

# Detektory

## požadovaná informace o částici / záření

- energie
- čas příletu
- poloha
- typ

## citlivost detektoru

- účinný průřez
- objem
- vnitřní šum
- vstupní okno

## výstupní signál detektoru



proudový puls  $p(t)$

$$E \approx Q = \int p(t) dt$$

# Detektory

výstupní signál detektoru



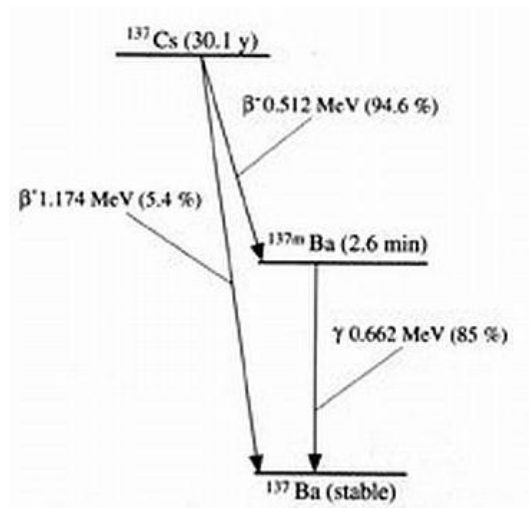
proudový puls  $p(t)$

$$E \approx Q = \int p(t) dt$$

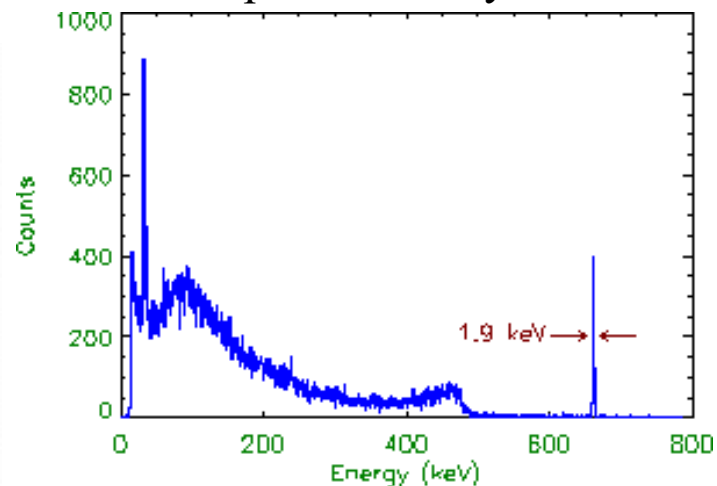
$$E \approx Q \approx A$$

- energetické rozlišení:  $R = \frac{\Delta E}{E}$

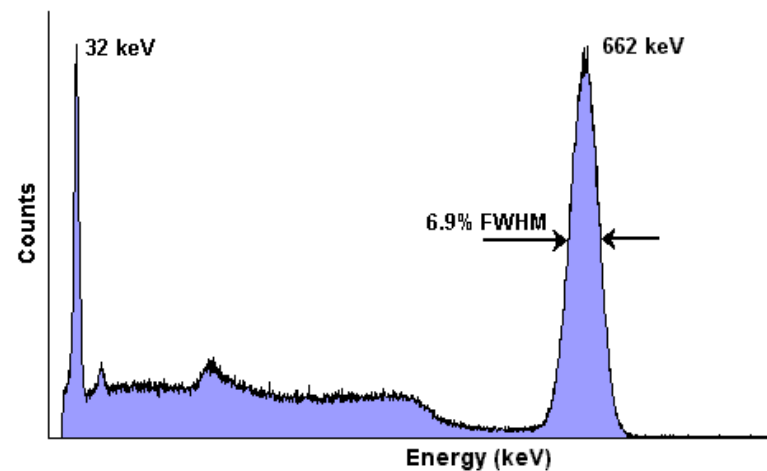
$^{137}\text{Cs}$



HPGe polovodičový detektor



NaI scintilační detektor



# Detektory – energetické rozlišení

## 1. nekompletní absorpce energie

- Poissonovo rozdělení
- střední energie nutná pro ionizaci:  $w$

- střední počet kolizí:  $J = \frac{E}{w}$

- energetické rozlišení:  $R = \frac{\Delta E}{E} = 2\sqrt{2 \ln 2} \frac{\sqrt{J}}{J} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sqrt{\frac{w}{E}}$

# Detektory – energetické rozlišení

## 1. kompletní absorpce energie

- celková energie předaná detektoru je fixní
- rozlišení je lepší než předpověď Poissonova rozdělení

$$\sigma^2 = FJ$$

- $F$  - Fano faktor

- energetické rozlišení: 
$$R = \frac{\Delta E}{E} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sqrt{\frac{Fw}{E}}$$

# Účinnost detektoru

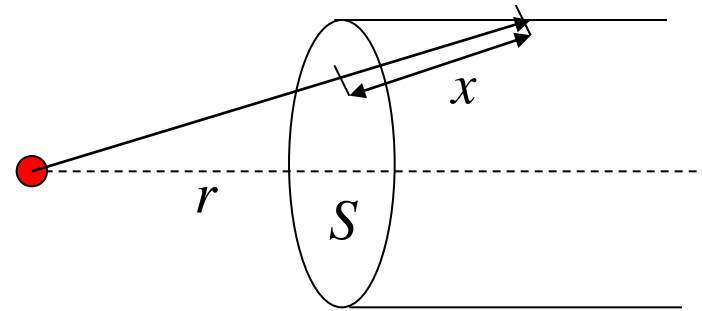
- celková účinnost:  $\eta_{\text{tot}} = \text{počet registrovaných událostí} / \text{počet událostí emitovaných zářičem}$

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

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

interní účinnost

geometrická účinnost

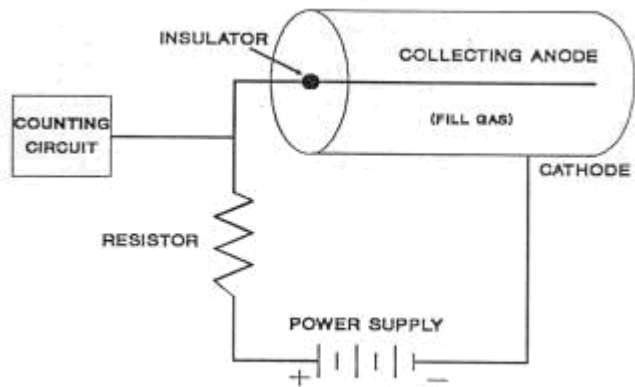


# Typy detektorů

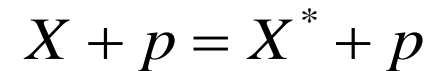
- ionizační detektory (ionizační komory, Geiger-Müllerovy počítače)
- scintilační detektory
- polovodičové detektory

# Typy detektorů

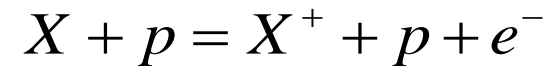
- ionizační detektory (ionizační komory, Geiger-Müllerovy počítače)



- excitace  $\sigma \approx 10^7$  barn



- primární ionizace  $\sigma \approx 10^8$  barn

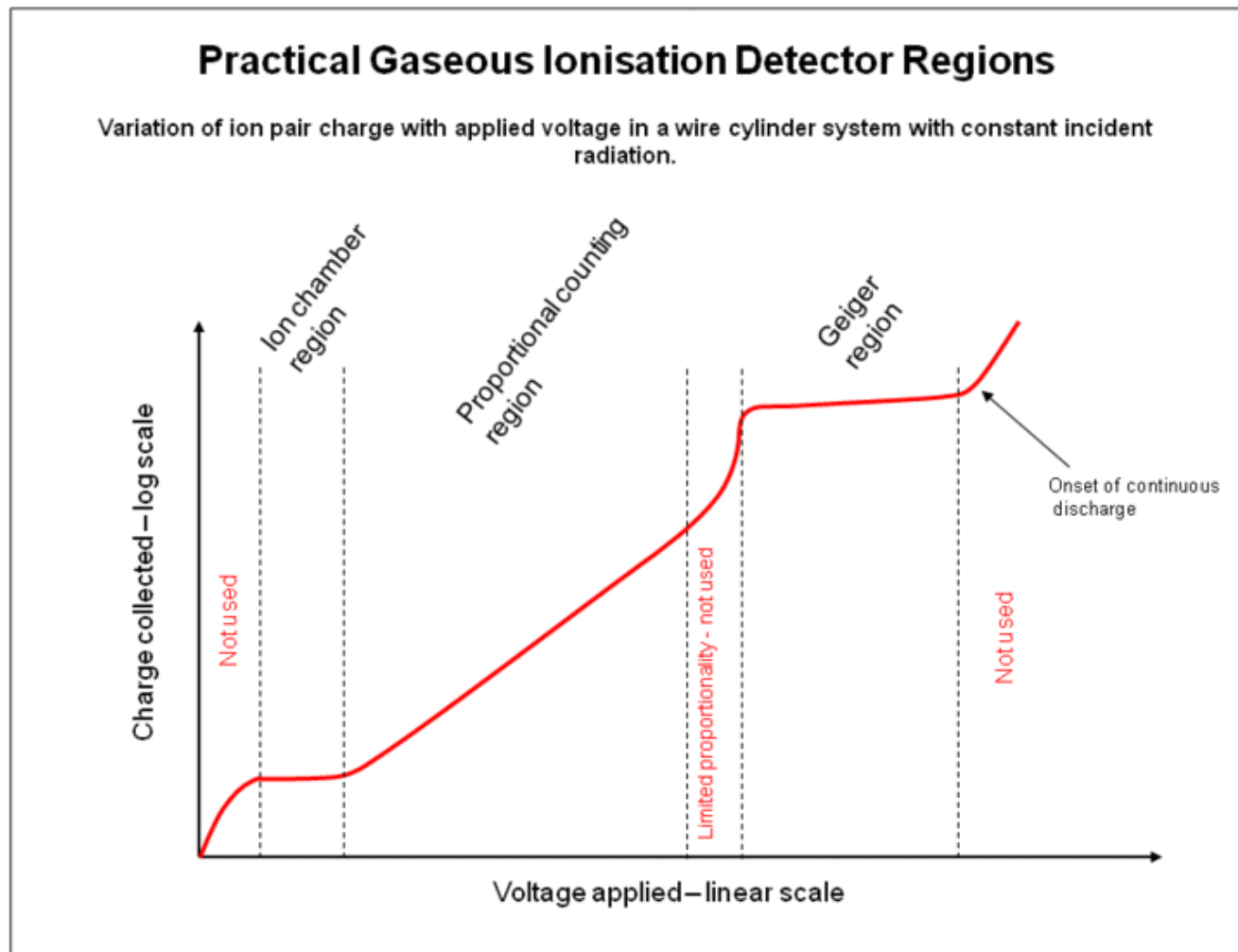


- sekundární ionizace (Penningův jev)



# Typy detektorů

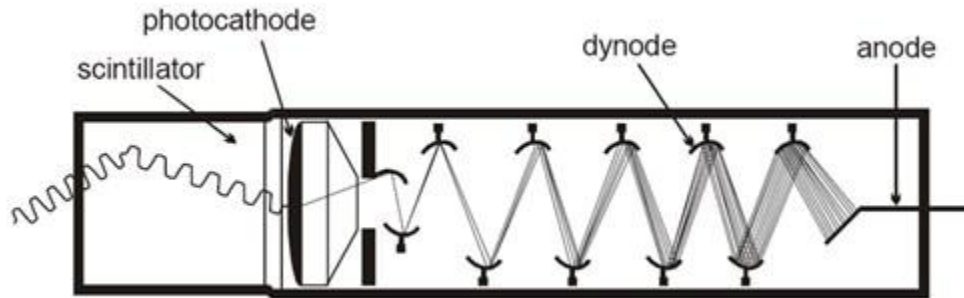
- ionizační detektory (ionizační komory, Geiger-Müllerovy počítače)





# Typy detektorů

- **scintilační detektory**

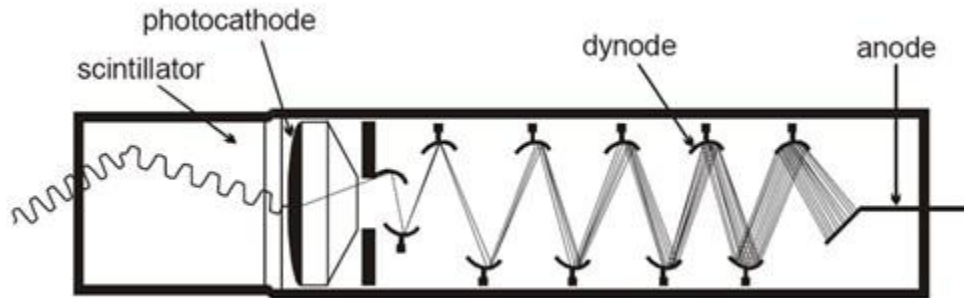


- lineární odezva na energii
- rychlá časová odezva
- diskriminace podle tvaru pulsů



# Typy detektorů

- **scintilační detektory**



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

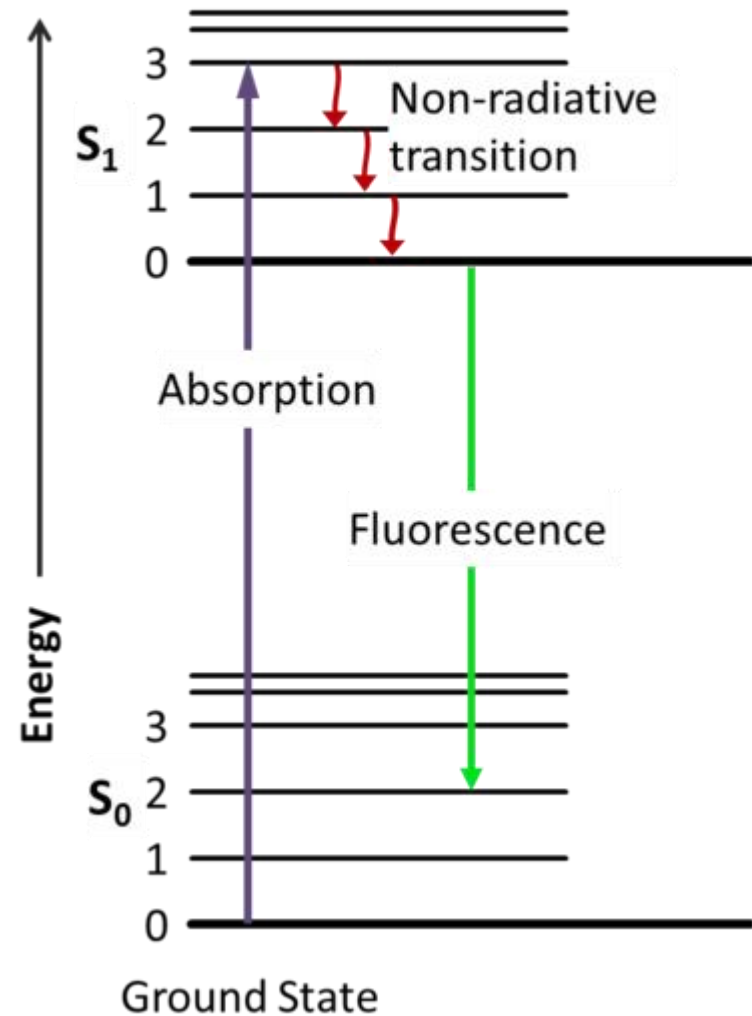
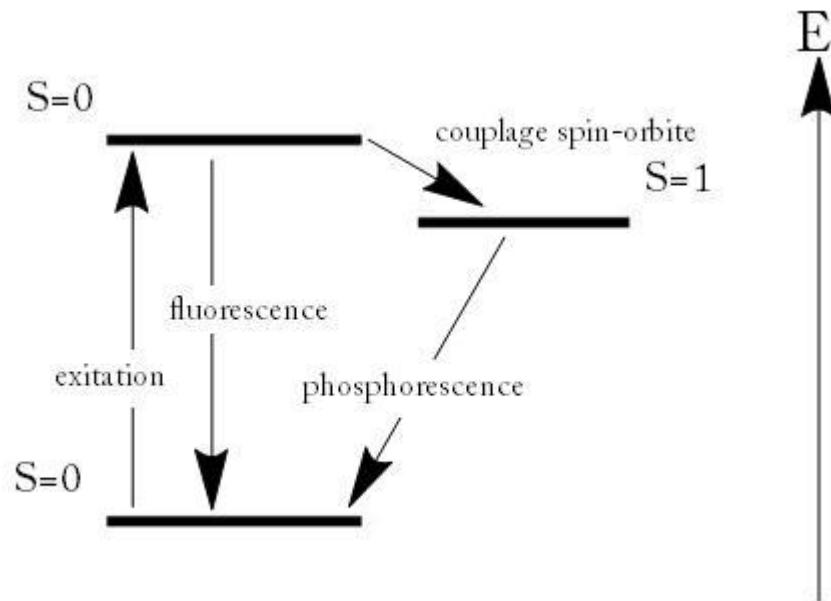


