

# サブミリ波を用いた ポジトロニウム超微細構造の 直接測定

末原大幹、山崎高幸、宮崎彬、秋元銀河、  
難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄

(東京大学・素粒子物理国際研究センター/大学院理学系研究科)

齋藤晴雄

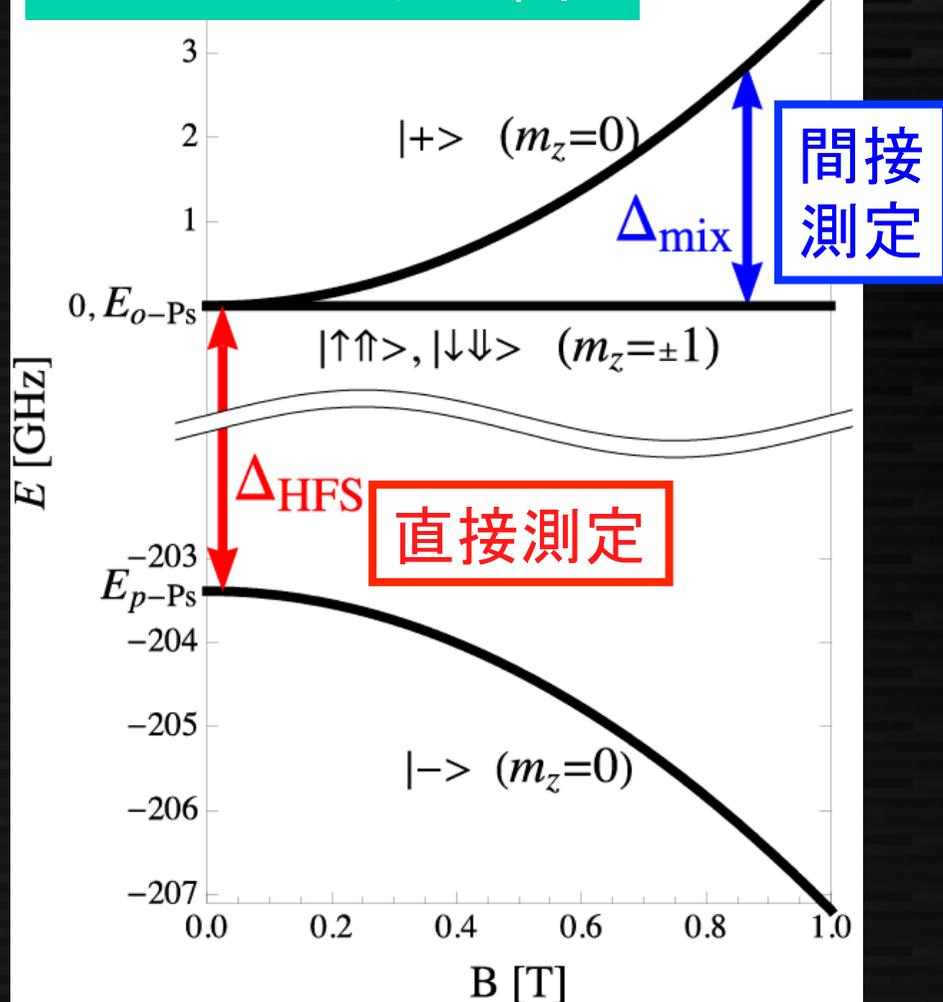
(東京大学・大学院総合文化研究科)

出原敏孝、小川勇、漆崎裕一、S. Sabchevski

(福井大学・遠赤外領域開発研究センター)

# 直接測定と間接測定

Psのエネルギー準位



間接測定

静磁場 + RF

石田、今までのすべての実験

Zeeman分裂を測定

→HFSに焼き直す

- 確立された方法、高精度
- 磁場に起因する系統誤差

直接測定

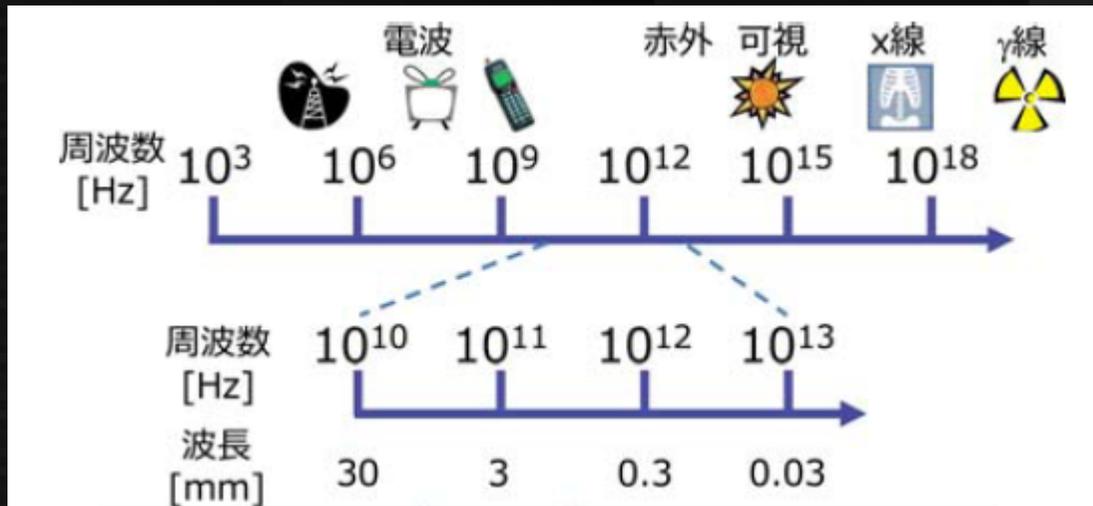
ミリ波 (203 GHz)

我々の新しい方法

大強度サブテラヘルツ波を照射しo-Psからp-Psへ直接遷移させる

- 独立な測定(独立な誤差)
- ミリ波→新しい技術

# ミリ波(テラヘルツ波): 0.1-10 THz



THz gap: 既存技術の空白領域

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(この実験)

