

ポジトロニウム超微細構造の直接測定

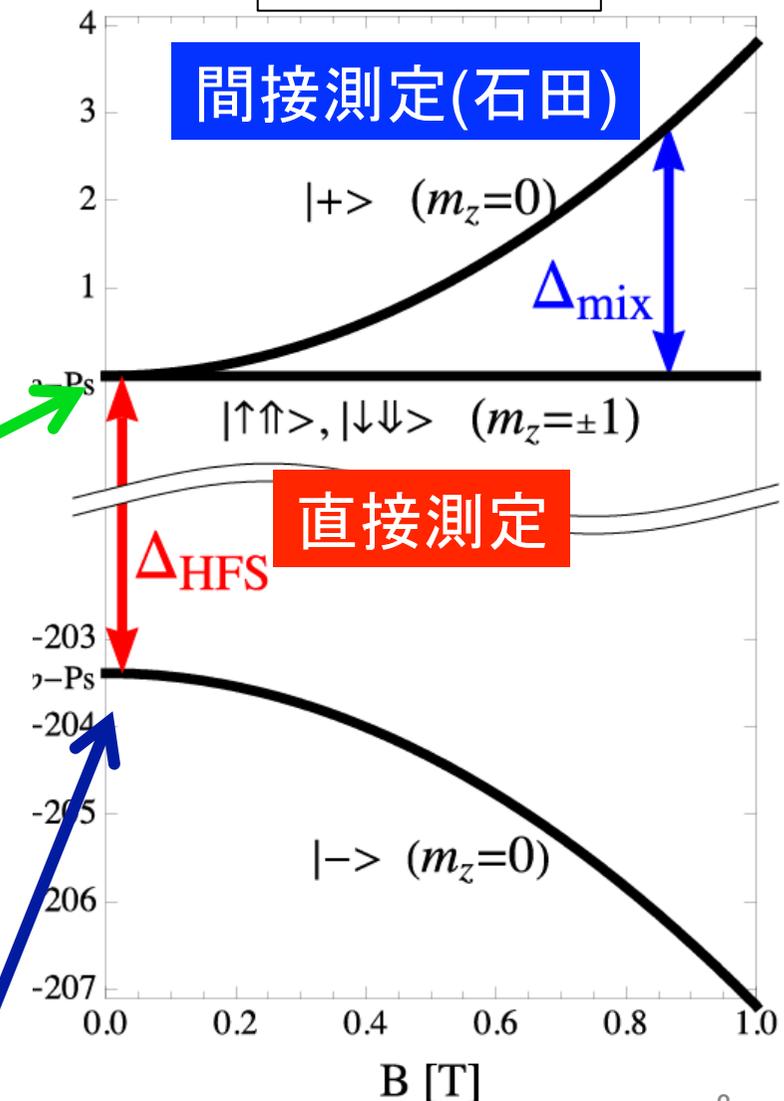
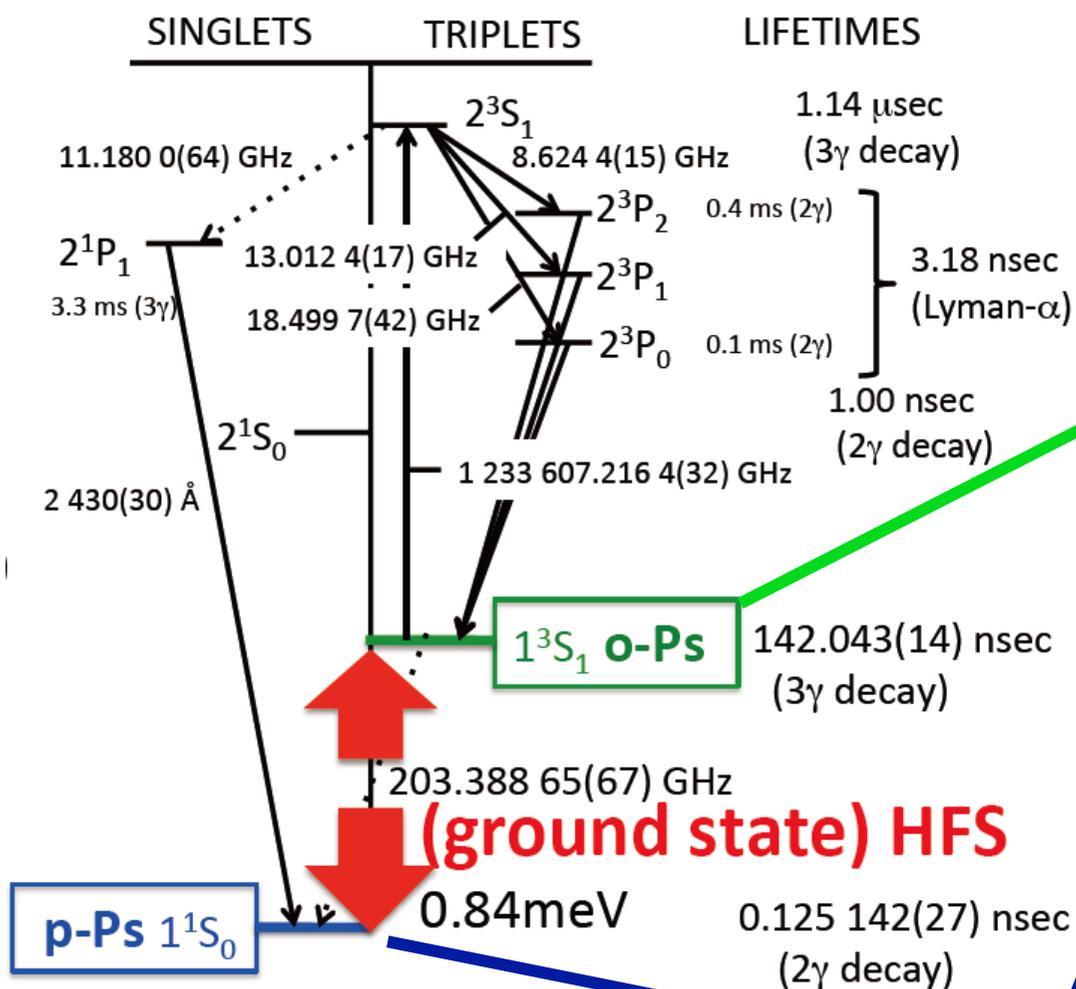
直接遷移の初観測及び超微細構造の測定へ向けて

宮崎彬, 山崎高幸, 末原大幹^A, 難波俊雄^A, 浅井祥仁,
小林富雄^A, 斎藤晴雄^B, 小川勇^C, 出原敏孝^C,
S.Sabchevski^D

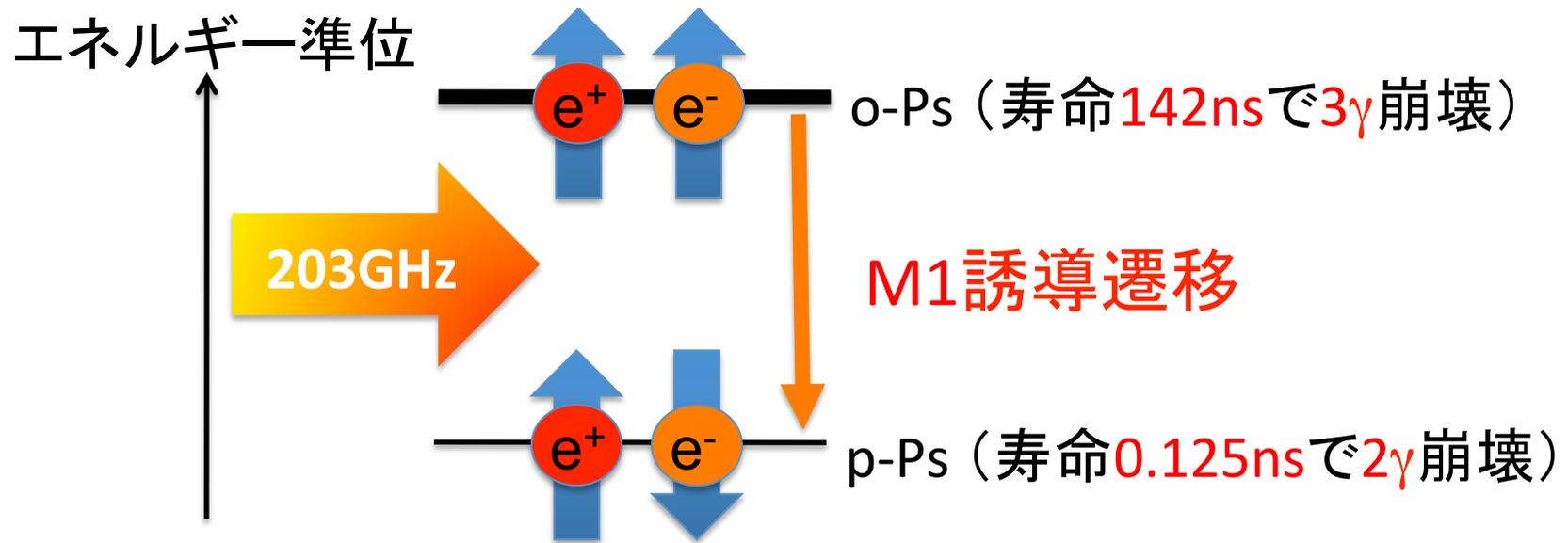
東大理, 東大素セ^A, 東大総文^B, 福井大遠赤セ^C,
ブルガリア科学アカデミー^D

