

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23740173

研究課題名（和文） 真空中におけるポジトロニウム超微細構造の直接測定

研究課題名（英文） Direct Measurement of Positronium Hyperfine Splitting in Vacuum

研究代表者

末原 大幹 (SUEHARA TAIKAN)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任研究員

研究者番号：20508387

研究成果の概要（和文）：ポジトロニウムのオルソ・パラ準位差(超微細構造)に相当する203GHzの大強度電磁波を用い、ポジトロニウム超微細構造の直接遷移の観測および遷移曲線の測定を行った。大強度ミリ波源のジャイロトロンと熱伝導率が高い高抵抗シリコン上に蒸着した金メッシュ鏡を用いたファブリー・ペロー共振器を用いることで、超微細構造の遷移中心では10シグマを越える遷移が確認でき、また複数の周波数で遷移を測定することで遷移曲線が確認できた。

研究成果の概要（英文）：We observed the direct transition between ortho-positronium and para-positronium using 203 GHz high power radiation to measure the hyperfine splitting of positronium. With a high power radiation source, gyrotron, and a Fabry-Perot cavity with golden mesh mirror on a high-resistivity silicon, we succeeded to observe the transition of more than 10 sigma significance. We also measured the transition curve with measurements using radiation of multiple frequencies.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：素粒子実験

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ポジトロニウム、超微細構造、テラヘルツ、ジャイロトロン、共振器

## 1. 研究開始当初の背景

真空中でのポジトロニウムの超微細構造は束縛系 QED(量子電気力学)計算の進歩により近年 2ppm の精度で求められ、以前の測定(3.3ppm 精度)と 3.9 $\sigma$ のずれがあることが近年判明した。このずれが未知の素粒子現象によるものか、それとも過去の実験の知られていない誤差によるものかを解明することが急務となっていた。

## 2. 研究の目的

過去のポジトロニウム超微細構造測定実験は、すべて静磁場によるゼーマン効果を用いた間接測定である。この方法では静磁場の

非一様性による誤差が測定に影響している可能性があり、静磁場を用いない方法により検証することが望まれる。本研究では、テラヘルツ波を用いてポジトロニウムのオルソ・パラ準位間の遷移を直接観測するという画期的な方法を開発し、この方法を用いて超微細構造遷移を観測し、その値を検証する。また、過去の測定ではガス中での超微細構造値を真空中の値に外挿し、最終結果としている。この外挿の精度が測定誤差に影響している可能性もある。この誤差をなくすため真空中での測定可能性を検討する。

### 3. 研究の方法

(1) これまでの研究で開発を進めてきた金属メッシュ蒸着石英ガラス基板を用いたファブリ・ペロー型共振器には、入力パワーの大部分を吸収するメッシュミラーの冷却が難しく、遷移の測定に必要な大強度のミリ波蓄積が難しい問題があった。この問題を解決するため、①銅板グレーティングを入力パワー結合に用いたリング型共振器、②冷却しやすい高抵抗シリコン基板を用いたファブリ・ペロー共振器、の二種を検討した。それぞれの共振器をシミュレーション等を用いて設計した後、実際に製作しミリ波蓄積性能を調べた。

(2) 超微細構造の測定のためには、いくつかの周波数でジャイロトロンを共振させる必要がある。このため Gyro-BWO という方法を用いた周波数可変光源を検討した。しかし当初の予想通りの性能が得られなかったため、ジャイロトロン共振器を換装可能にし、これを換装することで周波数を変更する方法をとった。

(3) 上記を組み合わせ陽電子線源を用いて超微細構造遷移のより精密な確認および遷移曲線の測定を行った。真空中での測定の検討は行ったがまず遷移曲線の確認を優先することとし、真空中での測定は今後の課題とした。

### 4. 研究成果

(1) ①リング型共振器で用いるための銅板グレーティングの設計を電磁場シミュレーションソフトウェアを用いて行った。本共振器で用いるグレーティングは 1%以下の弱い入力結合と 99%以上の高い正反射率が必要で、このようなグレーティングのミリ波領域での応用は例がない。シミュレーション上で得られたいくつかのパラメータに対しグレーティングを試作し、リング型共振器を構成してグレーティングの性能試験を行った(図 1, 2)。得られた結果はやや期待より悪かったものの、ファブリ・ペロー共振器と同等程度の入力結合および蓄積パワーが得られた。ただし、超微細構造の測定のためには線源とパワー蓄積部の距離が離れてしまう問題があり、本実験での採用は見送られた。

