

1

Metode de analiză bazate pe detecția radiațiilor X caracteristice

1.1 Radiațiile X caracteristice

1.1.1 Nomenclatura radiațiilor X și electronilor Auger

Ionizarea păturilor interne ale atomului (K, L, M) este urmată de rearanjarea electronilor din păturile exterioare care ocupă vacanțele create [1]. Rearanjarea electronilor conduce la emisia de **radiații X**, proces *radiativ*, dominant în elementele medii și grele, sau

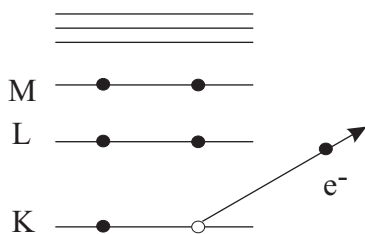
electroni Auger, proces *neradiativ*, dominant în atomii usori.

Spectrele de raze X ca și spectrele electronilor Auger sunt spectre de linii, cu valori ale energiei egală cu diferența între energiile de legătura din atom. În Figura ?? sunt prezentate schematic modurile de umplere a unei vacanțe din pătura K prin emisia de raze X și de electroni Auger.

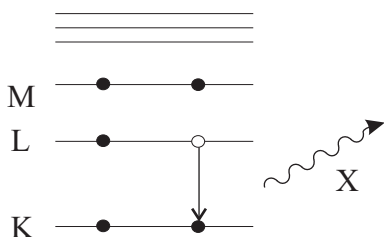
urmează unei ionizări atomice în pătura K

Radiatia X emisă în procesul de umplere a unei vacanțe din păturile interne se numește radiație *de fluorescență* sau *radiație*

a) ionizare în patura K



b) tranziție radiativă (emisie de raze X)



c) tranziție neradiativă (electroni Auger)

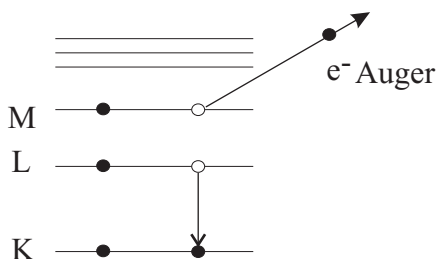


Figure 1.1: Procesele de emisie a radiațiilor X și electronilor Auger care urmează unei ionizări atomice în pătura K

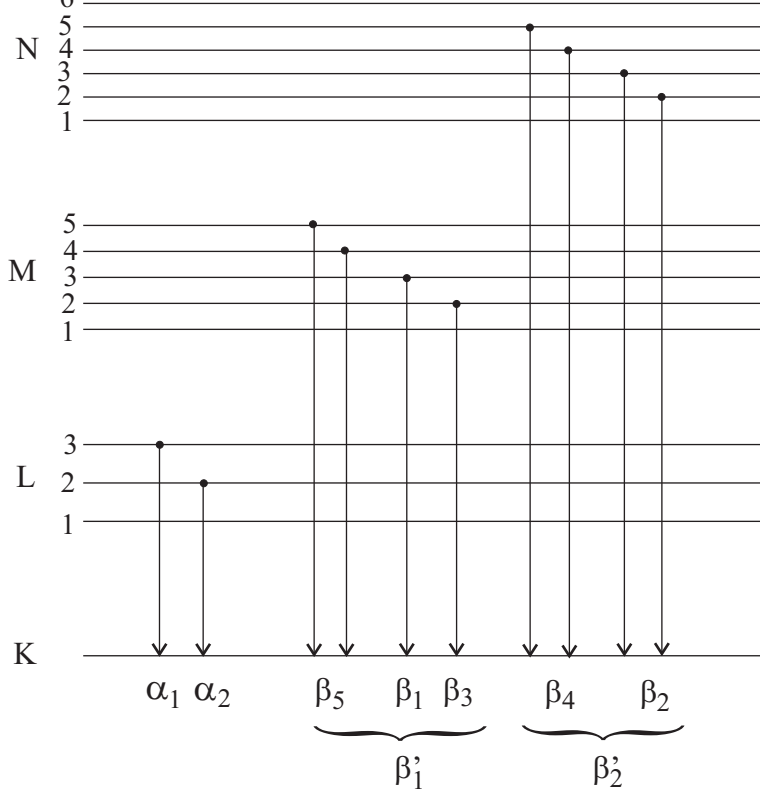


Figure 1.2: Nomenclatura razelor X caracteristice

X caracteristică. Energiile razelor X denumite K_α se calculează ca diferența energiilor de legătură (când se neglijează efectele de recul)

$$E(K_\alpha) = B_K - B_L \quad (1.1)$$

unde B_K , B_L sunt energiile de legătură ale electronilor în pătura K , respectiv L . Razele X au o nomenclatură rezultată din cunoașterea stărilor inițiale și finale între care are loc tranziția. Ea este prezentată în Figura ???. Intensitatea relativă a razelor X - K se află în următorul raport

$$K_{\alpha_1} : K_{\alpha_2} : K_{\beta_1} : K_{\beta_2} = 100 : 50 : 30 : 5 \quad (1.2)$$

cu 1 în scara energetică adoptată mai sus. Din punct de vedere al energiei radiațiilor de fluorescență, spectrul lor se întinde între ~ 100 eV (la elementele ușoare) și ~ 100 keV (la elemente grele).

