

Biologické účinky ionizujícího záření

Účinky záření na buňku

- smrt buňky (při vyšších dávkách)
 - přímá, mezi buněčnými děleními
 - ztráta schopnosti dělení (**mitotická smrt**)
- změna v genetické informaci (při nižších dávkách)
 - **gametické mutace** – poškození zárodečných buněk (→ příští generace)
 - **somatické mutace** – poškození ostatních buněk (→ ozářený jedinec)

Vztah dávky a účinku

- **deterministické** (tkáňové) **účinky**
 - **prahové** účinky
 - důsledek buněčné smrti, charakteristický klinický obraz
 - s rostoucí dávkou **roste závažnost**
- **stochastické** (pravděpodobnostní, statistické) **účinky**
 - **bezprahové** účinky
 - důsledek genetických mutací, nelze odlišit od jiných (spontánních) příčin
 - s rostoucí dávkou se (lineárně) **zvyšuje pravděpodobnost**

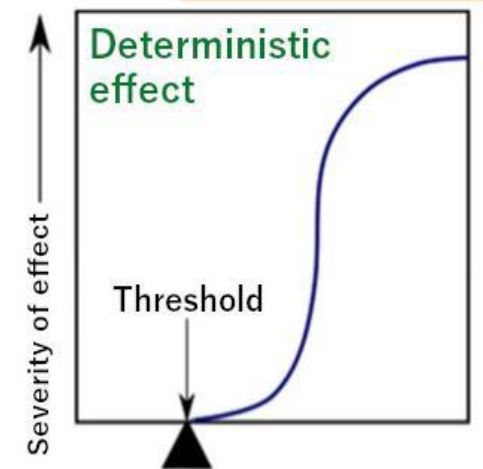
Účinky ionizujícího záření na lidský organismus

hlavní účinky u člověka

1. Akutní nemoc z ozáření (č)
 2. Akutní lokální změny (č)
 3. Nenádorová pozdní poškození (p)
 4. Poškození plodu v těle matky (č+p)
 5. Zhoubné nádory (p)
 6. Genetické změny (p)
- Dělení podle dávky a účinku
 - deterministické (č+p, s)
 - stochastické (p, s+g)
 - Dělení podle doby, za kterou se projeví klinické účinky
 - časné (č) – hodiny až dny po ozáření
 - pozdní (p) – měsíce až roky po ozáření
 - Dělení podle projevů u ozářené osoby nebo v dalších generacích
 - somatické (s) – projeví se u ozářené osoby
 - genetické (g) – projeví se až v další generaci (generacích)

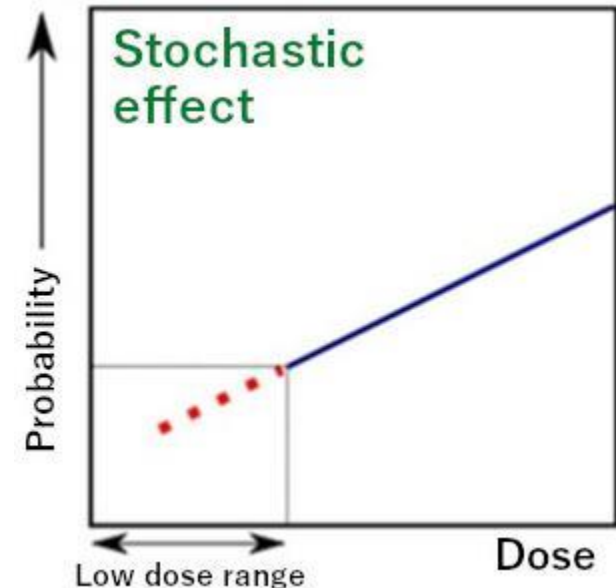
Deterministické účinky

- **prahové** účinky – projevy až po překročení určité dávky (podle orgánu), **míra poškození roste s velikostí dávky**
- **lokální** účinek – projevy v místě ozáření
- **jednorázové** ozáření (kratší časový interval) – nižší prahové dávky
protrahované ozáření (delší časový interval) – vyšší prahové dávky (2x – 10x)
- **klinické projevy** prokazatelně způsobené ozářením
 - akutní nemoc z ozáření (akutní radiační syndrom, ARS) $D > 1 \text{ Gy}$
 - radiační poškození kůže (radiodermatitida) $D > 2 \text{ Gy}$
 - radiační poškození oční čočky $D > 3 \text{ Gy}$
 - postižení fertility (neplodnost) $D > 250 \text{ mGy} - 3 \text{ Gy}$
- tkáně s vysokou **radiosenzitivitou** (rychlé buněčné dělení)
 - vysoká: kostní dřeň, lymfoidní orgány, pohlavní žlázy, střevo
 - střední: kůže, hltan, jícen, žaludek, močový měchýř, oční čočka
- charakterizujeme pomocí veličiny **ekvivalentní dávka** H_T případně **dávka** D



Stochastické účinky

- **bezprahové** účinky – mohou vznikat při nízkých dávkách, **pravděpodobnost výskytu roste s velikostí efektivní dávky, velikost účinku nezávisí na velikosti dávky**
- **nelokální** účinek – projevy mohou být mimo místo ozáření
- nerozlišuje se jednorázové a protražované ozáření
- **klinické projevy** prokazatelně způsobené ozářením
 - **rakovinové bujení** (somatické účinky)
koeficient rizika smrti $400 \times 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$
 - **genetické účinky** (zárodečné buňky)
např. Downova nemoc, nižší IQ, snížená motorika
- tkáně s vysokou **radiosenzitivitou na stochastické účinky**
 - kostní dřeň, žaludek, plíce
- charakterizujeme pomocí veličiny **efektivní dávka** E , důležitý je **tkáňový váhový faktor** w_T



Zdroje ozáření obyvatelstva

Poměr ozáření populace z přírodních a umělých zdrojů je cca 5:1 (87% ku 13%)

1. Přírodní ozáření (závisí na lokalitě)

- **radon** a (dceřiné) produkty jeho přeměny **54%**
 - rozpad ^{226}Ra (uranová rozpadová řada)
 - podloží budov (půdní vzduch), spodní voda, stavební materiály
- **kosmické záření** **16%**
 - pravidlo palce: 2x větší dávka každých 1,5 km
 - největší mezi 30. a 60 rovnoběžkou, nejmenší na rovníku
- γ záření **zemské kůry** (^{40}K) **19%**
- **vnitřní ozáření** (^{40}K , ^{14}C) **11%**
- kumulace dávek – nelze regulovat

Průměrná roční efektivní dávka na jednoho obyvatele způsobená ozářením z přírodních zdrojů je 2.4 mSv (Země) – 3.5 mSv (ČR).

Zdroje ozáření obyvatelstva

Poměr ozáření populace z přírodních a umělých zdrojů je cca 5:1 (87% ku 13%)

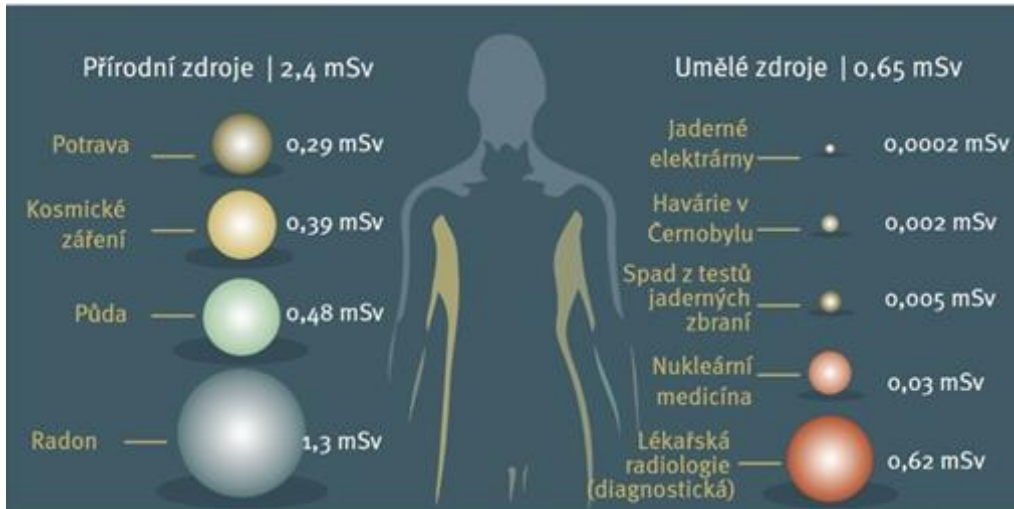
2. Umělé ozáření (závisí na zemi)

- **lékařské ozáření** (vyspělé země) **93%**
 - rentgenová diagnostika (nejvíce úkonů)
 - okrajově nukleární medicína a terapie
- jaderná energetika (běžný provoz) **1%**
- profesionální ozáření **2%**
- radioaktivní spad (Černobyl aj.) **2%**
- různé další zdroje **2%**
 - TV, monitory, drobné zdroje, spotřební výrobky

Průměrná roční efektivní dávka na jednoho obyvatele ČR z radiodiagnostických úkonů je cca 1.2 mSv.

Zdroje ozáření obyvatelstva

Průměrné expozice obyvatel podle zdrojů záření*



* Zaokrouhlené odhady efektivních dávek na jednoho obyvatele za rok (celosvětový průměr).

jednorázové ozáření	[mSv] <i>E</i> (mSv)
rentgenový skener na letišti	$0,25 \times 10^{-3}$
rentgen zubů	$5 - 10 \times 10^{-3}$
mamogram	0,4 – 0,6
CT sken celého těla	10 – 30
Fukushima (maximální dávka na evakuované obyvatele)	25 (< 2 for 94%)

Rozdělení dávek obyvatelstvu



opakované ozáření	<i>E</i> (mSv/rok)
kosmické záření (< 1000 m)	0,3 mSv / rok
přirozené pozadí	2,4 mSv / rok
radioizotopy v těle	0,29 mSv / rok
pozadí na palubě letadla	$10 \mu\text{Sv} / 10^3 \text{ km}$
Fukushima (místo s nejvyšším zamořením)	400 mSv / h

Cíle a principy radiační ochrany

Cíle radiační ochrany

- **vyloučení** deterministických účinků (základní limity)
- **snížení pravděpodobnosti** vzniku stochastických účinků (optimalizace)

Principy radiační ochrany

1. princip **zdůvodnění**
2. princip **optimalizace**
3. princip **limitování**
4. princip **bezpečnosti zdrojů** ionizujícího záření

Principy radiační ochrany

1. Princip zdůvodnění

- činnost musí být odůvodněna **přínosem, který vyváží možná rizika**

$$B = V - (P + X + Y)$$

B čistý přínos

V hrubá hodnota výsledku činnosti
(hodnota výrobku, společenský přínos)

P výdaje na výrobu
(zahrnuje ztráty pro společnost a náklady na neradiační ochranu)

X náklady na radiační ochranu

Y ztráty odpovídající újmě z ozáření

- vhodné relativní srovnání s alternativní činností

Principy radiační ochrany

2. Princip optimalizace

- princip **ALARA** = „**As-Low-As-Reasonably-Achievable**“
- riziko tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout při použití dostupných prostředků a při uvážení hospodářských a společenských hledisek
- **optimalizační meze** pro plánované expozice
- **referenční úrovně** pro existující a nehodové expozice
- porovnání nákladů na opatření a finančního ohodnocení tzv. ušetřené dávky (finanční ekvivalenty 1 Sv ve vyhlášce 422/2016 Sb.)

Principy radiační ochrany

3. Princip limitování

- **obecné limity** (pro obyvatele) **1 mSv/rok**
NEBO 15 mSv/rok (oční čočka) NEBO 50 mSv/rok (1 cm² kůže)
- **limity pro radiační pracovníky** **20 mSv/rok**
NEBO 100 mSv/5 let a max 50 mSv/rok (oční čočka)
NEBO 500 mSv/rok (1 cm² kůže, končetiny)
- limity pro žáky a studenty **6 mSv/rok**
NEBO 15 mSv/rok NEBO 150 mSv/rok (1 cm² kůže, končetiny)
- limity se nevztahují na přírodní zdroje, lékařské expozice, havarijní ozáření
- **odvozené limity** – pomocné ukazatele vyjádřené v měřitelných veličinách
- **dávkové optimalizační meze** – závazné ukazatele jako výsledek optimalizace

Principy radiační ochrany

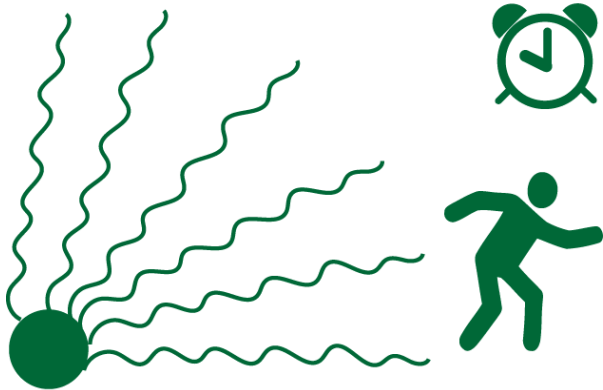
4. Princip bezpečnosti zdrojů ionizujícího záření

- **zabezpečení zdrojů tak**, aby nemohlo dojít ke ztrátě kontroly za předvídatelných podmínek
- zábrana odcizení a přístupu nepovolaných osob
- trvalé sledování zdroje a hlášení ztráty
- předání zdroje jen držiteli platného povolení
- pravidelná inventarizace radionuklidových zdrojů
- technická bezpečnost zdrojů
- **omezení potenciálního ozáření**

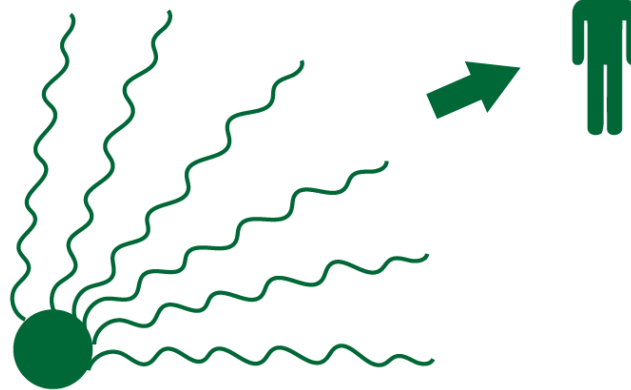
Způsoby ochrany před zevním ozářením

1. Ochrana vzdáleností
2. Ochrana stíněním
3. Ochrana časem

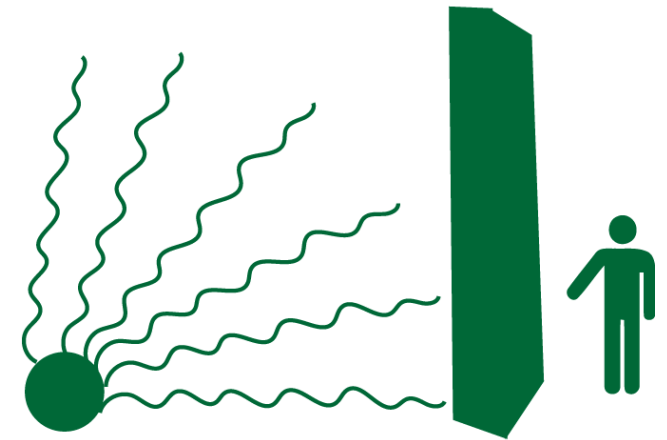
To reduce radiation exposure:



Limit Time



Increase Distance



Use Shielding

Způsoby ochrany před zevním ozářením

Ochrana vzdáleností (bodový zdroj ve vzduchu)

- radiační zátěž **zdrojů záření γ a X**

$$\dot{D}_\gamma = \frac{A\Gamma}{r^2}$$

A – aktivita zdroje

Γ – **dávková konstanta** v $\text{mGy m}^2\text{h}^{-1}\text{GBq}^{-1}$

např. ^{22}Na : $\Gamma = 0.282$

^{137}Cs : $\Gamma = 0.0768$

- radiační zátěž **zdrojů β záření**

- zanedbáváme absorpci β ve vzduchu \rightarrow konzervativní přístup: pokles dávkového příkonu se čtvercem vzdálenosti podobně jako u γ

- **brzdné záření** vznikající v materiálu zdroje

$$\dot{D}_b = \frac{A\Gamma_b Z}{r^2 26}$$

Z – protonové číslo materiálu obklopujícího zdroj

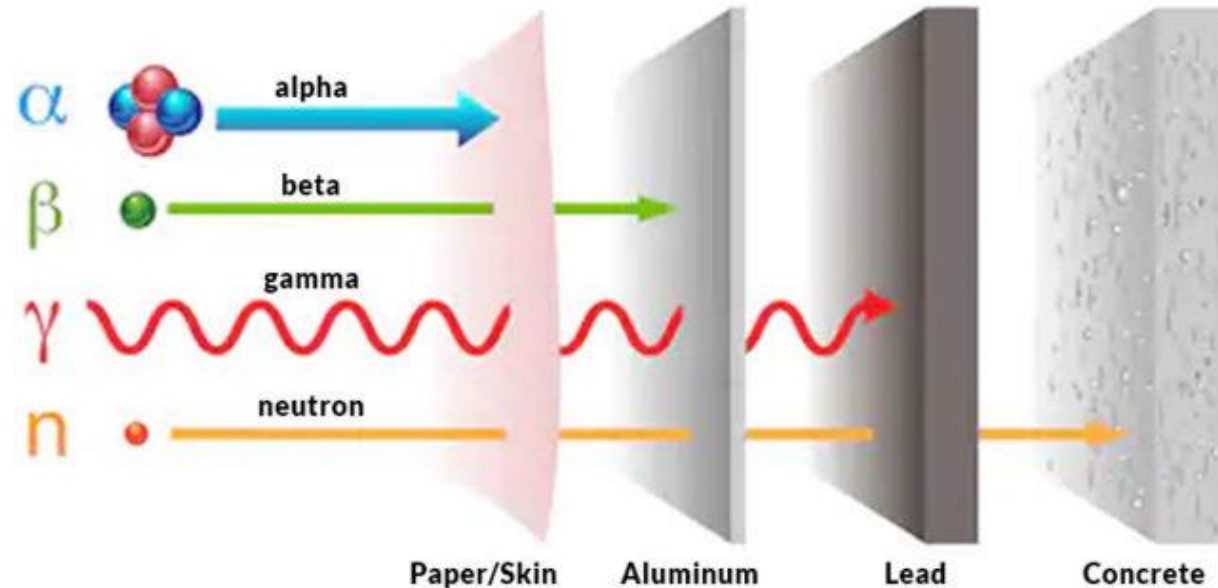
Γ_b – **dávková konstanta brzdného záření** v $\text{mGy m}^2\text{h}^{-1}\text{GBq}^{-1}$

např. ^{14}C : $\Gamma_b = 3.24 \times 10^{-5}$ (pro $Z = 26$)

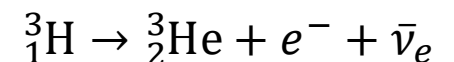
^{32}P : $\Gamma_b = 1.84 \times 10^{-3}$ (pro $Z = 26$)

Způsoby ochrany před zevním ozářením

2. Ochrana stíněním



- stínění záření α
 - krátký dolet: list papíru nebo několik cm vzduchu
- stínění záření β
 - lehké látky s nízkým Z (kvůli brzděnému záření), násobek dosahu (několik mm)
 - kombinované stínění při velké aktivitě zdroje (velká intenzita brzděného záření)



Způsoby ochrany před zevním ozářením

2. Ochrana stíněním

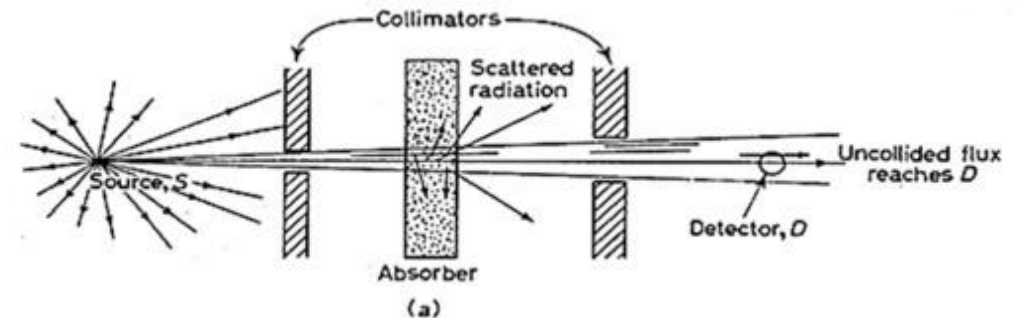
- stínění záření γ a X
 - **fotoefekt** ($\sigma \sim Z^5$), Comptonův rozptyl ($\sigma \sim \rho_e$), tvorba párů ($\sigma \sim Z^2$)
 - těžké materiály s vysokým Z (a hustotou)

a) úzký svazek

$$\dot{D} = \dot{D}_0 e^{-\mu d}$$

μ – lineární součinitel zeslabení

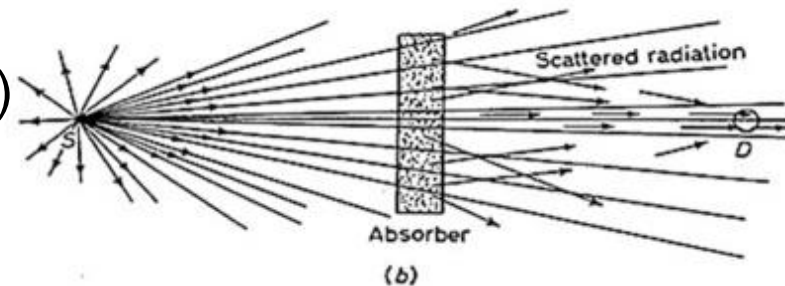
d – tloušťka stínění



b) široký svazek (+ rozptýlené fotony)

$$\dot{D} = B \dot{D}_0 e^{-\mu d}$$

B – vzrůstový faktor ($B > 1$)



Způsoby ochrany před zevním ozářením

2. Ochrana stíněním

- stínění záření γ a X

- **polotloušťka** (podobně jako poločas rozpadu) $d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$
- stínění ideálně 7 polotloušťek: $2^{-7} \doteq 0.0078 < 1\%$
- stínění ideálně 10 polotloušťek: $2^{-10} \doteq 0.00098 < 0.1\%$
(princip optimalizace)
- materiály vzestupně podle účinnosti: cihly, beton, olovo, wolfram, uran
- ekonomicky výhodnější použít levnější materiál ve větším množství (tloušťce)