# scintilatory

- **luminiscence**

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

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



# fosforescence

**ZnS**

**SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>**



na světle

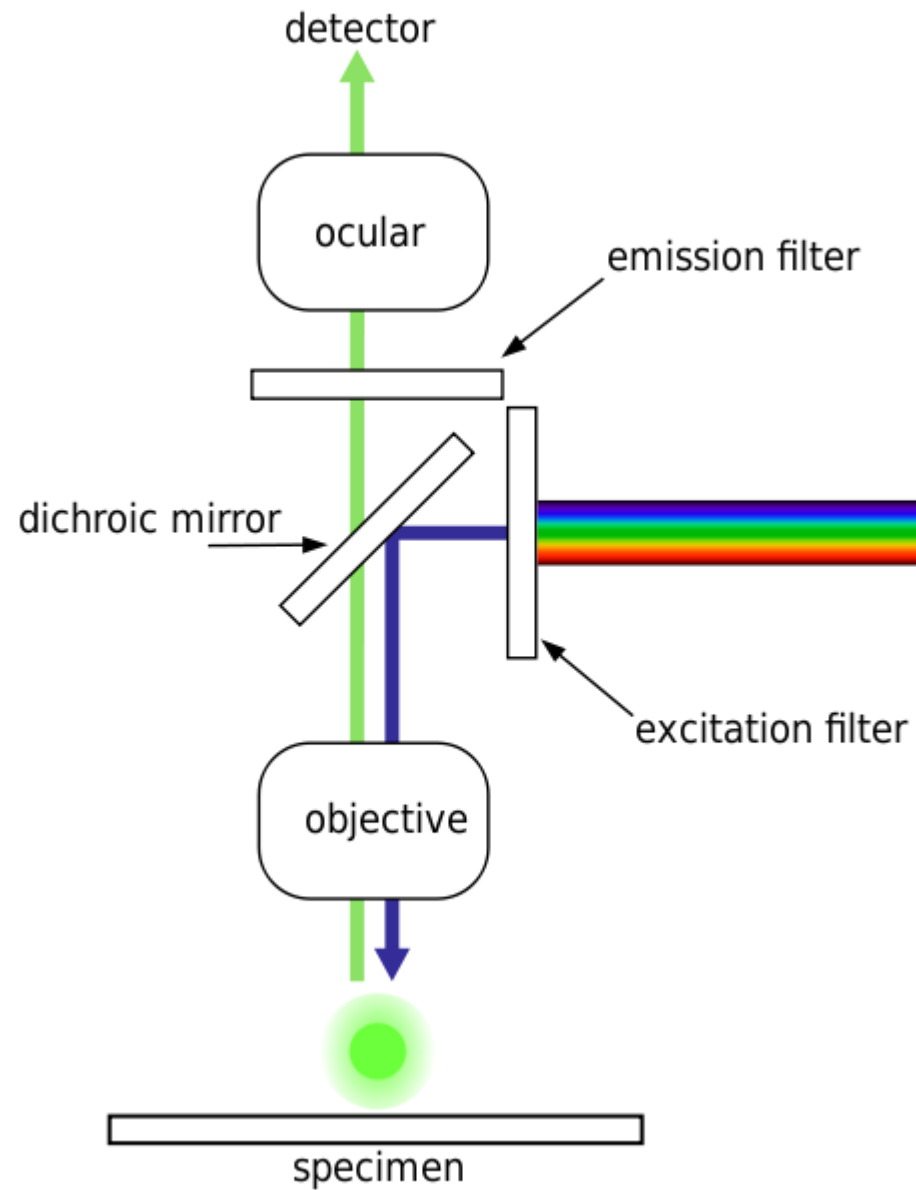
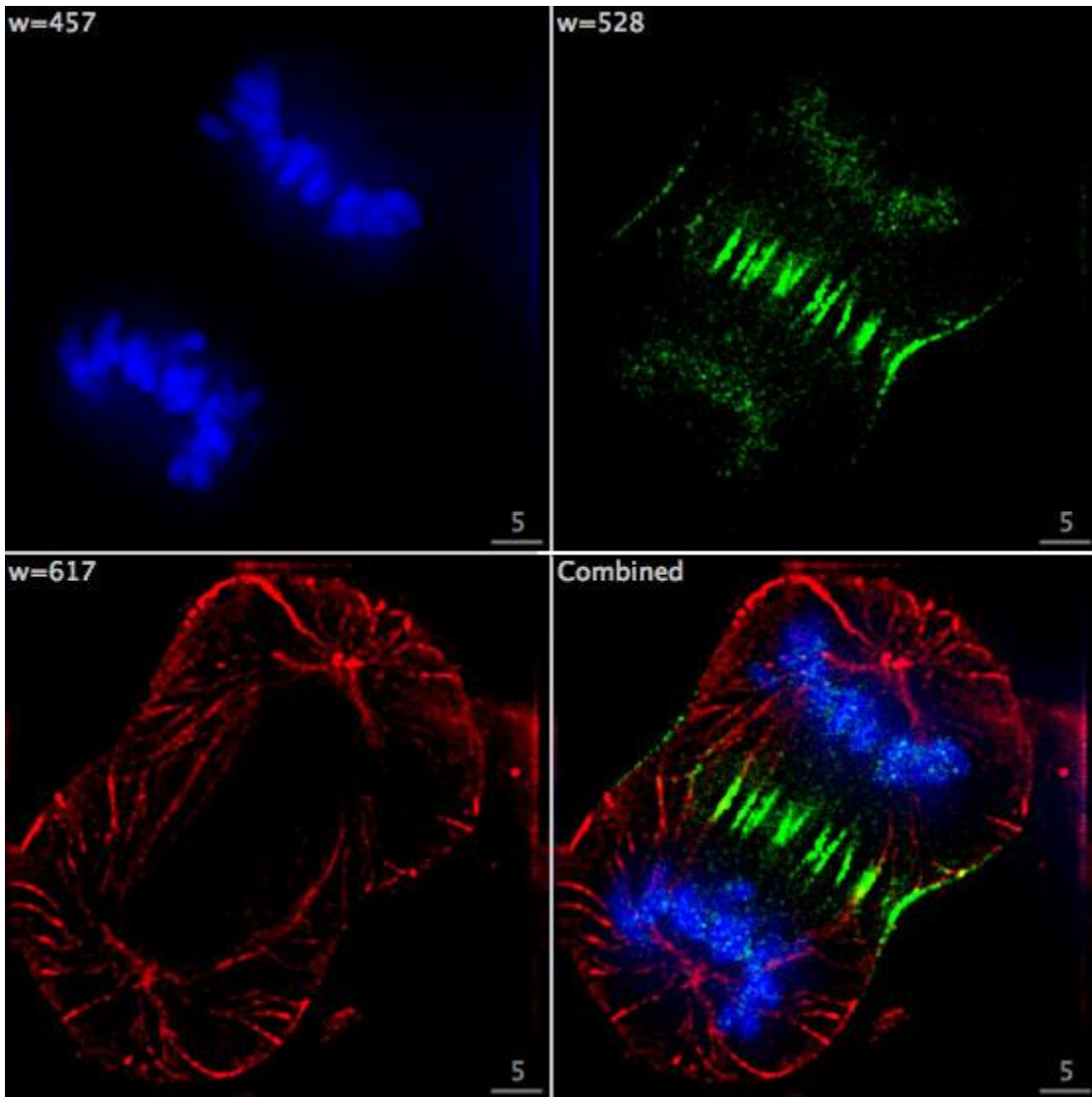


10 s



4 min

# Fluorescenční mikroskopie



# scintilátory

- **ideální scintilátor**

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

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

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

# scintilátory

- **organické scintilátory**

- **organické krystaly**

anizotropní výstup

## **antracén**

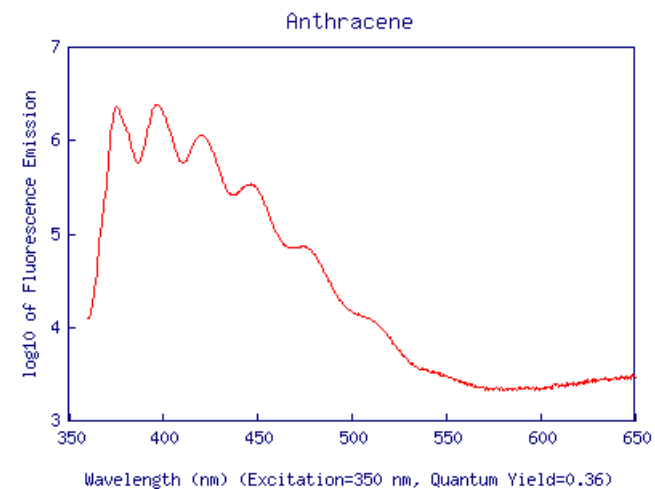
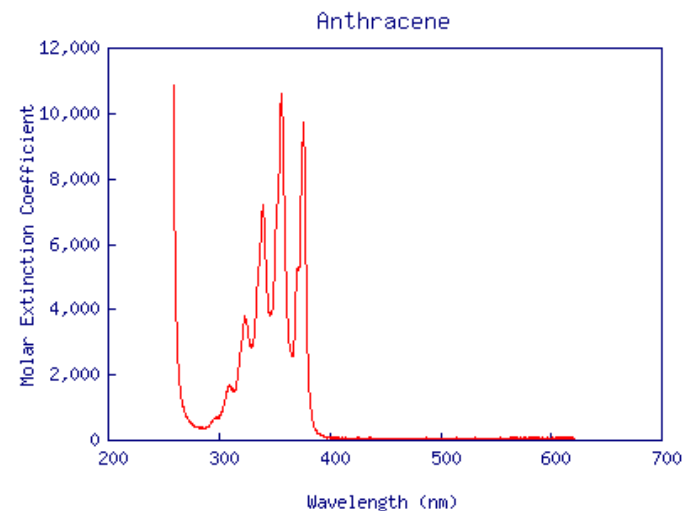
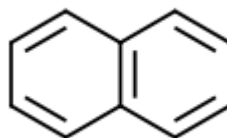
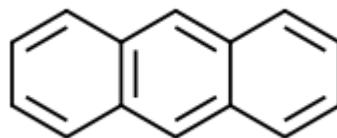
vysoký světelný výtěžek

$\tau \approx 30$  ns

## **naftalen**

vysoký světelný výtěžek

$\tau \approx 30$  ns



# Scintilátory

- **organické scintilátory**

- **organické kapaliny**

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

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

- $\tau \approx 3-4$  ns

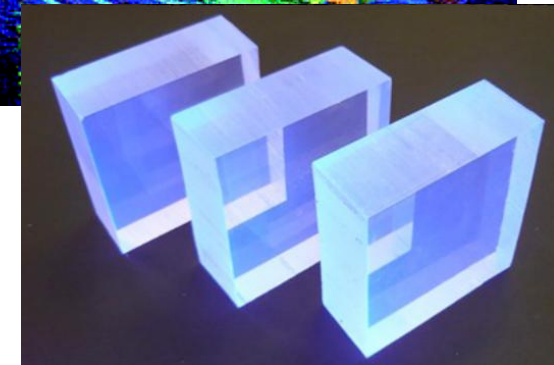
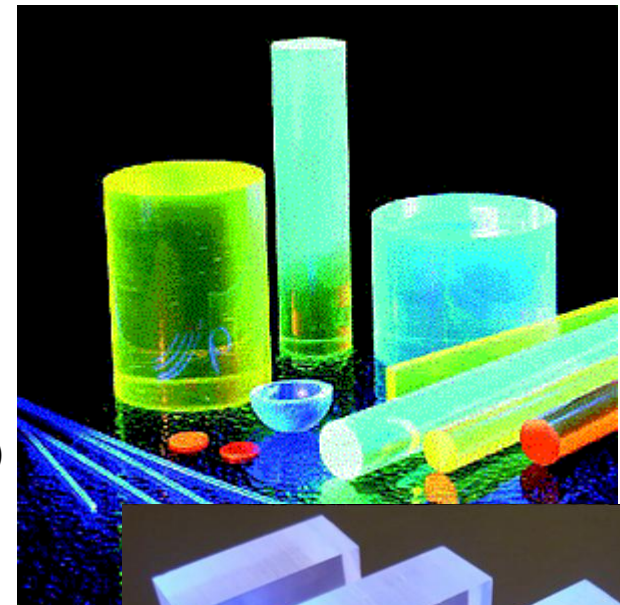
- **plastické scintilátory**

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

- $\tau \approx 1-3$  ns

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

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





# 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)

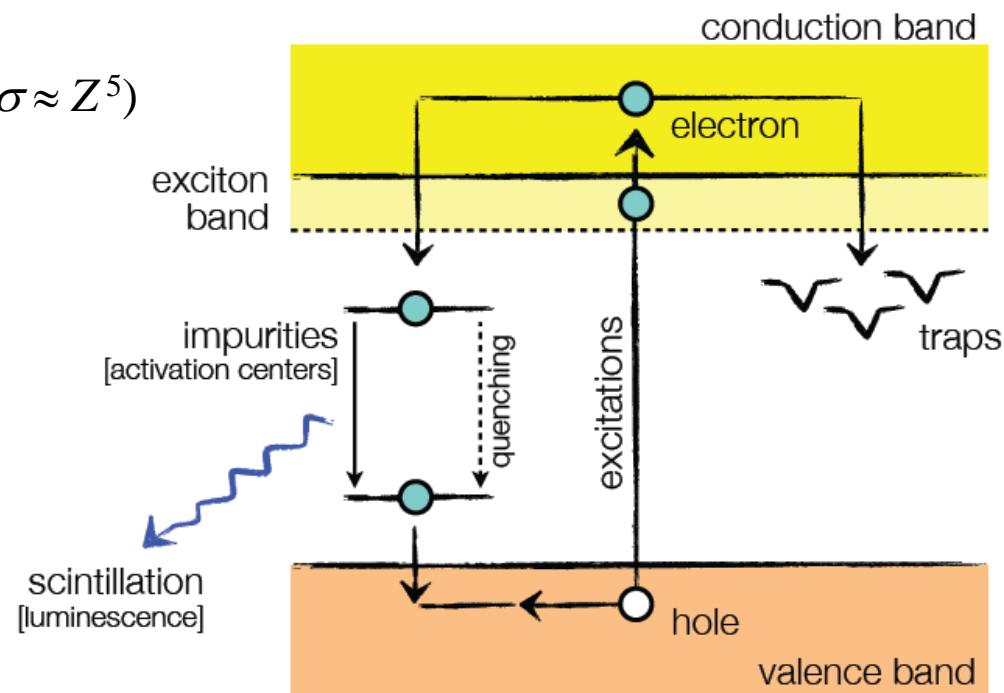
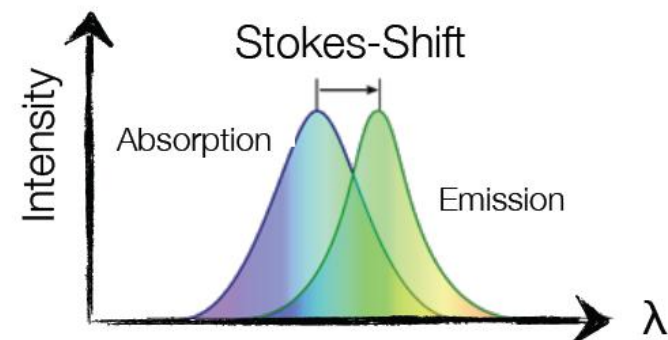
- 40000 fotonů/MeV

