

C8930 - Metody plazmochemické konzervace

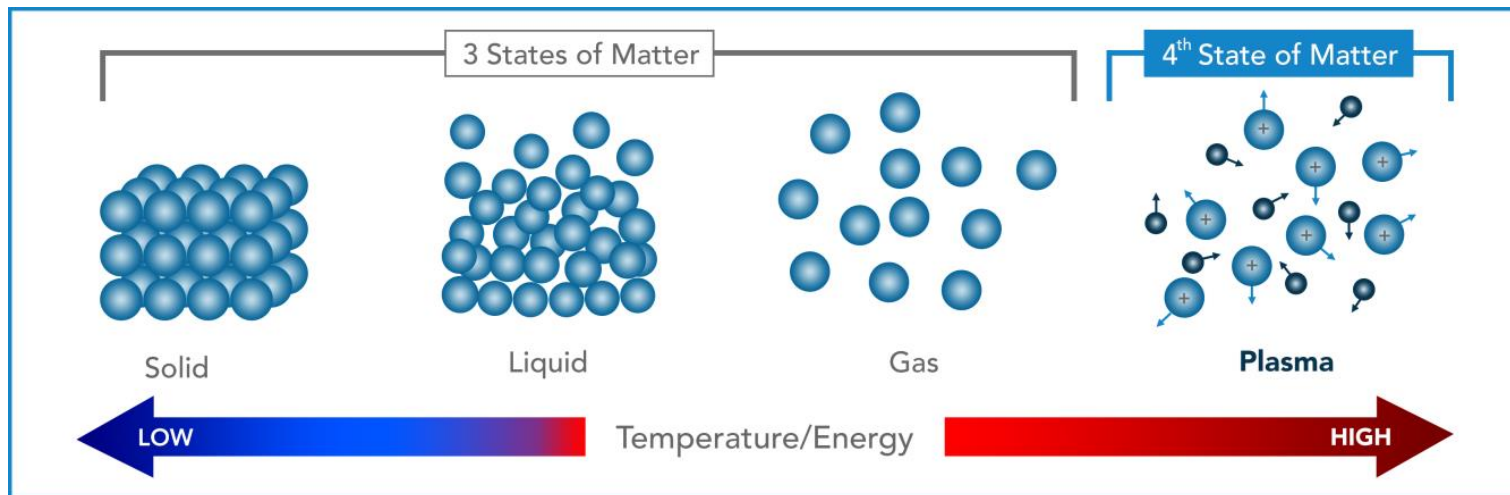
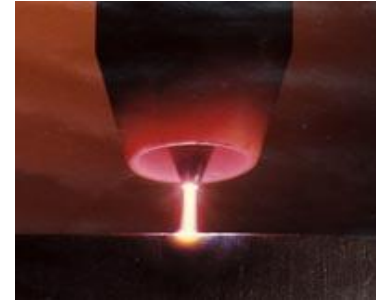
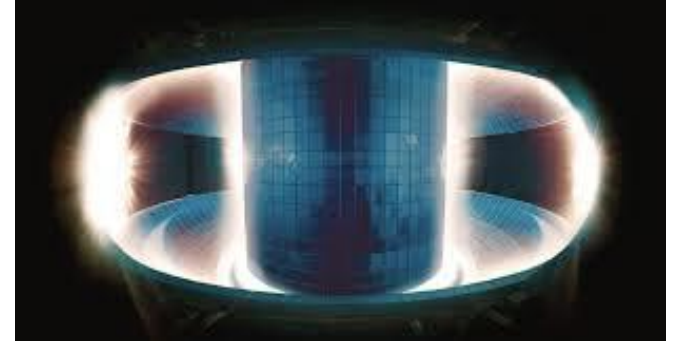
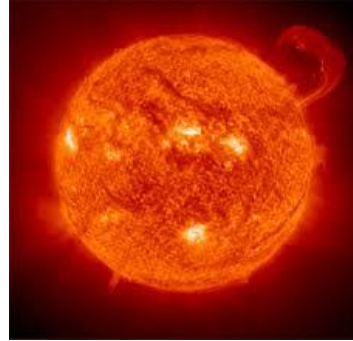
Výboje v plynech

D.Pavliňák 2019

Definice plazmatu

- Plazma je ionizovaný plyn složený z elektronů a iontů (případně i neutrálních molekul a atomů).
- Abychom mohli ionizovaný plyn považovat za plazma musí splňovat jisté vlastnosti – tzv. kritéria plazmatu. (Kolektivní chování a kvazineutralitu)

Plazma - čtvrté skupenství hmoty

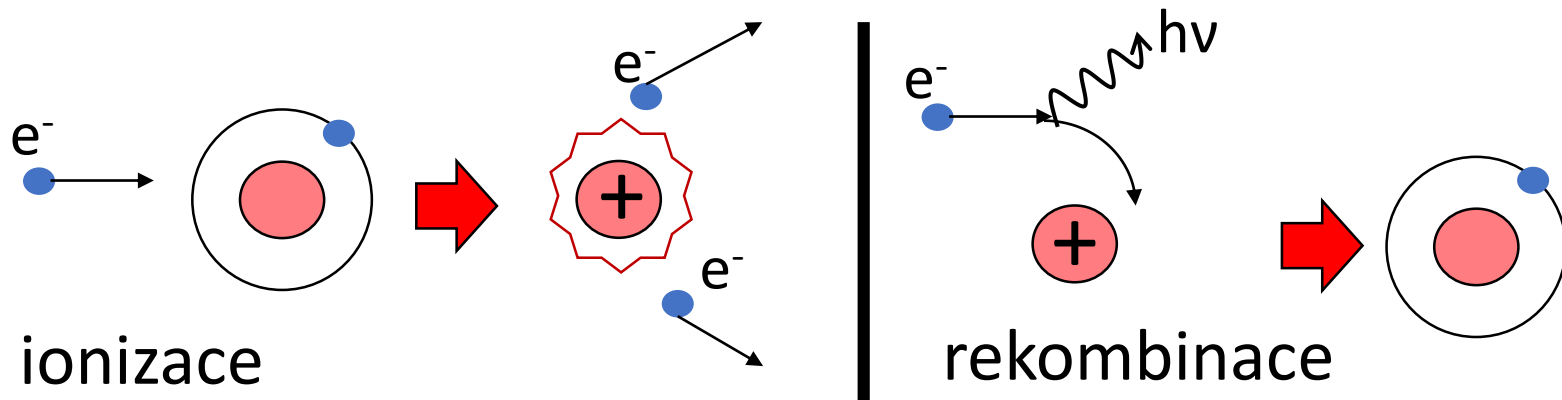


Výboje v plynech - plazma

- Výbojem v plynu rozumíme:
 - *„Vedení elektrického proudu plynem díky pohybu nabitých částic. Nabité částice vznikají především srážkovými procesy. Typickým srážkovým procesem je srážka elektronu s neutrální částicí plynu (atomem, molekulou) a vytvoření iontu + dalšího elektronu.“*
 - Problém - plyn je za normálních podmínek nevodič (vzduch: $\sigma \approx 10^{-14}$ S/cm, stříbro: $\sigma = 6 \cdot 10^7$ S/cm, Ar plazma: $\sigma > 10^3$ S/cm)
- Otázka zní jak přimět nevodivý plyn vést elektrický proud?
 - Odpověď: **IONIZACÍ PLYNU**

Výboje v plynech - plazma

- Ionizace plynu – ionizovat plyn znamená vytvořit dostatečné množství volných nosičů náboje (elektron, ion) a udržet je „aktivní“ po dostatečně dlouhou dobu.
 - Problém spočívá v reaktivnosti nabitých částic. Částice mohou reagovat mezi sebou (rekombinace) nebo se stěnami reaktoru (neutralizace). Pokud potřebujeme tyto ztráty vyrovnat a držet v systému dostatečný počet částic - **musíme do systému neustále dodávat energii.**



Ionizace plynu – dodání ionizační energie

- Zvyšováním teploty plynu

- Nepružné srážky částic plynu vedou ke generaci nabitých částic – ionizace plynu tepelnou energií. (*ohřev/hoření, fokusace laserových paprsků do jednoho bodu*)

- Absorpcí vysokoenergetického záření částicí plynu

- Absorpcí UV, X-ray, kosmického záření může dojít k ionizaci + odtržení elektronu a vytvoření dvojice elektron-ion.

- Urychlením nabité částice v elektrickém poli

- Elektrické pole začne urychlovat nabité částice (především má vliv na volné elektrony). Získá-li částice (elektron) dostatečnou rychlost (kinetickou energii), může při srážce dojít k ionizaci neutrální částice.

