

解 説

非対称核分裂について

日本エナジー(株) 原 田 吉之助

最近の核データニュースに、九大の大沢さんが核分裂¹⁾についての解説を書いておられます。それは、核データ研究という観点から、主として評価に役立つ核分裂モデルの発展について、最近の研究成果までとりあげてレビューしたもので、私は非常に興味深く読しました。たゞ、非常に多くの事柄に触れられており、紙数制限のせいでしょうか、いきおい各項目についての叙述が簡潔になされているので、一般の人には高級でやゝ読みにくいのではないかと思います。そして、10年程前に私達が行った研究成果²⁾を、私が一般向きに解説³⁾したことを想い出し、それに若干手を加えて核データニュースに投稿すれば大沢さんの解説の入門編として多少お役に立てるのではないかと考えました。

そのような動機で、核分裂において質量の分割がなぜ非対称に起るかという問題を、基底状態から鞍部点 (saddle point) までの断熱近似が成立つとされる範囲に限定して、平易を旨として書いたものがこの小論です。

啓蒙を狙ったもので、実用的な処方箋の紹介でないことゝ、*) self - contained を意図したため、導入部である第1章は大沢氏の解説と重複していることを予めお断りしておきます。

1. 核分裂障壁の二山構造

核分裂に対するポテンシャル・エネルギーは、原子核の変形度に対して、従来は最大値に到達するまで単調に増大し、最大値を通り越すと単調に減少するという1つのなめらかな山の形をしていると考えられていた。

核分裂をひき起こすためには、この山を越さねばならないのでこの山は核分裂の障壁と呼ばれている。原子核を液滴になぞらえて考察する液滴模型による計算では、分裂障壁は一山になる。

ところが、最近の実験事実⁴⁾は第1図に示したような二山ないし三山の構造をもった核分裂障壁を強く支持している。第1図は、文献(5)から引用したもので、 ^{240}Pu のポテンシャル・エネルギーを分裂片核の重心間の距離(親核の核半径で割ってある)の関数としてプロットしたもので、横軸上の点に対応する原子核の形も示されている。この図を見ると、ポテンシャル・エネルギー

*) self - contained を意図したため、導入部である第1章は大沢氏の解説と重複していること。

の極小点が2つあることがわかる。左側の極小点（第1極小点）は最小点であり、 ^{240}Pu の基底状態が球形でなく回転楕円体の形をしていることを示している。この最小点から右側にポテンシャル・エネルギーの1つの山があるというのが従来の考え方であった。

点線で示されているように、現在は、右側の第2極小点によって、ポテンシャル・エネルギーは2つの山の形をしている。第2極小点を中心にしたポテンシャル・ポケット内に原子核の準安定状態を考えることができる。この状態から核分裂するには、第1極小点である基底状態から核分裂するより透過すべき障壁の部分が少ないので、核分裂の寿命ははるかに短くなる。これが核分裂異性体と呼ばれているもので、 ^{240}Pu のその寿命は 10^{-9} 秒くらいである。ちなみに、 ^{240}Pu は基底状態からは自発性核分裂しない（寿命は約 10^{11} 年である）。

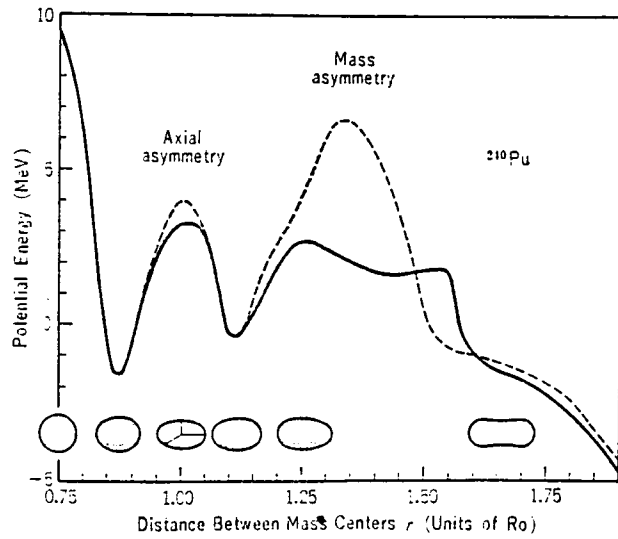
実線で書いてある核分裂障壁の部分は、核分裂の過程で次のような変形の自由度を与えた時に期待されるものである。すなわち、第1の山の付近では、楕円体の3つの軸の長さを変えることにより第1障壁が少し低くなり、第2の山の付近では、西洋梨のような形に変形させる（質量非対称変形）と第2障壁がかなり低くなることを示している。図からわかるように、第2障壁あたりではまだ原子核は2つに分かれておらず、大きく変形した1つの原子核と考えた方がよいが、実線の第2障壁の高さが点線のそれよりかなり低いことは、すでにこのあたりから非対称核分裂を好むような性質をもち始めることを示していて大変興味深い。

