

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H06205

研究課題名（和文）ポジトロニウムのレーザー冷却の実現と光周波数コムによる弱い等価原理の検証

研究課題名（英文）Realization of laser cooling of positronium atoms and test of the weak equivalence principle using an optical frequency comb

研究代表者

吉岡 孝高（Yoshioka, Kosuke）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：70451804

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,600,000円

研究成果の概要（和文）：反物質を含む原子であるポジトロニウムのレーザー冷却をはじめて実現するための、長時間持続で広帯域かつパルス内周波数チャープを有する深紫外パルスレーザーの開発に成功した。また、光ファイバー網を通じて光周波数標準に厳密に安定化可能なフェムト秒光周波数コムを実現し、加速器施設等の非光学実験室環境においても超高精度な遷移周波数測定を実現できるようになった。固体空孔内で予冷された高密度ポジトロニウムの生成のため、陽電子からの生成効率の材料選定による向上、および陽電子ビームの時間空間領域での圧縮を実現し、さらにエアロゲル空孔内での1S-2P遷移の観測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果を拡張することで、反物質を含む原子を実際に超低温状態にしてその遷移周波数を正確に測定することが可能となる。これは、最も精密に実験との比較が可能な量子電磁力学の厳密な検証となる他、反物質に働く重力の効果が日常の物質と同一であるか否かという物理学の根本的な問題の解明につながる。また、集団の量子縮退状態を形成することが可能となり、この新物質相の解明は物理学の進展に大きく貢献するほか、新奇ガンマ線光源としての活用も期待されている。本研究は、これらのような新しい学術分野の開拓につながる大きな一歩となったと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We successfully developed a special deep-ultraviolet pulsed laser for the realization of laser cooling of positronium. The laser has a long pulse duration, a very broad bandwidth, and it shows a fast frequency chirp. We also realized an stable femtosecond frequency comb that can be phase-locked to a remote optical frequency standard via optical fiber networks. It enables us to conduct ultra-precise frequency measurements in non-laboratory environments such as particle accelerators. We demonstrated an improved production efficiency of positronium atoms from positrons by searching the most efficient material to prepare pre-cooled, dense gases of positroniums in cavities in a solid-state material. For that purpose, we also succeeded in compression of a positron beam in both time and spatial domains. In addition, we succeeded in the observation of the 1S-2P transition of positronium atoms in cavities in an aerogel.

研究分野：レーザー分光学

キーワード：ポジトロニウム エキゾチック原子 レーザー冷却 フェムト秒光周波数コム ポース・アインシュタイン凝縮

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電子と、その反物質である陽電子の二体束縛対であるポジトロニウムは、レプトンのみで構成される最も基本的な原子である。反物質を含む物質系で唯一比較的高密度な生成が可能であり、この遷移周波数の精密な測定は量子電磁力学の厳格な検証のみならず、弱い等価原理の検証を通じた物理学への重大な貢献が可能であると考えられている。また、ボース・アインシュタイン凝縮体の実現へ向けた研究も数十年にわたって展開されてきた。これら全ての課題に対するブレークスルーとなるのは、寿命 142 ns の 1S オルソポジトロニウム(以下、ポジトロニウム)集団の温度を従来よりも桁違いに下げることである。しかし、軽い質量に起因して室温においても 140 GHz もの広帯域なレーザーが必要であり、先行研究ではレーザー冷却可能な光源は構築できていない状況であった。

2. 研究の目的

ポジトロニウムのレーザー冷却を世界で初めて実証するための特殊な光源を構築し、完成させること、低温化したポジトロニウムの高精度な遷移周波数測定を実現するためのフェムト秒光周波数コムを構築および性能評価を行うことを目指した。また、高密度なポジトロニウムの発生および固体との相互作用を通じた予備冷却を行うため、陽電子ビームの制御および固体試料内のポジトロニウムの挙動を解明する。これらを実現することで、ポジトロニウムのレーザー冷却の実証、およびポジトロニウムの精密な遷移周波数測定による反物質系の弱い等価原理の検証実験といった、未踏の実験研究に挑戦することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) ポジトロニウムのレーザー冷却用新奇光源の開発

