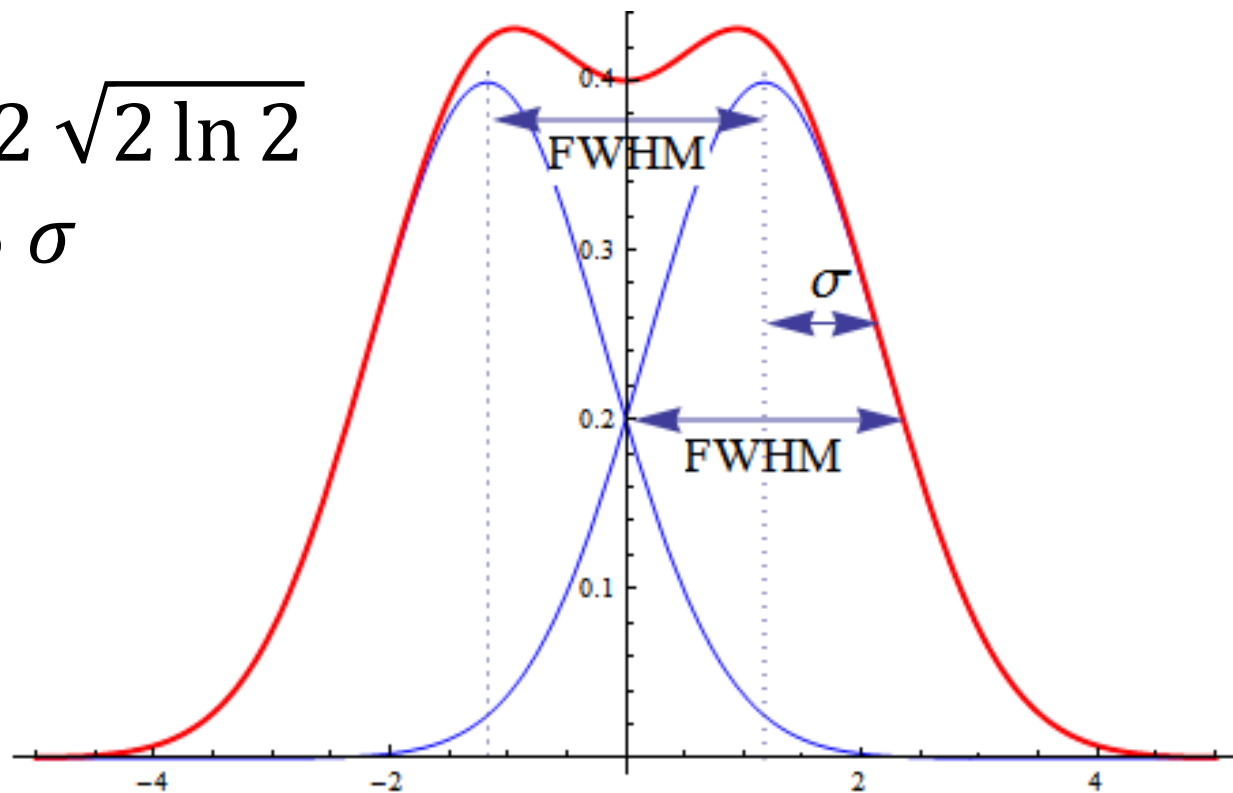


# DETEKTORJI

# Energijska ločljivost

$$\text{FWHM} = \sigma 2 \sqrt{2 \ln 2}$$
$$\approx 2,35 \sigma$$



# IZKORISTEK

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\text{zaznani}}{\text{oddani}} = \varepsilon_{intr} \varepsilon_{geo}$$

Primer za valj,  $l=10\text{cm}$ ,  $D=1\text{m}$ ,  $r=2\text{cm}$ .

$$\varepsilon_{geo} \approx 3 \times 10^{-4}$$

# Ionizacijski detektorji

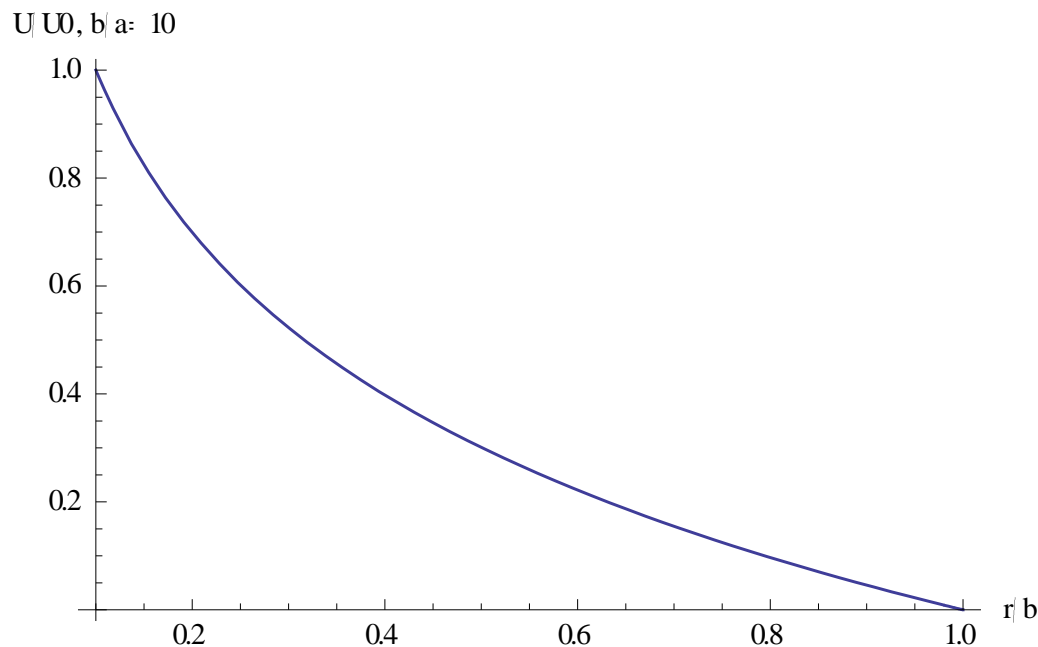
- Zbiranje naboja po ionizaciji plina
- Režimi delovanja:
  1. Ionizacijska celica
  2. Proporcionalni režim
  3. G-M režim
- Uporaba za sevalni nadzor
- Geometrija: valjasti kondenzator

Izračunaj polje v valjastem kondenzatorju in njegovo kapaciteto!

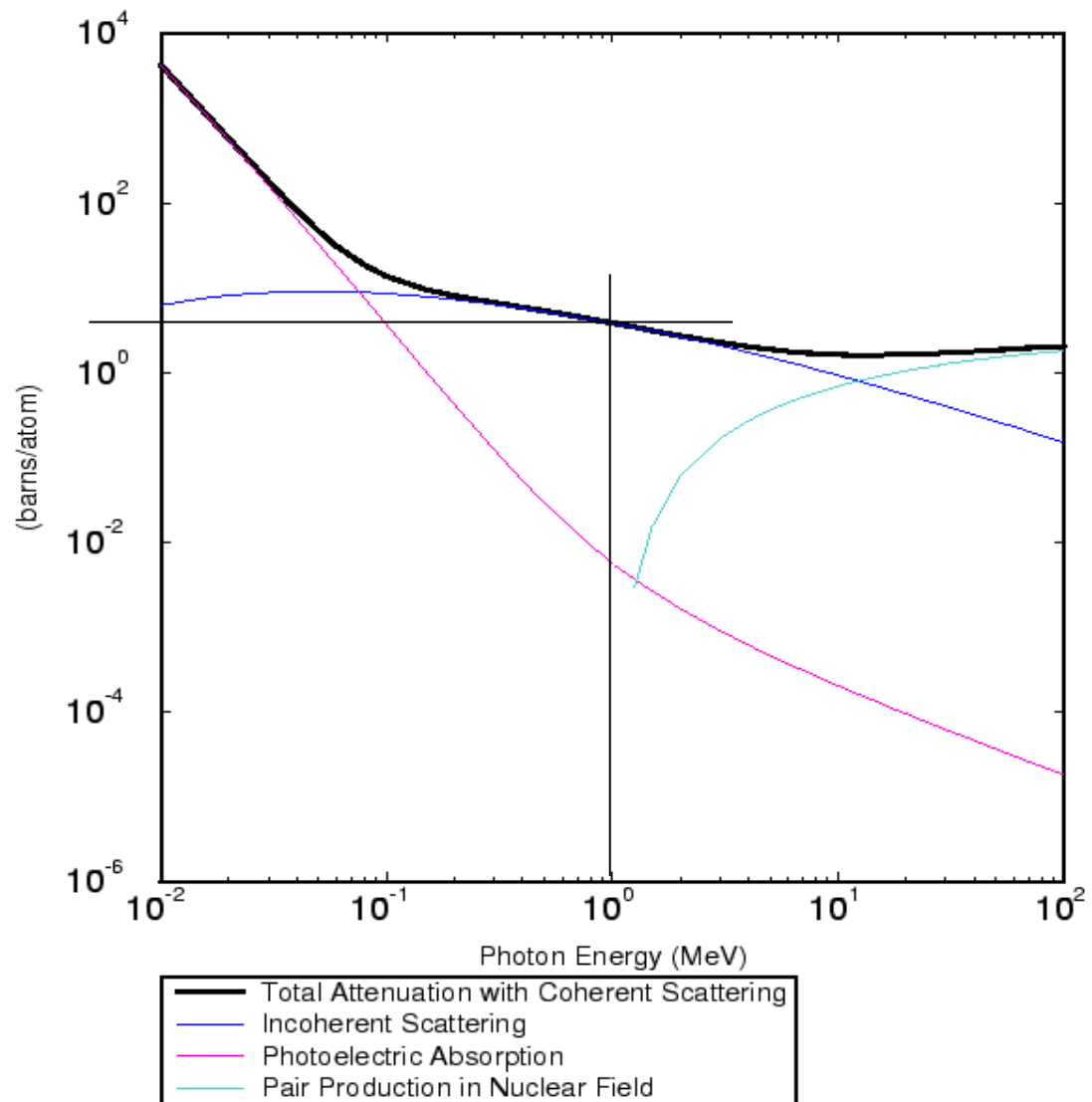
$$C = \frac{2 \pi \epsilon_0 L}{\ln \frac{b}{a}}$$

