

DETEKCE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

- Radiometrické přístroje a detekční metody jsou založeny na změnách fyzikálních, chemických či jiných vlastností látky tvořící detektor v důsledku interakcí ionizujícího záření s touto látkou. Z naměřených změn pak lze podle typu detektoru kvalitativně, ale i kvantitativně posuzovat vlastnosti zdroje záření a míru působení ionizujícího záření na prostředí, objekty, na něž dopadá (dávku, efektivní dávku).

Podle časového průběhu detekce rozeznáváme dvě skupiny detektorů

- Kontinuální "on-line" detektory - podávají průběžně informaci o okamžité hodnotě detekovaného ionizujícího záření. Odezva takového detektoru by měla být **úměrná** okamžité intenzitě záření – nebude-li detektor ozařován klesne výstupní hodnota na nulu, nebo hodnotu pozadí.
- Kumulativní (integrální) detektory - postupně shromažďují svou rostoucí odezvu během expozice (míra ozáření detektoru). Tato odezva zůstává v detektoru uchována i po skončení expozice (při příp. dalším ozáření detektoru se nový signál přičítá k původnímu) a může se vyhodnotit dodatečně. Vyhodnocením se získá údaj o celkové hodnotě ozáření za celou dobu, po kterou byl detektor vystaven ozáření (přerušovaně či nepřerušovaně). Používají se např. v osobní dozimetrii (termoluminiscenční či OSL).

Podle principu detekce rozeznáváme tři skupiny detektorů

- **Fotografické** - založené na **fotochemických účincích záření** (filmové dozimetry, rtg filmy, jaderné emulze), nebo využívající **fotografické zobrazení** stop částic v určitém látkovém prostředí (mlžné a bublinové komory).
- **Materiálové** - využívající dlouhodobější změny vlastností určitých látek (složení, objem, barva, excitace - *termoluminiscenční a OSL dozimetry*) působením ionizujícího záření.
- **Elektronické** - část absorbované energie ionizačního záření převádí na elektrické proudy či impulsy, které se zesilují a vyhodnocují v elektronických aparaturách.

K základním fyzikálním vlastnostem detektorů patří

➤ Účinnost detektoru

- *Absolutní (celková) detekční účinnost*

je poměr počtu impulsů zaznamenaných detektorem k počtu kvant vyzářených zdrojem za daný čas. Absolutní detekční účinnost závisí na geometrickém uspořádání zdroje a detektoru, na příp. absorpci záření v prostředí mezi zdrojem a detektorem a na vnitřní účinnosti.

- *Vnitřní detekční účinnost h*

je dána pravděpodobností registrace kvant záření procházejících citlivou oblastí detektoru. Vyjadřuje se jako poměr počtu impulsů zaznamenaných detektorem k počtu kvant daného druhu záření, které vstoupily do detektoru udává se v procentech ($0% < h < 100%$).

K základním fyzikálním vlastnostem detektorů patří I

➤ Časové rozlišení detektoru (mrtvá doba)

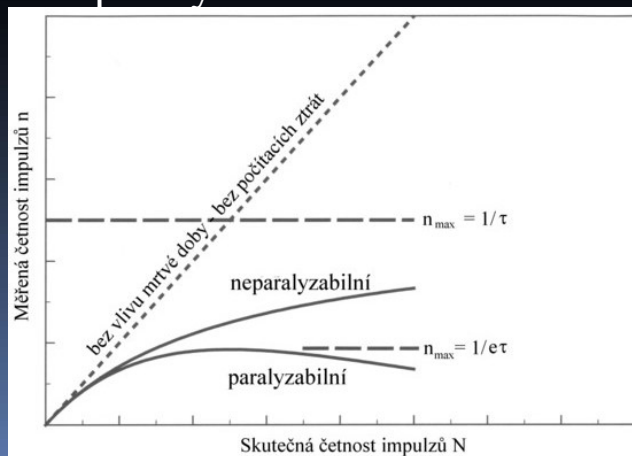
je čas, který detektor potřebuje ke zpracování a registraci odezvového signálu od jednoho kvanta záření => **mrtvá doba** (měří se v μs) => dochází ke **ztrátě** detekovaných impulsů. Ztráta roste s četností kvant měřeného záření => **porušení linearity odezvy**.

V praxi rozeznáváme dva typy mrtvé doby – paralyzabilní a neparalyzabilní.

Paralyzabilní mrtvá doba je taková, že během ní detektor nejen že neregistruje další částice, ale každá taková částice, která během mrtvé doby vletí do detektoru, znovu prodlouží o tutéž dobu jeho necitlivost. Dochází ke kumulování mrtvé doby a detektor může být i paralyzován. Naopak během **neparalyzabilní mrtvé doby** detektor není schopen registrovat další interakce a po jejím skončení je okamžitě připraven k detekci. Většina detektorů se chová jako systémy s paralyzabilní mrtvou dobou. Počítačová rozhraní, multikanálové analyzátory apod. se chovají jako systémy s neparalyzabilní mrtvou dobou. Scintilační kamery patří do skupiny přístrojů s

paralyzabilní mrtvou dobou.

Dříve než dojde k maximální dosažitelné měřitelné četnosti impulsů jsou měřeny četnosti nižší než je četnost skutečná (plné křivky se odklání od přerušované ideální závislosti). K mrtvé době přispívají všechny části detekčního systému (detektor, fotonásobič, zesilovač, ampl.analyzátor, čítač impulsů, A/D převodník).



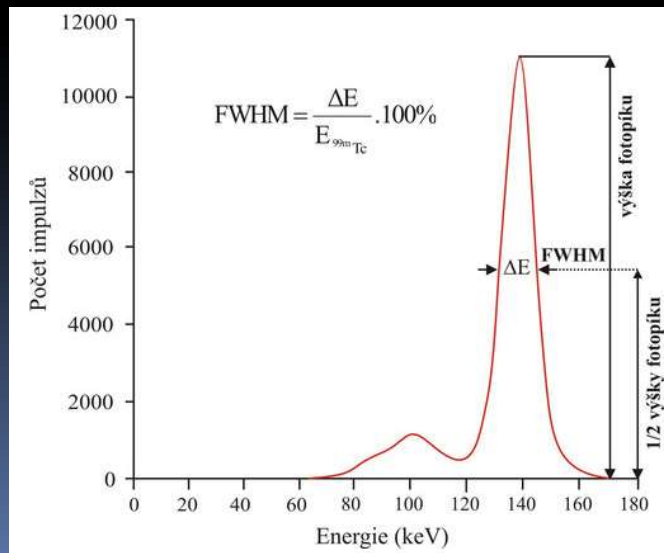
K základním fyzikálním vlastnostem detektorů patří II

➤ Energetická rozlišovací schopnost spektrometru

jedná se o nedokonalou rozlišovací schopnost spektrometru, který nedokáže rozlišit blízké energie záření. Měřené spektrum je pak výsledkem konvoluce skutečného spektra a *odezvové funkce LSF detektoru* (spektrometru) => *rozmazání spektra a zahlazení jemných detailů ve spektru.*

Rozlišovací funkce *LSF* (*Line Spread Function*) představuje odezvu spektrometru na monoenergetické záření energie a Diracovy fce. Odezvová fce *LSF* má většinou zvonovitý tvar blízký *Gaussově křivce*, její šířka často závisí na energii. Pološířka (šířka v poloviční výšce - *FWHM*) odezvové funkce *LSF* se nazývá *energetické rozlišení* spektrometru. Vyjadřuje se buď *absolutně* (ΔE) v [keV], nebo *relativně* jako podíl pološířky fotopíku a energie v [%].

