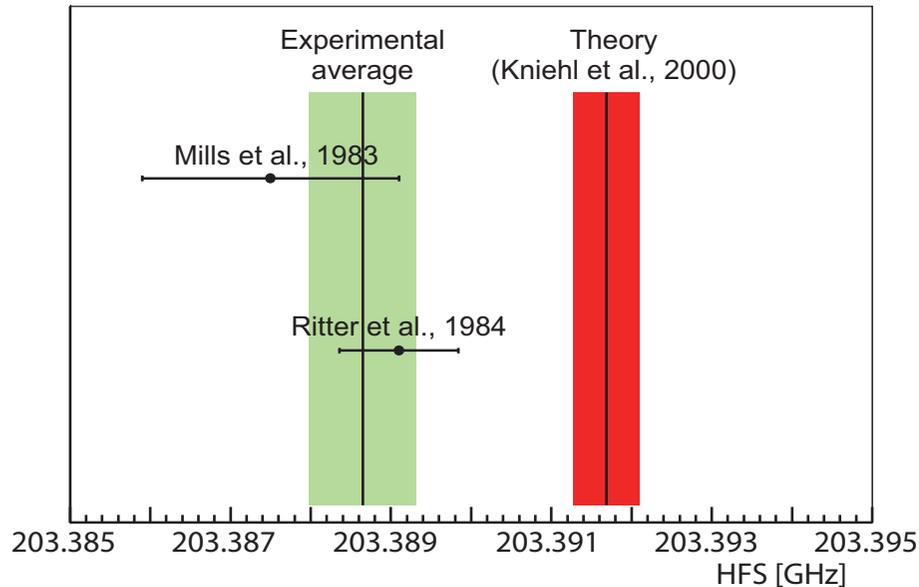


ポジトロニウム超微細構造の 直接測定

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

東大素セ, 東大理^A, 九大理^B, 東大総文^C, 福井大遠赤セ^D

Ps-HFSの直接測定



Exp.

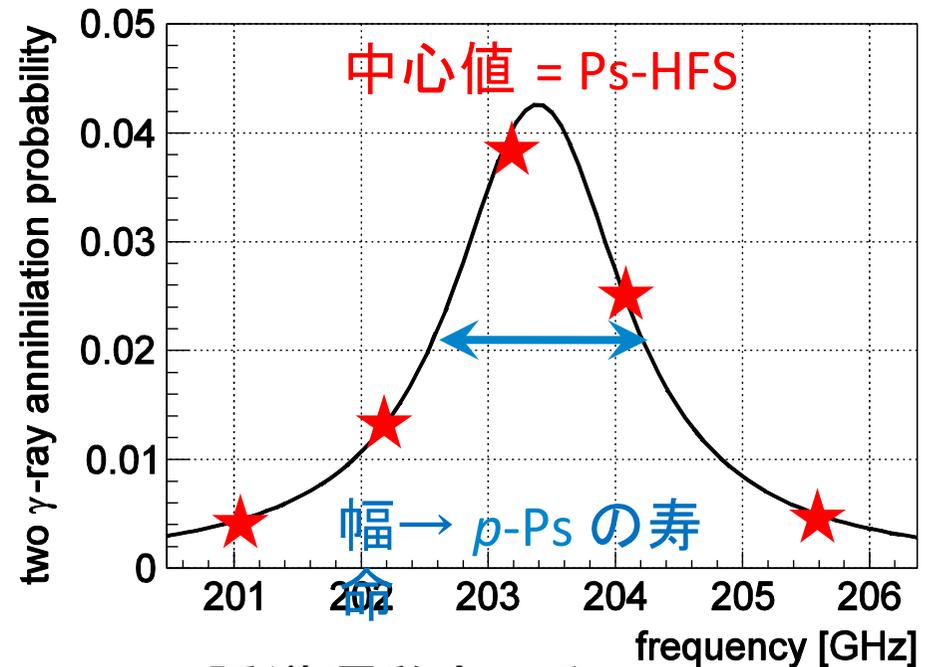
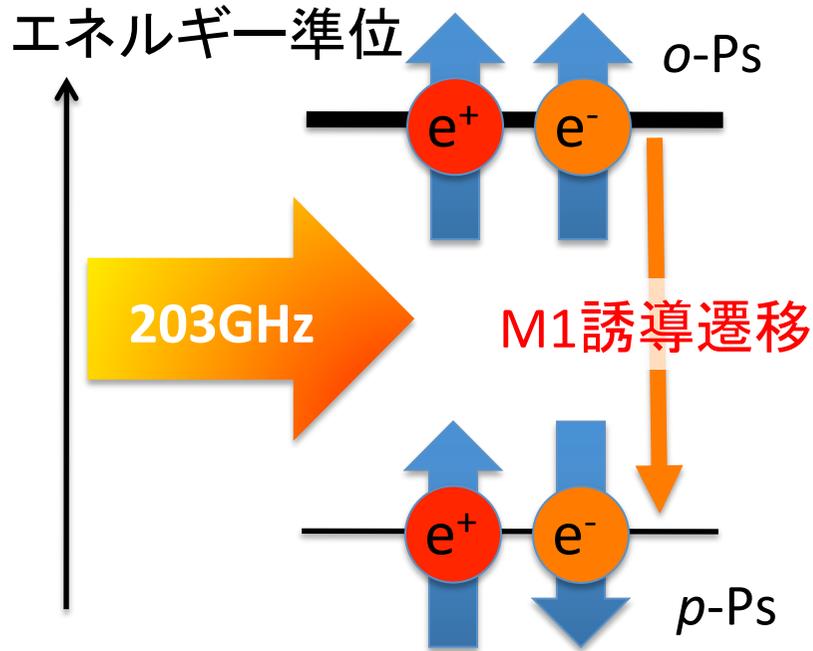
203.388 65(67) GHz (3.3 ppm)

$O(\alpha^3)$ 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 σ (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の値を真空中
外挿する際に物質の効果を過小
評価
- **高強度ミリ波を用いた初の直接
測定**
- ミリ波光源・パワーディテクタはま
だまだ発展途上。性能向上するこ
とで静磁場フリーでの精密測定が
可能になる

