

## Wyładowania elektryczne w gazach

### Powietrze atmosferyczne

Normalne warunki atmosferyczne:

$$p_n = 1013,25 \text{ hPa (760 mm Hg)}, \quad T_n = 293,15 \text{ K (20 } ^\circ\text{C)}$$

$$(760 \text{ Tr} = 101325 \text{ Pa} = 101325 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ atm} = 1,0333 \text{ kG/cm}^2 = 1 \text{ at} = 1,01325 \text{ bar})$$

Charakterystyka powietrza atmosferycznego o ciśnieniu  $p_n$  i temperaturze  $T_n$  jako środowiska, w którym powstają i rozwijają się wyładowania elektryczne:

- liczba wszystkich cząstek w  $1 \text{ cm}^3$ :  $2,7 \cdot 10^{19}$
- średnia średnica cząsteczek ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ):  $\sim 0,2 \text{ nm}$
- średnia odległość między cząsteczkami:  $\sim 100 \text{ nm}$
- średnia droga swobodna cząsteczek w ruchu cieplnym:  $\sim 3800 \text{ nm}$
- średnia prędkość w ruchu cieplnym:  $460 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- ładunek elektronu:  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- masa elektronu:  $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- masa cząsteczki  $\text{H}_2$ :  $3,3 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- energia jonizacji  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ :  $12,5 \dots 16,0 \text{ eV}$

## Rodzaje jonizacji gazu (powietrza)

Wyróżnia się trzy rodzaje jonizacji cząsteczek powietrza, jako źródła elektronów potrzebnych do rozwoju wyładowania.

### 1. Jonizacja zderzeniowa elektronowa

Jonizacja ta polega na wybijaniu elektronów z cząsteczek gazu przez elektrony swobodne rozpędzone w polu elektrycznym. Warunkiem wystąpienia tej jonizacji jest odpowiednia wartość energii kinetycznej elektronu przed zderzeniem z cząsteczką gazu.

$$\frac{m_e v_e^2}{2} \cdot \frac{m_{cz}}{m_e + m_{cz}} \geq W_j \quad \frac{m_e v_e^2}{2} - \text{energia kinetyczna elektronu}$$

$m_e$  - masa elektronu,

$v_e$  - średnia prędkość elektronu przed zderzeniem,

$m_{cz}$  - masa cząsteczki powietrza,

$W_j$  - energia jonizacji cząsteczki powietrza.

### Współczynnik jonizacji zderzeniowej elektronowej $\alpha$

$$\alpha = d \cdot f_\alpha \left( \frac{E}{d} \right) \quad d = \frac{p}{1013} \cdot \frac{293}{T}$$

$d$  - względna gęstość powietrza,

$E$  - natężenie pola elektrycznego,

$p, T$  - ciśnienie w [hPa] i temperatura powietrza w [K],

$f_\alpha$  - funkcja określająca prawdopodobieństwo zderzeń powodujących jonizację.

## 2. Fotojonizacja cząsteczek gazu

Fotojonizacja polega na wybijaniu elektronów z cząsteczek gazu przez fotony promieniowania o wystarczająco dużej energii.

$$h \cdot f \geq W_j \quad h \cdot f - \text{kwant promieniowania (foton)}$$

$$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad \text{stała Plancka}$$

$f$  - częstotliwość promieniowania

$W_j$  - energia jonizacji cząsteczki powietrza

Przykład fotojonizacji cząsteczek tlenu  $O_2$  ( $W_j = 12,5 \text{ eV}$ ):

$$c = \lambda \cdot f \quad c \cong 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{prędkość światła}$$

Kolejne przekształcenia, podstawienia wartości i obliczenia:

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad h \cdot \frac{c}{\lambda} \geq W_j, \quad \lambda \leq \frac{h \cdot c}{W_j} \quad \text{długość fali promieniowania}$$

$$\lambda \leq \frac{19,9 \cdot 10^{-26} \text{ J} \cdot \text{m}}{W_j} \frac{\text{J} \cdot \text{m}}{\text{J}}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$W_j = 12,5 \text{ eV} = 20,0 \cdot 10^{-19} \text{ J (tlen)}$$

$$\lambda \leq \frac{19,9 \cdot 10^{-26}}{20 \cdot 10^{-19}} \text{ m},$$

$$\lambda \leq 100 \text{ nm}$$

(promieniowanie w zakresie ultrafioletu)

$$f = \frac{c}{\lambda} \geq \frac{3 \cdot 10^8}{1 \cdot 10^{-7}} \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{m}},$$

$$f \geq 3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

### 3. Jonizacja termiczna

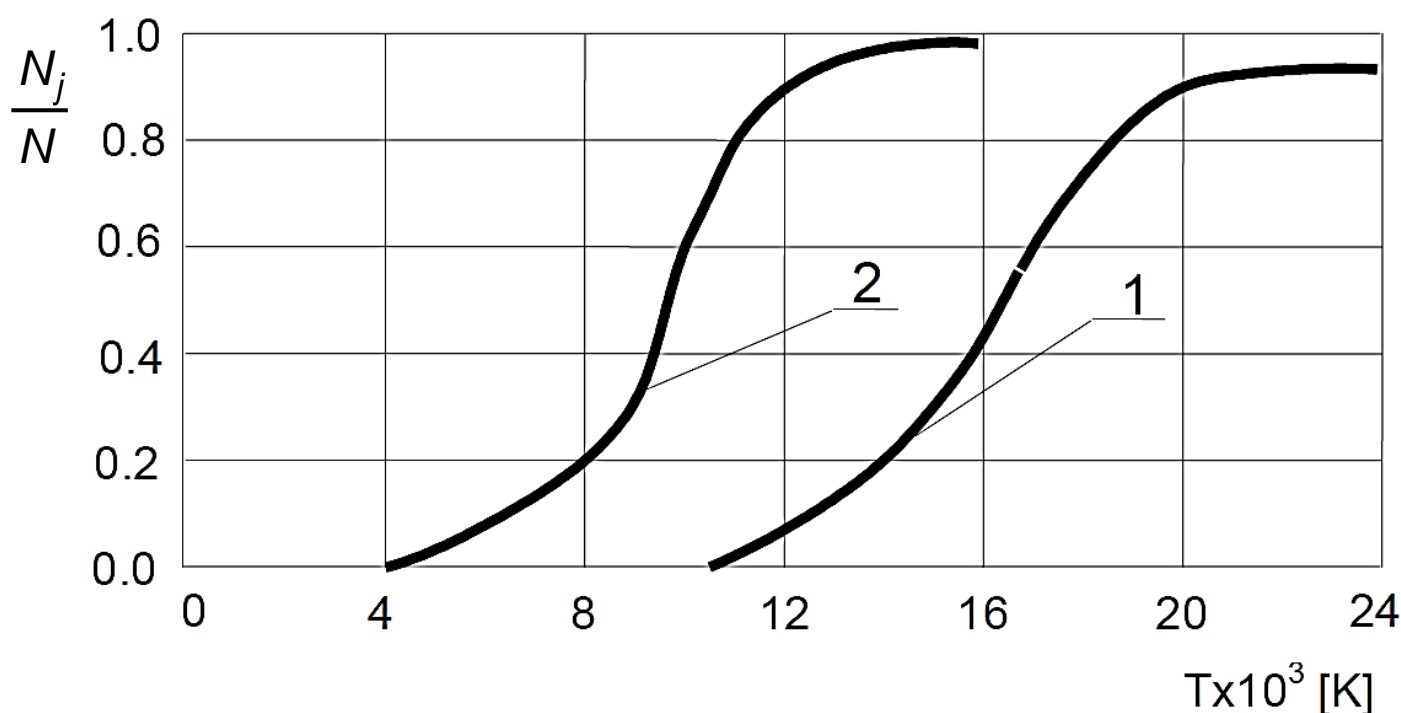
Jonizacja termiczna polega na wybijaniu elektronów z cząsteczek gazu przez ich wzajemne zderzanie się. Warunkiem wystąpienia tej jonizacji jest odpowiednia wartość energii kinetycznej cząsteczek gazu w ruchu cieplnym przed ich zderzeniem się. Energia ta zależy od temperatury gazu.

$$\frac{mw^2}{2} = \frac{3kT}{2} > W_j$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$  stała Boltzmannna,

$T$  - temperatura bezwzględna (w skali Kelvina),

$w$  - średnia prędkość cząsteczek w ruchu cieplnym.



