

1. Bazele fizicii radiaționale

Cuprins

- 1.1. Introducere**
- 1.2. Structura atomică și nucleară**
- 1.3. Interacțiunea electronilor cu materia**
- 1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia**

1

- 1.1. Introducere**
- 1.2. Structura atomică și nucleară**
- 1.3. Interacțiunea electronilor cu materia**
- 1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia**

2

Bazele fizicii radiaționale

1.1. Introducere

1.2. Structura atomică și nucleară

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.1. Introducere

1.2. Structura atomică și nucleară

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

3

1. Bazele fizicii radiaționale

1.1. Introducere

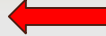
1.1.1. Constantele fizice fundamentale

- Numărul lui Avogadro: $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ atomi / g-atom.
- Numărul lui Avogadro: $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ molecule / g-mol.
- Viteza luminii în vid: $c = 299\,792\,458$ m / s ($\approx 3 \times 10^8$ m / s).
- Sarcina electron: $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C.
- Masă de repaus electron: $m_e = 0.5110$ MeV / c^2 .
- Masă de repaus pozitroni: $m_{e^+} = 0.5110$ MeV / c^2 .
- Masă de repaus proton: $m_p = 938.3$ MeV / c^2 .
- Masă de repaus neutron: $m_n = 939.6$ MeV / c^2 .
- Unitatea de masă atomică: $u = 931.5$ MeV / c^2 .
- Constanta lui Planck: $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J · s.
- Permitivitatea de vid: $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ C / (V · m).
- Permeabilitatea de vid: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (V · s) / (A · m).
- Constanta gravitației newtoniene: $G = 6.672 \times 10^{-11}$ m³ · kg⁻¹ · s⁻².
- Masa protonului / masa electronului: $m_p / m_e = 1836.0$.

4

1.1. Întroducere

1.1.2. Constante fizice derivate



•Reduced Planck's constant x speed of light in vacuum

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm} \cup 200 \text{ MeV fm}$$

•Classical electron radius

$$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} = 2.818 \text{ MeV}$$

•Bohr radius:

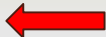
$$a_0 = \frac{\hbar c}{\alpha m_e c^2} = \frac{4\pi\epsilon_0 (\hbar c)^2}{e^2 m_e c^2} = 0.529 \text{ Å}$$

Electronvoltul, are simbolul eV, este o unitate de măsură pentru energie având ca valoare lucrul mecanic efectuat de un electron atunci când se deplasează între două puncte între care este o diferență de potențial (tensiune electrică) de 1 volt.

5

1.1. Întroducere

1.1.3. Cantități fizice și unități



•**Cantitățile fizice** sunt caracterizate prin valoarea lor numerică (magnitudine) și unitatea asociată.

•**Simbolurile** pentru cantitățile fizice sunt stabilite în **tip cursiv**, în timp ce simbolurile pentru unități sunt prevăzute cu caractere romane

De exemplu, $m = 21 \text{ kg}$; $E = 15 \text{ MeV}$.

•**Valoare numerică și unitatea de o cantitate fizică trebuie să fie separate de un spațiu**

De exemplu,

21 kg și nu 21kg , 15 MeV , și nu 15MeV).

6

1.1. Întroducere

1.1.3. Cantitățile fizice și unități

Sistemul metric de unitati utilizat în prezent este cunoscut ca *Système International d'unités* (International System of Units) - Sistemul Internațional de Unități cu prescurtarea internațională SI. Sistemul se bazează pe unitățile de bază pentru șapte cantitățile fizice de bază:

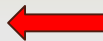
- ***l* - Lungime: metru (m).**
- ***m* - masa: kilogram (kg).**
- ***t* - Timp: secundă (s).**
- ***I* - Curent electric: amperi (A).**
- ***T* - Temperatura: kelvin (K).**
- **Cantitatea de substanță: mol (mol).**
- **Intensitatea luminii: candelă (cd).**

Physical quantity	Symbol	Unit in SI	Units used in radiation physics	Conversion
Length	<i>l</i>	m	nm, Å, fm	$1\text{ m} = 10^9\text{ nm} = 10^{10}\text{ Å} = 10^{15}\text{ fm}$
Mass	<i>m</i>	kg	MeV/c ²	$1\text{ MeV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-30}\text{ kg}$
Time	<i>t</i>	s	ms, μs, ns, ps	$1\text{ s} = 10^3\text{ ms} = 10^6\text{ μs} = 10^9\text{ ns} = 10^{12}\text{ ps}$
Current	<i>I</i>	A	mA, μA, nA, pA	$1\text{ A} = 10^3\text{ mA} = 10^6\text{ μA} = 10^9\text{ nA}$
Charge	<i>Q</i>	C	e	$1\text{ e} = 1.602 \times 10^{-19}\text{ C}$
Force	<i>F</i>	N		$1\text{ N} = 1\text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Momentum	<i>p</i>	N·s		$1\text{ N}\cdot\text{s} = 1\text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Energy	<i>E</i>	J	eV, keV, MeV	$1\text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19}\text{ J} = 10^{-6}\text{ keV}$

7

1.1. Întroducere

1.1.4. Clasificarea forțelor în natură



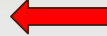
Există patru forțe distincte observate în interacțiunea între diferite tipuri de particule (W și Z – bosoni):

Force	Source	Transmitted particle	Relative strength
Strong	Strong charge	Gluon	1
EM	Electric charge	Photon	1/137
Weak	Weak charge	W ⁺ , W ⁻ , and Z ⁰	10 ⁻⁶
Gravitational	Energy	Graviton	10 ⁻³⁹

8

1.1. Întroducere

1.1.5. Clasificarea particule elementare



Două clase de particule fundamentale subatomice sunt cunoscute:

☐ **Cuarcii sunt particule care prezintă interacțiuni puternice**

Cuarcul este o particula elementara care interactioneaza prin forta nucleara puternica si care constituie materia "greă" (numita si barionica). Ipoteza existentei cuarcului a fost propusa de teoreticianul Murray Gell-Mann in 1964. Modelul Standard au 6 tipuri de cuarci, numiti "up", "down", "charm", "strange", "top" si "bottom". Obiectele alcătuite din cuarci sunt cunoscute sub numele de hadroni; exemple bine cunoscute sunt protonii și neutronii.

☐ **Leptonii sunt particule care nu interacționează puternic.**

Leptonii sunt particule de spin $\frac{1}{2}$ (fiind un fermion) care nu se supune fortei nucleare tari. Acestia formeaza o familie separata de particulele elementare, care este distincta fata de familia cuarc-urilor. Cel mai cunoscut lepton dintre toti este electronul, ce guverneaza aproape toata chimia atomului.

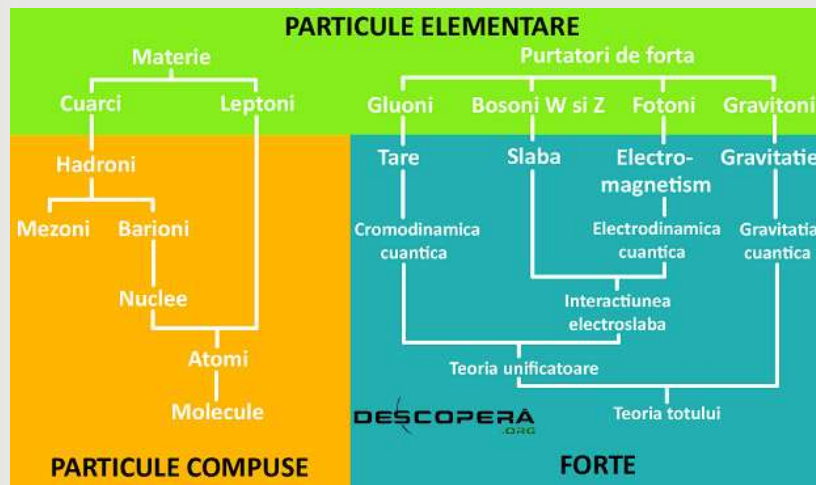


Un proton, compus din trei quarcuri: două quarcuri up (cu sarcina $+\frac{2}{3}$) și altul down cu sarcina $+\frac{1}{3}$

9

1.1. Întroducere

1.1.5. Clasificarea particule elementare

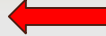


Un proton, compus din trei quarcuri: două quarcuri up (cu sarcina $+\frac{2}{3}$) și altul down cu sarcina $+\frac{1}{3}$

10

1.1. Introducere

1.1.6. Clasificarea de radiații



Radiația este clasificată în două categorii principale,

- **Radiație non-ionizantă** (nu poate ioniza materie).
- **Radiație ionizantă** (poate ioniza direct sau indirect):
 - **radiații direct-ionizante** (particule încărcate): electroni, protoni, alfa-particule și ioni grei
 - **radiații indirect-ionizante** (particule neutre): fotoni (raze X și raze gama), neutroni.

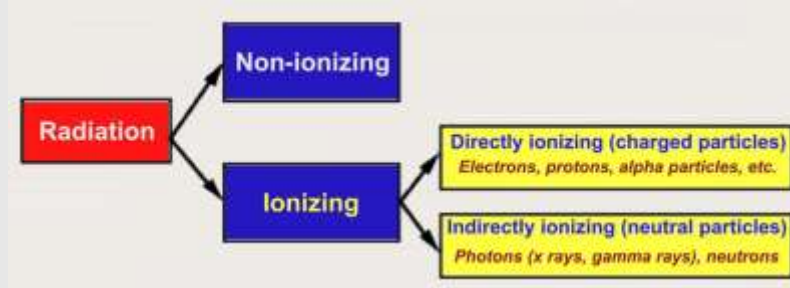


FIG.1.1. Clasificarea de radiații.

11

1.1. Introducere

1.1.6. Clasificarea de radiații

- **Radiația direct-ionizantă** depozitează energie în mediu prin interacțiuni Coulomb directe între particule direct ionizante încărcate și electronii orbitali ai atomilor din mediu.
- **Radiații indirect ionizante (fotoni sau neutroni)** depozitează energie în mediul printr-un proces în două etape:
 - În primul pas o particulă încărcată este eliberată în mediu (fotonii eliberează electroni sau pozitroni, neutronii eliberează protoni sau ioni mai grei);
 - În al doilea pas particulele eliberate încărcate depozitează energia la mediu prin interacțiuni Coulomb directe cu electronii orbitali ale atomilor din mediu.

12

1.1. Întroducere

1.1.6. Clasificarea de radiații

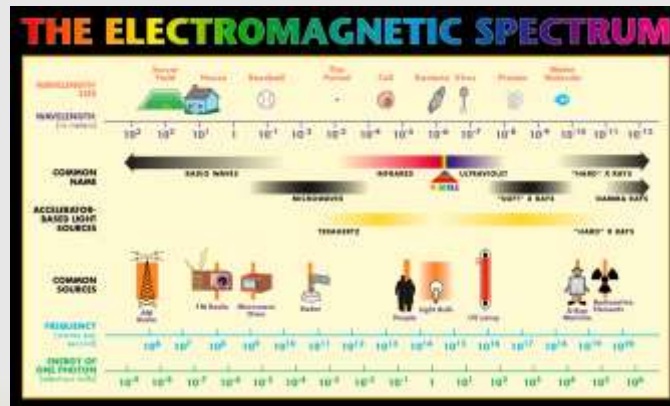
- **Radiațiile ionizante** atât directe, cât și indirecte, sunt folosite în tratamentul bolilor, în principal, dar nu exclusiv pentru boala malignă.
- **Ramura medicinei care folosește radiații în tratamentul bolii se numește radioterapie, radiologie terapeutică sau radiații oncologie.**
- **Radiologia diagnostică și medicina nucleară sunt ramuri ale medicinei care utilizează radiații ionizante în diagnosticul bolii.**

13

1.1. Întroducere

1.1.7. Clasificarea de radiații ionizante de fotoni

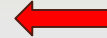
- ❖ **Razele X caracteristice:** rezultă de la tranziții electroni între niveluri atomice diferite.
- ❖ **De frânare:** rezultă de la interacțiunile Coulomb electron-nucleu.
- ❖ **γ raze:** rezultă din tranziții nucleare.
- ❖ **Cuante de anihilare:** rezultă de la pozitroni-electron anihilare.



14

1.1. Întroducere

1.1.8. Relațiile Einstein între masa relativistă, energie și impuls



☐ Mass:

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma m_0$$

☐ Normalized mass:

$$\frac{m(v)}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma$$

where

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \text{and} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

15

1.1. Întroducere

1.1.8. Relațiile Einstein între masa relativistă, energie și impuls

☐ Total energy: $E = m(v)c^2$

☐ Rest energy: $E_0 = m_0 c^2$

☐ Kinetic energy: $E_K = E - E_0 = (\gamma - 1)E_0$

☐ Momentum: $p = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - E_0^2}$

with

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \text{and} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

16

1.1. Introducere

1.1.9. Cantitățile de radiații și unitățile

Cantitățile cele mai importante de radiații și unitățile lor sunt prezentate în tabelul 1.3.

Quantity	Definition	SI unit	Old unit	Conversion
Exposure X	$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m_{\text{air}}}$	$\frac{2.58 \times 10^{-4} \text{ C}}{\text{kg air}}$	$1 \text{ R} = \frac{1 \text{ esu}}{\text{cm}^3 \text{ air}_{\text{STP}}}$	$1 \text{ R} = \frac{2.58 \times 10^{-4} \text{ C}}{\text{kg air}}$
Dose D	$D = \frac{\Delta E_{\text{ab}}}{\Delta m}$	$1 \text{ Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$	$1 \text{ rad} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{g}}$	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$
Equivalent dose H	$H = D w_R$	1 Sv	1 rem	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$
Activity A	$A = \lambda N$	$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$	$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$	$1 \text{ Bq} = \frac{1 \text{ Ci}}{3.7 \times 10^{10}}$

- ΔQ este sarcina de ambele semne;
- Δm_{air} este masa de aer;
- ΔE_{ab} este energia absorbită;
- Δm este masa de mediu;
- w_R este factorul de ponderare radiații;
- L este constanta de degradare;
- N este numărul de atomi radioactivi;
- R notația pentru Roentgen;
- Gy notația pentru gray;
- Sv notația pentru sievert;
- Bq notația pentru Becquerel;
- Ci notația pentru Curie;
- STP notația pentru temperatură standard (273.2 K) și presiunea standard (101,3 kPa).

17

1.1. Introducere

1.2. Structura atomică și nucleară

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

18

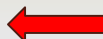
1.2. Structura Atomică și nucleară

- 1.2.1. Definițiile de bază pentru structura atomică
- 1.2.2. Modelul Rutherford al atomului
- 1.2.3. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen
- 1.2.4. Atomi multielectron
- 1.2.5. Structura nucleară
- 1.2.6. Reacții nucleare

19

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Definițiile de bază pentru structura atomică



- Particulele constitutive care formează un atom sunt

- **protoni,**
- **neutroni și**
- **electroni.**

*Protonii și neutronii sunt cunoscuți ca **nucleoni** și formează nucleul atomului.*

- **Număr atomic Z:** numărul de protoni sau numărul de electroni în atom.
- **Număr masă atomică A:** numărul de nucleoni în atom (De exemplu, numărul de protoni Z, plus de neutroni N într-un atom: $A = Z + N$).

Nu este o relație de bază între A și Z, dar relația empirică este

$$Z = \frac{A}{1.98 + 0.0155A^{2/3}}$$

și furnizează o aproximație bună pentru nuclee stabile.

20

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Definițiile de bază pentru structura atomică

- **Mol Atomic este definit ca numărul de grame de un compus atomic care conține exact un număr de atomi Avogadro, adică**

$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ atom/mol}$$

- **Numărul de masă atomică A a tuturor elementelor este definit astfel că A grame de fiecare element conține exact N_A atomi.**

De exemplu:

- 1 mol de cobalt-60 este de 60 g de cobalt-60.
- 1 mol de radiu-226 este 226 g de radiu-226.

21

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Definițiile de bază pentru structura atomică

- **Mol molecular este definit ca numărul de grame dintr-un compus molecular care conține exact Numărul Avogadro de molecule, adică**

$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ molecule/mol}$$

- **Masa unei molecule este suma maselor tuturor atomilor care alcătuiesc molecula.**

De exemplu:

- 1 mol de apă este 18 g de apă.
- 1 mol de dioxid de carbon este de 44 g de dioxid de carbon.

22

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Definițiile de bază pentru structura atomică

Masa atomică M : exprimată în Unități de masă atomică u , unde

- **1 u este egal cu 1/12 din masa atomului ^{12}C sau 931.5 MeV/ c^2 .**
- **Masa atomică M este mai mică decât suma maselor individuale ale particulelor constituate din cauza energiei intrinseci asociate cu legarea particulelor (nucleoni) în cadrul nucleului.**

Masa nucleară M este definită ca masa atomică fără masa de electroni orbitali atomice, de exemplu,

$$M = \mathcal{M} - Zm_e$$

unde M este masa atomică. Energia de legătură electroni orbitali la nucleul este neglijată.

23

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Definițiile de bază pentru structura atomică

- **În fizică nucleară o convenție este de a desemna un nucleu X ca A_ZX ,**

unde

A este numărul de masa atomică și

Z este numărul atomic,

De exemplu,

- **nucleul Co-60 cu $Z = 27$ de protoni și $A = 60$ neutroni este identificat ca $^{60}_{27}\text{Co}$,**
- **nucleul Ra-226 cu 88 de protoni și neutroni 138 - ca $^{226}_{88}\text{Ra}$.**

- **În fizică pentru ioni o convenție este de a desemna ioni cu + sau - superscript.**

De exemplu,

- ✓ $^4_2\text{He}^+$ reprezintă un atom ionizat ^4He și
- ✓ $^4_2\text{He}^{2+}$ reprezintă un dublu atom ionizat, care este o particula.

