



5. 重核の崩壊特性と質量公式

宇野正宏 (文部省初等中等教育局)

要旨: 超重元素を含む重核の安定性を決定する上で、主要な役割を果たすのは α 崩壊および核分裂である。一方、安定性を左右するほど高い確率では起こらないが、重クラスター崩壊のようなエキゾテックな崩壊様式もいくつか観測されている。本稿の前半では各種崩壊の半減期予測について概観するとともに、主に重クラスター崩壊について、質量公式から求めたQ値を示すことにより、崩壊の可能性を議論する。また、これ以外のエキゾテックな崩壊についても話題を提供する。

後半は、質量公式研究の最近の動向について、歴史的視点から概観し、今後の発展の展望について議論する。

1. α -、 β -崩壊、核分裂の概観

超重元素を含め重核の安定性については、 β 崩壊に加えて α 崩壊および核分裂が顕著な役割を果たす。

β 崩壊の半減期計算法については、山田、橘らによる大局的理論¹⁾やKlapdor、武藤らによる微視的理論(Quasi-particle RPA)²⁾などがあり、未知核種に対してある程度の信頼度をもった半減期予測値を得ることができる。参考までにやや古いバージョンではあるが、大局的理論による半減期鳥瞰図を図1に示しておこう。

α 崩壊の半減期については、WKB法によるトンネル透過率の計算や、それに諸種の補正を施したものなどを使うことにより、半減期予測値をやはりある程度定量的に求めることができる。参考までに有馬、吉田の方法によって計算された半減期の鳥瞰図³⁾を、図2に示しておこう。

α 崩壊、 β 崩壊では崩壊半減期決定のかなりの部分を支配するのがQ値、すなわち親核の基底状態エネルギー(質量といってもよい)と娘核の基底あるいは励起状態エネルギーの差に相当する量である。勿論、どのような崩壊メカニズムを考えるかによる依存性、つまり模型依存性がないわけではないが、それによって半減期の計算値が数桁変わるといようなことは、めったに起こらないことである。

一方、核分裂について見ると、事情は大きく異なっていると言わなければならない。Q値が分裂半減期決定を支配するのとほぼ同程度、場合によってはそれ以上に、分裂のメカニズムに対する依存度が大きいことが、他の崩壊の場合と決定的に違うところだと言っても過言ではなかろう。つまり、分裂メカニズムのモデルを変えると、半減期の計算値は簡単に数桁変わってしまうという状況なのである。これは裏を返せば核分裂メカニズムのモ

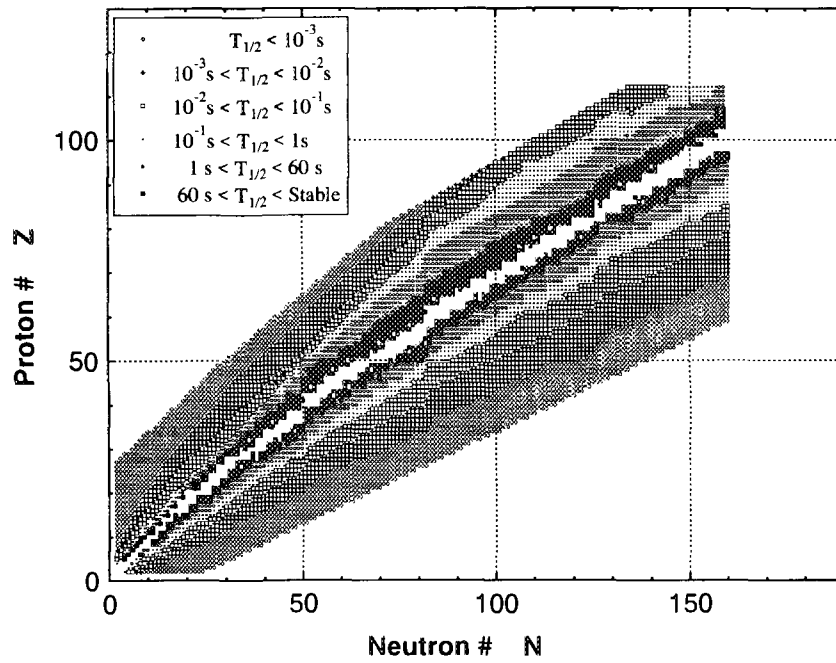


図1 ベータ崩壊の半減期鳥瞰図
(大局的理論による計算値)