軽い未知素粒子の探索など

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

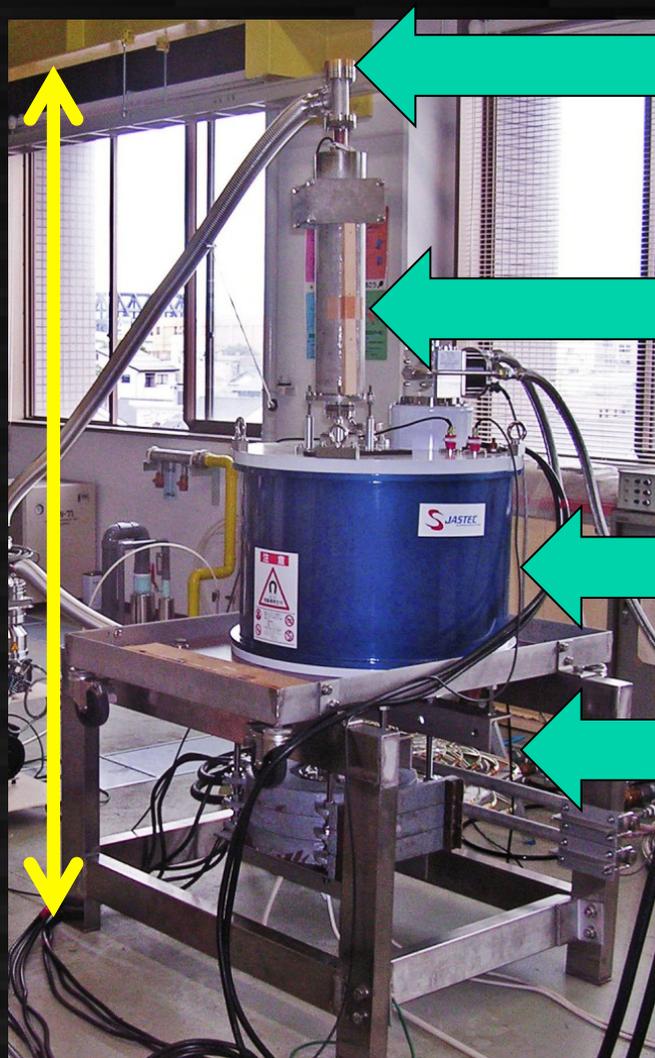
電波と光の両面から近年飛躍的に技術開発が進展

# この実験の鍵

ポジトロニウム生成領域に大強度( $\sim 10\text{kW}$ )のミリ波を蓄積し、遷移を精密に測定する

1. 大強度ミリ波光源: ジャイロトロン
2. ガウシアンビームへの変換と光学的共振器
3. 陽電子源・測定器の配置とシールド

# 大強度ミリ波光源: ジャイロトロン



出力窓

コレクタ  
(電子回収)

7.4T 電磁石  
中心部にcavity

電子銃

高磁場下での電子のサイクロトロン振動で空洞共振器を発振させ導波管より取り出すデバイス

【特徴】

- 100 GHz – 1 THz
- ハイパワー (核融合用点火源)
- 連続発振も可能
- 共振のさせ方次第で周波数可変にも

Gyrotron FU CW IV @福井大

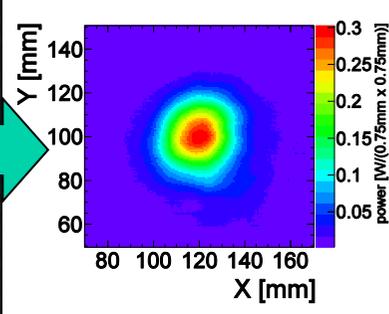
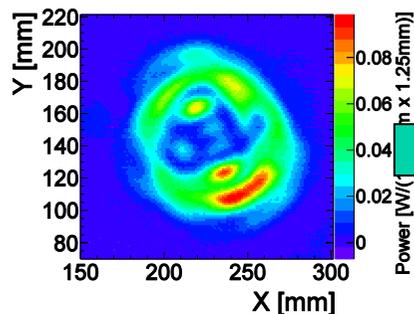
この実験のために福井大で203GHz, 300W long pulse (60ms/5Hz, duty 30%)のジャイロトロンを開発

