

Direct Measurement of the Hyperfine Transition of Positronium using High Power Sub-THz Radiation

山崎 高幸

東京大学素粒子物理国際研究センター

日本物理学会第68回年次大会 2013/03/28

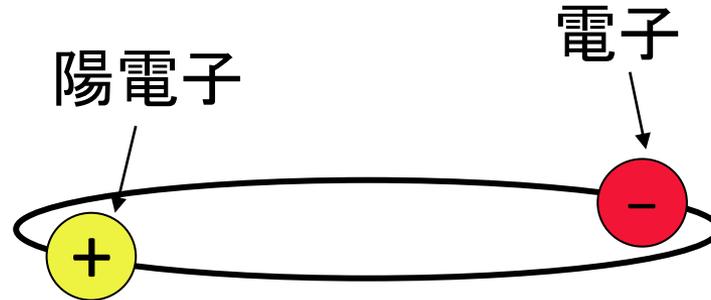
講演の概要

- イントロダクション
 - ✓ 基底状態におけるポジトロニウム超微細構造 (Ps-HFS)
 - ✓ 高強度ミリ波を用いたPs-HFS間の直接遷移測定
- 実験装置
 - ✓ 準光学系
 - ◆ Gyrotron
 - ◆ Fabry-Pérot 共振器
 - ✓ ポジトロニウム生成および遷移測定システム
- データ解析
- 結論
- Ps-HFS直接測定実験の現状と今後

イントロダクション

- ポジトロニウム
- ポジトロニウム超微細構造 (Ps-HFS)
- 高強度ミリ波を用いたPs-HFS間の直接遷移測定

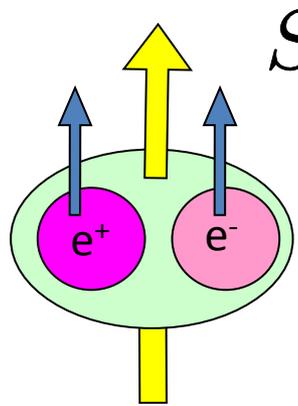
ポジトロニウム (Ps)



- 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、対消滅に伴な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)



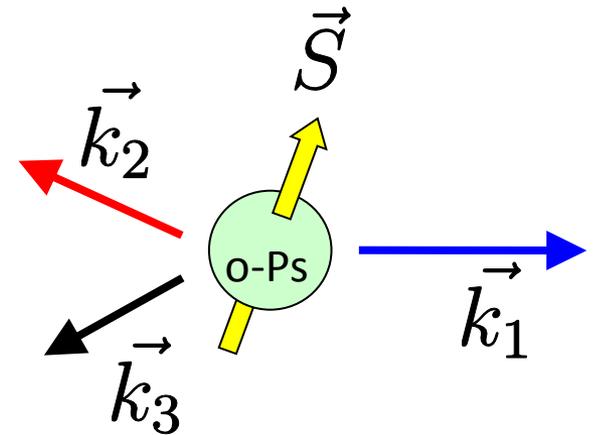
$S = 1$ スピン3重項

光子と同じ量子数

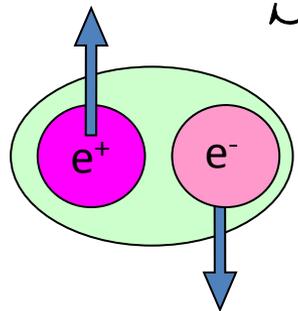
o-Ps $\rightarrow 3\gamma$ (, 5γ , ...)

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)



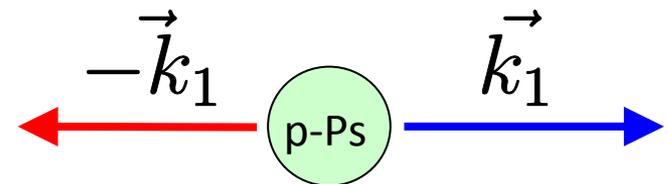
$S = 0$ スピン1重項

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

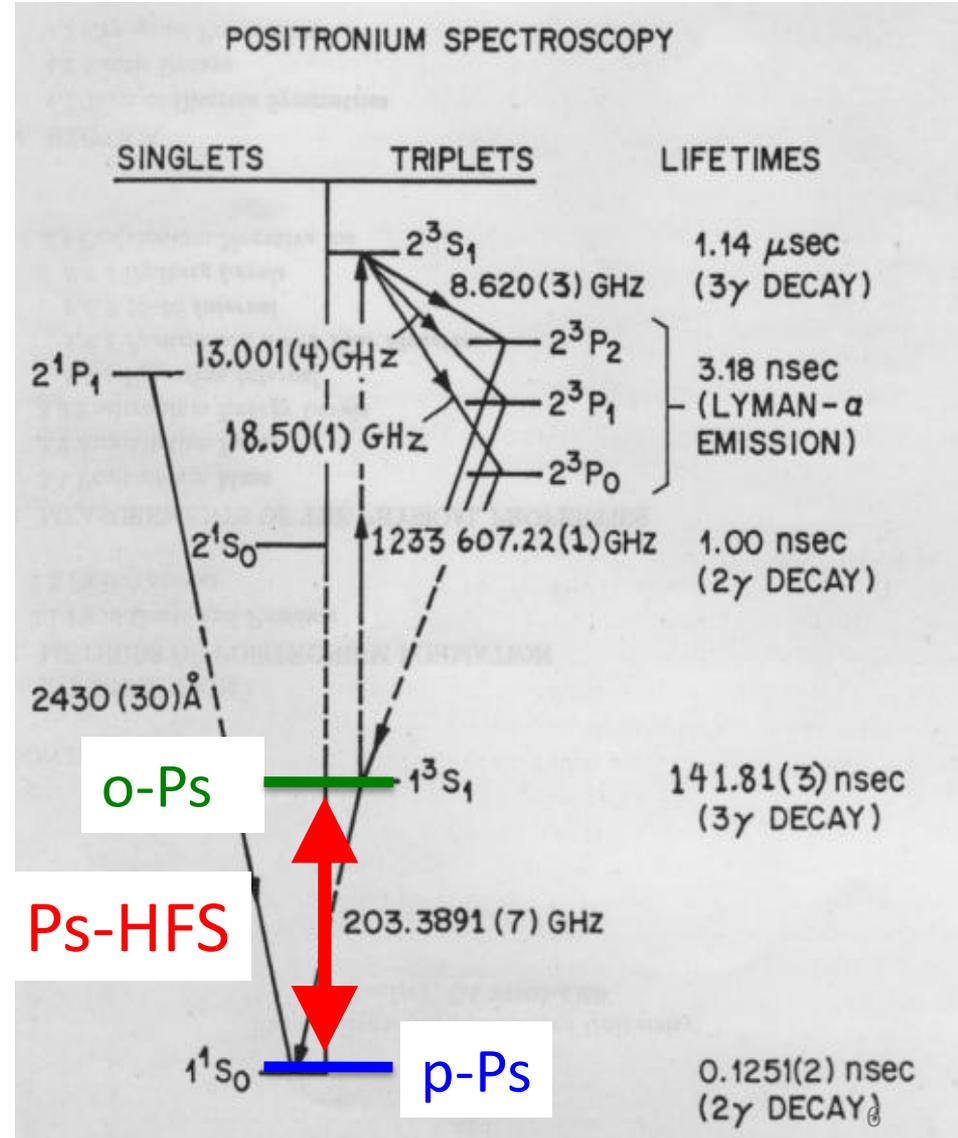
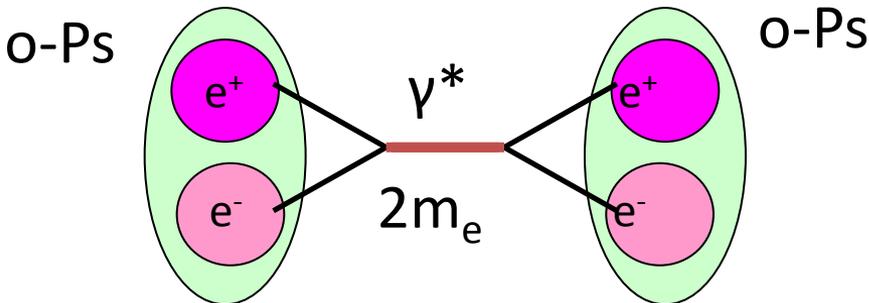


ポジトロニウム超微細構造 (Ps-HFS)

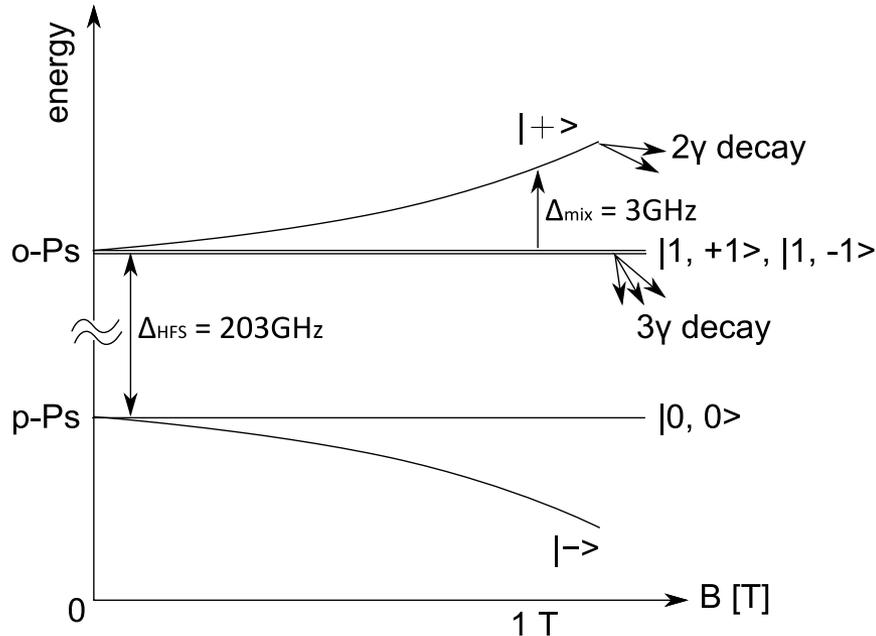
- 電子と陽電子のスピン・スピン相互作用によって生じる、基底状態のp-Psとo-Psのエネルギー準位差 $203\text{GHz} = 0.84\text{meV}$

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

- Psは質量が小さいため、相互作用が大きい
- 203GHzのうち量子振動の寄与が87GHz



過去のPs-HFS測定（間接測定）

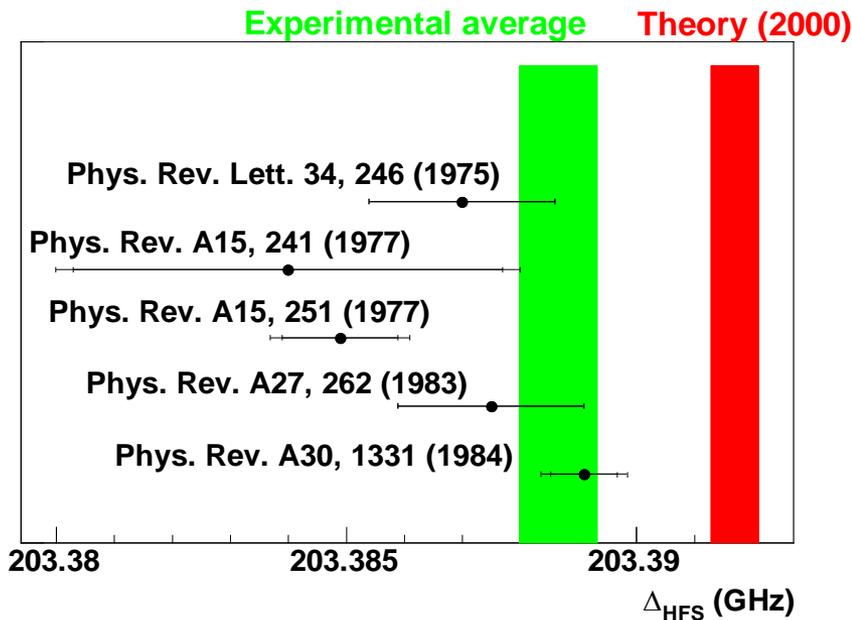


- 1970～80年代に精密測定
- 当時は高強度・Long Pulse・Narrow BWを満たすsub-THz光源がなく、Ps-HFS間の直接遷移を起こすのに必要な高強度sub-THz波を用意するのは不可能
- 1T程度の静磁場によってo-Psの準位を3GHz程度Zeeman分裂させ、クライストロン等で発生させたRFによって分裂した準位間を遷移させる。RF周波数固定、静磁場でスキャンして遷移曲線を得る。ピークでの磁場の値とRF周波数からPs-HFSの値を計算

$$\Delta_{\text{mix}} = \frac{\Delta_{\text{HFS}}}{2} \left(\sqrt{1 + x^2} - 1 \right)$$

$$x = \frac{2g'\mu_B B}{h\Delta_{\text{HFS}}}$$

理論値と実験値に 3.9σ のずれ



Exp.

