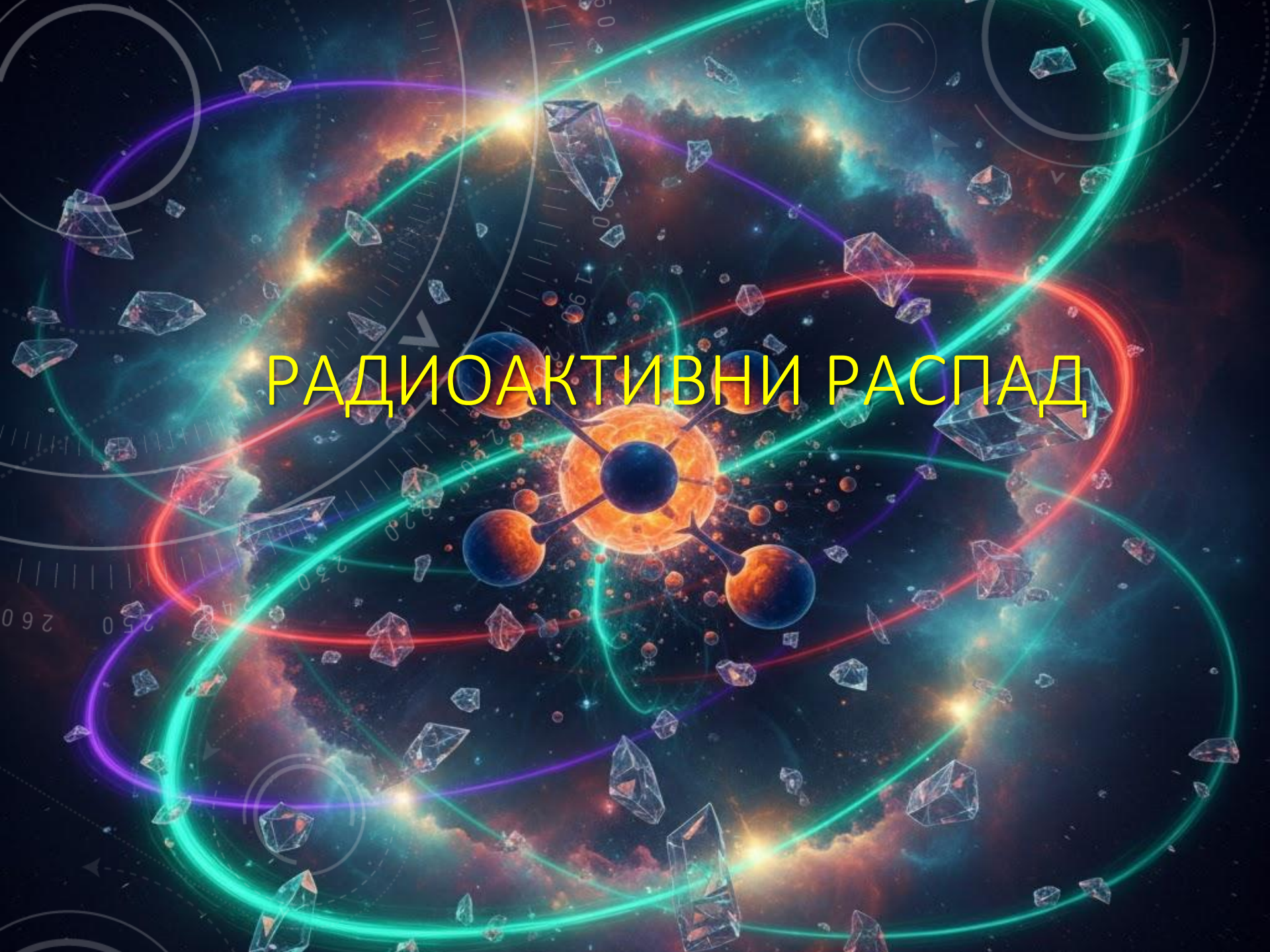


РАДИОАКТИВНИ РАСПАД



- Спонтана трансформација језгра при чему 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

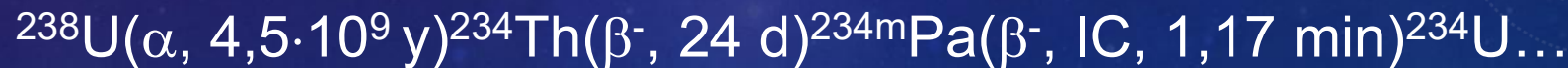
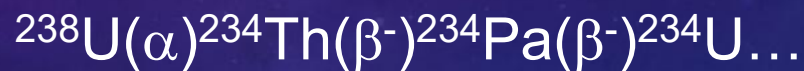
ВРСТЕ РАДИОАКТИВНОГ РАСПАДА

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

НОТАЦИЈА РАДИОАКТИВНОГ РАСПАДА

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

$${}^A_mZX \rightarrow {}^A_ZY + \gamma$$



ЗАКОНИ ОДРЖАЊА КОД РАДИОАКТИВНОГ РАСПАДА

- Ови закони важе радиоактивне распаде и за нуклеарне реакције



- Одржање енергије** (укључујући масени еквивалент енергије)

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4$$

- Одржање импулса**

$$p_1 + p_2 = p_3 + p_4$$

ОАС-Радиохемија и нуклеарна хемија

- 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_l

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

- 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

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

ЕНЕРГЕТИКА РАСПАДА

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

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

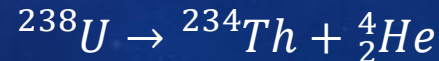
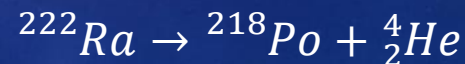
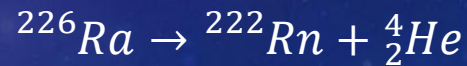
α РАСПАД

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

55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo

*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

221Ra	222Ra	223Ra
220Fr	221Fr	222Fr
219Rn	220Rn	221Rn



ЕНЕРГИЈА АЛФА РАСПАДА

- Енергија алфа распада дефинише се као

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

- На пример за распад ^{226}Ra

$$\begin{aligned} Q_{\alpha} &= -931,5(M_{222Rn} + M_{4He} - M_{226Ra}) \\ &= (222,017578 + 4,002603 - 226,025410) = 4,871 \text{ MeV} \end{aligned}$$

- За алфа распад ^{238}U

- $Q_{\alpha} = -931,5(M_{234Th} + M_{4He} - M_{238U}) = -931,5(234,043601 + 4,002603 - 238,050788) = 4,27 \text{ MeV}$

РАСПОДЕЛА ЕНЕРГИЈЕ АЛФА РАСПАДА

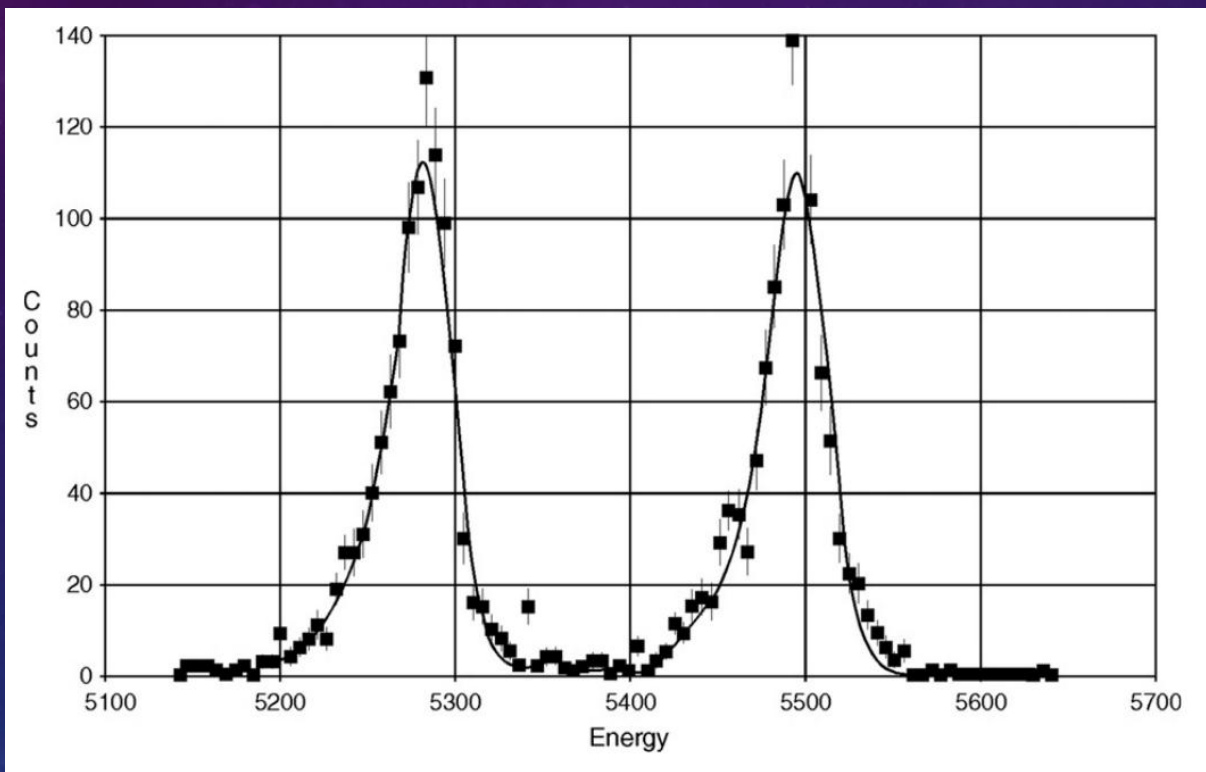
$$Q_{\alpha} = E_{Z-2}^{A-4} + E_{\alpha}$$

