

# Fizikalna merjenja 2 – vaje 2014

Klemen Bučar, F2 IJS

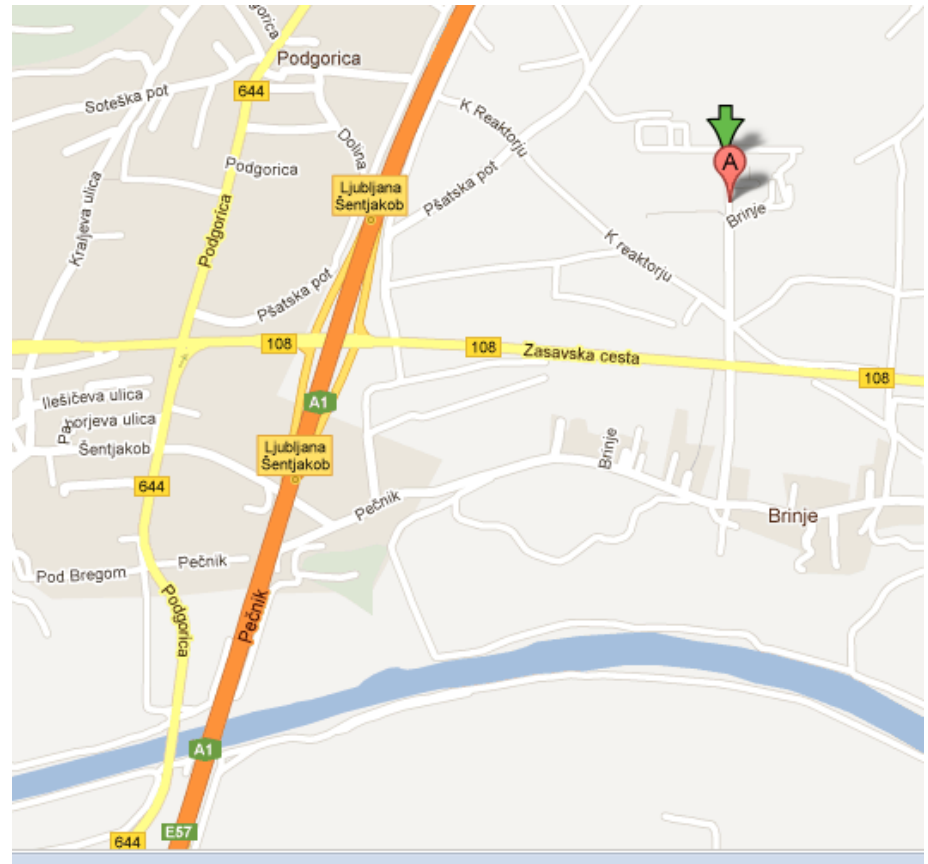
# Kontakt

[klemen.bucar@ijs.si](mailto:klemen.bucar@ijs.si)

Telefon: 01-5885275

Pisarna: RCP, Brinje,

Pospeševalnik



# Program dela

- Pospeševalniki (žarkovna optika)
- Zgradba atoma
- Interakcija delcev s snovjo
- Detektorji ionizirajočega sevanja  
(plinski, polprevodniški, scintilacijski)
- Ločevanje delcev
- Dozimetrija
- Obisk RCP

# Režim dela

- Vaje pred tablo
- 2 kolokvija + pisni izpit iz vaj (DATUMI!)
- Spletna učilnica

## Literatura:

1. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer
2. Cvelbar, *Merjenje ionizirajočega sevanja*
3. Wilson, *An Introduction to Particle Accelerators*, Oxford
4. Lee, *Accelerator Physics*
- (5. Ž. Šmit, *Spektroskopske metode s pospešenimi ioni*)

# Energije reakcij

- Atomska in mol. fizika: 0.1 eV .. 100 keV
- Fizika jedra: 0,1 MeV .. 100 MeV
- F. osnovnih delcev GeV, TeV, PeV,...

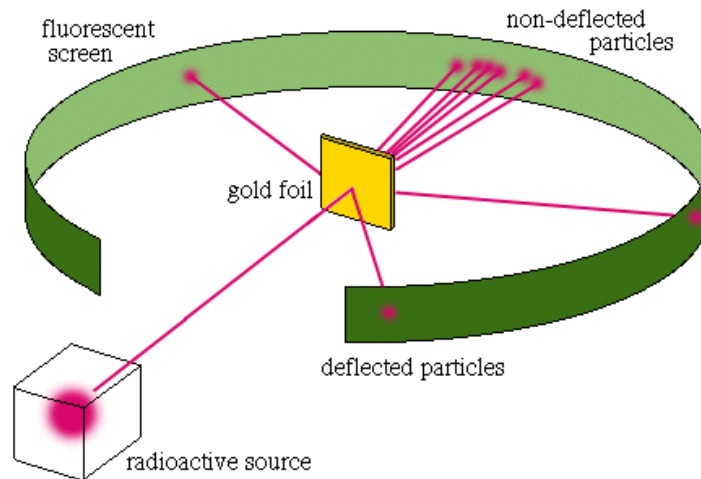
Orodje: POSPEŠEVALNIKI  
(uporaba v fiziki in medicini)

# Ideja pospeševalnika

1. Izvir
2. Pospeševanje
3. Transport žarka
4. Tarča
5. Spektrometri

# Naravni pospeševalniki

- $\alpha$  delci (Ra, Th),  $\approx 5$  MeV, 1911 Rutherford



- kozmični žarki („galaktični posp.“) do  $10^{20}$  eV

# Pospeševalniki

## Enosmerni (elektrostatični)

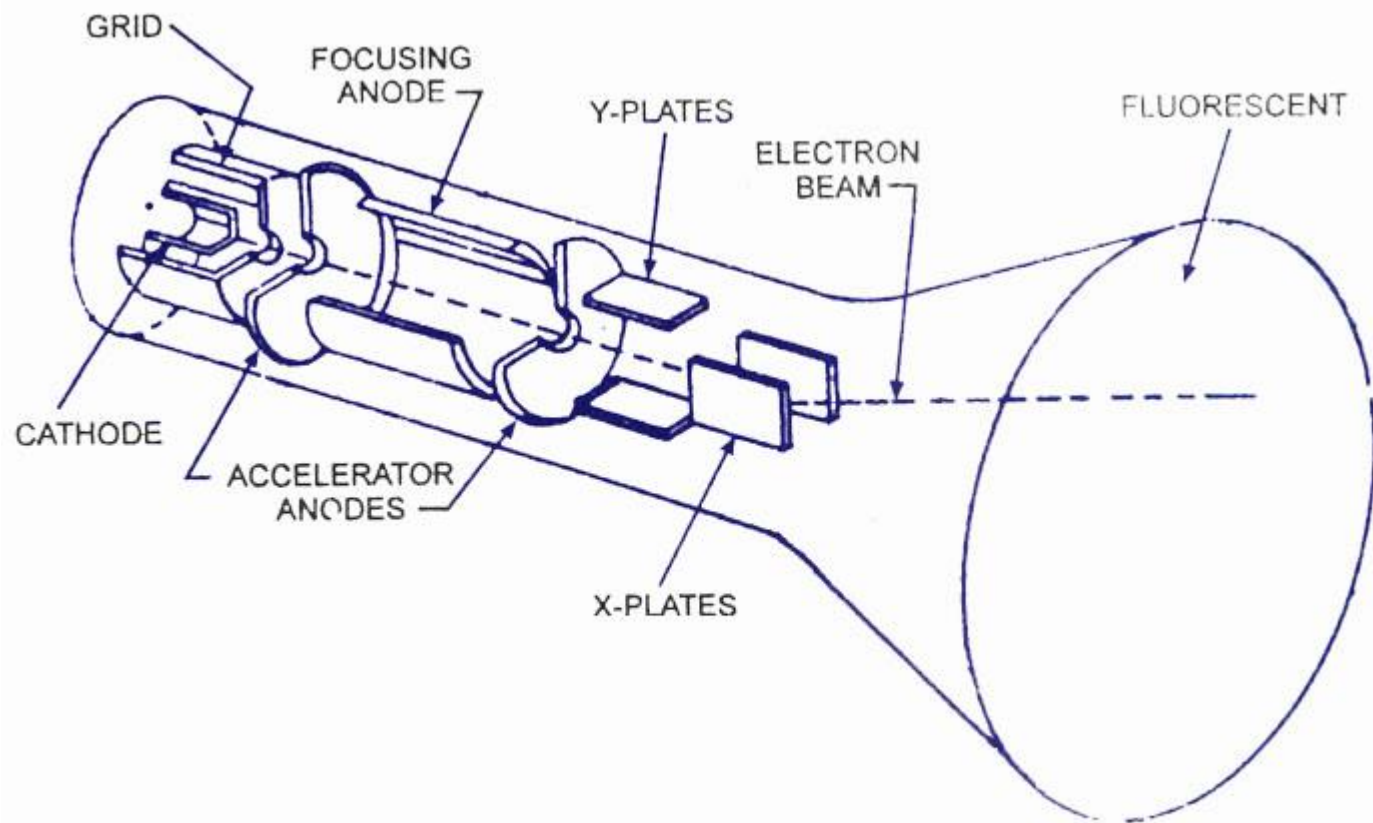
- katodna cev (CRT)
- rentgenska cev
- van de Graaffov posp.
- tandentron
  
- stalen žarek

## Izmenični

- Linac
- ciklotron
- sinhrotron
- ...
  
- gruče

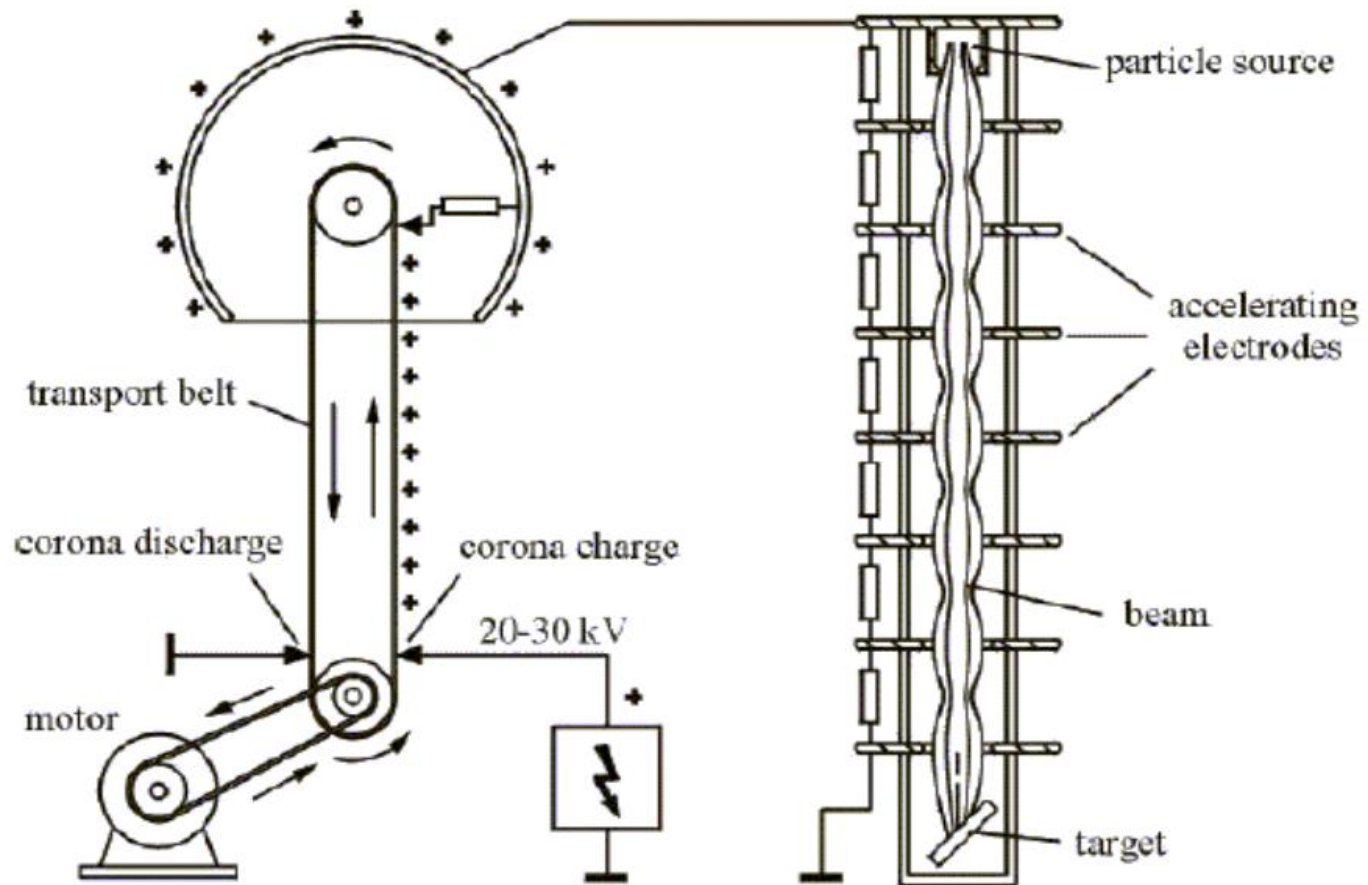


# CRT



*Cathode Ray Tube*

# van de Graaff



# Naloga za ogrevanje

## van de Graaffov pospeševalnik

- Največja napetost: 15 MV.
- Elektrode po 50 kV.
- $R_1 = 500 \text{ M}\Omega$ .

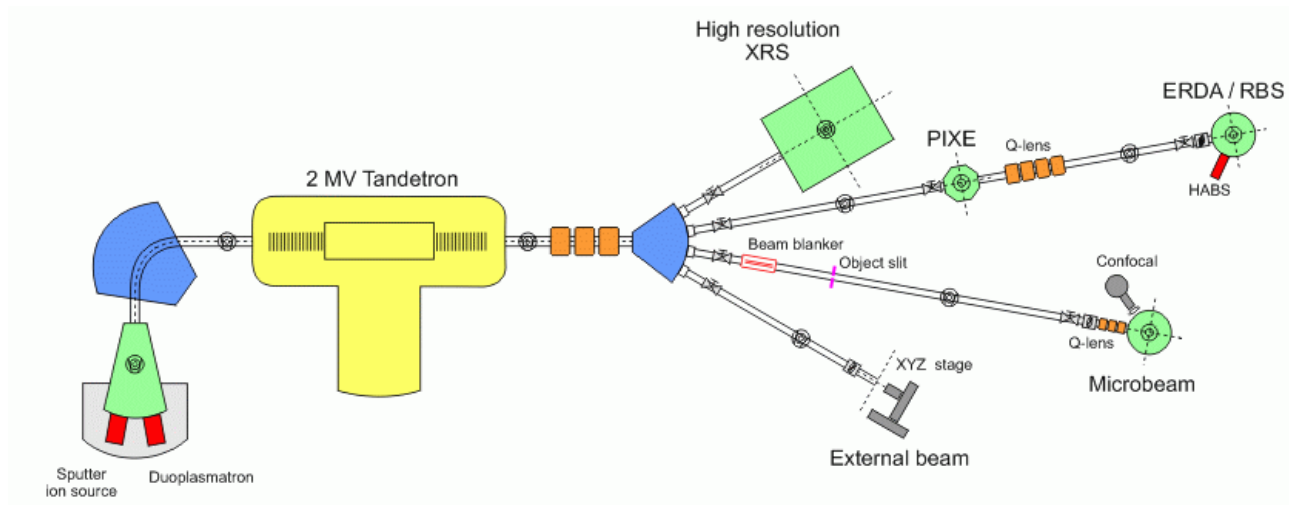
Kolišen tok teče po uporih? Kolikšna moč se troši? Kolikšna moč se troši v tarči, če se protoni popolnoma ustavijo? Tok protonov je  $10 \mu\text{A}$ .

