

EFECTUL COMPTON

Scopul lucrării

Verificarea experimentală a teoriei efectului Compton, de schimbare a lungimii de undă a fotonilor împrăștiați, în funcție de unghiul de împrăștiere folosind un spectrometru γ cu detector cu scintilație și o sursă γ de 661 keV.

Principiul lucrării

Efectul Compton este împrăștierea elastică a unui foton pe un electron cu schimbarea lungimii de undă a fotonului. În calculele teoretice considerăm electronul liber și în repaus.

Un foton având energia $h\nu$, impulsul $h\nu/c$ și lungimea de undă λ interacționează cu un electron liber în repaus, conform legilor de conservare ale energiei și impulsului.

$$h\nu + m_0c^2 = h\nu' + mc^2$$
$$p^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h\nu}{c} \cdot \frac{h\nu'}{c} \cos\theta$$

unde θ unghi, mc^2 energia totală a electronului împrăștiat, iar \vec{p} impulsul electronului după interacție. Scoțând din prima relație mc^2 și din a doua p^2 și introducându-le în relația relativistă dintre impuls și energie :

$$(mc^2)^2 = p^2c^2 + (m_0c^2)^2$$

obținem:

$$(h\nu + m_0c^2 - h\nu')^2 = h^2\nu^2 + h\nu'^2 + 2h^2\nu\nu' \cos\theta + (m_0c^2)^2$$

De aici se poate calcula ν' funcție de θ , respectiv λ

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = f(\theta)$$

rezultă creșterea lungimii de undă a fotonului împrăștiat:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta)$$

În prezenta lucrare se verifică relația de mai sus, măsurând schimbarea lungimii de unda ($\Delta\lambda$) în funcție de unghiul de împrăștiere.

Montajul experimental

Dispozitivul experimental este ilustrat în figura 1. Sursa radioactivă (S) de ^{137}Cs de 5mCi emite cuante γ de $E_\gamma = 661 \text{ KeV}$, printr-un colimator de Pb (CP) spre o țintă cilindrică de fier (Fe). Atomii de fier conțin electroni slab legați și cu energia destul de mică în comparație cu cea a radiațiilor gamma incidente, încât pot fi considerați practic liberi și în repaus.

Energia E_γ a radiațiilor γ împrăștiate Compton la diferite unghiuri θ este măsurată cu ajutorul unui lanț spectrometric γ format dintr-un detector cu scintilație, un amplificator-analizor monocanal de impulsuri și dintr-un numărător electronic.

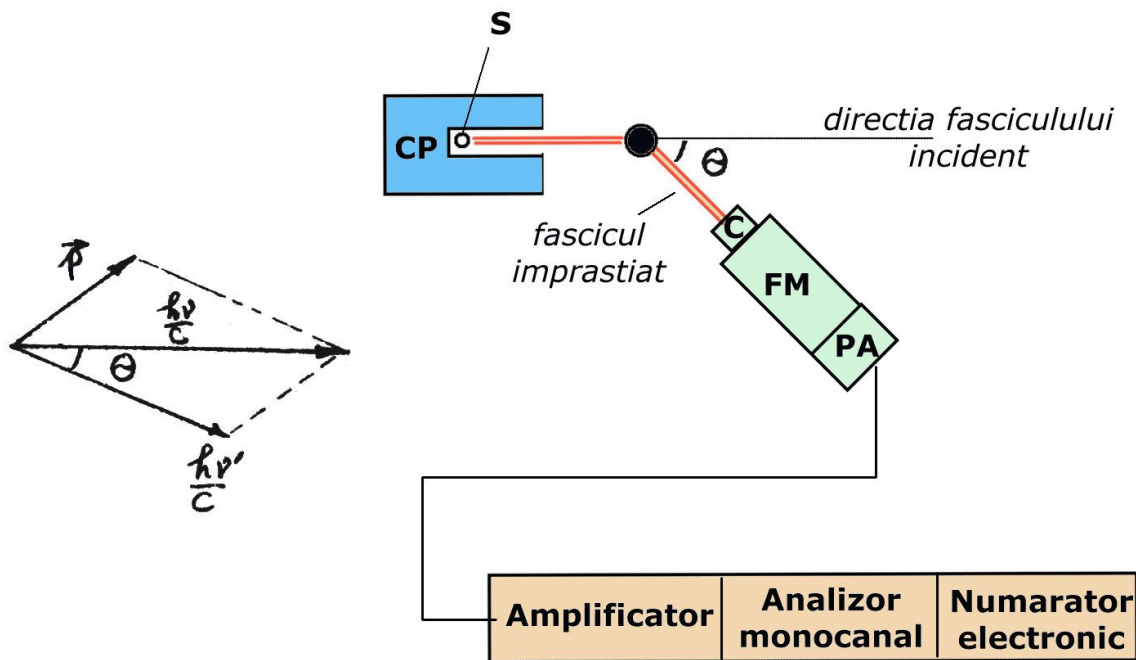


Figura 1

Variația unghiului θ se face prin deplasarea brațului mobil pe care este fixat detectorul, unghiul θ putând fi citit pe un cerc gradat coaxial cu cilindrul de Fe (centrul cercului).

