

Интеракција зрачења са материјом

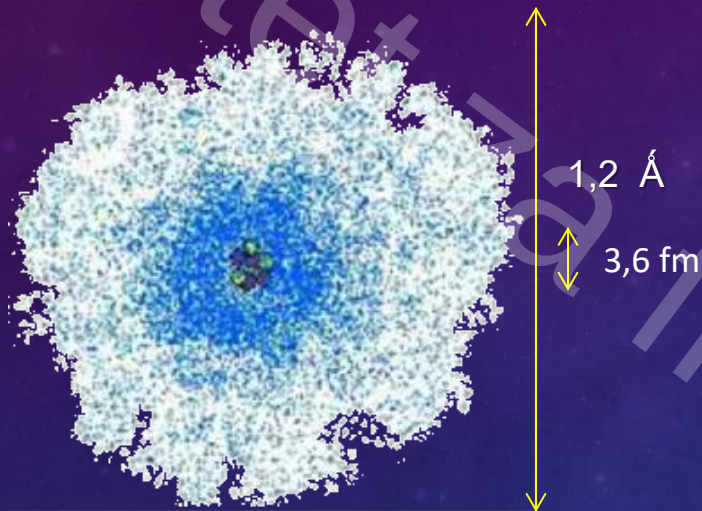


НУКЛЕАРНО ЗРАЧЕЊЕ

- Јонизујуће зрачење - елементарне 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)

ПРОЦЕСИ У КОЈИМА СЕ АПСОРБУЈЕ ЈОНИЗУЈУЋЕ ЗРАЧЕЊЕ

- Шта у материјалној средини интерагује са зрачењем?



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

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

- Јонизација, при чему настаје **јонски пар**
- Ексцитација при чему се атом или молекул средине преводи у побуђено стање

ОСТАЛИ ЕФЕКТИ ПРОЛАСКА ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА КРОЗ МАТЕРИЈУ

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

ВЕЛИЧИНЕ КОЈЕ КАРАКТЕРИШУ ПРОЛАЗ ЗРАЧЕЊА КРОЗ МАТЕРИЈУ

- Зауоставна моћ губитак енергије по јединици пређеног пута

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

- Линеарни трансфер енергије (LET)

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

- Релативна зауоставна моћ

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

- Специфична јонизација

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

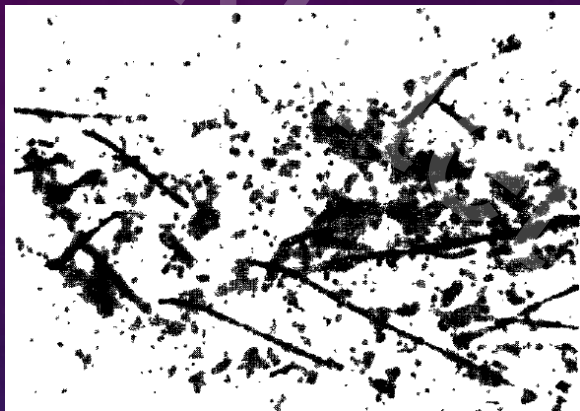
- Домет честице **R** (cm) је растојање које честица пређе од уласка у материјал до потпуног заустављања

Површинска густина

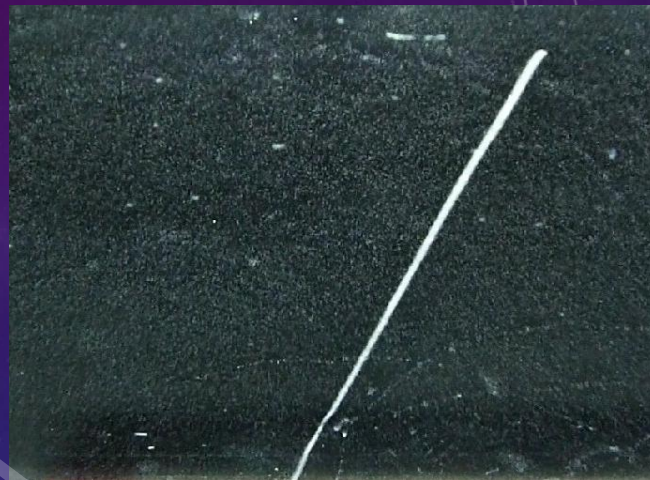
$$x = \frac{\left(\frac{m}{y \cdot z} \right)}{\rho} = \frac{A_d}{\rho} \text{ (g cm}^{-2}\text{)}$$

