



Systematika výbojů

Přechodné x ustálené

Podle makroskopických projevů, ovlivňovaných různými jevy, dělíme elektrické výboje na několik hlavních typů:

Podle doby trvání rozdělujeme výboje na

přechodné (např. jiskra)

ustálené (např. doutnavý výboj)

Samostatné x nesamostatné (1)

Nesamostatné výboje

k tvoření nosičů náboje (a tedy ke vzniku elektrického proudu **je třeba** vnější, tzv. ionizační činidlo)

Samostatné výboje

k tvoření nosičů náboje (a tedy ke vzniku elektrického proudu **není třeba** vnější, tzv. ionizační činidlo)

Ionizační činidlo - proud elektronů vystupující ze žhavené katody, ozařování výbojového prostoru rentgenovými paprsky, ozařování katody ultrafialovými paprsky, atd.

Nesamostatné výboje

Nesamostatný výboj přestane při přerušení působení ionizačního činidla (zdroje nosičů náboje, nebo zdroje energie schopného ionizovat atomy a disociovat molekuly ve výbojové dráze) existovat.

Přehled výbojů

Pokud může elektrický výboj vzniknout a existovat i bez působení ionizačního činidla, nazýváme jej **samostatným**.

Samostatné výboje dělíme na:

doutnavý výboj,

obloukový výboj,

jiskrový výboj,

koróna,

vysokofrekvenční výboj.



Teorie elektronových lavin

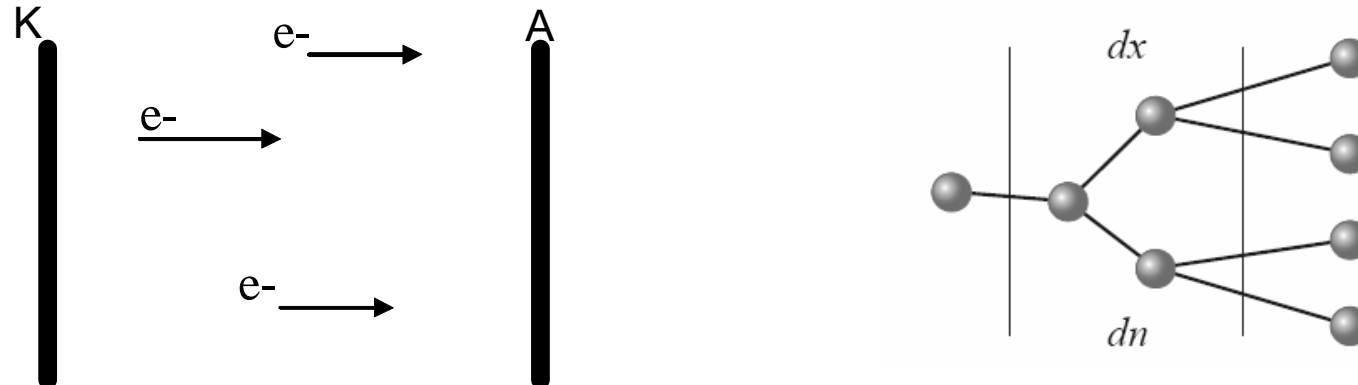
Townsendova teorie

První teorie, která popisovala poměry v plynném elektrickém výboji.

Tato teorie je použitelná u těch druhů výbojů, kde **unášivý (driftový) pohyb elektronů** převažuje nad jejich tepelným neuspořádaným pohybem.

Platí tedy hlavně pro výboje ve zředěném plynu (**doutnavý výboj**).

Vznik elektronové laviny

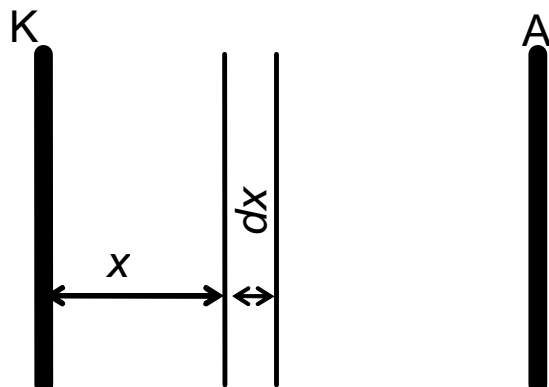


Předpokládejme, že elektrony opouštějí katodu v důsledku fotoemise.

Každý elektron při svém pohybu směrem k anodě ionizuje neutrální částice plynu → vznikne další elektron, který je elektrickým polem také urychlen.

Tyto elektrony nárazem opět ionizují, vznikají další elektrony - lavina.

Vznik elektronové laviny



n_0 - počet elektronů, které opouštějí jednotku
povrchu katody za 1 s
 j_0 - proudová hustota na povrchu katody

Zjistíme počet elektronů vzniklých ionizací ve vrstvě dx :

Necht' jednotkou plochy vstupuje do této vrstvy n elektronů od katody.

Zavedeme koeficient α , tzv. *Townsendův koeficient (první)*.

Udává, kolikrát ionizuje jeden elektron při uběhnutí jednotkové dráhy.

Na dráze dx tedy **jeden** elektron provede αdx ionizací, (vzniká αdx nových elektronů).

Vznik elektronové laviny

Přírůstek elektronů dn , který zapříčiní n elektronů ve vrstvě dx , potom je

$$dn = n\alpha dx$$

Řešením této rovnice dostáváme

$$\ln n = \alpha x + \text{konst}$$

Protože pro $x = 0$ je $n = n_0$, bude po odlogaritmování

$$n = n_0 e^{\alpha x}$$

Proudová hustota je analogicky

$$j = j_0 e^{\alpha x}$$

x je vzdálenost od katody

Vznik elektronové laviny

Bude-li vzdálenost mezi elektrodami rovna d , pak je celkový počet elektronů, které dopadnou na anodu

$$n_0 e^{\alpha d}.$$

V tomto počtu je zahrnuto n_0 elektronů, které dodala do výbojového prostoru katoda.

Počet elektronů **nově** vzniklých ionizací mezi katodou a anodou tedy je

$$n_0 e^{\alpha d} - n_0$$

Druhý Townsendův koeficient

Jelikož uvažujeme pouze jednoduchou ionizaci, je poslední výraz současně roven počtu kladných iontů, které vzniknou ve výbojovém prostoru.

Prostorovou ionizaci nárazem kladných iontů zanedbáváme

(tj. druhý Townsendův koeficient $\beta = 0$).

Záporné ionty při styku s neutrálními částicemi nebo kladnými ionty obvykle rekombinují, takže vytváření nových nabitých částic ve výbojovém prostoru zápornými ionty je rovněž ve většině případů zanedbatelné.

Třetí Townsendův koeficient

Dopadne-li na katodu kladný ion, vyrazí z ní γ nových elektronů.

γ je tedy další koeficient, který vystihuje poměry při elektronové lavině (*třetí Townsendův koeficient*).

Dopadne-li tedy na katodu $n_0(e^{\alpha d} - 1)$ kladných iontů, vyrazí z ní $\gamma n_0(e^{\alpha d} - 1)$ nových elektronů.

Potom tedy nebude z katody vystupovat pouze n_0 elektronů v důsledku foto-ionizace, ale větší počet.

Počet kladných iontů dopadajících na katodu tedy bude větší.

Třetí Townsendův koeficient

Označme počet elektronů vystupujících z jednotky povrchu katody za jednotku času jako n_1 (uvažujeme ustálený stav).

Tento počet je dán především z n_0 elektronů, které vystupují z katody fotoemisí a z $\gamma n_1 (e^{\alpha d} - 1)$ elektronů, které vyrazí z katody dopadající počet $n_1 (e^{\alpha d} - 1)$ kladných iontů.

Takže n_1 je celkem

$$n_1 = n_0 + n_1 \gamma (e^{\alpha d} - 1)$$

Podle dříve uvedené rovnice $n = n_0 e^{\alpha x}$ však nyní dopadne na anodu n_a elektronů

$$n_a = n_1 (e^{\alpha d})$$

Třetí Townsendův koeficient

Z předchozích dvou rovnic nyní určíme

$$n_1 - n_1 \gamma (e^{\alpha d} - 1) = n_0$$

$$n_1 = \frac{n_0}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)}$$

$$n_a = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \quad - \text{počet elektronů dopadajících na anodu}$$

Třetí Townsendův koeficient

Protože n_a je počet elektronů, které dopadnou na jednotku povrchu anody za jednotku času, bude $e_0 \cdot n_a$ proudová hustota, tj.

$$j = j_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)}$$

což je proud **nesamostatného lavinového výboje** (protože j_0 je hustota proudu z katody vznikajícího působením ionizačního činidla).

Podmínka samostatného výboje

Při ustáleném výboji nebude třeba pomocnou fotoemisí dodávat do výboje n_0 elektronů. Tedy n_0 bude rovno nule.

Jelikož však v tomto případě se počet elektronů, které dopadají na anodu n_a nule nerovná, tj. i proudová hustota j je nenulová, musí být jmenovatel rovnic rovný (blízký) nule,

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

což je podmínka pro udržení lavinovitého samostatného výboje.

