

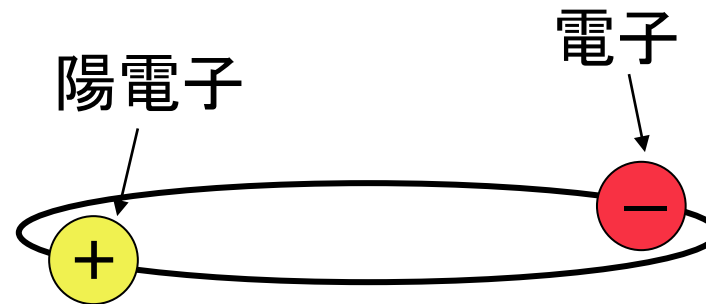
ポジトロニウムにおける 超微細構造間遷移の直接観測

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, 出原俊孝^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

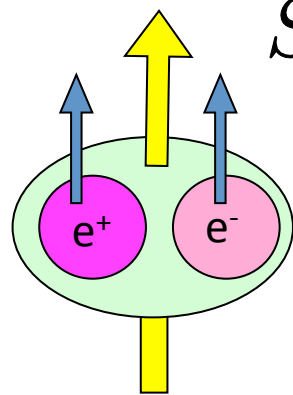
ポジトロニウム (Ps)



- 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)

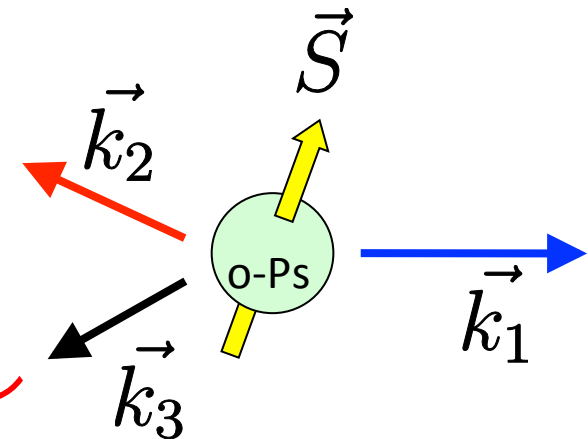


$S = 1$ スピン3重項

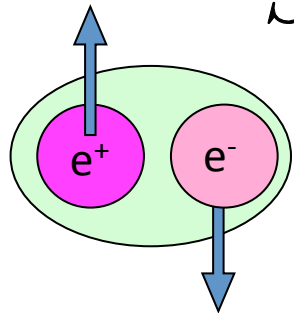
$\text{o-Ps} \rightarrow 3\gamma$ (, 5γ , ...)

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)

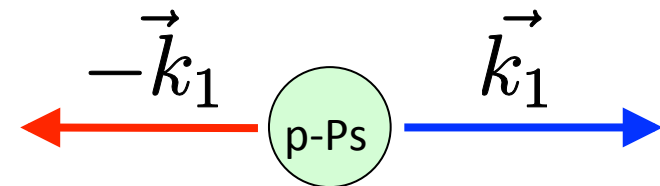


$S = 0$ スピン1重項

$\text{p-Ps} \rightarrow 2\gamma$ (, 4γ , ...)

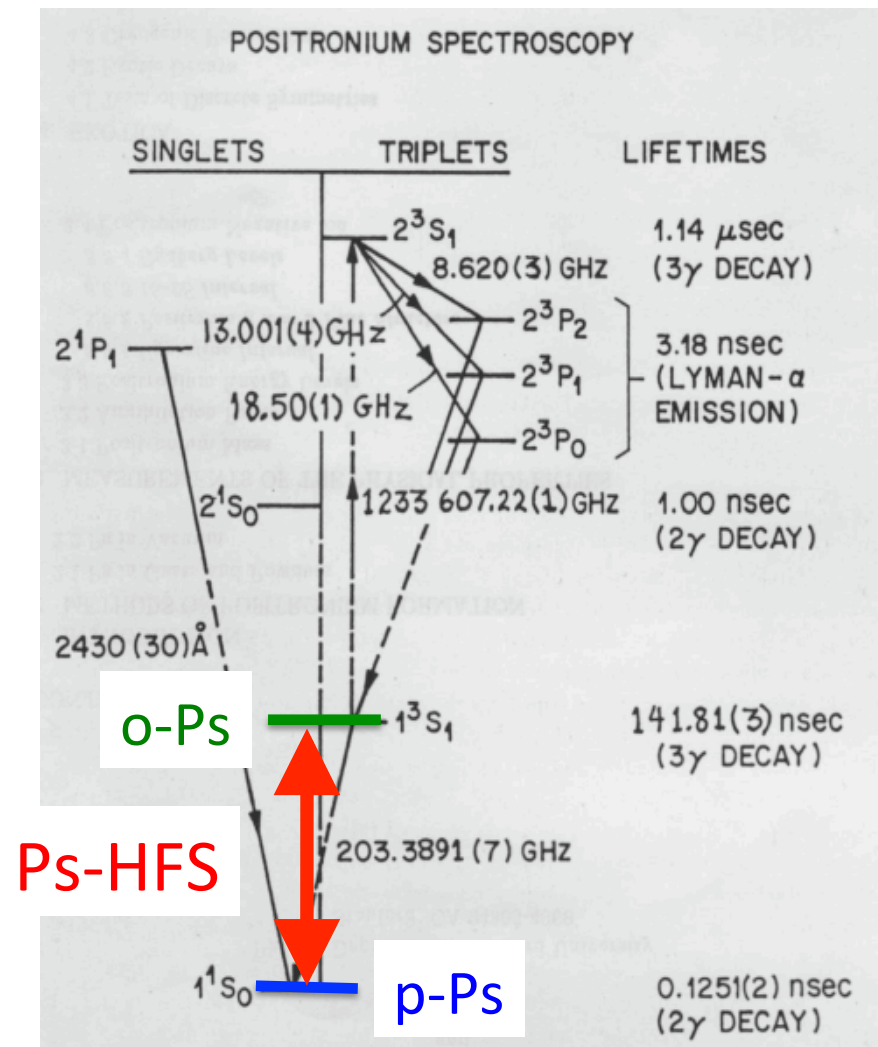
短寿命0.125nsec

511keVの γ 線2本をback-to-backに放出

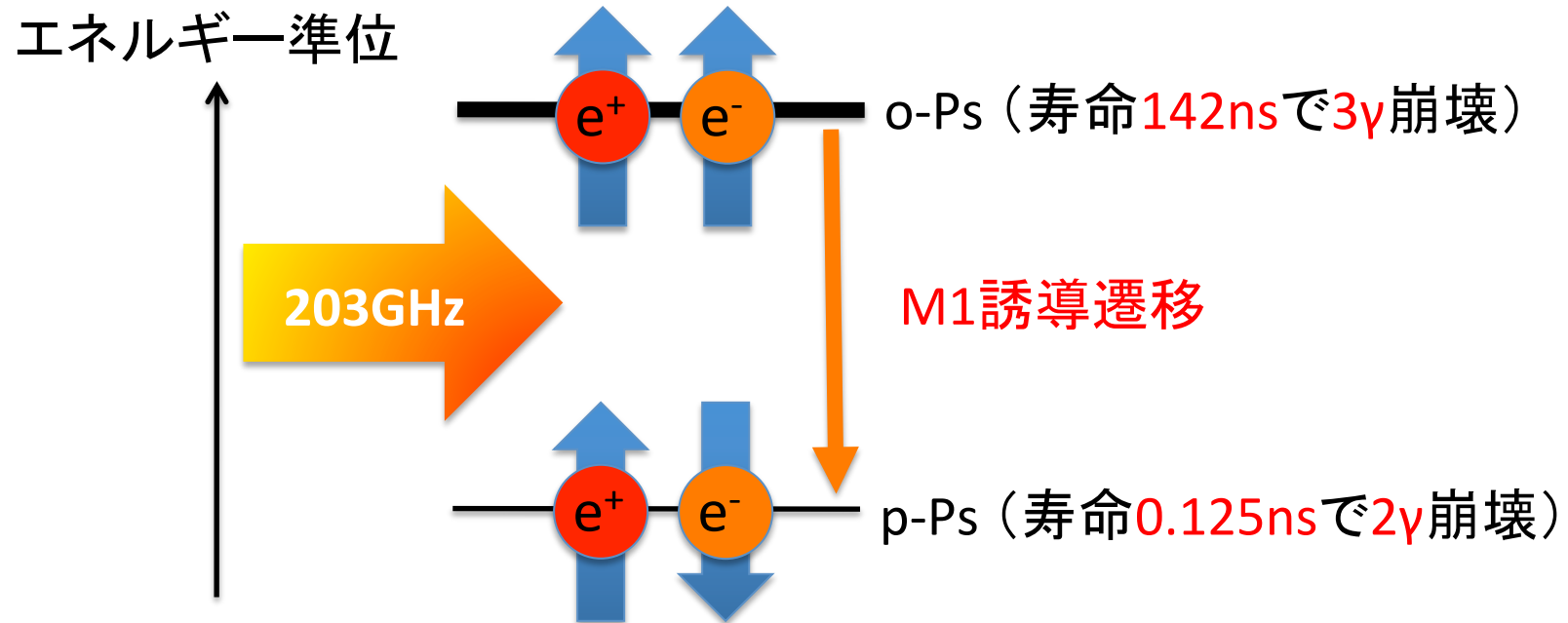


ポジトロニウム超微細構造 (Ps-HFS)

- 電子と陽電子のスピン・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 $203\text{GHz} = 0.84\text{meV}$

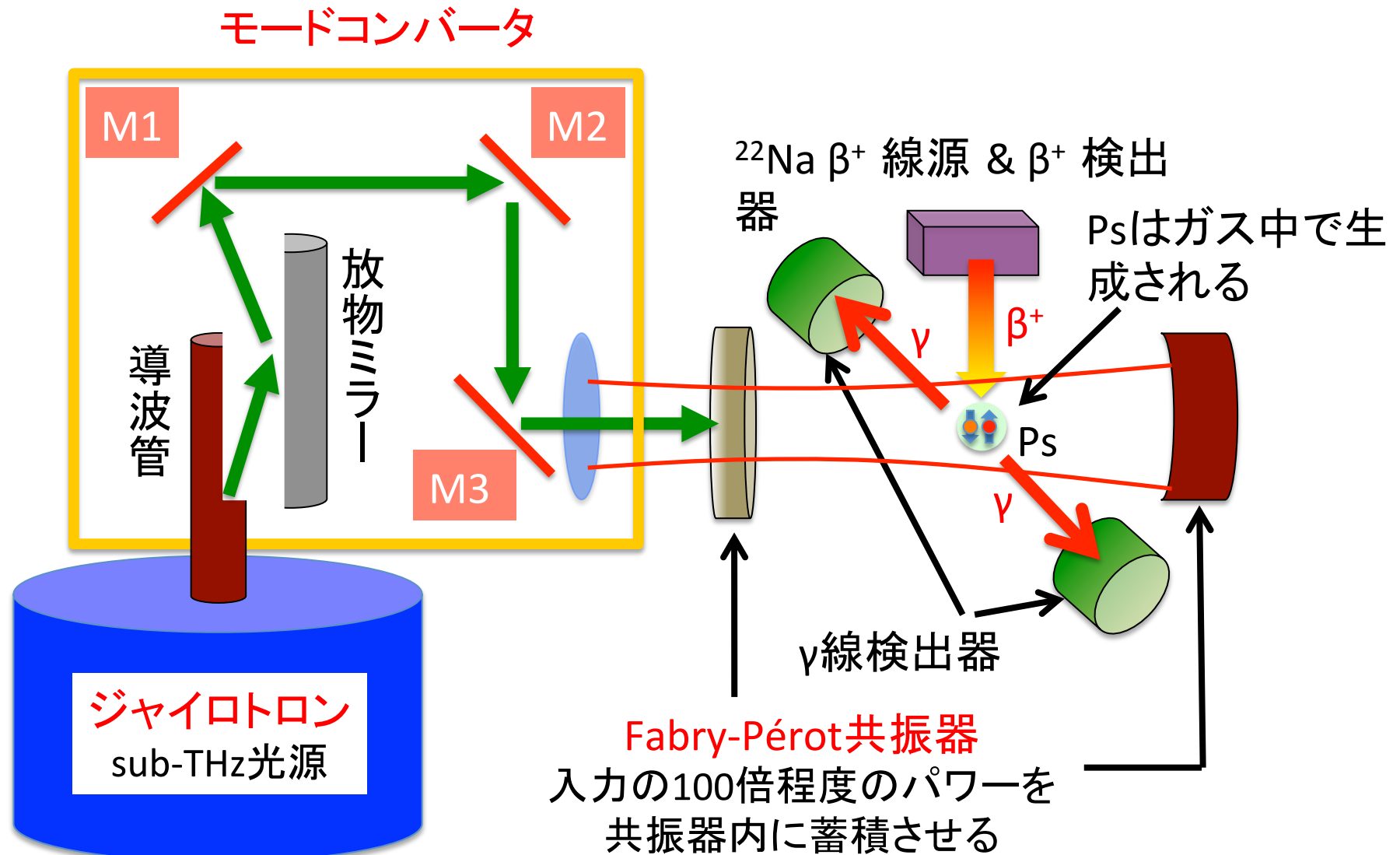


Ps-HFS間の直接遷移



- 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($\tau = 125\text{ps}$)2 γ 崩壊するので、遷移事象は長寿命な2 γ 崩壊(単色511keV・back-to-backに放出される)という特徴を持つ
- M1遷移なので遷移確率が低く(o-Psの崩壊率より14桁小さい)、十分な量の誘導遷移を起こすには10kW程度の高強度sub-THz波が必要
- 遷移測定自体が世界初(超微細構造の直接測定→宮崎)

セットアップ



ジャイロトロン

@ 福井大学



- 超伝導磁場による電子のサイクロトロン周波数 ($\omega_c = eB/m\gamma$) を磁場中心に置かれた空洞共振器の共振周波数

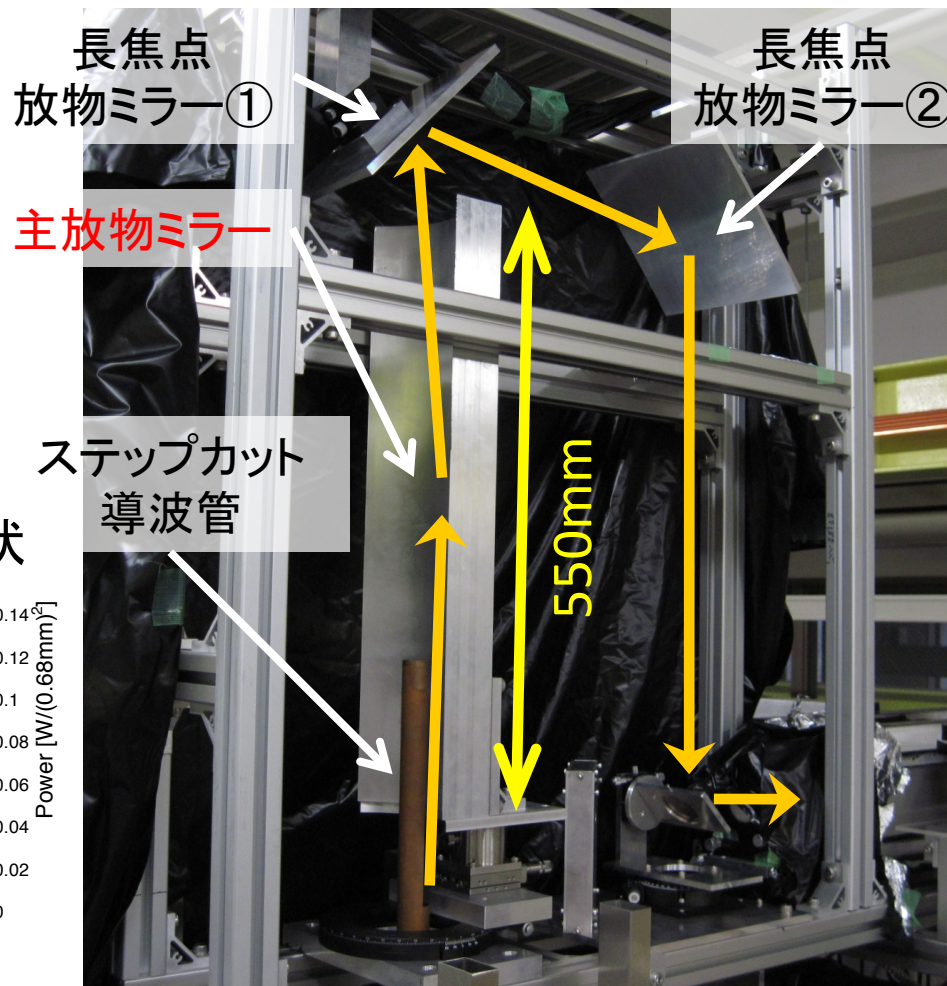
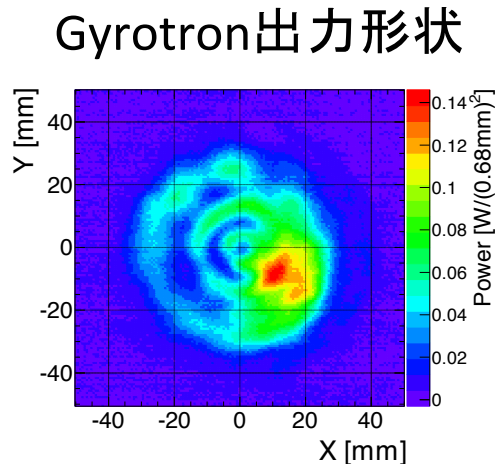
$$\omega_{mn,l} = c \sqrt{\left(\frac{j'_{mn}}{R}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{L}\right)^2}$$

に合わせることでサイクロトロン運動のエネルギーを空洞共振器 (Q値 ~ 1000) 中の電磁場エネルギーに変換させ、この電磁波を導波管から取り出す

- 202.89 GHz (TE₀₃ mode)、単色
- 300 W, 20Hz, duty 30%
- 電子銃ヒーターへのfeedbackで < 10 % fluctuation

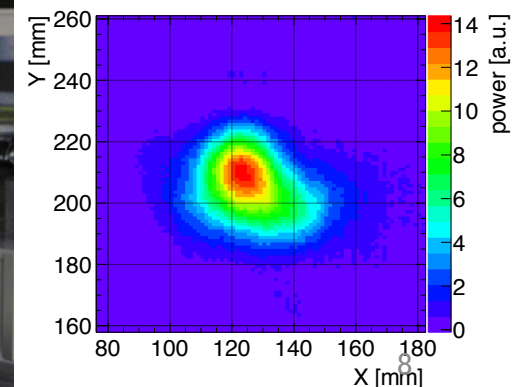
モードコンバータ

- ステップカット導波管でジャイロトン出力を全て主放物ミラー (Vlasov antenna) に向け、反射させることで直線偏光した平面波に変換する。その後長焦点ミラー2枚で整形、apertureでサイドローブを除去