# Tandetron

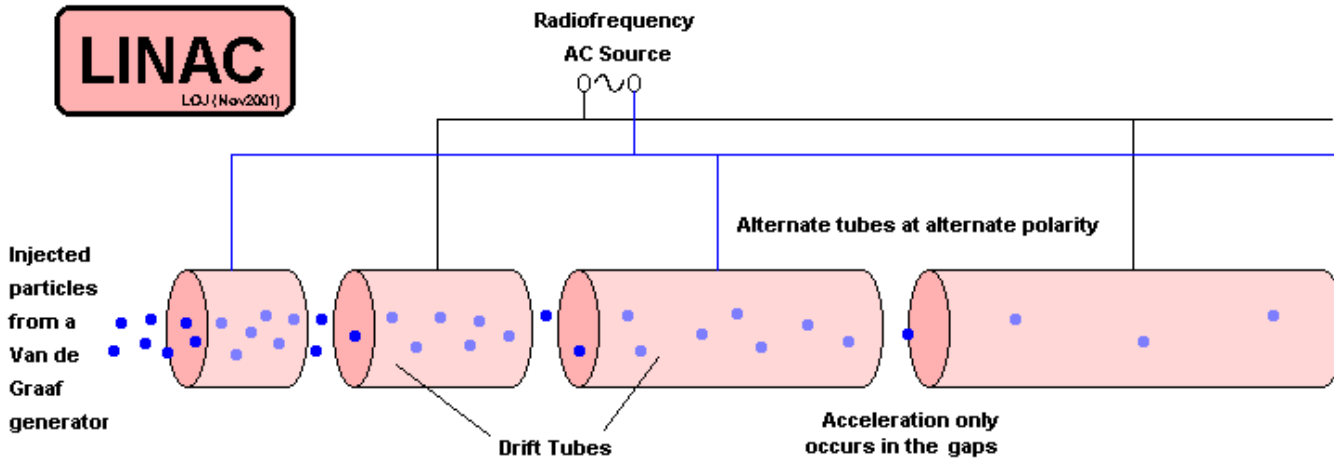
IJS – ionski pospeševalnik

- 2 MV
- 4 eksperimentalne linije
- predviden ogled

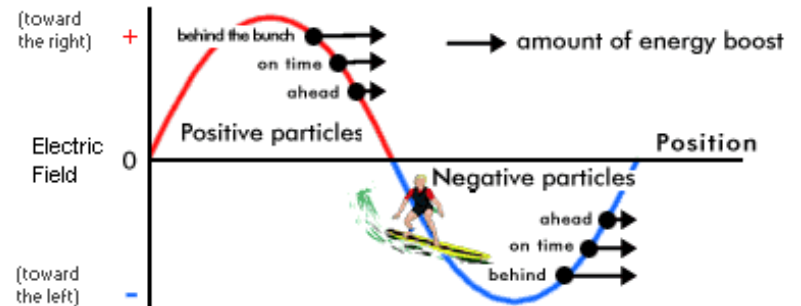
<http://www.rcp.ijs.si/mic/>



# Linearni pospeševalnik

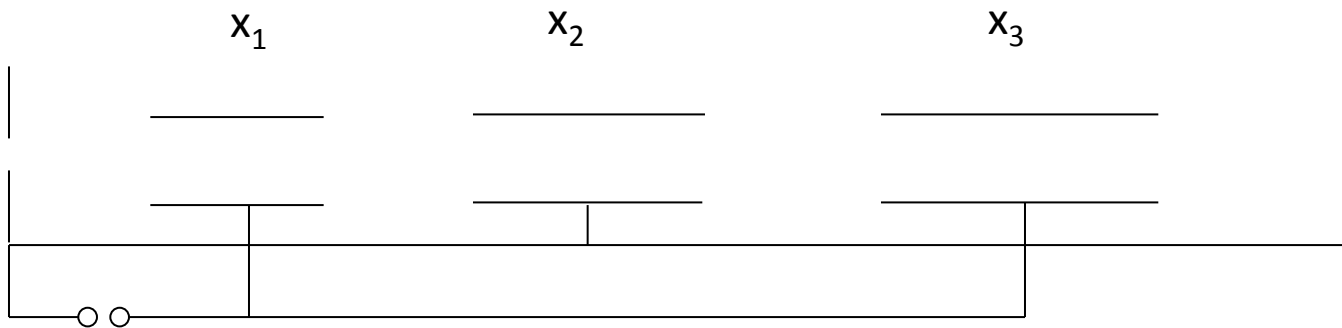


## SLAC @ Stanford (50GeV, 3,2km)

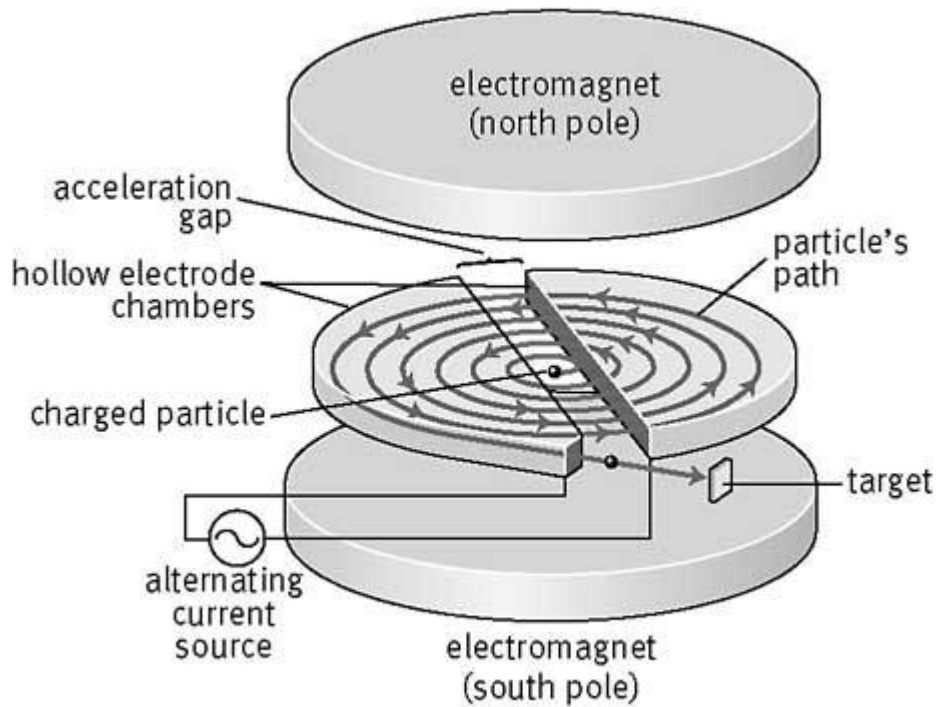


# Naloga

Z linearnim pospeševalnikom pri frekvenci 0.5 Ghz pospešujemo elektrone od 100 keV do 1.3 MeV. Pospeševalnik ima tri votline. Kolikšne naj bodo njihove dolžine?



# CIKLOTRON

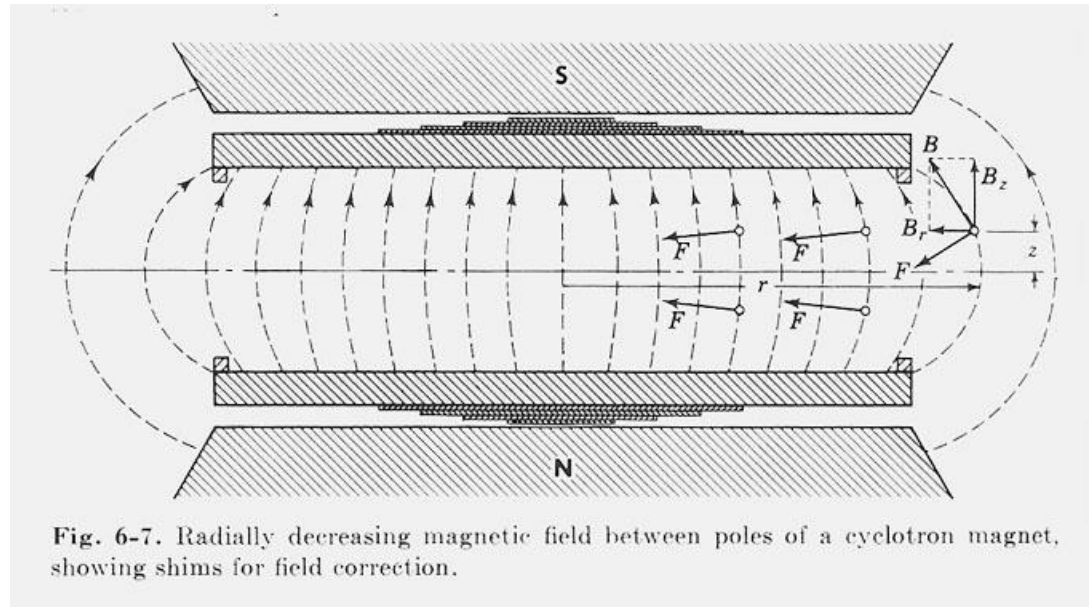


Precision Graphics

- Ciklotronska frekvenca
- Gibanje v osi z?

# Šibko fokusiranje

Magnetno polje  
dobi majhno  
radialno  
komponento,  
ki lahko  
fokusira v smeri  
osi  $z$  in radija.





# Lorentzova sila

$$\frac{d}{dt} m\gamma\vec{v} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Kartezične:

$$X: \quad \frac{d}{dt} m\gamma\dot{x} = e(E_x + \dot{y}B_z - \dot{z}B_y)$$

$$Y: \quad \frac{d}{dt} m\gamma\dot{y} = e(E_y + \dot{z}B_x - \dot{x}B_z)$$

$$Z: \quad \frac{d}{dt} m\gamma\dot{z} = e(E_z + \dot{x}B_y - \dot{y}B_x)$$

# Lorentzova sila

$$\frac{d}{dt} m\gamma\vec{v} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Cilindrične:

$$r: \frac{d}{dt} (m\gamma\dot{r}) - m\gamma\dot{\varphi}^2 r = e(E_r + r\dot{\varphi}B_z - \dot{z}B_\varphi)$$

$$\varphi: \frac{1}{r} \frac{d}{dt} (m\gamma r^2 \dot{\varphi}) = e(E_\varphi + \dot{z}B_r - \dot{r}B_z)$$

$$z: \frac{d}{dt} (m\gamma\dot{z}) = e(E_z + \dot{r}B_\varphi - r\dot{\varphi}B_r)$$

# Šibko fokusiranje v smeri z ( $e^-$ )

- Polje z majhno radialno komponento:

$$B_r = \frac{\partial B_r}{\partial z} z$$

- Enačba gibanja:

$$\ddot{z} + n \omega_c^2 z = 0$$

Indeks polja:  $n = - \frac{r_0}{B_z} \frac{\partial B_r}{\partial z}$ , stabilno pri  $n > 0$

(predznak je odvisen od naboja in smeri!)

# Določanje tira

$$z(t) \rightarrow z(s), \dot{z} = z' v, \ddot{z} = z'' v^2$$

Tir reši:  $z'' + \frac{n}{r_0^2} z = 0$ , harmonično gibanje

Matrični zapis:

$$\begin{bmatrix} z \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(s/s_z) & s_z \sin(s/s_z) \\ -1/s_z \sin(s/s_z) & \cos(s/s_z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_0 \\ z_0' \end{bmatrix}$$

$$s_z = r_0 / \sqrt{n}$$

„sektorski magnet“

# Podobno velja za radialno gibanje

- polje:  $B_z = B_0 + \frac{\partial B_z}{\partial r} (r - r_0) = B_0(1 - n \frac{\rho}{r_0})$
- gibalna enačba:  $\ddot{\rho} + (1 - n) \frac{v^2}{r_0^2} \rho = 0$
- harmonično gibanje, če  $n < 1$ .
- matrični zapis:

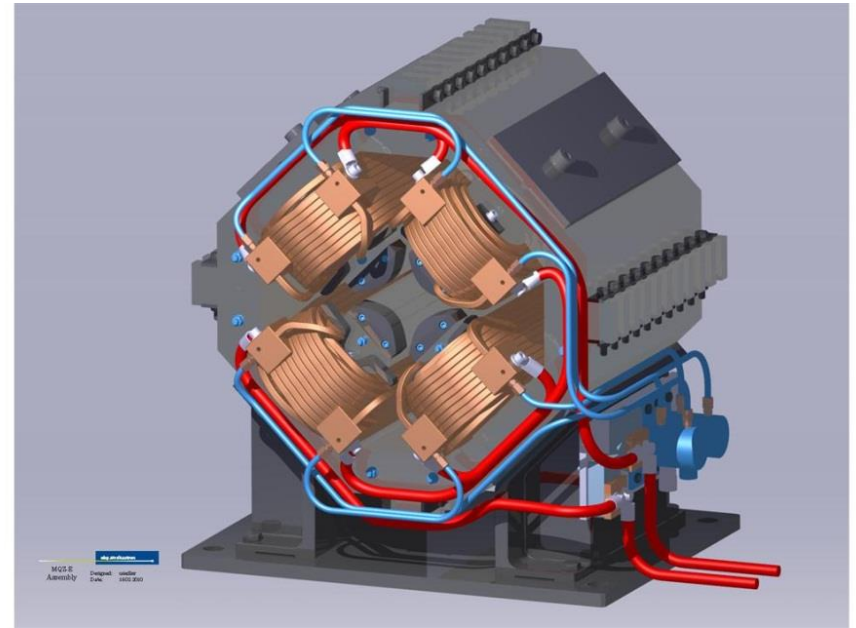
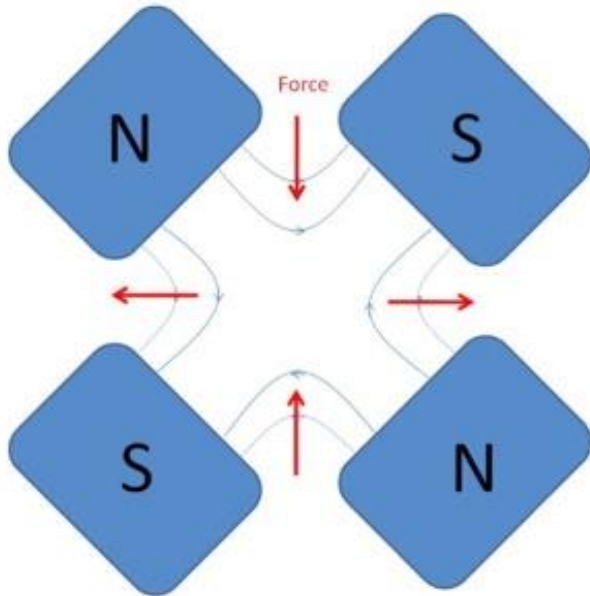
$$\begin{bmatrix} \rho \\ \rho' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(s/s_r) & s_r \sin(s/s_r) \\ -1/s_r \sin(s/s_r) & \cos(s/s_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_0 \\ \rho_0' \end{bmatrix}$$
$$s_r = r_0 / \sqrt{1 - n}$$

# Odvisnost polja za $e^-$

$$B_z = B_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^n$$

- $B_r = - \frac{n B_0}{r_0} z$
- $B_z = B_0 \left( 1 - n \frac{r-r_0}{r_0} \right)$

# Močno fokusiranje (kvadrupolni magnet)



- V eni smeri fokusira, v drugi defokusira
- V parih dosežemo fokusiranje

# Kvadrupolno polje

- $B_x = \frac{\partial B_x}{\partial y} y, B_y = \frac{\partial B_y}{\partial x} x$
- Iz  $\text{rot}(\vec{B}) = 0$  dobimo  $\frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{\partial B_y}{\partial x} = g$
- enačbi gibanja:  $m\gamma\ddot{x} = -e\dot{z}B_y, m\gamma\ddot{y} = e\dot{z}B_x$
- tir:  $x'' + k^2x = 0, y'' - k^2y = 0$

$$k = \sqrt{eg/p}, p = m\gamma v$$



# Matrika kvadrupolnega magneta

$$\text{Smer X: } \begin{bmatrix} \cos(kz) & 1/k \sin(kz) \\ -k \sin(kz) & \cos(kz) \end{bmatrix}$$

$$\text{Smer Y: } \begin{bmatrix} \cosh(kz) & 1/k \sinh(kz) \\ k \sinh(kz) & \cosh(kz) \end{bmatrix}$$

Tanek kvadrupolni magnet,  $kz \ll 1$ , debelina  $z \rightarrow 0$ :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \pm k^2 z & 1 \end{bmatrix}$$

# Tanka leča

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \pm 1/f & 1 \end{bmatrix}, \quad -\frac{1}{f} \text{ zbiralna, } \frac{1}{f} \text{ razpršilna}$$

Prazen prostor dolžine  $l$

$$\begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

# Dva kvadrupolna magneta

$f_2, f_1$ , razdalja  $d$ , ( $f > 0$ , zbiralna leča)

$$\begin{bmatrix} 1 - d/f_2 & d \\ -\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} + \frac{d}{f_1 f_2} & 1 - d/f_1 \end{bmatrix}$$

1.  $f_2 < 0, f_1 > 0, |f_1| = |f_2| = f$

2.  $f_2 > 0, f_1 < 0, |f_1| = |f_2| = f$

Neto fokusiranje v obeh smereh, gorišči pa NE sovpadata.

