

## 「現代の核構造論ミニマム」レジメ

この講義の主旨

1970年代から高励起状態、高スピン状態、不安定核などに対する実験が可能になり、原子核構造物理学は著しい進展をみせた。核子集団の極めて多様な存在形態や運動様式が見つかり、原子核という有限量子系に対する物質像が豊かになっただけでなく、原子核構造を理解するための基本的概念そのものが著しい革新を遂げた。しかしながら、残念なことに、この30年あまりの進展を踏まえた教科書は未だ少なく、1950年代の姿の教科書がいまだに広く使われており、最新の核構造論の基本概念は必ずしもよく知られていない。そこで、この講義では「少なくともこれだけは知って欲しい」現代的な核構造論の要点について語りかけたい。最近の実験データを紹介しながら、核子集団が作り出す静的および動的平均場の理論の到達点を基本として、原子核構造のダイナミクスを論じたい

**Chapter 1 現代的な核構造論への招待**

- 1a 間違いだらけの原子核像 ----- 核構造論の基本課題を論じる
- 1b 核構造論の歴史 ----- 「液滴モデル」と「シェルモデル」に関する誤解

**Chapter 2 平均場近似とは何か ----- 場の理論の視点から**

- 2a 真空とその励起モード
- 2b 対称性の自発的破れとその回復

**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

**Chapter 5 大振幅集団運動論**

- 5a オブレート・プロレート変形共存現象
- 5b パリティ二重項とカイラル二重項

**Chapter 6 不安定核の集団励起モード**

- 6a 新しい理論的課題
- 6b 期待される新しい集団現象

## 我々は今どこにいるか

2006 年春 理研 RI ビームファクトリー稼動

-----新しい原子核画像の構築をめざした挑戦が始まる

-----これまでに築き上げられてきた概念を生き生きとした形で吸収することが肝要ところが、最近、原子核物理について書かれたいくつかのレビューをみると、この 50 年間、理論物理の観点から見て、核構造論に本質的な発展がなかったように読める。実際には重イオン核物理の目覚ましい発展があり、量子多体理論に基づく核構造論の時代が開け、核構造論は面目を一新したのに !!

そこで、

---

### **質問集**

- 問 1 この 50 年間の核構造理論において最も基本的で重要な進展とあなたが考えるものを 3 つ挙げてください。
- 問 2 球形核の第 1 励起  $2^+$  状態に対して液滴モデルの描像を適用することは妥当(妥当でない) ですか。その理由は何ですか。
- 問 3 アイソスカラー四重極巨大共鳴状態に対して液滴モデルの描像を適用することは妥当(妥当でない) ですか。その理由は何ですか。
- 問 4 基底状態回転バンドの慣性モーメントは剛体値の  $1/2-1/3$  ですが、その主な理由は何ですか
- 問 5 Bohr-Mottelson のノーベル賞に至った最も重要なアイデアは何だと思えますか
- 問 6 あなたは液滴モデルとシェルモデルの統一モデルが既に出来ていると考えますか
- 問 7 「核構造は殻模型によって原理的には記述できる」という見方がありますが、これに対して、あなたはどうか考えますか
- 問 8 変形した原子核はなぜ存在するのですか。何が「変形」しているのですか。
- 問 9 なぜプロレート変形した原子核の方がオブレート変形した原子核より沢山存在するのですか
- 問 10 核構造に BCS 理論が適用されていますが、無限系での超流動と核構造での超流動とはどこが共通で、どこが違っていますか
- 問 11 核構造論に相転移の概念を適用することは妥当(妥当でない)ですか。その理由は何ですか。 妥当と考える場合、無限系での相転移と何が共通で何が違っていますか
- 問 12 高速回転による superfluid phase から normal phase への相転移は観測されていますか。Yes と応えられた場合、その実験的証拠は何ですか。
-