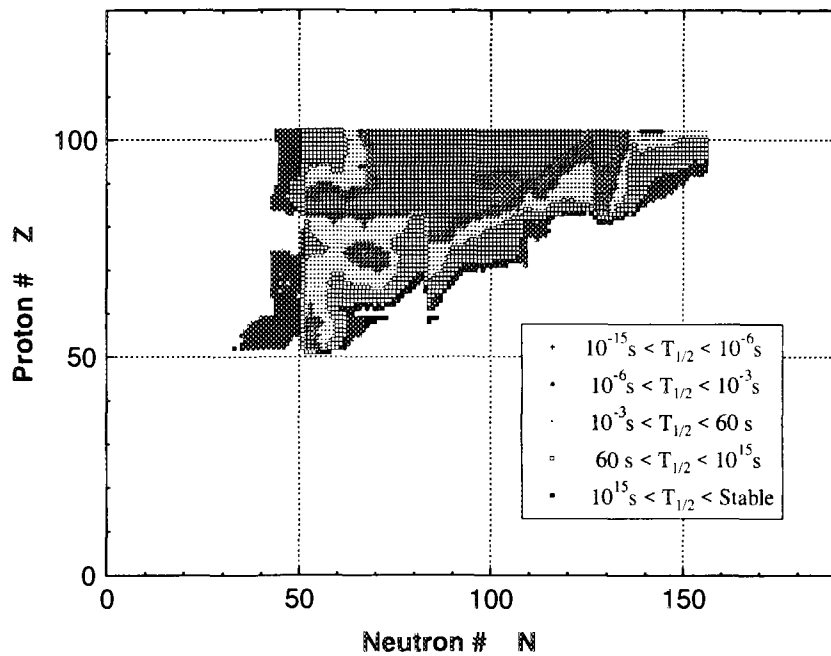


図2 アルファ崩壊の半減期鳥瞰図
(有馬一吉田の方法による計算値)

デルが、今もって確たる方向に収束していないことを示しているということもできそうである。Hahn, Strassmann による核分裂現象の発見⁴⁾以来、60余年たった現在の状況であることを考え合わせると、問題の難しさ如何ばかりかである。

やや言い訳めいてしまったが、この場に核分裂についての半減期鳥瞰図を並べ提示することができない所以である。かわりにここでは、この問題を解く上でのキーポイントを上げるに止める。

核分裂のメカニズムを大雑把に表現すれば、もともと球形あるいはわずかに変形していた原子核が、次第に変形の度合いを強めつつネックを形成し、ついに一体性を保ち得なくなったところで、二つの原子核に分かれる過程と言ってもよかろう。そこでこのメカニズムを追いつつ半減期を計算するためには、変形度を変数とした核のポテンシャルエネルギー面を正確に知る必要がある。これ自体、大変難しい問題であり、現時点でこの種の計算を系統的に行っている研究グループは、世界中を見渡しても数えるほどしかない。最も有名などころでは P. Möller らのグループが、質量公式の研究と合わせて古くから研究を進めていることは周知であろう⁵⁾。また、やや微視的な立場からの研究として、Sobiczewski らのグループも長い研究歴を持っている⁶⁾。また、主に90年代に入ってからのものであるが、著者を含む早稲田グループが質量公式研究のなかで同様の研究を進めている⁷⁾。