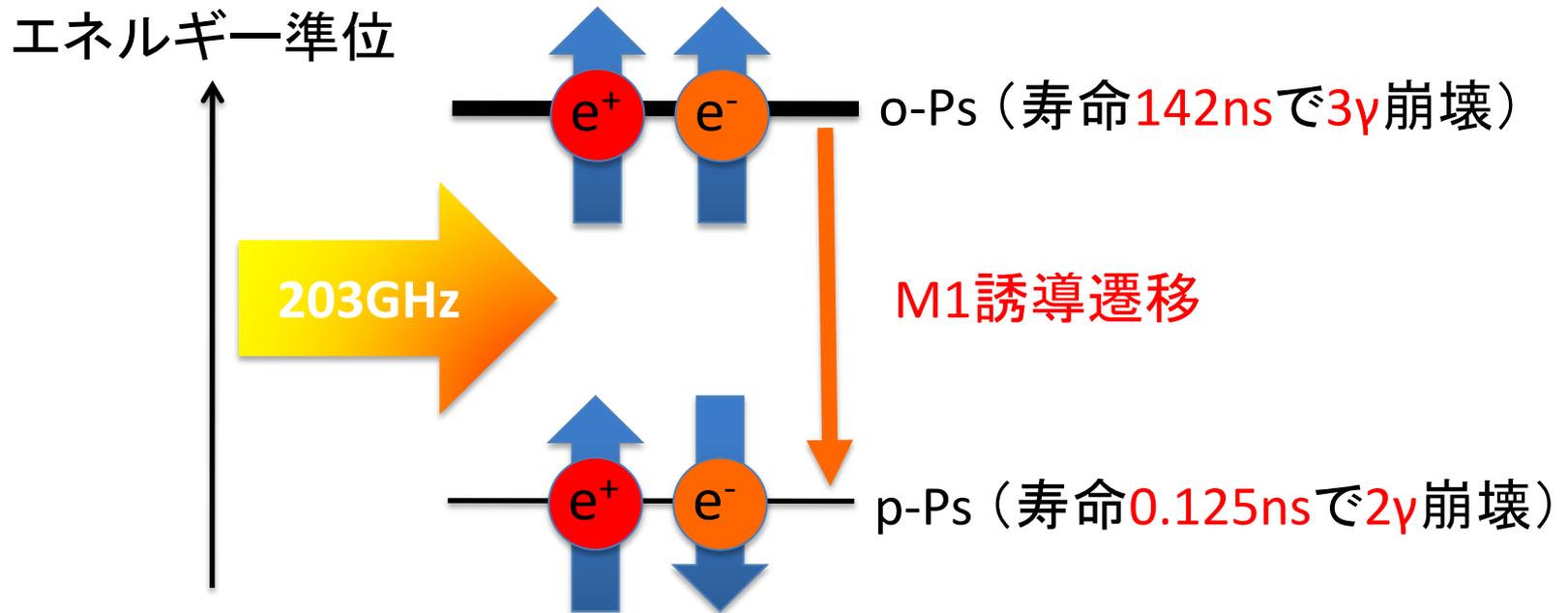
203.388 65(67) GHz (3.3 ppm)

$O(\alpha^3)$ QED calc.

203.391 69(41) GHz (2.0 ppm)

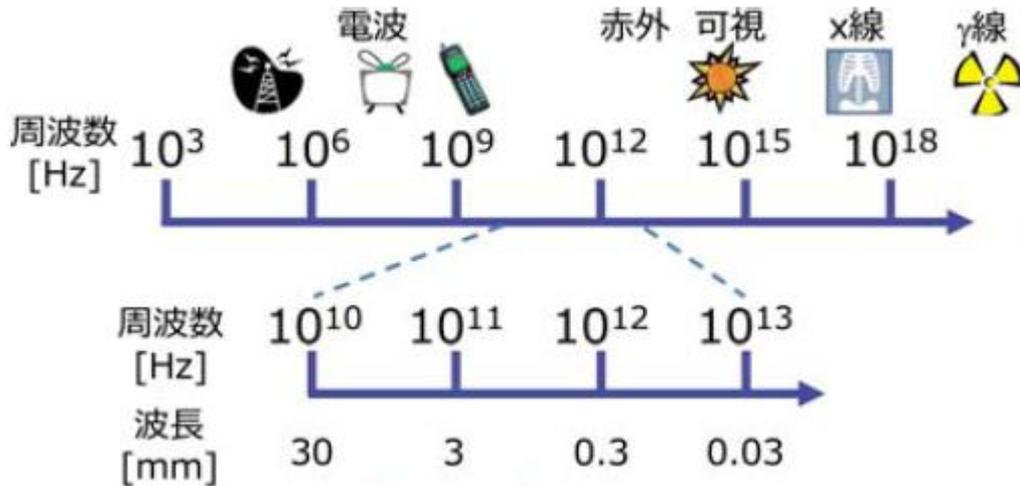
- 2000年に $O(\alpha^3)$ で理論計算が行われ、実験値との間に 3.9σ (15ppm)ものずれがあることがわかった
- 実験値が低い方に一様にずれている
- 考えられる原因としては、
 - ✓ 共通な系統誤差の見落とし
 - ✓ 未知粒子の寄与
 - ✓ 理論計算の間違い
- 過去の実験で最大の系統誤差は静磁場の非一様性に起因
 - 直接精密測定によって検証したい(※最終目標)

Ps-HFSの直接測定



- 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 \cdot 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、またo-Psの寿命が短いため($\tau = 142\text{ns}$)、十分な量の誘導遷移を起こすには10kWを超える高強度ミリ波が必要
- 遷移測定自体が世界初(\rightarrow 本論文のテーマ)

ミリ波(テラヘルツ波): 0.1-10 THz



電波と光の中間領域

- mm程度より大きなスケールでは粒子的
- mm程度より小さなスケールでは波動的

THz gap: 既存技術の空白領域

電波と光の両面から近年飛躍的に技術開発が進展

基礎科学での利用: 新たな「目」

物性: 有機物の振動・回転励起による構造決定・微小検出(THz分光)

宇宙: 星間物質の検出・同定→星の形成・進化

宇宙背景輻射の精密測定→インフレーション宇宙論の検証

素粒子: 標準理論の精密検証(Ps-HFS実験の最終目的)

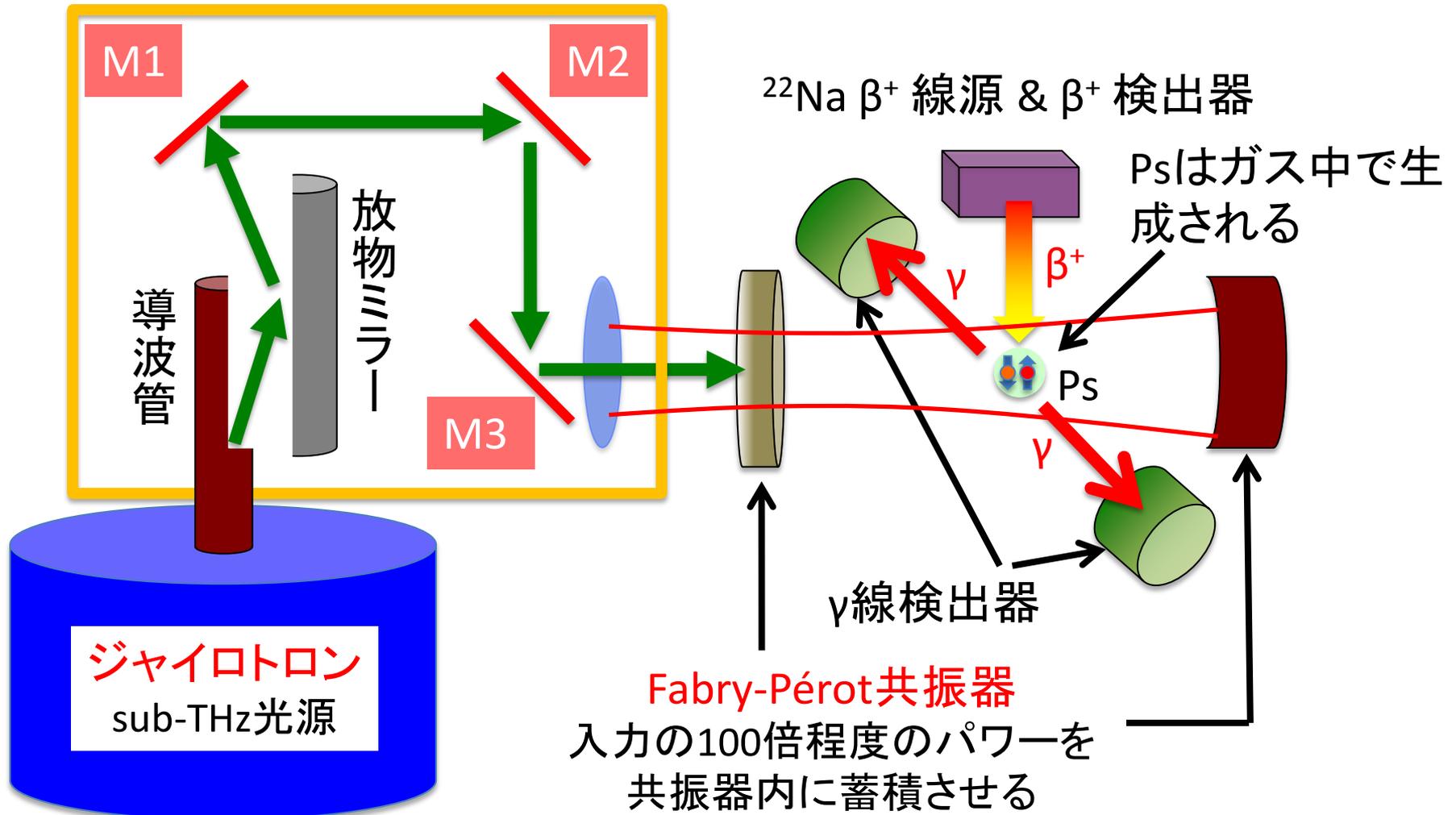
軽い未知素粒子の探索(axion, hidden photon)