# Kje je gorišče za vzporeden žarek?

- lečo obdamo s praznim prostorom  $b$
- preslikamo točko  $\begin{bmatrix} y \\ 0 \end{bmatrix}$  in zahtevamo, da žarek seka os  $x$  za vsak  $y$

$$1. \quad -bd + f(f - d) = 0 \rightarrow b = \frac{f(f-d)}{d}$$

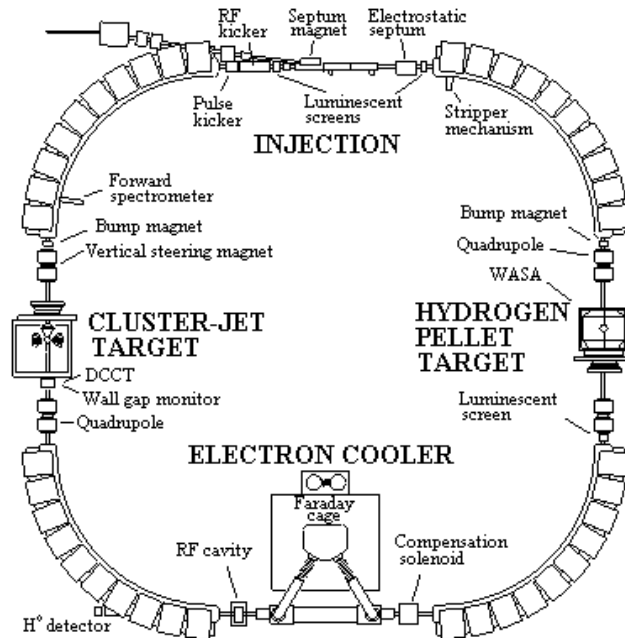
$$2. \quad -bd + f(f + d) = 0 \rightarrow b = \frac{f(f+d)}{d}$$

Gorišči ne sovpadata!

# SINHROTRONI

pospeševanje, fokusiranje, zavoje, potovanje

CERN, Ženeva



Uppsala

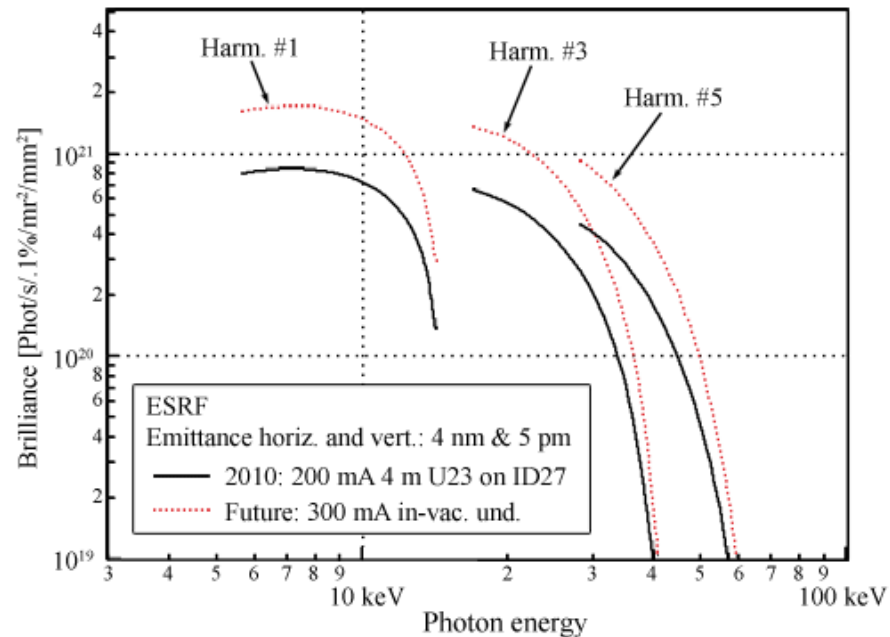
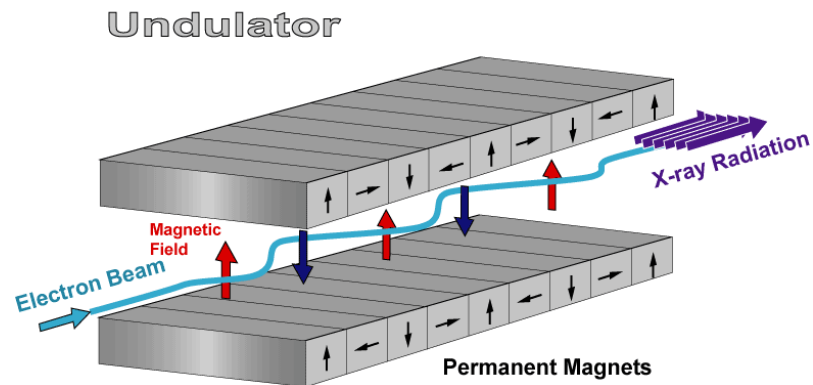
[http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_synchrotron\\_radiation\\_facilities](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_synchrotron_radiation_facilities)

# Sinhrotroni kot vir fotonov

- Izkoriščamo sevanje pospešenih delcev
- Magneti, wigglerji, undulatorji

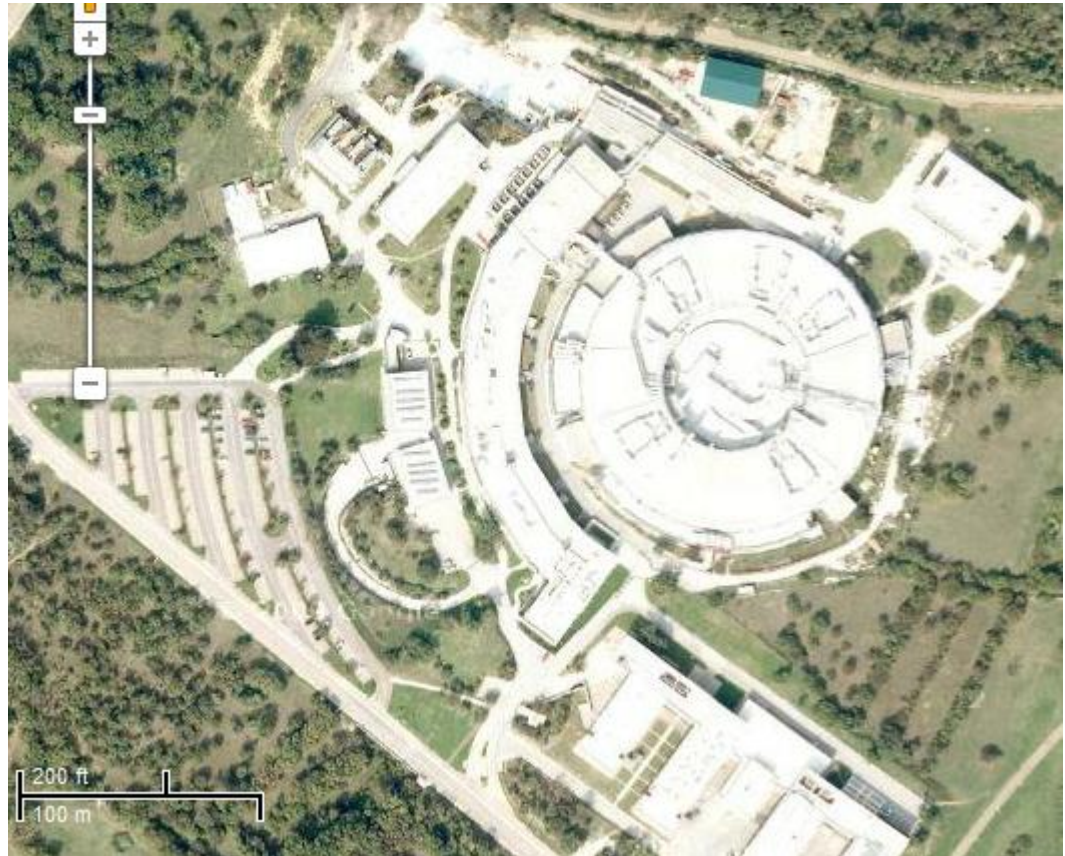
Rezultat:

- koheretna polarizirana svetloba
- zvezen spekter, IR – žarki X (50keV)
- veliko aplikacij

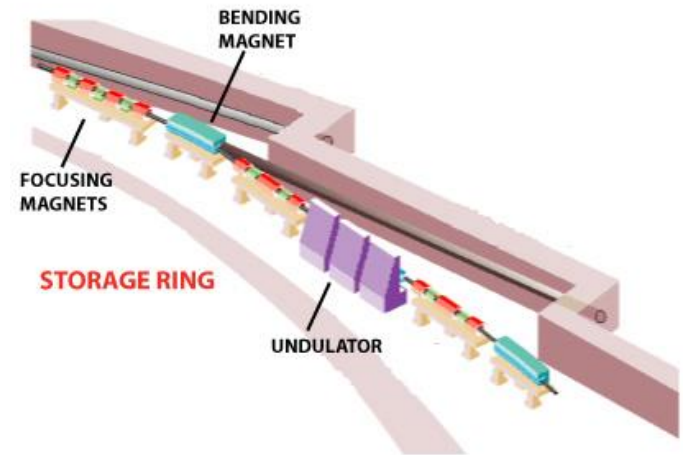
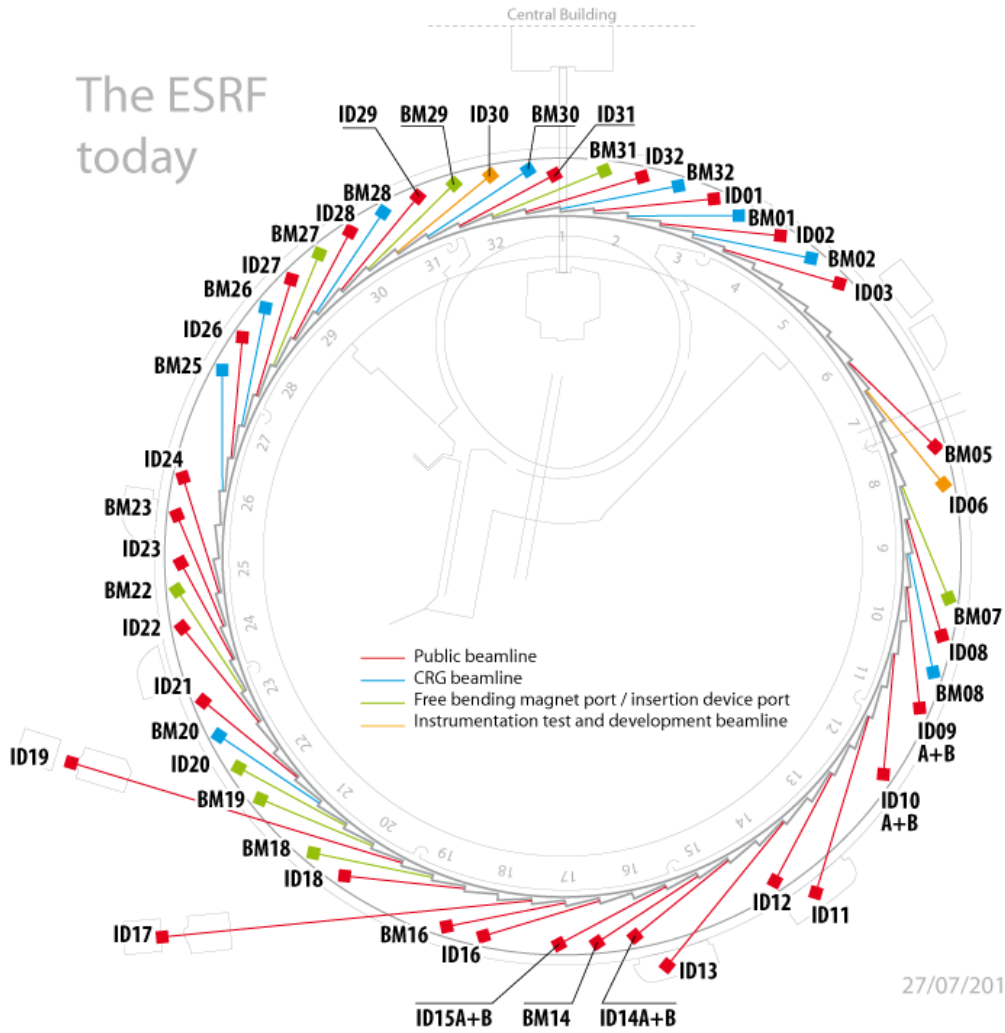


# ELETTRA

- 2,4 GeV
- obseg 260m
- UV, X žarki
- 25 linij
- FEL



# The ESRF today



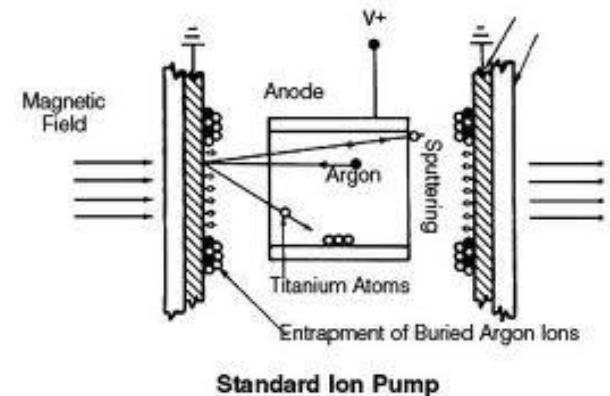
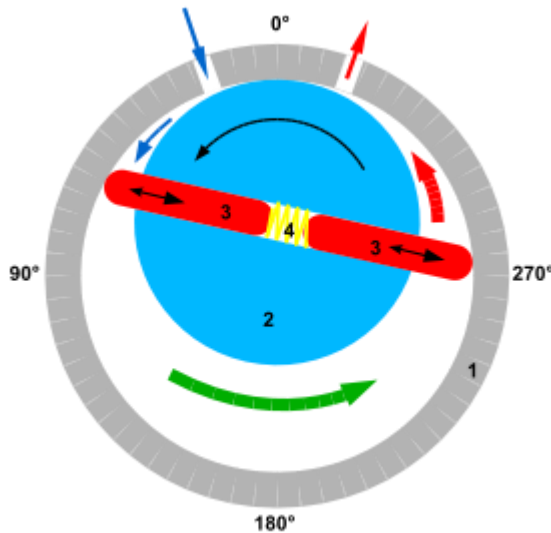


# Vakuuum

- daljša prosta pot molekul plina
- manjši fluks molekul na površino
- odstranjevanje nečistoč s površine
- omogoči visoke napetosti
- v praksi merimo v mbar (hPa)
- HV ( $10^{-6}$ ), UHV ( $10^{-9}$ )

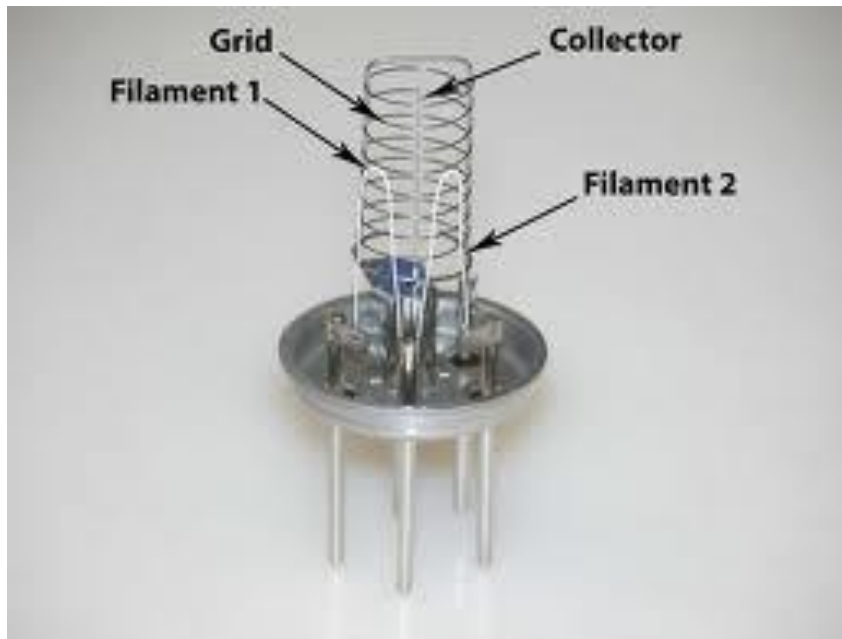
# Vakuumske črpalke

- rotacijske črpalke (grobe, 1mbar)
- turbočrpalke ( $10^{-3} - 10^{-11}$ )
- ionske ( $10^{-5} - 10^{-11}$ )

