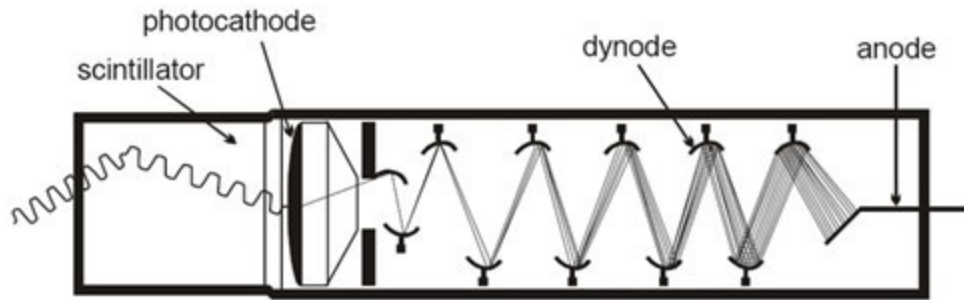


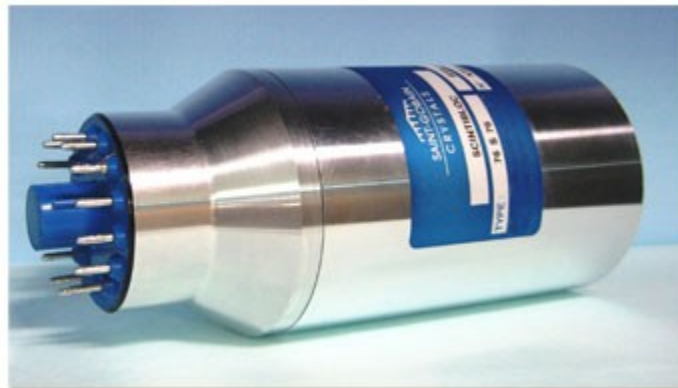
Anihilace pozitronů – pozorovatelné

- **doba života pozitronů LT (τ, E_s, E)**
 - **úhlové korelace ACAR (τ, θ)**
- } scintilační detektory
- **Dopplerovské rozšíření DB ($\Delta E, \tau$)** polovodičové detektory
 - **scintilační detektory (scintilátor + fotonásobič)**
 - výborné časové rozlišení
 - horší energetické rozlišení
 - **polovodičové detektory (HPGe)**
 - vynikající energetické rozlišení
 - špatné časové rozlišení

Scintilační detektory



- lineární odezva na energii
- rychlá časová odezva
- diskriminace podle tvaru pulsů

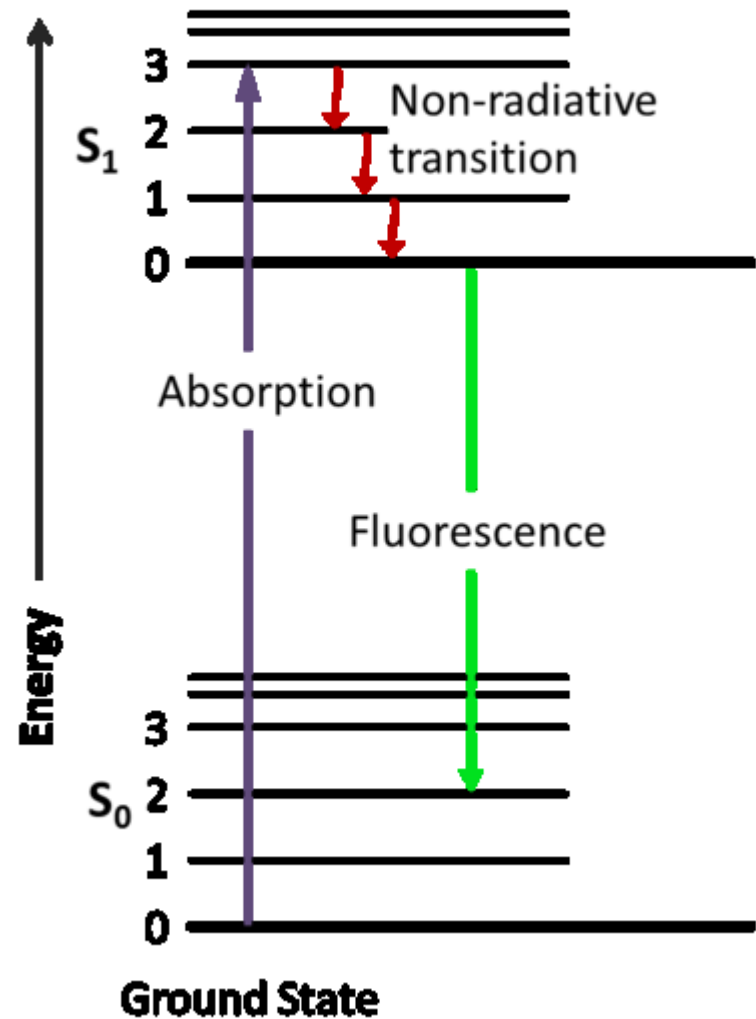
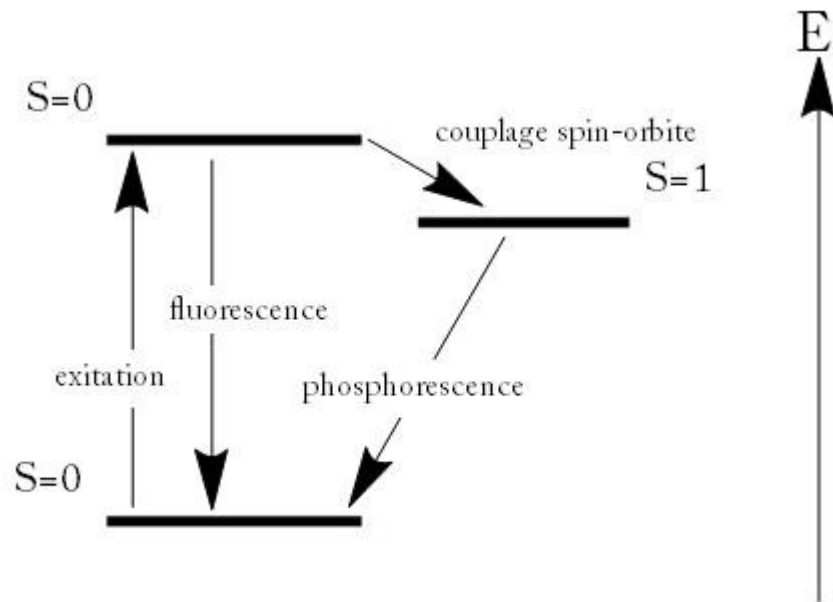


Scintilatory

- **luminiscence**

- **fluorescence** , $\tau < 100$ ns

- **fosforescence**, $\tau > 100$ ns



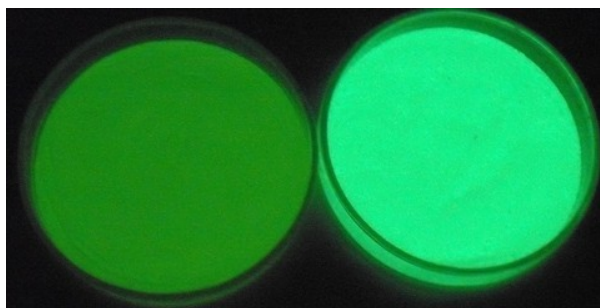
Fosforescence

ZnS:Cu

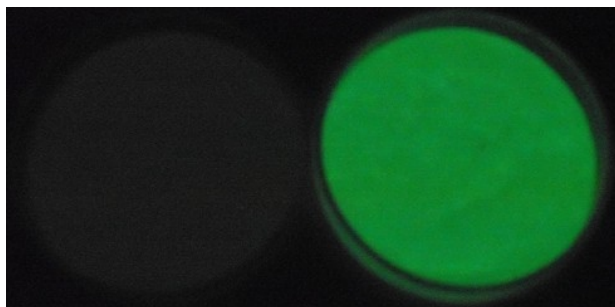
SrAl₂O₄:Eu



na světle



10 s



4 min

Scintilátory

- **ideální scintilátor**

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

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

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

Scintilátory

- **organické scintilátory**

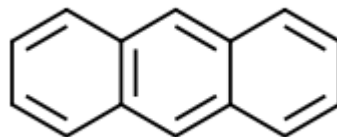
- **organické krystaly**

anizotropní výstup

antracén

vysoký světelný výtěžek

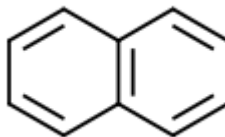
$\tau \approx 30$ ns



naftalen

vysoký světelný výtěžek

$\tau \approx 5$ ns



Scintilátory

- **organické scintilátory**

- **organické kapaliny**

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

- p-Terpenyl $C_{18}H_{14}$, di-fenyloxadiazol $C_{20}H_{14}N_2O$

$$\tau \approx 3-4 \text{ ns}$$

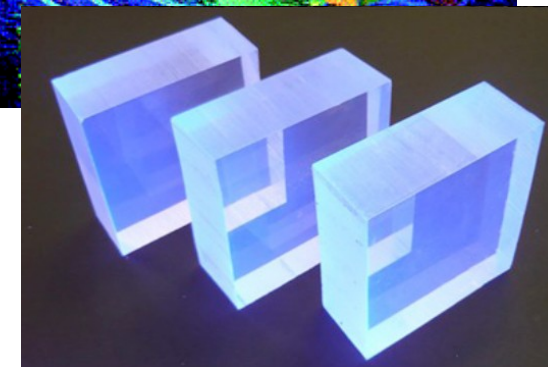
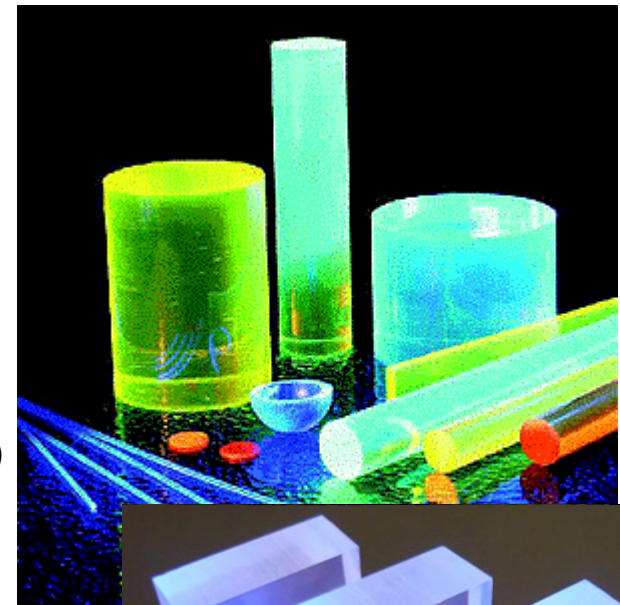
- **plastické scintilátory**

- organický scintilátor rozpuštěný v pevném polymeru (PS, PC)

$$\tau \approx 1-3 \text{ ns}$$

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

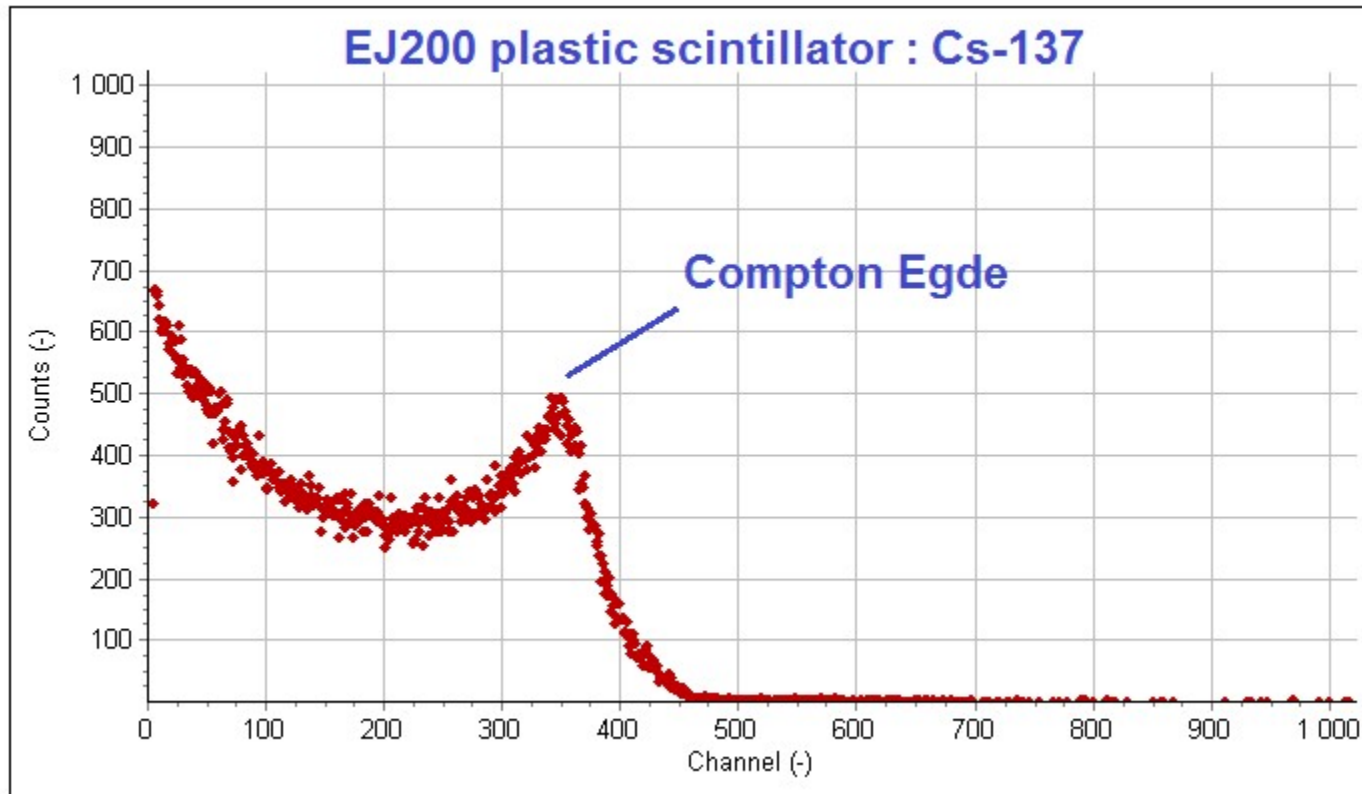
- PILOT U, světelný výtěžek 40-45%, $\tau = 0.4-0.6 \text{ ns}$, $\lambda_{\text{max}} = 390 \text{ nm}$



Scintilátory

- **organické scintilátory**

- hlavní nevýhoda: nízké $Z \rightarrow$ nízký účinný průřez pro fotoefekt ($\sigma \approx Z^5$)
- dominuje interakce γ -záření Comptonovým rozptylem ($\sigma \approx Z^2$)



Scintilátory

• Anorganické scintilátory

- krystaly solí alkalických kovů s malým množstvím aktivátoru

- NaI(Tl), světelný výtěžek 100%, $\tau = 230$ ns, $\lambda_{\max} = 415$ nm

- větší hustota \rightarrow větší dE/dx

- větší $Z \rightarrow$ větší účinný průřez pro fotoefekt ($\sigma \approx Z^5$)

- hydroskopické

- příklad

- NaI(Tl), $\lambda_{\max} = 415$ nm (3 eV)

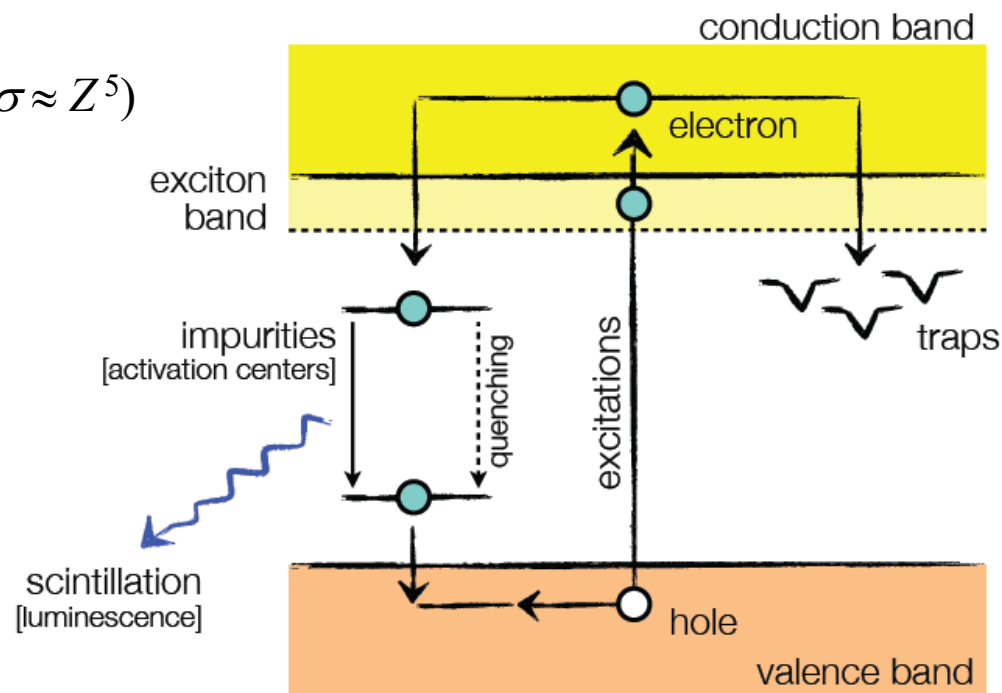
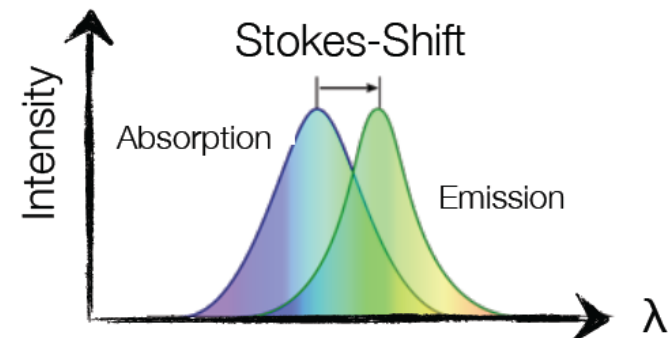
- 40000 fotonů/MeV

- $\tau = 230$ ns

- PbWO₄, $\lambda_{\max} = 420$ nm (3 eV)

