

ポジトロニウムの超微細構造の 直接測定へ向けた ミリ波光学デバイスの開発

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, S.Sabchevski^D

東大理, ^A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

日本物理学会第67回年次大会
2011.3.24 @関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス

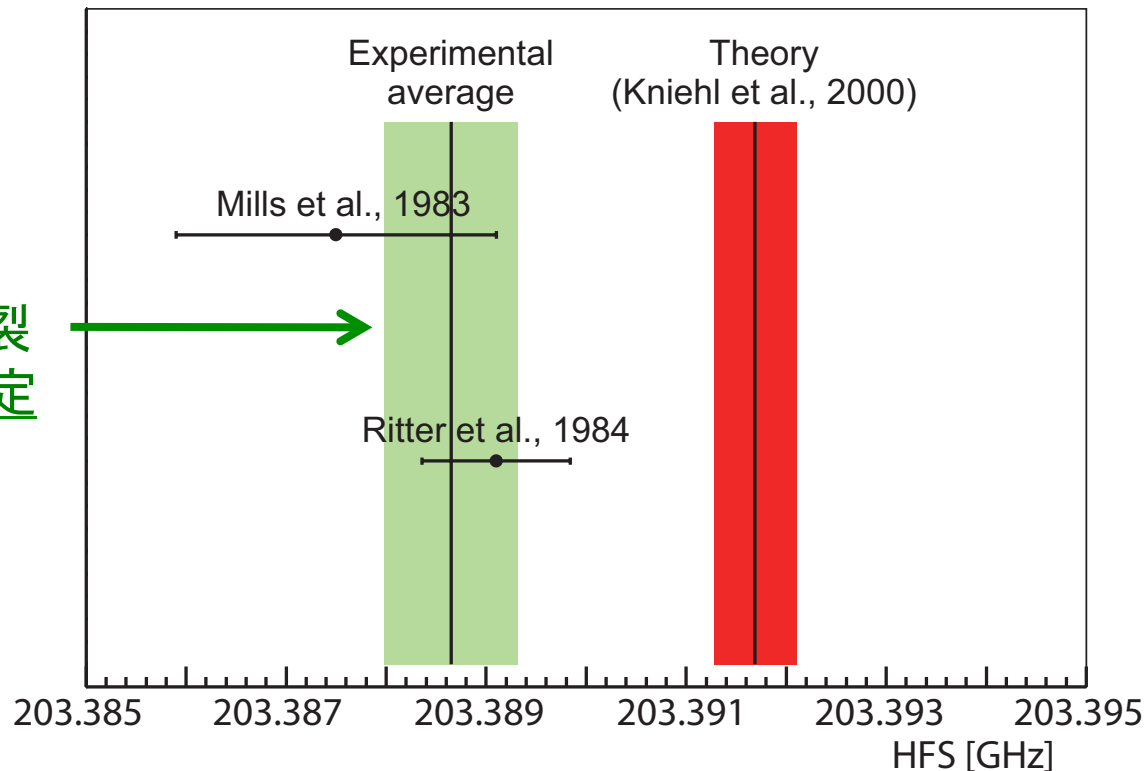
目次

- ポジトロニウム超微細構造の問題
- 直接遷移観測実験から超微細構造測定へ
- 現在の光学系の改良点
- 新しい光学系
 - ガウシアンコンバータ内蔵ジャイロトロン
 - Diffraction gratingを用いたRing-cavity
- Ps-assembly & γ 線検出器と超微細構造測定
- まとめ