実験装置

- 準光学系
 - ✓ Gyrotron
 - ✓ Fabry-Pérot 共振器
- Ps生成・遷移測定システム

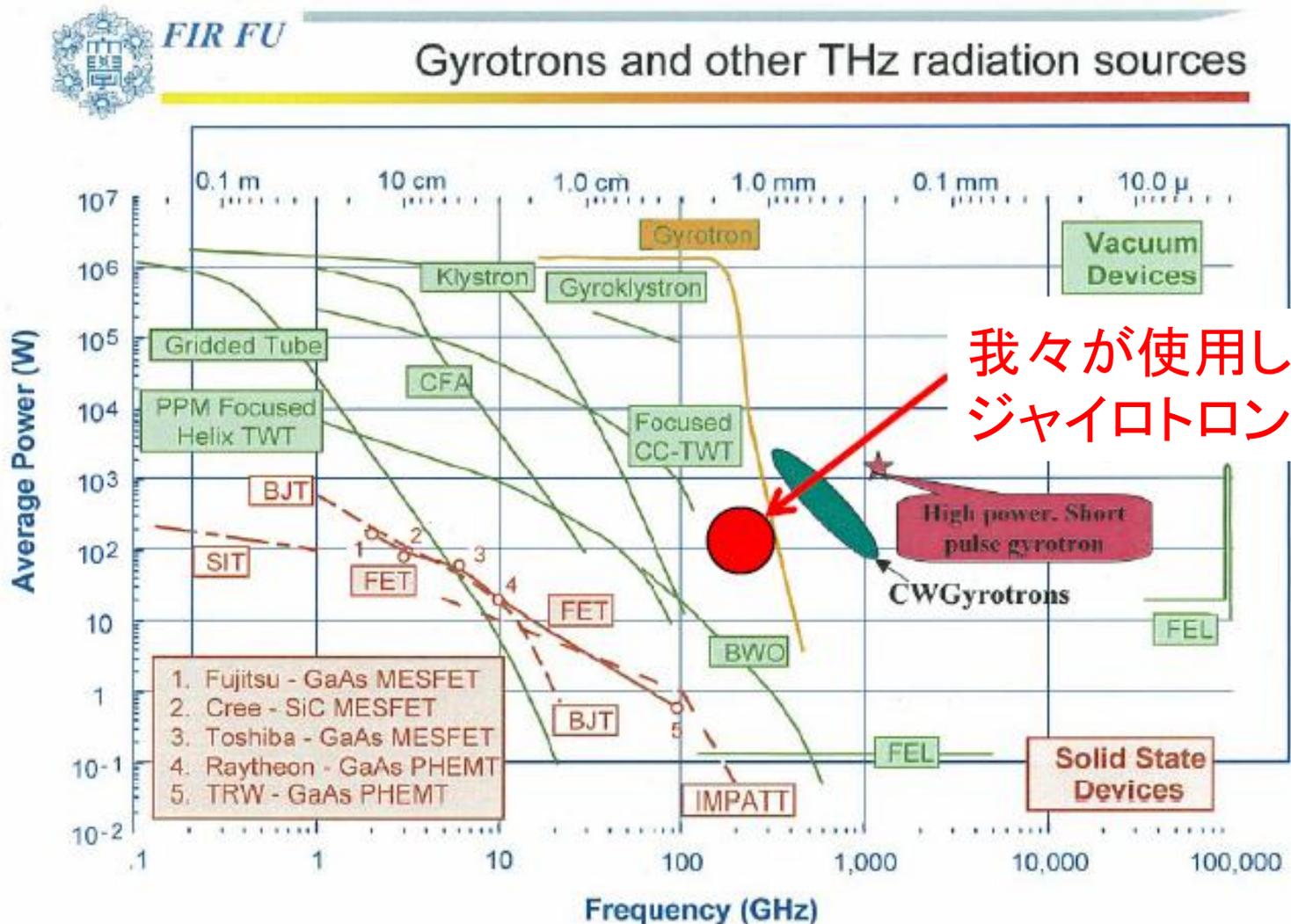
実験セットアップ

モードコンバータ



Gyrotron

- ミリ波領域で唯一のハイパワー光源。線幅が細く(<1MHz)、Tabletopサイズの装置。



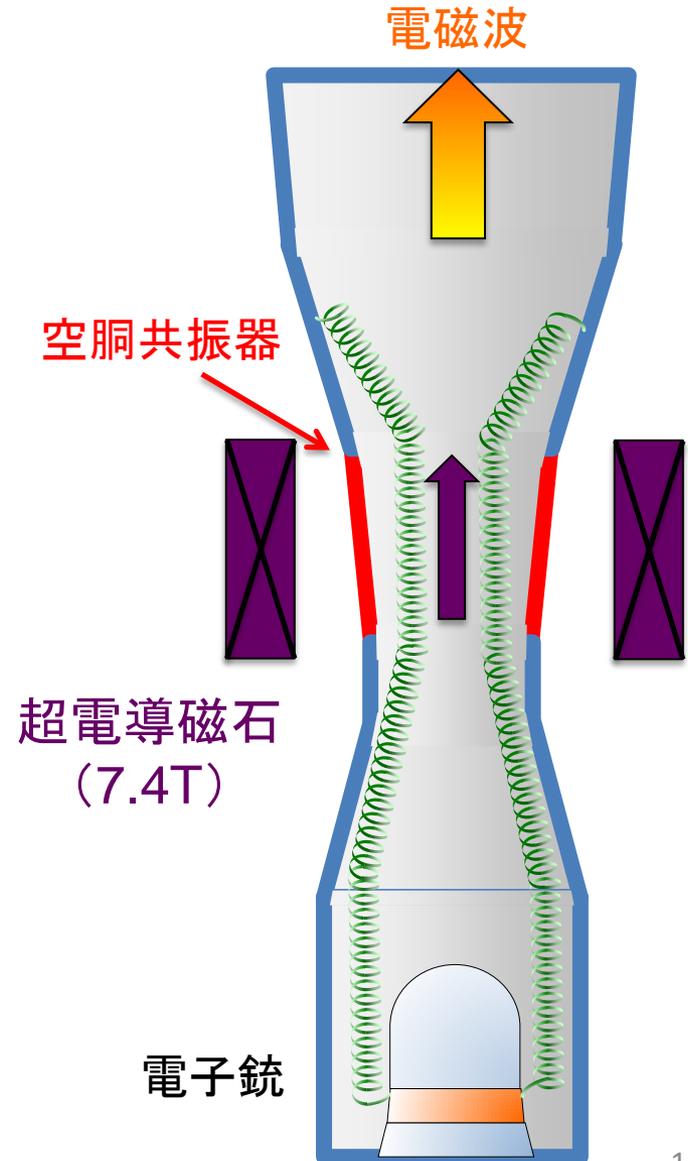
我々が使用している
ジャイロトロン

Gyrotron

- 電子銃から出た電子が電位差で加速され、磁場に巻き付きながら空洞共振器へ
- 超伝導磁場による電子のサイクロトロン周波数 ($\omega_c = eB/m\gamma$) と磁場中心に置かれた空洞共振器の共振周波数

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

を合わせるとサイクロトロン運動の位相が揃って発振し、回転エネルギーが空洞共振器 (Q値 ~ 1000) 中の電磁場エネルギーに変換される

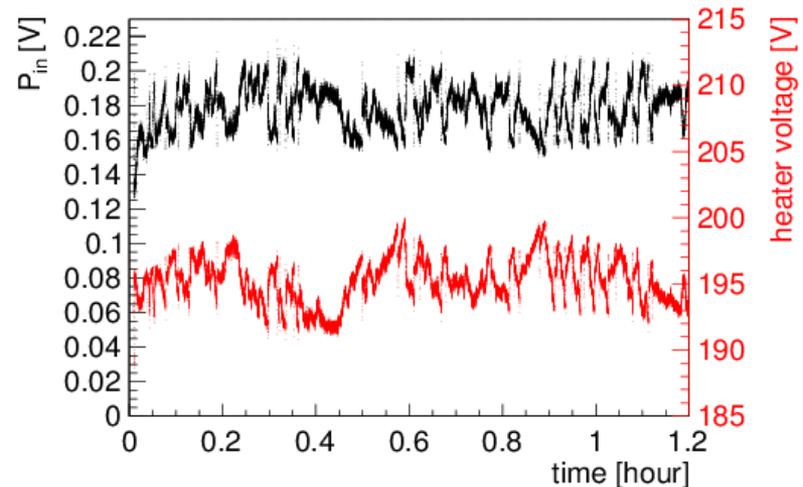


Gyrottron “FU CW V”

@ 福井大学



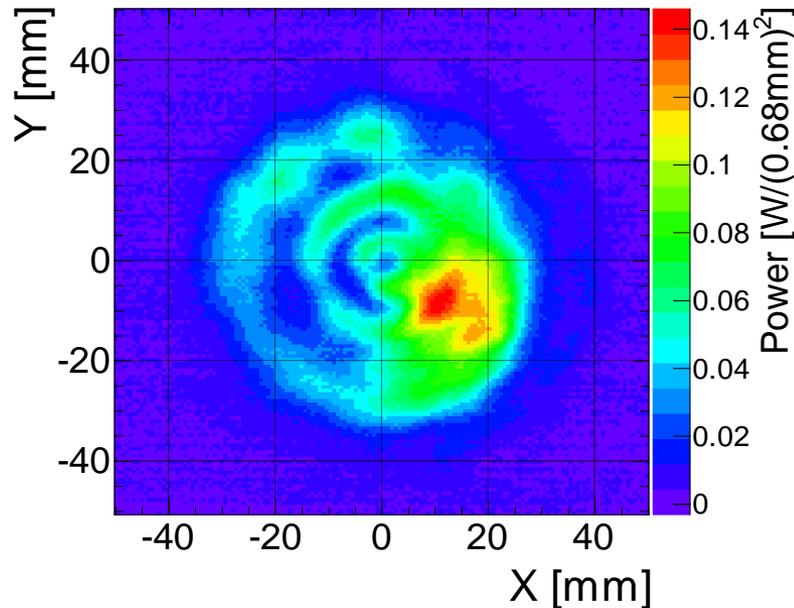
- 発振周波数は内部空洞共振器の径 ($\phi 4.78\text{mm}$) とモードで決まる。円形導波管 TE_{03} mode で **203GHz**
- 線幅 **1MHz**
- ハイパワー (**300W**, 20Hz **duty 30%**)
- 電子銃ヒーター電圧をコントロールすることで出力パワーを安定化 ($\pm 10\%$)



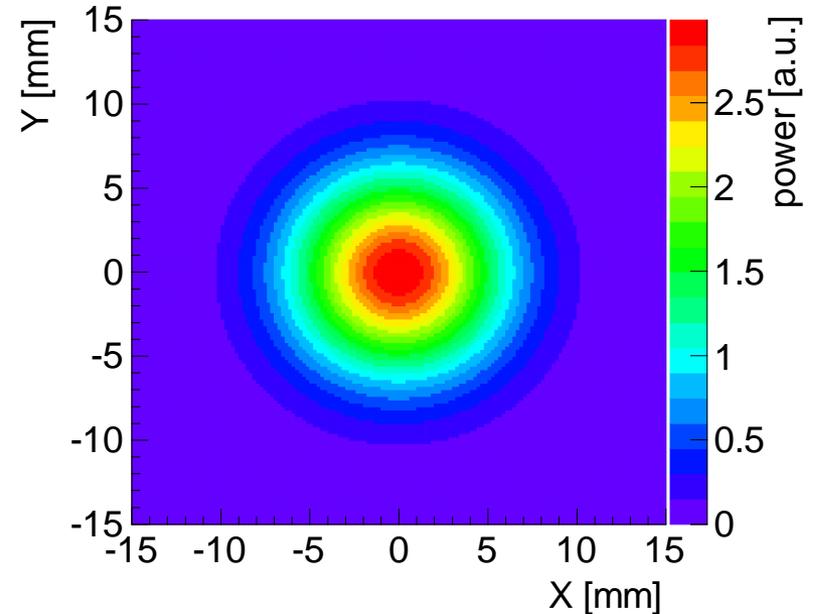
モードコンバータ 1/2

- Fabry-Pérot共振器(内部モードはガウスビーム)とカップルさせるには、ジャイロトロン出力をガウスビームに変換しなければならない

ジャイロトロン出力
TE₀₃モード(実測)



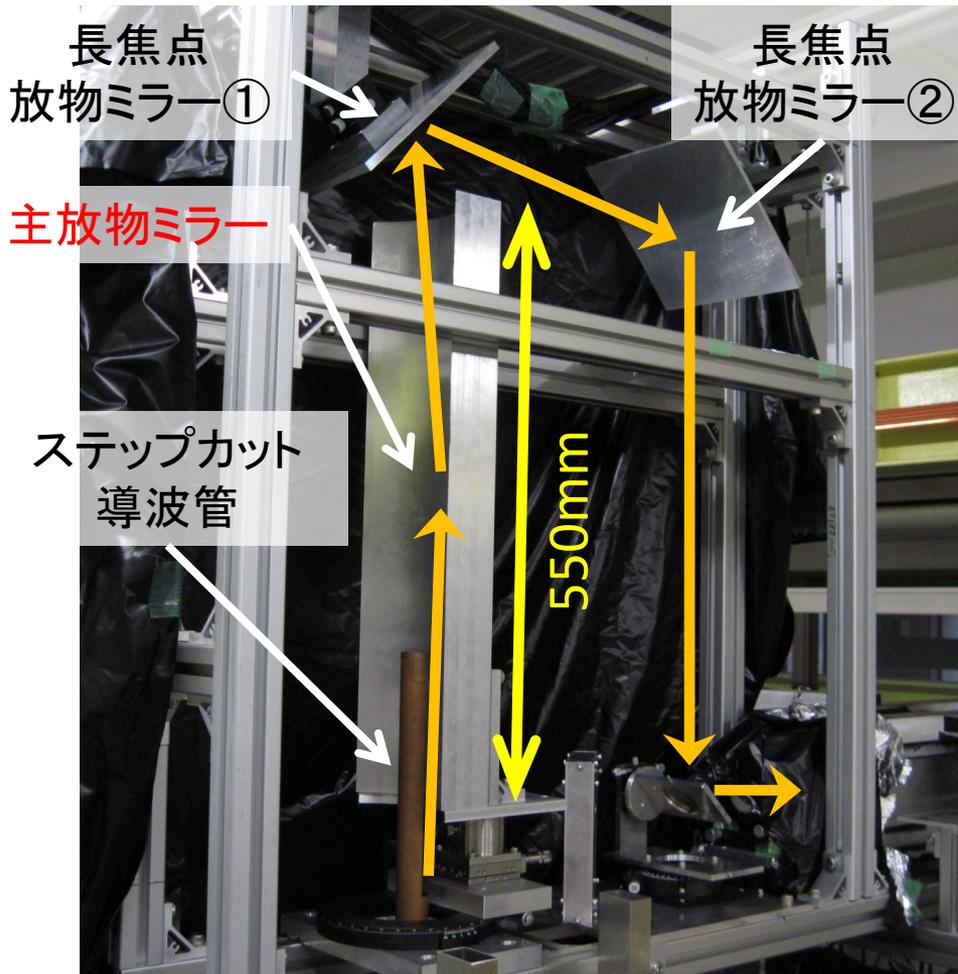
Fabry-Pérot共振器
ガウスビーム(理論@waist)



