

# Zeeman効果を用いた ポジトロニウム超微細構造の 精密測定

東大理, 東大素セ<sup>A</sup>, 東大院総合文化<sup>B</sup>, KEK<sup>C</sup>

石田明, 秋元銀河, 佐々木雄一, 宮崎彬, 加藤康作,  
末原大幹<sup>A</sup>, 難波俊雄<sup>A</sup>, 浅井祥仁, 小林富雄<sup>A</sup>,  
齋藤晴雄<sup>B</sup>, 吉田光宏<sup>C</sup>, 田中賢一<sup>C</sup>, 山本明<sup>C</sup>

2010年3月23日 日本物理学会第65回年次大会 於岡山大学

# 目次

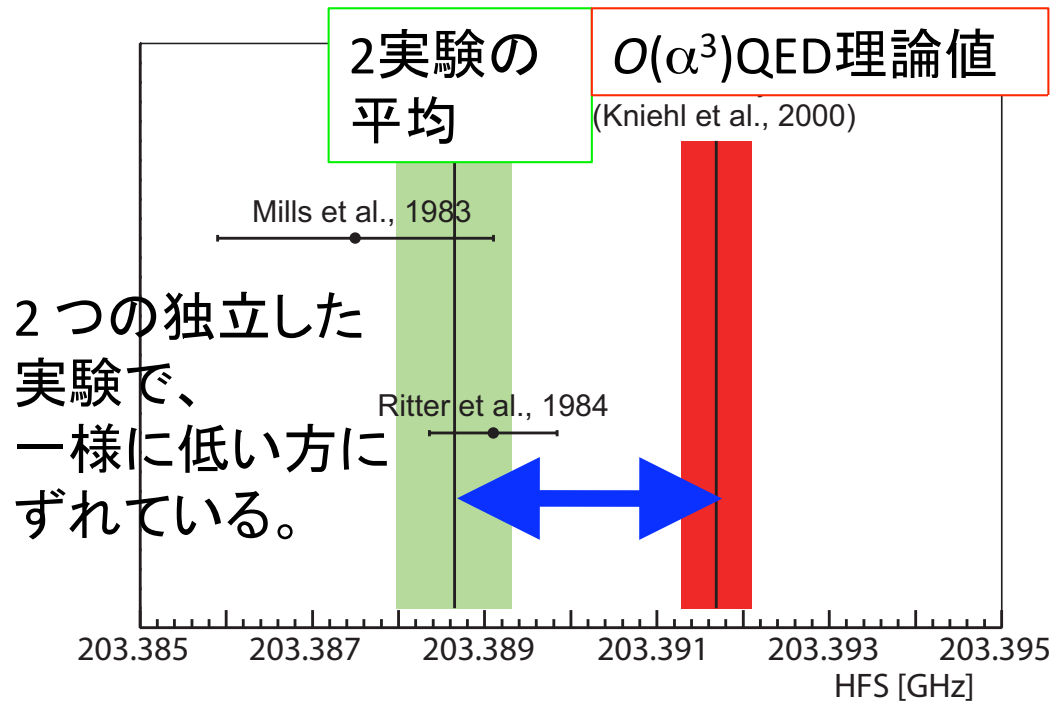
- インTRODクシヨン  
(磁場を用いた  $O(\text{ppm})$  の精密測定)
- 我々の新しい実験セツトアツプ
- プロトタイプ測定とその結果
- 今後の展望

# ポジトロニウム超微細構造(Ps HFS)とずれ

(基底状態の)ポジトロニウム超微細構造(Ps HFS)

= o-Psとp-Psのエネルギー準位差 (203GHz, スピン・スピン相互作用)

+量子振動の寄与



15 ppm (3.9  $\sigma$ ) のずれ

ずれの原因は？

1. 理論の誤り
2. 実験の系統誤差の見落とし
3. **標準理論を超えた新しい物理**

系統誤差の候補

- 磁場の非一様性
- 物質の効果の過小評価  
(Psの**熱化**をまじめに扱っていない → 詳しくは佐々木)

