

時間依存平均場理論に基づく原子核大振幅集団ダイナミクスの研究

日野原 伸生¹、中務、孝²、松尾 正之³、松柳 研一²

京都大学基礎物理学研究所¹、理化学研究所仁科加速器研究センター²、新潟大学理学部³

hinohara@yukawa.kyoto-u.ac.jp

概要: 多くの陽子、中性子から構成される原子核は低励起状態において様々な集団ダイナミクスを示す。我々は時間依存平均場理論に基づいた大振幅集団運動理論である自己無撞着集団座標法により、系の集団運動を記述する本質的な自由度を求め、集団ダイナミクスに関与する位相空間を多体系全体の張る広大な位相空間から抜き出し、原子核の低励起状態の性質を記述する手法を確立した。オブレート・プロレート変形共存核の⁶⁸Seや⁷²Krでの計算例を紹介する。

1 はじめに

原子核の基底状態の記述に平均場近似が広く用いられているが、平均場近似を超えた多体相関が本質的に重要となる現象も多く存在する。たとえば一つの同位体において、複数の平均場解が存在する場合がある。これらの平均場解は異なった変形状態に対応することから変形共存現象と呼ばれ、様々な質量領域の原子核でみられる。変形共存核ではそれぞれの変形状態が基底状態および励起状態において実現することが期待できるが、実際のエネルギー固有状態ではこれらの変形の混合状態が実現する。それぞれの平均場は原子核全体の変形ポテンシャルエネルギーでの極小点となっているが、多体系のトンネル効果によって互いに相互作用するためである。このような非線形集団ダイナミクスの理解のためにはどのような集団的自由度を通じて変形の混合が起こるのか、また変形の混合の強さがどの程度であるかを、原子核の構成要素である陽子、中性子の自由度から出発して明らかにする必要がある。

2 集団的自由度の抜き出し

原子核は多くの陽子、中性子から構成されている量子多体系であるため、殻模型で低励起状態を記述するためには莫大な数の基底を用意する必要がある。しかしながら、集団運動によって理解が可能な低励起状態は少数の集団的自由度によって本質的な記述が可能である。このような集団的自由度を求める微視的理論として、時間依存平均場理論に基づいた自己無撞着集団座標法(SCC法)が提唱されていた[1]。これまでに様々な集団運動の記述で成功を収めたものの、従来の解法では一つの平衡平均場を仮定するため、変形共存現象のよ

うな複数の平均場が関与する大振幅の集団ダイナミクスの記述には困難があった。近年我々はこれを変形共存現象のような複数の平均場が共存する系での大振幅集団運動にも応用可能である断熱的SCC法(ASCC法)を開発した[2]。ASCC法を用いることで、集団的自由度を抜き出すのみならず、集団運動のHamiltonianが構築できるため、実際に量子状態や物理量を求めることが可能である。ASCC法の基礎方程式は多次元位相空間の中から1組あるいは少数組の正準変数で記述される集団部分空間上にある点を局所的に求める方程式および、その点における集団的自由度の方向を定める方程式からなり、それぞれは非平衡変形状態におけるHartree-Fock-Bogoliubov方程式およびRandom phase approximation(RPA)方程式を拡張したものに対応する。集団部分空間の一点を求める際にこれらの二つの方程式の自己無撞着解を求める必要があり、例えば集団部分空間を約 10^3 点で離散化し、自己無撞着解の収束のためにそれぞれ10回の反復計算が必要であれば、一つの原子核に対して約 10^4 回の自己無撞着な平均場計算とRPA計算が必要となる。特に、2次元の集団部分空間を局所的に決定してゆくためには複雑な自己無撞着性が要求され、次世代スーパーコンピュータの利用が不可欠となる。

3 オブレート・プロレート変形共存への適用

⁶⁸Se、⁷²Krはオブレート・プロレートの二つの変形状態の共存核であり、二つの変形状態がエネルギー的に近くに存在していることが実験、理論双方から予想されている。我々はASCC法を用いて⁶⁸Seおよび⁷²Krの1組の集団正準変数で記述され

る1次元の集団部分空間を抜き出し、オブレート、プロレートの変形状態が主に非軸対称変形の自由度を通じて混ざること示した(図1)[3]。また、集団Hamiltonianを量子化することで、低励起エネルギーや電磁遷移確率を計算し、実験と対応する状態を計算することが出来た(図2)。個々の量子状態の波動関数の分析によると、基底状態では二つの変形状態は非軸対称の自由度を通じて強く混ざり合っており、状態の角運動量量子数が増えるにつれて、この変形の混合は小さくなるという、系の集団回転運動と変形混合の競合が起こることを明らかにした。