Se definește *randamentul de fluorescență* η ca raportul între numărul de vacanțe de pe un anumit nivel atomic care se umplu prin emisie de raze X și numărul total de vacanțe de pe același nivel. Spre exemplu pentru cazul razelor X emise prin umplerea vacanțelor din pătura K avem

$$\eta_K = \frac{\text{numarul de cuante X din seria K}}{\text{numarul total de vacante din patura K}}$$

În esență randamentul de fluorescență exprimă probabilitatea ca umplerea unei vacanțe dintr-o pătura atomică să se facă prin emisie de raze X (radiativ). O relație empirică pentru randamentul de fluorescență în concordanță cu calculele teoretice și rezultatele experimentale, are forma [6]

$$\eta = 0.957 \frac{Z^4}{0.984 \times 10^6 + Z^4} \quad (1.3)$$

din care se poate constata că pentru elementele ușoare randamentul de fluorescență este mic, sub un procent, pe când la elementele grele ajunge la peste 90%. Spre exemplu pentru radiația K_α , randamentul de fluorescență la carbon este de 0.09%, la Al de 2.5% iar la Pb de 93%.

În Figura ?? se arată faptul că emisia de electroni Auger (modul neradiativ de umplere a unei vacanțe) se află în competiție cu emisia de raze X. Pentru electronii Auger se utilizează următoarea nomenclatură

KLL : se umple o vacanță din pătura K cu un electron din pătura L , energia disponibilă fiind transmisă altui electron din pătura L care părăsește atomul. În final au rămas două vacanțe în pătura L iar electronul emis are energia

$$E_{KLL} = B_K - B_L - B_L = B_K - 2B_L \quad (1.4)$$

unde $B_K, B_L, \dots$ semnifică energiile de legătură ale electronilor în păturile atomice.

pătura L iar energia disponibilă este transmisă unui electron din pătura M , electron care părăsește atomul. În final rămân două vacanțe - una în pătura L alta în pătura M iar electronul emis are energia

$$E_{KLM} = B_K - B_L - B_M \quad (1.5)$$

În mod analog cu randamentul de fluorescență se definește *randamentul de emisie al electronilor Auger* (a_K) ca fiind raportul între numărul electronilor Auger emiși prin umplerea vacanțelor dintr-o pătură atomică și numărul de vacanțe existente în acea pătură. Din definiția celor două randamente rezultă

$$\eta_K + a_K = 1 \quad (1.6)$$

însă fenomenele numeroare ce apar la tranzițiile în păturile atomice fac ca suma din membrul stâng al ecuației (1.6) să fie mai mică decât unitatea.

1.1.2 Mecanisme de excitarea a radiațiilor X

Producerea vacanțelor electronice în păturile interioare ale atomului este condiția necesară apariției radiației X caracteristice. Mecanismul prin care se produc aceste vacanțe poartă uneori numele de "excitare a radiației X caracteristice" sau de "excitarea radiației de fluorescență".

În aplicațiile uzuale, excitarea radiației de fluorescență se face în principal prin următoarele procese

1. Capura electronică (CE)
2. Conversia internă (IC)
3. Excitarea unui electron atomic cu ajutorul unei radiații corpusculare sau electromagnetice din afara atomului

Primele două mecanisme conduc la apariția razelor X caracteristice în urma proceselor nucleare de dezintegrare beta și gamma. Ele au utilitate în studiile de spectroscopie nucleară deoarece coincidența între razele X caracteristice și razele gamma

reacțiilor nucleare. Utilitatea practică este limitată deoarece nu permit excitarea razelor X caracteristice în izotopii stabili.

Radiatiile de excitare exterioare atomului pot fi următoarele:

- Radiatii alfa, beta sau gamma provenite de la surse radioactive.
- Radiatii X de frânare produse de un generator de raze X.
- Particule încărcate provenite de la un accelerator de particule.

Folosirea surselor radioactive pentru excitarea razelor X prezintă avantajul unei tehnici economice și este ușor transportabilă. Există însă anumite cerințe care se impun surselor radioactive utilizate

- (i). perioadă de dezintegrare suficient de lungă,
- (ii). activitate specifică suficient de mare pentru a permite determinarea cantitativă a unui element într-un timp comparabil cu cel obținut în cazul când se utilizează tuburi de raze X.

