

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）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： 基盤研究(B)

研究期間： 2010~2012

課題番号： 22340051

研究課題名（和文） 強力ミリ波源を用いたパラポジトロニウム崩壊率の直接測定

研究課題名（英文） Direct measurement of the decay rate of parapositronium using high power milli-wave radiation source

研究代表者

小林 富雄 (KOBAYASHI TOMIO)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授

研究者番号： 50126059

研究成果の概要（和文）：電子と陽電子の束縛系であるポジトロニウムの基底状態には、スピン状態に対応したオルソとパラの二つの状態が存在し、両者のエネルギー差はポジトロニウムの超微細構造と呼ばれる。超微細構造に相当する 203GHz の強力なミリ波源を開発し、世界初の超微細構造間の直接遷移を観測した。観測された遷移確率は理論計算値と良く一致している。またミリ波源を周波数可変に改造し、超微細構造の直接遷移の共鳴幅を用いてパラポジトロニウムの寿命を直接測定する装置を開発した。

研究成果の概要（英文）：Positronium is a bound state of an electron and a positron. Two ground states, orthopositronium and parapositronium, have energy level difference called as the hyperfine structure. A high power milli-wave (203GHz) radiation source corresponding to the hyperfine structure is developed. With this source, the direct transition of positronium hyperfine splitting is observed for the first time. The observed event rate is in good agreement with the theoretical value. This source is improved to be tunable in frequency to measure the decay rate of parapositronium from the resonance width of the transition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2011 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2012 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：数物系科学

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：素粒子実験、ミリ波、ポジトロニウム、超微細構造、量子電磁力学

1. 研究開始当初の背景

電子と陽電子の束縛系であるポジトロニウムは、束縛系の量子電磁力学の精密検証を行う上で重要な研究対象である。ポジトロニウムの 2 種類の基底状態のうち、オルソポジトロニウムの寿命(崩壊率の逆数)は約 142ns であり、100ppm の高い精度で測定されている。

一方、パラポジトロニウムの寿命(約 125ps)は静磁場によってオルソポジトロニウムと混合させて測定した結果しか無く、系統誤差の少ない直接測定による精度良い結果が望まれていた。

また、本研究ではミリ波帯の電磁波を使用するが、この領域の電磁波はほとんど未踏の領

域であり、電波源、センサー、共振器などのデバイスはあまり開発が行われていなかった。また、素粒子物理学への応用もほとんど手つかずの状況であった。

2. 研究の目的

強力なミリ波源を製作し、それを用いてオルソポジトロニウムをパラポジトロニウムに直接遷移させる(超微細構造遷移)。この遷移の共鳴幅はパラポジトロニウムの崩壊率によって決まる。したがって、超微細構造の共鳴幅を測定することで、パラポジトロニウムの崩壊率を直接測定する。この直接測定の方法を用いれば、「オルソパラ混合用の静磁場による系統誤差」、「ピックオフ崩壊(ポジトロニウムが周囲の物質と相互作用する崩壊)の熱化の系統誤差」の両者の影響を抑えられ、既存の測定より精度の高い測定ができる。

3. 研究の方法

ポジトロニウムの超微細構造は禁制遷移であるため、遷移の確率(アインシュタインのA係数)は、 $A=3.37 \times 10^{-8} \text{s}^{-1}$ と非常に小さい。オルソポジトロニウムの寿命(142ns)中に遷移を起こさせるためには、大強度のミリ波を照射する必要がある。そこで、ジャイロトロンを大強度ミリ波源として使用し、その出力をファブリペロー共振器内に蓄積することによって誘導遷移を起こす。共振器内には外部のNa-22陽電子源から陽電子を打ち込み、共振器中のガスでポジトロニウムを作る。打ち込む際には0.1mmの厚さのプラスチックシンチレータを通過させ、この信号をポジトロニウム生成のタイミングとして使用する。共振器の周囲には崩壊ガンマ線を検出するためのシンチレータを配置し、パラポジトロニウム崩壊によって生じた511keV back-to-back ガンマ線を検出する。互いに反対側の検出器が鳴ること、エネルギーが511keVであることを要請し、さらにポジトロニウム生成からの時間差を見ることで、超微細構造遷移からのガンマ線であることを検証する。共振器内のミリ波のオンとオフの時の信号の差からシグナル量を算出し、入力するミリ波の周波数を変えることで共鳴曲線を求める。この共鳴の幅がパラポジトロニウムの崩壊率となる。

