

サブミリ波を用いたポジトロニウム 超微細構造の精密測定

光学系の現状と検出器系

宮崎彬^A, 末原大幹^A, 石田明^A, 秋元銀河^A, 難波俊雄^A, 浅井祥仁^A, 小林富雄^A,
斎藤晴雄^B, 漆崎裕一^C, 小川勇^C, 出原敏孝^C, S.Sabchevski^D

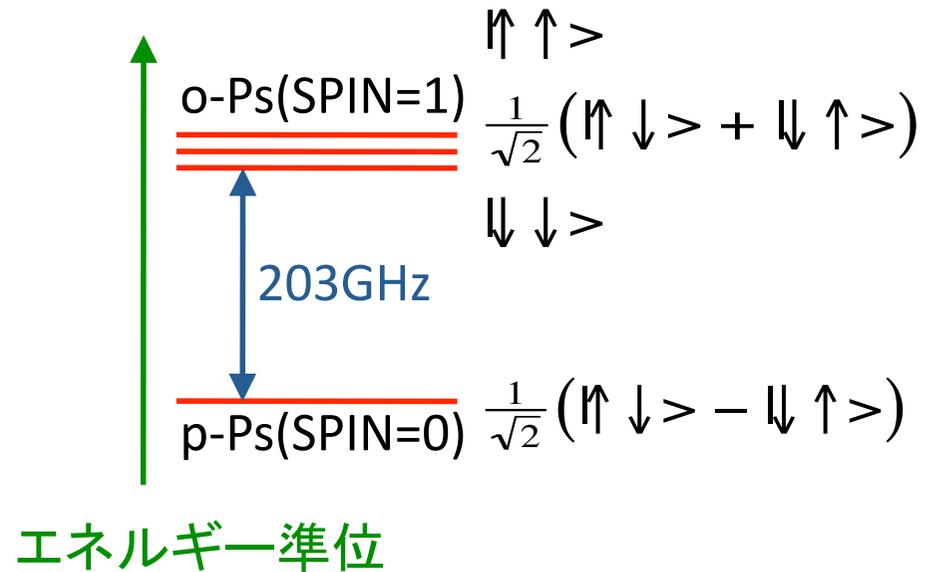
^A 東大理・東大素粒子センター, ^B 東大院総合文化,
^C 福井大遠赤センター, ^D ブルガリア科学アカデミー

京都大学原子炉実験所専門研究会
「陽電子科学とその理工学への応用」
2009.11.20 @京都大学原子炉実験所

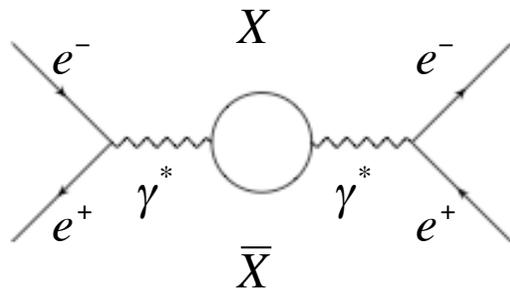
ポジトロニウムと ポジトロニウム超微細構造について

ポジトロニウム (Ps) のエネルギー準位と超微細構造 (HFS)

- e^+e^- の束縛系
 spin=1 : オルソポジトロニウム
 (o-Ps, 3γ 崩壊, $\tau=142\text{ns}$)
 spin=0 : パラポジトロニウム
 (p-Ps, 2γ 崩壊, $\tau=0.125\text{ns}$)
- o-Ps と p-Ps の間のエネルギー差
 HFS = 203GHz (0.84meV)
 (c.f. H原子のHFS=1.4GHz)
- Spin相互作用に由来
 + 高次の量子補正が効く



何が面白いのか？
 レプトンペアのクリーンな系
 → 精密な予測、測定が可能
 o-Psは光子と同じ量子数
 → 未知粒子Xが介在する反応
 p-Psは真空と同じ量子数



HFSの値は実験と理論で乖離している

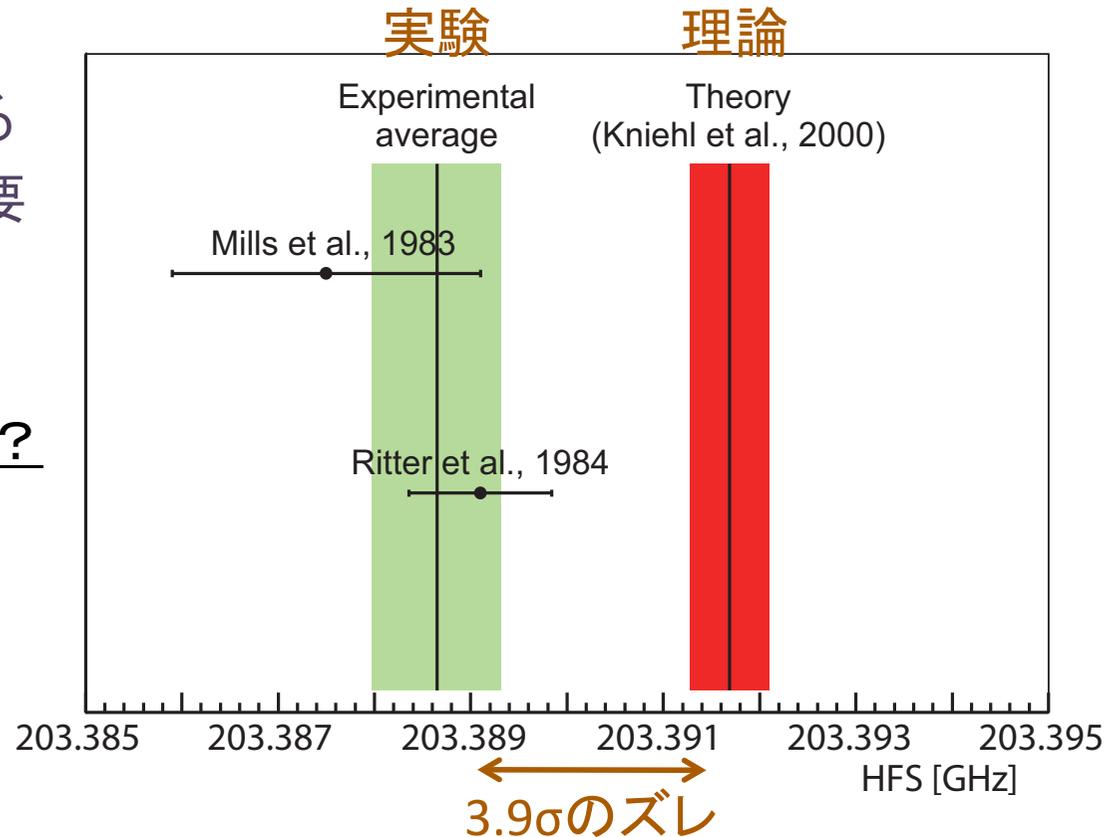
- 過去の実験の平均で3.3ppmの精度(Mills, Ritter, et al.)
- 理論はそれを後追いする形で、 $O(\alpha^3)$ の精度(Kniehl et al., 2000)

(実験) = 203.388 65(67) GHz (3.3ppm)
(理論) = 203.391 69(41) GHz (2.0ppm)

<HFSの値>

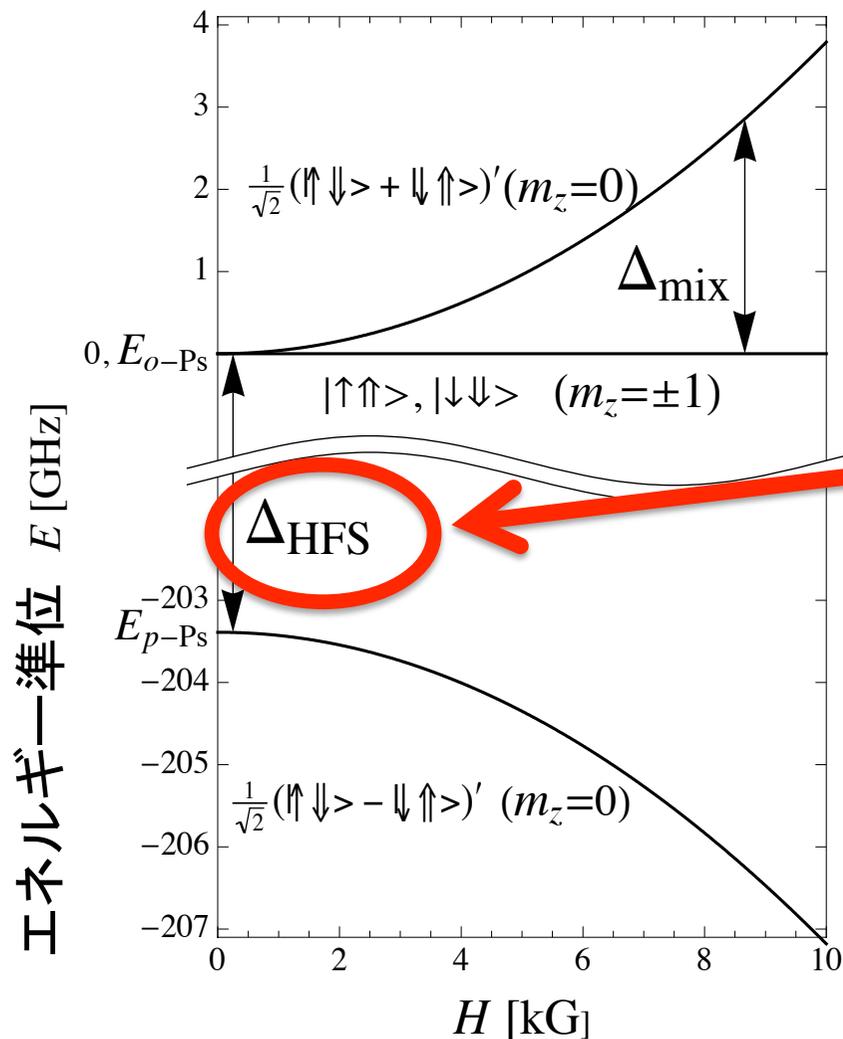
実験の平均と3.9 σ ずれている
->再度精密測定が必要

- 新しい物理の可能性？
- 系統誤差を見逃しただけ？



過去の実験と我々の方針

<磁場が変わったときのPsエネルギー準位> <過去の実験>



磁場の強さ[kG]

203GHzの直接測定は不可能

→磁場中でゼーマン効果を見ていた

- ◆ 磁場の系統誤差
- ◆ 物質の効果によるズレ

<我々の実験>

◆ 磁場を使わない直接測定

→203GHz測定(宮崎)