## Chapter 1 現代的な核構造論への招待

### 1a 間違いだらけの原子核像

- \* 原子核は
  - ・量子力学の世界--- 核子は量子力学的粒子、基底状態近傍では波動性が特に重要
  - ・フェルミ粒子の集団 --- パウリ原理はときに魔法のような働きをする
  - ・有限個数の多体系 --- 表面効果が重要
- \* 原子核もある意味ではメゾスコピック系、ただし「巨視的（マクロ）、微視的（ミクロ）」の概念を単なる空間的スケールの意味から、より一般的なものに拡張する必要がある。メゾスコピック系を「平均自由行程と系のサイズが同程度で表面効果（境界条件）、量子効果が本質的な役割を果たしている系」として定義する
- \* 奇妙な性質
  - ・強い力で結合した高密度のシステムなのに、(基底状態近傍で)核子はほとんど衝突せず光速の約  $1/5$  で自由に飛び回っている!
  - ・短距離力なのに、協力して集団運動する
  - ・状況によっては、お互いに衝突してカオス的に振舞う
  - このようにお互いに矛盾する性質を、どのように考えたら統一的に理解できるだろうか?
- \* 一見すると矛盾する多様な現象を統一的に理解したい
  - 粒子性と波動性、古典的と量子的、巨視的と微視的、集団的と個別的、平均とゆらぎ、断熱的と透熱的、弾性と塑性、対称性の破れと回復、秩序とカオス ----- 「お互いに対立するものは相補的である」(Niels Bohr)
  - しかし、いまだ大統一は達成されていない。そのうえ、新しい領域が拡大しつつある
- \* きわめて多様な秩序運動をどう分類するか、どのように相互の関係をつけるか、秩序運動とカオス運動の共存とそれらの間の転移：
  - 現象の豊さに圧倒されないために
  - 個々の現象を位置づける座標軸をもつことが大切

### 1b 核構造論の歴史

(Appendix: 「3分間で聞く核構造論の歴史」参照)

**1930-1940年代: 複雑系としての原子核**

1932 中性子の発見、核構造論の始まり

1936 Niels Bohr 複合核モデル

最初に見た原子核は「量子カオス」の世界だった

-----> ランダム行列理論 (1960年代 Wigner, Metha, Dyson, Porter)

#### 1950年代: 平均場モデルの成立、超低温での秩序運動

1949 Mayer-Jensen 球形シェルモデル

----> その理論的基礎付け (1955 Bruckner 理論)

1953 Bohr-Mottelson 集団モデル (振動と回転は平均場の時間変化)

1955 Nilsson 変形シェルモデル

1957 BCS 理論 ----> 準粒子シェルモデル

#### 1960年代: 核構造の多体問題、集団運動の微視的理論の始まり

非調和性、非線形効果の発見

---> 準粒子 RPA, ボソン展開法, 生成座標法, 対演算子法

#### 1970年代: 重イオン核物理の始まり

高スピニラスト分光学

時間依存平均場理論(TDHF)、大振幅集団運動理論の試み

1971 Backbending 現象の発見

回転座標系での準粒子シェルモデルの成立

#### 1980年代: 高スピニフロンティアの発展

1986 超変形核の発見

多様な変形共存現象の発見

#### 1990年代: 非イラスト核構造論の始まり

暖かい核の減衰回転

(秩序運動からカオス運動への転移領域、

両者の統一的理解にむけて)

不安定核研究の始まり、中性子ハロー、スキンの発見

#### 2000年代: 不安定核ビームを用いた核物理の時代

ドリップ線近傍における新現象、弱束縛系の多体問題

---

### いくつかのポイント

\* Niels Bohr の複合核モデルと液滴モデル (1936-1939)

現代的な眼で見れば、

核分裂は極めて高度な非平衡・非線形現象

自発核分裂は多体系の巨視的トンネル現象

\* 最初に見た原子核の姿は「量子カオス」の世界であった

----- ランダム行列理論 = ハミルトニアンアンサンブル

というアイデア = 新しいタイプの統計力学

- 高励起状態ではミクロな状態は無数にある
- 「決定論的力学系における非可逆性の起源」に対し示唆的
- 平均自由行程が核半径より小さくなくても複合核モデルは成立する
- 「このような高励起状態も殻模型で原理的には記述できる」と言っても「物理的には」無意味

