

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

1. 研究目的

核反応は元素合成や星の進化などの様々な天体現象のエネルギー源である。天体現象における核反応では、特に閾値近傍の共鳴状態の寄与が大きい。したがって、閾値近傍の共鳴状態の性質を明らかにすることは、原子核物理のみならず天体物理にも重要な分野横断的な課題である。

本課題の目的は、Ia 型超新星等の爆発的天体現象に重要な影響を及ぼす核反応を、数値シミュレーションで明らかにすることである。 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 核融合反応率は Ia 型超新星における S から Ca 領域の元素の生成率に大きく影響するとされるが、十分な理解に至っていない。X 線スーパーバースト等で主要となる $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合反応では、閾値近傍の低エネルギー $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 分子共鳴の寄与が主要であることが分かっている。 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 核融合でも低エネルギー $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 分子共鳴状態の寄与する可能性はあるが、その程度は未解明である。 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 衝突による直接測定により、崩壊幅の広い共鳴状態の候補が見つかったが、その状態の核融合反応への寄与は分かっていない。低エネルギー $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 分子共鳴状態の性質を解明することは、Ia 型超新星及びそこにおける元素合成の理解に重要である。

低エネルギー $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 分子共鳴状態の核融合反応の寄与を数値シミュレーションで解明することは、多体トンネル効果や多核子組み換えを扱う必要がある挑戦的な課題である。そのためには、個々の陽子や中性子の運動を扱う微視的シミュレーションが必要となる。

研究目標は、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ の複合核である ^{28}Si の構造を、基底状態から $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 閾値より数 MeV 高い領域まで数値シミュレーションで明らかにすることである。基底状態では、オブレートとプロレートの形状混合について詳しく調べる。一般に低エネルギー分子共鳴状態の直接測定は困難だが、基底状態にプロレート成分が強く混合すると、非弾性散乱を代替反応として $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 分子共鳴状態探索に使える可能性がある。 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 核融合反応に重要である $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 成分は、プロレート構造と強いアイソスカラー型単極遷移行列要素をもつためである。

2. 研究成果の内容

基底状態及び $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 閾値近傍の励起状態を、微視的原子核模型を用いて計算し

た。

基底状態については、角運動量射影後のエネルギーを分析することで、オブレート及びプロレート形状の構造を求めた。それと電気四重極遷移や基底状態の荷電半径の実験データから、基底状態におけるオブレートとプロレートの形状混合の強さを評価した。それより、 ^{28}Si の基底状態はオブレートとプロレートの形状混合が起きていることが示された。これは、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 分子共鳴状態を非弾性散乱で観測可能なことを示唆している。

励起状態については、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$, $\alpha+^{24}\text{Mg}$, $p+^{27}\text{Al}$, $n+^{27}\text{Si}$ チャネルの結合を、核子間ポテンシャルを用いて微視的に解くことで、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 閾値近傍に $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 分子共鳴状態が存在することを示した。そして、それらは $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 核融合反応に一定の寄与を示した。以上の成果は、国際会議や国内学会で発表している。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

チャネル結合を微視的に解くには、それぞれのチャネル間の行列要素の計算が必要である。今回のような多チャネルの結合を微視的に解くためには、大きな計算コストが必要である。学際共同利用プログラムによって大規模計算機を利用できたことで、その計算が可能となった。

4. 今後の展望

主に 3 つの進展が期待される。1 つは、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 分子共鳴状態に加えて複合核過程を評価することで、信頼性の高い $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 反応率を導出することである。それは Ia 型超新星での元素合成のシミュレーションなど、宇宙物理への波及効果も見込まれる。2 つ目は、系統的な反応率の研究につながることで、今回の理論モデルでは核子の自由度を直接扱うため、原理的には核融合反応にとどまらずあらゆる系に適用可能である。天体では様々な核反応が起きており、それらを理解するためには、系統的な反応率の評価が必要である。3 つめは、基底状態の構造を詳細に理解することで、非弾性散乱による低エネルギー分子共鳴状態探索を可能とすることである。精度高く非弾性散乱断面積を評価するためには、基底状態と励起状態の双方の構造の詳細な解明が必要である。今回の、数値シミュレーションと実験データを組み合わせることで形状混合を評価する手法は、基底状態の解明の強力な手段となりうる。

5. 成果発表

学会発表

(1) 国際会議・研究会

① 招待講演

1. Y. Taniguchi, “Triaxiality and molecular resonances induced by

clustering in deformed states”, Physics Opportunities Using the 8pi Spectrometer at RCNP, Toyonaka, Japan, Feb 4–5, 2025.

2. Y. Taniguchi, “Impact of cluster resonances on low-energy nuclear fusion reactions”, Nucleosynthesis and Evolution of Neutron Stars, Kyoto, Japan. Jan 27–30, 2025
3. Y. Taniguchi, “Low-energy fusion reactions enhanced by resonance states”, Advancing Physics at Next RI Beam Factory (ADRI25), Saitama, Japan, Jan 22–25, 2025.
4. M. Kimura, “State of the Art of theoretical nuclear cluster physics”, Fifth International Workshop on “State of the Art in Nuclear Cluster Physics” (SOTANCP5), Hvar Island, Croatia, June 10–14, 2024.
5. M. Kimura, “Shape of Carbon isotopes”, ENST WS: Light nuclei between single-particle and clustering features, Paris, France, Dec 2–7, 2024.

② 一般講演

1. Y. Taniguchi, “Puzzle of the extremely large α -knockout cross section in ^{48}Ti ”, The 3rd OMU workshop on “Probes of exotic nuclear structure”, Osaka, Japan, February 10, 2025.
2. Y. Taniguchi, “Nuclear fusion reactions in explosive astrophysical phenomena”, 2nd OMU workshop “Recent advances in nuclear cluster physics”, Osaka, Japan, August 1–2, 2024.
3. Y. Taniguchi, “ $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion reaction rate at low temperatures from a microscopic nuclear model”, Fifth International Workshop on “State of the Art in Nuclear Cluster Physics” (SOTANCP5), Hvar Island, Croatia, June 10–14, 2024.

(2) 国内学会

- ① 谷口億宇, 木村真明, “ $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 核融合反応率の微視的評価”, 日本物理学会年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 16-19 日.

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	追加配分
Cygnus	○	4000	0	0
Pegasus	○	2500	0	0
Wisteria/BDEC-01	○	40000		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。 * バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				