

論文の内容の要旨

論文題目

Study of Bound State QED : Precision Measurement
of the Orthopositronium Decay Rate

束縛系量子電磁力学の研究：
オルソポジトロニウム崩壊率の精密測定

氏名

陣内 修

水素様システムの研究は現代物理学において、特に量子電磁力学 (以後 QED) の発展に多大なる寄与をしてきており、QED の計算は非常に高次の項まで検証されている。しかしながら束縛系の QED に関しては、自由粒子に対する QED のような摂動的取り扱いが出来ず、高次項の計算は自由粒子の場合のように機械的なものに帰する方法が確立されていない。ところが近年、理論側で非相対論的 QED (以後 NRQED) という実効的な理論の枠組みが発展し、高次の項の計算が精力的に進められるようになった。

ポジトロニウム (以後 Ps) は電子と陽電子が束縛し合っている最も軽い原子であり、電磁相互作用以外の効果を受けない為、そのスペクトラムや崩壊率は非常に高い精度で計算が行える。そのため Ps の精密測定はこの実効的な理論の最適な検証の場になりうる。

基底状態の Ps は総スピンの大きさにより、一重項でスピン 0 のパラ・ポジトロニウム (以後 p-Ps) と 3 重項でスピン 1 のオルソ・ポジトロニウム (以後 o-Ps) の 2 種類に分けられる。p-Ps は 125psec の短い寿命で崩

壊し、その崩壊率は o -Ps との混合を用いて間接的に測定されている。この値は 1999 年に得られた NRQED による α 2 次の計算と一致していることが確認されている。

一方、 o -Ps の寿命は約 142nsec と比較的長く、直接測定で QED の検証が行える数少ない例の一つである。崩壊率の計算は α 1 次の項までは 1980 年代初頭には得られていたが 2 次の項に関しては部分的な計算しか得られておらず、実験側からの 2 次の項の検証が待たれていた。

このような背景からミシガン大学を中心に過去 25 年に渡って行われてきた o -Ps の崩壊率測定は 200ppm 程度の測定誤差で得られるようになったが、一貫して QED 1 次の計算よりも 1000ppm 近く大きく、その差を埋め合わせるには不自然に 2 次の項を大きくする必要があった。この理論と測定の大きなずれは「 o -Ps の寿命問題」と呼ばれ、その不自然さを回避する別の解として、 o -Ps の未知粒子への崩壊モード探索が様々なグループによって行われたが、どれも否定的な結果で終わった。

ミシガン大学の測定は、陽電子線源をガス容器中に置き、ガス分子をターゲットにして Ps を生成させるガス実験と、真空容器中の酸化物ターゲットに陽電子ビームを打ち込み Ps を生成させる真空実験の主に 2 種類の方法で測定を行ってきた。 o -Ps の崩壊率測定には、 o -Ps を構成する陽電子がターゲット分子中の電子と対消滅をする pick-off と呼ばれるバックグラウンド事象が必ず存在する。真空中での崩壊率を求めるにはこのバックグラウンド事象を取り除く必要がある。

どちらの場合も、ガスの密度や真空容器の形状などを変えて何点かで o -Ps の崩壊率を測定し、その値を密度ゼロ（ガス実験の場合）または真空容器の体積無限大（真空実験の場合）に外挿することにより、真空中での o -Ps の崩壊率を求めている。

しかしながら、これらの方法には o -Ps の熱化による系統的問題があることが指摘された。 o -Ps の熱化とは生成されたばかりの o -Ps がターゲット分子との間で弾性散乱を繰り返すうちに、運動エネルギーを失いやがて室温で平衡状態になることを言う。この時 pick-off 率は平衡になるまでの間、徐々に減少していく。ミシガン大学の測定ではこの熱化が速い時間帯（150nsec）で既に終了していることを仮定し、それ以降のタイムスペクトラムを使って崩壊率の fit を行っていた。しかしながら最近の研究でガス中での o -Ps の熱化には 600nsec 程度の比較的長い時間がかかることが分かり、外挿による方法では pick-off の効果を完全に除くことが出来ず、系統的に高い崩壊率を得ていた可能性がある。

1995 年に東京グループは外挿によらず、この熱化の効果を測定に直接取り込んで真空中での崩壊率を求める方法を考案し新しい結果を得た。この方法は、pick-off が 2 対の単色 γ 線に、 o -Ps が 3 体の連続 γ 線に崩壊

することを利用し、非常にエネルギー分解能の高いゲルマニウム検出器（以後 Ge）で崩壊 γ 線の時間とエネルギー情報を同時に測ることにより、pick-off と o-Ps 崩壊を完全に分離し熱化の推移を正確に押さえる。これをタイムスペクトラムの fitting に取り込むことにより、熱化の効果を受けずに真空中での崩壊率を直接求めることが出来るというものであった。

