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精密測定I(概要と共振器)

末原 大幹 (東大ICEPP)

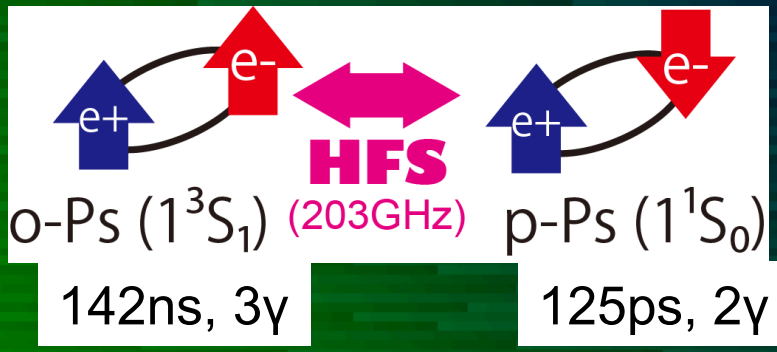
宮崎彬,石田明, 秋元銀河,佐々木雄一,加藤康作, 浅井祥仁(東大理),
難波俊雄, 小林富雄 (東大ICEPP), 斎藤晴雄 (東大総合文化),
吉田光宏 (KEK加速器), 田中賢一, 山本明 (KEK低温センター),
小川勇, 漆崎裕一, 小林真一郎, 出原敏孝 (福井大遠赤センター),
S.Sabchebski (ブルガリア科学アカデミー)

Our Talks

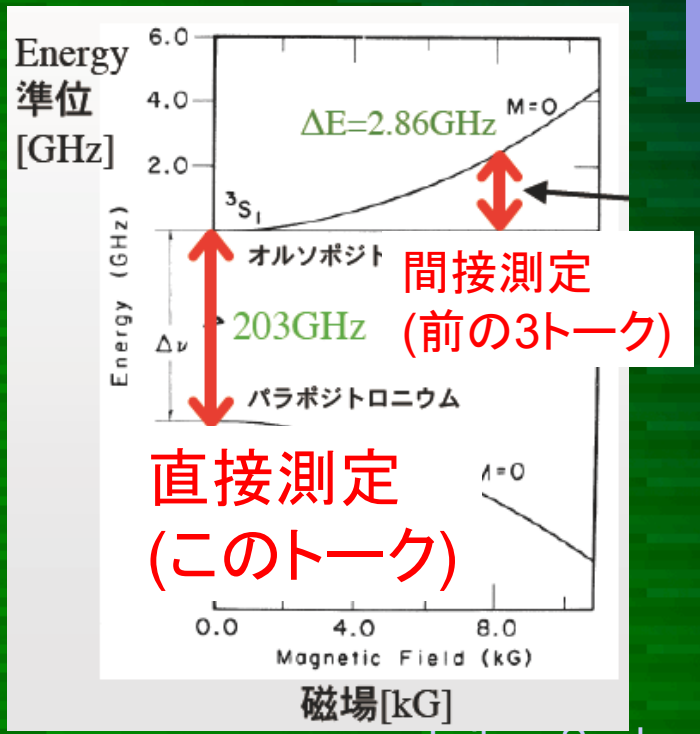
- ポジトロニウム超微細構造の測定
  - スピン振動 (佐々木)
  - 3 GHz 間接測定 (秋元, 石田)
  - 203 GHz 直接測定
    - 末原: 概要と共振器 (このトーク)
    - 宮崎: 測定システム
    - 漆崎: 光源 (熊本, 9/26) – このトークでもカバーする
- ポジトロニウムのCP対称性の測定 (山崎)
- ポジトロニウムのCPT対称性の測定 (山口)

Ps-HFSおさらい & 直接測定の特徴

超微細構造(HFS) : 原子核と電子のスピンの向きによる順位差



直接測定: 203 GHz photonを
Psに食わせてo-Ps to p-Ps遷移を
直接引き起こす (誘導放出)



直接測定の特徴

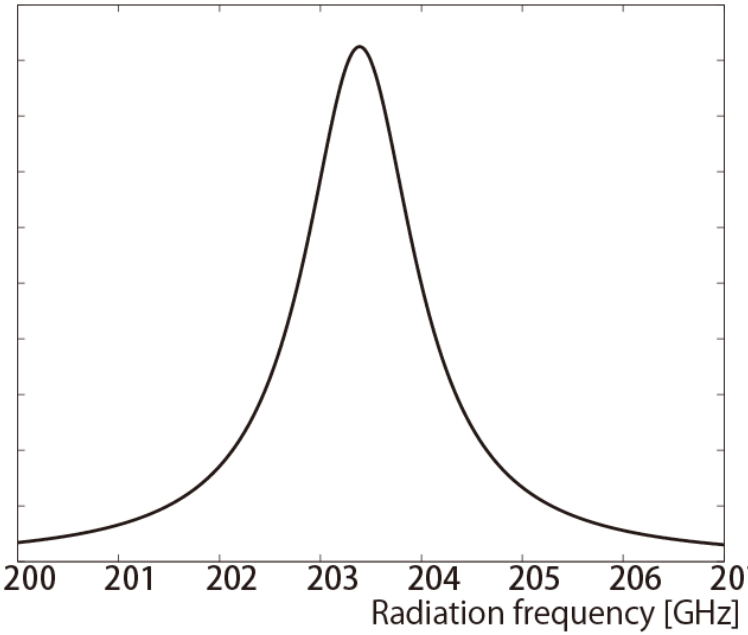
- 静磁場不要
  - 静磁場の非一様性は
    大きなsystematic error要因
- 技術的におもしろい
  - (サブ)テラヘルツ: “新しい”光
  - 他の実験に応用できるかも…

