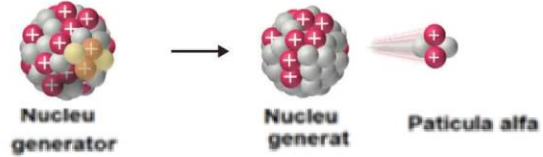
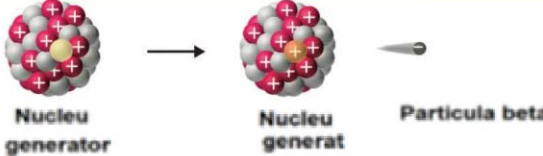
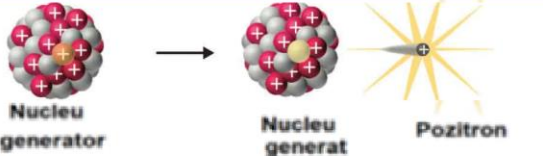
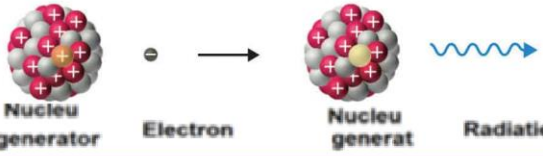
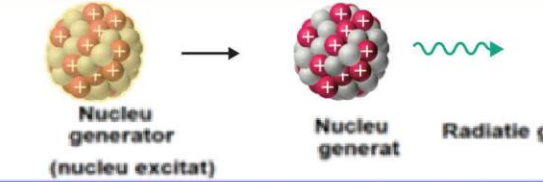
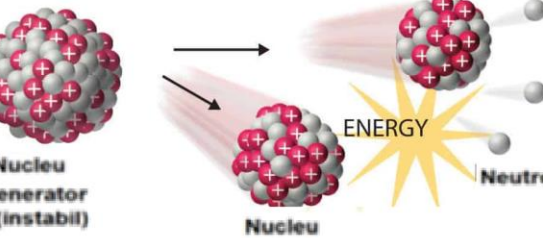


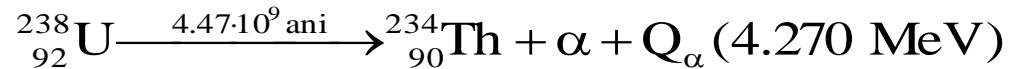
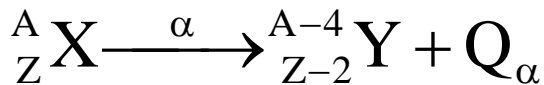
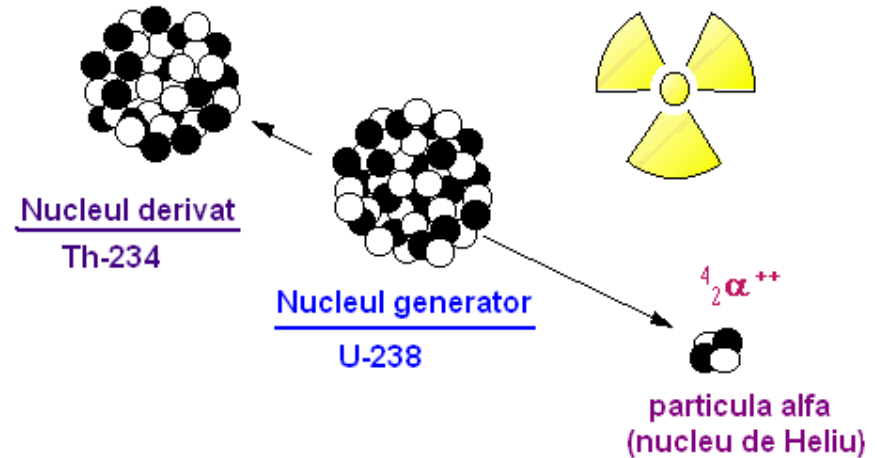
DEZINTEGRĂRILE NUCLEARE

Tip de dezintegrare	Radiatia emisa	Ecuatia generica	Model
Dezintegrarea alfa	${}^4_2\alpha$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X' + {}^4_2\alpha$	 <p>Nucleu generator → Nucleu generat + Particula alfa</p>
Dezintegrarea beta	${}^0_{-1}\beta$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z+1}X' + {}^0_{-1}\beta$	 <p>Nucleu generator → Nucleu generat + Particula beta</p>
Emisia de pozitroni	${}^0_{+1}\beta$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z-1}X' + {}^0_{+1}\beta$	 <p>Nucleu generator → Nucleu generat + Pozitron</p>
Captura electronica	Radiatie X	${}^A_ZX + {}^0_{-1}e \longrightarrow {}^A_{Z-1}X' + \text{Radiatie X}$	 <p>Nucleu generator + Electron → Nucleu generat + Radiatie X</p>
Emisie gama	${}^0_0\gamma$	${}^A_ZX^* \xrightarrow{\text{Relaxation}} {}^A_ZX + {}^0_0\gamma$	 <p>Nucleu generator (nucleu excitat) → Nucleu generat + Radiatie gama</p>
Fisiunea spontana	Neutroni	${}^{A+B+C}_{Z+Y}X \longrightarrow {}^A_ZX' + {}^B_YX' + C^1_0n$	 <p>Nucleu generator (instabil) → Nucleu + Nucleu + ENERGY + Neutroni</p>

