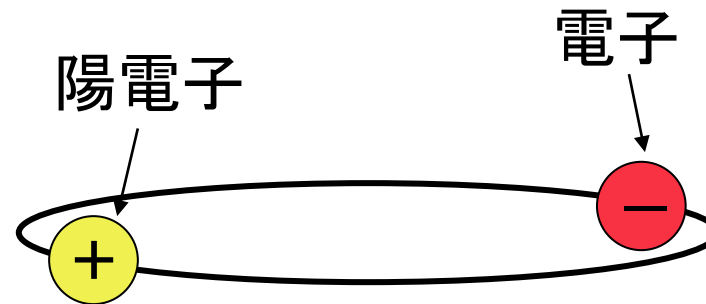


サブテラヘルツ波を用いたポジトロ ニウム超微細構造の直接測定

山崎高幸, 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, 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 (Ps)



- 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

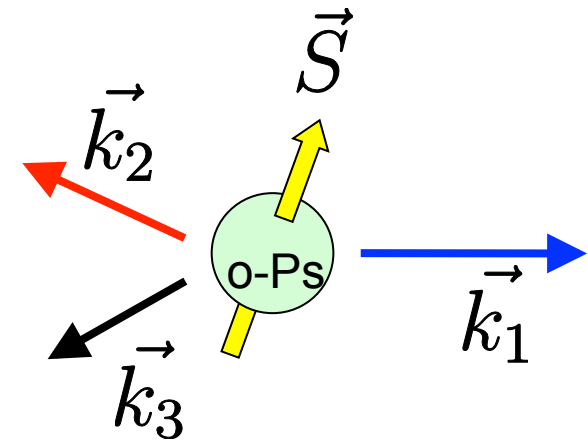
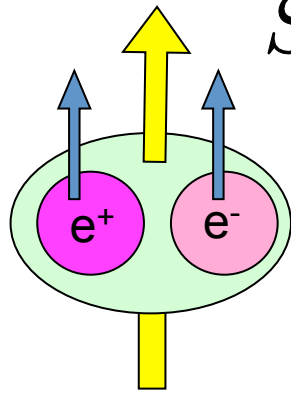
ポジトロニウム (o-Ps, p-Ps)

- 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 $\rightarrow 3\gamma$ (, 5γ , ...)

長寿命142nsec
連続的なエネルギースペクトル

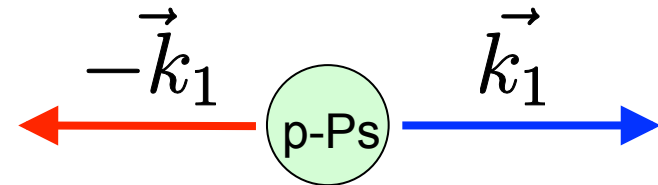
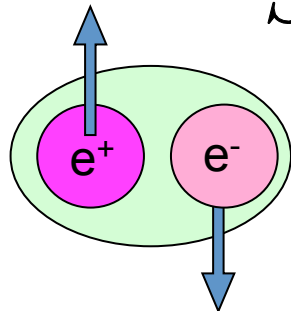


- パラポジトロニウム (p-Ps)

$S = 0$ スピン1重項

スカラー粒子
p-Ps $\rightarrow 2\gamma$ (, 4γ , ...)

短寿命0.125nsec
511keVの γ 線2本をback-to-backに放出

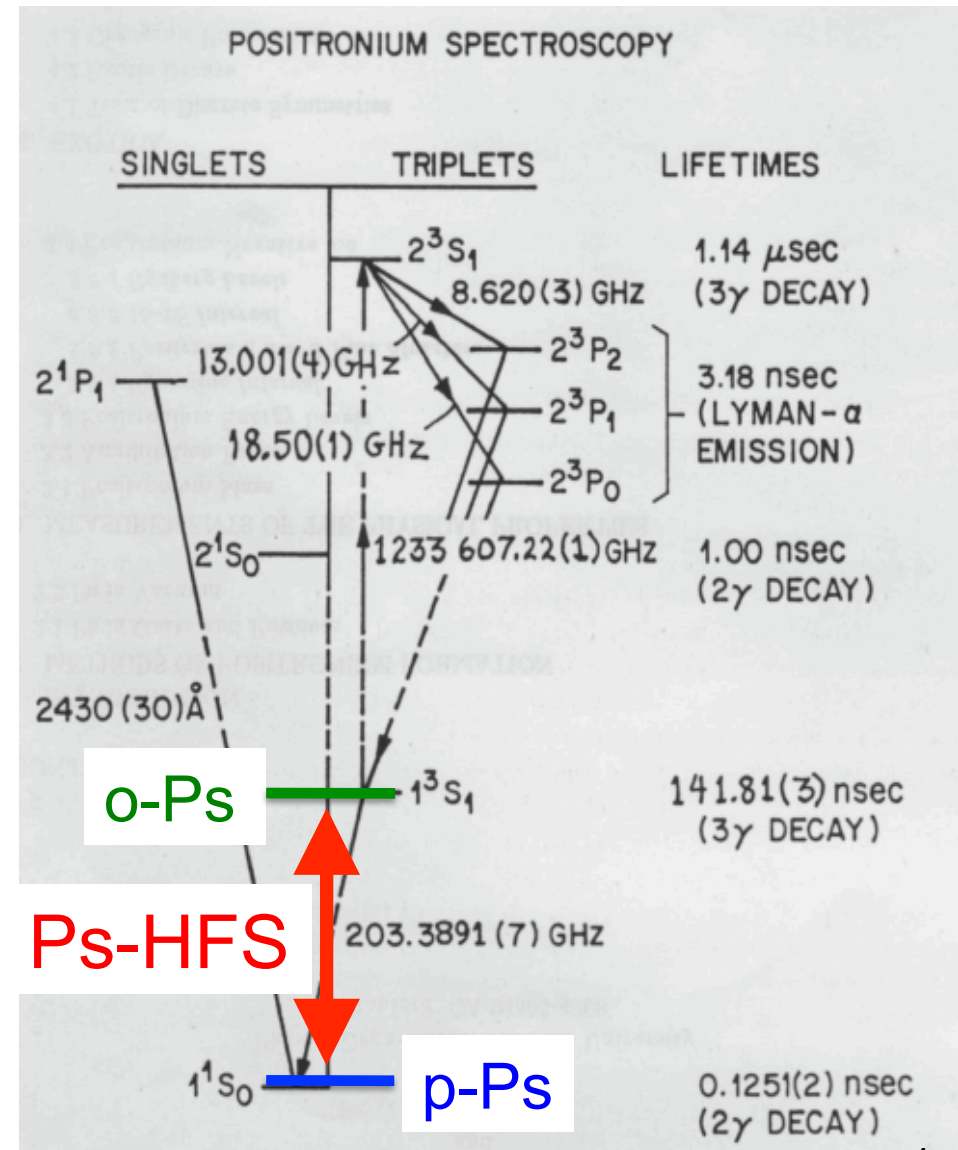
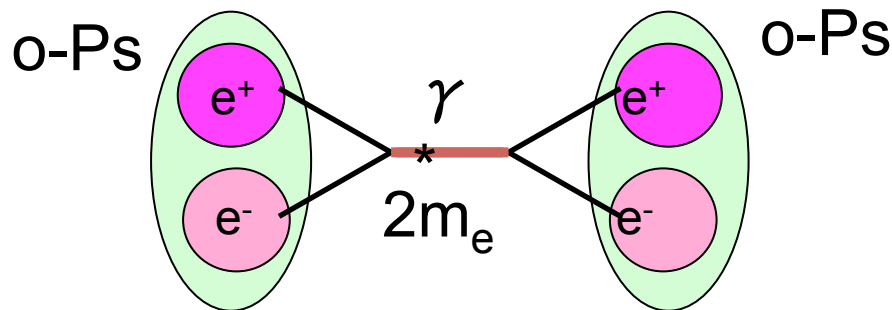