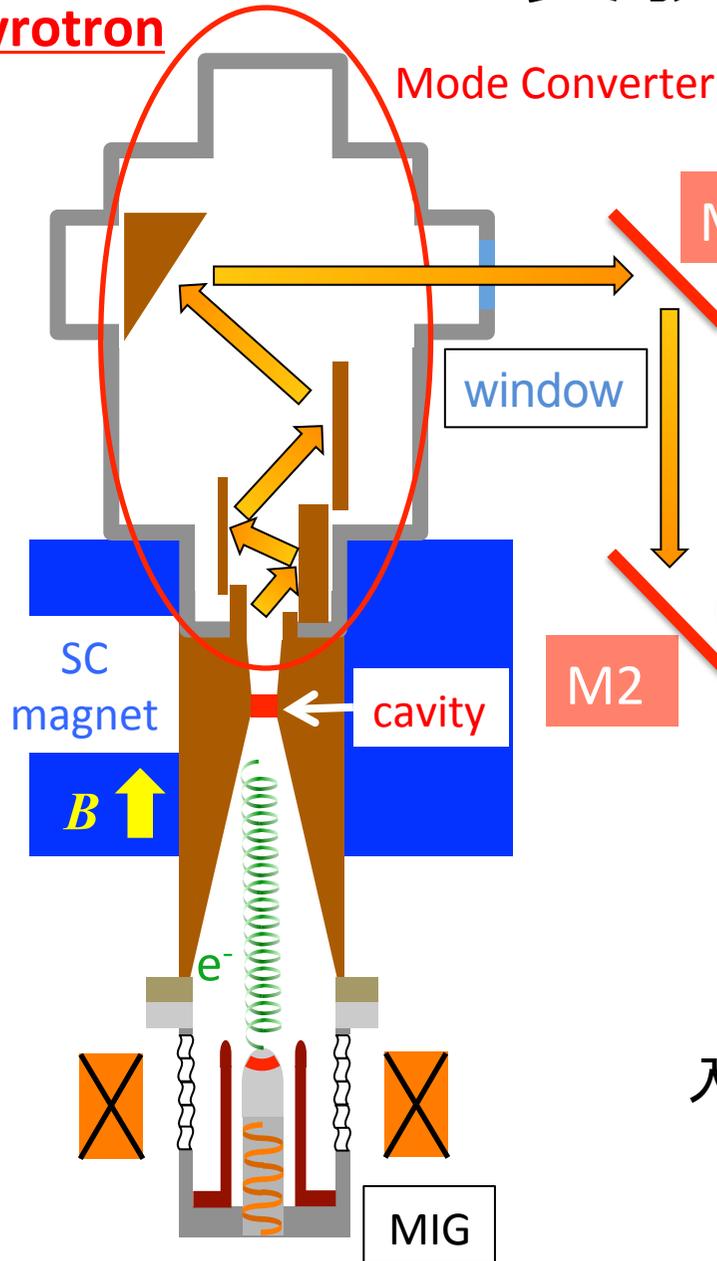
Ps-HFSの直接測定



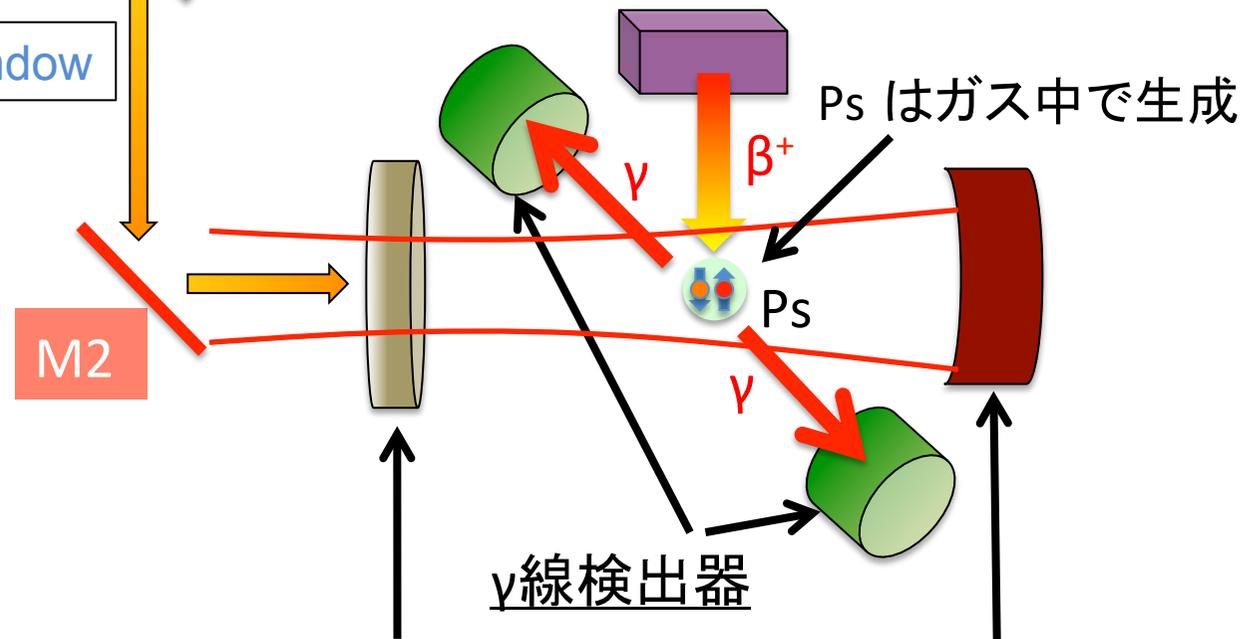
- 直接203GHzの光を照射し、o-Ps \rightarrow p-Psに誘導遷移させる
- p-Psは即座に($\tau = 125$ ps) 2γ 崩壊するので、遷移が起きると長寿命な 2γ 崩壊(単色511keV \cdot back-to-backに放出される)が増加
- M1遷移であり遷移確率が低く(o-Psの崩壊率より14桁小さい)、10kWオーダーの高強度ミリ波が必要である。さらに、201~206GHz程度にわたって周波数を変えて遷移測定を行う必要がある
 \rightarrow 新しいミリ波技術による世界初のPs-HFS直接測定

