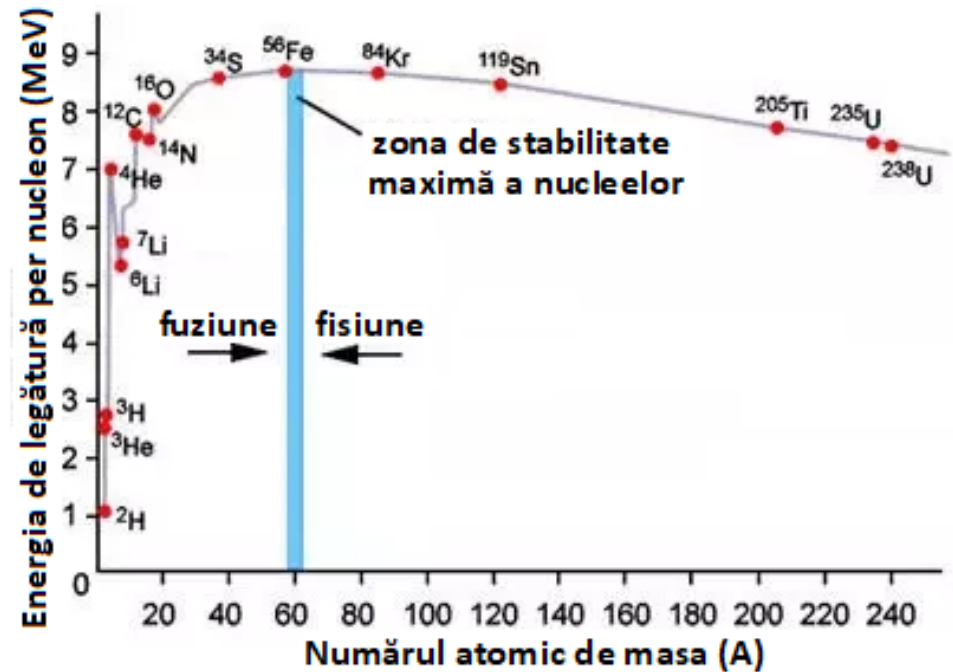
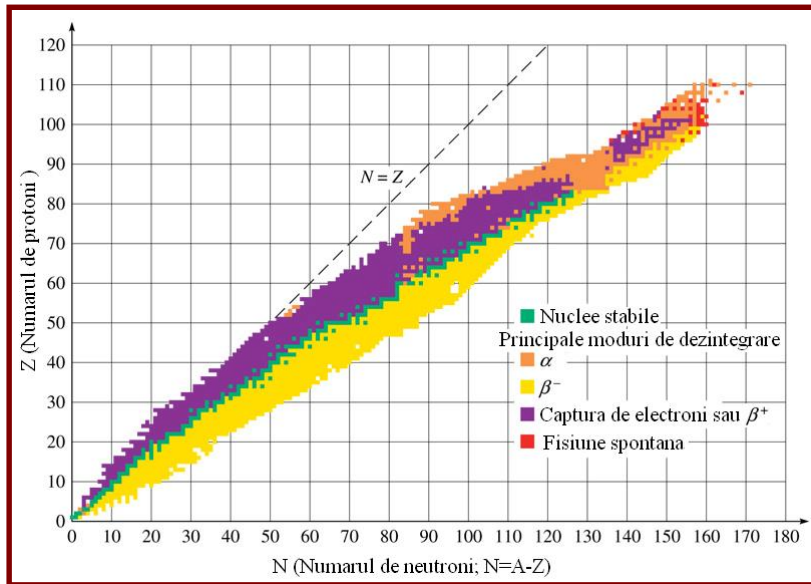


## □ Reacții nucleare de interes energetic

- Reacții de captură urmată de fisiune (n, f)
- Reacții de fuziune



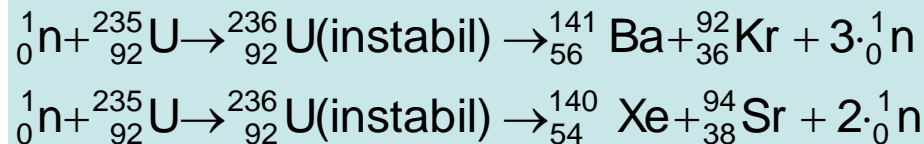
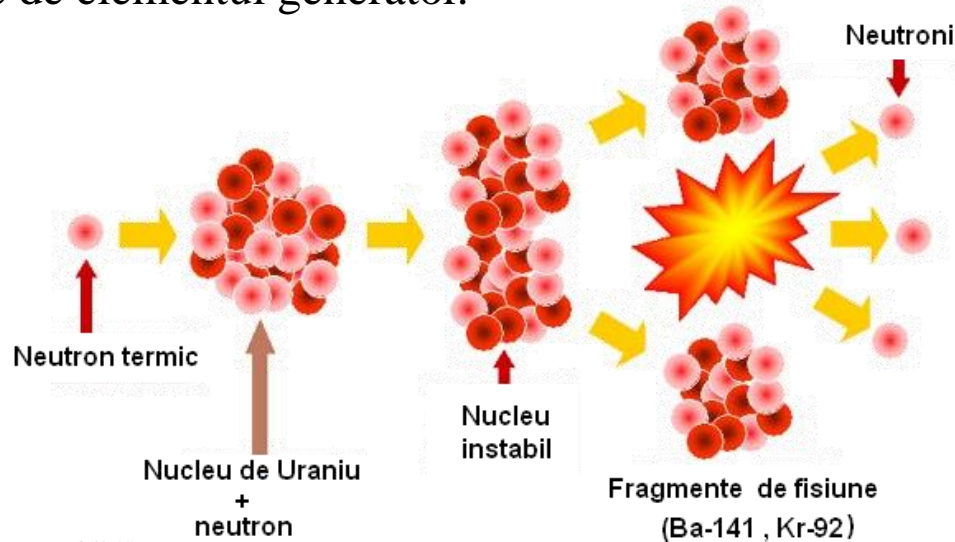
- Factori principali - stabilitatea nucleară;
  - ✓ raportul neutron / proton
  - ✓ numărul total de nucleoni din nucleu