◆ 0(100)ppmの結果を簡単に(光源を用いず)出せる新しい方法

→量子振動での測定(佐々木)

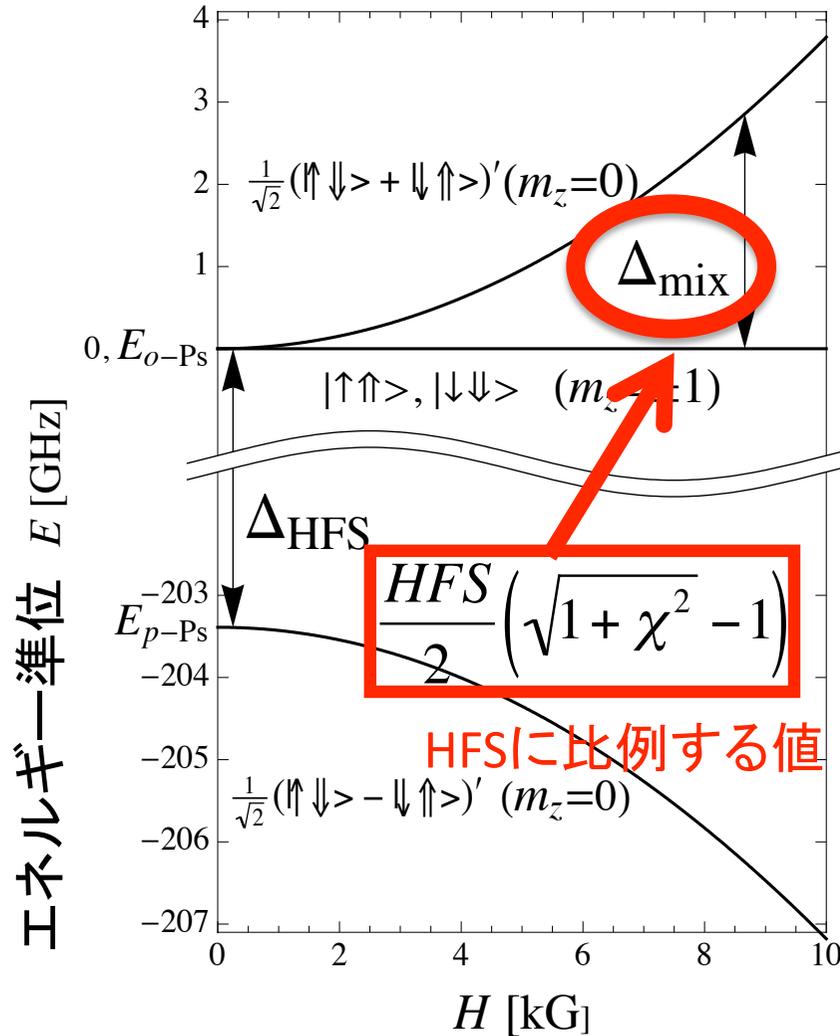
◆ 物質の効果を正しく入れる

+高精度の磁場

→3GHz測定(秋元)

過去の実験と我々の方針

<磁場が変わったときのPsエネルギー準位><過去の実験>



磁場の強さ[kG]

203GHzの直接測定は不可能
→磁場中でゼーマン効果を見ていた

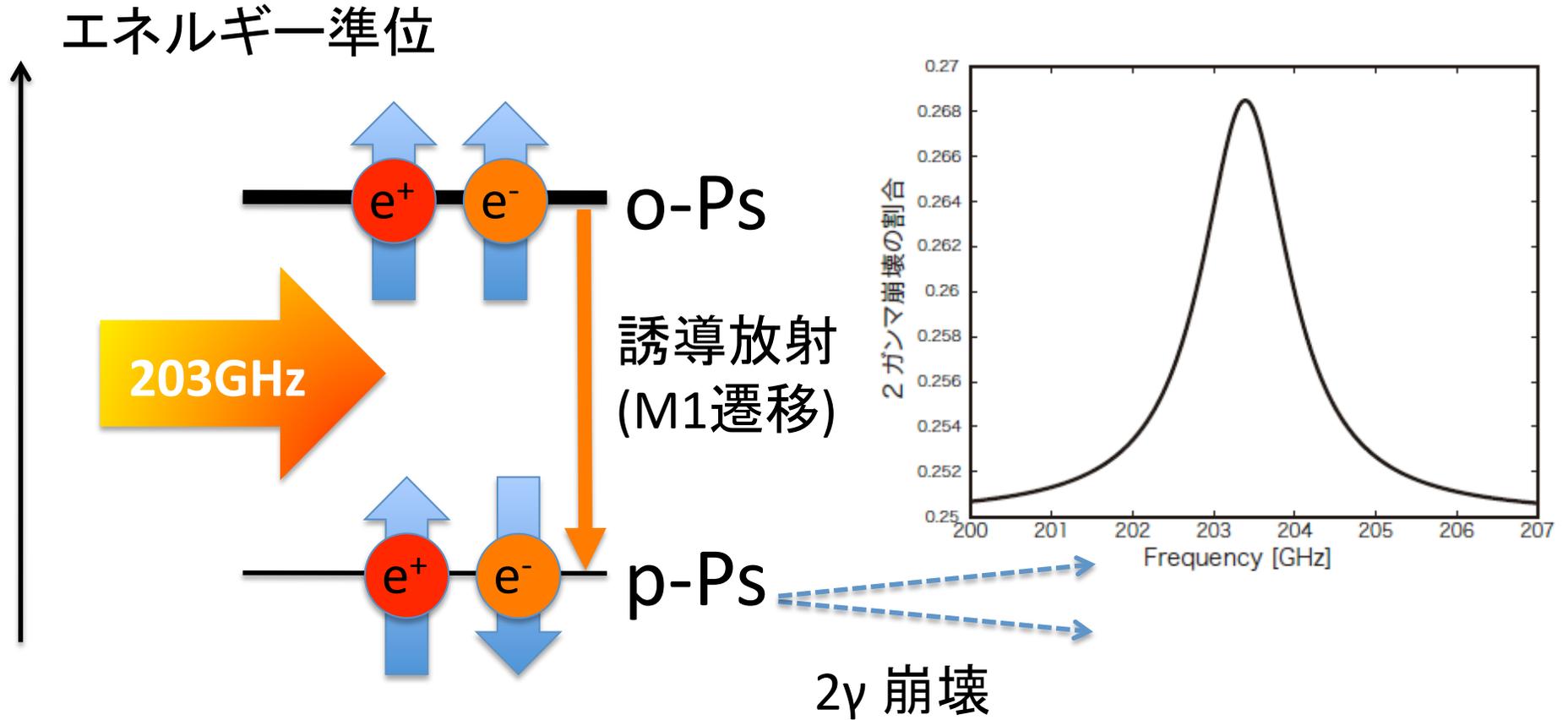
- ◆ 磁場の系統誤差
- ◆ 物質の効果によるズレ

<我々の実験>

- ◆ 磁場を使わない直接測定
→203GHz測定(宮崎)
- ◆ 0(100)ppmの結果を簡単に(光源を用いず)出せる新しい方法
→量子振動での測定(佐々木)
- ◆ 物質の効果を正しく入れる
+高精度の磁場
→3GHz測定(秋元)

サブミリ波を用いた直接測定

HFS直接測定の概要



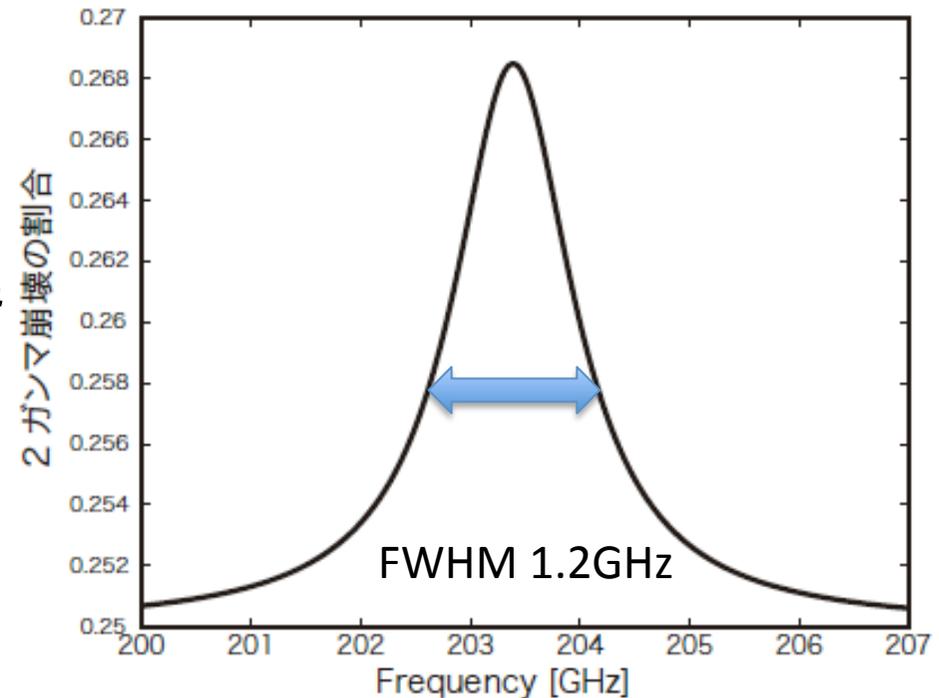
- $o\text{-Ps}$ がサブミリ波によって $p\text{-Ps}$ に遷移
- $p\text{-Ps}$ はすぐに (寿命125 psec) 2γ 崩壊 \rightarrow 2γ 崩壊率の上昇
- 入力波の周波数に対して, 203GHzを中心とした共鳴曲線が得られる

直接測定の“鍵”

