

#### 測定の概要

宮崎彬, 山崎高幸<sup>A</sup>, 末原大幹<sup>A</sup>, 秋元銀河, 難波俊雄<sup>A</sup>, 浅井祥仁, 小林富雄<sup>A</sup>,斎藤晴雄<sup>B</sup>, 漆崎裕一<sup>C</sup>, 小川勇<sup>C</sup>, 出原敏孝<sup>C</sup>, S.Sabchevski<sup>D</sup>

東大理, ^東大素粒子センター, <sup>B</sup>東大院総合文化 <sup>C</sup>福井大遠赤センター, <sup>D</sup>ブルガリア科学アカデミー

> 日本物理学会第65回年次大会 2010.3.23 @岡山大学津島キャンパス

# outline

- ポジトロニウムと超微細構造について
- サブテラヘルツ波をもちいた直接測定
- ・ジャイロトロン
- ・ファブリー・ペロー共振器
- Summary

# ポジトロニウムと ポジトロニウム超微細構造について



#### HFS測定に関する過去の実験と我々の方針

<過去の実験>

203GHzの直接測定は不可能

→過去の実験は全て,磁場中でのゼーマン効果を見ていた

つまり<u>間接測定しかなされていない</u>

しかも過去の実験と理論値には3.9σのズレがある

<我々の2つの実験>

◆ 精度を上げるアプローチ:物質の効果を正しく入れる+高精度の磁場
 →3GHz測定(石田, 佐々木)

◆磁場を使わないで直接測定
<u>初めての直接測定</u>(このtalk)→203GHz測定(宮崎,山崎)



### HFS直接測定の概要



- o-Ps がサブテラヘルツ波によってp-Ps に遷移
- p-Psはすぐに (寿命125 psec) 2γ崩壊 → 2γ崩壊率の上昇
- 入力波の周波数に対して,203GHzを中心とした共鳴曲線が得られる
- 世界初のサブテラヘルツ波領域での分光実験である

#### 直接測定の鍵

- 高いphoton密度が決定的に重要
  - o-Ps → p-PsはM1遷移: τ = 3x10<sup>8</sup> sec
  - o-Psの寿命142 nsecに比べ14桁も大きく, それだけ遷移しにくい
  - σ~1/v→3GHz (ゼーマン効果による間接測定)の70倍遷移しにくい

Akira Miyazaki

- Next Stepとして周波数可変性が必要
  - on-resonanceとoff-resonanceを確認後, 共鳴曲線の幅1.2GHzをスイープする

0.27

- 将来的に周波数に対する可変性が求められる
- 以下が測定の鍵となる
   ジャイロトロン
   大強度・高安定光源
   周波数可変なものも開発中
   ファブリー・ペロー共振器
   photon密度をさらに100倍
   周波数可変なサル振器
  - ・ 周波数可変な共振器



206

207

#### 全体のセットアップ



#### ジャイロトロン



### ジャイロトロン(1) 写真



- 電子銃から出た電子は強力な磁場によ りサイクロトロン運動をする
  - サイクロトロン周波数 f<sub>c</sub>=eB/2πm<sub>0</sub>γ
  - 本実験で使用するジャイロトロンはB~
     7.36 Tで運用
- 磁場中心の横方向にサイクロトロン周 波数で共振する共振器を形成してお くとそこでその周波数の電磁波が発 振する
- 発振した電磁波は上部のウインドウから取り出す。使用済みの電子ビームはウインドウ下部のコレクタに収集される
- 出力強度の変調:電子銃の電子放出頻度を変える
   周波数変調:磁場・電子速度(γ)を変える
   (変調幅が広い場合共振器にも変調機構が必要)

本測定用に開発した ジャイロトロン(Gyrotron FU CW V)

約2m

### ジャイロトロン(2)特性

- Gyrotron FU CW V
- ウィンドウ直後で609Wの出力を達成
- 中心周波数203.08 GHz • (実測値, 偏光はTE03 mode)。
  - 周波数変調幅は数百MHz程度。 数GHz変調可能なジャイロトロンも開発中で 今後upgradeを予定。
  - 別の共振モードにより199GHzの off-resonance測定・比較は可能。
- 単色性は極めて高く、10kHz程度。 (他のジャイロトロンでの実測値)



206

Radiation frequency [GHz]

207

右図の測定すべき共鳴曲線のうち, 赤線で示した部分の測定が可能 →遷移の確認実験をまず目指す 共鳴曲線全体の測定はupgrade後 201 202 203 204 205

Akira Miyazaki

200

#### ファブリー・ペロー共振器





- 入射側はメッシュミラーで効率的にパワーを導入
- 出射側は銅凹面ミラーで横方向の閉じこめ
  - 平面-平面の共振器より安定化し、ミラー同士の平行調節の精度が共進長ほどは効かない
- ピエゾステージで共振長をsub-micronでコントロール
- 透過側にパワーモニタ(パイロエレクトリックディテクター)を固定,共振を測定

### ファブリー・ペロー共振器 (2) 写真 (絵とは左右逆)



#### ファブリー・ペロー共振器(3)必要条件

#### Finesse $\mathcal{F}$

・ 共鳴の鋭さ=パワー蓄積度の指標(~photon密度の倍率×2π)



1.14 µm

step[µm]

680

- $\mathcal{F} \sim 650$ :実験に必要なphoton密度100倍を達成
- ジャイロトロンのパワー導入効率
- 現在最大の課題
- mode matchingをコントロールするための伝送系を開発している



