

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 6日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654114

研究課題名（和文） ポジトロニウムをプローブとする局所磁場測定法の開発

研究課題名（英文） Development of a new local-magnetic-field measurement system utilizing positronium as the probe

研究代表者

齋藤 晴雄 (SAITO HARUO)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：60235059

研究成果の概要（和文）： ポジトロニウムは磁場中においてスピン回転する。このスピン回転にともなって、ポジトロニウムの対消滅で放出されるガンマ線の方位分布も回転するため、ポジトロニウムの回転周波数に応じて放射線の計数率が振動する。本研究は、この計数率の振動数を測定することで、逆にポジトロニウムの感じる局所磁場を求める試みであり、技術上の問題点を解決することによって、はじめて物質（ヘキサン）中で、ポジトロニウムスピン回転信号の観測に成功した。

研究成果の概要（英文）： Positronium spin rotation under a magnetic field can be observed as an oscillation of detection rate of the annihilation radiation. Then, the strength of a local magnetic field can be estimated by the oscillation frequency of the detection rate. We measured the oscillation due to positronium spin rotation in a condensed matter (hexane) for the first time overcoming technical problems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

 キーワード：磁気共鳴、陽電子、ポジトロニウム、スピン回転、磁場、消滅放射線、L a B r
 3 (C e) シンチレータ、デジタルオシロスコープ

1. 研究開始当初の背景

ポジトロニウムは、電子とその反粒子である陽電子が結合した、水素様原子である。ポジトロニウムは電子と陽電子の対消滅によってガンマ線に崩壊する。

ポジトロニウムは磁場中において歳差運動をする。これをポジトロニウムスピン回転 (P s S R) と呼ぶ。ポジトロニウムの回転にともない、対消滅 (三光子消滅) によって放出されるガンマ線の方位分布も回転する。固定したガンマ線検出器でポジトロニウムスピン回転を測定すると、ポジトロニウムの回転周波数に応じて消滅放射線の計数率が振動する様子が観測される。

この振動の周波数はポジトロニウムの感じる磁場強度に依存するため、逆にポジトロニウムスピン回転の周波数を測定して磁場強度が求められる。

原理は、1989年に Baryshevsky (J. Phys. B 22, 2835 (1989)) によって示されているが、現在まで技術的な困難により、実用化には到っていない。

2. 研究の目的

これまでポジトロニウムスピン回転を磁場測定に用いる試みはなされてこなかった。その原因は主に二つである。

一つにはポジトロニウムの物質中における

る寿命は数ナノ秒以下と極めて短く、測定装置に非常に高い時間分解能が求められる。

二つには、ポジトロニウムの消滅には二光子消滅と三光子消滅の二通りがあるが、このうちポジトロニウムスピン回転が観測されるのは三光子消滅のみである。ところが、物質中におけるポジトロニウムの消滅の大半は二光子消滅であり、これがノイズとなってポジトロニウムスピン回転の信号が埋もれるため、測定装置には三光子消滅を精度よく抽出する能力が求められる。

本研究の目的は、この二つの困難を解決し、ポジトロニウムスピン回転を利用して物質中で磁場強度を測定する事である。これによって、例えば、 μ SR (ミュオンスピン回転)で行われている物質の局所磁場測定を、 μ SRのように大型の加速施設を用いることなく、実験室で行えるようになる。

ポジトロニウムは物質中を熱拡散して被測定部位に到達すると、信号を透過力の大きな γ 線として発信するため、物質内部の局所的な磁場情報の探査に有用である。

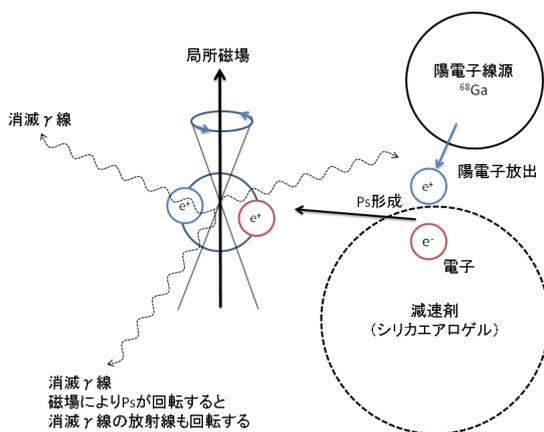


図1 ポジトロニウムスピン回転の概念図

3. 研究の方法

第一の問題である時間分解能は、検出器からの信号を全てデジタルオシロスコープによって記録し、波形を後処理で精密に解析することにより、従来のアナログモジュールに依存した計測方法よりも高い時間分解能を達成することで解決を図る。