Ionizace plynu – zvyšováním teploty plynu

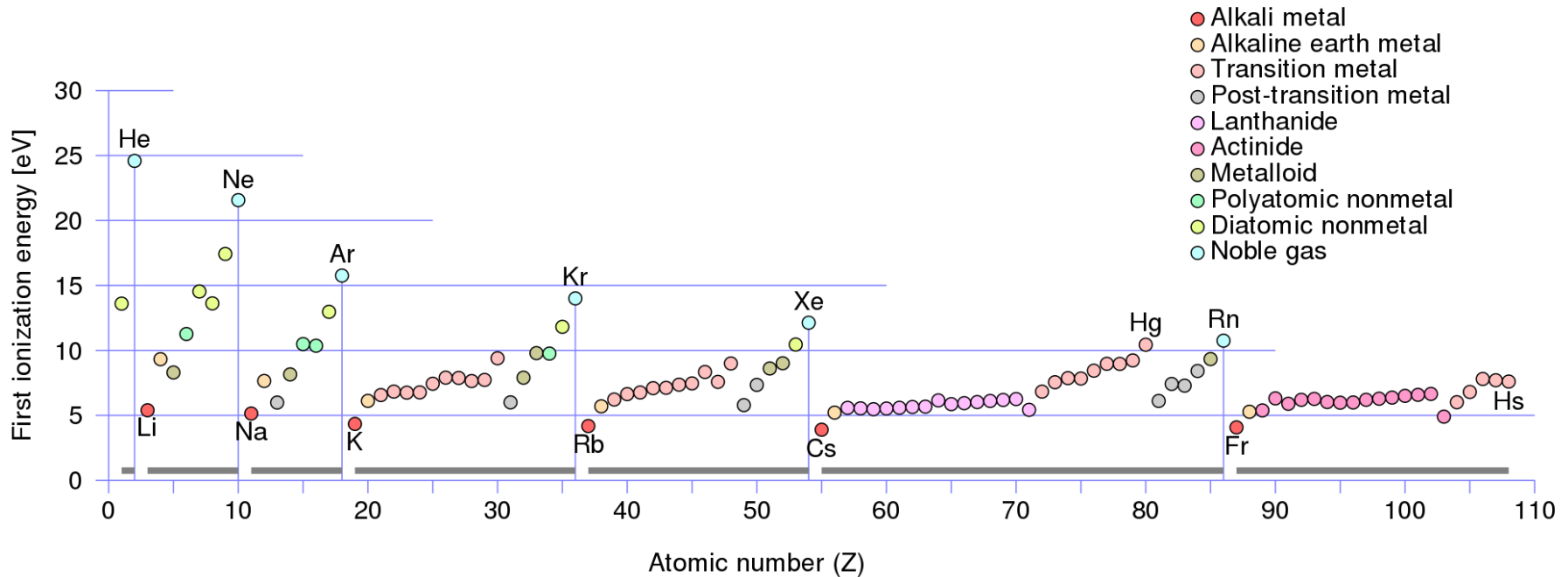
- *Sahova rovnice:*

$$\frac{n_e^2}{n - n_e} = CT^{3/2} \exp\left(-\frac{U_i}{kT}\right)$$

- *Kde: $n_e = n_i$, $n = n_0 + n_i$, $C \approx 2,4 * 10^{21} \text{ m}^{-3}$, k - Boltzmanova konst., T – teplota plynu, U_i - ionizační potenciál*
- *Za termodynamické rovnováhy se proces generace párů nabitých částic s rostoucí teplotou dá popsat statisticky pomocí Sahovy rovnice.*

Ionizace plynu – zvyšováním teploty plynu

Ionizační potenciál - U_i



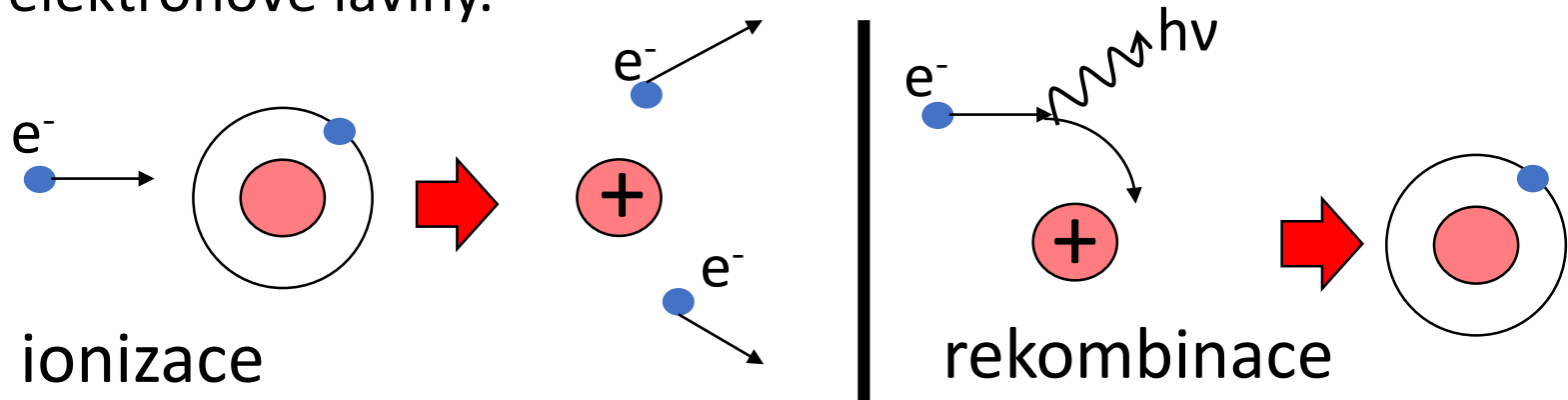
Ukázka stupně ionizace vodíku a helia v závislosti na teplotě:

http://csep10.phys.utk.edu/OJTA2dev/ojta/c2c/ordinary_stars/harvard/ionization_ic/frame.html

Ionizace plynu - Urychlením nabité částice v elektrickém poli

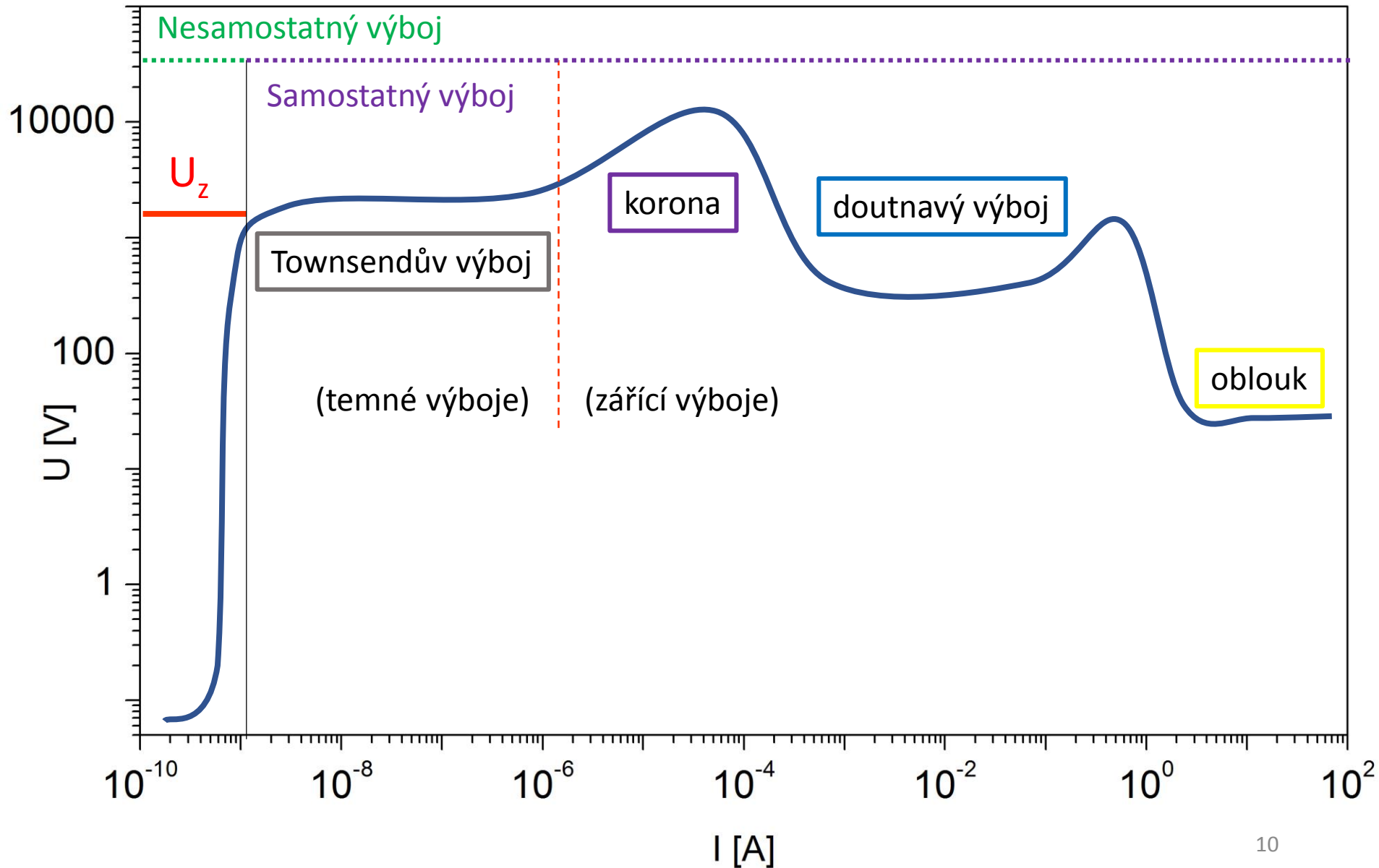
Otázka: Co se stane v ionizovaném plynu po přiložení napětí?

- Elektrické pole začne urychlovat nabité částice. (Má největší vliv na lehké částice tj. elektrony)
- Urychlené elektrony se sráží s částicemi plynu
- Získají-li elektrony dostatečnou energii, může dojít k ionizaci částice (resp. excitace + disociace). Může vést až ke vzniku elektronové laviny.