ポジトロニウム超微細構造 (Ps-HFS)

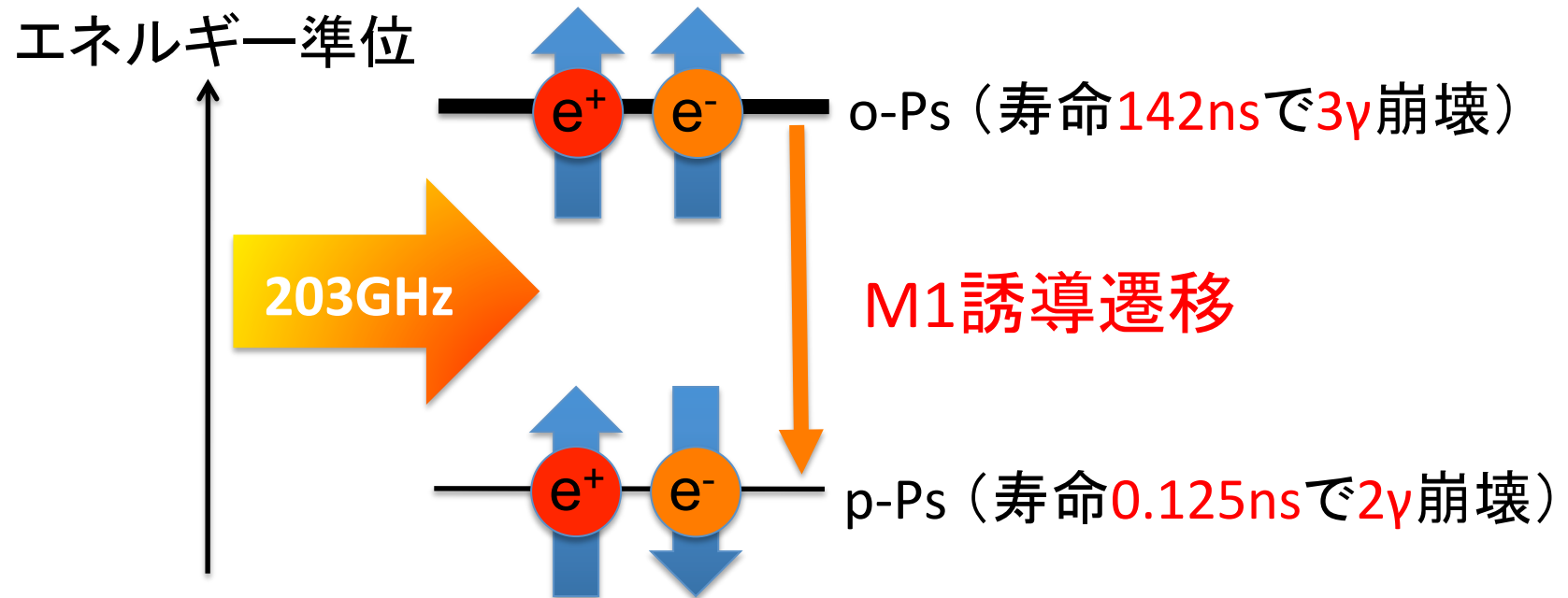
- スピン・スピン相互作用によって生じる、基底状態のp-Psとo-Psのエネルギー準位差
203GHz = 0.84meV (c.f. 水素原子では1.4GHz)

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

- 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



Ps-HFSの直接測定

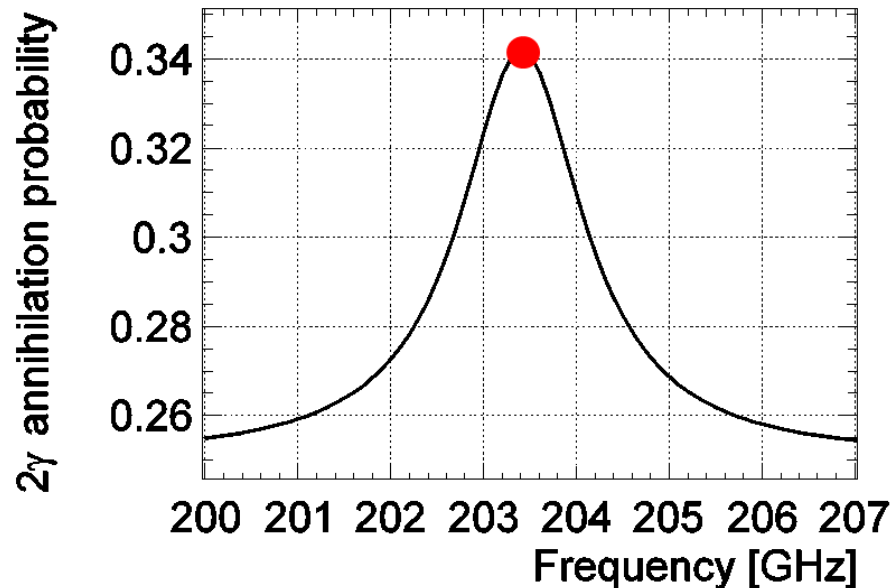


- 203GHzの光を照射し、o-Ps $\rightarrow$ p-Psに誘導遷移させる。静磁場を用いず直接測定するのは世界初
- 長寿命な2 γ 崩壊(単色511keV $\cdot$ back-to-back)がシグナルとなる
- 遷移確率が極めて低く、遷移曲線の測定には10kW程度で200 $\sim$ 207GHz程度の範囲にわたって周波数可変な光が必要

直接測定実験の予定

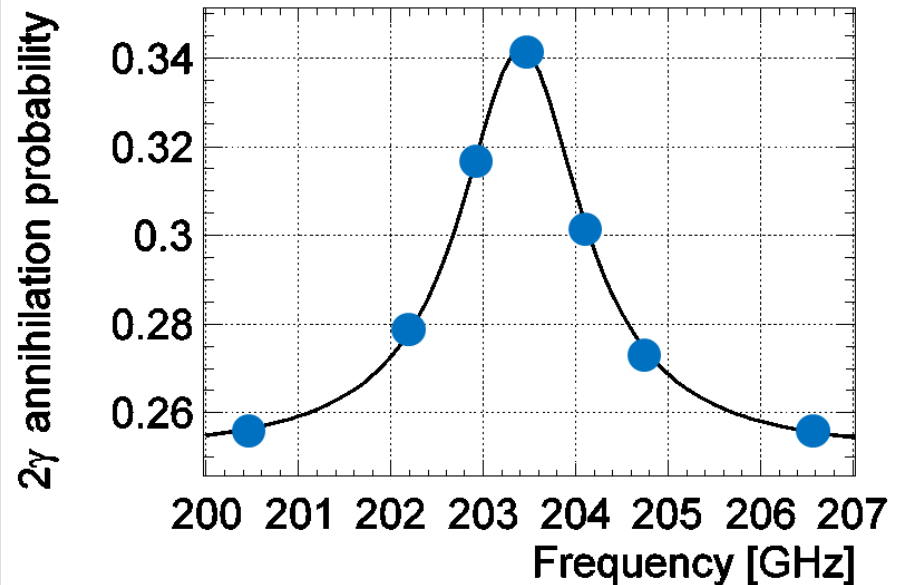
1st step : 遷移測定

On-poleでM1遷移を観測する
(世界初のPs-HFS直接遷移
の観測)



