



ポジトロニウム 超微細構造の 新しい測定

東京大学素粒子物理国際研究センター
難波俊雄

東京大学 素粒子物理国際研究センター

山崎高幸、末原大幹(現九大)、難波俊雄、小林富雄(現KEK)



理学系研究科

宮崎彬(現CERN)、石田明、浅井祥仁

総合文化研究科

斎藤晴雄

KEK

加速器

吉田光宏



超伝導低温工学センター

田中賢一、山本明

福井大学 遠赤外線センター

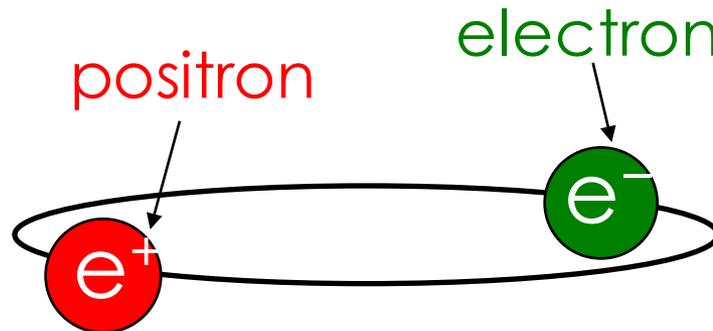
立松芳典、小川勇、出原敏孝



赤字: このテーマで Ph. D 取った人たち

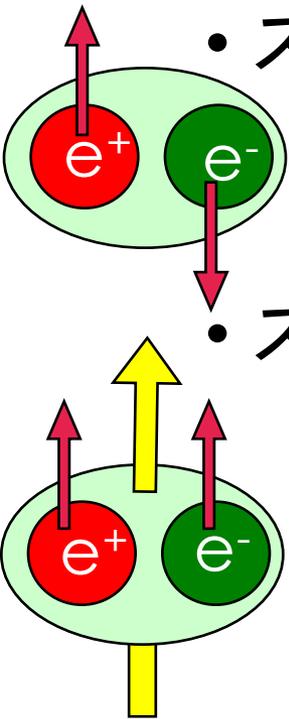
ポジトロニウム IN 素粒子物理

- 素粒子物理の観点からポジトロニウムを見ると、
 - シンプル: たった2個のレプトン系 (純粋にQED) なので、理論計算値のズレが新物理に直結する
 - 重心系エネルギー=1022keVの電子・陽電子コライダー (エネルギーは低いですが加速器が不要)
 - 粒子と反粒子のペア: 基礎対称性や重力の検証に有用

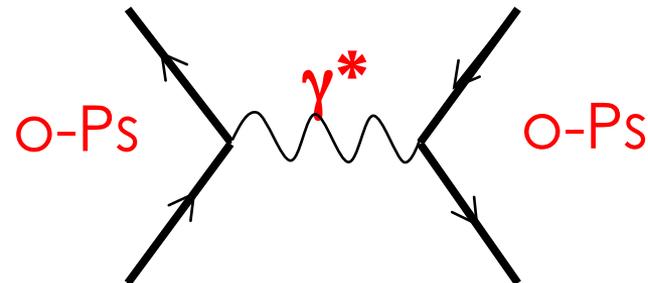


基底状態のオルソ/パラポジトロニウム

1S状態の二つのスピン状態



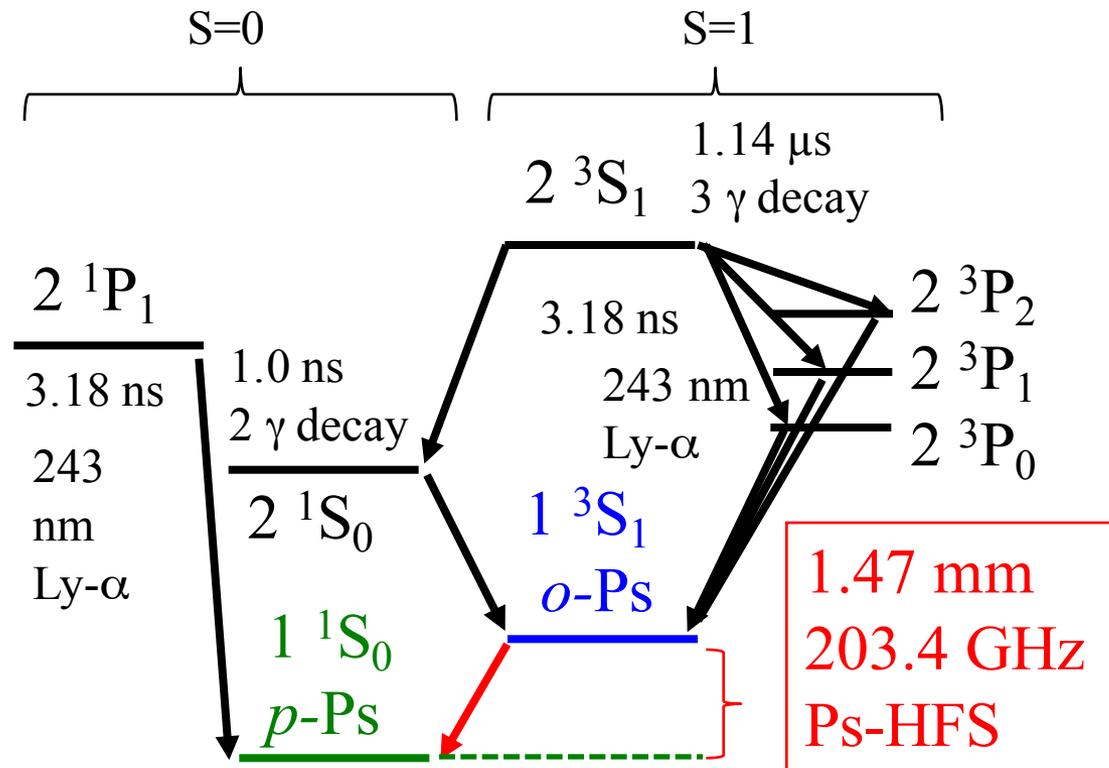
- スピン一重項=パラポジトロニウム
- 真空と同じ量子数: 偶数本の γ 線に崩壊
- $\tau=125\text{ps}$
- スピン三重項=オルソポジトロニウム
- 光子と同じ量子数: 奇数本の γ 線に崩壊
- $\tau=142\text{ns}$: 電磁気力が媒介する崩壊としては、とんでもなく長寿命 (=未知の現象によるズレが見やすい)
- 仮想光子との振動



超微細構造

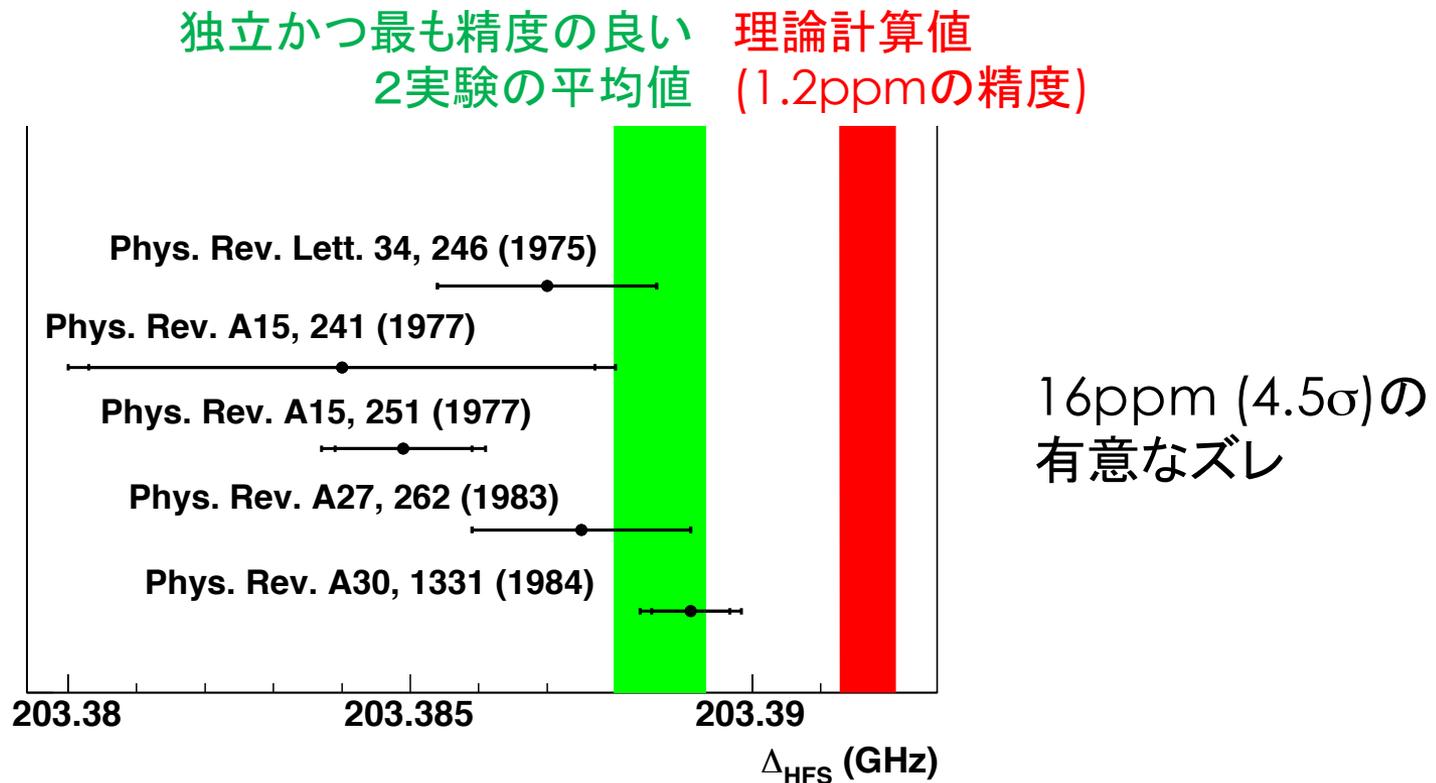
- オルソポジトロニウムとパラポジトロニウムのエネルギー準位差
- でかい! $0.84\text{meV}=203\text{GHz}=1.47\text{mm}$ ミリ波の波長帯
(電子が軽い効果+真空振動の効果)

c.f. 水素: 1.4GHz



超微細構造の値のズレ

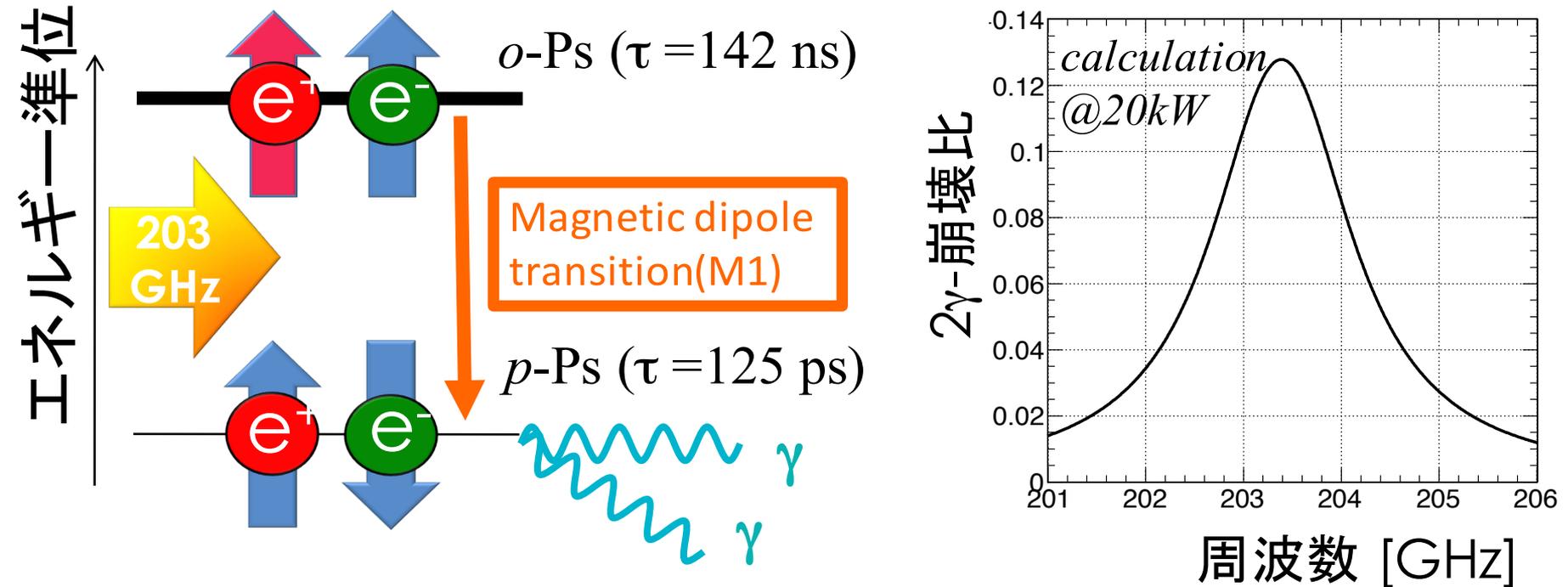
- 1980年代前半まで、精力的に測定 (すべて間接測定)
 - 常伝導磁石、時間情報なし、物質の効果は直線で外挿
- 理論計算は、2000年頃から精度向上



未知の物理の介在？ 系統誤差？

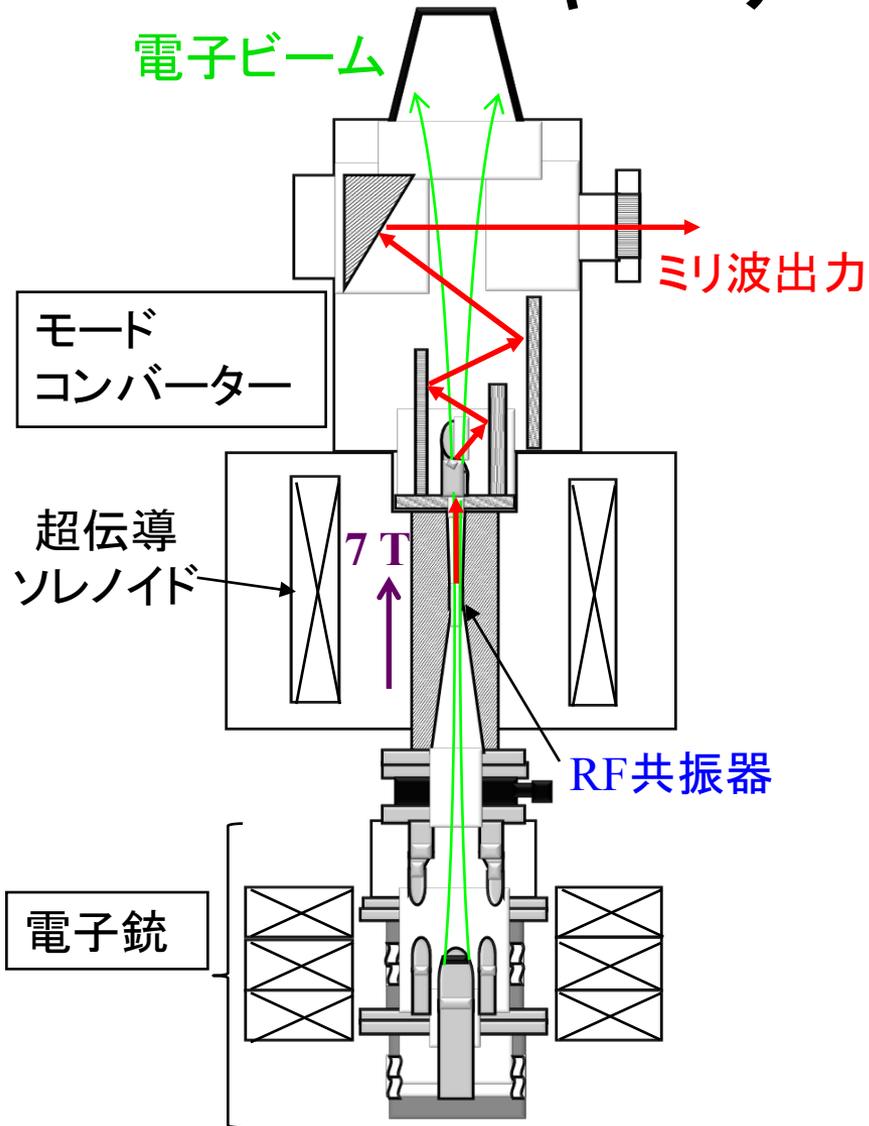
- 新しい方法で測って、白黒つけてみよう (二種類)
 1. とにかく、何も考えず**直接**測定
 2. 過去の実験の系統誤差を考慮して、**精密**に間接測定してみよう

1. ミリ波を用いた直接遷移測定



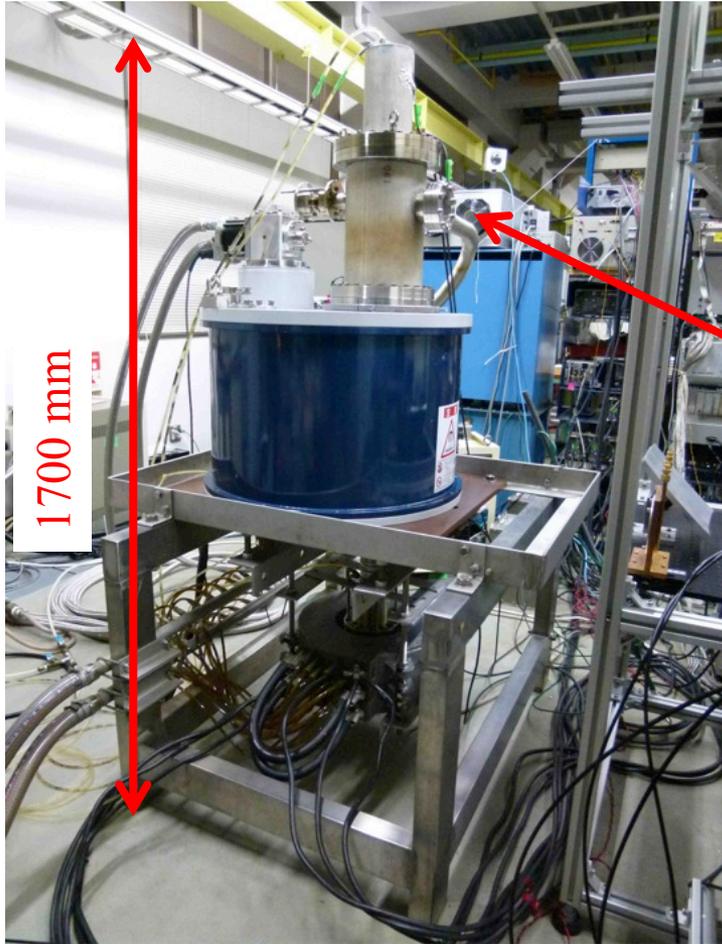
- 直接、203GHzを照射して誘導遷移する方法 (単純明快)
- ただし、これまで測定されていなかった
 - M1遷移であるため、起こりにくい (準位寿命 $3 \times 10^8 \text{ s}$)
 - ミリ波の強力な光源が存在しなかった (10kW以上のパワーが必要)

キーデバイス：ジャイロトロン

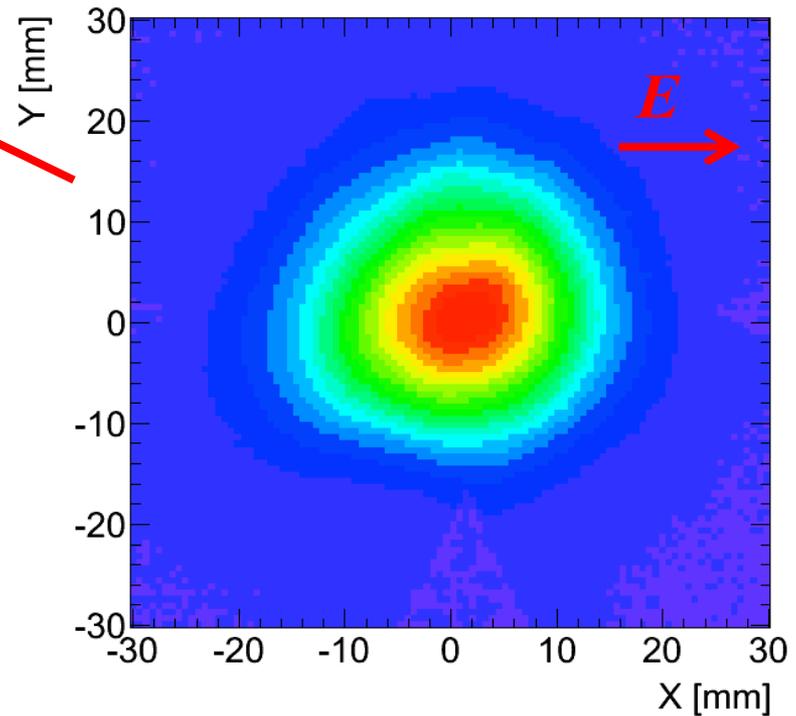


- 強磁場中での電子のサイクロトロン放射を利用した強力ミリ波発生器
- 内部のRF共振器でTEモードの発振 → 内蔵モードコンバーターでTEM₀₀モードにして出力
- 発振周波数はRF共振器のサイズを変更により変化させる
- 5Hz、duty30%でパルス運転
- 電子銃にフィードバックをかけて出力を安定化

