РАДИОАКТИВНИ РАСПАД

Fakultet za fizicku hemiju

- Спонтана трансформација језгра причему оно прелази у стабилнији облик, било у језгро другог елемента или у енергетски стабилније језгро истог елемента, уз емисију честица и/или електромагнетног зрачења.

- Независан од спољашњих услова: притиска, температуре, хемијског облика* итд.

- Временска константа распада се назива временом полураспада ($t_{1/2}$)
- Радиоактивни распад укључује прелаз са дефинисаног квантног стања нуклида који се распада до дефинисаног квантног стања нуклида који настаје

Fakultet za fizičku hemiju

Врсте радиоактивног распада

- α–распад
- β–распад (β^-, β^+ и EC)
- γ–распад
- Интерна конверзија (IC)
- Спонтана фисија (SF)
- Егзотични распади (p, n, …^{12}C)

Fakultet za fizicku hemiju

Нотација радиоактивног распада

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A\pm m}_{Z\pm n}Y + \mathrm{p} + \mathrm{q} + \mathrm{E} $$

$$ {}^{Am}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z}Y + \gamma $$

$$ {}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He + \mathrm{E} $$

$^{238}U(\alpha)^{234}Th(\beta^-)^{234}Pa(\beta^-)^{234}U\ldots$

$^{238}U(\alpha,\ 4{,}5\cdot10^{9}\ y)^{234}Th(\beta^-,\ 24\ d)^{234m}Pa(\beta^-,\ IC,\ 1{,}17\ min)^{234}U\ldots$

Fakultet za fizičku hemiju

Закони одржања код радиоактивног распада

- Ови закони важе радиоактивне распаде и за нуклеарне реакције

$$X_1 + X_2 \rightarrow X_3 + X_4 \qquad X_1 \rightarrow X_2 + X_3$$

- Одржање енергије (укључујући масени еквивалент енергије)

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4$$

- Одржање импулса

$$p_1 + p_2 = p_3 + p_4$$

Fakultet za fizicku hemiju

- Одржање наелектрисања

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$$

- Одржање масеног броја

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4$$

- Одржање укупног угаоног момента система. p_I

$$p_{I,1} + p_{I,2} = p_{I,3} + p_{I,4}$$

  - Практичнија формулација

$$\Delta I = I_3 + I_4 - I_1 - I_2$$

I је укупни нуклеарни спински квантни број.

ΔI у респадима/нуклеарним реакцијама може имати вредности

$$\Delta I = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots$$

Fakultet za fizicku hemiju

Енергетика распада

- У радиоактивном распаду долази до ослобађања енергије
- $Q = -\left[M_{X_2} + M_{X_3} - M_{X_1}\right] \cdot 931{,}5\ MeV$
- $Q = E_k(uzmak\ X_2) + E_k(X_3) + \cdots$
- Уколико радионуклид пре распада мирује

$$E_k(uzmak) = \frac{M(X_3)}{M(X_2)} \cdot E_k(X_3)$$

Fakultet za fizičku hemiju

α распад

- Запажа се код језгара тежих од олова - и код неких изотопа из серије лантаноида (изузетак ^{8}Be).

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$





$$^{226}Ra \rightarrow {}^{222}Rn + {}^{4}_{2}He$$

$$^{222}Ra \rightarrow {}^{218}Po + {}^{4}_{2}He$$

$$^{238}U \rightarrow {}^{234}Th + {}^{4}_{2}He$$

ВИШАК ПРОТОНА И НЕУТРОНА

Fakultet za fizičku hemiju

Енергија алфа распада

- Енергија алфа распада дефинише се као

$$Q_\alpha(\text{MeV}) = 931{,}5\Delta M = -931,5\left(M_{Z-2}^{A-4} + M_{He} - M_Z^A\right)$$

- На пример за распад ^{226}Ra

$$Q_\alpha = -931{,}5(M_{222Rn} + M_{4He} - M_{226Ra})$$
$$= (222.017578 + 4{,}002603 - 226{,}025410) = 4{,}871\ \text{MeV}$$

- За алфа распад ^{238}U

- $Q_\alpha = -931{,}5(M_{234Th} + M_{4He} - M_{238U}) = -931{,}5(234{,}043601 +$

Fakultet za fiziku i hemiju

Расподела енергије алфа распада

$$Q_\alpha = E_{Z-2}^{A-4} + E_\alpha$$

- Из законâ о одржању енергије и момента импулса следи

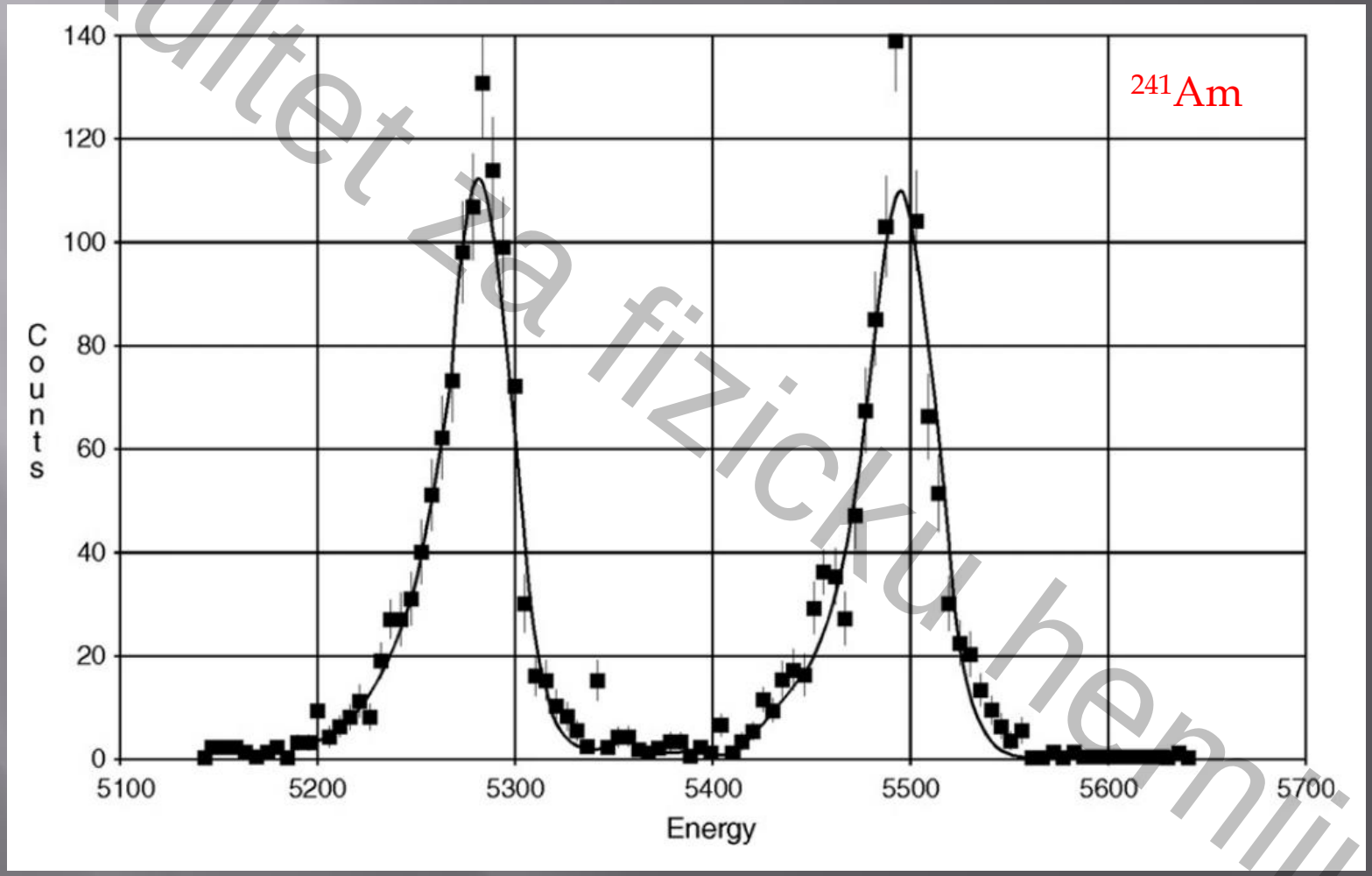
$$E\left(X_{Z-2}^{A-4}\right) = \frac{M_\alpha}{M_X} Q_\alpha \qquad E(\alpha) = \frac{M_X}{M_\alpha} Q_\alpha$$

- Тако α-честица емитована при распаду ^{238}U (Q_α =4,27 MeV) односи енергију 0,983 Q_α , а атом ^{234}Th свега 0,017 Q_α

- Енергија узмака језгра ^{234}Th је 72 keV што је више него довољно за раскидање хемијске везе у молекулу

Fakultet za fizičku hemiju

Спектар α-распада



Fakultet za fizičku hemiju

β распад

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + \beta^{-} \; ({}^{0}_{-1}e) \qquad {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e$$

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + \beta^{+} \; ({}^{0}_{1}e) \qquad {}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e$$

$${}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y \qquad {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{1}_{0}n$$ EC

Промена спина у β распаду

$${}^{90}Sr \rightarrow {}^{90}Y + {}^{0}_{-1}e$$

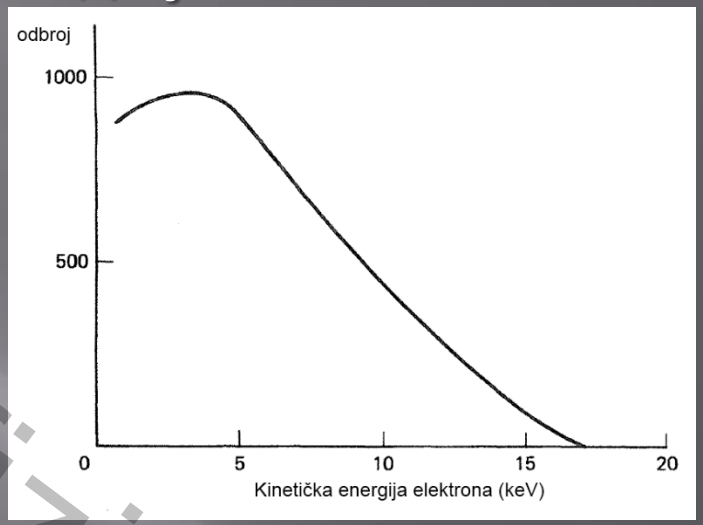
$$\Delta \mathrm{I} = \mathrm{I}({}^{90}Y) + I({}^{0}_{-1}e) - ({}^{90}Sr) = 2 + \frac{1}{2} - 0 = \frac{5}{2}$$

Али ΔI мора имати целобројне вредности!