- Nucleele cu număr de masă mare își pot crește stabilitatea prin fragmentare (*fisiune*) în timp ce nucleele cu număr de masă mic, prin unirea acestora (*fuziune*)

## ➤ Reacții de captură urmată de fisiune (n, f)

- ✓ Fisiunea nucleară - descoperită la 17 decembrie 1938 de Otto Hahn și Fritz Strassmann
- ✓ Lise Meitner și Otto Frisch a explicat teoretic mecanismul în 1939.
- ✓ Frisch a numit procesul prin analogie cu fisiunea biologică a celulelor vii

- Tip de reacții nucleare care au loc cu nucleele fisile (nuclee grele) care conduc la formarea unui nucleu compus înalt excitat, instabil ( $\sim 10^{-2}$  s) care se fragmentează (fisiune).
- **Fisiunea** este o formă de transmutație nucleară - fragmentele rezultate (sau atomii generați) sunt diferite de elementul generator.

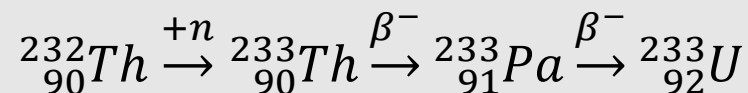
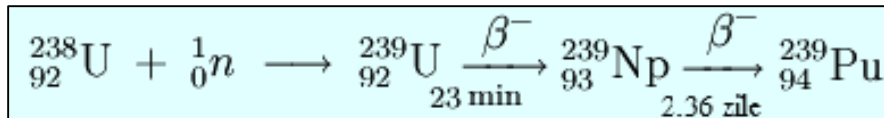


- Unele elemente grele, pot fisiona spontan (*fisiunea spontană*) ca o formă a procesului de dezintegrare radioactivă și/sau prin reacții nucleare (*fisiunea indusă*).
- Mărimea caracteristică a acestor procese - **fisionabilitatea**
- **Fisionabilitatea** - raportul dintre energia de suprafață a nucleului considerat sferic ( $E_c^0$ ) și dublul energiei superficiale ( $E_s$ )

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

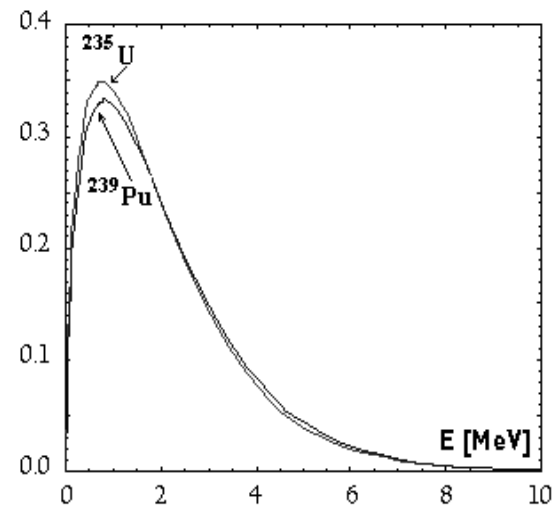
- ✓ dacă  $X \leq 1$  nucleul poate fisiona numai dacă din exterior primește energie –*fisiune indusă*
- ✓ dacă  $X \geq 1$  nucleele sunt instabile față de procesul de fisiune - *fisiune spontană*.

- ◆ materiale fisile (*izotopi fisionabili: U-233, U-235, Pu-239, Pu-241*)
- ◆ materiale fertile (*materia primă pentru obținerea izotopilor fisili: U-238, Th-232*)



- Prin fisiune, toți izotopii fisili și fertili eliberează neutroni liberi care au un timp mediu de viață de aproximativ 13.7 minute și se descompun în protoni și particule beta.
- Două tipuri de neutroni:
  - ✓ neutroni prompti – emiși în procesul de fisiune
  - ✓ neutroni întârziați – ca produși de fisiune
- Neutronii emiși *după circa*  $10^{-14}$  s de la fisiune- **neutroni prompti**

Izotopi fisionabili	Număr mediu de neutroni per act de fisiune ( $\nu$ )	Energia medie a neutronilor (MeV)
$^{233}\text{U}$	2.49	1.94
$^{235}\text{U}$	2.43	1.95
$^{239}\text{Pu}$	2.87	2.1



► **spectrul energetic continuu**

$$n(E) = n_0 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{E_n}}{T_N^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{E_n}{T_N}\right)$$

► **Temperatura nucleară** - măsură a gradului de excitare a nucleului compus

$$T_N = 0.5 + 0.43\sqrt{1 + \nu}$$

► **Energia medie** a neutronilor de fisiune

$$\bar{E}_n = \int_0^{\infty} E_n \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{E_n}}{T_N^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{E_n}{T_N}\right) dE_n = \frac{3}{2} T_N$$

➤ **Fragmentele de fisiune** - în jur de 30 de perechi

➤ Două grupe, asimetrice sub aspectul maselor atomice, în raport de aproximativ 3:2

➤ Prima grupă cuprinde radionuclizi cu masele atomice cuprinse în domeniul **A=72÷117** și poartă denumirea de **grupa ușoară**