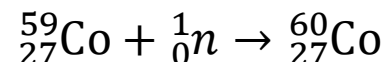
Způsoby ochrany před zevním ozářením

2. Ochrana stíněním

- stínění neutronového záření
 - zpomalení **rychlých neutronů** ($w_R = 20$) pružným rozptylem na jádrech atomů
→ lehké materiály bohaté na vodík (voda, parafin, polyetylen)
 - absorpce **pomalých neutronů** ($w_R = 2 - 5$) záchytem jádry atomů
→ kadmium, bor, indium

provázena emisí γ (dodatečné stínění)

pozor na aktivaci stínícího materiálu (vznik radionuklidů)



(v některých ocelích, poločas rozpadu 5,3 let)

Způsoby ochrany před zevním ozářením

3. Ochrana časem

- dávka vs dávkový příkon $D = \dot{D} \cdot t$
 - organizace a efektivita práce, střídání pracovníků
 - doporučuje se nacvičit si všechny manipulace bez zdroje
-

Ochrana před kontaminací radionuklidy

- kontaminace požitím, vdechnutím, proniknutím kůží a sliznicemi (aktivita)

- biogenní radionuklidy (chemicky podobné biogenním prvkům)

např. ^{131}I , ^{132}I (štítná žláza, jód)
 $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$ (kost, vápník)
 ^{137}Cs (svalovina, draslík)

- biologický poločas T_B , poločas rozpadu $T_{1/2} \rightarrow$ efektivní poločas $T_E = \frac{T_{1/2} T_B}{T_{1/2} + T_B}$

Legislativa v radiační ochraně

- [Zákon č. 263/2016 Sb.](#)
- [Vyhláška č. 422/2016 Sb.](#) o radiační ochraně zabezpečení radionuklidového zdroje
- [Státní úřad pro jadernou bezpečnost \(SÚJB\)](#) – metodické návody
- zdroje ionizujícího záření
 - generátory
 - otevřené / uzavřené radionuklidové zdroje
 - nevýznamné (NVZ), drobné (DZ), jednoduché (JZ), významné (VZ), velmi významné (VVZ)
- kategorizace pracovišť
 - pracoviště kategorie I. až IV.
 - kontrolované a sledované pásmo
 - radiační pracovníci kategorie A a B

Detektory ionizujícího záření

Typy detektorů

- **integrální** (filmové, luminiscenční) → **dozimetry**
 - celková informace za dobu ozařování
- **kontinuální** (ionizační, scintilační, polovodičové) → **detektory, čítače**
 - průběžná informace, okamžitá hodnota

Požadovaná informace

- energie
- čas příletu
- poloha
- typ částice / záření

Citlivost detektoru

- účinný průřez
- objem
- vnitřní šum
- vstupní okno

Integrální detektory

- **filmové dozimetry**
 - latentní obraz na fotografickém materiálu
 - vyvolání: optická hustota (zčernání) je **měrou dávky**
 - + vysoká citlivost, trvalost záznamu, nízká cena
 - malá přesnost, energetická závislost, malý rozsah
- **luminiscenční dozimetry (termoluminiscenční a fotoluminiscenční)**
 - zachycení generovaných elektronů a děr v lokálních defektech
 - ohřev / osvětlení: uvolnění nosičů a vyzáření energie ve formě elektromagnetického záření (UV-VIS)
 - intenzita světelného impulzu (do fotonásobiče) je **měrou dávky**
 - + velký rozsah, malá energetická závislost, rychlé vyhodnocení
 - nákladné vyhodnocování, není trvalost záznamu

Kontinuální detektory

- **ionizační detektory** (plyn + 2 elektrody)
 - ionizace plynu → elektrický puls
 - nízké nebo žádné energetické rozlišení
 - měření dávky (čítače)
- **scintilační detektory** (scintilátor + fotonásobič)
 - světelný záblesk (scintilátor) → elektrický puls (fotonásobič)
 - vysoké časové rozlišení, střední energetické rozlišení
 - spektrometrická měření
- **polovodičové detektory** (PN přechod v závěrném směru)
 - generace párů elektron-díra → elektrický puls
 - vysoké energetické rozlišení, nízké časové rozlišení
 - spektrometrická měření

Kontinuální detektory

Výstupní signál detektoru (proudový puls $p(t)$) $E \propto N \propto Q = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} p(t) dt$

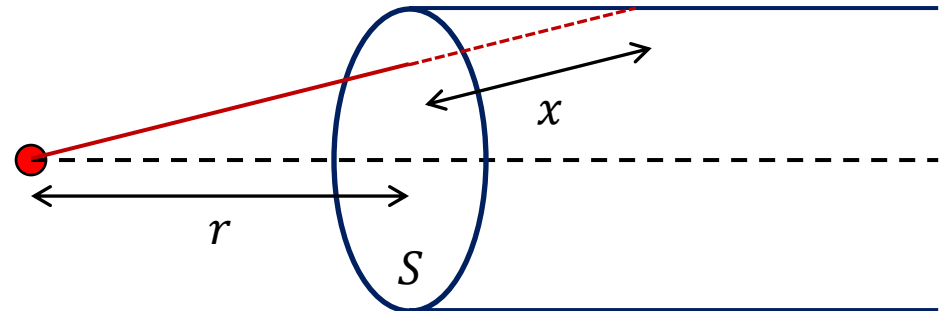
Účinnost detektoru

- η_{tot} = počet registrovaných událostí ku počtu událostí emitovaných zářičem

$$d\eta_{tot} = \left(1 - e^{-\frac{x}{\lambda}}\right) \frac{S}{4\pi r^2}$$

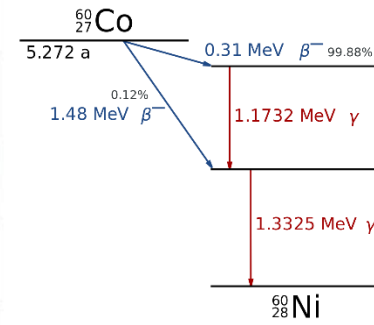
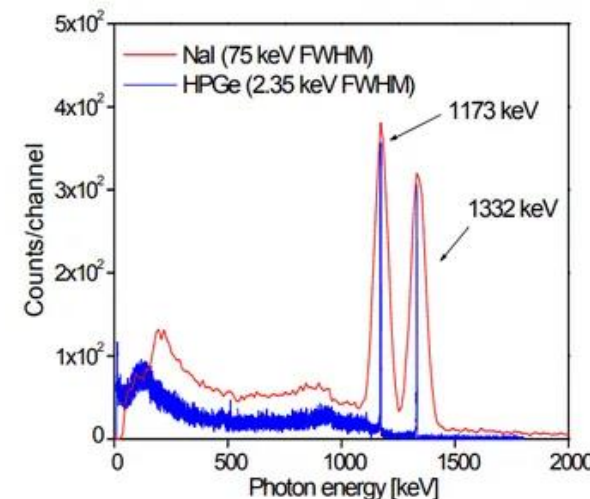
$$\eta_{tot} = \eta_{int} \eta_{geom}$$

interní účinnost geometrická účinnost



Energetické rozlišení detektoru $R = \frac{\Delta E}{E}$

- ΔE = FWHM (“Full Width at Half Maximum”)
- kompletní/nekompletní absorpce energie



Detektory – energetické rozlišení

- Částice zanechala energii E , s jakým rozlišením ji naměříme?

$$R = \frac{\Delta E}{E} = 2\sqrt{2 \ln 2} \frac{\sqrt{N}}{N} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{E}}$$

- Naivní model:
 - Dojde k N ionizacím,
 - N je náhodné, s Poissonovým rozdělením,
 - Tedy $\sigma_N = \sqrt{N}$,
 - $N = E / \varepsilon$,
 - ε je střední energie ionizace

$$[\Delta E] = \text{FWHM}$$

Pro Gaussián:

$$\Delta E = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma_E \sim 2.35 \sigma_E$$

(std. odchylka E)

- V reálných materiálech:
 - Rozlišení je lepší, než předpověď Poissonova rozdělení
 - $\sigma_N = \sqrt{FN}$
 - Fano faktor $F < 1$
 - Si, Ge: $F = O(0.1)$
- Ovšem, často je pro rozlišení detektoru limitující spíše:
 - Šum elektroniky,
 - Fluktuace v deponované energii samotné.

Ionizační detektory

1. ionizační komory

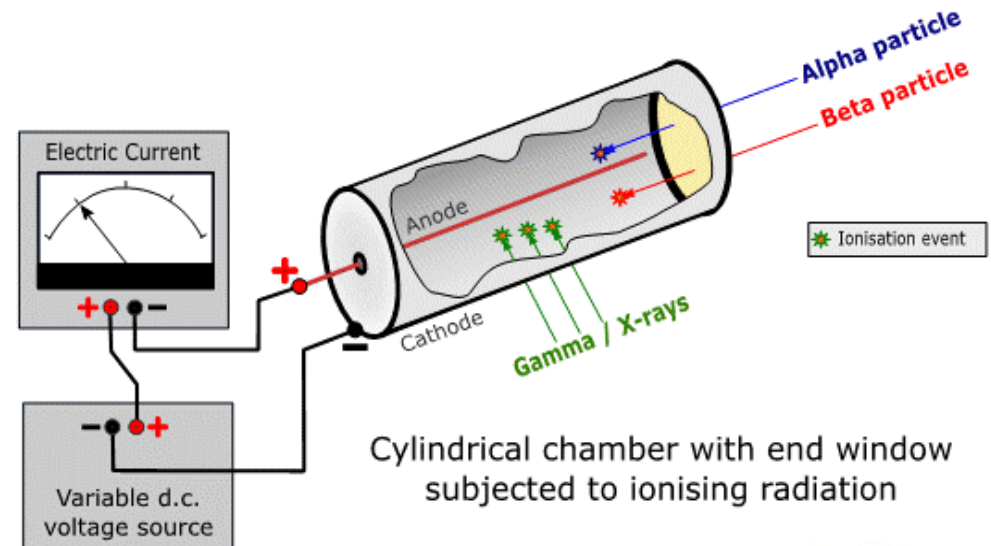
- primární ionizace (bez zesílení)
- pro vysoké dávkové příkony

2. proporcionální čítače

- sekundární ionizace (zesílení úměrné napětí)
- energeticky citlivé

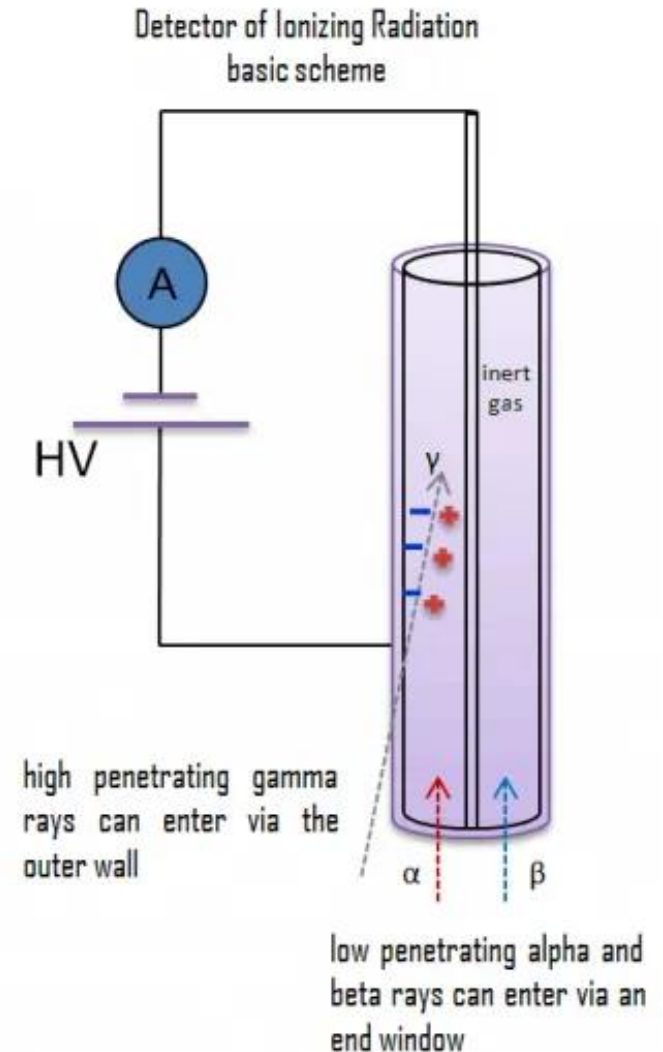
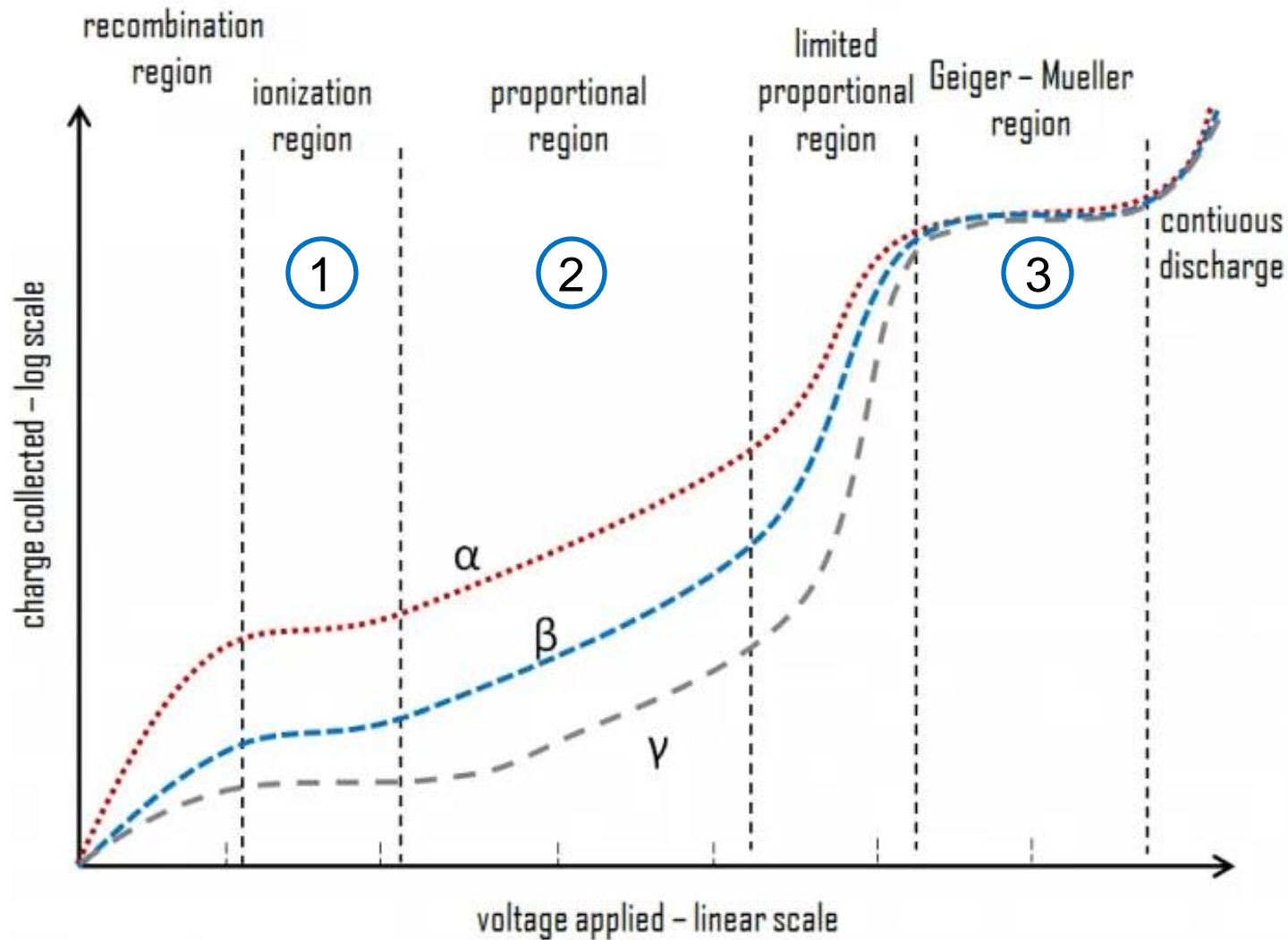
3. Geiger-Müllerovy čítače

- sekundární ionizace + excitace (bez zesílení)
- bez energetického rozlišení, mrtvá doba $10^{-4} - 10^{-5}$ s
- měření četnosti pulzů a (ekvivalentní) dávky



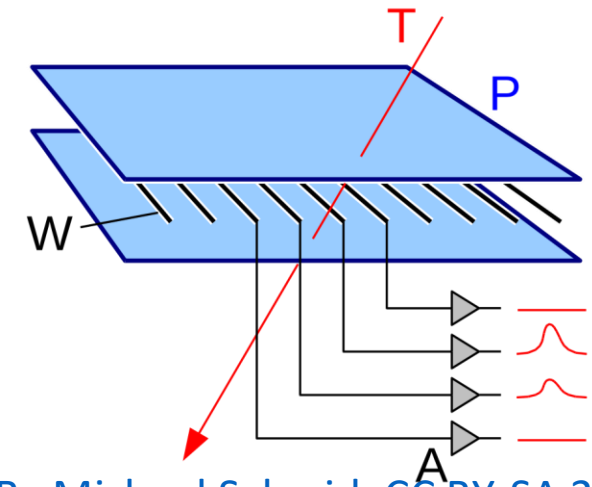
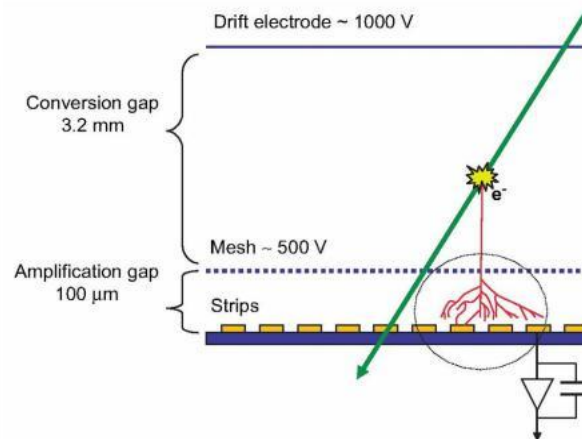
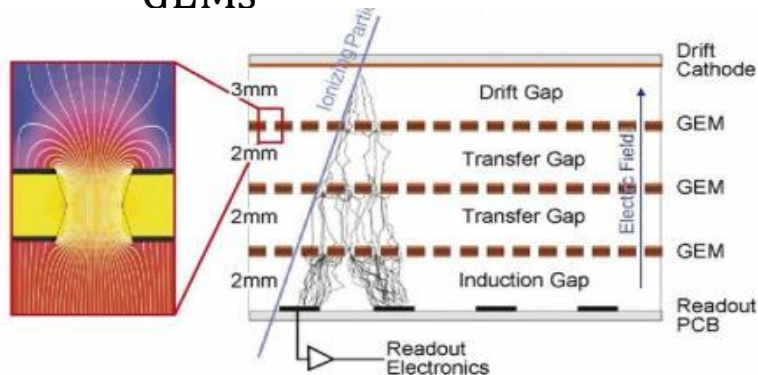
Ionizační detektory

Regions of Gaseous Ionization Detectors

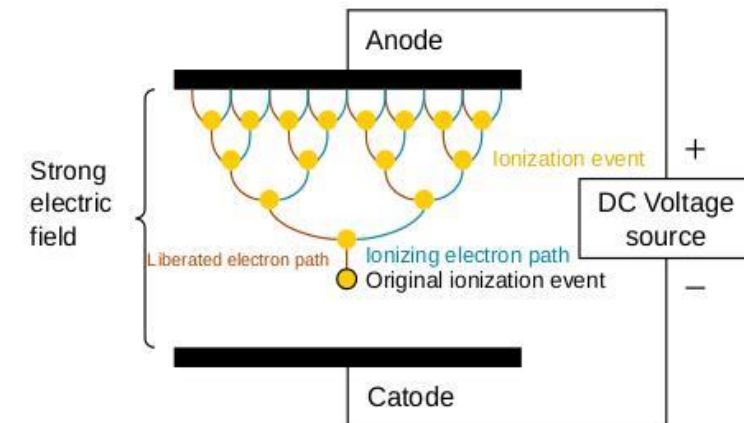


Ionizační detektory -- prostorové rozlišení

- Proporcionální drátová komora (multi-wire proportional chamber, MWPC)
 - Nobelova cena: Georges Charpak,
 - První detektor částic umožňující elektronické zpracování měření.
 - Rozlišení cca 1 mm.
- Driftová komora
 - Měří se čas driftu elektronu do blízkosti drátu
 - Rozlišení až 0.1 mm
- Micro-pattern detectors: rozlišení 0.1 mm
 - Micromegas
 - GEMs



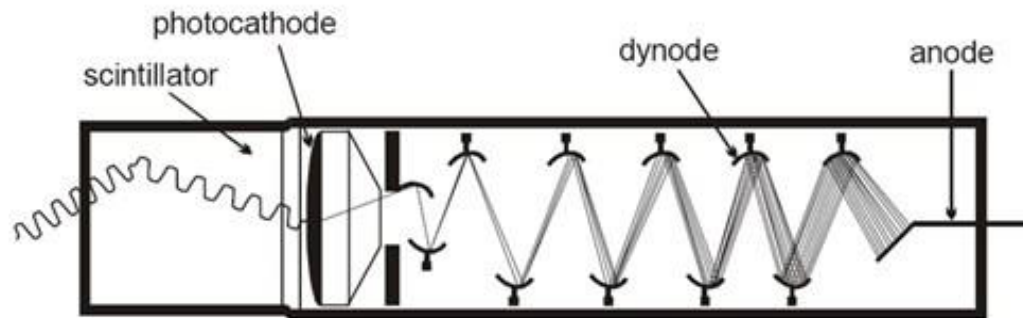
[By Michael Schmid, CC BY-SA 3.0](#)



Townsendova lavina.

