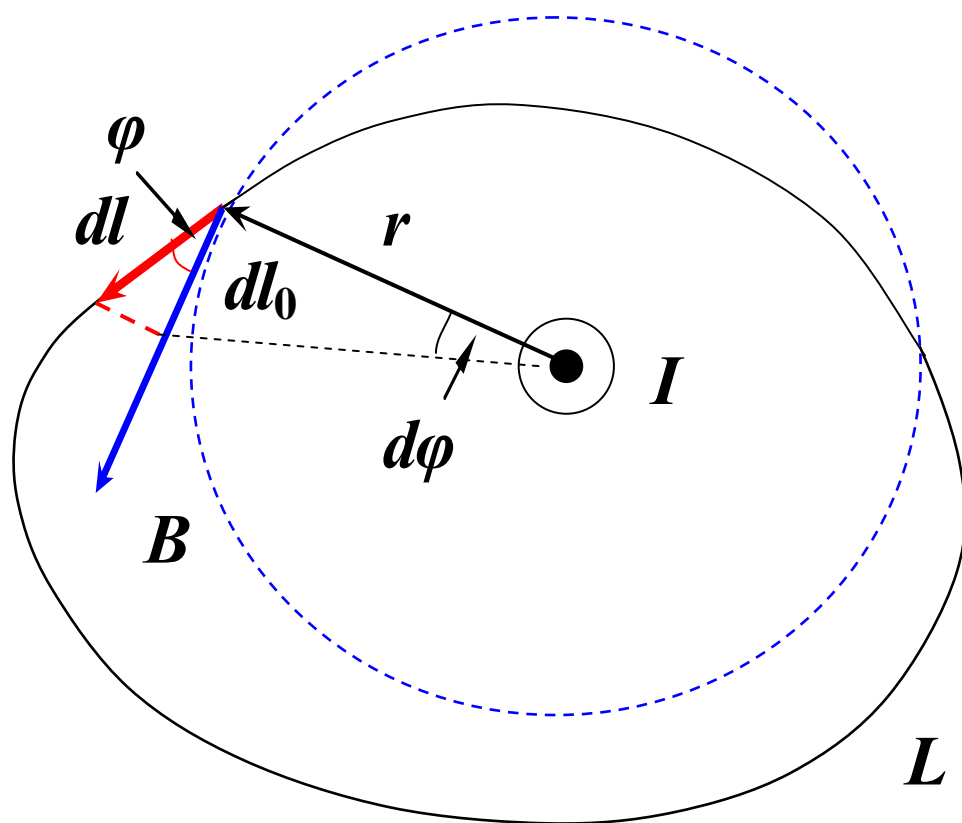


# **Закон полного тока (теорема о циркуляции вектора магнитной индукции)**

Аналогичен закону Гаусса в  
электростатике

## Закон полного тока в интегральной форме



Бесконечно длинный проводник  
с током  $I$

$L$  – замкнутый контур  
произвольной формы.

Вектор магнитной индукции  
 $\vec{B} \perp \vec{r}$  – радиус вектору.

$dl$  – элемент произвольного  
контура  $L$ .

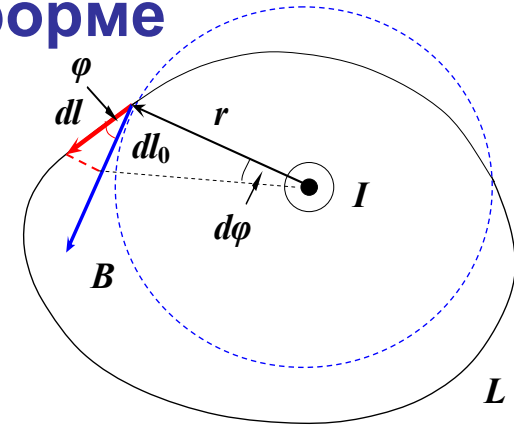
$dl_0$  – элемент силовой линии  
прямого бесконечного тока  
(окружности).

$\varphi$  – угол между  $dl$  и  $dl_0$   
или  $\varphi = \angle \vec{B}, d\vec{l}$ .

$dl_0 = dl \cos \varphi$  – проекция  $dl$  на  $B$ .

## Закон полного тока в интегральной форме

Циркуляция вектора  $\mathbf{B}$   
по замкнутому контуру  $L$ :



$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B dl \cos \varphi = \oint_L B dl_0.$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \quad \mu_0 - \text{магнитная постоянная}$$

$$dl_0 = r d\varphi.$$

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L \frac{\mu_0 I}{2\pi r} r d\varphi =$$

$$= \frac{\mu_0 I r}{2\pi r} \int_0^{2\pi} d\varphi = \mu_0 I.$$

$$\oint_L (\vec{B} d\vec{l}) = \mu_0 I.$$

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{j} d\vec{S}.$$

## Закон полного тока в интегральной форме

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{j} d\vec{S}. \quad \Rightarrow$$

1. Циркуляция вектора магнитной индукции не равна нулю. Поля, обладающие таким свойством ( $\oint_L \vec{B} d\vec{l} \neq 0$ ).

называются **вихревыми (или соленоидальными)**

Электрическое поле – потенциальное ( $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$ )

и его можно охарактеризовать потенциалом

Магнитное поле не является потенциальным.

2. **Циркуляция вектора  $\vec{B}$**  прямолинейного тока **одинакова** вдоль всех линий магнитной индукции и равна произведению  $\mu_0 I$ .

## Закон полного тока в интегральной форме

- Если магнитное поле создано системой токов, то по принципу суперпозиции:

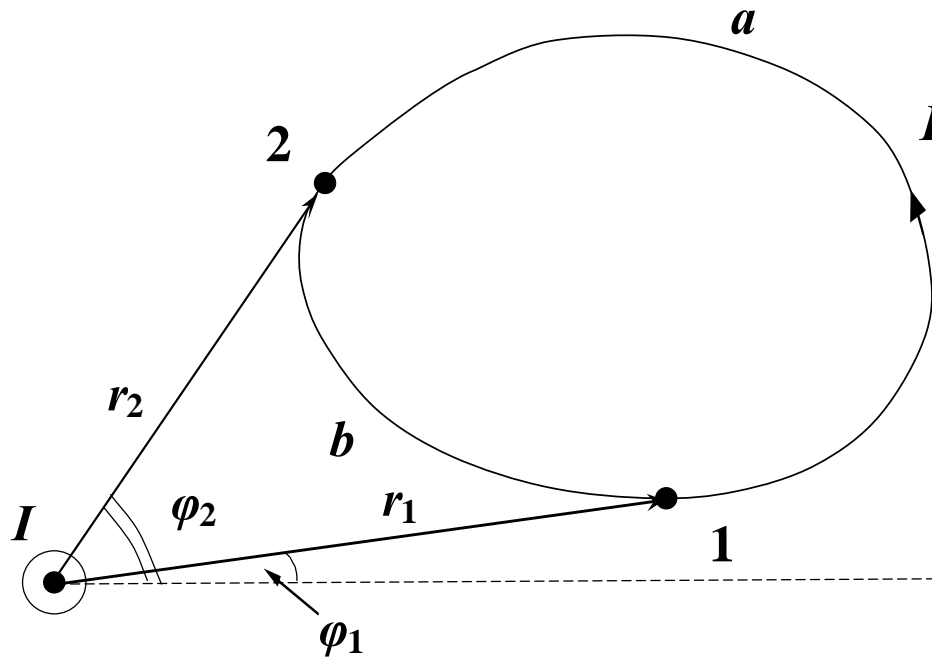
$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i, \quad \oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum I_i.$$