Fakultet za fizicku hemiju

- Према закону одржања енергије, енергија емитованих електрона (позитрона) треба да је

$$E_e = \frac{m_X^2 - m_Y^2 + m_e^2}{2m_X}$$



- Wolfgang Pauli 1930. – Претопставка да део енергије односи мала неутрална честица

- Enrico Fermi 1933. у својој теорији β-распада уводи неутралну честицу – неутрино

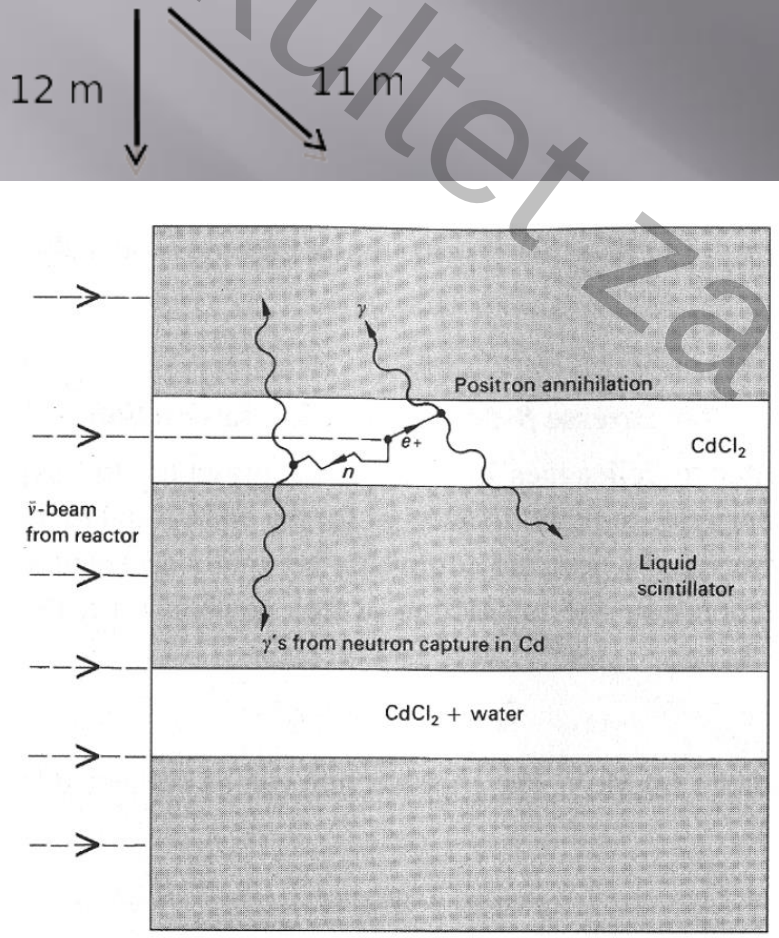
Fakultet za fizičku hemiju

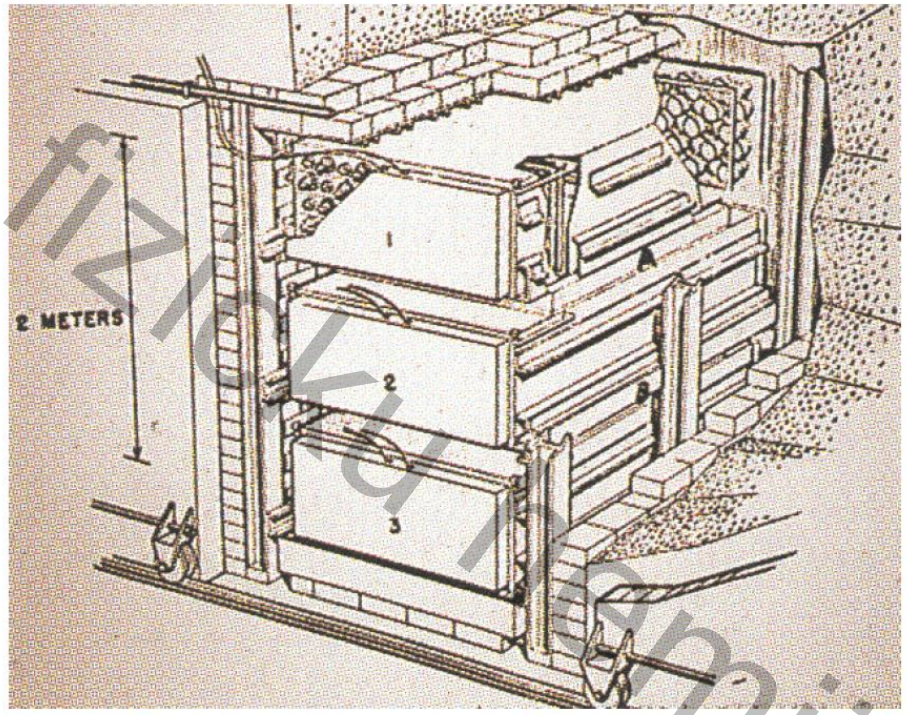
Експериментална потврда постојања неутрина

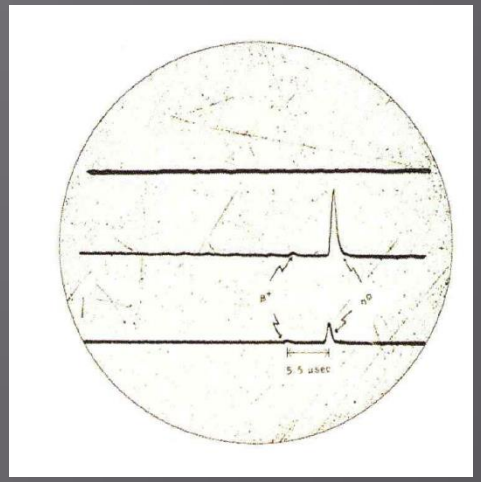
- Неутрино због своје неутралности и мале масе једва да реагује са средином кроз коју пролази
- Reines & Cowan 1955. Sawana River нуклеарни реактор (флукс неутрина $5 \cdot 10^{13}$) – потрага за инверзним β^+ распадом.
- Ако $\quad {}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + \beta^+ + \nu$
- онда постоји и
- $$ {}^1_1X + \tilde{\nu} \rightarrow {}^1_0n + \beta^+$$



Fakultet za fizičku hemiju







Fakultet za fiziku Rijeka

- Неутрину је приписан спин ½ што решава проблем са променом спина у току радиоактивног распада

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + \tilde{\nu} $$

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e + \nu $$

$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + \nu $$

- Претпостављена маса неутрина (на основу експеримената на Kamiokande постројењу) је мања од 0,07 eV

Fakultet za fizičku hemiju

Енергија β-распада

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + \tilde{\nu} $$

$$ Q_{\beta^-} = -931{,}5\,(M_{Z+1} - M_z) $$

За распад $ {}^{90}Sr \rightarrow {}^{90}Y + {}^{0}_{-1}e + \tilde{\nu} $

$$ Q_{\beta^-} = -931{,}5\left(M_{{}^{90}Y} - M_{{}^{90}Sr}\right) $$

$$ = -931{,}5(89{,}907144 - 89{,}907730) = 0{,}546\ MeV $$

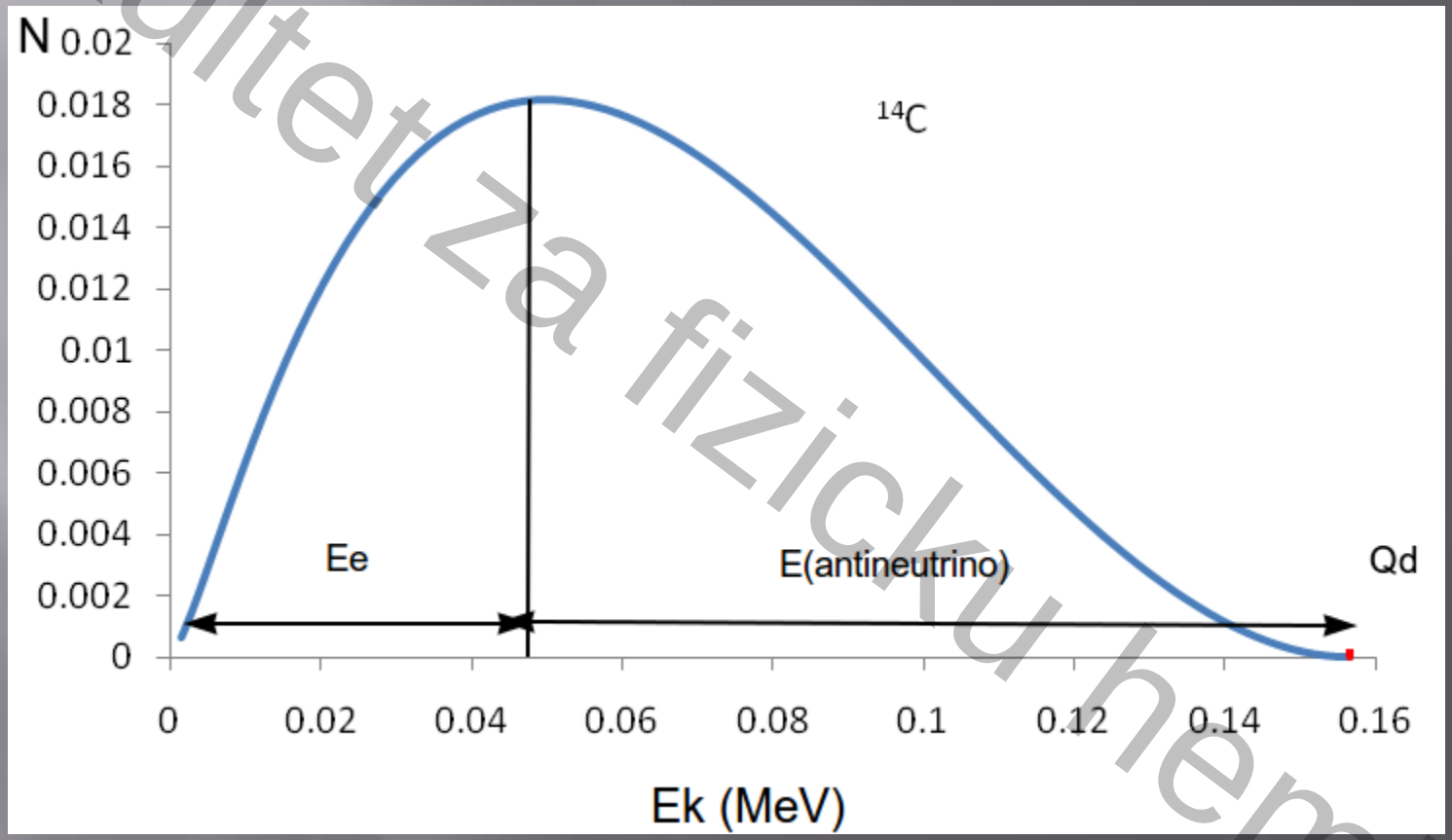
Средња енергија емитованог електрона дата је емпиријском формулом

$$ \bar{E} \approx 0{,}33E_{max}\left(1 - \frac{\sqrt{Z}}{50}\right)\left(1 + \frac{\sqrt{E_{max}}}{4}\right) $$