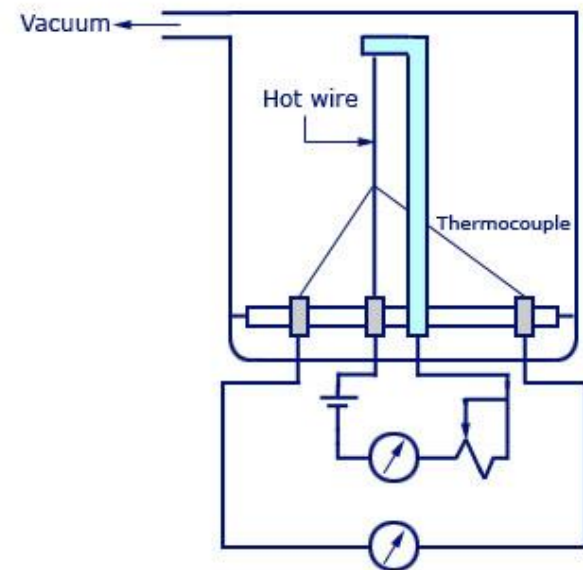


# Merjenje vakuuma

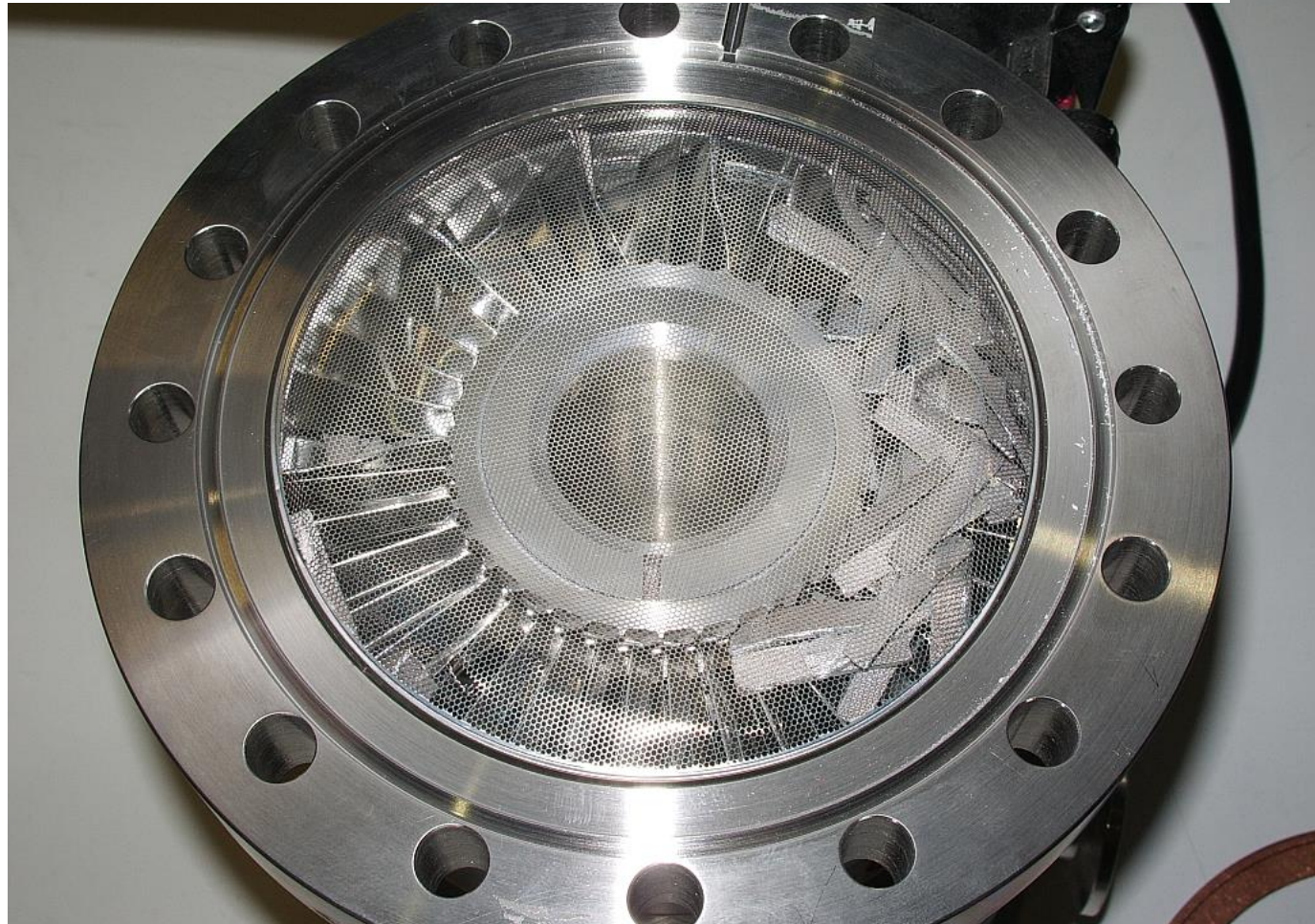
- termočlen ( $10^{-3}$ , Pirani  $10^{-5}$ )
- ionski ( $10^{-11}$ )



Thermocouple Type Vacuum Gauge



**IMPORTANT:** If you don't know what you are doing ask someone, opening the wrong valve at the wrong time can have catastrophic and unrecoverable effects on the system!



# Vakuum

Naloga: določi povprečno prosto pot molekul dušika pri različnih tlakih!

1000 mbar

1 mbar

$10^{-7}$  mbar

$10^{-11}$  mbar

$$k_B = 8,6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$R = 8314 \frac{\text{J}}{\text{kmol K}} = 5,2 \cdot 10^{22} \frac{\text{eV}}{\text{kmol K}}$$

$$R = k_B N_A$$

TABLE 3.1

 $n$ ,  $\lambda$ , and  $J$  at various  $p$  for  $N_2$  at 295 K  $d = 0,38$  nm

$p$ mbar	$n$ ( $m^{-3}$ )	$\lambda$	$J$ ( $cm^{-2} s^{-1}$ )
$10^3 = 1$ atm	$2.5 \times 10^{25}$	64 nm	$2.9 \times 10^{23}$
1	$2.5 \times 10^{22}$	64 $\mu m = 0.064$ mm	$2.9 \times 10^{20}$
$10^{-3}$	$2.5 \times 10^{19}$	64 mm	$2.9 \times 10^{17}$
$10^{-6}$ , HV	$2.5 \times 10^{16}$	64 m	$2.9 \times 10^{14}$
$10^{-10}$ , UHV	$2.5 \times 10^{12}$	640 km	$2.9 \times 10^{10}$

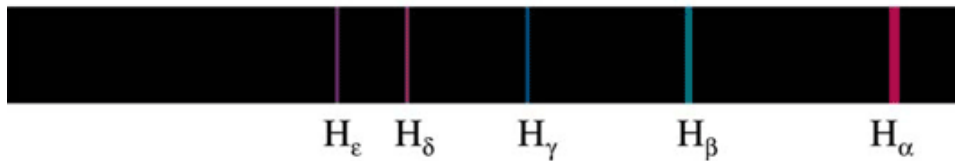
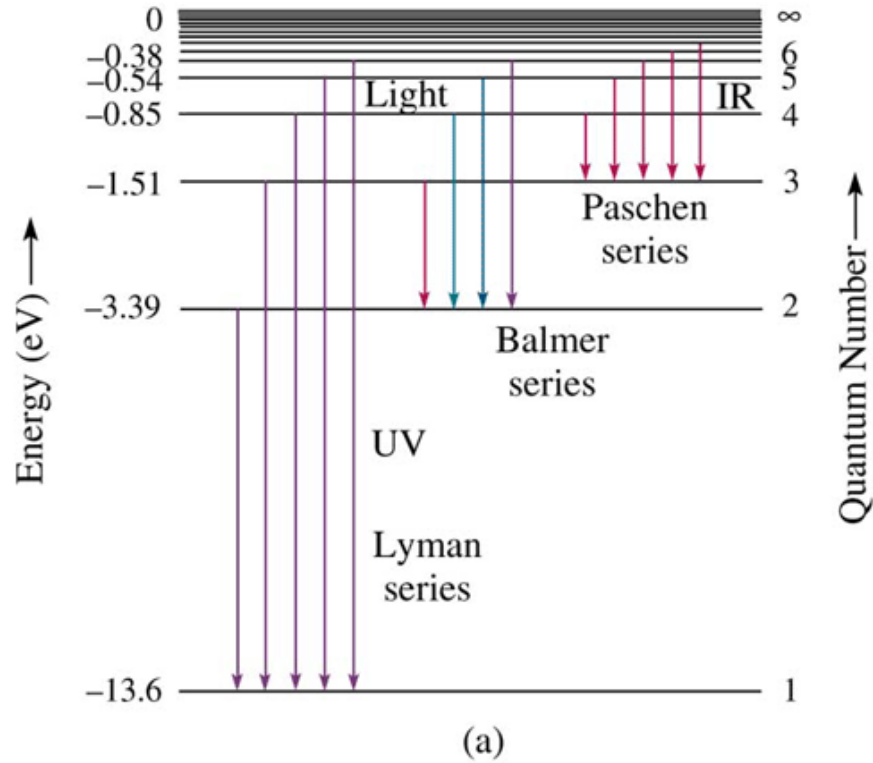
Naloga: primerjaj hitrost dušikove molekule z obodno hitrostjo lopatic turbočrpalke polmera 7cm, ki se vrti s frekvenco 600 Hz!

Naloga: koliko časa potrebuje črpalka ( $S=60\text{l}/\text{min}$ ), da v prostornini 50l vzpostavi tlak 1mbar? Računaj, da je minimalni tlak precej manjši od 1mbar.

# Atomska fizika



# Vodikov atom



(b)

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2}$$

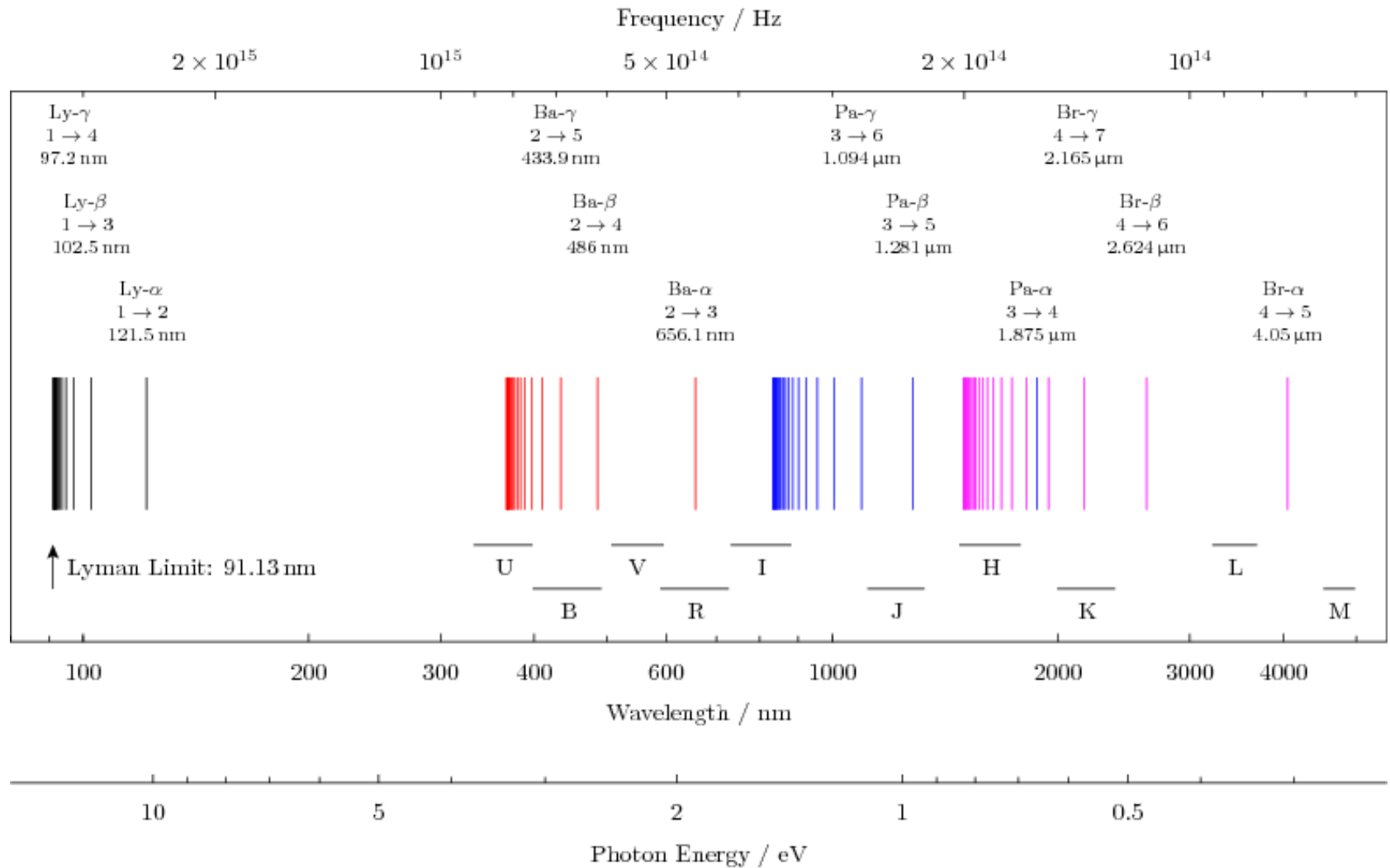
$$E_0 = 13,6058 \text{ eV}$$

$$a_0 = 53 \text{ pm}$$

$$a_n = a_0 n^2$$

$$E_n = -E_0 \frac{Z^2}{n^2}$$

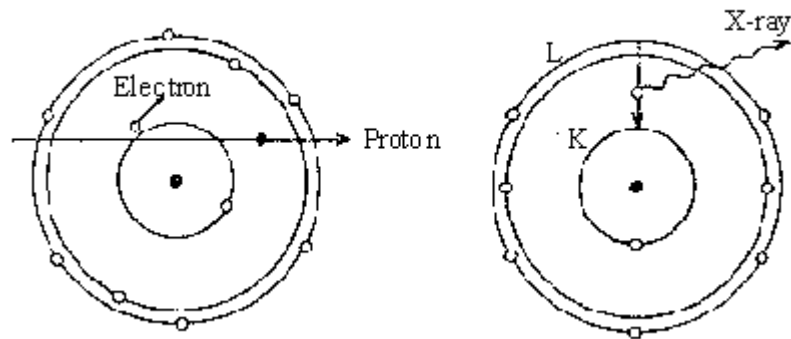
# Prehodi med stanji



# Uporaba: rentgenska spektroskopija

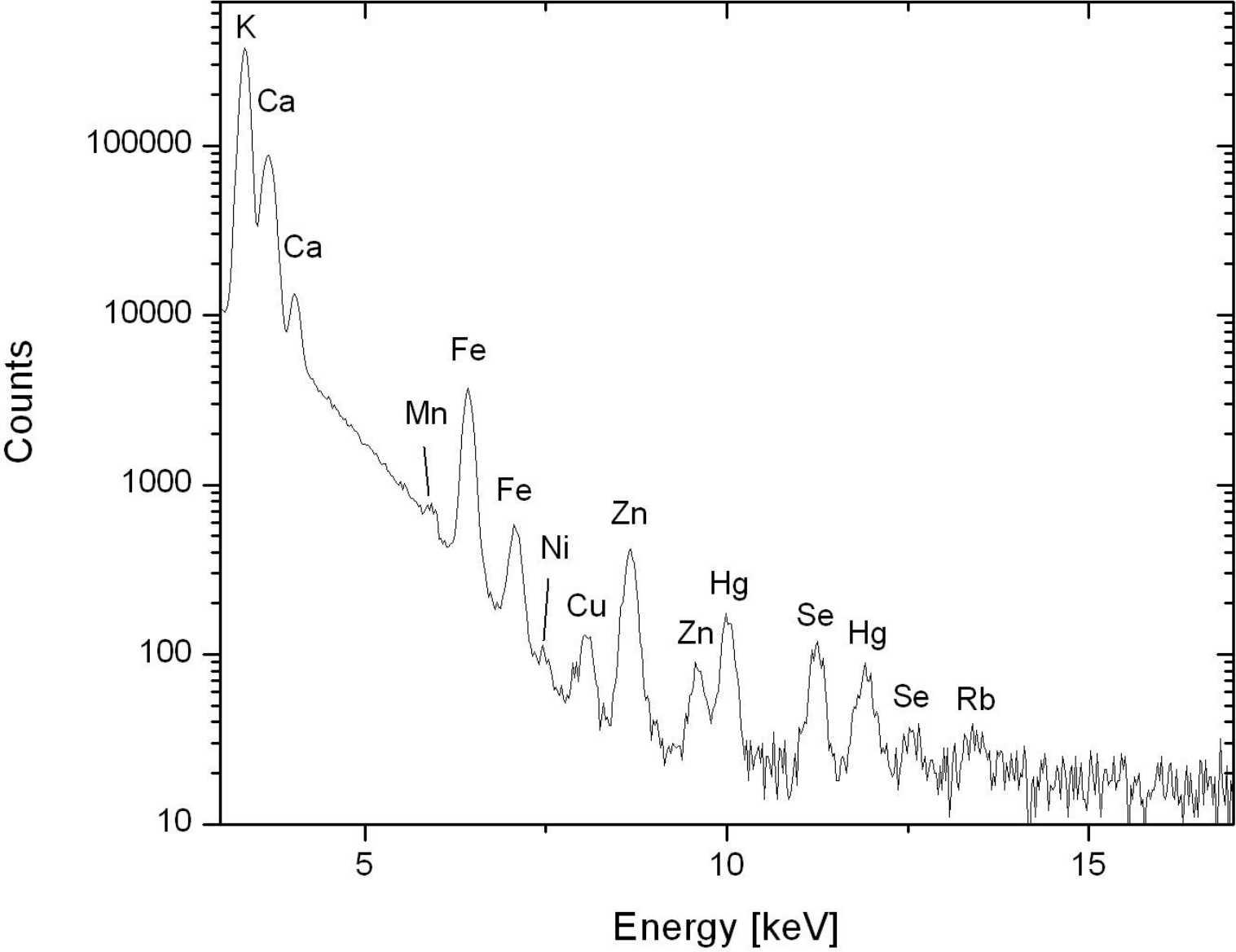
Analizni tehniki:

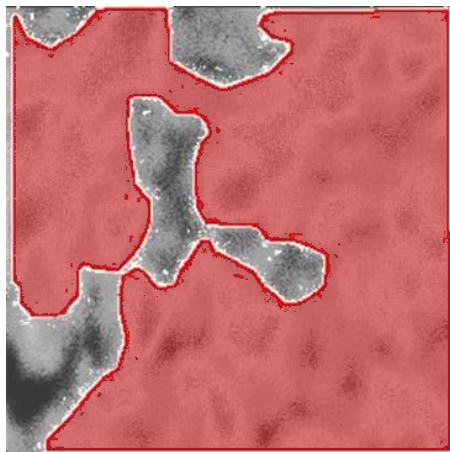
1. absorpcijska,
2. emisijska, npr. PIXE.





