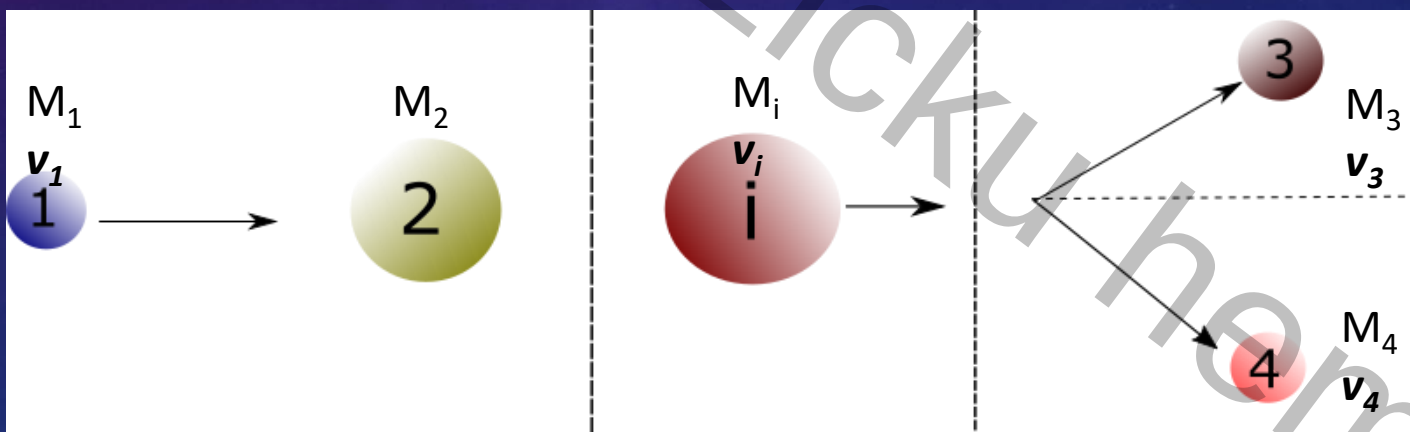


НУКЛЕАРНЕ РЕАКЦИЈЕ



ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

- Свака интеракција атомском језгра са другом честицом назива се нуклеарном реакцијом
- У основи постоје три типа
 - Реакције еластичног расејања (мења се само E_k)
 - Реакције екситације (језгро мете бива побуђено на више енергетске нивое)
 - Реакције трансмутације (настаје нови нуклид/и)



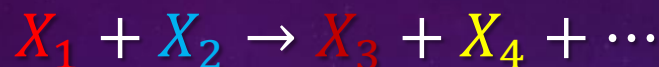
проектил

мета

Сложено језгро

Производи/ејектили

НОТАЦИЈА НУКЛЕАРНИХ РЕАКЦИЈА



X_1 пројектил

X_2 језгро мета

X_3 језгро производ

X_4 ејектил

Bethe-ова нотација



Пример



- Закони одржања су идентични као за радиоактивни распад, осим код реакција са честицама са енергијом већом од 100 MeV/нуклеону.
- Рекапитулација закона одржања у нуклеарним процесима

$$\Delta E=0$$

$$\Delta p=0$$

$$\Delta Z=0$$

$$\Delta A=0$$

$$\Delta I=0$$

Закон одржања импулса

$$p_p + 0 \rightarrow p_3 \cos \theta_3 + p_4 \cos \theta_4$$

- Због (често) високих енергија честица пројектила у прорачунима везаним за нуклеарне реакције употребљавају се релативистичке масе/енергије

