

令和 2 年 9 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05592

研究課題名(和文) 低速反水素原子過程四体系の非断熱組替え精密計算

研究課題名(英文) High-precision non-adiabatic calculation of slow anti hydrogen atomic processes

研究代表者

木野 康志 (Kino, Yasushi)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：00272005

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：低速反水素原子と水素原子またはポジトロニウムの四体系の非断熱組替え精密計算をおこなった。計算結果は断熱近似による従来の計算結果を大きく改善した。計算結果から物質と反物質間の特徴を明らかにした。物質と反物質中の粒子と反粒子が自発的に対となる組み替え反応が、物質と反物質の衝突で主要な反応となる事が分かった。また、原子核と反原子核間の核力による相互作用が、量子効果により原子・分子のスケールまで影響を及ぼした。三体模型では表現しきれなかった内部構造をもつ粒子同士の反応や共鳴状態が内部に共鳴状態を含む二重の共鳴状態など四体系特有の現象が取り扱えるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

標準理論において保証されるCPT対称性や、重力相互作用における弱い等価原理を検証する上で、良いプローブとなる低速反水素原子を取り扱う上で基礎となる原子衝突過程を明らかにした。測定が困難な原子核と反原子核間の相互作用が、反水素化水素分子のエネルギーや寿命から直接測定できることが明らかになった。反水素と地球との重力相互作用の研究に必要な超低速反水素生成のための材料となる反水素陽イオンの生成についての基礎データが得られた。また、物質と反物質の最小単位としての水素原子と反水素原子の反応過程を明らかにすることにより、物質科学の理解の幅が広がった。

研究成果の概要(英文)：Non-adiabatic coupled rearrangement channel calculations were precisely performed for the four-body systems of slow antihydrogen atoms and hydrogen atoms or positronium. The calculated results greatly improved the conventional calculation of adiabatic approximation. From the calculated results, the characteristics between matter and antimatter were clarified. It was found that the rearrangement reaction, in which particles and antiparticles in matter and antimatter spontaneously pair, is the main reaction in the collision of matter and antimatter. In addition, the interaction due to the nuclear force between the nucleus and the anti-nucleus affected the atomic and molecular scales by the quantum effect. Phenomena peculiar to the four-body system that cannot be fully represented in the three-body model can now be handled, such as reactions between particles having internal structures and double resonance states in which the resonance state includes the resonance state inside.

研究分野：原子分子理論

キーワード：反水素 反陽子 陽電子 反物質 エキゾチック原子 少数多体系 非断熱過程 共鳴状態

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

ビッグバン後に生成した粒子・反粒子対が宇宙の膨張による冷却とともに対消滅したが、粒子・反粒子の非対称性により、物質だけの宇宙が僅かに残ったと考えられている。しかし、この非対称性は、CP(Charge conjugation, Parity inversion)対称性の破れで説明するには差が大きすぎるとされている。標準理論では、粒子と反粒子の質量、電荷の大きさ、磁気モーメントの大きさ、寿命などが完全に等しいとする CPT(Time reversal)対称性が保証されているが、重力を含む曲がった時空間上では CPT が破れる可能性があり、この破れのほころびを見つける方法の一つとして、粒子・反粒子の高精度分光や重力測定などによる比較がある。反水素原子 ( $\bar{H}$ ) は電子の反粒子である陽電子 ( $e^+$ ) と陽子の反粒子である反陽子 ( $\bar{p}$ ) からなる反原子であり、反粒子のみで構成される反物質である。欧州原子核研究機構 (CERN) の反陽子減速器 (AD) において、反水素生成・取扱技術が飛躍的に進展し、長時間(1000 s 以上)の低温トラップが実現し、偏極反水素ビームや反水素イオン ( $\bar{H}^+$ ) のレーザー冷却の開発などが精力的に進められ、分光や重力の測定による反水素と水素の高精度の比較が実際に可能になりつつある。計画中も含め 7 つの大きな実験グループが精力的に研究を進めており、CERN も反陽子を 5.3 MeV から 0.1 MeV に電子冷却する超低速反陽子リング (ELENA) の建設を決め数年後の稼働を目指している。

