

# Электростатика



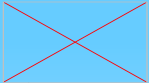
**Кузнецов Сергей Иванович**  
доцент кафедры ОФ ЕНМФ ТПУ

# Тема 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

- 8.1. Явление ионизации и рекомбинации в газах.
- 8.2. Несамостоятельный газовый разряд.
- 8.3. Самостоятельный газовый разряд.
- 8.4. Типы разрядов.
- 8.5. Применение газового разряда.
- 8.6. Понятие о плазме.



# Основные соотношения

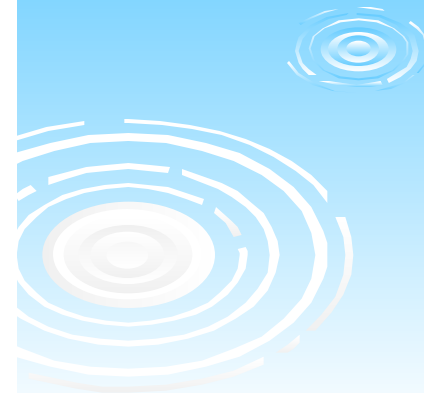
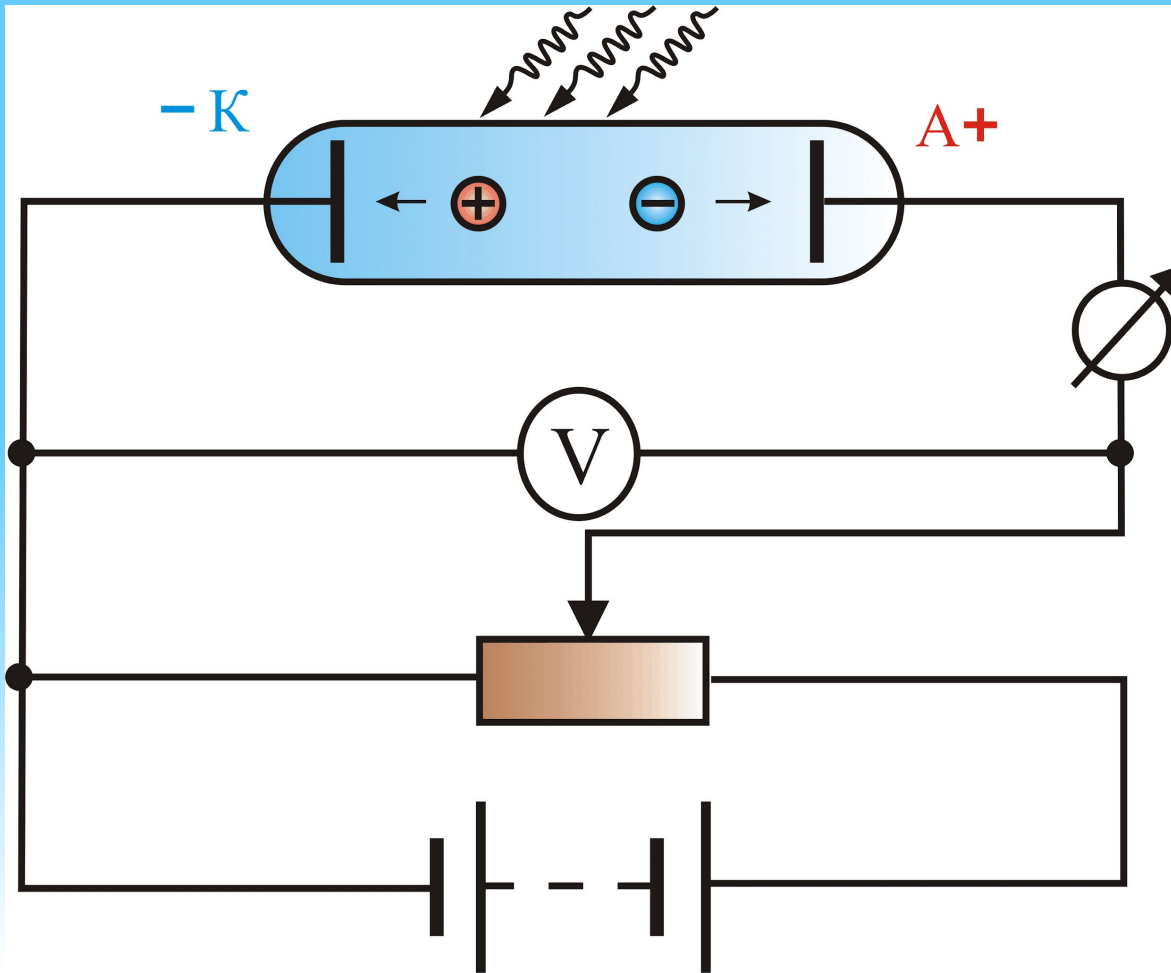
- $\Delta n_i = \Delta n_r$  – условие равновесия возникающих и рекомбинирующих ионов без поля.
- $\Delta n_i = \Delta n_r + \Delta n_j$  – условие равновесия ионов в электрическом поле.
- 1) Случай слабого поля  $\Delta n_j \ll \Delta n_r$
- $\vec{j} = nq(\vec{v}^+ + \vec{v}^-)$  – плотность тока в цепи
- $\vec{v}^+ = \mu_+ \vec{E}$  и  $\vec{v}^- = \mu_- \vec{E}$
- Обозначим  $nq(\mu_+ + \mu_-) = \sigma$  – удельная проводимость тогда
-  Закон Ома в дифференциальной форме
- 2) Случай сильного поля
- $\Delta n_r \ll \Delta n_j$  и  $\Delta n_i = \Delta n_j$  ( $\Delta n_r \rightarrow 0$ )
- $\Delta n_i$  – не зависит от  $E$
- $I_n$  – ток насыщения
- $j_n = Nqd$  – плотность тока насыщения

# 8.1. Явление ионизации и рекомбинации 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.
- Ток в газах – это встречный поток ионов и свободных электронов.
- 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**.

## 8.2 НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД

*Несамостоятельным газовым разрядом называется такой разряд, который, возникнув при наличии электрического поля, может существовать только под действием внешнего ионизатора.*



# Основные обозначения

- $N_0$  – число молекул газа в единице  $V$
- $N$  – число ионов одного знака;
- $N/V = n$  – концентрация ионов
- $\Delta n_i$  – число пар ионов возникающих под действием ионизатора за 1 сек в единице  $V$
- $\Delta n_r$  – число пар ионов рекомбинирующих за 1 сек в единице объема
- $\Delta n_j$  – число пар ионов уходящих из газоразрядного промежутка к электродам за 1 сек
- $\vec{v}_+$  и  $\vec{v}_-$  – скорости направленного движения положительных и отрицательных ионов
- $\mu$  – подвижность ионов
- $q$  – заряд, переносимый ионами
- $\vec{j}$  – плотность тока
- $\vec{E}$  – напряженность электрического поля
- $d$  – расстояние между электродами

**Равновесное состояние, при котором число пар ионов, возникающих под действием ионизатора за одну секунду в единице объёма, равно числу пар рекомбинировавших ионов.**

$$\Delta n_i = \Delta n_r = rn^2$$

$$\Delta n_i = \Delta n_r + \Delta n_j.$$

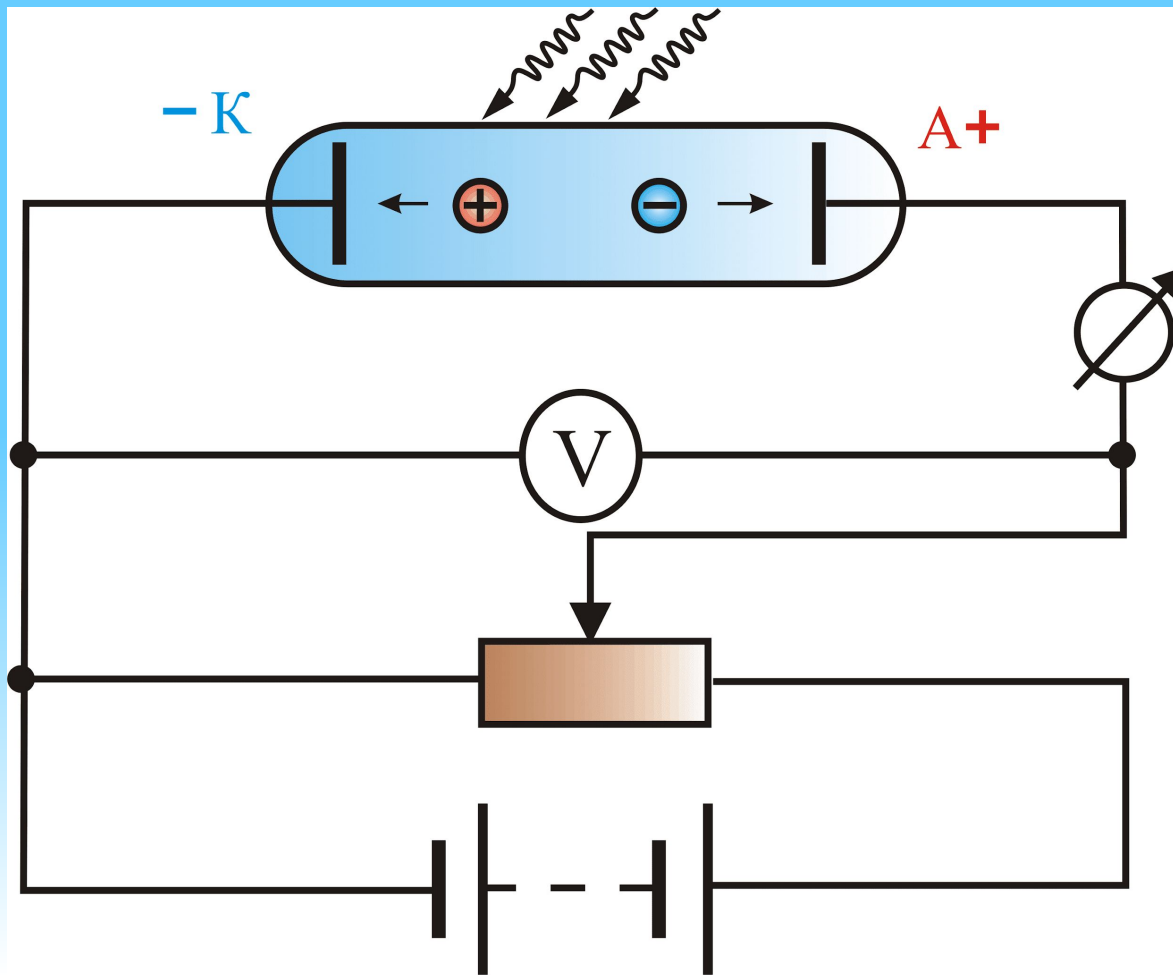
**При этом скорость ионизации равна скорости рекомбинации:**

$$v^{\text{ген}} = v^{\text{рек}}$$



# *Условие равновесия в случае слабого поля*

$$\Delta n_i = \Delta n_r + \Delta n_j.$$





□ 1. *Слабое поле*  $\Delta n_j \ll \Delta n_r$ .

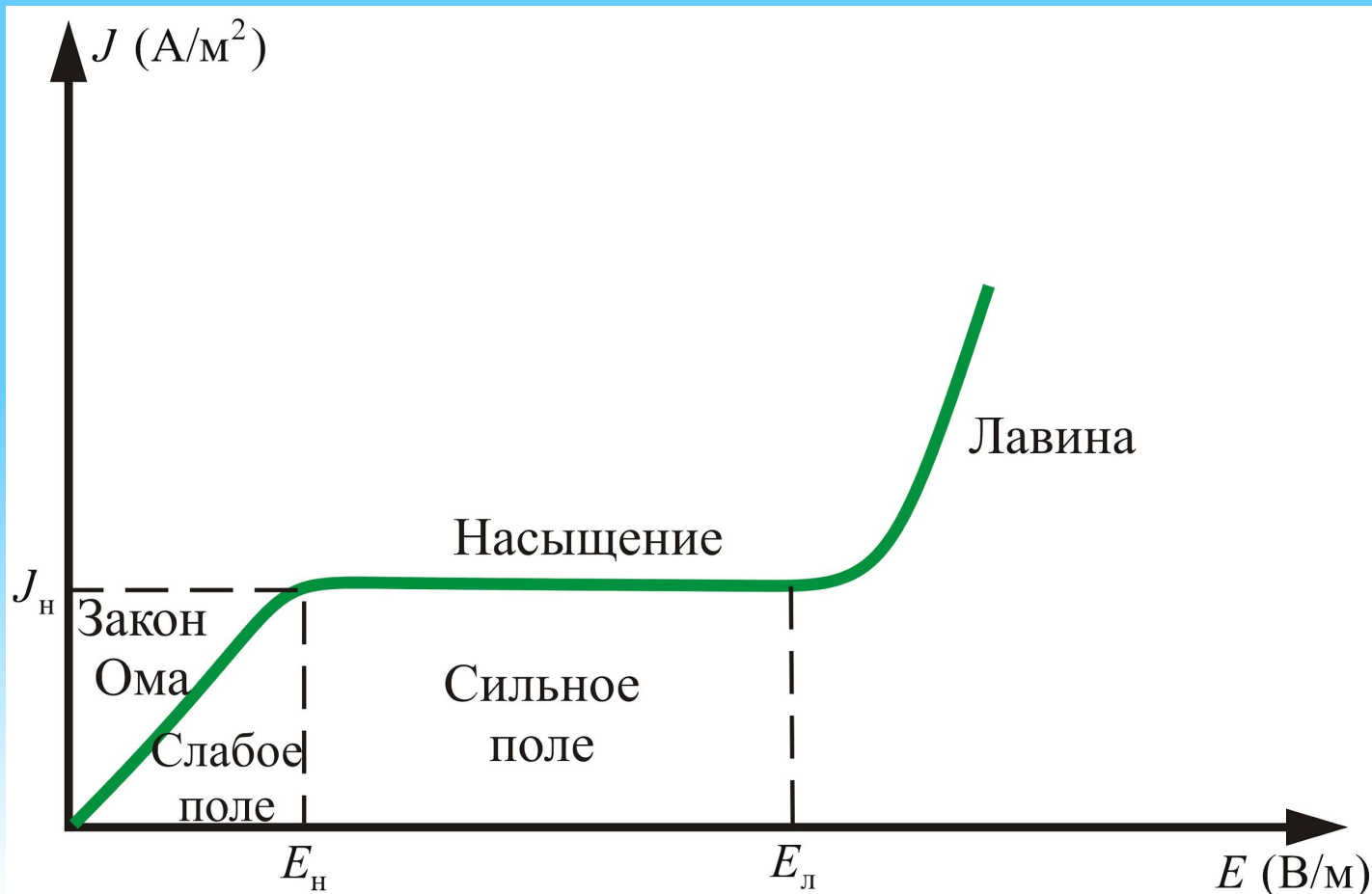
*Слабый ток*

$$\begin{aligned}\mathbf{j} &= nq(\mathbf{v}^+ + \mathbf{v}^-) \\ \mathbf{v}^+ &= \mu_+ \mathbf{E}, \quad \mathbf{v}^- = \mu_- \mathbf{E}, \\ \mathbf{j} &= nq(\mu_+ + \mu_-) \mathbf{E} \\ \mathbf{j} &= q \sqrt{\frac{\Delta n_i}{r}} (\mu_+ + \mu_-) \mathbf{E}\end{aligned}$$

$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$  — закон Ома в диф. форме.

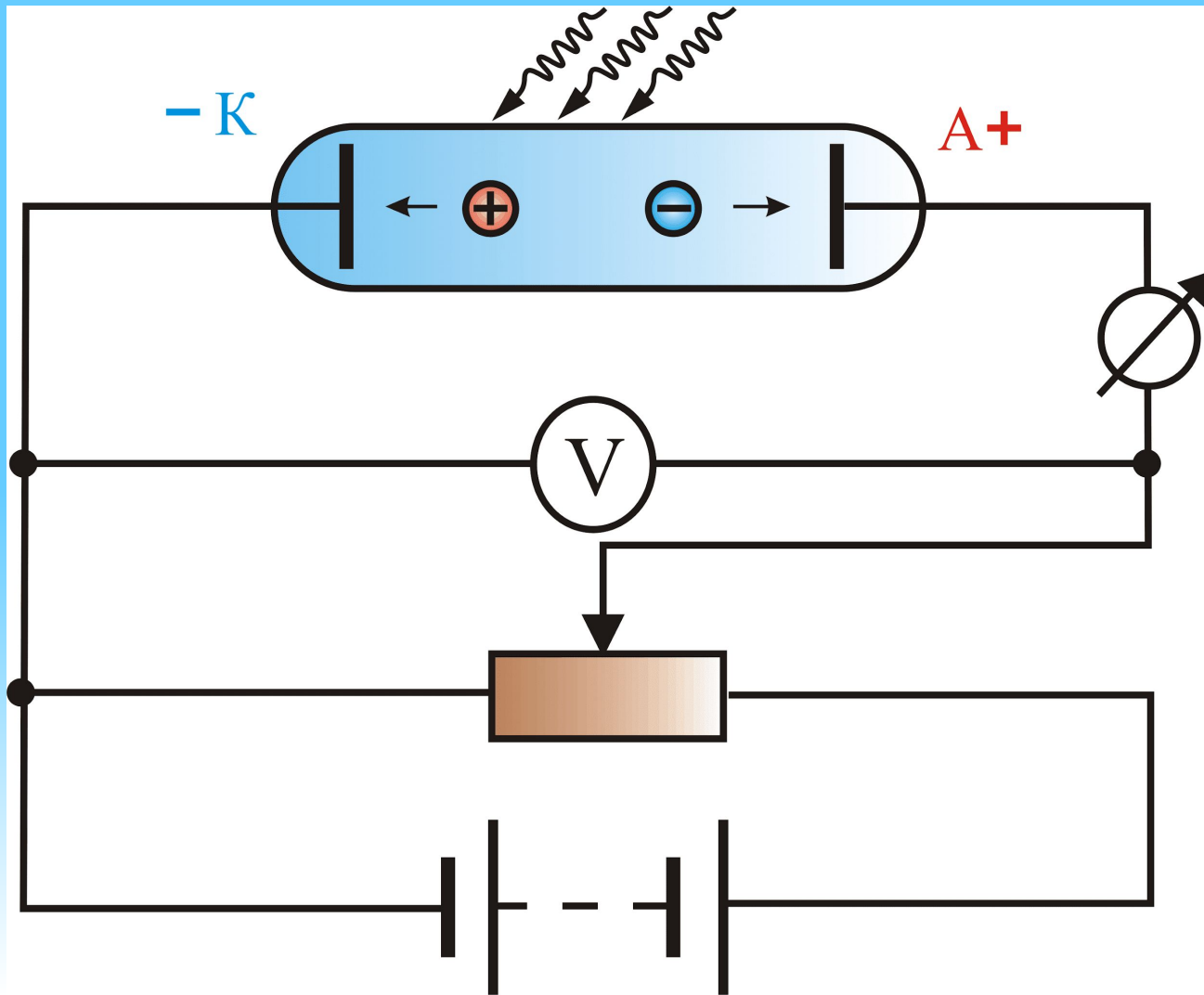
$\vec{j} = \sigma \vec{E}$  – закон Ома в диф. форме.

