

集団運動サブグループ案内

1 概要

集団運動サブグループは核構造における多様な集団現象に興味をもち、現象に密着したモデルの構築から有限フェルミ系に対する多体理論の展開まで、幅広い研究活動を行っています。構成要素の集団が生み出す集団現象には多体系の物理の醍醐味があり、魅力あふれる研究課題がたくさんあります。物理だけでなく、非常に大きな学際的広がりをもっていることもよく知られているとおりです。私達は核構造物理学の分野で、集団現象の多体理論を中心に個性ある研究をすすめて、これからの核構造物理学を担う若手研究者を育てていきたいと考えています。

私達の研究の目標は

1. 極限状況の原子核(高速回転、超変形、不安定核など)における新しい集団励起モードの探求と微視的モデルの展開、
2. 有限フェルミ系の秩序運動とカオス運動の統一的理解

ですが、これらは広大な分野ですので私達が実際に手がけていることは勿論このなかの極く小さな一部分にすぎません。

個々の研究テーマの設定にあたっては、

1. 現象(実験事実)を深く分析し、微視的モデルを構築し、
2. 理論物理としての一般性をめざす

よう努力しています。極く当たり前と感じられるかもしれませんが、1)と2)を切り離さず、これらを総合的に進めていくことはそんなに容易なことではありません。それは、国内および国際的な交流による実験のフロンティアとの連携、大学院生の意欲的な仕事ぶり等いくつかの要因があってはじめて可能になるものです。ここには核構造物理学という個別科学にしっかりと根差しながら、その深化を通じて(理論物理としての普遍性のある)新しい概念の発見をめざす姿勢が反映されています。もっと具体的にいえば、(金属クラスター、量子ドット等の)メソスコピック系と核子多体系の類似性と異質性に特に興味をもって研究しています。

新しい研究テーマにチャレンジする際、これまでの蓄積のうえに立ってアプローチの方針を定めていることは勿論です。研究グループの伝統はこのような形で生かされ、個性的な研究の土壌となります。以下では、最近私達が取り組んでいる研究テーマのいくつかを紹介します。

2 高速で回転する超変形核

2.1 超変形状態の発見

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あって、このような巨大変形に伴う見事な回転バンド (角運動量約 $20\hbar \sim 60\hbar$) が、(1986 年に ^{152}Dy で発見されて以来) 現在までに軽い核から重い核まで広範な質量数領域にわたって 200 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。その形成メカニズム、微視的構造、崩壊メカニズムといろいろな問題がありますが、先ず最初の疑問は、なぜ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) 個性を保って (準) 安定に存在できるのか。なぜ、超変形・回転運動という秩序運動と複合核モデルで記述されるカオス運動が共存できるのか、ということです。

この疑問に対する簡単な答えは、図 1 に示されている様に、両者を隔てるポテンシャル・バリアーの存在です。(ポテンシャルの形は角運動量の変化につれて変化し、それに伴いトンネル崩壊の確率も角運動量に依存します。) つまり、超変形状態とはこのポテンシャル・エネルギー曲線の第 2 極小点にトラップされた状態なのです。(場の理論での偽の真空 'false vacuum' に対応します。) それでは何故このような第 2 極小が現れるのでしょうか。

それは超変形シェル構造と呼ばれる新しいシェル構造が形成される為です。この構造形成に伴い結合エネルギーの利得が生じ、これが第 2 極小をもたらすのです。そこで、次の課題は、超変形シェル構造とは何か、それはどのようなメカニズムで形成されるのかを理解することとなります。

2.2 シェル構造の新しい観点

基底状態やイラスト状態 (ある角運動量をもつ最低エネルギー状態のこと。励起エネルギーは高くても、それは集団回転運動という秩序運動に使われているため、熱運動が無いので絶対温度ゼロの極限に対応します) 近傍の超低温状態では平均場と一粒子運動の描像が成立しています。(よく使われている原子核の概念図は、核子が原子核内部で一定の位置に局在しているかのような間違ったイメージを与えています。言うまでもなく原子核は量子力学の世界であり、基底状態近傍では粒子性よりも波動性が支配的です。) 球対称な平均ポテンシャルに伴うシェル構造はよく知られていますが、嘗てはポテンシャルが変形し変形度が増大するにつれて、球対称性に由来する縮退がとけてシェル構造は徐々に消滅すると思われていました。超変形核の発見はこの考えが誤りであることを明瞭な形で示しました。確かに球対称ポテンシャルのシェル構造は消滅しますが、変形の成長に伴って新しいシェル構造が形成されるのです。これを変形シェル構造と呼びます。このような構造形成のメカニズムを理解するためには、個々のエネルギー準位の詳細より準位分布の大局的構造が重要ですから、シェル構造の概念を次のように一般的な形で定義しておきます。すなわち、「エネルギー粗視化された準位密度における規則的な振動構造」のことを

