

Nicolae Sfetcu

FIZICA FENOMENOLOGICĂ

COMPENDIU

Volumul 2

MultiMedia Publishing

Fizica fenomenologică

Compendiu

Volumul 2

PREVIZUALIZARE CARTE

NUCLEUL ATOMIC ȘI RADIOACTIVITATEA

Nicolae Sfetcu

Publicat de MultiMedia Publishing

Copyright 2019 Nicolae Sfetcu

Toate drepturile rezervate.

Publicat de MultiMedia Publishing, www.telework.ro/ro/editura

ISBN: 978-606-033-189-6, DOI: 10.58679/MM96651

Cartea include texte din cărțile și paginile web următoare având ca autor pe Nicolae Sfetcu:

- Fizica simplificată
- Pseudoștiință? Dincolo de noi...
- Legea gravitației universale a lui Newton
- Teoria specială a relativității
- Călătorii în timp
- Teoria generală a relativității
- Sunetul fizicii - Acustica fenomenologică
- Fizica atomică și nucleară fenomenologică
- Materia: Solide, Lichide, Gaze, Plasma - Fenomenologie
- Căldura - Termodinamica fenomenologică
- Lumina - Optica fenomenologică
- Mecanica fenomenologică
- De la Big Bang la singularități și găuri negre
- Schimbări climatice - Încălzirea globală
- Electricitate și magnetism - Electromagnetism fenomenologic
- Știința - Filosofia științei
- Mecanica cuantică fenomenologică
- Telework (surse: articole originale, și Wikipedia sub licență CC BY-SA 3.0 RO traduse și adaptate de Nicolae Sfetcu, și alte surse).

Textele din această carte sunt sub licență CC BY-SA 3.0 RO.

DECLINARE DE RESPONSABILITATE

Având în vedere posibilitatea existenței erorii umane sau modificării conceptelor științifice, nici autorul, nici editorul și nicio altă parte implicată în pregătirea sau publicarea lucrării curente nu pot garanta în totalitate că toate aspectele sunt corecte, complete sau actuale, și își declină orice responsabilitate pentru orice eroare ori omisiune sau pentru rezultatele obținute din folosirea informațiilor conținute de această lucrare.

Cu excepția cazurilor specificate în această carte, nici autorul sau editorul, nici alți autori, contribuabili sau alți reprezentanți nu vor fi răspunzători pentru daunele rezultate din sau în legătură cu utilizarea acestei cărți. Aceasta este o declinare cuprinzătoare a răspunderii care se aplică tuturor daunelor de orice fel, incluzând (fără limitare) compensatorii; daune directe, indirecte sau consecvente, inclusiv pentru terțe părți.

Înțelegeți că această carte nu intenționează să înlocuiască consultarea cu un profesionist educațional, juridic sau financiar licențiat. Înainte de a o utiliza în orice mod, vă recomandăm să consultați un profesionist licențiat pentru a vă asigura că faceți ceea ce este mai bine pentru dvs.

Această carte oferă conținut referitor la subiecte educaționale. Utilizarea ei implică acceptarea acestei declinări de responsabilitate.

Cuprins Volumul 1

1 Știința

- 1.1 Măsurători științifice
 - 1.1.1 Analiza dimensională
- 1.2 Matematica
- 1.3 Metode științifice
 - 1.3.1 Investigații științifice
 - 1.3.2 Elementele metodelor științifice idealizate
 - 1.3.3 Aspecte ale metodelor științifice
 - 1.3.4 Alte aspecte ale metodelor științifice
- 1.4 Teorii științifice
- 1.5 Atitudinea științifică
- 1.6 Filosofia științei
- 1.7 Știința și tehnologia
- 1.8 Știința și arta
- 1.9 Știința și religia
- 1.10 Pseudoștiința
 - - Metodologie științifică

2 Fizica

- Cercetarea în fizică
- Domenii de aplicare și obiective
- Ramuri ale fizicii
- 2.1 Filosofia fizicii
 - 2.1.1 Filosofia spațiului și timpului

3 Mecanica

- 3.1 Prima lege de mișcare a lui Newton - Inerția
 - 3.1.1 Aristotel despre mișcare
 - 3.1.2 Sistemul heliocentric
 - 3.1.3 Galileo și turnul înclinat
 - 3.1.4 Experimentele lui Galileo Galilei cu planul înclinat
 - 3.1.5 Prima lege de mișcare a lui Newton
 - 3.1.6 Forța netă
- 3.2 Mișcarea liniară
 - 3.2.1 Mișcarea este relativă (Invarianța galileană)
 - 3.2.2 Dimensiuni
 - 3.2.3 Viteza
 - - 3.2.3.1 Viteza instantanee
 - - 3.2.3.2 Viteza medie
 - 3.2.4 Viteza vectorială
 - 3.2.4.1 Viteza vectorială variabilă
 - 3.2.5 Accelerația
 - 3.2.6 Căderea liberă

- - 3.2.6.1 Ecuațiile căderii libere
- 3.3 A doua lege a lui Newton
 - - 3.3.1 Forța determină accelerația (Forța)
 - - 3.3.2 Frecarea
 - - 3.3.3 Masa și greutatea
 - - 3.3.3.1 Masa se opune accelerației (Masa și inerția)
 - - 3.3.4 A doua lege de mișcare a lui Newton
- 3.4 A treia lege de mișcare a lui Newton
 - - 3.4.1 Forțe și interacțiuni
 - - 3.4.2 A treia lege de mișcare a lui Newton (Acțiunea și reacția)
 - - 3.4.3 Acțiunea și reacțiunea
 - - 3.4.4 Sumarul celor trei legi ale lui Newton (Legile mișcării ale lui Newton)
 - - 3.4.5 Statica
 - - 3.4.6 Dinamica
- 3.5 Impuls
 - 3.5.1 Impulsul newtonian
 - 3.5.2 Variația de impuls
 - 3.5.3 Conservarea impulsului
 - 3.5.4 Coliziuni
 - 3.5.4.1 Coliziunea inelastică
- 3.6 Energia
 - - 3.6.1 Lucru mecanic
 - - 3.6.2 Puterea
 - - 3.6.3 Energia mecanică
 - - 3.6.4 Energia potențială
 - - 3.6.5 Energia cinetică
 - - 3.6.6 Lucrul mecanic și energia - Principiul lucru mecanic-energie
 - - 3.6.7 Conservarea energiei
 - - 3.6.8 Mașini
 - - 3.6.9 Eficiența conversiei energiei
 - - 3.6.10 Surse de energie
- 3.7 Mișcarea de rotație
 - - 3.7.1 Mișcarea circulară
 - - 3.7.2 Inerția rotațională (Momentul de inerție)
 - - 3.7.3 Cuplul (Momentul forței)
 - - 3.7.4 Centrul de masă și centrul de greutate
 - - 3.7.5 Echilibru mecanic - Stabilitatea
 - - 3.7.6 Forța centripetă
 - - 3.7.7 Forța centrifugă
 - - 3.7.7.1 Forța centrifugă în cadru de referință în rotație
 - - 3.7.8 Gravitația artificială
 - - 3.7.9 Momentul unghiular
 - - 3.7.9.1 Conservarea momentului unghiular
- 3.8 Gravitația

- 3.8.1 Legea universală a gravitației
- 3.8.1.1 Constanta gravitațională universală, G
- 3.8.1.2 Legea inversului pătratului în gravitație
- 3.8.1.3 Greutatea și imponderabilitatea
- 3.8.2 Maree
- 3.8.2.1 Mareele oceanelor
- 3.8.2.2 Mareea Pământului
- 3.8.2.3 Mareea atmosferei Pământului
- 3.8.2.4 Mareele lunare
- 3.8.3 Câmpul gravitațional
- 3.8.3.1 Gravitația în interiorul unei planete (Teorema carcasei)
- 3.8.3.2 Tesla și Teoria dinamică a gravitației
- 3.8.3.3 Teoria gravitației lui Einstein
- 3.8.3.4 Găuri negre
- 3.8.3.5 Gravitația universală (Gravitația în Univers)
- 3.8.3.4 Anti-gravitația
- 3.9 Mișcarea proiectilelor și sateliților (Balistica)
- 3.9.1 Mișcarea proiectilelor
- 3.9.2 Proiectile lansate orizontal
- 3.9.3 Proiectile lansate sub un anumit unghi
- 3.9.4 Sateliți artificiali
- - Lansarea pe orbită
- 3.9.5 Orbite circulare ale sateliților
- 3.9.6 Orbite eliptice
- 3.9.7 Legile lui Kepler
- 3.9.8 Energia sateliților
- 3.9.9 Viteza de scăpare
- 4 Materia
- 4.1 Natura atomică a materiei
- 4.1.1 Ipoteze atomice
- 4.1.2 Proprietățile atomilor
- 4.1.3 Imagistica atomică
- 4.1.4 Structura atomului
- 4.1.5 Elemente (Elemente chimice)
- 4.1.6 Tabelul periodic al elementelor
- 4.1.7 Izotopi (Variații, ocurența, aplicații)
- 4.1.8 Compuși și amestecuri
- 4.1.9 Molecule
- 4.1.10 Antimateria
- 4.1.11 Materia întunecată
- 4.2 Solide
- 4.2.1 Micrograful lui Muller (Microscopia cu ioni în câmp)
- 4.2.2 Structura cristalelor
- 4.2.3 Densitatea solidelor

- - 4.2.4 Elasticitatea
- - 4.2.5 Tensiunea și comprimarea (Rezistența materialelor)
- 4.3 Lichide
- - 4.3.1 Presiunea
- - 4.3.1.1 Presiunea în lichid
- - 4.3.2 Flotabilitatea
- - 4.3.3 Principiul lui Arhimede
- - 4.3.4 Forțe în cazurile scufundării și plutirii
- - 4.3.5 Flotarea (Principiul flotării)
- - 4.3.6 Principiul lui Pascal
- - 4.3.7 Tensiunea superficială
- - 4.3.8 Capilaritatea
- 4.4 Gaze
- - 4.4.1 Atmosfera
- - 4.4.1.1 Presiunea atmosferică
- - 4.4.2 Barometru
- - 4.4.3 Legea lui Boyle
- - - Sistemul respirator uman
- - 4.4.4 Flotabilitatea în aer (Aerostate)
- - - Baloane
- - 4.4.5 Principiul lui Bernoulli
- - 4.4.6 Aplicații
- - 4.4.7 Efectul Coandă
- 4.5 Plasma
- - 4.5.1 Plasma în natură, artificială și aplicații
- 5 Căldura
- 5.1 Temperatura, căldura și expansiunea
- - 5.1.1 Temperatura
- - - 5.1.1.1 Temperaturi negative
- - 5.1.2 Căldura
- - 5.1.3 Măsurarea căldurii (Măsurarea temperaturii)
- - 5.1.4 Capacitatea calorică specifică (Capacitatea calorică)
- - 5.1.5 Dilatarea termică
- 5.2 Transferul de căldură
- - 5.2.1 Conducția termică
- - 5.2.2 Convecția
- - 5.2.3 Radiația termică
- - 5.2.4 Emisia de energie radiantă (Emisivitatea)
- - 5.2.5 Absorbția energiei radiante
- - 5.2.6 Reflexia energiei radiante (Reflectanța)
- - 5.2.7 Răcirea radiativă
- - 5.2.8 Legea de răcire a lui Newton
- - 5.2.9 Energia solară - Celule solare
- - - - Celule fotovoltaice

- - 5.2.10 Transferul termic
 - - - - Schimbătoare de căldură
- 5.3 Schimbări climatice
 - - 5.3.1 Cauze
 - - 5.3.2 Evidențe fizice
 - - 5.3.3 Efectul de seră
 - - 5.3.4 Încălzirea globală
 - - 5.3.5 Efecte observate și așteptate asupra mediului
 - - 5.3.6 Efectele asupra sistemelor sociale
- 5.4 Schimbarea de fază
 - - 5.4.1 Evaporarea
 - - 5.4.2 Condensarea
 - - 5.4.2.1 Ceața
 - - 5.4.2.2 Nori
 - - 5.4.3 Fierberea
 - - 5.4.4 Înghețarea/Solidificarea
 - - 5.4.5 Topirea
 - - 5.4.6 Energia și schimbările de fază (Căldura latentă)
- 5.5 Termodinamica
 - - 5.5.1 Concepte în termodinamică
 - - 5.5.2 Zero absolut
 - - Temperaturi negative
 - - 5.5.3 Energia internă
 - - 5.5.4 Prima lege a termodinamicii
 - - 5.5.5 Procese adiabatice
 - - 5.5.6 Meteorologia (Fizica norilor)
 - - 5.5.7 A doua lege a termodinamicii
 - - - Principiul lui Carnot
 - - 5.5.8 Motoare termice
 - - 5.5.9 Tendința de la ordine la dezordine (Ordinea și dezordinea)
 - - 5.5.10 Entropia
- 6 Sunetul
 - 6.1 Vibrații și unde
 - - 6.1.1 Pendul
 - - 6.1.2 Descrierea undelor
 - - 6.1.3 Mișcarea undelor (Unde mecanice)
 - - Polarizarea
 - - 6.1.4 Viteza undelor
 - - 6.1.5 Unde transversale
 - - - Undele electromagnetice
 - - 6.1.6 Unde longitudinale
 - - - Unde sonore
 - - - - Unde de presiune
 - - 6.1.7 Interferența undelor

- 6.1.8 Unde staționare
- 6.1.9 Efectul Doppler
- 6.1.10 Unde de șoc
- 6.2 Acustica
 - 6.2.1 Cum se generează sunetele
 - 6.2.2 Natura sunetului în aer
 - 6.2.3 Media care transmit sunetele (Fizica sunetelor)
 - 6.2.4 Viteza sunetului în aer (Viteza sunetului)
 - 6.2.5 Reflexia sunetului - Ecoul
 - 6.2.6 Refracția sunetului
 - 6.2.7 Energia în undele sonore
 - 6.2.8 Vibrații forțate - Oscilații
 - 6.2.9 Rezonanța
 - 6.2.10 Bătăi
- 6.3 Sunete muzicale
 - 6.3.1 Înălțimea sunetelor
 - 6.3.2 Intensitatea și volumul sunetelor
 - 6.3.3 Calitatea sunetului
 - 6.3.4 Instrumente muzicale
 - 6.3.5 Analiza Fourier
 - 6.3.6 Disc compact (CD)
- 7 Electricitate și magnetism
 - 7.1 Electricitatea
 - 7.1.1 Forțe electrice
 - 7.1.2 Sarcini electrice
 - 7.1.3 Conservarea sarcinii
 - 7.1.4 Legea lui Coulomb
 - 7.1.5 Conductori și izolatori (Rezistența electrică și conductanța electrică)
 - 7.1.6 Semiconductori
 - 7.1.7 Superconductori (Superconductivitatea)
 - 7.1.8 Electricitatea statică
 - 7.1.8.1 Încărcarea electrică prin frecare și contact
 - Efectul triboelectric
 - 7.1.8.2 Încărcarea electrică prin inducție
 - 7.1.9 Polarizarea sarcinilor (Dielectrici)
 - Condensatori
 - 7.1.10 Câmpul electric
 - 7.1.11 Ecranarea electromagnetică
 - 7.1.12 Potențialul electric
 - 7.1.13 Stocarea energiei electrice
 - 7.1.14 Generator Van de Graaff
 - 7.2 Curent electric
 - 7.2.1 Circulația sarcinilor electrice
 - 7.2.2 Curentul electric (Convenții)

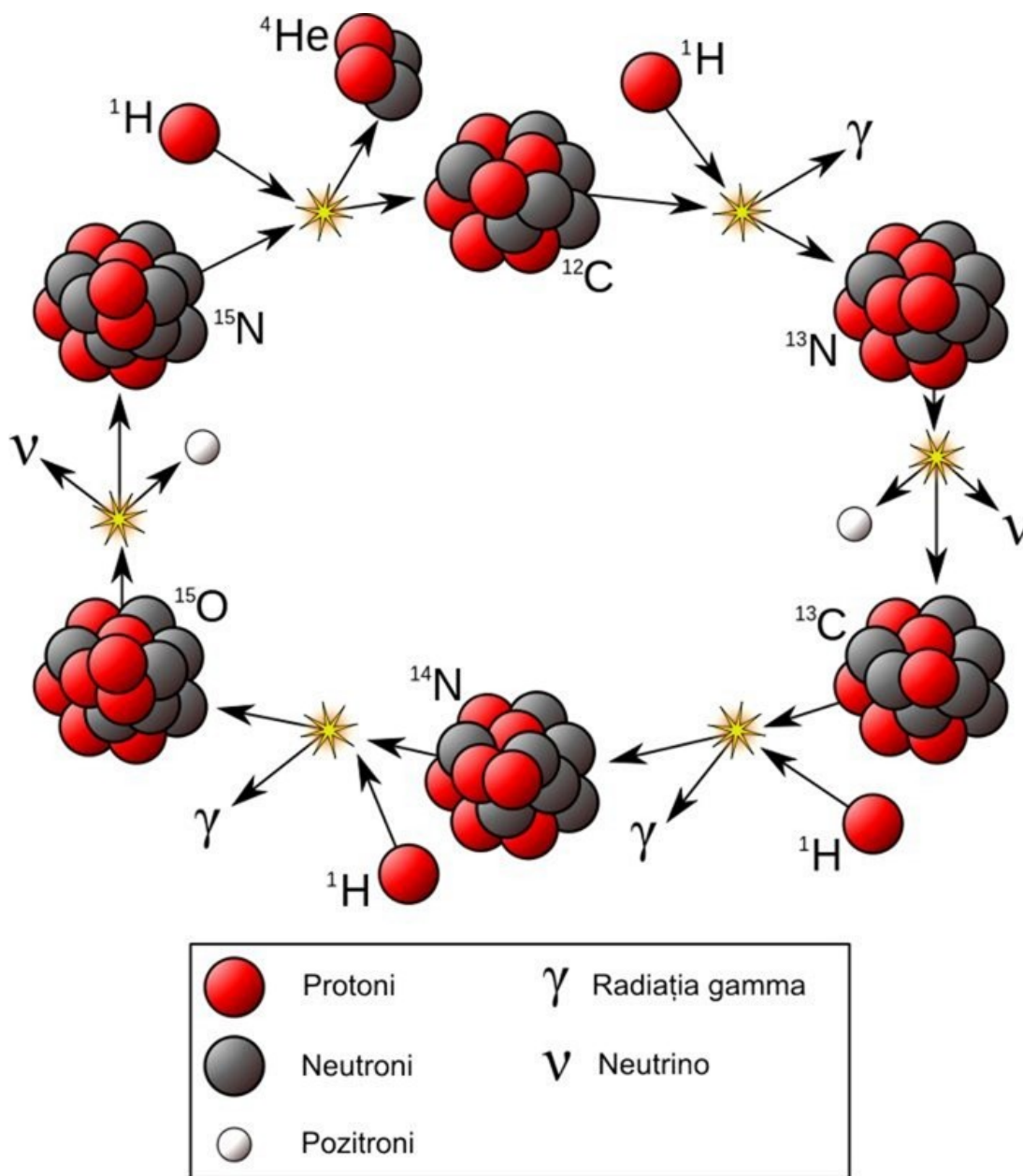
- - 7.2.3 Surse de tensiune
- - 7.2.4 Rezistența electrică (Rezistența electrică și conductanța)
- - 7.2.5 Legea lui Ohm
- - 7.2.6 Curent continuu și curent alternativ
- - 7.2.7 Conversia de la curent alternativ la curent continuu (Redresoare)
- - 7.2.8 Electroni într-un circuit electric
- - 7.2.9 Puterea electrică
- - - Curent alternativ
- - - Câmpuri electromagnetice
- - 7.2.10 Circuite electrice
- - 7.2.10.1 Circuite serie
- - 7.2.10.2 Circuite paralel
- 7.3 Magnetism
- - 7.3.1 Forțe magnetice
- - 7.3.2 Poli magnetici
- - - Polul geomagnetic
- - - Dipoli magnetici
- - 7.3.3 Câmpuri magnetice
- - 7.3.4 Domenii magnetice
- - 7.3.5 Curenți electrici și câmpuri magnetice (Legea Biot-Savart și Legea lui Ampère)
- - 7.3.6 Electromagneți
- - 7.3.6.1 Electromagneți supraconductori
- - 7.3.7 Forța Lorentz și forța Laplace
- - 7.3.8 Forța asupra conductoarelor electrice în câmp magnetic (Forța Laplace)
- - 7.3.9 Contoare electrice
- - 7.3.10 Motoare electrice
- - 7.3.11 Câmpul magnetic al Pământului
- - 7.3.12 Radiații cosmice
- 7.4 Inducția electromagnetică
- - 7.4.1 Electromagnetism
- - 7.4.2 Inducția electromagnetică (Aplicații)
- - 7.4.3 Legea lui Faraday (a inducției)
- - 7.4.4 Generatoare de curent alternativ (Alternatoare)
- - 7.4.5 Centrale electrice (Generarea electricității)
- - 7.4.5.1 Hidrocentralele Porțile de Fier
- - 7.4.6 Turbogeneratoare
- - 7.4.7 Generatoare magnetohidrodinamice
- - 7.4.8 Transformatoare
- - 7.4.10 Transmisia energiei electrice
- - 7.4.11 Câmpul electromagnetic

Cuprins

Fizica fenomenologică.....	1
Compendiu.....	1
Volumul 2.....	1
Cuprins Volumul 1	4
9.2 Nucleul atomic și radioactivitatea.....	13
9.2.1 Razele X	15
9.2.2 Radiații alfa, beta și gama	21
9.2.3 Nucleul atomic	29
9.2.4 Forțe nucleare	34
9.2.5 Izotopi	35
9.2.6 De ce sunt radioactivi atomii? (Dezintegrarea radioactivă)	38
9.2.7 Timpul de înjumătățire (Dezintegrarea radioactivă)	44
9.2.8 Detectoare de radiații (Detectoare de particule)	47
9.2.9 Transmutarea elementelor (Transmutarea nucleară).....	55
9.2.10 Transmutarea naturală (Transmutarea în univers).....	58
9.2.11 Transmutarea artificială (Transmutarea artificială a deșeurilor nucleare)	59
9.2.12 Izotopi radioactivi (Radionuclizi).....	62
9.2.13 Datarea radiometrică	67
9.2.14 Datarea cu carbon (Datarea cu radiocarbon)	71
9.2.15 Datarea cu uraniu	76
9.2.16 Efectele radiațiilor asupra oamenilor	77
9.2.17 Dozarea radiațiilor	82

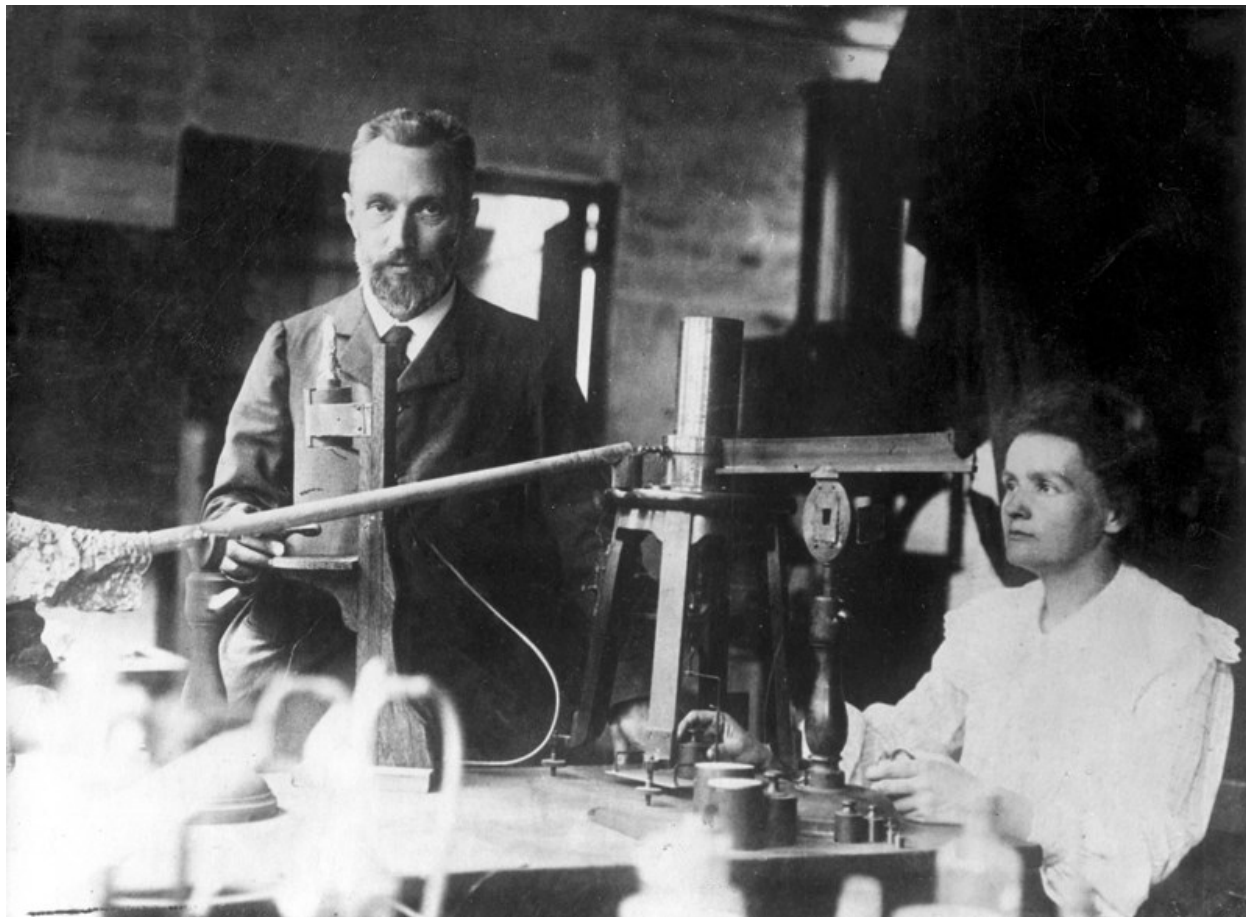
Cuprins.....	84
Cartea.....	90
De ce să alegi această carte?	90
Conținut captivant.....	91
Pentru cine este această carte?	91
Despre autor	93
Nicolae Sfetcu.....	93
Contact.....	93
Editura.....	94
MultiMedia Publishing	94

9.2 Nucleul atomic și radioactivitatea



(Ciclul reacțiilor nucleare din stelele mai grele decât Soarele. Sursa: Borb, https://en.wikipedia.org/wiki/File:CNO_Cycle.svg, CC Attribution-Share Alike 3.0 Unported, 2.5 Generic, 2.0 Generic and 1.0 Generic license, Traducere Nicolae Sfetcu)

Termenul de *nucleu* derivă din cuvântului latin *nucleus*, un diminutiv al *nux* ("nuci"). În 1844, Michael Faraday a folosit termenul pentru a se referi la "punctul central al unui atom". Sensul modern atomic a fost propus de Ernest Rutherford în 1912. Adoptarea termenului "*nucleu*" pentru teoria atomică, cu toate acestea, nu a fost imediată. În 1916, de exemplu, Gilbert N. Lewis a declarat, în celebrul său articol *Atomul și molecula*, că "atomul este compus din kernel și un atom sau *înveliș* exterior"



(Pierre și Marie Curie în laboratorul lor din Paris, înainte de 1907)

Radioactivitatea a fost descoperită în 1896 de cercetătorul francez Henri Becquerel, în timp ce lucra cu materiale fosforescente. Aceste materiale strălucesc în întuneric după expunerea la lumină și bănuia că strălucirea produsă în tuburile cu catod prin raze X ar putea fi asociată cu fosforescența. El a înfășurat o placă fotografică în hârtie neagră și a pus pe ea diferite săruri fosforescente. Toate rezultatele au fost negative până când a utilizat săruri de uraniu. Sărurile de uraniu au provocat o înnegrire a plăcii, în ciuda faptului că placa este învelită în hârtie neagră. Aceste radiații au fost denumite "Radiații Becquerel".

Curând a devenit clar că înnegrirea plăcii nu are nimic de a face cu fosforescența, deoarece înnegrirea a fost produsă și de săruri non-fosforescente de uraniu și uraniu metalic. Din aceste experimente a devenit clar faptul că există o formă de radiație invizibilă care ar putea trece prin hârtie și ar determina reacția plăcii ca și cum ar fi expusă la lumină.

La început, se părea că noua radiație era similară cu razele X descoperite recent. Studiile ulterioare efectuate de Becquerel, Ernest Rutherford, Paul Villard, Pierre Curie, Marie Curie și alții au arătat că această formă de radioactivitate este semnificativ mai complicată. Rutherford a fost primul care a realizat că toate aceste elemente se descompun în conformitate cu aceeași formulă exponențială matematică. Rutherford și studentul său, Frederick Soddy, au fost primii care și-au dat seama că multe procese de dezintegrare au

duș la transmutarea unui element în altul. Ulterior, legea privind deplasarea radioactivă a lui Fajans și Soddy a fost formulată pentru a descrie produsele dezintegrărilor alfa și beta.

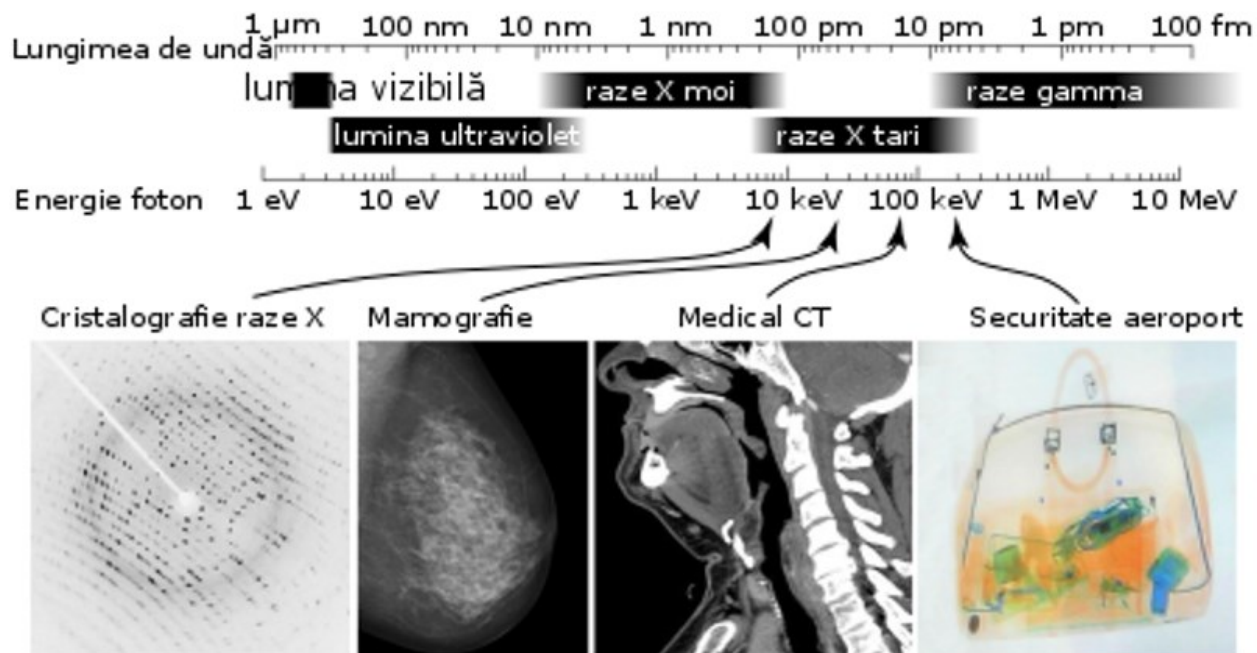
Cercetătorii timpurii au descoperit că multe alte elemente chimice, pe lângă uraniu, au izotopi radioactivi. O căutare sistematică a radioactivității totale în minereurile de uraniu a determinat, de asemenea, pe Pierre și Marie Curie să izoleze două elemente noi: poloniu și radium. Cu excepția radioactivității radiului, similitudinea chimică dintre radium și bariu a făcut ca aceste două elemente să fie greu de distins.

Studiul radioactivității al lui Marie și Pierre Curie este un factor important în știință și medicină. După ce cercetările lor despre radiația Becquerel i-au condus la descoperirea atât a radiului, cât și a poloniului, au inventat termenul "radioactivitate". Cercetarea lor asupra radiațiilor penetrante în uraniu și descoperirea radiului a lansat o epocă de utilizare a radiului pentru tratamentul cancerului. Explorarea radiului ar putea fi văzută ca prima utilizare pașnică a energiei nucleare și începutul medicinei nucleare moderne.

O mare parte din cercetările actuale în domeniul fizicii nucleare se referă la studiul nucleelor în condiții extreme. Cele mai grele nuclee sunt cele din stelele neutronice. Nucleele pot fi, de asemenea, caracterizate prin forme extreme, sau prin rapoarte extreme de neutroni-protoni. Experimentatorii pot utiliza, de asemenea, fuziunea indusă artificial la energii mari pentru a crea nuclee la temperaturi foarte ridicate, și există semne că aceste experimente au produs o fază de tranziție de la materie nucleară normală la o stare nouă, *plasma cuarc-gluonică*, în care cuarcii se amestecă între ei, în loc să fie separați în tripleți ca neutroni și protoni.

9.2.1 Razele X

Razele X formează radiația X, un tip de radiație electromagnetică. Cele mai multe raze X au o lungime de undă cuprinsă între 0,01 și 10 nanometri, corespunzând frecvențelor cuprinse între 30 petahertz și 30 exahertz (3×10^{16} Hz - 3×10^{19} Hz) și energii cuprinse între 100 eV și 100 keV. Lungimile de undă cu raze X sunt mai scurte decât cele ale razelor UV și de obicei sunt mai lungi decât cele ale razelor gamma. În multe limbi, radiația X este menționată cu termeni care denotă radiația Röntgen, după omul de știință german Wilhelm Röntgen, care de obicei este creditat ca descoperitor și care a numit-o radiația X pentru a semnifica un tip de radiație necunoscut.



(Razele X fac parte din spectrul electromagnetic, cu lungimi de undă mai scurte decât lumina vizibilă. Aplicații diferite utilizează diferite părți ale spectrului de raze X.)

