

VEDENÍ ELEKTRICKÉHO PROUDU V PLYNECH A VE VAKUU



Gymnasium F. X. Šaldy
Liberec
Honsoft 2021

FYSIKA
pro 2. ročník

SEMINÁŘ
z fyziky

Obsah

ÚVOD

ELEKTRICKÝ VÝBOJ

Voltampérová charakteristika plynu 8

VÝBOJ ZA NORMÁLNÍHO TLAKU

Tichý výboj 9
 Jiskrový výboj 9
 Obloukový výboj 10

VÝBOJ ZA SNÍŽENÉHO TLAKU

Výbojky 13
 Zářivka 14
 Neonka 15
 Doutnavka 15

KATODOVÉ A ANODOVÉ ZÁŘENÍ

Katodové záření 16
 Anodové (kanálové) záření 17
 Shrnutí 17

VEDENÍ ELEKTRICKÉHO PROUDU VE VAKUU

Elektronky 18

MALÝ SLOVNÍK POJMŮ

LITERATURA

Použitá literatura 21
 Zdroje číslovaných obrázků 21
 Zdroje ostatních obrázků 21





Úvod



Elektrina a magnetismus

Studijní materiály
Gymnasia F. X. Šaldy

KE STUDIJNÍMU TEXTU PATŘÍ

sbírka úloh
rozcestník odkazů na animace
a videa

Elektrický proud byl nejprve studován v pevných a v kapalných vodičích. Roku 1749 Benjamin Franklin sepsal 12 důvodů, které svědčí pro to, že blesk a elektrická jiskra mají touž podstatu. — Další rozvoj zkoumání vedení elektrického proudu v plynech byl podmíněn konstrukcí zařízení, jimiž bylo možno ze skleněných trubic čerpat vzduch a dosahovat v nich nízkých tlaků. Zejména konec 19. století je pak ve znamení řady experimentů s takovými trubicemi – je objeven fotoelektrický jev, rentgenové záření, elektron.

Do tohoto období časově spadá i vynález českého technika Františka Křižíka, vynález uváděný obvykle i v (českých) učebnicích dějepisu: vylepšení regulátoru obloukové lampy.

Ve 20. století se „učivo o výbojích“ stalo součástí učebnic fyziky různých typů škol.

Vyučovací hodiny je lépe věnovat spíše řešení problémů než obkreslování obrázků. Proto jsou zde takovéto obrázky a základní poznámky shrnuty; studenti/studentky budou moci méně psát a více přemýšlet. Učební materiál tak slouží jako pomocný, faktografický text k výuce fyziky v gymnasiu. Problémy, motivační otázky a příklady nejsou součástí tohoto textu; v hodinách jsou zadávány jinak. Ve vyučovacích hodinách je probírané učivo také doplněno množstvím experimentů.

Faktografický text nepřináší (ostatně ani přinášet nemůže) pranic originálního. Jde o kompilaci několika pramenů uzpůsobenou studentům gymnasia; seznam těchto pramenů je připojen v závěru. Tam je také přehled zdrojů použitých ilustrací.

První verze tohoto textu byla napsána v roce 2006. Na jaře 2021, během „II. dějství“ výuky za časů koronaviru, byl text významně aktualizován; pojednání o zařízeních, jež ztratila praktický význam, byla zkrácena nebo zcela vypuštěna. (Ovšem i výpravy „na smetiště fyzikálních dějin“ mohou mít dobrý smysl.)

Text je diferencován; hvězdičky (*) jsou označeny části textu, které není nutno podrobně studovat v „základním gymnasiálním kursu fyziky“; využijí je spíše seminaristé. Nově zařazené exkursy v postranních pruzích doplňují výklad fotografiemi konkrétních zařízení či připojují stručné historické poznámky. Prosím čtenáře, aby upozornili na případně nalezené chyby.

V Liberci 18. května 2021

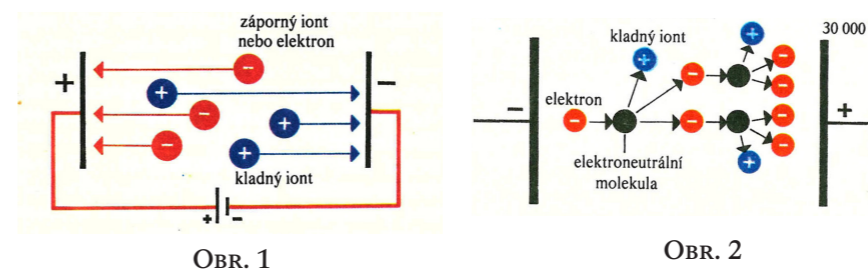
J. V.

NA PŘEDCHOZÍ DVOJSTRÁNCE ZLEVA

oblouková pec
obloukový výboj
koróna

Elektrický výboj

Plyny jsou za normálních podmínek velmi dobrými izolanty. Aby byl plyn vodivý, musí obsahovat volné částice s elektrickým nábojem a být ve vnějším elektrickém poli. Vodivými se plyny stanou **ionizací**: dodáním energie se některé atomy plynu rozštěpí na volný elektron a kation. Uvolněné elektrony se mohou připojovat k neutrálním atomům a vytvářet tak anionty. Elektrický proud v plynech tedy tvoří kladné i záporné ionty a volné elektrony. Energie potřebná k rozštěpení atomu se nazývá **ionizační energie** – udává se obvykle v elektronvoltech.



Současně s ionizací probíhá v plynu i opačný děj – **rekombinace**: Nesouhlasně nabitě částice se přitahují a vytvářejí opět neutrální atomy. Pokud převyšuje ionizace rekombinaci, zvyšuje se počet ionizovaných molekul a tedy i vodivost; pokud je tomu opačně, tak se vodivost zmenšuje. Pokud se ionizovaný plyn nachází v elektrickém poli mezi dvěma elektrodami, vznikne elektrický proud (OBR. 1) jako uspořádaný pohyb kationtů k záporně nabitě katodě a aniontů či elektronů ke kladně nabitě anodě (ionty, které dopadnou na elektrody, ztrácejí svůj náboj a mění se v neutrální atomy). Děj, kdy elektrický proud prochází plynem, se nazývá **výboj**.

Rozdělení výbojů:

a) **nesamostatný výboj** – vznik iontů a elektronů je způsoben cizím, vnějším zdrojem – **ionizátorem**; elektrický proud prochází pouze za přítomnosti tohoto ionizátoru; přestane-li ionizátor působit, převládne rekombinace nad ionizací a výboj ustává;

b) **samostatný výboj** – výboj sám udržuje potřebný počet nositelů náboje, je tedy nezávislý na vnějším ionizátoru; i pokud přestane ionizátor působit, vznikají ionty samovolně; převládá ionizace nárazem, většinou je doprovázena světelnými a zvukovými efekty.

V případě a) je ionizace plynu vyvolávána **ionizátory**:

ionizace zářením – ionizátorem jsou různé druhy záření (UV záření, rentgenové záření, záření γ),

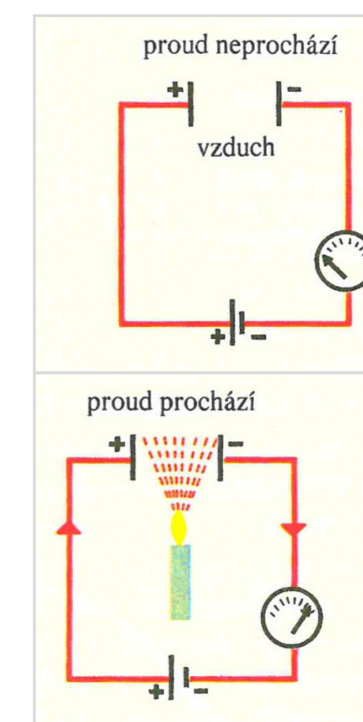
tepelná ionizace – příčinou ionizace je zahřátí plynu na vysokou teplotu (plamenem, topnou spirálou apod.).

V případě b) probíhá:

ionizace nárazem – ionty nebo elektrony urychlené elektrickým polem narážejí na dosud neutrální atomy, ty jsou rozděleny na nabitě částice, začíná lavinová ionizace (viz OBR. 2). Vysoce ionizovaný plyn při samostatném výboji se nazývá **plasma**. Obsahuje přibližně stejný počet nábojů kladných a záporných, takže je navenek elektricky neutrální. Plasma je např. přítomné v nitru a v atmosféře hvězd, ve sluneční koróně apod.

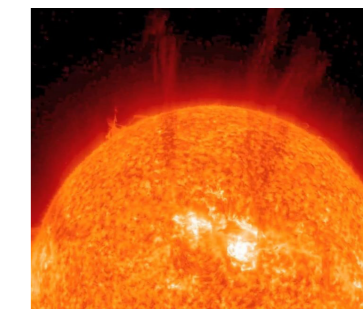
Elektronvolt je fyzikální jednotka energie užívaná spolu s jednotkami SI, odpovídá kinetické energii, kterou získá elektron urychlený ve vakuu napětím jednoho voltu. Protože $E = QU$, platí $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Příklad: Ionizační energie pro atom vodíku je 13,5 eV, pro atom kyslíku 15,6 eV.



Tepelná ionizace

Svíčka je zdrojem tepla; teplo způsobí ionizaci plynu, obvodem začne procházet elektrický proud.



Plasma

Vysoce ionizovaný plyn tvoří hmotu hvězd.

