

INIS-mf--6615

2

INSTITUTUL CENTRAL DE FIZICA
INSTITUTUL DE FIZICA SI INGINERIE NUCLEARA

MANUELA IONESCU-BUJOR

Structura izomerilor nucleari ai ^{112}In si
interactia lor cu cimpurile extranucleare

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

CONDUCATOR STIINTIFIC

Dr. E.A. IVANOV

- BUCURESTI -

1979

CUPRINSUL TEZEI

Introducere	1
Capitolul 1. Teoria nivelelor de energie joasă în nuclele sferice dublu impare	4
1.1 Interacția reziduală proton-neutron; spinii și paritățile nivelelor dublu impare	4
1.2 Momentele electromagnetice statice	9
1.3 Secțiuni de populare ale stărilor izomere	19
Capitolul 2. Investigarea experimentală a izomeriei de viață scurtă în ^{112}In	24
2.1 Tehnica experimentală de bază	24
2.2 Observarea tranzițiilor izomere	29
2.3 Studiul dezintegrării în cascadă	33
2.4 Măsurarea precisă a timpilor de viață	35
2.5 Multipolaritățile tranzițiilor izomere	41
2.6 Schema de nivele	46
2.7 Determinări de rapoarte izomere	49
Capitolul 3. Investigarea interacțiilor stărilor izomere cu câmpurile extranucleare	58
3.1 Elemente de teorie a distribuțiilor unghiulare perturbate	58
3.2 Dispozitive de iradiere a țintelor la temperaturi înalte	71
3.3 Interacția magnetică	76
3.4 Analiza coeficienților de distribuție unghiulară	81
3.5 Interacția electrică cvadripolară	86

<u>Capitolul 4.</u>	Interpretarea rezultatelor	92
4.1	Sistematica nivelelor joase în izotopii dublu impari de indiu	92
4.2	Probabilități de tranziție electromagnetică . .	96
4.3	Momentele electromagnetice statice	99
4.3.1	Momentele magnetice ale stărilor izomere 8^- și 6^+	99
4.3.2	Momentul electric cvadripolar al stării izomere 8^-	101
4.4	Analiza anomaliei secțiunilor de populare în izotopii dublu impari de indiu	103
<u>Capitolul 5.</u>	Investigarea dinamicii defectelor de iradiere folosind izomerii din ^{112}In	113
5.1	Interacția hiperfină ca metodă de studiu a corpului solid sub radiații	113
5.2	Defecte punctiforme în metale	117
5.3	Măsurători și rezultate experimentale	127
5.4	Interpretarea rezultatelor	132
<u>Concluzii</u>	144
<u>Bibliografie</u>	148

In această lucrare sînt prezentate rezultatele unor cercetări efectuate în perioada 1972 - 1978, la Institutul de Fizică și Inginerie Nucleară, în cadrul colectivului de Izomerie Nucleară.

Exprim profundă recunoștință conducătorului meu științific, Dr. Eugen Ivanov, inițiatorul și conducătorul unui program complex de cercetări de izomerie nucleară, pentru atența îndrumare și contribuția deosebită în formarea mea ca fizician. De asemenea, pentru sfaturile prețioase pe care le-am primit și pentru interesul cu care a urmărit elaborarea acestei lucrări îi aduc sincere mulțumiri.

Tin să mulțumesc în mod deosebit cercetătorilor științifici Dan Ploștinaru, Dr. Alexandru Iordăchescu și Dr. Gheorghe Pascovici pentru contribuțiile importante aduse la realizarea experiențelor prezentate în lucrare.

Aduc mulțumiri colegilor Dr. Stefan Vajda, Marius Zaharcu, Petru Racolțea și Bogdan Constantinescu pentru participarea în diferite etape la efectuarea măsurărilor experimentale.

Cu multă plăcere mulțumesc tehnicienelor Stefania Niculescu și Gabriela Stermin pentru solicitudinea cu care au răspuns mereu cerințelor mele.

INTRODUCERE

Un domeniu important al cercetărilor de spectroscopie nucleară în reacții induse de particule accelerate îl constituie studiul stărilor izomere. Abordat odată cu punerea la punct a tehnicii fasciculului pulsant la acceleratoarele de particule, acest domeniu a beneficiat de dezvoltări remarcabile ale metodicii experimentale, dovedindu-se fructuos pentru multe domenii ale fizicii.

Tehnica specifică folosită permite selectarea, din multitudinea de nivele excitate, a unor stări particulare, ale căror proprietăți se investighează în detaliu. Caracteristicile nucleare determinate experimental : spini, timpi de viață, momente electromagnetice statice, reprezintă mărimi importante în înțelegerea structurii stărilor de energie joasă. Studiul mecanismului de reacție, în particular dependența de spin a secțiunilor de populare a acestor stări, furnizează, pe de altă parte, informații asupra proprietăților nucleelor în stări cu energie înaltă de excitație.

În ultimii ani, investigarea interacțiilor momentelor electromagnetice ale stărilor izomere cu câmpurile extranucleare s-a conturat ca un domeniu de interes pentru cercetarea proprietăților corpului solid sub acțiunea iradierii. Nucleele excitate în stări izomere constituie probe cu ajutorul cărora se studiază proprietățile locale ale rețelei cristaline gazdă, în special defectele produse de iradiere.

Obiectul acestei lucrări îl constituie studiul detaliat al izomerilor de viață scurtă în nucleul dublu impar ^{112}In , abordându-se aspecte ale direcțiilor de cercetare menționate anterior.

Fenomenul de izomerie în nucleele dublu impare de indiu se explică prin existența, la energii joase de excitație, a unor stări cu valori diferite ale spinilor, produse prin cuplajul stării de un gol protonic pe nivelul $1g_{9/2}$ cu stările neutronice de joasă energie. Stări izomere de spin înalt și paritate pozitivă (7^+) și negativă (8^-) au fost identificate în $^{108,110}\text{In}$ și respectiv $^{114,116,118}\text{In}$.

Singurele informații cunoscute privind nucleul ^{112}In erau starea fundamentală 1^+ și o stare izomeră 4^+ . Cercetările au urmărit pe de o parte elucidarea schemei de nivele a stărilor izomere, iar pe de altă parte studierea interacțiilor momentelor electromagnetice ale acestor stări cu câmpurile extranucleare, atât cu scopul determinării valorilor momentelor electromagnetice, cât și pentru investigarea câmpurilor perturbatoare în rețeaua cristalină a țintei.

Lucrarea conține cinci capitole. În primul capitol sînt expuse ideile teoretice fundamentale necesare în interpretarea informațiilor de fizică nucleară. În capitolul al doilea sînt prezentate rezultatele investigației experimentale a izomerilor de viață scurtă în ^{112}In , concretizate într-o schemă a nivelelor de joasă energie în acest nucleu. Capitolul al treilea este dedicat studiului experimental al momentelor electromagnetice statice ale stărilor izomere. Interpretarea rezultatelor experimentale de structură nucleară constituie subiectul capitolului al patrulea. Ultimul capitol al lucrării este dedicat cercetărilor privind influența defectelor de iradiere asupra alinierii stării izomere din ^{112}In , implantate în rețeaua cristalină a argintului metalic.

CAPITOLUL 1 TEORIA NIVELELOR DE ENERGIE JOASA IN NUCLEELE SFERICE DUBLU IMPARE

În acest capitol sînt prezentate succint proprietățile stărilor de energie joasă în nucleele sferice dublu impare. Aplicarea modelului păturilor acestei clase de nuclee presupune că nucleonii, ca și în nucleele impare, umplu independent nivelele protonice și neutronice ale câmpului selfconsistent cu valori determinate ale momentelor unghiulare $j_{p(n)}$, iar momentul unghiular al grupei impare de nucleoni pe nivelul incomplet $I_{p(n)}$ este o integrală aproximativă a mișcării / ~~1.1~~ Caracteristicile cuantice ale stărilor nucleele dublu impare pot fi reprezentate ca o combinație a caracteristicilor cuantice ale grupelor impare protonice și neutronice.

Spini și parități. Configurației $[j_p^{v_p} I_p ; j_n^{v_n} I_n]$ cu v_p, v_n numărul nucleonilor pe nivelul incomplet, îi corespunde un multiplet de nivele cu spini I ce satisfac relația :

$$|I_p - I_n| \leq I \leq I_p + I_n \quad (1)$$

Un rol deosebit în nucleele dublu impare îl are interacți reziduală între protonul și neutronul impar. Sub acțiunea sa multipletul cu configurația $[j_p^{v_p} I_p ; j_n^{v_n} I_n]$ se despică, iar caracterul despicării este dependent de natura interacției. Analiza datelor experimentale asupra unor sisteme simple a permis determinarea caracteristicilor de bază ale interacției reziduale proton-neutron /2/. Au fost formulate reguli pentru determinarea spinilor stărilor celor mai joase ale multipletului (regulile de cuplaj Brennan - Bernstein /5/) :

Pentru configurații particulă-particulă sau gol-gol :

Regula tare R1 : $I = |I_p - I_n|$, pentru $j_p = l_p + \frac{1}{2}$ și $j_n = l_n + \frac{1}{2}$

Regula stabilă R2 : $I = |I_p + I_n|$ și nivelele

$I = I_p + I_n$ și $I = |I_p - I_n|$ apropiate ,

pentru $j_p = l_p \pm \frac{1}{2}$ și $j_n = l_n \pm \frac{1}{2}$

Pentru configurații de tip particulă-gol, independent de j_p și j_n :

Regula slabă R3 : $I = I_p + I_n - 1$

Studiile experimentale sistematice efectuate în ultimii ani asupra nucleelelor sferice dublu impare au stimulat calcule detaliate, în vederea obținerii unor informații mai bogate asupra interacției reziduale proton-neutron. Ele se bazează pe existența unor stări descrise de configurații foarte pure, ca membre ale multipletului proton-neutron. În spectrele energetice ale nucleelelor dublu impare s-au identificat, de asemenea, alături de aceste stări pure, stări descrise prin amestecuri de configurații, precum și stări cu caracter colectiv, expresie a complexității interacțiilor nucleonilor din nuclee.

Momentele electromagnetice statice. In caracterizarea stărilor nucleare un rol foarte important îl au momentele electromagnetice statice. Modelul păturilor indică pentru nucleele dublu impare sumarea contribuțiilor configurațiilor protonice și neutronice. Astfel, momentul magnetic al unei stări de spin I este :

$$\mu = \frac{1}{2} I \left[(g_p + g_n) + (g_p - g_n) \frac{I_p(I_p+1) - I_n(I_n+1)}{I(I+1)} \right] \quad (1.2)$$

g_p și g_n definind factorii giromagnetici ai sistemelor impare. Pentru acestea se folosesc în primă aproximație valorile uniparticulă (Schmidt). Se cunosc, pe de altă parte, deviații apreciabile ale mărimilor experimentale de la valorile Schmidt datorită contribuțiilor importante ale amestecurilor de configurații, în particular ale polarizării miezului /13,14/.