# ТЕОРЕМА О ЦИРКУЛЯЦИИ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ :

Циркуляция вектора магнитной индукции по произвольному замкнутому контуру, охватывающему токи, прямо пропорциональна алгебраической сумме токов, пронизывающих этот контур

$$\oint_L (\vec{B} d\vec{l}) = \mu_0 \sum I_i.$$

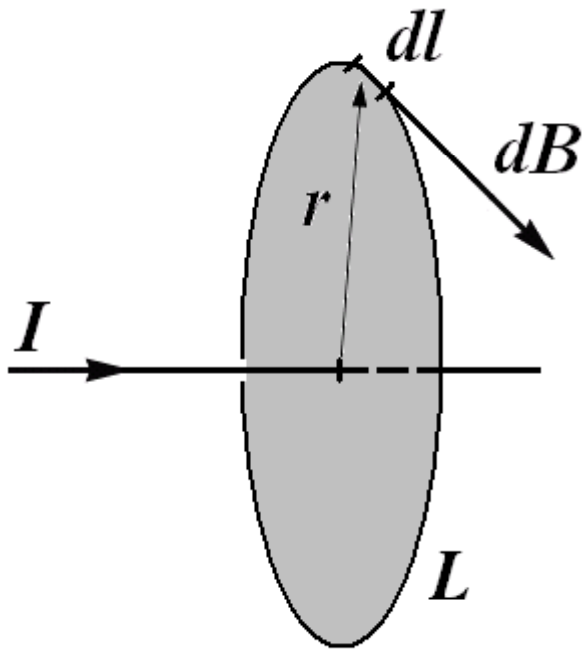
## Ток не пронизывает контур



$$\begin{aligned} \oint_L \vec{B} d\vec{l} &= \int_{1a2} \vec{B} d\vec{l} + \int_{2b1} \vec{B} d\vec{l} \\ &= \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi + \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} d\varphi = \\ &= \frac{\mu_0 I}{2\pi} (\varphi_2 - \varphi_1 + \varphi_1 - \varphi_2) = 0. \end{aligned}$$

Циркуляция вектора  $\vec{B}$  прямолинейного тока вдоль замкнутого контура, не охватывающего этот проводник, равна нулю.

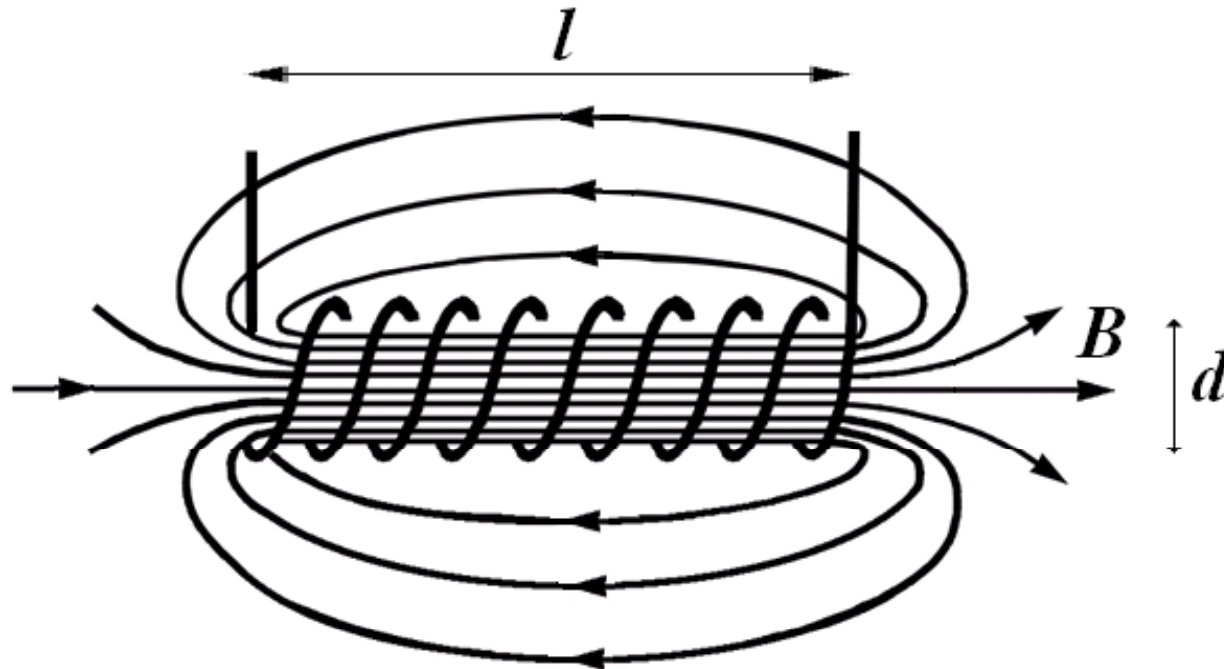
- Поле бесконечного прямого тока



$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$



- Магнитное поле длинного соленооида



$l$  – длина соленооида.

$N$  – число витков.