**Вывод:** в случае слабых электрических полей ток при несамостоятельном разряде подчиняется закону Ома.



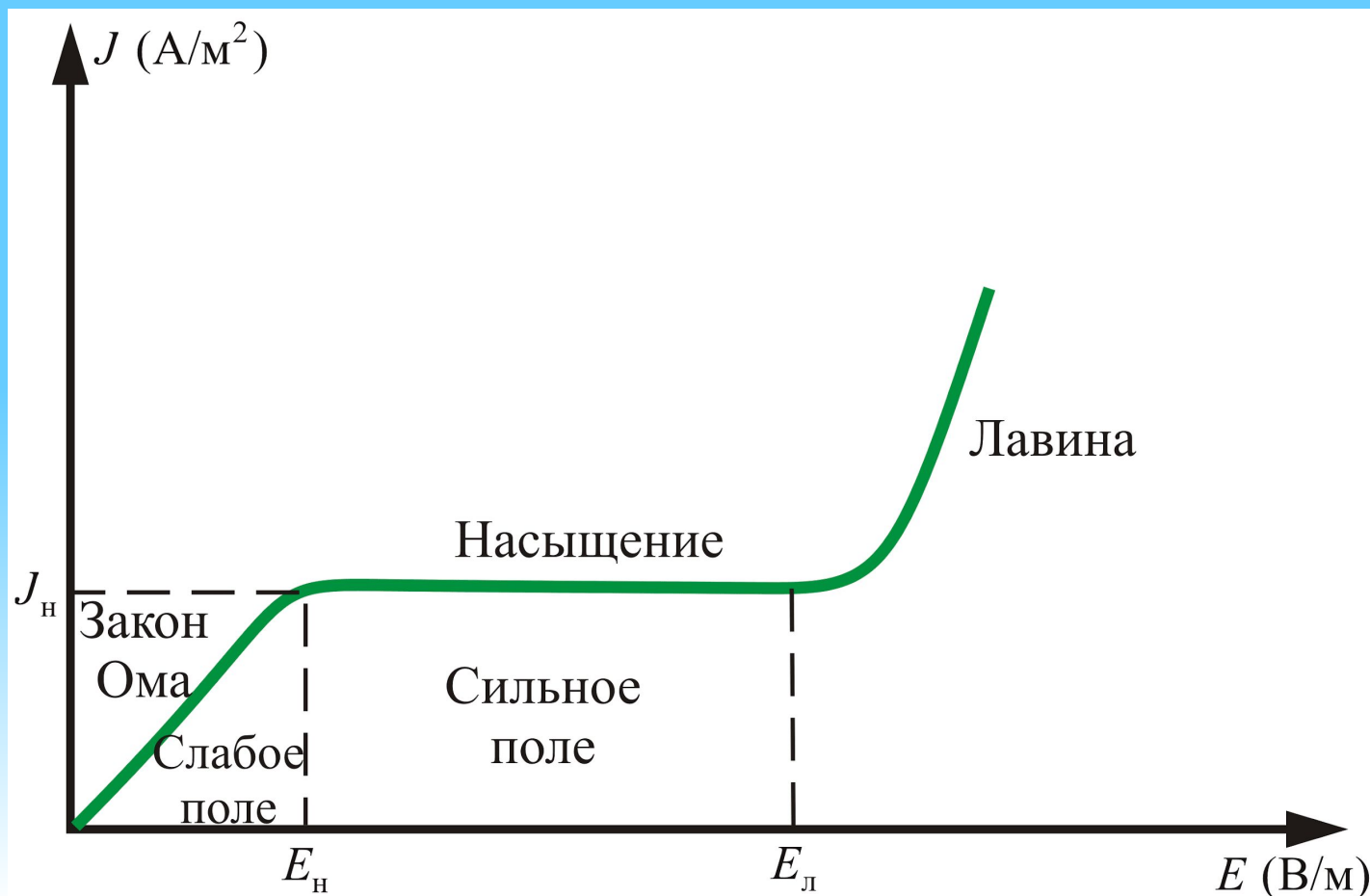
## 2. Сильное поле

$$\Delta n_r \ll \Delta n_j \quad \Delta n_i = \Delta n_j \quad (\Delta n_r \rightarrow 0)$$

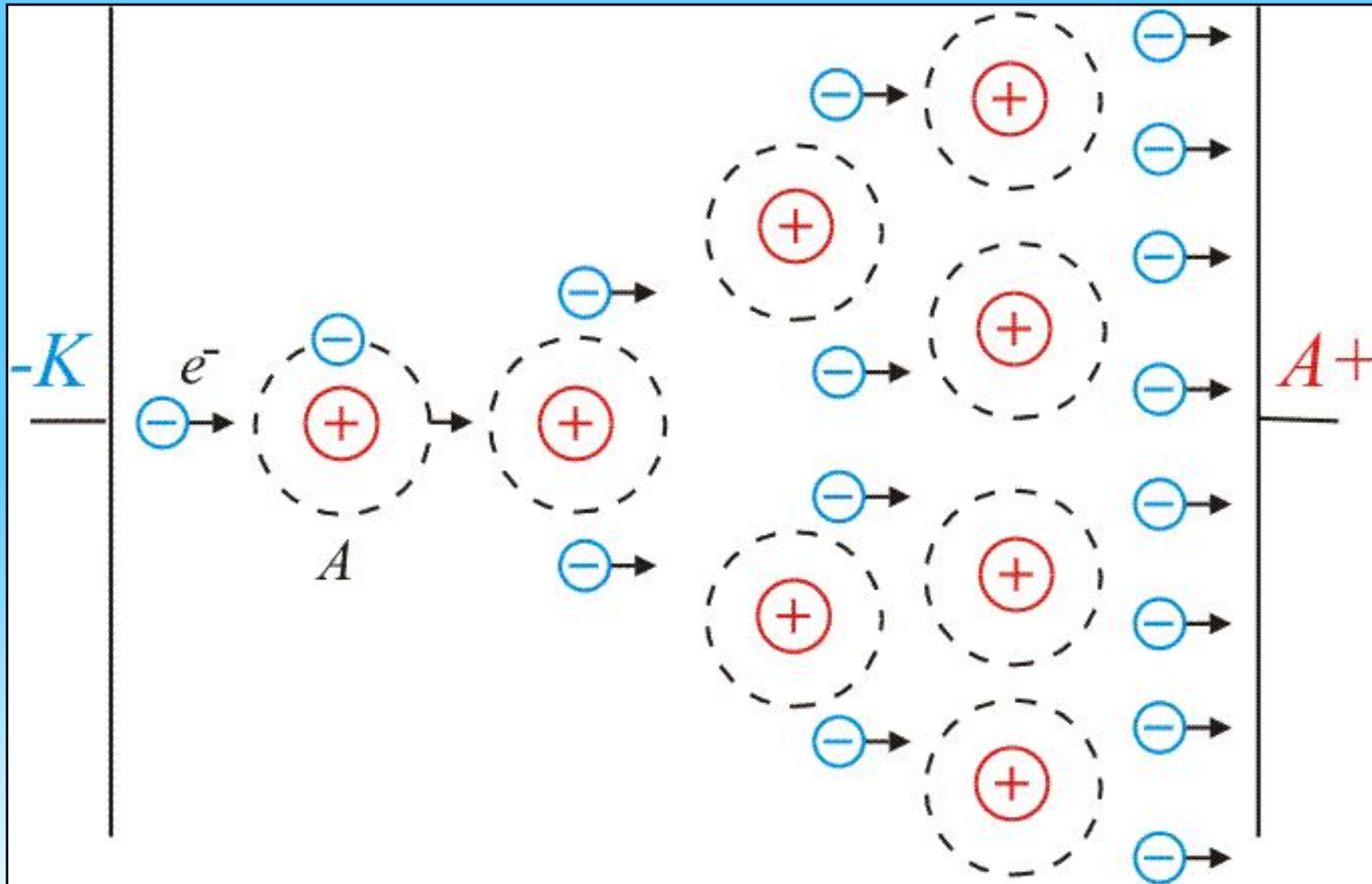


**Сильное поле**  $\Delta n_r \ll \Delta n_j$   $\Delta n_i = \Delta n_j$  ( $\Delta n_r \rightarrow 0$ )

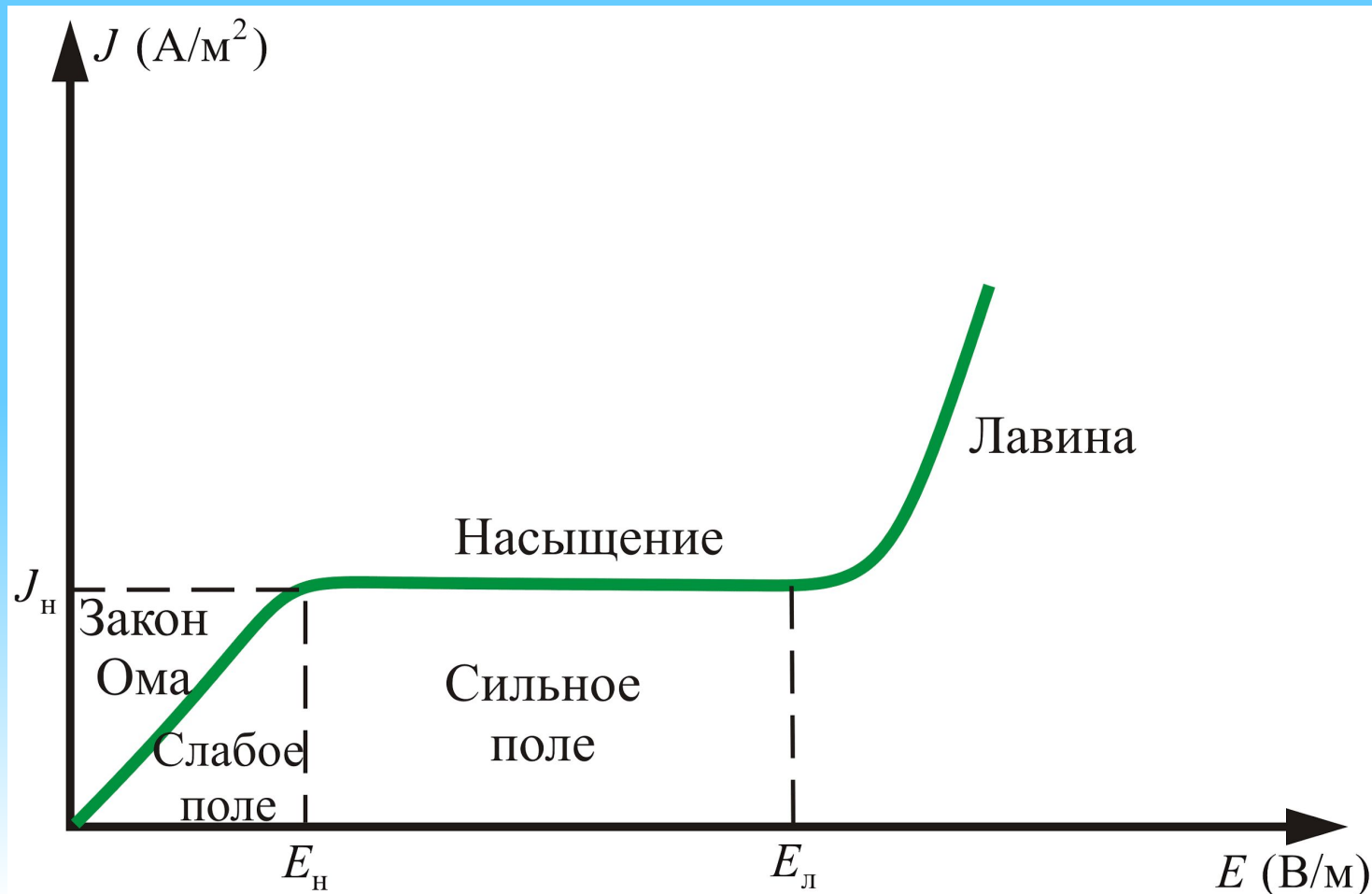
Максимальное значение тока, при котором все образующиеся ионы уходят к электродам, называется **ток насыщения**.



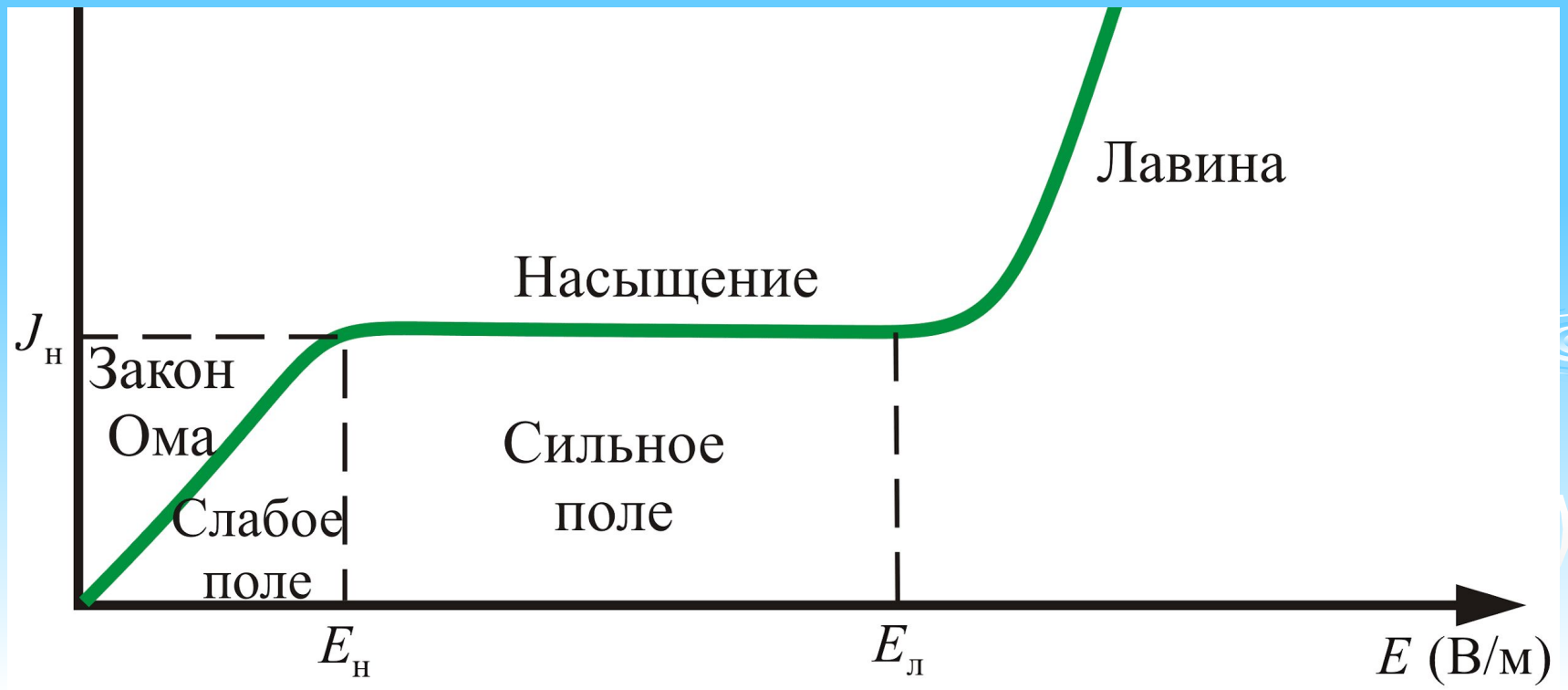
### 3. Дальнейшее увеличение напряженности поля ведет к образованию *лавины* электронов



Происходит **лавинообразное размножение первичных ионов и электронов**, созданных внешним ионизатором и **усиление разрядного тока.**



**Вывод:** для несамостоятельного разряда **при малых плотностях тока**, т.е. когда основную роль в исчезновении зарядов из газоразрядного промежутка играет процесс рекомбинации, имеет место закон Ома  $J \propto E$ . **при больших полях** закон Ома не выполняется – наступает явление **насыщения**, а **при полях превышающих  $E_{Л}$**  – возникает **лавиная** зарядов, обуславливающая значительное увеличение плотности тока.



