

「現代の核構造論ミニマム」第2回 レジメ

1970年代以降、安定核どうしの衝突によって、高い励起状態、高スピン状態など極限状況の原子核を研究する道がひらけた。そして、量子多体論にもとづく核構造論・核反応論（微視的モデル）がおおいに進展した。とりわけ、1970年代はじめに発見されたバックベンディング現象と、1980年代の後半に発見された超変形状態は核構造論にたいへん大きなインパクトを与えた。今回はこの2つの現象の発見がもたらした核構造の新しい概念を中心にして現代的な核構造論への道案内を試みたい。この時代の他の重要な進展、例えば、多様な巨大共鳴の発見や低い励起状態における非線形振動モードなどは、次回、不安定核構造論への展望を議論するなかでとりあげる。

Chapter 3 高速回転する原子核

- 3a 超低温核物理学 ----- 高スピンプロンティア
- 3b 回転座標系での準粒子シェルモデル
- 3c 減衰する回転運動という新しい概念

Chapter 4 超変形状態の発見

- 4a 変形シェル構造とは何か
- 4b 生成, 構造, 崩壊
- 4c Wobbling と Precession

第1回講義への Q & A

- Q "本当の"原子核はどう描けばよいのか?
- Q 破られた対称性を回復することと集団モード発生の関係は?
- Q intrinsic state は実験で観測される状態の重ね合わせか?
- Q 1つの原子核の基底状態に対応する intrinsic state は1つしかないのか?
- Q 平均場近似、Hartree-Fock、BCS等の理論の関係、役割、具体的な適用例
- Q 平均場近似が原子核で成り立つのは何故か?

いずれもこの講義の主旨に関わる本質をついた質問です。この講義全体を通じて少しずつお答えしていきたいと思えます。

Chapter 3 高速回転する原子核

3a 超低温核物理学 ----- 高スピンのフロンティア

- * **イラスト状態** = ある励起エネルギーのもとで最も高い角運動量をもつ状態
~ ある励起エネルギーのもとで最も高速で回転している状態
= 一定の角運動量をもつ状態の中で最もエネルギーの低い状態
~ ある角速度で一様に回転している座標系での基底状態
= 熱運動のない絶対零度の状態
- * 絶対零度というのは運動が凍りついた世界ではない。
量子力学的な秩序ある運動が支配する世界である。
超流動・超伝導現象はこのことを劇的なかたちで示している。
これらの発見は我々の物質観に根本的な革新をもたらした。
- * 「熱エネルギー」 = 「励起エネルギー」 - 「秩序運動のエネルギー」
ただし、「秩序運動」とは「平均場の振動と回転」あるいは「粒子-空孔励起」
現実には、秩序運動と熱運動の間には相互作用があるので、この分離は近似的。
この分離を如何に optimum に行うかは、核構造論の基礎的課題のひとつ。
- * 1970年代以降、重イオン衝突とイラスト分光学を組み合わせ、
超低温状態にある高速回転核の内部構造を探求することが可能になり、
核構造論はおおいに進展した。
- * 最初の大きな出来事は「**バックベンディング現象**」の発見であった。
当初、「高速回転による(超伝導状態から常伝導状態への)対相転移が見えた」
と思われたが、実は、一個のクーパー・ペアーのみが壊れて、このペアーを
構成していた2個の核子の角運動量が系全体の回転軸方向に整列(**align**)するという
メカニズムによって理解できることが分かった。残りの核子は依然クーパー・ペアー
を組んでいる。
- * このような過程を数回繰り返した後、回転角速度(角運動量)がもっと大きくなって
「**対相転移**」が起こる。この「相転移」は回転角速度の増大につれて徐々に起こる。
この過程を励起スペクトルの変化を通じて実験的に観測することができる。
高スピン・イラスト分光学は「**有限量子系での相転移**」の微視的メカニズムを理解
する絶好の機会を提供している。
(Y.R. Shimizu et al. Rev. Mod. Phys. 61 (1989) 131 に詳細な分析がある)
- * フェルミ面近傍の幾つかの核子が角運動量整列するにつれて、対相関だけでなく、
平均場の形も変わる。プロレートから非軸対称へ、そして、オブレートへ。
オブレートの極限で回転バンドは消滅する。これを「**バンド終結現象**」と呼ぶ。