[DougSim, Wikimedia Commons]

Scintilační detektory



scintilační detektor = scintilátor + fotonásobič



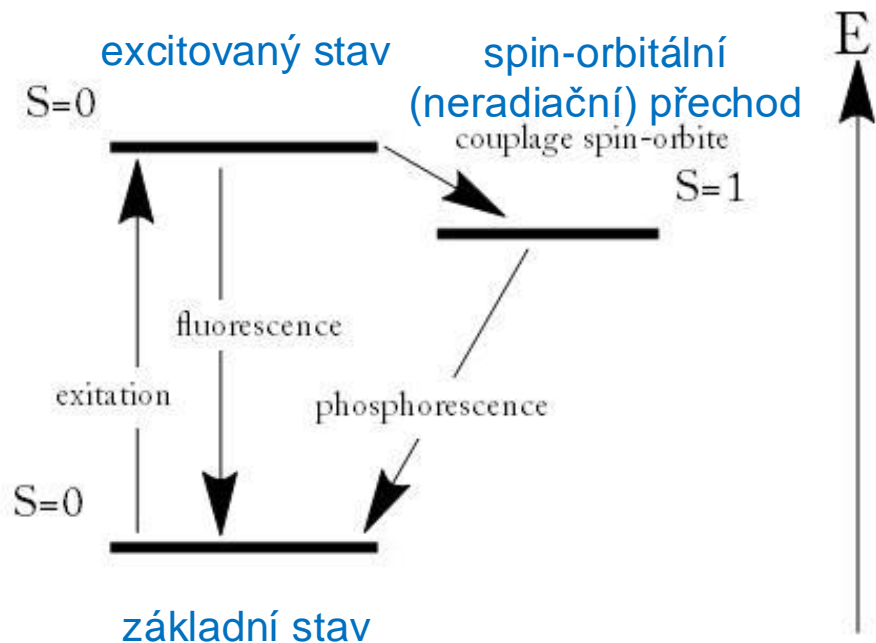
- **scintilátor**
 - převede γ/X foton na elektromagnetické záření
 - excitace mnoha elektronů \rightarrow de-excitace skrze vyzáření UV/VIS fotonu
- **fotonásobič**
 - převede UV/VIS záblesk na napěťový puls
 - vytvoření kaskády elektronů na soustavě dynod, sběr na anodě
 - lineární odezva na energii (ALE špatné energetické rozlišení)
 - rychlá časová odezva (výborné časové rozlišení)
 - diskriminace podle tvaru pulzů (odfiltrování falešných signálů)

Scintilátory

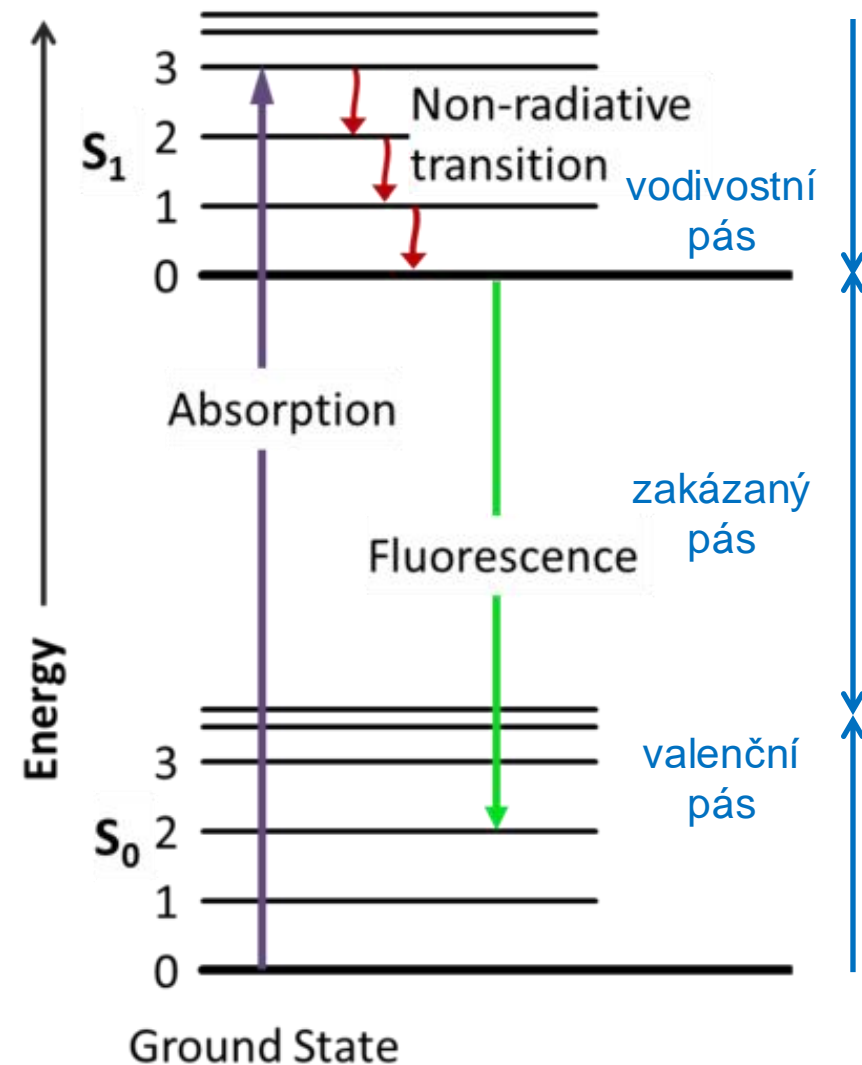
- luminiscence (scintilace)

fluorescence (rychlá): $\tau < 100$ ns

fosforescence (pomalá): $\tau > 100$ ns



pásová struktura (band structure)



Scintilátory

ZnS

SrAl₂O₄



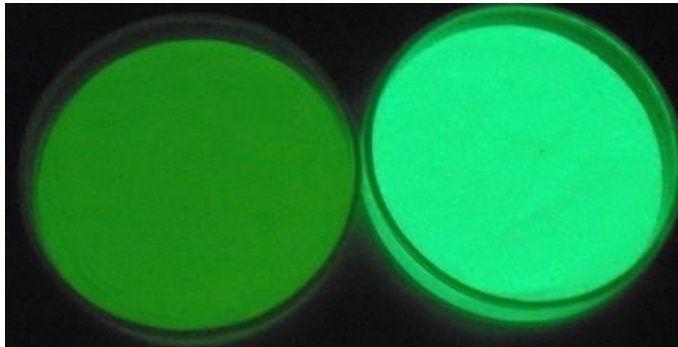
na světle

excitace UV zářením

fluorescence (glow)

$S = 0 \text{ (ex.)} \rightarrow S = 0 \text{ (gr.)}$

radiační přechod
rychlá de-excitace



10 s

fosforescence (afterglow)

$S = 1 \text{ (ex.)} \rightarrow S = 0 \text{ (gr.)}$



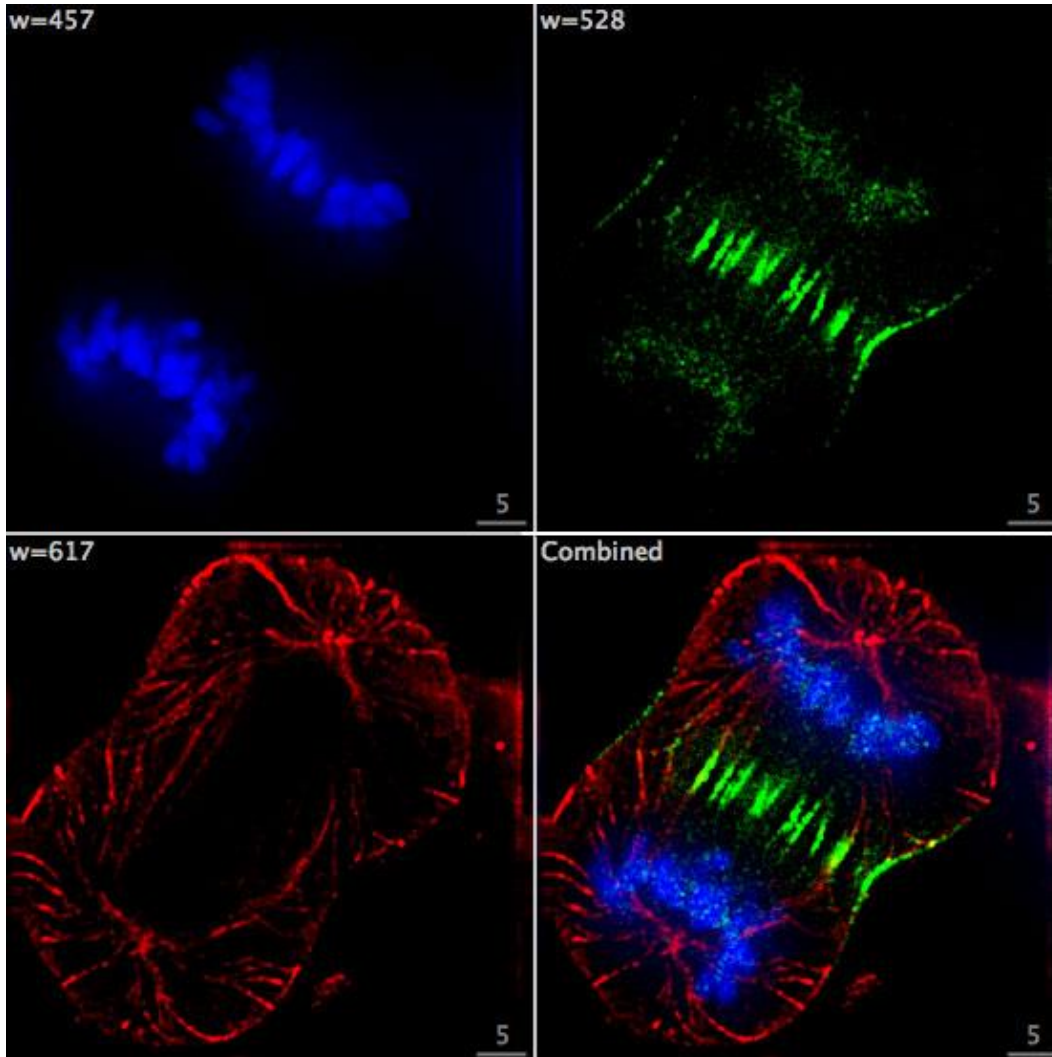
4 min

nutná konverze spinu
pomalá de-excitace

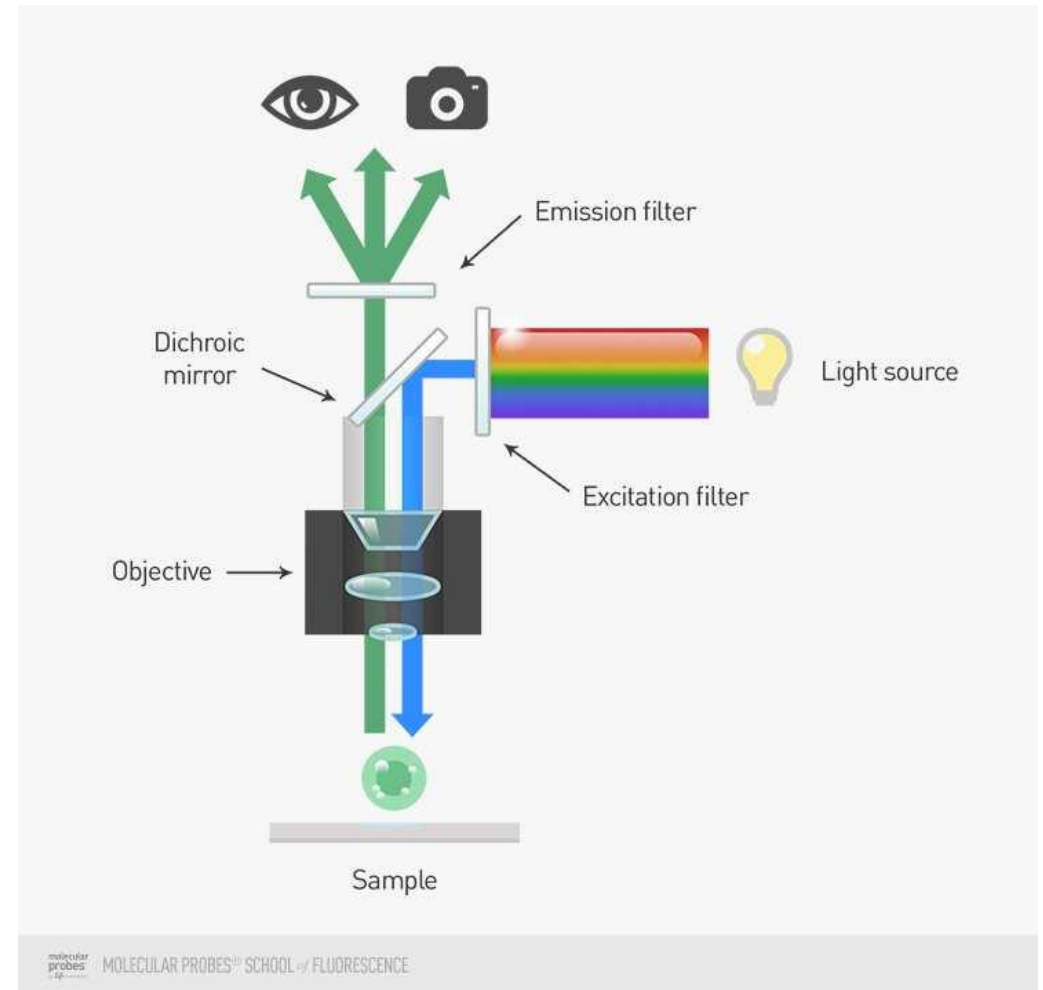
obvykle konkurenční procesy

Scintilátory

dělení buňky (mitóza)



epifluorescenční mikroskop



Scintilátory

- ideální scintilátor
 - vysoký světelný výtěžek
 - nulová absorpce na fluorescenční vlnové délce
 - emise v oblasti 300 – 600 nm (kvazispojité spektrum)
 - rychlá de-excitace (krátká rozpadová konstanta τ)

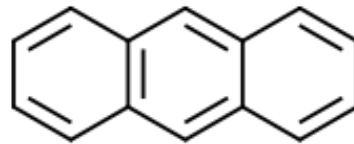
$$N(t) = \frac{N_0}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \text{jedno-komponentní spektrum}$$

$$N(t) = N_0 \sum_i \frac{I_i}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad \text{multi-komponentní spektrum } \sum_i I_i = 1$$

Scintilátory

- organické scintilátory
 - organické krystaly (anizotropní výstup)

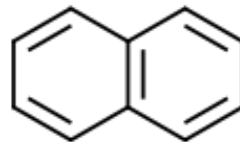
antracén



vysoký světelný výtěžek

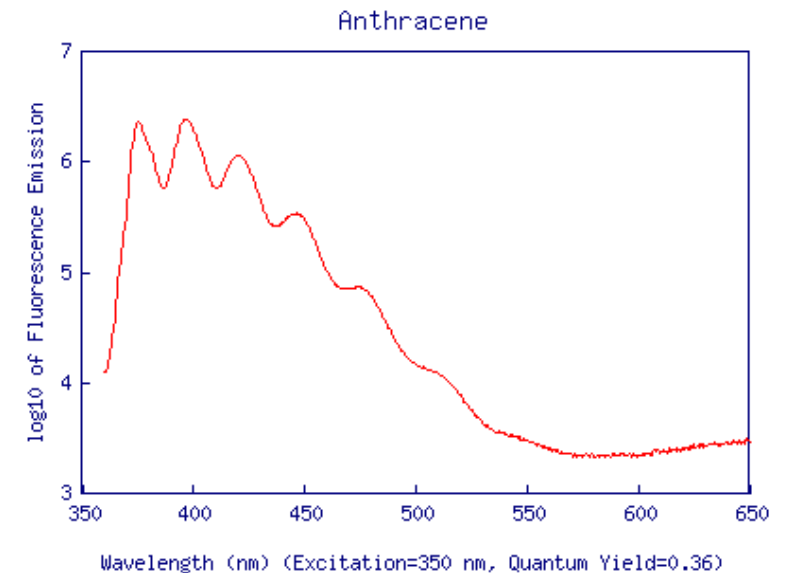
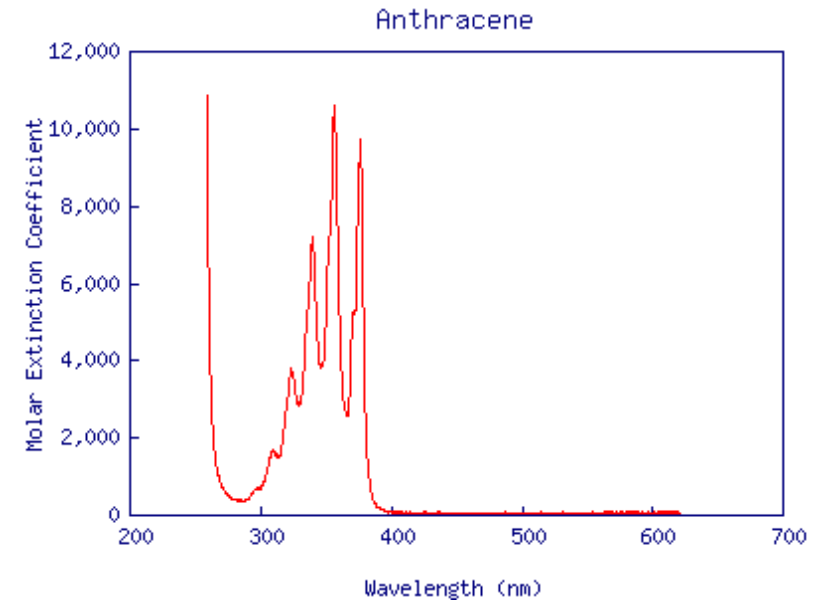
$\tau \approx 30$ ns

naftalen



vysoký světelný výtěžek

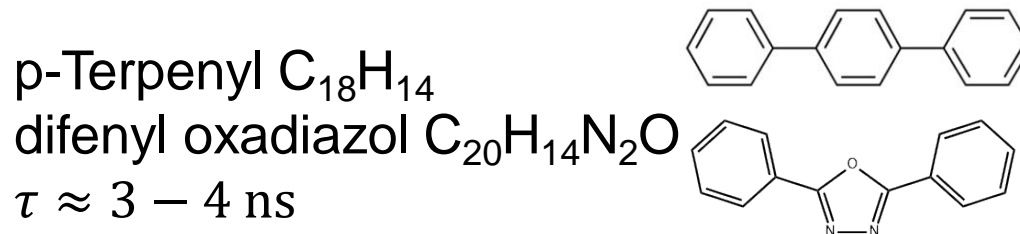
$\tau \approx 5$ ns



Scintilátory

- organické scintilátory
 - organické kapaliny (izotropní výstup)

organický scintilátor rozpuštěný v organickém rozpouštědle (xylen, toluen, benzen)

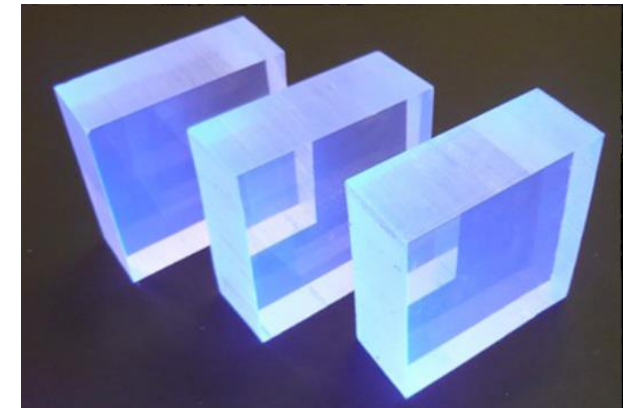
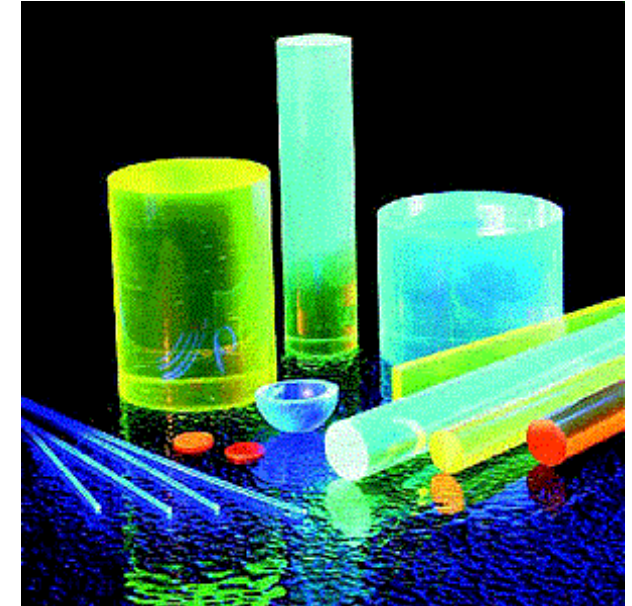


- plastické scintilátory (izotropní výstup)

organický scintilátor rozpuštěný v pevném polymeru (PS, PC)

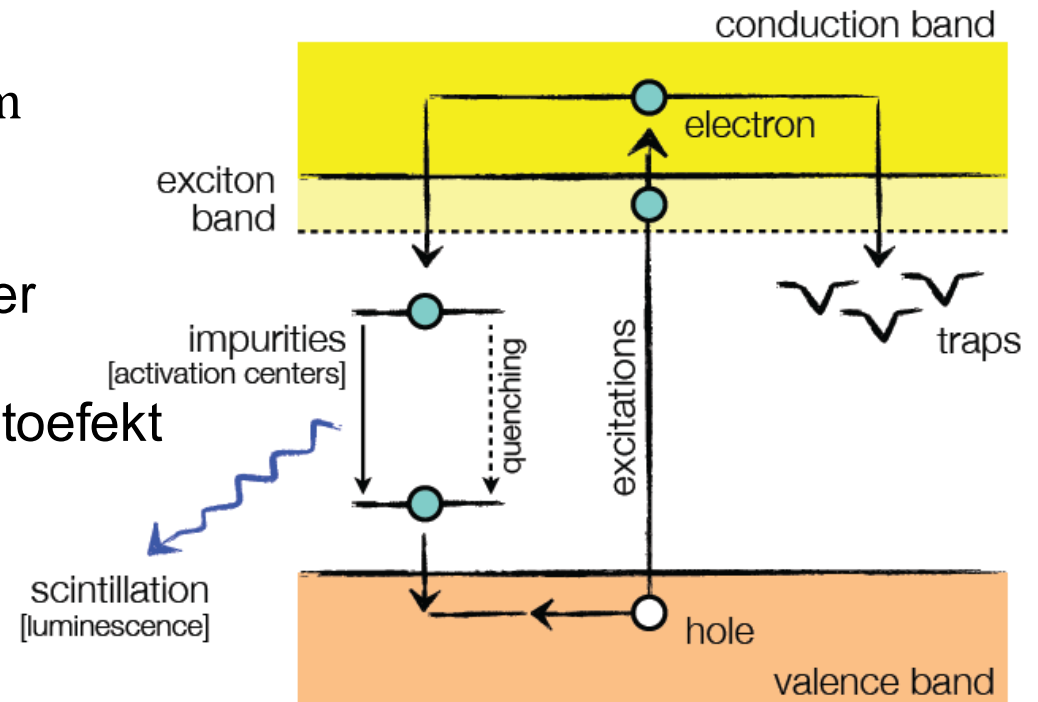
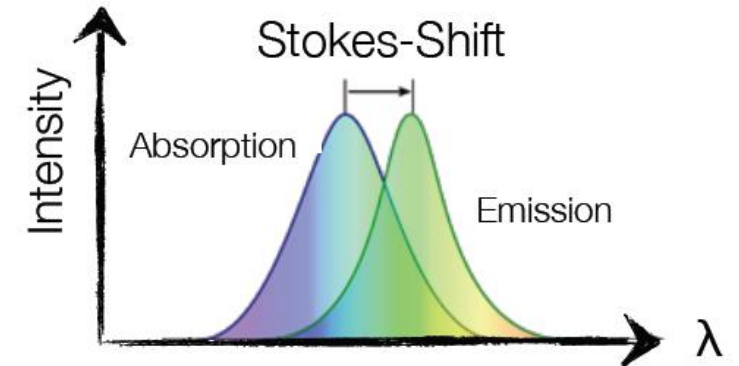
NE102A: výtěžek 65%, $\tau = 2.4$ ns, $\lambda_{\max} = 418$ nm