$$U(r) = U_0 \frac{\ln b/r}{\ln b/a}$$

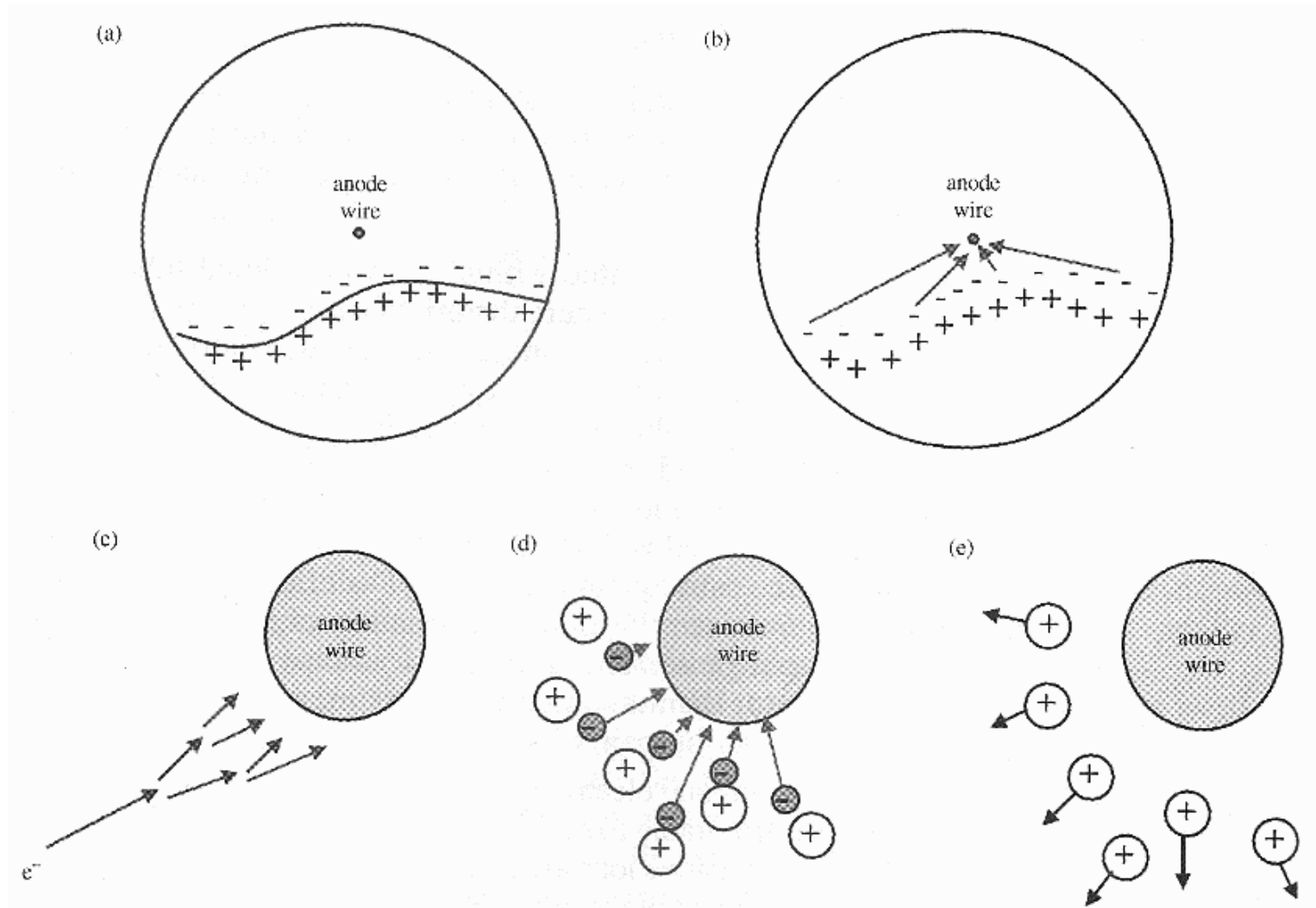
$$E(r) = \frac{U_0}{\ln b/a} \frac{1}{r}$$



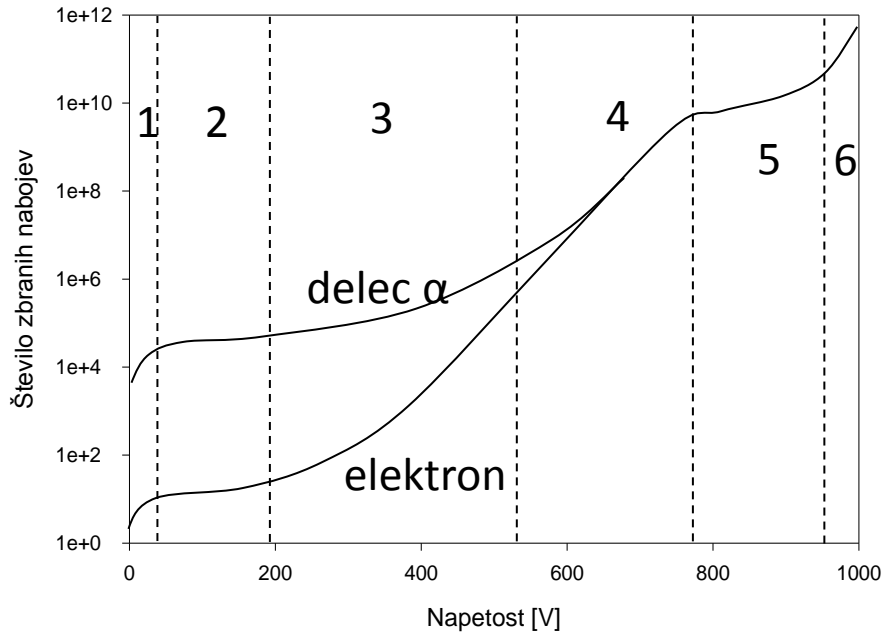
**Naloga:** Izračunaj izkoristek istega kondenzatorja za žarke  $\gamma$  z energijo 1 MeV na razdalji 1 m. Kondenzator ima dolžino 10 cm,  $b=2$  cm in je napolnjen z Ar pri tlaku 3 atmosfere. Sipanje v zraku med virom in detektorjem zanemari!



# Proporcionalni števec



**Naloga:** Pri kateri napetosti se ionizacijska celica iz prejšnjih dveh nalog spremeni v proporcionalni števec? Debelina žice je  $20\ \mu\text{m}$ . Za eno ionizacijo potrebujemo  $30\ \text{eV}$ .



povprečna prosta pot: 
$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{kT}{\sigma_0 p}$$

$$\lambda = 1,7\ \mu\text{m}$$

$$V_0 = 1500\ \text{V}$$

- 1-rekombinacija
- 2-ionizacijska celica
- 3-proporcionalni števec
- 4-neproporcionalen odziv
- 5-Geiger-Müllerjev števec
- 6-stalno prebijanje



**Naloga:** Kolikšno je pri tej napetosti polje tik ob anodi?

$$E(r) = \frac{U_0}{\ln b/a} \frac{1}{r}$$

$$E = 19 \text{ MV/m}$$

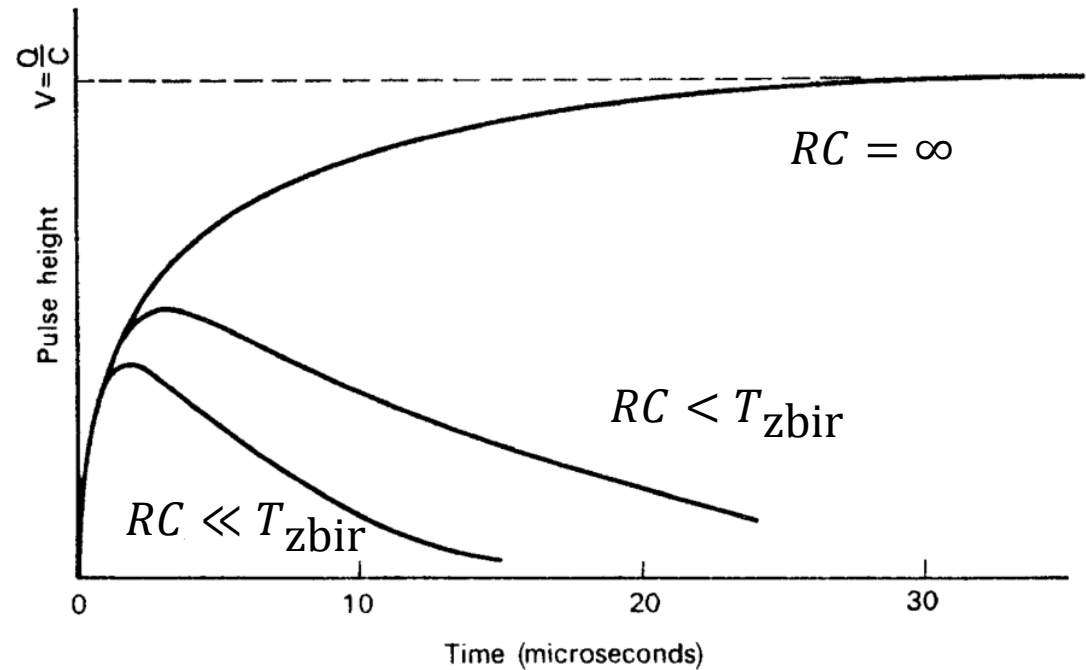
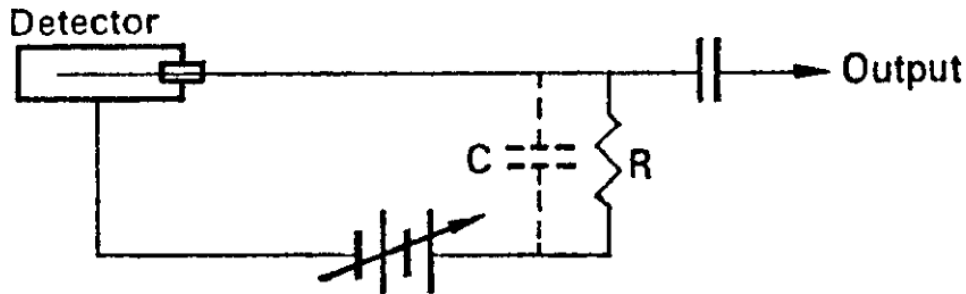
**Naloga:** Kakšna bi bila ta napetost pri ploščati ionizacijski celici z razdaljo med ploščama 10 cm.

$$U_0 = 1,8 \text{ MV}$$

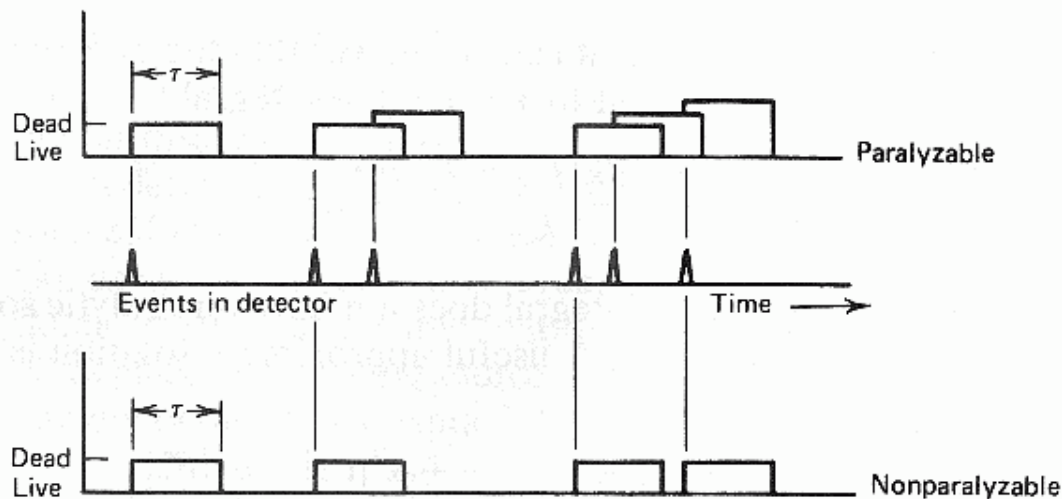
## Naloga:

1. Oцени prispevek elektronov in ionov k izhodnemu sunku prej omenjenega valjastega detektorja, če vsi naboji nastanejo na radiju  $a+r'$ ,  $r'=3 \mu\text{m}$ .
2. Oцени tudi število parov elektron-ion, če je (največja) amplituda neobdelanega napetostnega sunka na cevi 10 mV.
3. Vpadli foton je imel energijo 10 keV, detektor je polnjen z argonom (26 eV/par).  
Koliko korakov pomnoževanja se je izvedlo, če se število parov na vsakem koraku podvoji?

