

ポジトロニウム超微細構造の 精密測定実験

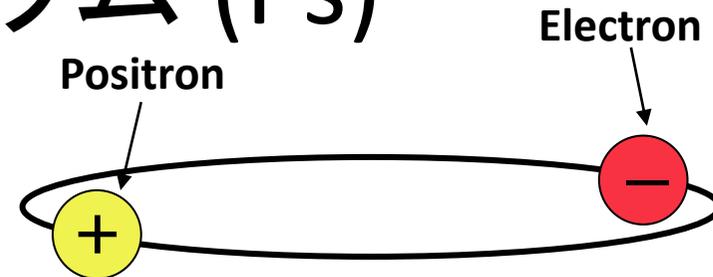
東京大学素粒子物理国際研究センター
難波俊雄

Fundamental Physics Using Atoms @ 東工大 ('09/8/4)

Ps HFS 測定

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

ポジトロニウム (Ps)



- 電子陽電子束縛系
 - レプトン二個だけから成る最も軽くて簡単な「原子」
- 束縛系 QED によって記述
- 基底状態 ($1S$) は、スピンの状態に応じて二種類の状態
 - 1^3S_1 (triplet、spin=1): オルソポジトロニウム (o-Ps)
 - $\tau=142\text{ns}$ 、 3γ 、(5γ 、 $7\gamma\dots$) に崩壊
 - 1^1S_0 (singlet、spin=0): パラポジトロニウム (p-Ps)
 - $\tau=125\text{ps}$ 、 2γ 、(4γ 、 $6\gamma\dots$) に崩壊

エネルギー準位

水素原子と同様に、
多彩なレベルが
存在する

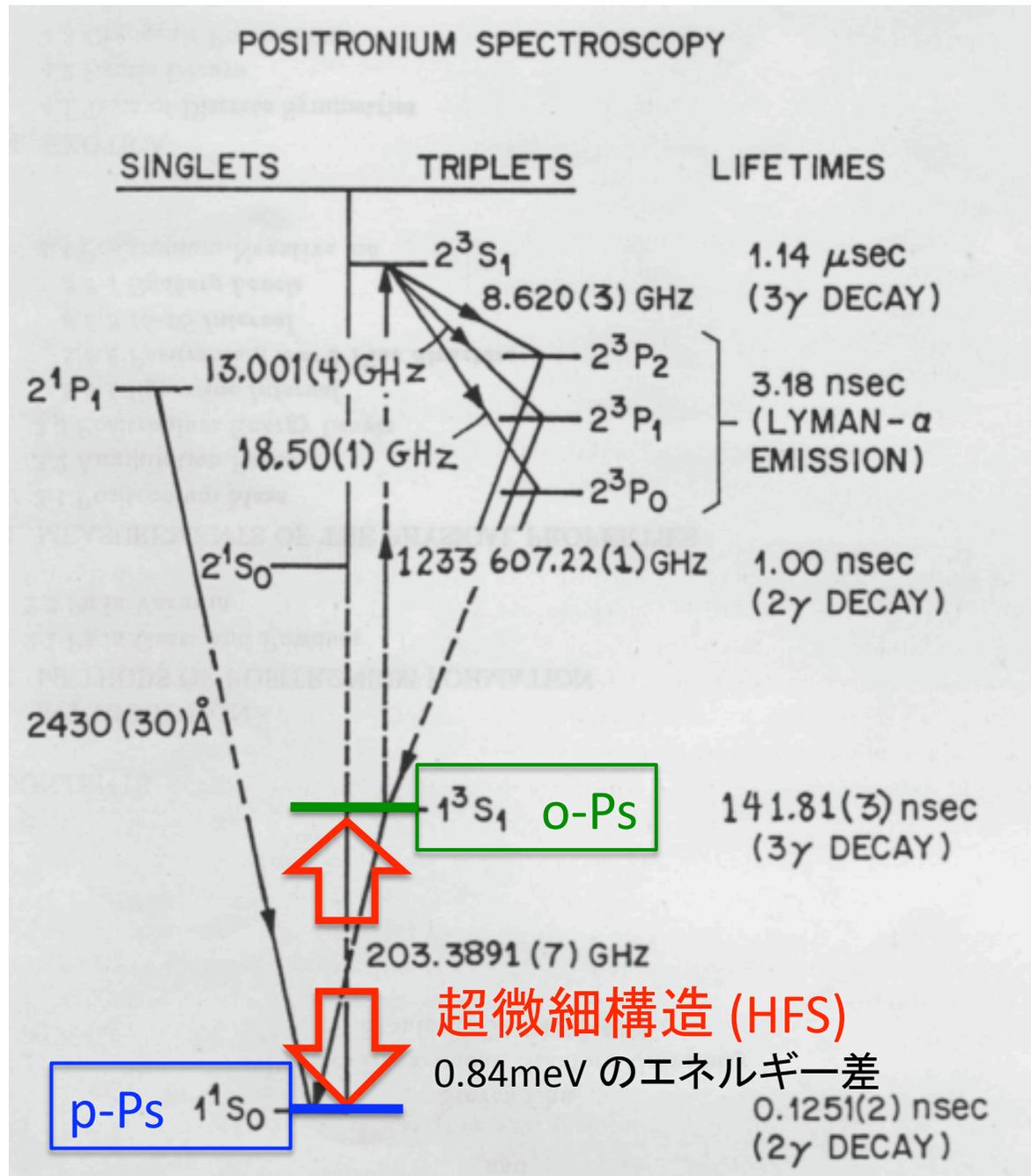
- 基底状態の束縛エネルギー: 6.8eV (水素原子の半分)

- n 軌道準位
 $E = -1/n^2$

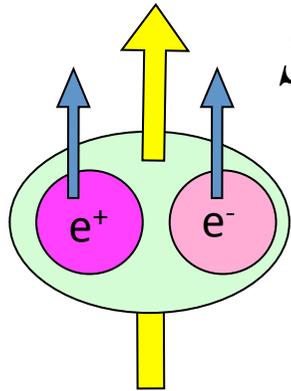
- Spin-Orbit相互作用

- Spin-spin相互作用

それぞれの準位間の
エネルギーや寿命の
精密測定



基底状態の Ps の二つの状態



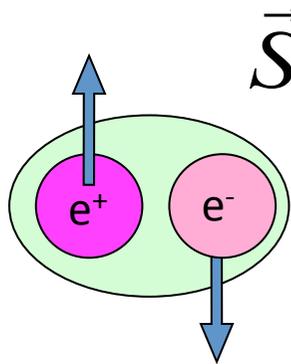
$\vec{S} = 1$ (スピンの平行、三重項)

オルソポジトロニウム

Spin=1 光と同じ量子数

o-Ps \rightarrow 3γ 、 (5γ) 、

奇数本のガンマ線へ



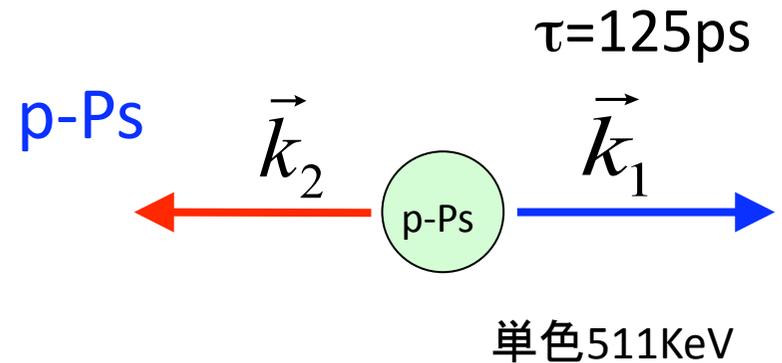
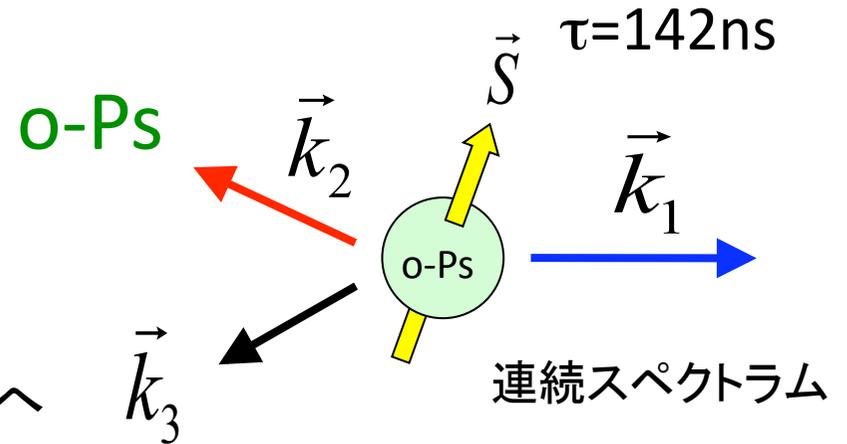
$\vec{S} = 0$ (スピンの反平行、一重項)