PILOT U: výtěžek 40 – 45%, $\tau = 0.4 - 0.6$ ns, $\lambda_{\max} = 390$ nm



Scintilátory

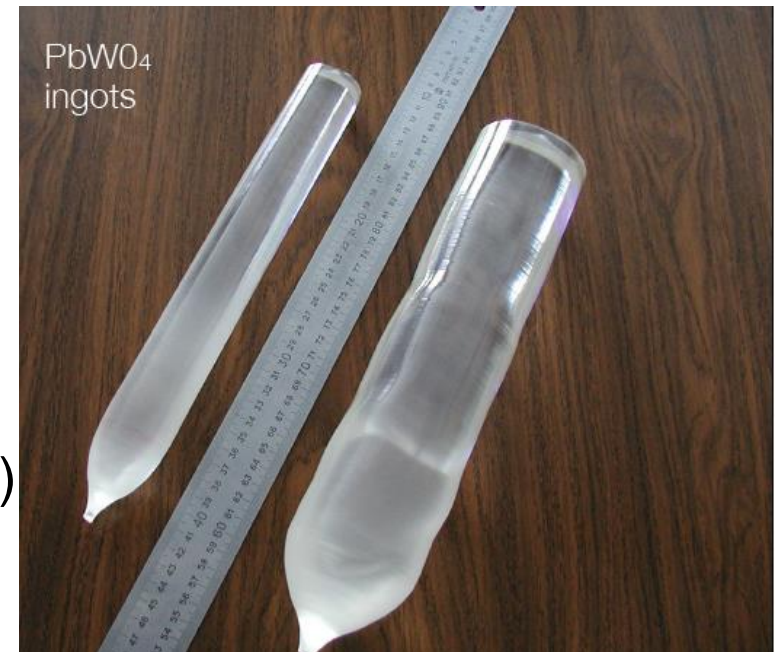
- anorganické scintilátory
 - krystaly solí alkalických kovů s malým množstvím aktivátoru (vytvoří příměsové hladiny v zakázaném pásu)
 - **Nal:TI** světelný výtěžek 100%
 $\tau = 230 \text{ ns}$, $\lambda_{\text{max}} = 415 \text{ nm}$
(jodid sodný dopovaný thalliem)
 - větší hustota \rightarrow větší stopping power
 - větší $Z \rightarrow$ větší účinný průřez pro fotoefekt
 - hygroskopické



Scintilátory

- anorganické scintilátory
 - **Nal:TI** světelný výtěžek 100%
40000 fotonů/MeV
 $\tau = 230 \text{ ns}$, $\lambda_{\text{max}} = 415 \text{ nm}$ (~3 eV)
 - **PbWO₄** světelný výtěžek 0.5%
200 fotonů/MeV
 $\tau = 6 \text{ ns}$, $\lambda_{\text{max}} = 420 \text{ nm}$ (~3 eV)
 - **BaF₂** světelný výtěžek 20%
8000 fotonů/MeV
 $\tau = 630 \text{ ns}$, $\lambda_{\text{max}} = 325 \text{ nm}$ (~3.8 eV)

světelný výtěžek 2%
800 fotonů/MeV
 $\tau = 0.6 \text{ ns}$, $\lambda_{\text{max}} = 220 \text{ nm}$ (~5.6 eV)

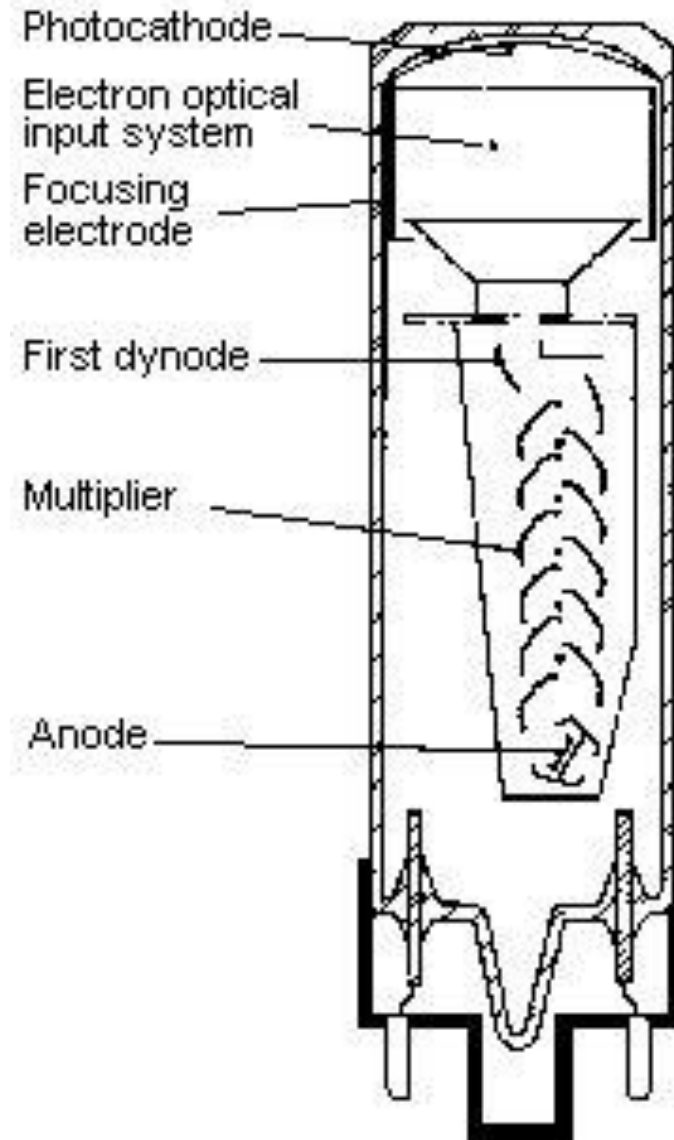


Scintilátory

Material	Nal:TI	Csl:TI	CaF ₂ :Eu	BaF ₂	BGO	YAG:Ce	YAP:Ce	GSO:Ce	CWO	PWO	NB:WO	ZnSe:Te	LAG:Ce
Physical Properties													
Chemical Formula	Nal:TI	Csl:TI	CaF ₂ :Eu	BaF ₂	Bi ₄ GeO ₄	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	YAlO ₃	Gd ₂ SiO ₅	CdWO ₄	PbWO ₄	NB(WO ₄) ₂	ZnSe:Te	Lu ₃ Al ₅ O ₇
Density g/cm ³	3.67	4.51	3.18	4.89	7.13	4.57	5.37	6.71	7.9	8.28	7.57	5.42	6.73
Hardness-Moh	2	2	4	3	5	8.5	8.6	5.7	4.0-4.5	3.5-4.0	6		
Hydroscopic	Yes	Slightly	No	No	No	No	No	-	No	No	No		
Crystal Structure	Cubic	Cubic	Cubic	Cubic	Cubic	Cubic	Rhomb.	Mono.	Mono.	Tetra.			Cubic
Therm. Exp. - PPM	47.5	50	19.5	18.4	7.0	8-9	4-11	4-12	10.2	10.0			
Melting Pt – C°	651	621	1360	1280	1050	1970	1875		1325	1125		1779	
Luminescence Properties													
Integrated Light Output (%Nal:TI)	100	45	50	20/2	15-20	15	40	20-25	35-40	5 (of BGO)			15
Wave Length of Max. Emissions (nm)	415	550	435	325/220	480	550	370	440	490	430/520	540		535
Decay Constant n/s	230	900	940	630/0.6	300	70	25	30-60	5000	2/10/30	20		70
Afterglow (% at 6 ms)	0.5-5	<2	<0.3	-	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.1	-		<0.05	
Radiation Length cm	2.9	1.86	3.05	2.03	1.1	3.5	2.7	1.38	1.06	0.85	0.98		
Photon yield @ 300K - 10 ³ pM/MeV	38	52	23	10	2-3	8	10	8-10	28	22.6-25.6		8	10

Fotonásobiče

1. vstupní okno
↓
2. fotokatoda $E = h\nu - \phi_e$
↓
3. fokusační elektronová optika
↓
4. systém dynod
↓
5. anoda

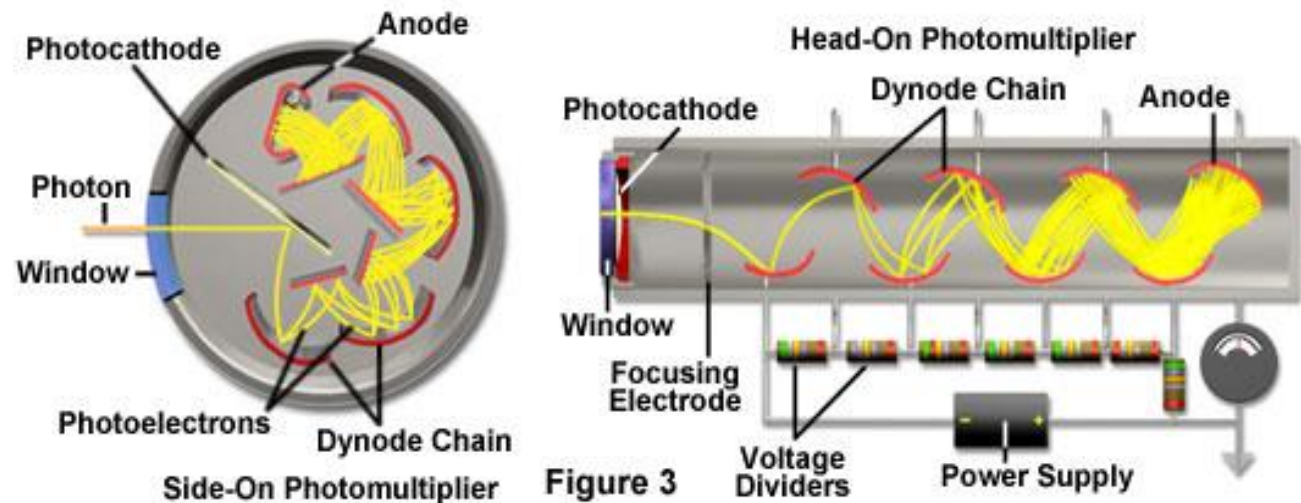


Fotonásobiče

- **zesílení** $G = \delta^N \propto (U_d)^N$
 - typicky $\delta \approx 3 - 4$ (koeficient sek. emise)
 - počet dynod $N = 10 - 12$
 - zisk $G = 10^5 - 10^7$
 - $\delta \sim U_d$ $\frac{dG}{G} = N \frac{dU_d}{U_d} = N \frac{dU_c}{U_c}$
 - stabilita napětí!!!



Common Photomultiplier Dynode Chain Configurations



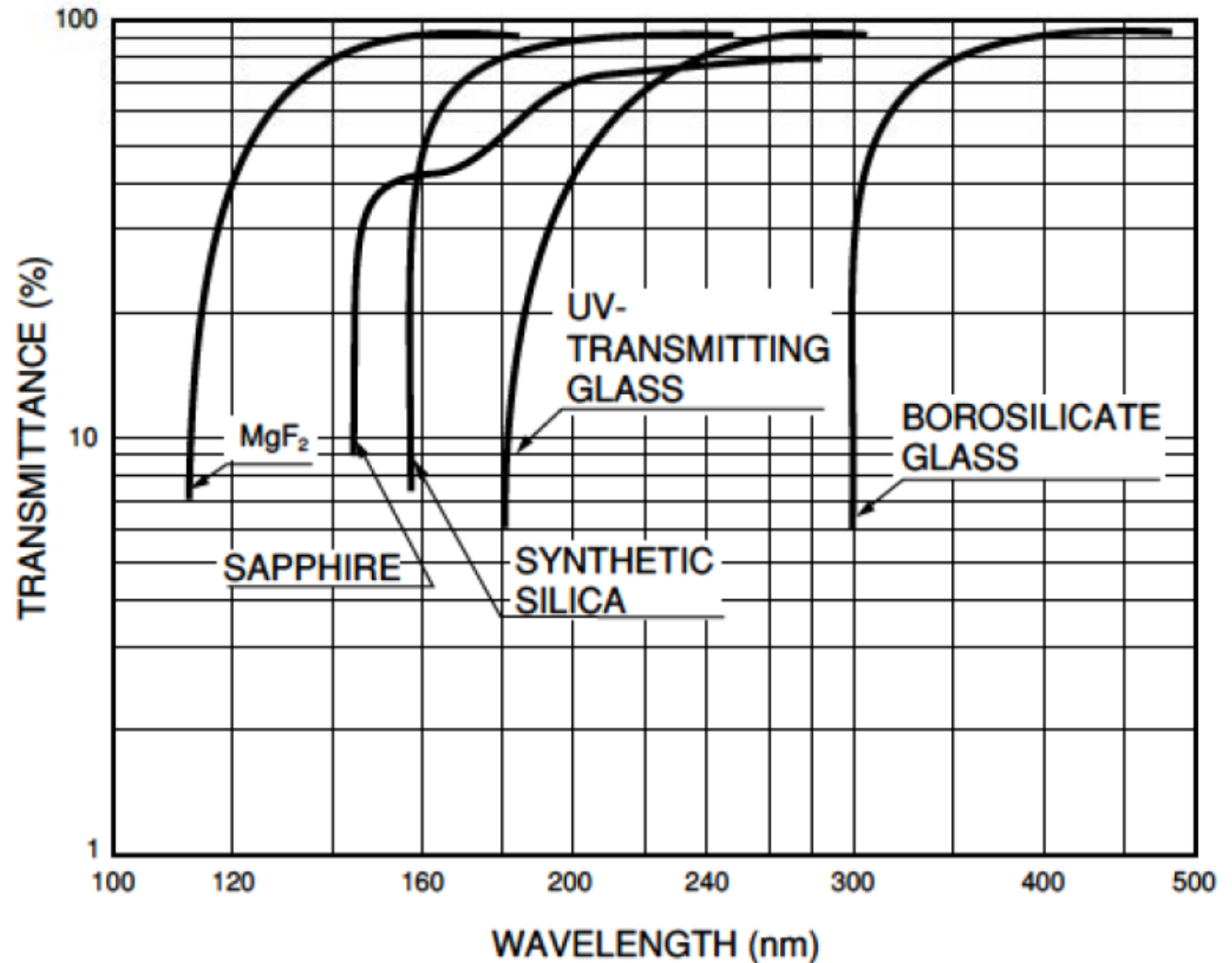
Fotonásobiče – vstupní okno

- vstupní okno

ideálně $I \approx 100\%$

transparentní
(propouští a netlumí)

různé pro UV/VIS



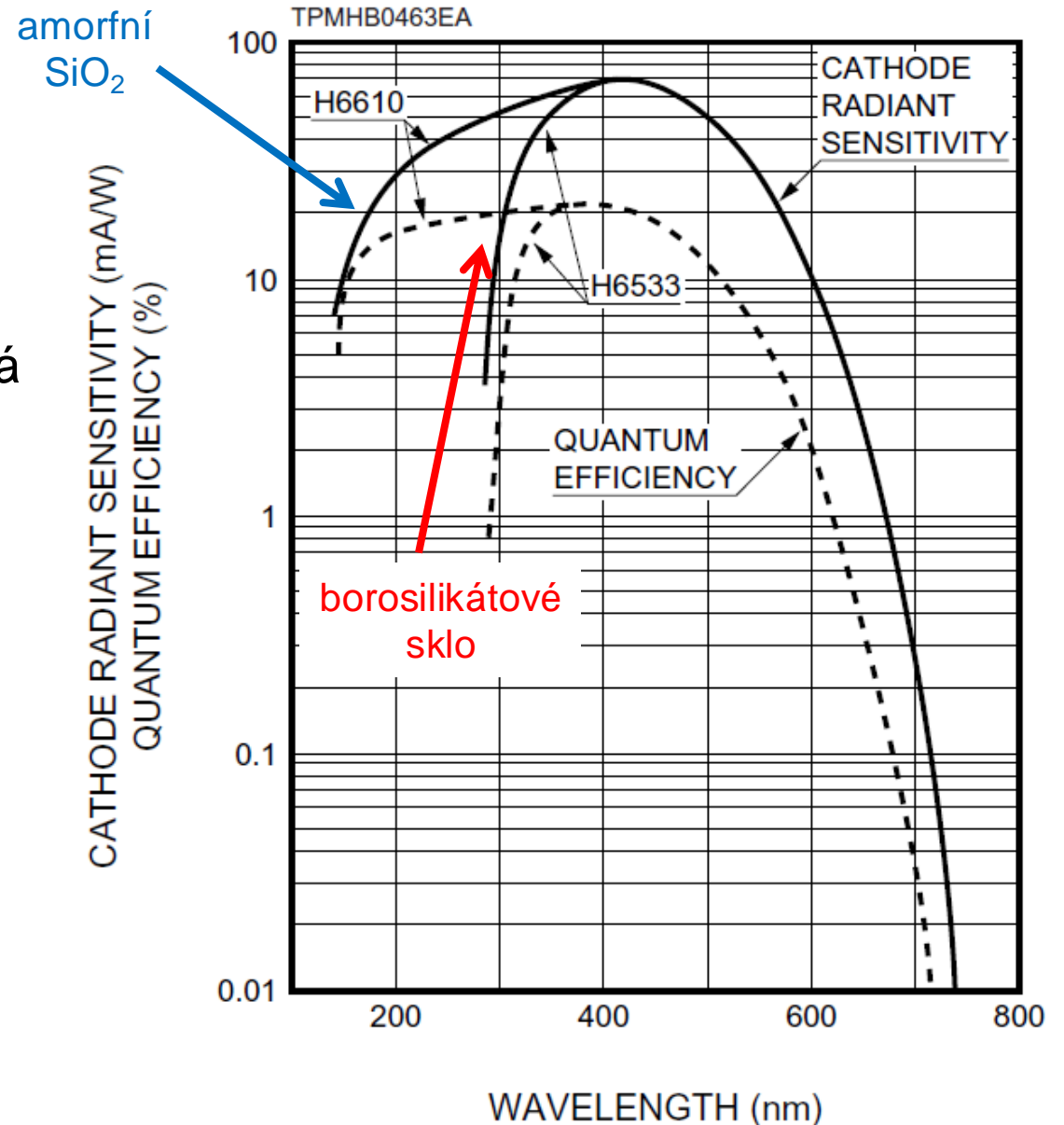
Fotonásobiče - fotokatoda

- fotokatoda

bi-alkalická K_2CsSb

10 – 50 nm tenká vrstva nanesená
na vstupním okně (substrát)

→ nízká výstupní práce
(nejlépe záporná)



Fotonásobiče - fotokatoda

- kvantová účinnost

$$\eta(\lambda) = \frac{N_{pe}}{N_{ph}(\lambda)}$$

N_{pe} počet uvolněných fotoelektronů

N_{ph} počet dopadajících fotonů o λ

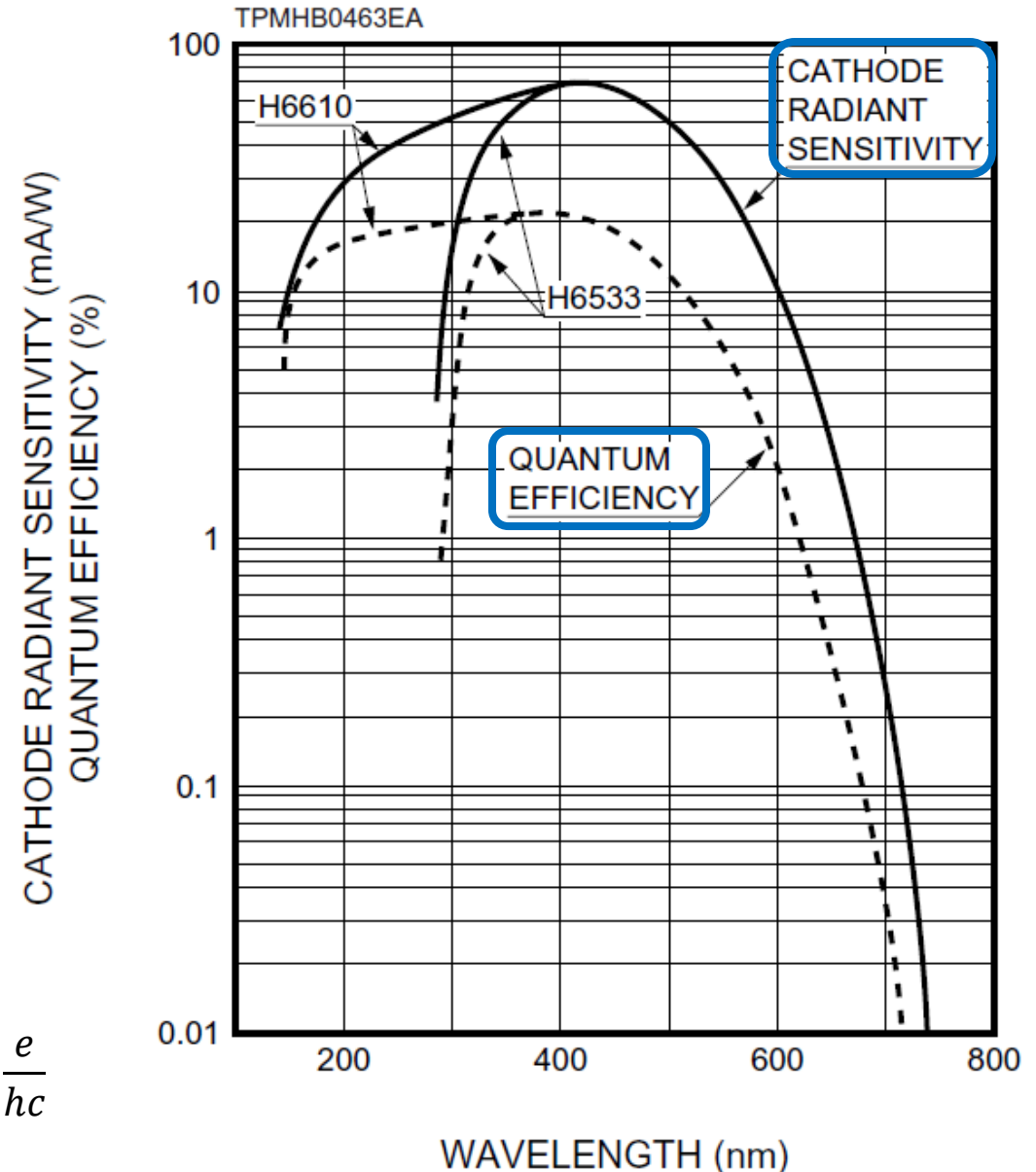
- spektrální citlivost

$$E(\lambda) = \frac{I_{pe}}{P_{ph}(\lambda)} = \lambda \eta(\lambda) \frac{e}{hc}$$