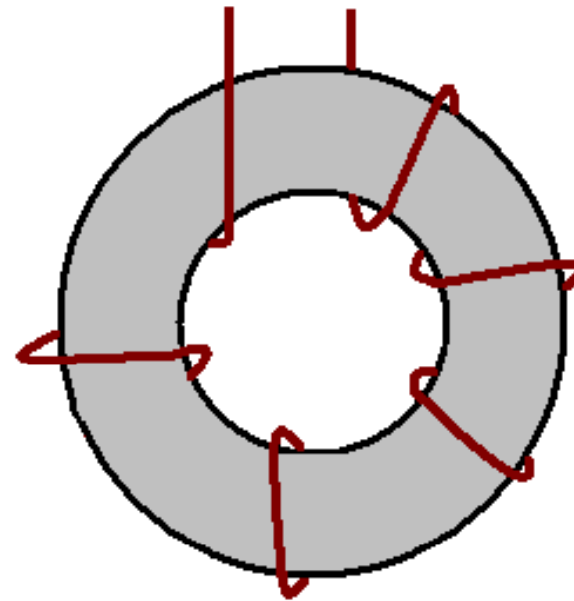
$l \gg d$ ;  $B_{\text{внутри}} = \text{const}$

$$B = \frac{\mu_0 N_L I}{L} = \mu_0 n I$$

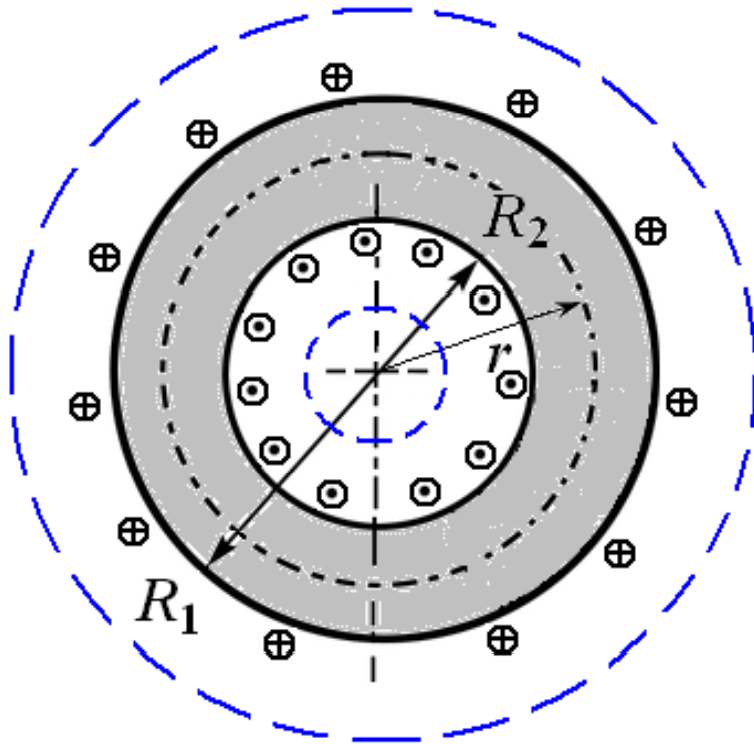
$n$  – число витков соленооида на единицу длины

- Магнитное поле тороида

***Тороид*** – кольцевая катушка, витки которой намотаны на сердечник, имеющий форму тора.



- Магнитное поле тороида



Поле вне тороида  
( $R_2 > r > R_1$ ) равно нулю

Поле внутри тороида  
( $R_2 < r < R_1$ ):

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}.$$

$N$  – число витков тора.

$R_1$  – внешний радиус тора.

$R_2$  – внутренний радиус тора.

$r$  - радиус произвольной окружности.

## Закон полного тока в дифференциальной форме

### ***Теорема Стокса:***

Циркуляция вектора  $\vec{A}$  по произвольному контуру  $L$  равна потоку ротора этого вектора через поверхность, опирающуюся на этот контур

$$\oint_L \vec{A} d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{A} d\vec{S}.$$

## Закон полного тока в дифференциальной форме

- $rot$  характеризует свойства поля в точке  $S \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} rot\vec{B} \equiv [\nabla\vec{B}] &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} = \\ &= \left( \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} \right) \cdot \vec{i} + \left( \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} \right) \cdot \vec{j} + \left( \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right) \cdot \vec{k}. \end{aligned}$$

## Закон полного тока в дифференциальной форме

**Теорема Стокса:** 
$$\oint_L \vec{A} d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{A} d\vec{S}.$$

(а) Согласно теореме Стокса

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{B} d\vec{S}.$$

(б) Закон полного тока в интегральной форме:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{j} d\vec{S}.$$

## Закон полного тока в дифференциальной форме

$$\Rightarrow \int_S \operatorname{rot} \vec{B} d\vec{S} = \mu_0 \int_S \vec{j} d\vec{S} = \int_S \mu_0 \vec{j} d\vec{S}.$$



$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$$

или, так как



$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H},$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}.$$

# Электрический ток в газах.

## Проводимость газов

Газ в нормальном состоянии не является проводником, т.к. он состоит из нейтральных молекул. Для создания проводимости необходимо нейтральные молекулы расщепить на положительные ионы и электроны.

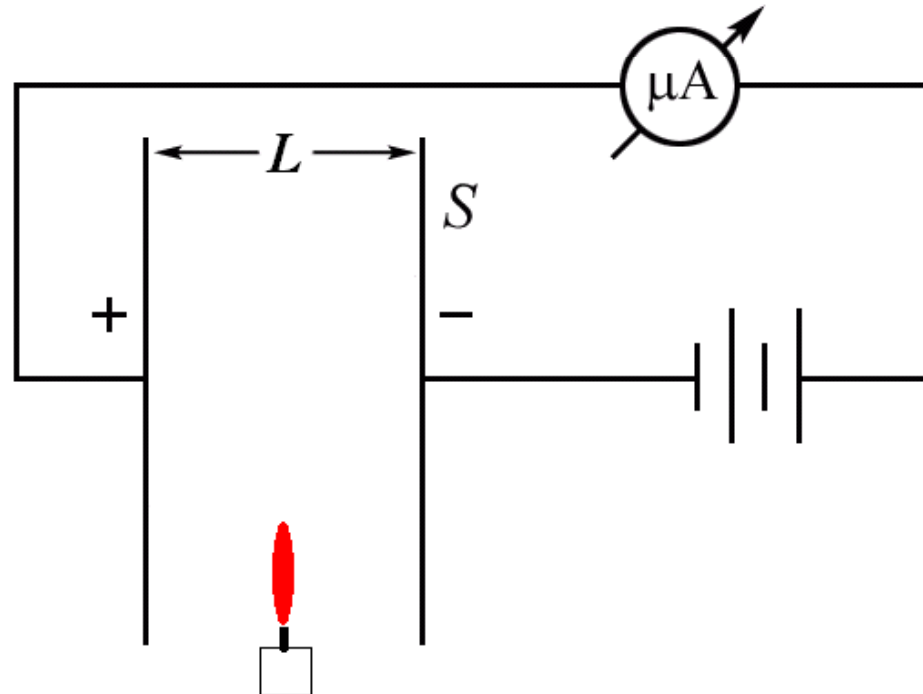


## Электрический ток в газах. Проводимость газов

- Между вырываемым электроном и атомным остатком (остальной частью атома) действует сила притяжения, поэтому для расщепления атома (молекулы) необходимо совершить работу, которая называется **работой ионизации**, а сам процесс расщепления – **ионизацией** атома (молекулы).

