

## Cursul 12.2 Fisiunea și fuziunea nucleară

### Fisiunea nucleară

#### *Energia nucleară*

Reacțiile nucleare de fisiune (precum și cele de fuziune) pot fi folosite pentru a se obține energie termică. Energia eliberată într-o reacție de fisiune este datorată faptului că energia de legătură medie per nucleon, în nucleul atomic, este mai mică pentru elementele de la sfârșitul tabelului periodic, decât pentru cele de la mijlocul lui. Aceasta este de circa 7.6 MeV pentru primele și de aproximativ 8.8 MeV pentru cele din urmă. Un raționament simplificat al proceselor nucleare arată faptul că dacă am putea alcătui un nucleu al unui element greu prin asocierea nucleonilor componenți, atunci s-ar degaja o energie totală egală cu  $(7.6 \text{ MeV}) \times A$ , unde  $A$  este numărul de masă al aceluia nucleu. Prin fisiune acest nucleu greu se sparge în alte două nuclee cu numere de masă intermediare a căror sumă este egală aproape cu  $A$  (ținând cont și de cei câțiva neutroni eliberați). Pentru alcătuirea acestor nuclee intermediare direct din nucleoni, s-ar fi degajat mai multă energie adică 8,5 MeV per nucleon. Diferența de 0.9 MeV per nucleon este energia care se degajă în urma fisiunii nucleului greu.

#### *Macanismul reacțiilor de fisiune*

Nucleele grele prezintă o stabilitate redusă, existând chiar probabilitatea fisiunii lor spontane, doar că durata de viață medie a unui astfel de proces este foarte mare. Teoria nucleară a *modelului picătură a nucleului* permite aflarea unei legături între numărul de masă  $A$ , numărul de sarcină  $Z$  și stabilitatea nucleului față de fisiune. Se poate arăta că raportul  $Z^2/A$  măsoară importanța relativă a forțelor electrostatice (repulsive) și a forțelor nucleare de suprafață. Teoretic, se deduce că pentru valori ale acestui raport  $Z^2/A > 50$  nucleele grele fisionează spontan.

Cele mai multe nuclee suferă o fisiune doar atunci când sunt bombardate, în anumite condiții, fie cu neutroni rapizi, fie cu particule încărcate de energie foarte mare. Pentru obținerea controlată a energiei nucleare o importanță practică o au procesele de fisiune activate de neutroni termici trimiși pe tinte de  $^{235}_{92}\text{U}$ . În natură, acest izotop se găsește în proporție de 0.7%, astfel că practic uraniul natural trebuie îmbogățit în izotopul  $^{235}_{92}\text{U}$  pentru a putea fi folosit ca material fisibil. Alte nuclee fisibile cu neutroni lenți sunt  $^{233}_{92}\text{U}$ ,  $^{239}_{94}\text{Pu}$ ,  $^{241}_{95}\text{Am}$ .

Despicarea nucleului țintă se face de obicei în două nuclee de masă comparabile și doi-trei neutroni expulzați extrem de rapid, la  $10^{-13}$  secunde după fisiune, și care se numesc **neutroni prompti**. Nucleele rezultate din fisiune sunt foarte radioactive. Ele se

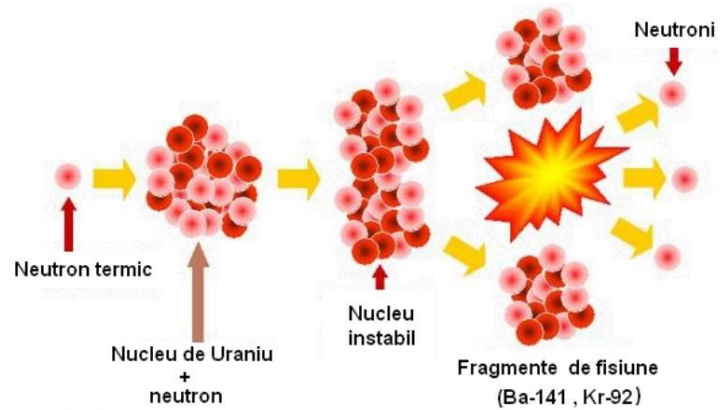
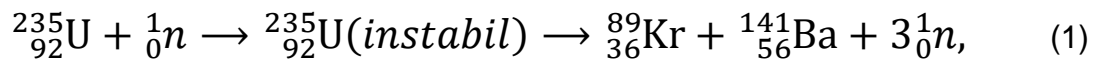


Fig. 1 Schema de fisionare a uraniului.