パラポジトロニウム

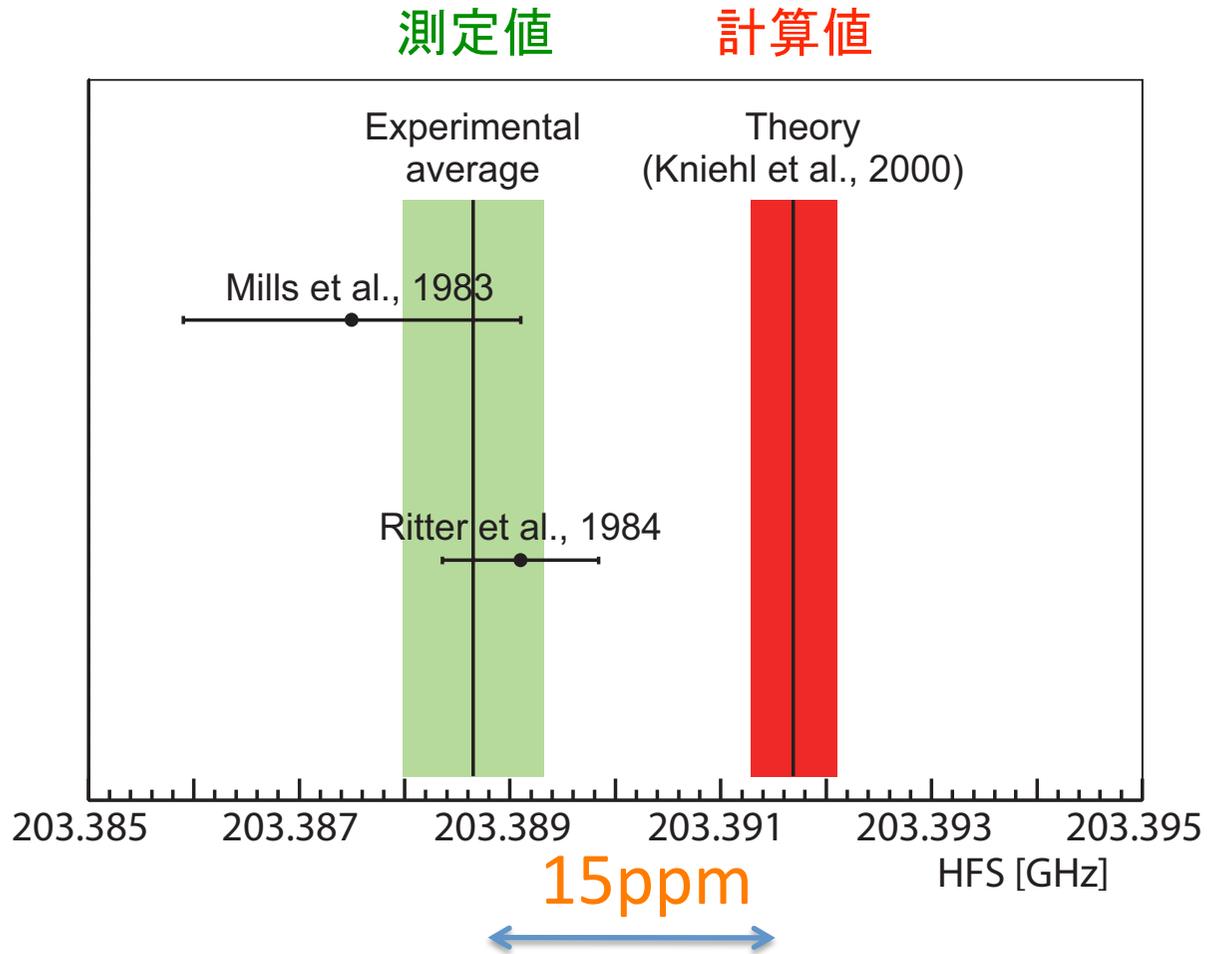
Spin=0 スカラー粒子

p-Ps \rightarrow 2γ 、 (4γ) 、

偶数本のガンマ線へ



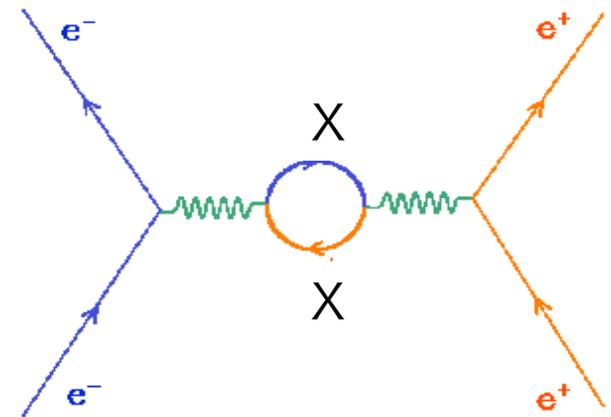
Ps の HFS の値は、ズレている



束縛系 QED による理論計算値と実験値との間に
3.9 σ のズレ

超微細構造のズレが何を意味するか

- 理論計算が間違っている
 - 自由粒子の QED 計算と違い、束縛系の計算はそれなりに難しい
 - 3 次の項の計算も、今世紀に入ってから
- 各測定に (共通の?) 間違いがある
 - なんとなく、心当たりはあります (われわれの測定では改善)
 - 後述します
- **未知の物理の可能性**
 - 相互作用の弱い未知の粒子の介在
 - 重い粒子には感度が弱いですが、 $g-2$ と違い、 s -channel の効果も見える (例えば、 $O(\text{MeV})$ 、 $\alpha \sim 10^{-8}$ の擬スカラー)
 - $o\text{-Ps}$ の場合、余剰次元にも感度



われわれが、はっきりさせましょう

HFS 測定: 二つの方法

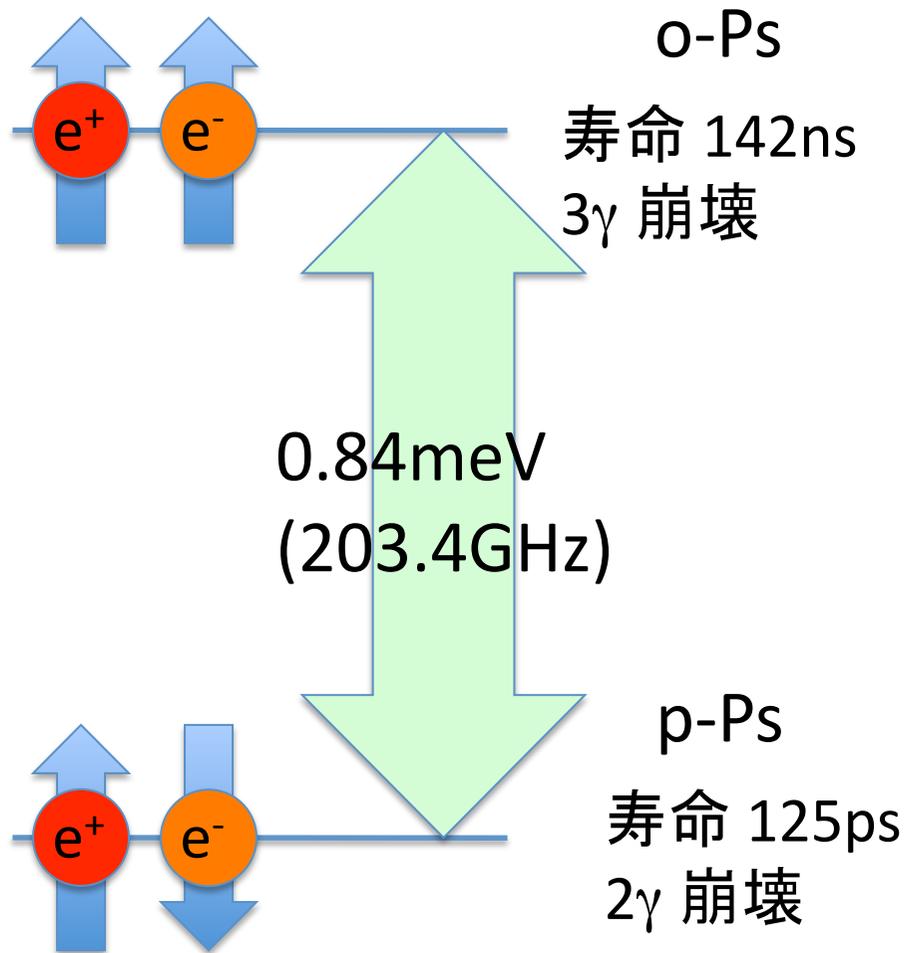
- 直接遷移測定
 - HFS 遷移を直接起こして測定
 - 今まで、行われた事はない
- ゼーマン効果を用いた間接測定
 - 静磁場によるゼーマン効果を用いて、HFS の準位を RF 帯に変換
 - 今までは、ほぼすべてこの方法で測定

われわれは、両方のアプローチで HFS をそれぞれ測定します

直接遷移測定

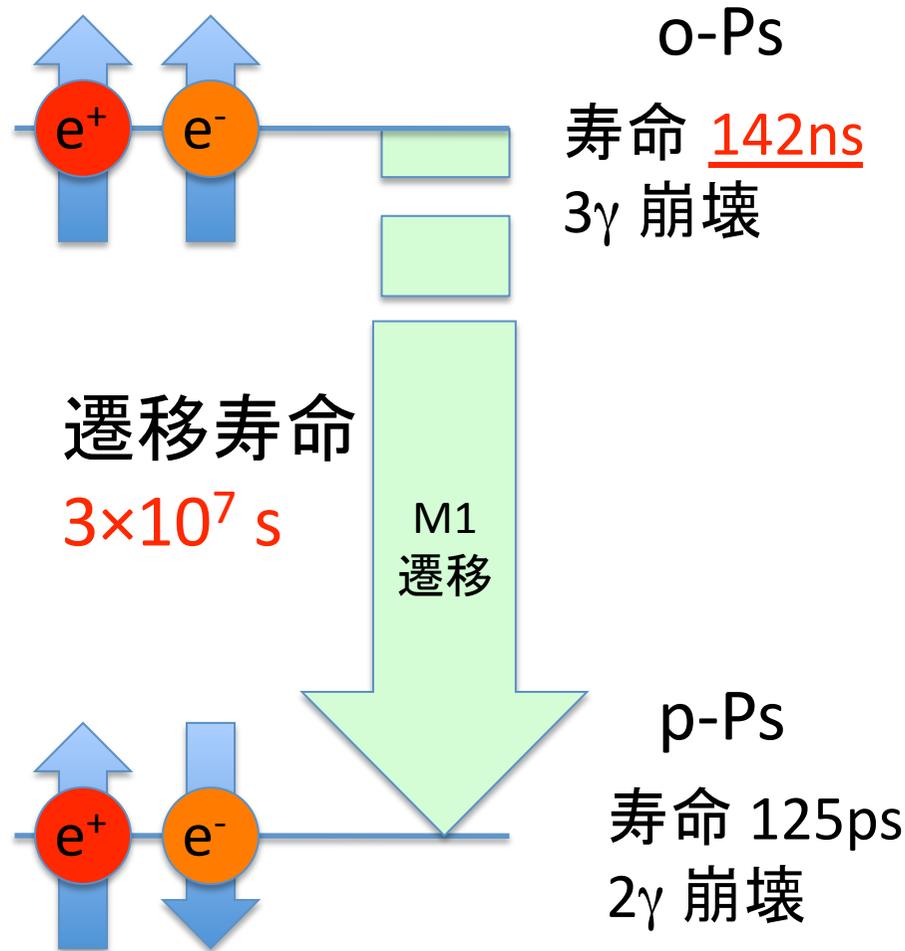
世界初? のミリ波分光実験

直接遷移測定



- Δ HFS の準位差に相当する photon を照射
- 誘導放射
- 2 γ 崩壊のレート上昇

ただし、今まで直接遷移実験は行われていない



問題点 1

- 遷移が M1 遷移であり、自然遷移の寿命が約 1 年 ($\sim 3 \times 10^7\text{ s}$)

