ИНТЕРАКЦИЈА ЗРАЧЕЊА СА МАТЕРИЈОМ

Fakultet za fizicku hemiju

Нуклеарно зрачење

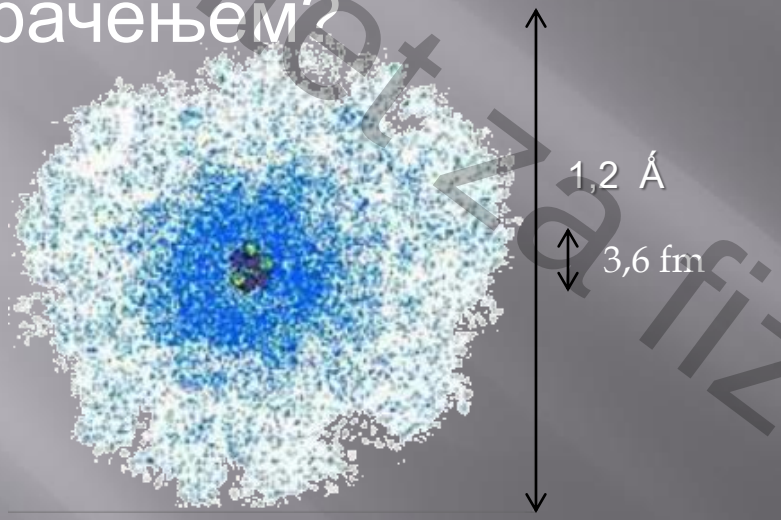
- Честице , наелектрисане и ненаелектрисане, које имају енергију већу од 100 eV
- Изузетак-неутрони (и при енергијама <100 eV могу да доведу до нуклеарних реакција и продукције секундарног зрачења (γ, p, α))

- По механизму
  - Директно јонизује (α, β^-, β^+ ,p)
  - Индиректно јонизујуће (γ, n)

Fakultet za fizicku hemiju

Процеси у којима се апсорбује јонизујуће зрачење

- Шта у материјалној средини интерагује са зрачењем?



$A_n = 4{,}1 \cdot 10^{-29}\ m^2$

$A_{ec} = 4{,}5 \cdot 10^{-20}\ m^2$

- Јонизација, при чему настаје јонски пар

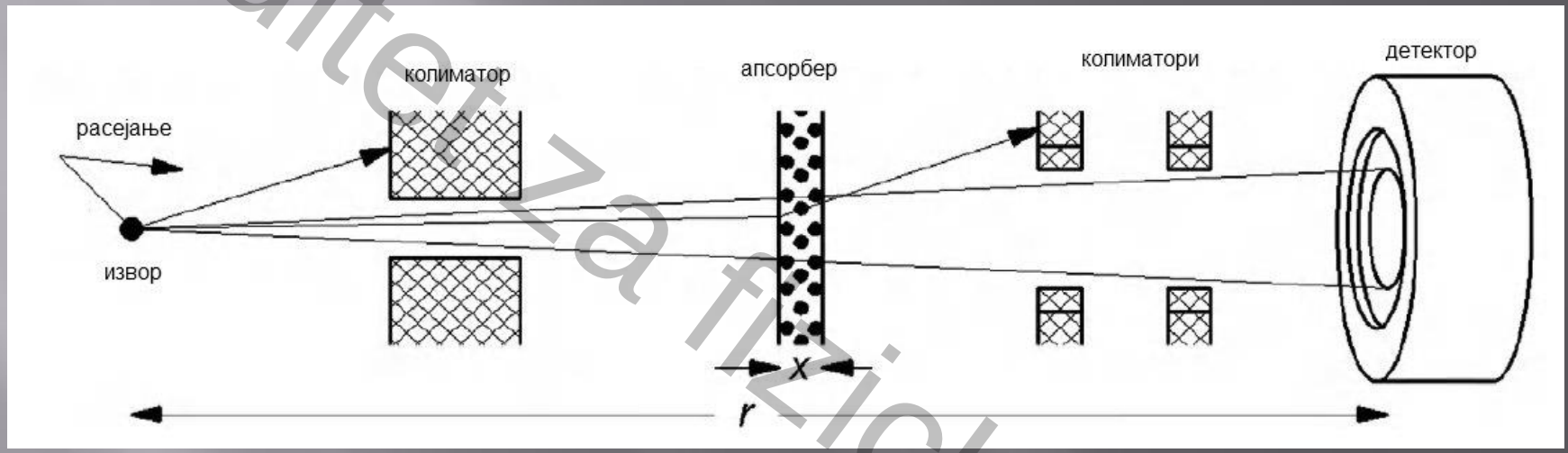
- Ексцитација при чему се атом или молекул средине преводи у побуђено стање

Fakultet za fizicku hemiju

- Закочно х-зрачење
- Фотоелектрични ефекат
- Комптонов ефекат
- Стварање парова
- Черенковљево зрачење
- Рејлијево расејање (нема губитка енергије честице већ само њеног расејања)

Fakultet za fizicku hemiju

Мерење апсорпције нуклеарног зрачења



$$R = \varepsilon A$$

$$R = S_{det}\varepsilon_{det}\Phi$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{uz} \cdot \varepsilon_{aps} \cdot \varepsilon_{det} \cdot \varepsilon_{geom}$$