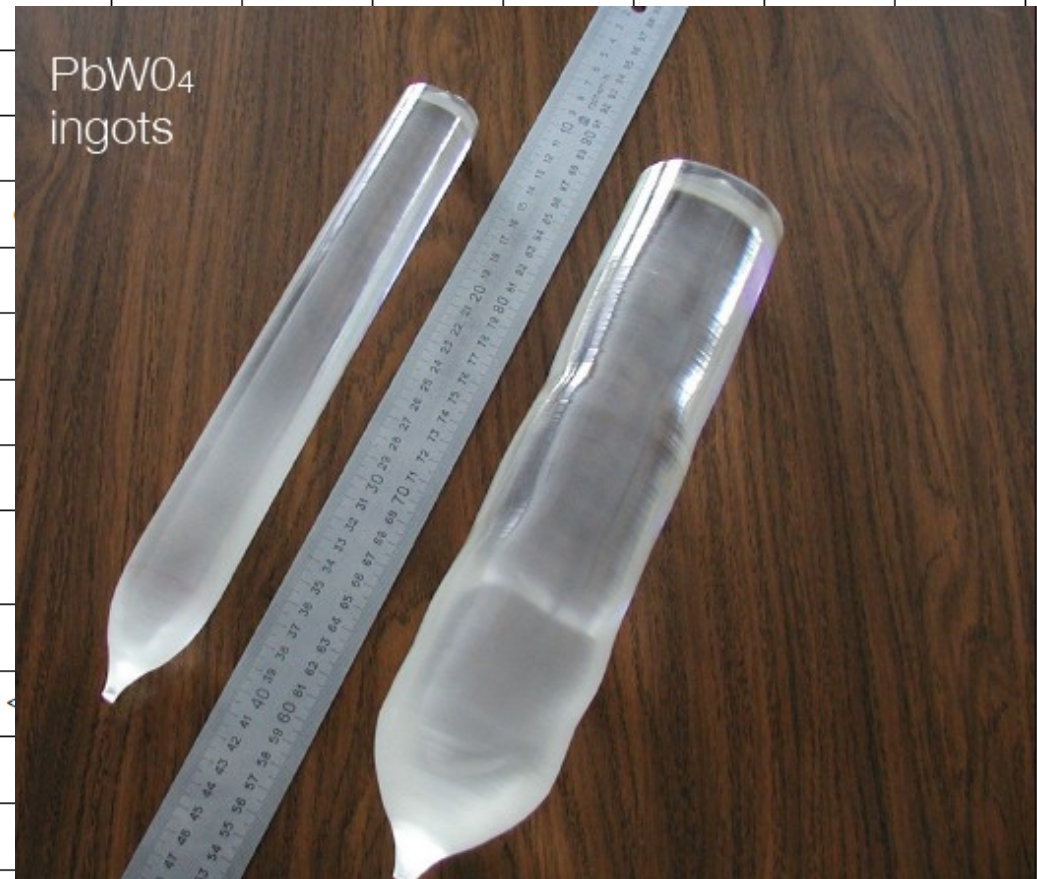
- 200 fotonů/MeV

- $\tau = 6$ ns



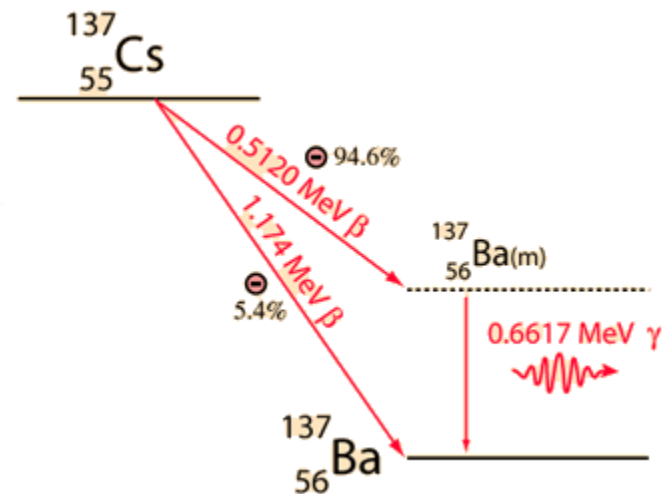
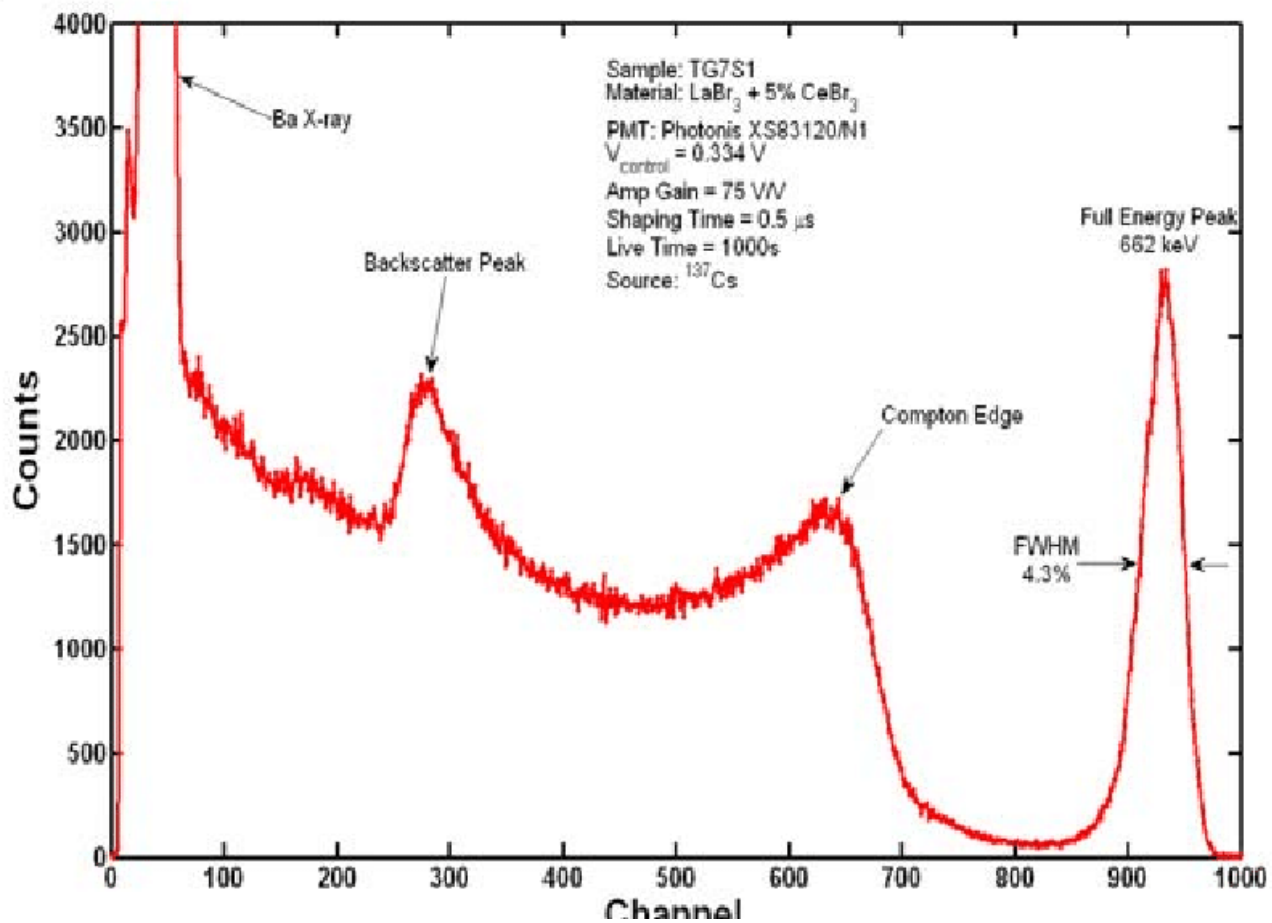
Scintilatory

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								
Hardness-Moh	2	2	4	3	5								
Hydroscopic	Yes	Slightly	No	No	No								
Crystal Structure	Cubic	Cubic	Cubic	Cubic	Cubic								
Therm. Exp. - PPM	47.5	50	19.5	18.4	7.0								
Melting Pt - C°	651	621	1360	1280	1050								
Luminescence Properties													
Integrated Light Output (%Nal:TI)	100	45	50	20/2	15-20								
Wave Length of Max. Emissions (nm)	415	550	435	325/220	480								
Decay Constant n/s	230	900	940	630/0.6	300								
Afterglow (% at 6 ms)	0.5-5	<2	<0.3	-	<0.005								
Radiation Length cm	2.9	1.86	3.05	2.03	1.1								
Photon yield @ 300K - 10 ³ pM/MeV	38	52	23	10	2-3								

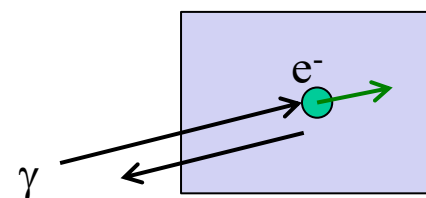


Scintilátory

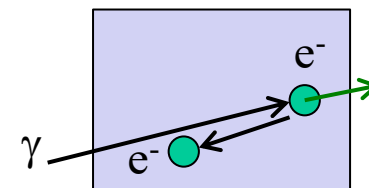
^{137}Cs : anorganický scintilátor $\text{LaBr}_3 + 5\% \text{CeBr}_3$



Comptonovská hrana



Zpětný odraz



Fotonásobič

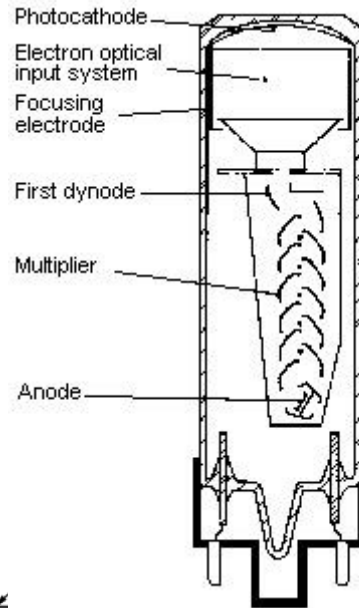
- vstupní okno

- fotokatoda $E = h\nu - \phi_e$

- fokusační elektronová optika

- systém dynod

- anoda



zesílení

$$G = \delta^N$$

- typicky:
 - koeficient sekundární emise $\delta = 3 - 4$
 - počet dynod $N = 10 - 12$
 - zisk: $G = 10^5 - 10^7$

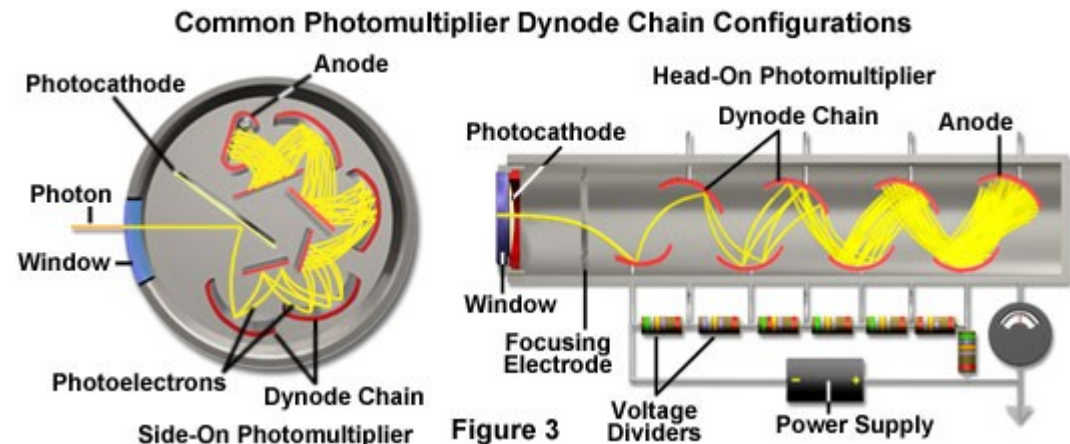
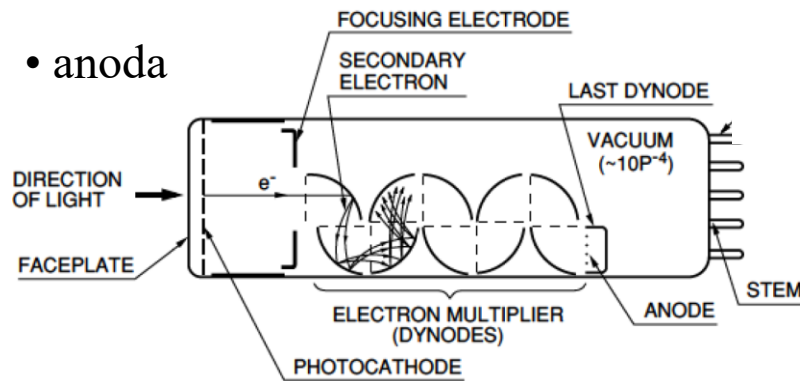