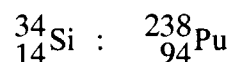
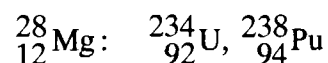
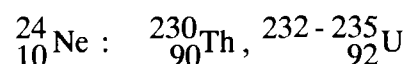
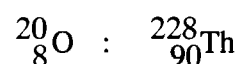
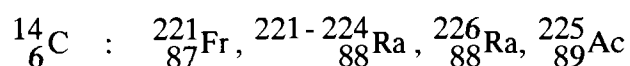
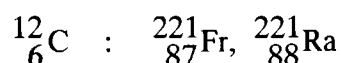
こうして仮にポテンシャル面が定まったとすると一仮にと言ったのは、未だ確たる結果が得られている訳ではないから一、つぎにはこのポテンシャル内での集団運動を解くことになる。微視的にきちんと解くとすると、たとえば時間依存 Hartree-Fock 法などが考えられるが、大変形を扱うための理論の枠組みを整えること自体きわめて難しく、わずかな試みはあるものの現実的な計算は皆無という状況である。また、微視的な扱いを避けると、WKB法による障壁透過率の計算などが考えられる。この場合には、 α 崩壊のときのように固定したポテンシャルでの障壁透過という静的描像には、やはり無理があるように思われる。過程が断熱的であるか否かとも関係するかもしれないが、障壁通過中の運動エネルギーとの関係で有効質量などを導入する必要もありそうである。また、変形パラメータ空間をある程度制限しなければならないなどの困難もある。こうしたどちらかと言うと現象論的な研究は、核物理や核化学の両面から世界的に進められており、two-mode fission、multi-mode fission、あるいは輸送方程式を用いる方法など諸々のアイデアが提出されてきているが、なかなか決定打に至らない状況のようである。

以上は核分裂の理論面であるが実験面に目を転じると、過去30年ほどの間にそれ以前とは比較にならないほど、様々な側面からの大量の核分裂データが蓄積されている。Mass yield, kinetic energy distribution, neutron multiplicity などなど、しかも熱中性子ばかりでなく陽子誘発の核分裂についても、これらに関するデータが提供されるようになってきている。しかしながら著者の目から見ると、現状では残念なことにそれらの大量なデータが、あまり整理もされずに雑然と置かれているという印象を拭えないのである。核分裂発見60周年を過ぎた今、これら諸々のデータを系統的に整理し、もう一度この現象の全体

像を捉え直す作業がぜひとも必要なのではないかを感じる次第である。

2. エキゾテック崩壊

1980年代はじめに ^{223}Ra からの ^{14}C 放出が始めて発見された⁸⁾。その後、原子番号87のFrから94のPuにかけて、 $^{12,14}\text{C}$, ^{20}O , ^{24}Ne , ^{28}Mg , ^{34}Si などを放出する同種の崩壊が十数例観測され⁹⁾、重クラスター崩壊と呼ばれるようになった。この現象は α 崩壊と核分裂の中間に位置することから、核分裂研究に新たな知見を提供するものとして、また核内でのクラスター形成のメカニズムを知る上で、重要な役割を果たすことが期待される。以下に現在までに観測されている重クラスター崩壊を、放出クラスター毎にまとめて示した。



またこの種の崩壊の生起可能性をさぐる意味で、この表に上げた親元素と娘クラスターの組み合わせについて、崩壊のQ値を質量公式から求め図3に示した。ここで用いた質量公式は、参考文献7)に報告された著者らのグループの公式である。

図から見られるようにQ値には必ずピークがある。ピークの位置はどれも娘核が二重魔法核 ^{208}Pb のところであるのは、閉殻構造からして当然とは言え興味深いところである。それを越えた安定近傍あるいは中性子過剰側の核種では、重クラスター崩壊が起りにくいことを示している。一方、陽子過剰側ではQ値だけから見ると、上に掲げた既知の観測例以外にも重クラスター崩壊を起こす核種が見つかってよさそうだが、今度は α 崩壊や β 崩壊との競合が起るので、それらについてのQ値あるいは半減期をも考慮した議論が必要になる。

ここでは既に観測例のある重クラスターについてだけ、親核を変えたときのQ値を示すに止めた。勿論、これら以外の親娘の組み合わせも、可能性として十分ありえるものと思われる。様々な組み合わせに対するQ値を質量公式から計算することは、さほど労を要す

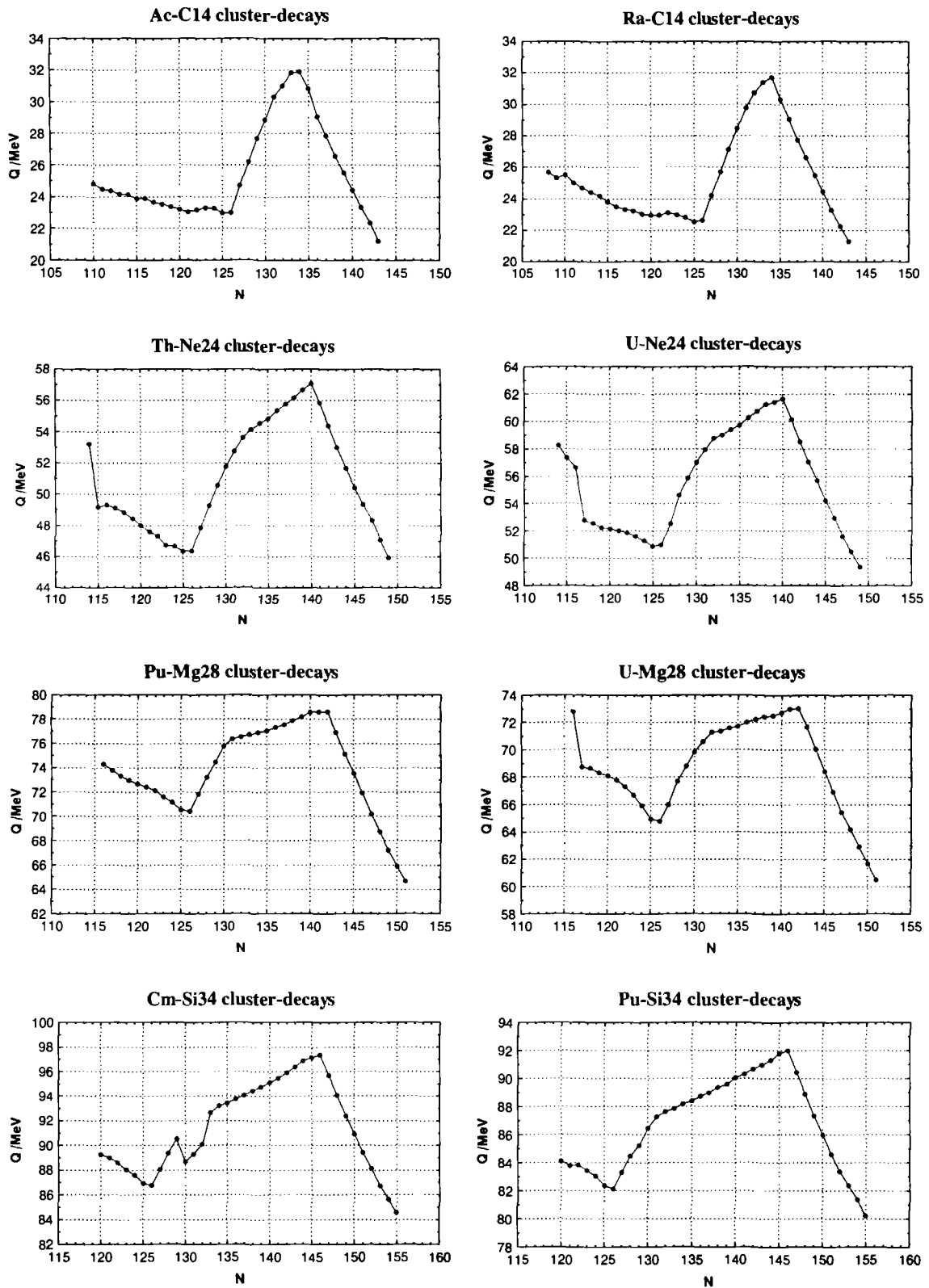


図3 重クラスター崩壊のQ値 (質量公式による計算値)

ることではないが、そこからさらに半減期を求めることは核理論の一つの課題となろう。これらの研究が、ひいては核分裂半減期の新しい計算法の開発につながると期待するものである。