ЕНЕРГЕТИКА НУКЛЕАРНЕ РЕАКЦИЈЕ

- Енергија нуклеарне реакције Q је дата релацијом

$$Q(\text{MeV}) = -931,5\Delta M_0$$

$$\Delta M_0 = M_3^0 + M_4^0 - M_1^0 - M_2^0$$

$\Delta M_0 < 0$, $Q > 0$ егзоенергетска реакција

$\Delta M_0 > 0$, $Q < 0$ ендоенергетска реакција

$$E_{kin} = (m - m^0)c^2$$

$$E_{mas}^0 = m^0 c^2$$

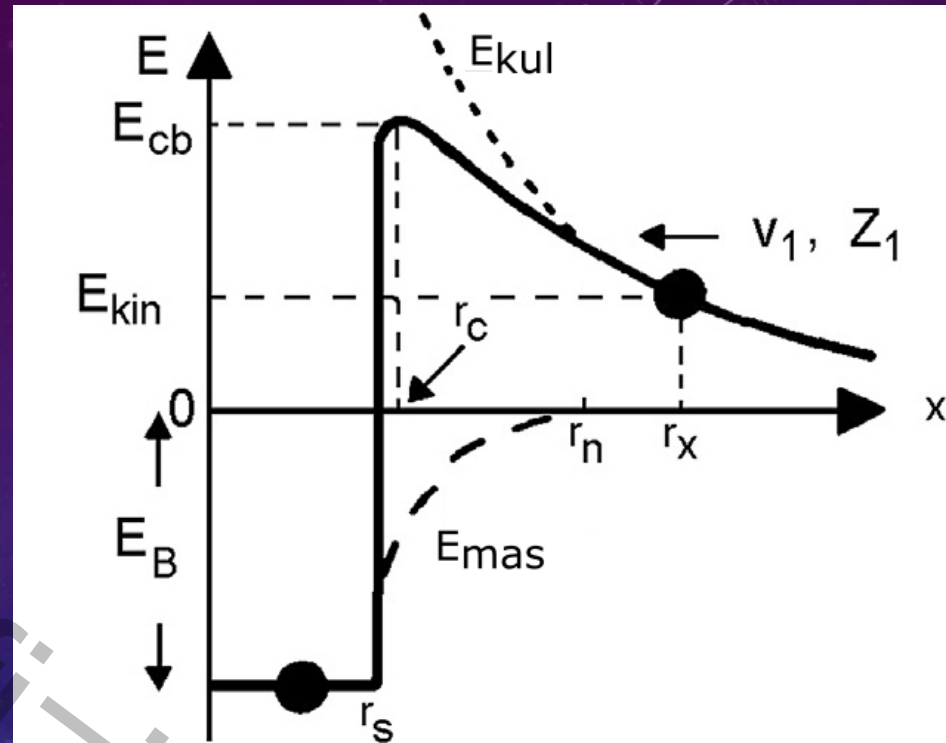
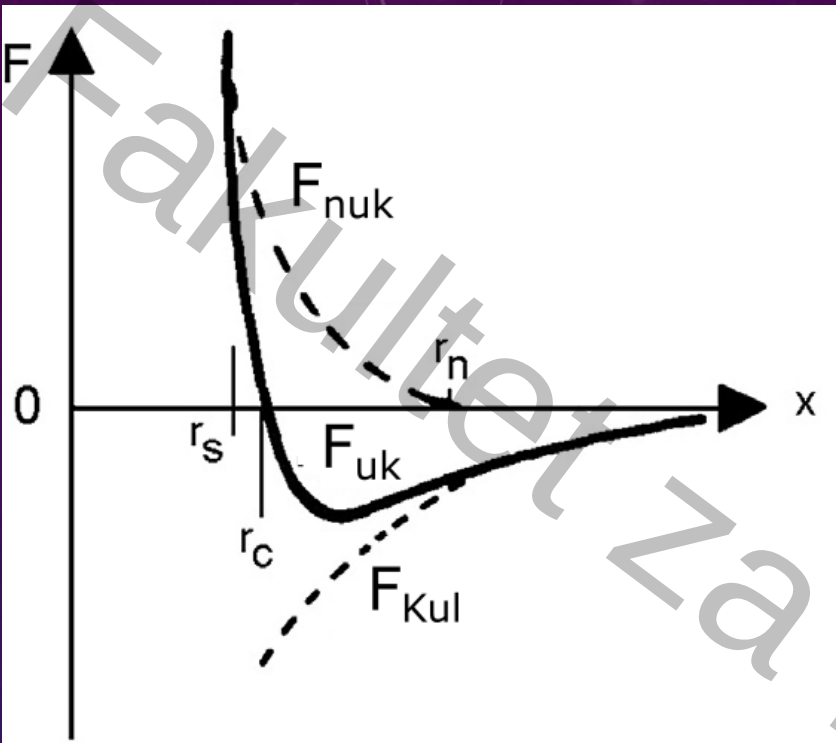
$$E_{uk} = mc^2$$

$$E_{uk} = E_{kin} + E_{mas}^0$$

КУЛОНСКА БАРИЈЕРА

- Укупна енергија укључује
 - Енергију масе мировања E_{mas}^0
 - Енергију ексцитације језгра E_{eks}
 - Апсорпцију или емсију фотона у реакцији E_n
 - Електростатички потенцијал (у реакцијама са наелектрисаним честицама) E_{Kul}
 - Кинетичку енергију E_{kin}
- У интеракцији позитивно наелектрисане честице – пројектила и језгра мете долази до међусобног одбијања

$$F = \frac{keZ_1eZ_2}{x^2}$$



$$E_{kin}^0 = E_{kin} + E_{kul}$$

Да би позитивно наелектрисана честица изазвала нуклеарну реакцију мора да има енергију већу од