Tipuri de dezintegrări nucleare

Dezintegrarea α

- Emisia de către unele nuclee radioactive a unor structuri compacte de doi protoni și doi neutroni (nuclee de heliu) și a unei cantități apreciabile de energie Q_α



- Se întâlnește la elemente cu $Z > 61$ și cuprinde circa 30 radioizotopi naturali și mai mulți radioizotopi artificiali, cum ar fi izotopii elementelor pământurilor rare (*Sm, Eu, Tb și Ho*) și izotopi ai elementelor transuraniene ($A > 92$; ex: Np, Pu, Am, etc.)
- Condiția de instabilitate față de dezintegrarea alfa

$$M(A, Z) > M_r(A - 4, Z - 2) + M_\alpha(4, 2)$$

- Defect de masă $[\Delta = M(A, Z) - A]$

[Diferența dintre suma maselor nucleonilor individuali și masa efectivă a nucleului]

$$\Delta(A, Z) - \Delta(A - 4, Z - 2) > \Delta(4, 2)$$

➤ Sub aspect **energetic**- condiția de instabilitate devine:

$$M(A, Z) \cdot c^2 > M_r(A - 4, Z - 2) \cdot c^2 + M_\alpha(4, 2) \cdot c^2$$

➤ Diferența

$$[M(A, Z) - M_r(A - 4, Z - 2) - M_\alpha(4, 2)] \cdot c^2 = Q_\alpha = E_\alpha + E_r \quad \text{Energie de reacție}$$

➤ Relația dintre energia cinetică a particulei α (E_α) și energia de recul (E_r) a nucleului derivat:

$$Q_\alpha = E_\alpha + E_r \quad \text{conservarea energiei totale}$$

$$\vec{p}_\alpha + \vec{p}_r = 0 \quad \text{conservarea impulsului} \quad M_r(A - 4, Z - 2) \cdot v_r = M_\alpha(4, 2) \cdot v_\alpha \Rightarrow v_r = \frac{M_\alpha}{M_r} v_\alpha$$

➤ Energia nucleului de recul

$$E_r = \frac{M_r}{2} \left(\frac{M_\alpha}{M_r} v_\alpha \right)^2 = \frac{M_\alpha}{M_r} \left(\frac{M_\alpha}{2} v_\alpha^2 \right) = \frac{M_\alpha}{M_r} E_\alpha$$

$$\frac{E_\alpha}{E_r} = \frac{M_r(A - 4, Z - 2)}{M_\alpha(4, 2)} \quad \text{energiile cinetice ale produșilor de dezintegrare sunt invers proporționale cu masele lor}$$

➤ Pentru nucleele grele

$$\frac{M_\alpha(4, 2)}{M_r(A - 4, Z - 2)} \cong \frac{1}{50}$$

✓ Deci numai 2% din energia de reacție este preluată de nucleul de recul, restul fiind sub formă de energie cinetică a particulei α

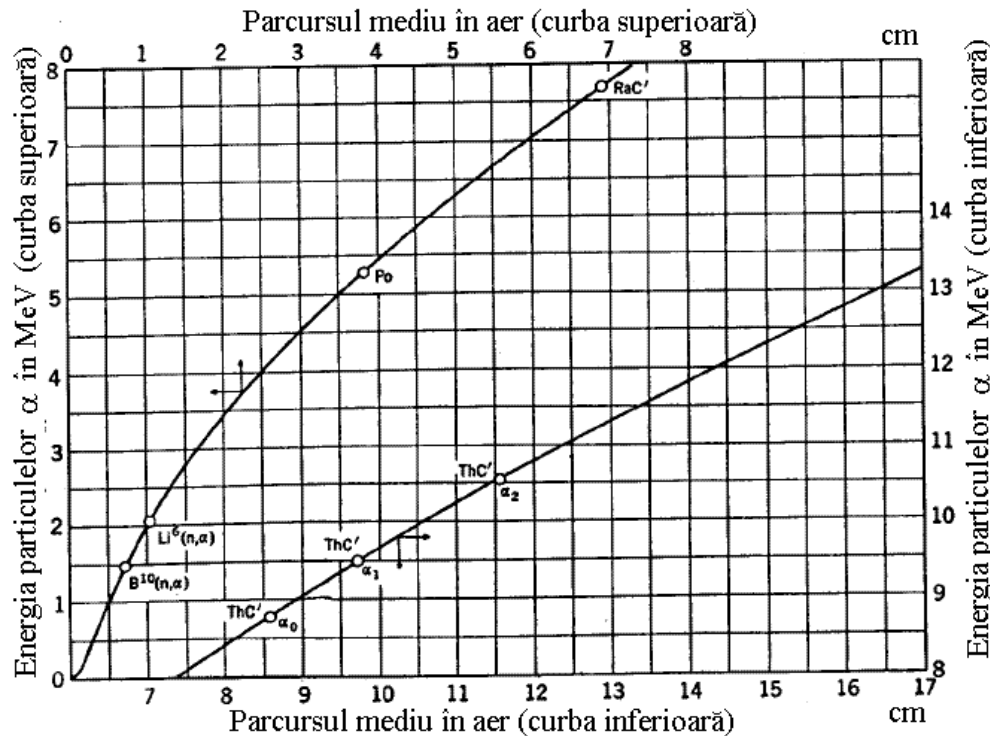
➤ *Dependența energiei de dezintegrare de numărul de masă.*