系統誤差を小さくした 新しい精密測定実験で、Ps HFSのずれを検証する。

# 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)

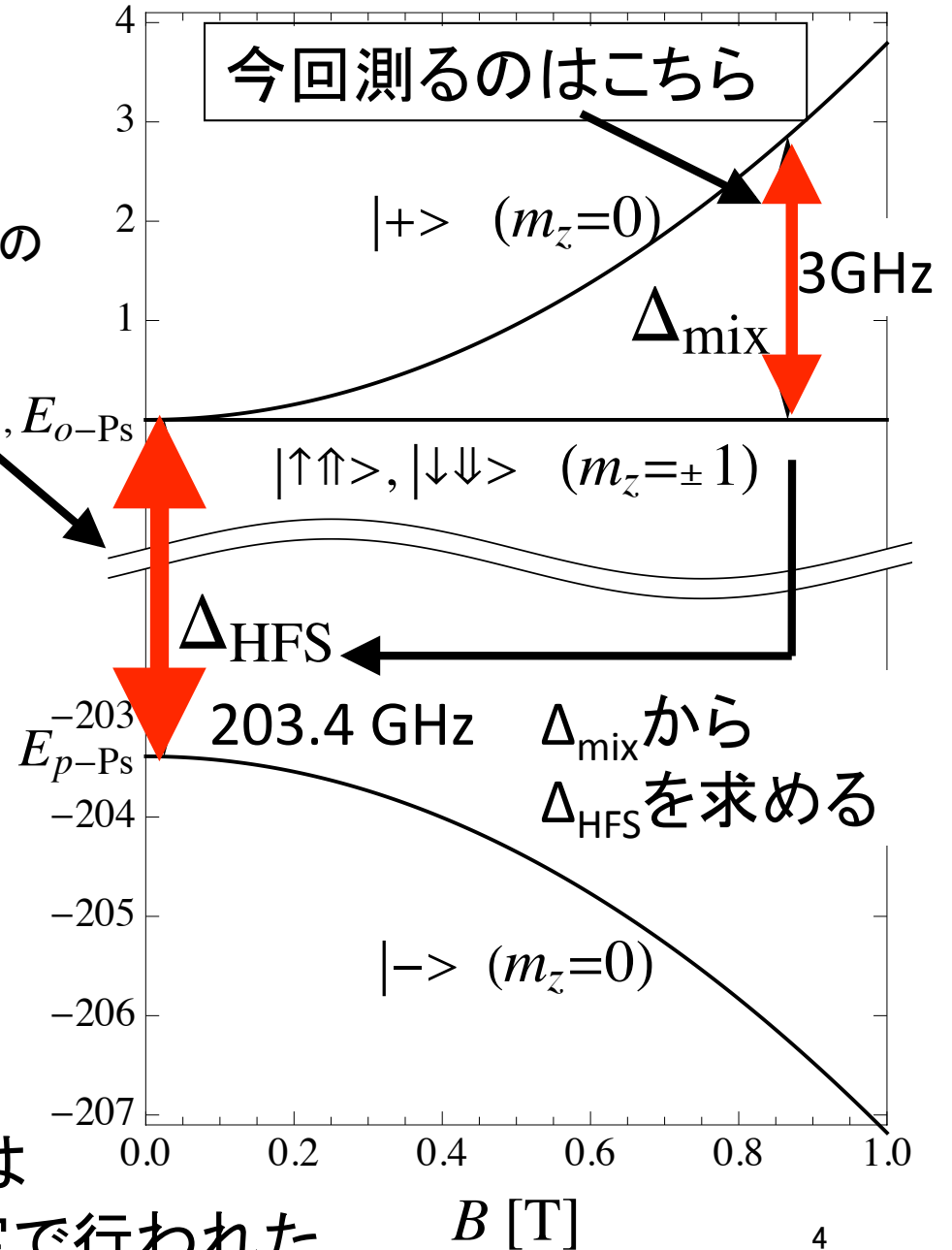
$\Delta_{mix}$  は、9 kG 程の磁場中で  
約 3 GHz  $\rightarrow$  マイクロ波なので  
大強度での利用が十分可能。  
 $\rightarrow$  この遷移を起こさせると2 $\gamma$ 崩壊の  
確率が高くなることを利用して測定。