4. 研究成果

(1) 測定装置の開発

図1のような測定装置を開発し完成させた。202.89GHzの単色ジャイロトロンFU CW Vを製作し、15ms、20Hzの運転モードで300Wの

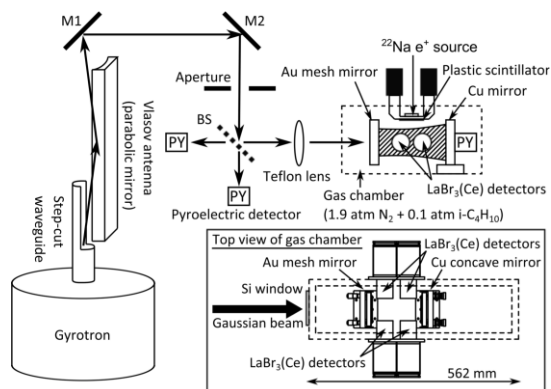


図1 製作した測定装置

得た。長期間安定して測定するために、出力をモニターしてフィードバックする装置を開発し、約10%程度の安定性で、1ヶ月以上にわたる長期運転を行うことに成功した。このような長期運転の実績は、世界的に見ても類が無いと思われる。

ジャイロトロン出力をモードコンバーターによってガウスビームに変換の後、ファブリペロー共振器に入射する。このファブリペロー共振器も独自に設計、製作した。入射側のミラーは広がりを持ったビームに対して高いカップリングを持ち、なおかつ内部ビームに対しては高い反射率を持つ必要がある。このため、電磁場シミュレーションを行ってデザインした金メッシュを石英基板に蒸着して、半透過ミラーとしてある。これにより、600以上の高いフィネスを達成し、10kW以上のミリ波パワーを共振器内に蓄積することに成功した。

共振器の周囲にはポジトロニウム生成用のNa-22線源、測定用のプラスチックシンチレータ、LaBr₃(Ce)シンチレータを配置した。

(2) 世界初の直接遷移の測定

製作した装置を用いて、ポジトロニウムの超微細構造遷移の直接測定を行った。ポジトロニウム崩壊からのガンマ線事象について、LaBr₃(Ce)シンチレータに落ちたエネルギー、

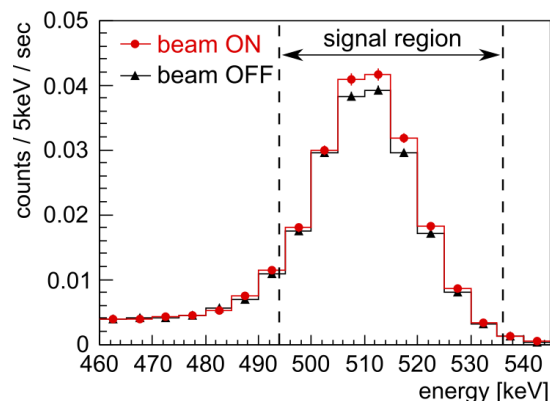


図2 測定されたエネルギースペクトル

ヒットした場所、ポジトロニウム生成時間からの時間差によって選別し、遷移候補事象を選び出した。選び出した事象について、共振器にミリ波を入力している時とそうでない時について比較をすると、5.4 標準偏差の有意性で差が観測された。エネルギースペクトルを図 2 に示す。赤がミリ波ありの時のスペクトルで、黒がミリ波なしの時である。両者の差が超微細構造遷移によって生じたパラポジトロニウムの崩壊である。

入力したミリ波の強度と、得られた事象数の差から、アインシュタインの A 係数を計算すると、 $A=3.1(+1.6/-1.2) \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ という値が得られた。この値は理論値と良く一致している。また、入射ミリ波の強度を変化させて測定する事により、遷移量がミリ波強度に比例

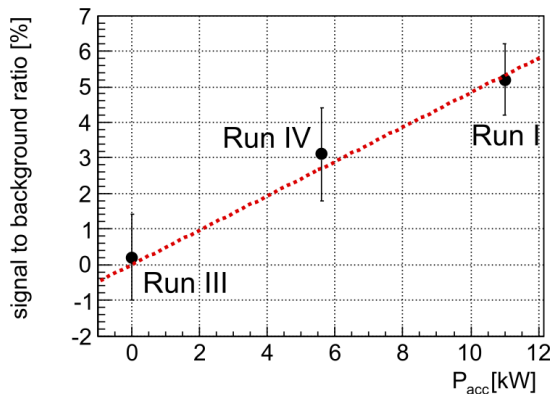


図 3 入射ミリ波パワーと遷移量の関係

とが確認された(図 3)。これは、世界初のポジトロニウム超微細構造の直接遷移観測となった。

(3)パラポジトロニウム寿命測定に向けての装置の改造

遷移観測に成功したため、これを分光測定につなげるための装置の改造を行った。具体的には以下の通りである。

- ① 共鳴曲線を得られるように、ジャイロトロン出力の周波数を可変に変更した(FU CW GI、図 4)。これは、ジャイロトロン内の共振空洞の交換が手軽にできるように設計し直すことで達成した。これにより、空洞交換時に電子銃を大気にさらす必要がなくなり、従来数ヶ月かかっていた周波数変更が 1 週間程度でできるようになった。
- ② 共鳴曲線を得るためには、テールの遷移イベントの少ない領域も S/N 比が良い状態で測定する必要がある。そこで、ジャイロトロンにガウスビームへのモードコンバーターを組み込んだ。これにより、モードコンバーターでの変換ロスが減って大出力をそのままファブリペロー共振器に入力できるようになった。
- ③ ファブリペロー共振器の入射側のミラー