- Из законâ о одржању енергије и момента импулса следи

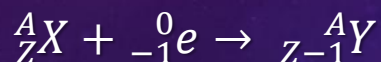
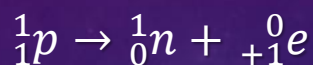
$$E(X_{Z-2}^{A-4}) = \frac{M_{\alpha}}{M_X} Q_{\alpha} \qquad E(\alpha) = \frac{M_X}{M_{\alpha}} Q_{\alpha}$$

- Тако α -честица емитована при распаду ^{238}U ($Q_{\alpha}=4,27$ MeV) односи енергију $0,983 Q_{\alpha}$, а атом ^{234}Th свега $0,017 Q_{\alpha}$
- Енергија узмака језгра ^{234}Th је 72 keV што је више него довољно за раскидање хемијске везе у молекулу

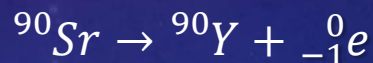
СПЕКТАР α -РАСПАДА



β РАСПАД



Промена спина у β распаду

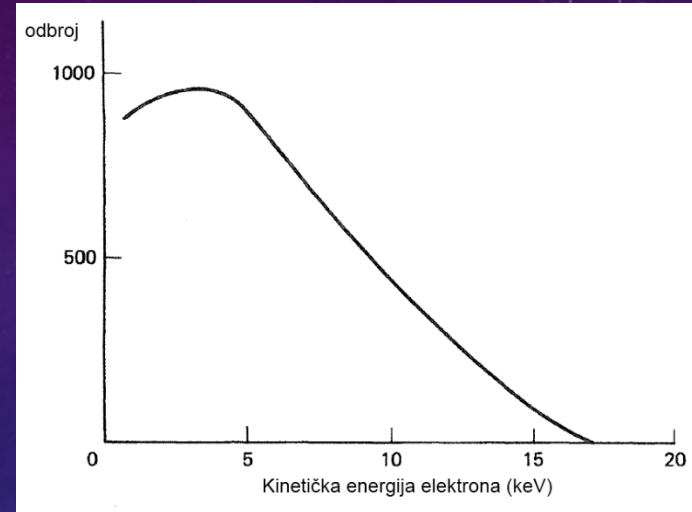


$$\Delta I = I({}^{90}\text{Y}) + I({}^0_{-1}e) - ({}^{90}\text{Sr}) = 2 + \frac{1}{2} - 0 = \frac{5}{2}$$

Али ΔI мора имати **целобројне вредности!**

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

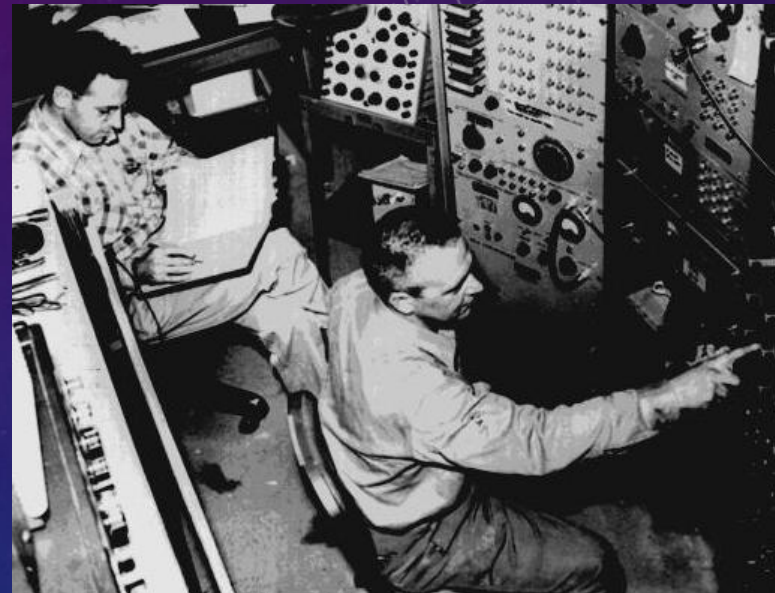
$$E_e = \frac{m_X^2 - m_Y^2 + m_e^2}{2m_X}$$



- Wolfgang Pauli 1930. – Претопоставка да део енергије односи мала неутрална честица
- Enrico Fermi 1933. у својој теорији β -распада уводи неутралну честицу – **неутрино**

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОТВРДА ПОСТОЈАЊА НЕУТРИНА

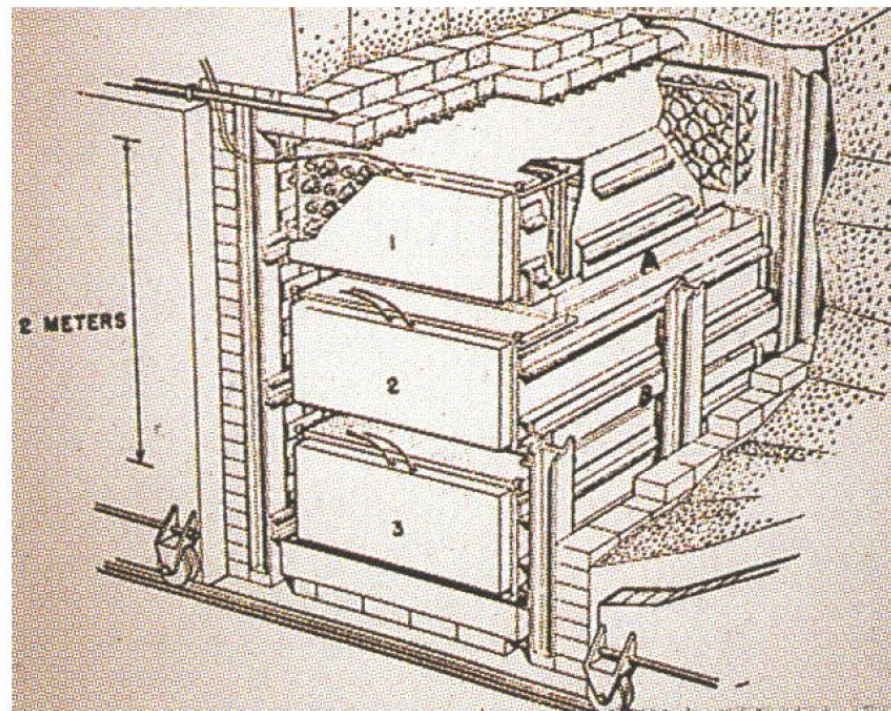
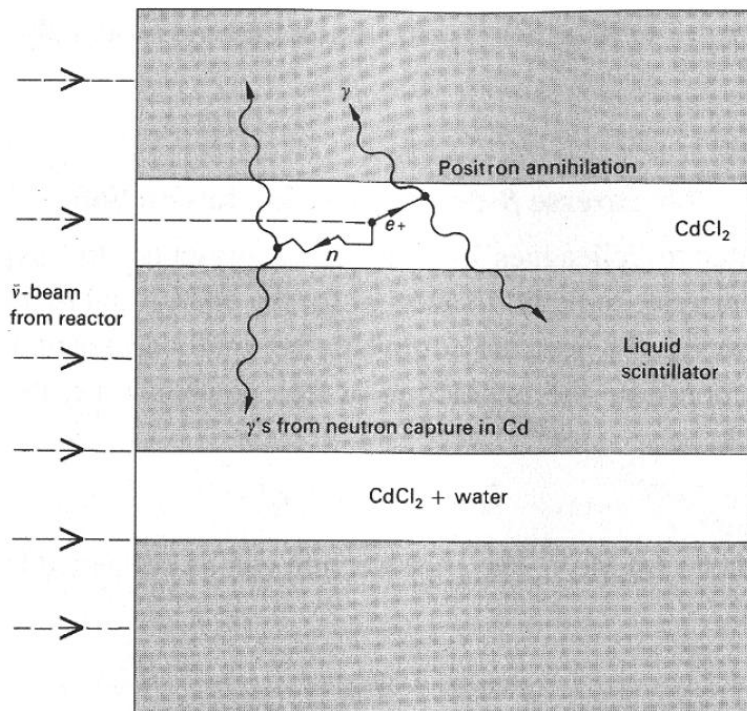
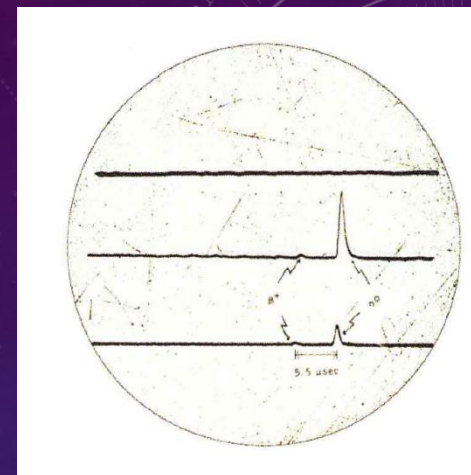
- Неутрино због своје неутралности и мале масе једва да реагује са средином кроз коју пролази
- Reines & Cowan 1955. Sawana River нуклеарни реактор (флукс неутрина $5 \cdot 10^{13}$) – потрага за инверзним β^+ распадом.



