

話 題 (II)

核分裂における中性子放出の物理

— IAEA 専門家会議におけるトピックスと議論

(近大・原研) 大澤 孝明

IAEA 主催の「核分裂における中性子放出の物理」専門家会議が1988年5月2日—27日に水戸で行なわれた。この会議の目的は、

- (1) I N D C 出版物として刊行するために、核分裂中性子の放出に関する実験・理論・データ評価の現状を集約する、
- (2) I N D C / N E A C R P 標準ファイルとして N E A N D C 次回会合 (1988.9) に提案する推奨値をまとめる —— $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ の中性子スペクトル χ と ν 値、および ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu の (n, ν, f) の ν 値の推奨値と精度について ——

の2つである。参加者は国外から13名、日本からは平川・馬場 (東北大)、木村 (京大)、中込・小林 (捷) (京大炉)、五十嵐・神野 (原研)、大澤 (近大) の8名であった。

この報文では、会議で発表された実験データ・計算結果、および集約された結論の概要を、核データ研究の観点からトピックスごとにまとめ、若干の解説と注釈をつけ加える。筆者のコメントは [] で囲んで示す。

なお、筆者は別のところ (1) に、別の観点からの解説とコメントを書いたので、関心のある向きはご参照いただければ幸いである。

トピック1 $\bar{\nu}$ のエネルギー依存性

Boldeman の報告に基づき、次のようにまとめた。

<結論と勧告>

(1) ^{252}Cf の $\bar{\nu}$ 値としては Axton の推奨値 3.766 ± 0.054 が実用上ほとんどの場合に十分な精度を持つといえる。しかし測定値には、大型液体シンチレータ法とマンガンバス法によるデータの間には系統的なずれがあり (前者の重み付き平均値は 3.7754、後者は 3.7563)、この意味でいまだ internal consistency に欠ける。

(2) 2200m/s における $\bar{\nu}$ 値は現在の応用に関する限り適正であると言える。Axton の値を推奨値とする。ただし、Fort らによる ^{239}Pu の核分裂共鳴断面積の最近の評価値に変更があるためこれが熱中性子領域の ν 値にも影響を及ぼす可能性がある。

(3) ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu の $\bar{\nu}$ 値のエネルギー依存性は原子炉への応用上は満足できる状況にある。しかし、Gwin のデータと、Fréhaut, Boldeman 両者のデータを合わせたものとの間に 0.5% の不一致がある。 ^{235}U , ^{239}Pu の $\bar{\nu}$ 値のエネルギー依存性には小さな構造がみられるが、その大きさについては実験者間で一致していない。

● ^{233}U の $\bar{\nu}(E_n)$ の 200keV 付近の構造は、最近の Gwin らによる測定では観測されておらず、おそらく実在しないと思われる。

● ^{235}U の $\bar{\nu}(E_n)$ に関する Gwin らの最近の測定で 40keV に極小が見いだされたが、全運動エネルギー (TKE) との間に相関はないようである。しかし、このエネルギーにおいて核分裂片の非等方性が極小点をもつ事実との間には関連がうかがわれる。

● $\bar{\nu}(E_n)$ の構造は核分裂過程の複雑さの現れであり、単純な解釈では片づかないであろう。

● ^{237}Np の $\bar{\nu}(E_n)$ は3つのグループにより測定されているが、Kuzminov および

VeesserのデータはFréhaütのデータとの間に3%のずれがある。

● $\bar{\nu}$ (En)の最新のデータが現在のファイルに含まれていないことは早急に改められるべきである。

トピック2 核分裂中性子数と個数分布及び分散

核分裂当り発生する中性子の個数分布 $P(\nu)$ のデータは、最近、保障措置の関係でPuの含有量の定量に使われるので詳細なデータが要求されている。この会議で、Fréhaütは1-15MeVの高速中性子による $^{235,238}\text{U}$, ^{239}Pu の核分裂における $P(\nu)$ とその分散のデータを報告した。面白いことにこの3核種の中性子個数分布には相違がなく、 $P(\nu)$ は実質的に分裂核にはよらないことがわかった。例として、 ^{239}Pu の $P(1) \sim P(7)$ を入射中性子エネルギーの関数として表わしたものを図1に示す。これらの核種について求められた $P(\nu)$ は、別に分散値だけを測定した ^{232}Th , ^{237}Np , $^{240,241}\text{Pu}$ のデータと比較すると、 ^{237}Np については当てはまるが、 ^{232}Th のばあいは分散値 σ^2 が (Enの関数としてみた場合も、 ν の関数としてみた場合も) 例外的に小さく、当てはまらないことがわかった (図2)。[なお、 ν にせよTKEにせよ、従来はその平均値に関心が向けられることが多かったが、核分裂過程の物理的研究の観点からすれば、むしろその分布の形や分散の大きさが重要であることに留意しておきたい。]

<結論と勧告>

(1) 中性子誘起核分裂における中性子個数分布の分散と入射エネルギーとの関係が見いだされたが、保障措置上必要とされる ^{239}Pu についてはより正確なデータが要請される。