2. 液滴模型と殻模型

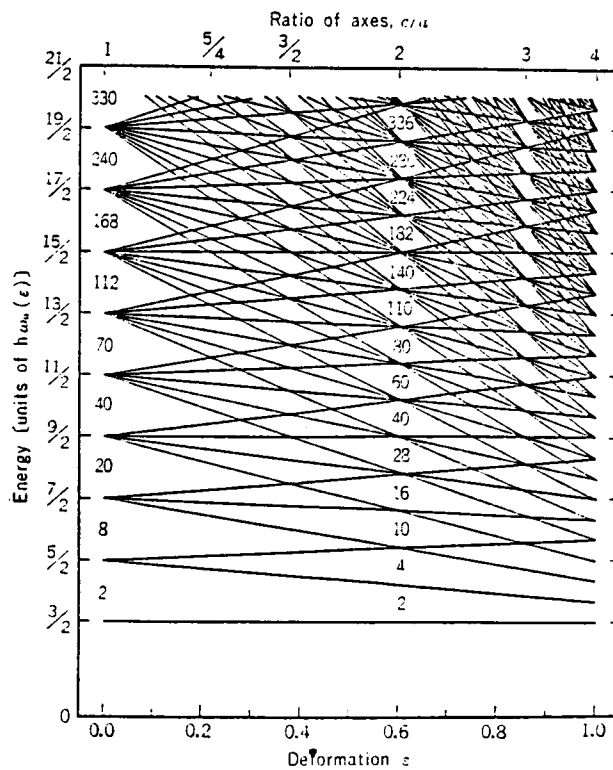
さて、それではどうして核分裂の障壁に2つの山ができたか、非対称変形を考慮すると第2障壁の高さが低くなるのであろうか。液滴模型では、前にも述べたように、分裂障壁は一山になる。また、この模型では非対称変形は必ず分裂障壁を高くする。このため非対称核分裂の現象は発見以来30年もの間説明できなかったのである。

この問題に対する解答は⁶⁾Swiateckiと⁷⁾Strutinskyによって与えられた。液滴模型は古典的な模型であり、原子核内にいる核子が位相空間中を一様に分布しているという仮定に基づいており、量子力学的効果は無視されている。原子核の低い励起状態をよく説明する核模型として、殻模型というものがあるが、これは原子核の内部をある一体ポテンシャルで表わせると仮定し、その中で量子力学的に許される粒子の状態を核内核子の状態に対応させるのである。

簡単化のために、中心からの距離の2乗に比例する一体ポテンシャル（調和振動子型のポテンシャルという）をとり、その中で許される粒子のエネルギー準位を考えてみる。球形の場合は、x軸、y軸、z軸方向の比例常数を全部等しくするが、z軸方向の常数をx軸、y軸のそれとは違えることにより、変形した原子核に対応する変形調和振動子ポテンシャルを考え、変形とともに粒子のエネルギー準位がどのように変化するかを調べてみよう。



第1図 ^{240}Pu の核分裂に対するポテンシャル・エネルギー



第2図 変形した調和振動子ポテンシャル内の1粒子のエネルギー準位

結果は第2図に示されている。よく知られているように、球形の場合のエネルギー準位の並び方は決して一様ではなく、いくつかの状態が同じエネルギーをもつ（これをいくつかの状態が縮退しているという）。