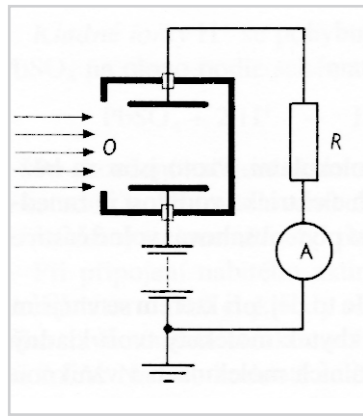


Schéma ionizační komory

Velikost U_z závisí na tlaku plynu a na druhu plynu. Se snižujícím se tlakem roste střední volná dráha částic. Na delší dráze získají ionty a elektrony kinetickou energii potřebnou k ionizaci molekul i při menším napětí. Proto je za nižšího tlaku zápalné napětí menší.



John Sealy Townsend

Irsko-britský fyzik, objevitel zákonů ionizace plynů.



Blesk

Příklad jiskrového výboje.

VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA PLYNU

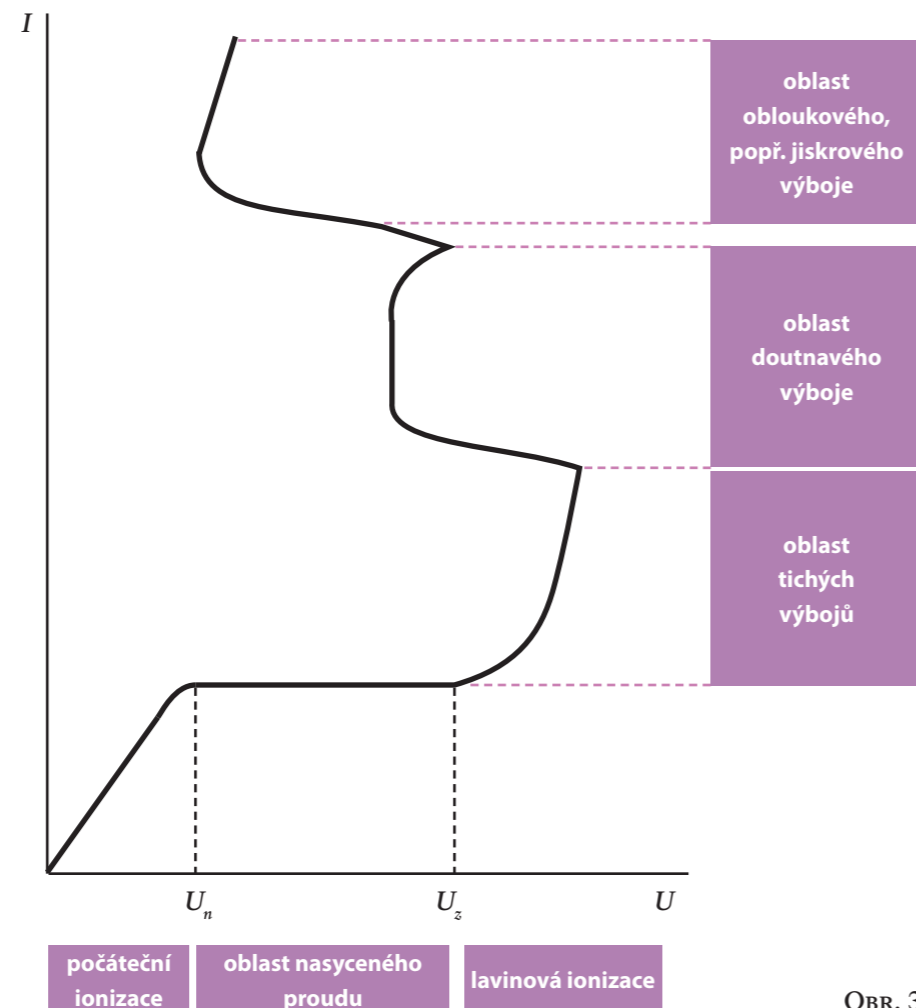
Elektrické vlastnosti ionizovaného plynu lze měřit v ionizační komoře (v principu jde o deskový kondenzátor; do prostoru mezi jeho deskami vniká ionizační záření; v závislosti na napětí mezi deskami se měří proud procházející plynem). Výsledná závislost je v OBR. 3.

1. Pokud je $U < U_n$, zanikne většina iontů rekombinací dříve, než dopadnou na elektrody. Za těchto podmínek je počet iontů, které předají náboj elektrodám (tj. těch, které tvoří elektrický proud), přímo úměrný napětí; platí Ohmův zákon. Výboj je nesamostatný.

2. Při napětí $U_z > U \geq U_n$ se všechny ionty a elektrony podílejí na vedení proudu (mají takovou rychlost, že nestačí rekombinovat) a proud se s rostoucím napětím již nezvyšuje (**nasycený proud**). Pro nasycený proud Ohmův zákon neplatí.

3. Při napětí $U \geq U_z$ (napětí U_z se nazývá **zápalné napětí**) nastane ionizace nárazem. Ionty a elektrony jsou urychleny elektrickým polem natolik, že při nárazu na neutrální molekulu ji ionizují. Počet ionizovaných molekul v plynu lavinovitě narůstá (**lavinová ionizace**), a proto roste velmi rychle i proud. Plyn vede proud bez přítomnosti ionizátoru. Vzniká **tichý výboj** (neboli: **Townsendův výboj**), který se projevuje světélkováním plynu a slabým šelestem na elektrodách.

V rozmezí tlaků 10 Pa – jednotky kPa hoří v trubici doutnavý výboj. Při zvýšení tlaku přechází doutnavý výboj ve **výboj obloukový**. Pokud není zdroj vhodně dimenzovaný, doutnavý výboj přejde v jiskru (**jiskrový výboj**), která vzápětí zhasne.



OBR. 3

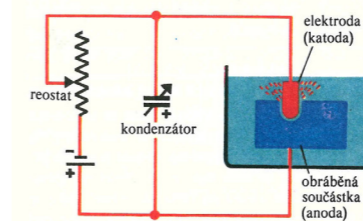
Výboj za normálního tlaku

TICHÝ VÝBOJ

V blízkosti nabitých vodičů je zvláště velká intenzita elektrického pole tam, kde má povrchová vrstva malý poloměr křivosti, tedy zvláště u hrotů. Veliká intenzita elektrického pole může vést k tomu, že v okolním plynu nastane ionizace nárazem, a tím vzniká výboj. Tento tichý výboj má ve vzduchu červeně fialové zabarvení, vzniká např. na stožárech lodí nebo hrotech věží (**Eliášovo světlo**), projevuje se světélkováním a jiskřením. Také na dálkovém vedení elektrického proudu (při napětích nad 100 000 V) nastává tichý výboj, zvaný **koróna**. Koróna způsobuje značné ztráty energie, jsou-li dráty vedení příliš tenké; užívá se proto dutých vodičů, neboť při téměř nulové odporu mají menší křivost.

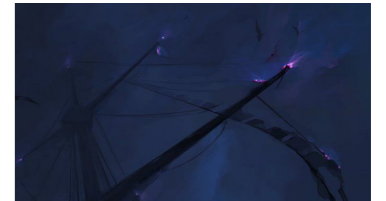
JISKROVÝ VÝBOJ

Výboj jiskrový je přechodem většího náboje při vysokém napětí – jde o elektrický průraz plynu. Nastává, jestliže intenzita pole mezi elektrodami dosáhne hodnot potřebných k lavinové ionizaci, ale zdroj není schopen trvale dodávat elektrický proud. Teplota v jiskře je velmi vysoká; celkový výboj trvá velmi krátkou dobu. Každá jiskra je provázena praskotem, který je způsoben tím, že Joulovo teplo vyvinuté okamžitým silným proudem vyvolá na výbojové dráze mimořádné ohřátí plynu. Takto vzniklý velmi vysoký tlak se vyrovnává v plynu tlakovou vlnou, projevující se jako praskot. Velkolepým příkladem tohoto výboje je **blesk** – jiskrový výboj při napětí až 10^9 V mezi dvěma mraky nebo mrakem a zemí; blesk trvá asi 10^{-3} sekundy a představuje energii asi 100 kWh.



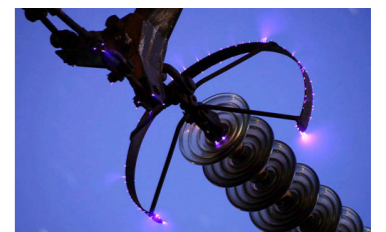
OBR. 4

Technické využití jiskrového výboje: **elektrojiskrové (elektroerozivní) obrábění**. Obráběná součást se vloží do stroje tak, aby byla vodivě spojena s jedním pólem zdroje (OBR. 4), kondenzátor se začne nabíjet, až se napětí na svorkách zdroje a kondenzátoru vyrovná, v tom okamžiku přeskočí z katody na anodu jiskra, jejíž tepelná energie zahřeje obráběnou součástku na teplotu vyšší než je bod tání kovu. V místě dopadu jiskry se přitom vytvoří malý kráter tím, že část kovu se vypaří a část roztaveného kovu odlétne do chladicí kapaliny. Tento proces se neustále velmi rychle opakuje, až je v součástce zhotoven požadovaný otvor.

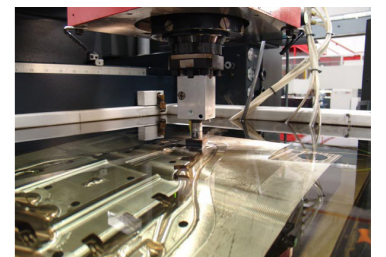


Eliášův oheň

Úkaz na stěžni lodě a při pohledu z letadla. Český název je spojován s biblickým prorokem Eliášem, který „byl vzat do nebe na ohnivém voze s ohnivými koni“ (2 Král 2,11). Anglicky se úkaz nazývá *St. Elmo's fire*. Sv. Elmo, přesněji sv. Erasmus Formský byl křesťanský mučedník, patron námořníků. Právě námořníci tento typ výboje nejdříve a nejčastěji pozorovali.