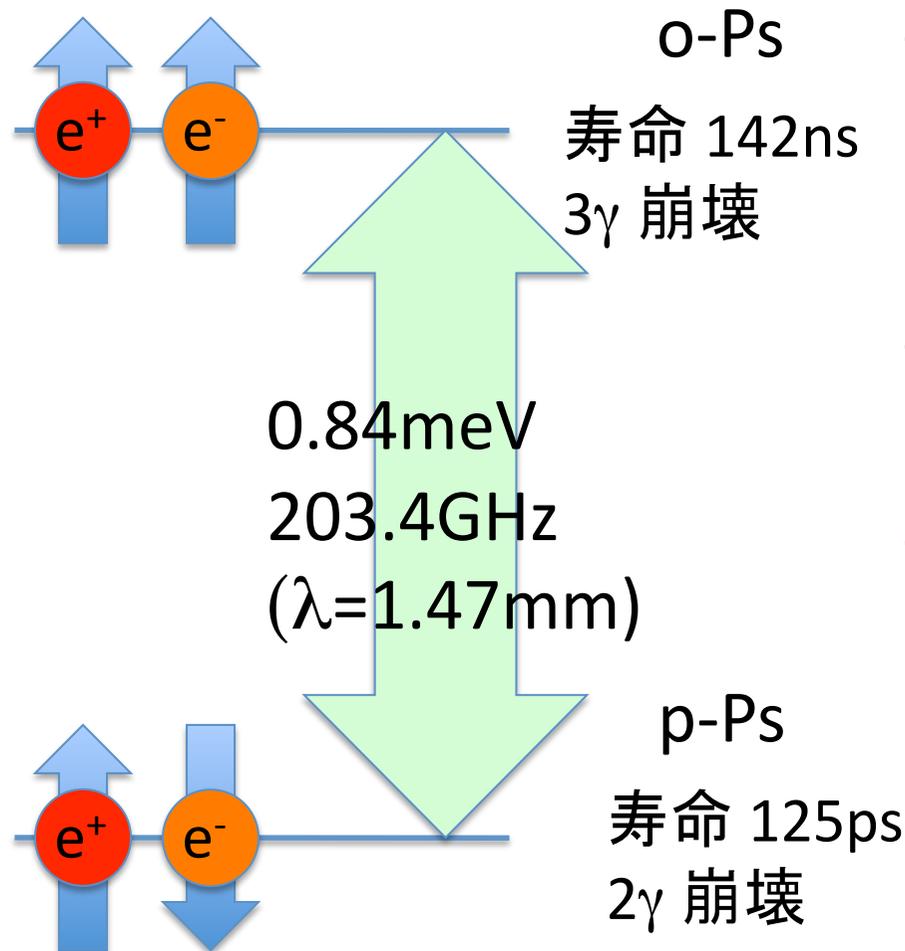


14 桁も違うため、非常に起こりにくい

- 一方、o-Ps の寿命は $\sim 10^{-7}\text{ s}$

ただし、今まで直接遷移実験は行われていない

問題点 2

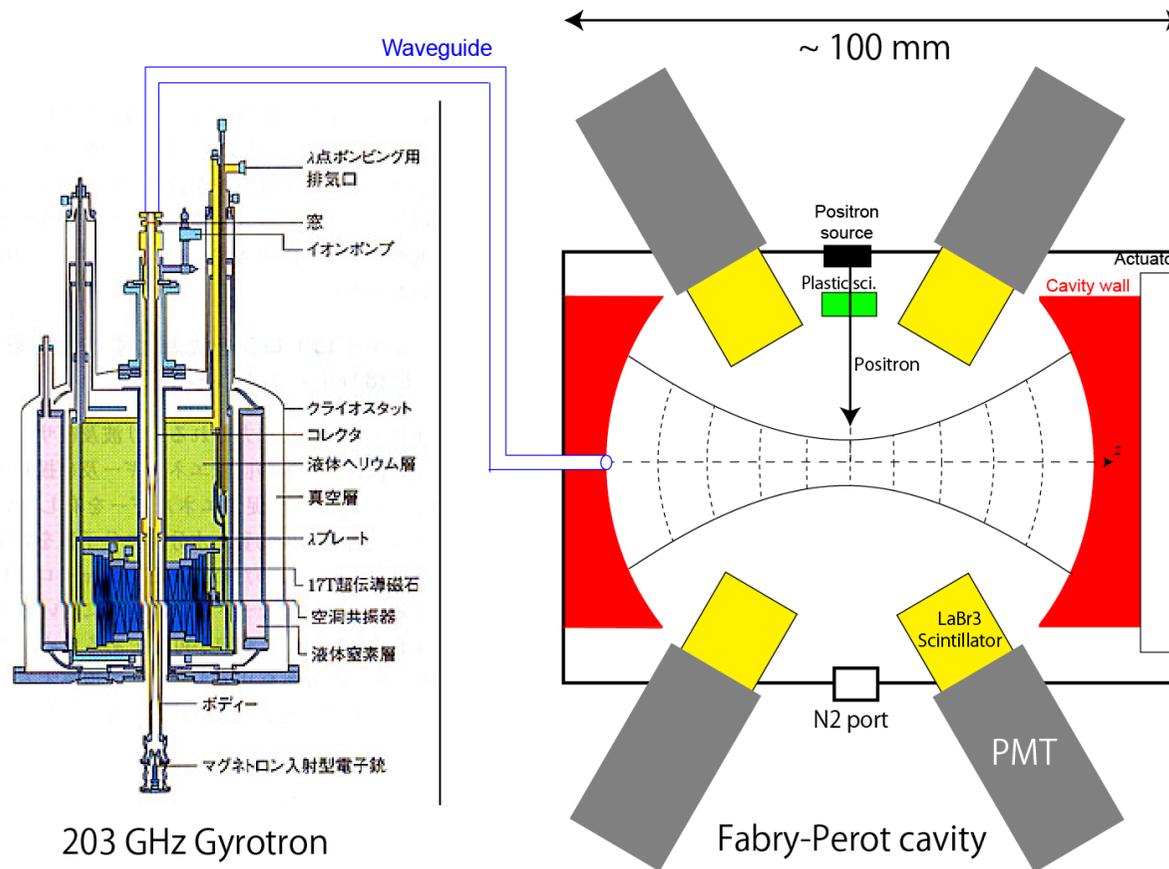


- エネルギー差がミリ波の領域
(電波と光の中間領域)
- この波長帯での分光測定は行われていない
- **大強度光源の不在**

我々の計画

いかにして大強度ミリ波を得るか

- ジャイロトロン + 1次元ファブリーペロー共振器

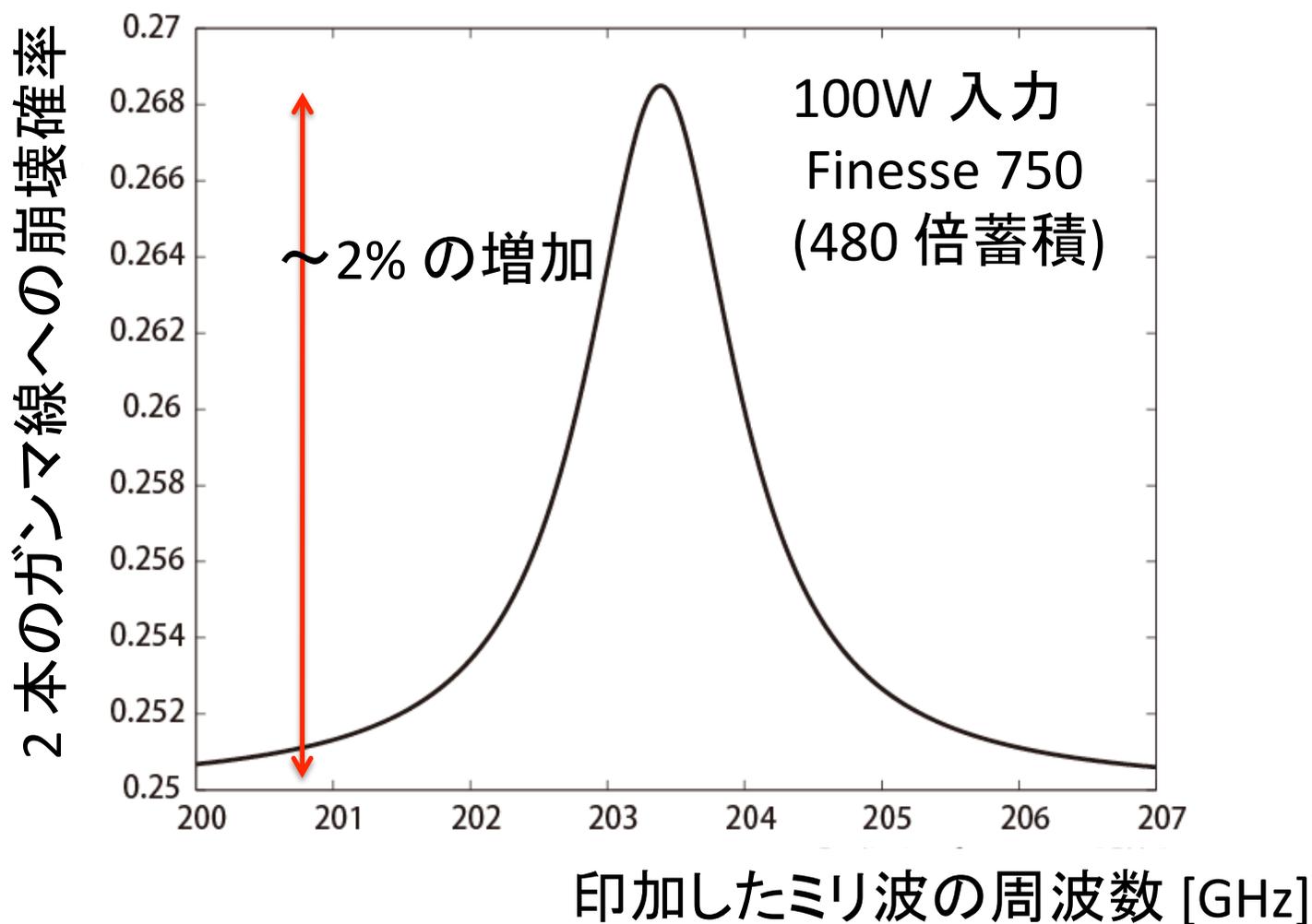


203 GHz Gyrotron

Fabry-Perot cavity

100 W 出力 + 100 倍のミリ波エネルギー蓄積

予定通りミリ波を印加した場合に 予想される遷移曲線



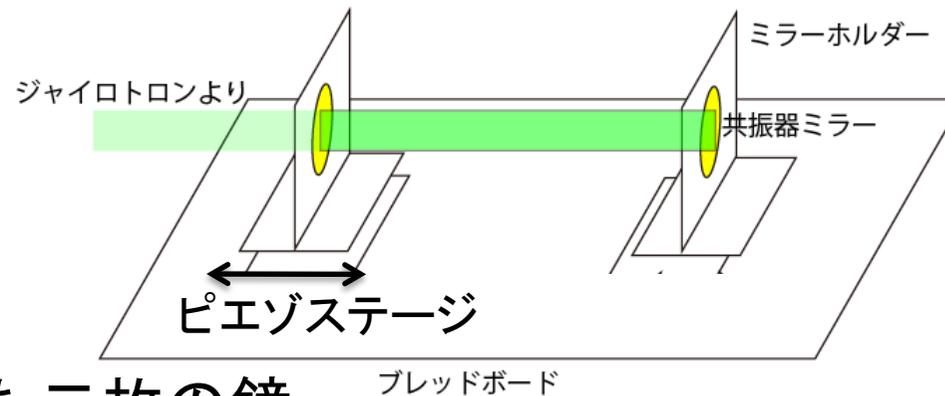
(フロアの部分は delayed coincidence によって除去可能)

ジャイロトロン

- 福井大 FU CW V
(当実験用に設計/製作)
 - CW 100W 出力可能
 - 中心周波数 203.08 GHz (実測値、
変調は計画中)
 - 単色性 $\sim 10\text{kHz}$
 - 今回のミラー試験では 20% duty
でピーク出力 200W で運転 (平均
出力 40W)



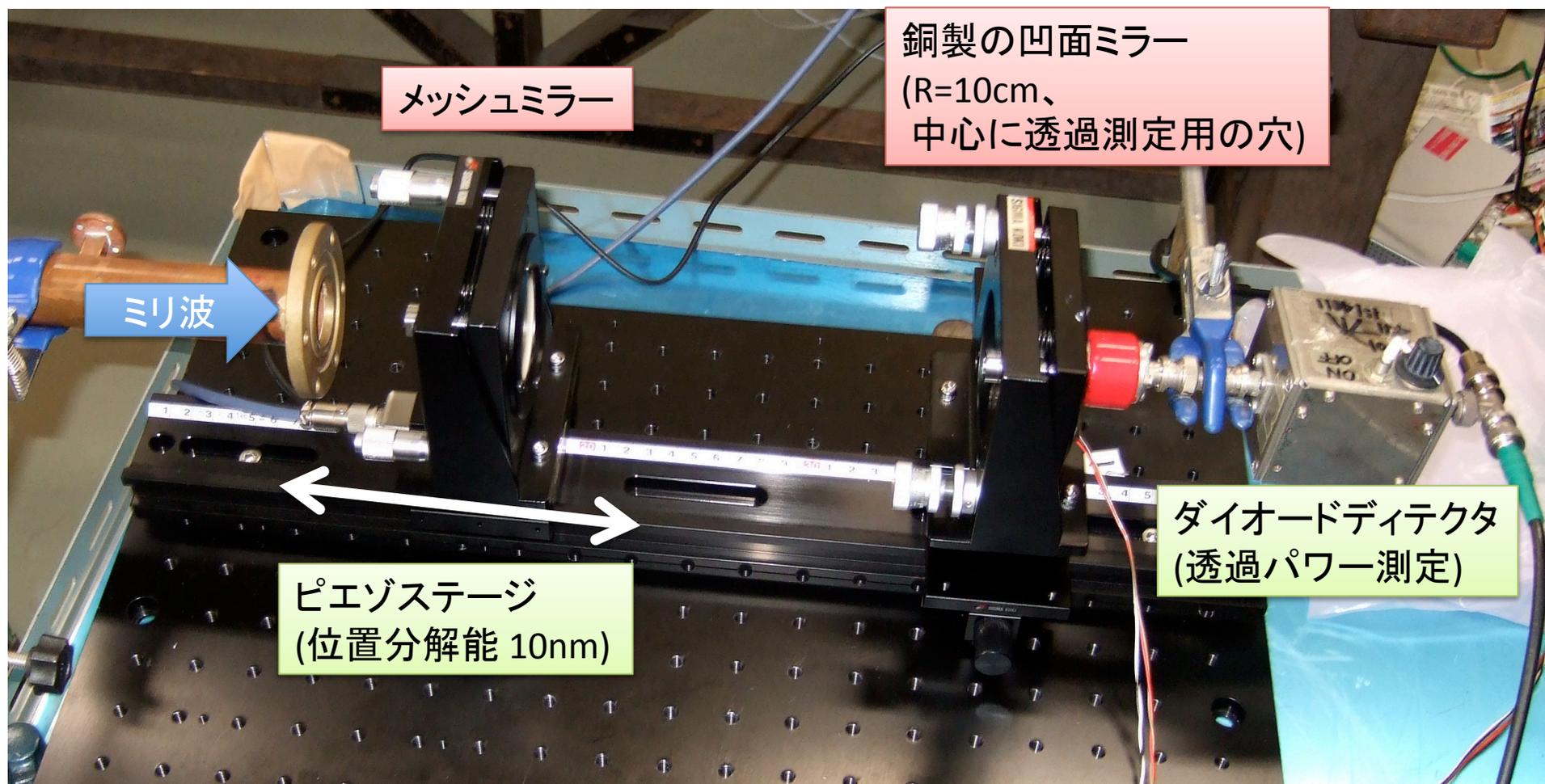
一次元ファブリーペロー共振器



- 向かい合わせた二枚の鏡
- 鏡の間の距離を波長に合わせてやる事で、共振をおこし、ミリ波を蓄積
- 今回は、片面は凹面鏡 (少々設置精度が悪くても OK)
- 中に蓄えられるエネルギー密度は、 $2F/\pi$ 倍になる。
(F: finesse、共振器の出来のよさを表すパラメータ)
- 設計にあたって重要な点
 - ミラーでの損失を小さくする事 (finesse を上げる事)
 - ジャイロトロンからのミリ波をロス無く導く事
- 今回は、カップリングに金属メッシュミラーを作成して試験