Pentru a ține cont de aceste efecte, se folosesc pentru g_p și g_n în (1.2) factorii giromagnetici ai stărilor corespunzătoare din nucleele impare vecine (factorii empirici). Contribuțiile polarizării miezului specifice nucleelor dublu impare, care se adaugă termenilor empirici, sînt apreciabil mai mici /14/.

Analog, momentul electric cvadripolar al stării descrise de configurația $[j_p^{v_p} I_p ; j_n^{v_n} I_n]$ se poate exprima prin descompunerea stărilor cuplate, punînd în evidență momentele electrice cvadripolare ale sistemelor impare, într-o formulă de tip :

$$Q = A \cdot Q_p + B \cdot Q_n \quad (1.3)$$

coeficienții A și B conținînd produse de coeficienți Clebsch - Gordan și $6j$ /8/. Pentru Q_p și Q_n se pot lua valori uniparticulă corectate pentru factorii de ocupare sau valori unicyasiparticulă /20/. Aceste evaluări necesită însă cunoașterea sarcinii efective și a contribuțiilor fononice, uneori apreciabile. Ca și în cazul momentelor magnetice, se folosesc pentru momentele electrice cvadripolare ale sistemelor impare valorile experimentale ale nucleelor vecine în stările j_p, j_n , ca un test al configurațiilor nucleare folosite.

Pentru elucidarea proprietăților stărilor izomere în nucleul ^{112}In au fost efectuate și studii asupra secțiunilor de populare ale stărilor izomere în reacții nucleare. În ultimul paragraf al acestui capitol se prezintă succint formalismul de interpretare a rapoartelor izomere, propus inițial de R. Vandebosch și J. Muizenga /21/. Acest formalism se bazează pe descrierea reacției nucleare cu ajutorul modelului statistic /22/ și pe o tratare statistică a tranzițiilor γ care populează stările izomere. Se evidențiază astfel studiul rapoartelor izomere ca o metodă utilă pentru verificarea presupunerilor modelului statistic și obținerea de informații asupra mărimilor (parametrul densității de nivele, factorul de tăiere a spinului) proprii acestui model. Pe de altă parte, acest formalism prevede o puternică dependență de spin a secțiunilor de populare a stărilor izomere. Studiul rapoartelor izomere constituie astfel o metodă pentru determinarea spinilor acestor stări.

Remarcăm în încheiere că studiile de rapoarte izomere au pus în evidență în anumite cazuri devieri ale valorilor experimentale de la valorile calculate cu formalismul statistic /27,18/, indicând faptul că popularea stărilor nucleare nu este corect descrisă de modelul statistic, fie datorită unui proces de interacție directă, fie datorită unor influențe specifice structurii nucleare, legate de existența păturilor nucleare sau a unor stări colective.

CAPITOLUL 2 INVESTIGAREA EXPERIMENTALA A IZOMERIEI DE VIATA SCURTA IN ^{112}In

Studiul stărilor izomere de viață scurtă din ^{112}In s-a realizat prin excitarea nivelelor nucleare în reacțiile $^{112}\text{Cd}(p,n)$, $^{112}\text{Cd}(d,2n)$ și $^{109}\text{Ag}(\alpha,n)$ la Ciclotronul U-120 și Tandemul IPIN. Măsurători efectuate anterior /30/ au pus în evidență, la bombardarea cu protoni a unei ținte de cadmiu natural, două tranziții γ întârziate, cu energiile de 203 keV și 270 keV, corespunzând unei perioade de înjumătățire de $(2\pm 1)\mu\text{s}$. Investigarea detaliată a acestor tranziții izomere s-a bazat pe punerea la punct a unor tehnici și metode experimentale noi, cum sînt utilizarea fasciculului

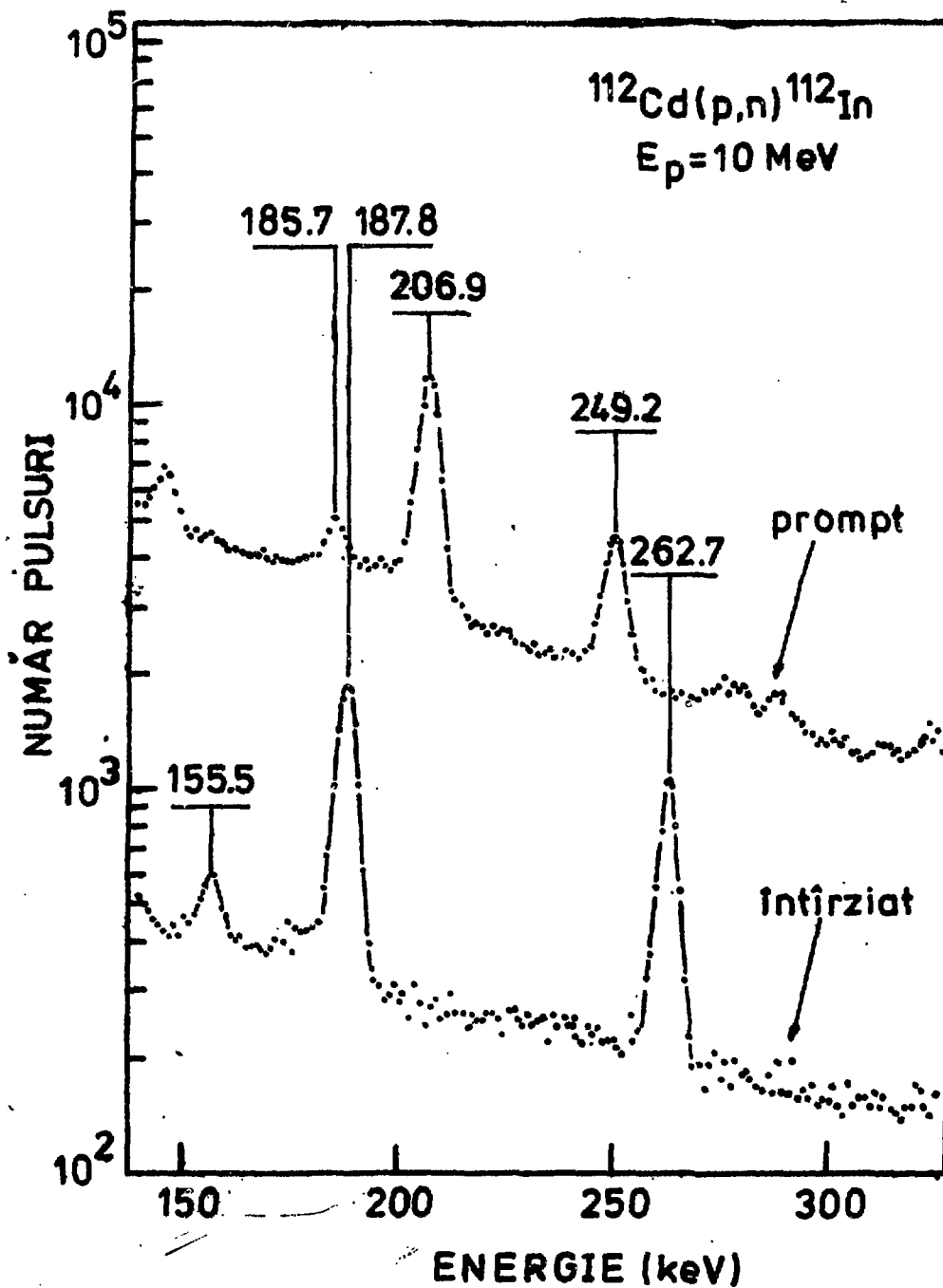


Fig.4. Spectre de raze γ prompt \bar{e} și intirziate.

pulsat în domeniul nanosecundelor asociată cu spectrometria γ de înaltă rezoluție cu detectori cu semiconductori, metode de iradiere a țintelor solide încălzite la diferite temperaturi și a țintelor lichide plasate în cîmpuri magnetice, etc.

Schema electronică standard folosită permitea înregistrarea spectrelor energetice la diferite intervale de timp după iradiere, precum și a spectrelor temporale pentru energii selectate. Măsurarea spectrelor γ prompte și întârziate cu un detector Ge(Li) (Fig.4) a permis stabilirea precisă a energiilor tranzițiilor izomere, de $187,8 \pm 0,3$ keV și $262,7 \pm 0,3$ keV. Picul de 155,5 keV prezent în spectrul întârziat se datorește dezexcitării stării izomere 4^+ cu $T_{1/2} = 20,9$ min din ^{112}In [32]. O măsurătoare efectuată cu un detector de Si(Li) nu a pus în evidență alte tranziții întârziate, pînă la energia minimă de 8 keV.

Lipsa componentei prompte pentru ambele tranziții (Fig.4) a indicat existența a două stări izomere. Pe de altă parte, raportul intensităților celor două tranziții întârziate, măsurat în intervalul de timp de la 4 μs la 15 μs după iradiere, a fost găsit constant, sugerînd presupunerea unei dezexcitări în cascadă. Această ipoteză a fost confirmată, prin punerea în evidență a sumării în cristalul scintilator de NaI(Tl) a evenimentelor coincidente, într-o măsurătoare cu eficacitate mare de detecție. Se observă în Fig.6 existența picului cu energie corespunzătoare sumei energiilor celor două tranziții întârziate.

