サブテラヘルツ波を用いたポジトロ ニウム超微細構造の測定 I

<u>山崎高幸</u>, 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, 漆崎裕一^C, 小川勇^C, 出原敏孝 ^C, S.Sabchevski^D

東大理,東大素セ^ヘ,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



- 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)

- ・ オルソポジトロニウム(o-Ps) S = 1 スピン3重項 光子と同じ量子数 o-Ps \rightarrow 3 γ (, 5 γ , ...) 長寿命142nsec 連続的なエネルギースペクトル
- パラポジトロニウム(p-Ps)

S = 0 スピン1重項 スカラー粒子 p-Ps → 2 γ (, 4 γ , ...) 短寿命0.125nsec 511keVのy線2本をback-to-backに放出

ポジトロニウム超微細構造(Ps-HFS)

 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 (c.f. 水素 原子では1.4GHz)

$$\vec{\mu} = \frac{e}{2m}\vec{\sigma}$$

- Psは質量が小さいため、相 互作用が大きい
- o-Psは光子と同じ量子数。量
 子振動の寄与が87GHz





3.9σのずれ



考えられる原因

- 標準理論を超える新しい物理
 - 未知の弱結合粒子による高次補正
 - 粒子•反粒子→s-channelも寄与

(ex. *O*(MeV), α~10⁻⁸の擬スカラー)



- o-Psの量子振動は余剰次元から影響を受ける
- 過去の実験に共通する系統誤差の見落とし
 - ガス中で測定したPs-HFSの値を外挿して真空中でのPs-HFSの値を求める際に、過去の実験では物質の効果を正 しく考慮していない(→石田14pSK09・佐々木14pSK10)
 - 過去の実験は全て静磁場によるZeeman効果を利用した 間接測定であり、Ps-HFSの値に磁場の非一様性が直接効 く。磁場を正しく理解できていなかった可能性がある
- 理論計算(NRQED)の間違い

我々の2つの実験

- 高精度な間接測定(石田14pSK09・佐々木14pSK10) 過去の実験と同様に、静磁場によるZeeman効果を利用し、 間接的にPs-HFSを測定する。大型超伝導磁石を使用すること で一様磁場を作り、物質の効果を正しく評価することで過去 の実験で共通の系統誤差となっていた可能性のある不定性 をなくした高精度の測定を行い、理論計算と実験値との間の 3.9g のずれを検証する
- 2. 世界初の直接測定(<u>山崎14pSK07</u>・宮崎14pSK08)

203GHz(sub-THz)の光を用いてo-Psをp-Psに誘導遷移させる ことで、直接Ps-HFSを測定する。非常に遷移確率が低いため これまでに行われたことがないが、周波数可変で高出力な sub-THz光源と、出力をさらに増幅する光学系を開発すること で世界初の直接測定を行う

Ps-HFSの直接測定



- 203GHzの光を照射し、o-Ps→p-Psに直接(M1)誘導遷移させる
- 磁場による不定性が存在しない
- 遷移曲線の幅からp-Psの寿命も測定できる(τ = 1/2πFWHM)
- ミリ波領域における初のM1遷移測定

難しい理由

o-Ps→p-Ps遷移確率(3x10⁻⁸/sec)は、o-Ps→3y崩壊確率(7x10⁶/sec)に比べて14桁も小さい。これはこの遷移がM1遷移であり、かつPs-HFSの値が極めて大きい(203GHz = 0.84meV)ため

10kWの光を照射したとき に期待される遷移曲線



→ 遷移曲線を測定するのに
 +分な量の遷移を起こすには、
 10kW程度で200~207GHz
 程度の範囲にわたって周波数
 可変な光が必要。このような
 大強度光源が存在しなかった
 ため、これまでにPs-HFSの直
 接測定実験は1度も行われて
 いない

我々の実験セットアップ

モードコンバータ



<u>※ Ps生成部および検出器系については次の宮崎の講演(14pSK08)</u>

ジャイロトロン

- Sub-THz領域で100W~kWレベルの
 出力が可能な唯一の光源
- 今実験のために、まずは単色(周波 数は約203GHz)で最大出力約600W、 比較的安定に約300W(duty 30%)の 出力が可能なジャイロトロンを製作し た(右写真)。下図はジャイロトロン出 カパワーの空間プロファイル