# Izhodni pulz detektorja



# Mrtvi čas detektorja



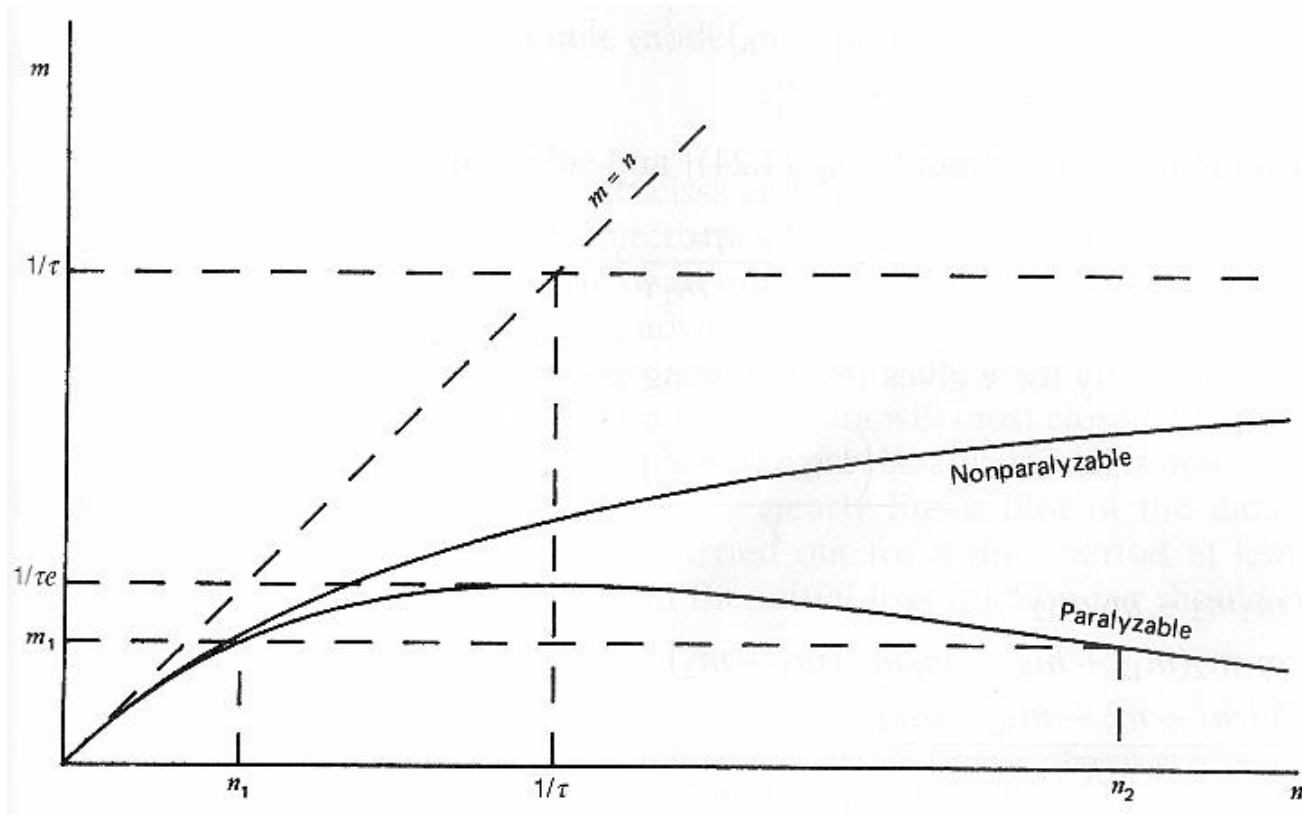
$$m = n e^{-n\tau}$$

$$n = \frac{m}{1 - m\tau}$$

$n$  = vsi dogodki (frekv.)

$m$  = zaznani dogodki (frekv.)

$\tau$  = mrtvi čas



**Naloga:** Pri kateri frekvenci štetja pade število zaznanih sunkov na polovico, če je mrtvi čas sistema  $100 \mu\text{s}$ . Primerjaj oba modela.

$m = 5 \text{ kHz}, 3,5 \text{ kHz}$

# Poissonova statistika

$$P(n) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!}$$

$$\sigma^2 = \mu$$

$$dP = r dt \quad \mu = rt$$

Približek za velike povprečne vrednosti ( $\mu > 25$ )

$$P(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu}} \exp\left(-\frac{(n - \mu)^2}{2\mu}\right)$$

**Naloga:** Preveriti želimo, ali je breznevtrinski dvojni beta razpad res „prepovedana“ reakcija.

V ta namen z detektorjem, ki ima učinkovitost 20%, 100 dni opazujemo 50g vzorca  $^{82}\text{Se}$  in ne zaznamo dogodkov, ki bi pripadali tej reakciji. Kakšna je spodnja meja razpadnega časa za omenjeno reakcijo? Interval zaupanja naj bo 90%.

$$\tau \geq 8,75 \cdot 10^{21} \text{a}$$

# Negotovosti

$$u(x, y, z, \dots)$$

$$\sigma_u^2 = \left( \frac{\partial u}{\partial x} \sigma_x \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \sigma_y \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} \sigma_z \right)^2 + \dots$$

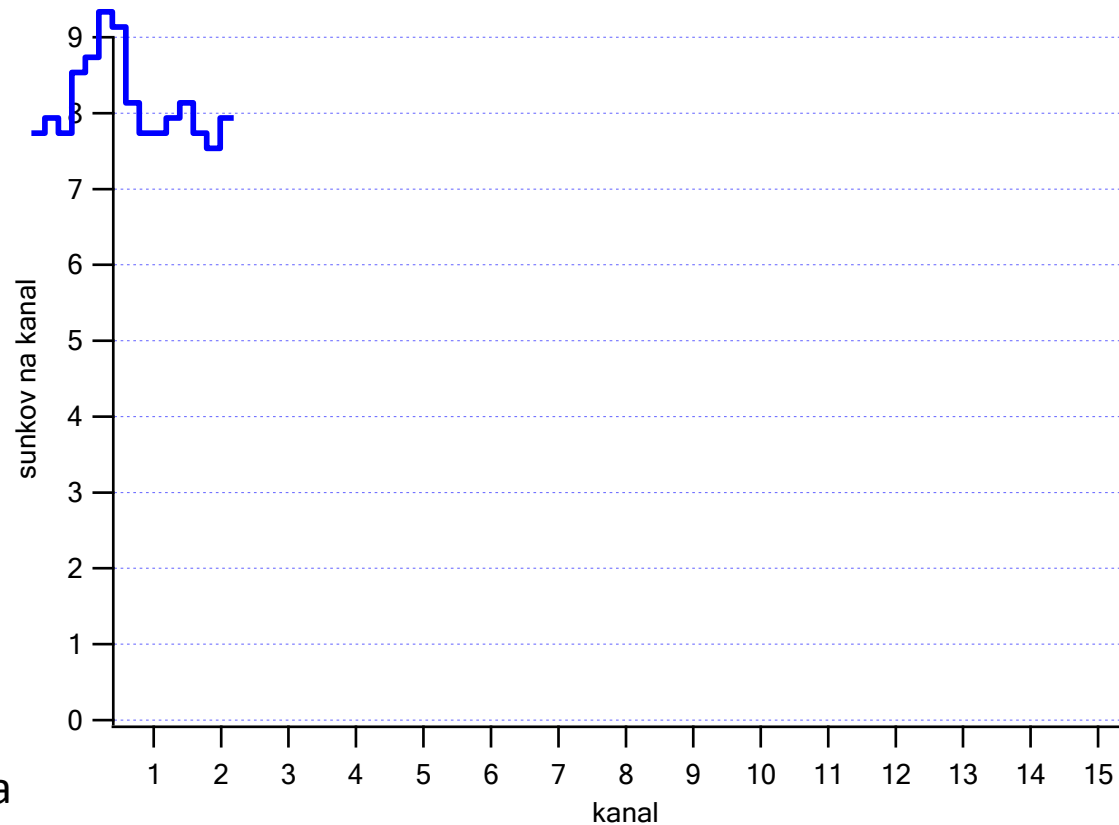
operacija (u)	izračun negotovosti
$x + y, \quad x - y$	$\sigma_u^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \dots$
$x \times y, \quad x/y$	$\frac{\sigma_u^2}{u^2} = \frac{\sigma_x^2}{x^2} + \frac{\sigma_y^2}{y^2} + \dots$



**Naloga:** Določi optimalni čas merjenja vzorca in ozadja, da bo napaka izračunane hitrosti štetja čim manjša, če imamo za obe meritvi skupaj na voljo čas  $T$ . Pri tem poznamo približne števne hitrosti vzorca in ozadja.

$$\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{S + B}{B}}$$

**Naloga:** Izračunaj pozicijo in ploščino vrha na spodnji sliki in njuno negotovost! Oceni resolucijo (FWHM) detektorja!



$$N_p = 24,0 \pm 5,9$$

$$\bar{x} = 5,9 \pm 0,2$$

$$\text{FWHM} = 2,9 \text{ kanala}$$

# Ponovitev – plinski detektor

1. ionizacija :  $\approx 30$  eV/par ion-elektron
2. (pomnoževanje)
3. zbiranje naboja, naboj  $\propto$  energiji
4. ločljivost:  $\text{FWHM} \propto \sigma_E$ , želimo čim manjšega
5. želimo čim več nabojev na dogodek, torej čim manj E na ustvarjen naboj
6. potrebujemo el. polje za zbiranje naboja:  
neprevodnik

# 1 MeV protoni

	Si	zrak	
$dE/\rho dx$	175	222	MeV cm <sup>2</sup> /g
doseg $\rho d$	3,7	2,8	10 <sup>-3</sup> g/cm <sup>2</sup>
$\rho$	2,32	1,2 × 10 <sup>-3</sup>	g/cm <sup>3</sup>
ustavljanje	0,04 MeV/μm	0,2 MeV/cm	
doseg	16 μm	2,3 cm	

# Polprevodniški detektor

polprevodnik : plin

**Naloga:** Kolikšno je razmerje med številom nosilcev naboja, ki jih ustvari proton z energijo 1 MeV, ko se ustavi v zraku ali siliciju? Povprečna izguba energije na eno ionizacijo je 34 eV v zraku in 3.62 eV v Si. Kako to razmerje vpliva na ločljivost, če velja Poissonova statistika? (0,3)