Timpii de viață ai stărilor izomere s-a determinat din analiza spectrelor temporale ale tranzițiilor întârziate, în reacțiile $^{112}\text{Cd}(p,n)$ și $^{109}\text{Ag}(\alpha,n)$. După cum se observă în Fig. 7-8, în ambele reacții s-a obținut pentru tranziția de 263 keV o dezintegrare exponențială simplă, corespunzînd unei perioade de înjumătățire de :

$$T_{1/2} = (2,81 \pm 0,03) \mu\text{s}$$

Spectrele temporale corespunzătoare tranziției de 188keV prezintă pentru timpi $t < 3 \mu\text{s}$ o deviere de la dezintegrarea exponențială simplă, indicînd că această tranziție depopulează nivelul izomer inferior. Potrivirea datelor experimentale cu o curbă

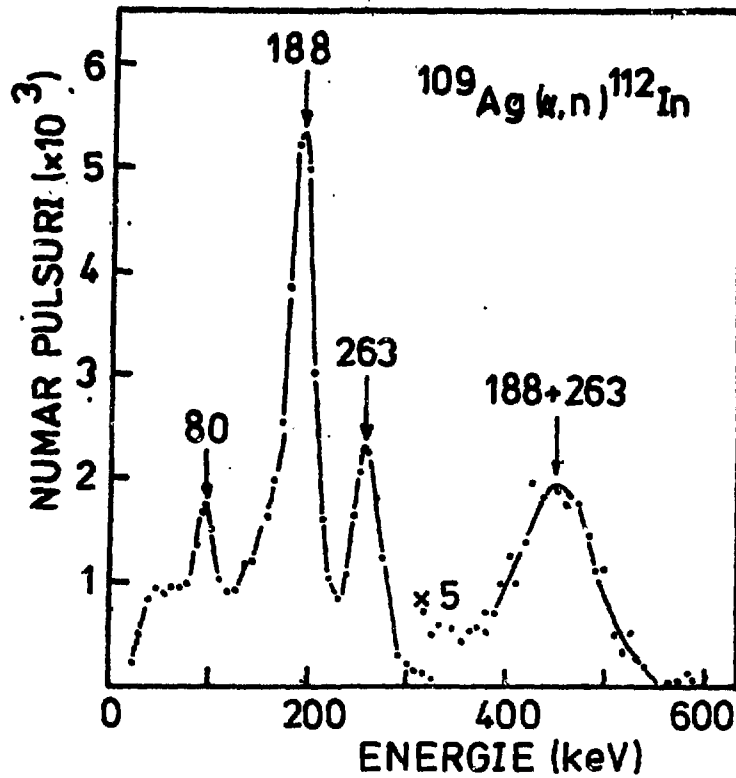


Fig.6. Spectrul γ întârziat al ^{112}In înregistrat într-o geometrie cu eficacitate mare de detecție.

teoretică de populare-dezintegrare a permis determinarea timpului de înjumătățire a acestui nivel, precum și a raportului α al populărilor inițiale, din iradiere, a stărilor izomere. Rezultatele sînt prezentate în Tabelul 1.

Tabelul 1

Reacția	$T_{1/2}$ (μs)	$\alpha = \frac{N_2^0}{N_1^0}$
$^{112}\text{Cd}(p, n)$	$0,74 \pm 0,10$	$0,25 \pm 0,05$
$^{109}\text{Ag}(\alpha, n)$	$0,68 \pm 0,10$	$0,52 \pm 0,07$

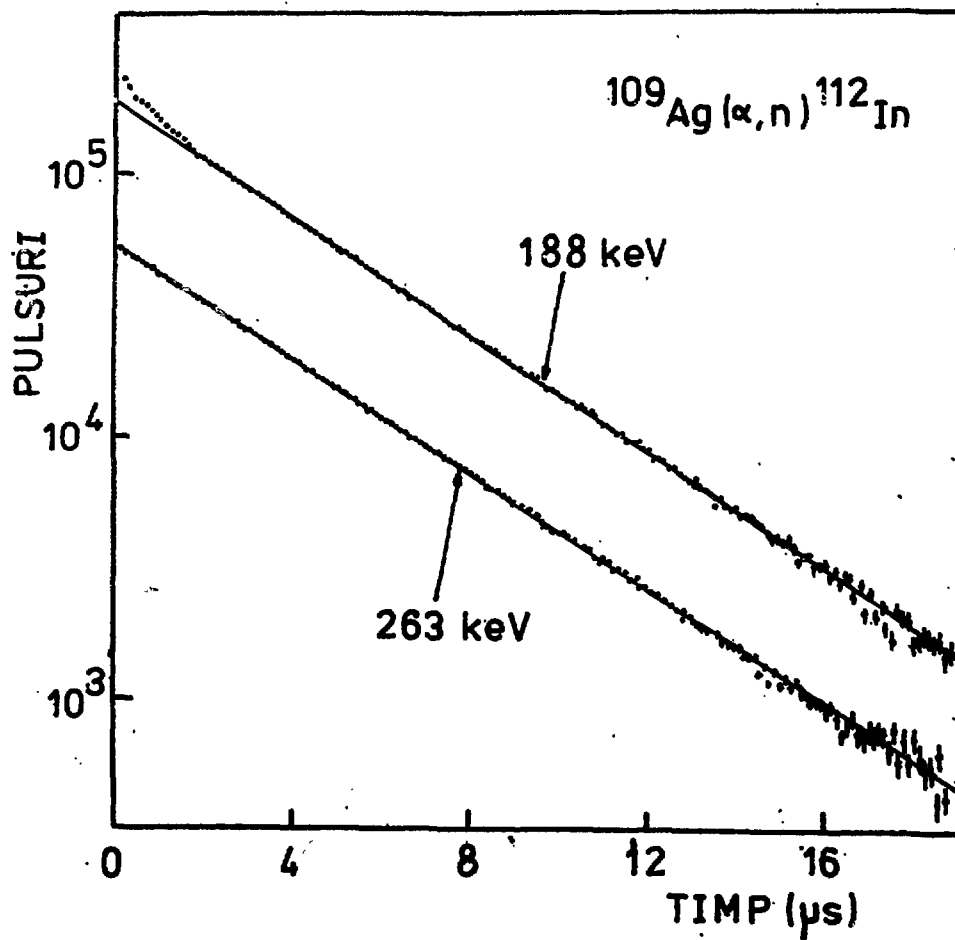
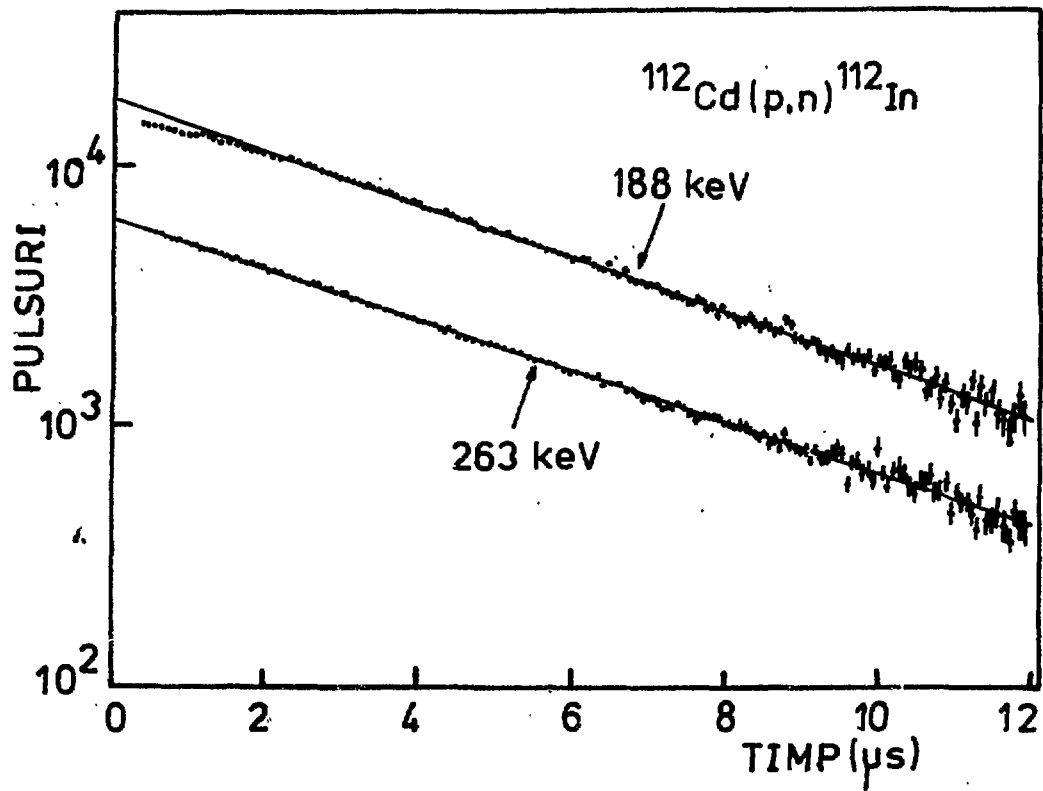


Fig.7-8. Spectre de timp pentru tranzițiile întârziate din ^{112}In .

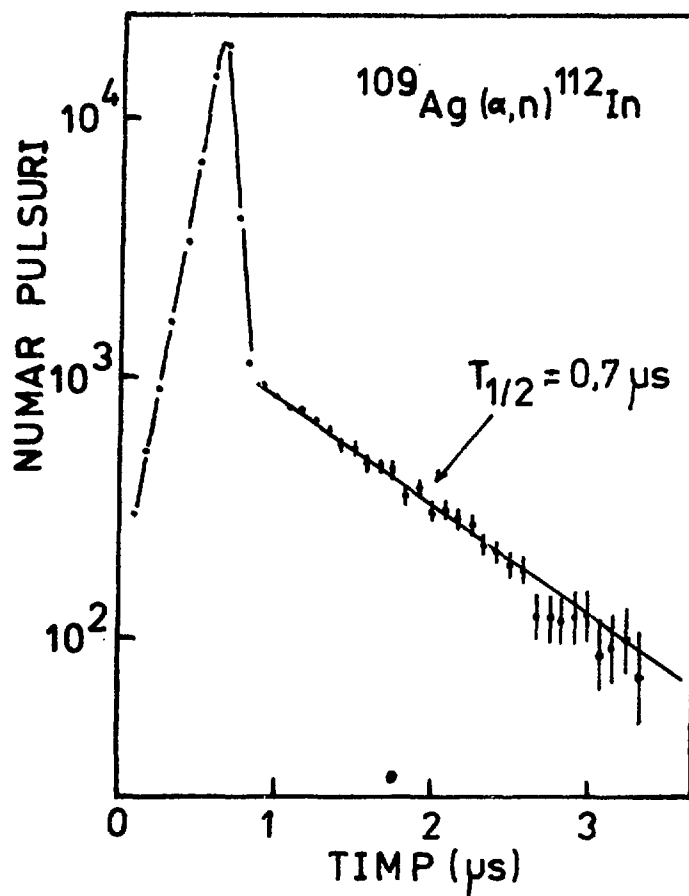


Figura 9. Spectru de coincidențe γ - γ în pauza de iradiere.

Timpul de viață al nivelului izomer inferior a fost obținut și direct, într-o măsurătoare de coincidențe întârziate γ - γ , în pauzele de iradiere. Un rezultat tipic este prezentat în Fig.9. Timpul de viață al celei de a doua stări izomere s-a găsit :

$$T_{1/2} = (0,69 \pm 0,05) \mu s$$

Stabilirea multipolarităților tranzițiilor izomere s-a bazat pe determinarea rapoartelor de intensități γ și X în pauzele de iradiere. Valorile experimentale :

$$\frac{I_{188 \text{ keV}}}{I_{263 \text{ keV}}} = 1,32 \pm 0,04$$

$$\frac{I_X}{I_{263 \text{ keV}}} = 0,27 \pm 0,04$$

sînt în acord cu valorile calculate, considerînd multipolaritățile 263 keV - M2 și 188 keV - E2.

