

## 課題名(タイトル):反陽子原子構造および反水素原子・ポジトロニウム反応の少数多体計算

利用者氏名:山下琢磨

理研における所属研究室名:仁科加速器科学研究センター ストレンジネス核物理研究室

## 1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

陽子の反粒子である反陽子と電子の反粒子である陽電子が結合した系を反水素原子と呼ぶ。水素原子を荷電反転した系に相当し、CPT 対称性の下では水素原子と同一のエネルギー準位を持つ。近年、低温の反水素原子を合成・貯蔵することができるようになり、反水素原子の分光実験が可能になった。さらに、反水素原子が電氣的に中性の反物質であることを利用して、物質・反物質間重力相互作用の検証実験が計画・準備されている。反水素原子を極低温に冷却する手法として、次の 2 段階のプロセスが期待されている:(1) keV 程度の運動エネルギーを持つ反水素原子をポジトロニウム(電子と陽電子の束縛状態)標的に入射し、電荷移行反応によって反水素正イオン(反陽子と二つの陽電子の束縛状態)を生成する、(2) 反水素正イオンをベリリウム正イオンとともにレーザー冷却後、光によって一方の陽電子を剥ぎ取る。反水素原子とポジトロニウムの反応は多チャンネル散乱問題であり、四粒子系のシュレーディンガー方程式をできるだけ厳密に評価する必要がある。本研究では、昨年度までに開発した計算コードを用いて、反水素原子と励起ポジトロニウムの衝突によって反水素正イオンを生成する反応を計算した。P 波以上の部分波を取り込んだ計算を実現した。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

四粒子系の時間非依存シュレーディンガー方程式を解き、連続状態の波動関数の遠方形を評価して反応断面積を任意のエネルギーに対して求めた。全波動関数を、散乱の中間状態を記述する部分と無限遠まで振動する散乱波を記述する部分の和で構成した。前者はガウス関数展開法を用いて、四粒子系の全ハミルトニアンを有限レンジの基底関数によって対角化した。レイリー・リッツの変分原理により一般化固有値問題に帰着し、intel MKL ライブラリのサブルーチンを使用して固有値・固有ベクトルを求めた。得られた固有ベクトルを散乱状態の近距離の相関を記述する新しい基底関数として用い、遠方での境界条件を課して連立微積分方程式を差分法により解いた。遠方の波動関数振幅から散乱行列要素を求め、各反応分岐に対応する断面積を求

めた。

## 3. 結果

反水素正イオン生成断面積と、これに競合するポジトロニウム励起・脱励起を明らかにした。特に、高い角運動量に対応する部分波まで計算に取り込んだことで、励起状態ポジトロニウムと基底状態反水素原子の反応断面積を計算することができた。この結果は New Journal of Physics の Fast Track Communication に掲載された[1, 7]。従来のボルン近似・歪曲波近似で予想されていた断面積に比べて、反水素正イオン生成断面積が小さく、ポジトロニウム励起・脱励起の断面積が大きいことが明らかになった[2]。第二励起ポジトロニウムと反水素原子の衝突において脱励起断面積が大きく、ポジトロニウム寿命を短くする要因となることが示唆された。

計算結果の妥当性を検証するために、四粒子計算で得られた非弾性散乱断面積のしきい値近傍での振る舞いを Wigner のしきい則に基づいて解析した。多くの断面積がしきい値近傍でしきい則に従うことが明らかになった。

## 4. まとめ

本研究では、反水素原子とポジトロニウムの衝突による反水素正イオン生成断面積の計算を行った。厳格な枠組みで散乱断面積を評価したことで、これまでの近似計算では見えていなかった反応過程が明らかになり、実験上重要な反水素正イオンのしきい値付近での生成過程について知見が深まった。

## 5. 今後の計画・展望

本計算を励起状態反水素原子との反応に拡張することを計画している。このためには、数値積分精度の向上とともに、より本質的な反応チャンネルの選定が必要である。

新たな研究の軸として、(i) 励起状態ポジトロニウムが深く関係する二電子励起ポジトロニウム化合物の輻射解離過程、(ii) 原子・分子との相互作用において反陽子と共通点が多い負ミュオン原子過程へ研究を展開している[5, 8, 9]。

2020 年度 利用研究成果リスト

**【雑誌に受理された論文】**

[1] "Near-threshold production of antihydrogen positive ion in positronium-antihydrogen collision", Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Svante Jonsell and Piotr Froelich, *New Journal of Physics (Fast Track Communication)* **23**, 012001 (2021) (8pp).

[2] "Towards prediction of the rates of antihydrogen positive ion production in collision of antihydrogen with excited positronium", Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Konrad Piszczatowski, Svante Jonsell and Piotr Froelich, *Journal of Physics: Conference Series* **1412**, 052012 (2020) (7pp).

[3] 「陽電子原子の三粒子描像による高精度構造計算 I: 束縛状態」、山下琢磨、木野康志、日本陽電子科学会誌「陽電子科学」 **15**, 17 (2020) (11pp).

[4] 「陽電子原子の三粒子描像による高精度構造計算 II: 共鳴状態」、山下琢磨、木野康志、日本陽電子科学会誌「陽電子科学」 **16** (accepted).

**【会議の予稿集】**

[5] "Four-body calculation of energy levels of muonic molecule  $d\mu e$  in muon catalyzed fusion", Motoaki Niiyama, Takuma Yamashita, Yasushi Kino, *Journal of Physics: Conference Series* **1412**, 222013 (2020).

(紙幅制限のため謝辞記載なし)

**【口頭発表】**

[6] "水素化ポジトロニウムの構造解析", 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Svante Jonsell, Piotr Froelich, 原子衝突学会 第 45 回年会, オンライン開催, 2020/12/8-12/10. (ホットトピック講演)

[7] "反水素原子と励起状態ポジトロニウムの衝突における反水素正イオン生成断面積の計算", 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Svante Jonsell, Piotr Froelich, 日本物理学会 2020 年秋季大会, オンライン開催 2020/9/8-11.

[8] "ルンゲクッタ法によるミュオン触媒核融合の時間発展の計算", 山下琢磨, 奥津賢一, 木野康志, 中島良太, 宮下湖南, 安田和弘, 岡田信二, 佐藤元泰, 岡壽崇, 河村成肇, 神田聡太郎, 下村浩一郎, Strasser Patrick, 竹下聡史, 反保元伸, 土居内翔伍, 永谷幸則, 名取寛顕, 西村昇一郎, Amba Datt Pant, 三宅康博, 石田勝彦, 日本物理学会 2020 年秋季大会, オンライン開催 2020/9/8-11.

**【ポスター発表】**

[9] "Time evolution calculation of muon-catalyzed fusion in deuterium-tritium mixture", T. Yamashita, K. Okutsu, Y. Kino, R. Nakashima, K. Miyashita, K. Yasuda, S. Okada, M. Sato, T. Oka, N. Kawamura, S. Kanda, K. Shimomura, P. Strasser, S. Takeshita, M. Tampo, S. Doiuchi, Y. Nagatani, H. Natori, S. Nishimura, A. D. Pant, Y. Miyake, K. Ishida, 3rd Asia Pacific Symposium on Tritium Science, Toyama, Toyama, Japan, 2020/11/3-11/6.