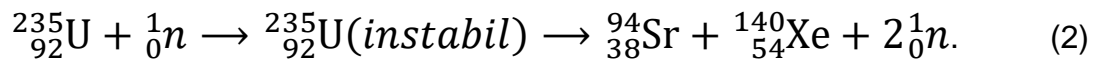
dezintegrează prin expulzarea unei particule  $\beta^-$  simultan cu emisie de noi neutroni, denumiți **neutroni întârziți**.

Cateva exemple de fisiune nucleară obținute prin bombardarea cu neutroni lenți a nucleelor de uraniu sunt:

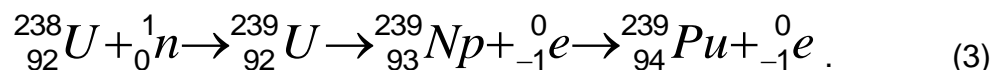
Fisiunea nucleară descoperită de Otto Hahn în 1939:



sau alta destul de probabilă:



Obținerea de elemente transuraniene:



### **Masa critică și reacția în lanț**

Neutroni rezultați prin fisiune pot la rândul lor să provoace noi fisiuni rezultând o reacție în lanț. Pentru ca aceasta să se întâmple trebuie asigurat impactul unui neutron secundar cu un nucleu fisionabil.

O reacție de fisiune în lanț are loc în trei pași (secvențe) după cum urmează (vezi Fig. 2):

1. Un atom de  ${}_{92}^{235}\text{U}$  absoarbe un neutron și se fragmentează în 2 atomi, 3 neutroni și energie.

2. Unul dintre acești neutroni este absorbit de un atom de  ${}_{92}^{238}\text{U}$  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  $^{235}_{92}\text{U}$  care fisionează elibererând neutroni și energia de legătură.

3. Ultimii doi neutroni se ciocnesc fiecare cu câte un atom de  $^{235}_{92}\text{U}$  care se fragmentează și eliberează 1-3 neutroni care pot continua reacția.

**Condiția de reacție în lanț** (în reactorul nuclear) este aceea ca 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.

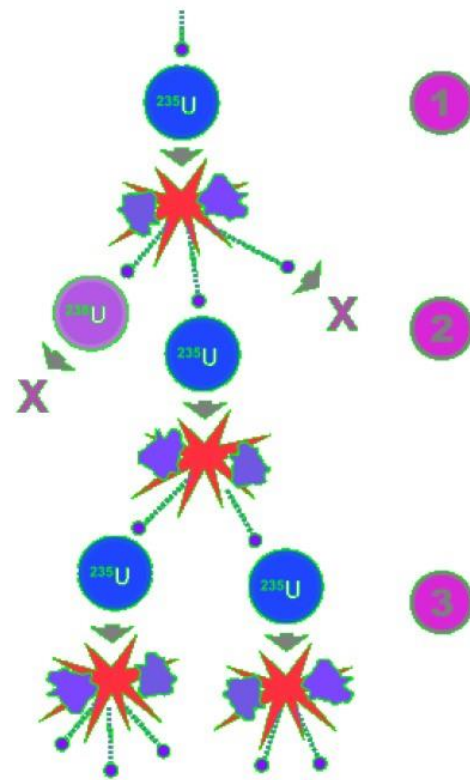
Masa minimă necesară pentru întreținerea reacției în lanț se numește **masă critică**. Ea este de aproximativ 40 de tone pentru uraniu natural, care conține uraniu 92 235, puțin peste 0,7%. Dacă se folosește uraniu îmbogățit în izotopul 235, masa critică este de aproximativ un kilogram.

**Factorul efectiv de multiplicarea neutronilor,  $k$** , este numărul mediu de neutroni (între 2.5 și 3 per act de fisiune) care generează reacția de fisiune. În funcție de valorile acestuia avem trei tipuri de reacții în lanț:

- $k < 1$  (masă subcritică): plecând cu o fisiune, avem în medie un total de  $1/(1-k)$  fisiuni și astfel reacția în lanț se stinge.

**Tabel 1.** Masa critică și diametrul diametrul câtorva nuclee.

| Nuclid                 | Masă critică (kg) | Diametru (cm) |
|------------------------|-------------------|---------------|
| $^{235}_{92}\text{U}$  | 52                | 17            |
| $^{239}_{94}\text{Pu}$ | 10                | 9.9           |
| $^{240}_{94}\text{Pu}$ | 40                | 15            |
| $^{241}_{95}\text{Am}$ | 55-77             | 20-23         |
| $^{249}_{98}\text{Cf}$ | 6                 | 9             |
| $^{251}_{98}\text{Cf}$ | 5                 | 8.5           |



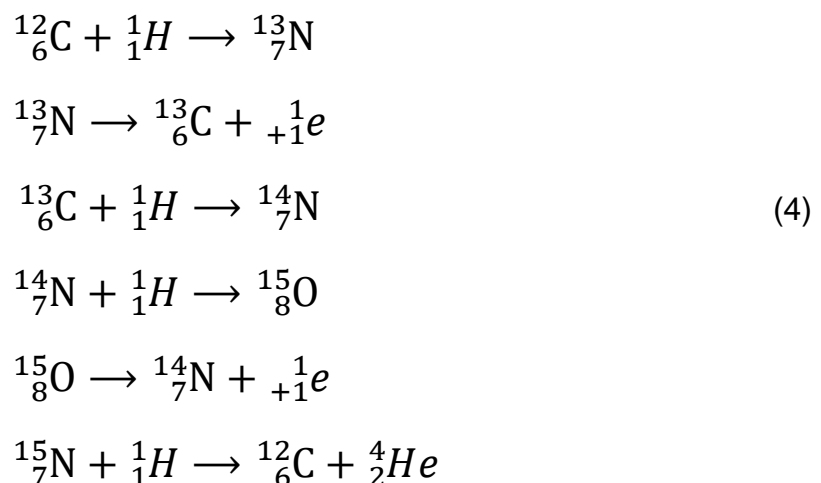
**Fig. 2** Cei trei pași ai unei reacții în lanț.

- $k = 1$  (masă critică): numărul actelor de fisiune rămâne constant.
- $k > 1$  (masă supercritică): numărul actelor de fisiune crește exponențial.

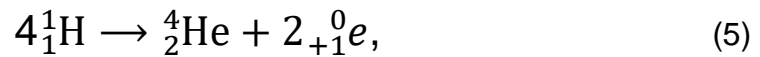
## Fuziunea nucleară

Procesul de contopire a unor nuclee ușoare, rezultând nucleele mai grele reprezintă **reacția de fuziune nucleară**. De exemplu, se poate produce fuziunea a doi protoni și doi neutroni pentru a se obține nucleul de heliu. În această reacție dispare o parte din masa particulelor implicate. Fenomenul se cuantifică ca defect de masă. Aceasta se regăsește în schimb sub formă de energie degajată cu o valoare de 27.12 MeV. Pentru a se realiza contopirea este nevoie de o temperatură ultra ridicată. Temperatura la care energia cinetică nucleelor le permite acestora să depășească bariera de potențial electrostatic care înconjoară pe fiecare nucleu. De aceea aceste procese se mai numesc și reacții termonucleare. În spațiul cosmic astfel de reacții se produc în interiorul stelelor.

A fost propusă mai multă variantă de cicluri de reacții care conduc la fuziunea nucleelor, rezultând nucleele de heliu. Unul dintre aceste cicluri este denumit ciclului Bethe. Acesta reprezintă de fapt o contopire a patru nuclee de hidrogen (sau 4 protoni) și este însoțită de eliminare a doi pozitroni. Asta înseamnă că doi dintre cei patru protoni se transformă în neutroni în cursul reacțiilor intermediare din ciclu. Aceasta se poate scrie după cum urmează.