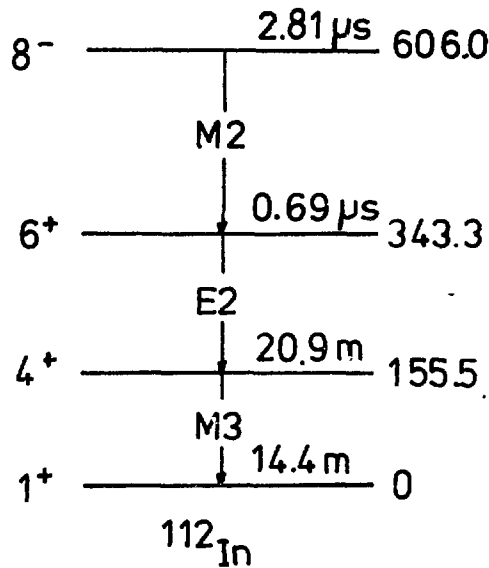


Fig.12. Schema de nivele izomere. $606,0 \text{ keV} / 55,56/$.
in ^{112}In .

In Fig.12 este prezentată schema de nivele izomere în nucleul ^{112}In . Poziționarea noilor tranziții izomere s-a bazat pe măsurarea raportului secțiunilor de populare a stărilor izomere de $2,8 \mu\text{s}$ și $20,9 \text{ min}$ în reacția $^{109}\text{Ag}(\alpha, n)$ și folosirea raportului populărilor stărilor izomere de viață lungă din ^{112}In /40/. Conform multipolarităților stabilite s-a atribuit spinul și paritatea 6^+ stării izomere de $0,69 \mu\text{s}$ la energia de excitație de $343,3 \text{ keV}$ și 8^- stării izomere de $2,81 \mu\text{s}$ la energia de excitație de

Ultimul paragraf al acestui capitol conține o prezentare a rezultatelor experimentale asupra rapoartelor de secțiuni izomere în izotopii dublu impari de indiu, excitați în reacția $\text{Cd}(p, n)$. Existența în aceste nuclee a multor stări izomere oferă condiții favorabile studiului dependenței de spin a secțiunilor de populare în reacții nucleare.

Măsurătorile au fost efectuate iradiind ținte metalice de cadmiu îmbogățit izotopic cu fasciculul de protoni furnizat de acceleratorul Tandem și înregistrând radiațiile γ de dezexcitare cu detectori de $\text{Ge}(\text{Li})$. Condițiile de iradiere și detecție au fost alese în funcție de caracteristicile (timpuri de viață, scheme de dezintegrare) fiecărui caz în parte.

Rapoartele izomere măsurate în izotopii dublu impari de indiu sînt prezentate în Tabelul 4.

Un rezultat interesant este punerea în evidență a unei populări foarte intense a stărilor izomere de spin înalt 8^- în $^{112-116}\text{In}$. Secțiunea de populare a acestei stări depășește secțiunea de populare a stării 6^+ în ^{112}In și este practic egală cu secțiunea de populare a stării izomere 5^+ în $^{114,116}\text{In}$, în condițiile în care starea izomeră de spin înalt 7^+ în ^{110}In are o sec-

țiune foarte mică de populare. Această anomalie în secțiunile de populare este analizată în Capitolul 4.

Tabelul 4. Rapoarte izomere măsurate în izotopii dublu impari de indiu.

Izotop	Rap. secțiuni	E_p (MeV)	
		10.0	8.0
^{110}In	$\frac{\sigma_{4,9 \text{ ore}(7^+)}}{\sigma_{69 \text{ min}(2^+)}}$	0,09 (2)	0,04 (1)
	$\frac{\sigma_{2,8 \mu\text{s}(8^-)}}{\sigma_{20,9 \text{ min}(4^++6^+)}}$	0,45 (5)	0,22 (4)
^{112}In	$\frac{\sigma_{2,8 \mu\text{s}(8^-)}}{\sigma_{0,7 \mu\text{s}(6^+)}}$	-	4 (1)
	$\frac{\sigma_{20,9 \text{ min}(4^++6^++8^-)}}{\sigma_{14,4 \text{ min}(1^+)}}$	1,05 (15)	0,85 (15)
	$\frac{\sigma_{42 \text{ msec}(8^-)}}{\sigma_{50 \text{ zile}(5^+)}}$	-	0,72 (15)
^{114}In	$\frac{\sigma_{50 \text{ zile}(5^++8^-)}}{\sigma_{12 \text{ sec}(1^+)}}$	-	0,83 (15)
	$\frac{\sigma_{2,16 \text{ sec}(8^-)}}{\sigma_{54 \text{ min}(5^+)}}$	0,80 (9)	1,1 (1)
^{116}In	$\frac{\sigma_{54 \text{ min}(5^++8^-)}}{\sigma_{14 \text{ sec}(1^+)}}$	0,59 (12)	0,21 (4)

CAPITOLUL 3 INVESTIGAREA INTERACȚIILOR STĂRILOR IZOMERE CU CIMPURILE EXTRANUCLEARE

Determinarea momentelor electromagnetice statice ale stărilor nucleare se bazează pe interacțiile acestora cu cimpurile extranucleare. Aceste interacții produc o ridicare completă sau parțială a degenerării stărilor nucleare. Printr-o măsurătoare directă sau indirectă a despicărilor energetice produse de aceste interacții cu cimpurile externe cunoscute se obțin valorile momentelor electromagnetice statice.

Investigarea interacțiilor stărilor izomere din ¹¹²In cu cimpurile extranucleare a utilizat metoda observării diferențiale în timp a perturbării distribuțiilor unghiulare a radiațiilor emise de nucleele aliniate în reacția nucleară. Teoria metodei este expusă în detaliu în /41/. Forma concretă a perturbării depinde de tipul interacțiilor (electrice sau magnetice, statice sau dinamice), tipul țintei (monocristalină sau policristalină), precum și de geometria experimentală.

În cazul unei interacții magnetice statice, într-un cîmp magnetic perpendicular pe planul de detecție, funcția de distribuție unghiulară are forma :

$$W(\theta, t, H) = \sum_{k \text{ par}} A_k \cdot P_k(\cos(\theta - \omega_L t)) \quad (3.1)$$

cu $\omega_L = -\frac{\mu H}{hI}$ frecvența Larmor, iar A_k coeficienții de distribuție unghiulară.

În cazul unei interacții cvadripolar electrice statice axial simetrice într-o probă policristalină, funcția de distribuție unghiulară perturbată are forma :

$$W(\theta, t) = \sum_{k \text{ par}} A_k \cdot G_k(t) \cdot P_k(\cos \theta) \quad (3.2)$$

factorul de perturbație $G_k(t)$ fiind dat de :

$$G_k(t) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} s_{kn} \cdot \cos(n\omega_0 t) \quad (3.3)$$

Frecvența de bază ω_0 este legată de frecvența de interacție cvadripolară

$$\omega_Q = \frac{eQV_{zz}}{4I(2I-1)h} \quad \text{prin relațiile :}$$

$$\omega_0 = \begin{cases} 3 \omega_Q & \text{pentru } I \text{ întreg} \\ 6 \omega_Q & \text{pentru } I \text{ semifîntreg} \end{cases}$$

V_{zz} este gradientul de cîmp electric la poziția nucleului, prin intermediul coeficienților s_{kn} , forma funcției de perturbație este dependentă de spinul stării nucleare.

Practic, apare de multe ori situația în care cîmpurile cristaline variază de la nucleu la nucleu datorită imperfecțiilor rețelei cristaline și influenței defectelor de iradiere. Aceasta se reflectă în modificarea factorilor de perturbație, mani-

festată prin atenuări ale anizotropiei inițiale ;

În cazul unor interacții fluctuante în timp, produse, de ex. prin difuzia defectelor de rețea sau de ioni mobili în lichide, factorul de perturbație $G_k(t)$ reprezintă o atenuare a alinierii de tip /44/ :

$$G_k(t) = \exp(-\lambda_k \cdot t) \quad (3.4)$$

În alegerea condițiilor experimentale pentru măsurarea momentelor electromagnetice trebuie ținut cont de efectele tuturor interacțiilor perturbatoare. Rețelele cu simetrie cubică sînt utile pentru studiul interacției magnetice în cîmp extern, deoarece simetria acestor rețele implică gradienti de cîmp electric nuli în poziții substituționale. Pe de altă parte, pentru studiul interacțiilor cvadripolare se folosesc gradientii de cîmp electric ai rețelelor cristaline cu simetrie necubică. Pentru evitarea efectelor perturbatoare ale defectelor de iradiere, se utilizează în multe cazuri ținte încălzite, ceea ce favorizează refacerea rapidă a rețelei cristaline în vecinătatea nucleelor probă.

Momentele magnetice ale stărilor izomere de viață scurtă din ^{112}In au fost măsurate folosind iradierea cu particule α de 24 MeV a unei ținte de ^{109}Ag în stare lichidă ($T = 1040^\circ\text{C}$) plasată în cîmp magnetic vertical. Schema electronică folosită permitea înregistrarea simultană a intensităților γ corespunzătoare dezexcitării stărilor izomere de 2,81 μs și 0,7 μs .

Procedura de determinare a factorilor giromagnetici a constat din înregistrarea radiațiilor γ la unghiurile $\theta_{1,2} = \pm 135^\circ$ și formarea raportului $R_\gamma(t)$ definit ca :

$$R_\gamma(t) = \frac{I'(t, \theta_1, H) - \alpha I'(t, \theta_2, H)}{I'(t, \theta_1, H) + I'(t, \theta_2, H)} \quad (3.5)$$

cu I' intensități corectate pentru fonduri, iar α o constantă de normare a intensităților radiațiilor γ izomere măsurate la cele două unghiuri. Rezultatele experimentale astfel obținute sînt reprezentate în Fig.20.

