

「現代の核構造論ミニマム」第4回 レジメ

この連続講義は3回6コマの予定でしたが、これからの不安定核構造研究について論ずる Chapter 6 に入る前に前回の講義が時間切れになってしまったことと、これまでの講義に対する Q&A を十分やった方がよいとの判断で今回の講義を追加企画していただきました。したがって、今回は先ずこれまでの講義の要点を復習し、寄せられた質問にお答えした後、「理研 RIBF でどのような新しい核物理の世界が開けるか」皆さんと一緒に議論したいと思います。多少の時間的余裕を頂きましたので、静的および動的平均場理論の最近の動向についても簡単に紹介したいと思います。

Chapter 6 不安定核の集団励起モード (増訂版)

これまでの講義の要点

- * 「平均場と1粒子運動モード」は集団現象である。

「1粒子運動モード」と「系の構成要素の運動」=「核子1個の運動」を区別すること。強い相互作用している核子そのものに対して独立粒子運動の描像は描けない。

平均場は強く相互作用している核子集団が生み出す秩序である。

これを self-consistent mean field という。

その基底状態は量子場の理論の真空に対応し、量子多体系を記述するための出発点を与える。

- * シェルモデルにおいてフェルミ面近くの1粒子モードの有効質量は近似的に核子の質量に近いが、これは実は、この1粒子モードが様々な振動モードの着物を着ているため。(Hartree-Fock で導かれる有効質量は核子の質量より小さい)
従って、フェルミ面から離れると有効質量は変化する。

- * 有限量子系で1粒子運動モードの描像を得るためには、対称性を破った平均場を導入する必要がある。

球形シェルモデルも並進対称性を破っている(有限量子系の特徴)。

より高次の対称性の破れが起こるにつれて1粒子運動の概念が拡張される。

核構造論の歴史はより良い1粒子運動モードの発見の歴史でもあった。

球対称性の破れ --- 変形シェルモデル

粒子数 (ゲージ対称性) の破れ --- 超伝導 BCS 理論の準粒子

時間反転対称性の破れ --- 回転座標系シェルモデル

「**集団現象が 1 粒子描像を作る** (創発する)」ことを端的に教えてくれたのが超伝導の BCS 理論であった。Bogoliubov 準粒子はクーパーペ어의凝縮という集団現象のもとでの 1 粒子励起モードである。基底状態におけるペ어의凝縮によって準粒子の励起エネルギーは大きくなる。(質量を獲得するメカニズム)

* 物理法則とは何か、その起源は? その意味は?

「それは集団的振る舞いの規則性であり.....(以下省略)」

(R.B. Laughlin, A Different Universe, Reinventing Physics from the Bottom

Down, Basic Books, 2005: 物理学の未来 日経 BP 社, 2006)

(ラフリン: 驚くべき集団効果によって分数電荷が生じること (分数量子ホール効果) を明らかにし 1998 年ノーベル賞)

* 対称性を破った平均場の基底状態は縮退している。

破られた対称性が連続対称性の場合、この縮退を解き、破られた対称性を回復する運動が (一般化された) **回転運動** である。有限量子系ではこの運動が実際に起こり、様々なタイプの回転スペクトルとして観測することが可能。

軸対称性の破れ --- Wobbling 回転バンド

破られた対称性が離散対称性の場合には**多重項**が出現する。

空間反転対称性の破れ --- パリティ 2 重項

カイラル対称性の破れ --- カイラル 2 重項

* 平均場は時間変化する。

この運動が振動モードとして観測される。平衡点近傍の小振幅振動は RPA 近似を用いて微視的に記述できる。この基準モードを量子化して**ボソンの励起モード**が得られる。

RPA 計算によってこのボソンの振動モードの微視的構造を分析できる。

有限量子系の平均場の固有関数はそれぞれが多様な個性をもっているため、きわめて多彩な振動自由度がある。振動は**低励起のソフトモード**と**高励起の巨大共鳴**に大別できる。