ポジトロニウム超微細構造(Ps-HFS)とその測定方法

Zeeman分裂



Ps-HFSの直接測定



- 203GHzの光を照射し, o-Ps \rightarrow 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
- ミリ波領域における初のM1遷移測定
- o-Ps \rightarrow p-PsはM1遷移であり, かつPs-HFSの値が極めて大きい (203GHz = 0.84meV) ため遷移確率が小さい (3.37×10^{-8} /sec)
→ハイパワー(>10kW)の強度の203GHz光が必要

直接測定実験の予定

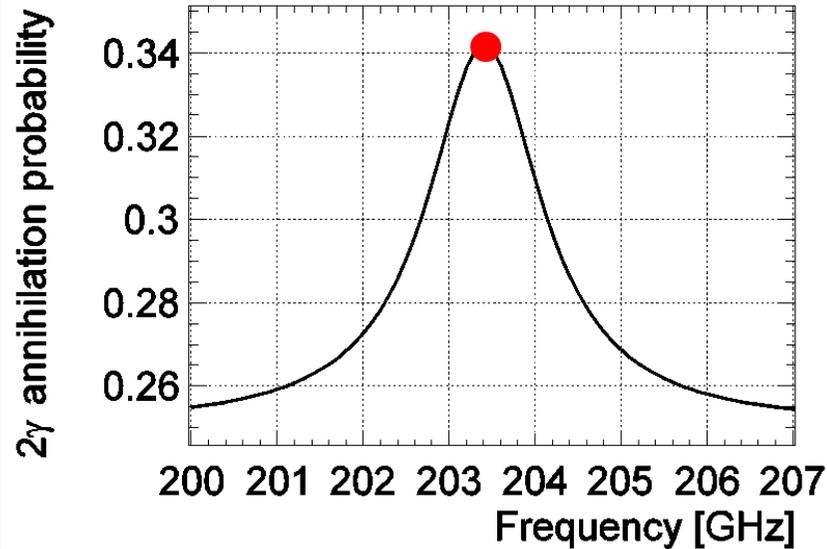
1st step

現在のジャイロトロンを使用して、sub-THz領域で初のM1遷移を観測する

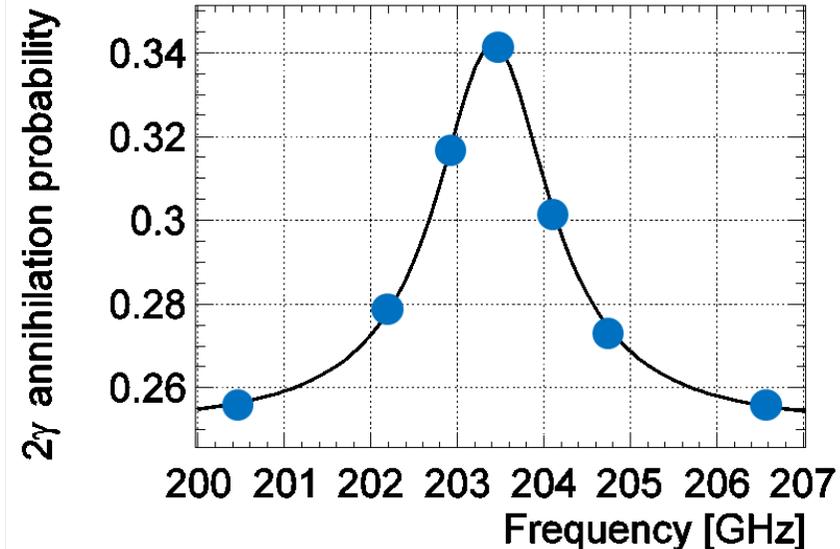
2nd step

ジャイロトロン内蔵共振器を測定毎に変更することで遷移曲線を観測し、Ps-HFSを直接測定する

10kWの光を照射したときに期待される遷移曲線



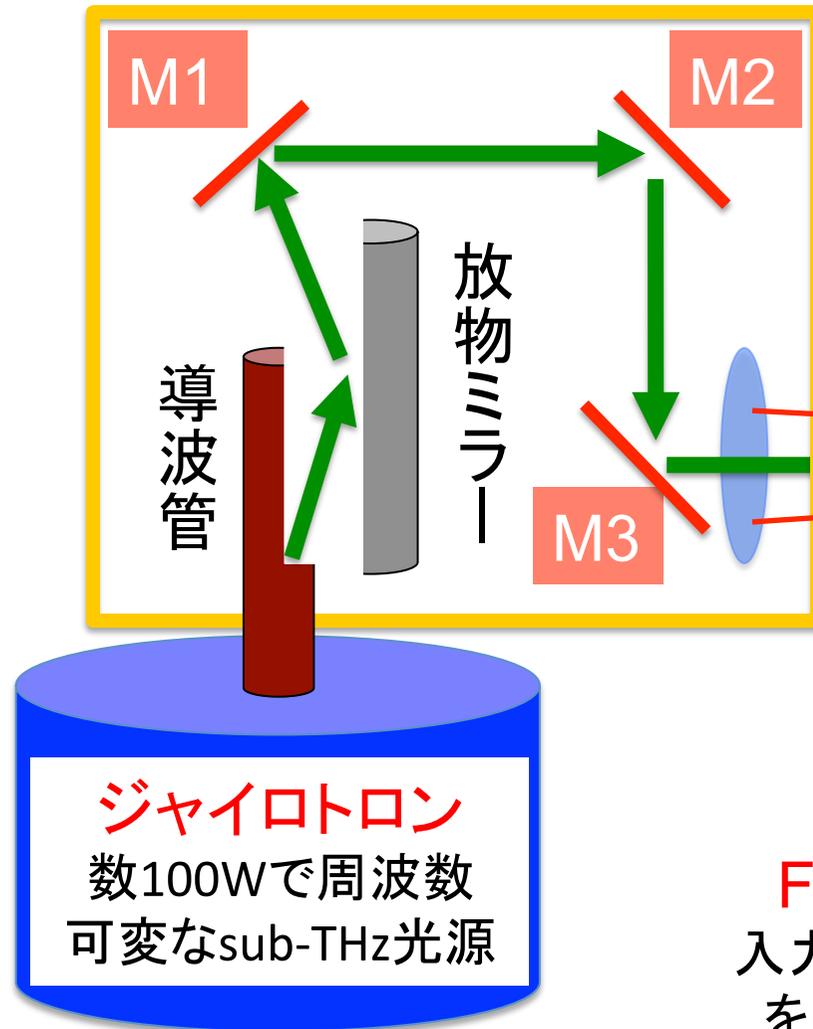
達成した