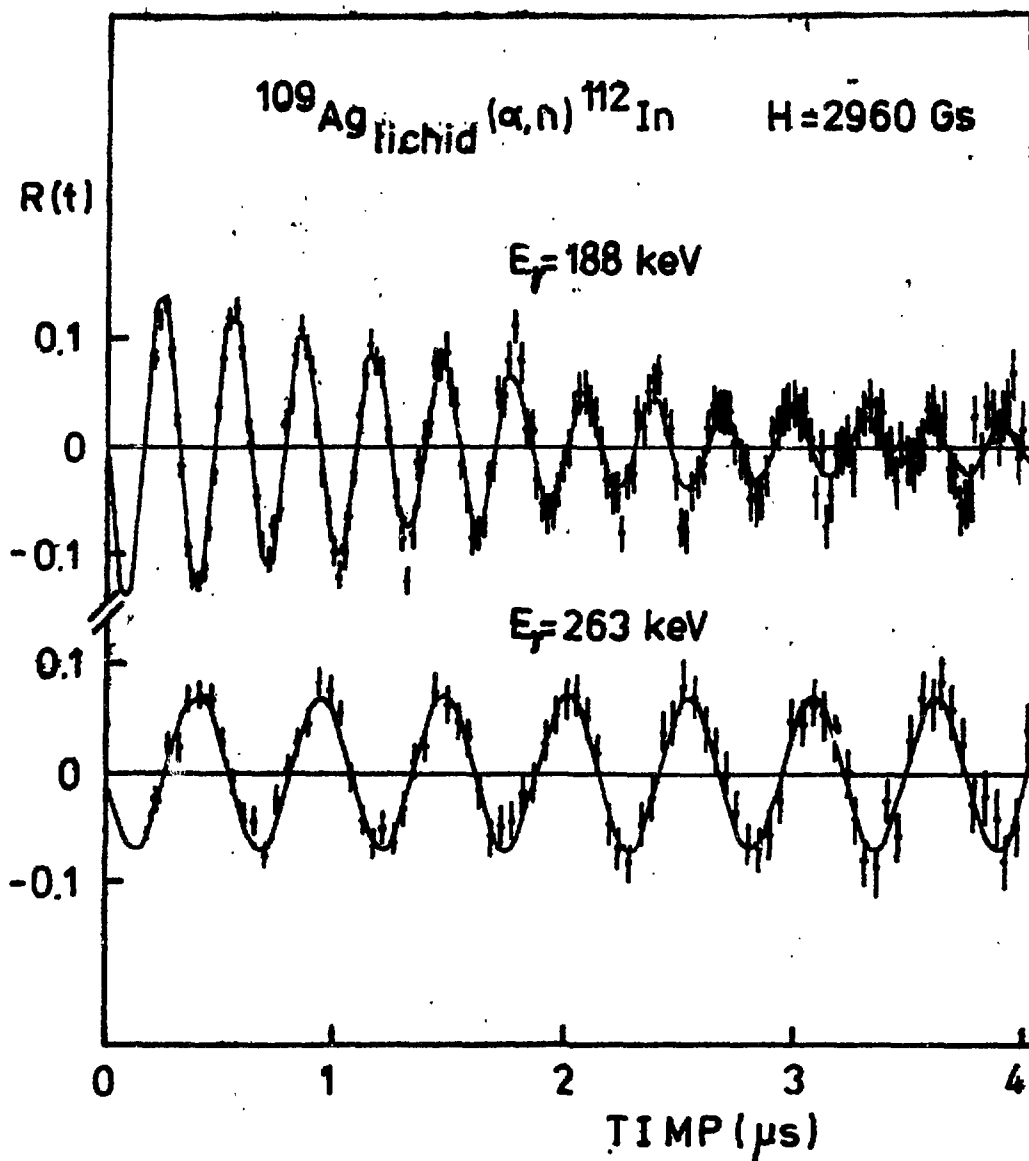


Fig.20. Spectre de precesie a spinilor in cimp magnetic extern.

După cum se observă în această figură, funcția $R(t)$ în cazul tranziției de 263 keV prezintă oscilații sinusoidale de amplitudine constantă, ceea ce indică conservarea alinierii pe durata măsurătorii. Relaxarea observată în cazul tranziției de 188 keV se datorește schemei specifice de dezintegrare. Curbele din Fig.20 reprezintă rezultatul potrivirii datelor experimentale cu expresiile teoretice adecvate. Din frecvențele de precesie Larmor obținute, după aplicarea corecțiilor de ecranare diamagnetică și deplasare Knight, s-au determinat factorii giromagnetici ai stărilor izomere de viață scurtă din ^{112}In /55,56/ :

$$g(8^-) = + 0,385(4)$$

$$g(6^+) = + 0,675(6)$$

Momentul electric cvadripolar al stării izomere 8^- din ^{112}In a fost determinat din interacția cu gradientul de câmp electric al rețelei hexagonale /45/ a cadmiului metalic. Starea izomeră a fost populată în reacția $^{112}\text{Cd}(d,2n)$, temperatura țintei fiind de 547 K. Spectrele temporale ale radiațiilor de 263 keV au fost măsurate cu doi detectori de NaI(Tl) plasați la 0° și 90° față de direcția fasciculului.

Figura 22 prezintă datele experimentale asupra raportului $R(t)$ împreună cu curba teoretică de potrivire prin minime pătrate.

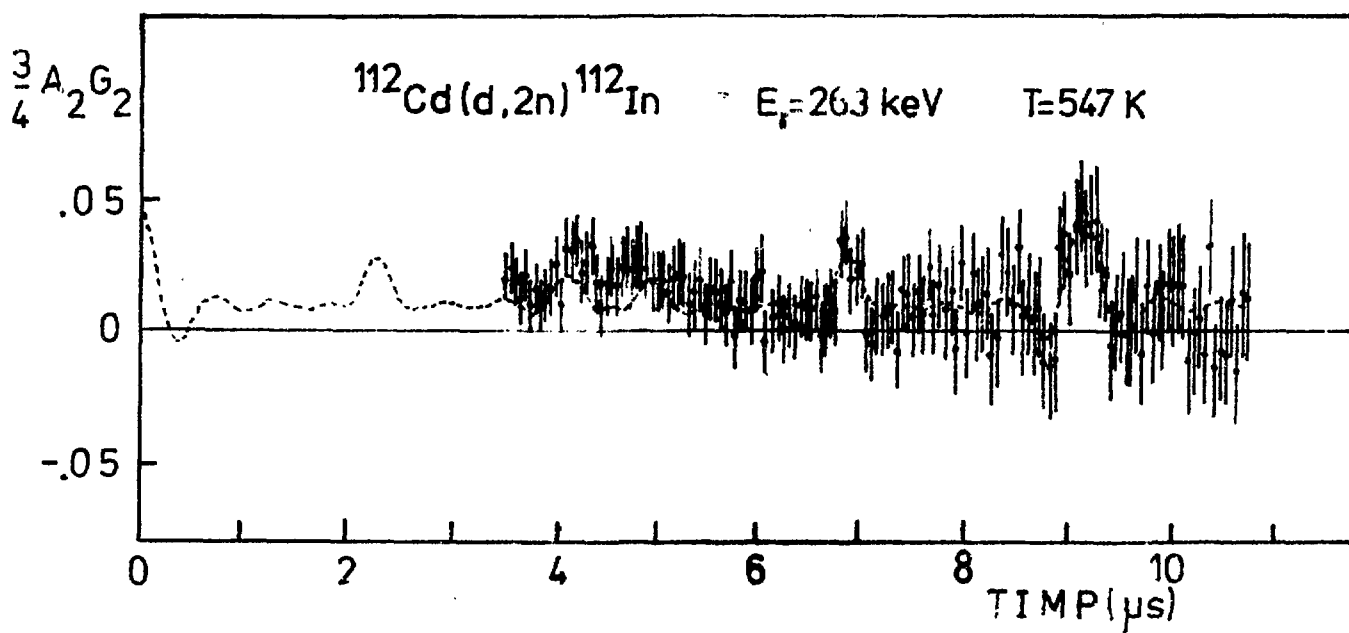


Figura 22. Spectrul distribuției unghiulare perturbate a $^{112}\text{In}(8^-)$ în rețeaua policristalină a cadmiului metalic.

Determinarea frecvenței de interacție cvadripolară nera condus la următoarea valoare pentru constanta de cuplaj cvadripolar :

$$\frac{eQ(8^-)V_{zz}}{h} = 17,3 \pm 0,4 \text{ MHz} .$$

Pentru calibrarea gradientului de câmp electric al rețelei cristaline a cadmiului metalic la poziția impurităților de indiu a fost folosită, ca etalon, starea izomeră $I = \frac{3}{2}, T_{1/2} = 53 \text{ ns}$ din ^{117}In cu moment electric cvadripolar cunoscut /53,54,60/.

S-a obținut astfel momentul electric cvadripolar al stării izomere 8^- din ^{112}In /61/ :

$$|Q(8^-)| = 0,093 \pm 0,006 \text{ b}$$

În încheierea acestui capitol, remarcăm faptul că, datorită dublei perturbări în cascadă, este imposibil să se observe interacția cvadripolară a stării izomere 6^+ prin metoda distribuțiilor unghiulare perturbate. În cazul interacției magnetice, printr-o alegere adecvată a cîmpului magnetic aplicat, a fost posibilă determinarea frecvenței Larmor ω_6 , micșorîndu-se efectul componenteii cu dublă perturbare. Acest lucru nu se poate însă realiza în cazul interacției cvadripolare, în care gradientii de cîmp electric sînt produși în însăși rețeaua cristalină a țintei.

CAPITOLUL 4 INTERPRETAREA REZULTATELOR

Nuclul impar-impar ^{112}In are 49 protoni și 63 neutroni, deci un gol protonic pînă la completarea miezului magic $Z=50$ și 13 neutroni pe orbitele din pătura majoră $50 \leq N \leq 82$. Nivelele joase ale acestui nucleu pot fi descrise prin cuplajul slab al stării protonice $1g_{9/2}^{-1}$ cu stările neutronice $1g_{7/2}$, $3s_{1/2}$, $2d_{5/2}$, $2d_{3/2}$ și $1h_{11/2}$.

În Figura 25 se prezintă sistematica stărilor izomere cunoscute în izotopii dublu impari de indiu, împreună cu rezultatele obținute în studiile noastre /55/. Se observă că nucleul ^{112}In se află la intersecția a două grupe distincte de nuclee dublu impare. În grupul de nuclee mai grele $^{114-118}\text{In}$ apar sistematic stările 1^+ (fundamentală) 5^+ și 8^- , descrise corespunzător de configurațiile neutronice $1g_{7/2}$, $3s_{1/2} + 2d_{3/2}$ și $1h_{11/2}$. Este interesant de remarcat că spinii pozitivi sînt în acord cu prevederile regulilor de cuplaj pentru configurațiile corespunzătoare. În ce privește starea 8^- , ea apare din cuplajul $I_p + I_n = -2$, care concură uneori cu regula R3 /6/. În nucleele mai ușoare $^{188,110}\text{In}$, spinii 2^+ și 7^+ apar ca membri ai multipletului de configurație $[1g_{9/2} \nu d_{5/2}]$, în acord cu regula de cuplaj R2.

