

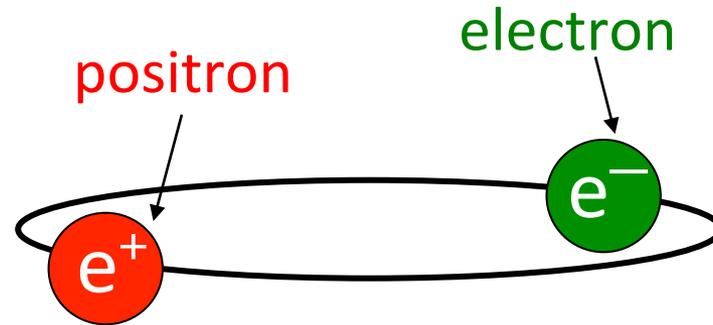
大強度ミリ波を用いた ポジトロニウム超微細構造の 直接測定

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

東大理, 東大素セ^A, 東大総文^B, 福井大遠赤セ^C

物理学会第69回年次大会@東海大学湘南キャンパス

ポジトロニウム (Ps)

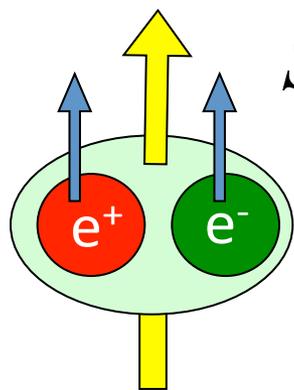


ポジトロニウムは e^- と e^+ の束縛系

- 最も軽い水素様原子
- 最も簡単な粒子-反粒子系

ハドロンからくる不定性がほぼ無視できるため、
高い精度で量子電磁気学(QED)の検証が可能

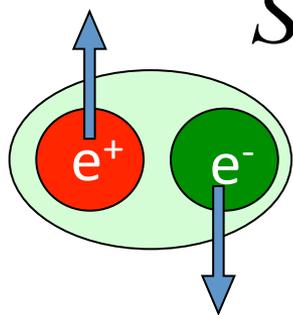
基底状態のPsと超微細構造



$\vec{S} = 1$ (Triplet)

オルソポジトロニウム (*o*-Ps)
3光子崩壊

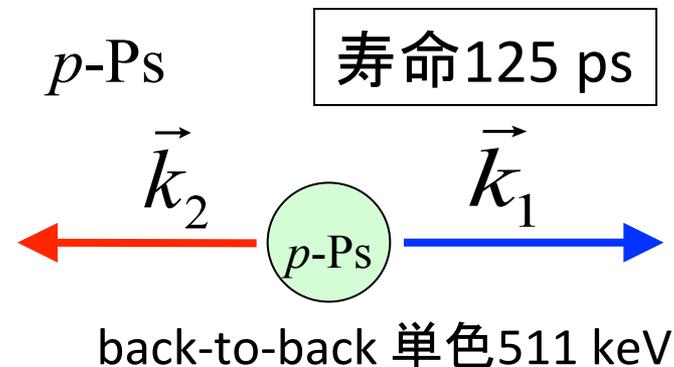
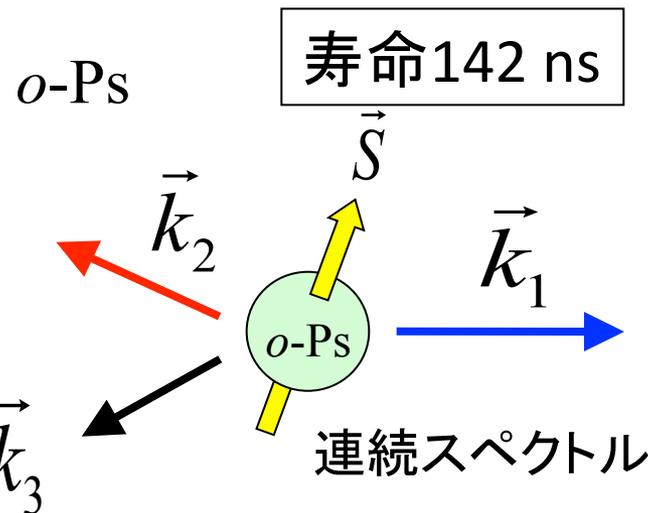
$o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ ($, 5\gamma, \dots$)



$\vec{S} = 0$ (Singlet)

パラポジトロニウム (*p*-Ps)
2光子崩壊

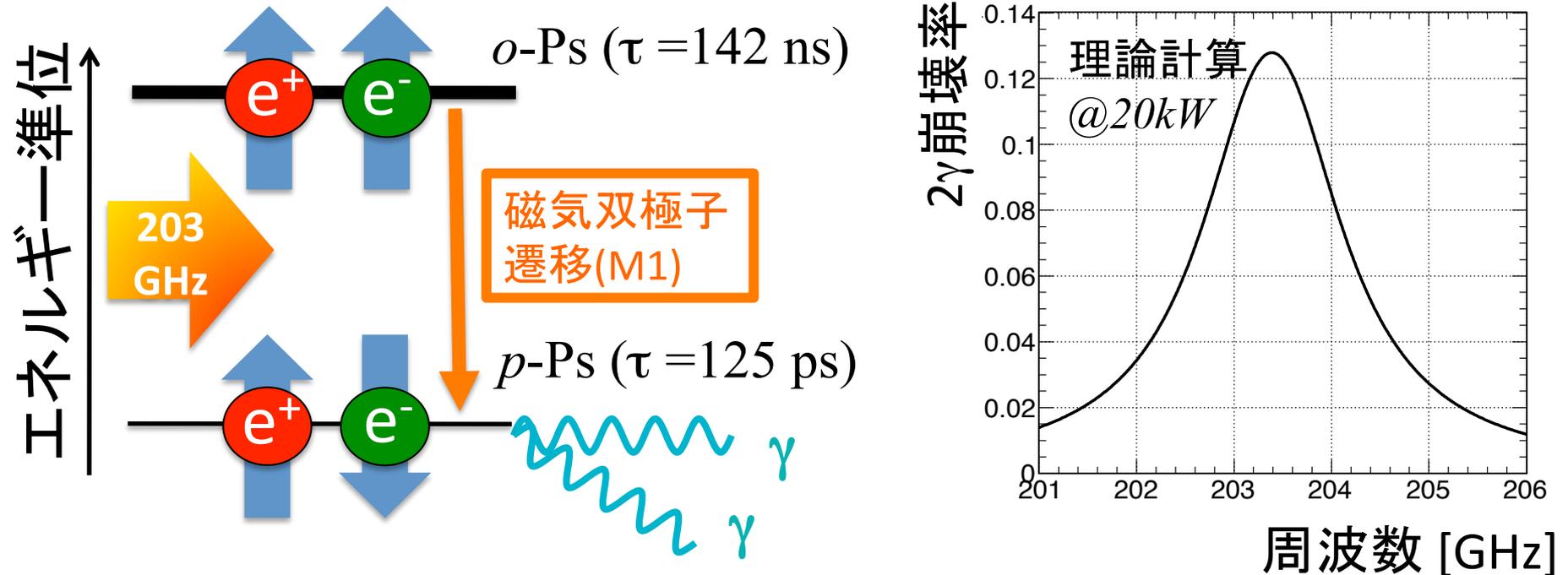
$p\text{-Ps} \rightarrow 2\gamma$ ($, 4\gamma, \dots$)



