

受付 ID	15a-46
分野	原子核

GPU 利用によるフェルミ多体系の超流動ダイナミクス

Superfluid dynamics in many-fermion systems using GPU

中務 孝

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

本プロジェクトでは、超流動性を考慮に入れた時間依存密度汎関数法 (TDSLDA) により、様々な量子多体系に発現するダイナミクスを解き明かすことを目標としている。平成 27 年度をスタートとして、冷却原子気体における量子渦のダイナミクス、中性子星クラストにおける量子渦のピン留め機構、超流動原子核の反応機構、重い原子核の核分裂ダイナミクス等を対象とした研究を実施する。これらの研究を通じ、最新の GPU 計算機を最大限に活用できる、汎用性の高い TDSLDA 計算コードを開発することも、本プロジェクトの目標の一つである。

2. 研究成果の内容

平成 27 年度には、主に以下の 2 つの研究を実施した：

(1) 渦・原子核間相互作用の TDSLDA 計算

グリッチと呼ばれる、中性子星の回転速度が急に上昇する現象は、天体核物理学の未解決問題の一つである。グリッチは、中性子星クラスト内部の原子核にピン留めされていた大量の超流動中性子の渦が雪崩的にピン留めから解放されることにより生じるという説が有力であるが、そのアイデアは 40 年以上も前に提案されたものでありながら、グリッチを理解するための鍵となる、渦と原子核の間の相互作用すら明らかになっていない。そこで、グリッチの起源を明らかにするために、渦・原子核間相互作用の TDSLDA 計算を行った。計算によって得られたダイナミクスの情報から渦が原子核に及ぼす力を抜き出す方法を開発し、実際の中性子星クラストに対応する中性子密度に対しての計算を実行した。その結果、計算を行った 2 つの密度領域 (0.014fm^{-3} , 0.031fm^{-3}) において、渦・原子核間相互作用が斥力的であるということを明らかにした。また、私たちの計算は、既存の研究では考慮されてこなかった、渦の湾曲や原子核の変形の自由度が、相互作用に影響を与えることを示唆している。今回の研究によって得られた斥力的な相互作用は、ある密度領域では渦のピン留めが起こらないことを示唆しており、中性子星グリッチを理解する上で重要な情報を与えると考えられる。現在、これらの成果を論文にまとめ、投稿を準備中。

(2) プルトニウム原子核の変形による誘導核分裂の TDSLDA 計算

核分裂過程を微視的に記述することは、原子核物理学の重要課題の一つである。これまで、原子核の変形度に対するポテンシャルエネルギー面上を運動するとしたモデルの記述が主流であり、核分裂過程のダイナミクスに対する知見は限られたものに留まっている。近年、時間依存密度汎関数法を用いた、誘導核分裂過程の研究が行われるようになりつつある。原子核中の核子は超流動状態にあることが知られており、より現実的な核分裂の道筋を明らかにするためには、超流動性を考慮に入れたダイナミクスの計算が必須である。そこで、プルトニウム原子核に対する誘導核分裂過程の TDSLDA 計算を行いました。長く伸長した原子核を用意するための拘束条件に加え、原子核の励起エネルギーを制御する外場を導入し、核分裂ダイナミクスの励起エネルギー依存性を調べている。これまでに行った計算は、複雑な励起エネルギー依存性を示しており、次年度に行うより詳細な計算により、内在する物理を明らかにすることができると期待している。

3. 学際共同利用として実施した意義

本計算では、3次元実空間で量子多体系のダイナミクスの TDSLDA 計算を行っている。この方法は、超流動性を考慮に入れない計算に比べ、約 1000 倍以上の計算コストが必要となる（格子点数 64^3 の場合）。この方法を用いた計算を、現実的な計算時間で実施するためには、多数の GPU を有するスーパーコンピュータの利用が不可欠となっている。また、本学際共同利用により、筑波大学とワルシャワ工科大学の間の、新たな共同研究が実現した。

4. 今後の展望

これまでに行った研究の中で、超流動中性子の海に浸された原子核の有効質量を抜き出す方法を開発しています。この方法を用い、中性子星クラストの様々な密度領域における原子核の有効質量を計算する予定である。また、超流動原子核の衝突計算コードの開発を行った。既に、ワルシャワ工科大学の GPU クラスタで計算を進めており、系統的な計算を HA-PACS により行うことを想定している。これらの研究により、これまでの研究の質を変える、新しい知見が得られると考えている。

5. 成果発表

(1) 学術論文 0 件

(2) 学会発表 7 件（ポスター発表 1 件、口頭発表 6 件（内 5 件は招待講演））

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース*
HA-PACS	○	1977
HA-PACS/TCA		
COMA		
※配分リソースについては 32node 換算時間をご記入ください。		