Starea izomeră 8^- din ^{112}In este descrisă de configurația

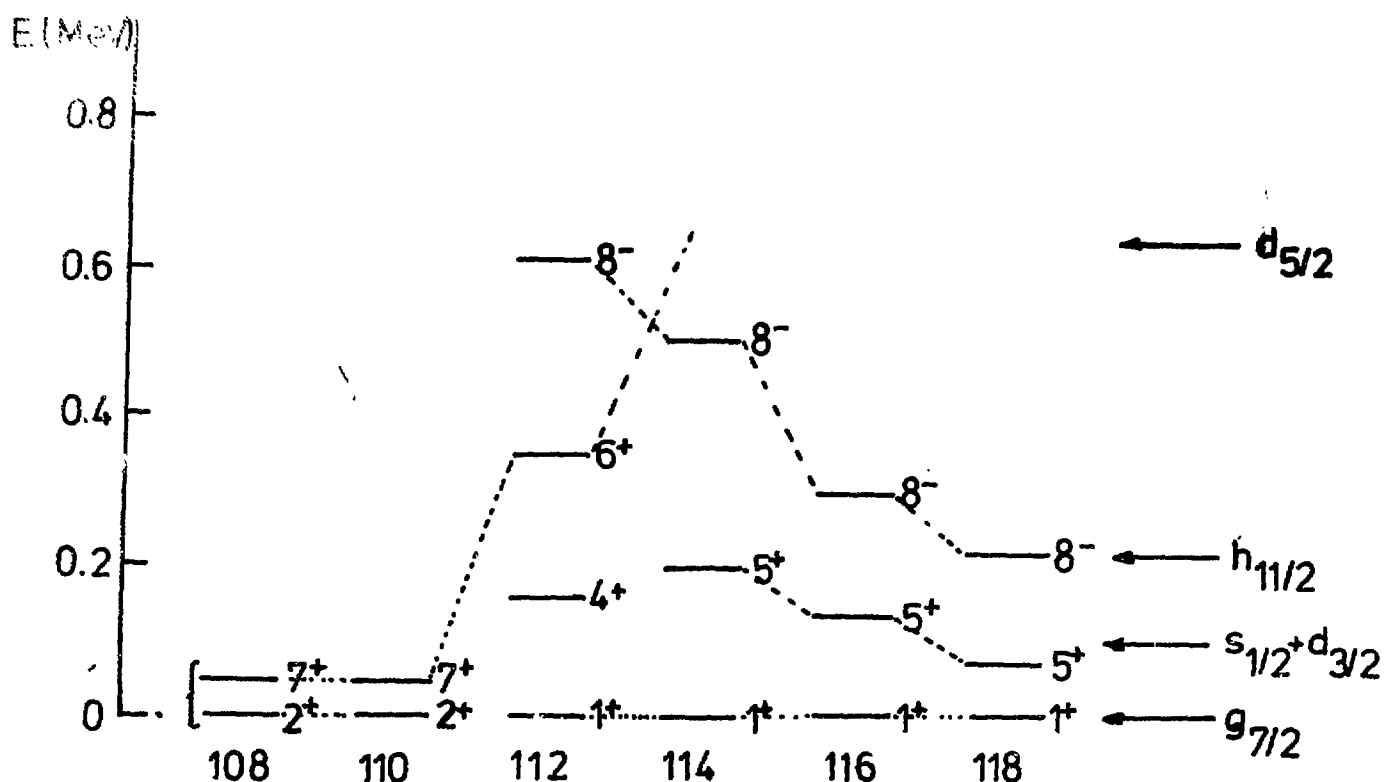


Fig.25. Sistemática nivelelor izomere în izotopii dublu impari de indiu.

$[\pi(1g_{9/2})^{-1} \nu(1h_{11/2})]$. Este de așteptat o configurație foarte pură pentru această stare, neexistând alte nivele pentru cuplajul la spin înalt și paritate negativă.

Starea izomeră 6^+ poate apărea din cuplajul stării protonice $1g_{9/2}$ cu stările neutronice $2d_{5/2}$, $2d_{3/2}$ și $1g_{7/2}$. Singura configurație care respectă regulile lui Brennan este cuplajul particulă-gol $[\pi(1g_{9/2})^{-1} \nu(2d_{5/2})]$, în timp ce pentru celelalte două configurații regula R1 prevede cuplaj antiparalel și deci spini mici.

Multipolaritățile atribuite tranzițiilor izomere sînt consistente cu timpii de viață măsurați. Față de estimarea Weisskopf, tranzițiile M2-263 keV și E2-188 keV sînt întîrziate cu un factor de 3 și respectiv 10. Tranzițiile octupolare, ar fi grăbite de cel puțin 10^4 ori, în timp ce tranzițiile dipolare ar fi întîrziate de cel puțin 10^5 ori. Menționăm că o analiză a probabilităților de tranziție electromagnetică în modelul simplu de cuplaj slab al protonului și neutronului impar nu reușește să elucideze configurația

stării izomere 6^+ .

În Tabelul 8, factorii g măsurați experimental sînt comparați cu calculele teoretice.

Tabelul 8. Compararea factorilor g experimentali pentru stările 8^- și 6^+ din ^{112}In cu calculele teoretice.

Configurația	$g_{\text{unip.}}$	$g_{\text{emp.}}$	$g_{\text{calc.}}$	g_{exp}	$\Delta g = g_{\text{calc}} - g_{\text{exp}}$
$[\pi(1g_{9/2})^{-1} \nu(1h_{11/2})]_{8^-}$	0,438	0,410	0,388	0,385 (4)	0,002 (4)
$[\pi(1g_{9/2})^{-1} \nu(2d_{5/2})^5]_{6^+}$	0,805	0,753	0,756	0,675 (6)	0,090 (6)
$[\pi(1g_{9/2})^{-1} \nu(2d_{3/2})^1]_{6^+}$	1,32	1,05	1,069		0,394 (6)
$[\pi(1g_{9/2})^{-1} \nu(1g_{7/2})^7]_{6^+}$	1,02	0,82	0,84		0,165 (6)

În cazul stării izomere 8^- constatăm o concordanță excelentă a valorii experimentale cu calculul teoretic. Pentru starea izomeră 6^+ rezultatele sugerează o funcție de undă impură.

Momentul electric cvadripolar al stării izomere 8^- a fost evaluat punînd în evidență contribuțiile sistemelor impare :

$$Q(8^-) = \sqrt{0,313} \cdot Q_{9/2}^{Z=49} + 0,538 \cdot Q_{11/2}^{N=63}$$

Valoarea obținută : $Q_{\text{calc.}}(8^-) = -0,094$ b este în deplin acord cu mărimea determinată experimental.

Concordanța perfectă a valorilor momentelor electromagnetice statice ale stării 8^- cu evaluările teoretice confirmă descrierea acestei stări printr-o configurație foarte pură, constituind totodată o verificare remarcabilă a legii de aditivitate pentru nucleele dublu impare.

Ultimul paragraf al acestui capitol este dedicat analizei secțiunilor de populare a stărilor izomere în nucleele dublu impare de indiu, în cadrul modelului statistic, folosînd formalismul lui R.Vandenbosh și J.Huizenga /64/.

În Tabelul 9 sînt date valorile experimentale ale secțiunilor relative de populare ale stărilor izomere σ_I , deduse din ra-

poartele izomere determinate experimental (Tabelul 4), împreună cu valorile calculate în modelul statistic.

Tabelul 9. Analiza secțiunilor de populare. În calcul s-a luat $a = 15 \text{ MeV}^{-1} / 68/$ și $\mathcal{J} = \mathcal{J}_{\text{rig}}$.

Izotop	Secțiune	$E_p = 8 \text{ MeV}$		$E_p = 10 \text{ MeV}$	
		σ_{exp}	σ_{calc}	σ_{exp}	σ_{calc}
^{110}In	σ_2	0,96	0,94	0,91	0,88
	σ_7	0,04	0,06	0,09	0,12
^{112}In	σ_1	0,56	0,52	0,52	0,42
	σ_4	0,35	0,48	0,33	0,57
	σ_8	0,08	0,002	0,14	0,007
^{114}In	σ_1	0,84	0,61		
	σ_5	0,28	0,38		
	σ_8	0,18	0,006		
^{116}In	σ_1	0,84	0,59	0,63	0,50
	σ_5	0,08	0,40	0,19	0,48
	σ_8	0,08	0,007	0,18	0,02

Rezultatele obținute ne conduc la concluzia că popularea stărilor izomere de paritate pozitivă este rezonabil descrisă de modelul statistic, confirmând parametrii de model propuși pentru aceste nuclee. În aceste condiții, popularea intensă, ce depășește cu peste un ordin de mărime calculul teoretic, a stărilor izomere 8^- , se datorește efectelor de structură nucleară, în particular acțiunii regulii de selecție după j între nivelele multiple-tului de configurație foarte pură $[\pi(1g_{9/2})^v(1h_{11/2})]$. Studiile de rapoarte izomere se dovedesc astfel utile în evidențierea unor efecte speciale, legate de structura colectivă sau de pătură a stărilor nucleare.

CAPITOLUL 5 INVESTIGAREA DINAMICII DEFECTELOR DE IRADIERE FOLOSIND IZOMERII DIN ^{112}In

Studiul proprietăților corpului solid sub acțiunea iradierii a cunoscut un progres remarcabil prin dezvoltarea cercetărilor de interacții hiperfine, în care interacțiile momentelor electromagnetice cu câmpurile extranucleare sînt investigate folosind metode nucleare. Intre acestea, alături de spectroscopia Mössbauer, corelațiile unghiulare perturbate și rezonanța magnetică nucleară, în ultimii ani a început să fie utilizată metoda distribuțiilor unghiulare perturbate a radiațiilor emise în reacții nucleare /77-79/. Iradierea corpului solid cu particule nucleare constituie un proces puternic generator de defecte de rețea. Prin ciocniri succesive ale atomilor primari cu atomii rețelei cristaline se formează o zonă cu defecte (vacanțe de rețea, atomi interstițiali, grupări de defecte) în vecinătatea ciocnirii inițiale /86,89/. Aceste defecte conduc la perturbări ale rețelei gazdă și produc la poziția nucleelor probă gradienti de câmp electric care interacționează cu momentul electric cvadripolar al stării nucleare. O caracteristică interesantă a metodei este că oferă posibilitatea urmării dinamicii defectelor corelate la timpi scurți după producere, scara de timp fiind definită de timpul de viață al stării excitate.

În această lucrare, stările izomere de viață scurtă din ^{112}In au fost folosite pentru studiul defectelor de iradiere în rețeaua cubică a argintului metalic, prin metoda distribuțiilor unghiulare perturbate în câmp magnetic extern /99,100/. Măsurătorile au fost efectuate pentru un domeniu larg de temperaturi ale țintei, de la 80 K la 1120 K.

Figurile 30 și 31 prezintă, pentru ilustrare, rezultatele obținute pentru trei temperaturi ale țintei, pentru tranzițiile izomere de 188 keV și 263 keV. Se observă că, pentru ambele tranziții, aspectul funcțiilor experimentale de perturbație este dependent de temperatură. Aceasta indică faptul că nucleeele excitate suferă, în afara interacției magnetice, perturbări suplimentare, generate în rețeaua cristalină a țintei.