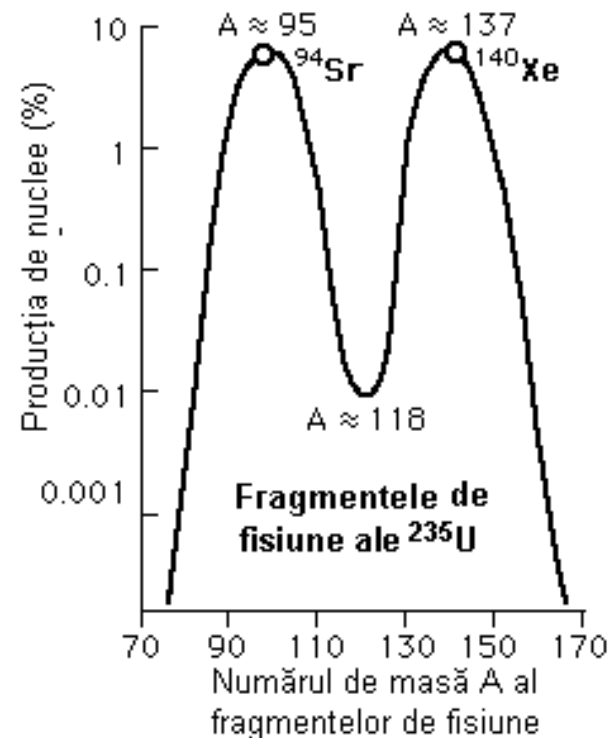
$$\bar{A}_u = \frac{A_F}{Z_F} (Z_u - 0.5)$$

➤ A doua grupă cuprinde radionuclizi cu masele atomice mai mari, situate în intervalul **A=119÷165** și poartă numele de **grupa grea**

$$\bar{A}_g = \frac{A_F}{Z_u} (Z_g - 0.5)$$

$Z_u$  - numărul atomic al fragmentului ușor

$Z_g$  - numărul atomic al fragmentului greu

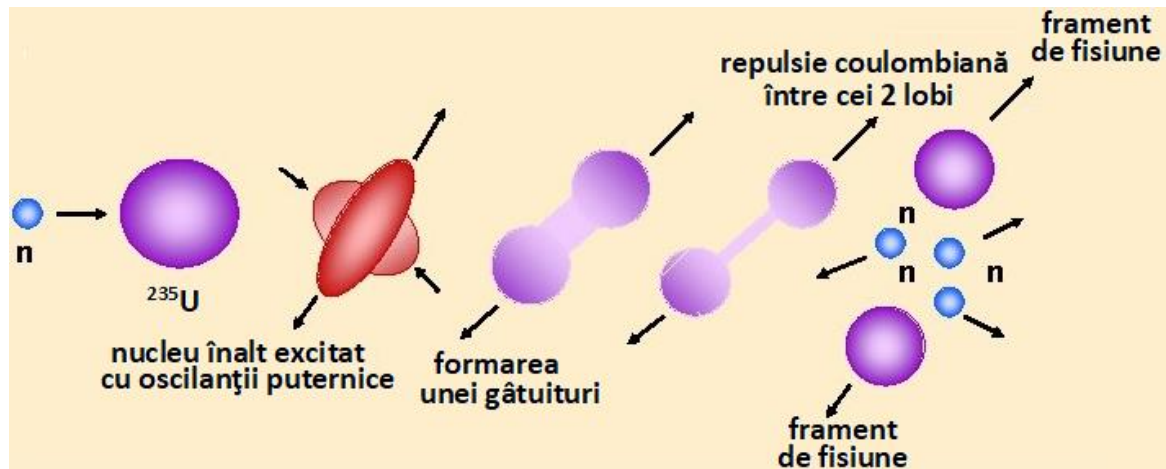


➤ **Produșii de fisiune sunt nuclee neutro-excedentare și în consecință sunt radioactive  $\beta^-$**

➤ Fragmentele de fisiune produc **neutroni întârziați** - neutroni emiși după procesul de fisiune nucleară, de către unele produse de fisiune ca urmare a dezintegrării beta.

## Mecanismul reacției de fisiune

- Procesul de fisiune poate fi descris cu modelul nucleului „*picătură de lichid*” extins pentru nuclee ne-sferice, foarte deformate.

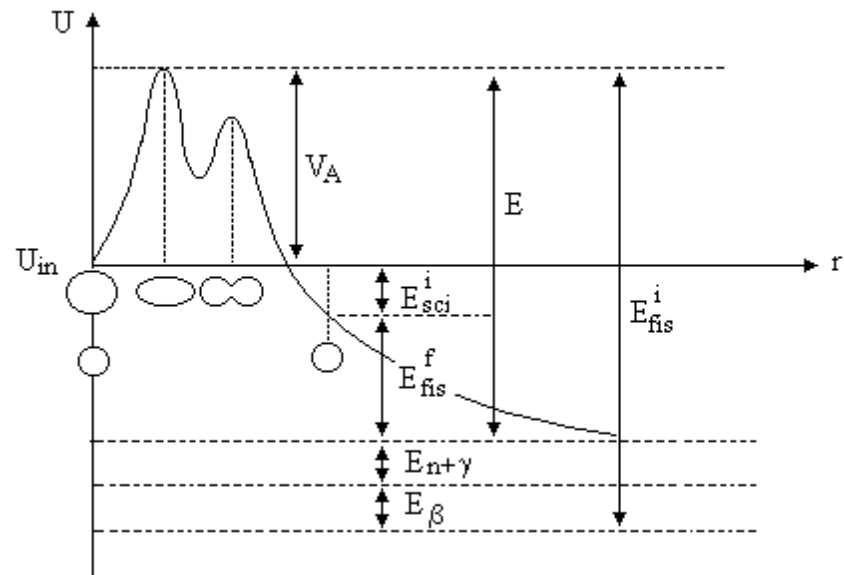


- ✓ Modelul nucleului “*picătură de lichid*” extins, poate fi studiat reprezentând suprafața deformată a nucleului prin polinoamele Legendre, care sunt combinații de numere reale de armonici sferice

$$R(\theta) = R_0 \left( 1 + \sqrt{\frac{5}{4\pi}} \beta_2 P_2(\cos \theta) + \sqrt{\frac{9}{4\pi}} \beta_4 P_4(\cos \theta) + \dots \right)$$

$P(\cos \theta)$ - Polinoamele Legendre

- După ce nucleul a trecut de cel de-al doilea punct de sa, are loc o rupere a acestuia în două fragmente cu degajarea unei cantități de energie  $E_{sci}^i$  care se regăsește atât sub formă de energie cinetică de translație a fragmentelor cât și sub formă de energie de excitație a acestora  $E_{sci}^f$

