

# 論文審査の結果の要旨

氏名 石田 明

本論文は、ポジトロニウム (Ps) の基底状態における超微細構造 ( $\Delta$ HFS) を、新たな方法、すなわち Ps が生成してから崩壊するまでの時間情報を取得し、それによって熱化した Ps の崩壊事象のみを選択する方法で精密測定した結果についての報告である。第 1 章では研究の背景と目的、第 2 章では実験の原理、第 3 章では実験装置、第 4 章では実験の解析が述べられている。第 5 章で得られた結果の妥当性と種々の系統誤差の検証および将来展望が述べられ、第 6 章に結論が示されている。

ポジトロニウムは、レプトンのみで構成されたクーロン束縛系であり、量子電磁力学 (QED) を検証する上で重要な系である。その基底状態は、スピンによって二つに分裂しており、これを超微細構造と呼ぶ。エネルギーが上の準位 (全スピンの 1、寿命 142ns で三光子崩壊) をオルソ・ポジトロニウム (o-Ps)、下の準位 (全スピンの 0、寿命 125ps で二光子崩壊) をパラ・ポジトロニウムと呼ぶ。

Ps の超微細構造の遷移周波数は約 203 GHz であり、これをミリ波を用いて直接分光することは困難である。そこで、先行研究および本研究で用いている方法は以下の通りである。すなわち、Ps に約 0.9 T の強磁場をかけ、周波数約 2.9 GHz、出力 500 W CW の大強度高周波を印加し、ゼーマン遷移を起こさせる。この遷移が起きると、通常三光子崩壊する o-Ps が、2 本の 511 keV の単色ガンマ線を放出して崩壊するようになる。マイクロ波周波数を固定して磁場を変化させ、二光子崩壊率を測定することにより、超微細構造を求める。

こうして得られた超微細構造の遷移周波数の最新結果は、量子電磁力学の理論計算値よりも  $3.9\sigma$  小さい。これは標準模型を超える物理の存在を示唆するようにも見えるが、磁場の不均一性や、Ps の熱化による効果が系統誤差を生んでいる可能性が指摘されている。

特に、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、真空中の値からシフトしてしまうことが知られている。先行研究では、超微細構造を様々なガス密度で測定し、シフト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、超微細構造周波数を求めている。ところが、Ps の熱化を考慮すると、シフトが密度にのみ比例し、熱化に伴う 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ものが、ここ 20 年ほどで分かってきた。

そこで、論文提出者は、Ps の熱化による系統誤差を抑えた、新しい実験を行った。先行研究と異なる新たな手法は以下の3点である。

1) Ps が生成してから崩壊するまでの時間情報を取得し、Ps 生成直後の、十分に熱化していない時間領域のデータを使用せず、ある程度熱化した Ps の崩壊事象のみを選択した。

2) ガンマ線検出器に  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  無機結晶シンチレータを用い、高統計の実験を可能にした。

3) 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、Ps 生成領域のほぼ全域の約  $100 \text{ cm}^3$  (従来の実験の約 10 倍) において平均 1.5 ppm 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。

ポジトロニウムは  $^{22}\text{Na}$  陽電子源から放出される陽電子が、ガス分子から電子を得ることによって、高周波共振器内で生成される。先行研究では窒素ガスが用いられていたが、論文提出者は、イソブタンを用いれば、低速陽電子による長寿命二光子対消滅事象を排除するとともに、Ps 生成率を高め、熱化も早めることができることに着目した。

高周波によってゼーマン遷移が誘導されると、二光子崩壊率が上昇する。これを  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  で検出し、ガンマ線のエネルギー選別を行った上で、高周波が on の場合と off の場合との崩壊率の差を高周波 off の崩壊率で規格化した値を求めた。この値を、静磁場の関数としてプロットすることにより、遷移曲線が得られる。

論文申請者はこのような遷移曲線を、11 のガス密度において測定した。そして Ps 熱化関数を取り入れた理論曲線を、全データにあてはめることにより、 $\Delta\text{HFS}$  を求め、更に、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て、

$\Delta\text{HFS} = 203.3942 \pm 0.0016$  (統計誤差, 8.0 ppm)  $\pm 0.0013$  (系統誤差, 6.4 ppm) GHz という、新しい測定値を得た。この値は、QED の理論値と無矛盾であるが、過去の実験値とは約  $3\sigma$  ずれている。このことは、過去の実験における、熱化していない Ps の効果の過小評価が、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。

本論文は、ポジトロニウムの超微細構造周波数を新たな手法によって測定し、先行研究の実験値と理論値に  $3.9\sigma$  の乖離があった原因が、熱化していない Ps の効果の過小評価にあったことを示唆する重要な結果を得たものとして高く評価できる。実験は論文申請者を含む 8 名の共同で行われ、その一部は Physics Letters B 734 (2014) 338-344 に公表されているが、実験装置の主要部分の開発・製作とデータ解析は論文提出者が主体となって行っており、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士 (理学) の学位を授与できると認める。