Germanium (iGe) X-ray spectrum (324003, whole)

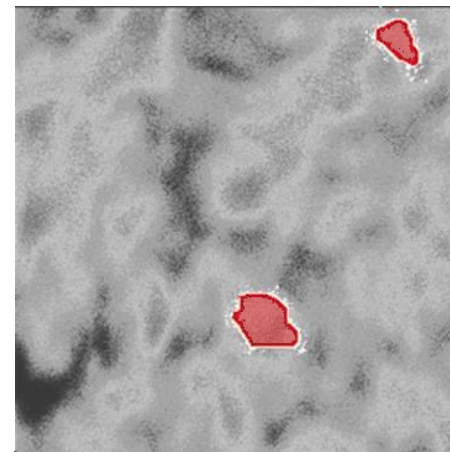




Celota

**Analiza  
koncentracij  
celotnega  
vzorca**

**Analiza  
koncentracij  
Hg gnezd**



Hg gnezda 1-2

**Hipofiza**

**File nr.  
324014**

Elementi	Konc [ppm]	Stat.err. %	Iod [ppm]
<b>K</b>	9675.8	0.06	4.8
<b>Ca</b>	1552.7	0.84	22.5
<b>Mn</b>	8.5	9.12	1.4
<b>Fe</b>	118.8	0.84	1.2
<b>Ni</b>	0.2	280.12	0.9
<b>Cu</b>	28.6	2.47	0.8
<b>Zn</b>	67.6	1.56	0.9
<b>Se</b>	53.6	3.93	2.7
<b>Rb</b>	17.0	19.26	5.8
<b>Hg</b>	138.8	2.93	4.7

Elementi	Konc [ppm]	Stat.err. %	Iod [ppm]
<b>K</b>	10501.0	0.3	20.5
<b>Ca</b>	1647.1	1.69	47.1
<b>Mn</b>	14.1	34.51	8.7
<b>Fe</b>	156.5	4.47	6.7
<b>Ni</b>	3.2	116.65	6.5
<b>Cu</b>	48.3	11.82	7.5
<b>Zn</b>	74.6	10.3	9.8
<b>Se</b>	201.4	11.67	31.3
<b>Rb</b>	58.6	46.55	35.6
<b>Hg</b>	606.6	8.03	37.1

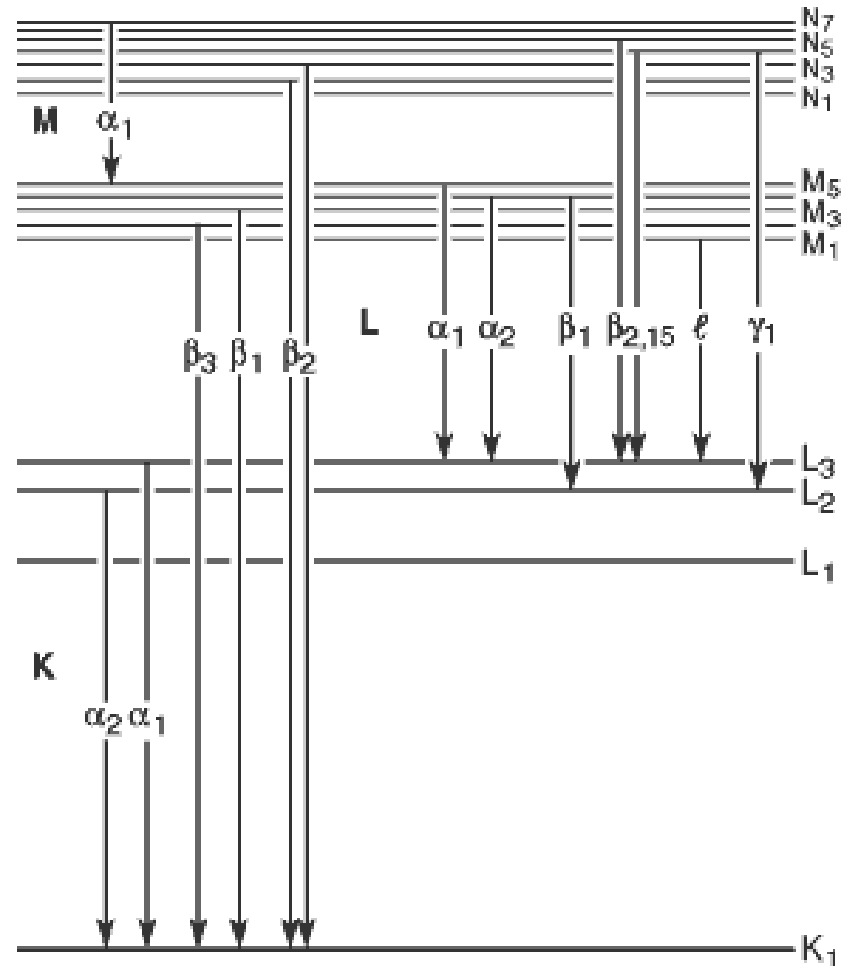
## Naloga: vsaj koliko energije potrebujemo za ionizacijo 1g argona-40?

*Table 1-1. Electron binding energies, in electron volts, for the elements in their natural forms.*

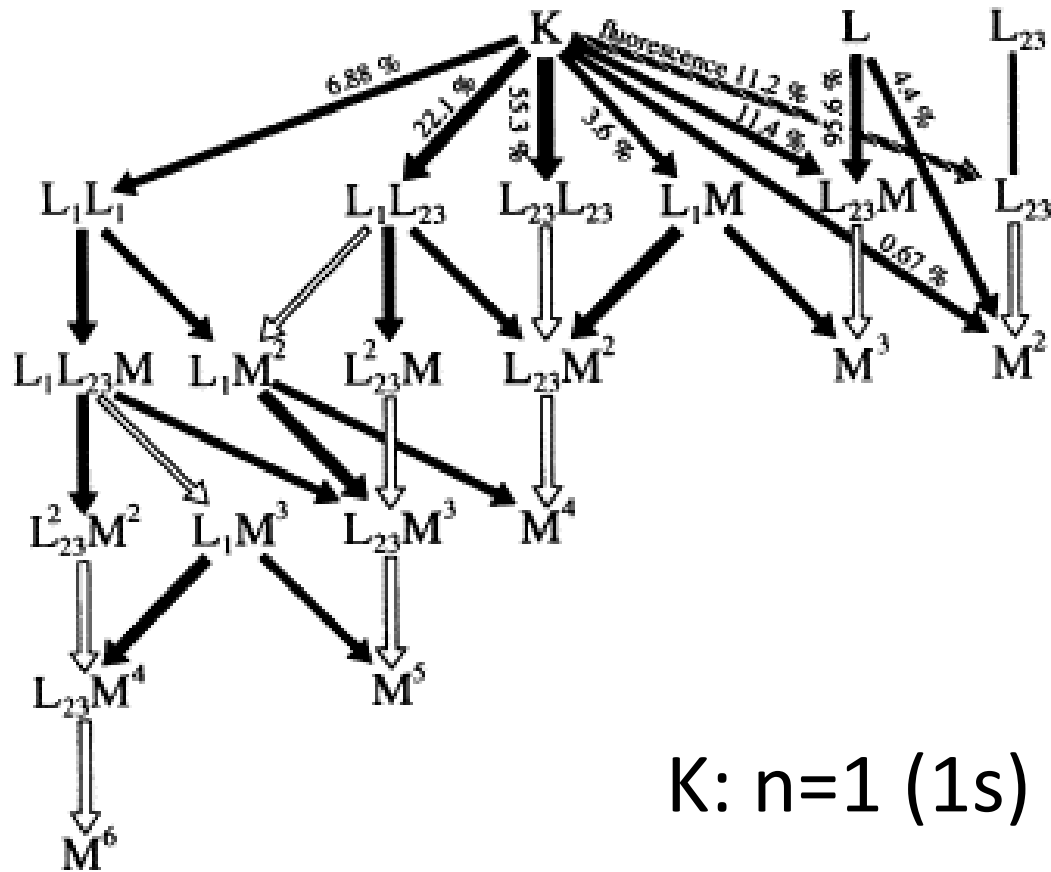
Element	K 1s	L <sub>1</sub> 2s	L <sub>2</sub> 2p <sub>1/2</sub>	L <sub>3</sub> 2p <sub>3/2</sub>	M <sub>1</sub> 3s	M <sub>2</sub> 3p <sub>1/2</sub>	M <sub>3</sub> 3p <sub>3/2</sub>	M <sub>4</sub> 3d <sub>3/2</sub>	M <sub>5</sub> 3d <sub>5/2</sub>	N <sub>1</sub> 4s	N <sub>2</sub> 4p <sub>1/2</sub>	N <sub>3</sub> 4p <sub>3/2</sub>
1 H	13.6											
2 He	24.6*											
3 Li	54.7*											
4 Be	111.5*											
5 B	188*											
6 C	284.2*											
7 N	409.9*	37.3*										
8 O	543.1*	41.6*										
9 F	696.7*											
10 Ne	870.2*	48.5*	21.7*	21.6*								
11 Na	1070.8†	63.5†	30.65	30.81								
12 Mg	1303.0†	88.7	49.78	49.50								
13 Al	1559.6	117.8	72.95	72.55								
14 Si	1839	149.7*b	99.82	99.42								
15 P	2145.5	189*	136*	135*								
16 S	2472	230.9	163.6*	162.5*								
17 Cl	2822.4	270*	202*	200*								
18 Ar	3205.9*	326.3*	250.6†	248.4*	29.3*	15.9*	15.7*					
19 K	3608.4*	378.6*	297.3*	294.6*	34.8*	18.3*	18.3*					

# Razpad vzbujenega stanja atoma

- fluorescenca:  $K_{\alpha}$ , ...
- Augerjev pojav:  
K-LL, K-LM, L-MM







K: n=1 (1s)

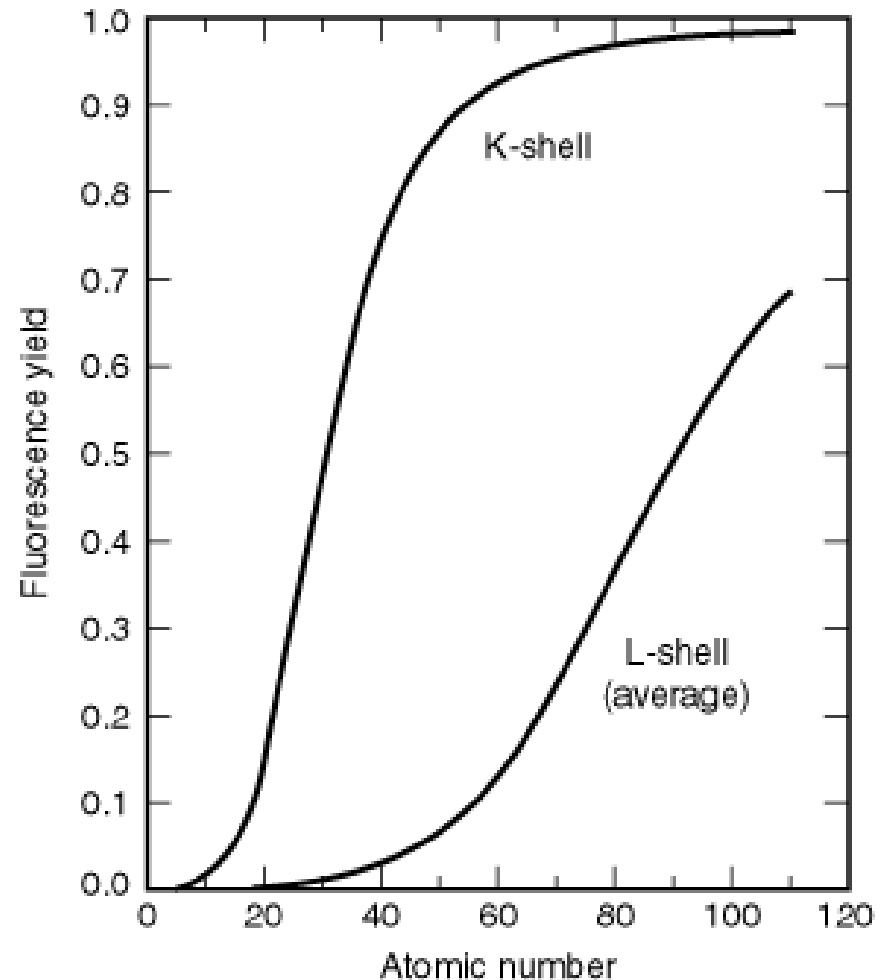
L: n=2 (2s, 2p)

M: n=3 (3s, 3p, 3d)

N: n=4 (4s, 4p, 4d, 4f)

# Fluorescenčni pridelek

= Razmerje med  
fluorescenčnim in  
Augerjevimi razpadom



Naloga: Vzorec srebra obsevamo z rentgenskimi žarki  $K_{\alpha}$  volframa. S spektrometrom izmerimo kinetične energije fotoelektronov, izbitih iz lupine M, ki so 58,6 keV. Oceni energijo Augerjevih K-LM elektronov!

*Table 1-2. Energies of x-ray emission lines (continued).*

Element	$K\alpha_1$	$K\alpha_2$	$K\beta_1$	$L\alpha_1$	$L\alpha_2$	$L\beta_1$	$L\beta_2$	$L\gamma$	$M\alpha_1$
63 Eu	41,542.2	40,901.9	47,037.9	5,845.7	5,816.6	6,456.4	6,843.2	7,480.3	1,131
64 Gd	42,996.2	42,308.9	48,697	6,057.2	6,025.0	6,713.2	7,102.8	7,785.8	1,185
65 Tb	44,481.6	43,744.1	50,382	6,272.8	6,238.0	6,978	7,366.7	8,102	1,240
66 Dy	45,998.4	45,207.8	52,119	6,495.2	6,457.7	7,247.7	7,635.7	8,418.8	1,293
67 Ho	47,546.7	46,699.7	53,877	6,719.8	6,679.5	7,525.3	7,911	8,747	1,348
68 Er	49,127.7	48,221.1	55,681	6,948.7	6,905.0	7,810.9	8,189.0	9,089	1,406
69 Tm	50,741.6	49,772.6	57,517	7,179.9	7,133.1	8,101	8,468	9,426	1,462
70 Yb	52,388.9	51,354.0	59,370	7,415.6	7,367.3	8,401.8	8,758.8	9,780.1	1,521.4
71 Lu	54,069.8	52,965.0	61,283	7,655.5	7,604.9	8,709.0	9,048.9	10,143.4	1,581.3
72 Hf	55,790.2	54,611.4	63,234	7,899.0	7,844.6	9,022.7	9,347.3	10,515.8	1,644.6
73 Ta	57,532	56,277	65,223	8,146.1	8,087.9	9,343.1	9,651.8	10,895.2	1,710
74 W	59,318.24	57,981.7	67,244.3	8,397.6	8,335.2	9,672.35	9,961.5	11,285.9	1,775.4
46 Pd	21,177.1	21,020.1	23,818.7	2,838.61	2,833.29	2,990.22	3,171.79	3,328.7	
47 Ag	22,162.92	21,990.3	24,942.4	2,984.31	2,978.21	3,150.94	3,347.81	3,519.59	
48 Cd	23,173.6	22,984.1	26,095.5	3,133.73	3,126.91	3,316.57	3,528.12	3,716.86	