ВИШАК НЕУТРОНА

Fakultet za fiziku, Nemanju

Спектар β-распада



Fakultet za fizicku hemiju

Позитронски распад

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y^{-} + {}^{0}_{+1}e + \nu \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{+1}e + \nu $$

$$ Q_{\beta^+} = -931{,}5\,(M_{Z-1} + 2M_e - M_Z) $$

Me=931,5·0,000549 MeV= 0,511 MeV

За распад $ {}^{22}Na \rightarrow {}^{22}Ne + {}^{0}_{+1}e + \nu $

$$ Q_{\beta^+} = -931{,}5(21{,}991385 - 21{,}994437) - 2\cdot 0{,}511\ MeV $$
$$ = 1{,}821\ MeV $$

ВИШАК ПРОТОНА

Fakultet za fizičku hemiju

Диракова једначина и позитон

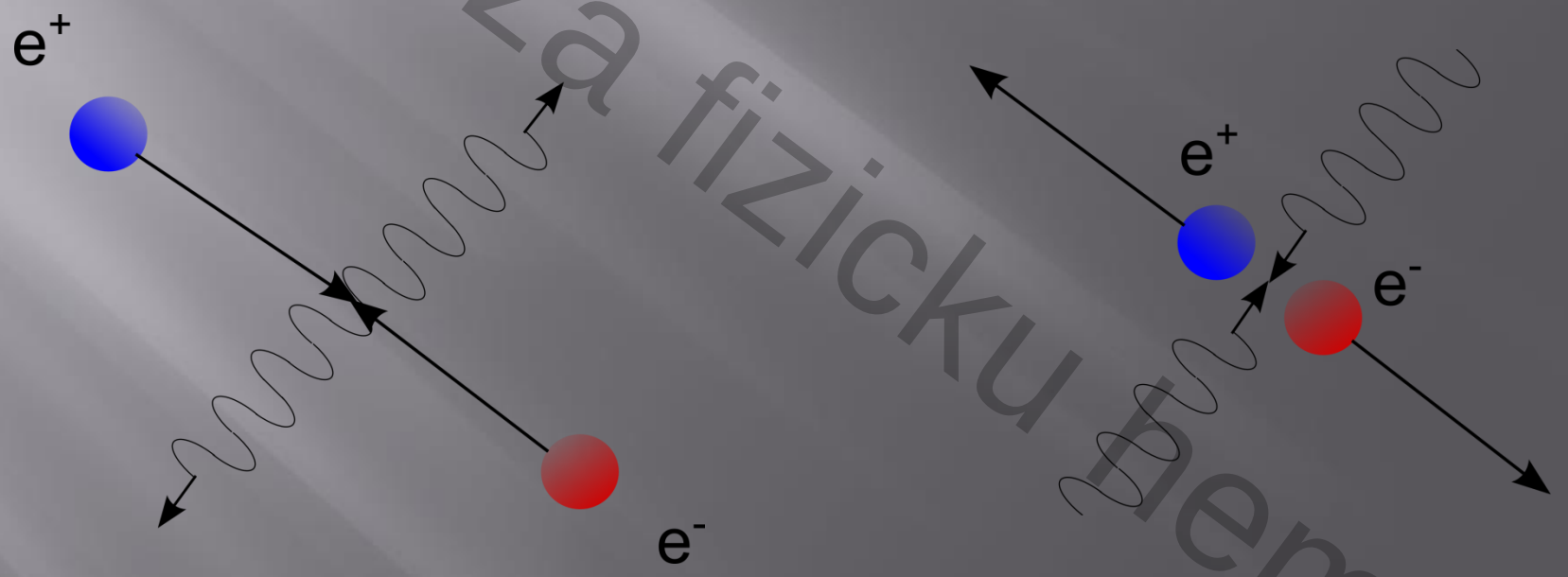
$$E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$

- Негативна енергија електрона ??
- Dirac : Сва стања негативне енергије су попуњена ?
- Fayman: нова честица са масом електрона али са супротним наелектрисање

Fakultet za fizičku hemiju

Електрон и позитрон-античестице

- Судар електрона и позитрона доводи до њихове анихилације при чему настају два гама кванта енергије по 0,511 MeV који се разилазе под углом од 180o



Анихилација

Стварање парова

Fakultet za fizicku hemiju www

Двоструки β-распад

- Крајње неуобичајен вид распада који се јавља код парно-парних језгара са дугачким временом полураспада

$^{82}_{34}Se \rightarrow {}^{82}_{36}Kr + 2\beta^- + 2\tilde{\nu}$ ($t_{1/2} = 1.7 \cdot 10^{20}$ y)

$^{82}_{32}Ge$?

Fakultet za fizicku hemiju

Електронски захват

- Конкурентски процес β^+

$$ {}^{A}_{Z}X + e^-_{K,L\ldots} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + \nu + x_{K,L\ldots} $$

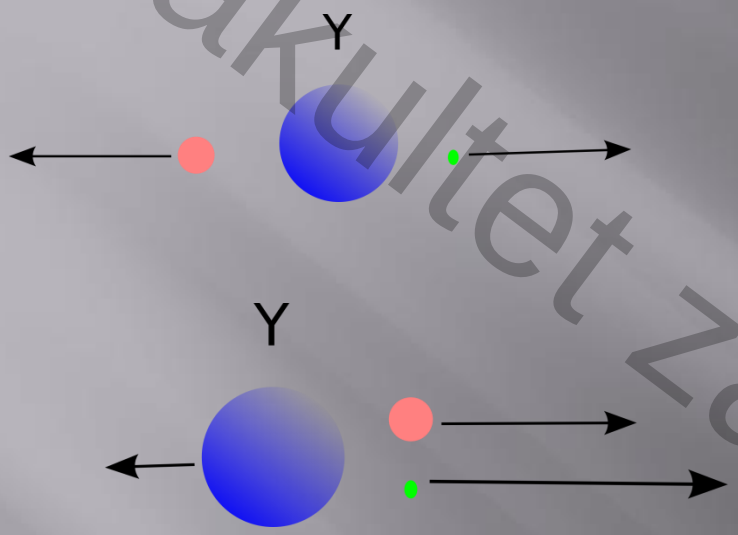
$Z<30 \rightarrow \beta^+$ $30<Z<80 \rightarrow \beta^+$, EC $Z>80 \rightarrow$ EC

Изузетак ${}^{7}Be \rightarrow {}^{7}Li + \nu$

$$ Q_{EC} = -931{,}5\left(M^{A}_{Z-1} - M^{A}_{Z}\right) = 0{,}861\ MeV $$

Fakultet za fizicku hemiju

Узмак језгра код β распада



$E_y = 0$

$$E_d = m_e \frac{E_{max}}{m_d} + \frac{E_{max}^2}{2m_d c^2}$$

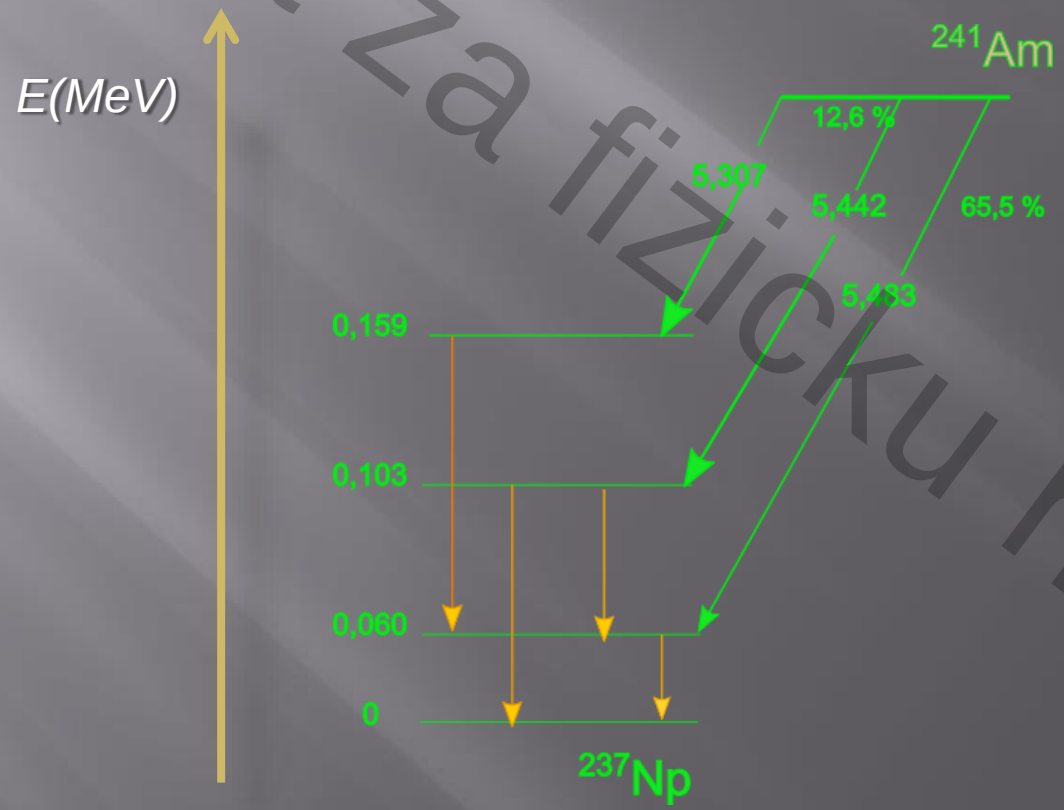
$E_d \approx 100\,V \rightarrow$ може изазвати раскидање веза у молекулу

$$^{52}MnO_4^- \rightarrow {}^{52}CrO_4^{2-} + \beta^+$$

Fakultet za fizičku hemiju

Гама распад (IT)

- У α и β радиоактивним распадима често настаје потомак у побуђеном стању које се даље деексцитира емисијом електромагентног зрачења – γ зрачења.



