

平成 22 年 6 月 7 日現在

研究種目：若手研究(スタートアップ)

研究期間：2008～2009

課題番号：20840010

研究課題名(和文) サブテラヘルツ波を用いたポジトロニウム超微細構造定数の精密測定

研究課題名(英文) Precise measurement of the hyperfine splitting constant of positronium using sub-THz radiation

研究代表者

末原 大幹 (SUEHARA TAIKAN)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任研究員

研究者番号：20508387

研究成果の概要(和文)：

ポジトロニウムの超微細構造には、測定結果と理論の予言の間に 3.9σ の原因不明なずれがあり、このずれを検証するため強力なサブテラヘルツ光源を用いてオルソポジトロニウムとパラポジトロニウムのエネルギー差を直接測定する。この実験に必要なジャイロトロン光源、ファブリー・ペロー共振器、ガウシアンモードコンバータおよび検出器シミュレーションの研究開発を行い、本測定を可能とする技術開発が完了した。

研究成果の概要(英文)：

Hyperfine splitting of positronium, which is the energy difference between ortho-positronium (o-Ps) and para-positronium (p-Ps), has 3.9σ deviation between theoretical expectations and experimental results. Observing direct stimulated transition from o-Ps to p-Ps under sub-THz radiation is effective to investigate the discrepancy. A sub-THz high power light source gyrotron, a high-Finesse Fabry-Perot cavity, a quasi-optical Gaussian converter and a detector simulation has been developed and optimized, which has enabled the transition observation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,310,000	393,000	1,703,000
2009年度	1,180,000	354,000	1,534,000
総計	2,490,000	747,000	3,237,000

研究分野：素粒子実験

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子実験、放射線、X線、粒子線、ファブリー・ペロー共振器、ジャイロトロン、ミリ波、ポジトロニウム、超微細構造

1. 研究開始当初の背景

ポジトロニウムは、電子・陽電子が束縛された準安定な系であり、束縛系の量子電磁力学(QED)の精密検証を行う上で重要な研究対象である。ポジトロニウムの1重項状態(パラポジトロニウム:p-Ps)と3重項状態(オルソポジトロニウム:o-Ps)のエネルギー準位差(=HFS)は、QEDの精密検証や新粒子による

寄与を探る上で特に重要な量であり、これまで多くの測定がなされてきた。現在までの測定でもっとも精度が高いのは Ritter et al.,(1984)の 203.38910 ± 0.00074 GHz(精度 3.6ppm)であり、1984年当時は理論予測の精度が低かったため、実験と理論の不整合は発見されなかった。その後、最近の理論研究の進展により束縛系 QED の高次補正が高い精度で計算できるようになり、実測値のずれが

発見された。現在実測と理論計算のずれは 3.9σ (15ppm) に達し、このずれの解明が急務となっている。このずれの原因は大きく分けて二つ考えられる。一つは、未知の素粒子を交換するダイアグラムが存在し、15ppm のずれを作っている可能性であり、もう一つは過去に行われた一連の実験で見落とされていた新しい系統誤差が潜む可能性である。前者は精密測定を通して標準理論を超えた新しい素粒子現象を探る重要な方法であり、そのためにも隠れた系統誤差を解明することは重要である。

2. 研究の目的

過去の実験においては、測定方法に起因する誤差が測定精度を制限している可能性がある。HFS の測定は準位エネルギー差に相当する周波数の光子を用いた誘導遷移により行うが、203GHz 電磁波の供給・制御が難しいため、過去の測定では遷移を直接検証せず、0.8 テスラ程度の磁場をかけてゼーマン効果で生じた準位差(2.2GHz 程度)を測定し、これを HFS に焼き直す間接的な方法をとっている。この方法では磁場の非一様性が HFS の不定性を生じ、測定精度を制限する。

この誤差を除去するためには、磁場を用いず 203GHz の電磁波を用いて o-Ps から p-Ps への遷移を直接観測することが望ましい。そのためには高強度・精密なサブテラヘルツ光源およびサブテラヘルツ蓄積光学系、精密測定のための高精度な測定システム等が必要となる。これらの要素開発を行い直接観測への道筋をつけるのが本研究の目的である。この直接観測は未だ行われたことがなく、観測に成功すれば世界初の測定となる。