ポジトロニウム超微細構造の問題

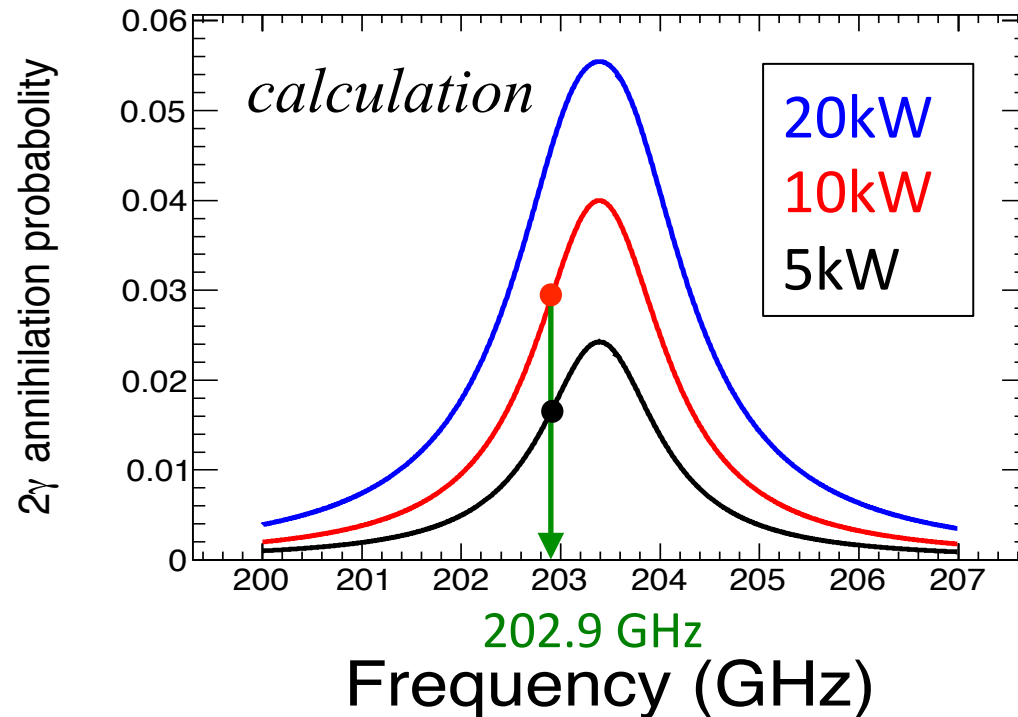
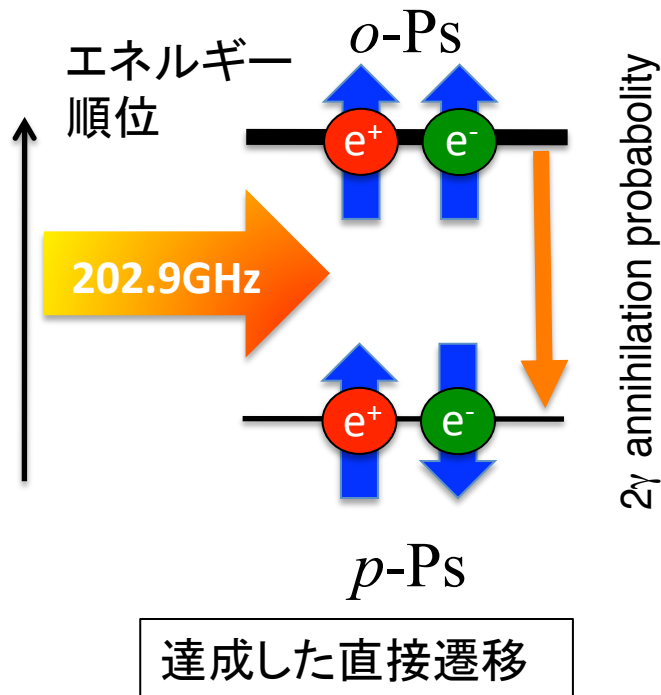
o -Ps (三重項), p -Ps (一重項)のエネルギー準位差であるポジトロニウム超微細構造は, 過去の測定と量子電磁気学の計算で値が有意にズレている(3.9σ)

過去の測定は
全てゼーマン分裂
を用いた間接測定



- 我々は, 異なる2つのアプローチでこの問題の検証を行なっている
1. ミリ波光学の開発による初の直接測定 (この話)
 2. 系統誤差を抑えた精密な間接測定(次の石田の話 24aFA11)

遷移測定から超微細構造測定へ



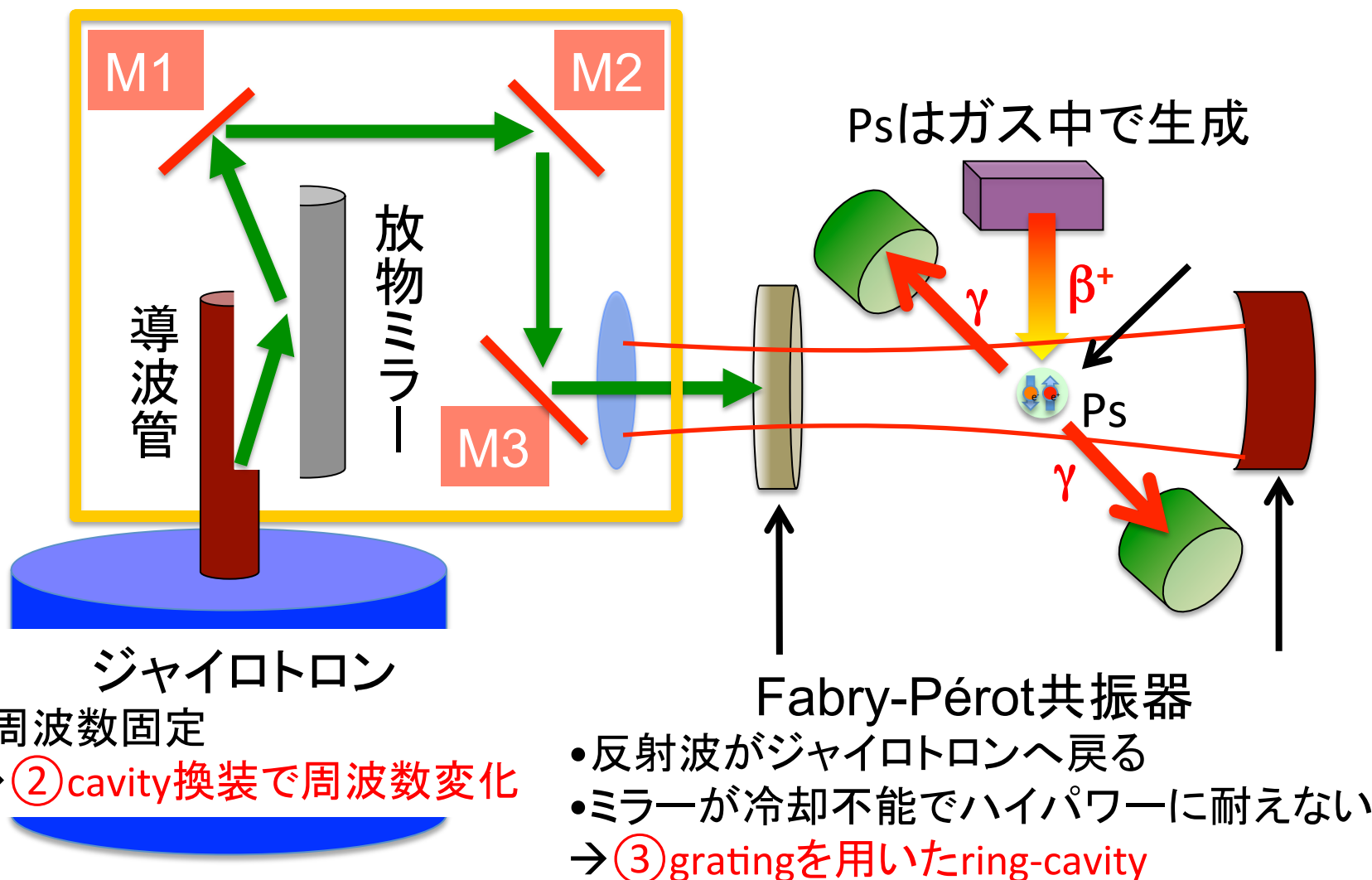
- 周波数202.9 GHzにおける直接遷移($o\text{-Ps} \rightarrow p\text{-Ps}$)を世界で初めて観測した (前の山崎の発表24aFA-9, 10kWと5kW)
- 遷移曲線を測定することで, 超微細構造(共鳴の中心)を測定するために
 1. 入力する周波数を200-207GHzの範囲でsweepする
 2. 共鳴の裾では遷移確率が小さいため, さらなるハイパワー(>10kW)が必要

