

平成21年 6月 1日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2009

課題番号：18540401

研究課題名（和文） 物質と反物質の反応

研究課題名（英文） MATTER-ANTIMATTER REACTION

研究代表者

崎本 一博（SAKIMOTO KAZUHIRO）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・助教

研究者番号：60170627

研究成果の概要（和文）：反陽子が原子と衝突し捕獲されると直ちに消滅するとは限らない。反陽子は負の電荷を持つため、原子内の電子が反陽子に置き換わった反陽子原子というエキゾチックな複合粒子が生成される可能性がある。反陽子原子は高い励起状態にあると消滅せずに長い寿命を持つことができる。一番シンプルなものは反陽子と陽子からなる二体系で反陽子水素（特にプロトニウム）と呼ばれ、反陽子とヘリウムの一価イオンからなる系は反陽子ヘリウムと呼ばれる。本研究では、新たな計算手法を開発し、これらの反陽子原子の生成反応過程・消滅に対する安定性を理論的に解明した。

研究成果の概要（英文）： An antiproton, which has a negative charge, can form with a nucleus an antiprotonic atom in its collisions with atoms or molecules. The antiprotonic atoms can have a long lifetime against annihilation, and hence can be regarded as a stable atomic system. Developing a new computational technique, I succeeded at making a complete quantum mechanical study of the formation process of the antiprotonic atoms.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	700,000	0	700,000
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
総計	3,300,000	780,000	4,080,000

研究分野：原子分子物理

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：反陽子、反陽子水素原子、反陽子ヘリウム原子、反陽子原子、プロトニウム、エキゾチックアトム、反水素、ミュオン原子

## 1. 研究開始当初の背景

物質と反物質が混在すると今までの原子分子の世界では見られなかった現象が生じる。反物質は物質中でどのように消滅してい

くであろうか、反物質を物質中で十分に長く生き存えさせることが出来るであろうか。このような疑問に答えるためには、物質・反物質相互作用の原子分子レベルでの研究が必

要である。また、これにより会得する反物質制御技術は今後科学技術あるいは医学等への反物質の応用に多大な貢献をすることが期待される。

CERN 研究所（ジュネーブ）の反陽子減速器と日本の研究グループ等が開発した反陽子トラップ技術により、反水素原子や反陽子原子が実際に大量に生成されるようになった。まさに反物質科学の黎明期といえる。今後さらに発展が期待される反物質研究の新たな局面に対応できるためにも、将来予定されている様々な精密実験に的確な指針を与えられるためにも、物質と反物質の反応諸現象を原子物理の立場から解明することが重要になってくる。特に、日本のグループが中心となって進めている反陽子水素生成の実験計画に理論面で貢献できるであろう。

反陽子水素生成は、本申請者によって国内外を通じて初めて量子力学的精密計算が行われ、全反応断面積を求めることに成功した。その後の研究においてもほとんど他の追随を許していない。本研究の遂行により、当該分野の理論研究において日本が継続して先駆的かつ指導的立場を保つことになる。計算機的能力は飛躍的な向上を続けている。そこで、より高い CPU 性能の計算機を使い、前回の計算ではできなかったことを進展させていくことは重要である。

物質・反物質相互作用を理解するために、原子分子物理の慣用的な手法は有効なであろうか。それとも、新たな概念・ターミノロジーが必要になってくるのだろうか。本申請者は、反陽子と水素分子イオンの衝突による反陽子水素生成反応を調べたが、この一風変わった反応過程が馴染みのある化学反応の言葉で説明できることを見出した。このことから、反物質化学とでもいべき新分野が今後開拓されることが期待される。この類の研究はまさに始まったばかりである。本研究の遂行は、今後の反物質研究の方向付けに大きな役割を果たすであろう。

