

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12645

研究課題名(和文) 静周期磁場によるポジトロニウムの超微細構造の観測

研究課題名(英文) Observation of hyperfine structure of positronium using a static periodic magnetic field

研究代表者

永田 祐吾 (Nagata, Yugo)

東京理科大学・理学部第二部物理学科・助教

研究者番号：30574115

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)：電子と陽電子で構成される水素様原子のポジトロニウム(Ps)における、基底状態の超微細構造遷移周波数203 GHzの測定は、QEDのテストとして注目されている。本研究では速度可変Psビームを用いて、この周波数の測定に運動誘起共鳴(MIR)を適用した。MIRには静的な周期磁場が必要なため、強磁性体の鉄を用いた多層構造の磁石である多層磁気格子を開発した。実際に実験を行い、Psの超微細構造共鳴遷移の観測に成功した。これはMIRのテラヘルツ波帯での初めての観測であり、さらにMIRによる反物質研究の第一歩となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ポジトロニウム(Ps)の基底状態の超微細構造遷移周波数203 GHzの測定はQEDのテストとして注目されており、従来、マイクロ波やレーザーによって測定されてきた。今回、運動誘起共鳴(MIR)による新しい測定方法を実証することができた。また、多層磁気格子が生成する周期磁場の強度は、電磁波のパワーに換算すると100 MW/cm<sup>2</sup>にも達し、これは従来の方法に対して1万倍強力であることが分かった。この測定はMIRのテラヘルツ波帯での初めての観測であり、さらにMIRによる反物質研究の第一歩となった。

研究成果の概要(英文)：Positronium (Ps), composed of a positron and an electron, has hyperfine structure in the ground state. The measurement of the transition frequency is attracting attention for the QED test. In this study, we tried to observe motion-induced resonance (MIR) using an energy-tunable Ps beam. To produce a periodic magnetic field, the multi-layered magnetic grating was developed using iron foils. We succeeded in observing the MIR of the hyperfine structure of the Ps atom. This is the first observation of the MIR in the sub-THz region, and the first step for the antimatter research using the MIR.

研究分野：原子物理

キーワード：ポジトロニウム 運動誘起共鳴 原子分光 コヒーレント共鳴励起 陽電子 sub-THz波

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 電子と陽電子で構成される水素様原子のポジトロニウム (Ps) は、スピン状態によって、超微細構造を持ち、基底状態の超微細構造遷移周波数の測定は QED のテストとして注目されている。これまでの測定は、マイクロ波分光や、レーザーによる飽和吸収分光で実施されてきた。

(2) 上記の分光法以外に、運動誘起共鳴(あるいはコヒーレント共鳴励起)を用いたものがある。この手法は静的な周期場とビームを用いた方法で、例えば速度  $v$  の原子が周期長  $a$  の周期場を通過するとき、原子は周波数  $f=v/a$  の時間的に振動する場を受ける。これが原子の遷移周波数に一致すると共鳴遷移が起こる。この手法は、主に結晶の周期電場中に高速の多価イオンビームを入射することで、多価イオンの分光に用いられてきた。周期磁場においては、回路基板上に周期的に配置したワイヤーに流れる電流から発生する周期磁場や、周期的に穴の開いたカプトンシートに磁性体を蒸着したものなどが用いられてきた。

(3) 高品質の速度可変 Ps ビームは、これまでの開発で安定的に利用可能になっており、0.4 keV から 3.3 keV の範囲でエネルギー調整可能である。

### 2. 研究の目的

速度可変 Ps ビームを用いて、周期磁場を用いた運動誘起共鳴による Ps の超微細構造(203 GHz)の観測を行う。成功すれば、運動誘起共鳴のテラヘルツ波帯での初めての検証、運動誘起共鳴による反物質あるいはエキゾチック原子の系での初めての測定、ポジトロニウム超微細構造の超高真空中での初めての測定となり、運動誘起共鳴の原理の検証とともに、運動誘起共鳴による反物質研究の第一歩となる。

