

4. 超変形状態の話題

九大理 清水 良文

ここ数年の系統的实验データの蓄積により巨大変形・高速回転極限状態の研究は新しい段階に入りつつあると言える。実際、超変形状態に特有の現象ばかりでなく、通常変形・回転状態において観測されている性質が超変形状態でどう変化するかという観点からも研究は進んでおり、巨大変形した原子核の新しい特徴が明らかになりつつある。

原子核構造の研究では、一般に超精密核分光による実験データが不可欠であり、この点で、今度の原研で計画されている高分解能クリスタルボールによってこれまで日本では難しかった、超変形状態の研究が可能になると期待される。そこで、この講演では、一昨年の INS シンポジウム以降のこの分野の進展を中心にどのようなことが明らかになってきたかをレビューした。以下では、概略を報告するに止め、詳細については参考文献に委ねることにする。

ごく軽い核を除けば、超変形状態が観測されている原子核は大きく分けて、 $A \approx 130, 150, 190$ 領域核^{1),2)}及び fission isomers として古くから知られていた actinide 領域核である²⁾。具体的にどの核でどれだけの超変形回転バンドが観測されているかについては ref.1),2) に詳しい。ただし、最近の新しい高分解能クリスタルボール、EurogamI,II Ga.Sp. Gammasphere 等により、データは日々更新されている。実際、この夏の Berkeley での国際会議 (1994.8.2-6) では、理論的には予測されていたがまだ実験的には観測されていなかった $A \approx 80$ 領域での超変形回転バンドが ^{82}Sr で初めて見つかったことが報告された。

現在蓄積されつつある系統的データを理解するためには、2:1 変形した一体ポテンシャル中での殻構造が重要である。特に、 γ -線のエネルギーのみから引き出すことができる $\mathcal{J}^{(2)}$ 慣性能率の振る舞いは、通常変形核の回転状態でも重要であった high- j intruder (unique parity) 軌道をどれだけ占有しているかということによって分類できる³⁾。また、これらの high- j 軌道がその他の normal parity 軌道と相対的にどのような位置にあるかを見れば、 $A \approx 150$ 領域と $A \approx 190$ 領域の shell gap の違いや $\mathcal{J}^{(2)}$ 慣性能率の振る舞いの違いを定性的に理解することができる。また、 $A \approx 150, 190$ 領域核では、超変形状態と通常変形状態との間の γ -線の崩壊経路はわかっておらず、正確な超変形回転バンドの角運動量は未知であるが、 $A \approx 150$ 領域核では系統的なデータに於ける relative な alignments の差を理論的に予想される軌道のそれと比べることにより、かなりの確度でスピン・パリティが予測できるようになってきている⁴⁾、また、 $A \approx 190$ 領域核では、その精度にいくらかの疑問はあるものの、Harris formula による fitting により角運動量がそれぞれの回転バンドで assign されている。

対相関の $\mathcal{J}^{(2)}$ 慣性能率に対する影響については⁵⁾、特に、 $A \approx 190$ 領域核において重要で多くの超変形回転バンドについて $\mathcal{J}^{(2)}$ が角速度とともに単調に増加する傾向を示す

原因と考えられているが、最近ではこれを支持する観測結果として、blocking effect によって、この対相関の効果がきわめて小さくなり、 $\mathcal{J}^{(2)}$ 慣性能率が一定の rigid-body 値を取り flat になる場合があることや⁶⁾、また、対相関の影響ならば高スピンの極限でこの効果はなくなり rigid-body 値に近づくために $\mathcal{J}^{(2)}$ が高スピン側で減少し始めなければならないが、このことも、つい最近初めて ^{194}Hg で観測にかかった⁷⁾。また、 $A \approx 150$ 領域核で初めて見つかった identical bands については、その後、通常変形核でも identical の程度の違いはあるものの (SD では 0.1% のオーダー、ND では 1% のオーダー) 多くの核の組み合わせで存在することがわかり、超変形核ではより良い精度で実現されるものの、それ特有の現象ではないらしいことが指摘されてきている。理論的には、ある特定の軌道に粒子をつめることによる芯偏極の対相関、変形、回転整列に対する効果が相殺して identical band 現象がおきるという定性的説明はあるものの、定量的には多くの問題がある。その外にもいろいろなアイデアは提案されているが、どれも決定的なものではなく、この identical band 現象は未だ難しい問題として残っている。