シェル構造と呼ぶことにします (図 2 参照)。(Schrödinger 方程式を数値的に解いてすべての固有値が求まったとしても、この振動パターンの由来を理解したことにはなりません。このあたりのことは物理の価値観の問題としても非常に重要なことです。) 超変形シェル構造の形成メカニズムを解明することによって、核子多体系が作る selfconsistent field の自発的対称性の破れの微視的起源に対する理解を深めることができます。この課題に対して、私達は最近、分岐による新しい秩序運動の形成メカニズムを発見し、この分岐現象を記述可能な新しい理論 (量子スペクトルと古典周期軌道の関係を与える新しいトレース公式) を開発しているところです。

2.3 新しい集団励起モードの探索

超変形シェル構造という新しい環境の下で、どのような新しい集団励起モードが出現するでしょうか。それを理論的に予測することは興味ある課題です。私達は微視的理論の観点からこの課題に取り組んできましたが、これまでの研究によって、超変形核は空間反転対称性と軸対称性を同時に破る 8 重極型の変形自由度の対して極めてソフトであること、これに伴い高スピン超変形状態における「バナナ」型振動モードの存在が期待できることが分かりました。ごく最近、超変形核の励起スペクトルのなかに、この予想に対応すると思われる状態群が見つかっており、今後の展開が非常に楽しみな状況を迎えています。

3 大振幅集団運動の理論

3.1 集団現象の微視的理論

超低温状態における低エネルギーの集団振動モードは他の系には見られない大変ユニークな特性をもっています。これらの集団運動はシェル構造と対相関に基づく本質的に量子力学的で、かつ、有限フェルミ系に特有な集団運動であって、液滴モデルの表面振動のような古典的振動とは異質なものです。それらは核子の集団が自発的に作り出した平均ポテンシャル (selfconsistent field) の時間変化として記述できます。この時間変化を平衡点のまわりの調和振動と近似する方法は RPA と呼ばれ、量子多体系の振動励起モードを系の構成要素とそれらの間の相互作用から導く微視的理論の出発点として良く知られています。RPA 近似で導入された励起モードはボーズ粒子的な性質を持っています。

3.2 非調和振動と変形共存現象

ところが、原子核の集団励起モードでは RPA 近似で無視された非調和効果 (非線形効果) が非常に強く、その理解には RPA を越えた理論が必要であることがこれまでの研究によって分かりました。非調和効果を記述するためにこれまでボソン展開などの方法が開発され、原子核の集団運動の性質の解明に成果を挙げてきました。ところが、実験が進むにつれて、異なった (Hartree-Fock-Bogoliubov) 局所平衡解が同一エネルギー領域に共

存する変形共存現象など、平衡点まわりの展開ではとらえきれない現象が広範に見出されてきました。こうして、平衡から遠く離れた大振幅の集団運動を記述できる新しい微視的理論が求められるようになってきました。

3.3 SCC (Selfconsistent Collective Coordinate) 法

この課題に応えるべく、丸森、益川、坂田、栗山は1980年、SCC法と呼ばれる方法を提案し、平均ポテンシャルの時間変化を支配する少数の集団変数を自己無撞着に決定する理論的枠組みを与えました。この方法は、これまでのところ、非調和ガンマ振動や(球形から変形への相転移の過程にある)転移領域核における振動と回転の中間的な低励起スペクトルの記述に適用され、その有効性が示されています。しかし、現実の核現象への適用はまだ限られており、定式化の面でも、基本方程式を解く一般的な方法の開発、量子化の処方箋とその基礎づけ、集団ハミルトニアン の導出など未解決の問題がたくさんあります。先に述べた変形共存現象をはじめ、重イオン反応や核分裂の過程で見られる大振幅集団運動への適用のためには、これらの課題に取り組む必要があり、今後の大きな課題となっています。

4 高励起状態における秩序とカオス

4.1 高スピン・フロンティア

超低温状態にある原子核の回転運動は古典的な剛体の回転と異なり、本質的に量子力学的で、かつ、多体系に特有な運動様式です。このことは、球形の原子核は回転しないことから明らかです。原子核の回転運動は、核子の集団が自ら作った平均ポテンシャル (selfconsistent field) が対称性を破っているとき、この破られた対称性を回復する集団運動として理解されます。近年、重イオン核反応を用いて大きな角運動量を持つ原子核を実験室で作り出すことができるようになり、高速回転の極限状況にある原子核の内部構造と構造変化についての研究が著しく進んでいます。超低温のイラスト線に沿って、より高速で回転する原子核を作り出す研究分野は高スピン・フロンティアと呼ばれています。私達はこのような極限状況での集団運動の性質を「回転座標系でのシェルモデルとRPA」に基づく微視的アプローチによって研究しています。