✓ Pentru radioizotopii unui element dat ($Z = \text{const.}$), energia de dezintegrare α scade cu creșterea numărului de masă A

➤ *Dependența energiei de dezintegrare α de timpul de înjumătățire.*

✓ Timpul de înjumătățire al nucleelor radioactive scade puternic cu creșterea energie particulelor α emise - *legea Geiger-Nuttall*

$$\ln T_{\frac{1}{2}} = a + bE_{\alpha}^{-\frac{1}{2}}$$



➤ *Parcursul particulelor α*

$$R_{\text{aer}}(\text{cm}) = \left(0.005 \cdot E_{\alpha}(\text{MeV}) + 0.285 \cdot E_{\alpha}^{\frac{3}{2}}(\text{MeV}) \right)$$

sau

$$R_{\text{aer}}\left(\frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}\right) = \left(0.40 \cdot E_{\alpha}^{\frac{3}{2}}(\text{MeV}) \right)$$

Parcursul particulelor α de diferite energii în aer uscat la temperatura de 15°C și presiune de 760 mm Hg

- Relații empirice pentru parcursul particulelor α pe grupe de elemente funcție de parcursul în aer

$$R_z = \begin{cases} R_{aer} \left[1 + (0.06 - 0.0086Z) \log_{10} \left(\frac{E_\alpha}{4} \right) \right], & Z < 10 \\ R_{aer} \left[0.09 + 0.0275Z + (0.06 - 0.0086Z) \log_{10} \left(\frac{E_\alpha}{4} \right) \right], & 10 < Z < 15 \\ R_{aer} \left[18Z^{-1} + 5.5 + (12Z^{-1} - 1.72) \log_{10} \left(\frac{E_\alpha}{4} \right) \right], & Z > 15 \end{cases}$$

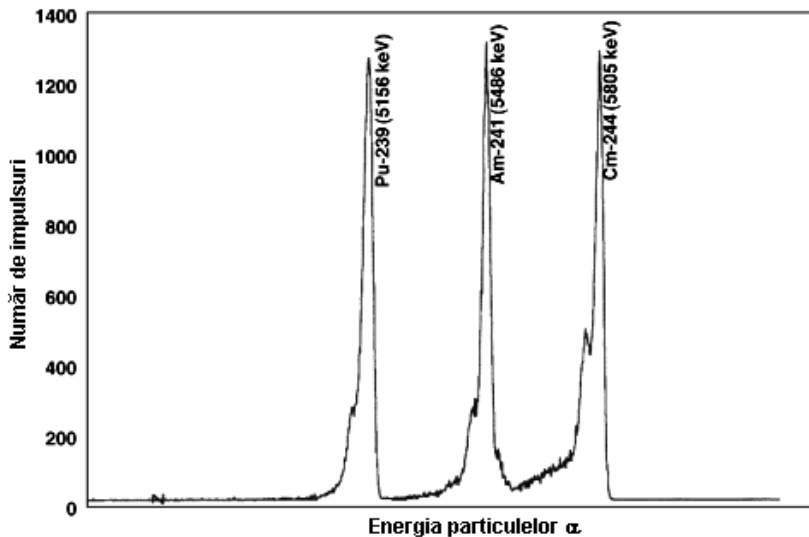
- ✓ R_z - parcursul particulei α într-un material de număr atomic Z [mg/cm^2]
- ✓ R_{aer} - parcursul în aer [mg/cm^2]
- ✓ E_α - energia particulelor α [MeV]

