

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340059

研究課題名(和文)ゼーマン遷移を用いたポジトロニウム超微細構造の精密測定

研究課題名(英文) Precision measurement of Hyperfine Splitting of Positronium using the Zeeman transition

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円、(間接経費) 4,500,000円

研究成果の概要(和文)：ポジトロニウムの基底状態の超微細構造を精密に測定した。過去の測定値と理論値の間のズレ(15ppm)を検証するために、一様で安定な磁場とポジトロニウム生成からの時間情報を用いて新たな手法を用いた。結果は、 $203.3942 \pm 0.0016(\text{stat.}) \pm 0.0013(\text{sys.})$  GHz が得られた。この結果は、理論値と1.2標準偏差で無矛盾であり favor している。一方、過去の測定値とは2.6標準偏差離れていた。また、精密測定においてポジトロニウムの熱化過程が無視できないことがわかった。

研究成果の概要(英文)：The ground state hyperfine splitting of positronium is newly measured to check the discrepancy between the past measurements and the QED prediction. In this measurement, the timing information of positronium is used for the analysis. The uniformity and the stability of the magnetic field is also well-controlled.

The obtained result is  $203.3942 \pm 0.0016(\text{stat.}) \pm 0.0013(\text{sys.})$  GHz. This result favors the QED prediction within 1.2 standard deviations, and disfavors the previous experimental average by 2.6 standard deviations. It is also found that the effect of the thermalization process of positronium cannot be negligible in the precision measurement.

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 ポジトロニウム 超微細構造 ゼーマン効果 量子電磁気学

1. 研究開始当初の背景

ポジトロニウムは水素原子の陽子を陽電子で置き換えた準安定な「原子」である。水素原子と同様に多彩なエネルギー状態を持つが、そのうち最も重要な量の一つが、スピン-スピン相互作用に起因したエネルギー準位差、超微細構造(HyperFine Structure、HFS)である。ポジトロニウムの基底状態でのHFSは、束縛系の量子電磁力学(Quantum ElectroDynamics、QED)の精密検証や、未発見の新粒子による間接的な寄与を探る上で、寿命と並んで重要な量であり、これまで多くの測定が為されてきた。1980年代には、米国の2つの独立なグループによって、3ppmの精度で互いに無矛盾な測定が行われている。一方、束縛系QEDの理論計算の進歩によって、2000年になって $O(\alpha^3)$ の精度で計算が行われた。その結果、計算値が先の測定値と $3.9\sigma$  (15ppm)もズレていることが明らかとなった。仮にこのズレが本当であった場合、「標準理論」を超えた未知の現象が介在している可能性がある。このため、ズレの原因の解明が急務であった。

2. 研究の目的

本研究は、実験の側面からポジトロニウムHFSのズレの原因を探る。スピン三重項であるオルソポジトロニウムと一重項であるパラポジトロニウムとの間の準位差(203GHz)がHFSであるが、これを直接測定するのではなく、静磁場を印加して生じたゼーマン準位の準位差(~3GHz)を測定する。このエネルギー差はちょうどマイクロ波領域に相当するため、マイクロ波を印加してポジトロニウムの遷移を起こす。印加する静磁場を変化させてゼーマン準位を変化させる事で、共鳴を測定する。

精度良くポジトロニウムHFSを測定するために、特に、過去の測定で見落とされていた可能性のある以下の系統誤差に留意する。

- (1) ポジトロニウムHFSは、磁場によるゼーマンシフトを利用して測定する。過去の実験では、このための静磁場印加を、磁極間ギャップの小さい常伝導磁石を用いて行っている。このため、磁場の一様性、安定性に疑問がある。
- (2) 過去の測定では、ポジトロニウム生成からの時間情報を一切使用していない。系の時間発展、特にポジトロニウムの熱化に伴う周囲の物質の影響の変化が問題となる可能性がある。