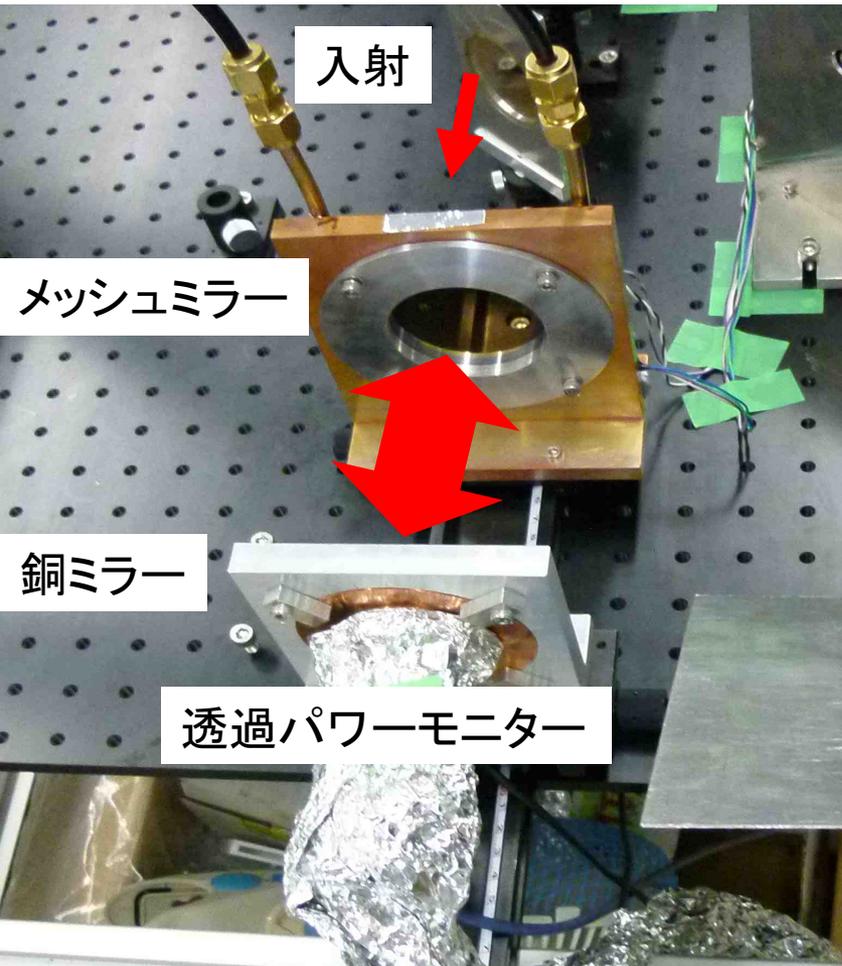
ジャイロトロン@福井大遠赤センター



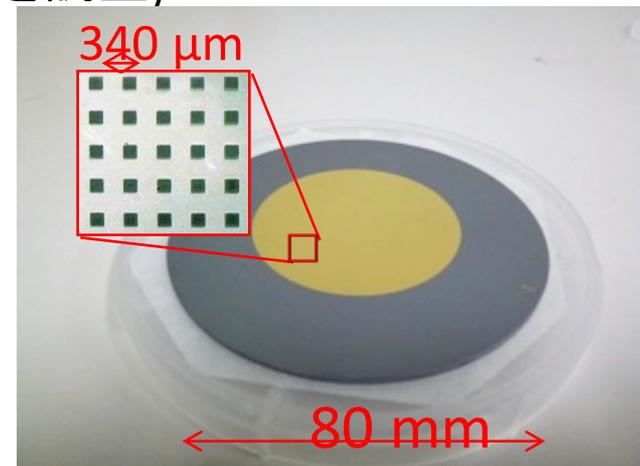
出力~100W、ガウスビーム



ファブリペロー共振器

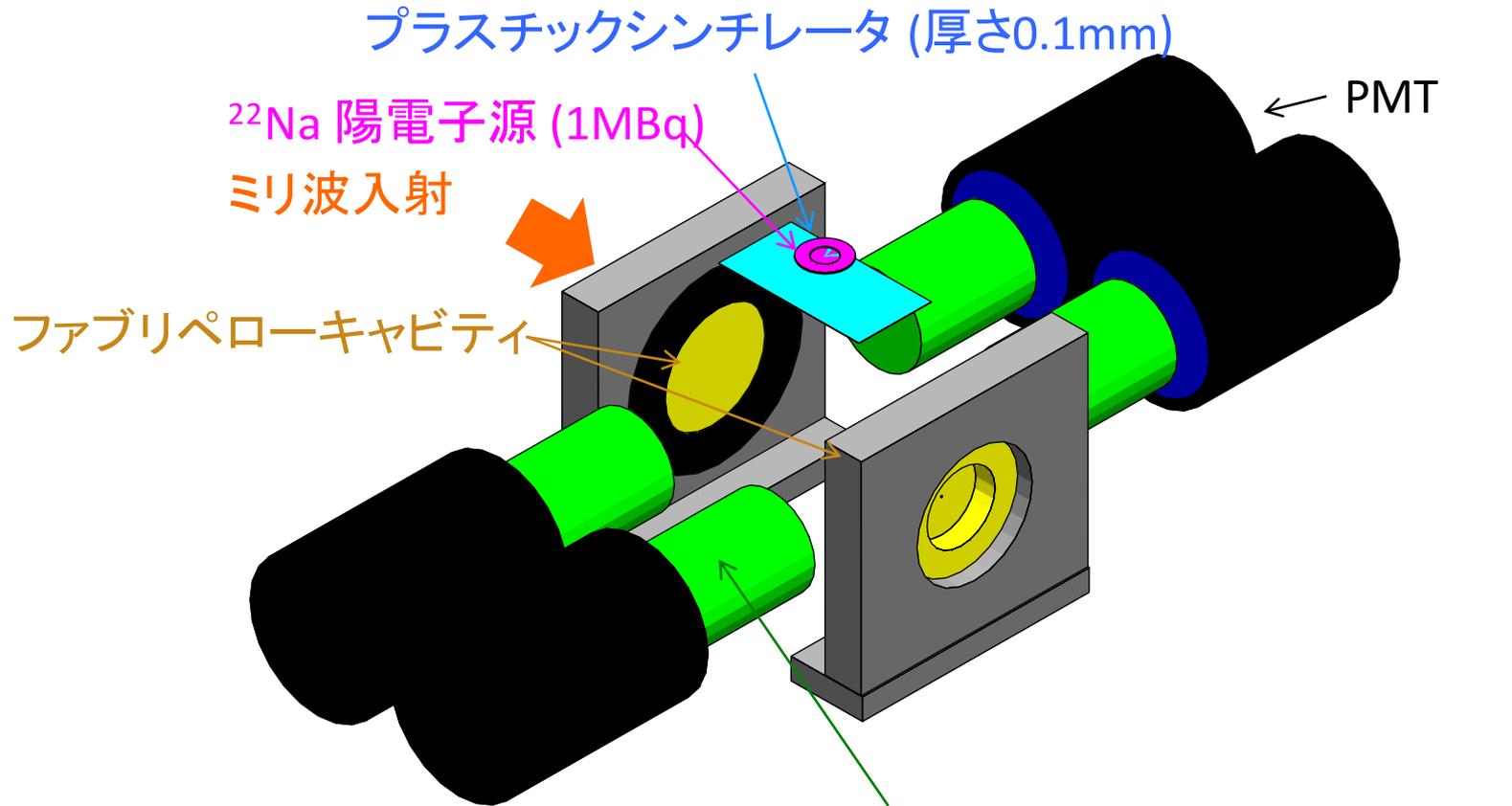


- 二枚の合わせ鏡の中にミリ波を蓄積
- 一枚はシリコン基板に金のメッシュを蒸着した鏡 (メッシュで反射率、カップリングを調整)



- ピエゾステージでミラー位置を調整して共鳴
- 実効パワーが2桁以上増加 (>20kW)

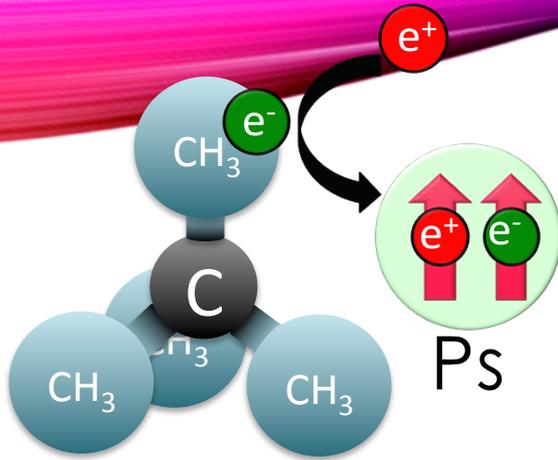
ポジトロニウム生成部



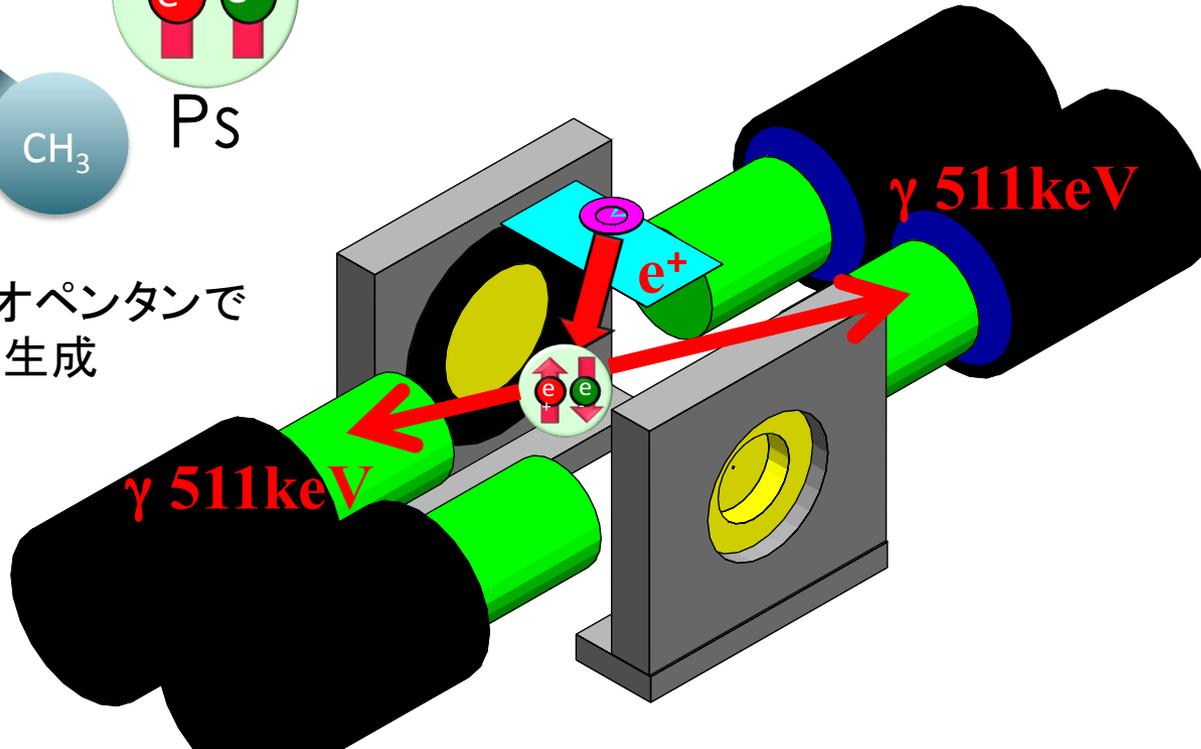
LaBr₃(Ce) シンチレータ

- 高エネルギー分解能(FWHM 4%@511keV)
- パイルアップ耐性 (decay constant = 16ns)
- 阻止能大

ポジトロニウム生成部



共振器中のネオペンタンで
ポジトロニウム生成



Na-22崩壊 → β^+ → プラスチックシンチレータでタグ
 → ネオペンタン中でo-Ps ($\tau=142\text{ns}$) → ミリ波で遷移
 → p-Ps ($\tau=125\text{ps}$) → 511keV back-to-back 崩壊

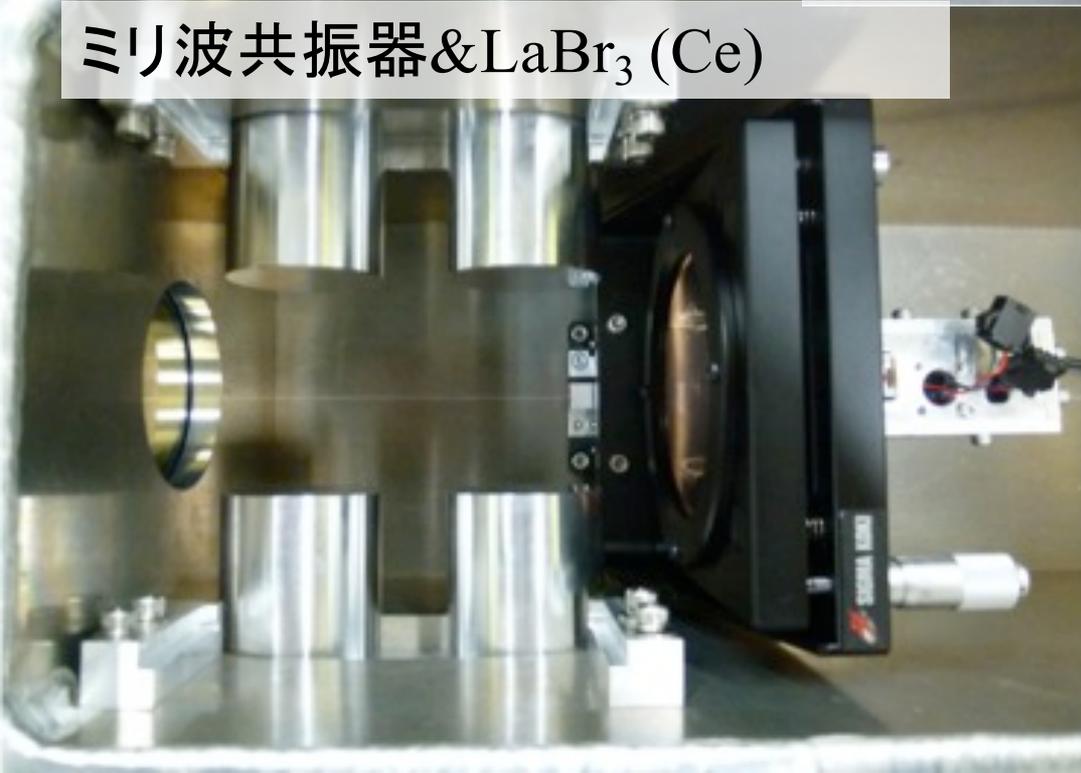
遅い511keV back-to-back シグナルを探す

実物の写真

線源 & プラシン&ライトガイド



ミリ波共振器&LaBr₃ (Ce)



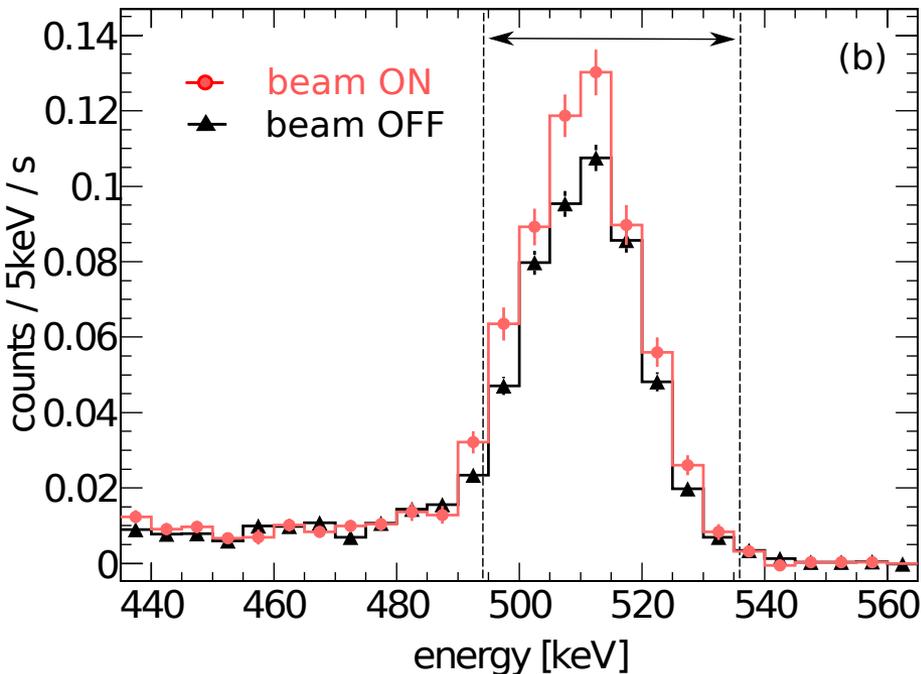
全体がネオペンタン封入チェンバー内

共振器のメッシュミラーはチェンバーの窓を兼ねている

遷移シグナル

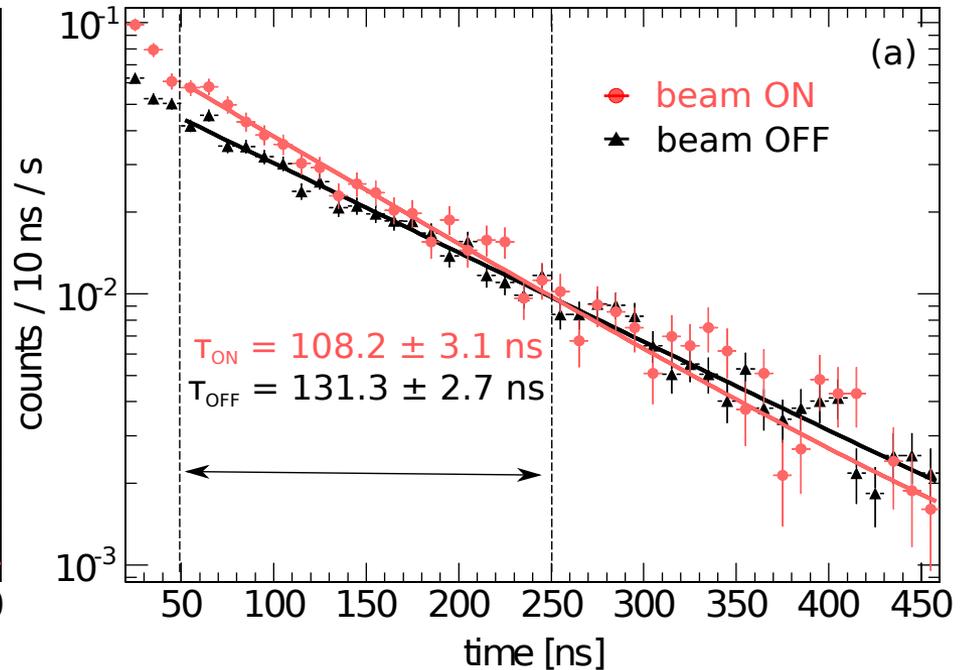
203.51 GHz, 67.4 kW 蓄積

エネルギースペクトル



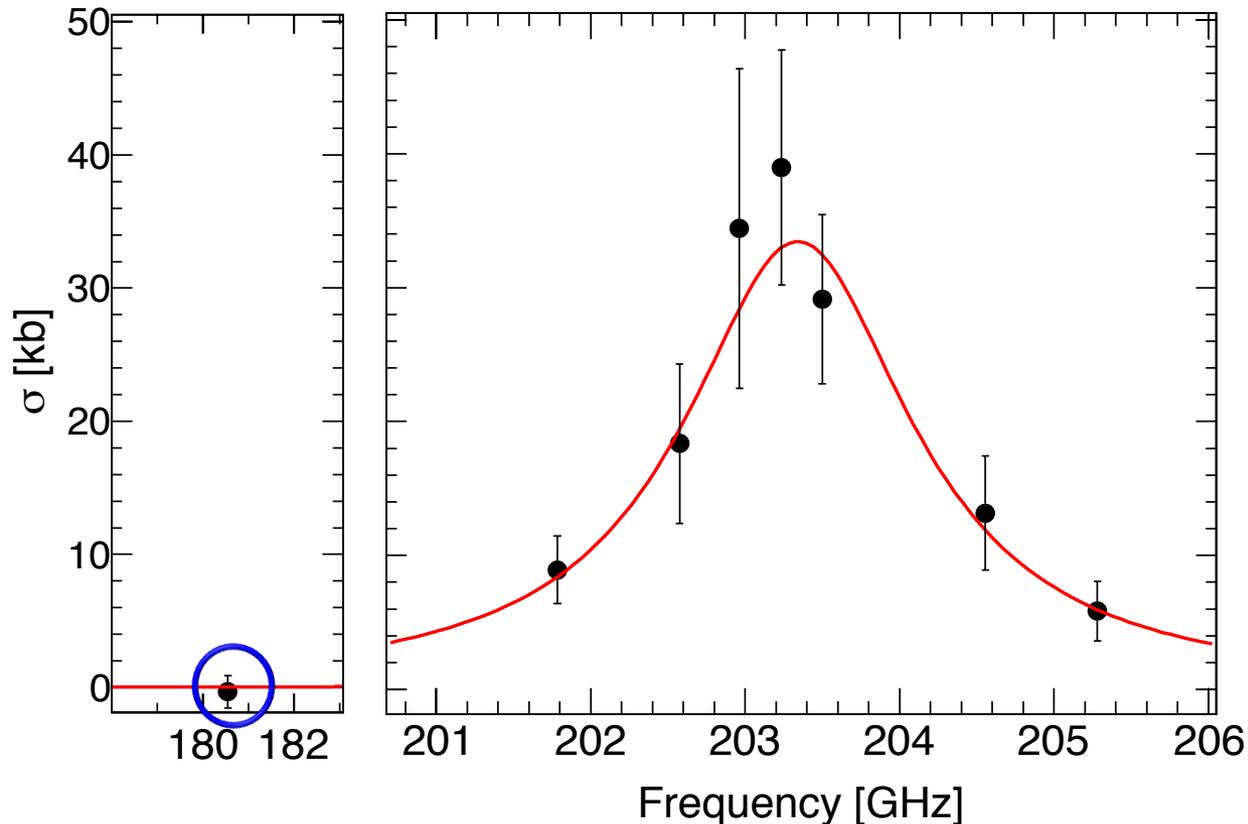
ミリ波ありで511keV増える (ON - OFF)
 93.3 ± 14.4 mHz (S/N=21%)

時間スペクトル



beam ON の寿命は、遷移のため
 短くなる

ミリ波周波数を変えて得られた共鳴カーブ

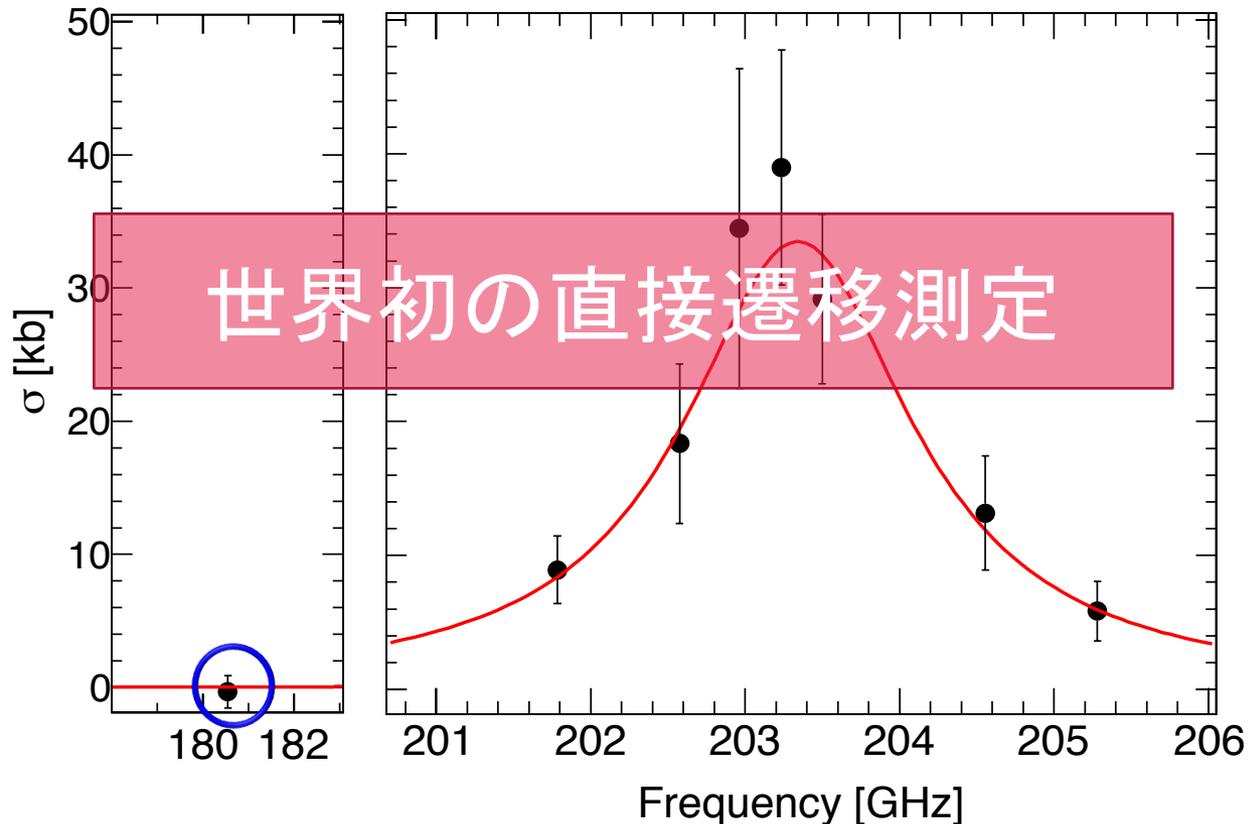


中心値から $\Delta_{\text{HFS}}^{\text{Ps}} = 203.39_{-0.14}^{+0.15} (\text{stat.}) \pm 0.11 (\text{syst.}) \text{ GHz}$

共鳴の幅から $\tau_{\text{p-Ps}} = 89_{-15}^{+18} (\text{stat.}) \pm 10 (\text{syst.}) \text{ ps}$

$\Delta_{\text{HFS}}^{\text{Ps}} (\text{QED}) = 203.391\,69(41) \text{ GHz}$ $\tau_{\text{p-Ps}} (\text{QED}) = 125.164\,7(2) \text{ ps}$

ミリ波周波数を変えて得られた共鳴カーブ



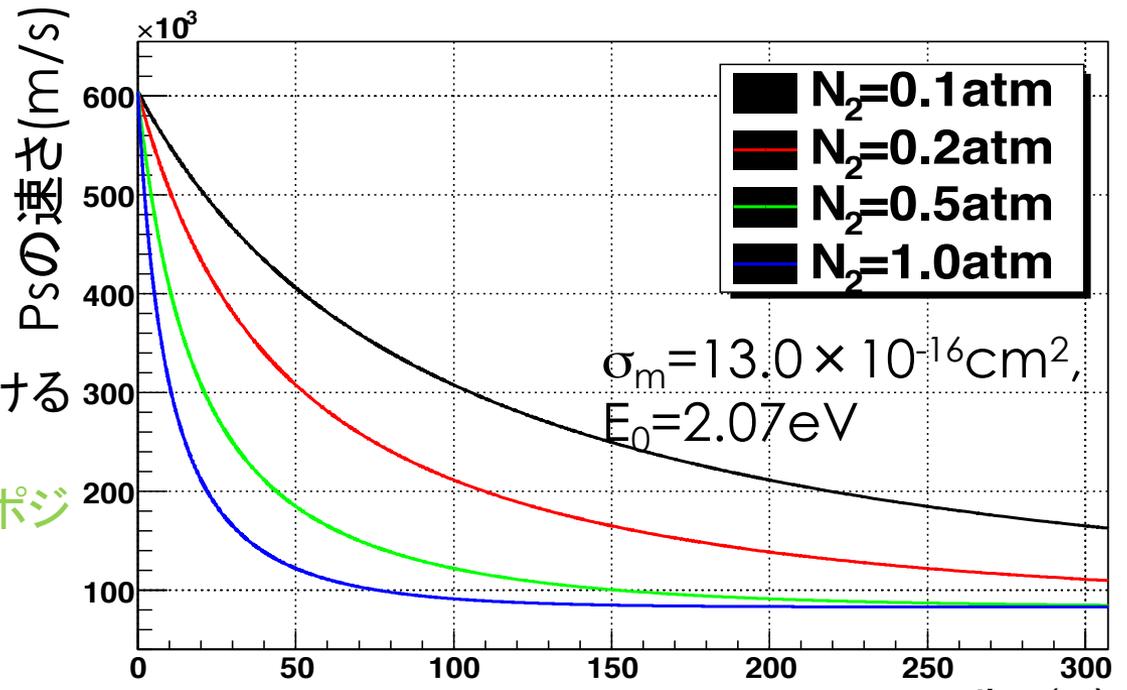
中心値から $\Delta_{\text{HFS}}^{\text{Ps}} = 203.39_{-0.14}^{+0.15} (\text{stat.}) \pm 0.11 (\text{syst.}) \text{ GHz}$

共鳴の幅から $\tau_{\text{p-Ps}} = 89_{-15}^{+18} (\text{stat.}) \pm 10 (\text{syst.}) \text{ ps}$

$\Delta_{\text{HFS}}^{\text{Ps}} (\text{QED}) = 203.391\,69(41) \text{ GHz}$ $\tau_{\text{p-Ps}} (\text{QED}) = 125.164\,7(2) \text{ ps}$

2. 時間情報を取り入れた間接測定

- 過去の測定のアヤシイところをまじめにやってみよう
 - 大型超伝導磁石による均一な磁場 (ボア径 80cm、補正コイルで1.5ppmの精度)
 - 時間情報と物質の熱化パラメータを利用した物質効果の評価



HFSはシュタルク効果の影響を受ける

シュタルク効果は、物質の密度とポジトロニウムの速さに依存する
 =生成からの時間に依存

Ps 形成からの時間 (ns)

間接測定の方法

静磁場中では、**p-Ps** は **o-Ps** の $m_z=0$ 成分と混合する。(2 γ 崩壊).

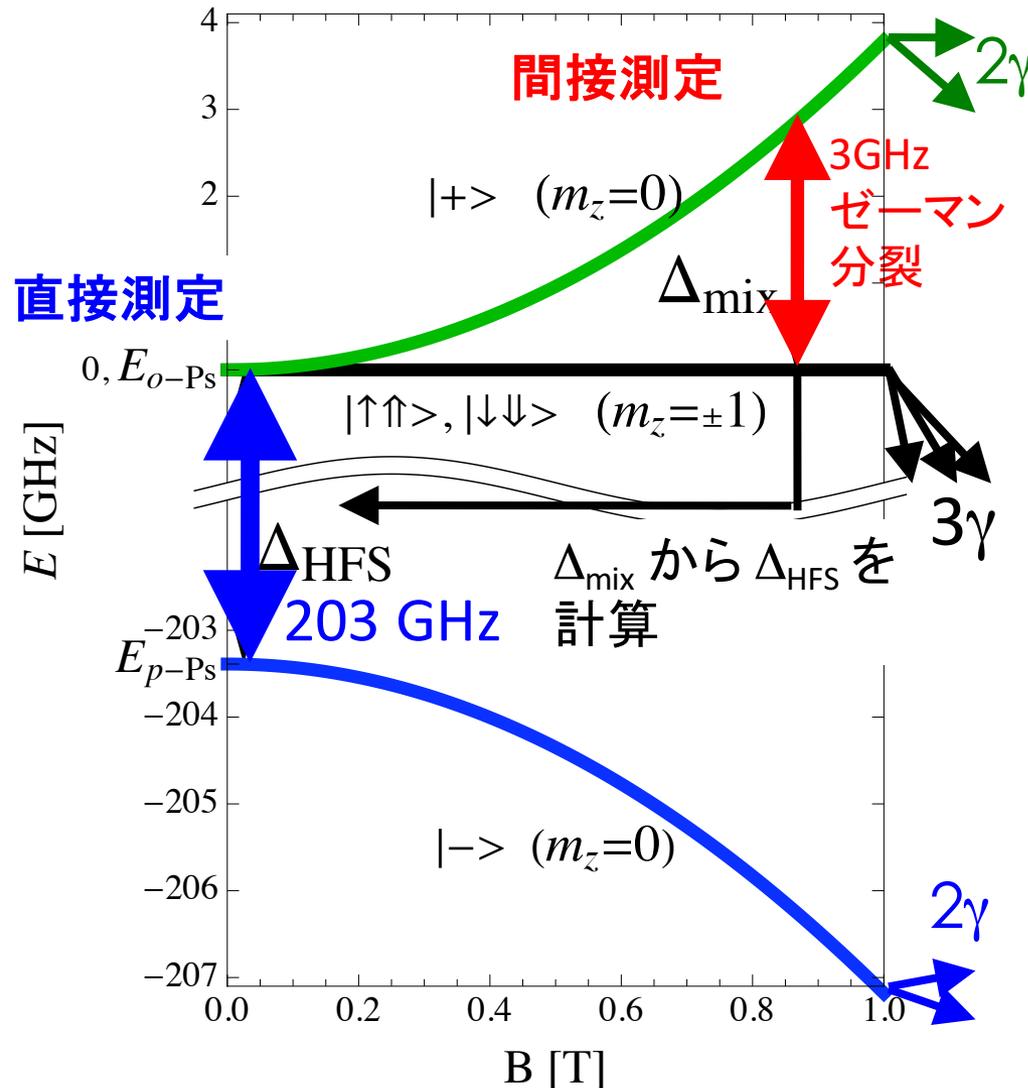
ゼーマン遷移させると、2 γ 崩壊(511 keV 単色) 率が大きくなる。

この崩壊率の変化が、実験のシグナルになる。

Δ_{mix} を精密に測定し、 Δ_{HFS} を求める。

$$\Delta_{mix} = \frac{1}{2} \Delta_{HFS} \left(\sqrt{1 + 4x^2} - 1 \right),$$

$$x = \frac{g' \mu_B B}{\Delta_{HFS}}.$$



実験の概念図

RF 発振器 + GaN アンプ

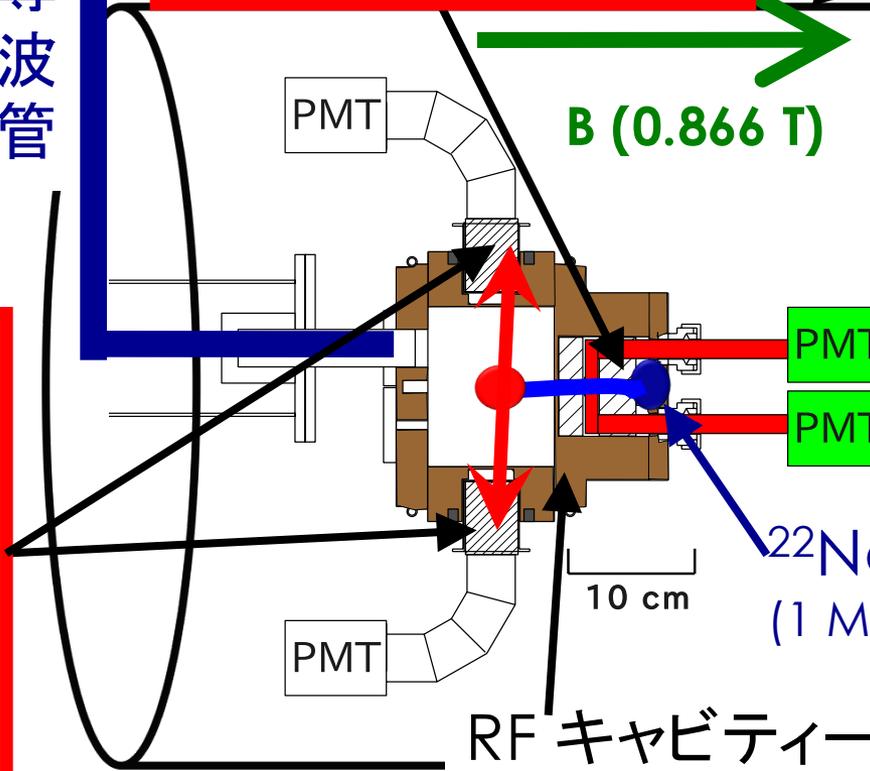
高強度 2.86Ghz RF (500W 連続)

導波管

β タグ系を用いて
時間情報を取得
(Psの熱化による系統誤差を解決)

大型超伝導磁石 + 補償コイル
(磁場の非一様性による系統誤差を解決)

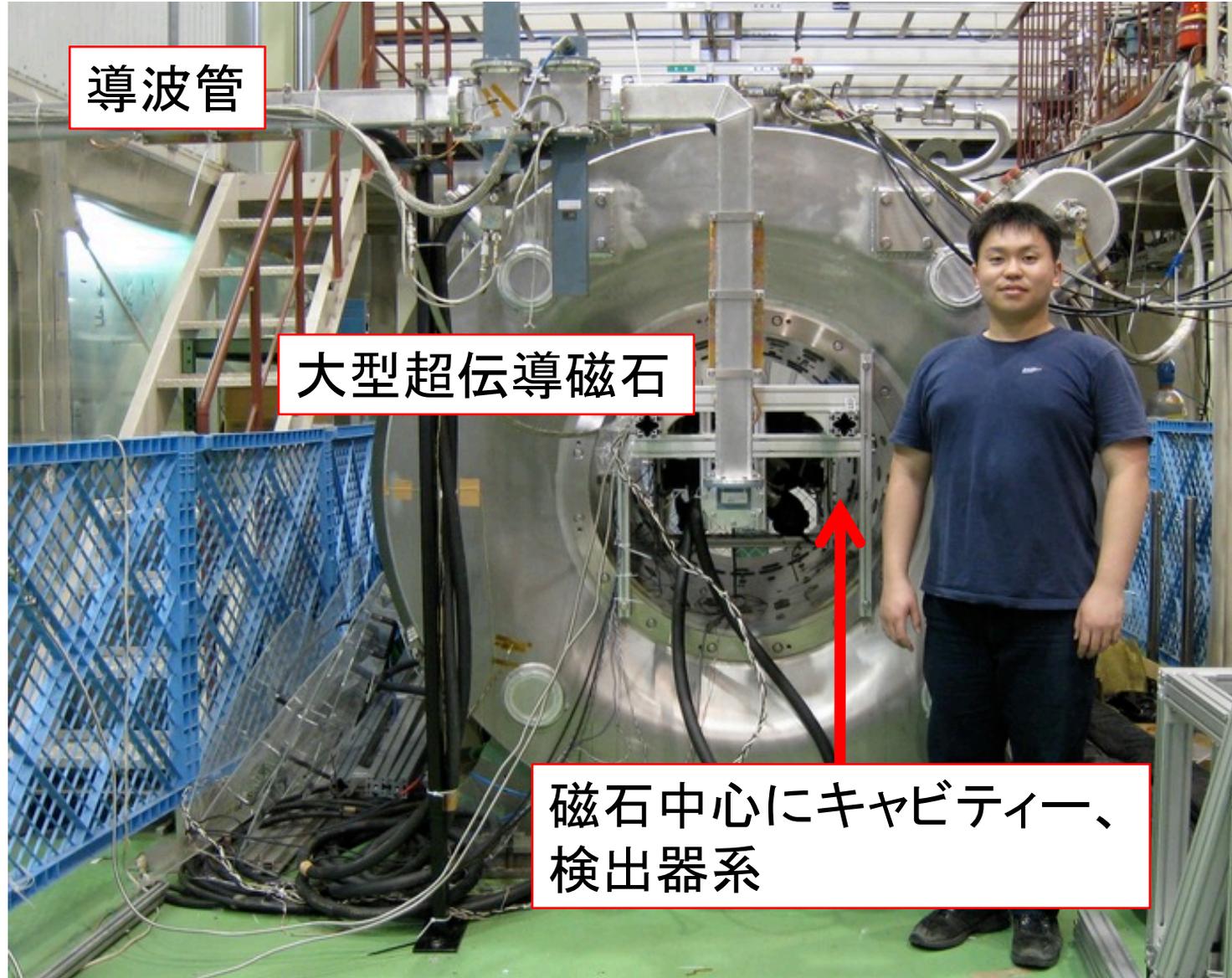
高性能 γ 線検出器
6個のLaBr₃(Ce)シンチレータを使用
(Psの熱化による系統誤差を解決)



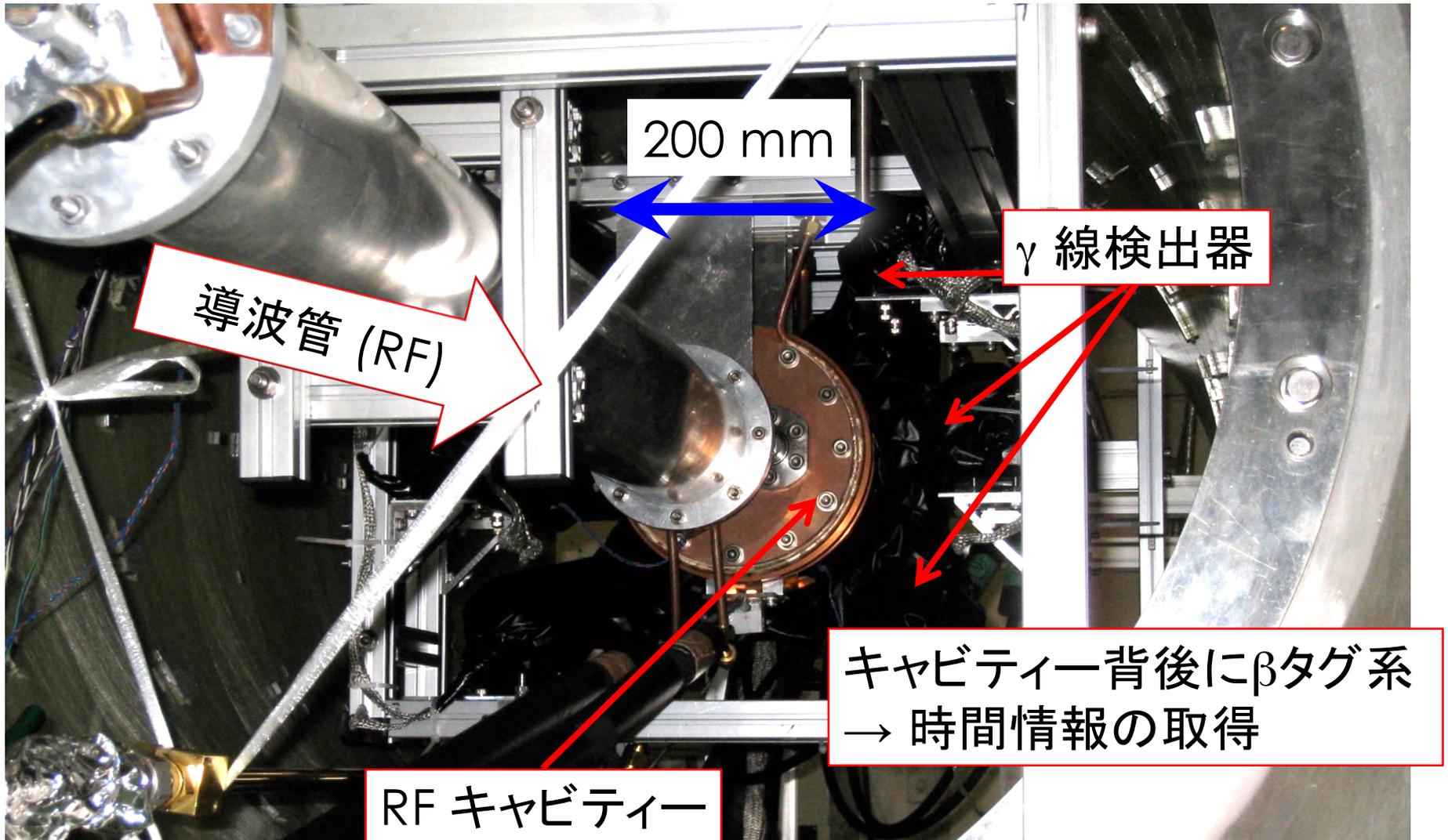
ppm level の一様性、安定性

RF キャビティ (Q~13000)
(純 $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ を封入)

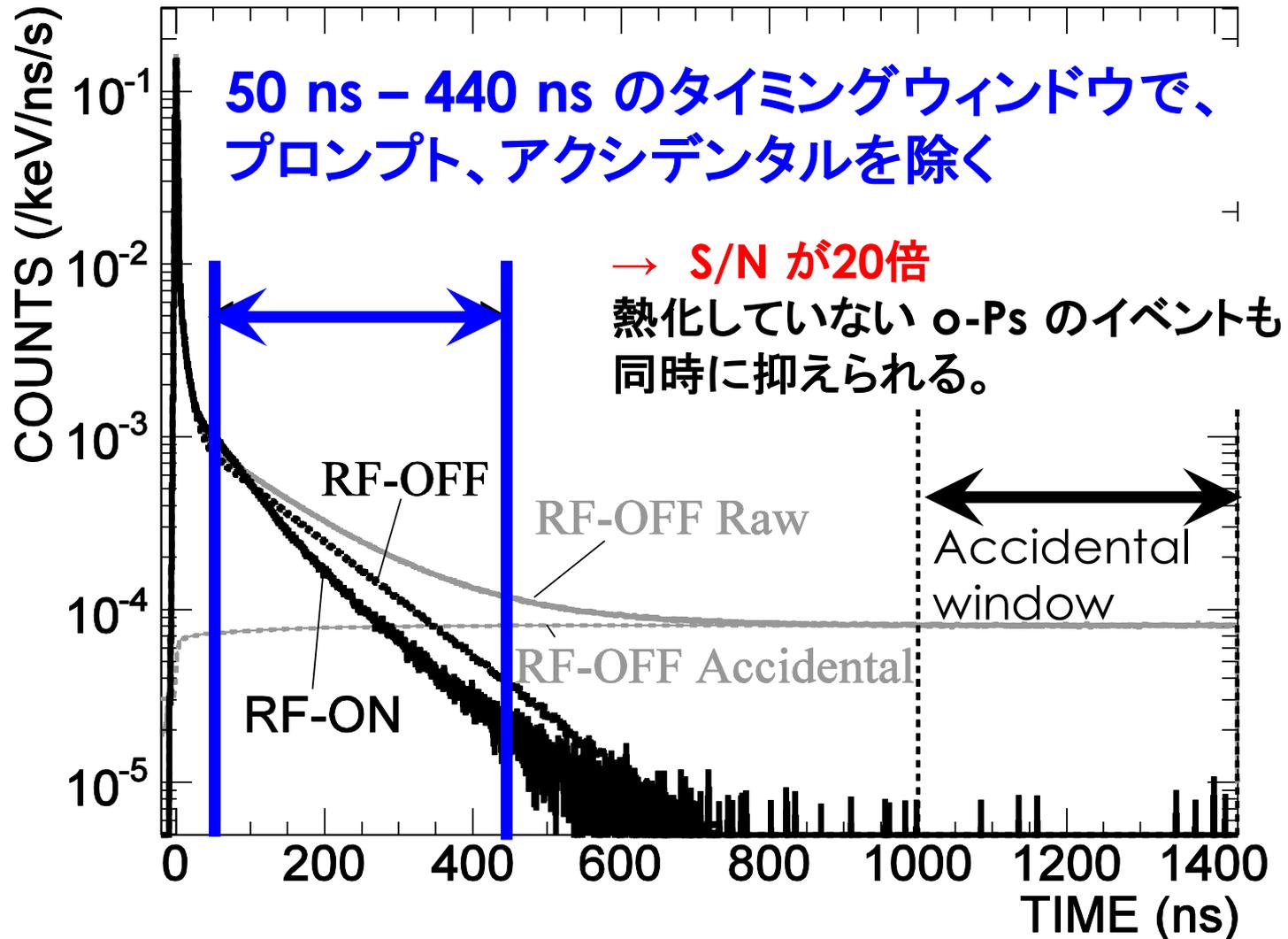
測定 @ KEK低温棟 平成22年7月～平成25年3月14日



磁石の中身

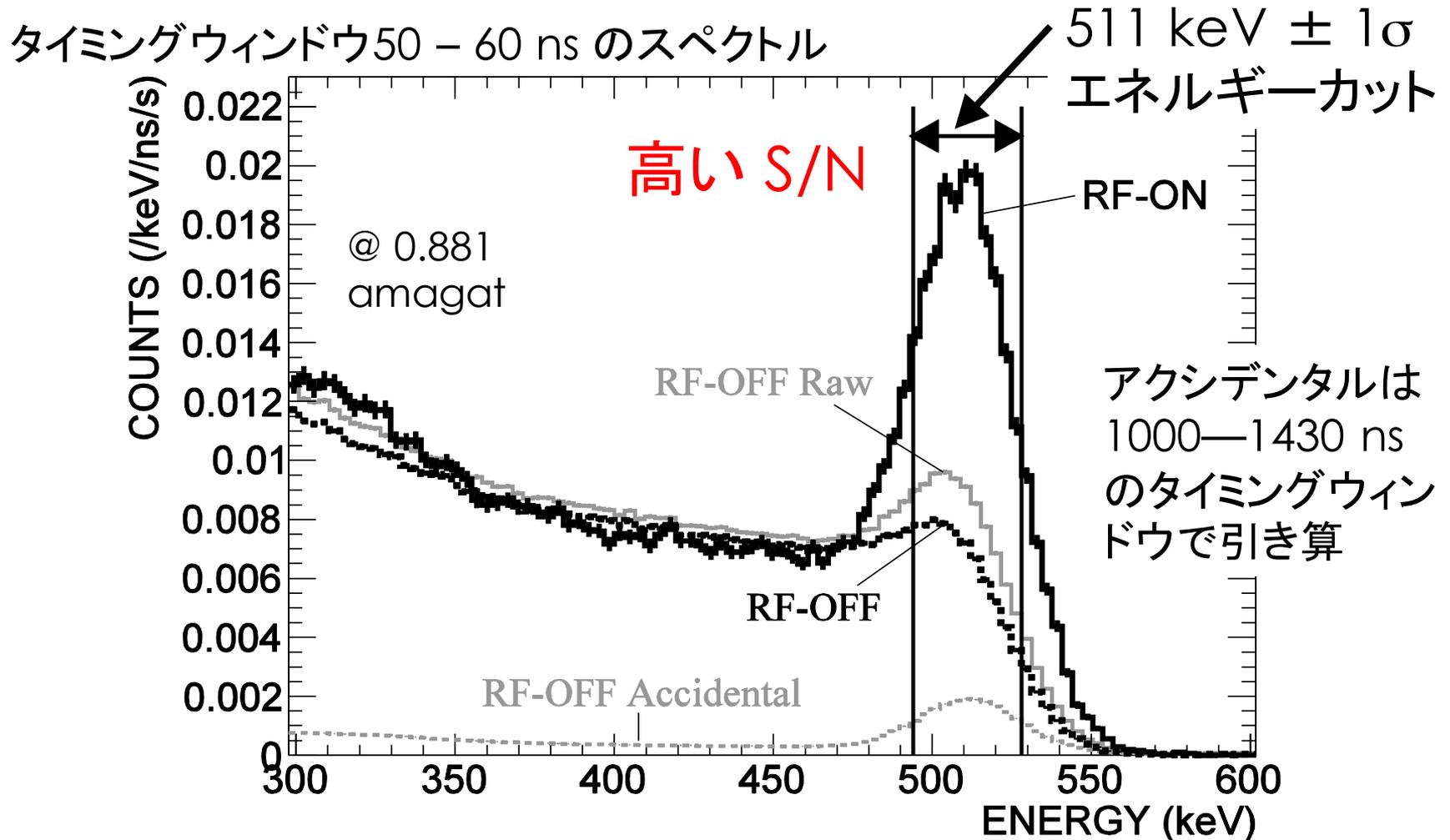


時間スペクトル

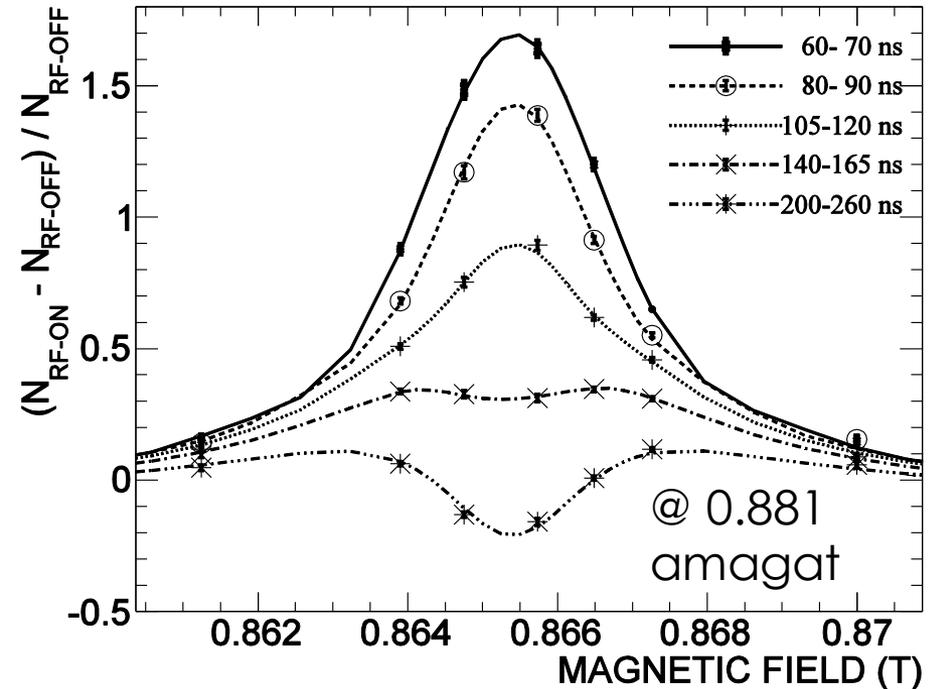
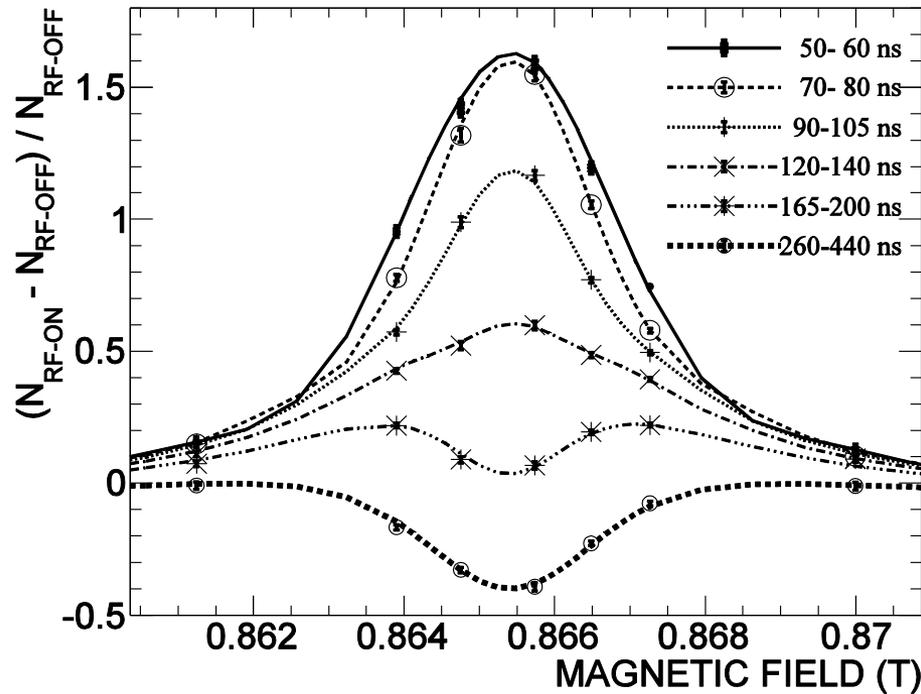


@ 0.881
 amagat

エネルギースペクトル



- RF の周波数、パワーを固定して、**磁場でスキャン**
- 50—440 ns を、11個のタイミングウィンドウに分け、11ガス圧・全磁場点・全タイミングウィンドウを理論式で同時フィット
- 熱化により、 Δ_{HFS} 及び pick-off 崩壊率が時々刻々変化 ($\propto nv^{3/5}$) する効果も入れた。



$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.394 \text{ 1(16) GHz (8.0 ppm)} \quad \chi^2/\text{ndf} = 632.6 / 592 \quad (p = 0.12)$$

系統誤差

系統誤差の要因

大きさ
(ppm)

物質の効果

o-Ps の pick-off rate

3.8

ガス密度

1.0

ポジトロニウムの熱化

1.0

磁場

非一様性

3.0

補正と再現性

1.0

NMR による磁場測定

1.0

RF

RF パワー

0.8

RF キャビティの Q_L 値

1.1

RF 周波数

1.0

Quadrature sum

5.4

統計誤差 8.0 ppm と合わせて、

$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.394 \text{ 1(20) GHz (9.7 ppm).}$$

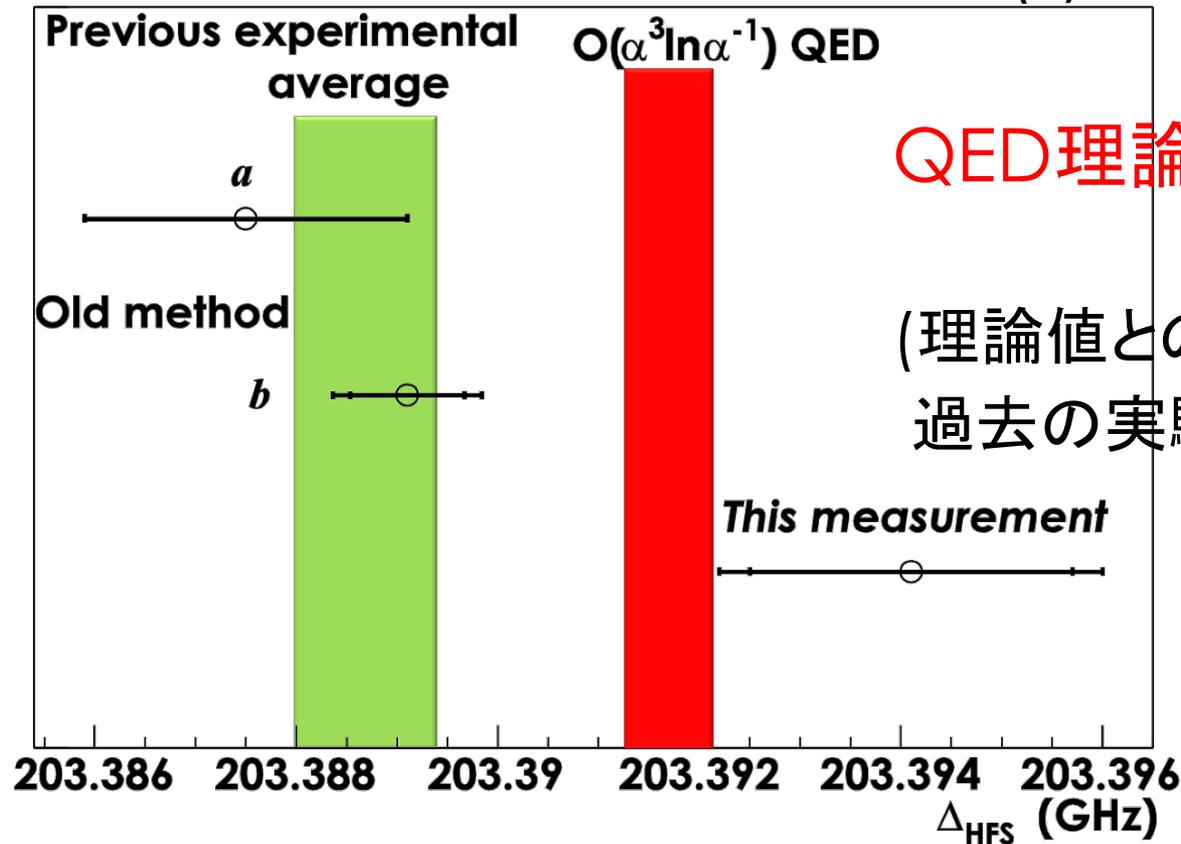
結果

本測定で得られた、

熱化していない Ps の効果を入れた超微細構造の結果

$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.394\ 1 \pm 0.001\ 6 \text{ (stat., 8.0 ppm)}$$

$$\pm 0.001\ 1 \text{ (sys., 5.4 ppm) GHz}$$



QED理論値を favor

(理論値との差: 1.2σ ,
過去の実験値との差: 2.7σ)

今後

- ミリ波による直接遷移
 - 測定精度: ミリ波のパワーモニターの開発
 - 新しい物理へのトリガー
- 間接測定は、精度の追求
 - 真空中でのポジトロニウム生成が鍵
 - 物質の効果の系統誤差がなくなる
 - 外挿するための大量の統計データが不要になる

まとめ

- ポジトロニウムはそのシンプルさ故に、未知の素粒子物理現象の探索に有用である
- 理論値と測定値の間にズレのあったポジトロニウムの超微細構造を二種類の新しい方法で測定した
- ジャイロトロンを使用し、ミリ波による直接遷移を世界で初めて観測した
- 時間情報を取り入れ、物質の効果を正しく取り扱った間接測定で、理論計算値をfavorする結果を得た
- 今後、真空中での測定で精度を高めることを予定している

Phys. Rev. Lett. 108(2012)253401
PTEP (2012)04D003
Phys. Lett. B 734(2014)338
PTEP (2015)011C01
Jour. of Phys. B 49(2016)064008