実験セットアップ

Gyrotron



^{22}Na β^+ 線源 & β^+ 検出器

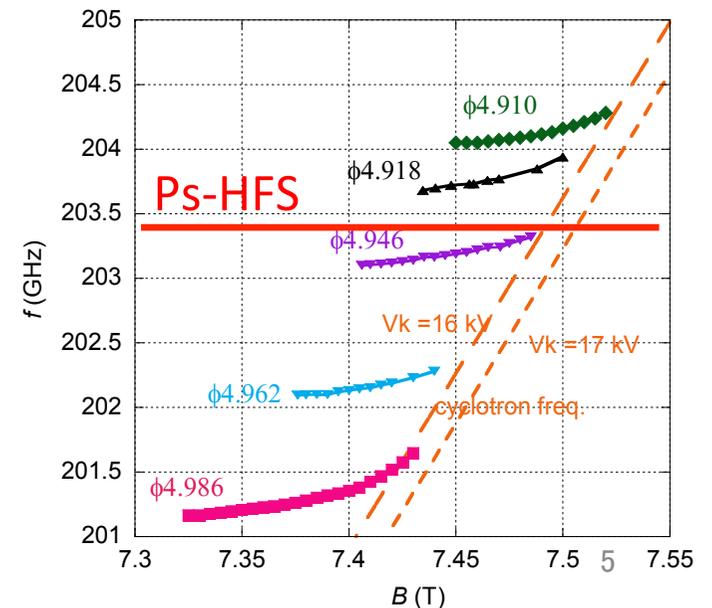
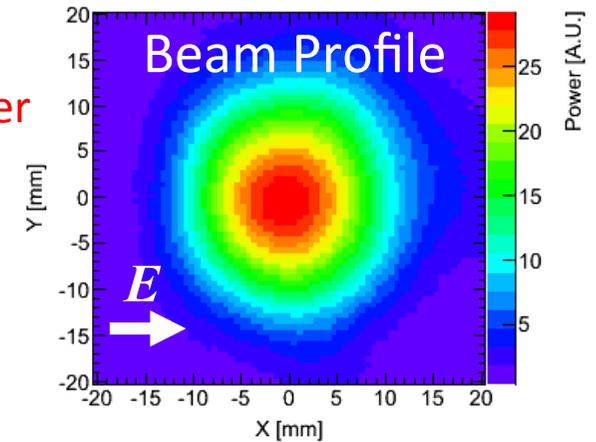
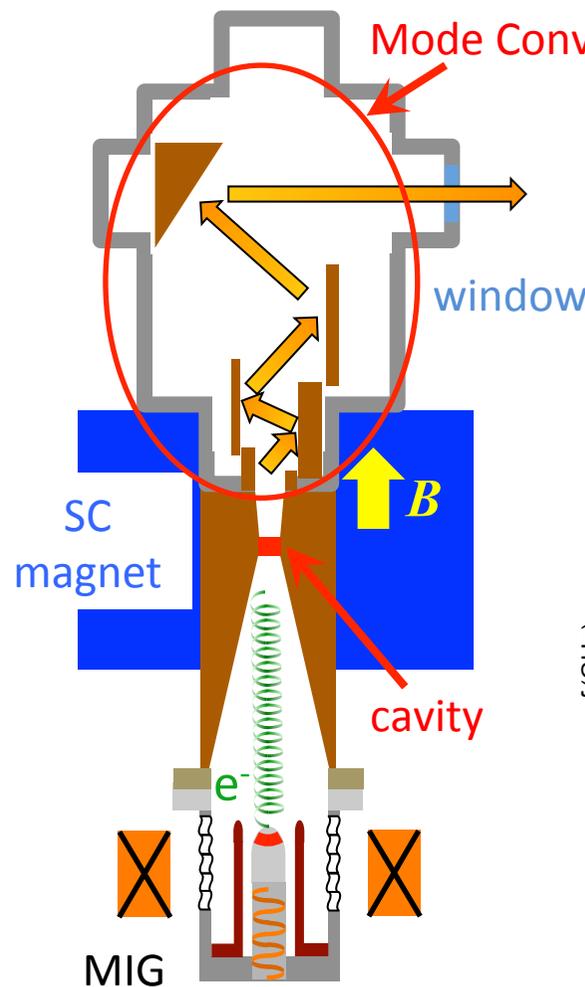