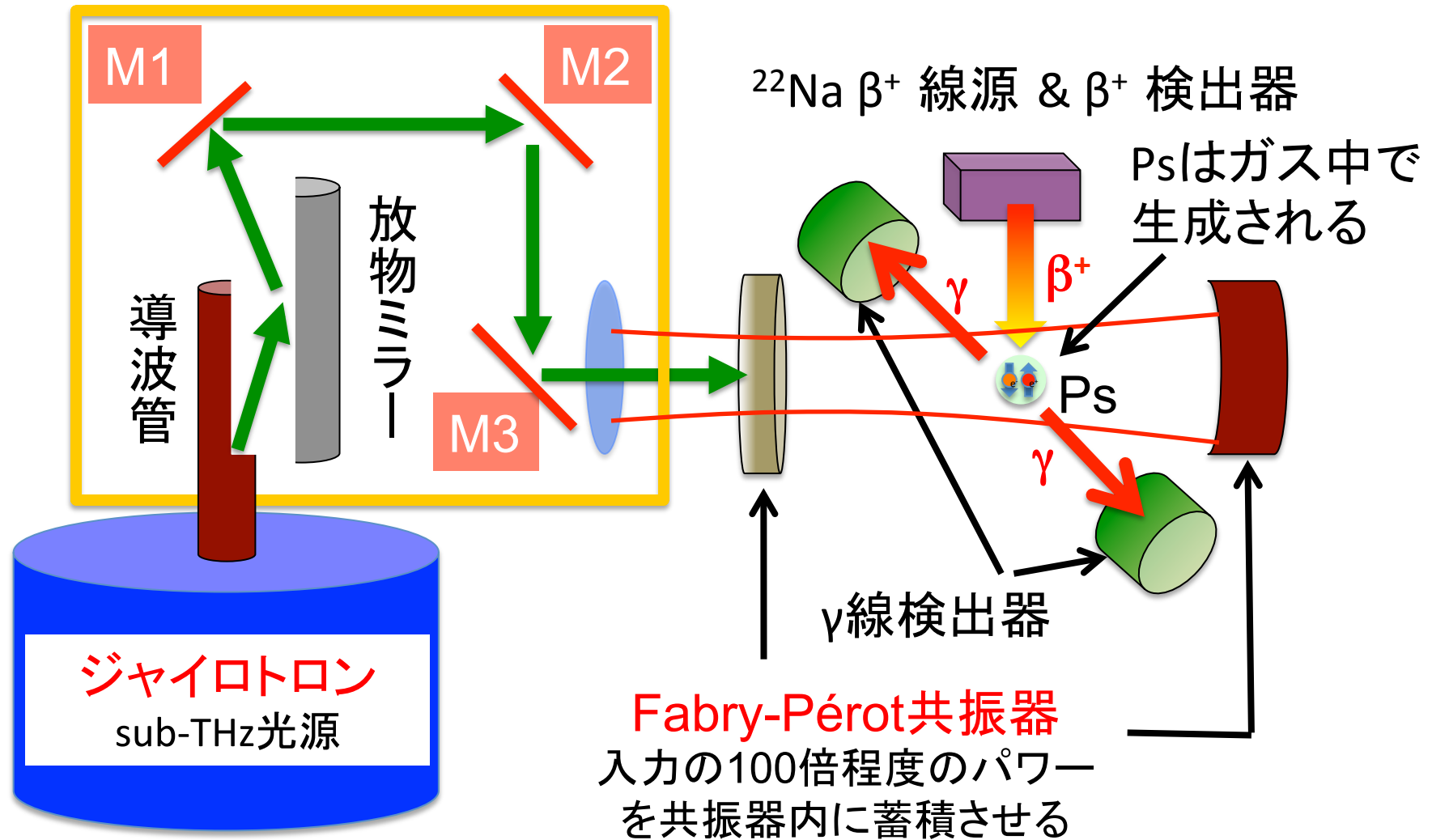
2nd step : HFS測定

遷移曲線を観測し、Ps-HFSを
直接測定する(世界初のPs-
HFSの直接測定)



