

**Nicolae Ion POMETESCU**



**Nicolae Ion POMETESCU**

**Introducere în fizica nucleară**



**EDITURA UNIVERSITARIA**  
**Craiova, 2019**

**Referenți științifici:**

**Prof.univ.dr. Eugen-Mihăiță CIOROIANU**

**Prof.univ.dr. Gyorgy STEINBRECHER**

Copyright © 2019 Editura Universitaria

Toate drepturile sunt rezervate Editurii Universitaria.

**Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României**

**POMETESCU, NICOLAE ION**

**Introducere în fizica nucleară / Nicolae Pometescu. - Craiova : Universitaria, 2019**

Conține bibliografie

ISBN 978-606-14-1487-1

539.1

© 2019 by Editura Universitaria

Această carte este protejată prin copyright. Reproducerea integrală sau parțială, multiplicarea prin orice mijloace și sub orice formă, cum ar fi xeroxarea, scanarea, transpunerea în format electronic sau audio, punerea la dispoziția publică, inclusiv prin internet sau prin rețelele de calculatoare, stocarea permanentă sau temporară pe dispozitive sau sisteme cu posibilitatea recuperării informațiilor, cu scop comercial sau gratuit, precum și alte fapte similare săvârșite fără permisiunea scrisă a deținătorului copyrightului reprezintă o încălcare a legislației cu privire la protecția proprietății intelectuale și se pedepsesc penal și/sau civil în conformitate cu legile în vigoare.

# Capitolul 1

## Introducere

Obiectivul fizicii nucleare este în principal studiul nucleelor atomice, a căror varietate este foarte mare: de la hidrogen  $H(Z = 1)$  la uraniu  $U(Z = 92)$  sunt aproximativ 1700 de specii care apar în mod natural pe Pământ. Pe lângă acestea, un mare număr de alte specii sunt create în laborator și în interiorul stelelor. Dintre cele patru interacții fundamentale cunoscute, *interacția tare* este principala forță responsabilă pentru proprietățile nucleare, dar atât *interacția slabă* cât și *interacția electromagnetică* joacă de asemenea un rol important. Din aceste motive, fizica nucleară servește ca o platformă importantă unde proprietățile de bază ale materiei subatomice pot fi examinate permițând studiul legilor fundamentale ale fizicii dintr-o nouă perspectivă. Ele stau la baza modelelor cosmologice de evoluție a Universului și în acest sens recomand celebra carte "*The first three minutes*" [1] a lui Steven Weinberg (laureat al premiului Nobel pentru fizică în 1979) publicată și în limba română, [2].

Procesele nucleare joacă un rol fundamental în fizică și studiul lor ne permite înțelegerea structurii subatomice, a transformării și creerii elementelor chimice. Studiul acestora nu se restrânge doar la fizica nucleară, și din această perspectivă există o suprapunere cu alte domenii de studiu: fizica particulelor elementare, astrofizica, medicina nucleară, energetica nucleară sunt doar câteva din domeniile conexe. Astfel, studiul plasmii quarc-gluon în ciocnirile relativiste ale ionilor grei implică atât fizica nucleară cât și fizica particulelor elementare. În astrofizică, evoluția stelară și nucleosinteza sunt legate intim de ratele reacțiilor nucleare de joasă energie. Utilizarea radioterapiei în tratarea diferitelor tipuri de cancer, precum și a rezonanței magnetice nucleare (RMN) în medicină și industrie este deja consacrată. Obținerea energiei în reactoarele termonucleare de fisiune reprezintă o contribuție importantă la energetica actuală, iar cercetările de construire a unui reactor bazat pe fuziunea nucleară ocupă un loc prioritar în programele de cercetare la nivel mondial. Toate aceste aplicații ale proprietăților nucleare implică cunoștințe de fizică nucleară și fizicienii nucleariști sunt profund implicați în dezvoltarea acestor domenii.

Scopul primar al fizicii nucleare este de a înțelege forța dintre nucleoni, structura nucleelor și cum interacționează nucleele între ele și cu alte particule subatomice. Aceste trei probleme, care sunt legate între ele, constituie preocuparea de bază a acestei cărți. De asemenea, vor fi prezentate pe scurt câteva din aplicațiile fizicii nucleare.