- $\tau = 230$  ns

- PbWO<sub>4</sub>,  $\lambda_{\max} = 420$  nm (3 eV)

- 200 fotonů/MeV

- $\tau = 6$  ns



# Scintilatory

Material	Nal:TI	Csl:TI	CaF <sub>2</sub> :Eu	BaF <sub>2</sub>	BGO	YAG:Ce	YAP:Ce	GSO:Ce	CWO	PWO	NB:WO	ZnSe:Te	LAG:Ce
<b>Physical Properties</b>													
Chemical Formula	Nal:TI	Csl:TI	CaF <sub>2</sub> :Eu	BaF <sub>2</sub>	Bi <sub>4</sub> GeO <sub>4</sub>	Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	YAIO <sub>3</sub>	Gd <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	CdWO <sub>4</sub>	PbWO <sub>4</sub>	NB(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	ZnSe:Te	Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>7</sub>
Density g/cm <sup>3</sup>	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	
<b>Luminescence Properties</b>													
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 <sup>3</sup> pH/MeV	38	52	23	10	2-3	8	10	8-10	28	22.6-25.6		8	10

# Scintilatory

Material	Nal:TI	Csl:TI	CaF <sub>2</sub> :Eu	BaF <sub>2</sub>	BGO	YAG:Ce	YAP:Ce	GSO:Ce	CWO	PWO	NB:WO	ZnSe:Te	LAG:Ce
<b>Physical Properties</b>													
Chemical Formula	Nal:TI	Csl:TI	CaF <sub>2</sub> :Eu	BaF <sub>2</sub>	Bi <sub>4</sub> GeO <sub>4</sub>	Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	YAlO <sub>3</sub>	Gd <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	CdWO <sub>4</sub>	PbWO <sub>4</sub>	NB(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	ZnSe:Te	Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>7</sub>
Density g/cm <sup>3</sup>	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								
<b>Luminescence Properties</b>													
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 <sup>3</sup> pH/MeV	38	52	23	10	2-3								



# Fotonásobič

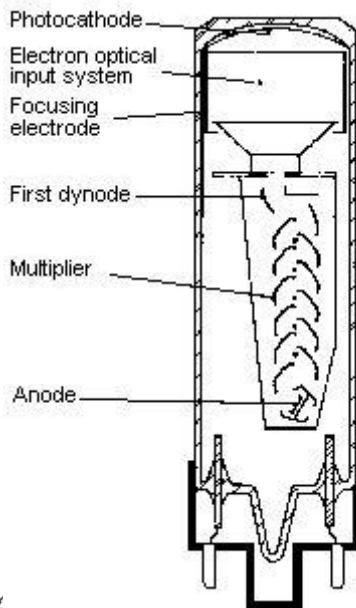
- vstupní okno

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

- fokusační elektronová optika

- systém dynod

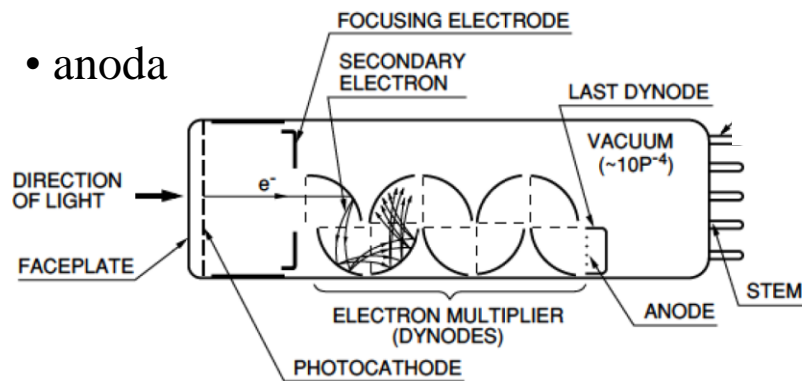
- anoda



zesílení

$$G = \delta^N$$

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



Common Photomultiplier Dynode Chain Configurations

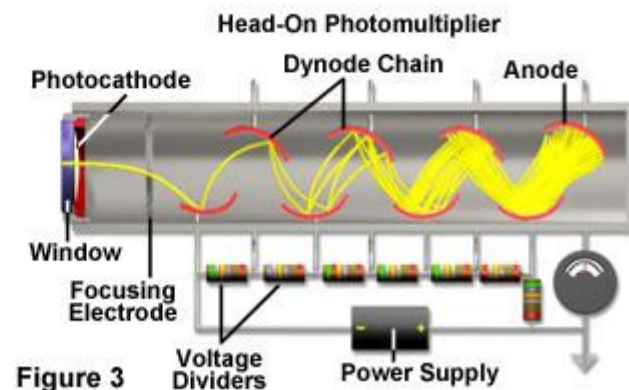
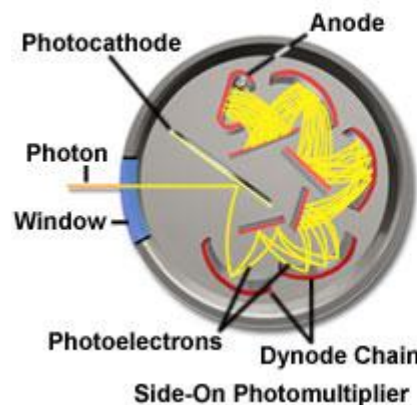


Figure 3

# Fotonásobič

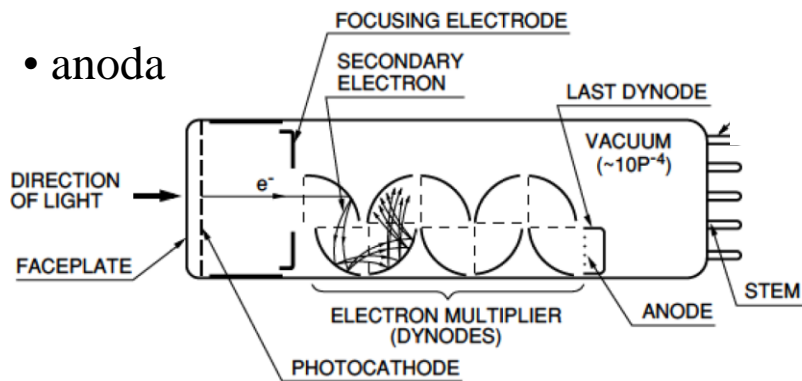
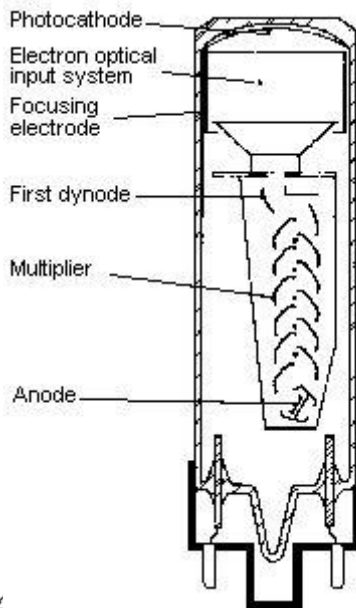
- vstupní okno

- 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

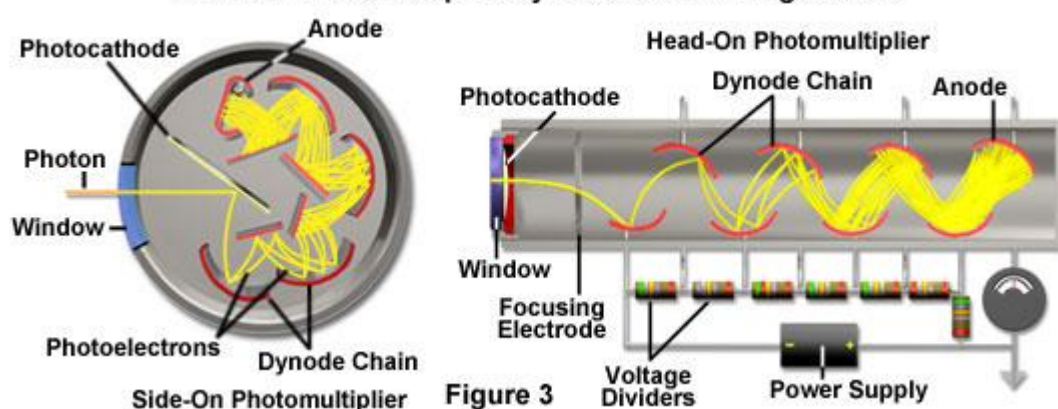
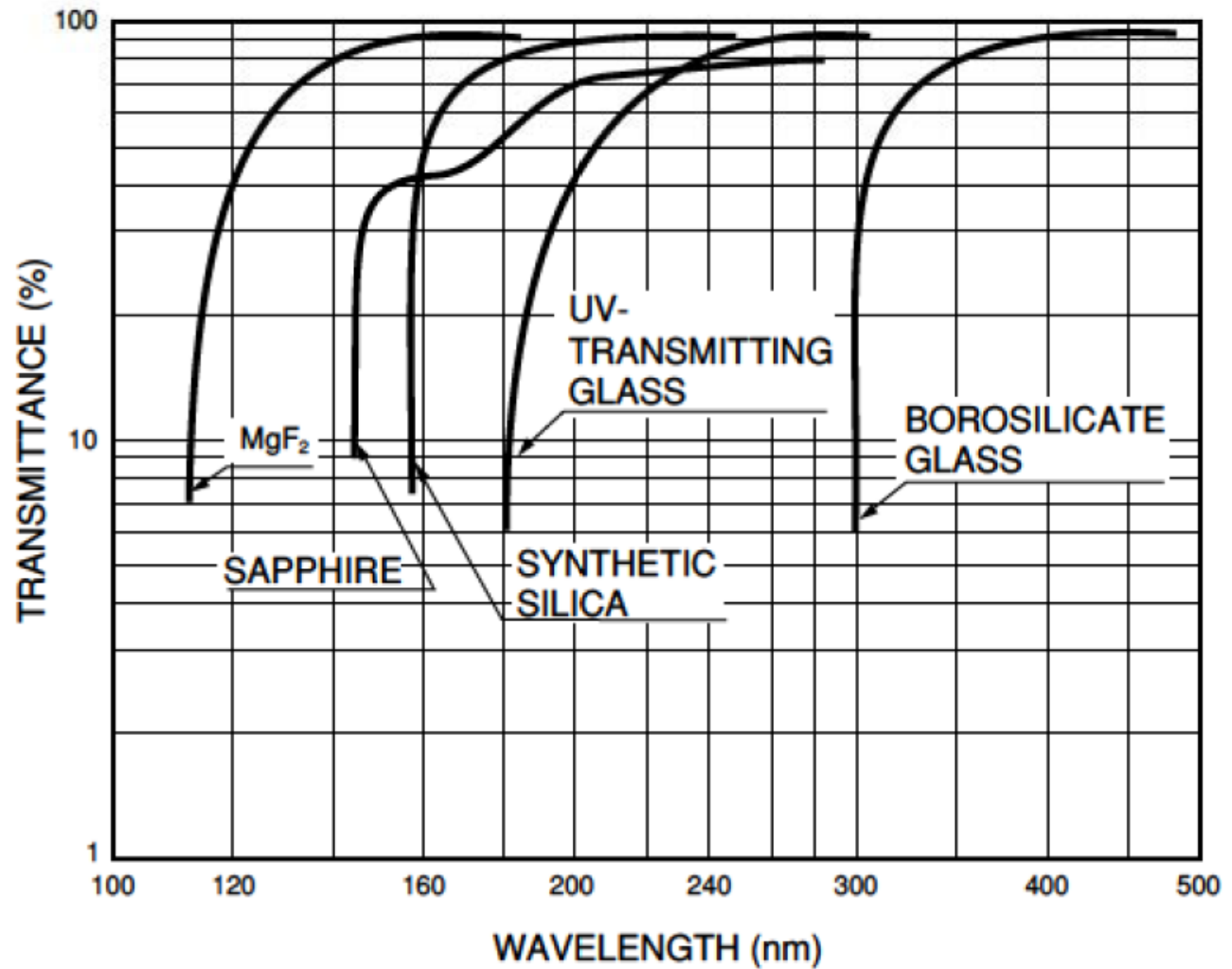


