

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN BUCURESTI
CATEDRA DE FIZICA**

**LABORATORUL DE FIZICĂ ATOMICĂ ȘI FIZICĂ NUCLEARĂ
BN 030**

**STUDIUL EFECTULUI COMPTON FOLOSIND
UN ANALIZOR MULTICANAL**

2016

STUDIUL EFECTULUI COMPTON FOLOSIND UN ANALIZOR MULTICANAL (MCA)

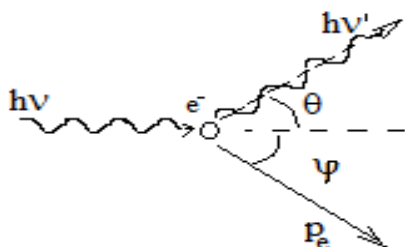
1. Scopul lucrării

Punerea directă în evidență a efectului Compton prin analiza energiei radiațiilor γ împrăștiate pe un cilindru de Fe, la diverse unghiuri față de direcția fotonilor incidenti proveniți de la o sursă de ^{137}Cs , folosind un detector cu scintilație cu cristal de NaI(Tl) și un analizor multicanal.

2. Teoria lucrării

Efectul Compton constă în schimbarea energiei fotonului la împrăștierea elastică pe particule. El pune în evidență proprietățile corpusculare ale cuantelor câmpului electromagnetic, fotonii. Dacă masa particulelor pe care se face împrăștierea elastică a fotonilor este mare, schimbarea energiei fotonului împrăștiat este nesemnificativă. Ea devine semnificativă în cazul ciocnirii elastice a fotonilor γ pe electroni liberi sau pe electronii slab legați din atomi (electroni care au energii de legătură mult mai mici în comparație cu energia fotonilor incidenti).

Considerăm ciocnirea elastică a unui foton pe un electron liber într-un sistem de referință în care electronul este inițial în repaus. Energia cuantei γ de frecvență ν (lungime de undă λ , $\lambda = \frac{c}{\nu}$) este $E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, iar impulsul $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$. După ciocnire fotonul împrăștiat pe direcția θ are energia $E'_\gamma = hv'$, iar electronul de recul se mișcă pe direcția φ față de direcția fotonului incident și are impulsul p_e . Aplicând legile de conservare ale energiei și impulsului, folosind expresia relativistă pentru energia electronului, $E_e = \sqrt{p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4}$ ($m_0 c^2$ este energia de repaus a electronului, 511keV),



$$\begin{aligned} \frac{hc}{\lambda} + m_0 c^2 &= \frac{hc}{\lambda'} + \sqrt{p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4} \\ \frac{h}{\lambda} &= \frac{h}{\lambda'} \cos \theta + p_e \cos \varphi \\ 0 &= \frac{h}{\lambda'} \sin \theta - p_e \sin \varphi \end{aligned}$$

Eliminând p_e și φ , rezultă formula Compton pentru deplasarea lungimii de undă

$$\Delta\lambda \equiv \lambda' - \lambda = 2\Lambda(1 - \cos \theta), \quad (1)$$

unde constanta

$$\Lambda = \frac{h}{m_0 c} \quad (2)$$

poartă numele de lungimea de undă Compton.

Trecând în (1) la energia fotonului ($\lambda = hc / E_\gamma$), rezultă relația

$$\frac{1}{E'_\gamma} = \frac{1}{E_\gamma} + \frac{1}{m_0c^2}(1 - \cos\theta) \quad (3)$$

sau putem scrie explicit energia fotonului difuzat în funcție de unghiul θ

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (4)$$

Din (4) rezultă energia electronului de recul

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma = E_\gamma \frac{\frac{E_\gamma}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (5)$$

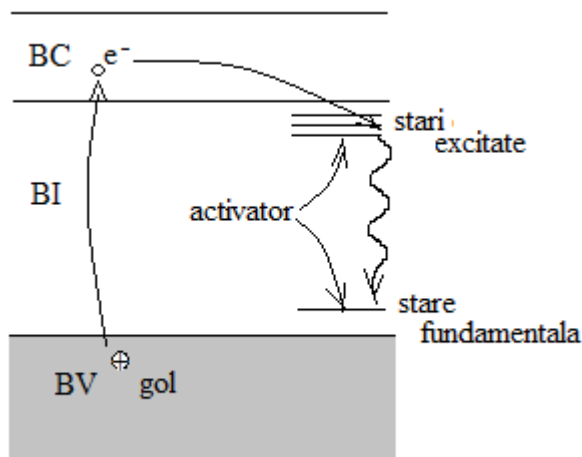
Transferul de energie de la foton la electron este maxim în cazul împrăștierii înapoi, $\theta = \pi$, astfel că energia maximă a electronului Compton este

$$E_e^{\max} = \frac{2E_\gamma^2}{2E_\gamma + m_0c^2} \quad (6)$$

3. Dispozitivul experimental

În lucrare se determină energia radiațiilor γ folosind un lanț spectrometric alcătuit dintr-un detector cu scintilație și un analizor multicanal (pe care îl vom denumi în continuare MCA, de la denumirea în limba engleză *MultiChannel Analyzer*).