## 1.1 Termeni și unități de măsură în fizica nucleară

Referirea la o anumită specie nucleară se face prin notația  ${}^A_ZX_N$  ce spune că nucleul X are A nucleoni dintre care Z sunt protoni și N sunt neutroni. Deoarece numărul Z de protoni (egal cu numărul de electroni ai atomului respectiv) indică despre care anume element chimic X este vorba, odată ce scriem explicit simbolul elementului chimic putem renunța la scrierea explicită a numărului Z. De asemenea, știind că  $N = A - Z$ , putem renunța și la scrierea explicită a numărului N de neutroni. De exemplu, notația simplificată pentru  ${}^{12}_6\text{C}_6$  va fi  ${}^{12}\text{C}$  (sau C-12), știind că pentru Carbon  $Z = 6$ .

Nucleele care au același număr Z dar număr N diferit se numesc *izotopi*. De exemplu,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{13}\text{C}$ ,  ${}^{14}\text{C}$  notează 3 izotopi ai Carbonului din care primii doi sunt stabili iar al treilea este instabil. Toți acești izotopi au  $Z = 6$  dar N are respectiv valorile 6, 7, 8.

Nucleele care au același N dar Z diferit se numesc *izotoni*. De exemplu,  ${}^{12}_6\text{C}_6$  și  ${}^{13}_7\text{N}_6$  sunt izotoni: pentru ambii  $N = 6$  dar pentru carbon  $Z({}^{12}\text{C}) = 6$  iar pentru azot  $Z({}^{13}\text{N}) = 7$ .

Nucleele care au același număr A de nucleoni dar numere N și Z diferite se numesc *izobari*. De exemplu  ${}^{40}_{18}\text{Ar}_{22}$ ,  ${}^{40}_{19}\text{K}_{21}$  și  ${}^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$  sunt izobari: ei au același A dar N și Z diferiți.

În nucleele atomice, avem de-a face cu scale de lungime extrem de mici și scale de timp care sunt extrem de scurte, în comparație cu măsurile standard din viața de zi cu zi. În locul metrului, o unitate de lungime mai potrivită este femtometrul, abreviat ca fm,

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

În fizica nucleară valorile de timp pe care le întâlnim se întind pe o scală foarte largă: de la intervale foarte scurte,  $10^{-23}$  secunde (specifice interacției tari) la intervale foarte lungi, de ordinul a  $10^9$  ani sau mai mult, pentru timpul de viață al unor elemente radioactive.

Valorile masei unui proton  $M_p$ , și respectiv a unui neutron, exprimate în kg sunt, [3],

$$M_p = 1.672621898(21) \times 10^{-27} \text{ kg} \quad , \quad M_n = 1.674927471(21) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Remarcăm că neutronii au masa mai mare decât protonii cu aproximativ 0,14%. O unitate convenabilă pentru masă este unitatea atomică de masă, abreviată ca *u* (sau *uam*), și definită prin

$$1u = \frac{\text{masa atomului } {}^{12}\text{C}}{12} = \frac{1 \text{ kg}}{N_A} = 1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg} = 931.49432(28) \text{ MeV}/c^2$$

unde  $N_A = 6.0221367(36) \times 10^{26} \text{ (kg mol)}^{-1}$  este numărul lui Avogadro, iar valorile din paranteză indică incertitudinea în ultimele zecimale. În termenii *uam*, masele protonului liber, și respectiv neutronului liber, sunt [3],

$$M_p = 1.007276466879(91)u \quad \quad M_n = 1.00866491588(49)u$$

Prin definiție, masa atomului de  ${}^{12}\text{C}$  este exact 12 *u*.

Unitatea de energie utilizată frecvent în fizica nucleară este MeV (mega-electron-volt) cu

$$1\text{MeV} = 1.60217733 \times 10^{-13}\text{Joule}$$

De exemplu, în reacția de fisiune nucleară indusă a unui singur nucleu de uraniu  $^{235}\text{U}$ , energia eliberată este de aproximativ 180 MeV. Pentru a ne da seama cât de mare este această energie să reamintim că energia cinetică medie a unei molecule de gaz la temperatura camerei este 0,026 eV, iar energia necesară ionizării unui atom de hidrogen aflat în starea fundamentală este 13,6 eV. Tocmai această extraordinar de mare energie ce poate fi eliberată în procesele nucleare face ca fizica nucleară să fie atractivă energetic și militar.