★ *Sructura fină a spectrelor radiației α.*

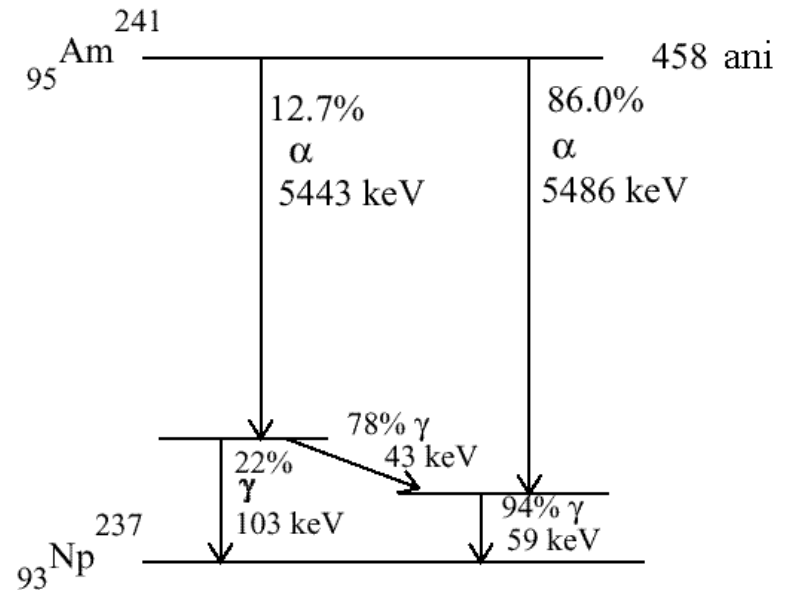
➤ Spectrul de energie al surselor izotopice de radiație α este format din grupuri de energie bine determinate.

✓ grupurile de particule cu energia cea mai mare, au intensitate maximă

★ procesul de dezintegrare α este însoțit și de emisia de radiații γ



Spectrul α al unei surse formate din trei izotopi

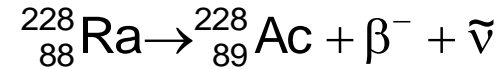
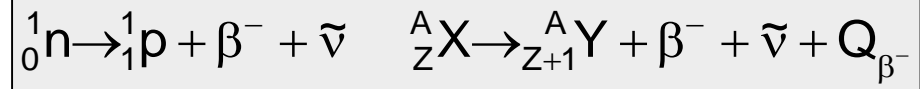
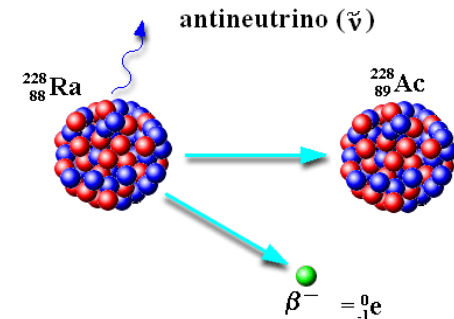


Schema de dezintegrare a $^{241}_{95}\text{Am}$

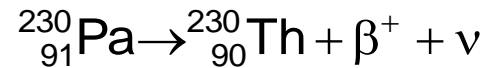
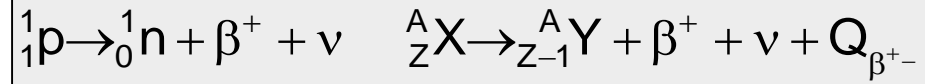
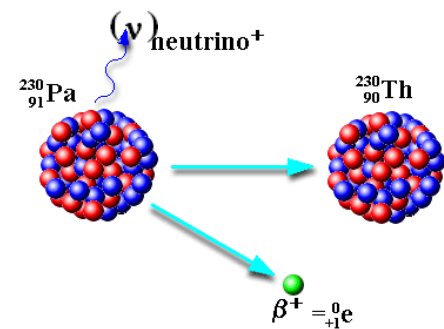
Dezintegrarea β

- Procesul de transmutație a spontană nucleelor radioactive în nuclee izobare stabile, în urma căruia numărul atomic variază cu o unitate, prin emisie de electroni, pozitroni sau prin captura unui electron din straturile electronice ale atomului

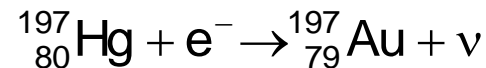
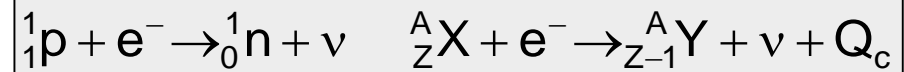
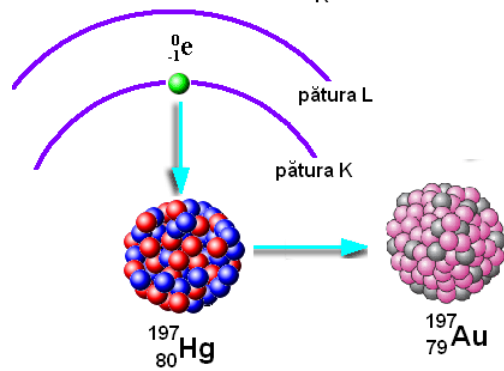
beta minus



beta plus



captura de electroni (e^-_K)