În cristalul (C) de NaI(Tl) al detectorului, cuanta γ produce prin efect fotoelectric fotoelectroni de energie $\sim E_\gamma$ sau prin împrăștiere Compton în atomii cristalului, electroni de recul. Energia disipată în cristal se transformă parțial și foarte rapid (în 10^{-8} s), în scintilații luminoase, care apoi cu ajutorul fotomultiplicatorului se transformă în impulsuri de tensiune electrică U_d , fiecare impuls având o amplitudine proporțională cu energia cuantei γ . Impulsurile U_d furnizate de sonda de detecție sunt amplificate și apoi analizate cu ajutorul analizorului monocanal.

Pentru o valoare constantă a lărgimii pragului ΔE_p (0,1V) al analizorului monocanal, se determină dependența $N(E_p)$ a numărului de impulsuri înregistrate în funcție de valoarea E_p a pragului de analiză. (fig. 2).

Prima porțiune corespunde electronilor Compton produși de cuantele γ în cristal, iar picul din a doua porțiune corespunde absorbției totale a energiei cuantelor γ în cristalul scintilator.

Picul de absorbție totală se mai numește și fotopic pentru că la formarea lui contribuie cel puțin un proces de absorbție fotoelectrică a cuantelor γ detectate sau a cuantelor γ împrăștiate Compton. În același timp, se observă că prezența efectului fotoelectric nu produce decât numai un fotoelectron de energie $E_\gamma - E_x$ urmat de o radiație X caracteristică atomului de iod, E_x fiind energia de ionizare a păturii K (sau L). **Numai prin detecția și a acestei radiații X emise imediat după primul efect fotoelectric (tot printr-un efect fotoelectric produs de radiația X) în cristal se disipă întreaga energie a cuantei γ inițiale.**

Pozitia pragului picului de absorbție totală $(E_{pi})_{max}$ este proporțională cu: energia cuantelor γ , randamentul de scintilație luminoasă $(n_s/E\gamma)$ produs pe cristalul de NaI(Tl), de sensibilitatea fotocathodei fotomultiplicatorului, de coeficientul de amplificare al fotomultiplicatorului, de coeficientul de amplificare al amplificatorului electronic.

Etalonarea în energie a spectrometrului se face măsurând spectrul unei surse de radiații ce produc cuante de energie cunoscută. Astfel, din spectrul sursei de ^{137}Cs care emite cuante γ de 661 KeV reprezentat în fig. 2 se deduce că picul apare la pragul $(E_p)_{max}$. Aceasta permite reprezentarea în fig. 3. a dreptei de etalonare a spectrometrului γ , din care apoi să se poată deduce energia cuantei detectate corespunzătoare oricărei poziții a pragului de discriminare, cuprinsă în intervalul 0-10V.

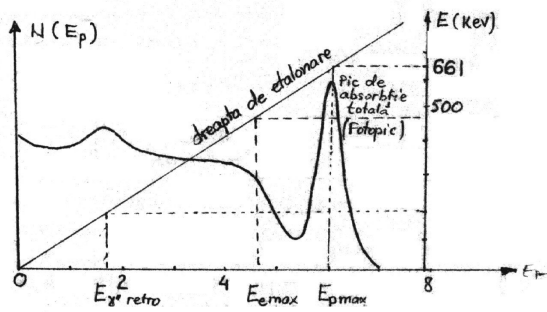


Figura 2

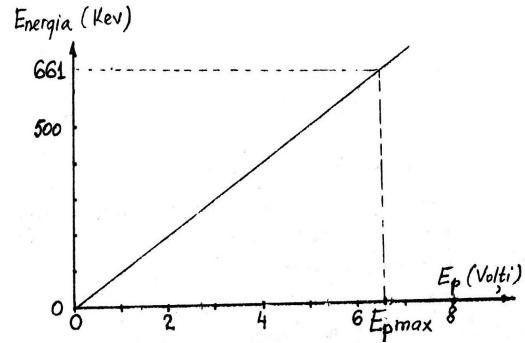


Figura 3

Proportionalitatea dintre poziția picului de absorbție totală (a fotopicului) și energia cuantelor γ permite determinarea energiei cuantelor γ' pentru diferite unghiuri θ și apoi calcularea lungimii

