

プロジェクト名(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. 本プロジェクトの研究の背景、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。反水素原子は、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。

今年度は、昨年度までの計算を拡張し、反水素正イオン生成と競合関係にある反応断面積を精密計算した。しきい値則との対応から計算の妥当性を評価した。加えて、反水素原子とポジトロニウムが双方励起状態で結合した第二束縛状態に研究を展開した。この系は対消滅が禁止され、対称性から自動解離も禁止されている。主たる崩壊経路は光を放出し対称性を変えて解離する過程である。本研究では、この解離光スペクトルの予言と、第二束縛状態の安定性を明らかにすることを目的に計算を行った。

## 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各衝突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。前者はストレンジネス核物理研究室で開発が続けられている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二乗可積分関数によっ

て対角化した。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。

反水素化ポジトロニウム第二束縛状態の解離光計算では、複素座標回転法によって解離後の連続状態を表現し、双極子近似によってスペクトルを計算した。

## 3. 結果

反水素正イオン生成断面積と、これに競合する非弾性散乱断面積を明らかにした[3]。すべての非弾性散乱過程でWignerのしきい則と良い一致がみられ、計算の難しい低エネルギー領域での結果の信頼性が示された。加えて、フラックスの保存則や散乱行列の対称性もよい精度で保たれていることが明らかになった。このような詳細な分析結果を論文にまとめ、現在査読中である。

反水素化ポジトロニウム第二束縛状態から放出される解離光のスペクトルが初めて明らかになった。この系は無数の解離チャンネルを持つが、主たる解離経路を4つに絞り込むことができた。そのうちの一つは、これまで予想されていなかった共鳴状態への遷移であり、他の3経路と異なり速度の大きいポジトロニウムを短時間で放出する経路であることが明らかになった。この結果はPhysical Review Aに出版された[1]。

## 4. まとめ

反水素原子とポジトロニウムの反応断面積や、反水素原子とポジトロニウムが励起状態で結合した系の安定性、およびその解離光スペクトルが明らかになり、反水素原子過程の理解が大きく前進した。

## 5. 今後の計画・展望

実験上重要になる別のスピン結合状態へ研究を発展させる。また、新たな研究の軸として、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する[2,4]。

## 2021 年度 利用研究成果リスト

## 【雑誌に受理された論文】

- [1] Takuma Yamashita, Emiko Hiyama, Daisuke Yoshida, Masanori Tachikawa, "Spontaneous radiative dissociation of the second bound state of positronium hydride", *Physical Review A* **105**, 012814 (2022).
- [2] Takuma Yamashita, Motoaki Niiyama, Kazuhiro Yasuda, Yasushi Kino, "Four-body variational calculation of a hydrogen-like atom involving an excited muonic molecule", *J. Phys.: Conf. Ser.* (accepted).
- [3] Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Svante Jonsell, Piotr Froelich, "Four-body Calculation of Inelastic Scattering Cross Sections of Positronium–Antihydrogen Collision", *Few-Body Systems* **62**, 81 (2021).
- [4] Takuma Yamashita, Kenichi Okutsu, Yasushi Kino, Ryota Nakashima, Konan Miyashita, Kazuhiro Yasuda, Shinji Okada, Motoyasu Sato, Toshitaka Oka, Naritoshi Kawamura, Sohtaro Kanda, Koichiro Shimomura, Patrick Strasser, Soshi Takeshita, Motonobu Tampo, Shogo Doiuchi, Yukinori Nagatani, Hiroaki Natori, Shoichiro Nishimura, Amba Datt Pant, Yasuhiro Miyake, Katsuhiko Ishida, "Time evolution calculation of muon catalysed fusion: Emission of recycling muons from a two-layer hydrogen film", *Fusion Engineering and Design* **169**, 112580 (2021).