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

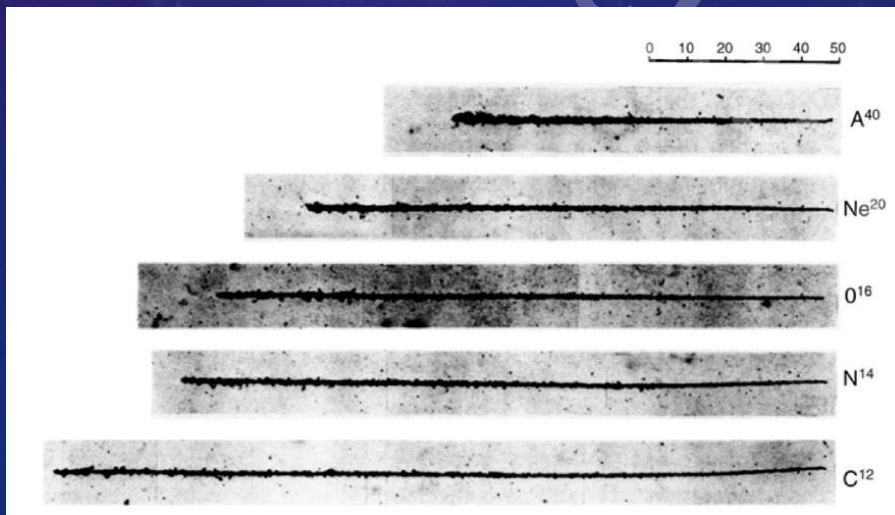
ПРОЛАЗ ПРОТОНА И ТЕШКИХ ЈОНА КРОЗ МАТЕРИЈУ



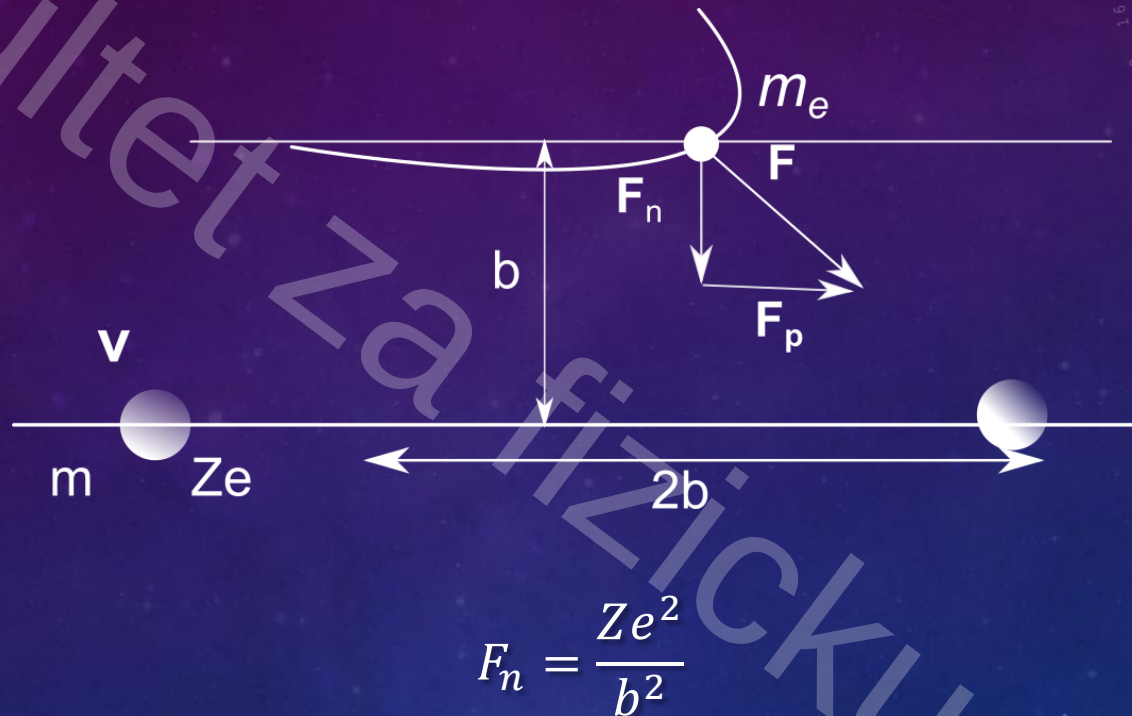
Протон- трагови у нуклеарној емулзији



Алфа честица- трагови у магленој комори



ИНТЕРАКЦИЈА АЛФА ЧЕСТИЦА И ТЕШКИХ ЈОНА СА МАТЕРИЈОМ



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

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

- Енергија коју електрон добије је једнака губитку енергије тешке честице $\varepsilon_e = -\Delta E$
- Ако је n_e електронска густина (број електрона/cm³, 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