24

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Definițiile de bază pentru structura atomică

- Numărul de atomi N_a per masă m al unui element:

$$\frac{N_a}{m} = \frac{N_A}{A}$$

- Numărul de electroni N_e pe masă m de un element:

$$\frac{N_e}{m} = Z \frac{N_a}{m} = Z \frac{N_A}{A}$$

- Numărul de electroni N_e pe volum V al unui element:

$$\frac{N_e}{V} = \rho Z \frac{N_a}{m} = \rho Z \frac{N_A}{A}$$

25

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Definițiile de bază pentru structura atomică

- Pentru toate elementele raportul $Z/A \approx 0,5$ cu două excepții notabile

- hidrogen 1, pentru care $Z/A = 1,0$.
- heliu-3 pentru care $Z/A = 0,67$.

- De fapt, raportul Z/A scade treptat:

- De la 0,5 pentru elemente cu număr mic atomic Z .
- La $\sim 0,4$ pentru elemente cu număr atomic Z mare.

- De exemplu:

- $Z/A = 0,50$ pentru ${}_2^4\text{He}$
- $Z/A = 0,45$ pentru ${}_{27}^{60}\text{Co}$
- $Z/A = 0,39$ pentru ${}_{92}^{235}\text{U}$

26

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Definițiile de bază pentru structura atomică

1.2.2. Modelul Rutherford al atomului

1.2.3. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen

1.2.4. Atomi multielectron

1.2.5. Structura nucleară

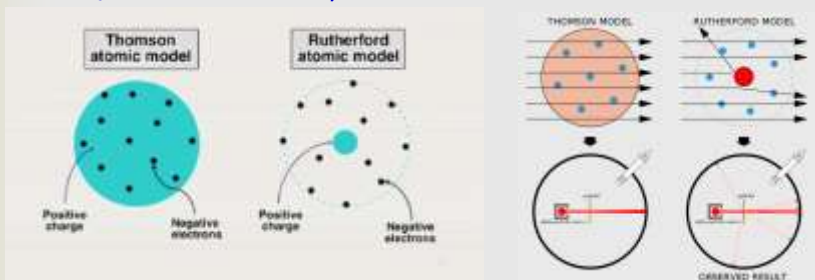
1.2.6. Reacții nucleare

27

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.2. Modelul Rutherford al atomului

• Modelul se bazează pe rezultatele unui experiment efectuat de Geiger și Marsden în 1909 cu câteva particule alfa cu 5.5 MeV împrăștiate pe folii subțiri de aur 10^{-6} m.

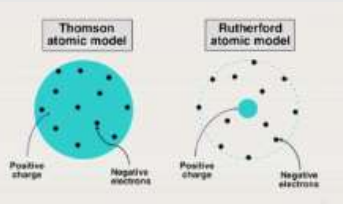


• Experimentul testează validitatea modelului atomic Thomson, care a postulat că sarcinile pozitive și electronii negativi sunt uniform distribuite în volumul atomic sferic, raza căruia este de ordinul a câteva angstreimi.

28

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.2. Modelul Rutherford al atomului



•Geiger și Marsden au constatat că mai mult de 99% de particule alfa incidente pe folia de aur s-au risipit în unghiuri de dispersie mai mic de 3° și că distribuția particulelor alfa împrăștiate a urmat o formă Gauss.

•Calculule teoretice (după Thomson) prevăd că probabilitatea ca particule α să fie împrăștiate pe un astfel de atom, cu un unghi de împrăștiere ce depășește 90° este de ordinul a 10^{-3500} , în timp ce experimentul Geiger-Marsden a arătat că aproximativ 1 din 10^4 α particule au fost împrăștiate de un unghi de împrăștiere $\theta > 90^\circ$ (probabilitate de 10^{-4}).

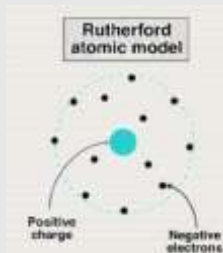
29

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.2. Modelul Rutherford al atomului

Din constatările experimentului Geiger-Marsden, Rutherford în 1911 a concluzionat că experimentul nu a suportat modelul atomic Thomson și a propus Modelul atomic acceptat și astăzi în care

- ✓ sarcina pozitivă și cea mai mare parte a masei atomului sunt concentrate în nucleul atomic (cu diametrul de a câțiva femtometri 10^{-15} m) și
- ✓ electronii negativi sunt întinși (smeared) pe periferia atomului (diametru a câțiva angstromi 10^{-10} m).



30

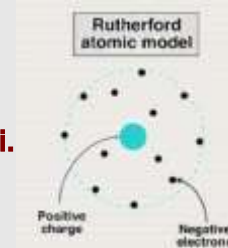
1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.2. Modelul Rutherford al atomului

- Bazat pe modelul său și patru ipoteze suplimentare, Rutherford derivat cinematica pentru împrăștierea de particule alfa pe nuclee de aur, folosind principiile de bază ale mecanicii clasice.

- Cele patru ipoteze sunt legate de:

- ✓ Masa nucleului aur.
- ✓ Dispersia de particule alfa pe electroni.
- ✓ Penetrarea nucleului.
- ✓ Energia cinetică a particulelor alfa.



31

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.2. Modelul Rutherford al atomului

- Cele patru ipoteze sunt:

- Masa nucleu aur $M \gg$ masa particulei alfa.
- Dispersia de particule alfa pe electroni atomici este neglijabila.
- Particule alfa nu penetrează nucleul, adică, nu există reacții nucleare care apar.
- Particulele alfa cu energii cinetice de ordinul a câțiva MeV sunt non-relativiste și relația clasică simplă pentru cinetica E_k energie de alfa particulelor este valabilă:

$$E_k = \frac{m_a v^2}{2}$$

32

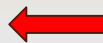
1.2. Structura Atomică și nucleară

- 1.2.1. Definițiile de bază pentru structura atomică
- 1.2.2. Modelul Rutherford al atomului
- 1.2.3. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen
- 1.2.4. Atomi multielectron
- 1.2.5. Structura nucleară
- 1.2.6. Reacții nucleare

33

1.2. Structura Atomică și nucleară

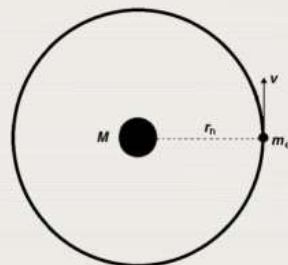
1.2.3. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen



Niels Bohr a extins modelul atomic Rutherford în 1913 și se bazează pe patru postulate care combină mecanica clasică, non-relativistă, cu conceptul de cuantificare a momentului cinetic.

Modelul lui Bohr cu succes se combină cu entități uni-electron, cum ar fi atomul de hidrogen, atomul heliu uni- ionizat, atomul de litiu dublu ionizat. etc .

- M nucleus with mass M
- m_e electron with mass m_e
- r_n radius of electron orbit



34

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.3. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen

Patru postulate Bohr sunt după cum urmează:

- **Postulatul 1: mișcarea planetară**
 - Electronii se rotesc în jurul nucleului Rutherford în orbite bine definite, acceptate.
 - Forța de atracție Coulomb între electronii negativi și nucleu încărcat pozitiv este echilibrată de forța centrifugă

$$F_{\text{coul}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r_e^2} \dots F_{\text{cent}} = \frac{m_e v_e^2}{r_e}$$



unde Z este numărul de protoni în nucleul (număr atomic), r este raza orbitei, m_e este masa electronului și v este viteza electronului în orbită.

35

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.3. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen

Postulatul 2: Nici o pierdere de energie în timp ce electronul este în orbită

- În timp ce e în orbită, electronul nu pierde nici o energie în ciuda faptului că este în mod constant accelerat
- Aceasta postulat este în contradicție cu legea fundamentală a naturii (Larmor's law), care este
 - De fiecare dată când o particulă încărcată este accelerată sau decelerată o parte din energie este emisă sub formă de fotoni (bremsstrahlung).

36

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.3. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen

Postulatul 3: Cuantificarea momentului cinetic

- Impulsul (momentul) unghiular $L = m_e v r$ de electroni într-o orbită permisă este cuantificat și dat ca $L = n\hbar$, unde n este un număr întreg menționat ca numărul cuantic principal și $\hbar = h/(2\pi)$, în cazul în care h este constanta lui Planck.
- Cel mai mic posibil moment cinetic a electronilor într-un orbita permis este $L = \hbar$.
- Cuantizare simplă a momentului cinetic prevede că **momentul cinetic poate avea numai multipli întregi de o valoare de bază ($\hbar$).**

37

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.3. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen

Postulatul 4: Emisie de foton în timpul tranziției atomice

- Un atom emite radiații atunci când un electron face o tranziție de la o orbită inițială cu numărul cuantic n_i la o orbită finală cu numărul cuantic n_f pentru $n_i > n_f$.
- Energia fotonului emis este egală cu diferența de energie între cele două orbite atomice .

$$h\nu = E_i - E_f$$

38

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.3. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen

- Raza r_n a unui atom uni-electron Bohr este dată de:

$$r_n = a_0 \left[\frac{n^2}{Z} \right] = (0.53 \text{ Å}) \times \left[\frac{n^2}{Z} \right]$$

unde a_0 este raza Bohr ($a_0 = 0.529 \text{ Å}$).

- Viteza v_n de electroni într-un atom uni-electron Bohr este:

$$v_n = \alpha c \left[\frac{Z}{n} \right] = \frac{c}{137} \left[\frac{Z}{n} \right] \approx 7 \times 10^{-3} c \left[\frac{Z}{n} \right]$$

unde α este constanta structurii fine ($\alpha = 1/137$).

- Nivelurile de energie pentru învelișurile orbitale electronice în atom uni-electron (de exemplu, heliu individual ionizat și litiu de două ori ionizat) sunt date de:

$$E_n = -R_\infty \left[\frac{Z^2}{n^2} \right]$$

- Numărul de undă k al fotonului emis pentru tranziția de la învelișul n_i la învelișul n_f este dată de:

unde R_∞ este constanta Rydberg.

39

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.3. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen

- Modelul lui Bohr** rezultă în diagrama nivelurilor de energie pentru atomul de hidrogen în Fig. 1.2.

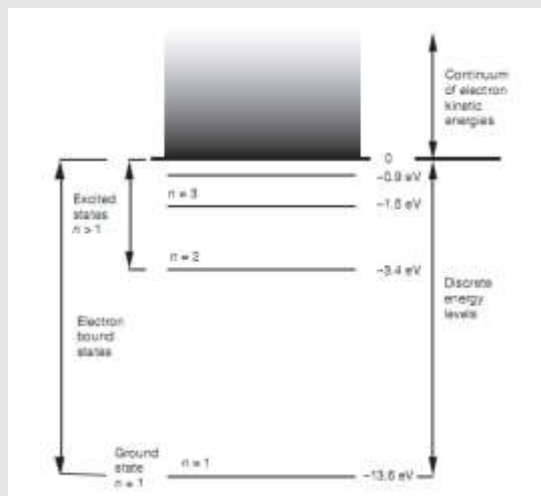


FIG. 1.2. Energy level diagram for a hydrogen atom (ground state: $n = 1$, excited states: $n > 1$).

40

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Definițiile de bază pentru structura atomică

1.2.2. Modelul Rutherford al atomului

1.2.3. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen

1.2.4. Atomi multielectron

1.2.5. Structura nucleară

1.2.6. Reacții nucleare

41

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.4. Atomi multielectron



- Pentru atomii multielectron conceptele fundamentale ale teoriei atomice Bohr furnizează date calitative pentru energii orbitale obligatorii de electroni și tranziții de electroni care rezultă în emisie de fotoni.
- Electronii ocupa învelișuri de permise, dar **numărul de electroni pe înveliș este limitat la $2n^2$** , unde n este numărul de înveliș (numărul cuantic principal). ^(1.23)
- **energiile obligatorii ale K învelișului $E_B(K)$ pentru atomi cu $Z > 20$ poate fi estimat cu următoarea relație:**

$$E_B(K) = E_R Z_{\text{eff}}^2 = E_R (Z - s)^2 = E_R (Z - 2)^2$$

unde Z_{eff} , numărul efectiv atomic, este dat de $Z_{\text{eff}} = Z - s$, unde s este constanta de ecranare egală cu 2 pentru electroni la învelișul K.

42

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.4. Atomi multielectron

- **Excitația** unui atom apare când o electron este mutat de la un înveliș dat la un înveliș cu n mai mare care este gol sau nu conține un set complet de electroni.
- **Ionizarea** atomului apare când un electron este îndepărtat de la atom (adică electronul este alimentat cu energie suficientă pentru a depăși energia de legare într-un înveliș).
- **Procese de excitație și ionizare au loc în atom prin diverse interacțiuni posibile, în care electronii orbitali sunt furnizați cu o anumită cantitate de energie. Unele dintre aceste interacțiuni sunt:**

- (i) interacțiunea Coulomb cu o particulă încărcată;
- (ii) efectul fotoelectric;
- (iii) efectul Compton;
- (iv) producția triplet;
- (v) conversie internă;
- (vi) captare de electroni;
- (vii) efectul Auger și
- (viii) anihilare de pozitroni.

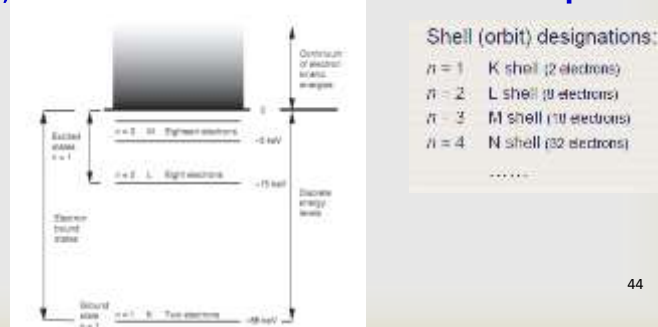
43

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.4. Atomi multielectron

- Un electron orbital de la un înveliș superior n umple loc vacant în un înveliș atomic cu n mai mic. Diferența de energie dintre cele două învelișuri va fi emisă în forma unui foton caracteristic sau va fi transferat la un electron de înveliș cu n mai mare, care va fi scos din atom ca un electron Auger.
- **Diagrame de nivele de energie de atomi multielectron** seamăna cu cele ale structurilor uni-electron, cu excepția faptului că electronii învelișului interior sunt legate cu energii mult mai mari, după cum se arată pentru un atom de plumb în Fig. 1.3.

G. 1.3. Energy level diagram for a multielectron atom (lead). The $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ shells are referred to as the K, L, M, O, ... shells, respectively. Electronic transitions that end in low n shells are referred to as X ray transitions because the resulting photons are in the X ray energy range. Electronic transitions that end in high n shells are referred to as optical transitions because they result in ultraviolet, visible or infrared photons



44

1.2. Structura Atomică și nucleară

- 1.2.1. Definițiile de bază pentru structura atomică
- 1.2.2. Modelul Rutherford al atomului
- 1.2.3. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen
- 1.2.4. Atomi multielectron
- 1.2.5. Structura nucleară
- 1.2.6. Reacții nucleare

45

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.4. Atomi multielectron

- Numărul de fotoni caracteristici (uneori denumiți fotoni fluorescenți) emiși per loc vacant este menționat ca **randamentul fluorescent ω** , în timp ce numărul de electroni Auger emiși per loc vacant de electroni este egal cu **(1 - ω)**.
- Randamentul fluorescent depinde de numărul atomic **Z** al atomului și de numărul cuantic principal al unui înveliș. Pentru atomii cu **$Z < 10$** randamentul fluorescent **$\omega_K = 0$** ; pentru **$Z \approx 30$** randamentul fluorescent **$\omega_K \approx 0,5$** ; și atomi de înalt număr atomic **$\omega_K = 0,96$** , în cazul în care **ω_K** se referă la randamentul fluorescent pentru învelișul K (vezi fig. 1.9).

46

1.2. Structura Atomică și nucleară

- 1.2.1. Definițiile de bază pentru structura atomică
- 1.2.2. Modelul Rutherford al atomului
- 1.2.3. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen
- 1.2.4. Atomi multielectron
- 1.2.5. Structura nucleară
- 1.2.6. Reacții nucleare

47

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.5. Structura nucleară

- Cele mai mare parte din masa atomică este concentrată în nucleul atomic format din protoni Z și $(A - Z)$ neutroni, unde Z este numărul atomic și A este numărul de masa atomică a unui nucleu dat.
- Raza r a nucleului este estimată la:

$$r = r_0 \sqrt[3]{A} \quad (1.24)$$
 unde r_0 este o constanta (~ 1.4 fm) aproximativ egală cu $1/2$ de r_e , raza de electron clasică.
- Protonii și neutronii sunt frecvent menționați ca nucleoni și sunt legați în nucleul cu forța tare.
- În contrast cu forțele electrostatice și gravitaționale, care sunt invers proporționale cu pătratul distanței dintre două particule, forță puternică între doi nucleoni este o forță de o gamă foarte scurtă, active numai la distanțe de ordinul a câțiva femtometri. La aceste distanțe scurte forță puternică este forță predominantă, mai mare decât alte forțe cu câteva ordine de mărime.