反水素や反陽子を含む低速原子衝突の三体系では、様々な反応機構が明らかにされてきた。しかし、低速の反水素原子を用いた基礎物理学の検証実験には、三体近似で表現出来ない衝突現象が多数ある。例えば、反水素・水素散乱 ( $\bar{H}+H$ ) は、残留水素などにより常に起こり得る現象で実験の大きな障害となるが、詳しい理解は得られていない。 $\bar{H}+H$  の系は、物質と反物質の相互作用を考察する上で必要最低限の構成粒子を含む雛形であるが、水素原子同士の衝突とは大きく異なる側面をもつ。水素原子同士の衝突では、核間距離が小さくなくても電子は束縛されているが、 $\bar{H}+H$  の衝突では、反陽子・陽子間距離が小さくなると双極子モーメントが小さくなり、電子と陽電子を束縛できなくなる。このため、断熱近似が破綻し、 $\bar{H}+H$  衝突の記述には非断熱的な取り扱いが不可欠となる。また、このような内部構造をもつ粒子同士の散乱問題は、原子物理学の最も基本的な反応であるが、通常の実験条件では、精密な理論との詳細な比較が難しいが、現在の低速反水素の条件では比較が可能となる(粒子・反粒子の対消滅現象を利用できることもこの研究の有利な点である)。

## 2. 研究の目的

標準理論において保証される CPT 対称性や、重力相互作用における弱い等価原理を検証する上で、低速反水素原子は良いプローブとなるが、低速反水素原子の生成・制御には、理論計算により正確に求めておく必要がある。反陽子と陽子を含む衝突には、核間距離が接近すると断熱的な描像が破綻する領域があり、非断熱による厳密な取り扱いを必要とする。本研究では、反水素原子を冷却し様々な検証実験を行うための反水素原子を含む四体系の原子過程を、非断熱な取り扱いにより厳密に計算する。また、水素原子と反水素原子の反応など、物質と反物質間の相互作用を解明するとともに、四体系特有の少数多体系の問題を開拓する。

## 3. 研究の方法

厳密な四粒子系のハミルトニアンを用い、正しい散乱の境界条件を課すことが出来るヤコビ型の座標系を用いて波動関数を記述する。四粒子系では、粒子の組み替えにより 15 種類のヤコビ型の座標系の取り方があるが、本研究では基底関数を全てのヤコビ座標につい

て用意することにより、効率よく四体系の波動関数を構築することが出来た。

ガウス型基底関数と球面調和関数で組み替え座標の計算を行うガウス関数展開法に基づく四体系を精密に計算する計算コードを新たに作成した。この方法は、我々を含む研究グループが開発し、発展させてきたが、これまで、この方法ではクーロン力等の長距離力を含む場合は、計算機の能力が足りず計算は困難であった。本研究により、クーロン四体系の束縛状態、共鳴状態、散乱状態を構成粒子や相互作用に依存する近似を含まずに高精度な計算を行うことができるようになった。四粒子系の共鳴状態では、複素座標回転法を用いて、共鳴エネルギー、寿命を計算した。

#### 4. 研究成果

陽電子と反陽子からなる反水素原子と水素原子やポジトロニウムがつくるエキゾチック分子系の研究を行った。ポジトロニウムは、陽電子と電子が結合した水素様の束縛状態である。これまでも、反水素原子と水素原子が分子状態(反水素化水素分子)を形成する可能性が指摘されていたが、反水素原子の核と水素原子の核の間の相互作用は引力で、接近によって二つの核は加速される。反陽子と陽子の距離が十分に小さくなると、双極子モーメントが弱まり、電子や陽電子を結合できなくなる。このために、核の運動と軽い粒子の運動を分離して解く従来の断熱近似が適用できず、非断熱計算が必要になる。反水素化水素分子は、分子内で陽子と反陽子が接近し結合してプロトニウムと呼ばれる二体系の束縛状態を形成すると、プロトニウムとポジトロニウムに自発的に解離する。この解離反応で放出されるプロトニウムの主量子数が30程度の高励起状態にあり、この高励起準位の波動関数を数値的に高精度で再現する必要がある。また、プロトニウムが高励起状態にあるため、様々な解離過程が可能な共鳴状態である反水素化水素分子を非断熱計算することはこれまで困難であった。本研究では、初めて高精度な非断熱計算により、水素原子と反水素原子の衝突しきい値の真下に反水素化水素分子の共鳴状態を見いだした。この状態はこれまでの断熱近似で議論されてきた分子状態とは、波動関数の性質がことなり、断熱近似はこの系では使用できないことが示された。また、陽子と反陽子間に核力の相互作用を入れると、共鳴エネルギーが16%減少した。これは、核力による陽子・反陽子の束縛状態が一つ増えるために、状態間の直交性によるエネルギーのシフトが分子共鳴状態にまで及んだためである。