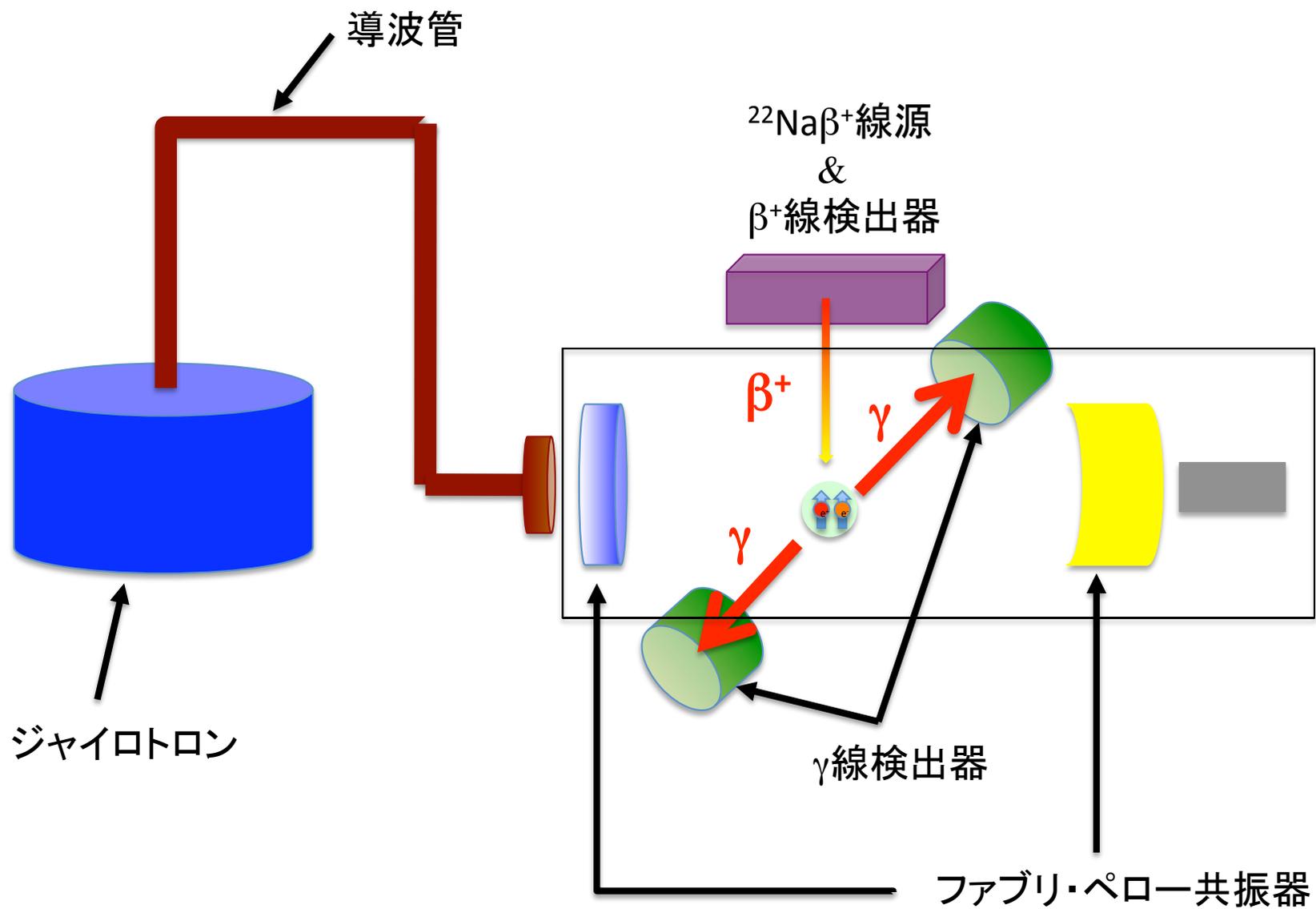
- 高いphoton密度が必要
 - o-Ps \rightarrow p-PsはM1遷移: $\tau = 3 \times 10^8$ sec
 - $\sigma \sim 1/\nu \rightarrow 3$ GHzの70倍遷移しにくい
- 数GHzの波長チューニングが必要