Istorie

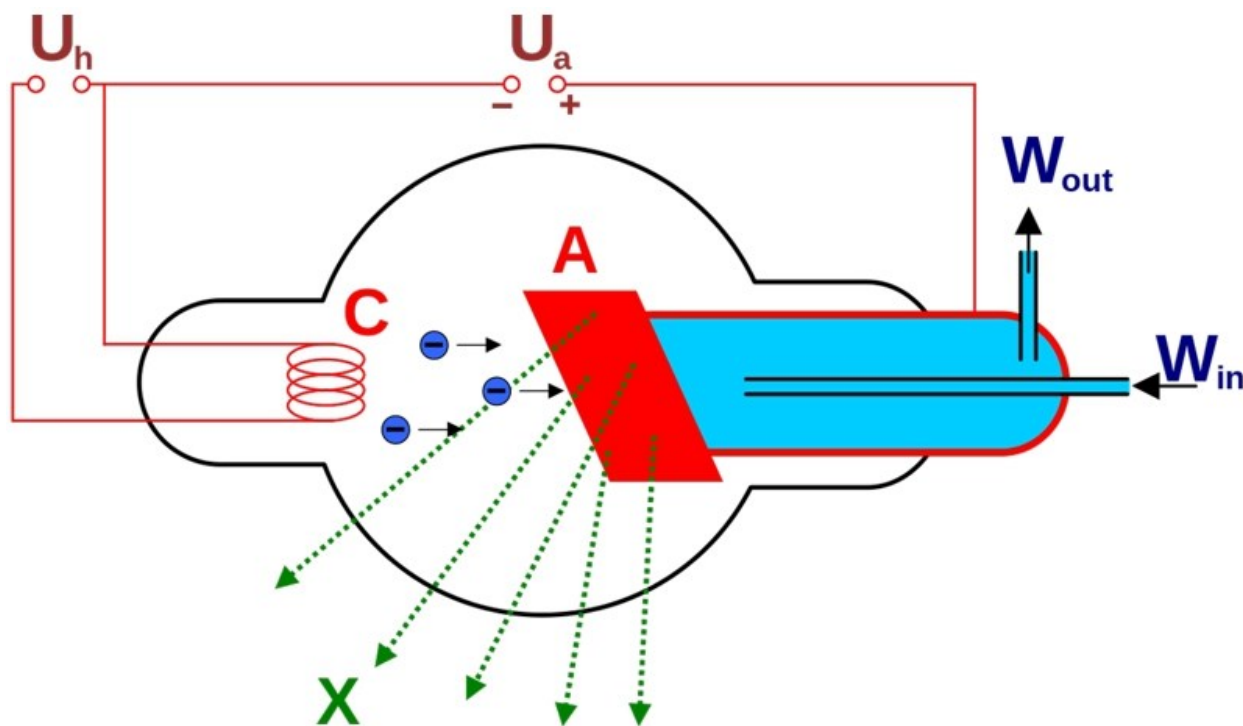


(Imagistica cu raze X cu aparate de tuburi Crookes timpurii, la sfârșitul anilor 1800. Tubul Crookes este vizibil în centru. Omul în picioare își vede mâna cu un ecran cu fluoroscop. Omul așezat face o radiografie a mâinii prin plasarea ei pe o placă fotografică. Nu sunt luate măsuri de precauție împotriva expunerii la radiații; pericolele sale nu erau cunoscute în acel moment.)

Fizicianul german Wilhelm Röntgen este de obicei creditat ca descoperitor de raze X în 1895, deoarece el a fost primul care le-a studiat sistematic, deși nu este primul care a observat efectele. El este, de asemenea, cel care le-a dat denumirea de "raze X" (semnificând o m[ime necunoscută]), deși mulți alții le-au menționat ca "raze Röntgen" (și radiografiile asociate cu raze X ca "Rontgenograme") timp de câteva decenii după descoperirea lor și chiar și până în prezent în unele limbi, inclusiv în limba germană a lui Röntgen.

Cel mai vechi experimentator care se crede că a produs (în necunoștință de cauză) raze X, a fost William Morgan. În 1785 a prezentat o lucrare Societății Regale din Londra, care descrie efectele trecerii curenților electrici printr-un tub de sticlă parțial evacuat, producând o strălucire creată de raze X. Această lucrare a fost explorată în continuare de către Humphry Davy și asistentul său Michael Faraday.

La 8 noiembrie 1895, profesorul german de fizică Wilhelm Röntgen a dat peste raze X în timp ce experimenta cu tuburile Lenard și Crookes și a început să le studieze. El a scris un raport inițial *"Cu privire la un nou tip de raze: o comunicare preliminară"*, iar la 28 decembrie 1895 a prezentat-o revistei Societății Fizico-medicale din Würzburg. Aceasta a fost prima lucrare scrisă despre raze X. Röntgen s-a referit la radiații ca "X", pentru a indica faptul că era un tip necunoscut de radiații. Numele a rămas, deși (peste obiecțiile mari ale lui Röntgen) mulți dintre colegii săi au sugerat să le numim razele Röntgen. Acestea sunt încă menționate ca atare în multe limbi. Röntgen a primit primul premiu Nobel pentru fizică pentru descoperirea sa.



(O diagramă simplificată a tubului cu raze X răcit cu apă)

În 1895, Thomas Edison a investigat capacitatea materialelor de a produce fluorescență atunci când sunt expuse la raze X și a constatat că tungstatul de calciu este cea mai eficientă substanță. În jurul lunii martie 1896, fluoroscopul pe care l-a dezvoltat a devenit standard pentru examinările medicale cu raze X. Cu toate acestea, Edison a renunțat la cercetarea cu raze X în jurul anului 1903, chiar înainte de moartea lui Clarence Madison Dally, unul dintre sticlari. Dally avea obiceiul de a testa tuburile cu raze X pe mâini și a dobândit un cancer în ele atât de tenace încât ambele brațe au fost amputate într-o încercare inutilă de a-și salva viața.

Odată cu descoperirea în 1895 de cercetători, medici și inventatori, au apărut numeroase povestiri despre arsuri, căderea părului, și alte simptome mai rele, în revistele tehnice ale timpului. În februarie 1896, profesorul John Daniel și dr. William Lofland Dudley de la Universitatea Vanderbilt au raportat căderea părului după ce Dr. Dudley a fost radiografiat. Un copil care a fost împușcat în cap a fost adus la laboratorul Vanderbilt în 1896. Înainte de a încerca să găsească glonțul, a fost încercat un experiment, pentru care Dudley "cu devotamentul său caracteristic științei" s-a oferit voluntar. Daniel a raportat că 21 de zile după ce a făcut o fotografie a craniului lui Dudley (cu o durată de expunere de o oră), el a observat o pată cheală de 2 inci (5,1 cm) în diametru, pe capul său în zona cea mai apropiată de tubul cu raze X: a fost fixat suportul de placă cu plăcile spre partea laterală a craniului și o monedă între craniu și cap. Tubul a fost fixat de cealaltă parte la o distanță de jumătate de centimetru de păr.

Multe aplicații ale razelor X au generat imediat un interes enorm. Atelierele au început să producă versiuni specializate ale tuburilor Crookes pentru generarea de raze X, iar aceste tuburi de raze X cu catod rece sau Crookes au fost utilizate până în 1920.

Din anii 1920 până în anii 1950, aparatele cu raze X au fost dezvoltate pentru a ajuta la potrivirea încălțămintei și au fost vândute la magazinele de încălțămintă comerciale. Preocupările legate de impactul utilizării frecvente sau prost controlate au fost exprimate în anii 1950, ceea ce a dus la sfârșitul final al acestei practici în deceniul respectiv.

Microscopul cu raze X a fost dezvoltat în anii 1950.

Observatorul de raze X din Chandra, lansat pe 23 iulie 1999, a permis explorarea proceselor foarte violente din univers care produc raze X. Spre deosebire de lumina vizibilă, care oferă o imagine relativ stabilă asupra universului, universul cu raze X este instabil. El prezintă stele care sunt sfâșiate de găuri negre, coliziuni galactice și novae și stele neutronice care creează straturi de plasmă care apoi explodează în spațiu.

Un dispozitiv cu laser cu raze X a fost propus ca parte a Inițiativei de apărare strategică a Administrației Reagan în anii 1980, dar singurul test al dispozitivului (un fel de "blaster" laser sau raze de moarte, alimentat de o explozie termionucleară) a dat rezultate neconcludente. Din motive tehnice și politice, proiectul general (inclusiv cel cu laser cu raze X) a fost decontaminat (deși a fost ulterior reînviat de administrația Bush ca o apărare națională a rachetelor folosind tehnologii diferite).

Imagistica cu raze X cu contrast de fază se referă la o varietate de tehnici care utilizează informația de fază a unui fascicul de raze X coerent pentru a evidenția țesuturile moi. A devenit o metodă importantă pentru vizualizarea structurilor celulare și histologice într-o gamă largă de studii biologice și medicale. Există mai multe tehnologii utilizate pentru imagistica de contrast cu fază radiologică, toate folosind principii diferite pentru a converti variațiile de fază în razele X care apar de la un obiect în variații de intensitate. Acestea includ contrastul de fază bazat pe propagare, interferometria cu talbot, imagistica îmbunătățită prin refracție și interferometria cu raze X. Aceste metode oferă un contrast mai mare comparativ cu imagistica cu raze X de absorbție normală, ceea ce face posibilă vizualizarea detaliilor mai mici. Un dezavantaj este că aceste metode necesită un echipament mai sofisticat, cum ar fi sursele de raze X de sincrotron sau microfoc, optica cu raze X și detectoarele cu raze X de înaltă rezoluție.

Proprietăți

Fotonii cu raze X transportă suficientă energie pentru a ioniza atomii și pentru a întrerupe legăturile moleculare. Aceasta face ca radiațiile să fie un tip de radiații ionizante și, prin urmare, dăunătoare țesutului viu. O doză foarte ridicată de radiații într-o perioadă scurtă de timp provoacă boală prin radiații, în timp ce dozele mai mici pot da un risc crescut de cancer indus de radiații. În imagistica medicală, acest risc crescut de cancer este, în general, mult mai mare decât beneficiile examinării. Capacitatea ionizantă a razelor X poate fi utilizată în tratamentul cancerului pentru a ucide celulele maligne folosind radioterapia. De asemenea, este utilizat pentru caracterizarea materialelor utilizând spectroscopia cu raze X.

Razele X de energie mare pot traversa obiecte relativ groase fără a fi prea absorbite sau împrăștiate. Din acest motiv, razele X sunt utilizate pe scară largă pentru a arăta interiorul obiectelor opace vizuale. Cele mai des întâlnite aplicații sunt în radiografia medicală și în scanerile de securitate ale aeroportului, dar tehnicile similare sunt de asemenea importante în industrie (de exemplu, radiografia industrială și scanarea industrială) și cercetare (de exemplu la animale mici). Adâncimea de penetrare variază cu câteva ordini de mărime pe spectrul de raze X. Aceasta permite ajustarea energiei fotonice pentru aplicație astfel încât să asigure o transmisie suficientă prin obiect și în același timp să asigure un contrast bun în imagine.

Razele X au lungimi de undă mult mai scurte decât lumina vizibilă, ceea ce face posibilă cercetarea structurilor mult mai mici decât se poate vedea utilizând un microscop normal. Această proprietate este folosită în microscopia cu raze X pentru a obține imagini de înaltă rezoluție și, de asemenea, în cristalografia cu raze X pentru a determina pozițiile atomilor în cristale.

Interacțiunea cu materia

Razele X interacționează cu materia în trei moduri principale, prin fotoabsorbție, împrăștiere Compton și împrăștiere Rayleigh. Rezistența acestor interacțiuni depinde de energia razelor X și de compoziția elementară a materialului, dar nu și de proprietățile chimice, deoarece energia fotonului cu raze X este mult mai mare decât energiile chimice de legare. Fotoabsorbția sau absorbția fotoelectrică este mecanismul de interacțiune dominant în regimul cu raze X moi și pentru energiile mai joase ale razelor X. La energii mai mari, împrăștierea Compton domină.

Producere

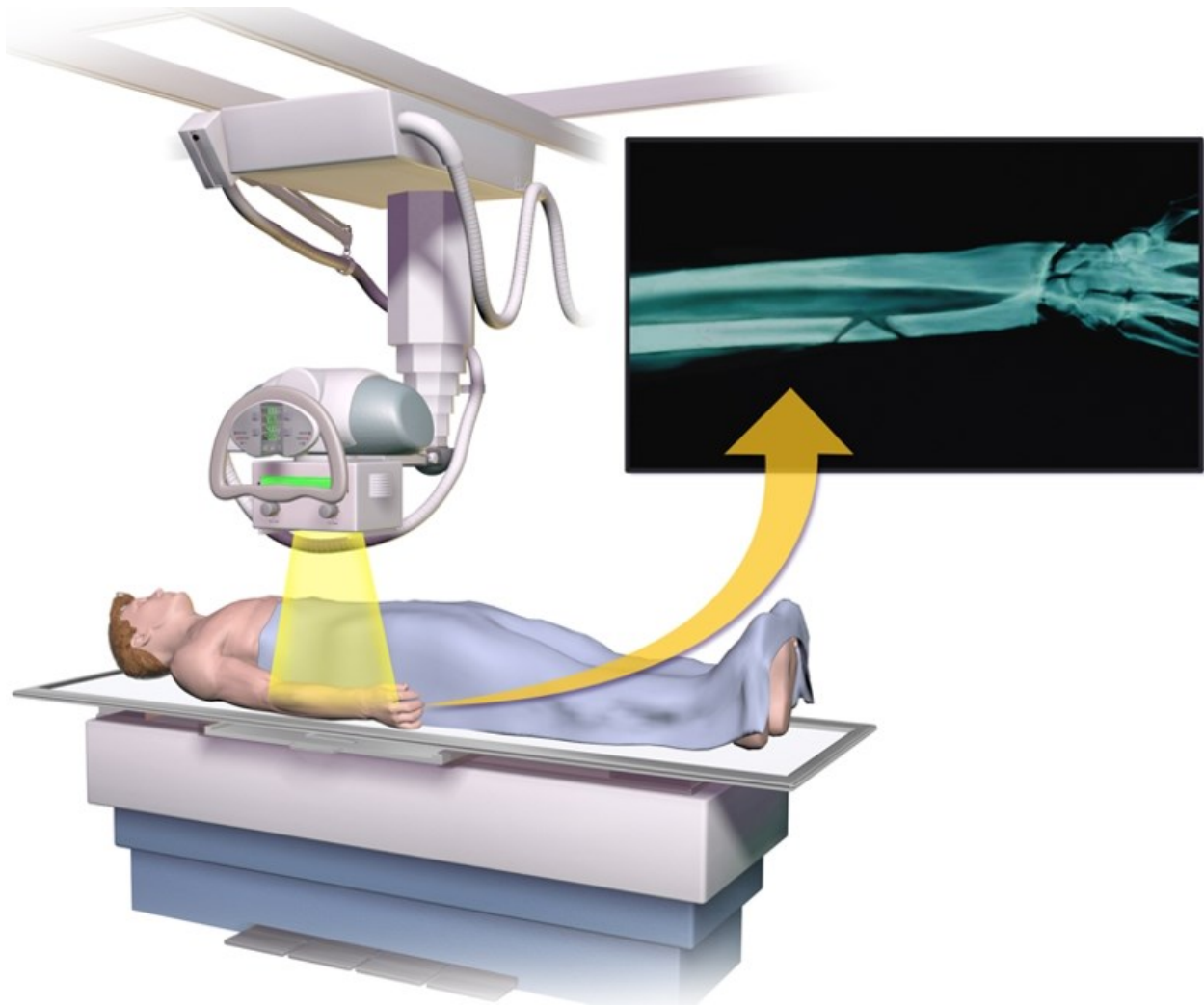
Ori de câte ori particulele încărcate (electroni sau ioni) de energie suficientă lovesc un material, se produc raze X.

Detectoare

Detectoarele cu raze X variază în formă și funcție în funcție de scopul lor. Detectoarele imagistice, cum ar fi cele utilizate pentru radiografie, au fost inițial bazate pe plăci fotografice și film fotografic ulterior, dar acum sunt în mare parte înlocuite cu diferite tipuri de detectori digitali, cum ar fi plăcile de imagine și detectoarele cu ecran plat. Pentru protecția împotriva radiațiilor, riscul expunerii directe este adesea evaluat utilizând camere de ionizare, în timp ce dozimetrele sunt folosite pentru a măsura doza de radiație la care a fost expusă o persoană. Spectrele de raze X pot fi măsurate fie prin dispersoare de energie, fie prin spectrometre de dispersie a lungimii de undă.

Utilizări medicale

De la descoperirea lui Röntgen că razele X pot identifica structurile osoase, radiografiile au fost folosite pentru imagistica medicală. Prima utilizare medicală a fost la mai puțin de o lună după ce a fost publicată această lucrare. Până în 2010, au fost efectuate 5 miliarde de examinări medicale la nivel mondial. Expunerea la radiații din imagistica medicală în 2006 a reprezentat aproximativ 50% din expunerea totală la radiațiile ionizante din Statele Unite.

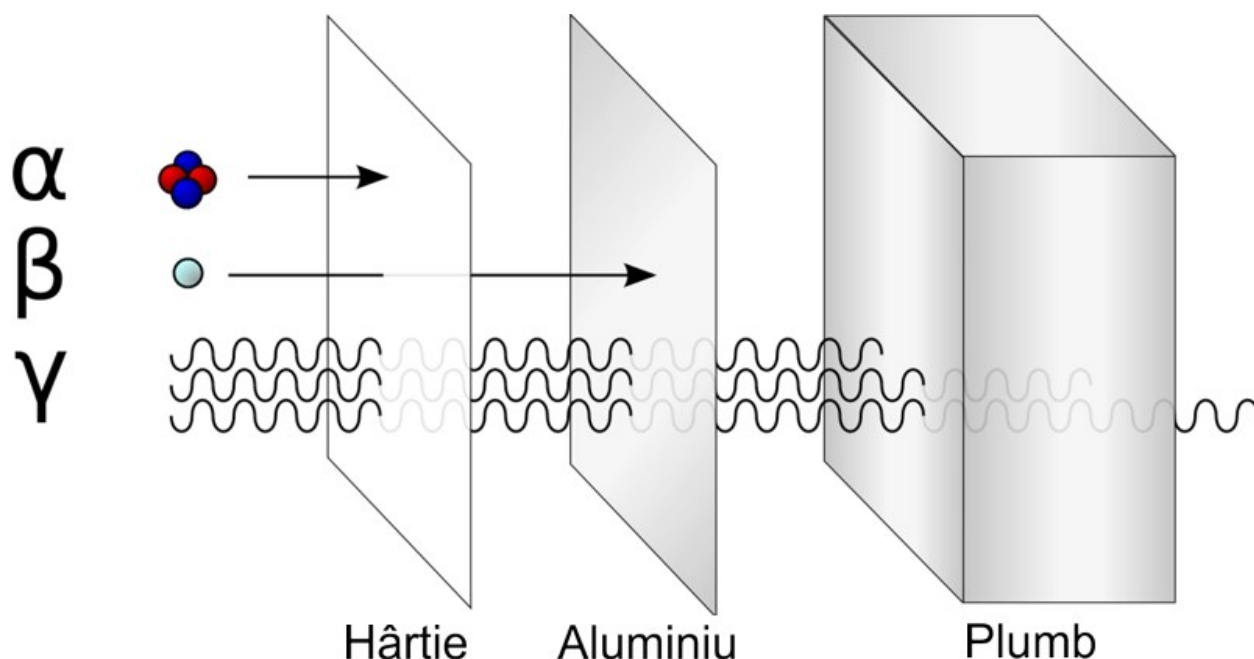


(Raze X. Sursa: BruceBlaus, <https://en.wikipedia.org/wiki/File:X-Ray.png>, CC Attribution-Share Alike 4.0 International license)

9.2.2 Radiații alfa, beta și gama

În fizică, radiația este emisia sau transmisia de energie sub formă de unde sau particule prin spațiu sau printr-un mediu material. Aceasta include:

- radiații electromagnetice, cum ar fi unde radio, microunde, lumină vizibilă, raze X și radiații gamma (γ)
- radiația de particule, cum ar fi radiația alfa (α), radiația beta (β) și radiația neutronică (particule de energie de repaus diferită de zero)
- radiații acustice, cum ar fi ultrasunetele, sunetul și undele seismice (în funcție de mediul fizic de transmisie)
- radiația gravitațională, radiația care ia forma undelor gravitaționale.



(Ilustrația capacităților relative ale trei tipuri diferite de radiații ionizante pentru a pătrunde în materia solidă. Particulele alfa tipice (α) sunt oprite de o foaie de hârtie, în timp ce particulele beta (β) sunt oprite de o placă de aluminiu. Radiația gama (γ) este amortizată atunci când pătrunde în plumb. Sursa: Stannered / Ehamberg, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Alfa_beta_gamma_radiation_penetration.svg, CC Attribution 2.5 Generic license, Traducere Nicolae Sfetcu)

Radiația este deseori clasificată ca fiind ionizantă sau neionizantă în funcție de energia particulelor radiate. Radiațiile ionizante poartă mai mult de 10 eV, ceea ce este suficient pentru a ioniza atomii și moleculele și pentru a rupe legăturile chimice. Aceasta este o diferențiere importantă datorită diferenței mari de nocivitate pentru organismele vii. O sursă comună de radiații ionizante sunt materialele radioactive care emit radiații α , β sau γ , constând în nuclei de heliu, electroni sau pozitivi, respectiv, fotoni. Alte surse includ razele X, muoni, mezoni, pozitroni, neutroni și alte particule care constituie razele cosmice secundare care sunt produse după ce razele cosmice primare interacționează cu atmosfera Pământului.

Radiații ionizante

Radiația ionizantă este o radiație care transportă suficientă energie pentru a elibera electroni de la atomi sau molecule, ionizându-le astfel. Radiația ionizantă este formată din particule energetice subatomice, ioni sau atomi care se deplasează la viteze mari (de obicei peste 1% din viteza luminii) și unde electromagnetice pe capătul energiei electrice a spectrului electromagnetic.

Razele X și partea superioară ultravioletă a spectrului electromagnetic sunt ionizante, în timp ce partea ultravioletă inferioară a spectrului electromagnetic și partea inferioară a spectrului sub UV, inclusiv lumina vizibilă (inclusiv aproape toate tipurile de laser lumină), infraroșu, microunde și unde radio sunt toate considerate radiații neionizante. Limita

dintre radiațiile electromagnetice ionizante și neionizante, care apare în ultraviolete, nu este clar definită, deoarece diferite molecule și atomi ionizează la diferite energii. Definiția convențională plasează limita la o energie fonică între 10 eV și 33 eV în ultraviolete (a se vedea secțiunea delimitată de mai jos).

Particulele subatomice ionizante tipice din radioactivitate includ particulele alfa, particulele beta și neutronii. Aproape toate produsele de dezintegrare radioactivă sunt ionizante, deoarece energia dezintegrării radioactive este de obicei mult mai mare decât cea necesară ionizării. Alte particule ionizante subatomice care apar în mod natural sunt muonii, mezonii, pozitronii și alte particule care constituie razele cosmice secundare care sunt produse după ce razele cosmice primare interacționează cu atmosfera Pământului. Razele cosmice sunt generate de stele și de anumite evenimente celeste, cum ar fi explozii supernova. Razele cosmice pot produce, de asemenea, radioizotopi pe Pământ (de exemplu, carbon-14), care, la rândul lor, se descompun și produc radiații ionizante. Razele cosmice și dezintegrarea izotopilor radioactivi sunt sursele primare ale radiațiilor ionizante naturale de pe Pământ, denumite radiații de fond. Radiațiile ionizante pot fi, de asemenea, generate artificial folosind tuburi de raze X, acceleratoare de particule și oricare dintre diferitele metode care produc în mod artificial radioizotopi.

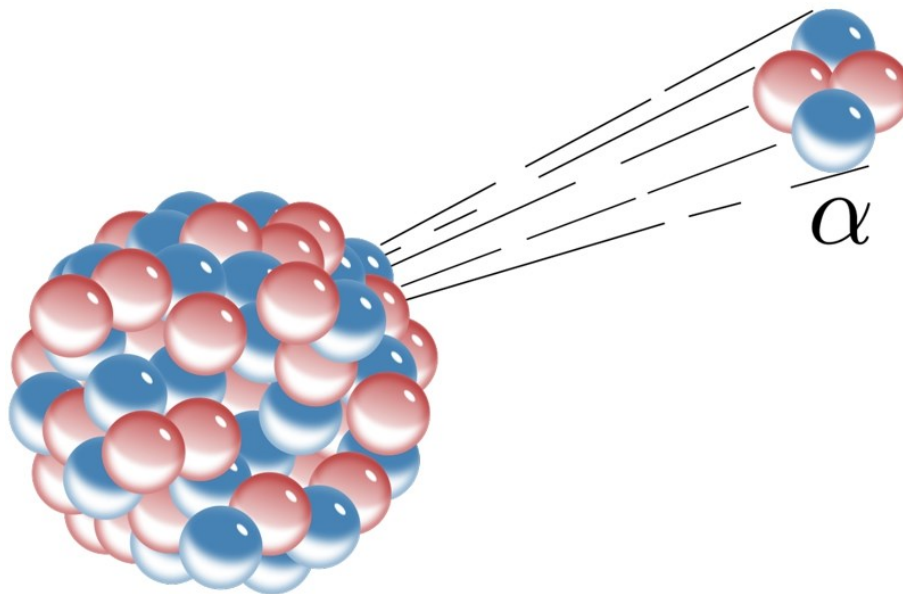
Radiațiile ionizante nu pot fi detectate de către simțurile umane, deci trebuie să fie folosite instrumente de detectare a radiațiilor, cum ar fi contoarele Geiger, pentru a indica prezența lor și a le măsura. Cu toate acestea, intensitățile mari pot provoca emisii de lumină vizibilă la interacțiunea cu materia, cum ar fi în radiația Cherenkov și radioluminescența. Radiația ionizantă este utilizată într-o gamă largă de domenii, cum ar fi medicina, energia nucleară, cercetarea, producția, construcția și multe alte domenii, dar prezintă un pericol pentru sănătate dacă nu se respectă măsurile adecvate împotriva expunerii nedorite. Expunerea la radiații ionizante cauzează deteriorarea țesutului viu și poate provoca mutații, boală de radiații, cancer și moarte.

Radiația alfa

Dezintegrarea alfa (α) este un tip de dezintegrare radioactivă în care un nucleu atomic emite o particulă alfa (nucleu de heliu) și astfel se transformă sau se "descompune" într-un atom cu un număr de masă redus cu patru și un număr atomic care este redus cu doi. O particulă alfa este identică cu nucleul unui atom de heliu-4, care constă din doi protoni și doi neutroni. Are o sarcină de $+2e$ și o masă de $4u$. De exemplu, uraniul-238 se dezintegrează pentru a forma toriu-234. Parametrii alfa au o încărcătură $+2$, dar ca o ecuație nucleară descrie o reacție nucleară fără a lua în considerare electronii - o convenție care nu implică faptul că nucleele se găsesc în mod necesar în atomi neutri - sarcina nu este de obicei arătată.

Dezintegrarea alfa apare de obicei în cele mai grele nuclee. Teoretic, se poate întâmpla numai în nuclee ceva mai grele decât nichelul (elementul 28), unde energia totală de legare pe nucleon nu mai este un minim și nuclidele sunt, prin urmare, instabile tinzând spre

processe spontane de tip fisiune. În practică, acest mod de dezintegrare a fost observat numai la nucleele considerabil mai grele decât nichelul, cei mai ușori emițători alfa fiind cei mai ușori izotopi (numere de masă 106-110) ai telurului (element 52). În mod excepțional, totuși, beriliul-8 se dezintegrează în două particule alfa.



(Reprezentarea vizuală a dezintegrării alfa)

Dezintegrarea alfa este de departe cea mai comună formă de dezintegrare de cluster, unde atomul părinte ejectează o colecție fixă definită de nucleoni, lăsând în urmă un alt produs definit. Este cea mai comună formă datorită energiei de legare extrem de ridicată și a masei relativ mici a particulelor alfa. Ca și alte dezintegrări de cluster, dezintegrarea alfa este fundamental un proces de tunelare cuantică. Spre deosebire de dezintegrarea beta, aceasta este guvernată de interacțiunea dintre forța nucleară și forța electromagnetică.

Particulele alfa au o energie cinetică tipică de 5 MeV (sau $\approx 0,13\%$ din energia totală, 110 TJ/kg) și au o viteză de aproximativ 15.000.000 m/s sau 5% din viteza luminii. Există o variație surprinzător de mică în jurul acestei energii, datorită dependenței mari a timpului de înjumătățire al acestui proces de energia produsă. Datorită masei lor relativ mari, încărcăturii electrice +2 și vitezei relativ mici, particulele alfa sunt foarte probabil să interacționeze cu alți atomi și să-și piardă energia, iar mișcarea lor în față poate fi oprită cu câțiva centimetri de aer. Aproximativ 99% din heliul produs pe Pământ este rezultatul dezintegrării alfa a depozitelor subterane de minerale care conțin uraniu sau toriu. Heliul este adus la suprafață ca un produs secundar al producției de gaze naturale.

Utilizări

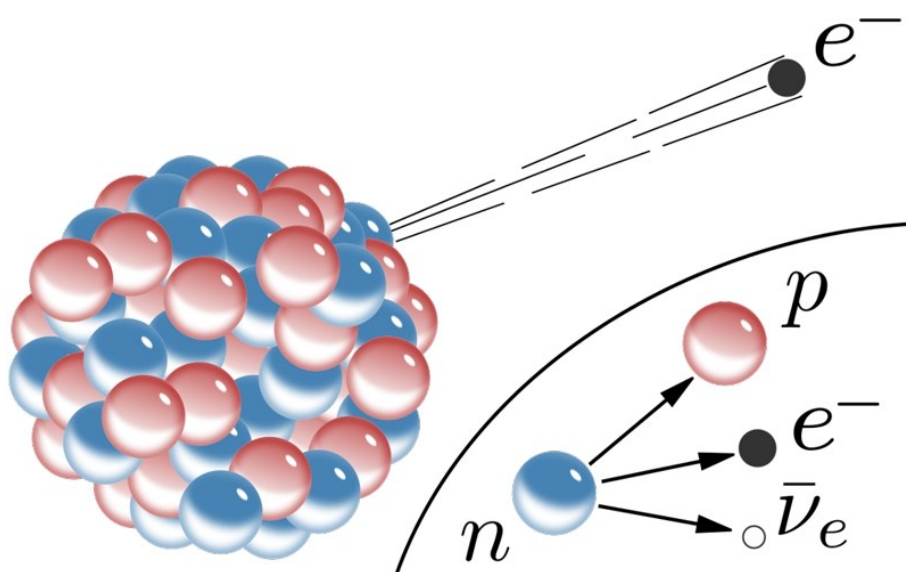
Americiu-241, un emițător alfa, este utilizat în detectoarele de fum. Particulele alfa ionizează aerul într-o cameră ionică deschisă și un curent mic trece prin aerul ionizat.

Particulele de fum din foc care intră în cameră reduc curentul, declanșând alarma detectorului de fum.

Dezintegrarea alfa poate fi o sursă de energie sigură pentru generatoarele termoelectrice radioizotopice utilizate pentru sondele spațiale, și au fost utilizate pentru stimulatoarele cardiace artificiale. Dezintegrarea alfa este mult mai ușor protejată împotriva altor forme de dezintegrare radioactivă.

Eliminatorii statici utilizează în mod obișnuit poloniu-210, un emițător alfa, pentru a ioniza aerul, permițând o disipare mai rapidă.

Radiația beta



(Dezintegrarea beta, Este arătată o particulă beta (în acest caz un electron negativ) emisă de un nucleu, un antineutrino (nereprezentat) este emis întotdeauna împreună cu un electron. Inserare: în dezintegrarea neutronului liber, sunt produse un proton, un electron (dezintegrare beta negativă), și un antineutrino electron.)

O particulă beta, denumită uneori radiație beta, marcată cu litera greacă beta (β), este un electron sau un pozitron de mare viteză, emis în dezintegrarea radioactivă a unui nucleu atomic, cum ar fi un nucleu potasiu-40, în procesul de dezintegrare beta. Două forme de dezintegrare beta, β^- și β^+ produc electroni, respectiv pozitroni. Particulele beta sunt un tip de radiații ionizante.

Dintre cele trei tipuri comune de radiații emise de materialele radioactive, alfa, beta și gamma, beta are puterea de penetrare medie și puterea ionizantă medie. Deși particulele beta emise de diverse materiale radioactive variază în funcție de energie, cele mai multe particule beta pot fi oprite cu câțiva milimetri de aluminiu. Totuși, acest lucru nu înseamnă că izotopii beta-emitători pot fi complet protejați de astfel de scuturi subțiri: pe măsură ce se decelerează în materie, electronii beta emit raze gama secundare, care sunt mai penetrante decât cele beta. Ecranul compus din materiale cu greutate atomică mai mică

generează gamma cu o energie mai mică, făcând astfel scuturile oarecum mai eficiente pe unitate de masă decât cele fabricate din materiale de masă Z mare, cum ar fi plumbul.

Fiind compusă din particule încărcate, radiația beta este mai puternic ionizantă decât radiația gamma. Atunci când trece prin materie, o particulă beta este decelerată de interacțiunile electromagnetice și poate da raze X.

În apă, radiația beta din multe produse de fisiune nucleară depășește de obicei viteza luminii din materialul respectiv (care este de 75% cea a luminii în vid) și astfel generează radiația albastră Cherenkov atunci când trece prin apă. Radiația beta intensă din barele de combustibil ale reactoarelor de tip piscină poate fi astfel vizualizată prin apa transparentă care acoperă și protejează reactorul.

Utilizări

Particulele beta pot fi folosite pentru tratarea afecțiunilor de sănătate, cum ar fi cancerul de ochi și oasele, și sunt, de asemenea, utilizate ca markeri. Stronțiu-90 este materialul cel mai frecvent utilizat pentru a produce particule beta.

Particulele beta sunt de asemenea utilizate în controlul calității pentru a testa grosimea unui element, cum ar fi hârtia, care intră printr-un sistem de role. Unele dintre radiațiile beta sunt absorbite în timp ce trec prin produs. Dacă produsul este făcut prea gros sau subțire, se va absorbi o cantitate corespunzătoare de radiație diferită. Un program de calculator care monitorizează calitatea hârtiei fabricate va muta apoi rolele pentru a schimba grosimea produsului final.

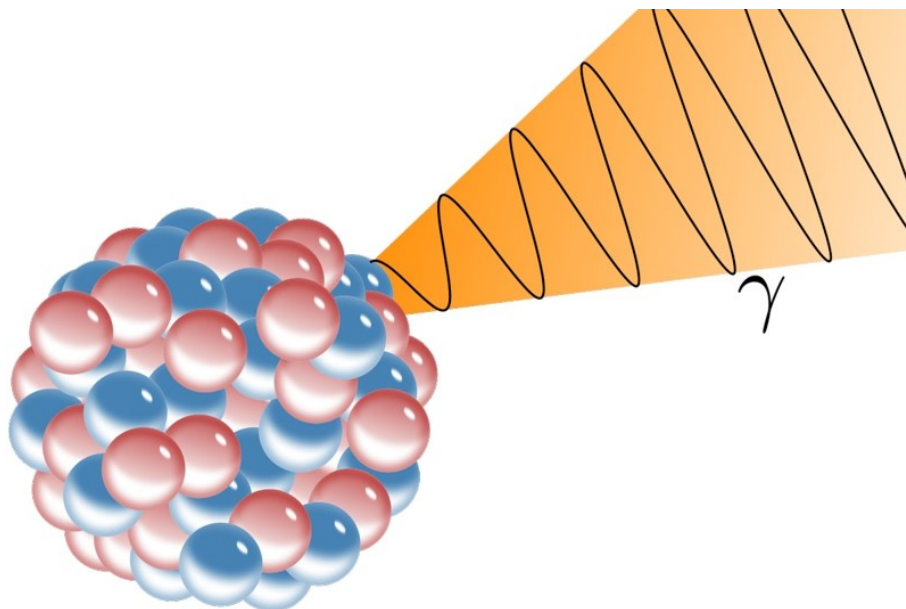
Un dispozitiv de iluminare numit "betalight" conține tritium și un fosfor. Pe măsură ce tritiumul se descompune, acesta emite particule beta; acestea lovesc fosforul, determinând fosforul să dea fotoni, la fel ca tubul catodic într-un televizor. Iluminarea nu necesită putere externă și va continua atâta timp cât există tritium (fosforul nu se schimbă chimic); cantitatea de lumină produsă va scădea la jumătate din valoarea inițială în 12,32 ani, timpul de înjumătățire al tritiului.

Dezintegrarea beta-plus (sau pozitronică) a unui izotop radioactiv al markerului este sursa pozitronilor utilizați în tomografia cu emisie de pozitroni (scanarea PET).