48

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.5. Structura nucleară

- **Energia obligatorie (binding) E_B per nucleon** într-un nucleu variază lent cu numărul de nucleoni A , este de ordinul a ~ 8 MeV / nucleon și prezintă un maxim de 8,7 MeV / nucleon la $A \approx 60$. Pentru un nucleu dat poate fi calculat din echivalentul energetic a **deficitului de masă Δm** ca următoarele:

$$\frac{E_B}{\text{nucleon}} = \Delta mc^2 / A = [Zm_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 - Mc^2] / A$$

unde

M este masa atomică nucleară în unitatea de masă atomică u (rețineți că $uc^2 = 931.5$ MeV);

$m_p c^2$ este energia de repaus de protoni;

$m_n c^2$ este energia de repaus de neutroni.

49

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.6. Reacții nucleare

- O mare parte din cunoașterea actuală a structurii nucleelor vine de la experimente în care un anumit **nuclid A este bombardat cu un proiectil a** . Proiectilul trece una dintre cele trei interacțiuni posibile:

- (i) **împrăștiere elastică** (are loc fără transferul de energie, cu toate acestea, traiectoria proiectilului suferă schimbări);
- (ii) **împrăștiere inelastică** (proiectilul intră în nucleu și este re-emis, cu mai puțină energie și într-o direcție diferită) sau
- (iii) **reacție nucleară** (proiectilul intră un nucleu A , care este transformat în nucleu B și o altă particulă b este emisă).

- **Reacțiile nucleare sunt desemnate după cum urmează:**



50

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.6. Reacții nucleare

- **Energia de prag pentru o reacție nucleară este definită ca cea mai mică valoare a energiei cinetice a unui proiectil la care o reacție nucleară poate avea loc. Pragul de energie cinetică a unui proiectil este derivat din conservarea relativistă de energie și impuls ca:**

$$(E_K)_{thr}^a = \frac{(m_B c^2 + m_b c^2)^2 - (m_A c^2 + m_a c^2)^2}{2m_A c^2}$$

- unde m_A , m_a , m_B și m_b sunt masele de repaos ale ținei A, proiectil a și produse B și b, respectiv.

51

Radiații ionizante în medicină



52

Radiații ionizante în medicină

- I. BAZELE FIZICII RADIAȚIONALE
- II. PRINCIPII, CANTITĂȚI ȘI UNITĂȚI DOSIMETRICE
- III. MAȘINI DE TRATAMENT PENTRU FLUXURI EXTERNE ÎN RADIOTERAPIE
- IV. FLUXURI EXTERNE FOTONICE: ASPECTE FIZICE ȘI CLINICE
- IV. BRAHITERAPIA: ASPECTE FIZICE ȘI CLINICE

Practica:

- I. DOSIMETRE
- II. INSTRUMENTE MONITORIZARE ZONĂ

53

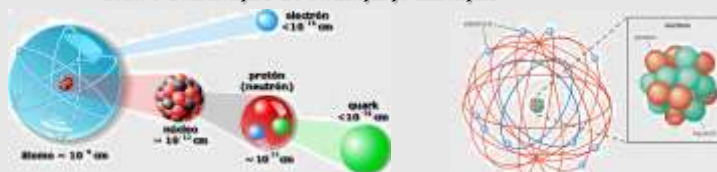
I. BAZELE FIZICII RADIAȚIONALE

1.1. Introducere

- 1.2. Structura atomică și nucleară
- 1.3. Interacțiunea electronilor cu materia
- 1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.1. Introducere

- 1.1.1. Constantele fizice fundamentale
- 1.1.2. Constante fizice derivate
- 1.1.3. Cantități fizice și unități
- 1.1.4. Clasificarea forțelor în natură
- 1.1.5. Clasificarea particule elementare
- 1.1.6. Clasificarea de radiații
- 1.1.7. Clasificarea de radiații ionizante de fotoni
- 1.1.8. Relațiile Einstein între masa relativistă, energie și impuls
- 1.1.9. Cantitățile de radiații și unitățile



54

I. BAZELE FIZICII RADIAȚIONALE

- 1.1. Introducere
- 1.2. Structura atomică și nucleară
- 1.3. Interacțiunea electronilor cu materia
- 1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

Planul prelegerii

1.2. Structura atomică și nucleară

- 1.2.1. Radioactivitate
- 1.2.2. Activarea nucleizilor
- 1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă
 - ✓ degradare alfa
 - ✓ degradare beta
 - beta plus degradare
 - degradare beta minus
 - captură de electroni
 - ✓ degradare gama
 - degradare gamma pură
 - conversie internă
 - fisiune spontană

- 1.2.4. Definițiile de bază pentru structura atomică
- 1.2.5. Modelul Rutherford al atomului
- 1.2.6. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen
- 1.2.7. Atomi multielectronici
- 1.2.8. Structura nucleară
- 1.2.9. Reacții nucleare



55

Finaliățile prelegerii

- **Ce este radioactivitatea**
- **Legile ce guvernează procesul de dezintegrare**
- **Parametrii ce caracterizează dezintegrare**
- **Metodele de producere a radionuclizilor**
- **Modurile de dezintegrare radioactivă**



Bibliografie:

1. PODGORSK E.B. *Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students*. International Atomic Energy Agency, VIENNA, 2005, 696 p. ISBN 92-0-107304-6.
Disponibil în format electronic.

2. PODGORSK E.B. *Radiation Physics for Medical Physicists. Second, Enlarged Edition*, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010, 773 p.
ISSN 1618-7210. ISBN 978-3-642-00874-0, DOI 10.1007/978-3-642-00874-5
Disponibil în format electronic

56

1.2. Structura atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitatea

1.2.2. Activarea nucleului

1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

- ✓ degradare beta
 - beta plus degradare
 - degradare beta minus
 - captură de electroni
- ✓ degradare gama
 - degradare gama pură
 - conversie internă
 - fisiune spontană

1.2.4. Definițiile de bază pentru structura atomică

1.2.5. Modelul Rutherford al atomului

1.2.6. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen

1.2.7. Atomul multi-electron

1.2.8. Structura nucleară

1.2.9. Reacții nucleare

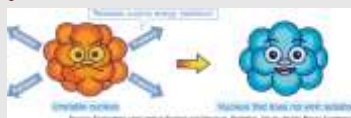
57

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Radioactivitate – definiție

- **Radioactivitatea** este transformarea unui nucleu instabil într-o entitate mult mai stabilă, care poate fi și instabilă și se va dezintegra în continuare printr-un lanț de dezintegrări până când o configurație stabilă nucleară este atinsă.



- Un atom este instabil ca urmare a unui exces sau a unui deficit de neutroni în nucleu (n asigură forța care ține protonii încărcati pozitiv împreună, contra respingerii unii pe alții și distrugerii atomului) și este mai susceptibil să dezintegreze în mod radioactiv.
- În plus, atunci când un atom atinge o anumită dimensiune, mai masiv în ceea ce privește domeniul forței care încearcă să dețină atomul împreună, acest lucru face mai probabil ca elementele cu număr atomic mare să elibereze protoni sau neutroni.

58

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Radioactivitate – legile dezintegrării

- **Legile exponențiale** care guvernează degradarea și obținerea de substanțe radioactive au fost formulate pentru prima dată de către **Rutherford și Soddy** în 1902 și apoi rafinate prin **Bateman** în 1910.



In the MacDonald Laboratory, McGill, Montreal

59

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Descoperirea radioactivității (naturale)

- **Henri Becquerel** a descoperit radioactivitatea 1896.
- Curând după descoperirea lui Becquerel, **Marie și Pierre Curie**, au meritul de a separa pentru prima dată componentii determinanți ai radioactivității peblendei. Studiind împreună obținerea de uraniu pur din minereuri, soții Curie descoperă două noi elemente radioactive, și anume poloniul și radiul - prelucrând tone de minereu au obținut **primul decigram de radium pur**.



60

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Descoperirea radioactivității (naturale)

- In anul 1903 Marie și Pierre Curie au obținut **premiul Nobel** pentru fizica care a fost împărțit cu Henri Becquerel.
- Perfect conștient de pericolul folosirii radioactivității în detrimentul comunității, Pierre Curie socotea cu optimism că: **“Noile descoperiri vor aduce omenirii mai mult bine decât rău”**, fiind ferm convins că aceasta nu depinde decât de oameni și de modul în care vor fi utilizate toate aceste descoperiri.



61

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Descoperirea radioactivității (artificiale)

- **Frederic Joliot-Curie** și soția sa **Irene** au studiat efectul particulelor alfa emise de poloniul radioactiv asupra unor elemente chimice, iar în anul 1934 au descoperit **radioactivitatea artificială**.
- După obținerea **primului element radioactiv artificial, siliciul**, a urmat prepararea de către diverși cercetători a unei serii întregi de radio-izotopi artificiali, astăzi fiind cunoscuți radio-izotopii aproape ai tuturor elementelor chimice.
- In anul 1935 li s-a decernat **Premiului Nobel pentru chimie** pentru descoperirea radioactivității artificiale.



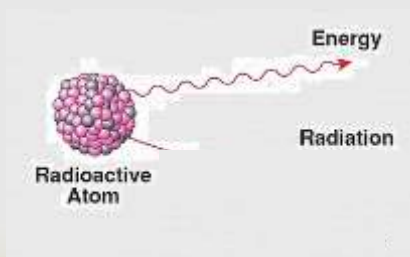
62

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Emiterea energiei

- **Dezintegrare radioactivă** presupune o trecere de la stare cuantică de părinte P la o stare cuantică a fiicei D.
- **Diferența de energie** între cele două stări cuantice este numită **energie de dezintegrare Q**.
- **energie de dezintegrare este emisă:**
 - Sub formă de **radiații electromagnetice** (raze gamma) sau
 - Sub formă de **energie cinetică a produșilor de reacție**.



63

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Activitate - definiție

- **Activitatea $A(t)$** a unei substanțe radioactive la momentul t este definită ca produsul constantei de degradare λ și numărul de nuclee radioactive $N(t)$:

$$A(t) = \lambda N(t)$$

- **Activitatea specifică a** este activitate al substanței mamă per unitatea de masă:

$$a = \frac{A(t)}{M} = \frac{\lambda N(t)}{M} = \frac{\lambda N_A}{A}$$

N_A este numărul lui Avogadro.
 A este numărul masa atomică.

64

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Activitate - definiție

- **Activitatea** reprezintă numărul total de dezintegrări (descompuneri) de nuclee părinte per unitate de timp.
- Unitatea SI de activitate este becquerel ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$).
Atât Becquerel cât Hertz corespund s^{-1} încă hertzi exprimă frecvență de mișcare periodică, în timp ce becquerel exprimă activitate.



- Unitatea mai veche de activitate este Curie, inițial definită ca activitatea de 1 g de radiu-226.

$$(1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1})$$



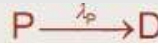
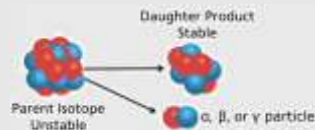
65

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Dezintegrarea simplă

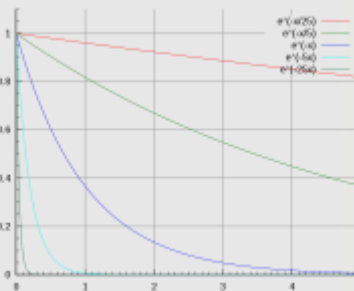
- Ceal mai simplă dezintegrare radioactivă se caracterizează printr-un nucleu părinte radioactiv P ce se descompune cu o constantă degradare λ într-un nucleu fiica stabil D:



- Rate de epuizare a numărului de nuclee părinți radioactivi este egală cu activitatea la momentul t :

$$\frac{dN_p(t)}{dt} = -A_p(t) = -\lambda_p N_p(t)$$

$$\int_{N_p(0)}^{N_p(t)} \frac{dN_p(t)}{N_p} = -\int_0^t \lambda_p dt$$



66

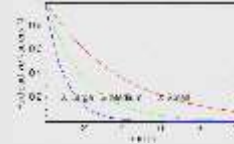
1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Activitatea – descreșterea în timp

- Numărul de nuclee părinte radioactive $N_p(t)$ în funcție de timpul t este reglementată de următoarea relație:

$$N_p(t) = N_p(0)e^{-\lambda_p t}$$



unde $N_p(0)$ este numărul inițial de nuclee părinte la momentul $t=0$

- în mod similar, activitatea de nuclee părinte $A_p(t)$ la momentul t este dată ca:

$$A_p(t) = \lambda_p N_p(t) = \lambda_p N_p(0)e^{-\lambda_p t} = A_p(0)e^{-\lambda_p t}$$

unde $A_p(0)$ este activitatea inițială a nucleelor mamă la timpul $t=0$.

67

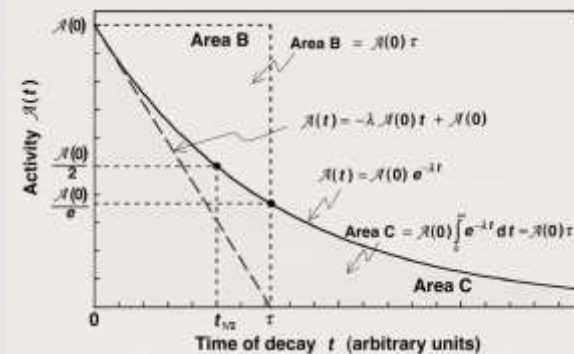
1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Activitatea – descreșterea în timp (continuare)

Activitatea de părinte în funcție de timp t ilustrează:

- ✓ descompunere exponențială a activitate.
- ✓ Conceptul de jumătate de viață.
- ✓ Conceptul de viață medie.



68

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

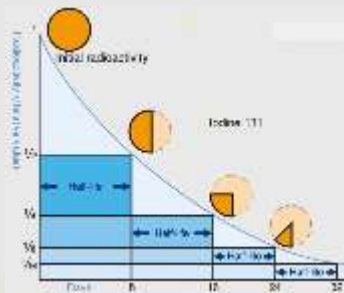
Activitatea – descreșterea în timp (continuare)

Timpul de înjumătățire $T_{1/2}$ a unei substanțe radioactive este timpul în care numărul de nuclee radioactive dezintegrează la jumătate din valoarea inițială $N_p(0)$ prezente la momentul $t = 0$:

$$N_p(t = t_{1/2}) = (1/2)N_p(0) = N_p(0)e^{-\lambda_p(t_{1/2})}$$

Constanta de degradare λ_p și timpul de înjumătățire ($T_{1/2}$) pentru părinte sunt legate după cum urmează:

$$\lambda_p = \frac{\ln 2}{(t_{1/2})_p}$$



69

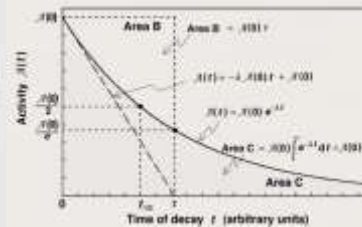
1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Activitatea – viața medie

Viață medie τ_p a unei substanțe radioactive reprezintă speranța de viață medie a tuturor atomilor mamă radioactivi în substanță, la timp $t = 0$:

$$\mathcal{A}_p(0)\tau_p = \int_0^{\infty} \mathcal{A}_p(t) e^{-\lambda_p t} dt = \frac{\mathcal{A}_p(0)}{\lambda_p}$$



Constanta de degradare λ_p și viața medie τ_p sunt astfel legate, după cum urmează:

$$\lambda_p = 1/\tau_p$$

rezultând în următoarea relație între $(t_{1/2})_p$ și τ_p : $(t_{1/2})_p = \tau_p \ln 2$

Dezintegrare – simulare -

http://iwant2study.org/lookangejss/06QuantumPhysics_20nuclear/ejss_model_decaychangeNwee/decaychangeNwee_Simulation.xhtml

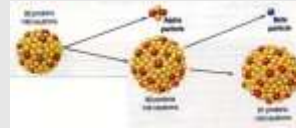
70

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Dezintegrare în serie

O dezintegrare radioactivă mai complicată apare atunci când un nucleul părinte radioactiv P se dezintegrează cu o constantă de degradare λ_P într-un nucleu fiica D care, la rândul său, este radioactiv și se dezintegrează cu o constantă de degradare λ_D într-o nepoata stabilă G:



Rata de modificare a numărului de nuclee fiica D este egal cu oferta de noi nuclee fiica prin descompunere de P și pierderea nuclee fiicei D din descompunere de la D la G dat ăca

$$\frac{dN_D}{dt} = \lambda_P N_P(t) - \lambda_D N_D(t) = \lambda_P N_P(0) e^{-\lambda_P t} - \lambda_D N_D(t)$$

71

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

Activitatea fiică - dezintegrare în serie

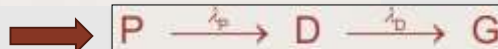
Numărul de nuclee fiice $N_D(t)$ poate fi exprimat ca:

$$N_D(t) = N_P(0) \frac{\lambda_P}{\lambda_D - \lambda_P} \left\{ e^{-\lambda_P t} - e^{-\lambda_D t} \right\}$$