# ガウシアンモードへの変換

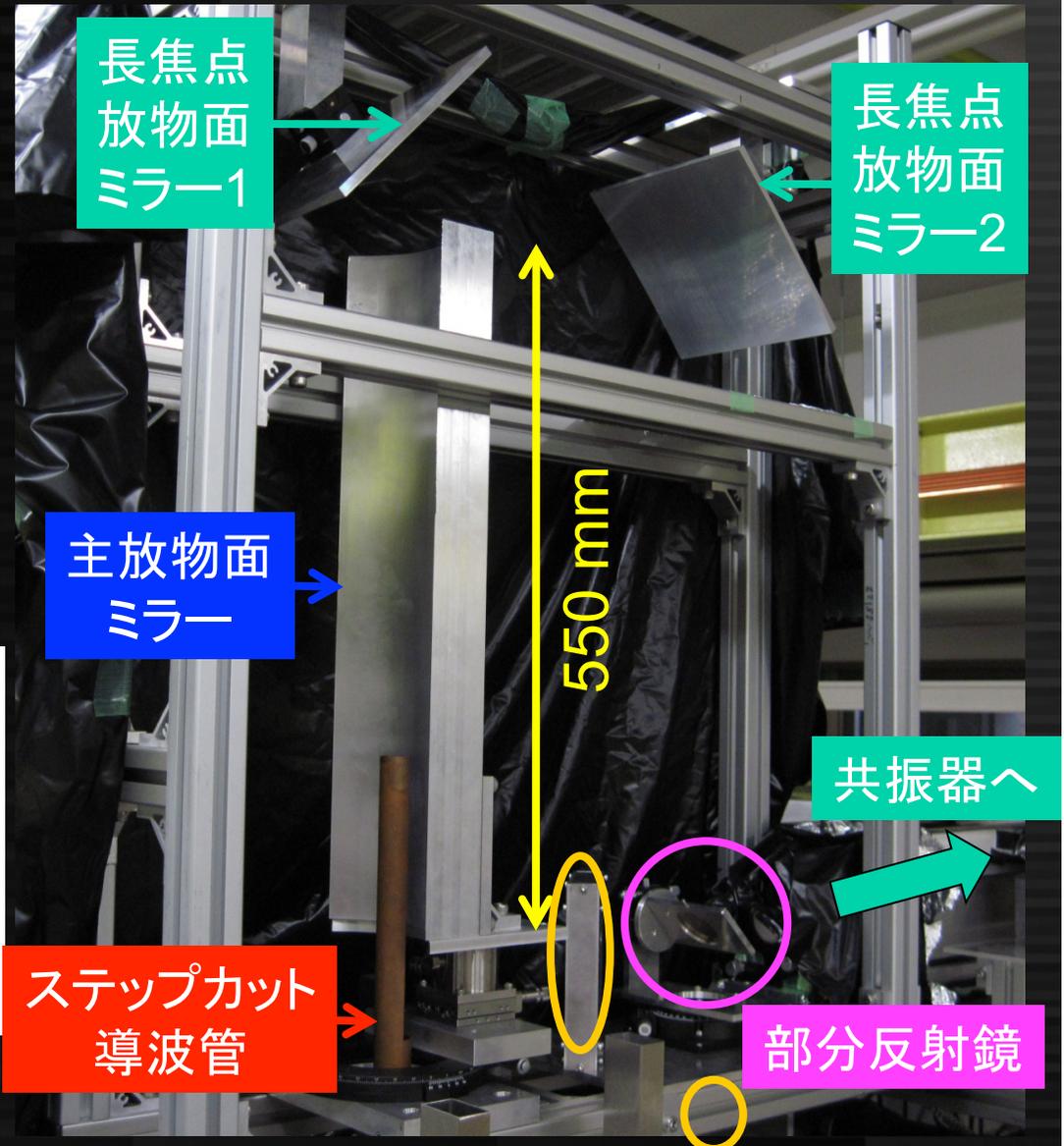
ジャイロトロン出力は  
導波管モード(TE<sub>03</sub>)  
→ 光学共振器での蓄積  
のためガウシアンビームに  
変換する必要がある

Gyrotron出力  
TE<sub>03</sub>

ガウシアン変換後  
TEM<sub>00</sub>



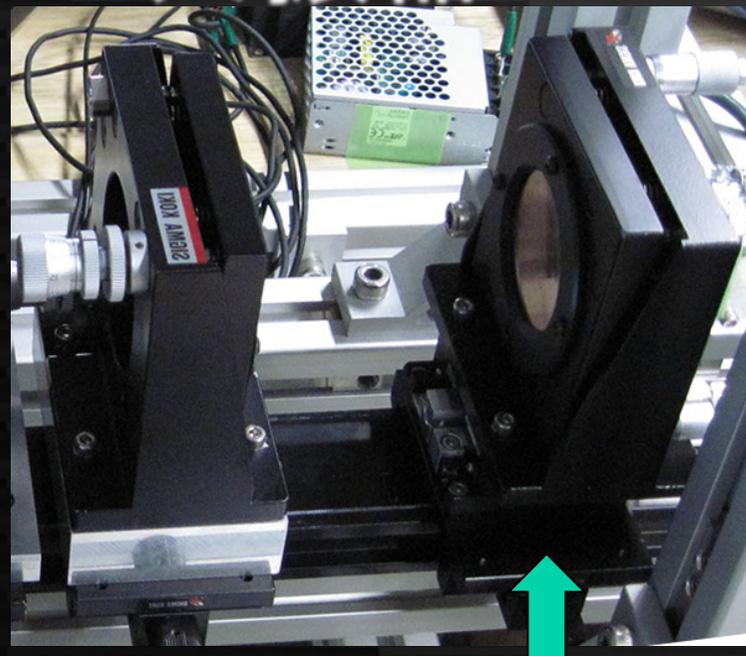
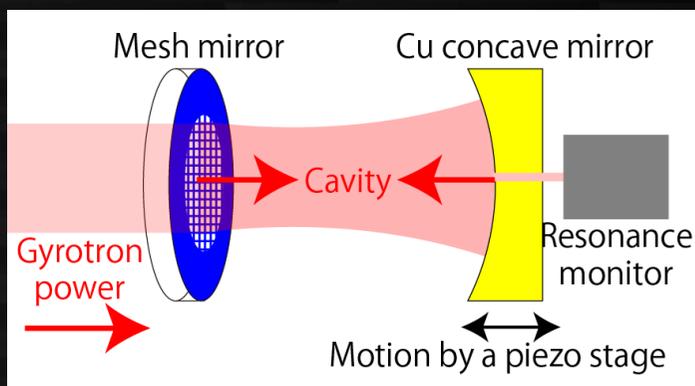
変換効率: 約30%



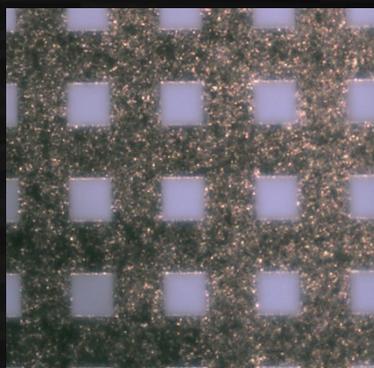
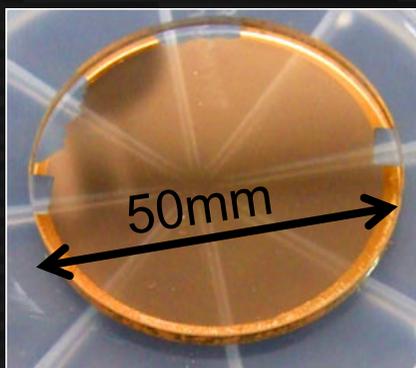
# ファブリーペロー共振器