$$E_{Kb} = \frac{kZ_1Z_2e^2}{r_c}$$

r_s радијус конст. густине

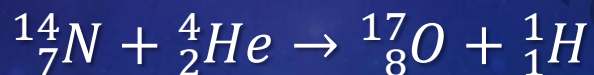
r_c Кулонов радијус

r_n нуклеарни радијус

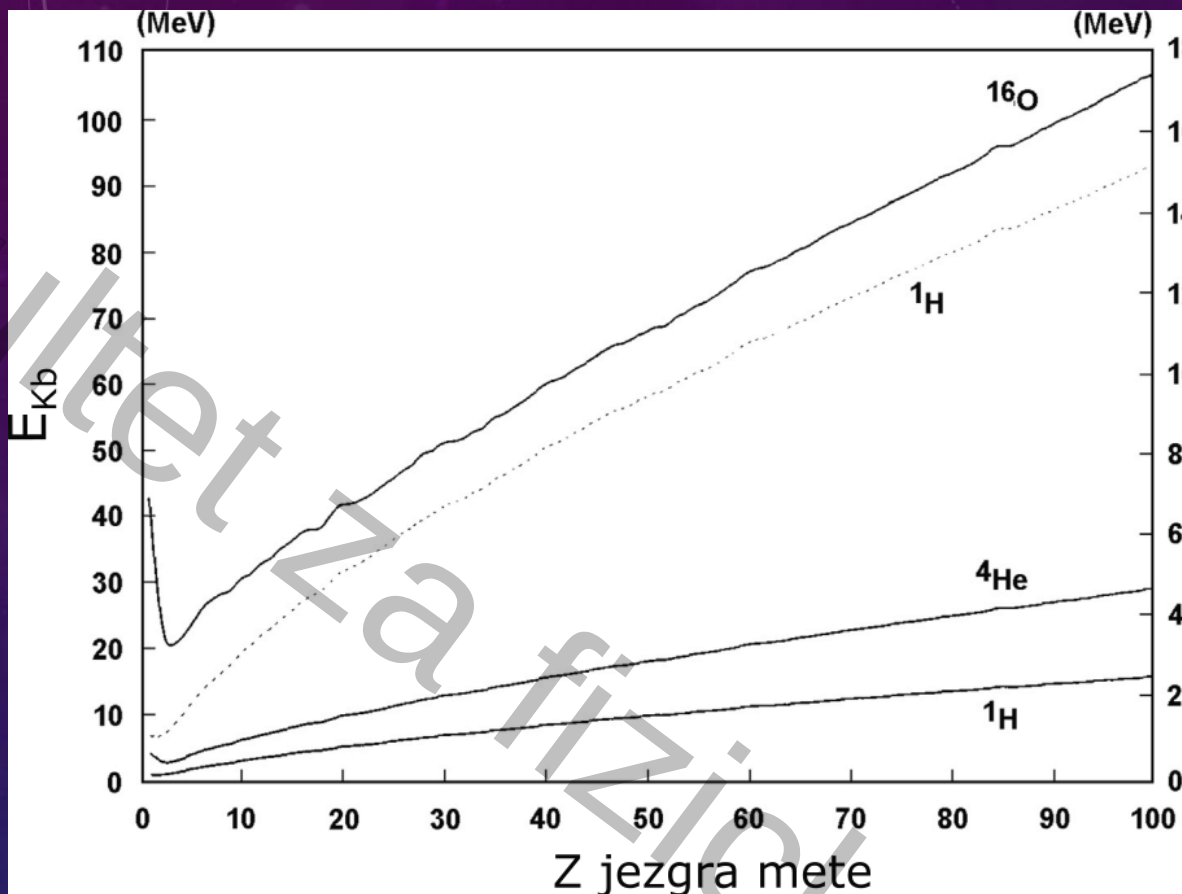
- Да би се израчунала E_{cb} за rc (у апроксимацији) можемо узети да је једнак збиру радијуса језгра мете и пројектила. Поред тога мора се узети у обзир да и центар масе таквог система има узмак, На основу тога и $r = r_0 A^{1/3}$ добија се

$$E_{Kb(min)} = 1,109(A_1 + A_2) \left[\frac{Z_1 Z_2}{A_2 (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})} \right] (\text{MeV})$$

Пример нуклеарна реакција



$$E_{\alpha}({}^{210}\text{Po}) = 7,68 \text{ MeV} \quad E_{Kb(min)} = 4,99 \text{ MeV}$$



У већини случајева не ради се о чеоном судару пројектила и мете. Минимално растојање између њих у одсуству дејства сила x назива се параметар удара.

Ако на пројектил делује E_c минимално растојање је веће и назива се растојање најближег приласка d

$$d = r + \sqrt{r^2 + x^2}$$

где је r радијус судара

$$r = \frac{kZ_1Z_2e^2}{\mu(v_1^0)^2}$$

ЕЛАСТИЧНО РАСЕЈАЊЕ

$$X_1(v_1) + X_2(v_2) \rightarrow X_1(v'_1) + X_2(v'_2) \quad Q=0$$

Енергија пренесена у судару (под условом да мета мирује)
је

$$E_s = E_{pr} \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right)$$

док су брзине пројектила и мете после судара дате
изразима

$$v'_1 = \frac{v_1(M_1 - M_2)}{(M_1 + M_2)}$$

$$v'_2 = \frac{2v_1M_1}{(M_1 + M_2)}$$

УСПОРАВАЊЕ (МОДЕРАЦИЈА) НЕУТРОНА

У случају чеоног судара неутрона са језгром мете предата енергија је

$$E_{s(max)} = E_n^0 \frac{4M_2}{(1 + M_2)^2}$$

За опсег енерија 0-10 MeV сви судари су подједнако вероватни тако да је средња предата енергија

$$E_s = E_n^0 \frac{2M_2}{(1 + M_2)^2}$$

Енергија коју неутрон задржи је

$$E_n = E_n^0 - E_{s(max)} = E_n^0 \left(1 - \frac{4M_2}{(1 + M_2)^2} \right)$$

Из овога следи да је наефикаснији трансфер енергије у судару са честицом сличне масе-протоном

- За судар са протоном

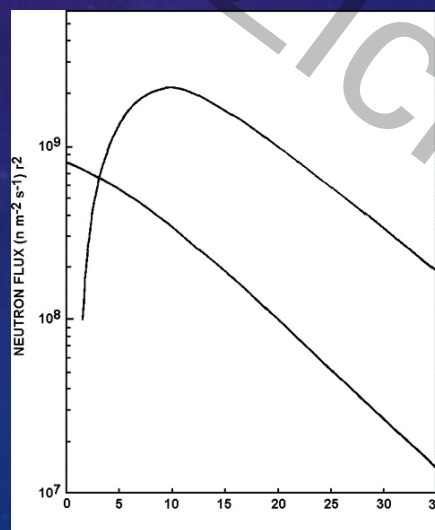
$$\frac{E_n}{E_n^0} = \left(1 - \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2}$$

После n судара са протонима енергија неутрона ће бити

$$\frac{E_n}{E_n^0} = \left(1 - \frac{1}{2}\right)^n = \frac{1}{2^n}$$

Стога су супстанције које садрже водоник добри модератори неутрона

За тачкасти неутронски извор окружен модератором флукс термалних неутрона је функција растојања



Rastojanje (cm)

ЕКСЦИТАЦИЈА ЈЕЗГРА У СУДАРИМА

- Процес у којем долази до промене потенцијалне енергије али не долази до трансформације језгра мете у друго