\* 原子核は未知の量子流体

---- D.H. Hill and J.A. Wheeler, Phys. Rev. 69 (1953) 1102

\* 1950年代のパラダイムシフト

- 平均場近似と1粒子運動の概念が成立している！
  - ・これは大変な驚きであり、50年代の核構造多体問題の主要課題は、その根拠を理解することであった
  - ・広い視野を持つことが大切 ---- もし Mayer-Jensen が軽い核だけ見ていたら、スピン軌道項の必要性を感じただろうか

\* 原子核はどんどん新しい姿を見せる、千変万化する、

実に不思議で奥深い量子系である

----- 気体とも液体とも固体とも異なる **New Form of Matter**

\* 液滴モデルとシェルモデルは未だ統一されていない

----- 核構造の大統一理論は将来に残されている大問題

\* 回転スペクトルの予言に至った Aage Bohr のアイディア

- ・ 現代的な「対称性の自発的破れの概念」のさきがけ (BCS 理論以前であったことに注意)
- ・ Bohr-Mottelson のノーベル賞講演を是非読んで欲しい (Rev. Mod. Phys. 48 (1976) 365 and 375)
- ・ Bohr-Mottelson の教科書では液滴モデルは Appendix に置かれていることに注意
- ・ 1953-1975 にかけての研究によって、回転運動に関する概念が飛躍的に一般化された。この経緯を学びたい
  - 平均場が回転対称性を破る (変形が発生する) と平均場の方向を指定する角度が集団変数になる
  - 一般化された回転運動の概念は3次元座標空間はもちろん、スピン・アイソスピン空間、粒子数空間 (ゲージ空間) など、異なった次元にも一般化できる
- ・ Bohr-Mottelson モデルを **geometrical model** と呼ぶのはひどい矮小化
- ・ 「対称性の自発的破れ」は現代物理学の中心的概念