Pro ^{99m}Tc 140 keV je u moderních přístrojů lepší nebo rovna 10 %

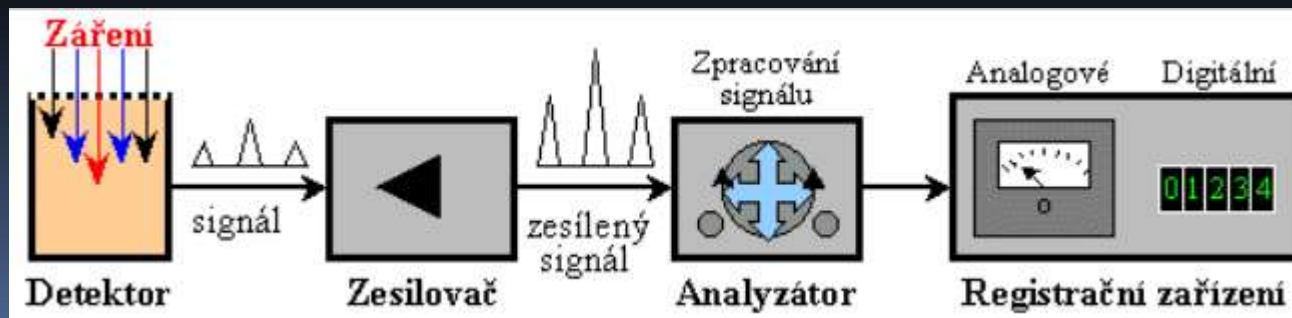


Detektory dělíme na :

- *Plynové*
 - *ionizační komory*
 - *proporcionální detektory*
 - *Geiger – Müllerovy detektory*
- *Scintilační*
- *Polovodičové*
- *Materiálové*

ELEKTRONICKÉ DETEKTORY

- Jsou založeny na látkách, které působením ionizujícího záření mění některé své elektrické vlastnosti, například vodivost. Působením přímo ionizujícího záření se některé atomy nebo molekuly, původně neutrální, přeměňují ionizací na kladně nabitě ionty a elektrony. Při interakci nepřímo ionizujícího záření tuto ionizaci způsobují sekundární nabitě částice.
- Detekční systém se skládá z :
 - *detektoru* – ten tvoří vstupní část přístroje a převádí část energie záření na měřitelnou elektrickou odezvu
 - Elektronické aparatury (zesilovač, amplitudový analyzátor, reg. zařízení) která zesiluje a vyhodnocuje el. impulsy



➤ PLYNOVÉ DETEKTORY

Plynový ionizační detektor je v podstatě kondenzátor, který je připojen ke stálému zdroji napětí. Vlétno-li do plynové náplně detektoru částice, ionizuje molekuly plynu uvnitř detektoru a kondenzátorem začne procházet elektrický proud.

➤ Přesná funkce detektoru závisí na hodnotě napětí přiloženého na elektrody. Podle toho se rozlišují:

- Ionizační komory
- Proporcionální detektory
- Geiger – Müllerovy detektory

Energie potřebná k ionizaci plynu je zhruba 20 eV - 40 eV. Dodáním této energie se vytvoří jeden pár iont - elektron

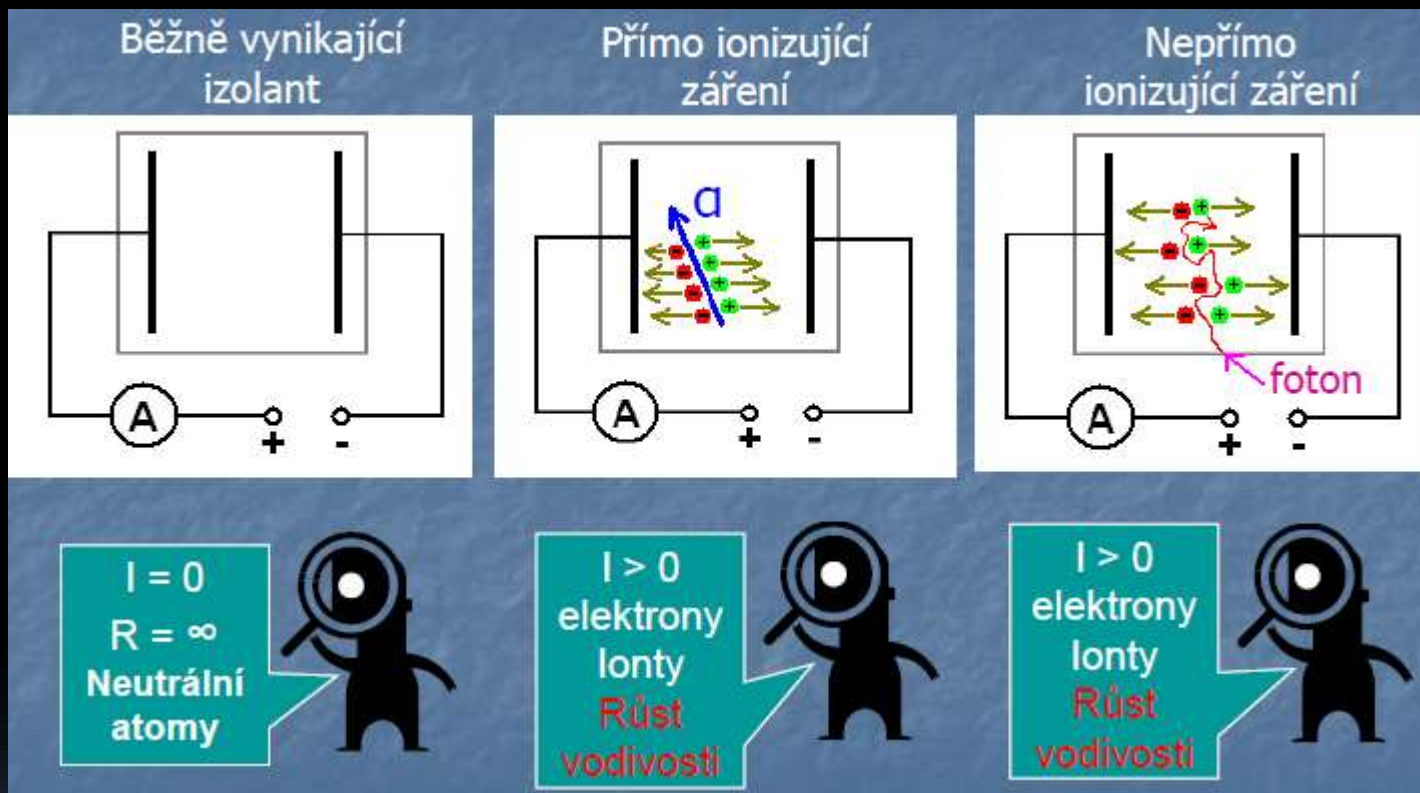
➤ PLYNOVÉ DETEKTORY – společný úvod

➤ V plynových detektorech mohou probíhat následující pochody :

- *Ionizace* –
ionty, které vytvoří ionizující záření, se pohybují k opačně nabitým elektrodám, v obvodu vzniká ionizační proud
- *Rekombinace* –
při setkání kladného a záporného iontu může vzniknout opět neutrální atom nebo molekula, pravděpodobnost rekombinace klesá s rostoucí rychlostí iontů, to znamená s rostoucím napětím
- *Přídavná(sekundární)ionizace* –
primární ionty mohou být urychleny na větší energii, než je ionizační energie plynu mezi deskami kondenzátoru a mohou v tomto prostoru vytvářet nárazovou ionizací další ionty