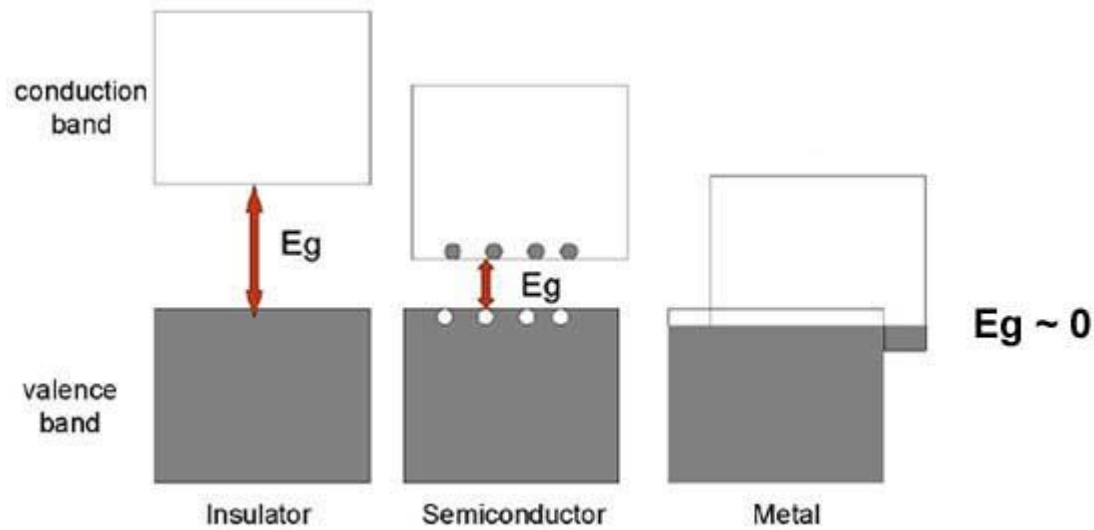
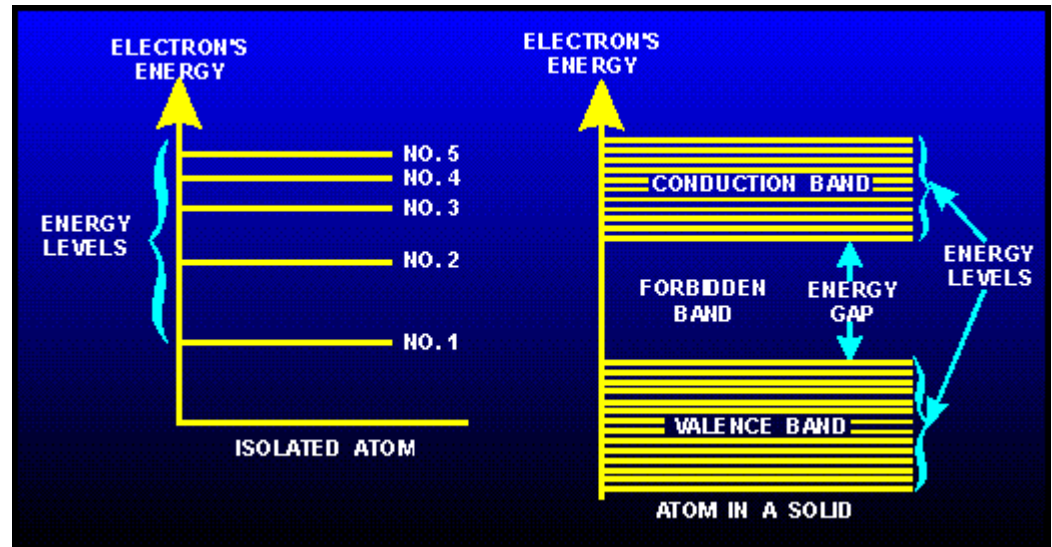
- + večji stopping power
- + majhen, hitro zbiranje naboja
- občutljiv na sevalne poškodbe

# Fano faktor

$$F = \frac{\sigma^2}{\bar{N}}$$

Za Poissonovo statistiko  $F=1$ ,  
ponavadi 0,06 .. 0,2.

# Kristal



**Table 11.1** Properties of Intrinsic Silicon and Germanium

	Si	Ge	
Atomic number	14	32	
Atomic weight	28.09	72.60	
Stable isotope mass numbers	28-29-30	70-72-73-74-76	
Density (300 K); g/cm <sup>3</sup>	2.33	5.32	
Atoms/cm <sup>3</sup>	$4.96 \times 10^{22}$	$4.41 \times 10^{22}$	
Dielectric constant (relative to vacuum)	12	16	
Forbidden energy gap (300 K); eV	1.115	0.665	
Forbidden energy gap (0 K); eV	1.165	0.746	
Intrinsic carrier density (300 K); cm <sup>-3</sup>	$1.5 \times 10^{10}$	$2.4 \times 10^{13}$	
Intrinsic resistivity (300 K); $\Omega \cdot \text{cm}$	$2.3 \times 10^5$	47	
Electron mobility (300 K); cm <sup>2</sup> /V · s	1350	3900	
Hole mobility (300 K); cm <sup>2</sup> /V · s	480	1900	
Electron mobility (77 K); cm <sup>2</sup> /V · s	$2.1 \times 10^4$	$3.6 \times 10^4$	
Hole mobility (77 K); cm <sup>2</sup> /V · s	$1.1 \times 10^4$	$4.2 \times 10^4$	
Energy per electron-hole pair (300 K); eV	3.62		
Energy per electron-hole pair (77 K); eV	3.76	2.96	
Fano factor (77 K)	0.143 (Ref. 7)	0.129 (Ref. 9)	
	0.084 (Ref. 8)	0.08 (Ref. 10)	
	0.085	< 0.11 (Ref. 11)	
	to		
	0.137		
	} (Ref. 12)		
		0.057	
		0.064	
		} (Ref. 14)	
	0.16 (Ref. 13)	0.058 (Ref. 14)	



**Naloga:** Za koliko se spremeni število parov elektron-vrzel v intrinzičnem germaniju, ko ga shladimo iz sobne na temperaturo tekočega dušika (77 K)? ( $10^{19}$ )

$$N = A T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad k = 8,6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} \quad E_g = ?$$

---

mobilnost nosilcev naboja:  $v = \mu E$  ločeno za elektrone in vrzeli

gostota toka:  $j = e n (\mu_e + \mu_h) E = \sigma E = \frac{1}{\xi} E$

(če je enako vrzeli kot elektronov)

**Naloga:** Izračunaj specifično upornost čistega Si pri sobni temperaturi!  
(230 k $\Omega$  cm)

# Dopiranje

Čisti polprevodnik:  $N_h = N_{el}$

- 5 valentni (donor): n tip, prevajajo elektroni
- 3 valentni (akceptor): p tip, prevajajo luknje

$$n_D \gg n_i$$

**Naloga:** Izračunaj specifično upornost silicija pri 5 valentnem dopiranju z gostoto  $10^{13}/\text{cm}^3$ ! ( $463 \Omega \text{ cm}$ )

$$\xi = \frac{1}{e(n_e \mu_e + n_h \mu_h)}$$

## n TIP

- gibljivi elektroni, -

## p TIP

- gibljive luknje, +

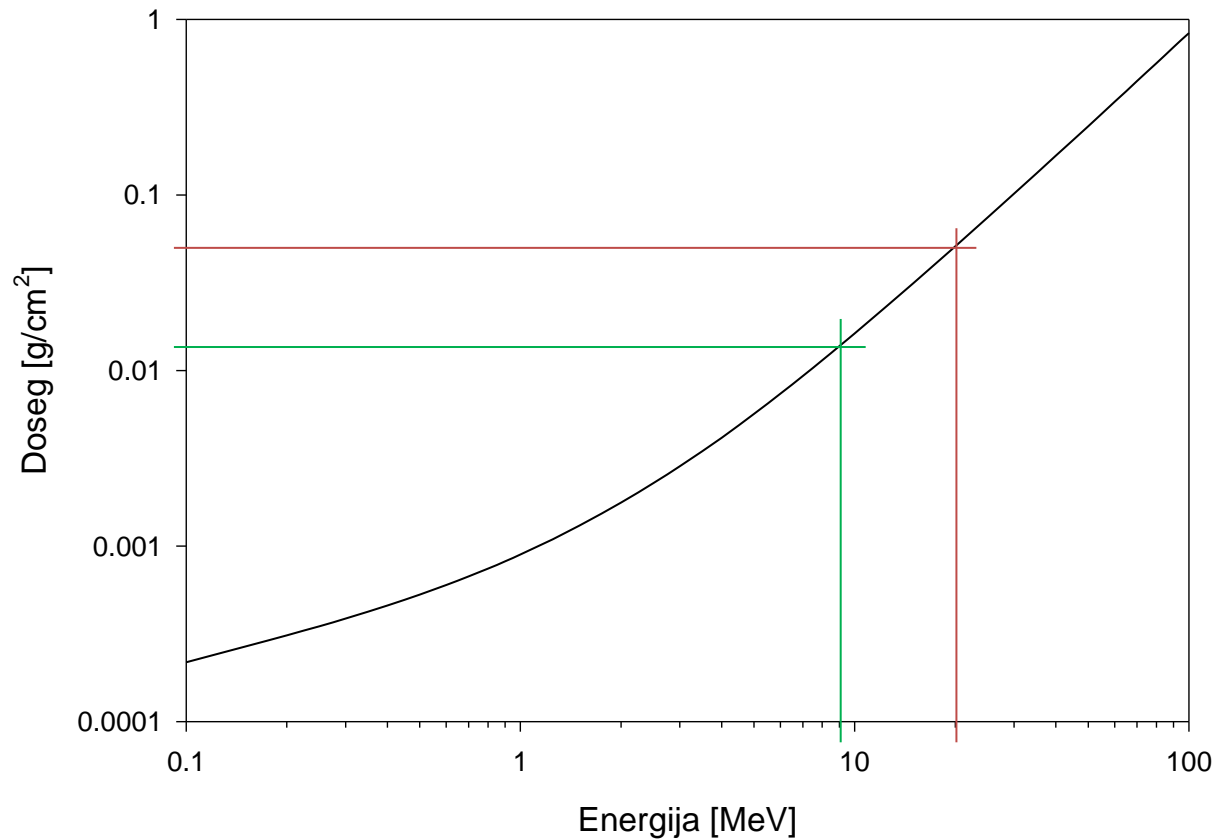
**Naloga:** Kako moramo priključiti napetost na stik p-n, da bo deloval kot detektor za ionizirajoče sevanje?

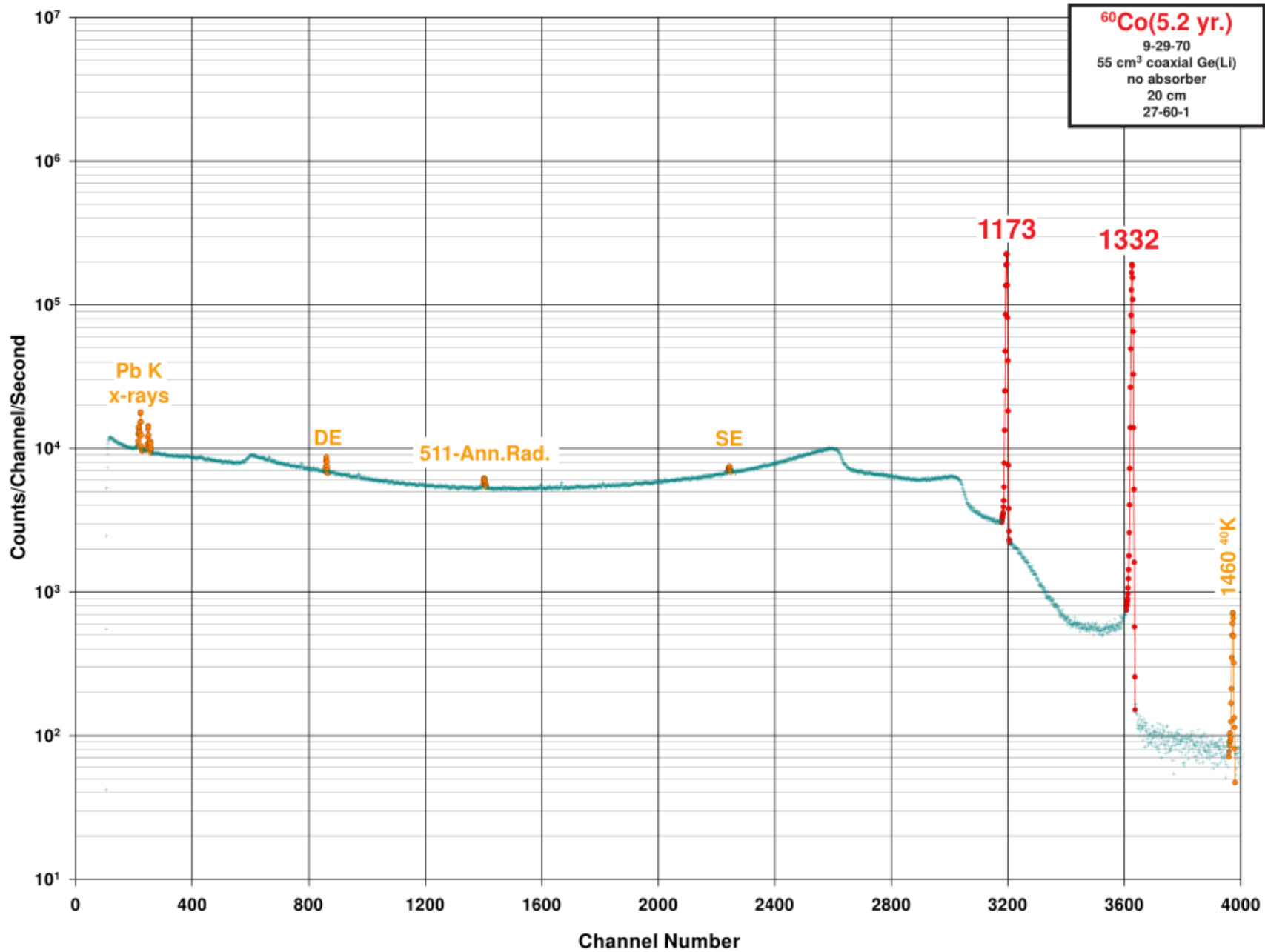
Izračunaj debeline depletirane plasti, če na stik priključimo napetosti 50V, 100V, 200V. Dielektrična konstanta silicija je 12,  $N_A = 2 \times 10^{13} \text{ 1/cm}^3$ ,  $N_D = 8 \times 10^{12} \text{ 1/cm}^3$ . (107, 152, 215) $\mu\text{m}$

$$d = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0 U}{e_0} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$