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

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

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

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

Заменом у израз за енергију електрона добијамо

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

- 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

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

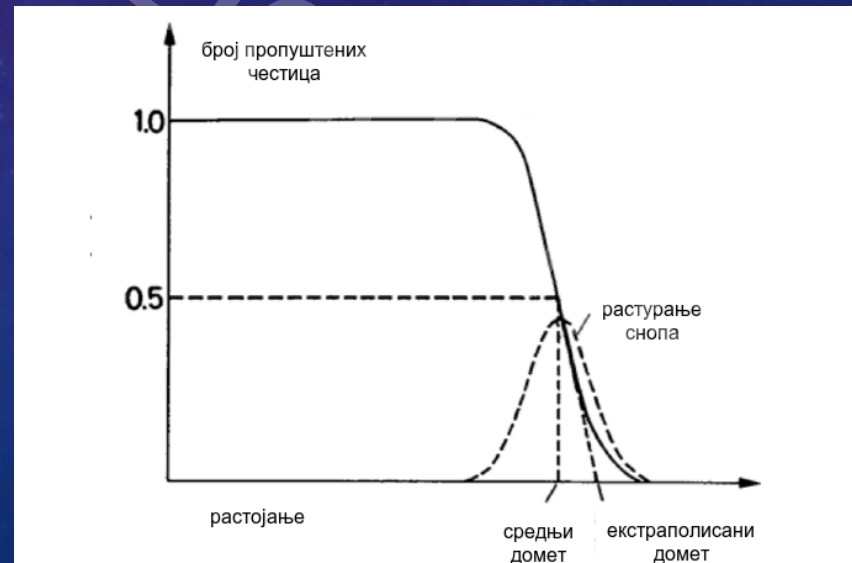
- Bohr-ову формулу наследила је **Bethe-Bloch –ова формула** која је такође изведена на основу трансфера импулса, али овог пута са коректним квантномеханичким формализмом

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

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

- Домет јона је

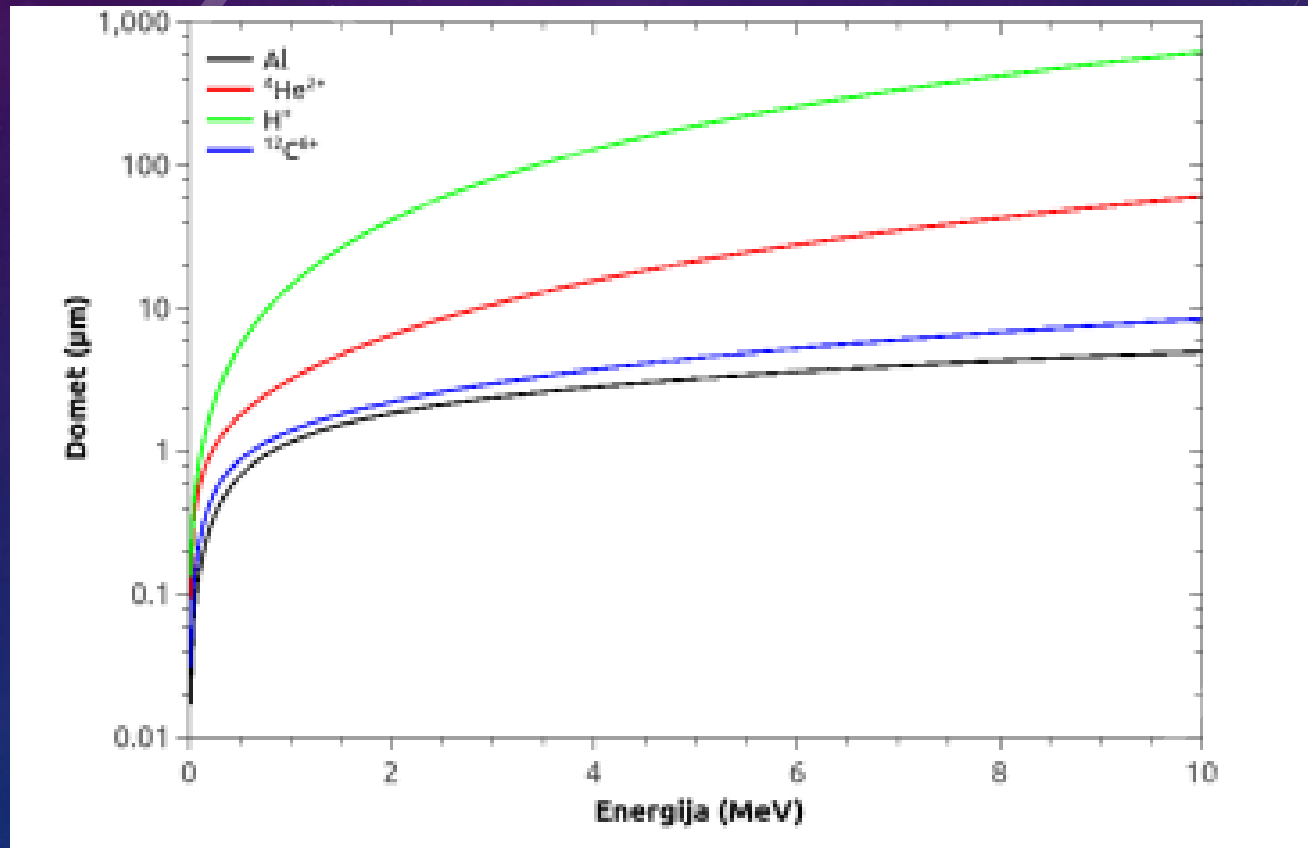
$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{\frac{dE}{dx}}$$