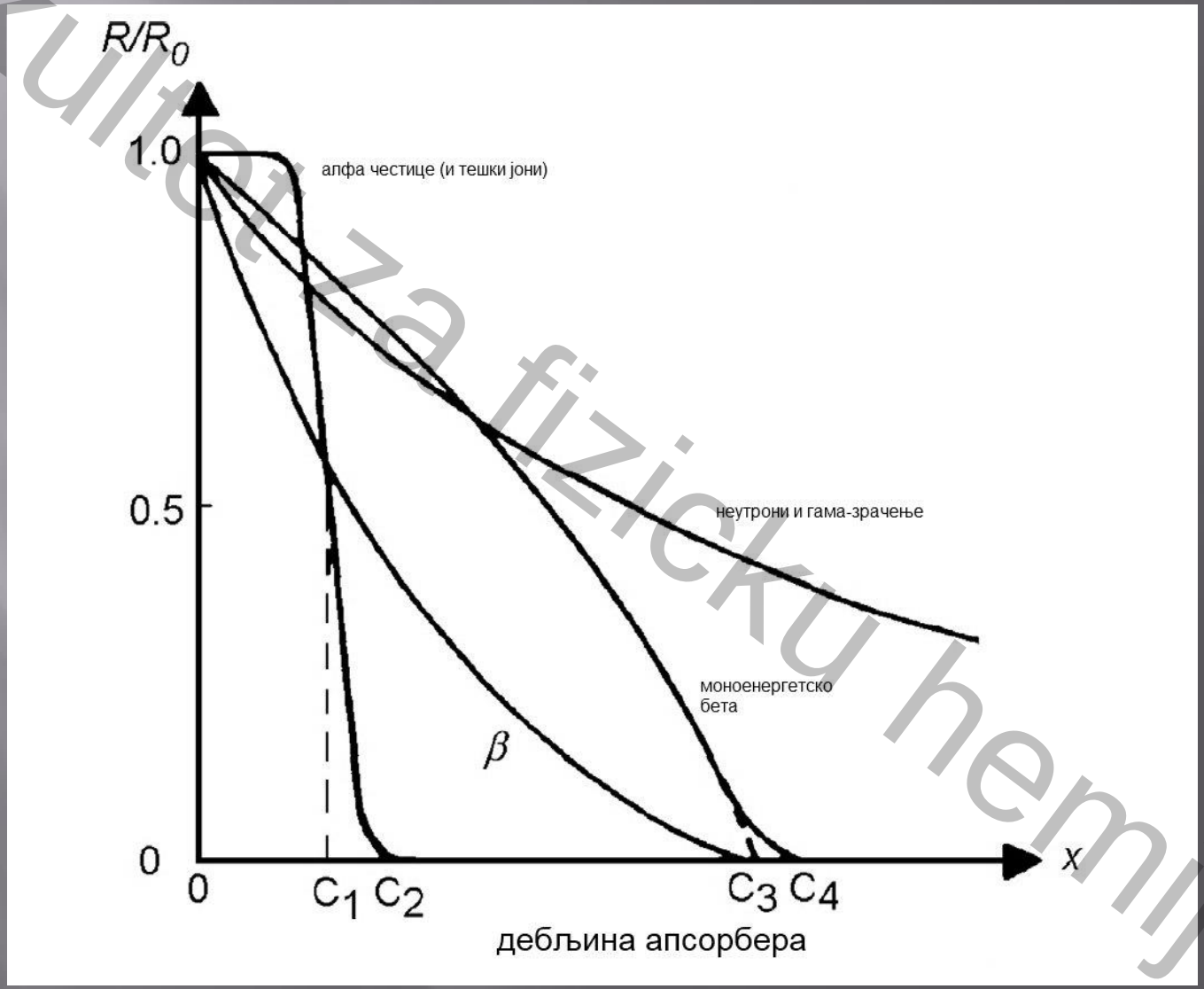
$$\Phi = \varepsilon_{aps}\Phi_0$$

$$\varepsilon_{geom} = \frac{S_{det}}{4\pi r^2}$$

$$\Phi_0 = \varepsilon_{uz} nA/4\pi r^2$$

Fakultet za fizicku hemiju

Апсорпционе криве



Fakultet za fizičku hemiju

Величине које карактеришу пролаз зрачења кроз материју

- Зауставна моћ губитак енергије по јединици пређеног пута

$$S = -\frac{dE}{dx}\ (\text{eV/cm}) \qquad S = S_{el} + S_n \approx S_{el}$$

- Линеарни транфер енергије (LET)

$$LET = \frac{dE_{abs}}{dx}\ (\text{eV/cm})$$

- Релативна зауставна моћ

$$S_l = \frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{mat}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{std}}$$

Fakultet za fizičku hemiju

- Специфична јонизација

$$J = \frac{dN_j}{dx} \left(\frac{\text{јонских парова}}{cm}\right)$$

- Домет честице R (cm) је растојање које честица пређе од уласка у материјал до потпуног заустављања

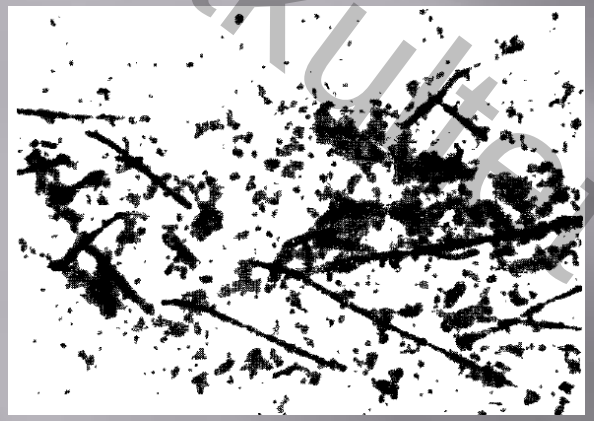
Површинска густина

$$x = \frac{\left(\frac{m}{y \cdot z}\right)}{\rho} = \frac{A_d}{\rho}$$

$$S = -\frac{dE}{dA_D} = -\frac{dE}{\rho dx} \left(eV\ cm^2 g^{-1}\right)$$

Fakultet za fiziku hemiju

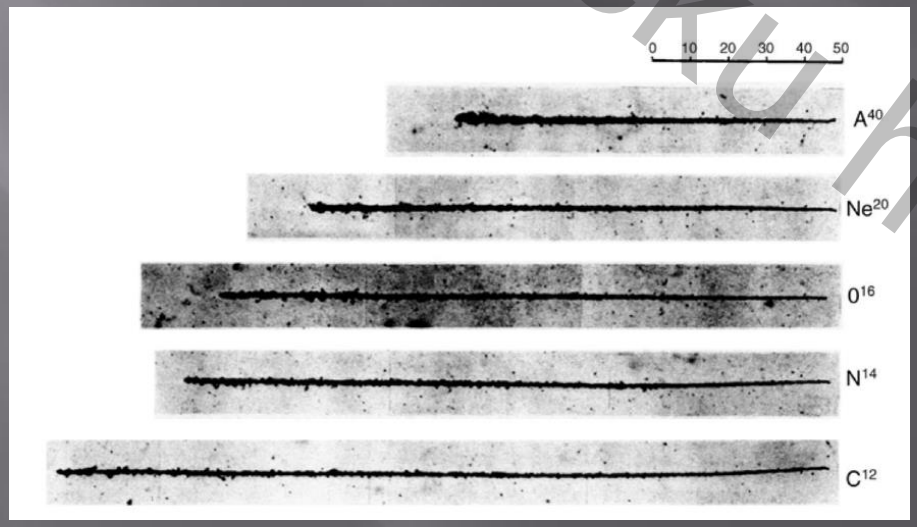
Пролаз протона и тешких јона кроз материју



