

論文の内容の要旨

論文題目 New precise measurement of the hyperfine splitting of positronium
(ポジトロニウムの超微細構造の新しい方法による精密測定)

氏名 石田 明

この論文は、ポジトロニウム (Ps) の基底状態における超微細構造 (Δ_{HFS}) を、新たな方法を用いて精密測定した結果についての報告である。ポジトロニウムとは、電子と陽電子の束縛系である。基底状態において、スピン一重項状態 (1^1S_0 , p-Ps, パラ・ポジトロニウム) は 125 ps の寿命を持ち、スピン三重項状態 (1^3S_0 , o-Ps, オルソ・ポジトロニウム) は 142 ns の寿命を持ち、主にそれぞれ 2 本、3 本のガンマ線に崩壊する。エネルギー準位は、o-Ps の方が p-Ps より 0.84 meV (203 GHz) 高く、この差が超微細構造である。Ps の超微細構造は、束縛系量子電磁力学 (QED) の高次補正の精密検証に適している。Ps の超微細構造には、図 1 のように、理論値と過去の測定値の間に、15 ppm (3.9 標準偏差) もの有意な乖離が存在している。この乖離が本当ならば、素粒子標準理論を超えた新しい物理現象の示唆となる。

そこで著者は、この乖離を検証するため、過去の実験において、Ps の熱化による効果が、無視できない系統誤差になっている可能性に着目した。過去の実験では、ガス中で Ps を生成し、超微細構造を測定している。しかし、ガス中における超微細構造の値は、Ps がガス分子と衝突する際に、ガス分子の電場の影響を受けるため、衝突頻度にほぼ比例して、真空中の値からずれてしまう。そこで、超微細構造を様々なガス密度で測定し、この物質の効果が密度に比例すると仮定して、真空中に線形に外挿することにより、値を求めている。ところが、Ps の熱化を考慮すると、衝突頻度が単純に密度にのみ比例する、即ち Ps の速さの時間変化は無視できるという仮定は、大きな系統誤差となりうるということが、ここ 20 年ほどで分かってきた [6]。

ガス中で生成された Ps は、 $O(\text{eV})$ の初期運動エネルギーを持つが、周りのガス分子との衝突により、徐々に運動エネルギーを失い、最終的に室温になる。この過程を熱化という。熱化の時定数は、高ガス密度 (~ 1 amagat, amagat は 0°C , 1 atm における理想気体の数密度で規格化された数密度の単位) では $O(\text{ns})$ (窒素の場合) と、o-Ps の寿命に比べて充分短い、低ガス密度では、密度に反比例して長くなり、o-Ps の寿命に比べて無視できなくなる。超微細構造の測定では、精度を高めるため、特に低ガス密度 (~ 0.2 amagat 以下) での測定が重要であり、熱化していない Ps の効果が大きい可能性がある。

そこで著者は、Ps の熱化による系統誤差を抑えた、全く新しい実験を行った。実験のセットアップを、図 2 に示す。まず、静磁場中で Ps を生成し、ゼーマン分裂を起こさせる。そこに約 2.9 GHz, 500 W CW の大強

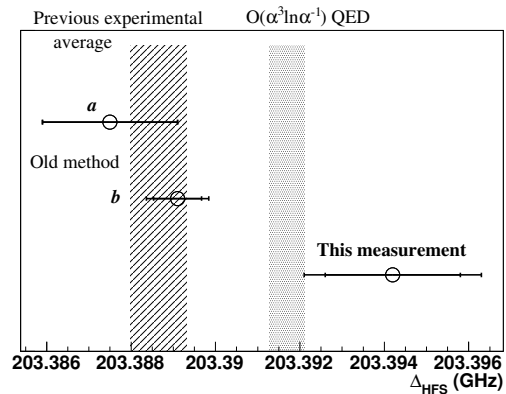


図 1 ポジトロニウムの超微細構造測定のまとめ。誤差棒つきの点が実験値 (a –[1], b –[2], **This measurement**–本実験の結果) であり、斜線は過去の実験の平均値、ドットは QED 理論値 [3, 4, 5] を示す。