Zależność stopnia zjonizowania gazu od temperatury:

1 - powietrze  $W_j = 15 \text{ eV}$ , 2 - pary miedzi  $W_j = 7,5 \text{ eV}$

## Rodzaje emisji elektronów z elektrody ujemnej

### 1. Emisja zderzeniowa

Emisja zderzeniowa polega na wybijaniu elektronów z elektrody ujemnej przez jony dodatnie rozpędzone w polu elektrycznym. Energia tych jonów przed zderzeniem z elektrodą ujemną zależy od wartości natężenia pola elektrycznego  $E$  oraz od gęstości względnej gazu  $d$ . Zależność tę wyraża współczynnik emisji  $\gamma$ .

Współczynnik emisji zderzeniowej  $\gamma$

$$\gamma = f_{\gamma} \left( \frac{E}{d} \right)$$

$f_{\gamma}$  - funkcja określająca prawdopodobieństwo wybitcia elektronu.

Jon dodatni powinien wybić co najmniej dwa elektrony. Pierwszy elektron zostaje przyłączony do jonu dodatniego. Drugi elektron swobodny może przemieszczać się do elektrody dodatniej.

### 2. Fotoemisja elektronów z elektrody ujemnej

Fotoemisja polega na wybijaniu elektronów z elektrody ujemnej przez fotony promieniowania o wystarczająco dużej energii.

$$h \cdot f \geq W_w$$

$W_w$  - energia wyjścia elektronu z elektrody ujemnej (jej wartość jest rzędu kilku elektronowoltów).

### 3. Emisja polowa

Emisja polowa polega na wyzwalaniu elektronów z elektrody ujemnej przez siły pola elektrycznego. Warunkiem wystąpienia tej emisji jest wystarczająco duża wartość natężenia pola elektrycznego, rzędu  $10^6 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ .

Wytrzymałość elektryczna powietrza w normalnych warunkach atmosferycznych w polu jednorodnym wynosi około 32 kV/cm. Możliwe jest jednak natężenie pola elektrycznego o bardzo dużej wartości w mikroprzestrzeniach przy elektrodzie ujemnej, np. przy obecnych na niej mikroostrzach, gdzie współczynnik niejednorodności pola  $\beta$  może osiągać wartości trzycyfrowe.

### 4. Termoemisja

Silne podgrzanie elektrody ujemnej, np. przez palącą się już iskrę elektryczną, umożliwia wyjście z niej elektronów przy relatywnie niewielkiej wartości natężenia pola elektrycznego.

### Procesy dejonizacyjne

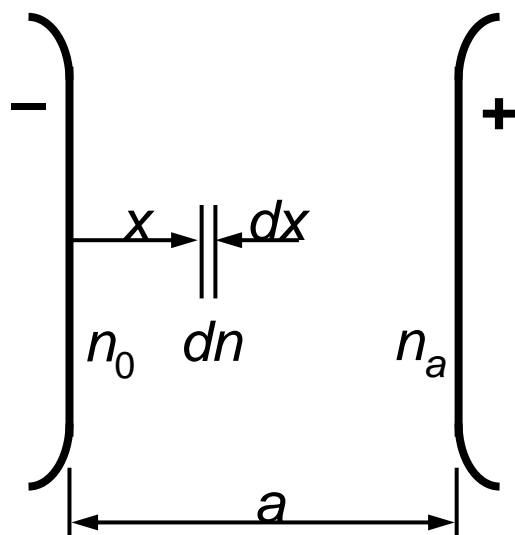
W czasie rozwoju wyładowań w powietrzu występują procesy powodujące zmniejszenie liczby swobodnych elektronów:

- rekombinacja elektronów i jonów,
- dyfuzja elektronów do otaczającej przestrzeni,
- powstawanie jonów ujemnych (z cząsteczek gazu i elektronów),
- adsorpcja elektronów na powierzchni materiałów stałych.

## Wyładowania niesamodzielne

Wyładowanie elektryczne określa się jako niesamodzielne, kiedy jego zapoczątkowanie i rozwój opiera się na elektronach pochodzących z jonizacji powietrza spowodowanej promieniowaniem pochodzącym spoza wyładowania, np. z ciał promieniotwórczych znajdujących się w ziemi i atmosferze.

Tworzenie się lawin elektronowych spowodowane jonizacją zderzeniową elektronową



$$dn = \alpha \cdot n \cdot dx \quad \alpha = \text{const.}$$

$$\int_{n_0}^{n_x} \frac{dn}{n} = \int_0^x \alpha \cdot dx \quad \ln \frac{n_x}{n_0} = \alpha \cdot x$$

$$n_x = n_0 \cdot e^{\alpha x} \quad n_a = n_0 \cdot e^{\alpha a}$$

$n$  - liczba elektronów,

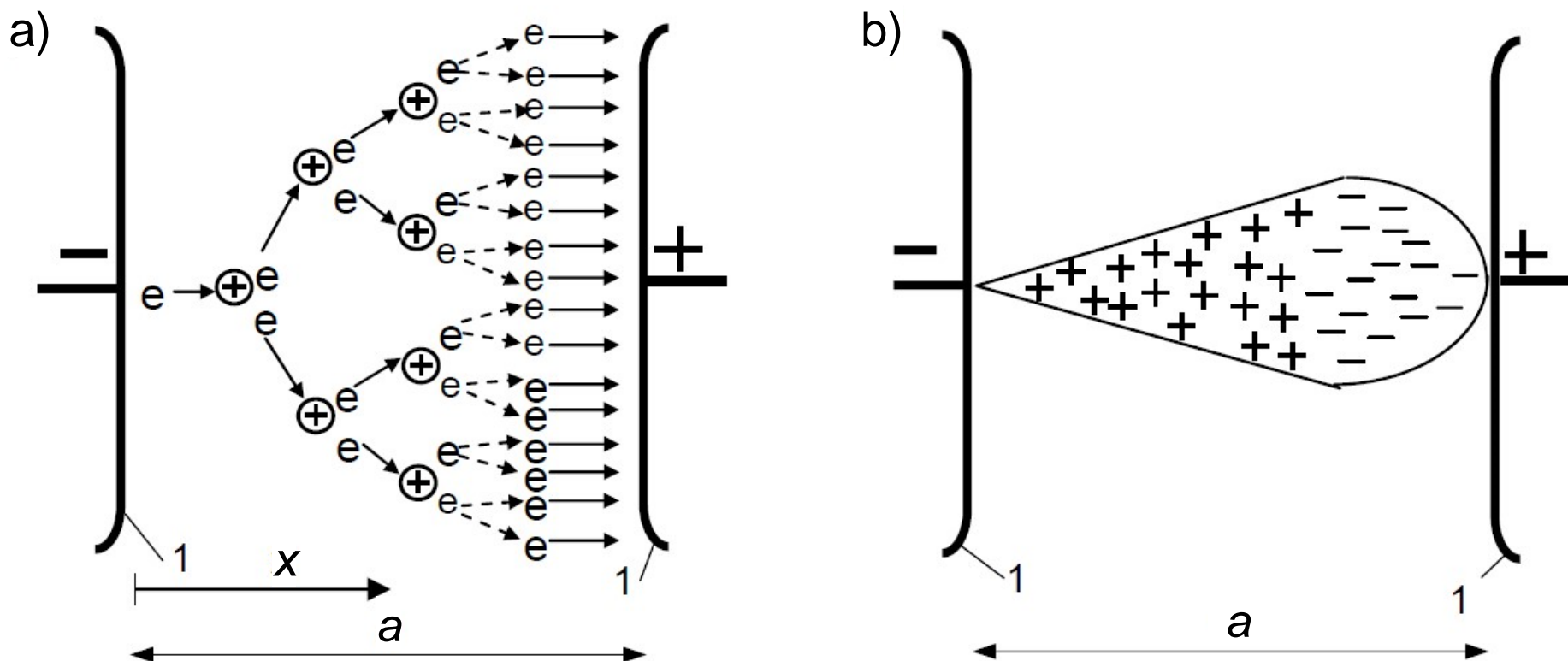
$n_0$  - liczba elektronów przy elektrodzie ujemnej pochodzących z fotojonizacji spowodowanej promieniowaniem zewnętrznym,