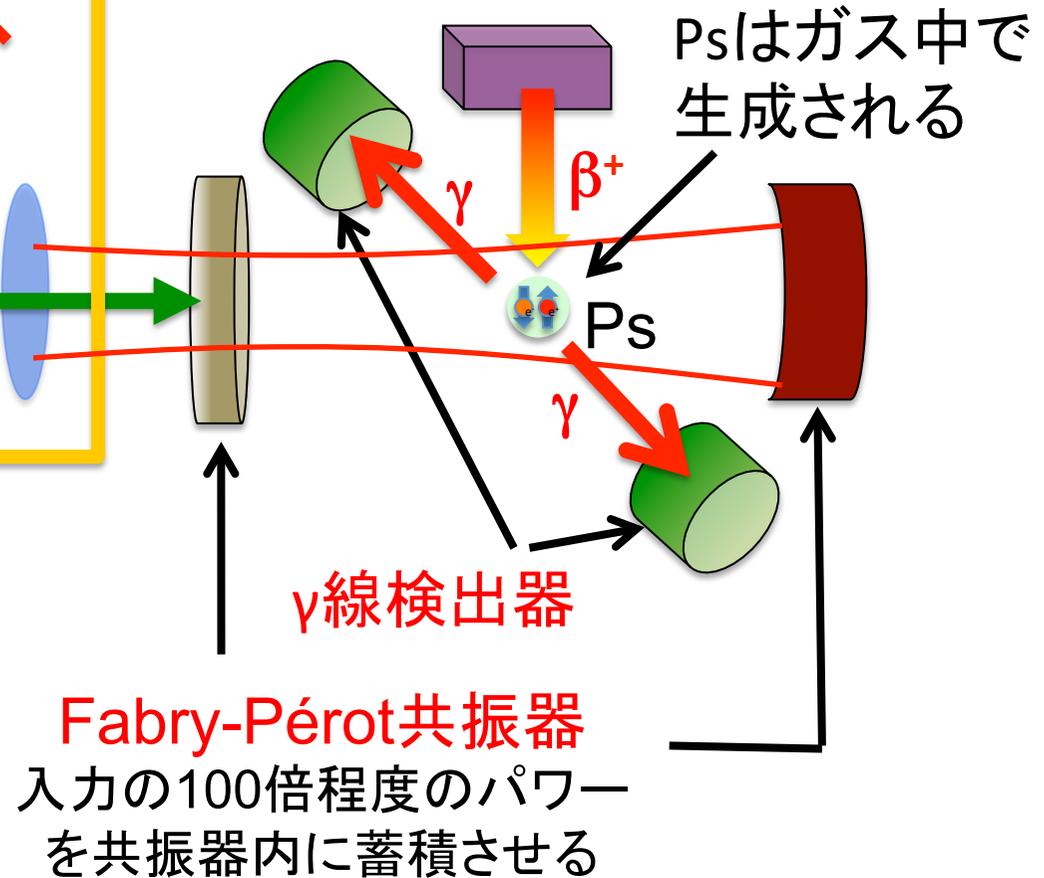
現在準備中

我々の実験セットアップ

モードコンバータ

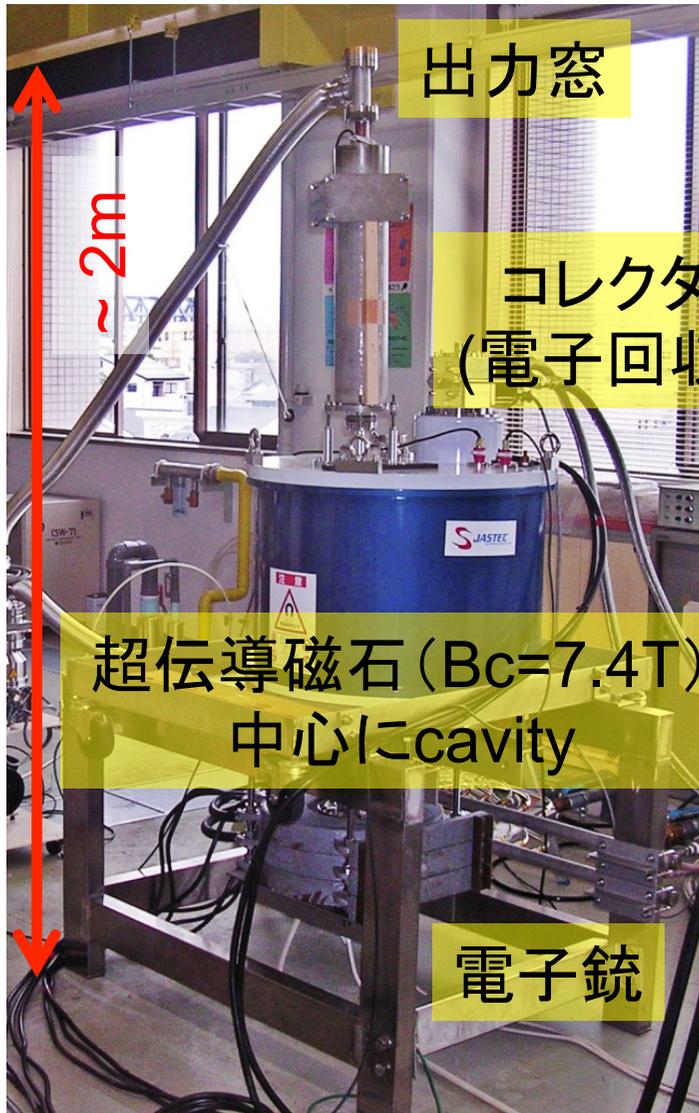


^{22}Na β^+ 線源 & β^+ 検出器



ジャイロトロン

@ 福井大学



高磁場下での電子のサイクロトロン運動で開放型空洞共振器を発振させ導波管より電磁波を取り出す

$$\omega_c = \frac{eB_c}{m_e\gamma} \sim 203 \text{ GHz} \quad : \text{電子の相対論的サイクロトロン周波数}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \quad : \text{電子のLorentz factor}$$

ハイパワー(核融合用点火源)
連続発振可能

今実験のために、単色(202.9GHz)、
安定に約300W(20Hz・duty 30%)
のパルス出力ジャイロトロンを製作

モードコンバーター

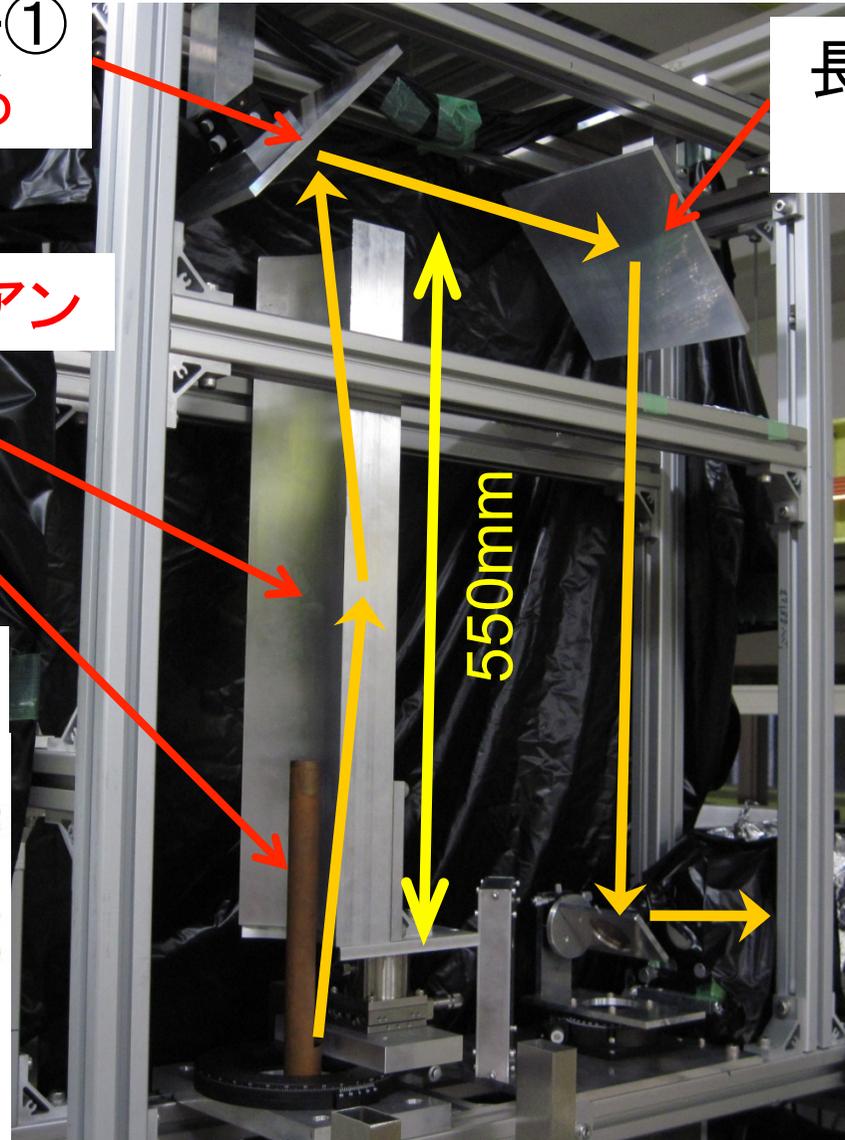
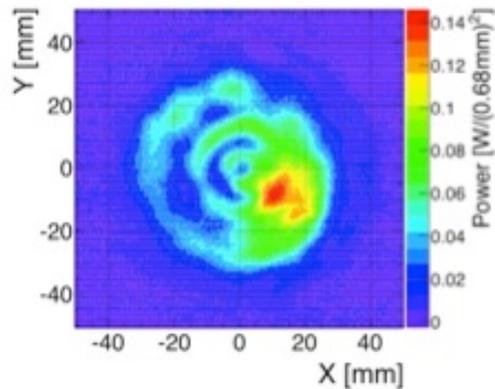
長焦点放物ミラー①
左右方向に絞る