Fakultet za fizicku hemiju

Енергија узмака језгра код γ-распада

- Закон одржања импулса

$$\frac{E_\gamma}{c} = -m_d v_d$$

$$E_{k_d} = \frac{E_\gamma^2}{2 m_d c^2}$$

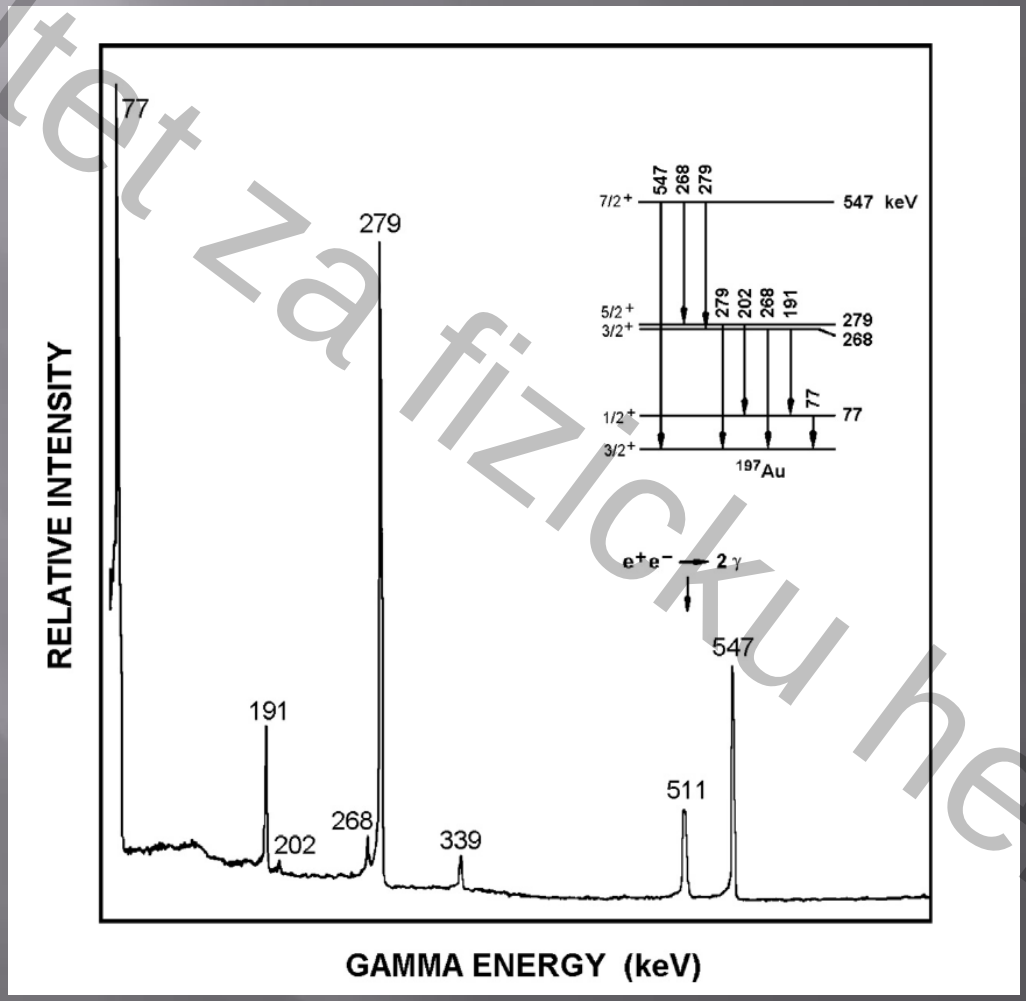
Колика је енергија узмака језгра ^{137m}Ba при емисији γ-фотона енергије 661 keV?

$$E_{k_d} = \frac{(0{,}661 \cdot MeV)^2}{2 \cdot 136.905827 \cdot 931{,}5\ MeV} = 1{,}71 \cdot 10^{-6}\ MeV$$

$$= 1{,}71\ eV$$

Fakultet za fizičku hemiju

Спектар γ-распада

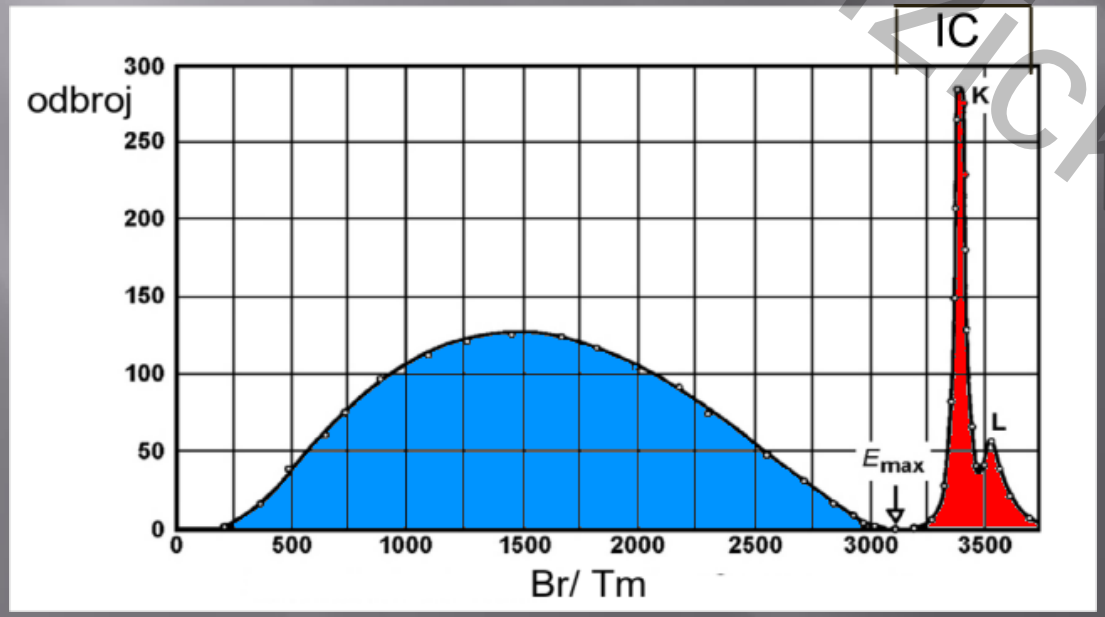


Fakultet za fizicku hemiju

Интерна конверзија (IC)

- У случајевима када се таласне функције (орбитале) преклапају језгро може пренети директно енергију електронима из K, L… љуске који напуштају атом са тачно одређеним енергијама. У овом процесу *нема емисије неутрина*

$$ {}^{Am}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{A}_{Z}X $$



Конверзиони коефицијент(и)

$$\alpha_K = \frac{N_K}{N_\gamma}$$

$$\alpha_{K+L+\ldots}\left({}^{137m}Ba\right) = 0{,}112$$

Fakultet za fizičku hemiju

Спонтана фисија (SF)

- Карактеристична за језгра са високим Z
- Откривена 1940 код језгра ^{238}U као вид распада компетитиван алфа распаду
- Језгро се дели на два тешка фрагмента – фисионе продукте

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A_2}_{Z_2}Z + \varsigma n $$

Нуклид	Z	Време полураспада (y)
^{238}U	92	$8 \cdot 10^{15}$
^{240}Pu	94	$1{,}2 \cdot 10^{11}$
^{244}Cm	96	$1{,}4 \cdot 10^{7}$
^{252}Cf	98	66
^{256}Fm	100	$3 \cdot 10^{-4}$

Fakultet za fizičku hemiju

Егзотични распади

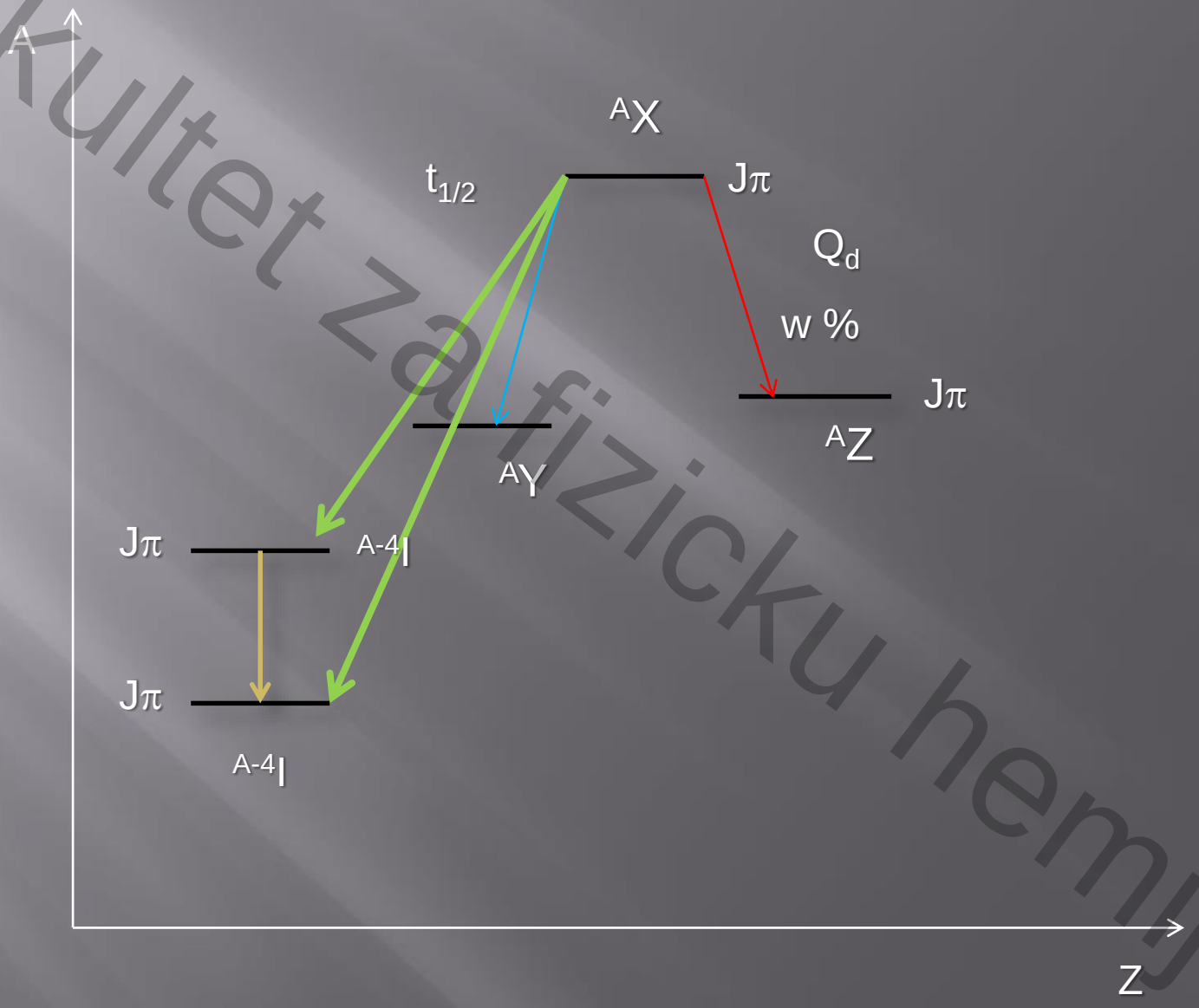
- Емисија протона код језгара који су веома дефицитарни у неутронима
- ^{53m}Co (1,5 % емисија протона)