(2) 現在のところ、一つの実験にのみに基づいていることが多いので、なお多く測定が望まれる。

トピック3 核分裂における中性子とガンマ線放出の競合

分裂片における中性子とガンマ線の放出の競合において、中性子放出が可能な限りガンマ線放出は起こらないと仮定すると、各々の分裂片の残留励起エネルギーは平均 $B_n/2$ (B_n : 中性子結合エネルギー) であり、2つの分裂片を合わせると $E_\gamma \approx B_n \approx 5 \sim 6 \text{MeV}$ 程度になるはずである。しかし実際には全ガンマ線エネルギーは $7 \sim 9 \text{MeV}$ であり、 B_n より大きい。これは、分裂片が大きな角運動量を持っていることによると考えられている。すなわち、中性子は大きな角運動量を持ち去ることができず、残留核の基底状態近傍には高スピン状態が乏しいので、最後の1個の中性子の放出確率は小さく抑えられる。一方、ガンマ線は高スピンをもつ highly-lying state へ崩壊することが可能なので、ガンマ線の放出が相対的に強められるのである。[Thomas & Grover(2)の計算によると、分裂片スピンの2乗平均平方根が8.4であれば、全ガンマ線エネルギーはスピン効果を無視した場合に比べて約50%増加し、実験データを説明できる。ちなみに、核分裂片スピンは、Fong(3)、Armbruster(4)によると7程度、Aumann(5)によると10程度である。なお、Miltonらは、上の原因をスピン効果ではなく、分裂片の変形効果によるものと考えている。]

さて、Fréhaütの報告によれば E_γ と $\bar{\nu}$ は、 $E_\gamma = a\bar{\nu} + b$ 型の1次比例関係にある。Fréhaütは、この現象は、分裂片スピンがその励起エネルギー ($\propto \bar{\nu}$) に比例して増加すると考えることで解釈できると述べている。[純粋の統計理論に基づいて考えれば、分裂片の最確スピン J_n は、式 $J_n = \sqrt{gT} - 1/2$ で与えられるから、確かに核温度 T が高いほどスピンは大きくなる。実験的にこのことを確認するためには、異なるエネルギーにおいて、即発ガンマ線の角度分布を、核分

裂片質量との相関をとって測定する必要があると思われる。]

<結論と勧告>

(1) $E\gamma$ と $\bar{\nu}$ の関係のデータは、 ^{235}U の熱中性子核分裂 (Pleasanton et al.) および $^{252}\text{Cf} (sf)$ (Signarbieux et al.) については知られている。また、 ^{235}U 、 ^{237}Np 、 ^{232}Th の高速中性子核分裂における $E\gamma$ と $\bar{\nu}$ (En) は、Fréhautらによって測定され、両者の間に直接的な相関があることが示された。このことの理論的解釈が必要である。さらに、 $^{252}\text{Cf} (sf)$ など特定の系について、 $E\gamma$ およびそのスペクトルを、分裂片質量の関数として測定する必要がある。

(2) $(n, \gamma f)$ 反応のシステマティックスは、特に ^{239}Pu に関してよくわかってきた。 ^{235}U の共鳴核分裂にみられる ν の統計的ゆらぎはスピン及び $(n, \gamma f)$ 反応とは関係がない。

トピック 4 Th のしきい値近傍の核分裂中性子

^{232}Th の $\bar{\nu}$ (En) のエネルギー依存性が 1.6 MeV を境に異なった振舞いを示すというデータはかねてよりあったが、最近の新しい測定でもそのことが確認され、 $En < 1.6\text{MeV}$ では $\bar{\nu}$ (En) が負の勾配をもつことが明らかになった。(JENDL-3 でもこれを考慮した two-segment fit を採用している。) この境界エネルギーはちょうど核分裂断面積が顕著な subthreshold structure をしめす領域にあたるため、特定の K 値 (K は全角運動量の対称軸成分) をもつ振動共鳴を通過する核分裂においては、中性子放出にもその影響が現われているのではないかと考えられる。この会議では Obninsk グループ (Goverdovsy, Kuzminov ら) により、 $\bar{\nu}$ (En) と TKE との関係エネルギーバランスの式に基づき解析した結果が報告された。このエネルギー領域で核分裂の全解放エネルギーが一定であるとする、TKE の変化にともない $\bar{\nu}$ (En) が変動していること (図 3) を説明できるという。[ただし、彼らはその変動の物理的根拠については言及していない。 $En < 1.6\text{MeV}$ の領域においては $d(\text{TKE})/dEn > 1$ 、すなわち入射中性子エネルギーの増加分以上の運動エネルギーの増加がみられ、 $En > 1.6\text{MeV}$ ではその傾向が反転することを考えると、このあたりでエネルギーの分配メカニズムが変わっているものと思われる。]

<結果と勧告>

(1) しきい値付近での $\bar{\nu}$ (En) と TKE の変動に関する実験結果は、測定の実験の困難さに拘らずよく一致している。

(2) このような構造を正確に理解するためには核分裂断面積の完全なチャンネル解析が行われねばならない。

トピック 5 共鳴における ν

^{239}Pu の $\bar{\nu}$ (En) は共鳴に対応するところで dip を示すことが知られている (図 4)。この dip は $\bar{\nu}$ の平均値を引き下げるので、とくに高転換軽水炉の特性に影響する。