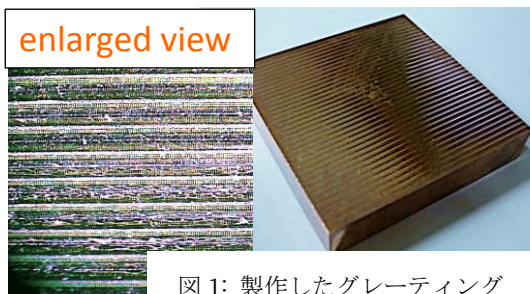


図 1: 製作したグレーティング

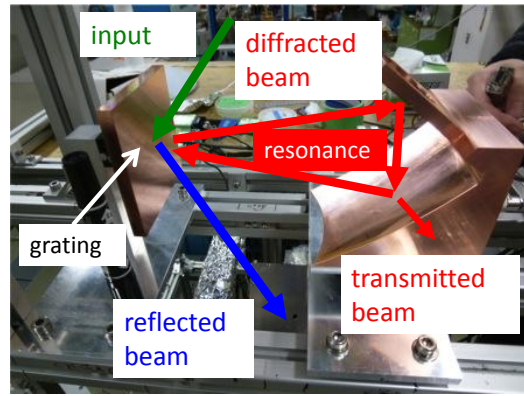


図 2: グレーティング試験の構成図

②メッシュ基板に用いる石英基板の代替として、高抵抗シリコン基板の検討を行った。高抵抗シリコン基板は石英基板より熱伝導率が高く、水冷を行うことで 30kW 程度パワーが蓄積しても中心部の温度が金の溶解温度を超えない。またミリ波の透過特性もよい。ただし屈折率が石英より高いため共振器を構成した際に基板の裏面反射の影響が大きく出てしまい、より精密な設計・精度のよい製作が必要となった。石英基板メッシュの製作でシミュレーションの信頼性はほぼ確かめられていたため、これを用いてパラメータ決定を行い、高抵抗シリコン基板上にメッシュを製作し、ミリ波共振試験を行った(図 3, 4)。石英基板メッシュを越える性能が得られ、冷却特性も良好だったため、本基板を採用することにした。

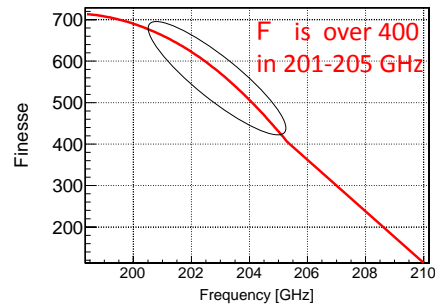


図 3: 最適化したメッシュの性能 (CST MW studio による計算値)

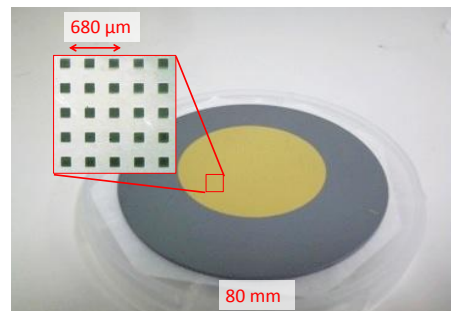


図 4: シリコン基板(φ80)上に蒸着したメッシュと顕微鏡による拡大図

(2) Gyro-BWO については、当初設計のパワーに遠く及ばず、周波数可変幅も設計より大幅に少なかったため採用に至らなかった。この問題については引き続き検討を進める。本実験では換装可能な共振器を持つジャイロトロンを用いた。共振器の直径を変えることで複数の発振波長に対応する(図 5)。換装に伴うエージング時間を少なくするため、電子銃部と共振器部の真空はバルブで分離できるようになっている。換装後数日〜週間程度のエージングで共振器が使用可能になることがわかった。

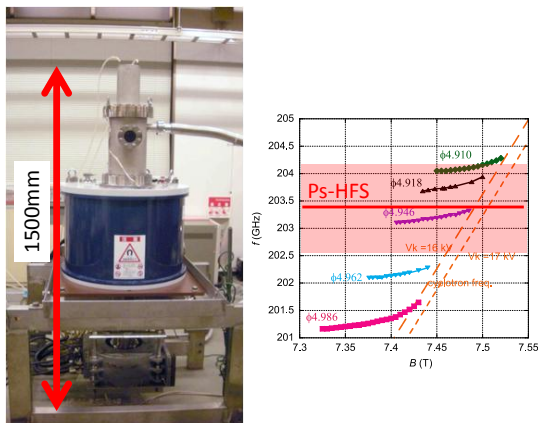


図 5: 本研究で用いたジャイロトロン (FU CW GI) と複数の共振器と磁場による発振周波数の変化

(3) ポジトロニウム生成・崩壊観測およびパワー蓄積のためのチェンバを用意し、2 気圧のイソブタン・窒素混合ガスを封入し、チェンバ内部にファブリー・ペロー共振器を構成して測定を行った(図 6)。陽電子線源としては  $^{22}\text{Na}$  (1MBq) を使い、100  $\mu\text{m}$  厚の薄いプラスチックシンチレータで生成時間をタグした。ポジトロニウム崩壊により生成するガンマ線を  $\text{LaBr}_3$  結晶シンチレータで精密に測定し、エネルギーと時間の情報からオルソ・パラポジトロニウムを区別し遷移を検出した。時間情報等を用いてバックグラウンド事象を除去した後、ミリ波パワーを供給する場合としない場合のエネルギースペクトルの比較(図 7)から、202.9 GHz において  $10.5\sigma$  の有意な遷移を観測した。共振器の蓄積パワーは  $15.1 \pm 4.0 \text{ kW}$  だった。またいくつかの周波数で測定を行い、遷移曲線を測定した。現在ポジトロニウム超微細構造の測定値に関わる最終的な系統誤差の確認を行っている。