更に、空間的構造、スピン・アイソスピン自由度によって分類される。

低励起の振動モードは非調和性・非線形性が強く、**ボソン展開**のように RPA 近似を超えた取り扱いを必要とする。

* 現実の多くの核は平均場の**量子相転移**の近傍にあり、また、**変形共存現象**のように異なった平均場が共存/競合する例が広範に知られている。このような大振幅振動も「(一般化

された) 時間に依存する平均場近似」に基づいて記述できるであろう

- * **大振幅集団運動の理論**の基本的課題は 1) 適切な集団変数の抽出, 2) 集団運動に対する慣性質量の導出, 3) 集団ポテンシャル曲面の計算などに大別できる. 集団ポテンシャル曲面に関してはかなり信頼できる計算が出来るようになったが, そのダイナミクス, 特に**慣性質量の物理的解釈と微視的導出**は今後に残された大きな課題である. 摂動的クランキング公式を超える自己無撞着な理論の建設が急務である.

これまでの講義への Q&A 及び

静的および動的な平均場理論の最近の動向

Q 無限系と有限系で最も基本的な違いは何ですか

A いろいろありますが、とりわけ重要なポイントは

1. 有限量子系ではそれぞれの 1 粒子波動関数が多様な個性をもつため、極めて豊かな構造を生み出すことが出来るということです. 1 粒子スペクトルは**シェル構造**と呼ばれる秩序あるパターンをつくり、そのパターンは平均場の形が変化するにつれて変化します. 核子多体系の場合、3 次元空間構造に加えてスピンとアイソスピンの自由度が結合するため実に豊富な構造を形成することが可能で、私達は未だそのほんの一部しか探求していません.
2. 対称性の自発的破れに伴う**集団モード (一般化された回転運動) を離散的スペクトル (回転バンド) として実験で見ることが出来ます**. 回転スペクトルの性質を調べることによって系の (微視的) 内部構造に対する知見を得ることが出来ます. 1970 年代以降、高速回転する原子核から放出される γ 線を測定するテクニックが大いに進展したおかげで、核構造に対する描像は著しく豊かなものになりました.

Q 「準粒子」という言葉はいろいろな意味に使われているようですが

A 有効相互作用と平均場近似を用いて記述される「核子」は **Hard core** による強い短距離相関やテンソル力相関の着物を着た「準粒子」と言えます. 現象論的シェルモデルにおける「核子」も有効電荷や有効 g 因子を用いることからわかるように様々な振動モードの着物を着た「準粒子」と言えます. この意味の準粒子やフェルミ液体論での準粒子と区別したいときには **BCS 理論の準粒子は「Bogoliubov 準粒子」とも言われます**. このように、1 粒子描像には何層にもわたる階層構造があること、これらの階層は多体系の集団

効果によって創生すること、私たちが通常「粒子」と呼んでいるものはほとんどの場合、実は「集団モード」であることに注意することが大切です。このようなことは、よく知られた固体の中の「電子」はもとより、物理学のあらゆる分野に普遍的に見ることが出来ます。

Q ある教科書に「**Quadrupole force** のような長距離力が変形を引き起こす」と書かれていましたが、核力は短距離力ではないのでしょうか

A 確かに、「原子核を球形に保とうとする短距離の **pairing force** と変形させようとする長距離の **quadrupole force** の競争によって原子核の形が決まる」というのが伝統的な見方です (**P+Q force** モデル)。この場合の **quadrupole force** というのは、四重極変形を引き起こす長距離の相関を引き起こす機能をモデル化したものであり、短距離の有効相互作用によって生み出された集団効果を表現していると考えられます。

Q 対相関についてどこまで分かっている、現在何が問題になっているのでしょうか

A 以下にいくつか論点を列挙します

・変形核での対相関

球形ポテンシャルでのクーパーペアは $J=0$ ペアですが、変形ポテンシャルでは角運動量は良い量子数ではなく、 $J=0,2,4,..$ の重ね合わさったペアになっています。お互いに時間反転した1粒子状態にある核子の間に働く強い相関と定義しておけば、球形でも変形でも一般的に通用します。