Koróna na elektrickém vedení



Elektrojiskrové obrábění

Obrábět lze i velmi tvrdé materiály, mezi nástrojem a obrobkem nepůsobí mechanické síly a stroj se snadno řídí počítačem. Nevýhodou je pomalý odběr materiálu a energetická náročnost.



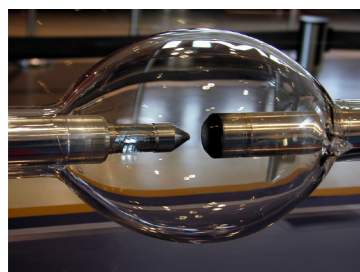
Oblouková lampa

Sestrojena roku 1875, zdokonalena Františkem Křižíkem. Kráter anody má teplotu asi 3500 až 3900 °C a je hlavním zdrojem obloukového světla (asi 85 %), kdežto na katodu připadá jen 10 % a na vlastní oblouk 5 %.



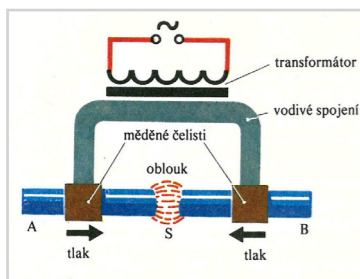
František Křižík

Český elektrotechnik a vynálezce samočinného regulátoru elektrické obloukovky. Stavěl první elektrickou dráhu v Praze a meziměstskou elektrickou dráhu Tábor–Bechyně.



Xenonová lampa

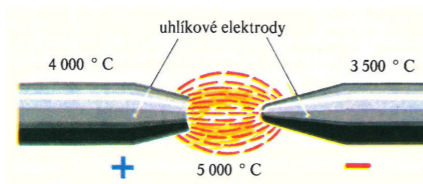
15kW xenonová oblouková lampa užívaná v projektorech IMAX.



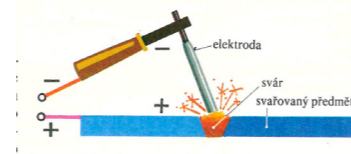
Svařování na tupo

OBLOUKOVÝ VÝBOJ

Elektrický oblouk vznikne po krátkém dotyku obou elektrod, při němž se jejich konce proudem rozžhaví, a po mírném oddálení elektrod od sebe. Mezi oběma elektrodami se vytvoří následkem vysoké teploty (asi 5000 °C) vrstva silně ionizovaného vzduchu (OBR. 5). Elektricky nabitě částice, které se pohybují velmi rychle již vlivem vysoké teploty, jsou ještě dále urychlovány elektrickým polem a svou energii přenášejí při srážkách i na neutrální molekuly. Rozžhavaná katoda emituje elektrony, které s sebou odnášejí i částičky uhlíku, proto se katoda během doby zahrocuje, kdežto anoda se vlivem dopadajících iontů a elektronů prohlubuje a tvoří se na ní kráter.



OBR. 5



OBR. 6

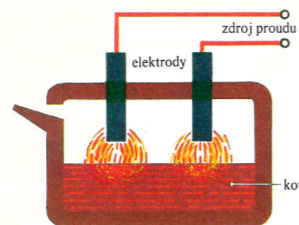
Využití obloukového výboje:

oblouková lampa – historický zdroj světla;

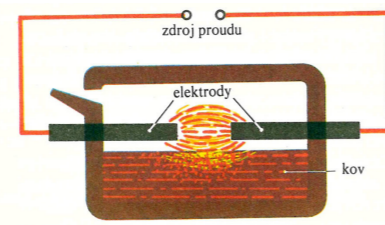
vysokotlaké výbojky – zdroje velmi intenzivního světla používané v promítacích přístrojích (výbojky plněné xenonem), protiletadlových světlomotech, k osvětlení majáků;

obloukové svařování – využívá se tepla, které vzniká účinkem elektrického oblouku mezi kovovou elektrodou a kovovým předmětem; svářeč se nejdříve lehce dotkne zápornou elektrodou (OBR. 6) kladné kovové desky, tím uzavře elektrický obvod – a po oddálení elektrody na vzdálenost několika milimetrů se vytvoří elektrický oblouk, v němž se elektroda a povrch svařovaného kovu taví, přičemž roztavená elektroda odkapává a vytváří svár;

obloukové pece – zařízení k tavení kovů, slitin kovů a jiných těžkovatelných látek, v OBR. 7 je pec s přímým ohřevem (určená především k tavení oceli; má velký výkon, nevýhodou jsou ztráty přepalováním kovu), v OBR. 8 je pec s nepřímým ohřevem (určená k tavení drahých kovů);



OBR. 7



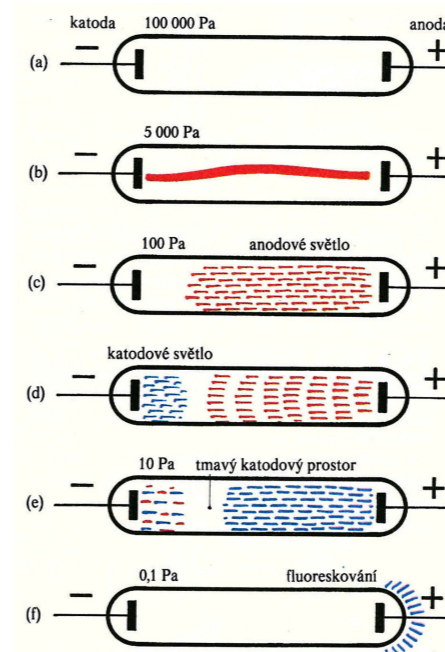
OBR. 8

svařování na tupo* – svařované tyče jsou upnuty do měděných čelistí, které jsou vodivě spojeny silnými měděnými vodiči, tento okruh tvoří jediný sekundární závit transformátoru; připojíme-li primární vinutí transformátoru na střídavé napětí, pak v sekundárním závitě vznikne sice jen malé napětí, ale při spojení ocelových tyčí může obvodem procházet proud, jehož hodnota dosahuje ve velkých svařovacích přístrojích až několika desítek tisíc ampér; když tyče od sebe poněkud oddálíme, vytvoří se mezi nimi elektrický oblouk, jehož tepelnými účinky se počnou konce tyčí tavit; v tomto okamžiku proti sobě tyče stlačíme vysokým tlakem, snížíme proud a během několika sekund je spojení dokončeno.

Výboj za sníženého tlaku

Ve zředěných plynech lze dosáhnout výboje mnohem nižším napětím než za normálního tlaku, neboť ionty mají mnohem větší volnou dráhu a získávají větší kinetickou energii potřebnou k ionizaci nárazem.

Výboj ve zředěném plynu se nazývá **výboj doutnavý**. Můžeme jej sledovat v trubici, z níž čerpáme postupně vzduch (OBR. 9); trubice je připojena ke zdroji vysokého napětí. Za tlaku 5332,9 Pa objeví se v trubici úzký, hadovitě se vlnící červený pruh, který vychází z anody, ale nesáhá až ke katodě. Při dalším zředování vzduchu se barevný pruh rozšiřuje a zkracuje, vzniká tzv. **anodový sloupec**, který je oddělen od katody tmavým **prostorem Faradayovým**, a na katodě se objevuje doutnavé **světlo katodové**. Dalším snižováním tlaku anodový sloupec bledne, stává se vrstevnatým a katodové světlo pokrývá celou katodu. Při tlaku asi 2,67 Pa světelné jevy v trubici mizejí a proti katodě se objeví žlutozelená **fluorescence** stěn trubice.



OBR. 9

Doutnavý výboj plynu je vždy provázen světelným zářením plynu, buzeným srážkami iontů s neutrálními molekulami plynu. Světelné jevy doprovázející doutnavý výboj jsou v OBR. 10; v horní části je fotografie, ve spodní schematický náčrt. **Rozdělení potenciálu*** mezi elektrodami výbojové trubice je naznačeno ve spodní části téhož obrázku.

Volbou délky trubice, tlaku plynu v trubici a volbou elektrického napětí, k němuž je trubice připojena, lze zvýraznit, či naopak potlačit některý ze světelných oborů.

■ Anodové světlo využívají: výbojky, zářivky, kompaktní zářivky, spektrální trubice, neonky.

■ Katodové světlo využívají: doutnavky.

O těchto zdrojích světla pojednají další kapitoly.



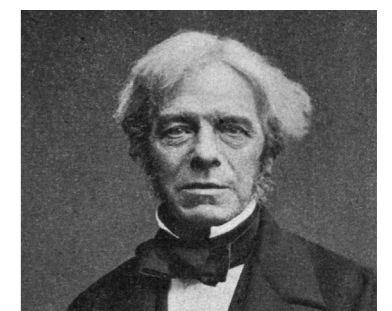
Francis William Aston

Anglický chemik a fyzik, objevitel mnoha izotopů různých prvků. Zkoumal různé typy záření ve výbojových trubiciích.