## 一次元のとじこめ(光学の技術)

- 高いパワー密度(光学的収束)
- 共振器長が自由にえられる



ピエゾステージで共振器長を~100nm精度で制御、共振位置に自動追従する



石英基板上に幅 $200\mu\text{m}$ , 周期 $360\mu\text{m}$ の金薄膜( $1\mu\text{m}$ 厚)を蒸着  
→ 99%反射, ~0.7%透過 @ 203 GHz

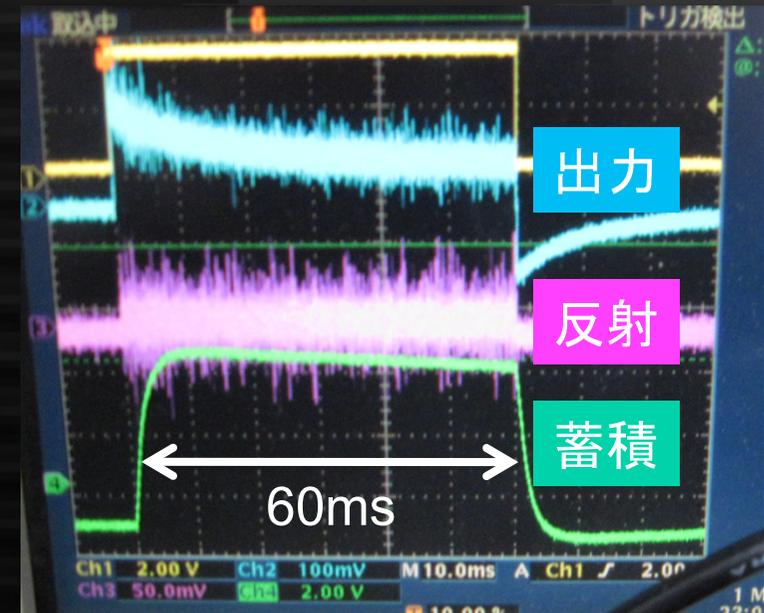
約130 mmの共振器長で  
Finesse ~ 600 (約100倍の蓄積)  
6-7 kW のパワー蓄積を実現

# ジャイロトロン・共振器の制御

## ジャイロトロン出力

制御なしでは倍以上の変動

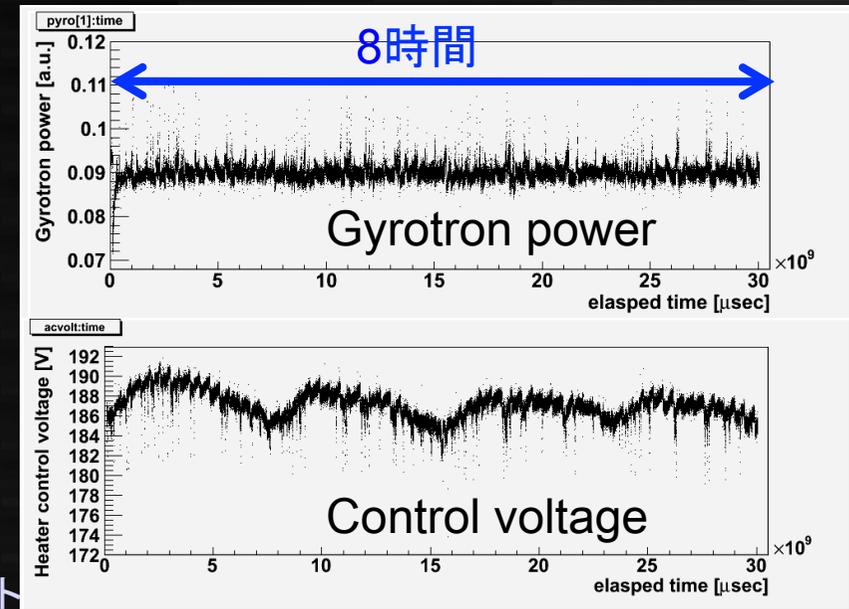
➡ 出力パワー(ガウシアン変換後)を  
焦電検出器で測定し、一定になる  
よう電子銃ヒータへの電圧を制御  
(PID制御)