Протон- трагови у нуклеарној емулзији



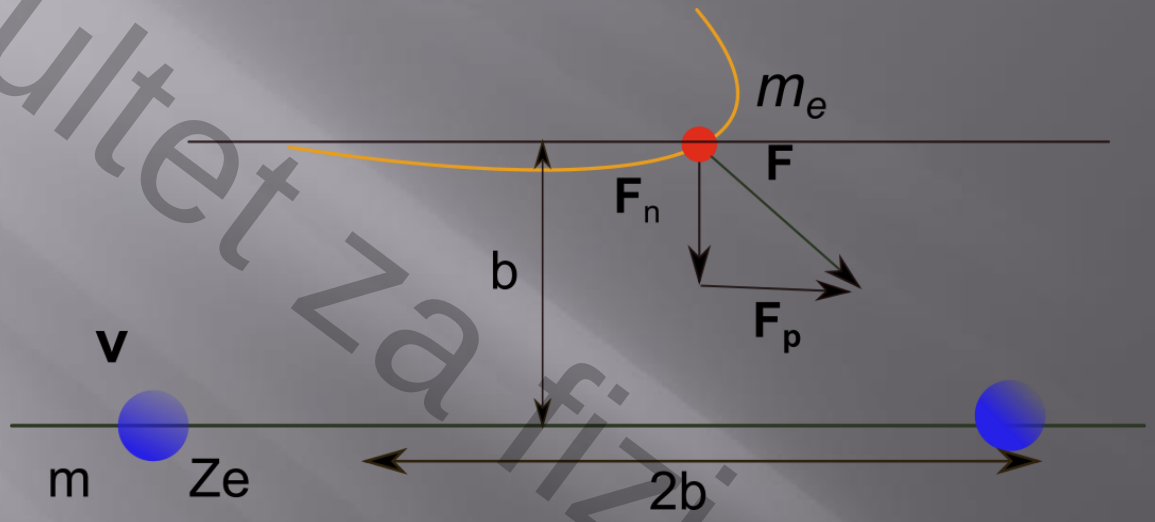
Алфа честица- трагови у магленој комори



Fakultet za fizičku hemiju

Интеракција алфа честица и тешких јона са материјом

Fakultet za fizicku hemiju



$$F_n = \frac{Ze^2}{b^2}$$

Импулс који у интеракцији прими електрон је

$$p_e \approx F_n \Delta t = F_n \frac{2b}{v} = \frac{2Ze^2}{bv}$$

- Енергија која се преда електрону је

$$\varepsilon_e \approx \frac{p_e^2}{2m} = \frac{2Z^2e^4}{mb^2v^2}$$

- Енергија коју електрон добије је једнака губитку енергије тешке честице $\varepsilon_e = -\Delta E$
- Ако је n_e електронска густина (број електрона/cm^3, онда ће се у запремини коју ограничавају цилиндри висине *dx* и радијуса *b* и *b+db* бити $2\pi n_e b db dx$ електрона

- Губитак енергије јона по јединици пута биће

Fakultet za fiziku i hemiju

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z^2 n_e\, e^4}{mv^2}\frac{db}{b}$$

Интеграција се врши од b_{min} до b_{max}

b_{min} вредност је при чеоном судару када електрон прима максималну енергију $2m_e\gamma^2 v_e^2$.

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Заменом у израз за енергију електрона добијамо

$$b_{min} = \frac{qe^2}{\gamma m_e v^2}$$

Fakultet za fizičku hemiju

- Максималну вредност b могуће је добити на основу времена које јон треба да проведе у близини електрона да би дошло до интеракције. Оно треба да буде мање од периода ротације електрона у орбитали

$$t_p = \frac{2b}{v} \leq \frac{1}{\omega} = f(Z)$$

- На крају нам интеграција једначине за губитак енергије јона даје Bohr-ову формулу

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{Bohr} = \frac{4\pi Z^2 n_e\ e^4}{mv^2} \int_{b_{min}}^{b_{max}} \frac{db}{b} = \frac{4\pi Z^2 n_e\ e^4}{mv^2} ln \frac{\gamma^2 m_e v^3 f(Z)}{qe^2}$$

Fakultet za fizičku hemiju

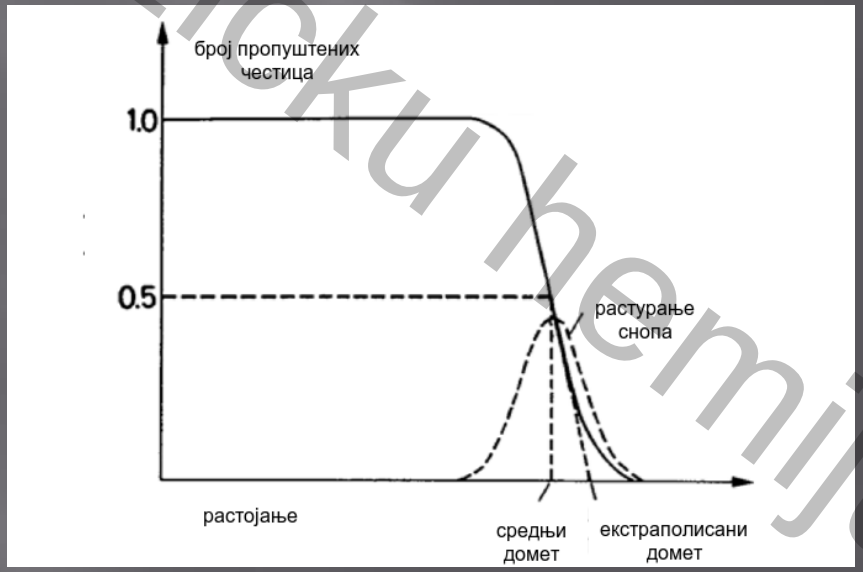
- Bohr-ову формулу наследила је Bethe-Bloch –ова формула која је такође изведена на основу транфера импулса, али овог пута са коректним квантномеханичким формализмом

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{B-B} = \frac{4\pi n\, Z^2 e^4}{m_e v^2} Z_A \left[ln \frac{m_e v^2}{E_j} - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right]$$