Пример



$$t_{1/2}({}^{107\text{m}}\text{Ag}) = 44 \text{ s}$$

АНАЛИЗА НУКЛЕАРНЕ РЕАКЦИЈЕ



$$\begin{aligned}\Delta M^0 &= M^0({}^{17}O) + M^0({}^1H) - M^0({}^{14}N) - M^0({}^4He) = \\ &= 16,999131 + 1,007825 - 14,003174 - 4,002603 = 0,001279u \\ Q &= -\Delta M^0 c^2 = -1,19 MeV\end{aligned}$$

Енергија узмака комплексног језгра је

$$E_{uz} = E_k({}^4He) \frac{M_1}{M_1 + M_2}$$

Да би дошло до реакције енергија честице мора имати кинетичку енергију већу за $-Q$ од енергије узмака комплексног језгра

- Енергија коју пројектил мора да има да би изазвао нуклеарну реакцију назива се *енергијом прага*

$$E_{pr} = -Q \frac{M_1 + M_2}{M_1} \approx -Q \frac{A_c}{A_2}$$

За Ратерфордову реакцију ова енергија је 1,53 MeV

Енергија у реакцији по ступњевима



Укупна енергија ексцитације ^{19}F је $4,40 + 7,68 - 1,71 \text{ MeV} = 10,37 \text{ MeV}$

Енергија реакције $^{19}\text{F} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$ је $Q = -5,59 \text{ MeV}$

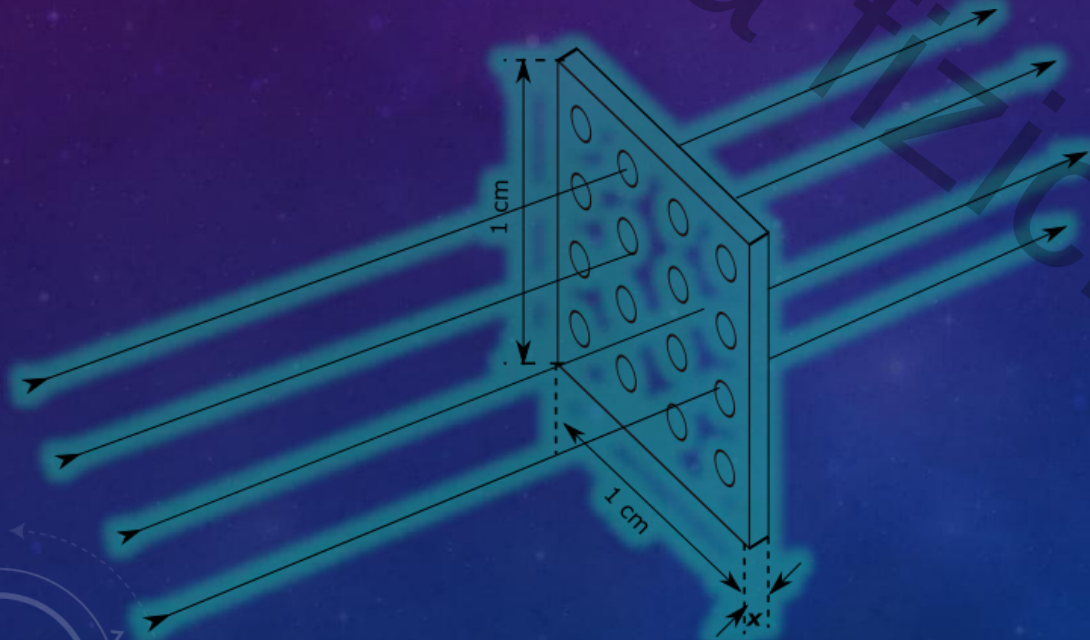
Стога је укупна кинетичка енергија продуката

$$E_k = 10,37 + 1,71 - 5,59 \text{ MeV}$$

ВЕРОВАТНОЋА НУКЛЕАРНЕ РЕАКЦИЈЕ

- Вероватноћа нуклеарне реакције изражава се параметром који се назива *ефикасни пресек*
- Ефикасни пресек има димензије површине

1. Случај танке мете



$$p = \frac{\Delta N}{I}$$

$$p = \sigma n x$$

$$\Delta N = \sigma I n x$$

$$\sigma = \frac{p}{nx} = \frac{p}{\frac{a}{V}x} = \frac{p}{\frac{a}{Px}x} = \frac{p}{\overline{P}}$$

- Пошто је $P = 1 \text{ cm}^2$

$$\sigma = \frac{p}{a} [\text{cm}^2]$$

- Ефикасни пресек је *вероватноћа нуклеарне реакције по једном језгру*

$$1 \text{ barn} = 1 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$$

- Овако дефинисан ефикасни пресек се назива микроскопским ефикасним пресеком ји карактеристичан је за само за једну нуклеарну реакцију (пројектил, мету и енергију пројектила)

- Макроскопски ефикасни пресек

$$\Sigma = n\sigma = \frac{mN_A}{MV} \sigma = \frac{\rho N_A}{M} \sigma$$

У случају да се мета састоји од различитих нуклида чије су заступљености $\eta_1, \eta_2, \dots$ И одговарајући ефикасни пресеци за реакције са истом честицом $\sigma_1, \sigma_2, \dots$ Макроскопски ефикасни пресек је

$$\hat{\Sigma} = n \sum_i \eta_i \sigma_i$$

2. Случај дебеле мете

$$\Delta N \rightarrow dI$$

$$-dI = In\sigma x$$

$$I = I_0 e^{-n\sigma x}$$

- стога је број реакција у мети

$$I_0 - I = I_0(1 - e^{-n\sigma x})$$

- Средњи слободни пут пројектила је Σ^{-1} (за мету која садржи више нуклида је $\hat{\Sigma}^{-1}$)