変形核でも $J=0$ ペアとの思い込みが第1回講義の冒頭で紹介した誤解を生じさせます。

・対相関力+4重極相関力 (**P+Q**) モデルについて

球形シェルモデルの **valence shell** に多数の核子が存在する状況において、対相関と4重極変形相関が競合する状況をモデル化したもの、と理解されてきました。しかし、 $N=20$ の球形魔法数の破れの微視的メカニズムにも関係することですが、閉殻から、例えば、**2p2h** 励起が起こると、対相関力と4重極相関力が同時に活性化され、共に系のエネルギーを下げる方に働きます。つまり、通常は相反すると考えられている2つの相関の共同によって閉殻からの **2p2h** 励起が促進されます。2つの相関の多彩な絡み合いについては、励起 $0+$ 状態の構造との関連で **Chapter 6** で議論を深めたいと思います。第1回目の講義からいきなり **Sn** や **Cd** の励起変形バンドや $N=40$ 近傍の **mysterious $0+$ 状態** を取り上げたため面食らった方も多くとお聞きしていますが、励起 $0+$ 状態は集団ダイナミクスを敏感に反映するととても良い指針となることを強調したいのです。

・アイソスピン依存性

これまでに得られた対ギャップの実験データを $(N-Z)/A$ の関数としてプロットしてみると著しく変化していることがわかります。つまり、対ギャップはアイソスピンに強く依存しているようですが、このメカニズムは未だよく分かっていません。

・ペアーの空間構造

BCS 理論におけるクーパーペアーは原子核全体に広がっていますが、弱束縛系としての不安定核の表面付近では（有効相互作用の密度依存性のために）対相互作用が強まり、ペアーが空間的に局在する（ダイニュートロンを形成する）可能性が指摘され、超低温原子ガスでの BCS 状態からボーズ・アインシュタイン凝縮相への転移（BCS-BEC クロスオーバー）と類似した現象が起こるのでは、と期待されています。

局在したペアーを球形シェルモデルの基底で記述するためにはパリティの異なったシェルを混合させなければなりません。同じパリティをもった一つの主殻内でどんなに強い Pairing force を働かせても局在は起きません。

・連続状態での対相関

これまで束縛状態での対相関が研究されてきましたが、ドリップ線に近づくにつれてペアーは連続状態にも容易に励起するようになります。このような状況において何が起こるか、研究が始まったばかりです。これは Chapter 6 の主要テーマとなります。

Q 平均場近似、Hartree-Fock, BCS 等の理論の関係は？

A 原子核に対する Hartree-Fock(HF)計算が本格的にやられるようになったのは

「密度に依存する有効相互作用」が導入されてから、と言えます。続いて、HF で平均場を導いた後に BCS 理論を適用する HF-BCS 計算が行われるようになりました。最近では、HF 平均場と対凝縮に伴う平均場（対ポテンシャル）を統一的に決定する HF-Bogoliubov 方程式を実座標空間で解くことも可能になりました。

手短に歴史をまとめてみます。

1950 年代 Bruckner 理論

シェルモデルの基礎づけと核内有効相互作用(G 行列)の導出

1960 年代 超伝導の BCS 理論の核構造への適用

1970 年代 G 行列の局所密度近似による密度依存相互作用の導出と

密度依存 HF 計算の始まり(Negele, Vautherin-Brink, Sprung, ……)

時間依存 HF による重イオン反応のシミュレーションの始まり

(Koonin, Bonche, …)

1980 年代 実座標空間での HF-Bogoliubov 計算の始まり (Dobaczewski, Flocard, …)

1990 年代 対称性の制限の除去：超変形、超重核、不安定核など

極限状況の原子核への適用の始まり

2000年代 連続状態を取り入れた HFB への試み
より一般性のある密度汎関数の構築へ

Q Skyrme 型有効相互作用を用いた Hartree-Fock 計算(SHF)の特徴は何ですか。
有限レンジでなくデルタ関数型の有効相互作用を用いる理由を教えてください