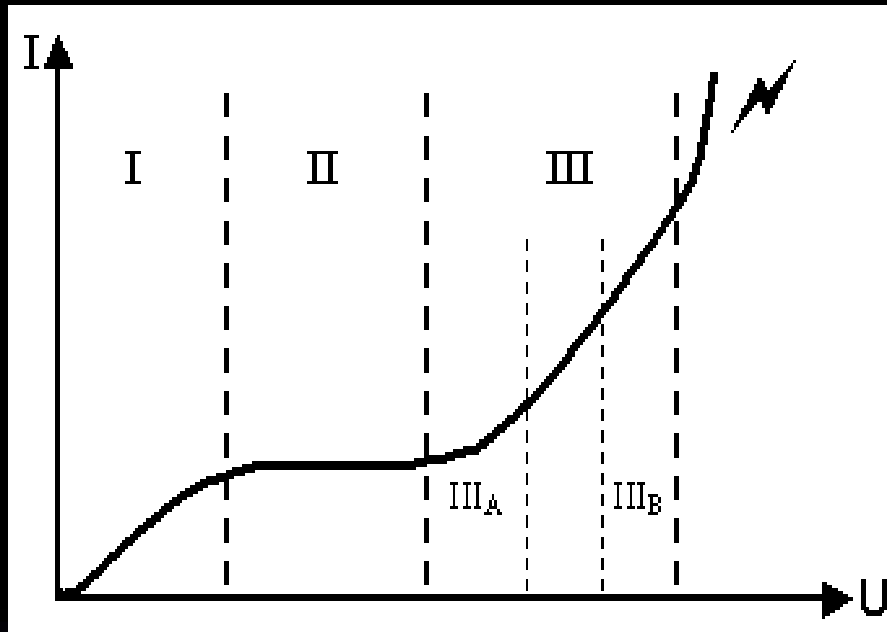
➤ PLYNOVÉ DETEKTORY - společný úvod

Princip plynových detektorů



➤ PLYNOVÉ DETEKTORY - společný úvod

Závislost ionizačního proudu I komorou na přiloženém napětí U



I – oblast rekombinační, též oblast Ohmova zákona

II – oblast nasyceného proudu

III – oblast nárazové ionizace

IIIA – oblast omezené proporcionality

IIIB – oblast Geiger – Müllerova

➤ PLYNOVÉ DETEKTORY - společný úvod

Obecný průběh charakteristiky detektoru I

oblast I -na elektrody je přiložené malé napětí. To znamená, že mezi elektrodami vzniká slabé elektrostatické pole a ionizované částice se pohybují velmi pomalu k opačně nabitým elektrodám. Dříve než se dostanou na elektrodu, rekombinují mezi sebou zpět na neutrální atomy či molekuly. Na výstupu z detektoru lze tedy naměřit velmi slabý signál a proto se tato, tzv. **rekombinační oblast**, k detekci částic nepoužívá.

oblast II -rekombinace ustává. Pracovní napětí je dostatečné, aby se sebraly všechny ionty vytvořené primární ionizací, proto hodnota ionizačního proudu nezávisí na hodnotě přiloženého pracovního napětí. V této oblasti pracují ionizační komory.

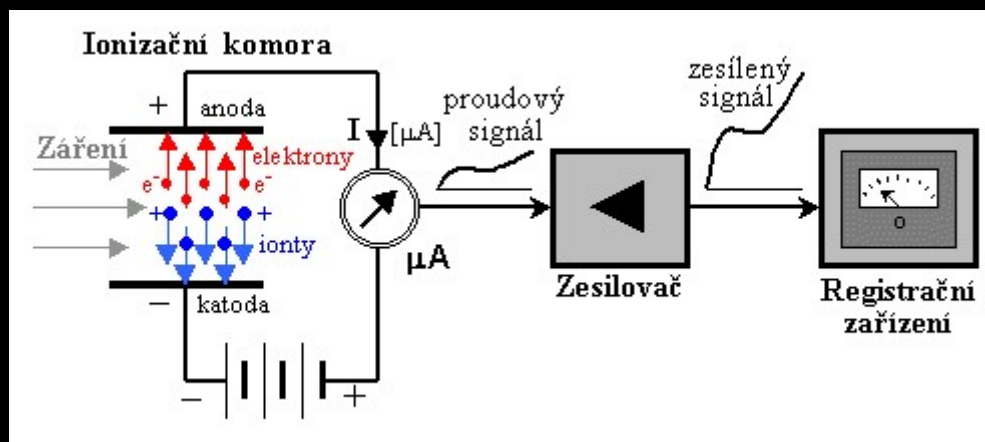
oblast III –primární ionty (vyvolané zářením) jsou silným elektrickým polem urychlovány natolik, že vytvářejí další sekundární ionty **nárazem** na neutrální atomy či molekuly plynu.

oblast IIIA -V počáteční části této oblasti je počet sekundárních iontů **přímo úměrný** počtu primárních iontů vyvolaných zářením. V této oblasti pracují **proporcionální detektory**.

Oblast IIIB - Při ještě vyšším napětí je sekundární ionizace nárazem již tak intenzivní, že dochází k **lavinovitému** **zmnožení** elektronů a iontů (k mikrovýboji) - v této oblasti pracují **Geiger-Mullerovy detektory**.

➤ PLYNOVÉ DETEKTORY

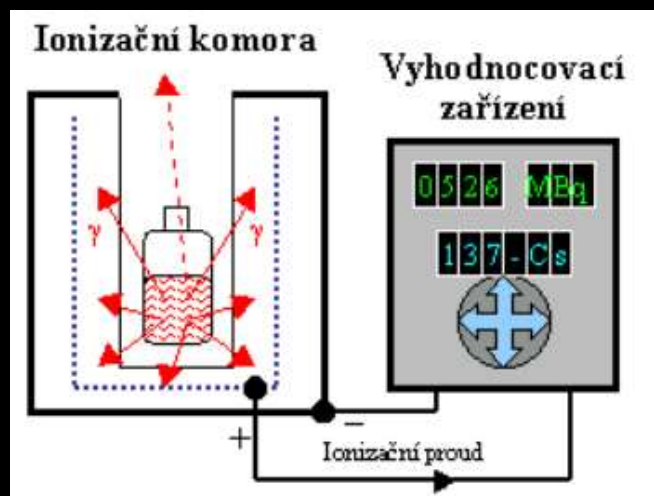
IONIZAČNÍ KOMORY



Ionizační komora je tvořena dvěma kovovými destičkami - elektrodami (anodou a katodou), umístěnými v plynném prostředí. Provozní napětí se volí tak, aby ionizační komora pracovala v oblasti nasyceného proudu (asi 150 až 200 V). Za normálních okolností (bez přítomnosti záření) systémem neprochází žádný proud - plyn mezi elektrodami je nevodivý, obvod není uzavřen. Vnikne-li však do prostoru mezi elektrodami ionizující záření, vyraží z původně neutrálních atomů plynu elektrony a mění je na kladné ionty. Záporné elektrony putují v elektrickém poli okamžitě ke kladné anodě, kladné ionty se dají do pohybu k záporné katodě - obvodem začne protékat slabý elektrický proud způsobený iontovou vodivostí ionizovaného plynu mezi elektrodami. Proud je přímo úměrný intenzitě ionizujícího záření