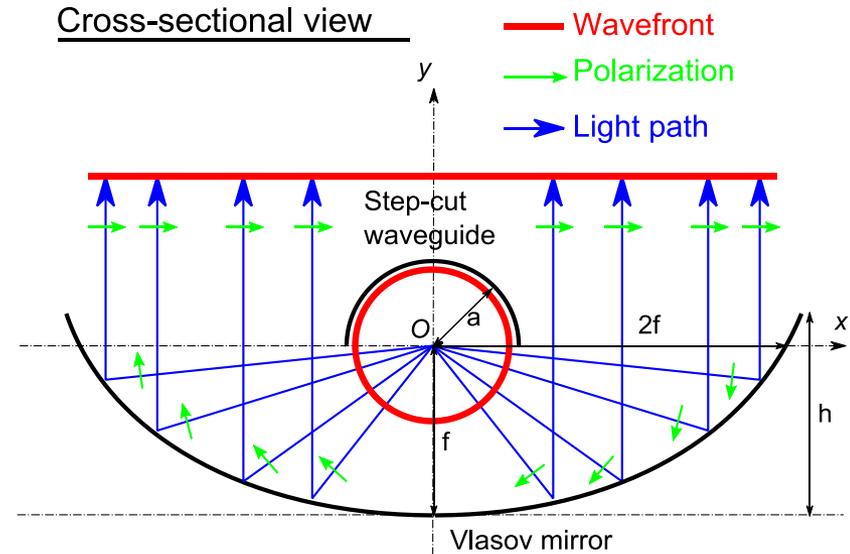
塩ビ板にsub-THz光を照射し、温度上昇をIRカメラで撮影することでパワー分布を測定

モードコンバータ 2/2

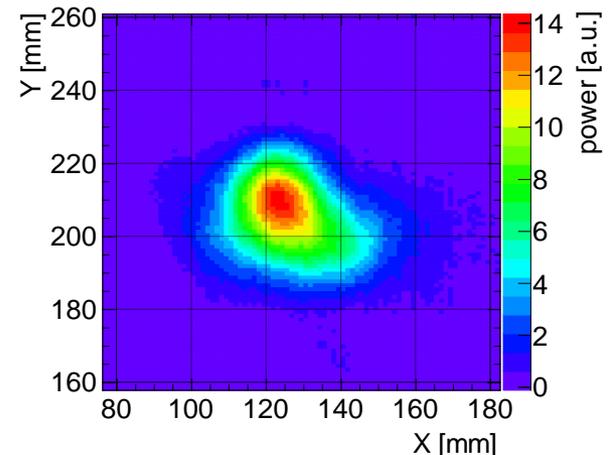
- ステップカット導波管を用い、ジャイロトロン出力を全て主放物ミラーで反射させることで波面と偏光を揃える



Cross-sectional view



変換後のビーム形状

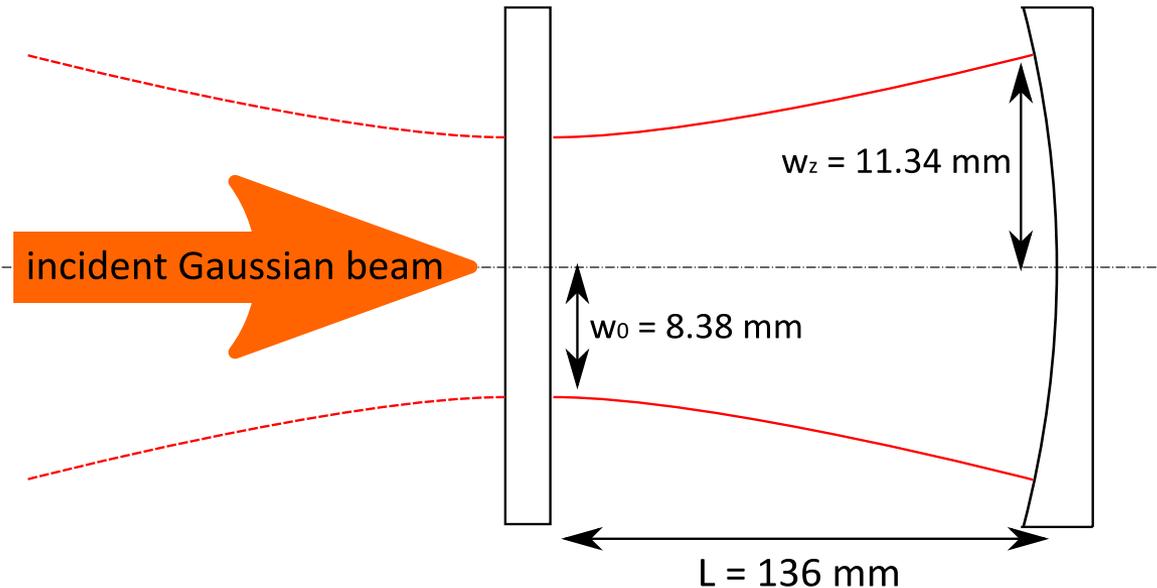


- パワー変換効率 $28 \pm 2\%$ → 100W

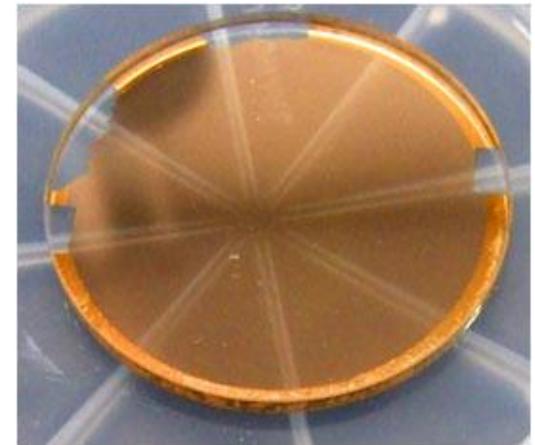
Fabry-Pérot 共振器 1/2

Au mesh plain mirror

Cu concave mirror
 $R = 300 \text{ mm}$

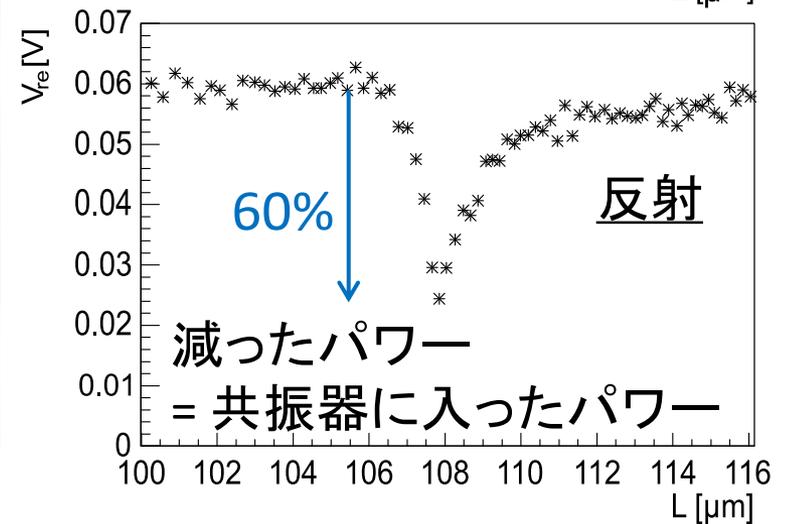
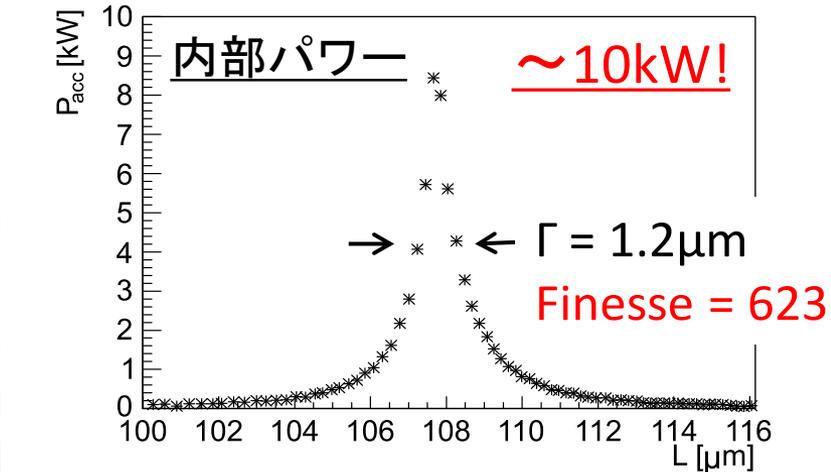
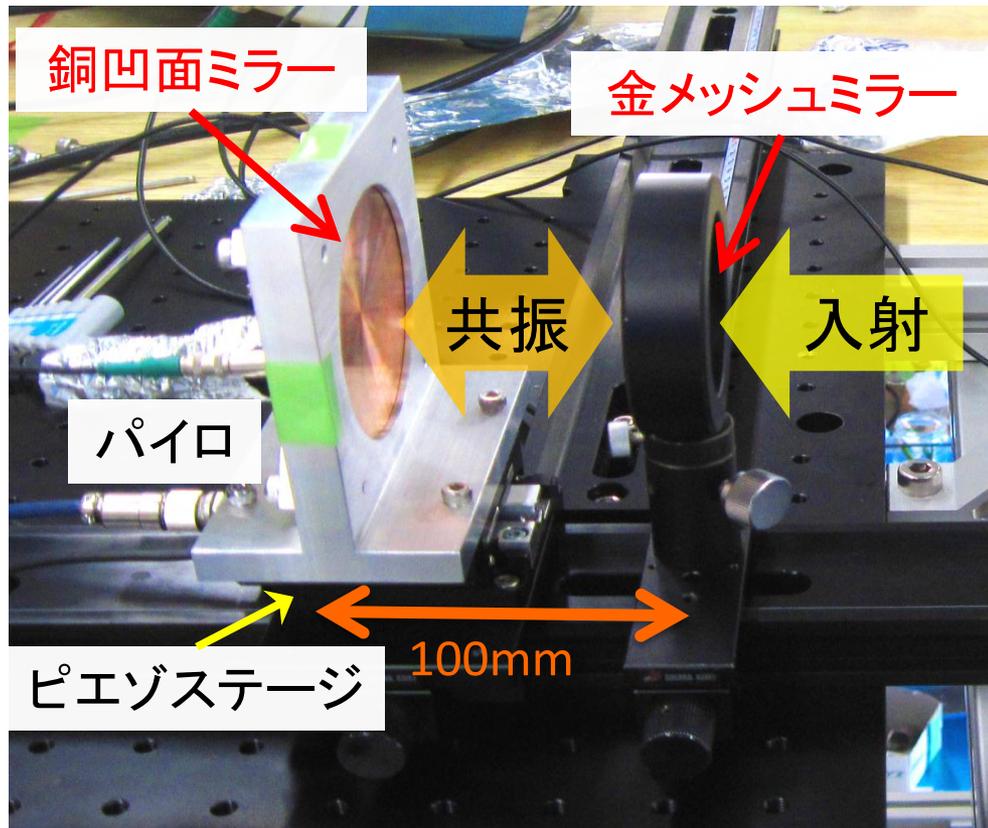


φ50 金メッシュミラー
ライン幅 = 200μm
ライン間隔 = 160μm
メッシュ厚さ = 1μm
石英基板上に蒸着



- 銅球面ミラーをピエゾステージでコントロール。ミラー間の長さが $\lambda/2 = 750 \mu\text{m}$ の整数倍になると共振
- 高いゲインを得るには、入射ビームと共振器とのカップリングが大きく、かつ共振器内部でのロスが少なくなければならない
→ 入射側の金メッシュミラーは高い反射率 (99.4%) と reasonable な透過率 (0.4%) を持つようにライン幅およびライン間隔を設計 (CST MWS)
- 銅ミラーの中央のφ0.6穴からの透過パワーをパイロでモニタ

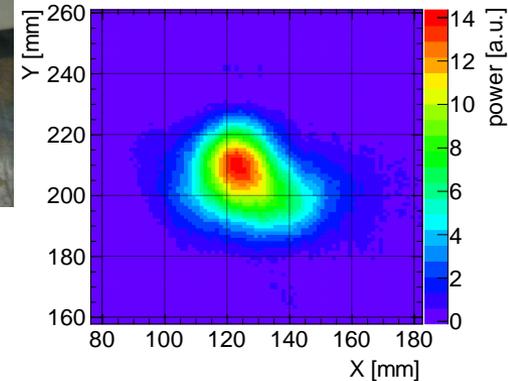
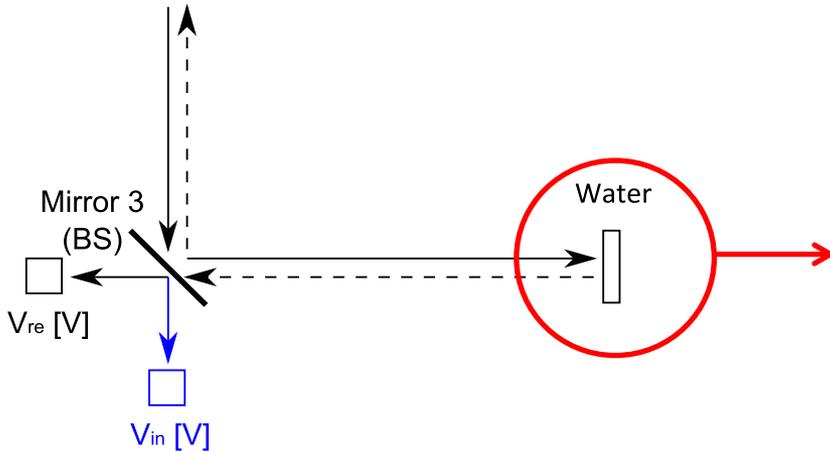
Fabry-Pérot共振器 2/2



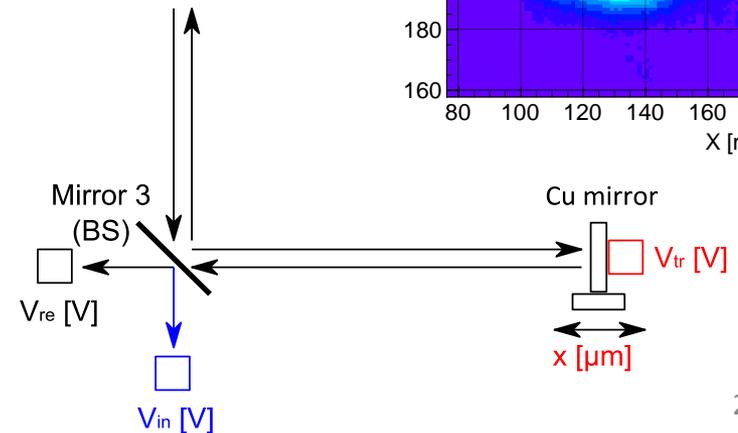
- Finesse = 623 \rightarrow 内部ロス1%、結合したビームが100回往復可
- ゲインは、coupling 60% x 往復回数100 x 2(往復) \sim 120!
- Gyrotron 300W x モード変換効率 30% x FP gain 120 = 10 kW!