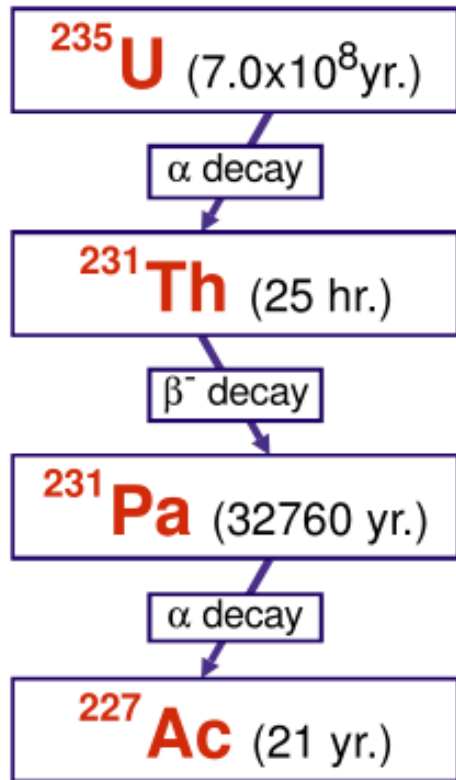
**Naloga:** Delci  $\alpha$  energije 20 MeV padajo pravokotno na 150  $\mu\text{m}$  debel silicijev detektor. Koliko energije pustijo v detektorju? Koliko parov nastane? Gostota silicija je  $2.33 \text{ g/cm}^3$ . (11MeV)

Doseg delcev  $\alpha$  v siliciju



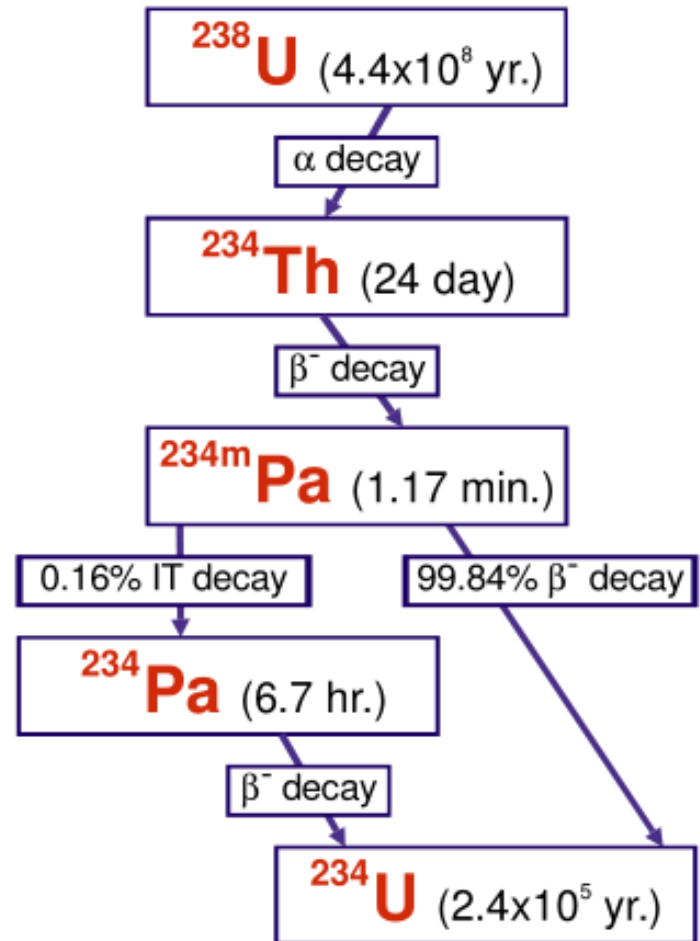


### <sup>235</sup>U Decay Chain

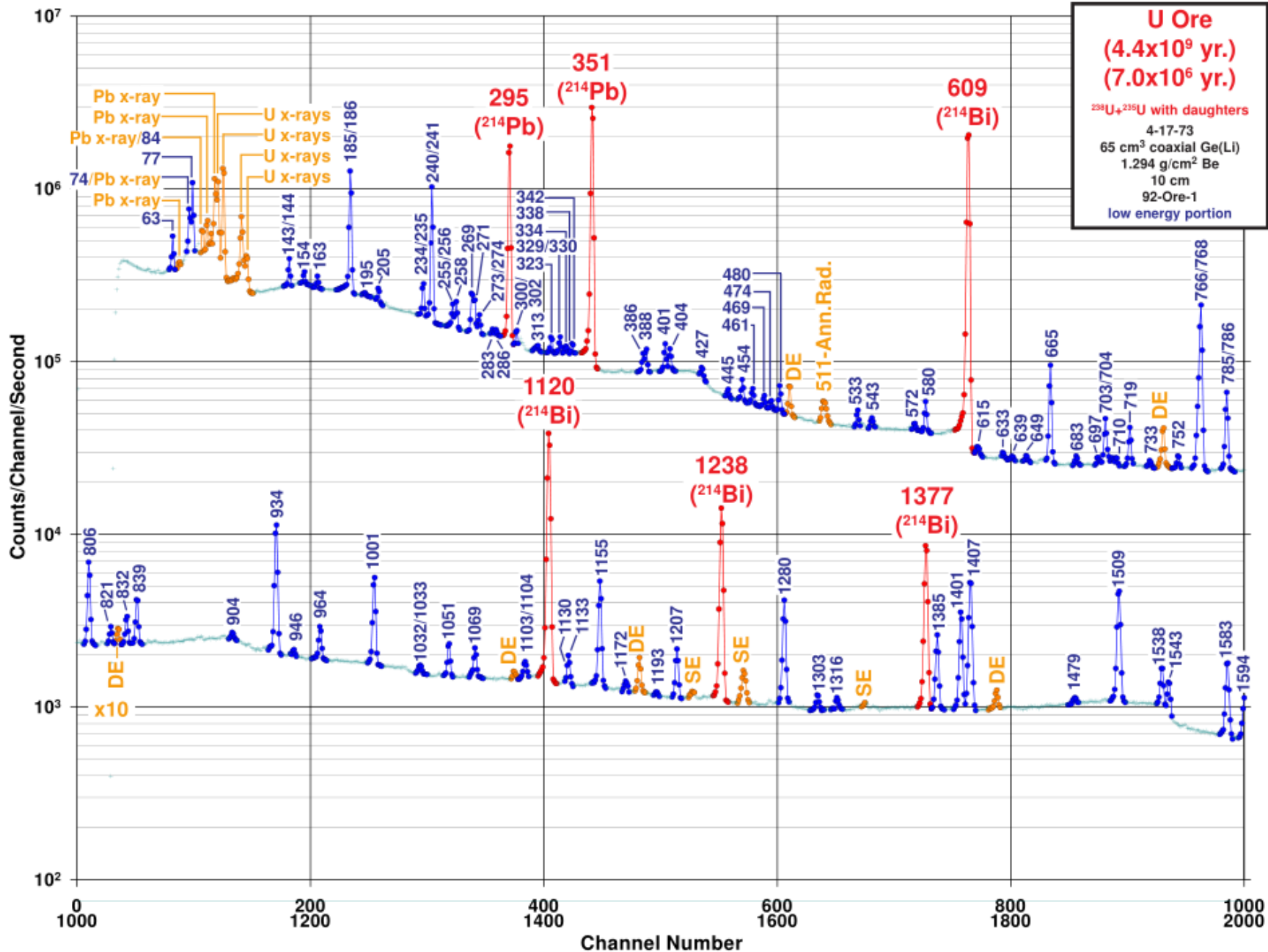


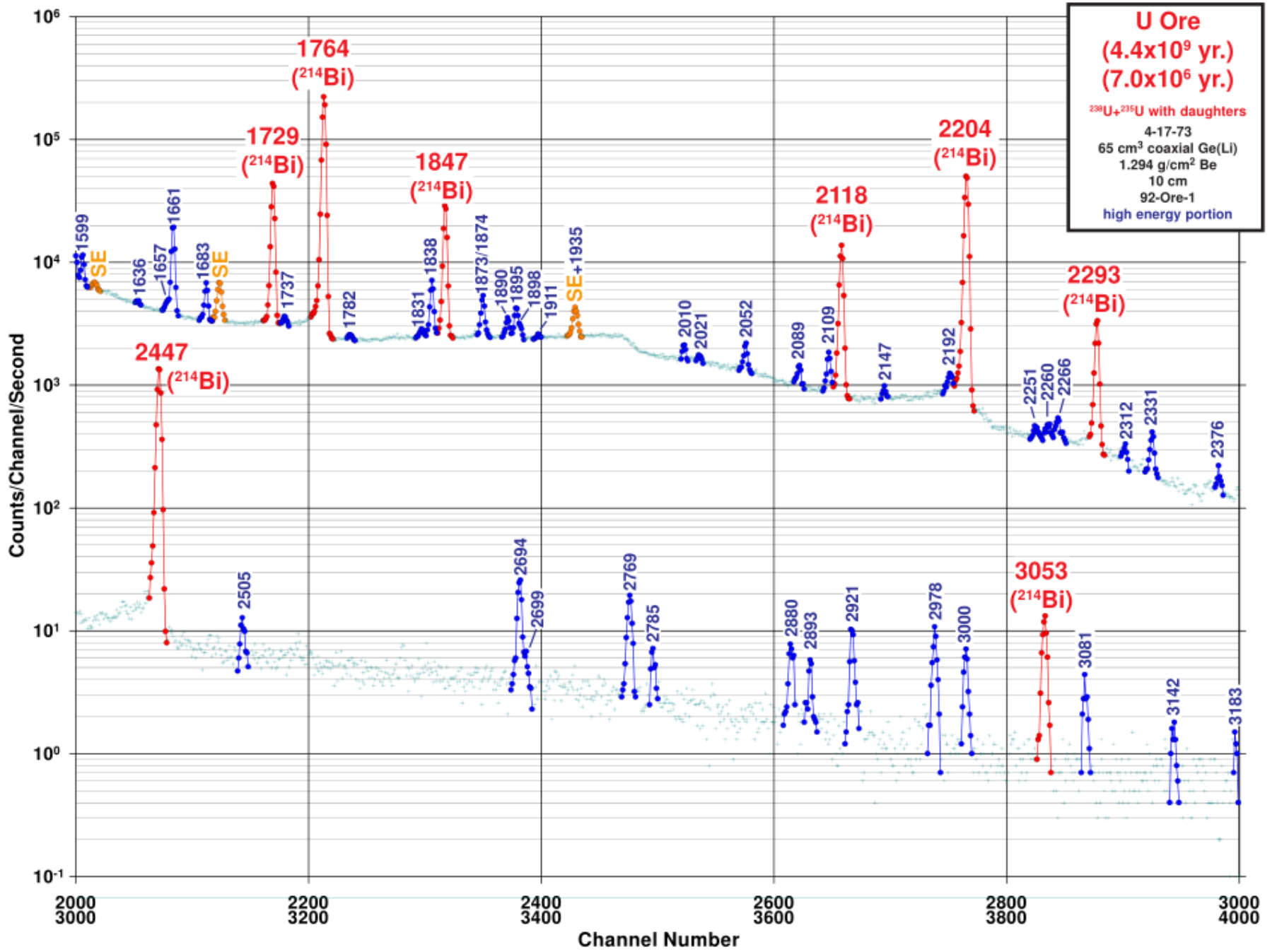
See <sup>227</sup>Ac for Chain completion