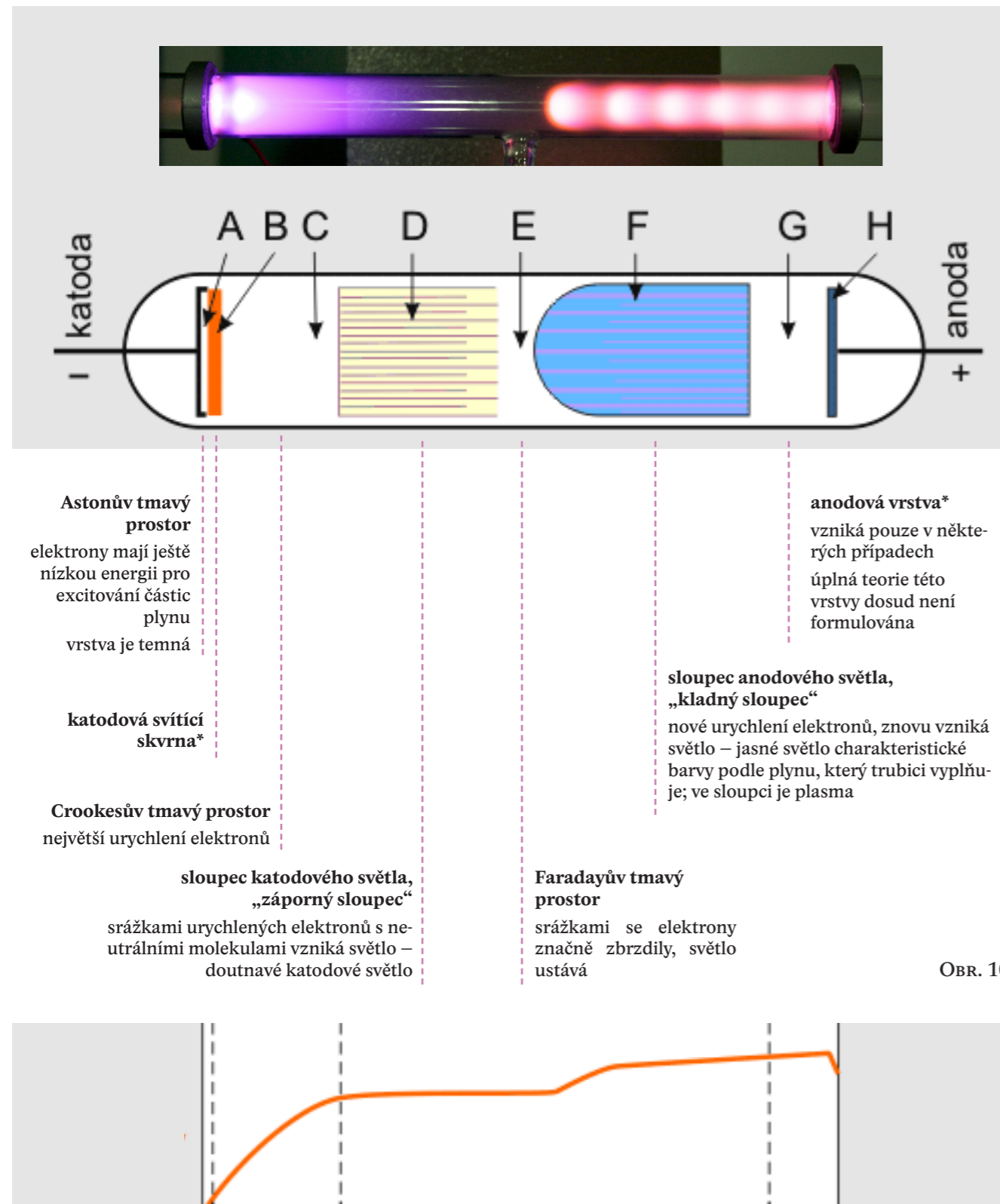
William Crookes

Britský chemik a fyzik. Zabýval se studiem elektrického výboje ve zředěných plynech. Roku 1861 objevil nový chemický prvek – thallium.



Michael Faraday

Anglický fyzik a chemik. Objevitel elektromagnetické indukce a zákonů elektrolýzy. Zavedl řadu dodnes užívaných pojmů, např. siločáry, anoda, katoda, elektroda, ion.



OBR. 10

Rozložení elektrického potenciálu*

Ve výbojové dráze jsou přítomny jednak částice elektricky nabitě – kladné a záporné ionty a volné elektrony, jednak částice elektricky neutrální – atomy a molekuly. Následkem silového působení elektrického pole získávají elektricky nabitě částice zrychlení. Poněvadž elektrony mají menší hmotnost než ionty, získávají na kratší dráze větší zrychlení, a tím i větší rychlost. Následkem toho je v prostoru kolem katody málo elektronů a převládá zde tudíž kladný náboj kationtů, které vlivem velkého spádu napětí v okolí katody získávají značnou hybnost. Jsou v prostoru katodového spádu (Crookesův tmavý prostor) tak urychleny, že při dopadu na katodu mají dostatečnou energii, aby z atomů katody vyrazily elektrony, které působením silného elektrického pole tento prostor rychle opouštějí. Elektrony při určitém zředění dosáhnou v elektrickém poli takové energie, že mohou samy ionizovat další neutrální molekuly plynu. Vzniká lavinová ionizace. Poněvadž kladné ionty

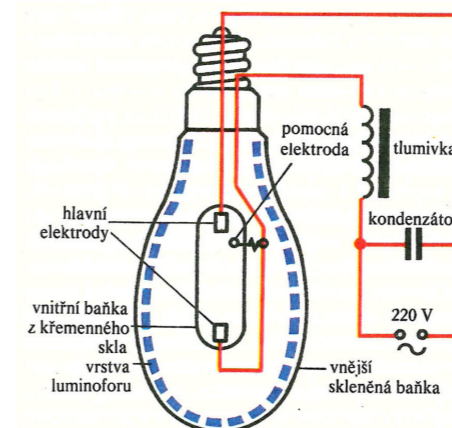
získávají mnohem menší zrychlení (mají daleko větší hmotnost než elektrony), zůstávají v prostoru mezi elektrodami déle než elektrony, takže v trubici vzniká kladný prostorový náboj. Proto potenciál v trubici neklesá rovnoměrně, jako je tomu u homogenního vodiče.

Z průběhu elektrického potenciálu můžeme snadno odvodit chování kladných a záporných nositelů náboje ve výbojové dráze. Kladné částice putují ke katodě a jsou urychlovány zvláště v Crookesově tmavém prostoru silným elektrickým polem, dopadají na kovovou katodu s velkou energií a vyrazí z ní elektrony. Ty pak probíhají opačným směrem tmavým prostorem, a jsou zde rovněž silně urychlovány. Již v malé vzdálenosti od katody stačí jejich energie k ionizaci molekul plynu a k vyvolání záření – katodová skvrna B. Na další své dráze v prostoru C jsou pak elektrony tak silně urychlovány, že srážkami s neutrálními molekulami způsobují světelné záření v prostoru D. Zabrždění elektronů je však tak velké, že přestává světelné záření v prostoru E. V dalším mírném vzestupu potenciálu vzrůstá kinetická energie elektronů v prostoru F natolik, že nárazovou ionizací vznikají kladné ionty a záření kladného sloupce anodového. Bývá to nejdelší část zářícího prostoru v trubici a má charakteristickou barvu plynu. V kladném sloupci anodovém je plasma.

VÝBOJKY

Podstatou výbojek je doutnavý výboj, který vzniká mezi elektrodami ve skleněné baňce naplněné parami rtuti nebo sodíku.

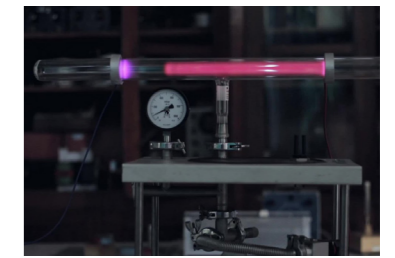
Rtuťová výbojka (OBR. 11) se skládá ze dvou baněk. Vnější baňka je skleněná a její stěny jsou pokryty vrstvou luminoforu. Vnitřní baňka je z křemičitého skla, jsou v ní zataveny dvě hlavní a jedna pomocná elektroda a je naplněna vzácným plynem argonem a nepatrným množstvím kapalné rtuti. Součástí rtuťové výbojky je rovněž tlumivka (cívka), která udržuje v prvních okamžicích po zapojení potřebné napětí na elektrodách, a dále kondenzátor. Připojíme-li výbojku na střídavé napětí, vznikne mezi hlavní a pomocnou



OBR. 11

elektrodou nejdříve doutnavý výboj ve zředěném argonu, teplem tohoto výboje se kapalná rtuť postupně vypařuje a v určitém okamžiku vznikne mezi hlavními elektrodami doutnavý výboj v parách rtuti. Světlo výboje je složeno z paprsků všech barev s výjimkou paprsků červených, a proto není bílé, ale nazelenalé. Se světelným zářením vzniká současně i neviditelné ultrafialové záření, které se účinkem luminoforu přemění především na červené paprsky, tyto paprsky pak doplní ostatní paprsky výboje a vnější baňka září světlem podobným přirozenému dennímu světlu.

Rtuťové výbojky mají mnohem vyšší účinnost než žárovky, ale postupně byly nahrazeny zejména sodíkovými výbojkami.

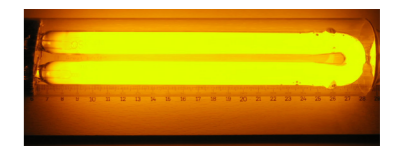


Výbojová trubice spojená s vývěvou

Aparatura pro popisovaný experiment.

