

III. Review of Gamma-Ray Transitions from keV Neutron Capture

B. J. ALLEN, AAEC/TM565

山越 寿夫(船舶技研)

中性子捕獲の研究は 10^{-2} eV から 10^2 MeV まで広いエネルギーに亙つているが、中性子束の高い原子炉が使用出来ることと捕獲断面積が大きいことから熱領域の中性子に対する研究がほとんどであつた。そこでは、エネルギーレベルやカスケードスキームおよび低エネルギーレベルのスピンヤパリテイ等核の情報が多量に得られたが次の理由で熱捕獲の研究には限界がある。

- a) 熱領域の捕獲は非共鳴性反応 (Non-Resonant Reaction) であるか、または束縛及び非束縛励起状態 (Unbound Excited States) の寄与の名残りが未だかなりまざりあつた反応であること。
- b) 複合核における低い励起状態への遷移を観測する場合、可能な2つのS波スピン状態に就いての多重極選択律、部分輻射幅 (Partial Radiative Widths) および種々の輻射振幅 (Radiative Amplitude) 間の相互作用の可能性等による制約があること。
- c) 捕獲輻射幅と最終状態の換算中性子幅の相関が厳密ではないこと。またチャンネル捕獲と直接捕獲の効果とを分離することが出来ぬこと。

以上の制約を取り除く事が共鳴捕獲の研究の意義である。重い核や中重核についての共鳴捕獲の研究は eV 領域に関して行われてきたがその場合の共鳴の間隔は $10 \sim 100$ eV である。しかし共鳴の間隔は keV の範囲の核がだいぶあり、特に軽い核や閉殻に近い核は単純な殻構造のため、共鳴間隔の統計的振舞からのずれがずつと大きくなる。

共鳴 γ 線の測定を解析するのは、それが期待された統計的振舞からのずれの様子の情報を与えるからである。統計的性質として関心のあるのは以下の三項目である。

- a) 捕獲ガンマのスペクトルは滑かであり、最終状態の密度を $\rho(E_c - E_\gamma)$ とすれば $E_\gamma^3 \rho(E_c - E_\gamma)$ に比例する。他方、個々の γ 線強度は、主として E1 の遷移のみが寄与すると仮定して、 αE_γ^3 に比例する。
- b) 部分輻射幅は自由度1の chi-square 分布で表わされる幅広い変動をする。
- c) 共鳴並びに最終状態の換算中性子幅と部分輻射幅との間の相関は考えない。

keV 領域の捕獲の実験値が以上の性質とはどのようにずれているかを要約する。尚、表 I に捕獲実験のあらましを示す。

Resolved Resonance Capture の場合

(イ) 2S-1d Shell

共鳴間隔が広く、崩壊のスペクトルが比較的単純なため高効率 NaI 検出器を用いて Fe Na Mg Al S 等による捕獲 γ 線を測定した結果から、いくつかの共鳴スペクトルでは統計的性質をよく満たしている事。Z-偶核では比 $M1/E1$ が小さく ($\sim 10^{-2}$)、Z-奇核ではより大きい事 ($\sim 10^{-1}$) 等がわかった。

(ロ) 2P-1f Shell

Ca, Mn, Fe, Co, Cu, Ti, Cr 等に fast chopper や線型加速器を用いた中性子を当て、Ge (Li) 検出器で γ 線を測定した。中性子捕獲の機構を示唆する情報、P 波中性子や d 波中性子の効果に関する情報等が新しく観測された遷移の様子から得られた。

(ハ) E₂ 遷移または d-波の捕獲

5-100 keV の測定では偶-偶核を対象とした最終状態が高いスピン状態 ($5/2^-$, $7/2^-$) となる遷移に関心がある。表 II によれば可能な多重極放射の型が判明するが、その換算幅を表 III に示す。他方、E₂ 遷移の場合は換算幅の値が Weiskopf の与えた一粒子の扱いの値とは 200 倍も大きくなっている。これは殻模型である特定の単一粒子殻の結合エネルギーが零となる事で説明されている。

(ニ) P 波と d 波の強度関数

光学模型で求めた S_1 , S_2 の値は $A \sim 60$ で ($10^{-4} \text{ eV}^{-\frac{1}{2}}$ を単位) $S_1 \sim 1.2$, $S_2 \sim 7$ であるが、実験値はこれとはやや異なる。 ^{65}Zn は $E1/M1 \sim 10$ を仮定して $S_1 \sim 0.04$, $S_2 > 2$ である。 $E_n > 60 \text{ keV}$ では S_2 はもつと小さくなるべきである。 1.15 MeV の ^{56}Fe の共鳴では ($E1/M1 \sim 1$ を仮定), $S_1 \sim 0.7$, $S_2 \sim 0$ となる。この理論と異なる S_2 の値も天然の Zn の全捕獲断面積の ℓ 波解析ではかえって良い結果をもたらしている。