La trecerea particulelor încărcate prin o serie de materiale are loc emisia unor pulsuri scurte de lumină, scintilații. Aceste pulsuri de lumină dau naștere, prin efect fotoelectric pe un fotocatod, la un puls de electroni care este amplificat în fotomultiplicator. Mecanismul de producere a scintilațiilor depinde de tipul de scintilator. Detectorul folosit are ca scintilator un cristal anorganic de NaI activat cu Tl, NaI(Tl). Fotonii γ nu au sarcină electrică, astfel că semnalul în detector este determinat de particulele încărcate electric care rezultă în urma interacției fotonilor în scintilator. Procesele prin care radiația γ interacționează cu substanța sunt: efectul fotoelectric,



și generarea de perechi electron- pozitron, e^-e^+ (pentru energii $E_\gamma \geq 1,02MeV$, energia de prag pentru procesul de producere a unei perechi). În cazul efectului fotoelectric electronii sunt scoși din atomi prin absorbția cuantei γ incidente, iar în cazul efectului Compton electronii de recul din ciocnirea electron-foton sunt scoși din atomi. Electronii primari rezultați în urma acestor procese interacționează electrostatic cu electronii cristalului. Cristalul de NaI are o structură

energetică de benzi, între banda de conducție (BC) și banda de valență (BV) lărgimea benzii interzise (BI) fiind $\sim 3,9eV$ (acestei energii corespunzând un foton cu $\lambda \sim 320nm$). Electronii primari interacționează cu electronii din cristal (din BV), generând perechi electron-gol (e^- în BC și golurile în BV). Recombinarea acestora cu generarea de fotoni cu aceeași lungime de undă ca și la absorbție este un proces lent, fiind favorizat în schimb următorul proces cu participarea atomilor de Tl. În cristalul de NaI sunt adăugați atomi de taliiu (Tl), care au rol de “activator”. Atomii de Tl pierd un electron în rețea și se află sub forma unui ion pozitiv Tl^+ . Un electron liber se poate combina cu Tl^+ , formând Tl neutru. Un gol este acaparat de Tl neutru, formând Tl^+ în stare excitată. Acesta se dezexcită în starea fundamentală emițând un foton ($Tl^+ + e^- \rightarrow Tl$; $Tl + g \rightarrow Tl^*$). Alternativ, un gol poate fi acaparat de Tl^+ formând un ion dublu ionizat, Tl^{++} . Acesta acaparează un electron rezultând Tl^+ în stare excitată, trecând în starea fundamentală cu emisia unui foton. Deoarece aceste nivele sunt în interiorul benzii interzise a cristalului de NaI, energia fotonului emis este mai mică decât lărgimea benzii interzise, spectrul fotonilor din cadrul unei scintilații având un maxim în jurul valorii de $410nm$ ($\sim 3eV$) (lumina emisă are o tentă albastruie). Pentru un foton incident de $1MeV$ se produc astfel $4 \cdot 10^4$ fotoni.

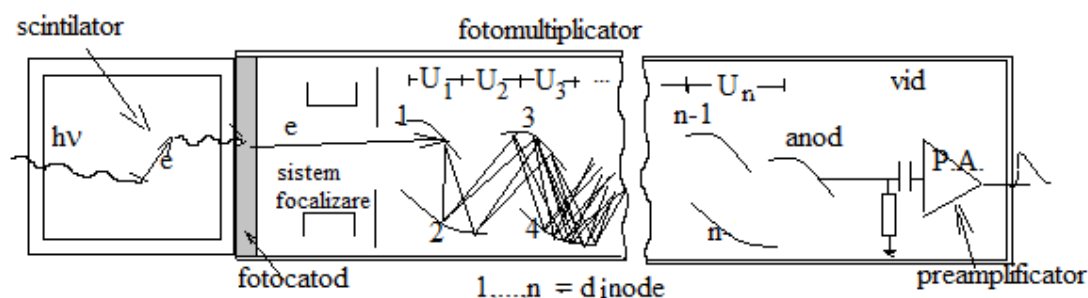


Fig 1. Schema de principiu a unui detector cu scintilație

Acest puls de fotoni este apoi amplificat folosind un fotomultiplicator. Fotonii rezultați în scintilație trec prin fereastra existentă în învelișul protector în care se află cristalul și cad pe un fotocatod unde scot electroni prin efect fotoelectric. Fotocatodul are sensibilitatea maximă producerii efectului fotoelectric în domeniul lungimii de undă ale fotonilor produși în scintilații. Electronii scoși din fotocatod sunt focalizați pe un electrod (prima dinodă), unde fiecare electron scoate câțiva electroni prin fenomenul de emisie secundară. Astfel, pentru un electron care ciocnește electrodul rezultă tipic 5-10 electroni de joasă energie. Electronii scoși din dinodă sunt accelerați în vid către a doua dinodă la o diferență de potențial de ordinul sutelor de volți, ceea ce face posibilă menținerea emisie secundare de electroni pe următoarea dinodă, procesul repetându-se cu toate dinodele (electrozii unde se produce multiplicarea electronilor prin emisie secundară). Rezultă, în final, pentru fiecare electron emis de fotocatod $10^7 - 10^{10}$ electroni pe anod (ultimul electrod). Numărul de electroni în puls ce apare la anod este proporțional cu numărul de fotoelectroni emiși, iar timpul după care se formează pulsul pe anod este de 20-50ns. Timpul în care apare un semnal la trecerea radiației prin scintilator este determinat de timpul de dezvoltare al unei scintilații (cu procesul descris anterior), care este de 250ns pentru NaI(Tl). Amplitudinea pulsului de tensiune dat de detector este proporțională cu energia electronilor ce a produs scintilația.