# Ионизация газа вызывается внешним воздействием:

- 1) достаточное повышение температуры – термическая ионизация,



## Ионизация газа вызывается внешним воздействием:

- 1) достаточное повышение температуры – термическая ионизация,
- 2) космические лучи,
- 3) радиоактивное излучение,
- 4) действие ускоренных электронов, ионов, заряженных частиц

## Количественная мера ионизации

- **Интенсивность (скорость) ионизации**  $\alpha$  - число пар ионов противоположного знака, образовавшихся за единицу времени  $t$  в единице объема  $V$ .

## Электрический ток в газах

- Процесс **ионизации** заключается в том, что под действием высокой температуры или некоторых лучей молекулы газа теряют электроны, и тем самым превращаются в положительные ионы.

$$A = e\varphi$$

$\varphi$  – потенциал ионизации  $\Rightarrow$

## Электрический ток в газах

- ***Потенциал ионизации  $\varphi$***  – разность потенциалов, которую должен пройти электрон, чтобы приобрести энергию, необходимую для ионизации молекулы.

## Электрический ток в газах

Вырванный электрон может “прилипнуть” к нейтральной молекуле. Следовательно, в проводимости газов одновременно участвуют положительные, отрицательные ионы и электроны.

*Электрический ток, возникающий в процессе ионизации газа – ток в газах – это встречный поток ионов и свободных электронов.*

## Электрический ток в газах

- Если не учитывать проводимость электронов, то справедлив закон Ома для газов:

$$j = ne(u_+ + u_-)E,$$

где  $u_+$  и  $u_-$  - подвижность положительных и отрицательных частиц, и

$$v_{\mp} = u_{\mp}E$$



## Электрический ток в газах

- Одновременно с процессом ионизации идёт обратный процесс **рекомбинации** (иначе – **молизации**).
- **Рекомбинация** – это нейтрализация при встрече разноименных ионов или воссоединение иона и электрона в нейтральную молекулу (атом).
- Факторы, под действием которых возникает ионизация в газе, называют **внешними ионизаторами**, а возникающая при этом проводимость называется **несамостоятельной проводимостью**.

## Электрический ток в газах

- При данной мощности внешнего ионизатора в объёме газа устанавливается **равновесное состояние**, при котором число пар ионов, возникающих под действием ионизатора за одну секунду в единице объёма, равно числу пар рекомбинировавших ионов. При этом **скорость ионизации равна скорости рекомбинации.**

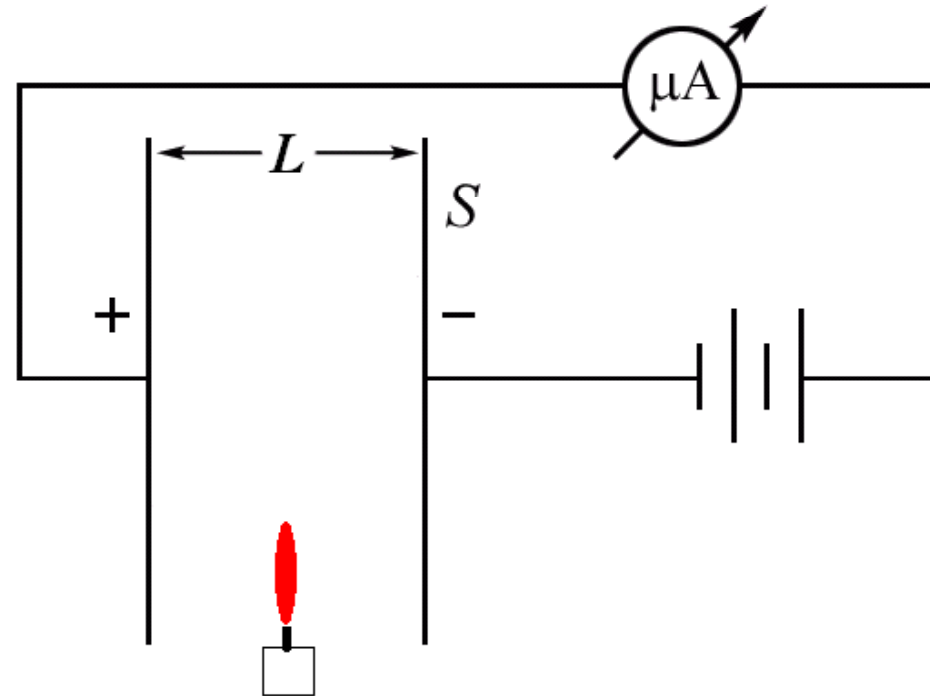
## Электрический ток в газах

- Явление прохождения электрического тока через газ называется ***газовым разрядом***.
- Газовые разряды можно разделить на два вида:

***несамостоятельный и самостоятельный.***

# Несамостоятельный газовый разряд

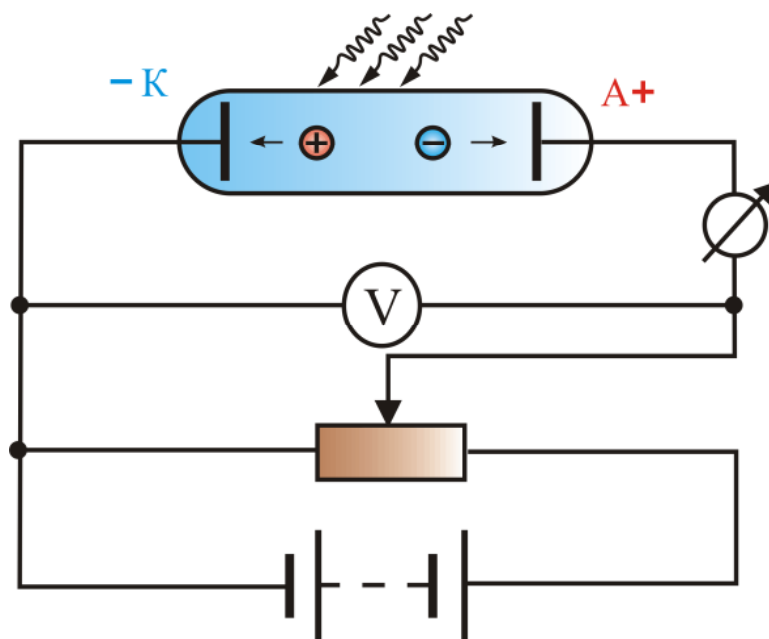
***Газовый разряд***  
– процесс протекания электрического тока через газ.



**Несамостоятельный** газовый разряд – газовый разряд, вызванный внешними ионизаторами и прекращающийся, если эти ионизаторы не действуют.

Процессы, происходящие при газовом разряде:

1. Ионизация – увеличение числа ионов.