Figure 3

Fotonásobič

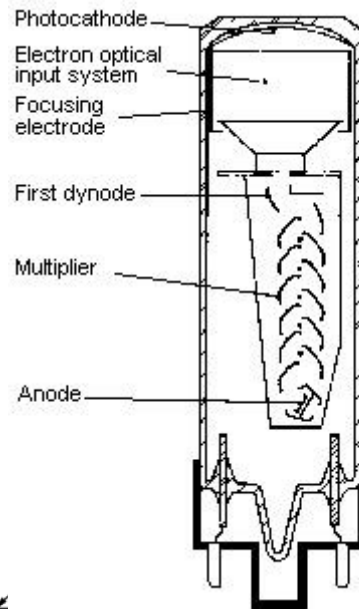
- vstupní okno

- fotokatoda $E = h\nu - \phi_e$

- fokusační elektronová optika

- systém dynod

- anoda

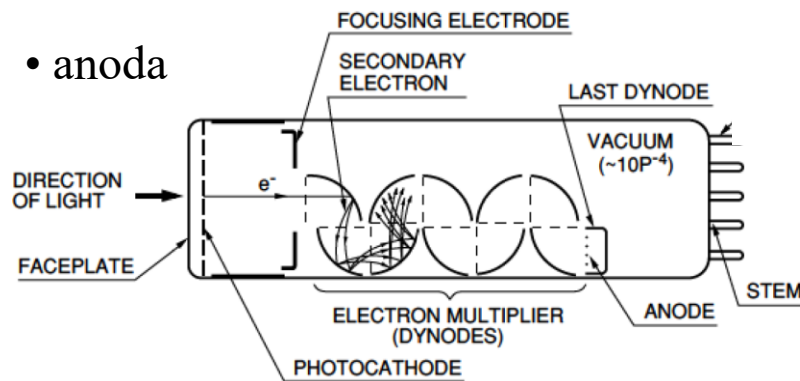


zesílení

$$G = \delta^N \propto (U_d)^N$$

$$\delta \sim U_d$$

$$\frac{dG}{G} = N \frac{dU_d}{U_d} = N \frac{dU_c}{U_c}$$



Common Photomultiplier Dynode Chain Configurations

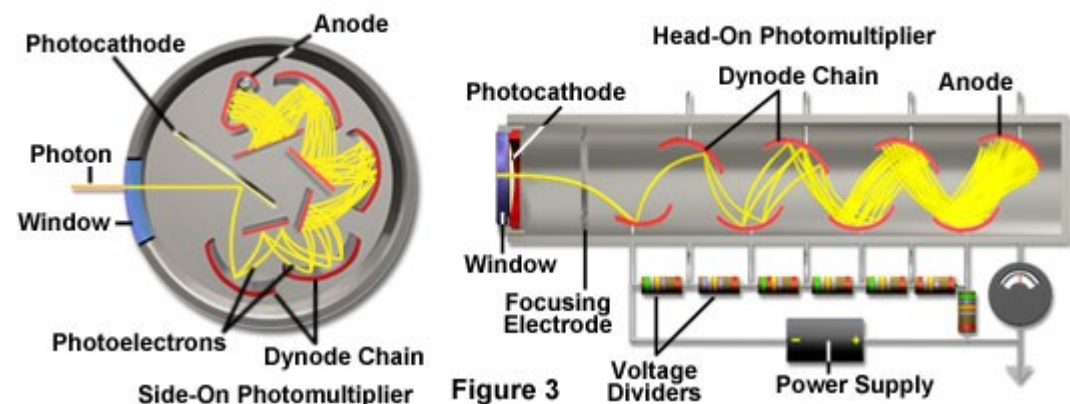
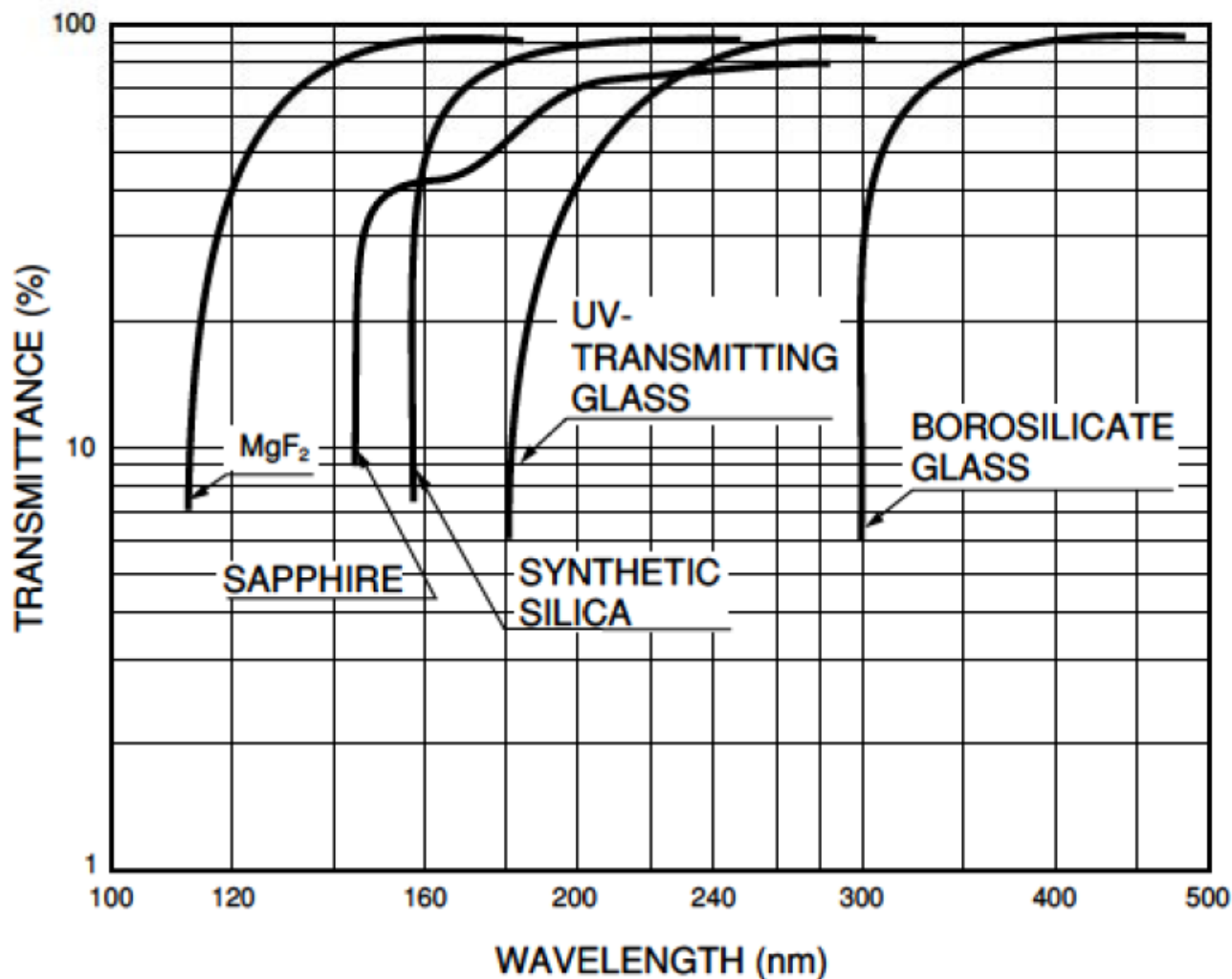
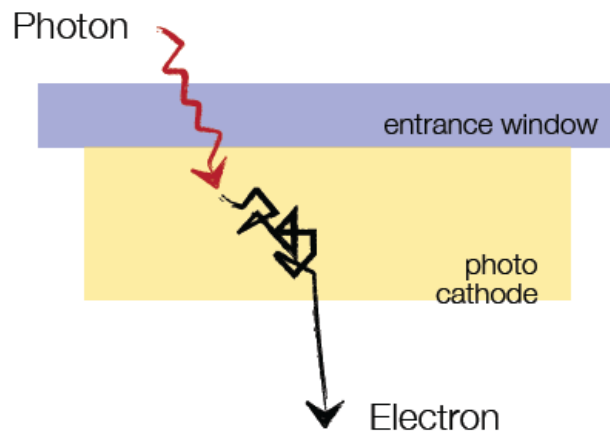


Figure 3

Fotonásobič – vstupní okno

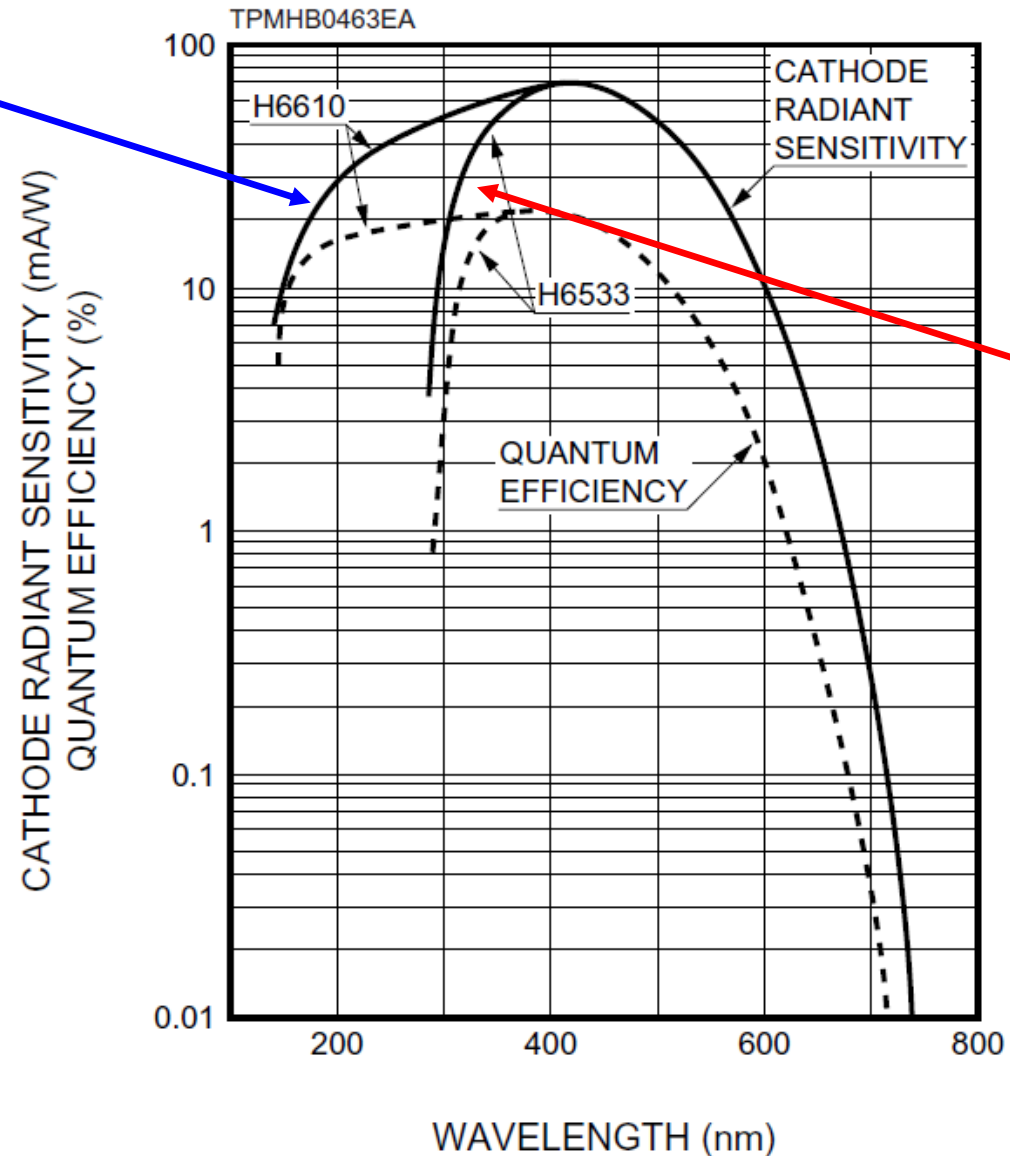
- vstupní okno



Fotonásobič - fotokatoda

- fotokatoda
- bi-alkalická K_2CsSb
- ~ 10-50 nm tenká vrstva napařená na vstupním okně