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

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

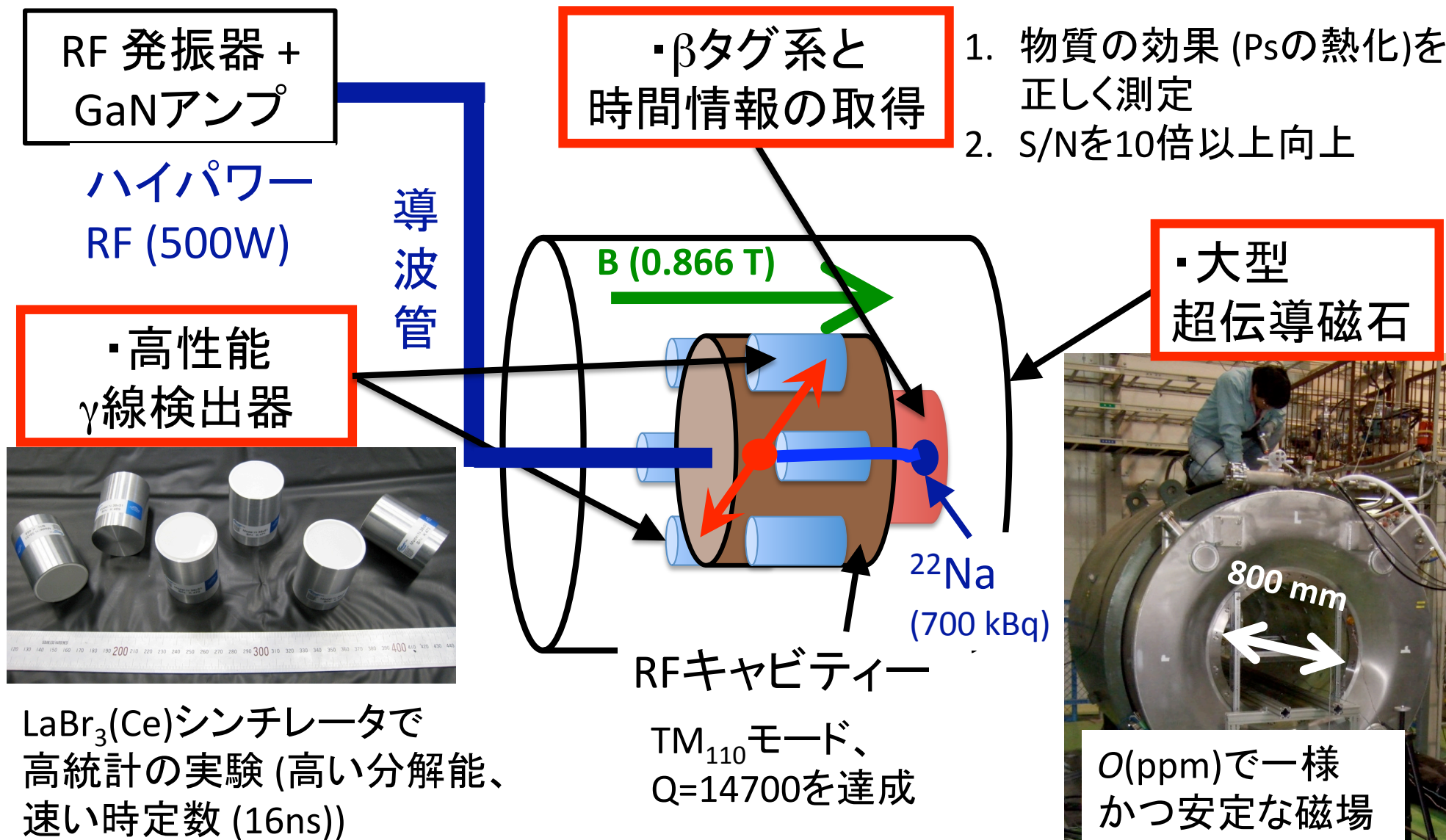
から $\Delta_{HFS}$ を求める。  
 $\rightarrow$  過去の精密測定は  
すべてこの間接測定で行われた。

直接測定  
(山崎、宮崎の  
トーク)



# 我々の新しい実験セットアップ

測定の実理は過去と同じ (Zeeman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。



# プロトタイプ測定 @ KEK低温棟

- 新しいセットアップの設計、実機製作を行い、遷移曲線、超微細構造を実際に測定。系統誤差を洗い出した。
- 目標精度は数 10 ppm (最終目標は0(ppm))。
- 2009年7月から9月に測定

導波管

500W 2.9GHz RF (CW)

