

## 天体での核反応率の微視的計算

### Full-Microscopic Calculation of Nuclear Reaction Rate for Astrophysical Phenomena

谷口 億宇  
福山大学工学部

#### 1. 研究目的

核反応の理解は、元素合成や恒星進化、爆発的天体現象のエネルギー生成機構の解明などに不可欠である。特に天体環境では低エネルギー核反応が重要であり、その評価には複合核状態のみならず分子共鳴状態の効果を取り入れることが求められる。しかし、これらの寄与を微視的立場から記述することは計算コストから容易ではなく、多くの研究では近似的取り扱いにとどまってきた。

本研究の目的は、微視的モデルに基づく数値シミュレーションによって、天体現象にとって重要な核反応率を高精度で評価することである。特に、変形や分子共鳴状態および複合核状態が核反応機構に果たす役割を明らかにする。

#### 2. 研究成果の内容

これまで CPU のみで実行していた反対称化分子動力学法による微視的計算プログラムを GPU 化した。これにより、実行時間が大幅に短縮され、従来は計算負荷の大きさから困難であった中重核への適用が可能となった。

GPU 化の成果として、質量数およそ 60 領域までの原子核について、変形に関わる性質を系統的に計算することが可能となった。これにより、天体核反応に関連する中重核領域において、原子核の形状変化やその安定性を微視的に調べられるようになった。

具体的には、陽子数および中性子数がそれぞれ 20 から 28 までの偶偶核を対象として、四重極変形および三軸変形を表す  $(\beta, \gamma)$  エネルギー面を計算した。これらの計算により、変形に対する殻構造などの微視的な効果が明らかになり、将来的に核融合反応や  $\alpha$  捕獲反応を扱うための基礎データが得られた。

これらの成果は、分子共鳴状態や複合核状態の寄与を議論する上でも重要であり、天体核反応の反応率評価に向けた基盤となる。

#### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究で実施した計算は、原子核の多自由度をあらわに取り扱う必要があり、研究室レベルの計算資源では実行が困難である。特に、原子核の変形自由度を含むエネルギー面の系統的計算や、GPUを用いた大規模並列計算には、高性能計算環境が不可欠である。

筑波大学計算科学研究センターの計算機資源を利用することで、GPU化した計算コードの開発および実行を行い、従来では実施困難だった規模の計算を可能とした。学際共同利用プログラムは、本研究の推進に決定的な役割を果たした。

#### 4. 今後の展望

本年度に開発したGPU対応の計算プログラムを基に、今後は天体核反応の反応率の計算へと研究を展開する計画である。特に、変形と分子共鳴状態の寄与を取り入れた微視的計算を進めることで、従来手法では不確定性の大きかった低エネルギー反応の記述精度向上が期待される。

得られた反応率は、元素合成やIa型超新星、X線バーストといった爆発的天体現象のシミュレーションに活用され、原子核物理と天体物理の両分野に貢献することが期待される。

#### 5. 成果発表

##### (1) 学会発表

###### ① 国際会議・研究会

1. Y. Taniguchi, “Microscopic Description of Low-Energy  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  Fusion Reaction”, Italy-Japan Symposium on Joint Activities in Fundamental Physics, Enna, Italy, March 9–12, 2026.
2. Y. Taniguchi, “Impacts of molecular resonances on the low-energy  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  fusion reaction”, The 2nd IReNA-Ukakuren Joint Workshop “Advancing Nuclear Astrophysics and Beyond”, Osaka, Japan, July 14–18, 2025.
3. Y. Taniguchi, “Impacts of cluster resonances on astronuclear reactions”, The 29th International Nuclear Physics Conference, Daejeon, Korea, May 25–30, 2025.

###### ② 国内会議・研究会

1. 谷口億宇, “Oblate-prolate shape-mixing and E0 transition in  $^{28}\text{Si}$ ”, 第10回関西核多体セミナー, 大阪公立大学, 2025年12月3-4日.
2. 谷口億宇, 木村真明, “ $^{28}\text{Si}$ の形状混合”, 日本物理学会年次大会, 広島大学, 2025年9月16-19日.

筑波大学計算科学研究センター 2025 年度学際共同プログラム利用報告書

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	2800		
Miyabi-G	○	9450		
Miyabi-C	○	1800		
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				