### <sup>238</sup>U Decay Chain

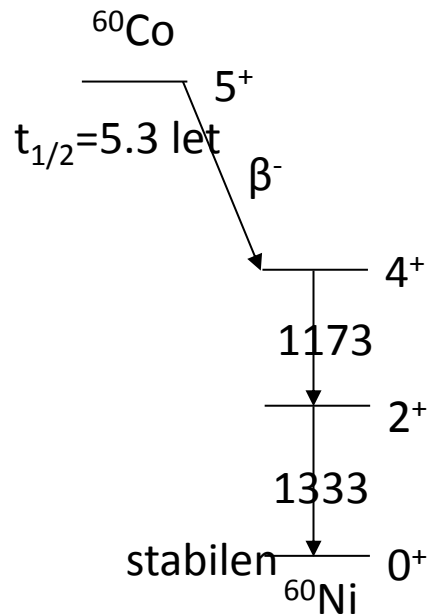


See <sup>234</sup>U for Chain completion







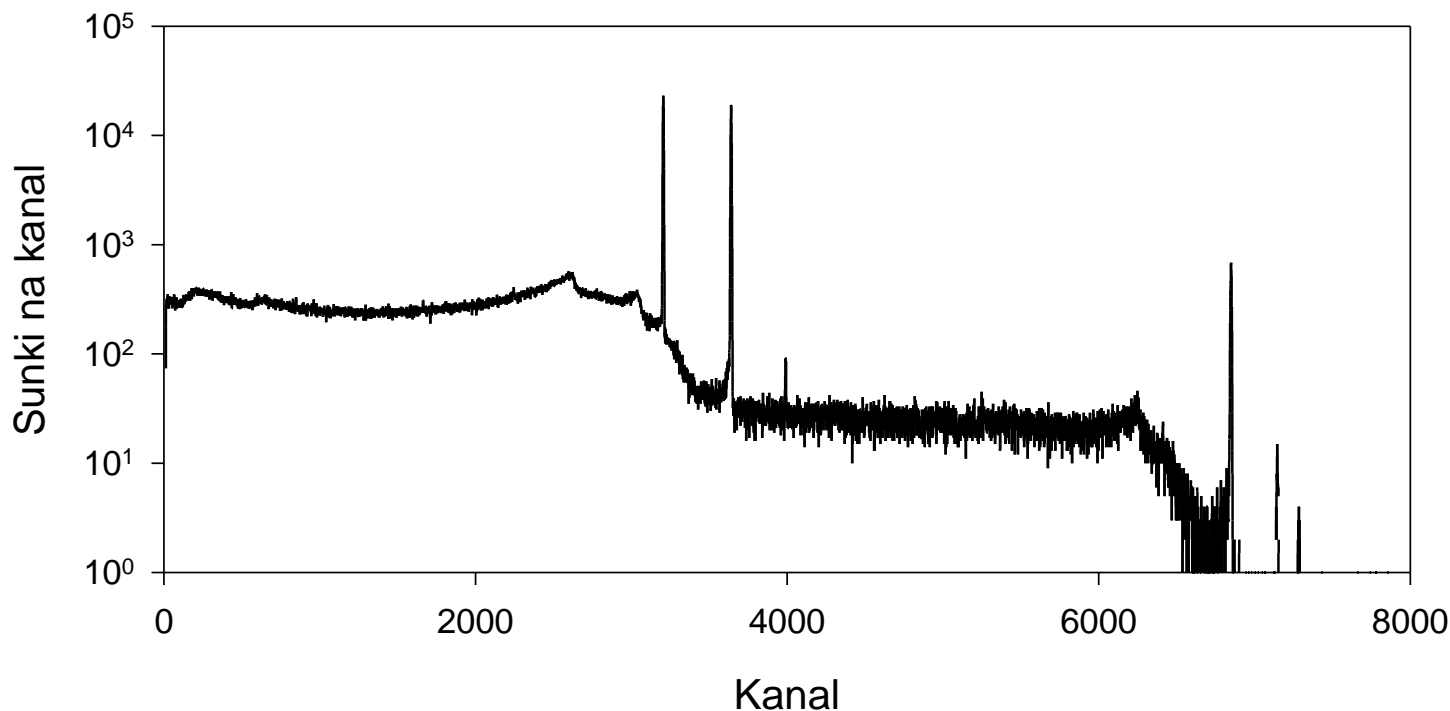


**Naloga:** Pojasni obliko zgornjega spektra iz večkanalnega analizatorja. Pomagaj si z razpadno shemo  $^{60}\text{Co}$  na levi in kalibriraj spekter.

$$E = a \cdot ch + b$$

$a = 0,364 \text{ keV}$   
 $b = 20 \text{ keV}$

Spekter  $^{60}\text{Co}$  v germanijevem detektorju



**Naloga:** V spektru vira  $^{60}\text{Co}$  v germanijevem detektorju je pri energiji 1.33 MeV  $10^4$  sunkov, v ozadju pa je 1500 sunkov. Izračunaj aktivnost vira in njeno negotovost! Izkoristek v fotovrhu je  $5,6 \times 10^{-5}$  in je natančen na 10%. Čas meritve je 1 ura.

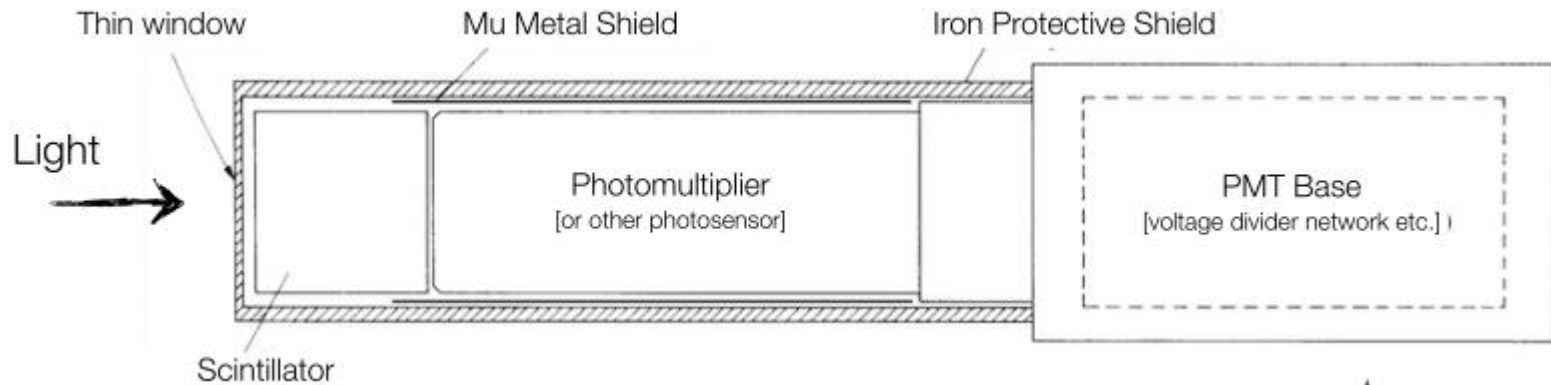
$$A = 42 \text{ kBq} (1 \pm 0.12)$$

**Naloga:** Izračunaj totalni izkoristek germanijevega detektorja za žarke  $\gamma$  z energijo 1 MeV na razdalji 1 m. Detektor ima obliko valja z radijem 2.5 cm in višino 5 cm. Točkasti vir je v osi valja. Gostota germanija je  $5.32 \text{ g/cm}^3$  in masno število 72.6. Sipanje v zraku zanemari!  $\sigma = 6,9\text{b}$

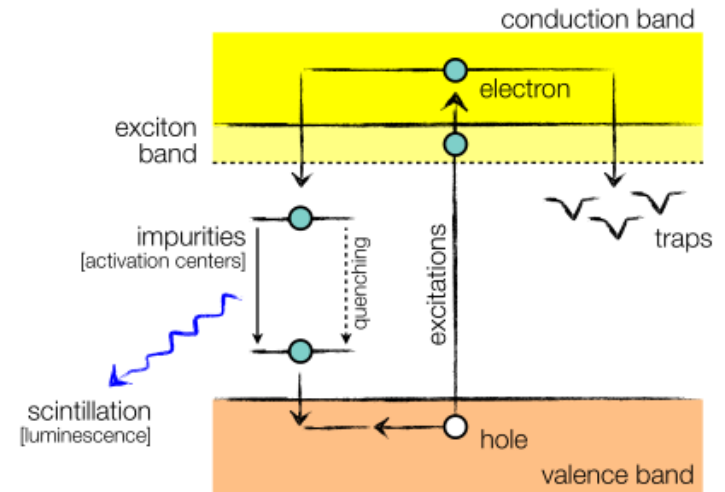
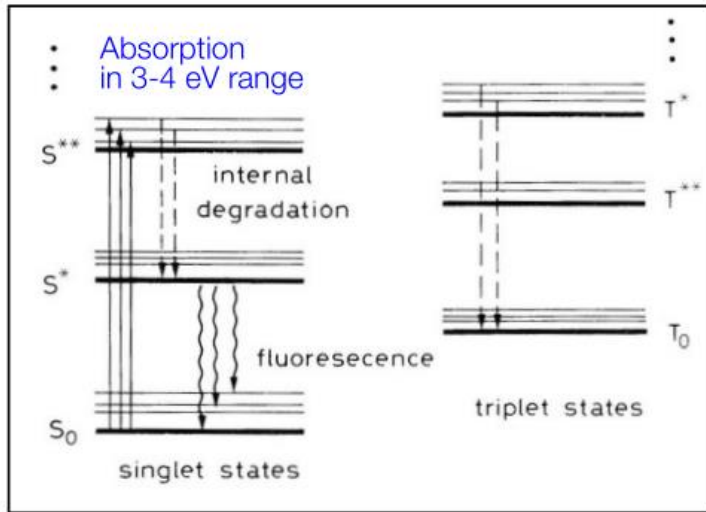
$$(\varepsilon = 1,2 \times 10^{-4})$$

# Scintilacijski detektorji

- scintilator + fotopomnoževalka



# Scintilator



**Naloga:** Energijska ločljivost scintilacijskega kristala NaI je 7% pri energiji žarkov  $\gamma$  0.66 MeV, ki jih dobimo pri razpadu  $^{137}\text{Cs}$ . Kolikšna je ločljivost za vir  $^{60}\text{Co}$ , ki seva pri 1.33 MeV? NaI: 25eV/foton