hydrogen 1 <b>H</b> 1.0079																	helium 2 <b>He</b> 4.0026	
lithium 3 <b>Li</b> 6.941	beryllium 4 <b>Be</b> 9.0122											boron 5 <b>B</b> 10.811	carbon 6 <b>C</b> 12.011	nitrogen 7 <b>N</b> 14.007	oxygen 8 <b>O</b> 15.999	fluorine 9 <b>F</b> 18.998	neon 10 <b>Ne</b> 20.180	
sodium 11 <b>Na</b> 22.990	magnesium 12 <b>Mg</b> 24.305											aluminium 13 <b>Al</b> 26.982	silicon 14 <b>Si</b> 28.086	phosphorus 15 <b>P</b> 30.974	sulfur 16 <b>S</b> 32.065	chlorine 17 <b>Cl</b> 35.453	argon 18 <b>Ar</b> 39.948	
potassium 19 <b>K</b> 39.098	calcium 20 <b>Ca</b> 40.078	scandium 21 <b>Sc</b> 44.956	titanium 22 <b>Ti</b> 47.867	vanadium 23 <b>V</b> 50.942	chromium 24 <b>Cr</b> 51.996	manganese 25 <b>Mn</b> 54.938	iron 26 <b>Fe</b> 55.845	cobalt 27 <b>Co</b> 58.933	nickel 28 <b>Ni</b> 58.693	copper 29 <b>Cu</b> 63.546	zinc 30 <b>Zn</b> 65.39	gallium 31 <b>Ga</b> 69.723	germanium 32 <b>Ge</b> 72.61	arsenic 33 <b>As</b> 74.922	selenium 34 <b>Se</b> 78.96	bromine 35 <b>Br</b> 79.904	krypton 36 <b>Kr</b> 83.80	
rubidium 37 <b>Rb</b> 85.468	strontium 38 <b>Sr</b> 87.62	yttrium 39 <b>Y</b> 88.906	zirconium 40 <b>Zr</b> 91.224	niobium 41 <b>Nb</b> 92.906	molybdenum 42 <b>Mo</b> 95.94	technetium 43 <b>Tc</b> [98]	ruthenium 44 <b>Ru</b> 101.07	rhodium 45 <b>Rh</b> 102.91	palladium 46 <b>Pd</b> 106.42	silver 47 <b>Ag</b> 107.87	cadmium 48 <b>Cd</b> 112.41	indium 49 <b>In</b> 114.82	tin 50 <b>Sn</b> 118.71	antimony 51 <b>Sb</b> 121.76	tellurium 52 <b>Te</b> 127.60	iodine 53 <b>I</b> 126.90	xenon 54 <b>Xe</b> 131.29	
caesium 55 <b>Cs</b> 132.91	barium 56 <b>Ba</b> 137.33	57-70 *	lutetium 71 <b>Lu</b> 174.97	hafnium 72 <b>Hf</b> 178.49	tantalum 73 <b>Ta</b> 180.95	tungsten 74 <b>W</b> 183.84	rhenium 75 <b>Re</b> 186.21	osmium 76 <b>Os</b> 190.23	iridium 77 <b>Ir</b> 192.22	platinum 78 <b>Pt</b> 195.08	gold 79 <b>Au</b> 196.97	mercury 80 <b>Hg</b> 200.59	thallium 81 <b>Tl</b> 204.38	lead 82 <b>Pb</b> 207.2	bismuth 83 <b>Bi</b> 208.98	polonium 84 <b>Po</b> [209]	astatine 85 <b>At</b> [210]	radon 86 <b>Rn</b> [222]
francium 87 <b>Fr</b> [223]	radium 88 <b>Ra</b> [226]	89-102 * *	lawrencium 103 <b>Lr</b> [262]	rutherfordium 104 <b>Rf</b> [261]	dubnium 105 <b>Db</b> [262]	seaborgium 106 <b>Sg</b> [266]	bohrium 107 <b>Bh</b> [264]	hassium 108 <b>Hs</b> [269]	meitnerium 109 <b>Mt</b> [268]	ununnium 110 <b>Uun</b> [271]	ununium 111 <b>Uuu</b> [272]	ununbium 112 <b>Uub</b> [277]		ununquadium 114 <b>Uuq</b> [289]				

\* Lanthanide series

\*\* Actinide series

lanthanum 57 <b>La</b> 138.91	cerium 58 <b>Ce</b> 140.12	praseodymium 59 <b>Pr</b> 140.91	neodymium 60 <b>Nd</b> 144.24	promethium 61 <b>Pm</b> [145]	samarium 62 <b>Sm</b> 150.36	europium 63 <b>Eu</b> 151.96	gadolinium 64 <b>Gd</b> 157.25	terbium 65 <b>Tb</b> 158.93	dysprosium 66 <b>Dy</b> 162.50	holmium 67 <b>Ho</b> 164.93	erbium 68 <b>Er</b> 167.26	thulium 69 <b>Tm</b> 168.93	ytterbium 70 <b>Yb</b> 173.04
actinium 89 <b>Ac</b> [227]	thorium 90 <b>Th</b> 232.04	protactinium 91 <b>Pa</b> 231.04	uranium 92 <b>U</b> 238.03	neptunium 93 <b>Np</b> [237]	plutonium 94 <b>Pu</b> [244]	americium 95 <b>Am</b> [243]	curium 96 <b>Cm</b> [247]	berkelium 97 <b>Bk</b> [247]	californium 98 <b>Cf</b> [251]	einsteinium 99 <b>Es</b> [252]	fermium 100 <b>Fm</b> [257]	mendelevium 101 <b>Md</b> [258]	nobelium 102 <b>No</b> [259]

# Aktivnost

- Aktivnost:  $A = \frac{N}{\tau}$  [Bq]
- Primer: aktivnost K-40 v 1kg KCl

$$M(\text{K}) = 39,1 \text{ kg/kmol}$$

$$M(\text{Cl}) = 35,45 \text{ kg/kmol}$$

$$w(\text{K-40}) = 0,0117\%$$

$$t_{1/2}(\text{K-40}) = 1,25 \cdot 10^9 \text{ let}$$

---

$$A = 1,66 \cdot 10^4 \text{ Bq}$$

# Datiranje

Pri datiranju starih zapisov so v pergamentu našli med 75% in 77% začetne koncentracije ogljika 14. Omeji leto nastanka teh zapisov!

Razpolovni čas  $^{14}\text{C}$  je 5730 let.

(384BC – 167BC)

A.J. Jull et al., 'Radiocarbon Dating of the Scrolls and Linen Fragments from the Judean Desert', *Radiocarbon* (1995) 37, 11–19

# Razpadi

- Po koliko razpolovnih časih dosežemo 97% ravnovesne aktivnosti, če nuklid v reaktorju nastaja s konstantno hitrostjo? (5)

# 3 nivojski sistem

1 → 2 → 3

$$N_1 = N_0 \exp(-\lambda_1 t)$$

$$N_2 = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} (\exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_1 t))$$

$$N_3 = N_0 \left( 1 + \frac{\lambda_2 \exp(-\lambda_1 t) - \lambda_1 \exp(-\lambda_2 t)}{\lambda_1 - \lambda_2} \right)$$

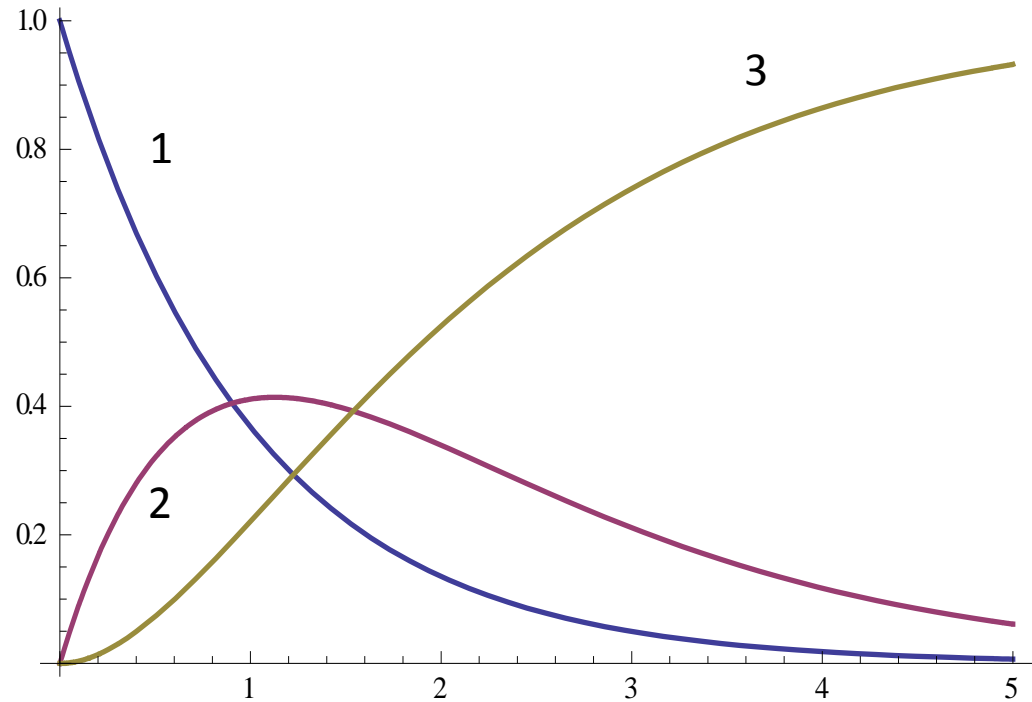


# Kdaj nivo 2 doseže max?

$$t_{max} = \frac{\ln(\lambda_1/\lambda_2)}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

$$\frac{A_2}{A_1} = ?$$

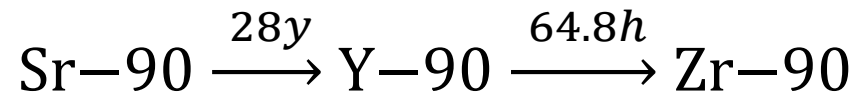
$$A = \frac{N}{\tau} \neq \frac{dN}{dt}$$



$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left( 1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t} \right)$$

1.  $\lambda_2 < \lambda_1$  : razmerje se s časom povečuje
2.  $\lambda_2 > \lambda_1$  : razmerje se s časoma stabilizira
3.  $\lambda_2 \gg \lambda_1$  : razmerje gre hitro proti 1

Primer, razpad  $\beta$ - pri Sr-90:



Reaktor v NEKu vsebuje 50 ton urana, v katerem je 5%  $^{235}\text{U}$ , ostalo je  $^{238}\text{U}$ . Oba spontano razpadata v Th z alfa razpadom. Energija delca alfa je 4,27 MeV (238) in 4,68 MeV (235). Razpolovna časa pa sta  $4,4 \cdot 10^9$  let (238) in  $7 \cdot 10^8$  let (235).

Določi, kakšna moč se sprošča pri spontanem razpadu.

Koliko se v enem letu zmanjša masa goriva? Moč reaktorja je 2GW.

$$1 \text{ MeV/s} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ W}$$

V prostoru s konstantno koncentracijo joda v zraku teden dni vzorčujemo. Pretok črpalke je 10L/min, učinkovitost jodovega filtra pa 90%. Po zaključku meritve na filtru izmerimo aktivnost  $^{131}\text{I}$ , ki je 100 kBq.

Ali je specifična aktivnost joda v zraku pod mejno vrednostjo za delovno okolje, ki je 1,1 kBq/m<sup>3</sup>?

Razpolovni čas  $^{131}\text{I}$  je 8 dni.

# Dodatne razpadne poti

Določi efektivni razpolovni čas  $^{131}\text{I}$  iz telesa, če je njegov razpolovni čas 8 dni, biološki razpolovni čas pa 100 dni. (7,4 dni)

Sodelovanje sevanja s snovjo

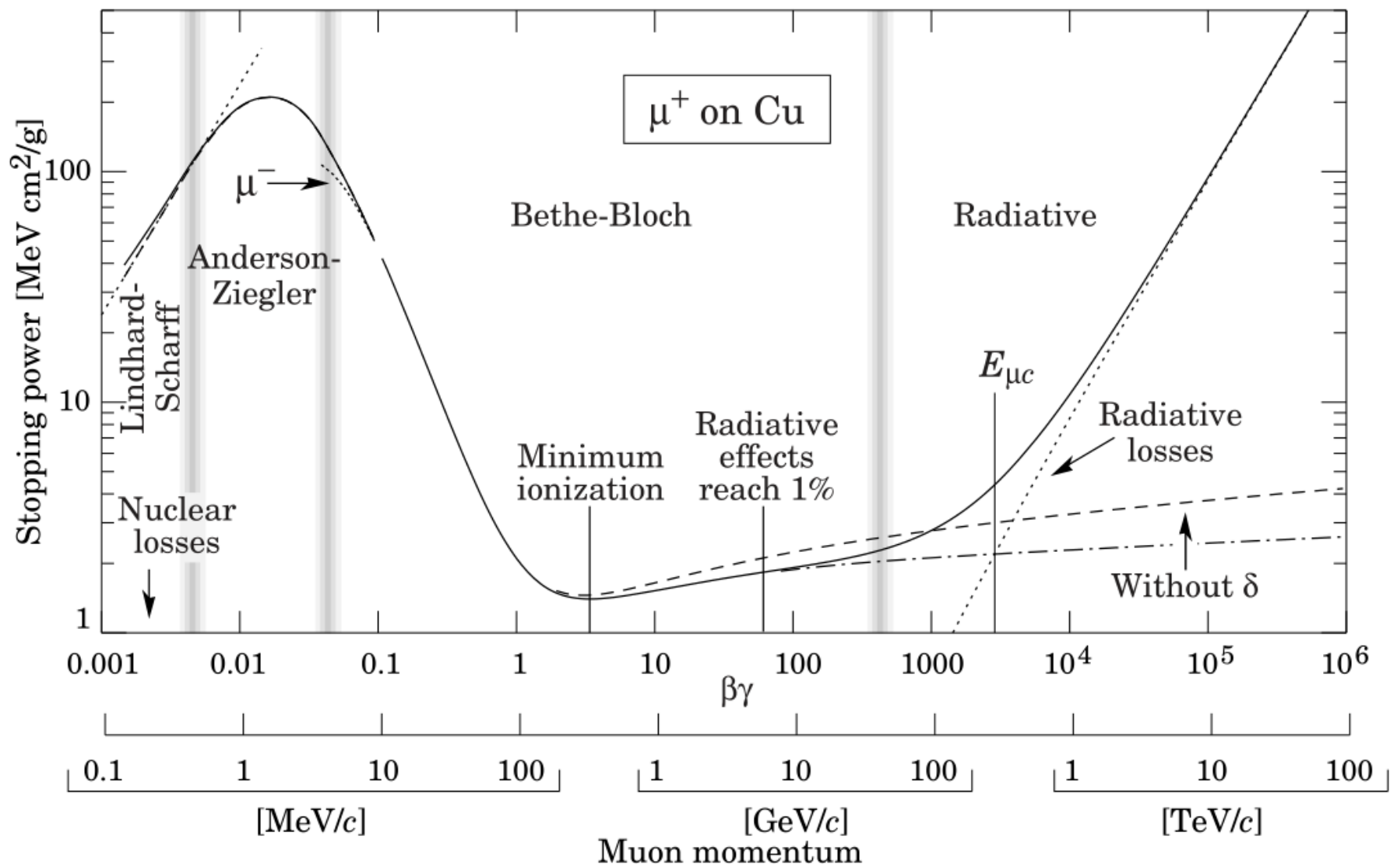
# Bethe-Blochova formula

$$-\frac{dE}{\rho dx} = K \frac{Z}{A} \frac{z_1^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2 m_e c^2}{I} \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \right) - \beta^2 \right]$$

$$K = 4\pi N_a r_e^2 m_e c^2 = 0,307 \text{ MeV} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$$

$$I \approx Z \cdot 13,5 \text{ eV}$$

Velja za  $\frac{v}{c} = \beta > 0.1$  in  $z_1 < 13$ ,  $M \gg m_e$





**Naloga:** Kakšno gibalno količino in kinetično energijo imajo minimalno ionizirajoči delci  $e^-$ ,  $\mu$ ,  $\pi$ ,  $p$  in  $\alpha$ ?



$$\beta = 0,96$$

$$T = ?, p = ?$$

$$pc = 3,43E_0, \quad T = \left( \sqrt{1 + 3,43^2} - 1 \right) E_0$$

delec	$mc^2$ [MeV]	$pc$ [MeV]	$T$ [MeV]
e	0,511	1,75	1,31
$\mu$	107	367	275
$\pi$	140	480	360
p	938	3200	2410
$\alpha$	3800	13000	9800