これらの系統誤差を排除した新たな測定手法で精度の良い測定を行う。これにより、ポジトロニウムHFSのズレが未知の物理現象に起因するものかどうかを解明する。

3. 研究の方法

先述の系統誤差を解決するために、以下の2点に関して、独自の測定セットアップを考案した。

- (1) 静磁場印加用に大型の超伝導磁石を使用する。ボア径が80cmの超伝導磁石を永久電流モードで使用することで、磁場の一様性と安定性を保証する。ポジトロニウムの生成領域(~10cm)でppmの精度を保証するために、チェンバーの周りに補正コイルも使用した。
- (2) ポジトロニウムを生成するためにNa-22放射線源からの陽電子を利用する。この陽電子をプラスチックシンチレータでタグすることで、ポジトロニウム生成タイミングをタグし、ポジトロニウム生成からの時間情報を取得する。また、ガス中のポジトロニウムの熱化を補正するためにはガスの熱化関数が必要となるが、それは別途ゲルマニウム検出器でピックアップ法を用いて取得する。

これらを考慮して製作したセットアップの概念図を図1に示す。

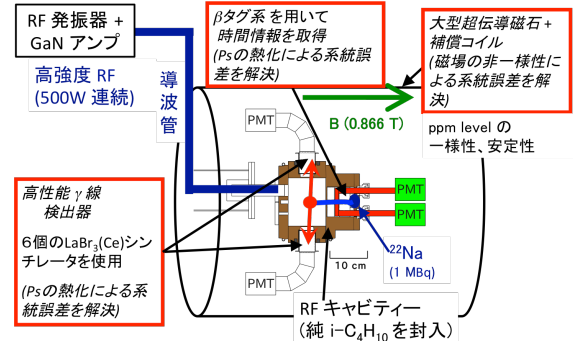


図1 セットアップの概念図

ポジトロニウムは、超伝導磁石ボア中心に設置したマイクロ波キャビティ(Q値=14700)中で作る。キャビティ内にはイソブタンガスを封入している。陽電子はキャビティ端のNa-22線源(1MBq)から供給し、薄いプラスチックシンチレータを通過する際に発する光を外側のPMTまで導いてタグする。ポジトロニウム崩壊時のガンマ線は周囲に設置した6個の臭化ランタンシンチレータ(直径1.5インチ、長さ2インチ)で検出する。これらのシンチレータにより、ポジトロニウム崩壊イベントについてエネルギーと時間の両方のデータを取得し、時間発展を考慮して解析を行う。

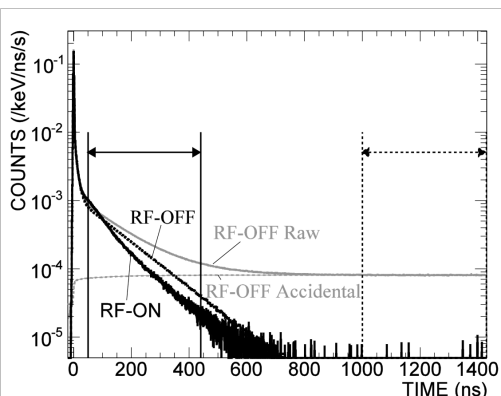


図2 タイミングスペクトル

#### 4. 研究成果

約3年間にわたり測定を行った。ポジトロニウム生成キャビティ内のイソプタンガスの圧力を、0.129、0.133、0.167、0.232、0.660、0.881、0.969、1.193、1.353、1.358、1.366 amagat にそれぞれ変化させ、各ガス圧で静磁場をスキャンした。スキャンした磁場点は、それぞれのガス圧について4~7点である。測定データのポジトロニウム生成からのタイミングスペクトルは図2のようになった。RFを印加することにより、明瞭にスペクトルに差が生じ、ゼーマン遷移が起きていることがわかる。エネルギーが511keVの周辺でイベントを選別し、共鳴カーブを作る。この解析では、ポジトロニウムの系の時間発展が重要であるため、ポジトロニウム生成後の時間が50nsから440nsの間を全部で11の時間ウインドウに分割し、各ガス圧、磁場点を一度にグローバルフィットした。

なお、フィットの際にはイソプタンガス中のポジトロニウムの熱化関数が必要となる。不定のパラメータとしてガスに対する断面積 $\sigma_m$ があるが、ピックオフ法を用いて独立に測定した結果から、そのパラメータは、 $\sigma_m = 47.2 \pm 3.9 \text{ \AA}^2$  ( $t > 40 \text{ ns}$ )の値を得た。 $t < 40 \text{ ns}$ に関しては、ドップラー広がり法から、 $\sigma_m = 146 \pm 11 \text{ \AA}^2$ 、初期エネルギー $E_0 = 3.1 + 1.0 / -0.7 \text{ eV}$ が得られているため、このパラメータを使って、熱化を記述した。