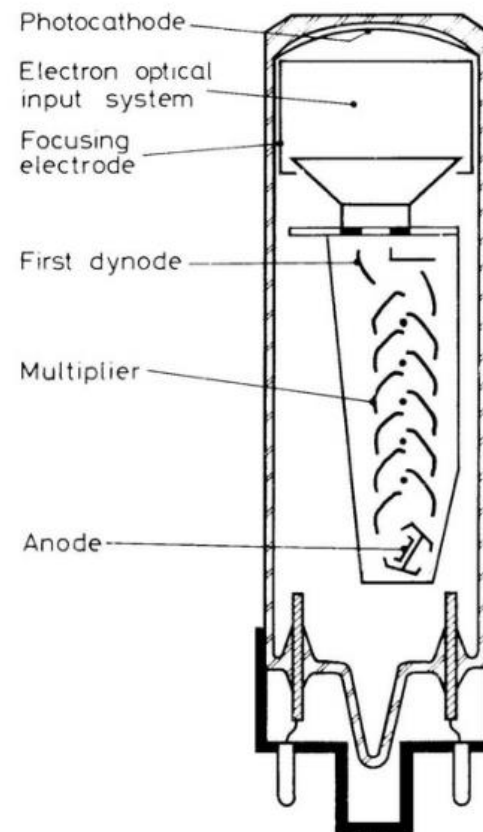
# Fotopomnoževalka

pomnoževanje:  $a = k U_d$

skupno ojačanje:  $G = a^n$

skupna napetost:  $U = \frac{n}{k} G^{1/n}$   
 $U = n U_d$

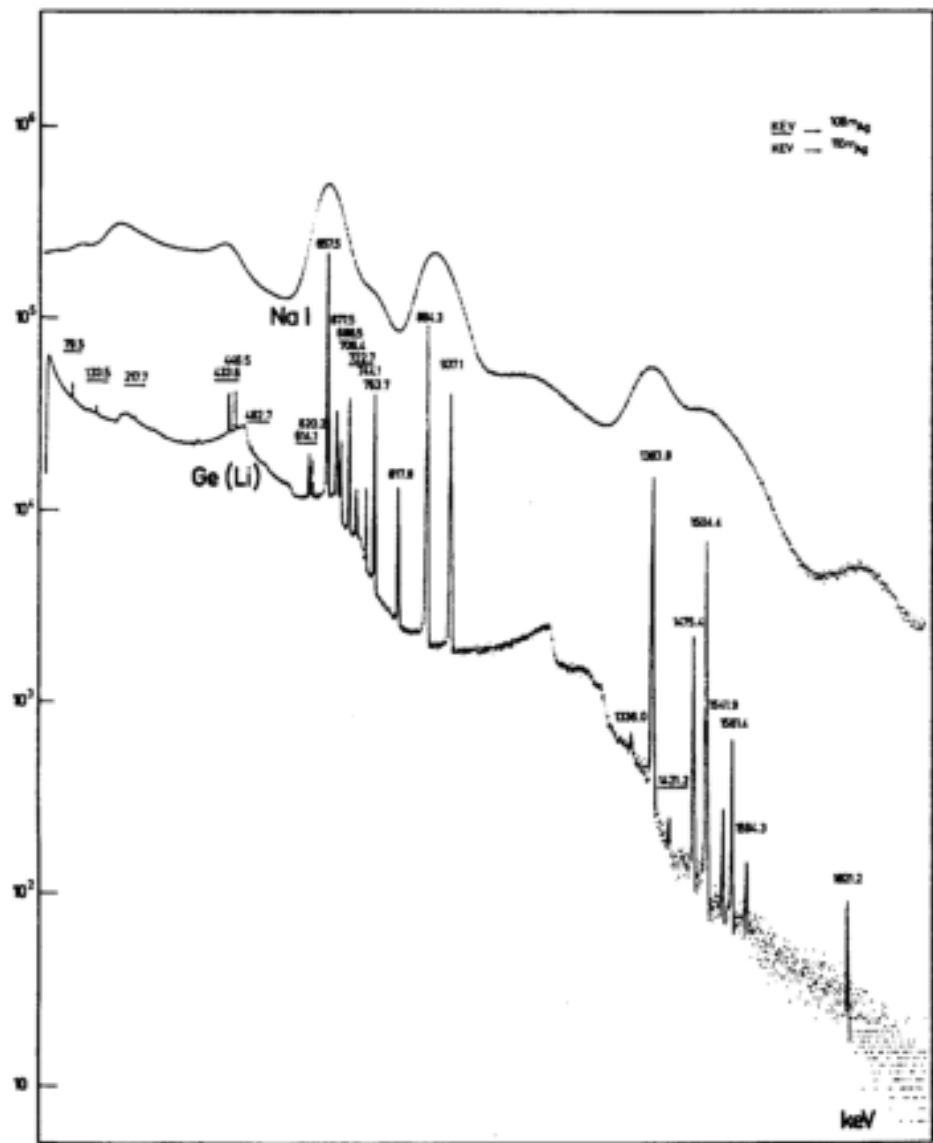
**Naloga:** poišči, pri koliko stopnjah ojačanja  $n$  je napetost na fotopomnoževalki najmanjša. Ojačanje  $G$  je dano. Kolikšna je ta napetost  $U$  in kolikšen je  $a$ ?



**Naloga:** Kako stabilna naj bo napetost na dinodi fotopomnoževalke, da bodo fluktuacije ojačenja manjše od 1%? Fotopomnoževalka ima 10 pomnoževalnih stopenj.

$$G = (k U_d)^n, \quad U = n U_d \quad \frac{dU}{U} < 0,1\%$$

# Ločljivost



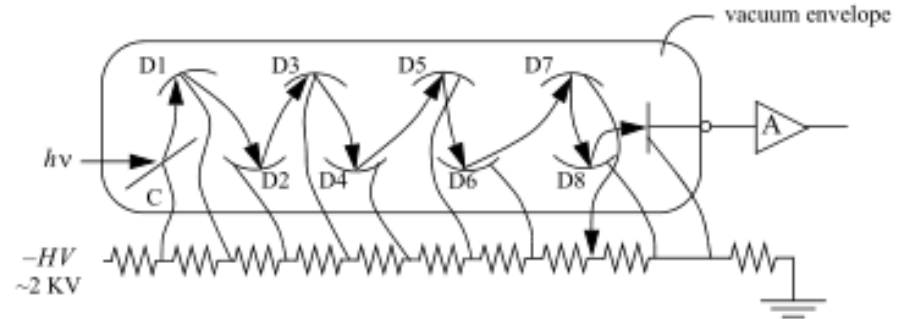
**Naloga:** Kolikšen naj bo pomnoževalni faktor na posamezni dinodi fotopomnoževalke, da še lahko ločimo izbitje enega fotoelektrona od izbitja dveh fotoelektronov iz fotokatode ?

$(a > 14)$

$$N_{k+1} = a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_{Nk}$$

$$\bar{N}_{k+1} = \bar{a} \bar{N}_k$$

$$\sigma_{k+1}^2 = \bar{N}_{k+1} + \bar{a}^2 \sigma_k^2$$



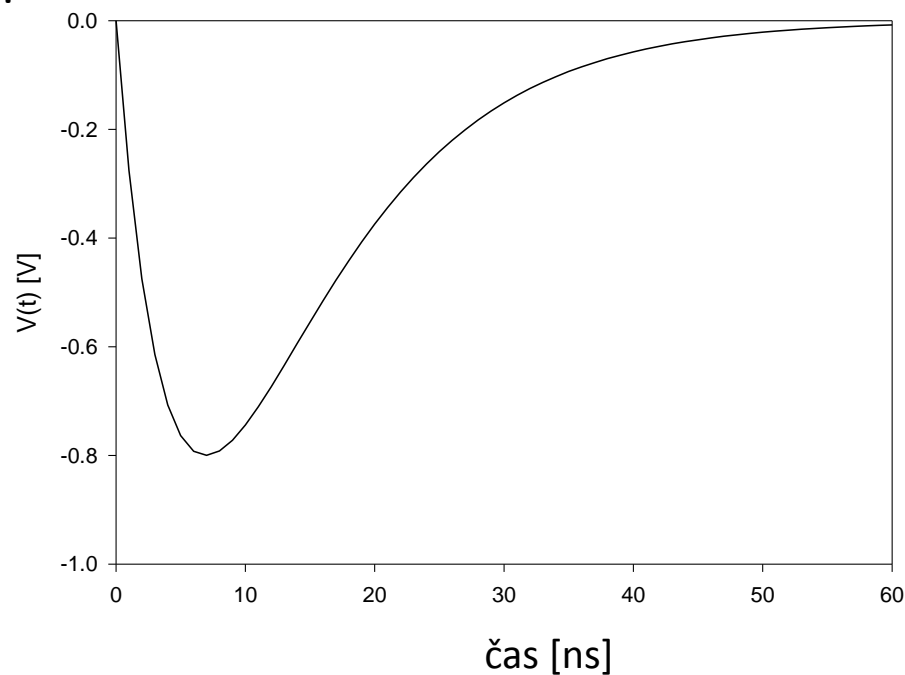
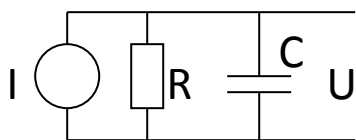
„Compound Poisson statistics“

$k$	$\bar{N}_k$	$\sigma_k^2$
0	$N_0$	0
1		
$k$	$\bar{a}^k N_0$	$\bar{N}_k (1 + \bar{a} + \bar{a}^2 + \dots + \bar{a}^{k-1})$



**Naloga:** Z dvema fotopomnoževalkama štejemo bliske, ki jih povzročajo kozmični mioni v tanku vode. S prvo preštejemo 100 sunkov, z drugo pa 150 sunkov. Izkoristek prve fotopomnoževalke je 1.0%, druge pa 1.1%. Koliko mionov je priletelo v tank? Kolikšna je negotovost meritve? ( $11624 \pm 744$ )

**Naloga:** Nariši potek signala iz fotopomnoževalke scintilacijskega detektorja z ojačenjem  $10^6$ , upornostjo  $1\text{ k}\Omega$  in kapaciteto  $10\text{ pF}$ . Razpadni čas za svetlobo v scintilatorju je  $5\text{ ns}$ . Detektiramo elektron z energijo  $1\text{ MeV}$ . Izkoristek fotokatode je  $0.25\%$ . Za en foton se potroši v povprečju  $25\text{ eV}$  energije.



# Dozimetrija

- **absorbirana doza** [ $\text{Gy} = \text{J/kg}$ ]

$$D = \frac{E_{abs}}{m}$$

- **ekvivalentna doza** (upošteva vrsto sevanja [ $\text{Sv}$ ])

$$H_T = \sum_R w_R D_R$$

- **efektivna doza** (upošteva dovzetnost tkiva [ $\text{Sv}$ ])

$$E = \sum_T w_T H_T$$

# Dozne meje

- Splošna populacija: 1 mSv/leto
- Poklicni: 20 mSv/leto (100 mSv/5let)
- to je dodatna izpostavitve v normalnih razmerah, brez medicinskih preiskav in tretmajev
- Naravno ozadje: 2,4 mSv/leto
- stohastični – deterministični učinki
- Tveganje za raka: 0,05 / Sv, smrtna doza 4 Gy