共振器内部パワーの評価

- 以下の方法で透過パイロの応答 V_{tr} [V] から蓄積パワー P_{acc} [kW] への校正係数を求めて蓄積パワーを評価。**絶対精度で±30%**
- 1. 入射ビームを水に照射して全吸収させ、温度上昇からビームの全パワー P_{in} [W] ($/ V_{in}$ [V]) を求める

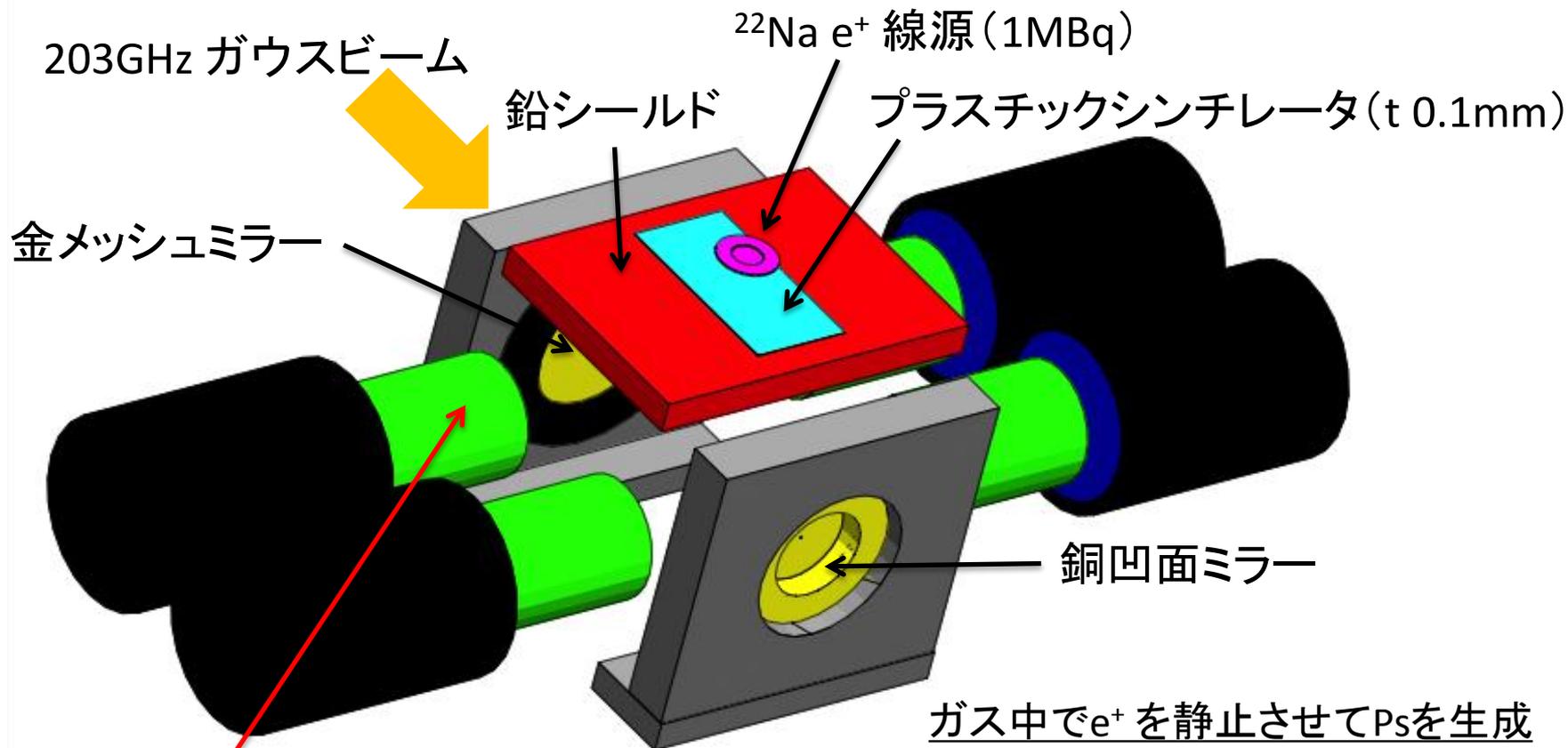


- 2. 入射ビームを銅凹ミラーに照射し $\phi 0.6$ 穴からの透過 V_{tr} [V] ($/ V_{in}$ [V]) をパイロで測定
- 3. 銅ミラー位置でのビーム形状は塩ビを用いて測定。FP内部モードとの差を補正



Ps生成部・ γ 線検出器

- Signal = o-Ps \rightarrow p-Ps \rightarrow 2γ : o-Psの長寿命 ($\tau = 142\text{ns}$) と p-Psの 2γ 崩壊 (511keV back-to-back)



LaBr₃(Ce) シンチレーター

- エネルギー分解能 FWHM 4%@511keV
- 時定数 16ns
- 時間分解能 FWHM 200ps @ 511keV

ガス中でe⁺を静止させてPsを生成

- 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
- 鉛によるaccidental抑制

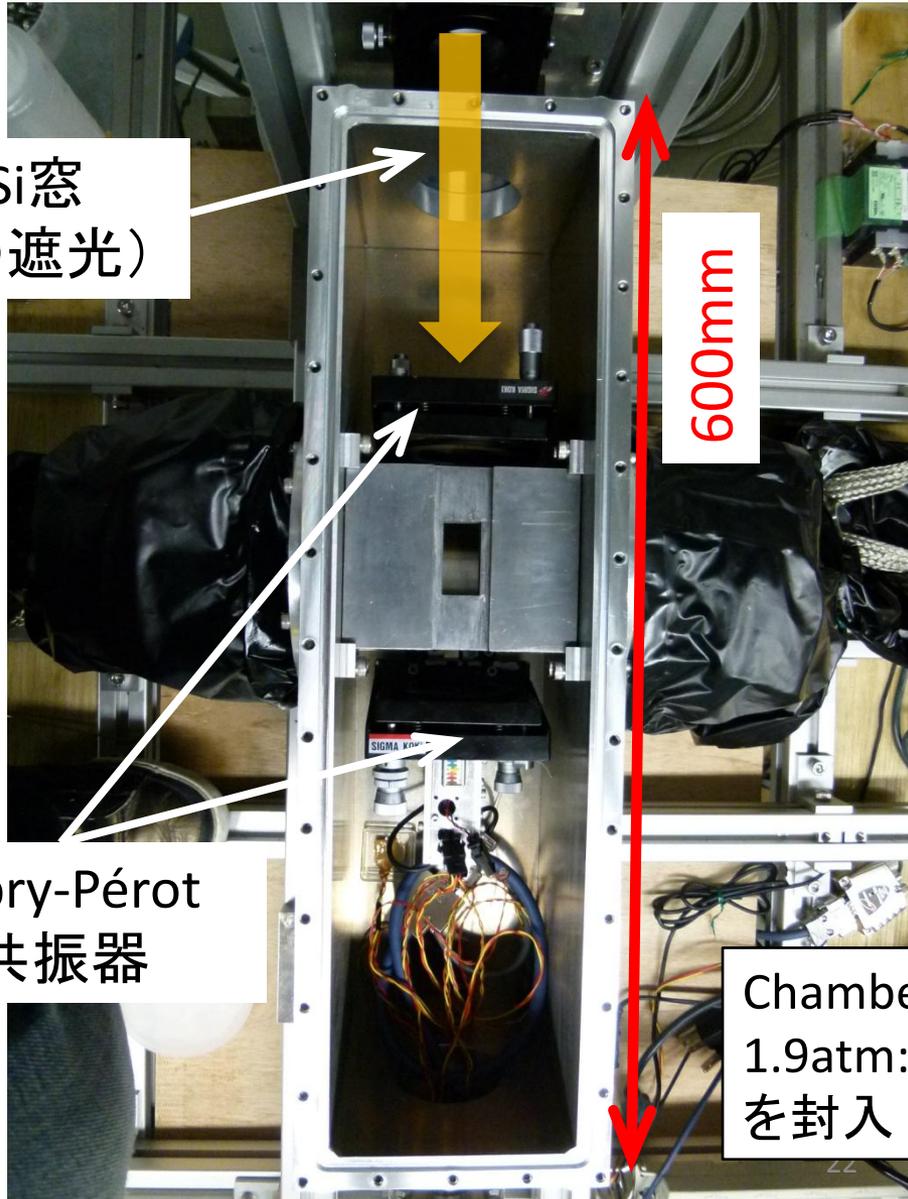
Ps生成chamberの写真

高抵抗Si窓
(可視光の遮光)

Fabry-Pérot
共振器

600mm

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

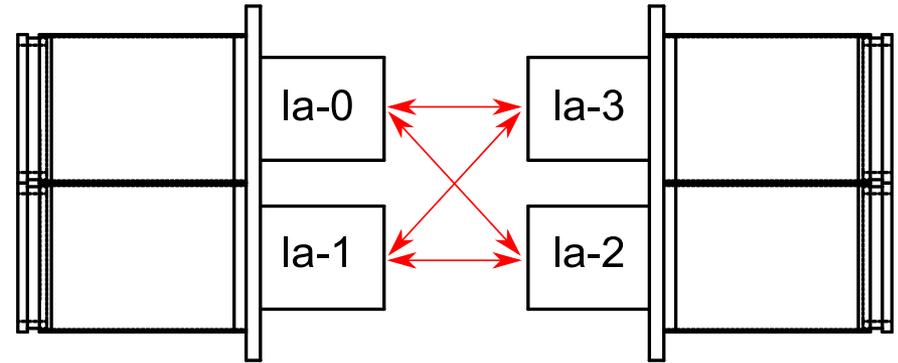


データ解析

Trigger, RUNs

- プラシンので e^+ がタグされてから
 - 100~1100nsの間にback-to-back γ 線ヒットがあったらtrigger
- Trigger rate ~ 1kHz

Back-to-back pairは4通り

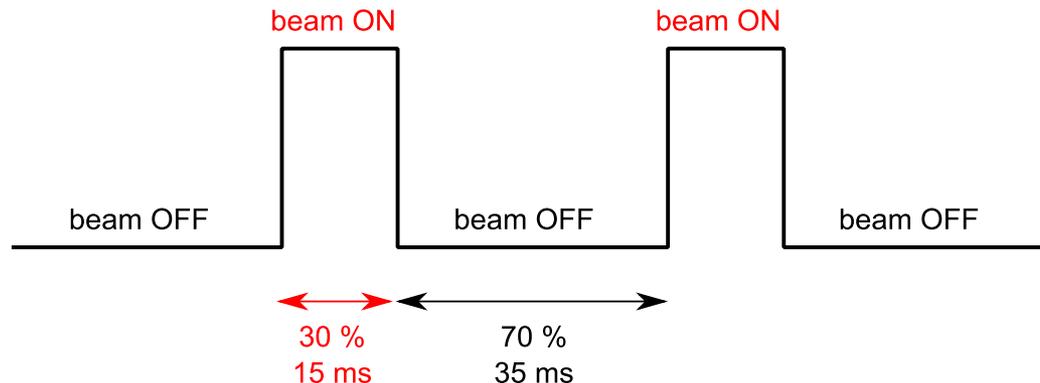


- 4つのRUNを行った。ON resonance (203GHz)で蓄積パワーを変えて3点。140GHzのビームを用いてFabry-Pérot共振器を共振させ、radiation以外の条件(温度etc)をON resonanceの11kW RUNと同じにした比較用データを1点