A Skyrme force は G 行列を踏まえた密度依存有効相互作用ですが、デルタ関数型のお陰で局所ポテンシャルが導かれるので、シェルモデルで用いられている Woods-Saxon ポテンシャルなど現象論的ポテンシャルとの対応がつけ易く、簡明な物理的描像が得られるという利点があります。もっと深い理由は、エネルギーが局所密度 $\rho(\mathbf{r})$ の汎関数の形に書けるので、原子・分子系に対して広く用いられている密度汎関数法との対応をつけることが出来る点にあります。Skyrme-Hartree-Fock を密度汎関数法の一つとみなすことによって、よりよい密度汎関数を構築するという更なる拡張の道が開けます。また、密度汎関数は核力と核構造を結びつける結節点の役割を果たすと期待されています。更に、時間に依存する場合への拡張が容易で、時間変化する平均場の描像に基づく集団励起モードの微視的記述への基盤を与えます。

Q 密度汎関数法での $\rho(\mathbf{r})$ はどの座標系から見た密度ですか

A 実験室系で定義された密度ではなく intrinsic 系（固有座標系）で定義された密度と考えるべきでしょう。そのように考えなければ、変形核の 0+ 基底状態に対応する $\rho(\mathbf{r})$ は球対称になってしまいます。球形核でも（外場が無ければ）原子核は任意の位置をとれ、どの位置でもエネルギーは同じですから、無限の縮退があり、このため実験系での $\rho(\mathbf{r})$ は一様になってしまいます。

=====

新しい理論的課題と期待される新しい集団現象

不安定核の新しいシェル構造と新しい対相関のもとで、新しい集団励起モードが形成されるだろうか。弱束縛系で集団性(コヒーレンス)が生み出される微視的メカニズムを基礎に立ち戻って考えてみよう。

A=30-100 のN=Z核近傍で期待されるエキゾチック変形状態

* Ti44 から Sn100 に至る陽子ドリップ線近傍の N=Z 核では陽子と中性子の変形シェル効果がコヒーレントに効くため、いろいろなエキゾチック変形が出現すると期待できる。例えば、オブレート変形と正三角形 (**triangular**, Y33) 変形が重なった状態 (Se68)、正四面体 (**tetrahedral**, Y32) 変形した低励起状態 (Zr80) など。

* Zr80 は非常に面白い原子核で、「球形状態」が変形ポテンシャルの第3極小点となっている。この「球形状態」は正四面体(**tetrahedral**, Y32) 変形に対して不安定と予想される。このような不安定性が発生するのは N=Z=40 が正四面体変形シェル構造の魔法の数になっているからである。このシェル構造は4重縮退した1粒子準位をもつという面白い性質をもっている。基底状態が球形で変形状態が励起状態として現れる例は多い。しかし、変形状態が基底状態になったら、多くの場合、球形は極大点となるので、球形状態が励起状態として現れる可能性は少ないと考えられる。ところが、Zr80 では励起状態として「近似的球形」状態が現れると期待できる。正四面体変形のようなエキゾチック変形が平均場の平衡変形として実現するか、あるいは、大振幅の集団振動モードとして実現するか、興味深い。どちらの描像が実現するかは(変形させようとする)変形シェル効果と(それを好まない)対相関の競争によって決まると考えられる。オブレート変形とプロレート変形の共存に伴う多様な現象を低スピン状態から高スピン状態まで系統的に調べるのが可能なのも、この領域の特徴である。

* 最近、球形シェルモデルの2重閉殻である Ca40 において励起 0+状態の上に立つ超変形バンドが発見された。2重閉殻核といえども僅かの励起エネルギーを与えるだけで超変形状態が実現するという事実は非常に教訓的である。Ca40 周辺の多くの原子核でも超変形状態やハイパー変形状態の出現が期待できる。軸対称な形だけでなく、非軸対称な超変形状態やそれらの上に立つソフト8重極振動モードの出現も期待できる。N=Z=16 の S32 は超変形魔法数の2重閉殻核に相当するので、超変形状態の存在が予想されてきたが、未だ実験で見つかっていない。