長焦点放物ミラー②
上下方向に絞る

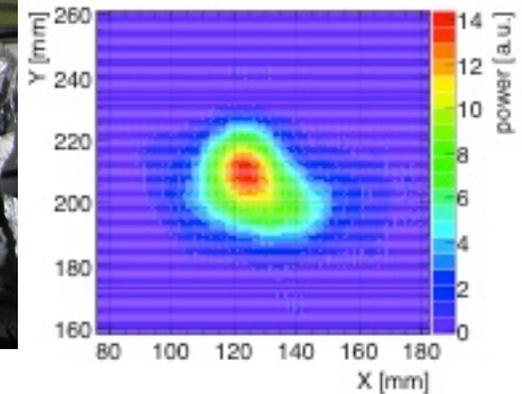
TE₀₃ → バイガウシアン

放物ミラー
ステップカット
導波管

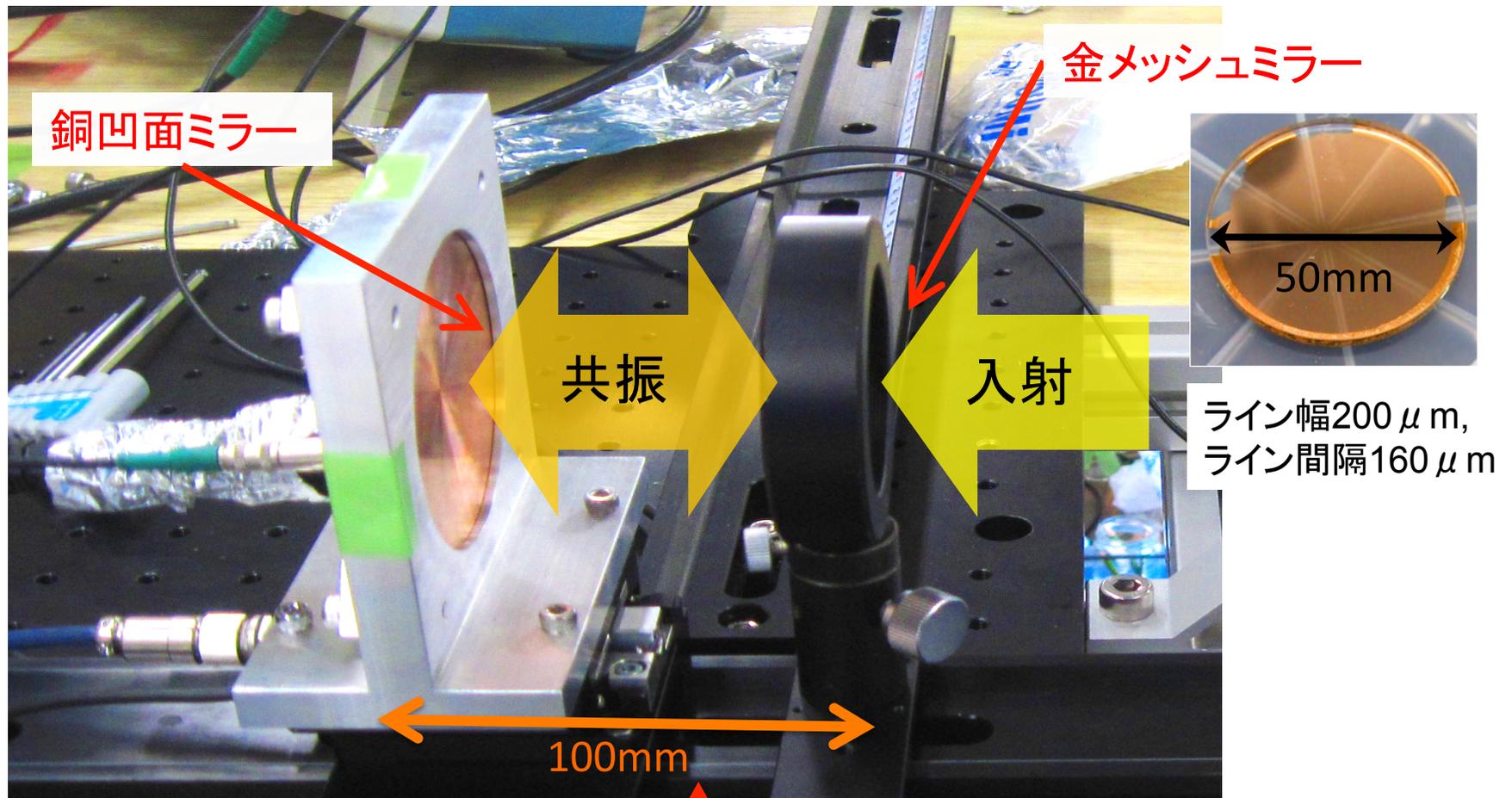
ジャイロトロン出力
TE₀₃モード



Fabry-Pérot共振器へ
ガウスビーム
(効率30%)