I_{pe} proud fotoelektronů

P_{ph} intenzita dopadajícího světla

$$E(\lambda) = \frac{I_{pe}}{P_{ph}(\lambda)} = \frac{N_{pe} \cdot e}{N_{\gamma}(\lambda) \cdot E_{\gamma}} = \eta(\lambda) \frac{e}{\frac{hc}{\lambda}} = \lambda \eta(\lambda) \frac{e}{hc}$$



Fotonásobiče – fokusační elektronová optika

- fokusační elektronová optika

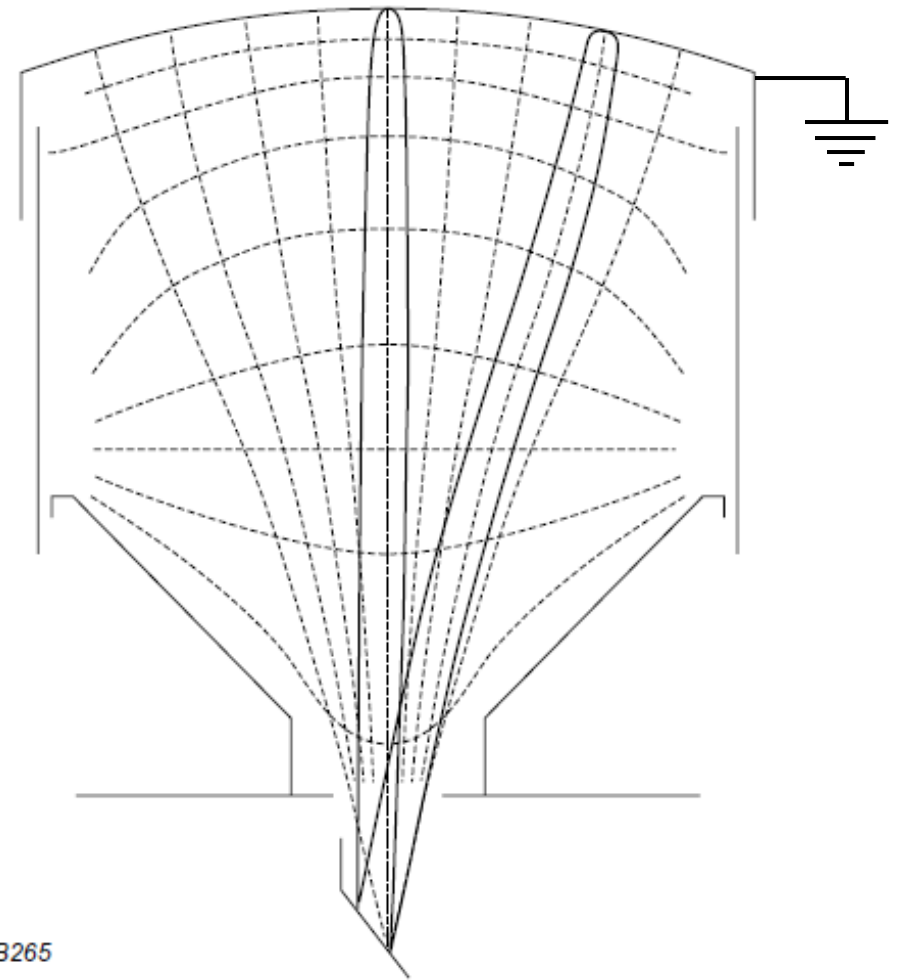
účinnost sběru > 80%

doba letu k dynodě musí být stejná
(nezávislá na místě emise)

zakřivená fotokatoda

zachování časové informace

- citlivost na magnetické pole
(změny zisku s orientací, řeší se stíněním)



MRB265

Fotonásobiče – systém dynod

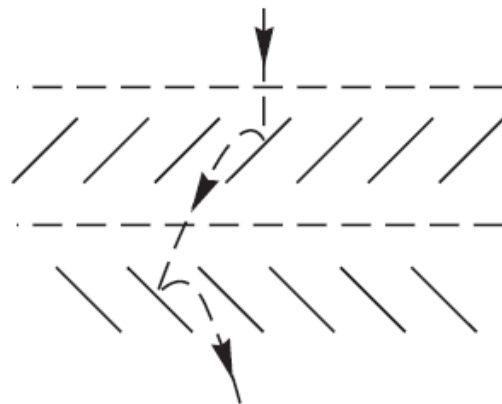
- emise sekundárních elektronů
- povrch dynod (vodivý): Cs-Sb, Cu-Be, Ag-Mg

vysoký faktor sekundární emise δ

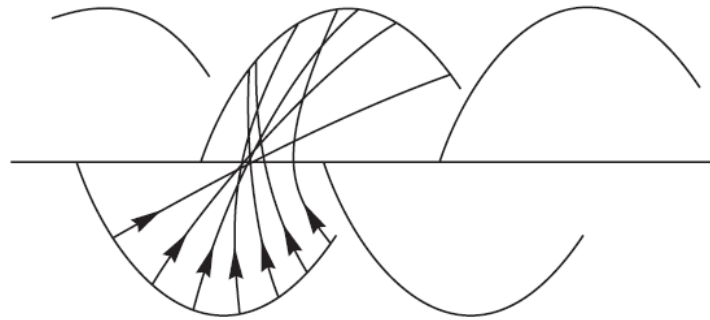
stabilita δ i při vysokých proudech

nízká termionická emise

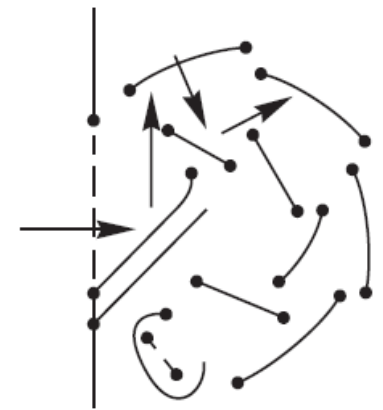
- speciální geometrie:



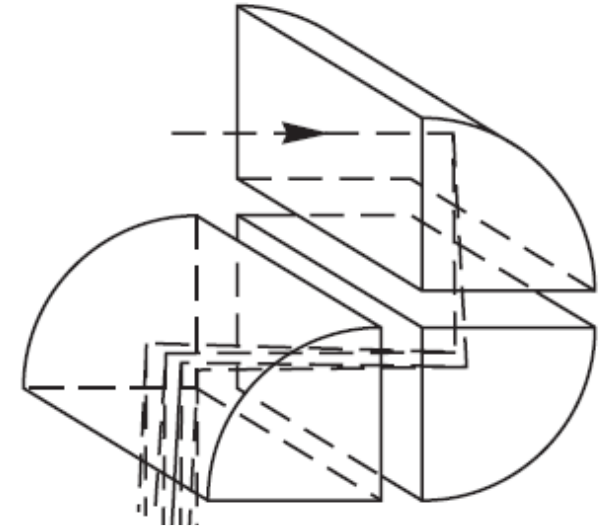
šikmé destičky



parabolické „zrcadlo“



parabolické „zrcadlo“

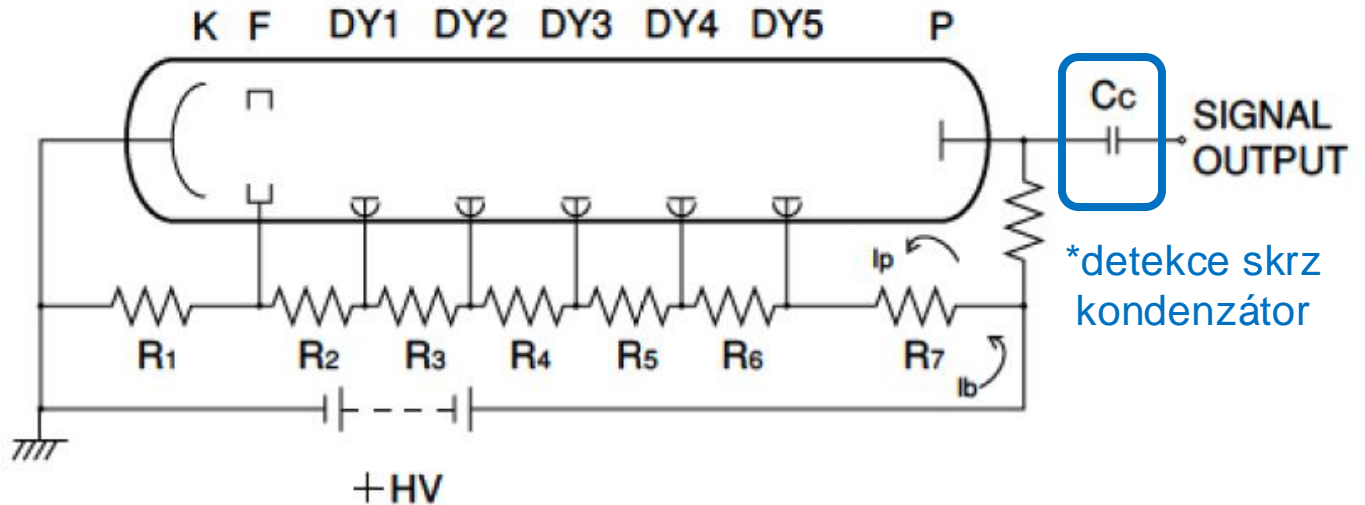


Fotonásobiče – dělič napětí

- kladné napětí

vysoké napětí na anodě
uzemněný obal

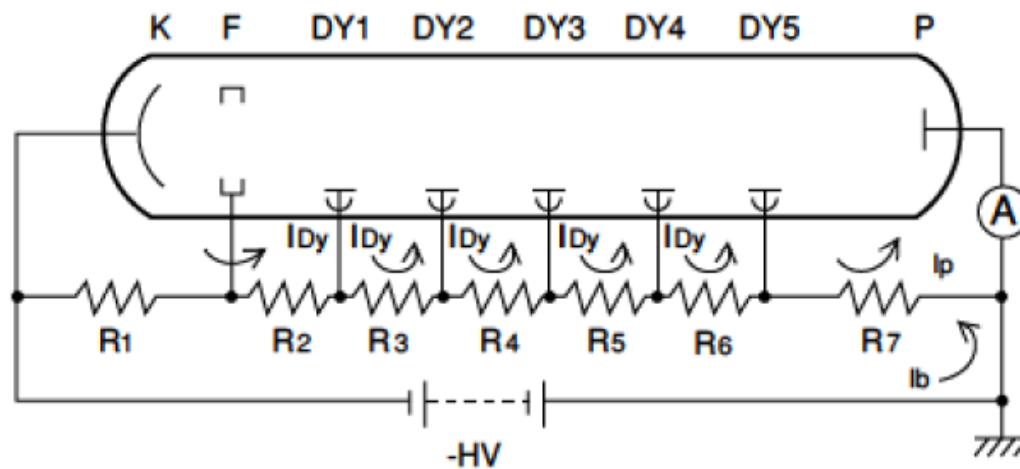
*detekují malý puls na
„hladině“ ~1 kV



- záporné napětí

uzemněná anoda
fotonásobič na vysokém
potenciálu

odizolování obalu



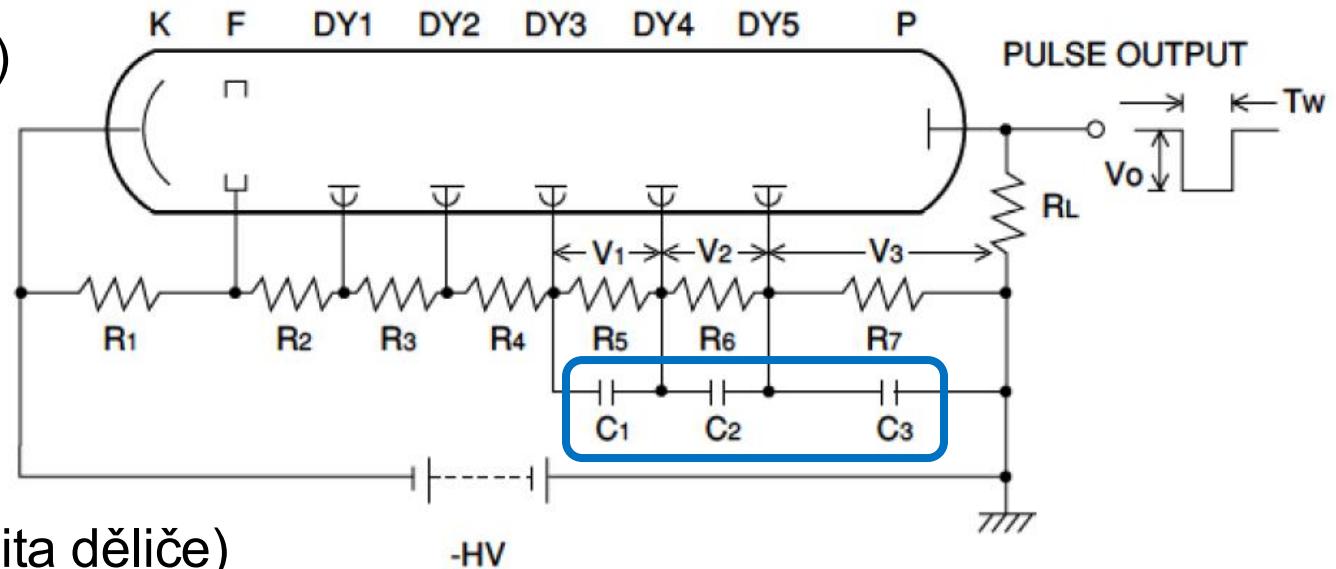
Fotonásobiče

- záporné napětí (pulzní mód)

všechny odpory stejné

oddělovací kondenzátory
(s rostoucími kapacitami)

tvrdost děliče napětí (stabilita děliče)



- zvýšena oddělovacími kondenzátory (stabilizace na napětí na posledních dynodách)

- co nejnižší odpor \rightarrow co nejvyšší tvrdost

$$I_{\text{dělič}} \gg I_{\text{fotonásobič}}$$

- kompromis kvůli nepřehřívání

- záporné napětí (kontinuální mód) \rightarrow sledujeme pouze intenzitu osvětlení (proud)

Fotonásobiče – temný proud

- šum (3 zdroje)
 1. termionická emise z katody a z dynod
 - dominantní, lze potlačit ochlazením
 - největší znásobení pro emisi z katody a prvních 2 dynod
 2. svodové proudy
 - kvůli vysokému napětí na děliči
 - při záporném napětí, vyrovnání napětí na trubici
 3. zbytková radiace (např rozpad ^{40}K)

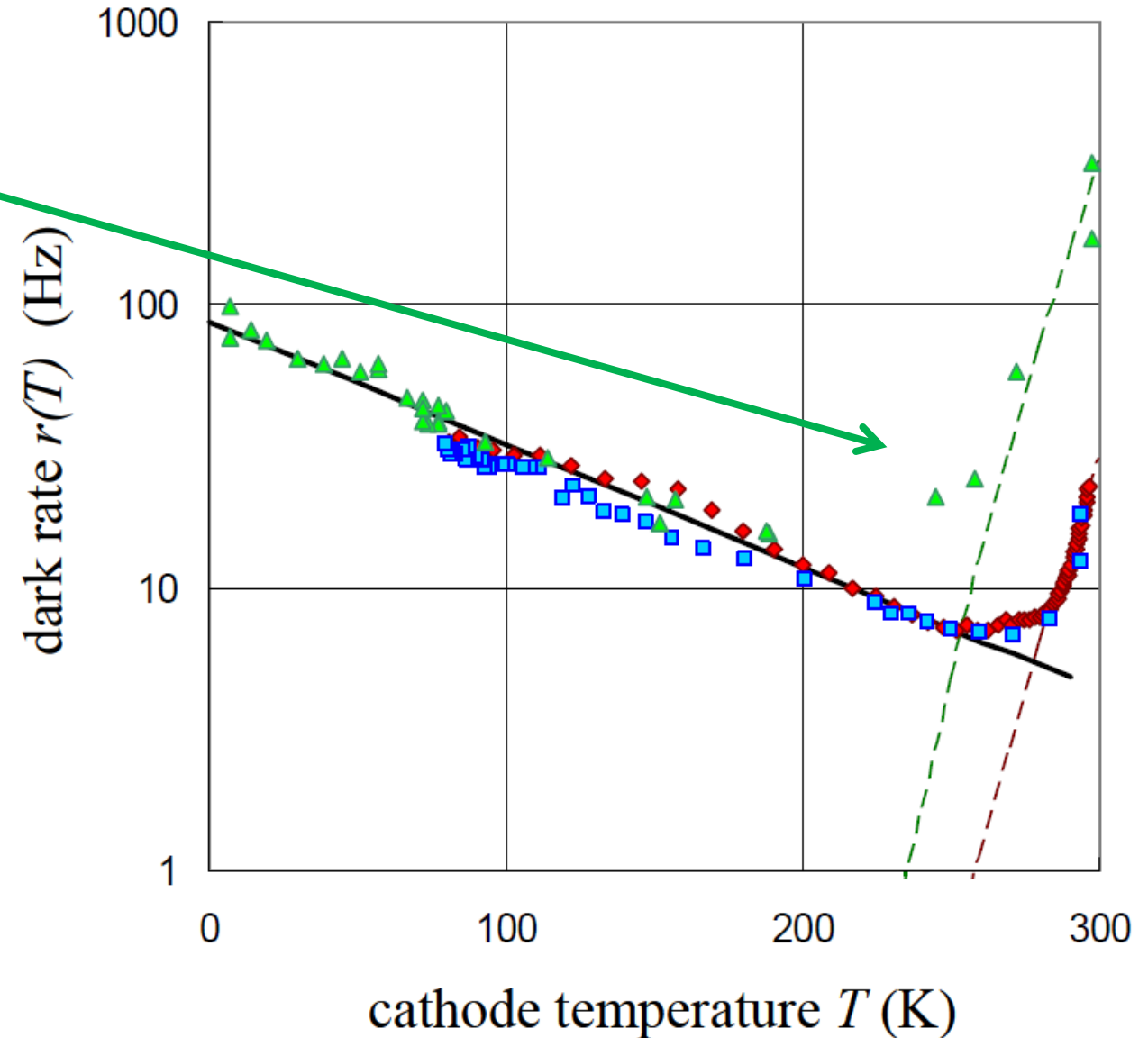
Fotonásobiče – temný proud

- Richardsonův zákon

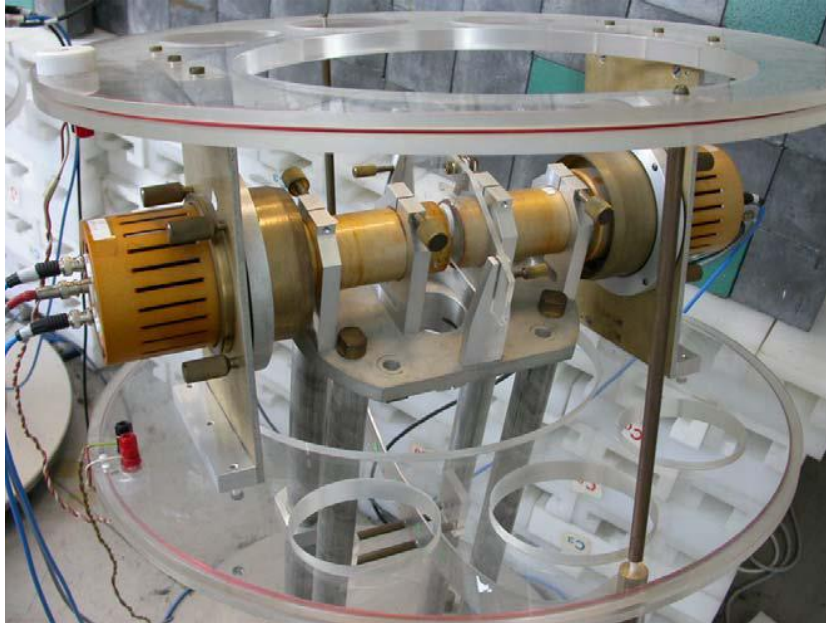
$$r(T) \propto T^2 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)$$

výstupní práce $W \approx 0.5$ eV

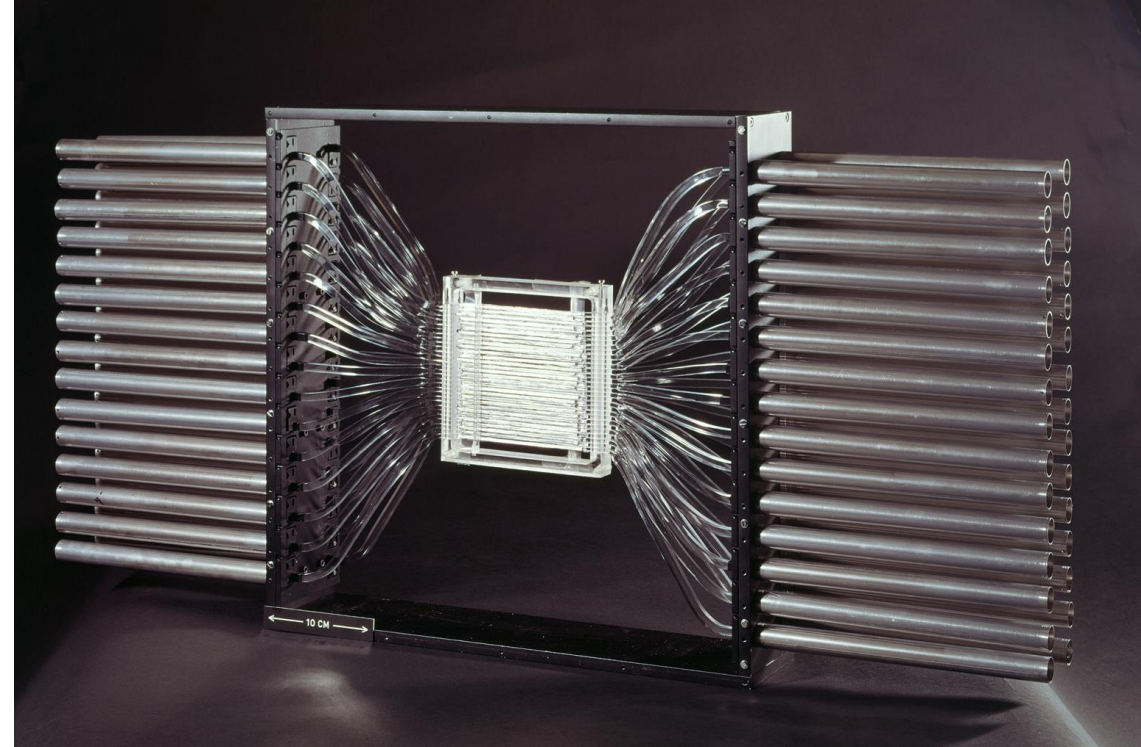
snížení temného proudu
do cca $T \approx 273$ K