Pulsul de tensiune este amplificat într-un preamplificator și trimis la ieșirea detectorului. Mai departe acest semnal este trimis la analizorul multicanal. Acesta sortează pulsurile în funcție de amplitudinea lor și numără câte pulsuri apar în fiecare

canal (domeniul de analiză este împărțit în zone adiacente de lărgime constantă, $(U_{\min}, U_{\min} + \Delta U)$, aceste ferestre numindu-se canale). Realizând calibrarea energetică se poate atașa fiecărui canal un interval de energie. Se obține astfel spectrul energetic care reprezintă numărul de pulsuri/canal în funcție de energia corespunzătoare canalului respectiv.

Dacă radiația γ este absorbită prin efect fotoelectric electronul scos din atom are energia $E_\gamma - E_g$, unde E_g este energia de legătură a electronului (probabilitatea producerii efectului este cea mai mare pentru electronii din pătura K). Locul rămas liber prin plecarea electronului este ocupat rapid de electronii de pe straturile superioare, emițându-se radiații X caracteristice. Acestea sunt reabsorbite prin efect fotoelectric. Pentru un cristal foarte mare suma energiei cinetice a tuturor electronilor rezultați ar fi egală cu energia radiației incidente. Spectrul obținut ar fi un pic cu vârful în dreptul energiei radiației γ incidente (figura 2a). În cazul unui detector foarte subțire, în care radiațiile γ difuzate Compton scapă în afara detectorului și nu sunt înregistrate, spectrul energetic ar fi format de un *fotopic* în dreptul energiei radiației incidente, determinat de electronii apăruți prin efect fotoelectric, și un *continuum Compton* reprezentând energia electronilor rezultați în urma efectului Compton al radiației incidente, energia radiației γ difuzate fiind nedetectată, această radiație scăpând în afara detectorului (figura 2b). Continuul Compton se întinde de la 0, la energia maximă Compton dată de formula (6). Pentru un detector real se combină cele două cazuri anterioare. Există un pic la energia radiației incidente, dar acesta nu conține numai contribuția dată de efectul fotoelectric, ci și cea dată de interacții Compton cu recoltarea ulterioară a întregii energii a produșilor rezultați. Picul se numește încă "fotopic", dar și, mai potrivit, "picul energiei totale" (full-energy peak) (în figura 2c la energia $h\nu$). Între picul energiei totale și limita Compton avem contribuții de la împrăștierea Compton multiple.

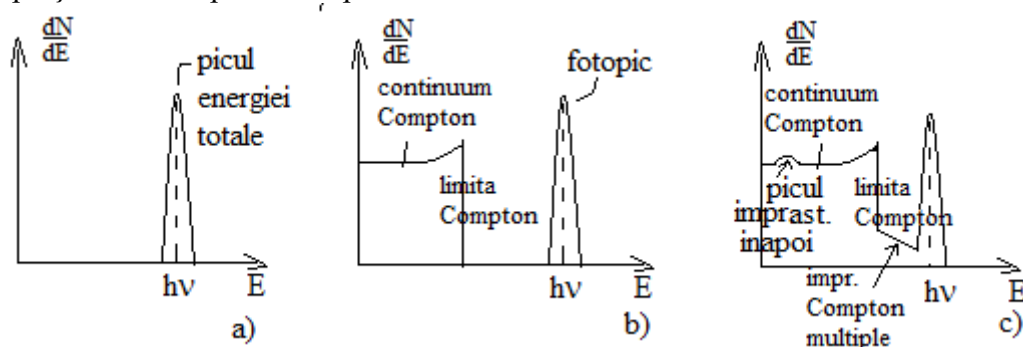


Fig. 2 Spectrul energetic al unei surse γ monoenergetice pentru: a) detector infinit de gros; b) detector subțire; c) detector real.

Acestea sunt principalele influențe pentru energii ale radiației γ mai mici decât pragul generării de perechi (1,022MeV), cazul sursei ^{137}Cs , folosită în lucrare. Influențe secundare asupra spectrului poate avea interacția radiației sursei cu pereții materialului care înconjoară detectorul. Efectul fotoelectric duce la apariția radiației X caracteristice, înregistrată apoi de detector, iar efectul Compton la unghiuri mari face ca radiația γ difuzată Compton în pereți să fie înregistrată apoi în detector, formând un pic la energii mici, picul împrăstierii înapoi (backscatter peak).