(ホ) 部分輻射幅の分布

共鳴間隔が keV 領域の場合の実験は P 波と d 波とによる捕獲が存在する為むづかしいが、 $40 < A < 70$ の領域でデータが揃いつつある。 ^{56}Fe の場合は 6 個の共鳴に汎る多くの遷移を観測し、S 波捕獲が最も決定的な役割を果たすと仮定した M1 の換算幅は E1 の幅と同じ値になるほど大きくなっていると仮定した結果、基底レベルと第一励起レベルへの遷移の成分は $\nu = 16$ の X-square 分布に、またこれ以外の成分は $\nu = 1, 2$ の X-square 分布に近似された。

(ヘ) 部分捕獲 (Partial Capture) の断面積の非対称性

直接過程の捕獲断面積を測定するのに $^{207}\text{Pb}(n, \gamma)^{208}\text{Pb}$ を利用した結果、実験値は

Lane and Lynnの式で予測する値よりも2倍も大きいこと並びに $^{208}\text{Pb}(\gamma_0, n)$ の断面積に非対称性があることがわかった。此れ等は、直接過程とDoor way 過程との相互作用を考慮して説明された。 $^{207}\text{Pb}(\gamma_0, n)$ の断面積を1200 keVまで測定した結果、広いDoor way state の存在の可能性が示されている。

中性子捕獲の平均的性質

広いエネルギー範囲あるいは広い質量数の範囲に亙つて捕獲スペクトルの平均的性質を測定する場合は、多くの非分離共鳴の励起を利用する。

(i) エネルギー依存性

Ge(Li)を用いたNi, Cuについての実験から、捕獲ガンマのスペクトルは E_γ^3 に比例し統計模型を満たすこと、共鳴効果の一種であるチャンネル捕獲は非統計的熱スペクトルの原因ではないことがわかった。他方、Znに就いては、スペクトルは重い核に対しBollingerとThomasとが得た E_γ^5 と E_γ^3 との中間である。 E_γ^5 はGiant Resonanceの寄与として説明されている。Co, Sc, V, Mnに就いては、配位効果の寄与が考えられる。Coの場合、10~20 keVの幅を持つ中間構造の存在が観測されている。

(ii) 捕獲 γ 線スペクトルの異常立上り

$110 < A < 130$ 並びに $180 < A < 210$ の範囲の核の γ 線スペクトルに異常立上りが見られる。この異常は $E_n \leq 4 \text{ MeV}$ の範囲では中性子エネルギーには依らず、直接相互作用の可能性を否定するものである。

この異常は先ず核がいくつかの可能なDoor Way Stateに入り、複合核の状態に至る前にE1(またはM1)の遷移をするため、5.5 MeVのE1 γ 線(Door Way Stateの粒子-空孔対の消滅が原因と考えられる。)が生ずることで説明されている。

ところで $^{62}\text{Ni}(n, \gamma)$ では、このような状態が期待されているにもかかわらず、keV領域の測定ではこの異常を立上りは認められない。

結 論

$40 < A < 70$ の範囲でkeV領域の捕獲実験を行う為には、P波とd波の中性子の相互作用の役割を明らかにする必要がある。その為にも、この質量領域の平均のE1, M1, E2の遷移強度の信頼出来る評価が達成されるよう、一次遷移の多重極性を認定出来る詳細な角度分布の実験を行う必要があること。

d波の共鳴断面積の測定には逆過程の反応(γ_0, n)を利用すべきこと。

ℓ 波捕獲のうちいくつかを分離する為には捕獲断面積の分解能(Resolution)を改善すること。

今の質量数の範囲のZ-偶核の測定からkeV領域での部分捕獲幅の分布がもつと求められること。この質量域のチャンネル捕獲の機構の様子を知る為に、部分輻射幅と換算共鳴中性子幅との間の相関を研究すべきこと。

N=82の領域ではkeVの捕獲の測定が未だ無いこと。そこでは最終状態の換算中性子幅と Γ_{γ_i} (i番目の励起レベルの幅)との間に高い相関が、熱領域の研究で示唆されたこと。

直接、Doorway Stateおよび共鳴の捕獲断面積の干渉効果に関する情報を得る為に、Resonance Shapesの測定を更に行うこと。yield曲線の中に多くの γ 線が含まれていると干渉効果は打ち消されるので、逆過程の反応(γ_0, n)がこの場合特に適したものであること。