o-Psは*p*-Psより準位が高い**超微細構造**(Ps-HFS) = 203 GHz
→ミリ波帯(波長1.5mm)のため未だ直接測定されていない

★本研究ではPs-HFSを世界で初めて直接測定した

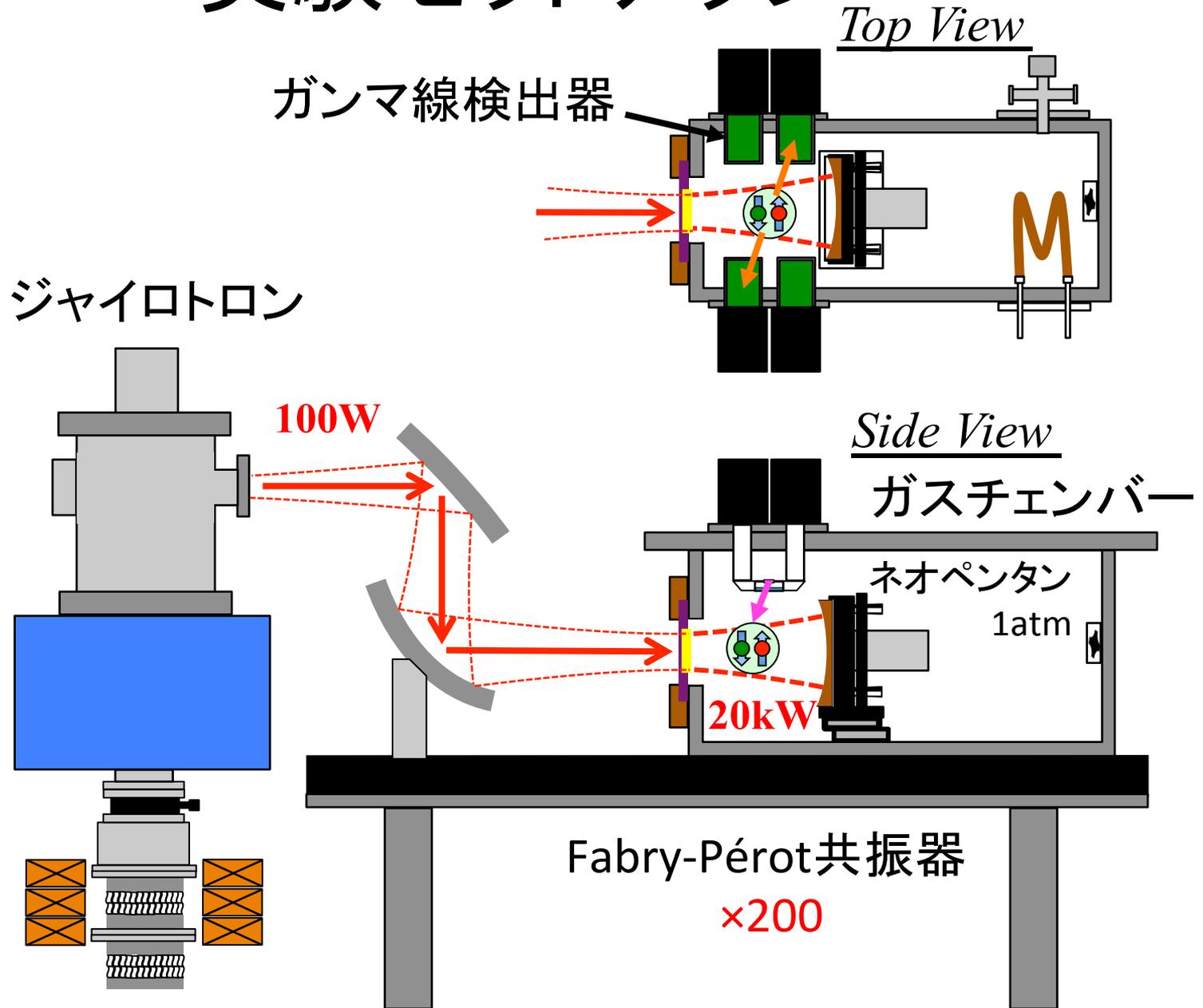
Ps-HFS直接測定の実験原理



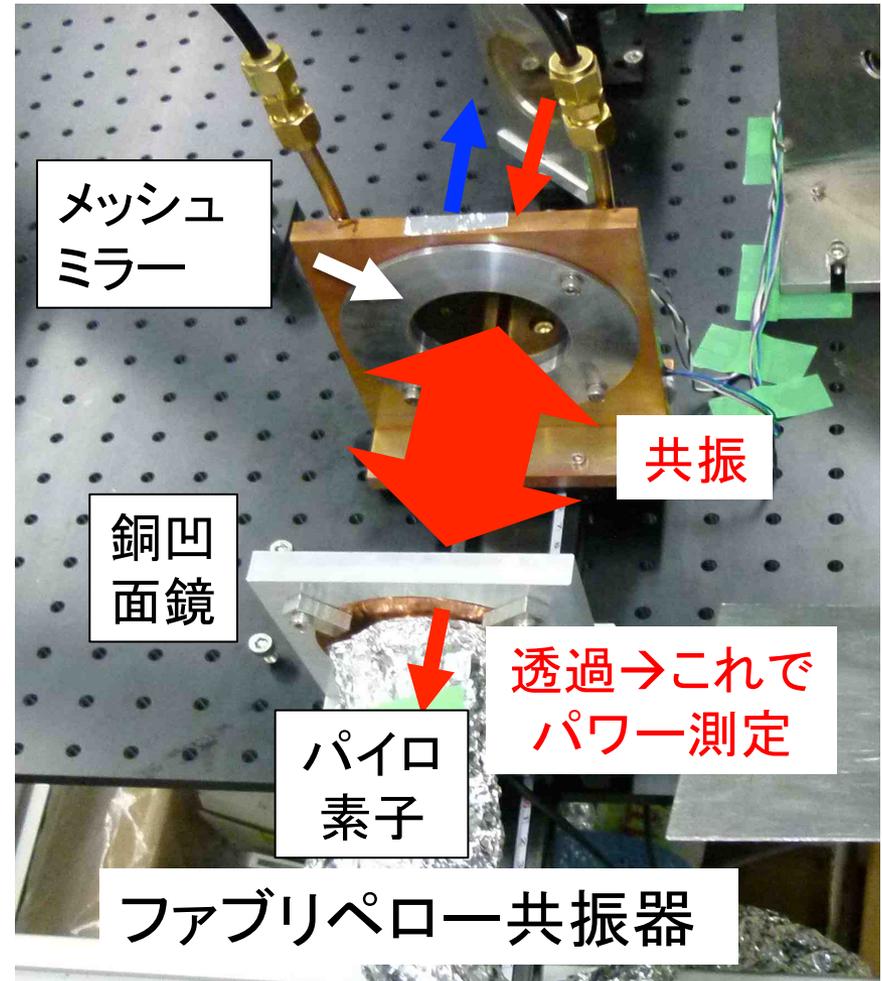
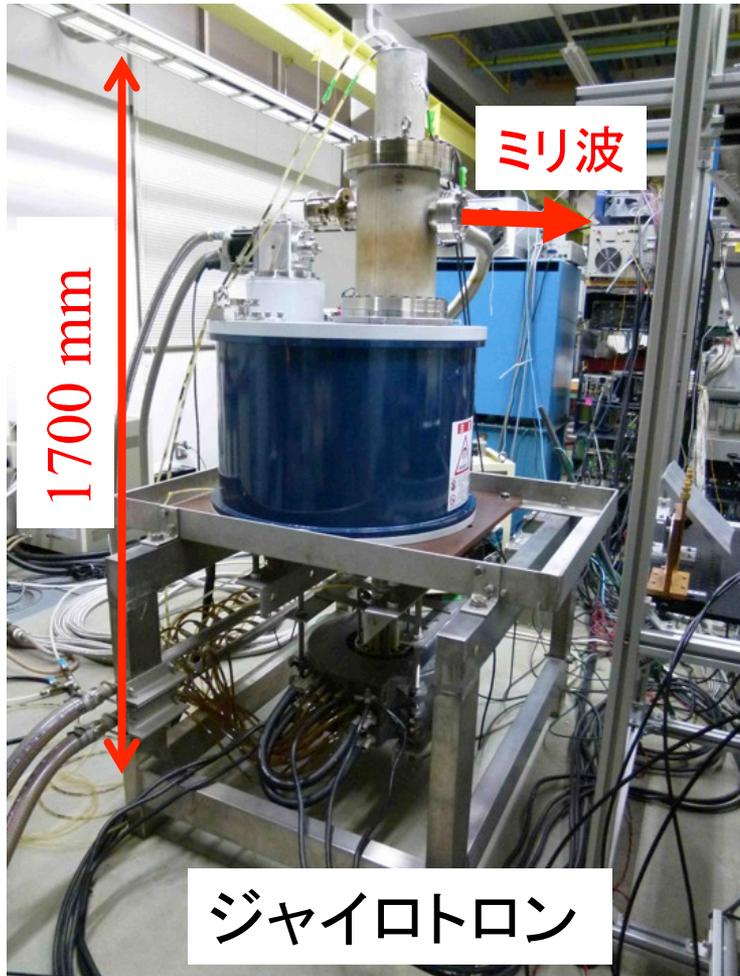
- 203GHzのミリ波により $o\text{-Ps}$ から $p\text{-Ps}$ へ誘導遷移(M1遷移)
- 遷移した $p\text{-Ps}$ が短寿命(125 ps)で2つのガンマ線に崩壊
→ 2γ 崩壊率がPs-HFSを中心としたBreit-Wigner曲線を描く