図中に書きこまれている数字は、最低のエネルギー準位から核子を許される数だけ詰めていった時の核子の総数で、核子数が2, 8, 20, …のところに大きなエネルギー・ギャップがあらわれる。このような数は魔法の数と呼ばれ、魔法の数の核子を持った原子核はきわめて安定であることを示している。図からわかるように、変形させるとエネルギー準位の縮退はとけて、一様な分布に近づくが楕円体の長軸と短軸の長さの比が2:1になるような変形で、再び顕著な縮退が起っており、原子核が変形した時にも魔法の数が存在し、この魔法の数だけ核子を持った原子核はこの変形度で安定であることを示している。

通常原子核に対して仮定される一体ポテンシャルは、簡単な調和振動子型のものとは異なるが、第1図で見たポテンシャル・エネルギーの第2極小点は、本質的には、第2図で二度目に現われる顕著な縮退（または新しい魔法の数といってよい）が原因で起るのである。

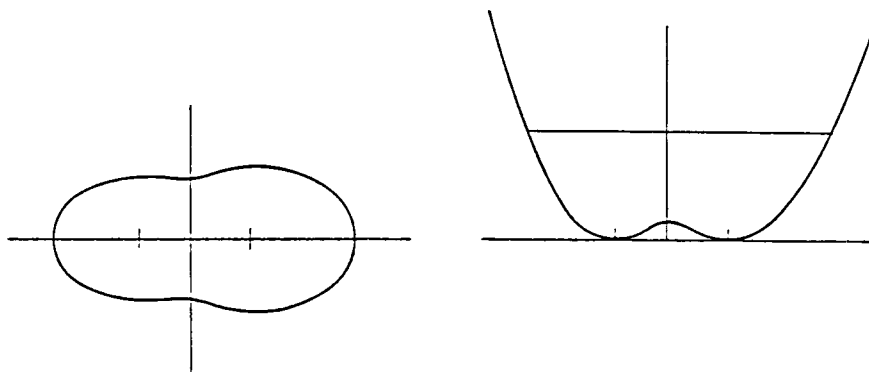
このような一様性からのずれは、一般に殻効果または量子力学変動と呼ばれている。この節の始めに述べたように液滴模型には殻効果は含まれていない。そこで、殻効果をできるだけ正しく計算し、液滴模型にその分だけ補正を加えることが必要になる。殻効果の補正を計算する処方箋がStrutinsky⁷⁾によって与えられて以来、核分裂障壁についての大規模な数値解析が世界の各地で進められた。

3. 2 中心ポテンシャル

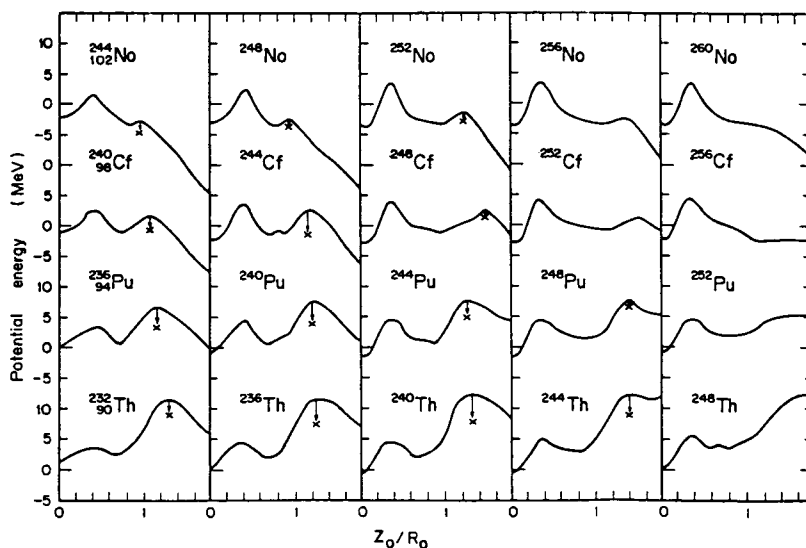
第1図で見たように、原子核の形は核分裂の過程で大きく変化する。すなわち、初めは球形に近い形をしていて、だんだんと大きく変形し、遂には2つの分裂片核に移行する。核分裂の全過程の各段階において、殻効果を正しく評価するためには、分裂過程中心に見せる原子核の形状の変化をできるだけリアリスティックに採りいれた一体ポテンシャルを仮定する必要がある。現在、広く用いられている一体ポテンシャルには4種類くらいあるが、文献(2)では（以下ではわれわれと言う）2中心ポテンシャルというものを用了。このポテンシャルは5つのパラメータを含んでいるが、このポテンシャルで再現できる原子核の形の一例を第3図に示す。2つの中心の位置が縦の棒線で記されている。