где је $\beta = v/c$, а E_j средњи јонизациони потенцијал материјала

- Домет јона је

$$R = \int_{E_0}^{0} \frac{dE}{\frac{dE}{dx}}$$

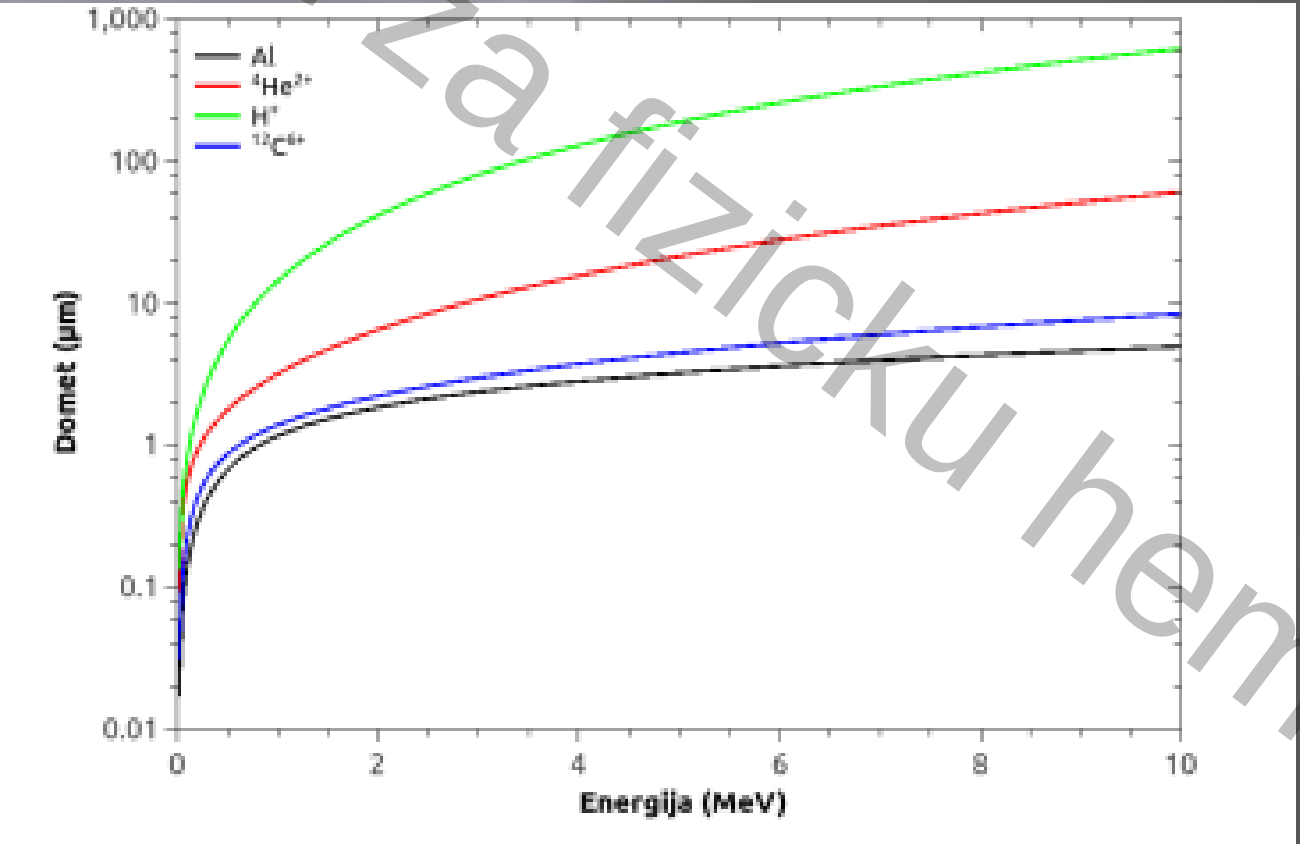


Fakultet za fizicku hemiju

- Емпиријске формуле за домет α-честица (Eα у MeV)

$$R_{\text{ваздух}} = 0{,}31E_{\alpha}^{3/2}\ (cm)$$

$$R_{\text{остало}} = 0{,}173E_{\alpha}^{3/2}A_{Z}^{1/3}\ (mg\ cm^{-2})$$

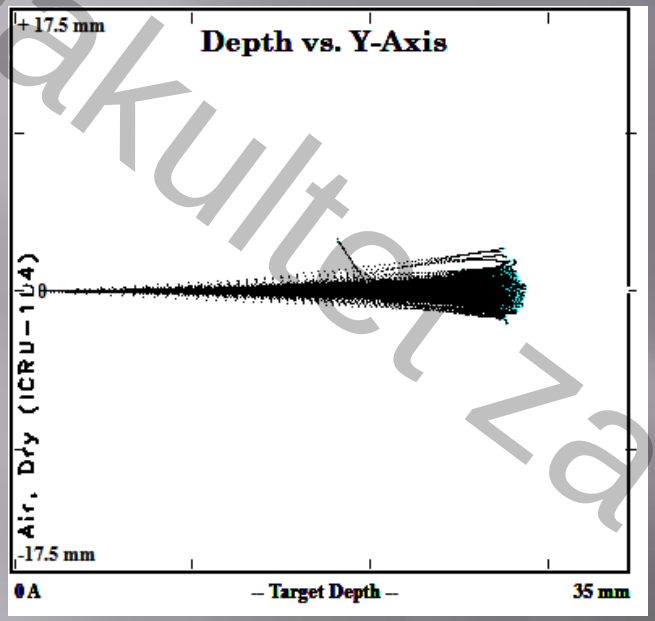


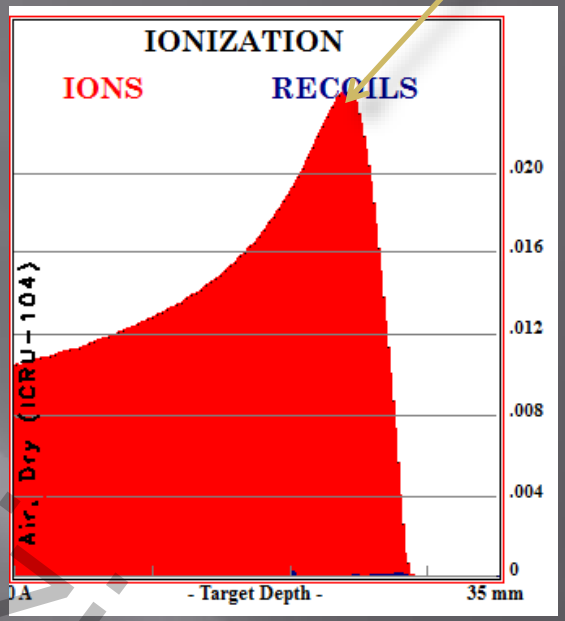
Fakultet za fizicku hemiju

Специфична јонизација

Bragg-ов пик

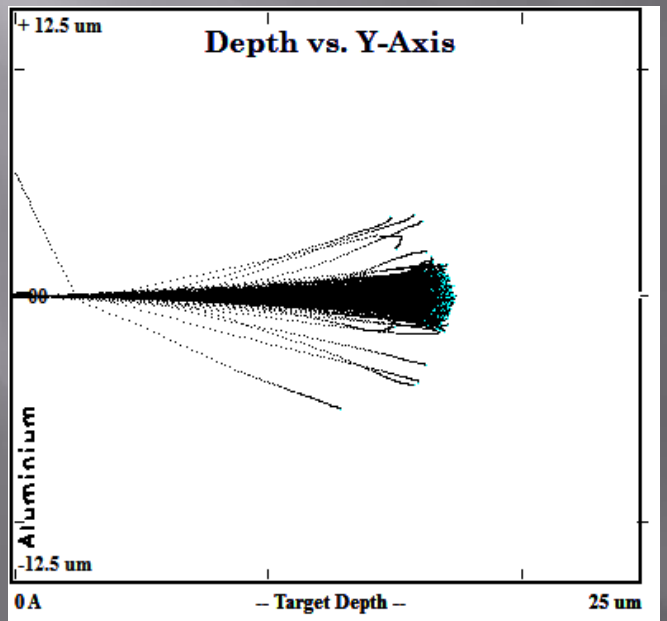
α-честице у ваздуху

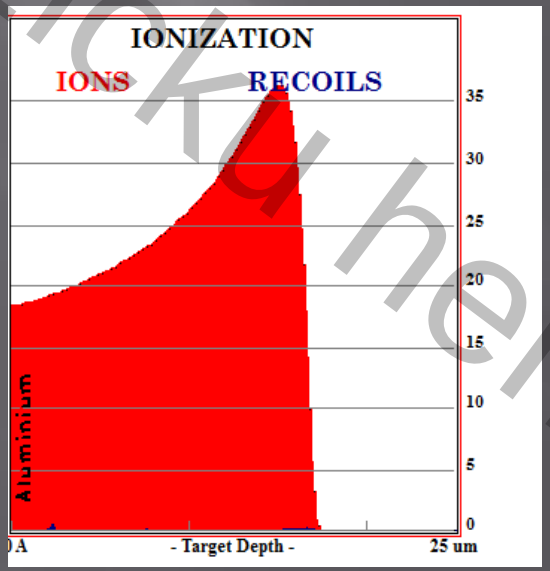




Специфична јонизација

α-честице у алуминијуму

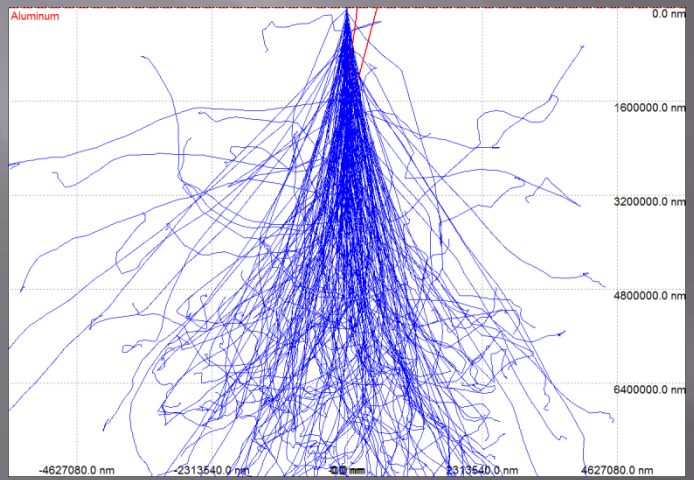




Fakultet za fizičku hemiju

Интеракција електрона са материјом

- Електрони доминантно губе енергију у истим процесима као и α-честице.
- Али…
  - Обзиром да имају исте масе као орбитални електрони могу изгубити велики део енегије у једном судару и променити правац свог кретања.
  - Енергије електрона добијених јонизацијом средине су велике и врше јаку додатну јонизацију (70 -80 % тоталне апсорпције енергије)



$$S_{\text{electronic}} = -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{electronic}} = \frac{2\pi Z e^4 \rho_N}{m_e v^2}\left[\ln\left(\frac{m_e v^2 E}{2I^2(1-\beta^2)}\right) - \ln 2\left(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2\right) + (1-\beta^2) + \frac{1}{8}\left(1-\sqrt{1-\beta^2}\right)^2\right]$$

Fakultet za fizičku hemiju

- Специфична јонизација је знатно нижа него код алфа честица

Закочно зрачење (*Bremsstrahlung*)

- Потиче од успоравања електрона у пољу језгра при чему се емитује континуално х-зрачење

- Мали допринос у укупном губитку енергије електрона који потичу из радиоактивног распада

- Интензитет му зависи од Z^2 (средине)

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{el}} = \frac{E_e Z}{800}$$

За Al ~1 %. Код олова доминантан процес

Fakultet za fizičku hemiju

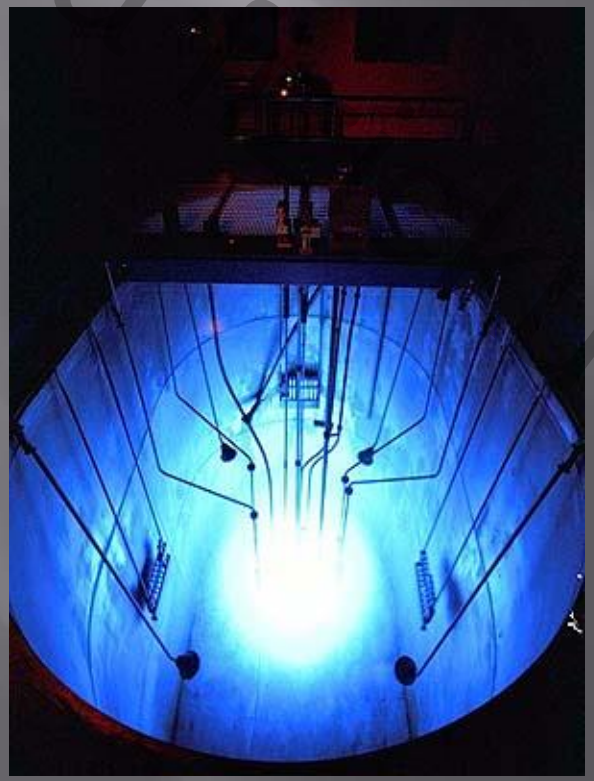
Черенковљево зрачење

- Емитују га честице при проласку кроз материјалну средину имају брзину већу од брзине светлости

$$c_n = \frac{c}{n_r}$$

n_r за воду 1,33

- $I \uparrow \ \lambda \downarrow$



Fakultet za ... hemiju

Интеракција позитрона са материјом

- Идентични процеси губитка енергије као за електроне
- Када брзина позитрона постане упоредива са брзином електрона у атомском омотачу долази до анихилације

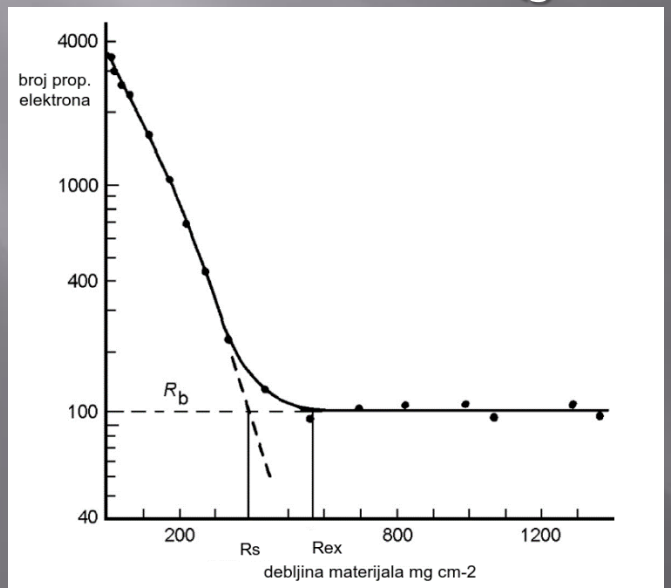
$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma \quad (2*0{,}511\ \text{MeV})$$