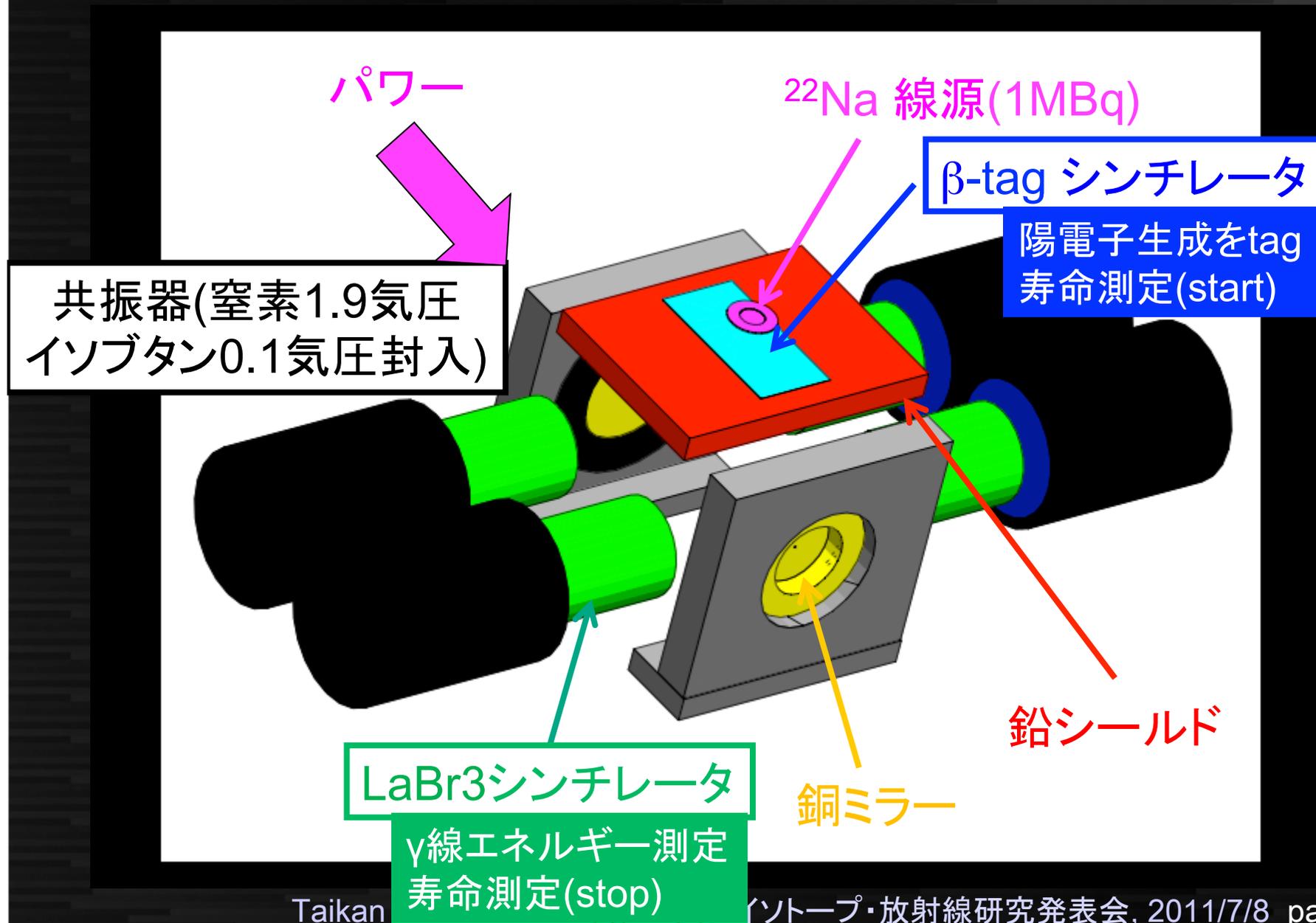
## 蓄積パワー

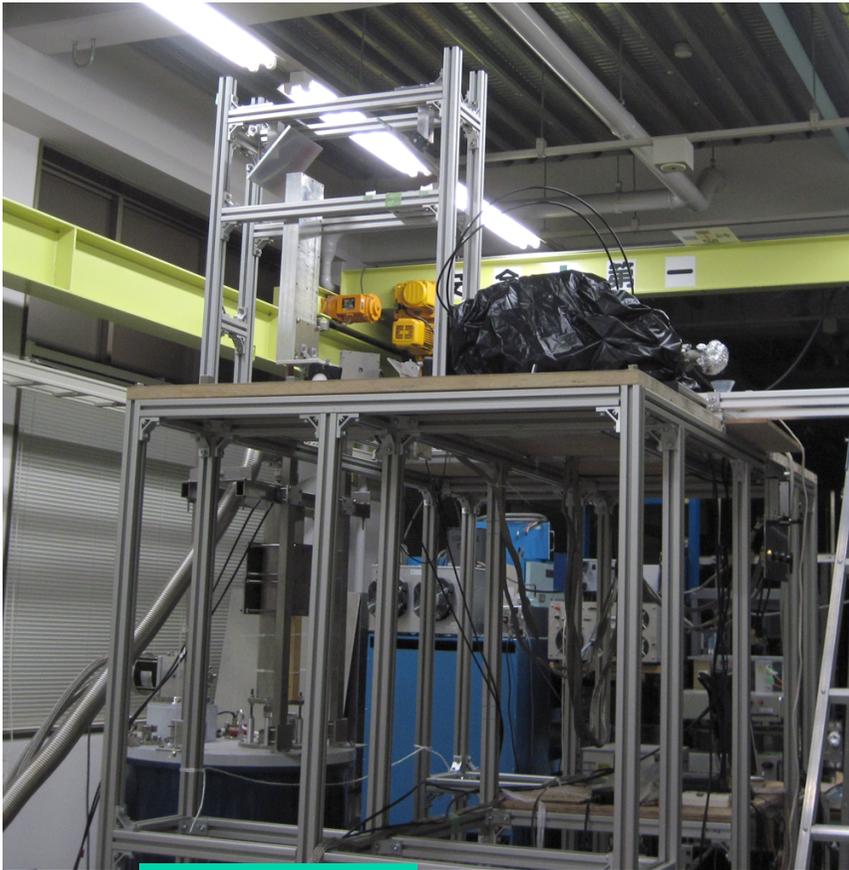
温度変化により共振長が変化  
→ 蓄積パワー減少

➡ 蓄積パワーを銅ミラー後部の  