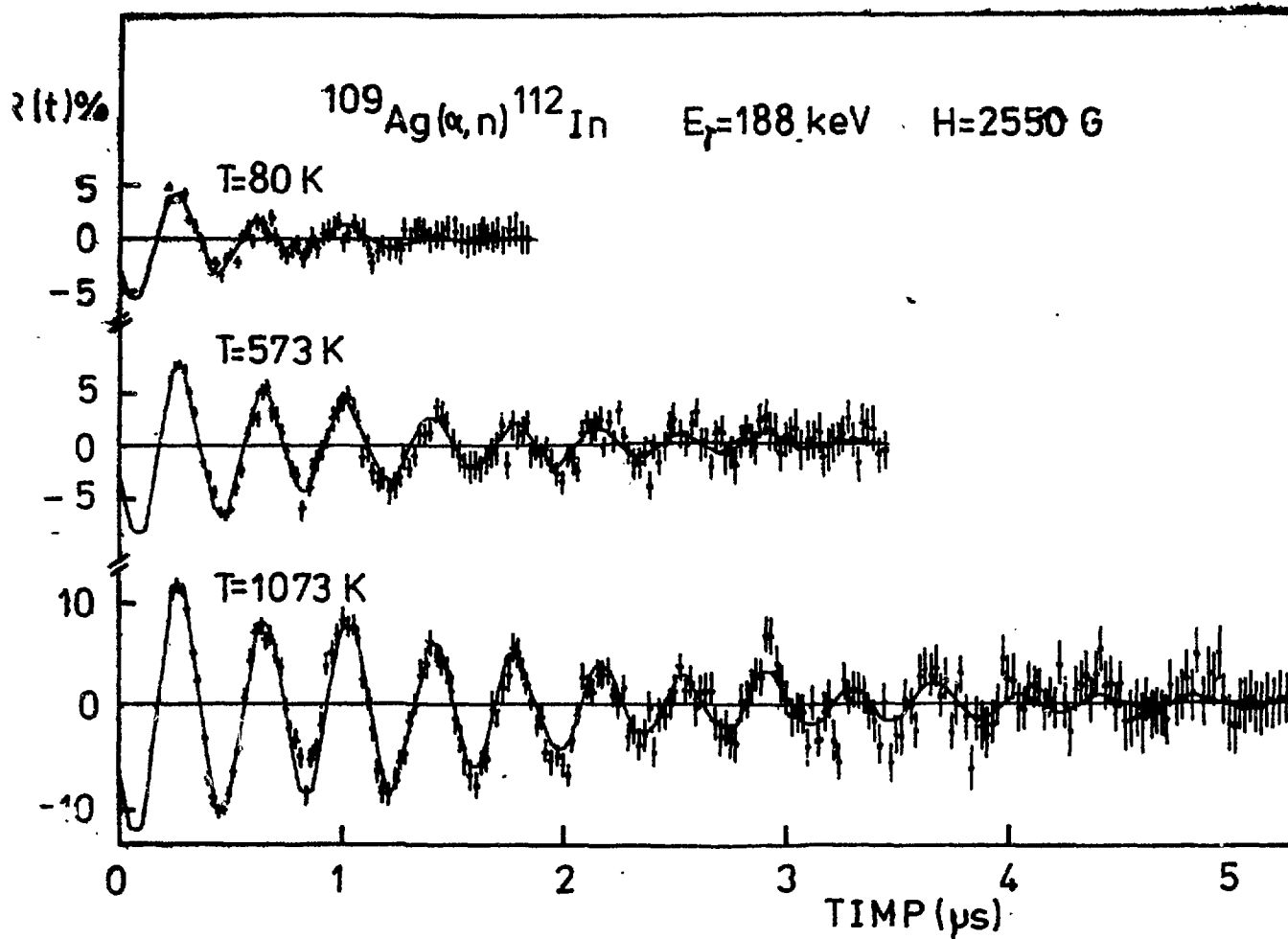


Fig.30. Spectre de precesie a spinilor, pentru starea izomeră 6^+ din ^{112}In .

Rezultatele obținute au pus în evidență două aspecte distincte :

- un fenomen de dezalinieră lentă, manifestat la temperaturi sub 500 K, echivalent unei relaxări în domeniul microsecundelor.
- o scădere a alinierii inițiale, echivalentă unor timpi de relaxare sub 0,1 μs , evidențiată în cazul stării izomere 6^+ și neobservată în cazul stării izomere 3^- .

Ambele fenomene, de dezalinieri rapide și lente, sînt dependente de temperatura rețelei gazdă (vezi Fig.33 pentru cazul anizotropiei inițiale).

Dezalinierile observate în aceste măsurători se explică în cadrul unui model bazat pe interacțiile cu defectele de iradiere,

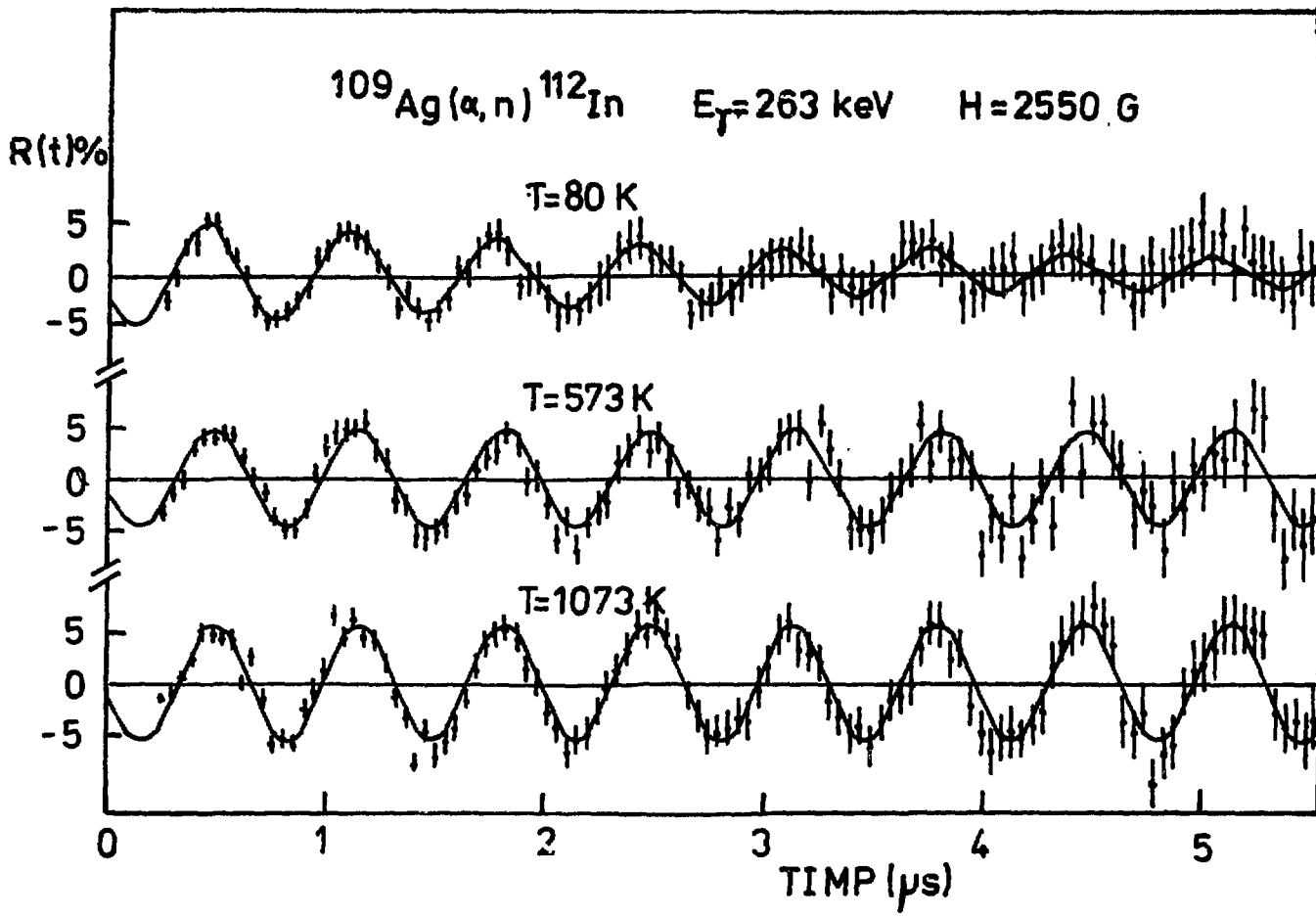


Fig.31. Spectre de precesie a spinilor pentru starea izomeră 8^- din ^{112}In .

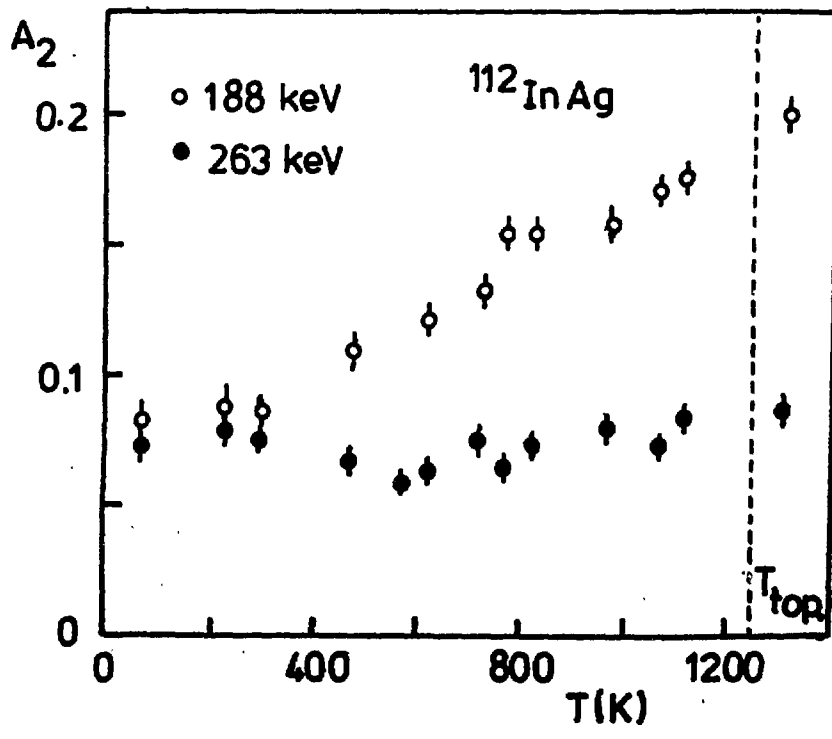


Fig.33. Dependența de temperatură a alinierei inițiale pentru stările izomere din ^{112}In .