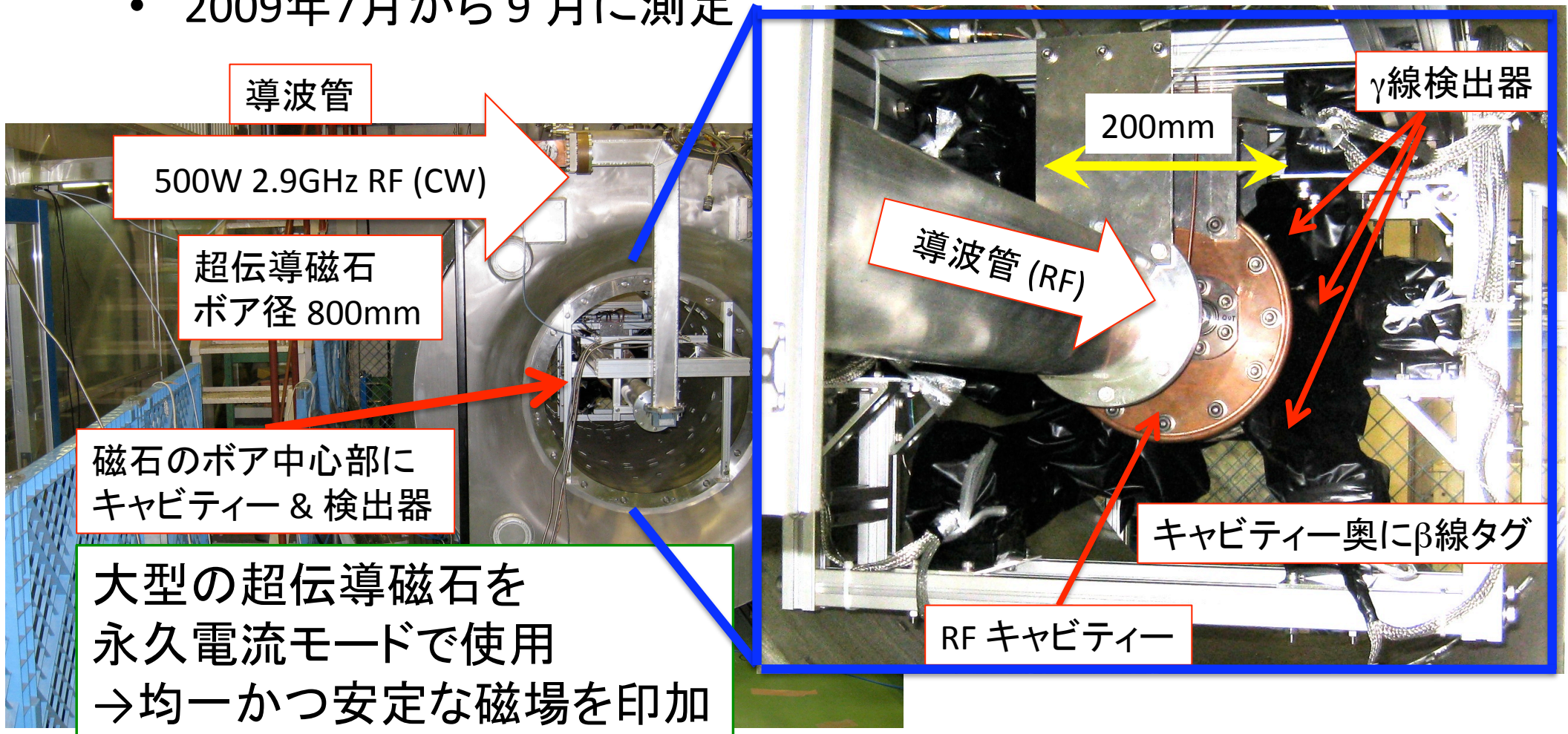
超伝導磁石  
ボア径 800mm

磁石のボア中心部に  
キャビティー & 検出器

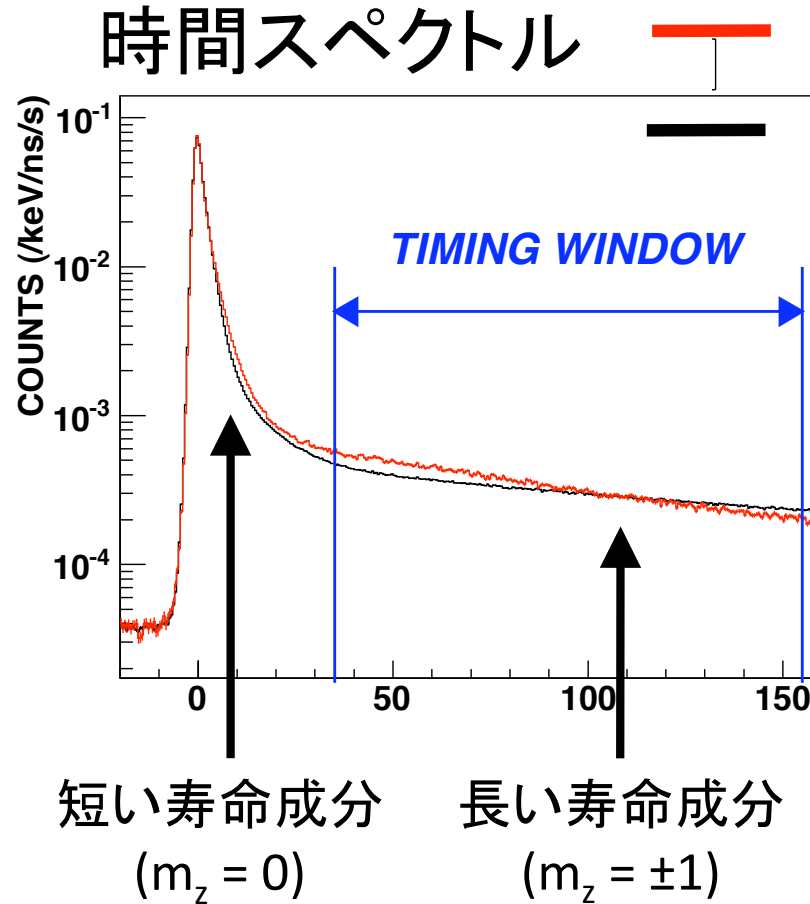
大型の超伝導磁石を  
永久電流モードで使用  
→均一かつ安定な磁場を印加

# プロトタイプ測定 @ KEK低温棟

- 新しいセットアップの設計、実機製作を行い、遷移曲線、超微細構造を実際に測定。系統誤差を洗い出した。
- 目標精度は数 10 ppm (最終目標は0(ppm))。
- 2009年7月から9月に測定