În cazul surselor α , excitarea razelor X pune probleme legate de absorbția radiațiilor X și alfa în aer. Din acest motiv geometria de excitare trebuie să fie extrem de compactă. Exemple de surse folosite la excitarea radiațiilor X sunt ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{55}Fe , și ^{121}Pm cu activități în jurul valorii de 30 mCi și perioade de înjumătățire de ordinul anilor. Această metodă de excitare prezintă avantajul că este nedistructivă. Datorită problemelor speciale de protecție biologică impuse de utilizarea unor surse de activitate mare, instalațiile ce folosesc excitarea radiațiilor X cu surse radioactive nu au sensibilități foarte ridicate. Pentru mărirea sensibilității fie se mărește fluxul radiației incidente, fie se alege un mecanism de excitație cu eficiență mai ridicată, spre exemplu bombardarea probei cu particule încărcate.

Excitarea razelor X caracteristice de către razele X produse de un tub de raze X este metoda cu cea mai mare utilizare practică. Expunând proba la radiația de frânare emisă de către un tub de raze X este posibilă excitarea simultană a razelor X a

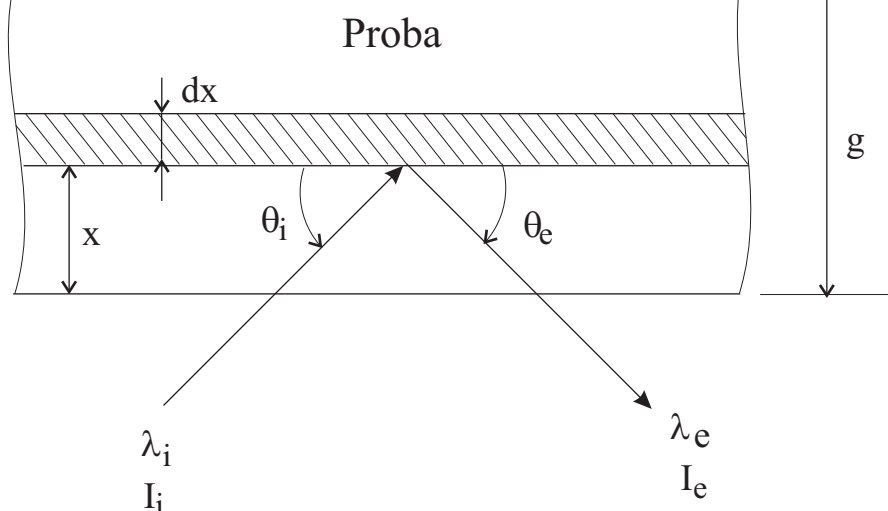


Figure 1.3: Geometria de iradiere și emisie utilizată în evaluarea intensității radiațiilor X de fluorescență

tuturor elementelor prezente. În interiorul tubului de raze X electronii emiși de către filamentul aflat la temperatură ridicată sunt accelerați spre o țintă de o diferență de potențial de ordinul a 50 kV. Atunci când electronii sunt frânați în țintă, se emit razele X caracteristice țintei ca și simultan radiație de frânare. Dacă suntem interesați în excitarea radiațiilor X pentru un singur element din probă, se reglează tensiunea de accelerare în tubul de raze X astfel încât maximul radiației emise să fie situat deasupra crestei K de absorbție. În acest mod se poate evita excitarea razelor X ale elementelor care constituie matricea probei, cu efect imediat asupra sensibilității măsurării. Uneori pentru obținerea unei radiații excitante monocromatică se utilizează diverse filtre între tubul de raze X și proba de investigat.

intensității radiațiilor X de fluorescență

Excitarea razelor X de către particulele încărcate accelerate la un accelerator de particule (Particle Induced X-ray Emission -

Deși costisitoare datorită folosirii unui accelerator de particule, metoda atinge sensibilități neegale de către celelalte mecanisme și este singura care permite scanarea compoziției de-a lungul suprafeței probei. Un accelerator de particule produce spre exemplu protoni cu energia de câțiva MeV. Proba este bombardată cu un fascicul a cărui dimensiuni poate ajunge la $1\mu m$ (microbeam) iar intensitatea la $100nA$. Zona bombardată (nu întreaga probă) care poate avea dimensiuni de ordinul micronului, devine o sursă foarte intensă de raze X caracteristice datorită ionizărilor produse de către fascicul. Un detector Si(Li) plasat la 90° față de direcția fascicului înregistrează spectrul de raze X. În general proba este plasată într-o cameră vidată (prin care trece fasciculul) și este separată de detector printr-o fereastră de mylar. În fața detectorului Si(Li) se plasează de obicei un absorbant construit dintr-un material cu Z redus (Be, mylar sau lucită) având grosimi de ordinul a 1-2 mm. Rolul lui este acela de a opri radiația de energie foarte joasă (0-2 keV) care este cu multe ordine de mărime mai intensă decât semnalul util (provine din frânarea electronilor delta). Detectorii actuali de Si(Li) pot rezolva razele X - K de la Al la Mo și razele X - L de la Mo la U. Pentru probe groase trebuie făcute corecții de autoabsorbție a razelor X în probă. Determinarea concentrațiilor se face de obicei prin compararea cu probe etalon. Analiza de urme prin metoda PIXE poate atinge sensibilități de până la 1 ppm prin detectia razelor X - K în cazul elementelor $13 < Z < 30$ și X-L pentru elementele cu numărul atomic $49 < Z < 83$. Razele X ale elementelor ușoare (C - Na) pot fi detectate prin folosirea unor tehnici speciale cum ar fi aceea a detectorilor Si(Li) fără fereastră de intrare, cuplați direct la camera de vid a incintei fascicului [34].