### 3. 研究の方法

(1) 超微細構造間の遷移は、スピン反転をともなうため、スピンと相互作用できる磁場によって遷移させることができる。図 1 は周期磁場による Ps 超微細構造周波数の測定方法を示している。周期磁場を発生させるために、鉄と銅のフォイルを交互に重ね、磁石で着磁したものに Ps が通過する穴を開けたものを使用した。Ps ビームに含まれる長寿命のオルソ Ps ( $o$ -Ps) は周期磁場を通過し、検出器でカウントされる。振動磁場の周波数  $f$  が超微細構造周波数に一致すると共鳴遷移が起こり、パラ Ps ( $p$ -Ps) に遷移する。 $p$ -Ps の寿命は 125 ps と非常に短いので、検出器には届かない。従って、Ps のカウント数を速度の関数として測定することで超微細構造周波数を決定することができる。

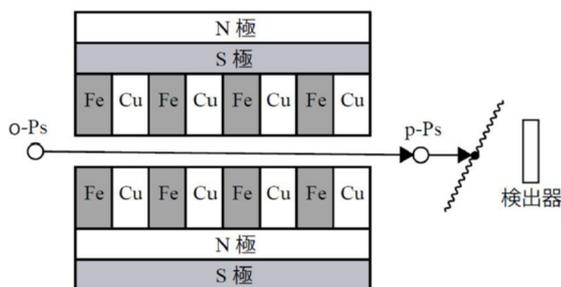


図 1 Ps 超微細構造測定概念図

(2) 本研究に必要な周期磁場について検討を行った。Ps の典型的な速度を  $1.8 \cdot 10^7$  m/s とすると、必要となる周期磁場の周期長は  $90 \mu\text{m}$  となる。これを 10 周期にしたとしても、磁場と相互作用する時間は 50 ps と短い。遷移に必要な磁場振幅の強度を遷移確率から計算すると、0.1 T 程度が必要であった。運動誘起共鳴で使用されてきた従来の周期磁場の振幅は 1 mT 程度であったので、強力な磁石を設計する必要があった。強磁性体の鉄を利用することで、強い周期磁場を発生する多層磁気格子を開発した。

(3) 本研究で開発した多層磁気格子は周期磁場に加え、大きなバイアス磁場(後述)が発生する。バイアス磁場を取り除く方法を検討した。

### 4. 研究成果

(1) 図 2 (a) に、強い磁場振幅を実現する磁石(多層磁気格子)の構造を示す。厚み  $50 \mu\text{m}$  の炭素鋼箔と、厚み  $40 \mu\text{m}$  の銅箔を交互に重ね、熱拡散接合した。そこにワイヤー放電加工で、箔に垂直な方向にスロット穴(幅  $45 \mu\text{m}$ )を開け、最後に SmCo 磁石で着磁した。図 2 (b) はスロット穴中に発生する磁場の数値計算の結果で、磁場振幅は 0.1 T 程度となり、上記の条件を満たすことができた。しかし、図で見られるように、周期磁場に加え、1 T 程度のバイアス磁場が発生した。このバイアス磁場は Ps のエネルギー準位の Zeeman シフトを引き起こす。

次に高品質の可変 Ps ビームを多層磁気格子のスロット穴に通して Ps カウント数を測定した。Ps の速度を変化させながら測定すると、超微細構造遷移が Ps カウント数の減少として観測できる。

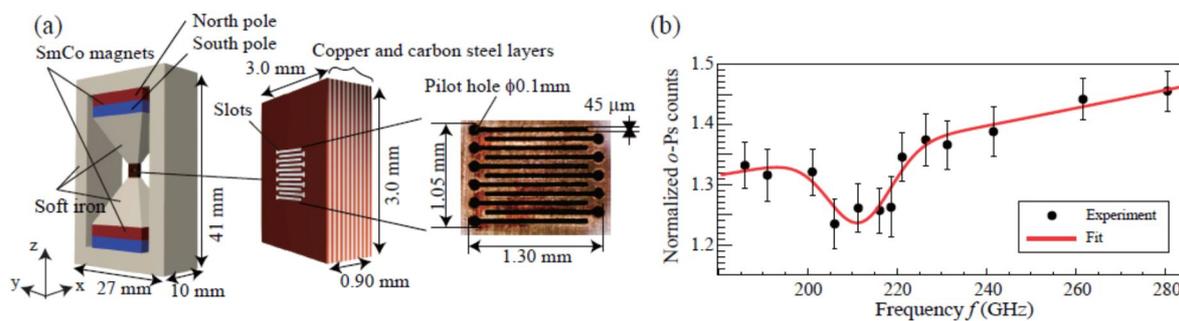


図 2 (a)多層磁気格子の概念図[1] (b)多層磁気格子が生成する z 方向の周期磁場[1]