直接測定の“鍵”

- 高いphoton密度が必要
  - o-Ps → p-PsはM1遷移: $\tau = 3 \times 10^{8}$ sec
  - $\sigma \sim 1/v$ → 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(図)

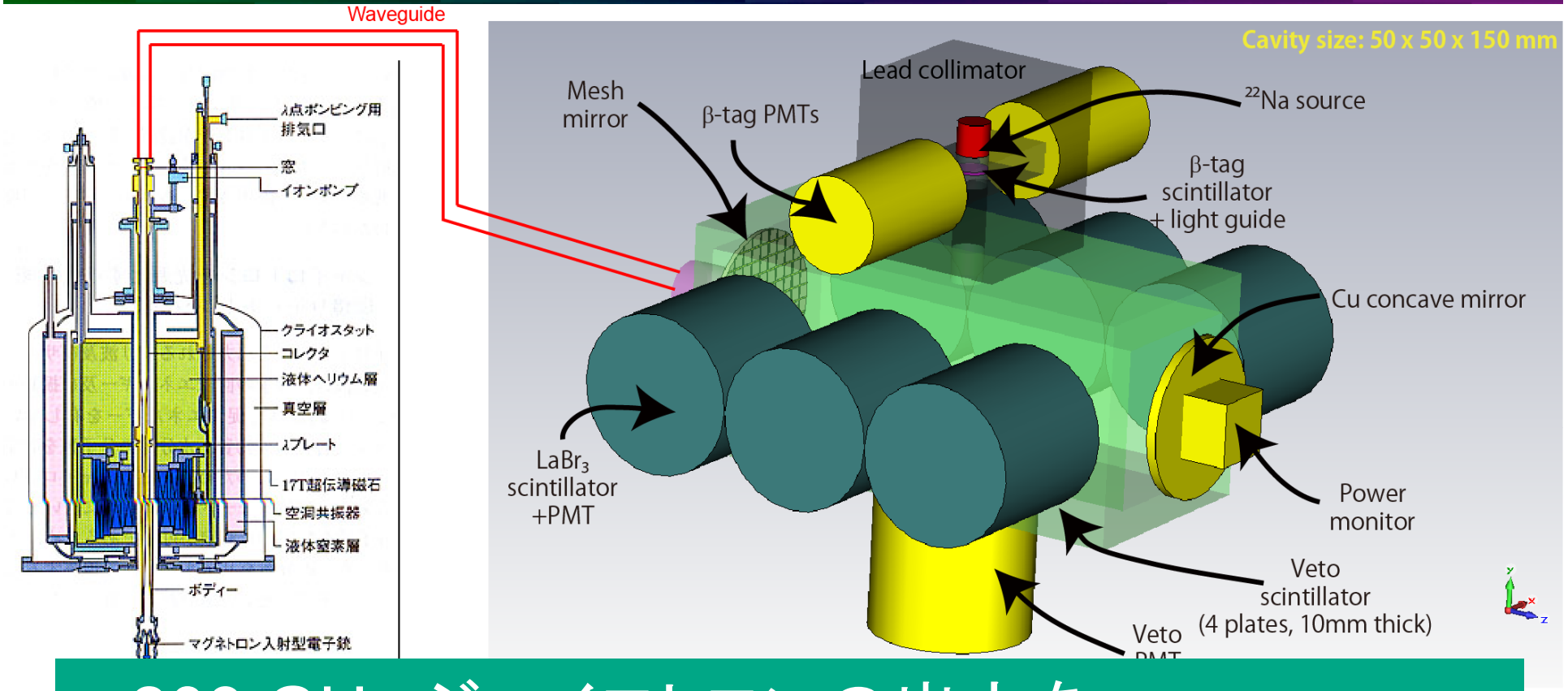
これが必要

- 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



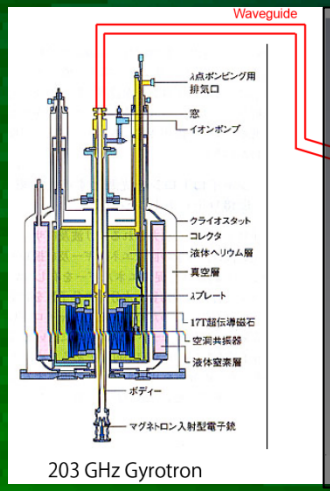
Taikan Suehara et al., JPS meeting

セットアップ概念図

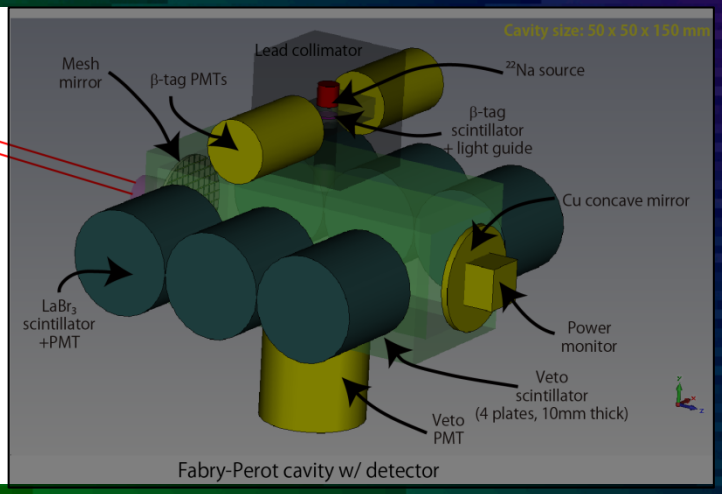


- 203 GHz ジャイロトロンの出力を
  ファブリー・ペロー共振器に接続
- 陽電子源、γ線検出器 (次のトーク)