- Емисија неутрона код радионуклида који су продукат фисије – закаснели неутрони

- ^{12}C и ^{16}O емисија је енергетски могућа код тешких алфа емитера

Fakultet za fizičku hemiju

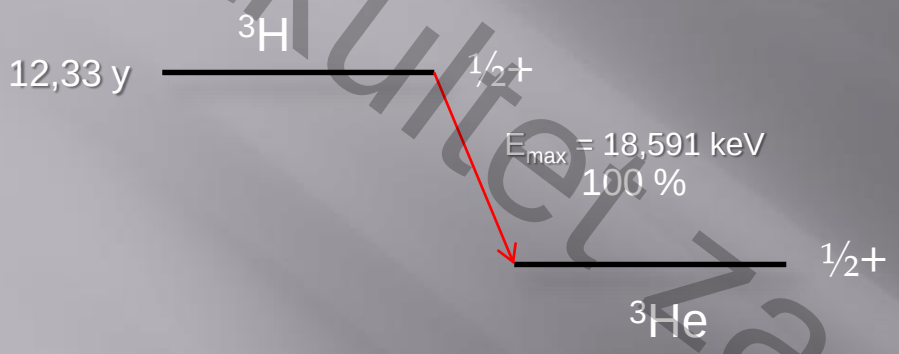
Шеме распада-правила

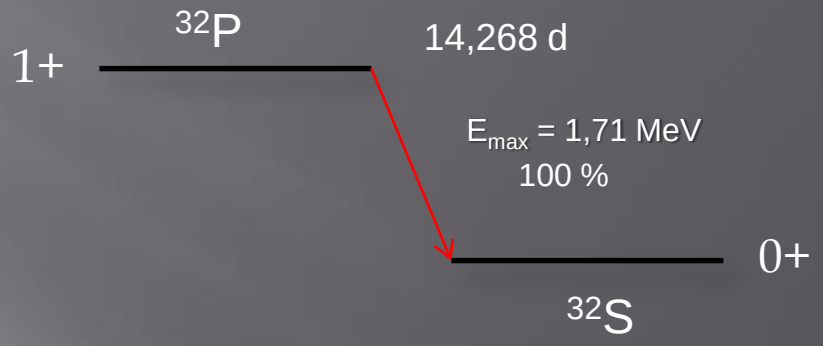


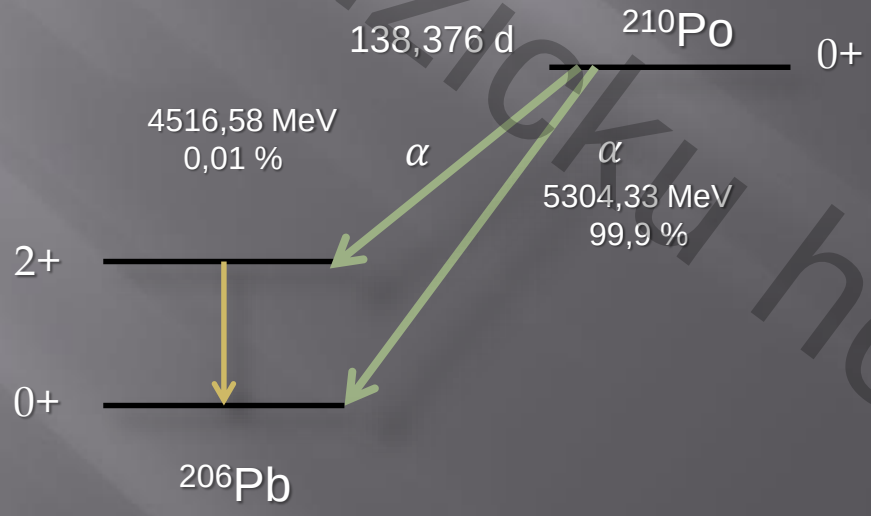
Fakultet za fizicku hemiju

Шеме распада

- Просте шеме распада

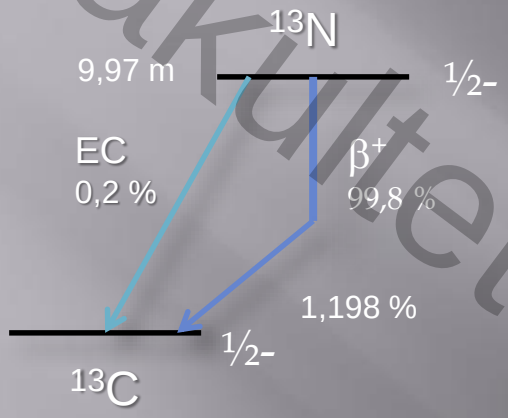


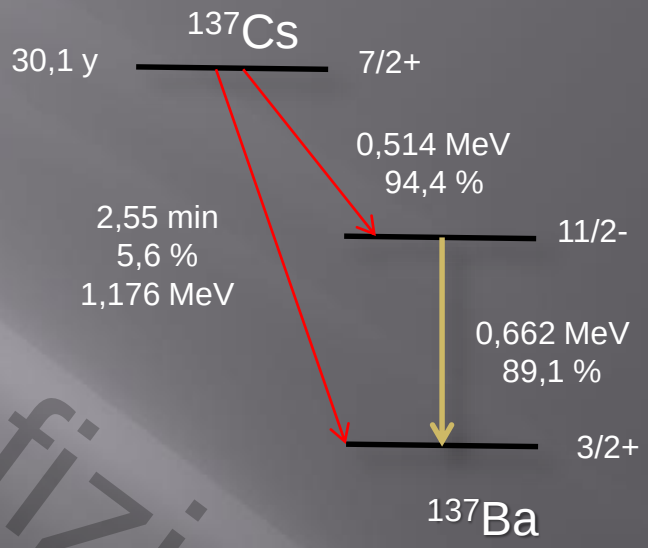


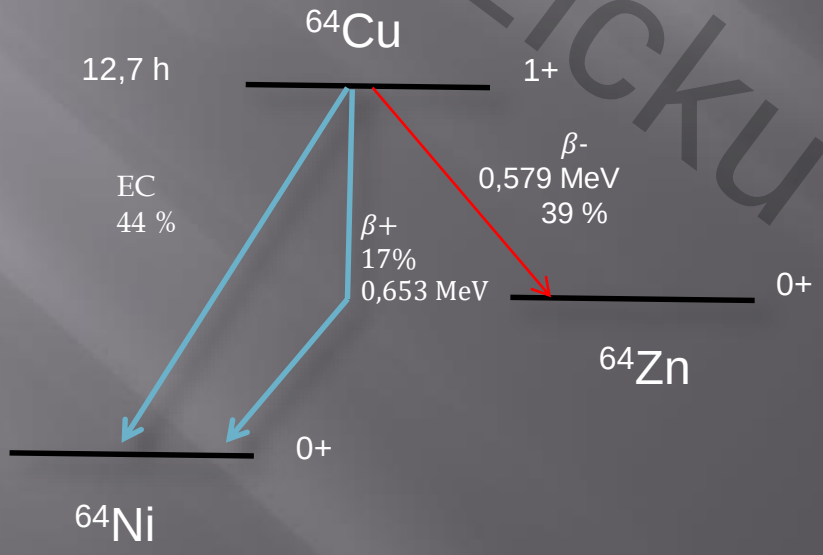


Fakulteta za fizikalno kemijo

Шеме распада (2)