4.2 温かい核の減衰回転

ある角運動量をもつ最低エネルギー状態(イラスト状態)から離れ内部励起のエネルギーが増えていくにつれて、平均ポテンシャルの中を運動する核子同士の衝突が頻繁になり、原子核はだんだん温かくなります。このような状況で回転運動の性格も変化します。ごく最近(高分解能ガンマ線多重測定器システムを用いて)これまで全く未知であった温かい核の回転運動の性質を実験で調べるのが可能になり、温かい原子核では「減衰回転」とよべる新しい運動様式が存在することが分かってきました。これは超低温での秩

序運動から高温でのカオス運動に至る中間的状況に特有な運動あり、これを調べることによって、原子核という有限量子系における秩序運動からカオス運動への「相変化」のプロセスについて多くのことを学べる、と私達は考えています。

4.3 超変形状態のトンネル崩壊

超変形状態は常変形の高温状態（カオス状態）の海の中に埋め込まれた超低温の秩序状態です。これらの共存を可能にしているのは両者を隔てるポテンシャル・バリアーですが、角運動量が減少したり、超変形極小点から測った内部励起エネルギーが増大すると、このバリアーを透過する量子力学的トンネル効果が重要になってきます。これが超変形状態のトンネル崩壊です。この現象は多次元変形空間で起こること、崩壊先が複合核状態（ランダム行列理論で記述される量子カオス状態）であることなどのため、理論的にも新しい課題をつきつけています。

4.4 強度関数のゆらぎの階層構造

高励起状態における核子集団の秩序運動（集団運動）とカオス運動の競合についてはまだ研究が始まったばかりであり、先に述べたように「減衰回転」という運動様式が示唆されたのはごく最近のことです。減衰回転の他に、巨大共鳴（高励起状態での振動モード）強度関数のゆらぎも内部励起エネルギー（温度）の増大につれてカオス化が進行するプロセスについて多くの情報を与えてくれると期待されます。私達は多重フラクタル解析の手法を拡張し、揺らぎの階層構造からこのような情報を抽出する新しい手法を開発しています。

図1

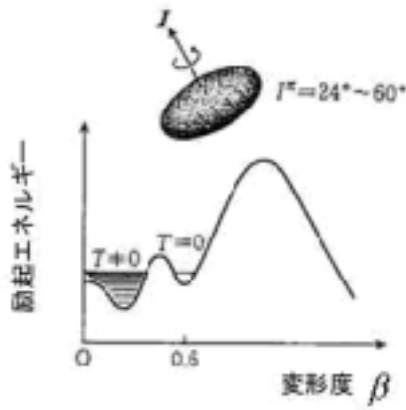

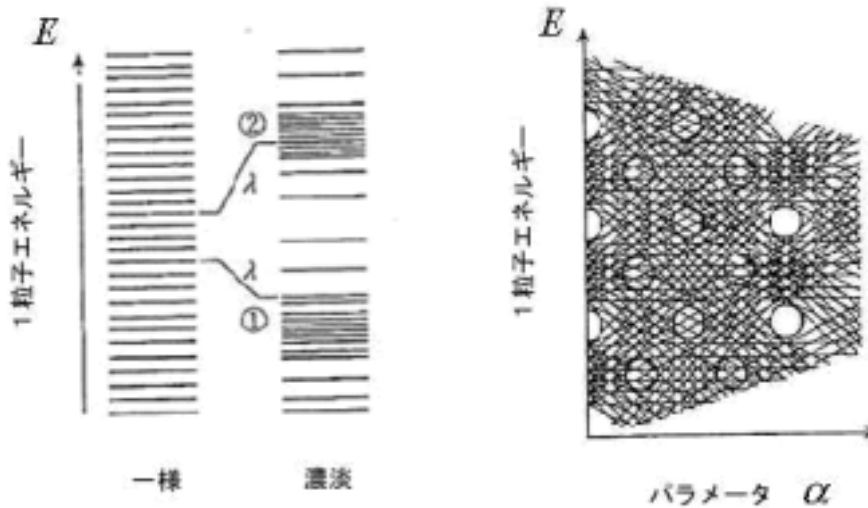


図2 シェル構造とは



$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\alpha) \right) \psi(\mathbf{r}) = E(\alpha) \psi(\mathbf{r})$$



パラメータ α

集団変数
変形度
秩序変数 etc...

粗視化 (coarse-grained)

準位密度における規則的な振動パターン