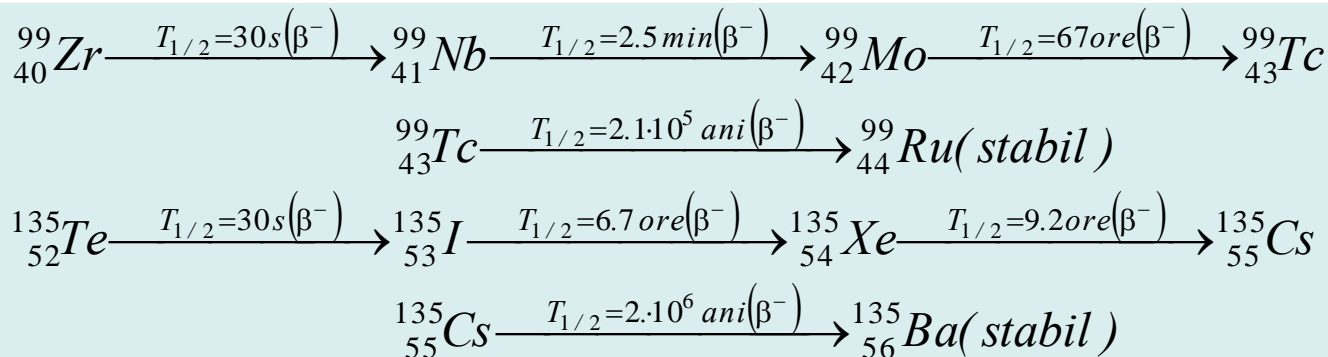
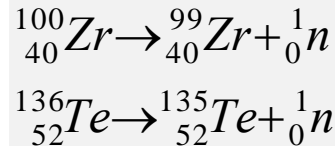
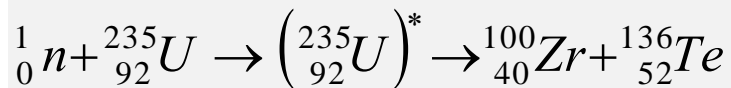


- Nucleele formate după fragmentare se resping ca urmare a repulsiei electrostatice, astfel încât energia câmpului coulombian se transformă în energie cinetică a fragmentelor de fisiune
- Viteza fragmentelor de fisiune, este aproximativ de ordinul a  $10^7$  m/s, energia cinetică a acestora este în jur de **166 MeV**, energie care se disipă prin interacțiunea cu mediul.
- Pe lângă energia de translație, fragmentele de fisiune au și o energie de excitație suficient de mare încât să emită neutroni după un interval de timp destul de scurt ( $10^{-7}$  s), câte 1-2 neutroni (neutroni întârziați) de către fiecare fragment, cu energii medii de circa 2 MeV.
- Procesul are loc prin emisia de radiații  $\gamma$ , a căror energie pentru ambele fragmente, totalizează în jur de **7 MeV**. Neutronii și radiațiile  $\gamma$  emise în acest proces, poartă numele de radiații prompte

➤ Bilanțul energetic al procesului de fisiune

✓ energia cinetică a produșilor de fisiune	162 MeV
✓ energia neutronilor	5 MeV
✓ energia radiației $\gamma$ prompte	6 MeV
✓ energia radiație $\beta$	7 MeV
✓ energia neutrinelor	11 MeV
✓ energia radiației $\gamma$ întârziate	6 MeV
<b>Total</b>	<b>197 MeV</b>

- Producții de fisiune sunt nuclee neutrono-excedentare și în consecință sunt radioactive  $\beta^-$
- Potrivit legii deplasării radioactive, acestea tind spre curba de stabilitate modificându-și numai numărul de ordine





## Exemplificare: fisiunea 235-U

- Energia cinetică medie a fragmentelor de fisiune: **168 MeV**
  - Energia neutronilor: **5 MeV** (*sunt emiși în medie 2.5 cu energia medie per neutron de 2 MeV*)
  - Energia medie a radiațiilor  $\gamma$ -prompte este **8 MeV**
  - Energia medie a particulelor  $\beta^-$  din dezintegrarea fragmentelor de fisiune este **8 MeV**
  - Energia medie a radiațiilor  $\gamma$  care însoțește dezintegrarea  $\beta^-$  a fragmentelor de fisiune este **7 MeV**
  - Energia medie a antineutrinoilor care însoțesc dezintegrarea  $\beta^-$  a fragmentelor de fisiune este **12 MeV**.  
Energia totală medie este **208 MeV**
- 
- Întrucât energia antineutrinoilor este nerecuperabilă, energia totală medie utilă este de 196 MeV per act de fisiune

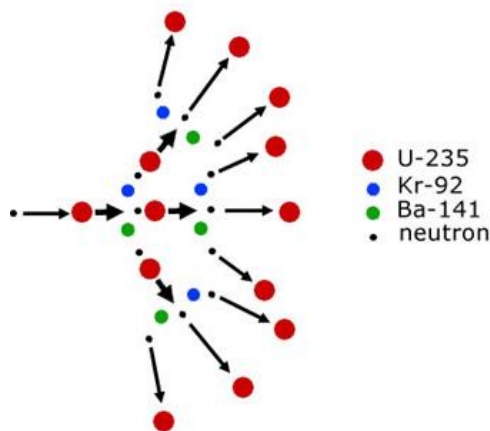
### Pentru 1 g de 235-U

- ▶ nr. atomi de 235-U în 1g:  $n = m/\mu \times N_A = 1/235 \times 6.02 \times 10^{23} = 2.56 \times 10^{21}$
- ▶ conversia MeV în Jules:  $196 \times 10^6 \text{ [eV]} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ [J/ev]} = 3.1 \times 10^{-11} \text{ [J]}$
- ▶ energia conținută în 1g de 235-U:  $2.56 \times 10^{21} \times 3.1 \times 10^{-11} \text{ [J]} \approx 8 \times 10^{10} \text{ [J]} = 80 \text{ [GJ]}$

▶ energia conținută în 1 g de cărbune:  $\approx 35 \text{ kJ}$ , (de 2.3 milioane de ori mai mică!)