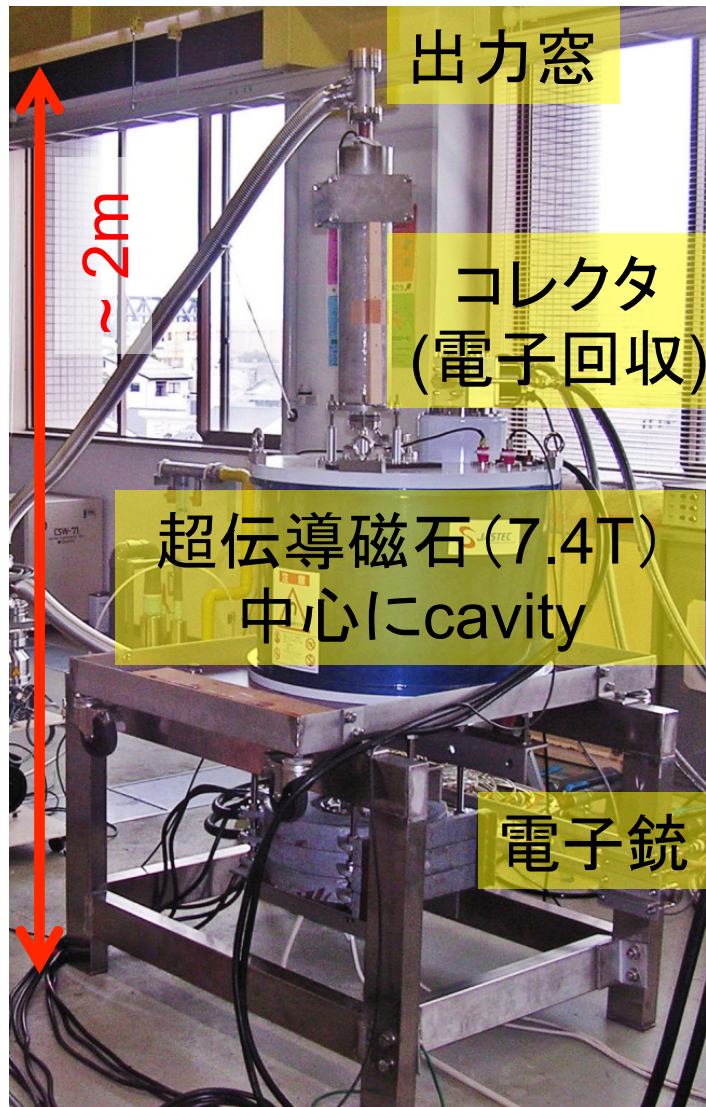
直接測定実験のセットアップ

モードコンバータ



ジャイロトロン

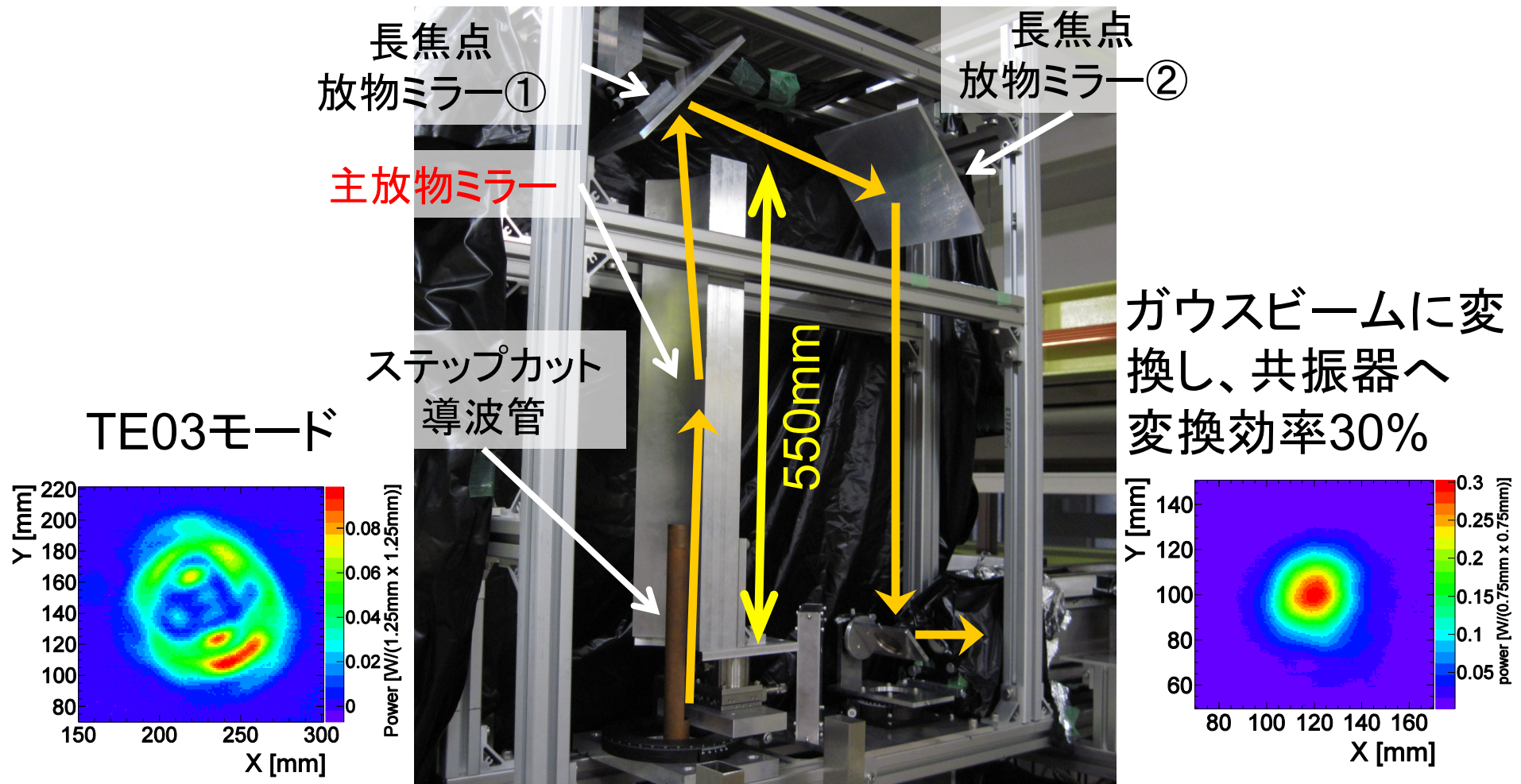
@ 福井大学



- 高磁場下での電子のサイクロトロン振動で空洞共振器を発振させ導波管より電磁波を取り出す
- 100 GHz – 1 THz
- ハイパワー(核融合用点火源)
- 連続発振可能
- 共振のさせかた次第で周波数連続可変にすることができる。ただしハイパワーとの両立は困難(開発中)
- 今実験のために、まずは単色(202.9GHz)、安定に約300W(20Hz・duty 30%)のパルス出力が可能なジャイロトロンを製作した

モードコンバータ

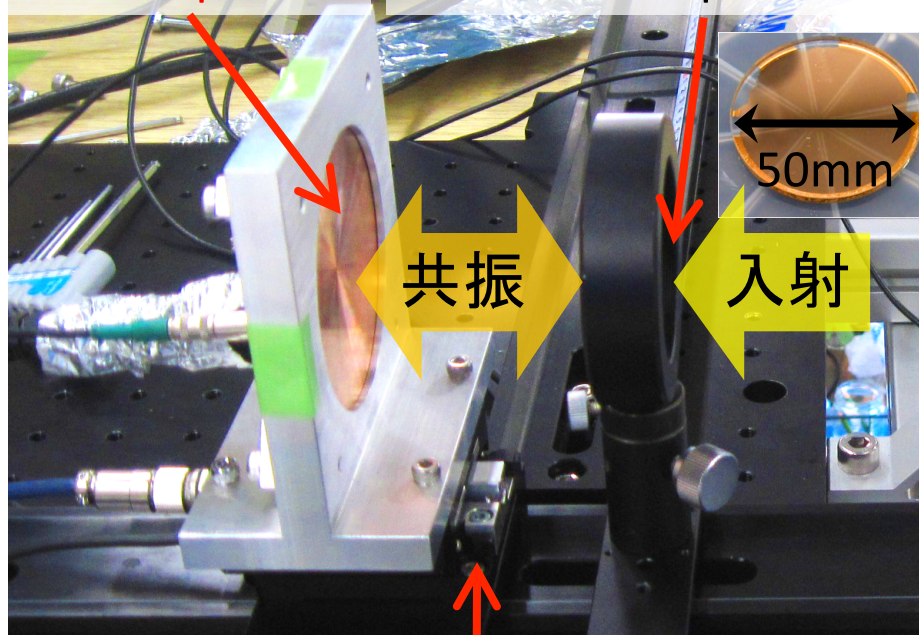
- ・ジャイロトロン出力(導波管モード、 TE_{03})をFabry-Perot共振器(内部モードはガウスビーム)と効率良くカップルさせるため、ガウスビームに変換する必要がある



Fabry-Pérot共振器

銅凹面ミラー
中央にφ0.6穴

金メッシュミラー $R = 99.3\%$, $T = 0.5\%$
(ライン幅 $200\mu\text{m}$ 、ライン間隔 $160\mu\text{m}$)

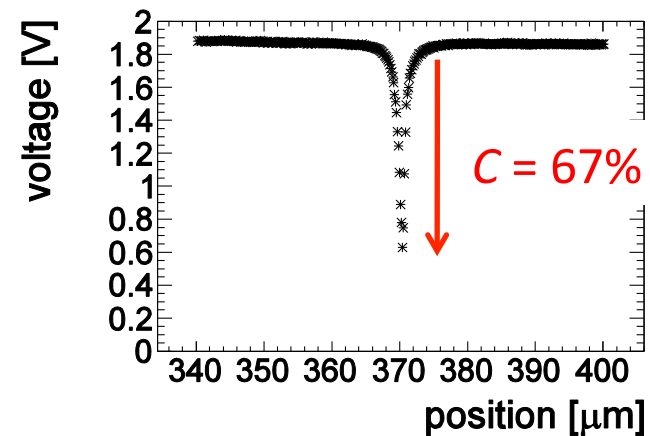


ピエゾステージを用いて共振器長を 100nm 精度で制御(共振器長が $\lambda/2 = 750\mu\text{m}$ の整数倍のとき共振)

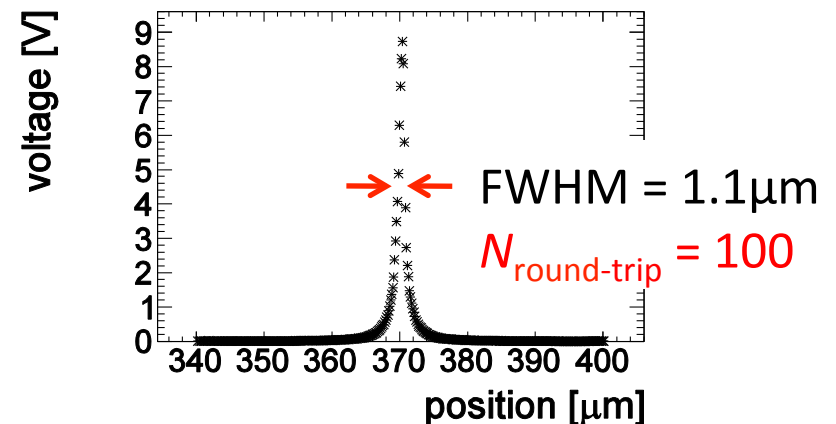
ガウスビームと共振器との結合率 C および共振器内での往復数から、ゲインが求まる