Psが短寿命のため10 kW以上のハイパワー安定ミリ波が必要

実験セットアップ



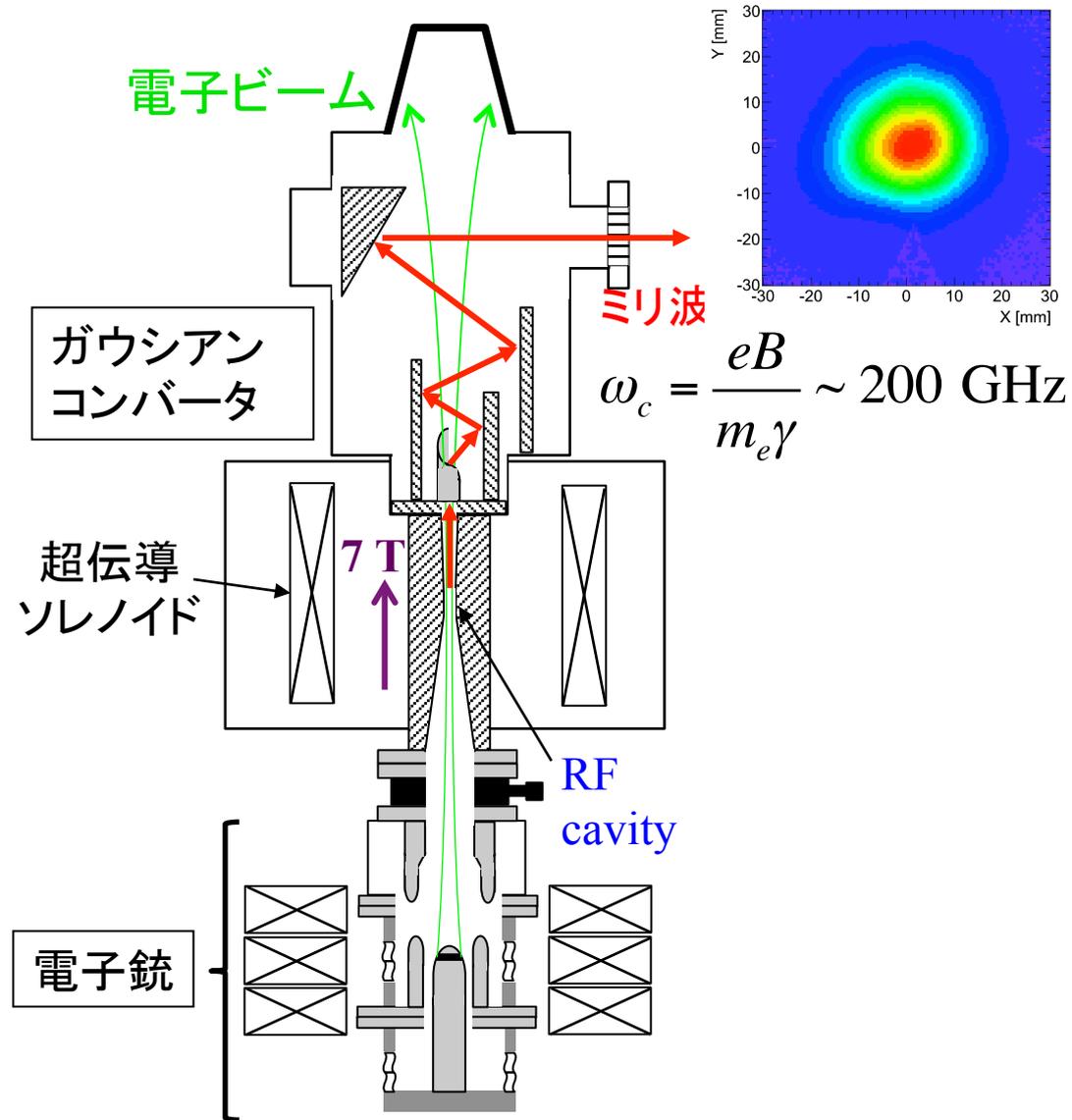
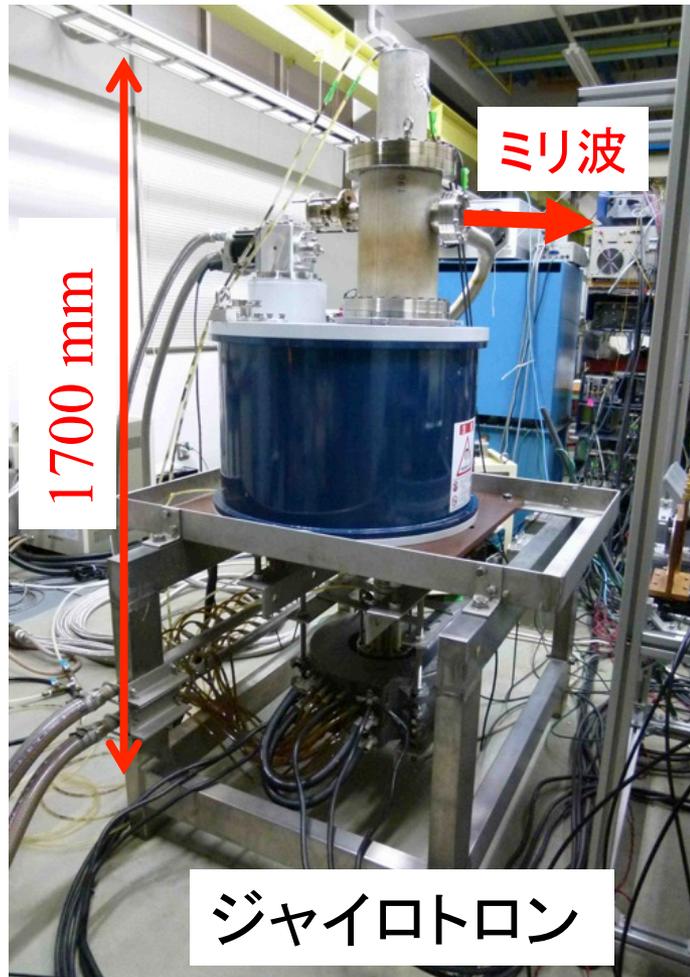
ジャイロトロンとファブリペロー共振器