@ 福井大学



ジャイロトロン

 電子銃から出た電子が加速され、 磁場中でサイクロトロン運動しな がら共振器に入る。サイクロトロ ン運動の周波数 Ω = eB/mγ が共 振器の共振周波数

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

と一致すると、サイクロトロン運動 のエネルギーが周波数 $\omega = \omega_c = \Omega$ の電磁波のエネルギーに変換さ れる(メーザー共振)。ジャイロトロ ン出力の空間プロファイルはこの 共振モードで決まる円形導波管 モード(m=0, n=3ならTE₀₃モード)



直接測定実験の予定

<u>1st step</u> 現在のジャイロトロンを使用 して、今年中にsub-THz領域 での初のM1遷移を観測する <u>2nd step</u> 現在開発中の周波数可変 ジャイロトロンを用いて遷移 曲線を観測し、Ps-HFSを直 接測定する



モードコンバータ

 ジャイロトロン出力は円形導波管TE₀₃モード。一方、Fabry-Pérot共振器の内部モードはガウスビーム。この2つのモード は全く異なっているため、300Wのジャイロトロン出力をそのま まFabry-Pérot共振器に入射しても共振器と結合しない



→ ガウスビームに変換するモードコンバータが必要

モードコンバータ



モードコンバータ







パイロエレクトリックディテクタで共振器透過パワーを測定。共振器に入射するパワー、共振器で反射するパワーは共振器前方で測定

ピエゾステージを用いて 共振器長をコントロールし、 λ/2の整数倍に合わせる



2 1.8

1.6

1.2

0.8

/oltage [V]

/oltage [V

共振器で反射するパワー

340 350 360 370 380 390 400

共振器を透過するパワー

実測

position [µm]

実測

- 入射ビームのうち共振器と結 合する割合(カップリング C)は、 共振器での反射が共振時に減 少する割合からわかる $C = 1 - \frac{0.63}{1.9} = 0.67 = 67\%$
- ・ 結合したビームが共振器内を <u>往復する回数</u>は、共振の鋭さ ($\Gamma = 1.1 \mu m$, FWHM)からわかる $N = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\lambda/2}{\Gamma} = 103$
- このときの入射パワーは72W。 蓄積パワーは直観的には、C=1で成り立つ以下の近似式から $P_{acc} = P_{in} \cdot C \cdot 2N = 9.9$ kW

別途、透過パワーとCuミラーの透過率から直接的に蓄積パワーを評価した

$$\begin{split} \frac{P_{tr}}{P_{in}} &= \frac{T_f T_e \sqrt{1-A}}{[1-\sqrt{R_f R_e(1-A)}]^2 (1+F\sin^2 \delta)} \\ \frac{P_r}{P_{in}} &= \frac{[\sqrt{R_f} - (T_f + R_f) \sqrt{R_e(1-A)}]^2 + 4(T_f + R_f) \sqrt{R_f R_e(1-A)} \sin^2 \delta}{[1-\sqrt{R_f R_e(1-A)}]^2 (1+F\sin^2 \delta)} \\ \frac{P_{int}}{P_{in}} &= \frac{T_f}{[1-\sqrt{R_f R_e(1-A)}]^2 (1+F\sin^2 \delta)} \end{split}$$



まとめ

- Ps-HFS(203GHz)の実験値と理論値は3.9σずれている
- 静磁場を用いた間接測定により3.9oのずれを検証する実験(石田 14pSK09・佐々木14pSK10)およびsub-THz光を用いた世界初の直接測 定実験(山崎14pSK07・宮崎14pSK08)を並行して行っている

直接測定実験:光学系まとめ

- 直接遷移によって遷移曲線を測定するには10kW程度のパワーで200GHzから 207GHz程度の範囲で周波数可変な光が必要である
- ジャイロトロン(光源:約300W)、モードコンバータ(約1/3のパワー効率でガウス ビームに変換)およびFabry-Pérot共振器(増幅率約100倍)からなる光学系を 開発し、目標とする10kWのパワーを共振器内に蓄積することに成功した
- 今後は周波数可変ジャイロトロンの開発を進める
- Ps生成部および検出器などの測定系、および直接測定実験のスケジュールについては次の宮崎(14pSK08)の講演で述べる