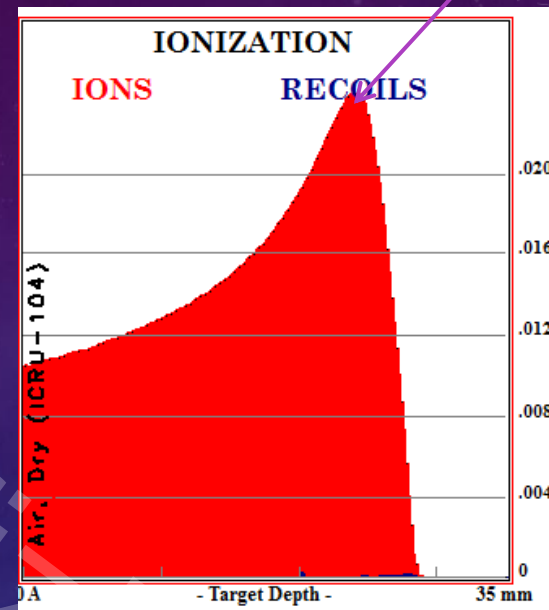
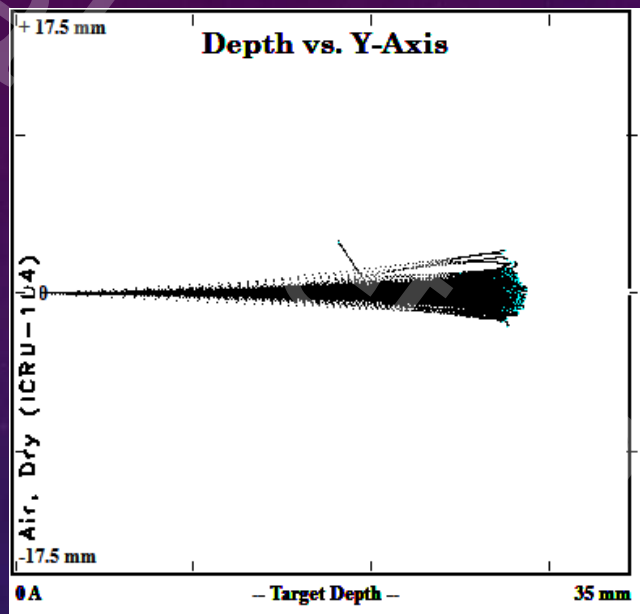
- Емпиријске формуле за домет α -честица (E_α у MeV)

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

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



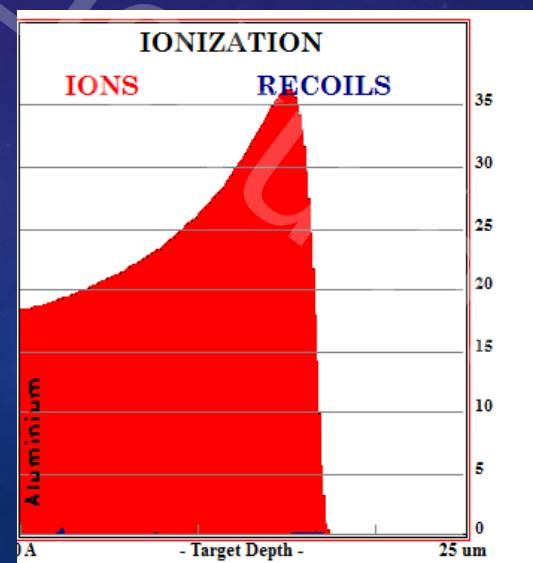
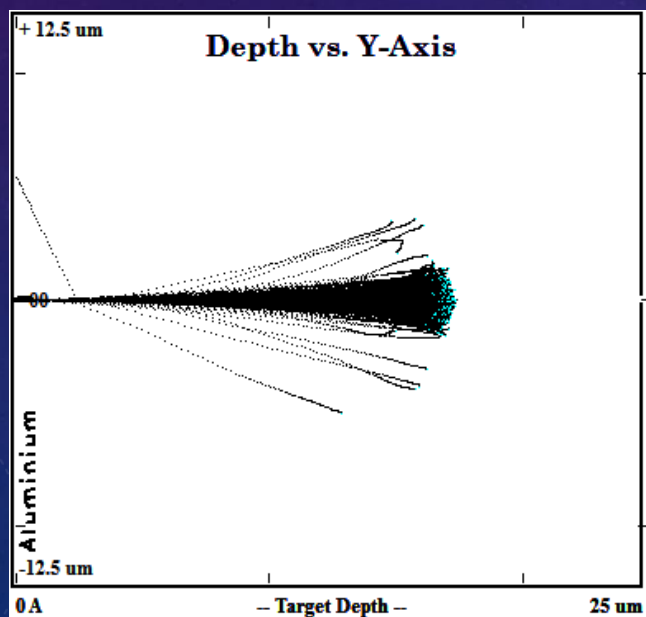
α -честице у ваздуху