本研究から、水素原子と反水素原子間の相互作用、すなわち物質と反物質間の特徴が明らかになった。

- 1) 物質と反物質を構成する粒子と反粒子間のクーロン引力による相関が強く働き、物質と反物質が接触すると、粒子と反粒子の対が組み替え反応によって生じる。このため、物質と反物質が引力ポテンシャルによって結合しても、自発的な組み替え反応が起こり解離する。この状態は準安定な共鳴状態となる。
- 2) 原子核と反原子核間の核力の相互作用の影響が原子・分子サイズのスケールまで及び、エネルギー準位や解離寿命が大きく変化する。
- 3) 原子核と反原子核間の相対運動を記述するための断熱ポテンシャルは核間距離が小さいときに破綻しており、断熱ポテンシャルが作る状態は束縛状態としての境界条件を満たしていない。

さらに、物質と反物質間の相互作用の応用例として、陽電子や反陽子と原子の衝突も取扱い、上記の特徴がここでも検証することができた。

また、関連する問題として、反水素とポジトロニウムの衝突から反水素陽イオン(反陽子と二つの陽電子から成る三体系)の生成断面積の計算を行った。この計算では、反水素とポジトロニウ

ムのように内部状態をもつ物同士の衝突や、反水素陽イオンの共鳴状態にと電子が共鳴的に結合した二重の共鳴状態など、四体系ならではの新しい少数多体系の問題が見つかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino	4. 巻 181
2. 論文標題 Three-body resonance states just below the antiproton and hydrogen dissociation threshold	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The European Physical Journal, Web of Conference	6. 最初と最後の頁 01034 (10 pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201818101034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino	4. 巻 7
2. 論文標題 Coupled channel study of antihydrogen-hydrogen molecular resonance state	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics, Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 011004 (9 pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAPCP.7.011004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino	4. 巻 72
2. 論文標題 Coupled channel effects on resonance states of positronic alkali atom	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The European Physical Journal D	6. 最初と最後の頁 13 (9 pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjd/e2017-80542-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Svante Jonsell and Piotr Froelich	4. 巻 875
2. 論文標題 A coupled rearrangement channel analysis of positronium antihydride	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 052031-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1742-6596/875/6/052031">https://doi:10.1088/1742-6596/875/6/052031</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Takuma Yamashita, Muhammad Umair, Yasushi Kino	4. 巻 50
2. 論文標題 Bound and resonance states of positronic copper atoms	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics	6. 最初と最後の頁 205002 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1361-6455/aa8b3b">https://doi.org/10.1088/1361-6455/aa8b3b</a> 0953-4075/	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino	4. 巻 72
2. 論文標題 Coupled channel effects on resonance states of positronic alkali atom	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The European Physical Journal D	6. 最初と最後の頁 13 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1140/epjd/e2017-80542-6">https://doi.org/10.1140/epjd/e2017-80542-6</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino	4. 巻 accepted
2. 論文標題 Three-body resonance states just below the antiproton and hydrogen dissociation threshold	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The European Physical Journal Web of Conference	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Atsuo Iiyoshi, Yasushi Kino, Motoyasu Sato, Yoshiharu Tanahashi, Norimasa Yamamoto, Shin Nakatani, Takuma Yamashita, Michael Tendler, Osamu Motojima	4. 巻 2179
2. 論文標題 Muon catalyzed fusion, present and future	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020010 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5135483	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamashita Takuma, Kino Yasushi	4. 巻 100
2. 論文標題 Relativistic corrections to the binding energy of positronic alkali-metal atoms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 062511 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.100.062511	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Froelich Piotr, Yamashita Takuma, Kino Yasushi, Jonsell Svante, Hiyama Emiko, Piszczatowski Konrad	4. 巻 240
2. 論文標題 Four-body treatment of the antihydrogen-positronium system: binding, structure, resonant states and collisions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Hyperfine Interactions	6. 最初と最後の頁 46 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10751-019-1572-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計48件 (うち招待講演 16件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Svante Jonsell, Piotr Froelich
2. 発表標題 ポジトロニウム・水素原子低速衝突の共鳴散乱断面積の計算
3. 学会等名 第55回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新山元彬, 山下琢磨, 木野康志
2. 発表標題 ミュオン触媒核融合におけるミュオン分子 $d\mu e$ のエネルギー準位の4体計算
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Konrad Piszczatowski, Piotr Froelich
2. 発表標題 核子・反核子相互作用の水素反水素分子共鳴エネルギーへの影響
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木野康志、山下琢磨、佐藤元泰
2. 発表標題 飛行中ミュオン触媒核融合サイクルと核反応断面積の計算
3. 学会等名 2018日本放射化学年会・第62回放射化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木野康志、山下琢磨、岡壽崇、佐藤元泰
2. 発表標題 核融合中性子によるLLFP 処理 (2) プラズマを標的とするインフライトミュオン触媒核融合の物理
3. 学会等名 日本原子力学会2018 年秋の大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤元泰、木野康志、棚橋美治、山本則正、高野廣久、武藤敬、藤田明希、飯吉厚夫、松原章宏
2. 発表標題 核融合中性子によるLLFP処理 (3) マッハ衝撃波面を標的とするインフライト・ミュオン触媒核融合中性子源
3. 学会等名 日本原子力学会2018 年秋の大会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Svante Jonsell, Piotr Froelich
2. 発表標題 ポジトロニウム・反水素原子共鳴の崩壊過程の分析
3. 学会等名 原子衝突学会第43回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下琢磨, 木野康志
2. 発表標題 反陽子を含む水素分子様少数多体系の共鳴状態の計算
3. 学会等名 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」キックオフシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木野康志
2. 発表標題 マッハ衝撃波干渉領域での飛行中ミュオン触媒核融合の創生