Dispozitivul experimental este prezentat în figura 3. Detectorul cu scintilație este introdus într-un cilindru de Pb în care există o fereastră laterală. Vor produce scintilații în cristalul detectorului în principal radiațiile γ care intră prin această fereastră, celelalte fiind ecranate de pereții de plumb. Sursa de radiații γ se plasează în orificiul cărămizii de Pb, fasciculul de radiații γ căzând, pe direcția dorită, pe un

cilindru de Fe vertical. Radiațiile γ difuzate Compton în cilindrul de Fe intră prin fereastra existentă în cilindrul de ecranare și sunt înregistrate de detector. Cealaltă cărămidă de Pb este folosită pentru ecranarea radiațiilor care pot intra prin fereastra detectorului venind direct de la sursă. Schema dispozitivului experimental pentru un unghi de împrăștiere θ este prezentată în figura 4.

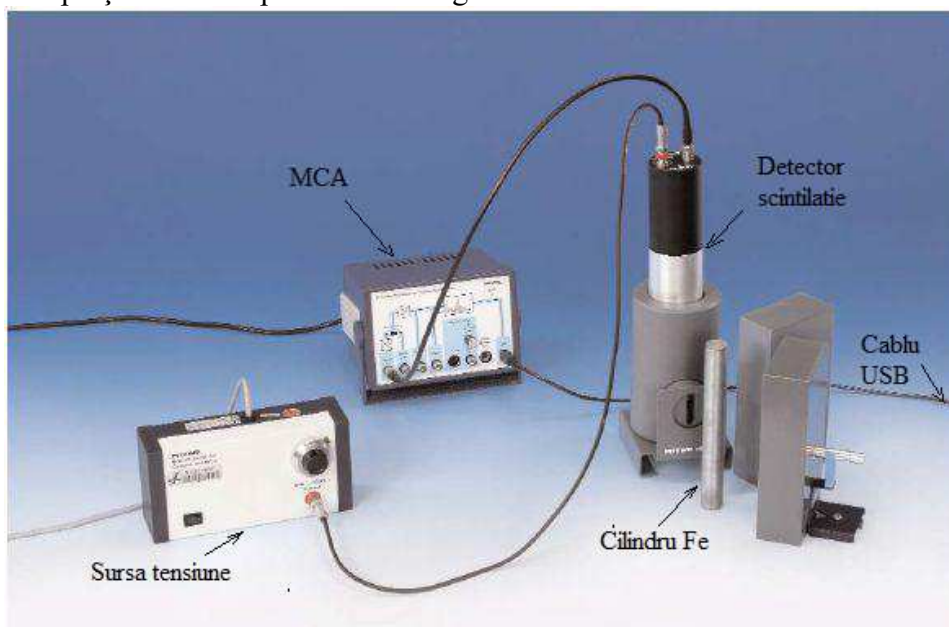


Fig. 3. Dispozitivul experimental

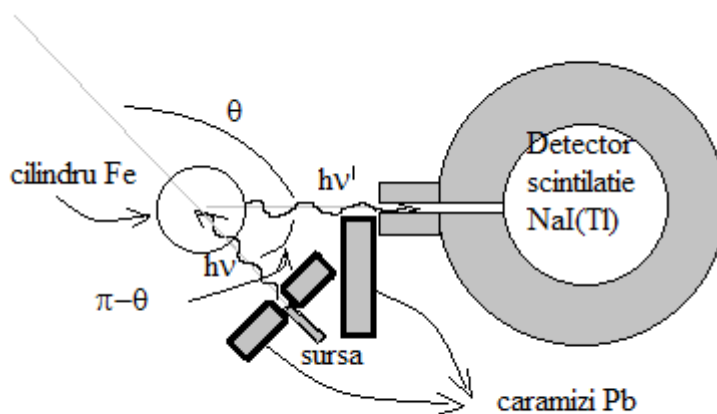


Fig. 4 Schema dispozitivului experimental (pentru $\theta > \pi/2$)

Schema de principiu a lanțului spectrometric este prezentată în figura 5. De la detector semnalul este trimis la intrarea MCA folosind un cablu BNC. Semnalul este transformat folosind un formator de pulsuri care dă pulsuri (pozitive) cu înălțimea proporțională cu integrala pulsului primit. Apoi semnalul este amplificat și trimis la un analizor al înălțimii pulsurilor. Acesta are 4000 de canale, procesând pulsuri în intervalul de la 0V la 4V. Pulsurile în afara acestui interval nu sunt analizate.

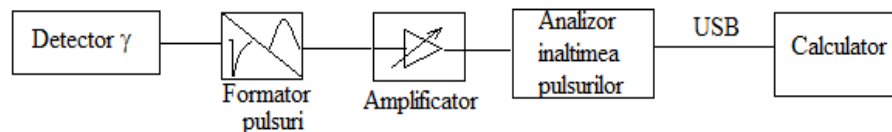


Fig. 5. Schema de principiu a lanțului spectrometric

În lucrare se folosesc trei surse radioactive (sau două în cazul folosirii variantei 1 pentru calibrare). Sursa ^{137}Cs (OW641) de 37kBq, ^{22}Na (OT460) de 74kBq și MIXTURA (OO497 sau OO491), care conține un amestec de trei surse, ^{241}Am cu o activitate de 4,44kBq, ^{90}Sr cu o activitate de 4,44kBq și ^{137}Cs cu o activitate de 333kBq.