3. 研究の方法

測定器のセットアップ概念図を図 1 に示した。203 GHz 電磁波はジャイロトロンで生成され、ガウシアンコンバータを通して自由空間伝送モードに変換され共振器へ送られる。共振器では 203GHz 電磁波を蓄積し高いパワー密度を実現する。共振器には ^{22}Na 線源が取り付けられ、陽電子を供給する。発生した陽電子はスタートタイミング用のトリガーシンチレータを通過し共振器中央で封入してある窒素分子との散乱により減速しポジトロニウムを生成する。生成したポジトロニウムのうち p-Ps は寿命 125ps で 2γ に崩壊し o-Ps (寿命 142ns) が残る。この intrinsic な p-Ps はバックグラウンドとしタイミング情報により veto する。

203 GHz 電磁波が o-Ps に作用すると、誘導放出により o-Ps から p-Ps への遷移が起こり、p-Ps は直ちに 2γ に崩壊するため、遅い 2γ

事象が増加する。ポジトロニウムの崩壊で生じた γ 線は 6 本の LaBr3 シンチレータで検出する。 2γ 事象は back-to-back に 511 keV の γ 線を放出し、連続的なエネルギーの 3γ 事象による γ 線とはエネルギー情報を用いて分けることができる。この遅い 2γ 事象の頻度を、供給する電磁波の周波数を変えながら測定することで、o-Ps から p-Ps への直接遷移を観測することができる。

本測定のための技術開発は主に (1) ジャイロトロン、(2) ガウシアンコンバータおよび伝送系、(3) ファブリー・ペロー共振器、(4) ガンマ線検出器および測定系がある。研究成果の項でそれぞれについて詳述する。

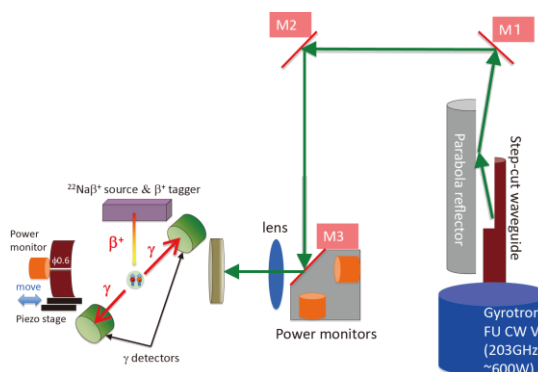


図 1: セットアップ概念図

4. 研究成果

(1) ジャイロトロン

ジャイロトロンは電子の強磁場下におけるサイクロトロン運動で共振器を励振するデバイスで、サブテラヘルツ~テラヘルツ領域で高出力を得られ、コヒーレント性も高いデバイスとして現在最も有力である。福井大学遠赤外領域開発研究センターでは、サブテラヘルツ~テラヘルツ帯のジャイロトロンを継続的に開発しており、本研究ではその技術を生かして 203 GHz, 500W のジャイロトロンを共同開発した。最大 609W のパワーが 203 GHz で得られた。また数百 MHz の変調が可能であり、共振ピークの形状をある程度調べることができる。

(2) ガウシアンコンバータおよび伝送系

本研究で用いるジャイロトロンは円形導波管出力で TE03 モードである。ファブリー・ペロー共振器に入力するためには、自由空間モードであるガウシアンビームに変換する必要がある。また自由空間伝播にすることで、伝送損失を抑えることができる。本研究ではステップカット導波管と放物面鏡を用いてモードコンバータを製作した。ジャイロトロンの出力波形が完全な TE03 モードでないこともあり、変換効率は 45%程度となっている

が、共振器に入射可能なガウシアン形状のビームが得られている。図2に変換前・変換後のビーム形状を示す。このプロファイルはPVC薄板にサブテラヘルツ光を入射し温度上昇を赤外線カメラで検出したものである。

変換されたサブテラヘルツ光は、凹面ミラーM1, M2で収束されつつ伝送され、最終収束レンズを通して共振器に入射する。収束レンズとしては減衰の少ないテフロン性のものを試作し、性能を確認した。

