

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 少数多体系物理研究室

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。現在、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、反水素原子とポジトロニウム(Ps;電子と陽電子の束縛状態)の衝突によって生成した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、という方式が提案されている。これまでに、反水素原子とポジトロニウムの多チャンネル散乱問題を独自に開発した計算コードを用いて精密に解き、反応断面積を明らかにしてきた。

今年度は、生成した反水素正イオンがPsと再衝突して失われる過程の計算に取り組んだ。5粒子系の問題であるが、反応の前後で解離しない反水素原子を一つの粒子として近似し、四体模型として扱った。反水素原子と電子・陽電子間の有効ポテンシャルを構築し、反水素正イオンがPsの電子を捕獲する反水素化ポジトロニウム分子形成反応の断面積を求めた。また、Psの物理と関連の深い水素分子イオンの非断熱波動関数の可視化研究や、反陽子原子と関連の深いミュオン分子共鳴状態のオージェ遷移確率の研究も行った。

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から散乱行列の各要素を決定し、反応断面積を各衝突エネルギーに対して求めた。有効ポテンシャルを組み込んだ模型計算を実現するため、模型構築に使用する三粒子系のコードを含め、実装を行った。有効ポテンシャルは、反水素正イオンの束縛エネルギーや、反水素化ポジトロニウムの束縛エネルギー、相関関数を再現するようにパラメータを最適化した。

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。前者は少数多体系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。

3. 結果

S, P, D波の部分波をそれぞれ計算した。0.25 eV程度以下では弾性散乱断面積より発熱反応による反水素化ポジトロニウムの生成断面積が大きく、エネルギーが高くなると弾性散乱断面積が反応断面積を上回ることを示唆する結果となった。また、本研究で注目した0.75 eV以下の低速散乱では、吸熱反応であるポジトロニウム正イオンの生成断面積は非常に小さく、生成過程や弾性散乱過程とほとんど競合しないことが示された。

また、本研究の計算コードの応用として、水素分子イオンの非断熱波動関数の可視化計算を行った。一般に、少数多体系波動関数は多数の基底関数の重ね合わせとして表現され、その実像を捉えにくい。今回、核間軸上の電子密度という形で、核の振動に伴う電子密度の変化を抽出できることを示した。

もう一つの応用研究として、ミュオン触媒核融合過程で注目されているミュオン分子共鳴状態のオージェ遷移過程の計算を行った。ミュオン分子共鳴状態は三粒子系であり、電子を纏って生成する。この系は共鳴準位間の余剰エネルギーを電子に受け渡して遷移するため、四粒子系の問題が重要であった。本研究で、既存の近似を一新する精度で、多くの振動回転準位を網羅した計算が達成された。

4. まとめ

反水素原子やそのイオンとポジトロニウムの反応断面積が明らかになり、実験の設計に重要な示唆を与えた。エキゾチック原子だけでなく、通常分子系への新しい着眼点での研究にも展開している。

2023 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

[1] "A four-body calculation of s-wave resonant scattering between positronium and antihydrogen atom", Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Konrad Piszczatowski, Svante Jonsell, and Piotr Froelich, JJAP Conference Proceedings **9**, 011002 (2023).

[2] "Role of resonance states of muonic molecule in muon catalyzed fusion", Kenichi Okutsu, Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Konan Miyashita, Kazuhiro Yasuda, Toshitaka Oka, Shinji Okada, Motoyasu Sato, JJAP Conference Proceedings **9**, 011003 (2023).

【口頭発表】

[1] "Few-body calculation of exotic atom collisions: positronium, antihydrogen, and muonic atoms", Takuma Yamashita, 34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023), Kobe, Japan 2023/8/4-8/8. **(Invited)**

[2] "Study of antihydrogen-positronium reactions by a four-body coupled-rearrangement-channel calculation", Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Svante Jonsell, Piotr Froelich, XXI International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics & XXIII International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (POSMOL2023), South Bend, USA 2023/8/3-8/6. **(Invited)**

[3] "Four-body calculation of positronium-antihydrogen scattering near antihydrogen positive ion production threshold", T. Yamashita, Y. Kino, E. Hiyama, S. Jonsell, P. Froelich, The 14th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, Online, 2023/2/13-17. **(Invited)**

[4] "四体模型による反水素正イオンとポジトロニウムの衝突の計算", 山下琢磨, 原子衝突学会第 48 回年会, 東京工業大学, 東京都目黒区, 2023/11/25-26.

[5] "Structure and stability of positronium hydride in bound and resonance states", 山下琢磨, 第 9 回クラスター階層領域研究会, 理化学研究所, 埼玉県和光市, 2023/9/22-23.

[6] "ミュオン重水素分子共鳴状態の輻射解離機構の分析 II", 山下琢磨, 安田和弘, 神谷直紀, 木野康志, 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 宮城県仙台市, 2023/9/16-19.

[7] "複素スケーリング法による陽電子-原子低速散乱の計算", 佐野 大志, ○山下 琢磨, 木野 康志, 第 60 回アイトープ・放射線研究発表会, 江東区, 東京, 2023/7/6-7.

[8] "ミュオン重水素分子共鳴状態の輻射解離機構の分析", 山下琢磨, 安田和弘, 神谷直紀, 奥津賢一, 木野康志, 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン開催, 2023/3/22-25.

【ポスター発表】

[1] "Calculation and Wigner law analysis of scattering cross sections for collisions of antihydrogen atom with excited positronium", Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Svante Jonsell, Piotr Froelich, XXXIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC2023), Ottawa,

2023 年度 利用報告書

Canada 2023/7/25-8/1.

[2] "Recent progress of muon catalyzed fusion study: I. new kinetics model with muonic molecular resonances", Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Kenichi Okutsu, Yuichi Toyama, Shinji Okada, Motoyasu Sato, XXXIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC2023), Ottawa, Canada 2023/7/25-8/1.