Figure 3

# Fotonásobič – vstupní okno

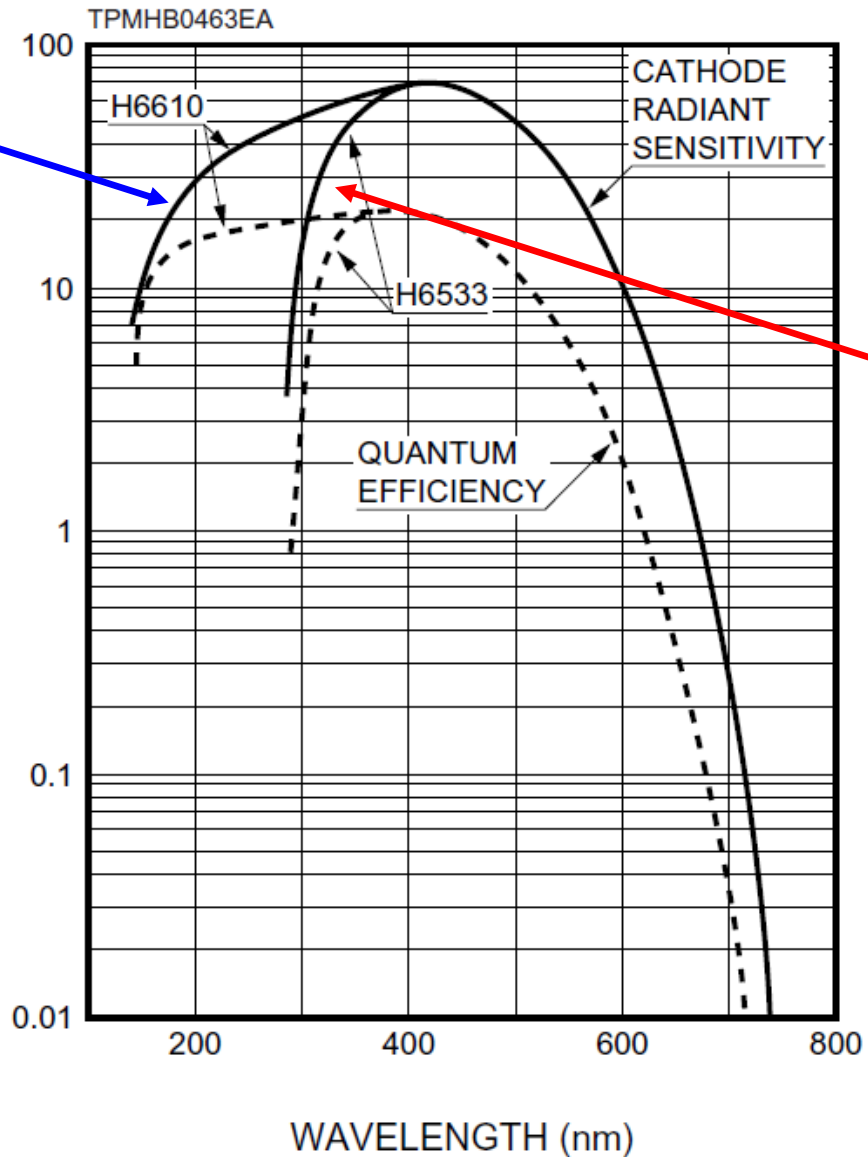
- vstupní okno



# Fotonásobič - fotokatoda

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

amorfní  
syntetické  
 $SiO_2$



borosilikátové  
sklo

# Fotonásobič - fotokatoda

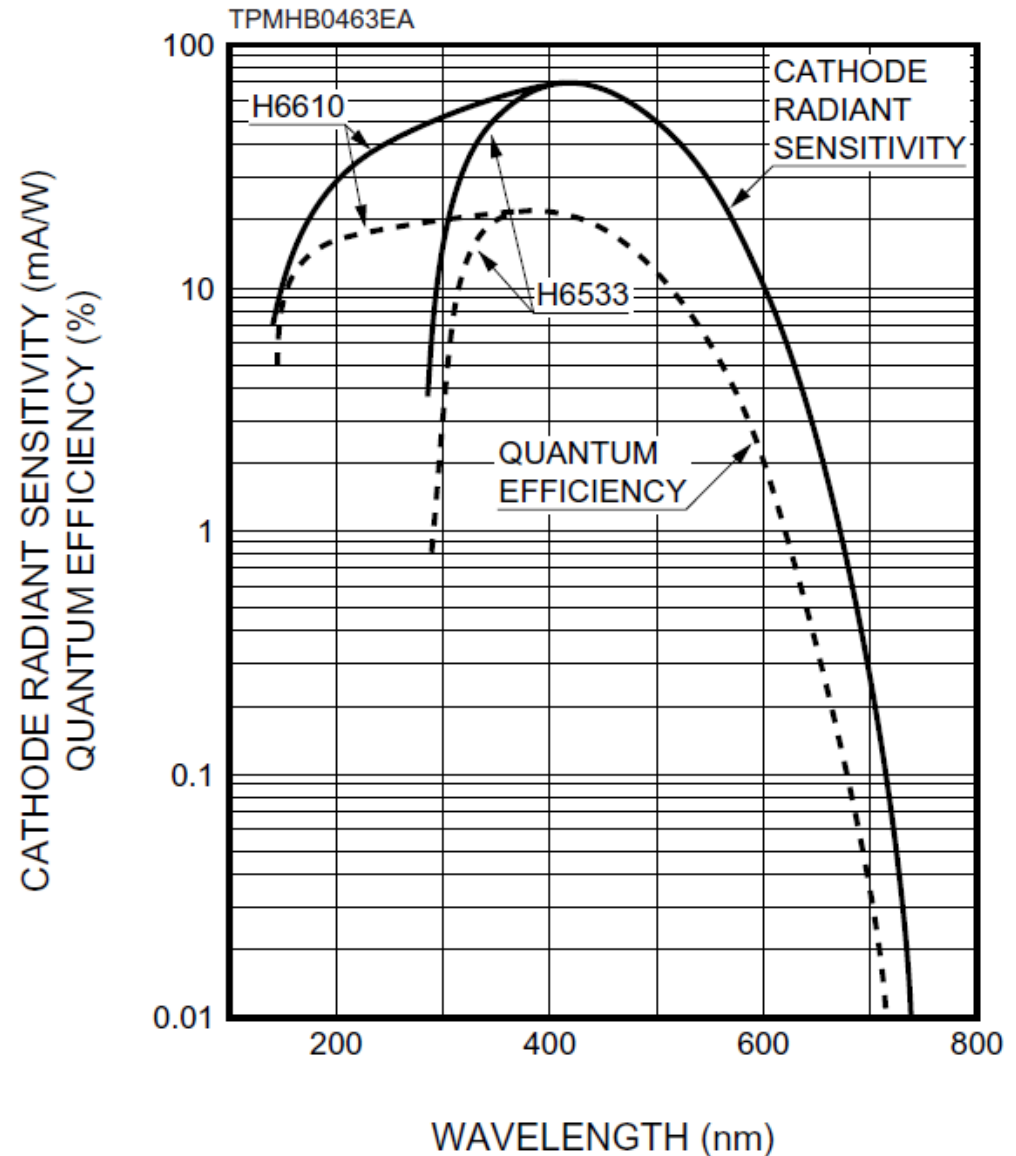
- kvantová účinnost:

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

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

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

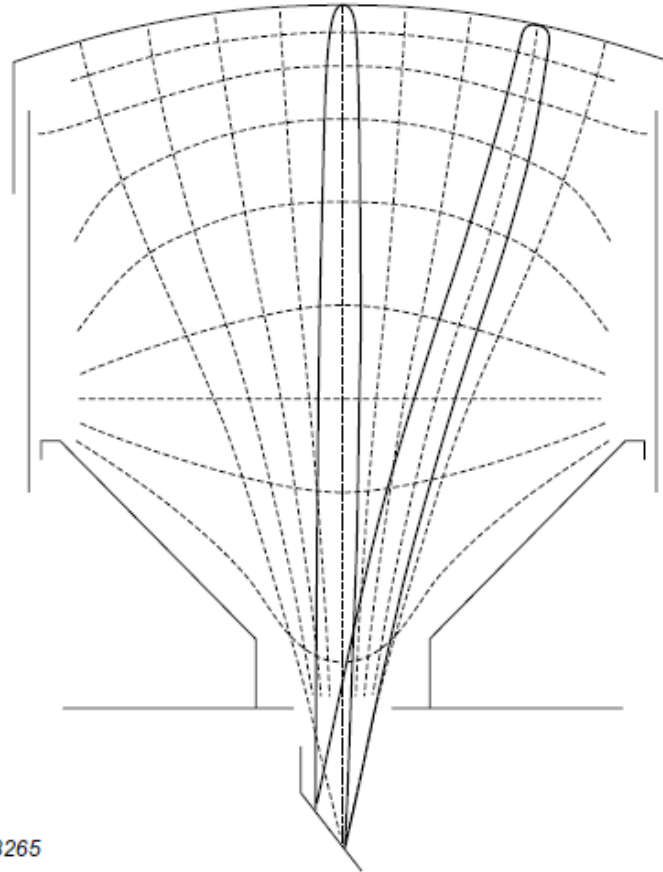
- $I_{pe}$  proud fotoelektronů
- $P_{ph}$  intezita dopadajícího světla





# Fotonásobič – fokusační elektronová optika

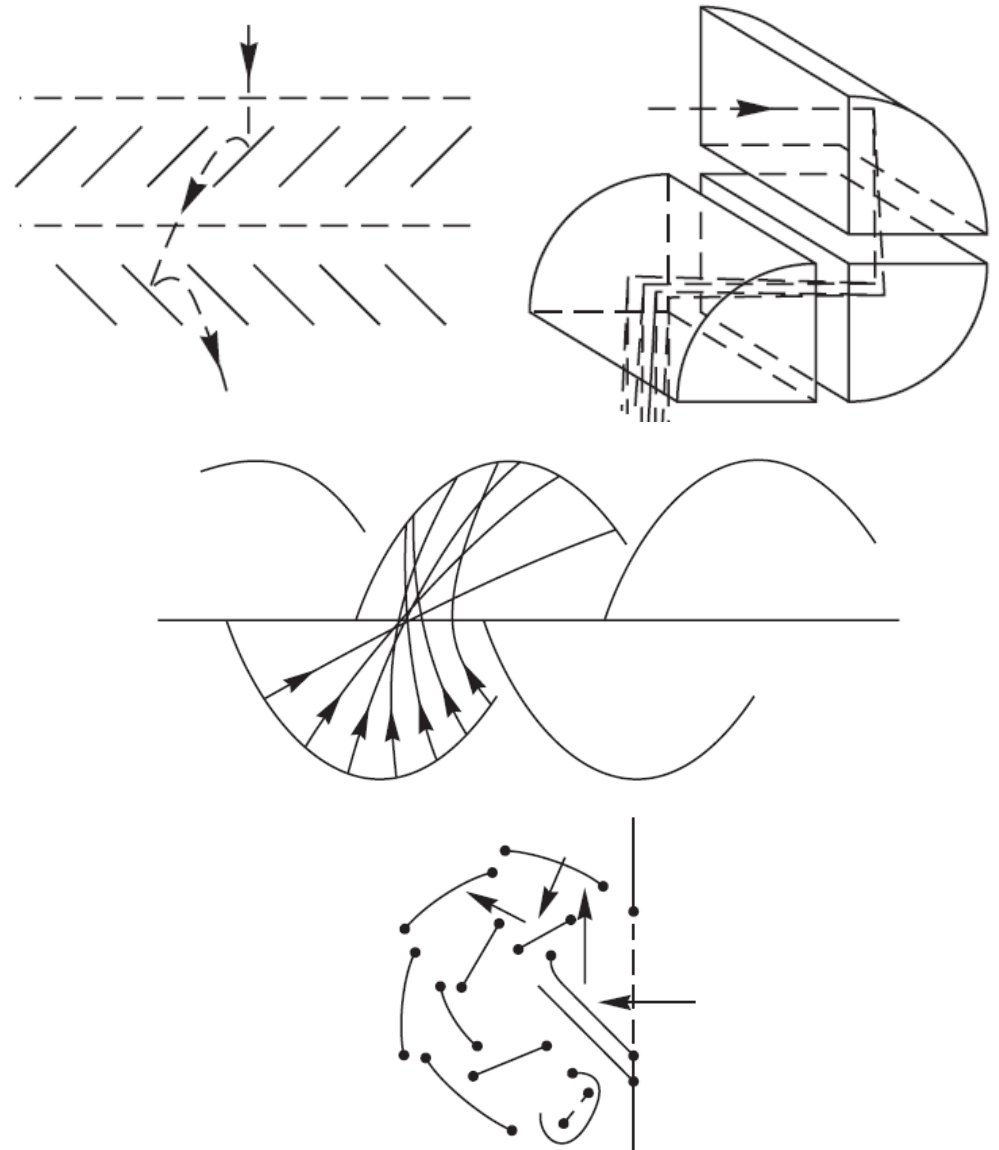
- fokusační elektronová optika
- účinnost sběru  $> 80\%$
- doba letu k dynodě musí být stejná (nezávislá na místě emise)