amorfní
syntetické
 SiO_2



borosilikátové
sklo

Fotonásobič - fotokatoda

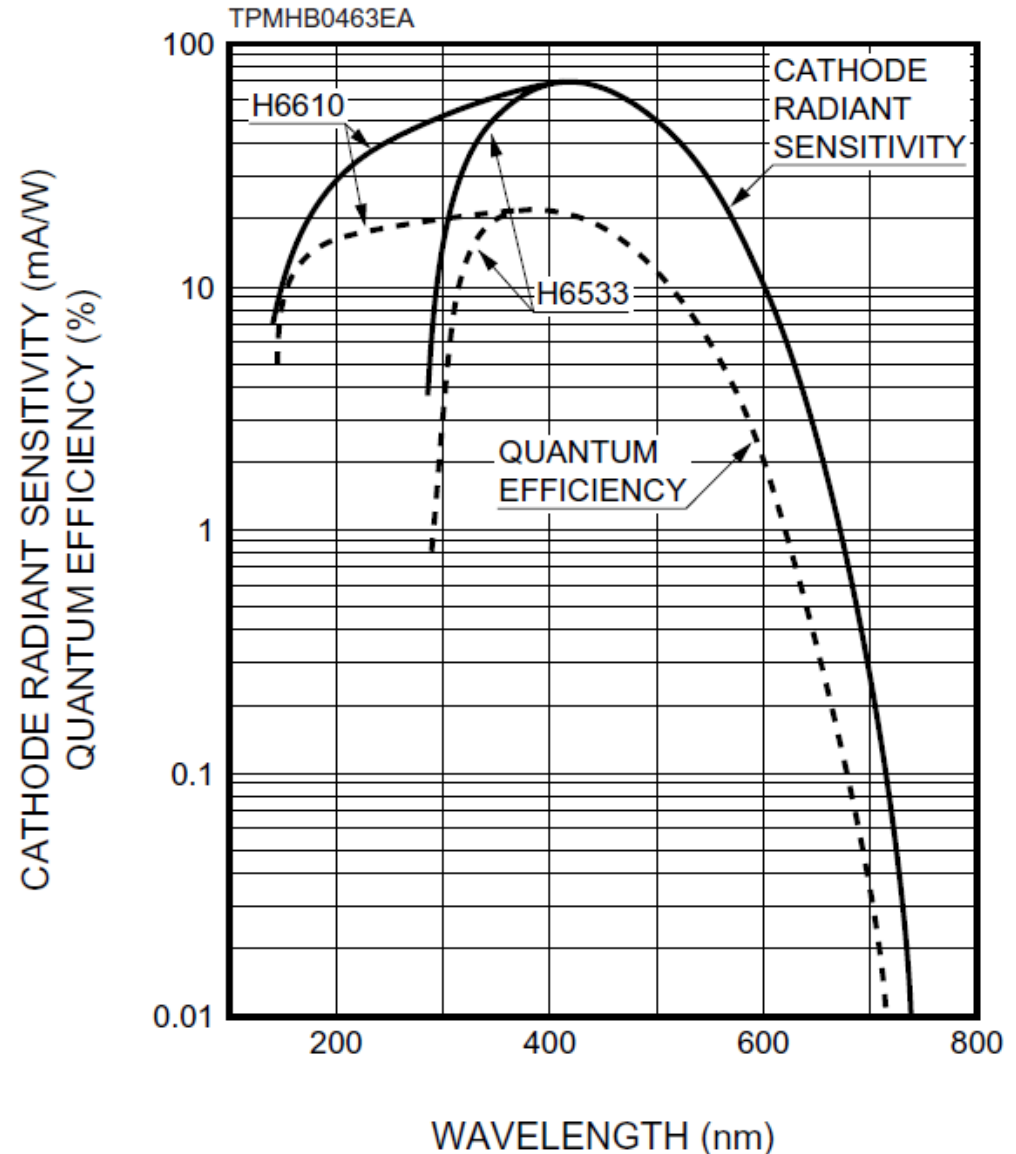
- kvantová účinnost:

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

- N_{pe} počet uvolněných fotoelektronů
- N_{ph} počet dopadajících fotonů
- spektrální citlivost:

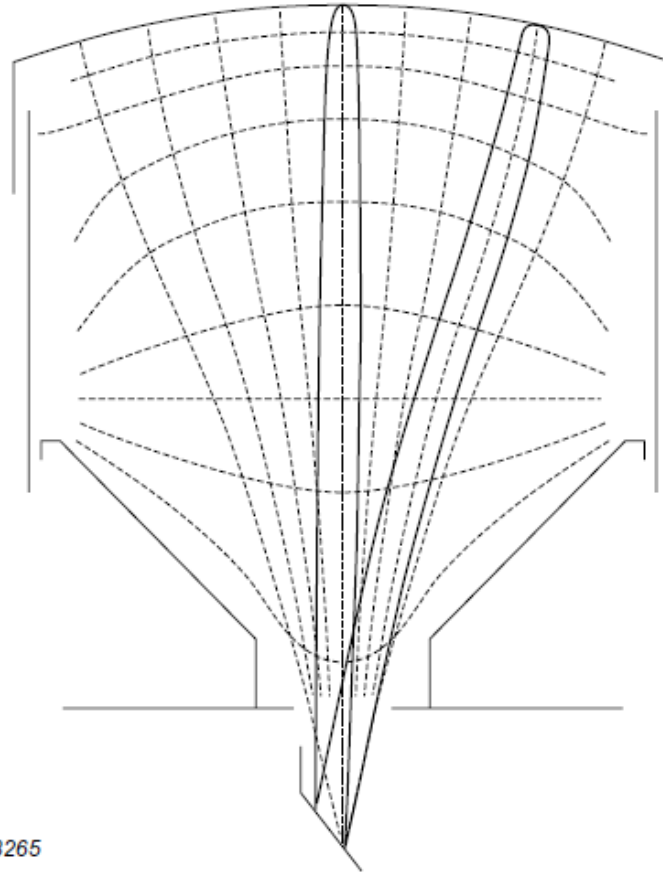
$$E(\lambda) = \frac{I_{pe}}{P(\lambda)_{ph}} = \lambda \eta(\lambda) \frac{e}{hc}$$

- I_{pe} proud fotoelektronů
- P_{ph} intezita dopadajícího světla



Fotonásobič – fokusační elektronová optika

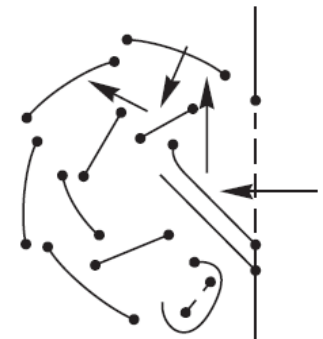
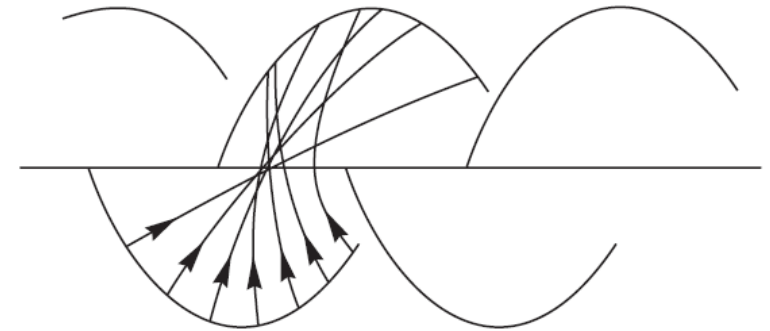
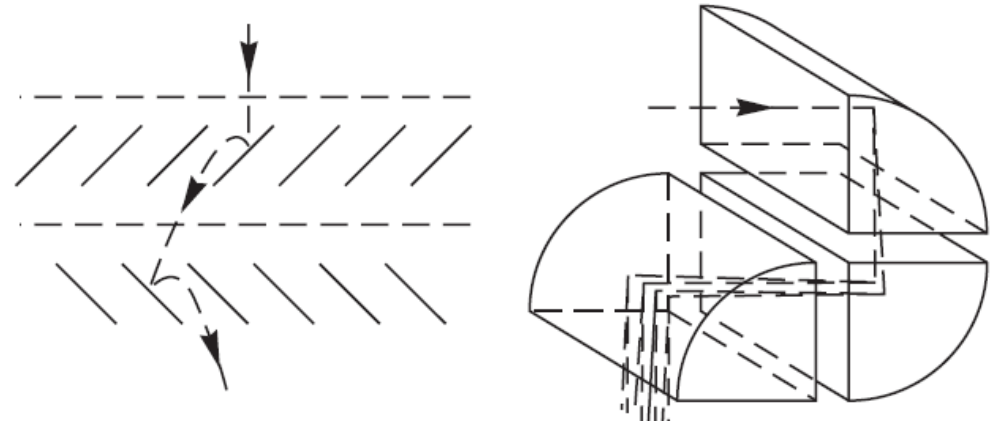
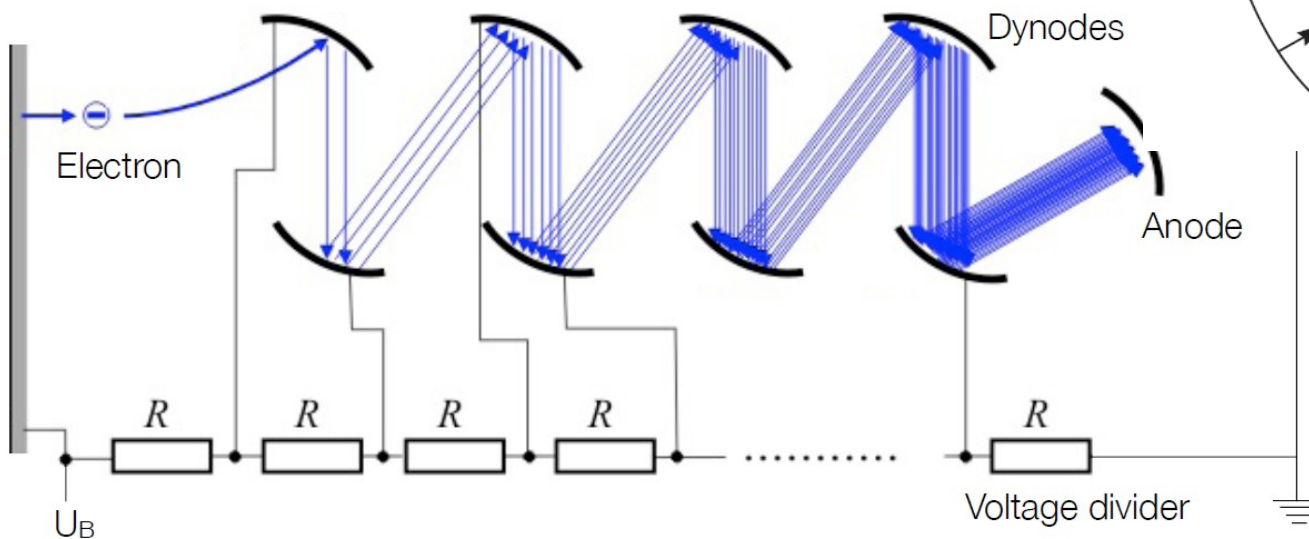
- fokusační elektronová optika
- účinnost sběru $> 80\%$
- doba letu k dynodě musí být stejná (nezávislá na místě emise)