ID	frequency	power	duration	live time (ON)	live time (OFF)	trigger rate
I	203 GHz	11.0 kW	4.3 days	7.0×10^4 sec	1.6×10^5 sec	949 Hz
II	140 GHz	3.3 kW	3.3 days	4.3×10^4 sec	1.0×10^5 sec	949 Hz
III	203 GHz	0.0 kW	2.4 days	4.1×10^4 sec	9.6×10^4 sec	936 Hz
IV	203 GHz	5.6 kW	2.8 days	3.8×10^4 sec	8.9×10^4 sec	932 Hz

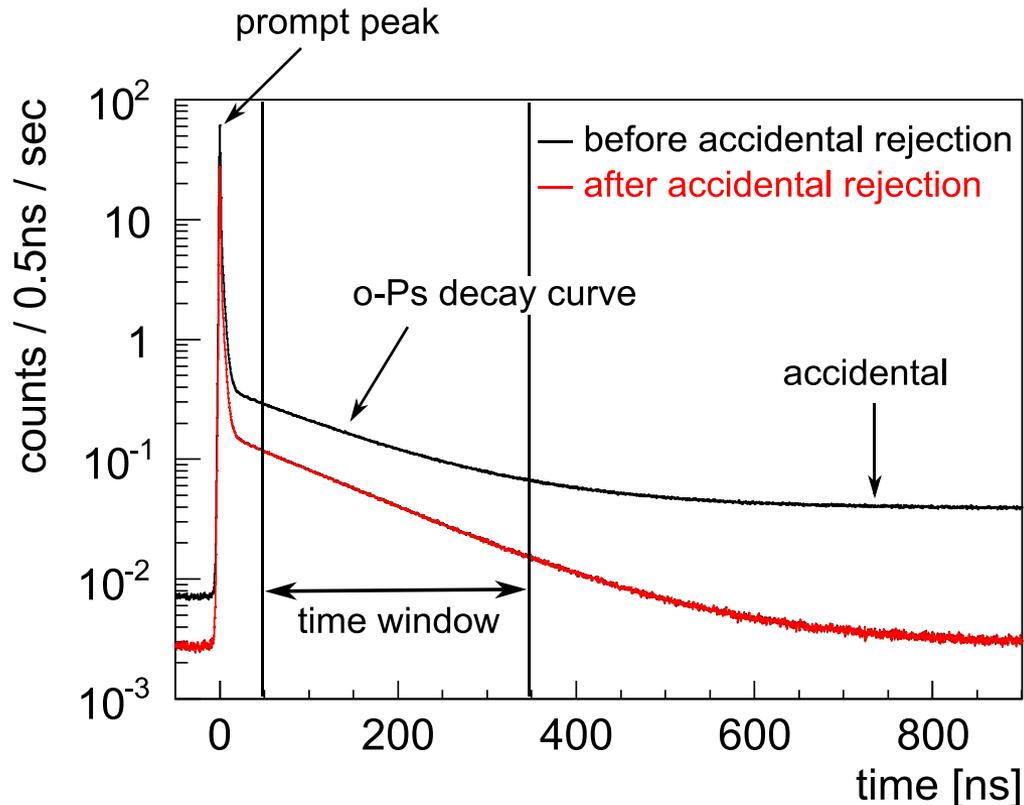
解析 (signal, background)

- Signal
 - ✓ o-Ps \rightarrow p-Ps \rightarrow 2 γ : o-Psのlong lifetime ($\tau = 142\text{ns}$) かつ p-Psの511keV back-to-back 2 γ 崩壊
- Background
 - ✓ o-Ps \rightarrow 3 γ : γ 線検出器のenergy resolutionおよび2 γ と1 γ がback-to-backに出るプロセス
 - ✓ o-Ps \rightarrow 2 γ (pick-off) : ガス分子中の e^- とo-Ps中の e^+ が対消滅
 - ✓ accidental
- ジャイロトロン出力は20Hz \cdot 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

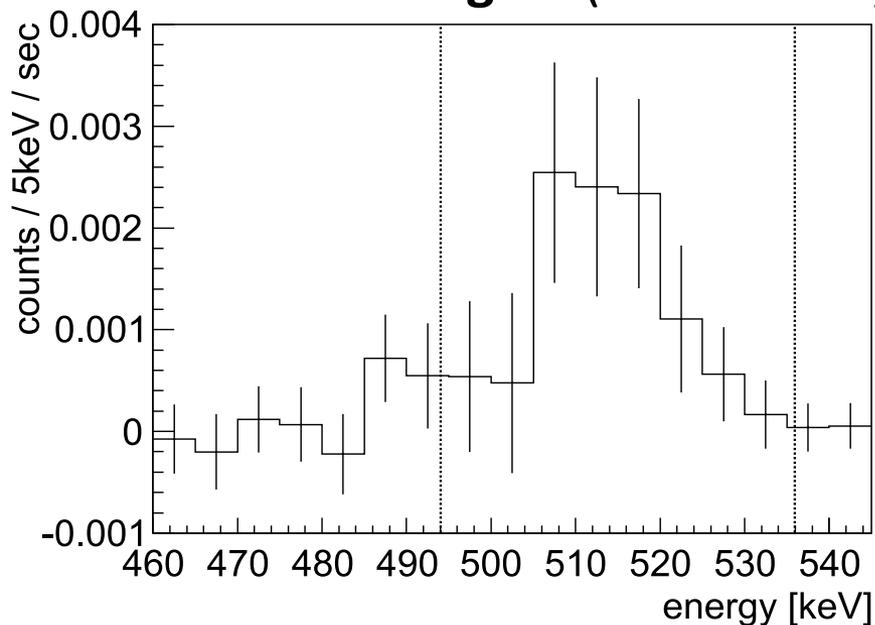
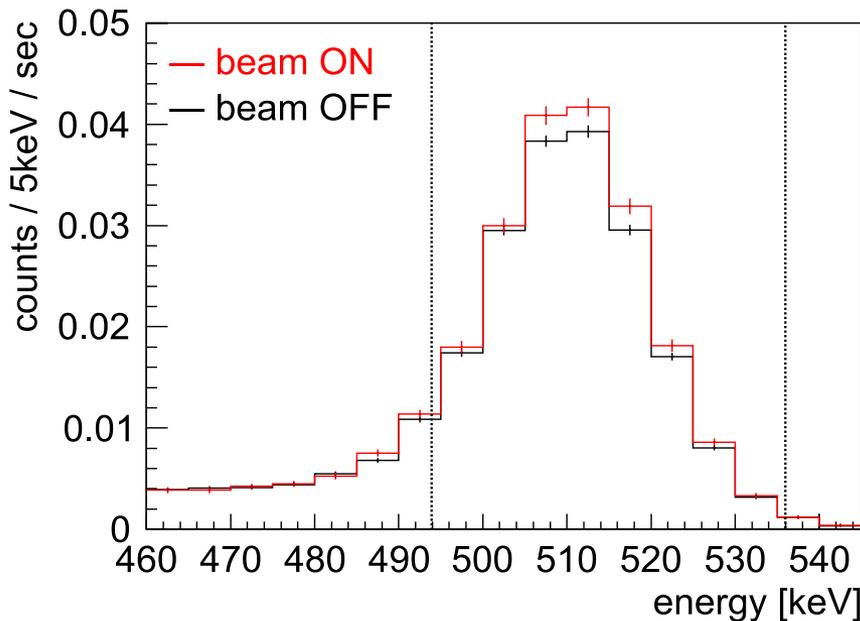
- プラシムで e^+ をタグしたタイミングと γ 線検出のタイミングの差からPsの寿命曲線が得られる
- Delayed coincidenceにより長寿命のイベント(遷移, o-Ps崩壊)を選び、S/Nを向上。この領域での511keVの量のON/OFF差が遷移シグナル



Back-to-back 511keV energy cut

- 最後にback-to-back 511keVを要求。下図は反対側の γ 線検出器に496keV~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 = 850~900ns)で評価しsubtractする

Transition signal (= ON - OFF)



- Signal = ON - OFF = 15.1 ± 2.7 (stat.) $^{+0.5}_{-0.8}$ (sys.) mHz (**5.4 σ**)
- 初めて P_s -HFS間の遷移を観測！

系統誤差

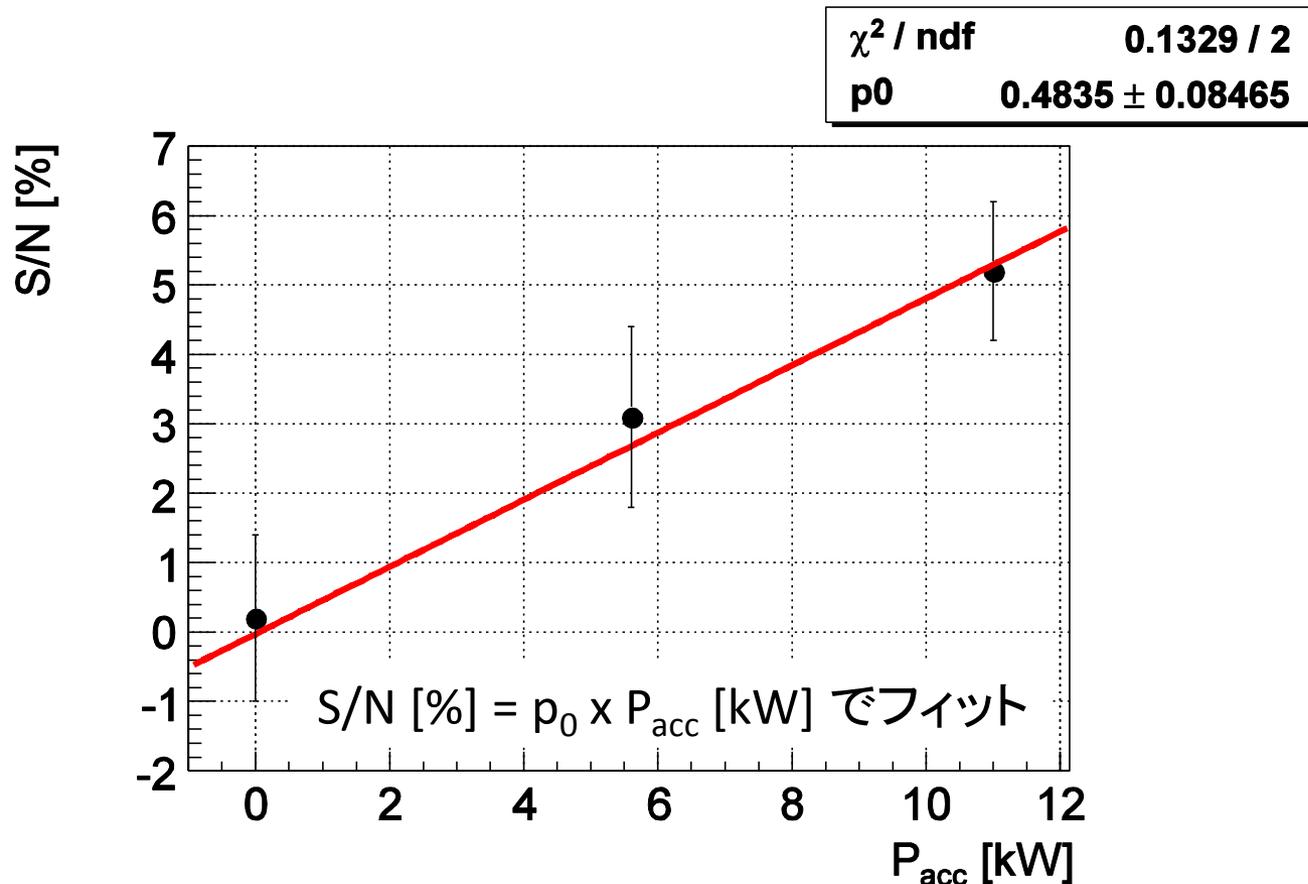
- 下表はbackgroundに対する割合で書いてある

source	RUN I	RUN II	RUN III	RUN IV
Energy scale and resolution	-0.08 %	+0.06 %	-0.11 %	-0.02 %
Ps formation probability	-0.27 %	-0.39 %	+0.20 %	-0.13 %
Pileup rejection efficiency	+0.17 %	+0.05 %	+0.13 %	+0.23 %
Background normalization	± 0.03 %	± 0.04 %	± 0.04 %	± 0.04 %
Total	+0.17 % -0.29 %	+0.08 % -0.39 %	+0.24 % -0.12 %	+0.24 % -0.14 %