## 2. 研究の目的

反陽子と原子分子が低エネルギーで衝突すると、原子内の電子が反陽子に置き換わった反陽子原子と呼ばれる束縛系が生成される。反陽子と陽子からなる二体系 $\bar{p}p$ を反陽子水素、特にプロトニウムと呼ぶ。反陽子とヘリウムの一価イオンからなる系 $\bar{p}\text{He}^+$ は反陽子ヘリウムと呼ばれる。生成される反陽子原子は一般に非常に高い原子的内部状態にあり、このため物質・反物質消滅チャンネルに対して長い寿命を持つことが可能である。この

長寿命反陽子原子の分光を精密に行うことにより、宇宙の起源に関わる物理の基本法則を検証したり、強い相互作用の情報を得たりすることができる。物質と反物質からなる反陽子原子の生成機構を解明し、反陽子原子の性質や生成時の内部状態分布の知見を得ることは、反陽子原子分光を行う上で不可欠である。

本研究では、まず反陽子と原子分子衝突による反陽子生成過程の動力学と、生成された反陽子原子の状態分布について詳しく調べる。さらに、反陽子の代わりに負ミューオンによる衝突過程も考える。負ミューオンは反陽子と同じ負の電荷を持った重い粒子であるが、質量が反陽子の9分の1であり、質量効果を議論するのに適している。また、最近、負ミューオンが原子によって捕獲されてできるミュオン原子についておもしろい応用が考えられている。ミュオン原子から放出される特性X線を利用すると、あるモノの原子組成をモノを破壊することなく分析することができる。このため、ミュオン原子は「考古学」の世界でも注目されている。

物質・反物質相互作用の基本的問題として誰もが真っ先に興味を持つのは水素と反水素の反応であろう。そこで、本研究の最終目的として、水素・反水素衝突過程、すなわち、電子・陽電子・陽子・反陽子からなるエキゾチックな四体衝突系に対して第一原理から出発した量子力学的精密計算を行うことも考えたい。

## 3. 研究の方法

著しいCPU性能の進歩を考慮し、初年度に高額なワークステーションを一括購入することはせず、各年で購入可能な最新機種を導入していく。これにより常に高性能を維持しつつ、かつ全研究経費に対するコストパフォーマンスを最大になるようにできる。二年目以降は、高速ネットワーク利用による複数台ワークステーションをクラスター化し、より大規模な計算が可能な環境を構築していく。このように計算機環境を整備しつつ、その時点で取り組み可能な問題点を特定し、段階的により難しい研究課題を扱っていく。

まず、反陽子と原子の衝突による反陽子原子生成を考える。生成された反陽子原子の内部状態分布をきちんと扱えるような理論と数値計算法を考える。そこで、新しくR行列法を利用した手法を開発する。R行列法だと、一度だけ内部状態の計算を行うと、いろいろな衝突エネルギーでの計算を簡単に済ませることができる。反陽子原子のように非常に大