1.2 Analiza compoziției unui sistem binar prin emisie de raze X

Probele investigate prin emisie de raze X au în general structură complexă, fiind alcătuite din mai multe componente incluse într-o

relația dintre concentrație și intensitatea radiației X emise devine tot mai complicată. În continuare vom exemplifica modul în care se obține această relație pentru o proba cu doua componente [34].

Să considerăm că radiația X caracteristică este produsă sub acțiunea unui fascicul primar de raze X provenind de la un tub generator de raze X. În notațiile din Figura ?? să considerăm că proba este iradiată cu un fascicul de raze X monoenergetice, cu lungimea de undă λ_i și intensitate I_i (în unități energetice) care este incident pe suprafața S a probei sub un unghi θ_i . Notăm cu m_a și m_b fracțiunile masice ale celor două elemente prezente în proba și cu μ coeficientul linear de absorbție

$$\mu = \tau + \sigma \quad (1.7)$$

unde τ este coeficientul linear al absorbției prin fotoefect iar σ coeficientul linear al împrăstierii. Evident, excitarea radiațiilor X caracteristice este un proces corelat cu valoarea lui τ . Dacă notăm cu μ_m coeficientii masici de absorbție în cele doua componente atunci

$$\mu = \mu_a m_a + \mu_b m_b \quad (1.8)$$

unde relația între coeficienții de atenuare linear și masic este

$$\mu_m = \mu / \rho$$

cu ρ simbolizând densitatea (masa unității de volum). Vom mai nota cu r_q raportul valorilor coeficientului de absorbție fotoelectric τ de la extremitățile crestei de absorbție pe nivelul atomic q . Cu aceste notații, intensitatea fluxului de raze X incident la adâncimea x din probă va fi

$$I_i(x) = I_i(0) e^{-\frac{\mu_i x}{\sin(\theta_i)}} \quad (1.9)$$

unde μ_i este coeficientul linear de atenuare al materialului țintei pentru radiația incidentă de lungime de undă λ_i .

Absorbția radiației incidente prin efect fotoelectric de către elementul component a aflat în stratul de grosime dx va fi

$$dI_{ia}(x) = -I_i(0) e^{-\frac{\mu_i x}{\sin(\theta_i)}} \cdot \frac{\tau_{ia}}{\rho_a} \cdot m_a \cdot \frac{dx}{\sin(\theta_i)} \quad (1.10)$$

fluxul incident energia

$$dE_{ia}(x) = -dI_{ia}(x) \cdot S \sin(\theta_i) = I_i(0) e^{-\frac{\mu_i x}{\sin(\theta_i)}} \cdot \frac{\tau_{ia}}{\rho_a} \cdot m_a \cdot S \cdot \sin(\theta_i) \cdot \frac{dx}{\sin(\theta_i)} \quad (1.11)$$

iar energia folosită pentru excitarea nivelului atomic q va fi

$$dE_{ia}^q = dE_{ia} \cdot \frac{r_q - 1}{r_q} \quad (1.12)$$

din care se poate determina numărul de fotoni incidenți absorbiți pe nivelul q al atomilor de tip a aflați în stratul de grosime dx din proba

$$dn_q^a \equiv n_q^a \cdot S \cdot dx = \frac{dE_{ia}^q}{h\nu_i} = \frac{\lambda_i}{hc} \cdot dE_{ia}^q \quad (1.13)$$

Dacă se notează cu η randamentul de fluorescență și cu p probabilitatea ca un atom aflat pe nivelul K să emită radiația de fluorescență de lungime de undă λ_e , atunci energia radiației de fluorescență emisă de către elementul a aflat în volumul de grosime dx al probei va fi

$$dE_{ea} = h\nu_e n_q^a \eta p S dx = \eta p \frac{\lambda_i}{\lambda_e} I_i \frac{\tau_{ia}}{\rho_a} m_a \frac{r_q - 1}{r_q} S e^{-\frac{\mu_i x}{\sin \theta_i}} dx \quad (1.14)$$