***Несамостоятельный*** газовый разряд – газовый разряд, вызванный внешними ионизаторами и прекращающийся, если эти ионизаторы не действуют.

Процессы, происходящие при газовом разряде:

1. Ионизация – прибыль ионов.
2. Рекомбинация – уменьшение числа ионов.
3. Разрядка ионов на электродах – уменьшение числа ионов.

## Несамостоятельный газовый разряд

Уравнение баланса:  $n$  – концентрация ионов

$$\underbrace{SL}_V \frac{dn}{dt} = \underbrace{\alpha SL}_1 - \underbrace{\beta n^2 SL}_2 - \underbrace{\frac{jS}{e}}_3.$$

Рекомбинация ионов (процесс 2) происходит при встрече положительных и отрицательных ионов.

Вероятность рекомбинации прямо пропорциональна числу как положительных, так и отрицательных ионов, т.е.  $\sim n^2$ .

$\beta$  – коэффициент рекомбинации, зависящий от вида газа.

$\beta n^2$  - скорость рекомбинации;

$\alpha$  - скорость ионизации.

- В установившемся режиме ( $n = const$ ,  $dn/dt = 0$ ) получаем

$$\alpha SL - \beta n^2 SL - \frac{jS}{e} = 0$$

⇓

$$\alpha - \beta n^2 - \frac{j}{eL} = 0.$$



$$\alpha - \beta n^2 - \frac{j}{eL} = 0.$$

*В слабых полях  
рекомбинация ионов интенсивнее  
разрядки ионов на электродах:*

$$\beta n^2 \gg \frac{j}{eL}.$$

⇓

$$\alpha - \beta n^2 = 0.$$

$$\alpha - \beta n^2 = 0. \quad \Rightarrow \quad n = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \quad \Rightarrow$$

в уравнение для плотности тока:

$$j = ne(u_+ + u_-)E = e \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} (u_+ + u_-)E -$$

-закон Ома при слабых полях.

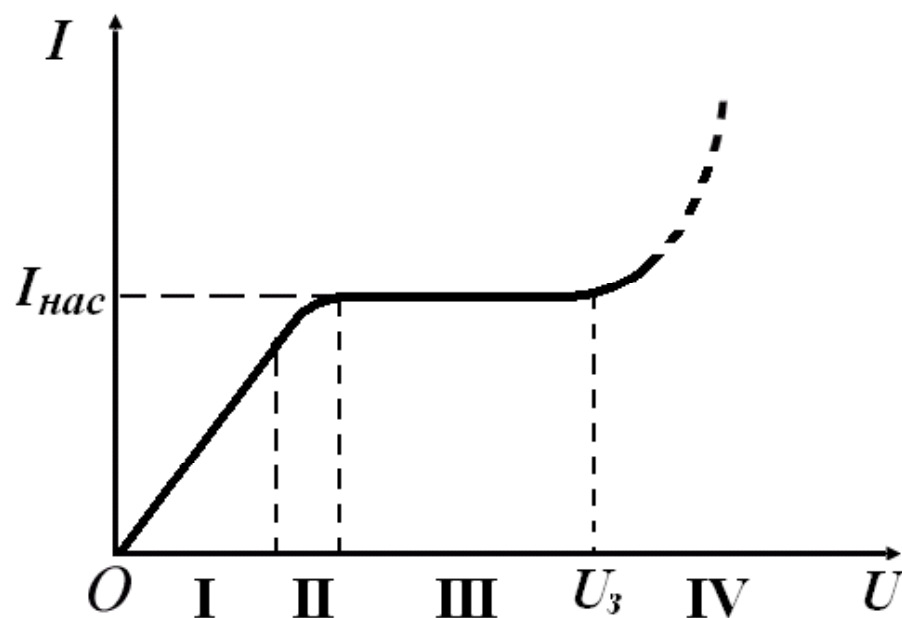
## Несамостоятельный газовый разряд

- В сильных полях убыль ионов происходит в основном за счет разрядки ионов на электродах:

$$\beta n^2 \ll \frac{j}{eL}. \quad \Rightarrow \alpha - \frac{j}{eL} = 0 \Rightarrow j = \alpha eL$$

Закон Ома не выполняется

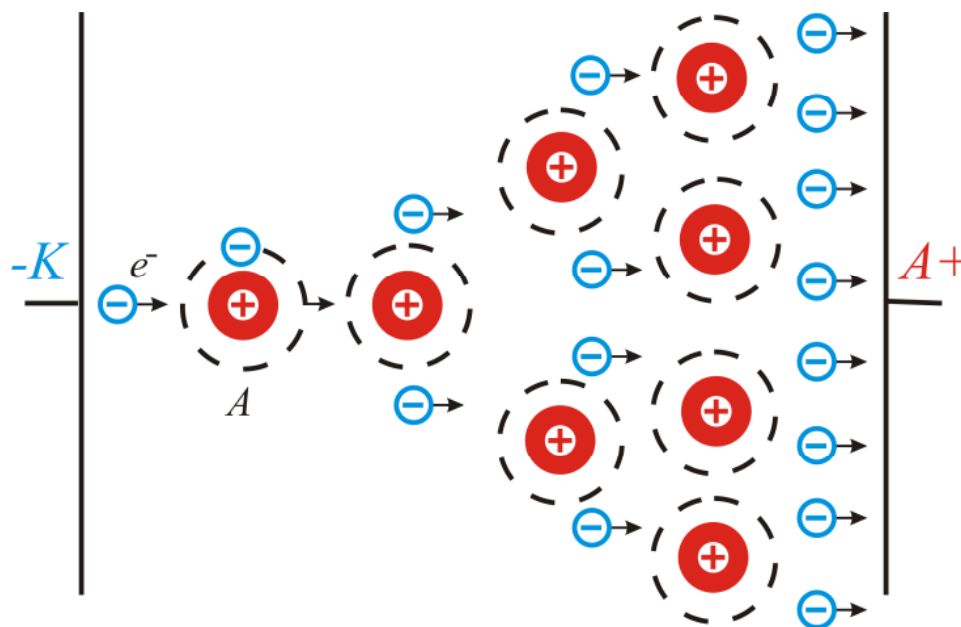
## Кривая зависимости тока $I$ от напряжения между электродами $U$ при несамостоятельном разряде.