TABLE 1
SURVEY OF keV CAPTURE EXPERIMENTS

Target	Neutron Energy, (keV) ^a	Detector	Neutron Source	Resolved (R) or Average (A) Resonance	Laboratory	Year	Reference	Results
F	20-110	NaI	VdG	R	Oak Ridge	1965	24	$\Gamma_{Y_1}(E1) \sim \Gamma_{Y_1}(M1)$
F, Na, Mg, Al, S, Cl	20-110	NaI	VdG	R	Oak Ridge	1967	26	
Mg, Si, P, S	20-80	NaI	VdG	R	Stockholm	1969	28	Transition to $5/2^-$, $7/2^-$
Na	2.85	Ge(Li)	Chopper	R	Brookhaven	1969	28	
^{40,42,44} Ca	10-60	NaI	VdG	R	Oak Ridge/ Lucas Heights		57	Transition to $5/2^-$, $7/2^-$ p or d-wave capture
Ca, Ti, Cr, Fe	5-100	Ge(Li)	VdG	R	Lucas Heights	1969	31	
Mn	2.4	NaI	Chopper	R	Argonne	1958	60	$\Gamma_{Y_1}(E2) \sim X200_{\text{th}}$ $\Gamma_{Y_1}(E1) \sim \Gamma_{Y_1}(M1)$
Mn	~ 2	Ge(Li)	Sc filter	R	Idaho Falls	1969	17	
Fe	1.17	Ge(Li)	Chopper	R	Brookhaven	1968	9	
Mn, Co, Cu	~ 10	Ge(Li)	Linac	R	Livermore	1968	29	Direct capture interference
Sc, V, Mn, Co	5-80	Ge(Li)	VdG	A	Lucas Heights	1969	31	Reduction in high energy intensity
Fe, Ni, Cu	10-60	NaI	VdG	A	Oak Ridge	1961	20	
Ni, Cu	15-300	NaI	VdG	A	Stockholm	1961/ 1962	19,61	Reduction in high energy intensity
^{54,56} Fe, nat.	10-60	NaI	VdG	R	Oak Ridge/ Lucas Heights	1968	62	Transitions to $5/2^-$, $7/2^-$
⁵⁶ Fe	0.7-70	(γ_0, n)	Linac	R	Livermore	1967	63	E_γ^3 dependence
Cu	0.5-2.66	Ge(Li)	Linac	R	Harwell		30	
Cu	10-60	Ge(Li)	VdG	A	Lucas Heights	1958	21	Transitions to $5/2^-$
Ni	5-80	Ge(Li)	VdG	A	Lucas Heights	1969	47	
Zn	10-60	Ge(Li)	VdG	A	Lucas Heights	1969	31	Transitions to \pm ve parity states
^{80,81,82,84} Zr	10-60	NaI	VdG	A	Oak Ridge		37	Transitions to $5/2^-$
Hf	2	Ge(Li)	Sc filter	A	Idaho Falls	1969	17	High energy enhancement independent of neutron energy
Ag, Sn, I, Cs	20-300	NaI	VdG	A	Stockholm	1962	48	
Ta	2	Ge(Li)	Sc filter	A	Idaho Falls	1969	17	5.5 MeV bump-independent of neutron energy
Ta, W, Au, Hg	15-300	NaI	VdG	A	Stockholm	1962/ 1964	49/ 50	
Pb, Ta, Au	15-4200							
Au	10-60	Ge(Li)	VdG	A	Lucas Heights	1968	56	Primary E1 gamma rays in bump
^{208,207} Pb	10-100	NaI	VdG		Oak Ridge	1967	65	Direct capture interference (n, γ)
²⁰⁷ Pb	41	NaI	VdG	R	Oak Ridge/ Lucas Heights		43	
²⁰⁷ Pb	20-1500	(γ_0, n)	Linac	R	Livermore	1969	44	Direct semi-direct interference
²⁰⁸ Pb	41	(γ_0, n)	Linac	R	Livermore	1969	45	Intermediate structure
Bi	1-12	(γ_0, n)	Linac	R	Livermore	1968	63	Agreement with statistical model
²⁰⁹ Bi	10-300	NaI	VdG	A	Stockholm	1962	64	

TABLE II
MULTIPOLARITY OF GAMMA RAY TRANSITIONS
FOR CAPTURE IN EVEN-EVEN TARGETS

Angular Momentum l_n	Resonance State J_f^π c	Final State			
		$1/2^-$	$3/2^-$	$5/2^-$	$7/2^-$
0	$1/2^+$	E1	E1	M2	E3
1	$1/2^-$	M1	M1	E2	M3
1	$3/2^-$	M1	M1	M1	E2
2	$3/2^+$	E1	E1	E1	M2
2	$5/2^+$	M2	E1	E1	E1

TABLE III
TRANSITIONS TO $5/2^-$ FINAL STATES

Compound Nucleus	Neutron Energy (keV)	Intensity (%)	Final State (keV)	Reduced Widths [†]	
				$k(E1) \times 10^{-3}$	$k(M1) \times 10^{-3}$
⁴³ Ca	AV	3	373	0.6	5
⁴⁵ Ca	AV	4	174	0.5	4
⁵³ Cr	30	18	1,007*	3.6	34
⁵⁵ Fe	AV	9	933	0.5	4.6
		4	1,322*	0.2	2.4
⁵⁷ Fe	26	3.3	706	1.6	15
	36	7.7	706	2.8	27
	52	8.4	135	2.4	23
		5.4	706	2.0	19
	72	12.6	135	3.6	35
		3.3	706	1.2	12
⁵⁹ Ni	AV	4	341*	0.2	2.0
⁶¹ Ni	AV	12	69	1.4	14
⁶⁵ Zn	AV	2	g.s.	0.9	9.4
⁶⁷ Zn	AV	$\frac{1}{2}$	g.s.	0.1	1

* Final State $l_n = 3$, $J_f^\pi = 5/2^-$ or $7/2^-$

† $\langle k(E1) \rangle = 1.5$; $\langle k(M1) \rangle = 14.0$