ジャイロトロン

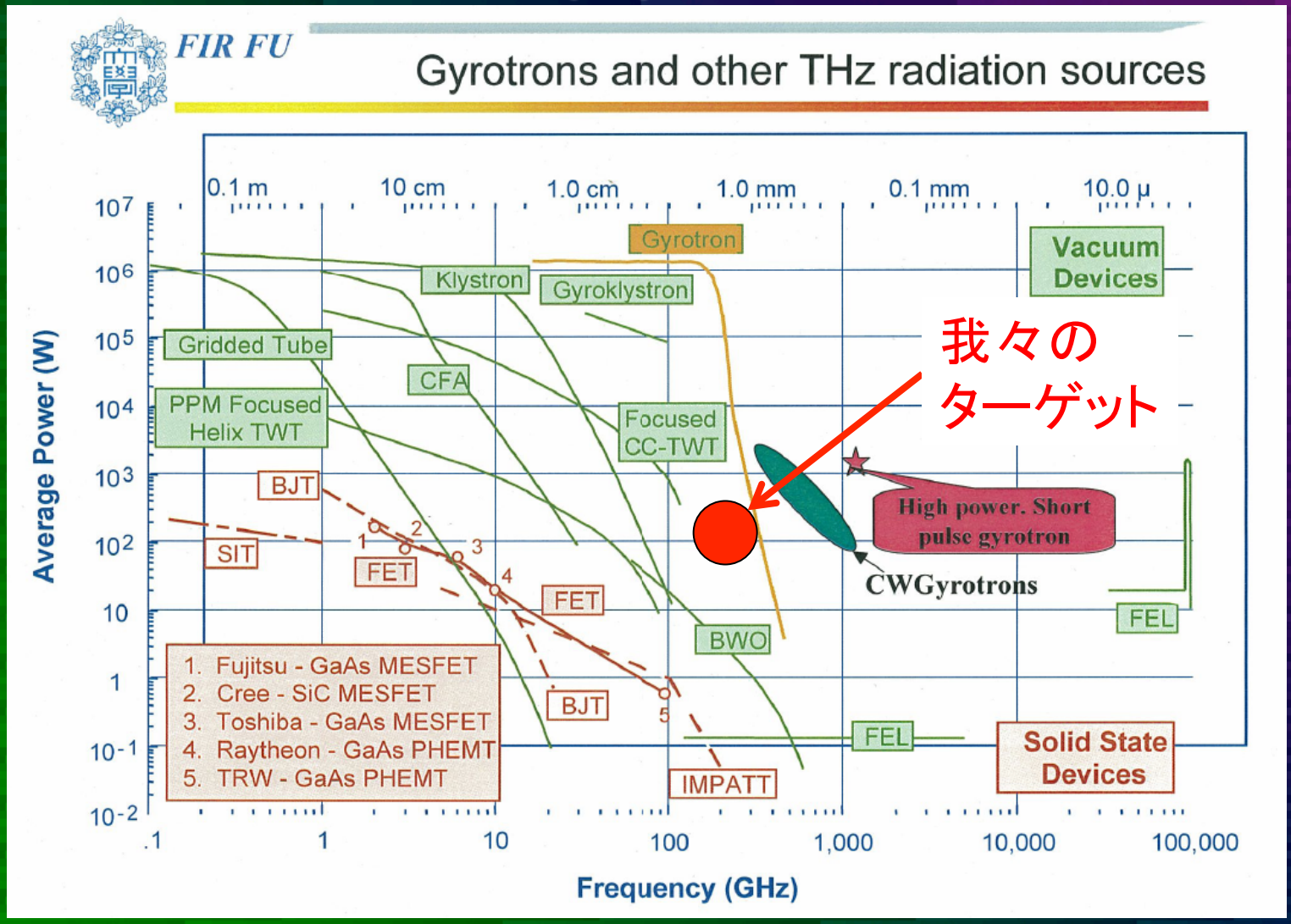


203 GHz Gyrotron



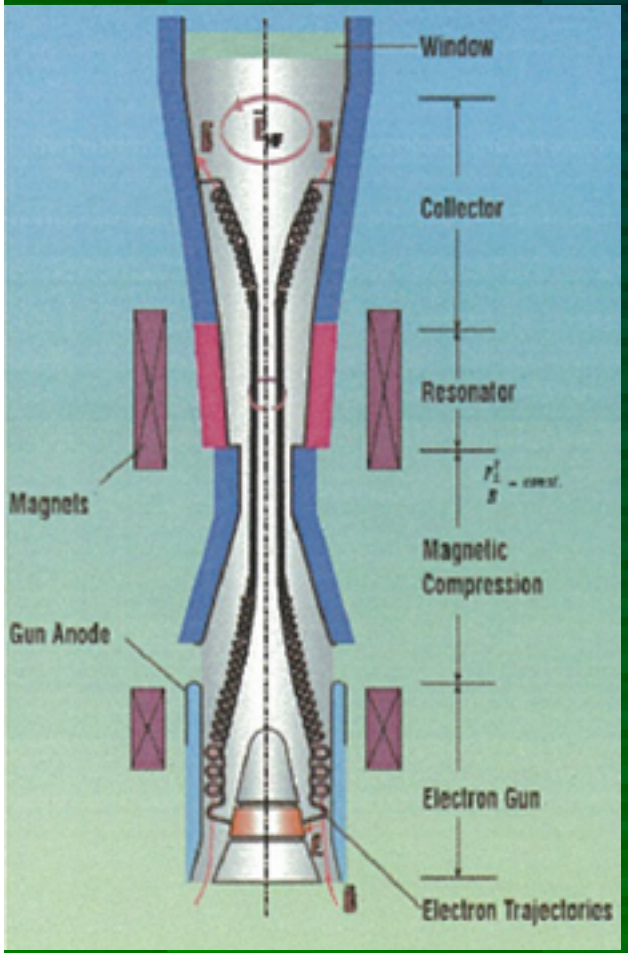
Fabry-Perot cavity w/ detector

ジャイロトロン(1) 高周波源の比較



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。

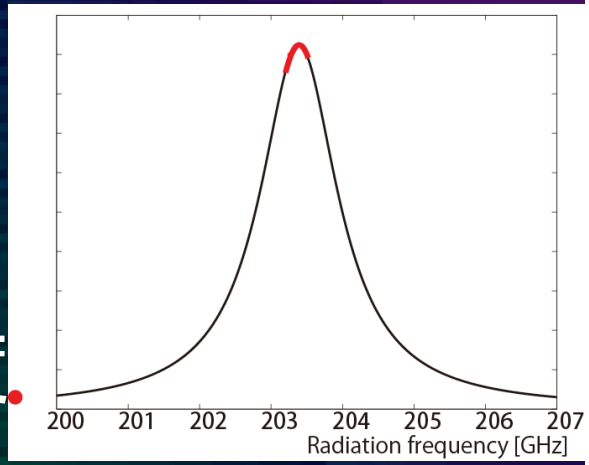
ジャイロトロン(2) 動作原理



- 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こで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)