Fabry-Pérot共振器

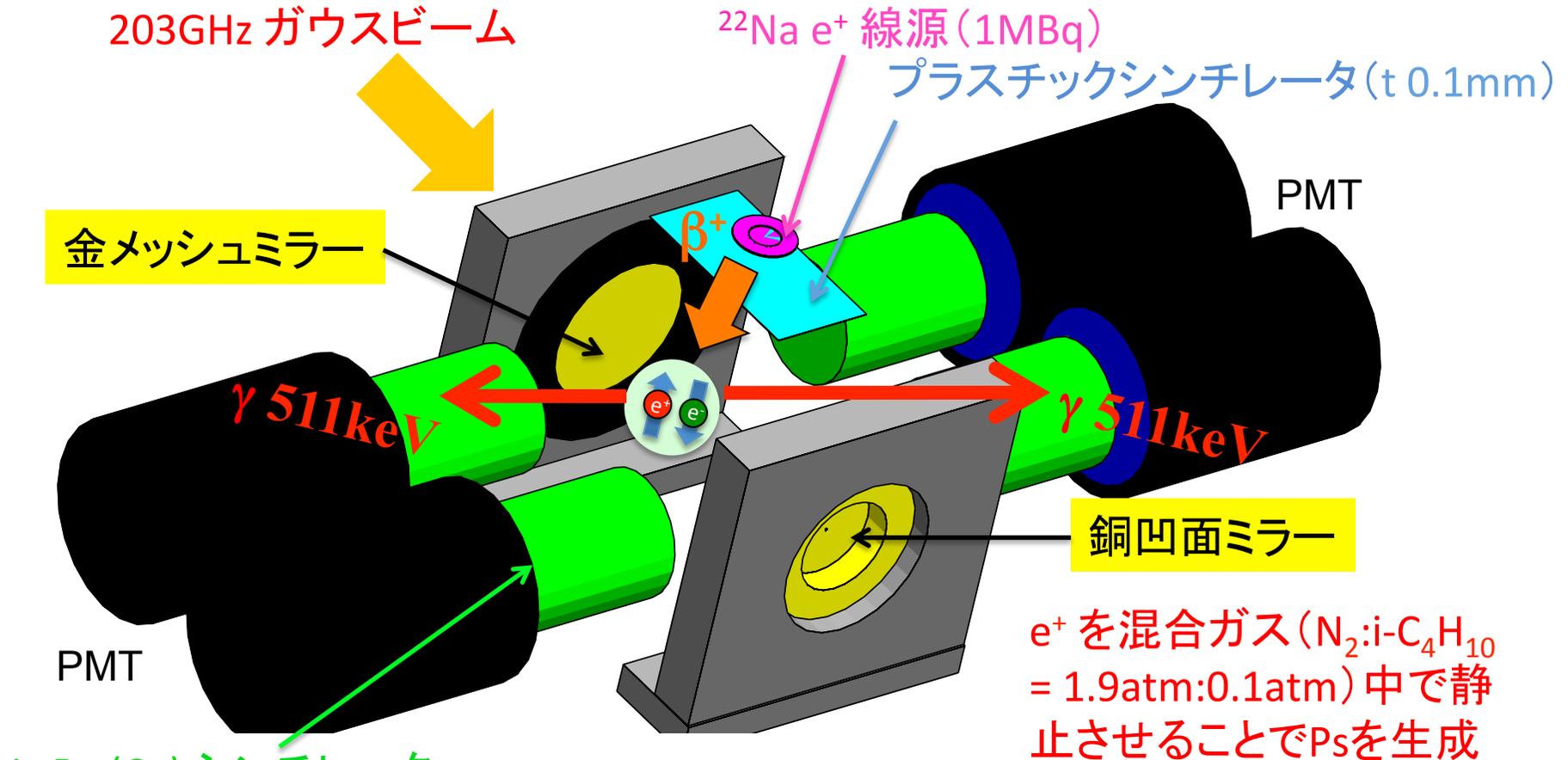


ピエゾステージを用いて共振器長を100nm精度で制御
(共振器長が $\lambda/2 = 735\mu\text{m}$ の整数倍のとき共振)

ジャイロトロン出力300W x mode converter効率 30% x Fabry-Pérot cavity蓄積増倍率140 = 10 kW を達成

Ps生成部・ γ 線検出器

シグナル = Delayed 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
- 時間分解能 FWHM 200ps @ 511keV