ținând cont de caracteristicile interacției combinate /43,105/. Prezența cîmpului magnetic permite separarea a două categorii de interacții cvadripolare : interacții puternice ($I\omega_Q \geq \omega_L$) care produc dezalinierile rapide ale nucleelor probă și interacțiile slabe, care îndeplinind condiția de decuplare ($\omega_L \gg I\omega_Q$), conduc la o atenuare lentă a alinierii în timp, fără a afecta anizotropia inițială.

În cazul stării 6^+ , interacțiile cvadripolare cu defecte apropiate sînt tari, iar cele cu defecte depărtate satisfac condiția de decuplare. În cazul stării 8^- , datorită momentului cvadripolar mic al acestei stări ($Q = 0,0093$ b) chiar și interacțiile cvadripolare cu defectele vecine de ordinul întii sînt slabe, ceea ce explică lipsa dezalinierii rapide pentru această stare și valoarea constantă a anizotropiei inițiale.

Variația cu temperatura a fenomenelor de dezalinieră se explică printr-un proces de refacere (annealing) în timpi scurți a rețelei cristaline perturbate. Creșterea temperaturii favorizează migrarea defectelor, identificate ca vacanțe sau divacanțe din compararea cu informațiile asupra stadiilor de refacere a argintului /77,87/ din studii macroscopice.

CONCLUZII

În această lucrare sînt prezentate cercetările privind structura stărilor izomere de viață scurtă din ^{112}In și interacțiile lor cu cîmpurile extranucleare. Stările izomere au fost populate în reacțiile $^{112}\text{Cd}(p,n)$, $^{109}\text{Ag}(\alpha,n)$ și $^{112}\text{Cd}(d,2n)$, folosind metoda fasciculului pulsant. Rezultatele studiilor efectuate pot fi rezumate astfel :

I Structura nucleară În ^{112}In există două stări izomere cu $J^\pi = 8^-$ ($T_{1/2} = 2,81 \mu\text{s}$) și $J^\pi = 6^+$ ($T_{1/2} = 0,69 \mu\text{s}$) la energiile de excitație de 606,0 keV și 343,3 keV.

Modul de dezintegrare a noilor stări izomere, reprezentat schematic, este : $8^-(262,7 \text{ keV-M2}) \rightarrow 6^+(187,8 \text{ keV-E2})4^+$.

Momentele magnetice ale stărilor izomere sînt :

$$\mu(8^-) = 3,03 \pm 0,03 \text{ m.n.}$$

$$\mu(6^+) = 4,05 \pm 0,04 \text{ m.n.}$$

Momentul electric cvadripolar al stării izomere 8^- este :

$$|Q(8^-)| = 0,093 \pm 0,006 \text{ b}$$

Starea izomeră 8^- reprezintă nivelul de energie minimă al multipletului produs de configurația $[\pi(1g_{9/2}) \nu(1h_{11/2})]$. Starea izomeră 6^+ a fost descrisă printr-un amestec de configurații, produs din cuplajul stării protonice $1g_{9/2}$ cu stările neutronice $2d_{5/2}$, $2d_{3/2}$ și $1g_{7/2}$.

II Secțiunile de populare. Studiul rapoartelor de secțiuni izomere în izotopii dublu impari $^{110-116}\text{In}$, excitați în reacții (p,n), a evidențiat o populare foarte intensă a stărilor izomere 8^- , în condiții în care stările izomere de paritate pozitivă au fost descrise satisfăcător în cadrul modelului statistic. Anomalia observată în popularea stărilor 8^- se explică prin acțiunea regulii de selecție după j asupra tranzițiilor γ , confirmând existența multipletului de nivele produse de configurația pură $[\pi(1g_{9/2}) \nu(1h_{11/2})]$ în aceste nuclee.

III Observarea efectelor produse de defectele de iradiere în sistemul InAg. Stările izomere de viață scurtă din ^{112}In , excitate în reacția $^{109}\text{Ag}(\alpha, n)$, au fost utilizate în studii de interacții hiperfine, prin metoda distribuțiilor unghiulare perturbate în câmp magnetic extern.

În stadiul actual, o serie de aspecte privind pe de o parte rolul sistemului impuritate - rețea gazdă, iar pe de altă parte influența particularităților nucleare ale probelor folosite nu sînt bine cunoscute. Oferind avantajul observării simultane a fenomenelor de interacție impuritate - defecte cu sonde ce diferă prin momentele electromagnetice statice, cercetările noastre au confirmat previziunile modelului de dezalinieri bazat pe interacția statică cu defectele corelate, în cazul interacției combinate.

În timp ce pentru starea izomeră 8^- s-a realizat condiția de decuplare a tuturor interacțiilor cvadripolare de către interacția magnetică, pe contul momentului electric cvadripolar foarte mic al acestei stări, în cazul stării izomere 6^+ s-au observat dezalinieri rapide, produse de interacțiile cvadripolare puternice cu

defectele învecinate. Aceste rezultate indică o valoare mare pentru momentul electric cvadripolar al stării 6^+ . Menționăm în încheiere faptul că studiul relaxărilor lente ale alinierii nucleare într-o experiență de precesie a spinilor, în câmp magnetic suficient de intens pentru a se realiza condiția de decuplare, reprezintă o metodă posibilă pentru determinarea momentului electric cvadripolar al acestei stări.

EXTRASE DIN BIBLIOGRAFIE

- /1/ M.G.Mayer și J.H.D.Jensen, Elementary Theory of Nuclear Shell Structure, Londra, John Wiley and Sons, Inc., 1955
- /2/ A.de Shalit și J.D.Walecka, Phys.Rev., 120 (1960) 1790
- /5/ M.H.Brennan și A.M.Bernstein, Phys.Rev., 120 (1960) 927
- /6/ L.K.Peker, Structura slojnih iader, Atomizdat, 1966
- /8/ A.Bohr și B.R.Mottelson, Nuclear Structure, Vol.1, W.A.Benjamin, Inc., New York, Amsterdam, 1969
- /13/ R.J.Blin-Stoyle, Proc.Phys.Soc. A66 (1953) 1158
- /14/ H.Noya, A.Arima și H.Horie, Progr.Theor.Phys. Suppl.8(1958)33
- /20/ L.S.Kisslinger și R.A.Sorensen, Rev.Mod.Phys.35 (1963) 853
- /21/ J.R.Huizenga și R.Vandenbosh, Phys.Rev.120 (1960) 1305
- /22/ W.Hauser și H.Feshbach, Phys.Rev., 87 (1952) 366
- /27/ D.Maor Zellermyer și B.Rosner, Phys.Rev.C6 (1972) 315
- /28/ K.F.Alexander, H.F.Brickmann, C.Heiser și W.Neubert, Nucl.Phys. A112 (1968) 474
- /30/ E.A.Ivanov, A.Iordăchescu și G.Pascovici, Rev.Roum.Phys., 13 (1969) 879
- /32/ S.Raman și H.J.Kim, Nucl.Data Sheets B7(1972) 79
- /40/ S.Fukushima, S.Kume, H.Okamura, K.Otozai, H.Sakamoto și Y.Yoshizawa, Nucl.Phys. 69 (1965) 273
- /41/ H.Frauenfelder și R.M.Steffen, Alpha, Beta and Gamma-ray spectroscopy, Edit.K.Siegbahn, North-Holland Publ.Company, Amsterdam, vol.2 (1965) 998
- /43/ K.Alder, E.Matthias, W.Schneider și R.M.Steffen, Phys.Rev., 129 (1963) 1199
- /44/ A.Abragam și R.V.Pound, Phys.Rev., 92 (1953) 943
- /45/ Ch.Kittel, Introducere în fizica corpului solid, Ed.Tehnică, 1972.

- /5 /52/ E.A.Ivanov, M.Ionescu-Bujor, A.Iordăchescu, D.Ploștinaru,
G.Pascovici și S.Vajda, Hyp.Int., 2(1976) 326
- /5 /53/ R.S.Raghavan și P.Raghavan, Phys.Rev.Lett., 28 (1972) 54
- /5 /54/ R.Bütt, H.Haas și S.R.Rosenblum, Phys.Rev., 9B (1974) 3705
- /5 /55/ M.Ionescu-Bujor, E.A.Ivanov, A.Iordăchescu, D.Ploștinaru
și G.Pascovici, Nucl.Phys., A272 (1976) 1
- /6 /56/ M.Ionescu-Bujor, E.A.Ivanov, A.Iordăchescu, D.Ploștinaru și
G.Pascovici, Hyp.Int. 2 (1976) 324
- /6 /60/ V.S.Shirley și C.M.Lederer, Table of nuclear moments, Lawrence
Berkeley Laboratory, Report LBL-3450 (1974)
- /6 /61/ M.Ionescu-Bujor, E.A.Ivanov, A.Iordăchescu, D.Ploștinaru și
G.Pascovici, Phys.Lett., 64B (1976) 36
- /6 /62/ M.Ionescu-Bujor, E.A.Ivanov, D.Ploștinaru și M.Zaharcu,
Rev.Roum.Phys., 19 (1974) 559
- /6 /63/ M.Ionescu-Bujor, E.A.Ivanov, D.Ploștinaru, în curs de publicare
- /6 /64/ W.L.Hafner, J.R.Huizenga și R.Vandenbosh, Argonne Nat.Lab.,
Argonne National Laboratory Report Nr. 6662 (1962)
- /7 /68/ W.Dilg, W.Schantl, H.Vonach și M.Uhl, Nucl.Phys., A217(1973)269
- /7 /77/ H.Bernas, Physica Scripta, 11 (1975) 167
- /7 /78/ H.de Waard, Physica Scripta, 11 (1975) 157
- /7 /79/ Proceedings of the Fourth International Conference on Hyperfine
Interactions, Madison, New Jersey, 1977
- /86 vs. /86/ M.W.Thompson, Defects and Radiation Damage in Metals,
Cambridge University Press, 1969
- /8 /87/ W.Schilling, Hyp.Int., 4 (1978) 636
- /8 /89/ H.Wollenberger, în "Vacancies and Interstitials in Metals, Ed.
J.Diehl, W.Schilling, D.Schumacher și A.Seeger, North-Holland
Publ. 1969
- /9 /99/ M.Ionescu-Bujor, E.A.Ivanov, A.Iordăchescu, D.Ploștinaru și
G.Pascovici, Rev.Roum.Phys., 2 (1977) 875
- /10 /100/ M.Ionescu-Bujor, E.A.Ivanov, A.Iordăchescu, D.Ploștinaru și
G.Pascovici, în curs de publicare
- /10 /103/ E.A.Ivanov, M.Ionescu-Bujor, A.Iordăchescu, D.Ploștinaru,
B.Constantinescu, P.Racolțea și S.Vajda, Rev.Roum.Phys.,
22 (1977) 1009
- /10 /105/ E.Dafni și G.D.Sprouse, Hyp.Int., 4 (1978) 77.