$n_x$  - liczba elektronów po przebyciu drogi  $x$ ,

$n_a$  - liczba elektronów dochodzących do elektrody dodatniej,

$a$  - odstęp między elektrodami,

$\alpha$  - współczynnik jonizacji zderzeniowej elektronowej



Rozwój lawiny elektronowej w polu jednostajnym:

a) przyrost liczby elektronów,

b) rozkład cząsteczek naładowanych w lawinie,

1 - elektrody,

$a$  - odstęp między elektrodami,

a)  $e$  - elektrony,  $\oplus$  - jony dodatnie,

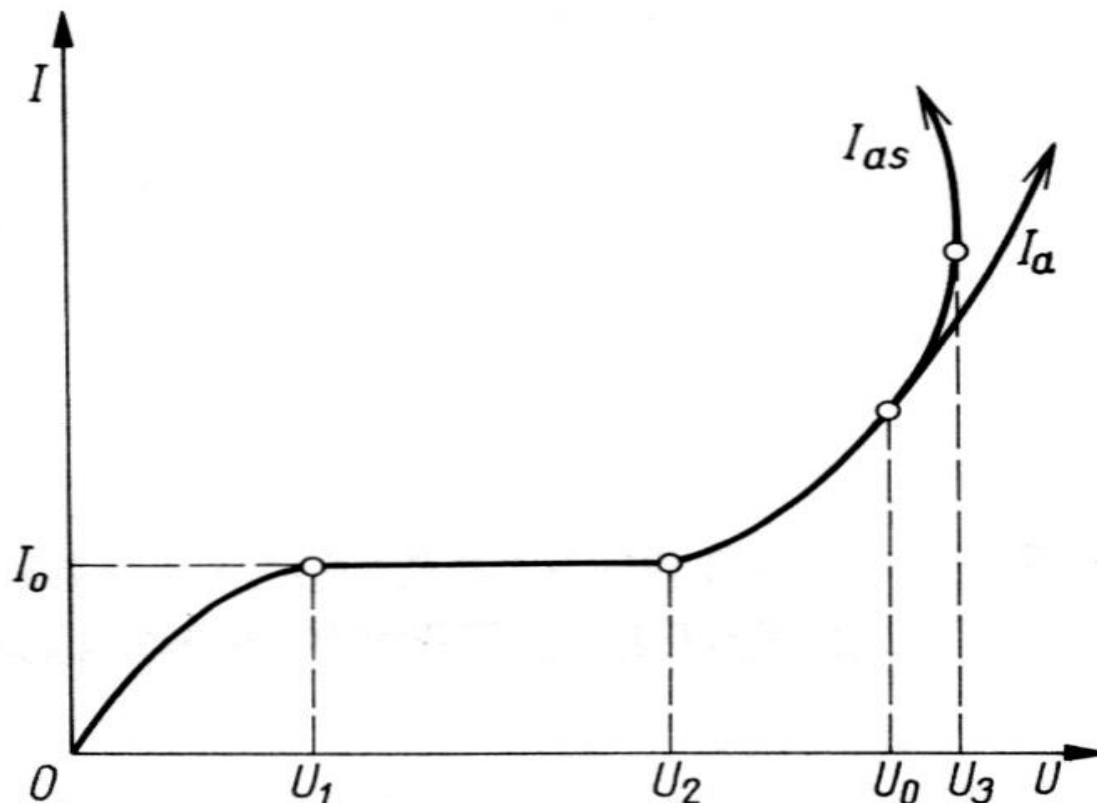
b) „+” jony dodatnie, „-” elektrony



## Zależność prądu od napięcia między elektrodami w powietrzu

W  $1 \text{ cm}^3$  powietrza w czasie  $1 \text{ s}$  przybywa (na skutek promieniowania zewnętrznego) i ubywa (na skutek rekombinacji) około 10 elektronów. Przy podwyższaniu napięcia, prąd wyładowania niesamodzielnego rośnie, a powyżej napięcia  $U_1$  jest stały. Wszystkie elektrony są odprowadzane do elektrody dodatniej. Powyżej napięcia  $U_2$  zaczyna się jonizacja elektronowa zderzeniowa (przybywa elektronów) i tworzą się z nich i jonów dodatnich lawiny.

Wyładowanie samodzielne zaczyna się po przekroczeniu napięcia  $U_0$ . Oznacza to, że pierwsze lawiny wyładowania generują dodatkowe elektrony zapoczątkowujące kolejne lawiny. Jony dodatnie wybijają elektrony z elektrody ujemnej.



# Wyładowania samodzielne w powietrzu atmosferycznym

Trzy mechanizmy rozwoju wyładowań

## 1. Mechanizm Townsenda

Warunki wystąpienia wyładowania Townsenda:

- jednorodne pole elektryczne,
- zakres wartości iloczynu ciśnienia powietrza i odstęp między elektrodami:

$$p \cdot a = \text{od } 100 \text{ do } 1000 \text{ hPa} \cdot \text{cm}$$

Liczba elektronów dochodzących do elektrody dodatniej:

$$n_a = n_0 \cdot e^{\alpha a}$$

Liczba jonów dodatnich wytworzonych w procesie jonizacji:

$$n_a - n_0 = n_0 \cdot e^{\alpha a} - n_0$$

Dla  $n_0 = 1$

$$n_a - 1 = e^{\alpha a} - 1$$

**Warunek Townsenda:**  $n_a - 1$  jonów dodatnich dochodzących do elektrody ujemnej powinno wybić z niej co najmniej jeden elektron, który zapoczątkuje kolejną lawinę.

Warunek Townsenda można zapisać w następujący sposób:

$$\gamma \cdot (e^{\alpha a} - 1) \geq 1$$

$\gamma$  - współczynnik emisji elektronów z elektrody ujemnej.

### Napięcie początkowe wyładowania samodzielnego $U_0$

W oparciu o warunek Townsenda, po kolejnych przekształceniach, można znaleźć zależność na napięcie początkowe wyładowania samodzielnego w powietrzu w polu jednorodnym, przy wartości iloczynu ciśnienia powietrza i odstępów między elektrodami od 100 do 1000 hPa·cm.

$$\gamma \cdot (e^{\alpha a} - 1) = 1$$

$$e^{\alpha a} = 1 + \frac{1}{\gamma}$$

$$\alpha = d \cdot f_{\alpha} \left( \frac{E}{d} \right)$$

$$d = f(p, T)$$

Przy stałej wartości temperatury  $T$ :  $d = f(p)$

Pełny wzór na współczynnik jonizacji zderzeniowej elektronowej  $\alpha$ :

$$\alpha = A \cdot p \cdot e^{-B \frac{p}{E}}$$

$A, B$  - stałe zależne od rodzaju i stanu gazu.