$$G = C \cdot 2N = 140$$

共振器で反射するパワー

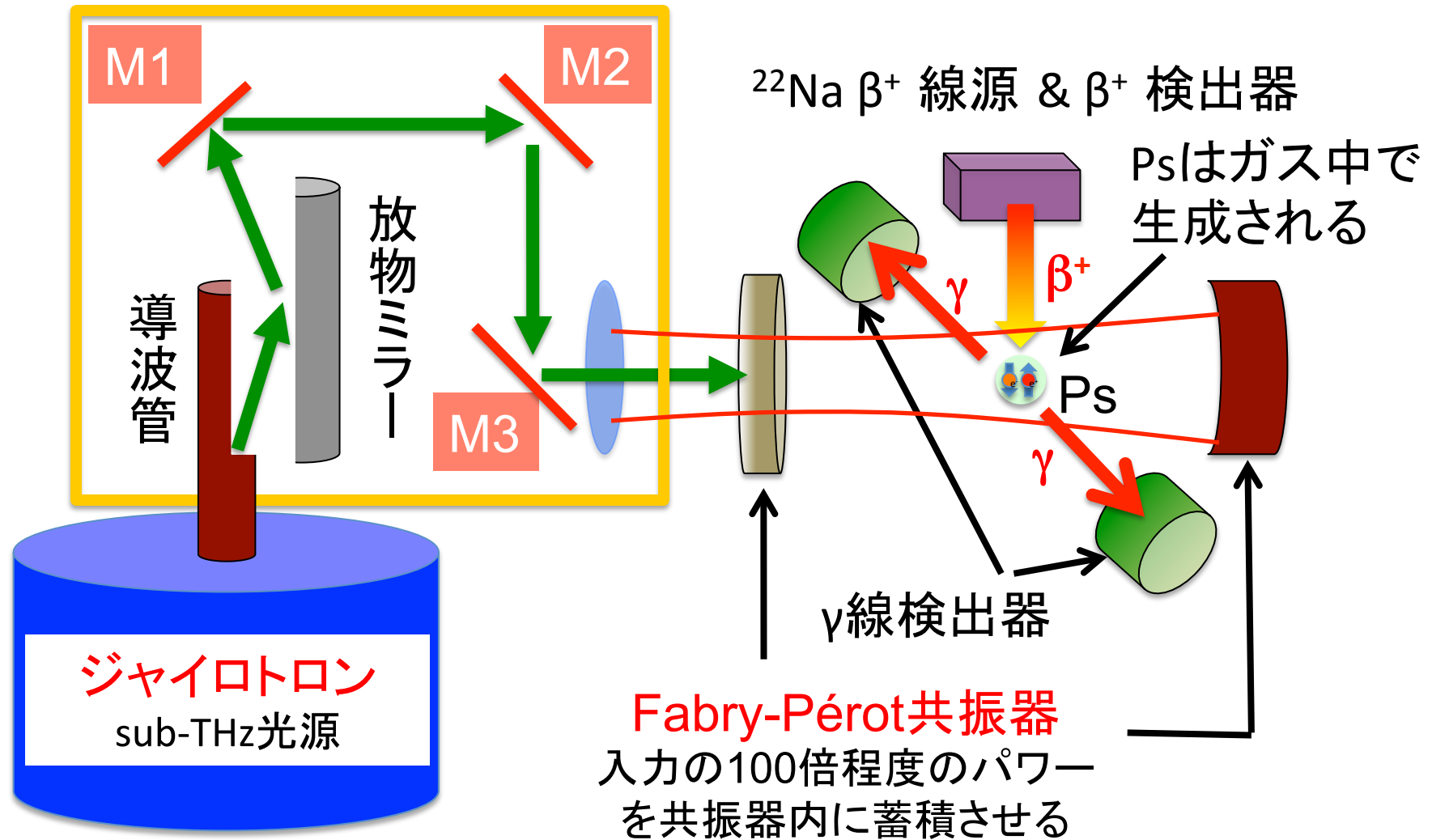


共振器を透過するパワー



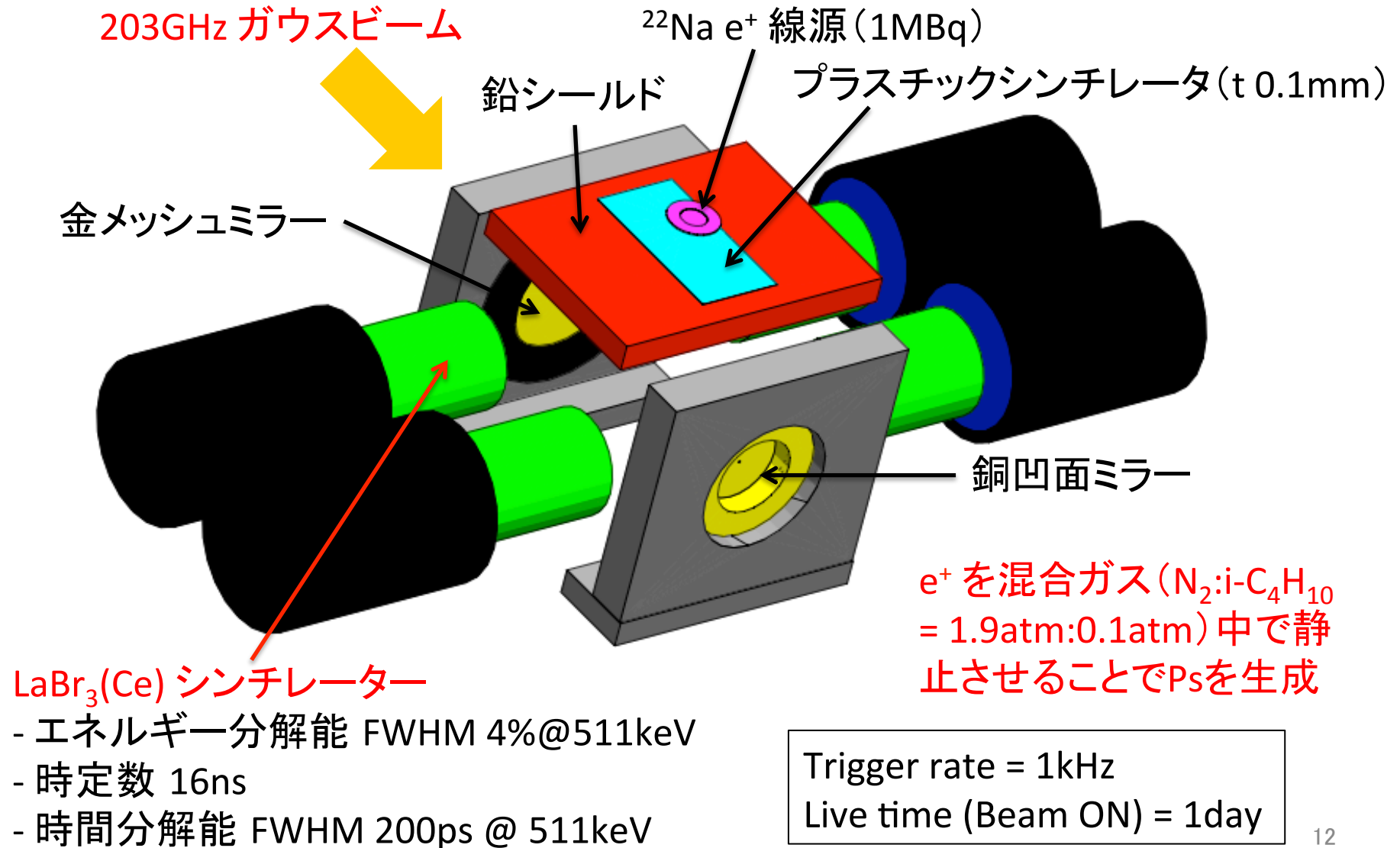
直接測定実験のセットアップ

モードコンバータ



Ps生成部・ γ 線検出器

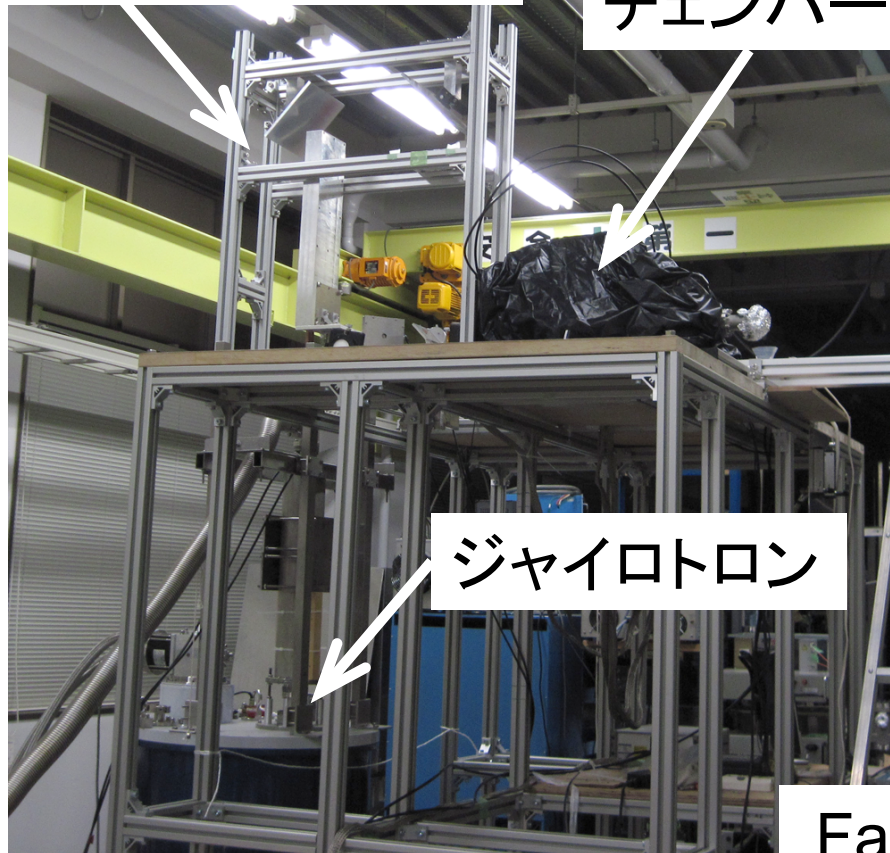