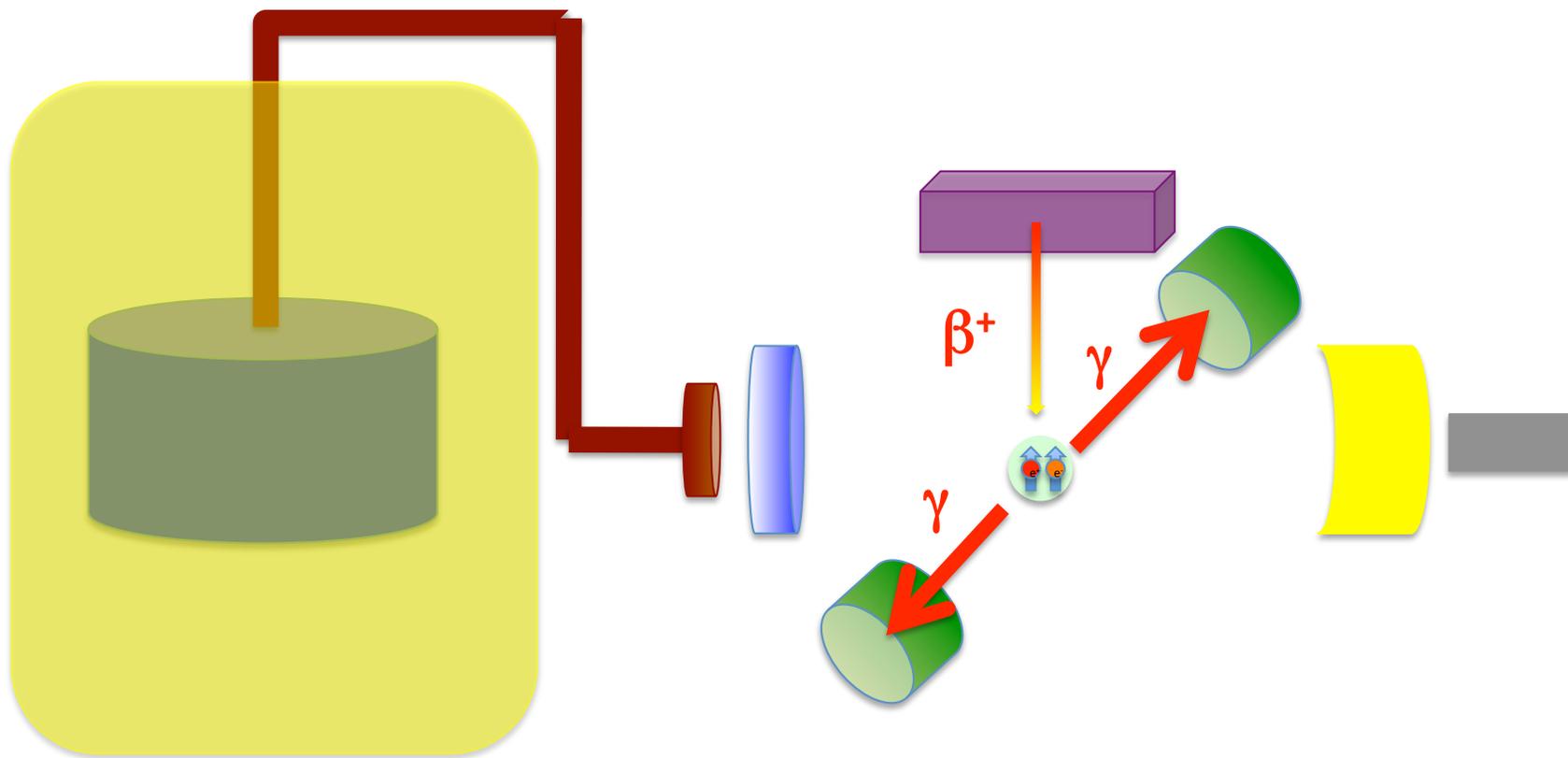


- 大強度・高安定光源
 - ジャイロトロン
- 高性能・周波数可変共振器
 - ファブリー・ペロー共振器



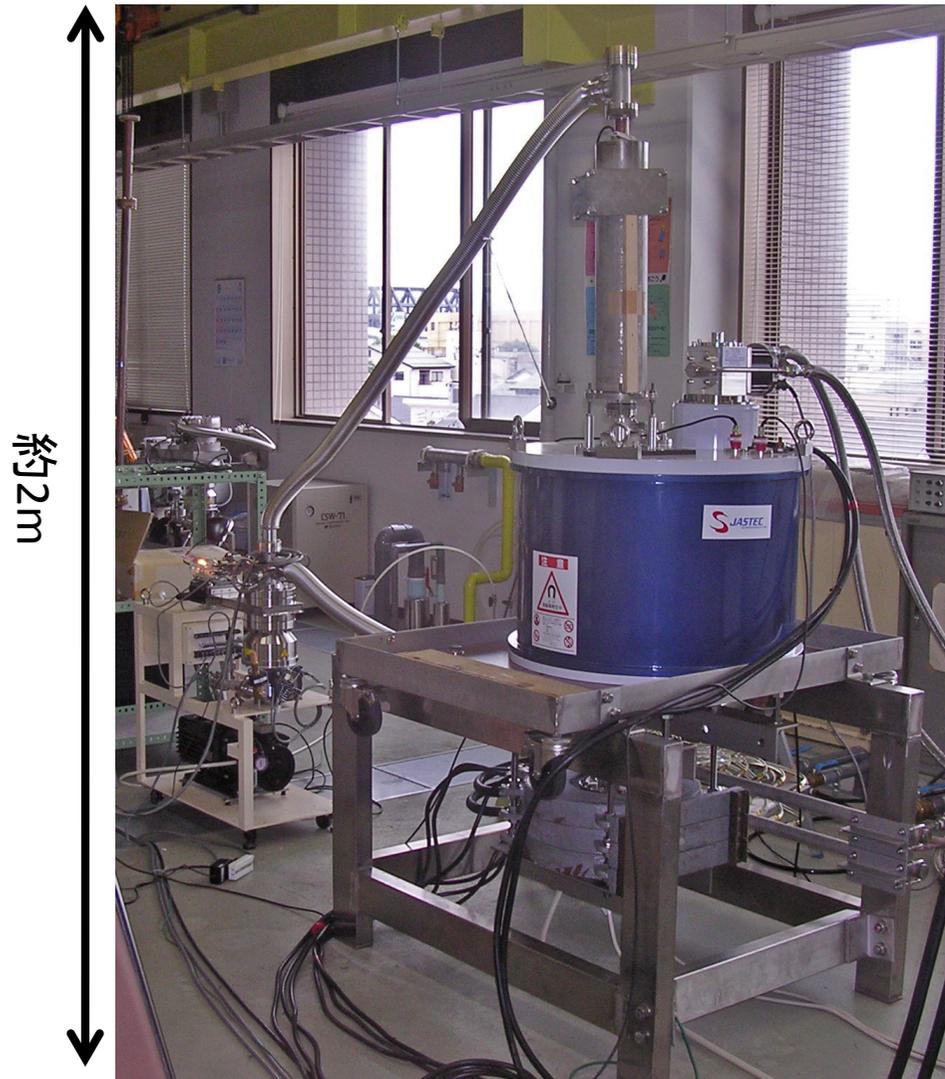
全体のセットアップ



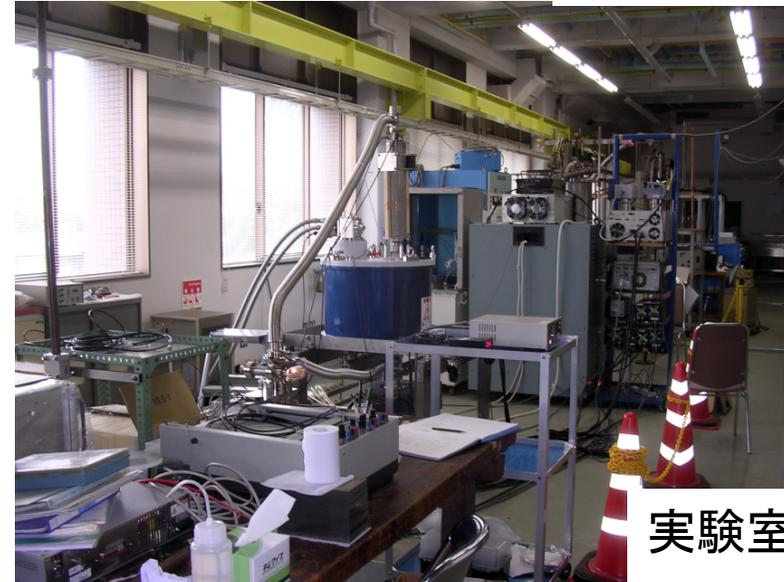


ジャイロトロン

ジャイロトロン(1) 写真

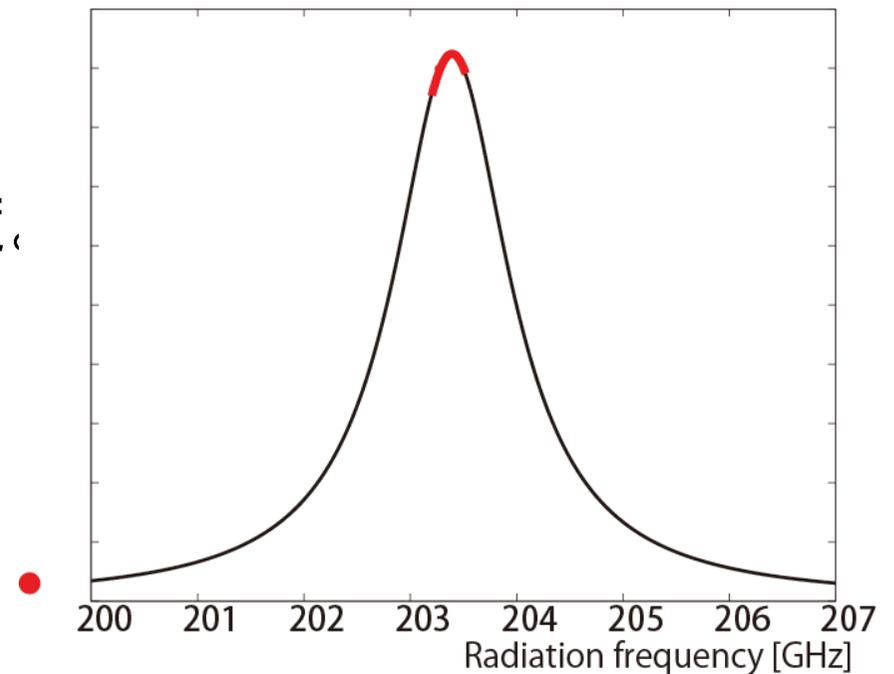


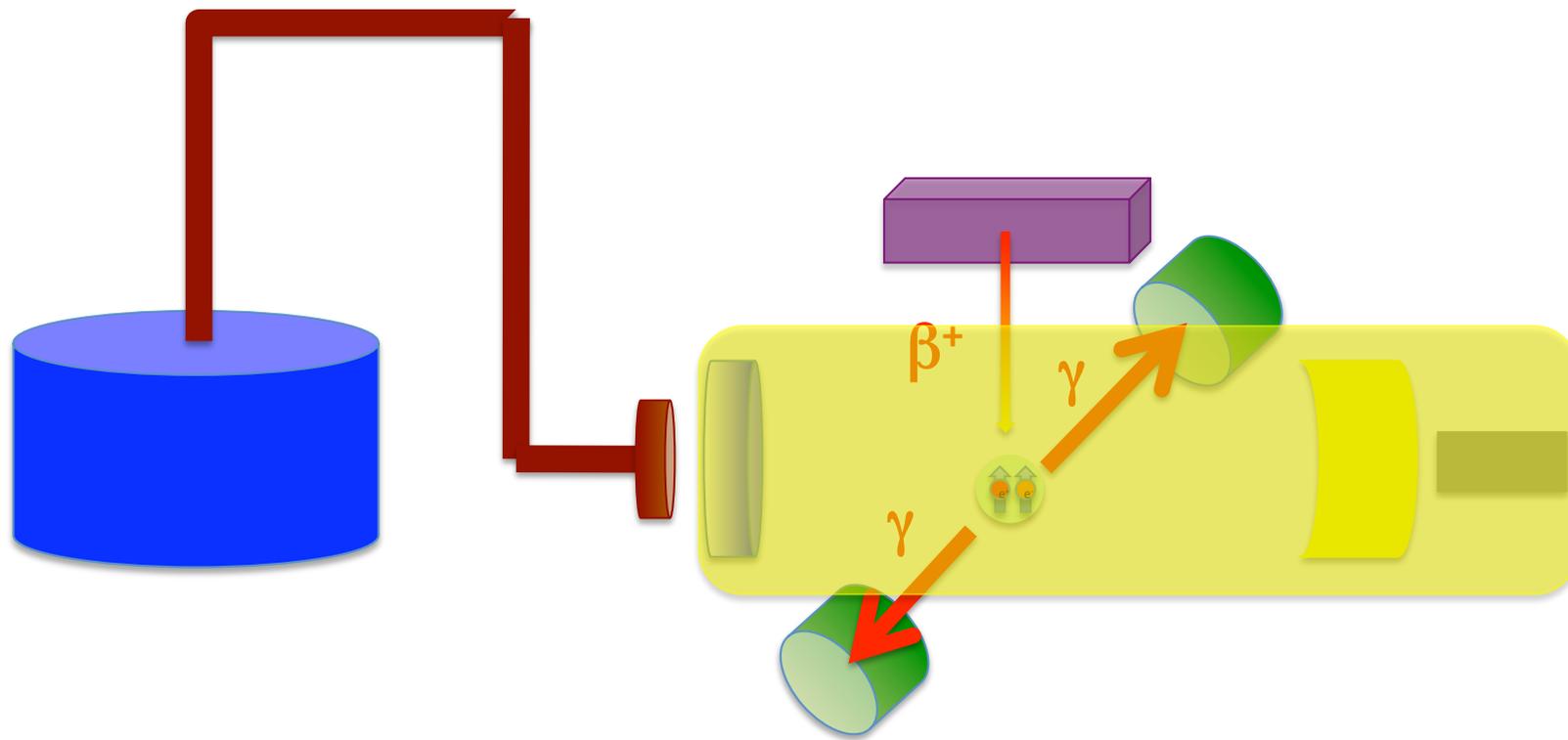
本測定用に開発した
ジャイロトロン(Gyrotron FU CW V)



ジャイロトロン(2) 特性

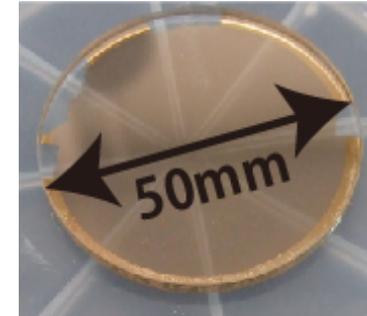
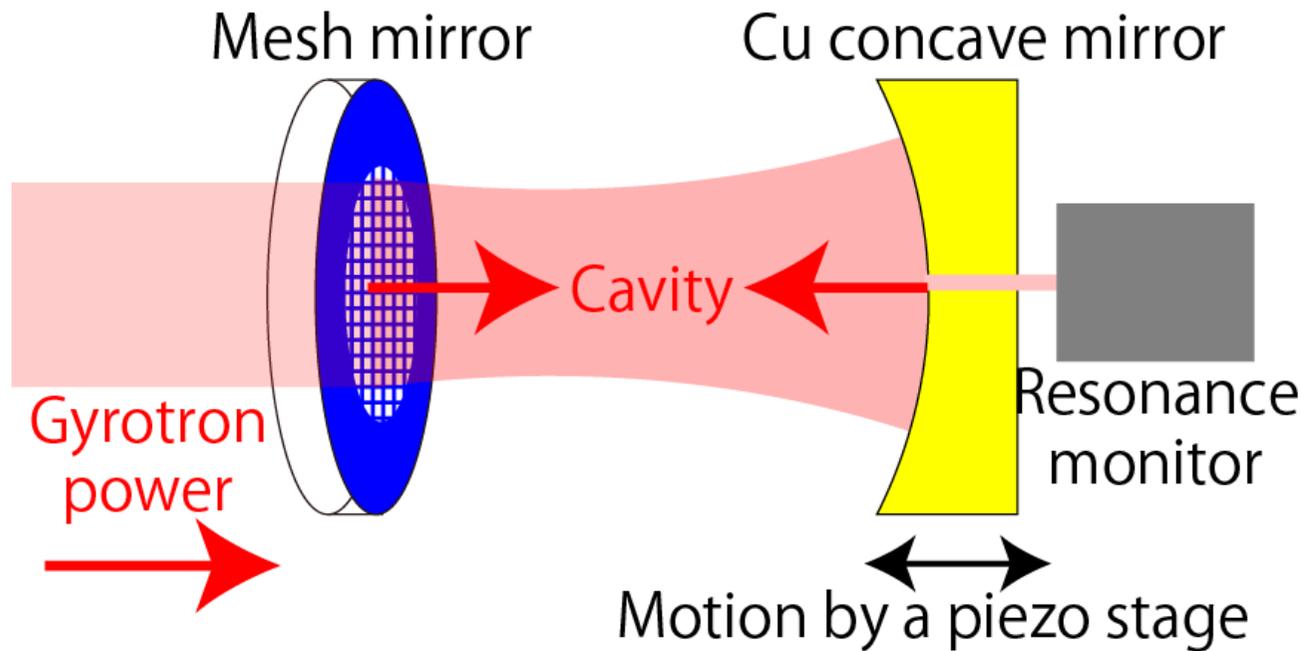
- Gyrotron FU CW V
- 609W出力を達成 (導波管出口で440W)。
- 中心周波数203.08 GHz (実測値)。
 - 周波数変調幅は数百MHz程度。
数GHz変調可能なジャイロトロンも開発中で
今後upgradeを予定。
 - 別の共振モードにより199GHzの
off-resonance測定・比較は可能。
- 単色性は極めて高く、10kHz程度、
(他のジャイロトロンでの実測値)