din care se poate determina intensitatea de fluorescență a elementului a , I_{ea} măsurată la distanța R de probă ($r \gg d$), ca fiind energia radiațiilor X de fluorescență emise pe unitatea de suprafață a probei sub unghiul θ_e . Dacă coeficientul liniar de atenuare în probă a radiațiilor de fluorescență este μ_e atunci

$$I_{ea} = \int_0^d \frac{I_i}{4\pi R^2} \frac{\lambda_i}{\lambda_e} \eta p \frac{\tau_{ia}}{\rho_a} m_a \frac{r_q - 1}{r_q} e^{-\left(\frac{\mu_i}{\sin(\theta_i)} + \frac{\mu_e}{\sin(\theta_e)}\right) \cdot x} S dx \quad (1.15)$$

care se integrează imediat și conduce la următoarea expresie a intensității radiației de fluorescență

$$I_{ea} = I_i \frac{\eta p}{4\pi R} \frac{r_q - 1}{r_q} \frac{\tau_{ia}}{\rho_a} \frac{m_a}{\mu_i} \frac{\lambda_i}{\lambda_e} \sin(\theta_i) \frac{1}{1 + \frac{\mu_e \sin(\theta_i)}{\mu_i \sin(\theta_e)}} \times \left[1 - e^{-\left(\frac{\mu_i}{\sin(\theta_i)} + \frac{\mu_e}{\sin(\theta_e)}\right) \cdot d} \right] \quad (1.16)$$

fluorescență emisă de elementul a din compusul binar este proporțională cu concentrația lui în probă. Dată fiind larga utilizare a spectrometriei de raze X, în prezent sunt dezvoltate programe de calcul complexe care consideră precis toate efectele posibile în interacția radiației primare și a celei de fluorescență cu materialul probei, corpurile înconjurătoare și detectorul.

1.3 Aplicații în determinarea urmelor elementale

1.3.1 Instalația experimentală

În Figura ?? este prezentată schematic o instalație de spectrometrie X. Ea constă din următoarele componente

- Sursa de radiații incidente care excită razele X caracteristice. Aceasta poate fi un tub de raze X, o sursă radioactivă sau particulele încărcate de la un accelerator.
- Detector de raze X. Cei mai utilizați sunt detectorii cu gaz în regim de contor proporțional sau cu corp solid de tip Si(Li). Acești detectori trebuie să fie ecranați de radiațiile incidente.
- Lanțul electronic caracteristic sistemelor spectrometrice (preamplificator, amplificator, analizor multicanal, calculator).
- În cazul utilizării fasciculului de particule încărcate de la un accelerator, este necesară colectarea fasciculului care pătrunde prin probă într-o cușcă Faraday care stopează acest fascicul, cușcă conectată la un circuit de integrare a sarcinii totale. În acest mod se obține o măsură a numărului de protoni incidenti pe probă și prin compararea cu o probă standard se pot obține din spectrele de raze X valorile absolute ale concentrației elementelor din probă (proba trebuie să fie subțire).

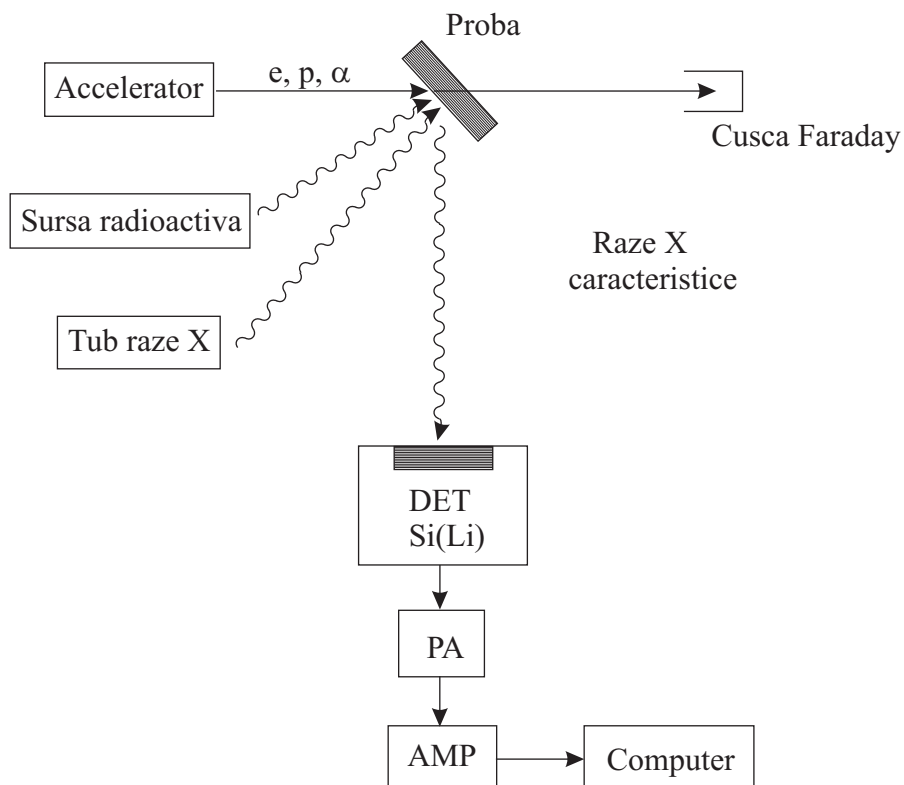


Figure 1.4: Schema unei instalații spectrometrice cu emisie de raze X caracteristice