稼働を始めた上にあげた新世代のクリスタルボールは新しい原子核で超変形回転バンドを見つけるだけでなく、既に見つかっている核でも新しい、より intensity の低い超変形バンドを続々と発見している。例えば、これまで、かなり良い二重超変形閉殻でそのためただ一つのバンドしか見つかっていないと思われていた ^{152}Dy でも一挙にもう 5 つのバンドが発見され⁸⁾。さらに、その内の 2 つが互いに cross talk しているらしいことがわかり、cross talk は $E1$ で片方が超変形状態の上に励起された八重極振動状態ではないかとも予想されている (この meeting の中務氏の報告参照)。八重極相関は Hg 領域でも重要であると考えられているが、最近、 ^{190}Hg でも、同様な cross talk が観測され八重極振動状態の可能性が指摘されている⁹⁾。また、 ^{149}Gd でも全部で 8 個のバンドが見つかり¹⁰⁾、そのうちの一つははじめて back-bending していることが発見され、また、他のバンドも核子数が 2 以上離れた他の核と identical band の関係にあることが指摘されている。

超変形状態から通常変形状態への崩壊については、 $A \approx 150, 190$ 領域核では崩壊がイラストからかなり高い励起状態 ($E_x \approx 3-5$ MeV) で起こり、 γ -線の崩壊経路は一つ一つは同定できない多くの経路から成る統計的な性質を持つと考えられている¹¹⁾。三重の γ -線同時計測を利用して、超変形状態の γ -線と結び付けられる 2 つの γ -線のエネルギー和を計ることによって、初めてイラストからの超変形状態の励起エネルギーとスピンを決定した ^{143}Eu の実験は¹²⁾この崩壊の描像を支持するものであるが、この他にも、Argonne のグループは独自のモンテカルロ・シミュレーションによって崩壊過程と生成過程を分離し、崩壊によって出てくる統計的 γ -線の分布を引き出す試みを行っており、この描像をより直接的に検証しようとしている。これに対し、 $A \approx 130$ 領域では超変形状態 (ただし、2:1 よりはかなり小さい変形度を持っているので、大変形状態といわれることもある) 自身が崩壊点の近傍でイラストになっており、離散的な γ -線により崩壊の linking transitions が測られている。その中でも、最近になって ^{133}Nd において、この崩壊経路が完全に同定さ

れ¹³⁾、どのように崩壊過程が起こるかが明らかにされた。また、これらのように linking transitions 自身を計る試みではないが、超変形回転バンドの γ -線強度の測定の精度は飛躍的に向上し、崩壊点のスピン（の予想値）の系統的分析¹⁴⁾が可能になりつつあり、崩壊スピンと high- j intruder orbits の配位との間に相関があることが示唆されているが、この事は崩壊過程がトンネル現象として記述できるということからは単純には説明できない¹⁵⁾。特に、¹⁵²Dy の基底超変形バンドと identical な¹⁵¹Tb の励起超変形バンドがほぼ同じスピんで崩壊し、¹⁵¹Tb の基底超変形バンドより遅く（より低いスピんで）崩壊するが¹⁴⁾、この夏の Berkeley での国際会議（1994.8.2-6）では、¹⁵¹Dy で新たに発見されたやはり ¹⁵²Dy の基底超変形バンドと identical なバンドはより高いスピんで崩壊することがわかっており、話しはそう単純ではなさそうである。

この他に、¹⁹³Hg では signature partner と考えられている超変形バンド間での $M1$ 遷移と思われる遷移の γ -線が観測にかかり¹⁶⁾、これによって初めて超変形状態の g -因子が測定され、それは Nilsson ポテンシャルによる理論的予想とよく一致することがわかった。Hg 領域核の幾つかのバンドでは、 γ -線強度が低スピン側でゆっくりと減少しトンネリングによる急激な崩壊過程の場合とは違った振る舞いを示すが、その原因が内部転換過程によって γ -線では見えにくい低エネルギーの $M1$ 遷移によるものである、という可能性¹⁷⁾がほぼ検証されたと言えるだろう。また、最近話題になっていることとしては、超変形回転バンドのエネルギーに見られる規則的な $\Delta I = 2$ staggering（すなわち、 $\Delta I = 4$ の相関がみられること）^{18),7)}がある。これは定量的には非常に小さなものであるが、これまで、軸対称であると思われてきたこれらの超変形状態が実は対称軸の回りに 4-fold の離散的対称性を持って (C_4 -symmetry) 軸対称を破っていることを示唆している。実際、このような C_4 -symmetry の仮定のもとで適当な回転子模型のハミルトニアンを解くと、ある条件のもとでこのような規則的な staggering が出ることを証明できる¹⁹⁾。微視的にはこのような対称性を導くのは Y_{44} 型の変形ポテンシャルであり、 $\Delta I = 2$ staggering が観測されている核でこのような静的ポテンシャルが起こるのか、そして、それが都合の良い回転子模型でのハミルトニアンを導くものなのかを明らかにすることが一つの課題であろう。また、超変形状態より更に大きな（ほぼ、3:1）の変形を持つ極超変形状態らしい γ -線スペクトルがすでに報告されているが²⁰⁾、今までの所、他の実験では確認されておらず、新世代のクリスタルボールでこの回転バンドを確認することは重要な事であろう。