ファブリー・ペロー共振器

203 GHz ファブリ・ペロー共振器の概要



クォーツに金を蒸着したメッシュミラー



銅凹面ミラー

- 入射側はメッシュミラーで効率的にパワーを導入
- 出射側は銅凹面ミラーで横方向の閉じこめ
- ピエゾステージで共振長さをコントロール
- 出射側にパワーモニタを設置, 共振を測定

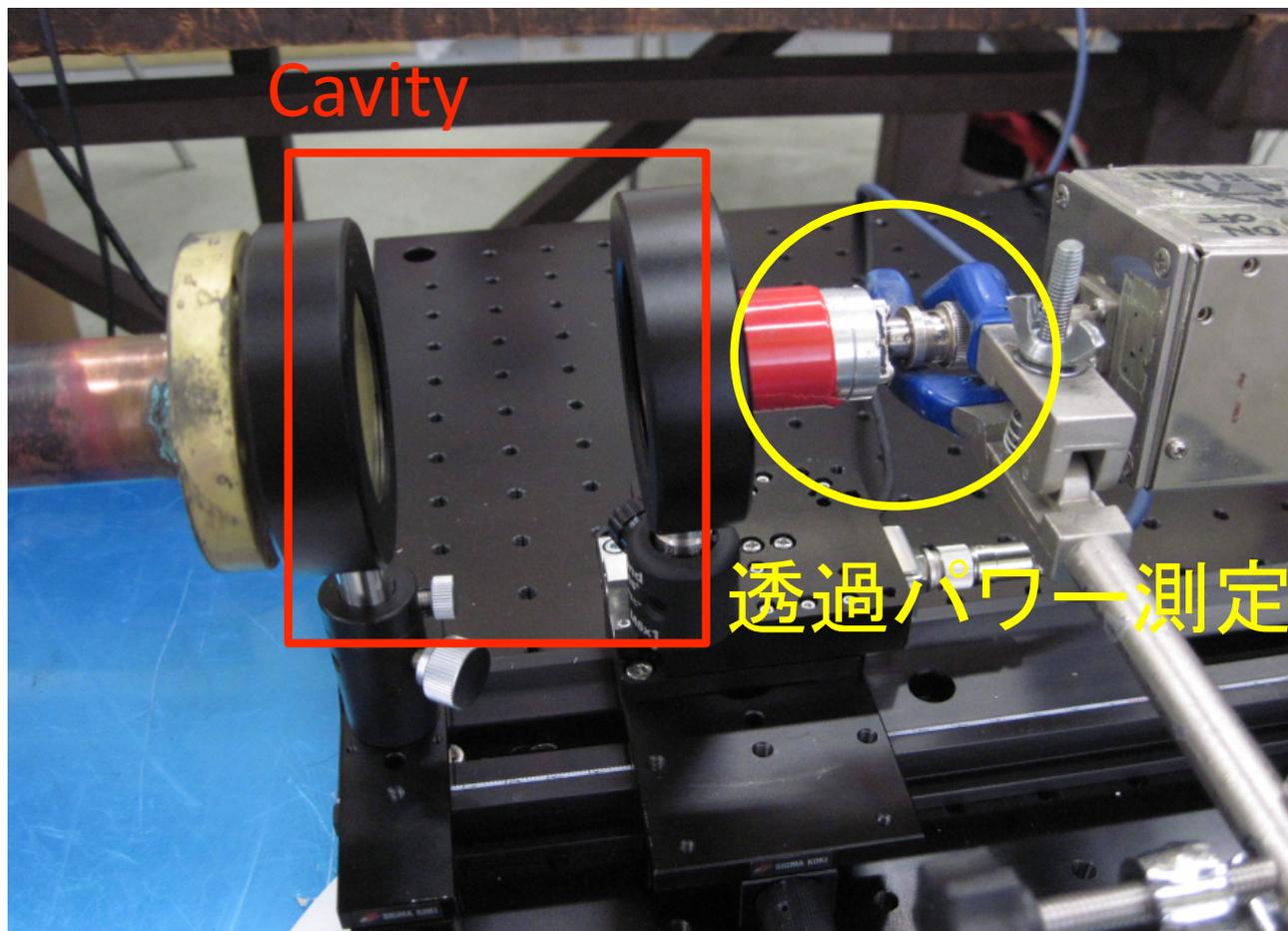
Cavity test (1) setup

- ジャイロトロンを用いて福井大学でCavity試験を行った
- Cavityの透過パワーをパイロエレクトリックディテクタで測定



パイロエ
レクトリ
ック
ディテク
タ

ジャイロトロン
から入力



Cavity test (2) 測定データ

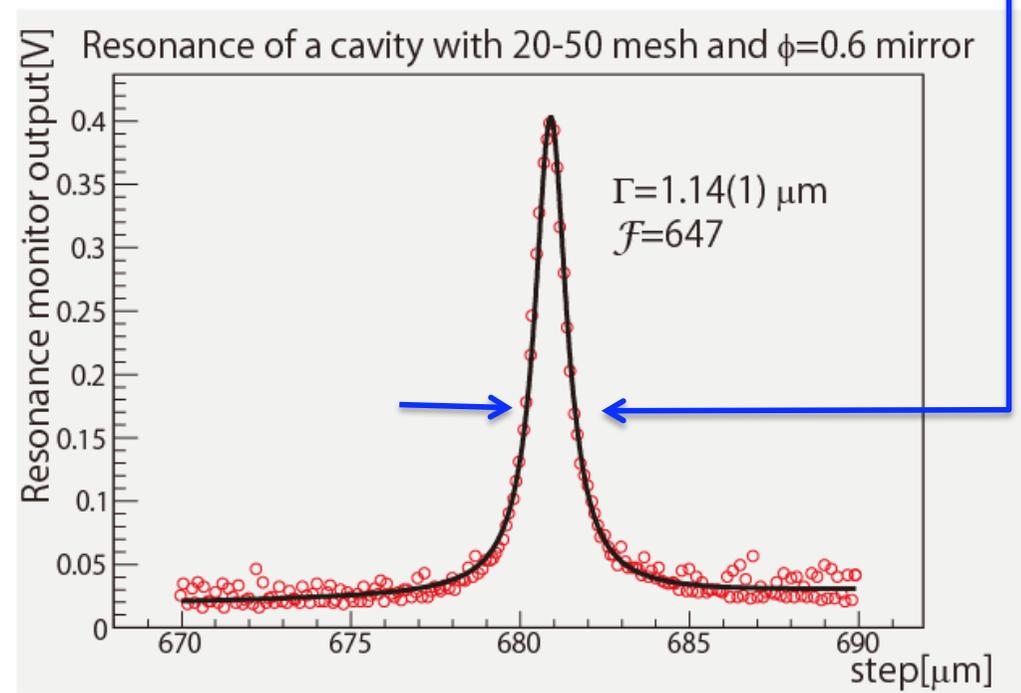
- Finesse: 共鳴の鋭さ=パワー蓄積度の指標

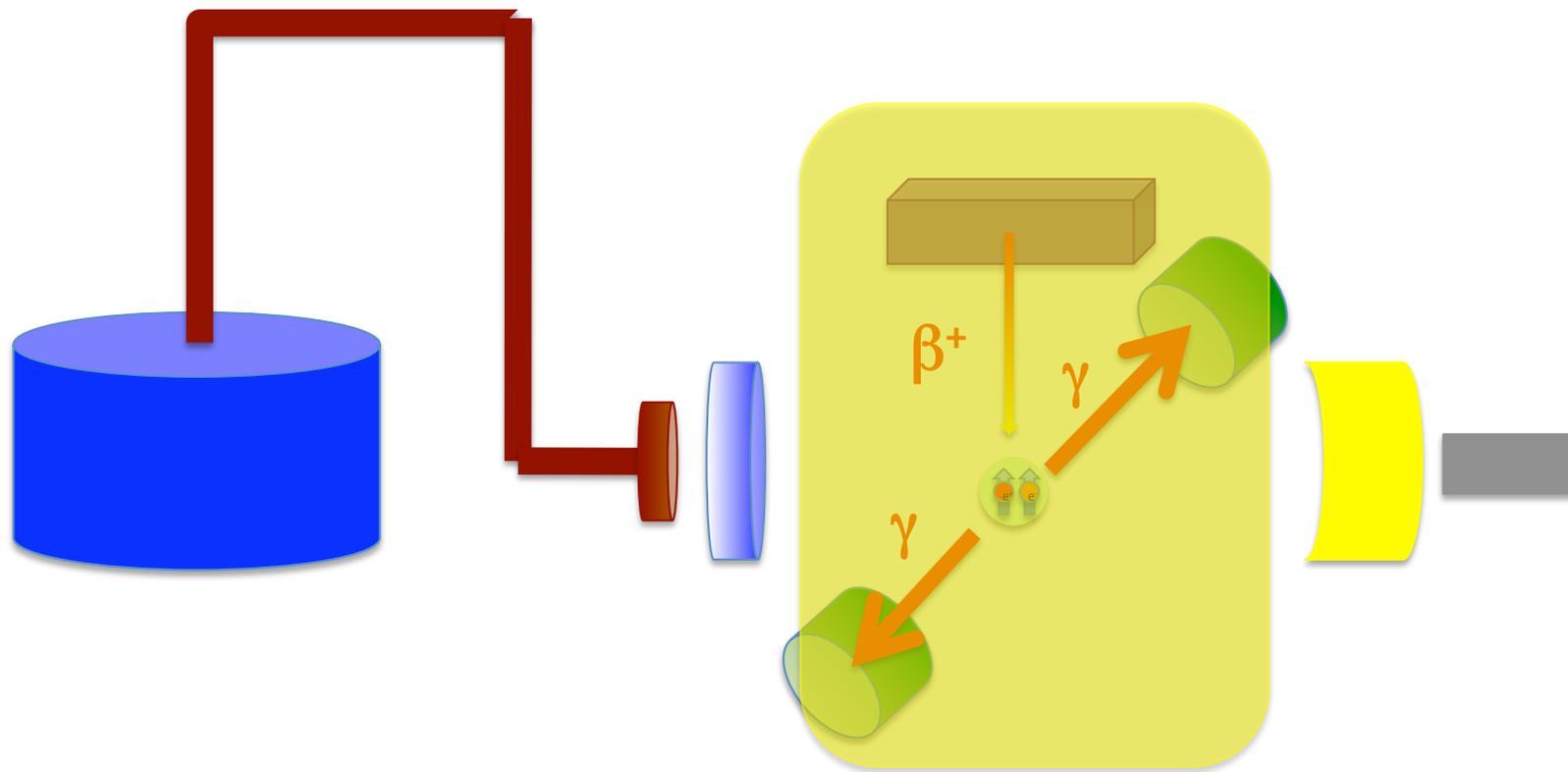
$$\mathcal{F} = \frac{\delta\nu}{\Gamma} \sim \frac{2\pi}{1-\rho}$$