☆現在の光学系では上記の2点は達成不可能→新しい光学系が不可欠

光学系の改良点(3点)

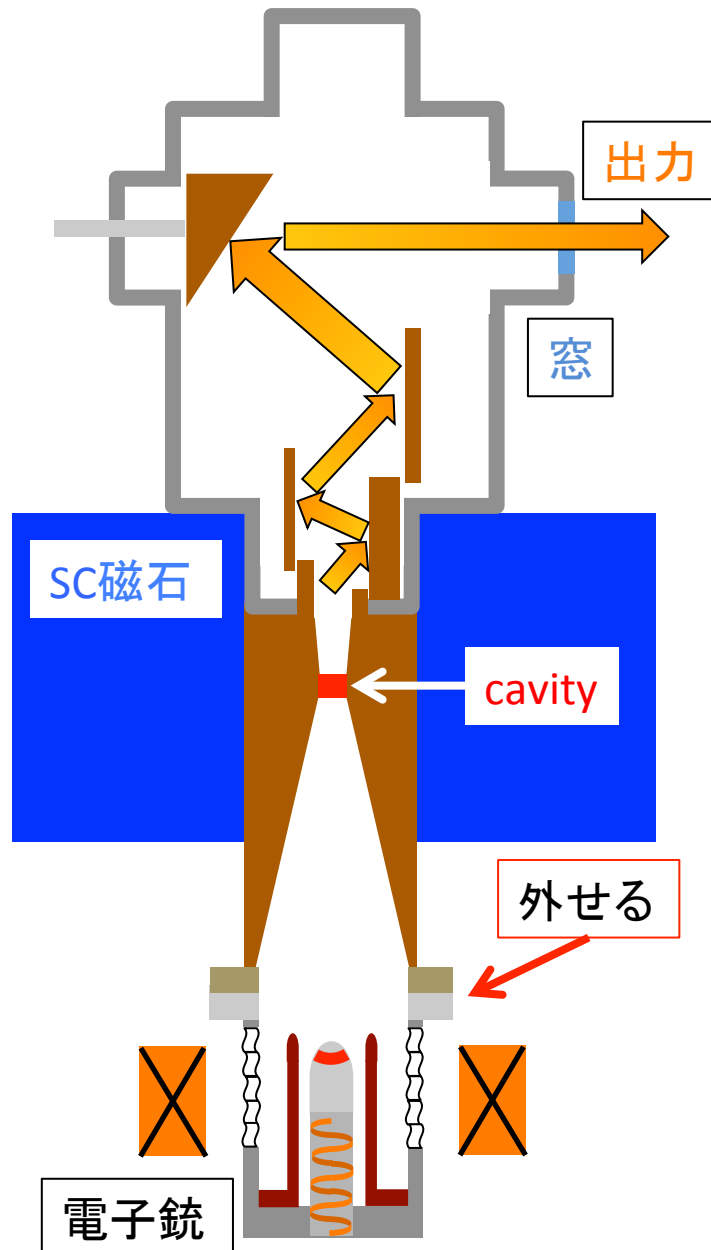
モードコンバータ

- 変換効率30% → ① ジャイロトロン内蔵で70%へ改善



- 周波数固定
- ② cavity換装で周波数変化

モードコンバータ内蔵ジャイロトロン 1/2



- ジャイロトロン¹の真空容器内部にモードコンバータを内蔵した新しいジャイロトロンを製作した。
- モードコンバータまでの距離が短いため、伝送による擾乱が小さく、高い効率(70%)でガウシアンビームを得ることが出来る。