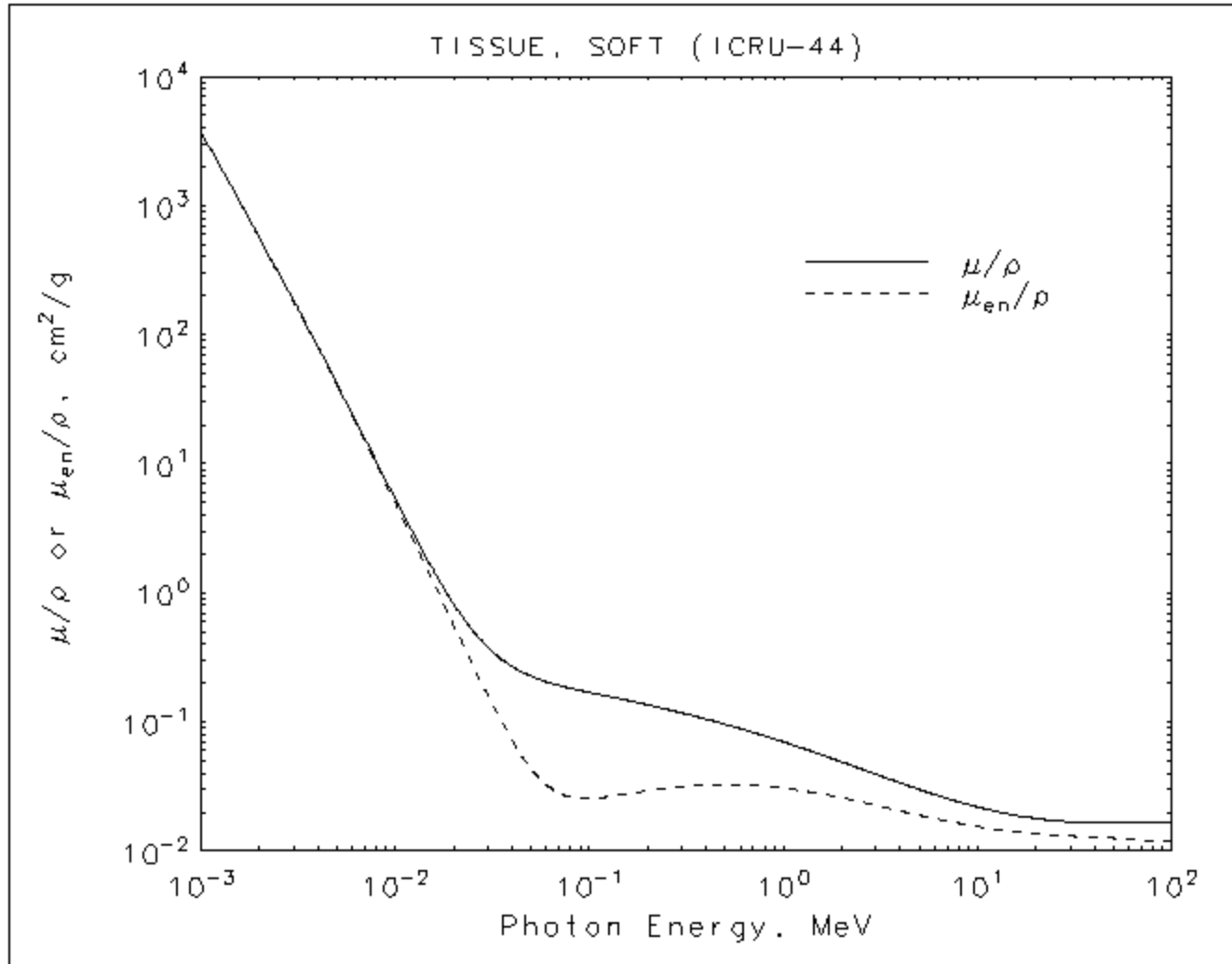
# Koliko je 1 Gy?

**Naloga:** oceni spremembo temperature telesa, če je telo prejelo energijsko dozo 4 Gy in se je vsa energija porabila za segrevanje!

**Naloga:** oceni prejeto dozo 70 kg telesa, v katerem se ustavi malokalibrska krogla z maso 2,4 g! Izstrelek leti s hitrostjo zvoka.

**Naloga:** Izračunaj absorbirano dozo za delavca, ki bi 8 ur delal 5 m stran od nezaščitenega vira  $^{137}\text{Cs}$  z aktivnostjo  $1 \text{ Ci}$  ( $3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ ).  $^{137}\text{Cs}$  seva žarke  $\gamma$  z energijo 662 keV in razvejitvenim razmerjem 0.85. Povprečen človek je visok 180 cm, težak 80 kg in ima obliko valja z radijem 12 cm. Računaj s povprečno potjo skozi valj! (0,75 mGy)

## The Mass Energy-Absorption Coefficient, $\mu_{en}/\rho$



<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>

**Naloga:** Kakšna je ekvivalentna doza v prejšnji nalogi? Kakšna pa bi bila, če bi namesto žarkov  $\gamma$  enako energijo v tkivu pustili hitri nevtroni (npr. iz vira) ali termični nevtroni (npr. iz reaktorja)?

sevanje	utežni faktor $w_R$
fotoni	1
elektroni	1
nevtroni:	
- termični (< 10 keV)	5
- 10 keV - 100 keV	10
- hitri (0.1 - 2 MeV)	20
- 2 MeV - 20 MeV	10
- > 20 MeV	5
protoni (> 2 MeV)	5
delci $\alpha$ , težki ioni	20

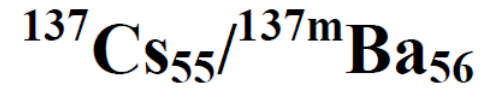
tkivo	utežni faktor $w_T$
gonade	0.20
kostni mozeg	0.12
debelo črevo	0.12
pljuča	0.12
želodec	0.12
mehur	0.05
dojka	0.05
jetra	0.05
požiralnik	0.05
ščitnica	0.05
koža	0.01
pokostnica	0.01
preostanek	0.05
skupaj	1.0



**Naloga:** Kakšna je verjetnost, da bo delavec dobil raka zaradi prejete doze iz prejšnje naloge, če veš, da se pri prejeti dozi 0.1 Sv razvije 500 rakastih obolenj na 100000 ljudi? ( $= 4 \cdot 10^{-5}$ )  
Na katerem organu bi se najverjetneje razvila bolezen?

Ponavadi – dozni račun iz tabeliranih količin, t.i. „faktorji gama“.

# Caesium - 137 / Barium - 137m



Half life: 30.2 years  
 Specific activity: 3.20E+12 Bq.g<sup>-1</sup>


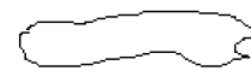

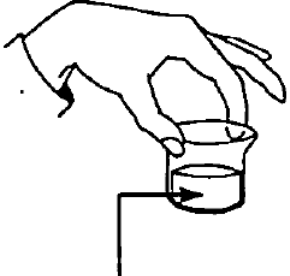

Risk group: 1  
 Risk colour: Red

Main emissions (keV)								
	Gamma or X		Beta (E <sub>max</sub> )		Electrons		Alpha	
	E	%	E	%	E	%	E	%
E1	32	6	512	95	624	8		
E2	36	1	1173	5	656	1		
E3	662	85			660	< 1		
% omitted		< 1		0		< 1		

Exemption levels	
Quantity (Bq)	1E+04
Concentration (Bq.g <sup>-1</sup> )	1E+01

Transport (TBq)	
IAEA ST1 A <sub>1</sub> value	2E+0
IAEA ST1 A <sub>2</sub> value	6E-1

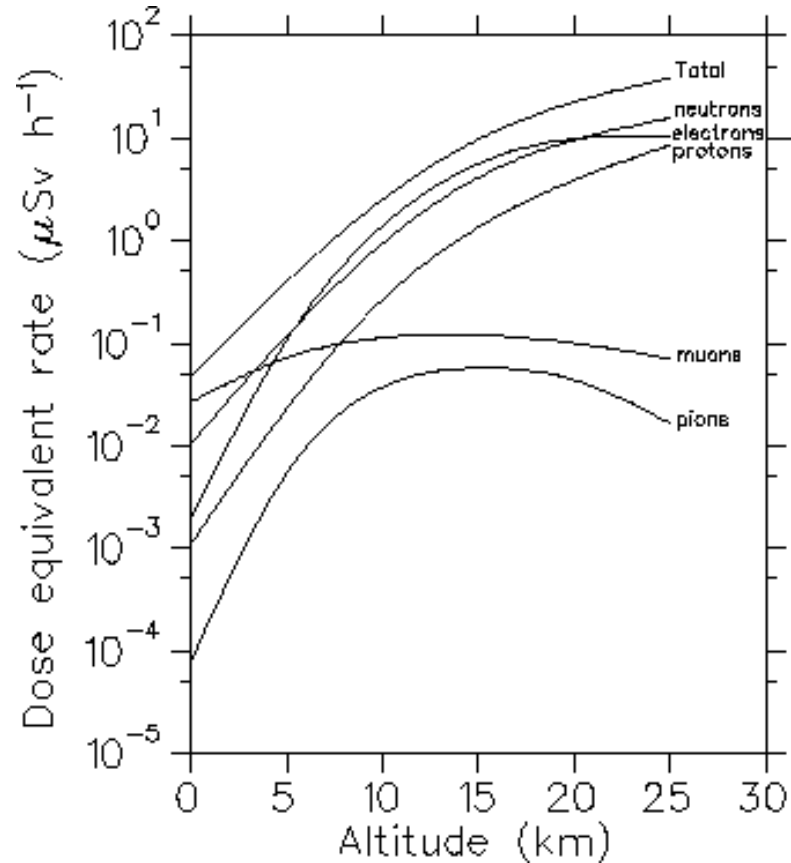
**EXTERNAL EXPOSURE (mSv.h<sup>-1</sup>) for an activity of 1 MBq or 1 MBq.m<sup>-2</sup> (as appropriate)**

Point source (30 cm)	Infinite plane source	10 ml glass vial	Contact with 50 ml glass beaker	Contact with 5 ml plastic syringe												
 Betas, electrons (skin dose) 2.13E-1 Gammas, X rays (deep tissue dose) 1.07E-3	 Betas, electrons (skin) <table border="1"> <tr><td>10 cm</td><td>9.0E-02</td></tr> <tr><td>1 m</td><td>6.0E-03</td></tr> </table> Photons (skin) <table border="1"> <tr><td>10 cm</td><td>3.9E-03</td></tr> <tr><td>1 m</td><td>2.5E-03</td></tr> </table> Photons (deep dose) <table border="1"> <tr><td>10 cm</td><td>3.7E-03</td></tr> <tr><td>1 m</td><td>2.4E-03</td></tr> </table>	10 cm	9.0E-02	1 m	6.0E-03	10 cm	3.9E-03	1 m	2.5E-03	10 cm	3.7E-03	1 m	2.4E-03	 100 cm 9.19E-5	 3.30E-1	 1.66E+0
10 cm	9.0E-02															
1 m	6.0E-03															
10 cm	3.9E-03															
1 m	2.5E-03															
10 cm	3.7E-03															
1 m	2.4E-03															

The values above do not include Bremsstrahlung radiation.

**Naloga:** Rentgenska cev seva vzporeden curek fotonov z gostoto  $10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Pri mamografiji uporabljajo molibdenovo anodo, ki seva karakteristične žarke-X z energijo 20 keV. Izračunaj efektivno dozo na pacientko. Obsevani volumen tkiva ima obliko kocke z dolžino stranice 10 cm, čas slikanja pa je 1 ms. (16  $\mu\text{Sv}$ )

**Naloga:** Kakšna je verjetnost, da bo pilot Boeinga 747, ki leti 2000 ur na leto, dobil raka zaradi ionizirajočega sevanja po 20 letih službe. Kakšno efektivno ekvivalentno dozo dobi astronaut, ki preživi pol leta na mednarodni vesoljski postaji s hitrostjo doze  $50 \mu\text{Sv/h}$ ? (0,7%, 1,1%)



**Naloga:** Ob černobilski nesreči je v Belorusiji 10000 ljudi popilo vsak po 5 l kontaminiranega mleka s specifično aktivnostjo 200000 Bq/l  $I-131$ , ki razpada s sevanjem  $\beta$  s povprečno energijo 180 keV in razpolovnim časom 8 dni. V ščitnico, ki tehta 20 g, se naloži približno tretjina zaužitega joda, iz nje pa se izloča z biološkim razpolovnim časom 100 dni.

Koliko rakastih obolenj pričakujemo med temi ljudmi zaradi nesreče? (11)

## Pogostost raka ščitnice pri otrocih (Černobil)