experimentală ca urmare a scăderii randamentului de fluorescență în funcție de Z . Primele elemente din tabelul periodic se caracterizează prin radiații X foarte moi, emise cu probabilitate slabă. Aceste radiații având absorbție puternică în substanță nu pot fi transmise în mod convenabil decât prin medii de densitate superficială foarte redusă. Din acest motiv, în spectrometria cu emisie de radiații X problema naturii și grosimii ferestrei detectorului este extrem de importantă. Practic la energii de peste 3 keV se pot încă utiliza ferestre de Be sau Al cu grosimi de ordinul a 1 mg/cm². La energii mai joase devine necesară utilizarea unor pelicule nemetalice (mylar, kapton) pentru confecționarea ferestrelor detectorilor.

Sensibilitatea metodei de analiză depinde de eficiența mecanismului de excitare a razelor X caracteristice, de eficacitatea (geometrică și intrinsecă) detectorului și de valoarea raportului semnal-util/fond. Radiația de fond din detector este determinată de valoarea radiațiilor Compton și de frânare produse de către sursa de excitație precum și de radiația rezultată prin interacția cu matricea structurală a probei. Dintre elementele componente ale lanțului electronic asociat, calitatea preamplificatorului este critică. Alegerea lui potrivită dă posibilitatea să se reducă zgomotul de fond, deci să se reducă pragul de detecție și să se poată analiza elementele ușoare care au un spectru al radiației de fluorescență sub 10 keV. Pentru a micșora cât mai mult zgomotul produs de electronică se utilizează în preamplificatori tranzistori cu efect de câmp răciți la temperatura detectorului.

1.3.2 Aplicații în studiul materiei vii

Una din cele mai importante caracteristici a celulelor vii este aceea de a transfera elemente din diverse soluții *în direcție opusă* gradientului de concentrație al respectivului element. Un exemplu semnificativ în acest sens este acela al organismelor marine care își obțin substanțele nutritive din apa de mare. Organismele vii concentrează din mediul înconjurător toate elementele necesare vieții. Procesul de omogenizare a concentrațiilor, guvernat de legile difuziei este specific substanței nevii. Pentru elementele

un domeniu foarte îngust al concentrației lor pentru a fi benefice proceselor biologice (creștere, divizare, etc.). Dacă sunt în concentrații prea mici încetează de a mai stimula reacțiile biochimice, iar dacă sunt în concentrații prea mari devin toxice.

Materia vie este alcătuită din 11 elemente chimice cu mase atomice reduse: H, C, N, O, Na, Mg, P, S, Cl, K și Ca. Aceste elemente sunt cunoscute de mult timp ca fiind esențiale pentru existența vieții, datorită faptului că se găsesc în cantități mari în structura ființelor vii, prezența lor fiind în acest fel ușor de detectat. Relativ recent au fost găsite în structura materiei vii și alte elemente, care se află în cantități foarte mici care poartă numele de *microelemente sau elemente-urmă*. În prezent, este clar stabilit că următoarele 14 microelemente sunt esențiale pentru biochimia vieții: F, Si, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Fe, Se, Mo, Sn și I. Marea majoritate a microelementelor sunt componente ale sistemului enzimatic sau proteinelor având funcții vitale. Dacă atomul de metal - microelement este înlăturat, proteina respectivă își pierde capacitatea de a funcționa ca o enzimă. Trebuie remarcat faptul că dintre cele 14 microelemente vitale pentru viața animalelor cu sânge cald, numai I și Si au numărul atomic mai mic decât 20. În plus, elementele mai grele decât I nu au fost găsite cu funcție fiziologică. Distribuția microelementelor cu funcții vitale în sistemul periodic poate avea o anumită semnificație în legătura cu dezvoltarea vieții în perioada prebiotică.

Probele biologice (microorganisme sau țesuturi) sunt expuse iradierii cu protoni având energia de 3 MeV și intensități de 100 nA, fiind înregistrate radiațiile X emise în timpul iradierii. Din ariile picurilor de raze X caracteristice, având o calibrare corespunzătoare în eficacitatea de detecție, se pot determina concentrațiile microelementelor respective în probe.