Fabry-Pérot 共振器

入射パワーの100倍のパワー
を蓄積する

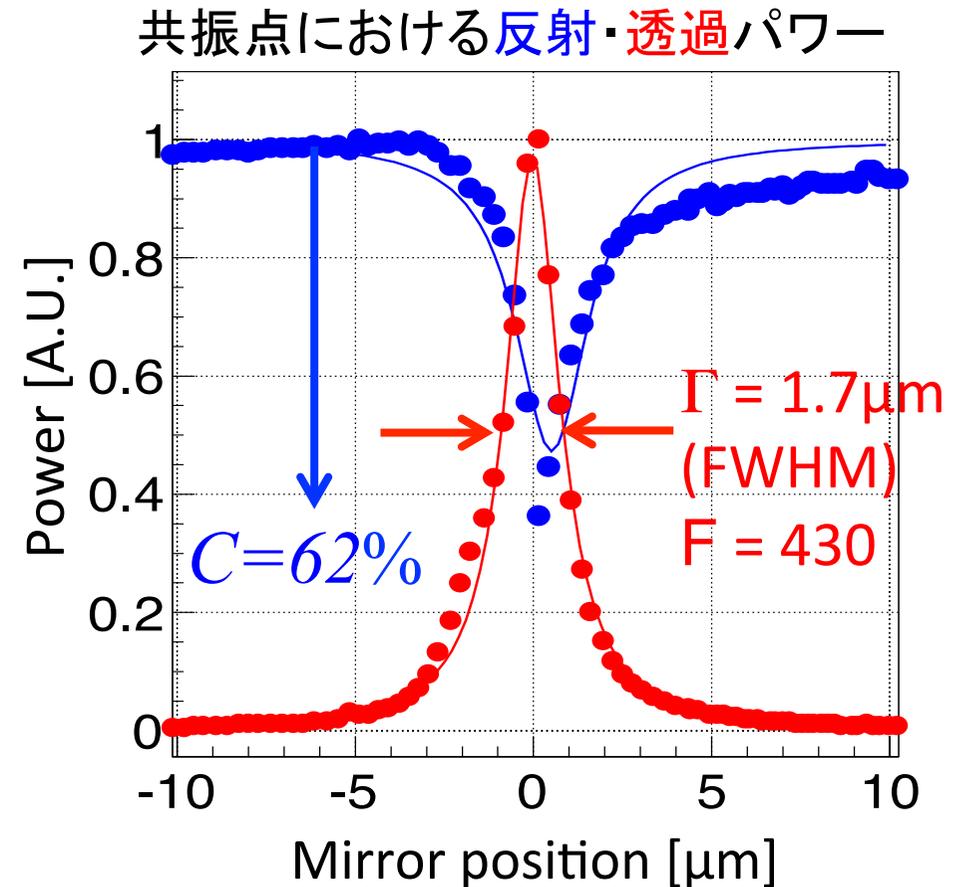
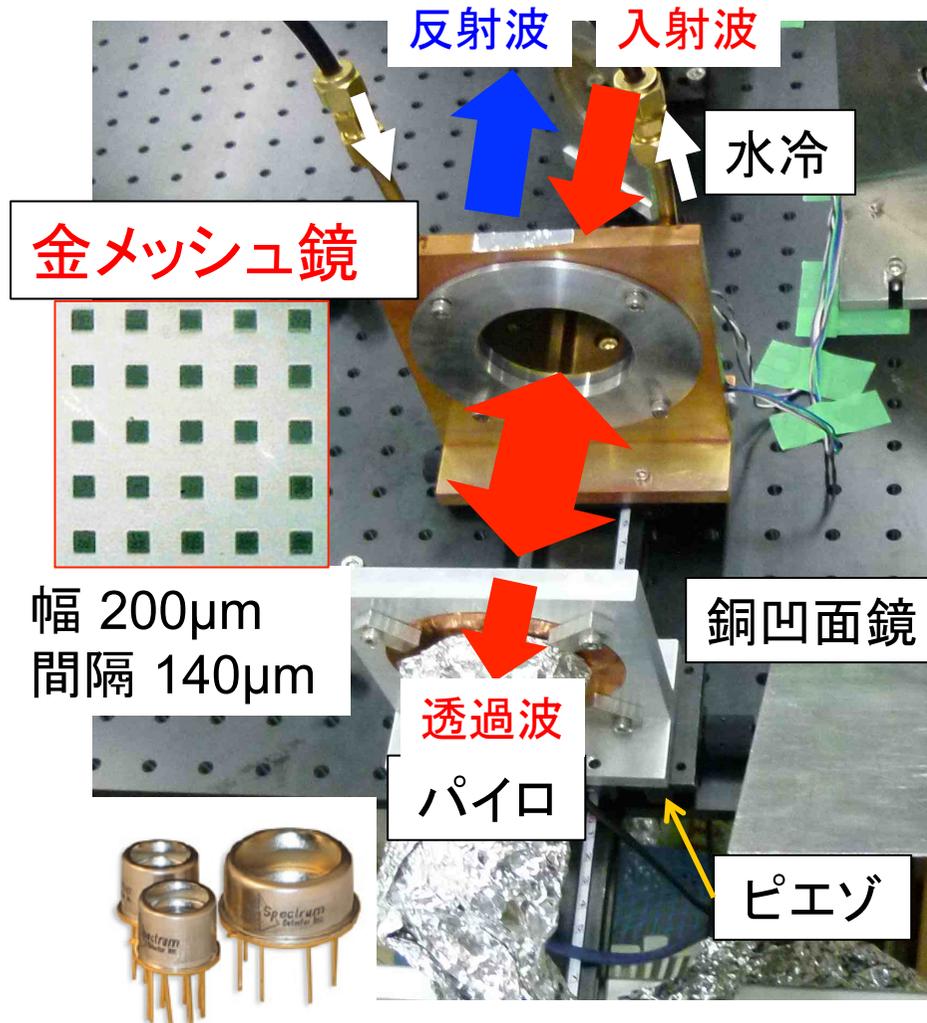
Gyrotron "FU CW GI"

- (Sub-)THz領域での大強度コヒーレント光源。350 W (5Hz, duty 30%)
- 内蔵キャビティを異なる径のキャビティに交換することで周波数を201~206 GHz の範囲で変化させる



Fabry-Pérot 共振器

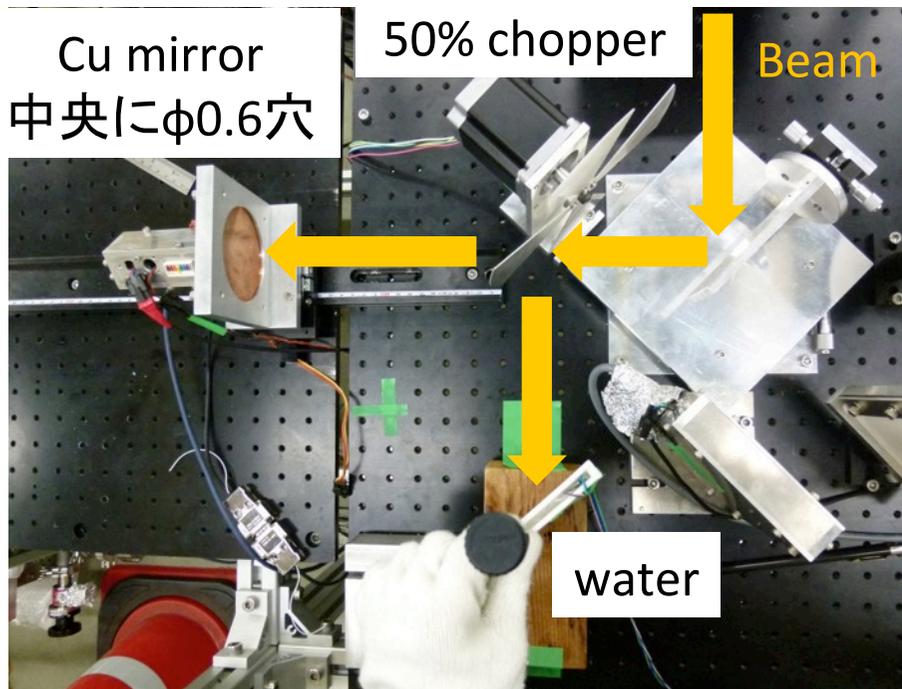
- ジャイロトロン出力 (~350W) ではパワーが足りないため、出力ガウスビームを光学共振器に蓄積し約100倍にパワーを増幅