共鳴ピークの幅から分かる

- Finesse ~ 650, 実験に必要なphoton密度100倍を達成

- Input Coupling: ジャイロトロンのパワー導入効率
- 入力modeの関係で, 現在上手く測定出来ていない
- 導波管の影響と考え, 導波管内でのパワープロファイルを測定する予定

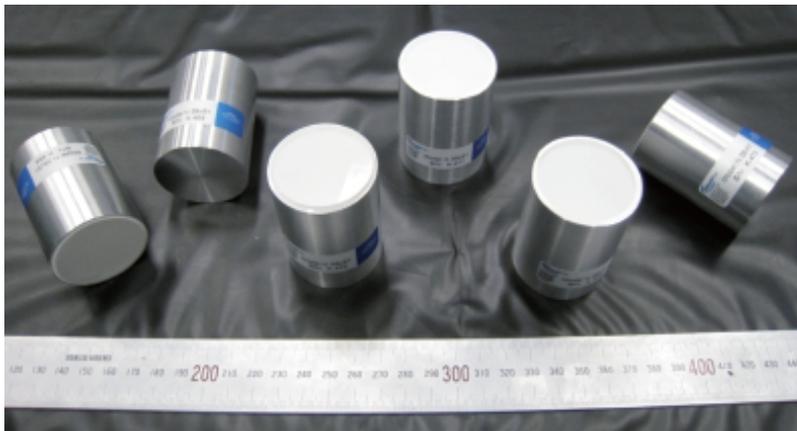




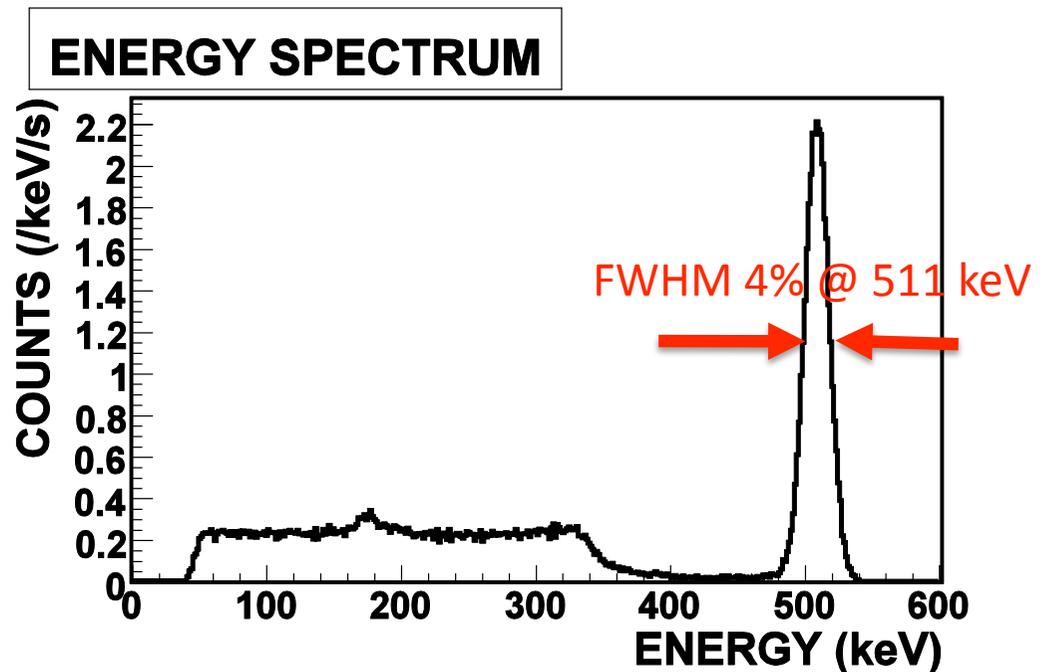
γ 線検出器及び β^+ 線検出器

LaBr₃ (Ce) シンチレータ

- ◆高いエネルギー分解能(FWHM 4% @511 keV)を持つ
- ◆2 γ 崩壊に対するo-Psの3 γ 崩壊の混入を効果的に抑えられる
- ◆さらにBack-to-backのセレクションを加えることで、3 γ バックグラウンドを徹底的に落とす