Compoziția elementală a plantelor reflectă în mare compoziția solului sau a mediului de creștere în care s-au dezvoltat. Valorile relative a concentrației diverselor elemente în corpul unei plante nu este necesar identic cu cel al mediului de creștere. Planta este *selectivă* în absorbția elementelor din mediu. Și în cazul plantelor, lipsa unor microelemente esențiale din sol conduce la anomalii în dezvoltare - în principal este afectată viteza de creștere. Microele-

Cl, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Zn. Pentru analiza probelor vegetale prin metoda PIXE (emisie de radiație X indusă de protoni) acestea se carbonizează prin ardere, apoi pot fi transferate în incinte vidate unde pot fi bombardate cu protoni, razele X fiind detectate printr-o fereastră subțire de Be.

Studiul prin emisie de raze X a concentrației microelementelor în probe sanguine, firele de păr și diferite tesuturi, s-a dovedit un instrument puternic în tratarea unor boli prin faptul că sunt detectate în faze incipiente. Această metodă prezintă avantaje față de altele prin faptul că necesită cantități de ser foarte mici și conduce la rezultate în timpi de ordinul minutelor de la recoltarea probei. În prezent există deja standarde care arată care sunt concentrațiile microelementelor în țesuturile sănătoase, în acest fel putând determina rapid instalarea unor boli. Spre exemplu, s-au gasit diferențe semnificative între osul normal și cel afectat de sarcoma osteogenetică în ceea ce privește concentrația a 8 microelemente. În țesutul osos bolnav Fe, Zn, Cu și Mn cresc, în timp ce Ca, Mg, Co și Ni scad. Spectroscopia prin emisie de raze X prezintă marele avantaj că se pot determina *simultan* concentrațiile microelementelor. Acest lucru este extrem de important pentru determinarea concentrației de microelemente corelată cu apariția unor tumori maligne. În acest tip de studii de mare actualitate se urmărește:

- (i). Detectarea apariției tumorilor în faze foarte incipiente.
- (ii). Stabilirea dependenței între evoluția tumorii și concentrația de microelemente.
- (iii). Determinarea efectului variației concentrației de microelemente asupra evoluției tumorilor.

Există suficiente motive pentru a spera că se va ajunge la momentul în care o simplă analiză prin spectroscopie cu emisie de raze X a compoziției microelementale a unui fir de păr uman va permite identificarea multor afecțiuni din organism aflate în stadii incipiente în care nu au apărut încă manifestări fiziologice.

Distribuția elementelor în natură, concentrația și dinamica lor poate fi serios afectată de activitățile umane. Poluarea mediului apare prin introducerea de către activitățile umane a diverselor substanțe în sol, apa și atmosferă. De foarte multe ori această poluare produce dezechilibre în ecosistemele terestre punând în pericol sănătatea ființelor vii. Urmărirea apariției factorilor poluanți în mediile naturale necesită utilizarea unor metode de detecție rapide, precise și nu în ultimul rând ieftine. Din acest punct de vedere, spectroscopia cu emisie de radiații X este foarte potrivită.

Peste 60% din poluarea atmosferică este produsă de către mijloacele de transport uman. Motoarele cu ardere internă emit în atmosferă poluții care conțin monoxid de carbon, oxizi de azot, plumb, etc. Poluanții prezenți în atmosferă participă în diverse reacții fotochimice, pătrund în structurile biologice ale ființelor vii, având efecte secundare dintre cele mai neprevăzute. În mod curent probe de aerosoli atmosferici sunt colectate pe filtre speciale și apoi sunt supuse analizei prin emisie de radiație X în urma iradierii cu un fascicul de protoni. Se obțin în câteva minute rezultate complete care indică elementele chimice prezente în poluanți.

Compoziția elementală a apei este un factor de importanță majoră pentru sănătatea ființelor vii. Spre exemplu, multe studii medicale au găsit o puternică corelație între moartea survenită în urma unei afecțiuni cardiovasculare și compoziția apei potabile. Corelația indică o scădere a incidenței acestor boli odată cu creșterea elementelor benefice Cr, F, Mn, Si, V, Zn și scăderea concentrației elementelor grele Cd, Co, Pb. Metoda multi-elementală de analiză prin spectrometrie de raze X este de mare utilitate și în acest caz. Prepararea probelor se poate face simplu prin uscarea unor picături de apa pe un anumit suport de aluminiu. În acest caz sensibilitățile de detecție sunt limitate la valori mai mari de $0.1 \mu\text{g/ml}$. Mărirea sensibilității de măsură presupune anumite metode chimice de preparare a probei și fixarea microelementelor în anumiți compuși a căror concentrație poate fi mărită prin metode fizico-chimice. Prin secțiunile eficace mari de excitare a emisiei de raze X se pot atinge sensibilități mari de detecție simultană a prezenței microelementelor în natură. Standardizarea

pentru prelucrarea automată a datelor și sensivitatea simultană în detecția unui număr mare de elemente, fac din spectrometria de raze X una dintre cele mai folosite tehnici în măsurarea microelementelor în laborator și industrie.