ジャイロトロン(3) 特性

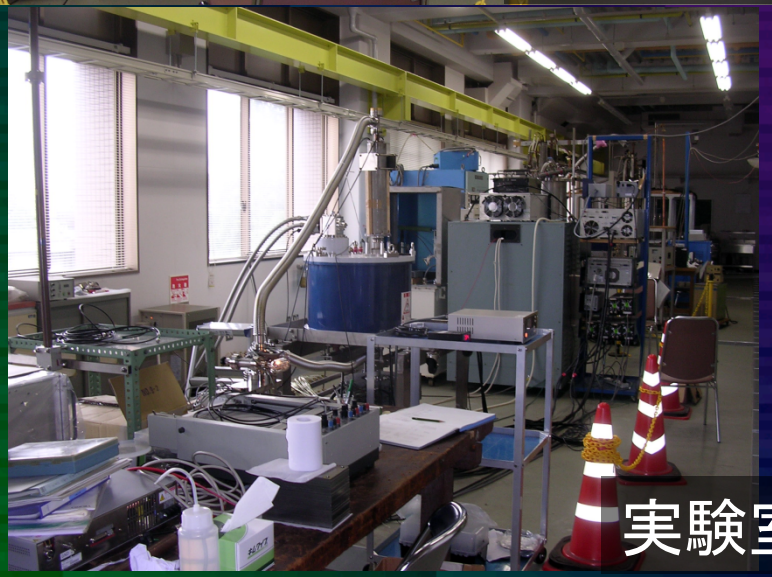
- 福井大学遠赤外センターと共同で開発。
- 609W出力を達成 (導波管出口で440W)。
- 中心周波数203.08 GHz (実測値)。
  - 周波数変調幅は数百MHz程度。
    数GHz変調可能なジャイロトロンも開発中で
    今後upgradeを予定。
  - 別の共振モードにより199GHzの
    off-resonance測定・比較は可能。
- 単色性は極めて高く、10kHz程度
  (他のジャイロトロンでの実測値)



ジャイロトロン(4) 写真

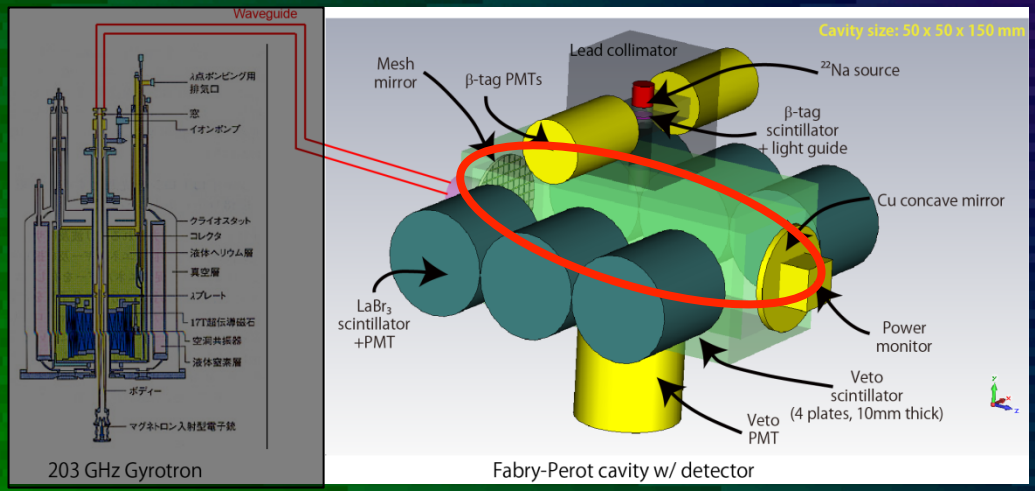
本測定用に開発された
ジャイロトロン(Gyrotron FU CW V)