電子 2 個分のきわめて軽い質量を持つポジトロニウムが示すきわめて広帯域なドップラー広がりに対応させ、寿命内の効果的な冷却を実現するため、特殊な冷却用レーザー光源を構築しその性質を調べた。具体的には、729 nm において発振する単一縦モード外部共振器型半導体レーザーを構築し、これを別途開発したサブマイクロ秒 Ti:Sapphire パルスレーザーに注入同期を行う。本パルスレーザーの共振器内には電気光学位相変調器を導入し、光周波数帯域の拡張を行う。さらに、この出力パルスマルチパスアンプで増幅した上で、第二高調波発生および和周波発生を経て 243 nm の冷却用パルスを生じさせる。ファブリー・ペローエタロンを用いたシングルショットスペクトル観測や、マルチパスアンプにおけるタイミング制御を通じて、パルスレーザー内の光周波数帯域拡大のダイナミクス観測を行った。

また、本研究で構築した特殊な配置の光源について動作原理の理解を行うため、数値計算を実装し実験結果との比較を行った。

図 1: ポジトロニウム冷却用レーザーの概念図

(2) 遷移周波数の精密計測のための高精度光周波数コムの開発

ポジトロニウムの集団を低温にすると、量子電磁力学の精密検証のために重要な 1S-2S 遷移等の遷移周波数の測定精度が格段に向上することが期待される。この遷移周波数測定に必要な超高精度なフェムト秒光周波数コムを完成させた。構築した長期安定 Ti:Sapphire フェムト秒光周波数コムを RF の国家標準に安定化した上で、通信用光ファイバー網を通じて遠隔の光周波数標準を受信し、それに直接的に光周波数コムを縦モードの 1 本を位同期した。このことで、高密度なポジトロニウムを生成する加速器施設においても世界最高精度の遷移周波数測定を実施可能とすることを狙った。光周波数精度は劣化するものの、簡便な方法としてドップラーフリー分光したルビジウム原子の遷移への安定化法の構築も併せて行った。

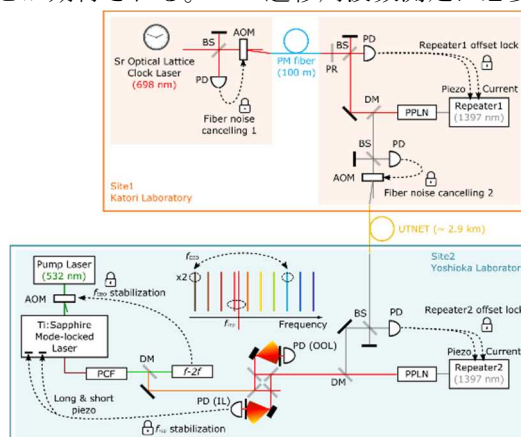


図 2: 光ファイバーネットワークを活用した超高精度フェムト秒光周波数コム構築

(3) ポジトロニウムの高効率な生成法と予備冷却法の開拓

陽電子ビームをもとに高密度なポジトロニウムを発生させるとともに、レーザー冷却を行う直前の予備冷却を実現するために、本研究ではシリカの微小な空孔を活用することを計画した。これは将来のボース・アインシュタイン凝縮の実証実験も見据えた配置であり、最適なシリカエアロゲルを用いて高効率なポジトロニウム発生のための材料探索と冷却ダイナミクスの観測を行った。

