

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 2 9 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

高温高密度重水素・三重水素混合ガス中に負電荷ミュオン（以下、ミュオン）を打ち込むと、ミュオンは原子核からのクーロン引力につかまり、ミュオン原子を生成する。このミュオン原子が高速の水素原子核と衝突すると、衝突中に核融合反応をおこす。我々は、この反応を基盤とする新しいミュオン触媒核融合（ μCF ）サイクルを提案しているが、このなかで鍵となるミュオン原子衝突中における重陽子-三重陽子（d-t）核融合反応率の衝突エネルギー依存性の理論計算を行う。前年度の結果から、ミュオンの介在により核反応断面積が増大することが示され、散乱断面積や波動関数の振る舞いの分析から、アルファ付着係数が小さくなり、ミュオン再活性化係数向上することが示唆された。これにより、本プロジェクトのなかで、「高温プラズマ中での μCF 反応」が有効であることが確定的になってきた。ただし、核反応断面積については、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。今年度は、この不安定性を解消するため、次の点を考慮した計算法の開発を行った。

1) 核反応断面積に対する原子核の動的効果（非断熱効果）。ミュオンの質量（ミュオン質量は 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る効果（原子核の質量を有限とする非断熱効果）である。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相対運動を表すヤコビ座標系が散乱座標となる。この重心のずれによるミュオン原子内で原子核は 0.1 keV 程度の反跳エネルギーを得る。この反跳エネルギーによる動的効果は衝突エネルギー（1 keV）と比べて無視できない。

2) 原子核間相互作用による散乱の寄与。この核反応は、ミュオン原子衝突過程が主で、原子核間の相互作用（核力相互作用）は反応に影響を与えないと考えてきた。これは、ミュオン分子内核反応率の計算では、クーロン相互作用だけで計算したミュオン分子波動関数で原子核間の光学ポテンシャルの期待値をとれば、実験結果と矛盾しない結果が得られていた。このため、核反応率の計算でも、ミュオン原子衝突の波動関数から光学ポテンシャルの期待値を求めていたが、束縛状態に比べ散乱状態はエネルギーが数倍高いため、原子核間相互作用が散乱の波動関数へ及ぼす寄与も無視できない。

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

ミュオン原子衝突中の核反応断面積（ $t\mu + d \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17.6 \text{ MeV}$ ）に対する原子核の動的効果を取り込むため、散乱の波動関数を原子核間の相互作用がはたらく領域まで精密に計算した。ミュオン原子内で原子核が受ける反跳効果を取り込むため、ミュオン原子の重心ともう一方の原子核間の相対運動を表す2つのヤコビ座標系を導入し、原子核間の重心とミュオン間の相対運動を表すヤコビ座標と併せて、散乱の中間状態を表現した。ミュオン原子衝突を表す前者の座標系から原子核間の核力相互作用を記述する後者の座標系にスムーズに接続できるように、十分な数の基底関数を用意し、計算の収束性をチェックした。基底関数の数を増やすに従って、原子核の動的効果が反映されるようになった。一方、原子核間の核力相互作用の領域での原子核間の運動が波動関数に反映されるようになると、逆に、原子核間の光学ポテンシャルの不定性が結果に影響を及ぼすことが明らかになった。

2-2 成果

ミュオン原子衝突中の核反応断面積を精密な3体系散乱問題として理論計算を行った。昨年度までは、数値計算の不定性により、一桁以上のばらつきがあったが、ミュオン原子内での原子核の動的効果と原子核間の核力相互作用の散乱波動関数への寄与を取り入れることにより、バラツキを40%程度に納めることができた。この計算結果から、ミュオン原子衝突中の核反応断面積が、1 keVの衝突エネルギーで、700 bに達することが分かった。これは、液体水素密度換算で、核反応率が、 10^9 s^{-1} になり、従来の μCF より一桁以上高い値である。この大きな核反応断面積を利用すれば、高温ガス（プラズマ）中での μCF が高い反応確率で起こることが期待される。従来のミュオン分子内核融合を基盤とする μCF での多くの問題点が解決され、中性子源、エネルギー源としての応用も期待できる。このミュオン原子衝突中核反応を基盤とする飛行中ミュオン触媒核融合（In Flight Muon Catalyzed Fusion; IF μCF ）の機構を提案した。

2-3 新たな課題など

今年度の研究結果から、通常の熱核融合で使われる核反応断面積の10,000倍の大きさを1/10の衝突エネルギーで持つことが理論的に分かってきた。衝突エネルギーが1/10になると、衝突頻度は1/3になるが、標的の温度が1/10になれば、実際の核反応装置建設にとって、メリットは計り知れない。核反応が続くためには高温状態を保つ必要があるが、核反応で生成する3.5 MeVの高エネルギーアルファ粒子を標的の加熱に使用する自己点火条件を検討すると、高強度ミュオン源（ 10^{17} muons/s ）が得られれば、この条件をクリアすることが推定された。同じく本プログラム内の中部大の佐藤教授らと事故点火を実現するための新奇高温高圧ガス標的について議論を重ね、風洞内に生成した「マッハ衝撃波干渉領域」を標的として、本プロジェクトの目的である高強度中性子源の実現を目指すこととした。現在、このための大型研究費獲得に挑戦している。また、この実験の遂行にあたって、三重水素の使用には様々な制限があるため、重水素のみによる検証実験を行う。このため、d-d核融合断面積の計算が必要になるが、d+d反応は終状態が ${}^3\text{He} + n$ チャンネルと $d + d \rightarrow t + p$ チャンネルと二つあるため、分岐比の計算が必要になる。

本研究の実施において、少数多体系計算の数値計算法について技術的な改新があった。より大規模の計算が可能となり、取り扱える系が4体系の散乱問題まで拡大した。これにより、ミュオン原子衝突中核反応において原子核の内部自由度を取り込んだ計算も視野に入ってきた。現在、核反応は光学ポテンシャルの虚部による波動関数の吸収として取り扱っているが、原子核内の核子の組み替えにより核反応を表現できる。さらに、原子核のスピン自由度も取り入れることができる。これらにより、より正確な核反応断面積に加え、d-d反応の分岐比、核反応後のアルファ粒子へのミュオン付着反応、標的原子核の周りを回る電子による遮蔽効果などの計算も行えるようになる。

3. アウトリーチ活動報告

特になし