シグナル = 長寿命 ($\tau = 142\text{ns}$) な 2γ 崩壊 (単色 511keV ・back-to-back)



セットアップの写真

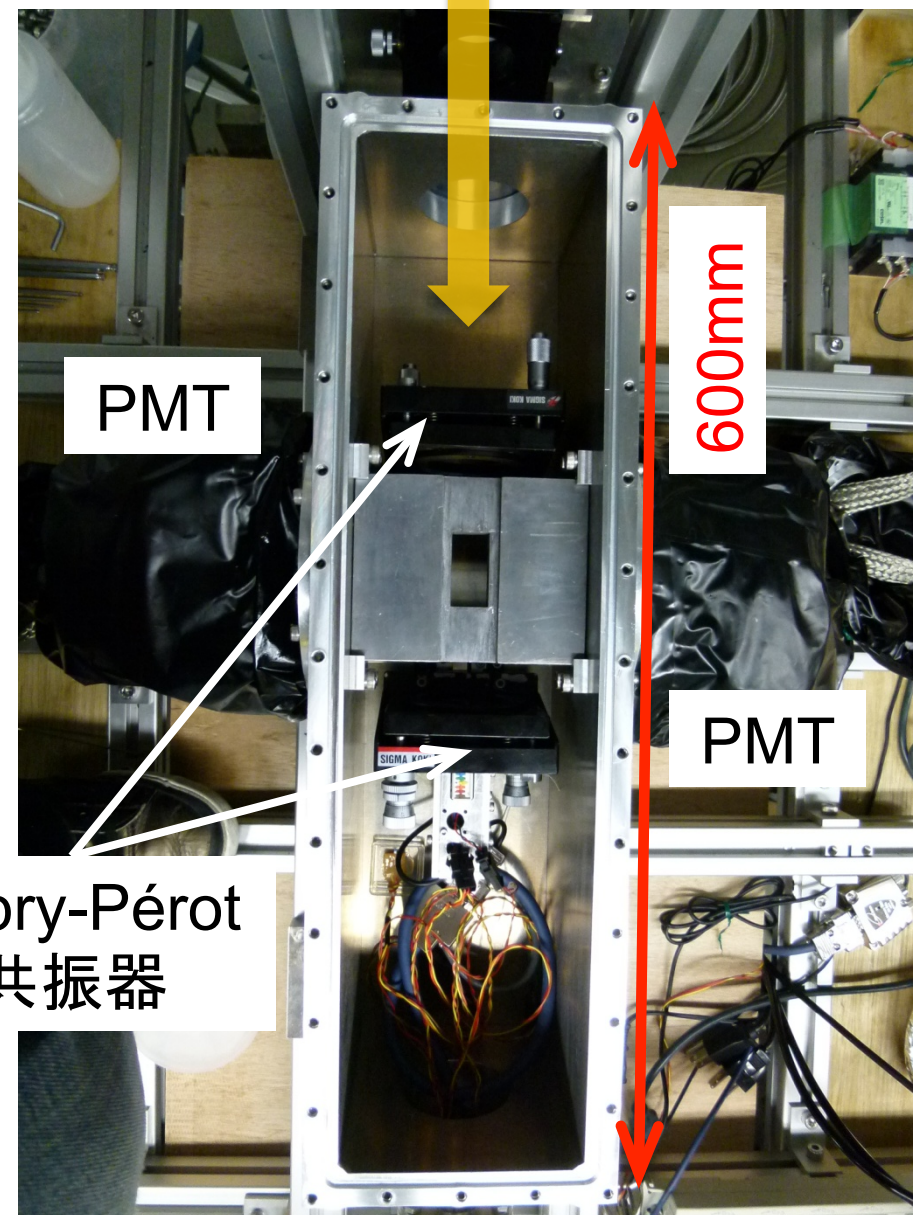
モードコンバータ

チェンバー



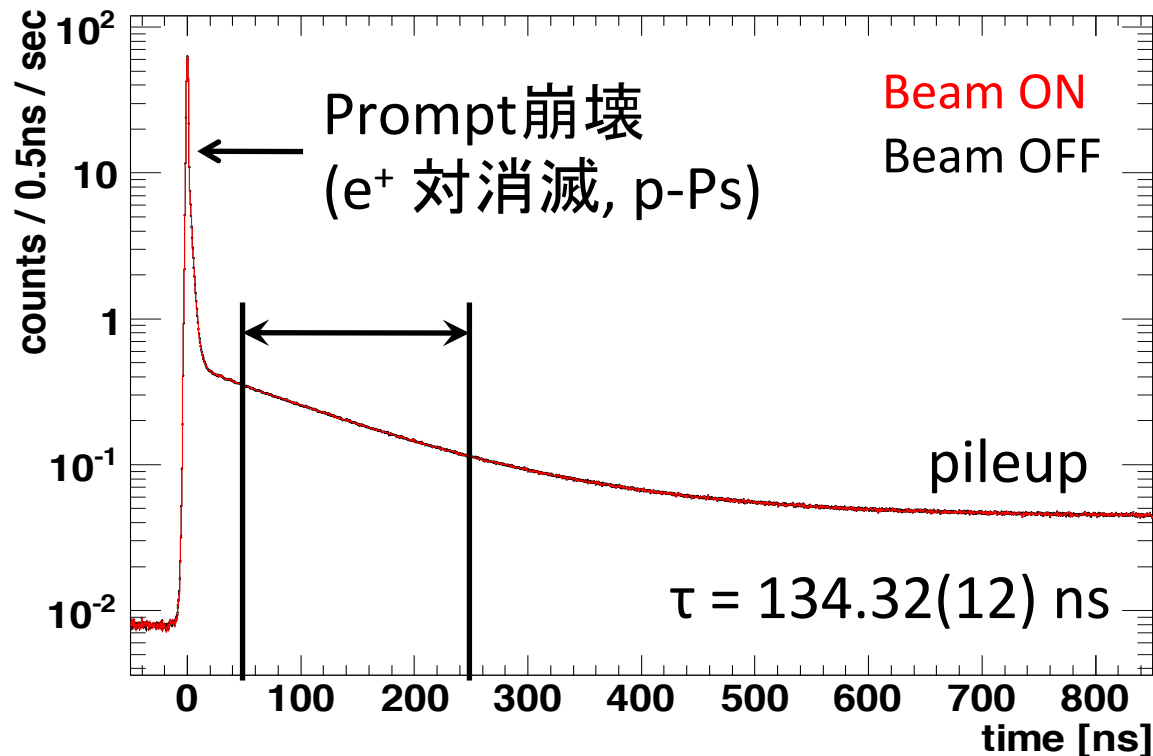
Chamber 内に $\text{N}_2:\text{i-C}_4\text{H}_{10} = 1.9\text{atm}:0.1\text{atm}$ の混合ガスを封入する