# 解析

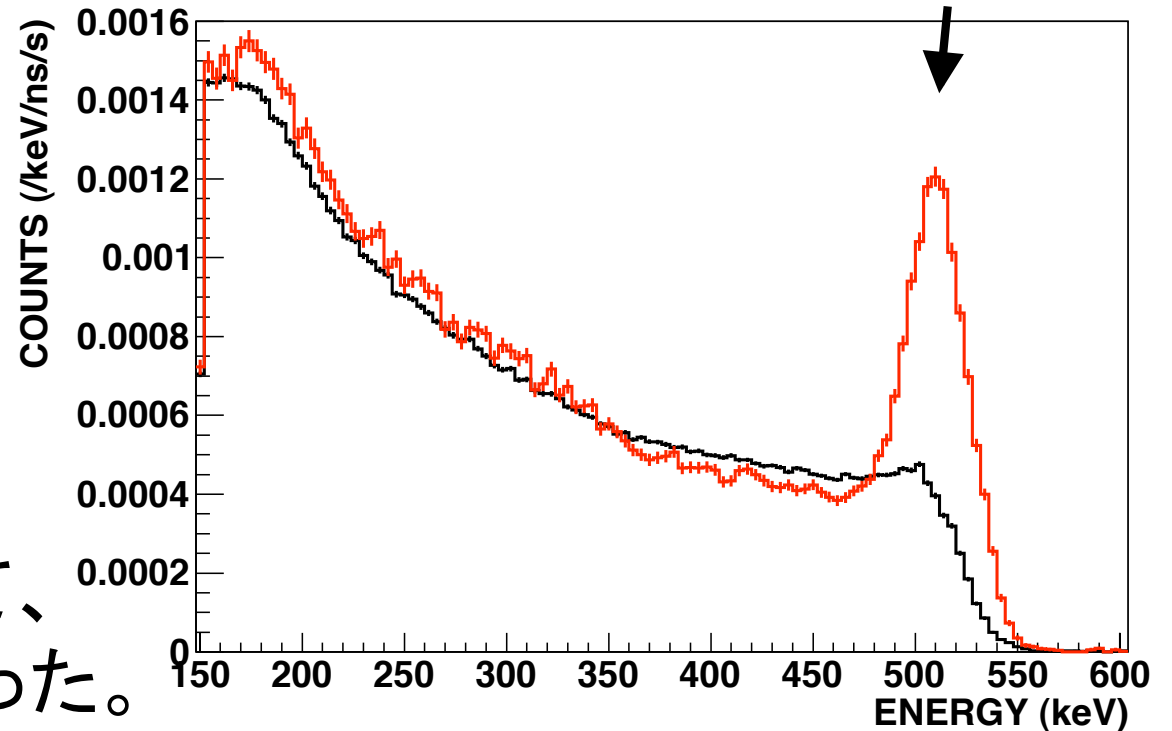


ON Resonance RF ON

ON Resonance RF OFF

35 ns – 155 ns のタイミングウィンドウで、  
プロンプト、アクシデンタルを除く

エネルギースペクトル 511 keV



Zeeman遷移によって、  
 $2\gamma$ 崩壊確率が大きくなった。

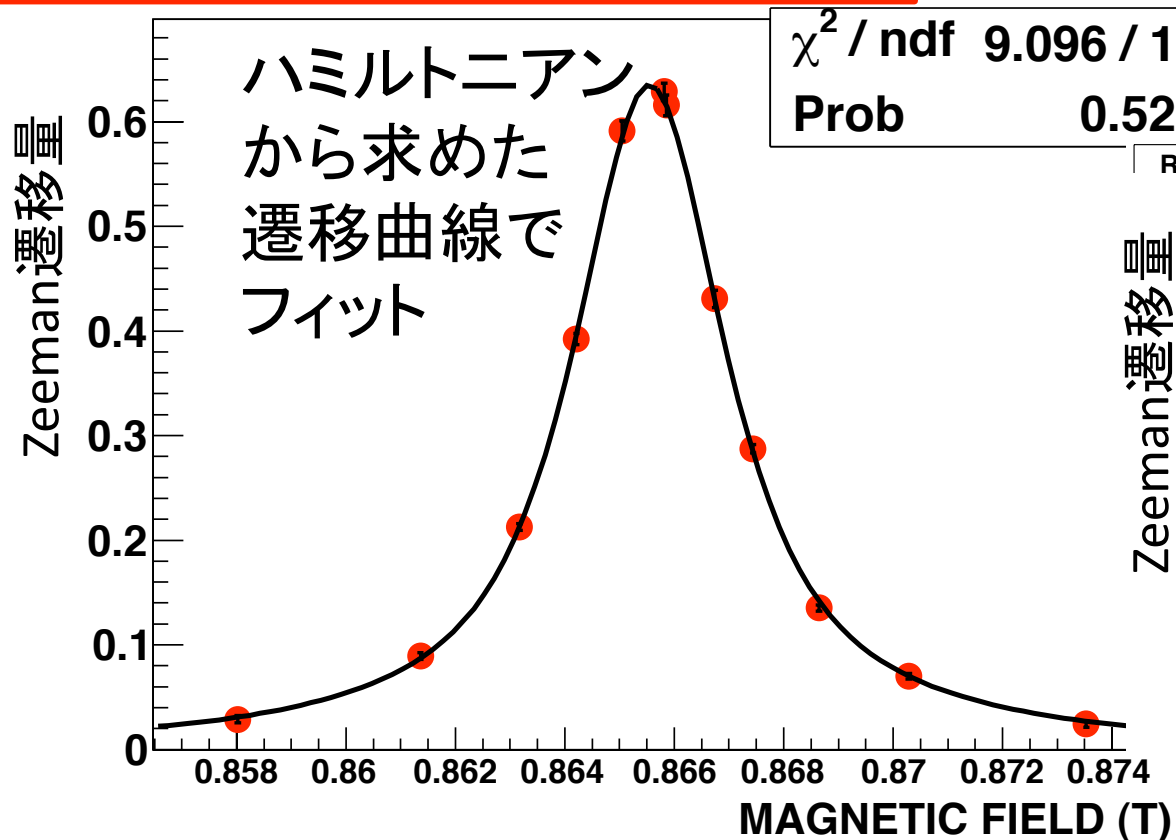