焦電検出器で測定し、一定量  
以上減少した場合ピークサーチ  
を再実行し共振点へ復帰

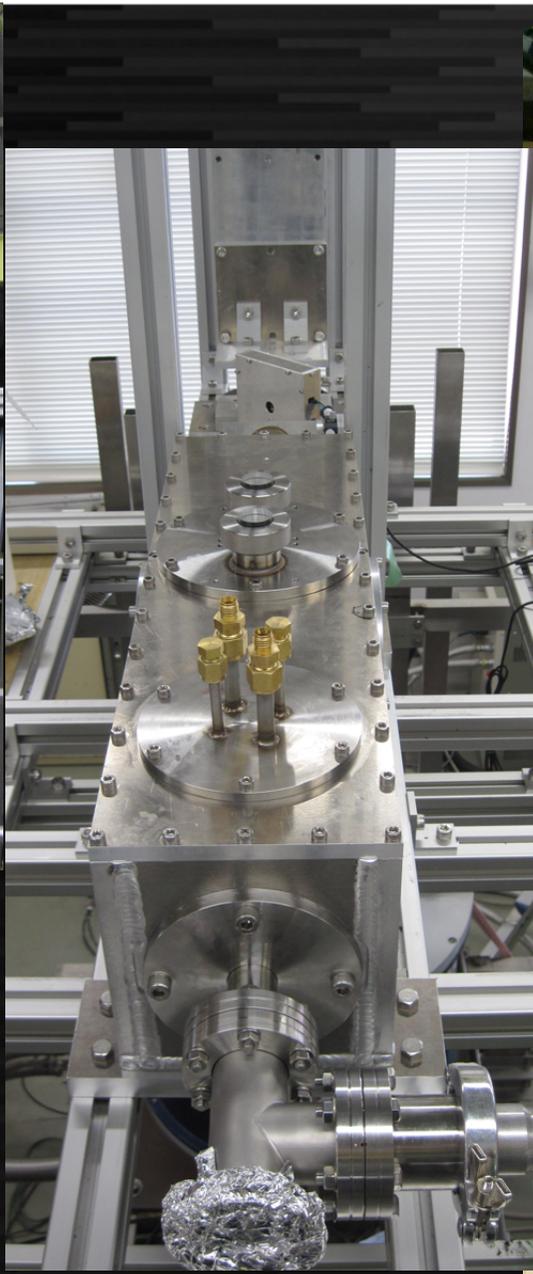
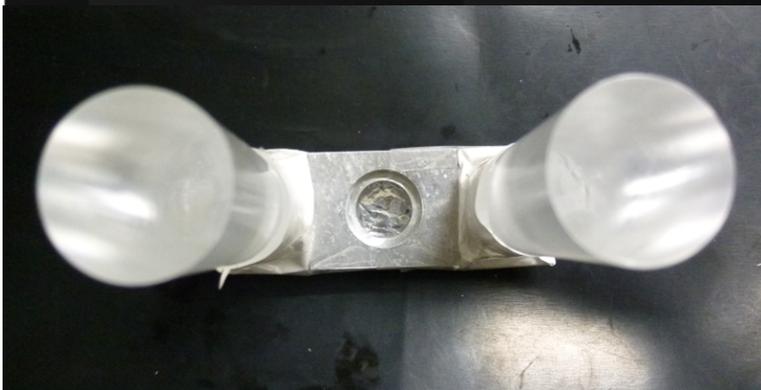


