



2.5 不安定核ビームを用いた核構造研究

Nuclear Structure Study by Using Unstable Nuclear Beam

清水 良文

九州大学理学研究院物理学部門

Y. R. SHIMIZU

*Department of Physics, Kyushu University, Fukuoka 812, Japan***Abstract**

In this talk, the following two topics related to physics of unstable nuclei are discussed: change of shell structure or magic number in very neutron rich nuclei, and “phase” transition/coexistence expected in nuclear chart. In the latter topic, the well-known transition between spherical and prolate or oblate shape, the transition to large and/or triaxial deformation, as well as expected existence of exotic shapes like tetrahedral one are exemplified. The interesting phenomena in combination with high-frequency rotation are also mentioned.

§はじめに

最近進展の著しい不安定核ビームを用いた原子核研究は、ハローやスキンといった新しい核物質の存在形態の知見を与えると同時に、超重核探査など核図表((N, Z) -平面)上で未知の核種へ原子核物理学の研究領域を広げる、という意味からも興味深い。また、ビッグバン時や星の中での元素合成など宇宙物理学との境界領域の研究にとっても大変重要である。このように不安定核の物理に関係する範囲は広く、そのすべてを概観するのはとても私の手に負えるものではない。幸いにして、この研究会では他に適当な講演者の方がおられるので、本講演では、原子核構造の理論的研究の立場から、1) 不安定核で見られる殻構造の変化、2) (N, Z) -平面上で期待される種々の相転移現象、の2つの話題に限って議論した。最近のより詳しいこの分野の動向については、例えば Refs. 13, 14) を御覧ください。なお、文献はオリジナルなものよりなるべく新しいものを載せました。

§殻構造、独立粒子軌道の変化 — 魔法の数の消滅・生成

最近明らかになってきたことのうちで特に興味深いことの一つは、中性子数と陽子数のアンバランスな不安定核では、魔法の数といえども変更を受けるらしいことである。良く知られているように、中性子数(N)または陽子数(Z)が $N, Z = 2, 8, 20, 50, 82, 126$ の原子核は特に安定であり、この数を魔法数という。これは核内核子は近似的に独立粒子運動を行っており、その一粒子エネルギー準位が一様でなく、ちょうど魔法の数だけ核子を詰めると次の準位との間に特に大きなエネルギー的ギャップが存在するために安定化する、ということを示している。これは原子中の電子の運動と同様に魔法の数のところでシェルが閉じることに対応し、殻構造(シェル構造)を表している。この殻構造を規定する一核子のエネルギー準位は、核子間の有効相互作用の結果として自己無撞着に作られた平均場によって決まっているが、(対相関や変形といった残留相互作用の効果を除いて)安定核ではほぼ核種に依らずに決まった準位を取ると考えられてきた。しかし、最近の不安定核の実験データにより、例えば、 $Z \approx 8$ の原子核では $N = 20$ の魔法の数は破れ、その代わりに $N = 16$ がより安定な新しい魔法の数になっていることがわかってきた^{1,2)}。

この魔法の数の変化を引き起こすメカニズムとしては、不安定核に特徴的なハローやスキンといった広がった密度分布によるという考え方¹⁾の他に、平均場を作る核子間有効相互作用として中性子・陽子間のスピン交換力が重要であり、中性子数と陽子数がアンバラ

ンスなために平均場の性質自身が安定核から変更を受け、それに伴って一粒子準位が大きく変化することによるという考え方³⁾が提案されている。前者は不安定核に特有の効果であるが、後者は程度の差はあれ安定核でもその効果は見られるはずである。一粒子エネルギー準位を直接的に観測するのは難しいが、それは原子核の集団運動など核構造にとって極めて重要な役割を果たす。これまでも、例えば、オブレート型の高スピンアイソマーのエネルギー準位の系統的研究によって、核子数の変化によって徐々に一粒子準位が変化しているのではないかという分析⁴⁾が行なわれている。これまでは、一粒子準位は魔法の数の近傍の球形核で決められたものを用い、核構造の変化はすべて残留相互作用に押し込めて記述されることが多かったが、そのような方法で定量的な理解が困難であった問題に対しても、一粒子準位の変化を自己無撞着に採り入れることが本質的役割を果たすかもしれない。そのためには、不安定核での魔法の数の変化と安定核の基本的性質を同時に記述できる有効相互作用を定めることが重要であろう。このように、不安定核で特に明確に現れる効果を、安定核の核構造の研究にフィードバックすることも、これからの研究方向として是非とも検討すべきことであると思われる。

§ 核図表上で期待される種々の相転移・異相共存現象

原子核構造研究の重要なテーマの一つは、有限量子系としての原子核の示す相転移や異相共存現象のメカニズムを明らかにすることである。ここで、「相」というのは固有状態の内部構造を特徴付けるものとして使っている。原子核のような有限系では相転移はゆるやかに起こるが、内部構造の違いを反映した集団運動や独立粒子運動による励起スペクトルや電磁遷移の特徴が質的に変化するために、相の違いを区別できる。その古典的な例は、集団運動として振動励起状態を示す球形核から、回転励起状態を示す変形核への相転移である。核子数やアイソスピン(中性子数と陽子数の差)、または、角運動量などを変化させた時に見られる、このような相転移だけでなく、同じエネルギー領域に相異なる相が共存する現象も普遍的に見られる。例えば、Sn 原子核 ($Z = 50$) は基底状態近傍では典型的な球形核であるが、中性子数 $N \approx 60 - 70$ のアイソトープでは励起エネルギー 2MeV 程度に回転バンドが見られ、プロレート型変形励起状態が共存することがわかっている。最近では、中性子数の少ない ^{186}Pb で球形・オブレート型変形・プロレート型の3種類の変形状態が共存しているのではないかと、との報告も出されている⁵⁾。