最後に、これからの課題としては、これまで発見されてきた超変形状態とは違ったタイプの超変形状態の探索がある。これまで発見されてきた超変形状態は、すべて（ほぼ）軸対称でプロレート型に変形しており対称軸に垂直な軸の回りに回転していると考えられている。この他にも、非軸対称 ($\gamma \approx 30^\circ$) の巨大変形状態やオプレート型で対称軸の回りに回転しているような超変形状態も存在しうることが理論的に予測されている²¹⁾。これらの場合には、プロレート型で対称軸に垂直な軸の回りに回転している場合と違って非常に大きな $\mathcal{J}^{(2)}$ 慣性能率を持つわけではないので、どのようなスペクトルになるかは単純

ではない。特に、後者（オプレート型で対称軸の回りに回転）の場合は集団的回転は禁止されるので、非常に寿命の長いアイソマーになることが期待される。このような新しいタイプの超変形状態の探索も新世代のクリスタルボールによれば夢ではなくなるだろう。

原研で計画されているクリスタルボールをできるだけ早く実現させて、日本でもこれらの超変形状態の研究の新たな進展に寄与できることを望んでこの講を終えたい。

参考文献

- 1) Xiao-Ling Han and Cheng-Li Wu, "Nuclear Superdeformation Tables", *At. Data Nucl. Data Tables* **52** (1992), 43.
- 2) Richard B. Firestone and Balraj Singh, "Table of Superdeformed Nuclear Bands and Fission Isomers", preprint, LBL-35916, June, 1994.
- 3) S. Åberg, T. Bengtsson, I. Ragnarsson and P. Semmes, in *Proc. XXVI Int. Winter Meeting on nuclear physics, Bormio, Italy, 1998*, ed. I. Iori (Riceraca Scientifica ed Educazione Permanente, Milano, 1988).
- 4) I. Ragnarsson, *Nucl. Phys.* **A557** (1993), 167c.
- 5) Y. R. Shimizu, E. Vigezzi and R. A. Broglia, *Nucl. Phys.* **A509** (1990), 80.
Y. R. Shimizu, *Nucl. Phys.* **A520** (1990), 477c.
- 6) Y. Liang et. al., *Phys. Rev.* **C46** (1992), R2136.
- 7) B. Cedrewall, et. al., *Phys. Rev. Lett.* **72** (1994), 3150.
- 8) P. Twin *Nucl. Phys.* **A574** (1994), 51c.
- 9) B. Crowell et. al., *Phys. Lett.* **B333** (1994), 320.
- 10) B. Cederwall et. al., *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993), 688.
- 11) E. Vigezzi, R. A. Broglia and T. Dössing, *Phys. Lett.* **B249** (1990), 163; *Nucl. Phys.* **A520** (1990), 179c.
E. Vigezzi, T. Dössing and R. A. Broglia, *Nucl. Phys.* **A520** (1990), 179c.
- 12) A. Atac et. al., *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993), 1069.
- 13) D. Bazzacco et. al., *Phys. Rev.* **C49** (1994), R2281.
- 14) D. Curien et. al., *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993), 2559.
- 15) Y. Shimizu, E. Vigezzi, T. Dössing and R. A. Broglia, *Nucl. Phys.* **A557** (1993), 99c.
- 16) M. J. Joyce et. al., *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993), 2176.
- 17) P. B. Semmes, I. Ragnarsson and S. Åberg, *Phys. Rev. Lett.* **68** (1992), 460.
- 18) S. Flibotte et. al., *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993), 4299.
- 19) I. Hamamoto and B. R. Mottelson, *Phys. Lett.* **B333** (1994), 294.
- 20) A. Galindo-Uribarri et. al., *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993), 231.
- 21) S. Åberg, *Nucl. Phys.* **A557** (1993), 17c.