# 線源・測定器の配置





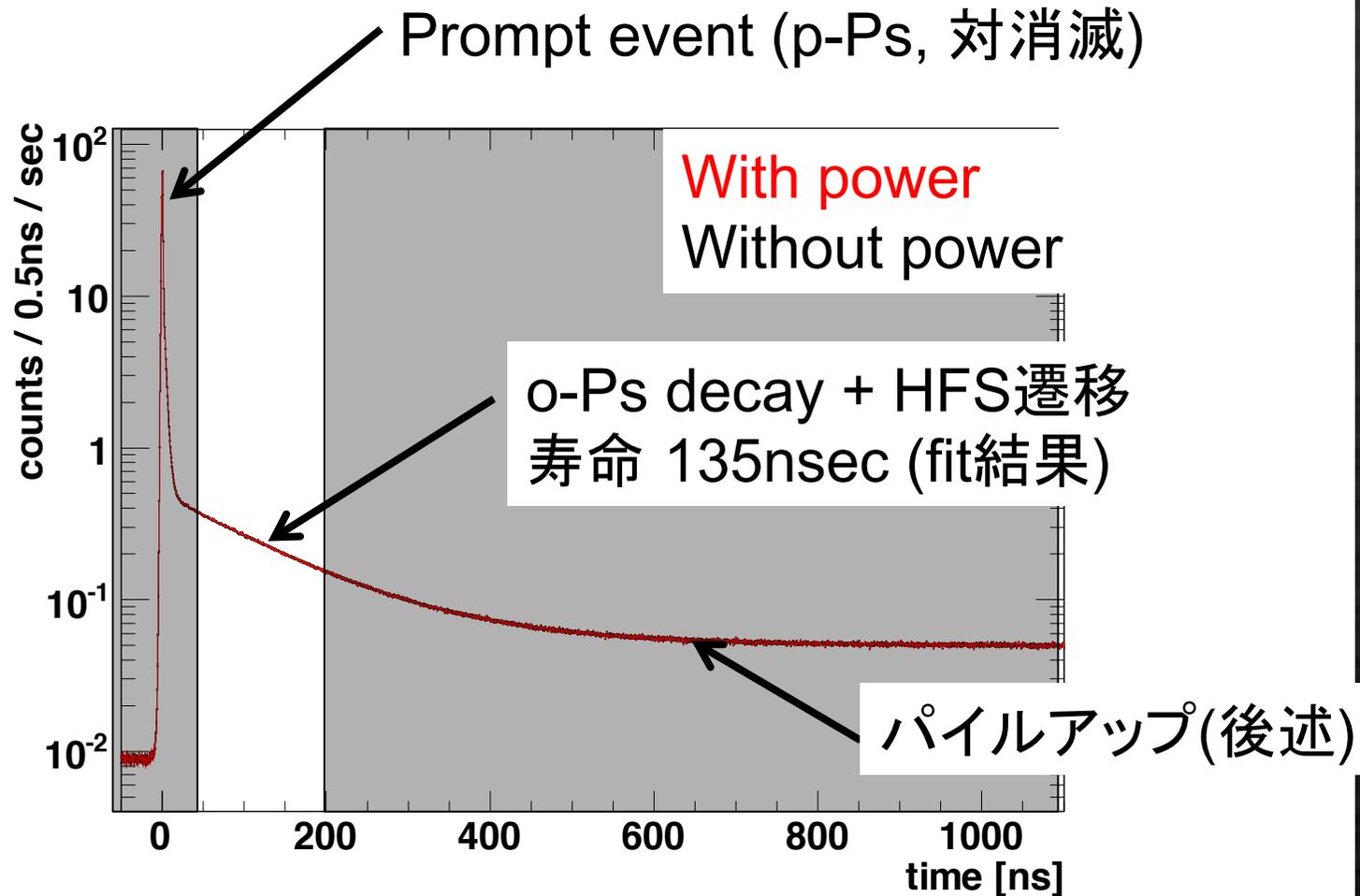
↑ 全体図  
↓ 線源ホルダ



↑ → 共振器とチェンバ  
第48回アイトープ・放射線研究



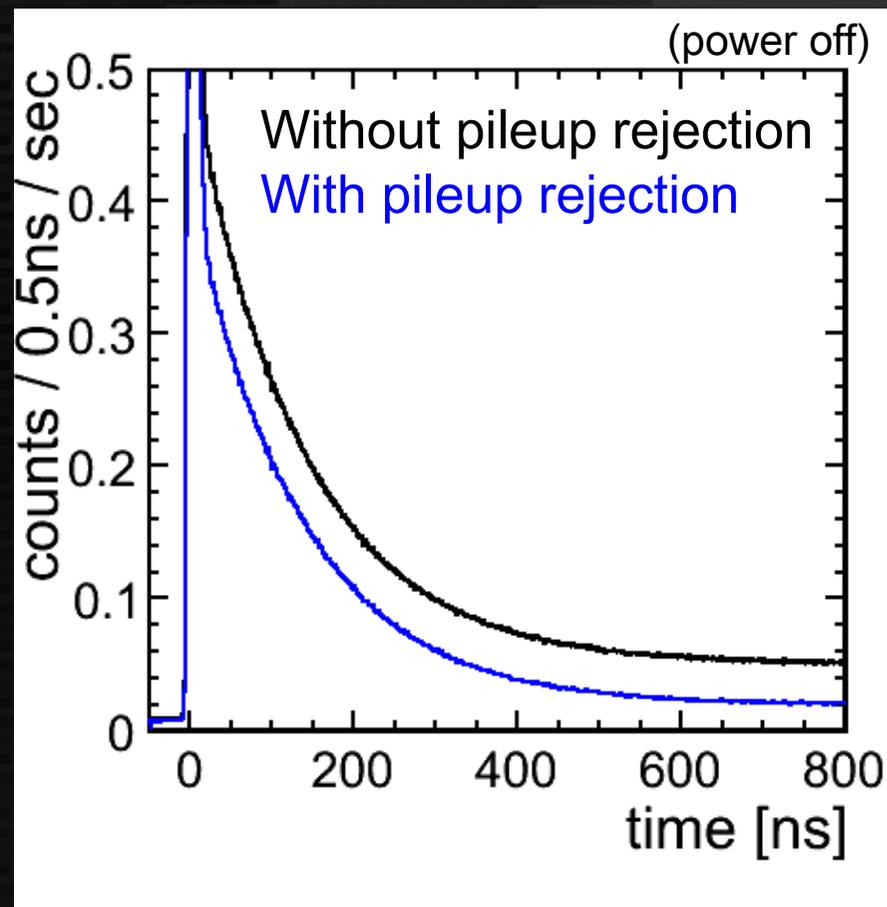
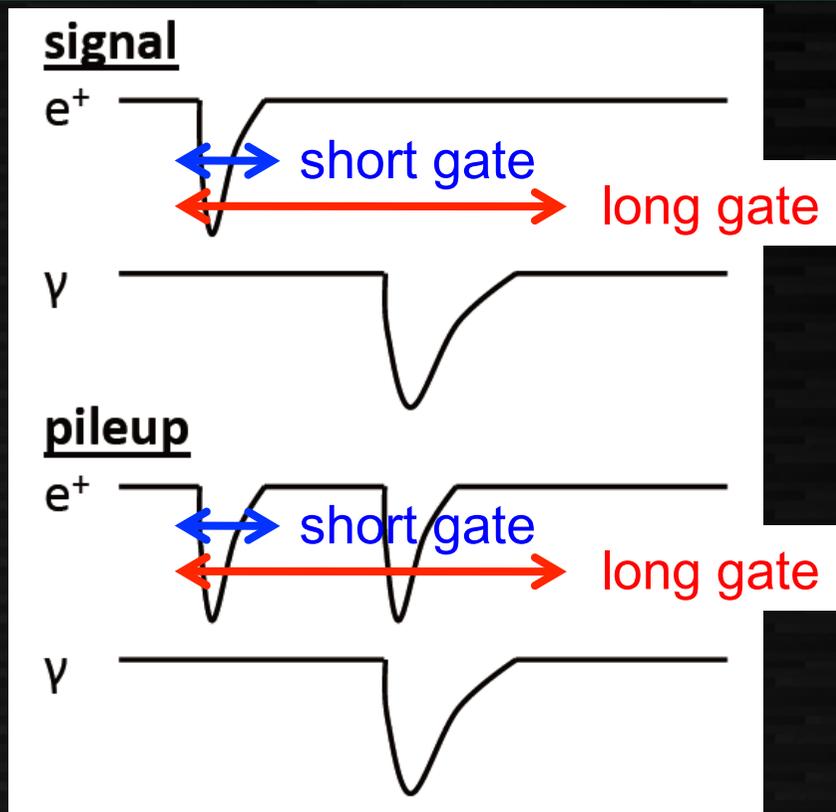
# 解析: Timing spectrum