\* 変形シェルモデルの導入当時の批判

---回転不変性 (角運動量保存則) を破っている

---しかし、球形殻模型だって並進不変性（運動量保存則）を破っている

\* N=20 は超変形の魔法数でもある

--- Ca40 近傍の1粒子エネルギーの変形度依存性をみる

\* 「N=20 魔法数消滅」について

---球形は極小点あるいは極大点？

\* オブレート・プロレート変形共存現象

--- 複数の真空（平均場）の間の巨視的（多体）トンネル現象

\* 真空の構造変化 ---- 有限量子系における温度ゼロでのゆるやかな相転移  
（Dy アイソトープにみる振動から回転スペクトルへのゆるやかな変化）

原子核の球形-変形相転移は、温度変化による古典的な相転移でなく、

極めつきの「量子相転移」（quantum phase transition）である。

それは、平均場の対称性の変化として定義され、量子スペクトル構造の質的変化として見える。その変化の様相は有限量子系の特性を反映して

多様であり、広い転移領域があったり、異なる相が共存したりする

\* 1957年 BCS理論

→ 1961 Nambu-Jona-Lasinio → 素粒子論は変わった

→ 1958 Bohr-Mottelson-Pines → 核構造論も変わった

\* 1960年代 核構造の多体問題の進展

振動しているものは平均場 → 平均場と集団運動の微視的理論

\* 1970年代 重イオン核物理の始まり

イラスト分光学、高スピン・フロンティアー

「回転座標系での準粒子シェルモデル」の確立

= 変形、対凝縮、回転による対称性の自発的破れを取り込んで

一般化された1粒子モードを定義する → 現在の標準モデル

\* 1粒子運動の一般化

1粒子運動モードの概念を固定化せず、発展させることが重要

実際、1粒子運動の概念は Mayer-Jensen 以後、

何度も本質的な拡張を遂げてきた

・3次元座標空間での変形 → 球対称性の破れ → 変形シェルモデル

・核子対の凝縮 → 粒子数（ゲージ）空間での対称性の破れ → 準粒子

・高速回転 → 時間反転対称性の破れ → 回転系準粒子モード

（磁場中の超伝導体とアナログス）

\* 1980年代 超変形状態 = 平均場の第2極小点（二つの真空）の発見

-- 常変形状態への巨視的トンネル現象が観測されている

-- 最近、球形2重閉殻 Ca40 でも超変形した励起状態が見つかった

○この 50 年間は核構造論にとってどういう時代であったか

あえて一言で言えば.....**微視的モデル**が進展した時代

安定核どうしの衝突を用いて、高い励起エネルギー状態、高スピン状態など  
極限状況の原子核をつくりだし、量子多体論にもとづく核構造論がおおいに  
進展し、原子核という不思議な物質に対する物理的描像が革新した時代

## Chapter 2 平均場近似とは何か ----- 場の理論の視点から

### 2a 真空とその励起モード

- intrinsic state とは何か
  - = intrinsic frame of reference で定義された状態
- intrinsic frame とは何か
  - = 平均場の基底状態(真空)に付随する座標系
- 実験室座標系では破られた対称性を回復した状態を観測する
- \* 真空の構造と励起モードの性質は不可分の関係にある
  - 励起モードの性質を調べることによって
  - 基底状態に対する知見を得ることが出来る
- \* Nilsson モデルが導入された当時のこれに対する抵抗感
  - 回転対称性を破っている (1 粒子状態は角運動量を保存しない)
  - しかし、球形シェルモデルだって並進対称性を破っている
  - 孤立した有限系の存在自体が対称性の破れの結果
- \* 対称性を自発的に破って得たもの
  - 一般化された 1 粒子モードの概念
  - これは量子多体系記述の基盤. そして、なによりも大切なのは物理的描像
  - 量子系における古典的性質の **emergence** (創発)
  - (古典的描像を一切排除した量子力学的描像はありえるか)
- \* 1 粒子運動も集団現象である
  - Dirac の空孔理論 : 1 個の電子といえども、その背後には無数の電子がいる
  - 「最初ディラックはただ 1 個の孤立した電子に対する理論の構成が可能であると仮定して出発したにもかかわらず負エネルギーの困難につきあたり、この矛盾を解決するために仮定に反して無限に多数の電子を同時に考えねばならなくなった」(坂田昌一「原子物理学の発展とその方法」(1946)より抜粋)
- \* 対相転移
  - 粒子対モードと空孔対モードがソフト化して BCS 状態が形成されると
  - 対ギャップが集団変数となる
- \* 真空とその励起 (1 粒子モード)

- Hartree-Fock 真空に対して ``particle”と ``hole”が定義される
- BCS 真空に対して Bogoliubov 準粒子が定義される
- \* Shriefer の回想 (Physics Today, April 1992)
  - 朝永の「 $\pi$  中間子の着物を着た核子の理論」に触発されて、
  - 「クーパーペアーに対する拡張された平均場近似」の着想を得た
- \* 素励起モードとしての「素粒子」
  - 質量の起源：BCS 理論における準粒子に対する運動方程式
  - と Dirac 方程式の類似性
  - 「質量は自発的対称性の破れによって生じる」というアイデア (南部)
- \* 回転運動の慣性モーメントに関する誤解
  - 変形核の核子対は  $J=0$  の monopole pair ではない。
  - 時間反転状態間のペアーであり、いろいろな角運動量成分を含む