Radiația gama

Razele gama (denumite și radiații gama), denotate de litera gama (γ), sunt radiații electromagnetice penetrabile de tipul celor care rezultă din dezintegrarea radioactivă a nucleul atomic. Se compune din fotoni în cea mai mare gamă observată de energie fonică. Paul Villard, un chimist și fizician francez, a descoperit radiația gama în 1900, studiind radiațiile emise de radium. În 1903, Ernest Rutherford a numit această radiație gama.

Rutherford a descoperit anterior alte două tipuri de dezintegrare radioactivă, pe care le numea radiație alfa și radiație beta.



(Ilustrație a emisiei unei raze gama (γ) dintr-un nucleu atomic)

Radiația gama apare din dezintegrarea nucleului atomic de la o stare de energie înaltă la o stare de energie mai scăzută. Radiația gama ionizează atomii (sunt radiații ionizante) și sunt astfel periculoase din punct de vedere biologic.

Sursele naturale de raze gama de pe Pamant sunt observate în dezintegrarea gama a radionuclizilor și radiațiilor secundare din interacțiunile atmosferice cu particulele de raze cosmice. Există surse rare de natură terestră, cum ar fi fulgerele și flash-urile terestre gama, care produc raze gama care nu au o origine nucleară. În plus, razele gamma sunt produse printr-un număr de procese astronomice în care sunt produși electroni cu energie foarte mare, care la rândul lor produc radiații gama secundare, prin radiații de frânare, dispersia inversă Compton și radiația sincrotronică. Cu toate acestea, o mare parte din astfel de raze gama astronomice sunt ecranate de atmosfera Pământului și pot fi detectate doar de nave spațiale. Razele gama sunt produse și prin fuziune nucleară în stele, inclusiv în Soare (cum ar fi ciclul CNO), dar sunt absorbite sau inelastic împrăștiate de materialul stelar, reducându-le energia, înainte de a scăpa, și nu sunt observabile de pe Pământ ca raze gama.

Gama are în mod obișnuit energii de peste 100 keV și, prin urmare, are frecvențe mai mari de 10 exaherți (sau $> 10^{19}$ Hz) și lungimi de undă mai mici de 10 picometri (10^{-11} m), care este mai mică decât diametrul unui atom. Aceasta nu este o definiție strictă, ci mai degrabă o descriere regulată a proceselor naturale. Radiațiile electromagnetice de la dezintegrarea radioactivă a nucleelor atomice sunt denumite "raze gama" indiferent de energia lor, astfel încât nu există o limită inferioară la energia gama derivată din dezintegrarea radioactivă. Această radiație are de obicei energie de câteva sute keV și aproape întotdeauna mai puțin de 10 MeV.

Utilizări

Radiația gama oferă informații despre unele dintre cele mai energice fenomene din univers; totuși, ele sunt în mare măsură absorbite de atmosfera Pământului. Instrumentele aflate la bordul baloanelor de înaltă altitudine și al sateliților, cum ar fi Telescopul Spațial Gamma Fermi, oferă singura noastră viziune asupra universului în razele gama.

Modificările moleculare induse de gama pot fi, de asemenea, folosite pentru a modifica proprietățile pietrelor semi-prețioase și sunt adesea folosite pentru a schimba topazul alb în topazul albastru.

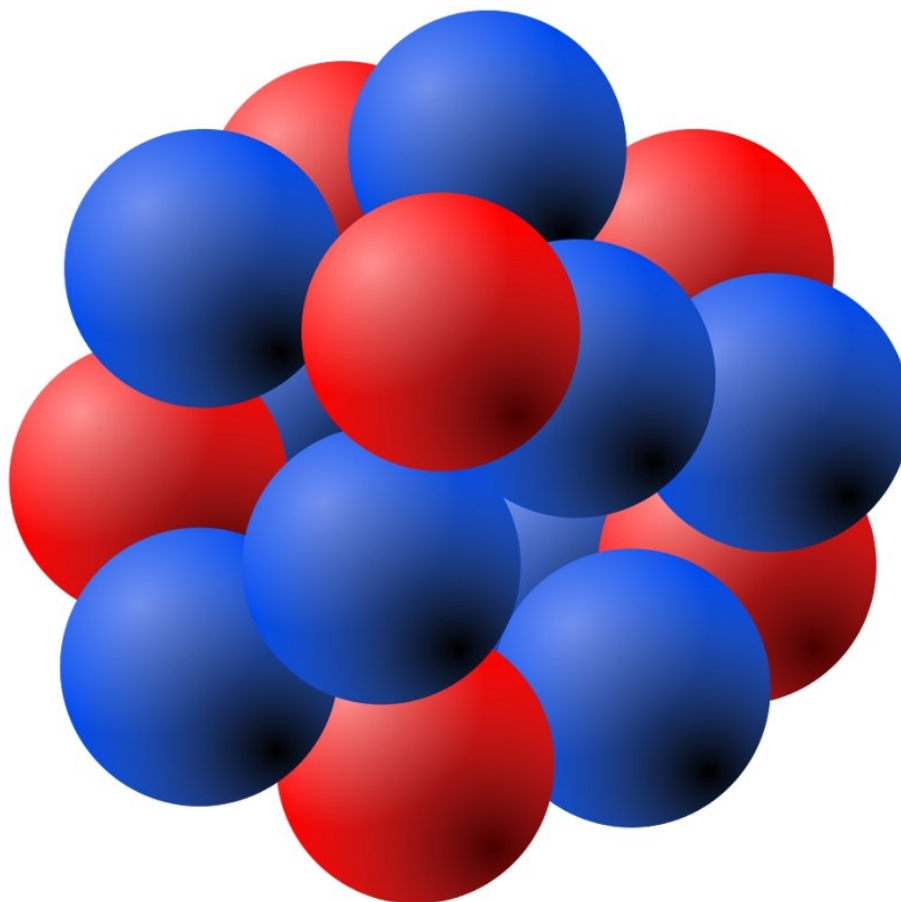
Senzorii industriali fără contact utilizează în mod obișnuit surse de radiații gamma în rafinare, minerit, produse chimice, alimente, săpunuri și detergenți și industria celulozei și hârtiei, pentru măsurarea nivelelor, densității și grosimilor. De obicei, acestea utilizează izotopi Co-60 sau Cs-137 ca sursă de radiație.

Radiația gama este adesea folosită pentru a ucide organismele vii, într-un proces numit iradiere. Aplicațiile includ sterilizarea echipamentelor medicale (ca o alternativă la autoclave sau mijloace chimice), îndepărtarea bacteriilor care cauzează degradarea din multe alimente și prevenirea germinării fructelor și legumelor pentru a le menține prospețimea și aroma.

În ciuda proprietăților lor cauzatoare de cancer, razele gama sunt, de asemenea, utilizate pentru a trata unele tipuri de cancer, deoarece razele ucid, de asemenea, celulele canceroase. În cadrul procedurii numite chirurgie cu cîțit gama, mai multe fascicule concentrate de raze gama sunt îndreptate spre tumoare pentru a ucide celulele canceroase. Fluxurile sunt orientate din unghiuri diferite pentru a concentra radiația asupra tumorii, reducând în același timp daunele asupra țesuturilor din jur.

Razele gama sunt, de asemenea, utilizate în scopuri de diagnostic în medicina nucleară în tehnicile imagistice. Sunt utilizați un număr de radioizotopi diferiți emițători de gama. De exemplu, într-o scanare PET un zahăr radiomarcant numit fludeoxiglucroză emite pozitroni care sunt anihilați de electroni, producând perechi de raze gama care evidențiază cancerul, deoarece cancerul are adesea o rată metabolică mai mare decât țesuturile înconjurătoare. Cel mai obișnuit emițător gama utilizat în aplicațiile medicale este izomerul nuclear ^{99m}Tc techetium care emite raze gama în aceeași scară de energie ca și razele X de diagnosticare. Atunci când acest traductor de radionuclizi este administrat unui pacient, o cameră gama poate fi utilizată pentru a forma o imagine a distribuției radioizotopului prin detectarea radiației gama emise. În funcție de ce moleculă a fost marcată cu markerul, astfel de tehnici pot fi folosite pentru a diagnostica o scară largă de condiții (de exemplu, răspândirea cancerului în oase prin scanarea osoasă).

9.2.3 Nucleul atomic



(Un model al nucleului atomic arătând ca un pachet compact al celor două tipuri de nucleoni: protoni (roșii) și neutroni (albastru). În această diagramă, protonii și neutronii arată ca niște bile lipite împreună, dar un nucleu actual (așa cum e înțeles de fizica nucleară modernă) nu poate fi explicat astfel, doar folosind mecanica cuantică. Într-un nucleu care ocupă un anumit nivel de energie (de exemplu, starea de bază), se poate spune că fiecare nucleon ocupă o gamă largă de locații. Sursa: Marekich, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Nucleus_drawing.svg, CC Attribution-Share Alike 3.0 Unported license)

Nucleul atomic este regiunea mică și densă formată din protoni și neutroni aflată în centrul unui atom, descoperit în 1911 de Ernest Rutherford pe baza experimentului cu folie de aur Geiger-Marsden din 1909. După descoperirea neutronului din 1932, modelele pentru un nucleu compus din protoni și neutroni au fost dezvoltate rapid de către Dmitri Ivanenko și Werner Heisenberg. Aproape toată masa unui atom este localizată în nucleu, cu o contribuție foarte mică a norului de electroni. Protonii și neutronii sunt legați împreună pentru a forma un nucleu de forță nucleară.

Descoperirea a electronului a fost primul indiciu că atomul avea structură internă. Această structură a fost inițial imaginată ca un model gen "*cozonac cu stafide*", în care electronii mici, încărcăți negativ, sunt incluși într-o sferă mare, care conține toată sarcina pozitivă. Cu toate acestea, Ernest Rutherford și Marsden au descoperit în 1911 că radiația alfa de la o

sursă de radii este uneori, împrăștiată înapoi de pe o folie de aur, ceea ce a dus la acceptarea unui *model planetar*, în care electronii orbitează în jurul unui nucleu mic la fel ca planetele în jurul soarelui.

Un nucleu greu poate conține sute de nucleoni (protoni și neutroni), ceea ce înseamnă că într-o anumită aproximare poate fi tratat ca un sistem clasic, mai degrabă decât unul cuantic. În *modelul picătură de lichid*, nucleul are o energie care rezultă în parte din tensiunea superficială și parțial din repulsia electrică a protonilor. Modelul picătură de lichid este capabil să reproducă multe caracteristici ale nucleelor, inclusiv tendința generală a energiei de legătură în raport cu numărul de masă, precum și fenomenul de fisiune nucleară.

Suprapuse pe această imagine clasică sunt efectele cuantice, care pot fi descrise cu ajutorul *modelului păturilor nucleare*, dezvoltat în mare parte de către Maria Goeppert-Mayer. Nucleele cu anumite numere de neutroni și protoni (numerele magice 2, 8, 20, 50, 82, 126, ...) sunt deosebit de stabile, deoarece păturile lor sunt pline.

Deoarece unele nuclee sunt mai stabile decât altele, rezultă că energia poate fi eliberată prin *reacții nucleare*. Soarele este alimentat prin *fuziune* nucleară, în care două nuclee se ciocnesc și fuzionează pentru a forma un nucleu mai mare. Procesul opus este de *fisiune*, pe care se bazează centralele nucleare. Deoarece energia de legătură pe nucleon este maximă pentru nuclee de masă medie (în jurul fierului), se eliberează energie, fie prin fuzionarea nucleelor ușoare, fie prin fisiunea celor mai grele.

Elementele mai ușoare decât fierul sunt create în stele în timpul unor serii de etape de fuziune. Primul, hidrogenul, fuzionează cu sine însuși, pentru a forma heliu, apoi heliul fuzionează cu el însuși de două ori pentru a forma carbonul, și în continuare alte fuziuni formează elemente mai grele, până la fier care nu fuzionează mai departe. Atunci când steaua explodează într-o supernova, fluxul de neutrini de mare energie de la supernova va bombarda elementele rezultate din explozie pentru a forma cantități mari de nuclee ale elementelor mai grele decât fierul. Prin urmare, în timpul evoluției stelare, prin progresia etapizată a fuziunii formând elementele grele, moartea unei stele într-o supernova poate crea elementele necesare pentru viață.

Reacțiile nucleare se petrec în mod natural pe pământ. Cu excepția cazului în care condițiile sunt provocate de om, cum ar fi exploziile atomice, temperaturile și presiunile pe pământ nu sunt suficient de mari pentru a depăși repulsia electrică dintre nuclee și a permite fuziunea. Dar nuclee grele, cum ar fi uraniul, pot fisiona și emite radiație alfa, și poate apărea și dezintegrarea beta. *Radiația alfa* poate fi considerată ca un caz de asimetrie extremă a fisiunii, în care un fragment este nucleul de heliu (particule alfa). În *dezintegrarea beta*, fie un proton este convertit într-un neutron (cu emisia unui antielectron și un neutrino), fie un neutron este convertit într-un proton (emittând un electron și un antineutrino).

O mare parte din cercetările actuale în domeniul fizicii nucleare se referă la studiul nucleelor în condiții extreme. Cele mai grele nuclee sunt cele din stelele neutronice. Nucleele pot fi, de asemenea, caracterizate prin forme extreme, sau prin rapoarte extreme de neutroni-protoni. Experimentatorii pot utiliza, de asemenea, fuziunea indusă artificial la energii mari pentru a crea nuclee la temperaturi foarte ridicate, și există semne că aceste experimente au produs o fază de tranziție de la materie nucleară normală la o stare nouă, *plasma cuarc-gluonică*, în care cuarcii se amestecă între ei, în loc să fie separați în tripleți ca neutroni și protoni.

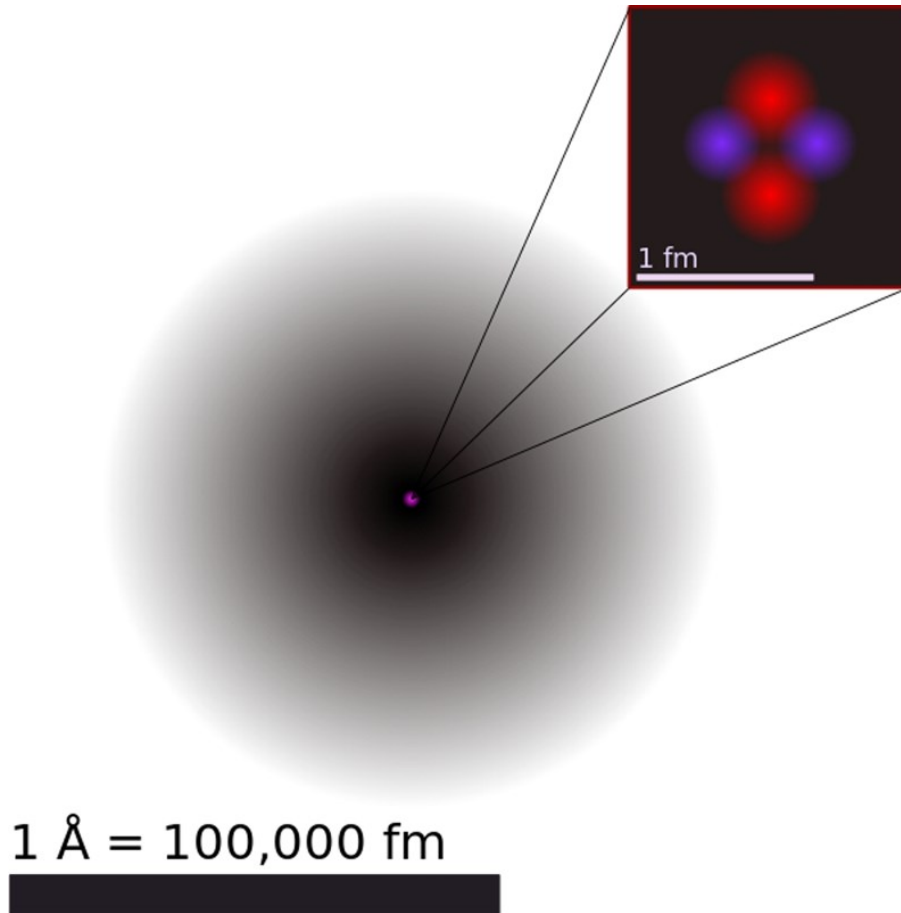
Diametrul nucleului este în intervalul de 1,75 fm ($1,75 \times 10^{-15}$ m) pentru hidrogen (diametrul unui singur proton) până la aproximativ 15 fm pentru cei mai grei atomi, cum ar fi uraniu. Aceste dimensiuni sunt mult mai mici decât diametrul atomului însuși (nucleul + norul de electroni), cu un factor de aproximativ 23.000 (uraniu) până la aproximativ 145.000 (hidrogen).

Ramura fizicii care se ocupă de studiul și înțelegerea nucleului atomic, inclusiv compoziția sa și forțele care o leagă, se numește *fizică nucleară*.

Structura nucleară

Nucleul unui atom constă din neutroni și protoni care, la rândul lor, sunt manifestarea unor particule mai elementare, denumite cuarci, care sunt unite de forța puternică nucleară în anumite combinații stabile de hadroni numiți barioni. Forța puternică nucleară se extinde suficient de departe de fiecare barion, astfel încât să lege neutronii și protonii împreună împotriva forței electrice repulsive între protonii încărcăți pozitiv. Forța puternică nucleară are o distanță foarte scurtă și, în esență, scade la zero imediat dincolo de marginea nucleului. Acțiunea colectivă a nucleului încărcat pozitiv este menținerea electronilor încărcăți electric negativ în orbitele lor în jurul nucleului. Electronii încărcăți negativ care orbitează în jurul nucleului prezintă o afinitate pentru anumite configurații și numere de electroni care determină stabilitatea orbitelor lor. Ce element chimic reprezintă un atom este determinat de numărul de protoni din nucleu; atomul neutru va avea un număr egal de electroni care orbitează nucleul respectiv. Elementele chimice individuale pot crea configurații electronice mai stabile prin combinarea lor pentru partajarea electronilor lor. Este această punere în comun a electronilor pentru a crea orbite electronice stabile în jurul nucleului ceea ce vedem noi a fi chimia lumii noastre macro.

Protonii definesc întreaga sarcină a unui nucleu și, prin urmare, identitatea sa chimică. Neutronii sunt neutri din punct de vedere electric, dar contribuie la masa unui nucleu aproape la fel ca protonii. Neutronii pot explica fenomenul izotopilor (același număr atomic cu masa atomică diferită.) Rolul principal al neutronilor este acela de a reduce repulsia electrostatică în interiorul nucleului.



(O reprezentare figurativă a atomului de heliu-4 cu norul de electroni în nuanțe de gri. În nucleu, cei doi protoni și cei doi neutroni sunt reprezentați în roșu și albastru. Această reprezentare arată particulele ca fiind separate, în timp ce într-un atom de heliu real, protonii sunt suprapuși în spațiu și cel mai probabil aflați chiar în centrul nucleului, și același lucru este valabil și pentru cei doi neutroni, astfel că toate cele patru particule sunt cel mai probabil aflate în exact același spațiu, în punctul central. Imaginile particulelor separate nu reușesc să modeleze distribuțiile de încărcări cunoscute în nucleele foarte mici. O imagine mai precisă este că distribuția spațială a nucleonilor într-un nucleu de heliu este mult mai aproape de norul electron de heliu prezentat aici, deși pe o scară mult mai mică decât imaginea nucleului imaginat. Sursa: Yzmo,

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Helium_atom_QM.svg, CC Attribution-Share Alike 3.0 Unported license)

Compoziție și formă

Protonii și neutronii sunt fermioni, cu valori diferite ale numărului cuantic de izospin puternic, astfel încât doi protoni și doi neutroni pot împărți aceeași funcție de undă spațială, deoarece nu sunt entități cuantice identice. Ei sunt priviți uneori ca două stări cuantice diferite ale aceleiași particule, *nucleonul*. Doi fermioni, precum doi protoni, sau doi neutroni, sau un neutron + un proton (deuteronul), pot prezenta comportament bosonic atunci când devin liberi legate în perechi, care au spin întreg.

În cazul rar a unui hipernucleu, un al treilea barion numit hiperon, conținând unul sau mai mulți cuarci stranii și/sau alți cuarci neobișnuiți, poate de asemenea să partajeze funcția de undă. Totuși, acest tip de nucleu este extrem de instabil și nu se găsește pe Pământ, cu excepția cazului experimentelor fizice de mare energie.

Neutronul are un miez încărcat pozitiv cu o rază $\approx 0,3$ fm, înconjurat de o sarcină negativă compensatoare de rază între 0,3 fm și 2 fm. Protonul are o distribuție a încărcăturii pozitive care se diminuează exponențial, cu o rază medie pătrată de aproximativ 0,8 fm.

Nucleii pot fi sferici, în formă de mingi de rugby (deformare alungită), în formă de disc (deformare oblică), triaxial (o combinație de deformare oblică și alungită) sau în formă de pară.

Forțe

Nucleii sunt legați împreună de forța reziduală puternică (forța nucleară). Forța reziduală puternică este un reziduu minor al interacțiunii puternice care leagă cuarcii împreună pentru a forma protoni și neutroni. Această forță este mult mai slabă între neutroni și protoni, deoarece este în mare parte neutralizată în ele, în același fel în care forțele electromagnetice dintre atomii neutri (cum ar fi forțele van der Waals care acționează între doi atomi de gaz inert) sunt mult mai slabe decât forțele electromagnetice care țin împreună părțile atomilor interne (de exemplu, forțele care țin electronii într-un atom de gaz inert legat de nucleul său).

Forța nucleară este foarte puternică atractiv la distanța de separare tipică a nucleonilor, iar aceasta se suprapune peste repulsia dintre protoni datorită forței electromagnetice, permițând astfel existența nucleilor. Cu toate acestea, forța reziduală puternică are un domeniu limitat deoarece scade rapid cu distanța (a se vedea potențialul Yukawa); astfel încât numai nucleeele mai mici de o anumită dimensiune pot fi complet stabile. Cel mai mare nucleu cunoscută complet stabilă (adică stabil la dezintegrările alfa, beta și gama) este plumb-208 care conține un total de 208 nucleoni (126 neutroni și 82 protoni). Nucleeele mai mari decât acest maxim sunt instabile și tind să aibă o viață din ce în ce mai scurtă, cu cât este mai mare numărul de nucleoni. Cu toate acestea, bismutul-209 este, de asemenea, stabil pentru dezintegrarea beta și are cel mai lung timp de înjumătățire pentru dezintegrarea alfa față de orice alt izotop cunoscut, estimat la de un miliard de ori mai mare decât vârsta universului.

Forța reziduală puternică este eficientă într-un interval foarte scurt (de obicei doar câțiva femtometri (fm), aproximativ unul sau două diametre nucleonice) și cauzează o atracție între orice pereche de nucleoni. De exemplu, între protoni și neutroni se formează deuteronul [NP] și, de asemenea, între protoni și protoni și neutroni și neutroni.

9.2.4 Forțe nucleare

Forța nucleară slabă

Forța nucleară slabă sau interacțiunea slabă este una dintre cele patru forțe fundamentale ale naturii. Aceasta este cel mai frecvent considerată a fi cauza dezintegrării beta și a radioactivității asociate. Aceasta este realizată de bosonii W (W^+ și W^-) și bosonii Z (Z^0).

Interacțiunea slabă este mecanismul responsabil pentru forța slabă sau forța nucleară slabă, unul dintre cele patru interacțiuni fundamentale ale naturii, alături de interacțiunea tare, electromagnetismul, și gravitația. Interacțiunea slabă este responsabilă atât pentru dezintegrarea radioactivă cât și pentru fuziunea nucleară a particulelor subatomice. Teoria interacțiunii slabe este numită uneori **flavordinamica cuantică**, în analogie cu termenii cromodinamica cuantică și electrodinamica cuantică, dar, în practică, termenul este rar folosit, deoarece forța slabă este cel mai bine înțeleasă în termenii teoriei electrolabe.

Interacțiunea slabă afectează:

- neutrinii
- leptonii încărcăți
- cuarcii.

Interacțiunea slabă permite tuturor particulelelor și antiparticulelor leptoni și cuarci să schimbe energie, masă și sarcină - schimb efectiv între particule.

Cu o intensitate a câmpului de cca. 10^9 ori mai mică decât forța nucleară tare (10^{-18} m), influența sa este limitată la acțiunea în interiorul nucleului atomic. Această rază scurtă se explică prin marea masă a particulelor de schimb slab (aproximativ 90 GeV).

Forța electromagnetică și forța nucleară slabă pot fi descrise ca două aspecte diferite ale unei singure forțe electrolabe.

Forța nucleară tare

Forța nucleară tare sau interacțiunea puternică este o forță fundamentală a naturii care afectează doar cuarcii, anticuarcii, și gluonii. Această forță este responsabilă de legarea cuarcilor împreună pentru a forma hadroni (inclusiv protoni și neutroni), iar efectele reziduale leagă, de asemenea, acești neutroni și protoni împreună în nucleul atomului.

În conformitate cu cromodinamica cuantică, fiecare quark poartă o *sarcină de culoare*, care vine în trei tipuri: "roșu", "verde" și "albastru". Acestea sunt doar nume și nu sunt legate de culorile obișnuite în niciun fel. Anticuarcii sunt fie "anti-roșu", "anti-verde" sau "anti-albastru". Atracția între o culoare și o anti-culoare este deosebit de puternică. Particulele

pot exista numai în cazul în care culoarea lor totală este neutră, ceea ce înseamnă că ele pot fi compuse fie dintr-un cuarc roșu, verde și albastru (o astfel de particulă este numit un barion; protonii și neutronii sunt astfel de exemple), sau dintr-un cuarc și un anti-cuarc având anti-culoarea corespunzătoare (o astfel de particulă este numită mezon).

Interacțiunea tare acționează între doi quarci prin schimbul de particule numite gluoni. Există opt tipuri de gluoni, fiecare purtând o sarcină de culoare și o sarcină anti-culoare.

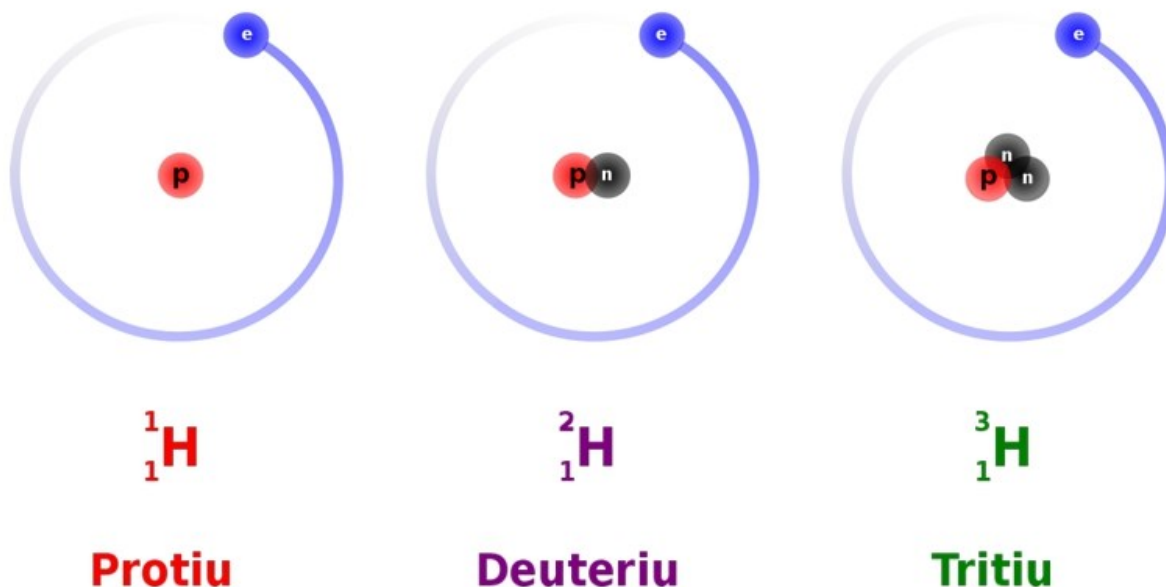
Întrucât perechile de quarci interacționează, își schimbă în mod constant culoarea lor, dar în așa fel încât suma totală de culoare este conservată. Dacă, să zicem, un cuarc roșu este atras de un cuarc verde în interiorul unui barion, un gluon care transportă culoare anti-verde și roșu este emis de cuarcul roșu și absorbit de cuarcul verde; ca urmare, primul cuarc se schimbă în verde și al doilea în roșu (sarcina totală de culoare rămâne verde+roșu). În cazul în care un cuarc albastru și un anticuarc anti-albastru interacționează în interiorul unui mezon, un gluon cu, de exemplu, anti-roșu și albastru, ar putea fi emis de cuarcul albastru și absorbit de cel anti-albastru; ca urmare cuarcul albastru devine roșu și anticuarcul anti-albastru se transformă anti-roșu (sarcina totală de culoare rămâne 0). Doi quarci verzi se resping reciproc prin schimbul unui gluon cu culoare verde și anti-verde; cuarcii rămân verde.

Spre deosebire de alte forțe fundamentale, interacțiunea puternică acționează, de asemenea, asupra particulelor de schimb în sine, deoarece gluonii transportă sarcina de culoare. Acest lucru conduce la o gamă foarte limitată de interacțiuni tari (nu mult mai departe decât raza hadronului), chiar dacă gluonii nu au masă. Ea are, de asemenea, efectul ciudat că devine mai puternică cu cât distanța dintre quarci crește. Acest efect face ca cuarcii liberi să nu fie observați. Cu cât distanța dintre doi quarci crește, forța dintre ei crește. În cazul în care forța devine suficient de puternică, nu este suficientă energie pentru a crea noi quarci. Acesta este motivul pentru care se văd doar quarci în perechi sau tripleți, și nu individual. O similitudine este o bandă de cauciuc. Când banda de cauciuc este întinsă destul de mult, banda se rupe și se obțin două benzi de cauciuc noi. Similar cu cuarcii: dacă separați o pereche de quarci suficient de mult, doi noi quarci se vor crea.

Fenomenul de a nu fi capabil să se separe cuarcii, se numește confinare. Când cuarcii sunt mutați suficient de aproape, astfel încât nu mai interacționează prin interacțiunea tare, și devin "liberi" - aceasta se numește libertate asimptotică. Alegoria cu banda de cauciuc este valabilă și aici. Apropiati capetele benzii suficient de aproape una de alta, și ele nu se vor mai "simți" reciproc.

9.2.5 Izotopi

Izotopii sunt variante ale unui element chimic particular care diferă prin numărul de neutroni. Toți izotopii unui element dat au același număr de protoni în fiecare atom. Termenul izotop este format din rădăcinile grecești *isos* (ἴσος, "egal") și *topos* (τόπος, "loc"), adică "același loc"; astfel, semnificația din spatele numelui este că izotopii diferiți ai unui singur element ocupă aceeași poziție în tabelul periodic.



(Cei trei izotopi naturali ai hidrogenului. Faptul ca fiecare izotop are un proton îi face pe toți variante ale hidrogenului: identitatea izotopului este data de numărul de neutroni. De la stânga la dreapta, izotopii sunt protiu (${}^1\text{H}$) cu zero neutroni, deuteriu (${}^2\text{H}$) cu un neutron și tritiu (${}^3\text{H}$) cu două neutroni. Sursa: Dirk Hünninger, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Hydrogen_Deuterium_Tritium_Nuclei_Schematic-en.svg, CC Attribution-Share Alike 3.0 Unported license, Traducere Nicolae Sfetcu)

Numărul de protoni din nucleul atomului se numește *număr atomic* și este egal cu numărul de electroni din atomul neutru (neionizat). Fiecare număr atomic identifică un element specific, dar nu izotopul; un atom al unui element dat poate avea o gamă largă de neutroni. Numărul de nucleoni (atât protoni cât și neutroni) din nucleu reprezintă *numărul de masă* al atomului și fiecare izotop al unui element dat are un număr de masă diferit.

De exemplu, carbon-12, carbon-13 și carbon-14 sunt trei izotopi ai elementului carbon cu numere de masă 12, 13 și, respectiv, 14. Numărul atomic al carbonului este de 6, ceea ce înseamnă că fiecare atom de carbon are 6 protoni, astfel încât numerele neutronilor acestor izotopi sunt 6, 7 și respectiv 8.

Izotop vs. nuclid

Un *nuclid* este o specie a unui atom cu un număr specific de protoni și neutroni în nucleu, de exemplu carbon-13 cu 6 protoni și 7 neutroni. Conceptul de nuclid (referindu-se la speciile nucleare individuale) accentuează proprietățile nucleare față de proprietăților chimice, în timp ce conceptul de izotop (grupând toți atomii fiecărui element) accentuează proprietățile chimice față de proprietățile nucleare. Numărul de neutroni are efecte mari asupra proprietăților nucleare, însă efectul său asupra proprietăților chimice este neglijabil pentru majoritatea elementelor. Chiar și în cazul celor mai ușoare elemente în care raportul dintre numărul de neutroni față de numărul atomic variază cel mai mult între izotopi, are de obicei doar un efect redus, deși este important în anumite circumstanțe (pentru

hidrogen, cel mai ușor element, efectul izotopic este suficient de mare pentru a afecta puternic biologia). Termenul izotopi (inițial, de asemenea, elemente izotopice, acum, uneori, nuclide izotopice) intenționează să impună o comparație (cum ar fi sinonime sau izomeri), de exemplu: nuclidele $^{12}_6\text{C}$, $^{13}_6\text{C}$, $^{14}_6\text{C}$ sunt izotopi (nuclide cu același număr atomic, dar cu numere diferite de masă), în timp ce $^{40}_{18}\text{Ar}$, $^{40}_{19}\text{K}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$ sunt *izobari* (nuclide cu același număr de masă). Cu toate acestea, deoarece izotopul este termenul mai vechi, este mai bine cunoscut decât nuclidul și este încă folosit uneori în contexte în care nuclidul ar putea fi mai adecvat, cum ar fi tehnologia nucleară și medicina nucleară.

Definiția

Izotopii sunt tipuri diferite de atomi ai aceluiași element care au același număr de protoni (număr atomic), dar numărul diferit de neutroni și numărul de masă diferit (numărul total de protoni și neutroni).

Notăție

Un izotop și/sau nuclid este specificat prin numele elementului particular (acesta indică numărul atomic) urmat de o cratimă și numărul de masă (de exemplu, heliu-3, heliu-4, carbon-12, carbon-14, uraniu-235 și uraniu-239). Atunci când se utilizează un simbol chimic, de ex. "C" pentru carbon, notația standard (acum cunoscută sub numele de "notație AZE" deoarece A este numărul de masă, Z numărul atomic și E pentru element) înseamnă a indica numărul de masă (numărul de nucleoni) cu o suprascriere în stânga sus la simbolul chimic, și a indica numărul atomic cu un indice (sucsorie jos) în stânga (ex. ^3_2He , ^4_2He , $^{12}_6\text{C}$, $^{14}_6\text{C}$, $^{235}_{92}\text{U}$ și $^{239}_{92}\text{U}$). Deoarece numărul atomic este dat de simbolul elementului, este obișnuit să se precizeze numai numărul de masă din superscript și să se renunțe la indicele numărului atomic (de ex., ^3He , ^4He , ^{12}C , ^{14}C , ^{235}U și ^{239}U). Litera *m* este uneori atașată după numărul de masă pentru a indica un izomer nuclear, o stare nucleară excitată metastabilă sau energetică (spre deosebire de starea de bază a energiei cea mai mică), de exemplu $^{180m}_{73}\text{Ta}$ (Tantal-180m).

Pronunțarea comună a notației AZE este diferită de modul în care este scris: ^4_2He este frecvent pronunțată ca heliu-patru în loc de patru-doi-heliu și $^{235}_{92}\text{U}$ ca uraniu două-sute-treizeci-și-cinci în loc de 235-92-uraniu.

Izotopi radioactivi, primordiali și stabili

Unii izotopi/nuclizi sunt radioactivi și, prin urmare, sunt denumiți *radioizotopi* sau *radionuclizi*, în timp ce alții nu au fost observați niciodată că se dezintegrează radioactiv și sunt menționați ca *izotopi stabili* sau *nuclizi stabili*. De exemplu, ^{14}C este o formă radioactivă de carbon, în timp ce ^{12}C și ^{13}C sunt izotopi stabili. Există aproximativ 339 de nuclizi care apar în mod natural pe Pământ, dintre care 286 sunt nuclizi *primordial*i, ceea ce înseamnă că au existat de la formarea Sistemului Solar.

Nuclizii primordiali includ 32 de nuclizi cu un timp de înjumătățire foarte lung (peste 100 de milioane de ani) și 253 care sunt formal considerați ca "nuclizi stabili", deoarece nu s-au observat că se vor dezintegra. În majoritatea cazurilor, din motive evidente, dacă un element are izotopi stabili, acești izotopi predomină în abundența elementară găsită pe Pământ și în Sistemul Solar. Cu toate acestea, în cazul a trei elemente (telur, indiu și reniu), izotopul cel mai abundent găsit în natură este de fapt unul (sau doi) radioizotopi cu timp de înjumătățire extrem de lung al elementului, în ciuda faptului că aceste elemente au unul sau mai mulți izotopi stabili.

Teoria prezice că mulți izotopi/nuclizi aparent "stabili" sunt radioactivi, cu perioade de înjumătățire extrem de lungi (reducând posibilitatea dezintegrării protonilor, ceea ce ar face în cele din urmă toți nuclizii instabili). Din cei 253 de nuclizi care nu au fost observate niciodată în dezintegrări, numai 90 dintre aceștia (toți din primele 40 de elemente) sunt teoretic stabili pentru toate formele cunoscute de dezintegrare. Elementul 41 (niobiu) este teoretic instabil prin fisiune spontană, dar acest lucru nu a fost niciodată detectat. Mulți alți nuclizi stabili sunt teoretic susceptibili la alte forme cunoscute de dezintegrare, cum ar fi dezintegrarea alfa sau dezintegrarea beta dublă, dar nu s-au observat produse de dezintegrare și astfel se consideră că aceste izotopi sunt "observațional stabili". Timpii de înjumătățire prezenți pentru acești nuclizi depășesc adesea cu mult vârsta estimată a universului și, de fapt, există și 27 de radionuclizi cunoscuți (vezi nucleul primordial) cu jumătăți de viață mai mari decât vârsta universului.

Adăugând nuclizii radioactivi care au fost creați în mod artificial, există 3339 nuclizi cunoscuți în prezent. Aceștia includ 905 de nuclizi care sunt fie stabili, fie au timp de înjumătățire mai mari de 60 de minute.

9.2.6 De ce sunt radioactivi atomii? (Dezintegrarea radioactivă)

Dezintegrarea radioactivă (cunoscută și sub denumirea de *dezintegrare nucleară* sau *radioactivitate*) este procesul prin care un nucleu atomic instabil își pierde energia (în termeni de masă în cadrul de repaus) prin emiterea de radiații, cum ar fi o particulă alfa, o particulă beta cu neutrino sau doar un neutrino în cazul capturii electronice, a razelor gama, sau a electronului în cazul conversiei interne. Un material care conține astfel de nuclee instabile este considerat radioactiv. Anumite stări nucleare foarte excitate, cu durată lungă de viață, se pot deteriora prin emisiile de neutroni sau, mai rar, emisiile de protoni.

Dezintegrarea radioactivă este un proces stohastic (adică la întâmplare) la nivelul atomilor unici, prin faptul că, conform teoriei cuantice, este imposibil să se prezică momentul în care un anumit atom se va dezintegra, indiferent de cât timp a existat atomul. Cu toate acestea, pentru o colecție de atomi, rata de dezintegrare așteptată a colecției este caracterizată prin constante de dezintegrare măsurate sau timp de înjumătățire. Aceasta este baza de datare radiometrică. Timpul de înjumătățire al atomilor radioactivi nu are limită superioară cunoscută, acoperind un interval de timp de peste 55 de ordine de mărime, de la aproape instantaneu până la mult mai mult decât vârsta universului.

Perioada	I		II		Grupa																III	IV	V	VI	VII	VIII																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1	1 H																																			2 He																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2	3 Li	4 Be																																		5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
3	11 Na	12 Mg																																			13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
4	19 K	20 Ca																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			

(Tabelul periodic cu elemente colorate în funcție de timpul de înjumătățire al izotopului lor cel mai stabil.

Formatul în 32 coloane este util în prezentarea modelului de stabilitate. Radioactivitatea este caracteristică elementelor cu un număr mare de atomi. Elementele cu cel puțin un izotop stabil sunt arătate în albastru deschis. Verde prezintă elemente ale căror izotopi stabili au un timp de înjumătățire măsurat în milioane de ani, Galben și portocaliu sunt progresiv mai puțin stabili, cu jumătăți de viață în mii sau sute de ani, în jos ajungând la o singură zi. Roșu și purpuriu arată elemente extrem de radioactive, unde izotopii cei mai stabili prezintă timpi de înjumătățire măsurați de ordinul zilei și mult mai puțin.)

Elemente care conțin cel puțin un izotop stabil.

Elementele radioactive: cel mai stabil izotop este foarte lung, cu un timp de înjumătățire de peste patru milioane de ani.

Elementele radioactive: cel mai stabil izotop are un timp de înjumătățire cuprins între 800 și 34.000 de ani.

Elementele radioactive: cel mai stabil izotop are un timp de înjumătățire între o zi și 103 de ani.

Elemente foarte radioactive: izotopul cel mai stabil are un timp de înjumătățire cuprins între câteva minute și o zi.

Elemente extrem de radioactive: cel mai stabil izotop are un timp de înjumătățire mai mic de câteva minute. Foarte puțin se cunoaște despre aceste elemente din cauza instabilității lor extreme și a radioactivității.

De notat că acest tabel abordează numai cel mai stabil izotop al fiecărui element. Prin urmare, ar fi eronat să se concluzioneze că toate elementele care apar în mod natural de la hidrogen la plumb nu sunt radioactive. De exemplu, dacă puneți un contor geiger la o banană, veți detecta radioactivitatea datorită izotopului de potasiu ^{40}K , care este și cel mai comun radioizotop din corpul uman. Sursa: Alessio Rolleri (et al), Lexi sioz, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Periodic_Table_Stability_%26_Radioactivity.png, CC Attribution-Share Alike 2.5 Generic license)

Un nucleu radioactiv cu spin zero nu poate avea o orientare definită și, prin urmare, emite impulsul total al produselor sale de dezintegrare izotrop (în toate direcțiile și fără părtinire). Dacă există mai multe particule produse în timpul unei singure dezintegrări, ca în dezintegrarea beta, distribuția lor unghiulară *relativă* sau direcțiile de rotație nu pot fi izotropice. Produsele de dezintegrare dintr-un nucleu cu spin pot fi distribuite neizotropice cu privire la direcția de rotație, fie din cauza unei influențe externe, cum ar fi un câmp electromagnetic, fie datorită faptului că nucleul a fost produs într-un proces dinamic care a

constrâns direcția spinului său. Un astfel de proces parental ar putea fi o dezintegrare anterioară sau o reacție nucleară.

Nucleul dezintegrat se numește *radionuclidul părinte* (sau *radioizotopul părinte*), iar procesul produce cel puțin un *nuclid fiu*. Cu excepția dezintegrării gama sau a transformării interne dintr-o stare excitată de nucleu, dezintegrarea este o transmutare nucleară care are ca rezultat un fiu care conține un număr diferit de protoni sau neutroni (sau ambii). Când se modifică numărul de protoni, se creează un atom al unui element chimic diferit.

Primele procese de dezintegrare care au fost descoperite au fost dezintegrarea alfa, dezintegrarea beta și dezintegrarea gama. Dezintegrarea alfa apare atunci când nucleul ejectează o particulă alfa (nucleul de heliu). Acesta este cel mai obișnuit proces de emisie a nucleonilor, dar nucleele foarte excitate pot emite singure nucleonii sau, în cazul dezintegrării clusterului, nuclee specifice ușoare ale altor elemente. Dezintegrarea beta are loc în două moduri: (i) dezintegrarea beta-minus, atunci când nucleul emite un electron și un antineutrino într-un proces care schimbă un neutron cu un proton sau (ii) o dezintegrare beta-plus, atunci când nucleul emite un pozitron și un neutrino într-un proces care schimbă un proton într-un neutron. Nucleele bogate în neutroni puternic excitați, formate ca produs al altor tipuri de dezintegrare, pierd ocazional energie prin emisia de neutroni, rezultând o schimbare de la un izotop la altul a aceluiași element. Nucleul poate capta un electron care orbitează, determinând transformarea unui proton într-un neutron într-un proces numit captură electronică. Toate aceste procese conduc la o transmutare nucleară bine definită.

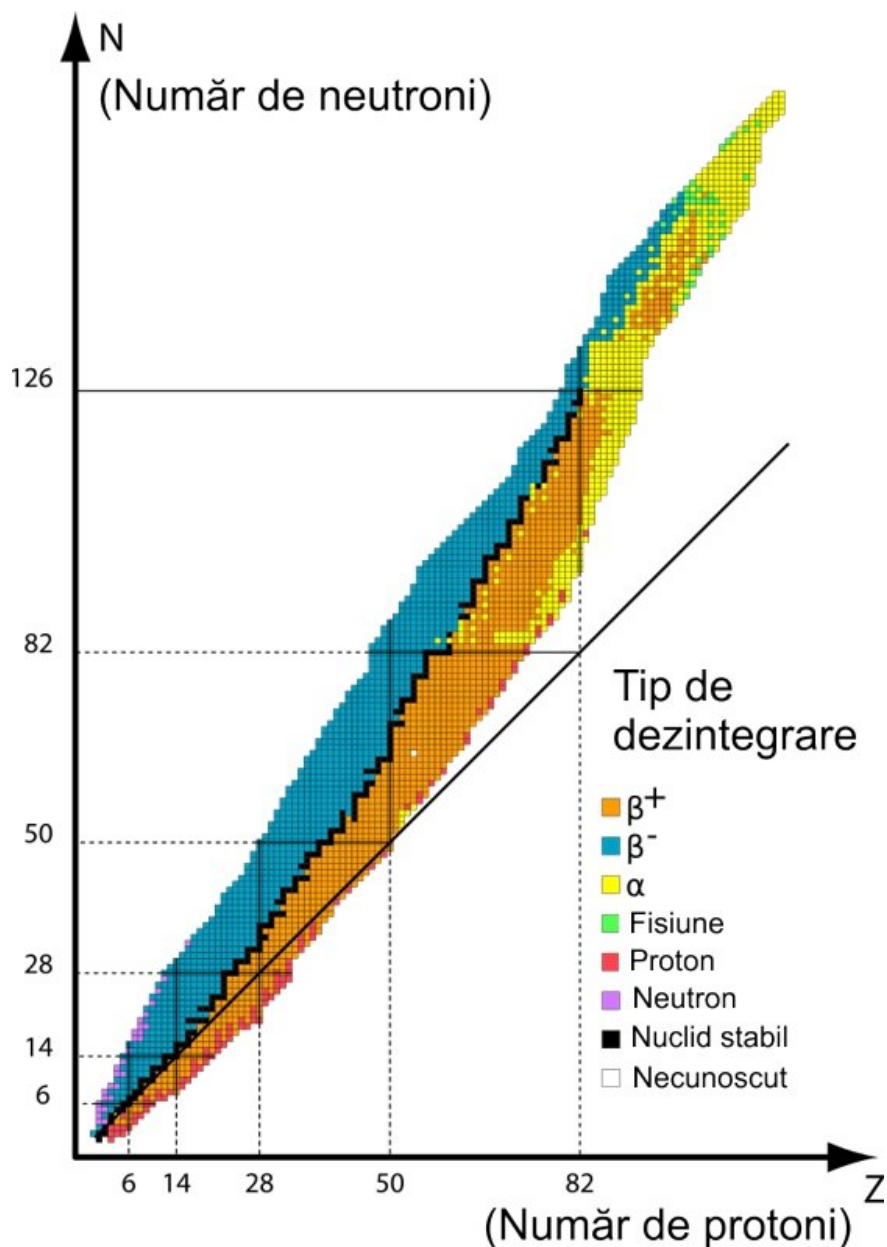
În schimb, există procese de dezintegrare radioactivă care nu duc la o transmutare nucleară. Energia unui nucleu excitat poate fi emisă ca o rază gama într-un proces numit dezintegrare gama, sau energia poate fi pierdută atunci când nucleul interacționează cu un electron orbital provocând ejecția lui din atom, într-un proces numit conversie internă.

Un alt tip de dezintegrare radioactivă are ca rezultat produse care variază, apărând ca două sau mai multe "fragmente" ale nucleului original cu o serie de mase posibile. Această dezintegrare, numită fisiune spontană, se întâmplă atunci când un nucleu mare instabil se sparge spontan în două (sau ocazional trei) nuclee fii mai mici și, în general, conduce la emisia de raze gama, neutroni sau alte particule din aceste produse.

Există 29 de elemente chimice naturale care apar pe Pământ și care sunt radioactive. Acestea sunt cele care conțin 34 de radionuclizi care datează înainte de momentul formării sistemului solar și sunt cunoscute ca nuclizi primordiali. Exemple bine-cunoscute sunt uraniul și torul, dar sunt incluse și radioizotopi de lungă durată, cum ar fi potasiul-40. Alți 50 de radionuclizi cu durată mai scurtă de viață, cum ar fi radium și radon, existenți pe Pământ, sunt produsele lanțurilor de dezintegrare care au început cu nucleele primordiale sau sunt produsul proceselor cosmogene în curs de desfășurare, cum ar fi producerea carbonului 14 din azot-14 în atmosferă prin raze cosmice. Radionuclizii pot fi, de asemenea, produși în mod artificial în acceleratoare de particule sau reactoare nucleare, rezultând în

650 dintre acestea cu un timp de înjumătățire mai mare de o oră și câteva mii mai multe cu un timp de înjumătățire mai scurt.

Baza teoretică a fenomenelor de dezintegrare



(Tipuri de dezintegrare radioactivă legate de numerele N și Z . Sursa: Napy1kenobi / Sjlegg, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Table_isotopes_en.svg, CC Attribution-Share Alike 3.0 Unported, 2.5 Generic, 2.0 Generic and 1.0 Generic license, Traducere Nicolae Sfetcu)

Neutronii și protonii care formează nuclee, precum și alte particule care se apropie destul de mult de ele, sunt guvernate de mai multe interacțiuni. Forța nucleară puternică, neobservată la scara macroscopică familiară, este forța cea mai puternică pe distanțele

subatomice. Forța electrostatică este aproape întotdeauna semnificativă și, în cazul dezintegrării beta, este implicată și forța nucleară slabă.

Interacțiunea acestor forțe produce o serie de fenomene diferite în care energia poate fi eliberată prin rearanjarea particulelor în nucleu, sau schimbarea unui tip de particule în altele. Aceste rearanjamente și transformări pot fi împiedicate în mod energetic, astfel încât să nu apară imediat. În anumite cazuri, fluctuațiile aleatorii cuantice în vid sunt teoretizate pentru a promova relaxarea la o stare de energie mai mică ("dezintegrarea") într-un fenomen cunoscut sub numele de *tunelare cuantică*. Timpul de înjumătățire a dezintegrării radioactive a nucleizilor a fost măsurat pe durate de 55 de ordine de mărime, de la $2,3 \times 10^{-23}$ secunde (pentru hidrogen-7) la $6,9 \times 10^{31}$ secunde (pentru telur-128). Limitele acestor termene sunt stabilite de sensibilitatea instrumentelor numai și nu există limite naturale cunoscute pentru cât de scurte sau lungi poate fi o perioadă de înjumătățire prin decădere pentru dezintegrarea radioactivă a unui radionuclid.

Procesul de dezintegrare, ca toate transformările de energie restricționate, poate fi asemănat cu o suprafață de zăpadă pe un munte. În timp ce frecarea dintre cristalele de gheață poate susține greutatea zăpezii, sistemul este în mod inerent instabil în ceea ce privește o stare de energie potențială mai mică. O perturbare ar facilita calea spre o stare de entropie mai mare; sistemul se va deplasa spre starea de bază, producând căldură, iar energia totală va fi distribuită pe un număr mai mare de stări cuantice, rezultând astfel o avalanșă. Energia totală nu se schimbă în acest proces, dar, din cauza celei de-a doua legi a termodinamicii, avalanșele au fost observate într-o singură direcție, îndreptându-se către "starea de bază" - starea cu cel mai mare număr de moduri în care energia disponibilă ar putea fi distribuită.

Un astfel de colaps (un *eveniment de dezintegrare* a radiațiilor gama) necesită o energie specifică de activare. Pentru o avalanșă de zăpadă, această energie vine ca o perturbare din afara sistemului, deși astfel de perturbări pot fi arbitrar mici. În cazul unui nucleu atomic excitat care se dezintegrează prin radiații gama într-o emisie spontană de radiație electromagnetică, perturbarea arbitrară mică provine din fluctuațiile de vid cuantic.

Un nucleu radioactiv (sau orice sistem excitat în mecanica cuantică) este instabil și, astfel, se poate stabiliza *spontan* într-un sistem mai puțin excitat. Transformarea rezultată modifică structura nucleului și are ca rezultat emisia fie a unei particule fotonice fie a unei particule de mare viteză care are masă (cum ar fi un electron, o particulă alfa sau alt tip).

Apariție și aplicații

Conform teoriei Big Bang, izotopii stabili ai celor mai ușoare cinci elemente (H, He și urme de Li, Be și B) au fost produse imediat după apariția universului, într-un proces numit nucleosinteza Big Bang. Cei mai ușori nuclizi stabili (inclusiv deuteriu) supraviețuiesc până astăzi, dar orice izotop radioactiv al elementelor ușoare produse în Big Bang (cum ar fi tritiul) s-a dezintegrat cu mult timp în urmă. Izotopii elementelor mai grele decât borul nu au fost produși deloc în Big Bang și aceste prime cinci elemente nu au radioizotopi cu

durată lungă de viață. Astfel, toate nucleele radioactive sunt, prin urmare, relativ tinere în ceea ce privește nașterea universului, formate mai târziu în diferite alte tipuri de nucleosinteză în stele (în special, supernove) și, de asemenea, în timpul interacțiunilor continue între izotopi stabili și particule energetice. De exemplu, carbonul 14, un nucleu radioactiv cu un timp de înjumătățire de numai 5730 de ani, este produs în mod constant în atmosfera superioară a Pământului datorită interacțiunilor dintre razele cosmice și azot.

Nuclizii care sunt produși prin dezintegrare radioactivă sunt numiți nuclizi radiogeni, indiferent dacă însele sunt stabili sau nu. Există nuclizi radiogeni stabili care au fost formați din radionuclizi dispăruți de scurtă durată în sistemul solar timpuriu. Prezența suplimentară a acestor nuclizi radiogeni stabili (cum ar fi Xe-129 din primordialul I-129) pe fundalul unor nuclizi stabili primordiali, poate fi dedusă prin diverse mijloace.

Dezintegrarea radioactivă a fost pusă în aplicare în tehnica de etichetare radioizotopică, care este utilizată pentru a urmări trecerea unei substanțe chimice printr-un sistem complex (cum ar fi un organism viu). O probă a substanței este sintetizată cu o concentrație ridicată de atomi instabili. Prezența substanței în o parte sau alta a sistemului este determinată de detectarea locațiilor evenimentelor de dezintegrare.

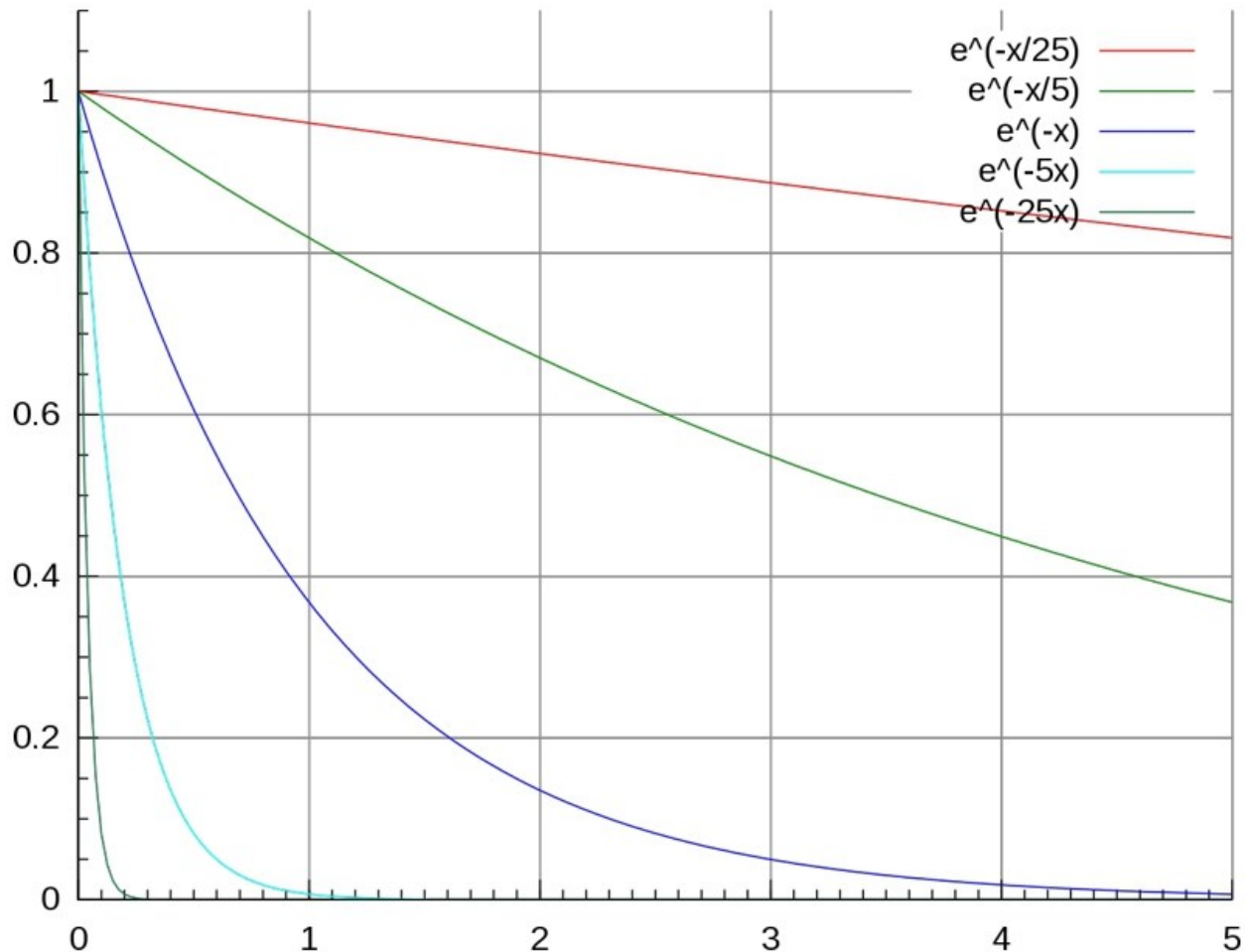
Pe baza premisei că dezintegrarea radioactivă este cu adevărat aleatoare (mai degrabă decât pur haotică), ea a fost utilizată în generatoare de numere aleatoare de tip "hardware". Deoarece procesul nu este considerat a varia semnificativ în mecanism de-a lungul timpului, este de asemenea un instrument valoros în estimarea vârstei absolute a anumitor materiale. Pentru materialele geologice, radioizotopii și unele dintre produsele lor de dezintegrare sunt capturate atunci când se solidifică o stâncă și apoi poate fi utilizată ulterior (sub rezerva multor calificări bine-cunoscute) pentru a estima data solidificării. Acestea includ verificarea rezultatelor mai multor procese simultane și a produselor lor una față de cealaltă, în cadrul aceluiași eșantion. Într-o manieră similară și, de asemenea, supusă calificării, cu rata de formare a carbonului-14 în diferite epoci, se poate estima data formării materiei organice într-o anumită perioadă legată de timpul de înjumătățire al izotopului, deoarece carbonul-14 ajunge să fie blocat atunci când materia organică crește și încorporează noul carbon-14 din aer. Ulterior, cantitatea de carbon-14 din materia organică scade conform proceselor de dezintegrare care pot fi, de asemenea, controlate în mod independent prin alte mijloace (cum ar fi investigarea atomului de carbon 14 în inele individuale de arbori, de exemplu).

Originea nuclizilor radioactivi

Nuclizii primordiali radioactivi găsiți pe Pământ sunt reziduuri ale exploziilor supernovase care au avut loc înainte de formarea sistemului solar. Acestea sunt fracțiuni de radionuclizi care au supraviețuit din acel moment, la formarea nebuloasei solare primordiale, prin acreția planetei și până în prezent. Radionuclizii radiogeni de scurtă durată care se găsesc în mod natural în rocile de astăzi, sunt fiii acelor nuclizi radioactivi primordiali. O altă sursă minoră de nuclizi radioactivi naturali sunt nuclizii cosmogeni, care sunt formați prin

bombardarea cu raze cosmice a materialului din atmosfera sau crusta Pământului. Dezintegrarea radionuclizilor în roci ale mantalei și crustei Pământului contribuie în mod semnificativ la căldura internă a Pământului.

9.2.7 Timpul de înjumătățire (Dezintegrarea radioactivă)



(O dezintegrare exponențială. Constantele mai mari ale dezintegrării determină o dispariție mult mai rapidă a materiei. Acest grafic arată dezintegrarea pentru constanta de dezintegrare (λ) de 25, 5, 1, $1/5$ și $1/25$ pentru x de la 0 la 5. Sursa: PeterQ / Autopilot, <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Plot-exponential-decay.svg>, CC Attribution-Share Alike 2.5 Generic, 2.0 Generic and 1.0 Generic license)

Rata de dezintegrare sau activitatea unei substanțe radioactive se caracterizează prin:

Cantități constante:

- *Timpul de înjumătățire* - $t_{1/2}$, reprezintă timpul necesar pentru ca o anumită cantitate dintr-o substanță radioactivă să scadă la jumătate din valoarea sa inițială.

- *Constanta de dezintegrare* - λ , "lambda", este reciproca duratei medii de viață, uneori numită pur și simplu *rata de dezintegrare*.
- *Durata medie de viață* - τ , "tau", este durata medie de viață ($1/e$ din viață) a unei particule radioactive înainte de dezintegrare.

Deși acestea sunt constante, ele sunt asociate cu comportamentul statistic al populațiilor de atomi. În consecință, predicțiile care utilizează aceste constante sunt mai puțin corecte pentru probele minuscule de atomi.

În principiu, un timp de înjumătățire, o a treime din viață sau chiar o fracție ($1/\sqrt{2}$) din viață, poate fi utilizat exact în același mod ca timpul de înjumătățire; dar durata medie de viață și timpul de înjumătățire $t_{1/2}$ au fost adoptate ca perioade standard asociate cu dezintegrarea exponențială.

Cantități variabile în timp:

- *Activitatea totală* - A , este numărul de dezintegrări pe unitatea de timp a unei probe radioactive.
- *Numărul de particule* - N , este numărul total de particule din probă.
- *Activitatea specifică* - A_s , numărul de dezintegrări pe unitate de timp per cantitate de substanță a eșantionului la timpul setat la zero ($t = 0$). "Cantitatea de substanță" poate fi masa, volumul sau molii probei inițiale.

Timpul de înjumătățire (simbolul $t_{1/2}$) este timpul necesar pentru ca o cantitate să fie redusă la jumătate din valoarea inițială. Termenul este folosit în mod obișnuit în fizica nucleară pentru a descrie cât de repede sunt dezintegrați atomii instabili sau cât timp supraviețuiesc atomii stabili la dezintegrarea radioactivă. Termenul este, de asemenea, folosit mai general pentru a caracteriza orice tip de dezintegrare exponențială sau non-exponențială. De exemplu, științele medicale se referă la timpul biologic de înjumătățire al medicamentelor și al altor substanțe chimice din corpul uman. Inversul perioadei de înjumătățire este timpul de dublare.

Termenul original, *perioada de înjumătățire*, datând de la descoperirea principiului de Ernest Rutherford în 1907, a fost schimbat în *timpul de înjumătățire* la începutul anilor 1950. Rutherford a aplicat principiul timpului de înjumătățire al elementului radioactiv la studiile privind determinarea vârstei rocilor prin măsurarea perioadei de dezintegrare a radiației pentru plumb-206.

Timpul de înjumătățire este constant pe întreaga durată de viață a unei cantități dezintegrate exponențial și este o unitate caracteristică pentru ecuația exponențială de dezintegrare. Tabelul de mai înainte arată reducerea unei cantități în funcție de numărul de timpi de înjumătățire scurși.

Timpul de înjumătățire poate fi scris în termeni de constantă de dezintegrare sau de durată medie, după cum urmează:

$$t_{1/2} = \ln(2)/\lambda = \tau \ln(2).$$

Atunci când această expresie este introdusă pentru τ în ecuația exponențială de mai sus, și $\ln 2$ este absorbit în bază, această ecuație devine:

$$N(t) = N_0 2^{-t/(t_{1/2})}.$$

Astfel, cantitatea de material rămas este $2^{-1} = 1/2$ ridicată la numărul (întreg sau fracțional) de timpi de înjumătățire care au trecut. Astfel, după 3 timpi de înjumătățire va fi $1/2^3 = 1/8$ din materialul original rămas.

Prin urmare, durata medie de viață τ este egală cu timpul de înjumătățire împărțit la logaritmul natural de 2 sau:

$$\tau = t_{1/2} / \ln(2) \approx 1,44 \cdot t_{1/2}.$$

De exemplu, polonium-210 are un timp de înjumătățire de 138 de zile și o durată medie de viață de 200 de zile.

O cantitate este supusă *dezintegrării exponențiale* dacă scade cu o rată proporțională cu valoarea sa actuală. În mod simbolic, acest proces poate fi exprimat prin următoarea ecuație diferențială, unde N este cantitatea și λ (lambda) este o rată pozitivă numită **constantă de dezintegrare** exponențială:

$$dN/dt = -\lambda N.$$

Soluția la această ecuație este:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

unde $N(t)$ este cantitatea la momentul t , iar $N_0 = N(0)$ este cantitatea inițială, adică cantitatea la momentul $t = 0$.

Dacă cantitatea de dezintegrare, $N(t)$, este numărul de elemente discrete într-un anumit set, este posibil să se calculeze durata medie a timpului în care un element rămâne în set. Aceasta se numește **durata medie de viață** (sau pur și simplu **durata de viață**), unde constanta temporală exponențială, τ , se referă la rata de dezintegrare, λ , în felul următor:

$$\tau = 1/\lambda.$$

Durata medie de viață poate fi privită ca un "timp de scalare", deoarece ecuația exponențială de dezintegrare poate fi scrisă în termeni de durată medie, τ , în loc de constanta de dezintegrare, λ :

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau},$$

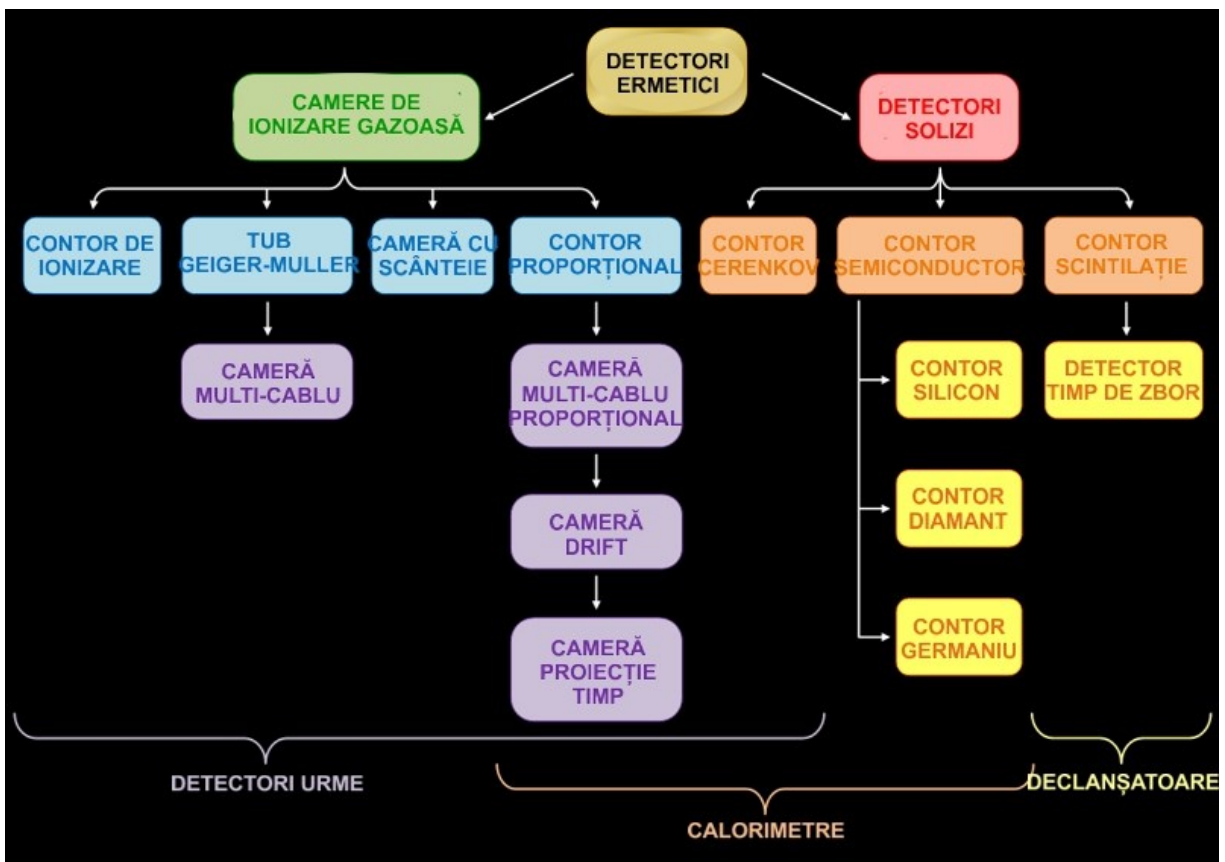
și τ este momentul în care populația ansamblului este redusă la $1/e \approx 0,367879441$ ori valoarea sa inițială.

De exemplu, dacă populația inițială a ansamblului, $N(0)$, este 1000, atunci populația la momentul τ , $N(\tau)$, este 368.

O ecuație foarte asemănătoare va apare atunci când baza exponențială este aleasă să fie 2, mai degrabă decât e. În acest caz, timpul de scalare este "timpul de înjumătățire".

9.2.8 Detectoare de radiații (Detectoare de particule)

În fizica experimentală și aplicată a particulelor, fizica nucleară și ingineria nucleară, un *detector de particule*, de asemenea cunoscut ca un *detector de radiații*, este un dispozitiv utilizat pentru detectarea, urmărirea și/sau identificarea particulelor ionizante, cum ar fi cele produse prin dezintegrarea nucleară, radiații sau reacții într-un accelerator de particule. Detectoarele pot măsura energia particulelor și alte atribute, cum ar fi impuls, spin, sarcină, în plus față de simpla înregistrare a prezenței particulei.



(Rezumatul tipurilor de detectori de particule. Sursa: Wdcf,

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Detectors_summary_3.png, CC Attribution-Share Alike 3.0 Unported license,

Traducere Nicolae Sfetcu)

Mulți dintre detectorii inventați și utilizați până în prezent sunt detectori de ionizare (dintre care detectoarele de ionizare gazoasă și detectoarele cu semiconductoare sunt cele mai tipice) și detectoare de scintilație; dar s-au aplicat și alte principii complet diferite, cum ar fi radiația de lumină și radiația tranzitorie Čerenkov.



(Camerele cu ceață vizualizează particulele prin crearea unui strat suprasaturat de vapori. Particulele care trec prin această regiune creează trasee de nori similare traseelor de condensare ale avioanelor. Sursa: Nuledo, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Alpha_radiation_in_a_cloud_chamber.jpg, CC Attribution-Share Alike 4.0 International license)

Detectoare de ionizare gazoasă

Detectoarele de ionizare gazoasă sunt instrumente de detectare a radiațiilor utilizate în fizica particulelor pentru a detecta prezența particulelor de ionizare, și în aplicațiile de protecție împotriva radiațiilor pentru măsurarea radiațiilor ionizante.

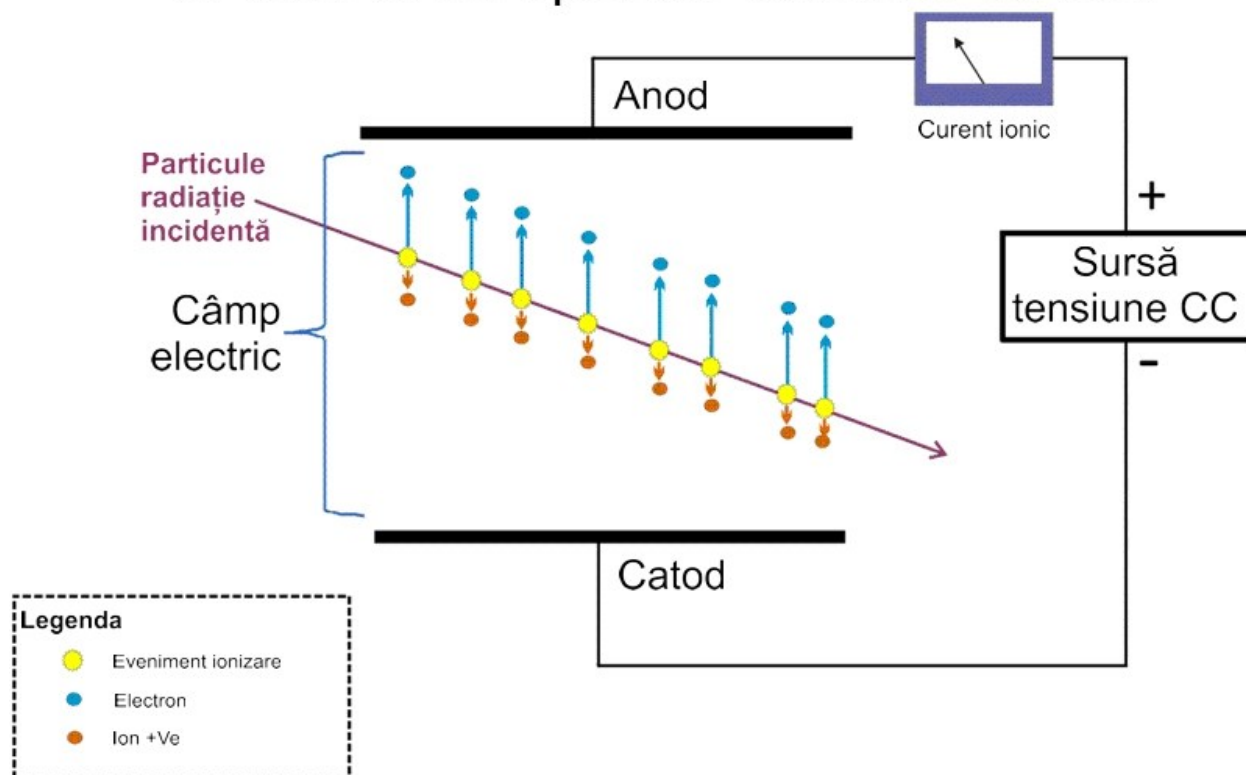
Ele folosesc efectul ionizator al radiației asupra unui senzor plin cu gaz. Dacă o particulă are suficientă energie pentru a ioniza un atom sau o moleculă de gaz, electronii și ionii care rezultă provoacă un flux de curent care poate fi măsurat.



(Un contor complet Geiger, cu tubul Geiger-Muller montat într-o incintă cilindrică conectată printr-un cablu la instrument. Sursa: Boffy b, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Geiger_counter.jpg.CC Attribution-Share Alike 3.0 Unported license)

Detectoarele de ionizare gazoasă formează un grup important de instrumente utilizate pentru detectarea și măsurarea radiațiilor. Există trei regiuni principale de funcționare practice: 1) camere de ionizare, 2) contoare proporționale și 3) tuburi Geiger-Müller. Toate acestea au aceeași construcție de bază a doi electrozi separați prin aer sau un gaz de umplere special, dar fiecare utilizează o metodă diferită pentru a măsura numărul total de perechi de ioni care sunt colectate. Intensitatea câmpului electric între electrozi și tipul și presiunea gazului de umplere determină răspunsul detectorului la radiațiile ionizante.

Vizualizarea operării camerei cu ioni



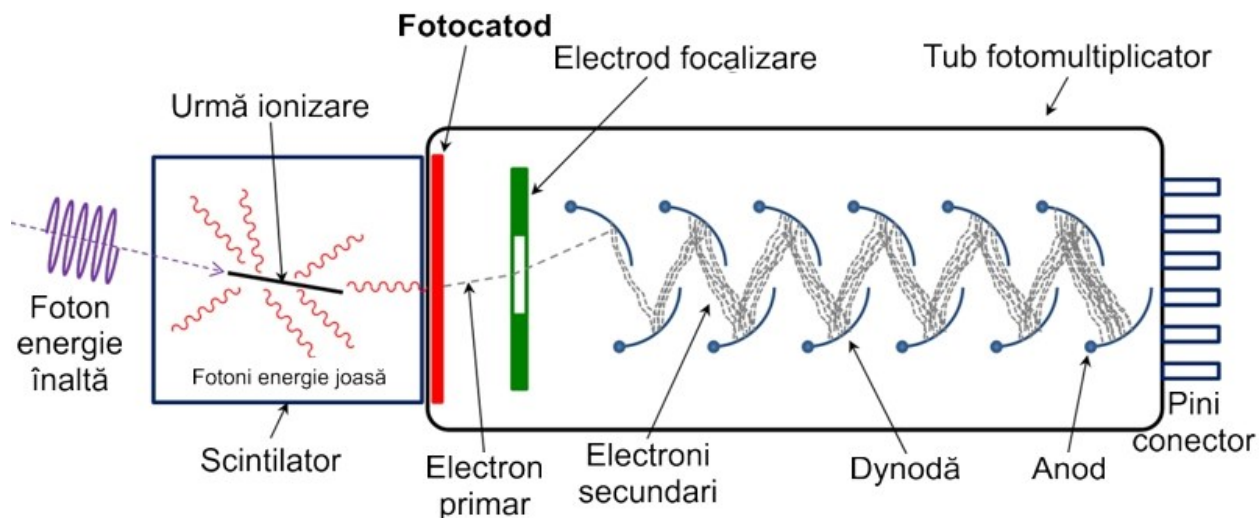
(Diagrama schematică a camerei de ionizare cu placă paralelă, care prezintă deviația ionilor. Electronii se deplasează de obicei de 1000 de ori mai repede decât ionii pozitivi datorită masei lor mult mai mici. Sursa: Dougsim, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ion_chamber_operation.gif, CC Attribution-Share Alike 3.0 Unported license, Traducere Nicolae Sfetcu)

Detector de urme nucleare în stare solidă

Un *detector de urme nucleare în stare solidă* sau SSNTD (cunoscut și ca un detector de urme imprimate sau detector de urme dielectrice) este un eșantion de material solid (emulsie fotografică, cristal, sticlă sau plastic) expus radiației nucleare (neutroni sau particule încărcate, uneori și raze gama), imprimate și examinate microscopic. Mărimea și forma acestor urme oferă informații despre masa, sarcina, energia și direcția de mișcare a particulelor. Principalele avantaje față de alți detectori de radiație sunt informațiile detaliate disponibile despre particule individuale, persistența liniilor care permit efectuarea măsurătorilor pe perioade lungi de timp și construcția simplă, ieftină și robustă a detectorului.

Baza SSNTD-urilor este aceea că particulele încărcate distrug detectorul la nivel de nanometri de-a lungul urmei. Imprimarea, în mod tipic cu durată de mai multe ore, lărgeste asperitățile conice de dimensiuni micrometrice, care pot fi observate cu ajutorul microscopului. Pentru un anumit tip de particule, lungimea urmei dă energia particulei.

Dacă particulele intră în suprafață la incidență normală, urmele sunt circulare; în caz contrar, elipticitatea și orientarea urmelor indică direcția de incidență.



(Schemă arătând un foton incident de energie înaltă lovind un cristal scintilator, declanșând eliberarea fotonilor cu energie redusă, care apoi sunt transformați în fotoelectroni și multiplicați în fotomultiplicator. Sursa: Qwerty123uiop, <https://en.wikipedia.org/wiki/File:PhotoMultiplierTubeAndScintillator.svg>, CC Attribution-Share Alike 3.0 Unported license, Traducere Nicolae Sfetcu)

SSNTD-urile sunt utilizate în mod obișnuit pentru a studia razele cosmice, elementele radioactive cu durată lungă de viață, concentrația radonului în case și vârsta eșantioanelor geologice.

Calorimetre

În fizica particulelor, un *calorimetru* este un aparat experimental care măsoară energia particulelor. Cele mai multe particule intră în calorimetru și inițiază o ploaie de particule, iar energia particulelor este depozitată în calorimetru, colectată și măsurată. Energia poate fi măsurată în ansamblul său, necesitând o izolare totală a ploii de particule, sau poate fi eșantionată. În mod tipic, calorimetrele sunt segmentate transversal pentru a furniza informații despre direcția particulei sau a particulelor, precum și despre energia depusă, iar segmentarea longitudinală poate furniza informații despre identitatea particulei pe baza formei ploii pe măsură ce se dezvoltă. Proiectarea calorimetrică este o zonă activă de cercetare în domeniul fizicii particulelor.

Detectoare plate cu microcanale

O placă cu microcanale este o componentă plană utilizată pentru detectarea particulelor unice (electroni, ioni și neutroni) și a radiațiilor ultraviolete și a radiațiilor X, cu intensitate scăzută. Este strâns legată de un multiplicator de electroni, deoarece ambele intensifică particulele singulare sau fotonii prin înmulțirea electronilor prin emisia secundară. Cu

toate acestea, deoarece un detector de plăci cu microcanale are mai multe canale separate, acesta poate oferi în plus o rezoluție spațială.

Detectarea neutronilor

Există două aspecte-cheie pentru detecția eficientă a neutronilor: hardware și software. Hardware-ul de detecție se referă la tipul detectorului de neutroni folosit (cel mai frecvent utilizat astăzi este detectorul de scintilație) și la cele electronice utilizate în configurația de detectare. Mai mult, configurația hardware definește și parametrii cheie experimentali, cum ar fi distanța detectorului sursă, unghiul solid și ecranarea detectorului. Software-ul de detectare constă în instrumente de analiză care efectuează sarcini precum analiza grafică pentru a măsura numărul și energiile neutronilor care lovește detectorul.

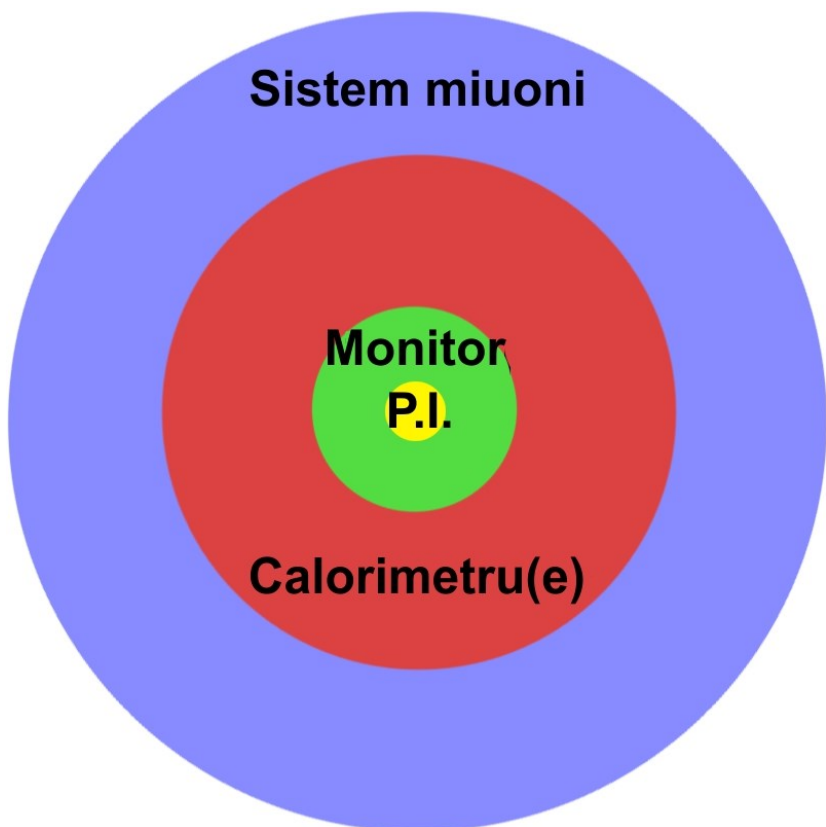
Detectoare moderne

Detectoarele moderne din fizica particulelor combină mai multe din elementele de mai sus cu straturi asemănătoare unei cepe.

Detector ermetic

(O schemă a componentelor de bază ale unui detector ermetic, I.P se referă la regiunea care conține punctul de interacțiune pentru particulele de coliziune, aceasta fiind o secțiune transversală a tipului cilindric tipic. Sursa: SCZenz, <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Hermetic.png>, CC Attribution-Share Alike 3.0 Unported license, Traducere Nicolae Sfetcu)

În fizica particulelor, un *detector ermetic* (numit și un *detector 4π*) este un detector de particule conceput pentru a observa toate produsele de dezintegrare posibile ale unei interacțiuni între particulele subatomice într-un accelerator de particule prin acoperirea cât mai largă a unei zone în jurul punctului



de interacțiune și încorporarea mai multor tipuri de sub-detectoare. Acestea sunt de obicei aproximativ cilindrice, cu diferite tipuri de detectori înfășurate unul în altul în straturi concentrice; fiecare tip de detector este specializat în particule specifice, astfel încât aproape orice particulă va fi detectată și identificată. Astfel de detectori se numesc "ermetici", deoarece sunt construiți astfel încât mișcarea particulelor să se oprească la limitele camerei fără a se deplasa dincolo de izolator; numele "detector 4π " provine din faptul că astfel de detectori sunt proiectați să acopere aproape toți steradianii de un unghi solid 4π în jurul punctului de interacțiune; în ceea ce privește sistemul standard de coordonate utilizat în fizica acceleratoarelor de particule, acesta este echivalent cu acoperirea întregului interval de unghi azimutal ($-\pi \leq \varphi \leq \pi$) și pseudorapiditate ($|\eta| \geq 0$). În practică, particulele cu pseudorapiditate peste un anumit prag nu pot fi măsurate, deoarece sunt prea aproape paralele cu fasciculul și pot astfel trece prin detector. Această limită a intervalelor de pseudorapiditate care pot fi observate face parte din *acceptanța* detectorului; în general, obiectivul principal al unui detector ermetic este să maximizeze acceptarea, adică să se asigure că detectorul este capabil să măsoare cât mai mult posibil o regiune spațială de fază.

Instrumente de protecție împotriva radiațiilor

Măsurarea practică a radiațiilor utilizând instrumente calibrate pentru protecția împotriva radiațiilor este esențială pentru evaluarea eficacității măsurilor de protecție și pentru evaluarea dozei de radiații care poate fi recepționată de către persoane fizice. Instrumentele de măsurare pentru protecția împotriva radiațiilor sunt atât "instalate" (într-o poziție fixă), cât și portabile (sau transportabile).

Instrumente instalate

Instrumentele instalate sunt fixate în poziții despre care se știe că sunt importante în evaluarea pericolului general de radiații într-o zonă. Exemple sunt monitoarele de radiații "zonale", monitoarele de interblocare gama, monitoarele de ieșire a personalului și monitoarele de particule în aer.

Monitorul de radiație de suprafață va măsura radiația ambientală, de obicei raze X, gamma sau neutroni; acestea sunt radiații care pot avea nivele radiative semnificative într-un interval mai mare de zeci de metri de la sursa lor, acoperind astfel o arie largă.

Interfața de monitorizare a radiațiilor gamma este utilizată în aplicații pentru a preveni expunerea accidentală a lucrătorilor la o doză în exces prin împiedicarea accesului personalului într-o zonă în care există un nivel ridicat de radiație. Acestea interblochează direct accesul la proces.

Dispozitivele de monitorizare a contaminării în aer măsoară concentrația de particule radioactive în aerul ambiental pentru a se proteja de particulele radioactive care sunt ingerate sau depozitate în plămânii personalului. Aceste instrumente vor da în mod normal

o alarmă locală, dar sunt adesea conectate la un sistem integrat de siguranță, astfel încât zonele de instalație să poată fi evacuate și personalul să fie împiedicat să pătrundă într-o zonă de contaminare cu aer ridicat.

Monitoare de ieșire a personalului sunt utilizate pentru a monitoriza lucrătorii care părăsesc zona "contaminată" sau potențial contaminată. Acestea pot fi sub formă de monitoare manuale, sonde de îmbrăcăminte sau monitoare pentru tot corpul. Aceștia monitorizează suprafața corpului lucrătorilor și îmbrăcămintea pentru a verifica dacă a fost expusă la o contaminare radioactivă. Acestea măsoară în general radiații alfa sau beta sau gamma sau combinații ale acestora.

Instrumente portabile



(Aparat de măsurare a camerei ionice de mână utilizat pentru măsurarea ratei dozei de suprafață pe una dintre cele trei generatoare termoelectrice radioizotopice pentru nava spațială Cassini.)

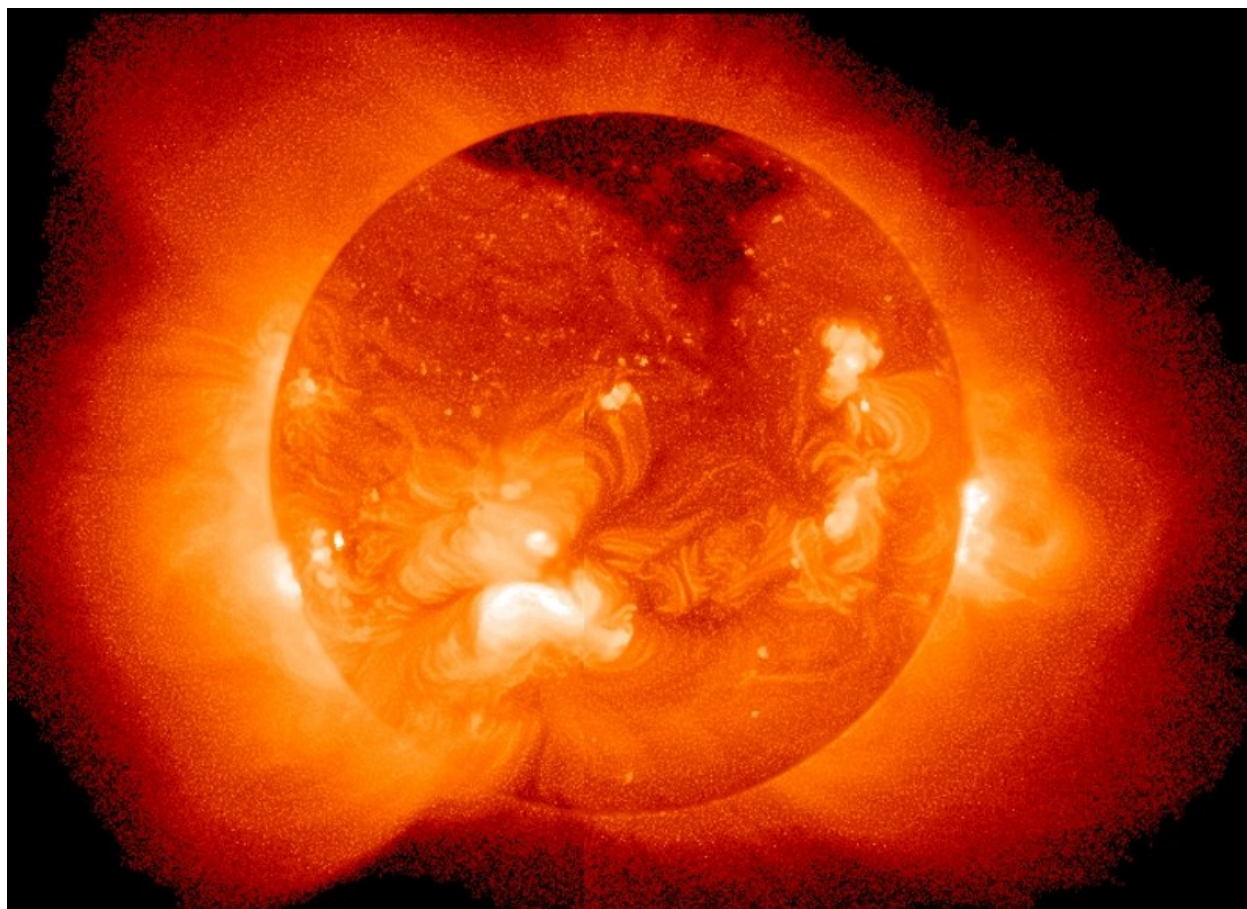
Instrumentele portabile sunt manuale sau transportabile. Instrumentul manual este utilizat în general ca un contor pentru a verifica în detaliu un obiect sau persoană sau pentru a evalua o zonă în care nu există instrumente instalate. Acestea pot fi, de asemenea, utilizate pentru monitorizarea personalului sau pentru verificarea contaminării personalului în teren. Acestea, în general, măsoară radiații alfa, beta sau gamma sau combinații ale acestora.

Instrumentele transportabile sunt, în general, instrumente care pot fi instalate permanent, dar sunt plasate temporar într-o zonă pentru a asigura o monitorizare continuă în cazul în care este probabil că va exista un pericol. Astfel de instrumente sunt adesea instalate pe cărucioare pentru a permite deplasarea ușoară și sunt asociate cu situații operaționale temporare.

Detectoare de particule în cercetare

Detectoarele proiectate pentru acceleratoarele moderne sunt uriașe, atât în dimensiune cât și în costuri. Termenul *contor* este adesea folosit în locul detectorului atunci când detectorul numără particulele, dar nu se ocupă de energie sau ionizare. De asemenea, detectorii de particule pot urmări de obicei radiațiile ionizante (fotoni de energie înaltă sau chiar lumină vizibilă). Dacă scopul lor principal este măsurarea radiațiilor, ele sunt numite *detectori de radiație*, dar, în timp ce fotonii sunt și particule (fără masă), termenul *detector de particule* este încă cel corect.

9.2.9 Transmutarea elementelor (Transmutarea nucleară)



(Soarele este un reactor de fuziune naturală și transmutează elementele ușoare în elemente mai grele prin nucleosinteză stelară, o formă de fuziune nucleară).

Transmutarea nucleară este transformarea unui element chimic sau a unui izotop într-un alt element chimic. Deoarece orice element (sau izotop al unui) este definit prin numărul de protoni (și neutroni) din atomii săi, adică în nucleul atomic, transmutarea nucleară are loc în orice proces în care numărul de protoni sau neutroni din nucleu este schimbat.

O transmutare poate fi realizată fie prin reacții nucleare (în care o particulă exterioară reacționează cu un nucleu), fie prin dezintegrare radioactivă, în care nu este necesară o cauză exterioară.

Transmutarea naturală prin nucleosinteza stelară a creat în trecut cele mai multe dintre elementele chimice mai grele din universul cunoscut deja și continuă să aibă loc și în prezent, creând marea majoritate a celor mai comune elemente din univers, inclusiv heliul, oxigenul și carbonul. Majoritatea stelelor efectuează transmutarea prin reacții de fuziune care implică hidrogen și heliu, în timp ce stelele mai mari sunt, de asemenea, capabile să fuzioneze elemente mai grele până la fier târziu în evoluția lor.

Elementele mai grele decât fierul, cum ar fi aurul și plumbul, sunt create prin transmutări elementare care pot avea loc doar în supernove - deoarece stelele încep să fuzioneze elementele mai grele, se eliberează substanțele mai puțin energetice din fiecare reacție de fuziune, și fiecare reacție de fuziune care produce elemente mai grele decât fierul are o natură endotermică, iar stelele sunt incapabile să le îndeplinească.

Un tip de transmutație naturală observabilă în prezent apare când anumite elemente radioactive prezente în natură se descompun spontan printr-un proces care provoacă transmutarea, cum ar fi dezintegrarea alfa sau beta. Un exemplu este dezintegrarea naturală a potasiului-40 până la argon-40, care formează cea mai mare parte a argonului în aer. De asemenea, pe Pământ se produc transmutări naturale provenite de la mecanismele diferite ale *reacțiilor nucleare naturale*, datorită bombardării cu raze cosmice a elementelor (de exemplu, formarea carbonului-14) și ocazional din bombardarea cu neutroni naturali.

Transmutarea artificială poate apărea în mașinile care au suficientă energie pentru a provoca schimbări în structura nucleară a elementelor. Astfel de mașini includ acceleratoarele de particule și reactoarele tokamak. Reactorii de putere de fisiune convenționali, de asemenea, provoacă transmutație artificială, nu din puterea mașinii, ci prin expunerea elementelor la neutronii produși prin fisiune dintr-o reacție nucleară produsă artificial. De exemplu, atunci când un atom de uraniu este bombardat cu neutroni lenți, are loc fisiunea. Aceasta eliberează, în medie, 3 neutroni și o cantitate mare de energie. Neutronii eliberați provoacă apoi fisiunea altor atomi de uraniu, până când tot uraniul disponibil este epuizat. Aceasta se numește o reacție în lanț.

Transmutarea nucleară artificială a fost considerată un posibil mecanism de reducere a volumului și pericolului de deșeuri radioactive.

Istorie

Alchimie

Termenul de *transmutare* datează din alchimie. Alchimiștii au căutat piatra filozofală, capabilă de criopoeie - transformarea metalelor de bază în aur. În timp ce alchimiștii înțelegeau de multe ori criopoeia ca o metaforă pentru un proces mistic sau religios, unii practicanți au adoptat o interpretare literală și au încercat să obțină aur prin experiment fizic. Imposibilitatea transmutației metalice a fost dezbătută între alchimiști, filozofi și oameni de știință încă din Evul Mediu. Transmutarea pseudo-alchimică a fost scoasă în afara legii și batjocorită public începând cu secolul al XIV-lea. Alchimiștii precum Michael Maier și Heinrich Khunrath au scris cărți care expun pretenții frauduloase de obținere a aurului. Până în anii 1720, nu mai existau persoane respectabile care să urmărească transmutarea fizică a substanțelor în aur. Antoine Lavoisier, în secolul al XVIII-lea, a înlocuit teoria alchimică a elementelor cu teoria modernă a elementelor chimice, iar John Dalton a dezvoltat în continuare noțiunea de atomi (din teoria alchimică a corpusculilor) pentru a explica diverse procese chimice. Dezintegrarea atomilor este un proces distinct care implică energii mult mai mari decât ar putea fi obținute de alchimiști.

Fizica modernă

La început a fost aplicată în mod conștient fizicii moderne de Frederick Soddy când, împreună cu Ernest Rutherford, a descoperit că toriul radioactiv se transformă în radiu în 1901. La momentul realizării, Soddy a reamintit mai târziu, a strigat: "Rutherford, asta este transmutație!" Rutherford a strigat și el: "Pentru numele lui Dumnezeu, Soddy, nu-l numi *transmutație*, ne vor lua capul ca alchimiști."

Rutherford și Soddy au observat transmutarea naturală ca parte a dezintegrării radioactive a tipului de dezintegrare alfa. În 1919, Rutherford a reușit să realizeze transmutarea azotului în oxigen, folosind particule alfa direcționate spre azot $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{p}$. Aceasta a fost prima observație a unei reacții nucleare, adică o reacție în care particulele dintr-o singură dezintegrare sunt folosite pentru a transforma un nucleu atomic. În 1932, o reacție nucleară complet artificială și transmutarea nucleară au fost realizate de colegii lui Rutherford, John Cockcroft și Ernest Walton, care au folosit protoni accelerați artificial ciocnind litiul-7 pentru a împărți nucleul în două particule alfa. Faptul a fost popular cunoscut sub numele de "divizarea atomului", deși nu a fost reacția de fisiune nucleară modernă descoperită în 1938 de către Otto Hahn, Lise Meitner și asistentul lor Fritz Strassmann în elemente grele.

Mai târziu în secolul al XX-lea a fost explicată transmutarea elementelor din stele, car determină abundența relativă a elementelor mai grele din univers. Luând în considerare primele cinci elemente, care au fost produse în Big Bang și alte procese cu raze cosmice, nucleosinteza stelară a explicat abundența tuturor elementelor mai grele decât borul. În

studiul lor din 1957, *Sinteza elementelor în stele*, William Alfred Fowler, Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge și Fred Hoyle au explicat cum abundența elementelor chimice esențiale, în afară de cele mai ușoare, poate fi explicată prin procesul nucleosintezei în stele.

S-a constatat că, într-o transmutare nucleară adevărată, este mult mai ușor să transformi aurul în plumb decât reacția inversă, care era cea pe care alchimiștii o urmăriseră cu ardoare. Experimentele nucleare au transformat cu succes plumbul în aur, dar cheltuielile depășesc cu mult orice câștig. Ar fi mai ușor să transformi plumbul în aur prin captarea neutronilor și dezintegrarea beta, lăsând plumbul într-un reactor nuclear pentru o perioadă lungă de timp.

Glenn Seaborg a produs câteva mii de atomi de aur din bismut, dar cu o pierdere netă.

9.2.10 Transmutarea naturală (Transmutarea în univers)

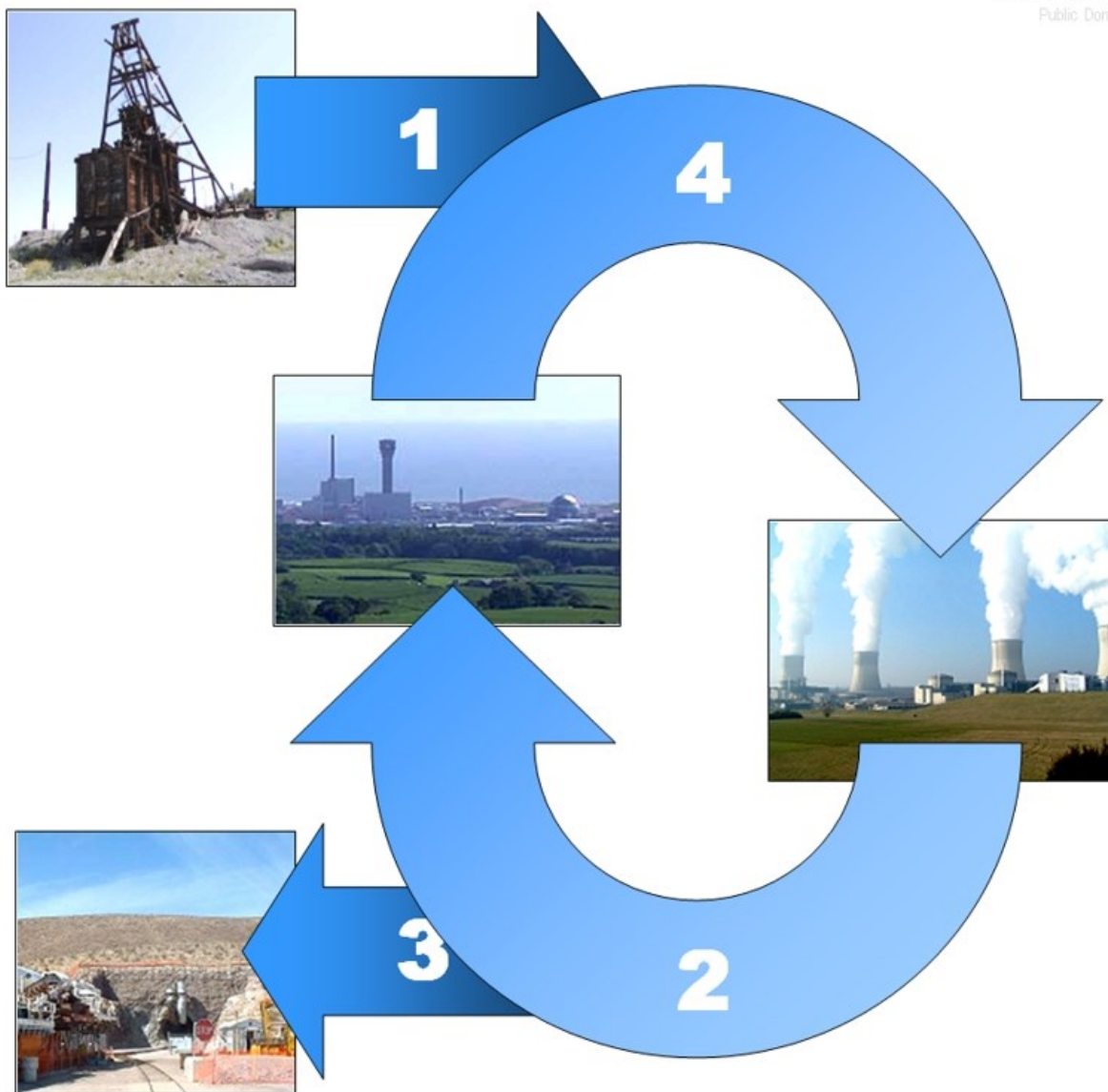
Big Bang este considerat a fi originea hidrogenului (inclusiv a întregului deuteriu) și a heliului din univers. Hidrogenul și heliul reprezintă împreună 98% din masa materiei obișnuite din univers, în timp ce celelalte 2% reprezintă restul. Big Bang a produs de asemenea cantități mici de litium, beriliu și, probabil, bor. Mai mult litium, beriliu și bor s-au produs mai târziu, într-o reacție nucleară naturală, fragmentarea razelor cosmice.

Nucleosinteza stelară este responsabilă pentru toate celelalte elemente care apar natural în univers ca izotopi stabili și nuclee primordiale, de la carbon la uraniu. Aceasta a avut loc după Big Bang, în timpul formării stelelor. Unele elemente mai ușoare, de la carbon la fier, au fost formate în stele și eliberate în spațiu de către ramura gigant asimptotică a stelelor. Acestea sunt un tip de gigant roșu care "își mănâncă" atmosfera sa exterioară, care conține unele elemente de la carbon la nichel și fier. Toate elementele cu greutate atomică mai mare de 64 de unități de masă atomică sunt produse în stele supernova prin intermediul captării neutronilor, care se subdividează în două procese: proces-r și proces-s.

Se crede că Sistemul Solar a condensat cu aproximativ 4,6 miliarde de ani în urmă, dintr-un nor de hidrogen și heliu care conține elemente mai grele în grăunții de praf formați anterior de un număr mare de astfel de stele. Acești grăunți conțineau elementele mai grele formate de transmutare mai devreme în istoria universului.

Toate aceste procese naturale de transmutare în stele continuă și astăzi, în propria noastră galaxie și în altele. Stelele fuzionează hidrogen și heliu în elemente mai grele și mai grele pentru a produce energie. De exemplu, curbele de lumină observate ale stelelor supernove, cum ar fi SN 1987A, arată că se aruncă în spațiu cantități mari (comparabile cu masa Pământului) de nichel și cobalt radioactiv. Puțin din acest material ajunge și pe Pământ. Majoritatea transmutărilor naturale de pe Pământ de astăzi sunt mediate de razele cosmice (cum ar fi producerea de carbon-14) și de dezintegrarea radioactivă a nuclizilor radioactivi primordiali rămași de la formarea inițială a sistemului solar (cum ar fi potasiul-40, uraniul și toriu), plus dezintegrarea radioactivă a produselor acestor nuclizi (radu, radon, poloniu, etc.).

9.2.11 Transmutarea artificială (Transmutarea artificială a deșeurilor nucleare)



(Ciclul de combustibil nuclear începe atunci când uraniul este extras, îmbogățit și procesat în combustibilul nuclear, (1) care este livrat într-o centrală nucleară. După utilizarea în centrala electrică, combustibilul uzat este livrat într-o instalație de prelucrare (2) sau într-un depozit final (3) pentru depozitarea geologică. În reprocesare, 95% din combustibilul uzat poate fi reciclat pentru a fi returnat pentru utilizare într-o centrală electrică (4).)

Transmutarea elementelor transuranice (respectiv, actinide minus de la actiniu la uraniu), cum ar fi izotopii plutoniului (aproximativ 1% în cazul reactoarelor cu apă ușoară, folosit în combustibilul nuclear) sau actinidele minore (respectiv, neptuniu, americiu curiu, în jur de

0,1% din fiecare în cadrul combustibilului nuclear al reactoarelor cu apă ușoară) are potențialul de a contribui la rezolvarea unor probleme legate de gestionarea deșeurilor radioactive prin reducerea proporției de izotopi de lungă durată pe care le conține. (Acest lucru nu exclude necesitatea unui depozit geologic profund pentru deșeurile de nivel radioactiv ridicat.) Atunci când sunt iradiate cu neutroni rapizi într-un reactor nuclear, acești izotopi pot suferi fisiune nucleară, distrugând izotopul actinid original și producând un spectru de produse de fisiune radioactive și nonradioactive.

Țintele ceramice care conțin actinide pot fi bombardate cu neutroni pentru a induce reacții de transmutare pentru a elimina cele mai dificile specii de lungă durată. Acestea pot consta în soluții solide conținând actinide cum ar fi (Am,Zr)N, (Am,Y)N, (Zr,Cm)O₂, (Zr,Am)O₂, sau doar faze de actinide cum ar fi AmO₂, NpO₂, NpN, AmN, amestecate cu câteva faze inerte cum ar fi MgO, MgAl₂O₄, (Zr,Y)O₂, TiN și ZrN. Rolul fazelor inerte non-radioactive este, în principal, acela de a oferi un comportament mecanic stabil țintei în cazul iradierii neutronice.

Tipurile de reactoare

De exemplu, plutoniul poate fi reprocessat în combustibili MOX (oxid mixt) și transmutat în reactoare standard. Elementele mai grele ar putea fi transmutate în reactoare rapide, dar probabil mai eficient într-un reactor subcritic, cunoscut uneori ca un amplificator de energie și care a fost conceput de Carlo Rubbia. Surse de neutroni de fuziune au fost, de asemenea, propuse ca fiind potrivite.

Tipuri de combustibil

Există mai mulți combustibili care pot încorpora plutoniul în compoziția lor inițială la începutul ciclului și au o cantitate mai mică de acest element la sfârșitul ciclului. În timpul ciclului, plutoniul poate fi ars într-un reactor de putere, generând electricitate. Acest proces nu este doar interesant din punctul de vedere al producerii energiei electrice, ci și datorită capacității sale de a consuma plutoniul excedentar pentru arme din programul de arme și plutoniu care rezultă din reprocessare.

Combustibilul MOX este unul dintre acestea. Amestecul său de oxizi de plutoniu și uraniu constituie o alternativă la combustibilul cu uraniu îmbogățit cu conținut scăzut utilizat în mod predominant în reactoarele cu apă ușoară. Deoarece uraniul este prezent în combustibilul MOX, deși plutoniul va fi ars, se va produce plutoniul de a doua generație prin captarea radiativă a U-238 și cele două dezintegrări beta minus ulterioare.

Combustibilii cu plutoniu și toriu sunt, de asemenea, o opțiune. În aceștia, neutronii eliberați în fisiunea plutoniului sunt capturați de Th-232. După această captură radiativă, Th-232 devine Th-233, care suferă două dezintegrări beta-minus, rezultând producerea izotopului fisionabil U-233. Secțiunea transversală de captare a radiațiilor pentru Th-232 este de peste trei ori cea a lui U-238, obținând o conversie mai mare a combustibilului

fisionabil decât cea din U-238. Datorită absenței uraniului din combustibil, nu există nicio altă generație de plutoniu, iar cantitatea de ardere a plutoniului va fi mai mare decât în cazul combustibililor MOX. Cu toate acestea, U-233, care este fisionabil, va fi prezent. Plutoniul rezidual din reactor și arme poate fi utilizat în combustibili cu plutoniu-toriu, plutoniul de arme fiind cel care arată o reducere mai mare a cantității de Pu-239.

Motivația din spatele transmutării

Izotopii plutoniului și a altor actinide au tendința de a trăi îndelungat, cu timpi de înjumătățire de multe mii de ani, în timp ce produsele de fisiune radioactive tind să aibă o durată mai scurtă de viață (majoritatea cu timpi de înjumătățire de 30 de ani sau mai puțin). Din punctul de vedere al managementului deșeurilor, transmutarea (sau "arderea" sau "incinerarea") actinidelor elimină un pericol radioactiv pe termen foarte lung și îl înlocuiește cu unul pe termen mult mai scurt.

Este important să se înțeleagă că amenințarea reprezentată de un radioizotop este influențată de numeroși factori, printre care se numără și proprietățile fizice (de exemplu, radiația fonică în infraroșu - care reprezintă un avantaj pentru depozitarea sau eliminarea deșeurilor radioactive), proprietățile chimice și biologice ale elementului. De exemplu, cesiul are un timp de înjumătățire biologic relativ scurt (de la 1 la 4 luni), în timp ce stronțitul și radiul au ambele biosecvențe biologice foarte lungi. Ca urmare, stronțitul-90 și radiul sunt mult mai capabile să provoace daune decât cesiul-137 atunci când o anumită activitate este ingerată.

Multe dintre actinide sunt foarte radiotoxice deoarece au biodegradări biologice lungi și sunt emițători alfa. În transmutare, intenția este de a transforma actinidele în produse de fisiune. Produsele de fisiune sunt foarte radioactive, dar majoritatea activităților se vor deteriora într-un timp scurt. Cele mai îngrijorătoare produse de fisiune cu durată scurtă de viață sunt cele care se acumulează în organism, cum ar fi iodul-131 care se acumulează în glanda tiroidă, dar se speră că, prin proiectarea bună a combustibilului nuclear și a instalației de transmutare, produsele de fisiune pot fi izolate de oameni și de mediul lor și sunt lăsate să se dezintegreze. Pe termen mediu, produsele de fisiune care reprezintă cea mai mare preocupare sunt stronțitul-90 și cesiul-137; ambele au un timp de înjumătățire de aproximativ 30 de ani. Cesiul 137 este responsabil pentru majoritatea dozei gama externe experimentată de lucrătorii din fabricile de prelucrare nucleară și, în 2005, de lucrătorii de la amplasamentul de la Cernobîl. Când acești izotopi cu durată medie de viață s-au dezintegrat aproape complet (de obicei după 10 jumătăți de viață), izotopii rămași vor reprezenta o amenințare mult mai mică.

Produse de fisiune cu durată lungă de viață

Unele produse de fisiune radioactivă pot fi transformate în radioizotopi cu durată scurtă de viață prin transmutare. Transmutarea tuturor produselor de fisiune cu timpul de înjumătățire mai mare de un an este studiată la Grenoble, cu rezultate diferite.

Sr-90 și Cs-137, cu un timp de înjumătățire de aproximativ 30 de ani, sunt cei mai mari emițători de radiație (incluzând căldură) din combustibilul nuclear uzat, pe o scară de zeci de ani până la ~305 ani (Sn-121m este ne semnificativ din cauza randamentului scăzut) și nu sunt ușor de transmutat deoarece au secțiuni transversale cu absorbție neutronică. În schimb, ele ar trebui pur și simplu să fie stocate până când se vor dezintegra. Având în vedere că această perioadă de stocare este necesară, produsele de fisiune cu timpi de înjumătățire mai scurți pot fi de asemenea păstrate până când se vor dezintegra.

Următorul produs de fisiune cu durată lungă de viață este Sm-151, care are un timp de înjumătățire de 90 de ani și este un absorbant de neutroni bun, care este transformat în cea mai mare parte în timp ce combustibilul nuclear este încă folosit; totuși, transmutarea eficientă a Sm-151 rămas în deșeurile nucleare ar necesita separarea de alți izotopi a samariului. Datorită cantităților mai mici și a radioactivității sale cu consum redus de energie, Sm-151 este mai puțin periculos decât Sr-90 și Cs-137 și poate fi lăsat să se dezintegreze timp de aproximativ 970 de ani.

În cele din urmă, există 7 produse de fisiune cu durată lungă de viață. Ele au un timp de înjumătățire mult mai lung, cuprins între 211.000 de ani și 15,7 milioane de ani. Două dintre ele, Tc-99 și I-129, sunt suficient de mobile în mediul înconjurător pentru a fi pericole potențiale, sunt libere sau în mare parte libere de amestecul cu izotopi stabili ai aceluiași element și au secțiuni transversale neutronice mici dar potrivite pentru a suporta transmutarea. De asemenea, Tc-99 poate înlocui U-238 în furnizarea lărgimii Doppler pentru feedback negativ pentru stabilitatea reactorului. Cele mai multe studii ale schemelor de transmutare propuse au considerat ^{99}Tc , ^{129}I și TRU ca ținte pentru transmutare, cu alte produse de fisiune, produse de activare și posibil uraniu reprocessat rămânând ca deșeu.

Dintre celelalte 5 produse de fisiune cu durată lungă de viață, Se-79, Sn-126 și Pd-107 sunt produse doar în cantități mici (cel puțin în neutronul termic de astăzi, reactoarele de apă ușoară cu arderea U-235), iar ultimele două ar trebui să fie relativ inerte. Celelalte două, Zr-93 și Cs-135, sunt produse în cantități mai mari, dar, de asemenea, nu sunt foarte mobile în mediul înconjurător. Ele sunt, de asemenea, amestecate cu cantități mai mari de izotopi din același element.

9.2.12 Izotopi radioactivi (Radionuclizi)

Un **radionuclid** (**nuclid radioactiv**, **radioizotop** sau **izotop radioactiv**) este un atom care are exces de energie nucleară, făcându-l instabil. Această cantitate de energie excesivă poate fi folosită în trei moduri: emisă din nucleu ca radiație gama; transferată la unul din electronii săi, pentru a-l elibera ca electron de conversie; sau folosită pentru a crea și emite o particulă nouă (particule alfa sau particule beta) din nucleu. În timpul acestor procese, se spune că radionuclidul suferă o dezintegrare radioactivă. Aceste emisii sunt considerate radiații ionizante, deoarece sunt suficient de puternice pentru a elibera un electron de la un alt atom. Dezintegrarea radioactivă poate produce un nuclid stabil sau va produce uneori un nou radionuclid instabil, care poate suferi alte dezintegrări. Dezintegrarea radioactivă este un proces aleatoriu la nivelul atomilor unici: este imposibil să se prevadă când un

anumit atom se va dezintegra. Cu toate acestea, pentru o colecție de atomi dintr-un singur element, viteza de dezintegrare și, astfel, timpul de înjumătățire ($t_{1/2}$) pentru această colecție pot fi calculate din constantele lor de dezintegrare măsurate. Intervalul timpilor de înjumătățire a atomilor radioactivi nu are limite cunoscute și acoperă un interval de timp de peste 55 de ordine de mărime.

Radionuclizii apar în mod natural sau sunt produși în mod artificial în reactoare nucleare, ciclotroni, acceleratori de particule sau generatoare de radionuclizi. Există aproximativ 730 de radionuclizi cu timpi de înjumătățire mai mari de 60 de minute. Treizeci și doi dintre aceștia sunt radionuclizi primordiali care au fost creați înainte ca pământul să se formeze. Cel puțin alți 60 de radionuclizi sunt detectabili în natură, fie ca fii ai radionuclizilor primordiali, fie ca radionuclizi produși natural pe Pământ prin radiații cosmice. Mai mult de 2400 de radionuclizi au un timp de înjumătățire mai mic de 60 de minute. Cei mai mulți dintre aceștia sunt produși numai artificial și au un timp de înjumătățire foarte scurt. Pentru comparație, există aproximativ 254 de nuclizi stabili.

Toate elementele chimice pot exista ca radionuclizi. Chiar și cel mai ușor element, hidrogen, are un binecunoscut radionuclid, tritium. Elementele mai grele decât plumbul, elementele tehneciu și promethium, există doar ca radionuclizi.

Expunerea neplanificată la radionuclizi are, în general, un efect nociv asupra organismelor vii, inclusiv a oamenilor, deși nivelele scăzute de expunere apar în mod natural, fără efecte dăunătoare. Gradul de afectare va depinde de natura și amploarea radiațiilor produse, cantitatea și natura expunerii (contact apropiat, inhalare sau ingestie) și proprietățile biochimice ale elementului; cu risc crescut de cancer fiind cea mai obișnuită consecință. Cu toate acestea, în medicina nucleară se utilizează radionuclizi cu proprietăți adecvate atât pentru diagnostic, cât și pentru tratament. Un trasor de imagine realizat cu radionuclizi este numit trasor radioactiv. Un medicament farmaceutic realizat cu radionuclizi este numit un produs radiofarmaceutic.

Origine

Natural

Pe pământ, radionuclizii naturali se împart în trei categorii: radionuclizi primordiali, radionuclizi secundari și radionuclizi cosmogeni.

- Radionuclizii sunt produși în exploziile stelare de nucleosinteză și supernova, împreună cu nuclizii stabili. Cele mai multe dezintegrări sunt rapide dar pot fi observate astronomic și pot juca un rol în înțelegerea proceselor astronomice. Radionuclizii primordiali, cum ar fi uraniul și toriul, există în prezent, deoarece timpul lor de înjumătățire este atât de lung (> 100 de milioane de ani) încât aceștia nu s-au dezintegrat încă. Unii radionuclizi au timpi de înjumătățire atât de mare (de multe ori vârsta universului), încât dezintegrarea a fost detectată

abia recent, iar pentru cele mai multe scopuri practice pot fi considerate stabile, în special bismut-209: detectarea acestei dezintegrări a însemnat că bismutul nu mai este considerat stabil. Este posibil ca dezintegrarea să poată fi observată și în alți nuclizi adăugându-i la această listă de radionuclizi primordiali.

- Radionuclizii secundari sunt izotopi radiogeni derivați din dezintegrarea radionuclizilor primordiali. Au un timp de înjumătățire mai scurt decât radionuclizii primordiali. Ei apar în lanțul de dezintegrare al izotopilor primordiali toriu-232, uraniu-238 și uraniu-235. Exemplele includ izotopii naturali ai poloniului și ai radiului.
- Izotopii cosmogeni, cum ar fi carbonul-14, sunt prezenți deoarece se formează continuu în atmosferă datorită razelor cosmice.

Mulți dintre acești radionuclizi există doar în cantități mici în natură, incluzând toți nuclizii cosmogeni. Radionuclizii secundari vor apare proporțional cu perioada de înjumătățire a acestora, astfel încât cei cu viață scurtă vor fi foarte rari. Astfel, poloniul poate fi găsit în minereurile de uraniu la aproximativ 0,1 mg pe tonă metrică (1 parte în 10^{10}). Radionuclizii suplimentari pot să apară în natură în cantități practic nedetectabile, ca urmare a unor evenimente rare cum ar fi fisiunea spontană sau interacțiunile radiațiilor cosmice mai puțin frecvente.

Fisiunea nucleară

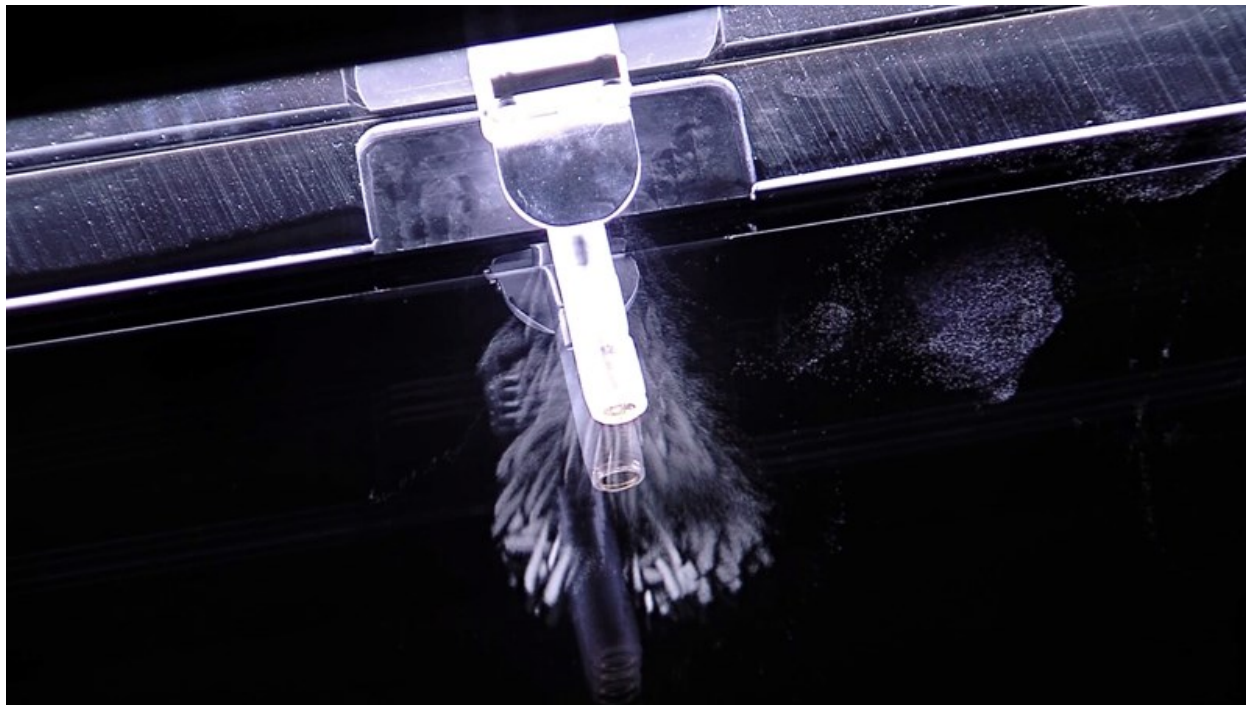
Radionuclizii sunt produși ca un rezultat inevitabil al fisiunii nucleare și al exploziilor termonucleare. Procesul de fisiune nucleară creează o gamă largă de produse de fisiune, dintre care majoritatea sunt radionuclizi. Radionuclizii suplimentari pot fi creați prin iradierea combustibilului nuclear (creând o gamă de actinide) și a structurilor din jur, generând produse de activare. Acest amestec complex de radionuclizi cu diferite chimii și radioactivități face ca manipularea deșeurilor nucleare și tratarea acestora să fie deosebit de problematică.

Sintetic

Radionuclizii sintetici sunt sintetizați în mod deliberat utilizând reactoare nucleare, acceleratoare de particule sau generatoare de radionuclizi:

- Pe lângă faptul că sunt extrași din deșeuri nucleare, radioizotopii pot fi produși în mod deliberat în reactoare nucleare, exploatând fluxul mare de neutroni prezenți. Acești neutroni activează elementele plasate în interiorul reactorului. Un produs tipic dintr-un reactor nuclear este iridiu-192. Elementele care au o mare înclinație de a prelua neutronii din reactor sunt considerate a avea o secțiune transversală mare a neutronilor.

- Acceleratoarele de particule, cum ar fi ciclotronii, accelerează particulele pentru a bombarda o țintă pentru a produce radionuclizi. Ciclotronii accelerează protonii spre o țintă pentru a produce radionuclizi cu emisie de pozitroni, de ex. fluor-18.
- Generatoarele de radionuclizi conțin un radionuclid părinte care se descompune pentru a produce un fiu radioactiv. Părintele este de obicei produs într-un reactor nuclear. Un exemplu tipic este generatorul de tehneciu-99m utilizat în medicina nucleară. Părintele produs în reactor este molibdenul-99.



(Nuclizi artificiali de americiu-241 care emit particule alfa într-o cameră de ceață pentru vizualizare. Sursa: Nuledo, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Artificial_nuclide_americiu-241_emitting_alpha_particles_inserted_into_a_cloud_chamber_for_visualisation.jpg, CC Attribution-Share Alike 4.0 International licens)

Utilizări

Radionuclizii sunt utilizați în două moduri principale: fie numai pentru radiațiile lor (iradiere, baterii nucleare) sau pentru combinația proprietăților chimice și a radiației lor (markeri, biofarmaceutice).

- În biologie, radionuclizii de carbon pot servi ca markeri radioactivi, deoarece sunt chimic foarte asemănători cu nuclizii nonradioactivi, astfel încât cele mai multe procese chimice, biologice și ecologice le tratează într-un mod aproape identic. Se poate examina apoi rezultatul cu ajutorul unui detector de radiație, cum ar fi un contor Geiger, pentru a determina unde au fost încorporați atomii

obținuți. De exemplu, dacă s-ar putea planta culturi într-un mediu în care dioxidul de carbon conține carbon radioactiv; atunci părțile plantei care încorporează carbonul atmosferic ar fi radioactive. Radionuclizii pot fi utilizați pentru monitorizarea proceselor cum ar fi replicarea ADN sau transportul de aminoacizi.

- În medicina nucleară, radioizotopii sunt utilizați pentru diagnosticare, tratament și cercetare. Identificatorii chimici radioactivi care emit raze gama sau pozitroni pot furniza informații diagnostice despre anatomia internă și funcționarea anumitor organe, inclusiv creierul uman. Aceștia sunt utilizați în anumite forme de tomografie: scanare și imagistică cu lumenecență Cherenkov cu tomografie computerizată cu emisie de un singur foton și tomografie cu emisie de pozitroni. Radioizotopii sunt, de asemenea, o metodă de tratament în forme hemopoietice de tumori; succesul pentru tratamentul tumorilor solide a fost limitat. Surse gama mai puternice sterilizează seringile și alte echipamente medicale.
- În conservarea alimentelor, radiația este utilizată pentru a opri germinarea culturilor de rădăcini după recoltare, pentru a ucide paraziții și dăunătorii și pentru a controla maturarea fructelor și legumelor păstrate.
- În industrie și în minerit, radionuclizii sunt utilizați pentru a examina sudurile, pentru a detecta scurgeri, pentru a studia rata de uzură, eroziunea și coroziunea metalelor, precum și pentru analiza în flux a unei game largi de minerale și combustibili.
- La nave spațiale și în alte părți, radionuclizii sunt utilizați pentru a furniza energie și căldură, în special prin generatoare termoelectrice radioizotope.
- În astronomie și cosmologie, radionuclizii joacă un rol în înțelegerea procesului stelar și planetar.
- În fizica particulelor, radionuclizii ajută la descoperirea noilor fizici (fizica dincolo de modelul standard) prin măsurarea energiei și a impulsului produselor lor de dezintegrare beta.
- În ecologie, radionuclizii sunt utilizați pentru a urmări și a analiza poluanții, pentru a studia mișcarea apei de suprafață și pentru a măsura scurgerile de apă de ploaie și zăpadă, precum și debitele fluxurilor și râurilor.
- În geologie, arheologie și paleontologie, radionuclizii naturali sunt utilizați pentru a măsura vârstele rocilor, mineralelor și materialelor fosile.

9.2.13 Datarea radiometrică

Datarea radiometrică sau **datarea radioactivă** reprezintă o tehnică folosită pentru a data materialele, cum ar fi roci sau carbon, în care impuritățile radioactive au fost încorporate în mod selectiv când s-au format. Metoda compară abundența unui izotop radioactiv natural în interiorul materialului cu abundența produselor sale de dezintegrare, care se formează la o rată constantă de dezintegrare cunoscută. Utilizarea datării radiometrice a fost publicată pentru prima oară în 1907 de Bertram Boltwood și este acum sursa principală de informații despre epoca absolută a rocilor și a altor caracteristici geologice, inclusiv vârsta formelor de viață fosilizate sau vârsta Pământului însuși, și poate fi, de asemenea, utilizată pentru a obține o gamă largă de materiale naturale și artificiale.

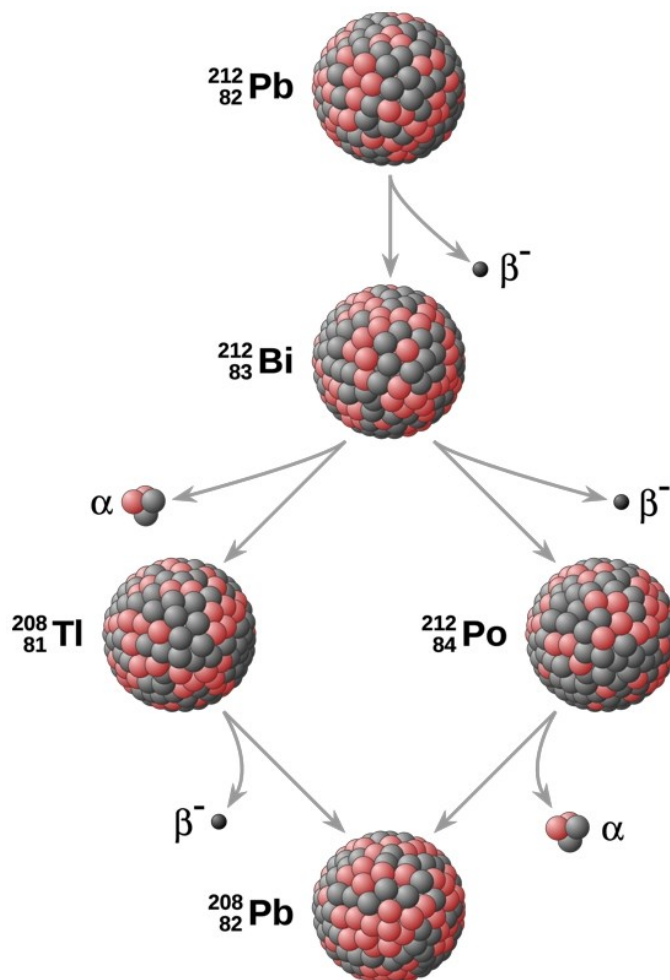
Împreună cu principiile stratigrafice, metodele de datare radiometrică sunt utilizate în geocronologie pentru a stabili scala temporală geologică. Printre cele mai cunoscute tehnici se numără datarea cu radiații de carbon, datarea cu potasiu-argon și datarea cu uraniu-plumb. Permițând stabilirea calendarului geologic, acesta oferă o sursă importantă de informații despre vârstele fosilelor și despre ratele deduse ale schimbărilor evolutive. Datările radiometrice sunt, de asemenea, folosite pentru materialele arheologice actuale, inclusiv artefactele antice.

Diferitele metode de datare radiometrică variază în funcție de intervalul de timp pentru care acestea sunt exacte și de materialele la care pot fi aplicate.

Bazele datării radiometrice

Dezintegrarea radioactivă

(Exemplu de lanț de dezintegrare radioactivă de la plumb-212 (^{212}Pb) la plumb-208 (^{208}Pb). Fiecare nuclid părinte se descompune spontan într-un nuclid fiu (produsul de dezintegrare) printr-o dezintegrare α sau o dezintegrare β . Produsul de dezintegrare final, plumb-208 (^{208}Pb), este stabil și nu mai poate suferi dezintegrare radioactivă spontană. Sursa: Eugene Alvin Villar (seav), https://en.wikipedia.org/wiki/File:Thorium_decay_chain_from_lead-212_to_lead-208.svg, CC Attribution-Share Alike 4.0 International license)



Toată materia obișnuită este alcătuită din combinații de elemente chimice, fiecare cu propriul număr atomic, indicând numărul de protoni din nucleul atomic. În plus, ele pot exista în izotopi diferiți, fiecare izotop al unui element diferă în numărul de neutroni din nucleu. Un izotop particular al unui anumit element este numit nuclid. Unii nuclizi sunt în mod inerent instabili. Adică, la un moment dat, un atom al unui astfel de nuclid va suferi dezintegrare radioactivă și se va transforma în mod spontan într-un nuclid diferit. Această transformare poate fi realizată în mai multe moduri diferite, incluzând dezintegrarea alfa (emisii de particule alfa) și dezintegrarea beta (emisii de electroni, emisii de pozitroni sau captarea electronilor). O altă posibilitate este fisiunea spontană în doi sau mai mulți nuclizi.

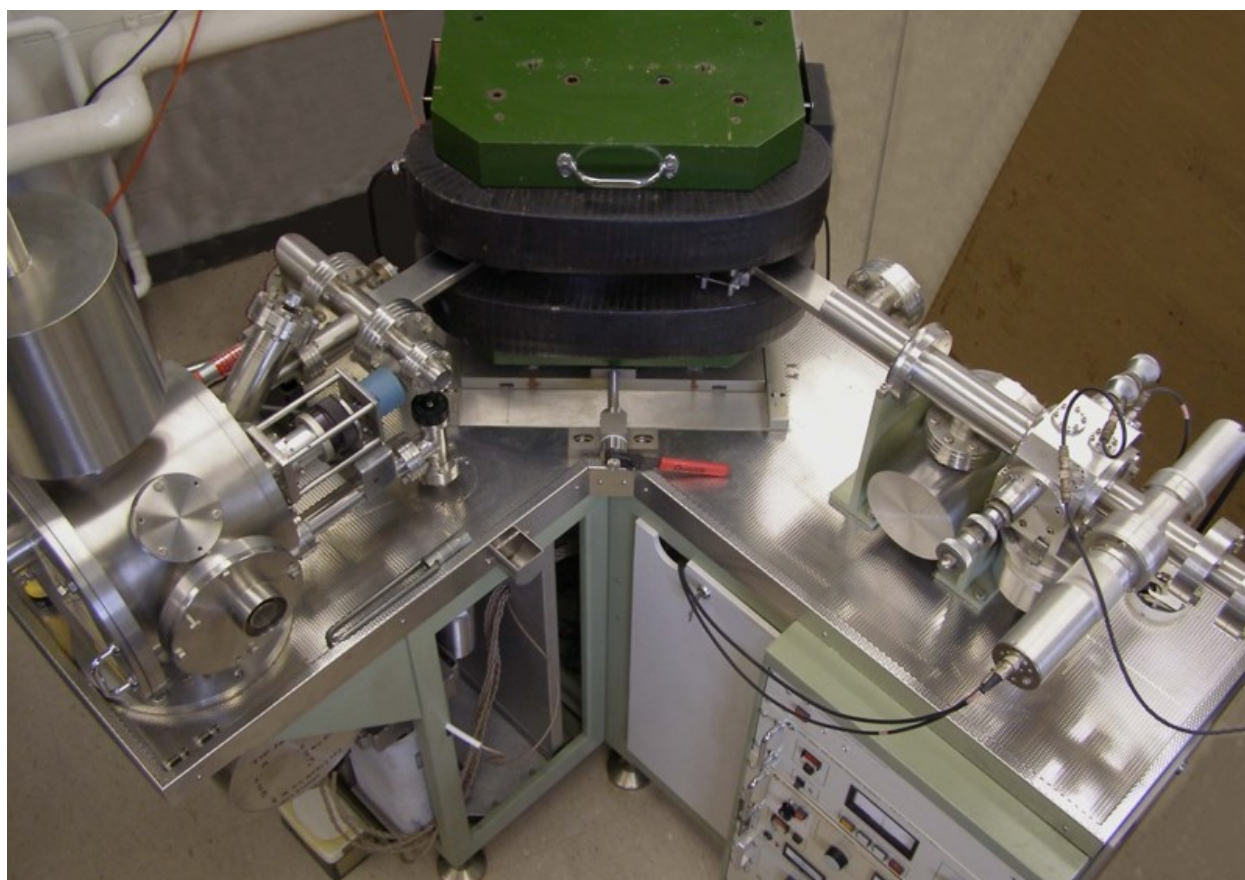
În timp ce momentul în care se dezintegrează un anumit nucleu este imprevizibil, o colecție de atomi ai unui nuclid radioactiv se descompune exponențial la o rată descrisă de un parametru cunoscut ca timpul de înjumătățire, de obicei dat în unități de ani când se discută tehnicile de datare. După ce a trecut un timp de înjumătățire, jumătate din atomii nuclidului în cauză s-a dezintegrat într-un produs "nuclidic" al fiului sau produs al dezintegrării. În multe cazuri, fiul nuclid însuși este radioactiv, rezultând un lanț de dezintegrare, care în cele din urmă se încheie cu formarea unui nuclid fiu stabil (nonradioactiv); fiecare pas într-un astfel de lanț este caracterizat printr-un timp de înjumătățire distinct. În aceste cazuri, de obicei, timpul de înjumătățire de interes pentru maturitatea radiometrică este cel mai lung din lanț, factor care limitează viteza în transformarea ulterioară a nucleului radioactiv în fiul său stabil. Sistemele izotopice care au fost exploatate pentru datarea radiometrică au un timp de înjumătățire cuprins între numai aproximativ 10 ani (de exemplu, tritiu) până la peste 100 de miliarde de ani (de exemplu samariu-147).

Pentru cei mai mulți nuclizi radioactivi, timpul de înjumătățire depinde exclusiv de proprietățile nucleare și este, în esență, o constantă. Nu este afectat de factori externi cum ar fi temperatura, presiunea, mediul chimic sau prezența unui câmp magnetic sau electric. Singurele excepții sunt nuclizii care se dezintegrează prin procesul de captare electronică, cum ar fi beriliu-7, stronțiu-85 și zirconiu-89, a căror rată de dezintegrare poate fi afectată de densitatea electronică locală. Pentru toți ceilalți nuclizi, proporția nucleului original la produsele sale de dezintegrare se modifică într-un mod previzibil, pe măsură ce nucleul inițial se dezintegrează în timp. Această predictibilitate permite ca abundențele relative ale nuclizilor aferenți să fie utilizate ca un ceas pentru a măsura timpul de la încorporarea nuclizilor originali într-un material până în prezent.