- Ако ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + \beta^+ + \nu$

- онда постоји и

- ${}_1^1X + \tilde{\nu} \rightarrow {}_0^1n + \beta^+$



- Нeutрину је приписан спин $\frac{1}{2}$ што решава проблем са променом спина у току радиоактивног распада



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

ЕНЕРГИЈА β -РАСПАДА



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

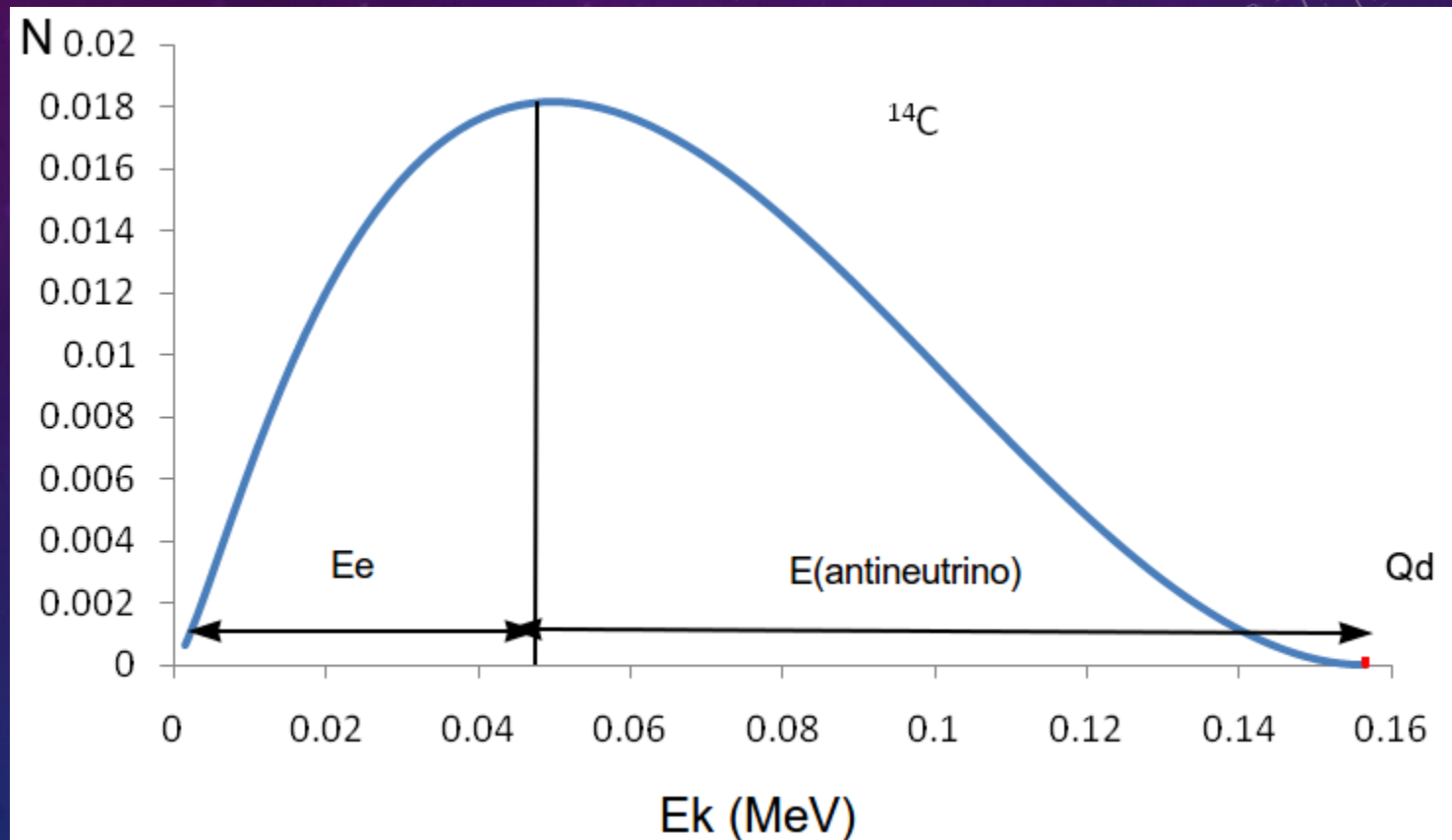
За распад ${}^{90}\text{Sr} \rightarrow {}^{90}\text{Y} + {}^0_{-1}e + \tilde{\nu}$

$$Q_{\beta^-} = -931,5 (M_{{}^{90}\text{Y}} - M_{{}^{90}\text{Sr}}) = -931,5(89,907144 - 89,907730) \\ = 0,546 \text{ MeV}$$

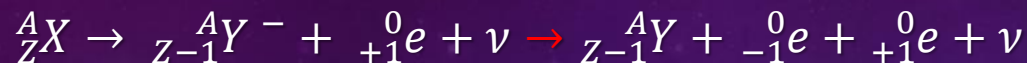
Средња енергија емитованог електрона дата је емпиријском формулом

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

СПЕКТАР β -РАСПАДА



ПОЗИТРОНСКИ (β^+) РАСПАД



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

$$Me = 931,5 \cdot 0,000549 \text{ MeV} = 0,511 \text{ MeV}$$



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

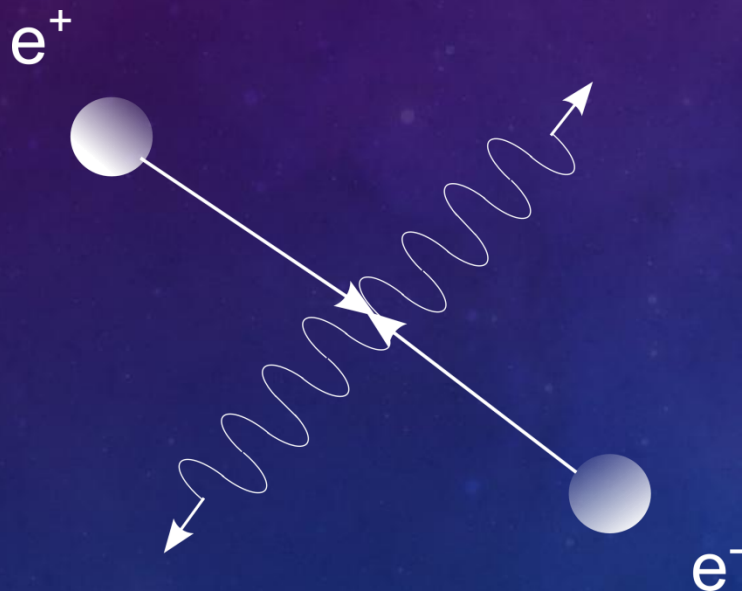
ДИРАКОВА ЈЕДНАЧИНА И ПОЗИТОН

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

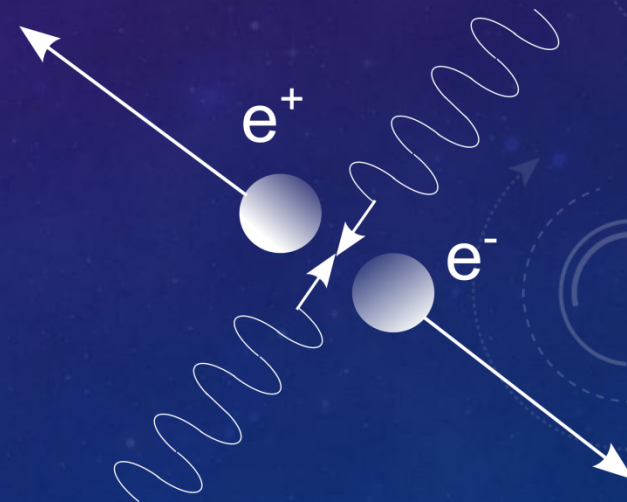
- Негативна енергија електрона ??
- Dirac : Сва стања негативне енергије су попуњена ?
- Фајман: нова честица са масом електрона али са супротним наелектрисање