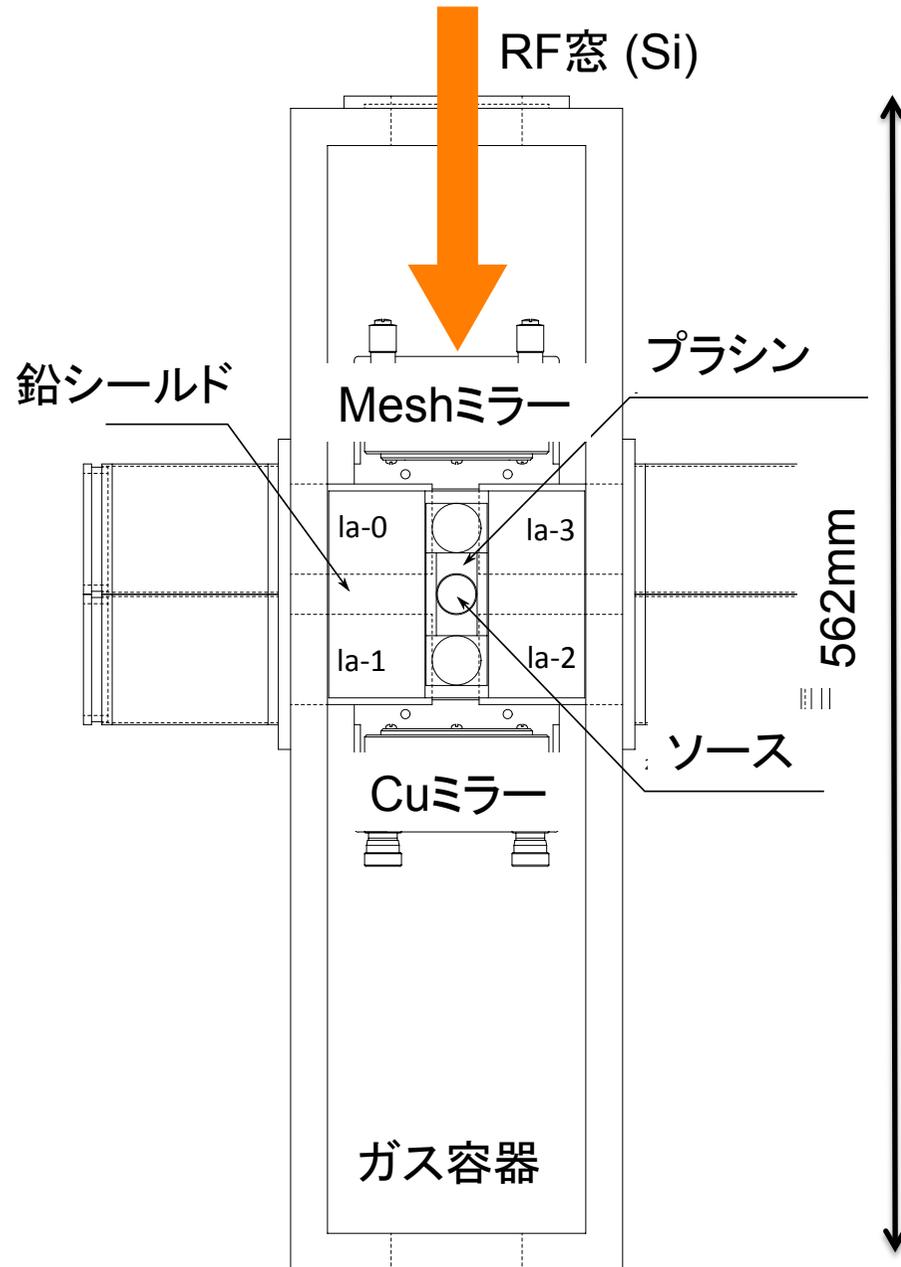
Trigger rate = 1kHz

Real time = 4.3 days

Live time (Beam ON) = 19hours

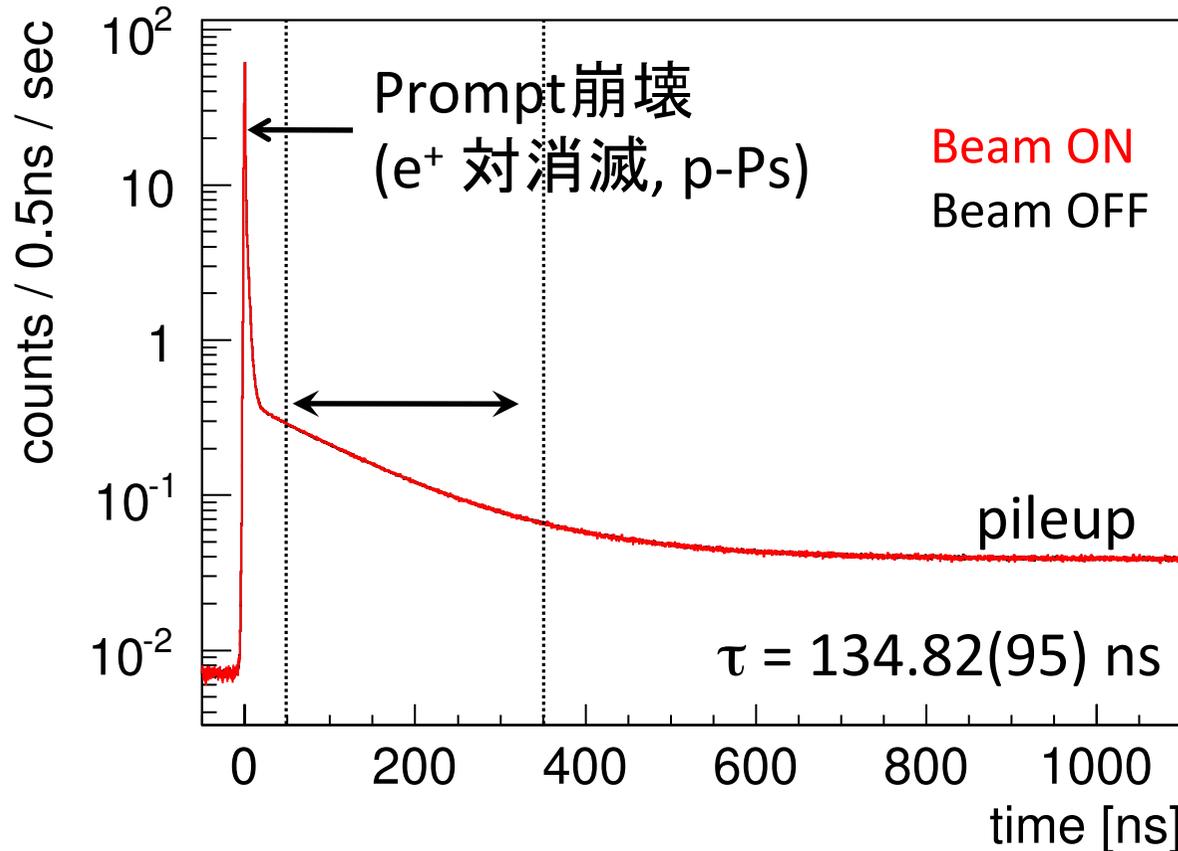
ガスChamber

ガウシアンビーム



Delayed Coincidence

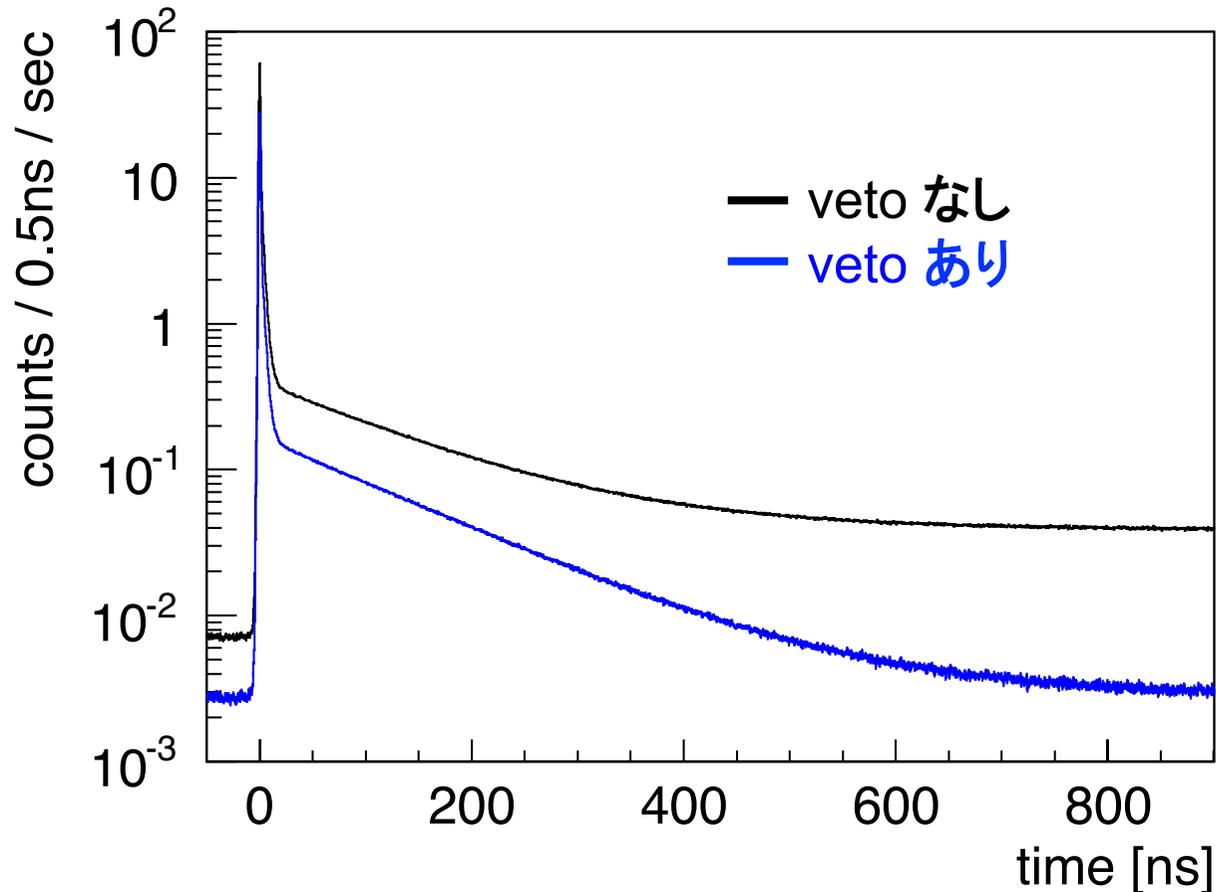
- プラシンで e^+ をタグしたタイミングと γ 線検出のタイミングの差からPsの寿命曲線が得られる



- Delayed coincidenceにより長寿命のイベント(遷移, o-Ps崩壊)を選び, S/Nを向上. この領域での511keVの量のON/OFF差が遷移シグナル

Pileup Rejection

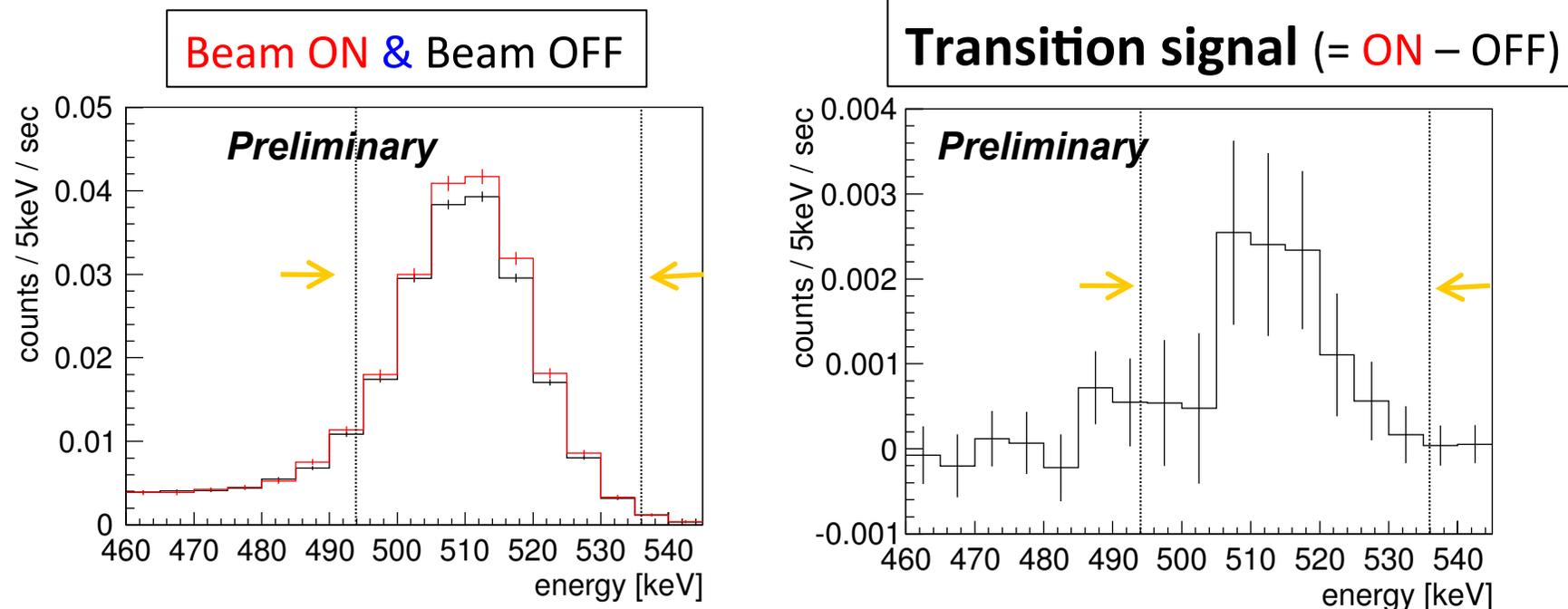
- プラシンのPileupを抑制するため, プラシンへのenergy depositを short-gate (50ns), long-gate (1000ns) で測り, 差が大きいイベントはvetoする (pileupイベントではlong-gateのほうが大きくなる)