MRB265

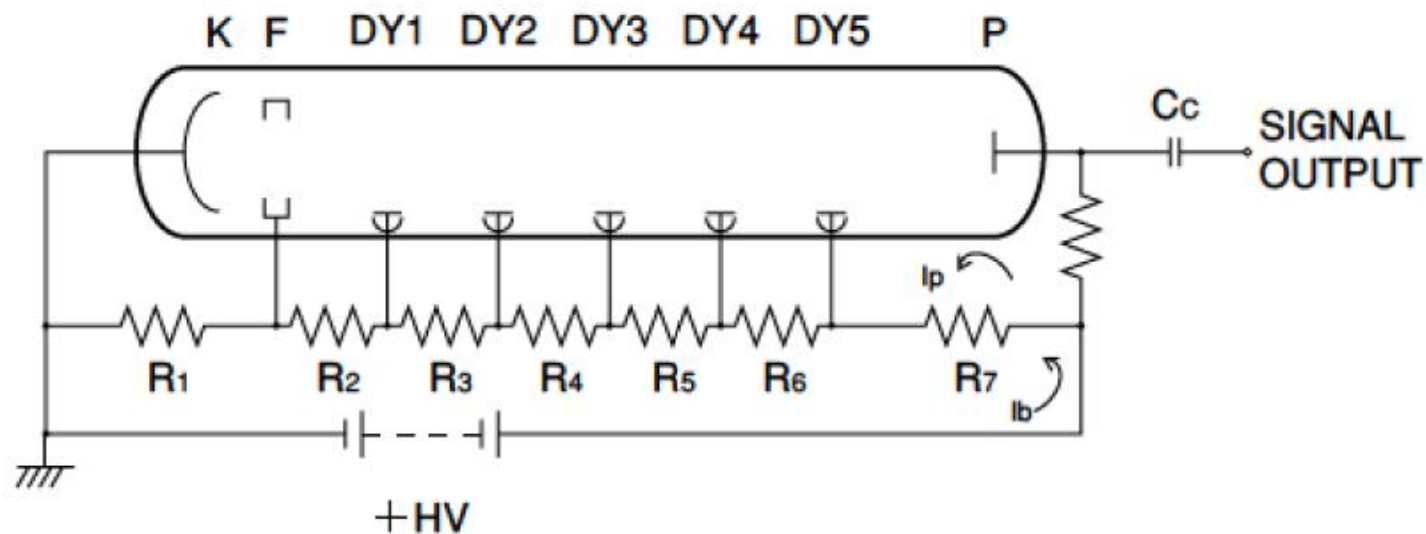
# Fotonásobič – systém dynod

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

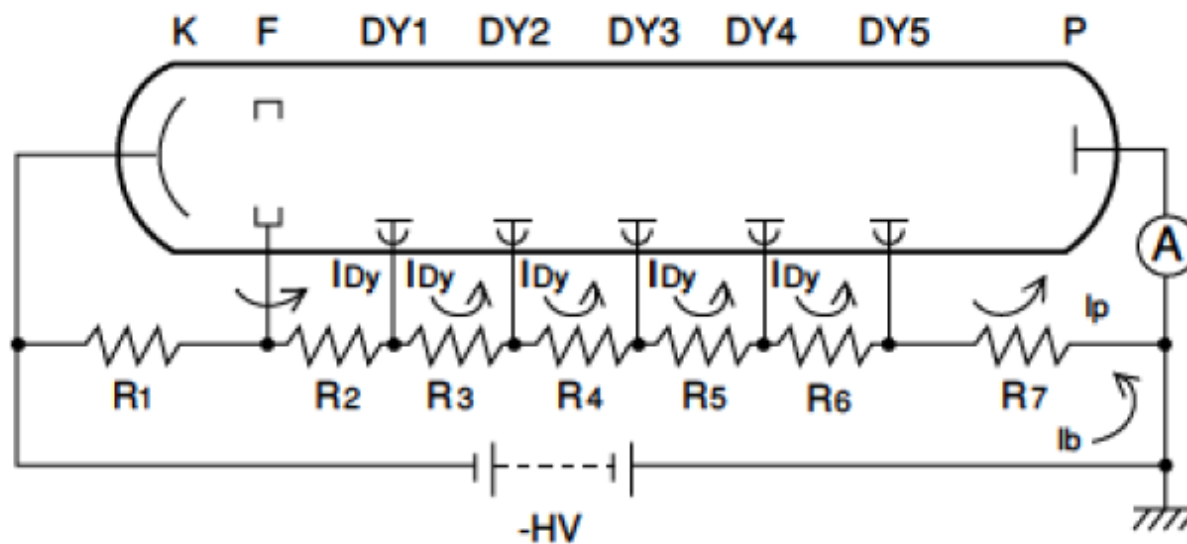


# Fotonásobič – dělič napětí

- kladné napětí

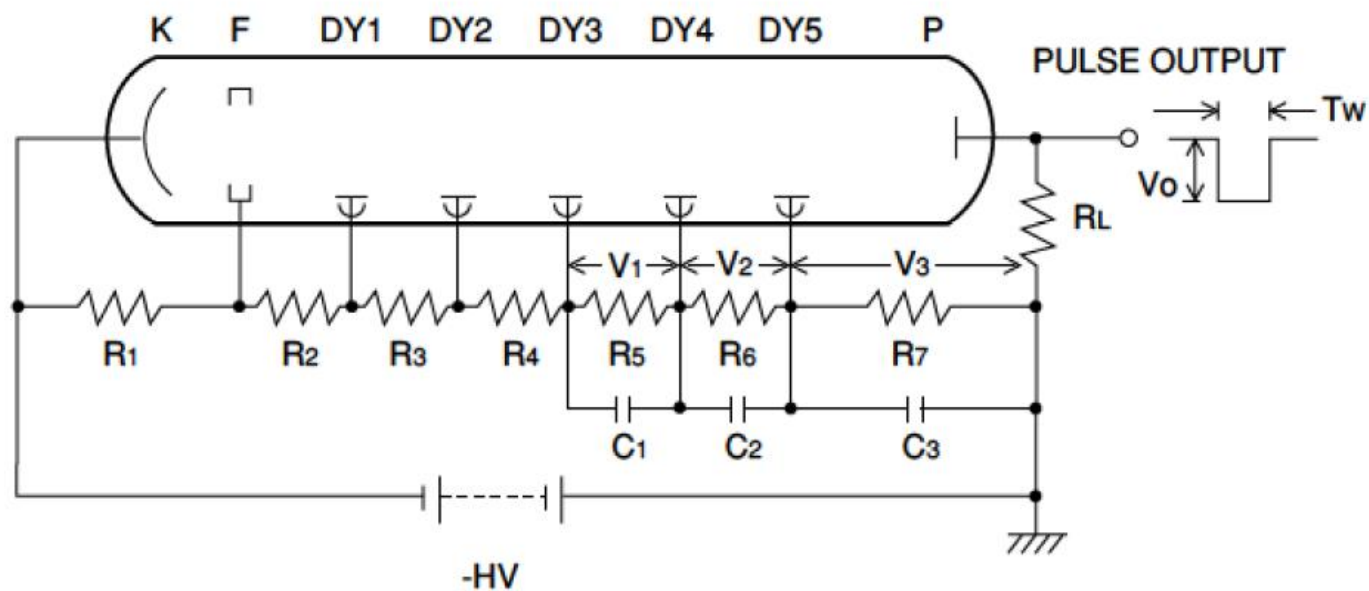


- záporné napětí



# Fotonásobič – dělič napětí

- záporné napětí – pulsní mód

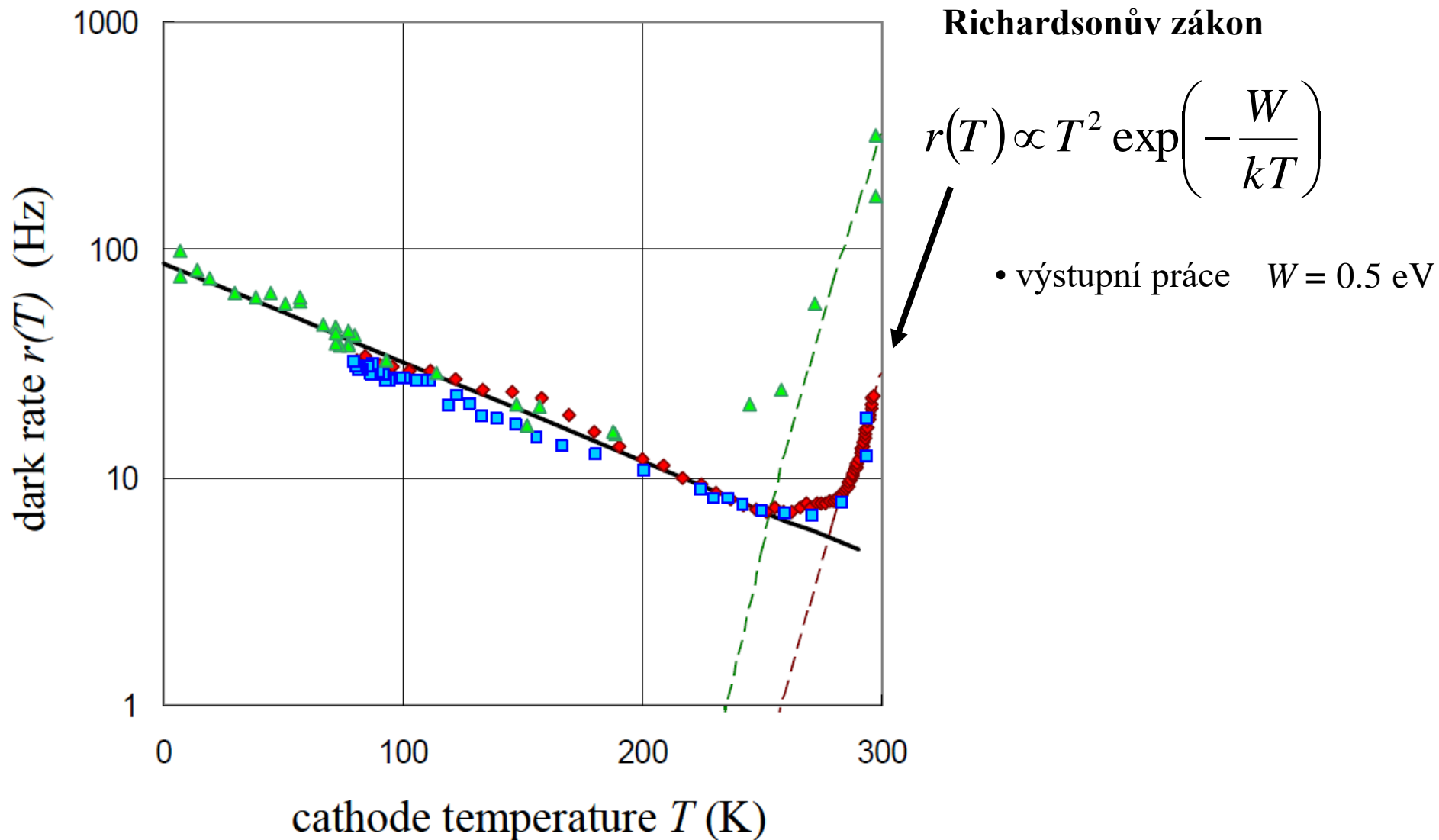


# Fotonásobič – temný proud

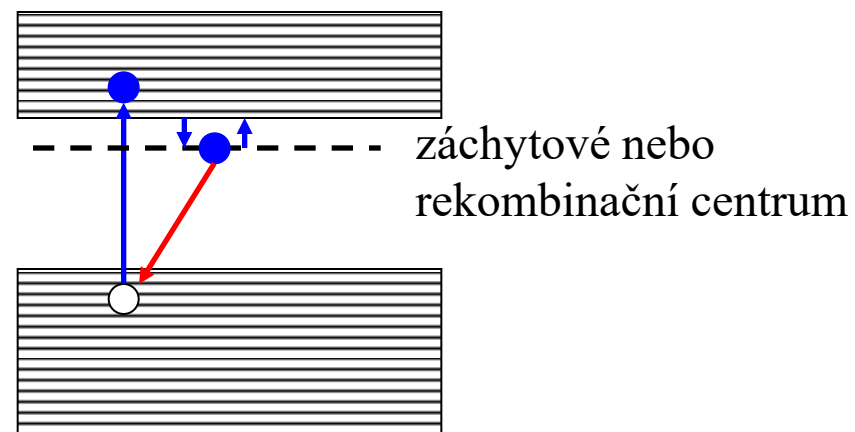
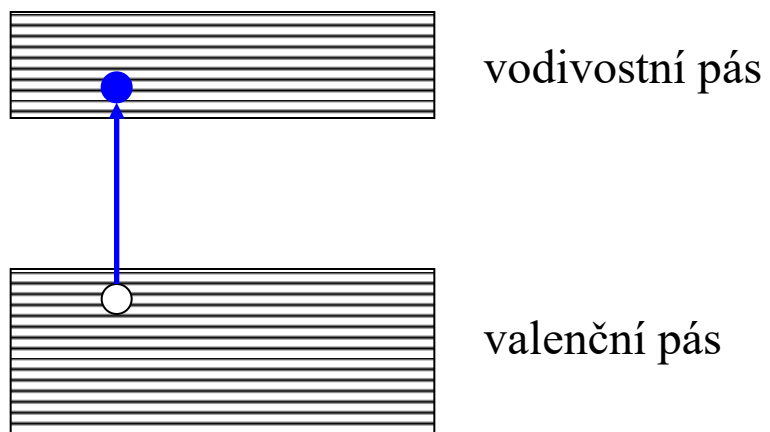
## šum

- termionická emise z katody a z dynod
- svodové proudy
- zbytková radiace

# Fotonásobič – temný proud

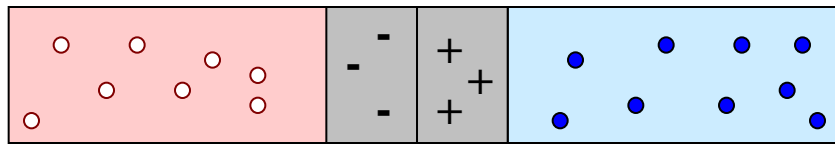
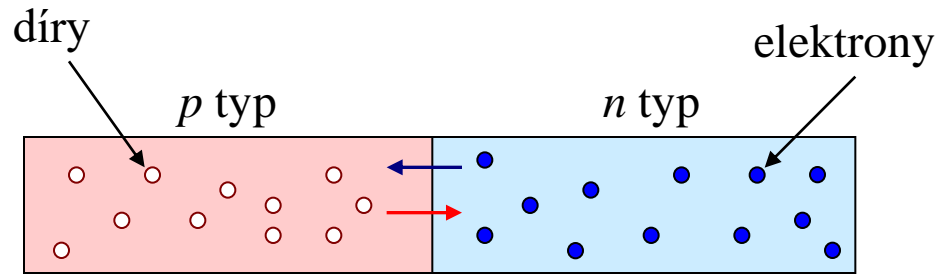


# Polovodičové detektory

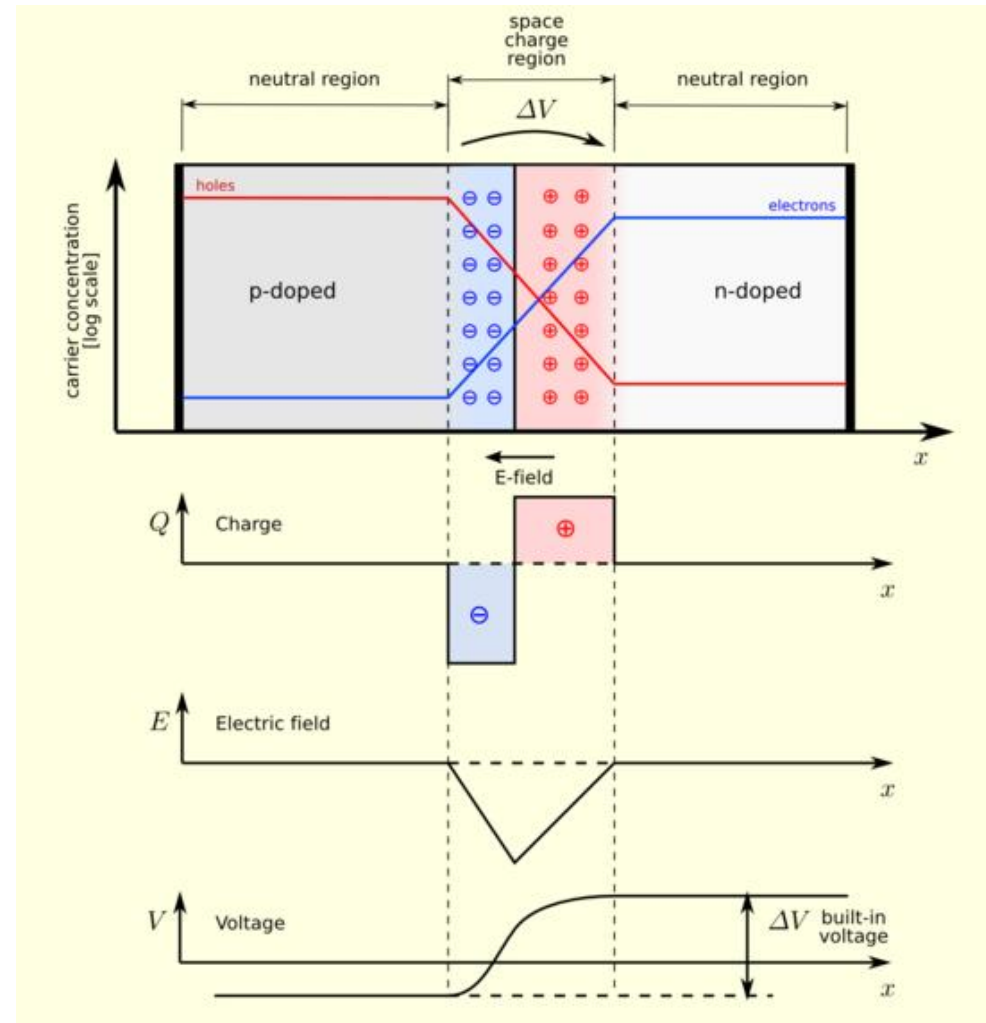
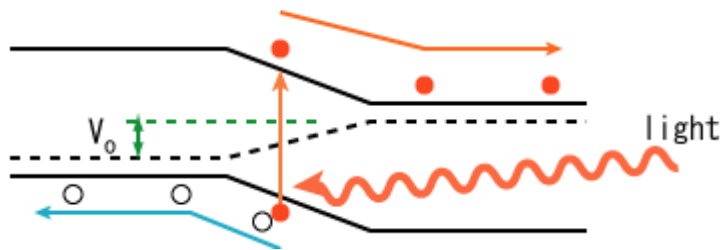


# Polovodičové detektory

## $p$ - $n$ přechod



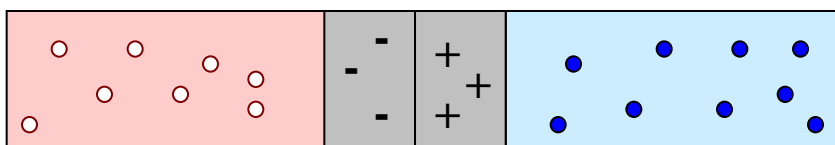
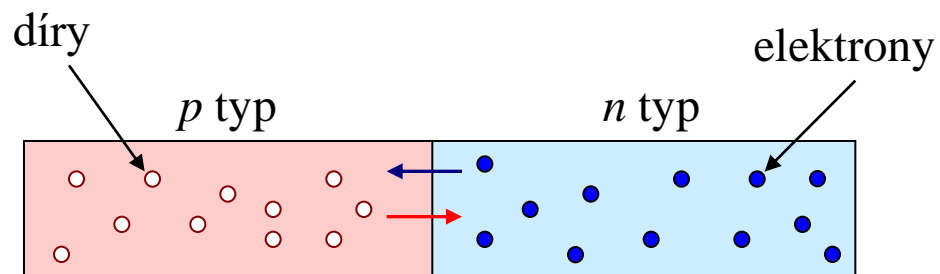
depleted layer  $\sim 100 \mu\text{m}$



