

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340049

研究課題名(和文) ミリ波を用いた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 Ps Hyper Fine Structure using sub THz

研究代表者

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

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 (Ps) の超微細構造 (HyperFine Structure、HFS) は 203GHz と大きい。これまではゼーマン分裂を用いた間接的な方法での測定しか行われておらず、QED 予言値と実測値に有意な乖離がみられる。本研究では、強力なミリ波光源 (ジャイロトロン) の開発や分光技術を開発し、10kW のミリ波を蓄積することに成功し、o-Ps から p-Ps への初めての直接遷移を確認した。この装置を用いて、直接遷移の分光を行っている。

研究成果の概要(英文)：

Positronium is an ideal system for the research of the bound state QED. The hyperfine splitting of positronium (Ps-HFS, about 203 GHz) is an important observable but all previous measurement Ps-HFS employed static magnetic field and measured Ps-HFS indirectly using Zeeman splitting. We propose new method to measure Ps-HFS directly using sub-THz radiation. We developed an optical system to accumulate high power (about 10 kW) radiation in a Fabry-Perot resonant cavity and observed the positronium hyperfine transition for the first time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2009年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：数物系科学

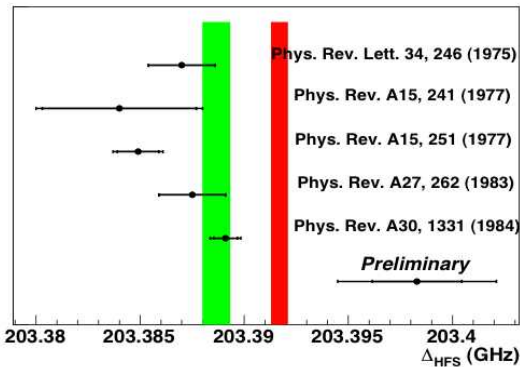
科研費の分科・細目：物理学 ・ 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ポジトロニウム、量子電磁気学、テラヘルツ波、超微細構造、ジャイロトロン

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 (Ps) の基底状態は、スピン状態に応じてオルソポジトロニウム (o-Ps $S=1$) とパラポジトロニウム (p-Ps, $S=0$) の二つが存在する。両者のエネルギー準位差は Ps の超微細構造 (HyperFine Structure、HFS) とよばれ 203GHz 相当である。

Ps HFS の値は束縛系 QED を検証する上で重要であり、過去多くの測定がなされた (下図エラーバー付き点)。測定値 (下図緑帯) と理論値 (赤帯) に 15ppm (3.9σ) の大きな乖離が報告されている。過去の測定実験はいずれも静磁場を印加してゼーマン分裂した幅から間接的に得られた値であり、磁場の一様性の不定性など系統誤差が含まれている可



能性がある。

2. 研究の目的

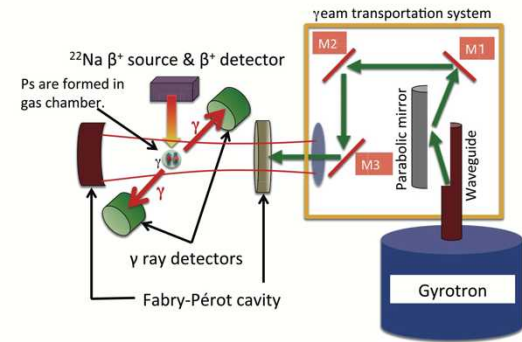
ゼーマン分裂をもちいた間接的な測定でなく、203GHz 波(ミリ波)を照射して Ps HFS 遷移をおこし、その値を測定する方法を開発する。これはミリ波分光を切り拓く新しい技術である。これにより最終的にこの乖離の原因を究明する。またこの遷移のブライト・ウィグラー共鳴曲線の幅は p-Ps の寿命に対応しており、p-Ps 寿命(125ps)の初めての直接測定も可能になる。

3. 研究の方法

実験装置は 4 つの部分で構成される。(図 2)

(1) 強力なミリ波源であるジャイロトロンを開発し、単色で強力な(>300W)なミリ波源を開発する。第一段階は単色固定波長を開発し安定的運用する。第二段階は、このジャイロトロンに後進管を組み入れ周波数可変なジャイロトロンを開発を行う。

(2) ジャイロトロンからミリ波を蓄積するファブリペロー共振器まで、モードを変換しつ



つロス無く伝送するシステムの開発を行う。ジャイロトロンは TE03 モードであるので、これを TEM00 ガウシアンモードへの変換を行う。(3) メッシュミラーを通してミリ波を Fabry-Perot 共振器の中に導き、 piezo素子で銅の球面ミラーを調整しレゾナンスを起こし、finesse 600 以上の共振状態を安定的に作り出す。