重クラスター崩壊以外のエキゾチックな崩壊として、「冷たい核分裂 (cold fission)」や「サテライト核分裂 (satellite fission)」などの話題もある。前者は分裂片の一つが ^{132}Sn の低い励起状態に行く、(その意味で冷たい) アクチナイド核あるいは超アクチナイド核の核分裂であり、重クラスター崩壊発見以前に数例が確認されていた。また後者は分裂片が直線状に並ぶ三体核分裂 (colinear tripartition) であり、ごく最近その例が報告されたものである。これらについてここでは、その名前を紹介するに止める。

3. 質量公式研究の最近の動向

既に見てきたとおり、各種崩壊の半減期を計算する上で崩壊の Q 値は大変重要な量である。この値を予測するのにしばしば質量公式が用いられる。一口に質量公式と言っても、比較的最近のものだけでも十ほどの公式が提案されており、Q 値の予測にあたってどの公式を使えばよいか迷うところであろう。実際のところ現段階でも、これは絶対と言える公式を指名することは大変難しく、また使う目的によっても公式による向き不向きがあるのが現状である。ここでは質量公式研究の最近の動向を示すことにより、選択判断の参考に供したいと思う。

はじめに質量公式研究の歴史を振り返ってみよう。図 4 はこれを年表風に示したものである。この図には主要な原子核模型の提出年代もあわせて記してある。1930年代半ばの Weizsäcker¹⁰⁾ あるいは Bethe & Bacher¹¹⁾ による液滴模型公式の提出に始まる研究の歴史のなかで、これまでに三つのエポックを画する段階があった。第一は Levy¹²⁾, Cameron¹³⁾, Zeldes¹⁴⁾ らが殻効果の導入を提案した時期であり、核構造論における殻模型の提出に呼応している。この動きはその後の研究の潮流を大きく方向づけ、殻効果を取り入れた公式が多く提出された。この流れの中には有名な Garvey-Kelson の質量関係式¹⁵⁾ があり、Kelson や Jänecke らによってその流れは継がれてきている。

第二は Myers & Swiatecki¹⁶⁾ が殻効果に加えて核変形の効果を取り入れた公式を提出した時期である。集団模型提出から遅れること 10 年ほどであるが、これに対応した動きであった。

第三は第二とほぼ時を同じうしているが、Strutinsky¹⁷⁾ が Nilsson ポテンシャルのような変形一粒子ポテンシャルから殻エネルギーを導出する、極めてスマートな処方案を提案した時期である。これは Nilsson 模型に対応した動きといえることができる。この処方案の提案により、殻効果と変形効果を首尾一貫して取り扱うある意味でお墨付きの方法が与えられたと見做され、現在に至る研究の一大潮流を形成してきた。