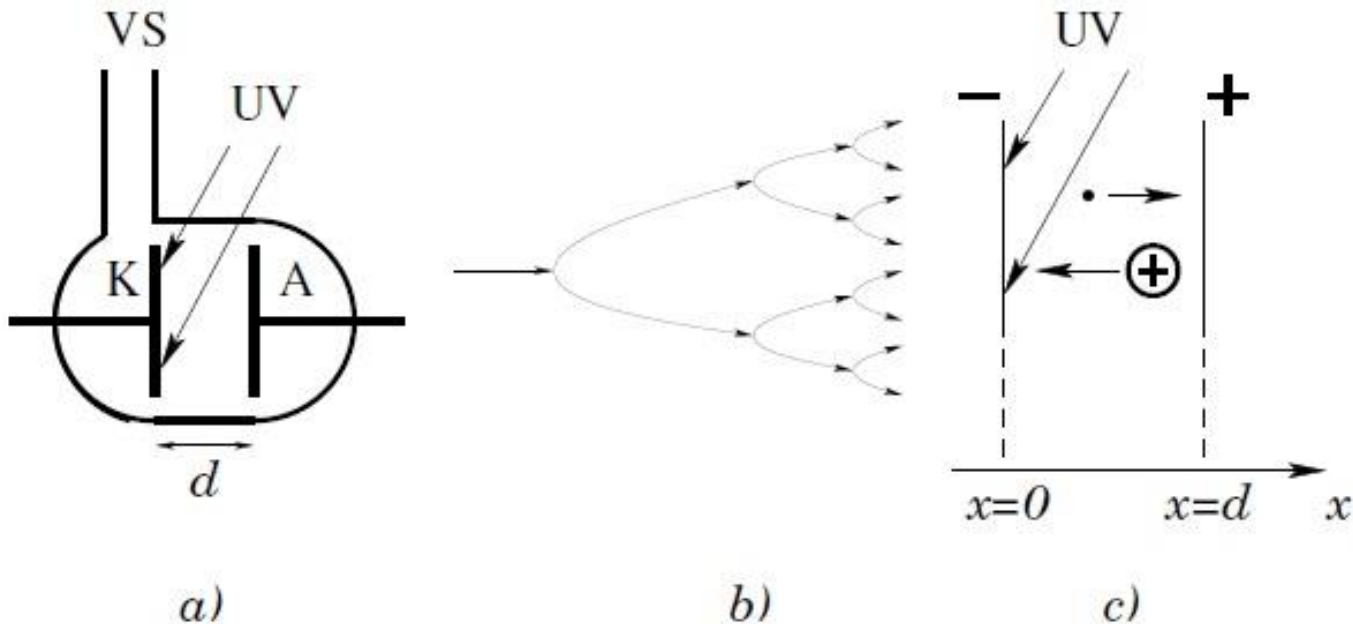


Proces je ukončen dopadem elektronů na anodu (resp. rekombinací elektronu s kladným iontem).

Evoluce výboje s rostoucím napětím – za nízkého tlaku

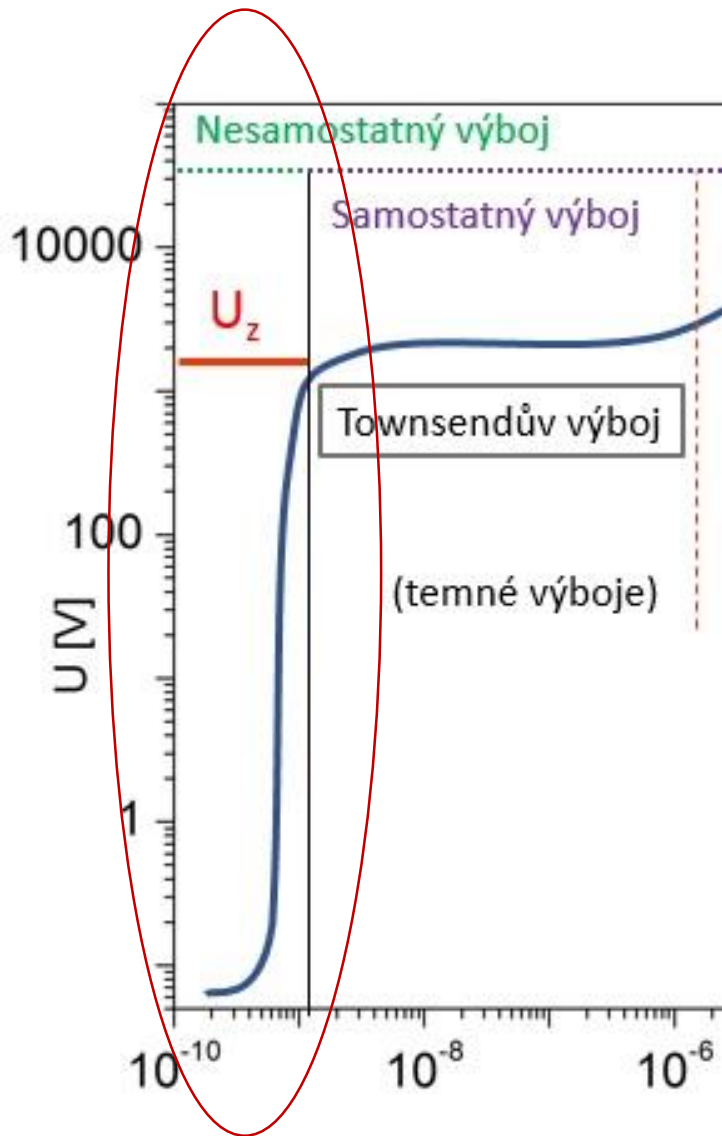


Nesamostatný výboj - experiment



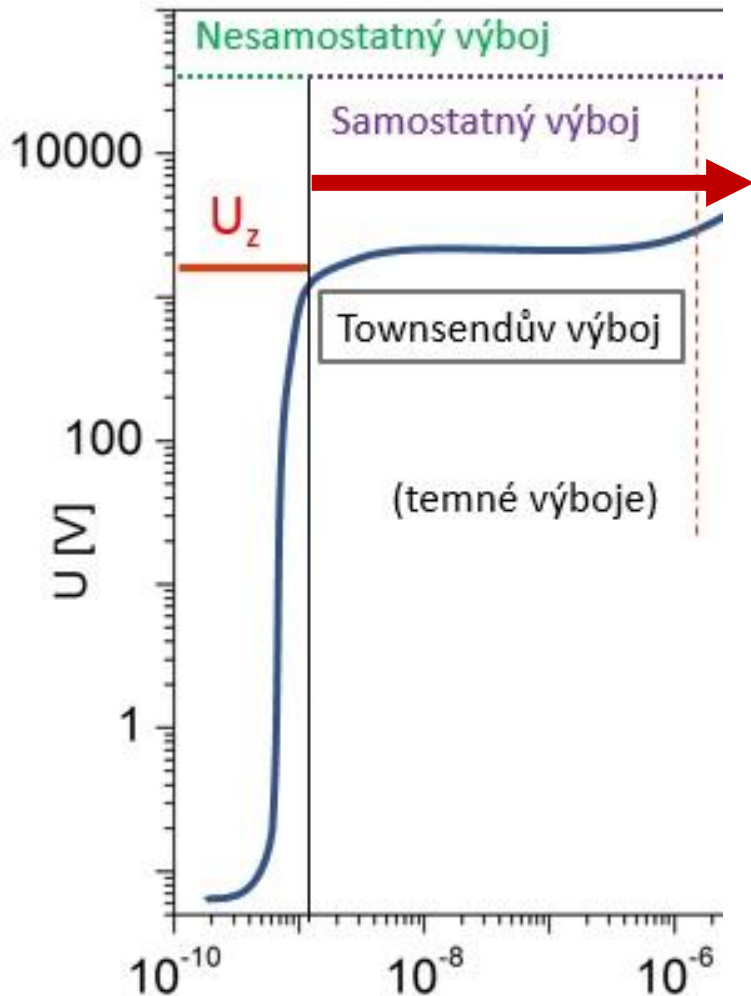
V experimentální komoře lze postupně snižovat tlak a měnit vzdálenost elektrod **(a)**. Pozoruje se za jakých podmínek (U , I) se výboj zapálí. Je zjištěno, že na výboji se podílí tzv. **primární elektrony** vznikající při takzvané **elektronové lavině (b)**. Dalším zjištěním je, že pro samostatnost výboje potřeba dosáhnout určitého napětí - **zápalné napětí**. Bez tohoto napětí výboj nehoří nebo je potřeba dodat energii na katodu (např. ji osvětit UV zářením – tím dokážeme emitovat z katody další elektrony, které vstupují do elektronové laviny). Experimentálně bylo potvrzeno, že na samostatnost výboje má významný vliv tzv. potenciálová emise elektronů, produkující **sekundární elektrony** při dopadu kationtů na katodu **(c)**.