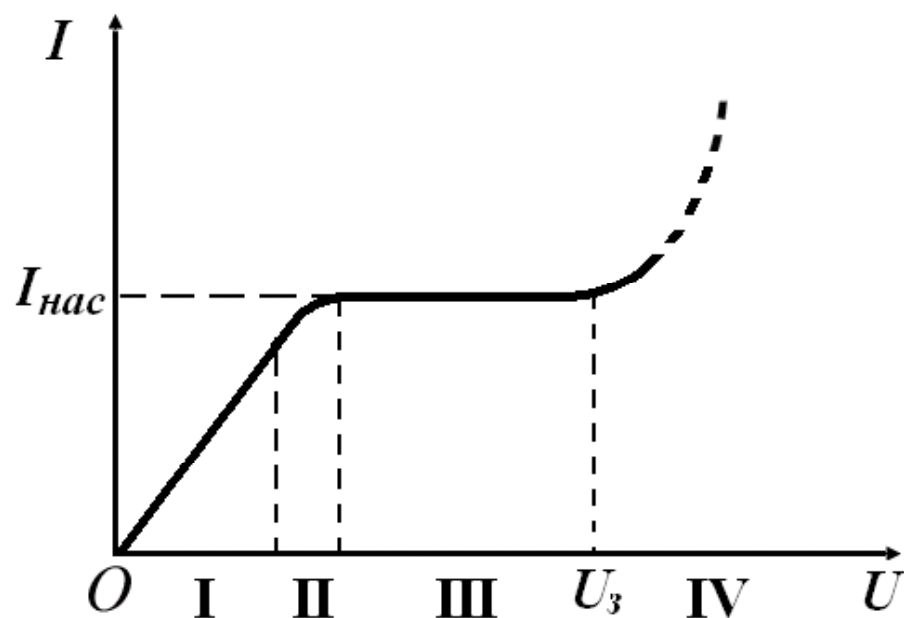
- I – закон Ома выполняется.
- II – сила тока растет медленнее.
- III – при неизменной интенсивности ионизации все образовавшиеся ионы в сильном электрическом поле достигают электродов, ток выходит на насыщение (**ток насыщения**). Закон Ома не выполняется

## Несамостоятельный газовый разряд

Дальнейшее увеличение напряженности поля ведет к образованию *лавины* электронов, когда возникшие под действием ионизатора электроны приобретают на длине свободного пробега (от столкновения до столкновения) энергию, достаточную для ионизации молекул газа (ударная ионизация). Возникшие при этом вторичные электроны, разогнавшись, в свою очередь, производят ионизацию и т. д. – происходит *лавинообразное размножение первичных ионов и электронов*, созданных внешним ионизатором и *усиление разрядного тока*.



## **Кривая зависимости тока $I$ от напряжения между электродами $U$ при несамостоятельном разряде.**



I – закон Ома выполняется.

II – сила тока растет медленнее.

III – при неизменной интенсивности ионизации все образовавшиеся ионы в сильном электрическом поле достигают электродов, ток выходит на насыщение (ток насыщения). Закон Ома не выполняется

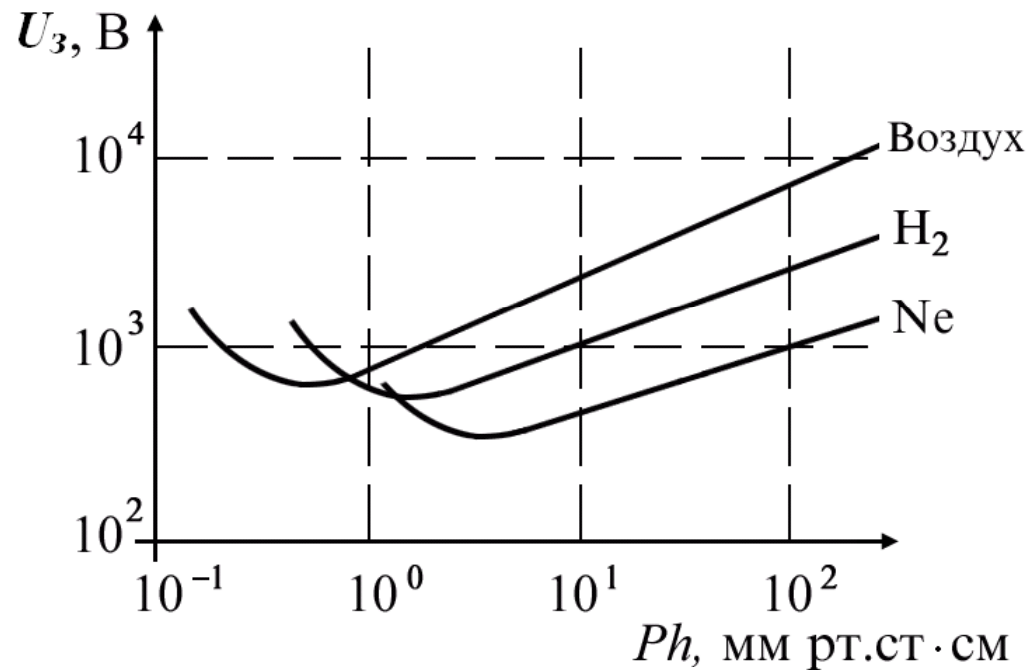
IV – электрический пробой газа.

Наименьшее напряжение зажигания  $U_3$  газового разряда между двумя плоскими электродами есть величина постоянная (характерная для данного сорта газа) при одинаковых значениях произведения  $Ph$ ,

где  $P$  – давление газа;  $h$  – расстояние между электродами.

Закон Ф. Пáшена

## Закон Ф. Пашена (1865–1947).



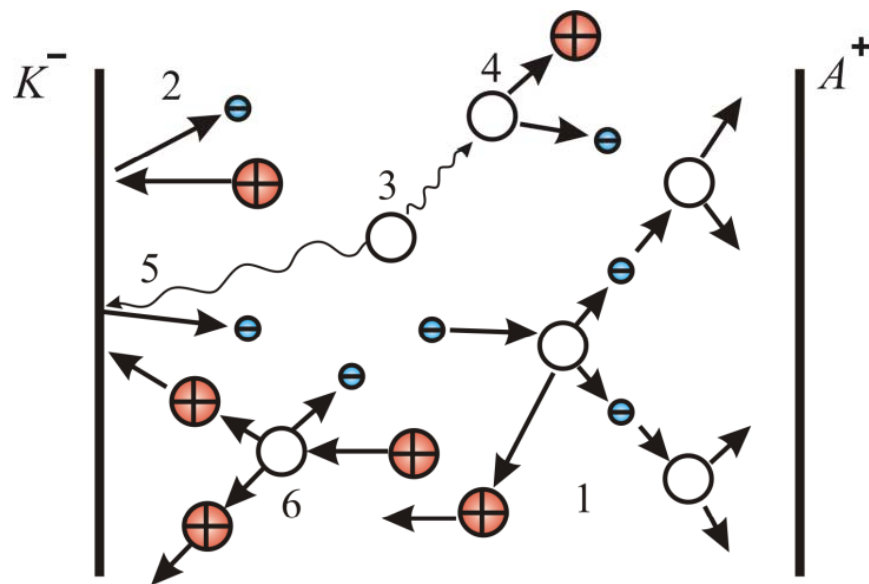
Потенциал зажигания возрастает в области малых и в области больших значений  $Ph$ , при  $Ph \sim 1$  мм рт.ст. · см потенциал зажигания достигает для большинства газов минимальной величины, обычно порядка сотен вольт.