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 180°



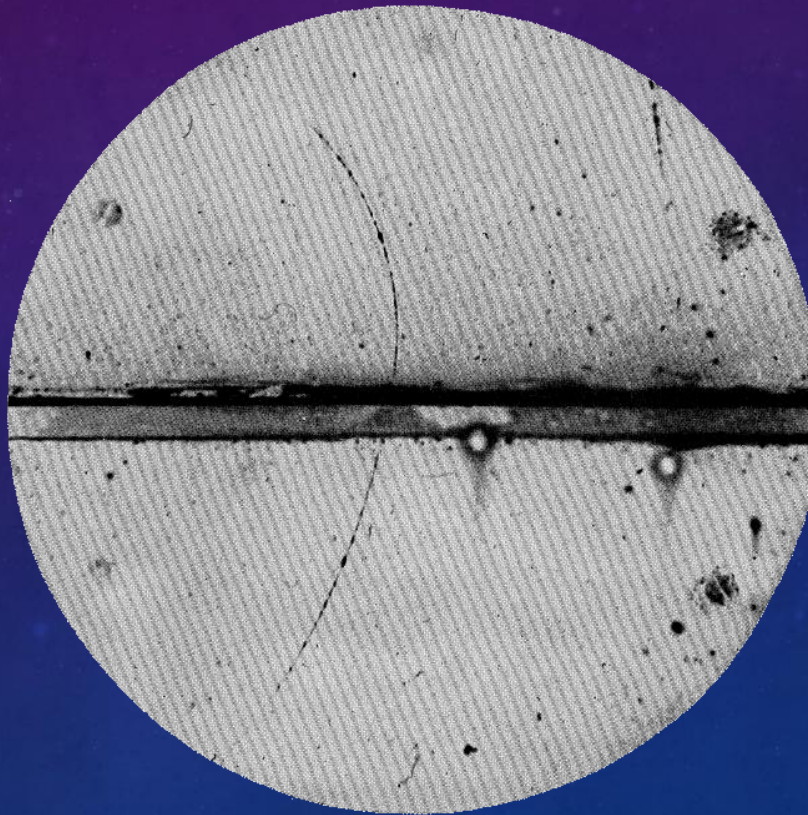
Анихилација



Стварање парова

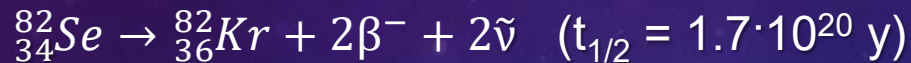
ОТКРИЋЕ ПОЗИТРОНА

- Андерсон је проучавао трагове космичког зрачења у Wilson – овој комори и нашао траг честице са “необичним” понашањем.



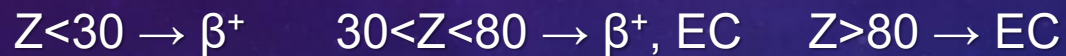
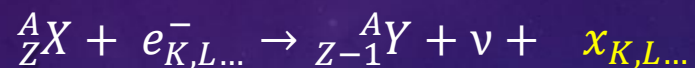
ДВОСТРУКИ В-РАСПАД

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



ЕЛЕКТРОНСКИ ЗАХВАТ

- Конкурентски процес β^+

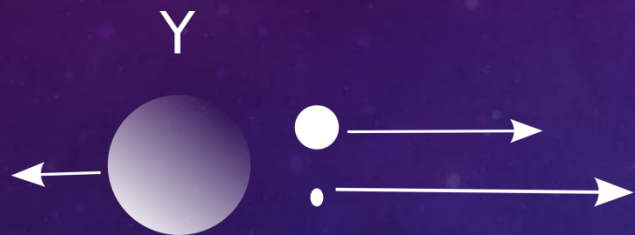


$$Q_{EC} = -931,5(M_{Z-1}^A - M_Z^A) = 0,861 \text{ MeV}$$

УЗМАК ЈЕЗГРА КОД В РАСПАДА



$$E_{\gamma} = 0$$



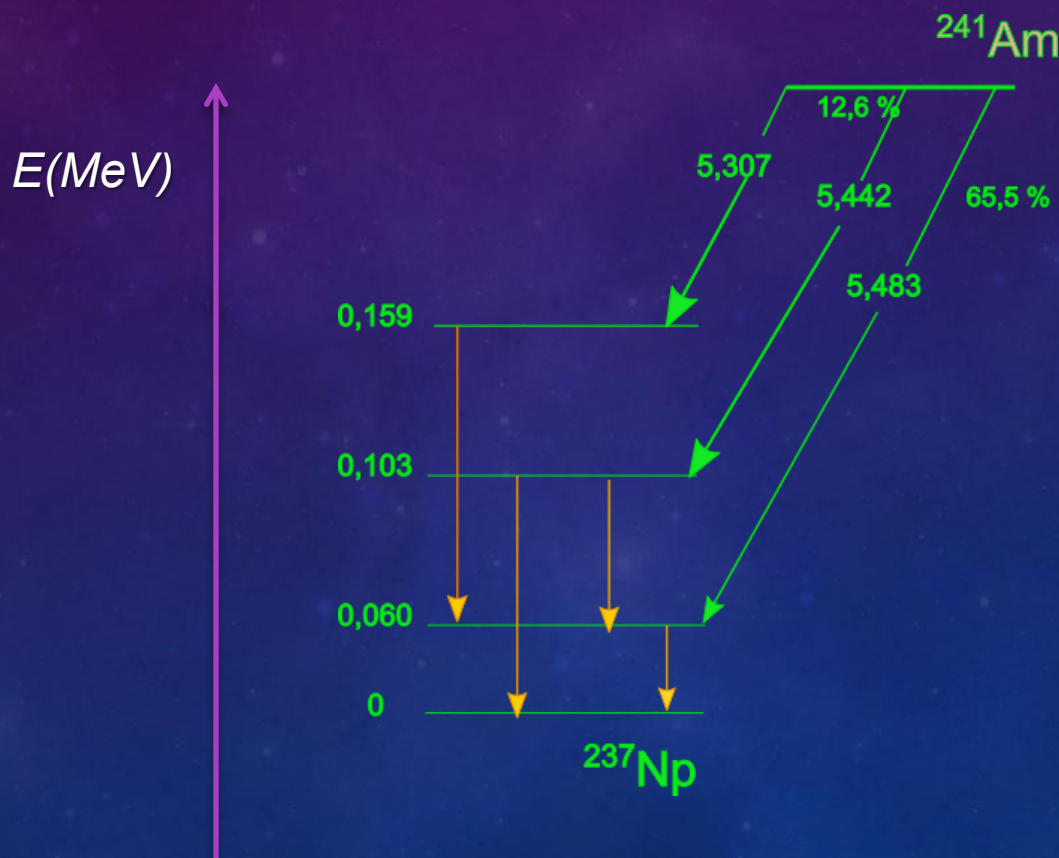
$$E_d = m_e \frac{E_{max}}{m_d} + \frac{E_{max}^2}{2m_d c^2}$$

$E_d \approx 100 \text{ V} \rightarrow$ може изазвати раскидање веза у молекулу



ГАМА РАСПАД (IT)