電源・制御部



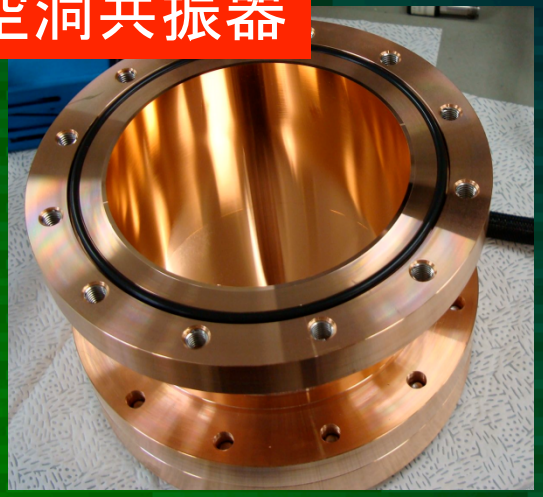
実験室

ファブリー・ペロー共振器



空洞 vs Fabry-Perot 共振器

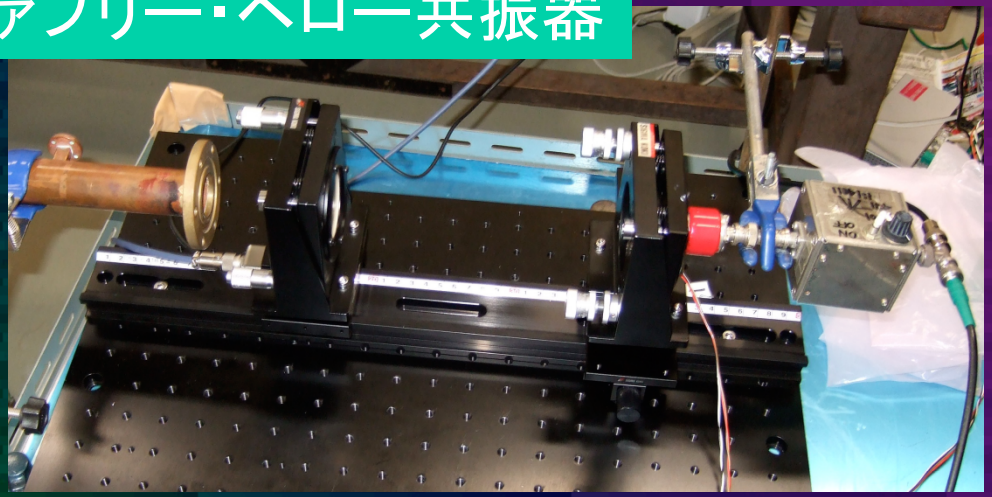
空洞共振器



- 3次元閉じこめ
- 波長～数倍程度の大きさ
  (高次モードは製作が難)
- 共振周波数は基本的に固定

203 GHz (波長1.5mm)
には不適

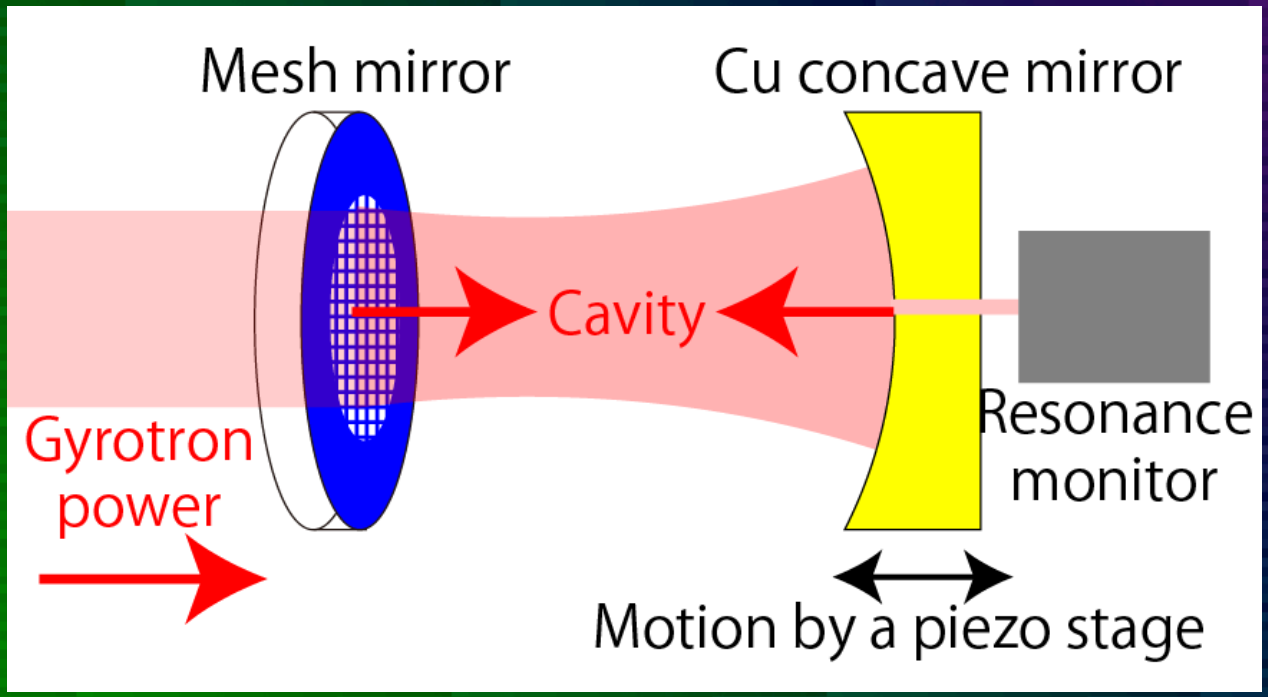
ファブリー・ペロー共振器

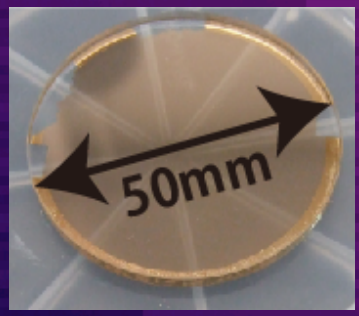


- 1次元閉じこめ
  (残りの2次元はオープン)
- 波長より十分大きい必要あり
  (準光学的取扱い)
- ミラー間距離を変えられれば
  共振周波数は自由に変更可

こちらを採用

203 GHz 共振器の概要





- 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周波数をコントロール
- 出射側にパワーモニタを設置，共振を測定

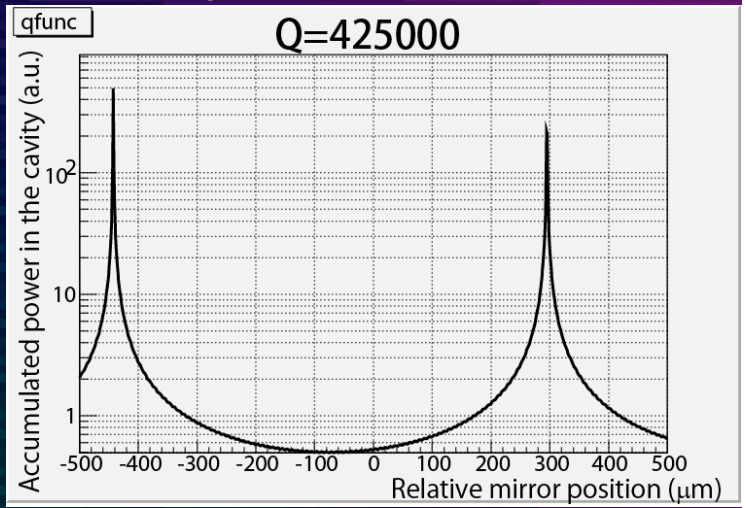
共振器のパラメータ(1)