このような歴史を通して、現在は第三の潮流から発する流れが、質量公式研究の中樞を

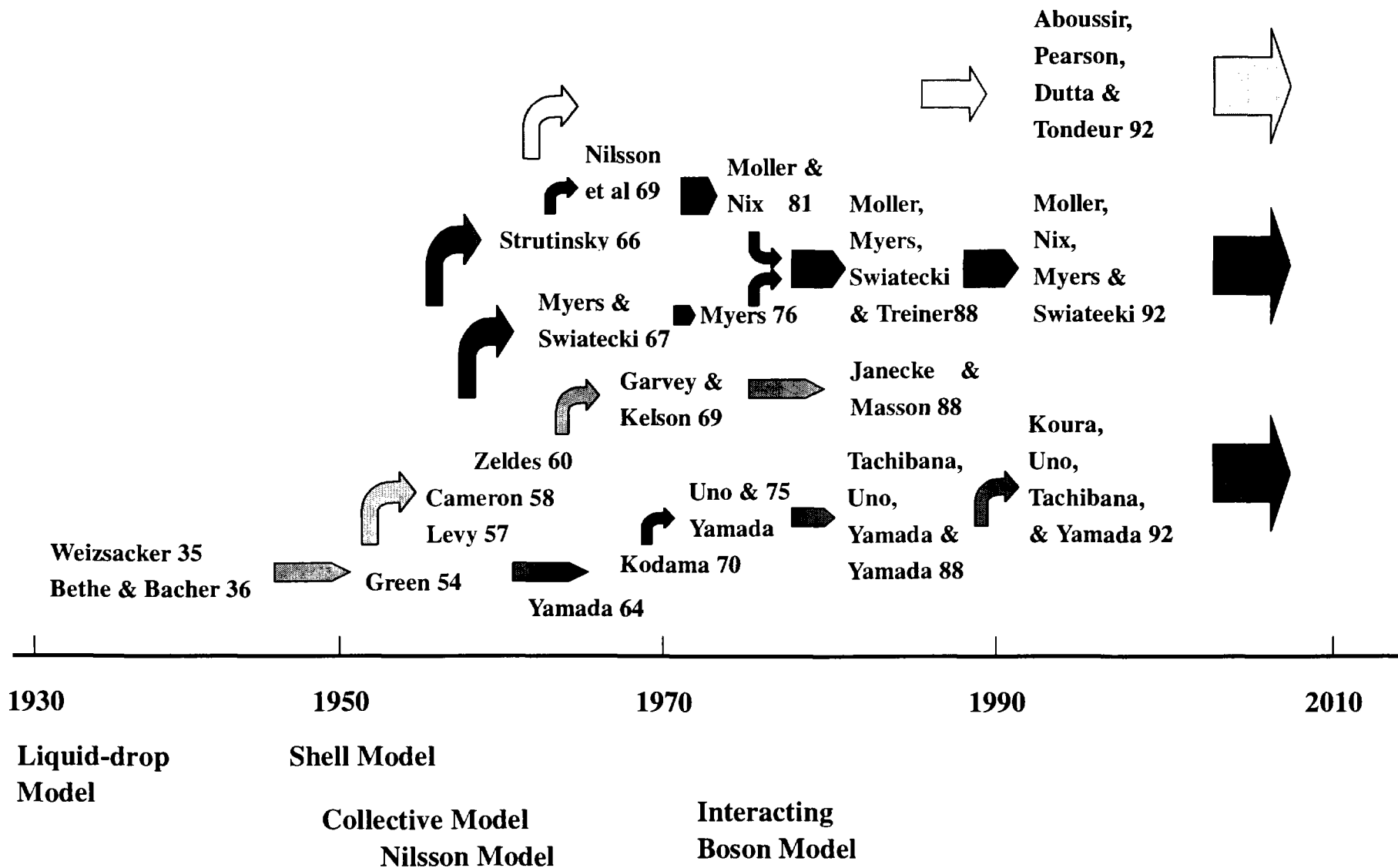


図4 原子質量公式の研究年代記

占めていると言ってもよかろう。これらの内で Möller & Nix らは、この流れの正統派とも言うべきグループであり、ごく最近は第二の動きと合流して Möller, Nix, Myers & Swiatecki 公式を提出している¹⁸⁾。彼らの公式は質量面の大局的傾向を表すものとして、小液滴模型から導かれる陽子数 Z と中性子数 N の滑らかな関数部分を持っている。また殻部分としては、folded-Yukawa single-particle potential に通常の Strutinsky 処方を施して得られる殻エネルギーが用いられている。

第三の潮流から発する他のグループに、Pearson & Tondeur らがある。彼らは質量を大局的部分と殻部分に分けて求めることを批判する立場から、Strutinsky 処方を別のかたちで適用する公式を提出している¹⁹⁾。その方法は Thomas-Fermi 計算を拡張して、Skyrme 型 Hartree-Fock 力と δ 関数型対形成力に適用可能なものとし、これに Strutinsky 積分を結合させるというものである。