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



ЕНЕРГИЈА УЗМАКА ЈЕЗГРА КОД γ -РАСПАДА

- Закон одржања импулса

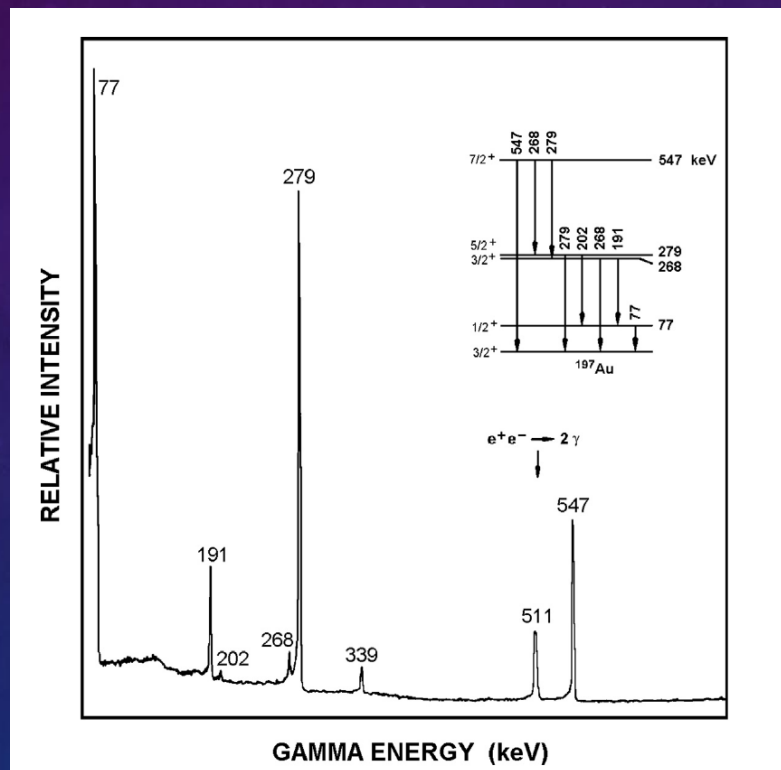
$$\frac{E_{\gamma}}{c} = -m_d v_d$$

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

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

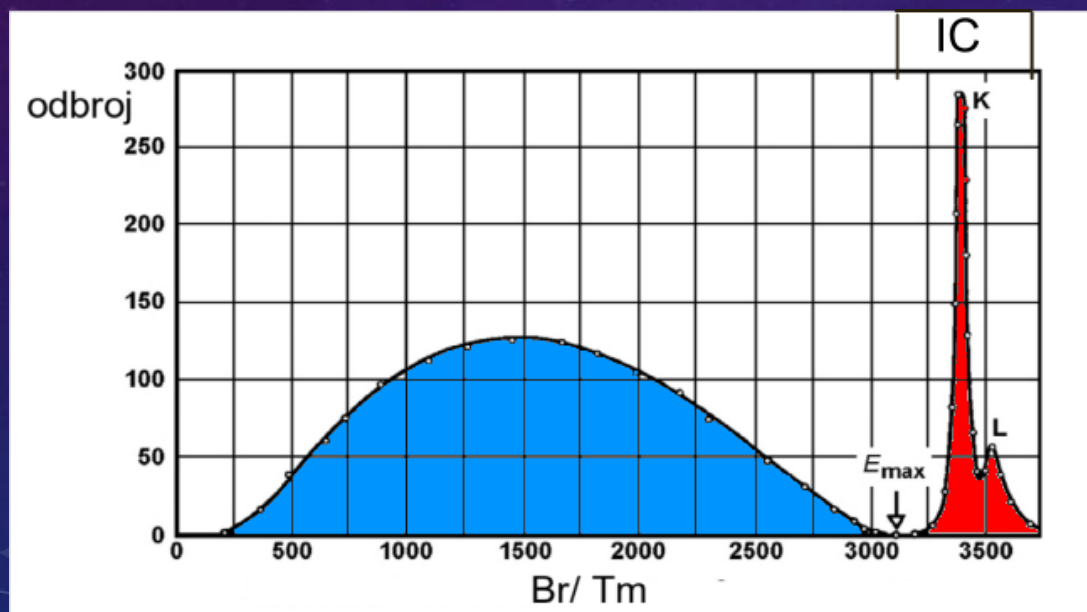
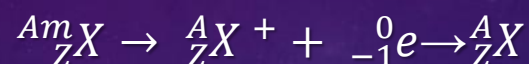
$$E_{k_d} = \frac{(0,661 \cdot \text{MeV})^2}{2 \cdot 136.905827 \cdot 931,5 \text{ MeV}} = 1,71 \cdot 10^{-6} \text{ MeV} = 1,71 \text{ eV}$$

СПЕКТАР γ -РАСПАДА



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**



Конверзионни коефицијент(и)

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

$$\alpha_{K+L+\dots}({}^{137m}\text{Ba}) = 0,112$$

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

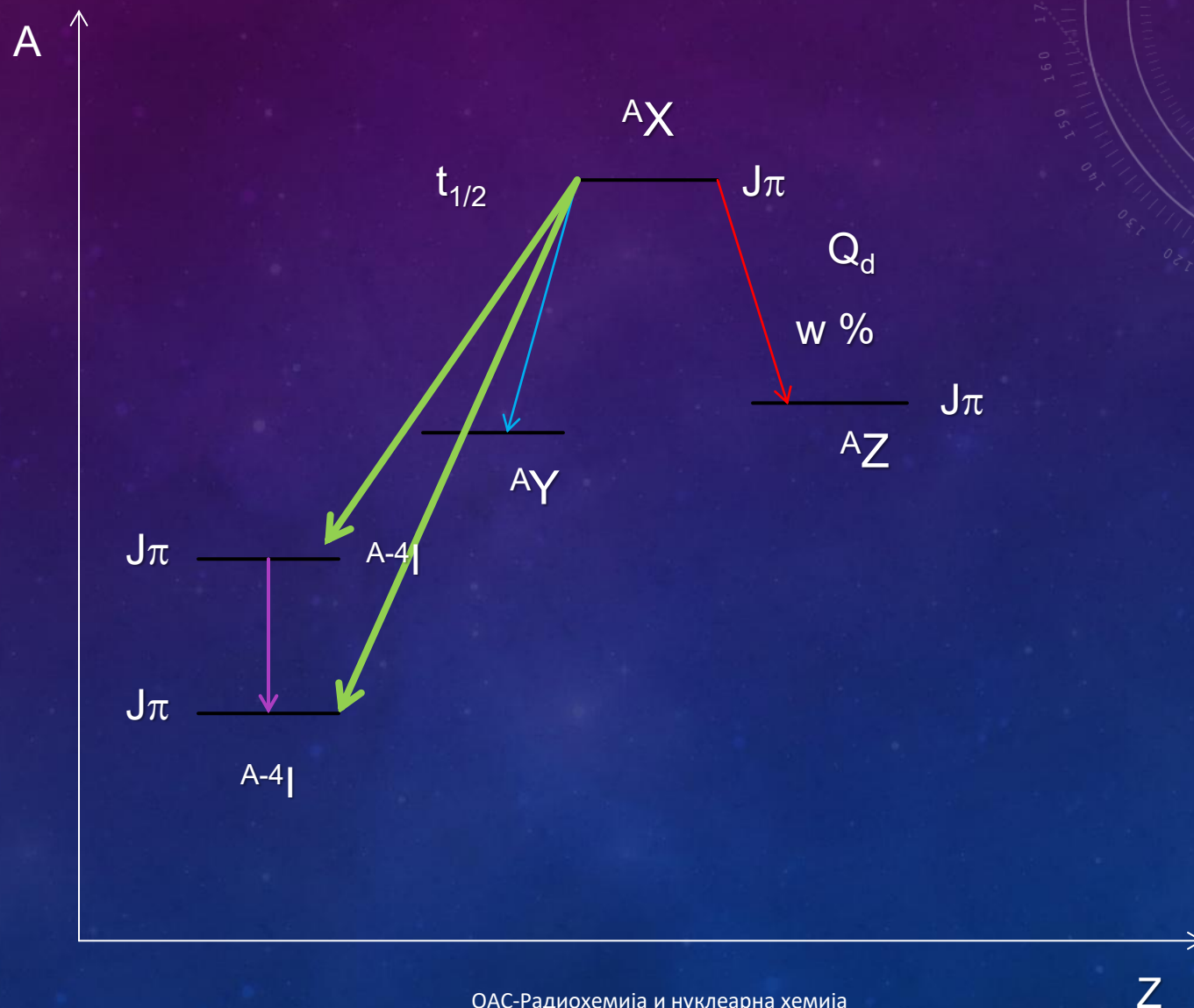


Нуклид	Z	Време полураспада (y)
^{238}U	92	$8 \cdot 10^{15}$
^{240}Pu	94	$1,2 \cdot 10^{11}$
^{244}Cm	96	$1,4 \cdot 10^7$
^{252}Cf	98	66
^{256}Fm	100	$3 \cdot 10^{-4}$