Rodzaj gazu	A		B	
	cm <sup>-1</sup> Tr <sup>-1</sup>	cm <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup>	Vcm <sup>-1</sup> Tr <sup>-1</sup>	Vcm <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup>
Powietrze	14,6	0,112	365	2,8
Azot	12,6	0,096	342	2,6
Wodór	5,0	0,038	130	1,0
Hel	2,8	0,021	34	0,2

Dla  $U = U_0 \rightarrow E = E_0 = U_0 \cdot a^{-1}$

stąd:

$$\alpha = A \cdot p \cdot e^{-B \frac{pa}{U_0}}$$

Po wstawieniu powyższej zależności do wzoru:

$$e^{\alpha a} = 1 + \frac{1}{\gamma}$$

Otrzymuje się:

$$e^{A \cdot p \cdot a \cdot e^{-B \frac{pa}{U_0}}} = 1 + \frac{1}{\gamma}$$

Wykonując kolejne przekształcenia:

$$A \cdot p \cdot a \cdot e^{-B \frac{pa}{U_0}} = \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)$$

$$A \cdot p \cdot a \cdot \frac{1}{e^{B \frac{pa}{U_0}}} = \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)$$

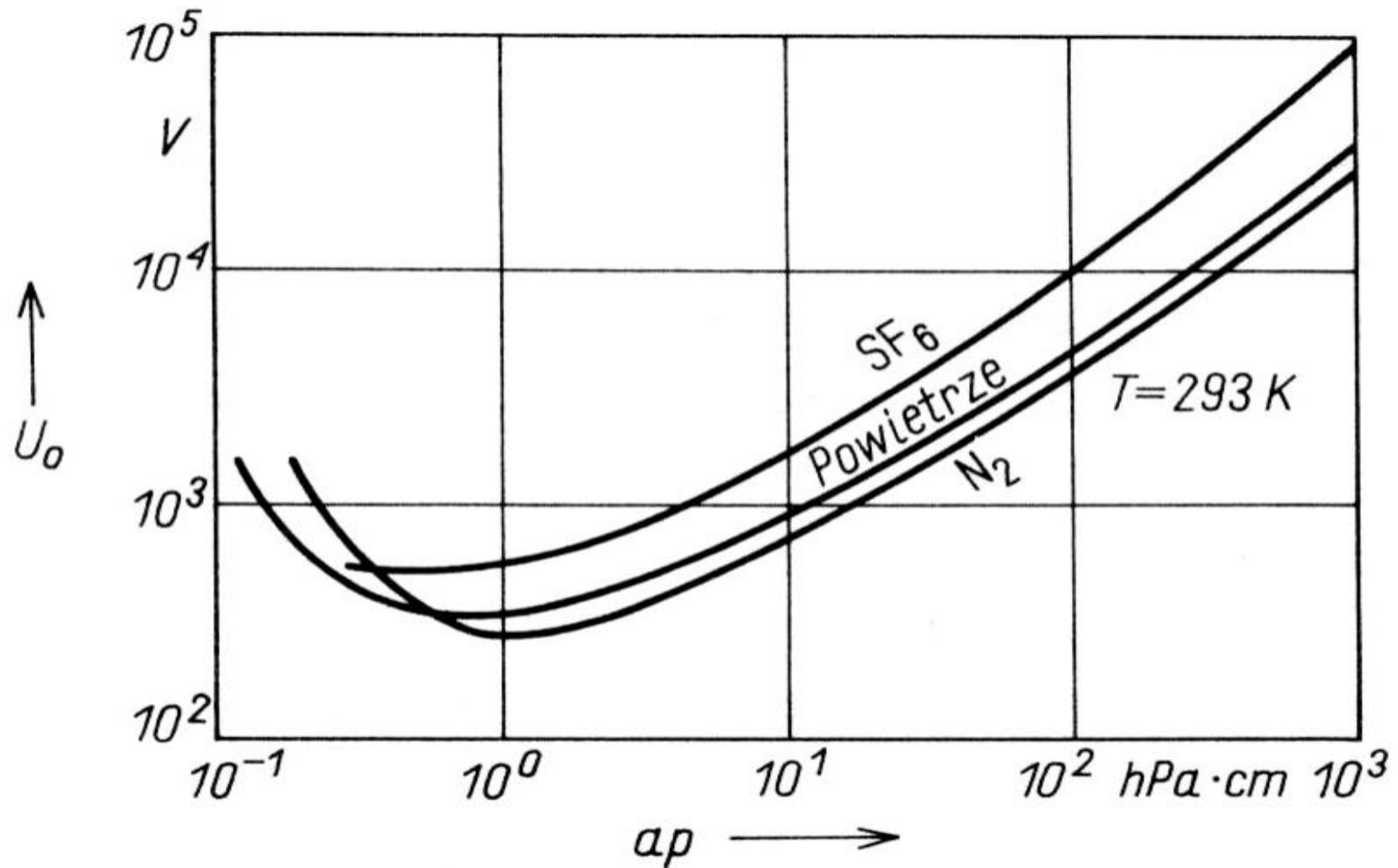
$$e^{B \frac{pa}{U_0}} = \frac{A \cdot p \cdot a}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)}$$

$$\frac{B \cdot p \cdot a}{U_0} = \ln \frac{A \cdot p \cdot a}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)}$$

otrzymujemy krzywą Paschena dla stałej temperatury  $T$ :

$$U_0 = \frac{B \cdot p \cdot a}{\ln \frac{A \cdot p \cdot a}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)}}$$

## Przykładowe krzywe Paschena (dla wybranych gazów)

Krzywe Paschena  $U_0 = f(p \cdot a)$ 

Krzywe Paschena charakteryzują się występowaniem minimum. W przypadku powietrza minimum występuje dla współrzędnych:  $p \cdot a = 0,73$  hPa·cm,  $U_{0 \min} = 350$  V. Przy ciśnieniu normalnym  $p = 1013$  hPa,  $U_{0 \min} = 350$  V występuje przy  $a = 7,2$   $\mu\text{m}$

## 2. Mechanizm kanałowy

### Podsumowanie mechanizmu Townsenda

Jest to wyładowanie objętościowe składające się z dwóch etapów:

- 1 etap - jonizacja zderzeniowa elektronowa - tworzenie się lawin,
- 2 etap - wybijanie elektronów z elektrody ujemnej i tworzenie się kolejnych pokoleń lawin.

Przy ciśnieniu normalnym wyładowanie występuje w polu elektrycznym jednorodnym dla odstępów elektrod  $a = 0,1 \dots 1$  cm.

Czas rozwoju wyładowania wynosi około  $10^{-6}$  s. W tym czasie powstaje około 100 lawin tworzących wyładowanie.

### Wyładowanie kanałowe

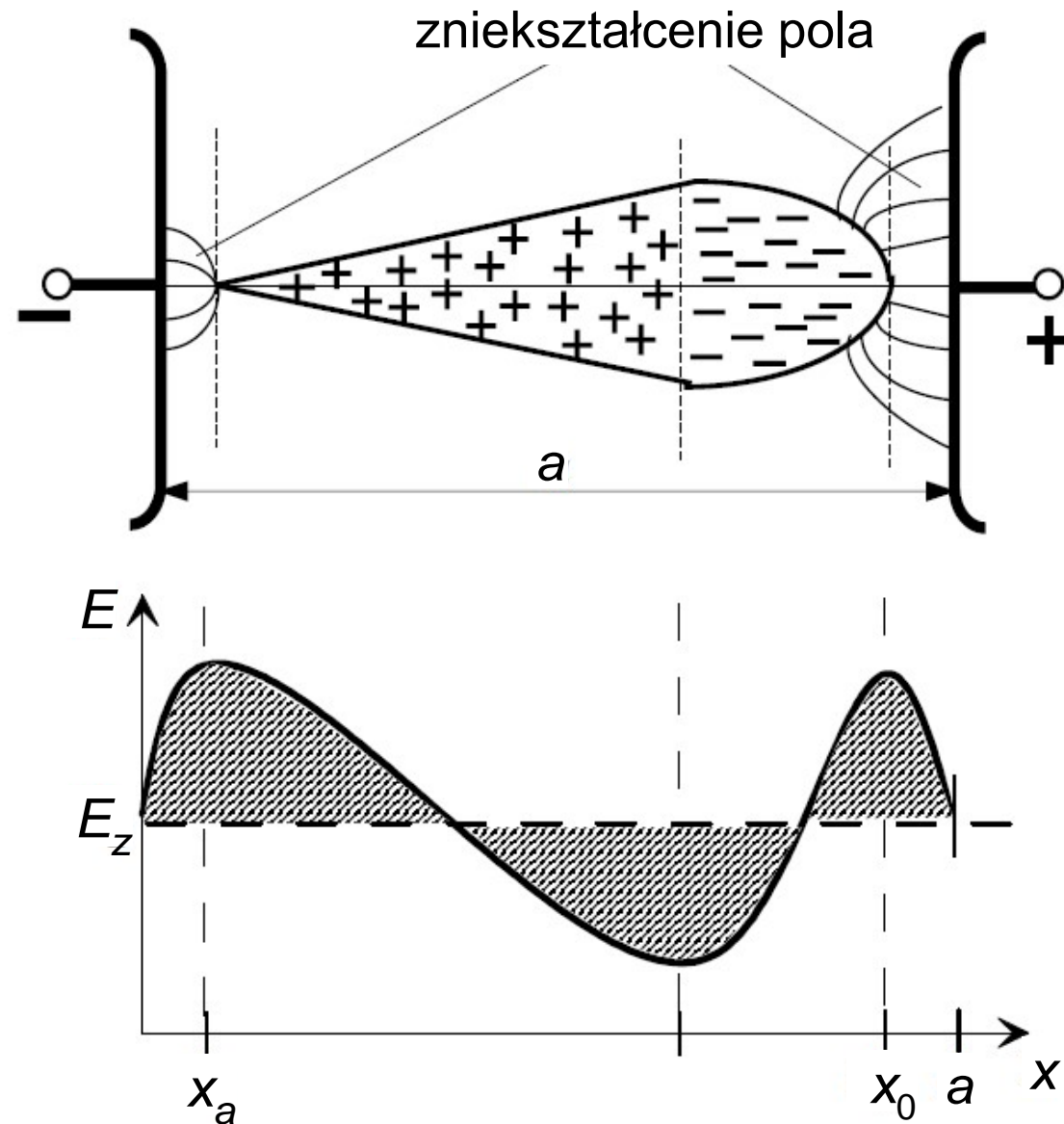
Jest to wyładowanie strimerowe (wstępowe) dwuetapowe. Drugi etap jest inny niż w wyładowaniu Townsenda:

- 1 etap - jonizacja zderzeniowa elektronowa - tworzenie się lawin,
- 2 etap - fotojonizacja cząstek gazu i tworzenie się kolejnych pokoleń lawin łączących się w wąski kanał wyładowania.

Wyładowanie występuje w polu elektrycznym zarówno jednorodnym jak i niejednorodnym dla odstępów elektrod  $a = 1 \dots 100$  (200) cm.

Czas rozwoju wyładowania wynosi około  $10^{-8}$  s.

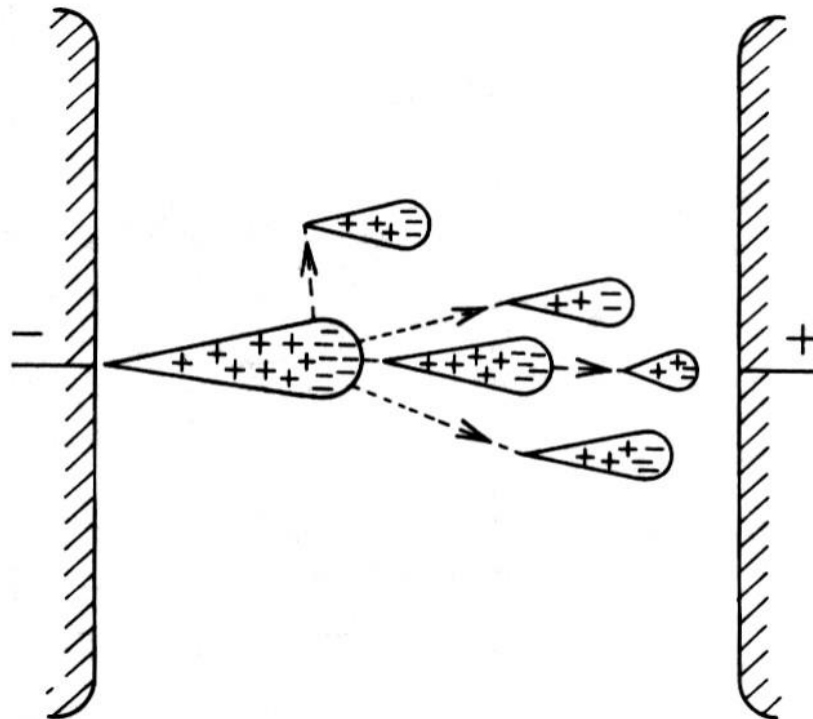
Dłuższy czas „życia” pierwszej lawiny, przy większym odstępnie między elektrodami powoduje, że ulega ona znacznym zmianom. Rośnie gęstość ładunku, zmniejsza się jej średnica, zwiększa się przewodność, powodując zniekształcenie rozkładu pola.



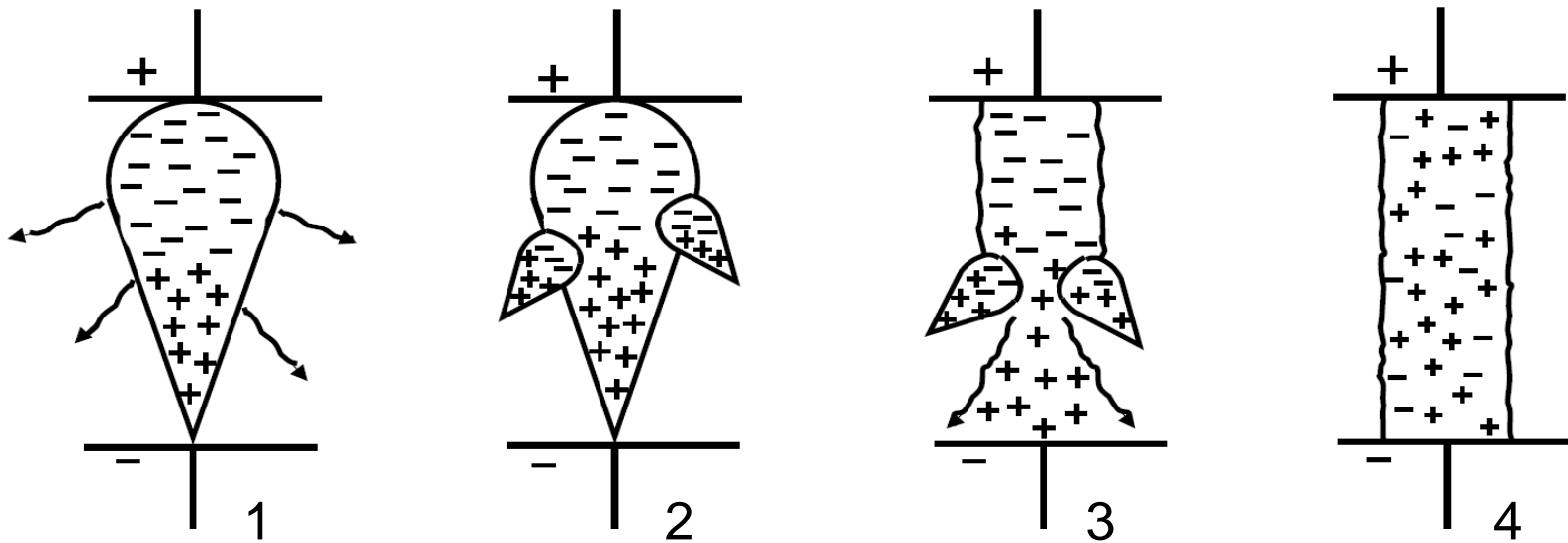
Lawina elektronowa w polu jednostajnym - zniekształcenie zewnętrznego pola elektrycznego  $E_z$



Rozwój wyładowania kanałowego polega na tym, że w „żyjących” dłużej pierwszych lawinach, intensyfikują się zjawiska jonizacji, pobudzania i rekombinacji, które są źródłem promieniowania jonizującego cząsteczki powietrza znajdujące się w pobliżu. Kolejne pokolenia lawin, powstające za „życia” pierwszych z nich, łączą się ze sobą szeregowo, tworząc wąski kanał wyładowania. Przypadkowość miejsca powstawania kolejnych lawin objawia się, przy większych odstępach elektrod, rozwojem kanału wyładowania po linii łamanej.



Powstawanie kolejnych pokoleń lawin na skutek fotojonizacji powietrza. Łączenie się szeregowo lawin i tworzenie kanału wyładowania między elektrodami.



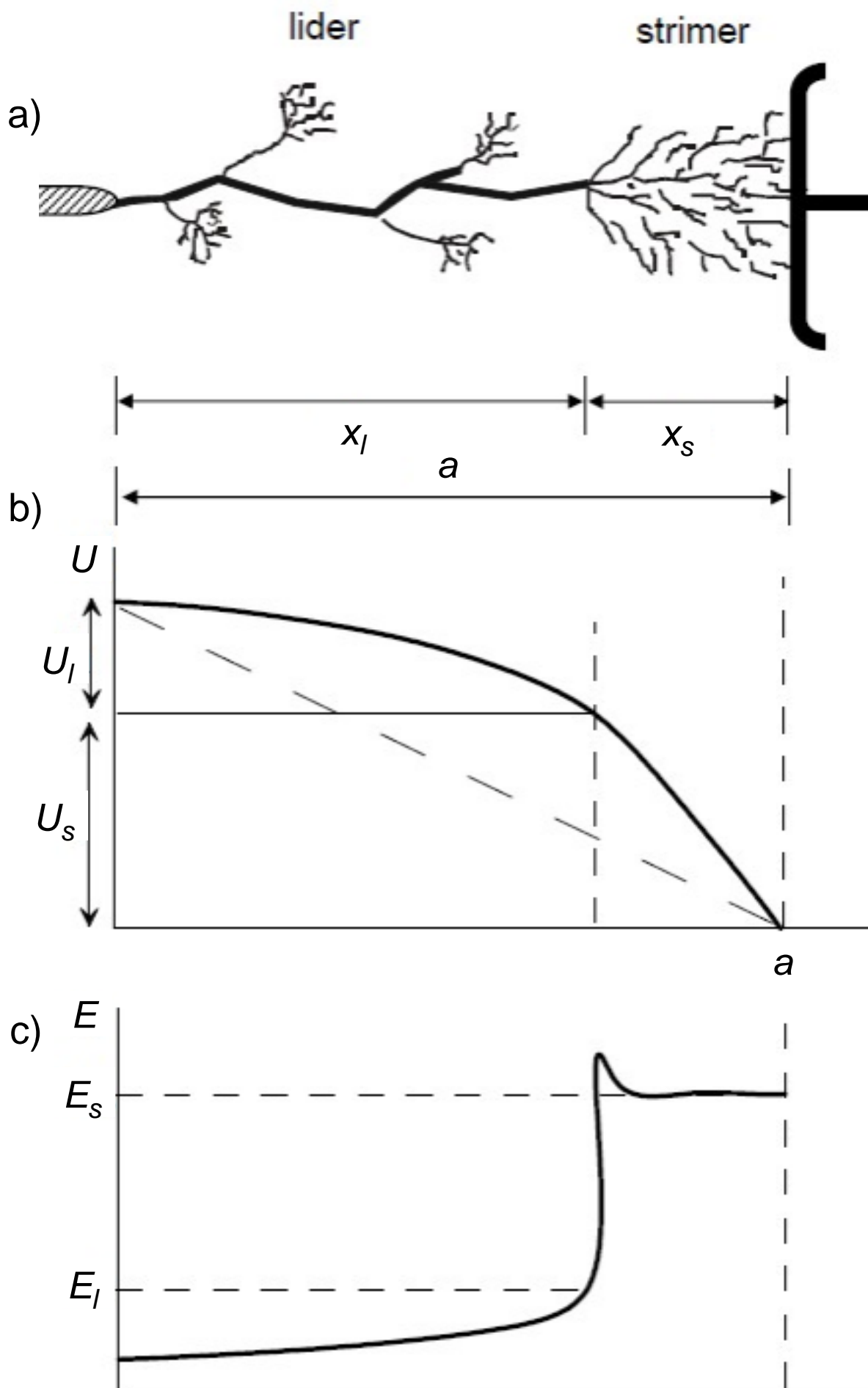
Rozwój wyładowania kanałowego w polu jednostajnym:  
 1 - lawina pierwotna i fotojonizacja, 2 - lawiny wtórne,  
 3 - anodowy kanał plazmowy, 4 - wyładowanie zupełne

### **3. Mechanizm iskry długiej**

Jest to wyładowanie strimerowo-liderowe składające się z trzech etapów. Pierwsze dwa etapy są takie same, jak w wyładowaniu kanałowym. Intensyfikacja wyładowania w długim kanale umożliwia zapoczątkowanie jonizacji termicznej cząsteczek powietrza:

- 1 etap - jonizacja zderzeniowa elektronowa - tworzenie się lawin,
- 2 etap - fotojonizacja cząstek gazu i tworzenie się kolejnych pokoleń lawin łączących się w wąski kanał wyładowania,
- 3 etap - wzrost temperatury w kanale - jonizacja termiczna gazu, rozwój wyładowania liderowego.

Mechanizm iskry długiej występuje przy odstępach elektrod większym niż 1...2 m.



Ostatni etap rozwoju wyładowania między elektrodami pręt- płyta o dużym odstępie:

- a) model wyładowania,
- b) rozkład napięcia na odcinku lidera  $U_l$  i streamera  $U_s$ ,
- c) rozkład natężenia pola elektrycznego  $E_l$ ,  $E_s$

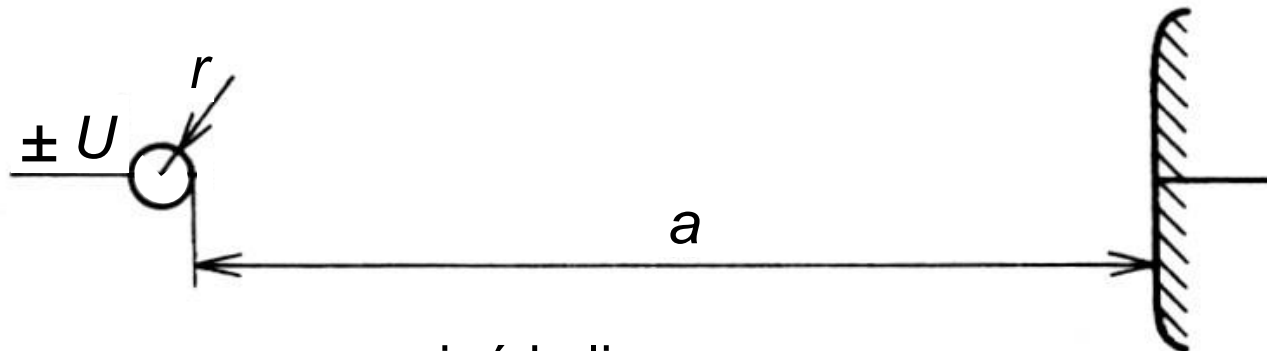
## Wyładowanie samodzielne w gazie

Wyładowania samodzielne w powietrzu (w gazie) dzielą się na dwa rodzaje: niezupełne i zupełne.

Wyładowania niezupełne (świecenie, ulot impulsowy lub ciągły, snopienie) występują w polu elektrycznym niejednorodnym, zwierając tylko część drogi między elektrodami. Zaczynają się po przekroczeniu napięcia początkowego wyładowania samodzielnego  $U \geq U_0$  i trwają w zakresie napięcia między elektrodami  $U_0 \leq U \leq U_p$ .