実際のセットアップ

平板メッシュミラーでカップリング、反対側は銅製の凹面鏡 (R=10cm)



メッシュミラー

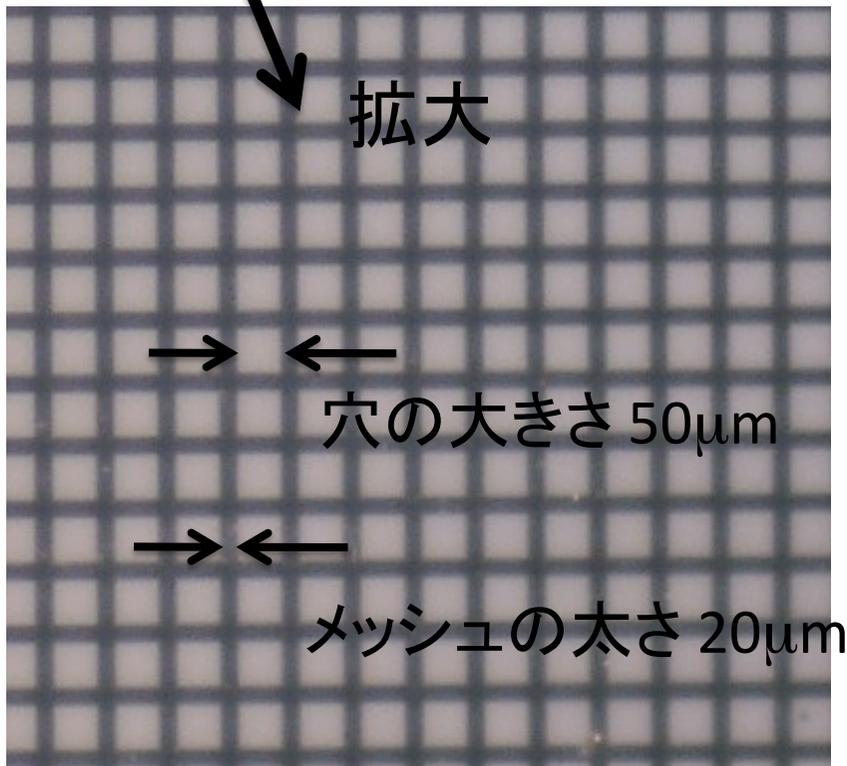
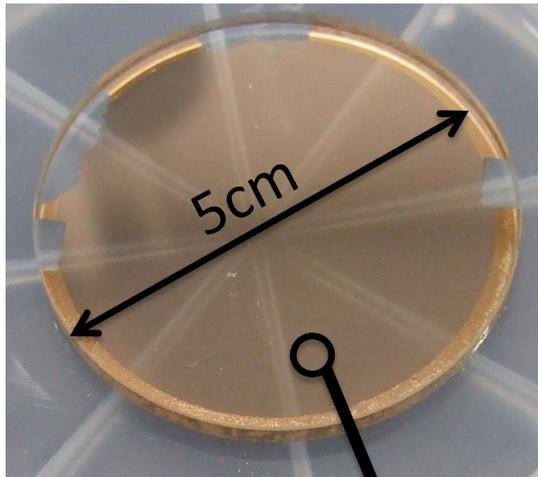
銅製の凹面ミラー
(R=10cm、
中心に透過測定用の穴)

ミリ波

ピエゾステージ
(位置分解能 10nm)

ダイオードディテクタ
(透過パワー測定)

金属メッシュミラー

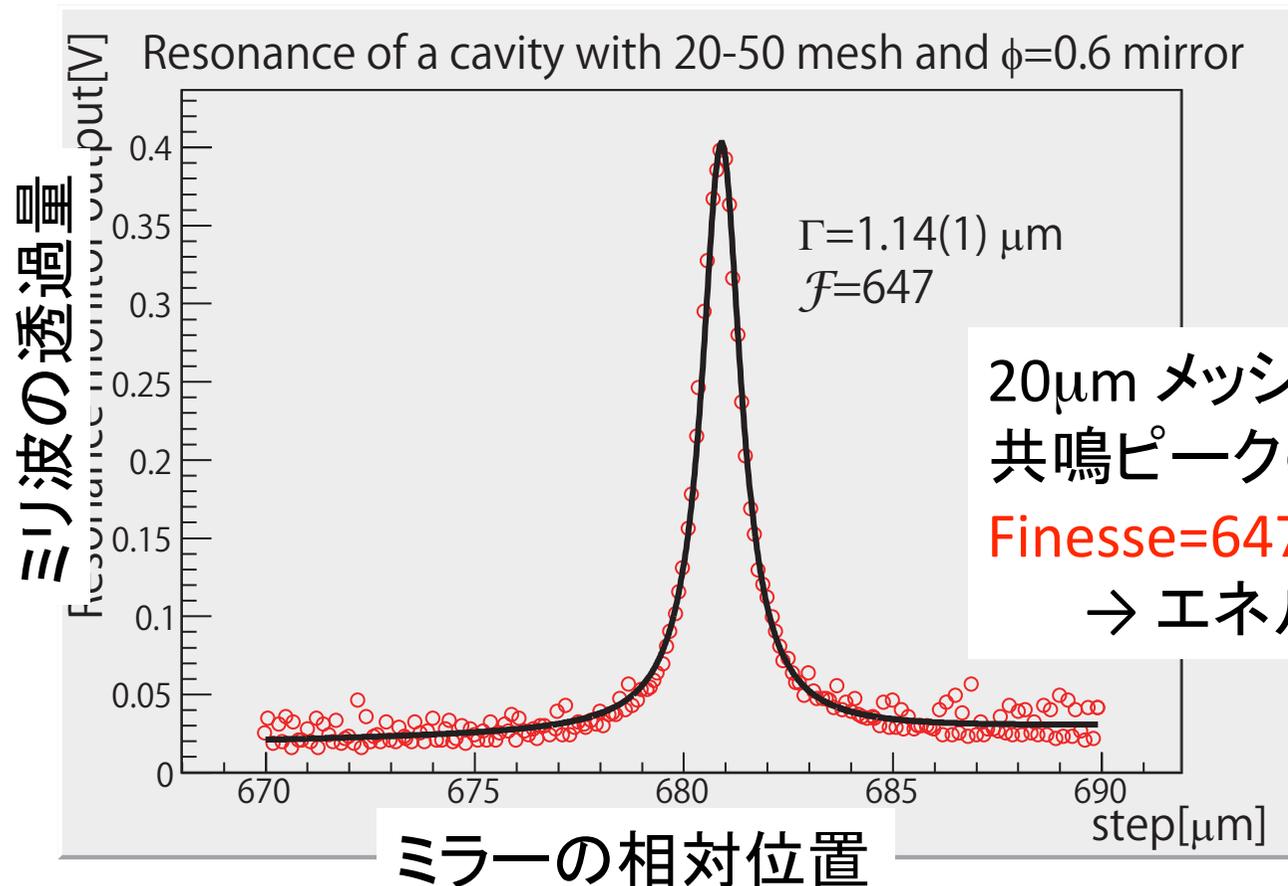


- 平面石英基板に金蒸着
- 厚さ $1\mu\text{m}$ (\gg ミリ波のスキンデプス=168nm)
- メッシュの間隔と太さで反射率、透過率を調整

- 可視光では透けて見えるが、ミリ波では反射率99%以上の鏡(のはず)

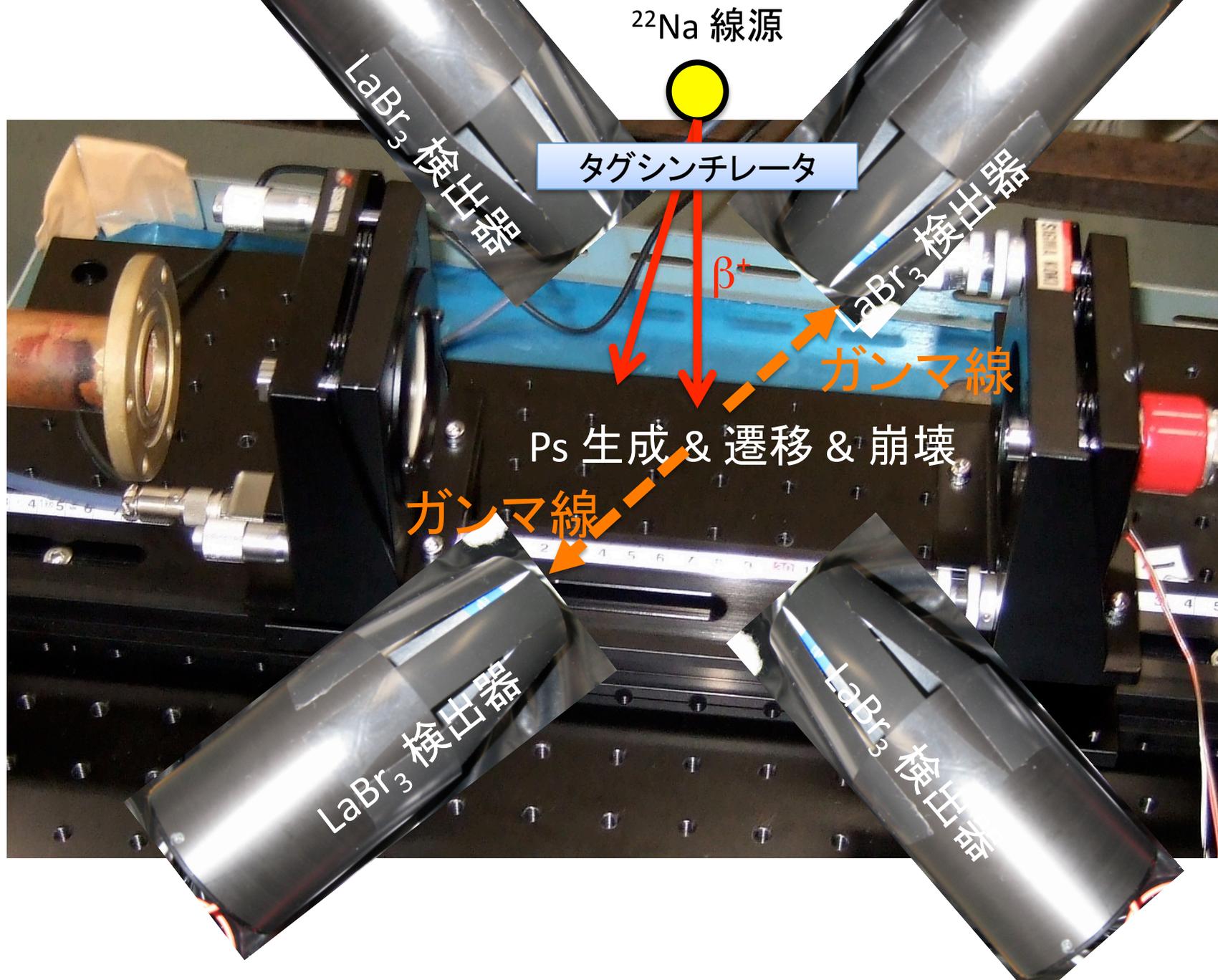
金属メッシュミラーを用いた測定

- ピエゾステージを移動させる事で、共振器長を変化
- 共鳴の幅の鋭さから、finesse を求めた



20 μm メッシュの時、
共鳴ピークの幅 (1.14 μm) から、
Finesse=647 (Q \sim 42000相当)
→ エネルギー密度: **\sim 400 倍**