ミリ波デバイスを新たに開発

- 核融合の点光源「ジャイロトロン」を精密科学へ応用 (100W)
- レーザーで使われる「ファブリペロー共振器」をミリ波応用 (20kW)

ジャイロトロン、レーザ→ブリペロ 井 拓 昭



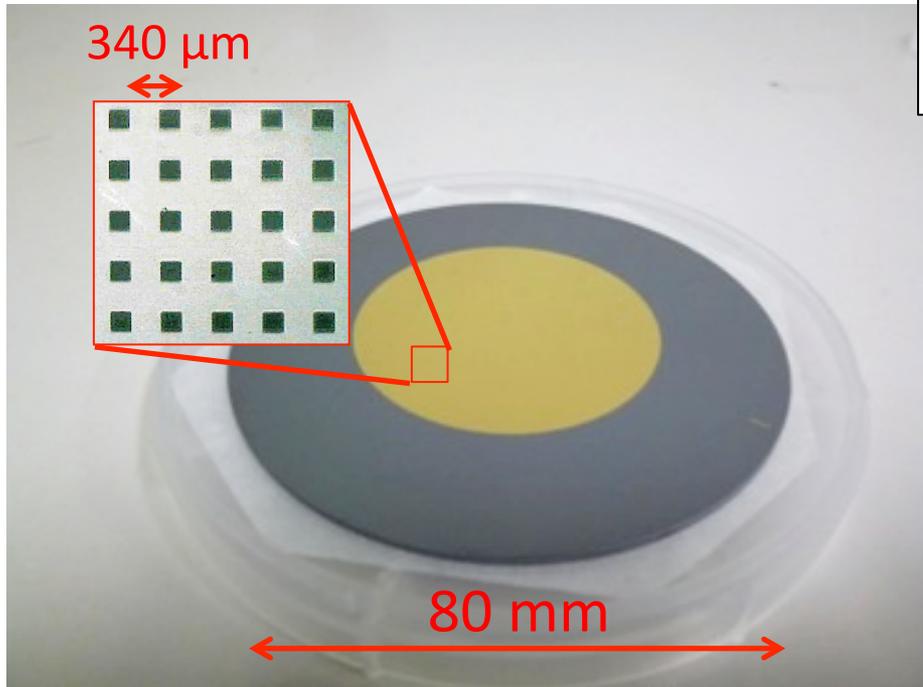
ミリ波デバイスを新たに開発

- 核融合の点光源「**ジャイロトロン**」を精密科学へ応用 (100W)
- レーザーで使われる「ファブリペロー共振器」をミリ波応用 (20kW)

