



超変形状態 (Nuclear Superdeformation)

井手口 栄治 (大阪大学核物理研究センター)

高速回転する原子核が核分裂を起こす前にどれほど高い角運動量を持ちうるのか、またどれほど大きな変形状態を取り得るのかは原子核物理の未解決で基本的な問題として残っている。それらは高スピン核物理の中心課題として主に欧米を中心とした重イオン加速器施設で精力的に研究が続けられてきた。原子核の高スピン状態に現れる変形構造については1970年代半ばに Strutinsky の処方 [1] による殻効果を取り入れた理論計算が進み、超変形状態の出現が予想され [2, 3, 4, 5]、中性子数 $N=80-86$ 、陽子数 $Z=64-66$ の原子核がその候補に挙げられていた。原子核の超変形状態とは長軸と短軸の比が $2:1$ と大きく変形した状態を指す。そのような大きな変形状態の出現は変形殻構造に起因すると考えられている。

魔法数 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 の閉殻での球形原子核の安定性は核子が占める単一粒子軌道中の大きなエネルギーギャップに関係している。調和振動子ポテンシャル中の単一粒子軌道では、球形のエネルギーギャップ以外に長軸と短軸の比が $2:1$ の変形状態においても大きなエネルギーギャップが系統的に現れる。それらの殻効果は系全体のエネルギーを修正し、エネルギー極小点を生じさせる。但し大きな変形を安定させるには追加のエネルギー補正効果が必要になる。アクチノイド領域ではクーロン力がそれに対応し、超変形の形状を持った準安定状態が核分裂アイソマーとなっている。その最初の観測例は ^{242}Am [6] であるが、超変形原子核の最初の発見例である。その後この領域では系統的に超変形に対応する核分裂アイソマーが発見されている。

一方、高速回転する系においては大きな慣性モーメントを持った巨大変形核の回転エネルギーが相対的に低い為、超変形状態を安定化させる。従って高スピンのイラスト線（ある角運動量で最もエネルギーが低い状態）付近に超変形回転バンド構造が現れる。

超変形状態を観測するには高スピン状態を生成する必要があるため、そのために核融合反応が使用される。1980年代半ばに英国ダレスバレー研究所のタンデム加速器で 205MeV の ^{48}Ca ビームを用いて $^{108}\text{Pd}(^{48}\text{Ca}, 4n)^{152}\text{Dy}$ 反応により ^{152}Dy で最大角運動量 $60\hbar$ 程度の高スピン状態が生成された。ガンマ線を50台のBGO検出器と12台のコンプトン抑止器付きのGe検出器で測定する事により、19本のガンマ遷移でピーク間隔が 47keV の回転バンドが観測された。これは超変形状態に相当する大きな慣性モーメントに対応し、超変形回転バンドの最初の発見となった [7]。

その後検出効率向上のために多数のコンプトン抑止器を球状に配置した大規模Ge検出器アレイの建設（米国の Gammasphere, 欧州の Euroball など）が行われ、高スピン状態の研究（とりわけ超変形状態の研究）は急速に進展した。超変形状態の探索は質量数 150 領域以外に 190, 130, 80, 60 領域と重い質量数領域から軽い質量数領域へと進み、最近では質量数 40 領域での研究が進んでいる。質量数 40 領域では球形の二重閉殻核として知られている ^{40}Ca ですら励起状態に超変形構造が現れている [8]。また日本国内では2010年に原子力機構タンデム加速器施設で16台のコンプトン抑止器付きGe検出器アレイ GEMINI-II を使用して ^{40}Ar での超変形回転バンドが初めて観測された [9]。

これらの超変形原子核の研究の中で多くの興味深い物理現象が発見された。以下にその数例を示すが、その多くは完全な理解に至っていない。

超変形回転バンドの崩壊 超変形回転バンド (特に質量数 150, 190 領域) では、ほぼ同じ強度を保ったまま長いガンマ線カスケード遷移の後にイラスト線から 3MeV 程度高いエネルギー位置で突然通常変形状態への崩壊が起る事が知られている。イラスト線からエネルギーが上がるにつれて準位密度は指数関数的に増加すると考えられているが、その様な高い準位密度の中で超変形状態が他の状態と混じらずに保たれていると言う奇妙な現象である。

同一バンド対 (Identical band) ^{150}Gd , ^{151}Tb , ^{152}Dy の超変形回転バンド ($^{150}\text{Gd}/^{151}\text{Tb}$ と $^{151}\text{Tb}/^{152}\text{Dy}$ の組) でガンマ線のエネルギーが 3 keV の範囲で等しいガンマ線カスケードが発見された [10]。このような同一ガンマ線エネルギーの超変形回転バンドの組は他の多くの原子核でも見つかっており、更にガンマ線のエネルギーは異なるが慣性モーメントが同一のバンドの対も発見されている。これが偶発的な出現か、新たな対称性を意味するかは興味深い問題であるが、まだ統一的説明は得られていない。

その他、三軸非対称変形の超変形回転バンドとそれに伴うウォブリングモード [11] や超変形回転バンド生成メカニズム、超変形バンド内遷移での C_4 対称性に関係したガンマ線エネルギーの間隔の変化の周期性 [12] など未解決の問題が多く残されている。

また殆どの超変形バンドでは通常変形状態へ接続する崩壊ガンマ線 (リンキング遷移) が発見されておらず、励起エネルギーやスピン・パリティが決まっていない。リンキング遷移は高いエネルギーで多くの分岐を伴って起こると考えられているが、遷移強度が弱いため、それらを明らかにするには現在の検出器より感度を大幅に上げる必要がある。

先に示したようなコンプトン抑止器付き Ge 検出器で構成されるアレイでは感度に限界があった。それを打破するため、Ge 検出器のみで立体角の大部分を覆い、多数に分割された電極からの出力信号の波形分析によりガンマ線の検出位置を導出する事で高分解能を実現できる、ガンマ線トラッキングアレイと呼ばれる検出器の開発が欧米を中心に進行している。

今後はこれら次世代ガンマ線検出器と理化学研究所の RIBF など得られる大強度の不安定核ビームを組み合わせた実験により、超変形核研究に残された未解決問題が解明され、更に超変形を大きく越えた長軸・短軸比が 3:1 のハイパー変形や八重極相関に伴うバナナ型超変形状態など未知のエキゾチック変形状態の研究が進展すると期待される。

参考文献

- [1] V.M. Strutinsky, Nucl. Phys. A **95**, 420 (1967); A **122**, 1 (1968).
- [2] R. Bengtsson et al., Phys. Lett. **57** B, 301 (1975).
- [3] K. Neergard, V.V. Pashkevich, Phys. Lett. **59** B, 218 (1975).
- [4] K. Neergard, V.V. Pashkevich, S. Frauendorf, Nucl. Phys. A **262**, 61 (1976).
- [5] G. Andersson et al., Nucl. Phys. A **268**, 205 (1976).
- [6] S.M. Polikanov et al., Sov. Phys. JETP **15**, 1016 (1962).
- [7] P.J. Twin et al., Phys. Rev. Lett. **57**, 811 (1986).
- [8] E. Ideguchi et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 222501 (2001).
- [9] E. Ideguchi et al., Phys. Lett. B **686**, 18 (2010).
- [10] T. Byrski et al., Phys. Rev. Lett. **64**, 1650 (1990).
- [11] S.W. Odegard et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 5866 (2001).
- [12] Flibotte et al., Phys. Rev. Lett. **71**, 4299 (1993).