În locul masei, uneori este preferabil să se lucreze în termenii echivalentului energiei masei de repaus. Masa unui neutron în repaus exprimată în  $\text{MeV}/c^2$  este, [3],

$$M_n = 939.5654133(58) \text{ MeV}/c^2$$

Pentru unele dintre evenimentele nucleare ce implică energii mai mari, este mai bine să se folosească în schimb GeV (giga-electron-voltul)

$$1\text{GeV} = 1000 \text{ MeV} = 10^9\text{eV}$$

sau TeV (tera-electron-voltul)

$$1\text{TeV} = 1000 \text{ GeV} = 10^{12}\text{eV}$$

Spre exemplu, energia masei de repaus a unui neutron se poate exprima aproximativ ca

$$M_n c^2 = 0.939 \text{ GeV}$$

Acceleratorul de hadroni (LHC) de la CERN, care a debutat la 10 septembrie 2008, a fost proiectat să funcționeze la o energie maximă de ciocnire de 14 TeV.

Uneori energia particulelor este exprimată în Kelvin (unitate pentru temperatură), energia fiind legată de temperatură prin relația  $E = k_B T$ , unde este constanta Boltzmann. Prin urmare, între eV și K există relația

$$1 \text{ eV} \simeq 11604,525 \text{ K}$$

respectiv

$$1 \text{ MeV} \simeq 11,6 \times 10^9 \text{ K}$$

## 1.2 Energia și lungimea de undă de Broglie

În studierea nucleelor atomice se recurge adesea la împrăștierea (difuzia) unei particule pe o altă particulă. Acest lucru provine din necesitatea de a examina obiecte cu dimensiuni foarte mici, de ordinul femtometrilor.

O estimare a energiei necesare într-un experiment de împrăștiere pentru a ajunge la o scară de lungime dată poate fi obținută prin examinarea lungimii de undă de Broglie corespunzătoare:

$$\lambda = \frac{hc}{E} \tag{1.1}$$

Tabel 1.1:

Energie (MeV)	Lungimea de undă de Broglie (fm)		
	Foton	Electron	Proton
0,1	$1,2 \times 10^4$	3701	90
0,5	$2,5 \times 10^3$	1421	40
1	$1,2 \times 10^3$	872	29
10	$1,2 \times 10^2$	118	9
100	$1,2 \times 10$	12	2,80
1.000	1,2	1,20	0,73
10.000	$1,2 \times 10^{-1}$	0,12	0,11

unde  $h$  este constanta lui Planck iar  $c$  este viteza luminii în vid.

La o energie de aproximativ 12 eV, lungimea de undă a luminii vizibile este de ordinul  $10^{-7}$  m care este mult mai mare decât dimensiunea nucleului. Din relația (1.1) rezultă că pentru a obține lungimi de undă mult mai scurte decât lumina vizibilă este necesară o energie mult mai mare decât cea a unui foton din spectrul vizibil. Tabelul 1.1 listează valorile energiilor tipice pentru fotoni, electroni și protoni folosite în experimentele nucleare.

### 1.3 Structura subatomică a materiei

Care este structura materiei este una din întrebările fundamentale la care filozofii și oamenii de știință au încercat să răspundă. Răspunsul la această întrebare a depins foarte mult de scala de energie la care era analizată întrebarea. Astfel, la nivelul reacțiilor chimice unde scala de energie este sub 1eV, *atomul* este cea mai mică unitate constituantă care are proprietățile unui element chimic. La începutul secolului XIX atomul era considerat în modelul Thomson ca fiind format dintr-o distribuție uniformă de sarcină pozitivă în care se aflau distribuți electronii. Modelul lui Thomson a fost numit plastic și sugestiv "budincă cu stafide", în care electronii erau în rolul "stafidelor" ce se găseau în interiorul distribuției de sarcină pozitivă, adică al "budincii".