Activitatea fiicei $A_D(t)$ poate fi exprimată ca:

$$\begin{aligned} A_D(t) &= \frac{N_P(0) \lambda_P \lambda_D}{\lambda_D - \lambda_P} \left\{ e^{-\lambda_P t} - e^{-\lambda_D t} \right\} = A_P(0) \frac{\lambda_D}{\lambda_D - \lambda_P} \left\{ e^{-\lambda_P t} - e^{-\lambda_D t} \right\} = \\ &= A_P(0) \frac{1}{1 - \frac{\lambda_P}{\lambda_D}} \left\{ e^{-\lambda_P t} - e^{-\lambda_D t} \right\} = A_P(t) \frac{\lambda_D}{\lambda_D - \lambda_P} \left\{ 1 - e^{-(\lambda_D - \lambda_P)t} \right\}, \end{aligned}$$

Simulare activitate serie:



72

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

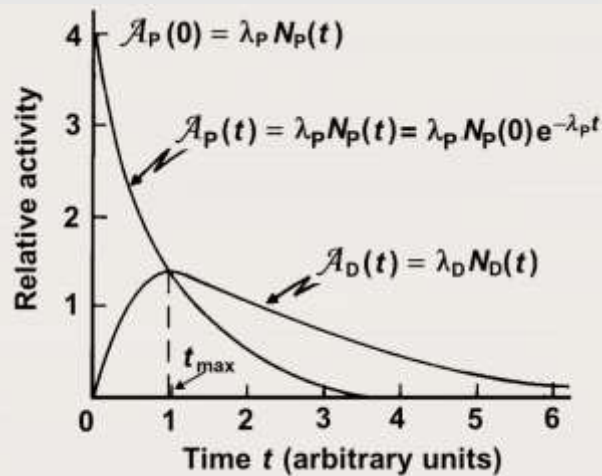
Activitatea maximă a nucleelor fiică

Activitatea maximă a nucleelor fiică are loc la momentul $t_{\max}$ dată de:

$$t_{\max} = \frac{\ln(\lambda_D/\lambda_P)}{\lambda_D - \lambda_P}$$

La $t_{\max}$ activitatea mamă și fiică sunt egale și activitatea fiică atinge maximum

$$\left. \frac{dA_D}{dt} \right|_{t=t_{\max}} = 0$$



73

1.2. Structura atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

1.2.2. Activarea nuclizi

1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

- ✓ degradare beta
 - beta plus degradare
 - degradare beta minus
 - captură de electroni
- ✓ degradare gama
 - degradare gama pură
 - conversie internă
 - fisiune spontană

1.2.4. Definițiile de bază pentru structura atomică

1.2.5. Modelul Rutherford al atomului

1.2.6. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen

1.2.7. Atomul multi-electron

1.2.8. Structura nucleară

1.2.9. Reacții nucleare

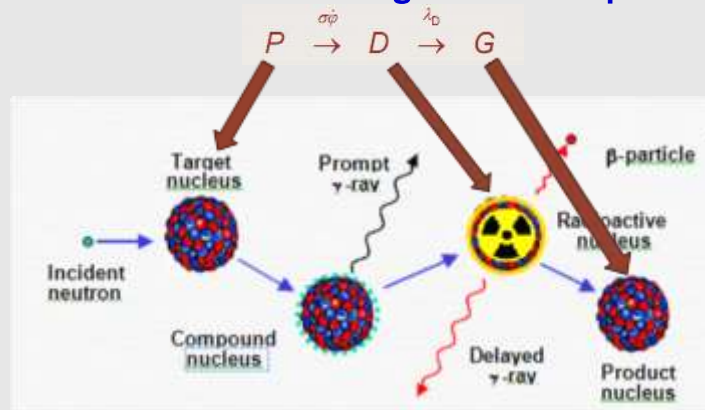
74

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.2. Activarea nucleizi

Activare nucleizi – bombardare cu neutroni

- Activarea de nucleizi se produce atunci când un izotop-părinte stabil P este bombardat cu neutroni, și se transformă într-o fiică radioactiv D care se dezintegrează într-o nepoată G :



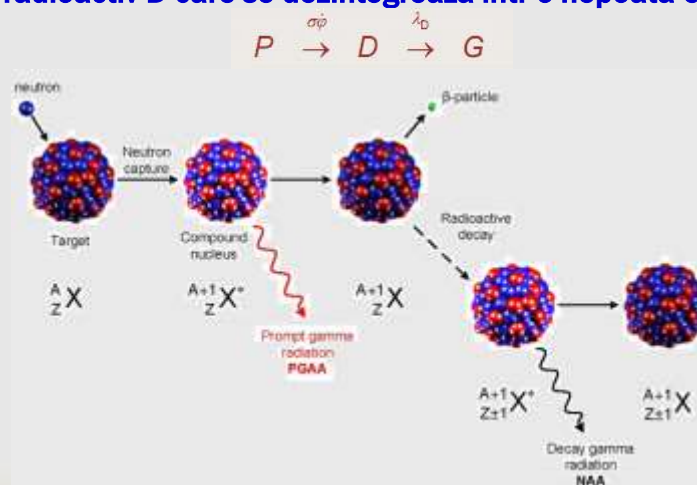
75

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.2. Activarea nucleizi

Activare nucleizi – bombardare cu neutroni

- Activarea de nucleizi se produce atunci când un izotop-părinte stabil P este bombardat cu neutroni, și se transformă într-o fiică radioactiv D care se dezintegrează într-o nepoată G :



76

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.2. Activarea nucleizi

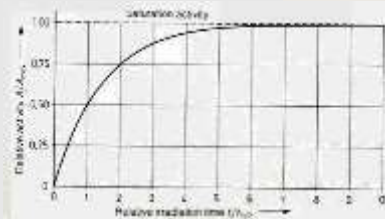
Activare nucleizi – activitate filcă

- Activitatea filcă în radioactivare este descrisă de o expresie similară cu cea acordată pentru descompunerea serie cu excepția faptului că λ_p se înlocuiește cu produsul $\sigma\phi$:

$$A_p(t) = \frac{N_p(0)\lambda_p}{\lambda_D - \lambda_p} [e^{-\lambda_D t} - e^{-\lambda_p t}] \rightarrow A_D(t) = \frac{\sigma \phi \lambda_D}{\lambda_D - \sigma \phi} N_p(0) [e^{-\sigma \phi t} - e^{-\lambda_D t}]$$

- Timpul în care activitatea filcă atinge maximum este dată de

$$t_{\max} = \frac{\ln[\lambda_D / (\sigma \phi)]}{\lambda_D - \sigma \phi}$$



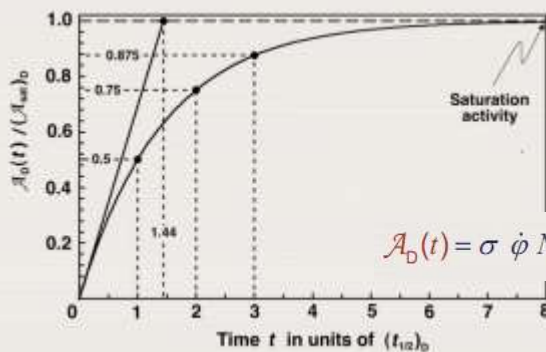
77

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.2. Activarea nucleizi

Probabilitate activare

- Probabilitatea de activare este determinată de secțiunea transversală δ pentru reacție nucleară, de obicei exprimată în barn per atom, unde 1 barn = 10^{-24} cm² și rata fluență neutroni ϕ în cm⁻²s⁻¹.
- Când, $\sigma\phi \ll \lambda_D$ expresia activitate filcă se transformă într-o exprimare simplă creștere exponențială



$$A_D(t) = \frac{\sigma \phi \lambda_D}{\lambda_D - \sigma \phi} N_p(0) [e^{-\sigma \phi t} - e^{-\lambda_D t}]$$

$$A_D(t) = \sigma \phi N_p(0) \{1 - e^{-\lambda_D t}\} = A_{\text{sat}} \{1 - e^{-\lambda_D t}\}$$

78

1.2. Structura Atomică și nucleară

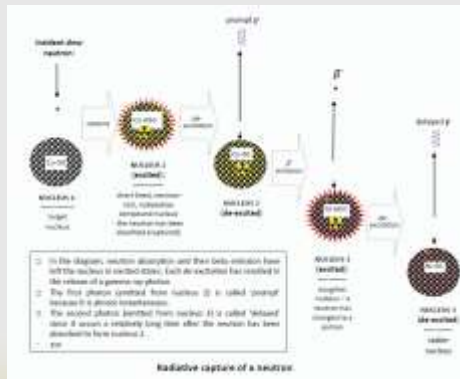
1.2.2. Activarea nucleizi

Activare nucleizi – ^{60}Co

- Un exemplu important de activare nucleară este producerea de izotop ^{60}Co prin bombardarea cu neutroni termici ^{59}Co într-un reactor nuclear:



cu o secțiune transversală de activare δ de $37 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 / \text{atom}$ (37 barn / atom cu $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$) și o rată de fluență neutroni tipică de reactor ϕ de ordinul a $10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.



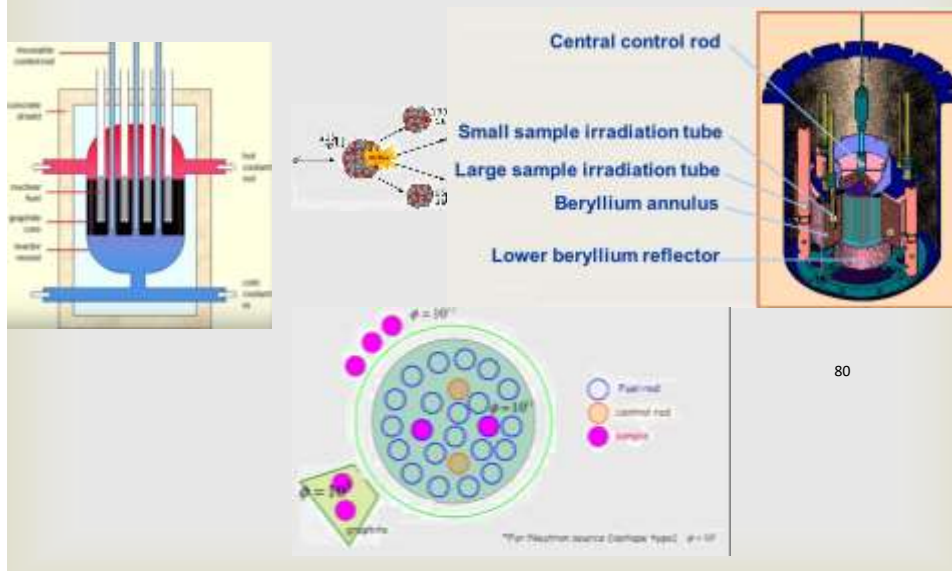
79

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.8. Activarea nucleizi

Activare nucleizi în reactorul nuclear

- Producerea radionuclizi în reactorul nuclear



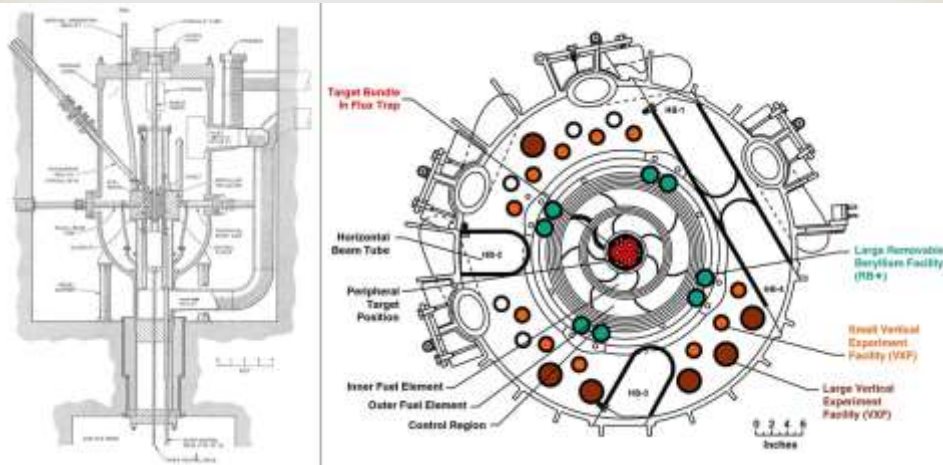
80

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.2. Activarea nucleizi

Activare nucleizi în reactorul nuclear

❑ Producerea radionucleizi în reactorul nuclear



OPAL research reactor animation

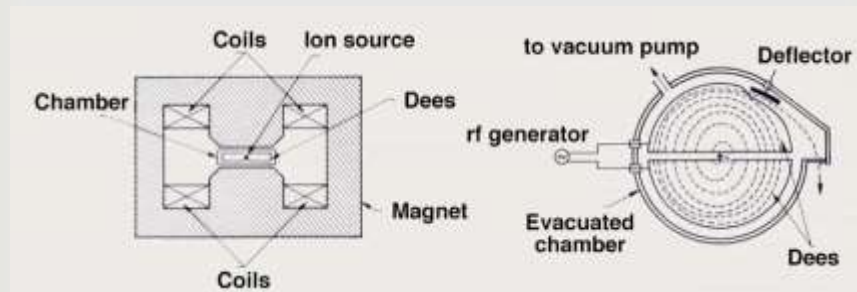
1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.2. Activarea nucleizi

Activare nucleizi ciclotron

❑ Producerea radionucleizi prin bombaradare cu protoni

❑ Într-un ciclotron particulele sunt accelerate de-a lungul unei traiectorii în spirală ghidată în interiorul doi electrozi semi-cilindrici (Dees) de către un câmp magnetic uniform produse între piesele polare ale unui magnet mare (1 T).



cyclotron

1.2. Structura atomică și nucleară

1.2.1. Radioactivitate

1.2.2. Activarea nuclizi

1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

✓ degradare beta

▪ beta plus degradare

▪ degradare beta minus

▪ captură de electroni

✓ degradare gama

▪ degradare gama pură

▪ conversie internă

▪ fisiune spontană

1.2.4. Definițiile de bază pentru structura atomică

1.2.5. Modelul Rutherford al atomului

1.2.6. Modelul lui Bohr al atomului de hidrogen

1.2.7. Atomul multi-electron

1.2.8. Structura nucleară

1.2.9. Reacții nucleare

83

1.2. Structura Atomică și nucleară

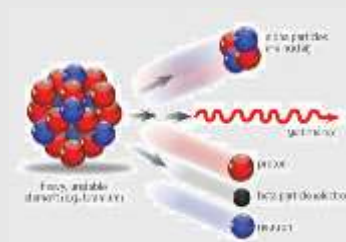
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Moduri de dezintegrare

❑ Dezintegrarea radioactivă este un proces prin care nuclee instabile ajung la o configurație mai stabilă.

❑ Există patru moduri principale de dezintegrare radioactivă:

- degradare alfa
- degradare beta
 - ✓ beta plus degradare
 - ✓ degradare beta minus
 - ✓ captură de electroni
- degradare gama
 - ✓ degradare gama pură
 - ✓ conversie internă
- fisiune spontană

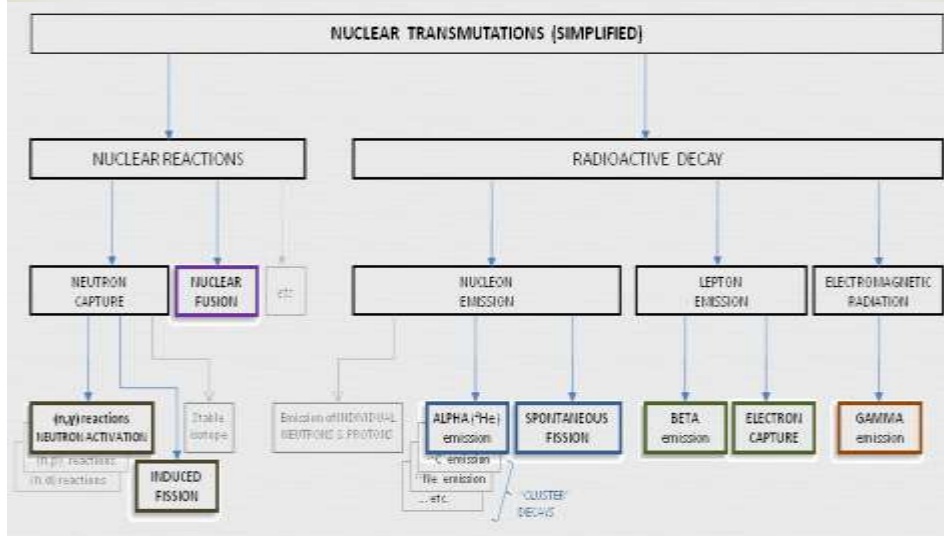


84

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Moduri de dezintegrare



85

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Emitere particule la dezintegrare

❑ Transformări nucleare sunt, de obicei, însoțite de emisii de **particule energetice** (încărcate, neutre, fotoni, neutrini)

❑ Dezintegrare radioactivă Emitere particule

• Alpha decay	α particle
• Beta plus decay	β^+ particle (positron), neutrino
• Beta minus decay	β^- particle (electron), antineutrino
• Electron capture	Neutrino
• Pure gamma decay	Photon
• Internal conversion	Orbital electron
• Spontaneous fission	Fission products

86

1.2. Structura Atomică și nucleară
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Emitere energie la dezintegrare

- **Energie totală de particulelor eliberate în procesul de transformare este egală cu scăderea netă a energiei de repaus a atomului neutru, de la mamă P la fiică D.**
- **Energia de degradare (valoarea Q) este dat ca:**

$$Q = \{M(P) - [M(D) + m]\} c^2$$

$M(P)$, $M(D)$, și m sunt masele de repaus nucleare a mamă, fiică și particulelor emise.