$$\lambda' = \frac{hc}{E\gamma'}$$

Dispozitivul experimental utilizat este prezentat în figura 4

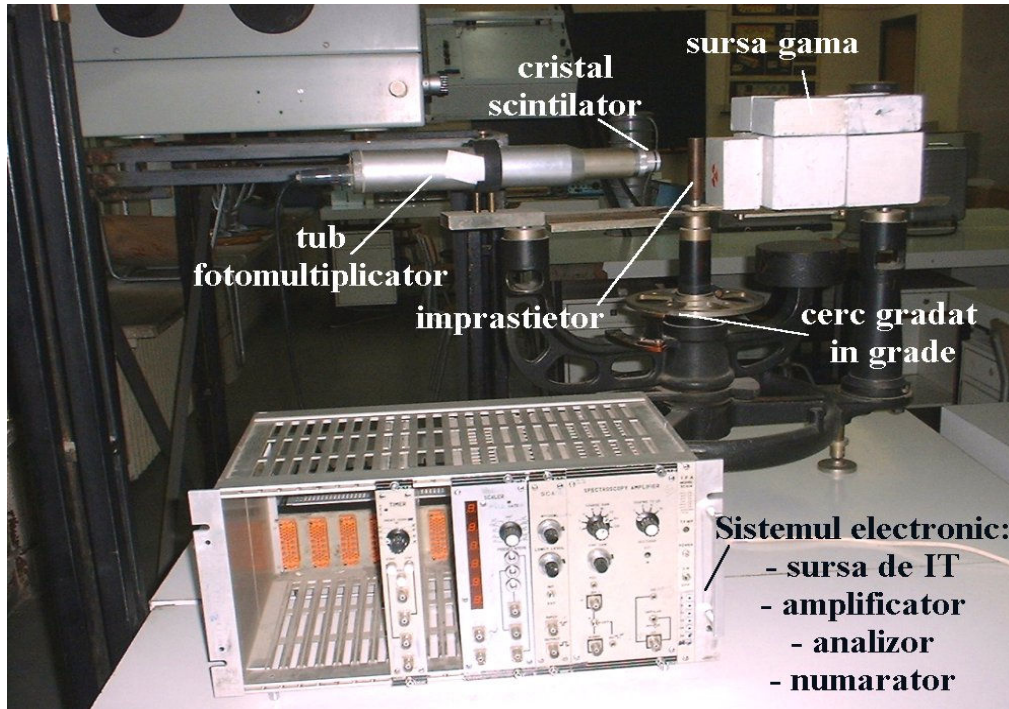


Figura 4

Modul de lucru

1. Se verifică conectarea la aparate a cordoanelor de alimentare de la rețea și a cablurilor de legătură dintre analizor și numărător.
2. Se pune în funcțiune amplificatorul și analizorul monocanal prin conectarea tensiunii de alimentare de 220V.

Prelucrarea datelor

- a) Se etalonează analizorul monocanal astfel: pe graficul spectrului cu $\theta = 0^0$ (fig. 2) se trasează dreapta care trece prin origine și punctul de coordonate $x = (E_p)_{\max}$ ($\theta = 0^0$) și $y = 661$ KeV. Această dreaptă de etalonare permite, în continuare, determinarea directă a energiei cuantelor γ în funcție de diferite poziții $(E_p)_{\max}$ obținute.
- b) Din reprezentarea grafică a spectrelor măsurate se determină energiile $E_{\gamma'}$ pentru diferite unghiuri θ și se calculează datele conform următorului tabel:

Tabelul 1

θ^0	$(E_p)_{\max}$ (V)	E_{γ} (KeV)	$\lambda(10^{-2} \text{ \AA})$	$\Delta\lambda(10^{-2} \text{ \AA})$	$1 - \cos\theta$

- c) Se reprezintă grafic dependența $\Delta\lambda$ funcție de $(1 - \cos\theta)$. Prin punctele obținute se trasează o dreaptă $y = mx$. Valoarea experimentală a pantei dreptei (m) se compară cu cea teoretică:

$$m_{teor} = \frac{h}{m_0 c}$$

- d) Din spectrul obținut la $\theta = 0^0$ se va determina energia maximă $(E_e)_{\max}$ a electronilor Compton obținuți din cristalul de NaI(Tl) prin împrăștierea Compton a cuantelor γ pe electronii liberi ai cristalului. Poziția $(E_e)_{\max}$ corespunde punctului de pantă maximă a porțiunii spectrului electronilor de recul (figura 3.) Din același spectru se determină $(E_{\gamma'})_{\text{retro}}$ a picului de retroîmprăștiere datorat cuantelor care neinteracționând inițial cu detectorul au suferit împrăștiere Compton de 180^0 și apoi au revenit în cristal fiind detectate. Valorile experimentale ale lui $(E_e)_{\max}$ și $(E_{\gamma'})_{\text{retro}}$ vor fi comparate cu valorile obținute din teoria efectului Compton.