Bragg-ov pik

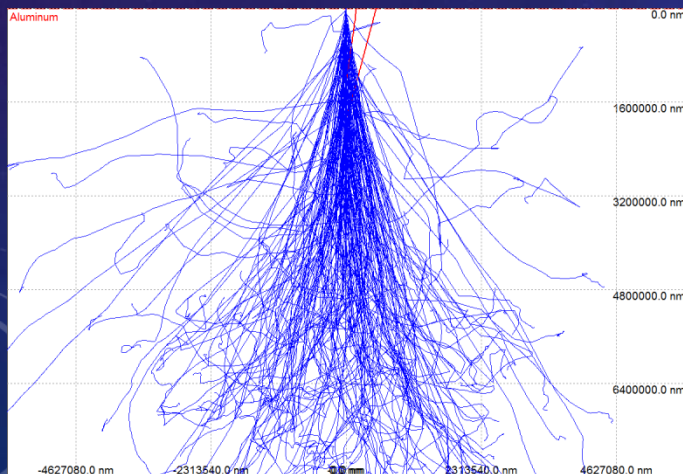
Специфична
јонизација

α -честице у алуминијуму



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)



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

- 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

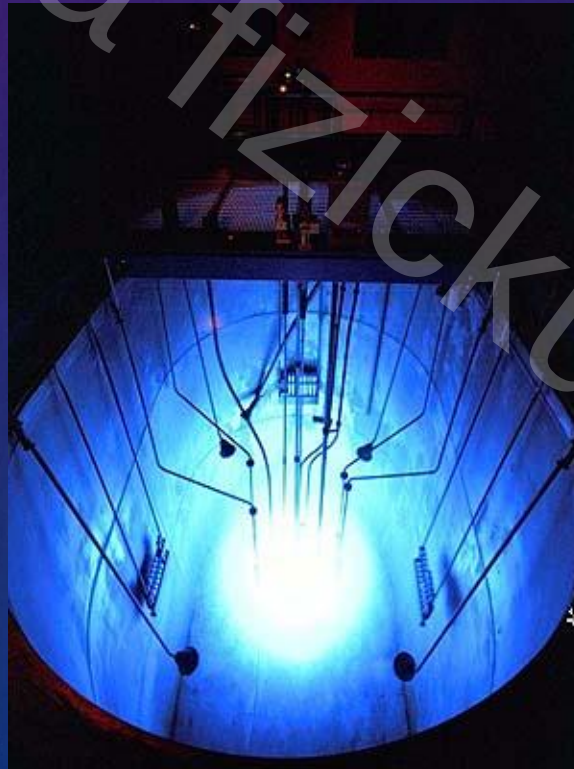
Черенковљево зрачење

- 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

- $I \uparrow \lambda \downarrow$



Интеракција позитрона са материјом

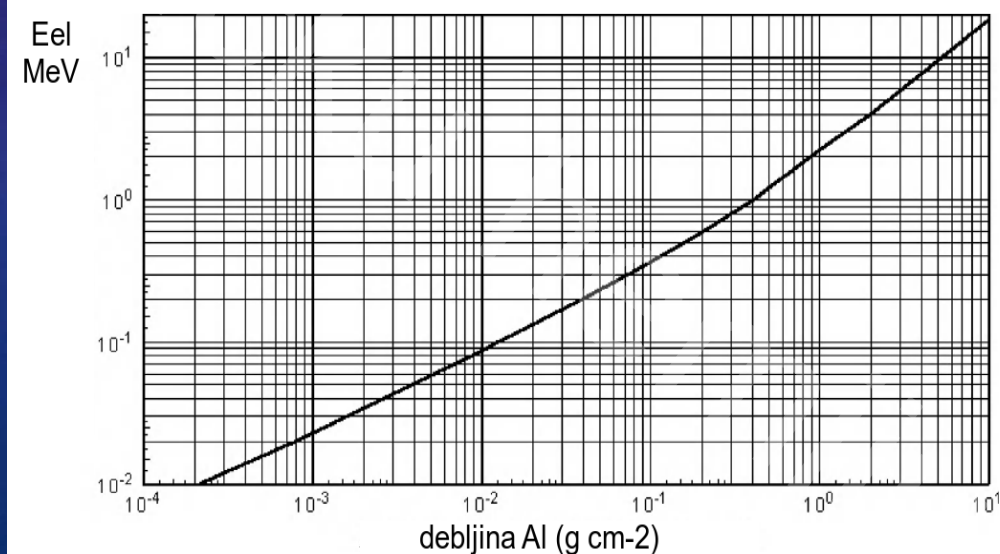
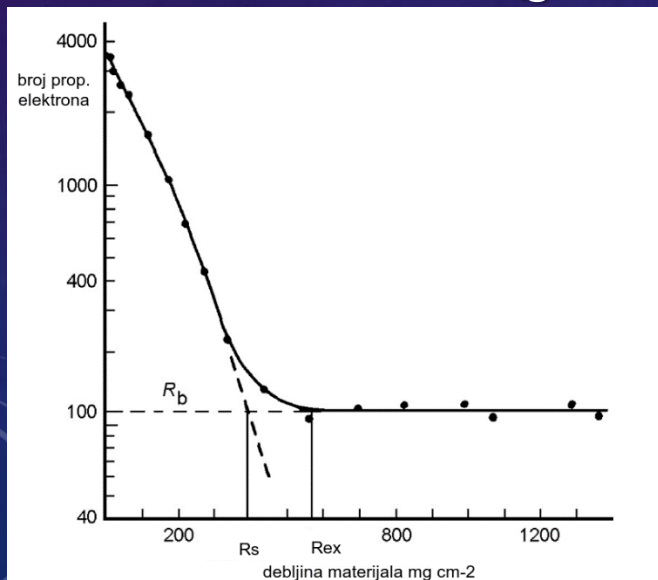
- Идентични процеси губитка енергије као за електроне
