

天体環境における核反応率の微視的評価 Microscopic Estimation of Nuclear Reaction Rates in Astrophysical Environments

谷口億宇
香川高等専門学校

1. 研究目的

原子核反応は様々な天体現象のエネルギー源であり、核反応率は天体現象の理解の基礎となる。しかし、天体の環境は、核物理としては低エネルギーで、加速器実験での再現は難しい。したがって、理論計算によるシミュレーションが必要である。X線スーパーバーストなどの爆発的天体現象に重要な、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合や $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)$ などの核反応率を、微視的理論と数値シミュレーションで評価することを目的とする。

2. 研究成果の内容

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応率を微視的に評価するとともに、微視的モデルの不定性の一種となる有効相互作用依存性について調べた。 ^{24}Mg の $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 閾値付近の共鳴状態を、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ チャネルや $\alpha+^{20}\text{Ne}$ や $p+^{23}\text{Na}$ の崩壊チャネルを結合させて微視的に求めた。それらの共鳴状態の崩壊幅から核融合断面積とエネルギーの関係を求め、さらに核融合反応率を評価した。X線スーパーバーストで重要な低温での $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応率は、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 閾値付近の共鳴状態のエネルギーに敏感であることが分かった。その共鳴エネルギーは、有効相互作用の到達距離など、有効相互作用の性質に強く依存する。また、核融合反応に重要な共鳴状態は、基底状態から強いアイソスカラー型遷移強度を持つため、非弾性散乱で観測できる可能性があることが分かった。これは、核融合に重要な共鳴状態のエネルギーを、非弾性散乱を代替反応として測定可能なことを示す。これらの成果は国際会議での招待講演等で発表し、論文は現在準備中である。また、 $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)$ 反応率は、 ^{19}Ne の共鳴状態の崩壊幅から計算できる。それら共鳴状態の計算に必要となる、基底状態近傍に重要な構造を計算した。核反応断面積の評価に向けて、計算が進行中である。

さらに、不安定核における変形共存現象について調べた。核種によって共存する変形状態が異なることが分かり、この違いはモノポール型遷移強度に現れることを示した。これらの成果を論文にまとめ、国際会議でも発表した。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

学際共同利用プログラムが提供する計算資源を活用することで、研究を効率的に遂行できた。チャネル結合を扱う計算では、多くの基底波動関数が必要である。そのた

め物理量を評価する際に必要な行列要素の計算も膨大となる。それら行列要素を並列化により高速に計算できた。

4. 今後の展望

低温での核反応率を代替反応で実験的に評価できるよう、研究を進めている。共鳴状態のエネルギーは理論の不定性である有効相互作用依存性が大きく、その解決には実験情報が必要である。ただし、直接反応で測定が難しい共鳴状態の性質は代替反応で調べる必要がある。

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応については、非弾性散乱を代替反応の候補として研究を進めている。アイソスカラー型遷移の微分断面積から、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合の情報を引き出すことを検討している。

5. 成果発表

(1) 学術論文

Y. Suzuki, W. Horiuchi, M. Kimura, “Erosion of $N=28$ shell closure: Shape coexistence and monopole transition”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2022**, 063D02 (2022), DOI: 10.1093/ptep/ptac071

(2) 学会発表

① 国際会議・研究会

1. Y. Taniguchi, “*Microscopic Estimation of $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ Fusion Reaction Rate at Astrophysical Energies*”, YIPQS long-term workshop “Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (MCD2022)”, Kyoto, Japan, May 9–June 17, 2022. (招待講演)
2. Y. Taniguchi, “ *$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion reaction rate from a microscopic nuclear model*”, PANDORA Workshop, Onna, Japan, March 5–7, 2023.
3. Y. Taniguchi, “ *$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion reaction rate from a full-microscopic nuclear model*”, The 16th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, Hanoi, Vietnam, October 24–28, 2022.
4. Y. Taniguchi, “ *$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion astrophysical S -factor from a full-microscopic nuclear model*”, Developments of Physics of Unstable Nuclei (YKIS2022b), Kyoto, Japan, May 23–27, 2022.
5. Y. Suzuki, W. Horiuchi, M. Kimura, “*Shape coexistence in $N=28$ neutron-rich nuclei: $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$* ”, Developments of Physics of Unstable Nuclei (YKIS2022b), Kyoto, Japan, May 23–27, 2022.

② 国内会議・研究会

1. 谷口億宇, “天体核融合とノックアウト反応の微視的モデルによる研究”, 日本物理学会春季大会, オンライン, 2023 年 3 月 22–25 日.
2. 谷口億宇, 木村真明, “ $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ molecular resonances that enhance $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion reaction rate”, 星の進化と爆発天体における核反応の物理, 理化学研究所, 2023 年 2 月 20–21 日.
3. 谷口億宇, 木村真明, “X線バーストを引き起こす $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 分子共鳴状態”, 核反応シミュレーションと機械学習による核反応モデルの発展, 北海道大学, 2022 年 12 月 13–15 日.
4. 谷口億宇, 木村真明, “クラスター共鳴による天体における $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応率の増大”, 原子核におけるクラスター物理の新展開, 大阪公立大学, 2022 年 10 月 19–20 日.
5. 谷口億宇, 木村真明, “天体における $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応率の微視的評価”, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学, 2022 年 9 月 6–8 日.
6. 谷口億宇, 木村真明, “低エネルギー $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応率の微視的モデルによる評価”, 低エネルギー核物理と高エネルギー天文学で読み解く中性子星, 大阪大学核物理研究センター, 2022 年 8 月 3–5 日.
7. 谷口億宇, 木村真明, “ $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion reaction rate at low temperature from a microscopic nuclear model”, UKAKUREN-RCNP Conference on AstroNuclear Physics (ANP2022), 大阪大学, 2022 年 7 月 20, 21 日.
8. 谷口億宇, 木村真明, “天体エネルギーにおける $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応率の微視的評価”, RCNP 研究会「原子核反応研究の最近の話題と展望」, 大阪大学核物理研究センター, 2022 年 7 月 8, 9 日.
9. 鈴木祥輝, 堀内渉, 木村真明, “中性子魔法数 28 の消失に伴う変形共存現象 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ ”, RCNP 研究会「原子核反応研究の最近の話題と展望」, 大阪大学核物理研究センター, 2022 年 7 月 8, 9 日.

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			
Wisteria/BDEC-01	○	45,000	0
※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。			