中性子ドリップ線近傍核で新しい型の集団励起モードが形成されるか

* 中性子ドリップ線近傍の平均場と 1 粒子運動モードはこれまで経験したことのない全く新しい性質をもつと考えられる。そこでは核子ペアーの連続状態への励起を取り入れて、一般化された平均場をつくる必要がある。現在、空間座標表示の **Hartree-Fock-Bogoliubov** 理論に基づく分析によって、このような弱束縛系の表面付近での対相関が豊富な空間的構造をもつ可能性が盛んに議論されている。更に、連続状態応答関数や時間変化する平均場の方法に基づいて、弱束縛、陽子-中性子のアンバランス、中性子スキンなど平均場の新しい様相に伴って不安定核に特有な様々なソフトモードが出現する可能性が検討されつつある。安定核のソフトモードは対相関とシェル構造に極めて敏感であることは良く知られているが、不安定核での対相関もシェル構造も安定核とは著しく異なるので、そもそも不安定核で集団モードが形成される微視的メカニズムを基礎に立ち戻って分析する必要がある。

* 中性子ドリップ線近傍の原子核では核子ペアーの連続状態への励起が重要となり、通常の BCS 理論に基づく準粒子の描像は破綻する。しかし、HFB(Hartree-Fock-Bogoliubov)理論に基づいてより一般性のある準粒子描像を導入することができる。HFB 理論によれば、フェルミ面が連続状態に近くなると、準粒子波動関数の上成分は非局在、下成分は局在し、両者の積に依存するペアリング・ポテンシャルは通常のパテンシャルに比べて核表面の外側に広がる。

* 現在、HFB 理論に基づいて弱束縛系の表面付近で対相関が豊富な空間的構造をもつ可能性が盛んに議論されている。新潟グループは対相関の密度依存性に着目し、**Bose-Einstein Condensation (BEC)-BCS crossover** の観点から弱束縛系における di-neutron 相関の性質を議論している。更に、連続状態 QRPA に基づく微視的計算に基づいて、di-neutron の振動によるソフト双極振動モード(di-neutron dipole mode)の出現を予測している。

* HFB計算によればMg36-40, Si42, S44などは変形した弱束縛系と考えられる。変形した弱束縛系はどのような集団励起モードを生み出すだろうか。この問題を研究するためには連続状態への励起、対相関、平均場の変形の3要素を自己無撞着に取り入れたHFB計算とそこで得られた準粒子を基底とする準粒子RPA計算を遂行する必要がある。局在した束縛状態と非局在の連続状態を統一的に取り扱うという課題は（これまで別々に発展してきた）核構造論と核反応論を統一するという多体理論の新しいチャレンジである。対相関、変形、連続状態への励起の統一的記述にむけて、連続状態HFB理論に基づく連続状態QRPA法を構築する目標に関して近年 breakthroughがあった。

[M. Matsuo, Continuum Quasiparticle RPA, Nucl. Phys. A 696 (2001) 271]

[T. Nakatsukasa and K. Yabana, 吸収境界条件 TDHF, J. Chem. Phys. 114 (2001) 2550]

* 中性子ドリップ線近傍でどのような集団励起モードが出現するだろうか. この問いに答えを出すためには, 集団性 (コヒーレンス) が生み出される微視的メカニズムを基礎に立ち戻って分析する必要がある. 問題の核心は多くの準粒子(粒子-空孔)励起の間のコヒーレンス (集団性) を生み出すメカニズムを解明することである. 安定核では多数の準粒子(粒子-空孔)励起の波動関数が核表面領域で重なり合う結果, 引力相互作用が有効に働いて強いコヒーレンスを生み出した. 中性子ドリップ線近傍では弱束縛状態の波動関数が空間的に広がり, しかも, それぞれが個性をもつため, 同様なメカニズムが働くかどうか分からない. したがって, 低振動数の集団励起モードが形成されるかどうかは決して自明なことではない.

* 中性子ドリップ線近傍では, 集団性の弱い励起モードでも極めて大きい遷移強度をもつことがある. 典型例は**弱束縛準位から共鳴準位への1粒子励起**である. これらの波動関数が空間的に大きく広がっているため, 遷移強度は著しく大きくなる. このため, 安定核の場合と異なり, 遷移強度が大きいことだけを指標として「集団性が高い」と言えなくなる.

