STRUCTURA SUBATOMICĂ

Standard Model of

FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

FERMIONS

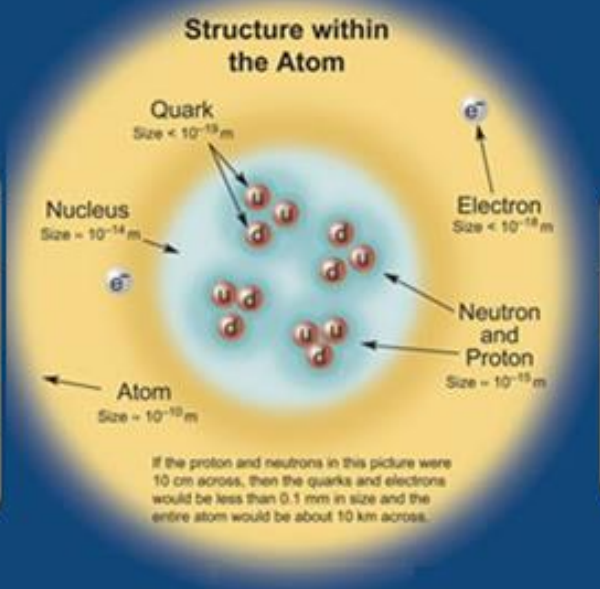
matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c²	Electric charge
ν_1 lightest neutrino*	$(0-0.13)\times10^{-9}$	0
e electron	0.000511	−1
ν_2 middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times10^{-9}$	0
μ muon	0.106	−1
ν_3 heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times10^{-9}$	0
τ tau	1.777	−1

Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c²	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	−1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	−1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	−1/3



BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.39	−1
W^+	80.39	+1
W bosons		
Z^0 Z boson	91.188	0

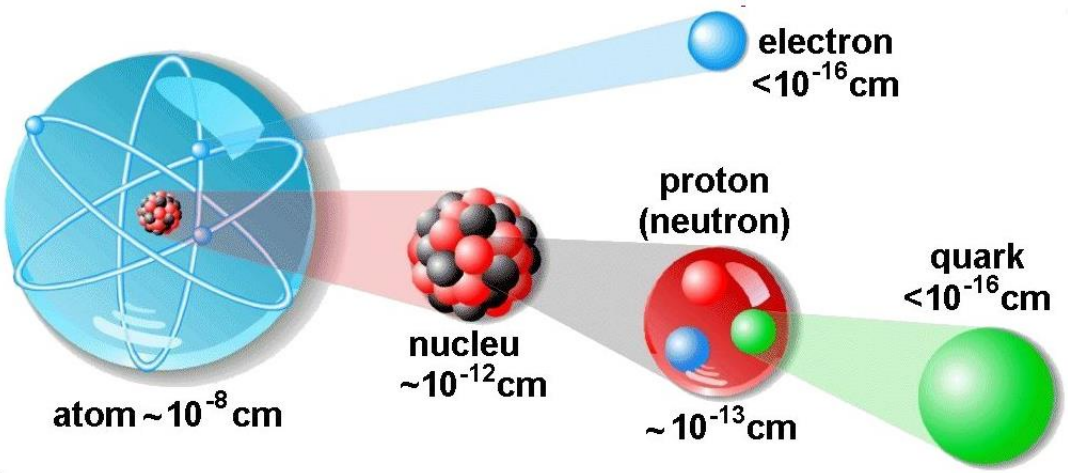
Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c²	Electric charge
g gluon	0	0

Interactions

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25
Strength at 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60

STRUCTURA SUBATOMICĂ



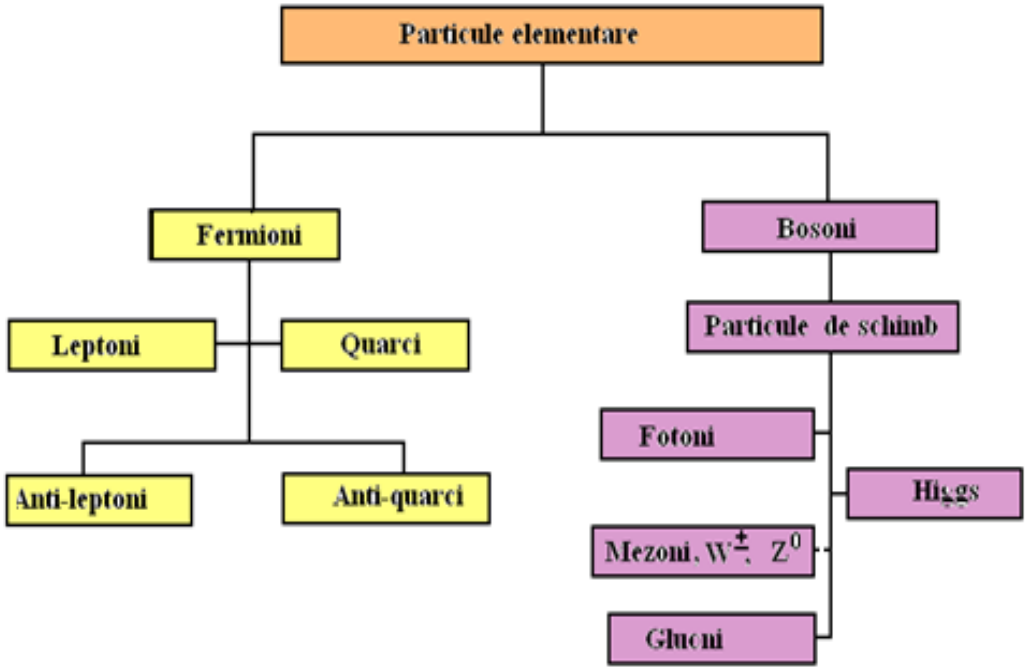
Tabelul particulelor elementare

3 generatii de fermioni

	I	II	III	Bosoni (interactiuni)
masa→ / sarcina→ / spin→ / nume→	2.4 MeV, ⅔, ½, u, up	1.27 GeV, ⅔, ½, c, charm	171.2 GeV, ⅔, ½, t, top (truth)	0, 0, 1, γ, photon (electromagnetic)
Quarci	4.8 MeV, -⅓, ½, d, down	104 MeV, -⅓, ½, s, strange	4.2 GeV, -⅓, ½, b, bottom (beauty)	0, 0, 1, g, gluon (strong force)
	<2.2 eV, 0, ½, ν_e, electron neutrino	<0.17 MeV, 0, ½, ν_μ, muon neutrino	<15.5 MeV, 0, ½, ν_τ, tau neutrino	91.2 GeV, 0, 0, 1, Z, weak force
Leptoni	0.511 MeV, -1, ½, e, electron	105.7 MeV, -1, ½, μ, muon	1.777 GeV, -1, ½, τ, tau	80.4 GeV, ±1, 1, W±, weak force

115-185 GeV, ±1, 0, H±, higgs boson

descoperit experimental la CERN in 2012 si comfirmat in 2013



STRUCTURA ŞI CARACTERISTICILE NUCLEULUI

➢ Structura protono-neutronică a nucleului

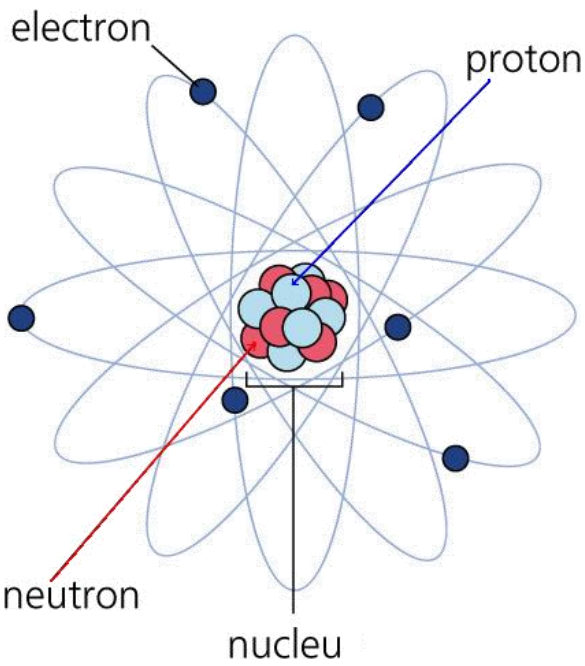
✓ ***Ernest Rutherford*** *– din împrăştierea particulelor* ***α*** *a dedus că atomul este constituit dintr-un înveliş de sarcini negative şi o regiune centrală de sarcină pozitivă, de dimensiuni mici în care este concentrată aproape toată masa atomului*

