

Transformarea elementelor - Alchimia

- **Alchimia** - formă de cunoaștere *protoștiințifică*, dar și o artă *ocultă*, specifică etapelor din vechime ale *istoriei* cunoașterii umane (*antichitate* și *evul Mediu*), care avea trei obiective principale:
 - ✓ **transmutația metalelor în aur și argint**
 - ✓ crearea unui homunculus (om artificial)
 - ✓ obținerea unei substanțe magice (o licoare sau o pulbere numită *piatra filozofală*) care să permită obținerea **panaceului** (poțiune care să vindece toate bolile).
- Termenul *alchimie* provine din *al-kimiya* sau *al-khimiya* compus din articolul *al* (arab) și cuvântul grec *khymeia* (χυμεία) care înseamnă a topi, a lipi, a împreuna.



- Actualmente, fizicienii sunt implicați în *propria lor formă de alchimie* - transformând un element în altul.
- Se realizează ceea ce alchimiștii antici nu au putut – *transformând elementele și creând noi atomi oferind astfel, o nouă abordare asupra modului în care se comportă materia din univers.*
- **Aurul** a fost sintetizat în acceleratoare de particule încă din 1941, însă toți izotopii rezultați erau radioactivi.

Transmutation of Mercury by Fast Neutrons

- Sherr, R. (*Research Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts*);
- Bainbridge, K. T. (*Research Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts*);
- Anderson, H. H. (*Mallinckrodt Laboratory, Department of Chemistry, Harvard University, Cambridge, Massachusetts*)

Phys. Rev. **60**, 473 – Published 1 October 1941



The Energy Dependence of ^{209}Bi Fragmentation in Relativistic Nuclear Collisions

- K. Aleklett, D.J. Morrissey, W. Loveland, P.L. McGaughey, and G.T. Seaborg
- Nuclear Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory Berkeley, California

Phys. Rev. C **23**, 1044 – Published 1 March 1981

Nuclear Reactions:

$^{209}\text{Bi}(^{12}\text{C},\text{X})\text{Au}$, $E=4.8, 25.2$ GeV;

$^{209}\text{Bi}(^{20}\text{Ne},\text{X})\text{Au}$, $E=8.0$ GeV

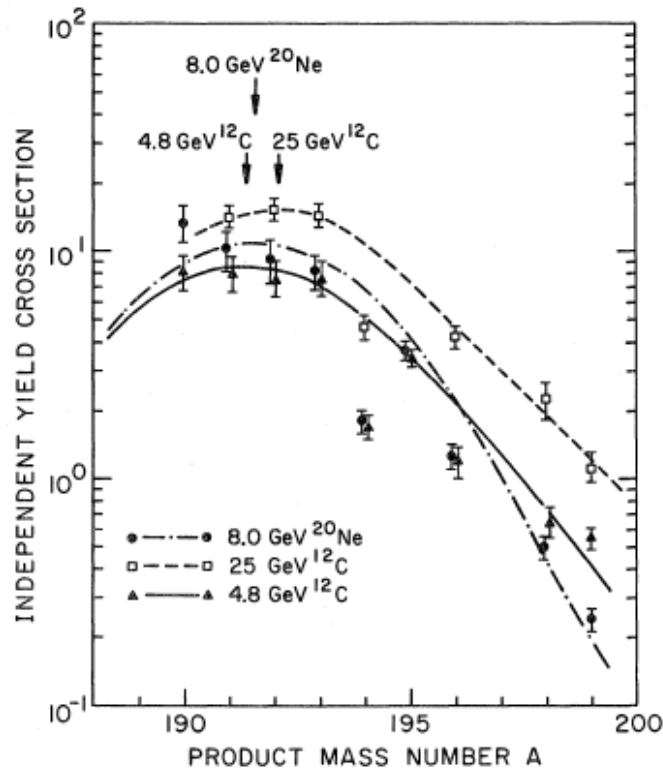


Fig. 1. The isotopic production cross sections for gold products from the reaction of 4.8 and 25.2 GeV ^{12}C and 8.0 GeV, ^{20}Ne with ^{209}Bi are shown. The lines represent the best Gaussian fit to each distribution with the arrows showing the distribution centroids.

Table I
Experimental Conditions and Results

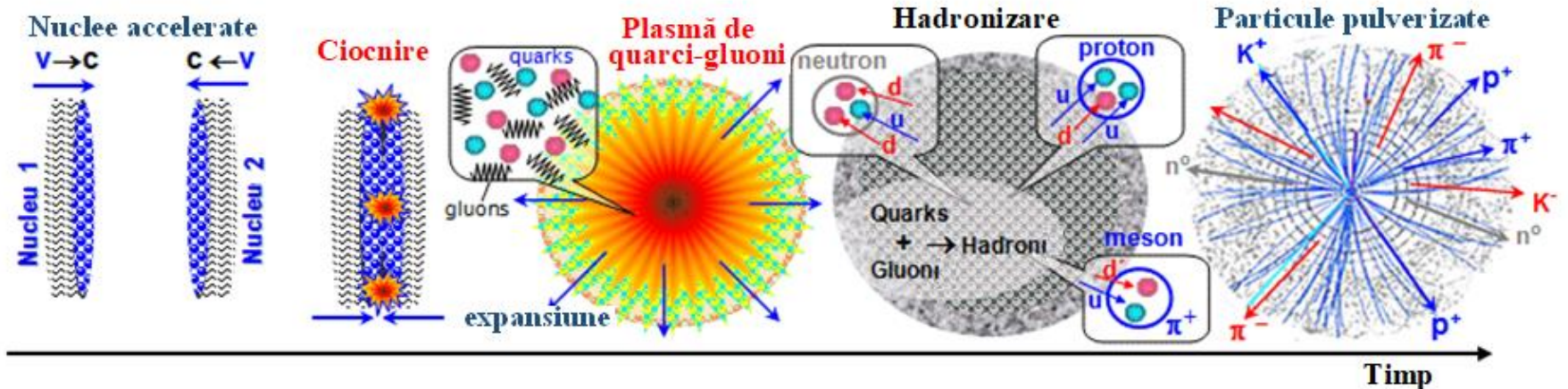
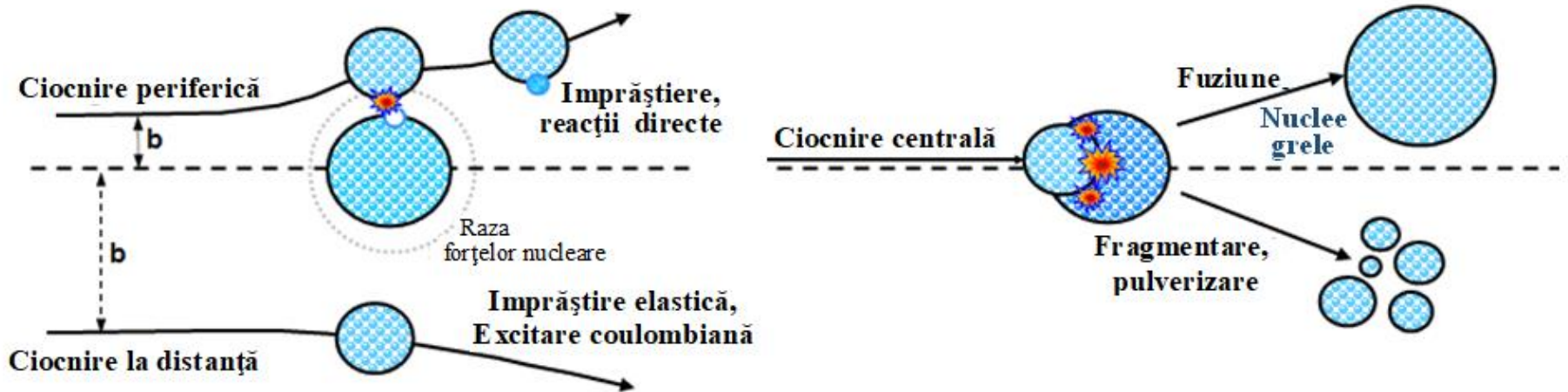
Projectile	^{12}C	^{20}Ne	^{12}C
Energy (GeV)	4.8	8.0	25.2
Target Thickness (mg/cm^2)			
(1) unseparated	112.6, 227.7	116	---
(2) chemical	132.9	137	~50
Bombardment Statistics (total particles [hours])			
(1) unseparated	6.19×10^{13} [13.7]	3.64×10^{13} [13.5]	---
(2) chemical	6.19×10^{13} [13.7]	3.75×10^{13} [13.5]	5.3×10^{12} [2.7]
Independent Yield Cross Sections			
	(mb)	(mb)	(arbitrary units)
^{190}Au	8.2 ± 1.4	13.6 ± 2.5	---
^{191}Au	8.1 ± 1.4	10.4 ± 1.9	14.2 ± 1.4
^{192}Au	7.7 ± 1.3	9.4 ± 1.9	15.5 ± 1.5
^{193}Au	7.7 ± 1.3	8.2 ± 1.6	14.6 ± 1.5
^{194}Au	1.7 ± 0.2	1.8 ± 0.2	4.6 ± 0.5
^{195}Au	3.4 ± 0.3	3.7 ± 0.4	---
$^{196\text{m}}\text{gAu}$	1.21 ± 0.1	1.24 ± 0.94	4.2 ± 0.5
$^{198\text{m}}\text{gAu}$	$0.65 \pm .052$	$0.51 \pm .039$	2.3 ± 0.2
^{199}Au	$0.54 \pm .058$	$0.24 \pm .026$	1.4 ± 0.1

Isotopic Distribution Centroids $\langle A \rangle$ for $Z = 79$

	^{12}C	^{20}Ne	^{12}C
Experimental	191.4 ± 0.3	191.6 ± 0.5	192.1 ± 0.3
Cascade Model ^B	189.4 ± 0.3	189.5 ± 0.5	190.6 ± 0.5

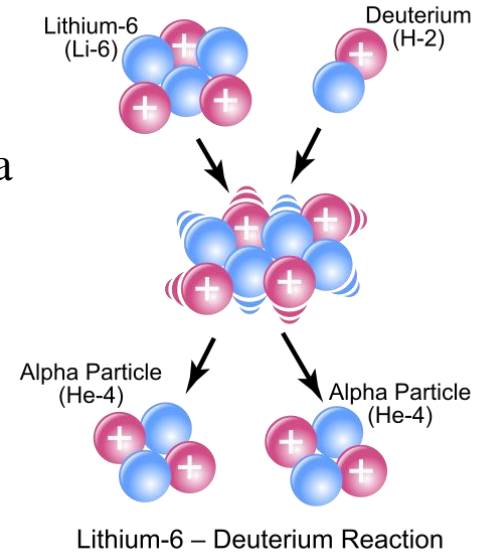
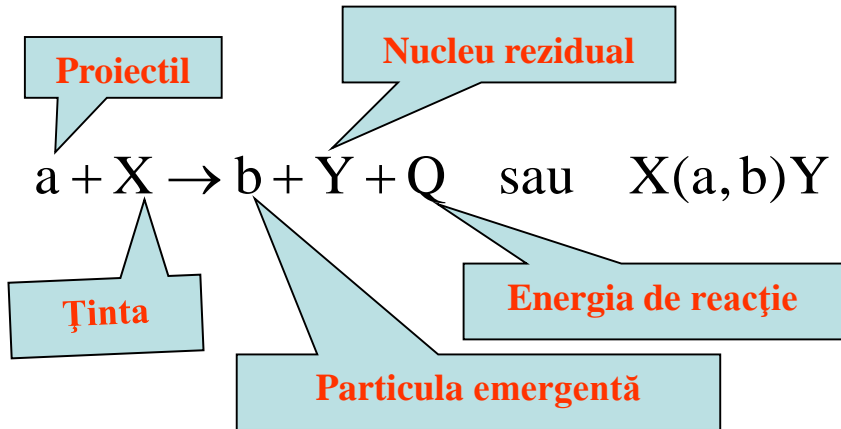
□ Reacții nucleare

- **Reacție nucleară** - procesul în care două nuclee atomice sau particule subatomice interacționează generând una sau mai multe structuri nucleare, particule noi sau radiații gamma

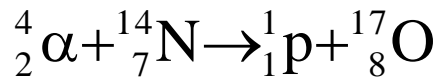


□ Caracterizarea reacțiilor nucleare

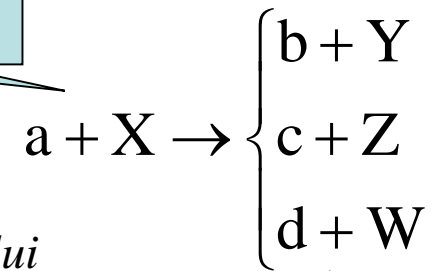
- **Reacții nucleare** - ansamblul proceselor generate de interacțiunea a două sisteme nucleare sub acțiunea forțelor nucleare



- Prima reacție nucleară -Rutherford în 1919



Canal de intrare



- **Canale de reacție** –stări cuantice determinate ale sistemului proiectil-țintă și nucleu emergent-nucleu rezidual

Canal de ieșire

□ Clasificare

➤ Criterii de clasificare

- (a) *natura nucleului țintă,*
- (b) *energia nucleului proiectil,*
- (c) *natura nucleului proiectil*

a) Natura nucleului țintă

- reacții pe nuclee foarte ușoare $A < 5$
- reacții pe nuclee ușoare $5 \leq A \leq 20$
- reacții pe nuclee medii $20 \leq A \leq 100$
- reacții pe nuclee grele $100 \leq A \leq 210$
- reacții pe nuclee foarte grele $210 \leq A \leq 260$

b) Energia nucleului proiectil

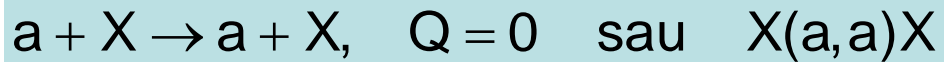
- reacții nucleare la energii joase - *energia particulei incidente - până la 30 MeV*
- reacții nucleare la energii înalte – *de la 30 MeV până la câțiva GeV*
- reacții nucleare la energii ultraînalte (*GeV – TeV*)

c) Natura nucleului proiectil

- împrăștierea - elastică
- neelastică
- reacții nucleare de rearanjare
- reacții nucleare de captură radiativă
- reacții nucleare cu emisie de mai multe particule
- reacții fotonucleare

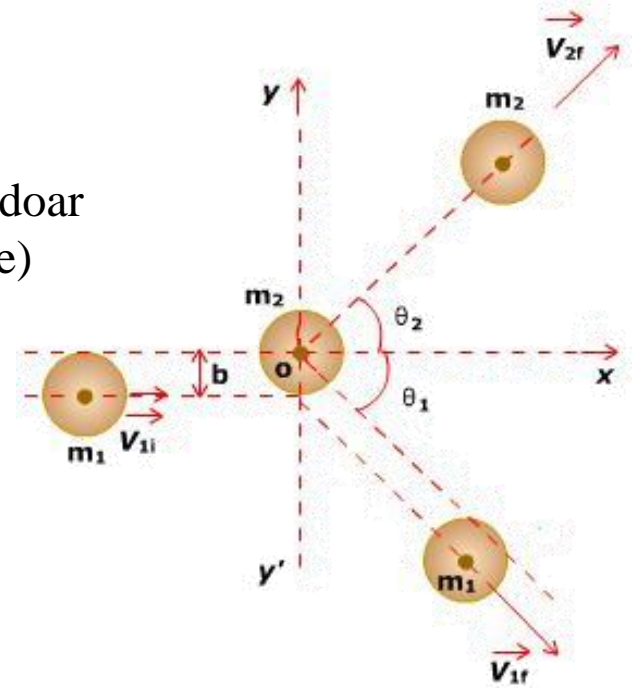
□ Împrăștierea elastică

- Proces de interacțiune între două sisteme nucleare - starea internă a sistemului rămâne neschimbată; au loc schimbări doar la nivelul parametrilor cinetici (transfer de impuls și energie)