今後、カップリングの最適化の後、HFS 測定予定 (今秋)



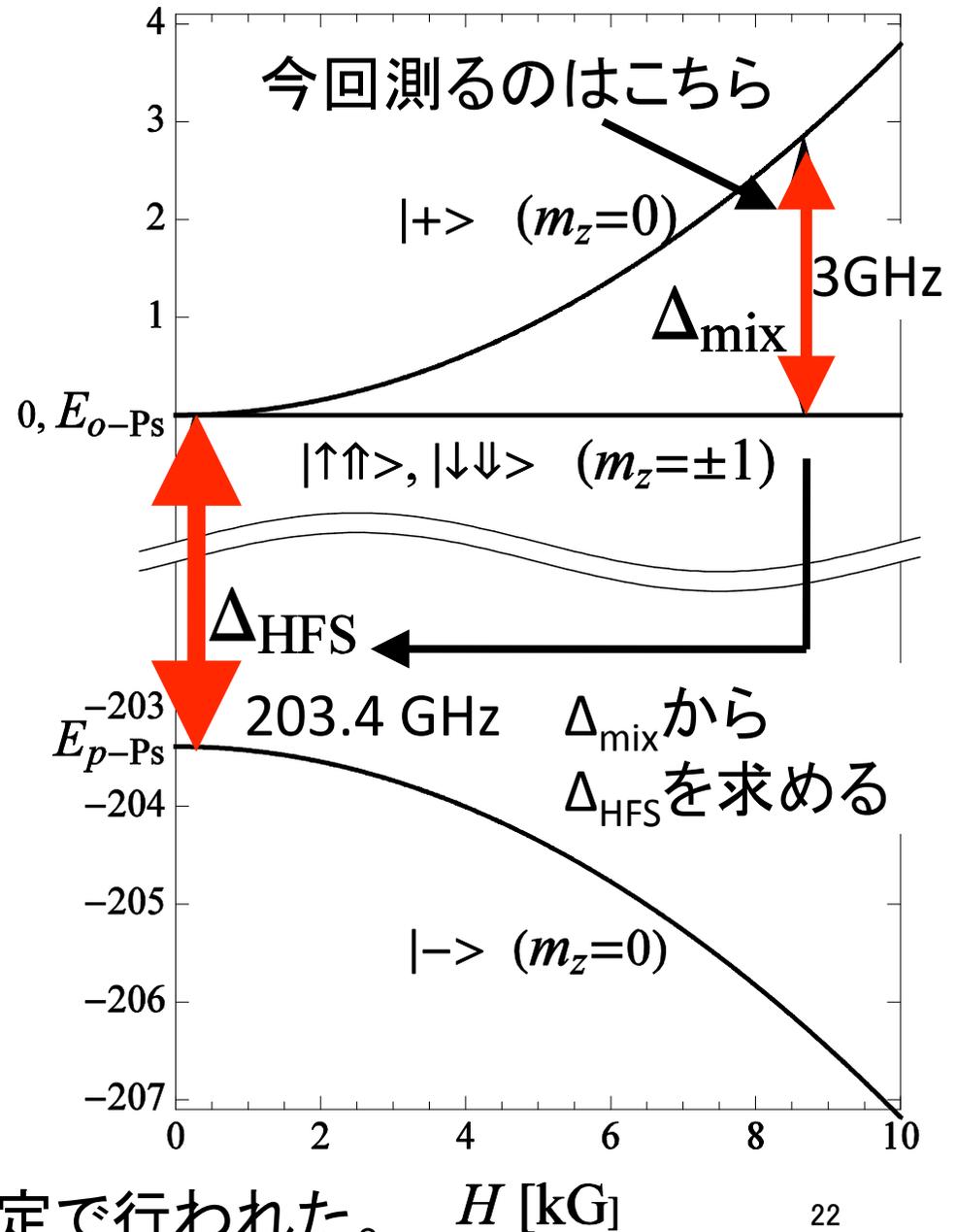
間接遷移測定

過去の実験の系統誤差をつきつ
め、ppm の精度を目指す

Zeeman効果を用いた間接測定の方法

磁場をかけると、
o-Psの($S=1, m_z=0$)と
p-Ps($S=0, m_z=0$)が混合し
エネルギー準位が分裂
(Zeeman 効果)

Δ_{mix} は、9 kG 程の磁場中で
約 3 GHz -> マイクロ波なので
大強度での利用が十分可能。
-> この遷移を起こさせると 2γ 崩壊の
確率が高くなることを利用して測定。



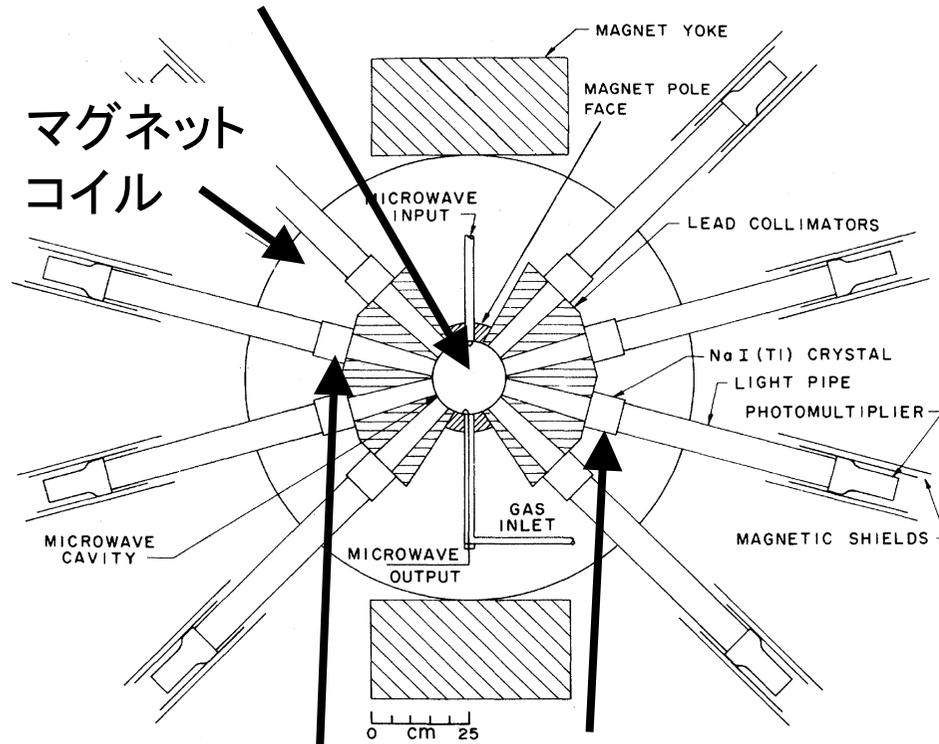
$$\Delta_{mix} = \frac{1}{2} \Delta_{HFS} \left(\sqrt{1 + x^2} - 1 \right)$$

$$x = \frac{2g'\mu_B H}{\Delta_{HFS}}$$

から Δ_{HFS} を求める。
->過去の実験は
すべてこの間接測定で行われた。

過去の実験と問題点

RF Cavityにガスを入れて
 β^+ 線からポジトロニウムを生成



NaI(Tl)シンチレータで
Back-to-backに測定

「磁石の神様」V. ヒューズらの
実験セットアップ(80年代前半)

問題点1. 磁場の非一様性

磁場の不定性そのまま
測定結果の主な系統誤差に。

一方、ポジトロニウムの
生成領域は数cmに及ぶ。
-> 大きなサイズでppm精度での
磁場制御は非常に困難。

問題点2. 物質の効果

過去の実験では、物質の効果
(Psの熱化過程)を正しく評価せず。

90年代、「オルソポジトロニウムの
寿命問題」で、この効果が
深刻な系統誤差を生むことを
我々が示した。

我々の間接測定の設定アップ @KEK 低温棟

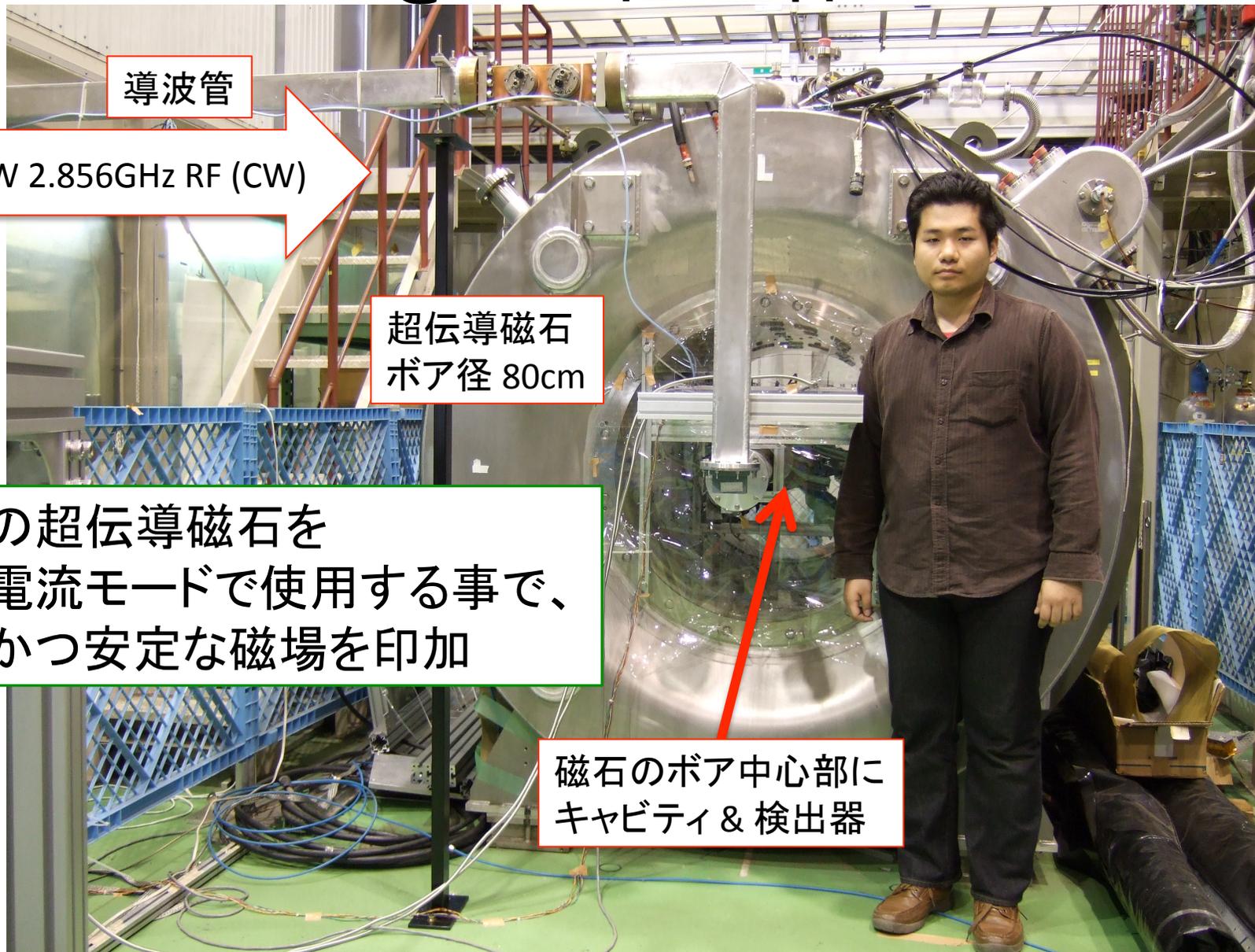
導波管

500W 2.856GHz RF (CW)