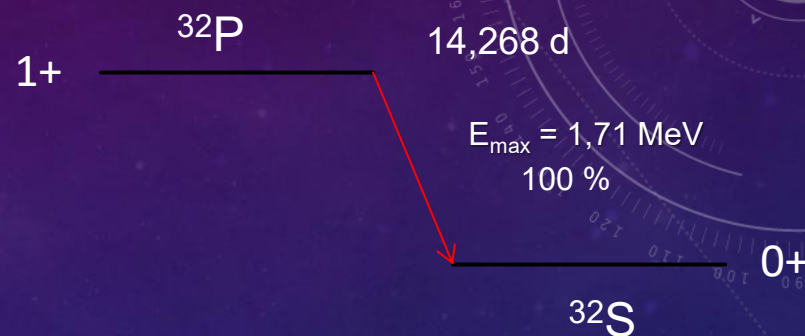
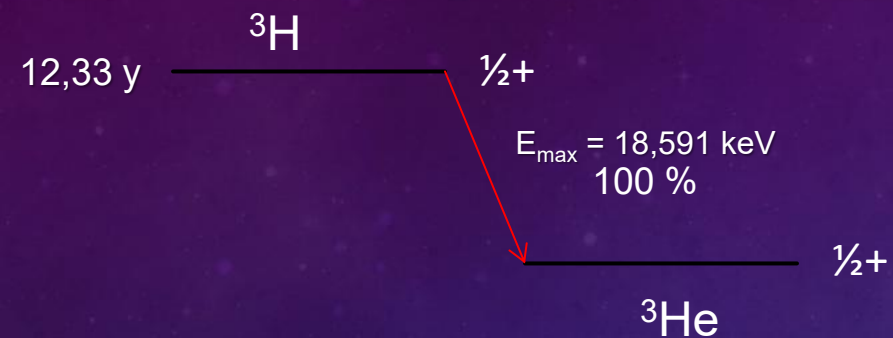
ЕГЗОТИЧНИ РАСПАДИ

- Емисија протона код језгара који су веома дефицитарни у неутронима
- $^{53\text{m}}\text{Co}$ (1,5 % емисија протона)
- Емисија неутрона код радионуклида који су продукат фисије – закаснили неутрони
- ^{12}C и ^{16}O емисија је енергетски могућа код тешких алфа емитера

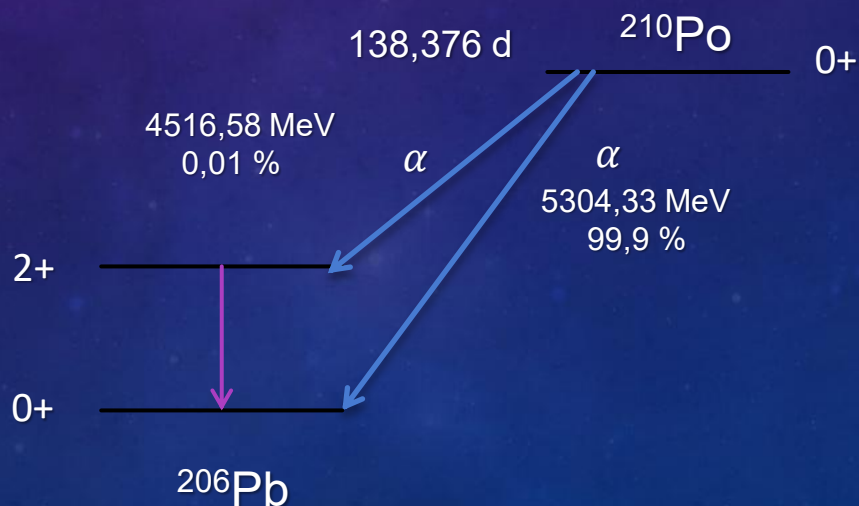
ШЕМЕ РАСПАДА-ПРАВИЛА



ШЕМЕ РАСПАДА



- Просте шеме распада



ШЕМЕ РАСПАДА (2)

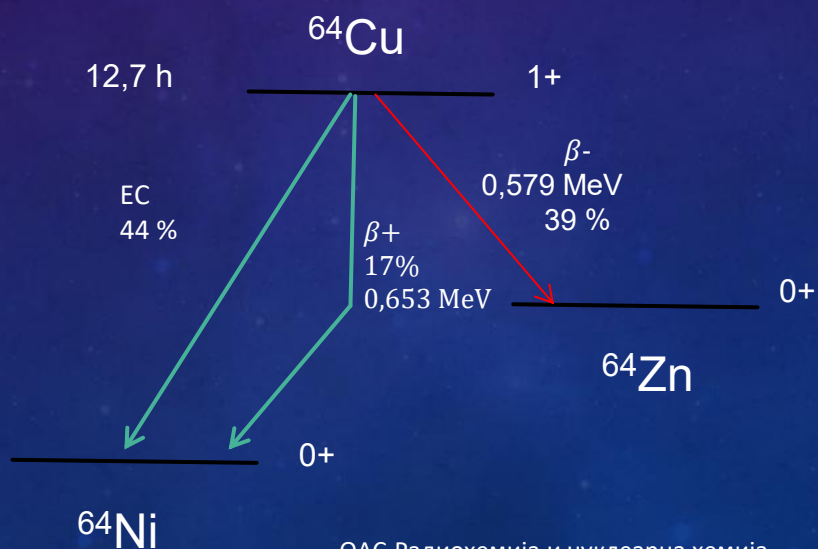
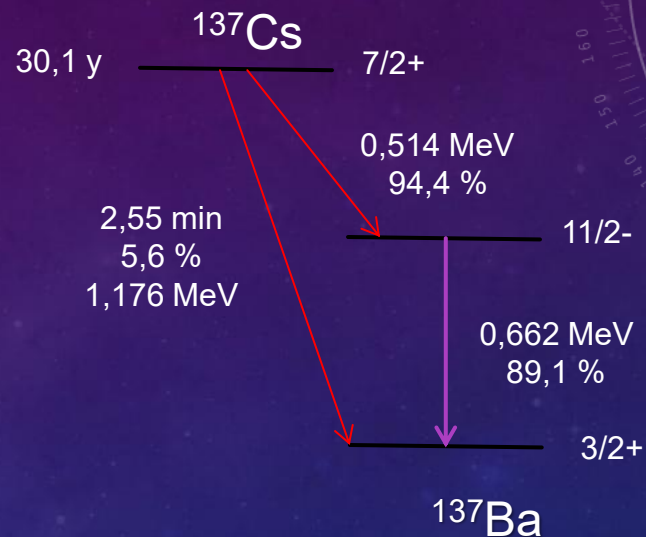
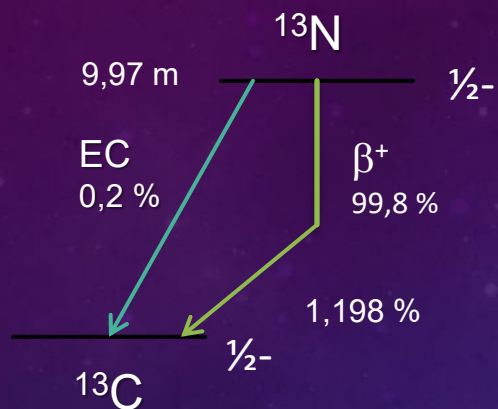


ТАБЛИЦА ИЗОТОПА

A=const

K38
7.636 m
3+
EC

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

ПРОЦЕСИ КОЈИ ПРАТЕ РАДИОАКТИВНИ РАСПАД

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

КИНЕТИКА РАДИОАКТИВНОГ РАСПАДА

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 екситације**

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

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

- 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 $n \rightarrow \infty$. Тада имамо

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

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

- 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

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

АКТИВНОСТ УЗРОКА

- Логаритмовањем облик једначине радиоактивног распада добијамо

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

- Диференцирањем ове једначине по t добијамо

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

λ је константа распада (радиоактивна константа) и представља **верованоћу одигравања распада**