Precizia datării radiometrice

Ecuția de bază a datării radiometrice necesită ca nici nucleul parental, nici produsul fiu să nu poată intra sau să părăsească materialul după formare. Trebuie luate în considerare posibilele efecte de confuzie ale contaminării izotopilor părintelui și fiului, ca și efectele oricărei pierderi sau câștiguri a unor astfel de izotopi de la crearea eșantionului. Prin urmare, este esențial să avem cât mai multe informații despre materialul datat și să verificăm posibilele semne de modificare. Precizia este îmbunătățită dacă se efectuează

măsurători pe mai multe eşantioane din diferite locații ale corpului rocii. Alternativ, dacă mai multe minerale diferite pot fi datate din aceeași probă și se presupune că s-au format de la același eveniment și s-au aflat în echilibru cu rezervorul când s-au format, ele trebuie să formeze un isocron. Acest lucru poate reduce problema contaminării. În datarea cu uraniu-plumb, se utilizează diagrama concordia, care reduce și problema pierderii de nuclid. În cele din urmă, poate fi necesară corelarea între diferite metode izotopice pentru a confirma vârsta unei probe. De exemplu, vârsta ginezilor Amitsoq din vestul Groenlandei a fost determinată ca fiind de $3,6 \pm 0,05$ milioane de ani folosind datarea cu uraniu-plumb și $3,56 \pm 0,10$ Ma folosind datarea plumb-plumb, rezultate care sunt consecvente unul cu celălalt.



(Spectrometrul de masă cu ionizare termică folosit în datarea radiometrică.)

Datările radiometrice precise necesită, în general, ca părintele să aibă un timp de înjumătățire suficient de mare încât să fie prezent în cantități semnificative la momentul măsurătorilor, timpul de înjumătățire a părintelui este cunoscut cu exactitate, și produsul fiu rezultat este măsurat cu suficientă precizie și distins de cantitatea inițială a fiului prezent în material. Procedurile utilizate pentru a izola și a analiza nuclizii părinte și fiu trebuie să fie precise și exacte. Aceasta implică în mod normal spectrometria de masă a raportului izotopic.

Precizia metodei de datare depinde în parte de timpul de înjumătățire al izotopului radioactiv implicat. De exemplu, carbon-14 are un timp de înjumătățire de 5730 ani. După ce un organism a murit cu 60 000 de ani în urmă, rămâne atât de puțin carbon-14 încât nu poate fi stabilită o datare precisă. Pe de altă parte, concentrația de carbon-14 scade atât de abrupt încât vârsta rămășițelor relativ tinere poate fi determinată cu o precizie de câteva decenii.

Temperatura de închidere

Dacă un material care respinge în mod selectiv nuclidul fiu este încălzit, orice nuclid fiu care a fost acumulat în timp va fi pierdut prin difuzie, stabilind "ceasul" izotopic la zero. Temperatura la care se întâmplă acest lucru este cunoscută ca *temperatura de închidere* sau *temperatura de blocare* și este specifică pentru un anumit material și pentru un sistem izotopic. Aceste temperaturi sunt determinate experimental în laborator prin resetarea artificială a probelor minerale utilizând un cuptor cu temperatură înaltă. Pe măsură ce mineralul se răcește, structura cristalină începe să se formeze, iar difuzarea izotopilor este mai puțin ușoară. La o anumită temperatură, structura cristalină s-a format suficient pentru a împiedica difuzia izotopilor. Această temperatură este ceea ce se numește *temperatura de închidere* și reprezintă temperatura sub care mineralul este un sistem închis la izotopi. Astfel, o rocă sau o topitură ignifugă sau metamorfică, care se răcește lent, nu începe să producă dezintegrare radioactivă măsurabilă până când nu se răcește sub temperatura de închidere. Vârsta care poate fi calculată prin datarea radiometrică este timpul în care roca sau mineralul s-au răcit la temperatura de închidere. Datarea diferitelor minerale și / sau a sistemelor izotopice (cu diferite temperaturi de închidere) în cadrul aceleiași pietre poate, prin urmare, să permită urmărirea istoricului termic al pietrei în cauză cu timpul, astfel încât istoria evenimentelor metamorfice poate deveni cunoscută în detaliu. Acest câmp este cunoscut sub numele de termocronologie sau termocronometrie.

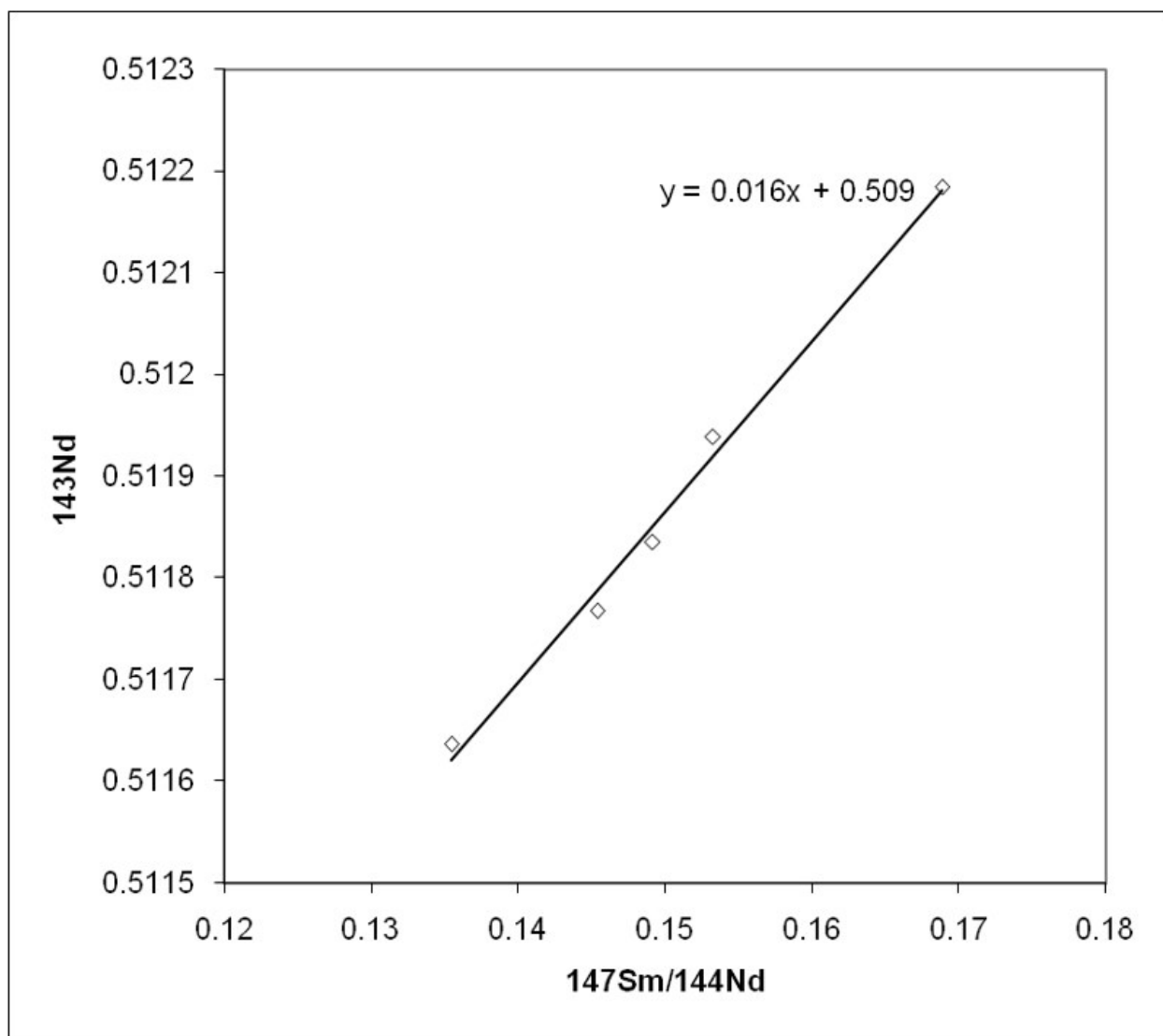
Ecuția vârstei

Expresia matematică care leagă dezintegrarea radioactivă de timpul geologic este

$$D = D_0 + N(t) (e^{\lambda t} - 1)$$

unde t este vârsta probei, D este numărul de atomi ai izotopului fiu din eșantion, D_0 este numărul de atomi ai izotopului fiu din compoziția originală, N este numărul de atomi ai izotopului părinte din probă la momentul t (prezent), dat de $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ și λ este constanta de dezintegrare a izotopului părinte, egală cu inversul timpului de înjumătățire radioactivă al izotopului părinte ori logaritmul natural al lui 2.

Ecuția este cel mai convenabil exprimată în termeni de cantitate măsurată $N(t)$ mai degrabă decât valoarea inițială constantă N_0 .

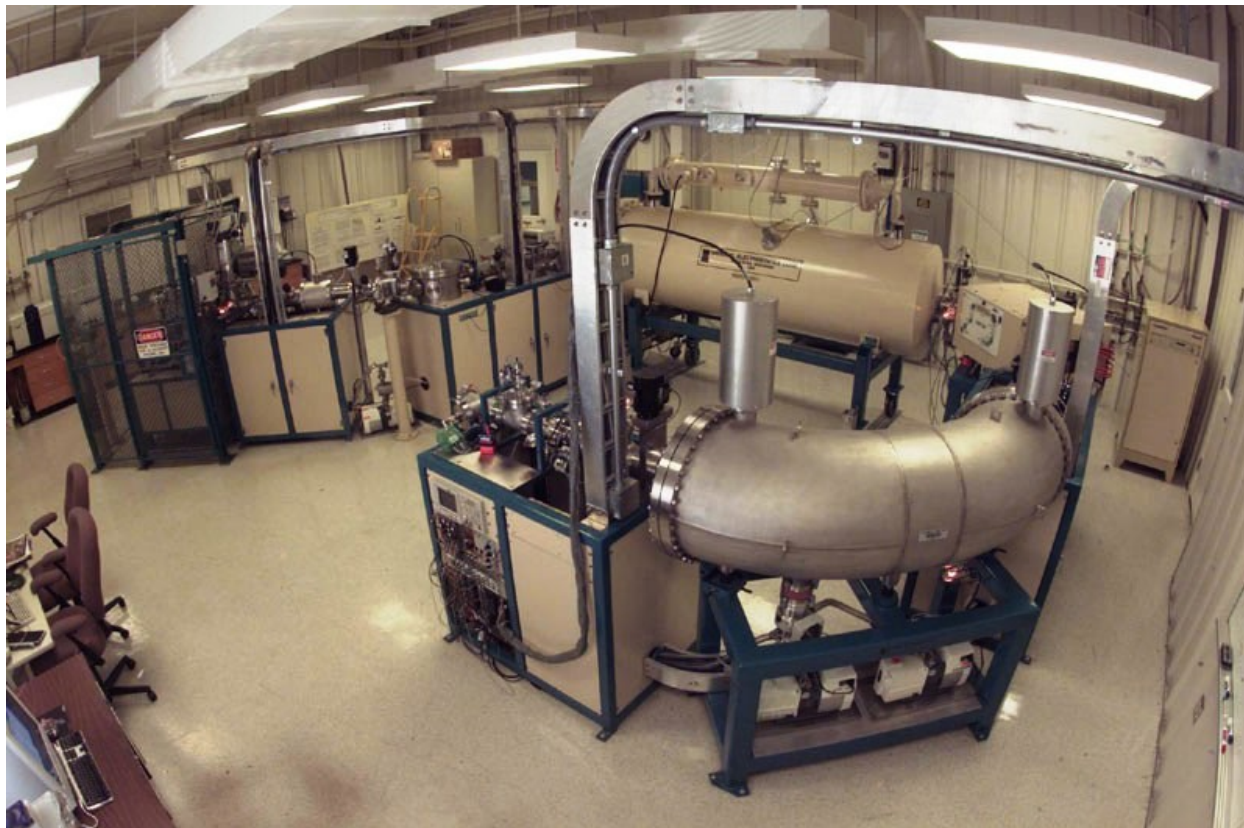


(Isocronul Sm/Nd reprezentat de mostrele din Great Dyke, Zimbabwe. Vârsta se calculează pornind de la panta (linia) isocronului și compoziția originală de la intersectarea isocronului cu axa y.)

Ecuția de mai sus folosește informații privind compoziția izotopilor părintelui și fiului în momentul în care materialul testat se răcește sub temperatura de închidere. Acest lucru este bine stabilit pentru majoritatea sistemelor izotopice. Cu toate acestea, construcția unui izocron nu necesită informații despre compozițiile originale, utilizând doar rapoartele actuale ale izotopilor părinte și fiu la un izotop standard. Plotarea unui izocron este utilizată pentru a rezolva grafic ecuația vârstei și a calcula vârsta probei și a compoziției originale.

9.2.14 Datarea cu carbon (Datarea cu radiocarbon)

Datarea cu radiocarbon (denumită și **datarea cu carbon** sau **datarea carbonului-14**) este o metodă pentru determinarea vârstei unui obiect care conține materiale organice prin utilizarea proprietăților radiocarbonului (^{14}C), un izotop radioactiv al carbonului.



(Măsurarea ^{14}C se face acum cel mai frecvent cu ajutorul unui spectrometru de masă accelerator.)

Metoda a fost dezvoltată de Willard Libby la sfârșitul anilor 1940 și a devenit rapid un instrument standard pentru arheologi. Libby a primit Premiul Nobel pentru Chimie pentru munca sa în 1960. Metoda de datare cu radiații carbonice se bazează pe faptul că radiocarbonul este în mod constant creat în atmosferă prin interacțiunea razelor cosmice cu azotul atmosferic. Radiocarbonul rezultat se combină cu oxigenul atmosferic pentru a forma dioxid de carbon radioactiv, care este încorporat în plante prin fotosinteză; animalele acumulează apoi ^{14}C prin consumul plantelor. Când animalul sau planta moare, el oprește schimbul de carbon cu mediul său, iar de la acel moment cantitatea de ^{14}C pe care o conține începe să scadă, pe măsură ce ^{14}C suferă o dezintegrare radioactivă. Măsurarea cantității de ^{14}C dintr-o probă dintr-o plantă sau animal mort, cum ar fi o bucată de lemn sau un fragment de os, furnizează informații care pot fi utilizate pentru a calcula momentul în care animalul sau planta au murit. Cu cât eșantionul este mai vechi este, cu atât este mai puțin detectabil este ^{14}C și, deoarece timpul de înjumătățire al ^{14}C (perioada de timp după care jumătate dintr-un eșantion dat va fi dezintegrat) este de aproximativ 5730 de ani, cele mai vechi date care pot fi măsurate în mod fiabil prin această datare de proces, sunt cu aproximativ 50.000 de ani în urmă, deși metodele speciale de preparare permit uneori o analiză precisă a probelor mai vechi.

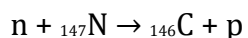
Ideea din spatele datării cu radiații carbonice este simplă, dar au fost necesari ani de lucru pentru a dezvolta tehnica până la punctul în care ar putea fi obținute date precise. Cercetările au fost în curs de desfășurare încă din anii 1960 pentru a determina ce

proporția de ^{14}C în atmosferă a fost în ultimii cincizeci de mii de ani. Datele rezultate, sub forma unei curbe de calibrare, sunt acum utilizate pentru a transforma o anumită măsurătoare a radiocarbonului dintr-o probă într-o estimare a vârstei eșantionului. Trebuie efectuate alte corecții pentru a se ține seama de proporția de ^{14}C în diferite tipuri de organisme (fracționarea) și de nivelele variabile ale ^{14}C în întreaga biosferă (efectele rezervoarelor). Alte complicații provin din arderea combustibililor fosili, cum ar fi cărbunele și uleiul, și testele nucleare de la suprafață efectuate în anii 1950 și 1960. Deoarece timpul necesar pentru a transforma materialele biologice în combustibili fosili este substanțial mai lung decât timpul necesar ca ^{14}C să se descompună sub nivele detectabile, combustibilii fosili nu conțin aproape deloc ^{14}C și, ca urmare, a existat o scădere notabilă a proporției de ^{14}C în atmosferă începând cu sfârșitul secolului al XIX-lea. În schimb, testarea nucleară a mărit cantitatea de ^{14}C în atmosferă, care a atins un maxim în 1963 de aproape două ori mai mare decât înainte de începerea testelor.

Măsurarea radiocarbonului a fost inițial efectuată cu dispozitivele de numărare beta, care au numărat cantitatea de radiații beta emise de dezintegrarea atomilor ^{14}C într-o probă. Mai recent, spectrometria de masă a acceleratorului a devenit metoda preferată; numără toți atomii ^{14}C din eșantion și nu doar câțiva care se pot deteriora în timpul măsurătorilor; poate fi folosită cu mostre mult mai mici (la fel de mici ca semințele individuale ale plantelor) și oferă rezultate mult mai rapide. Dezvoltarea datării radiocarbonului a avut un impact profund asupra arheologiei. În plus față de permiterea unei date mai precise în cadrul siturilor arheologice decât metodele anterioare, permite compararea datelor evenimentelor pe distanțe mari. Istoricul arheologiei se referă adesea la impactul asupra sa a "revoluției radiocarbonului". Datarea radiocarbonului a permis tranzițiilor cheie din preistorie să fie datate, cum ar fi sfârșitul ultimei perioade glaciare și începutul erei neolitic-bronz în diferite regiuni.

Detaliile fizice și chimice

În natură, carbonul există ca doi izotopi stabili, non-radioactivi: carbon-12 (^{12}C) și carbon-13 (^{13}C), și un izotop radioactiv, carbon-14 (^{14}C), cunoscut și ca "radiocarbon". Timpul de înjumătățire al ^{14}C (timpul necesar pentru ca jumătate dintr-o anumită cantitate de ^{14}C să se dezintegreze) este de aproximativ 5730 de ani, deci concentrația sa în atmosferă ar putea fi de așteptat să scadă de-a lungul a mii de ani, dar ^{14}C este produs constant în stratosfera inferioară și troposfera superioară prin raze cosmice, care generează neutroni care, la rândul lor, creează ^{14}C atunci când lovesc atomii de azot 14 (^{14}N). Următoarea reacție nucleară creează ^{14}C :



unde n reprezintă un neutron și p reprezintă un proton.

După ce a fost produs, ^{14}C se combină rapid cu oxigenul din atmosferă pentru a forma dioxid de carbon (CO_2). Dioxidul de carbon produs astfel difuzează în atmosferă, se dizolvă în ocean și este preluat de plante prin fotosinteză. Animalele mănâncă plantele, iar în cele

din urmă radiocarbonul este distribuit în întreaga biosferă. Raportul dintre ^{14}C și ^{12}C este de aproximativ 1,5 părți de ^{14}C până la 10^{12} părți de ^{12}C . În plus, aproximativ 1% din atomii de carbon sunt de tipul de izotop stabil ^{13}C .

Ecuția pentru dezintegrarea radioactivă a compusului ^{14}C este:



Prin emiterea unei particule beta (un electron, e^-) și a unui antineutrino electron (ν_e), unul dintre neutronii din nucleul ^{14}C se modifică la un proton, iar nucleul ^{14}C revine la izotopul ^{14}N stabil (non-radioactiv).

Principii

În timpul vieții, o plantă sau un animal schimbă carbonul cu mediul său, astfel că carbonul pe care îl conține va avea aceeași proporție de ^{14}C ca și atmosfera. Odată ce a murit, acesta încetează să obțină ^{14}C , iar ^{14}C în materialul său biologic la acel moment va continua să se dezintegreze și, astfel, raportul de ^{14}C la ^{12}C în rămășițele sale va scădea treptat. Deoarece ^{14}C se dezintegrează la o rată cunoscută, proporția de radiocarbon poate fi folosită pentru a determina cât timp a trecut de când o probă dată a oprit schimbul de carbon - cu cât eșantionul este mai vechi, cu atât mai puțin va rămâne ^{14}C .

Ecuția care guvernează dezintegrarea unui izotop radioactiv este:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

unde N_0 este numărul de atomi ai izotopului din proba originală (la momentul $t = 0$, când organismul din care a fost prelevat eșantionul a murit) și N este numărul de atomi rămași după timpul t . λ este o constantă care depinde de izotopul particular; pentru un anumit izotop este egal cu inversul timpului mediu de viață - adică timpul mediu sau cel așteptat, în care un atom dat va supraviețui înainte de a fi supus dezintegrării radioactive. Viața medie, notată cu τ , a lui ^{14}C este de 8.267 de ani, deci ecuația de mai sus poate fi rescrisă ca:

$$t = 8267 \ln\left(\frac{N_0}{N}\right) \text{ ani}$$

Se presupune că eșantionul a avut inițial același raport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ca și raportul în atmosferă și, deoarece dimensiunea eșantionului este cunoscută, se poate calcula numărul total de atomi din probă, obținându-se N_0 , numărul de atomi ^{14}C din proba inițială. Măsurarea N , numărul de atomi ^{14}C prezenți în eșantion, permite calcularea lui t , vârsta eșantionului, utilizând ecuația de mai sus.

Timpul de înjumătățire al unui izotop radioactiv (notat de obicei prin $t_{1/2}$) este un concept mai familiar decât durată medie, deci, deși ecuațiile de mai sus sunt exprimate în termeni de viață medie, este mai obișnuit să se citească valoarea timpului de înjumătățire al ^{14}C decât viața sa medie. Valoarea acceptată în prezent pentru timpul de înjumătățire al ^{14}C este

de 5 730 de ani. Aceasta înseamnă că, după 5 730 de ani, doar jumătate din ^{14}C inițial va rămâne; un sfert va rămâne după 11.460 de ani; a opta parte după 17,190 de ani; și așa mai departe.

Calcululele de mai sus se bazează pe mai multe ipoteze, cum ar fi faptul că nivelul de ^{14}C din atmosferă a rămas constant în timp. De fapt, nivelul de ^{14}C din atmosferă a variat semnificativ și, ca urmare, valorile furnizate de ecuația de mai sus trebuie să fie corectate prin utilizarea datelor din alte surse. Aceasta se face prin curbele de calibrare, care convertesc o măsurare de ^{14}C într-o probă într-o epocă calendaristică estimată. Calcululele implică mai multe etape și includ o valoare intermediară numită "vârsta radiocarbonului", care este vârsta în "ani radiocarbonici" ai eșantionului: o vârstă menționată în ani radiocarbonici înseamnă că nu a fost utilizată nici o curbă de calibrare - calcululele pentru anii radiocarbonici presupune că raportul $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ nu s-a schimbat în timp. Calculul vârstelor radiocarbonice necesită, de asemenea, valoarea timpului de înjumătățire pentru ^{14}C , care pentru mai mult de un deceniu conform lucrării lui Libby a fost considerată a fi de 5.568 ani. Acest lucru a fost revizuit la începutul anilor 1960 la 5730 de ani, ceea ce a însemnat că multe date calculate în documentele publicate anterior au fost incorecte (eroarea la timpul de înjumătățire este de aproximativ 3%). Pentru consecvența cu aceste lucrări precoci și pentru a evita riscul unei corecții duble pentru timpul de înjumătățire incorect, vârstele radiocarbonice sunt încă calculate utilizând timpul de înjumătățire incorect. O corecție a timpului de înjumătățire este încorporată în curbele de calibrare, astfel încât, deși vârsta radiocarbonului se calculează utilizând o valoare a timpului de înjumătățire care este cunoscută a fi incorectă, data finală raportată, în anii calendaristici, este exactă. Când se citează o dată, cititorul trebuie să știe că, dacă este o dată necalibrată (termen folosit pentru datele date în ani radiocarbonici), acesta poate diferi substanțial de cea mai bună estimare a datei calendaristice reale, atât pentru că folosește o valoare greșită pentru timpul de înjumătățire al ^{14}C , cât și deoarece nu a fost aplicată nicio corecție (calibrare) pentru variația istorică a ^{14}C în atmosferă în timp.

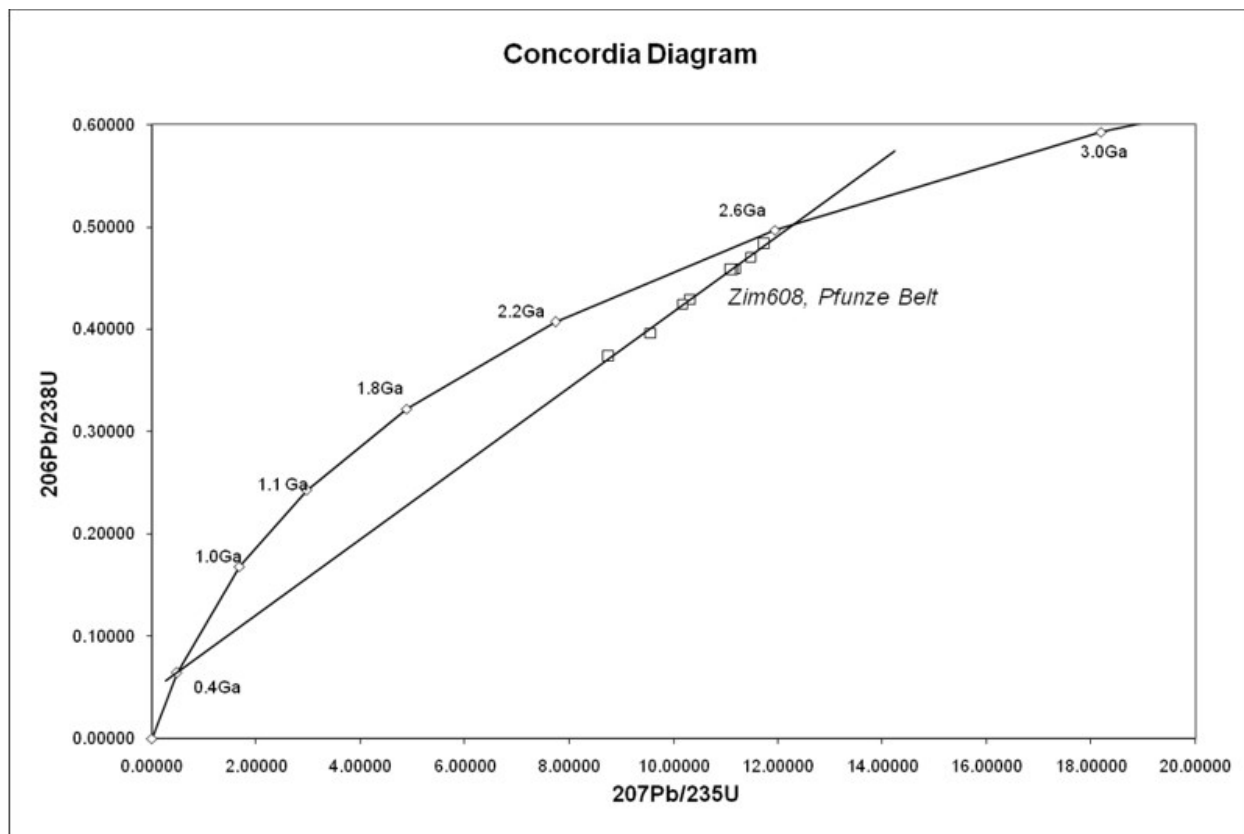
Considerații privind datarea

Variația raportului $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ în diferite părți ale rezervorului de schimb de carbon înseamnă că un calcul direct al vârstei unui eșantion pe baza cantității de ^{14}C pe care îl conține va da adesea un rezultat incorect. Există mai multe alte posibile surse de eroare care trebuie luate în considerare. Erorile sunt de patru tipuri generale:

- variații ale raportului $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ în atmosferă, atât din punct de vedere geografic, cât și în timp;
- fracționarea izotopică;
- variații ale raportului $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ în diferite părți ale rezervorului;
- contaminare.

9.2.15 Datarea cu uraniu

Metoda de datare cu uraniu-plumb



(O diagrama concordia folosită în datarea cu uraniu-plumb, cu date din Belt Pfunze, Zimbabwe. Toate probele arata pierderi de izotopi de plumb, dar interceptul erocronului (linia dreapta prin punctele probei) si concordia (curba) arată vârsta corectă a rocii.)

Datarea radiometrică cu uraniu-plumb implică utilizarea uraniului-235 sau a uraniului-238 pentru a data vârsta absolută a substanței. Acest sistem a fost rafinat până la punctul în care marja de eroare în datele de roci poate fi mai mică de două milioane de ani în 2,5 miliarde de ani. O marjă de eroare de 2-5% a fost obținută pe rocile mezozoice mai tinere.

Datările uraniu-plumb sunt adesea realizate pe zirconiu mineral (ZrSiO_4), deși pot fi folosite și pe alte materiale, cum ar fi badeleite, precum și monazite. Zirconul și badeleitele încorporează atomi de uraniu în structura lor cristalină ca înlocuitori ai zirconiului, dar resping cu putere plumbul. Zirconul are o temperatură foarte mare de închidere, este rezistent la intemperii mecanice și este foarte inert chimic. Zirconul formează, de asemenea, mai multe straturi de cristal în timpul evenimentelor metamorfice, care fiecare poate înregistra o vârstă izotopică a evenimentului. Analiza micro-fasciculului *in situ* poate fi realizată prin tehnici laser ICP-MS sau SIMS.

Unul dintre avantajele sale majore este că orice mostră oferă două ceasuri, unul bazat pe dezintegrarea uraniului-235 la plumb-207 cu un timp de înjumătățire de aproximativ 700 de milioane de ani și unul bazat pe dezintegrarea uraniului-238 la plumb-206 cu un timp de înjumătățire de circa 4,5 miliarde de ani, oferind o încrucișare încorporată care permite determinarea exactă a vârstei probei, chiar dacă o parte din plumb a fost pierdută. Acest lucru poate fi văzut în diagrama concordiei, unde eșantioanele se compun de-a lungul unei erocronii (linie dreaptă) care intersectează curba concordiei la vârsta probei.

Metoda de datare cu uraniu-toriu

O tehnică relativ scurtă de datare se bazează pe descompunerea uraniului-234 în toriu-230, o substanță cu un timp de înjumătățire de aproximativ 80.000 de ani. Este însoțită de un proces fiu, în care uraniul-235 se descompune în protactiniu-231, care are un timp de înjumătățire de 32.760 ani.

În timp ce uraniul este solubil în apă, toriul și protactiniul nu sunt, deci ele sunt precipitate selectiv în sedimente pe fundul oceanului, din care se măsoară rapoartele lor. Schema are un interval de câteva sute de mii de ani. O metodă asociată este datarea ioni-toriu, care măsoară raportul dintre ioni (toriu-230) și toriu-232 în sedimentul oceanic.

9.2.16 Efectele radiațiilor asupra oamenilor

Efectele asupra sănătății

În general, radiația ionizantă este dăunătoare și potențial letală pentru ființele vii, dar poate avea beneficii de sănătate în radioterapia pentru tratamentul cancerului și tirotoxicozei.

Cele mai multe efecte negative asupra sănătății ale expunerii la radiații pot fi grupate în două categorii generale:

- efecte deterministe (reacții de dăunătoare asupra țesuturilor) datorate, în mare parte, uciderii/disfuncției celulelor după doze mari; și
- efectele stocastice, și anume, cancerul și efectele ereditare care implică fie dezvoltarea cancerului la persoanele expuse datorită mutației celulelor somatice fie bolii ereditare la descendenții lor datorită mutației celulelor de reproducere (germeni).

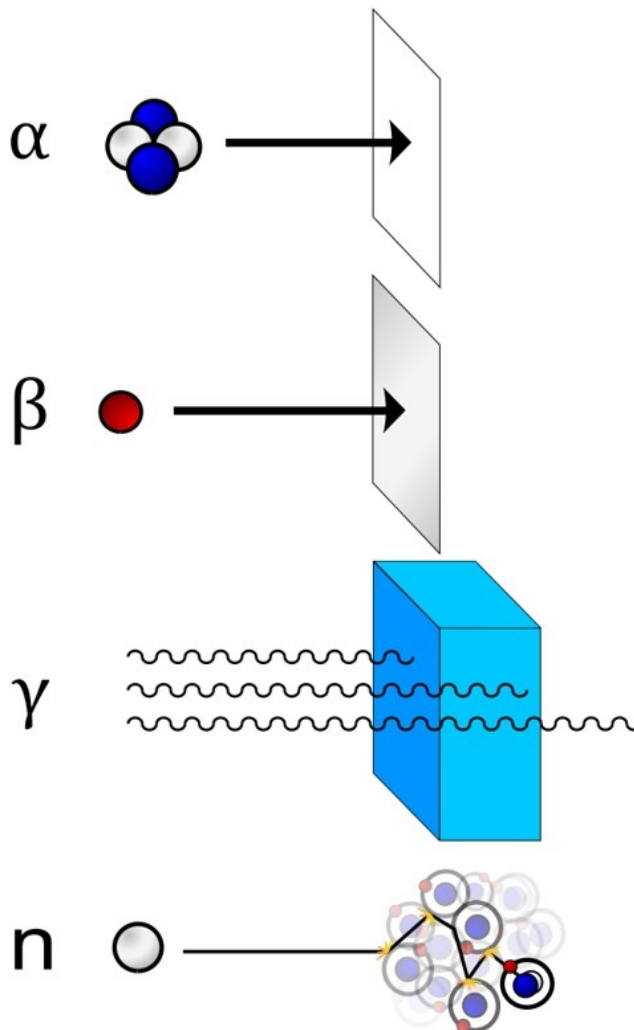
Impactul său cel mai comun este inducerea stocastică a cancerului cu o perioadă latentă de ani sau decenii după expunere. Mecanismul prin care acest lucru are loc este bine cunoscut, dar modelele cantitative care prevăd nivelul de risc rămân controversate. Cel mai larg acceptat model consideră că incidența cancerului datorită radiației ionizante crește liniar cu o doză efectivă de radiație cu o rată de 5,5% per sievert. Dacă acest model liniar este

corect, radiația naturală de fond este cea mai periculoasă sursă de radiații pentru sănătatea publică generală, urmată de imagistica medicală ca sursă secundă apropiată. Alte efecte stocastice ale radiațiilor ionizante sunt teratogeneza, declinul cognitiv și bolile cardiace.

Expunerea la radiații

(Radiația alfa (α) constă dintr-un nucleu de heliu-4 (4He) cu mișcare rapidă și este oprită de o foaie de hârtie. Radiația beta (β), constând din electroni, este oprită de o placă de aluminiu. Radiația gama (γ), formată din fotoni energetici, este absorbită în cele din urmă deoarece pătrunde într-un material dens.

Radiația neutronică (n) constă din neutroni liberi care sunt blocați de elemente ușoare, cum ar fi hidrogenul, care le încetinesc și/sau le captează. Nu este arătat: raze cosmice galactice care constau din nuclee încărcate energetic, cum ar fi protoni, nuclee de heliu și nuclee încărcate cu mare intensitate numite ioni HZE. Sursa: Anynobody~commonswiki, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Alfa_beta_gamma_n_neutron_radiation.svg, CC Attribution-Share Alike 4.0 International, 3.0 Unported, 2.5 Generic, 2.0 Generic and 1.0 Generic license)



Există trei modalități standard de a limita expunerea:

- **Timp:** Pentru persoanele expuse la radiații în plus față de radiațiile de fond naturale, limitarea sau minimizarea timpului de expunere va reduce doza de la sursa de radiații.
- **Distanța:** Intensitatea radiațiilor scade brusc cu distanța, conform unei legi invers-pătrate (în vid absolut).
- **Ecranare:** Aerul sau pielea pot fi suficiente pentru a atenua substanțial radiațiile alfa și beta. Barierele de plumb, beton sau apă sunt adesea folosite pentru a oferi o protecție eficientă împotriva particulelor mai penetrante, cum ar fi razele gama și neutronii. Unele materiale radioactive sunt stocate sau manipulate sub apă sau cu comandă la distanță în încăperi construite din beton gros sau căptușite cu plumb. Există scuturi speciale de plastic care opresc particule beta, iar aerul va opri cele mai multe particule alfa. Eficacitatea unui material în ecranarea radiațiilor este determinată de grosimea pentru

înjumătățirea valorii, grosimea materialului care reduce radiația la jumătate. Această valoare este o funcție a materialului însuși și a tipului și a energiei radiației ionizante. Unele grosimi de material atenuant general acceptate sunt 5 mm de aluminiu pentru majoritatea particulelor beta și 3 cm de plumb pentru radiația gama.