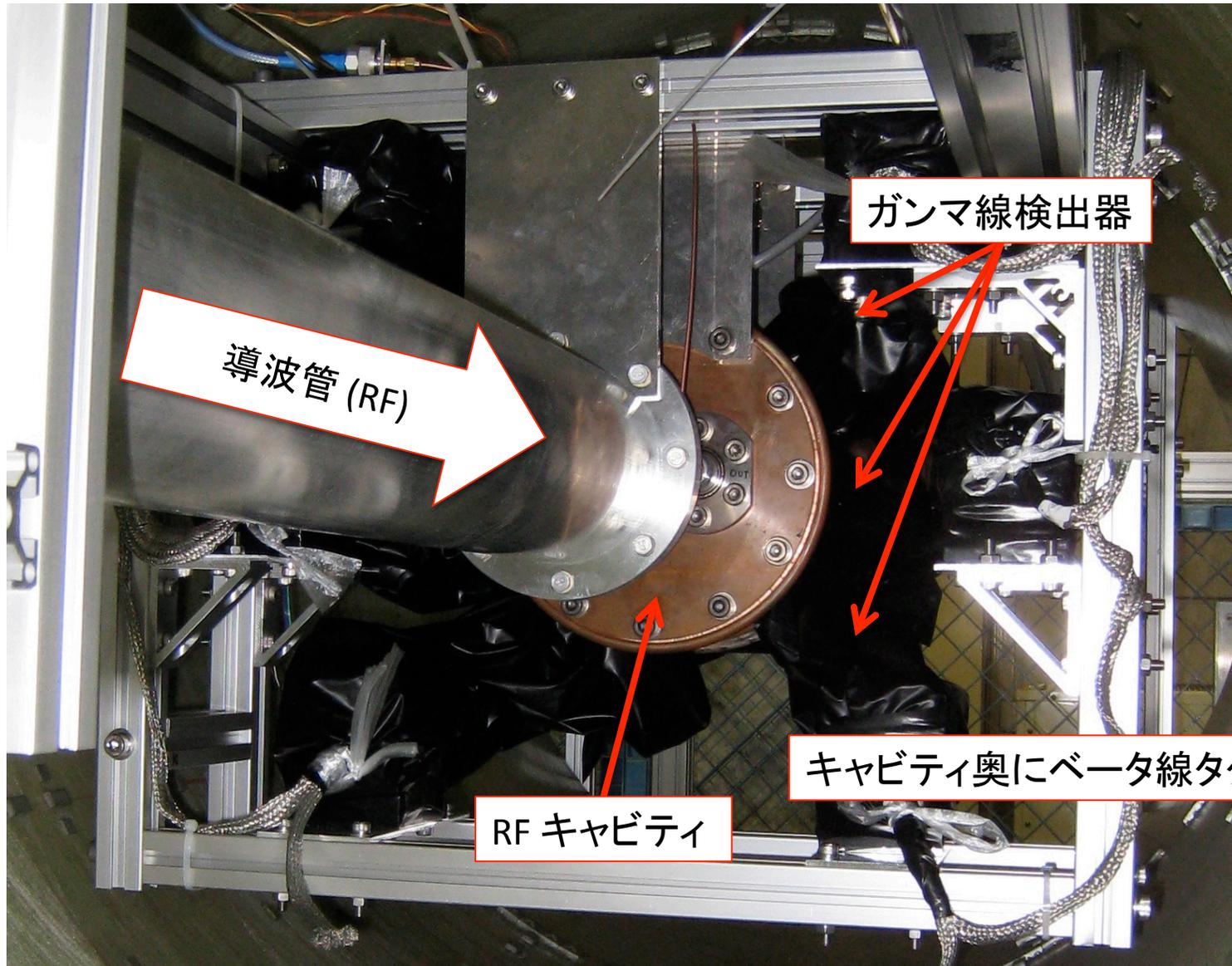
超伝導磁石
ボア径 80cm

大型の超伝導磁石を
永久電流モードで使用する事で、
均一かつ安定な磁場を印加

磁石のボア中心部に
キャビティ & 検出器

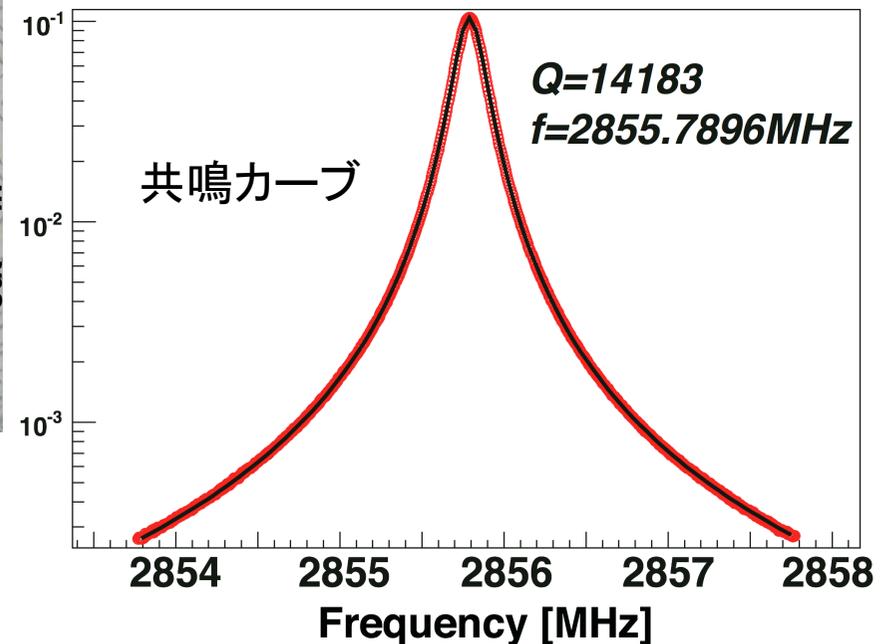
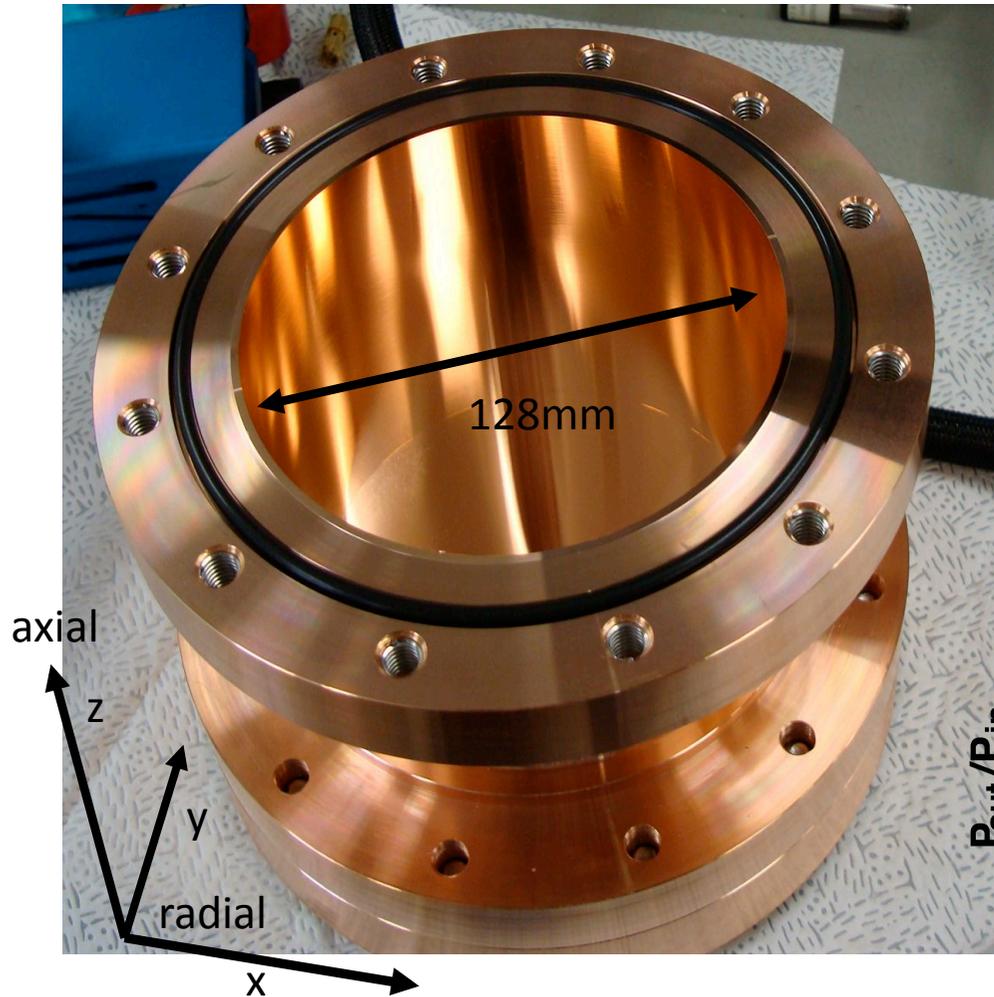


中心部のセットアップ (磁石ボア中心)



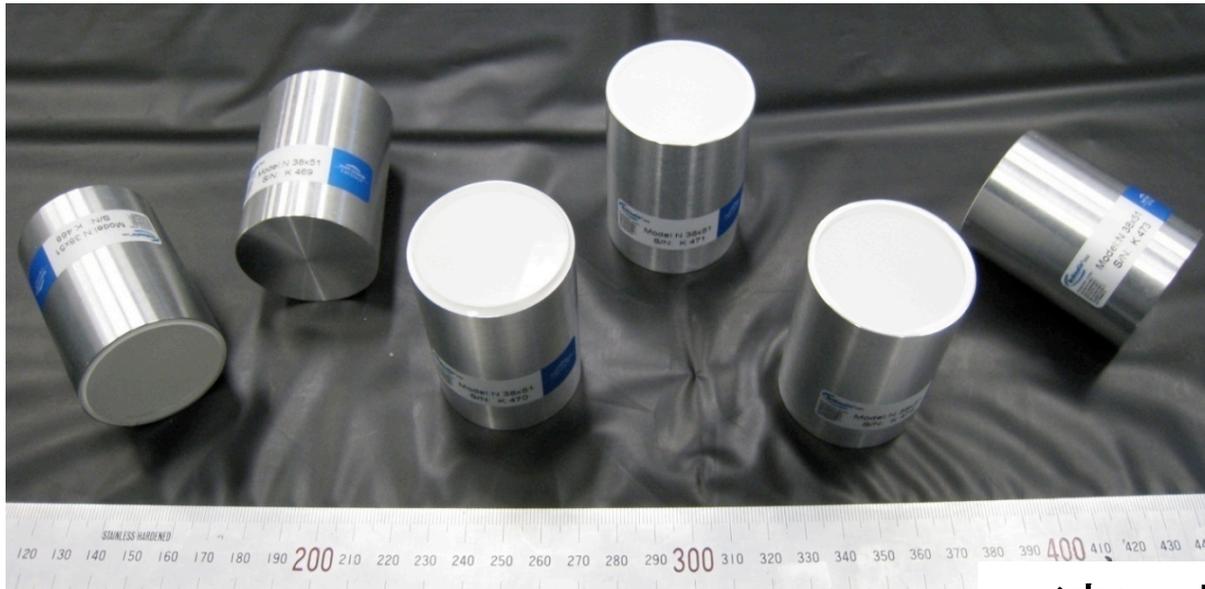
RF キャビティ

- 共振周波数: 2856MHz
- $Q=14200$
- 共振モード: TM_{110}
- 500W (CW) の RF を入射
- N_2 + イソブタン(10%) ガスを
つめて、ポジトロニウム生成