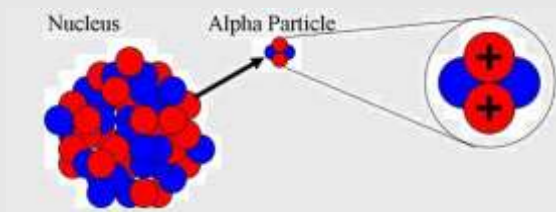
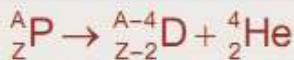


87

1.2. Structura Atomică și nucleară
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Dezintegrare alfa

- **Degradare alpha este o transformare nucleară în care:**
 - o particulă alfa energetică (ion de heliu-4) este emisă.
 - numărul atomic Z al părintelui scade cu 2.
 - numărul de masă atomică A a părintelui scade cu 4



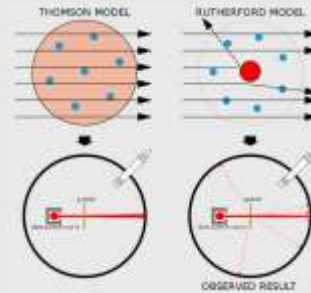
88

1.2. Structura Atomică și nucleară
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Particule alfa - energia

- Henri Becquerel a descoperit dezintegrarea alfa în 1896; George Gamow a explicat natura sa exactă în 1928, folosind efectul mecanic cuantic de tunelare.

- Hans Geiger și Ernest Marsden folosit 5,5 MeV alfa particule emise de radon-222 în experimentul lor de împrăștierea particulelor alfa pe o folie de aur.



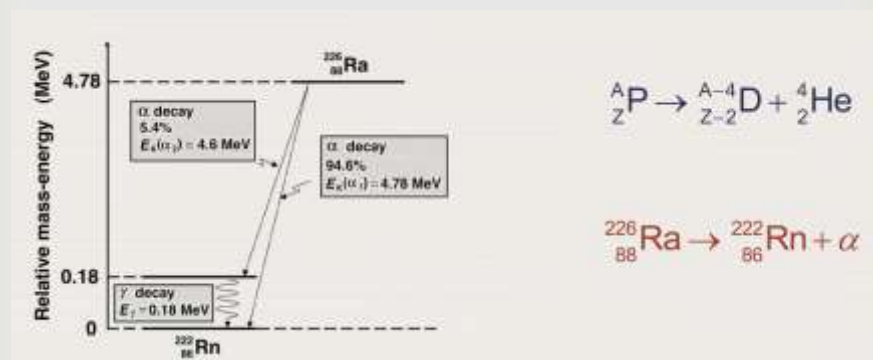
- Energie cinetică a particulelor alfa eliberate de radionuclizi naturali este între 4 MeV și 9 MeV.

89

1.2. Structura Atomică și nucleară
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Exemplu dezintegrare alfa

- Cel mai bun exemplu cunoscut de degradare alfa este transformarea de radu-226 în radon-222, cu un timp de înjumătățire de 1602 ani



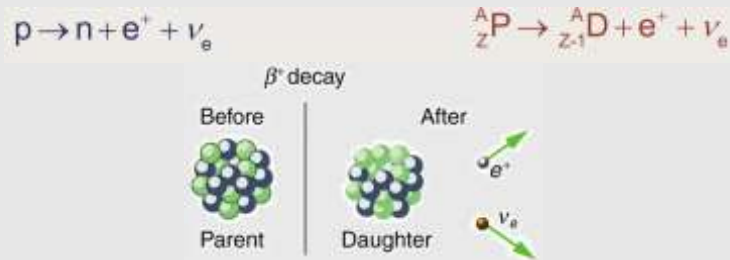
90

1.2. Structura Atomică și nucleară
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Dezintegrare beta plus

❑ **Degradare Beta plus** este o transformare nucleară în care:

- nucleu părinte radioactiv bogat în protoni transformă un proton într-un neutron.
- pozitroni și neutrino, sunt ejectate din nucleul părinte.
- număr atomic Z al părintelui scade cu unul; număr de masă atomică A rămâne aceeași.

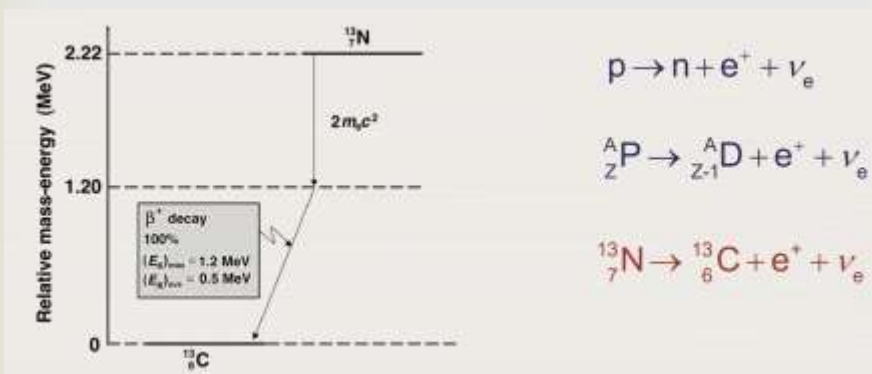


91

1.2. Structura Atomică și nucleară
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Exemplu dezintegrare alfa beta plus

❑ **Exemplu de dezintegrare beta plus** este transformarea azot-13 în carbon-13, cu un timp de înjumătățire de 10 min.

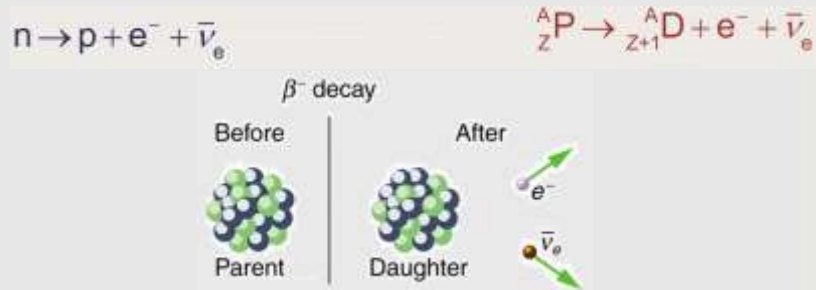


92

1.2. Structura Atomică și nucleară
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Dezintegrare beta minus

- ❑ **Degradare Beta minus este o transformare nucleară în care:**
- nucleu părinte radioactiv bogat în neutroni transforma un neutron în un proton și
 - electron și anti-neutrino, sunt ejectați din nucleul părinte.
 - număr atomic Z a părintelui crește de unul; masa atomică A rămâne aceeași.

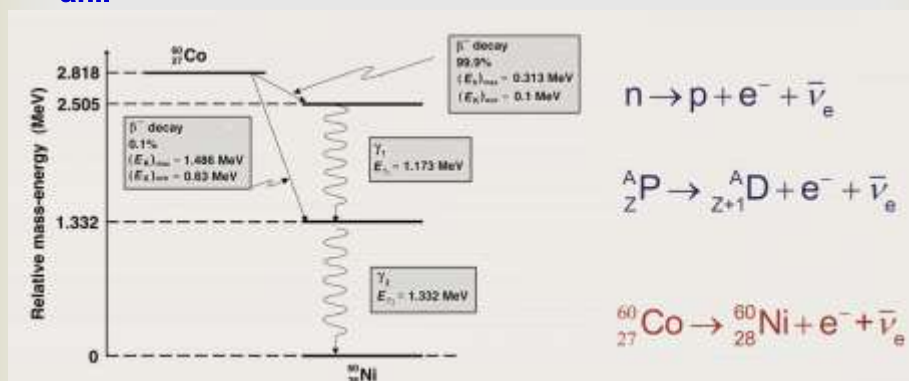


93

1.2. Structura Atomică și nucleară
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Exemplu dezintegrare beta minus

- ❑ **Exemplu de dezintegrare beta minus este transformarea cobalt-60 în nichel-60, cu un timp de înjumătățire de 5,26 ani.**



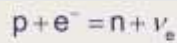
94

1.2. Structura Atomică și nucleară
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Dezintegrare captare electron

□ **Degradare captare electron** este o transformare nucleară în care:

- Nucleul captează un electron orbital atomic (de obicei K înveliș).
- Protonul se transformă într-un neutron.
- Neutrino este evacuat.
- Numărul atomic Z al părintelui scade cu unul; masa atomică A rămâne aceeași.

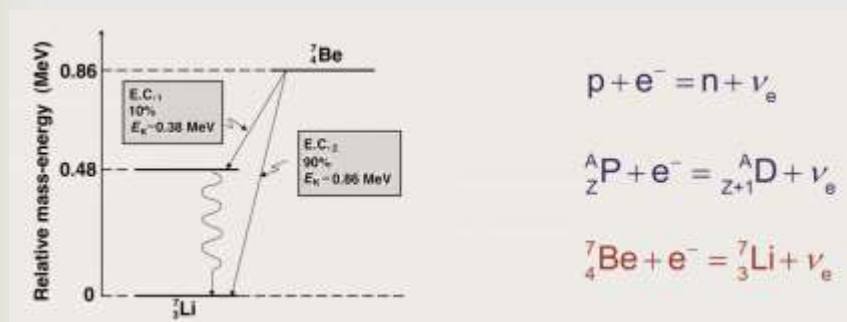


95

1.2. Structura Atomică și nucleară
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Exemplu dezintegrare captura de electroni

□ **Exemplu de descompunere nucleară prin captura de electroni** este transformare de berillium-7 în litiu-7

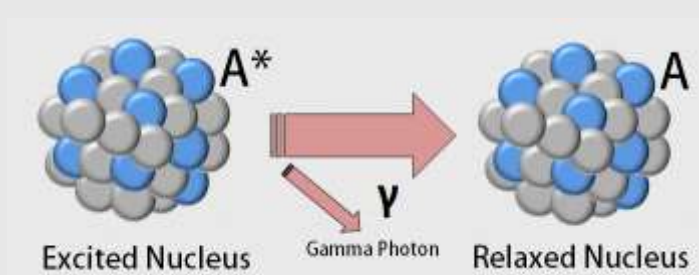


96

1.2. Structura Atomică și nucleară
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Dezintegrare gamma

- ❑ **Degradare gamma este o transformare nucleară în care un nucleu părinte excitat P, produsă în general prin dezintegrare alfa, beta minus sau beta plus degradare, atinge starea solului prin emisie de unul sau mai mulți fotoni gamma.**
- ❑ **numărul atomic Z și numărul de masă atomică A nu se va schimba în descompunere gamma.**

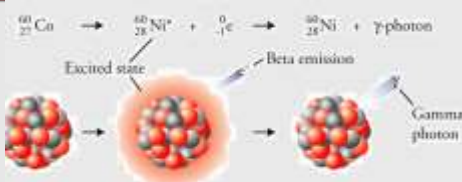


97

1.2. Structura Atomică și nucleară
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Dezintegrare gamma

- ❑ **În cele mai multe alfa și beta descompuneri de-excitația fiicii se produce instantaneu, astfel încât ne referim la emiterea raze gamma ca în cazul în care au fost produse de către nucleul părinte.**



- ❑ **În cazul în care nucleul fiica de-excită cu o întârziere de timp, stare excitată de fiica este menționată ca o stare metastabilă și proces de de-excitație se numește **tranziție izomerică**.**

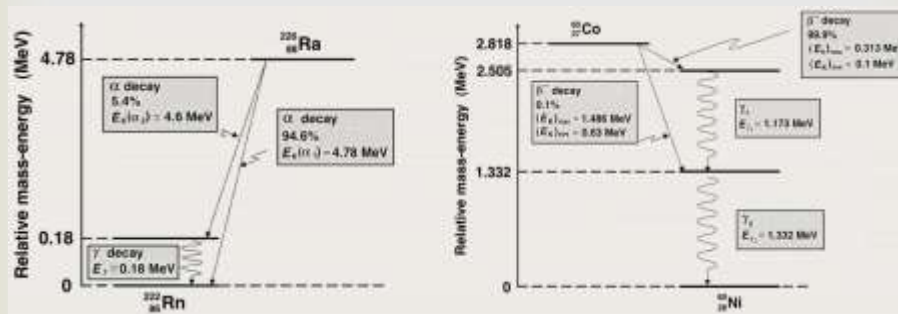
98

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Exemple dezintegrare gamma

- Exemple de dezintegrare gamma sunt transformarea cobalt-60 în nichel-60 în procesul de beta minus degradare, și transformarea de radu-226 în radon-222 în procesul de degradare alfa.



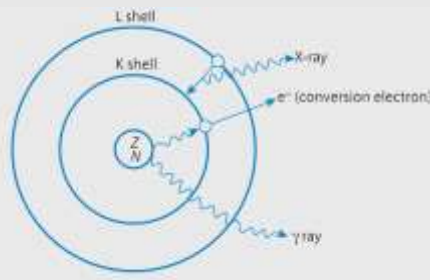
99

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Conversie Interna

- **Conversie internă este o transformare nucleară în care:**
- energia de-excitației nucleare este transferată către un electron orbital (de obicei K înveliș).
 - electron este emis de la atom cu o energie cinetică egală cu energia de de-excitare mai mică decât energia obligatorie a electronilor.
 - rezultă loc vacant în înveliș care este umplut cu un electron orbital de nivel superior iar energia de tranziție este emis sub forma fotoni caracteristici sau electroni Auger.



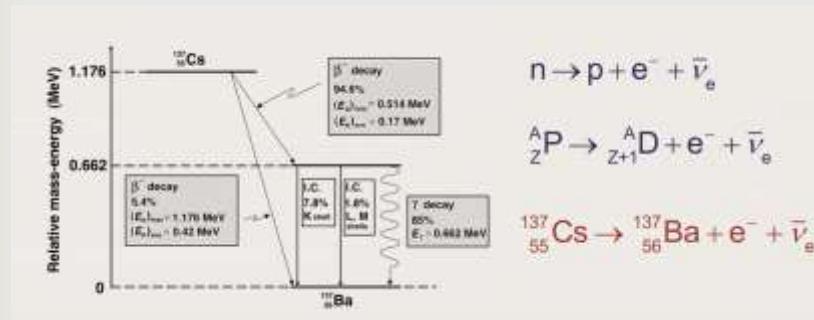
100

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Exemplu dezintegrare beta minus și conversie internă

- Exemplu pentru ambele emisii de fotoni gamma și emisie de electroni de conversie este descompunerea beta minus de cesiu 137 în bariu-137, cu un timp de înjumătățire de 30 de ani.



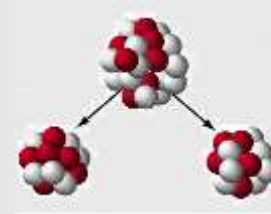
101

1.2. Structura Atomică și nucleară

1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Fiziune spontană

- Fisiune spontană este o transformare nucleară prin care un nucleu mare masă atomică se împarte spontan în două fragmente aproape egale de fisiune.
- De la doi până la patru neutroni sunt emise în timpul procesului de fisiune spontană
- Fisiune spontană urmează același proces ca fisiune nucleară cu excepția faptului că nu este în auto-susținere, deoarece nu generează rata fluență neutroni necesară pentru a susține o "reacție în lanț".



102

1.2. Structura Atomică și nucleară
1.2.3. Moduri de dezintegrare radioactivă

Fezabilitate fisiune spontană

- În practică, fisiunea spontană este doar energetic fezabilă pentru nuclizi cu mase atomice peste 230 u sau cu

$$Z^2/A \geq 235$$

- Fisiune spontană este un proces în competiție pentru alfa dezintegrare; cu atât mai mare este A peste uraniu-238, cu atât mai mult proeminent este fisiunea spontană în comparație cu descompunerea alfa și cu atât mai scurtă este timpul de înjumătățire pentru fisiune spontană.

https://www.youtube.com/watch?v=s9QIgY5_8ok 230 s

Metode de dezintegrare - Animatie

103

- 1.1. Introducere
- 1.2. Structura atomică și nucleară
- 1.3. Interacțiunea electronilor cu materia**
- 1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

104

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

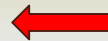
- 1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital
- 1.3.2. Interacțiuni electron-nucleu
- 1.4.3. Putere de frânare

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

- 1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante
- 1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni
- 1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant
- 1.4.4. Efectul fotoelectric
- 1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)
- 1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)
- 1.4.7. Producție Perechi
- 1.4.8. Reacții fotonucleare
- 1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare
- 1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale
- 1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

105

1.3. Interacțiunea electronilor



- Când electronii energetici străbat materia, acestea interacționează cu materia prin **Interacțiuni Coulomb** cu
 - **electroni orbitali atomici și**
 - **nucleeele atomice.**
- Prin aceste ciocniri electronii pot
 - pierde energia lor cinetică (**de coliziune și pierderile radiative**), sau
 - schimba direcția lor de deplasare (**imprastierea**).