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

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

Стога важи да је

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

и

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

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

$$R = \varepsilon A \quad \text{односно}$$

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

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

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

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

ПАРАМЕТРИ РАДИОАКТИВНОГ РАСПАДА

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

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

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

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

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

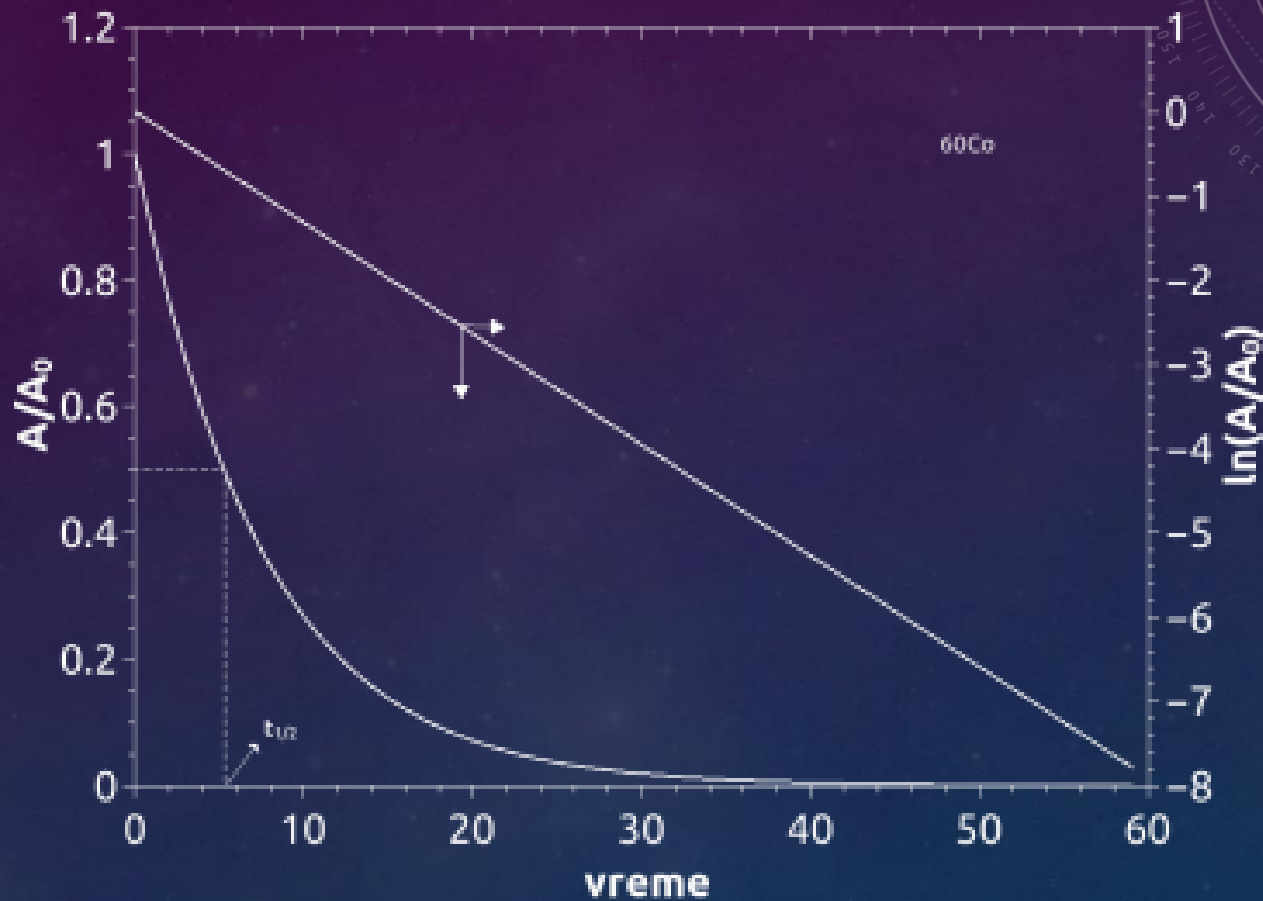
ЈЕДИНИЦЕ ЗА РАДИОАКТИВНОСТ

- SI јединица за радиоактивност је Бекерел (Bq) и дефинисан је као
$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ распад/ s}$$
- Измерени одброј R на уређају за мерење радиоактивности има јединицу одброј/s (*counts/s*)
- Већа једница је Кири (Ci) чија вредност износи

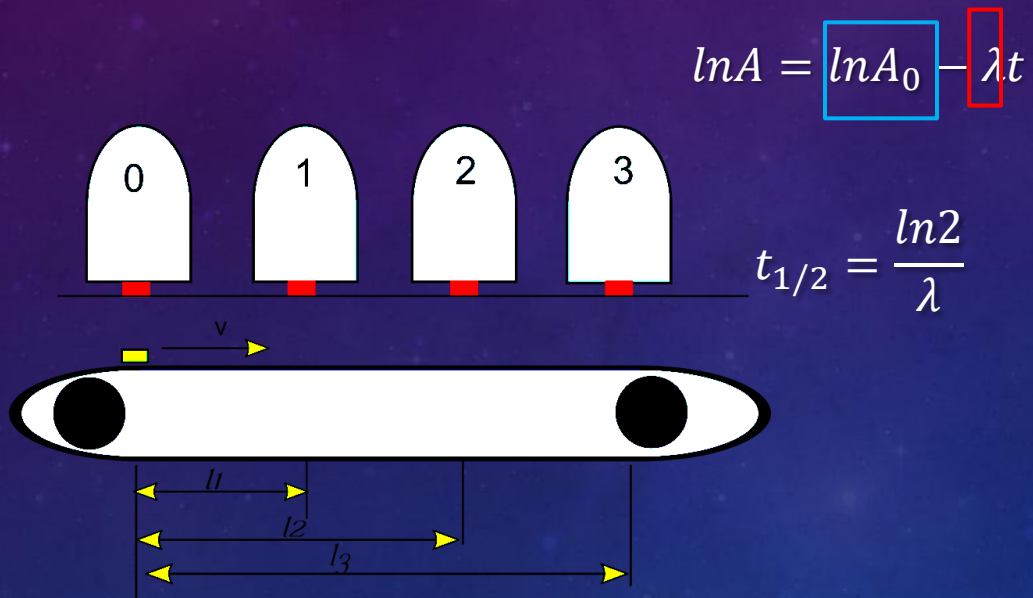
$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ распада/s}$$

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

ОДРЕЂИВАЊЕ ВРЕМЕНА ПОЛУРАСПАДА (ПРОСТ РАСПАД)



- Случај веома кратких времена полураспада



$$t = l/v$$

- Случај дугоживећих изотопа ($5\text{-}10^9$ 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

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

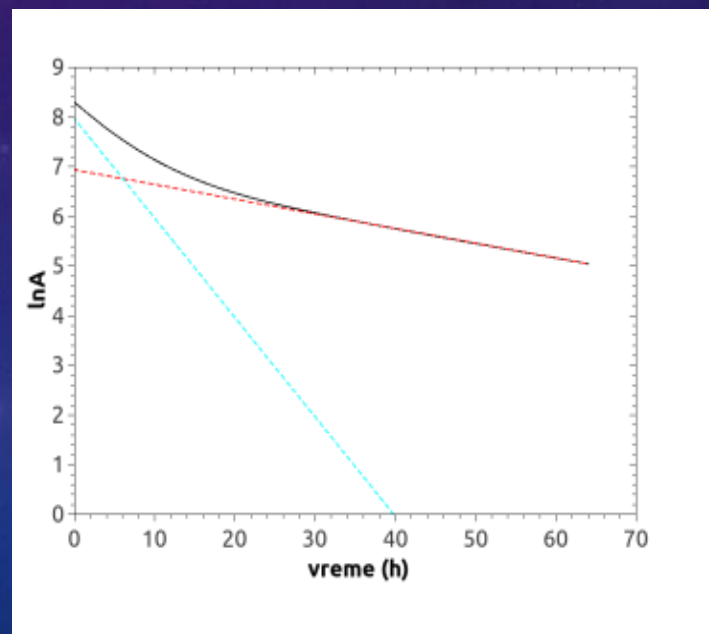
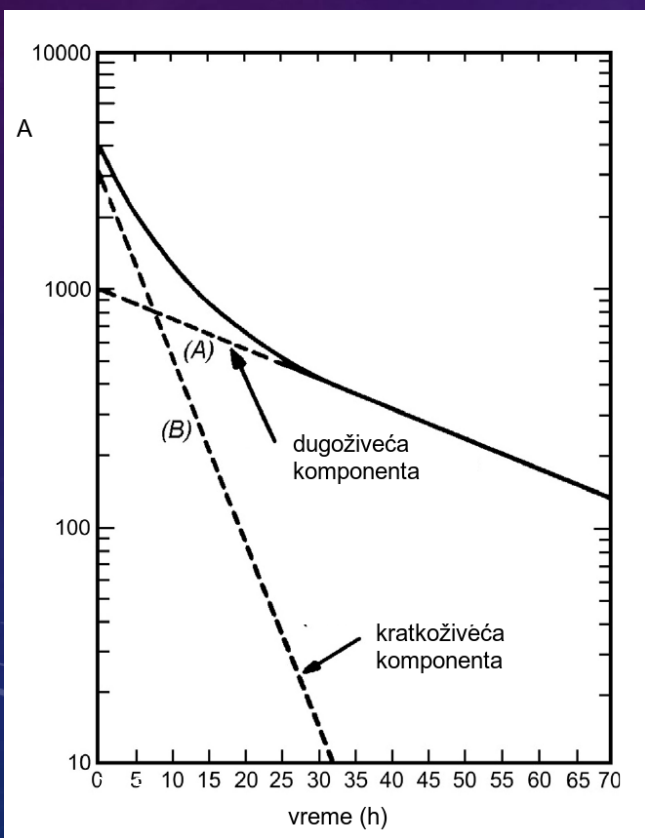
$$\lambda = \frac{A}{N}$$