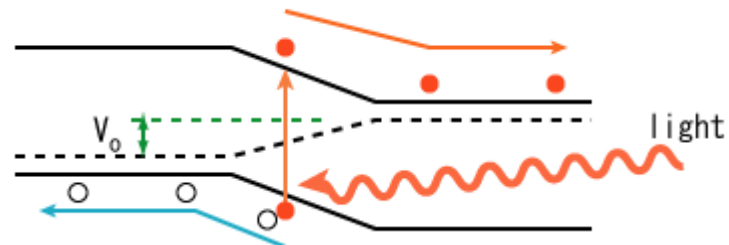
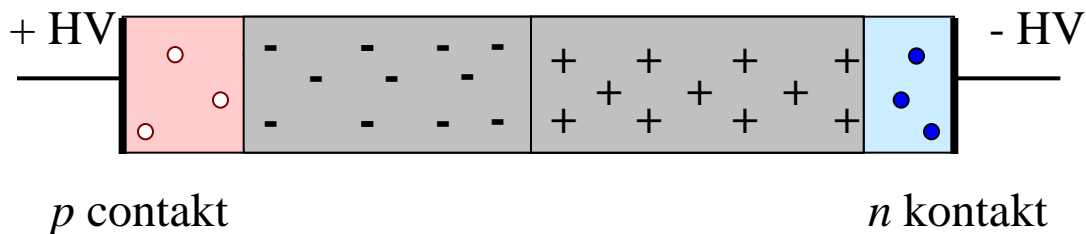


# Polovodičové detektory

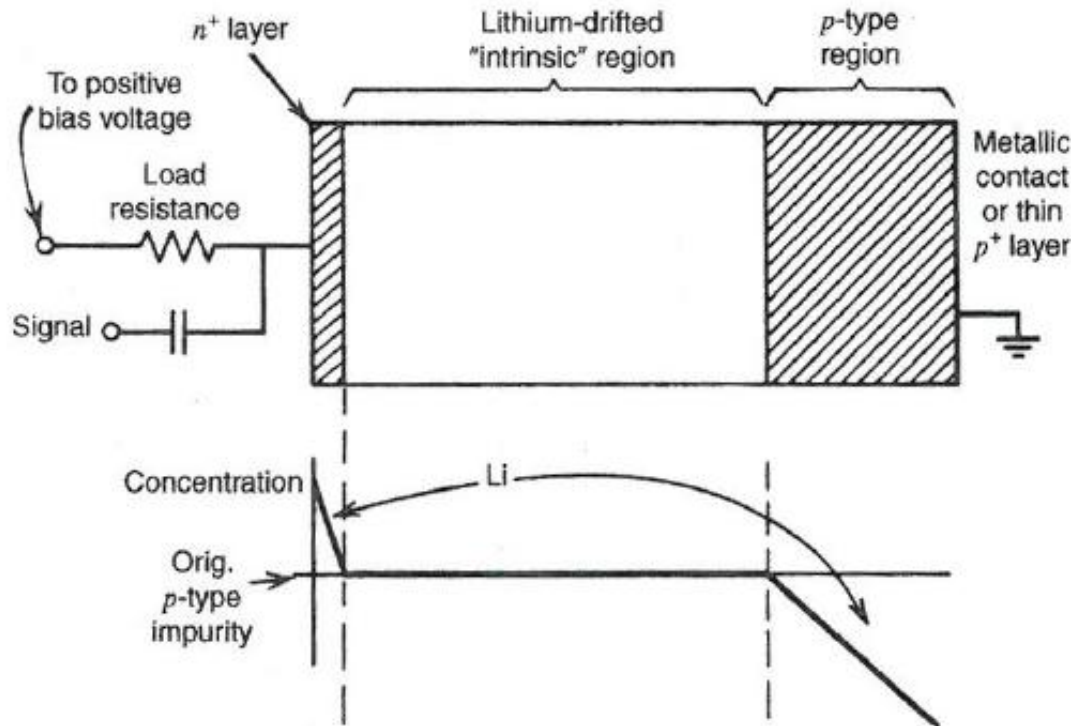
*p-n* přechod



depleted layer  $\sim 100 \mu\text{m}$



# Ge(Li) Polovodičové detektory

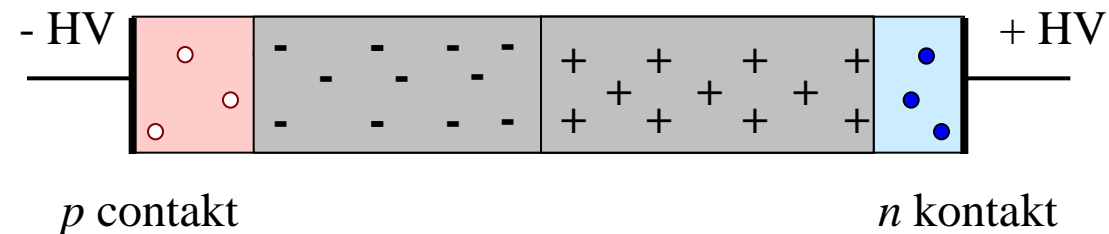


- $Z_{\text{Si}} = 14$

- $Z_{\text{Ge}} = 32$

$\sigma_{\text{fotoefekt}} \sim Z^5 \rightarrow 60 \times \text{větší pro Ge}$

- Li donor



# Ge(Li) Polovodičové detektory

Ge crystal: 65mm diam., 46mm length

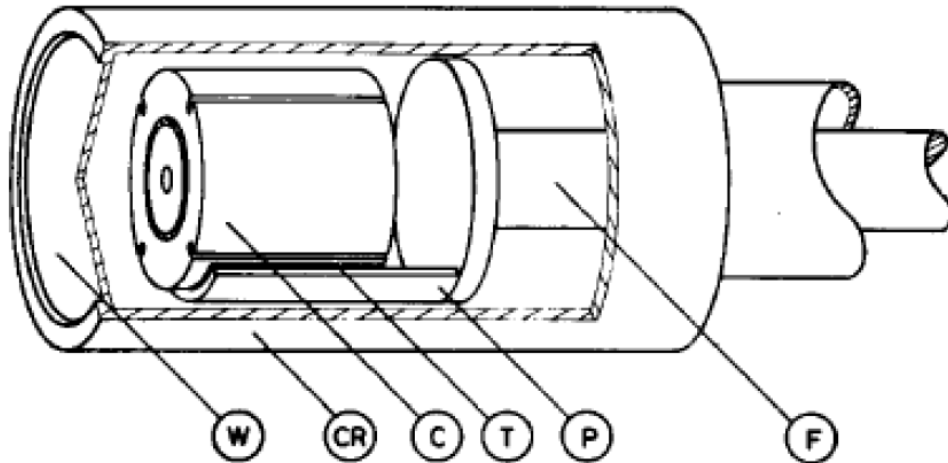
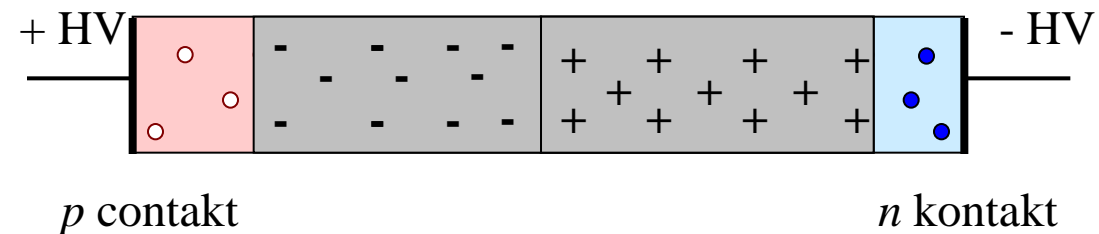
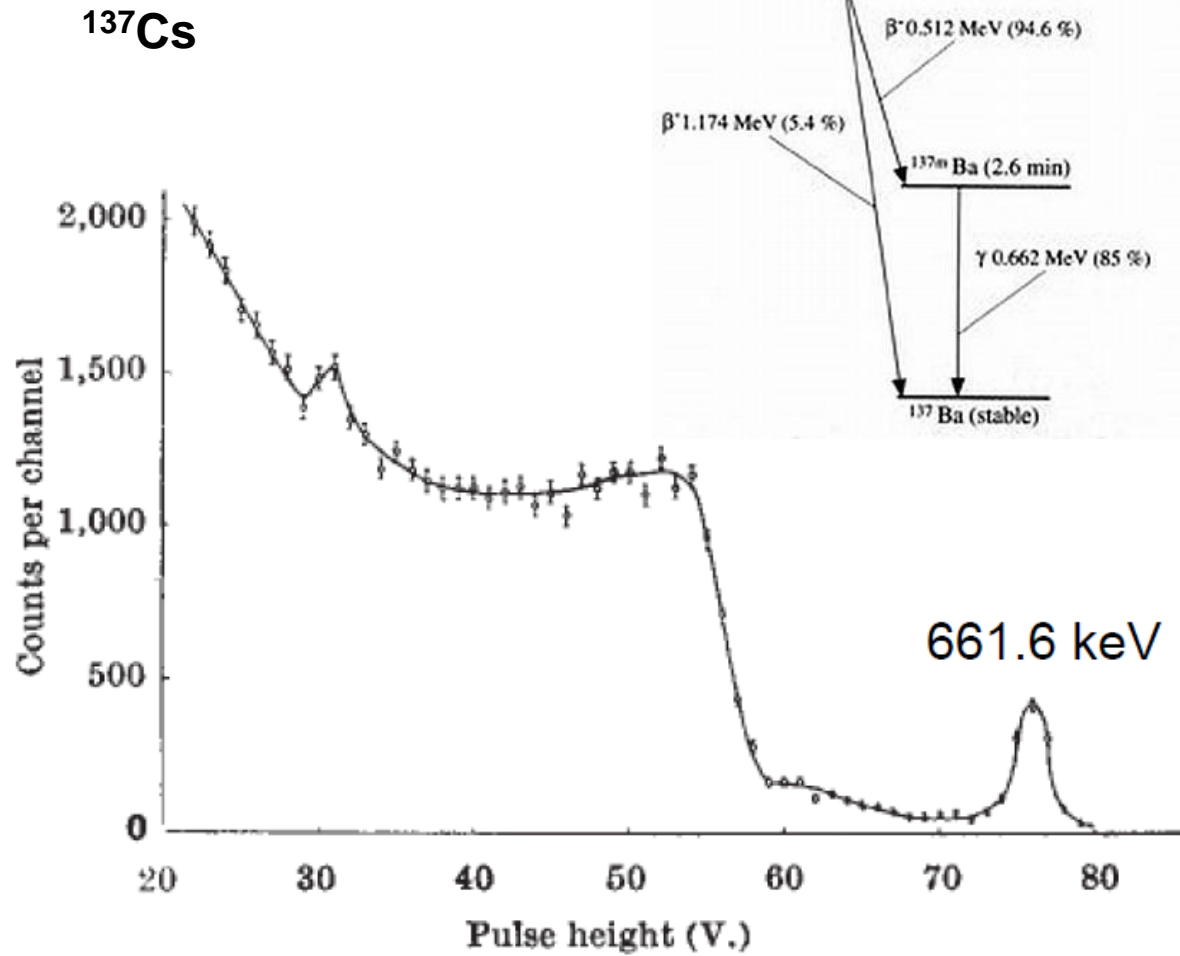


Fig. 1. Cross section of the polarimeter. W = thin window, CR = cryostat, C = crystal, T = Teflon insulation, P = crystal holder, F = cold finger.



# Ge(Li) Polovodičové detektory

$^{137}\text{Cs}$

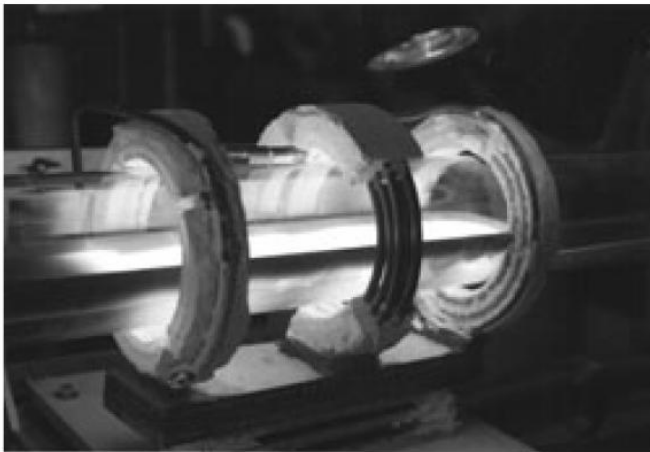


# HPGe polovodičové detektory

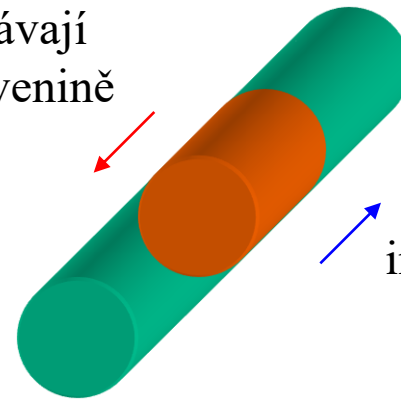
- krystal vysoce čistého Ge (p – typ)

- $c_{\text{imp}} < 10^{10} \text{ cm}^{-3} = 2 \times 10^{-7} \text{ ppm}$

- zonální čištění



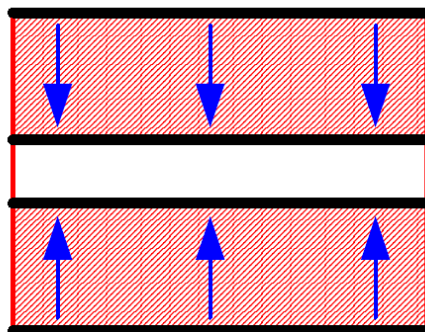
nečistoty  
zůstávají  
v tavenině



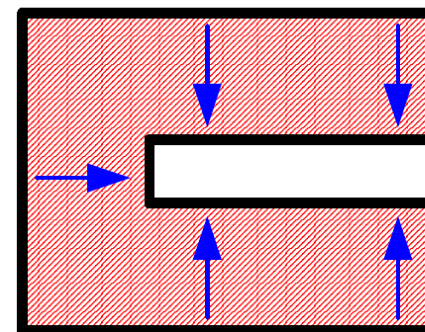
indukční cívky

# HPGe polovodičové detektory

- koaxiální konfigurace

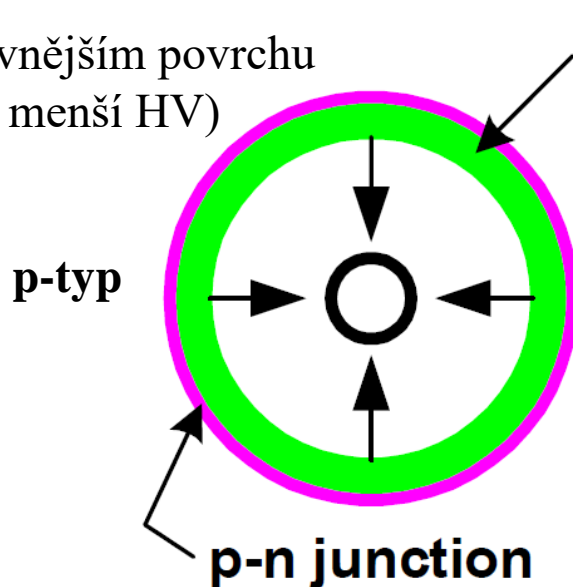


True coaxial

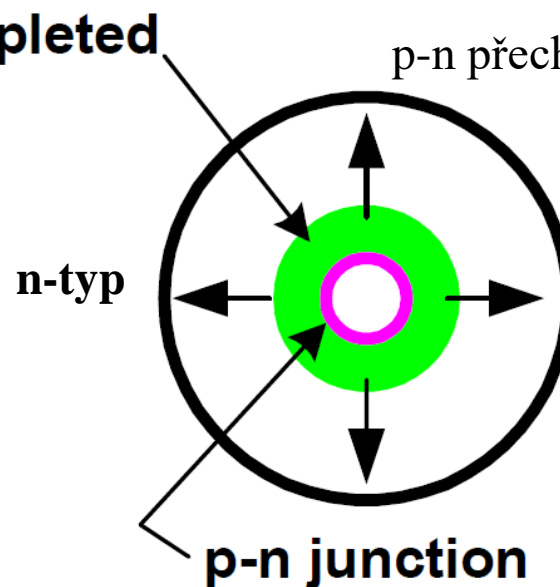


Closed-ended coaxial

n-p přechod na vnějším povrchu  
(vhodnější stačí menší HV)