きな内部エネルギーを持った系やたくさんの共鳴現象が現れたりする系には最適な方法と考えられる。

さらに、負ミュオンと原子の衝突によるミュオン原子の生成過程についても調べる。計算機環境が十分に整備でき、余力がある場合には水素と反水素の反応の研究に着手したい。

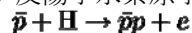
#### 4. 研究成果

具体的な項目に分けて研究成果について述べる。以下に述べる研究成果は全て本研究で実現したことであり、他の国内外の研究ではまだ成功していない。

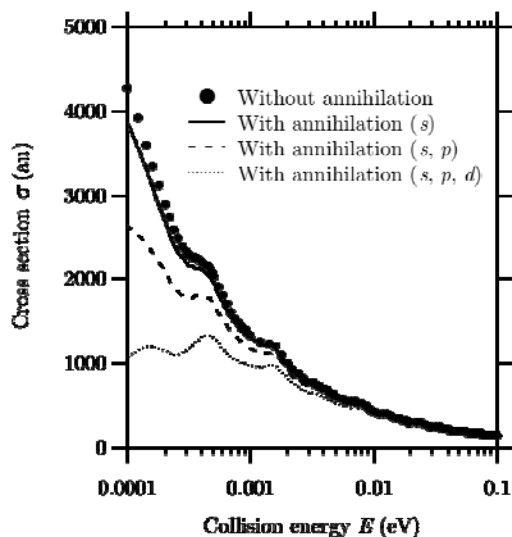
##### (1) R行列法の開発

テクニカルな面での本研究の最大の成果は、R行列法による数値的手法の開発に成功したことである。R行列の計算では、格子点表示による波動関数を直接解く方法を考えた。これにより、電子の連続状態や大きな内部エネルギーを持ったエキゾチックアトムを含んだ衝突反応過程の計算が可能になった。

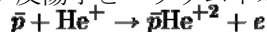
##### (2) 反陽子水素原子生成



反陽子と水素原子の衝突による反陽子水素原子（プロトニウム）生成過程の計算を行った。特に低エネルギー衝突での反陽子水素原子の状態分布について吟味した。この衝突系だと、低エネルギーでは低い角運動量状態しか生成されない。反陽子水素原子で角運動量が低いと、粒子反粒子消滅チャンネルが無視できなくなる。図は消滅が全く無いとした場合、ある角運動量状態が消滅するとした場合の反陽子水素原子生成断面積である。

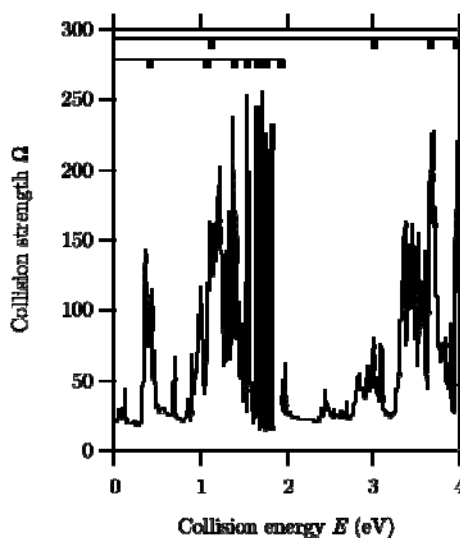


##### (3) 反陽子とヘリウムイオン生成

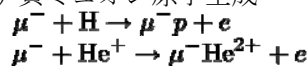


反陽子とヘリウムの一価イオンの衝突による反陽子ヘリウムイオン生成過程につ

いて研究した。この系では始チャンネルでクーロン引力が作用するため、低エネルギーでも高い角運動量状態の反陽子ヘリウムイオンが生成される。従って、反粒子消滅チャンネルの影響はあまり重要ではない。その代わりに、共鳴現象が非常にたくさん見られ、共鳴過程を正しく考慮しないと、反陽子ヘリウムイオン生成反応を理解することができない。共鳴は反陽子ヘリウムイオンをコアとした電子の Rydberg 状態と考えることができ、Rydberg シリーズで無限個の共鳴状態が現れる。この共鳴現象も R 行列法を用いることにより、容易に計算することができるようになった。図は反陽子ヘリウムイオン生成の collision strength (断面積にエネルギーをかけたモノ) である。たくさんの共鳴があり、複雑なエネルギー依存性を示すことが分かる。

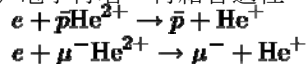


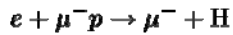
##### (4) 負ミュオン原子生成



負ミュオンと水素原子あるいはヘリウムの一価イオンの衝突によるミュオン原子生成過程について調べた。これにより、負の重粒子の捕獲反応における質量による違いについて論じ、反応動力学の理解を深めることができた。ミュオン原子では反陽子原子とは違い、粒子反粒子消滅チャンネルは存在せず、クーロン相互作用のみの系として考えることができる。(ミュオン自身、有限の寿命を持つが原子過程の時間スケールに比べると十分に長い。) このため、量子電磁気学の検証等に重要な役割を果たす。ミュオン原子生成時の状態分布はこの議論に不可欠な情報である。

