

プログラム名：核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化

PM名：藤田 玲子

プロジェクト名：核変換システム評価と要素技術開発

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 28 年度

研究開発課題名：

高温プラズマ中でのミュオン触媒核融合反応の素過程の理論計算

研究開発機関名：

国立大学法人 東北大学

研究開発責任者

准教授 木野 康志

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

核変換反応のための十分な強度をもつ中性子源の候補として、プラズマ中でのミュオン触媒核融合 (μCF) 反応の可能性を検討することを目的とする。平成 28 年度は、最初の段階として、ミュオン原子過程を正確に評価するための理論計算法の確立し、大規模計算を行う。

研究開発責任者らが開発した量子少数多体系を精密に計算する「ガウス関数展開法」を $t\mu + d$ または $d\mu + t$ (μ 、 d 、 t は、ミュオン、重陽子、三重陽子) のミュオン原子衝突に応用し、本研究の根幹となるミュオン原子過程であるミュオン原子の弾性散乱、組み替え散乱 (ミュオン移行反応) の計算を行う。さらに衝突中に原子核同士が $t + d \rightarrow \alpha + n + 17.6 \text{ MeV}$ の核融合反応をする自由度も取り込み、衝突中における $d-t$ 核融合反応 (In Flight μCF) 断面積の計算を行う。この核反応計算では、Froelich らによる先行研究があり、断熱近似に基づく計算、非断熱計算があった。前者の断熱近似は、低エネルギー領域 (100 eV 以下) においても不適切であることが既に知られており、より核間の運動エネルギーが高い本課題のエネルギー領域では、さらに不適切である。一方、後者は数値計算の収束性が悪く、断面積の衝突エネルギー依存性に一桁以上の不測のばらつきがあった。

1. 従来の μCF 研究において進められてきた 0.001 から 1 eV の衝突エネルギー範囲を、 $t\mu$ の $n=2$ 励起しきい値となる 2 keV までの高エネルギー側に広げる。この領域では先行研究がほとんどなく、さらに三体の散乱問題を量子力学に基づき、断熱近似を用いない厳密な手法で行った例は、以前の我々自身の計算のみである。また、この領域には、ミュオン分子 $d\mu$ の共鳴状態が多く含まれ、共鳴状態を経由する反応も考慮する必要がある。
2. ミュオン原子衝突の計算コードに、核反応チャンネルを新たに導入し、ミュオン原子衝突における原子核融合反応の断面積を計算する。計算には、入射チャンネル ($t\mu + d$) とミュオン移行チャンネル ($t + d\mu$) の散乱状態だけでなく、 $\mu + d + t$ の三体系の連続状態および、共鳴状態を正確に取り込む必要がある。このため、ガウス関数展開法に基づき、三体系のハミルトニアンを十分な数のガウス型基底関数で対角化して得た近似的な完全系を用いる。断面積の収束値が得られたのち、散乱の波動関数と核融合後の状態から、ミュオンのアルファ粒子への付着係数を計算する。核融合断面積、アルファ付着係数およびミュオンあたりの核融合反応数の値を低温で行われてきた従来のミュオン触媒核融合の結果と比較する。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

ミュオン原子衝突 ($t\mu + d$ または $d\mu + t$) の弾性散乱、組み替え散乱 (ミュオン移行反応) の計算を衝突エネルギー 100 から 2,000 eV の範囲で行った。最新の計算機システムに合わせて、計算コードのチューニングや、ライブラリ上のサブルーチンのテストを行った。

ミュオン原子衝突に核反応チャンネルの導入を行った。核反応を原子核同士の吸収と考え、光学ポテンシャルを導入し、全終状態に対する S 行列の和の減少を核反応断面積とする。

上記の断熱近似を用いない厳密なミュオン原子衝突の計算コードに原子核反応を再現する光学ポテンシャルを組み込み、数値計算を行った。

2-2 成果

以前の計算を行った時に比べ、今回は計算機事情が格段に向上したこともあり、今回の計算では、以前は不十分であった計算の収束性などのチェックなどが系統的行えるようになり、計算精度が大きく向上した。共鳴状態の断面積から、共鳴状態の寿命と崩壊の分岐比をもとめた。共鳴状態の寿命は、核反応の反応率よりもはるかに短く、共鳴状態が直接核反応を起こすことが困難であることが確かめられた。また、崩壊の分岐比から、 $t\mu + d$ 散乱では、 $t + d\mu$ チャンネルに崩壊する分岐比が大きくなることも確かめられた。これは、励起状態間のミュオン移行反応 ($d\mu$ から $t\mu$ に移行) が速いにもかかわらず、最終的には大部分のミュオンが $d\mu$ の基底状態に存在するという実験結果をうまく説明することができた。以上の結果から、衝突エネルギーが 2 keV 以下での高温のミュオン原子衝突について、信頼できる断面積が得られた。

この計算コードに、原子核反応を表現する光学ポテンシャル（光学ポテンシャルは、低エネルギー核反応断面積を再現するだけでなく、ミュオン分子内核融合率の実験も再現することを確認した）を導入し、核反応率の計算を行った。計算結果は、Froelich らの計算とほぼ同程度の値であったが、計算の収束性が不十分であった。

2-3 新たな課題など

核反応断面積に対する原子核の動的効果、すなわちミュオンの質量 (d 質量の $1/18$ 、 t の $1/27$) が原子核と比べて無視できないため、ミュオン原子の重心が原子核の中心からずれ、核反応断面積の上記の収束性の悪さの要因となっていることが判明した。散乱の境界条件を満たすためには、ミュオン原子の重心ともう一方の原子核間の座標が散乱座標になるが、核間の光学ポテンシャルは核間を結ぶ座標で記述される。散乱座標は、有限要素法を用いて微積分方程式を解いているため、計算精度の向上は要素間の刻み幅を細く取れば良いが、核間の座標はガウス型基底関数で展開しているため、ガウスレンジパラメータの操作による計算精度の向上は困難である。これは、核反応が起こる領域のサイズが、計算サイズの 100 万分の 1 以下であるため、核融合が起こる領域がガウス展開の結果に反映されにくいことによる。様々な計算条件での計算とガウスパラメータとガウス関数の振幅などの分析の結果、以上のことが判明してきた。H29 年度は、核反応の領域とミュオン原子衝突の領域に分け数値計算の安定化を目指す。

3. アウトリーチ活動報告

該当なし。