➤ PLYNOVÉ DETEKTORY

IONIZAČNÍ KOMORY



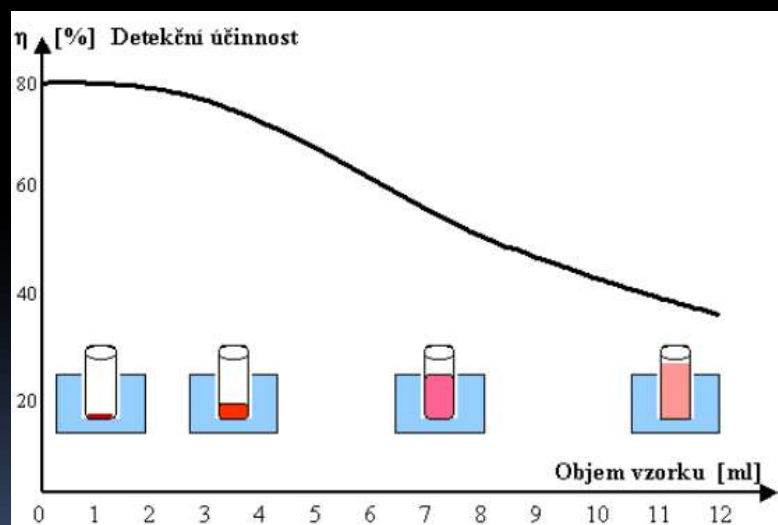
Ionizační komory pro gama záření využívají sekundární ionizace způsobené elektrony, které jsou uvolněny interakcí gama záření s náplní a stěnami ionizační komory. Hodnoty elektrického proudu protékajícího ionizační komorou se pohybují v rozmezí 10^{-16} až 10^{-9} ampéru. Ionizační komora má nízkou citlivost (účinnost), takže se nehodí pro detekci slabých zářičů. Její výhodou je však lineární závislost proudu i v oblasti velkých intenzit ionizujícího záření. Ionizační komory nacházejí hlavní využití v dozimetrii při stanovení dávky, expozice a kermy ve vzduchu. Nezastupitelné jsou v provozech s vysokými teplotami (válcovny, hutě), kde ostatní známé detektory pracovat nemohou.

➤ PLYNOVÉ DETEKTORY

IONIZAČNÍ KOMORY

Ionizační komory ve studnovém provedení se často používají v měřicích aktivitě radioaktivních preparátů. Lahvička či stříkačka s radioaktivní látkou se vloží do otvoru studnové ionizační komory, která v geometrii blízké 4π registruje vycházející záření γ .

Detekční účinnost studnové ionizační komory, a tím i přesnost měření aktivity preparátů, výrazně závisí na poloze vzorku ve studně, na objemu vzorku a na absorpci gama záření uvnitř vzorku, ve stěnách lahvičky a vnitřní stěně ionizační komory.

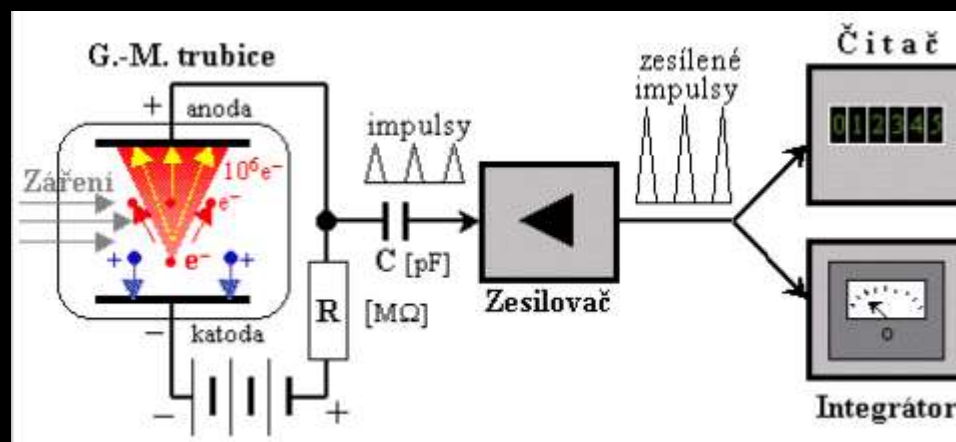


U studnového detektoru je nejvyšší detekční účinnost v případě, že vzorek malého rozměru leží na "dně" studnového detektoru - tehdy největší část záření prochází citlivým objemem detektoru a naopak nejmenší část vychází v kuželu otvorem ven bez registrace. Čím výše je umístěn vzorek v otvoru studny, tím větší část záření vychází "bez užitku" ven - studnový detektor má výraznou **polohovou závislost**

detekční účinnosti. S touto polohovou závislostí úzce souvisí i **objemová závislost** detekční účinnosti: čím větší je objem vzorku ve zkumavce zasunutá do otvoru studnového detektoru, tím větší část vzorku se nachází poblíž otvoru, kde je nižší detekční účinnost. K objemové závislosti detekční účinnosti přispívá i **samoabsorbce** záření ve vzorku.

➤ PLYNOVÉ DETEKTORY

Geiger-Müllerovy počítače



Geiger-Müllerovy počítače jsou založeny na principu využití ionizačních účinků záření. Jsou tvořeny válcovou katodou, v jejíž ose je uložena tenká anoda, tvořená zpravidla wolframovým drátkem. Celý systém elektrod je uzavřen v baňce s inertní plynovou náplní (argon, neon). Geiger-Müllerovy počítače pracují v režimu, kdy elektrony vzniklé primární částicí v počítači se mezi dvěma srážkami urychlí elektrickým polem natolik, že jsou schopny ionizovat další neutrální atomy. Takto vzniklé sekundární elektrony ionizují další atomy, takže na anodu dopadne celá lavina elektronů. Tím vzniká tzv. zesílení v plynu (koeficient zesílení je až 10^{10}). *Náboj na elektrodách pak nezávisí na primární ionizaci, ale je dán pouze vlastnostmi počítače.*

➤ PLYNOVÉ DETEKTORY

Geiger-Müllerovy počítače I

Průchod každé částice je tedy doprovázen samovolným výbojem v celém objemu počítače, který vyvolá na připojeném zatěžovacím odporu napěťový impuls, a ten se zpracovává v dalších částech radiometrické aparatury. Výboj, který vznikne v počítači je nutné co nejdříve přerušit (delší přetrvávání výboje by navíc mohlo poškodit plynovou náplň detektoru i samotné elektrody!), neboť po dobu výboje (vzhledem k poklesu napětí pod Geiger-Müllerův práh) neregistruje počítač další částice. Na **přerušení výboje** se podílejí dvě okolnosti. Tou první je **úbytek napětí** na poměrně vysokém pracovním odporu R (řádově MW), čímž se napětí na elektrodách sníží a produkce sekundárních elektronů se omezí. V ionizované plynové náplni však dochází k rekombinaci iontů a deexcitaci vzbuzených atomů, při čemž dochází k emisi fotonů **ultrafialového záření**. Fotony UV záření jsou schopny ionizovat a vyrážet fotoefektem z katody další elektrony, což má tendenci prodlužovat výboj. Proto se do plynové náplně přidává **zhášecí látka** (bývají to páry metylalkoholu, bromu a pod.), jejíž molekuly absorbují ultrafialové fotony a přispívají tak k rychlému přerušení výboje.

Časový interval, za který se obnoví pracovní napětí na počítači (obnoví se schopnost registrovat další částice), se nazývá mrtvá doba (bývá řádově v milisekundách).

➤ PLYNOVÉ DETEKTORY

Geiger-Müllerovy počítače II

Účinnost obecně závisí na stěnách (či vstupním okénku) detekční trubice a na její plynové náplni. Diametrálně se liší pro záření tvořené nabitými částicemi a pro fotonové záření.

Pro těžší **nabité částice** (např. pro záření alfa) a pro elektrony je detekční účinnost **blízká 100%** za předpokladu, že se dostanou do plynové náplně, t.j. do citlivého objemu detektoru. Aby tam pronikly, musí být vstupní okénko z co nejtencího lehkého materiálu; hovoří se o "bezokénkových" detektorech.

