

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19540271

研究課題名（和文） ポジトロニウムを用いたレプトン CP 対称性の破れの探索

研究課題名（英文） Search for lepton CP asymmetry with positronium

研究代表者

小林 富雄（KOBAYASHI TOMIO）

東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授

研究者番号：50126059

研究成果の概要：オルソポジトロニウム崩壊時の、スピンとガンマ線の角度相関を調べ、オルソポジトロニウム崩壊における CP 対称性の破れを探索した。系統誤差を減らすための検出装置を独自に設計、製作し、その装置でオルソポジトロニウム崩壊を詳細に測定する事により、CP 対称性の破れは発見できなかったが、CP 非対称度に対して  $5 \times 10^{-3}$  の上限値をつける事ができた。これは、既存の制限の約 3 倍厳しい制限である。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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、CP 対称性、ポジトロニウム

## 1. 研究開始当初の背景

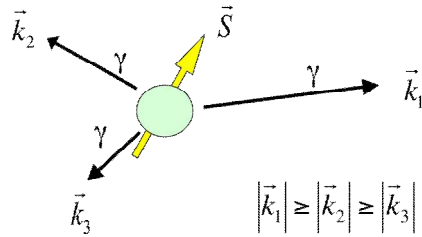
宇宙の進化において、物質・反物質の非対称性は非常に大きな謎であり、超高エネルギーの素粒子現象を探る上でも極めて重要である。物質・反物質非対称性の鍵は、「CP 対称性の破れ」であると考えられ、特にクォークセクターにおいて詳細に測定が行われてきた。この結果、小林-益川理論が検証されたが、同時にクォークセクターでの CP 対称性の破れは、物質・反物質の非対称性を説明するには小さすぎる事も明らかとなった。クォークセクターでの CP 対称性の破れの測定に対し、レプトンセクターでの CP 対称性の破れの測定は、ほとんど行われていない。従って、クォークセクターと同程度の感度

( $10^{-3}$ )での CP 対称性の破れの探索が必要とされている。

## 2. 研究の目的

レプトンセクターでの CP 対称性の破れを、オルソポジトロニウムの崩壊を通して探索する。レプトンセクターでの検証は、今まで 2%の感度までしか行われていないが、これを  $10^{-3}$ の感度で行う。これにより、レプトンセクターの CP 対称性の破れの発見を目指す。もし破れが発見できない場合には、CP 対称性の保存に関して、既存の制限を一桁程度上回る制限をつける。

### 3. 研究の方法



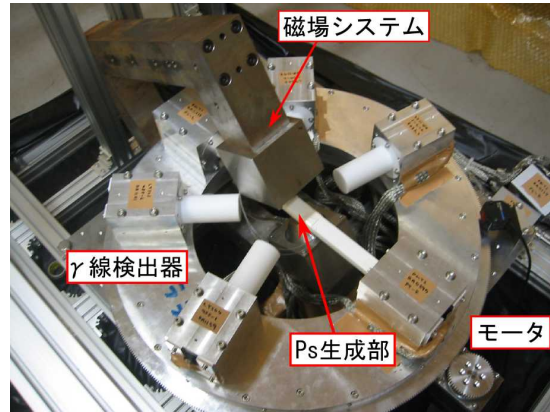
オルソポジトロニウムのスピンを  $S$ 、崩壊時に放出される3本のガンマ線の放出方向を、エネルギーが高い順に  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  とすると、 $(S \cdot k_1)(S \cdot k_1 \times k_2)$  の項は、CP を破り CPT が保存する最も単純な項となる。従って、 $S$  と  $k_1$ 、 $k_2$  の分布を測定し、上式の非対称性を測定する事から、CP を破る効果の存在を検証した。

実験装置は以下の部分から成る。

- (1) ポジトロニウム生成部： Na-22 の放射性壊変から放出される陽電子を、シリカエアロゲル(密度 0.1g/cc)中で止めてポジトロニウムを生成する。シリカエアロゲル部分は、酸素によるピックアップを防ぐために、乾燥窒素ガスでパージしてある。また、放出された陽電子は厚さ 0.2mm の薄いプラスチックシンチレータでタグし、ポジトロニウム生成のタイミングを測定する。プラスチックシンチレータからの光は、ライトガイドで二本の PMT に導き、コインシデンスを取る事によりノイズを減らす。
- (2) ガンマ線検出器： 直径 3 cm の LYSO シンチレータ ( $\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5$  シンチレータ)をポジトロニウム生成部の周囲に配置して、 $k_1$  と  $k_2$  の二本のガンマ線を測定する。感度が最も高くなるように、ペアの間のオープニングアングルは、 $150^\circ$  になるように配置してある。全部で 4 個のシンチレータを配置し、計 3 組の  $k_1$  と  $k_2$  のペアを測定できる。原子番号が大きく、密度の大きい LYSO シンチレータを使う事で、コンプトン散乱によるノイズの少ないデータ収集を行う事が出来る。
- (3) 磁場システム： ネオジウム磁石とリターンヨーク、フォーカスコーンの組み合わせにより、ポジトロニウムに 4.9 kG の磁場を印加する。ポジトロニウムの生成領域は 1cm 程度に広がっているが、この部分の磁場のばらつきが 2%以下になるように製作した。この磁石と、タイミングウインドウにより、ポジトロニウムをテンソル偏極させ、必要なスピン方向を持つオルソポ