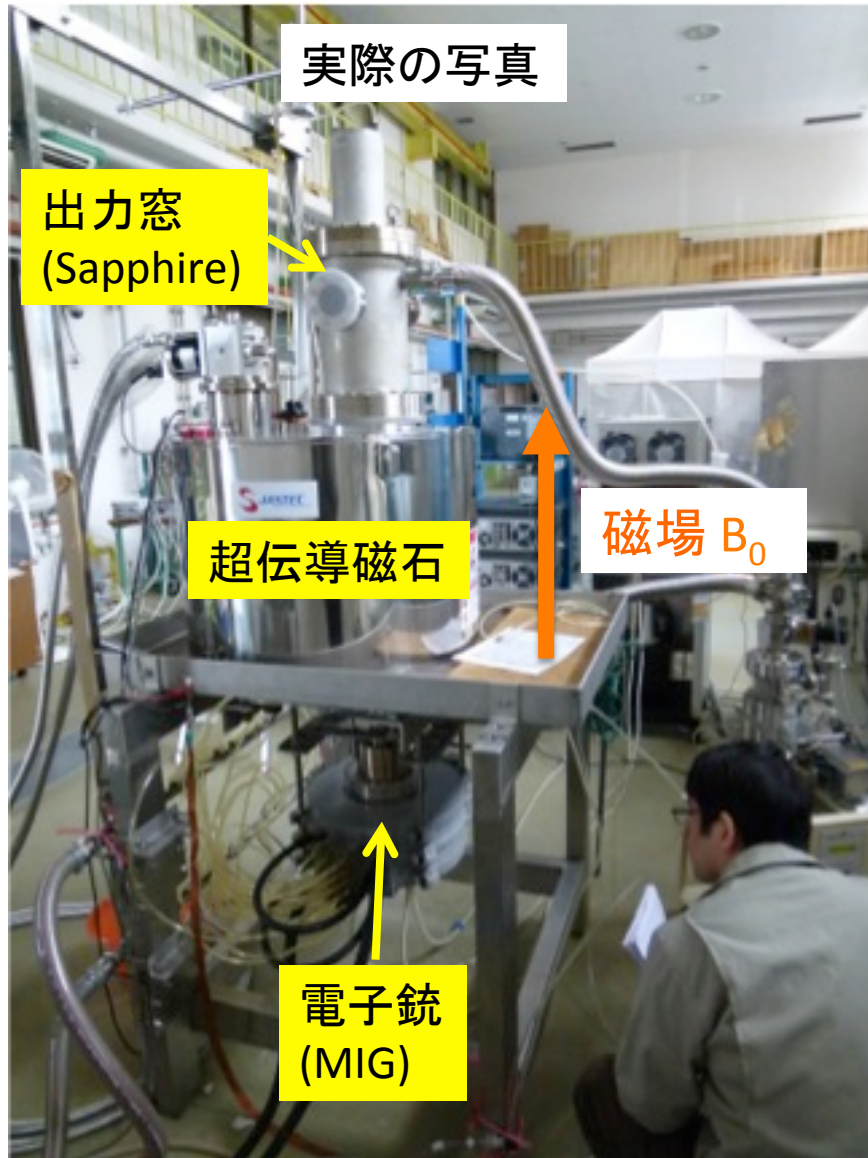
- デマンタブルであるため、**cavity**を換装可能
- 200-207GHzで発振する**半径R**の異なる複数の**cavity**を製作し、何個か実際に周波数を確認した

$$f \sim \frac{c}{2\pi} \left(\left(\frac{\chi'_{52}}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{14\text{mm}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \approx 203 \text{ GHz}$$