共鳴カーブのフィット結果の一例(0.881amagatでの結果)を図3に示す。各タイミングウインドウにおいて、共鳴カーブの振る舞いが良くフィットされている。自由度

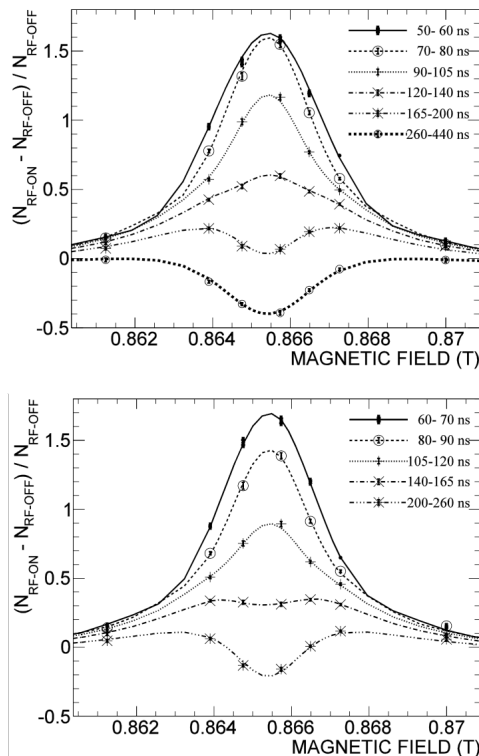


図3 0.881amagatでのフィット結果

592のグローバルフィットで、 $\chi^2$ は633.3と問題ない値であった。このフィットの結果、ポジトロニウム HFS の値として、 $203.3942 \pm 0.0016$  (stat.) GHz という結果が得られた。また、系統誤差を評価したところ、ポジトロニウムの熱化に起因した誤差は2ppm以下に抑えることができた。キャビティ内の温度分布や、磁場の一様性なども詳細に評価し、最終的な系統誤差は6.4ppmとなった。最終的に得られた結果は、 $203.3942 \pm 0.0016$  (stat.)  $\pm 0.0013$  (sys.) GHz であった。この結果を過

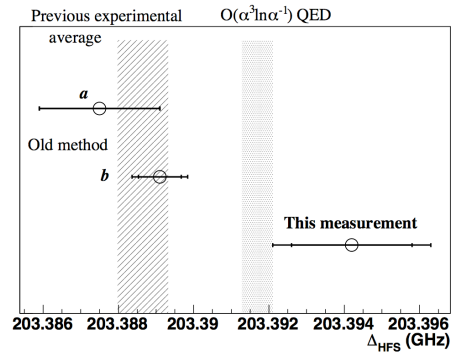


図4 今回の測定結果。aとbは過去の測定、中心のグレーの帯が理論計算値。

去の測定結果、理論計算値と比較してプロットした絵が図4である。過去の2つの測定の平均値とは2.6標準偏差離れているが、束縛系QEDの理論計算値とは1.2標準偏差内である。したがって、理論計算値をfavorする結果であった。また、過去の測定と同様に熱化の考慮をしないで解析を行ったところ、HFSの結果は $10 \pm 2 \text{ ppm}$  小さな値となり、熱化の過程を考慮しないと最終結果に深刻な影響を与えることがわかった。

#### 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 A. Ishida, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, M. Yoshida, K. Tanaka, A. Yamamoto, New Precision Measurement of Hyperfine Splitting of Positronium, arXiv: 1310.6923、査読無(投稿論文として査読のプロセス中)
- ② Toshio Namba, Precise measurement of positronium, Progress of Theoretical and Experimental Physics、査読有、2012 04D003-1 ~ 12、DOI: 10.1093/ptep/pts062
- ③ A. Ishida, Y. Sasaki, G. Akimoto, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, M. Yoshida, K. Tanaka, A. Yamamoto, Precise Measurement of positronium hyperfine splitting using the Zeeman effect, 査読有、Hyperfine interactions、2011、