##### (5) 電子付着・再結合過程





反陽子原子やミュオン原子はクーロン引力で強く結合している系である。そのために、原子の一種として考えることができる。しかし、一方で、重い粒子を複数個含んだ系でもあり、この立場から見ると、多原子分子と考えることもできる。そこで、分子の衝突現象との類似性を調べることがおもしろくなっていく。本研究では、特に電子と分子の衝突という観点で考えてみた。扱ったエキゾティック系は、反陽子ヘリウムイオン、ミュオンヘリウムイオン、ミュオン水素原子で、これらは二原子分子と考えられる。そして、解離性再結合、解離性電子付着などの分子過程に類似した現象が見られた。実際の分子では多電子問題となり、厳密な計算を行うことは非常に難しい。しかし、ここで扱うのは三体系であり、前に述べたエキゾティック原子生成反応の逆過程でもある。従って、本手法により厳密な計算を行うことができる。エキゾティックな系を扱うことにより、電子付着・再結合過程の反応動力学をより詳しく厳密に理解することができた訳である。

(6) 反水素原子と水素原子の反応

本研究では、個人的体調のこともあり、反水素原子と水素原子の反応まで計算を行うことができなかった。しかし、前述の反陽子を含んだ諸反応動力学の知見を得ることに成功し、反水素と水素の反応を調べる下地は十分に作る事ができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① Kazuhiro Sakimoto, Cross sections for antiproton capture by helium ions, Phys. Rev. A, (2010) to be published
- ② Kazuhiro Sakimoto, Capture of negative muons by hydrogen atoms at low collision energies, Phys. Rev. A, 81 (2010) 012511
- ③ Kazuhiro Sakimoto, R-matrix calculation of negative muon capture by helium ions, Phys. Rev. A, 80 (2009) 012517
- ④ Kazuhiro Sakimoto, Dissociative recombination of antiprotonic helium ions, Phys. Rev. A, 79 (2009) 042508
- ⑤ Kazuhiro Sakimoto, Dissociative electron attachment to muonic hydrogen, Phys. Rev. A, 78 (2008)

042509

- ⑥ Kazuhiro Sakimoto, R-matrix calculation of antiproton capture by helium ions, Phys. Rev. A, 76 (2007) 042513
- ⑦ Kazuhiro Sakimoto, Ionization of helium ions by low-energy antiproton collisions, Phys. Rev. A, 74 (2006) 042711
- ⑧ Kazuhiro Sakimoto, Low-energy capture of antiprotons by helium ions, Phys. Rev. A, 74 (2006) 022709

[学会発表] (計7件)

- ① 崎本一博、水素原子による負ミュオンの捕獲反応のR行列計算、日本物理学会 (2010年3月、岡山)
- ② 崎本一博、ヘリウムイオンによる負ミュオン捕獲反応のR行列計算、日本物理学会 (2009年9月、熊本)
- ③ 崎本一博、ミュオン水素原子の解離性電子付着、日本物理学会 (2009年3月、東京)
- ④ 崎本一博、ミュオンと水素原子衝突における共鳴現象、日本物理学会 (2008年9月、岩手)
- ⑤ 崎本一博、電子と反陽子水素原子の共鳴散乱、日本物理学会 (2008年3月、大阪)
- ⑥ 崎本一博、電子と反陽子ヘリウムイオンの衝突のR-行列計算、日本物理学会 (2007年3月、鹿児島)
- ⑦ 崎本一博、反陽子とヘリウムイオンの衝突、日本物理学会 (2006年9月、千葉)

[その他]

ホームページ等

<http://atom0.isaslnal.isas.jaxa.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

崎本 一博 (SAKIMOTO KAZUHIRO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・助教

研究者番号：60170627

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：