この段階では、Powerありとなしの差は見えない。

# 解析: Pileup rejection

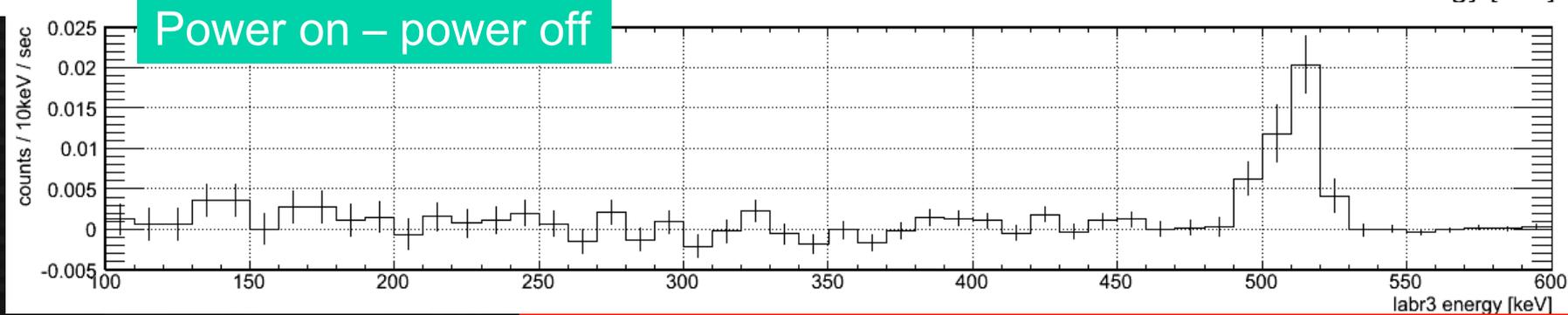
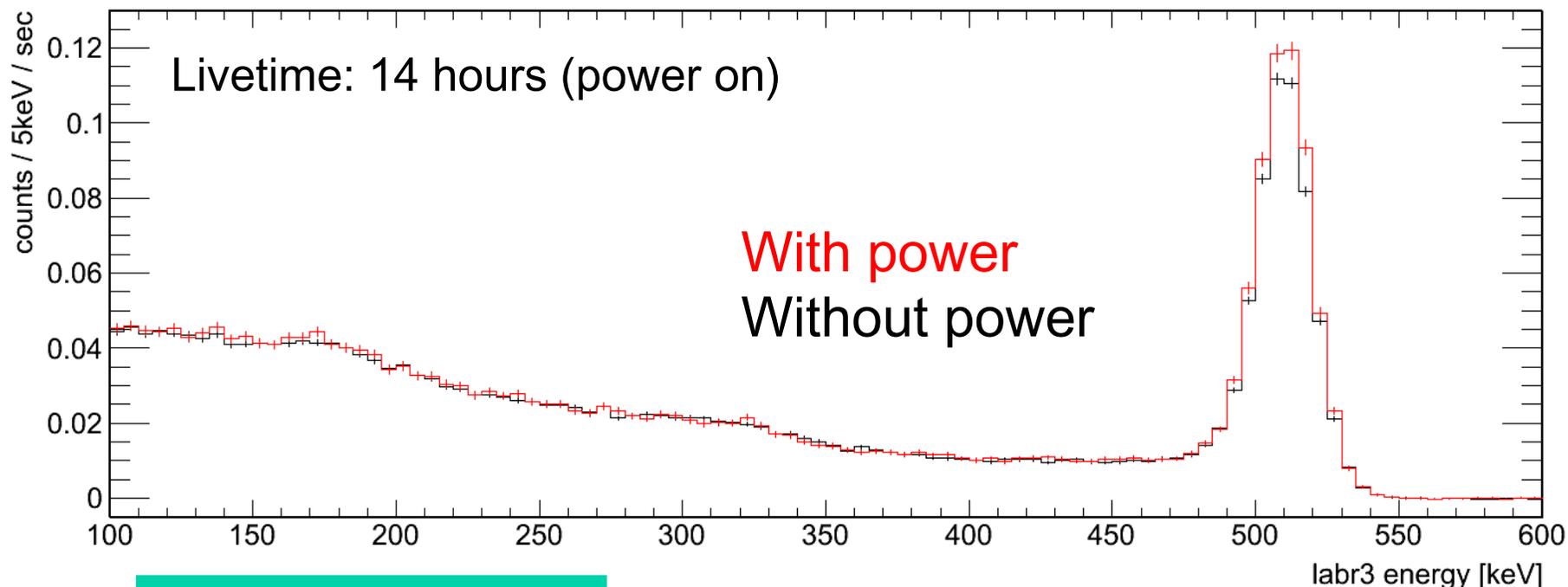
深刻なバックグラウンド: pileup



短時間と長時間の電荷積分の差を見ることでpileupをカットできる

Pileupを約1/3に減らすことに成功

# 解析: energy cutと結果



有意なずれ(HFS遷移と思われる)が見えた。  
Transition rate:  $38.7 \pm 5.6$  mHz (統計のみ)

# 今後の方針

- 「HFS遷移」の確認(証拠を重ねる)
  - 違う周波数での測定  
現在のジャイロトロンでは $TE_{02}$ : 140 GHzが発振可能、データ収集中
  - 蓄積パワーと遷移率の関係  
おおむね比例するはず
- HFS遷移曲線の取得  
(203GHzの周囲数点で測定)
  - 周波数可変ジャイロトロンが必要
- さらに高精度測定へ(最終目標: 10ppm)

# 周波数可変ジャイロトロン

- Reflective gyrotron-backward-oscillator (gyro-BWO)によりジャイロトロンのハイパワー性を維持したまま周波数を連続可変にできるはず
- 理論はあるが、ミリ波では原理実証段階
- 現在テスト準備中
  - Cavityの設計製作は完了
  - マグネット・電子銃取り付け・エージング中
  - まもなく出力試験が可能に
- 完成すれば本実験以外にもさまざまな応用が考えられる



アセンブリ中のGyro-BWO

# まとめ

- ポジトロニウムHFSの直接観測を行っている
- 大電力ミリ波発振器ジャイロトロンと光学共振器を組み合わせることで、6-7kWの蓄積パワーを達成→HFS遷移の検出可能に
- 14時間(power on)の測定でonとoffの間に有意なずれが見られ遷移を検出した可能性が高い
- 現在誤差要因を見積もり・再確認しており、近い将来HFS遷移の観測結果が出せる公算
- 周波数可変ジャイロトロンによりHFS値の精密決定が可能