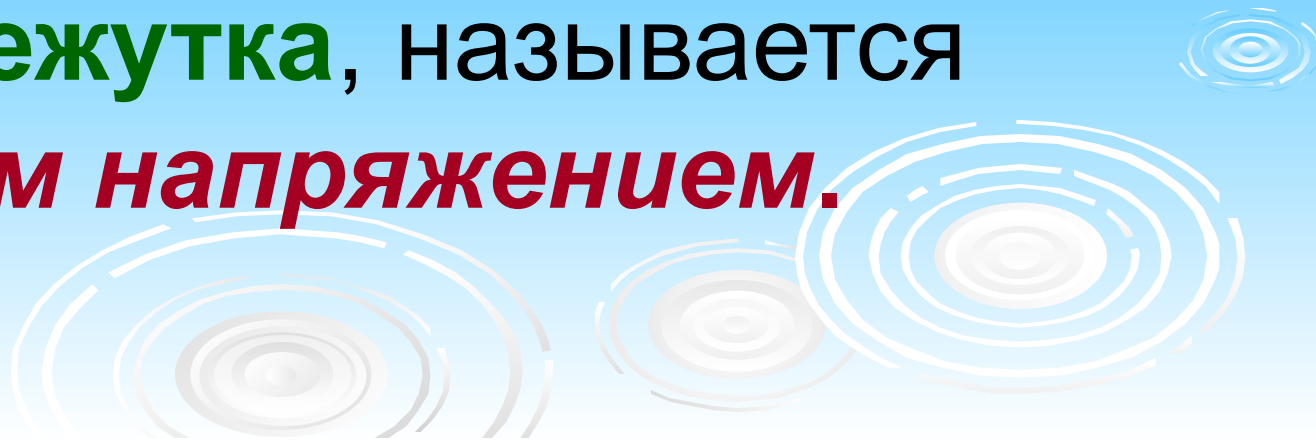
## 8.3. Самостоятельный газовый разряд

- *Самостоятельный разряд* такой газовый разряд, в котором носители тока возникают в результате тех процессов в газе, которые обусловлены приложенным к газу напряжением.
- *Т. е. данный разряд продолжается и после прекращения действия ионизатора.*

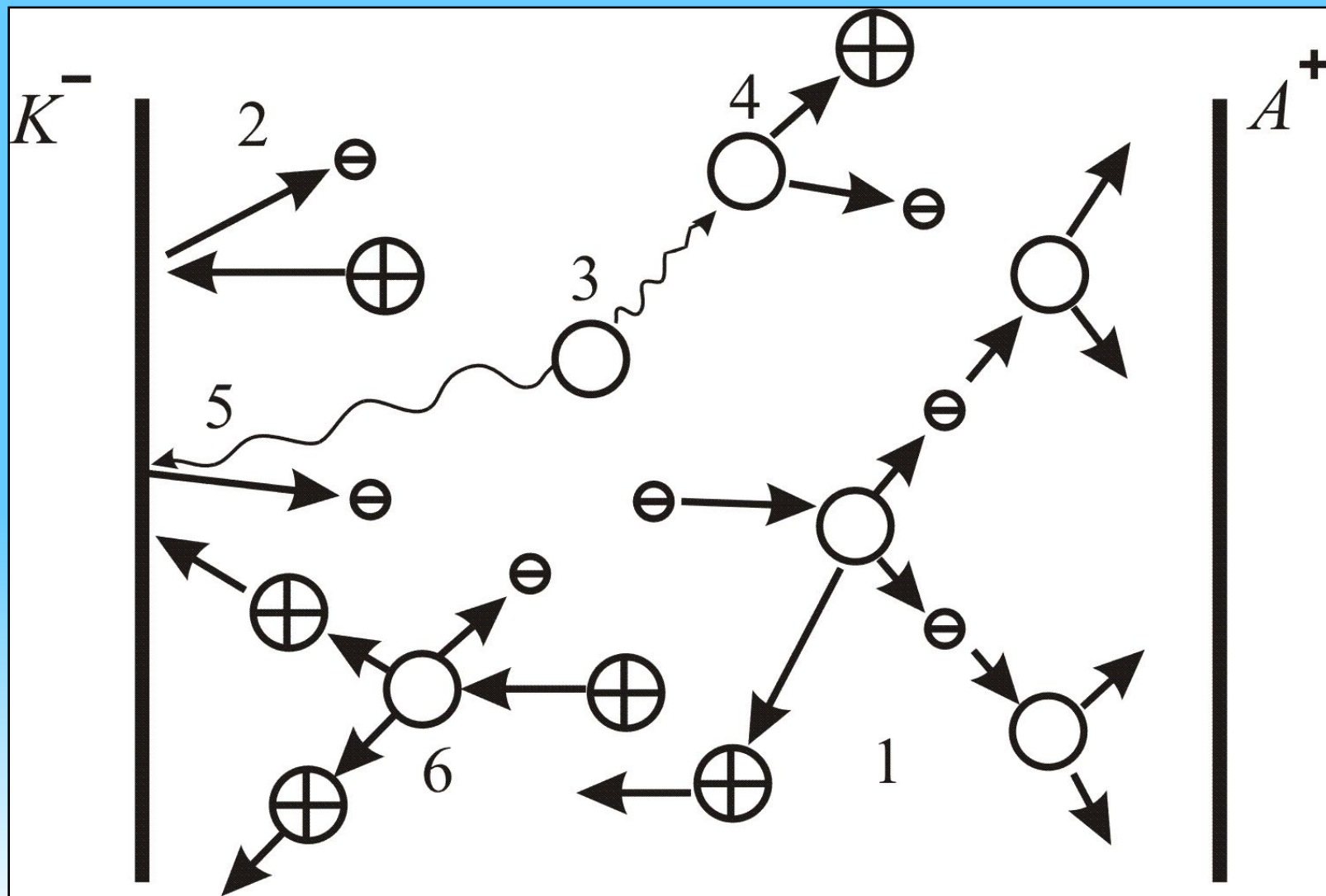


• Когда межэлектродный промежуток перекрывается полностью проводящей газоразрядной плазмой, наступает его ***пробой***.

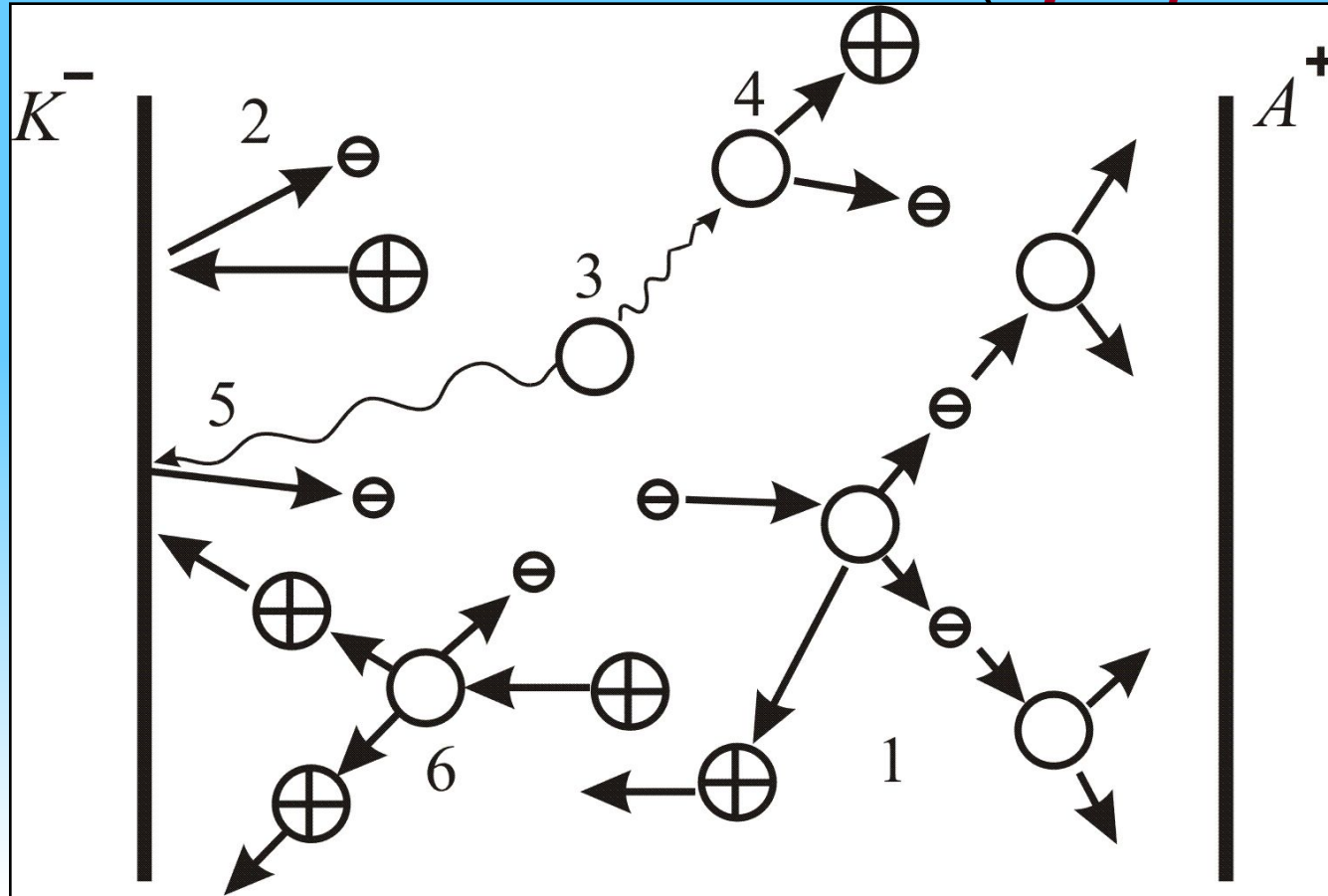
• Напряжение, при котором происходит пробой межэлектродного промежутка, называется ***пробивным напряжением***.



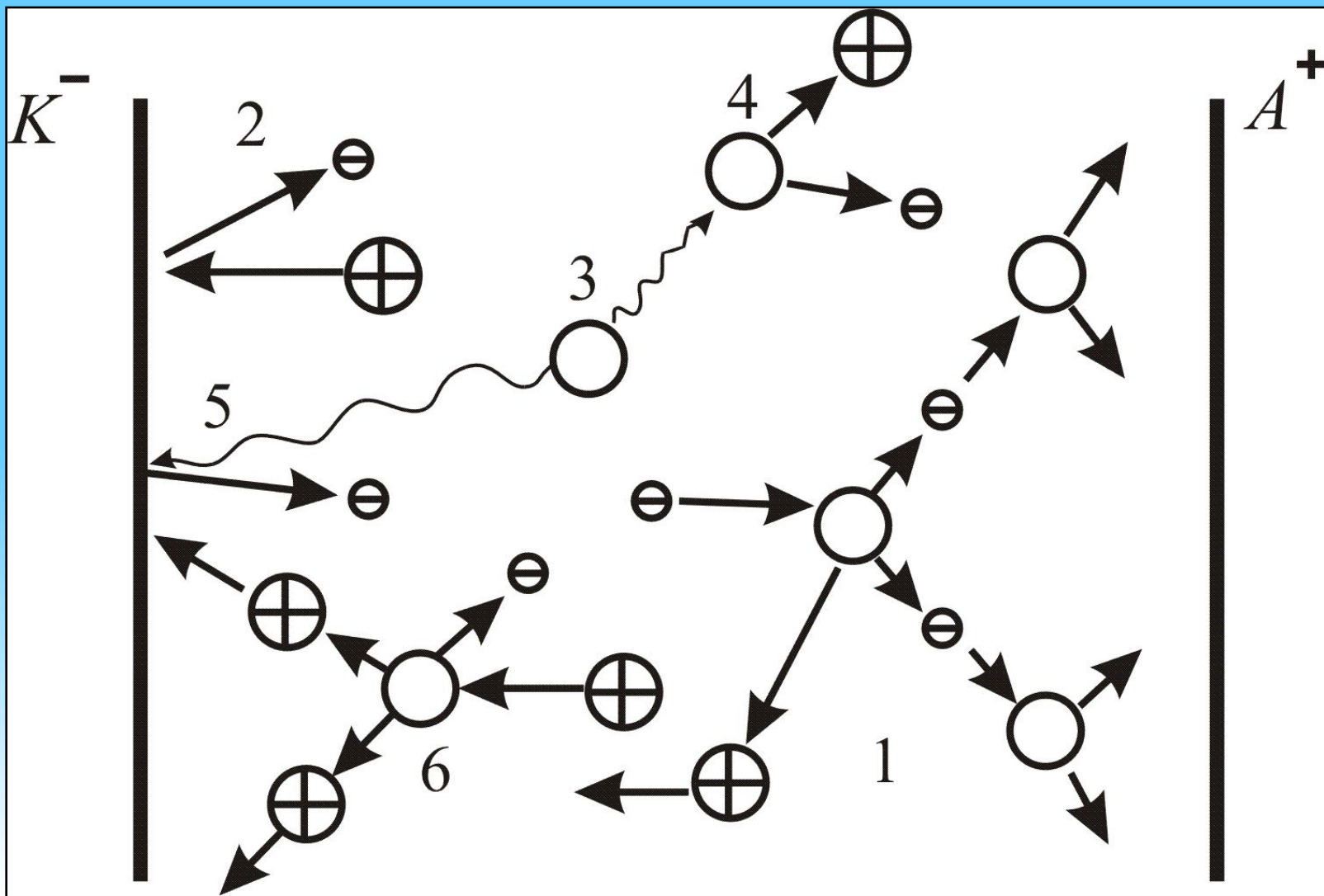
# Условия возникновения и поддержания самостоятельного газового разряда



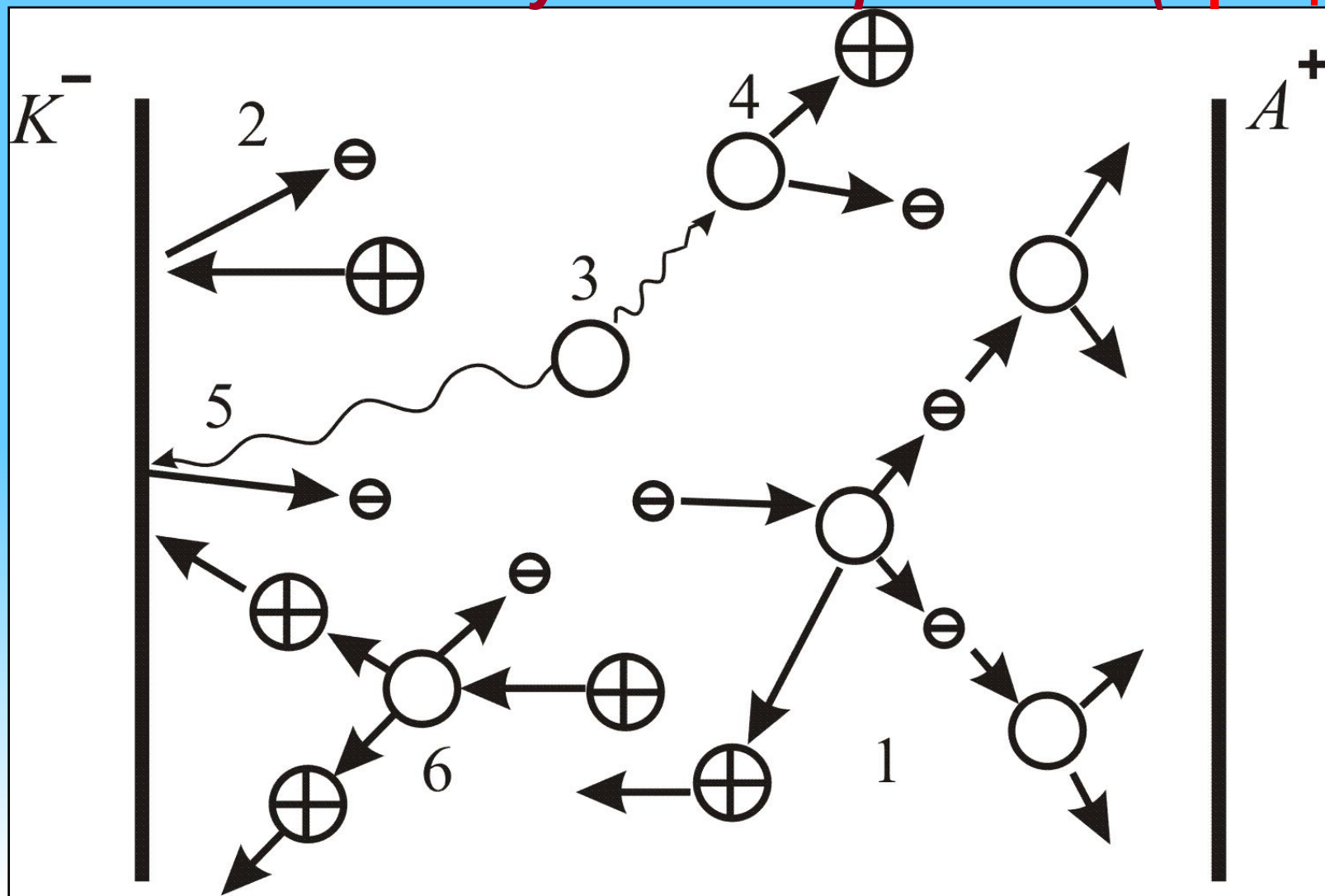
- 1. При больших напряжениях между электродами газового промежутка **ток сильно возрастает**. Это происходит вследствие того, что возникающие под действием внешнего ионизатора **электроны, сильно ускоренные электрическим полем, сталкиваются с нейтральными молекулами газа и ионизируют их**. В результате этого образуются **вторичные электроны и положительные ионы (процесс 1)**



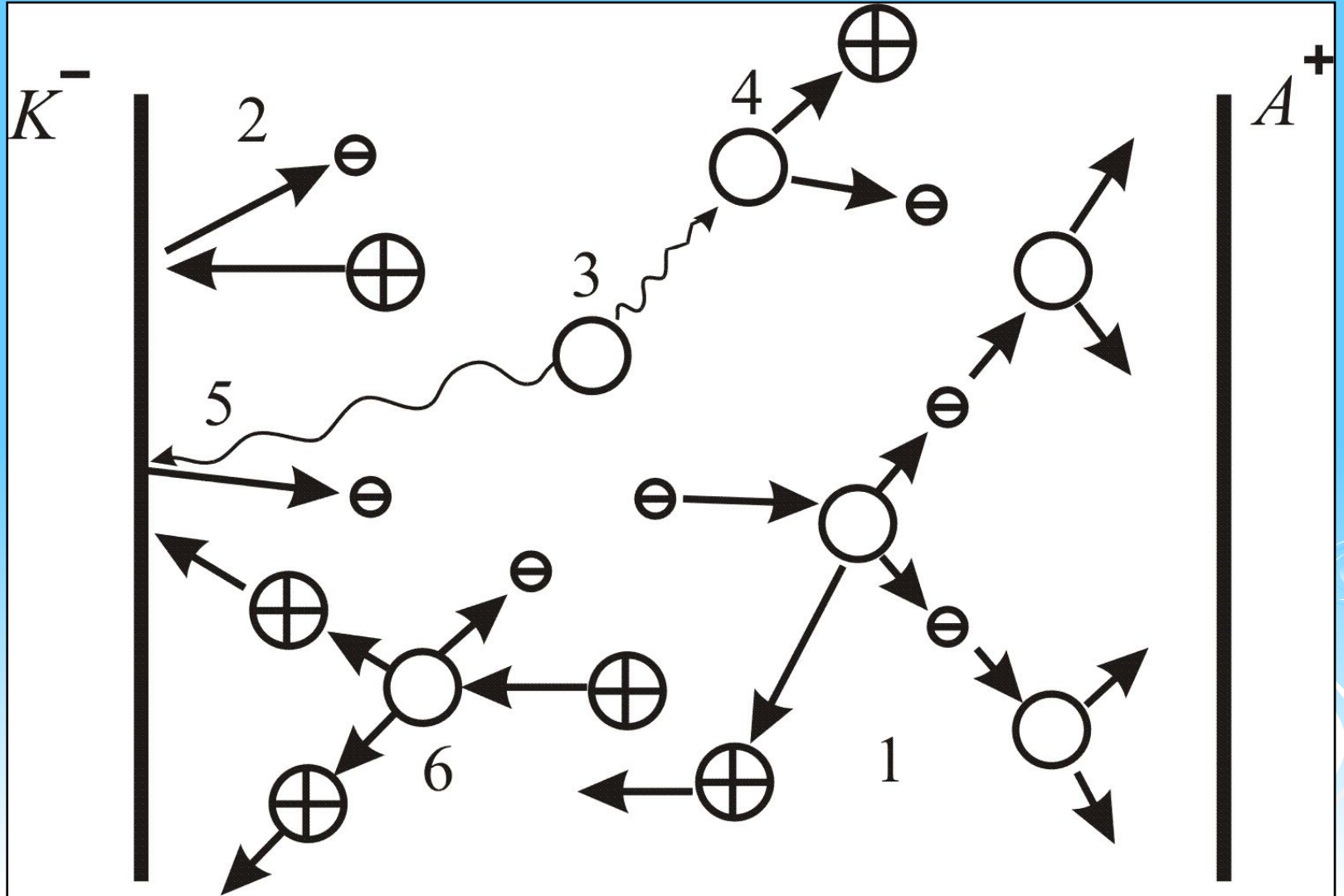
- 2. Ускоренные электрическим полем **положительные ионы, ударяясь о катод, выбивают из него электроны (процесс 2);**



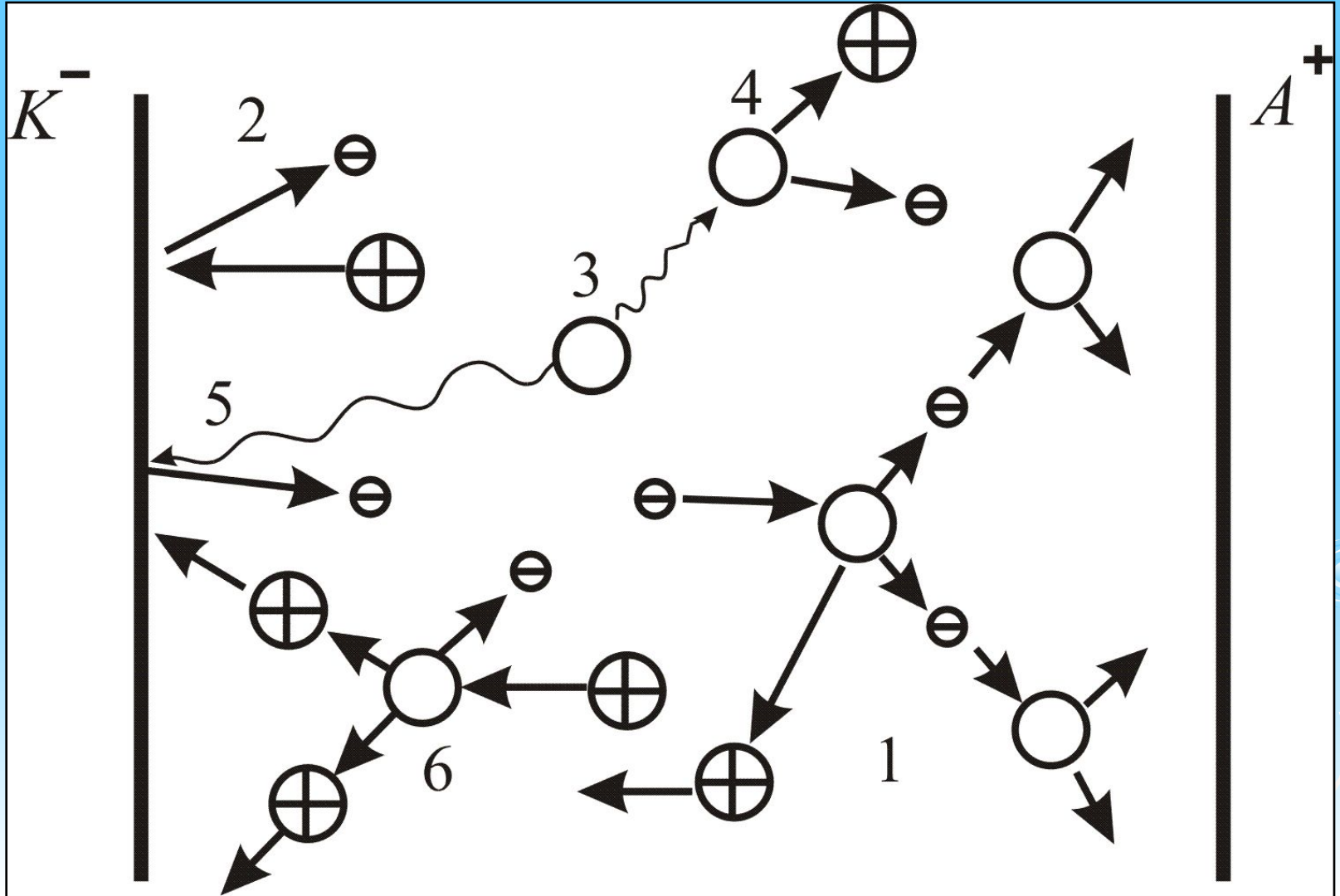
- 3. Положительные ионы, сталкиваясь с молекулами газа, переводят их в возбужденное состояние; **переход таких молекул в основное состояние сопровождается испусканием фотонов (процесс 3);**



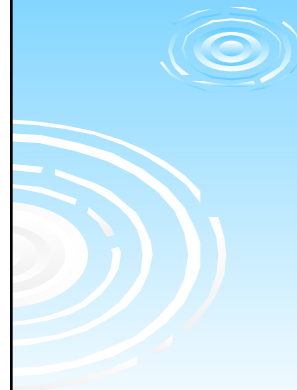
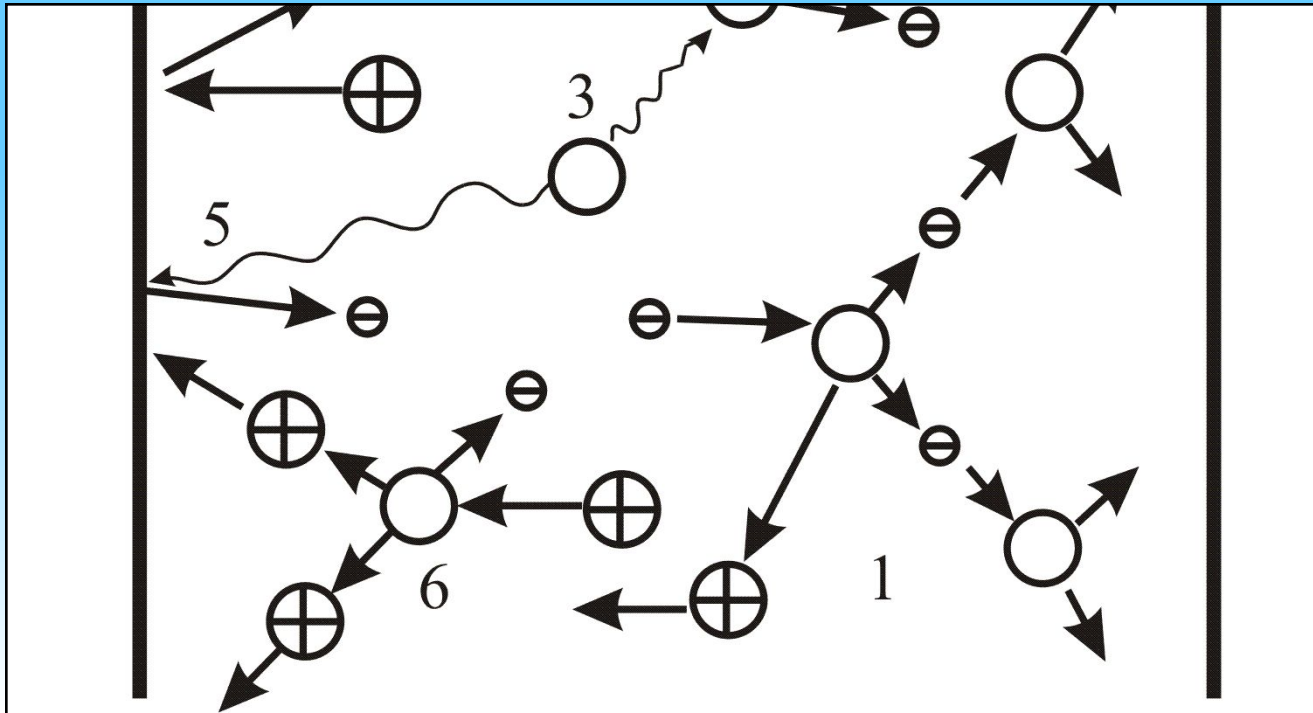
- 4. **Фотон, поглощенный нейтральной молекулой, ионизирует ее, происходит процесс фотонной ионизации молекул (процесс 4);**



• 5. **Выбивание электронов из катода под действием фотонов (процесс 5);**



- 6. Наконец, при значительных напряжениях между электродами газового промежутка наступает момент, когда **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.**
- Когда возникают, кроме электронных лавин, еще и ионные, сила тока растет уже практически без увеличения напряжения.





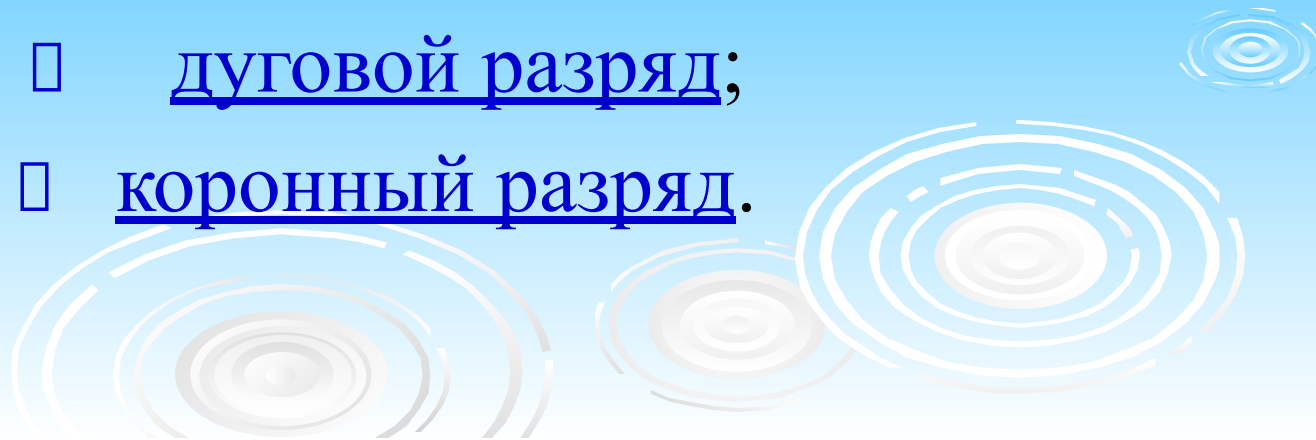
## □ Рассмотрим условия возникновения и поддержания самостоятельного разряда.

- 1) При больших напряжениях между электродами газового промежутка ток сильно возрастает. Это происходит вследствие того, что возникающие под действием внешнего ионизатора электроны, сильно ускоренные электрическим полем, сталкиваются с нейтральными молекулами газа и ионизируют их, в результате чего образуются *вторичные электроны и положительные ионы (процесс 1)*.
- 2) ускоренные электрическим полем положительные ионы, ударяясь о катод, выбивают из него электроны (*процесс 2*);
- 3) положительные ионы, сталкиваясь с молекулами газа, переводят их в возбужденное состояние; переход таких молекул в основное состояние сопровождается испусканием фотонов (*процесс 3*);
- 4) фотон, поглощенный нейтральной молекулой, ионизирует ее, происходит процесс фотонной ионизации молекул (*процесс 4*);
- 5) выбивание электронов из катода под действием фотонов (*процесс 5*);
- 6) наконец, при значительных напряжениях между электродами газового промежутка наступает момент, когда 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. Когда возникают, кроме электронных лавин, еще и ионные, сила тока растет уже практически без увеличения напряжения.

## 8.4. Типы разрядов

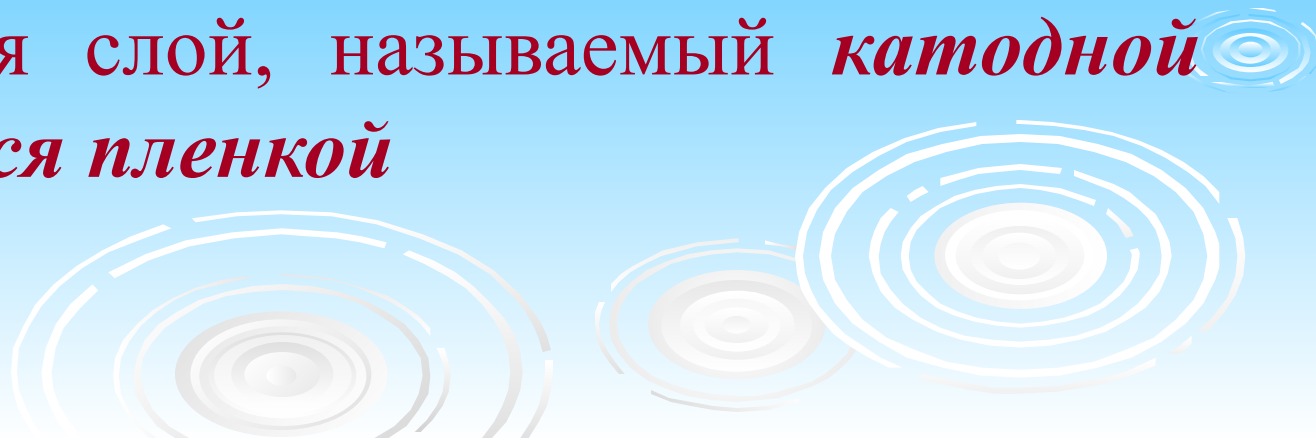
В зависимости от давления газа, конфигурации электродов и параметров внешней цепи существует *четыре типа самостоятельных разрядов:*

- тлеющий разряд;
- искровой разряд;
- дуговой разряд;
- коронный разряд.

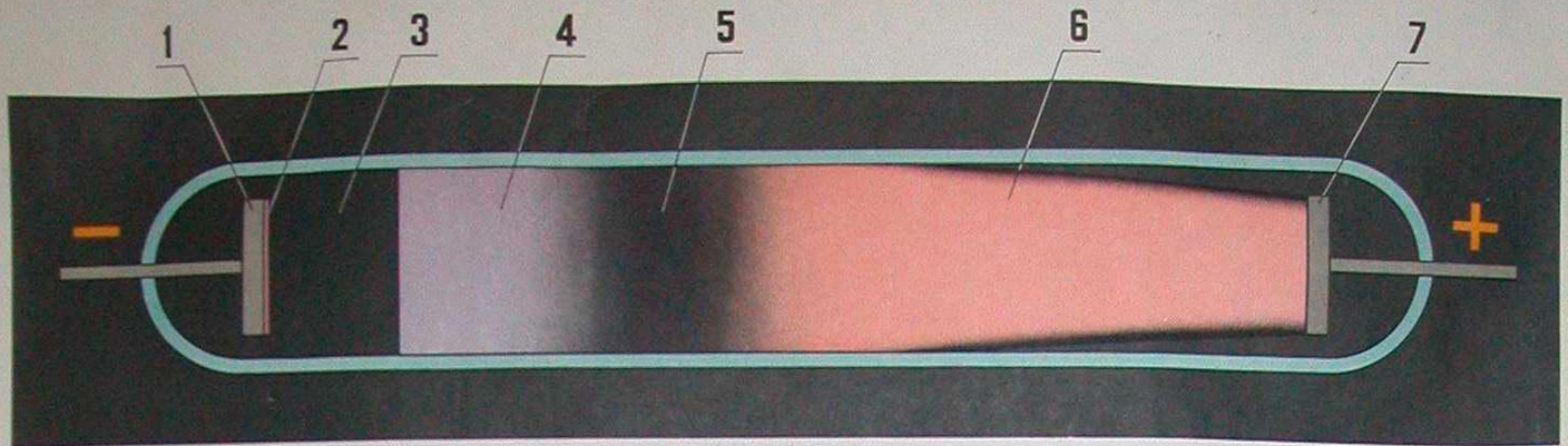


# Тлеющий разряд

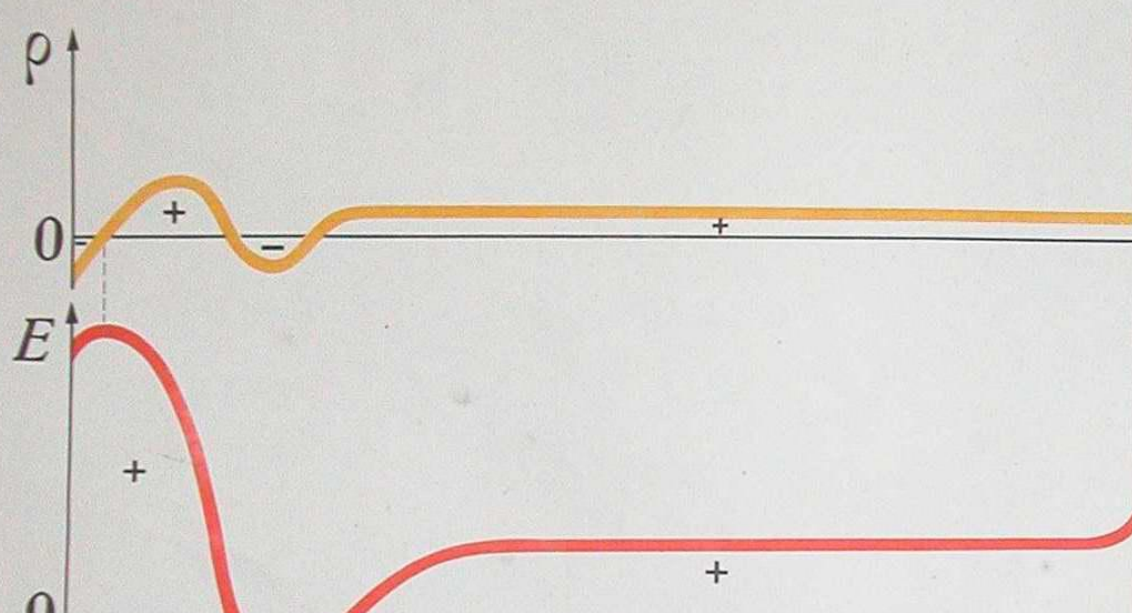
- **Тлеющий разряд** возникает при **низких давлениях** (в вакуумных трубках).
- Его можно наблюдать в стеклянной трубке с впаянными у концов плоскими металлическими электродами.
- Вблизи катода располагается **тонкий светящийся слой**, называемый **катодной светящейся пленкой**



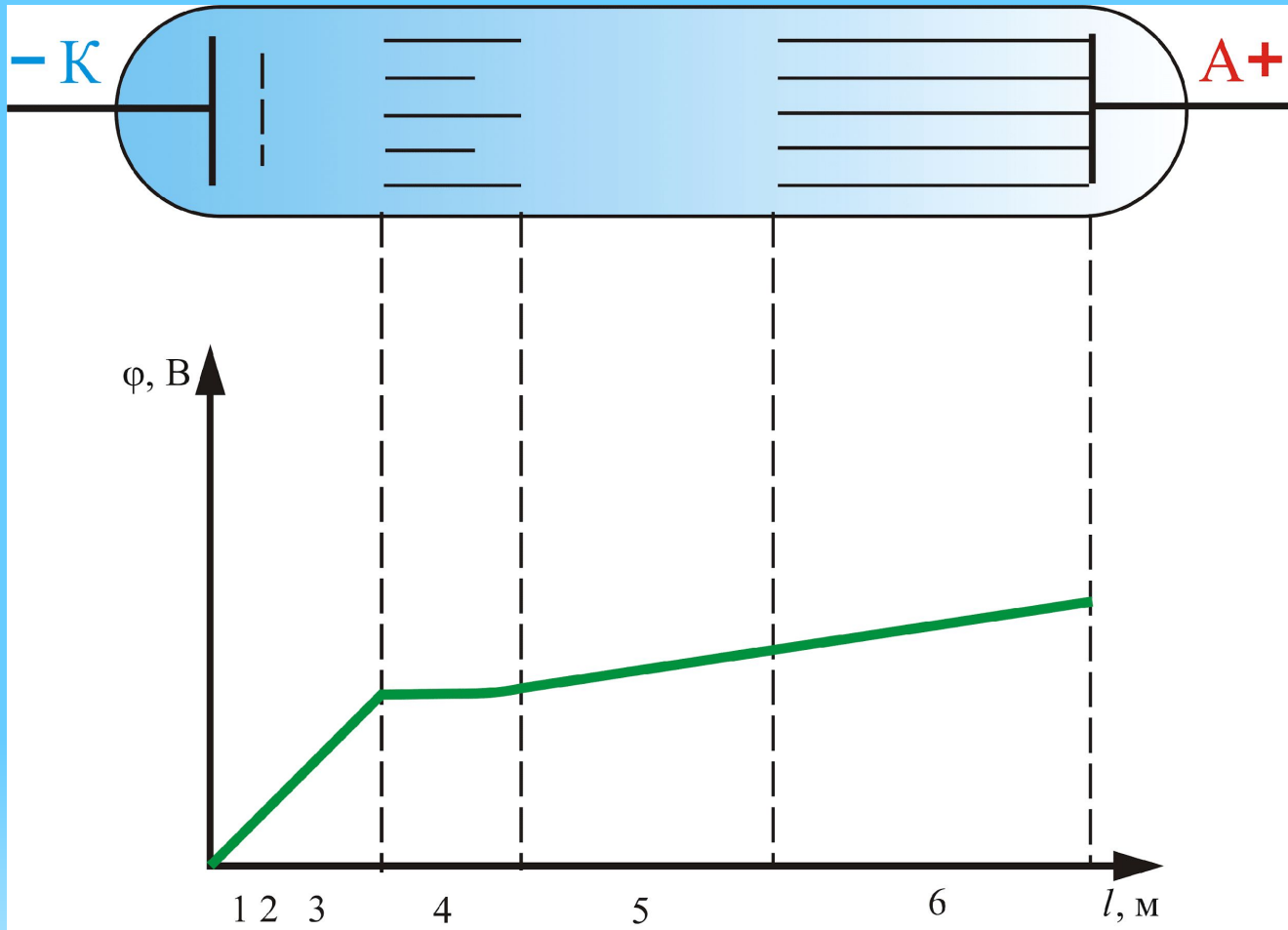
# ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД



КАТОДНАЯ ТРУБКА



# Тлеющий разряд

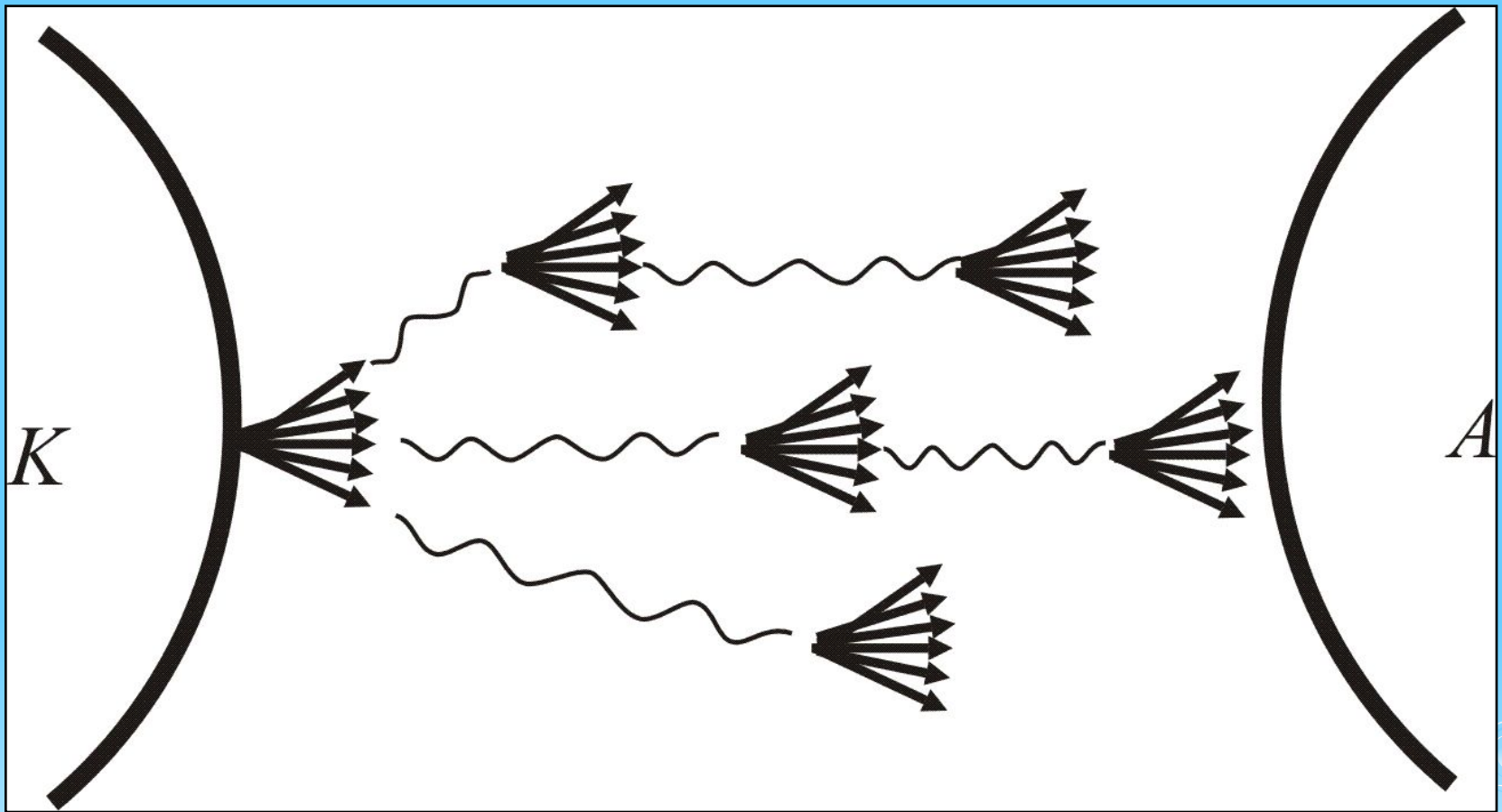


**1. Астоново темное пространство; 2. Катодная светящаяся пленка; 3. Катодное темное пространство; 4. Тлеющее свечение; 5. Фарадеево темное пространство; 6. Положительный столб.**

# Искровой разряд

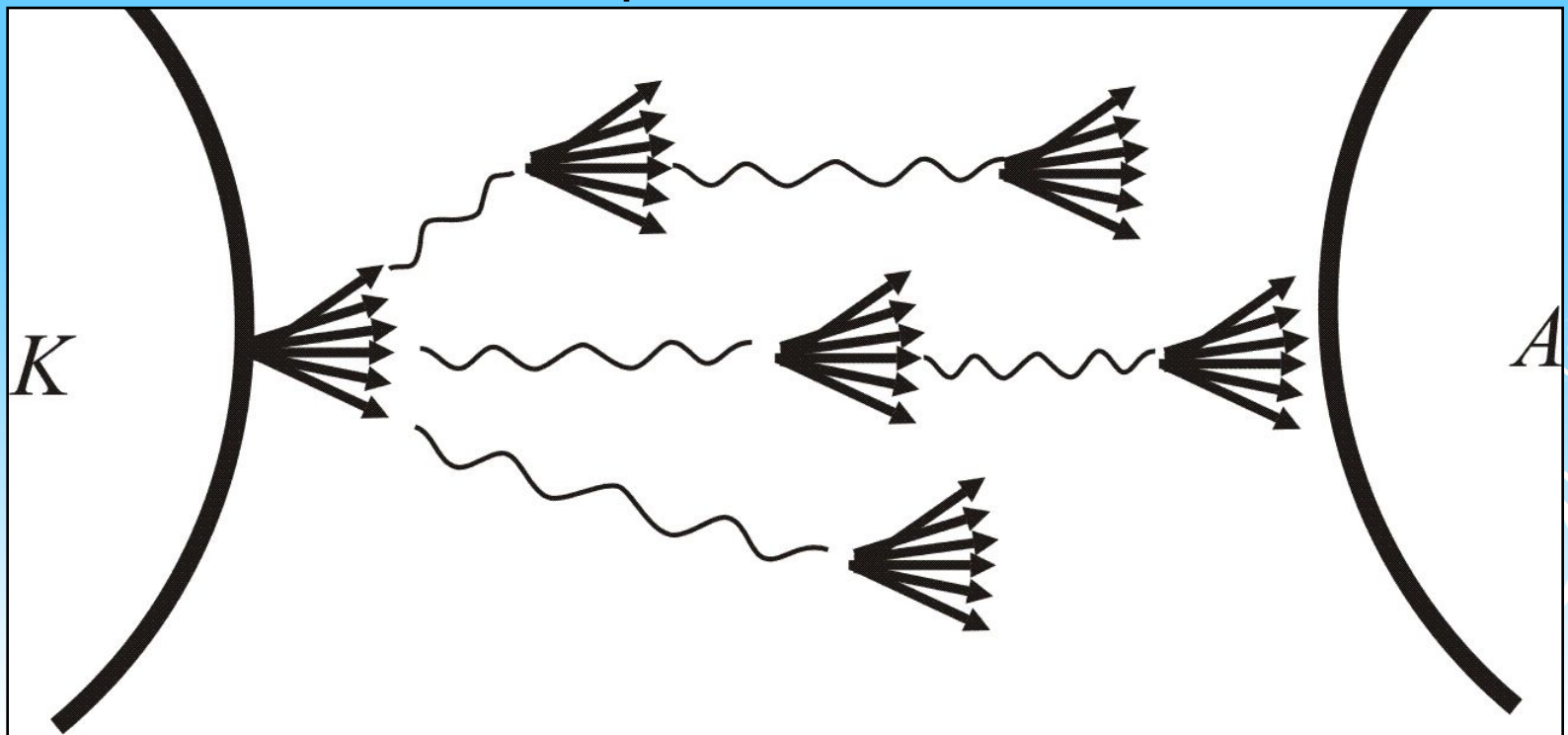
- Искровой разряд возникает в газе обычно при давлениях порядка атмосферного  $P_{ат}$ .
- Он характеризуется прерывистой формой.
- По внешнему виду искровой разряд представляет собой пучок ярких зигзагообразных разветвляющихся тонких полос, мгновенно пронизывающих разрядный промежуток, быстро гаснущих и постоянно сменяющих друг друга.
- Эти полосы называют **искровыми каналами.**

# Искровой разряд



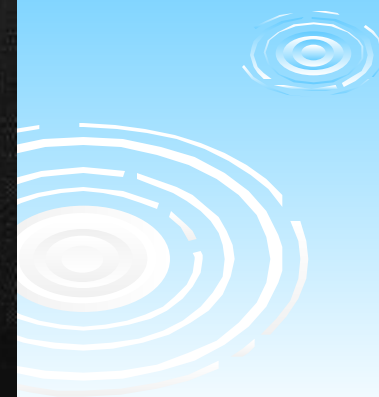
$$P_{ат} = 10000 K; \quad \Phi_{канала} \sim 40 \text{ см}; \quad I = 100 \text{ кА}; \quad t = 10^{-4} \text{ с}$$

- После того, как разрядный промежуток «пробит» искровым каналом, сопротивление его становится малым, через канал проходит кратковременный импульс тока большой силы, в течение которого на разрядный промежуток приходится лишь незначительное напряжение. Если мощность источника не очень велика, то после этого импульса тока разряд прекращается. Напряжение между электродами начинает повышаться до прежнего значения, и пробой газа повторяется с образованием нового искрового канала.





- В естественных природных условиях искровой разряд наблюдается в виде **молнии**.
- На рисунке изображен пример **искрового разряда** – **молния**, продолжительностью  $0,2 \div 0,3\text{с}$
- силой тока  $10^4 - 10^5\text{ А}$ , длиной  $20\text{ км}$







- *Диаметр канала молнии*
- *равен примерно 1 см,*
- *температура в канале молнии*
- *равна примерно 25 000°C,*
- *продолжительность разряда*
- *составляет доли секунды.*



Ток молнии может достигать 1 млн А, напряженность поля пробоя (10-30) кВ/см



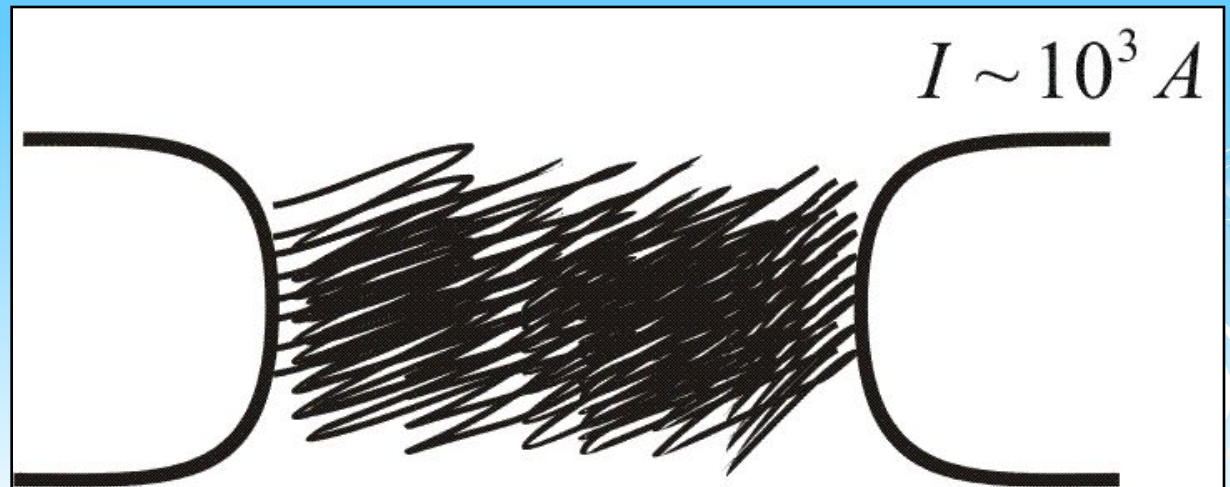
Характерная форма путей разрядов



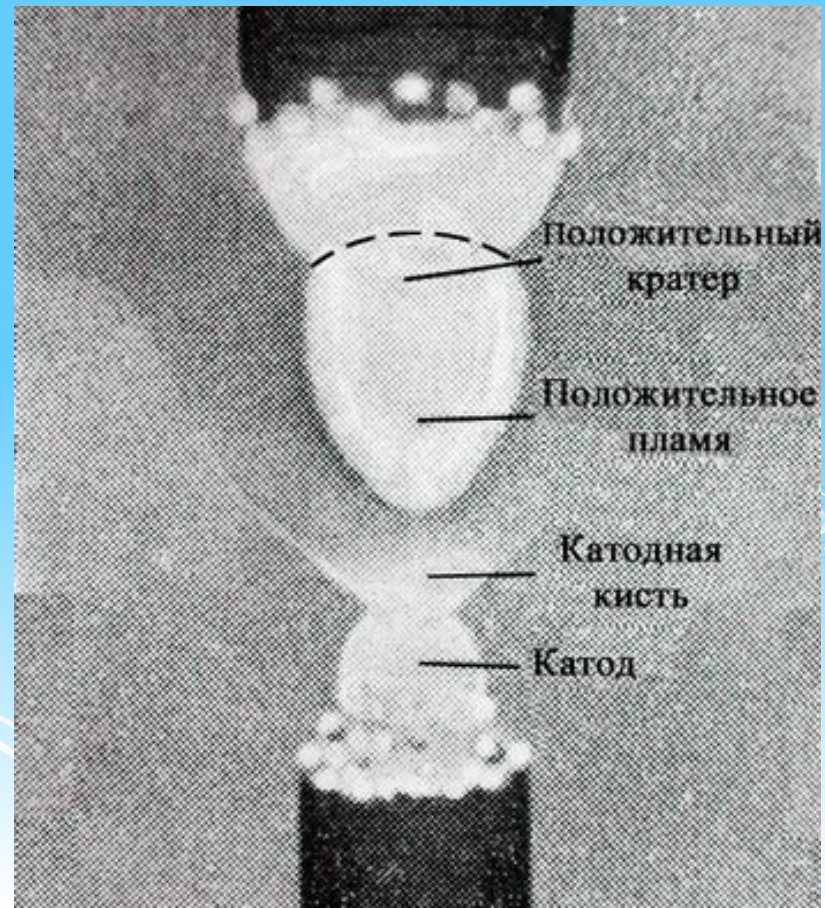
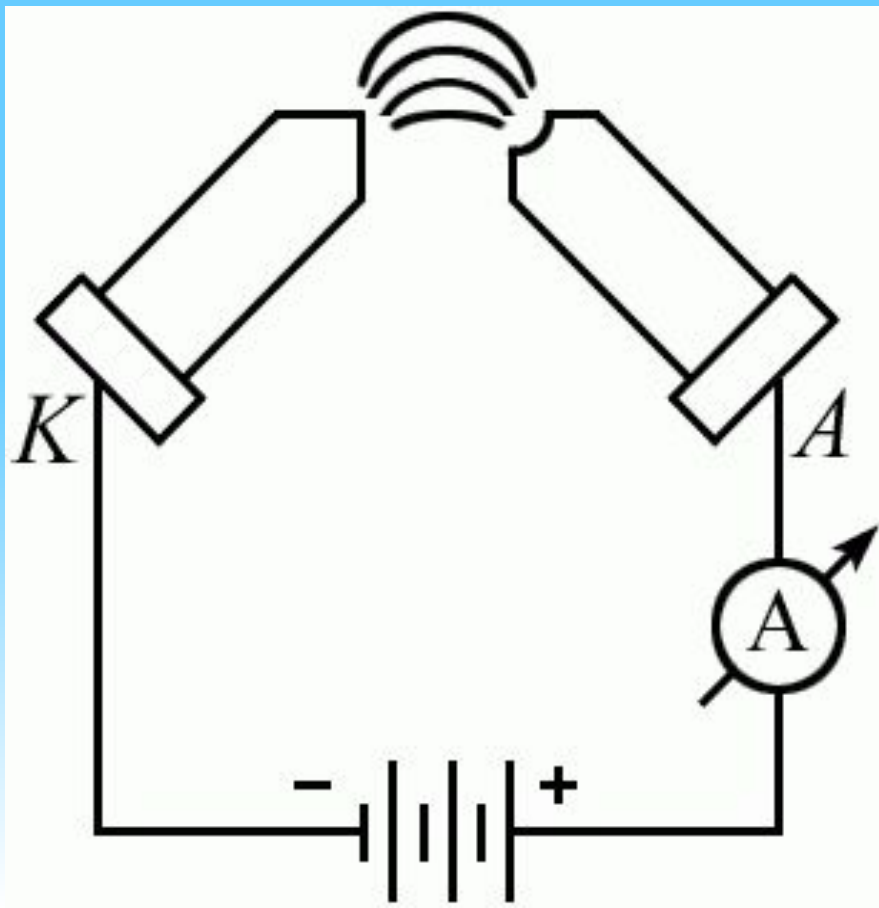
# Дуговой разряд

- **Дуговой разряд.** Если после получения искрового разряда от мощного источника постепенно уменьшать расстояние между электродами, то разряд из прерывистого становится непрерывным возникает новая форма газового разряда, называемая **дуговым разрядом.**

- $P_{ат}$
- $U=50-100 \text{ В}$
- $I = 100 \text{ А}$



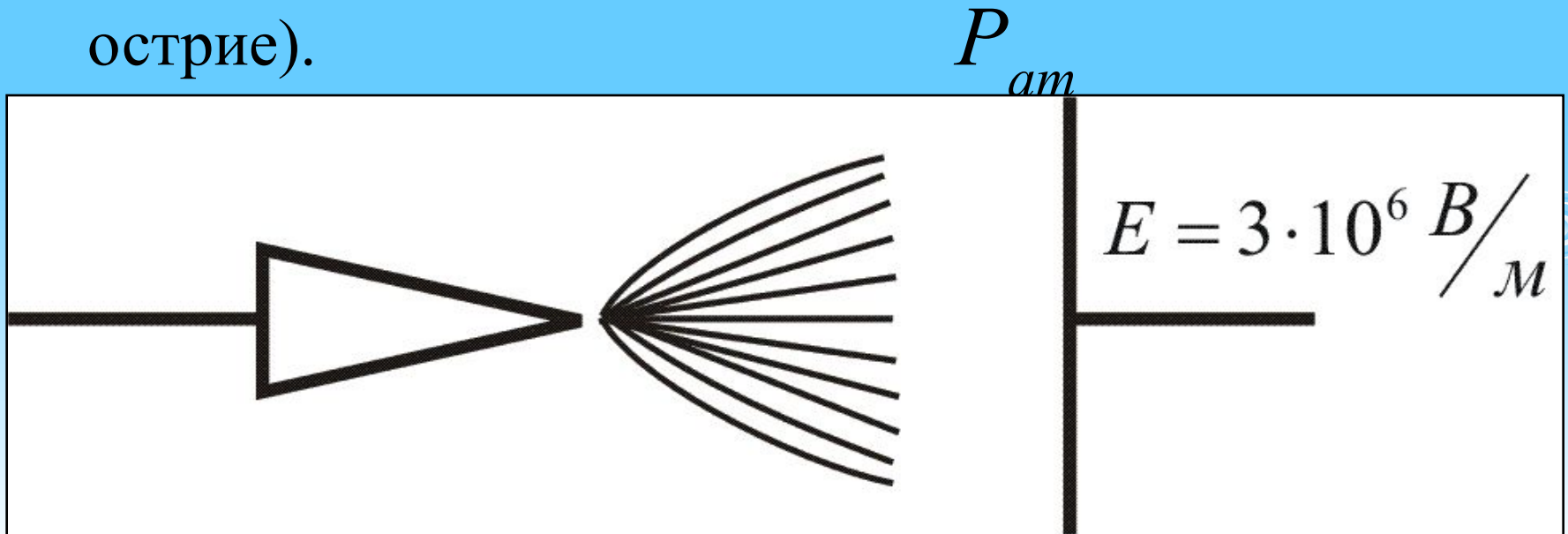
- **Ток** при дуговом разряде **резко увеличивается, достигая десятков и сотен ампер**, а **напряжение** на разрядном промежутке **падает до нескольких десятков вольт**.
- Дуговой разряд поддерживается, главным образом, за счет **термоэлектронной эмиссии с поверхности катода**.
- На практике – это **сварка, мощные дуговые печи**.



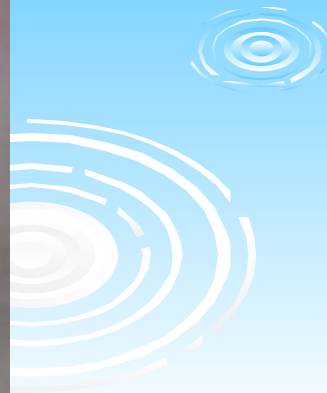


# Коронный разряд

- **Коронный разряд** возникает в **сильном неоднородном электрическом поле** при сравнительно **высоких давлениях** газа (порядка **атмосферного**).
- Такое поле можно получить между двумя электродами, поверхность одного из которых обладает большой кривизной (тонкая проволоочка, острие).



- Когда электрическое поле вблизи электрода с большой кривизной достигает примерно  $3 \cdot 10^6$  В/м, вокруг него возникает свечение, имеющее вид оболочки или короны, откуда и произошло название заряда.



## 8.5. Применение газового разряда

- Самыми распространёнными приборами, основанными на явлении газового разряда, являются точные приборы, которые можно разделить на следующие групп шесть групп.
  - Тиратроны и газотроны тлеющего разряда.
    - Стабиллитроны тлеющего и коронного разрядов.
  - Счётчики коммутаторные векотроны.
  - Индикаторы тлеющего разряда.
    - Газотроны тиратроны с наполненным катодом.
    - Импульсные водородные тиратроны с наполненным катодом.

Газоразрядные приборы очень разнообразны, и различаются видом используемого разряда.

Они используются для стабилизации напряжения, защиты от перенапряжения, выполнения переключательных функций, индикации электрического состояния и т. д.

- В последнее время для повышения защиты уязвимых и ответственных объектов, например, пусковых комплексов ракет, пытаются реализовать различные формы управления молнией, в частности лазерное инициирование молнии.

- Лазерное инициирование основано на создании в воздухе ионизованного канала с помощью лазерного излучения.

## 8.6. Понятие о плазме

- В газовом разряде возникает большое количество положительных ионов вследствие высокой эффективности ударной ионизации, причем концентрация ионов и электронов одинакова.
- Такая система из электронов и положительных ионов, распределенных с одинаковой концентрацией, называется плазмой.

*Плазма, в которой выполняется равенство:*

$$T_{\text{э}} = T_{\text{и}} = T_{\text{а}}$$

(где индексы «э», «и», «а» относятся к электронам, ионам, атомам) **называется изотермической**.

- Такая плазма имеет место при ионизации с помощью высокой температуры (дуга, горящая при атмосферном и выше давлении, искровой канал); например, в дуге сверхвысокого давления (до 1000 атм.) температура плазмы достигает 10000 К, температура плазмы при термоядерном взрыве – порядка нескольких десятков миллионов градусов, в установке «ТОКАМАК» для исследования термоядерных реакций – порядка  $7 \cdot 10^6$  К

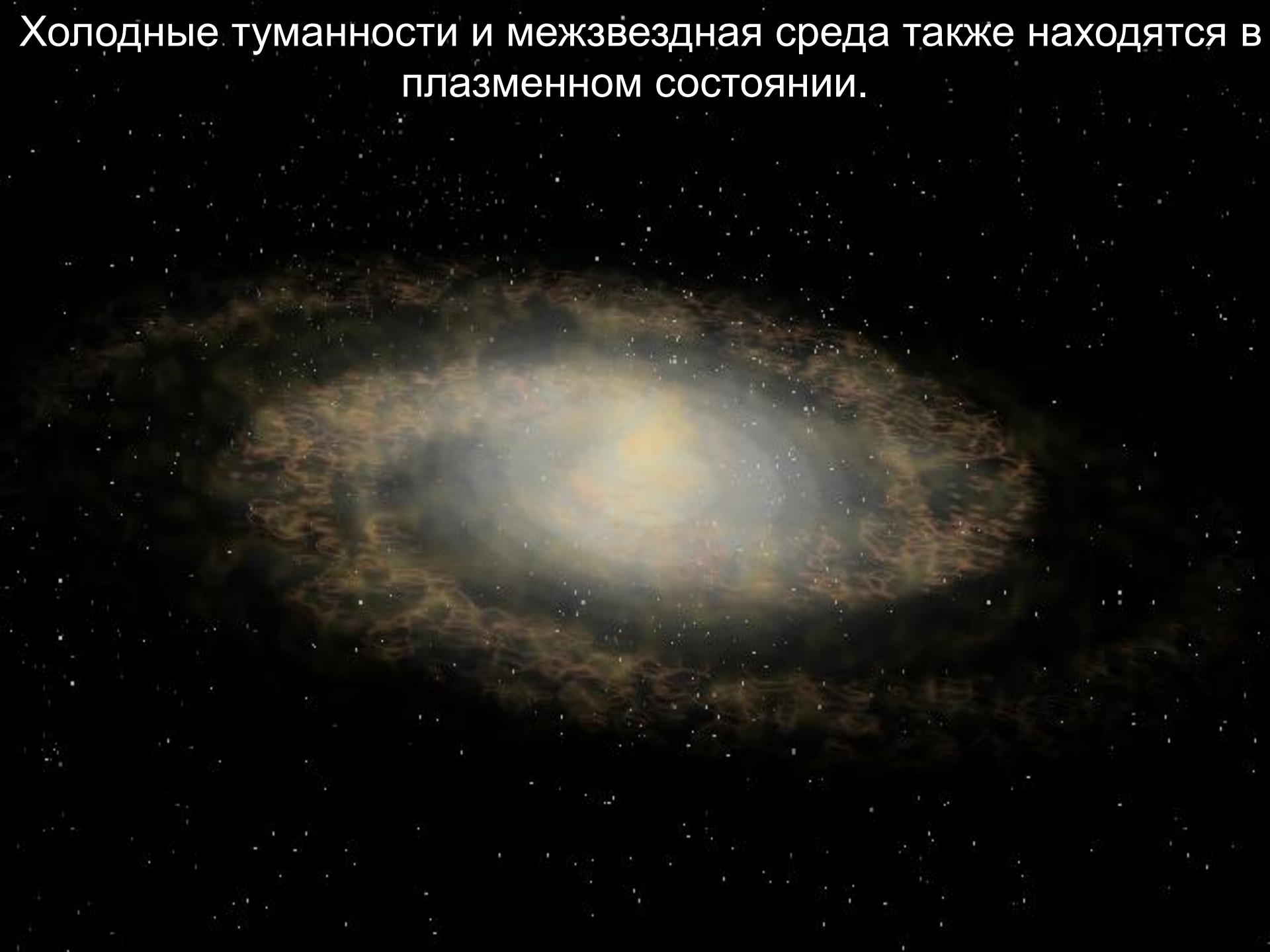
## Важнейшие свойства плазмы:

- а) **сильное** взаимодействие с внешними магнитными и электрическими полями, связанное с ее высокой электропроводностью;
- б) **специфическое коллективное взаимодействие частиц** плазмы, осуществляющееся через усредненные электрические и магнитные поля, которые создают сами эти частицы;
- в) **благодаря коллективным взаимодействиям** плазма ведет себя как своеобразная упругая среда, в которой легко возбуждаются и распространяются различного рода колебания и волны (например, ленгмюровские колебания плазмы);
- г) **во внешнем магнитном поле** плазма ведет себя как диамагнитная среда;
- д) **удельная электрическая проводимость**  $\sigma$  полностью ионизованной плазмы не зависит от плотности плазмы и увеличивается с ростом термодинамической температуры, и при  $T \geq 10^7$  К столь велика, что плазму можно приближенно считать идеальным проводником  $\sigma \rightarrow \infty$

Плазма – наиболее распространенное состояние вещества во Вселенной. Солнце и другие звезды состоят из полностью ионизованной высокотемпературной плазмы. Основным источником энергии излучения звезд – термоядерные реакции синтеза, протекающие в недрах звезд при огромных температурах.

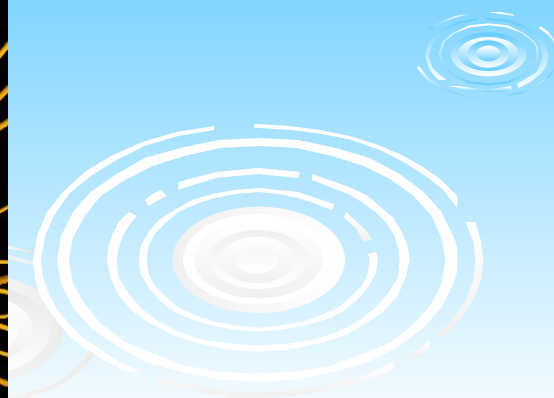
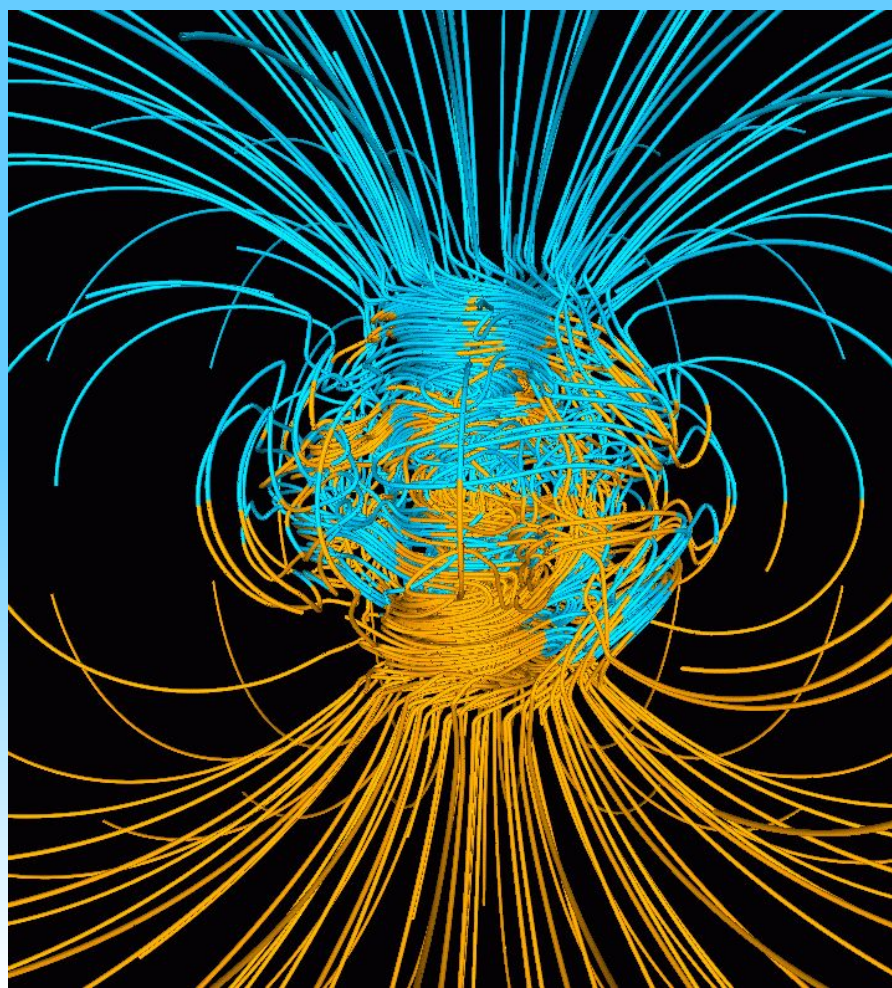


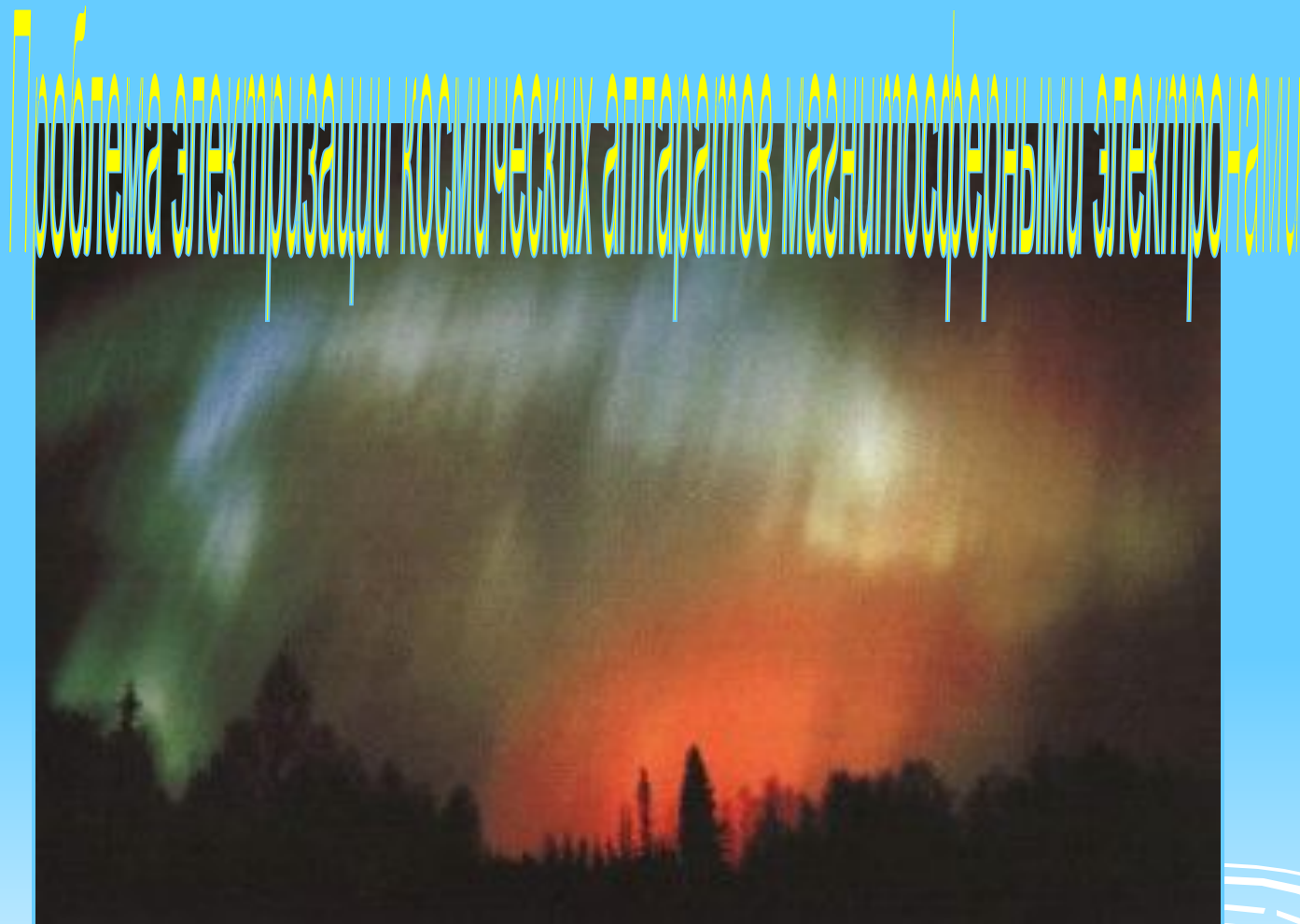
Холодные туманности и межзвездная среда также находятся в  
плазменном состоянии.





В околоземном пространстве слабоионизованная плазма находится в радиационных поясах и ионосфере Земли. С процессами, происходящими в этой плазме, связаны такие явления, как магнитные бури, нарушения дальней радиосвязи и полярные сияния

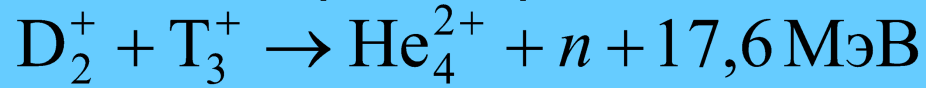




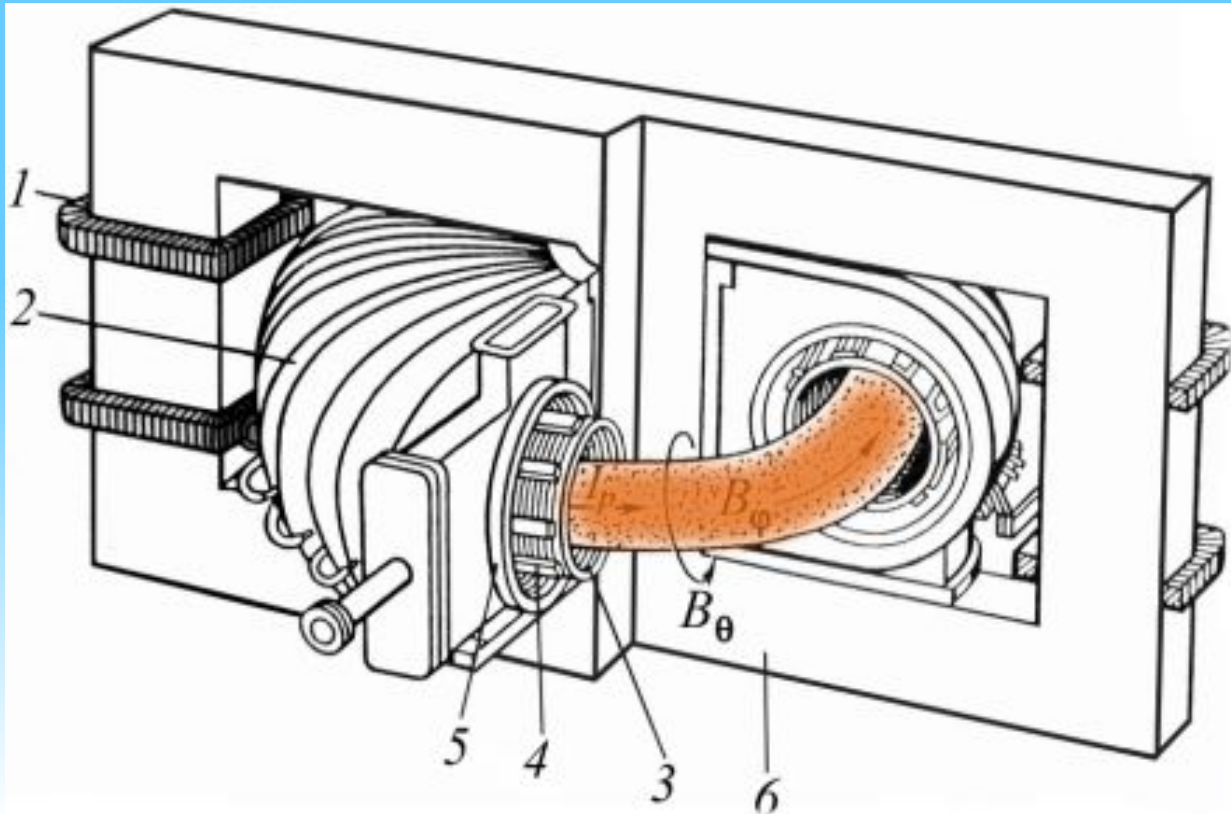
"высыпание" электронов 10-100 кэВ

- Основной практический интерес к физике плазмы связан с решением проблемы **управляемого термоядерного синтеза** – процесс слияния легких атомных ядер при высоких температурах  $\sim 10^8$  К.

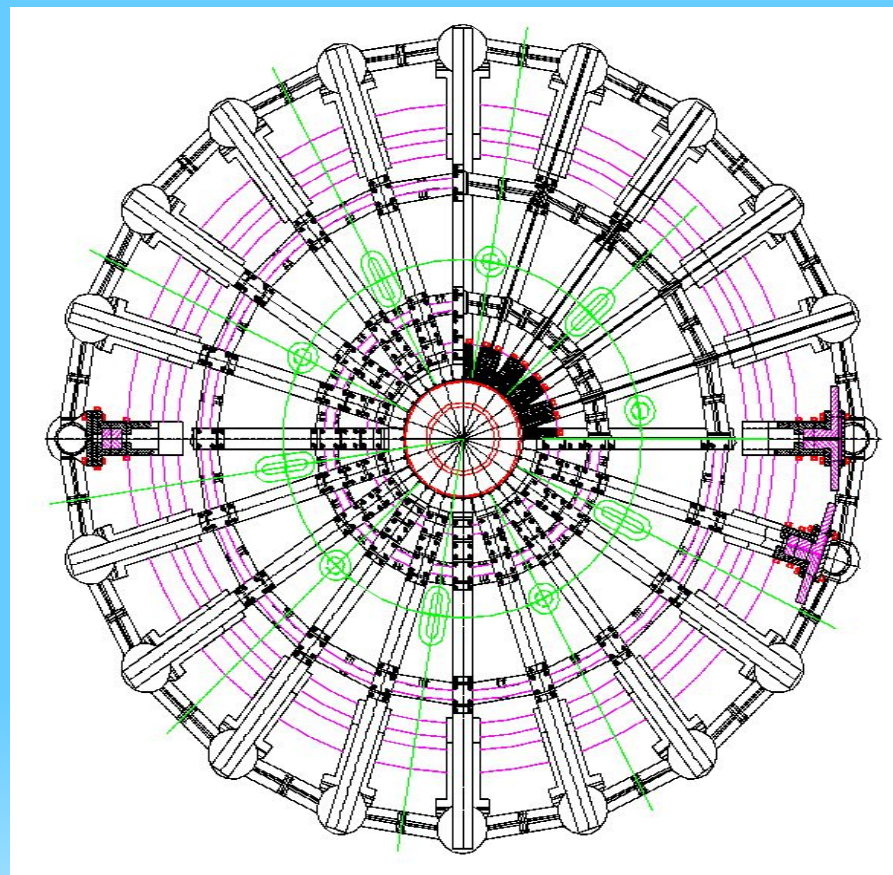
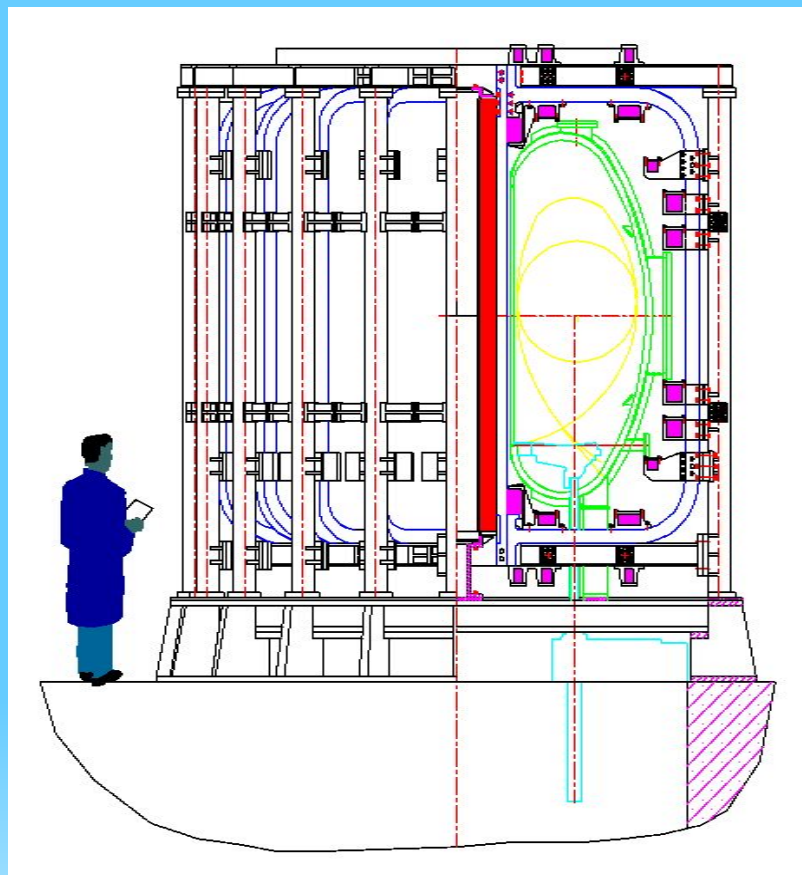
Энергетический выход реактора составляет  $10^5$  кВт/м<sup>3</sup>