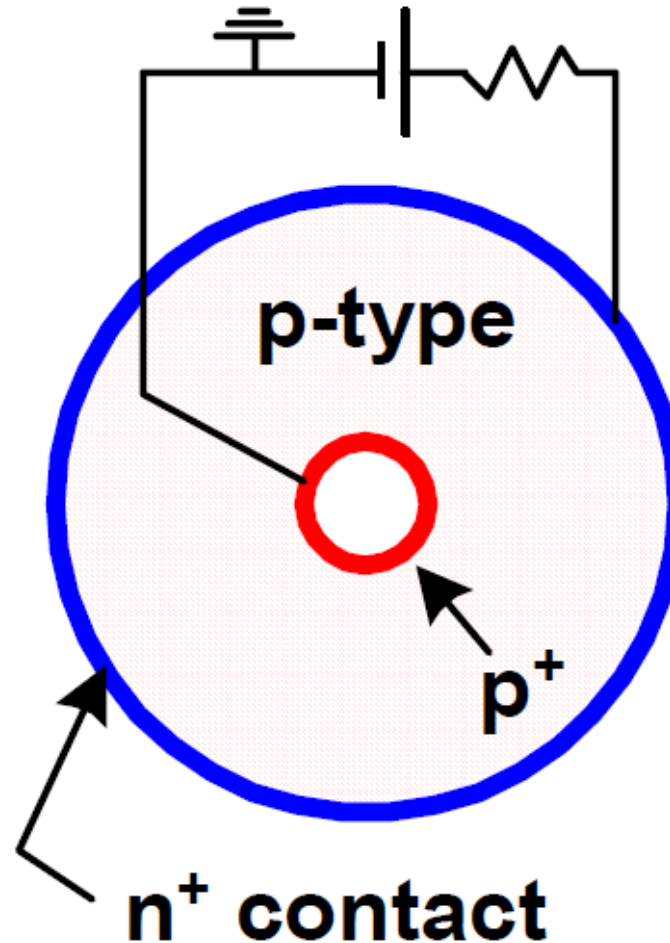


p-n přechod na vnitřním povrchu



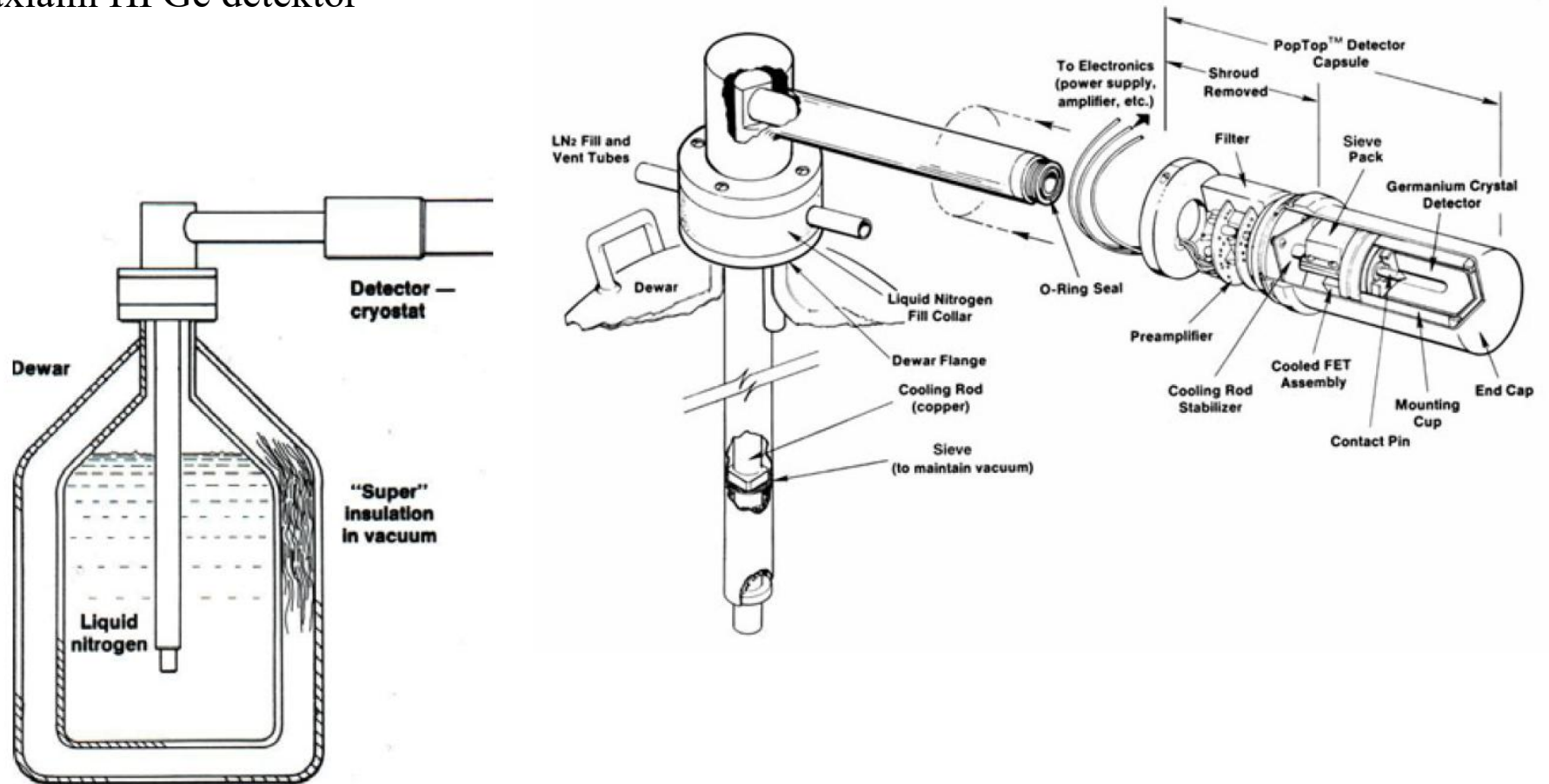
# HPGe polovodičové detektory

- koaxiální konfigurace (p-typ)
- n-p přechod na vnějším povrchu
- detekuje  $\gamma$  s  $E > 50$  keV  
(kvůli  $n^+$  elektrodě na povrchu)



# HPGe polovodičové detektory

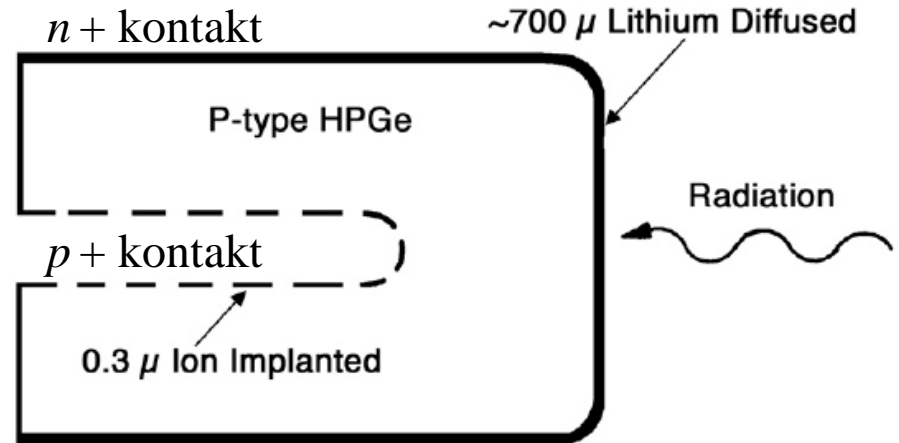
- koaxiální HPGe detektor



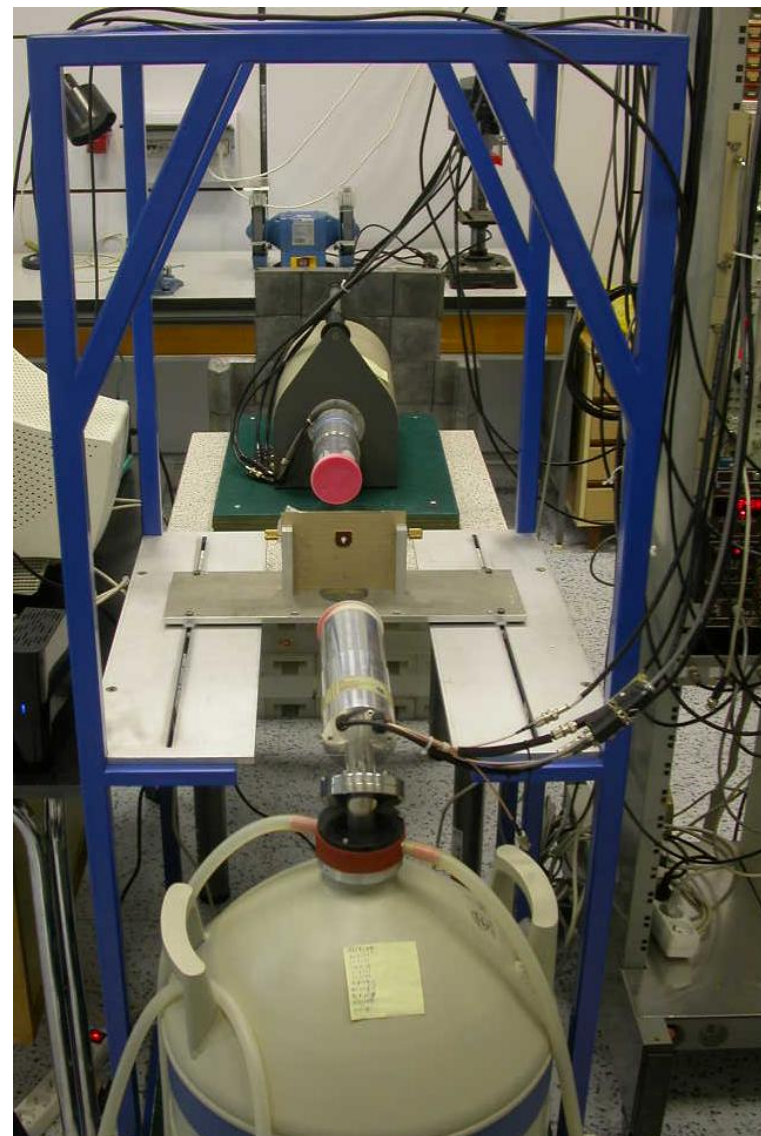
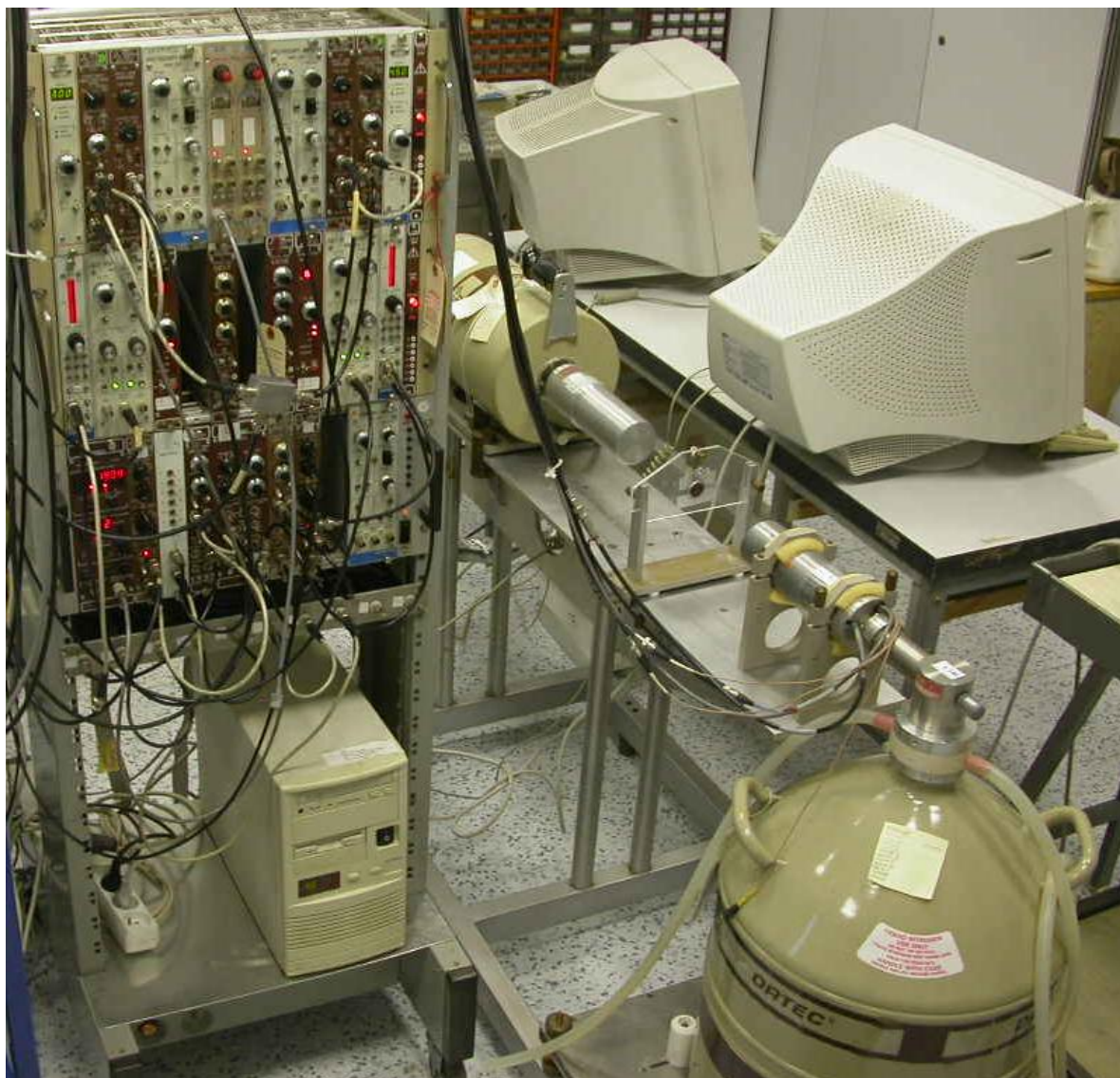


