

中性子過剰不安定核に対する量子多体計算

吉田賢市

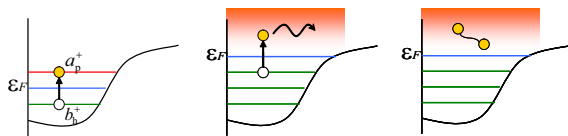
理化学研究所仁科加速器研究センター

Kenichi.Yoshida@riken.jp

概要: 静的及び動的平均場理論に基づき、大規模数値計算を遂行することによって、中性子数と陽子数のバランスが崩れたエキゾチック原子核におけるユニークな励起モードの発現とその微視的メカニズムを明らかにした。我々は特に、超流動性と原子核の変形、及び波動関数が原子核の存在領域の外側に大きく広がった空間構造をもつ弱束縛中性子の関与が、新しい集団モードの現れに重要な役割を果たしていることを示した。

1 はじめに

理研 RIBF をはじめとする新世代の加速器の稼働により、原子核の研究はベータ崩壊に対して安定な一次元の世界から、任意の中性子数と陽子数から成る二次元、更には励起エネルギーやスピンなどが加わった多次元の世界へと広がる。言わば、原子核の物性研究が可能となる。この状況に鑑み、不安定原子核の構造に関する理論研究も新たなフェーズへと移行している。原子核の量子構造は、外場に対する応答を通して調べることができ、自己無撞着平均場理論に基づいた RPA 法が標準的な理論として用いられる。RPA 法では、集団モードは粒子-空孔励起の重ね合わせとして記述される。しかし、中性子過剰核ではフェルミレベルが浅いため、低励起モードでさえ連続エネルギー状態への励起の効果が大きくなると考えられる。また、超流動性はフェルミ面付近にある中性子対の相関によって作られるため、連続状態も含めた対相関を考えなければいけない。更に、多くの不安定核は変形している可能性がある。したがって、これら 3 要素を取り込んだ RPA 法を構築することが求められる。



安定核 中性子ドリップ線核
図 1: 安定核と中性子ドリップ線核における低励起モードの作られ方の違い。

2 新しいRPA法の構築

変形している可能性のある様々な質量数領域にある原子核を系統的に、更に弱束縛状態や

共鳴状態も効果的に記述するためには、実空間で波動関数を記述することが適している。したがって、連続状態も含めた対相関を記述することのできる座標表示 Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 方程式を、FDM を用いた円筒座標系で解く。ここでは、有限の Box の中で連続スペクトルを離散化することによって、近似的に連続エネルギー状態を取り扱う。次に、HFB 方程式で得られた固有状態 (準粒子状態) を基底として、準粒子 RPA 方程式を解く。軸対称性の仮定、Box による離散化、RPA 方程式を解く際に用いる相互作用への近似を経て、世界で初めての RPA 計算が可能となった[1]。

3 計算の規模

軸対称性・反転対称性の仮定の下では、角運動量の対称軸成分及びパリティが良い量子数であるので、それぞれ独立に計算が可能となる。HFB 方程式は固有値問題に帰着され、2次元の lattice 上で波動関数が記述される。メッシュ幅を 0.6fm とし、20×20 程度の Box を用いるとき、離散化された HFB 方程式は 1600 次元となる。これを、2 (中性子・陽子) × 8 (角運動量の対称軸成分の数) × 2 (パリティ) = 32 回対角化することが 1 反復となる。収束解が得られるまで 100 ~ 200 回程度反復を繰り返す。全部で 25600 個の準粒子状態が得られるが、(準粒子エネルギーが 60MeV 以下の) 物理的に意味のある状態は 800 個程度である。

この約 800 個の準粒子を用い、二準粒子励起の組み合わせを考えて RPA 行列を構築する。例えば量子数が $K^\pi = 0^+$ のチャンネルを考えると、RPA 行列の次元は約 2 万次元となる。各行列要