Acestea pot fi aplicate tuturor surselor naturale și artificiale. Pentru sursele fabricate de om, utilizarea containerelor de izolare este un instrument major în reducerea absorbției dozei și este în mod eficient o combinație de ecranare și izolare de mediul deschis. Materialele radioactive se limitează la cel mai mic spațiu posibil și se izolează de mediul înconjurător, cum ar fi într-o "celulă caldă" (pentru radiații) sau în "container cu mănuși" (pentru contaminare). Izotopii radioactivi de uz medical, de exemplu, se distribuie în instalații cu manipulare închisă, de obicei "cutii cu mănuși", în timp ce reactoarele nucleare funcționează în sisteme închise cu bariere multiple care mențin materialele radioactive conținute. Camerele de lucru, celulele calde și cutiile cu mănuși au presiuni de aer ușor reduse pentru a preveni evadarea materialului din aer spre mediul deschis.

În conflictele nucleare sau emisiile nucleare civile măsurile de apărare civilă pot contribui la reducerea expunerii populațiilor prin reducerea ingerării izotopilor și a expunerii ocupaționale. Una este problema comprimatelor de iodură de potasiu (KI), care blochează absorbția iodului radioactiv (unul dintre principalele produse radioizotopice de fisiune nucleară) în glanda tiroidă umană.

Expunerea profesională

Persoanele expuse profesional sunt controlate în cadrul de reglementare al țării în care lucrează și în conformitate cu orice constrângeri locale de licență nucleară. Acestea se bazează, de obicei, pe recomandările ICRP. Comisia Internațională pentru Protecția Radiologică recomandă limitarea iradierii artificiale. Pentru expunerea profesională, limita este de 50 mSv într-un singur an, cu un maxim de 100 mSv într-o perioadă consecutivă de cinci ani .

Expunerea la radiații a acestor indivizi este monitorizată cu atenție cu ajutorul dozimetrelor și a altor instrumente de protecție radiologică, care vor măsura concentrațiile de particule radioactive, valorile dozelor gama și contaminarea radioactivă. Se păstrează o înregistrare legală a dozei.

Exemple de activități în care expunerea profesională reprezintă o preocupare includ:

- Companii aeriene (populația cea mai expusă)
- Radiografia industrială
- Radiologie medicală și medicină nucleară

- Exploatarea uraniului
- Centrale nucleare și fabrici de reprocesare a combustibilului nuclear
- Laboratoare de cercetare (guvernamentale, universitare și private)

Unele surse de radiații omenești afectează organismul prin radiații directe, cunoscute ca doze eficiente (radiații), în timp ce altele iau forma de contaminare radioactivă și iradiază corpul din interior. Acesta din urmă este cunoscut ca doză angajată.

Expunerea publică

Procedurile medicale, cum ar fi raze X de diagnostic, medicina nucleară și radioterapia sunt de departe cele mai semnificative sursă de expunere la radiații umane de către publicul larg. Unii dintre radionuclizii majori utilizați sunt I-131, Tc-99m, Co-60, Ir-192 și Cs-137. De asemenea, publicul este expus la radiații produse de consum, cum ar fi tutunul (poloniu-210), combustibilii (gaz, cărbune etc.), televizoare, ceasuri și cadrane luminoase (tritiu), sisteme de raze X, detectoare de fum (americium), tuburi electronice și mantale de gazon cu lanternă (toriu).

De importanță mai mică, oamenii sunt expuși la radiații din ciclul combustibilului nuclear, care include întreaga secvență de la procesarea uraniului până la eliminarea combustibilului uzat. Efectele unei astfel de expuneri nu au fost măsurate în mod fiabil datorită dozelor extrem de mici implicate. Oponenții folosesc un cancer per model de pe doză pentru a afirma că astfel de activități provoacă câteva sute de cazuri de cancer pe an, o aplicație a modelului linear fără prag acceptat pe scară largă.

Comisia Internațională pentru Protecția Radiologică recomandă limitarea iradierii artificiale de public la o medie de 1 mSv (0,001 Sv) de doză efectivă pe an, fără a include expunerile medicale și ocupaționale.

Într-un război nuclear, razele gama provenite atât din explozia inițială a armei, cât și din urma arderii ar fi sursele de expunere la radiații.

Zborul în spațiu

Particulele masive reprezintă o preocupare pentru astronauții din afara câmpului magnetic al pământului care ar primi particule solare din evenimentele protonice solare și razele cosmice galactice din surse cosmice. Aceste nuclee încărcate cu energie înaltă sunt blocate de câmpul magnetic al Pământului, dar reprezintă o preocupare majoră pentru sănătatea astronauților care călătoresc pe Lună și în orice loc îndepărtat dincolo de orbita pământului.

Transportul aerian

Călătoriile cu avionul expun persoanele din aeronave la radiații crescute din spațiu în comparație cu nivelul mării, inclusiv razele cosmice și de la evenimentele de explozii solare. Programele software precum Epcard, CARI, SIEVERT, PCAIRE sunt încercări de simulare a expunerii de către avioane și pasageri. Un exemplu de doză măsurată (doza nesimulată) este de 6 μSv pe oră de la Londra la Tokyo pe o rută polară de latitudine mare. Cu toate acestea, dozele pot varia, cum ar fi în perioadele cu activitate solară mare. FAA din Statele Unite solicită companiilor aeriene să furnizeze echipajului de zbor informații cu privire la radiațiile cosmice, iar o recomandare a Comisiei internaționale privind protecția radiologică pentru publicul larg este de maximum 1 mSv pe an. În plus, multe companii aeriene nu permit gravide ca membri ai echipajelor de nave, pentru a respecta o directivă europeană. FAA are o limită recomandată de 1 mSv total pentru gravide și nu mai mare de 0,5 mSv pe lună.

Semne de avertizare privind pericolele de radiație

Nivelele periculoase ale radiațiilor ionizante sunt semnalate de semnul a trei frunze pe fond galben. Acestea sunt, de obicei, postate la limita unei zone controlate de radiații sau în orice loc unde nivelele de radiații sunt semnificativ mai mari decât fundalul datorită intervenției umane.



(Simbol de pericol pentru radiații ionizante)

Simbolul roșu de avertizare privind radiațiile ionizante (ISO 21482) a fost lansat în 2007 și este destinat surselor IAEA din categoriile 1, 2 și 3 definite ca surse periculoase capabile de deces sau vătămări grave, inclusiv surse de iradiere alimentară, aparate de teleterapie pentru tratamentul cancerului și unități de radiografie industrială. Simbolul trebuie plasat pe dispozitivul care găzduiește sursa, ca avertisment să nu se demonteze dispozitivul sau să nu se apropie de el. Nu va fi vizibilă în condiții normale de utilizare, decât dacă cineva

Încearcă să dezassembleze dispozitivul. Simbolul nu va fi localizat pe uși de acces pentru clădiri, pe ambalaje de transport sau pe containere.



(Simbolul pentru pericolul de radioactivitate ISO din 2007, destinat surselor IAEA din categoriile 1, 2 și 3 definite ca surse periculoase capabile de deces sau vătămări grave.

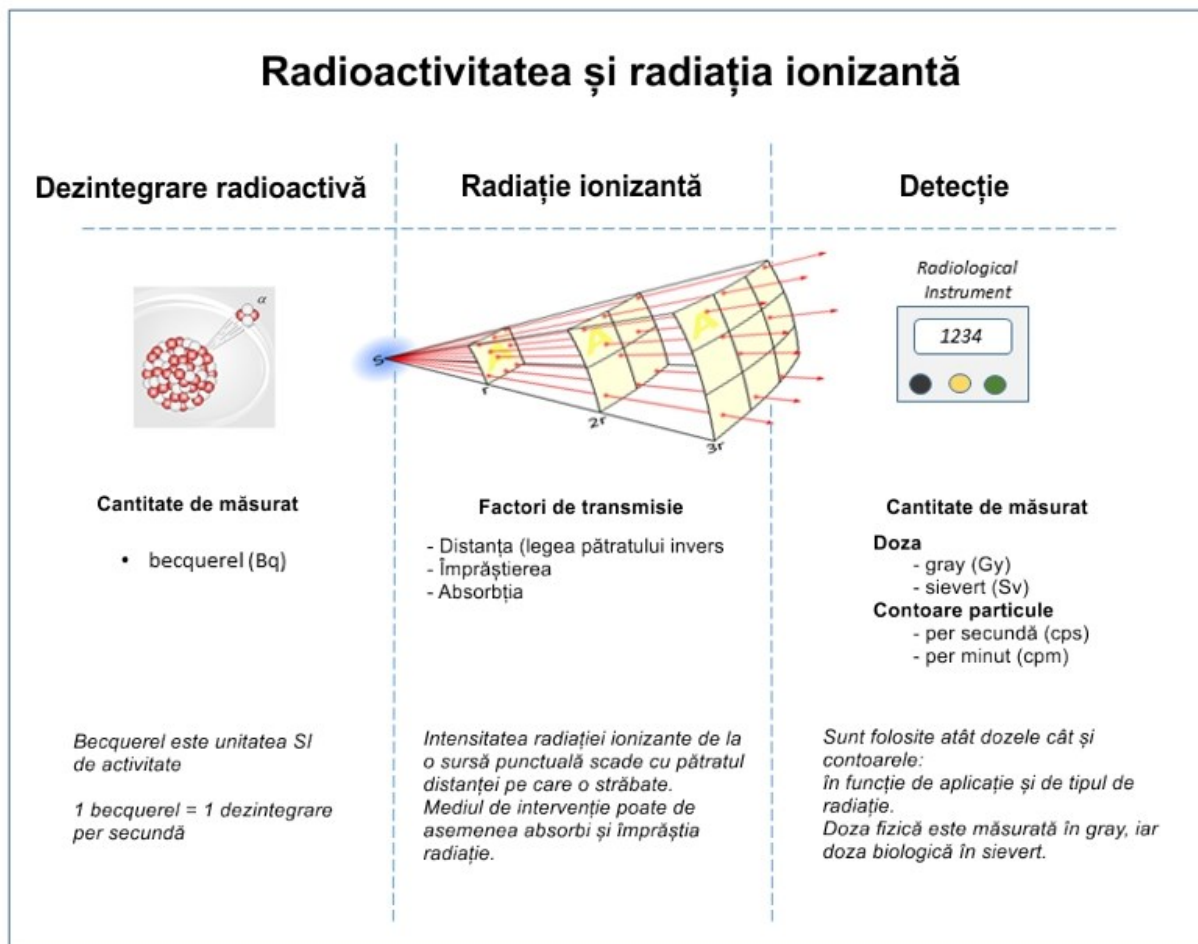
9.2.17 Dozarea radiațiilor

Măsurare

Tabelul de mai jos prezintă cantități de radiații și doze în unități SI și non-SI. Relațiile dintre cantitățile de doză ICRP sunt prezentate în diagrama însoțitoare.

- **Cantitate >>> Detector >>> Unități CGS >>> Unități SI >>> Alte unități**
- Rata de dezintegrare >>> >>> curie >>> becquerel >>>
- Flux particule >>> Contor Geiger, contor proporțional, scintilator >>> counts/cm² · second >>> counts/metre² · second >>> numărări pe minut, particule per cm² per secundă
- Fluența energetică >>> dozimetru termoluminiscent, dozimetru pentru plăci de film >>> MeV/cm² >>> joule/metre² >>>
- Energia fluxului >>> contor proporțional >>> electronvolt >>> joule >>>
- Transfer liniar de energie >>> cantitate derivată >>> MeV/cm >>> Joule/metre >>> keV/μm
- Kerma >>> camera de ionizare, detectorul semiconductor, dozimetrul cu fibre de cuarț, contorul de caderi Kearny >>> esu/cm³ >>> gray >>> roentgen
- Doză absorbită >>> calorimetru >>> rad >>> gray >>> rep

- Doză echivalentă >>> cantitate derivată >>> rem >>> sievert >>>
- Doză efectivă >>> cantitate derivată >>> rem >>> sievert >>> BRET
- Doză angajată >>> cantitate derivată >>> rem >>> sievert >>> doza echivalentă banana



(Grafic care arată relațiile dintre radioactivitate și radiațiile ionizante detectate. Sursa: Doug Sim, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Radioactivity_and_radiation.png, CC Attribution-Share Alike 3.0 Unported license, Traducere Nicolae Sfetcu)

Cuprins

Volumul 2:

8 Lumina

- 8.1 Proprietățile luminii
 - 8.1.1 Unde electromagnetice
 - 8.1.1.1 Viteza undelor electromagnetice
 - 8.1.2 Spectrul electromagnetic
 - 8.1.3 Materiale transparente
 - 8.1.4 Materiale opace (Opacitatea)
 - 8.1.5 Umbra
 - 8.1.6 Sistemul vizual uman (Ochiul)
 - 8.1.7 De ce este apusul de Soare roșu?
 - 8.1.8 De ce sunt norii colorați?
 - 8.1.9 Ce culoare are apa?
- 8.2 Culori
 - 8.2.1 Reflexia selectivă (Culoarea unui obiect)
 - 8.2.2 Transmiterea selectivă (Transparența și transluența)
 - 8.2.3 Amestecul luminii colorate (Amestecul culorilor)
 - 8.2.4 Culori complementare
 - 8.2.5 Amestecul pigmenților colorați (Pigmenți)
 - 8.2.6 De ce e cerul albastru?
- 8.3 Reflexia și refracția (Optica geometrică)
 - 8.3.1 Reflexia
 - 8.3.2 Principiul timpului cel mai scurt (Principiul lui Fermat)
 - 8.3.3 Legea reflexiei
 - 8.3.4 Oglinzi plane (Oglinzi)
 - 8.3.5 Reflexia difuză
 - 8.3.6 Refracția
 - 8.3.7 Mirajul
 - 8.3.8 Dispersia
 - 8.3.9 Curcubeul
 - 8.3.10 Reflexia internă totală
 - 8.3.11 Lentile
 - 8.3.11.1 Formarea imaginilor prin lentile
 - 8.3.11.2 Defecte ale lentilelor
 - 8.3.6 Refracția
 - 8.3.7 Mirajul
 - 8.3.8 Dispersia
 - 8.3.9 Curcubeul
 - 8.3.10 Reflexia internă totală
 - 8.3.11 Lentile
- 8.4 Undele luminoase (Optica fizică)
 - 8.4.1 Principiul Huygens–Fresnel
 - 8.4.2 Difracția luminii
 - 8.4.3 Interferența optică
 - 8.4.4 Interferența pe straturi subțiri
 - 8.4.5 Polarizarea

- 8.4.6 Vederea tridimensională (Percepția în adâncime)
- 8.4.7 Holografia
- 8.5 Emisia luminii (Surse de lumină)
- 8.5.1 Excitarea (Stări excitate)
- 8.5.2 Spectrul de emisie al luminii
- 8.5.3 Incandescența
- 8.5.4 Spectrul de absorbție (Spectroscopia de absorbție)
- 8.5.5 Fluorescența
- 8.5.6 Lămpi fluorescente
- 8.5.7 Fosforescența
- 8.5.8 LED
- 8.5.9 Lămpi cu LED
- 8.5.10 Laser
- 8.5.11 Extreme Light Infrastructure (ELI)
- 8.6 Cuanta de lumină (Fotoni)
- 8.6.1 Nașterea teoriei cuantice (Optica cuantică)
- 8.6.2 Cuantificarea și constanta lui Planck
- 8.6.3 Efectul fotoelectric
- 8.6.4 Dualitatea undă-particulă
- 8.6.5 Experimentul celor două fante
- 8.6.6 Difrakția electronilor
- 8.6.7 Principiul incertitudinii
- 8.6.8 Complementaritatea
- 9 Fizica atomică și nucleară
- 9.1 Atomul și cuanta
- 9.1.1 Descoperirea nucleului atomic
- 9.1.2 Descoperirea electronului
- 9.1.3 Spectroscopia atomică - Linii spectrale
- 9.1.4 Modelul Bohr al atomului
- 9.1.5 Mărimea relativă a atomilor (Raza atomilor)
- 9.1.6 Nivele energetice cuantificate: Undele electronilor
- 9.1.7 Mecanica cuantică
- 9.1.8 Principiul corespondenței
- 9.2 Nucleul atomic și radioactivitatea
- 9.2.1 Razele X
- 9.2.2 Radiații alfa, beta și gama
- 9.2.3 Nucleul atomic
- 9.2.4 Forțe nucleare
- 9.2.5 Izotopi
- 9.2.6 De ce sunt radioactivi atomii? (Dezintegrarea radioactivă)
- 9.2.7 Timpul de înjumătățire (Dezintegrarea radioactivă)
- 9.2.8 Detectoare de radiații (Detectoare de particule)
- 9.2.9 Transmutarea elementelor (Transmutarea nucleară)
- 9.2.10 Transmutarea naturală (Transmutarea în univers)

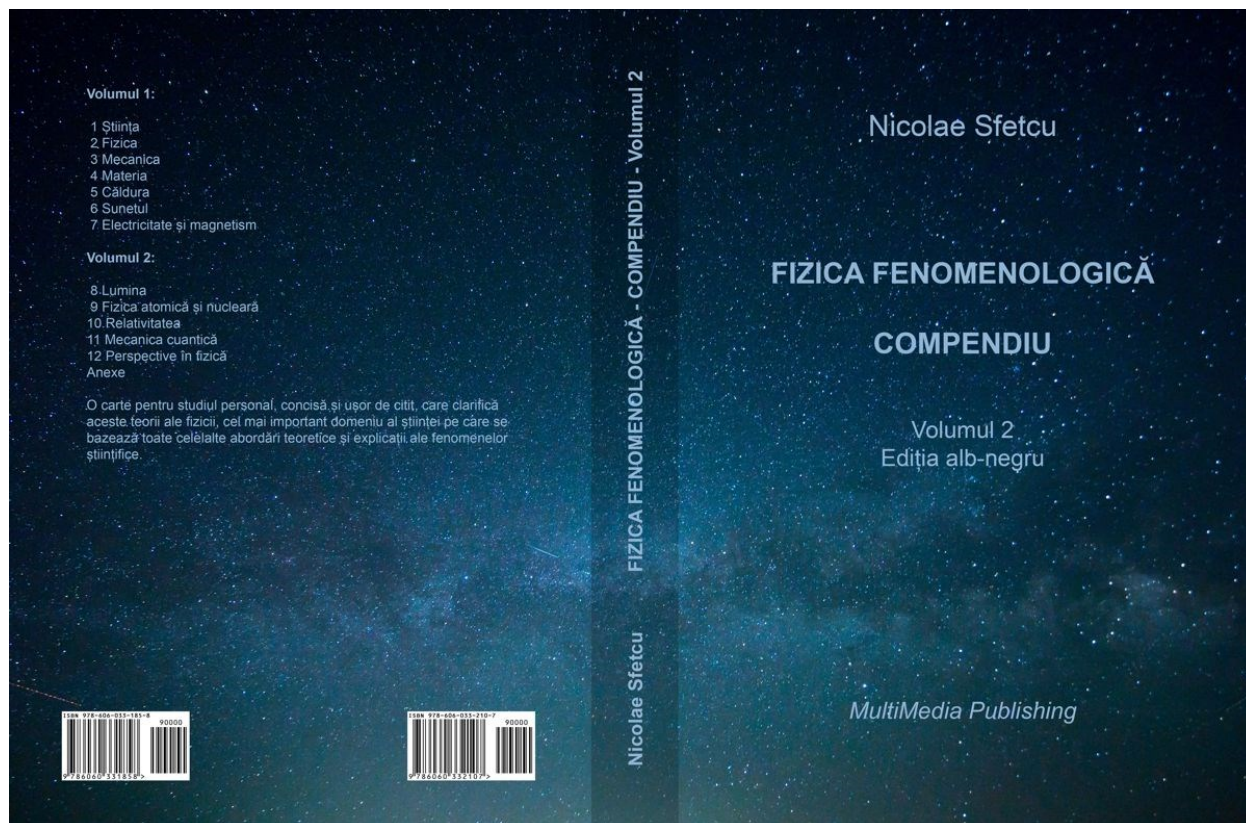
- 9.2.11 Transmutarea artificială (Transmutarea artificială a deșeurilor nucleare)
- 9.2.12 Izotopi radioactivi (Radionuclizi)
- 9.2.13 Datarea radiometrică
- 9.2.14 Datarea cu carbon (Datarea cu radiocarbon)
- 9.2.15 Datarea cu uraniu
- 9.2.16 Efectele radiațiilor asupra oamenilor
- 9.2.17 Dozarea radiațiilor
- 9.3 Fizica particulelor
 - 9.3.1 Particule elementare (Modelul Standard)
 - 9.3.2 Extensii ale Modelului Standard
 - 9.3.3 Protoni
 - 9.3.4 Neutroni
 - 9.3.5 Electroni
 - 9.3.6 Cuarci
 - 9.3.7 Fotoni
 - 9.3.8 Gluoni
 - 9.3.9 Bosoni W și Z
 - 9.3.10 Neutrini
 - 9.3.11 Fizica acceleratorilor
- 9.4 Fisiunea și fuziunea nucleară
 - 9.4.1 Fisiunea nucleară
 - 9.4.2 Reactoare de fisiune nucleară (Reactoare nucleare)
 - 9.4.3 Reactoare nucleare cu apă grea presurizată - CANDU
 - Reactorul CANDU
 - Centrala Nucleară de la Cernavodă
 - 9.4.4 Plutoniu
 - 9.4.5 Reactoare nucleare reproducătoare
 - 9.4.6 Energia de fisiune (Energia nucleară)
 - Centrale nucleare
 - Energia nucleară în România
 - 9.4.7 Echivalența masă-energie în reacțiile nucleare
 - 9.4.8 Fuziunea nucleară
 - 9.4.9 Controlul fuziunii (Energia de fuziune)
- 10 Relativitatea
 - 10.1 Teoria specială a relativității
 - 10.1.1 Cadre de referință, coordonate și transformarea Lorentz
 - 10.1.2 Experimentul Michelson-Morley pentru confirmarea eterului
 - 10.1.3 Postulatele teoriei speciale a relativității
 - 10.1.4 Simultaneitatea (Relativitatea simultaneității)
 - 10.1.5 Spațiu-timp
 - 10.1.6 Dilatarea timpului
 - 10.1.7 Paradoxul gemenilor
 - 10.1.8 Însurubarea vitezelor
 - 10.1.9 Călătoriile în cosmos

- 10.1.10 Contractia lungimii
- 10.1.11 Impulsul relativist (Cvadari-impuls)
- 10.1.12 Echivalența masă-energie ($E = mc^2$)
- 10.1.13 Masa în relativitatea specială
- 10.1.14 Cauzalitatea și imposibilitatea depășirii vitezei luminii
- 10.1.15 Principiul corespondenței
- 10.2 Teoria relativității generale
- Ecuațiile lui Einstein
- 10.2.1 Principiul echivalenței
- 10.2.2 Dilatarea gravitațională a timpului
- 10.2.3 Curbarea luminii de către gravitație (Lentile gravitaționale)
- 10.2.4 Desplasarea gravitațională spre roșu
- 10.2.5 Mișcarea lui Mercur (Precesia periheliului lui Mercur)
- 10.2.6 Gravitația, spațiul și o nouă geometrie (Geometria și gravitația)
- 10.2.7 Unde gravitaționale
- 10.2.8 Gravitația lui Newton și cea a lui Einstein
- 11 Mecanica cuantică
- 11.1 Mecanica cuantică
- 11.1.1 Radiația corpului negru și cuantificarea lui Planck
- 11.1.2 Unde materiale - Relațiile de Broglie
- 11.2 Dualitatea undă-particulă
- 11.2.1 Microscopul lui Heisenberg
- 11.2.2 Disputa Einstein-Bohr
- 11.2.3 Experimentul alegerii întârziate
- 11.3 Ecuația de undă Schrödinger
- 11.3.1 Stări cuantice
- 11.3.2 Funcția de undă
- 11.3.3 Colapsul funcției de undă
- 11.3.4 Interpretarea probabilităților (Problema măsurătorilor)
- 11.3.5 Formularea spațiului de fază
- 11.4 Pachete de unde
- 11.4.1 Aplicații ale relației de inertitudine
- 11.4.1.1 Relația de incertitudine timp-energie
- 11.4.1.2 Paradoxurile lui Zenon în mecanica cuantică
- 11.4.2 Funcții proprii
- 11.4.3 Operatorul impuls
- 11.4.4 Forma generală a ecuației Schrodinger: Operatorul hamiltonian
- 11.4.5 Postulatele mecanicii cuantice și semnificația măsurătorilor
- 11.5 Soluții ale ecuației Schrödinger
- 11.5.1 Particulă într-o cutie unidimensională
- 11.5.2 Barieră rectangulară de potențial
- 11.5.3 Puț de potențial finit
- 11.5.4 Paritatea
- 11.5.5 Oscilatorul armonic unidimensional

- - 11.5.6 Operatorul momentului unghiular
- - 11.5.6.1 Relația de incertitudine dintre momentul unghiular și unghiul de rotație
- - 11.5.7 Particule identice
- - 11.5.8 Potențialul central (Potențialul cuantic)
- - 11.5.9 Puțul de potențial
- 11.6 Paradoxuri și interpretări ale mecanicii cuantice
- - 11.6.1 Inseparabilitatea cuantică
- - 11.6.2 Paradoxurile mecanicii cuantice
- - 11.6.3 Paradoxul EPR
- - 11.6.4 Interpretarea Copenhaga
- - 11.6.5 Variabile ascunse
- - 11.6.6 Paradoxul pisicii lui Schrödinger
- - 11.6.7 Interpretarea ansamblului (statistică)
- - 11.6.8 Interpretarea multiplelor lumi
- 11.7 Stările cuantice conform lui Dirac
- - 11.7.1 Ecuația de undă Dirac
- - 11.7.2 Notăția bra-ket în mecanica cuantică
- 11.8 Corespondența cu mecanica clasică
- - 11.8.1 Ecuația de mișcare a lui Heisenberg (Reprezentările Heisenberg, Schrödinger și Dirac)
- - 11.8.2 Teorema Ehrenfest și limita clasică a mecanicii cuantice
- - 11.8.3 Aproximarea WKB
- - 11.8.4 Teorema adiabatică
- 11.9 Momentul unghiular și spinul
- - 11.9.1 Momentul unghiular
- - 11.9.2 Spin și matrice
- - 11.9.3 Mecanica matriceală
- - 11.9.3.1 Particule cu spin în câmp magnetic: Rezonanța magnetică nucleară
- - 11.9.3.2 Precesia spinului în câmp magnetic (Rezonanța paramagnetică a electronilor)
- - 11.9.4 Cuplarea momentelor unghiulare
- - 11.9.5 Principiul de excluziune Pauli
- - 11.9.6 Starea singlet și paradoxul EPR
- - 11.9.7 Teorem Bell
- - 11.9.8 Inegalitatea Bell
- 11.10 Materia cuantică
- - 11.10.1 Atomul de hidrogen
- - 11.10.1.1 Atomul de hidrogen în interpretarea de la Copenhaga
- - 11.10.2 Structura fină a hidrogenului
- - 11.10.3 Interacția spin-orbită
- - 11.10.4 Explicația cuantică a tabelului periodic al elementelor
- - 11.10.5 Structura moleculelor
- - 11.10.6 Condensat Bose-Einstein și condensat fermionic
- - 11.10.7 Gazul Fermi și gazul Bose
- 11.11 Perturbații

- - 11.11.1 Metode de aproximare pentru stări staționare
- - 11.11.2 Efectul Stark
- - 11.11.3 Teoria perturbației dependente de timp
- - 11.11.4 Perturbația periodică: Regula de aur a lui Fermi
- - 11.11.5 Teoria dispersiei. Aproximarea Born.
- - 11.11.6 Amplitudinea de împrăștiere
- 11.12 Teoria cuantică a câmpului
- - 11.12.1 Electrodinamica cuantică
- - 11.12.2 Efectul Zeeman
- - 11.12.3 Efectul Aharonov-Bohm
- - 11.12.4 Cuantizarea fluxului magnetic
- - 11.12.5 Filosofia macrealismului și SQUID
- 11.13 Modelul standard
- - 11.13.1 Cromodinamica cuantică
- 11.14 Gravitația cuantică
- - 11.14.1 Gravitația cuantică în bucle
- - 11.14.2 Teoria corzilor
- - 11.14.3 Teoria finală
- 11.15 Filosofia și interpretările mecanicii cuantice
- - 11.15.1 Interpretări ale mecanicii cuantice
- - 11.15.2 Măsurători în mecanica cuantică
- - 11.15.3 Matricea de densitate
- - 11.15.4 Interpretarea Von Neumann–Wigner
- 12 Perspective în fizică
- 12.1 Probleme rezolvate recent în fizică
- 12.2 Probleme nerezolvate în fizică
- Anexe
- Anexa A1 Sisteme de măsură
- Anexa A2 Vectori

Cartea



Descoperă universul fizicii printr-o perspectivă fenomenologică captivantă!

- **Autor:** Nicolae Sfetcu
- **Editura:** MultiMedia Publishing, 2019
- **ISBN:** 978-606-033-210-7 (ISBN general: 978-606-033-185-8)
- **DOI:** 10.58679/MM96651

„Fizica fenomenologică - Compendiu, Volumul 2” este o invitație în lumea fascinantă a științei, adresată atât pasionaților de fizică, cât și celor care vor să exploreze concepte fundamentale și fenomene complexe într-un mod accesibil. Scrisă de Nicolae Sfetcu și publicată de MultiMedia Publishing, această lucrare combină precizia științifică cu o abordare fenomenologică unică, oferind o înțelegere aprofundată a celor mai importante subiecte din fizica modernă.

De ce să alegi această carte?

- **Ghid complet în fizică:** Volumul acesta al cărții acoperă o gamă largă de subiecte, de la optica, fizica atomică și nucleară, până la mecanica cuantică și teoria relativității, fiind ideală atât pentru studiu individual, cât și pentru suport academic.

- **Abordare interdisciplinară:** Explorează legătura dintre fizică și alte domenii, cum ar fi filosofia științei, tehnologia și arta, oferind o imagine de ansamblu integrativă.
- **Stil clar și accesibil:** Nicolae Sfetcu folosește un limbaj clar și exemple practice pentru a explica conceptele complexe, făcând știința mai accesibilă pentru toți.
- **Structură logică:** Conținutul este organizat astfel încât cititorii să poată naviga cu ușurință prin conceptele și temele prezentate.

Conținut captivant

- **Optică și lumină:** Descoperă proprietățile luminii, mecanismele reflexiei și refracției și minunile fenomenelor optice precum curcubeul și holografia.
- **Fizica atomică și nucleară:** Explorează structura atomului, radioactivitatea și aplicațiile practice ale fizicii nucleare.
- **Mecanica cuantică:** Plonjează în lumea particulelor și undelor, de la principiul incertitudinii până la dualitatea undă-particulă.
- **Relativitatea:** Înțelege transformările spațiu-timp și implicațiile profunde ale teoriei relativității generale și speciale.

Pentru cine este această carte?

- Elevi, studenți și profesori care caută un compendiu bine documentat pentru studiu și predare.
- Profesioniști și cercetători care doresc să-și îmbogățească cunoștințele teoretice și aplicative.
- Orice cititor pasionat de știință, curios să descopere legile care guvernează universul.

Transformă-ți curiozitatea în cunoaștere și apropie-te de misterele universului cu ajutorul acestei lucrări remarcabile. „**Fizica fenomenologică - Compendiu, Volumul 2**” este mai mult decât o carte; este o experiență de învățare care va schimba modul în care privești știința.

Achiziționează acum și explorează universul fizicii!

Un compendiu care se dorește a fi exhaustiv pentru domeniul fizicii, cu accent pe explicarea fenomenelor și aplicațiilor practice. O carte pentru studiul personal, concisă și ușor de citit, care clarifică aceste teorii ale fizicii, cel mai important domeniu al științei pe care se bazează toate celelalte abordări teoretice și explicații ale fenomenelor științifice.

"Lumina" este o introducere în fenomenologia opticii geometrice, fizice și cuantice, și a teoriei culorilor în conexiune cu teoriile fundamentale ale luminii. Despre proprietățile luminii, absorbția și și emisia luminii.

"Fizica atomică și nucleară" abordează, pe lângă cele două enomene din titlu, radioactivitatea, fizica particulelor, fisiunea, fuziunea și energia nucleară. Conținutul oferă o perspectivă modernă a domeniului, simultan cu o retrospectivă istorică a dezvoltării sale cu accent pe explicațiile fizice ale fenomenelor, ocurența naturală, măsurare, și utilizarea practică a fenomenelor respective.

"Relativitatea" include cele două mari teorii dezvoltate de Albert Einstein, teoria relativității speciale și relativitatea generală, cu ecuațiile lui Einstein, unde "spațiu-timpul spune materiei cum să se miște, iar materia spune spațiu-timpului cum să se curbeze."

"Mecanica cuantică" este o introducere la nivel fenomenologic, cu un aparat matematic minimal, în mecanica cuantică, un ghid pentru cine dorește să înțeleagă cea mai modernă, mai complexă și mai neconformă disciplină fizică, un domeniu care a schimbat fundamental percepțiile oamenilor de știință despre Lume.

Ultimele două capitole prezintă cele mai noi descoperiri științifice din domeniul fizicii și problemele rămase încă fără răspuns ("Perspective"), și o introducere în sisteme de măsurare și lucrul cu vectori ("Anexe")

Despre autor

Nicolae Sfetcu

Asociat și manager MultiMedia SRL și Editura MultiMedia Publishing.

Partener cu MultiMedia în mai multe proiecte de cercetare-dezvoltare la nivel național și european

Coordonator de proiect European Teleworking Development Romania (ETD)

Membru al Clubului Rotary București Atheneum

Cofondator și fost președinte al Filialei Mehedinți al Asociației Române pentru Industrie Electronica și Software Oltenia

Inițiator, cofondator și președinte al Asociației Române pentru Telelucru și Teleactivități

Membru al Internet Society

Cofondator și fost președinte al Filialei Mehedinți a Asociației Generale a Inginerilor din România

Inginer fizician - Licențiat în fizică, specialitatea Fizică nucleară. Master în Filosofie.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0162-9973>

Contact

Email: nicolae@sfetcu.com

Facebook/Messenger: <https://www.facebook.com/nicolae.sfetcu>

Twitter: <http://twitter.com/nicolae>

LinkedIn: <http://www.linkedin.com/in/nicolaesfetcu>

YouTube: <https://www.youtube.com/c/NicolaeSfetcu>

Editura

MultiMedia Publishing

*web design, comerț electronic, alte aplicații web * internet marketing, seo, publicitate online, branding * localizare software, traduceri engleză și franceză * articole, tehnoredactare computerizată, secretariat * prezentare powerpoint, word, pdf, editare imagini, audio, video * conversie, editare și publicare cărți tipărite și electronice, isbn*

Tel./ WhatsApp: 0040 745 526 896

Email: office@multimedia.com.ro

MultiMedia: <http://www.multimedia.com.ro/>

Online Media: <https://www.telework.ro/>

Facebook: <https://www.facebook.com/multimedia.srl/>

Twitter: <http://twitter.com/multimedia>

LinkedIn: <https://www.linkedin.com/company/multimedia-srl/>