ペロー共振器

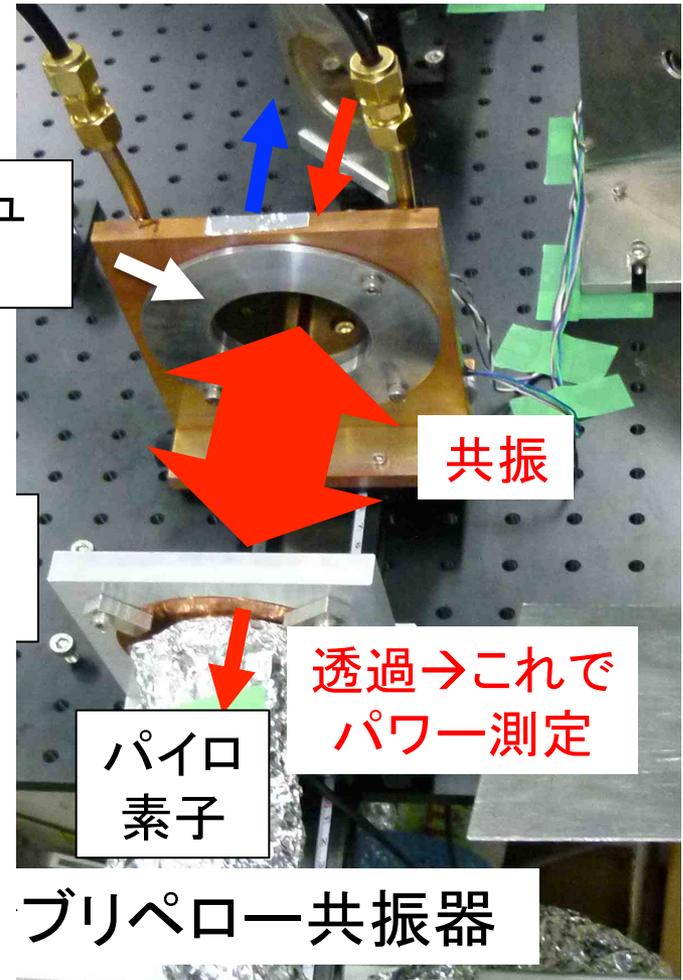
金の薄膜メッシュ

厚み $1\mu\text{m}$, 線幅 $200\mu\text{m}$, ギャップ $140\mu\text{m}$



高抵抗シリコン基板で水冷

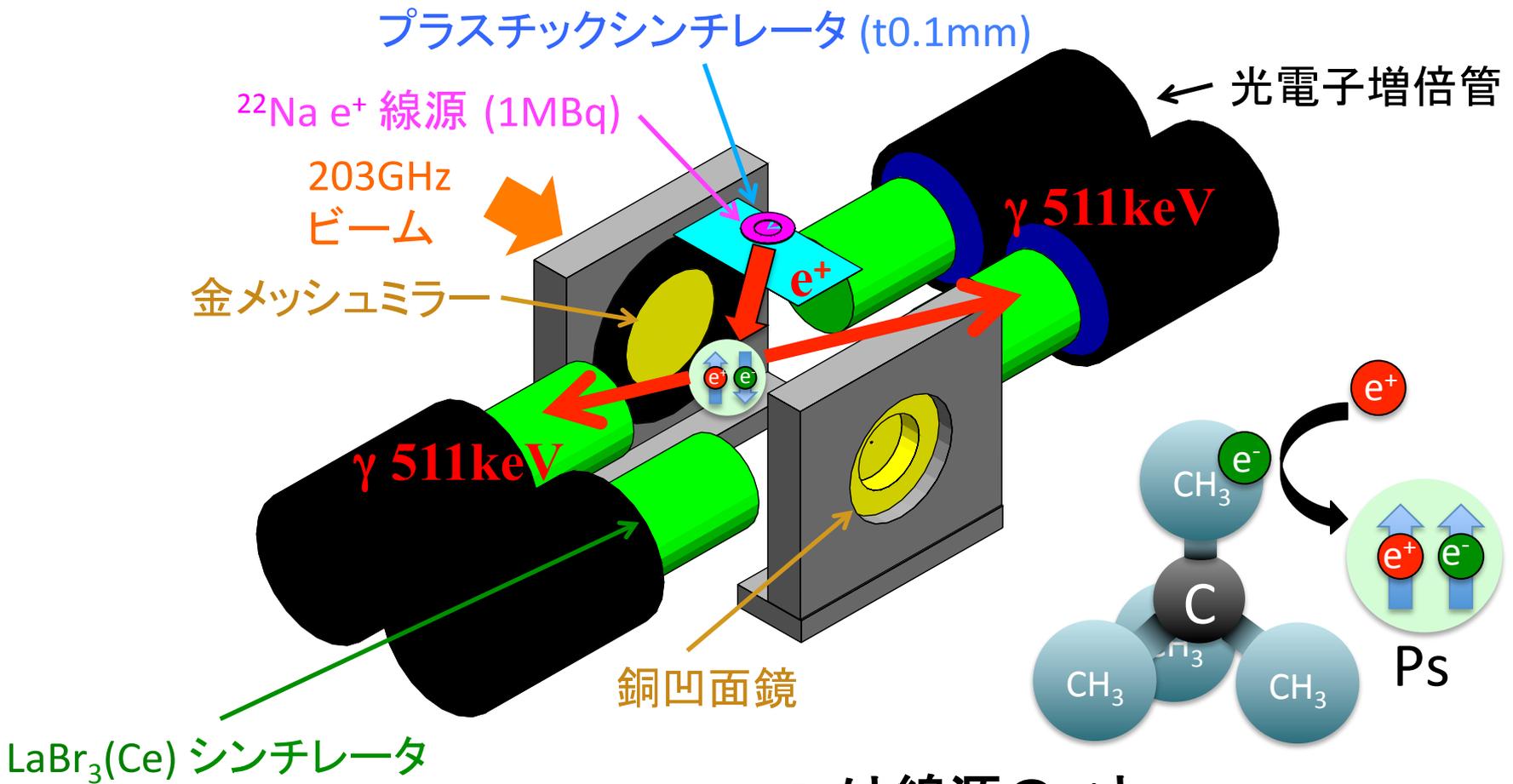
メッシュ
ミラー



- 核融合の点光源「ジャイロトロン」を精密科学へ応用 (100W)
- レーザーで使われる「**ファブリペロー共振器**」をミリ波応用 (20kW)

Ps生成・ガンマ線検出器

o -Ps (長寿命142ns) \rightarrow p -Ps \rightarrow 2γ (back-to-back 511keV) が遷移シグナル



Psは線源の e^+ と
ネオペンタンガス中の e^- で生成

Ps生成・ガンマ線検出器

o -Ps (長寿命142ns) \rightarrow p -Ps \rightarrow 2γ (back-to-back 511keV)が遷移シグナル

プラスチックシンチレータ (t0.1mm)

^{22}Na e^+ 線源 (1MRad)



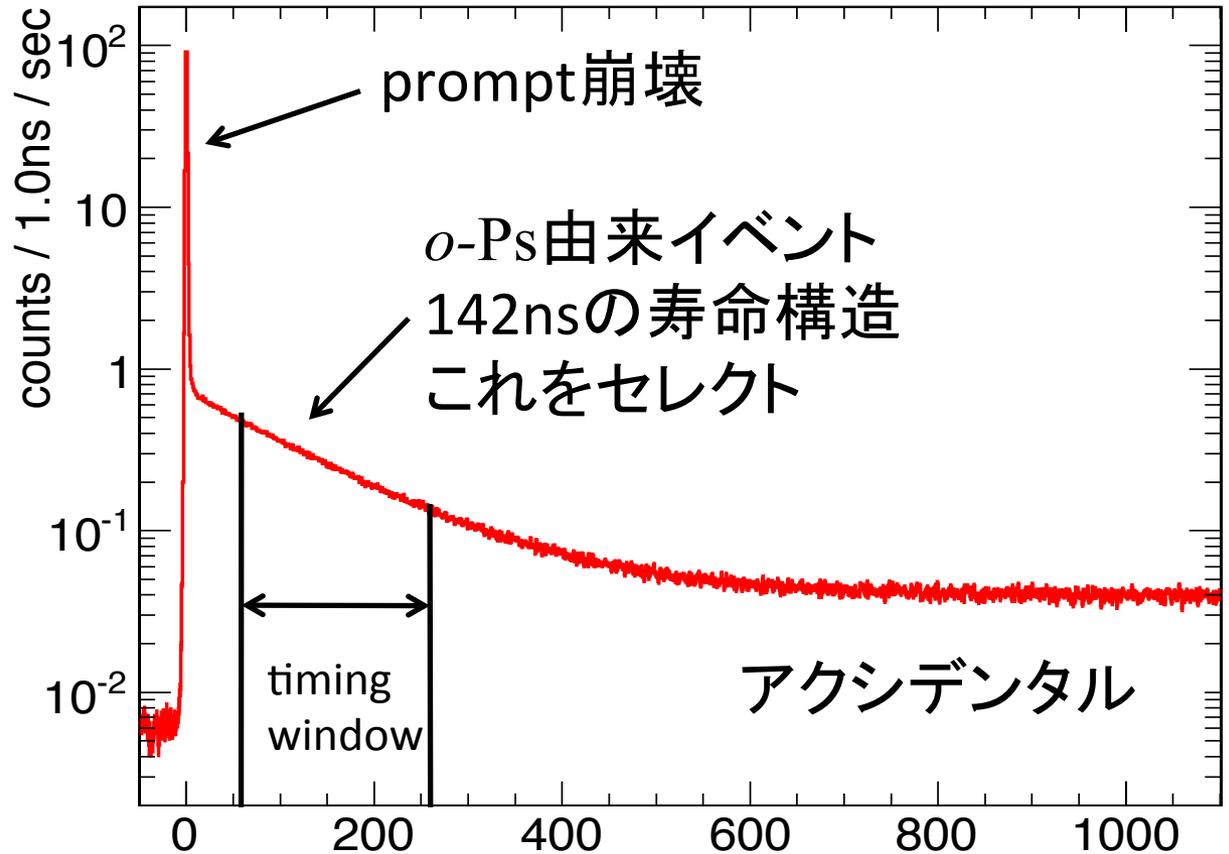
光電子増倍管

203GHz
ビーム

金メッシュミラー

γ 511

$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレータ

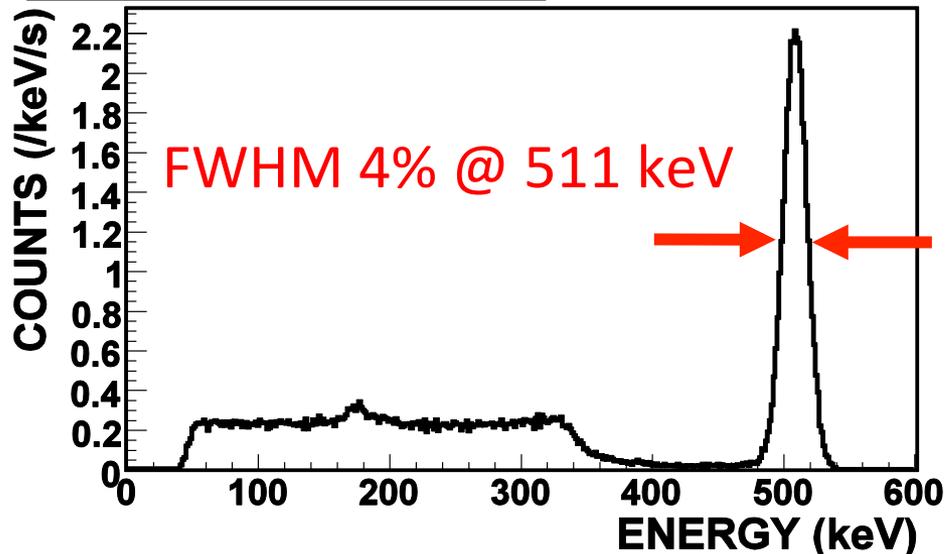


ガンマ線(LaBr₃)とe⁺(プラシン)の時間差 [ns]

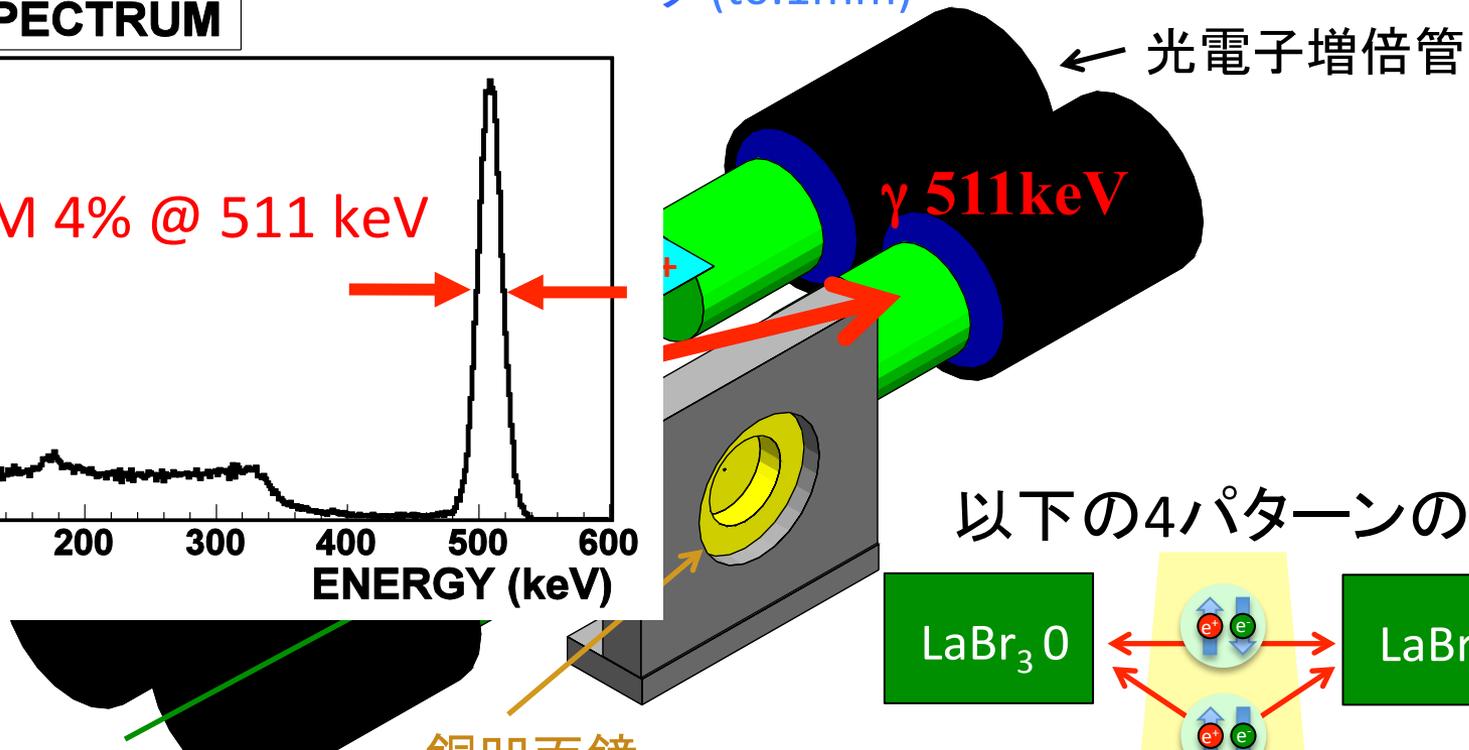
Ps生成・ガンマ線検出器

o -Ps (長寿命142ns) \rightarrow p -Ps \rightarrow 2γ (back-to-back 511keV) が遷移シグナル

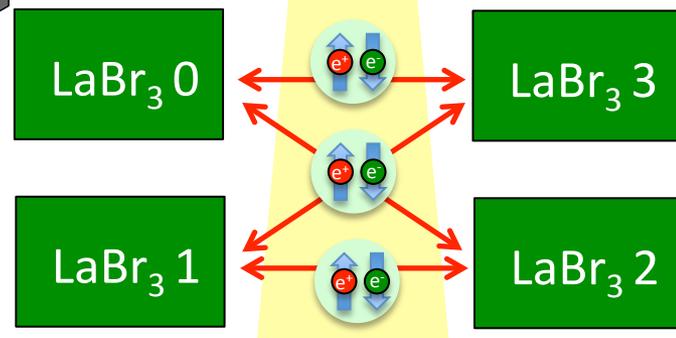
ENERGY SPECTRUM



タ (t0.1mm)



以下の4パターン之和

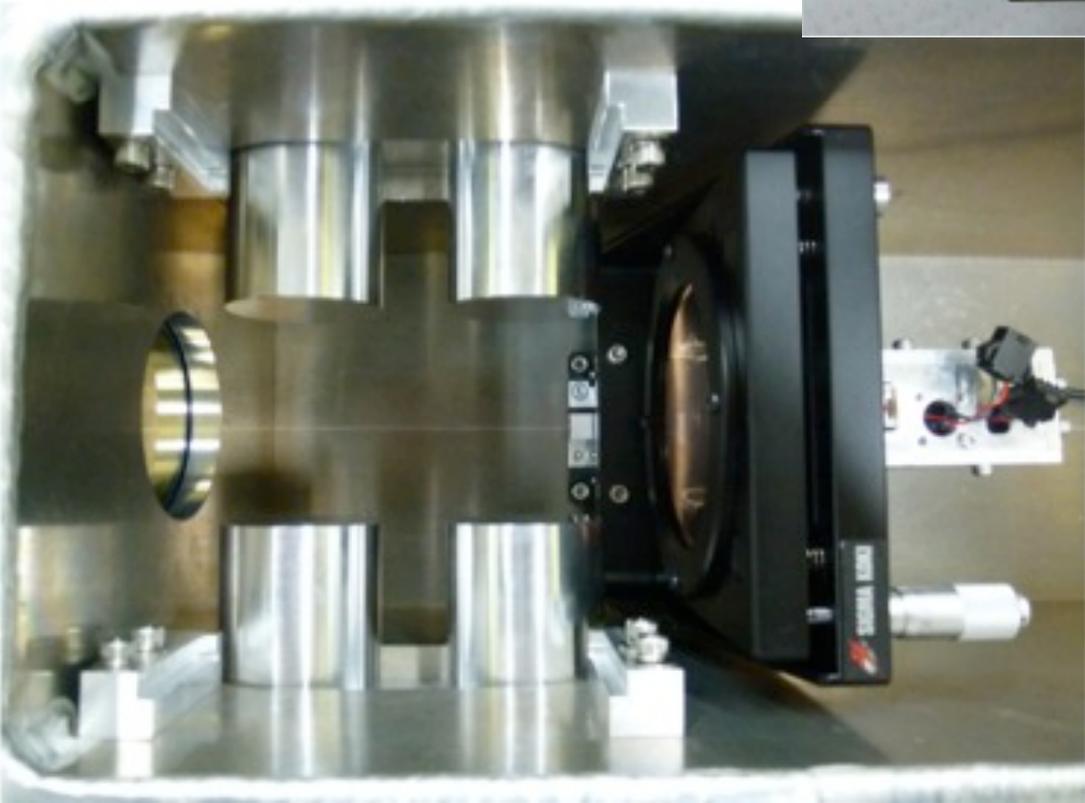
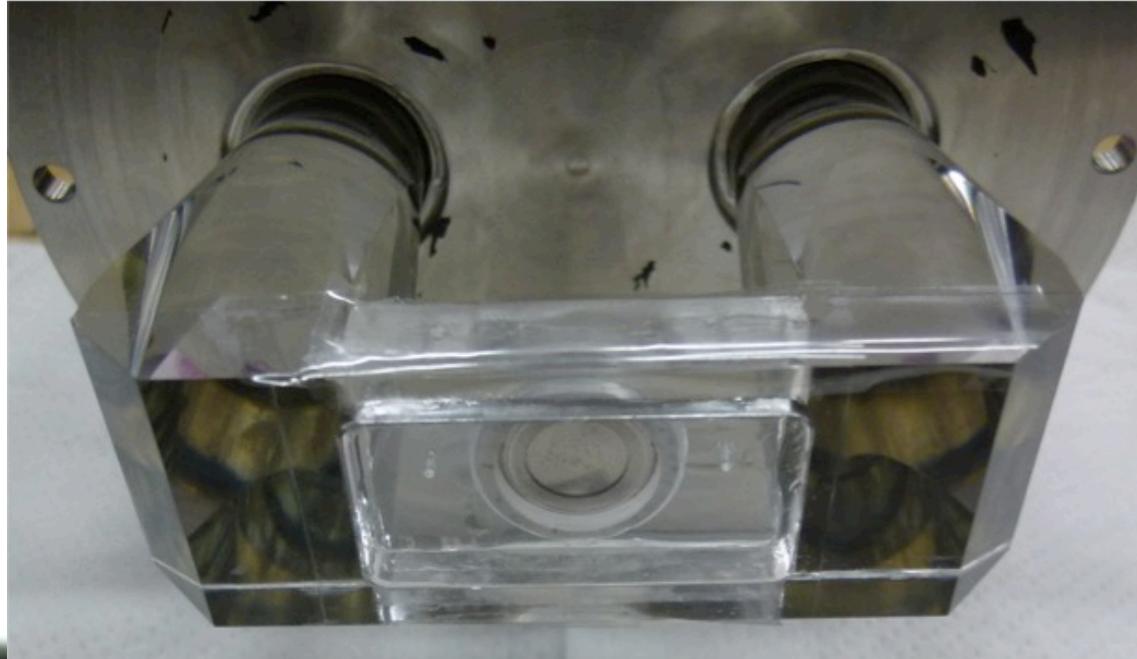


Psが広い領域で生成するため同じくらいのレート

LaBr₃(Ce) シンチレータ

- 高いエネルギー分解能 (FWHM 4%@511keV)
- 高統計に耐える(時定数16ns)
- 阻止能もNaI等にくらべ高い

線源&ライトガイド→



ファブリペロー共振器
&LaBr₃(Ce)結晶
←

取得したデータ (測定期間: 2013年5月から12月)

全8周波数点でデータ取得 (e^+ タグとback-to-back γ 線のコインシデンス)

frequency	power	livetime
180.59 GHz	41 kW	33 hours
201.83 GHz	22 kW	37 hours
202.64 GHz	23 kW	31 hours
203.00 GHz	21 kW	18 hours
203.25 GHz	21 kW	37 hours
203.51 GHz	41 kW	34 hours
204.56 GHz	20 kW	34 hours
205.31 GHz	24 kW	50 hours

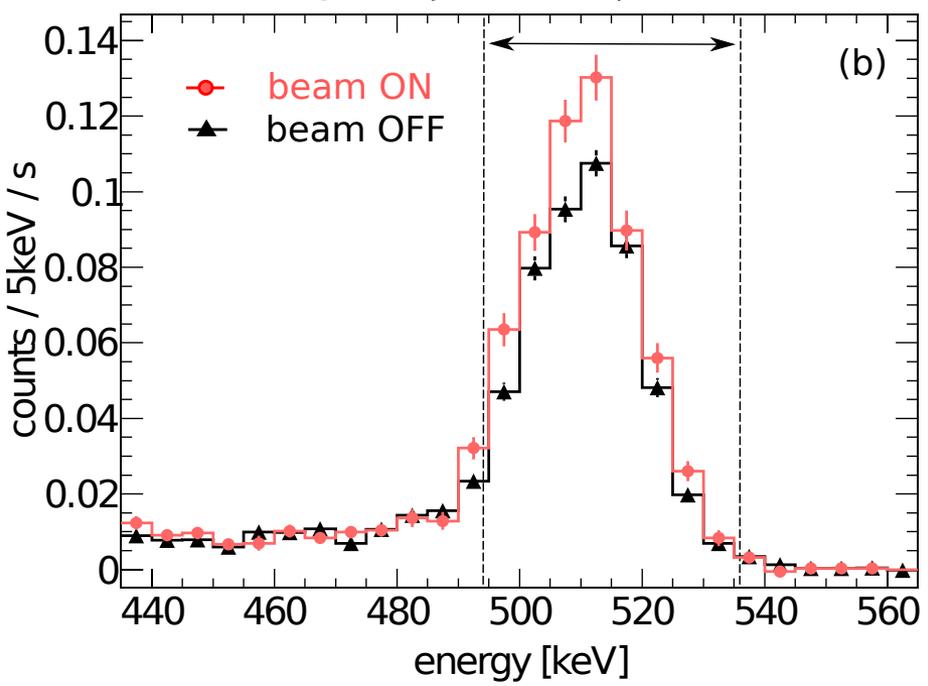
周波数はジャイロトロン内部cavityを交換することで変更

観測された遷移シグナルの例

ジャイロトロンをパルス動作(duty 30%)させ、beam OFFでバックグラウンドを見積もる

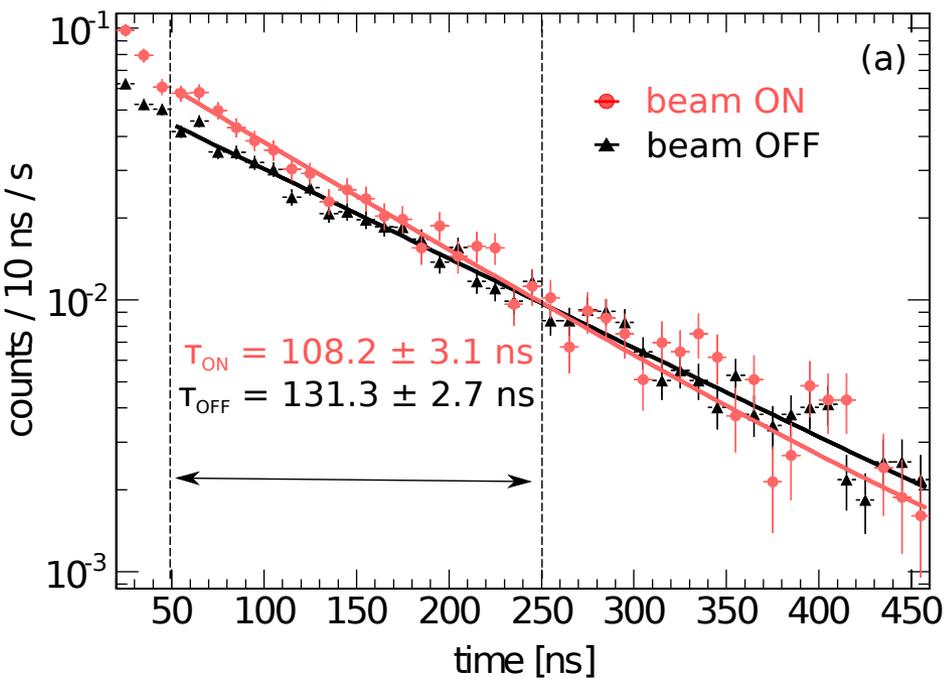
203.51 GHz, 67.4 kWの時の遷移

エネルギースペクトル



ON – OFFで有意なシグナル
93.3 ± 14.4 mHz (S/N=21%)を観測

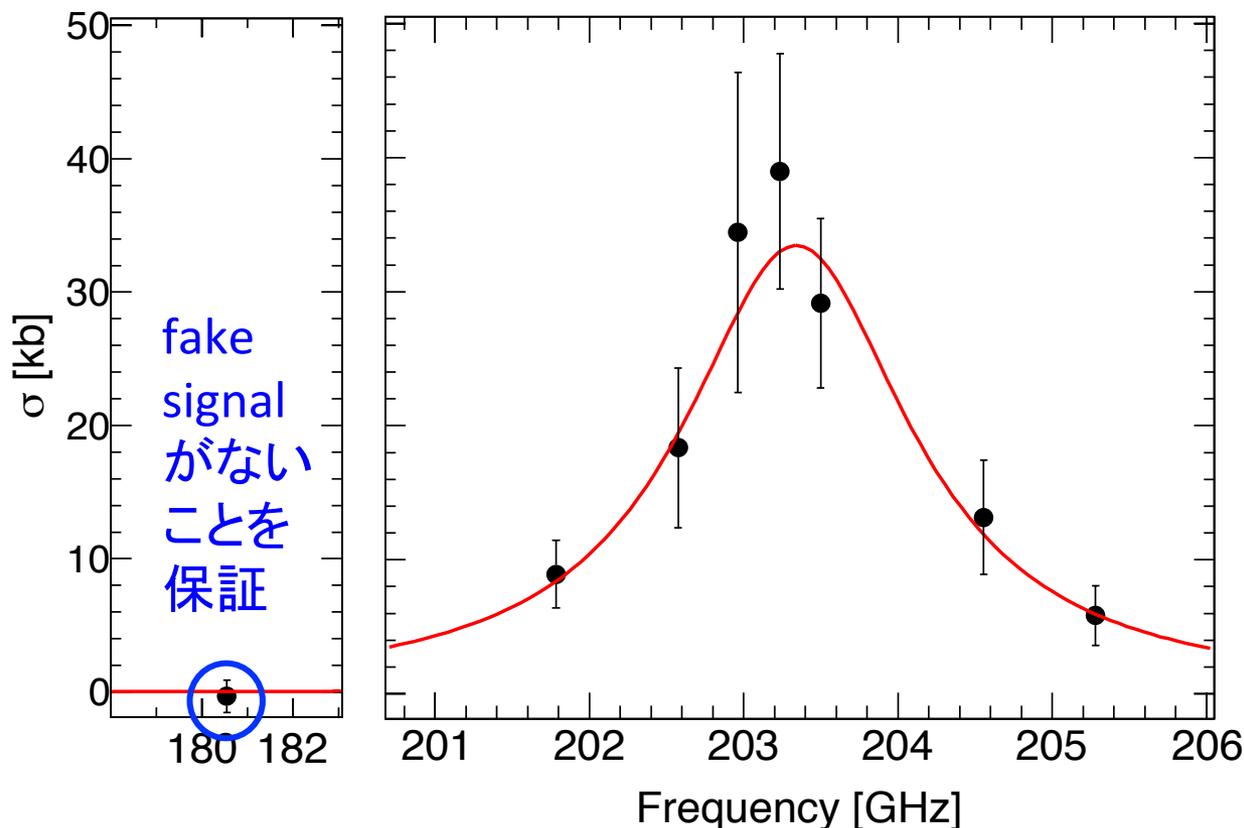
タイミングスペクトル



OFFにくらべONでは遷移によって
寿命が短くなっている

「遷移量 mHz」はパワー (photon flux) に依存
→ パワー情報から「遷移確率(反応断面積)」へ焼きなおす

遷移確率をBreit-Wigner関数でFit



共鳴中心 $\rightarrow \Delta_{\text{HFS}}^{\text{Ps}} = 203.39_{-0.14}^{+0.15} (\text{stat.}) \pm 0.11 (\text{syst.}) \text{ GHz}$

p -Ps寿命 $\rightarrow \tau_{p\text{-Ps}} = 89_{-15}^{+18} (\text{stat.}) \pm 10 (\text{syst.}) \text{ ps}$

$\Delta_{\text{HFS}}^{\text{Ps}} (\text{QED}) = 203.391\,69(41) \text{ GHz} \quad \tau_{p\text{-Ps}} (\text{QED}) = 125.164\,7(2) \text{ ps}$

いずれも初直接測定. 遷移量(高さ)含め理論予想と無矛盾

まとめ

- ポジトロニウムはQEDを検証する上で興味深い系であるが, その超微細構造はミリ波帯ゆえに直接測定されていなかった
- ミリ波技術開発に取り組み, ジャイロトロン発振器, Fabry-Pérot共振器によってポジトロニウム超微細構造の初直接測定に成功
- 値は $\Delta_{\text{HFS}}^{\text{Ps}} = 203.39_{-0.14}^{+0.15} (\text{stat.}) \pm 0.11 (\text{syst.}) \text{ GHz}$
- 同時に p -Psの寿命 (崩壊幅)も初直接測定
- 値は $\tau_{p\text{-Ps}} = 89_{-15}^{+18} (\text{stat.}) \pm 10 (\text{syst.}) \text{ ps}$
- 参考 arXiv:1403.0312