資 料

核分裂研究に関する最近の発展

竹 腰 英 子*

(1969年 12月16日 受理)

Recent Developments in Nuclear Fission Studies

By Eiko TAKEKOSHI

A review is presented on the current status of progress in fission studies, both experimental and theoretical. Special emphasis is laid on developments related to nuclear shell effects in the fissioning nucleus.

I. ま え が き

核分裂研究は、(1)核分裂に至るまでの非常に変形した複合核の分裂メカニズムに関する問題、(2)分裂後の生成核に関する問題の2つに大別することができる。物理的・化学的研究方法により研究された核分裂現象は、従来(2)に関する問題、すなわち分裂生成核より放出される既発中性子、既発 γ 線、遅延中性子、遅延 γ 線、そしてまた分裂生成核の運動エネルギー、質量、荷電分布が主なる研究対象であり、これらに関する核データは原子力研究の基礎となっている。数年前より開発された分解能のよい半導体検出器は(2)の問題に大きく貢献し、分裂生成核の質量の関数としての核データの詳細な検討に役立った。これらの研究は現在逐次進行しつつあるが、検出器の分解能の限界および走行核分裂片からのドップラー効果などの影響もあり、核データの質は最近めざましい進展を示していない。(2)の研究にくらべ、(1)の問題に関しては最近2～3年間に奇異な現象が続出してきた。すなわち、従来の Bohr-Wheeler による液滴モデルのような簡単なものではとても説明できない現象が発見された。

その1つは Dubna グループに始まる“異常に高い確率で自発性核分裂崩壊するアクチナイド核のアイソマ”，すなわち spontaneous fissioning isomer の発見である。これらの研究は Copenhagen, Seattle, Heidelberg グループに引きつがれ、現在では U, Pu, Am, Cm などの核種にも spontaneous fissioning isomer が見出されている。

他の1つは、アクチナイド核における (d, pf) , $(p, p'f)(n, f)$ 反応に見られる fission barrier 近くの励起

カーブの異常なバンプあるいはピーク、また中性子共鳴領域での核分裂断面積の奇異なパターンである。これらは Los Alamos, Copenhagen, Chalk River グループおよび Sacle, Geel, Harwell グループにより発見された。

上記2種の奇異な現象に対する理論的解釈には、液滴モデルによるポテンシャル・エネルギーをベースにし、それに核の shell effect を巧妙に付加した Strutinsky モデル⁽¹⁾が非常に適切であることが最近確認されつつある。Strutinsky モデルは1967年に登場し、その特徴は、従来の液滴モデルの1山の fission barrier に対して double humped barrier として表わされる。(1)に対する奇異な現象と double humped barrier の概念を結びつけて、実験データから double humped barrier の特性を定量的に解析しようという試みは Lynn^(2,3)により進められている。

以下、double humped barrier に関連した核データのいくつかを1969年 Vienna の“Physics and Chemistry of Fission”国際会議の報告を中心として紹介する。

II. Strutinsky モデル

液滴モデルへの shell effect としてミクロスコピックな核子軌道の影響を取り入れた unified model は Myers & Swiatecki⁽⁴⁾によりもたらされた。彼らの shell effect は核子軌道の Fermi gas スペクトルを核子の magic number に相当する band に bunch することにより導入され、この shell effect は核の β 変形の増加と共に smearing するという仮定が用いられ

* 日本原子力研究所(Japan At. Energy Res. Inst.)

た。この後 Strutinsky⁽⁴⁾ はミクロスコピックな個々の nucleon orbit に注目し、液滴モデルに対する shell effect の付加を巧妙に行なった。shell effect は δU として付加され $\delta U = U - \bar{U}$ であり、 $\bar{U}$ は uniform level density からくるもので level density function を用いて計算された。Strutinsky のこの計算方法では、ポテンシャル・エネルギー・カーブには ground state の変形パラメータ β_0 に対して約 $2\beta_0$ の所にもう 1 つの minimum をもつ double humped barrier となるのが特徴である。Strutinsky モデルはその後 Seeger & Perisho⁽⁵⁾, Nilsson ら⁽⁶⁾ により level density function について改良された。また、2nd minimum の安定性は β 以外の変形パラメータを付加した時についても検討され、double humped barrier の存在は確実なものとなった。詳細なことは Strutinsky & Pauli⁽⁷⁾ により論じられている。

III. Intermediate Structure

まがき中の(1)に関する奇異な現象は、double humped barrier の 2nd minimum に関する intermediate structure として理解される。Strutinsky & Pauli⁽⁷⁾ による double humped barrier の核分裂現象に対する機能は Fig. 1 で示されている。2nd minimum に帰因する intermediate state は spontaneous fissioning isomer に、また intermediate structure としては、①中性子共鳴領域で観測される核分裂断面積データの narrow intermediate structure, ②同領域における fine structure resonance, ③核分裂励起関数のちょうど fission barrier あたりに観測される gross structure などに対応させることができる。現在までに得られている spontaneous fissioning isomer のデータのまとめは Table 1 で示されている。intermediate structure に対するデータのうち①に対する $^{240}\text{Pu} + n^{(8)}$, $^{237}\text{Np} + n^{(9)}$ のデータは Figs. 2, 3 で、また③に対する $^{230}\text{Th} + n^{(10)}$, $^{239}\text{Pu}(d, pf)^{(11)(12)}$ のデータは Figs.