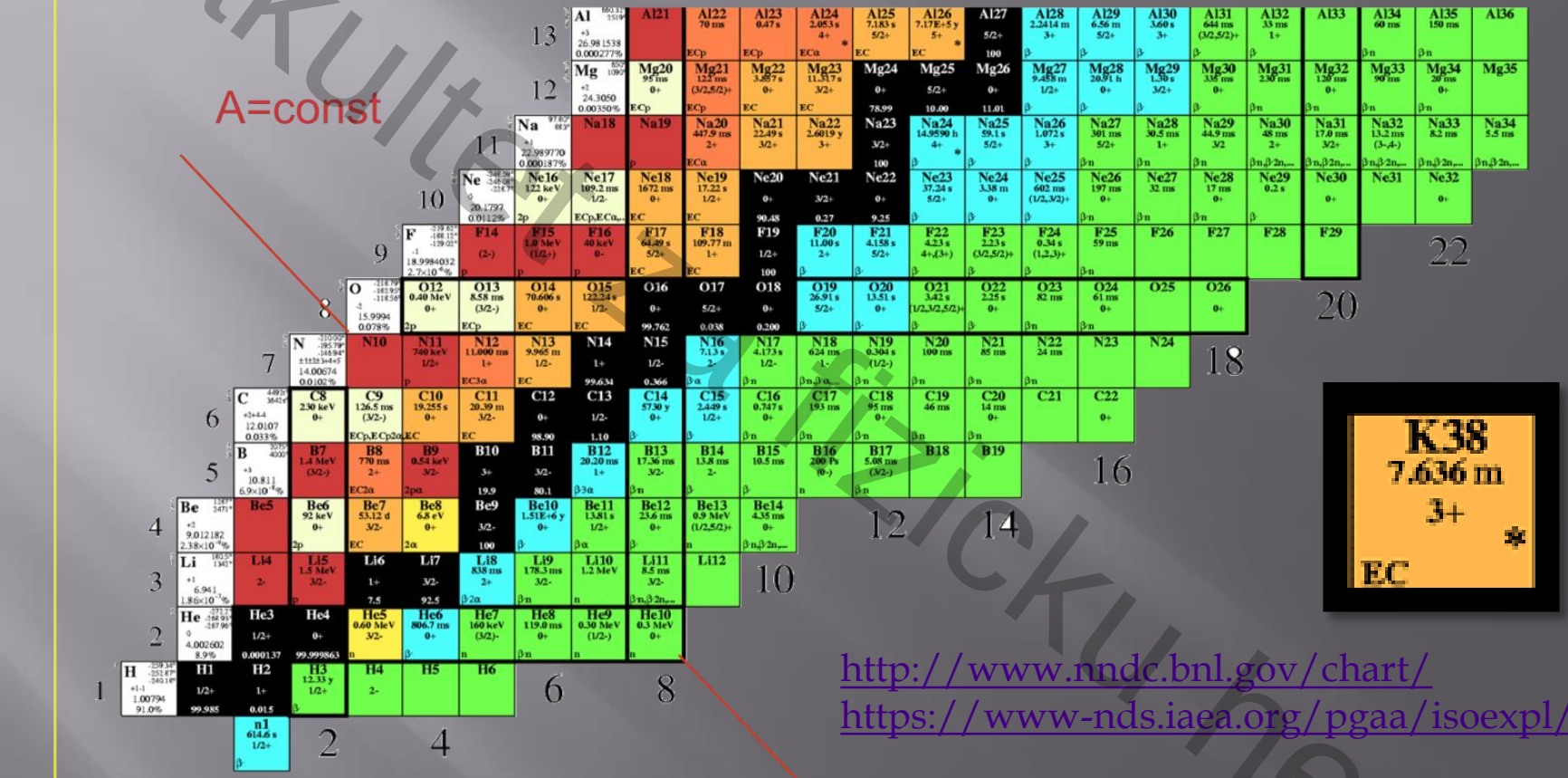






Fakultet za fizicku hemiju

Таблица изотопа



http://www.nndc.bnl.gov/chart/
https://www-nds.iaea.org/pgaa/isoexpl/ie2.htm

Fakultet za fizičku hemiju

Процеси који прате радиоактивни распад

- Емисија карактеристичног x-зрачења
- Ожеови (Auger) електрони
- Раскидање хемијских веза

Fakultet za fizicku hemiju

Кинетика радиоактивног распада

Fakultet za fiziku i hemiju

Закон радиоактивног распада

- Полази се од следећих претпоставки

1. Вероватноћа распада је независна од историје језгра
2. Вероватноћа распада је независна од окружења језгра
3. Вероватноћа је иста за све језгра истог типа и исте енергије екцитације

Вероватноћа да ће у времену Δt доћи до радиоактивног распада пропорционална је том времену

$$p=\lambda\Delta t$$

Вероватноћа да језгро преживи овај интервал је

$$1-p= 1-\lambda\Delta t$$

Fakultet za fizičku hemiju

- Вероватноћа да језгро преживи и време $t=2\Delta t$ је (и и догађај)

$$(1-p)_2=(1-\lambda\Delta t)(1-\lambda\Delta t)=(1-\lambda\Delta t)^2$$

- Вероватноћа да језгро преживи и време $t=n\Delta t$ је стога

$$(1-p)_n=(1-\lambda\Delta t)^n$$

Овај израз је валидан само за $\Delta t \ll t$ односно када $n\to\infty$. Тада имамо

$$(1-p)=\lim_{n\to\infty}\left(1-\lambda\frac{t}{n}\right)^n=e^{-\lambda t}$$

јер је

$$\lim_{n\to\infty}\left(1+a\frac{x}{n}\right)^n=e^{ax}$$

Fakultet za fizičku hemiju

- Са друге стране вероватноћа распада може се представити као

$$p = \frac{N_r}{N_0} = \frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - \frac{N}{N_0}$$

$$1 - p = \frac{N}{N_0}$$

Комбиновањем добијамо…

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

…закон радиоактивног распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Fakultet za fizicku hemiju

Активност узорка

- Логаритмовањем облик једначине радиоактивног распада добијамо

$$ln\frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

- Диференцирањем ове једначине по t добијамо

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \mathrm{N}$$

λ је константа распада (радиоактивна константа) и представља вероватноћу одигравања распада

- Активност је дефинисана као брзина радиоактивног распада односно број распада у јединици времена

Fakultet za fizičku hemiju

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Стога важи да је

$$\lambda \mathrm{N} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

и

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Уређаји који мере радиоактивност не могу регистровати сваки распад због коначне ефикасности детекције ε

$R = \varepsilon A$ односно

$$R = R_0 e^{-\lambda t}$$

Fakultet za fizičku hemiju

- Специфична активност узорка је дефинисана као активност по његовој маси, количини или запремини

$$S_A = \frac{A}{m} = \lambda \frac{N_A}{m}$$

$$S_A = \frac{A}{V}$$

Fakultet za fizicku hemiju

Параметри радиоактивног распада

- Константа распада λ (s^{-1})
- Средње време живота радионуклида

$$\tau = \frac{1}{\lambda}\,(\mathrm{s})$$

- Време полураспада је време које је потребно да број језграра радионулида опадне на половину

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad \Longmapsto \ln\frac{1}{2} = -\lambda t_{1/2} \quad \Longmapsto$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Fakultet za fiziku i hemiju

Јединице за радиоактивност

- SI јединица за радиоактивност је Бекерел (Bq) и дефинисан је као

$$1\ Bq = 1\ распад/\ s$$

- Измерени одброј R на уређају за мерење радиоактивности има јединицу одброј/s *(counts/s)*

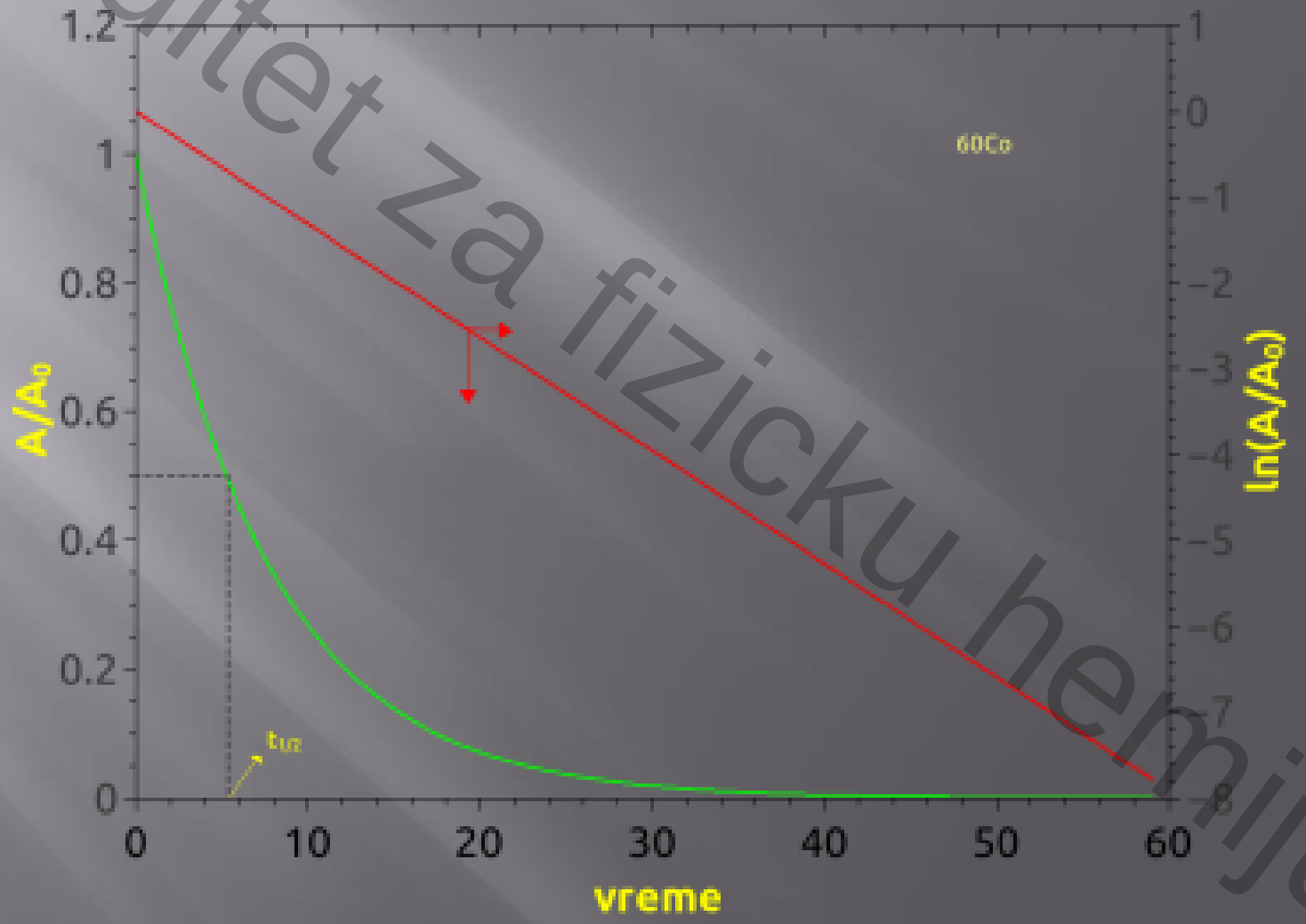
- Већа једница је Кири (Ci) чија вредност износи

$$1\ Ci = 3{,}7 \cdot 10^{10}\ распада/s$$

- Раније се 1 Ci дефинисао као активност 1 g ^{226}Ra
- Специфична активност има јединице распад/g s

Fakultet za fizičku hemiju

Одређивање времена полураспада (прост распад)