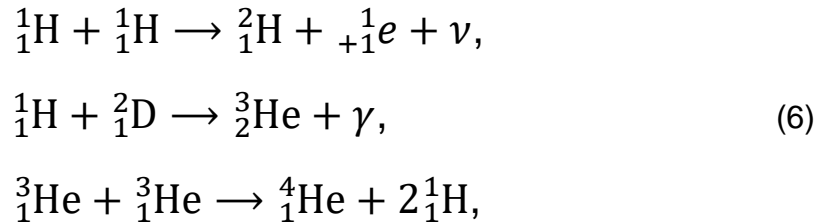


Așadar, în urma acestor reacții se generează din nou primul nucleu țintă ( ${}^{12}_6\text{C}$ ). Dacă se însumează termenii din fiecare membru pentru toate ecuațiile reacțiilor de mai sus și se reduc termenii care apar în ambii membri se obține o reacție simplă:

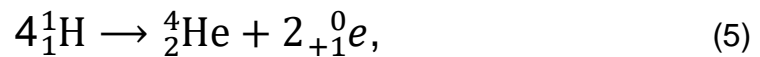


reacție care însă nu se poate petrece în mod direct.

Cercetările legate de fuziune aceste petreceri interiorul soarelui au dus la ipoteza că acolo, se pare că se produce un alt ciclu desfășoară după reacțiile:



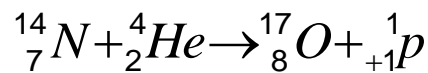
iar prin adunarea termenilor din fiecare membru rezulta că:



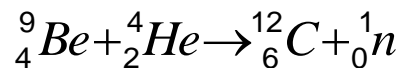
Pentru realizarea unui ciclu complet sunt necesare intervale de timp enorm, de ordinul a 50 de milioane de ani. Deoarece în Soare există foarte multe nuclee se au loc mai multe cicluri de reacții nucleare de fuziune în paralel.

### Alte reacții de fuziune nucleară cu semnificație istorică sunt

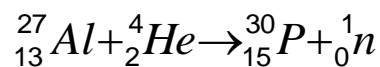
#### Prima reacție nucleară



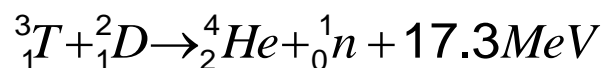
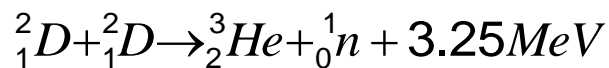
#### Producerea neutronilor

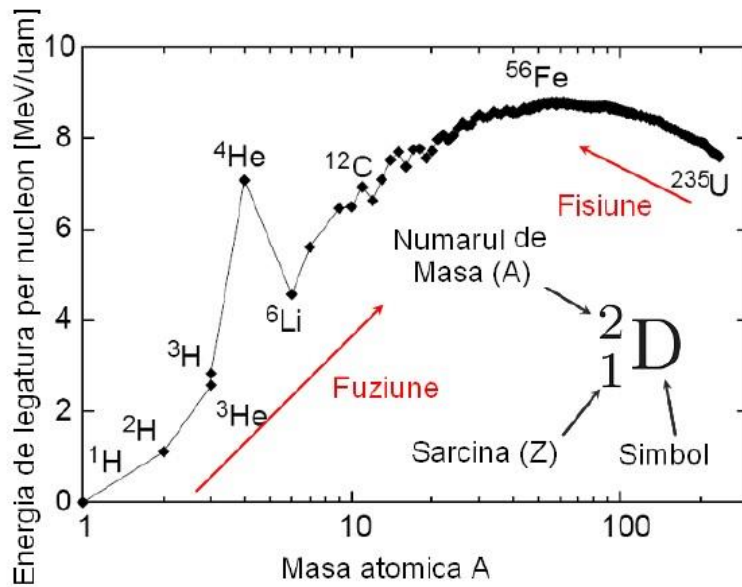


#### Radioactivitatea artificială (1934 Joliot Curie)



#### Fuziunea nucleară în bomba cu Hidrogen





**Fig. 3** Energia de legatură per nucleon stabilitatea nucleară și reacțiile de fisiune și fuziune nucleară.

### Bibliografie

1. Prof. Dr. Grigore Damin, UBB, Note de curs Online, (Curs de Fizică Nucleară) <http://www.phys.ubbcluj.ro/~grigore.damian/lectures.html>.
2. Simona Cornelia Nicoara, Fizica Mediului și Habitatului, Ed. Risoprint 2002.
3. Valdimir Znamirovski, Note de curs, 1995
4. Onuc Cozar, Note de curs, 1996.