106

1.3. Interactiunea electronilor

- ❑ Pierderile de energie sunt descrise prin **putere de oprire**;
- ❑ Imprastierea este descrisă de **putere de Imprastiere**.
- ❑ Coliziunile dintre electroni incidenți și un electron orbital sau nucleul unui atom poate fi
 - **elastica sau**
 - **Inelastica.**

107

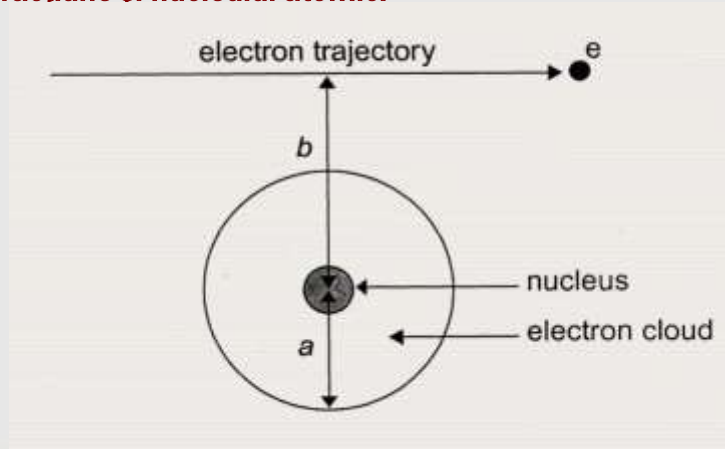
1.3. Interactiunea electronilor

- ❑ Într-o **clocnire elastică** de electronul este *deviat de la calea sa inițială, dar nici o pierdere de energie nu are loc, în timp ce*
- ❑ Într-o **coliziune inelastică** electronul este *deviat de la calea sa inițială și o parte din energie este transferată la un electron orbital sau emisă în formă de bremsstrahlung.*
- ❑ Electronii energetici experimentează mii de coliziuni în care acestea traversează un absorbant, prin urmare, comportamentul lor este descris de o teorie statistică a împrăstierii multiple îmbrățișând clocnirile elastice și inelastice individual cu electronii orbitali și a nucleele.

108

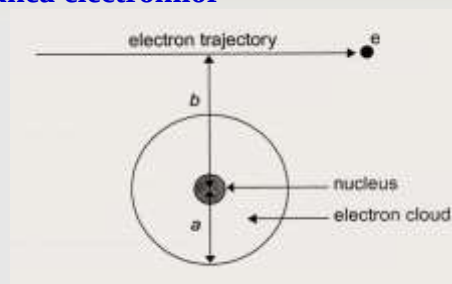
1.3. Interacțiunea electronilor

- Tipul de interacțiune în care electronul trece pe lângă un atom particular de raza a depinde de **parametrul de impact b al interacțiunii**, definit ca distanța perpendiculară între direcția electronului înainte de interacțiune și nucleului atomic.



109

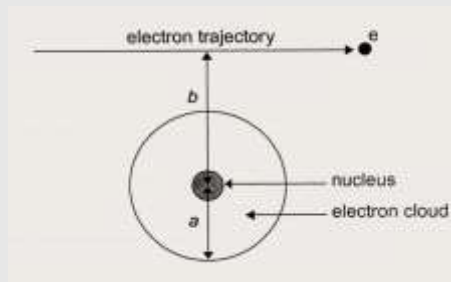
1.3. Interacțiunea electronilor



- Pentru $b \gg a$ electronul va suferi o **coliziune moale** cu întreg atomul și doar o cantitate mică de energie va fi transferată de la electronul incident electronilor orbitali.
- Pentru $b \approx a$ electronul va suferi o **coliziune tare** cu un **electron orbital** și o fracțiune semnificativă de energie cinetică a electronului va fi transferată electronilor orbitali.

110

1.3. Interacțiunea electronilor



- Pentru $b \ll a$ incident electron suferă o **Interacțiune radiativă** (coliziune) cu nucleul atomic. Electronul va emite un foton (bremsstrahlung) cu energie între zero și energia cinetică a electronului incident.
- Energia fotonului bremsstrahlung emis depinde de magnitudinea parametrului de impact b ; mai mic parametrul de impact, mai mare energia fotonului bremsstrahlung.

111

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital

1.3.2. Interacțiuni electron nucleu

1.4.3. Putere de frânare

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant

1.4.4. Efectul fotoelectric

1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)

1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)

1.4.7. Producție Perechi

1.4.8. Reacții fotonucleare

1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare

1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale

1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

112

1.3. Interacțiunea electronilor

1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital

- Interacțiuni Coulomb inelastice între electron incident și electroni orbitali rezultă în **ionizare și excitație** de atomi:
 - **Ionizarea:** evacuare a unui electron orbital de la atom absorbant;
 - **Excitație:** transferul unui electron orbital al atomului absorbant dintr-o orbita permisă la o orbita mai mare permisă (înveliș).
- excitații și ionizare atomică rezultă în pierderi de energie de coliziune și sunt caracterizate **puteri de stopare prin coliziune (ionizare)**.

113

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital

1.3.2. Interacțiuni electron nucleu

1.4.3. Putere de frânare

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant

1.4.4. Efectul fotoelectric

1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)

1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)

1.4.7. Producție Perechi

1.4.8. Reacții fotonucleare

1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare

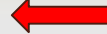
1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale

1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

114

1.3. Interacțiunea electronilor

1.3.2. Interacțiuni electron-nucleu



- Interacțiuni Coulomb între electron incident și nuclee de atom absorbant rezultată în
 - **Imprastiere electron** și nici o pierdere de energie (coliziune elastic):
caracterizată prin puterea împrăștierea unghiulară.
 - **Imprastiere electron** și o oarecare pierdere a energiei cinetice sub formă de bremsstrahlung (**pierdere radiații**):
caracterizată prin putere oprire de radiație

115

1.3. Interacțiunea electronilor

1.3.2. Interacțiuni electron-nucleu

- Producerea iradierii de frânare (Bremsstrahlung) este reglementată de relație Larmor,

$$P = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

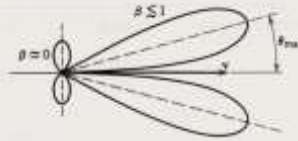
- și prevede că P puterea emisă în forma de fotoni de la o particulă încărcată accelerată este proporțională cu pătratul accelerării particulelor a și pătratul de sarcină q a particulei.

116

1.3. Interacțiunea electronilor

1.3.2. Interacțiuni electron-nucleu

- Distribuția unghiulară de fotoni emiși (Bremsstrahlung) este proporțională cu

$$\frac{\sin^2 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^5}$$


în cazul în care θ este unghiul dintre accelerația particulelor încărcate și un vector unitate de conectare a sarcinii cu punctul de observare și β este standardul relativist v/c .

- La vitezele mici v a particulei încărcate ($\beta \rightarrow 0$) distribuția unghiulară corespunde $\sin^2 \theta$ și prezintă un maxim la $\theta = 90^\circ$.
- Cu toate acestea, ca viteza particulei încărcate crește de la 0 spre c , distribuția unghiulară a fotonilor emiși devine din ce în ce mai mult să atingă direcția electronilor.

117

1.3. Interacțiunea electronilor

1.3.2. Interacțiuni electron-nucleu

- Unghiul la care fotonii de emisie au intensitate maximă poate să se calculeze de la următoarea relație:

$$\theta_{\max} = \arccos \left[\frac{1}{3\beta} (\sqrt{1 + 15\beta} - 1) \right]$$

- astfel că, pentru $\beta \rightarrow 0$ rezultă $\theta_{\max} = \pi / 2$ și $\beta \rightarrow 1$ rezultă $\theta_{\max} = 0$, indicând faptul că, în radiologia de diagnostic intervalul energetic (orthovoltage beams) majoritatea fotonilor de raze X sunt emise la 90° față de calea de electroni, în timp ce în intervalul megavoltaj (linac beams) cei mai mulți fotoni sunt emiși în direcția fasciculului de electroni care lovește țintă.
- energia pierdută pentru radiație și randamentul radiativ g crește direct cu numărul atomic Z al absorbantului și energia cinetică a electronilor.
- Randamentul radiației de raze X în intervalul energetic în radiodiagnostic (~ 100 keV) este de ordinul a 1%, în timp ce în intervalul energie megavoltaj acesta se ridică la 10-20%.

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital

1.3.2. Interacțiuni electron nucleu

1.4.3. Putere de frânare

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant

1.4.4. Efectul fotoelectric

1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)

1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)

1.4.7. Producție Perechi

1.4.8. Reacții fotonucleare

1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare

1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale

1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

119

1.3. Interacțiunea electronilor

1.3.3. Putere de frânare



- Pierderile de energie inelastice de către un electron ce se deplasează printr-un mediu cu densitate ρ sunt descrise de către **puterea de frânare lineară totală** care reprezintă energia cinetică E_K pierdută de electron pe unitatea de lungime x , sau:

$$S_{\text{tot}} = \frac{dE_K}{dx} \quad \text{in MeV/cm}$$

- Rata de pierdere a energiei pentru un fascicul de electroni terapie în apă și țesuturi este de aproximativ **2 MeV / cm.**

1.3. Interacțiunea electronilor

1.3.3. Putere de frânare

- **Putere de oprire masă totală** este definită drept putere de oprire liniară împărțită la densitatea mediului de absorbție.

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{tot}} = \frac{1}{\rho} \frac{dE_K}{dx} \quad \text{in} \quad \text{MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{g}$$

- $(S/\rho)_{\text{tot}}$ este formată din două componente:

- **puterea de frânare de de masa coliziune $(S/\rho)_{\text{col}}$** , rezultând din interacțiuni electron-electron-orbital (excitații atomice și ionizare),
- **precum și puterea de frânare de masă radiativă $(S/\rho)_{\text{rad}}$** care rezultă din interacțiuni electron-nucleu (producerea radiațiilor X):

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{tot}} = \left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{col}} + \left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{rad}}$$

121

1.3. Interacțiunea electronilor

1.3.3. Putere de frânare

- Pentru **particule încărcate grele** puterea oprire de radiații $(S/\rho)_{\text{rad}}$ este neglijabilă, astfel, $(S/\rho)_{\text{tot}} \approx (S/\rho)_{\text{col}}$

- Pentru **particule încărcate ușoare** ambele componente contribuie la puterea oprire totală, astfel,

$$(S/\rho)_{\text{tot}} = (S/\rho)_{\text{col}} + (S/\rho)_{\text{rad}}$$

- În termen de o gamă largă de energii cinetice sub 10 MeV pierderile coliziune (ionizare) sunt dominante;

$$(S/\rho)_{\text{col}} > (S/\rho)_{\text{rad}}$$

cu toate acestea, situația se inversează la energii cinetice mari.

- Trecerea între cele două moduri are loc la o energie cinetică critică în cazul în care cele două puteri de oprire sunt egale

$$(E_K)_{\text{crit}} \approx \frac{800 \text{ MeV}}{Z}$$

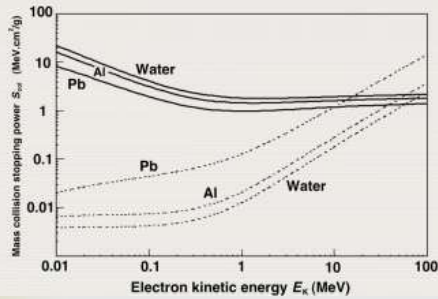
122

1.3. Interacțiunea electronilor

1.3.3. Putere de frânare

□ Rata de pierdere de energie pentru interacțiuni de coliziune depinde de:

- energia cinetică a electronului.
- densitate electroni a absorberului.



□ Rate pierderii de energie de coliziune este mai mare pentru absorbat cu număr atomic Z scăzut decât pentru absorbat cu Z înalt, pentru absorbat cu un Z mare are densitate electroni mai mică (mai puțini electroni per gram).

□ Linile solide: putere de oprire masă coliziune
Linile punctate: putere de oprire de radiații masa

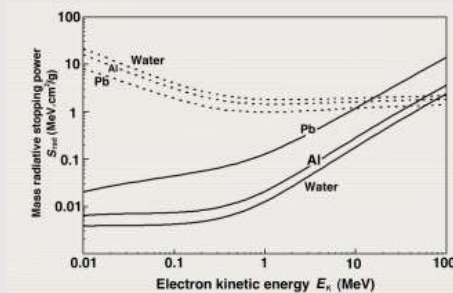
123

1.3. Interacțiunea electronilor

1.3.3. Putere de frânare

□ Rata de pierdere de energie pentru interacțiuni de radiații depinde de:

- Energia cinetică a electronului.
- Pătratul numărului atomic a absorberului.



□ producție bremsstrahlung prin pierderile de radiații este mai mult eficient pentru energie mai mare electroni și număr atomic mai mare amortizor.

□ Linile punctate : putere de oprire coliziune masă
Linile solide : putere de oprire de radiații masa

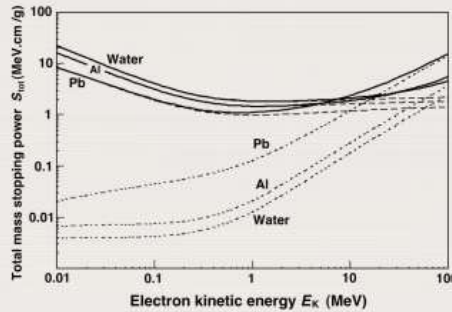
124

1.3. Interacțiunea electronilor

1.3.3. Putere de frânare

□ Rate de pierdere de energie **totală** depinde de:

- energia cinetică a electronului.
- numărului atomic a absorberului.
- densitate electroni a absorberului.



$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{tot}} = \left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{col}} + \left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{rad}}$$

- Linile solide: **putere totală de oprire masa**
- Linile întrerupte: **putere de oprire coliziune masa**
- Linile punctate: **putere de de oprire radiații masa**

125

1.3. Interacțiunea electronilor

1.3.3. Putere de frânare

$(S/\rho)_{\text{col}}$ are un rol important în dosimetria de radiații, întrucât doză D în mediu poate fi exprimată ca:

$$D = \phi (S/\rho)_{\text{col}}$$

$(S/\rho)_{\text{tot}}$ este utilizată în calculul interval de electroni R , după cum urmează:

$$R = \int_0^{E_k} \left(\frac{S}{\rho} (E_k) \right)^{-1} dE_k$$

Ambele $(S/\rho)_{\text{rad}}$ și $(S/\rho)_{\text{tot}}$ sunt utilizate în determinarea randamentului radiației (Mentionată ca eficiență radiației bremsstrahlung) Y ca:

$$Y = \frac{1}{E_k} \int_0^{E_k} \frac{(S/\rho)_{\text{rad}}}{(S/\rho)_{\text{tot}}} dE_k$$

126

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

- 1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital
- 1.3.2. Interacțiuni electron nucleu
- 1.4.3. Putere de frânare

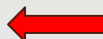
1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

- 1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante
- 1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni
- 1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant
- 1.4.4. Efectul fotoelectric
- 1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)
- 1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)
- 1.4.7. Producție Perechi
- 1.4.8. Reacții fotonucleare
- 1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare
- 1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale
- 1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

127

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante



□ În funcție de originea lor, radiatiile ionizante de fotoni în mod indirect se încadrează în una din următoarele patru categorii:

- **Bremsstrahlung (raze X continue)**,
emise prin interacțiuni electron-nucleu.
- **raze X Caracteristice (Discrete)**,
emise în tranziții de electronii orbitali de la o orbita permis la un post vacant într-o altă orbită permisă.
- **raze γ (Discrete)**,
emise prin tranziții nucleare la degradarea γ .
- **radiație de anihilare (Discrete, tipic 0.511 MeV)**,
emise prin pozitroni-electron anihilare.

128

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante

□ În penetrarea unui mediu absorbant, fotonii pot experimenta diverse interacțiuni cu atomii de mediu, care implică:

- • atom absorbant în ansamblu
- • nucleeele mediului de absorbție
- • electroni orbitali ai mediului de absorbție.

129

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante

□ Interacțiunile de fotoni cu nucleee pot fi:

- interacțiuni directe foton-nucleu (fotodezintegrare)
sau
- interacțiunile dintre foton și câmpul electrostatic al nucleului (producție pereche).

□ interacțiunile foton-electron orbital sunt caracterizate ca interacțiunile dintre foton și

- electron slab legat (efect Compton, producție triplet)
sau
- electron strâns legat (efect fotoelectric).

130

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante

- **Un electron slab legat** este un electron al cărui energie obligatorie la nucleu este mică în comparație cu energie fotonului

$$E_B \ll h\nu$$

- Interacțiunea dintre un foton și electroni slab legat este considerată a fi o **interacțiune între un foton și un electron liber** (nelegat).

131

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante

- **Electroni strâns legați** este un electron al cărui energie obligatorie este comparabilă cu, mai mare decât, sau ușor mai mică decât energia fotonica.

- Pentru o interacțiune foton cu un electron legat strâns, energia de legătură a electronului trebuie să fie de ordinea, dar puțin mai mică, decât energia de foton.

$$E_B \leq h\nu$$

- Interacțiunea dintre un foton și un electron strâns legat este considerată o interacțiune între un foton și atom ca un întreg.

132

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante

□ În ceea ce privește **soarta fotonului** după interacțiunea cu un atom există două rezultate posibile:

- **fotonul dispare** (adică, este absorbit complet) și o porțiune de energie este transferată la particule ușor încărcate (electroni și pozitroni din mediul de absorbție).
- **Fotonul este împrăștiat** și două rezultate sunt posibile:
 - ✓ fotonul rezultat are **aceeași energie ca fotonul Incident**, și nici o particulă încărcată nu este eliberată
 - ✓ fotonul împrăștiat are o **energie mai mică decât fotonul Incident**, iar surplusul de energie este transferată la o particulă încărcată ușor (de electroni).

133

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante

□ Particule încărcate ușor produse în mediul de absorbție prin interacțiuni fotonice **vor**:

- Sau vor depune energia lor la mediu prin **Interacțiuni Coulomb cu electroni orbitali ai mediului de absorbție** (pierdere coliziune)
- Sau **radiază energia în afară** prin interacțiuni Coulomb cu nucleele mediului de absorbție (pierderea de radiații).