直接遷移実験の結果

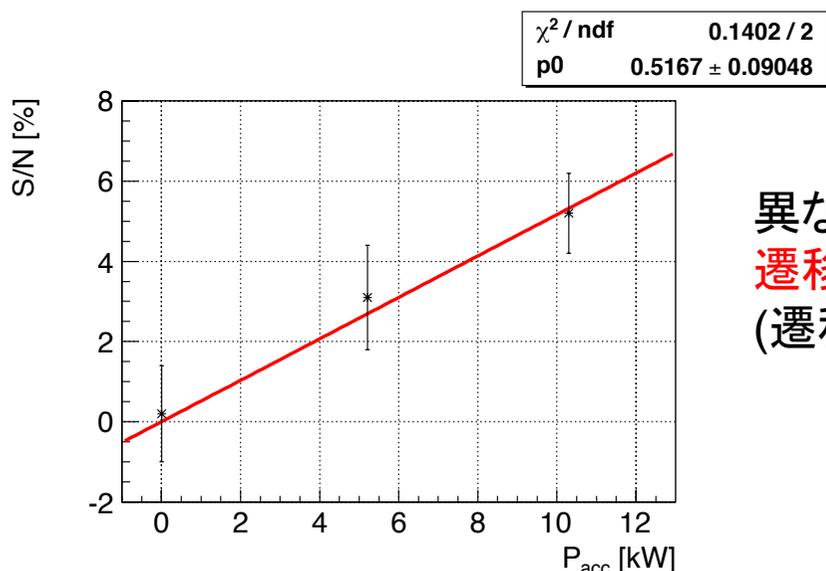
- 最終カットとしてback-to-back 511keVを要求する。下図は**反対側のγ線検出器に494keV～536keVのenergy deposit**を要求したときのenergy spectrum
- ジャイロトロン出力はパルスビーム (duty 30%) なのでbeam OFF イベントからバックグラウンドを見積もる

※ rejection後に残った pileup は $t = 850 \sim 900\text{ns}$ でのenergy spectrum を使ってさっぴいてある



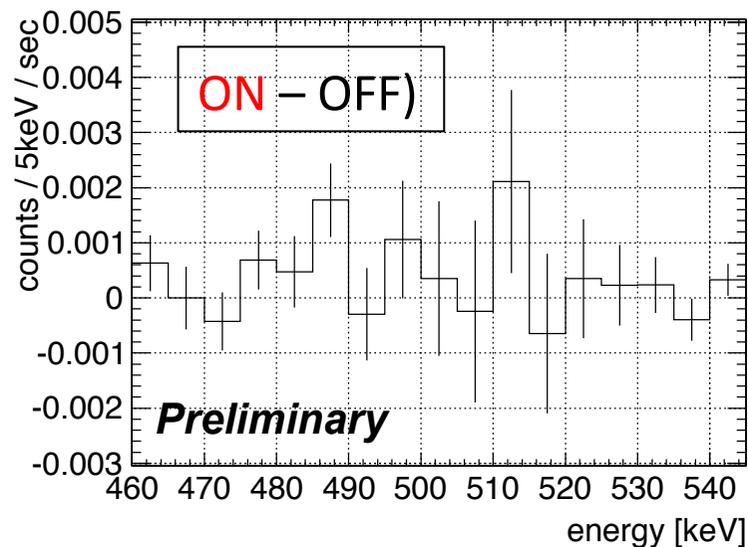
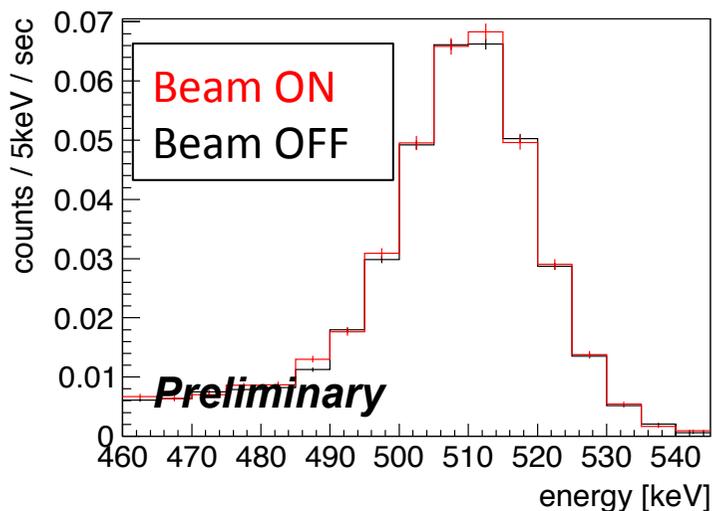
- Signal = $\text{ON} - \text{OFF} = 15.1 \pm 2.7(\text{stat.}) \pm_{-0.8}^{+0.5}(\text{sys.}) \text{ mHz}$ (5.4σ)
- 理論的予測とコンシステント

遷移確率とパワー&周波数

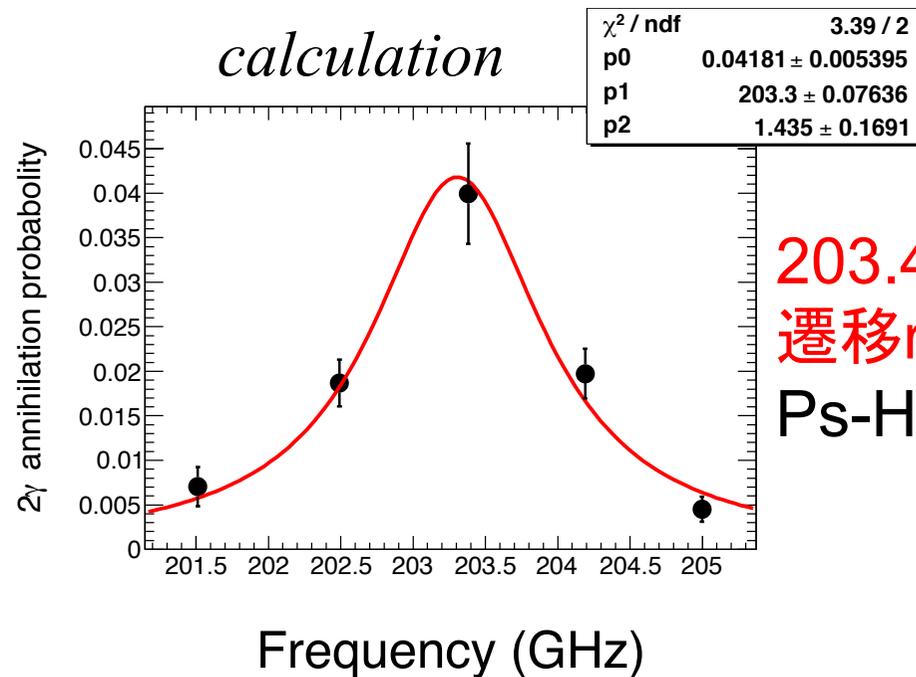


異なるパワーの203GHz光で実験を行い(0kW, 5kW)
 遷移量(S/N)がパワーに比例することを確かめた
 (遷移量=遷移確率(誘導遷移確率) x パワー)