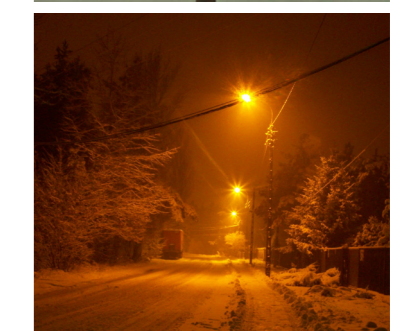


Rtuťová výbojka

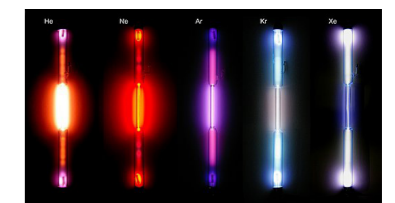


Sodíková výbojka

Jeden z mnoha typů, fotografováno s měřítkem.



Osvětlení komunikací sodíkovými výbojkami

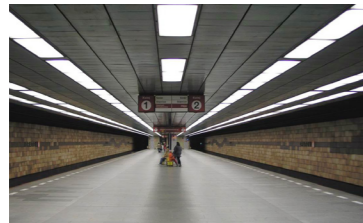


Spektrální trubice

V trubicih jsou různé plyny; na obrázku zleva helium, neon, argon, krypton, xenon.



Trubicové zářivky



Osvětlení zářivkami

Pražské metro, trasa C, stanice Opatov.



Solárium

Solárium horizontální konstrukce s trubicemi, jež produkují UV záření.



UV-C lampa

Germicidní lampa. UV-C záření ničí viry a bakterie.



Kompaktní zářivky

Různé typy s integrovaným elektronickým předřadníkem a standardní patiči.

Sodíková výbojka se skládá z vnější a vnitřní baňky, ze dvou hlavních a jedné pomocné elektrody, její součástí je i tlumivka a kondenzátor. Povrch vnější baňky však není pokryt luminoforem, vnitřní baňka je naplněna zředěným plynem neonem a obsahuje nepatrné množství pevného sodíku. Připojíme-li výbojku na střídavé napětí, vznikne nejdříve pomocný načervenalý doutnavý výboj ve zředěném neonu, teplem se sodík přemění v páry a vznikne hlavní žlutooranžový výboj. Sodíkové výbojky mají světelnou účinnost vyšší než výbojky rtuťové. Žlutooranžové světlo sodíkové výbojky sice zkrasluje barevnost předmětů, ale prochází velmi dobře mlhou a dýmem, a používá se proto především k osvětlování letištních ploch, seřadovacích nádraží či k zajištění veřejného osvětlení.

Sodíkové výbojky jsou v současnosti stále více nahrazovány zdroji LED.

Výbojky užívané ve spektroskopii se nazývají **spektrální trubice**. Trubice jsou plněny různými plyny (H_2 , N_2 , Ne, Ar, Kr, He apod.). Při připojení zdroje vysokého napětí září barvami charakteristickými pro daný plyn. Skleněná trubice je uprostřed zúžena v kapiláru, kde vzniká velká hustota proudu, a proto i značný jas.

ZÁŘIVKA

Zářivka vychází z podobných principů jako výbojka, konstrukce je však poněkud odlišná: Hlavní část trubicové zářivky tvoří zářivková trubice naplněná směsí rtuťových par a plynu argonu o tlaku přibližně 400 Pa, na jejichž obou koncích se nacházejí patice s kovovými elektrodami. Ty jsou pokryty vrstvou oxidů barya, stroncia a vápníku, které při teplotě asi 700 °C dobře emitují elektrony. Vnitřní stěny trubice jsou pokryty luminoforem (na vypnuté zářivce jej vidíme jako vrstvu bílé barvy), v němž vzniká (podobně jako ve výbojce) po dopadu UV záření viditelné světlo. Chemickým složením luminoforu lze ovlivnit také barvu světla zářivky.

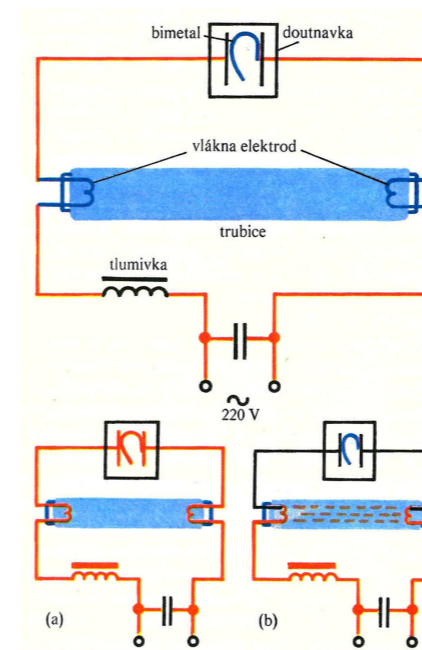
Některé trubice, podobné trubicím zářivkovým, jsou konstruovány tak, aby produkovaly určitou část spektra UV záření (UV-A, UV-B). Používají se jako hlavní součást solárií. Trubice produkující zdraví škodlivé UV-C záření se používají k desinfekci a hubení nežádoucích organismů např. v ordinacích (při zapojení přístroje nesmí být nikdo přítomen, škodí i domácím zvířatům, rybám v akváriu či rostlinám).

Klasické žárovky byly na čas nahrazeny kompaktními zářivkami vyráběnými v různých tvarech. **Kompaktní zářivky** mají patiči, která umožňuje jejich užití v běžných svítidlech. V patiči je zabudován elektronický předřadník, který nahrazuje jak tlumivku, tak startér (viz dále). Protože zářivky obsahují nebezpečné sloučeniny, musejí být likvidovány jako nebezpečný odpad; z trhu byly vytlačeny LED světelnými zdroji.

Podrobnější popis funkce trubicové zářivky*

K vysvětlení funkce zářivky je třeba dalších znalostí z fyziky, proto je tato kapitola určena spíše pro „druhé čtení“ v semináři.

Na elektrody zářivky se přivádí napětí, při němž vznikne elektrický výboj. Pro vznik výboje je nutné připojit k elektrodám vyšší napětí – zápalné napětí (cca 400 V). Jakmile výboj vznikne, udrží se i při nižším provozním napětí 230 V. Zápalné napětí se získá pomocným elektrickým obvodem (obr. 12). V obvodu je cívka s velkým počtem závitů a železným jádrem – tlumivka – a startér. Je to v podstatě malá výbojka se zápalným napětím menším než 230 V, v níž při zapnutí obvodu vznikne výboj, ten zahřeje bimetalový kontakt a obvod se uzavře. Proud prochází elektrodami, které se rozžhají. Současně se však začne ochlazovat bimetalový spínač, protože při spojených kontaktech výboj doutnavky zanikl. Když se spínač ochladí natolik, že se kontakty rozpojí, dojde k přerušení proudu, tím se však na tlumivce vlivem



OBR. 12

elektromagnetické indukce vytvoří zápalné napětí a v zářivce vznikne výboj, který se dále udrží při nižším napětí elektrické sítě.

Od této chvíle začne proud procházet jen mezi elektrodami zářivky (náčr. b), protože tlumivka sníží napětí na svorkách elektrod na 110 V, toto napětí stačí udržet výboj v trubici, nestačí však zapálit doutnavku a tím ohřát bimetalový spínač, protože doutnavka je konstruována tak, aby její zapalovací napětí bylo větší než 170 V.

Jestliže se zářivka nerozsvítí, spočívá závada ve většině případů v tom, že bimetalový spínač zůstane rozpojen; napětí 230 V na zapálení výboje v trubici nestačí.

NEONKA

Jestliže na elektrodách výbojové trubice zvýšíme napětí na 1 000 V a elektrody od sebe oddálíme, pak u katody bude zářit jen krátký katodový sloupec, a anodový sloupec se prodlouží po celé délce trubice. Takovýto zdroj světla se nazývá neonka. Neonky se používají zejména k reklamním účelům. Jejich trubice jsou různě tvarovány do písmen nebo kreseb a září nejrůznějšími barvami podle druhu plynu, jimiž jsou naplněny. Tak například vzácný plyn neon září červeně, argon fialově a krypton růžově, páry sodíku žlutě, směs neonu, argonu a par rtuti modře. Zápalné napětí neonek je přibližně 5 000 V na každý metr délky trubice, po vytvoření výboje však svítí již při napětí 1 000 V.

DOUŇAVKA

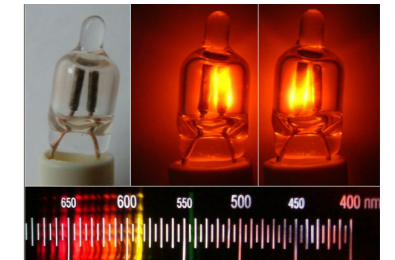
Jestliže na elektrodách výbojové trubice napětí snížíme a elektrody k sobě přiblížíme, pak při určité vzdálenosti anodové světlo zanikne a mezi elektrodami bude zářit jen katodové světlo. Takovýto zdroj světla se nazývá doutnavka. Doutnavky mají velmi malý světelný tok a používají se většinou jen k signalizaci, zda obvodem různých přístrojů, zařízení a strojů protéká proud (např. tužkové zkoušečky). Doutnavka má ocelové elektrody ve tvaru kotoučku a mezikružší; je naplněna zpravidla neonem nebo směsí neonu a helia při tlaku 1 000 Pa, přičemž svítí načervenalým výbojem. Zapalovací napětí doutnavek je většinou 80 až 100 V, v provozu spotřebovávají proud jen 0,001 A.