Finesse

- Cavityへのパワー蓄積度(ロスの少なさ)を表す

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

  - δv=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/λ=737μm → Γ<1.17μm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

$$C = T_{\mathrm{b}} T_{\mathrm{mesh}} C_{\mathrm{mode}}$$

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_{mesh} ~ 1-R_{mesh} ~ 1/F)
- Cavityへの蓄積パワーは

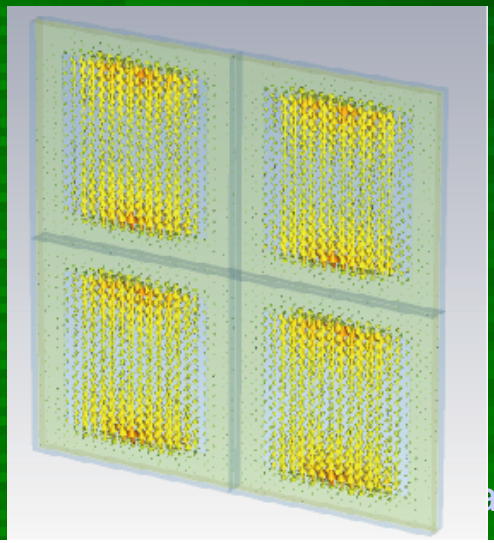
$$P_{\mathrm{acc}} = C \left(\frac{F}{\pi} \right)^2 P_{\mathrm{in}}$$

Mesh のロスを無視した場合,
反射率は高い方が良い(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