$$\chi'_{52} = 10.52$$

$$R \sim 2.45\text{-}2.50 \text{ mm}$$

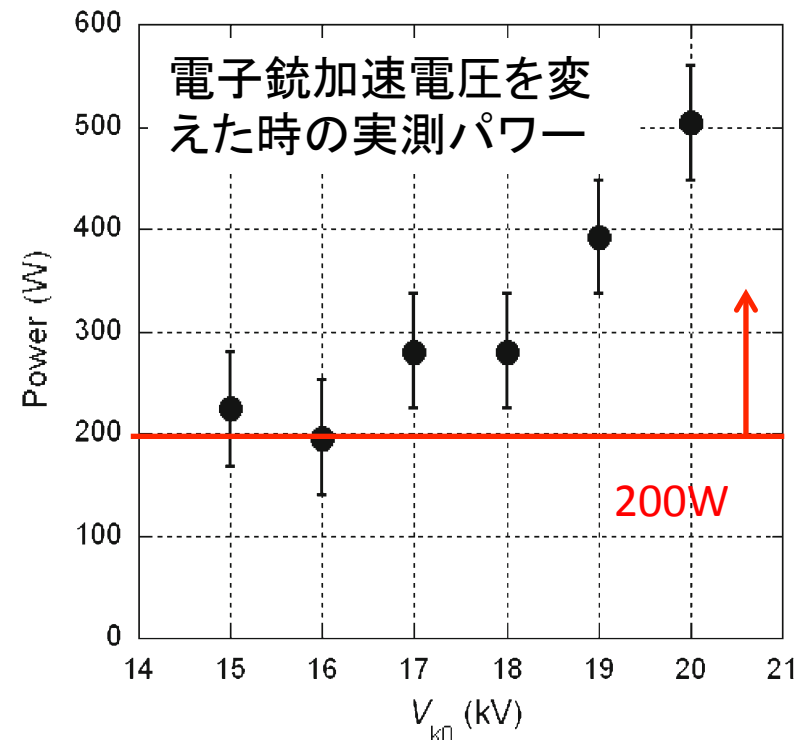
モードコンバーター内蔵ジャイロトロン 2/2



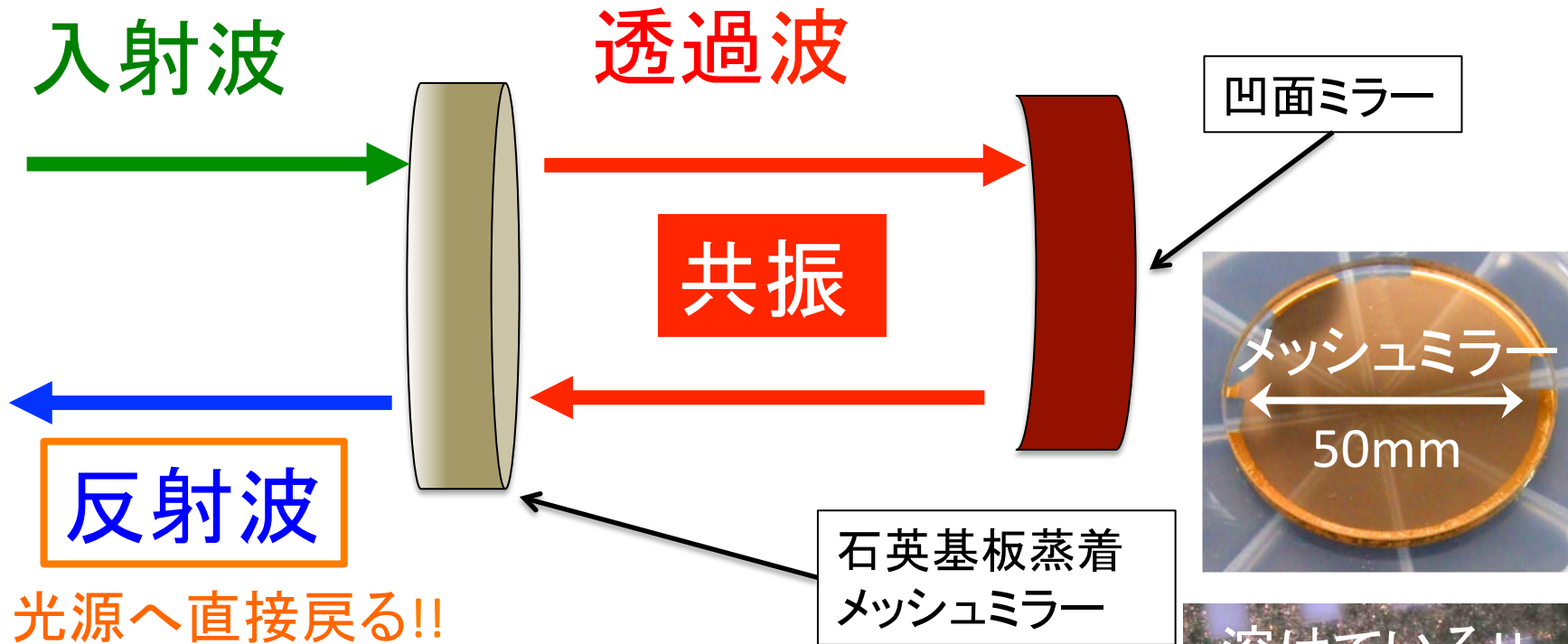
- 周波数202.5 GHzのcavityで性能試験
- 出力パワー**200W以上**(以前は100W)
- 変換効率アップによりパワーが倍

主磁場 $B_0=7.35-7.45$ T

発振mode : counter rotating TE_{52}



Fabry-Pérot cavityの問題点(2点)