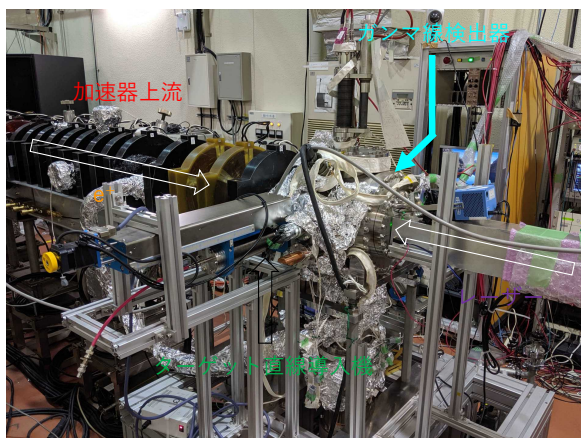


図 3 : KEK 低速陽電子施設において構築したポジトロニウム生成および分光用の実験系

シリカエアロゲルの表面には、プラズマ CVD 法により 75nm の薄膜を成膜し、空孔から逃げ出す陽電子を防いでいる。また、高密度実現のため KEK の低速陽電子施設 (SPF-B1 ビームライン) の陽電子ビームの短パルス化や集光のため、+5300V の高電圧パルスチョッパーの製作・導入、および磁気集束レンズの設置を行った。さらに、シリカエアロゲルの空孔内に生成したポジトロニウムに 243 nm のナノ秒パルスレーザーを照射して 1S-2P 遷移を誘起し、共鳴幅や寿命の計測を行った。図 3 中央の真空チャンバーにシリカエアロゲルターゲットが配置してあり、左から陽電子、右からレーザーを照射している。

4. 研究成果

(1) ポジトロニウムのレーザー冷却用新奇光源の開発

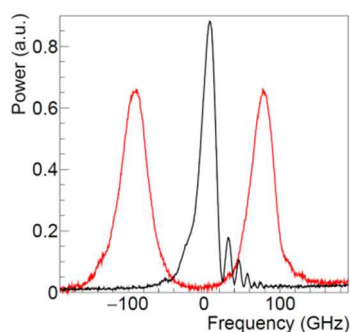


図 4 : 構築した冷却用レーザーの時間平均スペクトル (赤線)

繰り返し 10 Hz のナノ秒パルス Nd:YAG レーザーで励起した Ti:Sapphire 結晶をレーザー媒質とするレーザー共振器を構築した。類似のパルスレーザーでは通常採用されない高い反射率の出力鏡を採用し、さらに電気光学位相変調器を共振器内に配置することで、243 nm において冷却のために最適な 300 ns 以上のパルス幅と、時間積算スペクトル幅が片側 50 GHz 程度の対称な広帯域スペクトルが得られた (図 4)。パルスエネルギーは約 20 μ J であり、これらの性能は室温付近まで予冷されたポジトロニウムをレーザー冷却によって急冷するために十分である。

また、本研究で構築したパルスレーザーの動作シミュレーションのため時間領域の数値計算を構築し、時間分解スペクトルの実験結果との比較を行った。その結果、パルス内で高速な周波数チャープが発生しており、ポジトロニウムのレーザー冷却の効率向上に貢献することが明らかになった。また、この計算によってボース・アインシュタイン凝縮実現のために必要な、最も効率の良いレーザー冷却のための光周波数の設計を行うことが可能となった。

また、本研究で構築したパルスレーザーの動作シミュレーションのため時間領域の数値計算を構築し、時間分解スペクトルの実験結果との比較を行った。その

(2) 遷移周波数の精密計測のための高精度光周波数コムの開発

フィードバック制御を通じて片道 2.9 km の光ファイバーネットワークにおけるファイバーノイズをキャンセルした上で、フェムト秒光周波数コムへ光周波数標準用の超狭線幅 cw レーザー (698 nm) を送信した。構築した光周波数コムの光周波数のフリーランニングでの線幅が 30 kHz 程度と狭く、ファイバーノイズキャンセルの帯域以内に収まっていることに着目し、高フィネス共振器等を使用せず、直接的にフェムト秒光周波数コムの一本の縦モードを受信した超狭線幅レーザーに位相同期した。このような閉ループの安定化のもとで、開ループの光周波数コムの周波数安定度特性の評価を行った。その結果、相対不確かさと