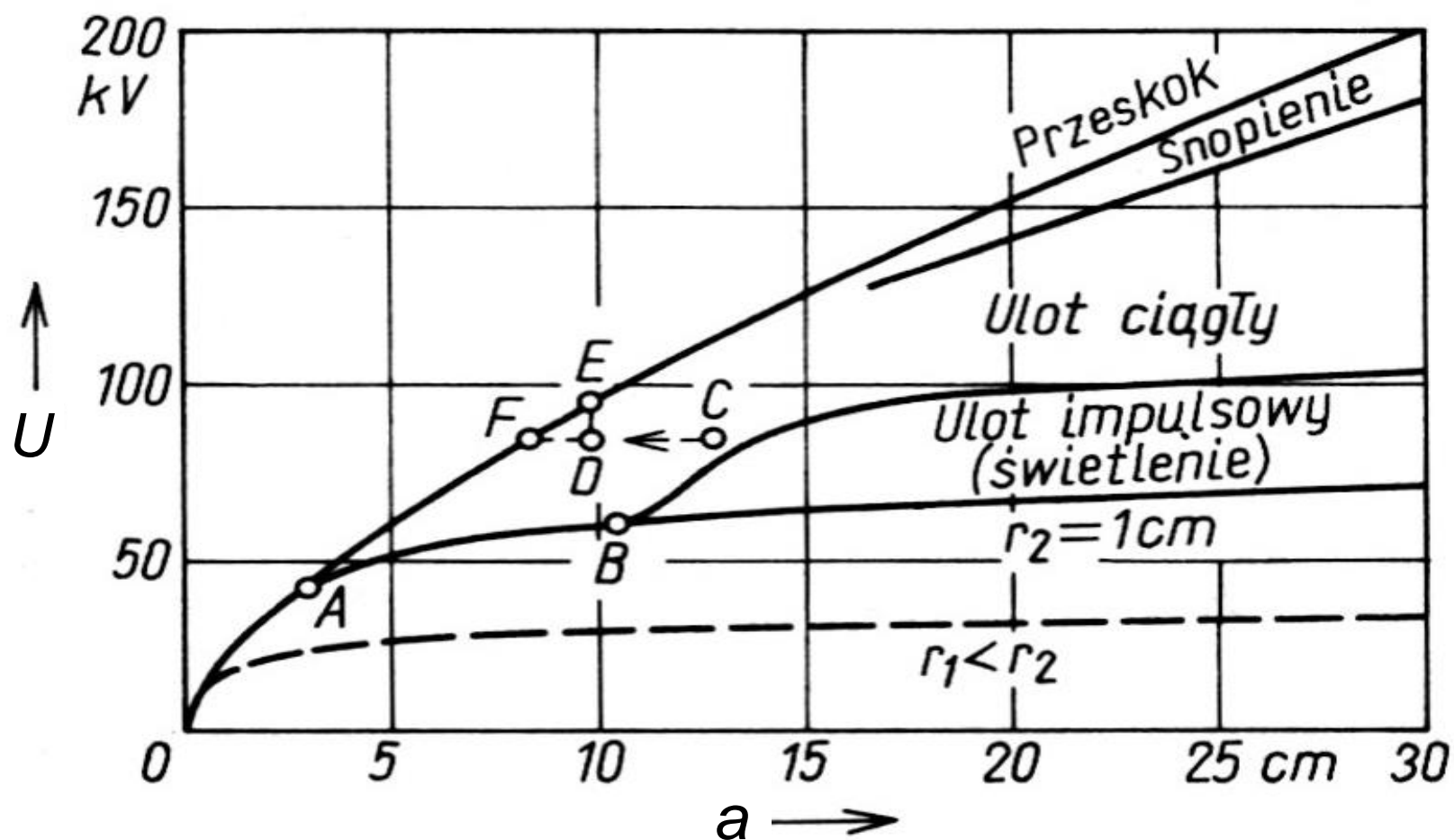
Wyładowania zupełne (przeskok iskry, łuk elektryczny) występują w polu elektrycznym jednorodnym, umiarkowanie niejednorodnym i silnie niejednorodnym, zwierając całą drogę między elektrodami kanałem o małej rezystancji. Zaczynają się po przekroczeniu napięcia przeskoku  $U \geq U_p$ .

Układ elektrod kula - płyta w powietrzu służący do wykonania pomiarów, których wyniki przedstawiono na kolejnych stronach w postaci wykresów.