Fort らは ^{239}Pu の共鳴領域における $\bar{\nu}$ (En) と Γ_f の関係を $(n, \gamma f)$ 反応の効果も含めて解析し、

$$\bar{\nu}_p(1+) = 2.8606 - 0.6941 / \Gamma_f (\text{meV})$$

$$\bar{\nu}_p(0+) = 2.8845 - 0.661 / \Gamma_f (\text{meV})$$

という関係を得た。この式の第一項はスピン効果を、第二項は $(n, \gamma f)$ 反応の効果であらわす。第一項どうしの差がスピン 1+ と 0+ の差を反映しているとすれば、共鳴スピンの効果は約 0.8% ということになる。 $(n, \gamma f)$ 反応が $\bar{\nu}_p$ におよぼす効果はエネルギー領域により異なるが、0.4-1.15% である。[これは ^{239}Pu の場合の数値であり、他の核種ではこれより小さい。これは、低エネルギーにおける

$^{239}\text{Pu}(n, f)$ 反応では $0+$ チャンネルは大きく開いているのに対し、 $1+$ チャンネルは開きかたが小さいため、スピン $1+$ の複合核が pre-fission gamma-ray を放出した後に核分裂を起こす $(n, \gamma f)$ 過程が、他核種より起こりやすいためである。]

<結論と勧告>

- (1) 共鳴ごとの $\bar{\nu}_p$ の詳細な変動をファイルに含めるべきである。
- (2) $(n, \gamma f)$ 反応は ^{241}Pu に対しては大きく、 ^{235}U に対しては小さい。しかし、このいずれの核種も Γ_f が大きいので、 $\bar{\nu}_p$ に対する影響は小さい。

トピック 6 即発中性子のエネルギースペクトル (実験)

2つのグループの実験データが報告された。

●東北大学 (馬場、平川) :

- a) 2MeV 中性子に対する ^{232}Th と ^{238}U の核分裂中性子スペクトルが測定された。データは ^{232}Th の JENDL-2 評価値および ^{238}U の JENDL-3T 評価値と一致した。
- b) Maxwell 型および Watt 型関数でフィッティングを試みたところ、Watt 型のほうがスペクトルの形を良好に表示することがわかった。

●Dresden 工科大学 (Märten et al.) :

- a) ^{232}Th の 7.3MeV 中性子による核分裂中性子スペクトルが測定された。データは Generalized Madland-Nix Model (GMNM) と Two-Spheroid Model (TSM) を組み合わせた計算値とよく一致している。
- b) 1.4MeV 中性子による ^{238}U の二重微分中性子放出断面積の測定データと、それを (n, f) , (n, nf) , $(n, 2nf)$, (n, n') , $(n, 2n)$ などに分けて解析したものが発表された。

<結果と勧告>

- (1) 核分裂中性子スペクトルの測定データは 1970 年代初めまでに行われたものが多い。測定技術の進歩を考えると、最近の理論との比較を行うためには質の高い新しい実験を行う必要がある。
- (2) とりわけ、 2MeV (1 次核分裂のみの場合)、 7.3MeV (1 次、2 次核分裂が混在する場合)、 1.4MeV (核分裂前の直接過程、前平衡過程、平衡過程による中性子、および 3 次までの核分裂中性子が混在する場合) における測定が望まれる。

トピック 7 核分裂片からの中性子の放出

Geel と Lenigrad でおこなわれた $^{252}\text{Cf}(sf)$ を対象とする核分裂片-中性子相関測定とその解析結果が報告された。

a) "Scission Neutron" の存在

核分裂中性子の大部分は十分に加速された核分裂片からの蒸発であることが知られているが、これ以外の非統計的メカニズムによる放出中性子がどの程度含まれているかについては諸説があった。Geel グループ (Budtz-Jørgensen & Knitter) は、核分裂片の運動方向に対して 0 度および 90 度方向における中性子計数値の比 $N(90^\circ)/N(0^\circ)$ が、入射中性子エネルギー 4MeV 以上において、従来の Bowman らのデータより 1 桁以上小さい (すなわち非等方向性が強い) ことを見いだした。同じことは、今回発表された Dresden グループのデータでも確認されている (図 5)。この新しいデータは、全ての中性子が加速後の分裂片から Maxwell 型で放出されると仮定した計算値とよく一致する。このことは、非平衡放出中性子の存在割合が小さいことを示している。

Lenigrad グループ (Batenkov et al.) は、 0 度方向での計数値から kinematics

に基づいて計算された90度方向での計数値が、実測値より小さいことに着目し、その差から scission neutron の割合を算出した。それによると scission neutron の割合は全放出中性子の約3%である。