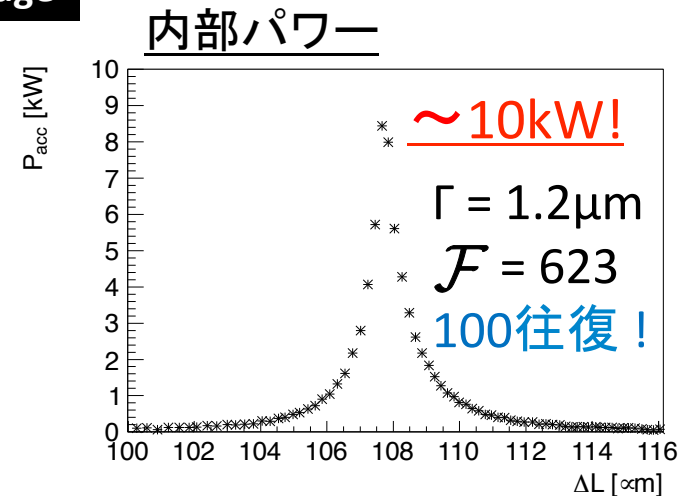
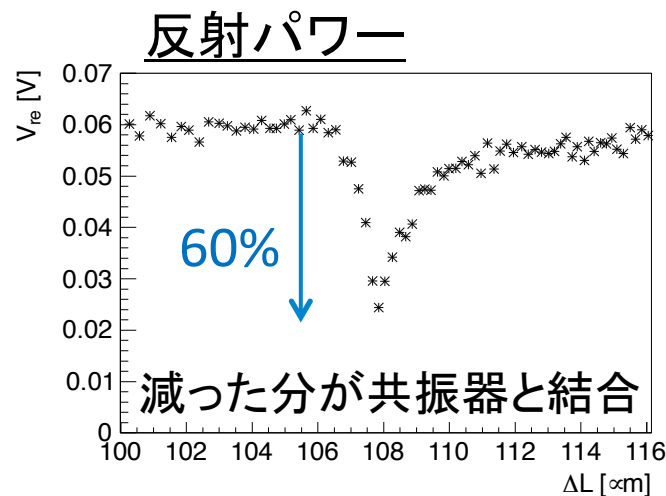
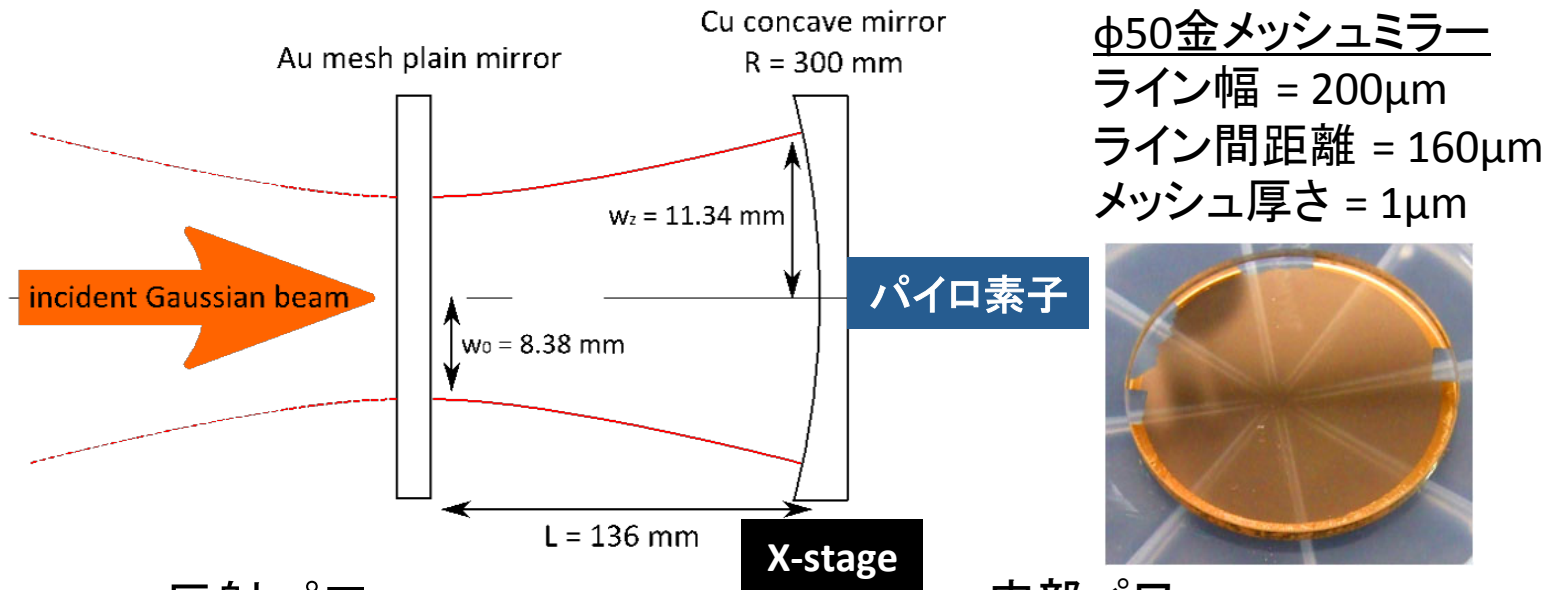
- Apertureを通る割合が $35\pm 2\%$ と低い (Gyrotron出力の理論式からのずれ)
- 偏光度 $80\pm 6\%$
- パワー変換効率 $28\pm 2\%$

変換後のビーム形状



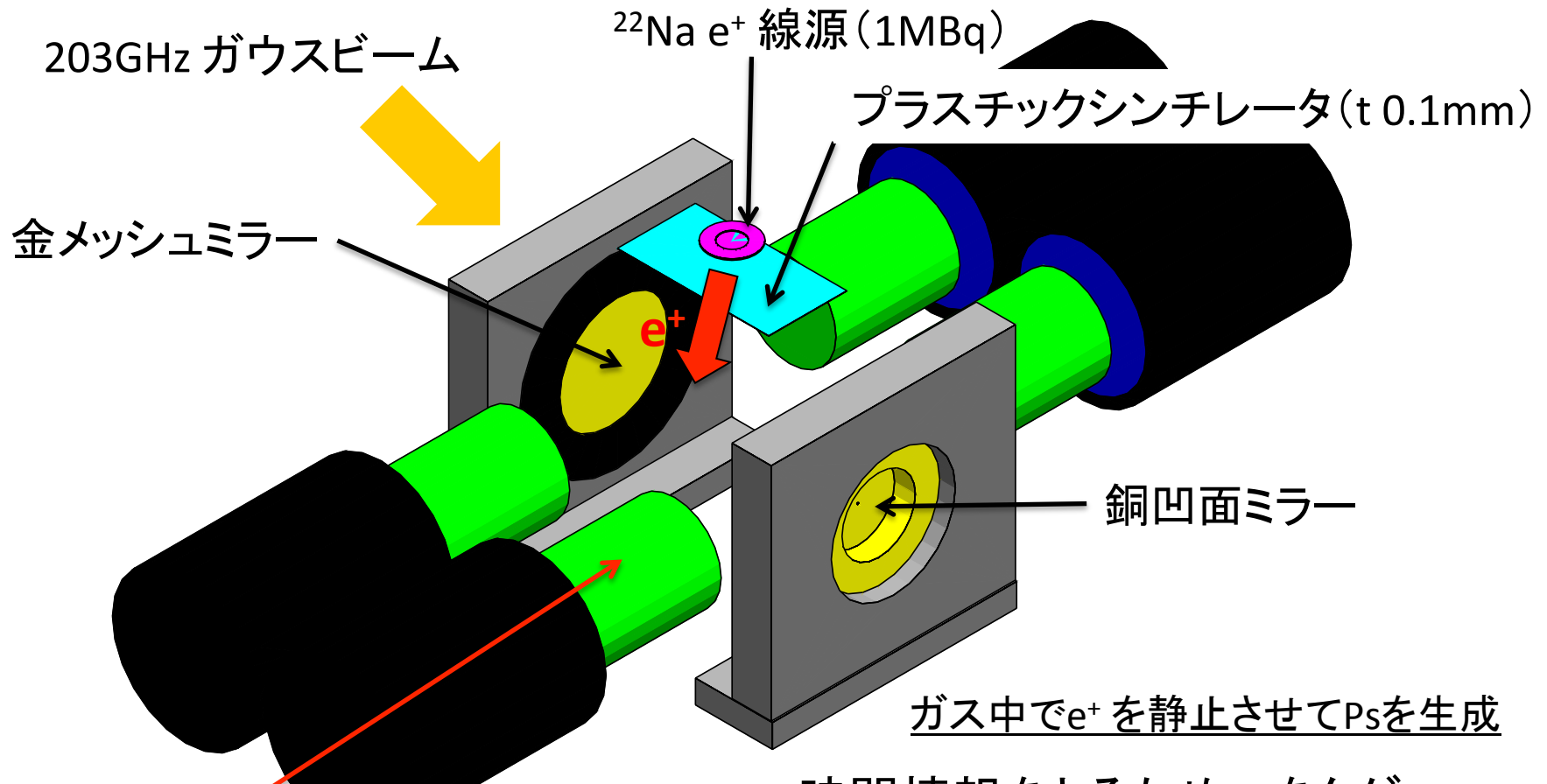
Fabry-Pérot共振器

- ミラー間の長さが $\lambda/2=750\mu\text{m}$ の整数倍になると共振
- 金メッシュ：高い反射率(99.4%)とreasonableな透過率(0.4%)