✓ Cel mai mic nucleu, (hidrogen) - *proton* – Rutherford-1919- prima reacţie nucleară

$$\boxed{{}^{4}_{2}\alpha + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{17}_{8}O - 1.26\ MeV}$$

şi o specie "*protono-electronică*" neutră

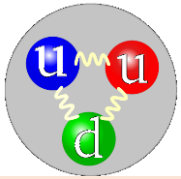
✓ 1932 - ***James Chadwick*** descoperă ***neutronul***



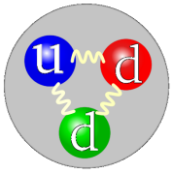
protonul - sarcină pozitivă şi masă egală cu masa nucleului de hidrogen (m_p=*1.008142*)

neutronul - sarcină electrică nulă şi masă foarte apropiată de ce a protonului (m_n=*1.008982*)

- Protonul şi neutronul au spinul $S=1/2$ şi se pot combina paralel $S_p+S_n=1$ sau antiparalel $S_p+S_n=0$
- Protonul şi neutronul reprezintă două stări cuantice ale aceleiaşi particule unice numită generic *nucleon*. Stările cuantice ale nucleonilor sunt reflectate în numărul de protoni şi neutroni şi de modul lor de interacţiune
- Protonii şi neutronii au ca structura fundamentală quarcii între care se manifestă interacțiunea tare a cărei constantă de schimb sunt gluonii



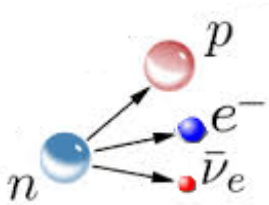
Proton (uud)

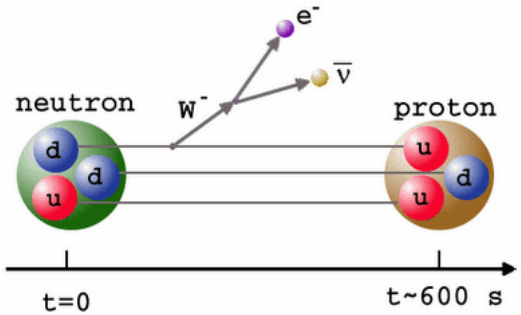


Neutron (udd)

- *Quarcii sunt constituenţii fundamentali ai materiei, care prin combinaţii specifice formează protoni, neutroni şi alte particule grele.*

- Protonul este practic stabil (timpul de înjumătăţire este apreciat la circa 10^{36} ani), în timp ce neutronul se dezintegrează după aproximativ 13 minute într-un proton, un electron şi un antineutrino (dezintegrarea β)





- *Nuclid* - specie atomică caracterizată printr-o anumită constituţie a nucleului, (protoni şi nucleoni) şi prin modul lor de aranjare.

- Sarcina unui nucleu este dată de numărul protonilor din nucleu (Z)
- Masa acestuia este caracterizată de numărul total de de nucleoni (A)

- Raportul dintre numărul de protoni şi neutroni şi de modul lor de interacţiune definesc speciile nucleare

Numărul de masă (numărul total de nucleoni)

Numărul de ordine (numărul de protoni-sarcina)

$$^{A}_{Z}X_{N}$$

Numărul de neutroni N=A-Z

- ***Izotopii*** - nuclizi cu acelaşi număr de protoni (*Z* constant) dar cu număr diferit de neutroni (*A* diferit). În general sunt cam 3-9 izotopi pentru un element

$$^{13}_{7}N,\ ^{14}_{7}N,\ ^{15}_{7}N$$

Izotopi naturali: *339 de nuclizi din care aprox. 250 (74%) sunt stabili*
Izotopi naturali + artificiali: *peste 3100*

- ***Izobarii*** - nuclizi cu aceleşi număr de nucleoni (*aceiaşi masă* - A constant) însă cu numere de protoni diferite (*Z* diferit):

$$^{14}_{7}N,\ ^{14}_{8}O,\ ^{14}_{9}F$$

- ***Izotonii*** - nuclizi cu acelaşi număr de neutroni (N=A-Z constant), dar cu numere diferite de nucleoni (A - diferit) şi de protoni (Z - diferit)

$$^{14}_{6}C_{8},\ ^{15}_{7}N_{8},\ ^{16}_{8}C_{8}$$

- ***Izomerii*** - nuclizi cu acelaşi număr de protoni (*Z* - constant) şi acelaşi număr de neutroni (*N* constant), însă se deosebesc prin energiile de excitare nucleară sau constantele de dezintegrare

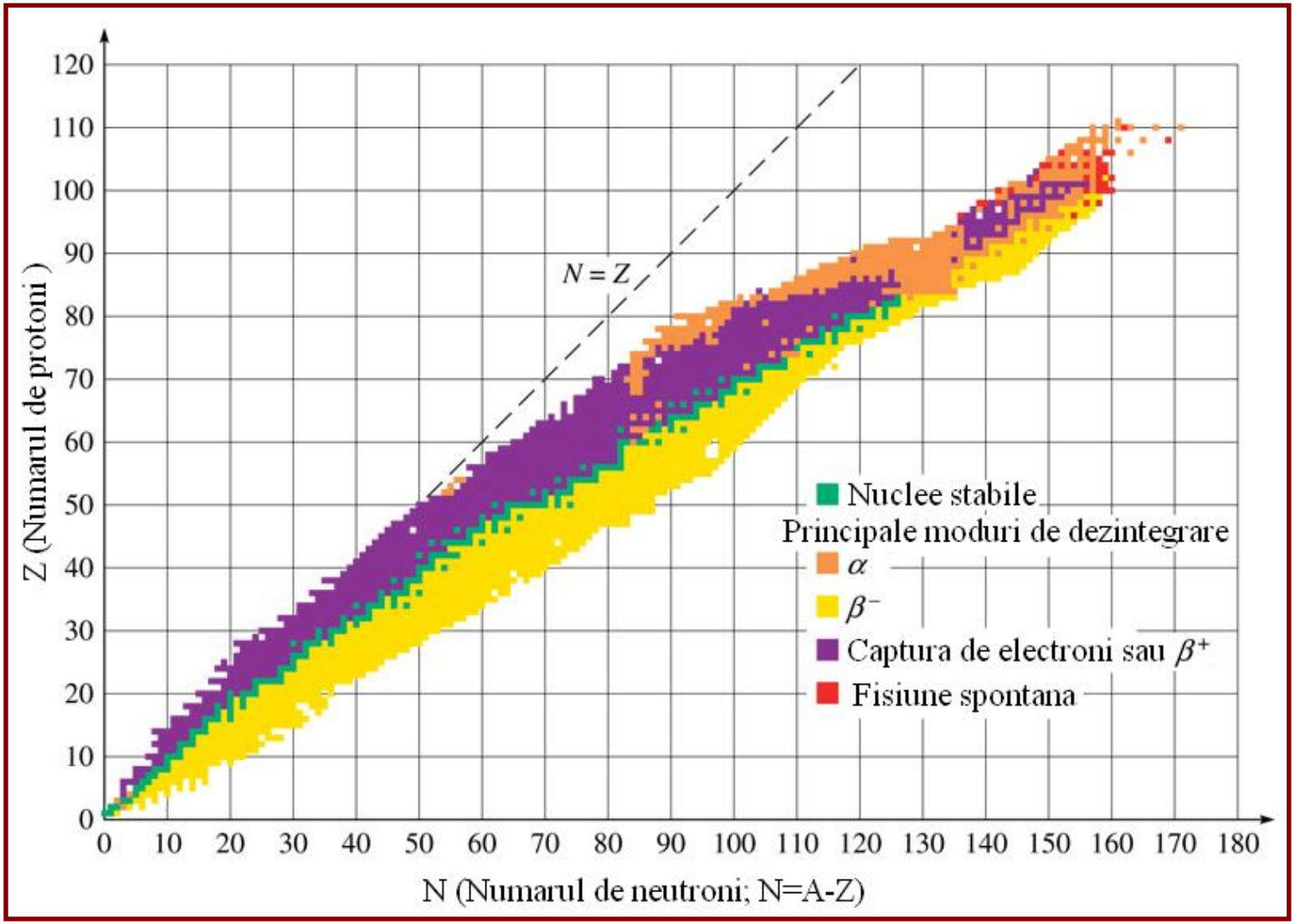
$$^{80m}_{35}Br(T_{\frac{1}{2}} = 4.42\ \text{ore}) \qquad ^{80}_{35}Br(T_{\frac{1}{2}} = 17.68\ \text{min})$$