Језгро	Ефикасни пресек за термалне неутроне (barn)			Ефикасни пресек за брзе неутроне (barn)		
	расејање	захват	фисија	расејање	захват	фисија
^1H	20	0.2	-	4	0.00004	-
^2H	4	0.0003	-	3	0.000007	-
^{56}Fe	10	2	-	20	0.003	-
^{16}O	4	0.0001	-	3	0.00000003	-
^{10}B	2	200	-	2	0.4	-
^{113}Cd	100	30,000	-	4	0.05	-
^{135}Xe	400,000	2,000,000	-	5	0.0008	-
^{235}U	10	99	583	4	0.09	1
^{238}U	9	2	0.00002	5	0.07	0.3

ТЕОРИЈСКИ МОДЕЛИ НУКЛЕАРНИХ РЕАКЦИЈА

- Оптички модел

Заснива и се на аналогијама у понашању светлости при расејању и апсорпцији и процеса у нуклеарним реакцијама. Модел добро објашњава еластично расејање честица на језгрима

- Модел сложеног језгра (Bohr 1936) је базиран на моделу течне капи и претпоставља формирање прелазног сложеног језгра



Време у коме се ова реакција одвија је $t = \frac{2R}{v}$ и назива се карактеристично нуклеарно време.

За $E_a = 1 \text{ MeV}$ $t \approx 10^{-21} \text{ s}$

- Након овога долази до прерасподеле енергије унутар сложеног језгра и

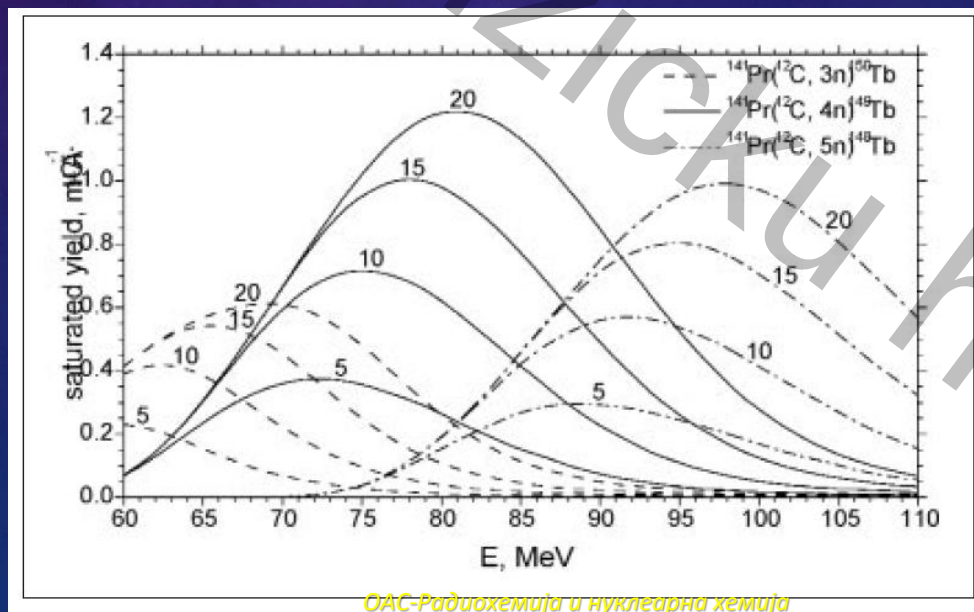


- Овај ступањ траје око 10^{-15} s.
- Укупна вероватноћа реакције једнака је производу ефикасног пресека за реакцију формирања комплексног језгра и вероватноће његове декомпозиције у производе

$$\sigma_{X-SN-Y} = \sigma_{X-SN} \cdot y$$

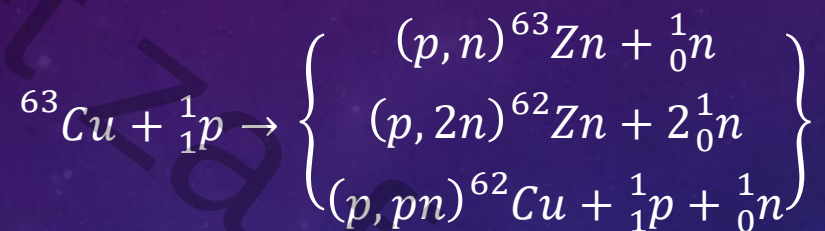
МЕРЕЊЕ ЕФИКАСНИХ ПРЕСЕКА

- Ефикасни пресек зависи од енергије упадне честице. Та зависност се назива **ексцитациона функција**
- Методе за одређивање ексцитационих функција
 - „stacked foil” техника
 - техника дебеле мете



ПАРЦИЈАЛНИ ЕФИКАСНИ ПРЕСЕЦИ

- У зависности од енергије, у систему једног пројектила може настати више производа



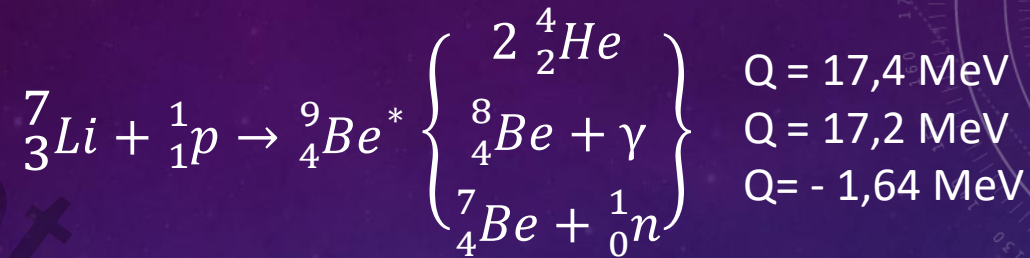
$$\sigma_{tot} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

