

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 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：2013～2014

課題番号：25800129

研究課題名(和文) 高強度ミリ波を用いたポジトロニウム超微細構造・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 Hyperfine Structure of Positronium and the Decay Rate of Parapositronium using High Power Millimeter Wave

研究代表者

山崎 高幸 (Yamazaki, Takayuki)

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：40632360

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ポジトロニウムは電子と陽電子が束縛された系であり、ハドロンの不定性を受けずに束縛系量子電磁力学(QED)によって記述される。ポジトロニウム超微細構造(Ps-HFS)は電子と陽電子のスピン・スピン相互作用によって生じる基本的な物理量であり、この精密測定は束縛系QEDの検証において重要である。現在、Ps-HFSの実験値と理論値との間に4程度の有意なずれが存在しているが、過去の実験は全て静磁場を用いた間接的な測定であった。本研究では大強度ミリ波によってPs-HFSを世界で初めて直接分光測定した。この結果はProg. Theor. Exp. Phys. 2015, 011C01 (2015)に掲載された。

研究成果の概要(英文)：Positronium is a bound state of an electron and a positron. The energy difference between para-positronium and ortho-positronium is called the hyperfine structure of the ground state positronium (Ps-HFS), which is caused by the spin-spin interaction between the electron and the positron. Precise measurement of Ps-HFS gives the direct information on QED in the bound state, therefore many experiments has been performed in the past. There is, however, a large discrepancy (3.9 standard deviations, 15ppm) between the measured and the theoretical value. All of the previous measurements used static magnetic field to cause Zeeman splitting to measure Ps-HFS indirectly, and the nonuniformity of the magnetic field gives a largest systematic error. In this study, I have developed a high power (> 20kW) frequency tunable millimeter wave system and measured Ps-HFS spectroscopically for the first time. The result is published in Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 011C01 (2015).

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子実験 原子・分子物理 テラヘルツ/赤外材料・素子

1. 研究開始当初の背景

ポジトロニウムは、電子・陽電子の準安定な束縛状態であり、最も軽い水素様原子である。ハドロンとの寄与による不定性がなく束縛系における量子電気力学(QED)のみで記述されるため、束縛系 QED の精密検証に適した系であり、理論と実験を精密に比較することで未知粒子の寄与を探ることが可能である。

電子と陽電子の間のスピン・スピン相互作用によって生じる(基底状態における)ポジトロニウム超微細構造(Ps-HFS)はポジトロニウムの基本的な物理量であり、理論値が O(ppm) の精度で計算されている。また、過去に複数の精密測定実験が行われてきたが、全ての実験で理論値より低い周波数が得られており、実験値と理論値に統計的に 3.9σ (15ppm) という有意なずれが存在する(図1)。このずれの原因として、1. 現在の理論計算に含まれていない未知粒子の寄与なのか、2. 過去の実験に共通した系統誤差の存在、の2つが考えられる。これを検証するため、過去の実験と異なる新たな手法での測定が必要である。

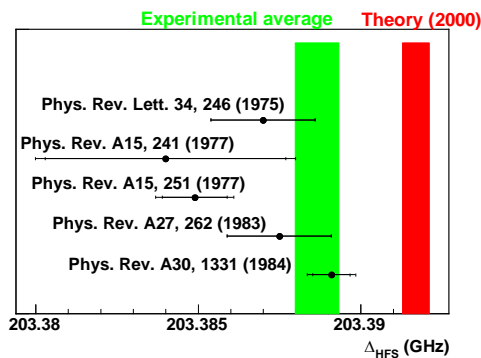


図1: Ps-HFS の実験値と理論値

2. 研究の目的

これまで、基底状態における Ps-HFS の測定は、ポジトロニウムに静磁場を印加させることでゼーマン分裂したエネルギー準位を測定することで間接的に行われてきた。しかし、ポジトロニウム生成領域(〜10cm)にわたり ppm レベルで一様な磁場を生成することは難しく、過去の実験においては静磁場の非一様性が最大の系統誤差要因となっていた。

本研究では、大強度ミリ波(〜203GHz)を用いて Ps-HFS を世界で初めて直接分光測定する。これは静磁場を用いない唯一の測定手法であり、Ps-HFS 間の遷移曲線の幅からパラポジトロニウムの崩壊率を直接測定することも可能である。

3. 研究の方法

大強度ミリ波源であるジャイロトロンからのアベレージパワー300W 程度の出力をファブリーペロー共振器に蓄積することで

30kW 程度まで増幅し、これをポジトロニウムに照射することで Ps-HFS 間の遷移を引き起こす。遷移が起きるとポジトロニウムが2本の 511keV の γ 線に崩壊する事象数が増加する。ジャイロトロンから出力されるミリ波の周波数を 201~206GHz の範囲で変化させた際の 2γ 崩壊事象数の変化を測定することにより、Ps-HFS 間の遷移曲線を得る。実験セットアップの概要を図2に示す。