- エネルギースケール・分解能がON/OFFでずれているとfake signalが生じる。実測した511keVピーク位置・分解能をMCに入れて評価
- sub-THz光を照射するとPs生成率が増加
- ON/OFFでのプラシンのレート差によるaccidental rejection効率のずれ
- BackgroundをOFFのイベントから評価する際、プロンプト崩壊したイベント数がON/OFFで同じになるように規格化している。この統計エラー

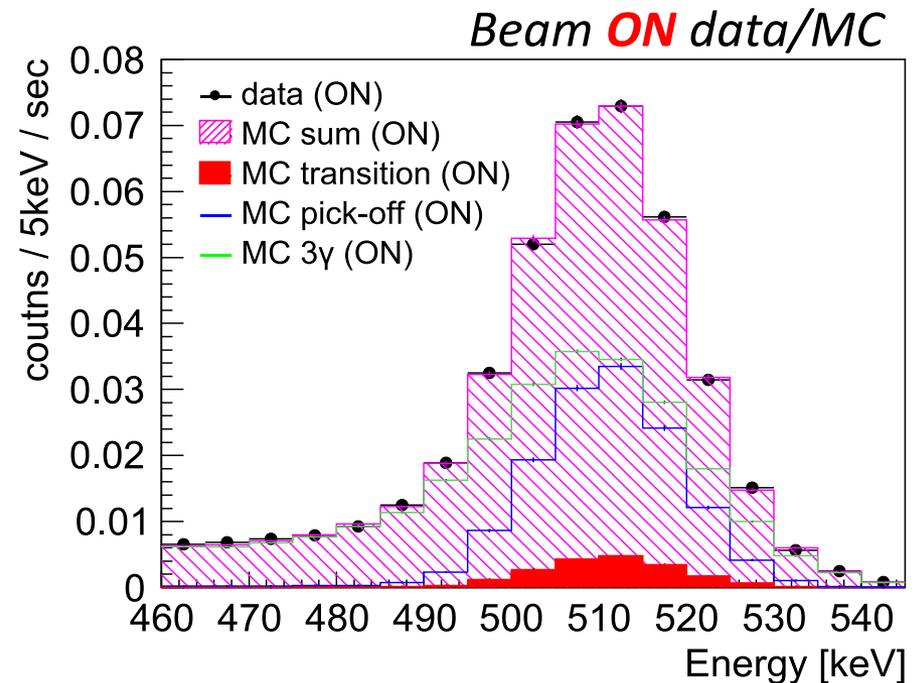
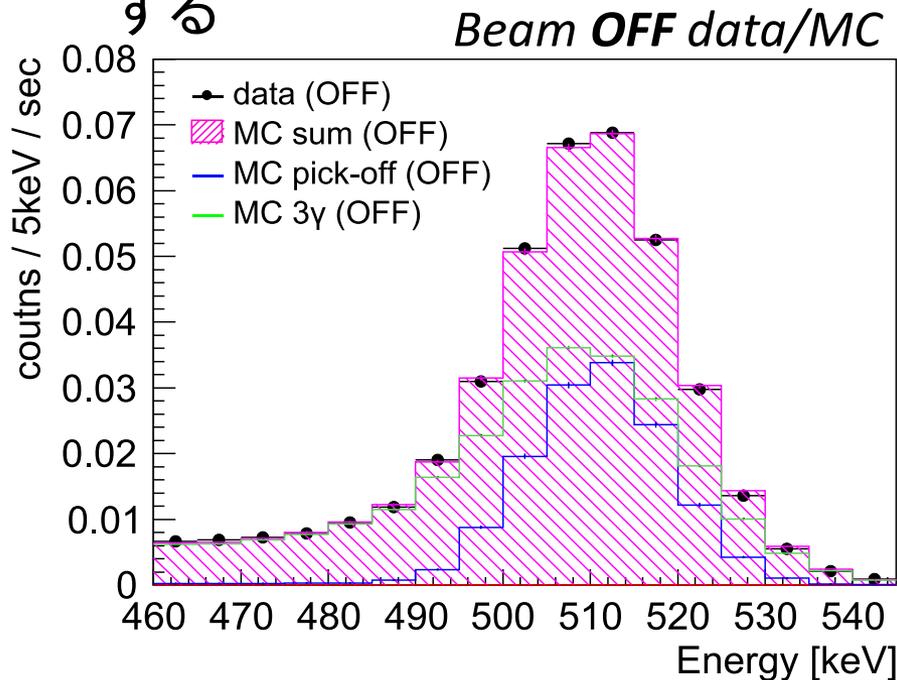
遷移量のPower依存性チェック

- Fabry-Pérot共振器の共振ピークのどこで安定化させるかを変えることで共振器内部パワーを変化させて測定を行い、**内部パワーの増加に従って遷移量が増えることを確認**。S/N = (ON - OFF)/OFF で定義



遷移量を理論計算と比較

- 透過パイロの値から見積もられた内部パワーをinput parameter、遷移確率 $A[s^{-1}]$ (pick-off probability, 全体のscale) をfit parameterにしてON/OFF同時にフィッティングを行い、best fitの $A[s^{-1}]$ を理論値と比較する



- $\chi^2 / \text{ndf} = 0.91$ (prob. = 77%). また、Pick-off prob. = $5.45 \pm 0.22\%$ はo-Psの寿命の測定値から得られた値 $5.35 \pm 0.73\%$ とコンシステント
- $A = 3.1^{+1.6}_{-1.2} \times 10^{-8} [s^{-1}]$ で理論値 $3.37 \times 10^{-8} [s^{-1}]$ とコンシステント 30

結論(ここまでがD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 $A = 3.1^{+1.6}_{-1.2} \times 10^{-8} [s^{-1}]$ は理論計算($3.37 \times 10^{-8} s^{-1}$)とコンシステント

This work is published in *Phys. Rev. Lett.* **108**, 253401 (2012).

Ps-HFS直接測定実験の現状

光学系のアップグレード

- これまでの光学系の問題点

1. Gyrottron の発振周波数が (Ps-HFS 周辺では) 202.9 GHz のみ
遷移曲線の測定が不可能。Ps-HFSの測定には201~206GHz程度
の範囲で周波数を変える必要あり

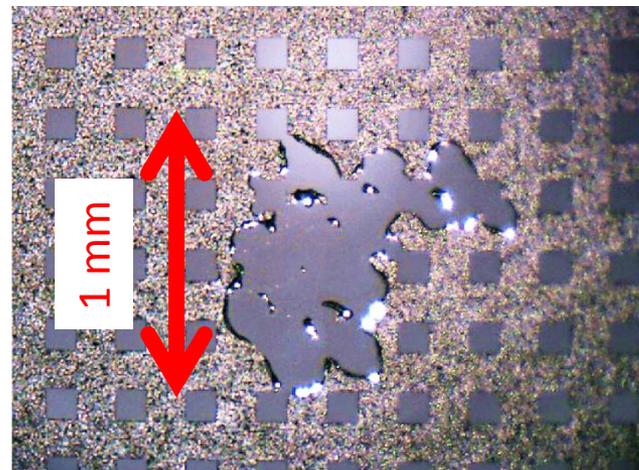
2. Fabry-Pérot 共振器内部に15kWを超えるパワーを蓄積すると、
メッシュが溶けてしまう

S/Nを向上させられず、測定に時間がかかってしまう。20kW程度は必要

3. パワー精度が30% (absolute) と低い

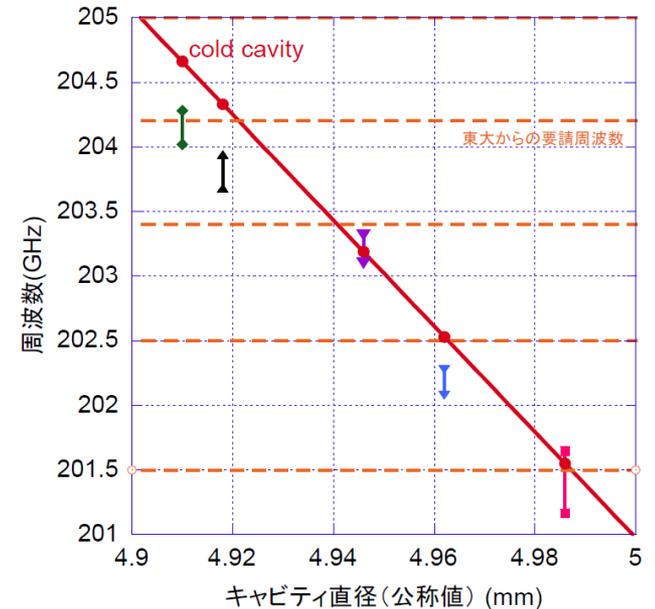
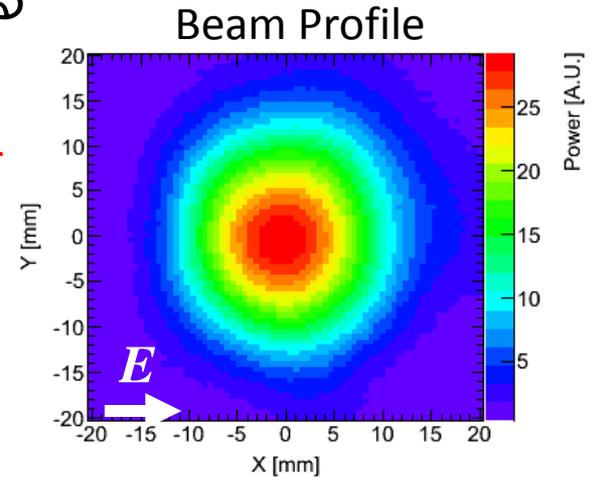
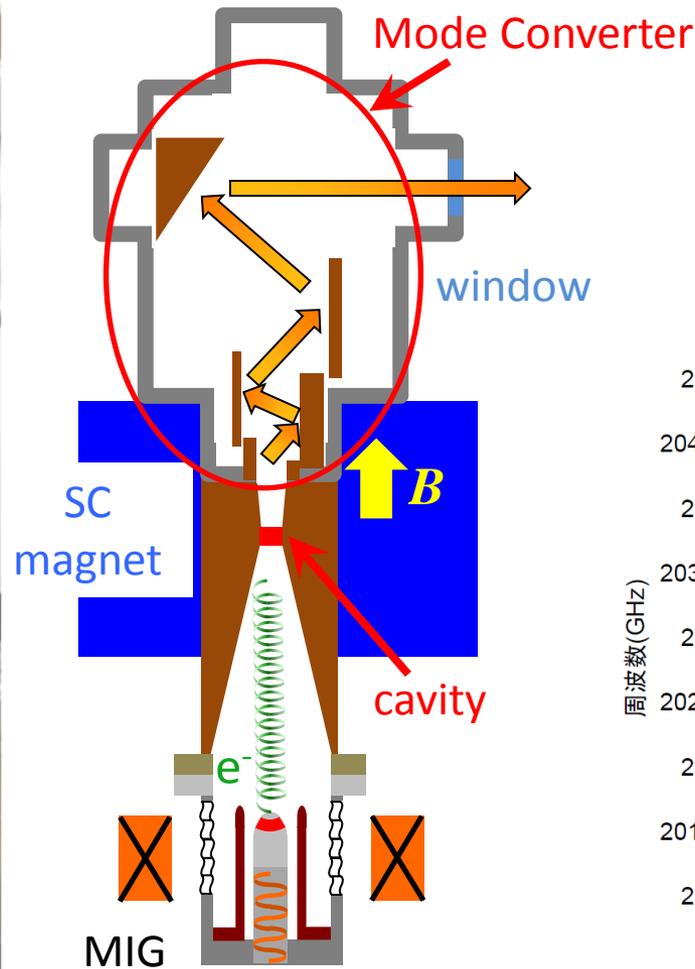
ピーク・半値・裾の点を取るのに、最低でも20%程度の相対精度が必要