Probleme și întrebări

1. Să se calculeze energia E_{γ} a cuantelor γ împrăștiate și energia E_e a electronilor de recul rezultați în funcție de energia E_{γ} a cuantelor γ și unghiul θ de împrăștiere Compton.
2. Să se explice de ce un spectrometru de scintilații furnizează un spectru continuu de amplitudini la detectia cuantelor γ monoenergetice (de 661 KeV în cazul $\theta = 0^0$ al prezentei lucrări). Să se explice proveniența fiecărei porțiuni a spectrului obținut experimental.
3. Folosind aparatura utilizată și o placă de Fe de grosime cunoscută, să se descrie măsurătorile și calculele care trebuie efectuate pentru a determina:
 - a) coeficientul liniar și coeficientul masic de interacție a cuantelor γ și secțiunea eficace corespondătoare acestei interacțiuni globale;
 - b) secțiunea diferențială de împrăștiere Compton presupunând că acest efect este preponderent la aceste energii.
4. Să se descrie calitativ felul în care este afectat spectrul măsurat experimental de diferitele valori ale lărgimii pragului de discriminare $\Delta E_p = 0,05$ V, 0,2V, 2V, și 5V. Care ar fi lărgimea optimă?
5. Cum se schimbă rezultatele experimentale din prezenta lucrare dacă în locul cilindrului de Fe este folosit un cilindru de carbon sau unul de Pb?

- De cine și cum depinde poziția picului de absorbție totală într-un spectru γ obținut cu detector de scintilație?
- Cum se poate determina experimental timpul mediu dintre două cuante γ detectate de instalația utilizată?
- Completați graficele prezentate în figurile 5 și 6 cu curbele corespunzătoare energiei de 0,661 MeV, a radiației folosite în acest experiment. Folosind aceste grafice, calculați energia și unghiul de împrăștiere a electronului Compton la unghiurile la care ați făcut măsurătorile experimentale

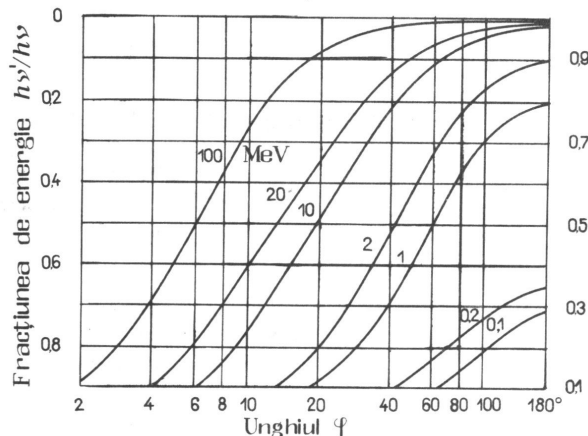


Figura 5

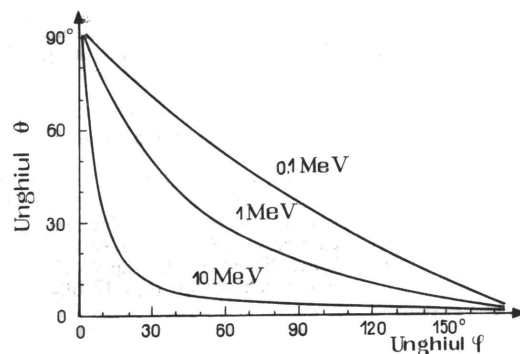


Figura 6

$$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Unghi	Cosθ	Unghi	Cosθ	Unghi	cosθ	Unghi	cosθ	Unghi	cosθ
5	0,9976	35	0,8192	65	0,4226	95	0,0872	125	0,5736
10	0,9848	40	0,7660	70	0,3420	100	0,1736	130	0,6428
15	0,9659	45	0,7071	75	0,2588	105	0,2588	135	0,7071
20	0,9397	50	0,6428	80	0,1736	110	0,3420	140	0,7660
25	0,9063	55	0,5736	85	0,0872	115	0,7660	145	0,8192
30	0,8660	60	0,5000	90	0,0	120	0,5000	150	0,8660

Bibliografie

H.Hulubei, "Structura materiei", Note de curs, Univ. din Bucuresti, 1948

E.V.Spolschi, "Fizica atomică", Ed. Tehnică, 1953

K.N.Muhin, "Fizica nucleară experimentală", Ed. Tehnică, 1981,

E.H.Wichmann, "Fizica cuantică", Cursul de fizică Berkley, vol IV, Ed. Didactică și Pedagogică, 1983; pp. 166-168

B.H.Brandsen, C.J.Joachain, "Fizica atomilor și moleculelor", Ed. Tehnică, 1995