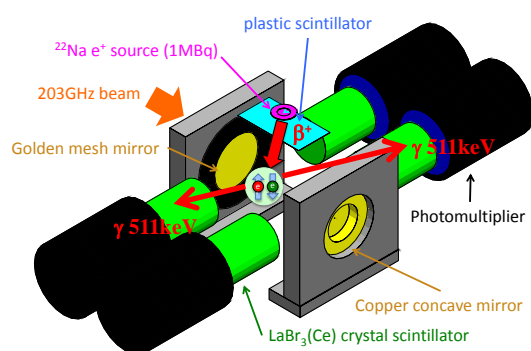


図 6: 遷移測定セットアップ図

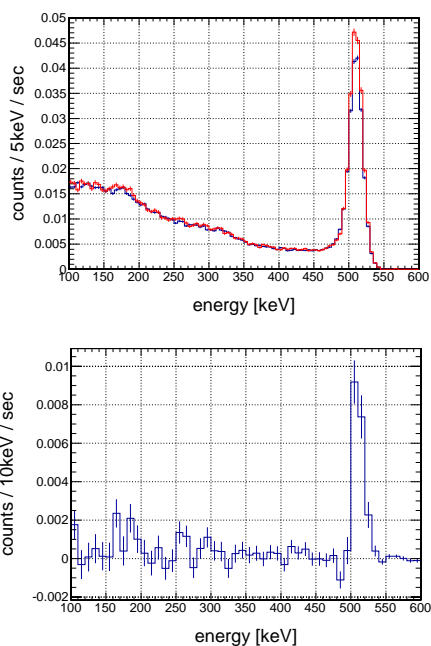


図 7: 得られたガンマ線のエネルギースペクトル。

(上図)ミリ波照射時(赤)と非照射時(青)の差が遷移に対応する。

(下図)上図の照射時と非照射時の差を拡大したもの。511 keV (パラポジトロニウムの消滅に対応) のイベント数の有意な増加が見られ、遷移によりパラポジトロニウムが増加していることがわかる。

## 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4件)

- ① T. Yamazaki, A. Miyazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, I. Ogawa, T. Idehara, S. Sabchevski, Direct Observation of the Hyperfine Transition of Ground-State Positronium, Physical Review Letters, 査読有, 108, 2012, 253401  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.253401
- ② T. Suehara, T. Yamazaki, A. Miyazaki, G. Akimoto, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, T. Idehara, I. Ogawa, S. Sabchevski, The First Direct Observation of Positronium Hyperfine Splitting, AIP Conference Proceedings, 査読有, 1441, 2012, 549-551  
DOI:  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3700613>
- ③ A. Miyazaki, T. Yamazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, T. Idehara, I. Ogawa, Y. Urushizaki, S. Sabchevski, New Experiment for the First Direct Measurement of Positronium Hyperfine Splitting with Sub-THz Light, Materials Science Forum, 査読有, 666, 2011, 133-136  
DOI:  
10.4028/www.scientific.net/MSF.666.133

[学会発表] (計20件)

- ① 山崎高幸, Direct Measurement of the Hyperfine Transition of Positronium using High Power Sub-THz Radiation, 日本物理学会第68回年次大会(招待講演), 2013年3月28日, 広島大学(広島県)
- ② Akira Miyazaki, The direct spectroscopy of positronium hyperfine structure using sub-THz gyrotron, International Symposium on Frontiers in THz Technology (招待講演), 2012年11月27日, Todaiji Culture Center (Japan)
- ③ Takayuki Yamazaki, Direct measurement of the Hyperfine Structure of the Ground state Positronium using High Power sub-THz radiation, The 37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2012年9月28日, Wollongong (Australia)

④ Taikan Suehara, The first observation of direct transition between o-Ps and p-Ps by sub-THz radiation, Cold Antimatter and High Precision Physics (Pbar11) (招待講演), 2011年11月29日, Matsue (Japan)

⑤ Taikan Suehara, The First Direct Observation of Positronium Hyperfine Splitting (Ps-HFS), The 19<sup>th</sup> Particles and Nuclei International Conference, 2012年7月25日, Boston (USA)

[その他]

[http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/tabletop\\_experiments/Direct\\_HFS\\_measurement.html](http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/tabletop_experiments/Direct_HFS_measurement.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

末原 大幹 (SUEHARA TAIKAN)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任研究員

研究者番号: 20508387