➤ Tipuri de împrăștieri elastice

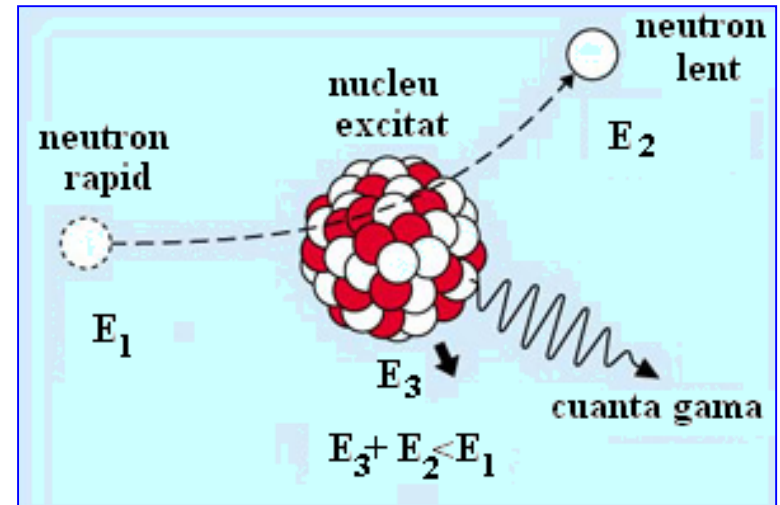
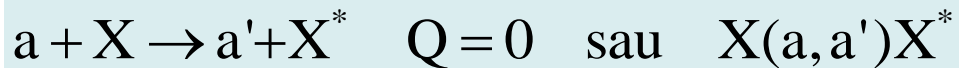
- ✓ *ciocnire normală* sau *potențială* (*shape-elastic scattering*) - împrăștierea elastică a proiectilului are loc la suprafața nucleului țintă
 - ✓ *împrăștiere anormală* sau *împrăștiere elastică de rezonanță* (*resonance scattering*) - formarea unui sistem intermediar de nucleu compus și apoi emisia proiectilului cu aceeași energie (în sistemul centrului de masă)
- Împrăștierea elastică totală este o sumă coerentă dintre împrăștierea potențială și împrăștierea de rezonanță și se produce la toate energiile de interacție.



Este observată în special la împrăștierea neutronilor termici (~0.02 eV) sau epitermici (~1 eV) în medii solide, lichide și gazoase (difracție de neutroni-analiză structurală)

□ Împrăștierea neelastică

- Implică transferul de energie cinetică a proiectilului în energie de excitare a nucleului țintă, fără ca identitatea compozițională a celor două sisteme nucleare să fie modificată.

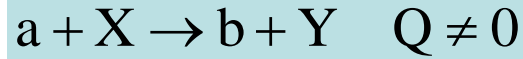


Obs.

- *împrăștierea neelastică are loc numai dacă energia de interacțiune în SCM depășește primul nivel de excitare a nucleului țintă, ($\sim 0.1 \div 2 \text{ MeV}$) și este dependentă de energia și natura nucleului țintă*
- *are importanță în studiul nivelelor de excitare a nucleelor și evidențierea emisiilor de radiații γ .*

□ Reacții nucleare de rearanjare

➤ Natura nucleelor emergente este diferită de natura nucleelor incidente

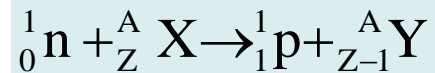


➤ Reacții nucleare de rearanjare

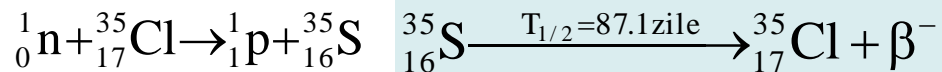
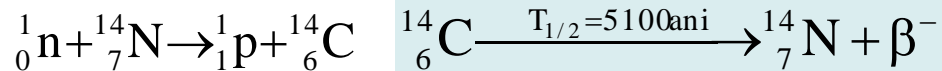
- ✓ reacții nucleare de rearanjare sub influența neutronilor
- ✓ reacții nucleare de rearanjare sub influența particulelor sau nucleelor încărcate

➤ **Reacții de rearanjare sub acțiunea neutronilor**- grupa cea mai largă de procese nucleare datorită lipsei barierei de potențial (*nucleul intermediar format este puternic excitat conducând la o formă de rearanjare dependentă de natura particulei emergente emise*)

(a) **Reacții de tip (n, p)** – au loc cu neutroni rapizi (0.5-10 MeV)



✓ Reacțiile de tip (n, p) au loc cu nuclee grele, cu excepția a două reacții

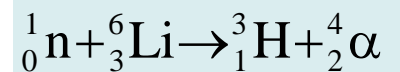


✓ Reacțiile de tip (n, p) conduc la formarea unor radioizotopi activi β^- -exces de neutroni

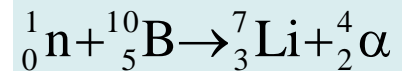
(b) **Reacții de tip (n, α)** ${}_0^1\text{n} + \text{X}(A, Z) \rightarrow \text{Y}(A-3, Z-2) + {}_2^4\alpha$

✓ **Cu nucleele grele** – sunt generate numai cu neutroni rapizi (0.5-10 MeV)

(bariera de potential înaltă pentru emisie α)