Pro **fotonové záření X** a zvláště gama je detekční účinnost vlastní plynové náplně **velmi nízká**, vzhledem k jeho malé absorpci v plynu. Naprostá většina g-fotonů projde citlivým objemem plynu bez interakce. Fotony o vyšších energiích mohou být detektorem s plynovou náplní detekovány prakticky jedině tehdy, když budou **interagovat s materiálem stěny** detekční trubice. Potom některé **elektrony** uvolněné Comptonovým rozptylem či fotoefektem proniknou do plynové náplně, kde jsou již účinně detekovány. Detekční účinnost G.M. detektorů pro fotonové záření proto závisí na materiálu a tloušťce stěn trubice (nejčastěji se používá hliník tloušťky několika desetin milimetru), samozřejmě ve vztahu k energii záření. Pro fotonové záření středních energií bývá detekční účinnost cca 0,1-10%.

G.-M. počítače se využívají např. v radiační ochraně jako **měřiče kontaminace**, hlásiče radiace, **monitorovací systémy** a pod.

➤ PLYNOVÉ DETEKTORY

Proporcionální detektory

Proporcionální detektory využívají rovněž **sekundární ionizace**, avšak vlivem nižšího napětí zde nedochází k lavinovitému mikrovýboji, ale pracují v oblasti proporcionality. Koeficient zesílení je cca 10^4 - 10^5 , mrtvá doba bývá řádově 10^{-6} s. Zapojení a konstrukční provedení je podobné jako u G-M detektorů, pracují v **impulsním režimu**. **Výstupní napět'ové impulsy jsou úměrné energii detekovaného záření** (přesněji řečeno energii, která byla při interakci kvanta záření s plynovou náplní pohlcena), takže tyto detektory mohou být v principu použity pro *spektrometrii*, i když jejich rozlišení se nevyrovná scintilačním a už vůbec ne polovodičovým detektorům.



➤ SCINTILAČNÍ DETEKTORY

Úvod

Scintilační detektory ionizujícího záření jsou založeny na vlastnosti některých látek reagovat **světelnými záblesky** neboli **scintilacemi** na pohlcení kvant ionizujícího záření. Tyto světelné záblesky se pak elektronicky registrují pomocí **fotonásobičů**. Látky vykazující tuto vlastnost se nazývají **scintilátory**.

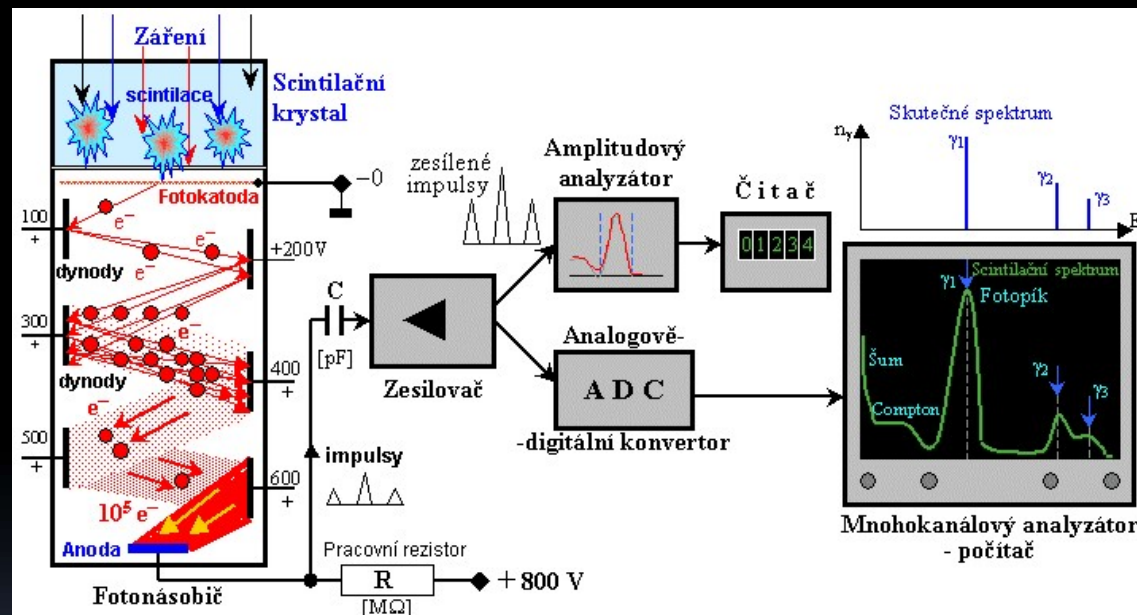
Pro účely detekce záření g se však nejčastěji používá *jodid sodný aktivovaný thaliem* - **NaI(Tl)**, ve formě monokrystalu.



➤ SCINTILAČNÍ DETEKTORY

Princip

SD jsou založeny na vlastnosti některých látek reagovat světelnými záblesky neboli scintilacemi (lat. *scintilla* = jiskra, záblesk) na pohlcení kvant ionizujícího záření. Kvantum měřeného neviditelného záření, např. záření γ , vniká do scintilačního krystalu, kde se částečně nebo úplně absorbuje a část jeho energie se přemění na záblesk (scintilaci) viditelného světla. Ke scintilačnímu krystalu je opticky přiložen fotonásobič.



- vznik scintilací v krystalu, emise elektronů z fotokatody a jejich násobení systémem dynod
- Horní větev schématu představuje prostou detekci s použitím "jednokanálového" amplitudového analyzátoru a čítače impulsů
- Dolní větev znázorňuje spektrometrické měření s použitím A/D konvertoru a počítačové akvizice energetického spektra ("mnohokanálový" analyzátor). Na obrazovce je vykreslen typický tvar scintilačního spektra záření gama - ve srovnání se skutečným čárovým spektrem nahoře.