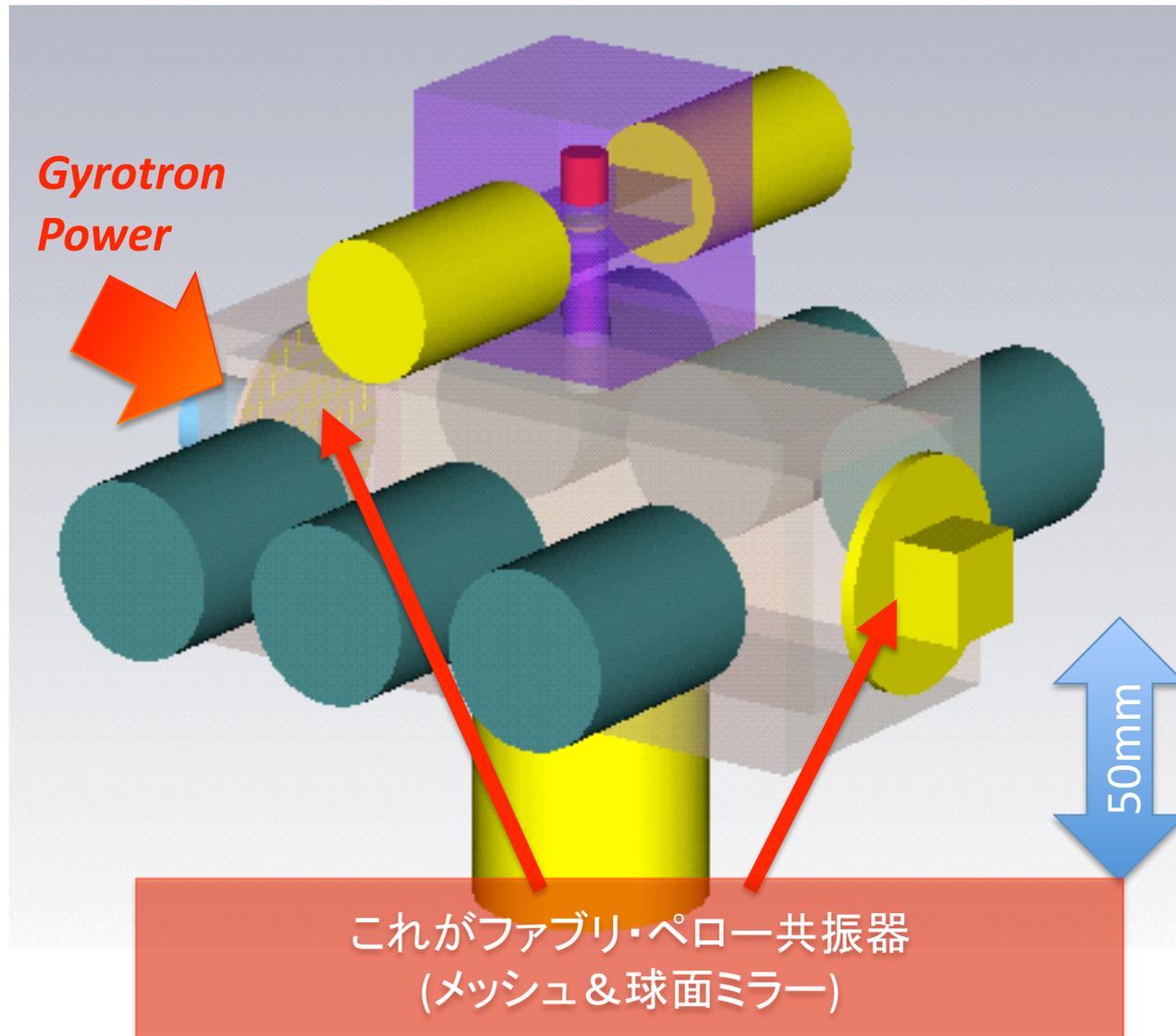


LaBr₃シンチレータの写真

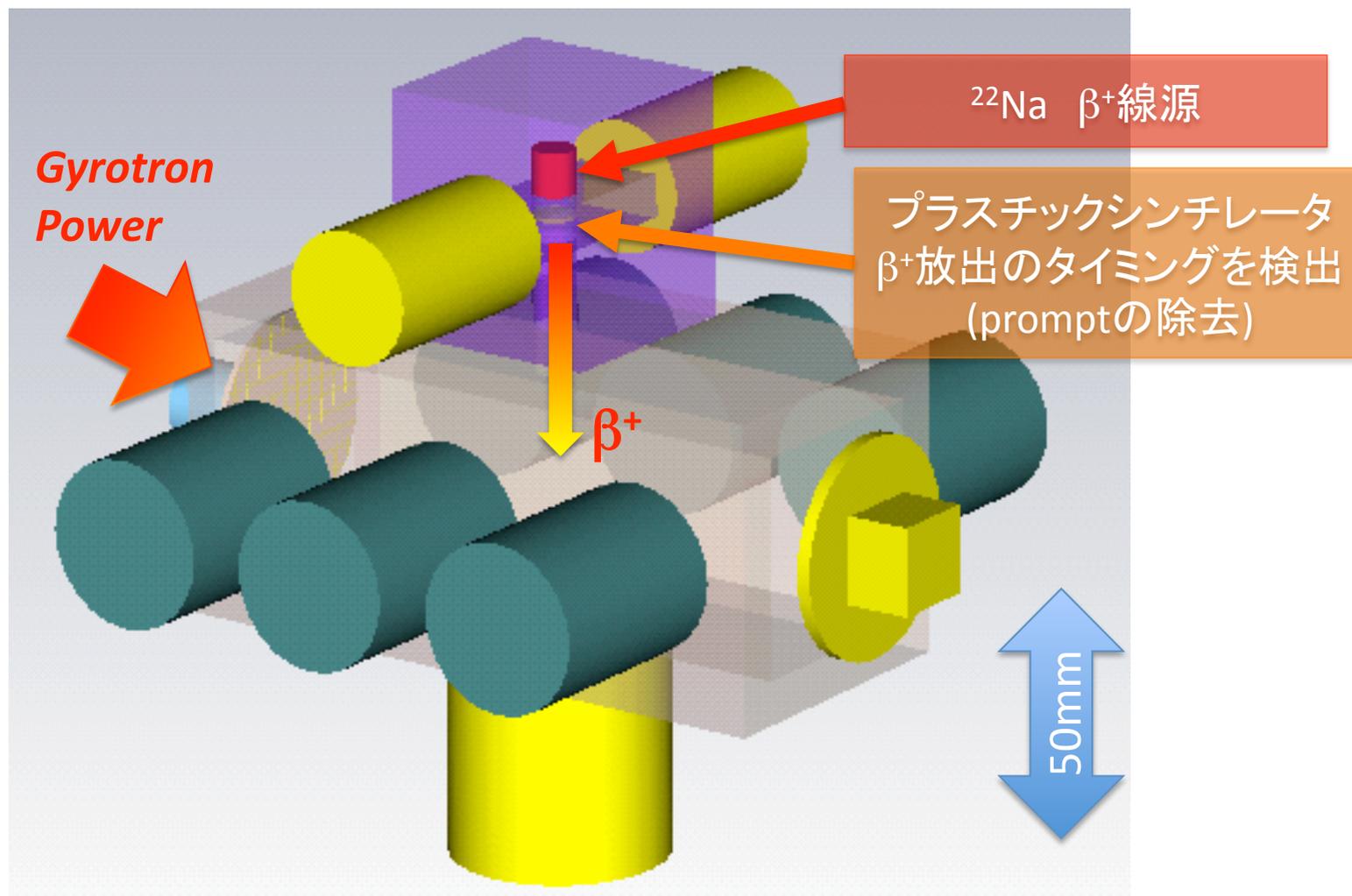


(時間分解能も290psecと非常に良い)

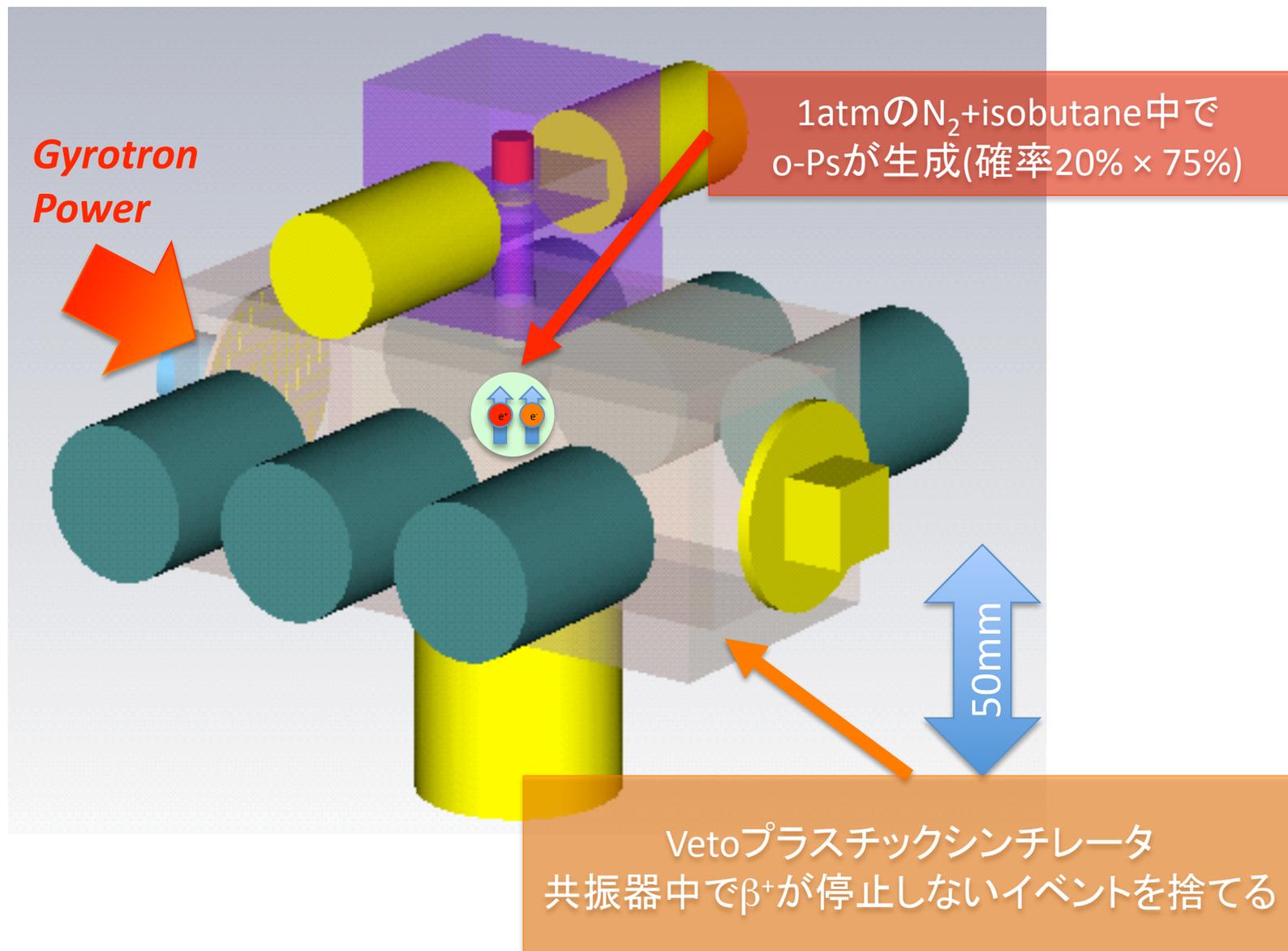
検出器周りのセットアップ (1)



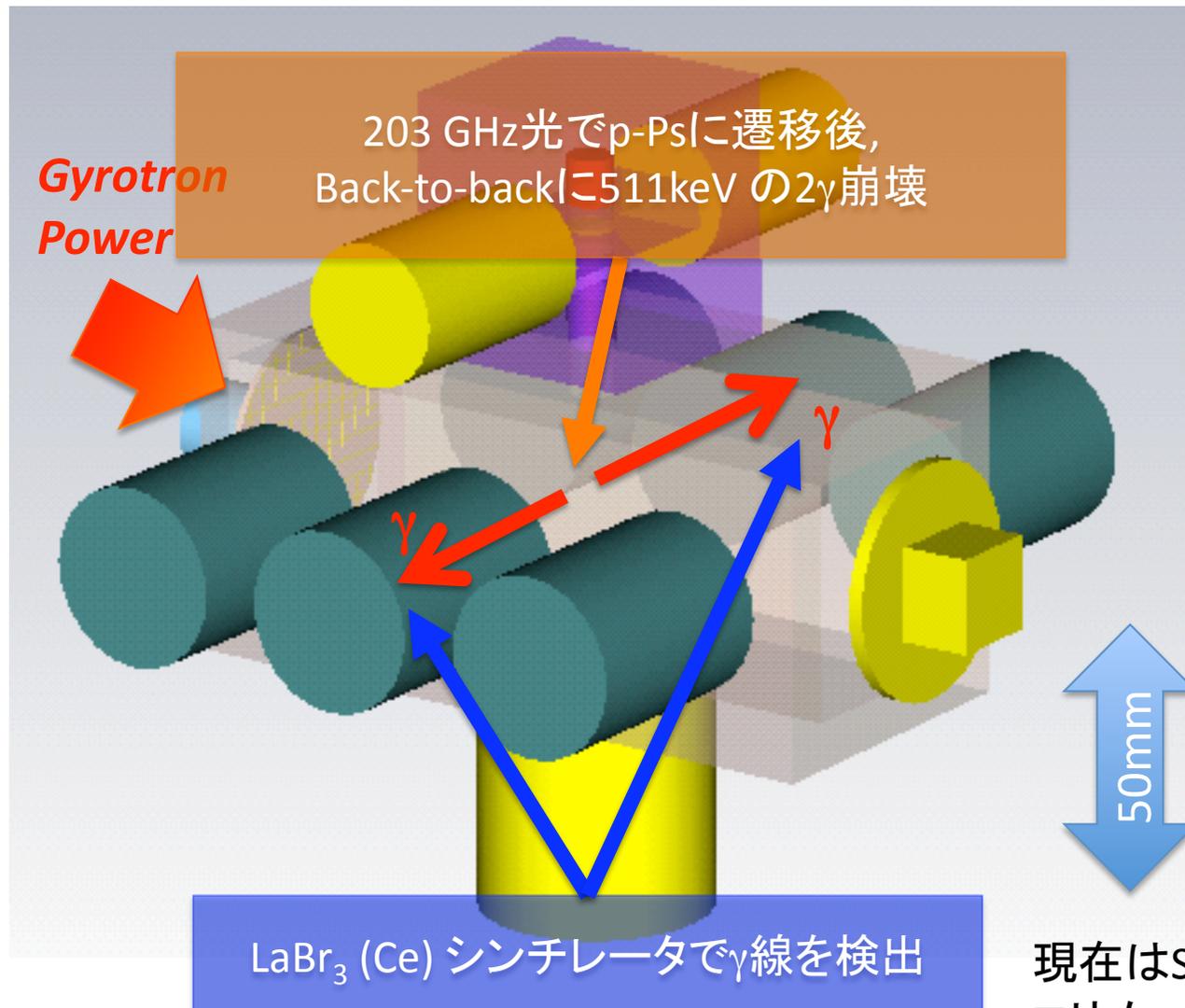
検出器周りのセットアップ(2)



検出器周りのセットアップ(3)



検出器周りのセットアップ(4)



現在はS/N 6%程度
コリメータを導入したり,
各種パラメタの最適化を
している

Conclusion & Future Plan

- ポジトロニウムのHFSを, o-Psとp-Ps間のM1直接遷移によって測定する
- サブテラヘルツの光学系を開発し, パラメータの最適化を進めている
- γ 線及び β^+ 線検出器の配置, さらに効果的にS/Nを上げる設計を行っている
- 1年以内に遷移の確認実験を行う