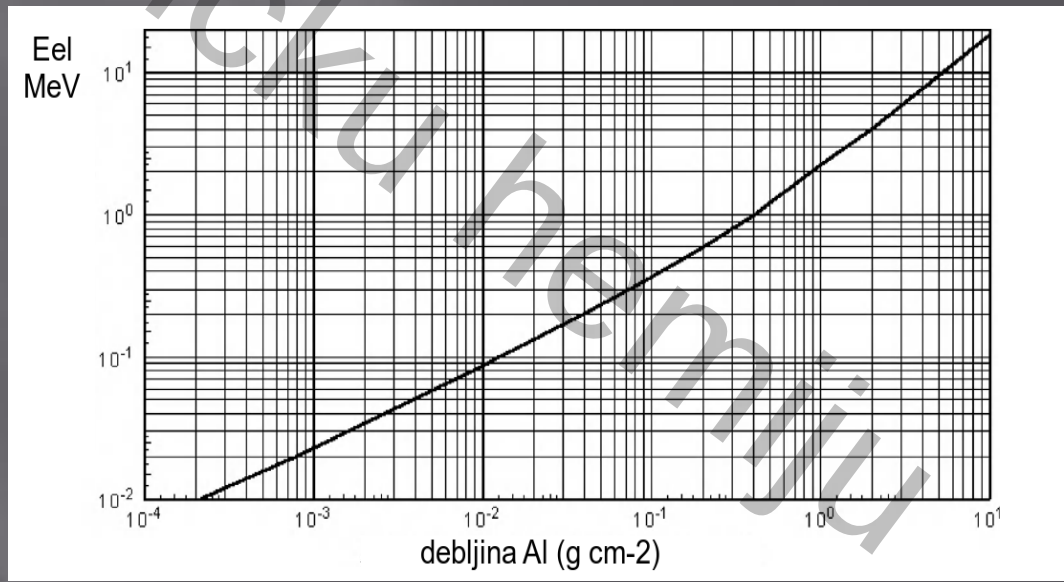
Fakultet za fizičku hemiju

Домет електрона у материји

- Дефинише се дебљина апсорбера неопходна да заустави 50 % електрона-полу*дебљина заустављање*
- За енергије електрона из радиоактивног распада полудебљина заустављања је дата као $d_{1/2} = \frac{ln2}{\delta}$ где је δ апсорпциони коефицијент материјала за електроне
- За енергије 0,7-3 MeV домет у Al је дат емпиријском формулом

$$d(gcm^{-2}Al) = 0{,}543E_{max} - 0{,}160$$

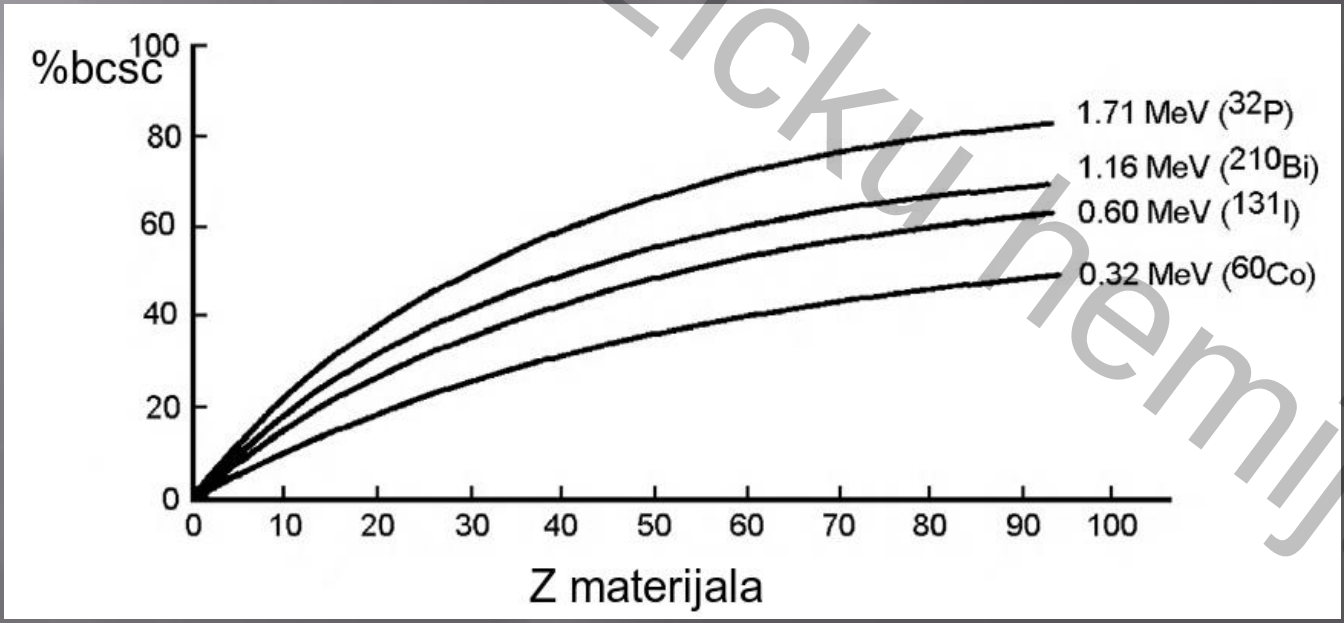




Fakultet za fizičku hemiju

Расејање од подлоге

- Проблем при мерењу кривих апсорпције електрона због тога што све честице нису емитоване у правцу мерног уређаја
- Удео оваквог расејања зависи од дебљине подлоге , енергије електрона, као и електронске густине материјала подлоге



Fakultet za fizičku hemiju

Интеракција γ-зрачења са материјом

- Слабо јонизујуће зрачење (1 -10 % јонизације коју производе електрони)
- Енергија се губи у свега неколико интеракција
- Губитак интензитета упадног γ-зрачења при проласку кроз средину је експоненцијална функција њене дебљине