- Врсте ефикасних пресека

- Ефикасни пресек за расејање σ_{ras}
- ||- за активацију σ_{akt}
- ||- за активацију σ_{fis}
- ||- за апсорпцију σ_{aps}

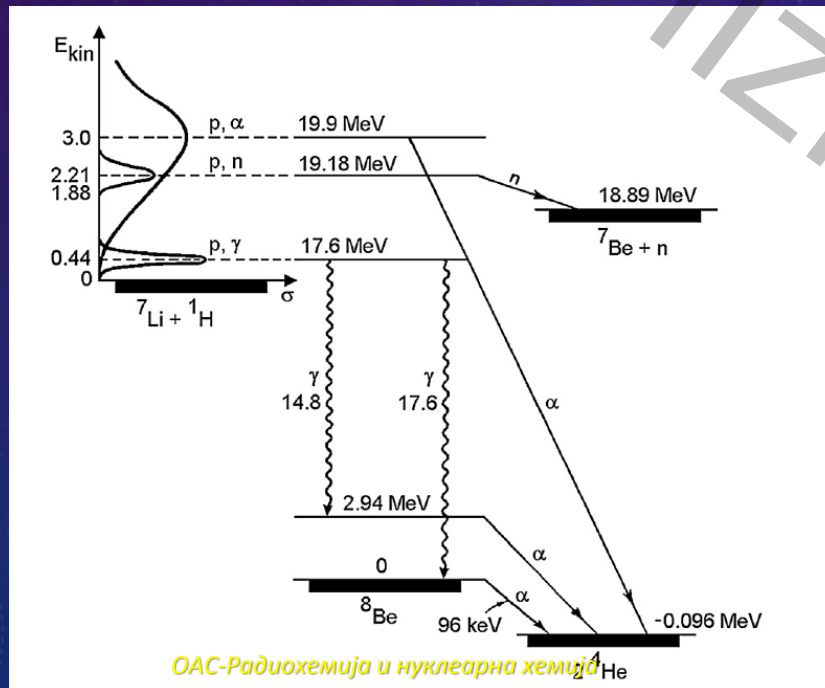
- Ако се сви процеси дешавају у мети $\sigma_{tot} = \sigma_{ras} + \sigma_{akt} + \sigma_{fis} + \sigma_{aps}$

ТУНЕЛ ЕФЕКАТ КОД НУКЛЕАРНИХ РЕАКЦИЈА



$$E_{\text{cb}} = 1,3 \text{ MeV}$$

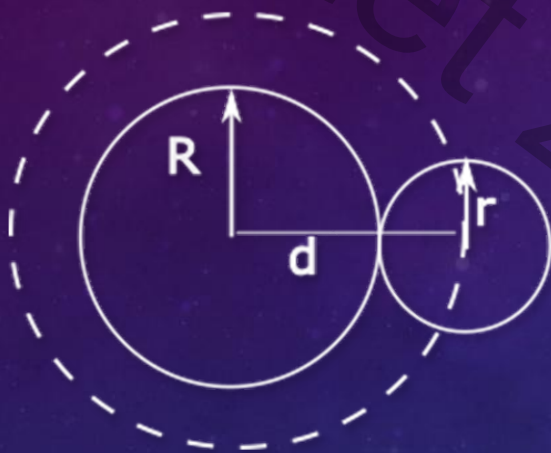
$$E(p) = 0,15 \text{ MeV} \quad T = 0,1 \% \quad E(p) = 0,3 \text{ MeV} \quad T = 1 \% \quad E(p) = 0,6 \text{ MeV} \quad T = 20 \%$$



Зависност ефикасног пресека од енергије екситације комплексног језгра

СУДАР ЧЕСТИЦЕ ЗА ЈЕЗГРОМ МЕТЕ

- ефикасни пресек за судар



$$\sigma = (R + r)\pi^2$$

$$\sigma_{geo} = R^2\pi$$

- Због његове дуалне природе, пројектил није могуће локализовати на растојању мањем од његове deBroglie-ве таласне дужине

