

核分裂における非平衡ダイナミクス ——非平衡グリーン関数法による解析

鷗沢浩太郎 (日本原子力研究開発機構 uzawa.kotaro@jaea.go.jp)

萩野浩一 (京都大学大学院理学研究科 hagino.kouichi.5m@kyoto-u.ac.jp)

量子多体系では、構成粒子が波動関数の位相を揃えコヒーレントに運動することで集団運動が生じる。原子核も陽子と中性子から構成される有限量子多体系であり、変形や回転、振動などの集団運動を示す。本稿では集団運動のうち最も劇的な例である**核分裂**について紹介する。この現象は重い原子核が大きく変形して2つに分かれるものであるが、ここでは、原子核が引き伸ばされるように変形するとともに中心部にくびれが形成され、最終的に2つの原子核へと分裂する。変形のパターンは一通りではなく、その違いにより分裂片の質量や形状、エネルギーが異なる多様な分裂モードが観測される。

核分裂は重い元素の主要崩壊モードであり、ニホニウムなどの超重元素を合成するためにはその性質を正確に理解する必要がある。また **r 過程元素合成** では中性子過剰核の核分裂が繰り返し起こり、元素収率に大きく寄与する。そのため、r 過程核における核分裂量を精度よく理論予測する手法の確立が求められている。

核分裂を記述する最も基本的な理論モデルは、1939年にボーア (N. Bohr) とホイラー (J. A. Wheeler) により提唱された。このモデルでは原子核を電荷を持った古典的な液滴として扱い、液滴の変形に伴う表面張力エネルギーとクーロンエネルギーの変化を見積もる。それにより、核分裂に対するポテンシャル障壁や分裂の条件が導かれる。より微視的な立場に立つと、核分裂は200–300個の核子が核力とクーロン力により互いに相互作用しながら集団的に変形する複雑な多体問題である。その過程では、変形に対応する集団運動自由度と一粒子運動間の複雑な相互作用が発生し、量子多体トンネル過程や集団運動エネルギーの散逸といった現象が現れる。核子の自由度に基

づいてこれらを包括的に取り扱う核分裂理論は、いまだ完成しておらず、原子核物理における長年の課題となっている。

その現状に一石を投じたのが、**非平衡グリーン関数法**の核分裂への適用である。非平衡グリーン関数法は、ナノデバイス中の電子輸送シミュレーションに幅広く使用されている手法である。核分裂過程と固体中の電子輸送は一見異なる現象に見えるが、どちらも中間状態を経由する量子散乱過程として記述できる。中間状態の寄与は、模型空間の分割と射影を行うフェッシュバツハ射影法を用いることにより、有効的に取り入れることが可能である。それにより、ナノデバイス中の電子輸送に適用された表式を用いて、核分裂反応における諸量を導出することが可能となる。

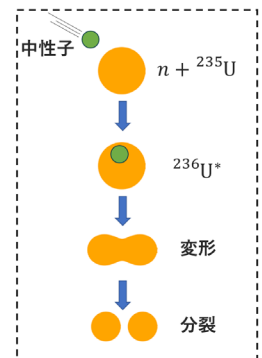
非平衡グリーン関数法を用いた核分裂研究により、我々はこれまでに以下の成果を得た。①**遷移状態理論**では遷移状態を超えた確率流束は始状態に戻らないという仮定を置くが、非平衡グリーン関数法を用いた微視的計算により、この過程が再現される条件を明らかにした。②非平衡グリーン関数法から得られる核分裂確率が**ポーター–トーマス分布**に従うこと、およびその自由度パラメータが実験データと同程度の量となることを明らかにした。さらに、自由度の起源が核分裂に寄与する多体固有状態に由来することを示した。

以上のように、非平衡グリーン関数法の導入により、核分裂バリア近傍におけるダイナミクスや、核分裂を支配する自由度に対する理解が大きく進展した。これらの研究は固体中の電子輸送過程や遷移状態理論を用いた化学反応過程と類似性を持つため、核分裂理論の発展に寄与するだけでなく、学際的な発展を促す可能性を有している。

用語解説

核分裂：

原子核が大きく変形し最終的に2つの分裂片に分かれるプロセス。摂動論や線形応答理論を適用できない大振幅集団運動であり、集団運動と一粒子運動の間にエネルギー散逸を伴う非平衡過程でもある。



r 過程元素合成：

中性子過剰な天体環境において、原子核が中性子を急速に次々と吸収することにより進行する元素合成過程。r は rapid (急速) を表す。

非平衡グリーン関数法：

外場下にある非平衡な系において、非平衡グリーン関数に基づきカレントや輸送係数を導く手法。ナノデバイスの電気伝導シミュレーションに広く使用される。

遷移状態理論：

ポテンシャル障壁によって区別された2つの状態間の遷移確率を決定する理論。化学反応で広く使用されるが、1939年に N. Bohr と J. A. Wheeler により核分裂現象に適用された。

ポーター–トーマス分布：

ランダム性の強い量子系では、崩壊幅の分布がカイ二乗分布に従い、この分布はポーター–トーマス分布とも呼ばれる。カイ二乗分布は自由度と呼ばれるパラメータを持ち、自由度は崩壊チャネルの数を反映する。