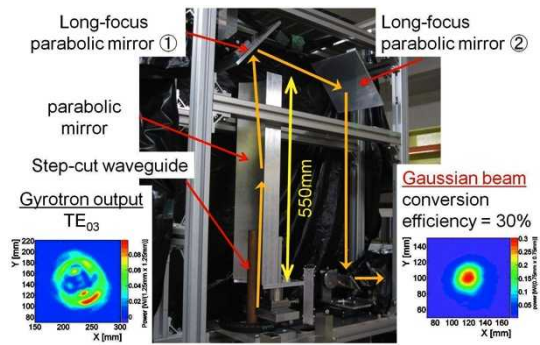
(4) Fabry-Perot 共振器は同時に Ps 生成アセンブリーになっており、²²Na 線源から放出された陽電子とガス(イソブタン 10%窒素 90%)の電子で Ps を生成する。(3)で蓄えられたミリ波で o-Ps から p-Ps への遷移が誘導される。p-Ps は 2 体の単色 γ 線に崩壊するので、 γ 線を LaBr シンチレーター検出器を用いて観測し、遷移をしらべる。

4. 研究成果

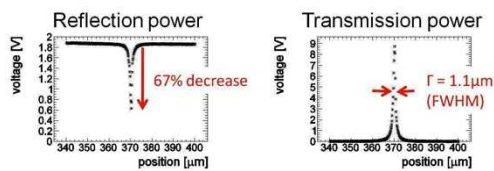
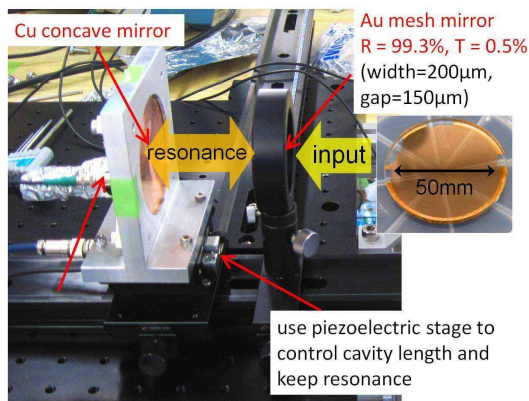
(1) ジャイロトロン(右写真)は完成し 203GHz 単色で安定的に 300W の出力に成功した。現在、周波数可変システムを組み込んでいる。



(2) 3 種類のミラーを組み合わせ(下写真)、モード変換装置を開発し、変換効率 30%でガウスモードに変換を行うことができた。図は実測したパワー分布であり、左のドーナツ型 (TE03) を右側の同心円 (TEM00) に変換している。



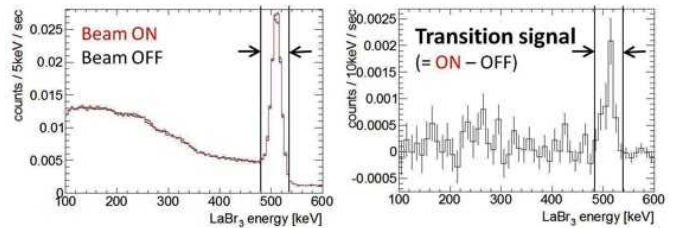
(3) Fabry-Perot 共鳴装置 (写真下) を開発した。写真右側にメッシュミラーは、ミリ波が外から内部に入射し、内部で共鳴状態のときに蓄えられる様になっている。図に示すように鋭い共鳴が得られ、finesse 650 が得られた。



(4) Fabry-Perot 共鳴装置を組み込んで、Ps 生成アセンブリとγ線検出器を組み合わせた。高いエネルギー分解能 (FWHM 4%@511keV) と時間分解能 (FWHM 0.5nsec) を有する LaBr シンチレーターを用いてγ線を検出する。



(5) ミリ波のありとなしでの Ps 崩壊シグナルを比較する事で、o-Ps から p-Ps への誘導遷移がおきている事を確認した。これは世界初の Ps HFS 直接遷移の測定であり、現在周波数可変ジャイロトロンを組み込んで開発することにより、Ps HFS のミリ波分光を行っている。



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 10 件)

① S. Asai et al., “Probing the Energy Structure of Positronium with a 203 GHz Fabry-Perot Cavity”, J. Phys. Conf. Ser., 査読無, 199, 012002, 2010

② S. Asai et al., “Precise measurement of Hyper Fine Structure of positronium using sub-THz light”, ArXiv, 査読無, 1003, 4324, 2010

③ S. Asai et al., “First direct measurement of positronium hyperfine splitting with sub-THz light”, ArXiv, 査読無, 1105 4392 2011

④ V. Bratman, M. Glyavin, T. Idehara et al., “Review of Subterahertz and Terahertz Gyrodevices at IAP RAS and FIR FU”, IEEE Trans. Plasma Sci., 査読有, 37-1, 36-43, 2009

⑤ 浅井 祥仁, “ポジトロニウムの新たな謎”, パリティ, 査読無, 24, 4-11, 2009

⑥ T. Idehara, T. Saito et al., “The potential of the gyrotrons for development of the sub-terahertz and the terahertz range - a review of novel and prospective application”, Thin Solid Films, 査読有, 517, 1503-1506, 2008