# Summary

- ポジトロニウムのHFSを, o-Psとp-Ps間のM1直接
   遷移によって測定する
- サブテラヘルツの光学系を開発している
- ファブリー・ペロー共振器に必要な条件のうち, finesseについては目標を達成しており, Couplingの研究を現在行っている
- Couplingを改善するための伝送系は次の発表

## BACKUP

#### ジャイロトロン 高周波源の比較



200 GHz付近で高出力を得られるのは現状ではジャイロトロンのみ。

### ジャイロトロン 動作原理



- 電子銃から出た電子は強力な磁場により サイクロトロン運動をする
  - サイクロトロン周波数 f<sub>c</sub>=eB/2πm<sub>o</sub>γ
  - 本実験で使用するジャイロトロンはB<sub>max</sub>=8T
- 磁場中心の横方向にサイクロトロン周波数
   で共振する共振器を形成しておくとそこで
   その周波数の電磁波が発振する
- 発振した電磁波は上部のウインドウから取り出す。使用済みの電子ビームはウインドウ下部のコレクタに収集される
- 出力強度の変調:電子銃の電子放出頻度 を変える
   周波数変調:磁場・電子速度(γ)を変える
   (変調幅が広い場合共振器にも変調機構 が必要)

#### 共振器のパラメータ(1)

Finesse

・ Cavityへのパワー蓄積度(ロスの少なさ)を表す

 $\mathcal{F} = \frac{\delta \nu}{\Gamma} \sim \frac{2\pi}{1-\rho}$ -  $\delta v$ =共振モード間隔 -  $\Gamma$ =共振ピーク幅 (FWHM) -  $\rho$ =両面反射率



- ・ 共振器の損失(鏡面損失・ガス損失・回折損失)が影響
- 両面反射率99%でFinesse=628:目標値 銅ミラーの反射率は99.85%(計算値)
   メッシュミラーの反射率が最大の決定要因
- ・ 共振モード間隔は2/λ=737μm → 「<1.17μmが必要</li>

#### 共振器のパラメータ(2)

Input coupling

Cavityへのパワー導入効率を表す

 $C = T_b T_{mesh} C_{mode}$ C: input coupling, T<sub>b</sub>: Cavity導人前透過率, T<sub>mesh</sub>: メッシュ透過率, C<sub>mode</sub>: Cavity mode結合度

- T<sub>mesh</sub>はFinesseにも影響する (T<sub>mesh</sub> ~ 1-R<sub>mesh</sub> ~ 1/F)
- Cavityへの蓄積パワーは

$$P_{\rm acc} = C \left(\frac{F}{\pi}\right)^2 P_{\rm in}$$

Mesh のロスを無視した場合, 反射率は高い方が良い(1乗で効く)

CはCavityからの反射・Cavityの透過から求められるが、
 困難がある。(透過はcalibrationが難しく,反射は干渉の影響がある)

#### Meshの最適化

- 必要条件

   R<sub>mesh</sub>>0.99 (P<sub>acc</sub> ~ R<sub>mesh</sub>)

   ロス(1 R<sub>mesh</sub> T<sub>mesh</sub>)が少ない (特にT<sub>mesh</sub>に比べ)
   電磁場シミュレーションによりR, Tを メッシュパラメータを変えながら調べた。
- ・いくつかのメッシュを実際に製作した(下記)。



mesh material	line width	line separation	$\operatorname{reflectance}$	${\it transmittance}$	finesse
gold	$20~\mu{\rm m}$	$50~\mu{ m m}$	99.3%	0.32%	650
gold	$10~\mu{ m m}$	$50~\mu{ m m}$	98.6%	0.75%	290
silver	$50 \ \mu m$	$130~\mu{ m m}$	96.9%	2.70%	180

reflectanceとtransmittanceはシミュレーション, finesse(後述)は実測値

# 塩ビによるpower測定



# TE03 modeの伝播

- ■今回用いる偏光, TE03 modelはpowerに
- して3つの同心円を持つ
- ■塩ビ板のスクリーンにはこのpowerによる温度上昇が投影される
- ■ホイヘンスの原理で波動計算した(右図)
   ■ジャイロトロン出口付近では中央の輪がもっとも強い
- ■far-fieldではフラウンホーファー回折に よって外側の輪が最も強くなる ■輪の半径の実験値はほぼ理論通り
- (下図の赤:外円,緑:中円,青:内円)





#### ファブリー・ペロー共振器 入力mode測定



■伝播するビームのパワープロファイルを調べることが出来る ■レンズによって収束されたビームは,共振器内部modeと効率よ くCoupleすることが出来ない → Gaussian Converter

屈折率と反射率



■203GHzに対するSiO2の屈折率は1.95(溶融シリカ)、2.1(結晶クオーツ)である Grischkowsky et al. J. Opt. Soc. Am. B, vol. 7, 10 (1990)

■今回は溶融SiO2を使用しているので反射率は10%、全体での反射率は18%

■レンズなので、実際にはここからずれが生じる

■垂直入射からずれると偏光と入射角、透過角によって界面での反射率が異なる
 ■従って無限級数和もとれない

■理論的に簡単には評価出来ないと思われる

#### β+線検出器とγ線検出器



### LaBr<sub>3</sub> (Ce) シンチレータ

◆高いエネルギー分解能(FWHM 4% @511 keV)を持つ

- ◆2γ崩壊に対するo-Psの3γ崩壊の混入を効果的に抑えられる
- ◆さらにBack-to-backのセレクションを加えることで,3γバックグラウンドを徹底的に落とす



#### 検出器周りのセットアップ(1)



#### 検出器周りのセットアップ(2)



#### 検出器周りのセットアップ(3)



#### 検出器周りのセットアップ(4)