もうひとつ、Märtenらが1982年に発見したという、核分裂中性子スペクトルにおける20 MeV以上の高エネルギー成分の存在の可否の問題がある。これが事実であれば、きわめて高いエネルギーをもった非平衡放出中性子が存在することになる。しかし、1986年にMannhart(6)は、 $^{169}\text{Tm}(n, 3n)$ 、 $^{187}\text{Ag}(n, 3n)$ 反応を利用した積分チェックの結果から、20 MeV以上の成分の存在につき否定的な見解を発表した。今回の会議に発表されたGeelグループの測定データによると、 $^{252}\text{Cf}(sf)$ の場合、20 MeV以上でMaxwell分布より上方へのずれを示しているが、その程度はMärtenらが言うほど大きくはない。[筆者がMärtenに尋ねたところ、最初の測定ではたしかに強い高エネルギー成分の存在を示すデータを得たが、別の検出器を用いた後の測定ではこれを確認することはできなかった、という返事であった。]

b) 重心系での核分裂中性子の角度分布

核分裂片は大きな角運動量を持っているため、放出中性子は重心系で非等方分布を示すと考えられてきた。ところが、 $^{252}\text{Cf}(sf)$ における中性子の重心系角度分布に含まれる $P_2(\cos\theta)$ 成分の係数 a_2 は、Geelグループのデータによると0.01、Leningradグループによると0.04程度にすぎず、非等方性はごく弱いことがわかった。[その物理的理由は明かでないが、上で述べたように、核分裂片のスピンの大きい間はガンマ崩壊が支配的になり、中性子放出が抑制されるためかもしれない。]

c) 核分裂片質量数Aの関数としての中性子スペクトル

質量数Aの核分裂片から放出される中性子のスペクトルをLe Couteur-Lang(7)の式

$$\phi(\eta) = c\eta^2 \exp(-\eta/T_{eff})$$

でフィッティングすれば、その平均エネルギー η 、実効核温度 T_{eff} 、Weisskopf分布からのずれのパラメータ s を決めることができる。Geelグループは $^{252}\text{Cf}(sf)$ についての詳細な解析データを発表した。 $\eta(A)$ のデータは、別に発表されたLeningradグループのデータと比べると、 $A \approx 130$ あたりに不一致が見られるが、全体的にはほぼ同じ傾向の振舞いを示している。

d) 核分裂片の準位密度パラメータ

エネルギーバランスから決定した分裂片励起エネルギーと上で求めた核温度から、分裂片質量Aに対する準位密度パラメータ $a(A)$ が求められる。Geelグループのデータによると、こうして決められた $a(A)$ は $\bar{a}(A)$ の振舞いに類似した鋸歯状の構造を示し、 $a=A/10$ で表わされる系統性からずれている。

Leningradグループはさらに一歩進んで、分裂片全運動エネルギーTKEが 177 ± 5 MeV、 186 ± 5 MeV、 196 ± 5 MeVの各グループに対する $a(A)$ を別個に求め、興味深い結果を得た(図6)。すなわち、 $90 < A < 120$ 、および $140 < A < 165$ の領域ではTKEの値にかかわらず a/A はほぼ一定($a \approx A/10$)であるのに対し、 $A = 132$ 付近では a/A はこれより小さく、かつ、TKEが小さいほど(つまり分裂片の励起エネルギーが大きいほど) a/A は大きくなる。これは、励起エネルギーの増加とともにshell effectが弱まっていくことを示す。[同時にこれは、分裂片の一方が閉殻に近い分裂モードにおいて、TKEが大(コンパクトな配位でのscission)のときには閉殻側の分裂片の励起エネルギーは小さいのに対し、TKEが小さい場合(伸張した配位でのscission)へ移行するにつれて、閉殻側分裂片の励起エネルギーは急速に増加する——すなわち、scission pointにおいてかなりのheatingが存在することを意味する。]

<結論と勧告>

(1) 即発中性子のほとんどは十分に加速された分裂片から放出され、scission neutronの存在割合は5%以下と推定される。

(2) Cfとは異なり対称核分裂が支配的になるFm同位体について同様な相関測定を行うことが望まれる。

トピック8 核分裂中性子スペクトルの理論

従来広く用いられてきたWatt型、Maxwell型、Cranberg型などの表式に替わって近年、Madland-Nix(8)の方法が有力な計算法として登場してきた。これは直角三角形型の核温度分布を仮定した近似的統計モデルであり、軽・重分裂片をそれぞれ代表する核種からの放出中性子スペクトルを重ね合わせるにより全スペクトルを求める。Märtenらは、このモデルに核分裂片の質量分布と $n-\gamma$ 競合、および中性子放出の重心系での非等方性を考慮にいたしたGeneralized Madland-Nix Model(GMNM)がさらに良好な結果を与えることを示した。一方、Madland自身は、質量分布を28核種で表示し、Gauss型の荷電分布を考慮し、質量収率、TKE、 $\bar{\nu}$ (A)等の物理量に測定データを採用する、などの改良を加えた改良型Madland-Nixモデルによる計算結果をこの会議で報告した。これらの改善策にもかかわらず、計算結果にはさほど大きな変化はみられない(図7)。1 MeV以下の低エネルギー領域での過小評価の原因として、Madlandは中性子放出の重心系非等方性を考慮しなかったことをあげている。[しかし、上で述べたように、この会議に出されたGeel, Leningrad両グループの実験データはいずれも非等方性はこれまでの推定よりも弱いことを示していることを考えると、これが本当の原因であるか断言し難い。Blinovは、彼らの小角度測定の結果では低エネルギー成分が低めにでたことから、この不一致は蒸発以外の機構による中性子放出によるものではないかと考えているようであった。そうすると、非平衡放出中性子のエネルギーは蒸発中性子のエネルギーより小さいことになる。]