以上は欧米での動向であるが、一方、目を東洋に転じると、著者を含む山田らの研究グループが 1960 年代半ばから、これらとはほぼ独立に質量公式研究を開始している²⁰⁾。彼らは、液滴模型を拡張した大局的部分と経験的殻項として表される殻部分をもつ公式の長い研究の後に、90 年代に入って現在に至るまで、殻効果と変形効果を首尾一貫して取り扱う Strutinsky 処方とは別の方法を開発し研究してきた。この新しい方法では、球形単一粒子ポテンシャルから出発して、対形成をも考慮した球形殻エネルギーを最初に求める。この球形殻エネルギーを適切に求めた混合比にしたがって混ぜ合わせることにより、変形核についての殻エネルギーを求めるものである。これらを殻部分として用い、大局的部分には従来から彼らが用いている関数型を採用し、パラメーターを再決定した新しい公式を提出している。既に国際会議等で中間結果は報告しているが⁷⁾、その最終版を近々論文発表するので詳しくはそちらを参照していただきたい²¹⁾。

以上、著者の独断に基づく質量公式研究の動向である。大雑把にまとめれば、殻効果と変形効果をどのように首尾一貫して取り扱うかが、現在の主要課題であり、この方向に向かって三つほどの研究グループが精力的に研究を行い、それぞれ新しい質量公式を提出しているといったところであろうか。ご参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 例えば、T. Tachibana, M. Yamada and Y. Yoshida, Prog. Theor. Phys. **84**, 641(1990)
- 2) 例えば、A. Staudt, E. Bender, K. Muto and H.V. Klapdor, At. Data and Nucl. Data Tables **44**, 79(1990)
- 3) A. Arima and S. Yoshida, Nucl. Phys. **219**, 475(1974); 佐藤 竝, 宇野正宏, 日本物理学会誌, **39**, 892(1984)
- 4) O. Hahn and F. Strassmann, Naturwissenschaften **27**, 11(1939)
- 5) 例えば、P. Möller and J.R. Nix, Nucl. Phys. **A361**, 117 (1981)

- 6) 例えば、A. Sobiczewski, *ENAM98 Exotic Nuclei and Atomic Masses*, B.M. Sherrill, D.J.Morrissey and C.N. Davids(Edts), AIP Conference Proceedings **455**, 639 (1998)
- 7) H. Koura, M. Uno, T. Tachibana and M. Yamada, *ENAM98 Exotic Nuclei and Atomic Masses*, B.M. Sherrill, D.J.Morrissey and C.N. Davids(Edts), AIP Conference Proceedings **455**, 114 (1998)
- 8) H.J. Rose and G.A. Jones, *Nature* **307**, 245 (1984); S. Gales et al, *Phys. Rev. Lett.* **53**, 759 (1984)
- 9) R.B. Firestone et al (editors), *Table of Isotopes, Eighth Edition* (1997)
- 10) C.F. von Weizsäcker, *Z. Phys.* **96**, 431 (1935)
- 11) H.A. Bethe and R.F. Bacher, *Rev. Mod. Phys.* **8**, 82(1936)
- 12) H.B. Levy, *Phys. Rev.* **106**, 1265(1957)
- 13) A.G.W. Cameron, *Can. J. Phys.* **35**, 1021(1957)
- 14) N. Zeldes, *Nucl. Phys.* **7**, 27(1958)
- 15) G.T. Garvey, W.J. Gerace, R.L. Jaffe, I. Talmi and I. Kelson, *Rev. Mod. Phys.* **41**, S1(1969)
- 16) W.D. Myers and W.J. Swiatecki, *Nucl. Phys.* **81**, 1(1966)
- 17) V.M. Strutinsky, *Yad. Fiz.* **3**, 614(1966); *Nucl. Phys.* **A95**, 420(1967)
- 18) P. Möller, J.R. Nix, W.D. Myers and W.J. Swiatecki, *At. Data and Nucl. Data Tables*, **59**, 185 (1995)
- 19) Y. Aboussir, J.M. Pearson, A.K. Dutta and F. Tondeur, *At. Data and Nucl. Data Tables* **61**, 127(1995)
- 20) M. Yamada, *Prog. Theor. Phys.* **32**, 512(1964); T. Kodama, *ibid.* **45**,1112(1970); M. Uno and M. Yamada, *ibid.* **53**, 987(1975)
- 21) H. Koura, M. Uno, T. Tachibana and M. Yamada, in preparation