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Fakultet za fizičku hemiju

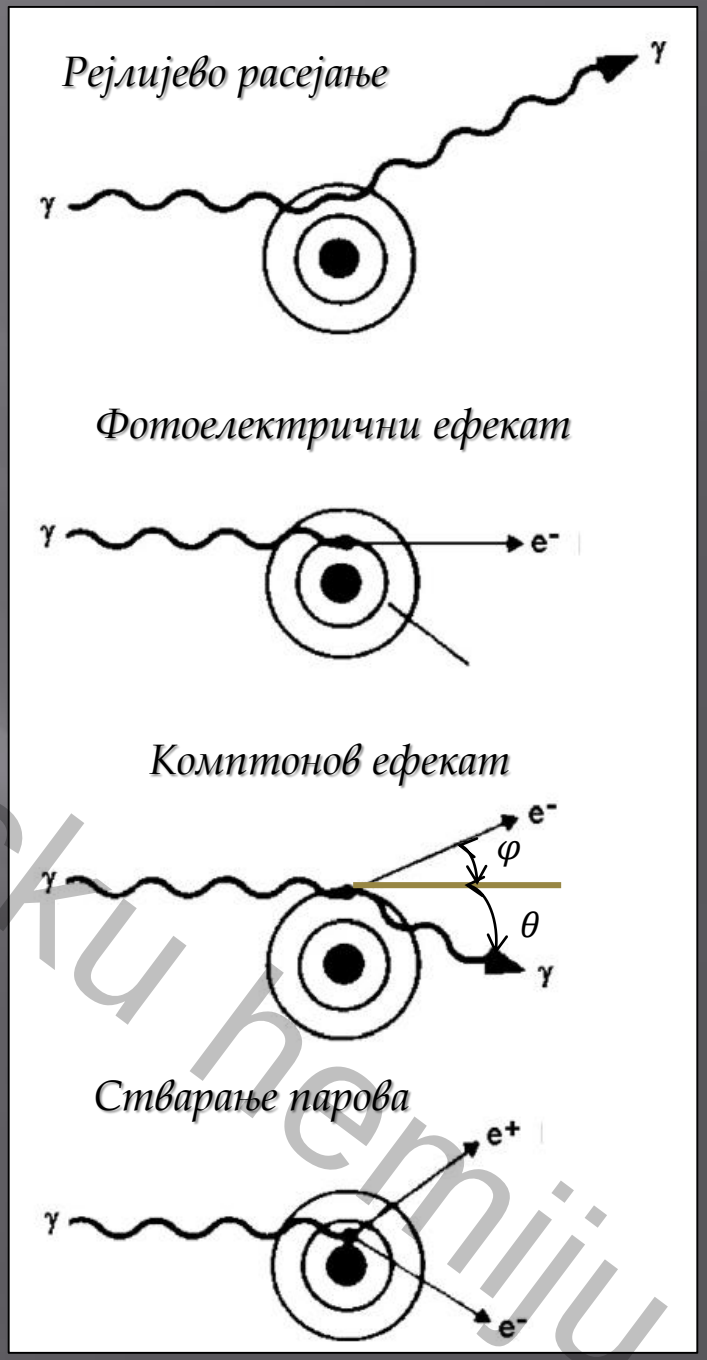
- Рејлијево расејање- атом апсорбује γ квант и одмах га емитује у другом правцу

- Фотоелектрични ефекат- γ квант предаје сву своју енергију електрону из унутрашњих љуски атома (K, L…) прои чему емитовани електрон има енергију

$$E_e = \frac{mv^2}{2} = h\nu - E_{j,K\ldots}$$

- Комптонов ефекат – расејање γ кванта на електронима из валентних љуски
- Кинтеичка енергија избаченог електрона једнака је

- $E_e = \frac{mv^2}{2} = h\nu_0 - h\nu_r - E_j$



Fakultet za fizicku hemiju

Таласну дужину расејаног фотона (а тиме и енергију) могуће је одредити на основу релације

$$\lambda_0 - \lambda = \frac{h}{m_e c^2}(1 - cos\theta)$$

- Стварање парова - γ-фотон у пољу сила језгра ствара пар позитрон – електрон са енергијама

$$E_{e^-} = E_{e^+} = h\nu - 1{,}022\ MeV$$

Fakultet za fizičku hemiju

Апсорпција γ-зрака

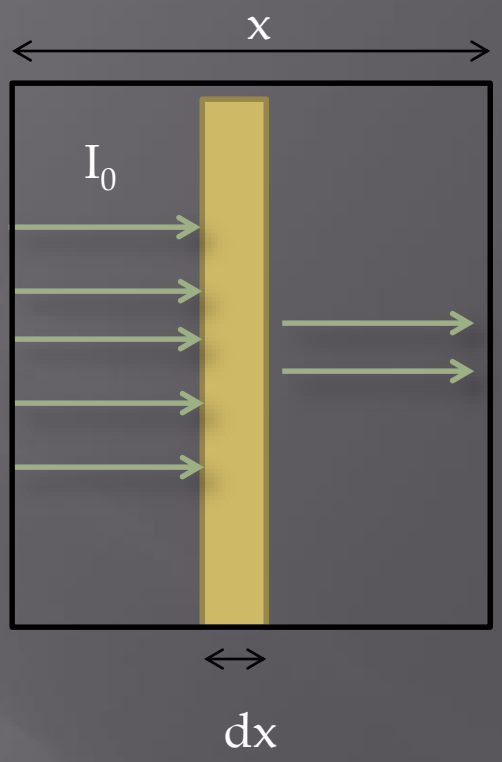
- Парцијални коефицијенти апсорпције
- Фотоелектрични ефекат

$$-dI = \mu_f I dx \Longmapsto I = I_o e^{-\mu_f x}$$

- Емпиријска једначина за коеф. апсорпције код фотоефекта
-

$$\mu_f = g\left(\frac{1}{h\nu_0}\right)^{2,8} Z^2$$

Фотоефекат је доминантан код нижих енергија упадног фотона



Fakultet za fizicku hemiju

- Комптонов ефекат

$$I = I_o e^{-\mu_c x}$$

$$\mu_c = \mu_c^e n_e Z = \frac{\rho Z N_A}{M}$$

$$\mu_c^e = f(E_\gamma)$$

Компонов ефекат доминира у области средњих енергија γ-зрачења.