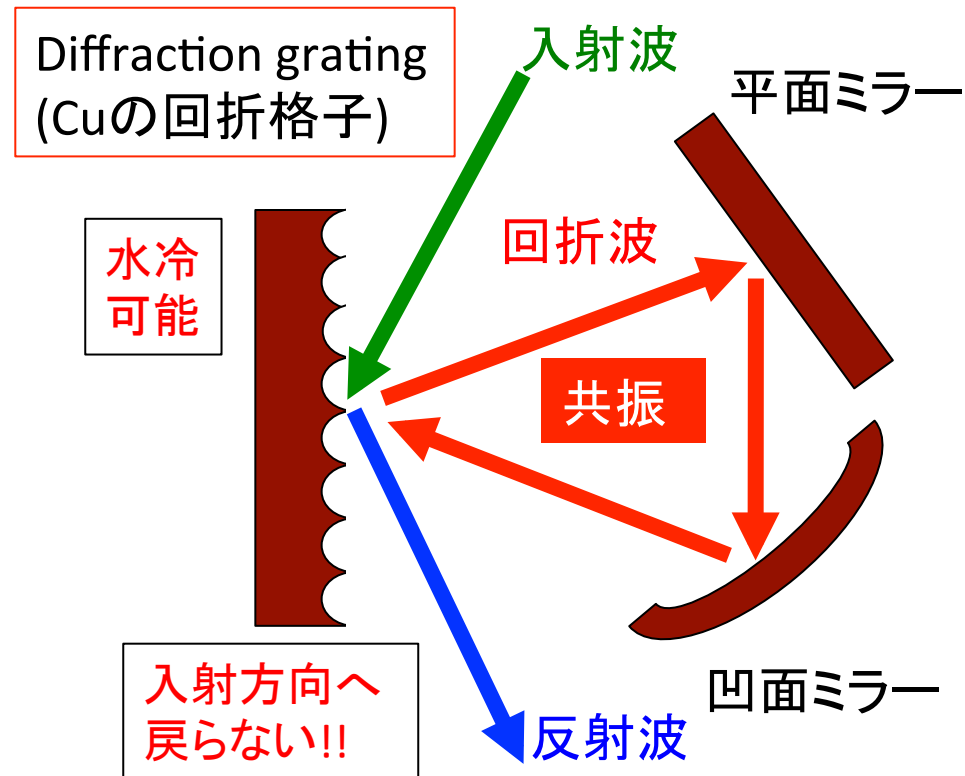


i) Fabry-Pérot cavityでは**反射波が戻り**,
ジャイロトロン発振不安定化

ii) 石英基板の熱伝導は悪い(5W/Km)ため
メッシュミラーを冷却できず, 10kW以上で**金のメッシュパターン溶解**

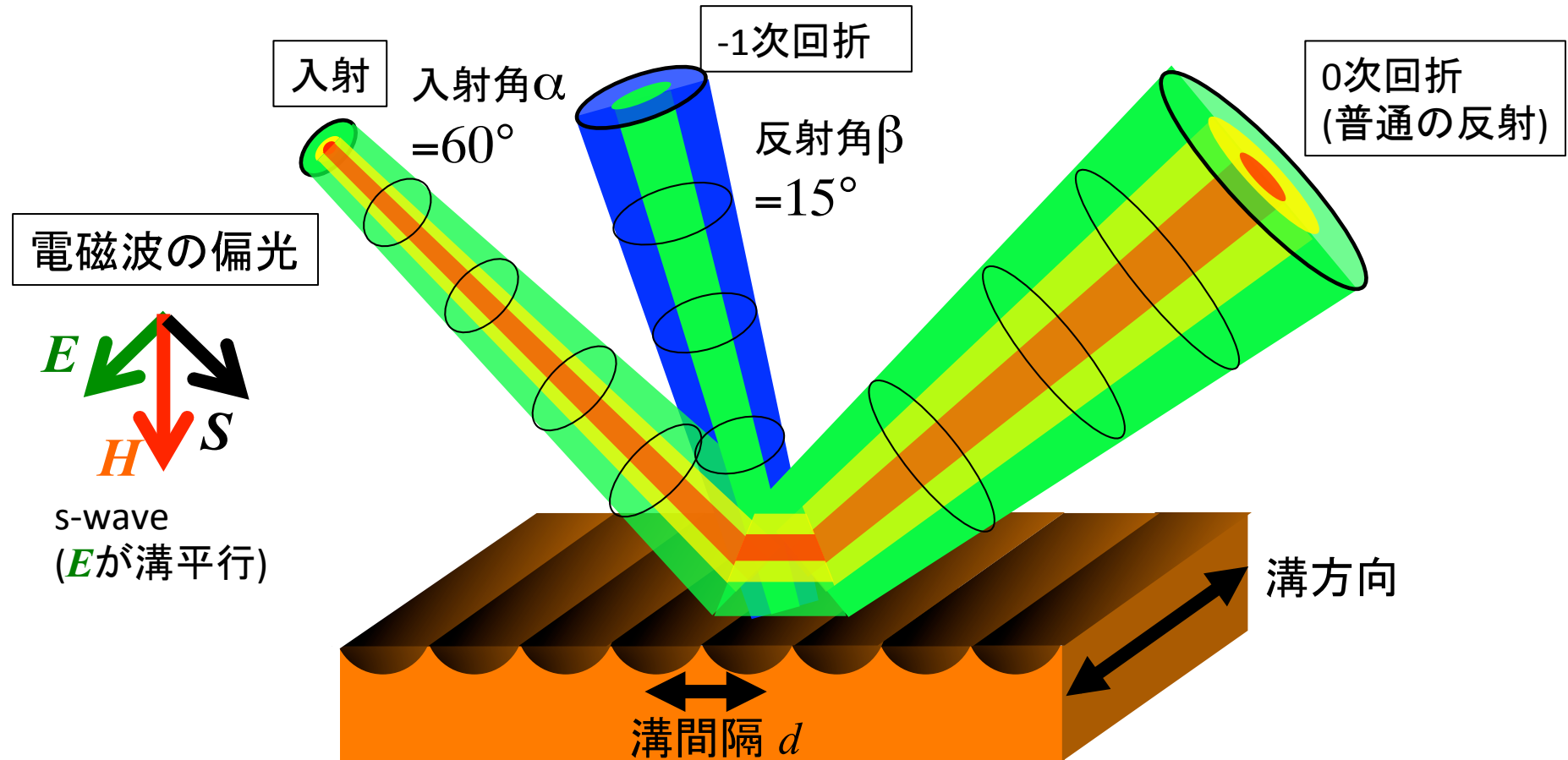


Diffraction gratingを用いたring-cavity 1/3



- Fabry-Pérot cavityでは反射波が戻り, ジャイロトロン発振が不安定化
→ ring-cavityにすると反射波が光源に戻らない
- 石英基板の熱伝導は悪い(5W/Km)ためメッシュミラーを冷却できず, 10kW以上で金のメッシュパターン溶解
→ ring-cavityの導入部を反射型diffraction grating(容易に水冷可能)にする