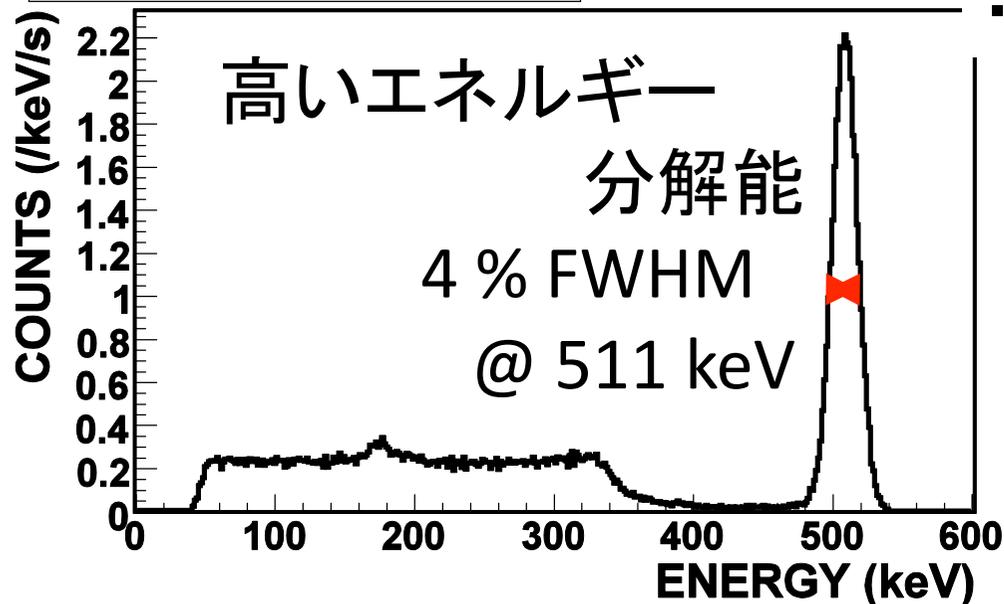
ガンマ線検出器

LaBr₃(Ce)シンチレータ
(直径1.5インチ、長さ2インチ)
を6個使用
ファインメッシュPMTで
読み出し



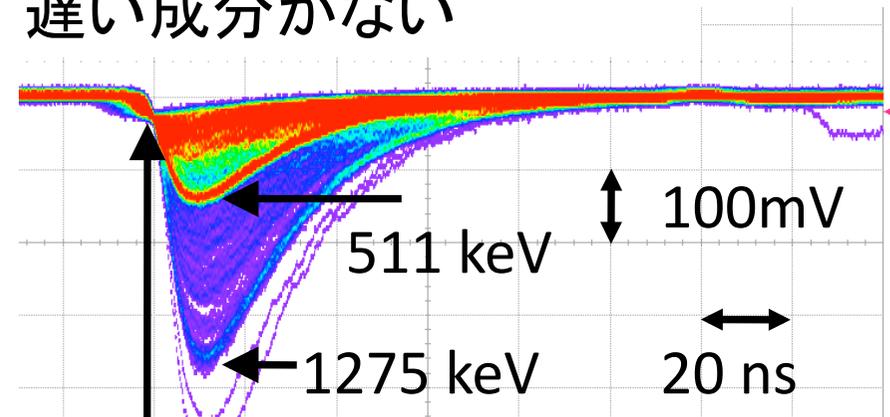
ENERGY SPECTRUM

²²Na



- ・ 速い立ち上がり
- ・ 遅い成分がない

²²Na



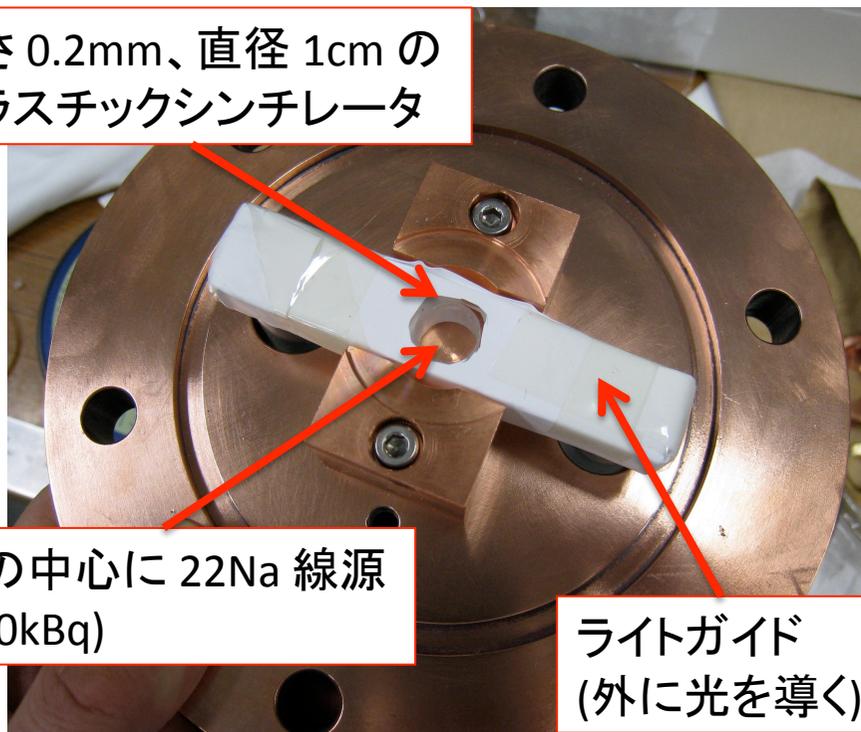
高い時間分解能

200 ps FWHM @ 511 keV

ベータ線タギング

- チェンバーに入射の β^+ 線を、プラスチックシンチレータでタグ
- イベント毎に、ポジトロニウムの生成から崩壊までの時間がわかる

厚さ 0.2mm、直径 1cm の
プラスチックシンチレータ



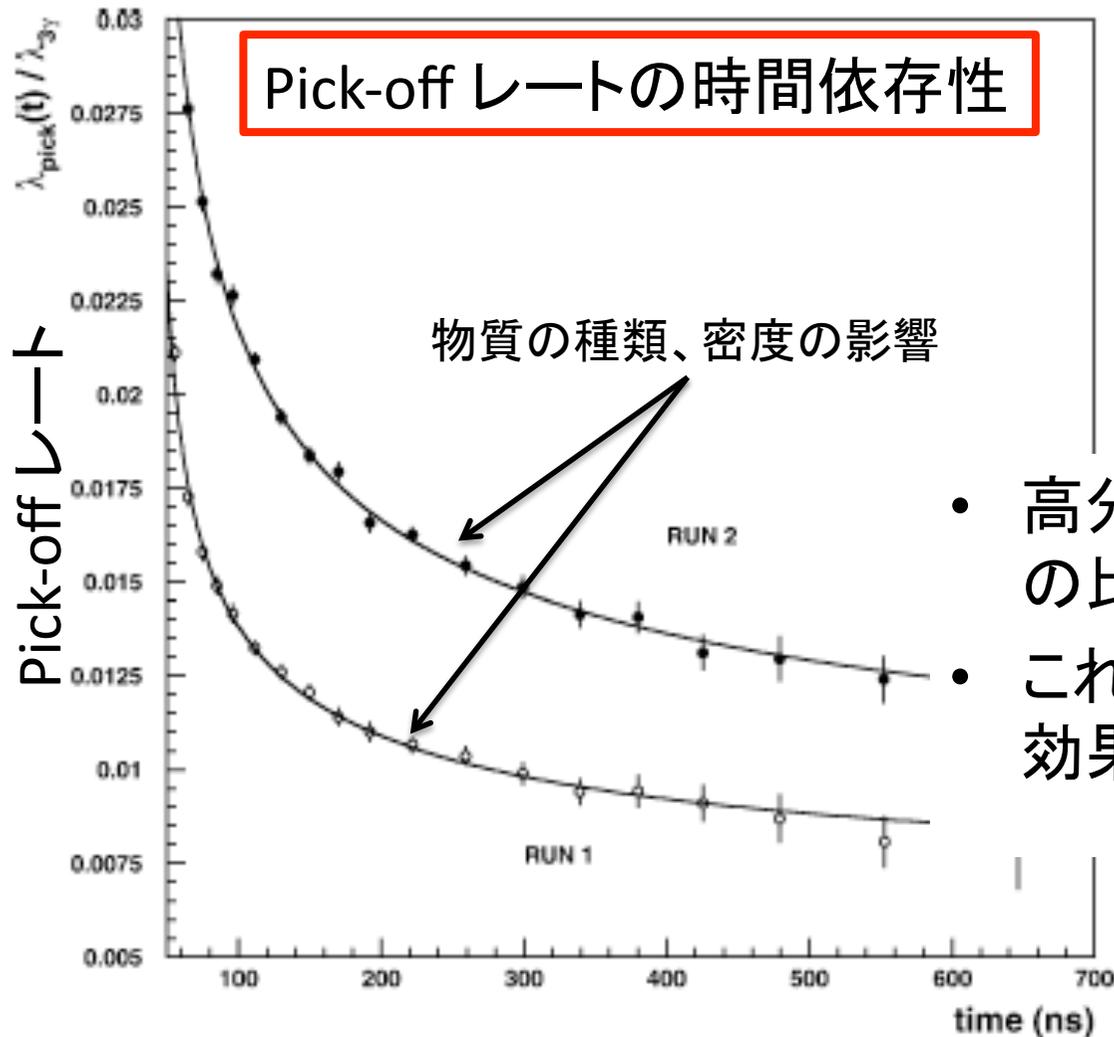
奥の中心に ^{22}Na 線源
(700kBq)

ライトガイド
(外に光を導く)

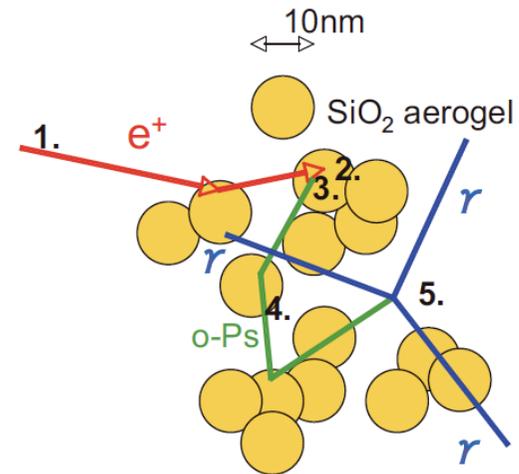
これにより、

- S/N を大幅に改善できる
- 物質が HFS に与える影響の正確な評価ができる

物質の効果は、ポジトロニウム生成後、 熱化されていくうちに変化する



Ps 生成からの時間



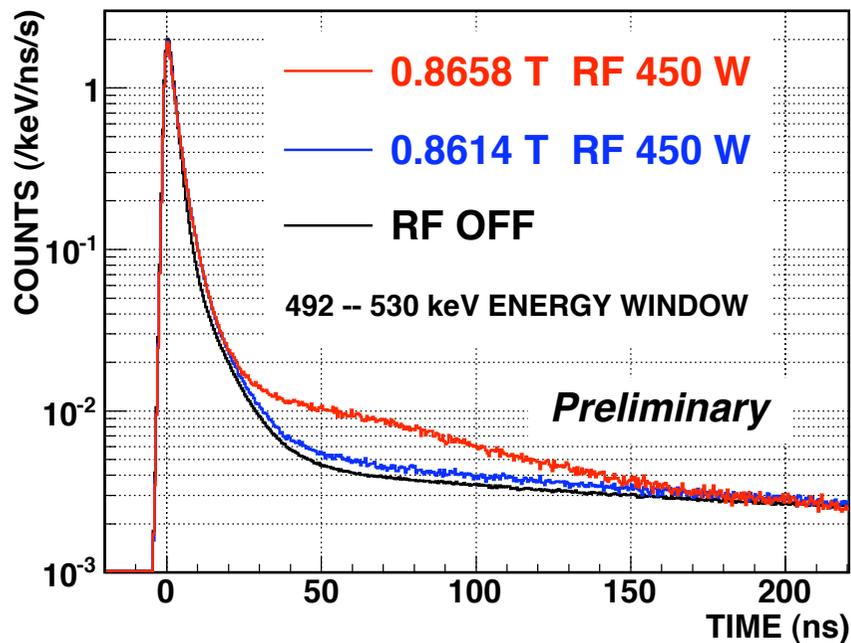
- 高分解能 Ge 検出器で、 $2\gamma/3\gamma$ の比の時間依存性を直接見る
- これにより、物質の効果 (Stark 効果等) の詳細な補正を行う