Gain = 85 → 入射350Wで 30kW

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 $\phi 0.6$ 穴(カットオフ未満)をわずかに透過してきたパワーに対するパイロ応答 $V_{tr}[V]$ から蓄積パワーを評価する。 $\phi 0.6$ 穴の透過率・銅ミラーとパイロの間の共振構造・パイロ応答の周波数特性を実測する必要がある



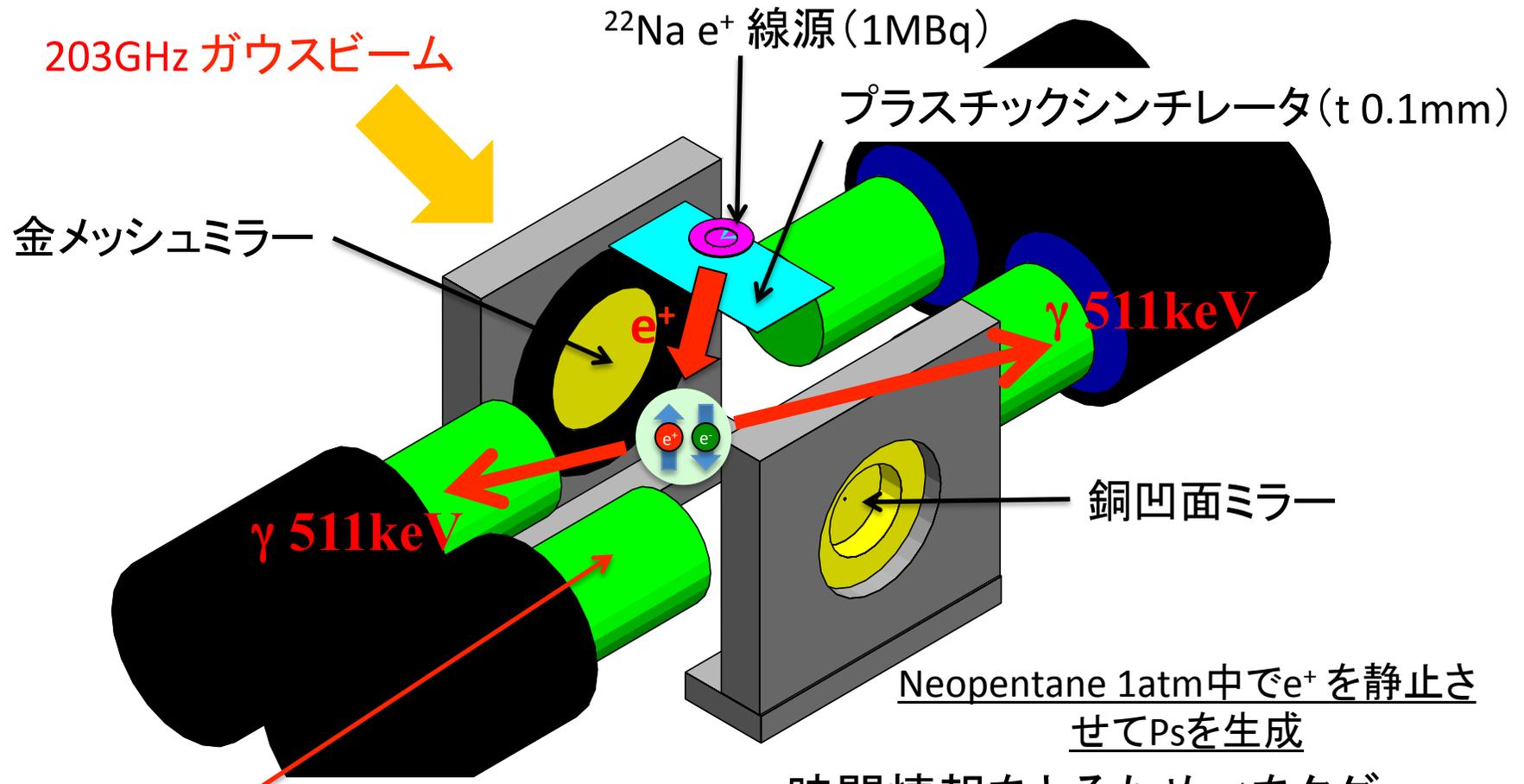
チョッパーで入射ビームを半分に分け、**同時に**銅ミラーおよび水負荷(全吸収。ハイパワーなミリ波のパワー測定の標準)に照射

→ パワー $P_{in}[W]$ の入射ビームに対する透過パイロの応答 $V_{tr}[V]$ が得られる

現状、約15%の絶対精度

Ps生成部・ γ 線検出器

シグナル = o -Psの寿命での 2γ 崩壊(単色511keV・back-to-back)