Zápalné napětí

Protože jsou koeficienty α a γ závislé na napětí U , které je přiloženo na elektrody, bude předchozí podmínka splněna při daném uspořádání pro zcela určitou hodnotu napětí U .

Aby se tedy zapálil samostatný výboj, musí se výbojový prostor nacházet mezi jistým rozdílem potenciálů, nazývaným *zápalné napětí*.

Zápalné napětí - U_z

$$U_z = N_0 U_i$$

$$\ln \left[N_0 \frac{\text{pd}}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]$$

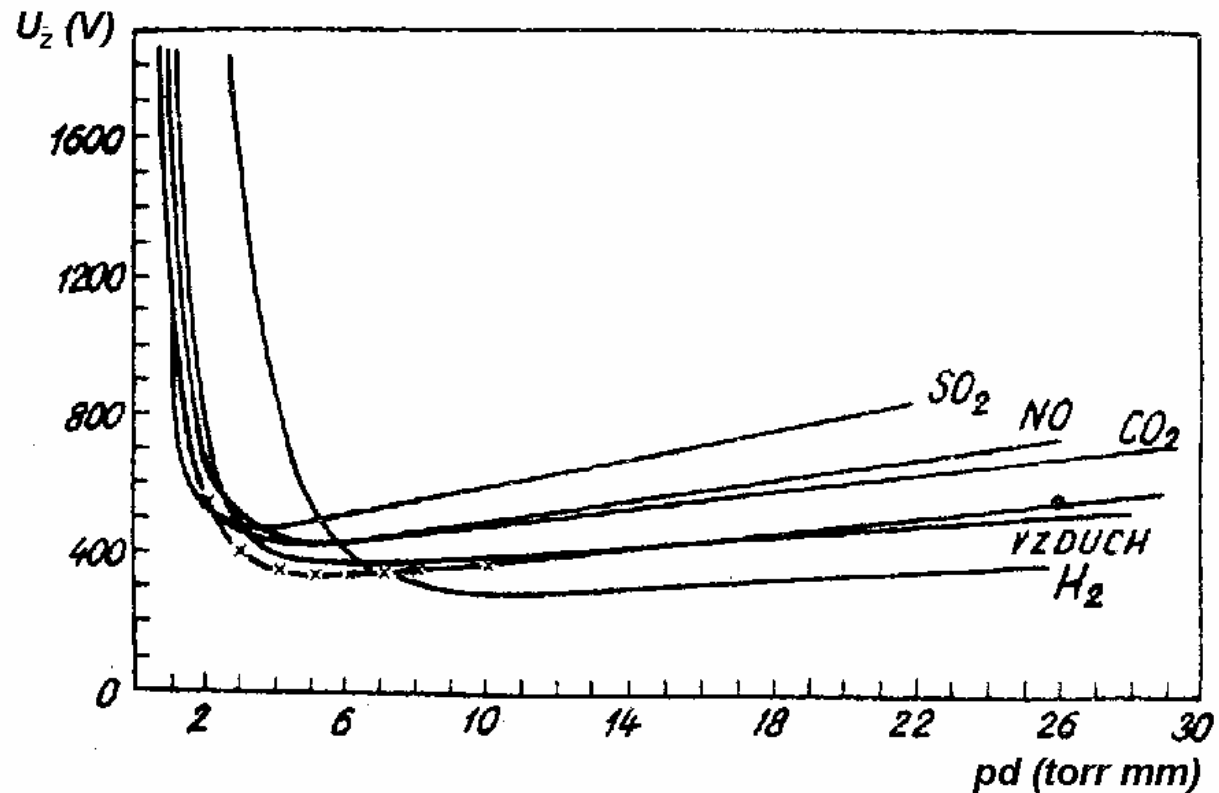
bez odvozování

N_0 - počet srážek elektronu na jednotkové dráze
a při jednotkovém tlaku

U_i - ionizační potenciál

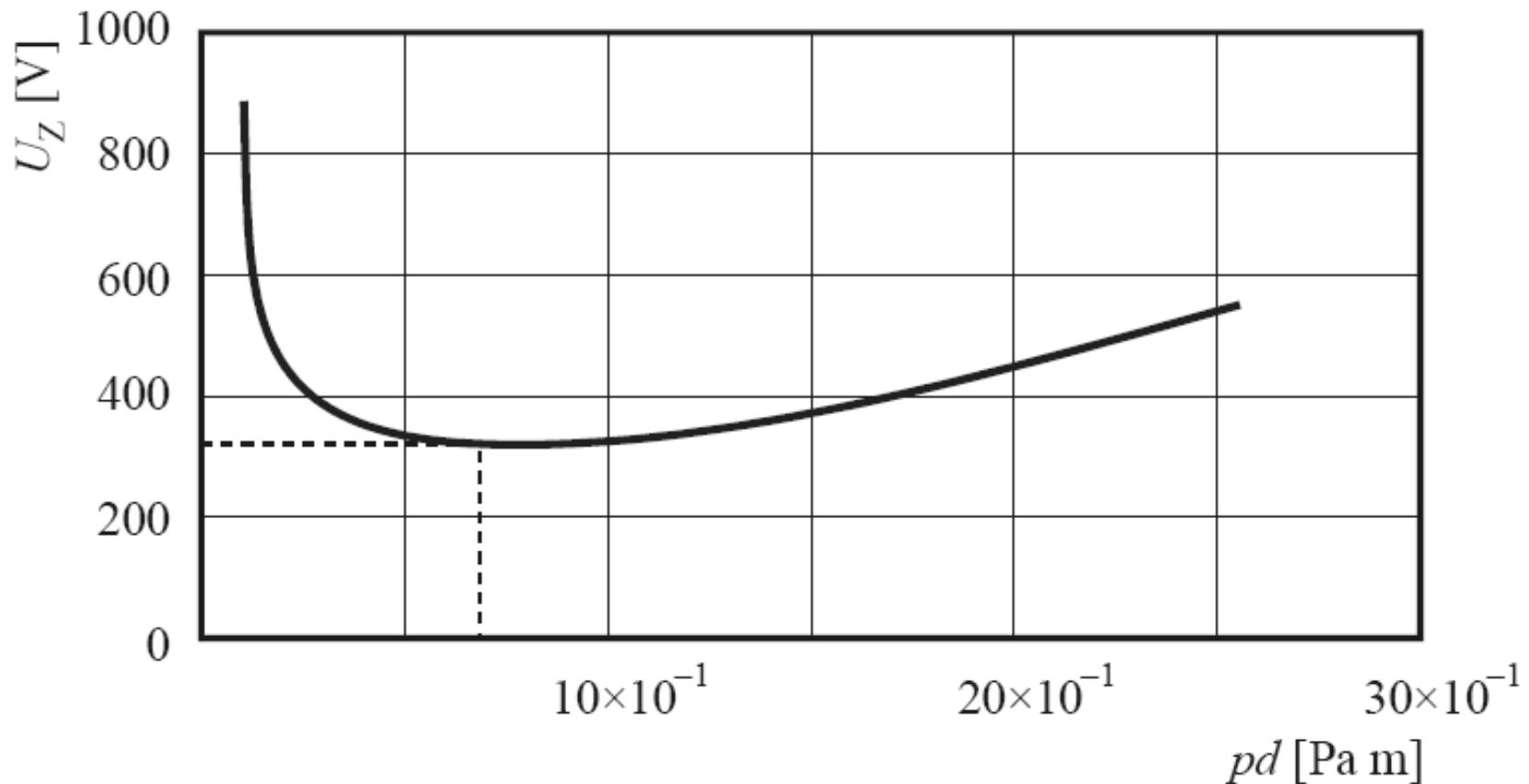
Zápalné napětí - Paschenův zákon

Zápalné napětí U_z je funkcí součinu tlaku plynu p a vzdálenosti elektrod d . Tato funkce vykazuje minimum.



Zápalné napětí U_z pro různé plyny

Zápalné napětí - vzduch



Při atmosférickém tlaku a vzdálenosti $d=1\text{mm}$ je zápalné napětí ve vzduchu asi 1 kV. Nejmenší zápalné napětí ~ 300 V odpovídá tlaku 1 torru a vzdálenosti elektrod 1 cm.

Interpretace Paschenova zákona

Tlak - p :

Při **malých** tlacích roste střední volná dráha, a proto má-li elektron mezi katodou a anodou provést stejný počet ionizací jako při větších tlacích, musí se zvětšit vzdálenost elektrod d . **Roste-li** tlak, zmenšuje se λ a elektrické pole se musí zvětšit, aby elektron mezi srážkami nabyl dostatečné energie k ionizaci. Vzdálenost d se musí zmenšit ($E=U/d$).

Vzdálenost - d :

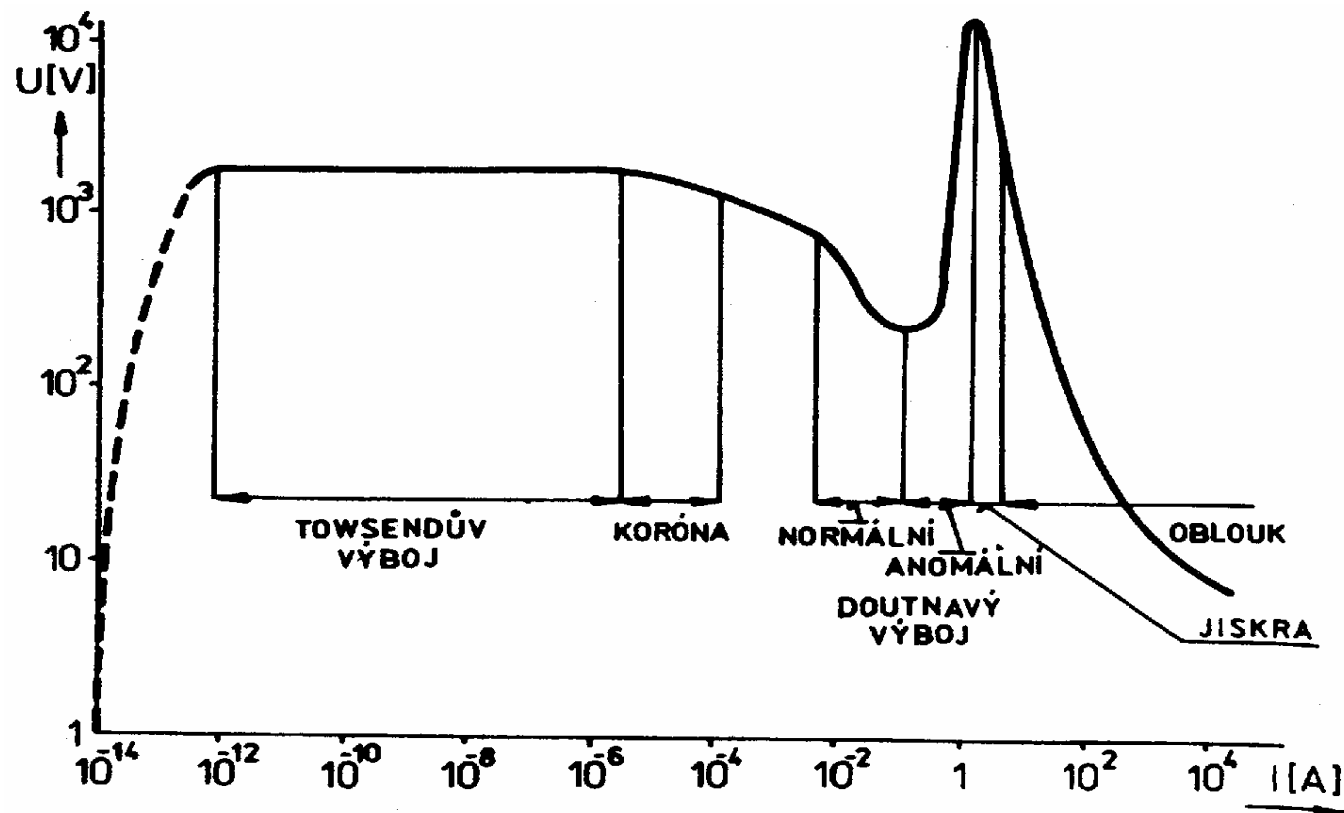
Zvětšujeme-li d , musíme zvětšit i U_z má-li E postačovat k ionizaci nárazem, **zmenšujeme-li** d , zmenšujeme počet srážek elektronu a tím i počet ionizací a musíme zvyšovat U_z .

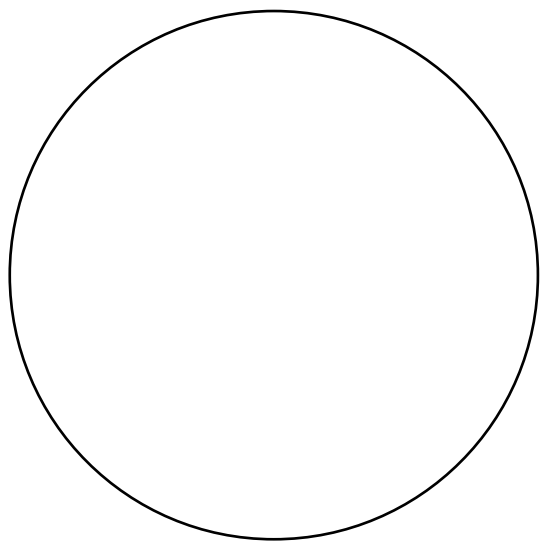
Bude tedy existovat optimální případ, kdy pro $(pd)_{min}$ je i U_z minimální.

Charakteristika výboje

Charakteristika výboje:

závislost napětí na elektrodách na proudu
protékajícím výbojem





Doutnavý výboj

Doutnavý výboj

Přechod od nesamostatného k samostatnému výboji:

- vzrůst proudu,
- světélkování plynu.

Při zápalném napětí se na elektrodách objevuje nejprve kolem anody slabé světélkování. Lavina elektronů, šířící se od katody k anodě, má totiž u anody nejvíce elektronů a dochází zde k největšímu počtu nabuzení srážkami s molekulami plynu.

Doutnavý výboj

Při vzrůstání proudu vzrůstá i koncentrace elektronů - světélkování se rozšíří přes celý prostor až ke katodě.

Při dalším zvětšení proudu se světélkující části výbojového prostoru rozpadají na charakteristické oblasti pro **doutnavý výboj**.

Vlivem prostorových nábojů se průběh potenciálu mezi katodou a anodou deformuje. U katody vzniká maximální úbytek potenciálu, tzv. *katodový úbytek*.

Doutnavý výboj

Podmínka existence doutnavého výboje:
napětí na elektrodách \geq zápalné napětí U_z

Po zapálení doutnavého výboje klesne napětí na elektrodách a ustálí se na hořícím napětí a při snižování napětí zdroje zanikne výboj při zhášecím napětí na elektrodách.

Doutnavý výboj se realizuje většinou při nízkých tlacích ~ 10 Pa.

Zápalné, hořící a zhášecí napětí jsou charakteristickými veličinami doutnavého výboje, jejich velikost závisí na:

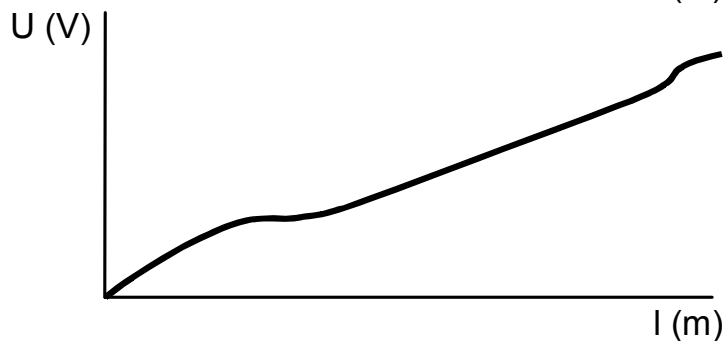
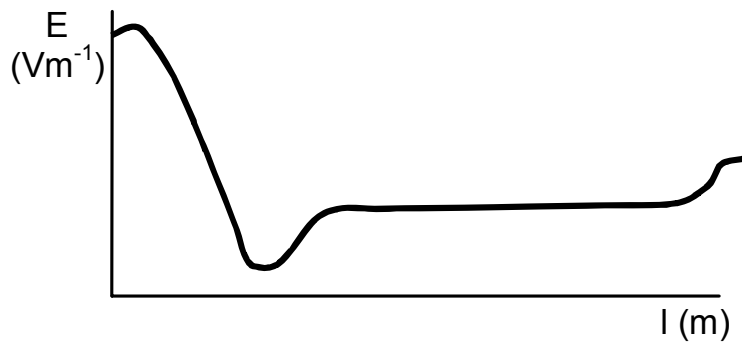
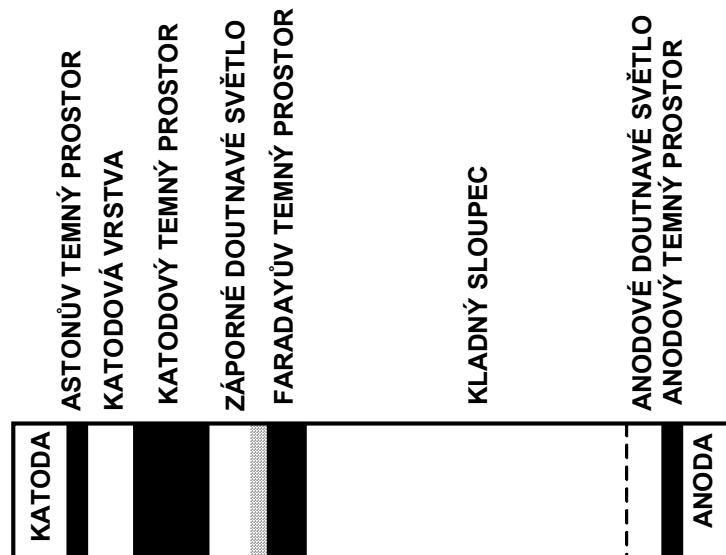
- materiálu elektrod
- vzdálenosti elektrod
- tvaru výbojové dráhy
- hustotě a chemickém složení výbojového plazmatu

Dalším charakteristickým znakem doutnavého výboje jsou **elektrodové úbytky**, jejich vliv je patrný v průběhu intenzity elektrického pole v doutnavém výboji a průběhu potenciálu.

Katodový úbytek má hodnotu řádově stovek voltů.

Rozdělení potenciálu je způsobeno rozložením prostorových nábojů, které je pro doutnavý výboj charakteristické.

Elektrony vystupují z katody v důsledku nárazů kladných iontů (γ - procesy).



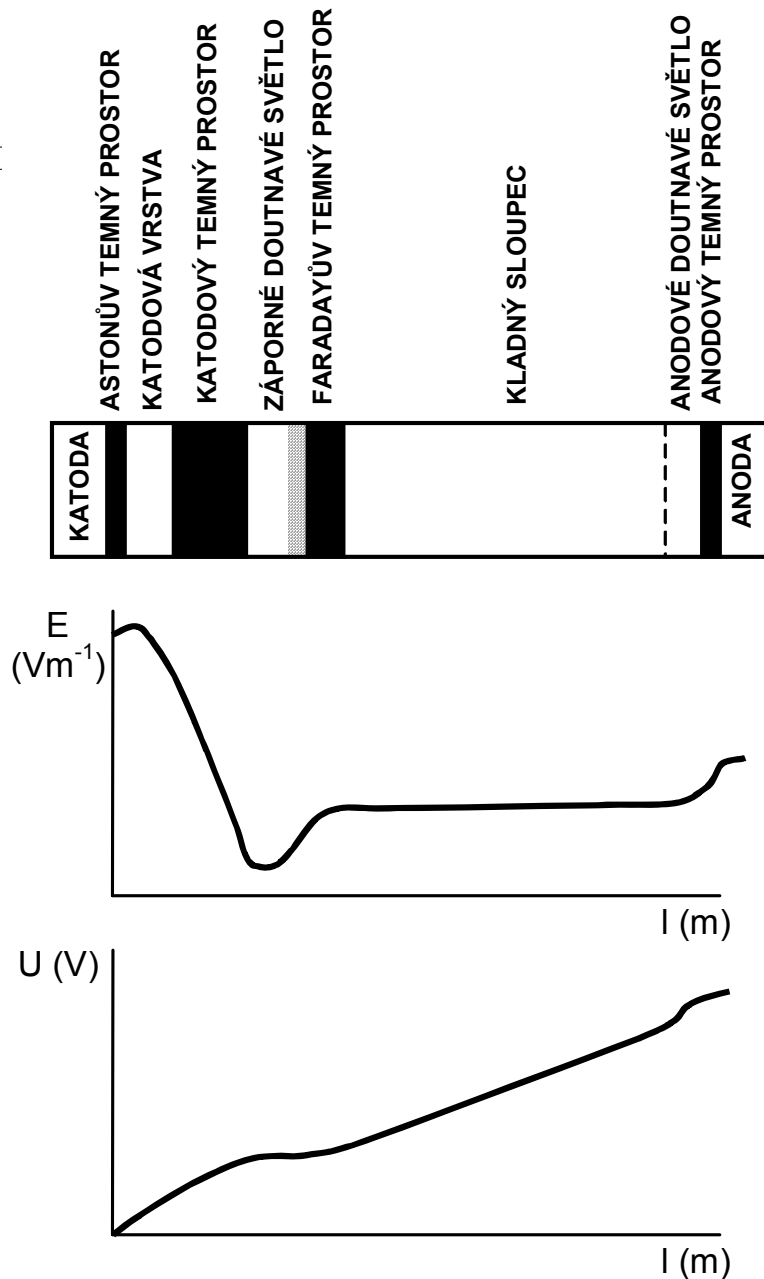
Průběh potenciálu způsobuje i rozdílný vzhled příslušných částí výbojového prostoru.

Jevy na katodě:

Svítilící katodová vrstva je od katody oddělena úzkým a temným *Astonovým* prostorem.

Se svítilící katodovou vrstvou sousedí směrem k anodě tzv. *temný katodový prostor (Crookesův)*, od kterého je ostře odděleno *doutnavé světlo*.

Směrem k anodě záporné doutnavé světlo postupně přechází v *temný Faradayův prostor*.



Jevy na anodě:

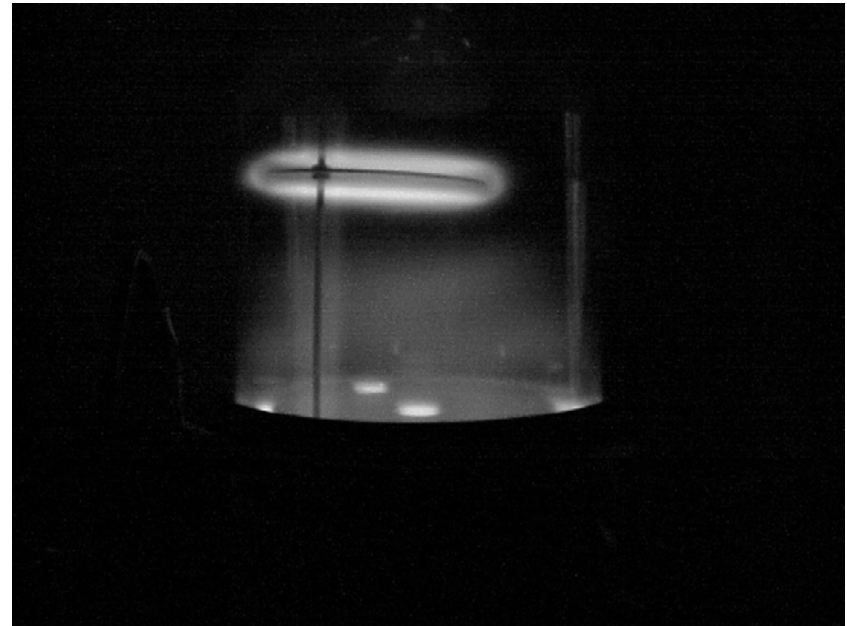
Dále směrem k anodě je část doutnavého výboje se stálým gradientem potenciálu. Je to sloupec ionizovaného svítícího plynu s velkou elektrickou vodivostí, tzv. *kladný sloupec výboje*, prostor kde svítí převážně neutrální molekuly a atomy a nabité částice unikají ke stěně kde rekombinují (ambipolární difúzí)

Někdy vzniká mezi kladným sloupcem a anodou temný anodový prostor a na samotném povrchu anody pak anodová svítící vrstva.

Doutnavý výboj

Barva výboje závisí na plynu ve výbojové trubici
Různé plyny září při excitaci různými barvami.

Dusík - fialový, Helium - modrý, Sodík – žlutý,
Bór - zelený, Neon – červený (neónové lampy)



Barva výboje

Barva výboje (vlnová délka) souvisí s vyzařovanou energií:

$$E = h \nu = hc / \lambda$$

E – energie fotonu v Joulech

ν - frekvence záření (s^{-1})

h – Planckova konstanta ($6,6 \times 10^{-34}$ Js)

c – rychlost světla (3×10^8 m/s)

λ - vlnová délka (m)

Detekce vlnové délky ve spektrální analýze umožňuje zjistit vlastnosti (složení, teplotu, ...) plazmatu.

Parametry doutnavého výboje

Pro světelné efekty se využívá kladný sloupec.
U zářivek se využívá ambipolární difúze k fluorescenci na vnitřním povlaku trubice.

V kladném sloupci je např. při tlaku rtuti 8 Pa
koncentrace elektronů a iontů 10^{19} cm^{-3}
a koncentrace neutrálních atomů $\sim 2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$.

Doutnavý výboj se vyznačuje výraznou nerovnováhou,
kdy teplota elektronů dosahuje
1,5 - 7 eV, což je 15000 - 80 000 K a teplota iontů
a neutrální je pokojová, 300 K.

Při vyšších atmosférických tlacích samostatné elektrické výboje probíhají při vyšších energiích a setkáváme se s obloukem, jiskrou a korunou.

Korónový výboj

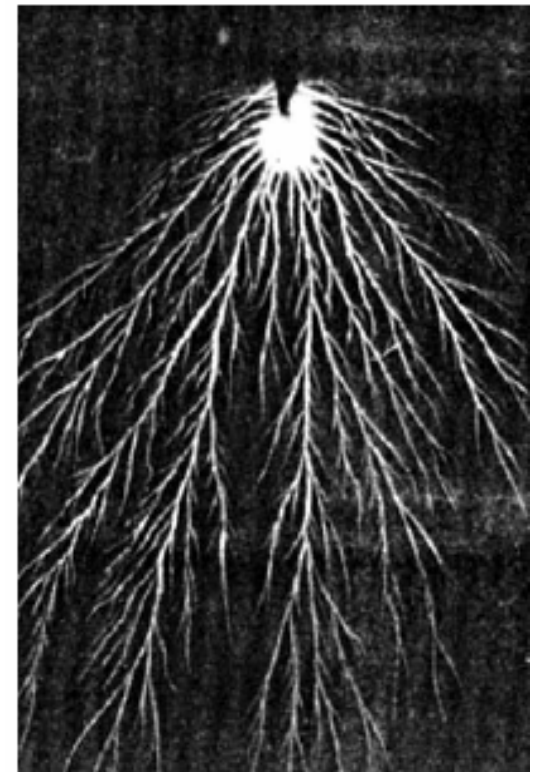
Korónový výboj se vytváří v **silném** a **silně nehomogenním** elektrickém poli, hoří v okolí hrotů a vodičů vysokého napětí.