Nucleul $^{137}_{55}\text{Cs}$ se dezintegrează β^- (electroni), rezultând un nucleu excitat $^{137}_{56}\text{Ba}$. Acesta trece în starea fundamentală în 94,4% din cazuri prin emisia unei cuante γ cu energia 661,7 keV și în 5,6% din cazuri ajunge în starea fundamentală neradiativ, prin conversie internă. Electronul care preia energia prin conversie internă părăsește starea fundamentală, care este rapid ocupată, emițându-se radiație X de 32keV. Schema de dezintegrare este prezentată în figura 6a.

Nucleul $^{22}_{11}\text{Na}$ trece în nucleul excitat $^{22}_{10}\text{Ne}$ prin emisia β^+ (pozitroni) în 90% din cazuri și în 10% prin captură electronică. Nucleul excitat ^{22}Ne trece în starea fundamentală prin emisia unei cuante γ cu energia 1274keV. Pozitronii emiși în sursă se anihilează și dau fiecare două radiații γ cu energia 511keV. Radiația X caracteristică are energii de 0,8keV. Schema de dezintegrare este prezentată în figura 6b. Astfel, această sursă are două linii γ importante, linia de anihilare la 511keV și tranziția în starea fundamentală la 1274keV.

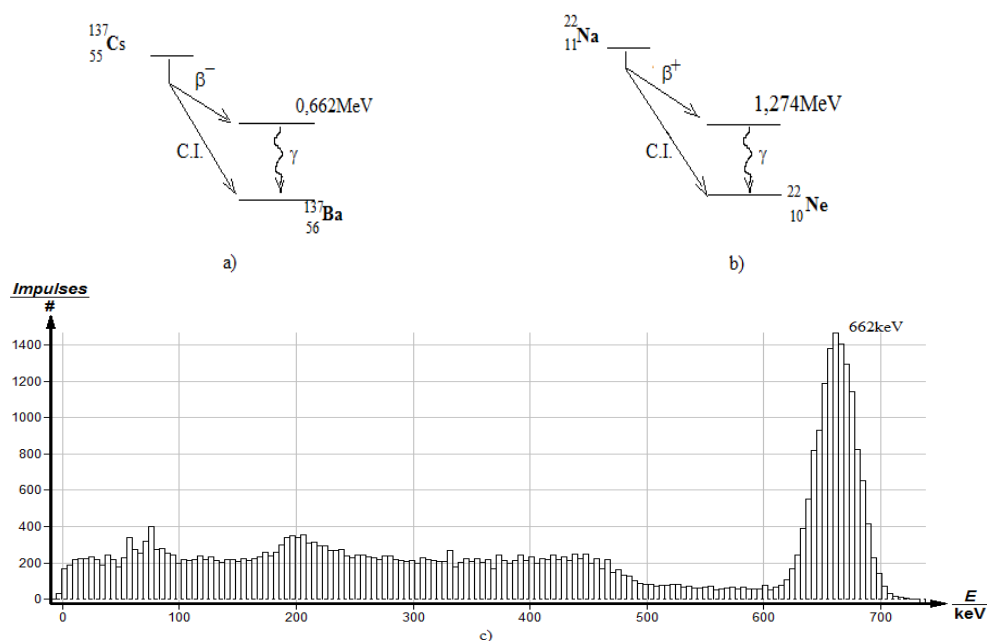


Fig. 6. a) Schema de dezintegrare pentru ^{137}Cs ; b) Schema de dezintegrare pentru ^{22}Na ; c) Spectrul energetic al sursei Mixtura

^{241}Am se dezintegrează α în 100% din cazuri în ^{237}Np , în 85% din cazuri Np fiind în starea excitată de 59,5keV, care trece în starea fundamentală prin emisia unei

cuante γ de 59,5keV în 80% din cazuri. ^{90}Sr este o sursă de radiații β . În figura 6c se vede spectrul sursei MIXTURA, în care se distinge clar linia de 662keV dată de componenta ^{137}Cs , scopul lucrării fiind studiul împrăstierii Compton pentru acești fotoni.