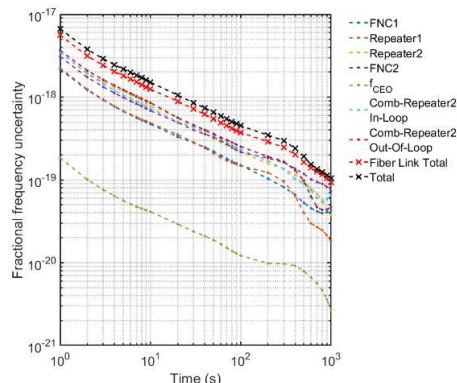


図 5 : 構築したフェムト秒光周波数コムの遠隔光周波数標準に対する相対不確かさの評価結果

して平均時間 1 秒あたり 6.7×10^{-18} 、1000 秒あたり 1.1×10^{-19} と世界最高の安定度を示すことが分かった (図 5)。この性能は現時点で最も高い安定度の光原子時計の精度と安定度を、一切の劣化なくフェムト秒光周波数コムに転写し、超高精度の光周波数測定に適用可能であることを示している。

(3) ポジトロニウムの高効率な生成法と予備冷却法の開拓

シリカエアロゲルの選定を行うことで、入射陽電子バンチに対するポジトロニウムの生成効率が 100 nm 程度のサイズの空孔内で約 50% となることが明らかになった。また、高密度化のための陽電子のパルス幅を 16 ns まで短パルス化し、直径 1.5 mm (半値全幅) まで集光することに成功した。一方、空孔内に生成されたポジトロニウムに、レーザー冷却に向けて 1S-2P 遷移を誘起する 243 nm のナノ秒深紫外レーザーと 2P 状態からイオン化のための 532 nm のナノ秒可視レーザーを照射し、2P 状態への励起を確かめる実験を行った。

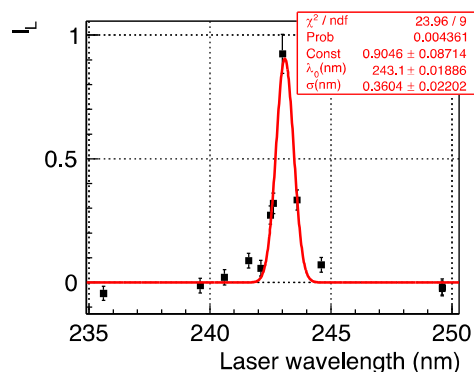


図 6: シリカエアロゲル空孔内のポジトロニウムの 1S-2P 励起スペクトル

その結果、2P 状態のポジトロニウムが確かに生成されていることが確認された。一方で、当初の想定を超えた展開として、空孔内のポジトロニウムの 1S-2P 励起スペクトルが FWHM で 0.8 nm と非常に広く (図 6)、かつ短寿命で崩壊する現象を観測した。同様の測定を真空中で実施したところ、共鳴幅は 0.21 nm (FWHM) と予想通りの値であり、即崩壊も観測されなかったことから、シリカエアロゲルの空孔に起因した現象であることがわかった。調査により、シリカエアロゲル空孔内の 300 kV/cm 程度の不均一電場によって 2P 状態がシュタルク効果を通じて共鳴スペクトルの線幅を拡大しており、また、2P 状態の小さい束縛エネルギーが表面化学基との相互作用を増幅しているという推論が得られた。この現象を回避するために、低温シリカエアロゲルでの 2P 状態の変化や、別の材料、例えば液体ヘリウム等での閉じ込めの可能性を検討することとした。

起する 243 nm のナノ秒深紫外レーザーと 2P 状態からイオン化のための 532 nm のナノ秒可視レーザーを照射し、2P 状態への励起を確かめる実験を行った。その結果、2P 状態のポジトロニウムが確かに生成されていることが確認された。一方で、当初の想定を超えた展開として、空孔内のポジトロニウムの 1S-2P 励起スペクトルが FWHM で 0.8 nm と非常に広く (図 6)、かつ短寿命で崩壊する現象を観測した。同様の測定を真空中で実施したところ、共鳴幅は 0.21 nm (FWHM) と予想通りの値であり、即崩壊も観測されなかったことから、シリカエアロゲルの空孔に起因した現象であることがわかった。調査により、シリカエアロゲル空孔内の 300 kV/cm 程度の不均一電場によって 2P 状態がシュタルク効果を通じて共鳴