⑦ T. Idehara, I. Ogawa, T. Saito et al., “Development of THz gyrotrons and application to high power THz technologies”, Terahertz Science and Technologies, 査読無, 1-1, 100-106, 2008

⑧ S. Asai, Y. Kataoka, T. Kobayashi, T. Namba, T. Suehara, G. Akimoto, A. Ishida, M.M. Hashimoto, H. Saito, T. Idehara and M. Yoshida, “Precision measurements of positronium decay rate and energy level” AIP Conference Proceedings, 査読無, 1037, 43-55, 2008

⑨ 難波 俊雄, 末原 大幹, “ポジトロニウムの超微細構造の精密測定”, 高エネルギーニュース, 査読無, 27, 100-108, 2008

⑩ 浅井 祥仁, “サブテラヘルツ波を用いた束縛系 QED の精密検証”, J. Plasma Fusion Res., 査読無, 27, 902-905, 2008

[学会発表] (計 18 件)

① S. Asai, “Application of Gyrotron: Precision measurement of Positronium HFS”, The 3rd International Workshop on Far-Infrared Technologies 2010, 2010 年 3 月 15 日-3 月 17 日, 福井大学

② A. Ishida, “Precise measurement of HFS of Positronium”, The Workshop on Low Energy Positron and Positronium Physics, 2009 年 7 月 29 日-8 月 1 日, カナダ・トロント

③ T. Suehara, “Probing the Energy Structure of Positronium with a 203 GHz Fabry-Perot Cavity”, The Workshop on Low Energy Positron and Positronium Physics, 2009 年 7 月 29 日-8 月 1 日, カナダ・トロント

④ A. Ishida, “Precise measurement of HFS of Positronium”, XXVI International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, 2009 年 7 月 22 日-7 月 29 日, アメリカ・ミシガン

⑤ T. Suehara, “The First Direct Measurement of the Hyperfine Splitting of Positronium”, XXVI International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, 2009 年 7 月 22 日-7 月 29 日,

アメリカ・ミシガン

⑥ 石田 明, “ポジトロニウム超微細構造の精密測定 I (全体と本測定の準備)”, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 27 日, 立教大学

⑦ 秋元 銀河, “ポジトロニウム超微細構造の精密測定 II (テスト測定での RF システム)”, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 27 日, 立教大学

⑧ 難波 俊雄, “ポジトロニウム超微細構造の精密測定 III (ミリ波を用いた直接遷移実験)”, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 27 日, 立教大学

⑨ 漆崎 裕一, “ポジトロニウムの超微細構造測定のための Gyrotron FU CW V”, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 27 日, 立教大学

⑩ 石田 明, “ポジトロニウムの HFS 精密測定 II Zeeman を用いた方法のテスト実験の報告”, 京都大学原子炉実験所専門委員会「陽電子科学とその理工学への応用」, 2008 年 12 月 5 日, 京都大学原子炉実験所

⑪ T. Idehara, I. Ogawa, H. Mori, S. Kobayashi, S. Mitsudo and T. Saito, “A high power THz radiation source - Gyrotron FU CW III for high power THz Technologies”, 2nd Japan-Korea Joint Workshop on THz Technology, 2008 年 10 月 24 日-10 月 25 日, コンファレンススクエアエムプラス

⑫ 秋元 銀河, “ポジトロニウム超微細構造の精密測定 I (全体と RF-Cavity)”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 21 日, 山形大学

⑬ Mark M. Hashimoto, “Positronium assembly system for the precise measurement of the Positronium hyper-fine splitting”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 21 日, 山形大学

⑭ 石田 明, “ポジトロニウム超微細構造の精密測定 III (ガンマ線検出器)”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 21 日, 山形大学

- ⑮ 末原 大幹, “サブテラヘルツ波を用いたポジトロニウム超微細構造の直接測定”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 21 日, 山形大学
- ⑯ La Agusu, T. Idehara et al., “Design of Gyrotron FU CW V for Accurate Measurement of Positronium Energy Level”, The 33rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2008 年 9 月 15 日-9 月 19 日, カリフォルニア・アメリカ
- ⑰ T. Idehara, “Development and application of THz gyrotrons”, 7th Int. Workshop on Strong Microwaves: Sources and Applications, 2008 年 7 月 27 日-8 月 2 日, ロシア・ニジニノヴゴロド
- ⑱ T. Idehara, “High power CW THz radiation sources - Gyrotron FU CW Series for application to high power THz technologies”, Int. Symposium on Terahertz between Japan and Sweden, 2008 年 5 月 27 日, 首都大学東京

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:
〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 連携研究者

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
(H20-H22)

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
(H20-H22)

齋藤 晴雄 (SAITO HARUO)
東京大学・総合文化研究科・准教授
研究者番号: 60235059
(H21-H22) (H20:研究分担者)

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
(H21-H22) (H20:研究分担者)