回転スペクトルに上限があるのは、まさに、有限量子系の特徴である。このような現象が沢山見つかっている。

* 大きい角運動量をもった状態（高スピン状態）の作り方には2種類ある。

1) 回転運動の角速度を増大させる

回転運動は対称性の自発的破れを回復する量子力学的な集団運動である。平均場が軸対称変形している場合、対称軸まわりの回転運動は存在しないから、回転軸は平均場の対称軸に垂直である。

2) 個々の核子の角運動量（軌道角運動量+固有スピン）を整列させる

軸対称変形の場合、平均場の対称軸方向に角運動量を整列する。上記のオブレート極限ではこのメカニズムで高スピン状態が作られているので、集団的な回転運動は消滅する。

高スピン・アイソマーとして観測される多くの状態も、このようなメカニズムによって大きい角運動量を作っている。イラスト線のある領域がこの種の高スピン・アイソマーの系列から成っている場合、面白いことに、これらの励起エネルギーを疎視化して大局的な振る舞いに注目すると、古典力学での剛体的回転運動の性質が見える。

1)と2)が組み合わさって、きわめて豊富な回転バンド構造を作り出す。

3b 回転座標系での準粒子シェルモデル

* 高スピン・イラスト分光の進展のなかで「**回転系準粒子シェルモデル**」が確立した。現在では、高スピン核構造の「標準モデル」として広く使われている。

この微視的モデルには 1) 平均場の変形, 2) 対相関, 3) 回転する平均場の中を運動する核子に作用するコリオリ力と遠心力の効果が取り入れられている。

このモデルの中心概念は「**回転系準粒子モード**」である。

これは、変形、対相関、回転の効果を取り込んだ「**一般化された独立粒子描像**」である。この概念を理解することが高スピン核構造を理解する為の基礎となる。

* 「**シェルモデル**」という用語は「**球対称 j-j 結合シェルモデル**」という狭い意味で用いられることが多いが、この50年間の研究によって、対称性の破れを取り入れた「**変形シェルモデル**」、対相関を取り入れた「**準粒子シェルモデル**」、回転運動の効果を取り入れた「**回転系シェルモデル**」へと一般化されていることを是非知って欲しい。

一粒子モードの概念は核構造に対する、より進んだ取り扱いへの出発点を与える。よりよい出発点を築くことは極めて重要なことである。

* 平均場が軸対称変形している場合、イラスト状態は対称軸に垂直な軸の周りに一様回転していると考えられる。通常、基底状態は超伝導状態になっている。

BCS 理論における(準粒子の)真空を(平均場に付随して) 一様に回転する座標系での真空に変換することは容易である. この「**一様回転系への変換**」と「時間に依存する変分原理」を組み合わせると「**回転座標系でのハミルトニアン**」が得られる. このハミルトニアンに対する「**一般化された一粒子モード**」を「**回転系準粒子モード**」という.

* いくつかのキーワード

角速度: 回転エネルギーの角運動量に関する微分

運動学的慣性モーメント: 角運動量と角速度の比

動力的慣性モーメント: 角運動量の角速度に関する微分

整列角運動量 (alignment): 全角運動量 - 「**集団回転運動の角運動量**」

- ・ 集団的回転運動の**慣性 (inertia)** を表す集団パラメタは動力的慣性モーメント
- ・ ガンマ線のエネルギーから直ちに角速度と動力的慣性モーメントがわかる
- ・ 準位の角運動量が決まらなければ運動学的慣性モーメントは決まらない

* 回転座標系に乗ることは磁場をかけることと等価:

回転する平均場内を運動する核子に働くコリオリ力を磁場に換算するととんでもない強磁場になる.

* 回転座標系での準粒子エネルギースペクトルは

1) 量子ドットに磁場をかけたときの電子のスペクトル

(例えば、D.C. Ralph et al., Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 688)

2) 重イオン衝突の際に作られる強い電場中の電子のエネルギー準位等と類似している.

* バックベンディング現象は強電場による「**QED 真空の崩壊**」とアナログス

* 「**回転座標系での準粒子シェルモデル**」は量子ドットをはじめとする

メソスコピック系の物理と多くの類似性をもち, 将来, 理論物理としての広がり期待される.

3c 減衰する回転運動という新しい概念

* イラスト線から離れていったとき回転運動はどうなるか. 平均場の回転という

概念は熱的運動が激しくなるにつれて消滅するか. 消滅するとすれば,

どのような過程を経て消滅するのか. 生き残るとすれば, どのようなかたちで生き残るのか. (カオスの性質が生じるプロセス)

* 1980 年代に, 高励起・高スピン状態からの連続ガンマ線スペクトルを解析する

新しい方法 (多重同時計測とスペクトル揺らぎの統計解析) が開発され,

高温状態における「**回転運動の減衰**」が論じられはじめた.

- ・ イラスト領域の回転バンドの数は高々 30 個程度で, 非イラスト領域にある無数の

励起準位のほとんどは回転バンドを構成していない

- E2 遷移は多数のガンマ線に分岐していて、100keV 程度の分散幅をもつことが示唆された。

- * 1990 年代になって、回転系シェルモデルに基づく微視的分析が進められ、「減衰する回転運動」という新しい概念が得られた。

最近になって、連続ガンマ線の相関関数は **2つの成分**からなることがわかった。

(幅が約 100 keV の狭い成分と幅が 約 500 keV の広い成分)

- **狭い成分**は複合核状態の分散幅に対応する：これはシェルモデルの特定の配位がエネルギー固有状態に分散する目安を与える。
- **広い成分**は**回転運動の減衰幅**に対応する。

[ガンマ-ガンマ相関のスペクトル形状を解析することによって、特定のシェルモデル配位が残留相互作用によって複合核状態に平衡化するまでの時間スケールを測定することができる]

(松尾正之：日本物理学会誌 54 (1999) No.8, 648)

- * なぜ、回転運動は減衰するか。減衰幅をもたらす微視的メカニズムとは？

- 高温回転状態がシェルモデル配位の複雑な重ね合わせであっても、その内部構造が角運動量の変化につれて変化しなければ、回転運動は減衰しない。このような回転バンドは「エルゴード・バンド」と言われるがまだ観測されていない。

(B.R. Mottelson, Nucl. Phys. A 557 (1993) 717c)

- ミクロの回転系シェルモデル配位は、角速度の変化に対して異なった応答を示す多様な一粒子状態から作られている。このため複合核状態の内部構造が角運動量の変化につれて徐々に変化する。このことが**回転減衰**という現象をもたらす。

Chapter 4 超変形状態の発見

4a 変形シェル構造とは何か

4b 生成, 構造, 崩壊

- * 1986 年、長軸と短軸の比が約 2:1 に大きく軸対称変形した高速回転状態が Dy152 で発見された。この変形は**核分裂アイソマー**と同様であるが、核分裂アイソマーと異なり高スピンになって現れる。その後、このような超変形状態は Hg192 領域、Sr82 領域、Zn60 領域に相次いで発見され、これまでに観測された超変形回転バンドの数は 200 を超えた。それらは領域ごとに違った個性を示しており、興味深い。最近、球形シェルモデルの 2 重閉核である Ca40 でも発見され、大きなインパクトを

与えている。重い核の超変形状態と異なり、Ca40の超変形回転バンドは0+状態から観測されている。(E. Ideguchi et al., Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 222501)

- * 超変形状態は準位密度が高い(高温の)複合核状態の海の中に埋め込まれている。それなのに、なぜ、それらに混合せず個性を保って存在できるのか。
- * 超変形状態は平均場の第2極小点に対応する。第1極小点との間には両者の混合を妨げるポテンシャル障壁がある。それらの間のトンネル効果が顕著になると超変形状態は常変形状態に崩壊する。
- * このトンネル崩壊確率は、1) 障壁の高さ、2) 大振幅集団運動の慣性質量、3) 常変形状態の準位密度などによって決定される。これらはいずれも角運動量の変化につれて変化する。
- * あるシナリオ (Condensation-induced tunnelling):
ガンマ線を放出して角運動量が下がってくると、ある角運動量で常伝導相から超伝導相への相転移がおこる。すると、大振幅集団運動の慣性質量が減少し、トンネル透過の確率が増大する。すなわち、対相転移の転移点近傍で超変形状態の生存確率は急激に減少する。
- * 回転系シェルモデルに基づく詳細な分析は
K. Yoshida, M. Matsuo and Y.R. Shimizu, Nucl. Phys. A 696 (2001) 85
この論文では超変形の基底状態からのトンネル崩壊だけでなく、励起状態からのトンネル崩壊確率も計算されており、一つの原子核で超変形バンドが何個くらい存在するかについても理論的予想が与えられている。
- * なぜ、変形ポテンシャル面に第2極小が出来るか。これは変形シェル効果という有限系に特有な量子効果のためである。
- * 軸対称変形した調和振動子ポテンシャルの場合、軸比がちょうど2:1になると準位の顕著な縮退がおこり、超変形の魔法数が現れる。この魔法数に対応する原子核は超変形の閉殻構造を作って結合エネルギーを稼ぐ
- * しかし、超変形バンドは非常に多くの原子核で見つかっており、それらの変形度も $\beta = 0.4 \sim 0.6$ の範囲に広がり多様である。軸比2:1($\beta = 0.6$)とは限らない。
調和振動子ポテンシャルではその理由を説明できない。
- * 実は、「準位の縮退」は古典周期軌道の形成と対応している。
調和振動子ポテンシャルでは軸比が2:1のとき(のみ)8の字型の周期軌道ができる。それでは、一般のポテンシャルではどうか。
- * 一般のポテンシャルのなかの古典軌道は非周期軌道である。周期軌道は例外的。それにもかかわらず、シュレーディンガー方程式の固有値は(無数の)古典周期軌道の寄与の総和として与えられる。(トレース公式)
(無数の非周期軌道の寄与は相殺する)

* シェル構造を「(エネルギー疎視化して見える) 一粒子準位分布の規則的な振動パターン」と一般的に定義する。 周期の短い周期軌道が大局的な構造を決める。(エネルギー疎視化と古典周期の相補性)

* 楕円ビリーアードにおける Butterfly の誕生, 軸対称キャビティにおける 8 の字型周期軌道の分岐: 軸対称キャビティでは軸比が 1.5 から 2.0 の広い領域で 8 の字型周期軌道が超変形シェル構造をつくる。 軸比がちょうど 2:1 でなくてもよい。 周期軌道の短軸方向と長軸方向の振動数の比が 2:1 であることが本質的。 こうして (調和振動子ポテンシャルという特殊な場合に限らない) より一般性のある理解が得られた。

(在田謙一郎, 松柳研一: 日本物理学会誌 57 (2002) No.1, 37)

* 超低温の原子核におけるソフトモードはシェル構造と対相関に極めて敏感である。 シェル構造と対相関は変形とともに変化するから, 新しい超変形シェル構造の下では新しい型の集団励起モードが現れるだろう。

* 私達は超変形イラスト状態からの励起モードとしてソフト Octupole 振動モードの存在を予言していたが, このモードは現在までに Hg190-194 領域および Dy152 で合計 10 個以上見つかった。

(T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, S. Mizutori and Y.R. Shimizu, Phys. Rev.

C 53 (1996) 2213; G. Hackman et al., Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 4100)

* バナナ変形(Y31)振動モードも超変形核のソフトモードとして面白い性質を持つと予想されるがまだ見つからない。 中性子過剰の不安定核ビームを使って安定核の超変形状態が調べられるようになると見つけられるかもしれない。(これまで安定核ビームを使って陽子過剰核の高スピン状態が調べられてきたので, 安定核の高スピン状態は未開拓の領域である)

4c Wobbling と Precession

* **Wobbling** とは平均場が軸対称性を破った場合に, 破られた軸対称性を回復する新しい型の 3 次元回転モードである。 平均場の主軸に固定された座標系から眺めると角運動量ベクトルが周期運動しているように見える。

一方, 角運動量ベクトルの方向に x 軸を固定した座標系 (一様回転系) からは, 平均場の形が振動しているかのように見える。

* このような 3 次元回転運動は剛体の古典力学でよく知られているが, これを量子化して得られる量子的回転モード (Wobbling Motion) が見つければ軸対称性破れの確固たる実験的証拠になると考えられてきた。

- * 長い間、クリアーな実験データがなかったが、2001年になって遂に、
Lu163の高スピン超変形状態で Wobbling モードの特徴を明確に示す綺麗なデータが得られた。(S.W. Odegard et al., Phys. Rev. Lett. 86 (2001), 5866)
- * 発見された回転バンドは Wobbling Motion の量子が一つ励起したバンドと解釈できるが、ある深刻な問題も提起している。3つの主軸まわりの慣性モーメントに渦なし流体値を用いると Wobbling 振動数が虚数になってしまう。一方、剛体値を用いると実数になるが、剛体モデルは原理的な矛盾を抱えている。つまり、「対称軸と角運動量の方向が一致するオブレート極限で回転運動は消滅する」(集団的回転運動の慣性モーメントはゼロになるべし) という量子力学の基礎的概念との矛盾を抱えている。このパラドックスをいかに解くか?
- * odd-A 核である Lu163 では1個の準粒子が容易に回転整列し、この寄与によって回転軸方向の運動学的慣性モーメントが大きくなる。回転座標系での準粒子 RPA モデルによってこの効果を微視的に取り入れると、実数の Wobbling 振動数をもった固有モードが得られる。すなわち、「回転バンドの角運動量=集団的回転運動の角運動量+準粒子の整列角運動量」であることを正しく考慮に入れるとパラドックスは解ける。
(M. Matsuzaki, Y.R. Shimizu, K. Matsuyanagi, Phys. Rev. C 65(2002)041303(R))
- * Wobbling モードとガンマ振動モードはモード・モード結合を起こし混じりあうことが(理論的に)可能である。両者の混合/移行は面白い問題だが、その様子は何も分かっていない。一般的に言って、(先に述べた超変形状態でのソフト Octupole 振動モードを除けば)高スピンでの振動モードは未だに見つかっておらず、それらの性質はほとんど分かっていない。依然として未開拓の領域として今後に残されている。
- * W178 領域のプロレート変形核において High-K アイソマーが系統的に見つかっている。これらのアイソマーでは多数の準粒子が励起しそれらの角運動量が対称軸方向に整列している。このような内部状態の上に形成される回転バンドに対して古典的歳差運動 (Precession motion) の描像を描き、この運動を量子化した振動子の概念を導入することが出来る。この「振動運動」は「傾斜したフェルミ面からの粒子-空孔励起」に対する RPA モデルによって微視的に記述できる。
(Y.R. Shimizu, M. Matsuzaki, K. Matsuyanagi, Phys. Rev. C 72(2005)014306)
- * 回転系 RPA モデルの理論的スキームでは Precession を Wobbling の軸対称極限とみなすことが出来る。High-K アイソマーの角運動量は集団的回転と起源が異なるので「回転座標系」の概念を適用するのは筋違いに見える。ところが、「傾斜したフェルミ面」という概念は「回転系での真空」の軸対称極限と見なすことができ、集団的角運動量と整列角運動量という物理的に異なる角運動量を一つの理論的枠組みのなかで統一的に取り扱うことが出来るのである。奇妙に感じられるかもしれないが.....