MRB265

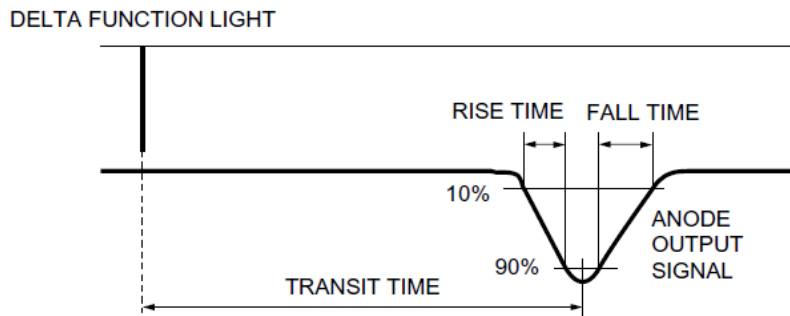
Fotonásobič – systém dynod

- emise sekundárních elektronů
- povrch dynod: Cs-Sb, Cu-Be, Ag-Mg
 - vysoký faktor sekundární emise δ
 - stabilita δ i při vysokých proudech
 - nízká termionická emise

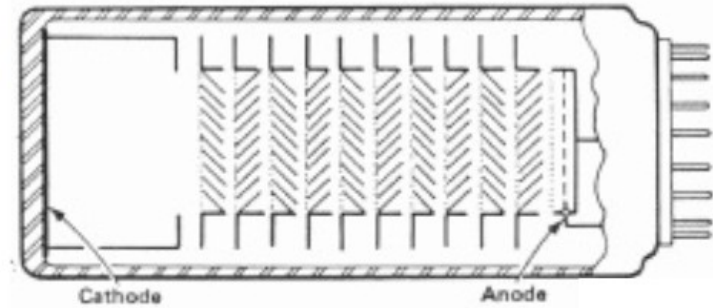


Fotonásobič – systém dynod

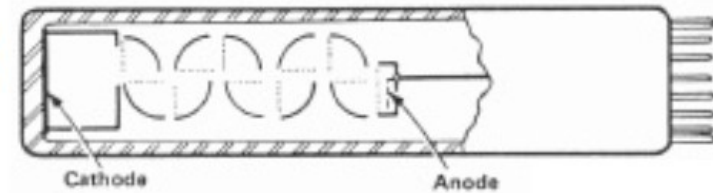
- časové vlastnosti fotonásobiče:
 - náběhová hrana pulsu (rise time)
 - doba transportu (transit time)
 - časové rozmazání při transportu (transit time spread)