- Када брзина позитрона постане упоредива са брзином електрона у атомском омотачу долази до анихилације

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

ДОМЕТ ЕЛЕКТРОНА У МАТЕРИЈИ

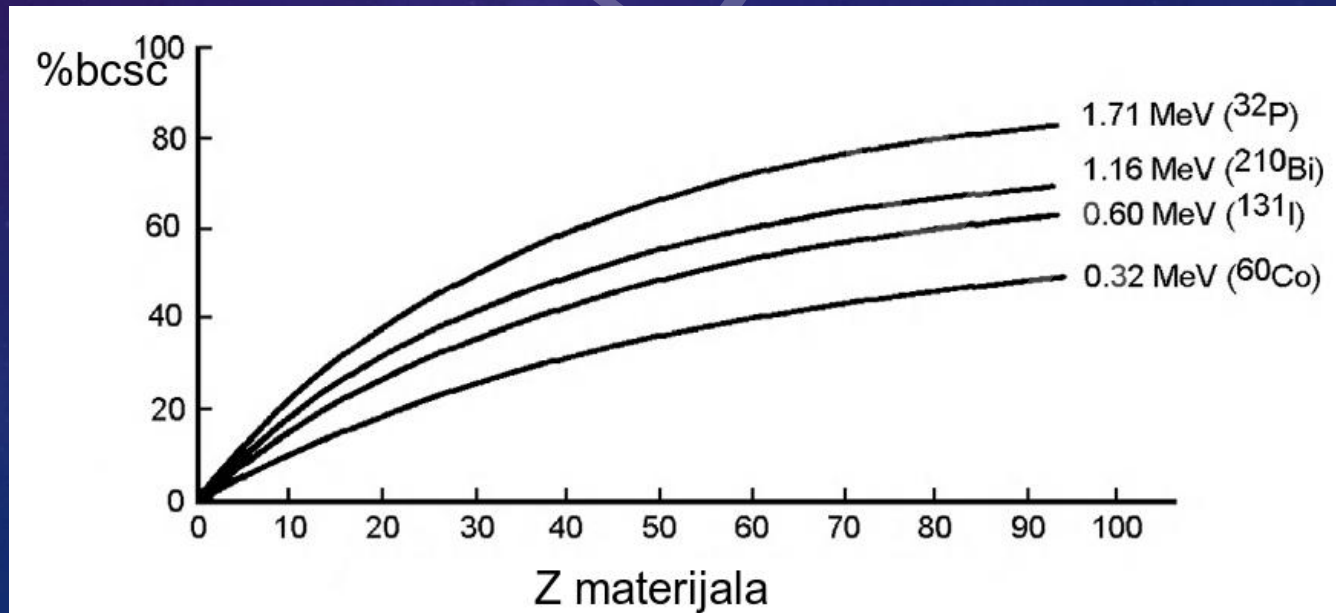
- Дефинише се дебљина апсорбера неопходна да заустави 50 % електрона-полудебљина заустављање
- За енергије електрона из радиоактивног распада полудебљина заустављања је дата као $d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\delta}$ где је δ апсорпциони коефицијент материјала за електроне
- За енергије 0,7-3 MeV домет у Al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