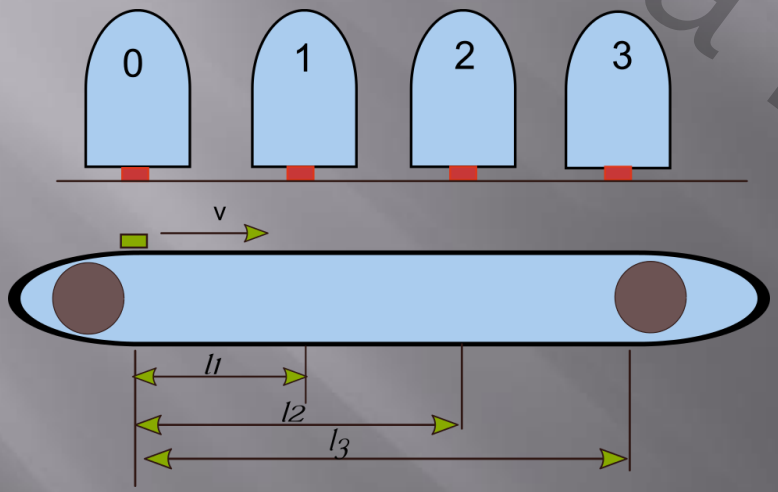


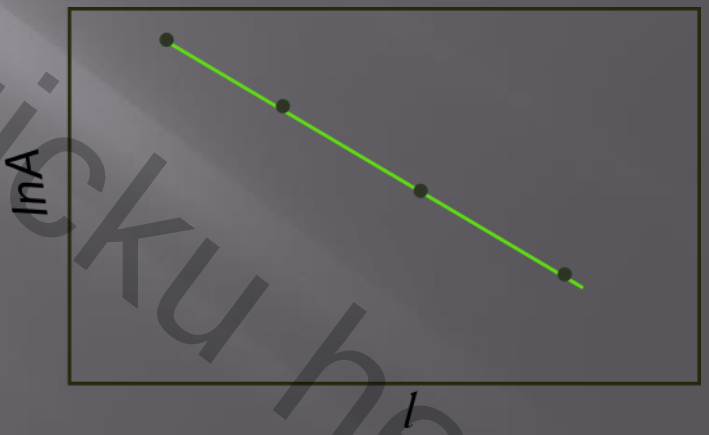
Fakultet za fizicku hemiju

$$lnA = lnA_0 - \lambda t$$

$$t_{1/2} = \frac{ln2}{\lambda}$$

- Случај веома кратких времена полураспада





$t=l/v$

Fakultet za fizičku hemiju

Случај дугоживећих изотопа (5-10^9 година)

- Помоћу одређивања апсолутних активности

Погодна за одређивање $t_{1/2}$ радионуклида који улазе у састав елемената присутних у природи (нпр ^{40}K).

- Калориметријски метод (уколико су познате енергије **ε** честица које радионуклид емитује)

Апсолутна активност се одређује на основу енергије E предате материјалу калориметра у току времена Δt

$$A = \frac{E/\Delta t}{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N$$

$$\lambda = \frac{A}{N}$$

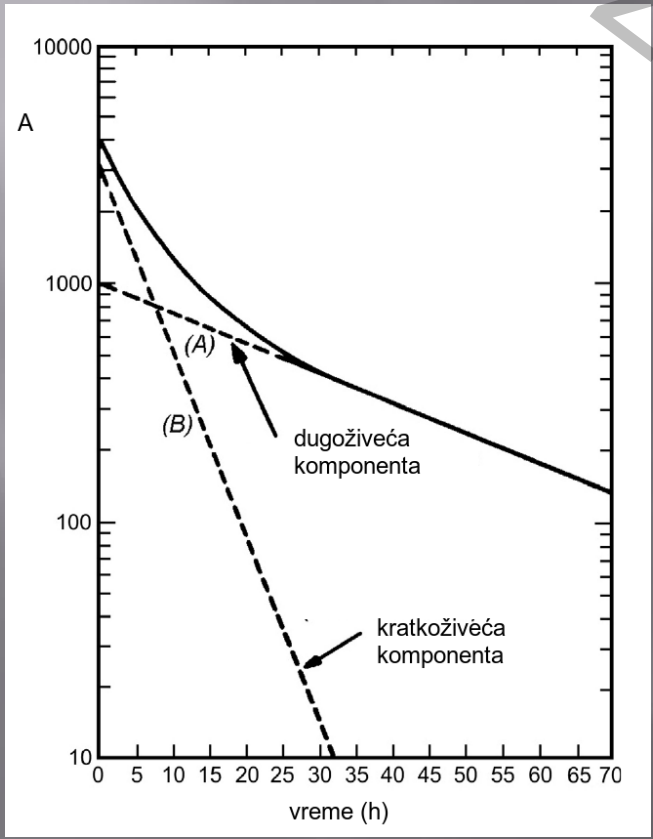
Fakultet za fizičku hemiju

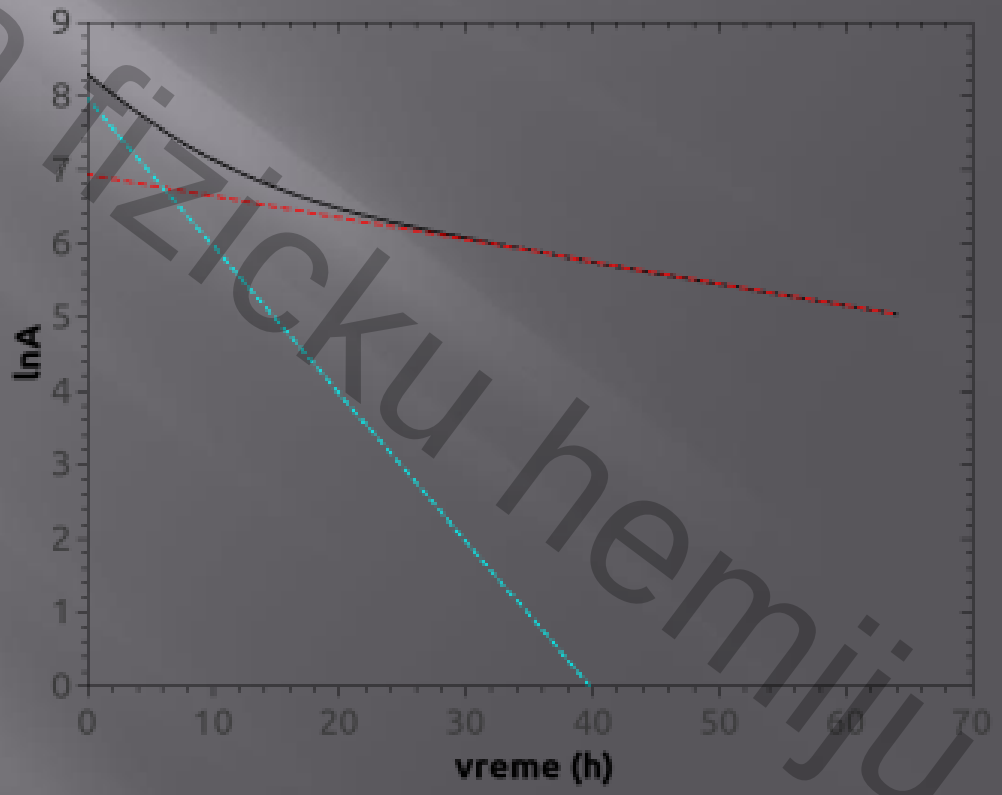
Распад у смеши генетски независних нуклида

$$A_1 = A_1^0 e^{-\lambda_1 t}$$

$$A_2 = A_2^0 e^{-\lambda_2 t}$$

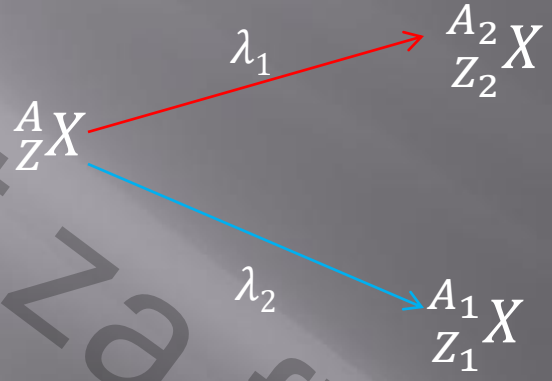
$$A = A_1 + A_2$$





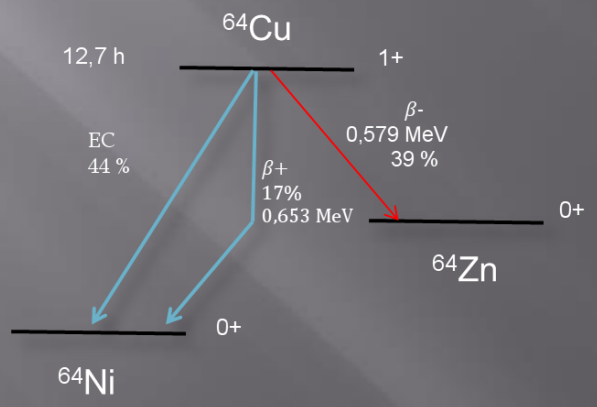
Fakultet za fizicku hemiju

Распад са гранањем



Мери се само $\lambda_{ukupno} = \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots$

$$A = A_0 e^{-\lambda_{ukupno} t}$$



λ_{EC}=0,44λ_{ukupno}
$\lambda_{\beta+}$=0,17λ_{ukupno}
$\lambda_{\beta-}$=0,39λ_{ukupno}

Fakultet za fizicku hemiju

Узастопни распади –општи случај

$$X_1 \xrightarrow{\lambda_1} X_2 \xrightarrow{\lambda_2} X_3 \xrightarrow{\lambda_3} \dots$$

$$N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \qquad -\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1 = A_1$$

$$N_2 = N_2^0 e^{-\lambda_2 t}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \qquad \frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$$

Множењем обе стране једначине са $e^{\lambda_2 t}$ *добија се*

$$\frac{dN_2}{dt} e^{\lambda_2 t} + \lambda_2 N_2^0 e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 N_1^0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1) t}$$

$$\frac{d}{dt}[N_2 e^{\lambda_2 t}] = \lambda_1 N_1^0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1) t}$$

$$N_2 e^{\lambda_2 t} = \int \lambda_1 N_1^0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1) t}\, dt = \frac{\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} N_1^0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1) t} + C$$

константу C добићемо када као почетни услов узмемо да је $t = 0$. *Тада је* $N_2 = N_2^0$ *па за C добијамо*

Fakultet za fizicku hemiju

$$C = N_2^0 - \frac{\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} N_1^0. \quad \textit{Заменом у претходну једначину добија се}$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_2^0 e^{-\lambda_2 t}$$