## Reacția de fisiune în lanț

- **Reacție nucleară în lanț** - reacție nucleară cauzată de o reacție nucleară anterioară, putând conduce la o creștere exponențială a numărului de reacții nucleare



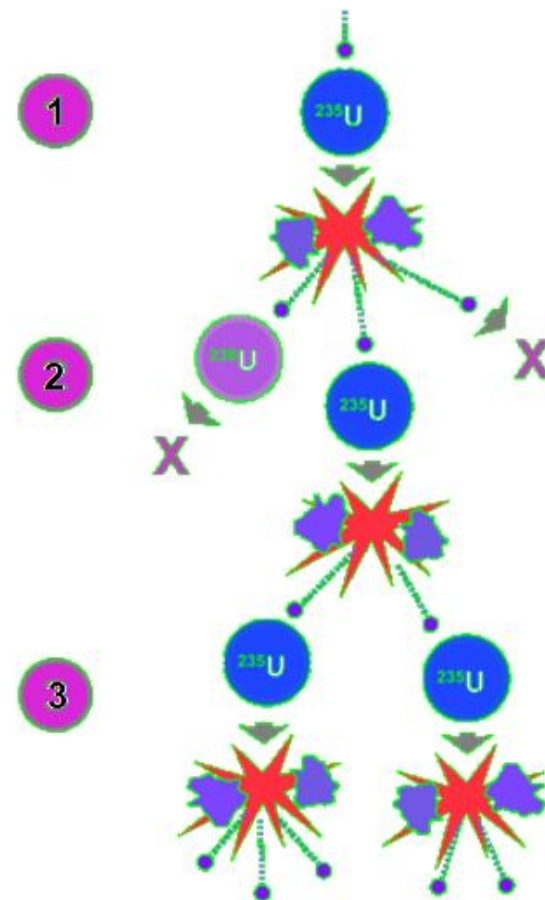
- Conceptul de reacție de fisiune nucleară în lanț a fost dezvoltat de **Leo Szilard** în 1933, pentru care a solicitat, în anul următor, un patent de invenție
- În 1936 Leo Szilard a încercat să obțină o reacție în lanț folosind **Beriliu** și **Indiu**, dar fără rezultat.
- Prima reacție nucleară în lanț artificială, autoîntreținută a fost inițiată la Metallurgical Laboratory din Chicago, condus de **Enrico Fermi** și Leo Szilard, la 2 decembrie 1942, în cadrul **Proiectului Manhattan**.

## ➤ Fisiune nucleară în lanț - 3 secvențe

1 Un atom de U-235 absoarbe un neutron și se fragmentează în 2 atomi, 3 neutroni și energie.

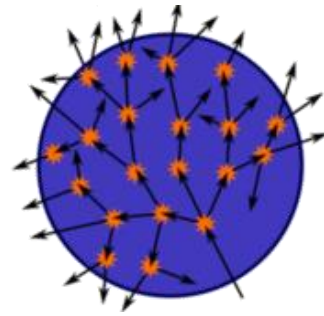
2 Unul din acești neutroni este absorbit de un atom de U-238 și nu mai participă în continuare la reacție. Al doilea neutron este pur și simplu pierdut în mediul/materialul înconjurător, nu se mai ciocnește cu alți atomi de uraniu, fapt pentru care nici el nu mai participă la continuarea reacției. Al treilea neutron se ciocnește cu un atom de U-235 care fisionează eliberând neutroni și energie de fisiune

3 Ultimii doi neutroni se ciocnesc fiecare cu câte un atom de uraniu-235 care se fragmentează și eliberează 1-3 neutroni care pot continua reacția



- **Condiția de reacție în lanț** - numărul de neutroni produși prin fisiunea combustibilului nuclear să fie egal cu suma dintre numărul neutronilor absorbiți de combustibil și numărul de neutroni absorbiți de celelalte componente ale reactorului, inclusiv a neutronilor care părăsesc zona activă.
- **Factorul efectiv de multiplicare a neutronilor,  $k$** , este numărul mediu de neutroni (între 2.5 și 3 per act de fisiune) care generează reacția de fisiune

- **$k < 1$  (masă subcritică):**
  - ✓ plecând cu o fisiune, avem în medie un total de  $1/(1-k)$  fisiuni - reacția în lanț se stinge
- **$k = 1$  (masă critică):**
  - ✓ numărul actelor de fisiune rămâne constant
- **$k > 1$  (masă supercritică):**
  - ✓ numărul actelor de fisiune crește exponențial



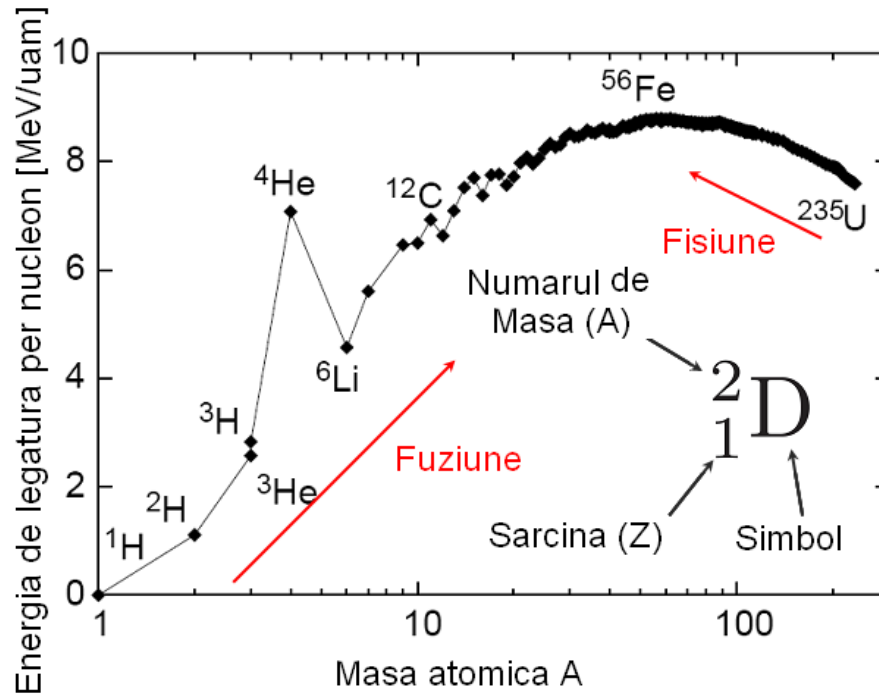
### Masa critică

- cantitatea de material fisionabil care permite menținerea unei reacții nucleare în lanț.
- depinde de secțiunea eficace de fisiune, densitate, geometrie, puritate și mediul în care se află.

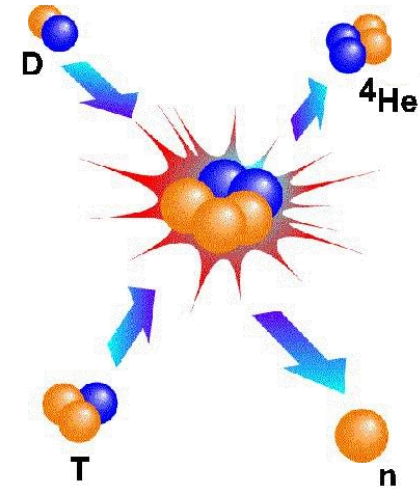
Nuclid	Masa Critică (kg)	Diametru (cm)
uraniu-235	52	17
plutoniu-239	10	9.9
plutoniu-240	40	15
americium-241	55-77	20-23
californiu-249	6	9
californiu-251	5	8.5

## □ Reacția de fuziune

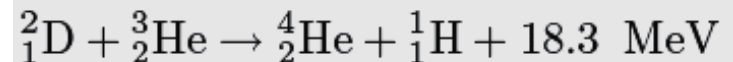
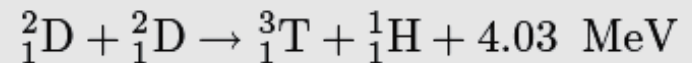
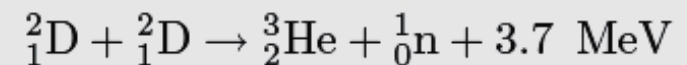
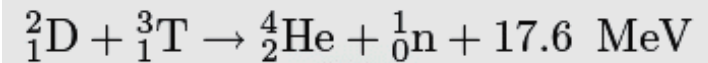
- Procesul prin care două nuclee atomice interacționează formând un nou nucleu, mai greu decât nucleele inițiale.
- Ca urmare a procesului de fuziune se produc și alte particule subatomice (*neutroni, particule alfa, sau beta*).
- Fuziunea nucleară este sursa principală de energie în stelele active



Deuteriu + Tritiu → Heliu + Neutron + Energie



- Eliberarea energiei nucleare poate avea loc în partea inferioară a curbei din grafic prin fuziunea a două nuclee ușoare într-unul mai greu.



➤ Calculul energiei nucleare din reacția de fuziune;



- ✓ Masele participanților din reacție de fuziune:

$$m_{\text{D}}=2.014102 \text{ u.a.m}$$

$$m_{\text{T}}=3.016050 \text{ u.a.m.}$$

$$m_{\text{He}}=4.002603 \text{ u.a.m}$$

$$m_{\text{n}}=1.008665 \text{ u.a.m}$$

- ✓ Defectul de masă :  $\Delta m=0.018884 \text{ u.a.m}$

$$1 \text{ u.a.m} = 1.66056 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

- ✓ Energia realizată:

$$E=\Delta mc^2 = 2.82 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV}=1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$E=17.6 \text{ MeV}$$

corespunde unei temperaturi de  $2 \cdot 10^{11} \text{ K}$

$$(1 \text{ eV} = 11605 \text{ K})$$

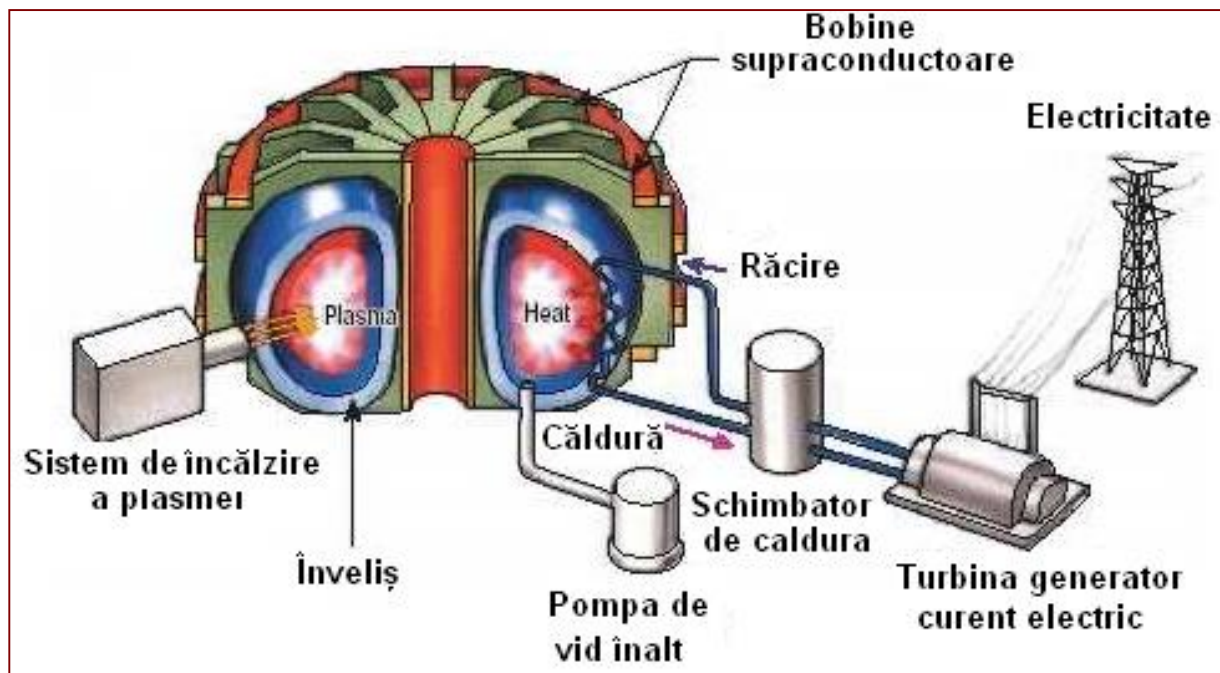
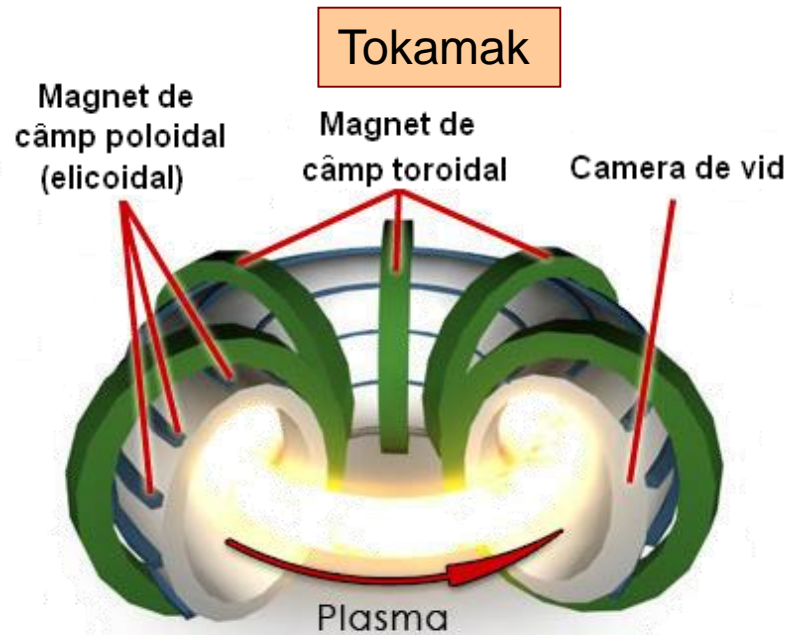
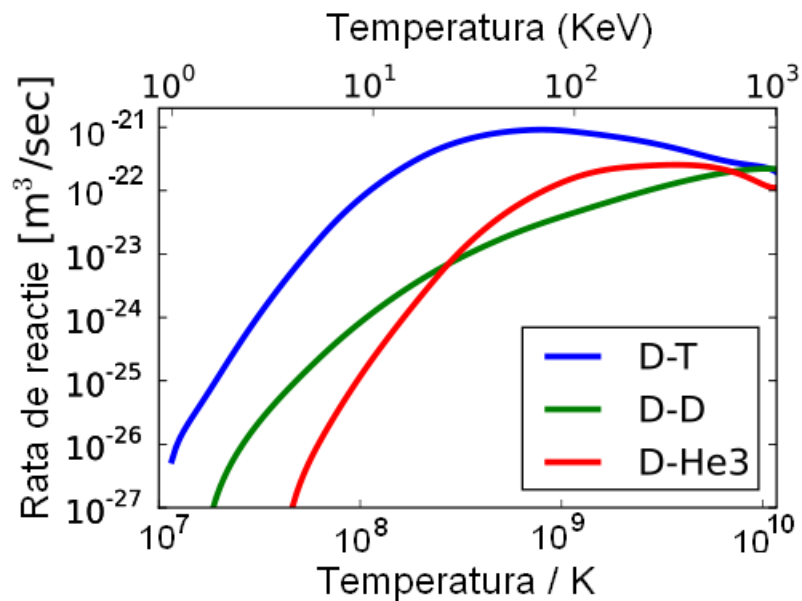
- 1 Kg de amestec Deuteriu/Tritiu conduc la un număr  $N$  de reacții:

$$N = \frac{0.5}{2.5 \cdot 1.67 \cdot 10^{-27}} = 1.2 \cdot 10^{26}$$

- ✓ Energia generată:

$$E=N \cdot 2.82 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

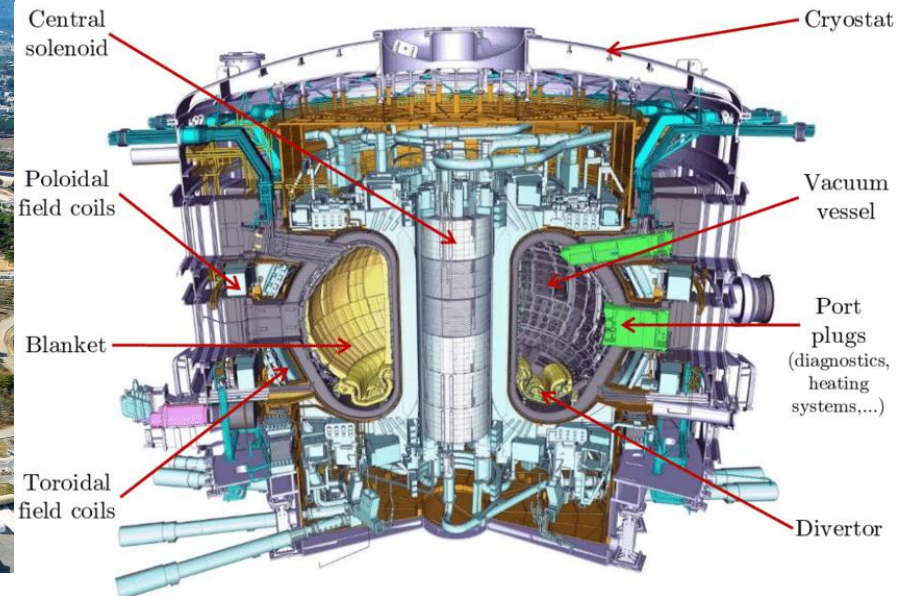
( aprox. 1700 MWh sau 4 GW pentru 24 ore)