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



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



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

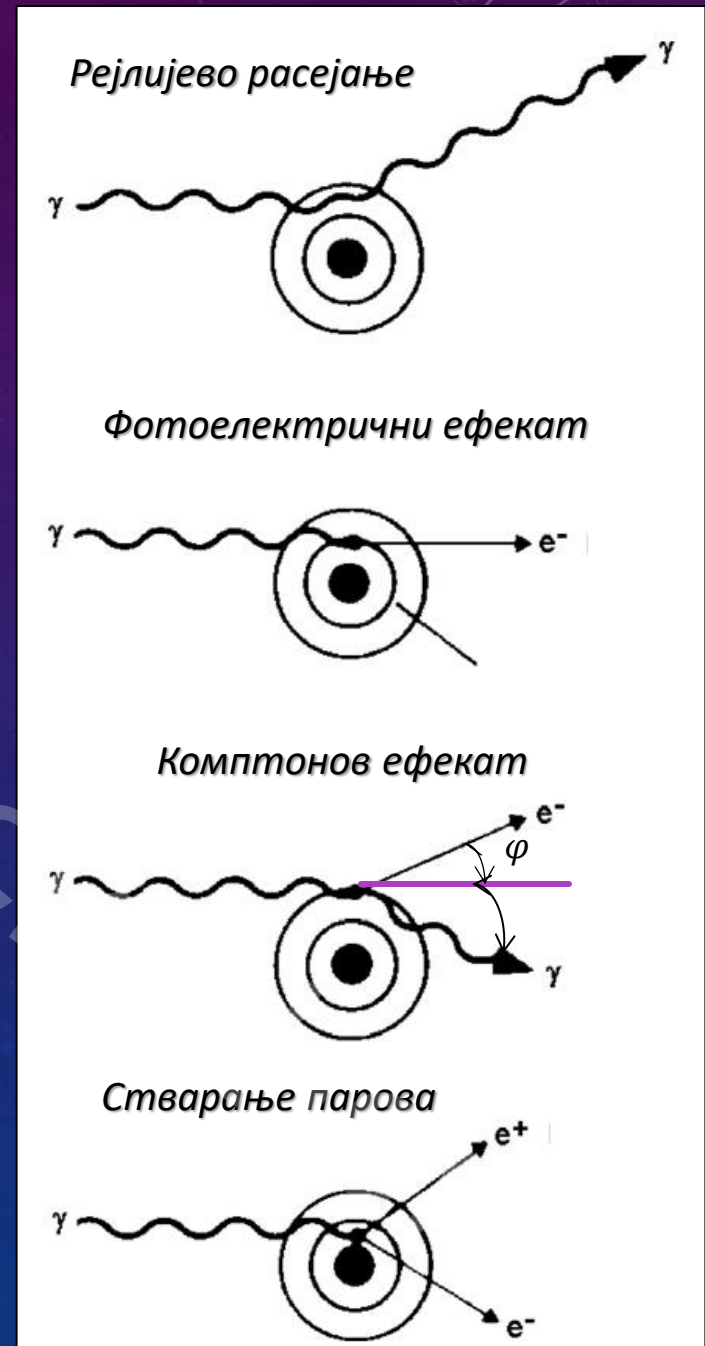
$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

- 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

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

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

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



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

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

АПСОРПЦИЈА γ -ЗРАКА

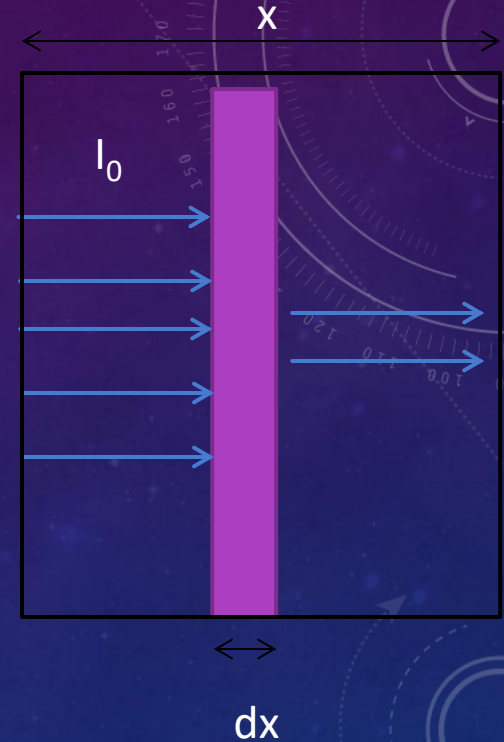
- Парцијални коефицијенти апсорпције
- Фотоелектрични ефекат