われわれは、まず対称分裂の場合について、Th, U, Pu, Cm, Cf, Fm, Noの7つの元素のおおの数個の同位元素について核分裂に対するポテンシャル・エネルギーを計算した。対称分裂の場合、パラメータは3つになるが、計算時間を節約するために、1つを固定し、分裂後2つの分裂片核の中心間の距離と分裂片核の変形度に移行するパラメータ Z_0 と δ の2変数の関数として

ポテンシャル・エネルギーを計算した。1つのパラメータを固定したことの影響についてはチェックしており、その影響は小さいことが判明している。 (Z_0, δ) 平面上にポテンシャル・エネルギーの様相を等高線を用いて表わすと、核分裂が静かに進行するとしての道の筋とそれに沿ってポテンシャル・エネルギーがどう変化するかがわかる。それを Z_0 軸方向に投影したものが第4図である。この図から、原子番号の増大に伴い、第1と第2の障壁の高さの比が逆転することが



第3図 2中心ポテンシャルを上からみた図(左側)と横からみた図(右側)



第4図 静的核分裂経路に沿って、2中心の間隔(核半径で割ってある)の関数としてプロットした核分裂ポテンシャル・エネルギー。矢印は非対称変形によるポテンシャル・エネルギーの減少分を示す。

わかる。つぎに、第1極小点、第1障壁、第2極小点、第2障壁の4つの点で分裂片核の質量の非対称性につながるパラメータを変化させ、それによるポテンシャル・エネルギーの変動を調べた。

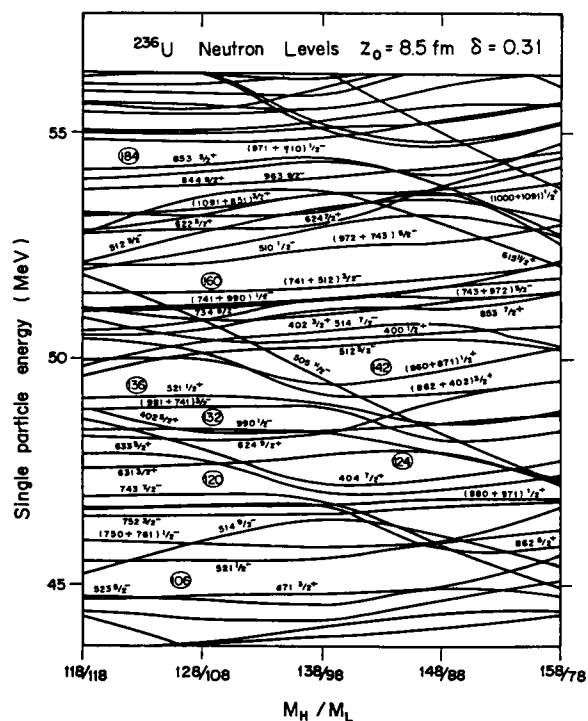
その結果、非対称性を考慮すると第2障壁以外の上記3点ではエネルギーが高くなり、第2障壁ではエネルギーが0～4 MeV 低くなることがわかった(第4図の中の矢印がそれを示す)。この計算結果は、核分裂において原子核は第2極小点付近までは左右対称の変形をして進み、第2障壁あたりから非対称の変形が現われてくることを意味している。なぜ、第2障壁あたりで非対称変形を好むようになるかという、第2図との関連で述べた殻効果のためであり、このあたりでは非対称性を考慮した方がエネルギー準位の並び方が密から粗になるためである。