## 【口頭発表】

- [1] "Relativistic effects on loosely bound states of positronic alkali-metal atom", Takuma Yamashita, Yasushi Kino, 32nd International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (Virtual iCPEAC), Online, 2021/7/20-23. (Progress Report, invited talk)
- [2] "Four-body treatment of antihydrogen atomic collisions", Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Konrad Piszczatowski, Svante Jonsell, Piotr Froelich, Yamada Conference LXXII: The 8th Asia-Pacific conference on Few-Body problems in Physics (APFB2020), Kanazawa, Ishikawa, Japan, 2021/3/1-5. (Plenary)
- [3] "精密三体計算による陽電子と原子の結合状態の理論的研究", 山下琢磨, 京都大学複合原子力科学研究所専門研究会, オンライン開催, 2021/12/10. (招待講演)
- [4] "クーロン少数多体系の精密計算とエキゾチックアトム研究", 山下琢磨, 第 41 回 原子衝突若手の会 秋の学校, オンライン開催, 2021/11/27. (講義)
- [5] "ミュオン分子共鳴状態を含むミュオン触媒核融合モデル", 山下琢磨, 安田和弘, 奥津賢一, 木野康志, 原子衝突学会 第 46 回年会, オンライン開催, 2021/10/26-28. (ホットトピック講演)
- [6] "ミュオン触媒核融合素過程計測へ向けた固体水素標的", 奥津賢一, 木野康志, 中島良太, 宮下湖南, 安田和弘, 山下琢磨, 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 2021 年秋季大会, オンライン開催 2021/9/20-23.
- [7] "ミュオン分子共鳴状態の輻射解離における X 線スペクトルの計算", 安田和弘, 山下琢磨, 奥津賢一, 木野康志, 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン開催 2021/9/20-23.
- [8] "ミュオン触媒核融合のミュオン分子共鳴状態形成を含めた再検討", 山下琢磨, 安田和弘, 奥津賢一, 木野康志, 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン開催 2021/9/20-23.
- [9] "陽電子アルカリ金属原子の束縛エネルギーへの相対論補正", 山下 琢磨, 木野 康志, 第 58 回アイソトープ・放射線

## 2021年度 利用報告書

研究発表会, オンライン開催 2021/7/7-9.

- [10] "二電子系ポジトロニウム化合物の部分系構造解析", 山下琢磨, 新学術領域「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」第6回クラスター階層領域研究会, オンライン開催 2021/6/14,19.

### 【ポスター発表】

- [1] "Four-body variational calculation of muonic molecules in an electron cloud", Takuma Yamashita, Kazuhiro Yasuda, Motoaki Niiyama, Yasushi Kino, XXXII IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2021), Online, 2021/8/2-5.
- [2] "Four-body calculation of muonic molecular resonances in the electron cloud", K Yasuda, T Yamashita, K Okutsu and Y Kino, 32nd International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (Virtual iCPEAC), Online, 2021/7/20-23.
- [3] "Design of a charged particle transport method using electrostatic field", K Okutsu, T Yamashita, 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, 32nd International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (Virtual iCPEAC), Online, 2021/7/20-23.
- [4] "複素座標回転法によるポジトロニウム負イオンの光脱離断面積の計算", 神谷直紀, 安田和弘, 山下琢磨, 奥津賢一, 木野康志, 原子衝突学会第 46 回年会, オンライン開催, 2021/10/26-28.
- [5] "複素スケーリング法のエキゾチック原子分子系での衝突現象への応用", 佐野大志, 安田和弘, 山下琢磨, 奥津賢一, 木野康志, 原子衝突学会第 46 回年会, オンライン開催, 2021/10/26-28.
- [6] "輸送管内芯線電極が作る静電場による荷電粒子の輸送効率の計算", 中島良太, 奥津賢一, 木野康志, 宮下湖南, 安田和弘, 山下琢磨, 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, 原子衝突学会第 46 回年会, オンライン開催 2021/10/26-28.
- [7] "ミュオン分子共鳴状態  $dd\mu^*$  の輻射解離の計算", 安田和弘, 山下琢磨, 奥津賢一, 木野康志, 原子衝突学会第 46 回年会, オンライン開催, 2021/10/26-10/28.
- [8] "ミュオン触媒核融合後の再生ミュオン検出のためのバックグラウンド低減: 数値シミュレーションによる装置設計", 宮下湖南, 中島良太, 奥津賢一, 木野康志, 安田和弘, 山下琢磨, 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, 原子衝突学会第 46 回年会, オンライン開催 2021/10/26-28.