- ***Nuclee oglindă*** - perechi de nuclizi pentru care numărul de protoni (*Z*) dintr-un nuclid este egal cu numărul de neutroni (*N*) ai celuilalt; structură de interschimb între nucleoni:

$$^{15}_{7}N_{8} \qquad ^{15}_{8}O_{7}$$

✓ *Datorită structurii nucleonice similare, nucleele oglindă au structuri nucleare intrinseci identice, determinate de natura forţelor nucleare*

Stabilitatea nucleară

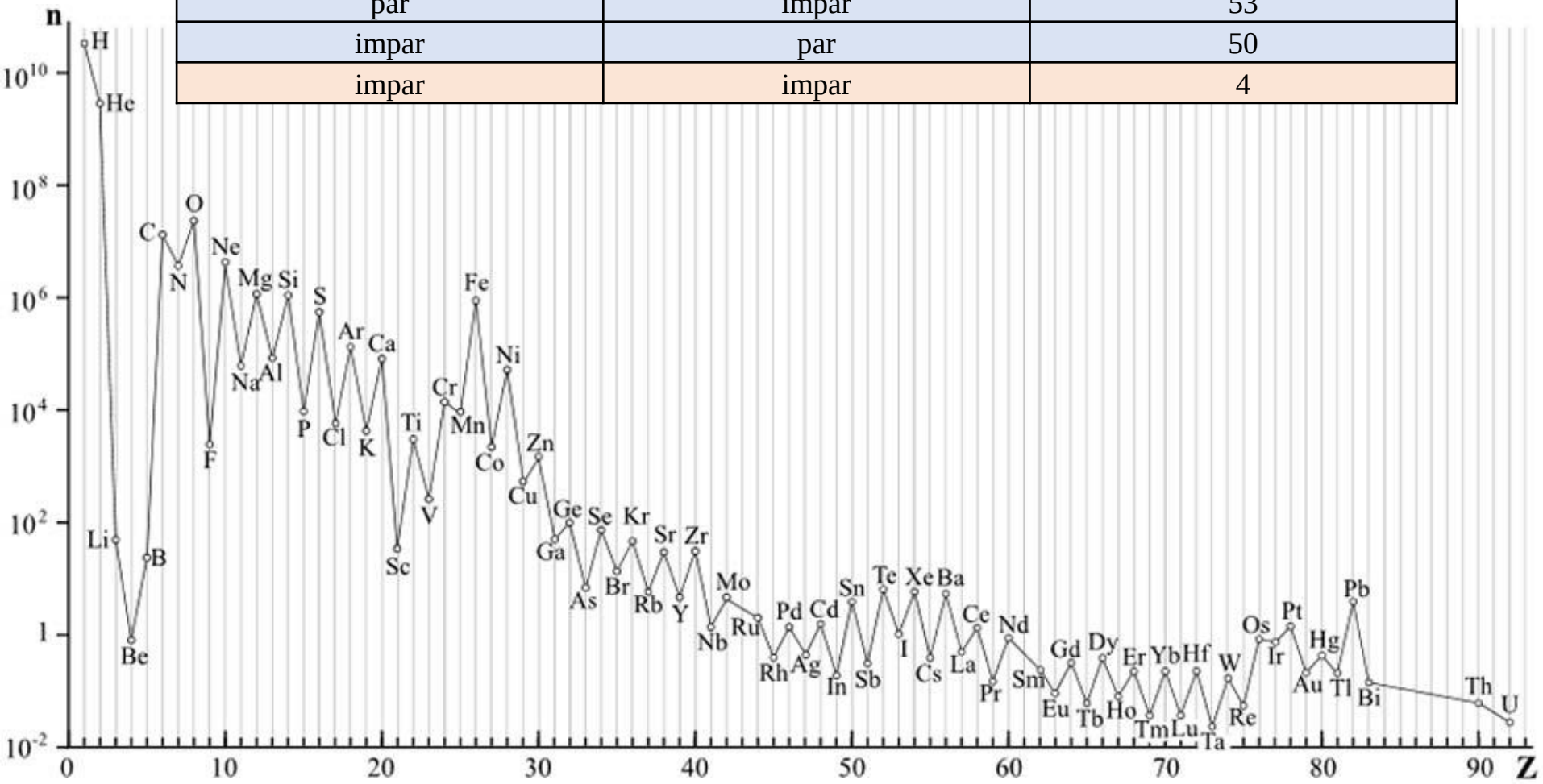


Factori principali determină stabilitatea nucleară;

- *raportul nr. neutroni / nr. protoni*
- *numărul total de nucleoni din nucleu*

Abundența elementelor în Univers

Distribuţia izotopilor stabili și instabili în funcţie de numărul de protoni(Z) și neutron(N)		
Număr de Protoni (Z)	**Număr de neutron (N=A-Z)**	**Număr de izotopi stabili**
par	par	163
par	impar	53
impar	par	50
impar	impar	4



Abundența elementelor scade exponențial cu numărul atomic (Z). Litiu, beriliu și bor sunt excepții.

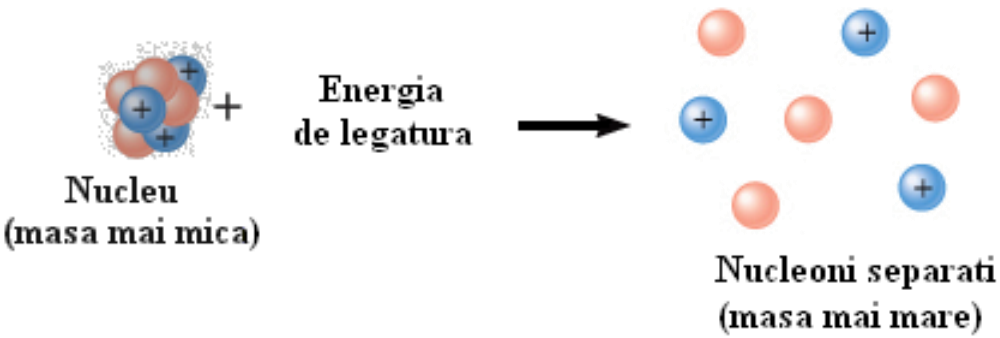
Masa şi energia de legătură per nucleon

$$M_{nucleu}(A,Z)c^2 = M_{atom}(A,Z)c^2 - \left[Zm_e c^2 + B_e(Z)\right]$$

m_e - masa de repaus a electronului (m_e = 0.510 998 902 MeV/c^2)
$B_e(Z)$ - *energia de legătură* a electronului

$$M_{nucleu}(A,Z) < Zm_p + (A-Z)m_n$$

$$B_e(Z) = 15.73 \cdot Z^{\frac{7}{3}}\ \text{eV}$$



m_p - masa protonului
(m_p= *1.00727646688 u.a.m*
sau 938.272 MeV/c^2)
m_n- este masa neutronului
(m_n= *1.0086649158 u.a.m*
sau 939.56533 MeV/c^2)

$$\text{Diferenta } \Delta M = M_{nucleu}(A,Z) - \left[Zm_p + (A-Z)m_n\right]$$ defect de masã