DOI: 10.1007/s10751-011-0455-9

- ④ A. Ishida, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, M. Yoshida, K. Tanaka, A. Yamamoto、Precise measurement of positronium hyperfine splitting using the Zeeman effect、査読無、Proceedings of 5<sup>th</sup> International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2011、17~21

[学会発表] (計 14 件)

- ① 難波俊雄、石田明、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、吉田光宏、田中賢一、山本明、ゼーマン効果を用いたポジトロニウム超微細構造の精密測定、陽電子科学とその理工学への応用、2013 年 12 月 6 日、京都大学原子炉実験所(大阪府)
- ② 石田明、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、吉田光宏、田中賢一、山本明、ポジトロニウム超微細構造の精密測定、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 20 日、高知大学(高知県)
- ③ A. Ishida, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, M. Yoshida, K. Tanaka, A. Yamamoto、New Precision Measurement of Hyperfine Splitting of Positronium、The XVII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics (POSMOL2013)、2013 年 7 月 20 日、金沢文化ホール(石川県)
- ④ 石田明、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、吉田光宏、田中賢一、山本明、ポジトロニウム超微細構造の精密測定、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 27 日、広島大学(広島県)
- ⑤ 石田明、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、吉田光宏、田中賢一、山本明、ポジトロニウム超微細構造の精密測定、陽電子科学とその理工学への応用、2012 年 11 月 30 日、京都大学原子炉実験所(大阪府)
- ⑥ 石田明、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、吉田光宏、田中賢一、山本明、ポジトロニウム超微細構造の精密測定、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 11 日、京都産業大学(京都府)
- ⑦ 石田明、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、吉田光宏、田中賢一、山本明、ポジトロニウム超微細構造の精密測定、第 49 回アイソトープ・放射線研究発表会、東京大学(東京都)
- ⑧ 石田明、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、吉田光宏、田中賢一、山本明、ゼーマン効果を用いたポジトロニウム超微細構造の精密測定、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 24 日、関西学院大学(兵庫県)
- ⑨ 石田明、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、吉田光宏、田中賢一、山本明、ポジトロニウム超微細構造の精密測定、

陽電子科学とその理工学への応用、2011 年 12 月 3 日、京都大学原子炉実験所(大阪府)

- ⑩ A. Ishida, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, M. Yoshida, K. Tanaka, A. Yamamoto、Precision measurement of positronium hyperfine splitting using the Zeeman effect、Cold Antimatter and High Precision Physics (Pbar11)、2011 年 11 月 28 日、島根県立産業交流会館(島根県)
- ⑪ A. Ishida, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, M. Yoshida, K. Tanaka, A. Yamamoto、Precise measurement of positronium hyperfine splitting using the Zeeman effect、Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2011)、2011 年 10 月 8 日、岡山大学(岡山県)
- ⑫ 石田明、秋元銀河、佐々木雄一、末原大幹、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、吉田光宏、田中賢一、山本明、ゼーマン効果を用いたポジトロニウム超微細構造の精密測定、日本物理学会 2011 年秋季大会、2012 年 9 月 18 日、弘前大学(青森県)
- ⑬ 石田明、秋元銀河、佐々木雄一、末原大幹、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、斎藤晴雄、吉田光宏、田中賢一、山本明、ポジトロニウム超微細構造の精密測定、第 48 回アイソトープ・放射線研究発表会、2011 年 7 月 8 日、日本科学未来館(東京都)
- ⑭ A. Ishida, Y. Sasaki, G. Akimoto, T. Suehara, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, M. Yoshida, K. Tanaka, A. Yamamoto、Precise measurement of positronium hyperfine splitting using the Zeeman effect、10<sup>th</sup> International Conference on Low Energy Antiproton Physics、2011 年 4 月 28 日、TRIUMF(カナダ)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2)研究分担者

浅井 祥仁 (ASAI, Shoji)

東京大学・理学系研究科・教授

研究者番号：60282505

(3)連携研究者

斎藤 晴雄 (SAITO, Haruo)

東京大学・総合文化研究科・准教授

研究者番号：60235059

吉田 光宏 (YOSHIDA, Mitsuhiro)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究  
施設・准教授

研究者番号：60391710