$$-dI = \mu_f I dx \Rightarrow I = I_0 e^{-\mu_f x}$$

- Емпиријска једначина за коеф. апсорпције код фотоэффекта
-

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

Фотоэффект је доминантан код нижих енергија упадног фотона



- Комптонов ефекат

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

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

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

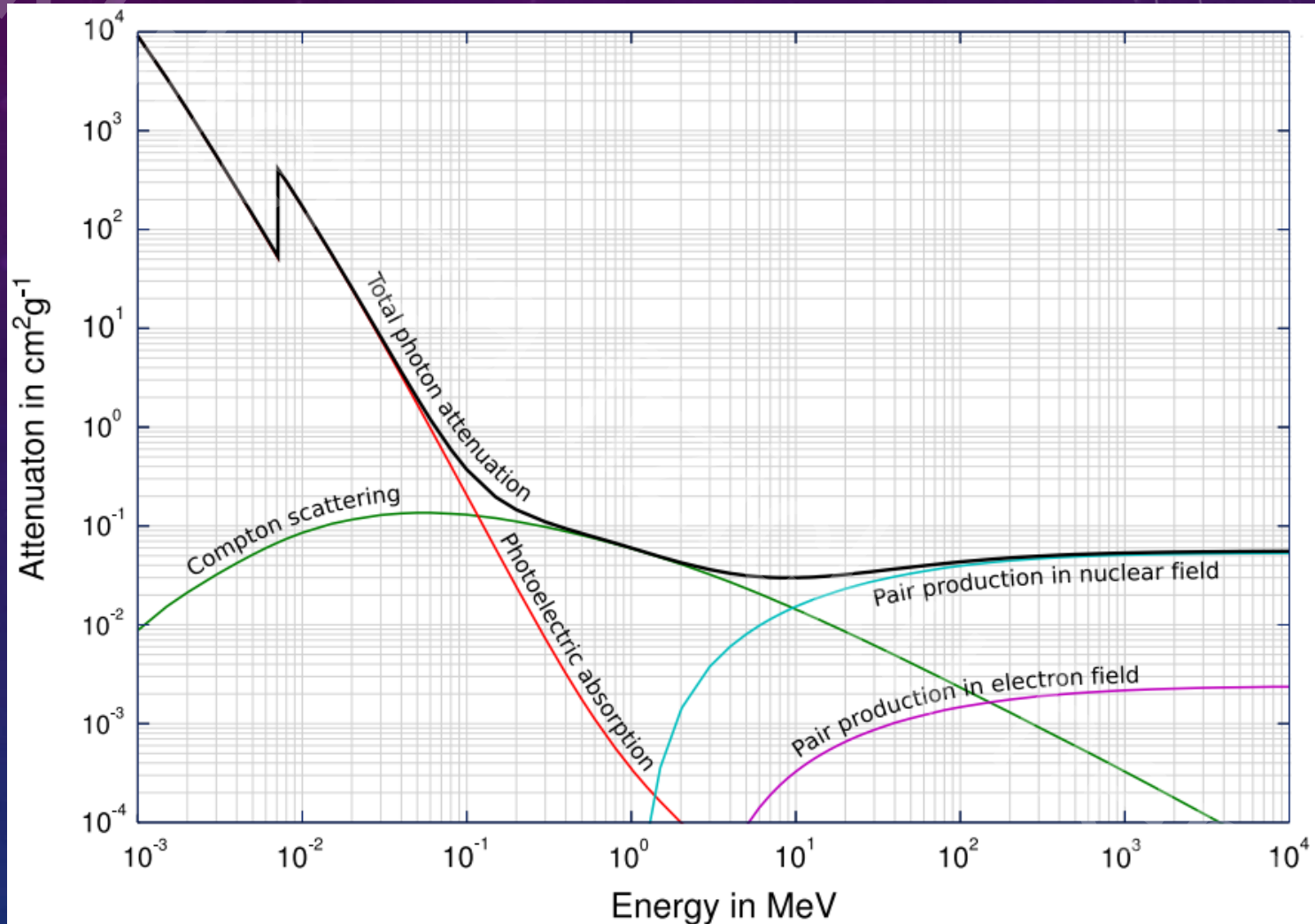
Комптонов ефекат доминира у области средњих енергија γ -зрачења.

- Стварање парова

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

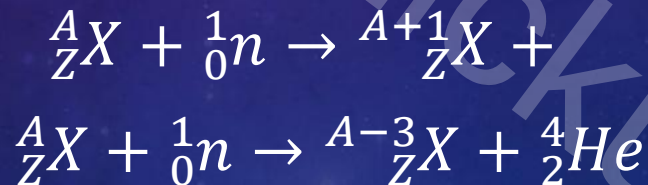
$$\mu_p = \kappa(E_\gamma - 2m_e c^2) Z^2$$

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



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



- Неутрони који избегну ове процесе распадају се β -распадом