Nesamostatný výboj - poznatky



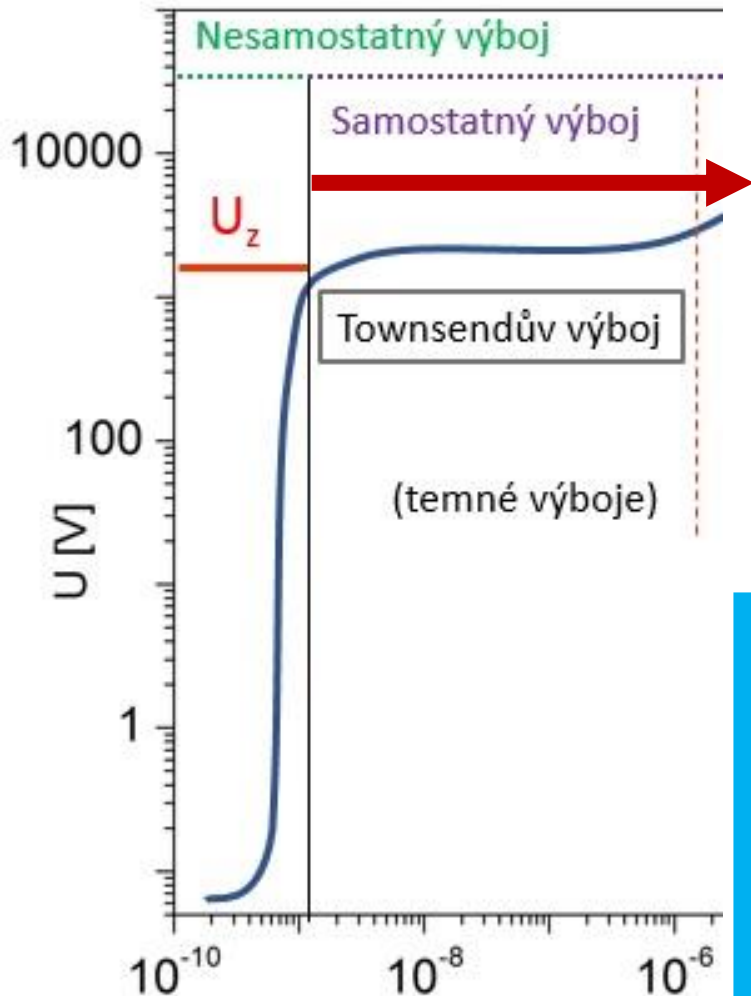
- Plyn je při normální teplotě tvořen neutrálními atomy a molekulami a je velmi dobrý izolátor. Pro umožnění průchodu proudu ve vnějším elektrickém poli je potřeba ionizaci.
- V důsledku přirozené radiace Země a kosmickým zářením vesmíru vzniká v 1 cm^3 v průměru 1000 iontových párů za sekundu což umožňuje ve vzduchu protékat jen velmi slabý elektrický proud ($10^{-12} - 10^{-6} \text{ A/m}^2$).
- V případě slabého urychlovacího napětí nemají elektrony dostatečnou energii potřebnou k ionizaci a převládá rekombinace – tzn. nesplňujeme kritéria plazmatu.
- Pro vedení elektrického náboje v plazmatu je zapotřebí elektrického proudu vyšší hustoty a je tedy potřeba dodatečný ionizátor (např. UV na katodě) – proto tyto výboje označujeme jako **nesamostatné. (Bez dodatečného ionizátoru výboje nehoří)**

Samostatný výboj - Townsendův výboj



- Při dosažení dostatečně silného elektrického pole se vytváří dostatečný počet iontů a elektronů vhodný pro samostatné udržení proudu – takové výboje nazýváme **samostatné**.
- Urychlené elektrony mají už vhodnou energii pro vytvoření kladných **iontů**.
- Ionty při dopadu na katodu uvolňují **další elektrony**, v počtu dostatečném pro vytvoření dalších elektronových lavin a udržení samostatného výboje. Při dosažení **zápalného napětí U_z** už není potřeba externího ionizátoru.
- **Proud v elektrických polích zpravidla vedou elektrony**, neboť mají v porovnání s ionty menší hmotnost a v elektrickém poli větší pohyblivost (toto je ještě více platné v AC než v DC).

Samostatný výboj - Townsendův výboj



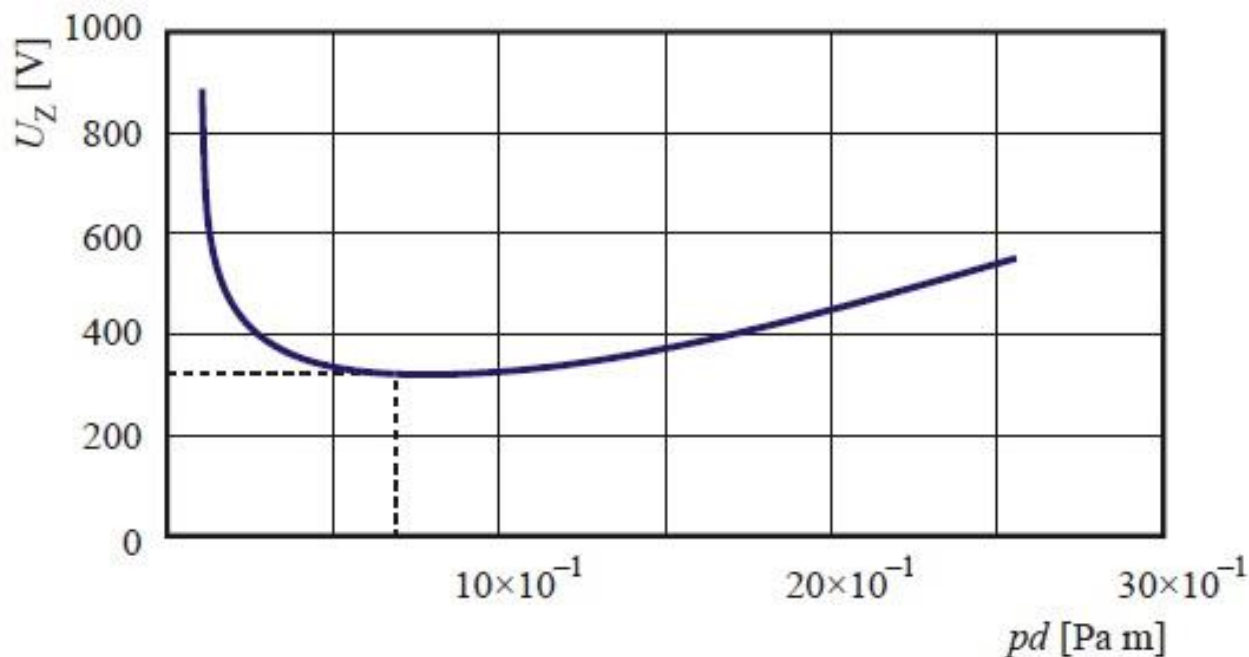
- Při proudech okolo $10^{-10} - 10^{-5}$ A jsou kinetické energie elektronů relativně malé a srážky **nejsou doprovázeny emisí viditelného záření**. Proto tyto výboje nazýváme **jako temný Townsendův výboj**.
- Výboje jsou charakteristické pro svoje zvukové projevy (syčení, šumění a prskání). Tyto projevy nejsou příliš hlasité (proto se tento typ výboje někdy označuje jako **tichý výboj**)
- Tento typ výbojů je charakteristický pro silná elektrická pole v kombinaci s nízkým pracovním tlakem.

Townsendova teorie samostatného výboje (podmínky):

- a) Urychlení volných elektronů na energii, kdy jsou schopny vytvářet kladné ionty v dostatečném množství.
- b) Urychlení iontů v blízkosti katody na energii dostatečné k bombardování katody a vyražení elektronů z kovu elektrody. (sekundární emise)

Opakování - Paschenův zákon

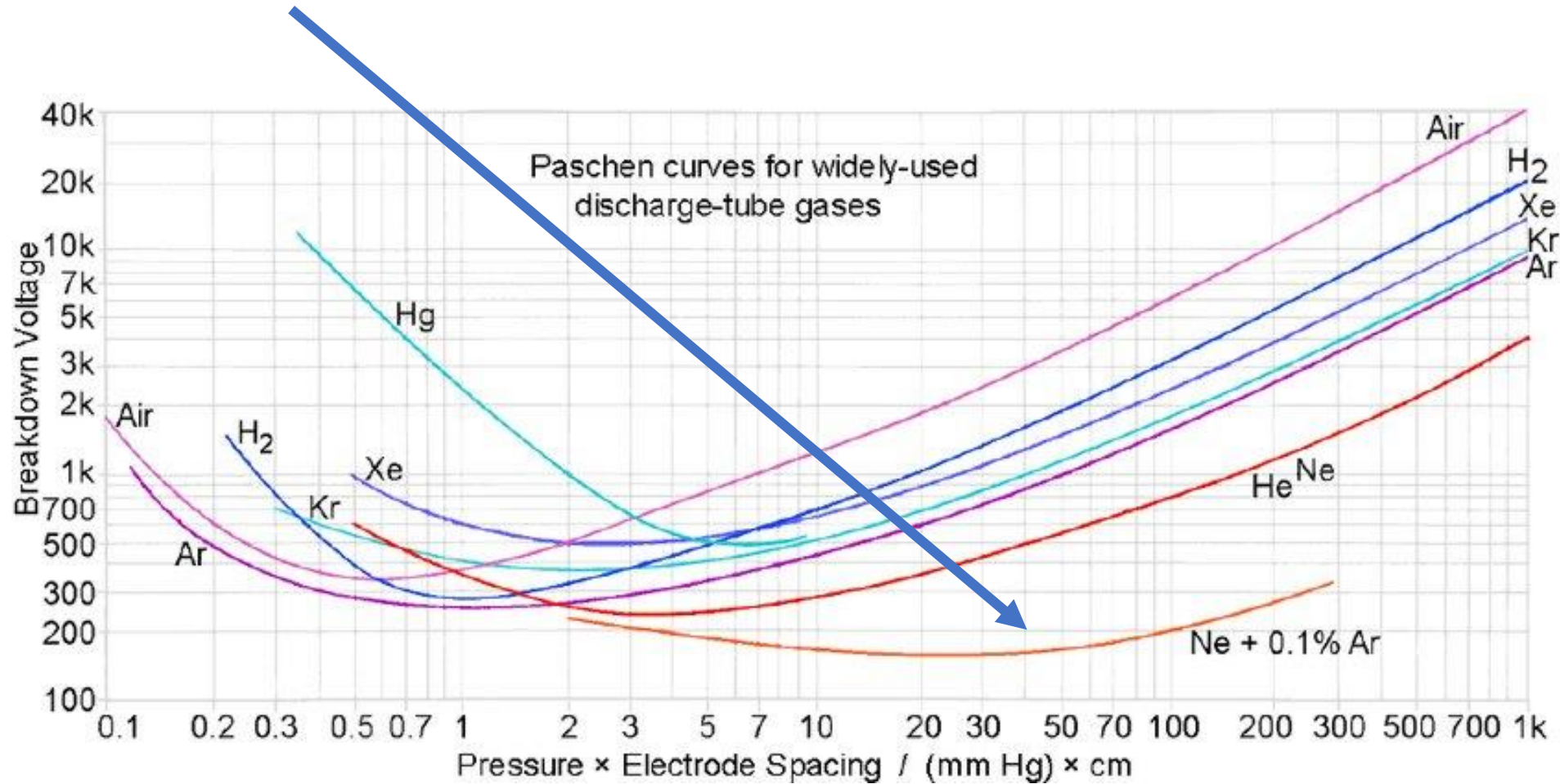
Paschenův zákon - zápalné napětí U_z je pro daný plyn funkcí součinu redukovaného tlaku a vzdáleností elektrod.