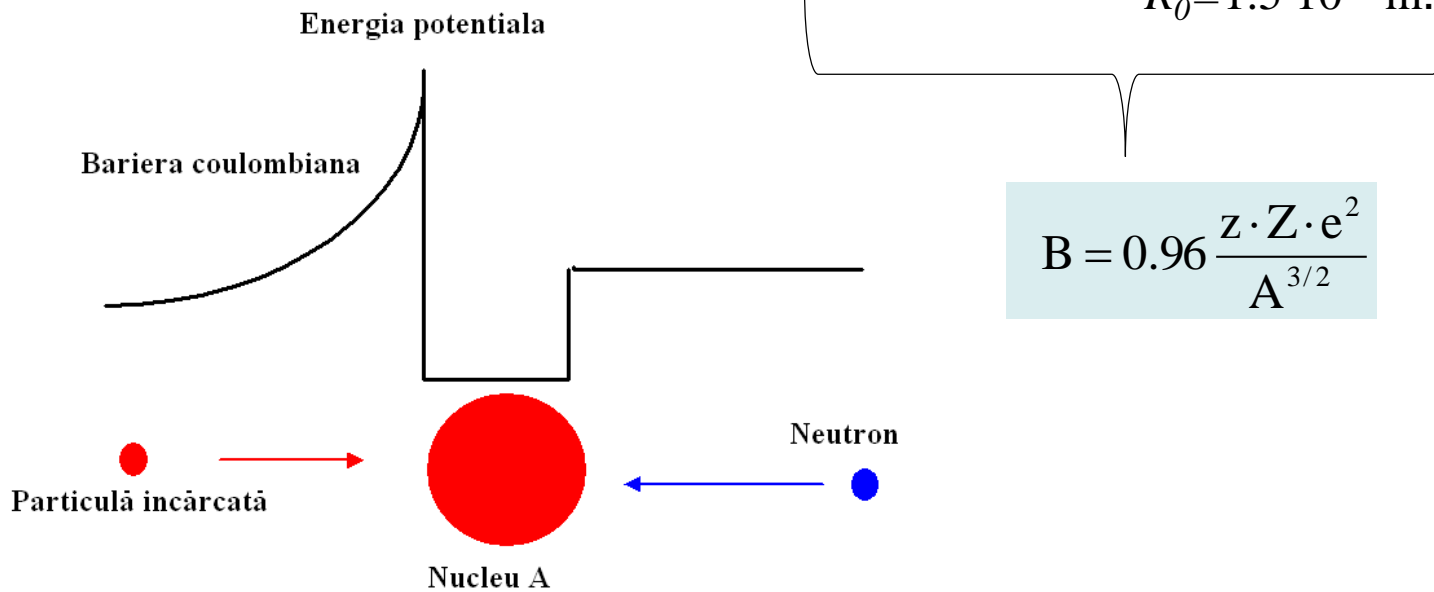


✓ **Cu nucleele ușoare** - sunt generate cu neutroni rapizi și termici



➤ Reacții de rearanjare sub acțiunea particulelor/nucleelor încărcate

- Bariera de potențial coulombian



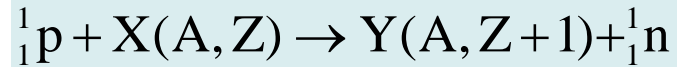
- ✓ De exemplu, bariera coulombiană pentru interacțiunea protonului ($Z=1$) cu nucleul de oxigen ($Z=8$) este de $\sim 3 \text{MeV}$, iar cu nucleul ^{238}U ($Z=92$) de circa 14.3MeV

Tipuri de reacții:

- a) - reacții generate de protoni
- b) - reacții generate de deuteroni
- c) - reacții generate de particulele α
- d) - reacții generate de ioni grei.

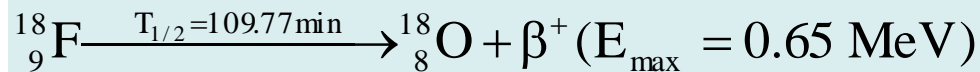
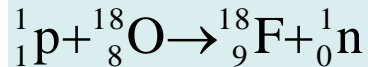
a) Reacții generate de protoni

✓ două tipuri (p, n) și (p, α)



✓ *Reacții de tip (p,n) - schimbare dintre un proton și un neutron*

- Reacția este determinată de două caracteristici principale ale nucleului rezultat:
 - un **surplus de masă** (masa neutronului este mai mare decât masa protonului)
 - un **surplus de protoni** față de nucleul de echilibru - nucleul rezultat prezintă radioactivitate β^+ sau captură de electroni (captură K)



- Neutronul expulzat are energie bine stabilită



- Energia reacției negativă – reacție cu prag (energia cinetică minimă a protonilor)

$$E_p = |Q| \left(1 + \frac{m_p}{m_{\text{Li}}} \right) = 1.67 \frac{8}{7} = 1.91 \text{ MeV}$$

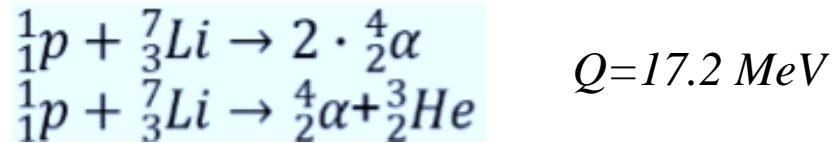
${}^7\text{Be}$ - γ radioactiv,

$T_{1/2}=53.44$ zile,

energie cinetică mică a neutronilor emiși (29.4 keV).

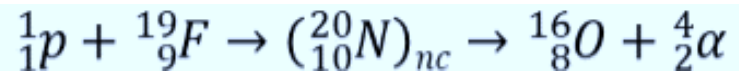
➤ **Reacții de tip (p, α)** - procese exoterme

- ✓ **Cu nucleeele ușoare** - energii mici (100-500 KeV), datorită barierei coulombiene scăzute și a efectului tunel



particulele α rezultate sunt monoenergetice

- ✓ **Cu nucleeele grele** - energii mari ale protonului (~25MeV) - valorilor mari ale barierei de potențial coulombian de emisie



- ✓ Cinci grupe energetice:

α₀ - cu energia maximă de 8.12 MeV

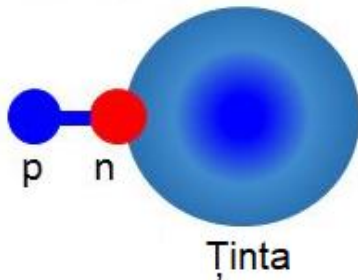
α₁, α₂, α₃ - energii mici cu emisie de radiație γ

α₄ - energie mică, însoțită de formarea de perechi electron-positron

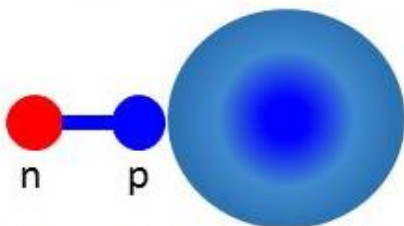
b) Reacții generate de deuteroni

- Reacții de interes deosebit teoretic și practic datorită particularității nucleului de deuteriu
 - ✓ energia de legătură a acestuia este mică (2.2 MeV)
 - ✓ distanța dintre proton și neutron de $4.3 \cdot 10^{-13}$ cm este mare față de raza de acțiune a forțelor nucleare ($1.4 \cdot 10^{-13}$ cm) → pragul reacțiilor cu deuteroni este mai mic decât înălțimea barierei de potențial ca urmare a efectului de **polarizare a deuteronului** de către câmpul coulombian al nucleului țintă

orientare favorabilă



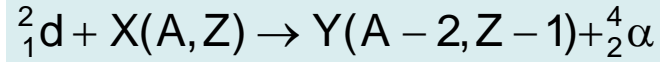
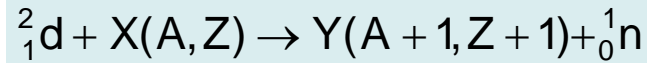
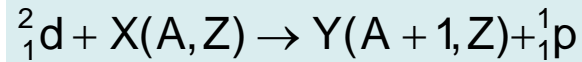
Un-favored



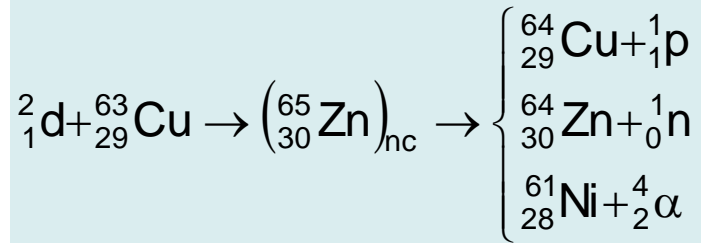
orientare nefavorabilă

- ✓ *Fenomenul de polarizare a deuteronului în procesul de interacțiune, constă în faptul că datorită respingerii electrostatice dintre protonul din deuteron și câmpul coulombian al nucleului țintă, deuteronul este expus interacțiunii cu “partea neutronică”.*
- ✓ *Întrucât distanța neutron-proton este mai mare decât raza de acțiune a forțelor nucleare, neutronul este captat de către nucleul intermediar, în timp ce protonul se află în zona barierei coulombiene; se formează astfel nucleul final fără ca bariera coulombiană să fie practic străpunsă*

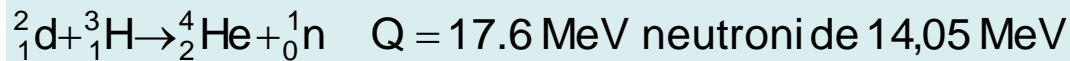
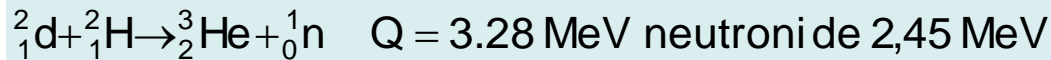
➤ Tipuri de reacții: (d, p) , (d, n) și (d, α)