203GHz beam



Delayed Coincidence

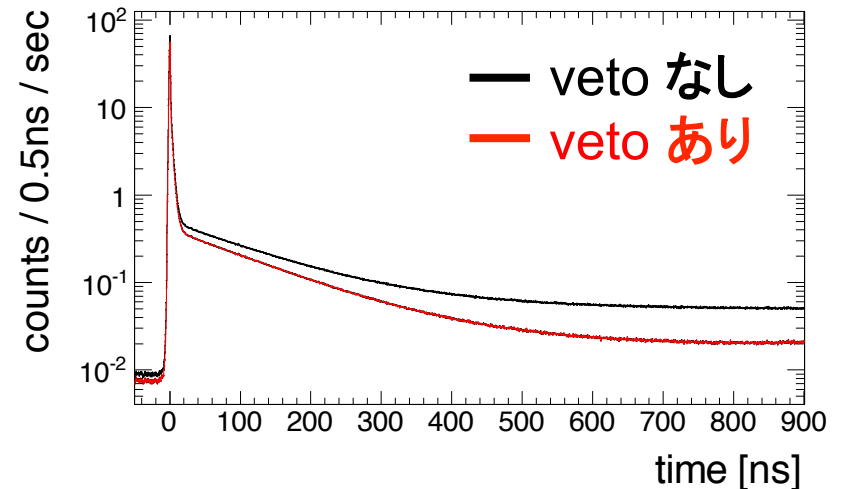
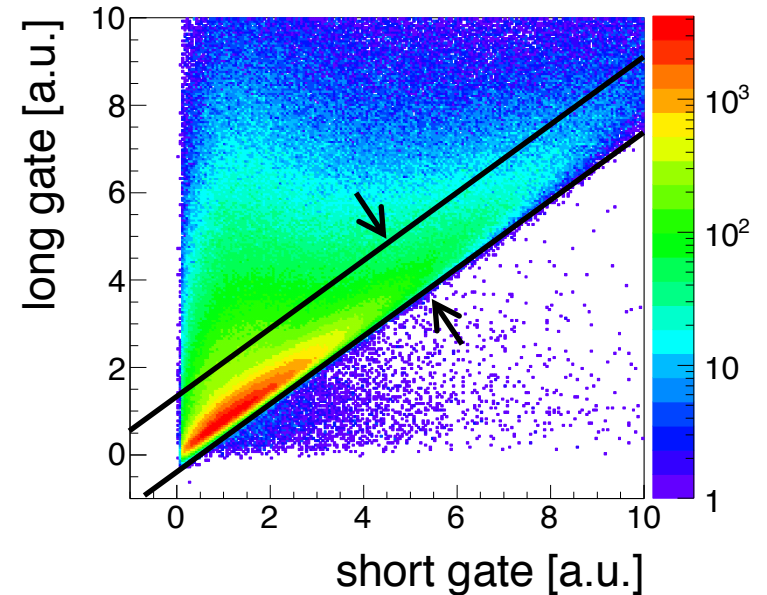
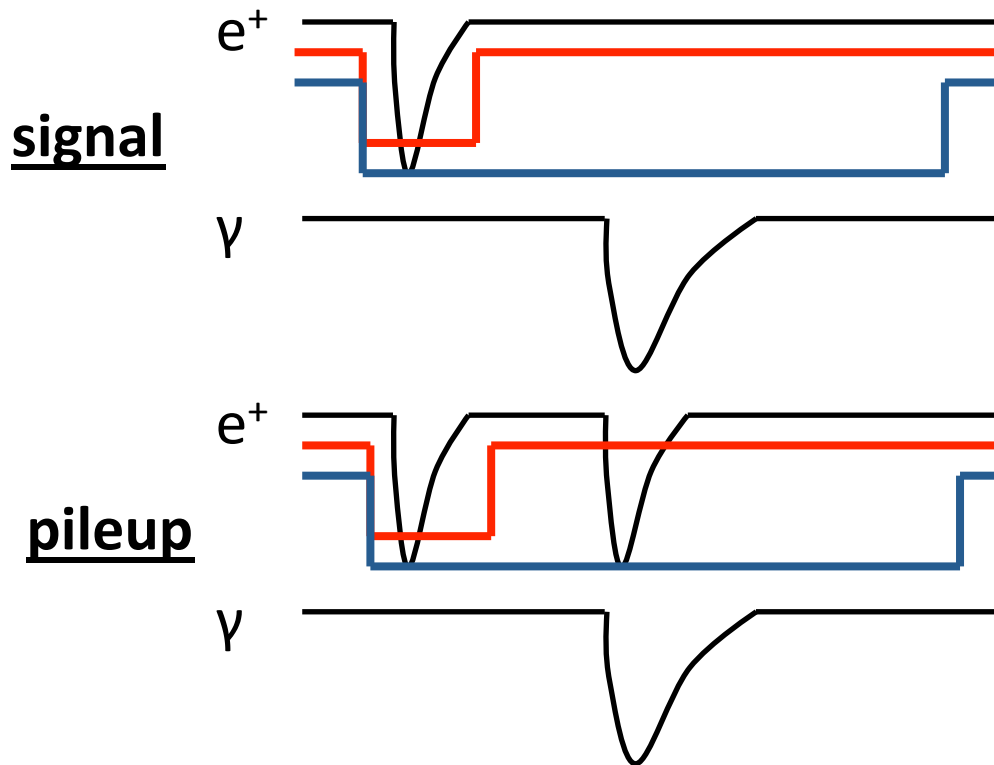
- プラシンで e^+ をタグしたタイミングと γ 線検出のタイミングの差からPsの寿命曲線が得られる