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar$$

$$\frac{h}{\Delta \lambda} \Delta x \geq \hbar$$

$$\sigma = (R + \lambda)^2 \pi$$

Гранични случајеви једначине

1. Пројектил има велику брзину $\lambda \rightarrow 0$

$$\sigma = \sigma_{geo} = R^2 \pi$$

2. Пројектил има малу брзину $\lambda \gg R$

$$\sigma = \lambda^2 \pi$$

ИНТЕРАКЦИЈА ЈЕЗГАРА СА НЕУТРОНИМА

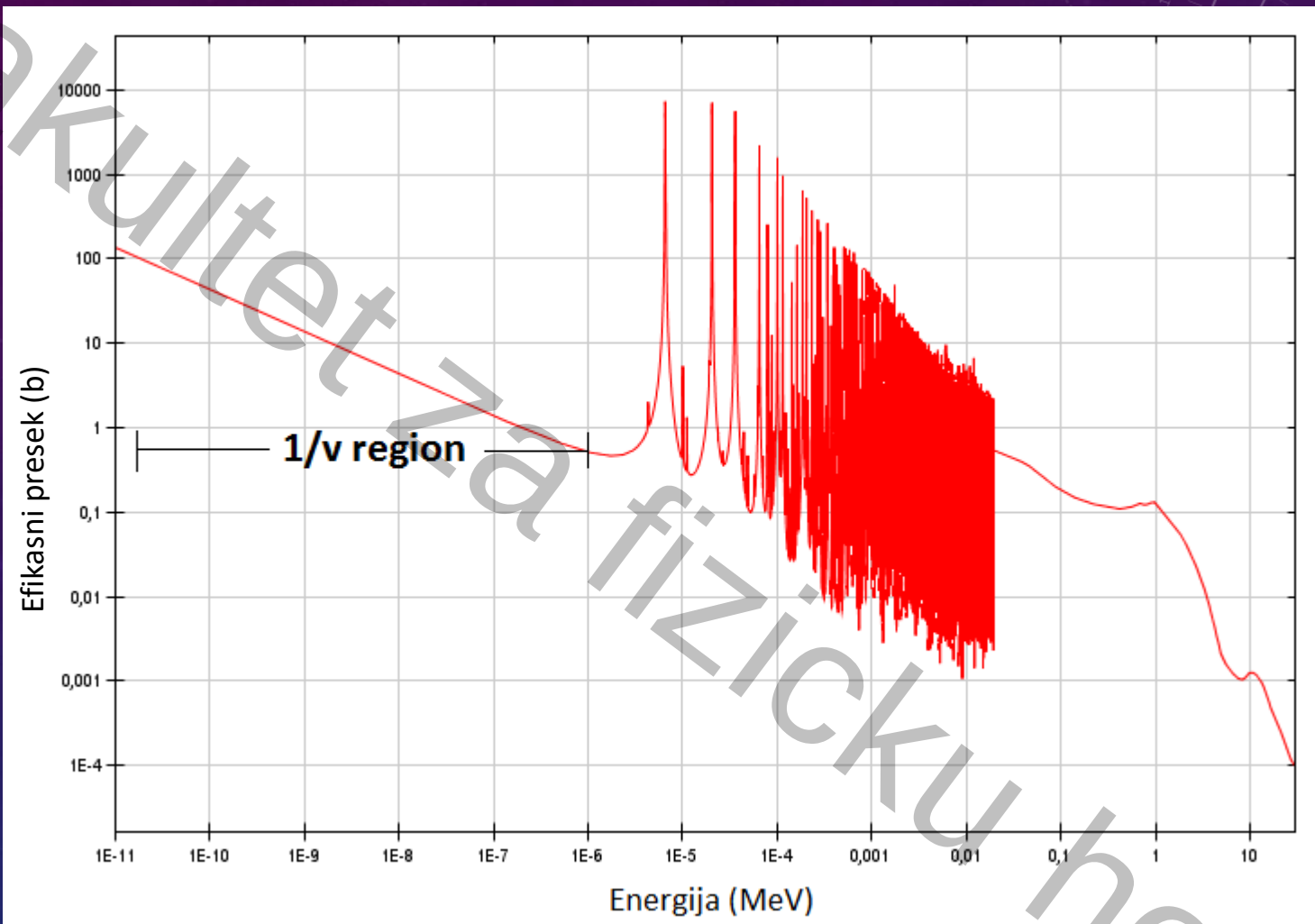
Спори неутрони

$$\sigma = \lambda^2 \pi$$

$$\sigma = \frac{h^2}{4\pi\mu^2 v^2} \left(* \frac{2\mu}{2\mu} \right)$$

$$\sigma = \frac{2h^2 \mu \pi}{\frac{\mu v^2}{2}} = \frac{c_1}{E} = \frac{c_2}{v^2}$$

$$\log \sigma = \log c_2 + 2 \log \left(\frac{1}{v^2} \right)$$



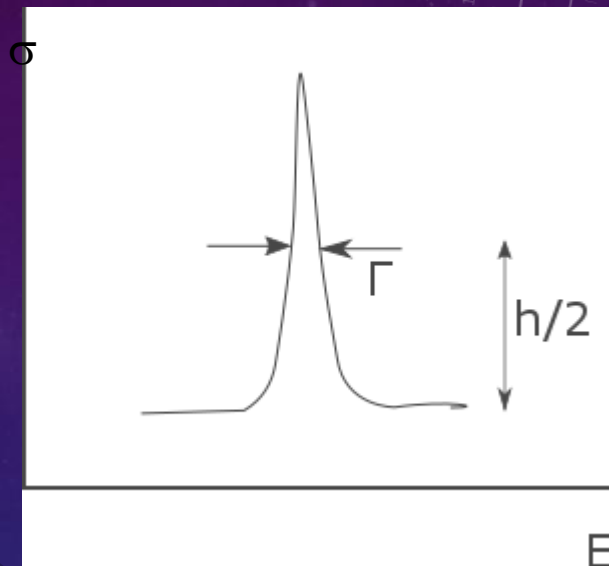
^{238}U

РЕЗОНАНТНЕ АПСОРПЦИЈЕ

- Збир кинетичке енергије пројектила и енергије његовог везивања (након захвата) је **енергија побуђивања комплексног језгра**
- Уколико је она једнака разлици између енергетских нивоа јављају се **резонантне апсорпције**
- Ефикасни пресеци на резонантним апсорпцијама су једнаки или често знатно већи од ефикасних пресека за термалне неутроне
- Прелаз између енергетских стања није бесконачно узак што је последица неодређености енергије побуђеног нивоа – **односно ширине нивоа Γ** (Heisenberg-ов принцип неодређености $\Delta E \Delta t \geq \hbar$)

- Расподела енергија око вредности енергије око E_0 дата је Лоренцовом функцијом

$$p(E)dE = \frac{\Gamma}{(E-E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}$$



- На основу овога је могуће израчунати минимално време живота побуђеног стања

$$\Delta t \geq \frac{\hbar}{\Gamma}$$

За $\Gamma = 0,03 - 2 \text{ eV}$ $t = 1 \cdot 10^{-14}$ и $1 \cdot 10^{-16} \text{ s}$

Општи израз за зависност ефикасног пресека од брзине пројектила у региону резонанција дат је Breit-Wigner-овом формулом

$$\sigma_{X-SN-\gamma} = (2l + 1) \frac{\lambda}{8\pi^2} \frac{\Gamma_{aX} \Gamma_{bY}}{(E - E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}$$

