ポジトロニウム超微細構造の 直接測定 I

山崎高幸, 宮崎彬, 末原大幹^A, 難波俊雄^A, 浅井祥仁, 小林富雄^A, 斎藤晴雄^B, 立松芳典^C, 小川勇^C, 出原俊孝^C, S. Sabchevski^D 東大理, 東大素セ^A, 東大総文^B, 福井大遠赤セ^C, ブルガリア科学ア カデミー^D

日本物理学会2012年秋季大会@京都産業大学 2012/9/11



- 電子 e⁻ と陽電子 e⁺ が電磁相互作用により束縛された状態
 - 最も軽い水素様原子
 - 粒子と反粒子からなる系であり、対消滅に伴なう未知の素 粒子物理に対する感度が高い
 - レプトンのみからなる綺麗な系であるため、束縛系QEDの 精密検証に適している

ポジトロニウム(*o*-Ps, *p*-Ps)



• パラポジトロニウム(*p*-Ps)



ポジトロニウム超微細構造(Ps-HFS)

 電子と陽電子のスピン・スピン相互作用によって生じる、基底状態のp-Psとo-Psのエネルギー準位差 203GHz = 0.84meV



ポジトロニウム超微細構造の問題

Ps-HFSの実験値と理論値の間に3.9σの有意なずれが報告 されている



我々は,異なる2つのアプローチでこの問題の検証を行なっている

- 1. ミリ波光学の開発による初の直接測定(このトーク& 宮崎11aSG02)
- 2. 系統誤差を抑えた精密な間接測定(石田11aSG03)



- ・
 直接203GHzの光を照射し、o-Ps→p-Psに誘導遷移させる
- p-Psは即座に(τ = 125ps)2γ崩壊するので、遷移事象は長寿命な2γ崩壊(単色511keV・back-to-backに放出される)という特徴を持つ
- M1遷移なので遷移確率が低く(o-Psの崩壊率より14桁小さい)、10kW 程度の高強度ミリ波が必要である。さらに、201~206GHz程度にわ たって周波数を変えて遷移測定を行う必要がある
 - → 新しいミリ波技術の開発による世界初のPs-HFS直接測定 [®]



ジャイロトロン



- 磁場中(~7.4T)でサイクロトロン運 動する電子ビームと、磁場内部に 設置されたキャビティーとの相互作 用により、ミリ波が発振(サイクロト ロンメーザー共鳴)
- 単色(~1MHz)
- ピークパワー300W、duty比が大き い(~10Hz, 30%)
- キャビティーでの発振は円形導波 管モード。ジャイロトロン出力を Fabry-Pérot共振器とカップルさせる にはガウスビームに変換するため のモードコンバータ(変換効率30%) が必要 8

Fabry-Pérot共振器



- ミラー間の長さがλ/2=750μmの整数倍になると共振
- 金メッシュ:高い反射率(99.4%)とreasonableな透過率(0.4%)
- 入射パワー(100W)の100倍程度(10kW)のパワーが蓄積される

Ps-HFS間の直接遷移を観測

 長い寿命を持ちかつ2γ崩壊する事象を選びだし、ミリ波の照射の有無 でイベント数を比較する。o-Ps→3γ(511keVの左にtail)が減ってo-Ps(→p-Ps)→2γ(511keV peak)が増える。Beam OFFのときにも511keV のピークがあるが、これはo-Ps+e⁻→2γ+e⁻(pick off崩壊)。



これまでの結果のまとめ

T. Yamazaki *et al.*, "Direct Observation of the Hyperfine Transition of Ground-State Positronium", Phys. Rev. Lett. 108, 253401 (2012)



- 202.9 GHzの周波数1点で世界で初めてPs-HFS間の直接遷移を観測
- あと数点同様の測定を行えば遷移曲線が得られ、ピーク位置から Ps-HFSの値が、遷移の幅からp-Psの寿命が直接測定できる

光学系の問題点

- しかし、これまでの測定で用いていた光学系には2点問題があり、
 そのままではPs-HFSの直接測定はできない
- 1. これまで使用していたジャイロトロン(FU CW V)が出力可能 な周波数は203.4 GHz近傍では 202.9 GHzの1点のみ

→大問題。遷移曲線が測定できない!

2. 15kWを超えるパワーを蓄積すると、Fabry-Perot共振器を構成している金メッシュミラーが溶ける

→202.9GHzという遷移曲線のピーク付近でも遷移測定の S/Nは5%程度しかない。S/N比を上げ、遷移曲線のピークか らずれた点での測定時間を短縮させたい

これらの問題を解決すべく光学系の改良を行った。1.については
 このトークで、2.については次の宮崎のトークで報告する

ジャイロトロン FU CW G1

出力できる周波数は、内部キャビティーの径で決まる。電子銃の真空を破らずキャビティーを交換できるデマウンタブル型ジャイロトロン(FU CW GI)を新たに開発。また、モードコンバータを内蔵させた



改良点① 出力周波数

φ4.910~4.986 mmの異なる径のキャビティーを複数作成し、発振周波数を測定した。Ps-HFS測定に必要な周波数が全て得られている



改良点② 出力ガウスビームパワー



- モードコンバータをジャイロトロンに内 蔵したことで実験装置がコンパクトに
- ガウスビームへの変換効率が 30%か ら70%に向上した
- 5Hz, duty 30%の運転条件で以前の3 倍、300Wのガウスビームパワーが得 られている



結論

- 新たなミリ波技術の開発により世界初のPs-HFS(203.4 GHz)の直接測 定を目指している
- Ps-HFS間の遷移はM1遷移であるため遷移確率が小さく、またo-Psの 寿命が短いため、観測可能な量の誘導遷移を起こすには10kW程度 の高強度ミリ波が必要
- ジャイロトロンから出力された202.9GHzのミリ波をFabry-Pérot共振器 に蓄積し、10kWまで増幅することで世界で初めてPs-HFS間の遷移を 測定した
- 遷移曲線を測定し、その中心であるPs-HFSを測定するためには、201
 ~206GHz程度の範囲にわたって周波数を変えて遷移量の変化を測定する必要がある
- 新たにモードコンバータ内蔵で内部キャビティーを交換可能なジャイロトロンを開発。これにより、Fabry-Pérot共振器に入射するパワーが以前の3倍程度、300Wまで増加した。また、キャビティーの交換によりPs-HFSの測定に必要な周波数が得られることを確認した