# ポジトロニウム超微細構造の直接測定(概要と光学系)

<u>山崎高幸</u>,宮崎彬<sup>A</sup>,末原大幹,難波俊雄,浅井祥仁<sup>A</sup>, 小林富雄,斎藤晴雄<sup>B</sup>,立松芳典<sup>C</sup>,小川勇<sup>C</sup>,出原俊孝<sup>C</sup>

東大素セ,東大理<sup>A</sup>,東大総文<sup>B</sup>,福井大遠赤セ<sup>C</sup>

日本物理学会2013年秋季大会@高知大学2013/9/20





- 電子 e<sup>-</sup>と陽電子 e<sup>+</sup> 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(*p*-Ps, *o*-Ps)

• パラポジトロニウム(*p*-Ps)

e⁻

 $e^+$ 





- ・ オルソポジトロニウム(o-Ps) S = 1 スピン3重項 o-Ps → 3γ(, 5γ, ...) 長寿命142nsec 連続的なエネルギースペクトル  $k_3$   $\vec{k}_2$ o-Ps  $\vec{k}_1$

## 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



 過去(1970-80年代)に約1Tの 静磁場を用いて3GHz程度に Zeeman分裂した準位間の遷移 を用いて精密測定が行われた が、直接測定はまだ



# 3.9σのずれ



Exp.

203.388 65(67) GHz (3.3 ppm) O(α<sup>3</sup>) QED calc. 203.391 69(41) GHz (2.0 ppm)

- 2000年に理論計算の精度が上がり、実験値と理論計算との間に
   3.9 o(15 ppm)のずれが存在することが判明
- 過去の実験に共通に存在しうる
   系統誤差要因として
  - ✓ Ps生成領域での磁場の非一様性
  - ✓ ガス中でのPs-HFSの値を真空に 外挿する際に物質の効果を過小 評価
- 我々は異なる2つのアプローチで
   この問題の検証を目指している
- 1. 高強度ミリ波を用いた初の直接 測定(<u>20aSD0</u>1, 20aSD02)
- 系統誤差を抑えた精密な間接測 定(20aSD03) 5

# Ps-HFSの直接測定



- ・
   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、遷移が起きると長寿命な 2γ崩壊(単色511keV・back-to-backに放出される)が増加
- M1遷移であり遷移確率が低く(*o*-Psの崩壊率より14桁小さい)、10kW オーダー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
   →新しいミリ波技術による世界初のPs-HFS直接測定



#### Gyrotron

- (Sub-)THz領域での大強度コヒーレン
   ト光源
- 1. 電子銃から放出された電子がカ ソード電圧(~18kV)により加速さ れ、超伝導ソレノイドによる磁場 (~7.5T)によりサイクロトロン運動 しながら空洞共振器に突入する
- サイクロトロン周波数 Ω = eB/mγ
   と空洞共振器の共振周波数(空 洞径と電磁場モードで決まる)

$$\omega_{c} = \sqrt{\left(\frac{\chi_{mn}}{R}\right)^{2} + \left(\frac{l\pi}{L}\right)^{2}}$$

が一致すると、サイクロトロン運動 の位相が揃い回転エネルギーが 電磁場エネルギーに変換され発 振する



#### Gyrotron "FU CW GI"

- ガウスビームパワー 350 W (5Hz, duty 30%)



# Fabry-Pérot 共振器



- ジャイロトロン出力(~350W)では パワーが足りないため、出力ガ ウスビームを光学共振器に蓄積 し約100倍にパワーを増幅
- ミラー間の距離(~156mm)がミリ 波の波長(~1.5mm)の半整数倍 になると共振。ミラー間距離はピ エゾステージで100nm程度の精 度でコントロール
  - 高い増幅率を得るにはロスの少 ない共振器が必要→入射側に 高抵抗Si基板(~t2mm)に金メッ シュ(~1µm)を蒸着したミラーを使 用。反射率 99.15%, 透過率 0.53% (CST MWS シミュレーショ ン)。また、Siは熱伝導率が高い ため水冷により50kWの蓄積パ ワーに耐えることが可能

#### Fabry-Pérot 共振器



 ・ 共振鋭さ 「=1.7µm (Finesse 430) & 共振器へのパワー導入効率
 C=62% → Gain = 85(入射パワー350Wで <u>30kW</u> 蓄積!)

#### パワー測定

- 遷移量は蓄積パワーに依存。パワーの相対精度が重要
- 銅ミラーのф0.6穴を透過してきたパワーに対するパイロ応答
   V<sub>tr</sub>[V] から蓄積パワーを評価するため、ф0.6穴の透過率および パイロ応答の周波数特性を実測



チョッパーで入射ビームを半分 に分け、同時に銅ミラーおよび 水負荷(全吸収。ハイパワーな ミリ波のパワー測定の標準)に 照射 →パワーP<sub>in</sub>[W]の入射ビーム に対する透過パイロの応答

V<sub>tr</sub>[V] が得られる

現状、約15%の絶対精度

#### 周波数測定

 ・ 周波数はヘテロダインミキサ(ショットキーバリアダイオード、GaAs)
 を用いて0.5GHz程度にダウンコンバートして測定。LOにはシグナル
 ジェネレータの出力~12GHzを16逓倍したものを使用



ビームパワーを300W→100uW程度まで減衰させた後にホーンアン
 テナを通してミキサに入れ、測定期間中モニタしている

#### まとめ

- 基底状態におけるポジトロニウム超微細構造には理論と実験の間に 3.9σ(15ppm)のずれが存在
- 過去の実験は全て静磁場をもちいてZeeman分裂させた準位間の遷移を用いた間接測定であるため、高強度ミリ波を用いてPs-HFSを直接分光測定する全く新たな手法を開発し、まずはO(100ppm)での測定を目指している
- ジャイトロンおよびFabry-Pérot 共振器を用い、201~206GHzの周波数 にわたり平均30kW程度のパワーというPs-HFS測定に十分な性能が得られている
- ただし現状、パワーの測定精度は絶対精度で±15%程度であり、これ が最終的に得られるPs-HFSの測定精度を制限している(最終目標であ るO(ppm)レベルの精密測定には0.1%のパワー測定精度が必要)