ジトロニウムからの崩壊の弁別が可能になる。

- (4) 回転テーブル： ポジトロニウム生成部とガンマ線検出器は回転テーブルの上に置き、モーターで全体を回転させる。これにより、スピンの向き  $S$  のみを変化させて、他の環境を一切変化させないデータを取得できる。これにより、系統誤差の小さな測定を行う。



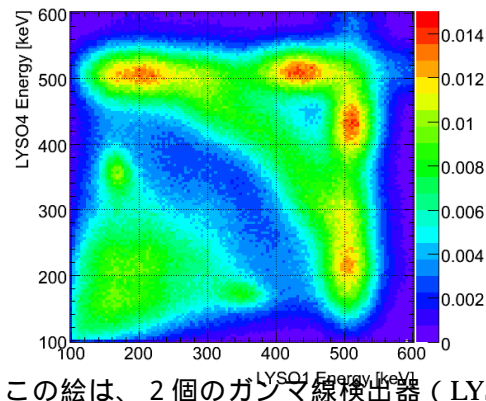
実際に製作した検出器の写真を上に示す。各検出器からのシグナルと、回転テーブルの位置読み取り、モーター制御はすべて CAMAC インターフェースで行い、リアルタイムでデータ取得、制御を行った。

### 4. 研究成果

2007年度と2008年度の前半は実験装置の製作を行い、2008年11月から測定を開始した。Na-22 の線源強度は 1 MBq であり、必要なシグナルの取得レートは、検出器ペアごとに約 2 Hz であった。データ取得は、2008年度いっぱいに行い、その後、現在も取得中である。測定は非常に安定して行われている。

2008年度中に取得したデータについては、既に解析を行った。

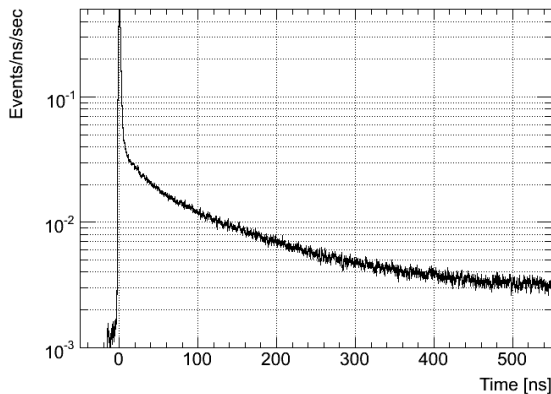
取得したデータのエネルギー分布の一例を示す。



この絵は、2 個のガンマ線検出器 (LYSO1

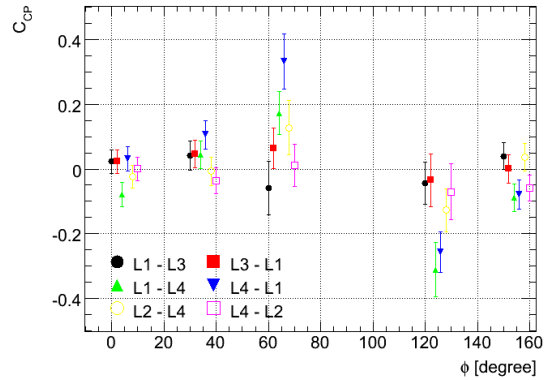
とLYSO4)のエネルギーの二次元分布である。横軸がLYSO1に落とされたエネルギー、縦軸がLYSO2に落とされたエネルギーで、青色から赤色になるにつれてイベントの頻度が上昇する。二つの総和が500keV程度になるように弧状に分布している緑色の部分が、オルソポジトロニウムの3体ガンマ崩壊に起因した部分である。欲しいイベントは、例えばLYSO1が $k_1$ (400-500keV程度)、LYSO4が $k_2$ (300-400keV程度)となったイベントであり、それぞれ該当するエネルギーウィンドウを設ける事により、イベント弁別を行った。