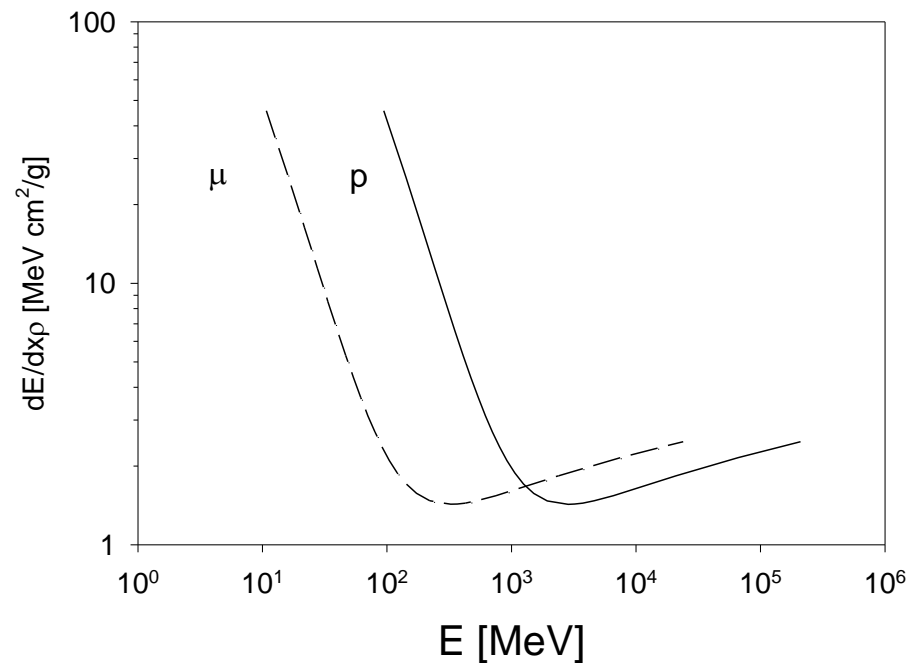
# Uporaba B-B

- Oceni, kolikšno energijo izgubi delec  $\alpha$  z energijo 20MeV, ko preleti list zlata debeline 1,5 $\mu$ m. Gostota zlata je 19,3 g/cm<sup>3</sup>, vrstno število 79 in masno število 197. Povprečna ionizacijska energija za težje elemente je sorazmerna z njihovim vrstnim številom:  
 $I \approx E_I Z$ , kjer je  $E_I = 9,1\text{eV}$ . (=0,4 MeV)

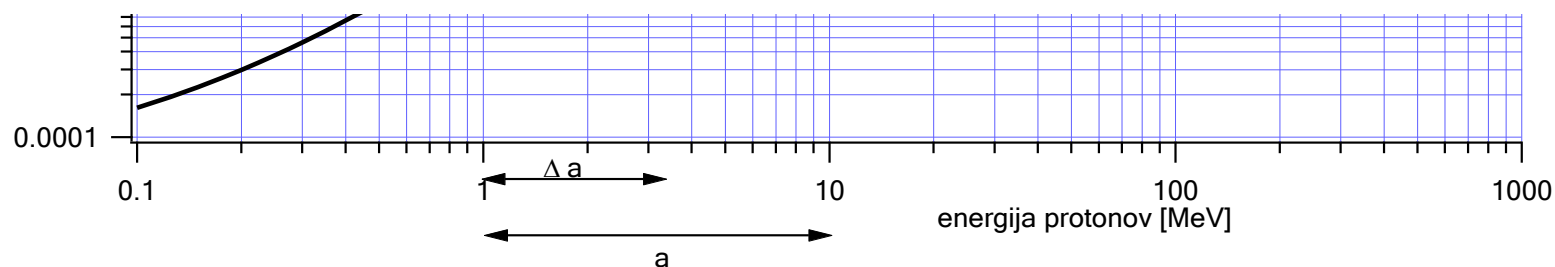
**Naloga:** Kozmične mione merimo z 2 cm debelim plastičnim scintilatorjem z gostoto  $1.03 \text{ g/cm}^3$ . Kakšna je povprečna energija, ki ostane v detektorju?

$$-\frac{dE}{\rho dx} \approx 1,5 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$$

$$\Delta E \approx 3 \text{ MeV}$$



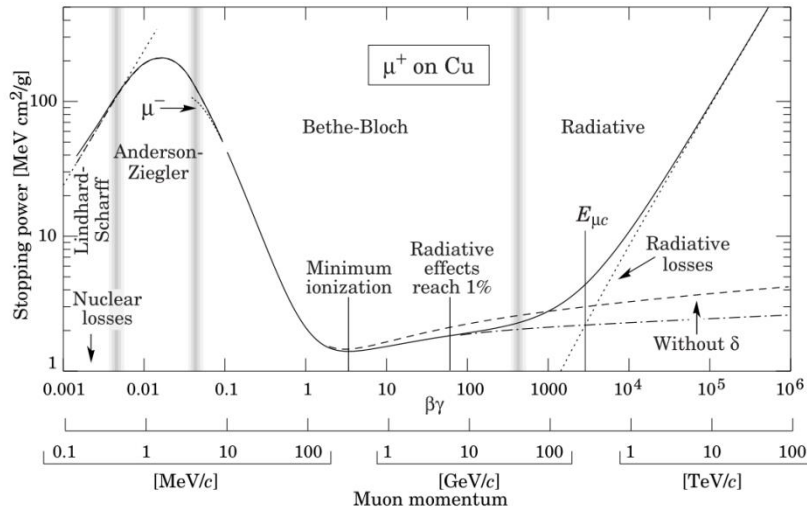
# Odčitavanje z logaritemskega grafa



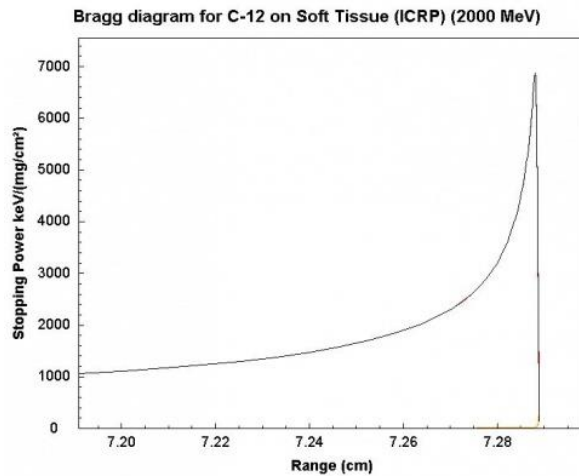
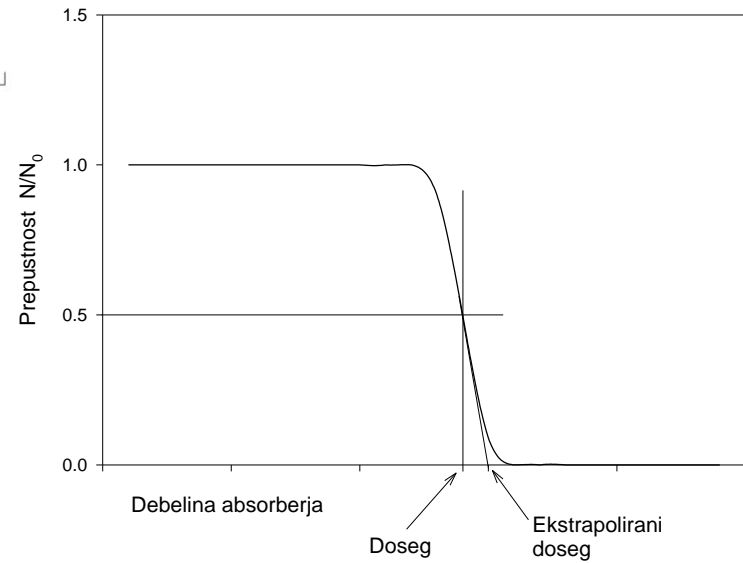
$$E = E_1 10^{\frac{\Delta a}{a} \log \frac{E_2}{E_1}}$$

$\Delta a/a$	E
0	1
0.30	2.00
0.50	3.16
0.70	5.00
1	10

# Doseg delcev



Delež prepuščenih delcev v odvisnosti od razdalje



# Doseg delcev

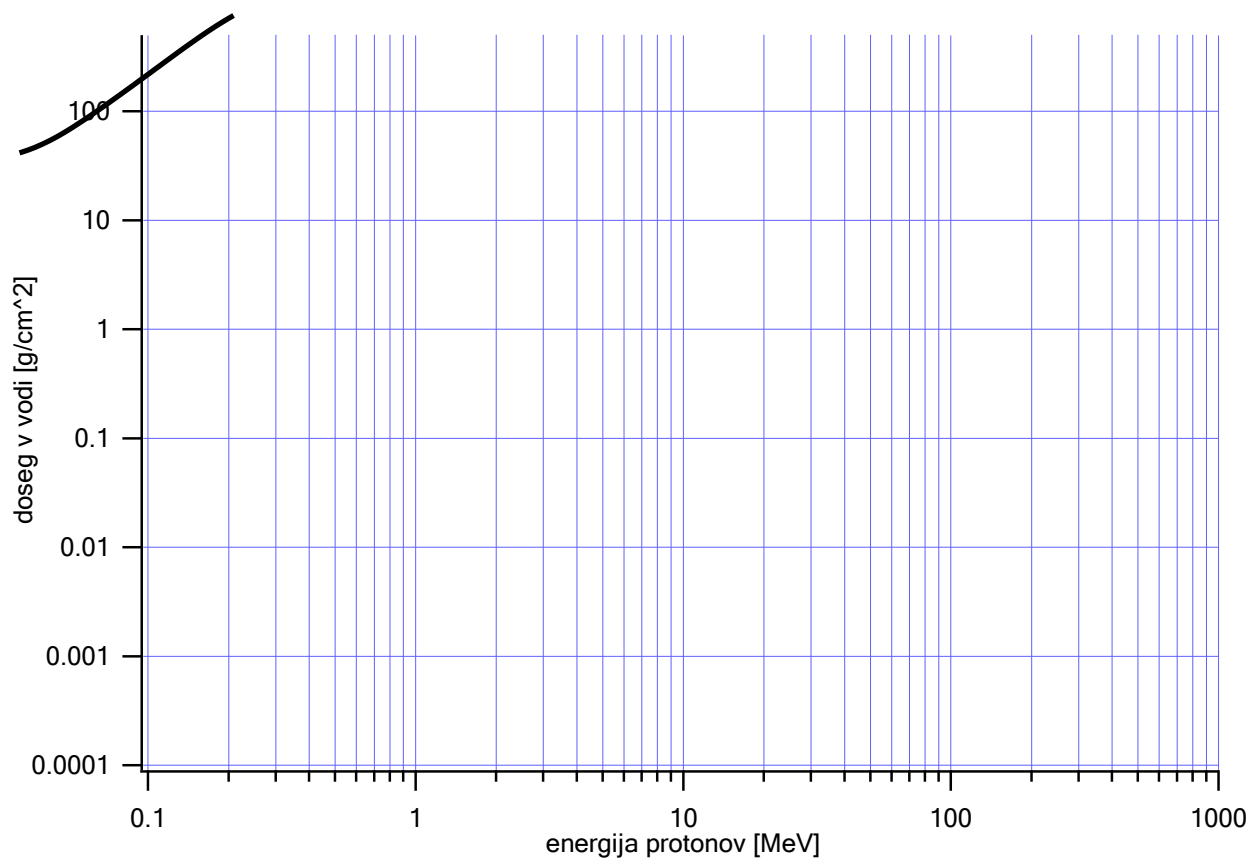
Uporabno:

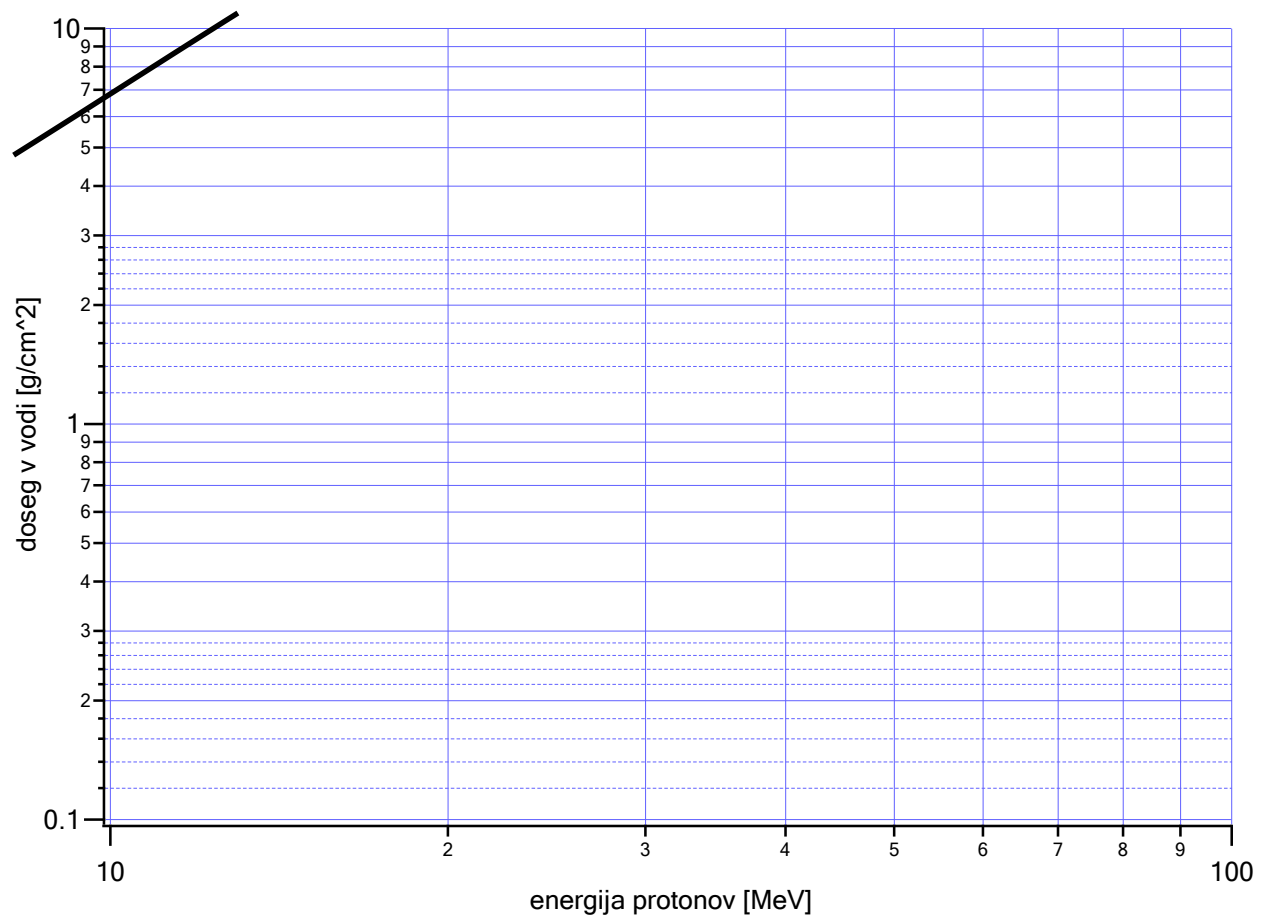
- Določanje energije delcev
- Velikost detektorjev
- Debeline ščitov
- Terapija

**Naloga:** Kakšna mora biti energija curka protonov, da z njimi uničimo tumor v možganih na globini 1 cm?

Podatki za doseg in izgube energij:

<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/contents.html>





$$E \approx 32 \text{ MeV}$$



## Dosegi nekaterih delcev z energijo 1 MeV iz okolja

delec	v vodi	v zraku
$\alpha$	0,01 mm	1 cm
$\beta$	1 mm	1 m
elektron	1 cm	10 m
nevtron	10 cm	100 m
$\gamma$	10 cm	100 m

Preseki = verjetnost za reakcije

$$\frac{N_r}{t} = \frac{N_0 \sigma_T}{t S}$$

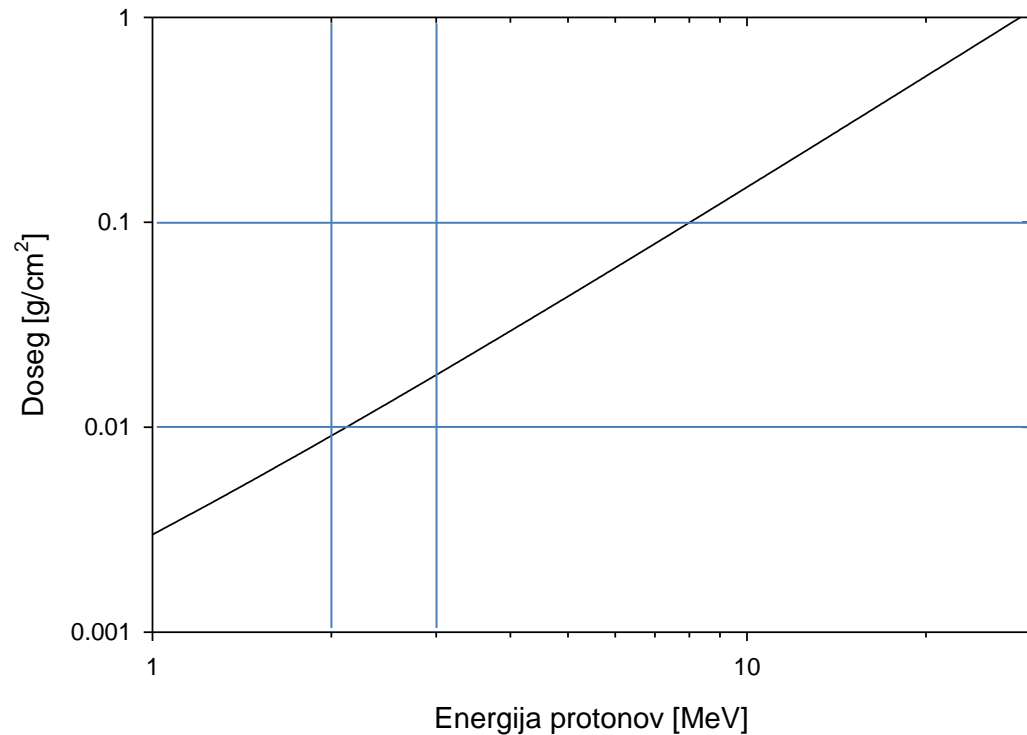
Skupni presek za reakcijo:  $\sigma_T = N_T \sigma_0$