遷移事象数は照射するミリ波の周波数およびパワーに依存するため、これらを精密にモニターするシステムを開発し、数ヶ月程度の遷移測定実験を行うことで Ps-HFS を世界で初めて直接測定する。

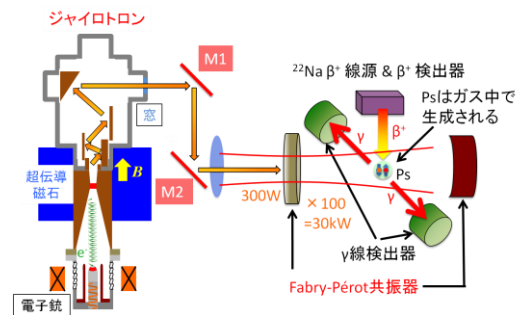


図2: 実験セットアップ

4. 研究成果

ポジトロニウム超微細構造を分光測定する際に重要となるミリ波のパワーおよび周波数のモニターシステムを開発した。

周波数については大強度ミリ波のごく一部をショットキーバリアダイオードにホーンアンテナを介して準光学的に結合させ、高精度な周波数源とヘテロダイン混合させることでダウンコンバートした周波数を常時モニターすることが可能となった(図3)。



図3: 周波数モニターシステム

また、ファブリーペロー共振器内部に蓄積されたパワーを測定するために蓄積パワーの一部をミラーに開けた小孔から透過させて焦電検出器で常時モニターしているが、本研究では周波数を変えて測定を行うため、小孔や焦電検出器などの周波数応答を実測する必要がある。そこで、新たに製作したミリ

波ビームチョッパーを周波数応答の測定に導入することでミリ波ビームのパワーと小孔・焦電検出器の応答を同時測定可能にした。これによりファブリーペロー共振器の内部に蓄積しているパワーを 15%の絶対精度で評価することができるようになった。周波数応答を測定するための実験セットアップの写真を図 4 に示す。

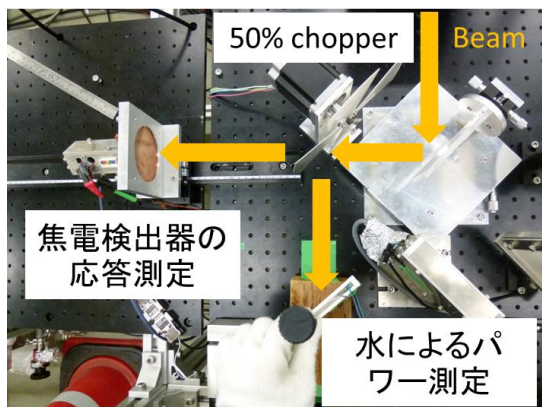


図 4：パワー測定器の周波数応答を測定するための実験セットアップ

上述したパワー・周波数のモニターシステムを導入した後、ジャイロトロンが発振周波数を変化させて遷移量の変化を測定することで、世界で初めてポジトロニウム超微細構造を直接測定した。図 5 に示す遷移曲線から得られた Ps-HFS の値は $203.39^{+0.15}_{-0.14}(\text{stat.}) \pm 0.11(\text{sys.})$ GHz であり、0.1%の精度で理論値と無矛盾な結果であった。また同時にパラポジトロニウムの崩壊率や Ps-HFS における自然放射率(アインシュタインの A 係数) が得られた。パラポジトロニウムの崩壊率を磁場なしで直接測定したのは本研究が初めてである。

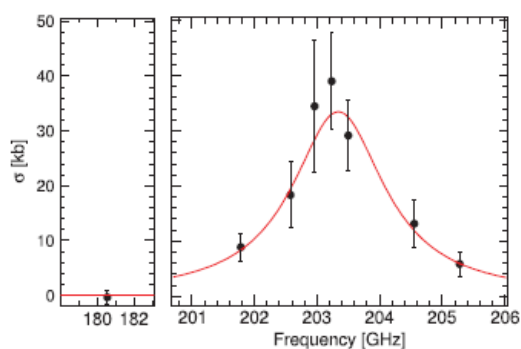


図 5：Ps-HFS 間の遷移曲線。黒点が実測値。赤線はそのフィット結果

この結果をまとめた論文は Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 011C01 (2015)に掲載された。また、本研究は素粒子物理・陽電子科学・テラヘルツ(ミリ波)などの分野にまたがる研究であるため、各分野の国際学会において発表を行った。

今後の展望として、ミリ波技術の高度化による Ps-HFS の実験値と理論値の ppm レベルでの検証がまず挙げられる。特にパワーの測定精度の向上が必須だが、ファブリーペロー共振器を用いず JAEA などが開発している MW クラスのジャイロトロンをそのまま用いれば、熱負荷によってパワーの絶対値を精度よく測定することが可能となると考えている。

また、Ps-HFS 間遷移はポジトロニウムのボーズアインシュタイン凝縮(BEC)との関連でも現在注目されている。ポジトロニウムは通常の原子と比べ高温・低密度で BEC を引き起こすと予想されている。Ps-HFS の上準位(オルソポジトロニウム)は下準位(パラポジトロニウム)に比べ 1000 倍も寿命が長いいため、BEC が起きた場合、コヒーレントなオルソポジトロニウムの集団が反転分布を形成する。これに対し本研究で開発した大強度ミリ波を照射してオルソポジトロニウムからパラポジトロニウムに誘導遷移させると、コヒーレントなパラポジトロニウムの集まりが生じ、このパラポジトロニウム集団が崩壊する際に放出する 511keV の γ 線はレーザーとなる(Phys. Rev. Lett. 113, 023904 (2014))。 γ 線レーザーは極めて学術的に価値が高い研究であり、本研究で開発した Ps-HFS 遷移技術の応用が期待される。

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 2 件)

- ① A. Miyazaki, T. Yamazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, Y. Tatematsu, I. Ogawa, and T. Idehara, "Direct Measurement of the Hyperfine Interval of Positronium Using High Power Millimeter Waves", Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, Vol. 2015, 2015, 011C01
DOI:10.1093/ptep/ptu181
- ② A. Miyazaki, T. Yamazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, T. Idehara, I. Ogawa, and Y. Tatematsu, "The direct spectroscopy of positronium hyperfine structure using a sub-THz gyrotron", Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 査読有, Vol. 35, 2014, 91
DOI:10.1007/s10762-013-0001-8

[学会発表] (計 8 件)

- ① 宮崎彬、山崎高幸、末原大幹、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、立松芳典、小川勇、出原敏孝、「大強度ミリ波を用いたポジトロニウム超微細構造の直接測定」、日本物理学会第 69 回年次大会、

- 2014年03月28日、東海大学(神奈川県)
- ② A. Miyazaki, T. Yamazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, Y. Tatematsu, I. Ogawa, and T. Idehara, “Direct Measurement of Positronium Hyperfine Structure with a High-Power Millimeter-wave Gyrotron”, The 5th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT2014) (招待講演), 2014年03月05日, University of Fukui, Fukui, Japan
- ③ 山崎高幸、宮崎彬、末原大幹、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、立松芳典、小川勇、出原敏孝、「ポジトロニウム超微細構造の直接測定」、陽電子科学とその理工学への影響、2013年11月30日、京都大学原子炉実験所(大阪府)
- ④ 山崎高幸、宮崎彬、末原大幹、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、立松芳典、小川勇、出原敏孝、「ポジトロニウム超微細構造の直接測定 I (概要と光学系)」、日本物理学会第2013年秋季大会、2013年09月20日、高知大学(高知県)
- ⑤ 宮崎彬、山崎高幸、末原大幹、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、立松芳典、小川勇、出原敏孝、「ポジトロニウム超微細構造の直接測定 II (解析及び暫定結果)」、日本物理学会第2013年秋季大会、2013年09月20日、高知大学(高知県)
- ⑥ T. Yamazaki, A. Miyazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, Y. Tatematsu, I. Ogawa, and T. Idehara, “Sub-THz Spectroscopy of the Ground State Hyperfine Splitting of Positronium”, 3rd Workshop on the Physics of Fundamental Symmetries and Interactions at low energies and the precision frontier (PSI2013), 2013年09月11日, Paul Scherrer Institut (PSI), Swiss Confederation
- ⑦ T. Yamazaki, A. Miyazaki, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, Y. Tatematsu, I. Ogawa, and T. Idehara, “Sub-THz Spectroscopy of the Ground State Hyperfine Splitting of Positronium”, The International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2013), 2013年09月06日, Mainz, Germany
- ⑧ T. Namba, A. Miyazaki, T. Yamazaki, T. Suehara, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, Y. Tatematsu, I. Ogawa, and T. Idehara, “Direct Measurement of the Hyperfine Structure of Ground-State Positronium”, The XVII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics (POSMOL2013), 2013年07月20日, Kanazawa Bunka Hall, Kanazawa, Japan

[その他]
ホームページ等
http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/tabletop_experiments/Home.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 高幸 (YAMAZAKI, Takayuki)
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：40632360