Побуђено језгро се може деекситовати на различите начине – „различитим каналима“. Укупна ширина нивоа дата збиром парцијалних ширина

$$\Gamma = \Gamma_{\gamma} + \Gamma_n + \Gamma_p + \dots$$

Неки од специјалних случајева

1) Еластично расејање $\sigma_{aa} = (2l + 1) \frac{\lambda}{8\pi^2} \frac{\Gamma_a^2}{(E - E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}$

2) Радијативни захват неутрона $\sigma_{n,\gamma} = (2l + 1) \frac{\lambda}{2\pi^2} \frac{\Gamma_n \Gamma_{\gamma}}{\Gamma^2}$

ЕФИКАСНИ ПРЕСЕК ЗА РЕАКЦИЈЕ СА НАЕЛЕКТРИСАНИМ ЧЕСТИЦАМА

Код реакција са наелектрисаним честицама присуство електростатичког одбијања (присуство Кулоновске баријере) доводи до редукције иницијалне кинетичке енергије пројектила за фактор

$$\frac{E_k - E_{Kb}}{E_k}$$

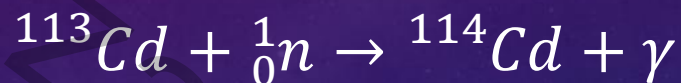
Овај фактор улази у израз за ефикасни пресек

$$\sigma = (R + \lambda)^2 \pi \frac{E_k - E_{Kb}}{E_k} = (R + \lambda)^2 \pi \left(1 - \frac{E_{Kb}}{E_k}\right)$$

ТИПОВИ НУКЛЕАРНИХ РЕАКЦИЈА

Реакције са неутронима

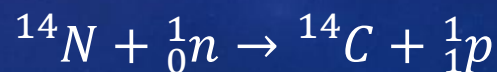
- Најчешће реакције захвата апсорпције неутрона -(n,γ) реакције



- (n,α) – реакције детекције неутрона



- (n,p) реакције



- (n,f) реакције

- Реакције са протонима

- (p,n)

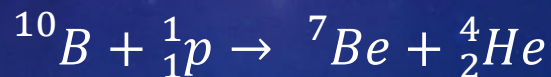
- Обично настаје β^+ радиоактивно језгро



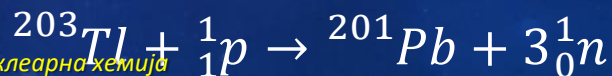
- (p, γ)



- (p, α)

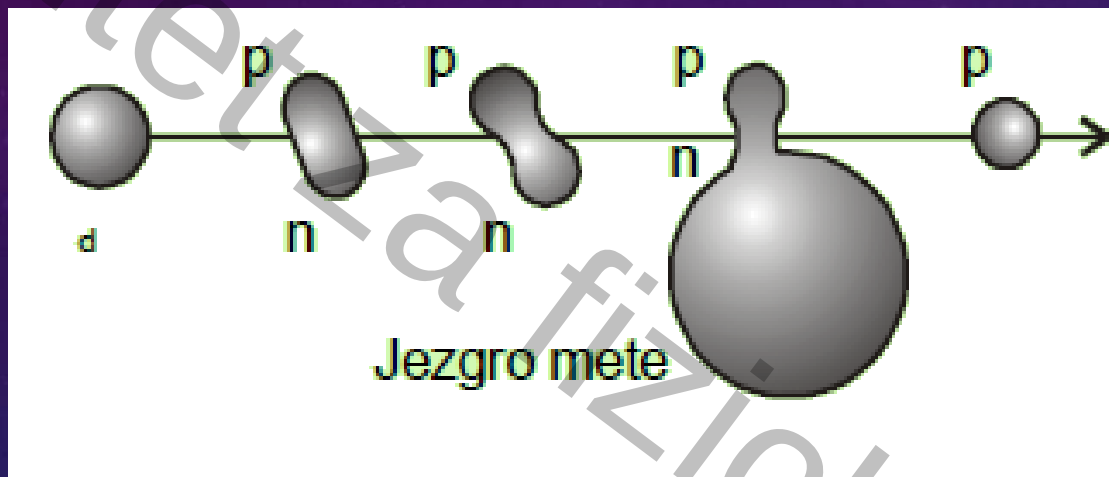


- (p,xn) реакције

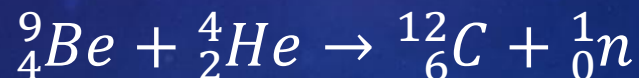


Реакције са честицама тежим од протона/неутрона

- Карактеристичне су реакције са деутеронима (d,p) реакција



- Реакције са α -честицама



(γ ,n) реакције

- Мали ефикасни пресеци $\sigma \sim 1 \cdot 10^{-3} - 1 \text{ barn}$
- Реакције су увек ендоенергијске



- РЕАКЦИЈЕ СПАЛАЦИЈЕ

ЛАКИ ПРОЈЕКТИЛ (ПРОТОН, НЕУТРОН ИЛИ ЛАКО ЈЕЗГРО СА КИНЕТИЧКОМ ЕНЕРГИЈОМ ОД НЕКОЛИКО СТОТИНА МЕВ ДО НЕКОЛИКО GEV РЕАГУЈЕ СА ТЕШКИМ ЈЕЗГРОМ (РЕЦИМО ОЛОВОМ) ПРИ ЧЕМУ ДОЛАЗИ ДО ЕМИСИЈЕ ВЕЛИКОГ БРОЈА НУКЛЕОНА (УГЛАВНОМ НЕУТРОНА) ИЛИ ФРАГМЕНАТА ЈЕЗГРА