Fig. 1 重核の変形エネルギー(Ref. (7)より)

4~6 で示されている。これら実験データを用いて double humped barrier の特性を得ようという解析方法は Lynn⁽²⁾⁽³⁾ により試みられている。

Table 1 偶-偶核に対する Spontaneous fissioning isomer の半減期データ

Nucleus	SF($T_{1/2}$) sec	Ref.
^{238}U	1.1×10^{-7}	Copenhagen group ^(a)
^{242}Pu	5×10^{-8}	Copenhagen group ^(b)
^{240}Pu	4×10^{-9}	Seattle group ^(c)
	7×10^{-9}	Heidelberg group ^(d)
	5×10^{-9}	(?)
^{238}Pu	$< 2 \times 10^{-9}$	Seattle group ^(c)
^{236}Pu	$< 2 \times 10^{-9}$	} Seattle group ^(c)
	$< 4 \times 10^{-9}$	
$^{244}\text{Cm}(?)$	1.2×10^{-8}	Heidelberg group ^(d)
	$> 5 \times 10^{-7}$	Heidelberg group ^(d)

奇核に対する spontaneous fissioning isomer の半減期データ

^{243}Pu	6×10^{-8}	Copenhagen group ^(b)
^{241}Pu	3×10^{-8}	Copenhagen group ^(b)
^{239}Pu	5×10^{-7}	Heidelberg group ^(d)
	$> 4 \times 10^{-7}$	Seattle group ^(c)
^{237}Pu	$\sim 10^{-7}$	Seattle group ^(c)
	$3 \sim 6 \times 10^{-8}$	Heidelberg group ^(d)
^{241}Am	1×10^{-8}	Copenhagen group ^(b)
^{239}Am	2×10^{-7}	Copenhagen group ^(b)
	1×10^{-7}	Heidelberg group ^(d)
$^{245}\text{Cm}(\text{or } ^{244}\text{Cm})$	1.2×10^{-8}	Heidelberg group ^(d)
	$> 5 \times 10^{-7}$	Heidelberg group ^(d)
^{243}Cm	3.5×10^{-8}	Copenhagen group
^{241}Cm	2×10^{-8}	Heidelberg group ^(d)
	2.7×10^{-8}	Copenhagen group ^(b)

奇-奇核に対する spontaneous fissioning isomer の半減期データ

^{244}Am	1×10^{-3}	Dubna group ^(e)
^{242}Am	1.4×10^{-2}	Dubna group ^(f)
^{240}Am	9×10^{-4}	Copenhagen group ^(g)
^{248}Am	6×10^{-7}	Dubna group ^(h)

(a) LARK, et al.: Nucl. Phys., A102, 443 (1967).

(b) LARK, et al.: Private communication.

(c) VANDENBOSCH, WALF.: SM-122/110, (1969).

(d) METAG, et al.: SM-122/29, (1969).

(e) FLEYOV, et al.: Nucl. Phys., A102, 443 (1967).

(f) POLIKANOV, et al.: JETP, 15, 1016 (1962); PERELYGIN, et al.: ibid., 15, 1022 (1962).

(g) BJORNHOLM, et al.: Nucl. Phys., A95, 513 (1967).

(h) BORGGREEN, et al.: Phys. Letters, 25B, 402 (1967).

Fig. 2 ^{240}Pu の fission cross section, total cross section との比較がされている (Ref. (8)より)

Fig. 3 ^{237}Np の fission cross section (Ref. (9)より)

Fig. 4 $^{230}\text{Th}+n$ における σ_f カーブ (Ref. (10)より)

IV. Intermediate Structure の解析

Lynn⁽²⁾⁽³⁾ は double humped barrier 上で 1st well (ground state) と 2nd well (isomeric state) の coupling Hamiltonian の強さから intermediate structure

Fig. 5 $^{239}\text{Pu}(d,pf)$ における σ_f カーブ (Ref. (11)より)

Fig. 6 $^{239}\text{Pu}(d,pf)$ における σ_f の fine structure (Ref. (12)より)

を解析する方法を示した。coupling Hamiltonian H'' の強さと 1st well, 2nd well の level spacing D_1, D_2 の相関関係より、主に a), b), c) の異なる structure が考えられる。

a) very weak coupling $|\langle H'' \rangle| \ll \bar{D}_1 \ll \bar{D}_2$ のときには、2nd well の narrow state は Perturbation method で解くことができる。fission width の分布は 2nd well の eigen value λ'' に対するものがとびぬけて大きく、1st well の eigen value λ' からくるものは非常に小さい。したがって、“finger print” 状のパターンが見られる。Fig. 3 で $^{237}\text{Np}+n$ 反応の $E_n \cong 40$ eV, および Fig. 4 で $^{240}\text{Pu}+n$ 反応の $E_n \cong 782, 1405, 1916$ eV に見られる σ_f のパターン (narrow intermediate structure) は very weak coupling により説明される。このほか $^{242}\text{Pu}+n$ ⁽¹³⁾ のデータもこれに含まれる。

b) moderate weak coupling $\bar{D}_1 < |\langle H'' \rangle| \ll \bar{D}_2$ のときは fission width のパターンは Lorentian form になる。 $^{234}\text{U}+n$ 反応における fine structure resonance として観測される $E_n \cong 600$ eV に対する width, w , は