## 2b 対称性の自発的破れとその回復

- \* しかし、破りっぱなしではない。破られた対称性は回復しなければならない
  - 対称性を回復する集団モードが存在する (Anderson, Nambu, Goldstone)
  - これが一般化された回転運動の概念
  - BCS 理論の場合はゲージ対称性の回復
  - (核構造における対回転スペクトル)
- \* 平均場 (真空) がどの対称性を破り、どの対称性を保存しているか
  - によって異なった 1 粒子励起、振動励起、回転励起モードが現れる
- \* 回転バンドという概念
  - 共通の内部構造をもつ (intrinsic frame で共通の 1 粒子配位をもつ)
  - 固有状態の集合 ---- これらの内部構造は角運動量 (BCS 理論の場合は粒子数) の関数として滑らかに変化してよい (配位が共通、1 粒子波動関数は滑らかに変化してよい) --- 対称性の自発的破れの概念から自然に導かれる
  - $0+$  状態だけ見ていたら、その状態が変形しているかどうか分からない
- \* 対称性の自発的破れに伴う励起スペクトルの例
  - 軸対称性の破れ → Wobbling motion
  - カイラル対称性の破れ → カイラル 2 重項 (巨視的トンネル現象)
  - 空間反転対称性の破れ → パリティ 2 重項 (巨視的トンネル現象)
  - まだ見つかってないが
    - エキゾチック変形 (バナナ変形した超変形核, 正 4 面体変形など)
    - = 新しい型の対称性の破れ
- \* 対凝縮にともなう回転モード
  - 対回転 (pairing rotation) = ゲージ空間での回転運動

- 位相表示と粒子数表示の関係
  - 「どちらの表示の方が優れている」とは言えない.
  - 相補的な 2 つの描像を統一的に見ることが大切
- パウリ原理の魔術
- \* 真空とその励起 (集団モード)
  - 振動とは---平均場の規則的な時間変化 (周期運動)
  - 時間変化する平均場の理論 → 振動モードの微視的理論
- \* 「時間依存の記述法」と「定常状態基底による展開」の関係
  - 「コヒーレント状態表示による調和振動子の記述」の一般化
  - (振動の古典的描像を得るためにはコヒーレント状態を導入する必要がある)
- \* Hartree-Fock 平衡点まわりの小振幅振動 (particle-hole RPA)
  - 平均ポテンシャルの振動 = particle-hole 励起のコヒーレントな重ね合わせ
  - 準粒子 RPA による対振動 (pairing vibration) の記述
  - 対ギャップの振動 = 2 準粒子励起のコヒーレントな重ね合わせ
- \* 平均場に対する時間依存変分原理の小振幅近似 → 準粒子 RPA 方程式
- \* RPA によるゼロ・モード (回転モード) の記述
  - 生成・消滅演算子による記述は破綻するが、集団座標と集団運動量を用いれば問題なく記述できる
  - 振動数=(弾性パラメータ/質量)の平方根
  - 弾性パラメータがゼロとなって振動数もゼロとなる
  - しかし、質量はゼロでない. これが回転エネルギーをもたらす
  - RPA は平均場が破った対称性を回復するコンシステントな近似法
- \* Sn アイソトープに対する(t,p), (p,t)反応断面積データ
  - (D.M. Brink and R.A. Broglia, Nuclear Superfluidity, Pairing in Finite Systems (Cambridge, 2005))
  - 一つの原子核だけを見ていたのでは、対回転モードは見えない
  - アイソトープを統一的に眺めれば対回転モードが見えてくる
  - (0+状態だけを見ていたのでは、その状態が変形しているかどうか分からない
  - 回転スペクトルを見てはじめて intrinsic な構造がわかる)
- \* 励起 0+状態の微視的構造
  - 対振動モードは他の型の K=0 モードと混ざりやすい
  - 実は、球形シェルの閉殻は容易に 2p2h 励起する
  - (J.L. Wood et al., Phys. Rep. 215 (1992) 101)
- \* 閉殻が 2p2h 励起すると変形する
  - 常識に反するようだが、ひとたび、閉殻が励起すると
  - 対相関と四重極相関はコヒーレントに作用する

プロレート変形が大きくなるにつれて、下がってくるプロレート準位と上がってくるオブレート準位が交差する。それぞれの準位にいる核子対の波動関数は空間構造が異なる。その違いを考慮するためには、モノポール対相関に加えて、四重極対相関も重要