- **Defectul de masă** (mărime negativă) - este proporţională cu energia de legătură totală a nucleonilor (tabelată pentru toţi nuclizii)

$$B_{totala}(A,Z) = -\Delta M \cdot c^2 = \left[Z\, m_p + (A-Z)\, m_n - M_{nucleu}(A,Z)\right]c^2$$

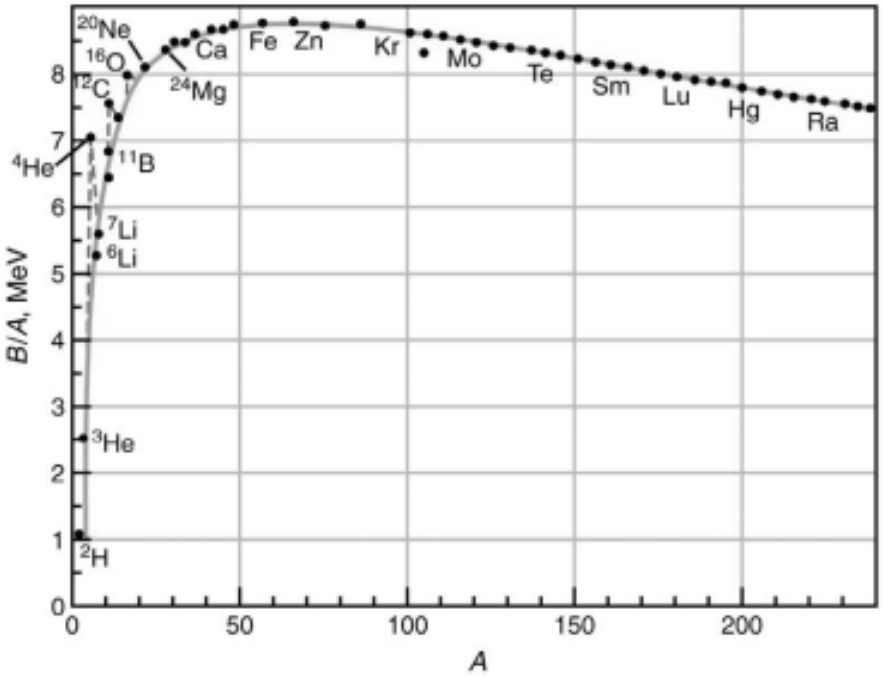
- *Energia medie per nucleon*

$$B_{medie} = \frac{B_{totala}(A,Z)}{A}$$

➢ ***Energia de legatură per nucleon*** - măsură a stabilităţii unui nucleu atomic

➢Cea mai mare stabilitate o au elementele cu număr de masă mediu (maximul pentru *Fe-Ni).*

➢Nucleele cu număr de masă mare îşi pot creşte stabilitatea prin fragmentare (*fisiune)* în timp ce nucleele cu număr de masă mic, prin unirea acestora (*fuziune*)



➢ O parte din nuclee, din domeniul de la *A*=40 (^{40}Ar) la *A*=120 (^{120}Sn) - independenţă relativă a energiei de legătură per nucleon, de numărul de masă *A* (între 8.6 MeV şi 8.8 MeV)

➢ Maxime ale energiei de legătură per nucleon (^{4}He, ^{12}C, ^{16}O, ^{20}Ne) –configuraţie stabilă

➢ Pentru valori mari ale numărului de masă (A>120), energia medie de legătură per nucleon scade, ca urmare a influenţei mai pronunţate a forţelor coulombiene, atingând o valoare de circa 7.3 MeV pentru ^{238}U.

➢ ***Energia de separare*** - energia necesară extracţiei unui nucleon (proton sau neutron) şi îndepărtarea acestuia departe de raza de acţiune a forţelor nucleare

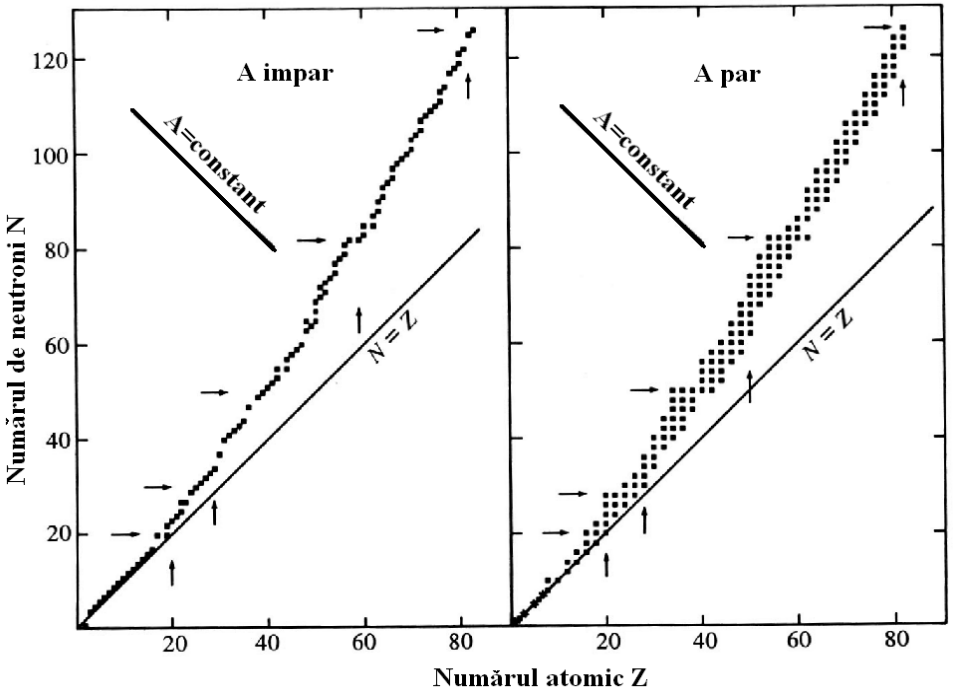
- Energia de separare pentru protoni şi neutroni se poate exprima prin:

$$S_n = [M(A-1,Z) + M(n) - M(A,Z)]c^2$$
$$S_p = [M(A-1,Z-1) + M(p) - M(A,Z)]c^2$$

- Pentru un element dat (*Z=constant, izotopii*), energia de separare a neutronilor S_n este mai mare pentru izotopi cu număr de neutroni N par decât pentru cei cu N impar.