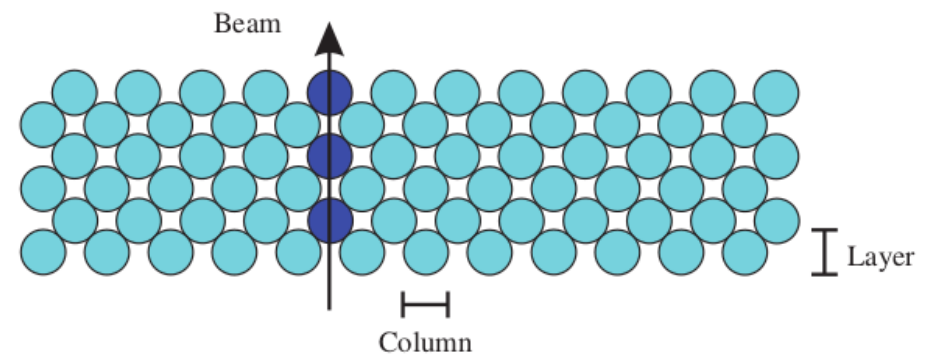
Scintilační detektory – příklady využití



Měření doby života pozitronů

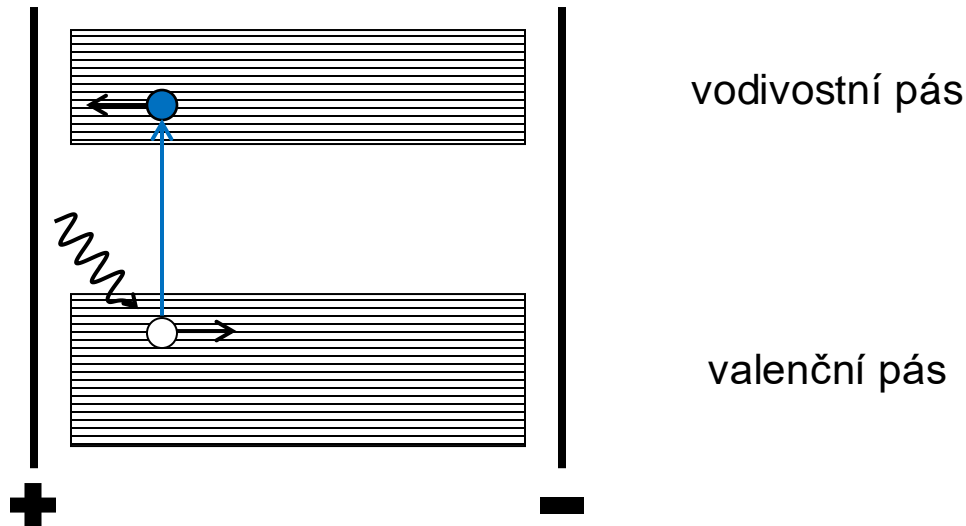


Scintillation hodoscope -- měření svazku částic

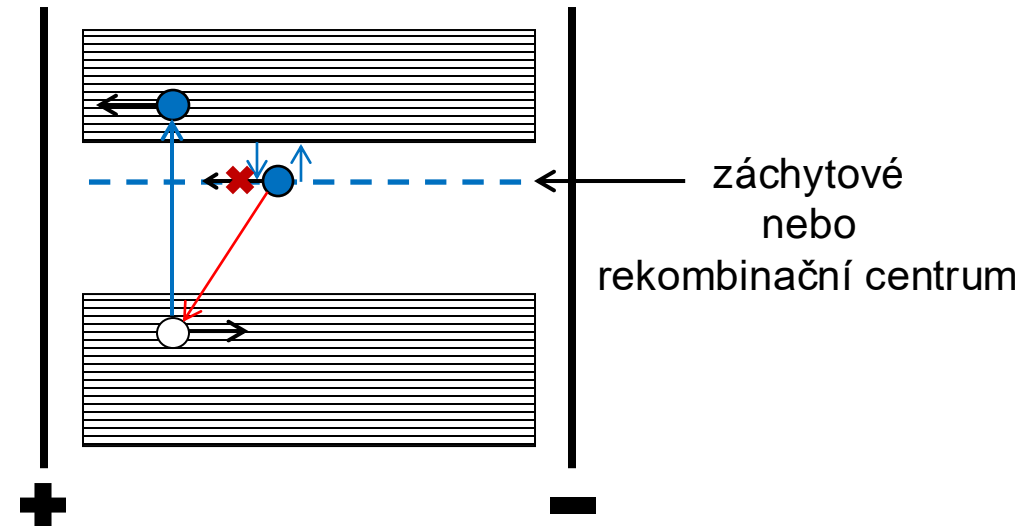


Polovodičové detektory

- ideální polovodič

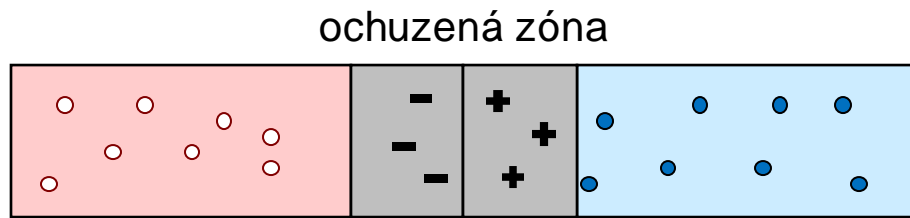
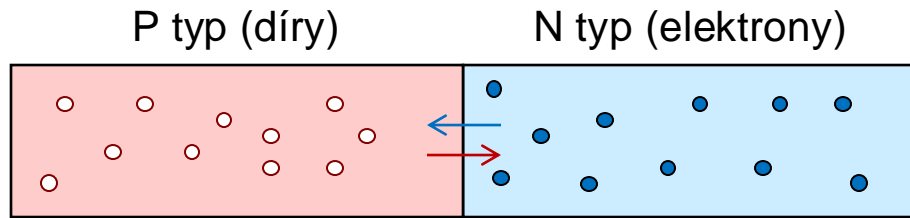


- příměsový polovodič

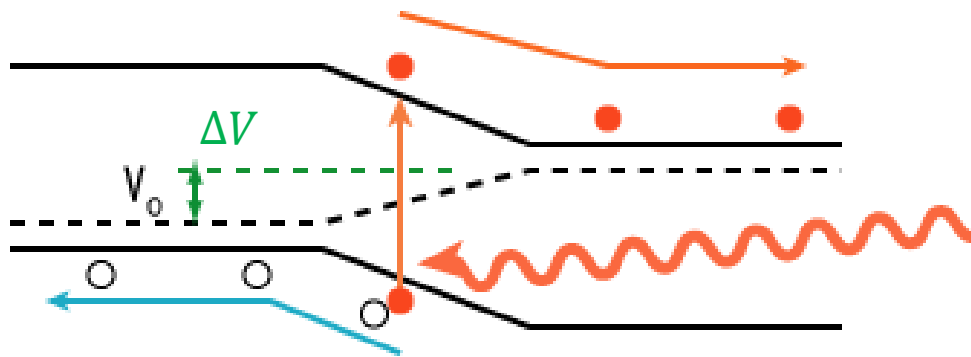


- detekujeme proud elektronů a děr
- příměsové hladiny (v zakázaném pásu)
 - donorové (N typ) vs akceptorové (P typ)
 - záchyt elektronu resp. díry → nepoteče proud → snížení rozlišení
 - centra vznikají i radiačním poškozením (částečně vratné -- "Lazarus efekt")

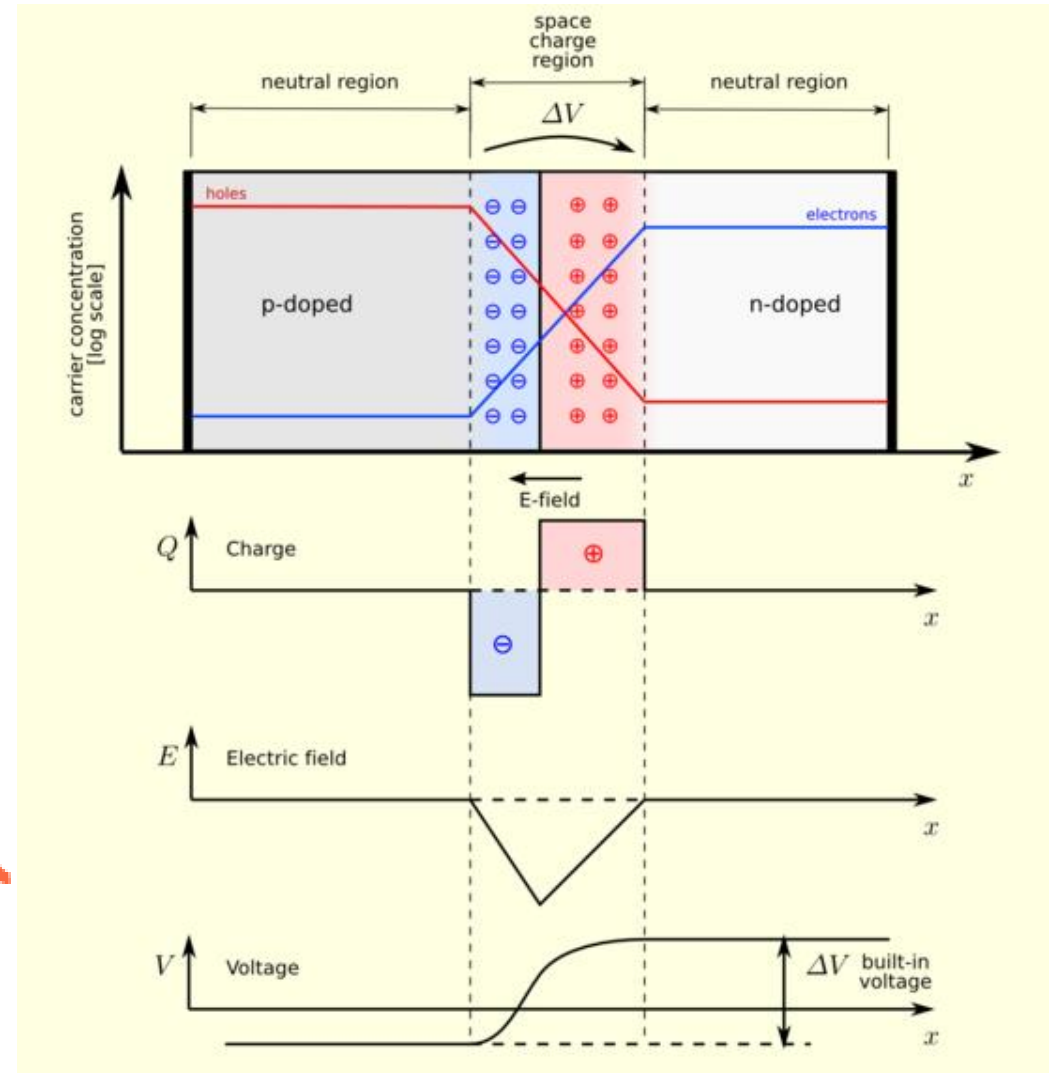
Polovodičové detektory – PN přechod



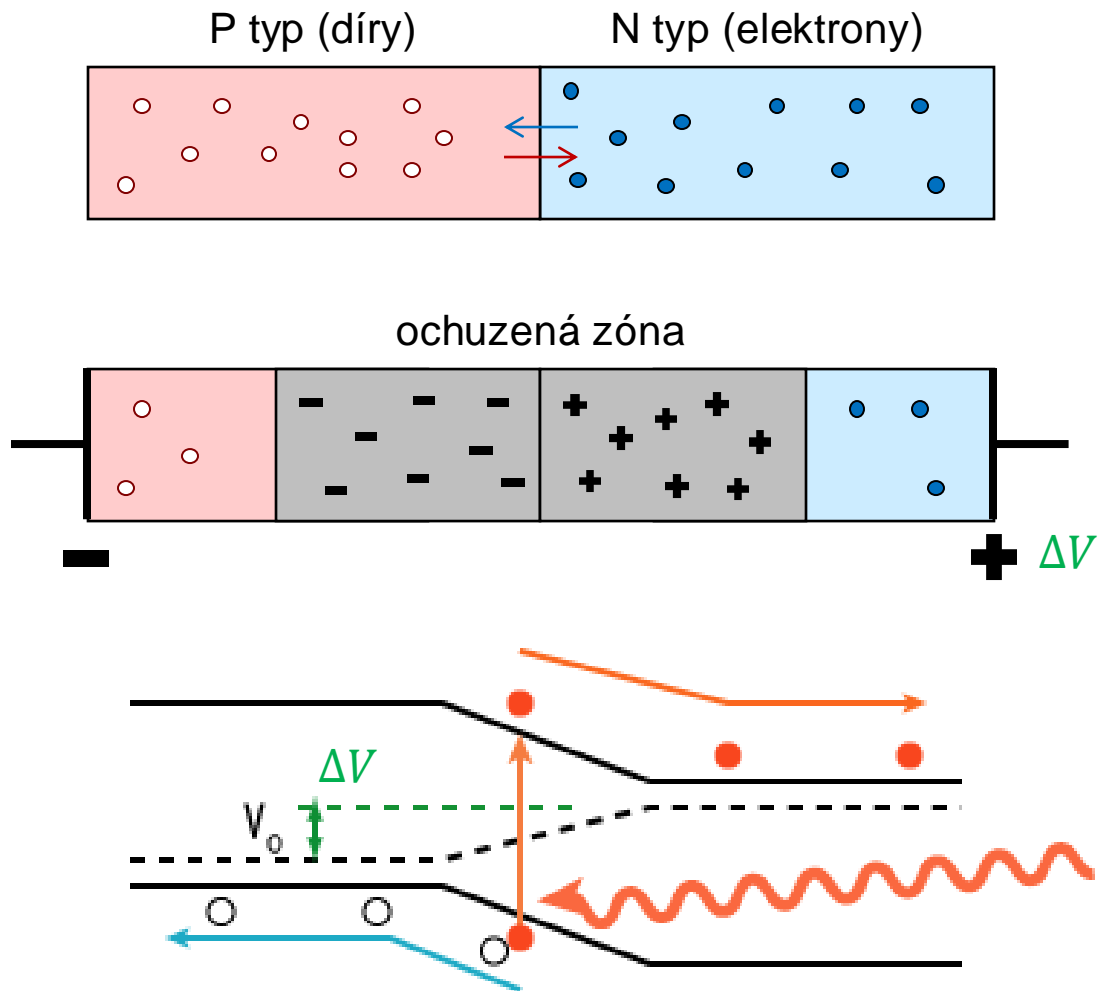
~100 μm



sběr náboje v PN přechodu před rekombinací

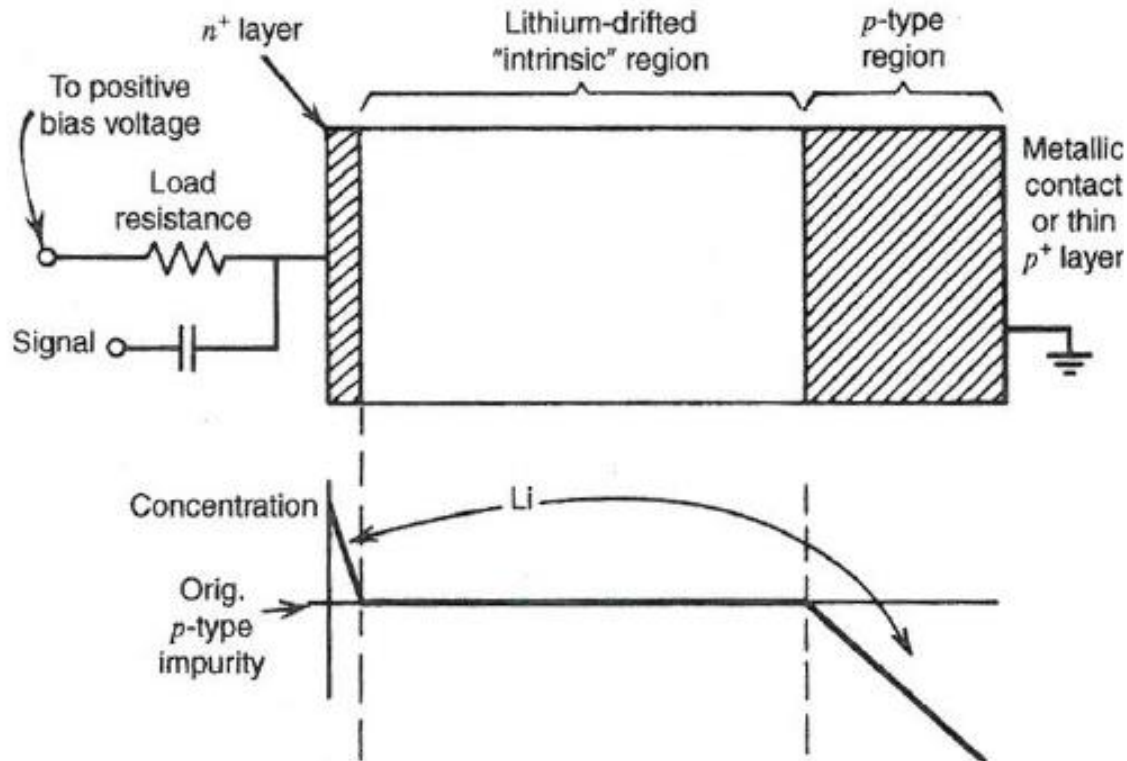


Polovodičové detektory – PN přechod

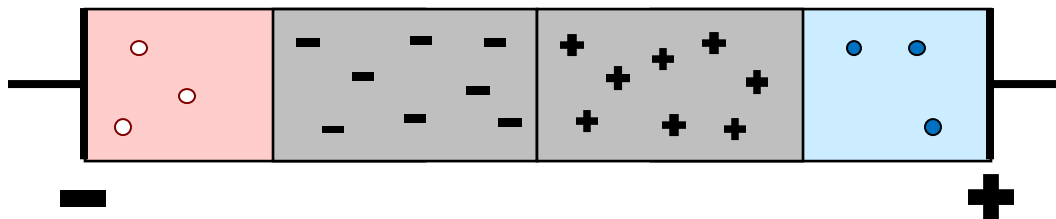


- ochuzená zóna (depleted zone)
 - malý aktivní objem
→ určuje účinnost detektoru
 - zapojení v závěrném směru
→ rozšíření ochuzené zóny
 - sběr náboje v PN přechodu
(opak zářivé rekombinace)

Ge(Li) polovodičové detektory



- $Z_{\text{Si}} = 14$
- $Z_{\text{Ge}} = 32$
- fotoefekt $\sigma \sim Z^5$ (60x větší pro Ge)
- Li donor



Velká ochuzená zóna (až cm) -- plná absorpce gamma až do MeV.