第二の問題である二光子消滅と三光子消滅の弁別は、ガンマ線検出器としてLaBr₃(Ce)シンチレータ結晶を採用し、従来のBaF₂シンチレータ結晶よりも高いエネルギー分解能を達成することで解決を図る。

実験法は、磁場(永久磁石)間に測定試料と陽電子線源(²²Na)を設置し、線源から放出される方向に偏極した陽電子を試料に入射させる。偏極方向は磁場と垂直にす

る。ポジトロニウムの三光子消滅を、ガンマ線の計数値の異方性が最大になる方位に二本設置した検出器で測定する。二本の検出器の相対位置は、振幅が大きく、かつ位相が正反対の位置を選び、二本の検出器の計数値の差を時間毎に求めることにより、ポジトロニウムスピン回転の周波数が求められる。

4. 研究成果

①シンチレーション検出器とシールド設計・製作

LaBr₃(Ce)シンチレータ結晶を高電子増倍管に搭載し、ガンマ線検出器を作製した。また、光電子増倍管は磁気により影響を受けて出力が低下するため、専用の磁気シールドを設計・製作した。また、ガンマ線による散乱の影響を防ぐために、ガンマ線シールドを配置した。

②ガンマ線検出効率のシミュレーション

Baryshevskyの論文に基づいて、三光子消滅の放射をシミュレーションし、ガンマ線検出器の一つを固定した場合に、残りの二つの配置によって、検出効率や観測されるポジトロニウムスピン回転の振動強度がどのように変化するか予想した。これによって、検出器の線源に対する立体角の影響等を見積もり、検出器の配置を決定した。

③シンチレーション検出器のテスト

新しく用いるLaBr₃(Ce)シンチレータは、従来のBaF₂シンチレータ結晶とは異なる出力波形を示すため、期待されるエネルギー分解能と時間分解能を実現するために、適切な引加電圧等の使用条件を決定した。

④同検出器を用いた測定システムの構築

LaBr₃(Ce)シンチレータを搭載したガンマ線検出器をデジタルオシロスコープにつなぎ、ポジトロニウムスピン回転を測定するためのシステムを構築した。

ポジトロニウムスピン回転は三光子消滅でのみ観測されるため、二光子消滅のエネルギースペクトルにおいて、全吸収ピークとコンプトンエッジの間のエネルギー領域に含まれる出力波高だけを抽出するように、波高弁別器を調整した。

また、ポジトロニウムスピン回転の開始時刻を決定するために、陽電子線源(²²Na)から陽電子の発生と同時に放出される即発核ガンマ線を測定するために、BaF₂シンチレータ結晶を搭載したガンマ線検出器を用意した。

この消滅放射線用の $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器と、即発核ガンマ線用の BaF_2 検出器の同時計数を判定するコインシデンス回路を調整し、デジタルオシロスコープに送るトリガー信号を構築した。

⑤ 波形解析ソフトウェア開発

$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器と、 BaF_2 検出器のそれぞれの波形から、エネルギー情報及び時間情報を抽出するソフトウェアを開発した。

また、これらの波形から、バックグラウンドが平坦でないもの、立ち上がり時間が不適切なもの、複数のピークがあるもの等、不適切なイベントを判定除去するアルゴリズムを組み込んだ。

これにより、従来のアナログ回路よりも高い計数率で測定しても、不適切なイベントを除去できるので、エネルギー分解能や時間分解能が損なわれないシステムを構築した。

⑥ 装置のテスト

開発した装置のテストとして窒素雰囲気下で外部から 1.0 kG の磁場を印加し、測定データを解析したところ、寿命値 132 ns、振動周期 26 ns でポジトロニウムスピン回転信号の観測に成功した。

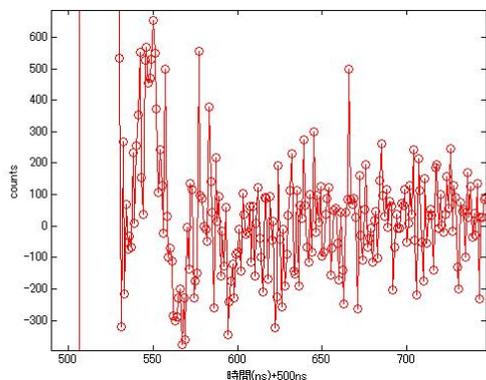


図2 装置テストの結果 (26 ns の振動を観測)