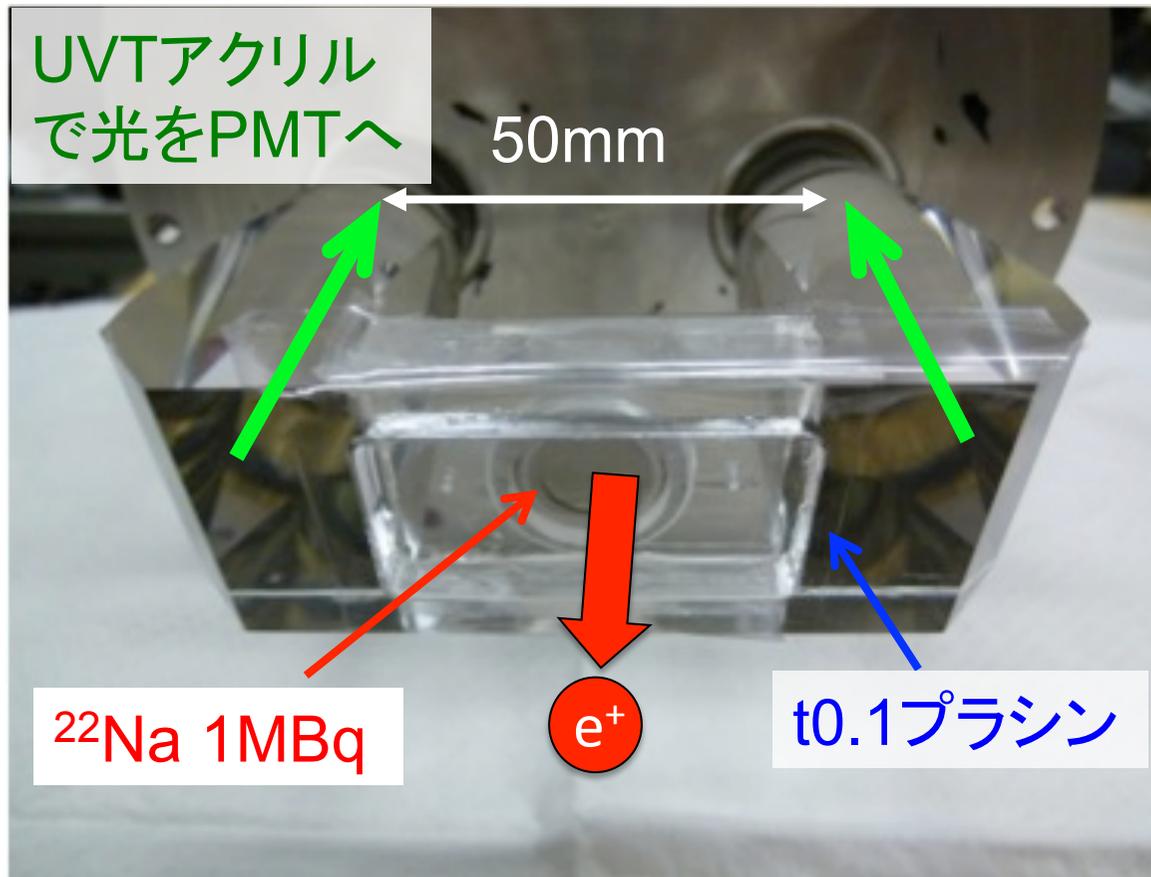


LaBr₃(Ce) シンチレーター

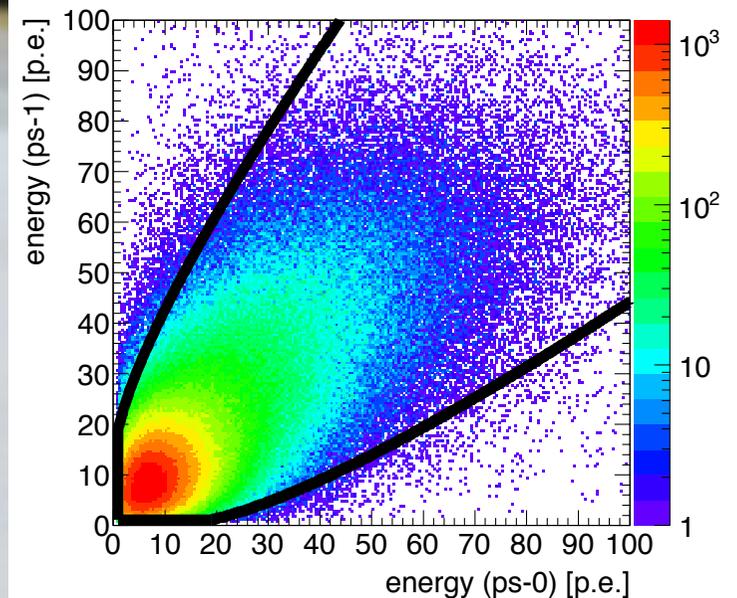
- エネルギー分解能 FWHM 4%@511keV
- 時定数 16ns

- 時間情報をとるため e^+ をタグ
- 高エネルギー分解能の γ 線検出器

線源とe⁺タグ系



左右のPMTで検出された
光量のバランスを要求



- e⁺放出時刻をプーラシンでタグ (120kHz)
- LaBr₃(Ce)にガンマ線が来た時刻とoff-lineでdelayed coincidenceをとってo-Ps由来イベントをセレクト