測定結果を図 3 に示す。横軸は Ps の速度であるが、周期長を用いて既に周波数に換算してある。210 GHz あたりにディップが観測された。これは Ps の共鳴遷移によってカウント数が減少したことによると考えられる。図 3 の赤線は、ガウス関数を基にした

$$I(f) = \varepsilon \left( A \exp\left(-\frac{(f - f_0)^2}{2\sigma^2}\right) + 1 \right) / \left( 1 - C \exp\left(-\frac{L}{fat}\right) \right)$$

を用いた実験データに対するフィットである。ここで、 $A$ 、 $C$ 、 $f_0$ 、 $\sigma$ 、 $\varepsilon$  はパラメータである。遷移周波数は  $f_0 = 211.5 \pm 1.9$  GHz となり、ゼロ磁場における 203 GHz からシフトした結果が得られた。多層磁気格子の磁場の計算結果を用いて、シュレディンガー方程式から Ps の遷移周波数を求めると、211.1 GHz であったため、実験結果は不確かさの範囲内で一致し、運動誘起共鳴の観測が実現されたとと言える[1]。

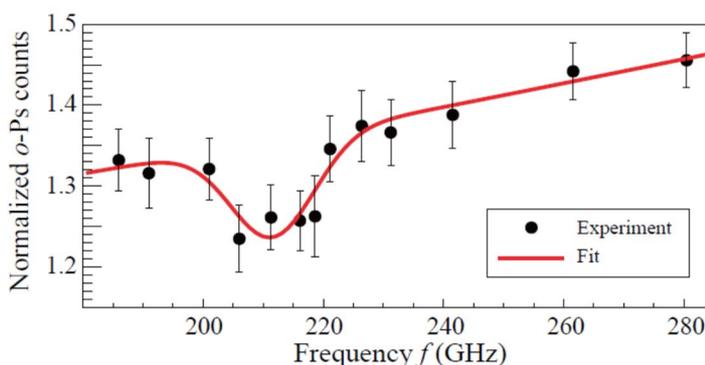


図 3 Ps 超微細構造の分光結果[1]

(2) Ps の高精度分光を目指すには、原理的には多層磁気格子の周期数を増やし、磁場との相互作用時間を延ばすことで可能になる。しかし、バイアス磁場があると、Ps は Zeeman シフトによってエネルギー準位が変化するため、高精度の分光測定ができない。それを解決するための以下の 2 つの検討を行った。

多層磁気格子の構造を改善して、バイアス磁場が変化しない磁石構造が可能か検討した。スロット内でバイアス磁場は、x 方向に見ると、磁気格子中央に向かって磁場が大きくなる。この問題は鉄の厚みを中央部に向かって薄くすることで、バイアス磁場が変化しないように調整できる。z 方向に見ると、鉄に近づくほど、磁場が大きくなる。そこで、スロットの中央部のみ開口したスリットを設けると、バイアス磁場の変化を抑えることができる。数値計算を行った結果、100 周期のとき、2 つの超微細構造遷移 207 GHz と 211 GHz の分離が可能となった。また、200 周期のときには、ピークの形状が  $p$ -Ps の二光子消滅率を反映したローレンツ分布に近くなることが分かった。

次に、加工性に優れた軟磁性体の鉄を用いて、バイアス磁場の無い周期磁場が生成可能かどうか、線形な周期場と回転場の 2 通りの方法を検討した。どちらもスロットが 1 つの時には上手くバイアス磁場を消すことができたが、透過率を向上させるためにスロットを増やした場合、磁気遮蔽によって、磁場が減少することが分かった。

#### <引用文献>

Y. Nagata, K. Michishio, T. Iizuka, H. Kikutani, L. Chiari, F. Tanaka, and Y. Nagashima, Phys. Rev. Lett. **124**, 173202