- Pentru elemente cu acelaşi număr de neutroni (*N=constant, izotoni*), energia de sparare a protonilor S_p, este mai mare pentru nucleele cu număr de protoni Z par decât pentru cei cu număr de protoni Z impar

- Efectele se datoresc exercitării forţelor nucleare între perechile de nucleoni (*protoni sau neutroni*) cuplaţi cu spinii antiparaleli, astfel că nucleele par-pare (*Z par, N par*) sunt mai stabile decât nucleele impar-pare sau par-impare şi care la rândul lor sunt mai stabile decât nucleele impar-impare (*energia de împerechere*)



Formula semiempirică a masei nucleare

- Parametrizare semiempirică a energiei de legătură în funcţie de numărul atomic de masă A şi de numărul de ordine Z (C.F.Weizsäcker, 1935)

$$B_{tot}(A,Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} \pm \delta$$

a_v, a_s, a_c, a_a- *parametri semiempirici*

$a_v A$ - *termen de volum* - contribuţia tuturor nucleonilor din volumul nucleului

$a_s A^{2/3}$ - *termen de suprafaţă* -nu toţi nucleonii au vecinăţăţi complete

aria πR^2 iar $R = R_0 A^{1/3}$ $\Rightarrow$ $\propto \pi R^2 = \pi R_0^2 A^{2/3} = a_s A^{2/3}$

$a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$ - *termenul coulombian* -reflectă energia de repulsie dintre protonii din nuclee

din $E_{Coulomb} = -\frac{3}{5}\frac{Z^2 e^2}{R}$ cu $R = R_0 A^{1/3}$ $\Rightarrow$ $E_{Coulomb} = -a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$

$\frac{(A-2Z)^2}{A} = \frac{(N-Z)^2}{A}$ - *termen de asimetrie – cu cât asimetria relativă dintre numărul de neutroni şi protoni creşte faţă de numărul total de nucleoni, energia de legatură scade*

δ - *termen de împerechere –* consideră cuplajul spinilor nucleonilor în nucleu pentru un anumit nivel energetic în conformitate cu principiul lui Pauli

$$\delta(A,Z) = \begin{cases} a_p A^{-1/3} & \text{pentru nuclee par – pare} \\ 0 & \text{par – impare sau impar – pare} \\ -a_p A^{-1/3} & \text{pentru nuclee impar – impare} \end{cases}$$

- *Valorile experimentale ale termenilor din relaţia semiempirică:*

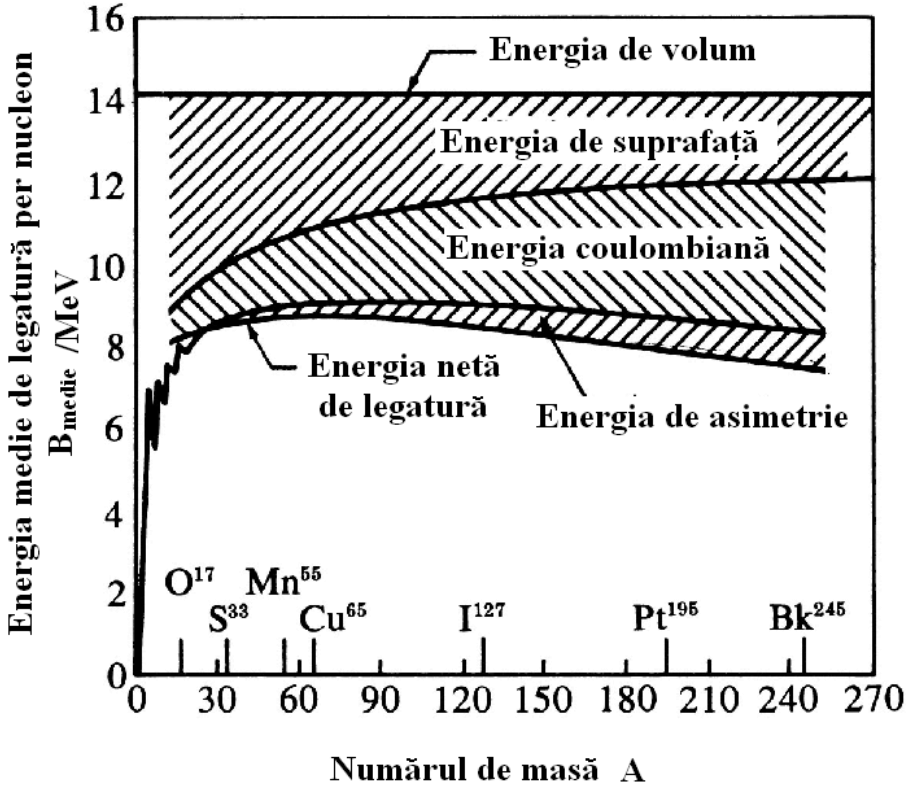
$$a_v = 15.75\,\text{MeV}$$

$$a_s = 17.8\,\text{MeV}$$

$$a_c = 0.711\,\text{MeV}$$

$$a_a = 23.7\,\text{MeV}$$

$$a_p = 11.18$$



$$M_{nucleu}(A,Z) = \left[Z\,m_p + (A-Z)\,m_n\right] - \frac{1}{c^2}\left[a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_a\left(A - 4Z + \frac{4Z^2}{A}\right) \pm \delta\right] =$$

$$= \underbrace{A\left[m_n - \frac{1}{c^2}a_v + \frac{1}{c^2}\frac{a_s}{A^{1/3}} + \frac{1}{c^2}a_a \pm \frac{1}{c^2}\frac{\delta}{A}\right]}_{\alpha} + Z\underbrace{\left[m_p - m_n - 4\frac{1}{c^2}a_a\right]}_{\beta} + Z^2\underbrace{\left[\frac{1}{c^2}\frac{a_c}{A^{1/3}} + \frac{1}{c^2}\frac{4a_a}{A}\right]}_{\gamma}$$

$$\boxed{M_{nucleu}(Z) = \alpha + \beta Z + \gamma Z^2}$$

- Termenul lui $\mathbf{Z^2}$ **(γ)** este pozitiv şi ca urmare reprezentarea grafică este o parabolă cu valoarea minimă pentru valori concrete ale numărului de ordine Z_A. Minimul acestei funcţii îl obţinem din condiţia:

$$\frac{dM(Z)}{dZ} = 0 = \beta + 2\gamma Z_A \Rightarrow Z_A = -\frac{\beta}{2\gamma} = -\frac{m_p - m_n - 4\frac{1}{c^2}a_a}{2\left(\frac{1}{c^2}\frac{a_c}{A^{1/3}} + \frac{1}{c^2}\frac{4a_a}{A}\right)}$$

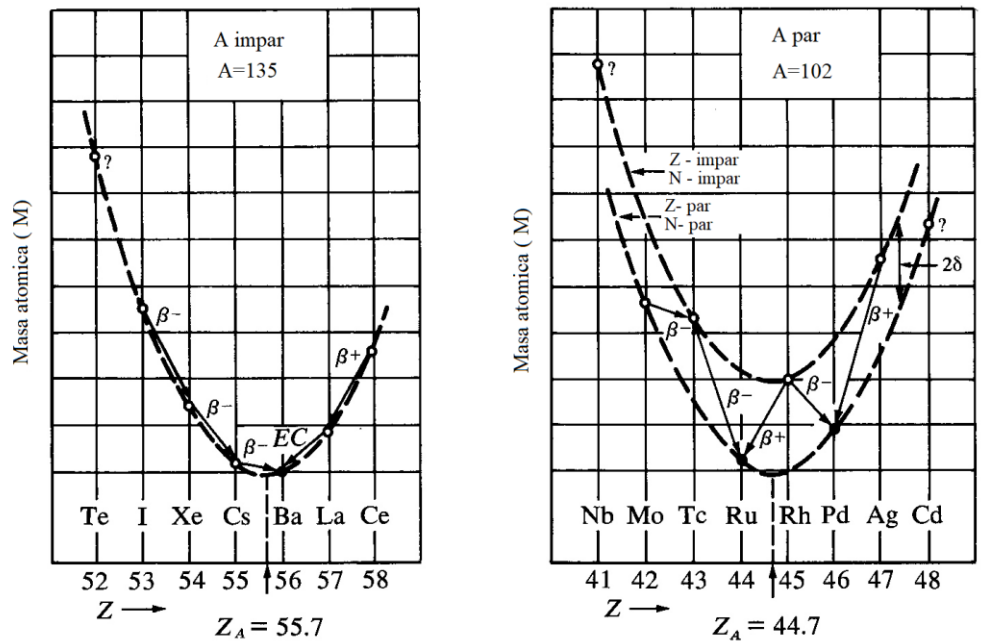
- ✓ Folosind valorile numerice şi împărţind cu A rezultă

$$\frac{Z_A}{A} \cong \left(\frac{1}{2}\right)\frac{96}{0.7A^{2/3} + 95}$$

- ✓ Poziţia valorii minime a masei pentru fiecare număr de masă A, poartă numele de *vale de stabilitate nucleară*