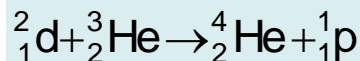
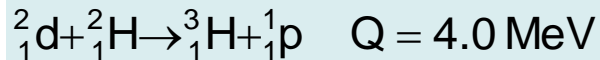
➤ În funcție de energia cinetică a deuteronului se pot produce diferite reacții:



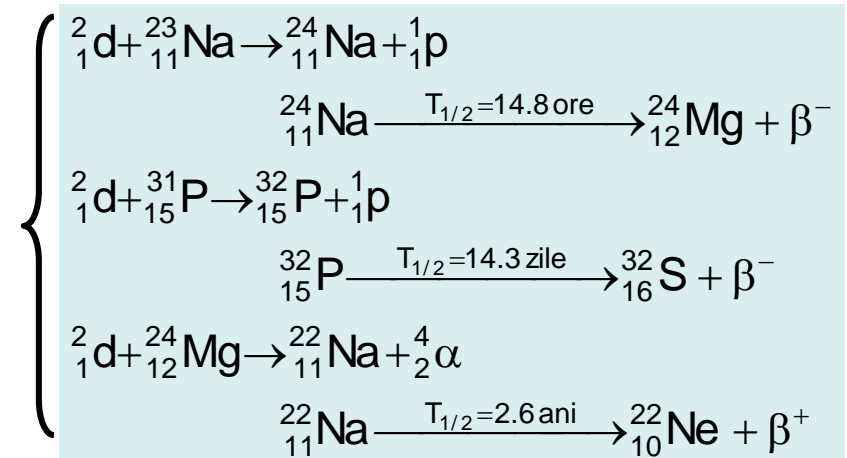
➤ Cu nucleele ușoare la energii mici ale deuteronilor (~100 KeV)-reacții de rearanjare de tip (d, n)



și (d, p)



➤ Reacții pentru obținerea radioizotopilor în acceleratori de particule

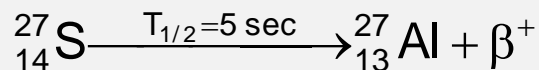
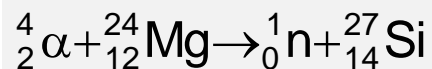
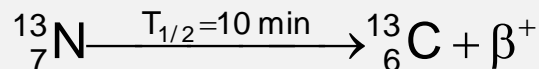
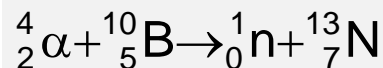
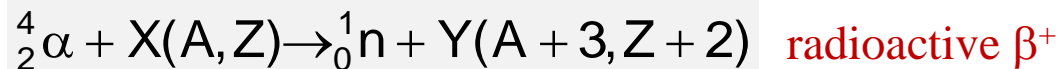


c) Reacții generate de particulele α

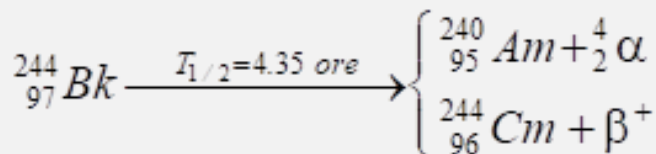
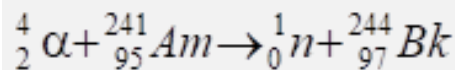
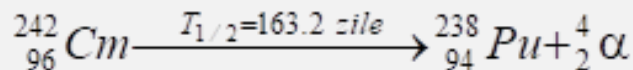
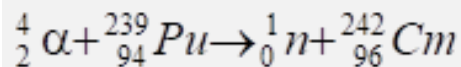
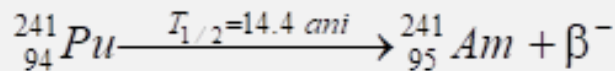
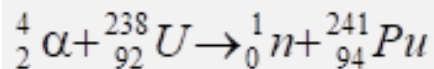
➤ Bariera coulombiană a particulei α este mai mare decât în cazul protonilor sau a deuterionilor, reacțiile cu particule α se produc la energii mari

➤ Două tipuri: (α, n) și (α, p) .

Reacții de tip (α, n)

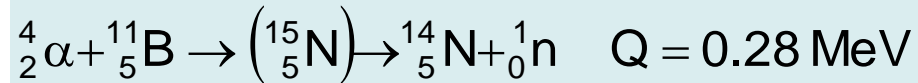
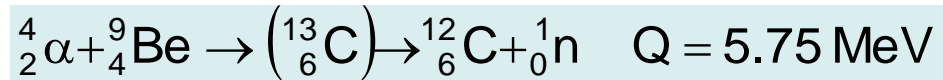


✓ Din reacțiile tip (α, n) cu elementele grele se obțin izotopi radioactivi artificiali



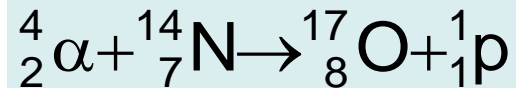
➤ Aplicații ale reacției (α, n) - sursele izotopice de neutroni.

✓ particulele α emise de radioizotopi produc reacții cu elemente ușoare și emisie de neutroni

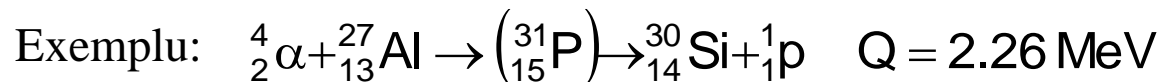
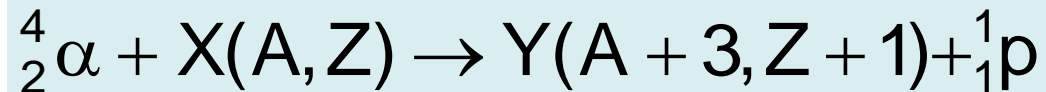


➤ *Reacții de tip (α, p) .*

✓ prima reacție nucleară descoperită de Rutherford in 1919



✓ Schema generală:

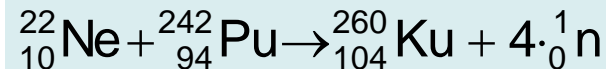
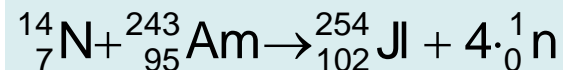
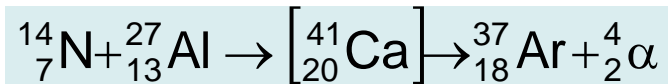


d) Reacții generate de ioni grei

➤ Reacțiile cu ioni grei ($A > 4$) - posibilitatea studierii unui mare număr de nuclee aflate în condiții extreme ale stărilor nucleare:

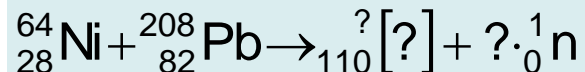
- obținerea unor stări izomere de mare densitate (nuclee superdense)
- formarea unor stări cvasiatomice cu Z mare
- sinteza de nuclee supragrele
- sinteza unor nuclee neutro excedentare
- studiul unor noi mecanisme de dezintegrare, etc.