4. Modul de lucru

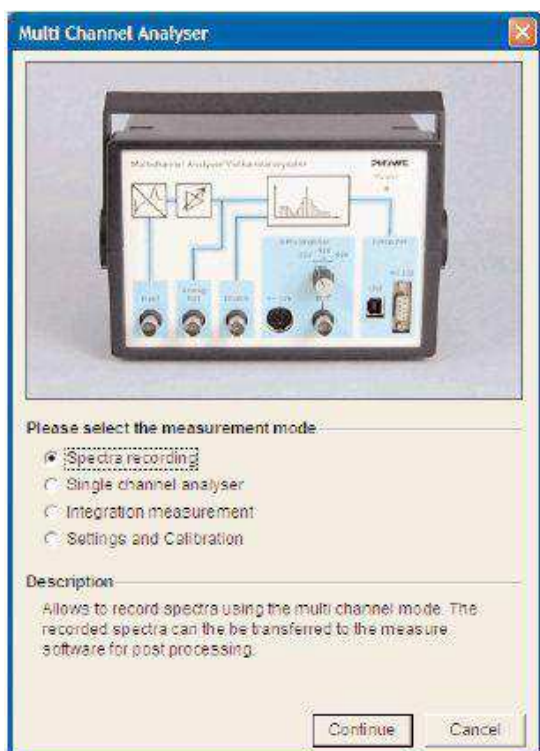


Fig. 7. Fereastra de start a MCA

4.1 Punerea în funcțiune

- Se verifică montajul și conexiunile, toate aparatele fiind scoase din priză. Se pornește calculatorul și se deschide programul *Measure*.

Se verifică faptul că potențiometrul sursei de alimentare a detectorului este pe poziția de minim, la diviziunea 0.00 (în această poziție tensiunea pe detector este 600V). Selectorul *Select input* al MCA trebuie să fie pe *Input*.

Se pornește sursa de alimentare a detectorului și analizorul multicanal.

- Se verifică dacă în programul *Measure* este selectat *Gauge* → *Multi Channel Analyser*.

- Se începe o măsurătoare nouă, *File* → *New measurement* (sau click cercul roșu). Se deschide fereastra din fig. 7. Se selectează *Spectra recording*, apoi *Continue*.

- În programul *Measure* apare fereastra pentru înregistrarea spectrului. În caseta *MCA Settings* se selectează *Gain* pe *Level 1*, *Offset* pe 0% și se alege *Channel number* pentru *x-Data* în caseta *Histogram*. *Interval width* se lasă 1. Înregistrarea spectrului se poate porni/opri folosind butonul *Start/Stop*. Selectând *Recording time* sau *Number of events* se poate alege o măsurătoare într-un timp fixat sau cu un număr fixat de evenimente.

4.2 Calibrarea spectrului

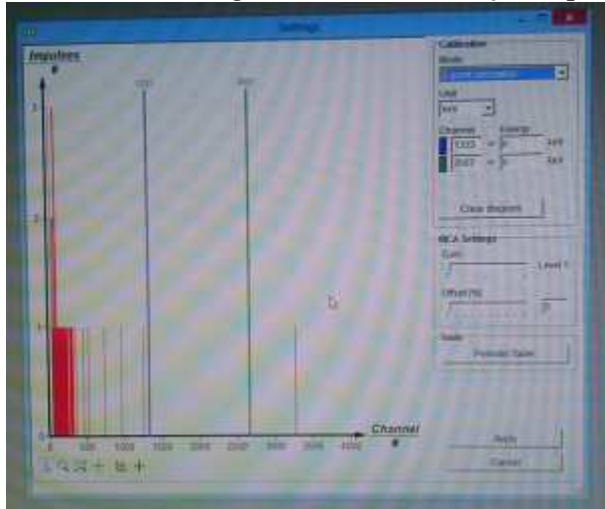
Calibrarea energetică permite stabilirea transformării de la numărul de canal, la energia evenimentului înregistrat. Transformarea este dată de ecuația unei drepte, determinată de doi parametri. Pentru calibrarea energetică se alege una din următoarele două variante, calibrare cu două sau trei puncte, la indicația conducătorului lucrării.

Varianta 1: Calibrarea folosind două puncte.

- Alegerea tensiunii de lucru: Se folosește meniul deschis anterior. Se pune sursa de ^{22}Na (OT460) în fața ferestrei detectorului. Folosind butonul *Start/Stop* se înregistrează spectrul ^{22}Na timp de un minut, observând picul de la 1,275MeV și picul de la 511KeV produs de anihilarea pozitronilor. Se mărește tensiunea aplicată pe

detector, reglând butonul potențiometrului sursei. O diviziune (1,00) corespunde unei variații de tensiune de 50V. Se alege tensiunea astfel încât picul de la 511KeV să fie prin dreptul canalului 2600. Aceasta corespunde diviziunii 6,00 a potențiometrului (tensiunea de alimentare 900V). Se blochează potențiometrul în această poziție, tensiunea pe detector rămânând fixată pe toată durata experimentului.

- Cu aceeași sursă în fața detectorului se pornește o nouă măsurătoare, *File* → *New measurement* (sau click cercul roșu). În fereastra deschisă se selectează *Settings&Calibration*, apoi *Continue*. În fereastra care apare, la secțiunea *Detector calibration* se alege *User calibration* și se apasă *Calibrate*.



- Se deschide o fereastră ca cea din figură. Pentru *Mode* se alege *2-point calibration*. Se alege *Unit* în *KeV*.

- În partea din dreapta a ferestrei spectrului se află un tabel cu 2 rânduri (pentru *2-point calibration*). Fiecare rând corespunde unei linii de marcaj din fereastra spectrului, diferențiată prin culoarea din dreptul liniei corespunzătoare din tabel. În coloana din stânga se trece numărul canalului corespunzător maximului

ales, iar în coloana din dreapta se trece energia cunoscută a liniei. Se dă *Clear diagram*.