\* 準位交差問題

準位が交差したとき配位を変えられるか。このダイナミクスが集団運動の断熱性(adiabaticity)と透熱性(diabaticity)を決める

\* 大振幅集団運動の質量

---- 配位換えが起こりにくいと集団運動の慣性質量は大きくなる

慣性とは配位を保とうとする性質

----- 四重極変形と対相関の絡み合い、

その微視的メカニズムを理解したい (これからの課題)

\* 剛性(rigidity)とは ----- 一見矛盾するようだが、

独立粒子運動(平均場)がこの性質をもたらす

弾性(elasticity)とは ----- 短い時間スケールでの応答 (巨大共鳴)

配位を保ったまま 1 粒子波動関数が歪曲する

塑性(plasticity)とは ----- 長い時間スケールでの応答 (大振幅集団運動)

配位が不可逆的に変化する

\* 不思議な 0+状態----- 古くて新しい問題, 典型例: Ge72 の異常 0+状態

2+フォノンが 2 個励起した 0+状態と対振動の励起による 0+状態は強く結合する

(K. Takada and S. Tazaki, Nucl. Phys. A 448 (1986) 56)

多くの不思議な 0+状態が知られているが、それらの性質はよく理解されていない

\* 不安定核における集団励起モードの研究にむけて

対相関、四重極変形、連続状態への励起の 3 要素を考慮した

準粒子 RPA 計算によると Mg32 でも、低い 0+状態の存在が期待される

## まとめ

- 対称性の破れ → 構造の形成 (emergence)
- 有限量子系の存在は対称性の破れによる
- 平均場の存在は集団現象である
- 平均場(真空)がどの対称性を破り、どの対称性を保存しているかによって異なった 1 粒子励起、振動励起、回転励起モードが現れる
- 対相関の具体例: Bogoluibov 準粒子、対振動、対回転
- 対称性の自発的破れがなければ、このような物理的描像は得られない
- これらの物理的概念の有効性は実験で検証されている
- 1 つの原子核だけを見ていたのでは、対回転モードは見えない。アイソトープを統一的に眺めれば、対回転モードが見えてくる

\* ここで再度、最初の質問について議論する

## 次回の予告

--- 「次回、原子核は、もっと速く、回転する」

## 3分間で聞く核構造論の歴史

京大理学研究科物理第二教室 2002 年度年次報告より抜粋：  
全文は松柳のホームページに公開されている。

<http://ruby2.scphys.kyoto-u.ac.jp/person/ken/index-j.html>

1936 年、Fermi らが中性子を使って初めて見た原子核の姿は、原子で馴染みのあったシェルモデル的描像と極めて異なるものでした。Niels Bohr は「原子核は複雑で大変難しい多体系」との認識に基づいて複合核モデル（液滴モデル）を提案したのでした。そして、その後、Wigner や Dyson たちが「複雑で理解不可能」な複合核状態を記述するために「ランダム行列理論」を展開しました。この理論は「ハミルトニアンアンサンブル」という概念を導入した、全く新しいタイプの統計力学であり、現在では「量子カオス」問題、メソスコピック系の輸送現象などで広く使われています。最初に見た「原子核は量子カオスの世界だった」ということは覚えておく価値があります。

ところが 1950 年代になって、原子核に対する描像は大転換を遂げます。基底状態近傍では平均場が成立していることが分かり、シェルモデルが導入されて核構造論は大変易しくなりました。この平均場は球対称とは限らず、変形する（球対称性を破った）方が安定な場合があることも分かりました。そして、低励起スペクトルにみられる振動や回転などの集団運動はこの平均場の時間変化として理解できることが分かりました。（このアイデアが Bohr-Mottelson の集団モデルの核心なのに、未だにこれを液滴モデルのように言う人が多いのは困ったことです。古典的液滴とのアナロジーは上に述べた複合核状態には使えませんが...）つまり、基底状態近傍での集団運動は古典的液滴の振動や回転とは本質的に異なるものだったのです。こうして、「集団運動の微視的理論」の出発点が築かれました。シェルモデルがあまりにもうまくいったので、「シェルモデルで原理的にはすべて理解できる」という人までいます。しかし、平均場の基底状態からの粒子-空孔励起でつくられるミクロな量子状態の数を計算してみればすぐわかることですが、対角化すべきハミルトニアン行列の次元数は宇宙の星の数ほど巨大なものになり、この「原理的には」という言葉は「物理的には」何の意味ももちません。