A mic ⇒ $\frac{Z_A}{A} \cong \frac{1}{2}$ ⇒ $Z_A = N = \frac{A}{2}$

A mare ⇒ $\frac{Z_A}{A} < \frac{1}{2}$



✓ *Când numărul de protoni este mai mare decât numărul neutronilor, contribuţia termenului coulombian duce la o scădere a stabilităţii. Creşterea stabilităţii nucleului poate avea loc prin transformarea protonilor în neutroni. (dezintegrare β^+).*

Dimensiunea şi forma nucleului

- Nucleul-*sistem cuantic* - se supune principiului de incertitudine ale lui Heisenberg - dimensiunile nu se poate determina cu exactitate

$$\Delta r \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} = \hbar$$

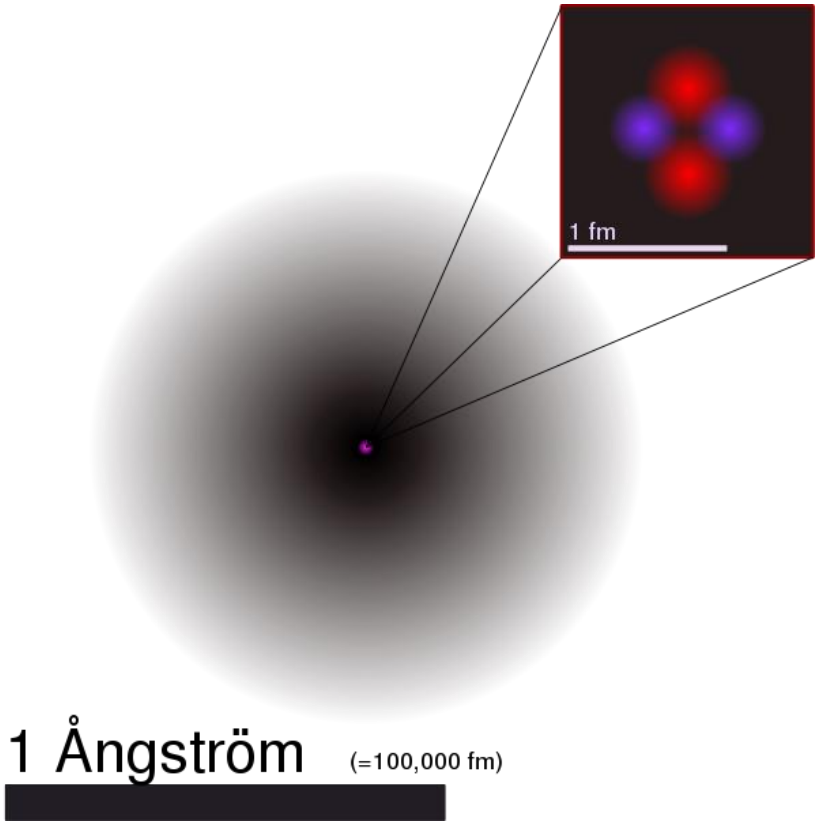
- O evaluare se poate face considerând nucleul picatură de lichid incompresibilă cu volumul proporțional cu numărul de nucleoni **A**:

$$V_{nucleu} \propto A$$

  - ✓ Presupunând că nucleul este sferic de rază *R*

$$V_{nucleu} = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad \text{rezultă}$$

$$R^3 \propto A \quad \Rightarrow \quad R = R_0 A^{1/3}$$



R_0 - unitate de rază nucleară

- ✓ valori între $1.2 \cdot 10^{-13}$*cm* şi $1.4 \cdot 10^{-13}$*cm*
- ✓ unitate de măsură - *fm* (Fermi); ***1fm=10^{-13}cm***

Densitatea materiei nucleare

- În aproximaţia picăturii sferice şi o distribuţie uniformă a nucleonilor în nucleu:
  - Numărul de nucleoni per unitatea de volum:

$$N_{nucleoni} = \frac{A}{V_{nucleu}} = \frac{A}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 A} \cong \frac{1}{7.23\cdot 10^{-39}\,cm^3} \cong 1.4\cdot 10^{38}\,\frac{nucleoni}{cm^3}$$

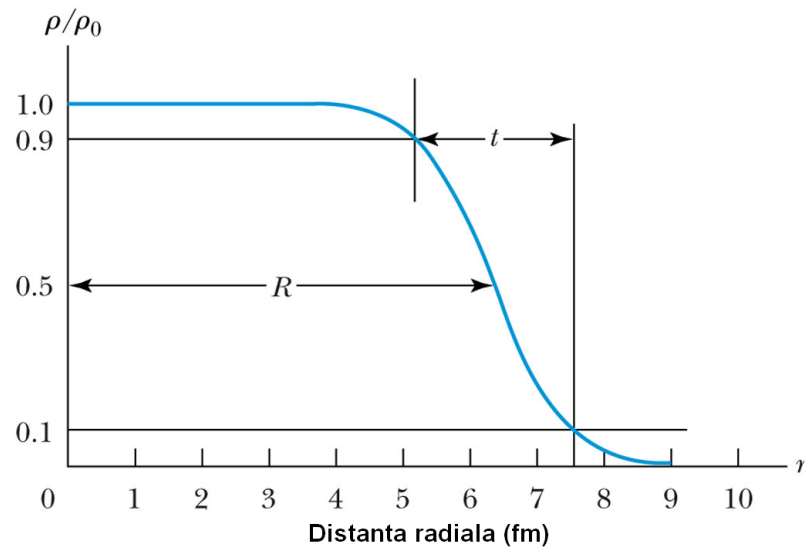
  - densitatea materiei nucleare

$$\rho_{nucleu} = \frac{M_{nucleu}}{V_{nucleu}} = \frac{A\ uam}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 A} \cong \frac{1.66\cdot 10^{-27}\,Kg}{7.23\cdot 10^{-39}\,cm^3} \cong 2.3\cdot 10^{11}\,\frac{Kg}{cm^3}$$

✓ O reprezentare mai realistă privind dimensiunea şi densitatea materiei nucleare - nu este constantă ci are o distribuţie *ρ(r)* de tip Fermi:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1+e^{(r-R)/a}} \qquad \text{cu} \quad \rho_0 = 0.172\,\frac{nucleoni}{fm^3}$$

este densitatea în interiorul nucleului



a - masură a difuzivitaţii suprafeţei nucleare
R - raza nucleului la jumătatea densităţii

Spinul şi paritatea

- ***Momentul cinetic de spin al nucleului*** - existenţa structurii hiperfine a liniilor spectrale
  - ✓ neutronul şi protonul au momentul cinetic de spin $s_n = s_p = \frac{1}{2}\hbar$
  - ✓ *nucleonii pot ocupa nivele energetice caracterizate de momentul cinetic orbital l, astfel că un nucleon individual este caracterizat de un moment cinetic individual* $\vec{j} = \vec{l} + \vec{s}$
- Pentru un nucleu cu mai mulţi neutroni şi protoni, momentele cinetice de spin individuale $\boldsymbol{j_i}$, se cuplează conducând la un moment cinetic de spin al nucleului **I**

$$\vec{I} = \sum_i \vec{j}_i \qquad \text{cu valorile proprii} \qquad \langle \vec{I}^2 \rangle = \hbar^2 I(I+1)$$

- Pentru un atom caracterizat de un moment cinetic orbital total J, contribuţia momentului cinetic de spin nuclear I, va duce la un moment cinetic total al atomului F

$$\vec{F} = \vec{J} + \vec{I} \qquad \text{cu valori vor fi cuprinse între} \qquad |I - J| \le F \le I + J.$$

- Interacţiunea hiperfină elimină degenerarea nivelelor energetice după momentul cinetic total **F** şi despică nivelele în 2J+1 componente dacă J<I sau în 2I+1 componente dacă J>I.