溶けたメッシュミラーの拡大写真



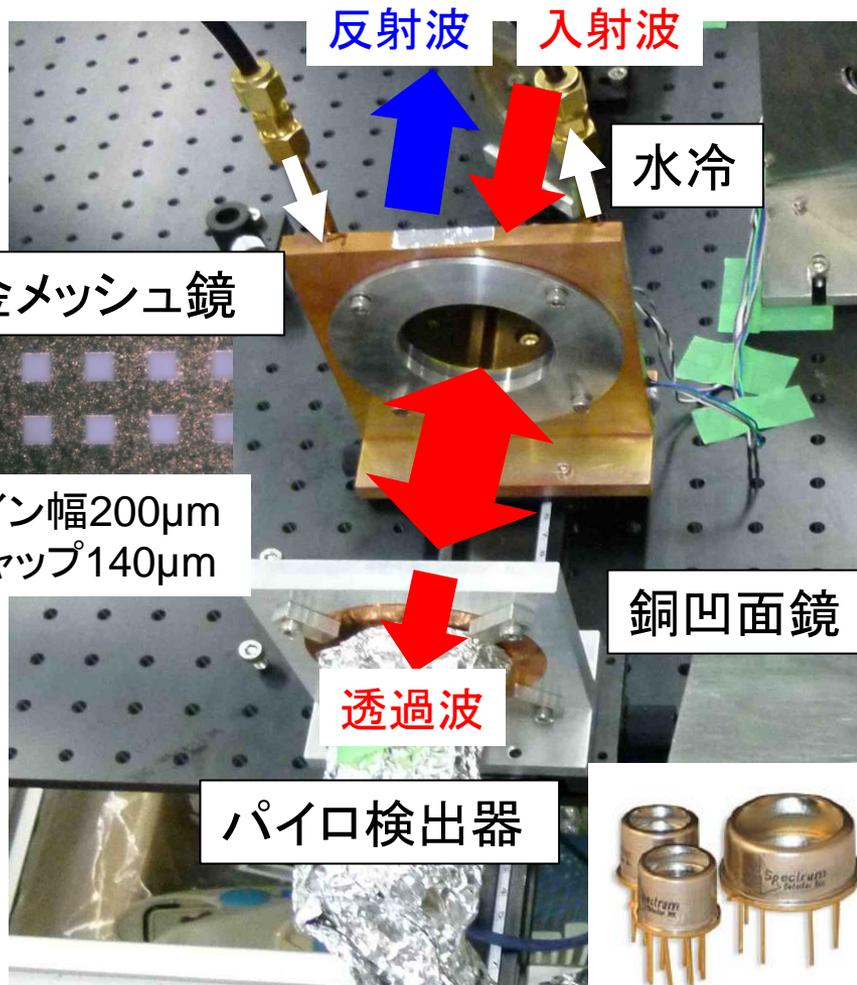
Gyrotron "FU CW GI"

- 内蔵キャビティーを異なる径のキャビティーに交換することで周波数を201~206 GHz (線幅1MHz)の範囲で変化させる
- ガウスビームパワー **300 W** (5Hz, duty 30%)

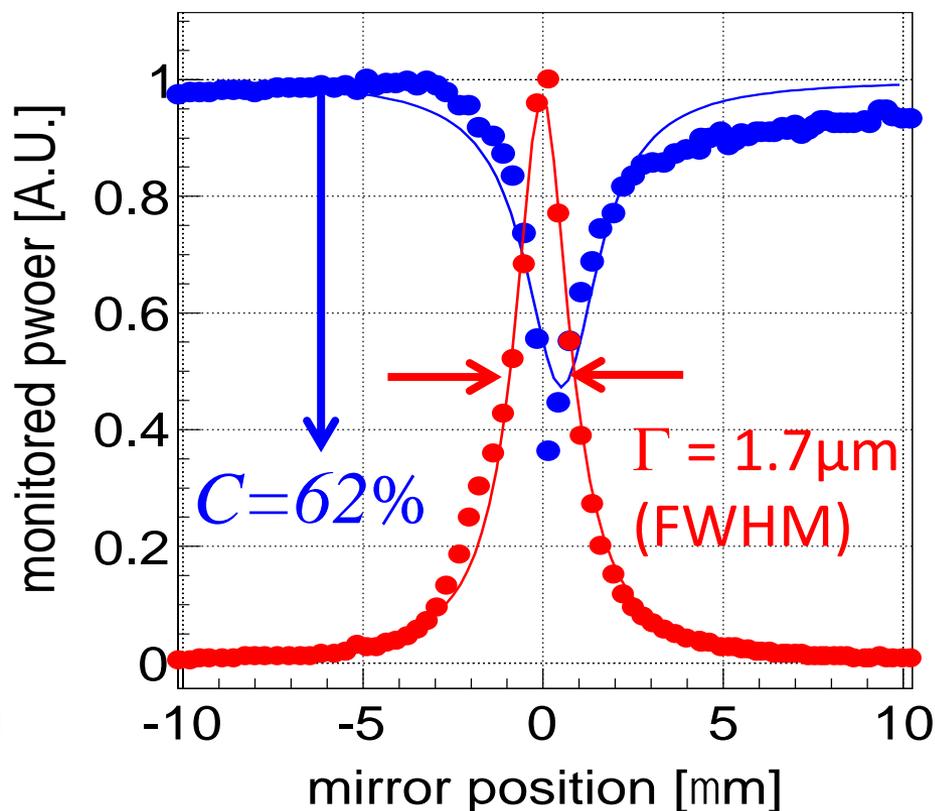


Fabry-Pérot 共振器

- 基板を熱伝導の良い高抵抗Siに変えて水冷→熱耐性UP



共振点における反射・透過パワー



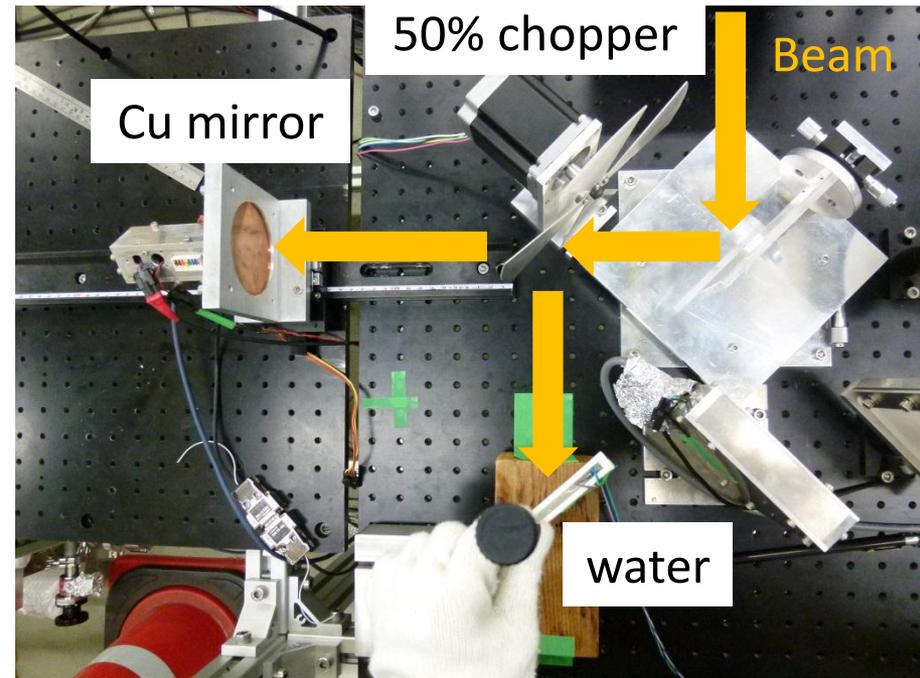
- 共振鋭さ $\Gamma=1.7\mu\text{m}$ 共振器へのパワー導入効率 $C=62\%$ → 25kW

パワー測定

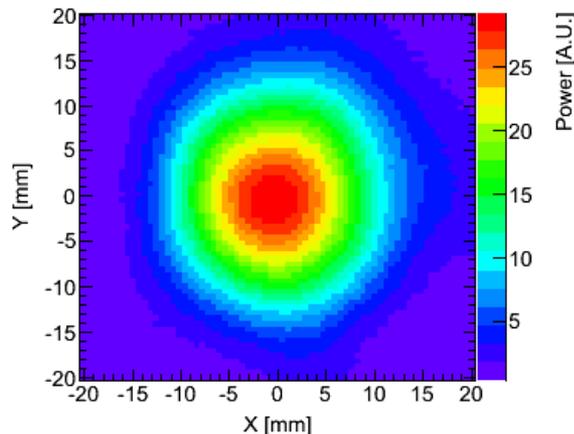
- 遷移量は蓄積パワーに(ほぼ)比例。パワーの相対精度が重要
- 実際には銅ミラーのφ0.6穴を透過してきたパワーに対するパイロ応答 V_{tr} [V] から蓄積パワーを評価。絶対精度で約15%

チョッパーで入射ビームを半分に分け、同時に銅ミラーおよび水に照射

→ パワー P_{in} [W] の入射ビームに対する透過パイロの応答 V_{tr} [V] が得られる



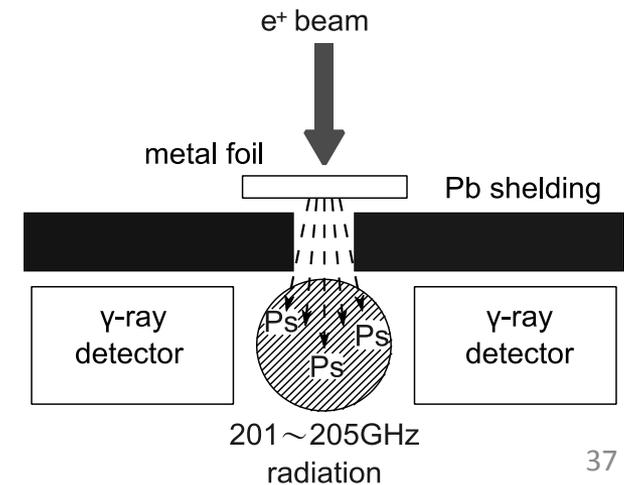
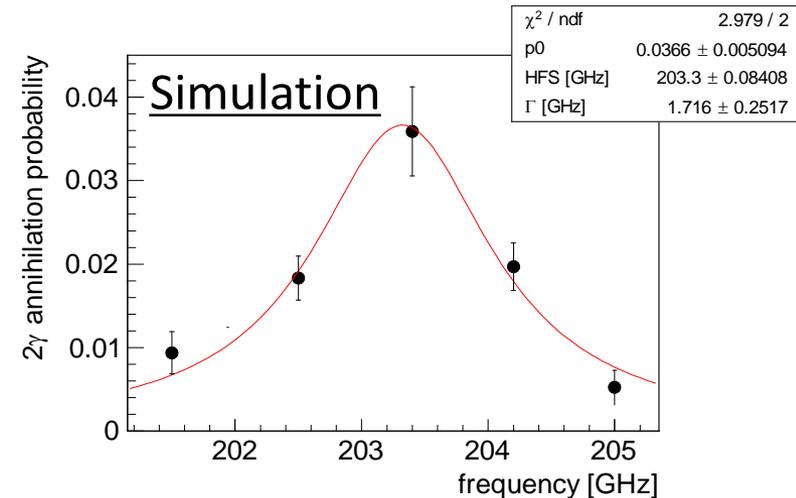
Beam profile @ Cu mirror



銅ミラー位置に塩ビ板を置き、温度上昇を赤外線カメラで撮影することで入射ビーム形状を測定。Fabry-Pérot 共振器内部のビーム形状に補正

Future Prospect of Ps-HFS exp.

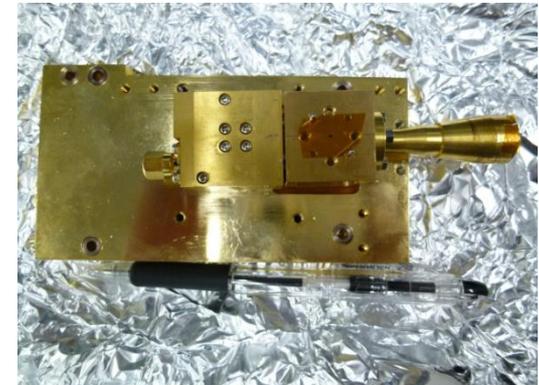
- 半年以内に $O(100\text{ppm})$ で初めてのPs-HFS直接測定。また、幅から直接 p -Psの寿命を測定できる
 - ✓ 201~206GHzの範囲で周波数5点(ピーク・半値・裾)で直接遷移測定。1点あたり準備1週間、測定2週間
- 最終的には $O(\text{ppm})$ でのPs-HFSの精密測定が目標
 - ✓ 0.1%の(相対)パワー測定精度
 - ✓ 低速陽電子ビームと金属foilを用いて真空中でPsを生成することによる、統計とS/Nの向上



Future Prospect of MMW-THz Particle Physics ?

- 基礎物理的に面白いエネルギー領域
 - ✓ CMB
 - ✓ Axion Like Particle
 - ✓ Neutrino mass difference
- パワーに関しては、**すでに1MWクラスのジャイロトンが存在**(原研ほか)。さらに熱耐性があり high finesseな**grating ring cavity** (我々が開発。ゲインは50倍程度)を用いることで10MW - 100MWの領域に到達する可能性がある。ミリ波は1 photonのエネルギーがmeV程度と低いため、100MWの光子フラックスは **$\sim 10^{30}$ photons/s**に達する
- ミリ波検出のほうは、TES、MKID、STJなどの超伝導検出器の開発が盛ん。今後の発展に期待

乞うご期待 ! (?)



Acknowledgment

以下の方々に改めてお礼申し上げます。

- 東大素粒子センター(ICEPP)の皆様、特に
 - ✓ 小林富雄教授
 - ✓ 浅井祥仁准教授
 - ✓ 難波俊雄助教
 - ✓ 末原大幹特任研究員
 - ✓ 宮崎彬くん
- 福井大学遠赤外領域開発研究センター(FIR-FU)の皆様、特に
 - ✓ 出原敏孝教授
 - ✓ 小川勇教授
 - ✓ 立松芳典准教授