第5図は、 ^{236}U の第2障壁付近での中性子のエネルギー準位が非対称変形の導入によりどのように変化するかを示したものである。横軸には、非対称変形度を重および軽分裂片核の質量比(まだ分離していないので $Z=0$ 平面に対して左右の質量比と言うべきところを便宜的にこう呼ぶ)で表示している。図から非対称質量比が144/92あたりに中性子数が142と144の間に大きなエネルギー・ギャップが生じ、レベル密度が粗となり、この非対称変形度がエネルギー的に安定であることがわかる。図を精視すると、 $615^{11}/2^{+}$ と $505^{11}/2^{+}$ という量子数をもった2本のレベルが、非対称度の導入によってエネルギー的に強く反発して、その結果エネルギー・ギャップが現はれていることがわかる。これらのレベルは8重極変形に関するオペレータ $P_3(\cos\theta)$ について大きな行列要素をもつので、反発が大きいのである。正確には、このように反発しあうレベル対がほかにも数組あって、それらが影響を及ぼしあった結果として、ギャップが出現したと言うべきなのである。また、陽子の殻効果は中性子のそれより弱い。

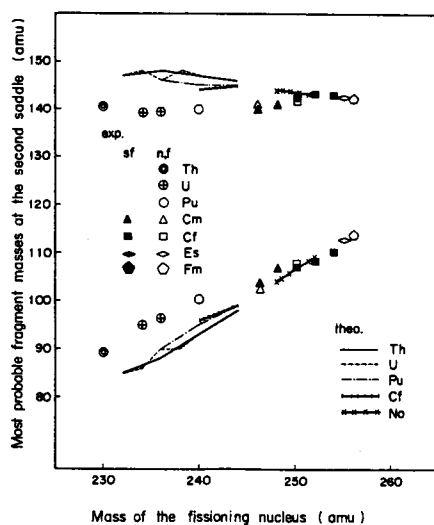
重要なことは、殻効果や魔法の数という概念が、球形の原子核に対してだけでなく、対称および非対称に変形した核にも適用され、核分裂に関する実験事実の理解に大きく役立っていることである。

さて、このようにして第2障壁の高さを最低にする非対称性が求められたので、これら2つの分裂片核の質量の推測値を計算し、実験値と比較したものが第6図である。自発性核分裂や低い励起エネルギーでの核分裂においては、分裂する親核の質量によらず、重い分裂片核の質量がほぼ一定になるような分裂が最大の確率で起る。われわれの計算結果は、この実験事実をほぼ再現している。第5図を用いて定性的な説明を試みると以下のようなになる。親核の質量が増大すると、中性子フェルミレベルの位置が中性子数142のところのギャップよりも高くなり、殻効果は減少する。従って、より小さい非対称性を好むようになるのである。

第6図に示したものと似たような解析は外国でもなされているが、それらと比べるとわれわれ



第5図 ^{236}U の中性子のエネルギー単位。第2障壁において非対称変形を導入した時の、エネルギー単位の変化を示す。



第6図 分裂する親核と、対応する分裂片核の質量

の計算結果は実験値をよりよく再現している。計算は第2障壁でなされているので、ここで決められた質量の非対称性が第2障壁を通過し、完全に2つの分裂片核に分れるところまで果して保存されるかどうか調べるのが今後の研究課題として残されている。これに関連した研究の現状は大沢さんの解説1)の2.2節の(c)鞍部点から切断点までの中に書かれている。しかしながら、第6図に示されている理論と実験との見事な系統的一致は、大小2つの分裂片核に成長していく芽のようなものがすでに第2障壁あたりで発生し、この芽が将来の成長を規制する機能を内蔵していることを暗示している。

以上、非対称核分裂についての静力学的研究成果を平易に述べてみた。第2障壁から切断点までの動力学的研究はまだ確立されたものがなく、今後も精力的に進める必要がある。自然の摂理は、多様でありそしてそれらはすべて美しくつくられていると記して、この小論の結語としたい。

参考文献

- (1) 大沢孝明, 核データニュース 26 (1986), 24
- (2) A. Iwamoto, S. Yamaji, S. Suekane and K. Harada, Prog. Theor. Phys. 51 (1974), 1617 および 55 (1976), 115
- (3) 原田吉之助, 原子力工業 21 (1975), 53
- (4) 核分裂異性体の発見は
S. M. Polikanov et al., ZhETF (USSR) 44 (1963), 804
に報告されている。
- (5) P. Möller and J. R. Nix, 核分裂の物理と化学に関する第3回 IAEAシンポジウム (1973) での発表論文 IAEA-SM-174/202
- (6) W. D. Myers and W. J. Swiatecki, Ark. Fys. 36 (1967), 343
- (7) V. M. Strutinsky, Nucl. Phys. A 95 (1967), 420 および A 122 (1968), 1