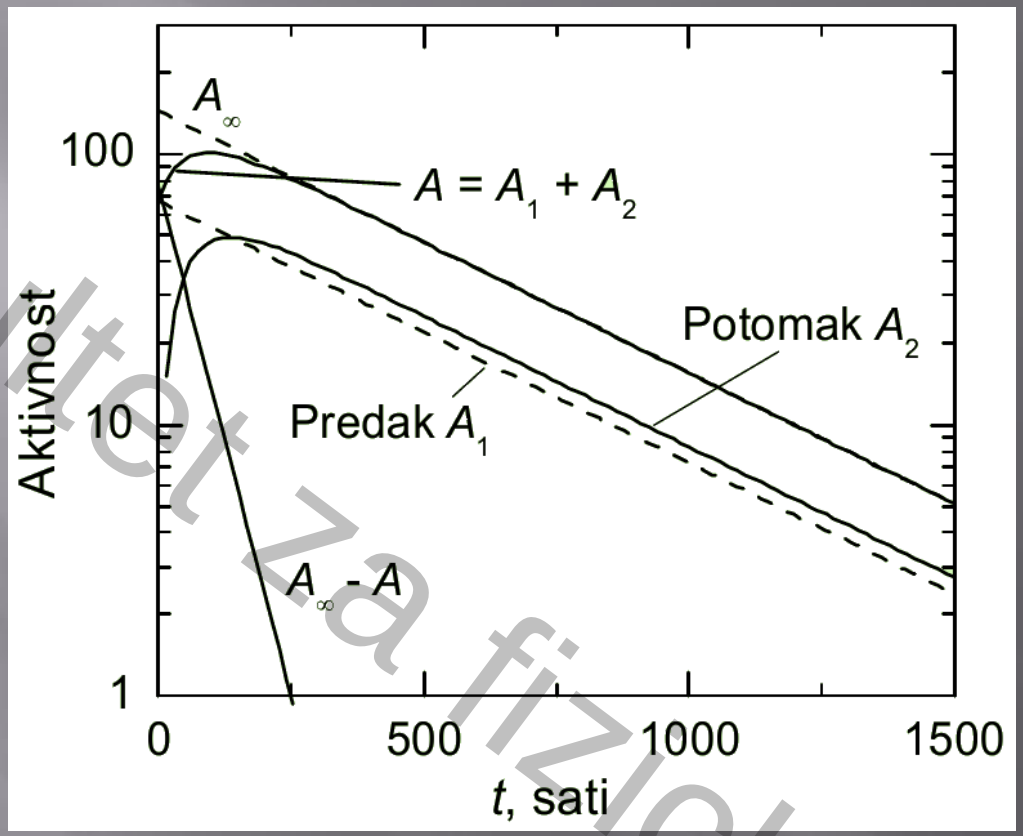
Ако је у времену $t = 0$ *и* $N_2^0 = 0$ *једначина се своди на*

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

- Привремена равнотежа $\lambda_1 < \lambda_2$
- После довољно дугог времена $e^{-\lambda_2 t} \ll e^{-\lambda_1 t}$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1$$

Fakultet za fizičku hemiju



$$A = A_1 + A_2 = \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$$

Када је $t >> t_{1/2}$ $A = A_\infty$ и $e^{-\lambda_2 t} \ll 1$

$$A_\infty = A_1 + A_2 = \left(\lambda_1 N_1^0 + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0\right) e^{-\lambda_1 t}$$

$$ln A_\infty = D - \lambda_1 t$$

Fakultet za fizičku hemiju

$$A_\infty - A(t) =$$

$$= \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} - -N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$$

$$- \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$$

$$A_\infty - A(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_2 t}$$

$$\ln(A_\infty - A) = D_1 - \lambda_2 \mathrm{t}$$

Fakultet za fiziku hemiju

Секуларна равнотежа

- $\lambda_1 << \lambda_2 \Longmapsto N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t} = N_1^0 \quad e^{-\lambda_1 t} \approx 1$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1 \left(1 - e^{-\lambda_2 t}\right)$$

$$A_1 = \lambda_1 N_1^0 \approx A_1^0$$

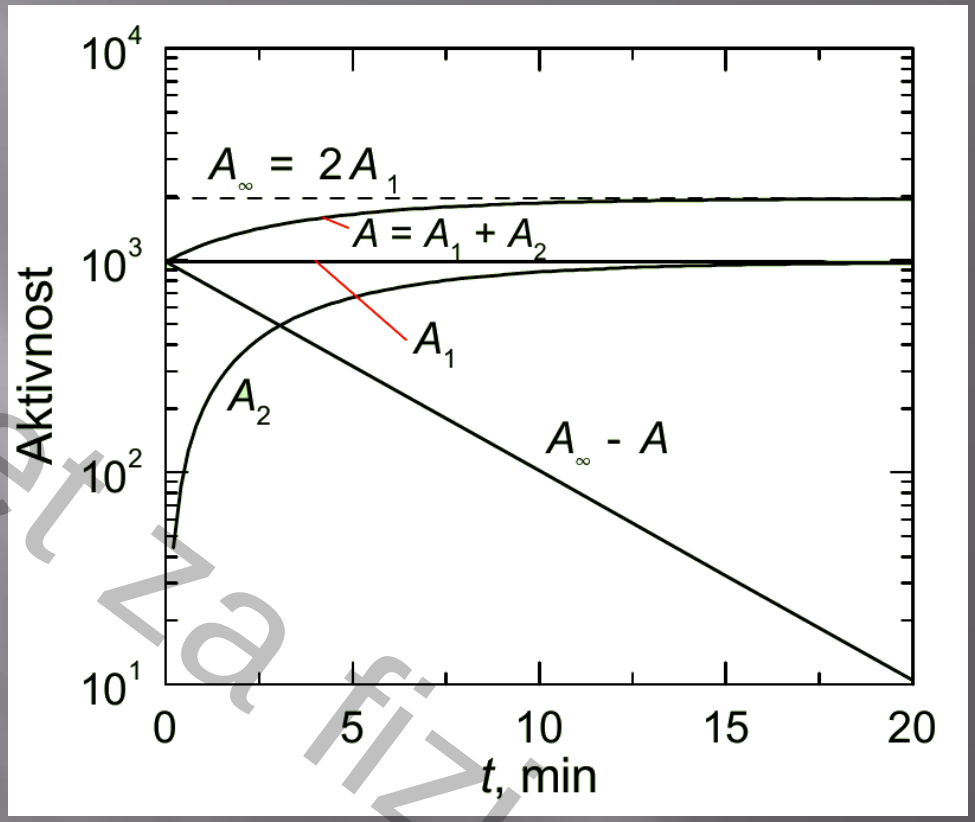
$$A_2 = \lambda_2 N_2 = \lambda_2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1^0 \left(1 - e^{-\lambda_2 t}\right)$$

Када је t>10 $t_{1/2}$

$$A_2 = A_1^0 = A_1$$

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \cdots$$

Fakultet za fizičku hemiju



$$A = A_1 + A_2 = \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) = \lambda_1 N_1^0 \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$$

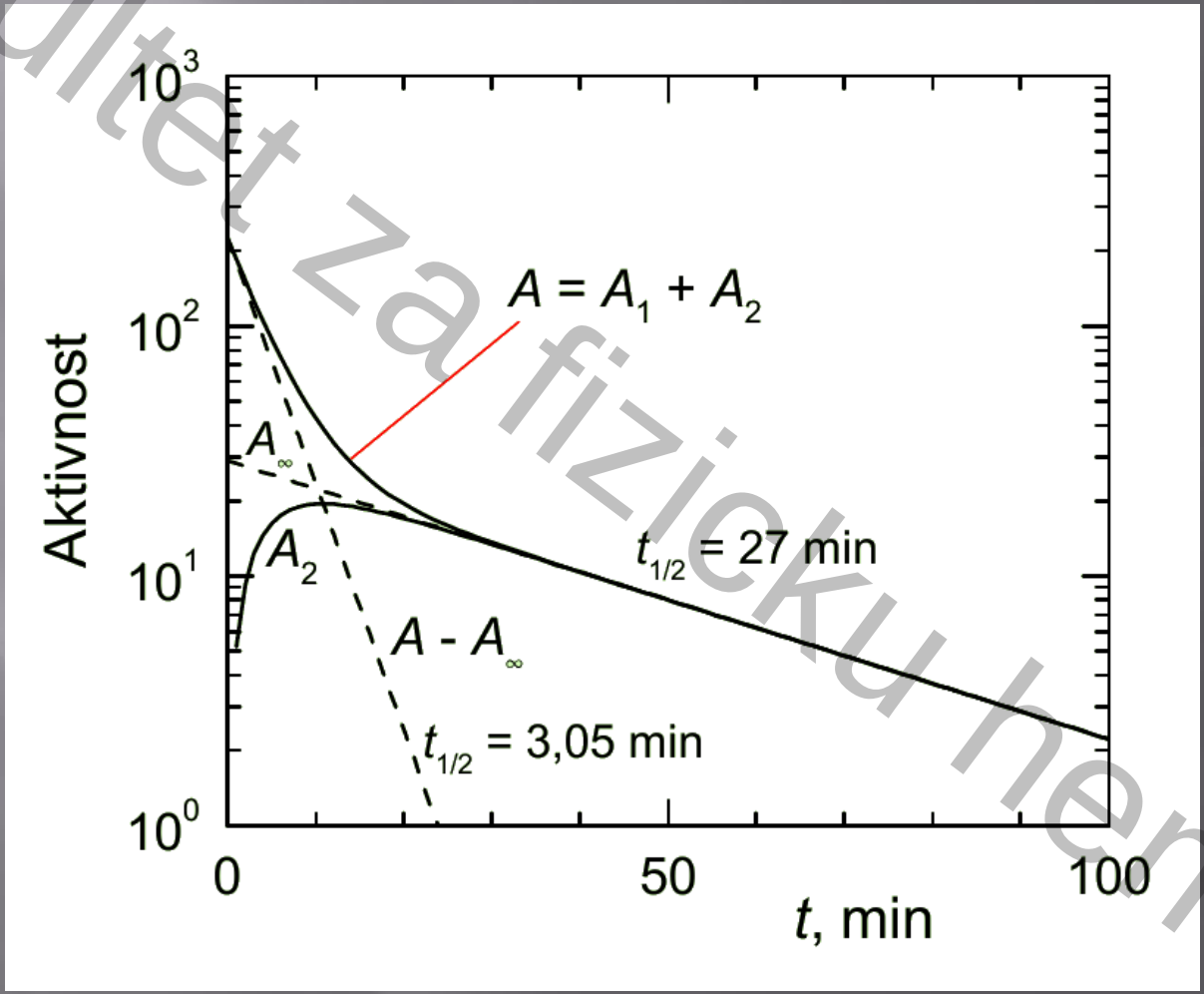
$$A_\infty = A_1 + A_2 = \left(\lambda_1 N_1^0 + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2} N_1^0\right) e^{-\lambda_1 t} = 2\lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$$

$$A_\infty - A = 2A_1 - (A_1 + A_2) = A_1 - A_2 = \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_1 N_1^0 \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$$

$$\ln(A_\infty - A) = lnA_0 - \lambda_2 t$$

Fakultet za fizičku hemiju

Случај непостојања равнотеже



Fakultet za fizičku hemiju