別周波数(140 GHz, 3.3kW)で遷移量はゼロコンシステント 3.3 ± 3.6 (stat.) mHz



超微細構造測定へ向けた新しい光学系



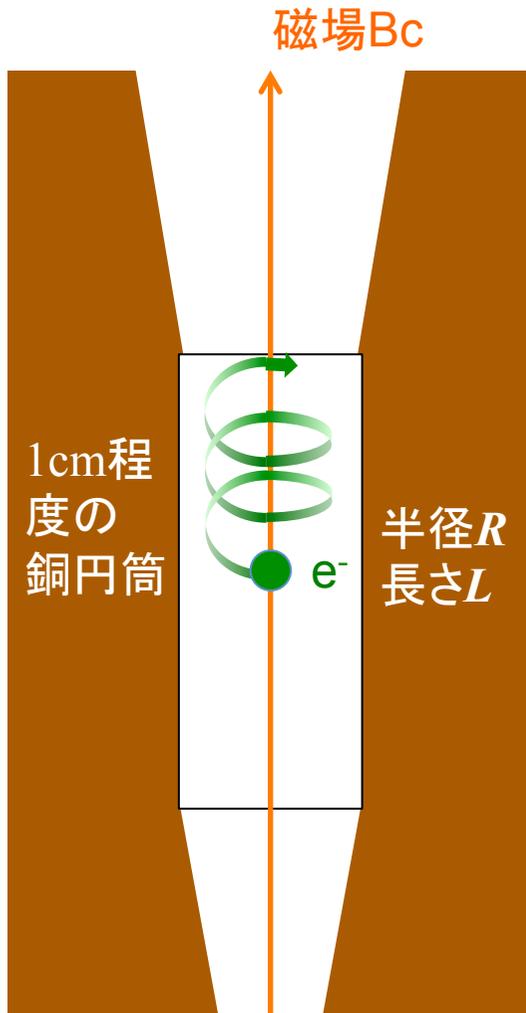
203.4 GHzの周り複数点で、
遷移rateを測定する必要がある。
Ps-HFSは共鳴曲線の中央周波数

開発が必要な項目:

1. 周波数の異なる複数のジャイロトロン
 2. Fabry-Pérot cavityに代わる新しいcavity
- 来春をめどに開発中

新しいジャイロトロン

ジャイロトロンcavity断面図

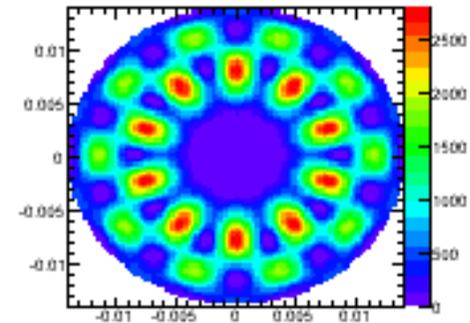


Cavity周波数

$$\omega = c \sqrt{\left(\frac{10.52}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2}$$

(c は光速)

TE₅₂ mode

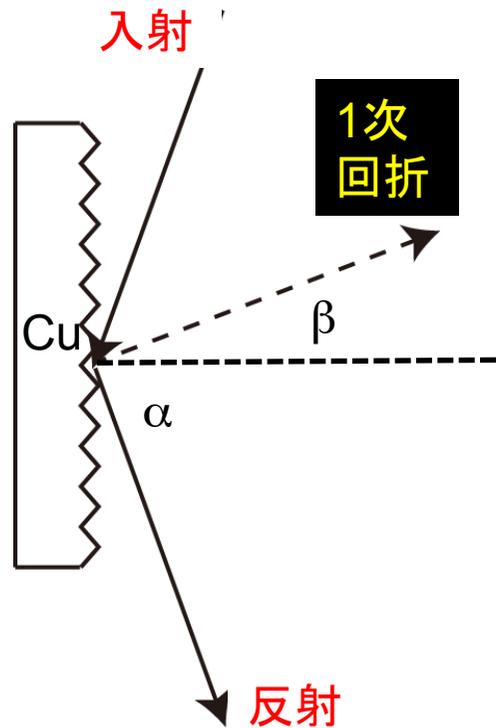


- ・Cavity半径 $R \sim 2.5\text{mm}$ の異なる複数のcavityを製作中
→203.4 GHzの周り複数点で測定
- ・さらにモードコンバータをジャイロトロンに内蔵する
→ガウシアンビーム変換効率up
(ガウシアン成分500Wを目指す)

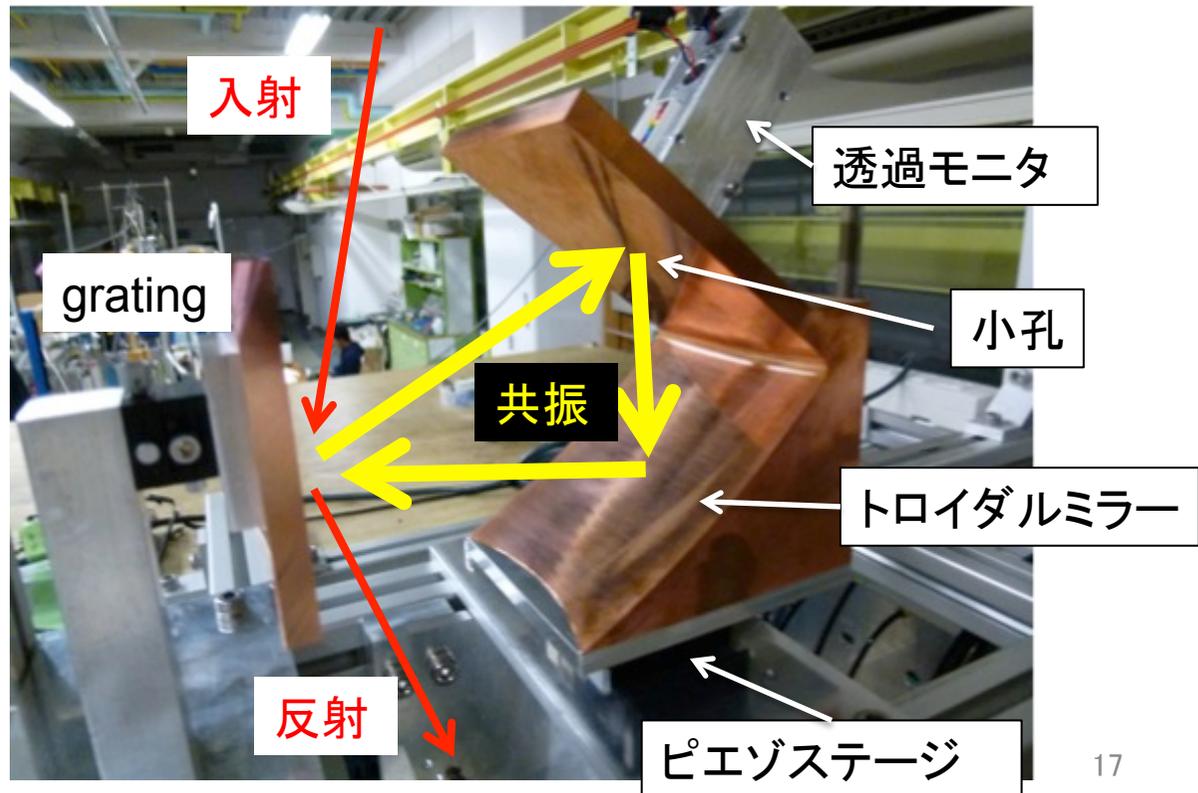
Fabry-Pérot cavityに代わる新しいcavity

Fabry-Pérot cavityのMeshミラーは冷却できない

→ 10kW以上のパワーだと溶けてしまい, 実験に大きな支障をきたす



Grating(回折格子)を用いたring-cavityを新たに開発中
→ 共振には成功し, 現在最適化中



$$d(\sin\alpha \pm \sin\beta) = m\lambda$$

d は格子間隔
 m は整数(負も含む)

まとめ

- サブテラヘルツ波を用いてPs-HFSの値を直接測定する
- 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
- ジャイロトロン(光源:約300W・202.9GHz)、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最大10kW程度のパワーを共振器内に蓄積させることに成功
- 1st stepとしてPs-HFS直接遷移測定実験を行い, Ps-HFS直接遷移と思われる信号を5 σ レベルで観測した. 得られた遷移量は理論計算とコンシステント
- 誘導遷移の量がパワーに比例することを確認し, 異なる周波数(140GHz)では遷移が無いことも確認した
- 今後はPs-HFS直接測定に必要な新しい光学系の開発を進める