Rozsvícení při přivedení napětí vyššího než je napětí zápalné, je využito také v různých **zkoušečkách** (lidově zvaných „fázovky“), kdy se doutnavka rozsvěcuje teprve při napětí, které považujeme za nebezpečné. Zároveň se využívá vlastnosti, že pro svit doutnavky stačí nepatrný proud, který může bez nebezpečí úrazu procházet lidským tělem. Ve zkoušečce je obvykle doutnavka se zápalným napětím kolem 70 V v sérii s rezistorem vysoké hodnoty. Jeden pól doutnavky je spojen se zkušebním hrotem a druhý přes předřazený rezistor s dotekovou ploškou. Pokud se někdo dotýká dotekové plošky, proud se uzavírá tělem a pokud je rozdíl potenciálů dostatečně velký, doutnavka svítí.

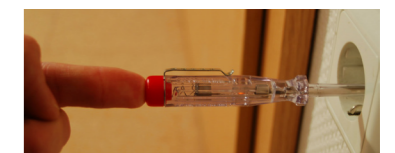


Neonové trubice

Užívají se v reklamě a k označení budov. Dole označení brněnského hotelu Avion, funkcionalistické stavby architekta B. Fuchse.



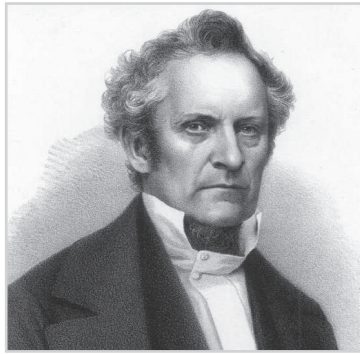
Doutnavka a její spektrum



Zkoušečka, „fázovka“

Fázovka je často konstruována ve tvaru šroubováku. Čepel šroubováku představuje měřicí hrot a slouží k měření přiložením na zkoušený vodič nebo vložením do zdířky v zásuvce. Druhého konce fázovky je třeba se zlehka dotýkat prstem, elektrický obvod se uzavírá lidským tělem. Je-li vodič pod napětím, doutnavka se rozsvítí. Proud, protékající tělem, je typicky v řádu mikroampér a je pro člověka bezpečný. Při doteku špičky fázovky s nulovým nebo zemnicím vodičem se doutnavka nerozsvítí, protože ty jsou na potenciálu okolí.

Katodové a anodové záření



Julius Plücker

Německý matematik a fyzik, objevitel katodového záření (1859).

V následujících letech až do konce 19. století se studiu tohoto záření věnovala řada fyziků: Phillip Lenard objevil fotoelektrický jev, který později vysvětlil Albert Einstein; Joseph John Thomson objevil elektron a stanovil jeho měrný náboj; Wilhelm Conrad Röntgen objevil paprsky X, rentgenové záření.



Šíření katodového záření v trubici

Kovová překážka ve tvaru kříže vytváří na stěnách trubice stín.



Crooksův mlýnek

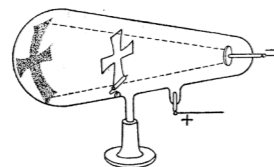
Školní pomůcka k demonstraci mechanických účinků katodového záření.

Při ještě větším zředění plynu, než bylo popsáno v předchozí kapitole, při tlaku pod 2,67 Pa, molekuly plynu již prakticky nepřekážejí pohybu elektronů a iontů v trubici, které se proto šíří prostorem zhruba přímočaře a dosahují na své značně dlouhé volné dráze velikých rychlostí. Pak již vlastně nejde o vedení elektřiny plynem, ale o šíření nabitých částic prázdňným prostorem.

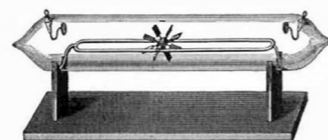
KATODOVÉ ZÁŘENÍ

Při výše popsaném snížení tlaku světelné úkazy z trubice mizí a jenom stěny trubice fluoreskují. Je-li v trubici kovová překážka, objeví se na protilehlé stěně její stín (pokus s trubicí s křížem, OBR. 13). Tento úkaz svědčí o tom, že z katody se šíří přímočaře neviditelné záření, schopné vyvolat fluorescenci. Je to roj elektronů, které se přímočaře pohybují z katody. Podle místa svého vzniku bylo toto záření nazváno katodové (**paprsky katodové**). Lze pozorovat tyto vlastnosti katodového záření:

- není-li pod vlivem vnějšího elektrického či magnetického pole, šíří se rovnoměrně přímočaře,
- vychyluje jej elektrické a magnetické pole,
- interaguje s látkou, způsobuje zahřátí, světélkování, chemické procesy (exponování fotografického materiálu),
- proniká tenkými vrstvami, rozptyluje se,
- vyvolá rentgenové záření při dopadu na kovy s vysokou relativní atomovou hmotností,
- má mechanické účinky (roztočí lehký Crooksův mlýnek – OBR. 14).

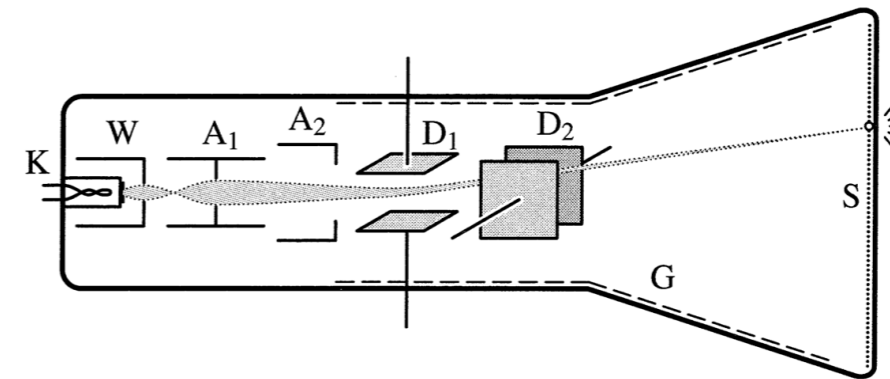


OBR. 13



OBR. 14

Elektronový paprsek se používá v **obrazovce osciloskopu** (OBR. 15; paprsek je vychylován elektrickým polem mezi dvěma dvojicemi desek, jedna dvojice je horizontální, druhá vertikální) nebo v klasické CRT (*cathode ray tube*) obrazovce starších televizorů (zde jsou místo vychylovacích destiček cívky a paprsek se vychyluje magnetickým polem.) Podrobněji jsou tato zařízení popsána ve studijním materiálu o pohybu nabitých částic v elektrickém, resp. magnetickém poli.

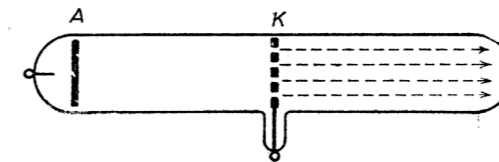


OBR. 15

ANODOVÉ (KANÁLOVÉ) ZÁŘENÍ

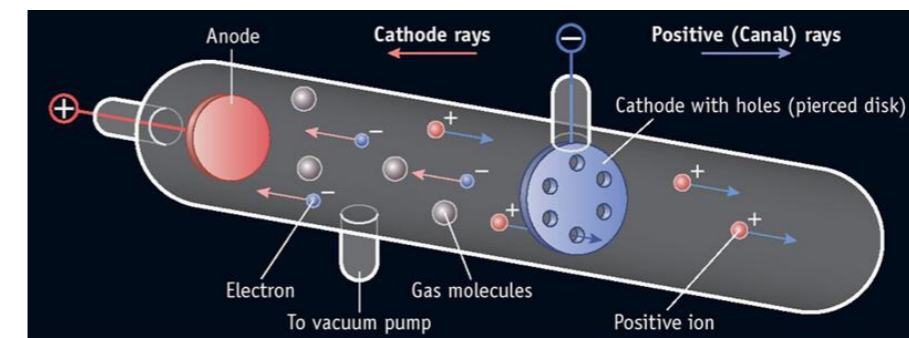
Opatříme-li katodu výbojové trubice otvory (OBR. 16), zjistíme, že těmito otvory (kanály) prochází rovněž záření, které bylo proto nazváno **záření anodové** (nebo: **záření kanálové**). Obdobně jako katodové záření šíří se i záření anodové přímočaře, nese však kladný elektrický náboj.

Jak vzniká? Elektrony katodového záření popsaného v minulém odstavci jsou urychlovány v elektrickém poli mezi katodou a anodou a jsou unášeny k anodě. Na své cestě tyto elektrony ionizují molekuly zbývajícího plynu obsaženého v trubici; tím vytvářejí kladné ionty plynu, které jsou rovněž urychlovány elektrickým polem, a to směrem od anody ke katodě.

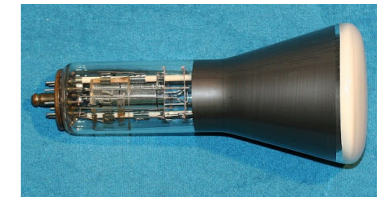


OBR. 16

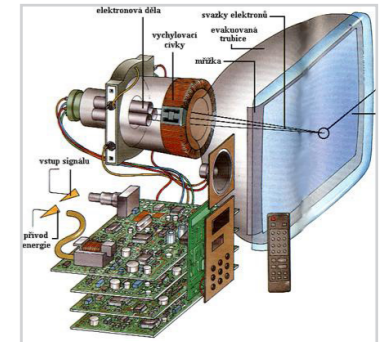
SHRNUTÍ



OBR. 17



Obrazovka osciloskopu



Televizní CRT obrazovka



Anodové (kanálové) záření

Záření prochází otvory v katodě a vytváří nad ní oblast růžové záře.