cf. ポジトロニウムの寿命問題

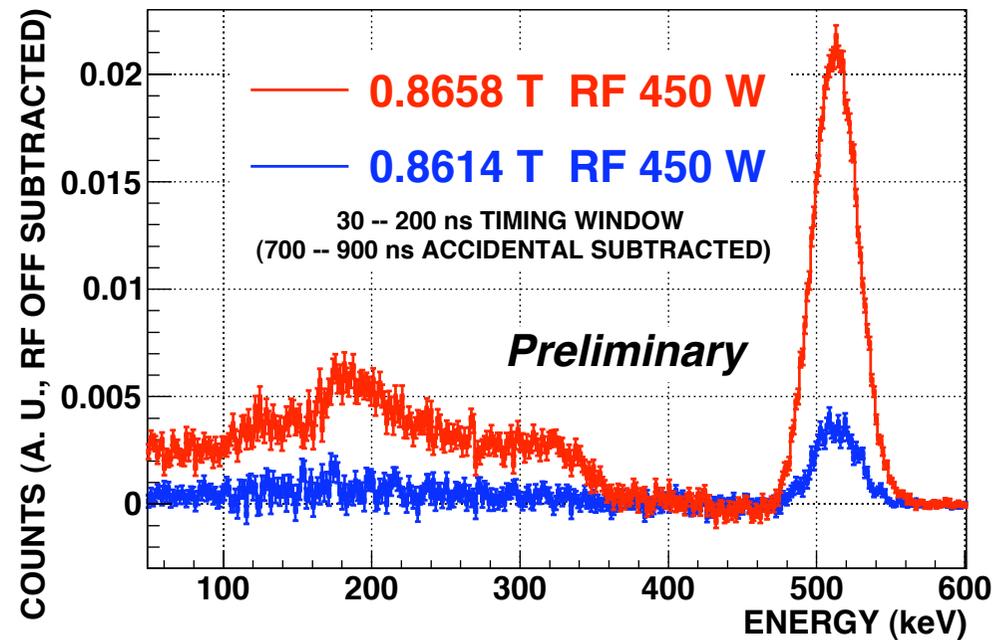
実験の現状

- 6月から第1回測定中 (9月末までの予定)
- RFによる遷移を明瞭に観測

寿命スペクトル



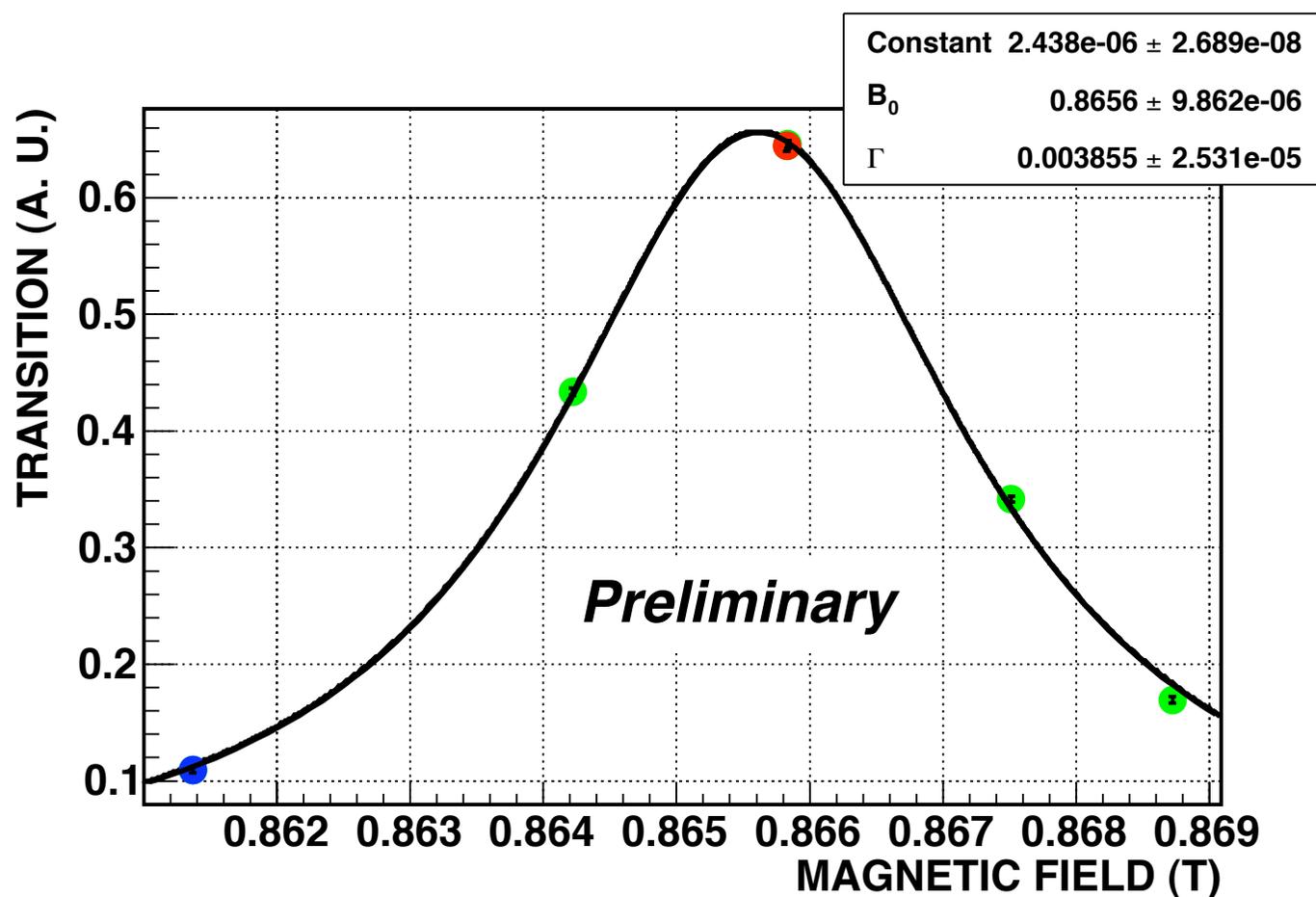
エネルギースペクトル



現在、磁場のスキャンにより、共鳴カーブを出しているところ

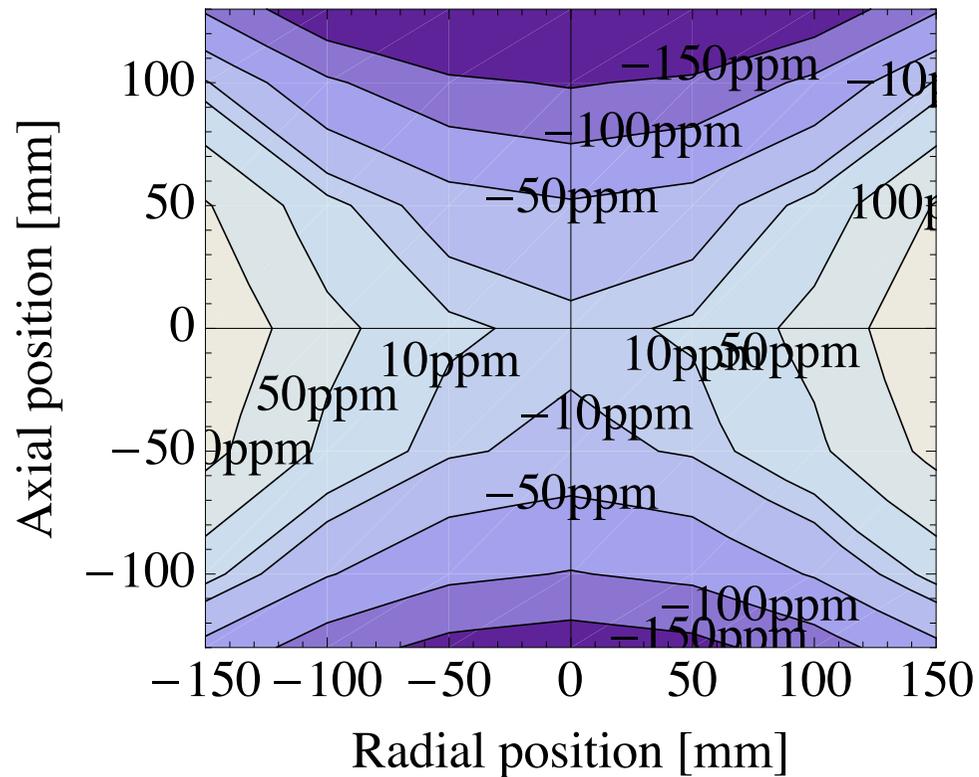
- 2 週間の測定での暫定値

$\Delta\text{HFS} = 203.399 \pm 0.005$ (23ppm. stat.) ± 0.029 (140ppm sys.) GHz

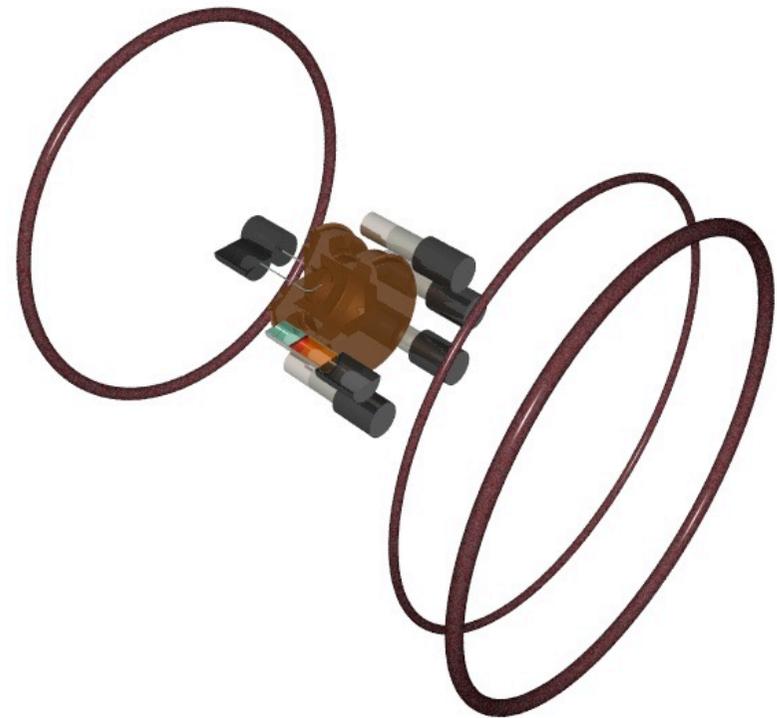


現在の課題: 磁場

- 現在、最大の系統誤差は、
磁場の不定性/非一様性



- 磁場補正コイルを設計中
- ppm の均一性
- 第2次測定で ppm の精度を



まとめ

- ポジトロニウムの HFS はずれており、新しい物理を示唆している可能性がある。
- 過去の系統誤差をふまえた上で、二つの新しい測定
 - ミリ波を用いた直接遷移実験
 - 世界初のミリ波領域での分光実験
 - 大型超伝導磁石を用い、時間タギングを行った間接遷移実験
 - ppm の精度での HFS 測定
- それぞれ、一年以内程度で結果が出る予定