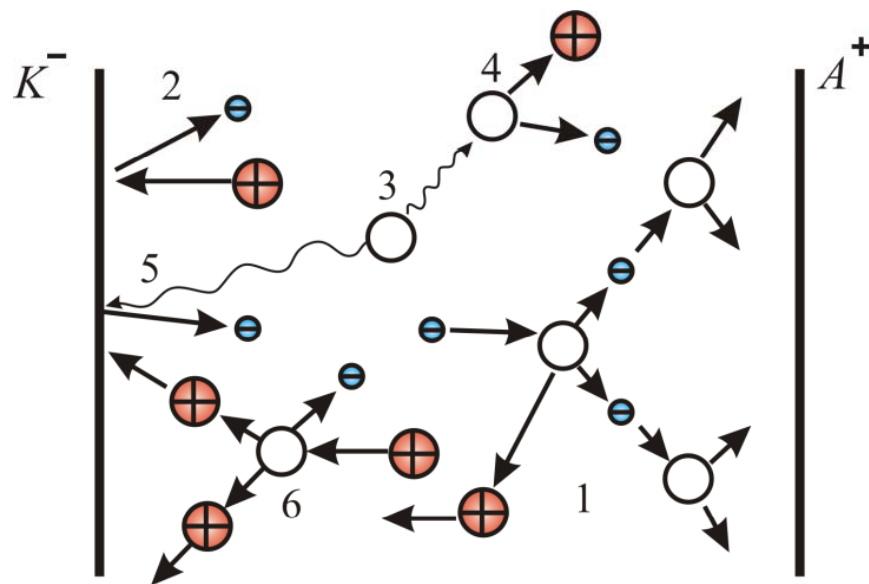
# Самостоятельный газовый разряд

Электрический разряд в газе, который продолжается после прекращения действия внешнего ионизатора.

Для существования такого разряда необходимо, чтобы в газе происходило непрерывное образование новых пар противоположно заряженных частиц. Основным источником таких частиц является **ударная ионизация** газа – ионизация газа под действием движущихся электронов или ионов. Однако, существуют и иные процессы:



- Это следующие процессы:
- ускоренные электрическим полем положительные ионы, ударяясь о катод, выбивают из него электроны (процесс 2);
- положительные ионы, сталкиваясь с молекулами газа, переводят их в возбужденное состояние; переход таких молекул в основное состояние сопровождается испусканием фотонов (процесс 3);



- □ фотон, поглощенный нейтральной молекулой, ионизирует ее, происходит процесс фотонной ионизации молекул (процесс 4);
- □ выбивание электронов из катода под действием фотонов (процесс 5);
- положительные ионы, обладающие меньшей длиной свободного пробега, чем электроны, приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа (процесс 6), и к отрицательной пластине устремляются ионные лавины.

# Самостоятельный газовый разряд

Когда межэлектродный промежуток перекрывается полностью проводящей газоразрядной плазмой, наступает его ***пробой***. Напряжение, при котором происходит пробой межэлектродного промежутка, называется ***пробивным напряжением***. А соответствующая напряженность электрического поля носит название ***пробивная напряженность***.

## Процессы, способствующие существованию самостоятельного разряда:

- 1) Термоэлектронная эмиссия – испускание электронов нагретыми телами.
- 2) Фотоионизация – ионизация молекул фотонами.
- 3) Фотоэлектронная эмиссия – испускание электронов под действием фотонов.
- 4) Автоэлектронная эмиссия – вырывание электронов из металла электрическим полем.

# Типы самостоятельных разрядов

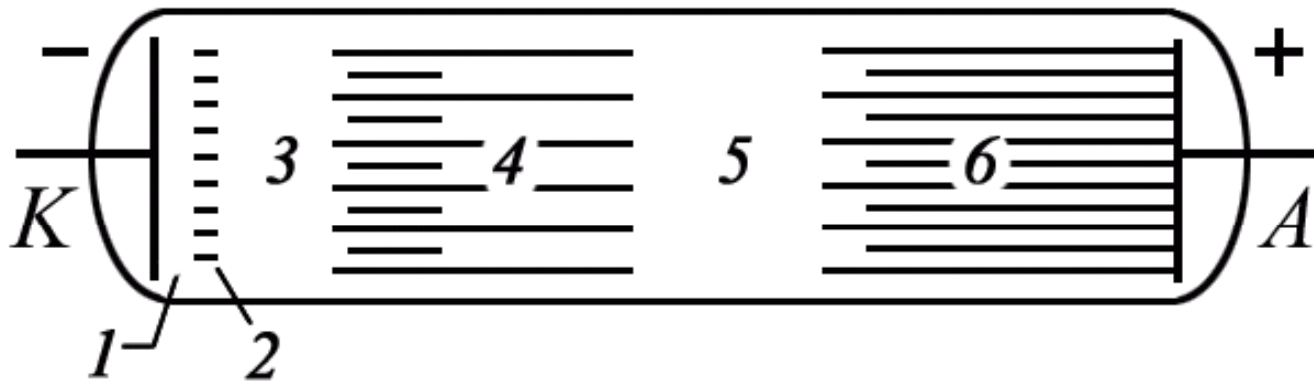
В зависимости от давления газа, конфигурации электродов, параметров внешней цепи можно выделить 4 типа самостоятельных разрядов:

- **Тлеющий разряд** наблюдается при низком давлении ( $\sim 0,01$  мм.рт.ст.), является следствием ударной ионизации и вторичной электронной эмиссии.
- **Коронный разряд** возникает на остриях («огни святого Эльма»).
- **Искровой разряд** является следствием фотоэмиссии и возникновения стримеров.
- **Дуговой разряд** является следствием термоэлектронной эмиссии.

# Тлеющий разряд

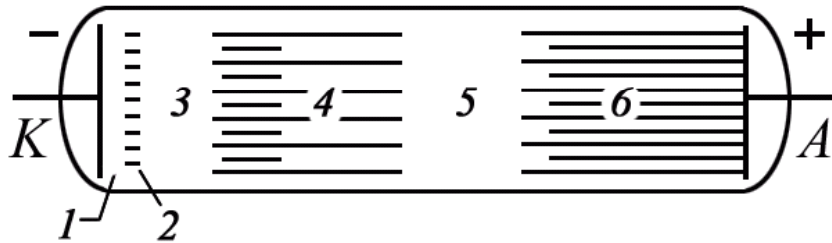
Возникает при низком давлении.