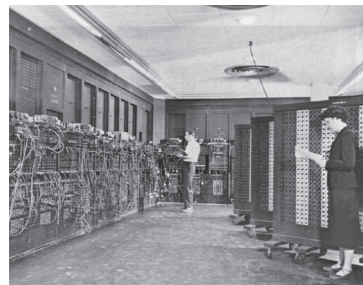
Eugen Goldstein

Německý fyzik, objevitel anodového (kanálového) záření (1886).

Vedení elektrického proudu ve vakuu

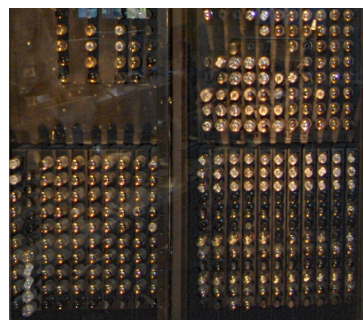
Vakuum

Vakuum je název pro prázdný prostor, tj. prostor bez hmotných částic. Reálně se lze podmínkám vakuu přiblížit snížením tlaku plynů odčerpáním plynu z uzavřeného prostoru vývěmami (viz studijní materiál *Struktura a vlastnosti plynného skupenství látek*).



ENIAC

ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Calculator*) je jeden z historicky prvních elektronkových počítačů. Jeho vývoj byl zahájen v roce 1943, dokončen byl v roce 1946 a pracoval až do roku 1955 pro americkou armádu. Obsahoval 17 648 elektronek, 7 200 krystalových diod, 1 500 relé, 70 000 rezistorů, 10 000 kondenzátorů, okolo 5 milionů ručně pájených spojů, vážil 30 tun. Na spodní fotografii detail jedné ze skříní počítače osazené elektronkami.

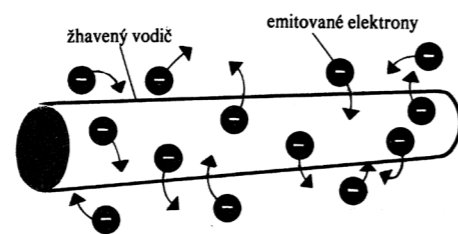


Různé elektronky

Vakuum neobsahuje nabitě částice; elektrický proud vakuem neprochází. Průchod elektrického proudu vakuem je umožněn vznikem nositelů náboje na elektrodách; tzn. aby vznikl proud ve vakuu, je nezbytně nutné uvolnit elektrony z katody.

Tok elektronů ve vakuu má velký praktický význam. Jeho použití v různých elektronických zařízeních spočívá na těchto okolnostech:

- Elektrony mají nepatrnou hmotnost, a proto mají ze všech částic největší měrný náboj, takže i při slabých magnetických nebo elektrických polích získávají značnou rychlost na krátké dráze. Jsou prakticky bez setrvačnosti.
- Přenos náboje není prakticky spojen s přenosem látky.
- Elektrony lze snadno získat rozmanitými způsoby uvolňováním z kovů.

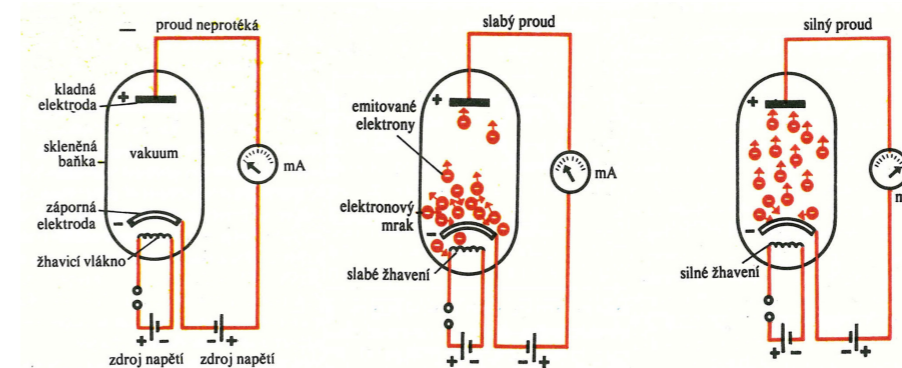


OBR. 18

Vysvětleme zjednodušeně princip vzniku volných elektronů a vedení ve vakuu: V každém kovovém vodiči se neuspořádaně pohybují záporně nabitě volné elektrony a za obvyklých podmínek se pohybují jen uvnitř vodiče. Jestliže však vodič zahřejeme na dostatečně vysokou teplotu, získají některé elektrony takovou rychlost, že přemohou vnitřní přitažlivé síly a vyletují z vodiče do okolního prostoru. Tento jev se nazývá **termoemise** nebo **tepelná emise elektronů** a vyletující elektrony se nazývají emitované elektrony. Termoemisí se ovšem původně elektricky neutrální vodič stává kladně nabitým, převážná část emitovaných elektronů je neustále přitahována, vrací se zpět na povrch vodiče – a tím vznikne v jeho okolí **elektronový oblak** (OBR. 18).

ELEKTRONKY

Elektronka je baňka, z níž byl vyčerpán vzduch na méně než 0,01 Pa; baňka je opatřena elektrodami. Předpokládejme, že záporná elektroda je připojena na záporný pól zdroje a kladná elektroda je připojena na kladný pól zdroje stejnosměrného napětí; žhavicím vláknem lze zahřívát zápornou elektrodu. Je-li žhavicí vlákno chladné (OBR. 19), pak obvodem s miliampérmetrem proud neprotéká, protože vakuum v baňce je dokonalý izolant. Jestliže vlákno rozžháváme, zahřeje se na vysokou teplotu i záporná elektroda, termoemise vzroste, od záporné elektrody se ke kladné elektrodě začne pohybovat podstatně vyšší počet emitovaných elektronů, a tím vzroste i proud zaznamenaný miliampérmetrem.

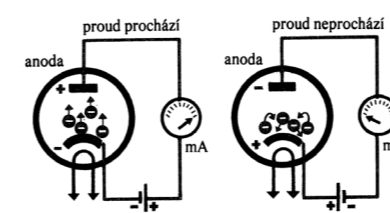


OBR. 19

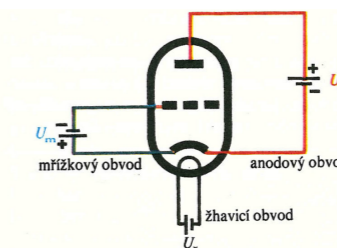
Konstrukce a využití elektronek*

Podle způsobu žhavení katody rozeznáváme elektronky přímo žhavené a elektronky nepřímě žhavené. V přímo žhavených elektronkách prochází žhavicí proud přímo katodou, která se rozžhává a emituje elektrony. Katoda takovéto elektronky je zhotovena například z těžkovytaveného kovu wolframu a je žhavana stejnosměrným proudem. V nepřímě žhavených elektronkách prochází žhavicí proud wolframovým vláknem, které je izolovaně zasunuto do kovové trubičky, a teprve tato trubička tvoří katodu, z níž se po nepřímém zahřátí emitují elektrony. Katody těchto elektronek jsou zhotovovány například z niklového plechu a jsou pokryty vrstvičkou oxidů různých kovů.

Elektronka se dvěma elektrodami se nazývá **dioda**. Dioda se užívala jako usměrňovač střídavého proudu, neboť propouští proud pouze jedním směrem. Princip je zřejmý z OBR. 20. Význam diod jako usměrňovačů je spíše historický; byly nahrazeny polovodičovými diodami.

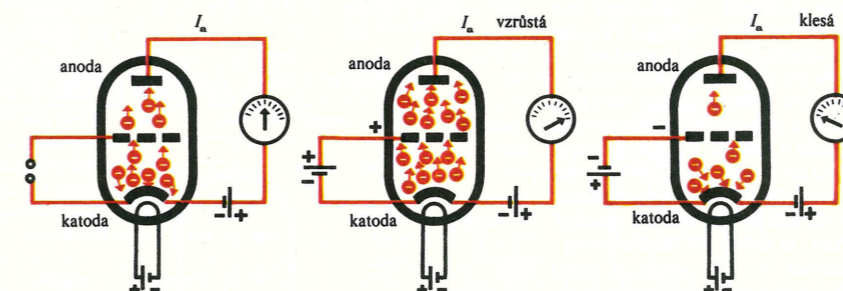


OBR. 20

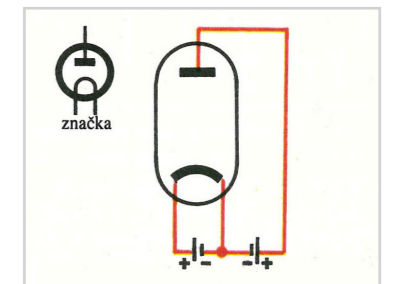


OBR. 21

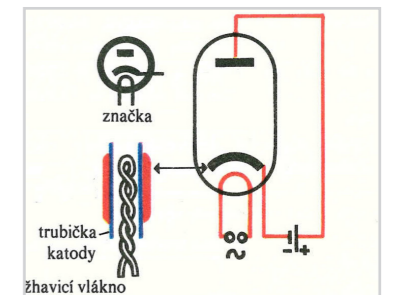
Trioda (OBR. 21) má tři elektrody (katodu, anodu, mřížku). Malými změnami mřížkového napětí můžeme podstatně měnit velikost anodového proudu (OBR. 22). Proto se trioda užívala jako zesilovač; dnes je nahrazena polovodičovou součástkou – tranzistorem.