Ve větší vzdálenosti od centra koróny má výboj charakter temné oblasti a projevuje se pouze prskáním a syčením

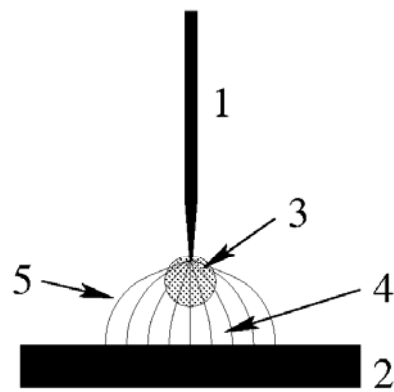
Proud vedou kladné a záporné ionty.

Koróna může být katodová (záporná) nebo anodová (kladná). Celkový proud korónou bývá malý a je určen odporem temné oblasti.

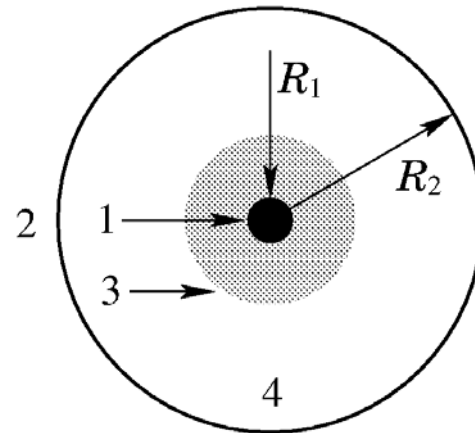
Charakteristické pro formu výboje jsou krátkodobě svítící rozvětvené kanálky.



Korónový výboj



a)



b)

- 1 - koronující elektroda (malé R)
- 2 - elektroda s velkým R
- 3 - ionizační vrstva (svítí)
- 4 - vnější oblast výboje
- 5 - elektrické siločáry

Nehomogenní pole se vytváří tak, že jedna z elektrod má malý poloměr křivosti - **koronující elektroda** (jehla-deska, drát uvnitř válce).

V okolí elektrody je silné el. pole - **elektronové laviny**.

Laviny se nemohou šířit do celého prostoru mezi elektrodami, protože intenzita pole rychle klesá.

Oblast ionizace je vázaná jen na okolí koronující elektrody.

Korónový výboj

Zápalné napětí koróny závisí na špičatosti ostří.

Koróna se vytváří při **stejnoseměrném** napětí na elektrodách, ale může hořet i při **vysokofrekvenčním** výboji.

Při koróně dochází k rozkladu plynů a generaci ozónu.

Ztráty na vedení vysokého napětí způsobené koronálním vyzařováním jsou např. u 200 kV vedení při slunečném počasí 0,1 kW/km a ve vlhku 0,7 kW/km.

Korónového výboje se používá k ovlivnění **plazmochemických** reakcí, rozkladu SO_2 a SO_3 , bifenylů a k čištění vody.

Střídavá korona

Výsledky teoretických výpočtů stejnosměrné koróny souhlasí s hodnotami stanovenými experimentálně.

Ve střídavé koróně jsou poměry mnohem složitější

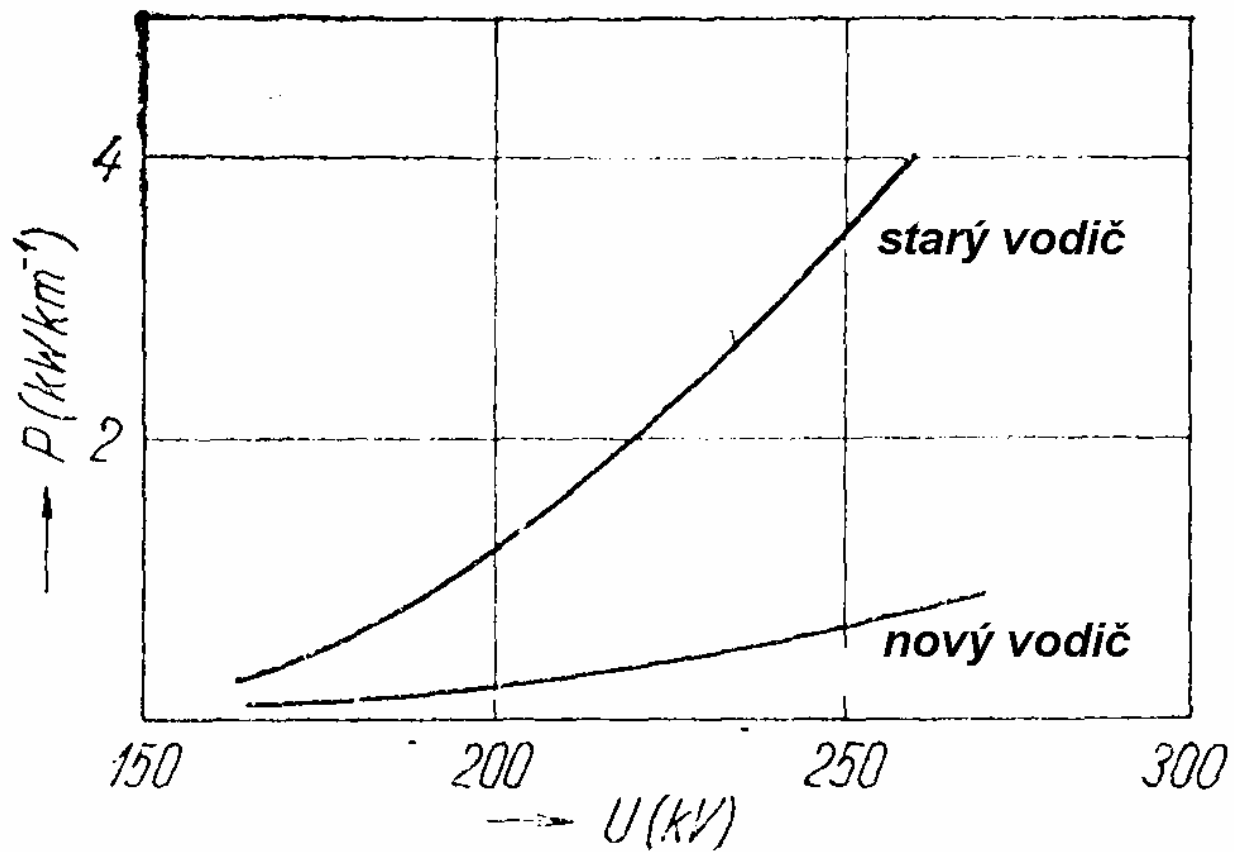
- ionty nemohou proběhnout celý výbojový prostor během jedné půlperrody
- vlastnosti koróny jsou funkcí času.

Střídavá korona

Uvažujme případ, který se vyskytuje nejčastěji, a to korónu na dvou nebo třech rovnoběžných drátech protékaných střídavým proudem.

Koróna v tomto případě vzniká každou půlperiodu znovu, v kladné půlperiodě se vytvoří okolo jednoho vodiče svítící část koróny, ze které vycházejí ionty s polaritou určenou polaritou náboje na vodiči. Ionty s opačným znaménkem směřují do svítící vrstvy.

Dráha obou druhů iontů je za dobu jedné půlperiody poměrně malá.



Ztráty korónou na 1 km vedení v závislosti na napětí.

Přechod koróny v jiskru a oblouk

Přechod koróny v jiskru - teorie streamerů.

Výbojovou dráhou proběhne lavina elektronů

Vzniklá buď působením elektronu uvolněného z katody, nebo elektronu vzniklého některým z elementárních procesů. Ke vzniku prvotního elektronu může dojít ionizací kosmickým zářením nebo světelným zářením.

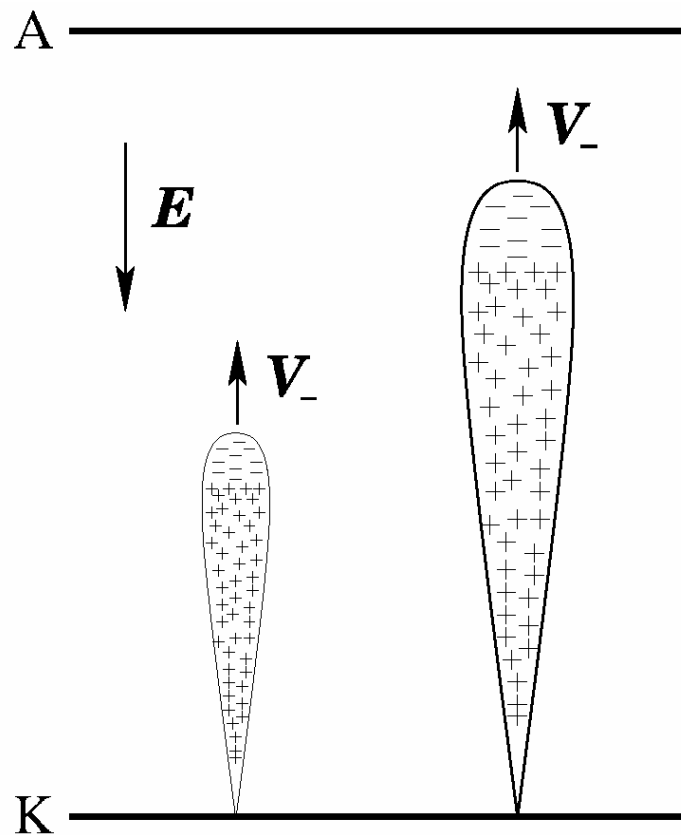
Uvolněný elektron se působením elektrického pole pohybuje poměrně velkou rychlostí k anodě a srážkami s neutrálními atomy vytváří kladné ionty.