- 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

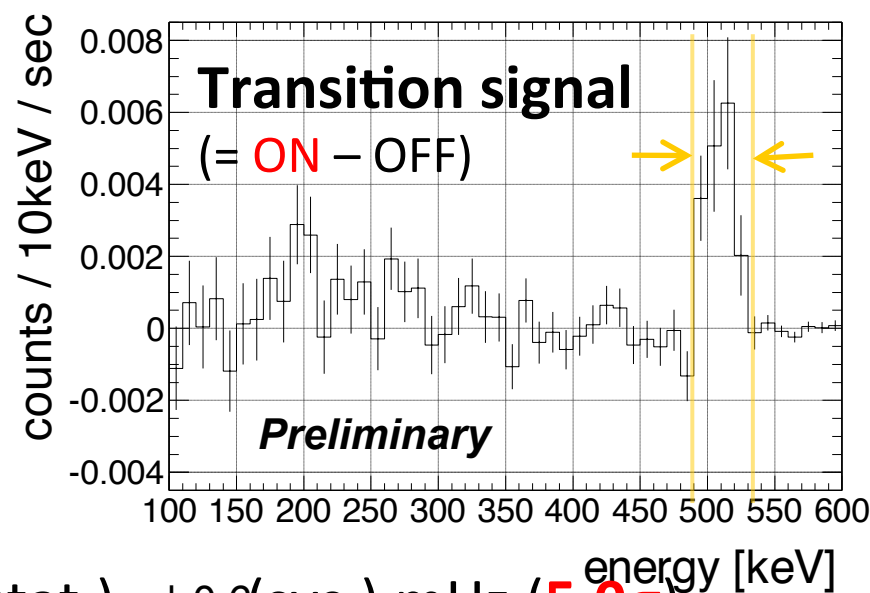
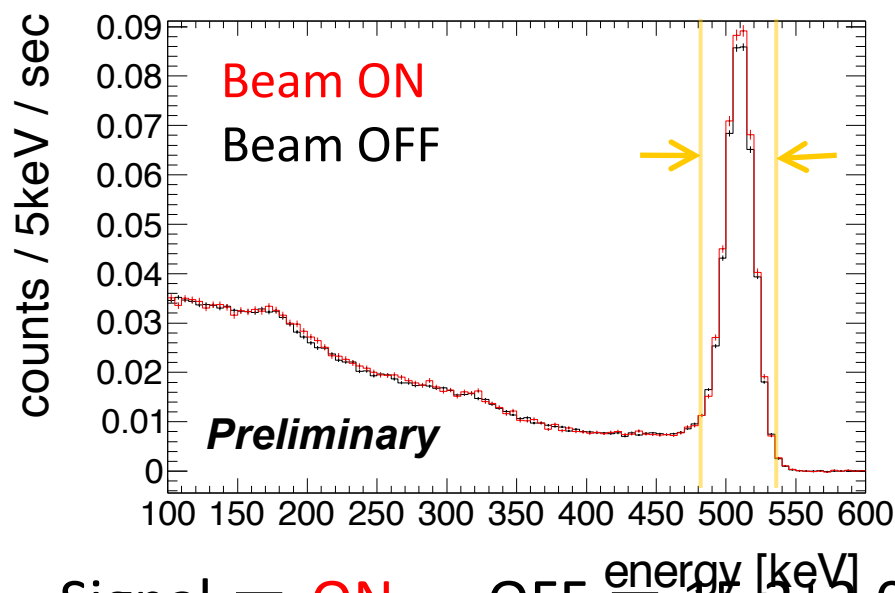
- Pileupを抑制するため、プラシンへのenergy depositをshort-gate (50ns), long-gate (1000ns) で測り、差が大きいイベントはvetoする (pileupイベントではlong-gateのほうが大きくなる)



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496keV～531keV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

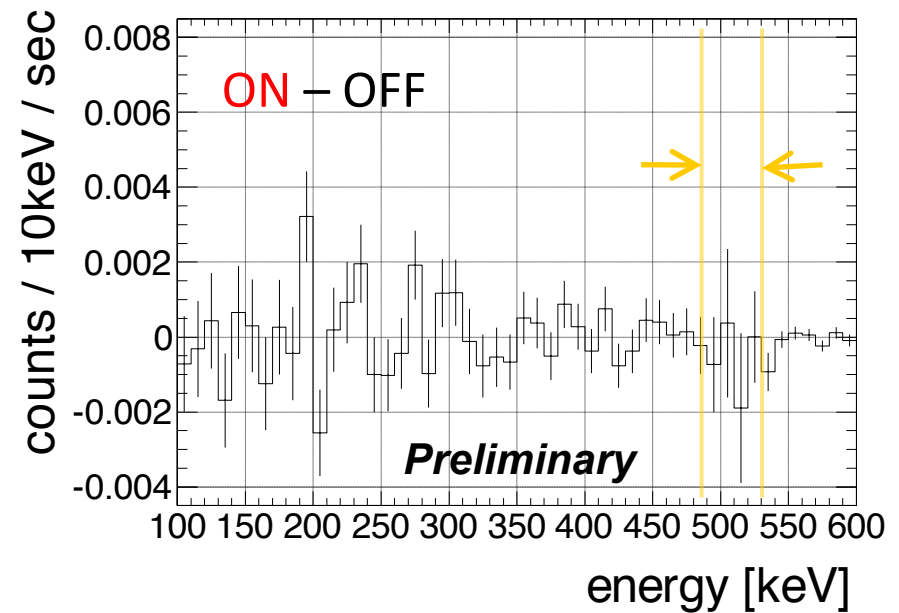
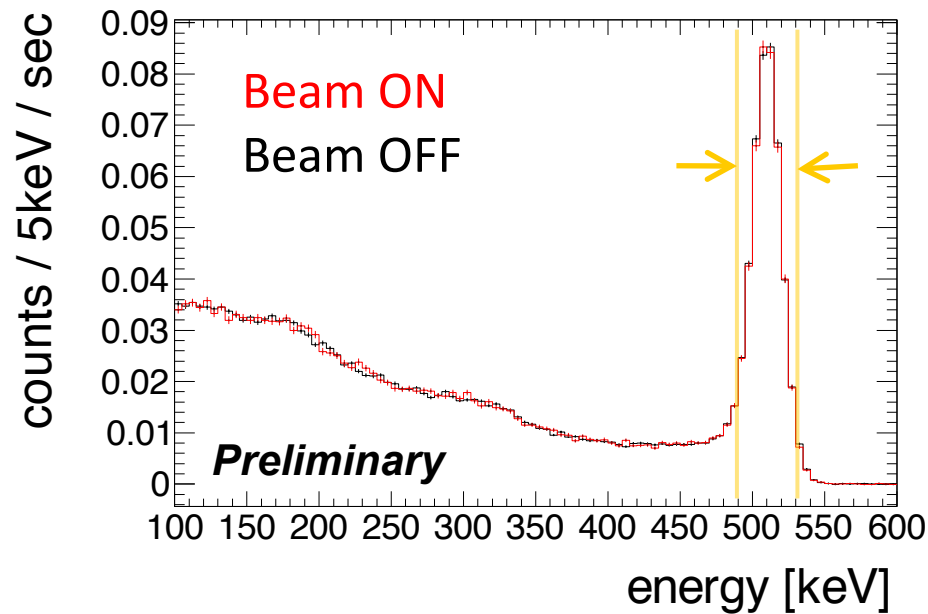
※ rejection後に残った pileup は $t = 550 \sim 850\text{ns}$ でのenergy spectrum を使ってさっぴいてある



- Signal = **ON** - OFF $\stackrel{\text{energy [keV]}}{=} 15.2 \pm 3.0(\text{stat.}) \pm_{-0.1}^{+0.6}(\text{sys.}) \text{ mHz (} \mathbf{5.0\sigma} \text{)}$
- 遷移量はpowerから予想される値 ($10.0 \pm 4.8 \text{ mHz}$ と一致)

周波数を変えての測定

- 異なる周波数(140GHz、ジャイロトロン出力モード = TE_{02})で測定し、有意なずれがないことを確認した



- Signal = **ON** - OFF = $-1.4 \pm 3.2(\text{stat.}) \begin{matrix} +0.5(\text{sys.}) \\ -0.1 \end{matrix} \text{ mHz}$

系統誤差

Source	Systematic error (BGに対する割合)
LaBr ₃ (Ce) のエネルギー分解能	−0.01%
Ps生成率	+0.18%
BGの規格化	±0.02%
Quadrature sum	+0.18% −0.02%

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
- また、Ps-HFSの値とは異なる周波数のビームを用いて同様の測定を行い、ずれが見られないことを確認した
- 今後はPs-HFS直接測定に必要な周波数可変ジャイロトロンの開発を進める