4 まとめ

ASCC法という大振幅集団運動の微視的理論を用いることによって、フェルミオンの量子多体系である原子核に対して、仮定をおくことなくその集団運動状態を記述する集団部分空間を多体位相空間の中から求めることが可能となった。原子核への初めての適用例として、 ^{68}Se , ^{72}Kr でのオブレート・プロレート変形共存ダイナミクスの記述を行い、二つの平衡変形状態をつなぐ1次元の集団部分空間を求めた。また低励起状態のエネルギースペクトルや電磁遷移確率も計算し、実験との対応を得ることができた。

ASCC法は変形共存のみならず核分裂現象や変形相転移など様々な大振幅の集団ダイナミクスに広く適用可能であると考えられる。特に1次元の集団部分空間については核分裂現象の微視的記述が最終的な目標であり、将来的には原子力分野への貢献を考えている。また、今後多次元の集団部分空間が議論できるようになれば、複数の自由度が絡み合う量子相転移のダイナミクスを微視的理論により統一的に扱うことが可能となり、原子核に限らず広く量子多体系の性質が解明できるであろう。

参考文献

- [1] T. Marumori, T. Maskawa, F. Sakata and A. Kuriyama, 「Self-Consistent Collective Coordinate Method for the Large-Amplitude Nuclear Collective Motion」, Progress of Theoretical Physics, Vol. 64, No. 4, 1294 (1980).
- [2] M. Matsuo, T. Nakatsukasa and K. Matsuyanagi, 「Adiabatic Selfconsistent

Collective Coordinate Method for Large Amplitude Collective Motion in Nuclei with Pairing Correlations」, Progress of Theoretical Physics, Vol. 103 No.5 959, (2000).

- [3] N. Hinohara, T. Nakatsukasa, M. Matsuo and K. Matsuyanagi, 「Microscopic Derivation of Collective Hamiltonian by Means of the Adiabatic Self-Consistent Collective Coordinate Method」, Progress of Theoretical Physics, Vol. 119, No. 1 59, (2008).

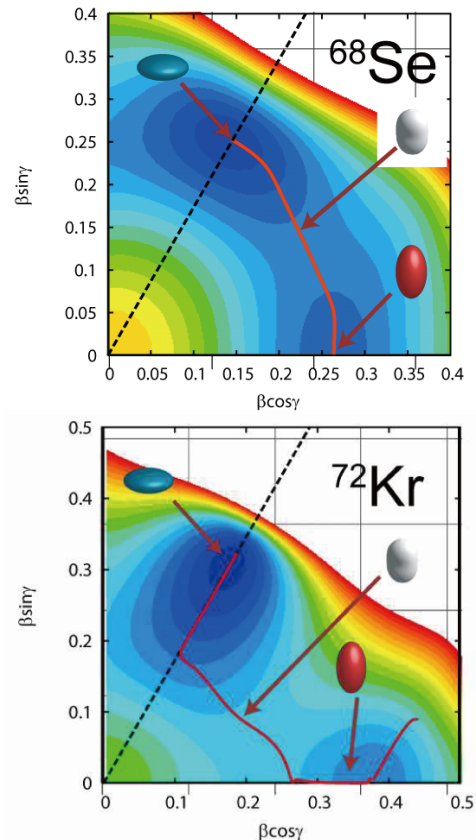


図1: 四重極変形ポテンシャルエネルギー面に射影した1次元集団部分空間(赤線)。

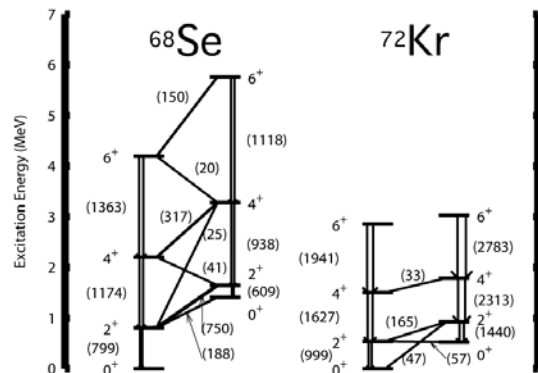


図2: ASCC法で求められた低励起状態のエネルギースペクトルおよびE2遷移確率