このような原子核の形の自由度に対する相転移・異相共存現象は、先に述べた殻構造とも密接に関係しており、不安定核ビームを用いて核図表のより広範囲な領域の核が探査できるようになると、より一層そのメカニズムの理解が進むと期待される。特に最近では、例えばこの原子核研究所のタンデム加速器を利用したクーロン励起実験⁶⁾に見られるように、複数の状態間の複雑な電磁遷移を分析することによって、それぞれの集団状態の電磁気モーメントを引き出し、原子核の形状をより精密に議論することが可能になるなど、実験的手法の進歩も著しい。また、比較的良く知られた基底状態近傍での四重極型の軸対称変形した状態(プロレート型・オブレート型)や、パリティを破った軸対称の八重極変形状態(洋梨型)の他にも、高速回転する原子核では、非軸対称(3軸非対称)に変形した状態や巨大変形状態(長軸と短軸に比がほぼ 2:1)が系統的に観測されてきており、「形状相」の種類も多様になってきている。この他にも、まだ観測されていないが理論的に予言されている興味深いエクゾチックな形としては、非軸対称な八重極変形状態がある⁷⁾。通常、八重極変形は四重極変形を伴うことが多く、例えば巨大変形状態の場合にはバナナ型のような変形状態、または、振動状態が考えられる。特に最近指摘されているのは、四重極変形を伴わないほぼ純粋な八重極変形状態の可能性であり、この場合は、三角形型や正四面体型(tetrahedral shape)などの形を持った状態が予言されている。特に、tetrahedral

shape に対しては空間の対称性が良く殻効果エネルギーを稼ぐために、対応する中性子数・陽子数を持つ原子核ではかなり安定な状態として存在し得るのではないかと予想されており⁸⁾、そのような状態の発見は大変興味深い。

角運動量を持ち込んで高速回転する原子核を考えると、変形の主軸の他に回転軸(角運動量ベクトルの方向)が新しい自由度として存在し、より一層多様な相転移・異相共存現象が現れる(例えば、Ref.9)参照)。実際、例えば同じプロレート型に変形していても、回転軸が変形の対称軸に平行な場合は集団的回転運動は存在せず、回転軸が対称軸に垂直な場合と全く異なった励起スペクトルを示し、回転の効果まで含めると異なる相にあると考えられる。このように回転軸が異なった状態間の遷移は近似的に禁止されるが、最近この禁止の度合がこれまで考えられていたよりずっと弱く、そのような遷移が実際に観測されて「*K*-アイソマーの崩壊現象」として興味を持たれている¹⁰⁾。これも一種の相転移・異相共存現象である。さらに、高速回転状態の中で最もエネルギーの低い状態(イラスト状態という)は、回転軸が変形の主軸に一致するような回転様式を取ると考えられるが、最近になって、回転軸が変形主軸から傾いた状態がイラスト状態近傍に普遍的に存在することがわかってきた⁹⁾。この時、特に非軸対称性な変形を持つ場合に興味深い運動が起こり得る。その一つは剛体の回転運動のアナロジーから物体固定系で角運動量ベクトルが複雑に運動する首振り運動(wobbling motion)であり、最近、それに対応すると考えられる回転バンドが非軸対称大変形状状態の励起状態として観測されている¹¹⁾。また、3軸非対称の場合は、回転軸が変形主軸から作られるどの平面内にもないような場合が起こり得るが、その時には右手系・左手系を区別するカイラル対称性が破れ、それにとまって特徴的な回転スペクトルが現れる。これに対応すると思われる回転バンド(カイラルバンド)も、最近になって観測されつつある¹²⁾。このように、角運動量の軸を加えることによってより一層豊かになる、核図表上での原子核が示す多様な相を調べることが、核構造研究にとって極めて重要であることを指摘してこの話を終りにしたい。

References

- 1) A. Ozawa, T. Kobayashi, T. Suzuki, K. Yoshida, and I. Tanihata, Phys. Rev. Lett. **84** (2000), 5493.
- 2) P. D. Cottle and K. W. Kemper, Phys. Rev. **C66** (2002), 061301.
- 3) T. Otsuka, R. Fujimoto, Y. Utsuno, B. A. Brown, M. Honma, and T. Mizusaki, Phys. Rev. Lett. **87** (2001), 083502.
- 4) A. Odahara et al., Nucl. Phys. **A620** (1997), 363.
- 5) A. N. Andreyev et al., Nature **405** (2000), 25.
- 6) Y. Toh et al., Euro. Phys. J. **A9** (2000), 353.
- 7) M. Yamagami, K. Matsuyanagi, and M. Matsuo, Nucl. Phys. **A693** (2001), 579.
- 8) J. Dudek, A. Goźdź, N. Schunck, and M. Miśkiewicz, Phys. Rev. Lett. **88** (2002), 252502.
- 9) S. Frauendorf, Rev. Mod. Phys. **73** (2001), 463.
- 10) T. Shizuma, Y. R. Shimizu, and T. Hayakawa, J. Nucl. Sci. Tech. **39** (2002), 1137.
- 11) D. R. Jensen et al., Nucl. Phys. **A703** (2002), 3.
- 12) K. Starosta et al., Phys. Rev. Lett. **86** (2001), 971.
- 13) Proceedings of International Conference on *Frontiers of Nuclear Structure* (FN2002), 29 July – 2 August, 2002, Berkeley.
- 14) Proceedings of International Symposium *Frontiers of Collective Motions* (CM2002), 6-9 November, 2002, Aizu, Japan.