### **Схема токамака**



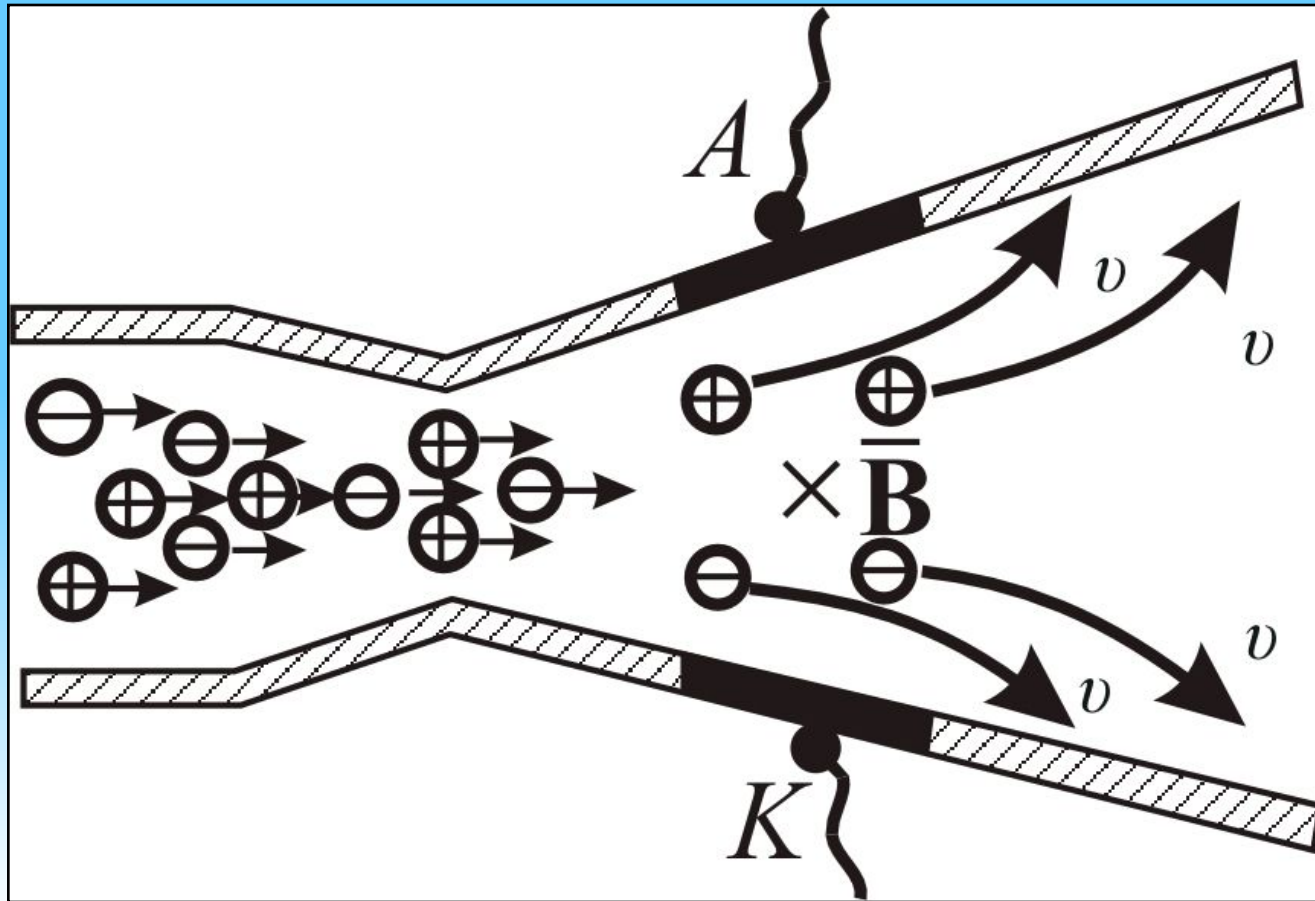
# Схема Казахстанского токамака КТМ в сечении и его вид с вакуумной камерой

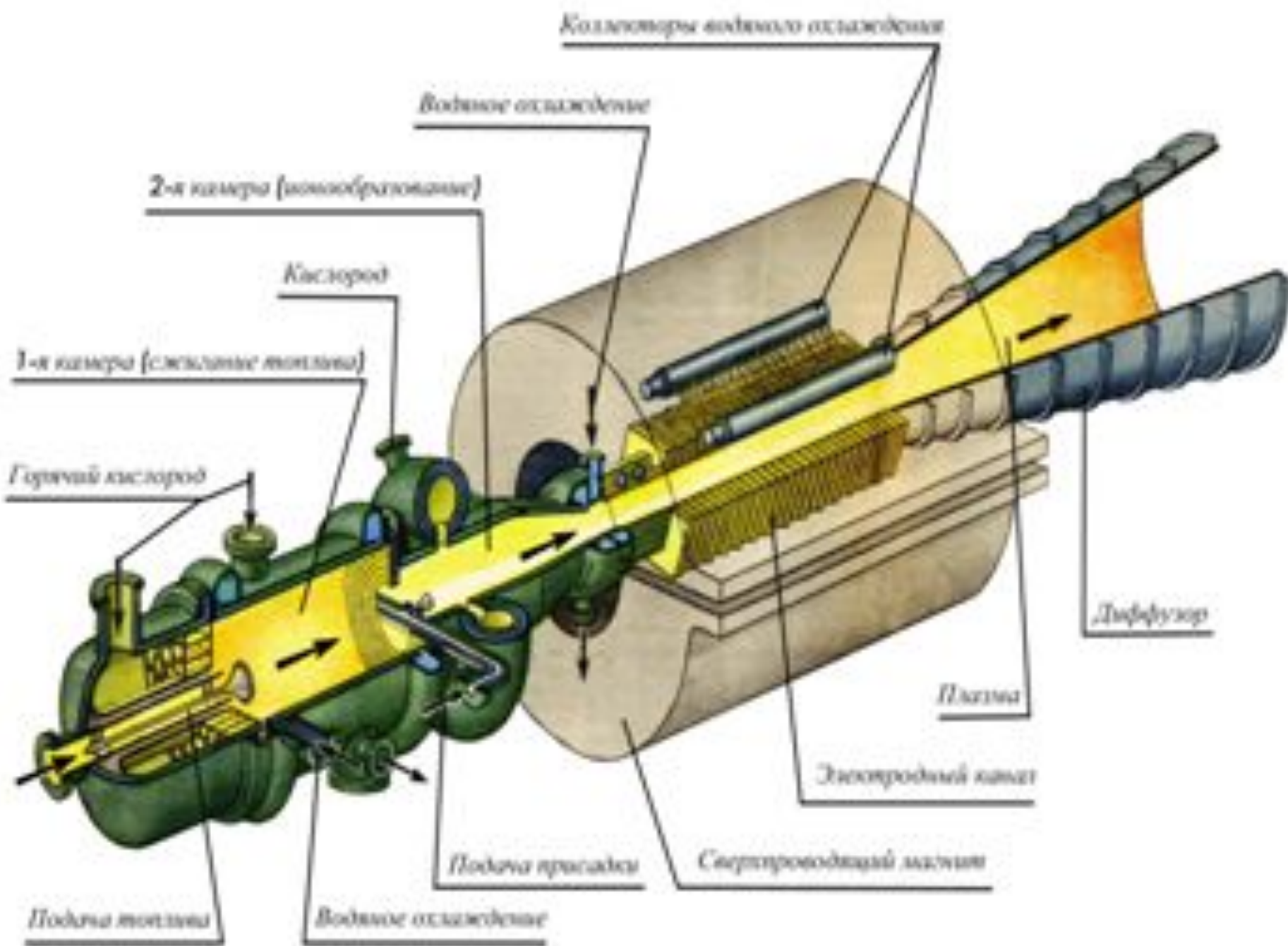


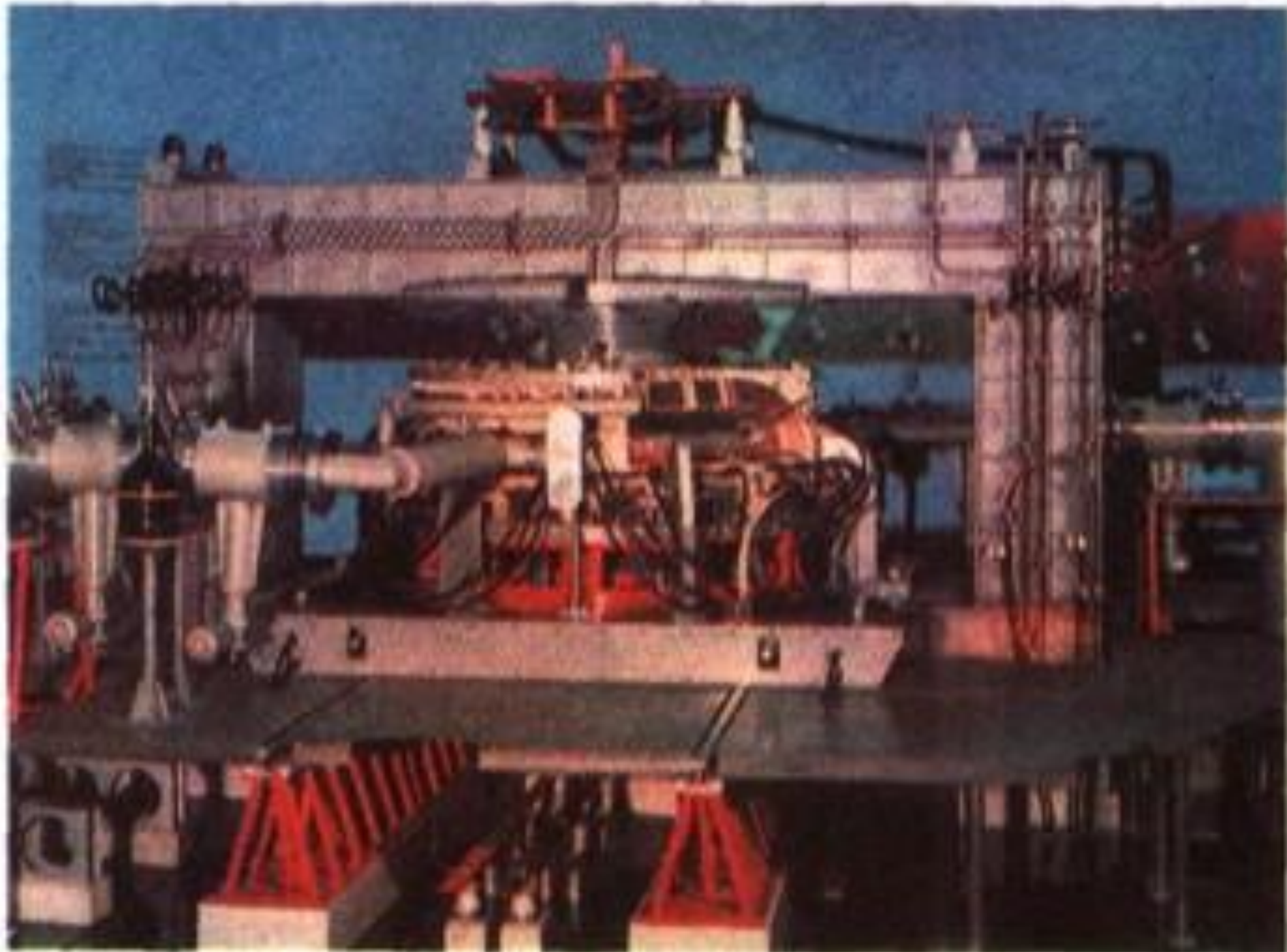
Осуществление управляемой термоядерной реакции в высокотемпературной плазме позволит человечеству в будущем получить **практически неисчерпаемый источник энергии.**

# МГД - генератор

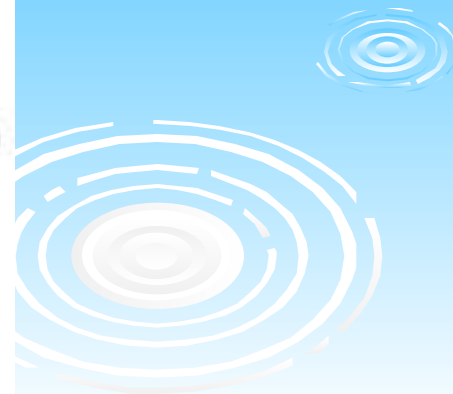
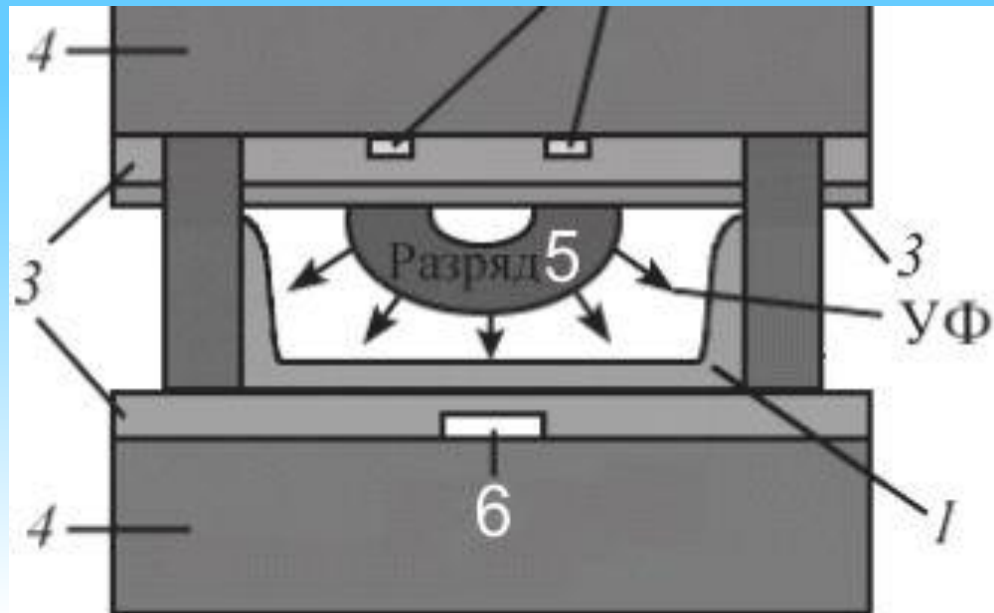
Движение плазмы в магнитном поле используется в методе прямого преобразования внутренней энергии ионизованного газа в электрическую. Этот метод осуществлен в *магнитогазодинамическом генераторе*





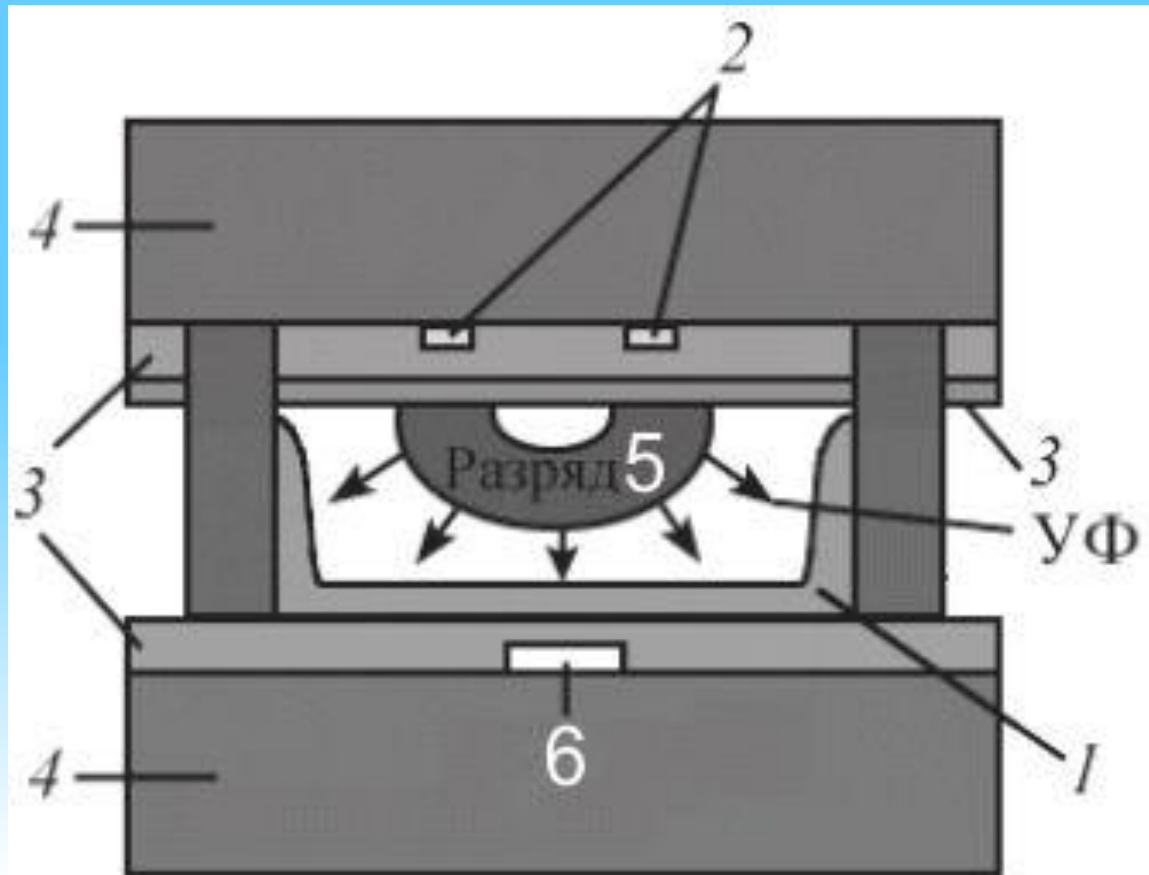


- Свойства плазмы излучать электромагнитные волны ультрафиолетового диапазона используются в современных телевизорах с плоским плазменным экраном.
- Ионизация плазмы в плоском экране происходит в газовом разряде. Разряд возникает при бомбардировке молекул газа электронами, ускоренными электрическим полем – самостоятельный разряд.





- Плоский телевизор с экраном из газоразрядных элементов содержит около миллиона маленьких плазменных ячеек, собранных в триады RGB – пиксели (*pixel – picture element*).



Лекция окончена