➤ SCINTILAČNÍ DETEKTORY

Fotonásobič

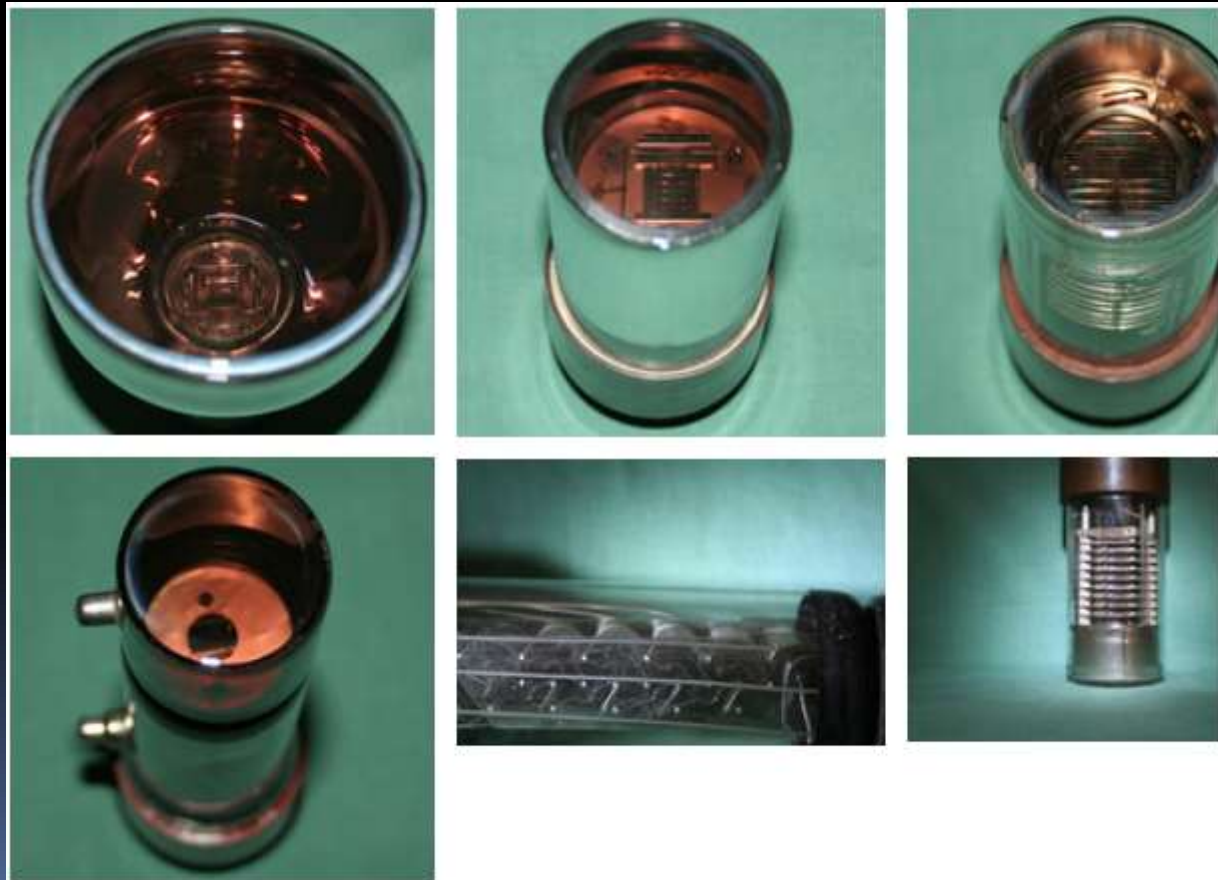
- je speciální optoelektronická součástka, která s vysokou citlivostí převádí scintilační světlo na elektrický signál. Na vstupním okénku fotonásobiče je zevnitř nanesena tenká kovová vrstvička – **fotokatoda**, která konvertuje světelné fotony na elektrony.

Fotonásobič obsahuje soustavu elektrod - tzv. **dynod**, které fungují jako *elektronový zesilovač*. Uvnitř celé trubice je vysoké vakuum. Na jednotlivé dynody je přiváděno kladné napětí - na každou dynodu postupně vyšší a vyšší.

Fotony světelného záblesku ze scintilátoru dopadají na fotokatodu, z níž **fotoelektrickým jevem** vyrážejí elektrony e^- . Každý takový elektron se v elektrickém poli začne zrychleně pohybovat k první (nejbližší) dynodě, na niž je přivedeno kladné napětí řekněme cca 100V. Na tuto dynodu dopadne s kinetickou energií cca 100eV - způsobí vyražení nejméně 2 a více **sekundárních elektronů** z kovového povrchu dynody. Tyto elektrony se vydají k další dynodě, na niž je vyšší kladné napětí. Opět vyrazí každý elektron 2 či více sekundárních elektronů - máme tedy již nejméně 4 elektrony, které se pohybují k další dynodě, kde vyrazí opět dvojnásobný počet elektronů atd. Díky tomuto **opakovanému násobení** se původně malý počet elektronů uvolněných z fotokatody **zmnoží** a na poslední dynodu (již vlastně anodu) dopadne cca 10^5 - 10^8 elektronů, což je již dostatečný počet k vyvolání dobře měřitelného **elektrického impulsu**.

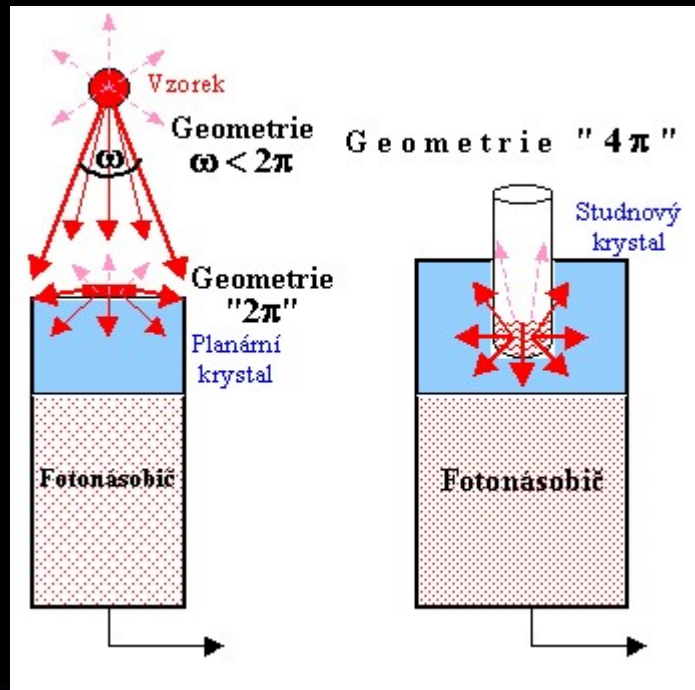
➤ SCINTILAČNÍ DETEKTORY

Fotonásobič



➤ SCINTILAČNÍ DETEKTORY

Geometrie měření



Celková účinnost měření je dána nejen vlastní detekční účinností detektoru, ale i vzájemným uspořádáním měřeného vzorku a detektoru - tzv. geometrií měření.

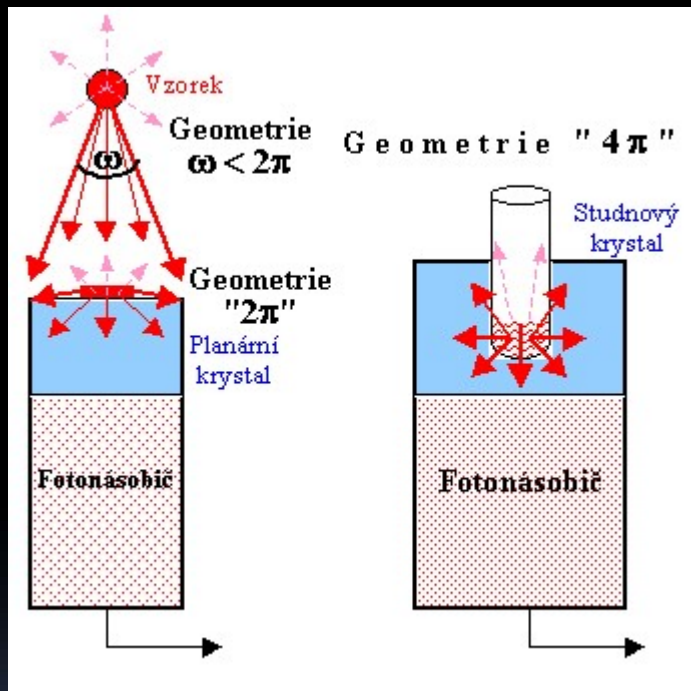
Geometrie 2π – vzniká přiložíme-li měřený vzorek těsně k detektoru. V ideálním případě je detekováno všechno záření, které směřuje od vzorku do poloviny v níž se nachází detektor, tedy **polovina veškerého záření** emitovaného vzorkem - říkáme, že měříme v **geometrii 2π**

Celková detekční účinnost pro přiložený vzorek zde může dosáhnout **max. 50%**. Detektory pro tento typ měření se někdy označují jako **planární**.

Geometrie menší než 2π - pokud je vzorek umístěn ve větší vzdálenosti od detektoru, jedná se o měření pod prostorovým úhlem $\omega < 2\pi$, s příslušně **nižší detekční účinností (0-50%)**.