250 eV⁽¹⁴⁾である。

c) vibrational mode damping に関する gross structure

c1) spontaneous fissioning isomer は 2nd well state の最も pure なものである。すなわち、2nd well deformation における lowest intrinsic state に couple した zero-point state である。fission の partial life time は Fig. 1 の barrier B パラメータによりきめられる。このほか 2nd well の pure vibrational state は Fig. 4 の $^{230}\text{Th}(n, f)$ 反応における $E_n \cong 700$ keV における $w \cong 30$ keV⁽¹⁵⁾ の narrow sub-barrier peak において見られる。

c2) damped vibrational state は 2nd well の state がいくつかの他の 2nd well state のある範囲に damp したものをいう。Figs. 5, 6 で示される $^{239}\text{Pu}(d, pf)$ の 5 MeV compound excitation における 170 keV 幅の peak, また、この gross structure 中の sub-structure は 2nd well state の level spacing 50 keV のオーダを与えている。 $^{241}\text{Am}(n, f)$ 反応での $E_n = 15$ keV における $w = 7$ keV の peak⁽¹⁶⁾, $^{234}\text{U} + n$ 反応における $E_n = 300$ keV における $w = 80$ keV の peak⁽¹⁷⁾ などは 2nd well の damped vibrational state として理解される。強く damp した vibrational state も考えられるが、はっきりした例はまだ見つかっていない。

以上のような解析を行い Lynn⁽³⁾ は double humped barrier に対する特性を実験データより求めている(詳細は Lynn の解析⁽³⁾を参照)。これらは純理論的に Strutinsky method による計算値と比較されるが、大体の合い具合はよいようである。今後のデータの集積および解析方法の精密化が待たれる。

最近、中性子共鳴領域における narrow intermediate

structure の存在は種々の fissile nuclei の capture to fission cross section, α value に観測される wide fluctuation に対する説明となるかも知れないということで、炉物理関係の人々の関心を集めているようである。

— 参 考 文 献 —

- (1) STRUTINSKY, V.M.: *Nucl. Phys.*, **A95**, 420 (1967); **A122**, 1 (1968).
- (2) LYNN, J.E.: *AERE-R* 5891, (1968).
- (3) LYNN, J.E.: *2nd Symp. Physics & Chemistry Fission July Vienna, 1969*, SM-122/204(以下上記 Symposium 報告文献を SM と略す。)
- (4) MYERS, W.D., SWIATECKI, W.J.: *Nucl. Phys.*, **81**, 1 (1966), *Ark. Fys.*, **36**, 593 (1967).
- (5) SEEGER, P.A., PERISHO, R.C.: *LA-3751*, (1967).
- (6) NILSSON, S.G., THOMPSON, S.G., TSANG, C.F.: *Phys. Letters*, **28 B** [7], 458 (1969); TSANG, C.F.: *UCRL-18855*, (1969).
- (7) STRUTINSKY, V.H., PAULI, H.C.: *SM-1221203*.
- (8) MIGNECO, E., THEOBALD, P.J.: *Nucl. Phys.*, **A112**, 603 (1968).
- (9) FUBINI, A., BLONS, J., MICHAUDON, A., et al.: *Phys. Rev. Letters*, **20**, 1373 (1968).
- (10) VOROTNIKOV, P., et al.: *Soviet J. Nucl. Phys.*, **5**, 210 (1967); *SM-122/138*.
- (11) BACK, B.B., et al.: *SM-122/74*.
- (12) SPECHT, H.J., et al.: *SM-122/128*.
- (13) JAMES, D.G.: *Nucl. Phys.*, **A123**, 24 (1969).
- (14) JAMES, D.G., SLANTHTER, G.G.: To be published.
- (15) JAMES, D.G., EARWAKER, L.: *SM-122/61*.
- (16) SEEGER, P.A., et al.: *Nucl. Phys.*, **A96**, 605 (1967).
- (17) JAMES, D.G., EARWAKER, L.: Private communication (Ref. (3)参照)。

本会誌バックナンバー

会員は2割引で入手できる

本会誌のバックナンバーは和文、欧文とも、一部の欠本(和文 Vol. 11, Nos. 5~10)を除いて創刊以来揃っております。

会員には定価の2割引で頒布しますので、お申し込み下さい。

なお、上記欠本お譲り願える方は定価で買上げますので、ご一報願います。

「和文誌」「欧文誌」各専用

合本ファイル

和文、欧文各誌約12冊を、簡単な操作で自由に入替えできるファイルです。

布装幀で、金文字の和文、欧文の各誌名が入った美麗・堅牢なもの。

大変便利で好評をいただいております。

1冊 ¥ 200円(千別)