Existența *nucleului* ca parte centrală mică a unui atom a fost prima dată propusă de Rutherford în 1911 ca urmare a rezultatelor experimentului realizat de Hans Geiger și Ernest Marsden, [6]. Sub directă îndrumare a lui Rutherford, Geiger și Marsden au efectuat între 1908 și 1913 în laboratoarele universității din Manchester experiențe în care un fascicul de particule alpha era trimis asupra unui strat foarte subțire dintr-un element greu, vezi figura 1.1. În unul din experimentele cele mai sugestive ei au folosit o foiță de Au ( $Z = 79$ ) iar ca sursă de particule alpha au utilizat Radium.

Determinând numărul de particule alpha deviate sub unghiuri  $\theta$  cuprinse între  $5^\circ$  și  $150^\circ$  au fost observate particule alpha deviate chiar și la unghiuri foarte mari. Astfel, într-unul din experimente efectuate pe o foiță de Au cu grosimea echivalentă de 1 mm aer, din aproximativ 60.000 scintilații totale observate, 33 dintre ele erau la  $150^\circ$  față de direcția fascicului incident de particule  $\alpha$ , [6]. Comentând rezultatul experimentului prin prisma modelului atomic Thomson cunoscut la acea vreme, Rutherford spunea: "*A fost cel mai incredibil eveniment din viața mea. Era la fel de incredibil ca și cel*



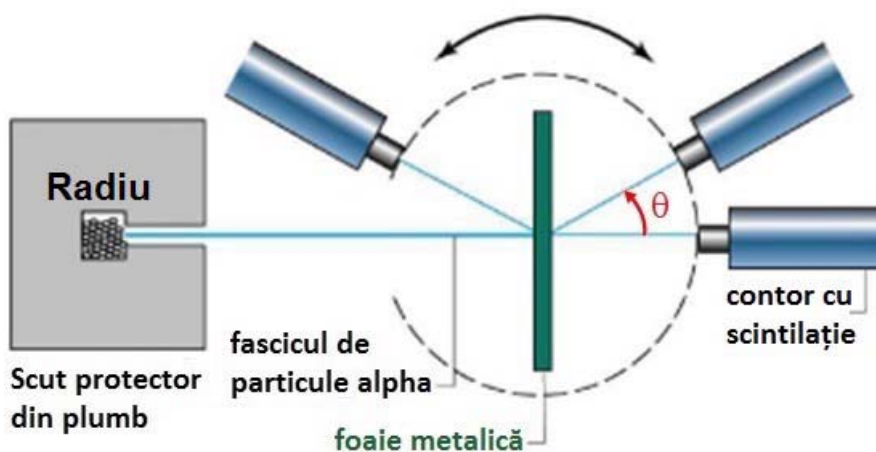


Figura 1.1: Schița montajului experimental de împrăștiere a particulelor  $\alpha$  pe o foiță metalică.

*în care ai trage un glonț de 15-inch într-o foaie de hârtie și glonțul s-ar întoarce și te-ar lovi."*

Rezultatul experimentului spunea în esență că intensitatea câmpului electric creat de sarcina pozitivă la suprafața sa era mult mai mare decât rezulta din modelul Thomson. Prin urmare raza distribuției de sarcină pozitivă trebuia să fie mult mai mică decât raza atomică. Mai târziu, în 1920, razele câtorva nuclee grele au fost măsurate de Chadwick și s-a găsit a fi de ordinul  $10^{-14}$  m, mult mai mici decât  $10^{-10}$  m, ordinul de mărime al razei atomice. Pentru a căpăta o intuiție a cât de "gol" este un atom, să ne imaginăm în jurul nostru un cerc cu raza de 1m ca fiind limita suprafeței nucleului, și un cerc cu raza de 10 km în jurul nostru ca fiind "orbita" electronică; spațiul dintre nucleu și orbita electronică fiind gol. (Acest model este desigur foarte simplist, dar el vă dă o intuiție asupra cât de comprimată este materia nucleară față de materia obișnuită constituită din atomi.)

Să vedem care este energia "proiectilelor" la care are loc "sondarea" atomilor din foița metalică în experimentul lui Geiger și Marsden menționat mai sus. Izotopul de radium Ra-226 (izotopul comun) se dezintegrează  $\alpha$  în radon (Rn-219) cu un timp de înjumătățire de 1602 ani iar particulele  $\alpha$  emise au o energie de 4.87 MeV, [7]. Așadar structura "planetară" a atomului propusă de Rutherford (cu un nucleu tare în centrul atomului) a fost vizibilă la energii de ordinul 1 MeV, adică mult mai mari decât cele implicate în reacțiile chimice.