Wilsonova mlžná komora

Tyto pochody (elektronové lavina) se experimentálně studují pomocí **Wilsonovy mlžné komory**, která umožňuje pozorovat stopy po lavinách.

Zviditelnění lavin je umožněno skutečností, že při malém podtlaku se na iontech kondenzuje vodní pára.

Lavina vytvořená prvotním elektronem se ve Wilsonově mlžné komoře jeví jako mlhový kužel s vrcholem u katody.



Typický tvar laviny
(primární).

Elektrony (pohyblivější)
jsou v čele laviny, kladné
ionty zůstávají rovnoměrně
rozložené v místě vzniku.

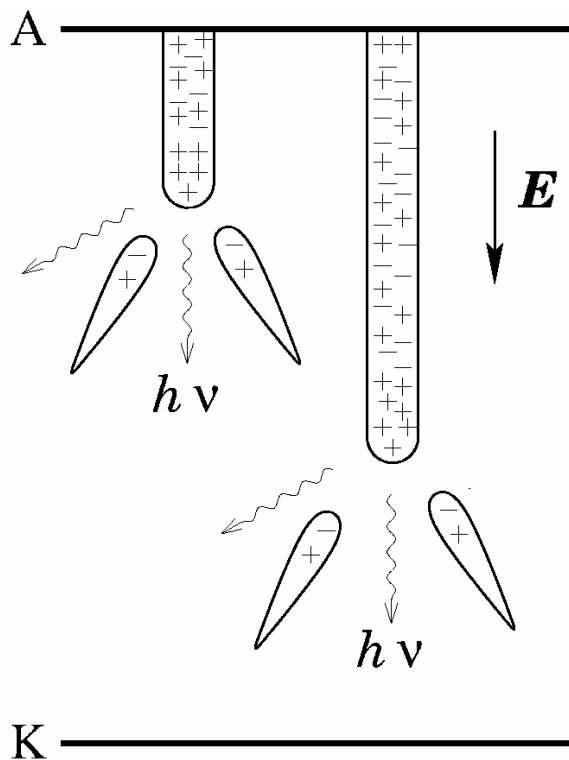
Čelo laviny se rozšiřuje
díky difúzi pohyblivějších
elektronů a později i vlivem
prostorového náboje
elektronů

Pokud má lavina pro svůj rozvoj dostatečně dlouhou dráhu (velké mezielektrodové vzdálenosti), tak ještě před dopadem na anodu se začne uplatňovat prostorový náboj částic v lavině.

Po příchodu k anodě, elektrony zaniknou a před anodou zůstane velký kladný prostorový náboj. Pole tohoto náboje se přičte k původnímu od elektrod a prakticky se zdvojnásobí a naruší se původní homogenita pole.

V silném el. poli vzroste ionizace plynu.

V čele původní laviny se tvořily kromě nabitých částic i excitované atomy a ionty, které při deexcitaci vyzařují fotony s velkou energií, které vytvářejí ve svém okolí sekundární laviny.



Sekundární laviny se potom šíří směrem ke kladnému prostorovému náboji - pozůstatku primární laviny. Elektrony sekundárních lavin tak kompenzují kladný náboj od primární laviny -> vytváří se plazma a oblast silného pole se přesouvá směrem ke katodě.

Ke katodě se tedy šíří (po původní dráze primární laviny) nový plazmový útvar - **streamer**.

Průměr streameru - 0,1 - 1 mm.

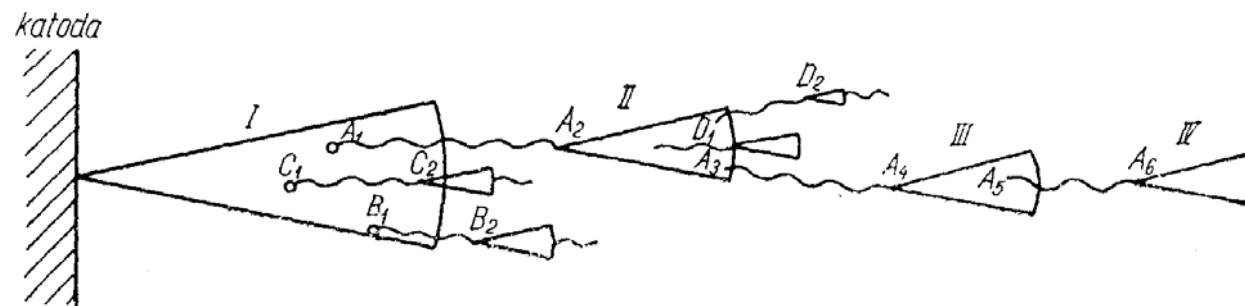
V okamžiku dotyku katodového streameru s povrchem katody je el. pole tak silné, že elektrony vytržené z katody, resp. vzniklé fotoionizací se rozmnožují obrovskou rychlostí.

Tak se vytvoří zárodek kanálu s vysokou elektrickou vodivostí, který se šíří velkou rychlostí **zpět k anodě** - vzniká **zpětná vlna** za jejímž čelem je plazma s velkou vodivostí.

Jakmile tento elektrický kanál dosáhne anodu, prudce se zvýší **proud** - intenzivní ionizace a ohřev plynu v kanálu - expanze - rázová vlna (ostrý zvuk a záblesk). Dojde ke zkratování elektrod - **jiskra**.

Energie nahromaděná v kapacitě elektrod a v kondenzátorech zdroje vysokého napětí se odčerpá a jiskra zanikne.

Elektrony vytvořené fotoionizací jsou zdrojem nových lavin. I je hlavní lavina šířící se od katody určitou rychlostí. II, III, IV atd. jsou laviny vytvořené elektrony uvolněnými fotoionizací. Fotony jsou vyzářeny nabuzenými atomy v bodech A1, B1, C1, atd. a ionizují neutrální atomy v bodech A2, B2, C2, atd. Dráha fotonů je znázorněna vlnovkami. Lavina I vyvolala lavinu II, tato lavina opět lavinu III, atd. Ve velmi krátkém čase se laviny spojí a po dotyku laviny s anodou se začne vytvářet kladný strimer.



Schématické znázornění vzniku elektronové laviny.

Streamerem nazýváme shluk ionizovaných částic, stupeň ionizace ve strimeru je mnohem větší než stupeň ionizace v elektrodové rovině.

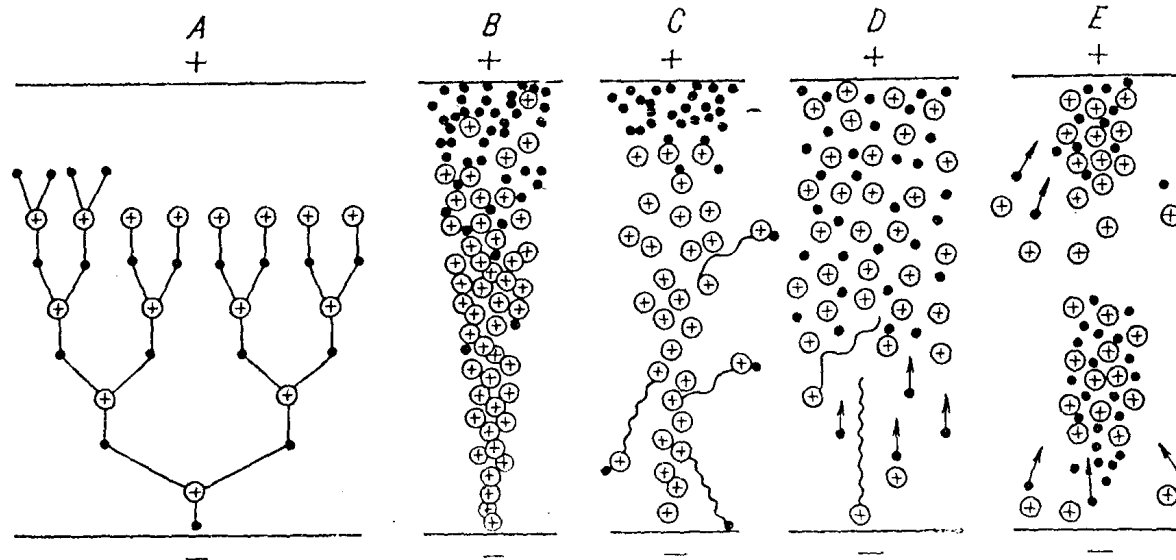
A představuje vznik elektronové laviny, v **B** je znázorněna elektronová lavina v okamžiku, kdy se čelem dotýká anody.