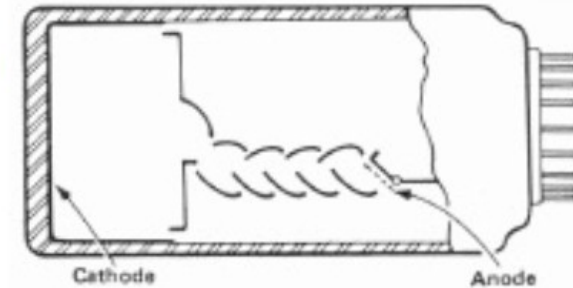
Venetian blind



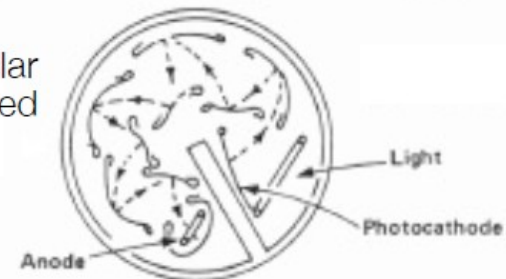
Box and grid



Linear focused

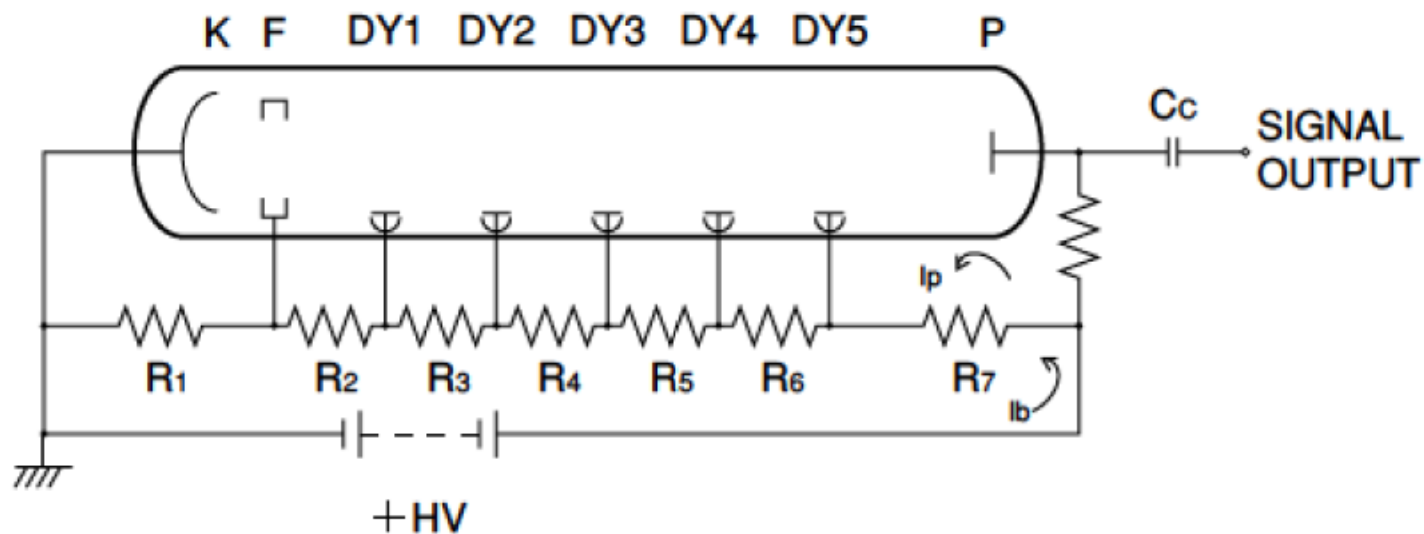


Circular focused

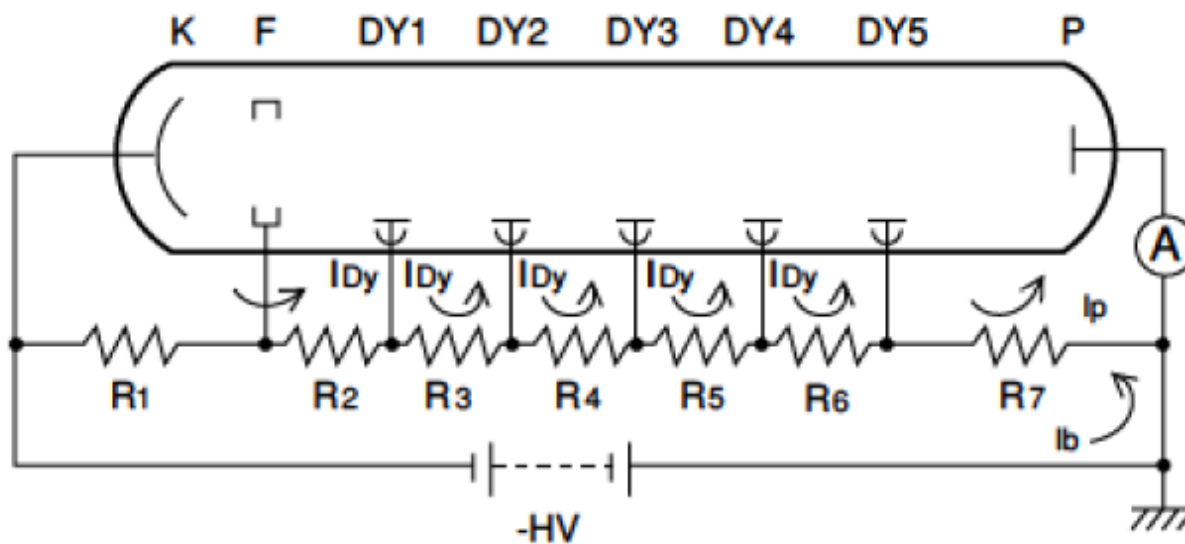


Fotonásobič – dělič napětí

- kladné napětí

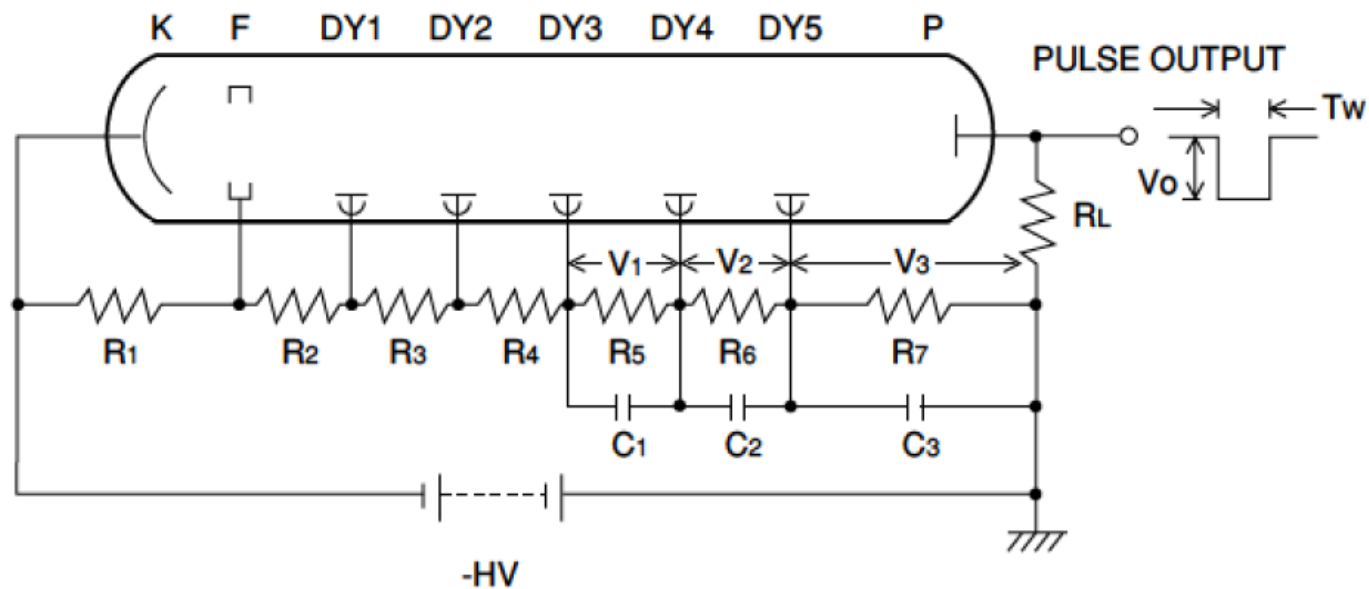


- záporné napětí



Fotonásobič – dělič napětí

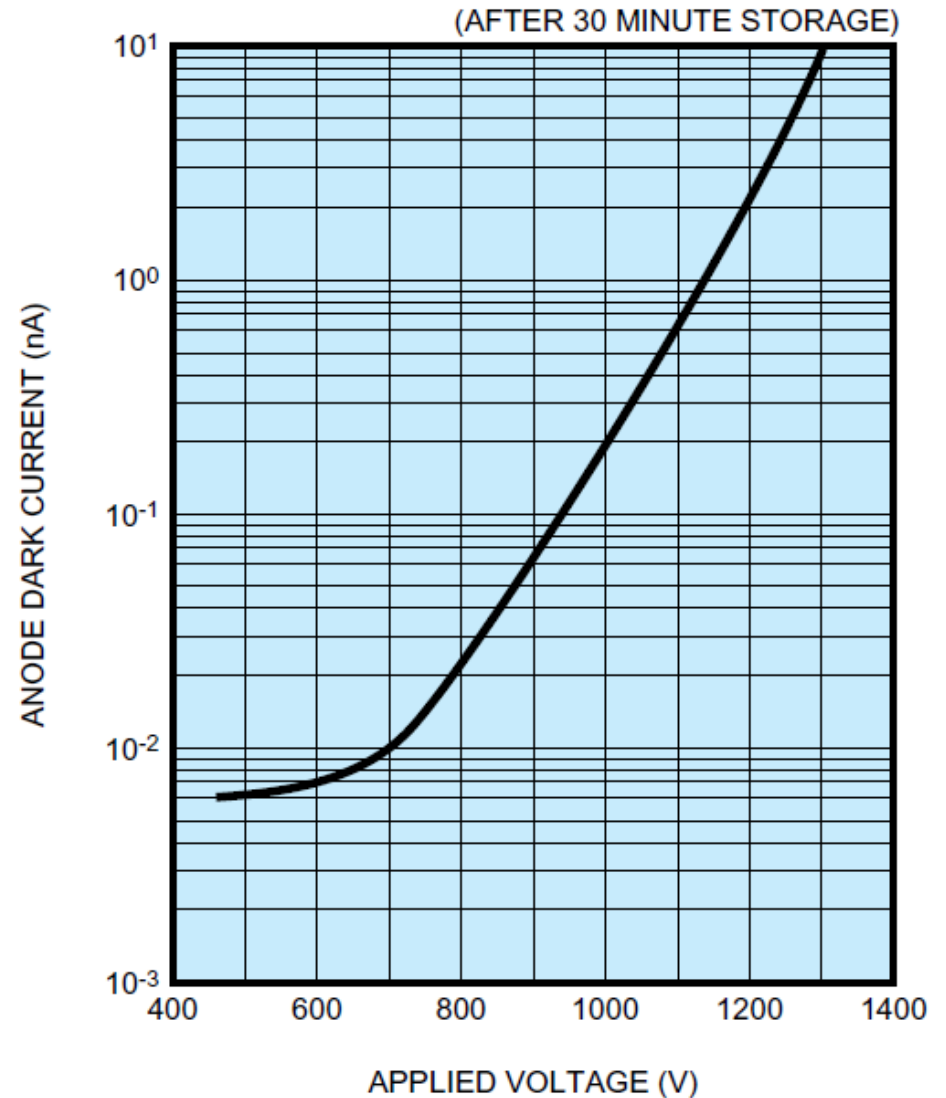
- záporné napětí – pulsní mód



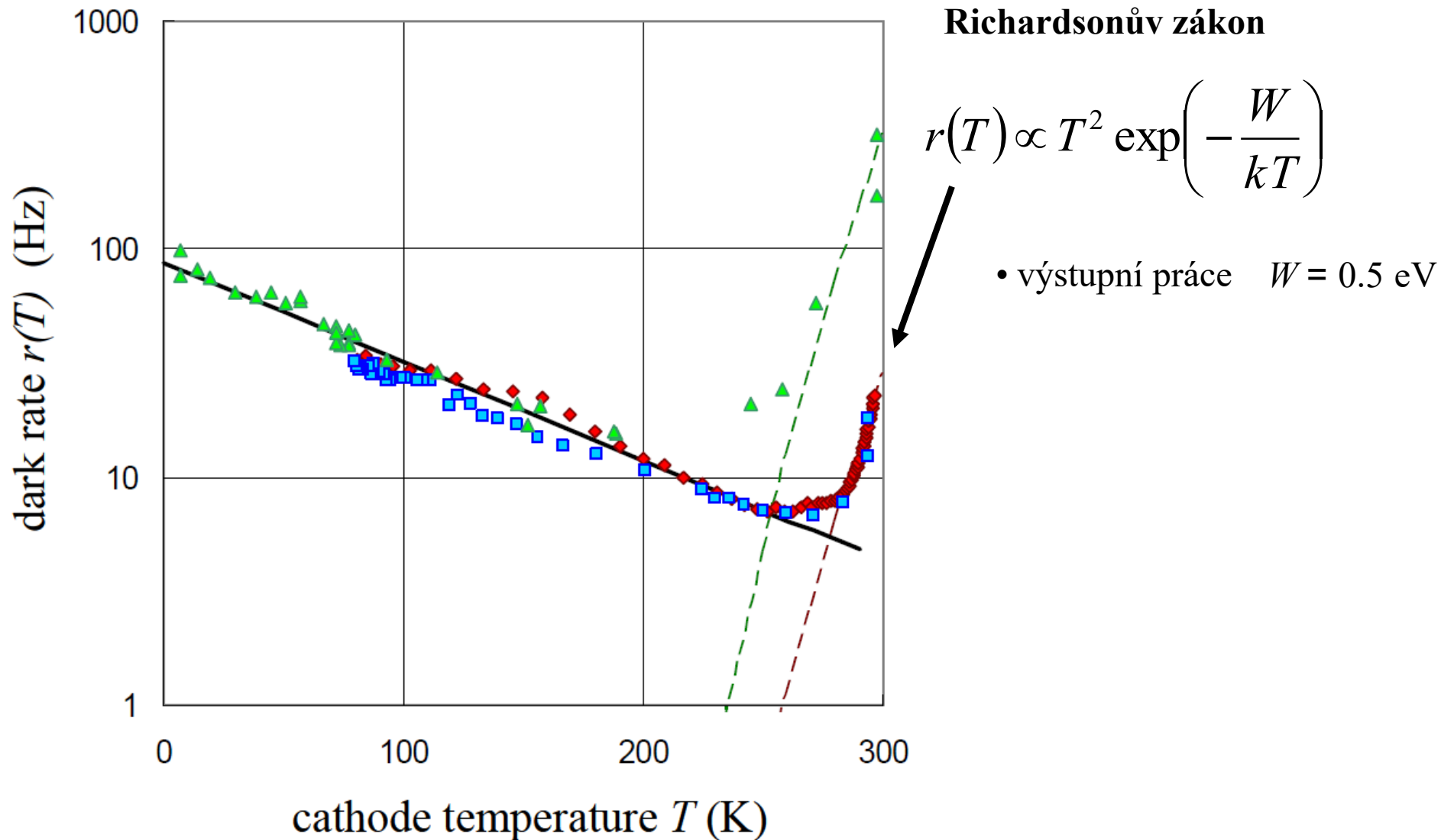
Fotonásobič – temný proud

šum

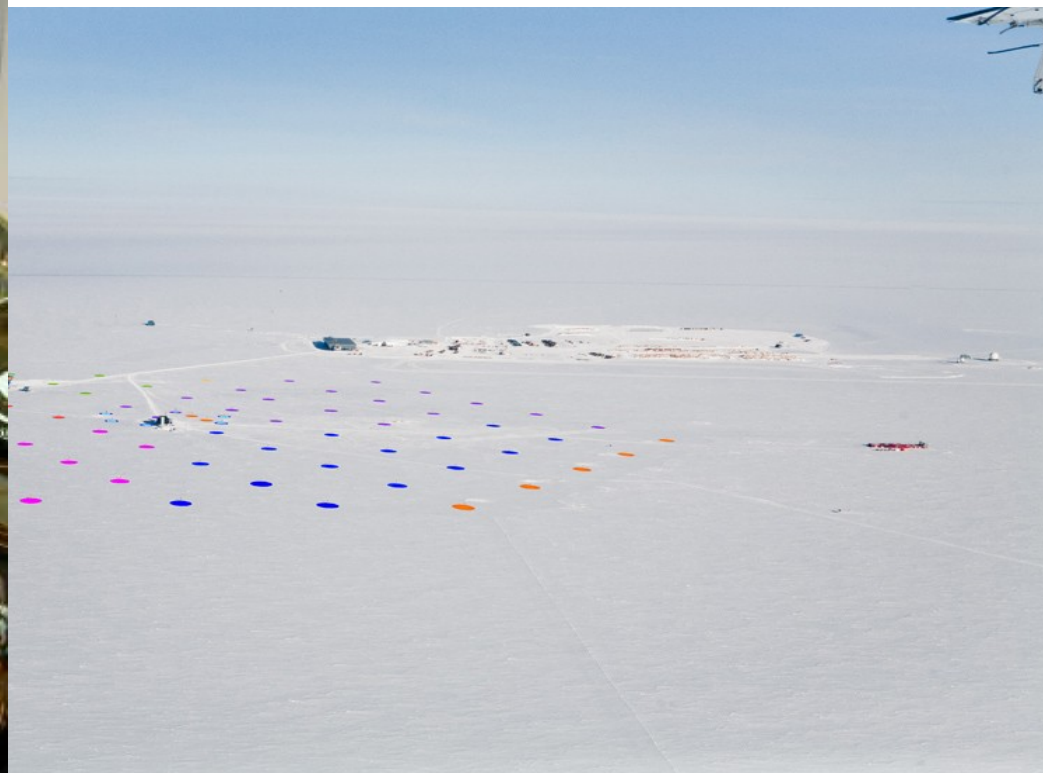
- termionická emise z katody a z dynod
- ionizace molekul plynů (afterpulsy)
- elektrony stimulovaná luminiscence skla
- svodové proudy
- zbytková radiace