Velja za tanko tarčo,  $S = \min(\text{tarča, žarek})$

S protoni iz tandem van de Graafovega pospeševalnika pri terminalni napetosti 1.5 MV obstreljujemo tarčo iz litija. Presek za reakcijo  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  je 345 mb, konstanten do praga pri 2 MeV, pri nižjih energijah protonskega žarka pa hitro pade na nič. Koliko reakcij bo nastalo, če na tarči izmerimo naboj  $100\ \mu\text{As}$ ?

$$1\ \text{b} = 10^{-24}\ \text{cm}^2$$

Doseg protonov v litiju



$$N_R = 1,6 \times 10^{11}$$

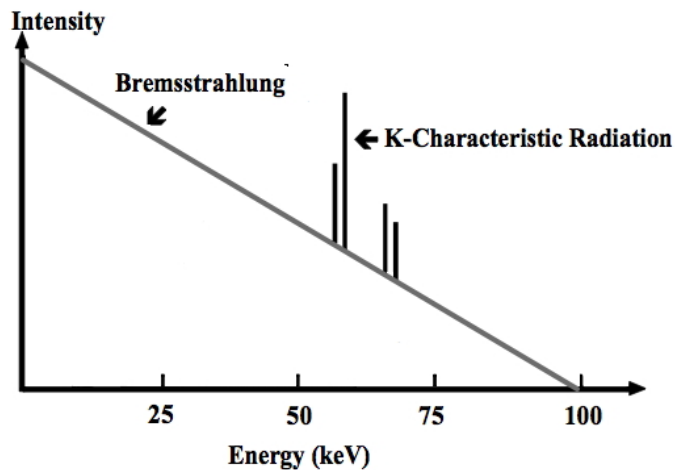
# Sodelovanje elektronov s snovjo

- Izguba energije s trki in sevanjem
- Lahki delci – povratno sipanje
- Trki: podobno kot Bethe-Bloch za težke delce
- Zavorno sevanje (*bremstrahlung*)

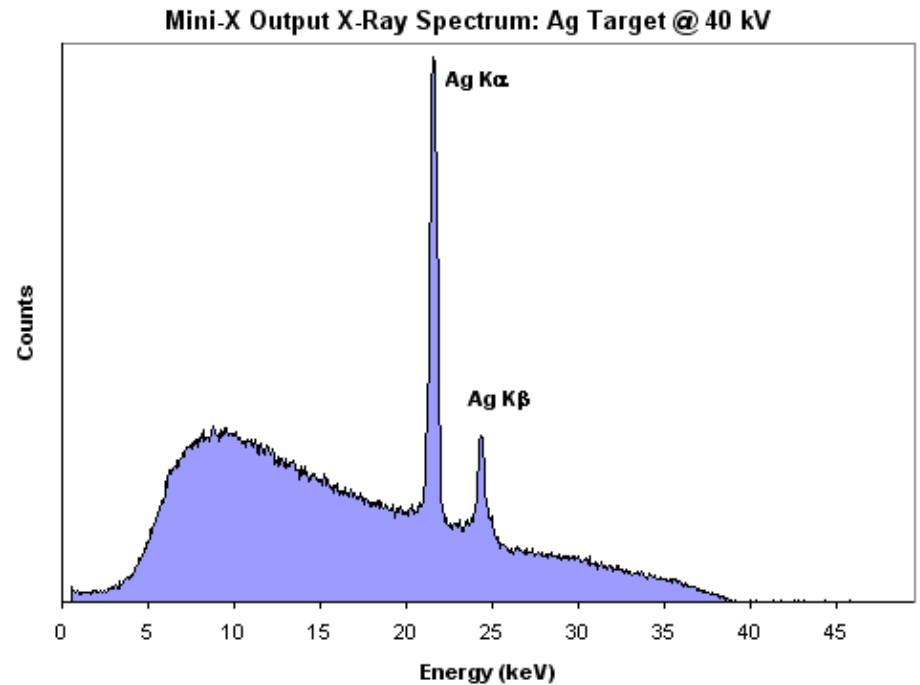
$$P \propto a^2, \text{ oz. } \ddot{p}^2$$

$$\frac{P_{el}}{P_{prot}} \propto \left( \frac{m_{prot}}{m_{el}} \right)^2 = 2000^2$$

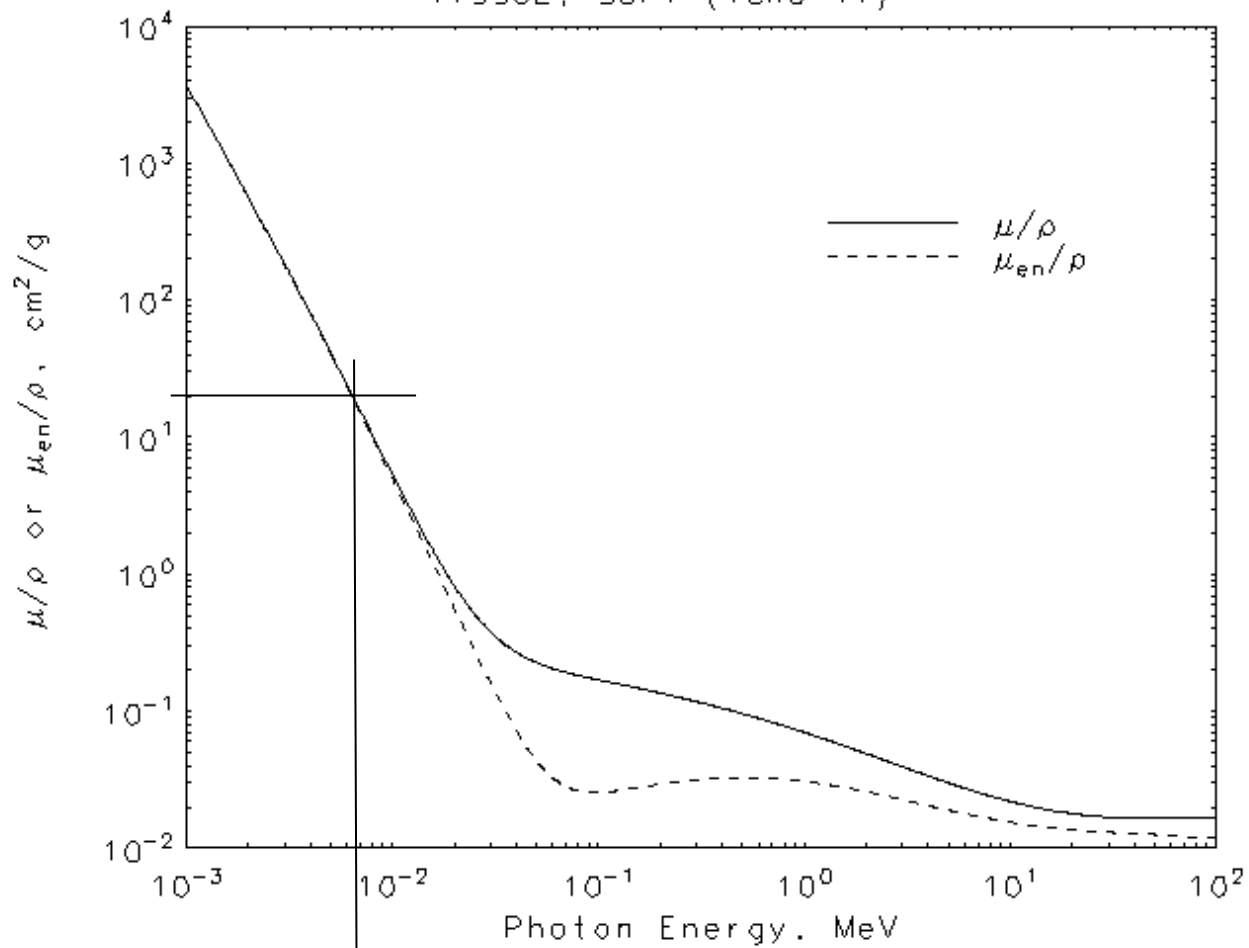
Izračunaj povprečno energijo sevanja iz 20 kV rentgenske cevi.  
Absorpcijo v cevi zanemari.  
Ali je taka cev primerna za slikanje glave?



The X-ray spectrum from tungsten



TISSUE, SOFT (ICRU-44)



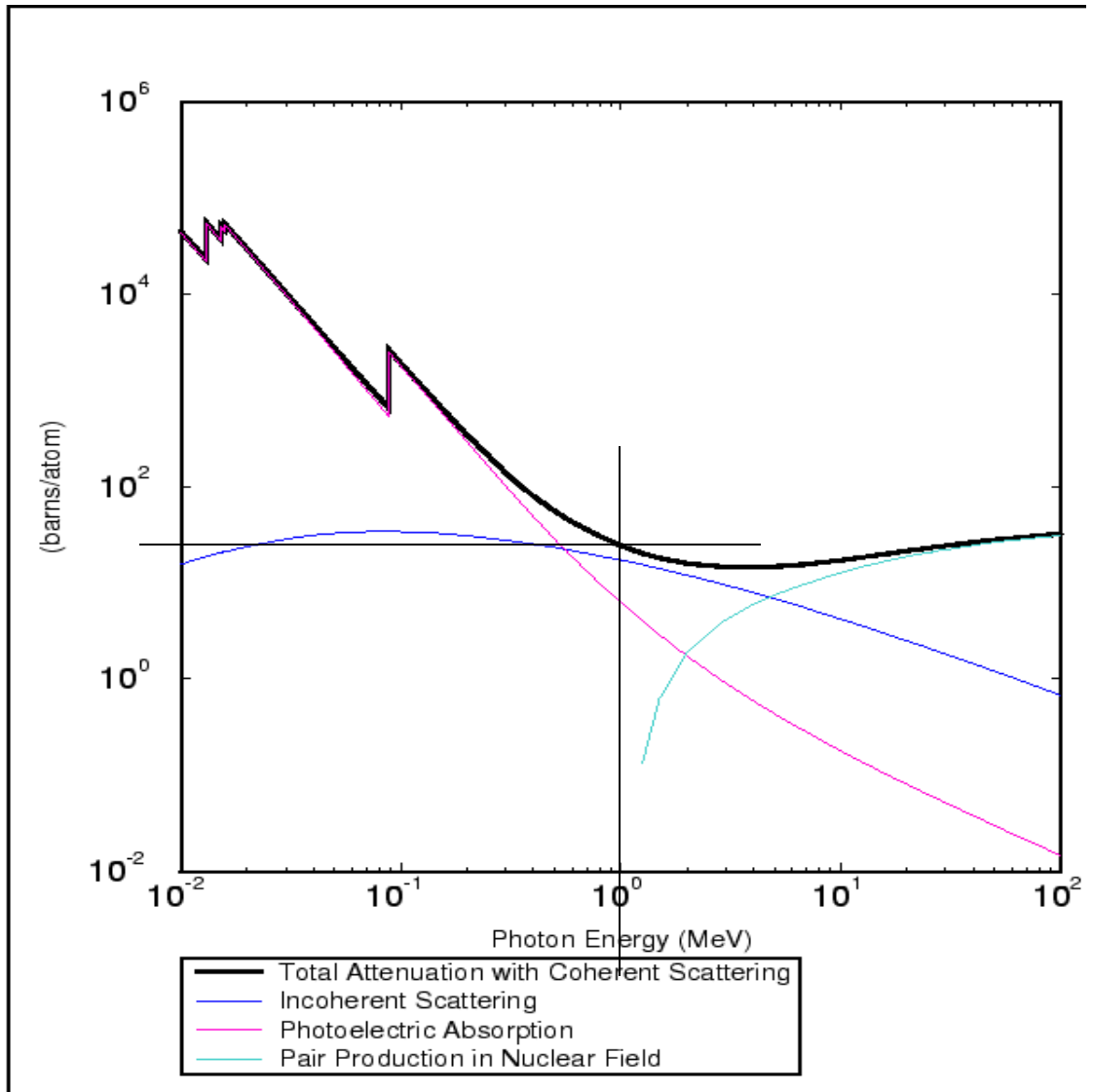
# Prehod žarkov $\gamma$ skozi snov

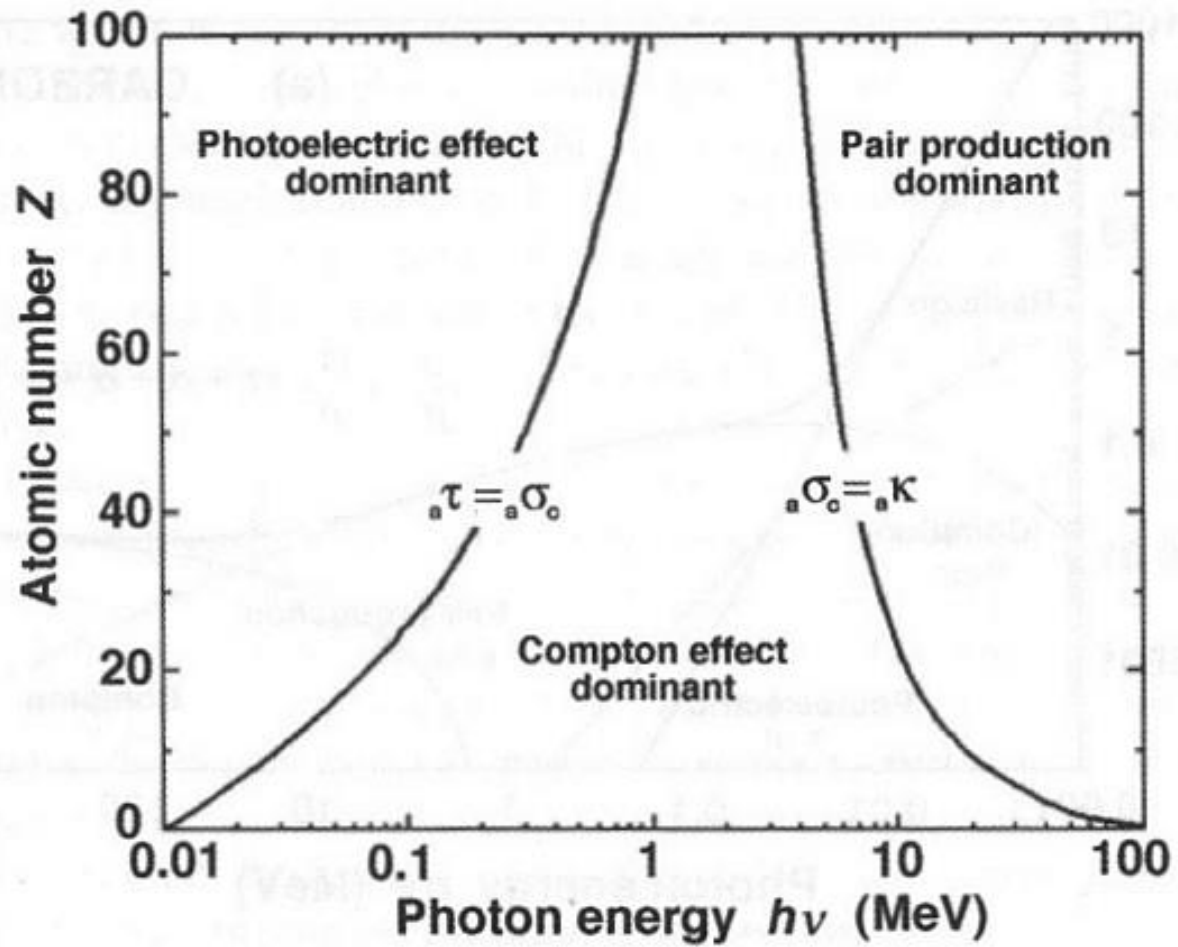
Kateri so trije najpogostejši procesi pri absorpciji žarkov  $\gamma$  v snovi?

Pokaži energijske odvisnosti sipalnih presekov zanje na sosednjem grafu za svinec.

Kateri proces prevladuje pri 1 MeV?

Kje je prag za proces prevladujoč pri visokih energijah?







$$\sigma = \sigma_f + \sigma_c + \sigma_p$$

Fotoefekt:  $\sigma_f \propto Z^5$

Comptonско sipanje:  $\sigma_c \propto Z$

Pari:  $\sigma_p \propto Z^2$

**Naloga:** Zakaj je fotoefekt samo na vezanih in ne na prostih elektronih?