Ge(Li) polovodičové detektory

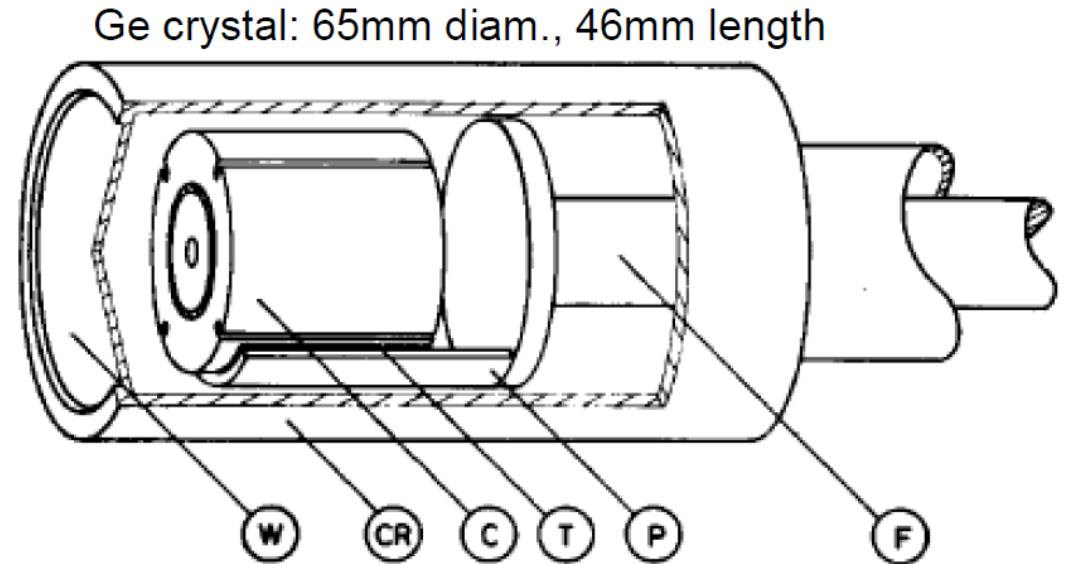
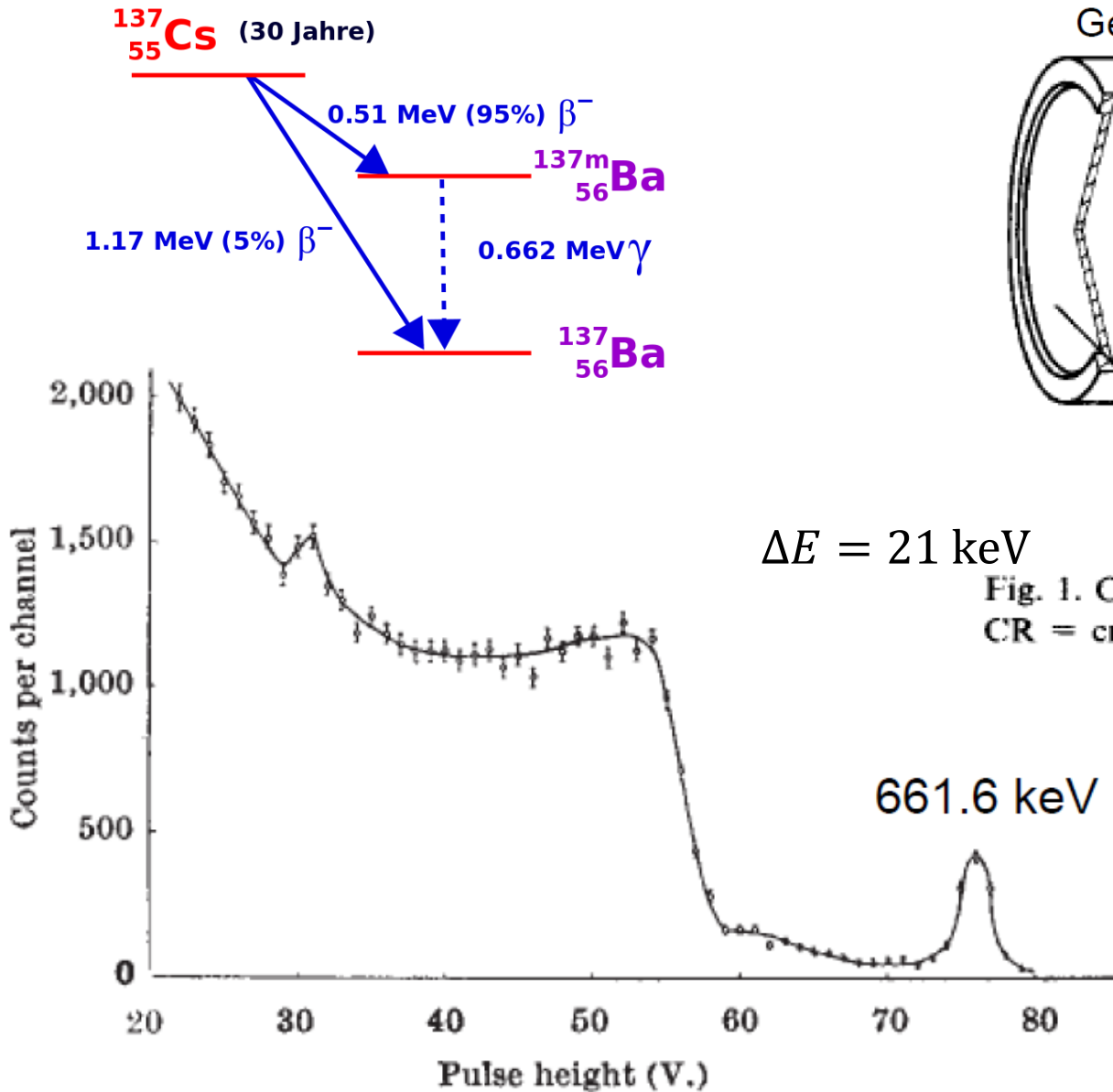
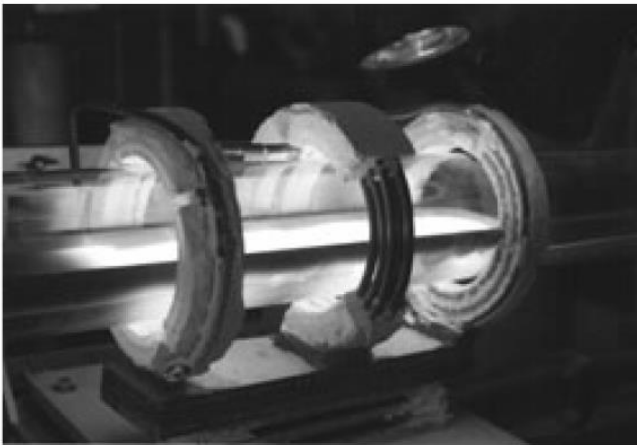


Fig. 1. Cross section of the polarimeter. W = thin window, CR = cryostat, C = crystal, T = Teflon insulation, P = crystal holder, F = cold finger.

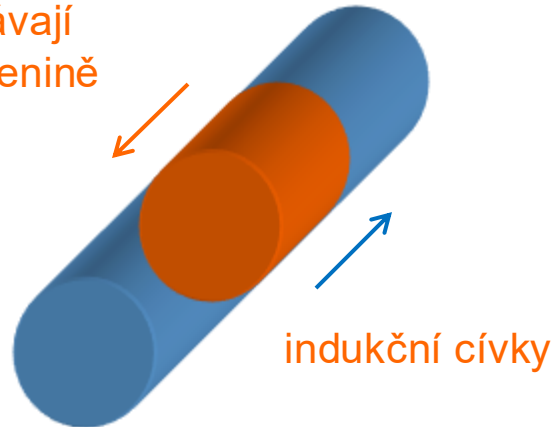
- koaxiální geometrie
- trvale chlazený (brání vyrovnání koncentračního gradientu Li)

HPGe polovodičové detektory

- krystal vysoce čistého Ge (p-tyt)
- koncentrace nečistot $c_{imp} < 10^{10} \text{ cm}^{-3} = 2 \times 10^{-7} \text{ ppm}$
- zonální čištění

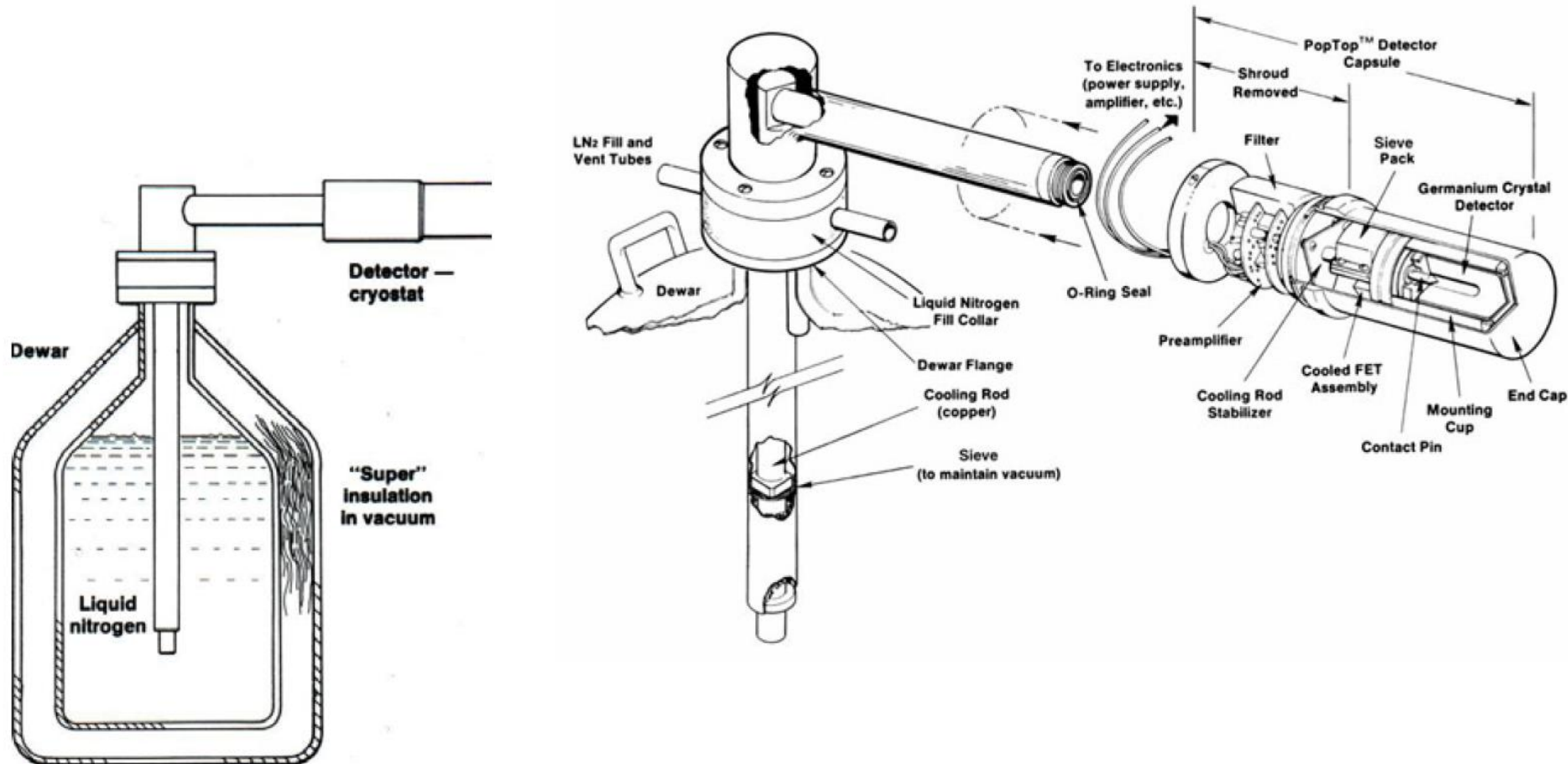


nečistoty
zůstávají
v tavenině



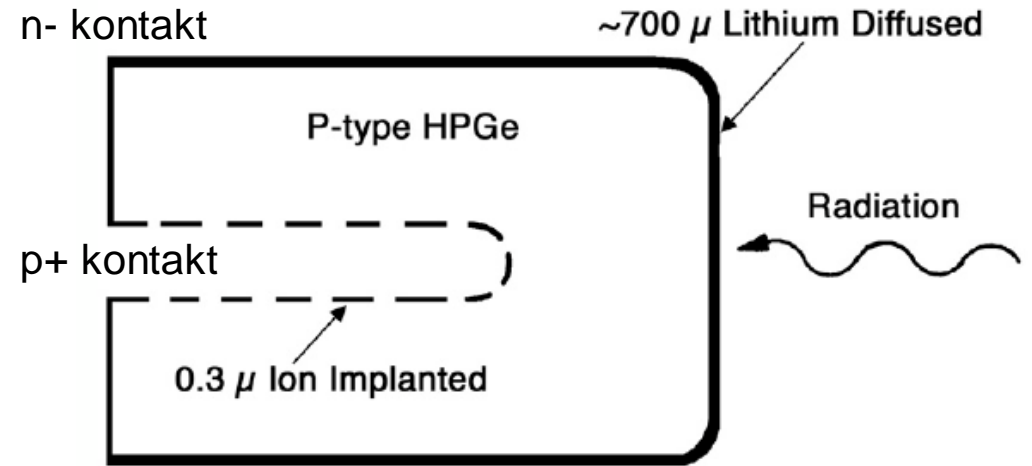
HPGe polovodičové detektory

- koaxiální konfigurace

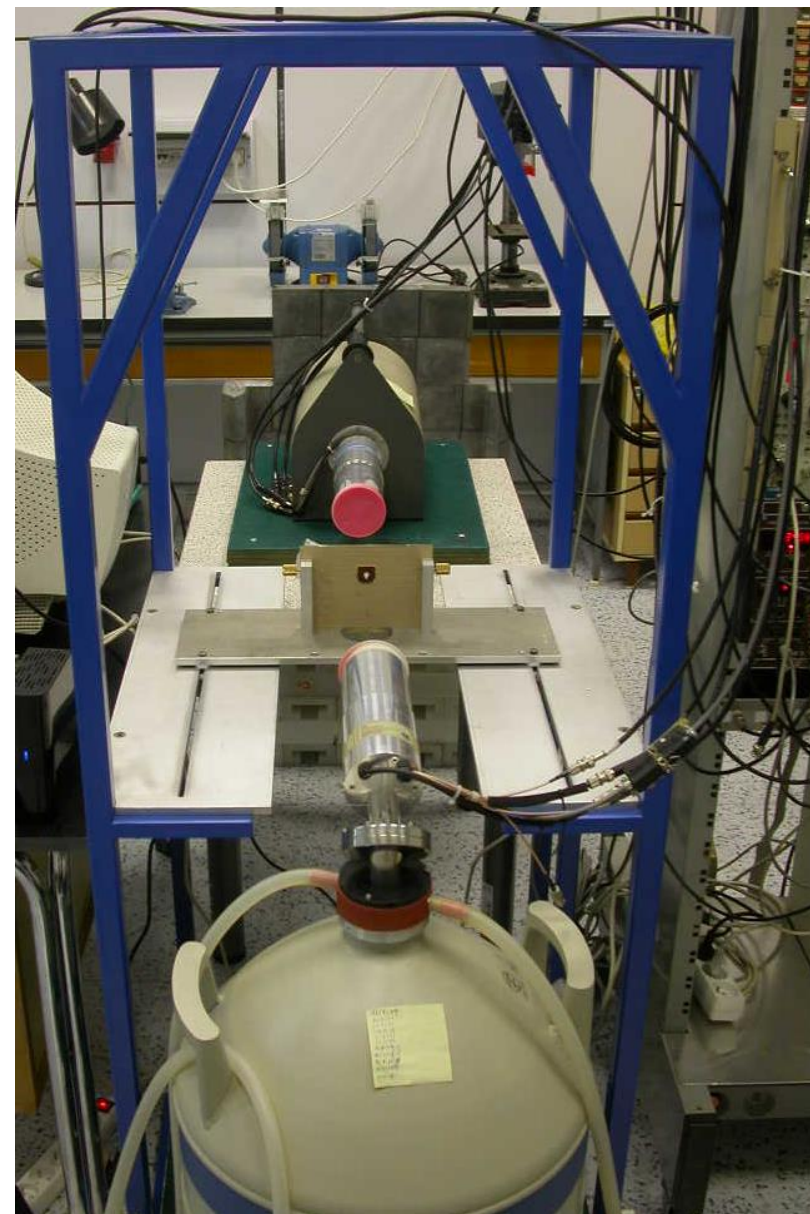
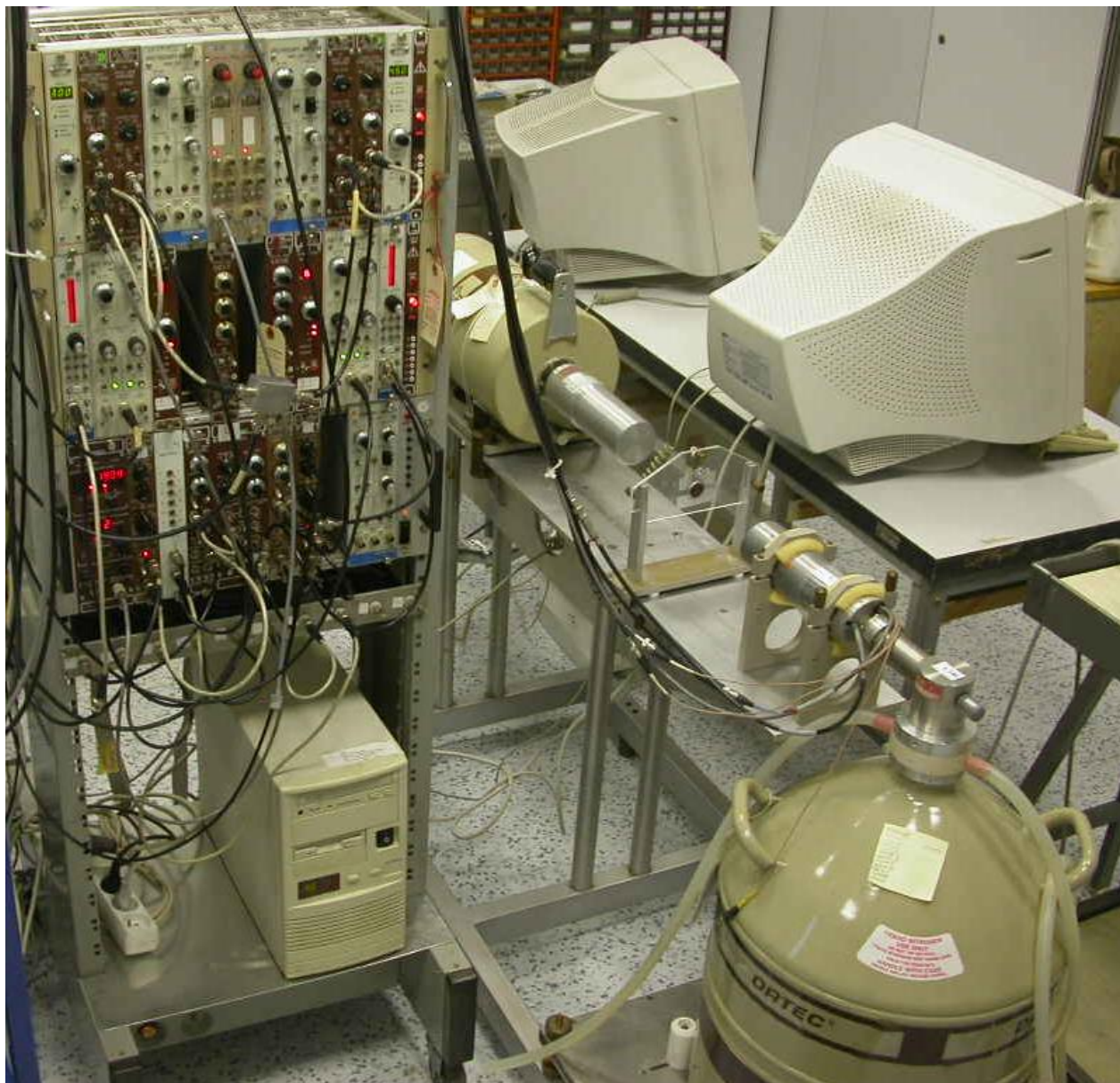


HPGe polovodičové detektory

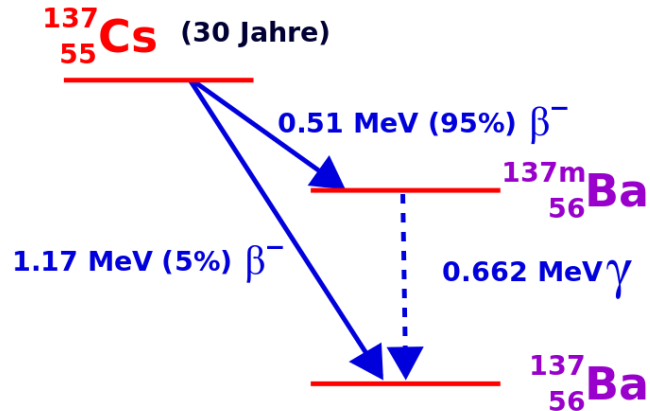
- krystal vysoce čistého Ge (p-tyt)
- $c_{imp} < 10^{10} \text{ cm}^{-3} = 2 \times 10^{-7} \text{ ppm}$



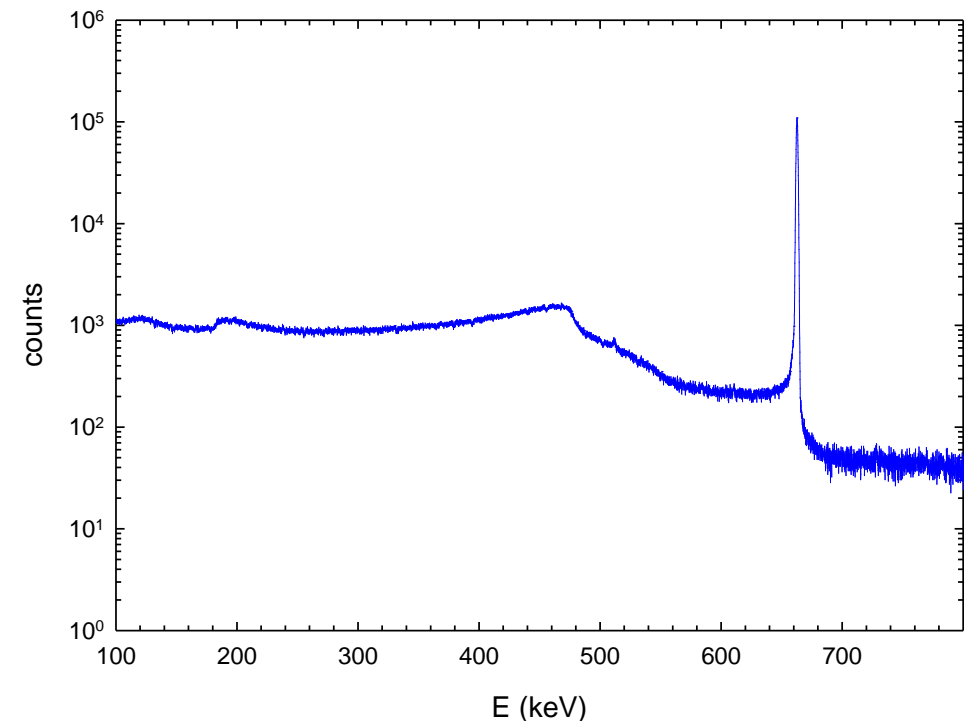
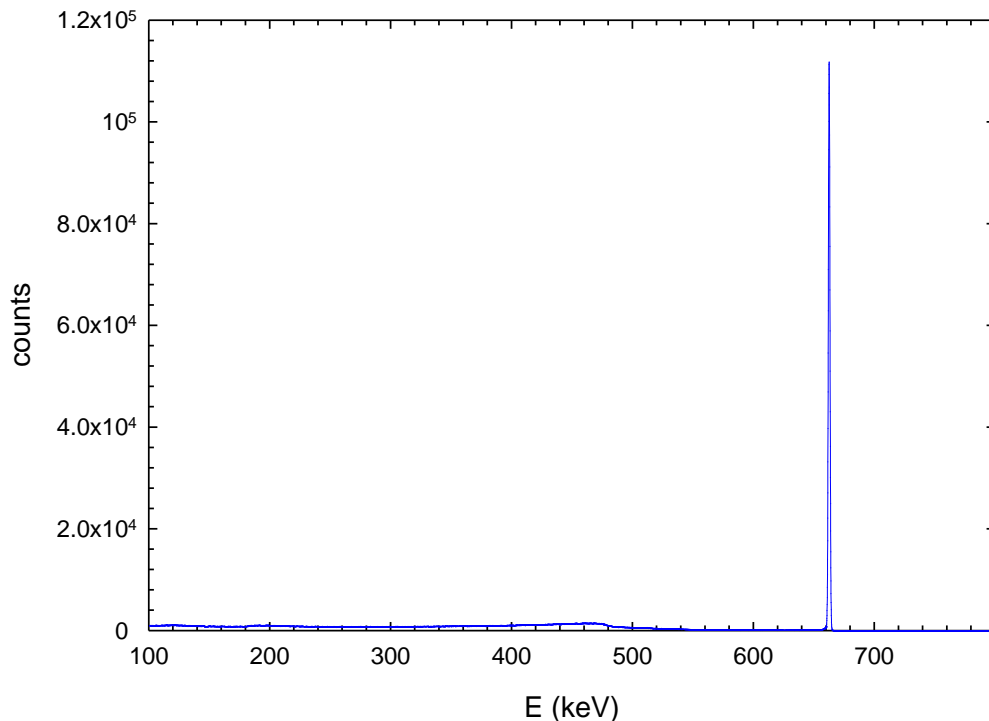
HPGe polovodičové detektory – Dopplerovské rozšíření