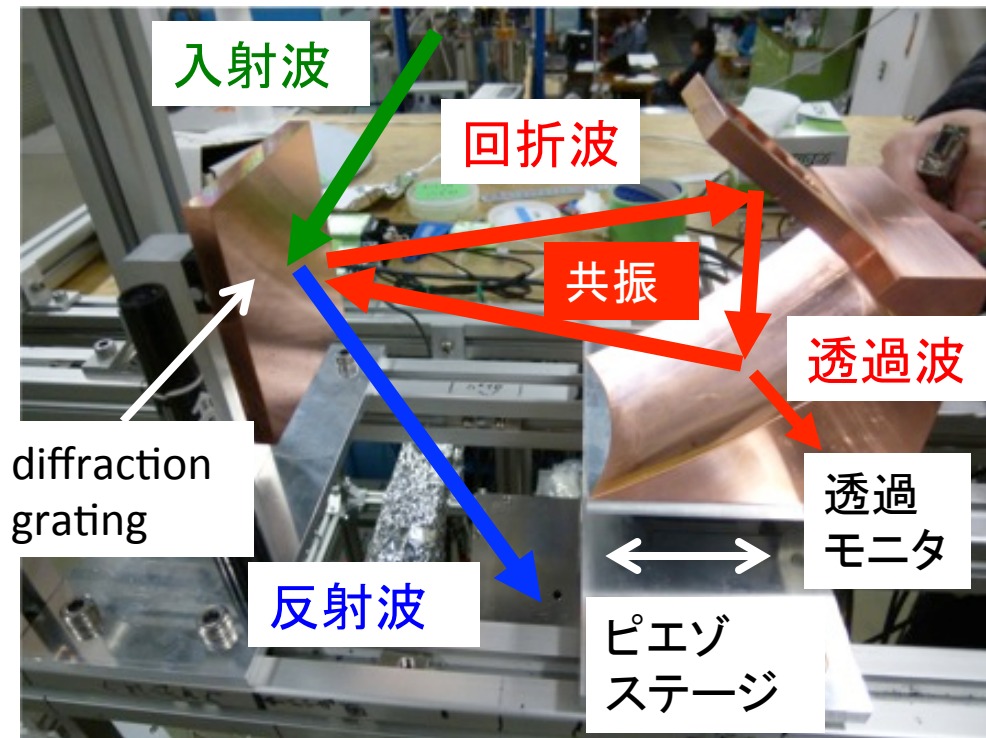
Diffraction gratingを用いたring-cavity 2/3



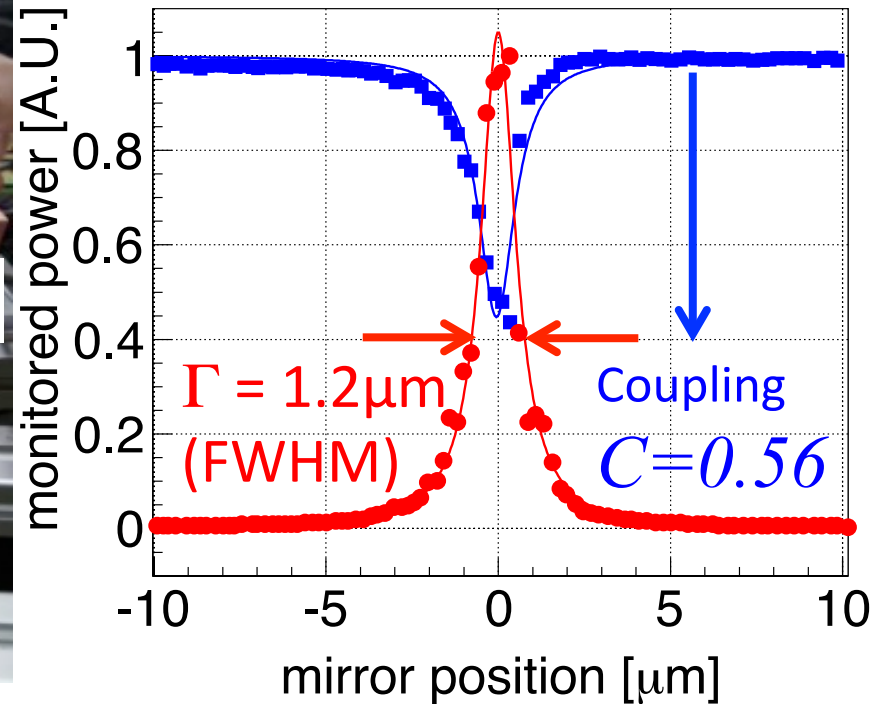
$$d (\sin \alpha \pm \sin \beta) = m \lambda \quad (m \text{は整数 } \pm 1, \pm 2, \dots)$$

- 入射角 60° に対して -1 次回折角 15° になるような diffraction grating を制作.
- この -1 次回折光を 2 枚のミラーで反射させ, ring-cavity を構成.

