

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

水素原子の反物質である反水素原子は、反陽子と陽電子から構成される系である。CPT 対称性のもとでは反水素原子のエネルギー準位は水素原子のエネルギー準位と一致する。反水素原子の精密な分光実験により、CPT 対称性の検証が可能になる。近年、低温の反水素原子を合成・貯蔵する技術が躍進し、反水素原子の分光実験が可能になった。素粒子物理学の基礎理論の検証としてだけでなく、反水素原子と原子分子の相互作用を軸とした新しい原子物理学の展開が現実味を帯びてきた。反水素原子は電氣的に中性な反物質であり、物質・反物質間重力相互作用の検証といったことも可能になる。このためには、反水素原子の加速・減速が必要である。反水素原子とポジトロニウム(電子と陽電子から成る水素様原子)の反応によって、反水素正イオン(反陽子と二つの陽電子から成る系)を得る過程が期待されている。一方で、反水素原子とポジトロニウムの反応は四粒子系の多チャンネル散乱問題であり、ポジトロニウムに重心を担う粒子が存在しないため、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、反水素原子とポジトロニウムの全反応解析に向け、四粒子系の多チャンネル散乱問題の計算コード開発を目的とした。

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ることを計画した。肥山主任研究員らが開発した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する。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、三重対角化・マルチセクション法・逆反復法を併用した SSL2 ライブラリのサブルーチン DM_VSEVPH 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。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。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。

副次的な結果として、反水素正イオンをコアとして、電子が結合した共鳴状態の生成・崩壊に関する情報が得られることが示された。多チャンネルの反応断面積を散乱行列に関するウィグナー公式によってフィッティングし、崩壊の分岐幅(寿命)を計算した。この結果は独立な方法である複素座標回転法による全幅と一致した。

4. まとめ

反水素正イオンの合成は、極低温反水素原子の生成、物質・反物質相互作用の検証にとって重要である。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。全ハミルトニアンを対角化した基底系を用いることで、四粒子系のシュレーディンガー方程式を精密に解くことができるようになった。

5. 今後の計画・展望

相互作用に依存せず、四粒子系の多チャンネル散乱問題を解くことができるようになったため、原子物理学のみならず、低速での核反応断面積の計算、ミュオン触媒核融合等、分野横断的な研究の展開を予定している。

2019 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

- T. Yamashita, Y. Kino, E. Hiyama K. Piszczatowski, S. Jonsell, P. Froelich, *Journal of Physics: Conference Proceedings* (in press).

【口頭発表】

- Takuma Yamashita, Yasushi Kino, "For analysis of fundamental muonic atom process: development of few-body calculation method and related topics on relativistic effects of exotic atoms", Seminar on fundamental theories for negative muon experiments at J-PARC, and its application to elemental analysis, Tokai, Japan, 2019/4/18.
- T. Yamashita, "Towards prediction of the rates of antihydrogen positive ion production in antihydrogen-excited positronium reaction", XXXIst International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC), Deauville, France, 2019/7/23-30. (Hot Topic Presentation)
- T. Yamashita, Y. Kino, S. Jonsell, E. Hiyama, and P. Froelich, "Calculation of positronium-hydrogen atom reaction and its application to antihydrogen physics", The 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS 2019), Nara, Japan, 2019/10/28-11/2. (Invited)
- 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Svante Jonsell, Piotr Froelich, 「ポジトロニウムと水素原子の低速四粒子反応計算」, 第 13 回分子科学討論会 2019, 名古屋市, 愛知県, 2019/9/17-20.
- 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Svante Jonsell, Piotr Froelich, 「ポジトロニウムと反水素原子の低速非弾性衝突の計算 II」, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 岐阜市, 岐阜県, 2019/9/10-13.
- 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Svante Jonsell, Piotr Froelich, 「ポジトロニウム・水素原子共鳴の崩壊過程の分析 II」, 原子衝突学会第 44 回年会, 調布市, 東京都, 2019/9/5-6.

【ポスター発表】

- Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Svante Jonsell, Piotr Froelich: " Inelastic resonant scattering of positronium by (anti)hydrogen atom", XX International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics & XXI International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms, Belgrade, Serbia, 2019/7/18-20.
- Motoaki Niiyama, Takuma Yamashita, Yasushi Kino: "Four-body calculation of energy levels of muonic molecule due in muon catalyzed fusion", XXXIst International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, Deauville, France, 2019/9/23-30.
- Takuma Yamashita, Muhammad Umair, Yasushi Kino, Emiko Hiyama: "Coupled rearrangement channel calculation of dipole resonance states of positronic helium atom", XXXIst International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, Deauville, France, 2019/9/23-30.