



中性子星表面近傍の非一様構造と核反応

素粒子、原子核、宇宙物理学
およびその関連分野

研究者所属・職名： 計算科学研究センター・教授

ふりがな なかつかさ たかし

氏名：中務 孝

主な採択課題：

- [基盤研究\(B\)「密度汎関数超並列ソルバの開発と原子核から中性子星までの統一的高精度計算」\(2018-2021\)](#)
- [新学術領域研究\(研究領域提案型\)「量子クラスター出現機構と低エネルギー核反応の非経験的記述」\(2019-2020\)](#)
- [基盤研究\(B\)「原子核の低エネルギー集団励起と核融合・核分裂機構の解明」\(2013-2016\)](#)

分野：原子核物理学、天体核物理学

キーワード：中性子星、原子核、超流動、核反応、密度汎関数理論

課題

●なぜこの研究をおこなったのか？（研究の背景・目的）

中性子星は規則的に電波を発するパルサーとして発見されたが、近年になってX線やガンマ線観測が進展し、その極限的様相が明らかになり、更にニュートリノや重力波観測からの新たな情報も期待されている。中性子星は1つの巨大な原子核と考えられる超高密度天体であるが、表面付近には、広がった自由中性子と周期的に配置された原子核が共存する非一様核物質相が存在すると考えられている。この表面近傍の構造とそこで起こる様々な核反応の研究は、中性子星の冷却・加熱過程、回転周期の急激な変化（グリッチ）など、観測可能な現象を理解する上で必須な情報を与える。

●研究するにあたっての苦労や工夫（研究の手法）

核子多体系の非一様構造の解析は、これまで準古典近似計算による研究がほとんどであり、有限温度での3次元構造や核子超流動状態を解明するための量子論的記述は実現できなかった。これに対して、計算のネックとなる大次元行列対角化（固有値・固有ベクトル）を行わず、代数方程式と複素積分を組み合わせた方法を開発した。この方法は高い並列効率を有しており、スパコンによる大規模並列数値計算に適した理論手法である。

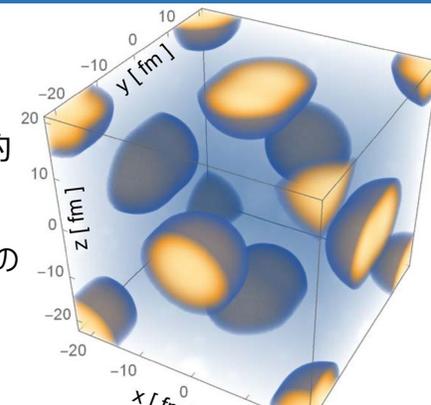


図1 計算された中性子星内殻の構造例。この中に陽子136個・中性子がおよそ4000個存在。



中性子星表面近傍の非一様構造と核反応

素粒子、原子核、宇宙物理学
およびその関連分野

研究成果

●どんな成果がでたか？どんな発見があったか？

1) 量子核反応の非経験的・微視的記述

中性子星表面近傍では様々な核反応が起きていると考えられている。表面に物質の降着が続くと、内部に押し込まれた物質は密度が上昇し、電子を捕獲して陽子を中性子に変換、さらに深部では核融合反応が熱源となっていると予想される。この核融合は量子トンネル効果を通して実現すると考えられるが、陽子・中性子多体系である原子核同士がどんな変化を経て融合に至るのか、その微視的過程を明らかにした。例として図2には、量子トンネル確率の計算に必要な、反応の慣性質量の振る舞いを図示した。

2) 中性子星内殻の量子力学的記述

超大規模並列計算に適用可能な理論手法・コード開発を行い、量子力学に基づく3次元数値シミュレーションによって、中性子星内殻に出現する非一様構造を予言した。有限温度・有限密度における3次元構造が計算でき、温度・密度変化に対する構造の変化が解析可能となった。密度の上昇に伴い、超流動中性子の海の中に変形した原子核が出現することが予言され、図1では、温度 $k_B T = 200$ keVの面心立法構造において、中性子を目一杯まとったセレンの原子核が変形した状態が現れた。さらに密度を上げると、いくつかのエキゾチックな構造を経て、パスタ相と呼ばれる構造に転移する様子が示唆された。

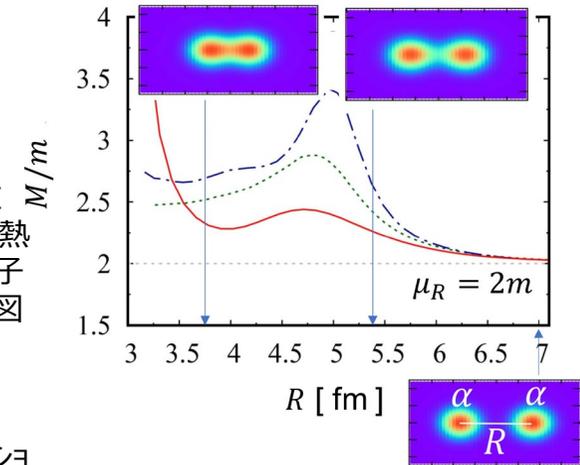


図2 ヘリウム原子核 (α 粒子)の融合反応経路と、核間距離による反応の慣性質量 M の変化 (赤線:陽子の質量 m を単位として)。

今後の展望

●今後の展望・期待される効果

有限温度・有限密度における3次元非一様中性子星物質に対する量子力学的計算が可能になり、今後、外殻・内殻・芯にいたる構造変化の新たな様相が明らかになると期待される。また、熱伝導と加熱・冷却過程、電気伝導と磁場、超流動中性子の渦糸ダイナミクスなどの研究が進み、中性子星の観測データとの比較から未知の内部構造が見えてくる。3次元量子力学計算のメリットを生かした中性子輸送の性質解明も期待され、グリッチの起源にも迫る成果が期待できる。

図3 中性子星の構造 (予想図)
Courtesy of D. Page