- Pentru sursa ^{22}Na se măsoară spectrul timp de 5min. În modul cursor, se pune linia de marcaj de culoarea aleasă peste picul corespunzător liniei de anihilare și se trece în tabel numărul canalului și energia 511KeV.

- Sursa de ^{22}Na se înapoiază personalului din laborator.

- Se pune în fața ferestrei detectorului sursa MIXTURA (OO497 sau OO491), care conține în principal ^{137}Cs (cu o activitate de 333kBq).

- Se dă *Clear diagram*, apoi se înregistrează spectrul pentru această sursă timp de 3min.

- În modul cursor se pune linia de marcaj de cealaltă culoare rămasă peste picul energiei de 622KeV din spectrul ^{137}Cs . Se trece în tabel, la culoarea corespunzătoare, numărul canalului și energia 662KeV.

- Se apasă butonul *Apply*. În fereastra de setări, la secțiunea *Detector description*, se apasă *Save* și se completează secțiunea *Save calibration (Description și Comment)*.

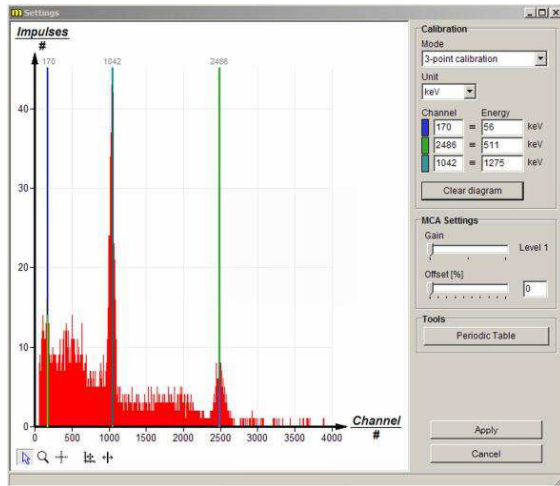
- Se apasă *Save*, apoi *Close*. Calibrarea cu numele dat în secțiunea *Description* este terminată.

Varianta 2: Calibrarea folosind trei puncte.

- Alegerea tensiunii de lucru: : Se folosește meniul deschis anterior (secțiunea 4.1). Se pune sursa de ^{137}Cs (OW641, de 37KBq) în fața ferestrei detectorului. Folosind butonul *Start/Stop* se înregistrează spectrul ^{137}Cs timp de cateva minute, observând picul de la 622KeV. Se mărește tensiunea aplicată pe detector, reglând butonul potențiometrului sursei. O diviziune (1,00) corespunde unei variații de tensiune de 50V. Se alege tensiunea astfel încât picul de la 622KeV să fie prin dreptul canalului 3500. Aceasta corespunde diviziunii 6,00 a potențiometrului (tensiunea de

alimentare 900V). Se blochează potențiometrul în această poziție, tensiunea pe detector rămânând fixată pe toată durata experimentului.

- Cu aceeași sursă în fața detectorului se pornește o nouă măsurătoare, *File* → *New measurement* (sau click cercul roșu). În fereastra deschisă se selectează *Settings&Calibration*, apoi *Continue*. În fereastra care apare, la secțiunea *Detector calibration* se alege *User calibration* și se apasă *Calibrate*.



- Se deschide o fereastră ca cea din figură. Pentru *Mode* se alege *3-point calibration*. Se alege *Unit* în *KeV*.

- În partea din dreapta a ferestrei spectrului se află un tabel cu 3 rânduri (pentru *3-point calibration*). Fiecare rând corespunde unei linii de marcaj din fereastra spectrului, diferențiată prin culoarea din dreptul liniei corespunzătoare din tabel. În coloana din stânga se trece numărul canalului corespunzător maximului ales, iar în coloana din dreapta se trece energia cunoscută a liniei. Se dă *Clear diagram*.

- Pentru sursa ^{137}Cs se măsoară spectrul timp de 8min. În spectru se văd

clar picurile corespunzătoare liniilor de 662KeV și 32KeV.

- În modul cursor, se pune linia de marcaj de culoarea aleasă peste picul corespunzător liniei de 32KeV și se trece în tabel numărul canalului și energia 32KeV. Se face același lucru cu linia de 662KeV, folosind o linie de marcaj de altă culoare.

- Sursa de ^{137}Cs se înapoiază personalului din laborator.

- Se pune sursa de ^{22}Na (OT460 - 74kBq) în fața ferestrei detectorului.

- Se dă *Clear diagram* și se măsoară spectrul timp de 5min pentru această sursă.

În modul cursor se pune linia de marcaj de culoarea rămasă nefolosită peste picul energiei de 511KeV și se completează ultima linie rămasă.

- Se apasă butonul *Apply*. În fereastra de setări, la secțiunea *Detector description*, se apasă *Save* și se completează secțiunea *Save calibration (Description și Comment)*.

- Se apasă *Save*, apoi *Close*. Calibrarea cu numele dat în secțiunea description este terminată.