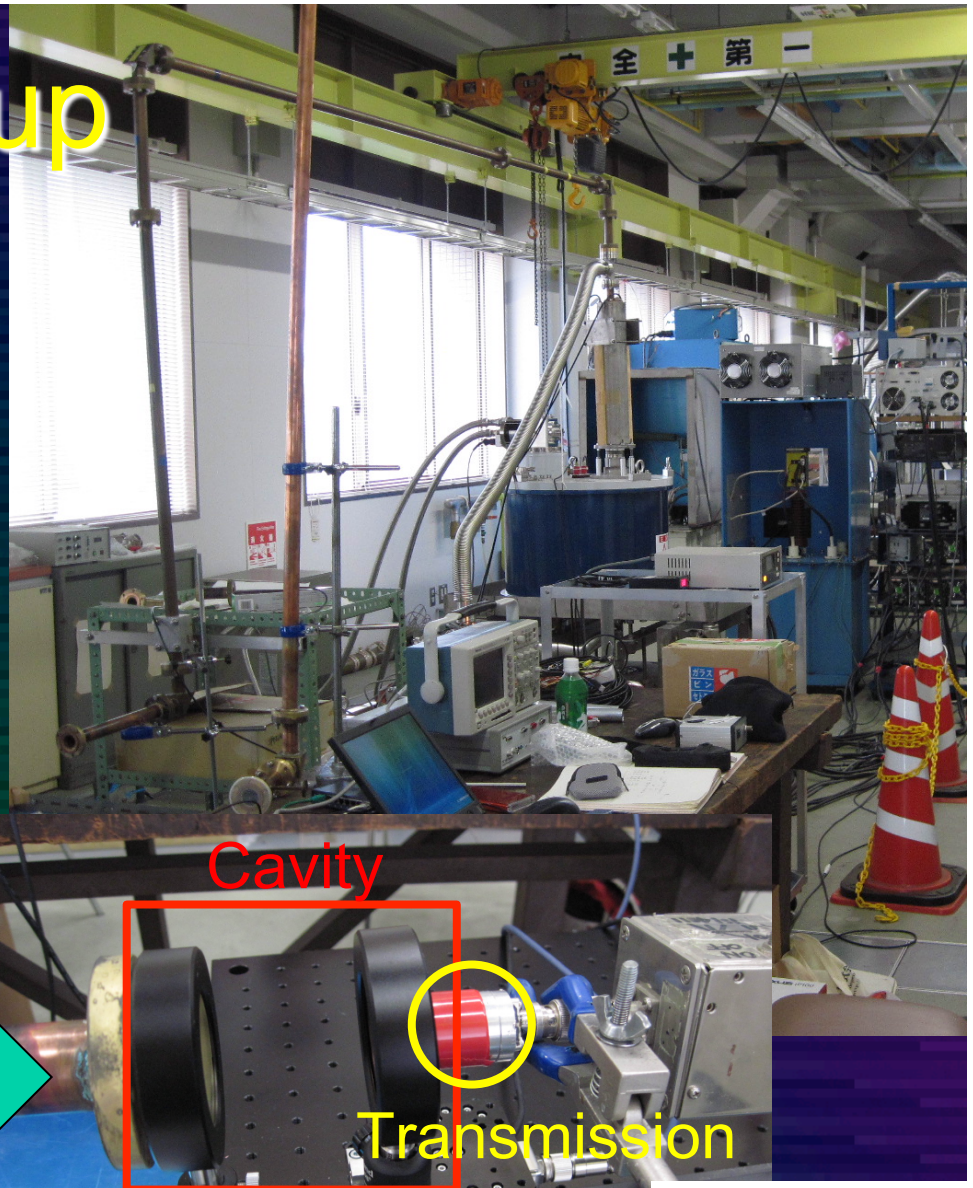
- 必要条件
  - R_{mesh}>0.99　(P_{acc} ~ R_{mesh})
  - ロス(1 – R_{mesh} – T_{mesh})が少ない (特にT_{mesh}に比べ)
- 電磁場シミュレーションによりR, Tを
  メッシュパラメータを変えながら調べた。
- いくつかのメッシュを実際に製作した(下記)。



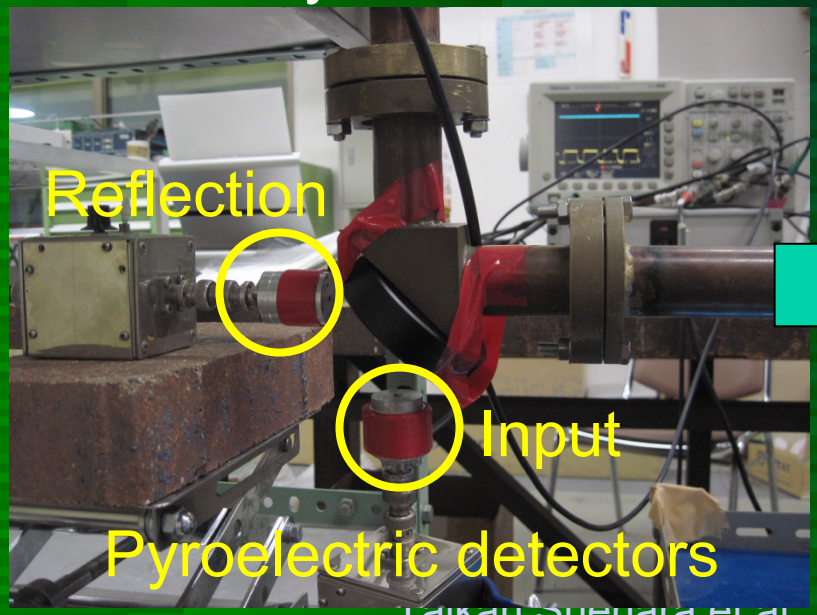
line width	line separation	reflectance	transmittance
20 μm	50 μm	99.3%	0.32%
10 μm	50 μm	98.6%	0.75%
50 μm	130 μm	96.9%	2.70%
400 μm	240 μm	99.2%	0.58%