➡ Nucleele cu numărul de masă A impar, au spinul semiîntreg; I=1/2, 3/2, 5/2, etc.

➡ Nucleele cu numărul de masă A par au:

I=0 pentru cele par-pare (Z=par, N=par)

I=1 pentru nucleele impar-impare (Z=impar, N=impar)

- ***Paritatea*** – proprietate de simetrie a funcţiilor de undă a particulelor sau a sistemelor de particule

$$\Psi(\vec{r},\vec{s}) = +\Psi(-\vec{r},-\vec{s})$$ *paritate pozitivă*

$$\Psi(\vec{r},\vec{s}) = -\Psi(-\vec{r},-\vec{s})$$ *paritate negativă*

- ✓ Pentru un potenţial central ($V = V(r)$), energia depinde numai de distanţă şi nu de orientarea spaţială (*paritatea se notează cu* π)

$$\pi = (-1)^{l}$$ l - momentul cinetic orbital al sistemului

- Spinul şi paritatea unei stări nucleare date, sunt caracteristici proprii unei anumite configuraţii.
- Notaţia utilizată în fizica nucleară şi care se referă la o anumită stare este:

  $\mathbf{I^P}$ (spinul^{paritatea})

Momentul electric cuadrupolar al nucleului

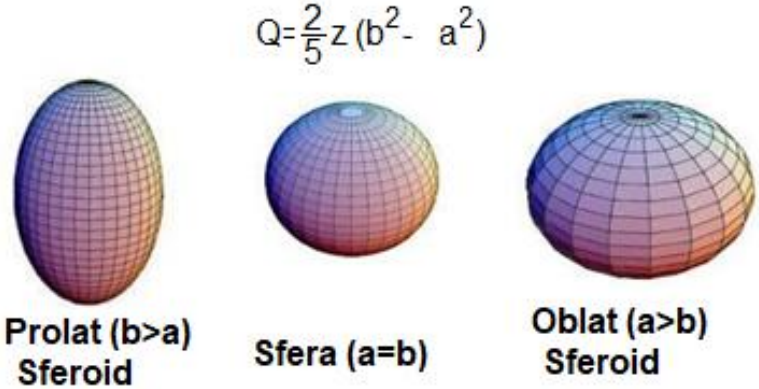
- Anumite nuclee nu au o forma sferică şi din punct de vedere al interacţiunii electromagnetice poate fi privit ca o distribuţie de sarcini positive, care poate determina momentele electrice nucleare . O măsură a gradului de deformare de la forma sferică a nucleelor este data de momentul de cuadrupol.

- ✓ Analog cu fizica clasică, se defineşte operatorul moment electric cuadrupolar $(3z^2 - r^2)$ pentru un ansamblu de sarcini Q:

$$Q=\int \Psi < (3z^2 - r^2) > \Psi d\vec{r}$$

- ✓ Legătura dintre funcţia de unda **ψ** şi densitatea de sarcină (protoni din nucleu) este dată de :

$$|\boldsymbol{\Psi}|^2 = \boldsymbol{\rho}$$



- ✓ Dacă nucleul se consideră ca fiind distribuit uniform cu sarcini electrice şi este sub forma de un elipsoid

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$$ şi ca urmare $$Q_0 = \frac{2}{5} z(b^2 - a^2)$$

- Pentru un nucleu cu numărul cuantic cinetic total egal cu J > 0 :

$$Q = \frac{2J - 1}{2(J + 1)} Q_0$$

Momentul magnetic

- Moment cinetic de spin nuclear **I** - existenţa unui moment magnetic $\vec{\mu}_I$
- Măsură a distribuţiei curenţilor electrici din nucleu şi explică existenţa structurii hiperfine a spectrelor

✓ Analog momentului magnetic al electronilor (sarcina protonilor este egală şi de semn opus cu cea a electronilor)

$$\vec{\mu}_I = g_N \frac{e\hbar}{2 m_N c} \vec{I}$$

g - este factorul giromagnetic pentru nucleu
m_N - masa nucleonului (proton sau neutron)
c - viteza luminii în vid

$$\boxed{\frac{e\hbar}{2 m_N c} = 5.05078324 \cdot 10^{-27} \frac{J}{T} = \mu_N}$$

magneton nuclear - *este mai mic de 1837 ori decât magnetonul Bohr*

- Contribuţia la momentul magnetic nuclear este dată de momentele magnetice intrinseci de spin şi orbitale ale nucleonilor

$$\mu_{nucleon} = \mu^{l}_{nucleon} + \mu^{s}_{nucleon} = g^{l}_{nucleon} \cdot \mu_N \cdot l + g^{s}_{nucleon} \cdot \mu_N \cdot s$$

- Pentru proton $g^{l}_{nucleon}$=1 iar pentru neutron $g^{l}_{nucleon}$= 0 datorită faptului că sarcina acestuia este nulă

- ✓ Întrucât momentul cinetic de spin ale protonului protonului este egal cu al neutronului şi este egal cu 1/2

$$g^{s}_{nucleon} = \frac{2 \cdot \mu^{s}_{nucleon}}{\mu_N}$$

  - ✓ Măsurători experimentale

$$g_s(p) = 5.5856912$$

$$g_s(n) = -3.8260837$$

Natura forţelor nucleare

✓ Evaluarea tăriei interacţiunii - *constanta de cuplaj* (notată cu *α)*

➢ Interacţiuni fundamentale:

► gravitaţională

$$\alpha_G = G_N \frac{m_p m_e}{\hbar c} \approx 3 \cdot 10^{-41}$$

m_p - *masa protonului*
m_e – *masa electronului*

$$G_N = 6.7 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{Kg \cdot s^2}$$ *constanta atracţiei universale*

► slabă

$$\alpha_{slaba} = \frac{g_F^2}{\hbar \cdot c} \approx 5 \cdot 10^{-14}$$

g_F - constanta Fermi

► electromagnetică

$$\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137.035} \approx 7.3 \cdot 10^{-3}$$

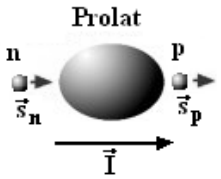
► tare

$$\alpha_{tare} = \frac{g_t}{\hbar \cdot c} \approx 14.8$$

Proprietăţi fundamentale ale forţelor nucleare

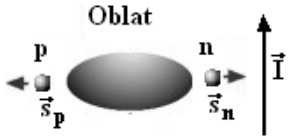
1. Forţele nucleare sunt *puternice* (constanta de cuplaj este de circa 14.8).
2. Sunt puternic atractive pentru distanţe, **r>d** (d fiind distanţa medie dintre nucleoni) şi putenic repulsive pentru distanţe **r<d** (d ≈0.4fm) ➡ densitatea materiei nucleare este relativ constantă în cea mai mare parte a miezului nucleului.
3. Au *rază scurtă de acţiune*, domeniu de manifestare este cuprins între 1 *fm* şi 2 *fm*, de ordinul dimensiunilor nucleului
4. Forţele nucleare au *proprietate de saturare* (valoare aproape constantă a energiei de legătură per nucleon de circa 8.5 MeV) ➡ un nucleon, interacţionează cu un număr puternic limitat de nucleoni învecinaţi
5. Au *caracter de schimb (*sunt dependente de stările spin şi de stările de sarcină ale nucleonilor). Schimbul de sarcină, spin şi coordonate spaţiale se realizează prin intermediul unei forţe nucleare care generează un câmp (*câmp mezonic*) caracterizat de o cuantă de acţiune care este *mezonul π*
6. Nu depind de sarcina electrică a nucleonilor; (*simetrie de sarcină* sau *independenţă de sarcină – nuclee oglindă*).
7. Depind de *orientarea relativă a spinilor* perechilor de nucleoni care interactionează şi ia în considerare cuplajul spinilor nucleonilor în nucleu pentru un anumit nivel energetic în coformitate cu principiul lui Pauli
8. *Nu sunt total centrale;* înafara componentei centrale, acestea conţin o componentă necentrală numită *forţă tensorială*, a cărei mărime depinde de unghiul dintre direcţia spinului şi dreapta care uneşte cei doi nucleoni

spinii neutronului şi protonului sunt orientaţi de-a lungul axei spinului nuclear (potential atractiv)