γ線検出器まわり

メッシュミラー

ガスチャンバーの窓として使用。Si基板なので遮光も兼ねる

ガウスビーム
f~203GHz, P~350W

ガスチャンバー内部の写真

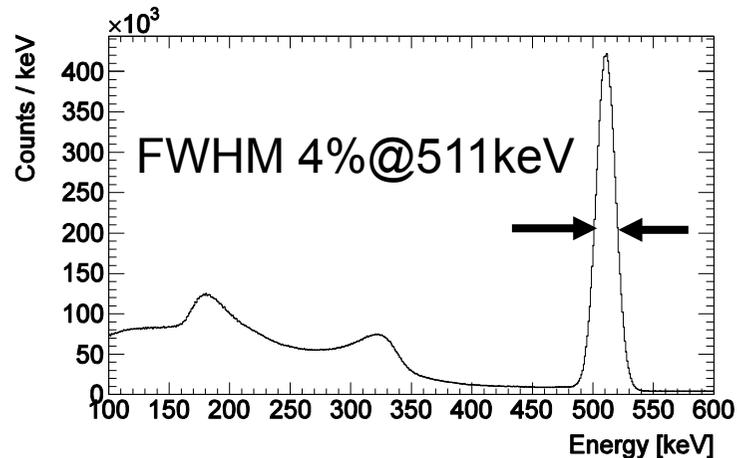
銅凹面鏡

γ 511keV

~30kW

γ 511keV

LaBr₃で測ったガンマ線スペクトル

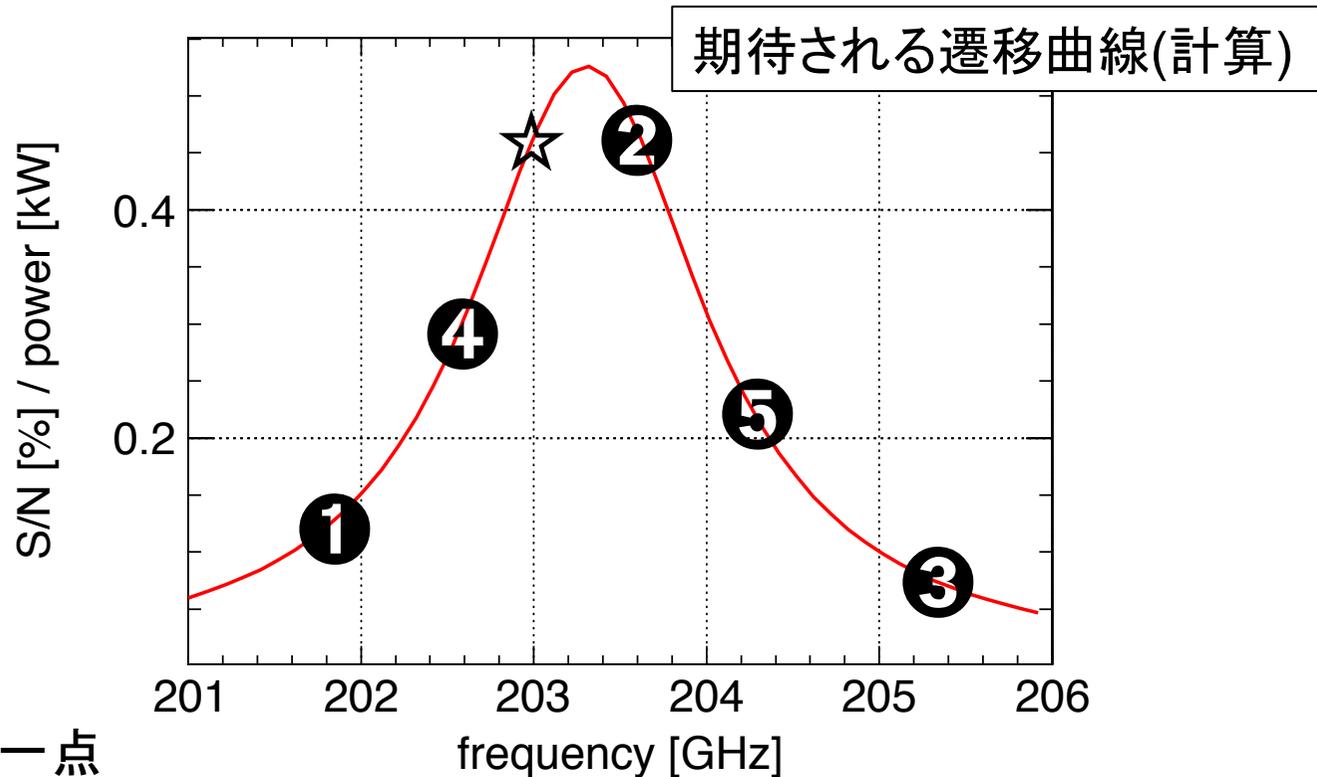


LaBr₃(Ce)結晶でガンマ線を検出(7kHz)

- エネルギー分解能 FWHM 4% @ 511keV
- 時間分解能 FWHM 200ps @ 511keV
- 時定数 16ns
- NaIより高い阻止能

最近注目されている新しい無機シンチ

現在までに取得したデータ



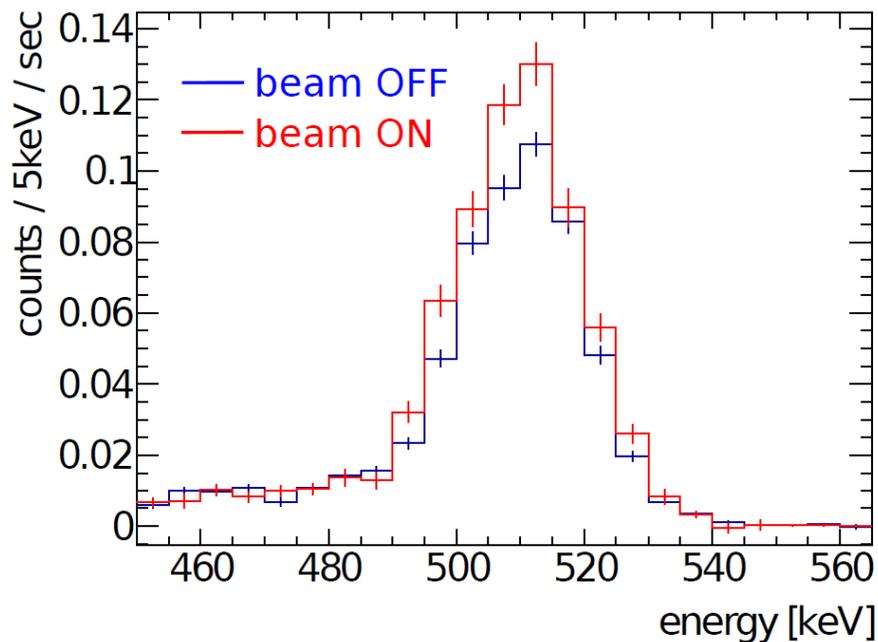
← ⑥
180GHzにも一点

- 6つの周波数で測定を行った。あと一点ピークに追加する
- 遷移量の多い②の点では蓄積パワーを変えながら遷移測定
- プラシンとLaBr₃(Ce)シグナルのコインシデンスでトリガ(600Hz)
- 一回の測定は1~3日程度の統計量
- 周波数変更に数週間かかる