Exemple:

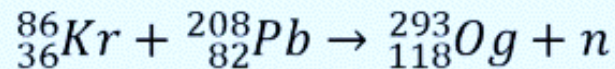
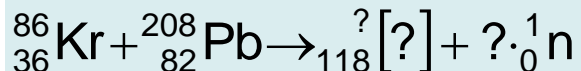


➤ Sintetizare elemente supragrele

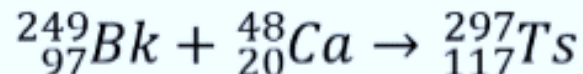
- 1995-1996 au fost sintetizate elemente cu $Z=110, 111, 112$



- 1999-2002 au fost descoperite elementele cu $Z=114, 116, 118$



- 2011 a fost sintetizat elementul cu $Z=117$



Periodic Table of the Elements

1 1IA 1A																	13 IIIA 3A	14 IVA 4A	15 VA 5A	16 VIA 6A	17 VIIA 7A	18 VIIIA 8A	
1 H Hydrogen 1.008																						2 He Helium 4.003	
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012																	5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.305	3 IIIB 3B	4 IVB 4B	5 VB 5B	6 VIB 6B	7 VIIB 7B	8 VIII 8	9 VIII 8	10 VIII 8	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948						
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.631	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.799						
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.711	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.294						
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.328	57-71	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.085	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [208.982]	85 At Astatine 209.987	86 Rn Radon 222.018						
87 Fr Francium 223.020	88 Ra Radium 226.025	89-103	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [278]	110 Ds Darmstadtium [281]	111 Rg Roentgenium [280]	112 Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [286]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [288]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennessine [294]	118 Og Oganesson [294]						

Lanthanide Series

57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.243	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.055	71 Lu Lutetium 174.967
---	--------------------------------------	--	---	--	---------------------------------------	--	---	---------------------------------------	--	---------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	---	--

Actinide Series

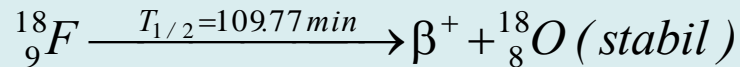
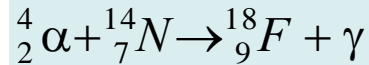
89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium [262]
--	---------------------------------------	--	--------------------------------------	---	---	---	--------------------------------------	---	---	---	--	--	---	---

Alkali Metal	Alkaline Earth	Transition Metal	Basic Metal	Semimetal	Nonmetal	Halogen	Noble Gas	Lanthanide	Actinide
--------------	----------------	------------------	-------------	-----------	----------	---------	-----------	------------	----------

Z	Symbol	Element	Origin of name	Atomic weight	Density (g/cm³)
99	Es	Einsteinium	Albert Einstein, physicist	[252]	(8.84)
100	Fm	Fermium	Enrico Fermi, physicist	[257]	(9.7)
101	Md	Mendelevium	Dmitri Mendeleev, chemist and inventor	[258]	(10.3)
102	No	Nobelium	Alfred Nobel, chemist, engineer, innovator, and armaments manufacturer	[259]	(9.9)
103	Lr	Lawrencium	Ernest O. Lawrence, physicist	[266]	(15.6)
104	Rf	Rutherfordium	Ernest Rutherford, chemist and physicist	[267]	(23.2)
105	Db	Dubnium	Dubna, Russia	[268]	(29.3)
106	Sg	Seaborgium	Glenn T. Seaborg, scientist	[269]	(35.0)
107	Bh	Bohrium	Niels Bohr, physicist	[270]	(37.1)
108	Hs	Hassium	Hesse, Germany, where the element was first synthesized	[277]	(40.7)
109	Mt	Meitnerium	Lise Meitner, physicist	[278]	(37.4)
110	Ds	Darmstadtium	Darmstadt, Germany, where the element was first synthesized	[281]	(34.8)
111	Rg	Roentgenium	Wilhelm Conrad Röntgen, physicist	[282]	(28.7)
112	Cn	Copernicium	Nicolaus Copernicus, astronomer	[285]	(23.7)
113	Nh	Nihonium	the Japanese name for Japan, Nihon, where the element was first synthesized	[286]	(16)
114	Fl	Flerovium	Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, part of JINR where the element was synthesized; itself named for Georgy Flyorov, physicist	[289]	(14)
115	Mc	Moscovium	Moscow Oblast, Russia, where the element was first synthesized	[290]	(13.5)
116	Lv	Livermorium	Lawrence Livermore National Laboratory(in Livermore, California) which collaborated with JINR on its synthesis	[293]	(12.9)
117	Ts	Tennesine	Tennessee, United States	[294]	(7.2)
118	Og	Oganesson	Yuri Oganessian, physicist	[294]	(5.0)

□ Reacții nucleare de captură radiativă (a, γ)

- Principalele de tip: (n, γ) și (p, γ)
- Cu mai mică probabilitate se produc și reacții de tipul (α, γ)



- Caracteristică importantă - prezența rezonanțelor foarte pronunțate; pentru valori bine determinate ale energiei proiectilului, secțiunea eficace de captură, σ se exprimă prin formula Breit-Wigner:

$$\sigma(a, \gamma) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{\Gamma_\gamma \Gamma}{(E - E_\gamma)^2 + \frac{1}{4} \Gamma^2}$$

λ - lungimea de undă a particulei proiectil (neutron sau proton)

Γ_x ($x=n, p, \gamma$) - lărgimea nivelului energetic definit prin relația

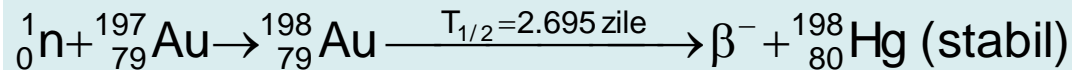
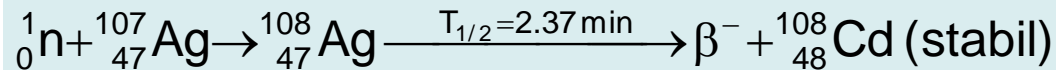
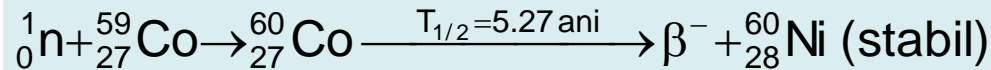
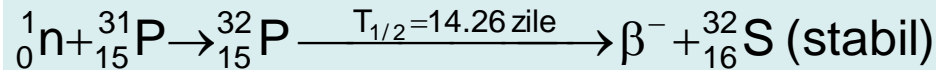
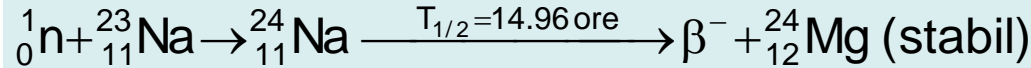
$$\Gamma_x = \frac{h}{2\pi \cdot \tau_x}$$

- ✓ Lărgimea totală a nivelului energetic Γ este dată de suma dintre largimile parțiale

$$\Gamma = \Gamma_a + \Gamma_\gamma$$

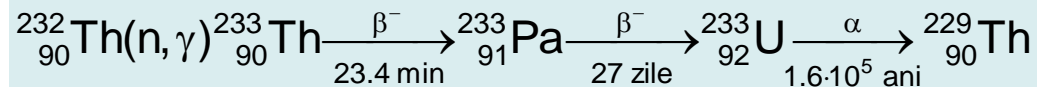
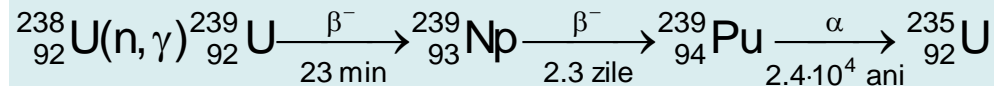
➤ *Reacții de tip (n, γ) - se realizează cu neutroni lenți și termici*

✓ Rezultă de obicei radioizotopi care se dezintegrează β⁻



✓ constituie baza analizei prin activare cu neutroni (NAA)

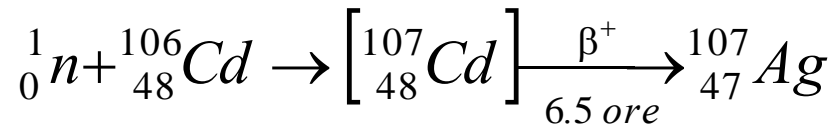
✓ În urma reacțiilor (n, γ) cu atomii de ²³⁸U și ²³²Th se obțin materiale fisionabile utilizate drept combustibil nuclear în reactori



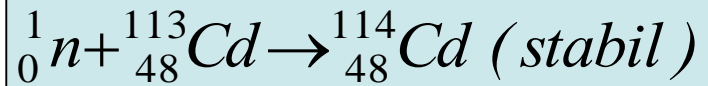
- Există situații în care dezintegrarea nucleului compus, are loc prin emiterie de radiație β^+ .