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 E. Chae, K. Nakashima, T. Ikeda, K. Sugiyama, K. Yoshioka	4. 巻 27
2. 論文標題 Direct phase-locking of a Ti:Sapphire optical frequency comb to a remote optical frequency standard	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 15649 ~ 15661
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.015649	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 X. Peiyu, M. Kuwata-Gonokami, K. Yoshioka	4. 巻 59
2. 論文標題 Geometrical analysis of Kerr-lens mode-locking for high-peak-power ultrafast oscillators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab9278	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 周健治, 山田恭平, 橋立佳央理, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 田島陽平, 蔡恩美, 吉岡孝高, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野 茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健, 甲斐健師	4. 巻 37
2. 論文標題 物質反物質非対称性探索を目指したポジトロニウムのレーザー冷却	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Photon Factory News	6. 最初と最後の頁 23 ~ 26
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 無
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 -

〔学会発表〕 計54件（うち招待講演 3件/うち国際学会 19件）

1. 発表者名 E. Chae, K. Nakashima, T. Ikeda, K. Sugiyama, and K. Yoshioka
2. 発表標題 Stabilizing a Ti:Sapphire optical frequency comb with 10^{-19} relative fractional instability through an optical fiber network
3. 学会等名 OSK-OSA-OSJ Joint Symposium 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名	A. Ishida, K. Shu, K. Yamada, K. Hashidate, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, Y. Tajima, E. Chae, K. Yoshioka, N. Oshima, B. E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada and T. Kai
2. 発表標題	Experimental progress towards positronium Bose-Einstein condensation
3. 学会等名	8th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	A. Ishida, K. Shu, K. Yamada, K. Hashidate, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, Y. Tajima, E. Chae, K. Yoshioka, N. Oshima, B. E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada and T. Kai
2. 発表標題	Recent progress towards positronium Bose-Einstein condensation
3. 学会等名	15th International Workshop on Positron Beam Techniques and Applications (SLOPOS-15) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Y. Tajima, K. Yamada, K. Shu, A. Ishida, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, E. Chae, and K. Yoshioka
2. 発表標題	Development of a Sub-microsecond Broadband Pulsed Laser for Cooling Positronium
3. 学会等名	Conference on Lasers and Electro-Optics 2020 (CLEO 2020) (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	石田明, 周健治, 山田恭平, 橋立佳央理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 田島陽平, 蔡恩美, 吉岡孝高, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健, 甲斐健師
2. 発表標題	ボース・アインシュタイン凝縮を目指した高密度・低温ポジトロニウム生成
3. 学会等名	日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名 山田恭平, 周健治, 橋立佳央理, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 田島陽平, 蔡恩美, 吉岡孝高, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健, 甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却I
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 周健治, 山田恭平, 橋立佳央理, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 田島陽平, 蔡恩美, 吉岡孝高, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健, 甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却II
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋立佳央理, 周健治, 山田恭平, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 田島陽平, 蔡恩美, 吉岡孝高, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健, 甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却
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 山田恭平, 周健治, 橋立佳央理, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 田島陽平, 蔡恩美, 吉岡孝高, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健, 甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却II
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 周健治, 山田恭平, 橋立佳央理, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 田島陽平, 蔡恩美, 吉岡孝高, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健, 甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却III
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 川崎彬斗, 山田恭平, 田島陽平, 周健治, 橋立佳央理, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 蔡恩美, 吉岡孝高
2. 発表標題 ポジトロニウムのレーザー冷却用243nm長持続広帯域パルス光源の開発
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 Akira Ishida, K. Shu, K. Yamada, T. Namba, S. Asai, E. Chae, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, N. Oshima, B. E. O' Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, and K. Kawai
2. 発表標題 Positron focusing system and positronium thermalization measurement for realizing positronium Bose-Einstein condensation