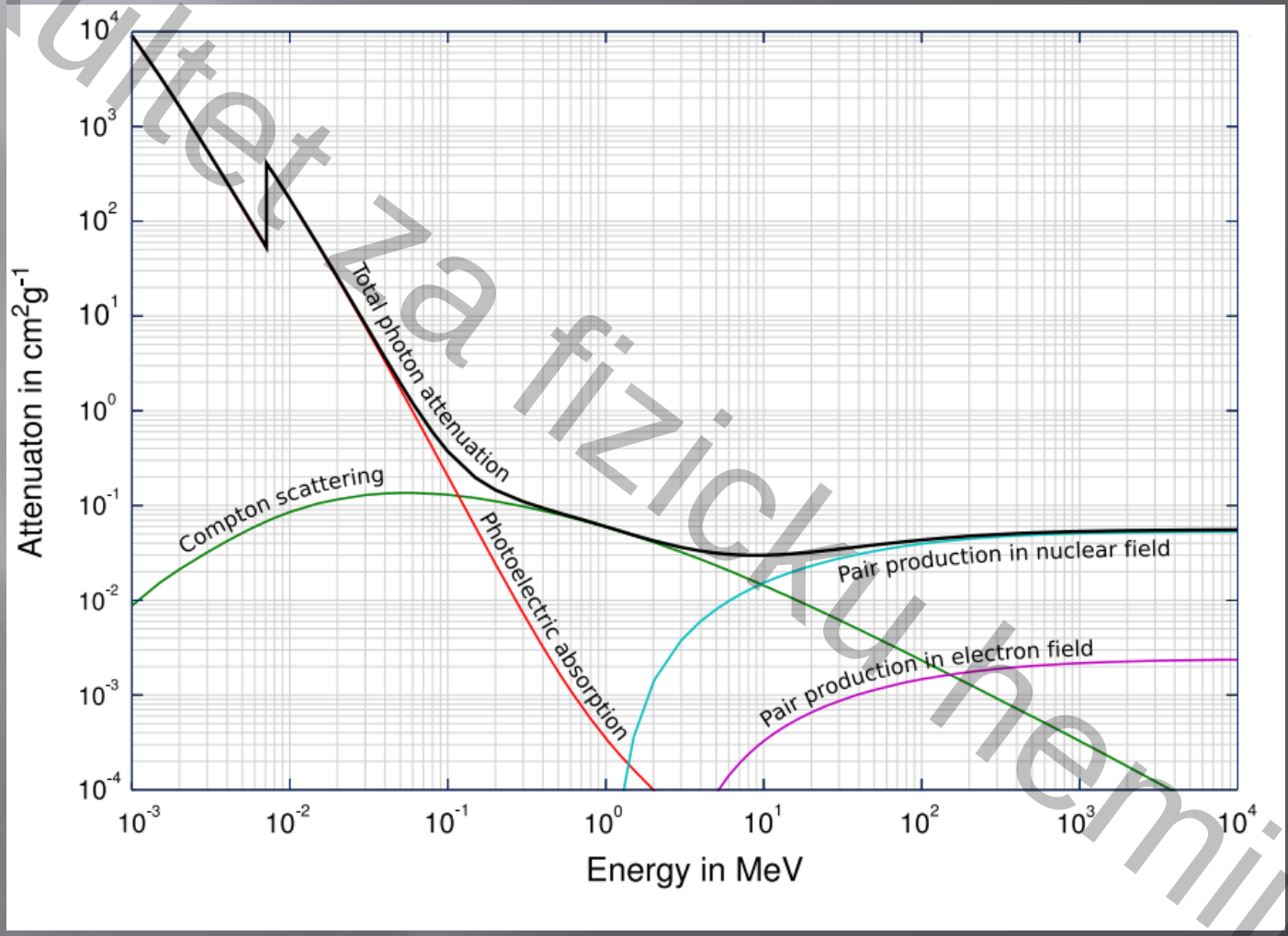
- Стварање парова

$$I = I_o e^{-\mu_p x}$$

$$\mu_p = \kappa(E_\gamma - 2m_e c^2)Z^2$$

Fakultet za fizicku hemiju

$$I = I_0 e^{-\mu_t x} = I_0 e^{-(\mu_f + \mu_c + \mu_p)x}$$



Fakultet za fizičku kemiju

Интеракција неутрона са материјом

- Исти закон слабљења као код γ-зрачења
- Неутрони трпе низ еластичних судара при чему опада њихова кинетичка енергија
- Када се довољно успоре бивају захваћени од стране језгра при чему се емитује честично или најчешће γ-зрачење

$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{A+1}_{Z}X + $$

$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{A-3}_{Z}X + {}^{4}_{2}He $$

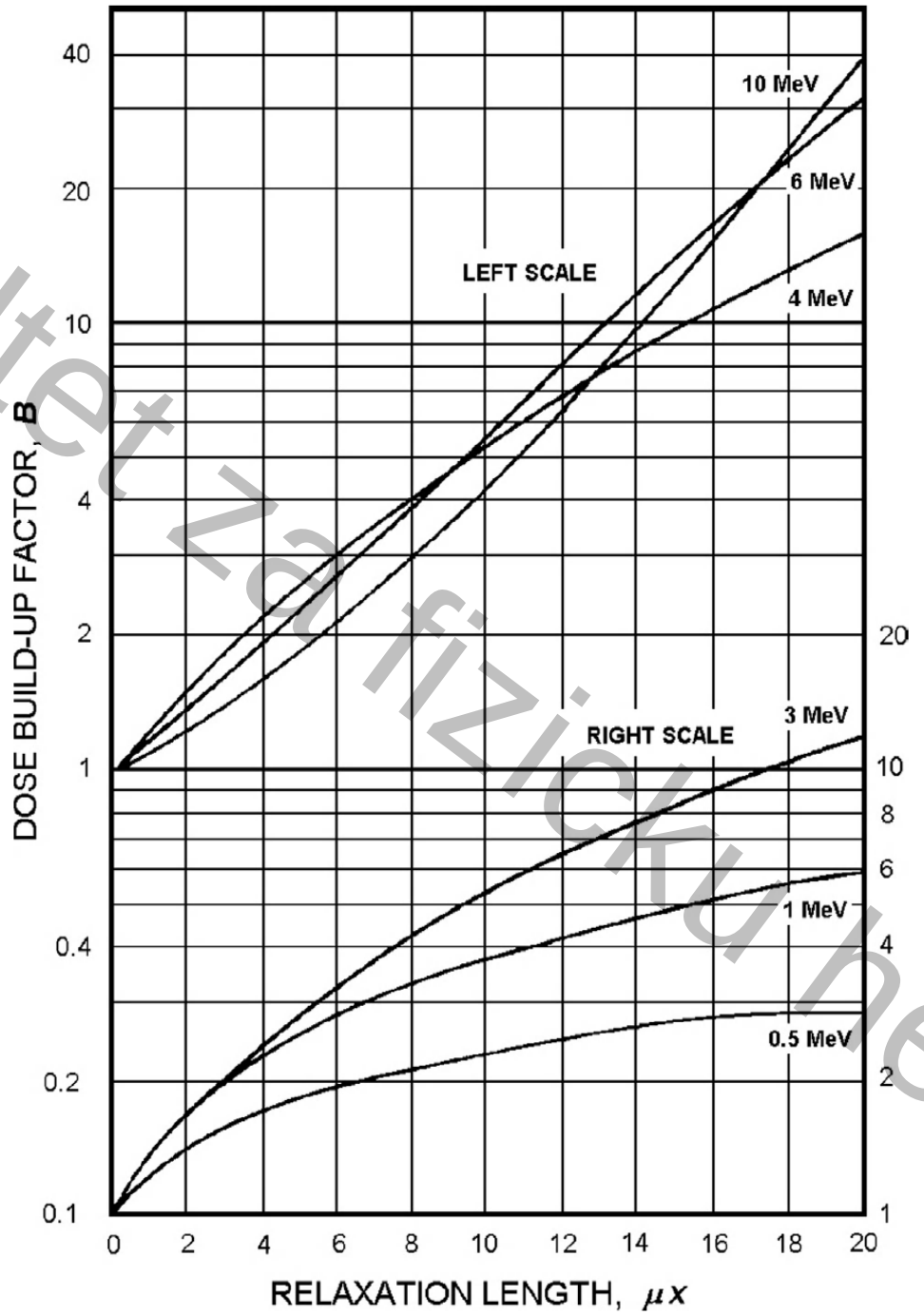
- Неутрони који избегну ове процесе распадају се β^- распадом

Fakultet za fizičku hemiju

Заштита од нуклеарног зрачења

- За алфа-честице ~0.2 mm
- За бета честице ~15 mm лаког материјала (нпр пластика)
- $\Phi = B\Phi_0 e^{-\mu x}$
- B – фактор нагомилавања дозе

Fakultet za fizičku hemiju



Fakultet za fizičku hemiju