1960 年代になるとシェルモデルは更なる変貌をとげます。核子がペアーを組む傾向がある

ことは古くから知られていたことですが、1957年にBCS理論がでると直ちに、その理論形式が取り入れられて、「準粒子シェルモデル」が展開されました。そして、超伝導状態として記述すれば(jj結合の閉殻を除く重い核の)低励起スペクトルを良く記述できることが示されました。

明らかに、シェルモデルと複合核モデルの描像は対立します。それにも拘らず矛盾する二つのモデルが成立している事実をどのように理解すればよいのでしょうか。超低エネルギーの中性を捕獲して形成された複合核は高励起状態にあり、核構造は励起エネルギーの増加とともに平均場近似で記述される秩序運動から複雑なカオス運動へと変化するのだと考えることによって、この問いに答える手がかりが得られました。

1970年代になると重イオン反応の実験が可能となり、核構造物理学は新しいフェーズに入ります。重イオン融合反応によって、高速で回転する熱い原子核を容易につくることができるようになりました。熱い原子核が冷える過程で放出するガンマ線を多重計測する検出器システムがヨーロッパとアメリカで競って建設されました(残念ながら、日本は立ち遅れました)。これらのガンマ線はイラスト領域の核構造に関する豊富な情報をもたらします。こうして、イラスト分光学を武器にして高スピフロンティアが拓かれました。イラストとは「ある角運動量での最低エネルギー状態」のことで、基底状態の概念を回転系に拡張したものといえます。イラスト領域は高い励起エネルギーの大半を回転運動という秩序運動に使っているため、超低温です。70年代から80年代にかけて、バックベンディング現象と呼ばれる慣性モーメントの異常、高速回転に伴う超伝導相から常伝導相への「相転移」、回転バンドの上限に達する「バンド終結現象」など有限フェルミ系に特有な現象が見つかり、これらの研究を通じて核構造モデルは大いに発展しました。平均場とシェルモデルの概念は一般化され、現在では「回転座標系での準粒子シェルモデル」が高スピン状態を分析する「標準モデル」として確立しています。このモデルでは平均場の変形、対凝縮、回転に伴う対称性の破れを取り入れて一般化された1粒子モード(準粒子)と、それらに対する真空としてのイラスト状態の概念が基本的な役割を演じています。球対称ポテンシャルとjj結合シェルモデルという狭い意味で「シェルモデル」という言葉を使う人が未だに多いですが、実際には、「シェルモデル」は今日では対称性の破れを取り入れて大いに一般化されていることを是非知って欲しいと思います。

1986年、 $^{152}\text{Dy}$ で超変形状態が発見されました。超変形状態とは長軸と短軸の比が約2:1に巨大変形した原子核の新しい存在形態で、このような巨大変形に伴う見事な回転バンド(角運動量20-60)がそれ以来現在までに軽い核から重い核まで広範な領域にわたって250例以上見つかっています。超変形回転バンドは通常、重イオン融合反応によって形成される高スピン高励起状態として、準位密度の高い複合核状態(ランダム行列理論で記

述されるカオス状態)の中に埋め込まれた秩序状態として観測されます。何故そのような状態が複合核状態の海の中で(それらに混じらず)個性を保てるのでしょうか。それは、超変形状態とは変形ポテンシャル・エネルギー曲線の第2極小点にトラップされた状態であり、両者がポテンシャル障壁によって隔てられているからです。