他方、MärtenらはComplex Cascade Evaporation Model(CEM)による ^{252}Cf の中性子スペクトルの計算結果を報告した。実験値との一致は良好だが、この計算を行うにはきわめて多数の分裂片(数千種類という)からの放出スペクトルを重ね合わせるが必要であり、多量の入力データと計算の手間を要する。[共著者のSeeligerは、この計算において個々の分裂片からのスペクトルは必ずしも正確でないかも知れないが、それらが互いに誤差をキャンセルしていることも考えられると言っていた。]

第3の型のモデルとして、Hauser-Feshbach理論を適用する方法がある。これについては、LeningradのGerasimenko & Rubchenyaの仕事がBlinovにより紹介された。これは最も一般性のある方法であるが、計算対象の分裂片と角運動量の範囲がいまのところごく限られている。

<結果と勧告>

(1) 現在つぎの3つタイプのモデルにつき研究が進められている:

(a) 近似的統計モデル(MNM, GMNM)

(b) 蒸発モデル(CEM)

(c) Hauser-Feshbach型モデル(Gersimenko et al.)

(a)はまだ改良の余地がある。(b)は多量の入力データが揃っているCfなど限られた核種にしか適用できない。最終的には(c)の方法にもとづく計算コードが確立されるのが望ましいが、そのためには種類の分布関数や単位密度パラメータおよび光学モデルのアイソスピン依存性等についての知識が確立されねばならない。

トピック9 核分裂中性子スペクトルの評価

MannhartとFröhner (Mannhart代読) による報告が行われた。いずれも ^{252}Cf を対象とした評価であるが、前者は特定の関数を仮定せず、後者はWatt型関数を用いてフィットしたものである。

<結果と勧告>

(1)Mannhartによると、現在の評価の不確定性は、150keV-11MeVで3%以内、1MeV-5MeVで1.5%以内である。この範囲外では不確定性は低い方で10%、高い方で30%である。また10keV-20MeVの間でCEMによる計算と3%以内で一致する。

(2)FröhnerのWatt型関数で表示する方法は、不確定性に高い要求をしなければ可能であるが、高い精度を要するときにはMannhartの数値によるべきである。

結語

今回の専門家会議に出席して感じたことを2、3述べてみる。

(1)核分裂現象のよききわめて多面的で、関与するパラメータの多い現象を研究するにはGeel、Leningradグループが行なったようなマルチパラメータ相関測定が威力を発揮する。パラメータ(物理量)相互の関係の解析から、これまでは推定の域を出なかったことについてのデータが引き出されてくるのを見ることはきわめて刺激的であった。とりわけ、核分裂片の準位密度パラメータや放出中性子の重心系での非等方性の問題のように、理論モデルの基本仮定にかかわることがらについての情報が得られるようになったことにより、理論の側からの詰めもやり易くなったと思われる。

(2)核分裂中性子の物理において長らく”トリックスター”的存在であった scission neutron (より一般的には非平衡放出中性子)は、その存在割合が5%以下に追いこまれたとはいえ、いまだにその本領を失ってはいない。核分裂中性子スペクトルの20MeV以上の成分の問題として顔を出すかと思えば、Blinov説によると1MeV以下の低エネルギー領域にも出役している気配である。あるいは、正体不明のゆえに、あれこれの食い違いの責任を押しつけられたこともあったのではないか。この正体をさらに突き止めることはできないであろうか。親戚筋の三体核分裂(LRA fission)の方から手を回して挙動をつかむことはできないものか。理論的な解明が待たれるところである。

参考文献

1. 大澤孝明、「核分裂と核破砕の物理と工学」専門研究会報告、KURRI-TR (京大原子炉実験所)として出版予定
2. T.D.Thomas & J.R.Grover: Phys. Rev. 159, 980 (1967)
3. P.Fong: Proc. Physics and Chemistry of Nuclear Fission, Juelich, p. 373
4. P.Armbruster et al.: Z.Naturforsch. 26a, 512 (1971)
5. D.C.Aumann et al.: Phys. Rev. C16, 254 (1977)
6. W.Mannhart: Preprint, IAEA/AGM on Neutron Source Properties, Leningrad (1986)
7. K.J.Le Couteur and D.W.Lang, 13, 32 (1959)
8. D.C.Madland & J.R.Nix, Nucl. Sci. Eng. 81, 213 (1982)

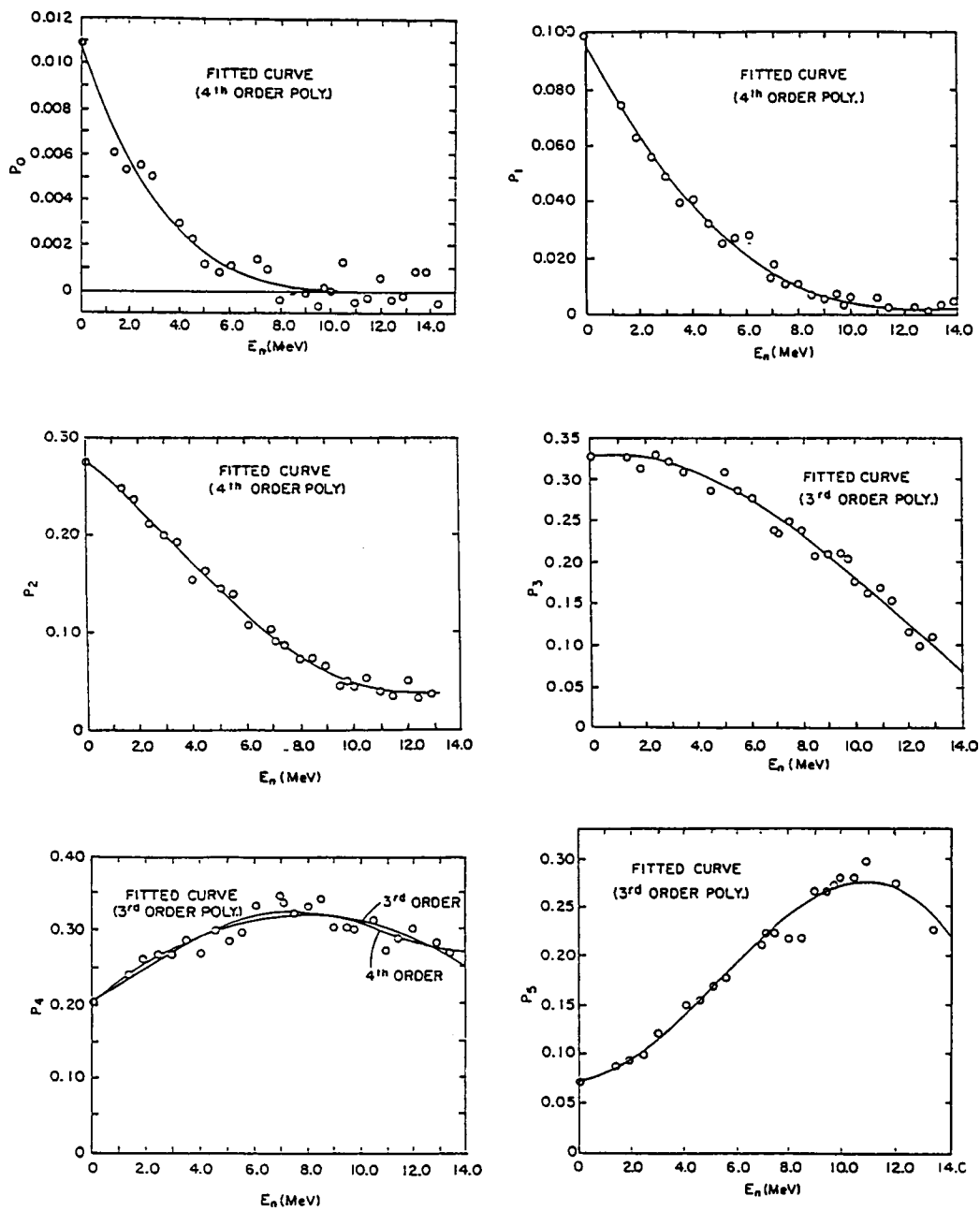


図1 Pu-239の核分裂中性子の個数分布 $P(\nu)$ の入射中性子エネルギー依存性 (Fréhaut)