РАСПАД У СМЕШИ ГЕНЕТСКИ НЕЗАВИСНИХ НУКЛИДА

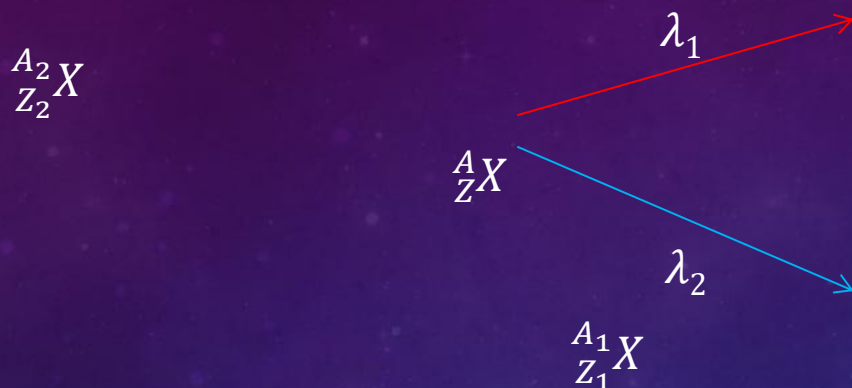
$$A_1 = A_1^0 e^{-\lambda_1 t}$$

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

$$A = A_1 + A_2$$

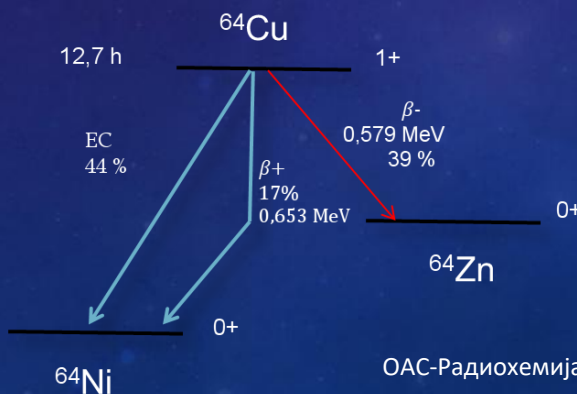


РАСПАД СА ГРАНАЊЕМ



Мери се само $\lambda_{укупно} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots$

$$A = A_0 e^{-\lambda_{укупно} t}$$



$$\begin{aligned}\lambda_{\text{EC}} &= 0,44 \lambda_{\text{укупно}} \\ \lambda_{\beta^+} &= 0,17 \lambda_{\text{укупно}} \\ \lambda_{\beta^-} &= 0,39 \lambda_{\text{укупно}}\end{aligned}$$

УЗАСТОПНИ РАСПАДИ – ОПШТИ СЛУЧАЈ

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

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

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

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

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

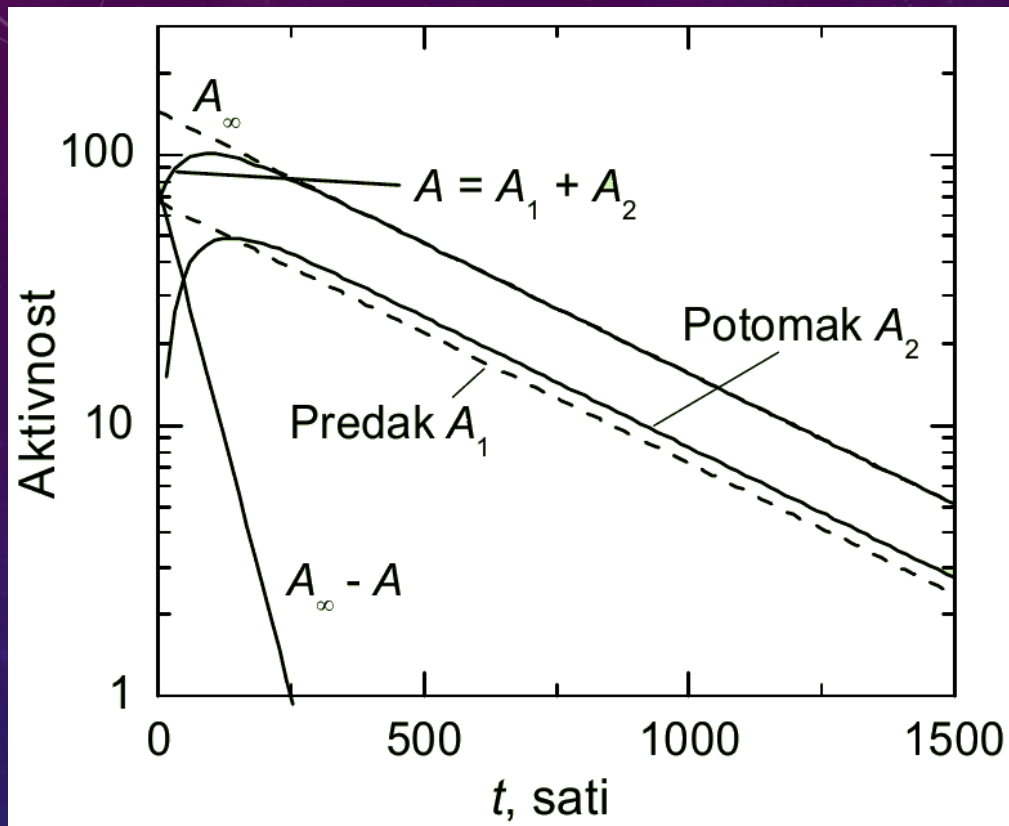
$$N_2 = \frac{\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_2^0 e^{-\lambda_2 t}$$

Ако је у времену $t=0$ и $N_2^0=0$ једначина се сводина

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

СЕКУЛАРНА РАВНОТЕЖА

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

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

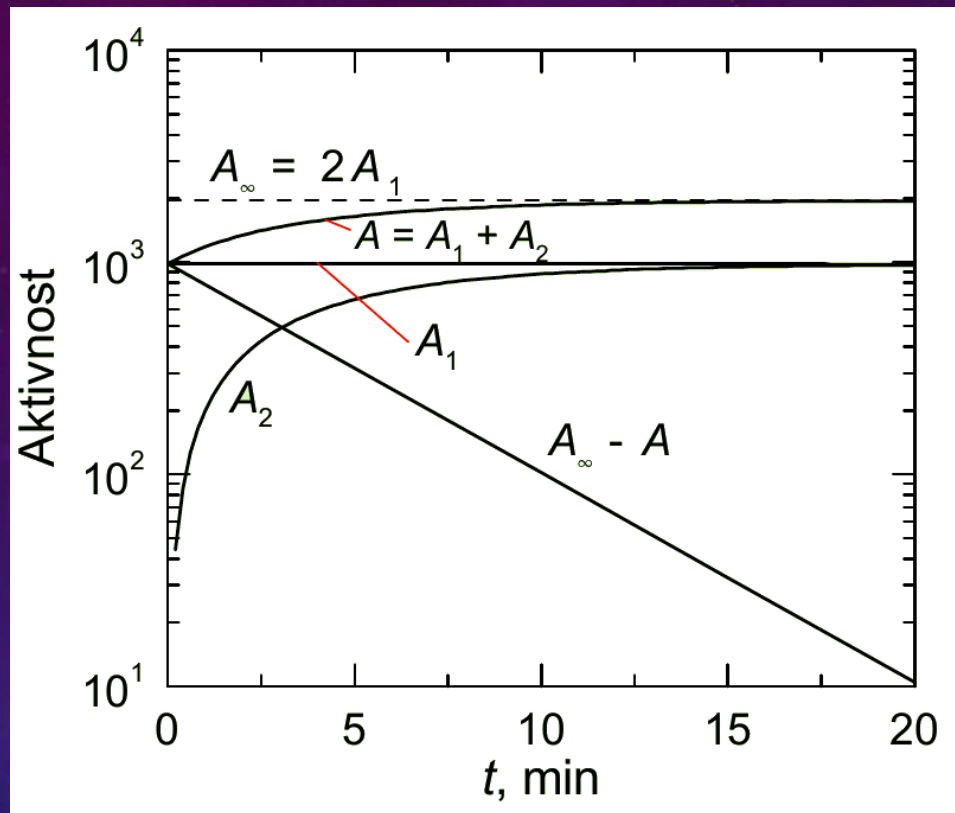
$$A_1 = \lambda_1 N_1^0 \approx A_1^0$$

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

Када је $t > 10 t_{1/2}$

$$A_2 = A_1^0 = A_1$$

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



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

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

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

$$\ln(A_\infty - A) = \ln A_0 - \lambda_2 t$$

СЛУЧАЈ НЕПОСТОЈАЊА РАВНОТЕЖЕ