Experiențele de difuzie a diferite particule (electroni, protoni) cu energii din ce în ce mai mari au permis observarea și mai detaliată a structurii nucleelor. Blocurile constitutive ale nucleelor sunt *neutronii* și *protonii*, două aspecte, sau stări cuantice, ale aceleiași particule, *nucleonul*. Deoarece un neutron nu este purtător de sarcină electrică netă și este instabil ca particulă izolată, nu a fost descoperit decât abia în 1932 de Chadwick cu contribuția lui Irene Joliot-Curie și Frédéric Joliot-Curie, [8]. Singurele particule cu sarcină electrică în interiorul nucleului sunt protonii, fiecare

din ei având o sarcină pozitivă elementară (adică de aceeași mărime cu cea a unui electron dar opusă ca semn).

## 1.4 Structura nucleonilor

Toate nucleele sunt alcătuite din *nucleoni* aflați în una din cele două stări: cea de *neutron* sau cea de *proton*. Totuși neutronii și protonii nu sunt particule elementare, ci sunt compuși din *quarci* (sau *quarcuri*). Studiul quarcilor și interacția dintre ei este o parte a subiectului mai larg al cromodinamicii cuantice (QCD), studiu care depășește obiectul prezentei lucrări. Fără a intra în detalii, vom încerca totuși aici o scurtă introducere a anumitor aspecte legate de quarcuri și leptoni, esențiale pentru fizica nucleară.

### 1.4.1 Quarcuri și leptoni

Căutarea blocurilor fundamentale a întregii materii din univers a fost totdeauna un subiect central al fizicii. Pe măsură ce înțelegerea noastră a legilor fizicii se îmbunătățește, se modifică și viziunea noastră despre care sunt particulele elementare (particule care nu pot fi constituite din altele).

În prezent, viziunea acceptată este că întreaga materie este constituită din două tipuri fundamentale de fermioni: *quarcuri* (numiți uneori *quarci*) și *leptoni*. La acestea se adaugă *fotonii* (particule ce mediază interacția electromagnetică), *bosonii*  $W^\pm$  și  $Z^0$  (particule ce mediază interacția slabă), *gluonii* (particule ce mediază interacția tare) și *gravitonii* (particule ce mediază interacția gravitațională).

### Quarcuri

Existența quarcurilor a fost postulată de M. Gel-Mann în 1964. Quarcii sunt blocurile constitutive de bază ale *hadronilor* (particule formate din doi sau mai mulți quarci ținuți laolaltă prin interacția tare) și principalii purtători de masă. Sunt două clase principale de hadroni: *barionii* (cu valori de spin semi-întreg) și *mezonii* (cu valori de spin întreg). De exemplu, protonii și neutronii sunt barioni, iar pionii sunt mezoani.

În fizica nucleară suntem interesați în special de cei mai ușori membri ai familiei hadronice: *nucleonii* (din care sunt făcute toate nucleele) și *pionii* (care constituie principalii purtători ai forței nucleare). Sunt șase tipuri diferite de *arome* (*flavors*) a quarcurilor:  $u$  (up),  $d$  (down),  $c$  (charm),  $s$  (strange),  $t$  (top) și  $b$  (bottom). Aceste șase particule pot fi aranjate corespunzător masei lor în trei perechi, cu un membru al fiecărei perechi având o sarcină  $2e/3$  și cealaltă  $-e/3$  (cum este arătat în tabelul de mai jos), iar antiquarcurile au sarcinile electrice opuse.

quarcuri			
$Q/e = \frac{2}{3}$	$u$	$c$	$t$
$Q/e = -\frac{1}{3}$	$d$	$s$	$b$

Masele lor variază de la aproximativ  $5 \text{ MeV}/c^2$  pentru cei mai ușori quarci ( $u$ ), până la aproximativ  $171,2 \text{ GeV}/c^2$  pentru cel mai greu quarc ( $t$ ), conform valorilor raportate de [4].