# 共鳴曲線

RFを固定して、磁場でスキャン。

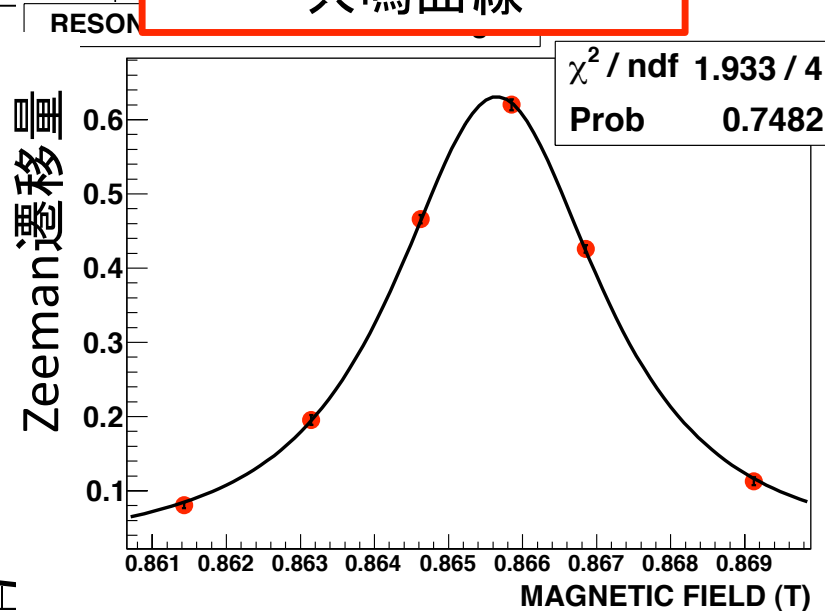
モンテカルロ・シミュレーションを使ってデータを解析、遷移量を導出した。

1.350 1 amagat での共鳴曲線



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

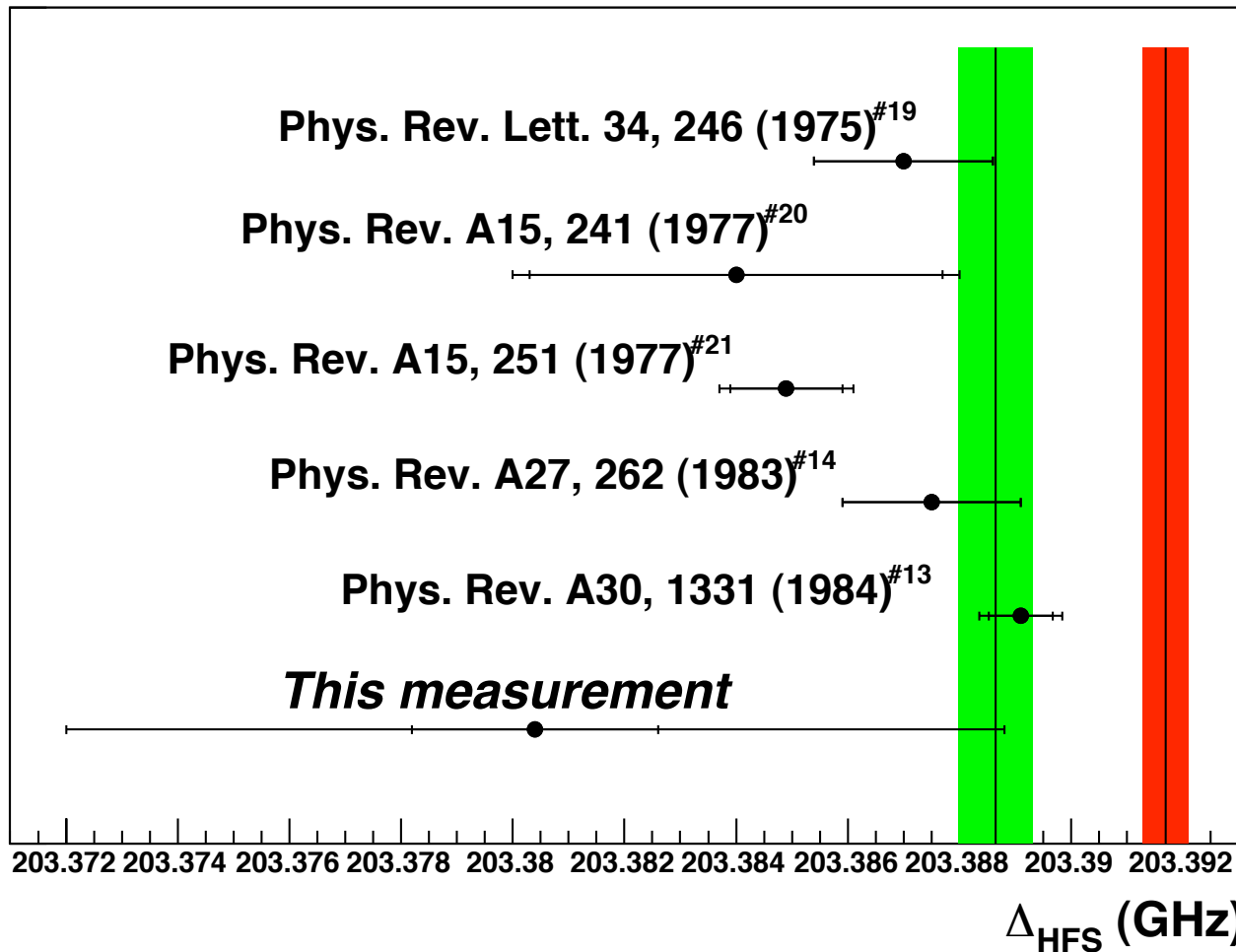
0.891 6 amagat での共鳴曲線



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

→ 密度依存性の補正をして、真空での値を求める。

# 結果



- 過去の実験値・理論値と無矛盾
- ずれを検証するため、最終目標は0(ppm)。達成には、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