➤ **Neutrino**-particulă elementară:

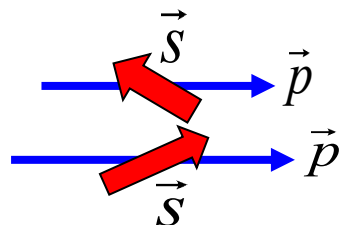
- viteza de mișcare este egală sau aproape egală cu viteza luminii,
- masa de repaus este foarte mică (aproape de zero)
- este neutru din punct de vedere electric
- interacționează foarte slab cu materia - *extrem de dificil de detectat*

▪ Există trei tipuri de neutrini: electronic ν_e , miuonic ν_μ și neutrinul τ , ν_τ
(*cele trei tipuri de neutrini se pot transforma unul în celălalt - proces cunoscut sub numele de oscilație de neutrino. Acest lucru este posibil numai dacă neutrinii au masă*).

▪ Masele celor trei tipuri de neutrini trebuie să fie extrem de mici și originea acestora este strâns legată de procesele subatomice care au avut loc imediat după Big Bang

$$M_e < M_\mu < M_\tau$$

- Spinul neutrinului este $s=1/2$ și este orientat în jurul direcției de mișcare;
- ✓ se definește elicitatea h ca fiind proiecția spinului s pe direcția impulsului p
(*neutrino $h = -1$; vectorul de spin antiparalel cu vectorul impuls, antineutrino $h = 1$; vectorul de spin paralel cu vectorul impuls*)



$$h \equiv \frac{\vec{s} \cdot \vec{p}}{|\vec{s}| |\vec{p}|}$$

➤ Condiția de instabilitate pentru dezintegrarea β^-

$$M_n(A, Z) > M_n(A, Z+1) + m_0$$

$$M_n(A, Z) = M(A, Z) - Zm_0$$

$$M_n(A, Z+1) = M(A, Z+1) - (Z+1)m_0$$

$$M(A, Z) > M(A, Z+1)$$

✓ Energia de dezintegrare β^-

$$Q_{\beta^-} = [M(A, Z) - M(A, Z+1)] \cdot c^2$$

➤ Condiția de instabilitate pentru dezintegrarea β^+

$$M_n(A, Z) > M_n(A, Z-1) + m_0$$

$$M_n(A, Z) = M(A, Z) - Zm_0$$

$$M_n(A, Z-1) = M(A, Z-1) - (Z-1)m_0$$

$$M(A, Z) > M(A, Z-1) + 2m_0$$

✓ Energia de dezintegrare β^+

$$Q_{\beta^+} = [M(A, Z) - M(A, Z-1) - 2m_0] \cdot c^2$$

➤ Condiția de instabilitate pentru captura de electroni

$$M_n(A, Z) + m_0 > M_n(A, Z-1)$$

$$M(A, Z) > M(A, Z-1) - m_0$$

✓ Energia de dezintegrare prin captura de electroni

$$Q_c = [M(A, Z) - M(A, Z-1) - m_0] \cdot c^2$$

★ Corelația dintre timpul de înjumătățire și energia radiație β este data de $T_{\frac{1}{2}} E_{\max}^5 = \text{const..}$

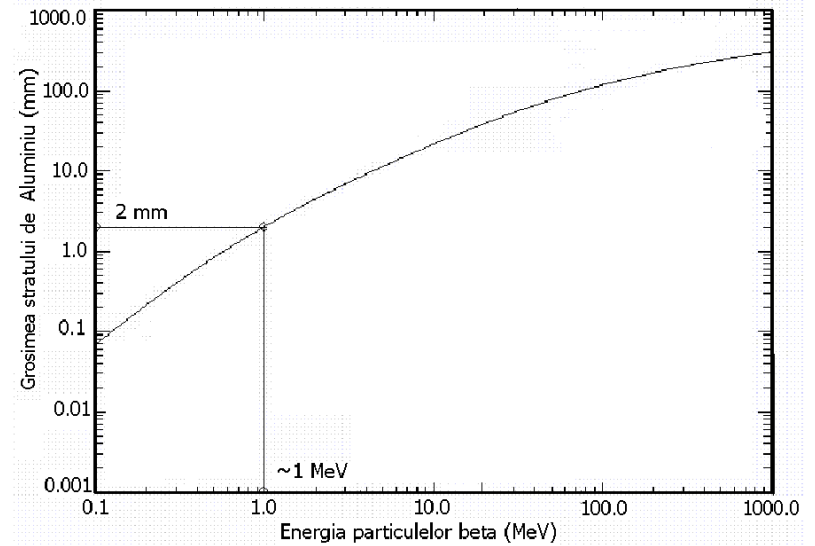
care se mai poate scrie sub forma $\log \lambda = 5 \log E_{\max} + \log C$ (C - constantă empirică)