## Reactorul de fuziune ITER (<https://www.iter.org/>)

- **ITER** (**I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor - în latină *I*ter – *cale*) - megaproiect internațional de cercetare și inginerie a fuziunii nucleare prin care se construiește un reactor de energie de fuziune (Cadarache - sudul Franței).
- Țări participante: **Uniunea Europeană, SUA, Rusia, Japonia, India, China, Coreea de Sud**
- Prevăzut ca începerea experimentelor cu deuterium-tritium în anul 2027.
- Scop tranziția de la studii experimentale asupra plasmei în fizică, la producerea de electricitate la scară largă în centrale de energie de fuziune (produce 500 MW de energie finală în timp ce are nevoie doar de 50 MW).
- Costul total al proiectului este estimat la aproximativ 20 de miliarde de euro.





## □ Legi de conservare

- **Legile de conservare** sunt considerate legi fundamentale ale naturii, cu o aplicare largă în fizică, precum și în alte domenii, cum ar fi chimia, biologia, geologia și inginerie.
- **Legile de conservare în fizică** – reprezintă o serie de principii care afirmă că anumite proprietăți fizice (adică cantități măsurabile) nu se schimbă în decursul timpului într-un sistem fizic izolat.
- **În fizica clasică**, legile de acest tip guvernează energia, impulsul, momentul cinetic, masa și sarcina electrică.
- **În fizica particulelor subatomice** se aplică și alte legi de conservare care sunt invariante în timpul interacțiunilor.
- O funcție importantă a legilor de conservare este aceea că fac posibilă prezicerea comportamentului macroscopic al unui sistem fără a fi nevoie să se ia în considerare detaliile microscopice ale evoluției unui proces fizic sau al unei reacții chimice.
- O lege de conservare particulară este de obicei exprimată matematic ca o ecuație de continuitate sau o ecuație diferențială parțială care oferă o relație între cantitatea mărimii fizice și „*transportul*” acelei mărimi.

## □ Legi de conservare în reacțiile nucleare

- Descrierea procesului **reacție nucleară**  $\longleftrightarrow$  **descrierea cuanto-mecanică** a acestuia în termeni de *interacție nucleu proiectil-nucleu țintă* și presupune:
- cunoașterea interacțiunii nucleon-nucleon;
  - găsirea unei legături dintre interacțiunea nucleon-nucleon și interacțiunea sistemului de nucleoni din nucleu;
  - tratarea matematică și rezolvarea ecuațiilor care descriu interacțiunea mai multor nucleoni în câmpul forțelor nucleare;
- **Stabilirea relațiilor între mărimile și caracteristicile cuantice implicate în procesele de interacții nucleare.**
- ✓ invarianța la translația spațială și temporală implică **legea conservării impulsului total** și **legea conservării energiei totale**
  - ✓ invarianța la rotație implică **legea de conservare a momentului cinetic total**
  - ✓ inversia spațială implică **legea conservării parității**
  - ✓ inversia temporală implică **reversibilitatea reacțiilor nucleare**
  - ✓ transformarea și distribuția numărului de neutroni și protoni într-o reacție nucleară, implică **legea conservării numărului de masă** și **legea conservării sarcinii electrice**.

- Considerăm o reacție nucleară binară cu formarea unei stări intermediare de nucleu compus



**a) Legea conservării impulsului liniar.**

- Impulsul total al sistemului se conservă

$$\vec{p}_a + \vec{p}_X = \vec{p}_b + \vec{p}_Y$$

*impulsul total înainte de ciocnire este egal cu impulsul linear total după ciocnire*

**b) Legea conservării energiei totale**

- Într-un sistem izolat în care nucleonii se află în interacție - energia totală se conservă

$$E_a + E_X + m_a c^2 + M_X c^2 = E_b + E_Y + m_b c^2 + M_Y c^2$$

*E - energia cinetică*

*mc<sup>2</sup> - energia de repaus*

- Diferența dintre energiile cinetice - energie de reacție *Q*

$$Q = E_b + E_Y - (E_a + E_X) = (m_a + M_X) c^2 - (m_b + M_Y) c^2$$

*Q > 0 - reacție exoenergetică (masa de repaus a nucleelor incidente este mai mare decât masa de repaus a nucleelor emergente și poate avea loc pentru orice valoare a energiei cinetice a proiectilului cu condiția ca să fie suficientă pentru a străbate bariera columbiană a nucleului țintă)*

*Q < 0, reacție endoenergetică (se pot produce numai de la o anumită valoare, numită energie de prag)*

### c) Legea conservării parității

- Paritate - mecanica cuantică - mărime care caracterizează simetria stărilor

$$\pi_a \pi_X (-1)^{l_{aX}} = \pi_b \pi_Y (-1)^{l_{bY}}$$

$\pi_a, \pi_b, \pi_X, \pi_Y$  paritățile nucleelor;  $l_{aX}$  și  $l_{bY}$  sunt momentele cinetice relative

### d) Legea conservării momentului unghiular

- Momentul unghiular total este o constanță a mișcării și ca urmare se conservă în orice reacție nucleară

$$I_a + I_X + l_{aX} = I_{NC} = I_b + I_Y + l_{bY}$$

### e) Legea conservării numărului de masă

- Numărul total al nucleonilor (A) care intră în reacție este egal cu numărul total al nucleonilor care ies din reacție

$$A_a + A_X \rightarrow A_b + A_Y$$

### f) Legea conservării sarcinii electrice.

- Suma sarcinilor electrice înainte și după interacție, se conservă  
(Numărul total al protonilor rămâne constant)

$$Z_a + Z_X \rightarrow Z_b + Z_Y$$