

原子核の閾値付近の共鳴状態

Nuclear resonances close to the threshold energies

谷口 億宇
香川高等専門学校

1. 研究目的

原子核は、励起に伴って複数の部分系に分かれた構造を持つクラスター状態へと構造変化を起こす。クラスター状態は、核融合や捕獲反応などの反応率に大きな影響を及ぼし、様々な天体現象での元素合成や星の進化に決定的な役割を果たす。重い星では、ヘリウム燃焼過程の後に、炭素燃焼過程が始まる。また、炭素燃焼過程は Ia 型超新星爆発や X 線スーパーバーストを起こす鍵でもあるとも考えられている。炭素燃焼過程の発端となるのは $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}\text{Mg}^*$ 反応であるが、恒星の環境下での反応率を実験で測定することは技術的に難しく、理論的研究が求められている。

本プロジェクトの目的は、 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ の低エネルギー共鳴を、反対称化分子動力学法を用いて調べ、その共鳴パラメータや α 崩壊と p 崩壊の分岐比を求めることで、超低エネルギーでの核融合反応率についての知見を得ることである。さらに、重い元素の合成に重要である中性子過剰核の安定性や形などの基本的性質を明らかにすることも目的とする。

2. 研究成果の内容

(1) $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 共鳴状態

天体現象で重要である低エネルギー $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応は、近年、結論の異なる研究結果が発表されるなど、各地で精力的に研究が進められている。低エネルギー領域では核融合確率が従来考えられていたよりも顕著に減退するという理論予想が示された一方で、顕著に増大するという逆の実験結果も示されている。ただし、その実験は間接反応を用いており、解析方法に議論が起きている。解析の不定性の少ない $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 直接反応による実験は技術的に難しいため、理論計算による評価が必要である。

低エネルギー $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応は、理論計算もこれまで進んでこなかった。 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ が核融合して ^{24}Mg を作ると、その後に $p+^{23}\text{Na}$ や $\alpha+^{20}\text{Ne}$ に分裂するという、多体組み換え反応が起きるためである。理論的に多体組み換え反応を扱うことは難しく、これまでなされてこなかった。

本プロジェクトでは、大規模計算により、微視的理論で $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ や $\alpha+^{20}\text{Ne}$ などをあらわに扱い、多体の組み換えが生じる $p+^{23}\text{Na}$ や $\alpha+^{20}\text{Ne}$ に分裂する効果を取り入れた上で $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合確率を計算した。そして、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 閾値近傍に共鳴状態が存在し、それらが核融合確率を増大させることを示した。そのため、一部が予想していた低エネルギー領

域での核融合確率の顕著な減退は見られないことが分かった。

(2) 中性子過剰核

中性子数 28 の中性子過剰核 ^{40}Mg , ^{42}Si , ^{44}S の構造を調べた。中性子数 28 は魔法数と呼ばれ、安定な球形構造を取りやすいとされている。しかし、 ^{40}Mg , ^{42}Si , ^{44}S は魔法数 28 が破れ、基底状態近傍に複数現れる変形共存現象が起きると期待されている。

大規模計算により、 ^{40}Mg , ^{42}Si , ^{44}S では変形共存現象が起き、陽子数の違いにより混合あるいは共存する形状やその混合割合が異なることが分かった。さらに、それら共存や混合の様相の違いはモノポール遷移強度に反映され、実験的に検証可能であることを示した。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

本研究は、エネルギー最適化計算や多重積分など、大きな計算コストが必要である。この研究の遂行は、学際共同利用による高性能な大規模計算機を使用なしには成しえなかった。

4. 今後の展望

天体における核融合反応について、天体シミュレーションの基礎となる温度の関数である核融合反応率を求め、それを天体シミュレーションに応用する。それにより、原子核構造の元素合成や星の進化に対する役割を明らかにする。

中性子過剰核について、モノポール遷移強度以外にも形状を評価できる物理量を明らかにし、より詳細な実験的検証を可能とする。また、より大きな魔法数 50 が破れた中性子過剰核の記述のため、大きい粒子数の系に適用できる理論モデルを開発する。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- “ $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion S*-factor from a full-microscopic nuclear model”, Y. Taniguchi, M. Kimura, *Physics Letters B* **823**, 136790 (2021). [10.1016/j.physletb.2021.136790](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2021.136790)
- “Triaxial deformation and the disappearance of the N=28 shell gap”, Y. Suzuki, M. Kimura, *Phys. Rev. C* **104**, 024327 (2021). [10.1103/PhysRevC.104.024327](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.104.024327)

(2) 学会発表

- “ $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ Fusion S-factor from a Full-microscopic Nuclear Model”, Y. Taniguchi, Nuclear burning in massive stars: towards the formation of binary black holes, 7/26-30 2021, オンライン
- “ $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ Fusion S*-factor from a Full-microscopic Nuclear Model”, Y. Taniguchi, M. Kimura, The 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC-XVI), 9/21-25 2021, オンライン

- “低エネルギー $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$ 核融合の微視的模型による評価”, 谷口億宇, 木村真明, 日本物理学会, 3/15-19 2022, オンライン
- “ $^9\text{Be}+^9\text{Be}$ 衝突による 4α 直鎖状態の生成可能性について”, 馬場智之, 谷口億宇, 木村真明, 日本物理学会, 3/15-19 2022, オンライン
- “ $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion astrophysical S-factor in a microscopic nuclear model”, 谷口億宇, 大規模シミュレーションと機械学習による原子核反応研究, 11/17-19 2021, 北海道大学
- “天体において共鳴状態により誘発される $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応”, 谷口億宇, 木村真明, 日本物理学会, 9/14-17 2021, オンライン
- “生成座標法によるアイソバリックアナログ状態とアイソスピン混合の記述”, 木村真明, 鈴木祥輝, 馬場智之, 谷口億宇, 日本物理学会, 9/14-17 2021, オンライン
- “中性子過剰 $N=28$ 核での変形共存現象の研究”, 鈴木祥輝, 堀内渉, 木村真明, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 9/14-17 2021, オンライン
- “ $N=28$ 核における変形共存現象”, 鈴木祥輝, 堀内渉, 木村真明, 大規模シミュレーションと機械学習による原子核反応研究, 11/17-19 2021, 北海道大学
- “Shape coexistence in $N=28$ isotones”, 鈴木祥輝, 堀内渉, 木村真明, Progress in nuclear structure and reaction theories, 1/25 2022, 北海道大学
- “中性子数 28 近傍核における魔法数消失に伴う変形共存現象”, 鈴木祥輝, 堀内渉, 木村真明, 日本物理学会, 3/15-19 2022, オンライン

使用計算機	使用計算機 に○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
Cygnus			
Oakforest-PACS	○	45,000	
※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。			