- Sursa de ^{22}Na se înapoiază personalului din laborator.

4.3 Determinarea variației energiei cuantelor gama împrăștiate Compton în funcție de unghiul de împrăștiere.

Sursa folosită este **MIXTURA** (OO497 sau OO491), care are drept componentă principală sursa ^{137}Cs (cu o activitate de 333kBq).

- Se realizează montajul din figura 4 pentru unghiurile $\theta = 120^{\circ}, 105^{\circ}, 90^{\circ}$ (eventual și unghiul de 60° , dar pentru acesta erorile de localizare ale picului sunt mai mari). Se va avea grijă ca la fiecare unghi să se realizeze o ecranare corespunzătoare pentru a nu înregistra direct radiațiile care vin de la sursă. Ne interesează picul format de cuantele de energie 662KeV care au fost împrăștiate, sub unghiul fixat, de către cilindrul de Fe. Cum nu ne interesează intensitatea radiației împrăștiate la diverse unghiuri nu este necesară menținerea constantă a distanței sursă-detector.

- La fiecare unghi se accesează o nouă măsurătoare, *File* → *New measurement* (sau click cercul roșu). Se deschide fereastra din fig. 7. Se selectează *Spectra recording*, apoi *Continue*.

- În fereastra de înregistrare a spectrului se pune *x-Data*, din secțiunea *Histogram*, pe *Energy*, iar în căsuța *Interval width* se selectează 25.

- La fiecare unghi se măsoară spectrul timp de 15min. Datele se salvează apăsând butonul *Accept data*, care trimite datele în programul *Measure*. Datele sunt salvate pe disc pentru a fi prelucrate după terminarea măsurătorilor (în fișiere tip .msr ce pot fi deschise de programul *Measure*).

Atenție!

- *Utilizarea surselor radioactive se face numai pe timpul efectuării măsurătorilor, după care se predau cadrului didactic sau laborantei.*
- *Utilizarea surselor radioactive se face cu respectarea strictă a normelor de protecție la folosirea a surselor radioactive.*

5. Prelucrarea datelor experimentale

- Se deschide programul *Measure*.

- În directorul unde au fost salvate datele brute se creează directorul Analiza, copiind în acesta, pe rând, fișierele cu măsurători (pentru a nu deteriora datele cu o salvare involuntară).

- Pentru fiecare unghi se deschide fișierul salvat anterior, *File* → *Open measurement*.

- Din *Analysis* → *Smooth* se realizează o netezire a spectrului, apoi cu *Analysis* → *Peak analysis*, selectând *Visualize results*, se găsește poziția picului împrăștiat Compton.

- Datele se trec în tabelul următor:

Unghi	Energia gama măsurată (keV)	Energia gama calculată (keV)
120°		
105°		
90°		
(60°)		

Energia gama calculată se obține aplicând formula (4).

- Se reprezintă grafic energia cuantelor γ difuzate în funcție de unghi, $E_\gamma = f(\theta)$, atât pentru valorile măsurate, cât și pentru cele calculate.

În continuare vom folosi dependența dată de formula (3), $\frac{1}{E_\gamma} = f(1 - \cos \theta)$, o

dependență liniară cu panta $\frac{1}{m_0 c^2}$:

- Din programul *Measure* se accesează *Measurement* → *Enter data manually*. Se alege numărul de canale egal cu 2: unghiul θ și energia cuantei împrăștiate, E_γ . Numărul de valori se va lua egal cu numărul de unghiuri măsurate plus o unitate. Deoarece numărul de date este mic, vom folosi și faptul că pentru $\theta = 0$, $E_\gamma = 662 \text{ keV}$

(sau că ordonata la origine este $\frac{1}{662} \text{ keV}^{-1}$). Numărul de zecimale se ia egal cu 2.

- Se dă *Continue* și se introduc datele.
- În *Analysis*→*Channel modification*, folosind ca sursă canalul pentru θ (să notăm simbolul canalului cu “theta”), folosind operația

$$1 - \cos(3.14 * \theta / 180),$$
 formăm un nou canal pe care îl notăm cu “X”.
 - În *Analysis*→*Channel modification*, folosind ca sursă canalul energie, fie acesta notat E, folosind operația $1000 / E$ (deoarece valorile sunt foarte mici, înmulțim arbitrar cu factorul “1000”), formăm un canal pe care îl notăm “Y”.
 - În *Measurement*→*Channel manager* se ia pentru axa-x, canalul “X” și pentru axa-y, canalul “Y”. Se reprezintă grafic $Y=f(X)$. (Datele pe x nu sunt monoton crescătoare, se alege “Sort data. Ask again if...”).
 - Din *Analysis*→*Show slope* se obține panta drepte, a cărei valoare teoretică este

$$\frac{1000}{m_0 c^2} = 1,96 \text{keV}^{-1}.$$

6. Bibliografie

1. www.phywe.fr/index.php/fuseaction/download/lrn_file/versuchsanleitungen/P2524415/e/P2524415.pdf
2. G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (John Wiley & Sons, New York, ed 3)