134

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

- 1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital
- 1.3.2. Interacțiuni electron nucleu
- 1.4.3. Putere de frânare

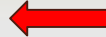
1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

- 1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante
- 1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni**
- 1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant
- 1.4.4. Efectul fotoelectric
- 1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)
- 1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)
- 1.4.7. Producție Perechi
- 1.4.8. Reacții fotonucleare
- 1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare
- 1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale
- 1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

135

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni



- ❑ Cel mai important parametru utilizat pentru caracterizarea penetrare raze X sau gamma a unui mediu absorbant **este coeficientul de atenuare liniară μ**
- ❑ Coeficientul de atenuare liniară depinde de:
 - energia fasciculului de fotoni
 - numărul atomic Z al absorbantului
- ❑ Coeficientul de atenuare poate fi descris ca **probabilitate că un foton va avea o interacțiune cu absorber per unitate de lungime .**

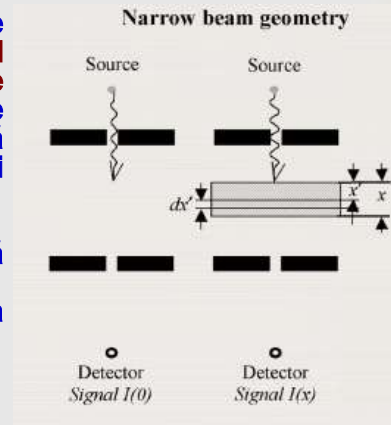
136

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

□ Coeficientul de atenuare este **determinat experimental** folosind așa-numita tehnică de geometrie fascicul îngust, care implică o sursă strict colimată de fotoni monoenergetici și detector strict colimat.

- x reprezintă grosime totală de absorbant
- x' reprezintă grosimea variabilă.



137

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

□ O placă de material absorbant de grosime x scade intensitatea semnalului detectorului de la $I(0)$ la $I(x)$.

□ Un strat de grosime dx' reduce intensitatea fasciculului cu dI și reducerea fracționată în intensitate, dI/I este proporțională cu

- coeficient de amortizare (atenuare lineară).
- grosimea stratului dx'

$$-\frac{dI}{I} = \mu dx'$$

□ După integrare obținem

$$\int_{I(0)}^{I(x)} \frac{dI}{I} = -\int_0^x \mu dx' \quad \text{or} \quad I(x) = I(0)e^{-\int_0^x \mu dx'}$$

138

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

- Pentru un mediu omogen $\mu = \text{const}$ și obținem o relație exponențială standard, valabilă pentru fascicule de fotoni monoenergetici

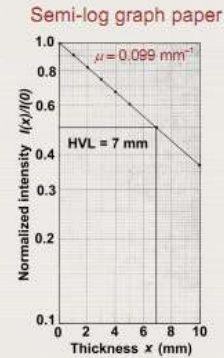
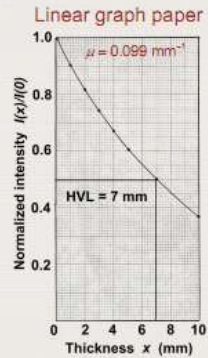
$$I(x) = I(0)e^{-\mu x}$$

or

$$I(x) / I(0) = e^{-\mu x}$$

For $x = \text{HVL}$

$$\frac{I(x)}{I(0)} = 0.5$$



139

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

- Relațiile între $x_{1/2}$, $\bar{x}$ și $x_{1/10}$

$$\mu = \frac{\ln 2}{x_{1/2}} = \frac{1}{\bar{x}} = \frac{\ln 10}{x_{1/10}}$$

or

$$x_{1/2} = (\ln 2) \bar{x} = \frac{\ln 2}{\ln 10} x_{1/10} \approx 0.3 x_{1/10}$$

140

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

□ În plus față de coeficientul liniar de atenuare μ alți coeficienți de atenuare aferente și secțiuni sunt în folosire pentru a descrie atenuare fascicul de fotoni:

➤ coeficientul de atenuare în masă μ_m

➤ secțiune transversală atomică ${}_a\mu$

➤ secțiune transversală electronică ${}_e\mu$

$$\mu = \rho \mu_m = n {}_a\mu = n {}_e\mu$$

$$n = \frac{N_a}{V} = \rho \frac{N_a}{m} = \rho \frac{N_A}{A}$$

➤ n – numărul de atomi per volum cu densitatea ρ și masa atomică A

141

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

	Symbol	Relationship to μ	Units
Linear attenuation coefficient	μ	μ	cm^{-1}
Mass attenuation coefficient	μ_m	$\frac{\mu}{\rho}$	cm^2 / g
Atomic cross section	${}_a\mu$	$\frac{\mu}{n}$	$\text{cm}^2 / \text{atom}$
Electronic cross section	${}_e\mu$	$\frac{\mu}{Zn}$	$\text{cm}^2 / \text{electron}$

142

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

- Coeficientul de transfer de energie,

$$\mu_{tr} = \mu \frac{\bar{E}_{tr}}{h\nu},$$

cu energia medie transferată de foton primar cu energie la energia cinetică de particule încărcate (e^- și e^+).

- coeficient de absorbție de energie,

$$\mu_{ab} = \mu \frac{\bar{E}_{ab}}{h\nu},$$

cu energia medie absorbită în volumul de interes în mediul de absorbție.

- În literatura de specialitate, este de obicei folosit μ_{en} în loc de μ_{ab} , totuși utilizarea de indicele "ab" pentru energie absorbită în comparație cu indicele "tr" pentru energie transferat pare mai logic.

143

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

- Energia medie absorbită în volumul de interes

$$\bar{E}_{ab} = \bar{E}_{tr} - \bar{E}_{rad}$$

- cu componenta E_{rad} de energie din E_{tr} care este energia particulelor încărcate pierdută sub formă de coliziuni de radiații (radiație de frânare) și nu este absorbită în volumul de interes.

144

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

□ Coeficientul liniar de absorbție a energiei este

$$\mu_{ab} = \mu \frac{\bar{E}_{ab}}{h\nu} = \mu \frac{\bar{E}_{tr} - \bar{E}_{rad}}{h\nu} = \mu_{tr} - \mu_{tr} \frac{\bar{E}_{rad}}{\bar{E}_{tr}} = \mu_{tr}(1 - \bar{g})$$

□ unde $\bar{g}$ este așa-numita **fracțiunea de radiație** (media fracțiunii din energia transferată - pierdută în interacțiunile de radiații de particule secundare încărcate, deoarece acestea călătoresc prin absorbant).

145

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

□ Coeficientul de atenuare masa a unui compus sau unui amestec este aproximat de o însumare de o medie ponderată a componentelor sale:

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \frac{\mu_i}{\rho}$$

✓ w_i este proporția în greutate a elementului constitutiv i .

✓ μ_i/ρ este coeficientul de atenuare în masă a elementului constitutiv al i .

146

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

- 1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital
- 1.3.2. Interacțiuni electron nucleu
- 1.4.3. Putere de frânare

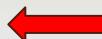
1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

- 1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante
- 1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni
- 1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant**
- 1.4.4. Efectul fotoelectric
- 1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)
- 1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)
- 1.4.7. Producție Perechi
- 1.4.8. Reacții fotonucleare
- 1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare
- 1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale
- 1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

147

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant



□ În funcție de **tipul de țintă**, există două posibilități pentru interacțiune foton cu un atom:

- interacțiunea foton - electron orbital
- interacțiunea foton - nucleu

□ În funcție de **tipul de eveniment**, există două posibilități pentru interacțiune foton cu un atom:

- absorbția completă a fotonului
- dispersia fotonului

148

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant

□ In fizica medicala interacțiunile fotoni se încadrează în patru grupe:

- **Interacțiunile de Importanță majoră:**
 - ✓ Efectul fotoelectric.
 - ✓ Compton împrăștiere de către electron liber.
 - ✓ producția perechi (inclusiv producția de triplet).
- **Interacțiunile de Importanță moderată:**
 - ✓ împrăștierea Rayleigh.
 - ✓ Thomson imprastiere de electroni liberi.
- **Interacțiuni de Importanță minoră**
 - ✓ reacții fotonucleare (efect fotoelectric nuclear)
- **interacțiuni neglijabile:**
 - ✓ Thomson și Compton împrăștiere de către nucleu.
 - ✓ producția meson.
 - ✓ Delbrück imprastiere.

149

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant

Interaction	Symbol for electronic cross section	Symbol for atomic cross section	Symbol for linear attenuation coefficient
Thomson scattering	σ_{Th}	σ_{Th}	σ_{Th}
Rayleigh scattering	-	σ_{R}	σ_{R}
Compton scattering	σ_{c}	σ_{c}	σ_{c}
Photoelectric effect	-	τ	τ
Pair production	-	K_{pp}	K_{p}
Triplet production	K_{tp}	K_{tp}	K_{t}
Photodisintegration	-	σ_{pn}	σ_{pn}

150

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant

☐ TIPURI DE ȚINTE IN INTERACȚIUNILE DE FOTONI

Interacțiune foton-electron orbital Interacțiune foton-nucleu

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • cu electroni legați
Efect fotoelectric
Împrăștierea Rayleigh | <ul style="list-style-type: none"> • cu nucleu direct
fotodezintegrare |
| <ul style="list-style-type: none"> • cu electroni "liberi"
Thomson împrăștierea
Compton împrăștierea | <ul style="list-style-type: none"> • cu câmp Coulomb de nucleu
producție perechi |
| <ul style="list-style-type: none"> • cu câmp Coulomb de electroni
producție triplet | |

151

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant

☐ Tipuri de interacțiuni foton-atom

Absorbție completă de foton

Efectul fotoelectric
Producție perechi
Producție triplet
Fotodezintegrare

Împrăștiere foton

Thomson împrăștiere
Împrăștierea Rayleigh
Împrăștierea Compton

152

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

- 1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital
- 1.3.2. Interacțiuni electron nucleu
- 1.4.3. Putere de frânare

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

- 1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante
- 1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni
- 1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant
- 1.4.4. Efectul fotoelectric
- 1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)
- 1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)
- 1.4.7. Producție Perechi
- 1.4.8. Reacții fotonucleare
- 1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare
- 1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale
- 1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

153

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.4. Efectul fotoelectric

Efectul fotoelectric:

- ☐ **Energie de photon interacționează cu un electron legat strâns, adică cu întregul atom.**
- ☐ **Fotonul dispare.**
- ☐ **Considerentele de conservare a energiei și impulsului arată că efectul fotoelectric poate avea loc doar cu electroni strâns legați și nu pe un electron legat slab ("liber")**

154

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.4. Efectul fotoelectric

- ❑ Electron orbital este expulzat din atom cu **energie cinetică**

$$E_K = h\nu - E_B,$$

unde E_B este energia de legătură a electronului orbital.

- ❑ electron orbital expulzat se numește un **fotoelectron**.
- ❑ **Când energia fotonica $h\nu$ depășește energie obligatorie K-shell $E_B(K)$ a atomului absorbant, efectul fotoelectric este cel mai probabil să apară cu un electron K-shell în comparație cu electroni de pe înveliș mai mari.**

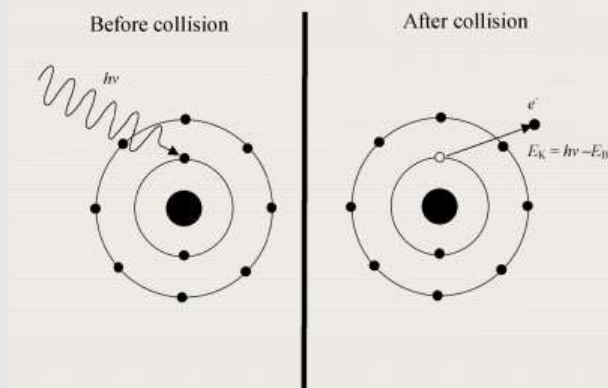
155

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.4. Efectul fotoelectric

- ❑ **Diagrama schematică a efectului fotoelectric**

- ✓ un foton cu energie $h\nu$ interacționează cu un electron orbital K-înveliș
- ✓ electron orbital este emis de atom ca un fotoelectron.

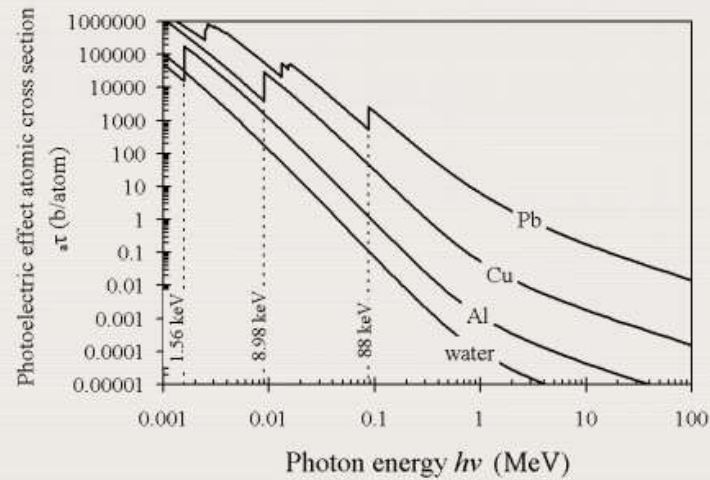


156

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.4. Efectul fotoelectric

- Secțiuni atomice fotoelectrice de apă, aluminiu, cupru și plumb în dependență de energia fotonică.



157

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

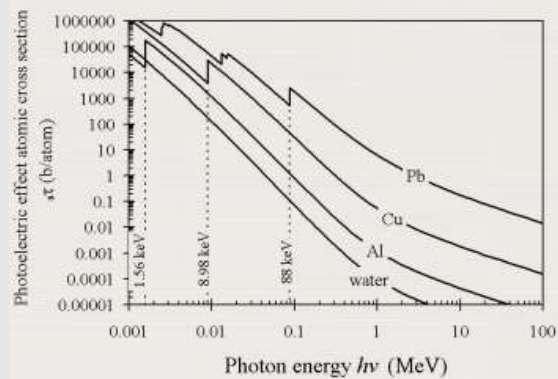
1.4.4. Efectul fotoelectric

- coeficient atenuare atomică σ_a pentru efect fotoelectric este proporțională cu.

$$Z^4 / (h\nu)^3.$$

- coeficient atenuare de masă τ_m pentru efect fotoelectric este proporțională cu for

$$Z^3 / (h\nu)^3.$$

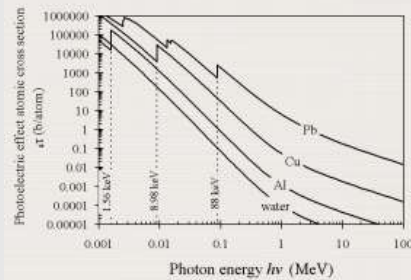


158

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.4. Efectul fotoelectric

- O reprezentare a τ_m față $h\nu$ constată scăderea cu creșterea energia fotonica, discontinuități ascuțite când $h\nu$ este egal cu energia de legătură E_B pentru un anumit înveliș electronic a absorberului.
- Aceste discontinuități, numite margini de absorbție, reflectă faptul că pentru $h\nu < E_B$ fotonii nu pot fi supuși efectului fotoelectric cu electroni în învelișul dat, pe când pentru $h\nu > E_B$ ei pot.



159

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital

1.3.2. Interacțiuni electron nucleu

1.4.3. Putere de frânare

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant

1.4.4. Efectul fotoelectric

1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)

1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)

1.4.7. Producție Perechi

1.4.8. Reacții fotonucleare

1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare

1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale

1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

160

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh) :

Împrăștierea coerentă (Rayleigh) :

- ☐ În împrăștierea coerentă (Rayleigh) fotonul interacționează cu un electron orbital legat, de exemplu, cu acțiunea combinată a întreg atomul.
- ☐ **Evenimentul este elastic** așa că fotonul nu pierde în esență, nici o energie și este împrăștiat prin intermediul doar a unui unghi mic.
- ☐ Nici un transfer de energie nu se produce de la foton la particule încărcate din absorber; astfel împrăștierea Rayleigh **nu joacă nici un rol în coeficientul de transfer de energie, dar contribuie la coeficientul de atenuare.**

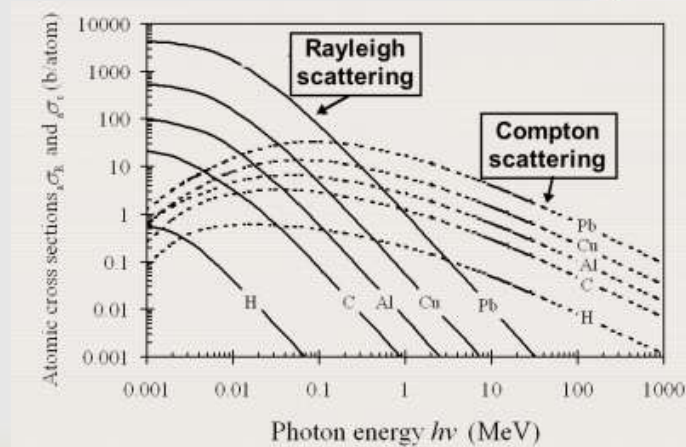
161

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh) :

☐ Coeficienții împrăștiere coerentă (Rayleigh)

- ☐ secțiune transversală atomică este proporțională cu $(Z/h\nu)^2$.
- ☐ coeficientul de atenuare masă este proporțională cu $(Z/h\nu)^2$.