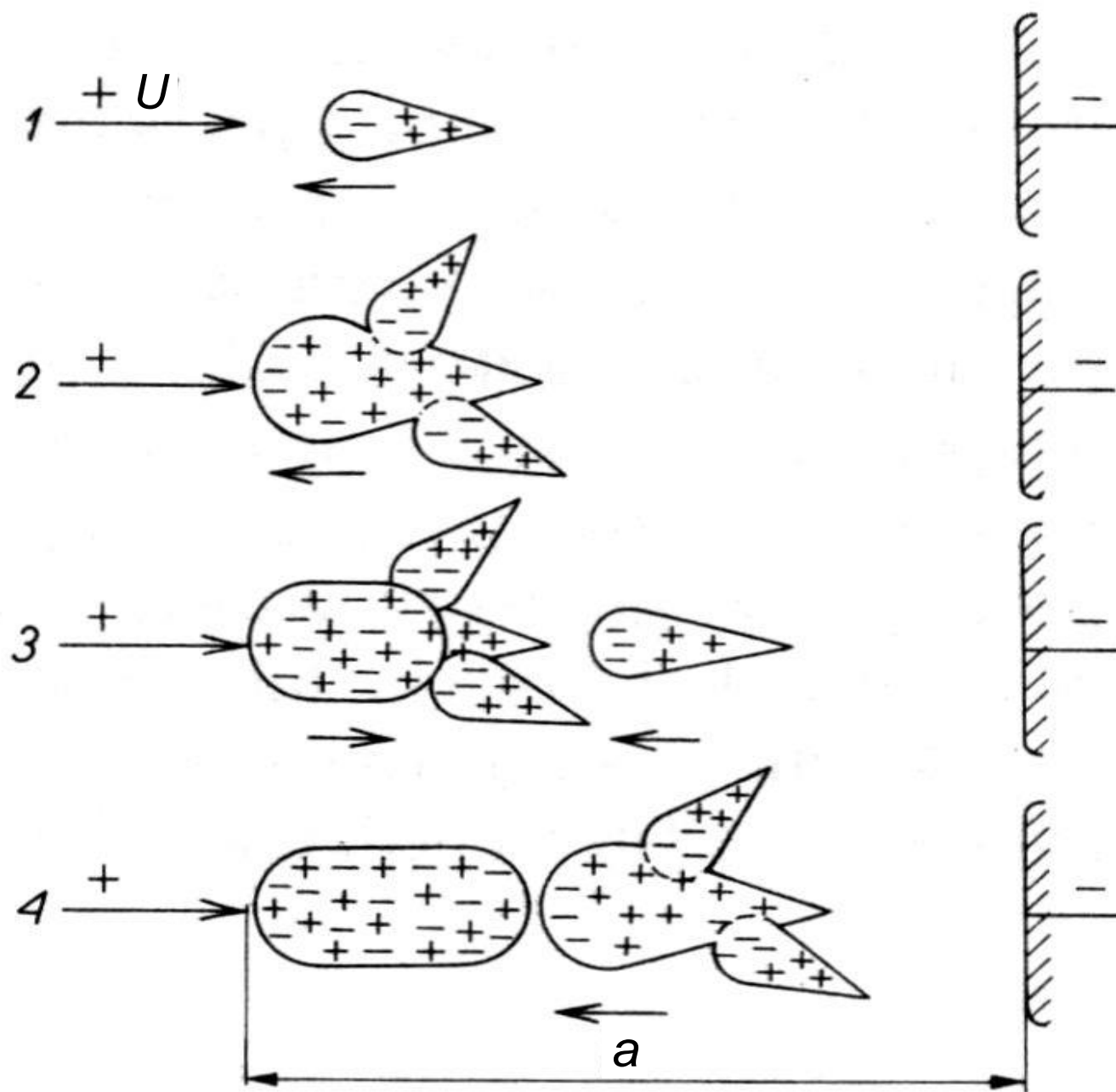


$r$  - promień kuli,

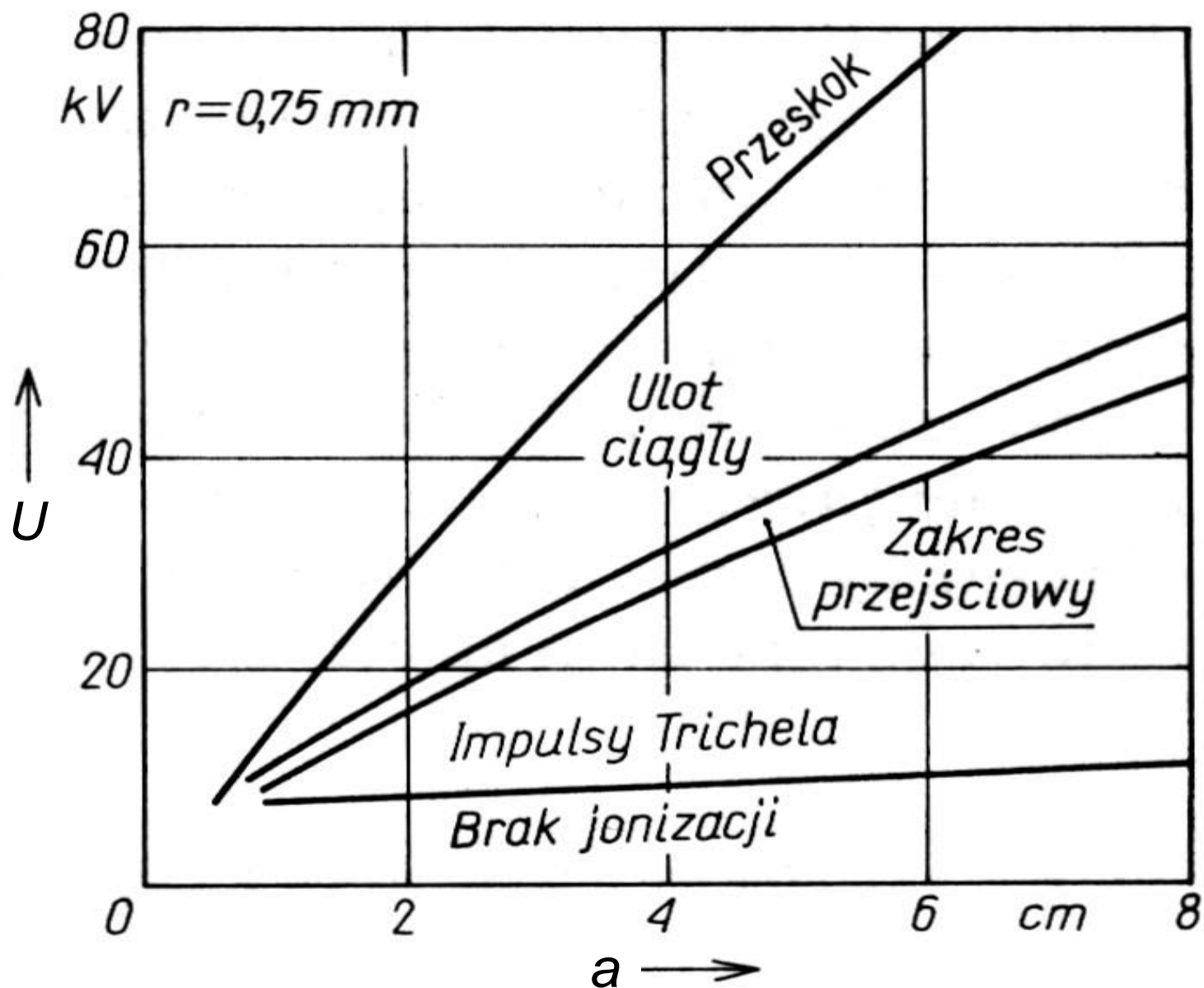
$a$  - odstęp między elektrodami.



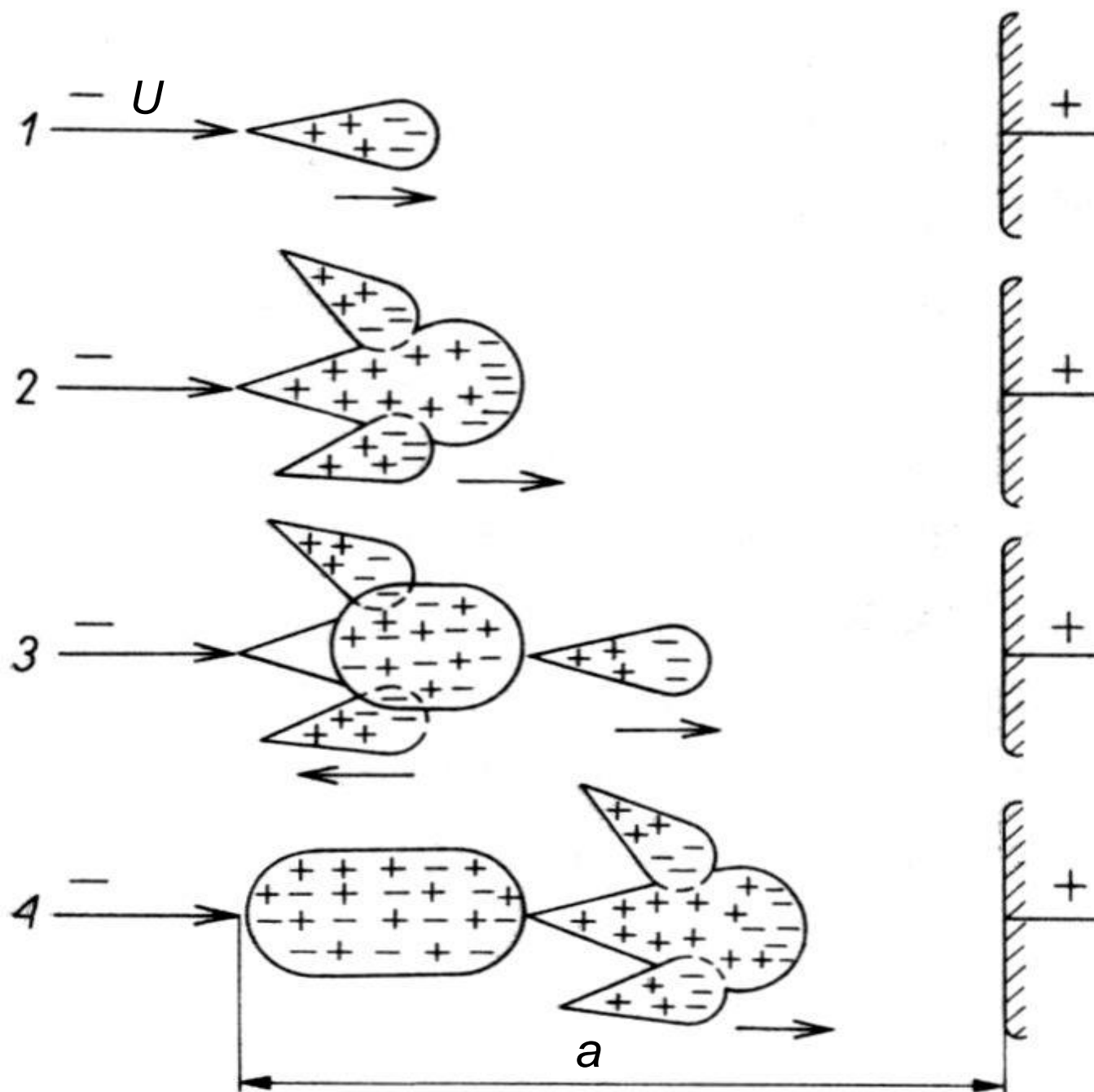
Zależność napięcia wyładowań niezupełnych i przeskoku od odstępów  $a$  między elektrodami kula - płyta i promienia elektrody kulowej  $r$ , przy biegunowości dodatniej elektrody kulowej



Kolejne fazy rozwoju kanału plazmowego anodowego w polu niejednorodnym



Zależność napięcia wyładowań niezupełnych i przeskoku od odstępów  $a$  między elektrodami kula - płyta, przy biegunowości ujemnej elektrody kulowej o promieniu  $r$



Kolejne fazy rozwoju kanału plazmowego katodowego w polu niejednorodnym