この方法で得られた値は、QED1 次の計算と一致しミシガン大学の結果を否定するものであったが、測定誤差が 400ppm と比較的大きく本来の目的であった QED2 次の検証には到らなかった。また、この方法では原理的に fitting 範囲の start 時間に因らず真空中での崩壊率が得られるという特色があるが、実際には 220nsec 以降でしか適用出来ず、それより前の早い時間帯では崩壊率が高くなり不明な部分が残った。また o-Ps 生成物質として使用したシリカパウダーは系統的なテストの為に 2 種類使ったが、この 2 種類のパウダーにおける o-Ps の熱化つまり pick-off 率の推移はほぼ同一の様相を呈したため、熱化の大きさや進み方に依らずに同じ結果が得られるという正当性を得ることが出来なかった。

これらの事情をふまえて、新しく始められた測定は以下の項目を目的にして進められた。

1. 220nsec 以前の早い成分で不明だったものの解明。
2. 熱化の補正がパウダーの種類に依らないことを示すために、全く pick-off 率の異なる種類のパウダーを使って同じ結果が得られるかどうかを調べる。
3. 統計誤差の軽減。

項目 1 の為にまず、タイミング関係のエレクトロニクスのセットアップ・デザインを一新した。特に Time to Digital Converter (TDC) に関係する積分線形性、微分線形性起源の系統誤差をクリアなものにするために、外部から 2GHz のクロックを受け取るカウンタータイプの高性能 TDC を開発し、絶対時間に対する信頼性を飛躍的にアップさせた。また Ge 検出器の時間特性を大幅に改良するために、今まで Constant Fraction Discriminator (CFD) というハードウェアで行っていたシグナルの立ち上がり補正をやめ、3 段階の閾値を用いてシグナルの立ち上がり情報をデータとして取り込み、オフライン解析の段階で正確にタイミング情報に焼き直す、全く新しい手法を導入した。この方法により、Ge 検出器に特有の Slow Rise Time イベント (SRT) を効率よく排除できるようになり、熱化過程の測定が非常に正確に行えるようになった。これによって得られた熱化のカーブを用いて pick-off の補正を行ったところ、100nsec 以前にまで fitting の start 時間に依らず同じ値が得られるようになり、95 年の測定に於ける不明な成分の理由を解明することが出来た。

項目2に関しては粒子径、密度の全く異なる2種類のパウダーを用意し2回の長期測定で使用したところ、約1.5倍の違いを示して2種類の pick-off 率のカーブが得られた。この2種類の異なるパウダーにより、pick-off の補正は約1.5倍違うことになるが、この2種類のパウダーで得られた値は、非常に高い精度で一致しており、この方法の正当性を系統的に示すことが出来た。

項目3に関しては、項目1と深く関わっている。崩壊のタイムスペクトラムのなるべく速い時間を使うことにより、イベント数が指数的に増大し統計精度が上げることが出来るようになった。また、これにより pick-off エネルギースペクトルを利用した系統誤差の評価において、統計精度の高いスペクトルを使うことが出来、系統誤差自体を抑えることが出来るようになった。

最終的に測定値は 230ppm の精度で得られ、最近理論側で得られた α -Ps の α 2 次の計算と非常に高い一致を見せ、1次までの補正值よりも2次までの補正值の方を支持する結果を示した。図1に今回得られた測定値と理論値、またこれまでに測定されてきた実験値を載せる。

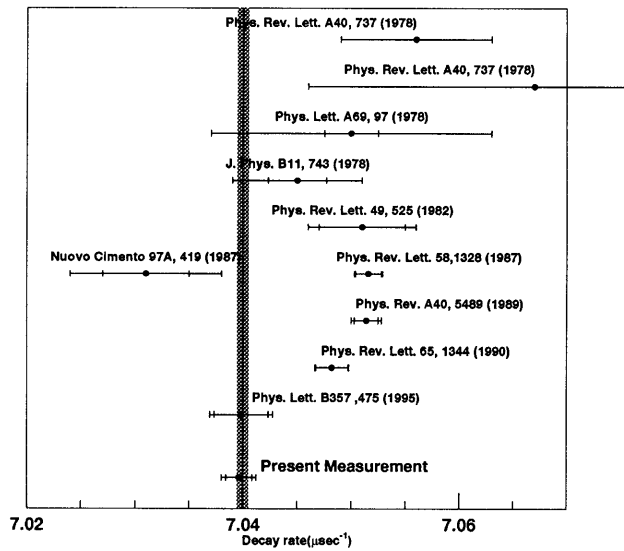


図1: 縦線は α 2次までを含めた理論値を表し、帯の部分には100ppmの誤差を表す。実験値の誤差中、内側の線は統計誤差を、外側の線は更に系統誤差を含んだものを表す。