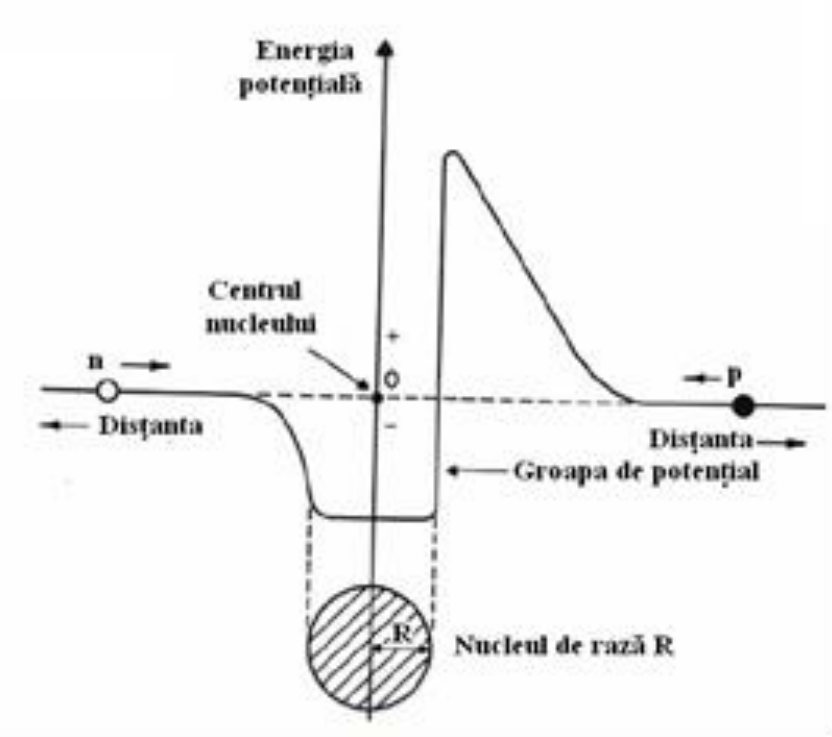
(elipsoid prolat)

spinii neutronului şi protonului sunt orientaţi perpendicular pe axa spinului nuclear (potential repulsiv)



(elipsoid oblat)

- Interacţiunile dintre nucleonii din nucleu ➡ existenţa unei gropi de potenţial nuclear
- Forma gropii de potenţial este diferită pentru neutroni faţă de protoni



Potenţialul neutron-nucleu şi proton-nucleu în funcţie de distanţă

- La distanţe mari (***de peste câţiva fm***) nu există forţe de interacţiune dintre neutron şi nucleu.
- La distanţe mici (***~1 fm***) apar forţe de atracţie nucleare şi neutronul va fi absorbit de nucleu ajungând în centrul nucleului, cu energia cea mai joasă.
- Energia potenţială rămâne relativ constantă pe toată raza nucleară.
- În cazul protonului, la apropierea de nucleu apar forţele de respingere coulombiană care se manifestă printr-o barieră de potenţial proporţională cu 1/r

❑ Expresii matematice ale gropii de potenţialui nuclear

►Groapă pătrată de potenţial

$$V(r) = -V_0 (r \leq R), V(r) = 0 \ (r \geq R)$$

► Potenţial oscilator armonic

$$V(r) = -V_0\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]$$

► Potenţial Wood-Saxon

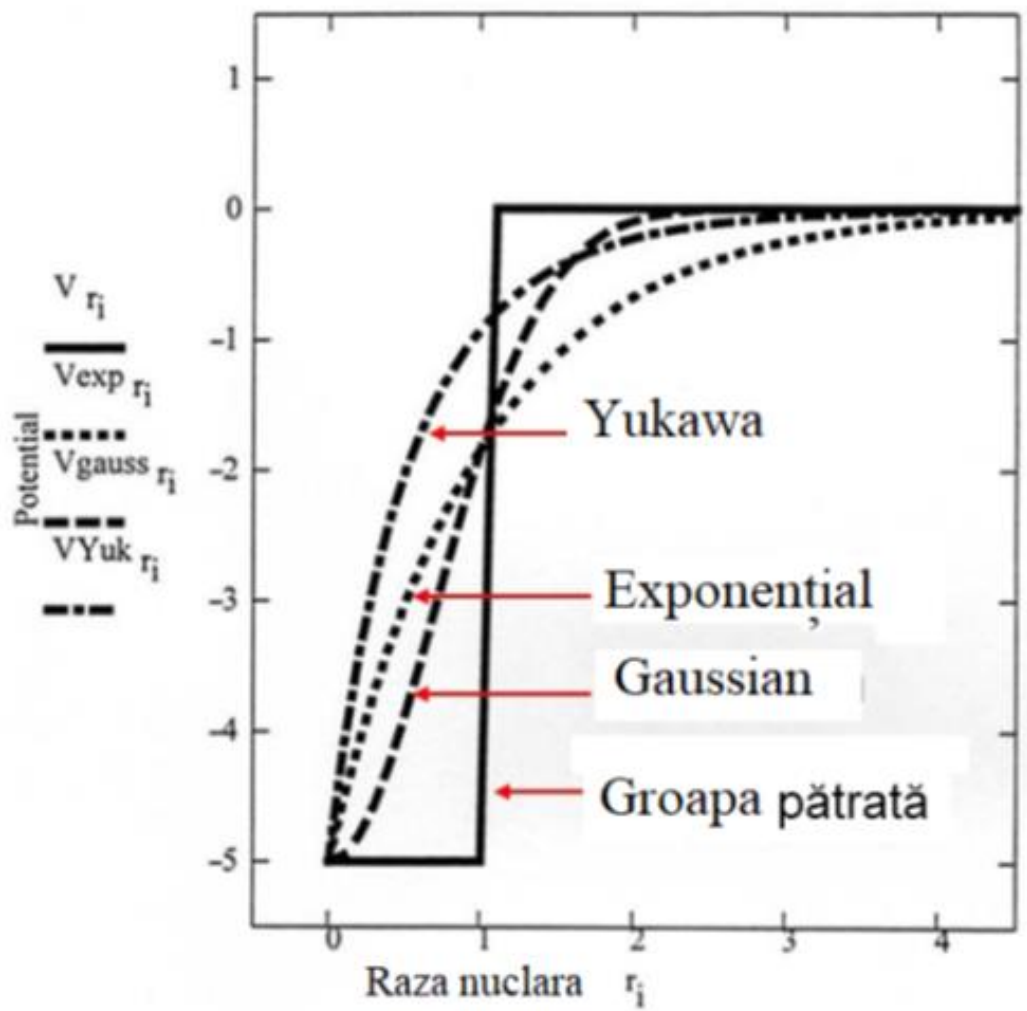
$$V(r) = \frac{V_0}{1+e^{\frac{r-R}{a}}}$$

► Potenţial exponenţial

$$V(r) = -V_0\, e^{-\frac{r}{R}}$$

► Potenţial Gaussian

$$V(r) = -V_0\, e^{-\frac{r^2}{R^2}}$$

► Potenţial Yukawa

$$V(r) = -V_0\left[\frac{e^{-\frac{r}{R}}}{\frac{r+1}{R}}\right]$$