3. 学会等名 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」キックオフシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木野康志
2. 発表標題 少数多体計算からみたエキゾチックな原子核・原子・分子
3. 学会等名 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」キックオフシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Motoaki Niiyama, Takuma Yamashita, Yasushi Kino
2. 発表標題 Non-adiabatic calculation of electron-muonic molecule compound in muon-catalyzed nuclear fusion
3. 学会等名 Tohoku University's Chemistry Summer School 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino
2. 発表標題 Development of Hybrid Gaussian Basis for 4-body Exotic Systems
3. 学会等名 Tohoku University's Chemistry Summer School 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Svante Jonsell, Piotr Froelich
2. 発表標題 ポジトロニウムと水素原子の低速非弾性衝突の計算
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Kino
2. 発表標題 Nuclear reaction in atomic collision under a screening effect from negatively charged massive particle
3. 学会等名 13th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Konrad Piszczatowski, Piotr Froelich
2. 発表標題 Resonance states in an ultra cold collision between an antihydrogen atom and impurity particles
3. 学会等名 3rd Japan-China Joint Workshop on Positron Science, Hefei, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino
2. 発表標題 Coupled channel effects on resonance states of positronic alkali atom
3. 学会等名 XIX International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics & XX International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasushi Kino
2. 発表標題 Nuclear reaction in muon atomic collision
3. 学会等名 The 30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC XXX), Cairns, Australia (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Svante Jonsell, Piotr Froelich
2. 発表標題 A coupled rearrangement channel analysis of positronium antihydride PsHbar
3. 学会等名 The 30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC XXX) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Konrad Piszczatowski, Piotr Froelich
2. 発表標題 Quasi-molecule formation in a cold antihydrogen-hydrogen reaction
3. 学会等名 Tohoku University's Chemistry Summer School (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Konrad Piszczatowski, Piotr Froelich
2. 発表標題 反水素・水素分子共鳴状態の非断熱計算II
3. 学会等名 原子衝突学会第42回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Konrad Piszczatowski, Piotr Froelich
2. 発表標題 Resonance states in a cold collision between an antihydrogen atom and a hydrogen atom/ion
3. 学会等名 International Conference on Exotic Atoms and Related Topics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Konrad Piszczatowski, Piotr Froelich
2. 発表標題 水素・反水素分子の四粒子非断熱計算
3. 学会等名 第11回分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Konrad Piszczatowski, Piotr Froelich
2. 発表標題 水素・反水素系における共鳴状態の非断熱計算II
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木野康志
2. 発表標題 マッハ衝撃波干渉領域での飛行中ミュオン触媒核融合の創生
3. 学会等名 第8回 Muon科学と加速器研究
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木野康志
2. 発表標題 ミュオン触媒核融合に関するミュオン分子共鳴状態の精密計算
3. 学会等名 第18回NIFS物質科学研究討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino
2. 発表標題 Bound and Resonance States of Positronic Alkali Atoms
3. 学会等名 14th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥津賢一、宮下湖南、安田和弘、木野康志、Patrick Strasser、永谷幸則、三宅康博、山下琢磨、岡壽崇、佐藤元泰
2. 発表標題 重水素固体薄膜中におけるミュオン触媒核融合反応率の計算
3. 学会等名 2019日本放射化学年会・第63回放射化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Kino
2. 発表標題 Basic research of in-flight muon catalyzed fusion in the Mach shock wave interference region (Theory)
3. 学会等名 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下琢磨、木野康志、肥山詠美子、Svante Jonsell、Piotr Froelich
2. 発表標題 ポジトロニウムと水素原子の低速非弾性衝突の計算
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsuo Iiyoshi, Yasushi Kino, Motoyasu Sato, Yoshiharu Tanahashi, Norimasa Yamamoto, Shin Nakatani, Takuma Yamashita, Michael Tandler, Osamu Motojima
2. 発表標題 Muon Catalyzed Fusion, Present and Future
3. 学会等名 Nature Conference Advances and Applications in Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Kino
2. 発表標題 Energy levels and stabilities of muonic molecule in muon catalyzed fusion
3. 学会等名 15th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino
2. 発表標題 For analysis of fundamental muonic atom process: development of few-body calculation method and related topics on relativistic effects of exotic atoms,
3. 学会等名 Seminar on fundamental theories for negative muon experiments at J-PARC, and its application to elemental analysis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木野康志
2. 発表標題 低温高密度ミュオン核融合(MCF)から IFMCFの理論の進展
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会 シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Okutsu, Y. Kino, K. Miyashita, K. Yasuda, T. Yamashita, and M. Sato
2. 発表標題 Role of resonance states of muonic molecular in muon catalyzed fusion
3. 学会等名 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下琢磨、木野康志
2. 発表標題 ポジトロニウム・水素原子共鳴の崩壊過程の分析
3. 学会等名 原子衝突学会第44回年会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本則正、木野康志
2. 発表標題 定常超音速衝撃波中インフライト・ミュオン触媒核融合の概念
3. 学会等名 原子衝突学会第44回年会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木野康志
2. 発表標題 飛行中ミュオン触媒核融合の創生
3. 学会等名 第36回無機・分析化学コロキウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Yamashita, Y. Kino, E. Hiyama, K. Piszczatowski, S. Jonsell, P. Froelich
2. 発表標題 Towards prediction of the rates of antihydrogen positive ion production in antihydrogen-excited positronium reaction
3. 学会等名 XXXIst International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年