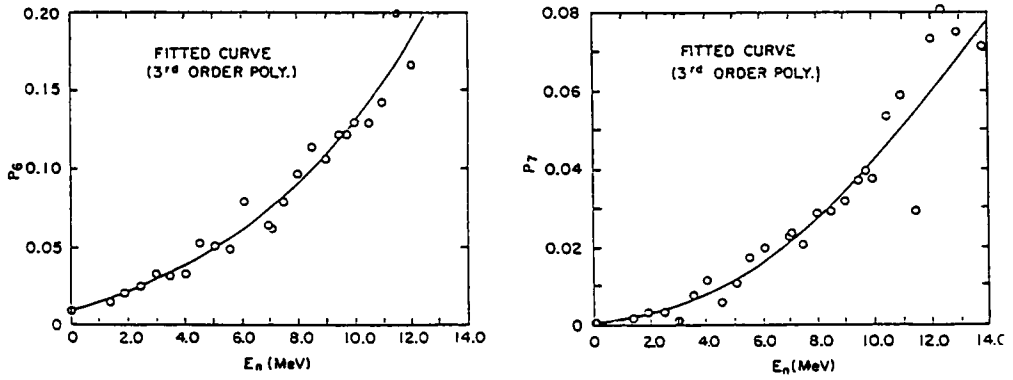


図1 (続き) Pu-239 の核分裂中性子の個数分布 $P(\nu)$ の入射中性子エネルギー依存性

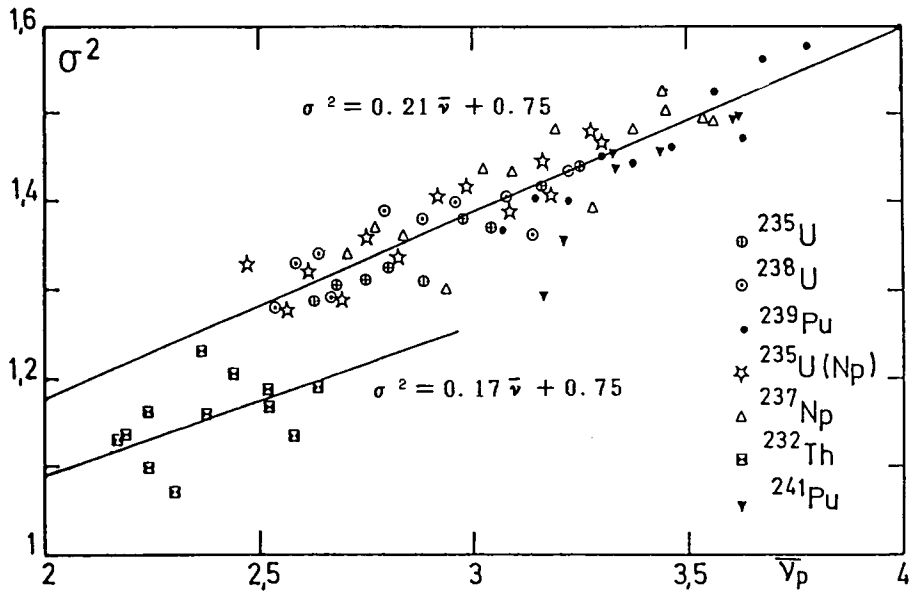


図2 個数分布の分散値と $\bar{\nu}$ との関係 (Fréhaut)

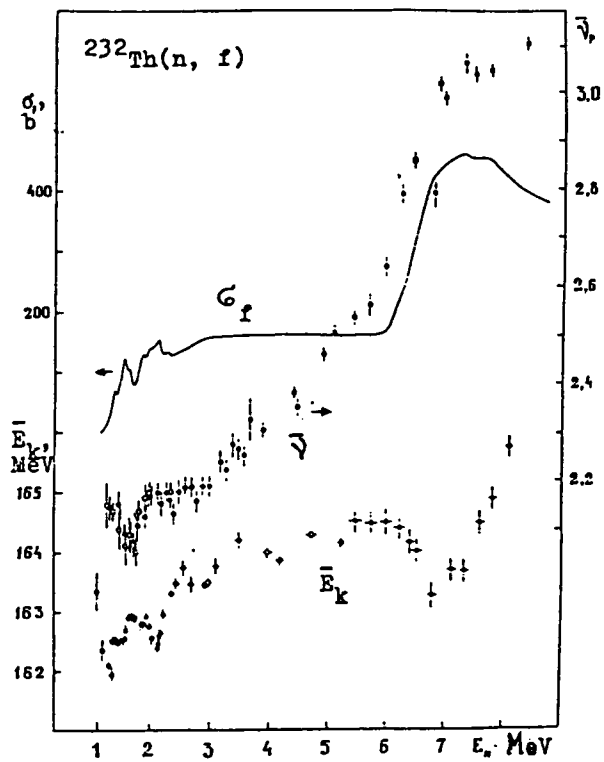


図3 Th-232 の $\bar{\nu}$ (E_n) と全運動エネルギー E_k および核分裂断面積

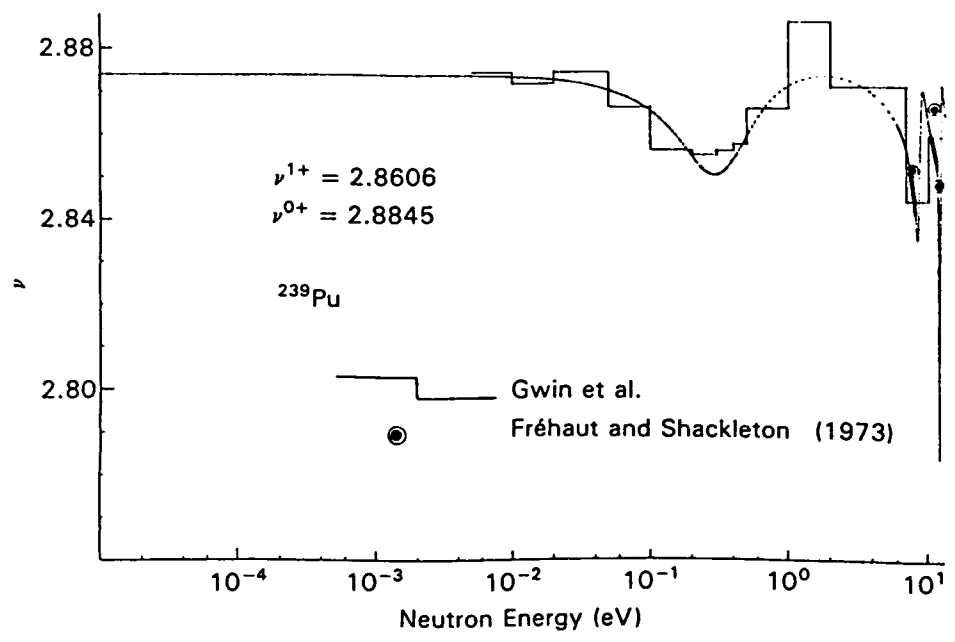


図4 Pu-239 の 0.3 eV 共鳴における $\bar{\nu}$ の変化 (Fort)