Exemplu:

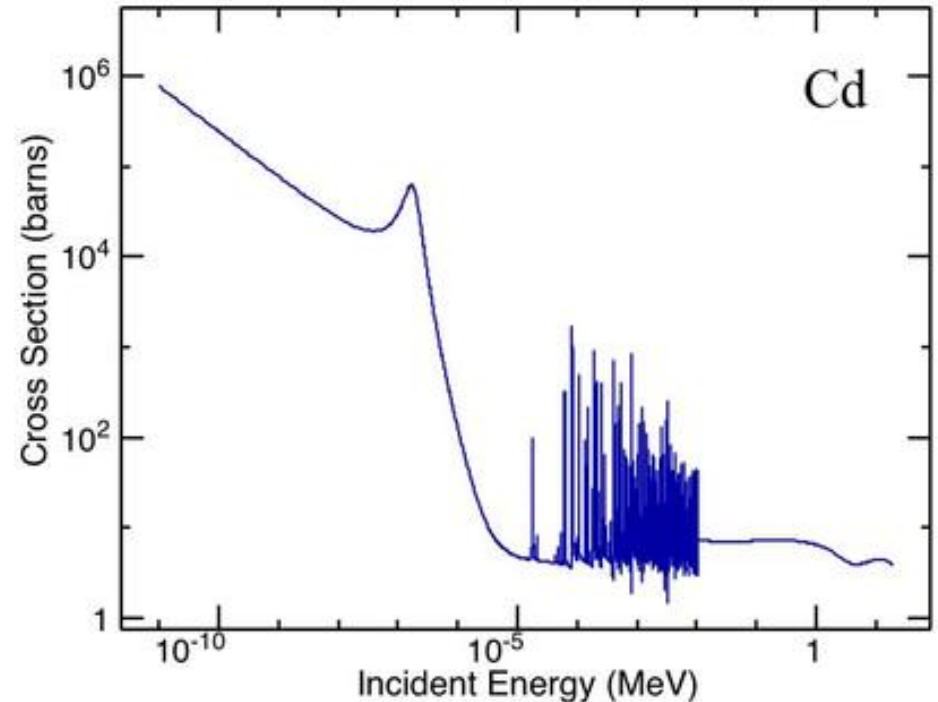
- ✓ captura neutronilor lenți de către nucleele de cadmiu, reacție de o importanță deosebită în controlul reacțiilor în lanț în reactorii nucleari:



sau reacția:

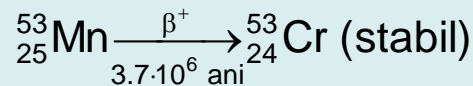
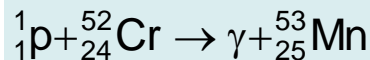
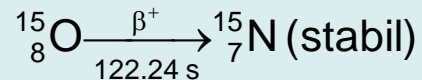
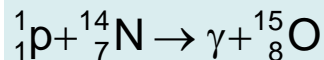
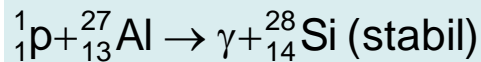
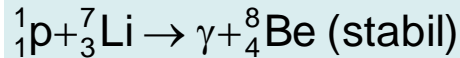


- ✓ secțiunea eficace de captură pentru neutroni de $\sigma_c = 2500 \text{ b}$
- ✓ secțiunea eficace rezonanță pentru neutronii de 0.18 eV (neutroni cadmici) de $\sigma_c = 7800 \text{ b}$

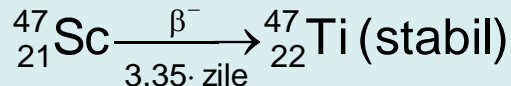
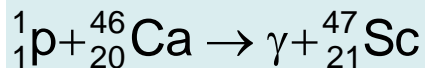


➤ *Reacții de tip (p, γ)*

- ✓ constă în captura unui proton de către nucleul țintă și emiterea surplusului de energie sub forma de radiație γ
- ✓ Nucleul format se situează în tabelul periodic cu o poziție la dreapta față de elementul țintă și poate fi un izotop stabil sau un izotop radioactiv β⁺



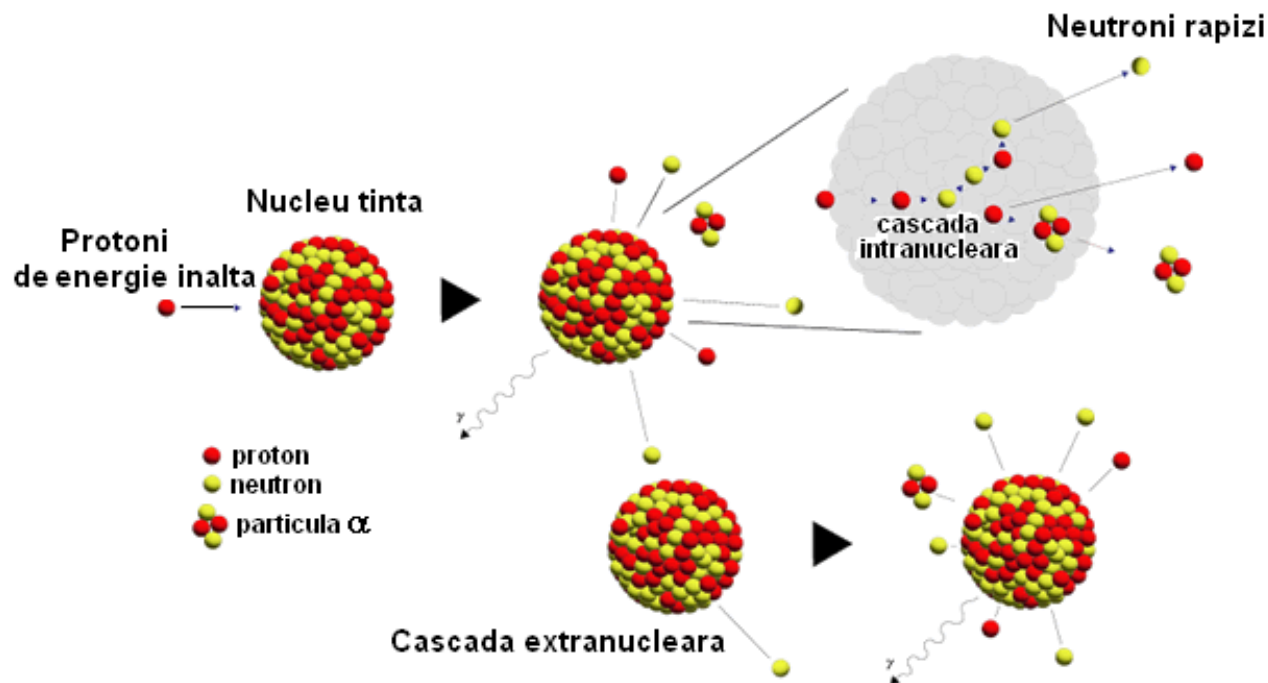
- ✓ Există și situații rare în care nucleu rezidual este radioactiv β⁻



- ✓ Reacții utile la etalonarea în energie a acceleratorilor de protoni datorită preciziei cu care se determină energia de rezonanță a radiației γ emise
- ✓ Reacția Li(p, γ)Be se emite radiații γ cu energie foarte înaltă ($E_\gamma = 17.2 \text{ MeV}$) utilizată în studiul reacțiilor fotonucleare

❑ Reacții nucleare cu emisie de mai multe particule

- Emisie de mai multe particule - reacții de "sfărâmare a nucleului" (**spallation**) și au loc la energii foarte mari ale proiectilului (de peste 10^2 MeV)