1 . 発表者名 T. Yamashita, Y. Kino
2 . 発表標題 Calculation of positronium-hydrogen atom reaction and its application to antihydrogen physics
3 . 学会等名 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (招待講演)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, Svante Jonsell, Piotr Froelich
2 . 発表標題 Inelastic resonant scattering of positronium by (anti)hydrogen atom
3 . 学会等名 XX International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics & XXI International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Takuma Yamashita, Muhammad Umair, Yasushi Kino, Emiko Hiyama
2 . 発表標題 Coupled rearrangement channel calculation of dipole resonance states of positronic helium atom
3 . 学会等名 XXXIst International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Motoaki Niiyama, Takuma Yamashita, Yasushi Kino
2 . 発表標題 Four-body calculation of energy levels of muonic molecule dtmue in muon catalyzed fusion
3 . 学会等名 XXXIst International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 木野康志
2. 発表標題 ミュオン触媒核融合の新展開
3. 学会等名 2019年度物質科学研究討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下琢磨, 木野康志
2. 発表標題 陽電子アルカリ金属原子における相対論効果
3. 学会等名 2019年度物質科学研究討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安田和弘, 山下琢磨, 新山元彬, 奥津賢一, 木野康志
2. 発表標題 新たなミュオン触媒核融合モデルのためのミュオン分子共鳴の計算
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下琢磨, 木野康志, Svante Jonsell, Piotr Froelich
2. 発表標題 反水素原子とポジトロニウムの衝突における反水素正イオン生成断面積の四体散乱計算
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木野康志
2. 発表標題 飛行中ミュオンによるミュオン触媒核融合
3. 学会等名 J-PARCにおけるトリチウム使用実験シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下琢磨, 木野康志, 肥山詠美子, Svante Jonsell, Piotr Froelich
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北大学大学院理学研究科化学専攻「最新の研究成果」 <a href="http://www.chem.tohoku.ac.jp/research/research_outcome/p009.html">http://www.chem.tohoku.ac.jp/research/research_outcome/p009.html</a>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考