# HPGe polovodičové detektory

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

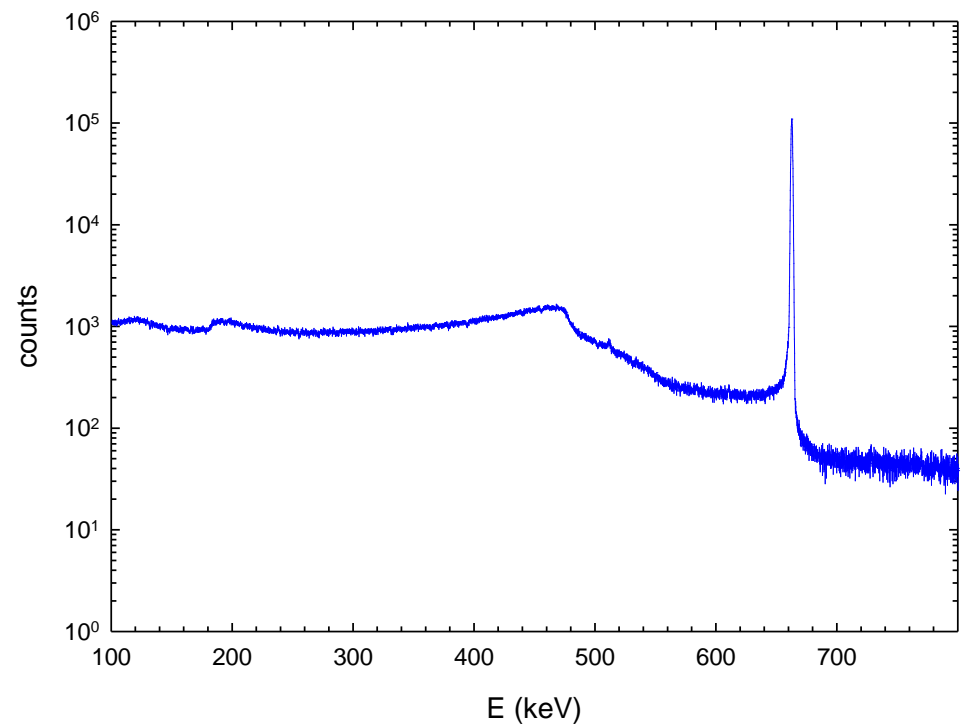
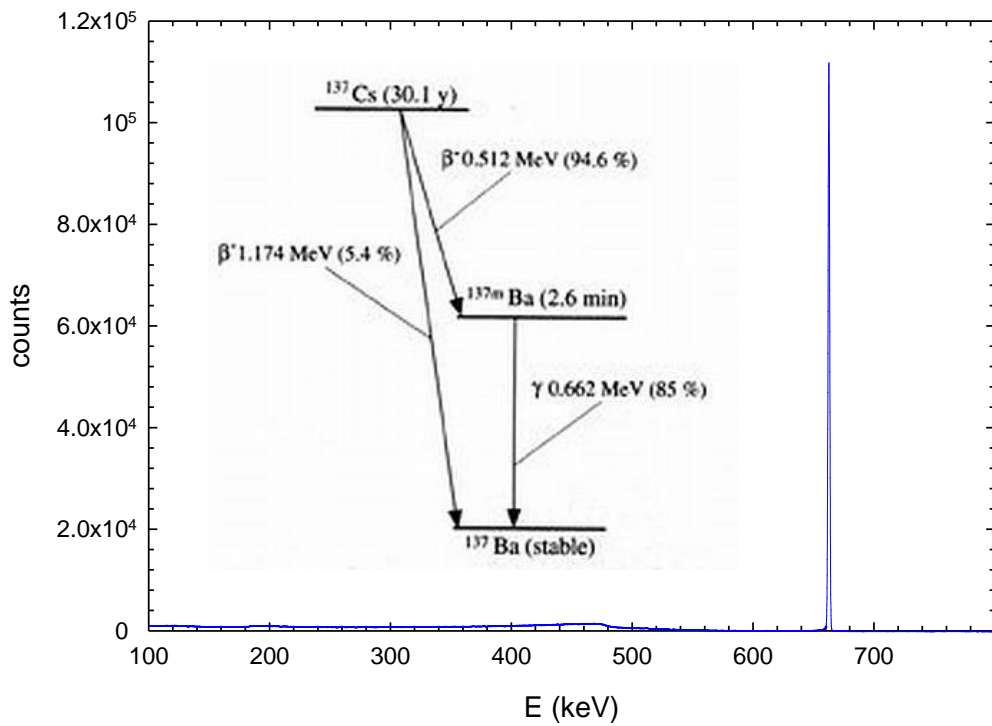


# HPGe polovodičové detektory



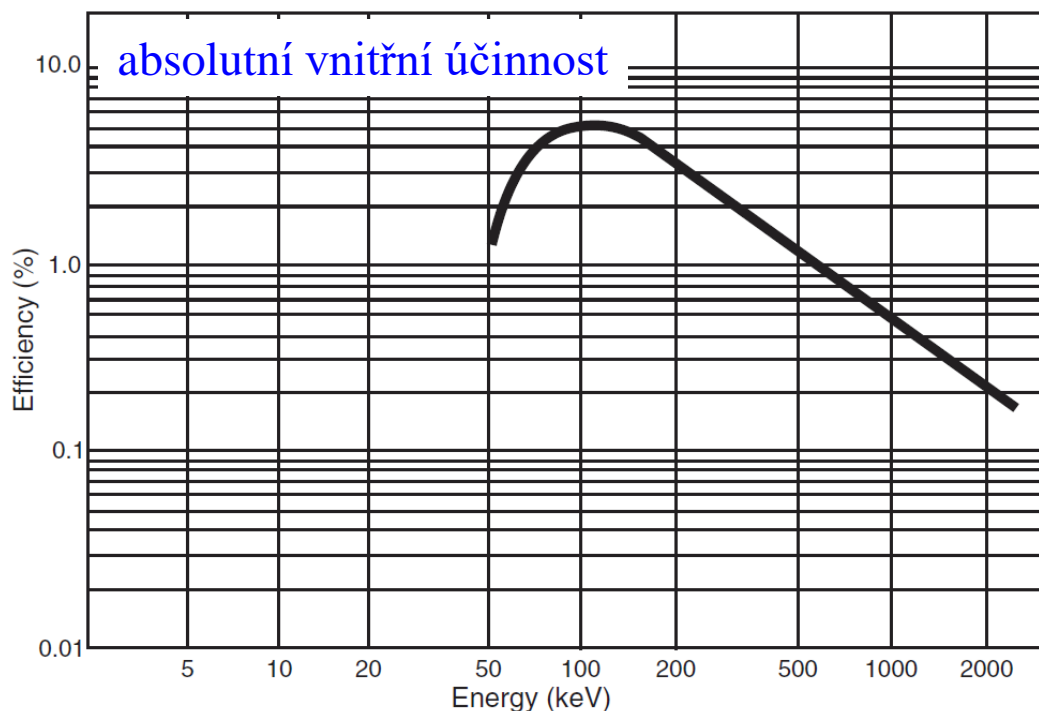
# HPGe polovodičové detektory

**$^{137}\text{Cs}$**



# HPGe polovodičové detektory

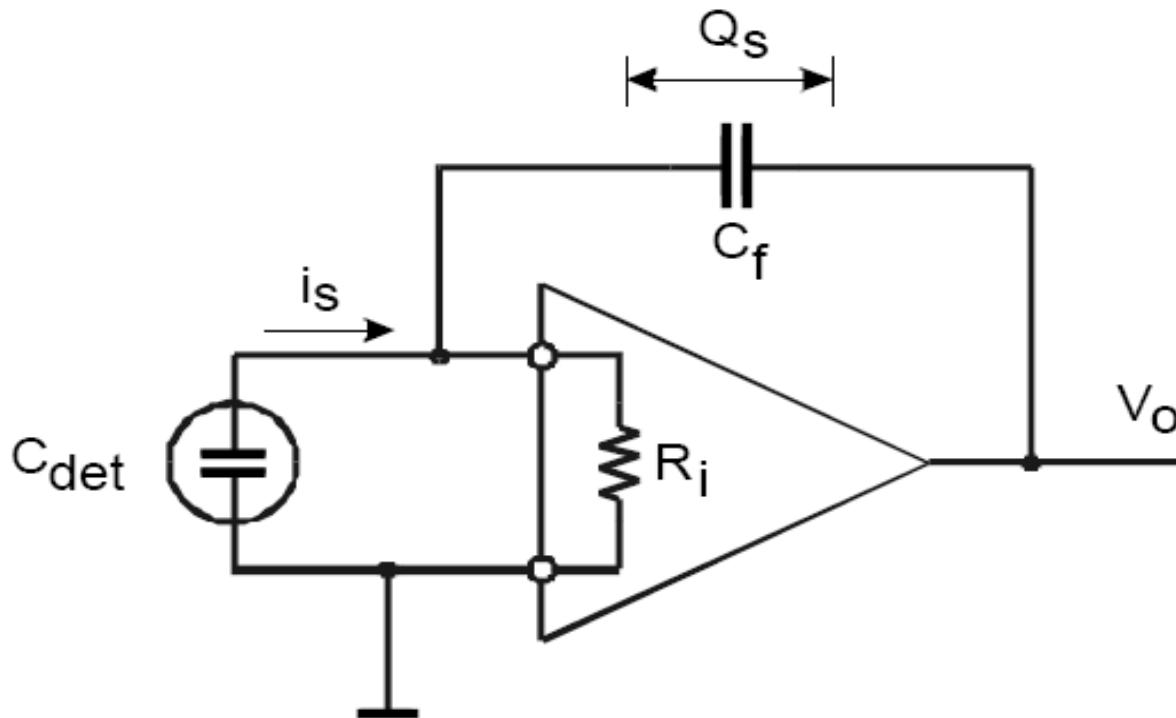
- energetické rozlišení (FWHM)
  - $E = 122 \text{ keV}$  ( $^{55}\text{Fe}$  EC)  $R = 0.5 - 1.0 \%$
  - $E = 1333 \text{ keV}$  ( $^{60}\text{Co}$   $\beta^-$ )  $R = 0.14 - 0.17 \%$
- relativní účinnost (% NaI)



Model Number	Relative Efficiency (%) $\geq$	Full Width Half Max (FWHM) Resolution (keV)		Peak to Compton Ratio (P/C)	Peak Shape	Endcap diameter mm (in.)
		At 122 keV energy	At 1.3 MeV energy		FWTM/FWHM	
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  $V_o \propto \frac{Q_s}{C_f}$
- zisk  $A_Q = \frac{dV_o}{dQ_s} \approx \frac{1}{C_f}$

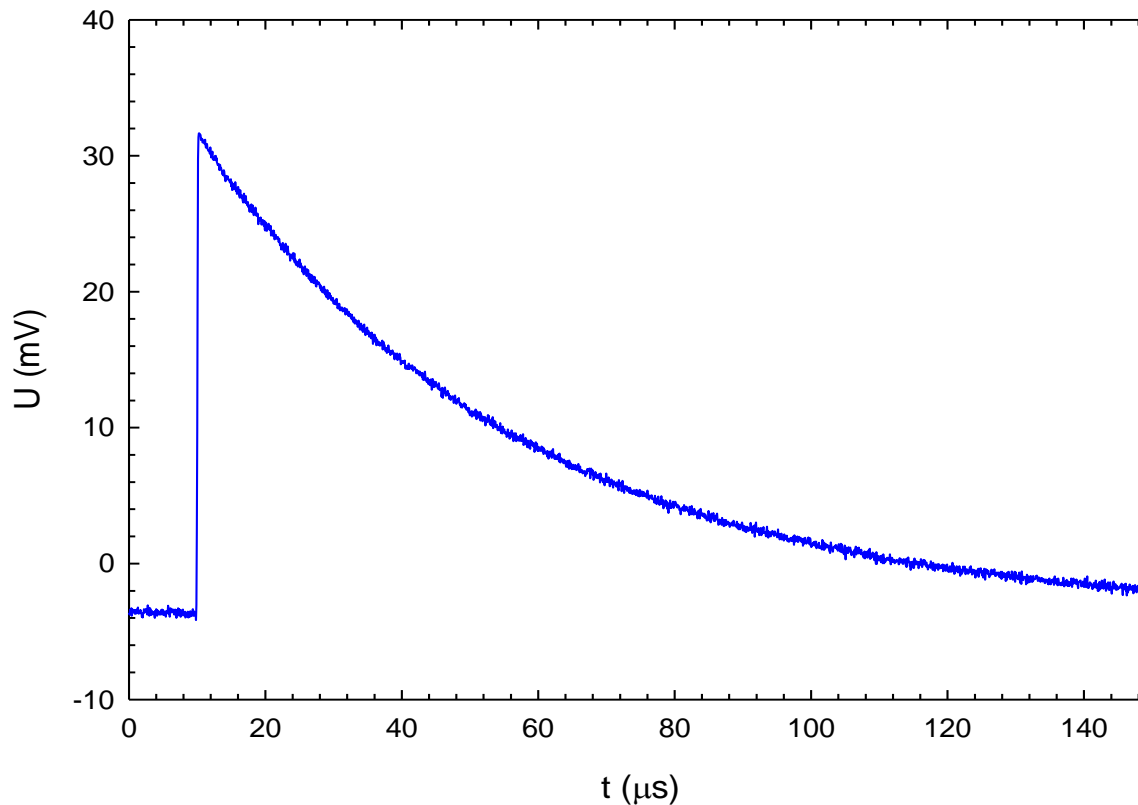


# Nábojově citlivý předzesilovač

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

• zisk  $A_Q = \frac{dV_o}{dQ_s} \approx \frac{1}{C_f}$

• výstupní napětí  $V_o \propto \frac{Q_s}{C_f}$



# Šum: scintilační detektory

511 keV  $\gamma$ -záření



~ 5000 fotonů emitovaných BaF<sub>2</sub> scintilátorem (100 eV/foton)



~ 100 fotonů na fotokatodě (rychlá komponenta)  
(integrální světelný výstup BaF<sub>2</sub> 20 / 2 % NaI)



~  $3 \times 10^8$  elektronů na anodě  
(zisk PMT  $G = 10^7$ , kvantová účinnost katody  $\eta = 25\%$ ),  
4 mA max. proud (délka pulsu 30 ns)  
0.2 V (pro 50  $\Omega$  vstupní impedanci)

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

Poissonovo rozdělení

$$\varepsilon_E = 6 \%$$



$$\text{FWHM} = 14 \%$$

(70 keV)

fluktuace signálu:	$\sigma_{sig} \approx \sqrt{G \eta 100} = 2 \times 10^4 e$
dosažitelný elektronický šum:	$\sigma_{el} \approx 10 - 1000 e$

**elektronický šum  
lze zanedbat**

# Šum: polovodičové detektory

511 keV  $\gamma$ -záření



~ 173000 párů elektron-díra (Ge  $\xi = 2.96$  eV/e-díra pár)



**vnitřní rozlišení** na energii  $E = 511$  keV

(fano faktor  $F = 0.1$ )

$$\eta_E = \sqrt{\frac{F \xi}{E}} = 0.08 \% \quad \longrightarrow \quad \text{FWHM} = 0.96 \text{ keV}$$

fluktuace signálu:  $\sigma_{sig} \approx \sqrt{173000 F} = 132 e$

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

**elektronický šum  
je dominantní**