Схема эксперимента: в стеклянную трубку длиной 30-50 см впаяны электроды, к которым прикладывается постоянное напряжение в несколько сотен вольт.



## Тлеющий разряд

- При давлении  $P \approx 5,3 \div 0,7$  кПа наблюдается разряд в виде шнура красного цвета, идущего от катода к аноду. При понижении давления шнур утолщается.
- При  $P \approx 13$  Па в разряде появляется несколько областей.



- При дальнейшем понижении давления  $P \leq 13$  Па свечение газа ослабевает и возникает свечение стенок трубки — *катодолюминесценция*.

- 1 — астоново темное пространство, названное в честь Ф.Астона (1877-1945), впервые наблюдавшего его.
- 2 — первое катодное свечение (катодная пленка).
- 3 — катодное темное пространство.
- 4 — тлеющее свечение имеет резкую границу со стороны катода, возникает из-за рекомбинации электронов с положительными ионами.
- 5 — фарадеево темное пространство.
- 6 — положительный столб.



## Тлеющий разряд

При  $P \leq 13$  Па молекул остаточного газа мало ( $n$  мала), электроны, ускоренные полем, преимущественно ударяются о стеклянные стенки трубки, вызывая их свечение.

Применение: лампы дневного света – в трубке пары ртути;

газосветные трубки – неон дает красный свет, аргон – синевато-зеленый.

# Искровой разряд



В природе примером искрового разряда является молния.

Возникает при больших напряжениях электрического поля  $\approx 3 \cdot 10^6$  В/м в газе, находящемся под давлением порядка атмосферного.

Стримерная теория.

## Искровой разряд

Появлению ярко светящегося канала искры предшествует возникновение слабосветящихся скоплений ионизованного газа – **стримеров**.

Стримеры возникают в результате образования электронных лавин вследствие

- 1) ударной ионизации,
- 2) фотонной ионизации газа.

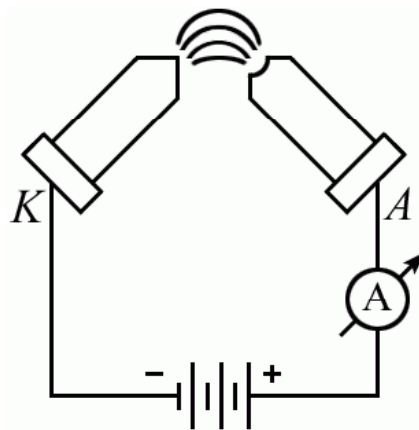
Лавины, следуя одна за другой, образуют проводящие каналы из стримеров, следствием чего является образование канала искрового разряда.

Применение: свеча зажигания, искровые разрядники, электроискровая обработка металлов.

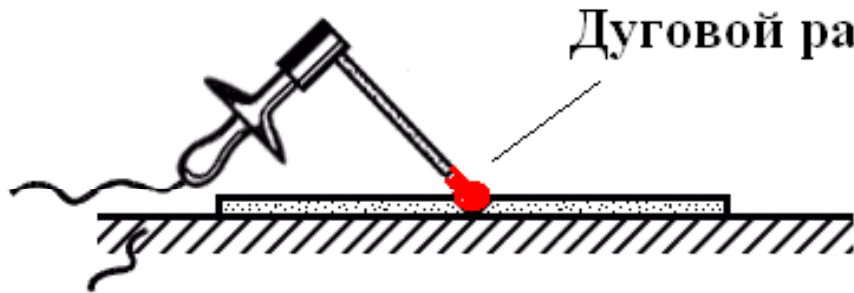
## Дуговой разряд

Впервые дуговой разряд был получен В.В. Петровым в 1802 г.

Возникает после зажигания искрового разряда при уменьшении расстояния между электродами, что приводит к резкому возрастанию тока (до сотен ампер). При этом напряжение на разрядном промежутке падает (~ десятки вольт).



## Дуговой разряд



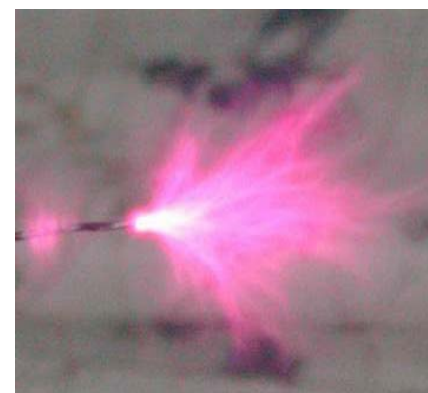
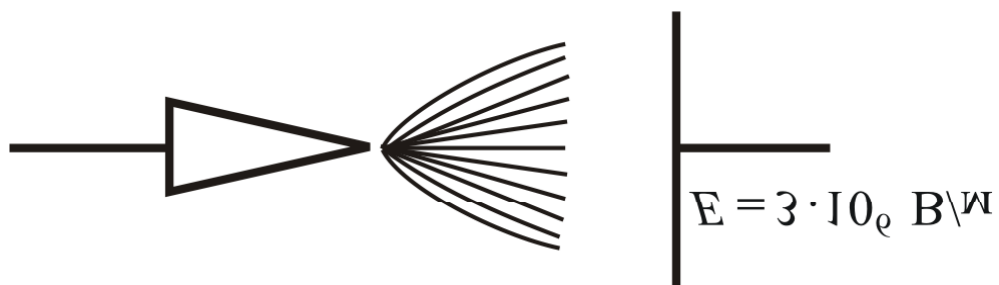
- Поддерживается за счет высокой температуры катода из-за интенсивной термоэлектронной эмиссии и термической ионизации молекул.

Применение: электросварка, дуговые электропечи, мощные источники света.

# Коронный разряд

Высоковольтный электрический разряд при высоком давлении ( $\sim$  атмосферном) в сильно неоднородном электрическом поле (вблизи электродов с большой кривизной поверхности – острия, линии электропередач).

При напряженности электрического поля  $E \sim 30$  кВ/см вблизи острия возникает свечение по форме напоминающее корону.



## Коронный разряд

В зависимости от знака коронирующего электрода различают отрицательную или положительную корону.

- Коронирует катод – отрицательная корона: электроны выбиваются из катода при его бомбардировке положительными ионами. Электроны вызывают ударную ионизацию молекул газа.
- Коронирует анод – положительная корона: электроны рождаются вследствие фотоионизации газа вблизи анода.

## Коронный разряд

Применение: молниеотводы, электрофильтры, нанесение красок в коронном разряде.

Вредное действие: радиопомехи; возникновение на проводах высоковольтных ЛЭП приводит к возникновению утечек тока (для снижения утечек высоковольтные провода делают большего диаметра).