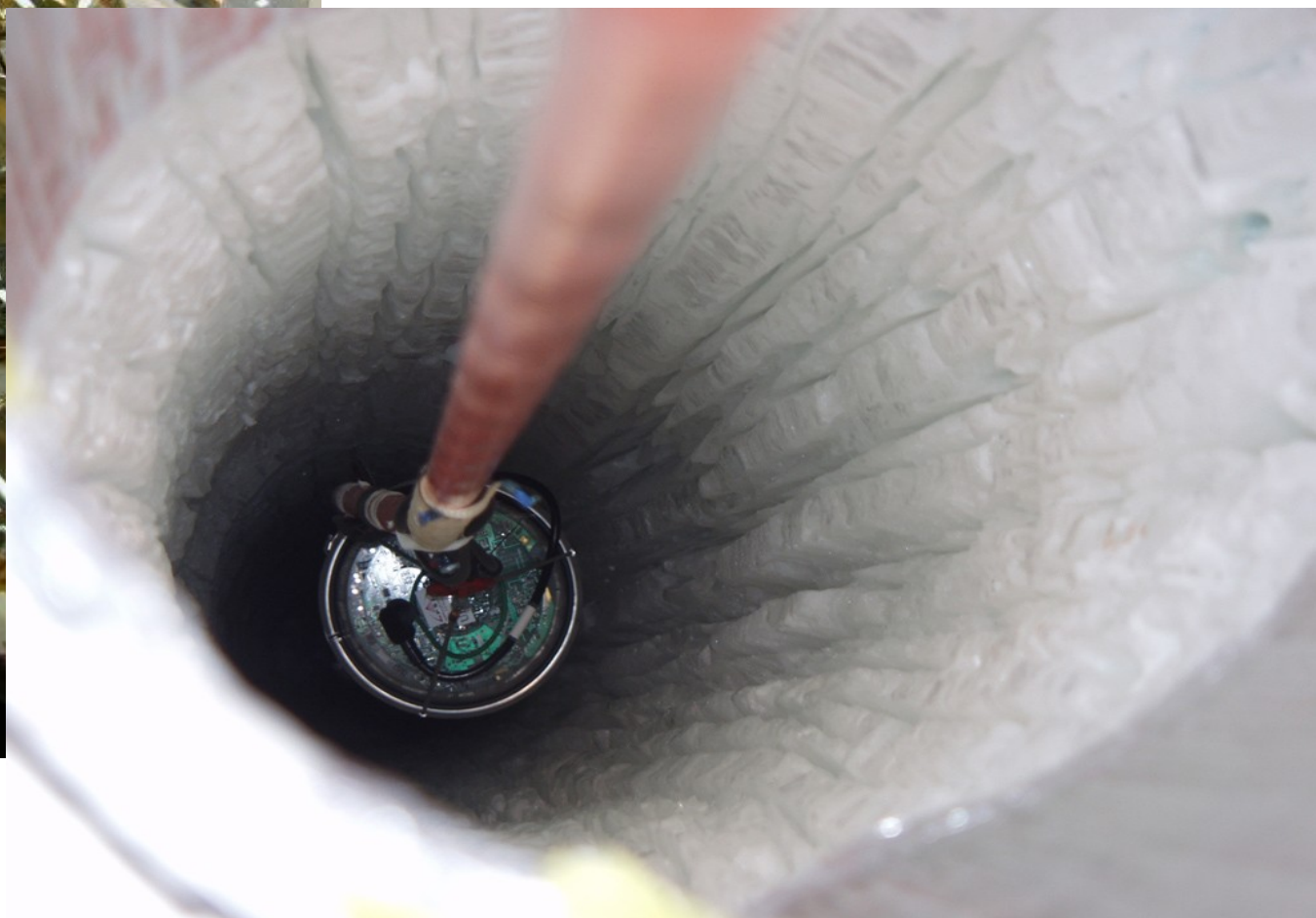
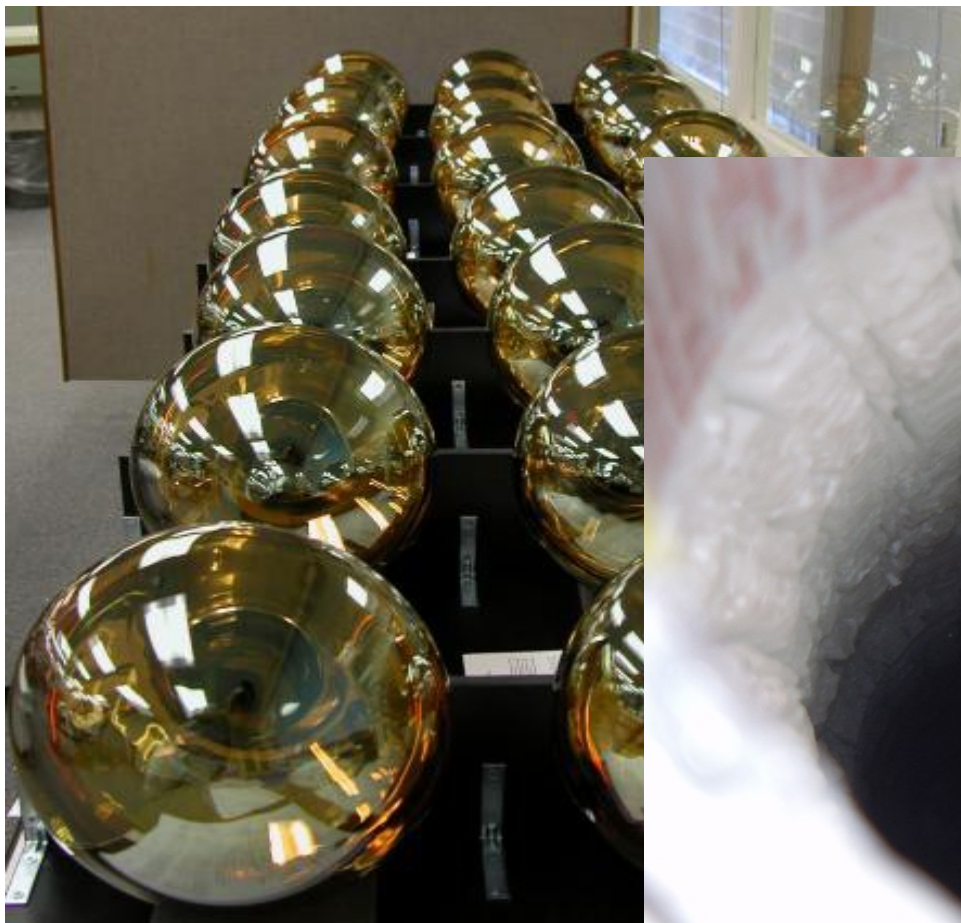
Fotonásobič – temný proud



Fotonásobič – temný proud

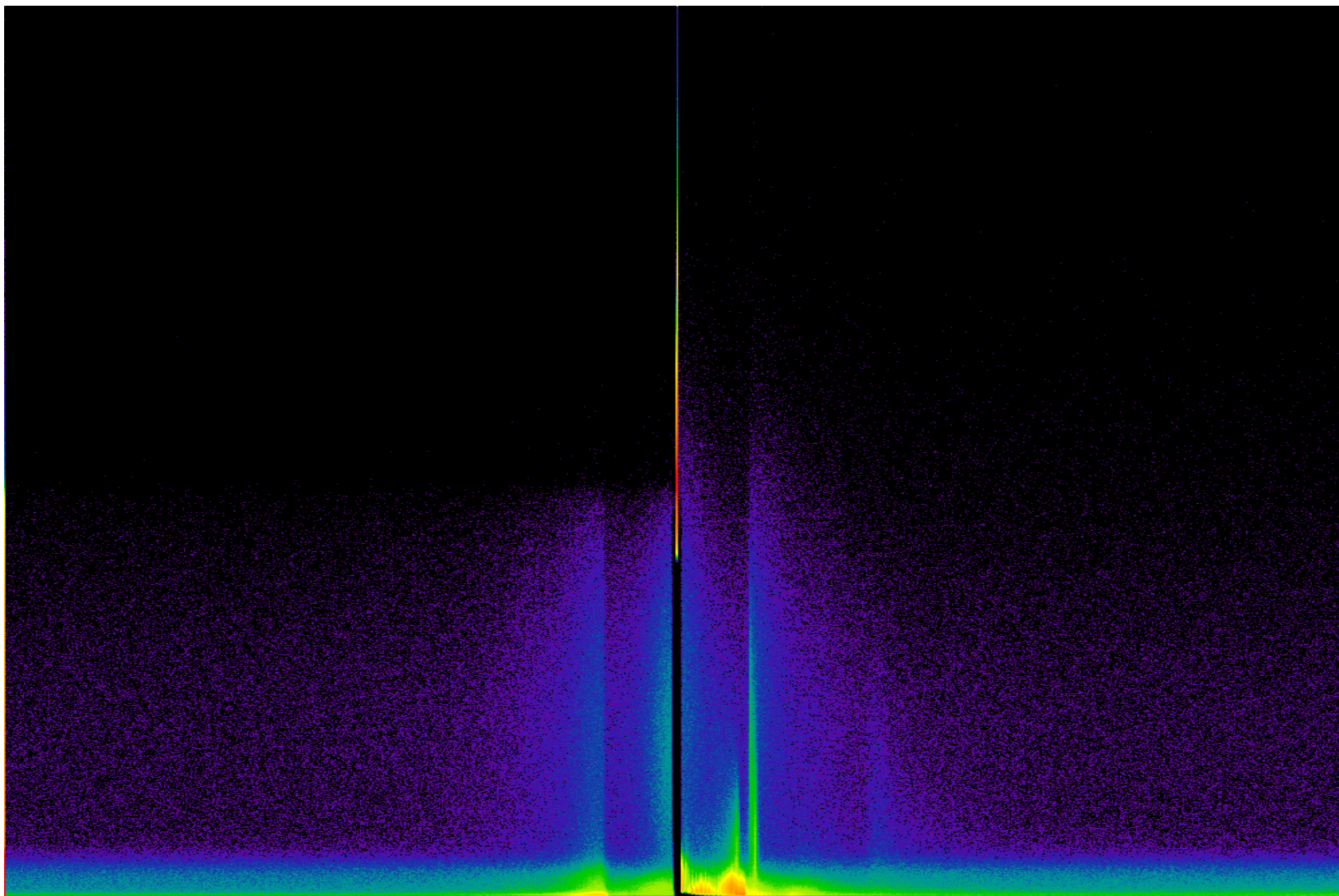


Fotonásobič – temný proud



Fotonásobič – temný proud

XP2020/Q photomultiplier, 12-bit digitizer Acqiris DC420, 420 Ms/s



Fotonásobič – temný proud

- scintilační detektory spektrometrů pro měření dob života pozitronů
- rychlý fotonásobič + BaF₂ scintilátory