➤ Reprezentarea grafică a funcției - *diagramă Sargent*, dispune punctele experimentale pe două drepte, ceea ce arată că energia maximă nu este singurul factor care determină mărimea timpului de înjumătățire al radionuclizilor emițători de radiație β

★ **Parcursul maxim al particulelor beta într-un material de grosime d** (rel.Katz și Penfold)

$$d = \frac{R_{\max}}{\rho}$$

$$R_{\max} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right) = \begin{cases} 0.412 (E_{\beta}^{\max})^{1.265 - 0.0954 \ln(E_{\beta})} & \text{pentru } 0.01 \leq E_{\beta}^{\max} \leq 2.5 \text{ MeV} \\ 0.530 E_{\beta}^{\max} - 0.106 & \text{pentru } 0.01 \leq E_{\beta}^{\max} \leq 2.5 \text{ MeV} \\ E_{\beta}^{\max} & \text{pentru } E_{\beta}^{\max} > 2.5 \text{ MeV} \end{cases}$$

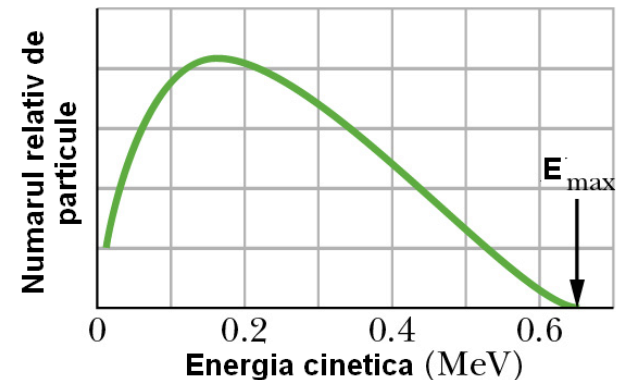


★ procesul de dezintegrare β este însoțit și de emisie de radiații X sau γ

★ **Spectrul energetic** al radiației β este continuu și are două elemente caracteristice:

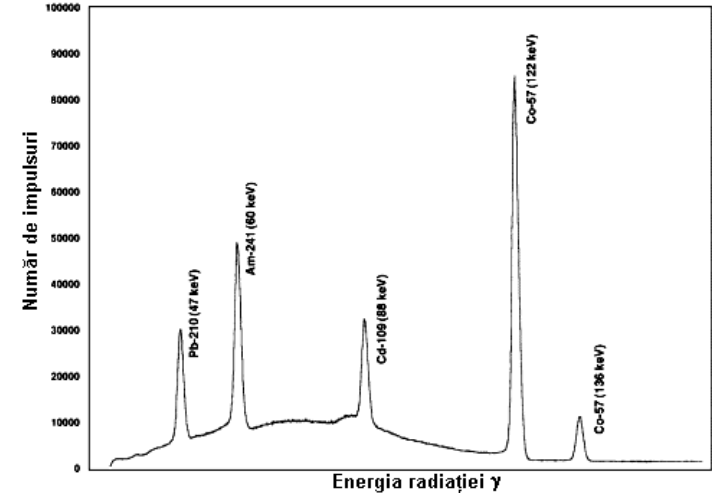
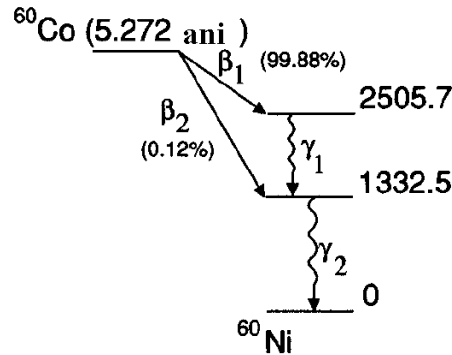
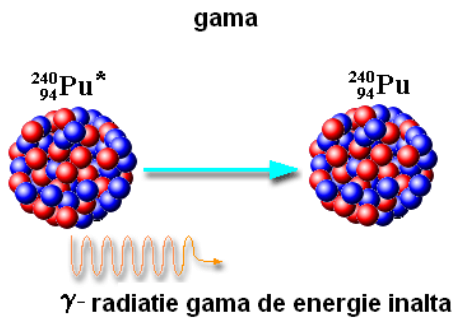
- ✓ energia maximă (E_{\max})
- ✓ energia medie (\bar{E})

$$\bar{E} \approx \frac{1}{3} E_{\max}$$



Dezintegrarea γ

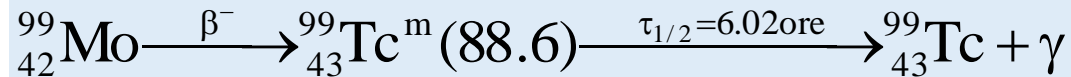
- Emisia spontană de radiații γ ca urmare a dezexcitării nucleelor prin trecerea pe un nivel inferior sau în stare fundamentală, ca urmare a unor procese de dezintegrare (α sau β) sau în urma unor reacții nucleare