C je stadium, kdy se téměř všechny záporné náboje v lavině dostaly k anodě.

D představuje stadium vytvoření kladného streameru.

E znázorňuje na horním konci vznik záporného streameru a streamer vzniklý uprostřed výbojové dráhy.

Plné kroužky značí záporné náboje, + kladné náboje a vlnovky označují fotony.



Obr. 6: Schématické znázornění vzniku strimerů.

Jiskra

Jiskra v atmosférickém vzduchu je nejstarší známý příklad uměle vyvolaných elektrických výbojů. Vzniká z korónového výboje, když napětí na elektrodách překročí určitou hodnotu nazývanou *průrazné napětí*.

Vnější vzhledem se jiskra podobá velmi krátkou dobu trvajícím elektrickým obloukům.

Je tvořena několika výbojovými kanály, které mají poměrně malý průřez a vyzařují velmi intenzivní světlo.

Výbojové kanály jiskry mohou končit ve vzduchu, všechny kanály vycházející z jedné elektrody nemusí nutně končit na druhé elektrodě.

Jiskra

Přeskok jiskry je provázen poměrně velkým hlukem. Je to způsobeno vytvořením rázové vlny ve vzduchu při vzniku výbojové dráhy jiskry.

Jiskru zařazujeme do *samostatných výbojů*, i když její časové trvání je velmi krátké.

Ve většině případů nepotřebuje jiskra vnější zdroj, který by ionizačními pochody vytvářel elektrické pole ve výbojové dráze.

Dobu vytváření, trvání a zániku jiskry rozdělujeme do čtyř etap

První etapa - zapálení jiskry,

Druhá etapa - vytvoření výbojového kanálu s vysokou teplotou, tj. vytvoření výbojového plazmatu.

Třetí etapa - vznikne, je-li zdrojem elektrické energie kondenzátor. Výbojová dráha se dále zvětšuje.

Čtvrtá etapa - obsahuje zánik jiskry, kdy výbojová dráha zaniká vyzářením energie, která v ní byla nahromaděna.

Doba vytvoření jiskry se měří od okamžiku přiložení napětí dostatečujícího k zapálení jiskry. Tato doba je ve většině případů velmi krátká a můžeme ji rozdělit do dvou částí: na **zpoždění zapalovacího procesu** a **vlastní dobu vytváření jiskry**.

Zpoždění zapalovacího procesu

doba, ve které se po připojení napětí na elektrody nezačne vytvářet jiskra. Je to doba, za kterou vznikne v prostoru mezi elektrodami první elektrický náboj nutný pro vznik výboje. Zpoždění zapalovacího procesu je tedy statistickou veličinou a závisí na dvou pravděpodobnostních procesech:

- pravděpodobnost výskytu náboje ve výbojové dráze,
- pravděpodobnost vzniku ionizačního pochodu vytvářejícího elektrického náboje.

Elektrický výboj může vzniknout uvolněním elektronu z katody fotoelektrickým jevem, případně ionizací plynu mezi elektrodami kosmickým a radioaktivním zářením. Poněvadž ionizační působení záření je statistického charakteru, jsou časy, za které vznikne první ionizační pochod, rozdílné, i když poměry na jiskřišti jsou stále stejné.

Střední doba zpoždění zapalovacího procesu závisí na několika činitelích. Hlavními z nich jsou intenzita ionizačního záření a velikost přiváděného napětí, které musí být vyšší než zapalovací napětí jiskry. O vlivu ionizačního záření je možné se přesvědčit odstíněním veškerého záření dostatečně tlustým olověným obalem. Při dokonalém odstínění je doba zpoždění zapalovacího procesu v některých případech rovna hodině.

Dobu zpoždění můžeme zkrátit ozařováním jiskřiště ultrafialovými paprsky nebo rentgenovým zářením. Ozářením a dostatečnou intenzitou může být doba zpoždění snížena na nulu.

Doba vlastního vytvoření jiskry je určena časem, který uplyne mezi začátkem vytvoření první elektronové laviny a vznikem výbojové dráhy spojující vodivě obě elektrody. Tento čas není statistické povahy, ale závisí pouze na parametrech výboje.

Jiskra vznikne, když intenzita elektrického pole mezi elektrodami je větší než počáteční intenzita elektrického pole potřebná ke vzniku koróny. Po vytvoření vodivé dráhy streamery se začne vytvářet plazma jiskrového výboje.

Doba vytvoření plazmatu jiskry je řádově 10^{-8} s. Za tuto dobu musí být plyn ve výbojové dráze zahřátý na vysokou teplotu. Další podmínkou vzniku jiskry je velký vnitřní odpor zdroje, při malém vnitřním odporu vznikne oblouk.

Fotografickým studiem vytváření výbojové dráhy jiskry bylo zjištěno, že nevzniká pouze jedna jiskra, ale celý sled dílčích jisker následujících za sebou ve velmi krátkých časových intervalech.

Protože jiskra vzniká při tlacích rovných tlaku atmosférickému nebo vyšších, musí být zapalovací napětí jiskry, nazývané průrazné napětí, velké.

Po přemostění výbojové dráhy mezi elektrodami kanálem jiskry klesne následkem velké ionizace ve výbojovém kanálu odpor, a tím i napětí na elektrodách, na velmi malou hodnotu.

Je-li vnitřní odpor zdroje elektrické energie velký, zanikne výboj po průchodu krátkého proudového impulsu.

Blesk

Na povrchu Země je elektrické pole s intenzitou

$$E = 100 \text{ V/m}$$

orientováno tak, že Země má záporný náboj a ionosféra je nositelem kladného náboje.

Toto elektrické pole je indukováno zemským magnetickým polem.





Blesk



Napětí mezi ionosférou ve výši 50 km a povrchem Země je asi 10^6 V.

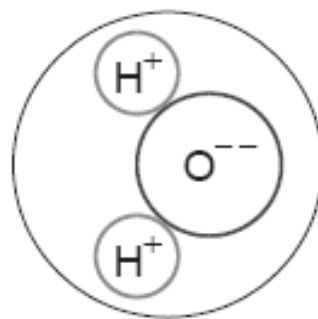
Iontové páry vytvářené v atmosféře kosmickým zářením a radioaktivitou zemského pláště v tomto poli vytvářejí tok záporných iontů.

Tento proud by přenesením náboje zemské elektrické pole E brzy vykompenzoval, kdyby nebylo přirozené zpětné cesty pro přenos záporného náboje zpět na Zem a tou jsou bleskové výboje.

V ovzduší putují záporné náboje ve formě iontů vzhůru. Záporné ionty vznikají připojením volných elektronů na některé molekuly, např. H_2O .

Ve výšce je nižší teplota a vodní pára kondenzuje. Molekula vody má dipólový charakter elektrického pole neboť elektrony vodíku jsou posunuty směrem k jádru kyslíku.

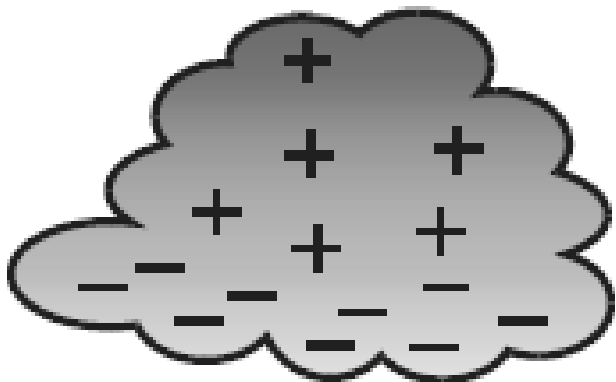
Na straně vodíku je náboj + a u kyslíkového atomu -



Obr. 21: Rozdělení nábojů v molekule vody.

Vodní kapičky gravitační tíhou klesají dolů a jejich záporný náboj se elektrostaticky váže k horní části mraku, kde se kumuluje kladný náboj.

Vodní kapky v dolní části mraku jsou gravitačně přitahovány k Zemi a elektrostaticky vzhůru.



Rozložení náboje v bouřkovém mraku

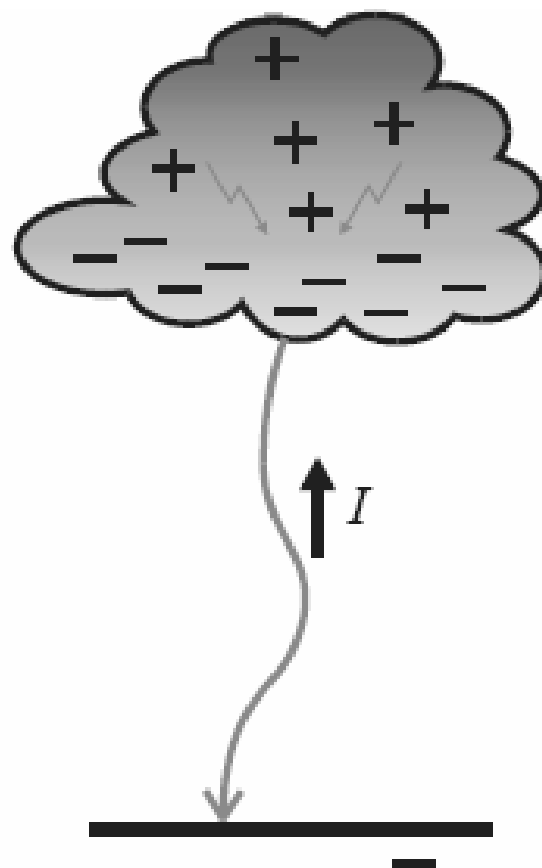
V dolní části mraku se shromažďuje záporný náboj s vysokou koncentrací, převyšující koncentraci záporného náboje na Zemi.