HPGe polovodičové detektory



- FWHM ΔE roste s rostoucí energií
- rozlišení $R = \Delta E / E$ se zlepšuje s energií
- účinnost η daná velikostí detektoru (velké detektory = hodně záchytových center = pomalý sběr a horší rozlišení)



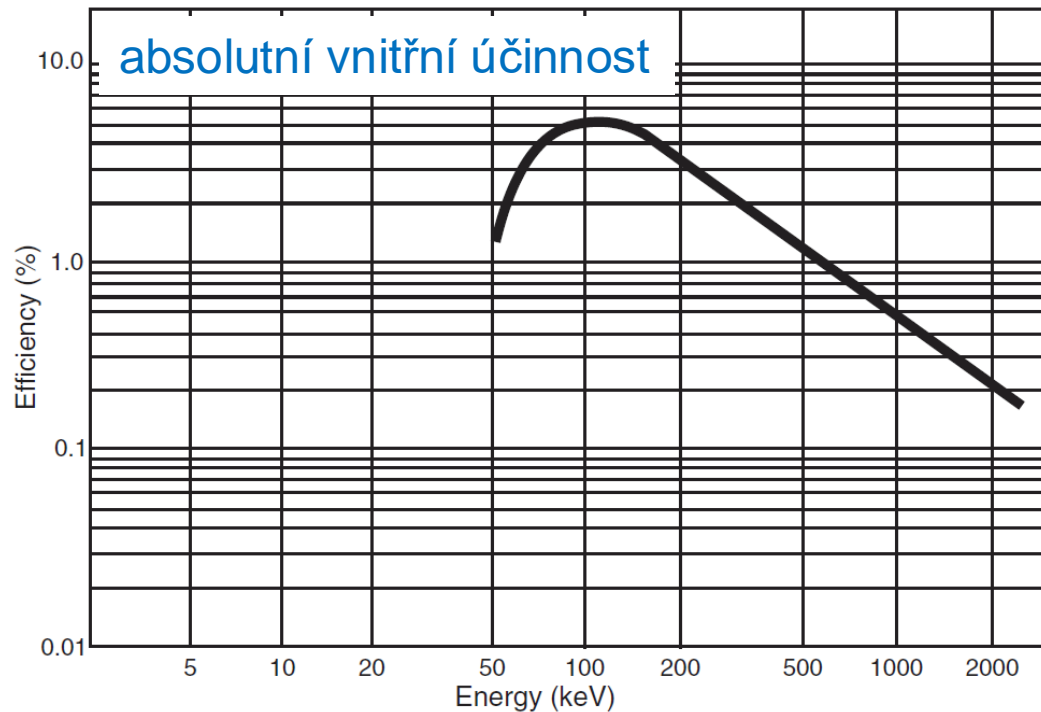
HPGe polovodičové detektory

- energetické rozlišení (FWHM)

$$E = 122 \text{ keV } (^{55}\text{Fe EC}) \quad R = 0.5 - 1.0\%$$

$$E = 1333 \text{ keV } (^{60}\text{Co } \beta^-) \quad R = 0.14 - 0.17\%$$

- relativní účinnost (% NaI)



Model Number	Relative Efficiency (%) \geq	Full Width Half Max (FWHM) Resolution (keV)		Peak to Compton Ratio (P/C)	Peak Shape FWTM/FWHM	Endcap diameter mm (in.)
		At 122 keV energy	At 1.3 MeV energy			
GC0518	5	0.8	1.8	32	1.90	76 (3.0)
GC1018	10	0.8	1.8	38	1.90	76 (3.0)
GC1020	10	0.9	2.0	34	2.00	76 (3.0)
GC1518	15	0.8	1.8	44	1.90	76 (3.0)
GC1520	15	0.9	2.0	40	2.00	76 (3.0)
GC2018	20	0.8	1.8	50	1.90	76 (3.0)
GC2020	20	0.9	2.0	46	2.00	76 (3.0)
GC2518	25	0.8	1.8	54	1.90	76 (3.0)
GC2520	25	0.9	2.0	50	2.00	76 (3.0)
GC3018	30	0.8	1.8	58	1.90	76 (3.0)
GC3020	30	1.0	2.0	54	2.00	76 (3.0)
GC3518	35	0.9	1.8	60	1.90	76 (3.0)
GC3520	35	1.0	2.0	56	2.00	76 (3.0)
GC4018	40	0.9	1.8	62	1.90	76 (3.0)*
GC4020	40	1.1	2.0	54	2.00	76 (3.0)*
GC4518	45	0.9	1.8	62	1.90	83 (3.25)
GC4520	45	1.1	2.0	54	2.00	83 (3.25)
GC5019	50	1.0	1.9	64	1.90	83 (3.25)*
GC5021	50	1.2	2.1	56	2.00	83 (3.25)*
GC5519	55	1.0	1.9	64	1.90	89 (3.5)
GC5521	55	1.2	2.1	56	2.00	89 (3.5)
GC6020	60	1.1	2.0	66	1.90	89 (3.5)
GC6022	60	1.2	2.2	60	2.00	89 (3.5)

Nábojově citlivý předzesilovač

- vstupní impedance

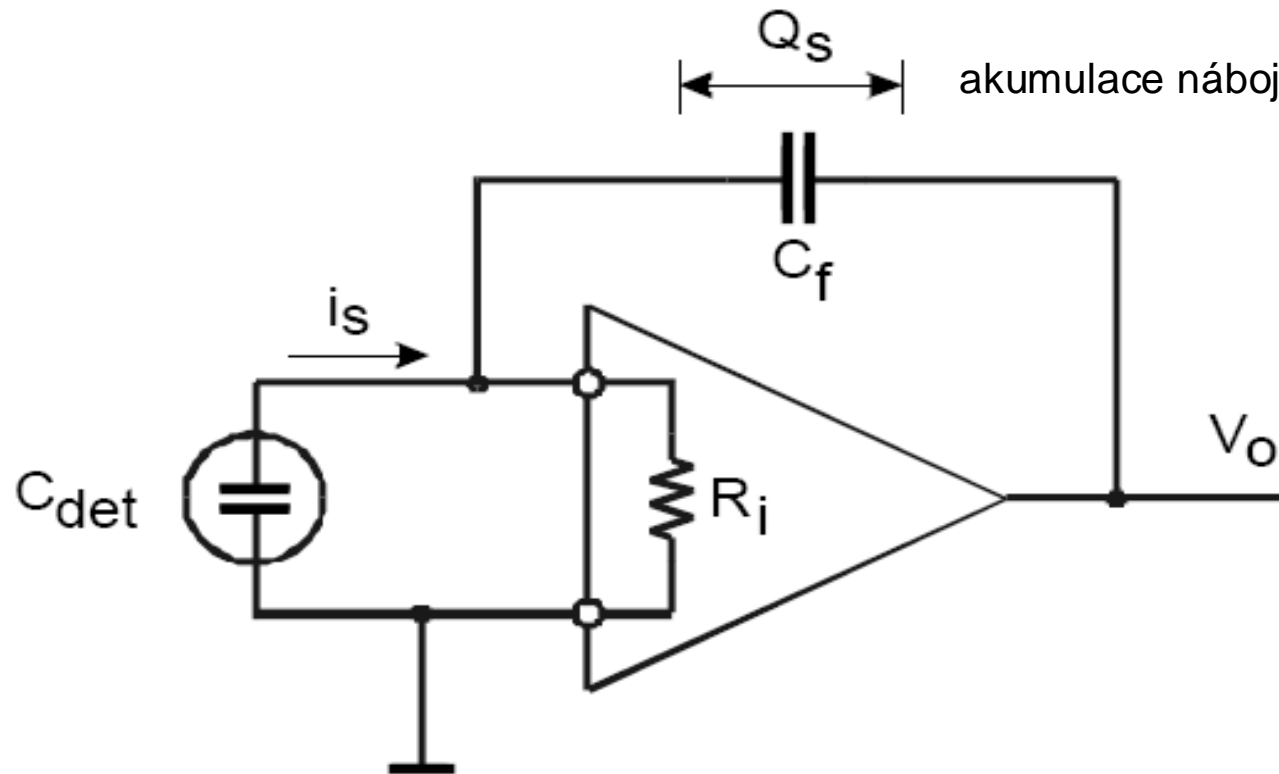
$$R_i C_{det} \gg t_{coll}$$

- výstupní napětí

$$V_0 \propto \frac{Q_S}{C_f}$$

- zisk

$$A_Q = \frac{dV_0}{dQ_S} \approx \frac{1}{C_f}$$



akumulace náboje v kondenzátoru

rychlý kondenzátor

→ vybíjení a současné nabíjení

pomalý kondenzátor

→ nízké časové rozlišení

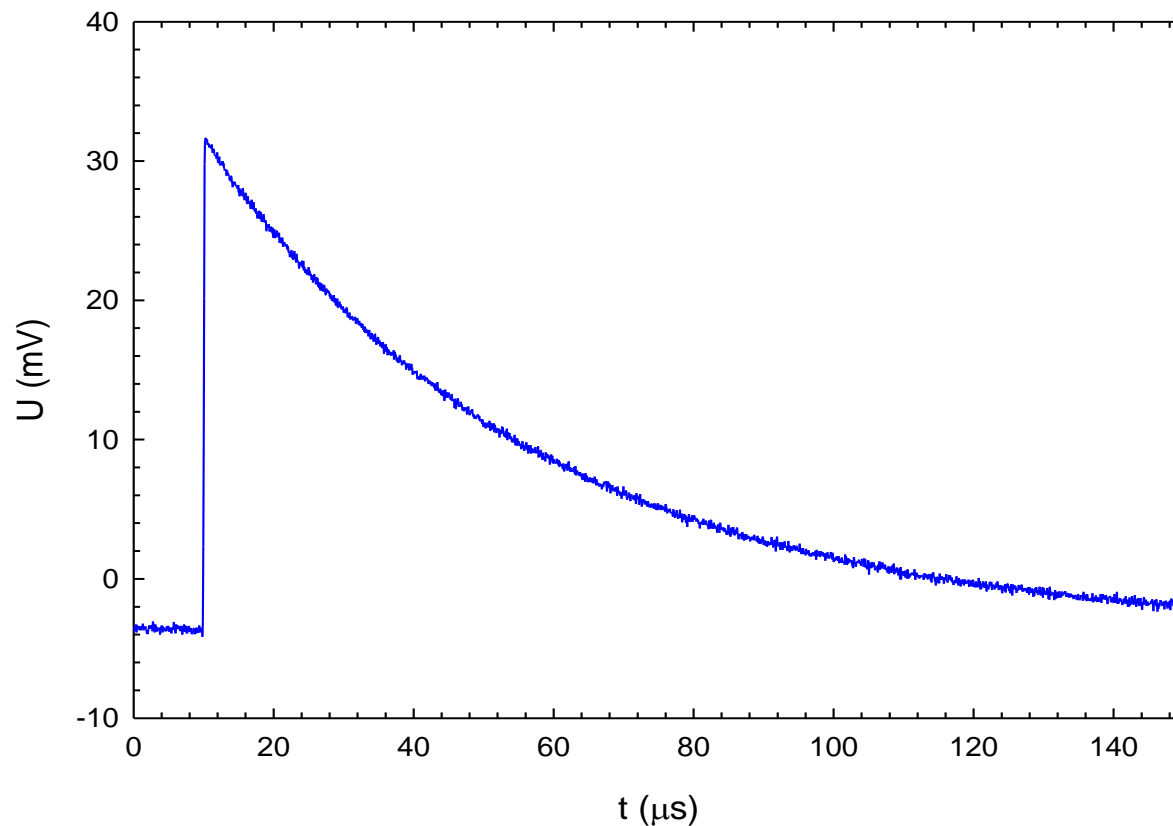
→ pozor na pile-up

Nábojově citlivý předzesilovač

• vstupní impedance $R_i C_{det} \gg t_{coll}$

• výstupní napětí $V_0 \propto \frac{Q_S}{C_f}$

• zisk $A_Q = \frac{dV_0}{dQ_S} \approx \frac{1}{C_f}$



amplituda

→ energie pulzu

exponenciální chvost

→ vybíjení, tvar pulzu

Šum scintilačních detektorů ($E = 511 \text{ keV}$)

anihilační záření $E_\gamma = 511 \text{ keV}$

$$\eta_E = \frac{\sigma_E}{E} = \frac{\sigma_N}{N} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

→ ~**5000** fotonů emitovaných BaF₂ scintilátorem (~100 eV/foton) Poissonovo rozdělení

→ ~**100** fotonů na fotokatodě (rychlá komponenta)

$$\eta_E = \sqrt{\frac{1}{100}} = 6\% \Rightarrow \Delta E = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma_E$$

FWHM = 14%

integrální světelný výstup BaF₂ 20 / **2%** NaI

→ ~**3×10⁸** elektronů na anodě (signál)

zisk PMT $G = 10^7$, kvantová účinnost katody $\eta = 25\%$

4 mA maximální proud (délka pulsu 30 ns)

0.2 V (pro 50 Ω vstupní impedanci)

fluktuace signálu

$$\sigma_{sig} \approx \sqrt{G\eta \times 100} \approx 6 \times 10^3 e$$

dosažitelný elektronický šum $\sigma_{el} \approx 10 - 1000e$

elektronický šum lze zanedbat

Šum polovodičových detektorů ($E = 511 \text{ keV}$)

anihilační záření $E_\gamma = 511 \text{ keV}$

→ ~**173 000** párů elektron-díra (Ge $\xi = 2.96 \text{ eV/pár elektron-díra}$)

→ vnitřní rozlišení na 511 keV

Fano faktor $F = \mathbf{0.1}$

$$\eta_E = \sqrt{F \frac{\xi}{E}} = 0.08\% \Rightarrow \text{FWHM} = 0.96 \text{ keV}$$
$$\Delta E = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma_E$$

fluktuace signálu

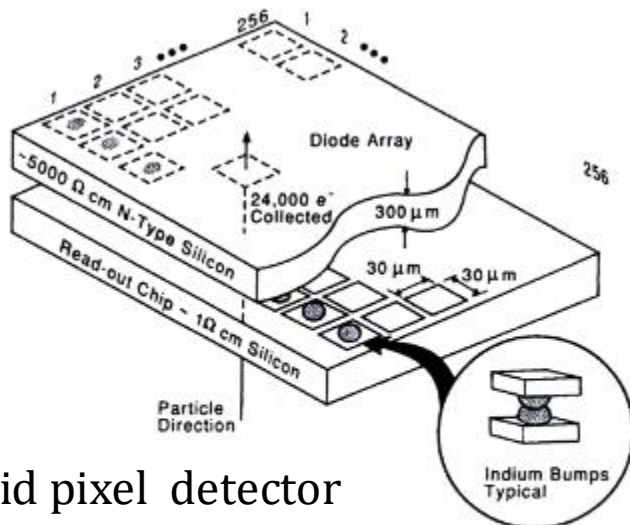
$$\sigma_{sig} \approx \sqrt{173\,000F} \approx 132e$$

dosažitelný elektronický šum $\sigma_{el} \approx 10 - 1000e$

elektronický šum je dominantní

Křemíkové dráhové detektory

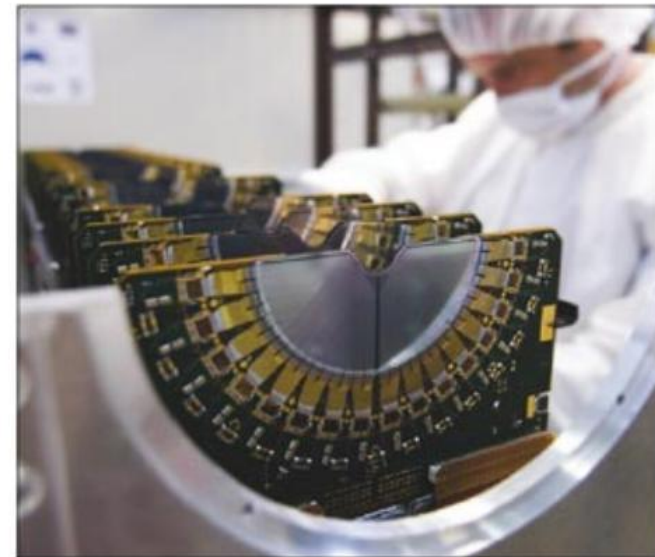
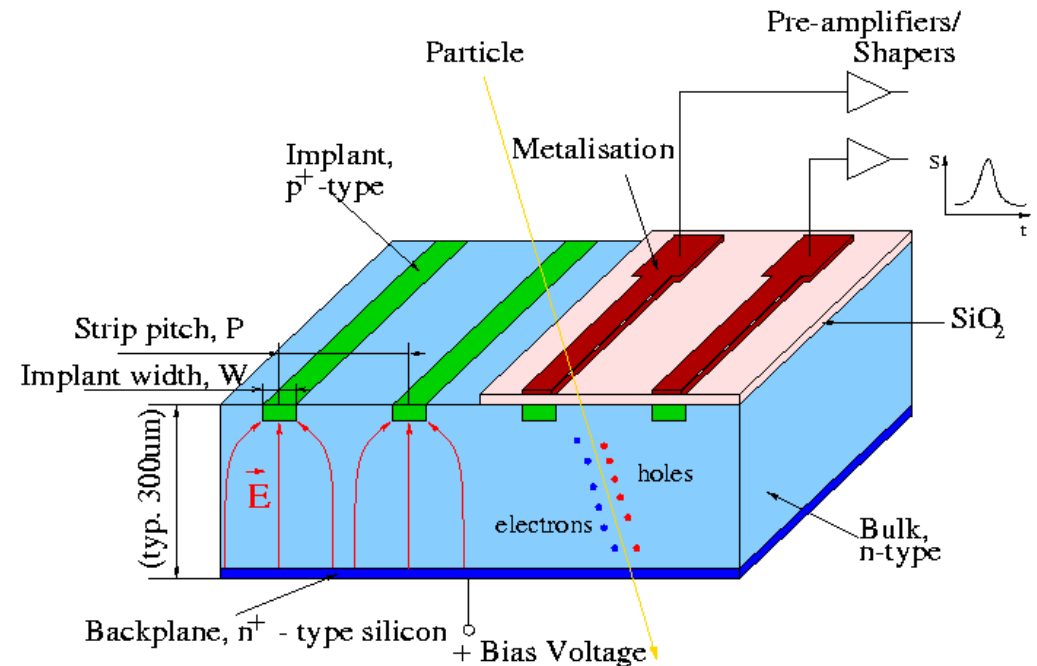
- Sběr náboje na stripech nebo pixelech.
- Rozlišení: jednotky μm , ns.
- Nové techniky:
 - monolithic active pixels,
 - Low-gain avalanche (LGAD)



Hybrid pixel detector

– vyčítací elektronika pod senzorem

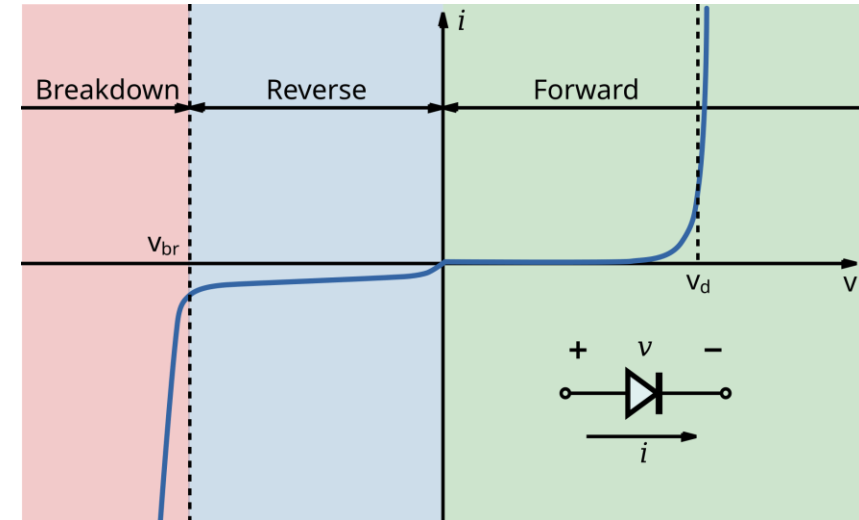
S.L. Shapiro et al., *Si PIN Diode Array Hybrids for Charged Particle Detection*, Nucl. Instr. Meth. A **275**, 580 (1989)



Křemíkový vertex detector, LHCb [CERN Courier]

Polovodičové detektory – Avalanche photo-diodes a SiPM

- Avalanche photo-diode (APD)
 - Detektor fotonů.
 - PN přechod v závěrném směru na hranici průrazu,
 - Nosiče náboje vytvořené fotonem iniciují lavinu podobně jako při ionizaci plynu.
- Single-photon avalanche diode (SPAD)
 - APD v režimu 'Geigerova čítače', velké napětí.



[CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

- SiPM – křemíkový fotonásobič
 - Matice SPADů (10–100 μm)
 - Součet diskretních signálů dává signál úměrný počtu fotonů