- Energia radiației $E_\gamma = (E_i - E_f) - \epsilon_r$
- ✓ *spectrul surselor de radiație γ este un spectru de linii (discret)*
- Lungimea de undă a radiației γ emise ca funcție de energia E a radiației α sau β precursoare

$$\lambda = 12.39 \times 10^{-13} \frac{1}{E (\text{MeV})} (\text{m})$$

- Durata de emisie a radiației γ ; circa 10^{-15} s
- *Izomeri nucleari* - nuclee radioactive ale căror particularități structurale fac ca emisia de radiații γ să fie mult întârziată cu timpi de înjumătățire de emisie de la 10^{-10} s până la 10^{10} s.



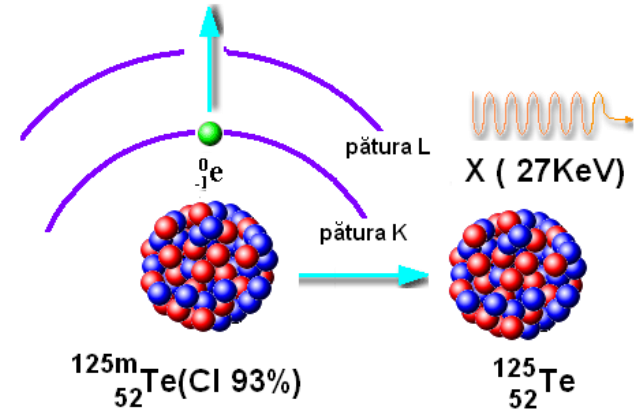
Conversia internă

- **Conversia internă** - proces competitiv cu dezintegrarea gama și constă în procesul de expulzare a unui electron de pe un strat interior al învelișului atomic (electron de conversie), ca urmare a interacțiunii electromagnetice directe dintre nucleul excitat și electronii de pe păturile interioare ale atomului.

- Energia electronilor de conversie, E_e este diferența dintre energia de excitare a nucleului și energia de legătură a electronului (B_e) corespunzător stratului de pe care a fost expulzat;

$$E_e = E_n^* - B_e$$

$$E_n^* = E_n^i - E_n^f$$



- Coeficientul de conversie internă α_e , - raportul dintre numărul electronilor de conversie, N_e , raportat la numărul cuantelor γ , emise concomitent cu procesul de conversie (N_γ)

$$\alpha_e = \frac{N_e}{N_\gamma} = \alpha_e(\text{K}) + \alpha_e(\text{L}) + \alpha_e(\text{M}) + \dots$$

- Constanta de dezintegrare totală - suma constantelor de dezintegrare parțiale

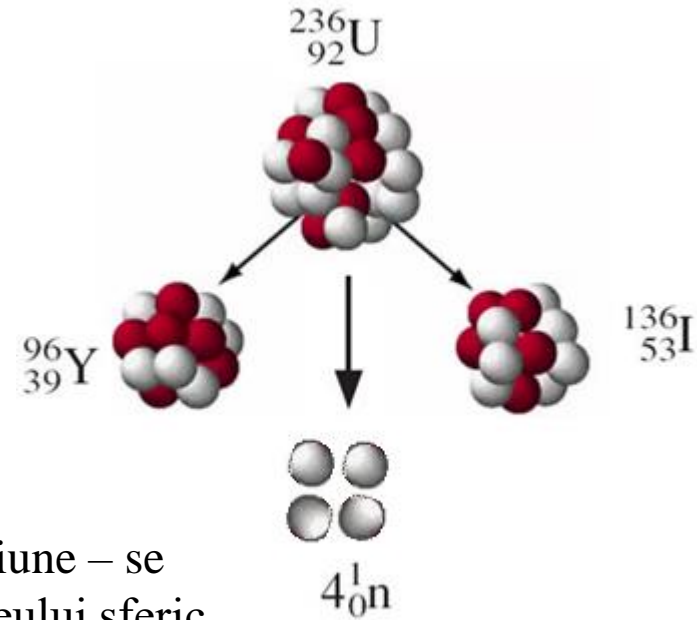
$$\lambda = \lambda_\gamma + \lambda_e = \lambda_\gamma (1 + \alpha_e)$$

- Timpul mediu de viață a stării excitate τ

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_\gamma (1 + \alpha_e)}$$

Fisiunea spontană

- Fisiunea nucleară - procesul de scindare a unui nucleu atomic greu în două fragmente, cu eliberare de neutroni și o cantitate apreciabilă de energie



- Fisionabilitatea- probabilitatea de dezintegrare prin fisiune – se definește ca raportul dintre energia de suprafață a nucleului sferic (E_c^0) considerat și dublul energiei superficiale (E_s) a acestuia

$$X = \frac{E_c^0}{2E_s} \cong \frac{Z^2}{50A}$$

- ✓ pentru $X \leq 1$ nucleul poate fisiona numai dacă din exterior primește energie – fisiune indusă
- ✓ pentru $X \geq 1$ nucleele sunt instabile față de procesul de fisiune - fisiune spontană.