Bibliography

- [1] I.M. Popescu, *Fizică, vol. I (1982), vol. II (1983)*, Editura Didactică și Pedagogică - București
- [2] A.H. Wapstra, G. Audi and R. Hoekstra, *Atomic and Nuclear Data Tables* 39 (1988) 1988
- [3] K. Heyde, *Basic Ideas and Concepts in Nuclear Physics*, Institute of Physics Publishing, London (1994)
- [4] W. Greiner, J.A. Maruhn, *Nuclear Models*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996
- [5] G. Vlăducă, *Elemente de Fizică Nucleară*, partea I (1988), partea a II-a (1990), Tipografia Universității București
- [6] J. Kantele, *Handbook of Nuclear Spectrometry*, Academic Press Limited 1995
- [7] E. Segree, *Nuclei and Particles*, W.A. Benjamin, Inc., Reading, Massachusetts 1977
- [8] C.M. Lederer, V.S. Shirley (eds), *Table of Isotopes*, John Wiley & Sons, New York 1987
- [9] A. Messiah, *Mecanică Cuantică*, Editura Științifică, București 1974
- [10] G. Deconninck, *Introduction to Radioanalytical Physics*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam 1978
- [11] A. Berinde, G. Vlăducă, *Reacții Nucleare Neutronice în Reactor*, Editura Tehnică, București 1978

- [13] S. Râpeanu, I. Pădureanu, I. Cristian, V. Cuculeanu, Gh. Rotărescu, M. Avrigeanu, *Tehnici și Măsuări la Reactorii Nucleari*, Editura Academiei, București 1983
- [14] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons Inc., New York 1989
- [15] R.D. Evans, *The Atomic Nucleus*, Krieger, New York 1982
- [16] P. Marmier, E. Sheldon, *Physics of Nuclei and Particles*, Academic Press Inc. New York and London, 1971
- [17] J.D. Jackson, *Classical Electrodynamics, 2nd Ed.*, John Wiley & Sons, New York 1975
- [18] W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1987, 1994
- [19] N. Tsoulfanidis, *Measurement and Detection of Radiation*, Taylor & Francis, 1984
- [20] H.A. Bethe, J. Ashkin, *Passage of Radiations through Matter*, in *Experimental Nuclear Physics*, Vol.1, ed. by E.Segree, John Wiley & Sons, New York, N.Y. 1953
- [21] S.P. Ahlen, Rev. Mod. Phys. 52, 121 (1980)
- [22] F. Fano, *Penetration of Protons, Alpha Particles and Mesons*, Annual Review of Nuclear Science, v.13, p.1-66 (1963)
- [23] E.M. Abramovitz, I. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publ. Inc. New York (1965)
- [24] L.C. Northcliffe and R.F. Schiling, Nuclear Data Tables A7,233(1970)

tons and mesons: Tabulations of Vavilov Distribution", in National Academy of Sciences Publication 1133, Nuclear Science Series Report No.39 (1964)

- [26] W. Heitler, *The Quantum Theory of Radiation*, 3rd ed., Oxford Univ. Press (Clarendon), London and New York 1954
- [27] J.F. Ziegler and W.K. Chu, "*Stopping Cross Sections and Backscattering Factors for ^4He Ions in Matter*", Atomic Data and Nuclear Data Tables v.13, p.463 (1974)
- [28] P.A.M. Dirac, Proc. Royal Soc. v.126,p.361 (1930)
- [29] A.T. Steward, L.O. Roelling, *Positron Anihilation*, Academic Press, New York (1967)
- [30] P. Hantojarvi, A. Vehanen, *Applications of positron annihilation*, AIEA Conference (1978)
- [31] G.L. Brownell, C.A. Burnham, in *Instrumentation in Nuclear Medicine*, Vol.2, p.135, Academic Press, New York (1974)
- [32] M. Alonso, E. Finn, *Physics*, Addison - Wesley Publishing Company, 1992
- [33] A. Septier (ed.) *Focusing of Charged Particles*, Academic Press, New York 1967
- [34] E. Rodean, *Aparate și metode de măsură, analiză și control cu radiații*, Editura Academiei, București, 1986
- [35] E. Ligeon, M. Bruel, A.Bonetemps, "*Analyse du Phosphore dans le Silicium par Reactions Nucleaires*", Journal of Radioanalytical Chemistry v.16,p.537 (1973)
- [36] J. H. Fremlin, *Applications of Nuclear Physics*, The English Universities Press Limited, London (1964)
- [37] P. Theodorsson, *Measurement of Weak radioactivity*, World Scientific Co.,1996

- [39] R. Muller, *Science*, v.196, p.489 (1977)
- [40] M. Ivascu et al. *Accelerator Mass Spectrometry - Applications*
Romanian Reports in Physics, vol.46, no.4, p.283 (1994)
- [41] R.P. Gardner, R.L. Ely, *Radioisotope Measurement - Applications in Engineering*, Reinhold Publishing Co. New York 1967