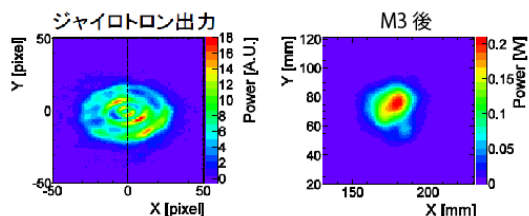


図2: コンバータによるパワー分布の変化

(3) ファブリー・ペロー共振器

ファブリー・ペロー共振器は2面のミラーを対向した共振器で、入射パワーは2面の間を反射することで増幅される。高い蓄積パワーを達成するためには、高い反射率および入射時のロスが少なく、モードを乱さずにカップルできることが重要になる。このような条件を満たす共振ミラーとして、入射側には石英基板上に金属メッシュを蒸着したもの、対向側には銅の凹面ミラーを用いた共振器を開発した。共振器の長さはピエゾステージを用いて100nm以下の分解能で調整している。金属メッシュは、高い反射率を維持しながら透過時のロスを減らすことに優位性がある。共振試験においては、100倍程度の共振倍率を達成できることが確認された。また入射効率については50%弱となっており、最小限必要な性能は満たしている。

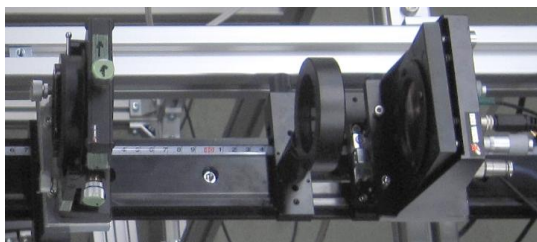


図3: 共振試験の様子。左から収束レンズ、メッシュミラー、凹面ミラー。凹面ミラー下部にはピエゾステージがある。

(4) ガンマ線検出器および測定系

「研究の方法」の項ですでに述べたように、ポジトロニウムは ^{22}Na 線源からの陽電子を用いて共振器中で生成し崩壊させ、共振器周囲に設置した LaBr_3 シンチレータで崩壊 γ 線を

検出する。HFS遷移の信号に対して主なバックグラウンドとなるのは $o\text{-Ps}$ の 3γ 崩壊と、気体中で $o\text{-Ps}$ が分子と衝突して 2γ 消滅するpick-off消滅の二つである。これらと比べて統計的に有意な信号が得られるか、また測定系の配置の最適化のため、モンテカルロシミュレーションを行った。前項の結果から期待される共振器への100W入射、100倍増幅を仮定すると、 LaBr_3 シンチレータの前に適切なコリメータを設置することで、10日程度の測定時間で有意な信号強度が期待できることがわかった。

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7件)

- ① T. Suehara, A. Miyazaki, A. Ishida et al., (13人中1番目)
Probing the Energy Structure of Positronium with a 203 GHz Fabry-Perot Cavity,
Journal of Physics: Conference Series,
査読有, 199 (2010) 012002
- ② 難波俊雄, 末原大幹
ポジトロニウムの超微細構造の精密測定
高エネルギーニュース, 査読無,
27 (2008) 100-108
- ③ S. Sabchevski, T. Idehara, T. Suehara et al., (11人中3番目)
Resonant Cavity for Study of the Energy Level of Positronium,
FIR Center Report, 査読無, FIR FU-93 (2008)

[学会発表] (計14件)

- ① T. Suehara, Detection of the direct hyperfine transition of positronium atoms using sub-THz high-power radiation,
The 3rd International Workshop on Far-Infrared Technologies 2010 (IW-FIRT 2010),
16 March 2010, Fukui University
- ② T. Suehara, Probing the Energy Structure of Positronium with a 203 GHz Fabry-Perot Cavity,
XV International Workshop on Low Energy Positron and Positronium Physics (POSMOL 2009),
30 July 2009, York University
- ③ T. Suehara, The first direct

measurement of the hyperfine splitting
in positronium
XXVI International Conference on
Photonic, Electronic, and Atomic
Collisions (ICPEAC 2009),
27 July 2009, Western Michigan
University

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

[http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/
Tabletop_experiments/Direct_HFS_measur
ent.html](http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/Tabletop_experiments/Direct_HFS_measurement.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末原 大幹 (SUEHARA TAIKAN)
東京大学・素粒子物理国際研究センター・
特任研究員
研究者番号：20508387

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし