

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。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。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厳密に評価する必要がある。

今年度は、反水素正イオン生成と競合関係にある反応断面積のしきい値近傍での挙動を精密に分析した。また、負電荷の重粒子という点で反陽子と共通点のある負ミュオンの原子分子系へ研究を展開した。昨年度までに開発した反水素化ポジトロニウムの第二束縛状態の輻射解離スペクトルの計算コードをミュオン分子共鳴状態へ適用し、解離 X 線スペクトルを計算した。さらに、ミュオン原子・分子の素過程について反応速度式を構築し、ミュオン触媒核融合におけるミュオン分子共鳴状態の寄与を評価した。

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。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。

ミュオン分子共鳴状態の X 線スペクトル計算では、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反応と、これに競合する非弾性過程、すなわち、Ps の励起・脱励起、分極・脱分極過程の散乱断面積が Wigner のしきい値と良く一致した[論文 1]。Ps(n=3) と反水素原子の衝突による反水素正イオン生成断面積が衝突エネルギーに対して速い減衰を示すことがわかり、これに対応して Ps の分極・脱分極反応(Ps の軌道角運動量のみと相対運動角運動量変化を伴い、相対運動の運動エネルギーは変化しない過程)の断面積が増大することが明らかになった。

ミュオン原子分子系への展開では、ミュオン重水素分子の共鳴準位を実スケール法、複素スケール法で求め、解離に伴う X 線スペクトルを、さまざまな振動・回転状態に対して網羅的に計算した。この結果を組み込んだミュオン触媒核融合のレート方程式を解き、新しいモデルを提案した[論文 2]。また、これまで摂動的に計算されていたミュオン分子擬似核の有限サイズ効果を変分計算した[論文 3]。

4. まとめ

反水素原子とポジトロニウムの反応断面積や、ミュオン分子の解離 X 線スペクトル、およびミュオン触媒核融合への寄与が明らかになった。

5. 今後の計画・展望

Ps と反水素原子のスピン三重項部分波の研究を進めている。さらに、反水素正イオンの安定性を左右する、反水素正イオンと Ps の 5 体系衝突について、計算を展開している。

2022年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

- [1] Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Svante Jonsell, and Piotr Froelich, “Near-threshold behavior of positronium-antihydrogen scattering cross sections”, *Physical Review A* **105**, 052812 (2022), Editor’s suggestion.
- [2] Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Kenichi Okutsu, Shinji Okada, Motoyasu Sato, “Roles of resonant muonic molecule in new kinetics model and muon catalyzed fusion in compressed gas”, *Scientific Reports* **12**, 6393 (2022).
- [3] 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.* **2207**, 012035 (2022)

【口頭発表】

- [1] 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Svante Jonsell, Piotr Froelich, “反水素原子-ポジトロニウム反応断面積のしきい値近傍での振る舞い”, 京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」, 京都大学複合原子力科学研究所,大阪府熊取町, 2022/12/9-10.
- [2] 山下琢磨, 安田和弘, 奥津賢一, 木野康志, “ミュオン水素分子イオンの解離 X 線スペクトルの非断熱計算”, 第 16 回分子科学討論会, 慶應義塾大学,神奈川県横浜市, 2022/9/19-22.
- [3] 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Svante Jonsell, Piotr Froelich, “四粒子多チャネル散乱計算による反水素原子-ポジトロニウム反応断面積のしきい則の解析”, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大学,東京都目黒区, 2022/9/12-15.
- [4] 神谷直紀, 山下琢磨, 奥津賢一, 木野康志, “エキゾチック原子・分子三体系の光解離断面積のエネルギー依存性”, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大学,東京都目黒区, 2022/9/12-15.

【ポスター発表】

- [1] Takuma Yamashita, Kazuhiro Yasuda, Yasushi Kino, “Four-body calculation of muonic molecular resonances in an electron cloud”, 33rd IUPAP Conference on Computational Physics, Online produced&hosted by The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA, 2022/8/1-4.
- [2] T. Yamashita, K. Yasuda, K. Okutsu, Y. Kino, “Non-adiabatic three-body calculation of X-ray spectrum from muonic hydrogen molecular ions”, 37th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Sendai, 2022/6/1-3.
- [3] N. Kamiya, T. Yamashita, K. Okutsu, Y. Kino, “Complex scaling calculation of photodissociation cross section of positronium negative ion”, 37th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Sendai, 2022/6/1-3.
- [4] 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Svante Jonsell, Piotr Froelich, “ポジトロニウム-反水素原子散乱の陽電子スピン三重項部分波の計算”, 原子衝突学会第 47 回年会, 宮崎大学,宮崎県宮崎市, 2022/9/8-9.