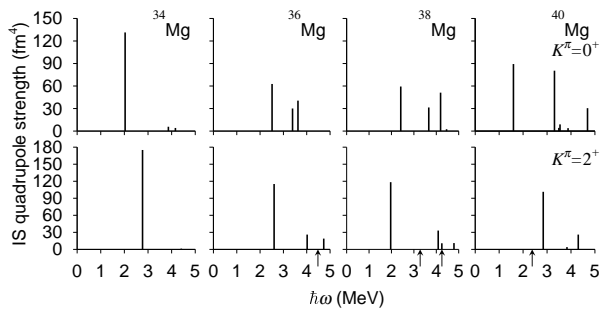


図 2: 中性子過剰領域からドリップ線近傍にある Mg 同位体における Isoscalar 四重極振動に対する応答関数。

素は、空間 2 次元の数値積分を行い得られる。波動関数及びその微分、RPA 行列の行列要素を計算・記憶するのに、およそ 25GB のメモリが必要となる。

4 計算結果

Skyrme 密度汎関数 (SkM*) を用いた 2D-HFB+QRPA 計算結果の例を図 2 に示す。 ^{34}Mg において、2MeV の辺りに目立った励起状態が得られた。これは、主に空間構造の異なる二つのレベル (プロレートレベルとオブレートレベル) にある準粒子ペアの重ね合わせによって作られており、ペア場の振動と中性子スキンの振動 (ベータ振動) の結合によって作られた励起モードである。このメカニズムは、他の質量数領域にある (プロレートレベルとオブレートレベルがフェルミ面付近において交差するというシェル構造をもった) 変形不安定核においても一般的に成立する[2]。

中性子ドリップ線近傍核における励起モードの特徴を、図 3 に示した ^{40}Mg における低励起 $K^\pi = 0^+$ モードの遷移密度分布から見て取ることができる。赤の実線は、(a)陽子及び(b)中性子の密度が中心部の半分となる点をつなげたものであり、原子核の表面に対応する。安定核においては、陽子・中性子ともに原子核の表面付近で密度分布が振動する。図 3 においては、陽子の励起は表面付近に集中している。一方、中性子の励起は、表面付近のみならず原子核の外側の領域でも大きな寄与をもつ。これは、フェルミ面付近にある軌道の波動関数の広がりを反

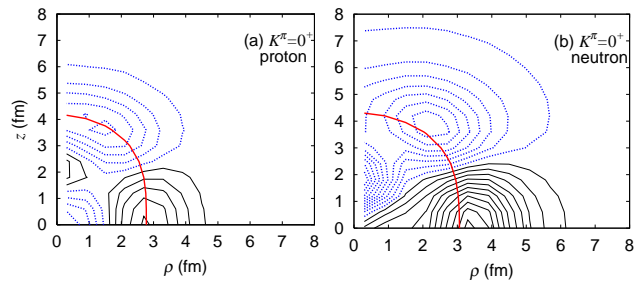


図 3: ^{40}Mg におけるソフト 0^+ モードの遷移密度。

映したものである。更に、この波動関数の広がりのため、遷移強度が大きくなる。

5 まとめと展望

変形した中性子過剰核における集団モードを微視的に記述するための手法を世界に先駆けて開発し、ソフト $K^\pi = 0^+$ モードなど不安定核における低励起集団モードの発現可能性とそのメカニズムを明らかにした。しかし、現在の QRPA 計算においては、小さな Box サイズの使用、二準粒子励起に対するエネルギーの制限と相互作用を一部無視する近似を行っている。Skyrme 密度汎関数に基づいた完全自己無撞着計算を遂行するためには、並列化による行列要素の計算、及び大次元 (数 10 万から 100 万次元程度の) 非エルミート RPA 行列を対角化する新しいアルゴリズムの開発が必要となる。

6 謝辞

数値計算は、京都大学基礎物理学研究所及び大阪大学核物理研究センターのスーパーコンピュータ NEC SX-8 を用いて行われた。

参考文献

- [1] K. Yoshida, M. Yamagami and K. Matsuyanagi, "Pairing and continuum effects on low-frequency quadrupole vibrations in deformed Mg isotopes close to the neutron drip line" Nucl. Phys. A 779, 99, 2006
- [2] K. Yoshida and M. Yamagami, "Low-frequency $K^\pi=0^+$ modes in deformed neutron-rich nuclei: Pairing- and β -vibrational modes of neutrons", Phys. Rev. C 77, 044312, 2008