⑦ ポジトロニウムスピン回転の測定

次に、物質中におけるポジトロニウムスピン回転信号の観測を目指し、ヘキサシアン中で外部から 2.0 kG の磁場を印加した。なお、ヘキサシアン中のポジトロニウムの寿命値は約 4 ns であることが知られており、これは凝集系としては比較的長い寿命値であるため最初のポジトロニウムスピン回転信号の観測に適している。

データを解析したところ、統計的に有意な計数率の増減が確認され、振動のピークとバレーの間隔は約 5 ns であった。これは期待

されるポジトロニウムスピン回転信号の一部分と考えられる。

このことから、凝集系でもポジトロニウムスピン回転信号が打ち消されることがなく、観測可能であることが初めて明らかとなった。

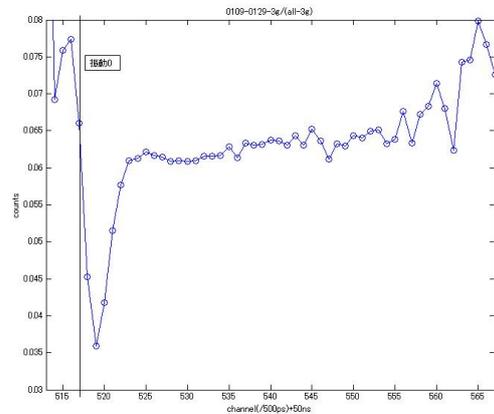


図3 ヘキサシアン中のポジトロニウムスピン回転信号の最初のデータ

ここで、従来の μSR とポジトロニウムスピン回転 (PsSR) の特徴を比較する。

	μSR	PsSR
減衰時定数 (物質中)	2.20 μs	10 ns 以下
プローブ	ミュオニウム スピン 1/2 質量 電子の約200倍	ポジトロニウム スピン 1 質量 電子の2倍
線源	加速器が必須	放射性同位元素 もしくは加速器

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 3 件)

(1) Haruo Saito and Kengo Shibuya: " Time correlation of two gamma rays resulting from positronium annihilation", Phys. Rev. A, vol. 85, pp. 0422111 1-7, 2012.
DOI: 10.1103/PhysRevA.85.042111

(2) Shunji Kishimoto, Fumihiko Nishikido, Rie Haruki, Kengo Shibuya, Masanori Koshimizu: " Fast scintillation detectors for high-energy X-ray region", Hyperfine Interactions, vol. 204, pp. 101-110, 2012.
DOI: 10.1007/s10751-011-0543-x

(3) Masanori Koshimizu, Kazuya Onodera, Fumihiko Nishikido, Rie Haruki, Kengo Shibuya, Shunji Kishimoto, and Keisuke

Asai: "X-ray detection capability of a BaCl₂ single crystal scintillator", J. Appl. Phys. vol. 111, pp. 024906 1-5, 2012.
DOI: 10.1063/1.3677986

〔学会発表〕 (計 5 件)

1. 齋藤晴雄、澁谷憲悟：「陽電子消滅ガンマ線の波動関数と時間相関」、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月、広島大学 (東広島市)。
2. 澁谷憲悟、川村純弘、齋藤晴雄：「AMOC による Ps 熱化過程のエネルギー測定」、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月、横浜国立大学 (横浜市)。
3. 澁谷憲悟、齋藤晴雄：「MPPC を用いたシンチレーション検出器の時間分解能評価」、第 49 回アイソトープ・放射線研究発表会、2012 年 7 月、東京大学 (文京区)
4. 齋藤晴雄、澁谷憲悟：「ポジトロニウム消滅ガンマ線の波動関数と時間相関」、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月、関西学院大学 (西宮市)。
5. 川村純弘、澁谷憲悟、齋藤晴雄：「デジタイザーを用いた陽電子消滅時間運動量相関測定装置の開発」、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月、富山大学 (富山市)

〔その他〕

ホームページ等

<http://positron.c.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 晴雄 (SAITO HARUO)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：6 0 2 3 5 0 5 9

(2) 研究分担者

澁谷 憲悟 (SHIBUYA KENGO)

東京大学・大学院総合文化研究科・助梗

研究者番号：2 0 4 1 5 4 2 5