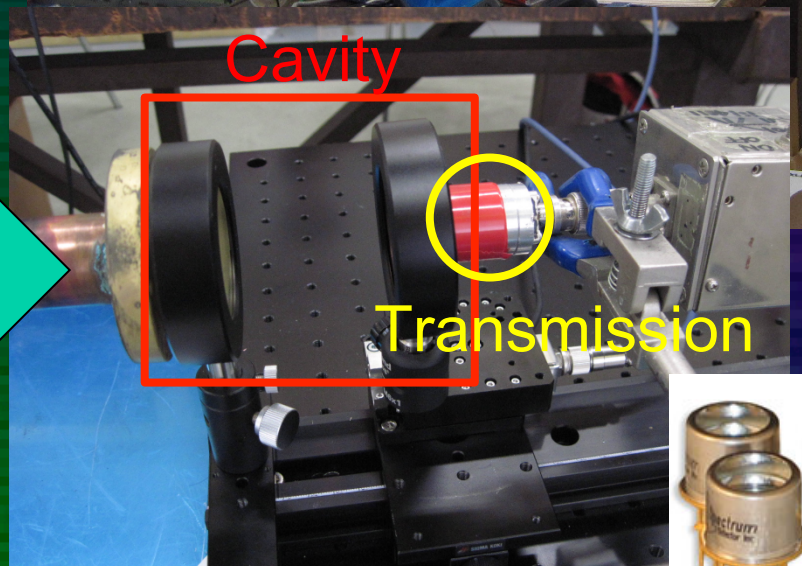
Cavity test (1) setup

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



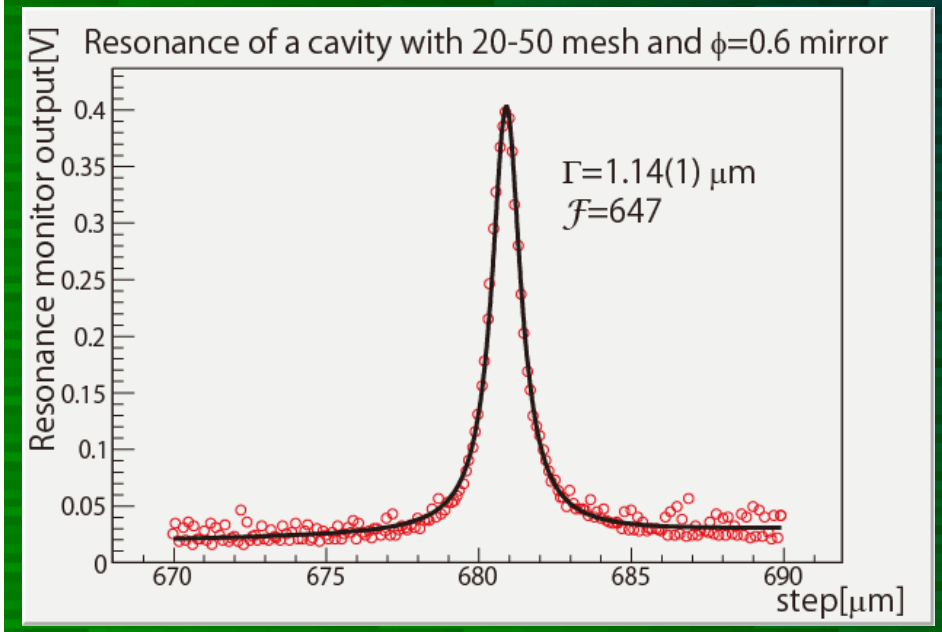
Gyrotronへ

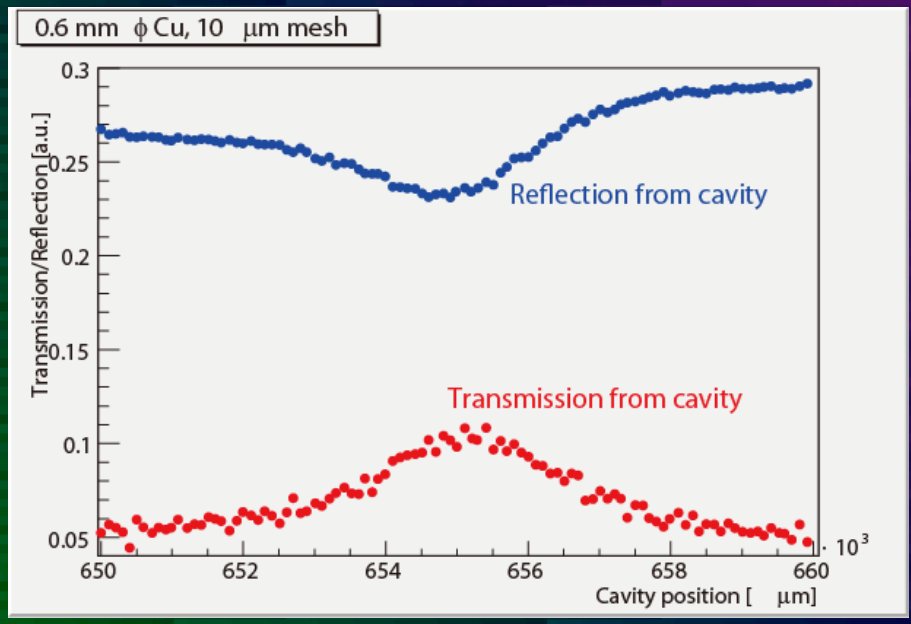




Cavity test (2) 測定データ

- Finesse: 共鳴ピークの幅を用いて容易に得られる。
- Input coupling: 反射データを用いて行うが、入力や随所での反射と干渉し良好なデータが得られていない。
  検討中。





Cavity test (3) 測定まとめ

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
silver	400 μm	240 μm	99.2%	0.58%	fabricating

- 20-50 meshで目標のF>628は達成している。
  得られたFinesseはシミュレーションからの予想に近い。
- ただし20-50 meshはロスが多い。
  400-240meshを製作済み・9/14～試験予定。
- Input coupling(T_{mesh}を除く)は20%程度と予想され改善が望ましい(導波管の出射モードが汚いのが一つの原因と考えられる)が20%でもなんとかHFSの測定は可能と考えられる。(詳細は次のトーク)

まとめと今後

- ポジトロニウム超微細構造の直接遷移実験に向けた光源および共振器の開発を行っている。
- ジャイロトロンに関しては、直接遷移の観測に必要なスペックが得られている。
  精密測定のためには波長可変機能を強化する必要がある。
- 共振器はメッシュミラーと銅凹面ミラーを用いたFabry-Perot共振器で目標とするFinesseを達成した。Input couplingはまだ十分ではないものの、11月からの本実験は可能と考えている。

Thank you
for your attention!