162

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

- 1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital
- 1.3.2. Interacțiuni electron nucleu
- 1.4.3. Putere de frânare

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

- 1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante
- 1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni
- 1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant
- 1.4.4. Efectul fotoelectric
- 1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)
- 1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)
- 1.4.7. Producție Perechi
- 1.4.8. Reacții fotonucleare
- 1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare
- 1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale
- 1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

163

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)

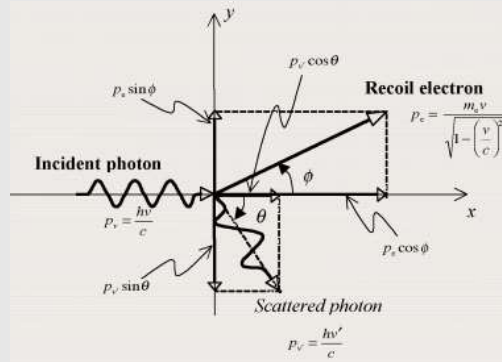
Împrăștierea Compton (necoerentă)

- ☐ În efectul Compton (împrăștiere necoerentă), un foton cu energie $h\nu$ interacționează cu un electron legat slab ("liber").
- ☐ O parte a energiei incidente foton este transferată la electron orbital "liber", care este emis de la atom ca electron Compton (recol).
- ☐ Photonul este risipit printr-un unghi de dispersie θ și energia sa $h\nu'$ este mai mică decât energia fotonilor incidenti $h\nu$.
- ☐ Unghiul ϕ reprezintă unghiul dintre direcție foton incident și direcția electronului de recul.

164

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)



Conservation of energy

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + m_e c^2 + E_K$$

Conservation of momentum (x axis)

$$p_v = p_{v'} \cos \theta + p_e \cos \phi$$

Conservation of momentum (y axis)

$$0 = -p_{v'} \sin \theta + p_e \sin \phi$$

Compton expression:

$$\Delta\lambda = \lambda_C (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = 0.024 \text{ \AA}$$

165

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)

Împrăștierea Compton (necoerentă)

- Unghiul de împrăștiere θ și unghiul de recul ϕ sunt legate, după cum urmează

$$\cot \phi = (1 + \varepsilon) \tan \frac{\theta}{2}$$

$$\varepsilon = \frac{h\nu}{m_e c^2}$$

- Relația dintre energia fotonului împrăștiat $h\nu'$ și energia fotonului incident este:

$$h\nu' = h\nu \frac{1}{1 + \varepsilon(1 - \cos \theta)}$$

$$\varepsilon = \frac{h\nu}{m_e c^2}$$

- Relația dintre energia cinetică a electronului recul și energia fotonului incident este:

$$E_K = h\nu \frac{\varepsilon(1 - \cos \theta)}{1 + \varepsilon(1 - \cos \theta)}$$

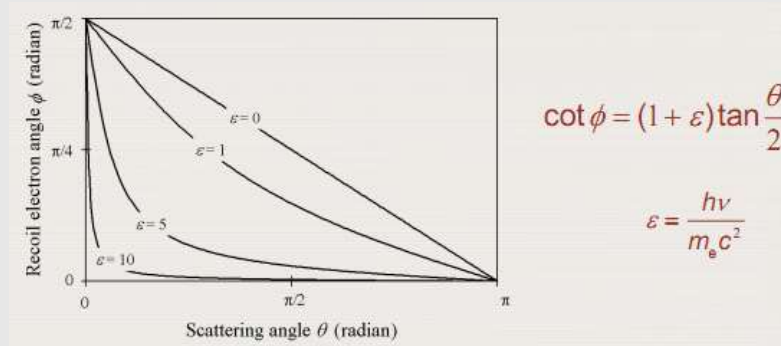
$$\varepsilon = \frac{h\nu}{m_e c^2}$$

166

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)

- relația dintre unghiul fotonului de dispersie și unghiul de recul al electronului Compton

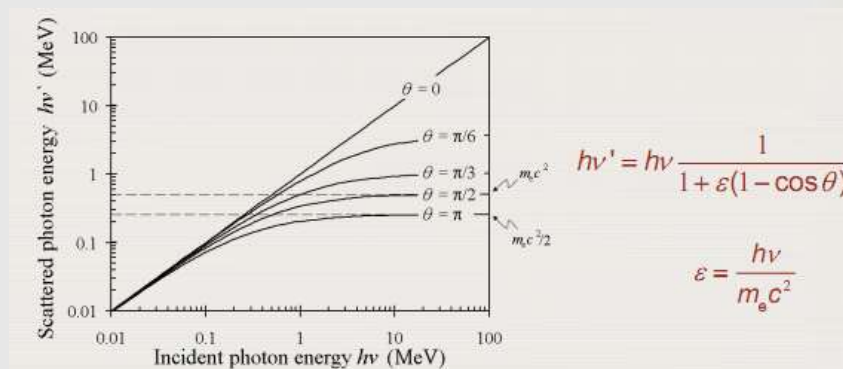


167

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)

- Relația dintre energia fotonică împrăștiată și energia incidentă de fotoni:



168

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

- 1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital
- 1.3.2. Interacțiuni electron nucleu
- 1.4.3. Putere de frânare

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

- 1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante
- 1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni
- 1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant
- 1.4.4. Efectul fotoelectric
- 1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)
- 1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)
- 1.4.7. Producție Perechi**
- 1.4.8. Reacții fotonucleare
- 1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare
- 1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale
- 1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

169

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.7. Producție Perechi

Producție Perechi (în câmp de nucleu)

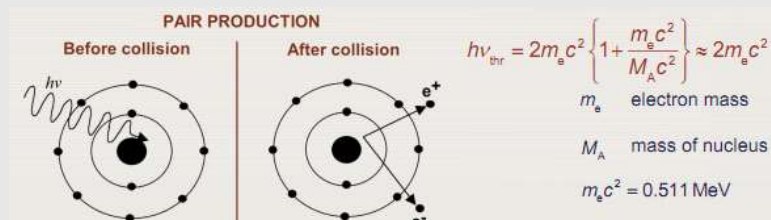
□ În producția pereche nucleară:

- Fotonul dispare.
- O pereche de electron și pozitron cu o energie cinetică combinată egală cu

$$h\nu - 2m_e c^2$$

este produsă în câmpul nuclear Coulomb.

- Energia de prag de producție pereche nucleară este:



170

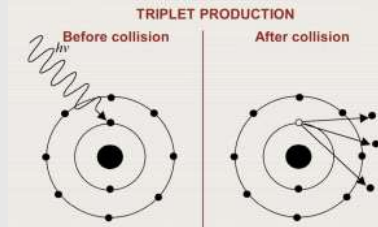
1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.7. Producție Perechi

Producție triplet (în câmp de electron orbital)
(de asemenea, numită producție pereche electroni)

❑ În producția triplet

- ❑ Fotonul dispare.
- ❑ O pereche de electroni și pozitron este produs în domeniul Coulomb a unui electron orbital, și un triplet (doi electroni și un pozitron) pleacă de la situl de interacțiune.
- ❑ Energia de Prag pentru producția de triplet



$$h\nu_{thr} = 4m_e c^2 = 2.04 \text{ MeV}$$

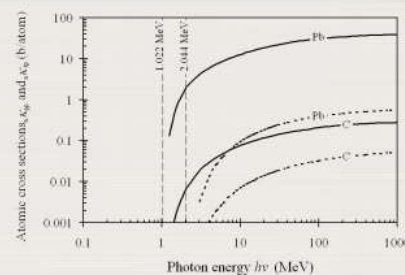
$$m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$$

171

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.7. Producție Perechi

- ❑ Secțiunea transversală atomică pentru producție pereche și triplet este egală cu zero pentru energiile fotonice de mai jos energia de prag.
- ❑ Secțiune transversală atomică pentru producție pereche și triplet crește rapid cu energia fotonica mai sus de energia de prag.



- ❑ Secțiuni atomice pentru producție pereche : curbe solide
- ❑ Secțiuni atomice pentru tproducție triplet: pcurbă punctată

172

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

- 1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital
- 1.3.2. Interacțiuni electron nucleu
- 1.4.3. Putere de frânare

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

- 1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante
- 1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni
- 1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant
- 1.4.4. Efectul fotoelectric
- 1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)
- 1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)
- 1.4.7. Producție Perechi
- 1.4.8. Reacții fotonucleare
- 1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare
- 1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale
- 1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

173

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.8. Reacții fotonucleare



Reacții fotonucleare

☐ Reacții fotonucleare (efectul fotoelectric nuclear):

- ✓ foton de înaltă energie este absorbit de nucleul absorberului.
- ✓ un neutron sau un proton este emis.
- ✓ atom de absorber este transformată într-un produs de reacție radioactivă.

☐ Pragul este de ordinul a ~ 10 MeV sau mai mare, cu excepție de deuteriu și beriliu-9 (~ 2 MeV).

☐ Probabilitatea de apariție a reacțiilor fotonucleare este mult mai mică decât pentru alte interacțiuni foton-atom; reacțiile fotonucleare sunt astfel de obicei neglijate în fizica medicală.

<https://www.youtube.com/watch?v=4p47RBPiOC0>

174

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

- 1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital
- 1.3.2. Interacțiuni electron nucleu
- 1.4.3. Putere de frânare

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

- 1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante
- 1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni
- 1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant
- 1.4.4. Efectul fotoelectric
- 1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)
- 1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)
- 1.4.7. Producție Perechi
- 1.4.8. Reacții fotonucleare
- 1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare
- 1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale
- 1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

175

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare

Contribuția la coeficienți de atenuare

□ Pentru un Z dat și $h\nu$:

- coeficientul de atenuare liniar μ
- coeficientul de transfer de energie liniar μ_{tr}
- coeficientul de absorbție a energiei μ_{ab}

sunt date ca o sumă de coeficienți pentru interacțiune foton individual

$$\mu = \tau + \sigma_R + \sigma_C + \kappa$$

$$\mu_{tr} = \tau_{tr} + (\sigma_R)_{tr} + (\sigma_C)_{tr} + \kappa_{tr} = f_{PE}\tau + f_C\sigma_C + f_{PP}\kappa$$

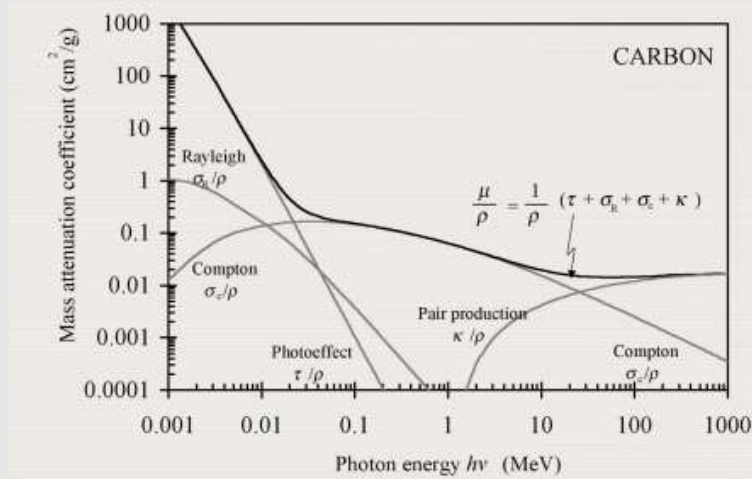
$$\mu_{ab} \equiv \mu_{en} = \mu_{tr}(1 - \bar{g})$$

176

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare

- Coeficientul de atenuare masă față de energia fotonica pentru carbon

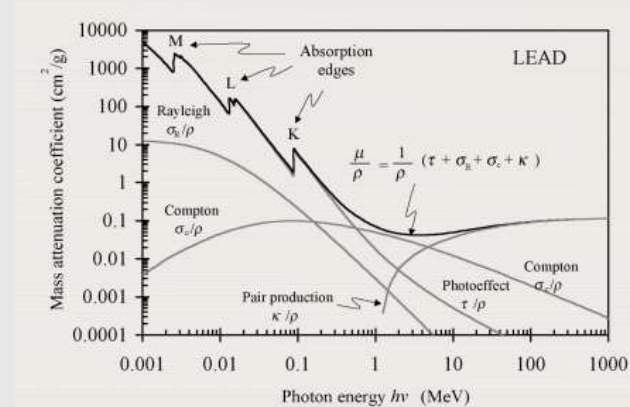


177

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare

- Coeficientul de atenuare în masă față de energia fotonica pentru plumb



178

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

- 1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital
- 1.3.2. Interacțiuni electron nucleu
- 1.4.3. Putere de frânare

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

- 1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante
- 1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni
- 1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant
- 1.4.4. Efectul fotoelectric
- 1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)
- 1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)
- 1.4.7. Producție Perechi
- 1.4.8. Reacții fotonucleare
- 1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare
- 1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale
- 1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

179

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale

Predominanță relativă a efectelor individuale

□ Probabilitatea pentru un foton să sufere unul dintre diferitele fenomene de interacțiune cu un atom de absorber depinde:

- De energia fotonului.
- De de numărul atomic Z al absorbantului.

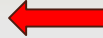
□ În general,

- Efectul fotoelectric predomină la energii fotonice mici.
- Efectul Compton predomină la energii fotonice intermediare.
- Producția perechi predomină la energii mari de fotoni.

180

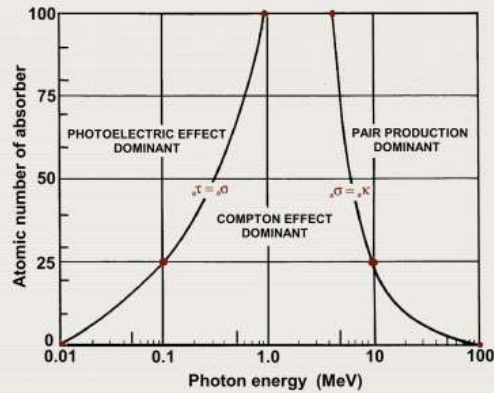
1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale



Predominanță relativă a efectelor individuale

- Regiunile de predominanță relativă a celor trei forme principale de interacțiune foton cu absorbant.



181

1.3. Interacțiunea electronilor cu materia

1.3.1. Interacțiuni electron-electron orbital

1.3.2. Interacțiuni electron nucleu

1.4.3. Putere de frânare

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.1. Tipuri de radiații fotonice indirect ionizante

1.4.2. Atenuare fascicul de fotoni

1.4.3. Tipuri de interacțiuni fotoni cu absorbant

1.4.4. Efectul fotoelectric

1.4.5. Împrăștierea coerentă (Rayleigh)

1.4.6. Împrăștierea Compton (necoerentă)

1.4.7. Producție Perechi

1.4.8. Reacții fotonucleare

1.4.9. Contribuția la coeficienți de atenuare

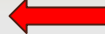
1.4.10. Predominanță relativă a efectelor individuale

1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotoni

182

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotonilor



Efecte următoare interacțiunii fotonilor

- ☐ În efect fotoelectric, Compton și producție triplet **vacanșii sunt produse** în orbite atomice prin eiecția unui electron orbital.
- ☐ Vacanșii sunt umplute cu luarea electroni orbitali prin **tranzii de la învelișul superior către cel inferior.**
- ☐ Tranzii electronice sunt urmate de **emisie de raze X caracteristice sau electroni Auger; proporție guvernată de randamentul fluorescență.**

183

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.11. Efecte următoare interacțiunii fotonilor

- ☐ Producție pereche și producția triplet sunt urmate de **anihilare pozitroni cu un electron "liber",** producând două unde de anihilare.
- ☐ Două cuante de anihilare au cel mai frecvent energia de **0.511 MeV fiecare, și sunt emise la aproximativ 180°** unul de altul pentru a satisface conservarea de impuls și energie.

184

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.12. Rezumatul interacțiunii fotoni

Rezumatul interacțiunii fotoni

	<i>Photoelectric effect</i>	<i>Rayleigh scattering</i>	<i>Compton effect</i>	<i>Pair production</i>
Photon interaction	With whole atom (bound electron)	With bound electrons	With free electron	With nuclear Coulomb field
Mode of photon interaction	Photon disappears	Photon scattered	Photon scattered	Photon disappears
Energy dependence	$\frac{1}{(h\nu)^3}$	$\frac{1}{(h\nu)^2}$	Decreases with energy	Increases with energy
Threshold	Shell binding energy	No	Shell binding energy	$\sim 2m_e c^2$
Particles released in absorber	Photoelectron	None	Compton (recoil) electron	Electron-positron pair

185

1.4. Interacțiunea fotonilor cu materia

1.4.12. Rezumatul interacțiunii fotoni

Rezumatul interacțiunii fotoni

	<i>Photoelectric effect</i>	<i>Rayleigh scattering</i>	<i>Compton effect</i>	<i>Pair production</i>
Linear attenuation coefficient	τ	σ_R	σ_C	κ
Atomic coefficient dependence upon Z	${}_a\tau \propto Z^4$	${}_a\sigma_R \propto Z^2$	${}_a\sigma_C \propto Z$	${}_a\kappa \propto Z^2$
Mass coefficient dependence upon Z	$\frac{\tau}{\rho} \propto Z^3$	$\frac{\sigma_R}{\rho} \propto Z$	Independent of Z	$\frac{\kappa}{\rho} \propto Z$

186