- ✓ Lungimea de undă λ a proiectilului este mai mică decât raza de acțiune a forțelor nucleare (energie mare)

$$\tilde{\lambda} = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{h}{2\pi p}$$

p - impulsul proiectilului în SCM

- ✓ Între impulsul din sistemul centrului de masă (SCM) și impulsul din sistemul laboratorului (SL) există relația

$$p_{SCM} = \frac{1}{2} p_{SL} = \frac{1}{2} \sqrt{2mE_{SL}}$$



$$\tilde{\lambda} = \frac{h}{\pi} \frac{1}{\sqrt{2mE_{SL}}}$$

Exemplu

- Un neutron cu o energie de 100 MeV, va avea $\tilde{\lambda} = 0.9 \cdot 10^{-13}$ cm și deci va interacționa doar cu nucleonii individuali ai nucleului (*ordinul de mărime al nucleonului este 10^{-13} cm*)

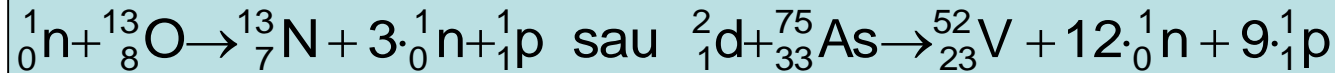
➤ Procese posibile :

- ✓ proiectilul transferă energie unuia sau mai multor nucleoni ai nucleului țintă, care pot părăsi nucleul, iar proiectilul poate să treacă prin nucleu
- ✓ proiectilul se oprește în nucleu cedând întreaga energie; nucleul se ”încălzește” instantaneu la valori mari ale temperaturii nucleare - explozie a nucleului
- ✓ la energii ultraînalte, ($\approx 10^3$ MeV) a proiectilului nucleul țintă să fie sfărâmat în întregime, producând dezintegrarea lui în toți nucleonii constituenți ai sistemului nuclear

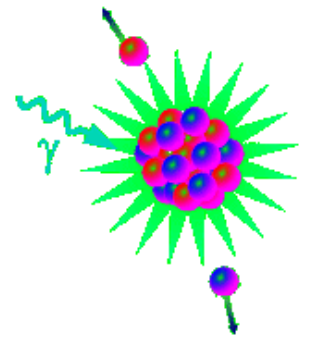
➤ Reacția nucleară cu emisie de mai multe particule (*spallation*) - două etape:

- ✓ inducerea de către proiectil a unor ciocniri cvasi-libere între nucleonii nucleului țintă care conduc la emisia promptă a câtorva neutroni sau protoni. O fracțiune a energiei cinetice a proiectilului rămâne sub formă de energie de excitare a nucleului țintă.
- ✓ dezexcitarea nucleului rezidual prin evaporarea de protoni și neutroni de energie joasă sau prin fisiune (determinată de temperatura nucleului rezidual)

De exemplu

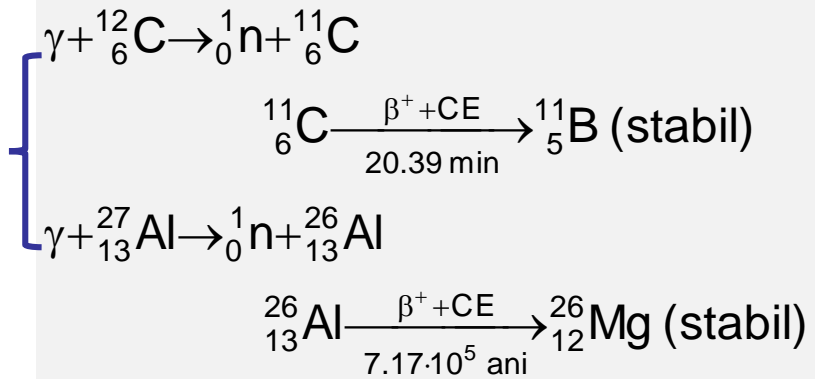


□ Reacții fotonucleare

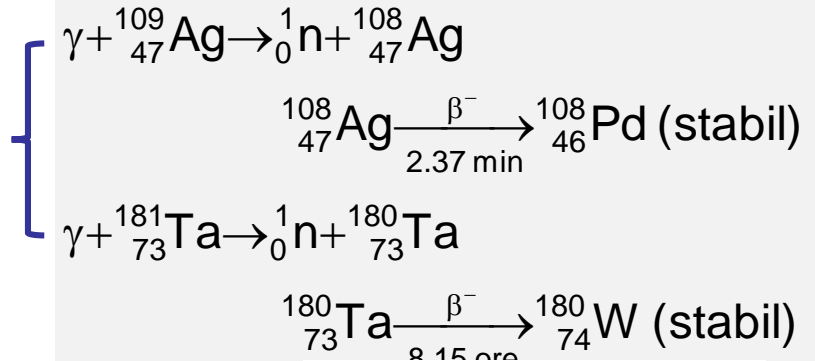


- **Condiția de realizare** este ca energia radiației γ să fie mai mare decât energia de legătură a nucleonilor în nucleu
- Pentru energii ale radiației γ sub 20 MeV, reacția cea mai probabilă este cea de eliminare a unui neutron din nucleu (γ, n)

✓ dacă nucleul țintă are numărul de masă **$A < 100$** nucleul rezidual-radioactiv β^+ sau e_k

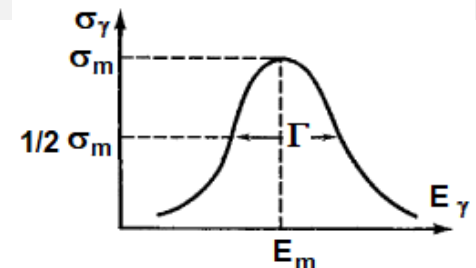


✓ dacă nucleul țintă are numărul de masă **$A > 100$** , nucleul rezidual-radioactiv β^-

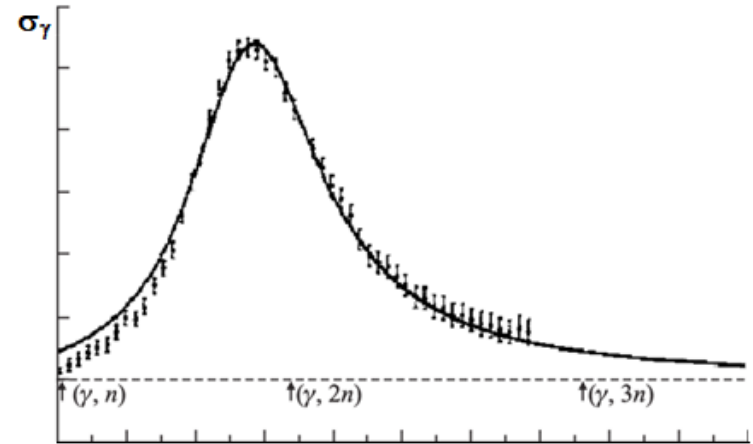


- La energii intermediare sunt caracterizate de rezonanțe

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\Gamma^2/4}{(E - E_R)^2 + \Gamma^2/4}$$



- Pentru energii ale radiației γ peste 20 MeV sunt probabile reacții de tip (γ, p) , $(\gamma, 2n)$, (γ, np) și (γ, α) iar la energii de peste 100 MeV au loc și reacții cu emisie de mai multe particule.



$$\sigma(\gamma, \text{abs}) = \sigma(\gamma, \text{sn}) + \sigma(\gamma, p) + \sigma(\gamma, 2p) + \sigma(\gamma, d) + \sigma(\gamma, d p) + \sigma(\gamma, \alpha) + \dots$$

- Reacțiile fotonucleare cu emisie de protoni (γ, p) au loc în special cu nuclee ușoare.

Exemplu: $E_\gamma \sim 160\text{-}350$ MeV, se generează reacțiile de tipul:

