

# ゼーマン効果を用いた ポジトロニウム超微細構造の 精密測定

石田 明  
東京大学

第16回素粒子物理国際研究センターシンポジウム  
平成22年2月15日 於白馬

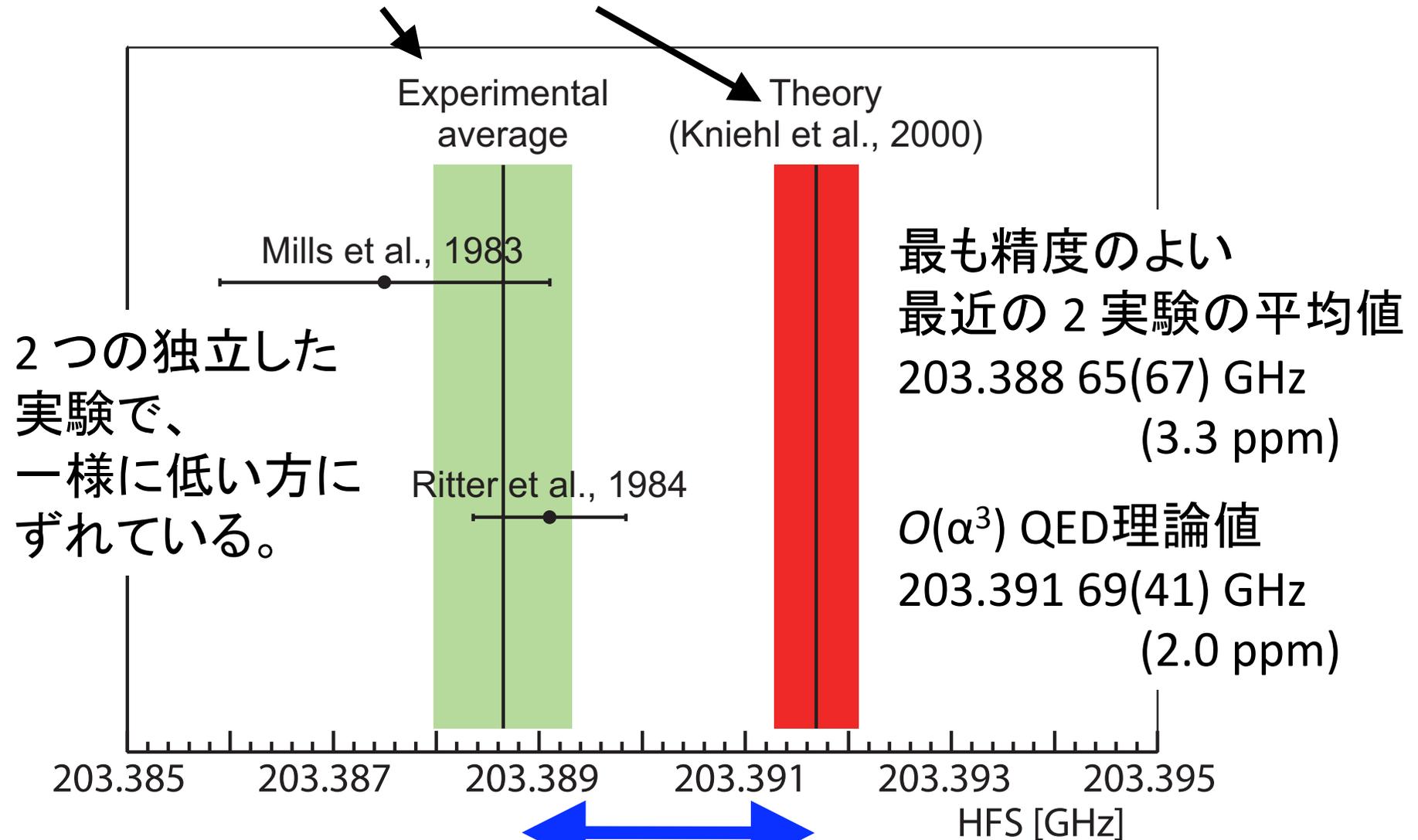
# Ps HFS 測定

- 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、漆崎裕一
  - ブルガリア科学アカデミー
    - S. Sabchevski
- } 203 GHz  
直接遷移実験

# 目次

- インTRODクシヨン
- 我々の新しい実験セツトアツプ
- プロトタイプ測定とその結果
- 今後の展望

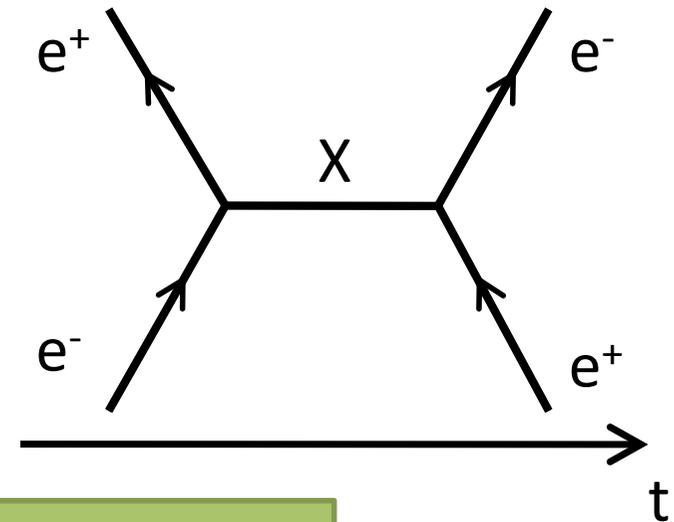
# ポジトロニウムの超微細構造(HFS)は、 実験と理論でずれている



15 ppm (3.9  $\sigma$ ) のずれ

# 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、2000年代に入ってから
- 過去の測定に共通の間違ひがある
  - 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-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

# ゼーマン効果を用いた間接測定の方法

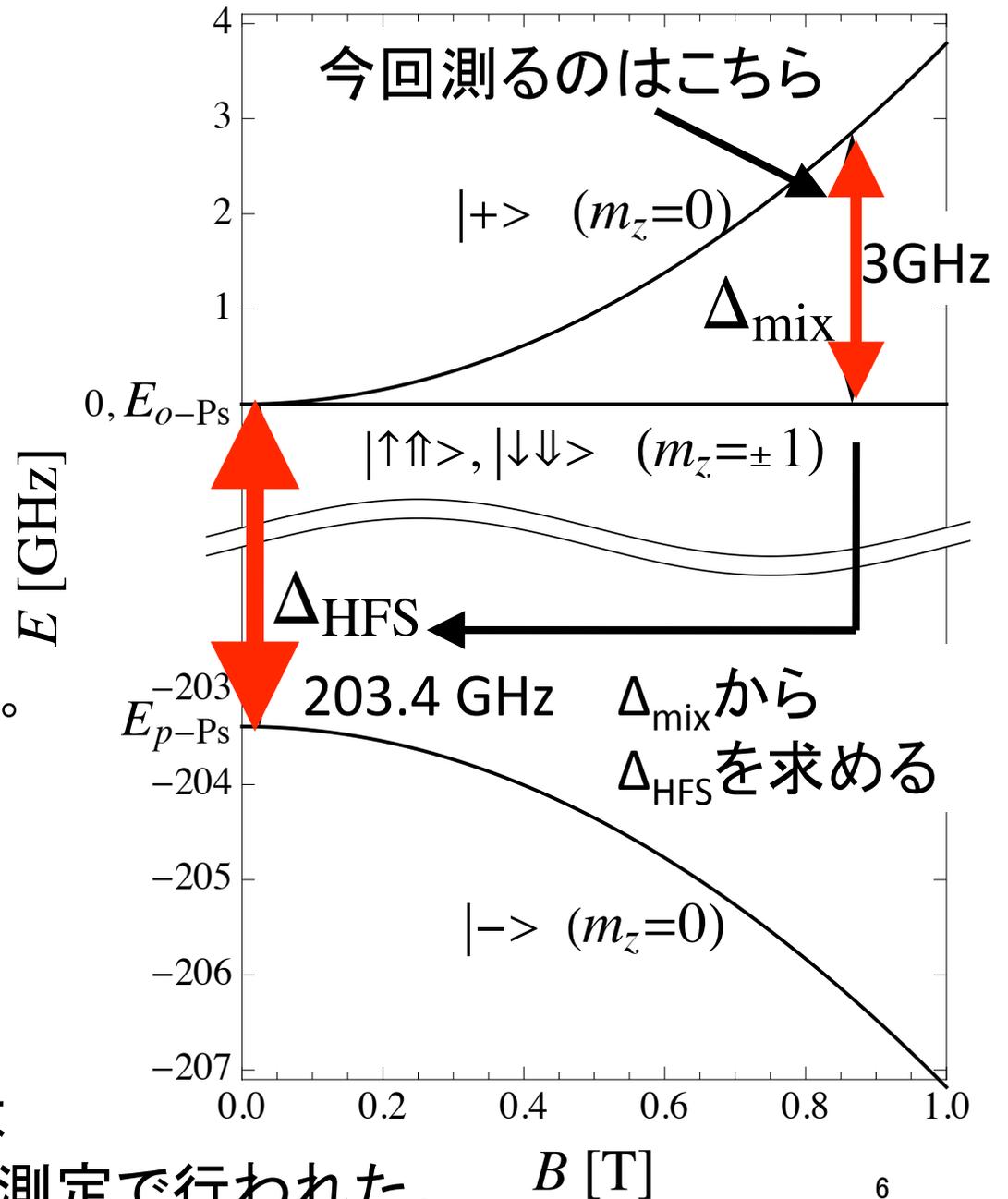
磁場をかけると、  
o-Psの( $S=1, m_z=0$ )と  
p-Ps( $S=0, m_z=0$ )が混合し  
エネルギー準位が分裂  
(ゼーマン効果)

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

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

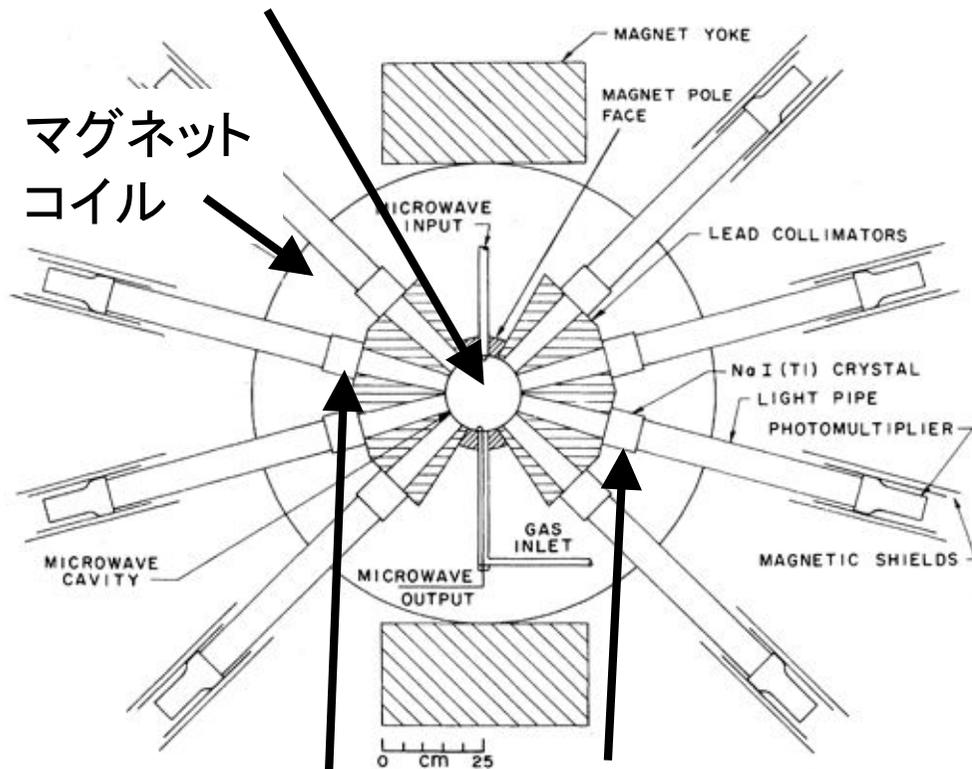
$$x = \frac{g' \mu_B B}{h \Delta_{HFS}}$$

から $\Delta_{HFS}$ を求める。  
 $\rightarrow$  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、考えられる系統誤差

RFキャビティにガスを入れて  
 $\beta^+$ 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)

## 系統誤差1. 磁場の非一様性

磁場の不定性がそのまま  
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。

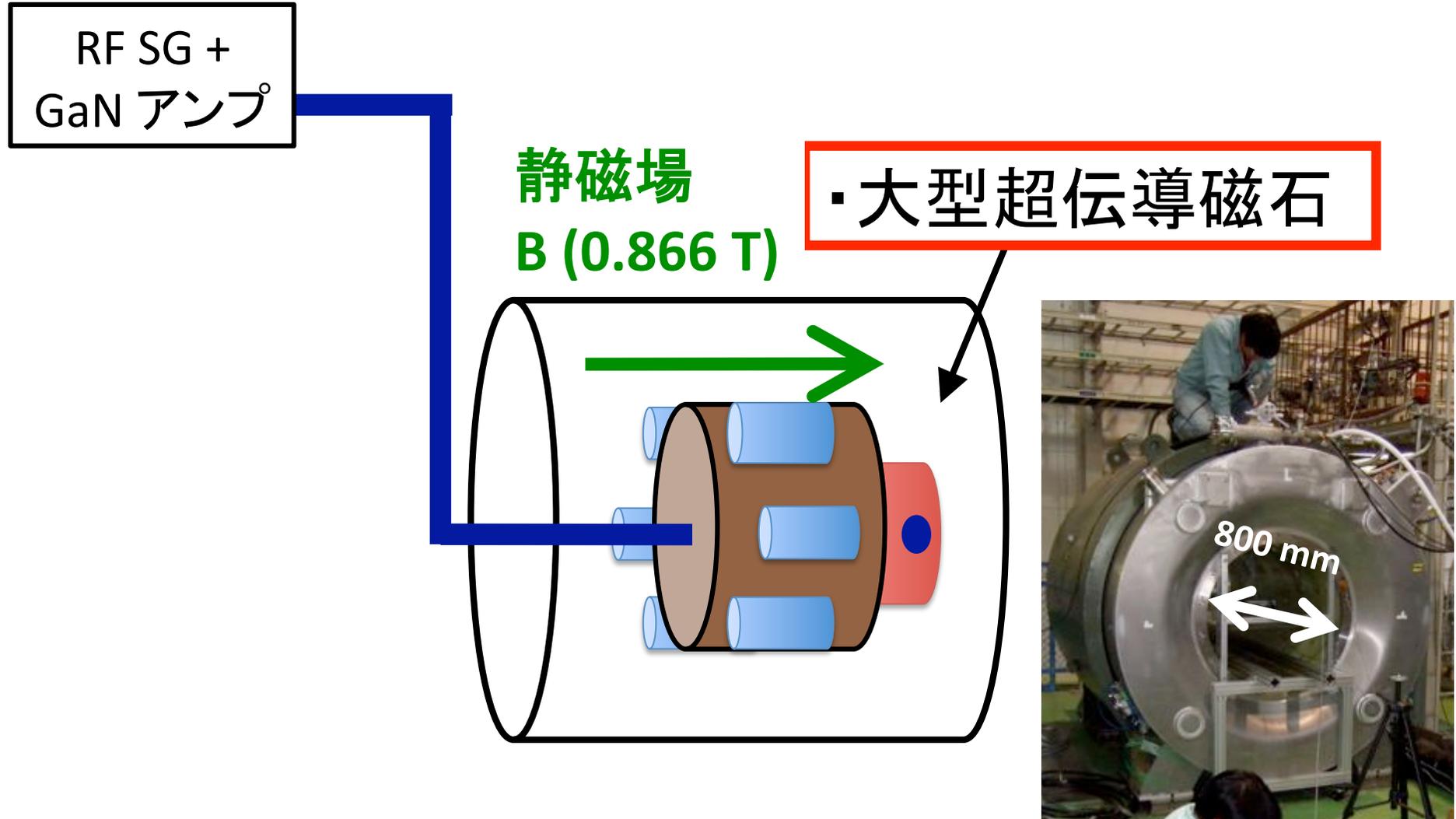
## 系統誤差2. 物質の効果

ポジトロニウム生成には、物質  
(ここではガス)が必要不可欠だが、  
物質は、HFSの値をずらしてしまう。

過去の実験では、物質の効果  
の評価が、十分でなかった可能性  
がある。

# 我々の新しいセットアップ

測定の実理は過去と同じ(ゼーマン効果を使った間接測定)だが、過去の問題点(磁場の非一様性、物質の効果)を解決するため新しい方法を用いる。

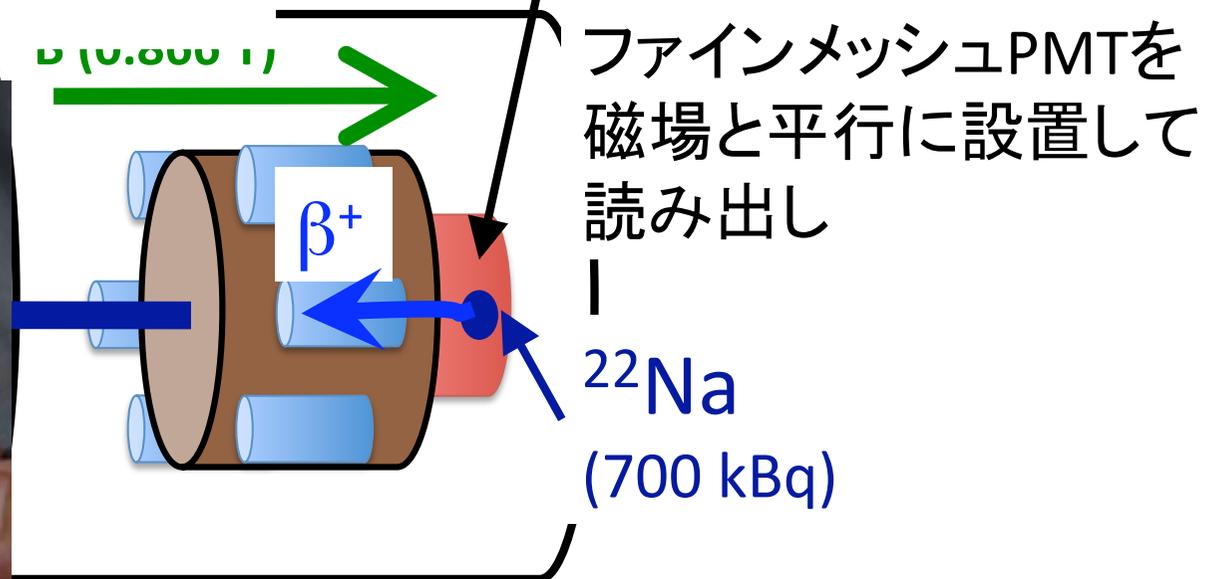
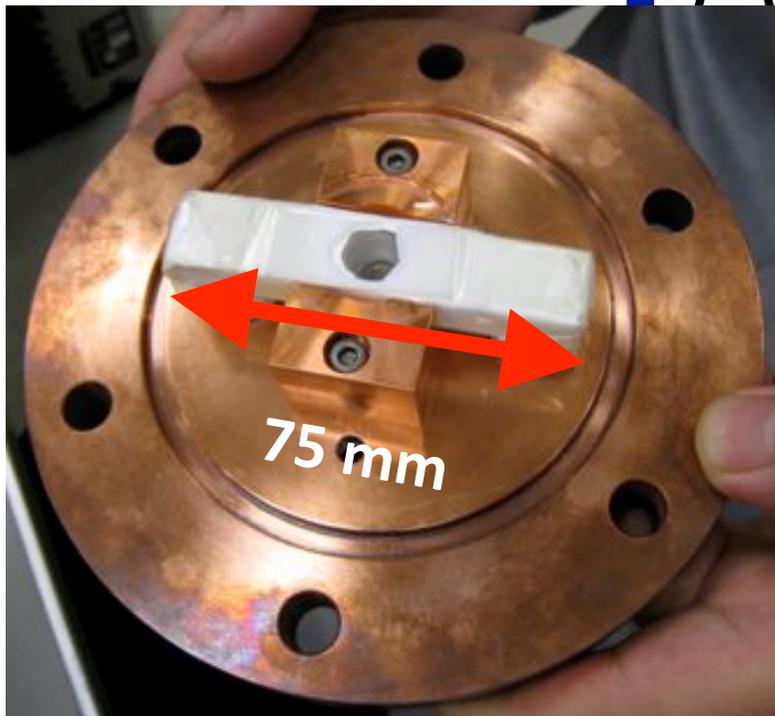


# 我々の新しいセットアップ

過去の問題点(磁場の非一様性、物質の効果)を解決するため新しい方法を用いる。

## ・βタグ系と時間情報の取得

- (1) プロンプイベントを抑制
- (2) ポジトロニウム熱化関数を直接測定



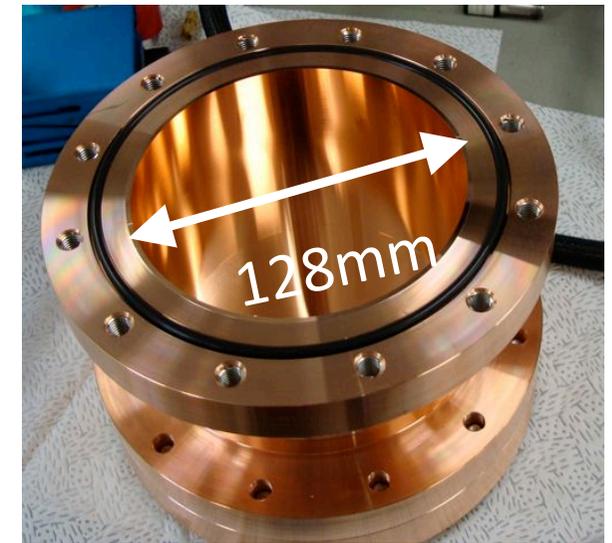
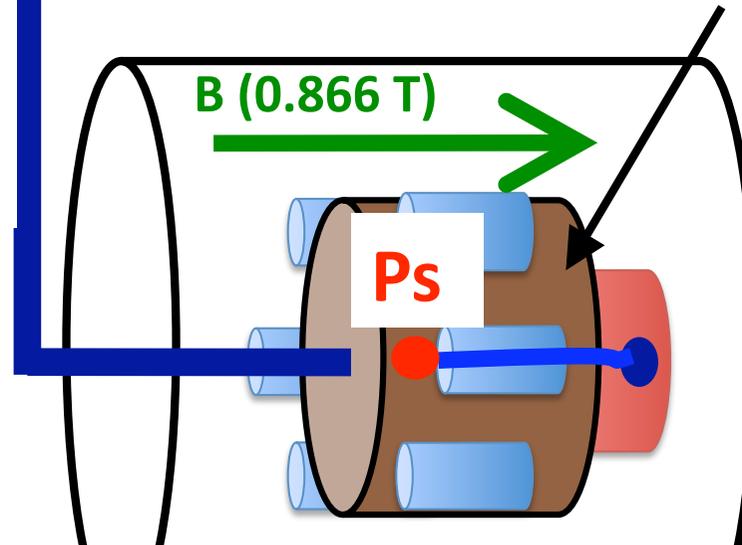
# 我々の新しいセットアップ

過去の問題点(磁場の非一様性、物質の効果)を解決するため新しい方法を用いる。

RF SG +  
GaN アンプ  
2.9 GHz  
500 W CW

導波管

RFキャビティー  
TM<sub>110</sub> モード,  $Q_L=14700$   
混合ガスを充填  
(90 % N<sub>2</sub> + 10 % iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)



ポジトロニウムは、キャビティー中の混合ガスによって生成。  
イソブタン (クエンチング・ガス)によって、低速陽電子からのバックグラウンドを抑える。

ガス圧 1.5 atm (1.350 1(71) amagat), 1.0 atm (0.891 6(23) amagat)で測定。

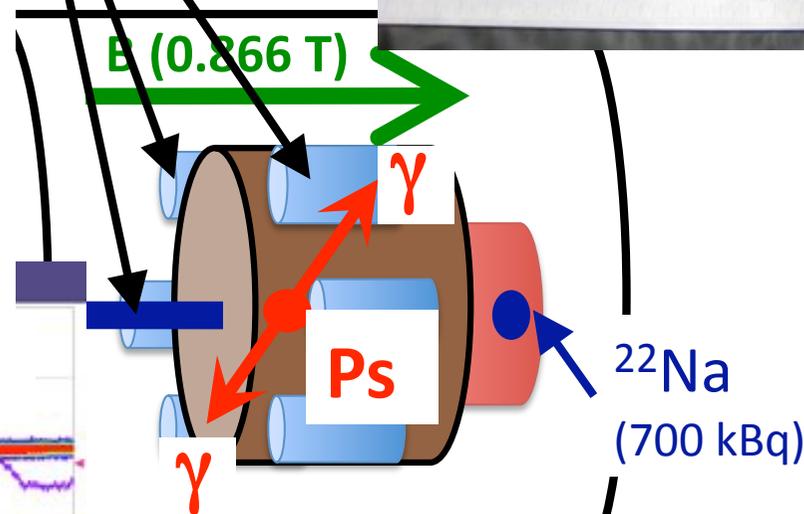
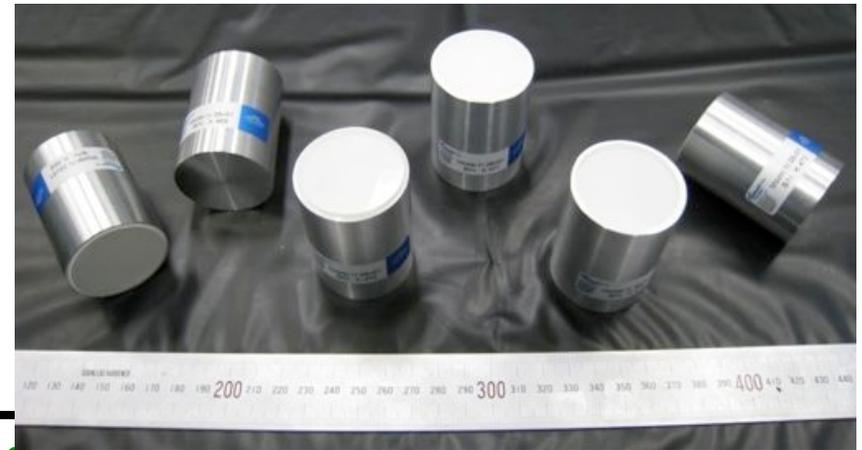
# 我々の新しいセットアップ

過去の問題点(磁場の非一様性、物質の効果)を解決するため新しい方法を用いる。

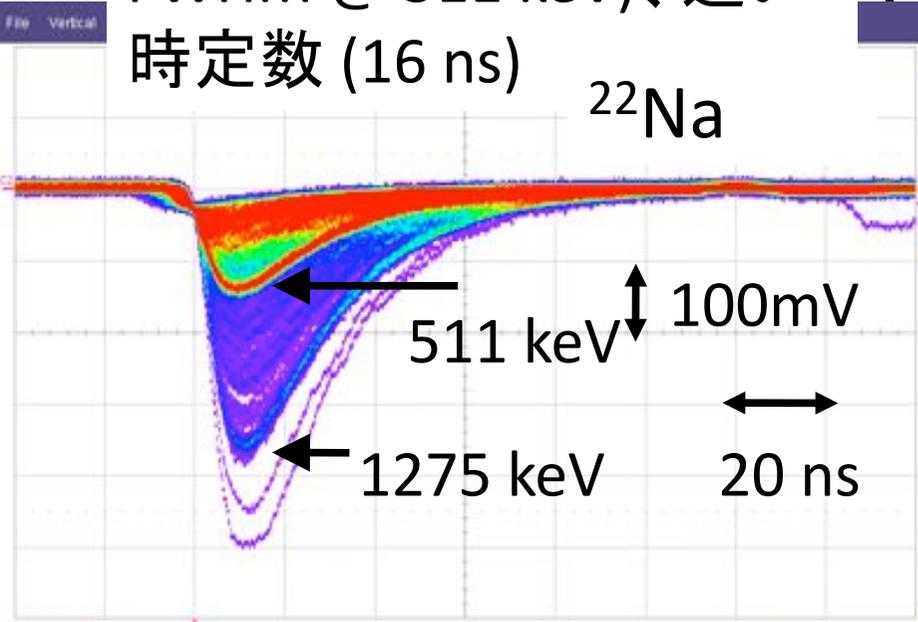
## ・高性能 $\gamma$ 線検出器

-LaBr<sub>3</sub>(Ce) シンチレータを  
6個使用

-高いエネルギー分解能  
(4% FWHM @ 511 keV)、  
高い時間分解能 (200 ps  
FWHM @ 511 keV)、速い  
時定数 (16 ns)

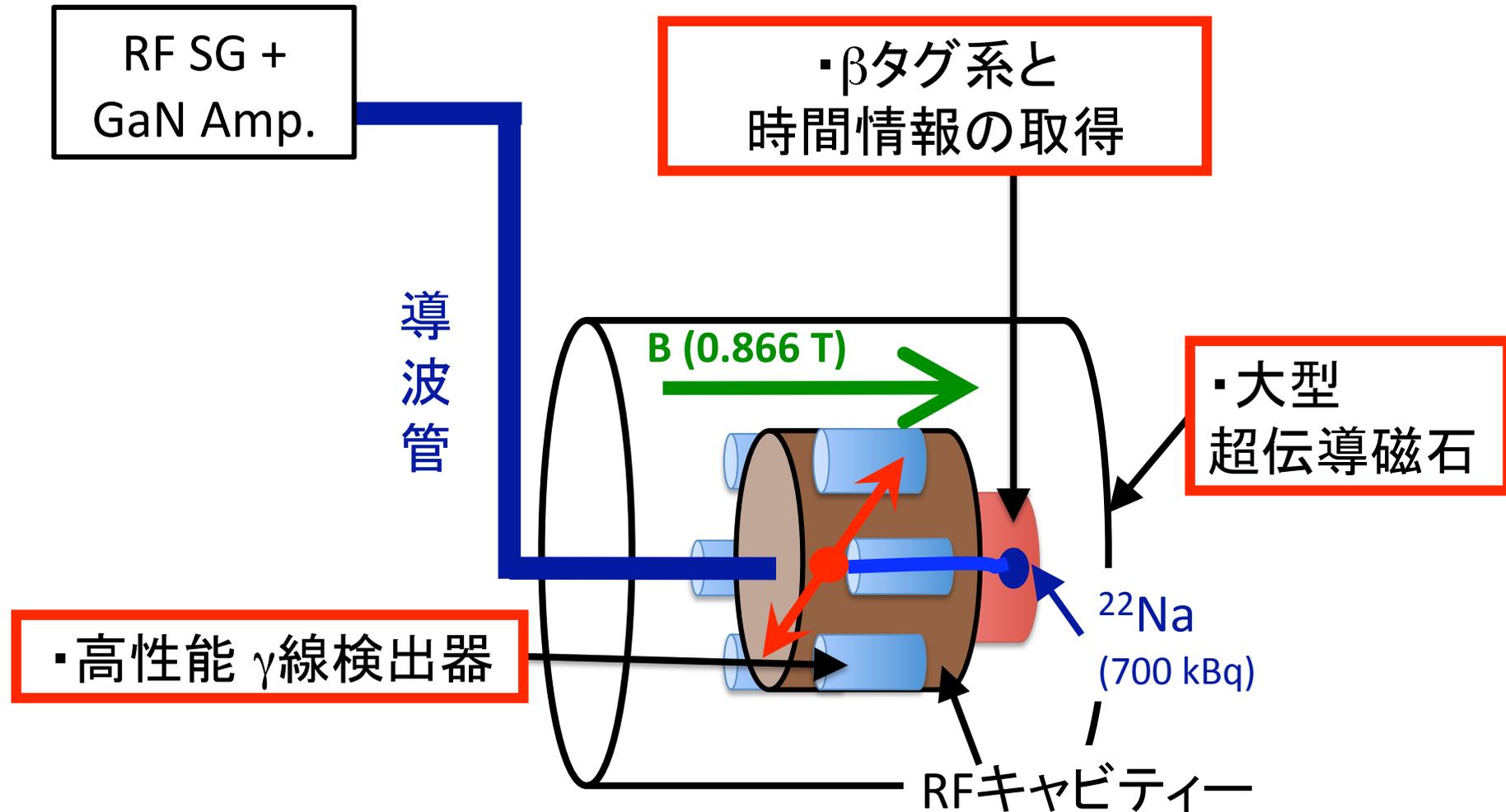


ファインメッシュPMTを  
磁場と平行に設置して  
読み出し



# 我々の新しいセットアップ

過去の問題点(磁場の非一様性、物質の効果)を解決するため新しい方法を用いる。



# プロトタイプ測定 (1)

- 我々の新しいセットアップで、遷移曲線、超微細構造の初回測定。
- 系統誤差の洗い出し。
- 目標精度は数 10 ppm (最終目標は $O(\text{ppm})$ )。
- 2009年7月から9月まで、測定した。
- トリガーは、 $\beta$ タグ系でのプラスチックシンチレータのコインシデンスと $\text{LaBr}_3$ のORを、コインシデンスさせて作る ( $\beta$ がタグできて、かつ $\text{LaBr}_3$ が1個でも鳴ったらデータを取る)。
- トリガーレート  $\sim 3.6$  kHz, DAQレート  $\sim 0.65$  kHz

# プロトタイプ測定 (2)

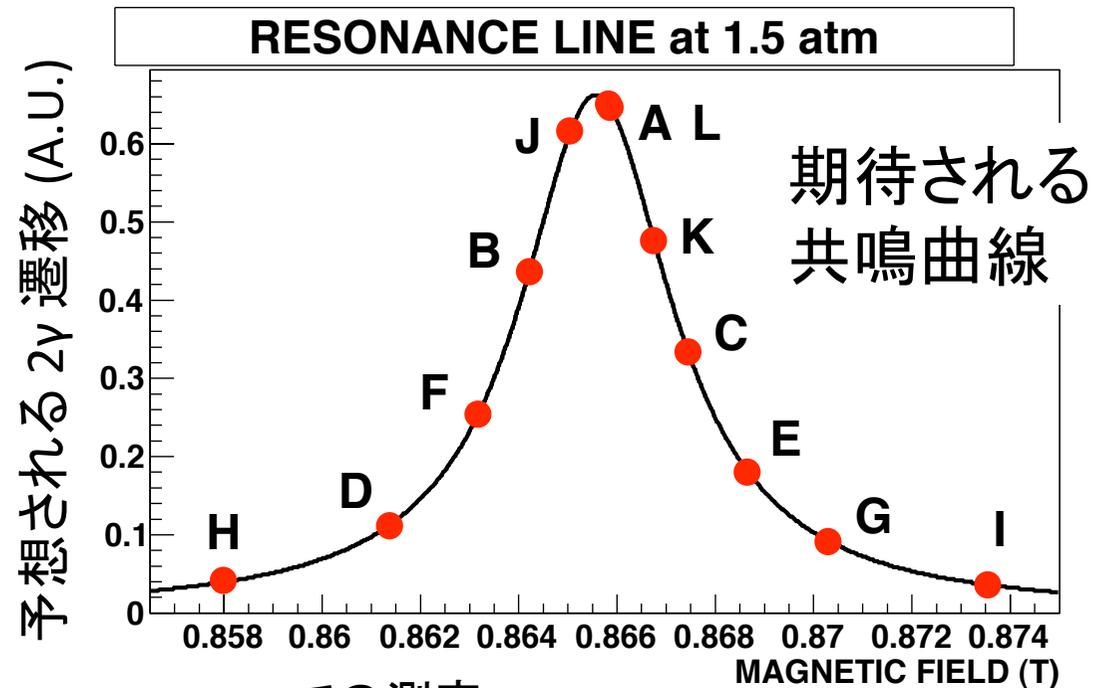
- ・  $m_z = \pm 1$ 成分から  $|+\rangle$ 成分への遷移(ゼーマン遷移)によって **2 $\gamma$ 崩壊の数が増える**のを見る。

- ・ 固定磁場において、RFの周波数を変えて測りたいが、アンプやキャビティは、広範な周波数に対応できない。

- ・ 固定周波数で、磁場を変えて変化を見ても、本質的には同じ。→ **磁場でスキャン**

- ・ 磁場は、変更するたび、**永久電流モード**にする(安定した後の変化は、 $\pm 1\text{ppm}$ 以下)。

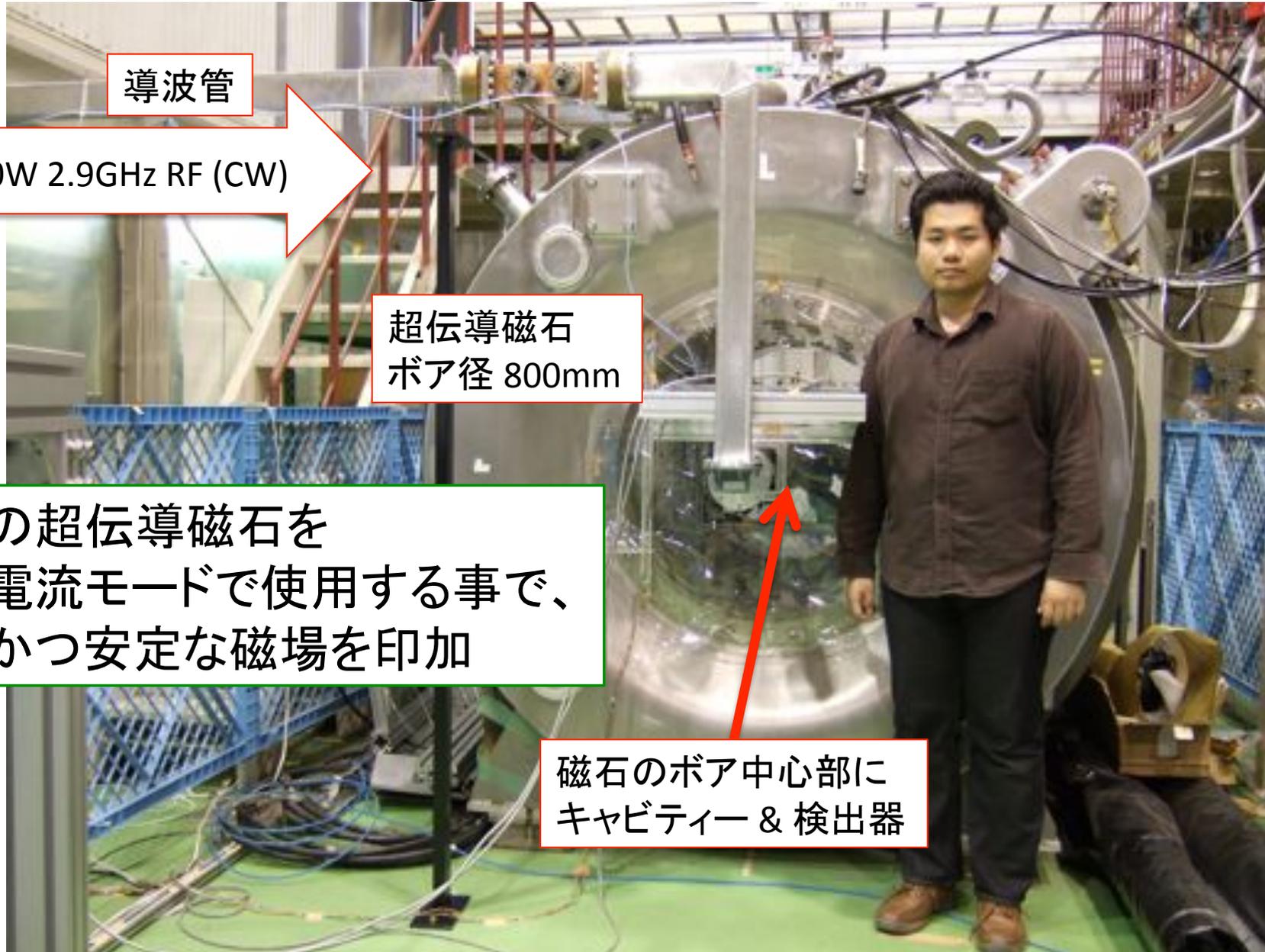
- ・ 日中、RFをかけて測定し、夜中・休日に、RF-OFFの測定を行う。



1.350 1 amagat での測定

| Run | 磁場 | 期間        | Run | 磁場 | 期間         |
|-----|----|-----------|-----|----|------------|
| 1   | A  | 7/2 - 6   | 7   | G  | 7/22 - 27  |
| 2   | B  | 7/6 - 8   | 8   | H  | 7/27 - 29  |
| 3   | C  | 7/8 - 13  | 9   | I  | 7/29 - 8/3 |
| 4   | D  | 7/13 - 15 | 10  | J  | 8/3 - 12   |
| 5   | E  | 7/15 - 20 | 11  | K  | 8/12 - 14  |
| 6   | F  | 7/20 - 22 | 12  | L  | 8/20 - 24  |

# プロトタイプ測定の設定アップ @KEK 低温棟



導波管

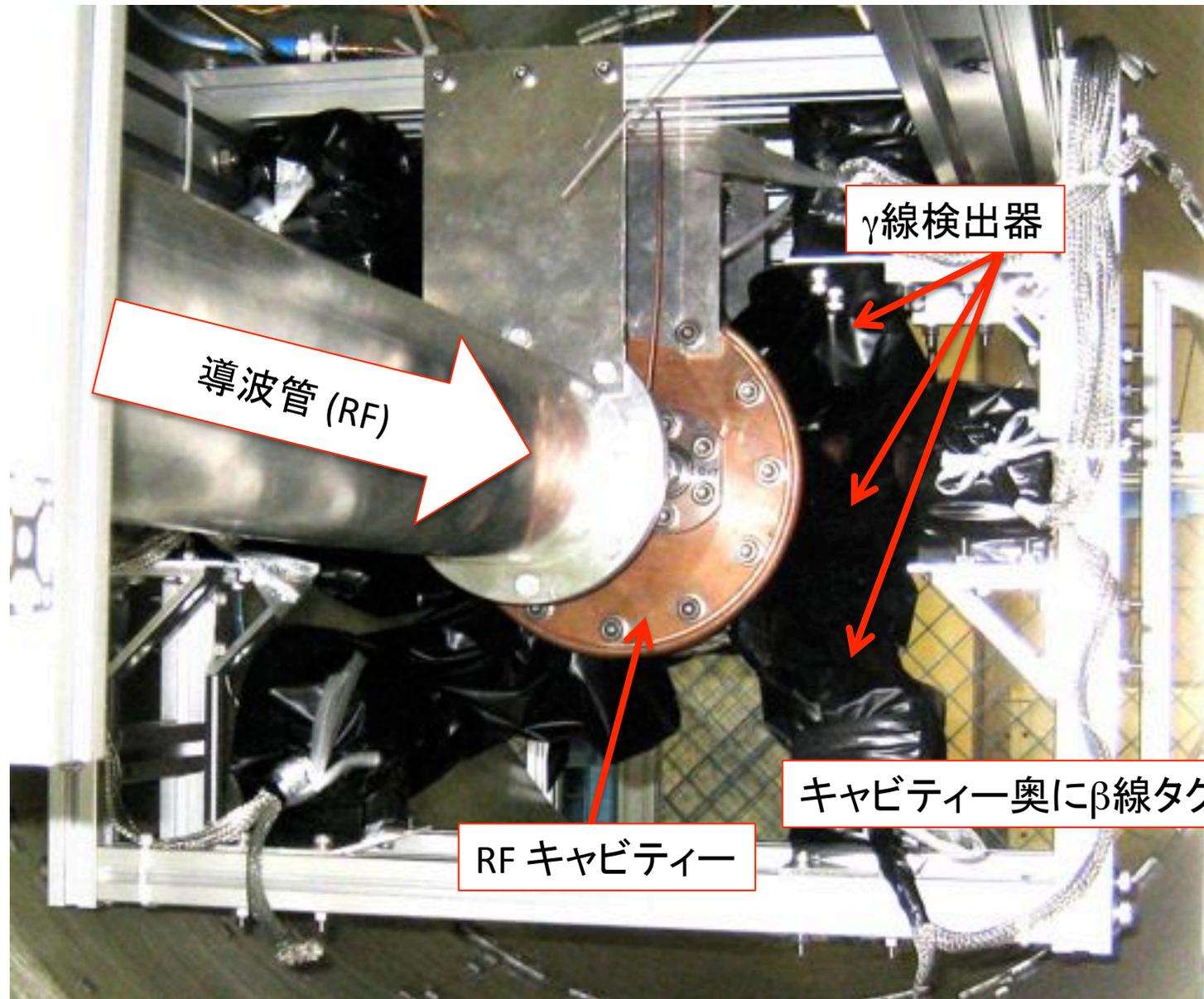
500W 2.9GHz RF (CW)

超伝導磁石  
ボア径 800mm

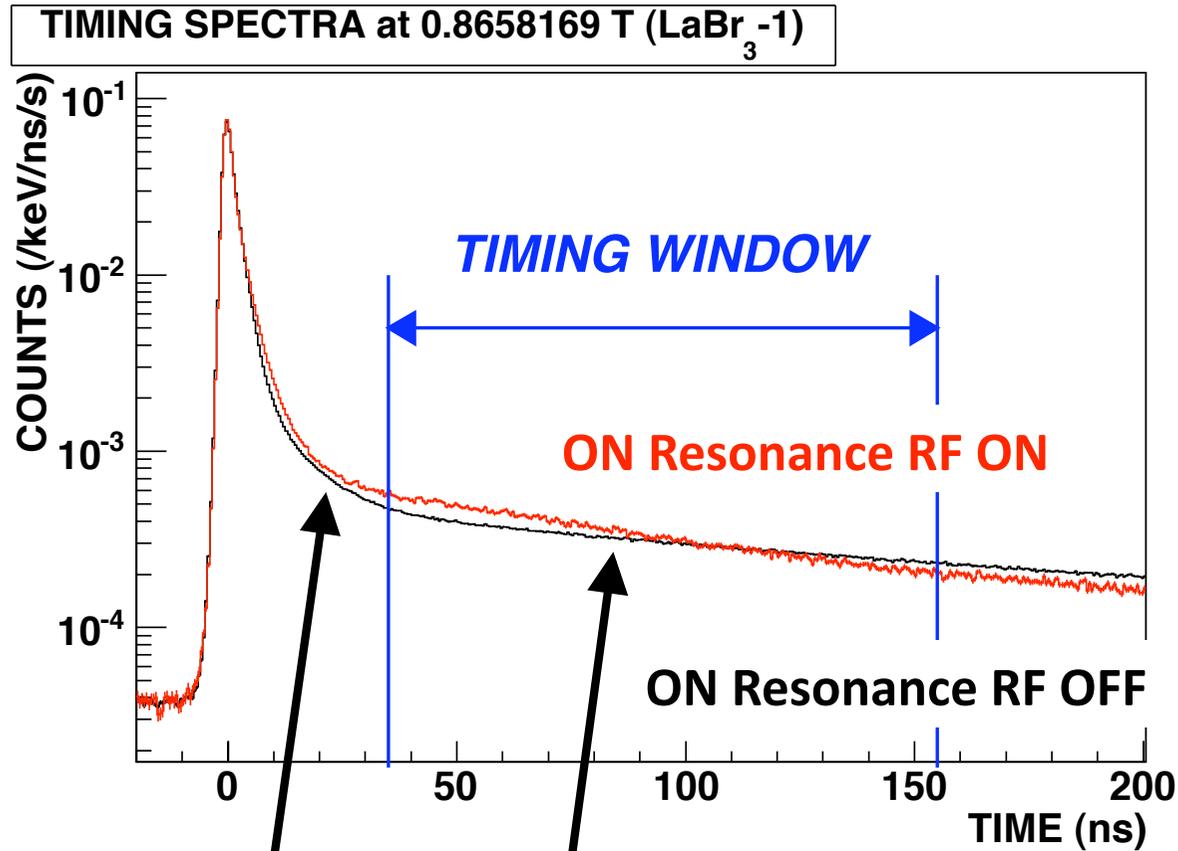
大型の超伝導磁石を  
永久電流モードで使用する事で、  
均一かつ安定な磁場を印加

磁石のボア中心部に  
キャビティー & 検出器

# 中心部のセットアップ (磁石ボア中心)



# 時間スペクトル



短い寿命成分 ( $m_z = 0$ )      長い寿命成分 ( $m_z = \pm 1$ )

$m_z = \pm 1 \rightarrow m_z = 0$  の遷移が起きている。

- プラスチックシンチレータと、 $\text{LaBr}_3$  の時間差。

- 分解能  $\sigma \sim 1.0$  ns

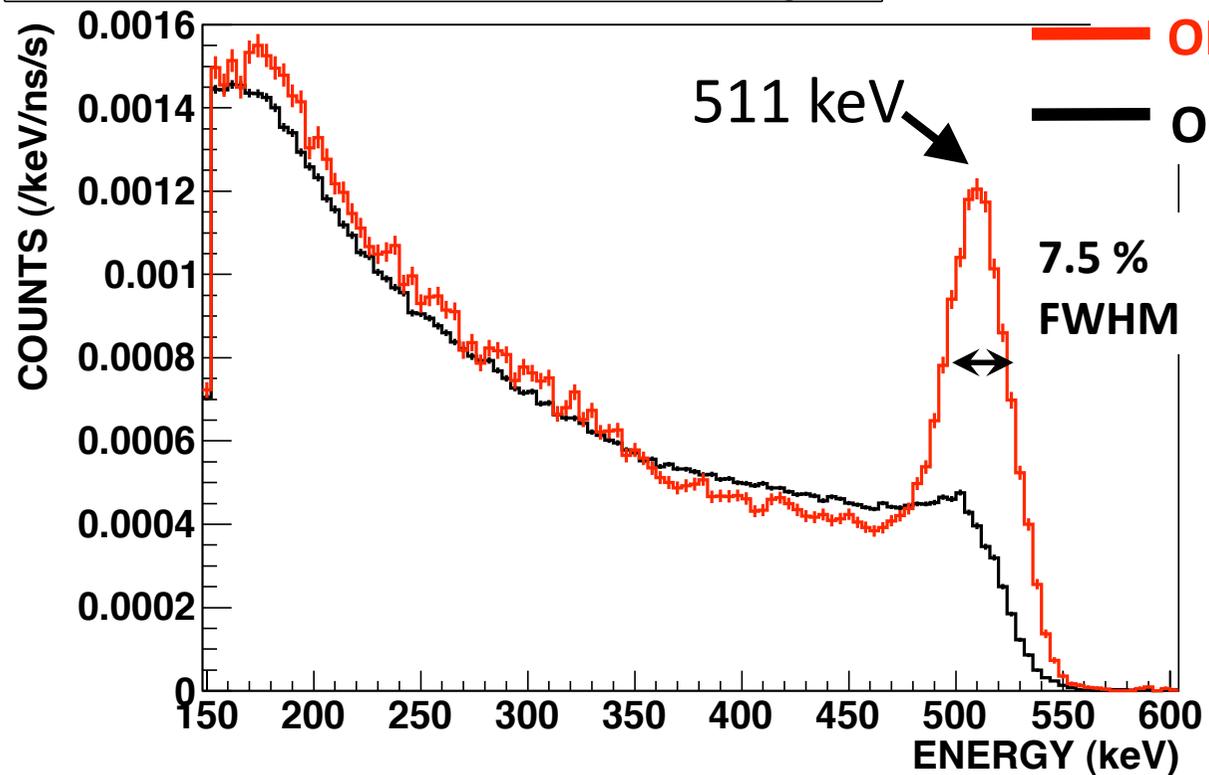
- 通常 (RF OFF) は、短い成分 (磁場) と、長い成分 (pick-off)。

- 共鳴ピーク上 (赤) では、遷移によって、寿命が短くなっている。

- プロンプト及びアクシデンタルを除くため、35–155 ns のタイミングウィンドウをかける。

# エネルギースペクトル

ENERGY SPECTRA at 0.8658169 T (LaBr<sub>3</sub>-1)

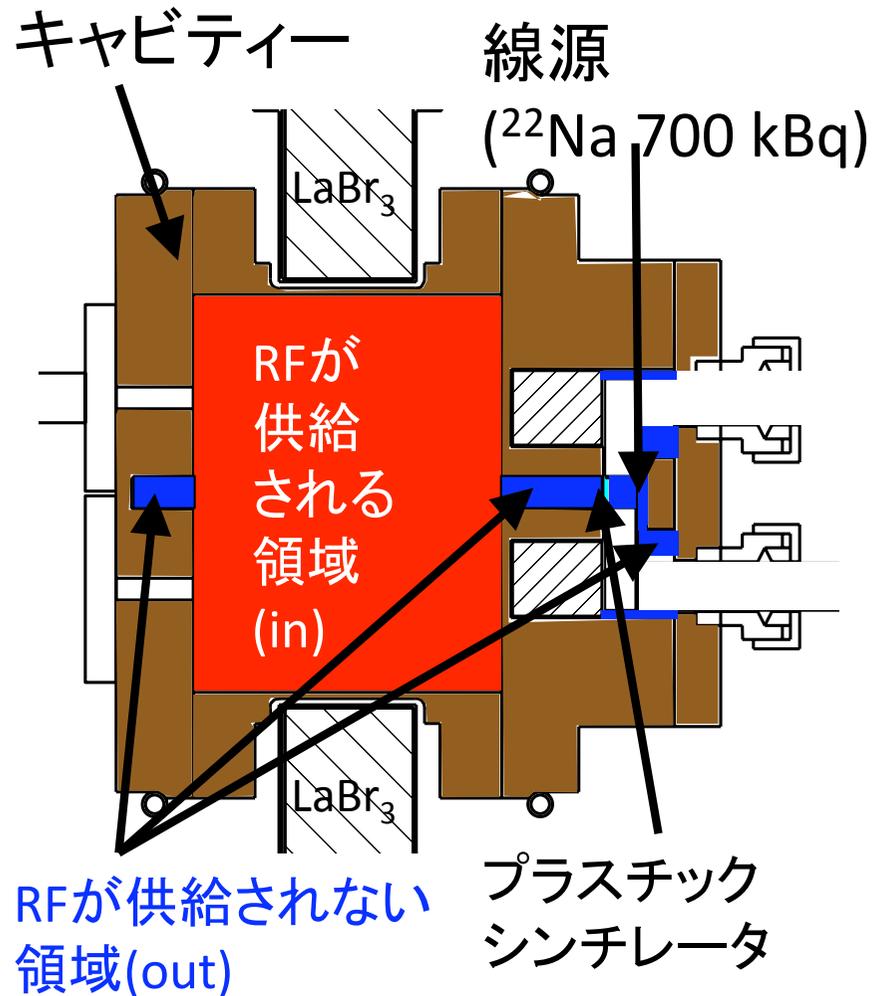


• 35—155 ns のタイミン  
グウィンドウ。

• アクシデンタル(700—  
850 ns)を、差し引いて、  
エネルギースペクトルを  
作成。

ゼーマン遷移によって、 $2\gamma$ 崩壊確率が大きくなっている。  
→ RF-OFF, ONそれぞれをモンテカルロ・シミュレーションで  
フィットし、 $2\gamma/3\gamma$ 崩壊確率比を求め、遷移量を導出する。

# エネルギースペクトルのフィット



- RFキャビティーには、RFが供給される領域と、RFが供給されない領域がある。
- ポジトロニウムは、そのどちらの領域でも生成・崩壊する。
- RF-OFFでは、どちらの領域でも、 $2\gamma/3\gamma$ 崩壊比は変わらないので、

OFFのスペクトル  
Livetimeで  
ノーマライズ

$$S_{OFF} = \frac{A_{OFF} (S_{3\gamma MC, out} + \beta S_{2\gamma MC, out})}{A_{OFF} (S_{3\gamma MC, in} + \beta S_{2\gamma MC, in})}$$

RFが供給されない領域  
RFが供給される領域

- RF-ONでは、RFが供給される領域のみ、 $2\gamma/3\gamma$ 崩壊比がRF-OFFと異なり、

ONのスペクトル

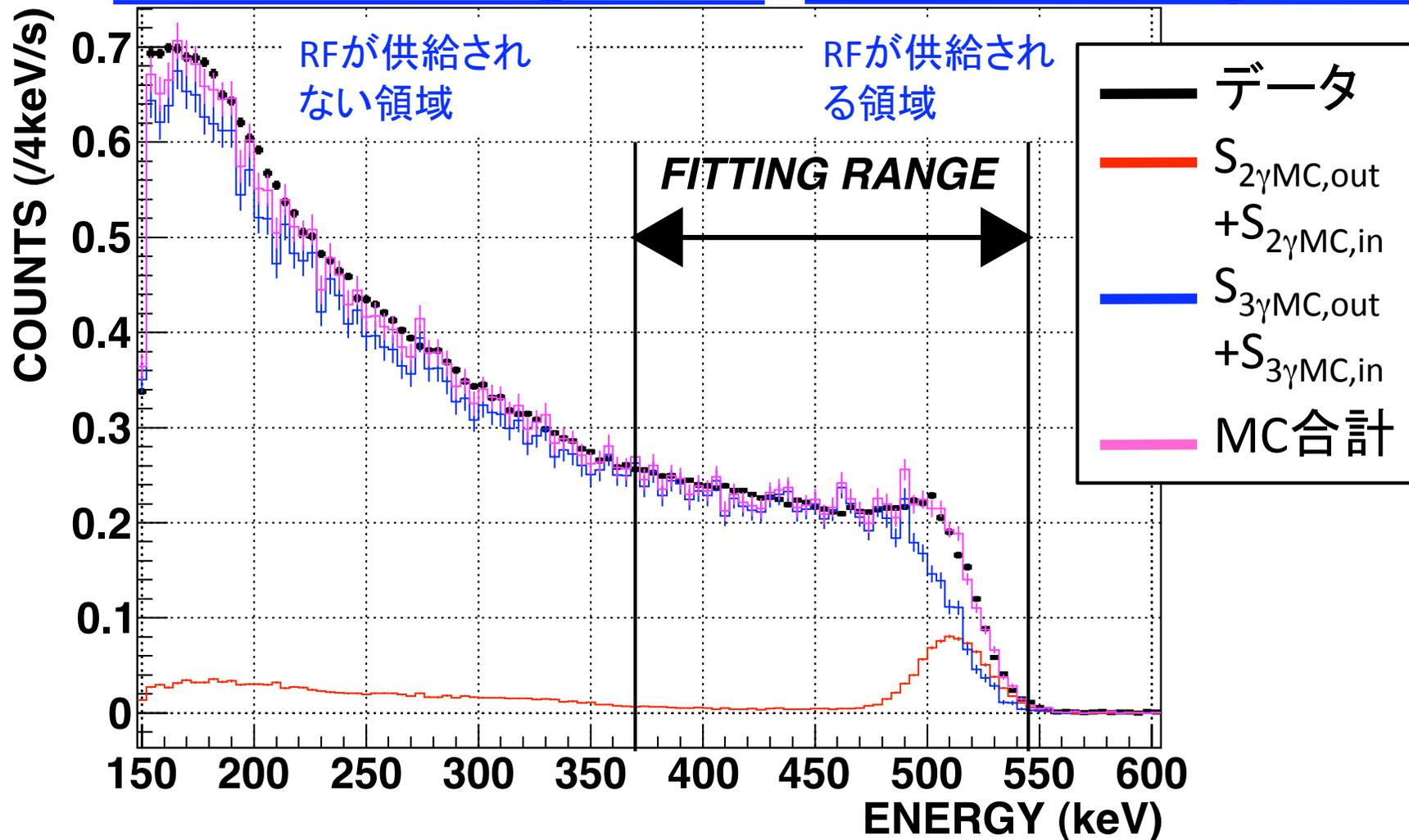
$$S_{ON} = \frac{A_{OFF} (S_{3\gamma MC, out} + \beta S_{2\gamma MC, out})}{A_{ON} (S_{3\gamma MC, in} + \Gamma S_{2\gamma MC, in})}$$

RFが供給されない領域  
RFが供給される領域

$A_{OFF}$  ,  $A_{ON}$      $3\gamma$ 崩壊確率  
 $\beta$     ,  $\Gamma$          $2\gamma/3\gamma$ 崩壊比  
 $S_{3\gamma MC}$  ,  $S_{2\gamma MC}$     MCスペクトル

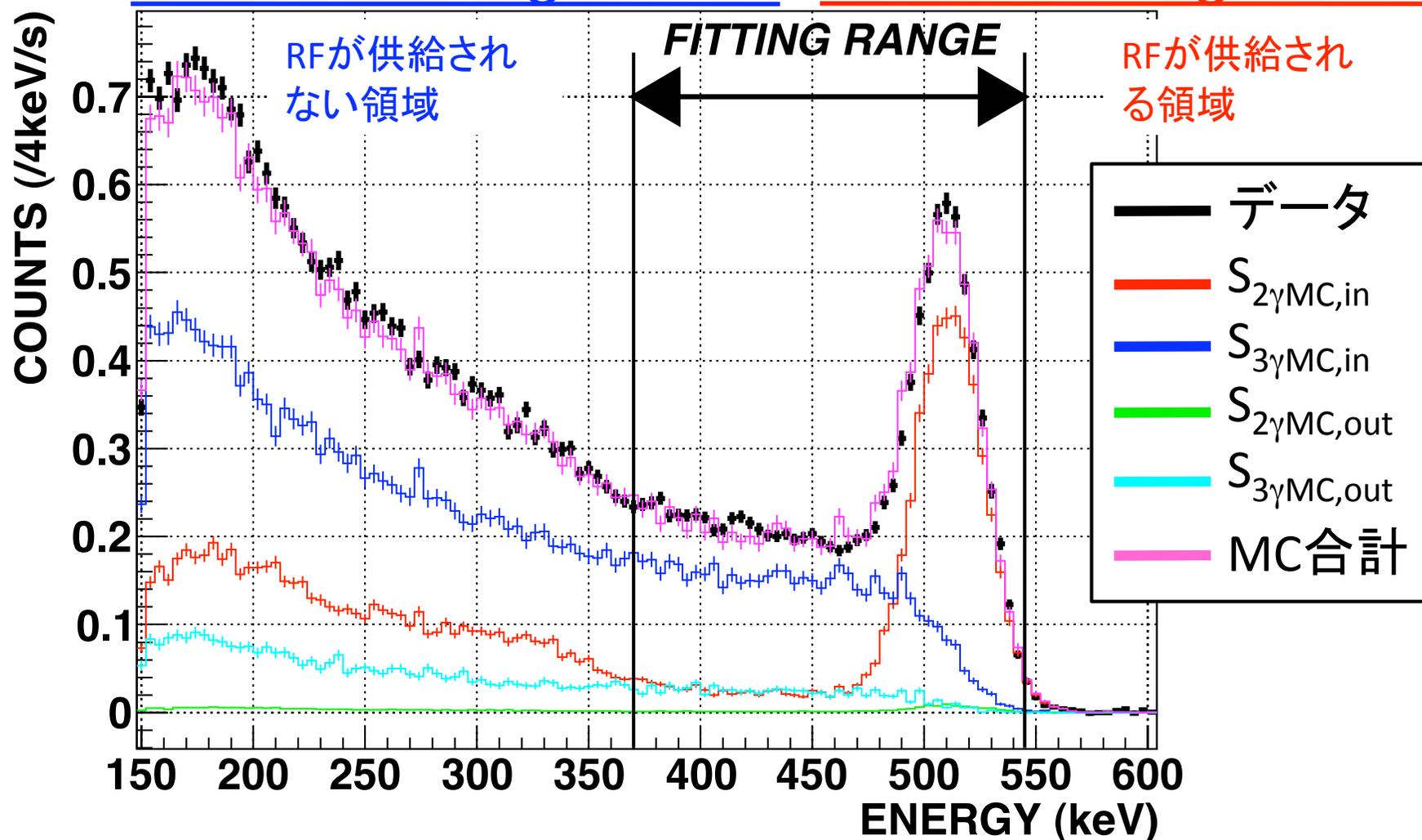
# モンテカルロ・シミュレーションによる エネルギースペクトルのフィット (RF-OFF)

$$S_{OFF} = A_{OFF} \left( S_{3\gamma MC, out} + \beta S_{2\gamma MC, out} \right) + A_{OFF} \left( S_{3\gamma MC, in} + \beta S_{2\gamma MC, in} \right)$$



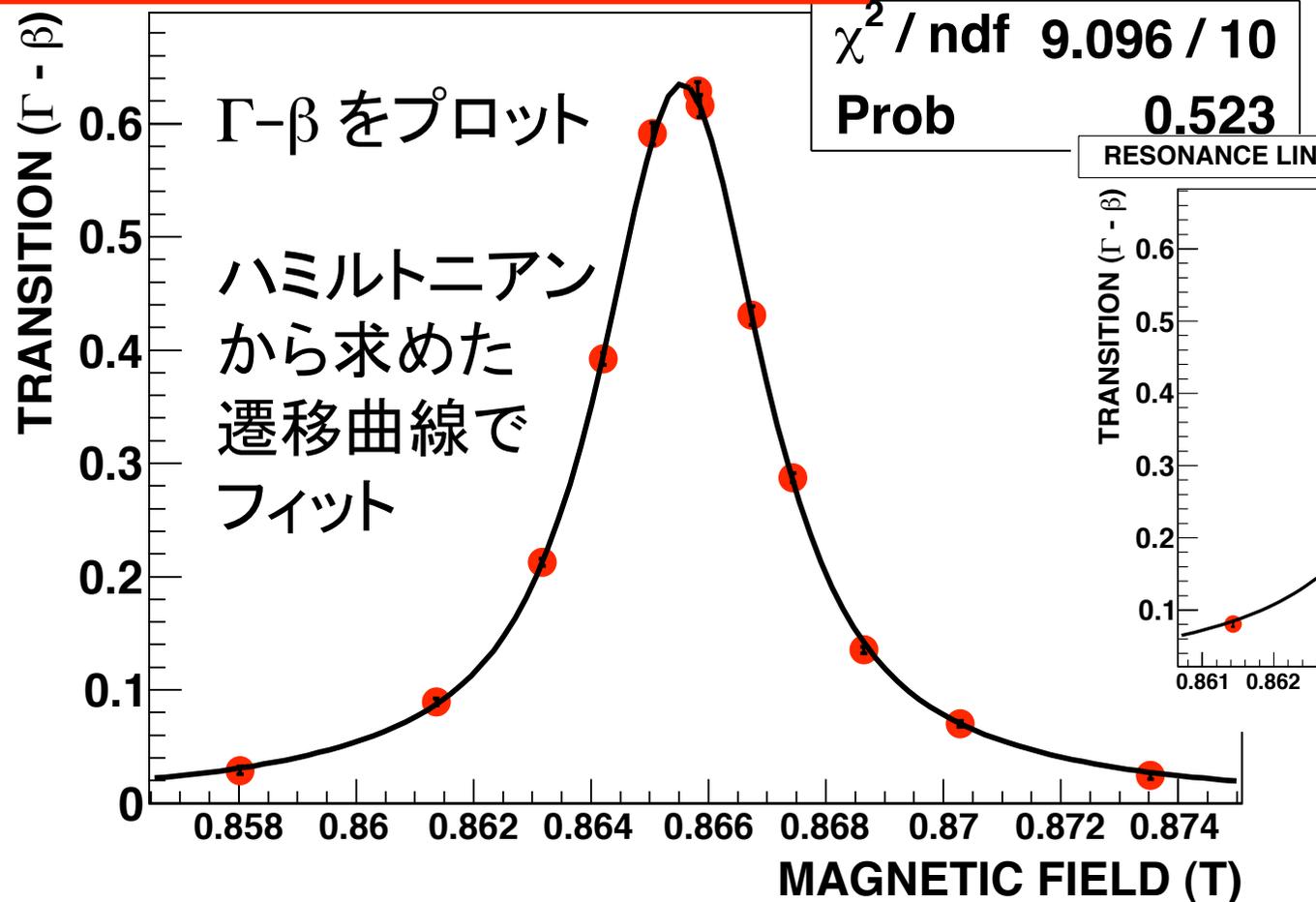
# モンテカルロ・シミュレーションによる エネルギースペクトルのフィット (RF-ON)

$$S_{ON} = A_{OFF} \left( S_{3\gamma MC, out} + \beta S_{2\gamma MC, out} \right) + A_{ON} \left( S_{3\gamma MC, in} + \Gamma S_{2\gamma MC, in} \right)$$

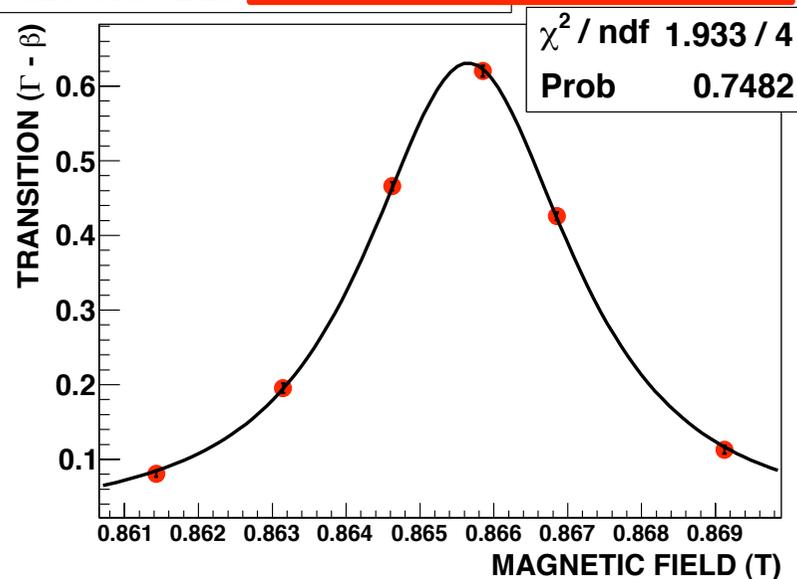


# 共鳴曲線

1.350 1 amagat での共鳴曲線



0.891 6 amagat での共鳴曲線

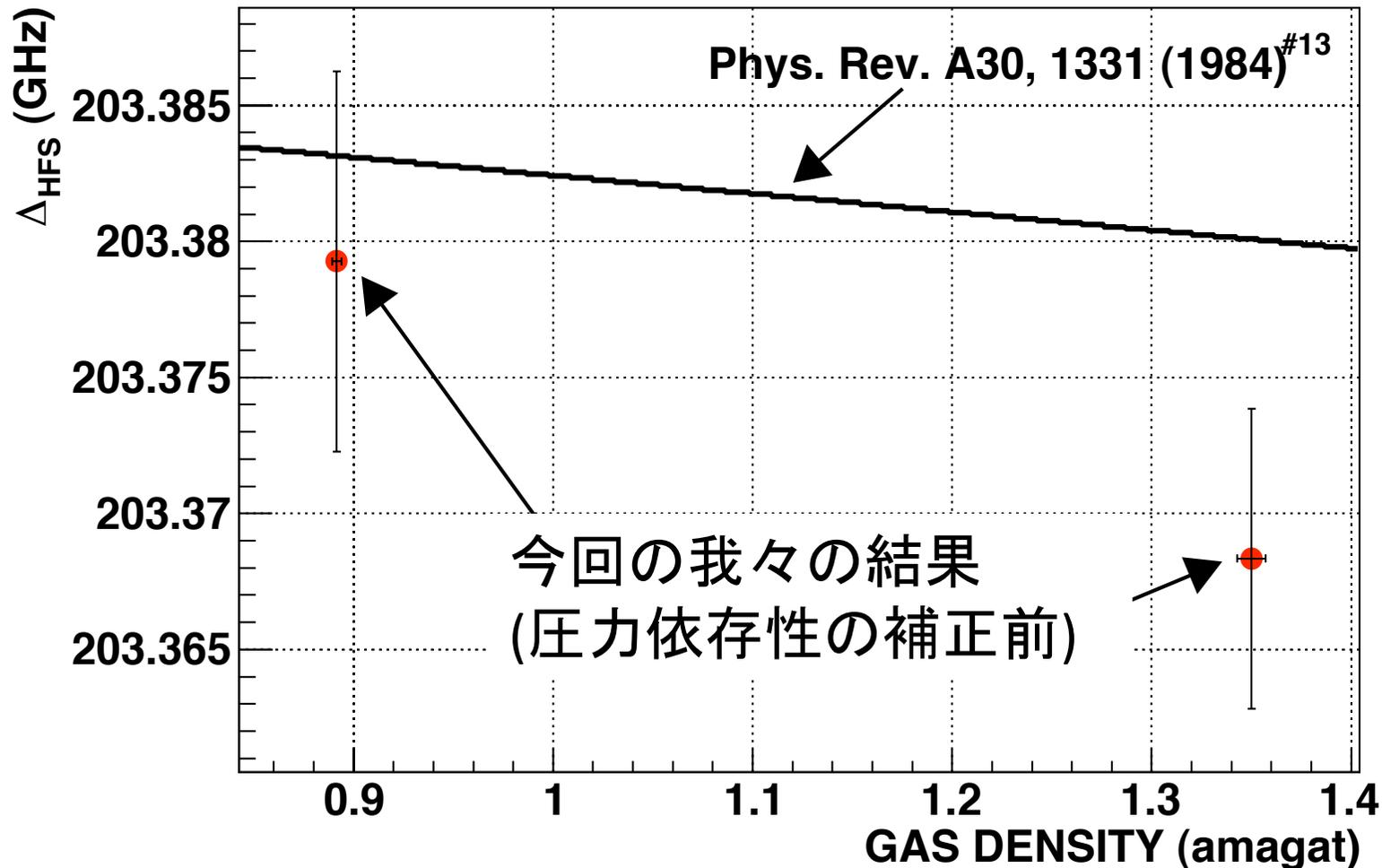


$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.368\ 3(55)\ \text{GHz}\ (27\ \text{ppm})$$

$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.379\ 3(70)\ \text{GHz}\ (34\ \text{ppm})$$

エラーは、統計、MCの統計、RFパワー、キャビティー $Q_L$ の誤差。

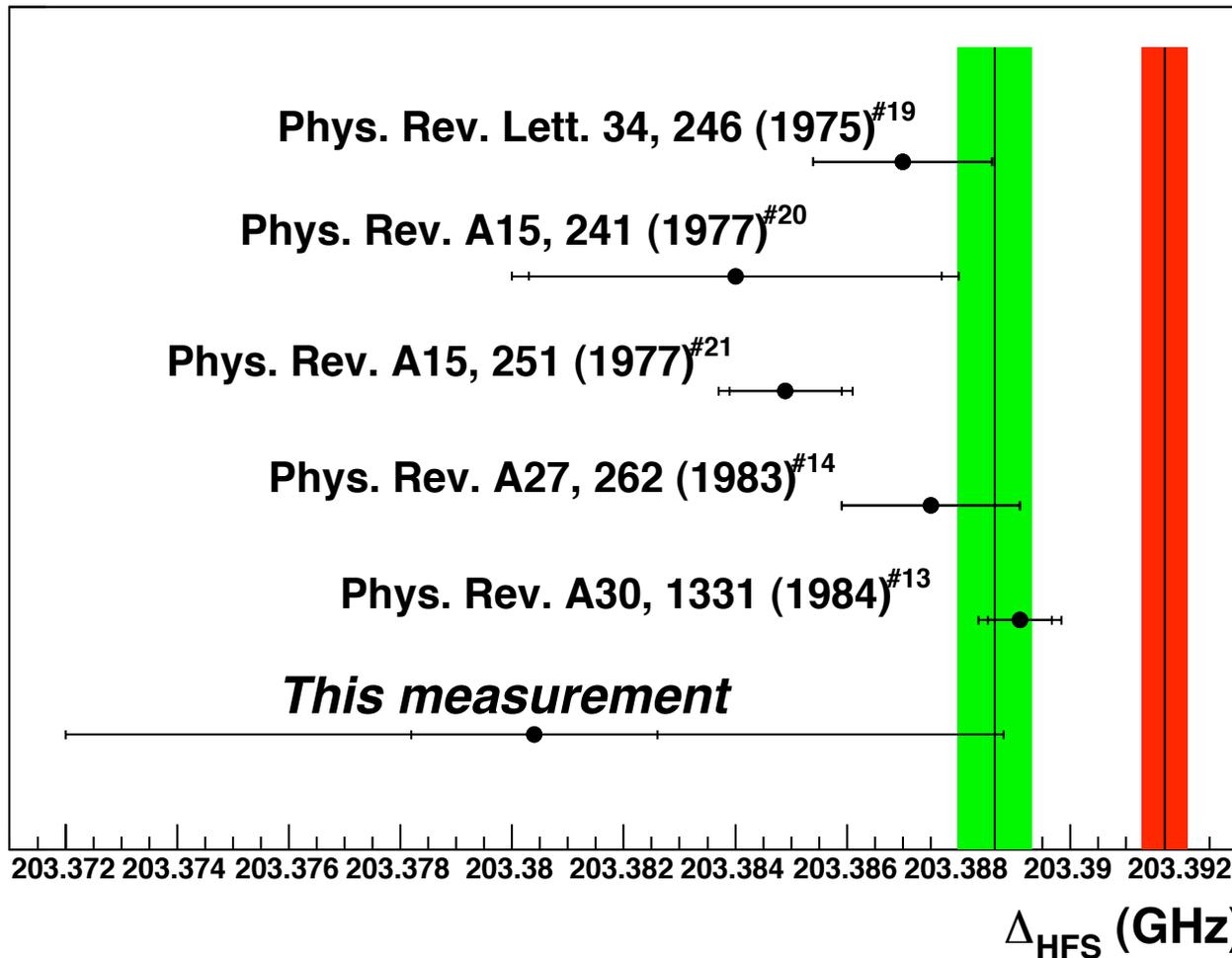
# 圧力 (密度) 依存性



今回の、我々の結果からだけでは、圧力依存性は見られなかったが、過去の実験とはコンシステント

→ 今回は、-33 ppm/amagat (Ritter et al., 1984) の補正を入れる。

# 結果と課題



- 過去の実験値・理論値と無矛盾
- 最終目標のO(ppm)達成のため、1桁以上の精度向上が課題

プロトタイプ測定で得られた、超微細構造の値

$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.3804 \pm 0.0022 \text{ (stat., 11 ppm)} \\ \pm 0.0081 \text{ (sys., 40 ppm) GHz}$$

# 系統誤差

| 系統誤差の要因        |                       | 大きさ (ppm) |
|----------------|-----------------------|-----------|
| 磁場             | 磁場の非一様性               | 21        |
|                | 磁場補正                  | 4         |
|                | 磁場測定値                 | 2         |
| MC             | モンテカルロ・シミュレーションの統計    | 17        |
|                | モンテカルロ・シミュレーションの磁場依存性 | 18        |
| 物質の<br>効果      | ポジトロニウムの熱化            | 20        |
|                | 密度依存性 (熱化以外)          | 7         |
| RF             | RF パワー P              | 5         |
|                | RF キャビティの $Q_L$       | 6         |
|                | RF周波数                 | 5         |
| Quadrature sum |                       | 40        |

# 今後の展望

- **磁場** : 深刻な系統誤差である磁場の非一様性を克服するため、補償磁石を用いる。磁場精密測定の結果を基に、設計を開始している。実機製作を行い、試験的に超微細構造測定を行う(4月以降)。 $O(\text{ppm})$ の磁場一様性を得る。
- **MC** : MCを研究し、系統誤差を $O(\text{ppm})$ に抑える。
- **物質の効果** : ポジトロニウムの熱化関数を精密に測定する。
- **RF** : 温度管理で $O(\text{ppm})$ を達成する。
- **統計誤差** : プロトタイプ測定で、85日で11 ppm. DAQレートの向上や、24時間測定などにより、2年以内に4 ppm以下にする。
- 本測定を5月以降に開始し、2011年内をメドに、 $O(\text{ppm})$ の測定を終える。

# まとめ

- 重要な物理量である、ポジトロニウムの超微細構造が、実験と理論で 一様に  $3.9\sigma$  ずれている。
- ポジトロニウムの超微細構造の精密測定に向け、約3ヶ月間、プロトタイプ測定を行った。
- プロトタイプ測定で、過去の実験値・理論値と無矛盾な結果が、41 ppm で得られた。
- 現在、深刻な系統誤差は、磁場の非一様性。
- 補正磁石の開発、ポジトロニウム熱化関数の測定などにより、系統誤差を  $O(\text{ppm})$  に抑える。
- 2年程度で、物質の効果を入れて  $O(\text{ppm})$  の精度を達成する。