3. 学会等名 18th International Conference on Positronium Annihilation (ICPA-18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Shu, K. Yamada, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, E. Chae, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, N. Oshima, B. E. O' Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, and K. Kawai
2. 発表標題 Development of cooling system for positronium
3. 学会等名 18th International Conference on Positronium Annihilation (ICPA-18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 E. Chae, T. Ikeda, K. Nakashima, K. Sugiyama, T. Takano, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Akatsuka, H. Katori, M. Kuwata-Gonokami, and K. Yoshioka
2. 発表標題 An optical frequency comb stabilized to an optical lattice clock laser through optical fiber networks
3. 学会等名 The 26th International Conference on Atomic Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Nakashima, T. Ikeda, E. Chae, T. Takano, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Akatsuka, H. Katori, M. Kuwata-Gonokami, and K. Yoshioka
2. 発表標題 Cross-correlation measurement between two Ti:Sapphire optical frequency combs referencing a clock laser transferred via an optical fiber link
3. 学会等名 The 26th International Conference on Atomic Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 周健治, 山田恭兵, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 田島陽平, 蔡恩美, 吉岡孝高, 五神真, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却I
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 山田恭平, 周健治, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 田島陽平, 蔡恩美, 吉岡孝高, 五神真
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却II
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 山本昂平, Fan Xing, 島原光平, 中嶋虹太, 蔡恩美, 吉岡孝高
2. 発表標題 熱的原子干渉計を参照したフェムト秒光周波数コム安定化
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 橋立佳央理, 周健治, 山田恭平, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 田島陽平, 蔡恩美, 吉岡孝高, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健, 甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却II
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 山田恭平, 周健治, 橋立佳央理, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 田島陽平, 蔡恩美, 吉岡孝高, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健, 甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却III
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 田島陽平, 山田恭平, 周健治, 橋立佳央理, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 蔡恩美, 吉岡孝高
2. 発表標題 ポジトロニウムのレーザー冷却のためのサブマイクロ秒広帯域光源の開発
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 K. Shu, X. Fan, T. Murayoshi, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, N. Oshima, B. E. O' Rourke, R. Suzuki
2. 発表標題 Toward a Realization of Bose-Einstein Condensation of Positronium
3. 学会等名 2nd Jagiellonian Symposium on Fundamental and Applied Subatomic Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 池田拓矢, 杉山慶, 蔡恩美, 高野哲至, 大前宣昭, 赤塚友哉, 香取秀俊, 五神真, 吉岡孝高
2. 発表標題 東京大学内光ファイバーリンクを用いたTi:Sapphire光周波数コム安定化
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 蔡恩美, 池田拓矢, 中嶋虹太, 高野哲至, 牛島一朗, 大前宣昭, 赤塚友哉, 香取秀俊, 五神真, 吉岡孝高
2. 発表標題 Ti:Sapphire光周波数コムフォトリック結晶ファイバーによる位相雑音への影響
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 中嶋虹太, 池田拓矢, 蔡恩美, 高野哲至, 牛島一朗, 大前宣昭, 赤塚友哉, 香取秀俊, 五神真, 吉岡孝高
2. 発表標題 2台のTi:sapphire光周波数コム相互相関測定
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 周健治, 村吉諄之, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 蔡恩美, 五神真, 大島永康, 満汐孝治, オロークブライアン, 鈴木良一, 藤野茂, 望月出海, 兵頭俊夫
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却I
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 村吉諄之, 周健治, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 蔡恩美, 五神真, 大島永康, 満汐孝治, オロークブライアン, 鈴木良一, 藤野茂, 望月出海, 兵頭俊夫
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却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 A. Ishida, K. Shu, T. Murayoshi, T. Namba, S. Asai, E. Chae, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, N. Oshima, B. E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada
2. 発表標題 Recent progress in positronium experiments for Bose-Einstein condensation
3. 学会等名 Low Energy Antiproton Physics Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石田明, 周健治, 村吉諄之, 難波俊雄, 浅井祥仁, 蔡恩美, 吉岡孝高, 五神真, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却I
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 周健治, 村吉諄之, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 蔡恩美, 吉岡孝高, 五神真, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 望月出海, 兵頭俊夫, 和田健, 川合健太郎
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却II
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

吉岡研究室ホームページ http://www.fs.t.u-tokyo.ac.jp/ 浅井研究室ホームページ http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/asai/ ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 実験ホームページ https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110
--

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
研究分担者	難波 俊雄 (Namba Toshio) (40376702)	東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教 (12601)	