- Experimental s-a constatat că fisiunea spontană apare pentru nucleele a căror raport este:

$$\frac{Z^2}{A} \geq 35.5$$

- Pentru elementele cu $Z > 100$ probabilitatea de dezintegrare prin fisiune spontană este mai mare decât prin dezintegrare α .
- Relația empirică între timpul de înjumătățire prin fisiune spontană ($T_{1/2}^{fs}$) și fisionabilitate ($\frac{Z^2}{A}$)

$$\ln T_{1/2}^{fs} = a - b \left(\frac{Z^2}{A} \right) \quad a \text{ și } b \text{ sunt constante empirice}$$

- Pentru izotopii unui element dat, timpul de înjumătățire prin fisiune spontană depinde de tipul nucleului și de numărul atomic de masă, fiind maxim pentru nucleele par-pare.
- Domeniul de variație al timpului de înjumătățire prin fisiune spontană, este cuprins între $4.5 \cdot 10^9$ ani (^{238}U) și câteva secunde (^{256}No).

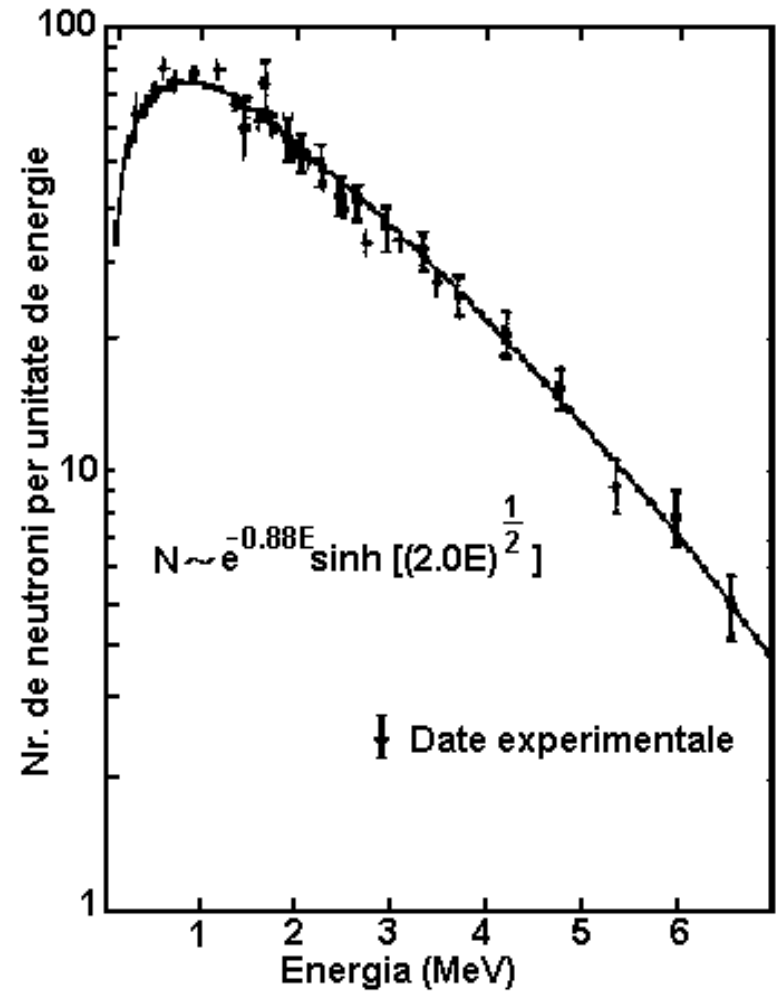
- **Spectrul energetic** al neutronilor emiși în urma procesului de fisiune spontană poate fi descris de o funcție de tip Maxwell

$$n(E_n) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{E_n}}{(kT_N)^{3/2}} \exp\left(-\frac{E_n}{kT_N}\right)$$

k - este constanta lui Boltzmann,
 E_n - energia neutronilor,
 T_N - temperatura "de evaporare" nucleară

$$kT_N = 0.5 + 0.43(1 + \nu)^{1/2}$$

ν - numărul mediu de neutroni emiși la un act de fisiune



Spectrul energetic al neutronilor unei surse izotopice de Cf-252

➤ Procesul de dezintegrare prin fisiune spontană este concurent cu procesul de dezintegrare α
(exemplu: dezintegrarea izotopului Cf-252)

$^{252}_{98}\text{Cf}$

97% $\alpha + \text{Cm}^{248} + 6 \text{ MeV}$
 $T_{1/2} = 2.645 \text{ ani}$

3% produși de fisiune + $3.8 \frac{\text{neutroni}}{\text{act de fisiune}} + 183 \text{ MeV}$