Ps生成部・ γ 線検出器

^{22}Na 線源から出た e^+ をプラシンでタグ



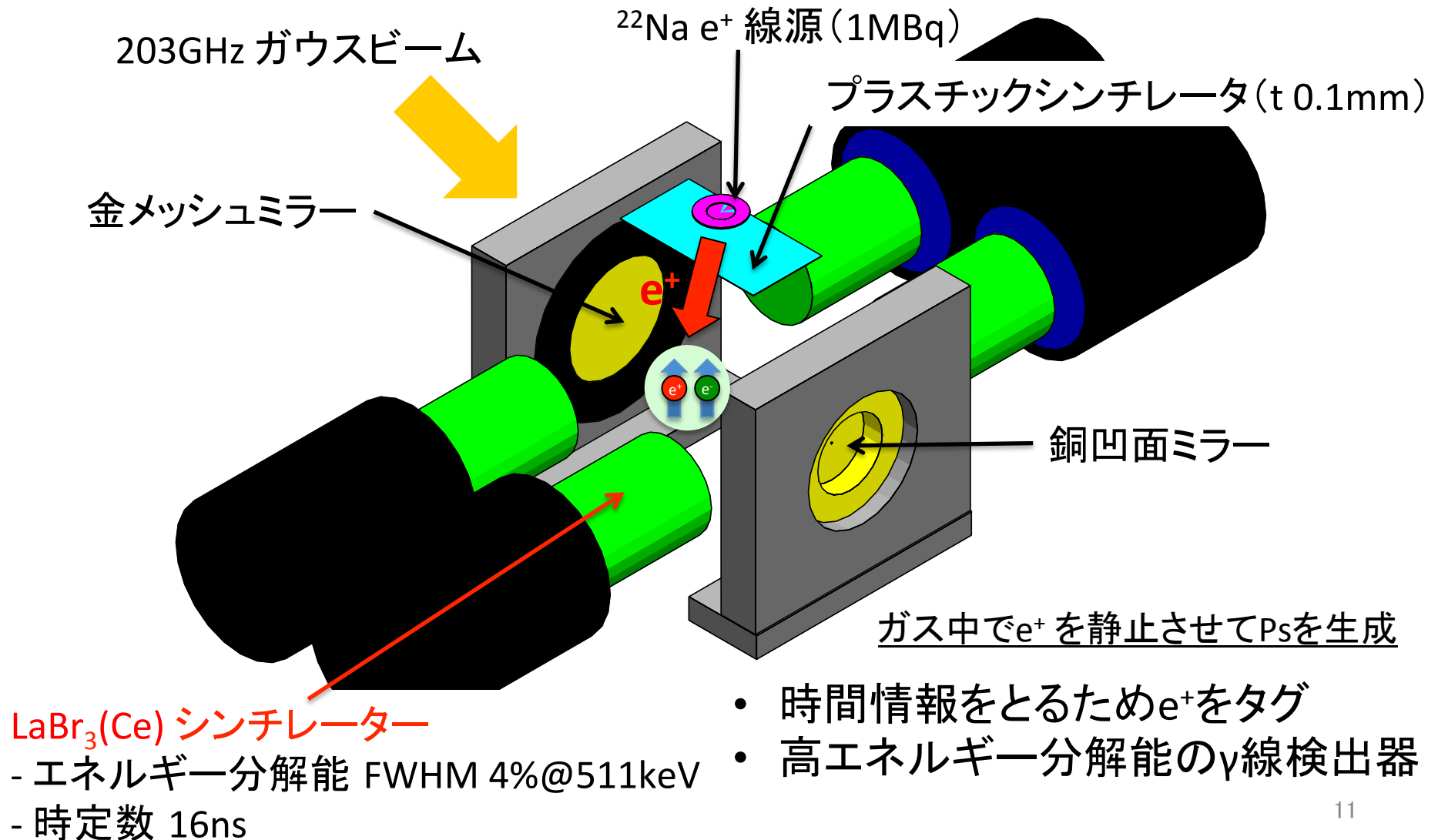
$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーター

- 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

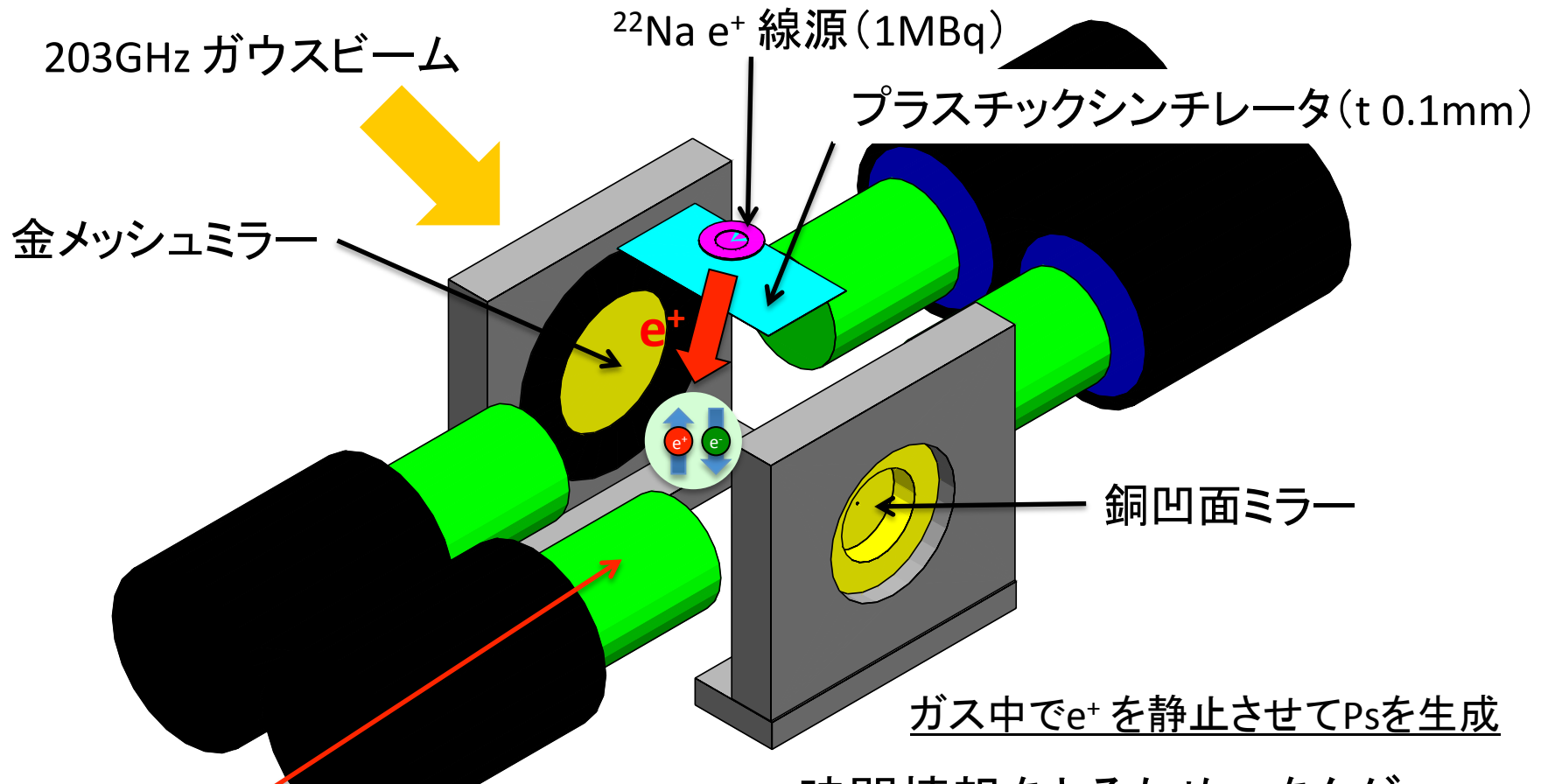
Ps生成部・ γ 線検出器

ガス中で静止した e^+ とガス分子中の e^- からPsが生成される



Ps生成部・ γ 線検出器

Fabry-Pérot共振器に蓄積されたミリ波によってo-Psがp-Psに遷移



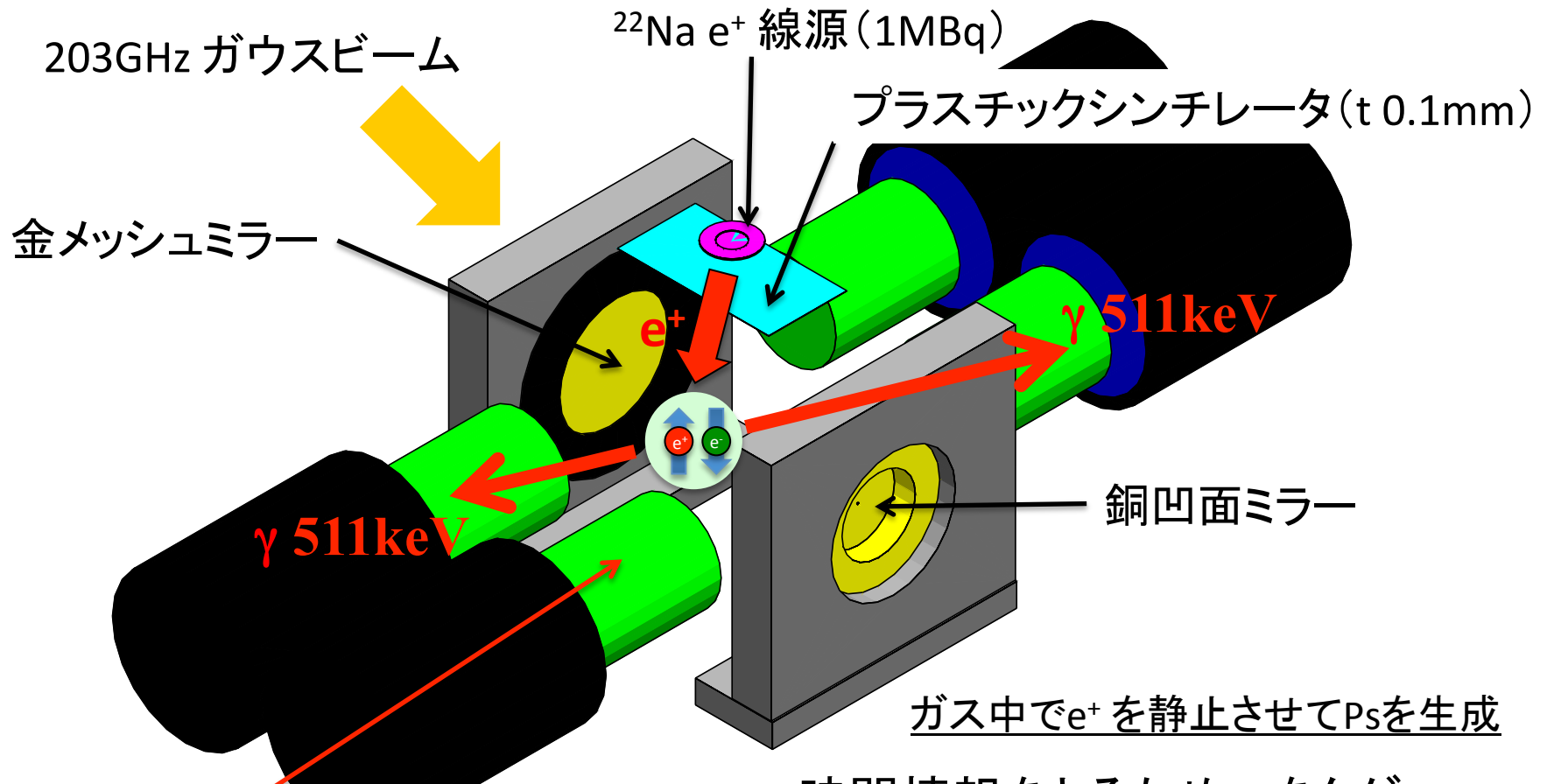
LaBr₃(Ce) シンチレータ

- 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

Ps生成部・ γ 線検出器

p-Psは即座に 2γ 崩壊する。 γ 線を $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレータで検出

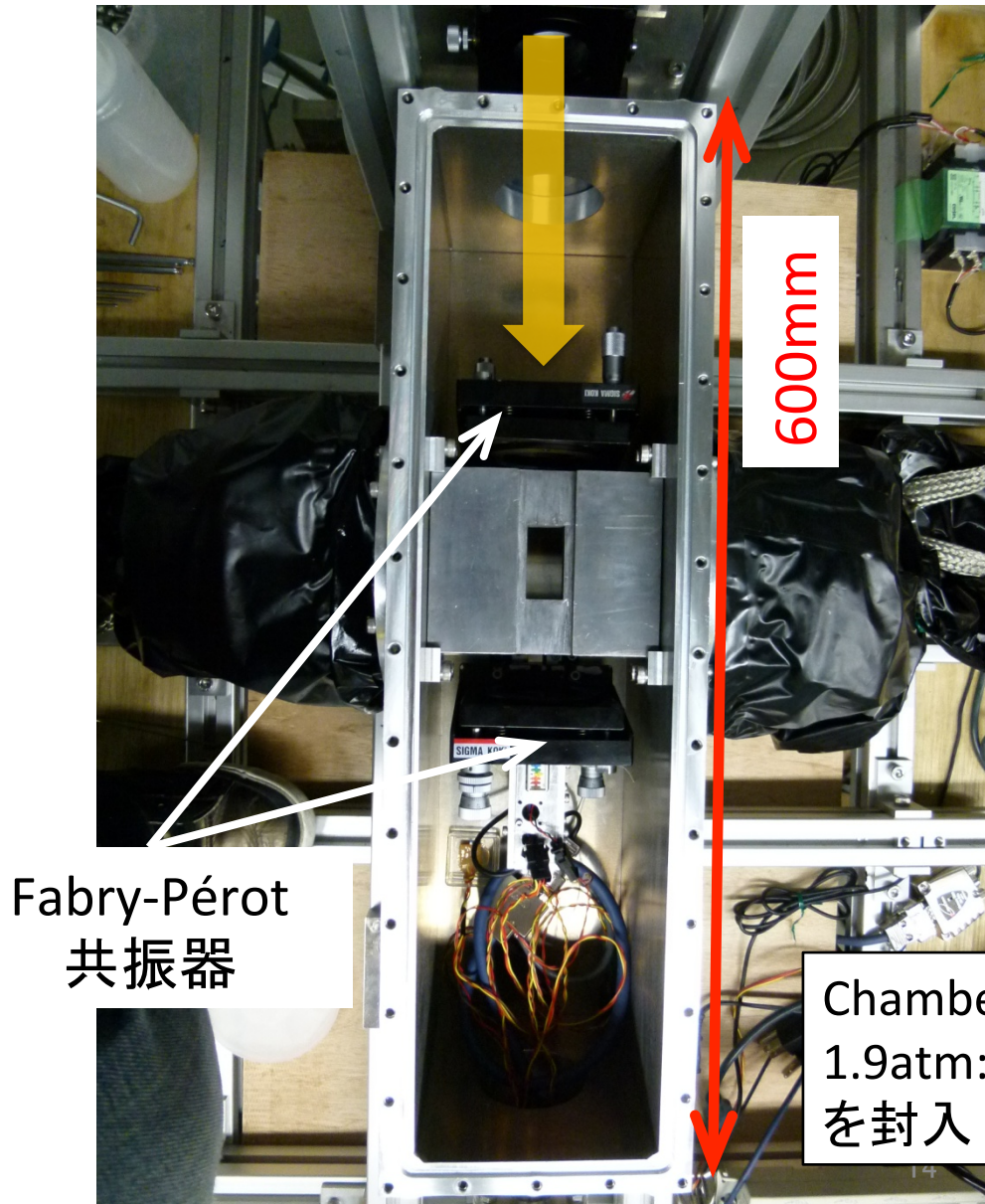


LaBr₃(Ce) シンチレータ

- エネルギー分解能 FWHM 4%@511keV
- 時定数 16ns

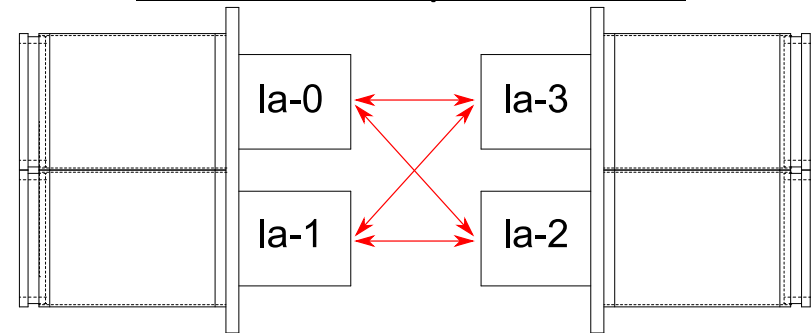
- 時間情報をとるため e^+ をタグ
- 高エネルギー分解能の γ 線検出器

Ps生成chamber, trigger



Fabry-Pérot
共振器

Back-to-back pairは4通り

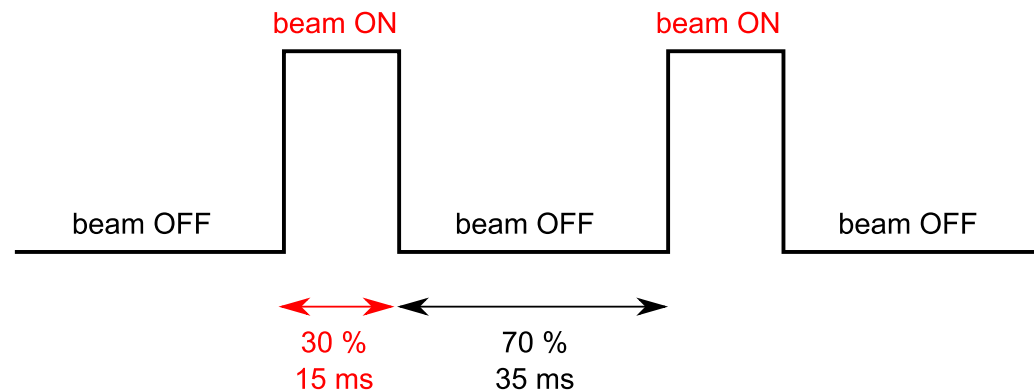


- プラシンで e^+ がタグされてから $-100 \sim 1100$ nsの間に back-to-back γ 線ヒットがあったらtrigger
- Trigger rate ~ 1 kHz
- 周波数、パワーを変えながら2週間測定

Chamber 内に $N_2:i-C_4H_{10} = 1.9\text{atm}:0.1\text{atm}$ の混合ガスを封入

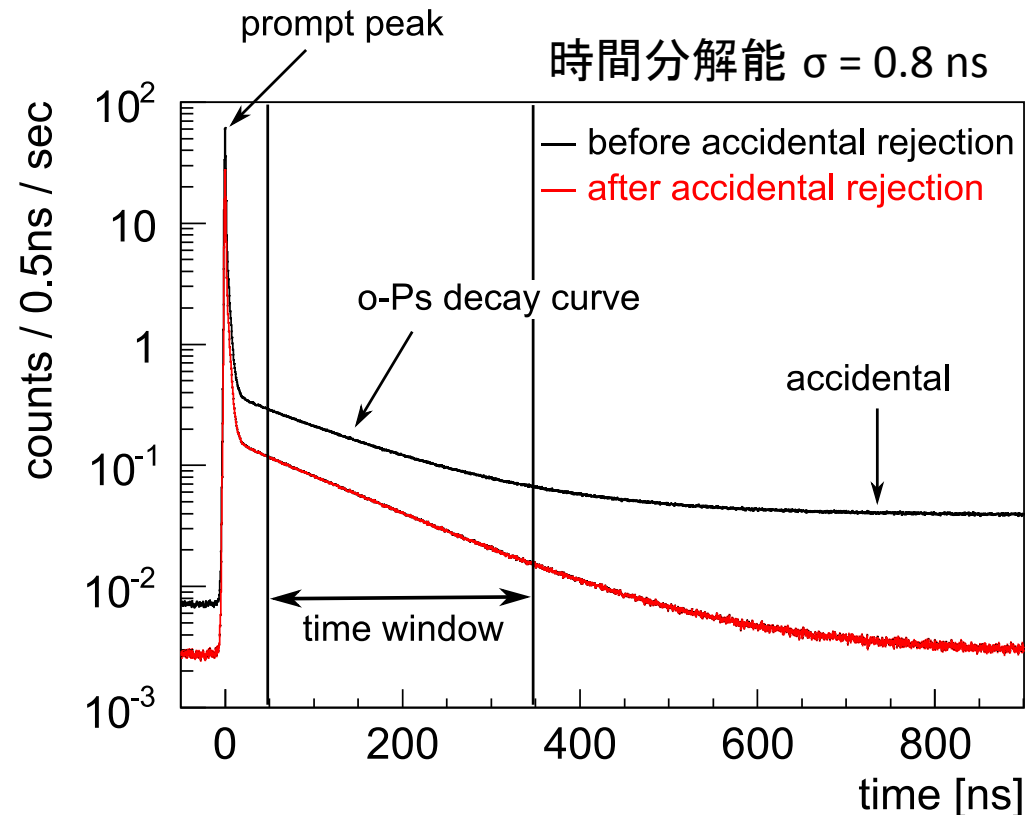
解析 (signal, background)

- Signal
 - ✓ $\text{o-Ps} \rightarrow \text{p-Ps} \rightarrow 2\gamma$: o-Psのlong lifetime ($\tau = 142\text{ns}$) かつ p-Psの511keV back-to-back 2γ 崩壊
- Background
 - ✓ $\text{o-Ps} \rightarrow 3\gamma$: γ 線検出器のenergy resolutionおよび 2γ と 1γ がback-to-backに出るプロセス
 - ✓ $\text{o-Ps} \rightarrow 2\gamma$ (pick-off) : ガス分子中の e^- とo-Ps中の e^+ が対消滅
 - ✓ Accidental : プラシンをタグした e^+ と無関係な γ 線
- ジャイロトロン出力は20Hz・duty 30%のpulse outputなので、beam OFFの間のイベントを用いてbackgroundを評価



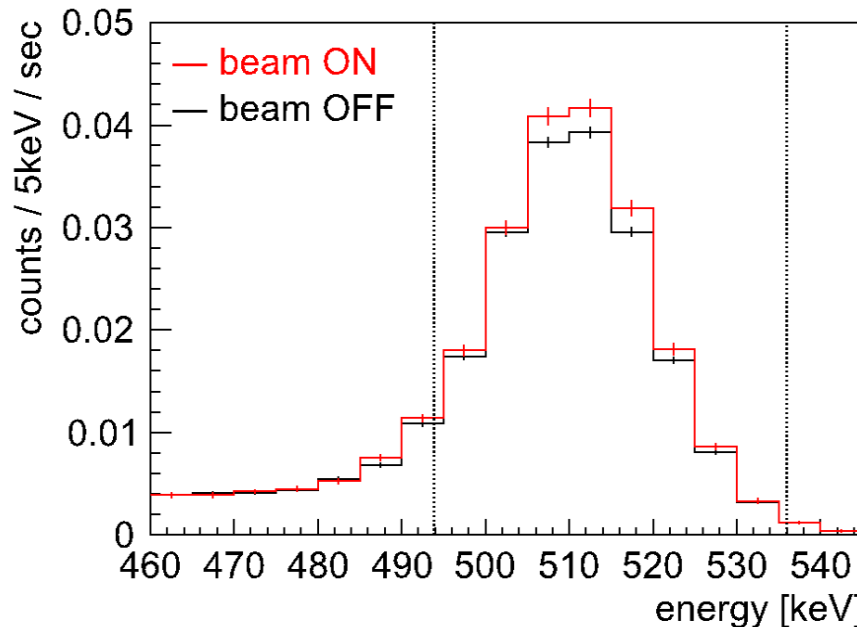
Delayed Coincidence

- 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)を選択
- さらにAccidental Backgroundを抑制するカットをかける(→backup)

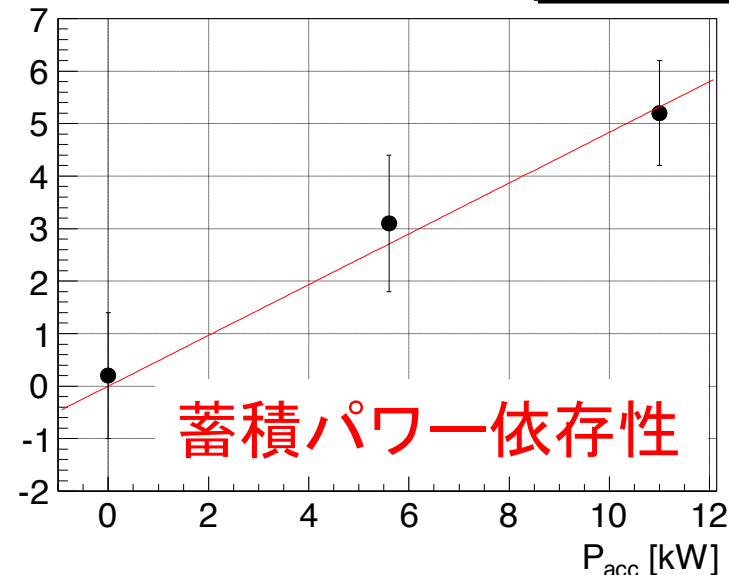


Result

- 最後にback-to-back 511keVを要求。下図は反対側の γ 線検出器に496keV $\sim$ 531keVを要求したときのenergy spectrum. $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ (511keVの左にtail) が減って $o\text{-Ps}(\rightarrow p\text{-Ps}) \rightarrow 2\gamma$ (511keV peak) が増える
- Accidental rejection後にもわずかにaccidental eventsが残るが、time spectrumのflatな領域 ($t = 850 \sim 900\text{ns}$) で評価しsubtractする



S/N [%]



χ^2 / ndf	0.1329 / 2
p0	0.4835 ± 0.08465

- Signal = ON - OFF = 15.1 ± 2.7 (stat.) $^{+0.5}_{-0.8}$ (sys.) mHz (**5.4 σ !**)
- 遷移量と絶対パワー(精度30%)から遷移確率を求めた。

$A = 3.1^{+1.6}_{-1.2} \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ で理論値 $A = 3.37 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ とコンシステント

結論

- 高強度サブテラヘルツ波を用いて初めて基底状態のPs-HFS (203GHz) 間遷移を 5.4σ レベルで直接観測した
- この遷移はM1遷移であるため遷移確率が小さく、またo-Psの寿命が短いため、観測可能な量の誘導遷移を起こすには高強度なsub-THz (203GHz) 波が必要
- 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、遷移を観測。遷移量が蓄積パワーに従って増加することも確認
- 遷移量と蓄積パワーから求めた遷移確率 $A = 3.1^{+1.6}_{-1.2} \times 10^{-8} [\text{s}^{-1}]$ は理論計算とコンシステント
- 次の宮崎のトークは、直接遷移によるPs-HFSの測定