203.6 GHz, 56.5kWにおける遷移シグナル

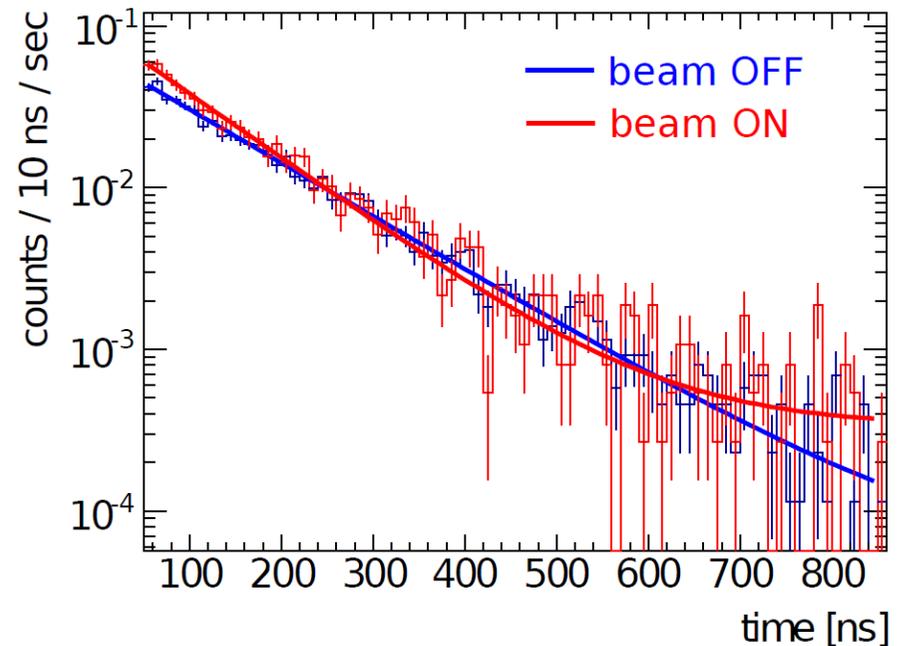
- 遷移シグナル ($o\text{-Ps} \rightarrow p\text{-Ps} \rightarrow 2\gamma$) は寿命が長く ($\sim 142\text{ns}$)、511keVの γ 線2本をback-to-backに放出するため、50~250nsのtime windowおよびback-to-back 511keVのenergy cutをかける
- Gyrotronは5Hz, duty 30%のパルス動作。ミリ波照射の有無で寿命の長い 2γ 崩壊イベント ($o\text{-Ps} \rightarrow p\text{-Ps} \rightarrow 2\gamma$) の数を比較する

Time window後のエネルギースペクトル



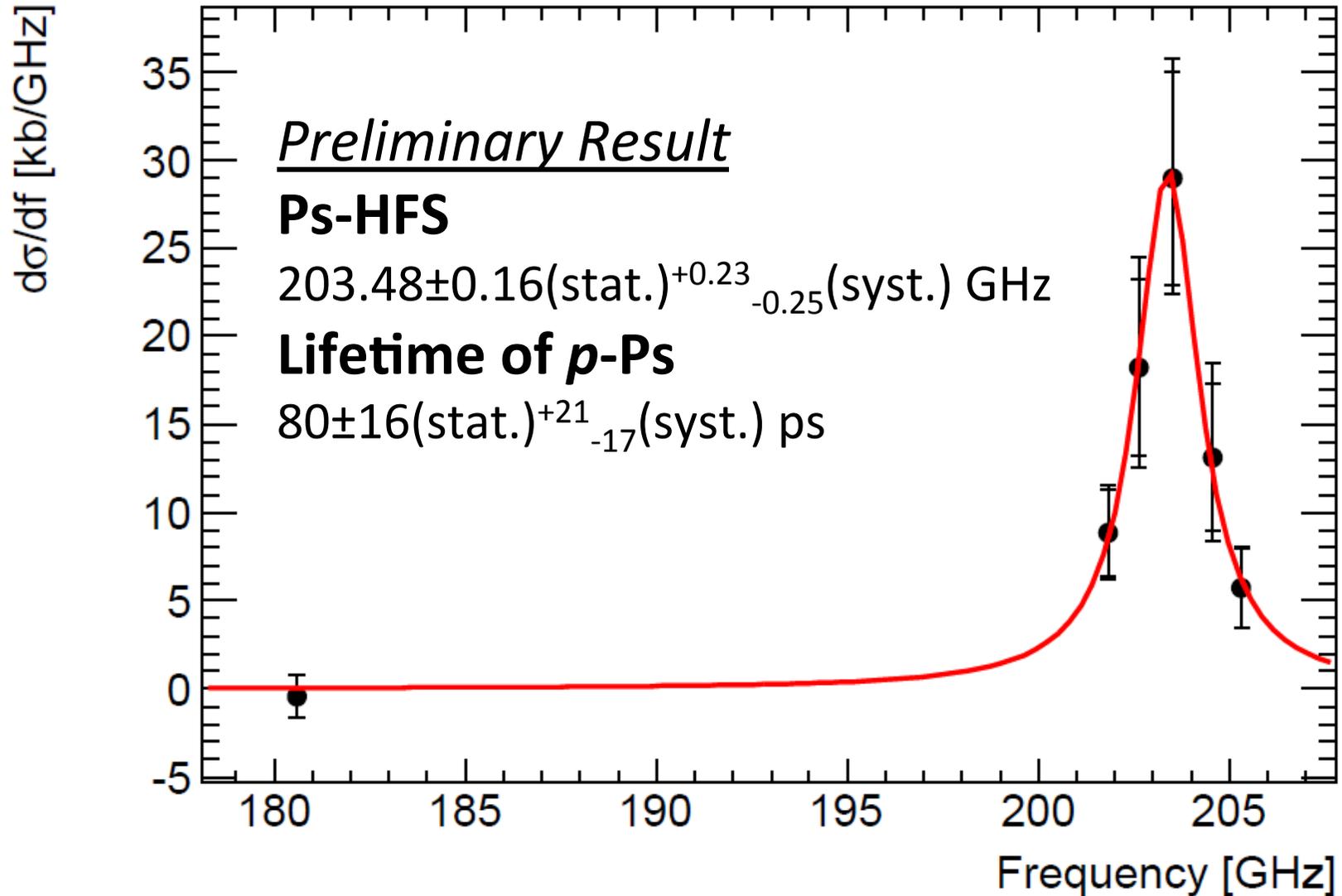
$$S/N = 18.9 \pm 3.1\% (6.3\sigma)$$

Energy cut後のタイムスペクトル



遷移によって寿命が短くなる

遷移曲線(暫定結果)



- 理論値と 2σ 以内で無矛盾。精度の低いピーク付近にもう1点追加して最終結果を出します

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た
- ジャイatron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
- これまで6つの周波数点で測定を行い、

$$\text{Ps-HFS} = 203.48 \pm 0.16(\text{stat.})^{+0.23}_{-0.25}(\text{syst.}) \text{ GHz}$$

$$\text{Lifetime of } p\text{-Ps} = 80 \pm 16(\text{stat.})^{+21}_{-17}(\text{syst.}) \text{ ps}$$

という理論値と無矛盾な暫定結果を得た。あと1点遷移曲線のピーク付近の周波数でデータを追加し、最終結果を出す