- Při atmosférickém tlaku a vzdálenosti elektrod $d = 1$ mm je zápalné napětí asi 1 kV.
- Nejmenší průbojové napětí ve vzduchu je cca 300 V, což odpovídá tlaku 133 Pa a vzdálenosti elektrod $d = 1$ cm. (viz obrázek)
- Zápalné napětí v zářivkách je asi 120 V, při tlaku 400 Pa a vzdálenosti 120 cm. Složení pracovního plynu je argon + páry rtuti. Zde se ale projevuje i **Penningův jev** – zápalné napětí je v této směsi nižší než v obou samostatných plynech.

Penningův jev

Penningův jev – zápalné napětí je v této směsi nižší než v obou samostatných plynech

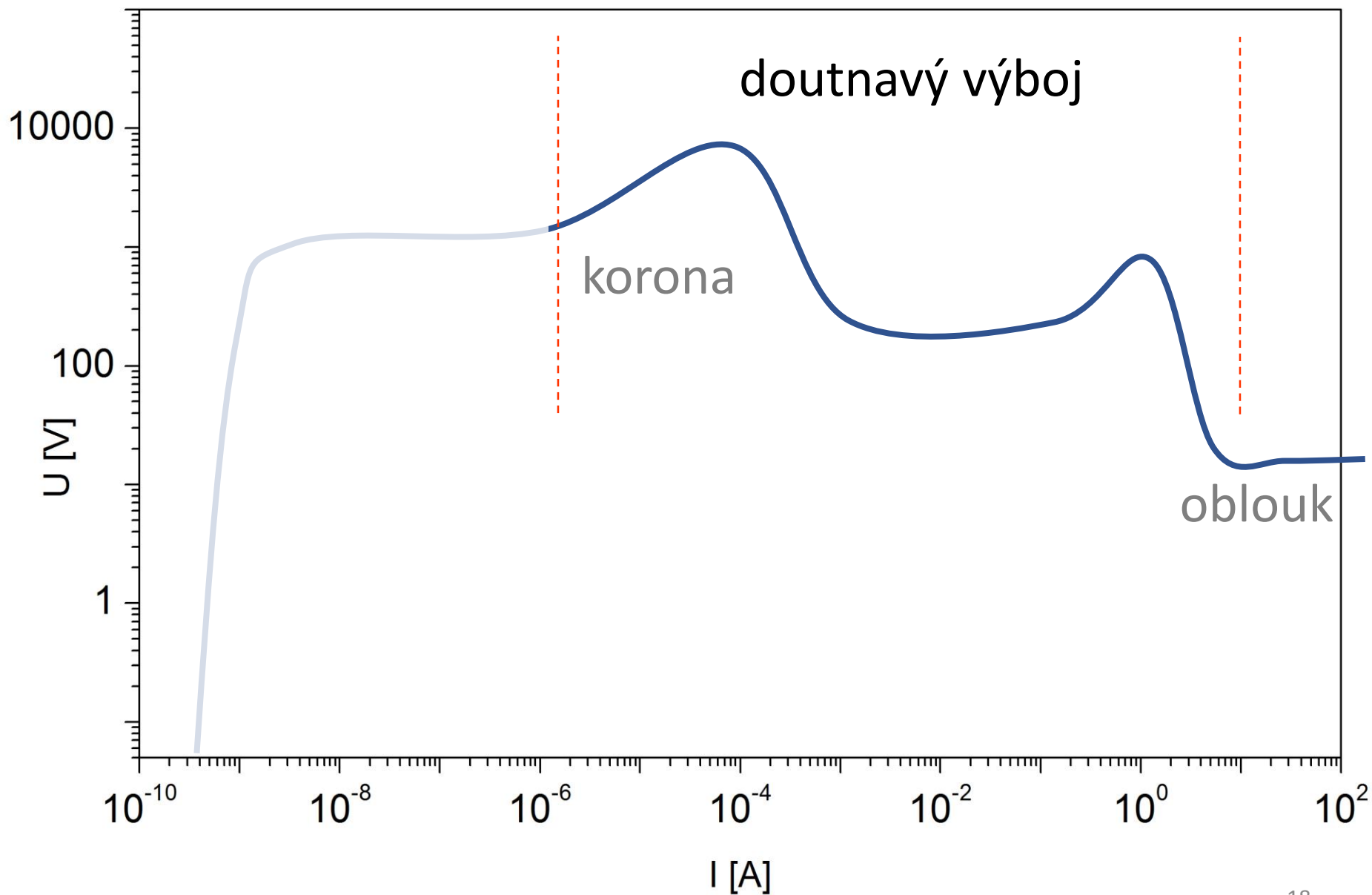


Samostatné výboje

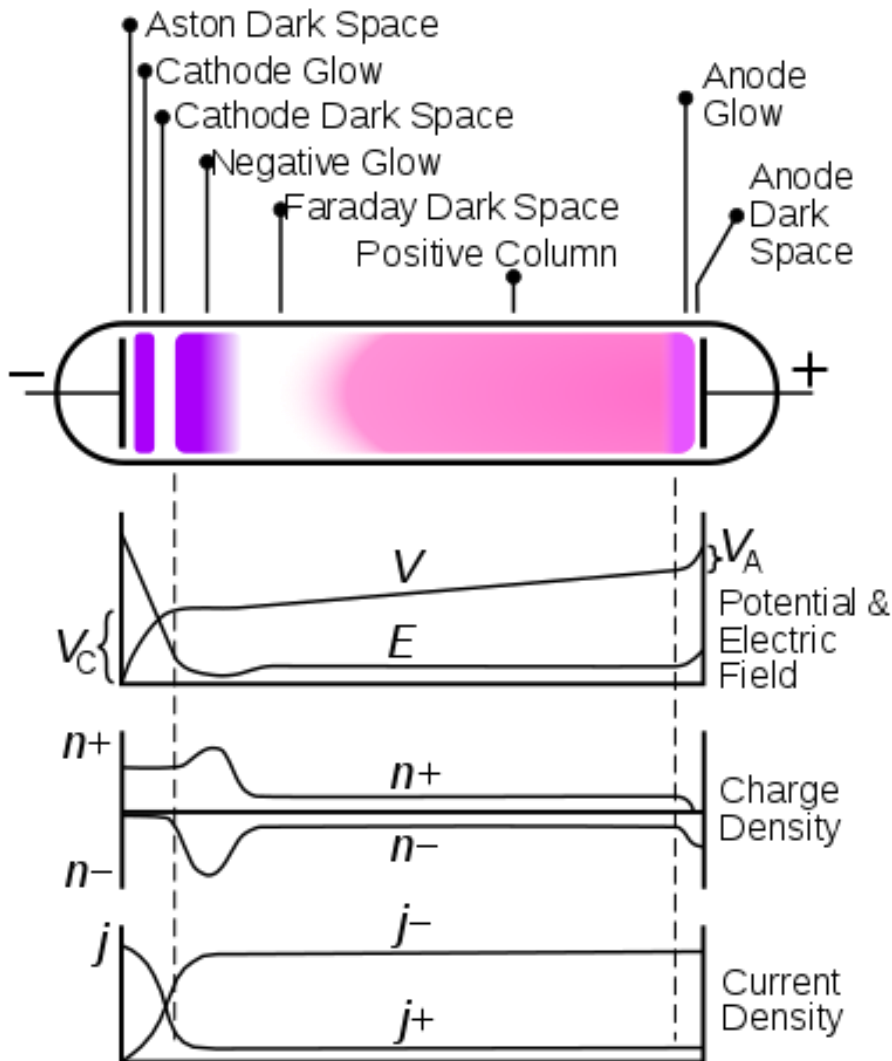
Na samostatnost výboje tedy mají vliv rozhodující faktory:

- Velikost napětí přivedeného na elektrody. (**U_z – zápalné napětí**)
- Pracovní tlak a složení pracovního plynu. (**Paschenova křivka, Pennigovská směs**)
- Konstrukce reaktoru, vzdálenost mezi elektrodami a tvar a materiál elektrod. (**Paschenova křivka**)

Samostatné výboje: Evoluce výboje s rostoucím napětím – za nízkého tlaku



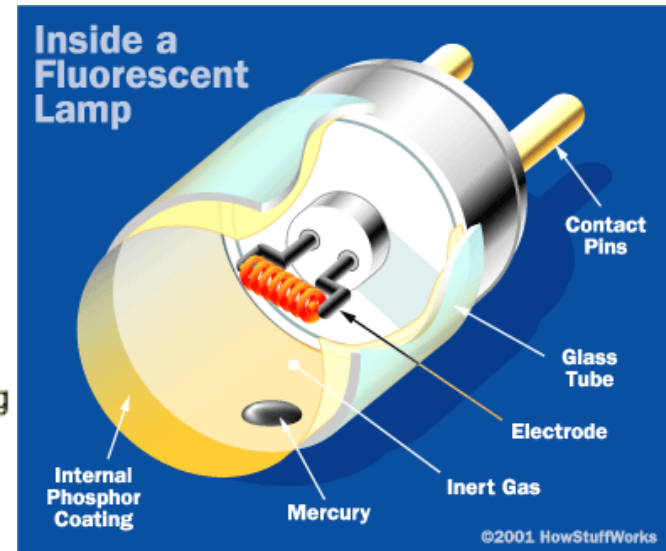
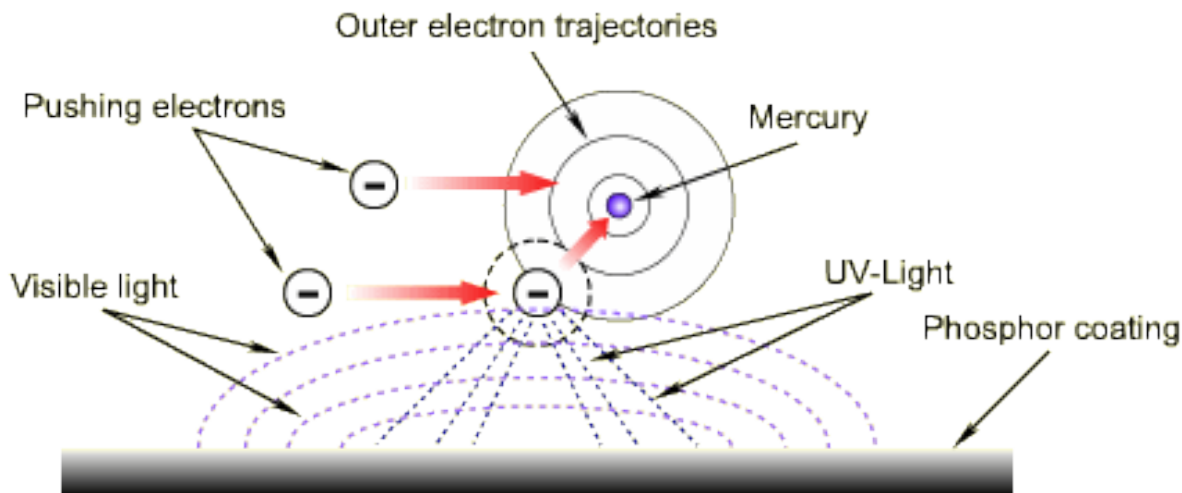
Doutnavý výboj



- Glow discharge (ENG), Tlecí výboj (SK)
- Doutnavý výboj se realizuje většinou při nízkých tlacích řádově 1-100 Pa při zápalném napětí řádově 100 V.
- Pozorujeme v něm několik zářivých oblastí:
 - Katodové doutnavé světlo – dochází k ionizaci a záření iontů
 - Záporné doutnavé světlo - dochází k ionizaci a srážkám elektronů
 - **Kladný sloupec anodového světla** – svítí převážně neutrální atomy molekuly a nabité částice difundují ke stěně, kde rekombinují.
 - Anodové doutnavé světlo – ionizace způsobená nárůstem potenciálu před anodou.

Doutnavý výboj

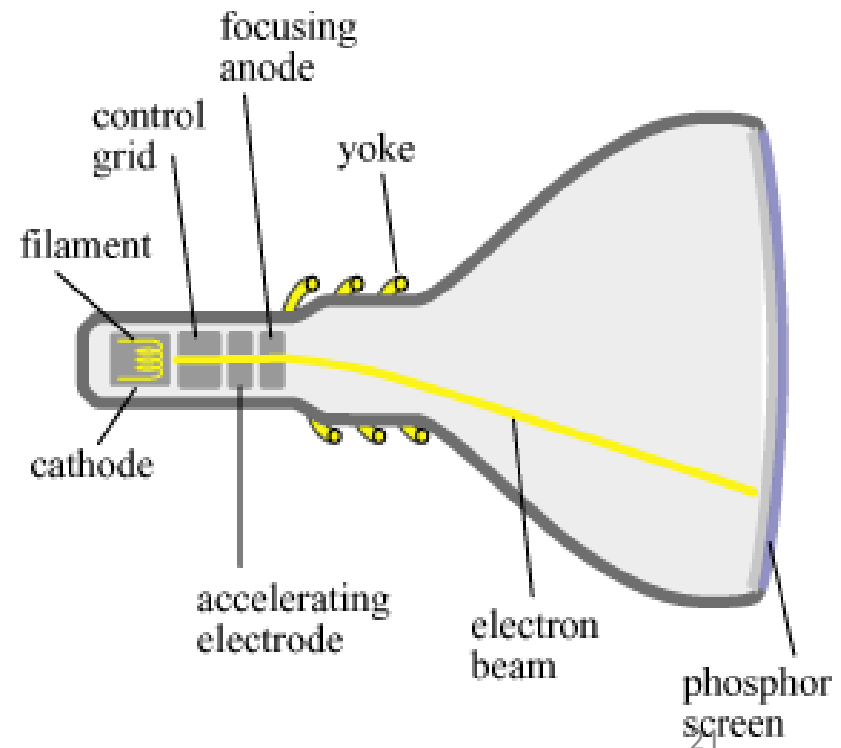
- Z praktického hlediska (dnešek) je nejdůležitější **kladný sloupec anodového světla**, protože dokáže vyplnit celý prostor výbojové trubice. (viz. neonové trubice, zářivky).



Fluorescenční lampy (**CCFL, zářivky**) využívají difúze iontů na povrch trubice, kde nastává fluorescence luminoforu. V principu se využívá ještě radiace par rtuti v UV oblasti a její převedení na viditelné světlo pomocí luminoforu.

Doutnavý výboj

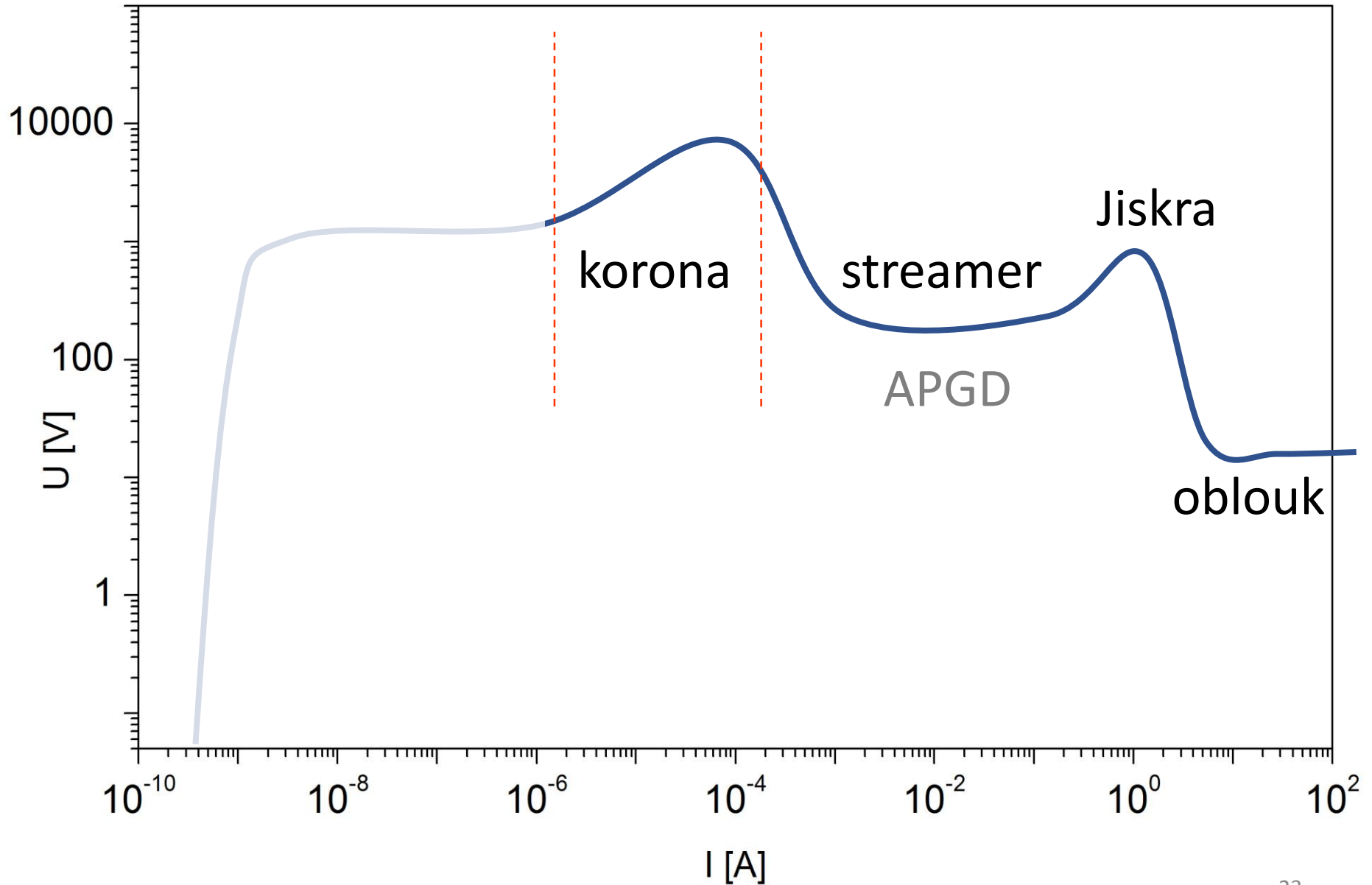
- Z praktického hlediska (v minulosti) bylo důležité i využití **katodového záření** – tj. toku elektronů emitovaných z katody ve vyčerpané výbojové trubici. (Tlaky méně jak 2 Pa a při napětí cca 10 000 V). Při tomto výboji nepozorujeme sice žádné světlo, ale v místě dopadu elektronového svazku na stěnu reaktoru se objevuje nazelenalé světélkování skla.
- **Využití** – konstrukce CRT obrazovek a prvních televizí. (elektronový paprsek se dá vychylovat pomocí magnetického pole)



Doutnavý výboj

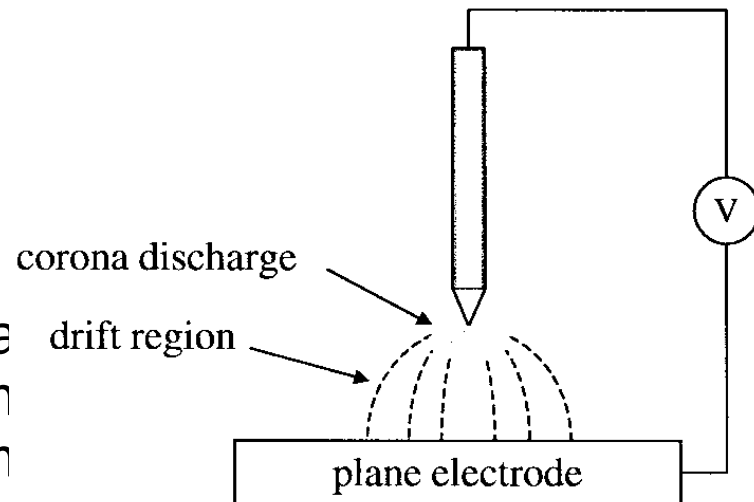
- V praxi je doutnavý výboj poměrně nenáročný na přiložené napětí a i proudy které jím protékají jsou poměrně nízké. V případě výbojové trubice se vytváří neizotermické plazma, které můžeme poměrně efektivně převést na světlo - tzn. úspornost CFL trubic oproti klasickým žárovkám je asi 3-4x větší.
- Vyšší proudová hustota vede k nadměrnému zahřívání katody a erozi anody (dochází k termoemisi a masivnímu odtrhávání iontů z anody – materiál na anodě ubývá. S rostoucím obsahem vodivého materiálu (ionty kovu) v pracovním plynu roste i elektrická vodivost plazmatu, tj. roste elektrický proud a snižuje se napětí. Zároveň roste i teplota plazmatu a plazma se stává izotermní. Doutnavý výboj přechází do svého finálního stadia – **Obloukový výboj**.

Samostatné výboje: Evoluce výboje s rostoucím napětím – za atmosférického tlaku



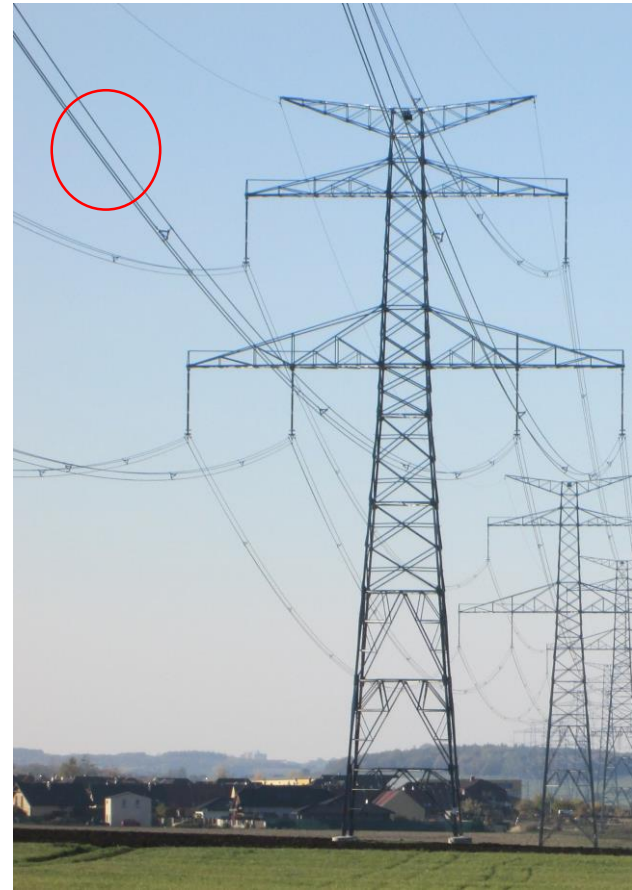
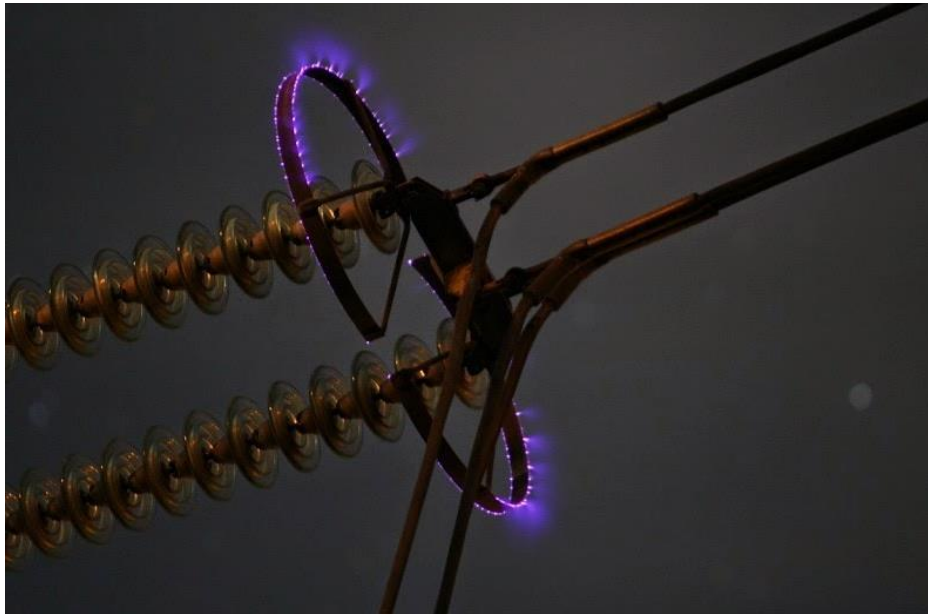
Korona

- Většinou se objevuje až při vyšších tlacích ($p > 1$ kPa).
- Charakteristické pro koronu je vysoké napětí a „relativně“ malé proudy.
- Lokální průraz – korona se objevuje na ostrých hranách a nezaizolovaných vodičích. (v silně nehomogenním elektrickém poli)
- Nemusí být přítomna druhá elektroda - korona se uzemňuje do okolí (do vzduchu).
- Nemá příliš výrazné světelné projevy, ale zvukově se projevuje syčením a prskáním.



Korona - výskyt

- S korunou se nejčastěji setkáte u vedení vysokého napětí, kde „hoří“ na ostrých hranách do prostoru. Tímto způsobuje ve vedení velké ztráty (cca 0,1-1 kW/km). Korona hoří i na tenkých, nezaizolovaných vodičích.



Z tohoto důvodu se na dálkovém vedení (220 kV) vodiče skládají do trojice – zvyšuje se tím poloměr křivosti a omezuje korona.

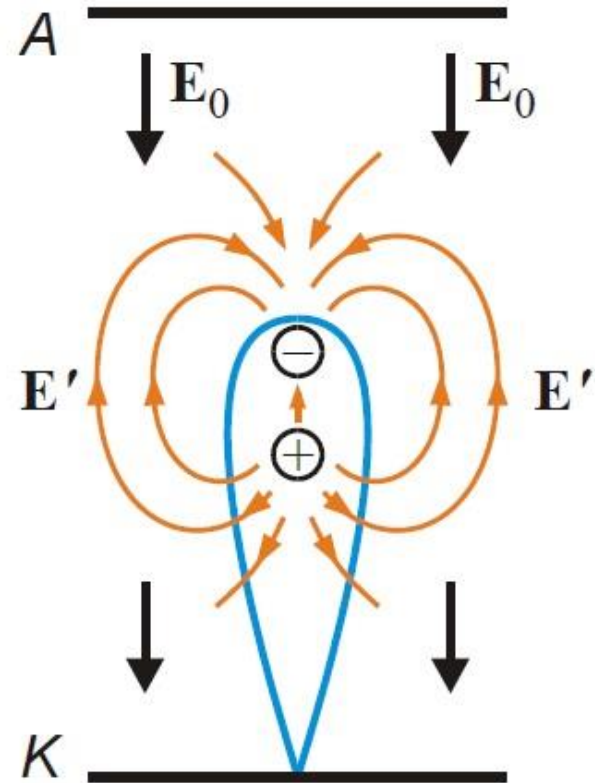
Streamer – mechanismus generace výboje za vysokého tlaku

- Townsendova teorie je aplikovatelná jen při nízkých tlacích ($< 200 \text{ Pa}$), při atmosférických tlacích se mění mechanismus průběhu výboje.
 - Za atmosférického tlaku není možné zapálit difúzní objemový výboj (doutnavý výboj). Výboj hoří v tenkém kanálu a po krátkou dobu (např. jiskra).
 - Neplatí Paschenův zákon. (zápalné napětí při vzdálenějších elektrodách může být nižší)
 - V porovnání s doutnavým výbojem přenáší tento typ výboje velký proud.
 - Výboje se projevují silnými světelnými a akustickými projevy (jiskra, blesk).
 - Výboje se projevují většinou několika fázemi: elektronová lavina, streamer, (lider), zpětná vlna, vytvoření plazmového kanálu a rozpad.
 - Tyto výboje lze všeobecně popsat pomocí **Teorie zapálení výboje pomocí streamerů.**

Zapálení výboje pomocí streamerů

- V prvním kroku se uplatňuje tzv. **elektronová lavina**. Souvisí s nárůstem volných elektronů a rozvojem elektron-fotonových lavin.

Princip: Vnější elektrické pole je dostatečně silné pro urychlení elektronů a vytvoření iontů při srážkách s neutrálními částicemi. Jsou splněny podmínky pro vytvoření elektronové laviny (elektron je schopen vytvořit větší počet iontů) a díky vysokému el. poli se do čela separují mobilnější elektrony. Proto je čelo laviny záporně nabitě oproti kladnému zbytku tvořenému „nepohyblivými“ ionty. Zároveň lavina získává dipólový charakter, který formuje nové elektrické pole okolo vzniknutého útvaru a „pomáhá“ rozšiřování a migraci čela laviny ku anodě. Při atmosférickém tlaku na vzduchu má tato lavina průměr cca 1 mm a délku až 1 cm.

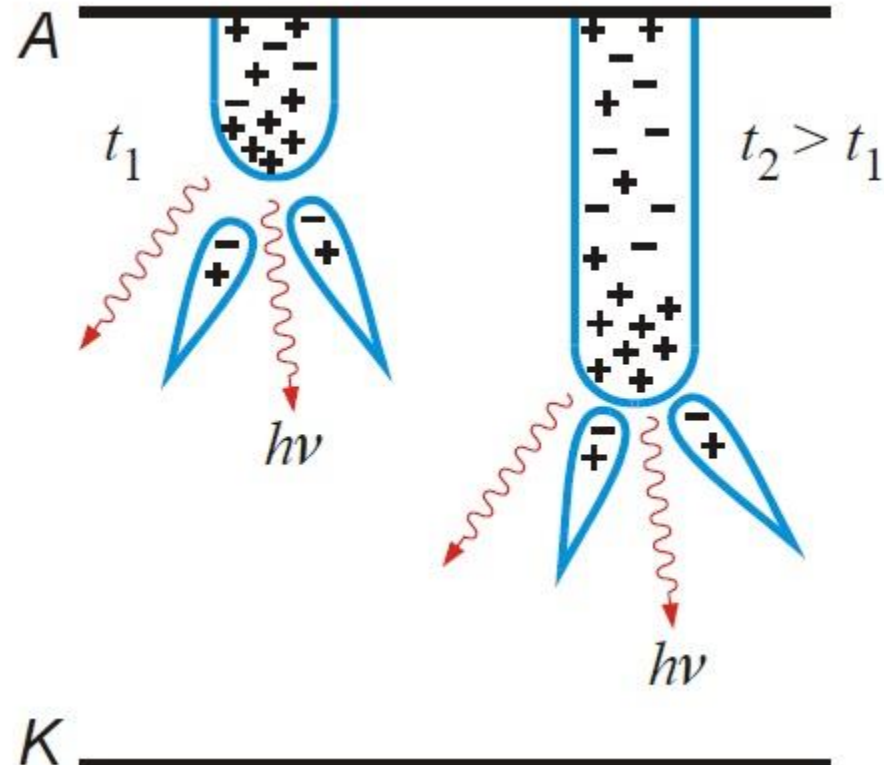


Zapálení výboje pomocí streamerů

- Ve skutečnosti je el. lavina velmi řídká (přibližně 1 srážka elektronů ze sta vytvoří nový iont) a studená (jen 1 částice z milionu v lavině je ionizovaná). Proto tuto fázi ještě nemůžeme považovat za plnohodnotné plazma.

Elektronová lavina má několik možností dalšího vývoje:

- Čelo laviny se vlivem odpudivých sil elektronů příliš rozšíří a lavina vyhasne.
- Připojí se k jiné lavině.
- Nebo se po dopadu na anodu začne zbytek laviny protahovat k dalším lavinám a pomocí UV záření (elektron-fotonové laviny) se vytvoří tenký vodivostní kanál – **streamer**.

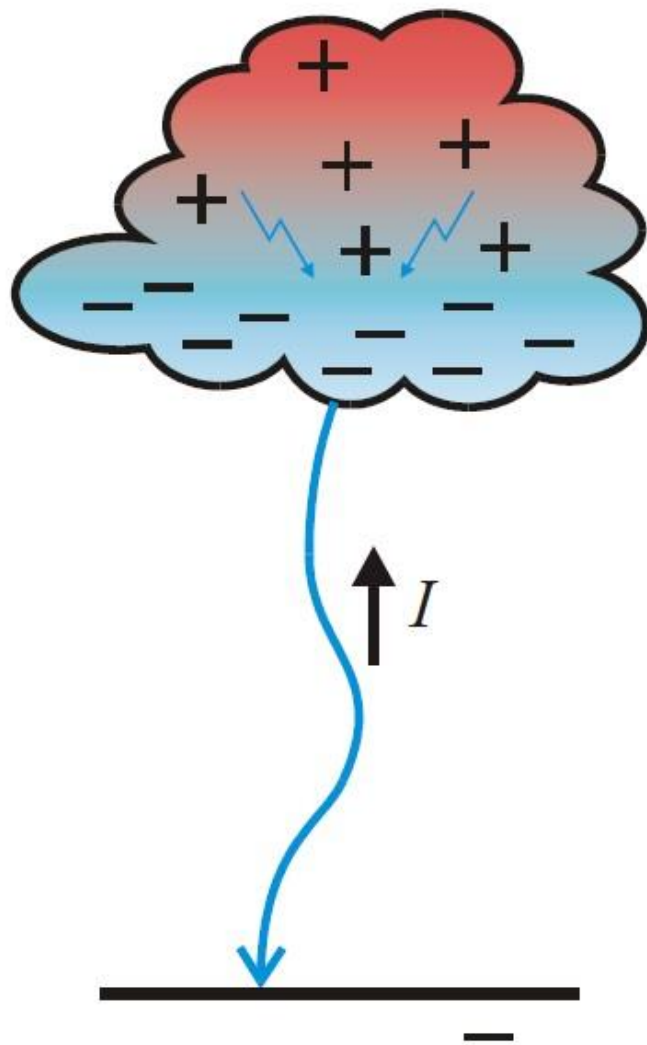


Zapálení výboje pomocí streamerů

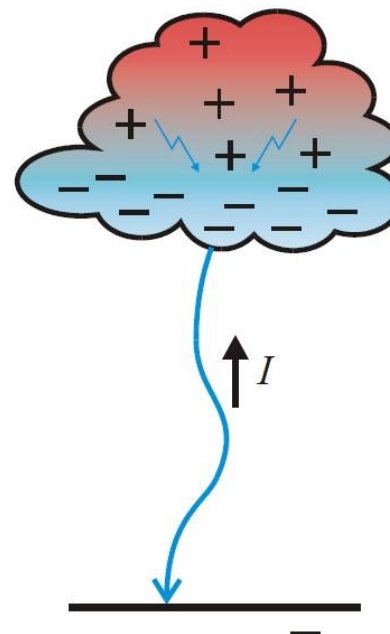
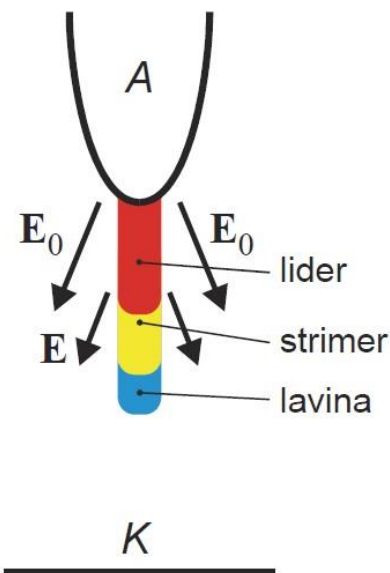
1. Vytvořený streamer má podobné rozměry jako původní elektronová lavina. Díky foto-ionizaci se však šíří velmi rychle ku katodě. V této chvíli je ještě chladný (ionty mají ještě teplotu okolí) a nemá příliš vysokou elektrickou vodivost (můžeme ale už hovořit o neizotermickém plazmatu).
2. V okamžiku kdy doputuje na katodu, katoda se zahřeje (+UV z čela laviny) a je možné do výboje přidat výtěžek elektronů vytržených z katody. Výboj propojí obě elektrody a vytvoří se **vodivostní kanál**.
3. Díky velkému množství elektronů je nyní možné přenést velké množství proudu, vzniká takzvaná **zpětná vlna**, která migruje velkou rychlostí zpět ku anodě. Vysoké proudové hustoty zahřejí okolní plyn, který začne zářit a prudce se rozpínat (rychlost rozpínání překonává rychlost zvuku) – navenek se to projevuje silným zábleskem a ostrým zvukem (např. jiskra, blesk).

Blesk

Na Zemi je elektrické pole orientováno tak, že povrch Země má záporný náboj a ionosféra má kladný náboj. V ovzduší putují záporné náboje ve formě iontů vzhůru (v naše případě je nosičem molekula vody díky svému dipólovému charakteru). Ve výšce je nižší teplota, což vede ke kondenzaci vody a vytvoření malých kapiček. Vyrovnávají se zde dvě síly: 1) **gravitační** – stahuje kapičky vody dolů a 2) **elektrostatická**, kde vyšší partie mraku, které jsou kladně nabitě, elektrostaticky přitahují záporně nabitě kapičky vody. V mraku se tedy náboj rozloží do dvou vrstev. V okamžiku, kdy spodní vrstva, která je záporně nabitá svým potenciálem přesáhne potenciál na povrchu země, může dojít k přenesení náboje – **blesku**.



Blesk -mechanismus



1. Nejdříve se směrem k Zemi začne šířit streamer. Jeho maximální délka je cca 50 m. Pak se kanál rozšíří na průměr 1 cm a z mraku se přenesou větší množství náboje – vytvoří se **lider** (je jasnější a pomáhá přenášet proud), expanse streameru může pokračovat.
2. Mechanismem streamer/lider doputuje vodivý kanál až na povrch Země. V okamžiku kontaktu se z povrchu přenesou obrovské množství energie zpět k mraku – **Zpětná vlna**. (projeví se silným zábleskem světla a zvukem –blesk+hrom).
3. Uvnitř mraku se vykompenzují rozdíly potenciálu (blesky v mracích) a ve zbytku iontového kanálu může ještě 2-3x dojít výboji než se kanál zhroutí.
https://www.youtube.com/watch?v=IrrGEXVe_NQ