Diffraction gratingを用いたring-cavity 3/3



共振点における反射波・透過波パワー

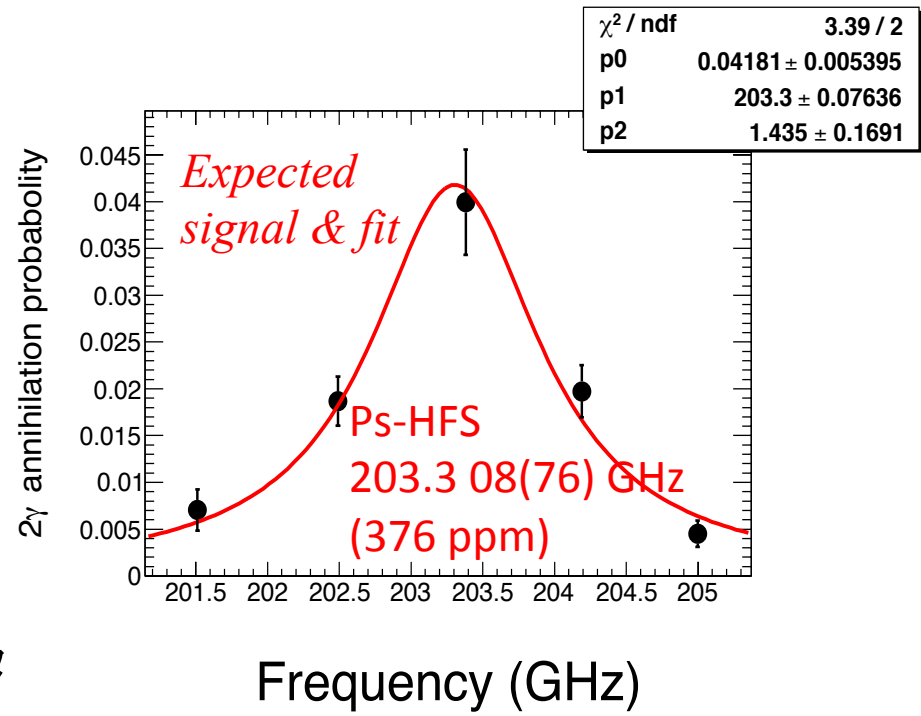
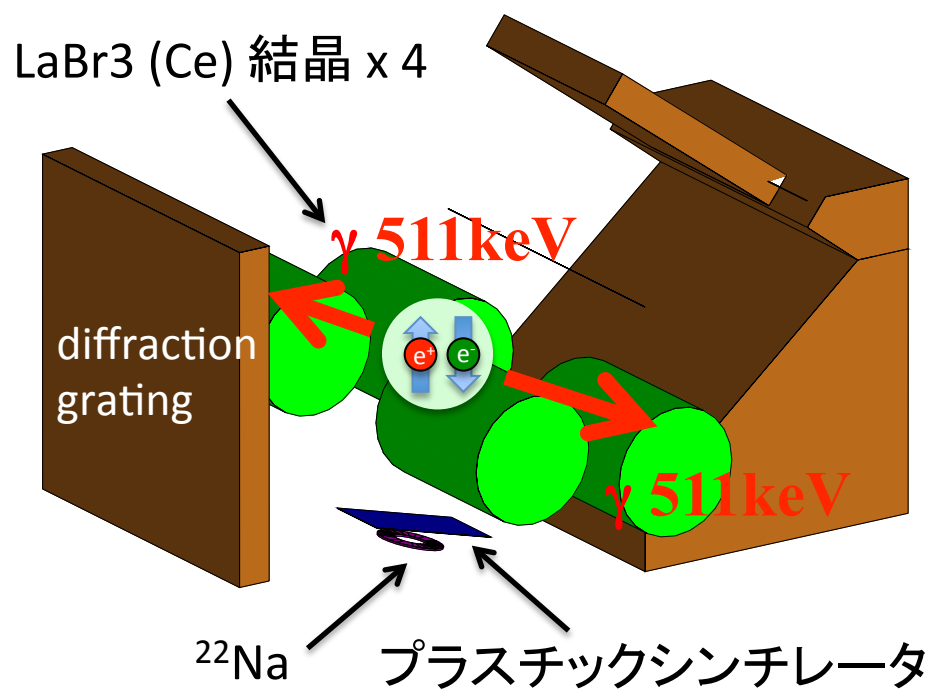


共振試験

- ピエゾステージでdiffraction gratingと2つのミラーの間隔を $0(0.1\mu\text{m})$ で制御
- 反射波はcavity外部のピロ素子でモニタ
- 凹面ミラー中心に小孔を空け, 漏れ出る透過波もピロ素子でモニタ
- cavity内光路が波長(1.47mm)の整数倍の地点(右図 $0\mu\text{m}$ 点)で共振を確認
- 共振の幅 Γ と反射の減り方 C からパワーゲイン68 (200W入力で14kW)を得た

Ps-assembly & γ 線検出器と超微細構造測定

- 2 atmのガス中でポジトロニウム生成
- ビーム中で o -Ps \rightarrow p -Ps 遷移し, p -Ps の崩壊 γ 線 (back-to-back, 511keV) 検出



- ヘテロダインを用いてジャイロトロン発振周波数を 100ppm でモニタ
 - パイロ素子を用いてcavity内部パワーを相対的に10%の精度でモニタ
 - 半年の測定で5つの周波数点で統計精度10%
- 1年以内にポジトロニウム超微細構造を精度300ppmで初めて直接測定する

まとめ

- ポジトロニウム超微細構造の値は実験と理論で有意にズれている
- ポジトロニウム超微細構造を世界で初めて直接測定する実験を行なっている
- 直接遷移の観測は成功したが、超微細構造の測定には光学系の改良が不可欠である
- cavityを換装することで周波数を変えられ、かつガウシアンビーム変換効率の高い新しいジャイロトロンを開発した
- ジャイロトロンへ反射波が戻らず、冷却も可能なring-cavityをdiffraction gratingを用いて開発した
- 1年以内に超微細構造が300ppm精度で測定可能である

- 精密測定へのロードマップ
 1. ミリ波の10kWのパワーを相対精度0.3%以下で測定する検出器の開発
 2. 陽電子ビームを用いたポジトロニウム統計量の改善
 3. 物質の効果を除去するため真空中で実験を行う