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

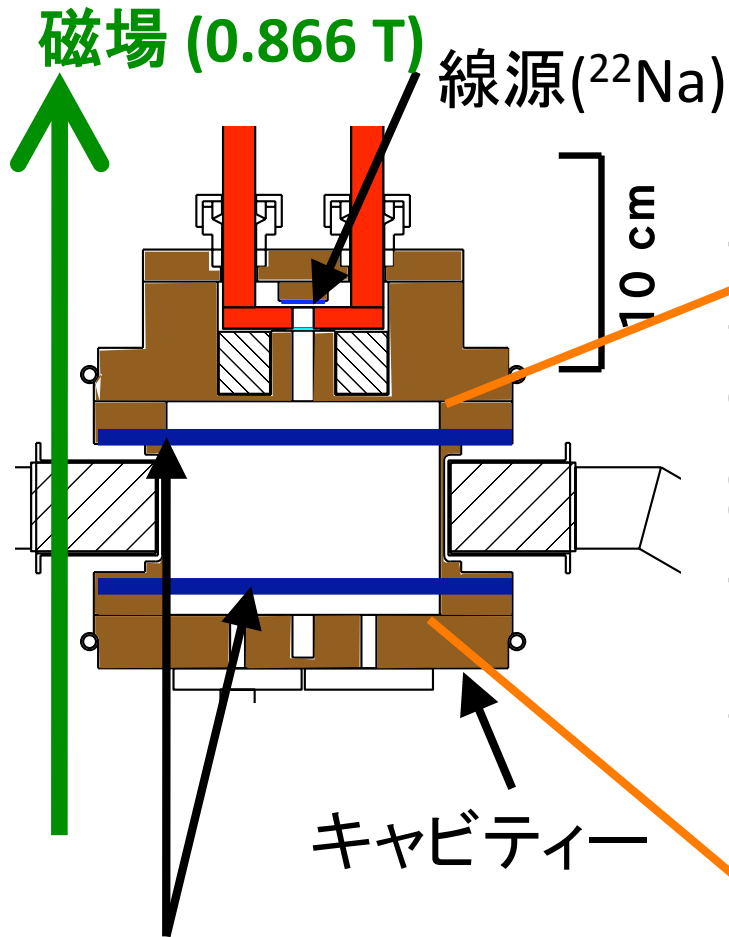
# 系統誤差

| 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        |

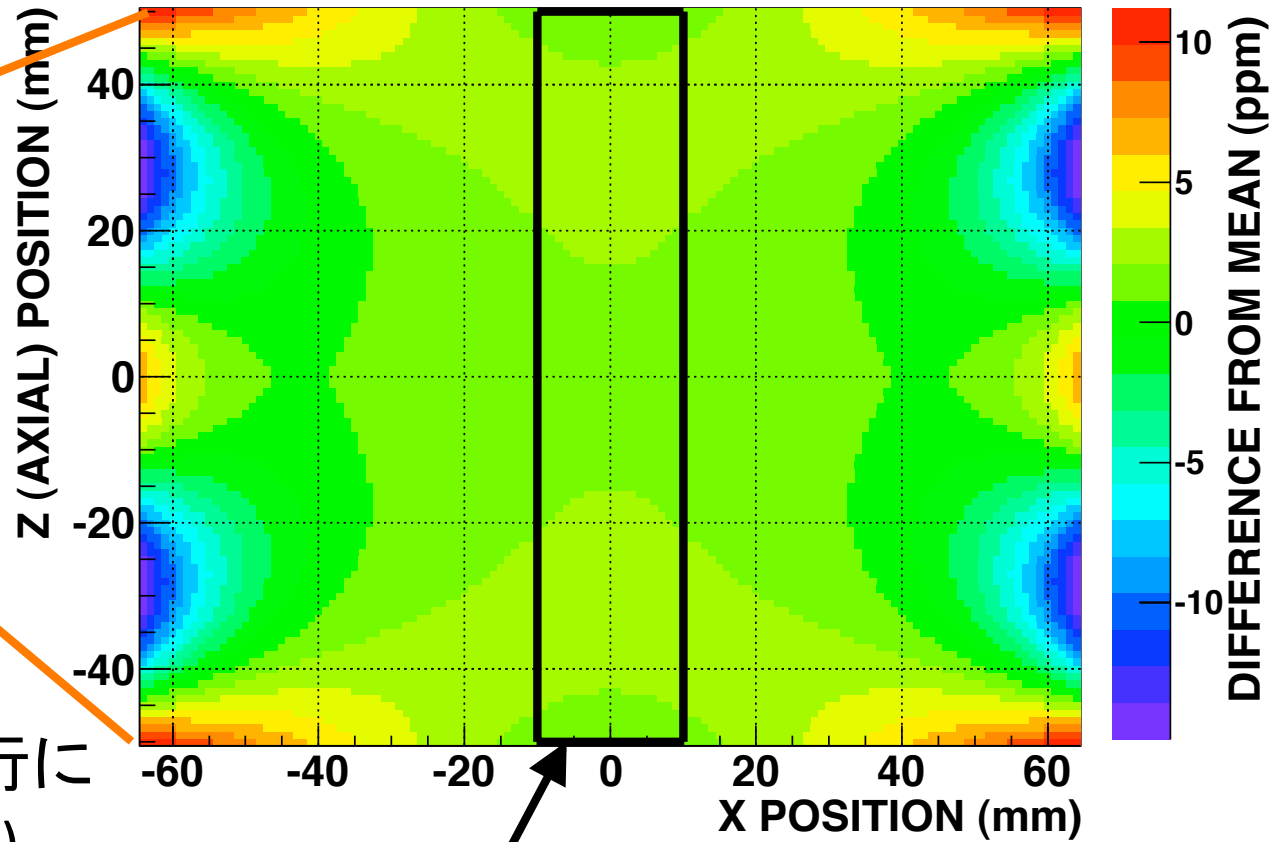
# 今後の展望

- **磁場** : 最大の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、設計した。実機製作中。試験的に測定を行う(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。(→佐々木のトーク)
- **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。

# 補償磁石



上から見た磁場分布 (計算値)  
(キャビティーの中心を通る平面、中心が原点)



- ・ 2つの円形コイルを平行に設置 (キャビティーに巻く)。
- ・ 静磁場と逆向きの磁場を作り、キャビティー内の磁場勾配を打ち消す。

ポジトロニウム生成領域内での一様性は、0.8 ppm (RMS)

→4月に測定して確かめる。

# まとめ

- 重要な物理量である、ポジトロニウム超微細構造が、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、最大の系統誤差は、磁場の非一様性。
- 補償磁石の開発、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。