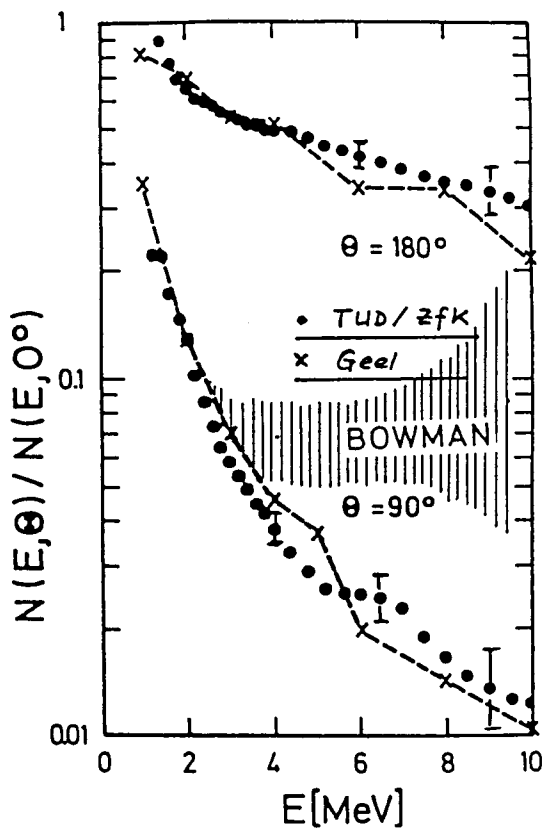


図5
実験室系でのCf-252 (sf) 核分裂
中性子の非等方性 (Märten et al.)

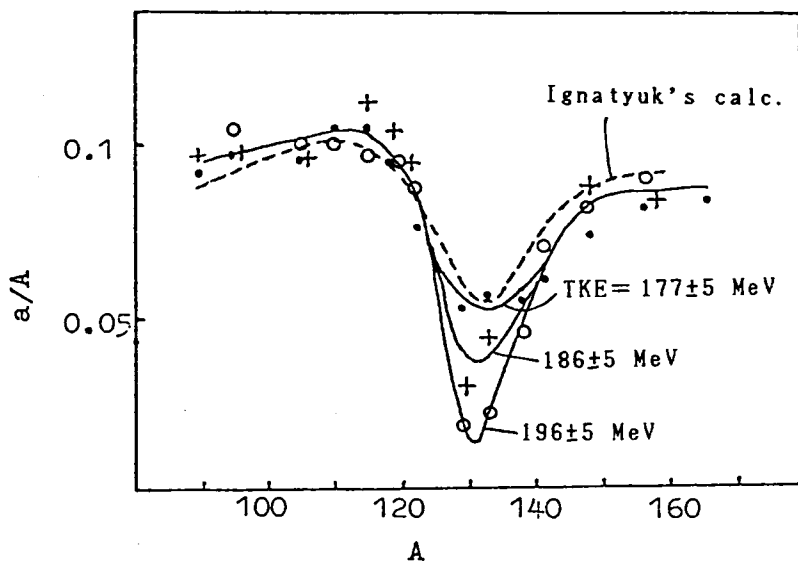


図6 異なる全運動エネルギーTKEに対する核分裂片の
単位密度パラメータ (Batenkov et al.)

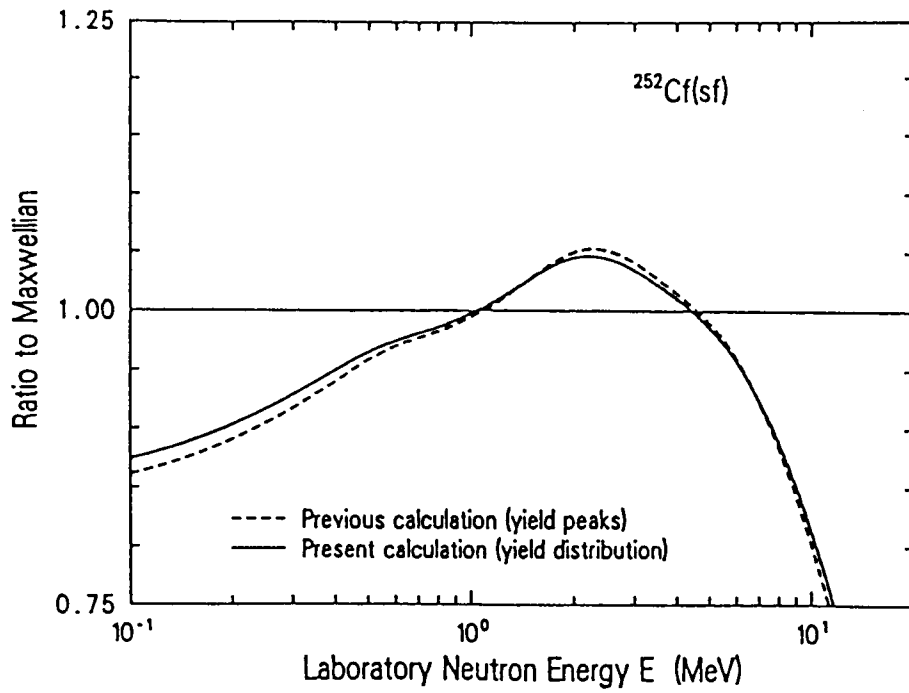


図7 Madland& Nixの原型モデルおよび改良型モデルによる
Cf-252 (sf) 核分裂中性子スペクトルの計算値