Mezi spodní částí vysokého bouřkového mraku a povrchem tak vzniká silné elektrické pole E_Z opačné přirozenému poli E_0 . Ve vlastním bouřkovém mraku se separuje ~ 50 C náboj a vytváří pole, která mohou dosáhnout průbojových hodnot - jiskrový výboj.

První částí jiskrového výboje je tzv. **leader**. V této fázi se lavina elektronů blíží po jakýchsi rychlých skocích směrem k zemi, přičemž vyhledává cestu nejmenšího odporu, tedy nejvodivější cestu.

Jakmile dosáhnou elektrony až na zem, dojde k uzavření elektrického obvodu (povrch země je rovněž elektricky nabit). Dojde tak vlastně k vytvoření vodivého kanálu, který spojuje oblak se zemí. Pak následuje druhá etapa - hlavní část blesku.

Vodivým kanálem proběhne hlavní elektrický výboj, po němž může stejnou cestou následovat ještě několik výbojů dalších, což se projeví jako "blikání" blesku.



Obr. 23: Schematický přenos náboje v mraku při bleskovém výboji.

První etapa vývoje blesku, tedy leader, směřuje většinou od mraku směrem k zemi rychlostí $\sim 10^6 \text{ ms}^{-1}$. Někdy dokonce vyjde leaderu směřujícímu dolů z mraku naproti leader od země, konkrétně od vyšších špičatých předmětů.

Celková doba trvání blesku činí přibližně **setiny až desetiny sekundy**, ale byly zaznamenány případy, kdy díky mnoha po sobě následujícím výbojům, trval blesk i více než 1 sekundu.

Průměr kanálu většinou dosahuje hodnot pouze milimetrových až centimetrových, vzácněji bývá širší (až několik desítek centimetrů).

Proud, který kanálem protéká, dosahuje intenzity kolem 25 000 A, ale může být i značně vyšší než 50 000 A.

Teplota uvnitř kanálu se pak pohybuje v desetitisících stupních, nejčastěji kolem 30 000 K.

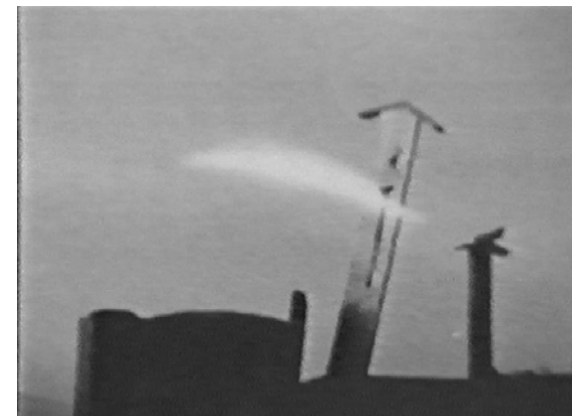
Kulový blesk (*ball lightning*)

Kulový blesk je exotická fyzikální záhada. Pokud by to měla být žhavá plazmatická koule, měla by svítit asi $1 \mu\text{s}$. Kulový blesk má dobu života i desítky sekund, což je o 7 řádů více.

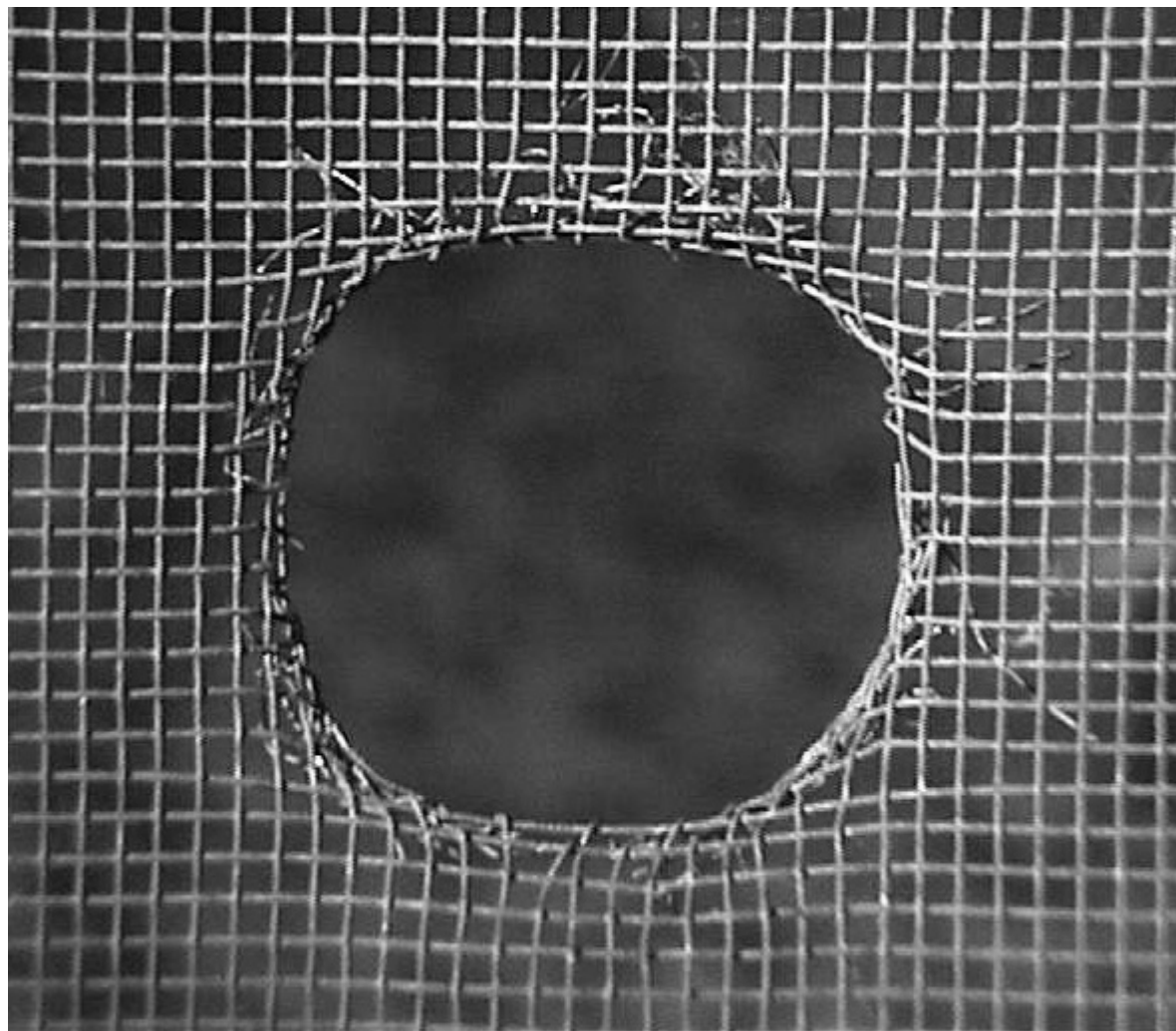
Uvnitř probíhá zatím záhadný mechanismus. Navzdory intenzivní snaze se jej zatím nepodařilo realizovat uměle v laboratoři.

Kulový blesk má většinou kulovitý tvar se středním průměrem 20 cm a dobou života $10 \div 20 \text{ s}$.

Rychlost jeho pohybu je v rozmezí $0,1 \div 10 \text{ ms}^{-1}$. Vzniká a vyskytuje se většinou při letních bouřkách (70 %).



Kulový blesk



Statisticky se kulový blesk vyskytuje na zeměkouli 1× za hodinu a ze 2 000 lidí jej pozoruje během svého života jeden.

50 % kulových blesků se rozpadá výbuchem, 40 % pomalu se syčením a 10 % se rozpadá na pozorovatelné části.

Vnitřní energie je ~ kJ, výkon 50 ÷ 100 W, světelný tok 1 500 lumenů.

Předpokládaná teplota odpovídá teplotě vlákna svítící žárovky 1 500 ÷ 2 000 K. Zřejmě nezáří celý objem ale větší počet malých částí s celkovým nepatrným zlomkem objemu. Barva kulového blesku je většinou bílá nebo žlutá (24 %), ale také červená (18 %), oranžová (14 %) a modrá (12 %).

Zdrojem záření blesku není ideální plazma neboť doba života iontů je ($10^{-3} \div 10^{-4}$) s, ani se nejedná o excitované stavy ($10^{-2} \div 10^{-3}$) s u kyslíku.

Elektrostatická energie odvozená z hodnot elektrického pole při bleskovém výboji $E \sim 10^6$ V/m je nepatrná v porovnání s pozorovanou.

Experimenty i současné hypotézy jsou stále v počátečním stadiu výzkumu.