OBR. 22



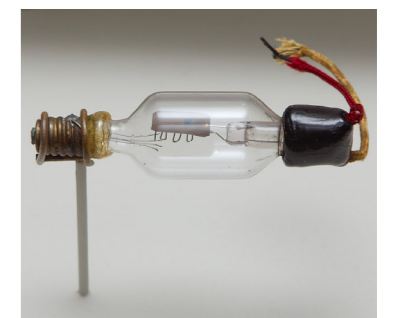
Přímo žhavená elektronka
Zapojení a schematická značka.



Nepřímo žhavená elektronka
Zapojení a schematická značka.



Různé diody



První zkonstruovaná trioda
První trioda byla zkonstruována v roce 1908.



Různé triody

Malý slovník pojmů

elektrický výboj	electrical discharge
ionizační činidlo	(external) ionisation factor, (external) ionising factor
nesamostatný elektrický výboj	dependent discharge, nonselfmaintain discharge
samostatný elektrický výboj	independent discharge, selfmaintain discharge
plasma	plasma
koróna	corona discharge
Eliášův oheň	St. Elmo's fire
jiskrový výboj	spark discharge
blesk	lightning
obloukový výboj	arc discharge
doutnavý náboj	glow discharge
zářivka	fluorescent lamp
vysokofrekvenční výboj	high frequency discharge
elektroda	electrode
katoda	cathode
anoda	anode

Literatura

POUŽITÁ LITERATURA

- [EM] Lepil, O. – Šedivý, P.: *Fyzika pro gymnázia: Elektřina a magnetismus*. 3. vyd. Praha: Prometheus, 1995.
- [EM'] Lepil, O. – Šedivý, P.: *Fyzika pro gymnázia: Elektřina a magnetismus*. 5. vyd. Praha: Prometheus, 2007. ISBN 978-80-7196-202-1.
- [Opa85] Opava, Z.: *Elektřina kolem nás*. 2. vyd. Praha: Albatros, 1985.
- [SŠ93] Sedlák, B. – Štoll, I.: *Elektřina a magnetismus*. 1. vyd. Praha: Academia a Karolinum, 1993. ISBN 80-200-0172-7.
- [FH79] Fuka, J. – Havelka, B.: *Elektřina a magnetismus*. 3. vyd. Praha: SPN, 1979.
- [Čič80] Čičmanec, P.: *Elektrina a magnetismus*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1980.
- [FLS2] Feynman, R. P. – Leighton, R. B. – Sands, M.: *Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady 2*. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 2001. ISBN 80-7200-420-4.
- [Lep09] Lepil, O. a kol.: *Fyzika aktuálně*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2009. ISBN 978-80-7196-381-3
- [Svo91] Svoboda, E. a kol.: *Přehled středoškolské fyziky*. 1. vyd. Praha: SPN, 1991. ISBN 80-04-22435-0.
- [VSF] *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2001.
- [1] ENIAC [online; cit. 17. 5. 2021]. <<https://cs.wikipedia.org/wiki/ENIAC>>
- [2] Khun, J. – Scholtz, V.: *Nízkoteplotní plazma IV – doutnavý výboj* [online; cit. 17. 5. 2021]. In: Aldebaran Bulletin, 42/2012. <https://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_42_pla.php>

ZDROJE ČÍSLOVANÝCH OBRÁZKŮ

[Opa85] 1, 2, 4–9, 11–12, 18–22; [EM] 15; [FH79] 13, 16; [2] 10; wikimedia.org 14; www.sutori.com 17



Elektřina kolem nás

Populární knížka „pro čtenáře od 12 let“ získala mnoho svých čtenářů pro fyziku a elektrotechniku. — Z knihy byla do učebního textu převzata většina názorných ilustrací.



Písmo Academica

Studijní text je vysazen písmem Academica. Písmo vzniklo úpravou písma Academia, které jeho autor Josef Týfa poprvé publikoval v roce 1967. V letech 2003–2004 autor písmo ve spolupráci s Františkem Štormem upravil a ve *Storm Type Foundry* vznikla digitální verze.

■ NA POSLEDNÍ STRANĚ OBÁLKY

Různé zdroje světla

Vozovka v levé části obrázku je osvětlena světelnými zdroji LED, vozovka v pravé části obrázku sodíkovými výbojkami.

ZDROJE OSTATNÍCH OBRÁZKŮ

1 https://all-free-download.com/free-photos/download/norman-oklahoma-lightning_214777.html | 3 itras.cz | 4 <https://www.pavelzubek.cz/nejnovejsi/elektricka-obloukova-pec-524.html>; <https://www.livescience.com/how-big-can-lightning-get.html>; https://www.wikiwand.com/en/Arc_lamp | 5 [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kor%C3%B3na_\(elektrotechnika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kor%C3%B3na_(elektrotechnika)) | 7 space.com | 8 [Svo91]; https://en.wikipedia.org/wiki/John_Sealy_Townsend; <https://wallpapers.gg/blue-lightning/> | 9 <https://www.electronicshobby.com/2018/07/corona-effect-can-influence-the-overhead-transmission-lines.html>; <https://cz.pinterest.com/pin/370350769334964089/>; https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrojiskrov%C3%A9_obra%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD#/media/Soubor:Electrical-discharge-machine.jpg | 10 https://cs.wikipedia.org/wiki/Obloukov%C3%A1_lampa; https://cs.wikipedia.org/wiki/Franti%C5%A1ek_K%C5%99i%C5%BE%C3%ADk; By Atlant, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=294010>; [Opa85] | 11 <https://www.chemistryworld.com/opinion/crookes-tube/8381.article>; <https://nasregion.cz/>; <https://www.prints-online.com/francis-william-aston-576704.html> | 12 [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_42_pla.php;ByDerivedfile:ChetvornoOriginalfile:JannisAndrijaSchnitzer-DerivedfromGasdischarge.jpgOriginalfilegasdischarge\(file#/4444189404\)onFlickr,CCBY-SA2.0,https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=50149633](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_42_pla.php;ByDerivedfile:ChetvornoOriginalfile:JannisAndrijaSchnitzer-DerivedfromGasdischarge.jpgOriginalfilegasdischarge(file#/4444189404)onFlickr,CCBY-SA2.0,https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=50149633) | 13 https://cs.wikipedia.org/wiki/Doutnav%C3%BD_v%C3%BDboj; <https://www.kupzarovky.cz/polamp-lrf-125w-e27-rtutova-vybojka-p-22037.html>; <https://de.wikipedia.org/wiki/Gasentladungsr%C3%B6hre>; Autor: Swisstack – Vlastní dílo, Volné dílo, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8850217> | 14 <https://aukro.cz/6-x-trubicova-zarivka-6972723770>; metroweb.cz; <https://www.esvit.cz/germicidni-zaric-30w-philips-tuv-30w-g13-s-flexo-snurou-5m>; https://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescent_lamp#/media/File:Compact_fluorescent_straight_crop.jpg; <https://www.istockphoto.com/photos/solarium>; https://cs.wikipedia.org/wiki/Kompaktn%C3%AD_z%C3%A1%C5%99ivka; <https://www.ledvance.cz/produkty/znalosti-produktu/kompaktni-zarivkove-svetelne-zdroje-s-integrovanym-ovladacim-zarizenim/index.jsp> | 15 <https://www.neon-b.cz/produkty/neonova-reklama/neon-na-panelu>; <https://www.neon-b.cz/>; Autor: de:Benutzer:Anton – German Wikipedia, Glimmlampe_spektrum.jpg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1811450>; Autor: Photographiert von Philipp Neuhaus, neuhaus@dodekatex.de – Vlastní dílo, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=645519> | 16 https://cs.wikipedia.org/wiki/Julius_Pl%C3%BCcker; <https://fintechsystem.estranky.cz/clanky/crt.html>; sbazar.cz | 17 <http://pokusy.chytrak.cz/schemata/osciloskop.htm>; <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/519-barevna-televize>; <https://www.britannica.com/science/cathode-ray>; <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/pred-170-lety-se-narodil-nemecky-fyzik-eugen-goldstein-17634> | 18 By Stefan Riepl (Quark48) - Self-photographed, CC BY-SA 2.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14682022>; By Unknown author - U.S. Army Photo, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=55124>; By The original uploader was TexasDex at English Wikipedia. - Transferred from en.wikipedia to Commons by Andrei Stroe using CommonsHelper., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6480859> | 19 Autor: RJB1 – Vlastní dílo, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14533720>; By Gregory F. Maxwell & Itgmaxwell@gmail.com & gt; PGP:OxB0413BFA - Photo by uploader, taken at The History of Audio: The Engineering of Sound, an exhibition of the San Francisco Airport Museums in SFO Airport, Terminal 3 from 2006-09 to 2007-05., GFDL 1.2, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1365357>; <http://www.alfaelektronky.cz/teorie/dioda.html> | 24 <http://www.verejnesvetlo.cz/>



Elektrický výboj
Voltampérová charakteristika plynu
Výboj za normálního tlaku
Tichý výboj
Jiskrový výboj
Obloukový výboj
Doutnavý výboj
Výbojky
Zářivka
Neonka
Doutnavka
Katodové záření
Anodové (kanálové) záření
Vedení elektrického proudu ve vakuu
Elektronky

Studijní text Gymnasia F. X. Šaldy shrnuje základní poznatky o vedení elektrického proudu v plynech a ve vakuu.

Relativně rozsáhlé exkursy v postranních pruzích stránek usazují téma výkladu do širších fyzikálních, obecně přírodovědných či historicko-společenských souvislostí.

K tématu studijního textu je připravena sbírka úloh a rozcestník s odkazy na doporučené animace a videa.

www.gfxs.cz