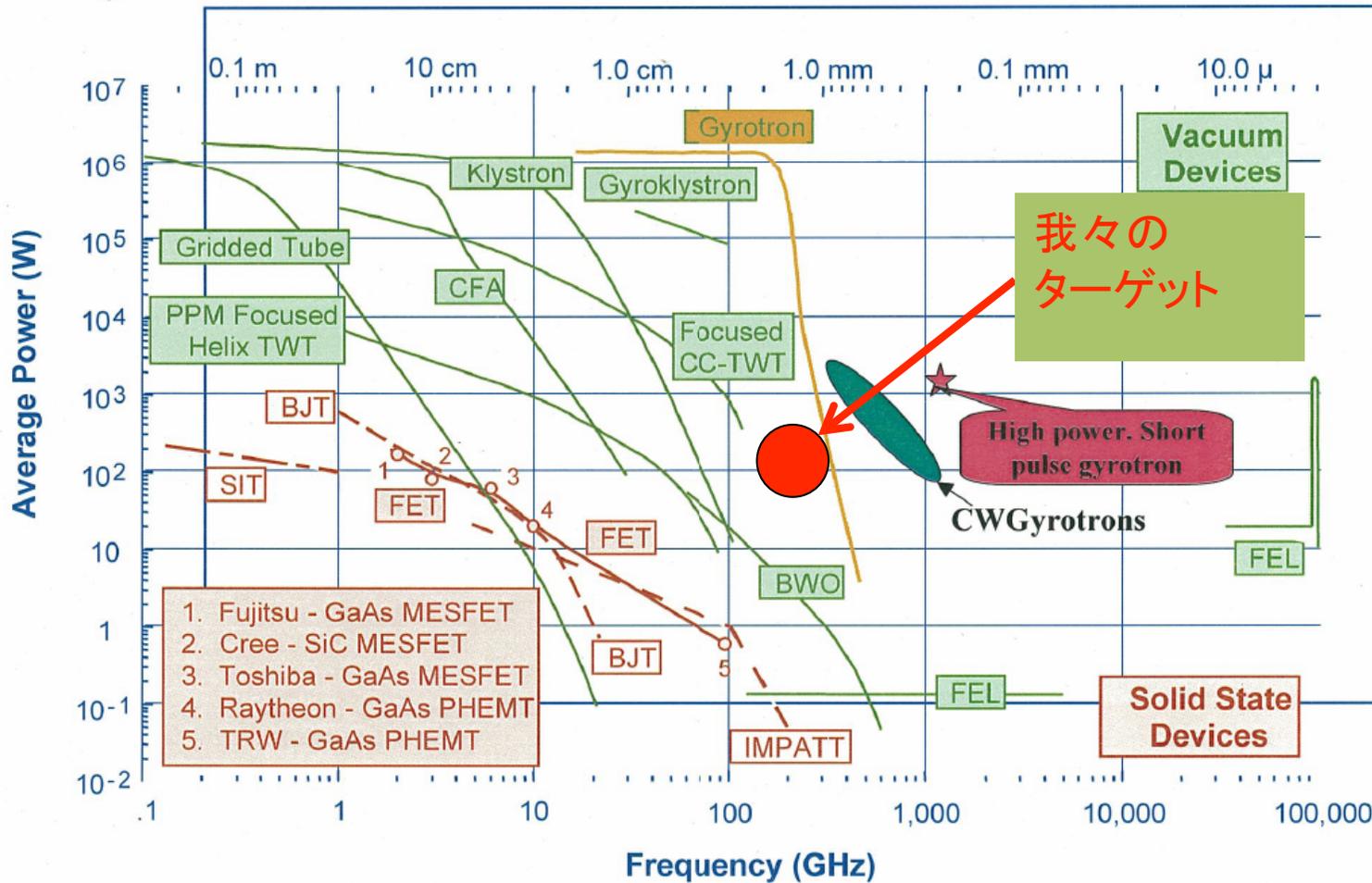
BACKUP

ジャイロトロン(1) 高周波源の比較



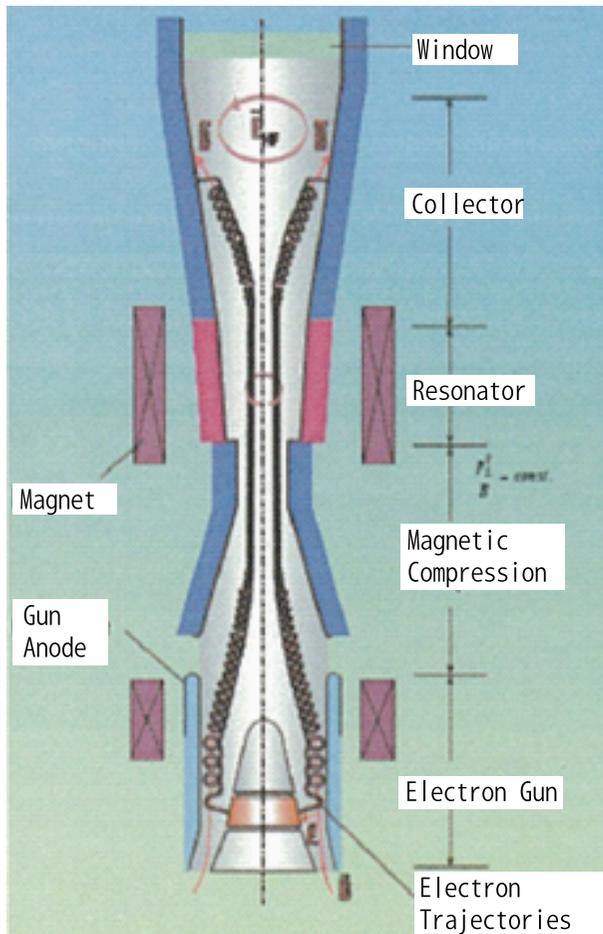
FIR FU

Gyrotrons and other THz radiation sources



200 GHz付近で高出力を得られるのは現状ではジャイロトロンのみ。

ジャイロトロン 動作原理



- 電子銃から出た電子は強力な磁場によりサイクロトロン運動をする
 - サイクロトロン周波数 $f_c = eB/2\pi m_0 \gamma$
 - 本実験で使用するジャイロトロンは $B_{\max} = 8T$
- 磁場中心の横方向にサイクロトロン周波数で共振する共振器を形成しておくとその周波数の電磁波が発振する
- 発振した電磁波は上部のウインドウから取り出す。使用済みの電子ビームはウインドウ下部のコレクタに収集される
- 出力強度の変調: 電子銃の電子放出頻度を変える
周波数変調: 磁場・電子速度(γ)を変える
(変調幅が広い場合共振器にも変調機構が必要)

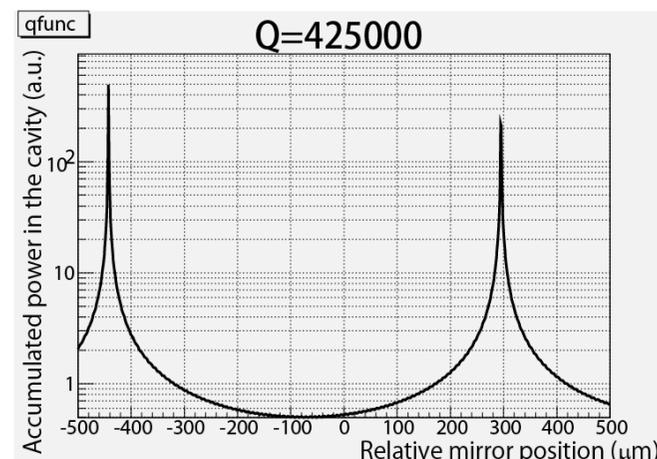
共振器のパラメータ(1)

Finesse

- Cavityへのパワー蓄積度(ロスの少なさ)を表す

$$\mathcal{F} = \frac{\delta\nu}{\Gamma} \sim \frac{2\pi}{1-\rho}$$

- $\delta\nu$ =共振モード間隔
- Γ =共振ピーク幅 (FWHM)
- ρ =両面反射率



- 共振器の損失(鏡面損失・ガス損失・回折損失)が影響
- 両面反射率99%でFinesse=628 : 目標値
銅ミラーの反射率は99.85%(計算値)
メッシュミラーの反射率が最大の決定要因
- 共振モード間隔は $2/\lambda=737\mu\text{m}$ → $\Gamma < 1.17\mu\text{m}$ が必要

共振器のパラメータ(2)

Input coupling

- Cavityへのパワー導入効率を表す

$$C = T_b T_{\text{mesh}} C_{\text{mode}}$$

C: input coupling, T_b : Cavity導入前透過率,

T_{mesh} : メッシュ透過率, C_{mode} : Cavity mode結合度

- T_{mesh} はFinesseにも影響する ($T_{\text{mesh}} \sim 1 - R_{\text{mesh}} \sim 1/F$)
- Cavityへの蓄積パワーは

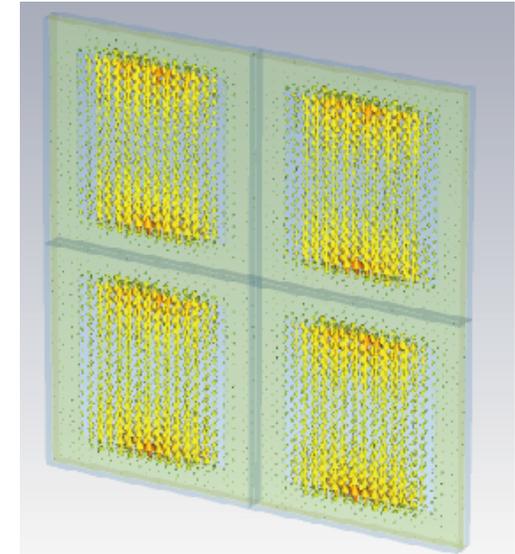
$$P_{\text{acc}} = C \left(\frac{F}{\pi} \right)^2 P_{\text{in}}$$

Mesh のロスを無視した場合,
反射率は高い方がよい(1乗で効く)

- CはCavityからの反射・Cavityの透過から求められるが、困難がある。(透過はcalibrationが難しく、反射は干渉の影響がある)

Meshの最適化

- 必要条件
 - $R_{\text{mesh}} > 0.99$ ($P_{\text{acc}} \sim R_{\text{mesh}}$)
 - ロス($1 - R_{\text{mesh}} - T_{\text{mesh}}$)が少ない (特に T_{mesh} に比べ)
- 電磁場シミュレーションによりR, Tをメッシュパラメータを変えながら調べた。
- いくつかのメッシュを実際に製作した(下記)。



mesh material	line width	line separation	reflectance	transmittance	finesse
gold	20 μm	50 μm	99.3%	0.32%	650
gold	10 μm	50 μm	98.6%	0.75%	290
silver	50 μm	130 μm	96.9%	2.70%	180

reflectanceとtransmittanceはシミュレーション, finesse(後述)は実測値