➤ SCINTILAČNÍ DETEKTORY

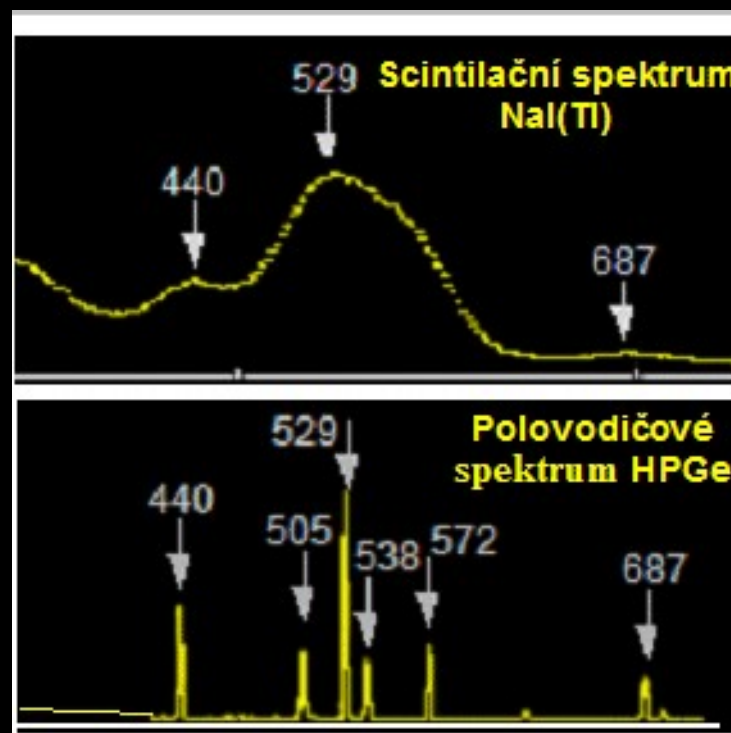
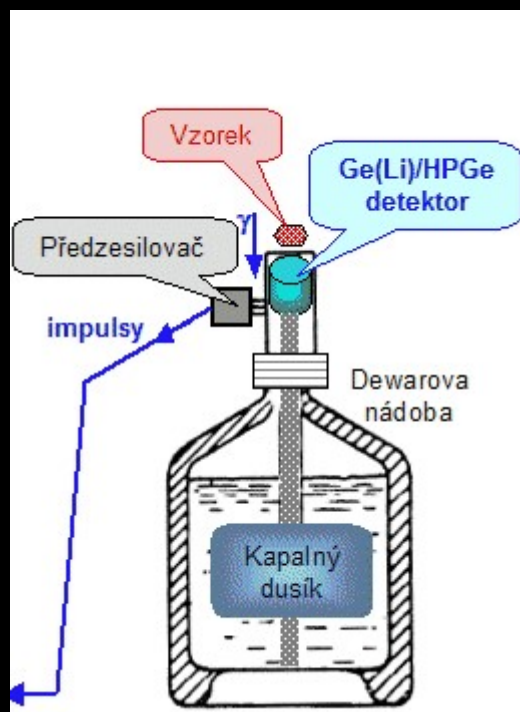
Geometrie měření



Geometrie 4π

Chceme-li zvýšit účinnost detekce a měřit veškeré záření emitované vzorkem do plného prostorového úhlu 360° - tedy v geometrii 4π , použijeme tzv. **studnového detektoru**. Pro citlivá měření nízkých aktivit vzorků se však používají studnové scintilační detektory s otvorem vyvrtaným v krystalu **podélně** do určité hloubky. Zkumavka s měřeným vzorkem se zasune do tohoto otvoru, takže téměř všechno záření emitované vzorkem (s výjimkou úzkého kužele ve směru otvoru) musí procházet citlivým objemem detektoru a může být detekováno - jedná se tedy o geometrii **blízkou 4π** . V geometrii 4π se detekční účinnost může teoreticky blížit až 100%, v praxi u studnových scintilačních detektorů dosahuje cca 80-90%.

➤ POLOVODIČOVÉ DETEKTORY



-mají **velmi dobrou energetickou rozlišovací schopnost** (zpravidla lepší než 1 keV), asi 30-krát lepší než detektory scintilační.

-Přispívají k tomu především dva faktory:

-Sběr náboje vytvořeného v polovodiči ionizací je poměrně dokonalý z celého citlivého objemu

-Malá šířka zakázaného pásu vede k malé energii potřebné k vytvoření elektron-děrového páru. Počet těchto nábojových párů, vzniklých při detekci kvanta dané energie, je proto vysoký (více než 10-krát vyšší než u plynových nebo scintilačních detektorů)

➤ POLOVODIČOVÉ DETEKTORY

Polovodičové detektory jsou založeny na ionizačních účincích v pevných látkách. Vnikne-li ionizující částice do vhodného polovodiče, vytváří v něm ionizací páry elektron - díra, přičemž většina primárních elektronů má tak velkou energii, že způsobuje další nárazovou ionizaci prostředí. Dochází k lavinovitému uvolňování elektronů do vodivostního pásu a tvorbě děr ve valenčním páse, počet uvolněných nosičů náboje tedy závisí na energii primární částice. Přiložíme-li na tento polovodič napětí, pak vlivem elektrického pole se volné nosiče nábojů (elektrony a díry) dají do pohybu v příslušném směru a v připojeném obvodu vznikne proudový impuls, jehož velikost závisí na energii dopadající částice ionizujícího záření. To umožňuje využít polovodičové detektory jak pro detekci ionizujícího záření, tak pro spektrometrická měření.

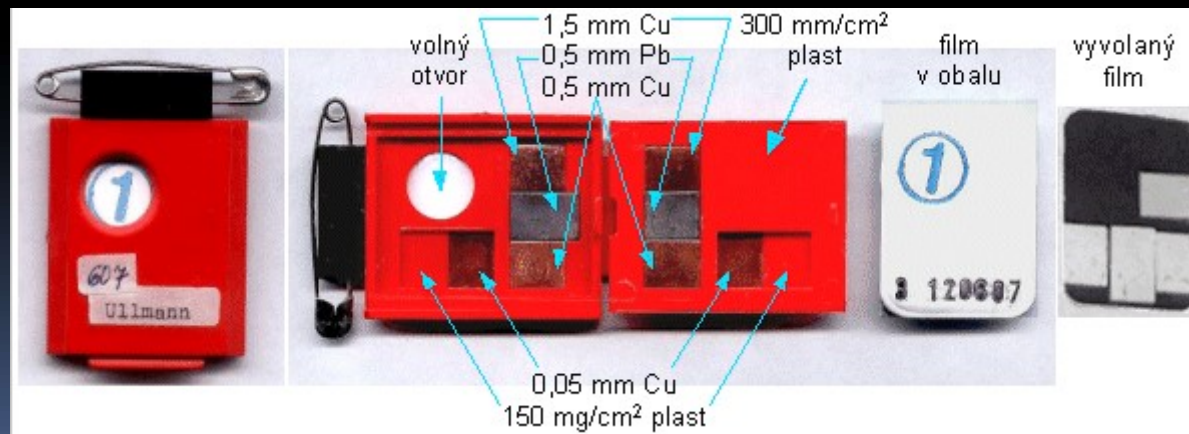
Energie potřebná k tvorbě jednoho páru elektron - díra je asi 10 x nižší než energie potřebná k tvorbě iontového páru v plynu a asi 50 x nižší než ionizační energie u scintilačních detektorů. Energetická rozlišovací schopnost polovodičových detektorů je proto značně lepší než rozlišovací schopnost detektorů plynových a scintilačních.

Nevýhodou polovodičových detektorů je nutnost nepřetržité udržování nízké teploty (kapalným dusíkem -196 °C), omezení dosažitelných rozměrů a tedy i menší geometrická účinnost.