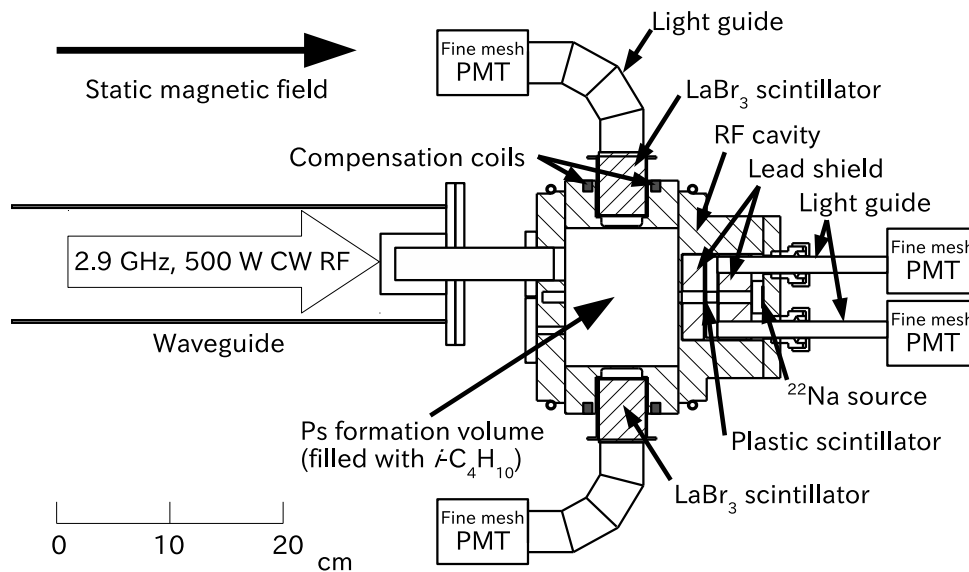


図2 本実験のセットアップ (磁石内平面図)。

度マイクロ波を印加し、ゼーマン遷移を起こさせる。この遷移が起こると、通常 3 本のガンマ線に崩壊する o -Ps が、2 本の 511 keV の単色ガンマ線に崩壊するようになる。この崩壊の違いから、遷移確率を求める。マイクロ波周波数を固定して静磁場を振り、ゼーマン遷移曲線を作ることで、ゼーマン分裂の大きさを精密に測定する。そして、ゼーマン分裂の大きさから、超微細構造を求める。これらの基本的な方法は、過去の精密測定実験と同様であるが、本実験では、熱化していない Ps による系統誤差を抑えるため、以下の 3 つの全く新しい方法を導入した。

1. 時間情報の取得。これが最も重要な点である。Ps が生成してから崩壊するまでの時間情報を新たに取得することにより、Ps の熱化による効果を抑え、かつ補正することを可能にした。Ps が生成してすぐの、十分に熱化していない時間領域のデータを使用しないことにより、ある程度熱化した Ps の崩壊事象のみを選択することができる。また、ゼーマン遷移事象を効果的に選択し、シグナル・ノイズ比を従来の実験に比べて 20 倍向上した。
2. 高性能ガンマ線検出器。LaBr₃(Ce) 無機結晶シンチレータを用いることで、高統計の実験を可能にした。
3. 大型超伝導磁石。静磁場の非一様性による系統誤差を減らすため、ボア径 800 mm、長さ 2 m の大型超伝導磁石を用いた。本実験では、 $O(100 \text{ cm}^3)$ という、従来の実験の約 10 倍の広範囲で、Ps 生成領域のほぼ全てにおいて 1.5 ppm RMS の一様性を確保した。また、永久電流モードでの運転により、1 週間の長期にわたり $\pm 1 \text{ ppm}$ で安定した静磁場を確保した。

本実験では、ガスとして純イソブタン (>99.9%) を用いた。イソブタンを用いることで、過去の実験で使用された窒素では顕著なバックグラウンドである、低速陽電子による長寿命 2γ 対消滅事象を排除するとともに、窒素に比べ Ps 生成率を高め、熱化も早めることができる。運動エネルギー 0.17 eV 以下の領域での、イソブタンガス中での Ps 熱化関数を、独自に測定し、 $\sigma_m = 47.2 \pm 6.7 \text{ \AA}^2$ という運動量移行断面積を得た。

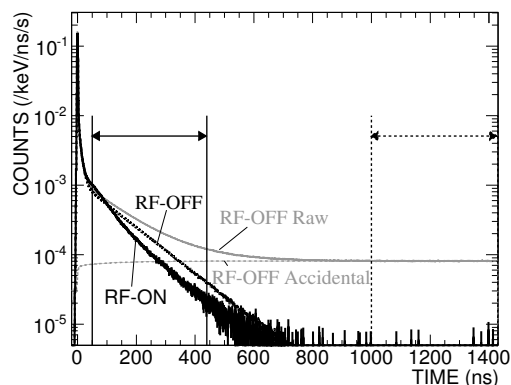


図 3 時間スペクトル (0.881 amagat, 0.865 733 6 T)。実線の矢印は遷移曲線の導出に用いられた時間領域を、破線の矢印はエネルギースペクトルの引き算に用いられたアクシデンタル時間領域を示す。黒の「RF-OFF」及び「RF-ON」のプロットは、アクシデンタル事象を除いたもの。

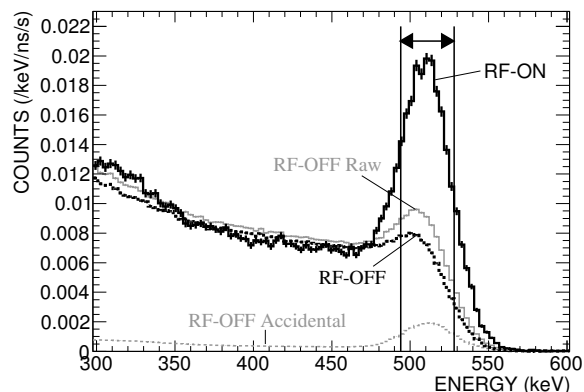


図 4 50–60 ns におけるエネルギースペクトル (0.881 amagat, 0.865 733 6 T)。黒の「RF-OFF」及び「RF-ON」のプロットは、アクシデンタル事象を除いたもの。遷移曲線は、図中に矢印で示された領域の、RF-ON 及び RF-OFF の面積を比較することによって得られる。

本実験で得られた典型的な時間スペクトルを、図 3 に示す。この図は、Ps が生成してから崩壊するまでの時間差を示したものである。矢印で示した領域のデータを選択することで、熱化していない Ps の効果を抑え、かつシグナル・ノイズ比を高める。

次に、本実験で得られた、典型的な崩壊ガンマ線のエネルギースペクトルを、図 4 に示す。図 3 に示した、アクシデンタル領域におけるスペクトルを用いることにより、真のエネルギースペクトルを求める。そして、 $511 \text{ keV} \pm 1 \text{ 標準偏差} (\approx 17 \text{ keV})$ の領域内のイベントレートについて、 $[(\text{RF-ON でのレート}) - (\text{RF-OFF でのレート})] / (\text{RF-OFF でのレート})$ を、静磁場の関数としてプロットすることにより、図 5 のような遷移曲線を得る。この遷移曲線は、11 個の時間領域に分けてプロットしてあり、理論曲線によくフィットできている。このような遷移曲線を、11 のガス密度 (0.129, 0.133, 0.167, 0.232, 0.660, 0.881, 0.969, 1.193, 1.353, 1.358, 1.366 amagat) において測定した。Ps 熱化関数を取り入れた理論曲線により、全データ (11 のガス密度 \times 11 の時間領域 \times 4–7 の静磁場点) をグローバル・フィットし、

$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.3942(16) \text{ GHz} \quad (1)$$

を、 $\chi^2/\text{ndf} = 633.3/592$, p -値 0.12 で得た。

熱化していない Ps による、超微細構造測定への効果の大きさを見積もるため、理論曲線から Ps の速さの時間依存性を排除し、十分に熱化しているという仮定での Δ_{HFS} を求めた。その結果、203.3922(16) GHz という値が得られた。式 (1) と比較し、熱化していない Ps による効果は、 $10 \pm 2 \text{ ppm}$ もの大きさであることが判明した。

系統誤差に関しては、物質の効果の不定性、磁場の系統誤差、マイクロ波システムの不定性、及び解析方法による系統誤差を考慮し、6.4 ppm を計上した。最終的に、熱化の効果을正しく取り扱った結果として、

$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.3942 \pm 0.0016 (\text{統計誤差, } 8.0 \text{ ppm}) \pm 0.0013 (\text{系統誤差, } 6.4 \text{ ppm}) \text{ GHz} \quad (2)$$

という、新しい測定値を得た。図 1 に、この結果も併せて示してある。この値は、QED の理論値と無矛盾で

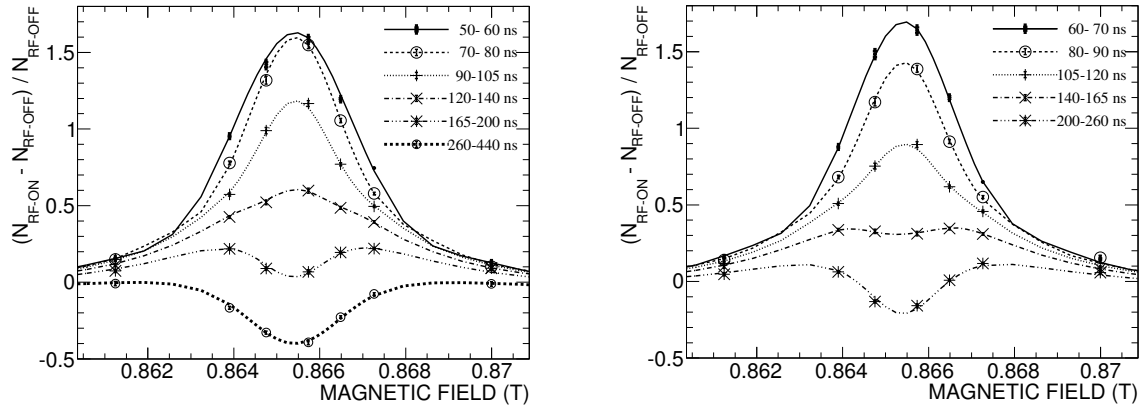


図5 ガス密度 0.881 amagat における遷移曲線。誤差棒つきプロットは得られたデータを、曲線はフィット結果を示す。見易くするため、11 個の遷移曲線を 2 つの図に分けてプロットしてある。

あるが、過去の実験値とは約 3 標準偏差ずれている。このことは、過去の実験において、熱化していない Ps の効果を過小評価していることを示しており、実験と理論の乖離の原因になっていたことを示唆している。

参考文献

- [1] A. P. Mills, Jr., G. H. Bearman, Phys. Rev. Lett. **34**, 246 (1975); A. P. Mills, Jr., Phys. Rev. A **27**, 262 (1983).
- [2] M. W. Ritter, P. O. Egan, V. W. Hughes, K. A. Woodle, Phys. Rev. A **30**, 1331 (1984).
- [3] B. A. Kniehl, A. A. Penin, Phys. Rev. Lett. **85**, 5094 (2000).
- [4] K. Melnikov, A. Yelkhovsky, Phys. Rev. Lett. **86**, 1498 (2001).
- [5] R. J. Hill, Phys. Rev. Lett. **86**, 3280 (2001).
- [6] Y. Kataoka, S. Asai, T. Kobayashi, Phys. Lett. B **671**, 219 (2009).