* 中性子ドリップ線に近づくにつれて対相関は弱くなり, ソフト振動モードの集団性も弱まるだろうか. あるいは, 逆に, 対相関が強まりソフト振動モードの集団性も強まるだろうか. 弱束縛中性子の波動関数は大きく広がっている所以他の中性子集団と空間的にデカップルする可能性がある. 一方, 他の中性子と共同して低密度領域での対相関を強める可能性もある (**anti-hallo効果**). どちらのシナリオが実現するかは, これらの相反するメカニズムの競争によって決まると考えられる. あるHFB+QRPA計算によれば, 中性子過剰Niアイソトープの第1励起 2+状態へのB(E2)がドリップ線に近づくにつれて著しく増大している. この計算結果は後者のシナリオを示唆している. このような分析をもっと系統的に遂行することが望まれる.

* 最近, 私達は **Box**境界条件で連続状態を離散化する近似の下で, 連続状態への励起, 対相関, 軸対称変形の3要素を取り入れたHFB+QRPA計算を遂行した. 変形した中性子過剰Mgアイソトープに対する計算結果によれば, 極めて集団性の高いK=0とK=2の低励起振動モードが系統的に出現すると期待できる. これらの集団励起モードは興味深い微視的構造を示している. 特に, K=0励起モードの集団性を生み出す微視的機構が興味深い.

* 4重極変形の増大につれてf7/2シェルから下がるプロレート準位とsdシェルから上がってくるオブレート準位が交差するあたりで, **核子ペアー分布の揺らぎ**が顕著になり, これに伴って基底状態から励起状態への4重極遷移強度が著しく増大する. ペアー密度の

揺らぎと4重極変形の揺らぎがカップルするメカニズムは次のように理解できる: オブレート準位からプロレート準位にペアが励起すると4重極変形を大きくしてエネルギーを下げる. 逆に, プロレート準位からオブレート準位にペアが励起すると4重極変形を小さくしてエネルギーを下げる. この振動を繰り返す(シーソー機構).

* 粒子-空孔型の遷移強度だけでなく, **4重極型の核子ペア**を付加する(2核子移行)遷移強度が極めて顕著に増大する. 対照的に, 単極子(monopole)型の核子ペア遷移強度はほとんどゼロである. このことは4重極型の空間構造をもつペア密度の揺らぎが起きていることを意味している. 変形した平均場のもとでの核子のクーパーペアは様々な角運動量の重ね合わせになっていることに注意. (高温超伝導ではd波のクーパーペアが本質的な役割を演じていることと比較すると面白い.) 山上の最近のHFB計算によると, 核表面でははっきりした**di-neutron**相関が見える. この計算結果は球形の場合だけでなく変形したドリップ線近傍核でもdi-neutron相関が重要であることを示唆している.

* **K=2 励起モード**にも同様な性質が見えるが, **K=0 励起モード**がほとんど中性子のペア型励起によって形成されているのと異なり, 陽子の粒子-空孔型励起と中性子のペア型励起モードのコヒーレントな重ね合わせになっている. **K=2 励起モードの流れパターン**を調べてみると面白いだろう. それには, 不安定核に対して電子散乱させる実験が必要となろうが..... 古典液滴と類似したパターンを示す場合でも, 流れの実体とコヒーレンスを生み出すメカニズムが本質的に異なる. [ちなみに, 朝永の集団運動理論で仮定された2次元速度場は**K=2**の γ 振動モードに対応する. ただし, (運動学はあてはまるが)ダイナミクスが異なる.] いま議論している新しい集団励起モードでは核子と核子ペアの量子力学的コヒーレンスが本質的な役割を演じている. この集団モードも一般化された平均場の時間的振動として記述できる.

まとめ

- * この連続講義では, 現代の核構造論において最も基礎的であるにもかかわらず, 教科書で十分には説明されていないと思われる概念を精選し, これらを一貫した視点から解説することによって, 理論物理の広い観点からみた**核構造物理学の意義**を論じることを試みた.
 - * これまで核構造論は主として束縛状態を扱ってきたが, 不安定核物理の時代には束縛状態と連続状態を統一的に記述する「**開かれた量子系(open quantum system)**としての核構造論」の構築が求められる.
 - * 不安定核は新しい核物理の世界を切り開くだけでなく, 有限量子系に対する多体問題の観点から理論物理として非常に価値ある**チャレンジングな問題の宝庫**である.
-