➤ FILMOVÉ DOZIMETRY

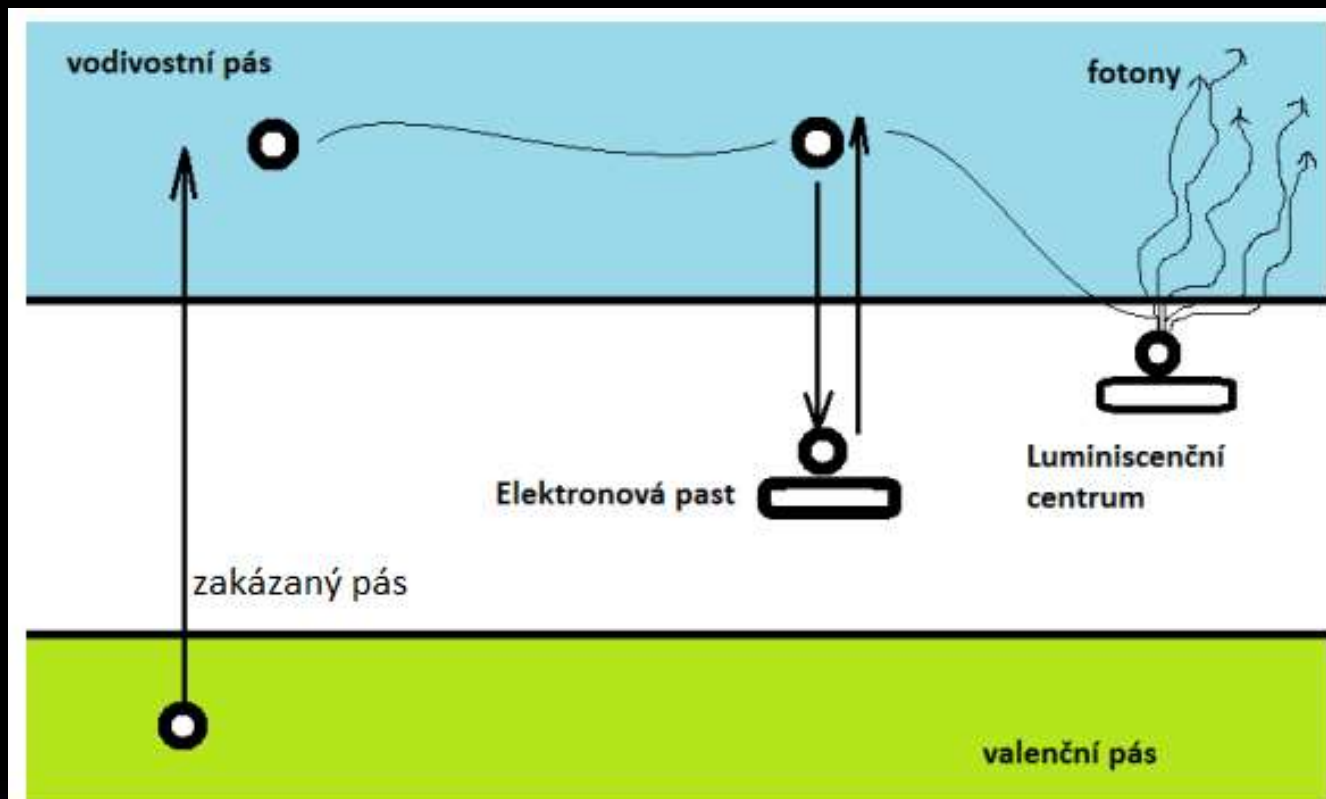
Základem filmového dozimetru je políčko fotografického filmu, světlotěsně zabalené do černého papíru. Ionizující záření prochází obalem filmu a ve fotoemulzi vytváří latentní obraz, který se vyvoláním zviditelní. Optická hustota zřednutí či zčernání filmu, kterou lze vyhodnocovat fotometricky, je pak mírou **integrálního množství záření**, které filmem prošlo během expozice. Filmové dozimetry se využívají především pro **osobní dozimetrii** pracovníků s ionizujícím zářením.

Plastové pouzdro je opatřeno filtry (Cu a Pb plíšky různých tlouštěk), které slouží k porovnání zčernání filmu pod jednotlivými filtry, z čehož lze odhadnout druh a zhruba i energii záření.



Termoluminiscenční (TLD) a fotoluminiscenční (OSL) dozimetry

- Termoluminiscence – jev, při kterém materiál, který byl ozářen IZ po zahřátí, nebo ozářením LED diodou emituje světlo
- ionizujícím zářením uvolněné elektrony přecházejí z valenčního pásma do vodivostního pásma, odkud se zachycují v místech poruchy krystalové mřížky materiálu na energeticky vzbuzených hladinách ("záchytné pasti") a dlouhodobě tam setrvávají. Z těchto hladin se elektrony nemohou dostat samovolně, ale uvolní se až dodáním určité energie (zahřátím nebo ozářením světlem).
- Zahřátím - **termoluminiscence** (tepelně stimulovaná luminiscence), nebo ozářením viditelným světlem - **OSL** (Opticky Stimulovaná Luminiscence), dochází k **deexcitaci** a elektrony se vrací zpět na nižší energetické hladiny (a do elektronových obalů atomů materiálu). Uvolněná excitační energie se vyzařuje ve formě **fotonů** viditelného světla - dochází k **luminiscenci**
- Čím větší radiační dávkou byl materiál ozářen, tím více elektronů se nashromáždilo v metastabilních hladinách a tím více fotonů je při vyhodnocení termoluminiscencí nebo OSL-luminiscencí vyzářeno: tento světelný výtěžek je tedy **úměrný radiační dávce** v ozářeném materiálu.



Obr. 1 Pásový model pevných látek

- Termoluminiscenční látky: *fluorid lithný* LiF , *fluorid vápenatý* CaF_2 , *síran vápenatý* CaSO_4 , *alumino-fosfátové sklo* $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$
- Fotoluminiscenční látky: *kysličník hlinitý* $\text{Al}_2\text{O}_3(:\text{C})$, aktivovaný uhlíkem

Vyhodnocení TLD dozimetru

- TLD reader
 - Vyhřívací těleso
 - Vyhodnocovací PMT
 - Používání vývěvy –
Zamezí znečištění vzorku



Vyhodnocení TLD dozimetru

- Vyhřívací křivka – je označení pro elektrický signál z fotonásobiče v závislosti na teplotě
- integrál (plocha pod křivkou) je **úměrná dávce** v dozimetru
 - Předohřev na teplotu 100°C po dobu 5s
 - Vlastní ohřev rychlostí 2°C/s na teplotu 270°C – tedy 70s
 - Zchlazení na teplotu 50 - 60°C
 - Po vyhodnocení se provede annealing
 - – zahřátí na teplotu 400°C po dobu 1h a 2h 100°C



Vyhodnocení OSL dozimetru

- K vyhodnocování se používá ozáření LED diodou, přičemž vzniká luminiscence, která je detekována fotonásobičem. Celková takto vzniklá luminiscence je opět úměrná ozáření dozimetru. Ve srovnání s TLD je vyhodnocení jednodušší a reprodukovatelnější (ozářování LED diodou se snadněji standardizuje než řízené teplotní vyhřívání).
- Oproti filmovým dozimetrům je zde výhoda vyšší radiační citlivosti a přesnosti, většího rozsahu měřených dávek, malé citlivosti na vnější vlivy (teplota, vlhkost, chemické výpary), možnost průběžného operativního vyhodnocení a **opakovaného použití** materiálu.

Osobní OSL dozimetr



LiF

Prstový TLD
dozimetr



OSL