には、石英基板に金メッシュを蒸着したものを使用していた。これだと、石英の熱伝導率が悪いので、入射ミリ波の強度が強すぎると熱で金メッシュが溶けてしまう。このため、石英を高抵抗

シリコンに変更した。



図 4 ジャイロトロン FU CW GI

これらの変更により、周波数を 201~206GHz の間で調整できるようになり、またファブリペロー共振器内の蓄積パワーも 20kW 以上まで増加した。

改造後の装置を用いて、パラポジトロニウムの寿命測定(超微細構造の遷移測定)を開始した。既に周波数を共鳴ピークと両裾の 3 点で測定しており、データを解析中である。今後、測定点を増やして解析することで、年内にも目的のパラポジトロニウムの寿命が得られる。

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 12 件)

- ① Toshio Namba, Precise measurement of positronium, Progress of Theoretical and Experimental Physics、査読有、04D003、2012、DOI: 10.1093/ptep/pts062
- ② Takayuki Yamazaki, Direct measurement of the hyperfine structure of the ground state positronium using high power sub-THz radiation, Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2012 37th International Conference on、査読無、2012、DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2012.6380416
- ③ T. Yamazaki, A. Miyazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, I. Ogawa, T. Idehara, and S. Sabchevski, Direct Observation of the Hyperfine Transition of Ground-State Positronium, Physical Review Letters、査読有、108 巻、253401、2012、DOI:

- 10.1103/PhysRevLett.108.253401
- ④ T. Yamazaki, First observation of o-Ps to p-Ps transition and first direct measurement of positronium hyperfine splitting with sub-THz light、Hyperfine interactions、査読有、2011、DOI: 10.1007/s10751-011-0399-0
- ⑤ A. Miyazaki, T. Yamazaki, T. Suehara、T. Namba、S. Asai、T. Kobayashi、H. Saito、T. Idehara、I. Ogawa、S. Sabchevski、Materials Science Forum、査読有、666 巻、2010、133-137、DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.666.133

[学会発表] (計 26 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、2013 年 3 月 28 日、広島大学
- ② 山崎高幸、Sub-THz Spectroscopy of the Ground State Hyperfine Splitting of Positronium、International Symposium on Development of Terahertz Gyrotrons and Applications、2013 年 3 月 14 日、福井大学
- ③ 宮崎彬、The direct spectroscopy of positronium hyperfine structure using sub-THz gyrotron、International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT2012)、2012 年 11 月 27 日、東大寺総合文化センター
- ④ 山崎高幸、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、豪州、ウロンゴン大学
- ⑤ 宮崎彬、The sub-THz direct spectroscopy of positronium hyperfine splitting、16th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-16)、英国、ブリストル大学
- ⑥ 山崎高幸、Direct Measurement of the Hyperfine Structure of the Ground State Positronium using High Power Sub-THz Radiation、The 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2012 (FIRT2012)、2012 年 3 月 8 日、福井大学 遠赤外線センター
- ⑦ 末原大幹、The First Observation of Direct Transition between o-Ps and p-Ps by sub-THz Radiation、Cold

Antimatter and High Precision Physics 2011 (Pbar11)、2011 年 11 月 29 日、島根県立産業交流会館

- ⑧ 宮崎彬、Direct Measurement of Positronium Hyperfine Splitting、36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz2011)、2011 年 10 月 7 日、米国、ヒューストン
- ⑨ 山崎高幸、First Direct Measurement of Hyperfine Splitting of Positronium using sub-THz light、10th International Conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP2011)、2011 年 4 月 27 日、TRIUMF、カナダ
- ⑩ 宮崎彬、Positronium Hyperfine Splitting、International School of Subnuclear physics 2010、2010 年 8 月、エリーチェ、イタリア
- ⑪ 宮崎彬、New Experiment for the First Direct Measurement of Positronium Hyperfine Splitting with sub-THz light、39th Polish Seminar on Positron Annihilation (PSPA10)、2010 年 6 月 23 日、カジメルツドルニー、ポーランド

[その他]

ホームページ等

<http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 富雄 (KOBAYASHI TOMIO)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授

研究者番号：50126059

(2) 研究分担者

浅井 祥仁 (ASAI SHOJI)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号：60282505

(3) 連携研究者

出原 敏孝 (IDEHARA TOSHITAKA)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・特任教授

研究者番号：80020197

難波 俊雄 (NAMBA TOSHIO)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：40376702

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