一方、ポジトロニウムの生成タイミングをタグしているため、ポジトロニウムの寿命スペクトルも得ている。その一例を下に示す。



時間が0の点がプラスチックシンチレータでタグされたポジトロニウム生成のタイミングであり、ポジトロニウムを作らないで対消滅したガンマ線によるピークがある。そこからなだらかに500ns程度まで続いているカーブがオルソポジトロニウム崩壊の寿命スペクトルである。この寿命スペクトル中には、必要なテンソル偏極したオルソポジトロニウム( $\tau = 142\text{ns}$ )以外に、邪魔な横向きオルソポジトロニウム成分も混入している。この邪魔な成分は、磁場によってパラポジトロニウムと混合して寿命 $\tau = 23\text{ns}$ と短くなっている。このため、生成時間50-400nsのタイミングウィンドウをかける事によって、必要なテンソル偏極成分のみを弁別する。また、時間的に相関の無いアクシデンタルイベントも、タイミングスペクトルの解析から除いてある。

以上のイベント弁別を行った後、CPを破る項に関して非対称度を求めた。この際、特筆すべきは、回転テーブルによって磁石に対して検出装置全体を回転させているため、検出器の相対位置は全く変化しないで、Sのみが変化していることである。従って、回転角度に対する自分自身のイベント数分布がそのままCP対称性の破れと直結する。各検出器ペアについて角度毎にCP対称性の破れの項をプロットした結果が次の図である。



この絵の横軸は、回転テーブルの角度であり、縦軸は、CP対称性の破れの大きさを表す。各点は、各検出器ペアが特定の角度にいる時と、そのペアが $180^\circ$ ずれた角度にいる時との差から、CP対称性の破れを求めたものである。もしCP対称性が破れていた場合、各点は0からずれた一定の値にプロットされるはずであるが、測定データは、誤差の範囲で0に一致した値を示している。このことから、CP対称性は、この測定の感度の範囲では破れてない事が確認できた。

全ての測定点から、CP対称性の破れの大きさを算出すると、

$$C_{CP} = 0.0011 \pm 0.0039(\text{stat.}) \pm 0.0011(\text{sys.})$$

という結果を得た。ここで、stat. は1の統計誤差を表し、sys. は系統誤差を表す。この結果から、信頼区間90%で、CP対称性の破れは $6 \times 10^{-3}$ 以下という制限を得る事ができた。この値は、過去の制限の3倍強い制限であり、また、当初計画していた通り、 $10^{-3}$ の桁の感度でのCP対称性の破れを検証する事が出来た。また、レプトンセクターでの直接のCP対称性の破れの感度としては最も強い感度であると考えられる。

なお、本実験の最大の特徴は、検出器のデザインを工夫して、全体を回転させる事により、実験の系統誤差を小さくできる点にある。先程のCP対称性の破れに対する結果からも分かる通り、測定の系統誤差は現在の統計誤差よりもまだ小さい。このことから、現在も測定は継続して行っており、さらなる感度向上が期待できる。

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0件)  
現在、今測定結果について執筆中である。

[学会発表](計7件)

山崎高幸、ポジトロニウムを用いた CP 対称性の破れの探索、日本物理学会、2009 年 3 月 30 日、立教大学

山崎高幸、荷電レプトンを用いた CP 破れの探索、日本物理学会、2008 年 9 月 21 日、近畿大学

山崎高幸、 $o$ -Ps を用いた CP 破れの探索-実機製作-、日本物理学会、2008 年 3 月 25 日、近畿大学

難波俊雄、 $o$ -Ps を用いた CP 破れの探索-プロトタイプ装置での実験結果-、日本物理学会、2008 年 3 月 25 日、近畿大学

難波俊雄、Tests of CP and CPT symmetry with positronium、Workshop on Cold Antimatter Plasmas and Application to Fundamental Physics、2008 年 2 月 20 日、沖縄ハーバービューホテル

西原一幸、 $o$ -Ps を用いた CP の破れの探索(1)、日本物理学会、2007 年 9 月 24 日、北海道大学

東裕也、 $o$ -Ps を用いた CP の破れの探索(2)、日本物理学会、2007 年 9 月 24 日、北海道大学

[その他]

山崎高幸、東京大学修士学位論文、オルソポジトロニウムを用いた CP 対称性の破れの探索、2009 年 3 月

西原一幸、東京大学修士学位論文、オルソポジトロニウムを用いた CP 非保存の探索実験、2008 年 3 月

学会発表の資料・修士論文はすべて  
<http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp>  
にまとめてある。

6. 研究組織

(1)研究代表者

小林 富雄 (KOBAYASHI TOMIO)  
東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授  
研究者番号: 50126059

(2)研究分担者

(3)連携研究者

浅井 祥仁 (ASAI SHOJI)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号: 60282505

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