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nagata Y., Michishio K., Iizuka T., Kikutani H., Chiari L., Tanaka F., Nagashima Y.	4. 巻 124
2. 論文標題 Motion-Induced Transition of Positronium through a Static Periodic Magnetic Field in the Sub-THz Region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 173202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.124.173202	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 Michishio Koji, Kuma Susumu, Nagata Yugo, Chiari Luca, Iizuka Taro, Mikami Riki, Azuma Toshiyuki, Nagashima Yasuyuki	4. 巻 125
2. 論文標題 Threshold Photodetachment Spectroscopy of the Positronium Negative Ion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 63001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.125.063001	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 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 4件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 永田祐吾, 三上カ久, 長嶋泰之
2. 発表標題 運動誘起共鳴によるポジトロニウムの超微細構造共鳴遷移の周期数依存性
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 満汐孝治, 久間晋, 永田祐吾, Chiari Luca, 飯塚太郎, 三上カ久, 東俊行, 長嶋泰之
2. 発表標題 ポジトロニウム負イオンのしきい光脱離分光実験
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三上力久, 永田祐吾, 長嶋泰之
2. 発表標題 ポジトロニウム干渉実験に向けたグラフェンの電子線回折スポットの加熱処理による尖鋭化
3. 学会等名 原子衝突学会第45回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三上力久, 永田祐吾, 長嶋泰之
2. 発表標題 2 - 3層グラフェンを用いたポジトロニウムの回折
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永田祐吾, 長嶋泰之
2. 発表標題 静的な回転周期場を用いた原子共鳴
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永田祐吾, 長嶋泰之
2. 発表標題 静的な回転周期場による原子の共鳴遷移
3. 学会等名 原子衝突学会第46回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永田祐吾, 満汐孝治, 飯塚太郎, 鞠谷温人, L. Chiari, 田中文, 長嶋泰之
2. 発表標題 静的な周期磁場を通過するポジトロニウムの超微細構造の共鳴遷移
3. 学会等名 低速陽電子実験施設研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 満汐孝治, 久間晋, 永田祐吾, Chiari Luca, 飯塚太郎, 三上力久, 東俊行, 長嶋泰之
2. 発表標題 ポジトロニウム負イオンのしきい光脱離の赤外レーザー分光
3. 学会等名 低速陽電子実験施設研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Nagata, K. Michishio and Y. Nagashima
2. 発表標題 A monoenergetic energy-tunable positronium beam and its applications
3. 学会等名 4th International Workshop on Models and Data for Plasma-Material Interaction in Fusion Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nagata, K. Michishio, T. Iizuka, H. Kikutani, F. Tanaka, L. Chiari, Y. Nagashima
2. 発表標題 Hyperfine resonance of positronium atoms using a static periodic magnetic field
3. 学会等名 POSMOL 2019 (XX International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics XXI International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Nagata, K. Michishio, T. Iizuka, F. Tanaka, H. Kikutani, L. Chiari, Y. Nagashima
2 . 発表標題 Atomic resonance of the hyperfine structure of positronium using a multi-layered transmission magnetic grating
3 . 学会等名 ICPEAC 2019 (XXXIst International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Nagashima, K. Michishio, L. Chiari, Y. Nagata, F. Tanaka, T. Iizuka, H. Kikutani and K. Tokesi
2 . 発表標題 Applications of a high-brightness energy-tunable positronium beam produced using the photodetachment of positronium negative ions
3 . 学会等名 ICPEAC 2019 (XXXIst International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Nagashima, K. Michishio, L. Chiari, Y. Nagata , H. Terabe , S. Iida , F. Tanaka , T. Iizuka , and N. Oshima
2 . 発表標題 Progress in the study of energy tunable Ps beams employing the Ps- photodetachment technique
3 . 学会等名 15th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques and Applications (SLOPOS-15) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 L. Chiari, K. Michishio, Y. Nagata, T. Iizuka, F. Tanaka, H. Kikutani and Y. Nagashima
2 . 発表標題 A novel high-brightness and energy-tunable positronium beam and future applications
3 . 学会等名 15th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques and Applications (SLOPOS-15) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 飯塚太郎, 永田祐吾, 満汐孝治, 鞠谷温人, 田中文, L. Chiari, 長嶋泰之
2. 発表標題 運動誘起共鳴によるポジトロニウムの超微細構造遷移の観測実験
3. 学会等名 原子衝突学会第44回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永田祐吾, 飯塚太郎, 満汐孝治, 鞠谷温人, 田中文, L. Chiari, 長嶋泰之
2. 発表標題 静周期磁場によるポジトロニウム超微細構造の観測実験
3. 学会等名 日本物理学会「秋季大会」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永田祐吾, 満汐孝治, 飯塚太郎, 田中文, 鞠谷温士, L. Chiari, 大島永康, 長嶋泰之
2. 発表標題 sub-THz領域におけるポジトロニウムの運動誘起共鳴
3. 学会等名 京都大学原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工へ応用」
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------