

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

東大理, 東大素セ^A, 東大院総合文化^B, KEK^C

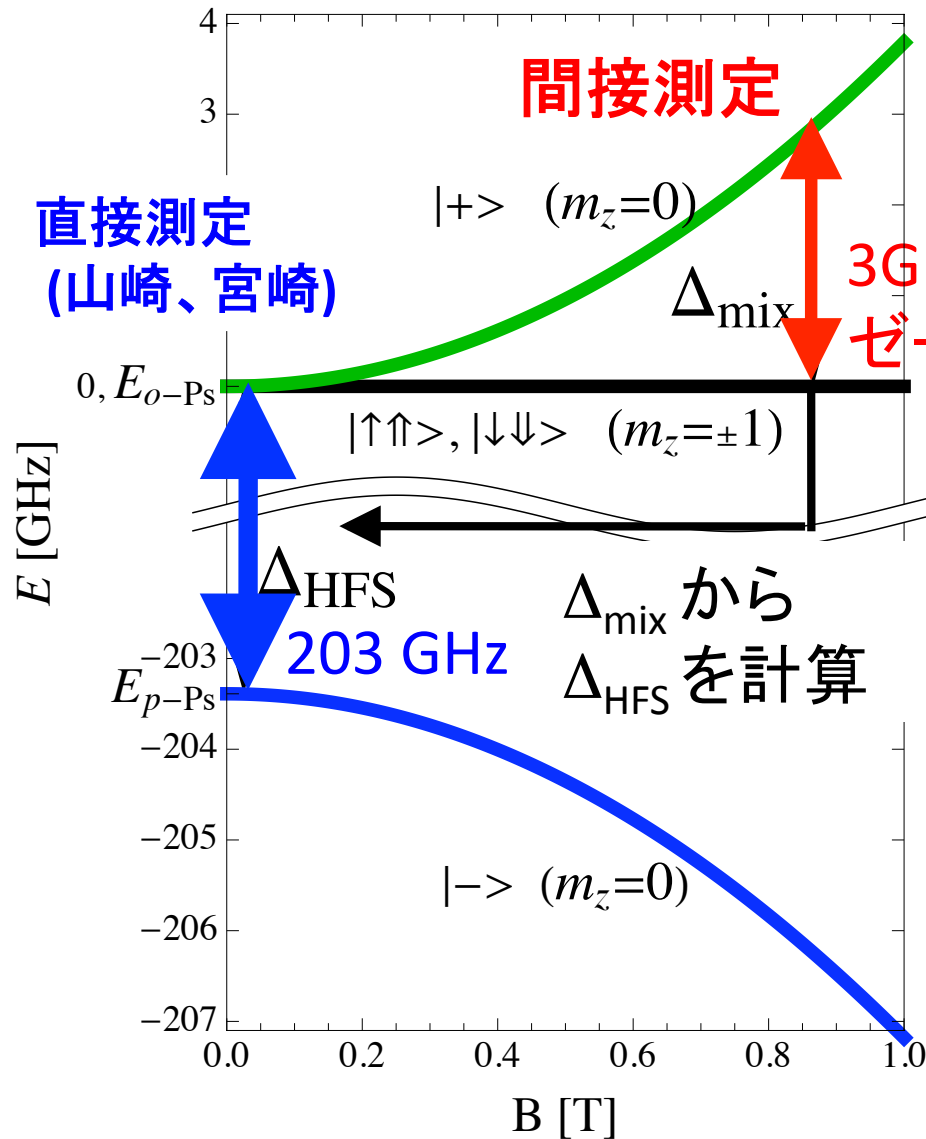
石田明, 秋元銀河, 佐々木雄一,
末原大幹^A, 難波俊雄^A, 浅井祥仁, 小林富雄^A,
斎藤晴雄^B, 吉田光宏^C, 田中賢一^C, 山本明^C

平成22年9月14日 日本物理学会 2010年秋季大会
於九州工業大学戸畑キャンパス

目次

- インTRODクシヨN
(磁場を用いた O(ppm) の精密測定)
- 我々の新しい実験セツトアツプ
- 本測定の途中結果
- 今後の展望と現状

ゼーマン効果を用いた間接測定の方法



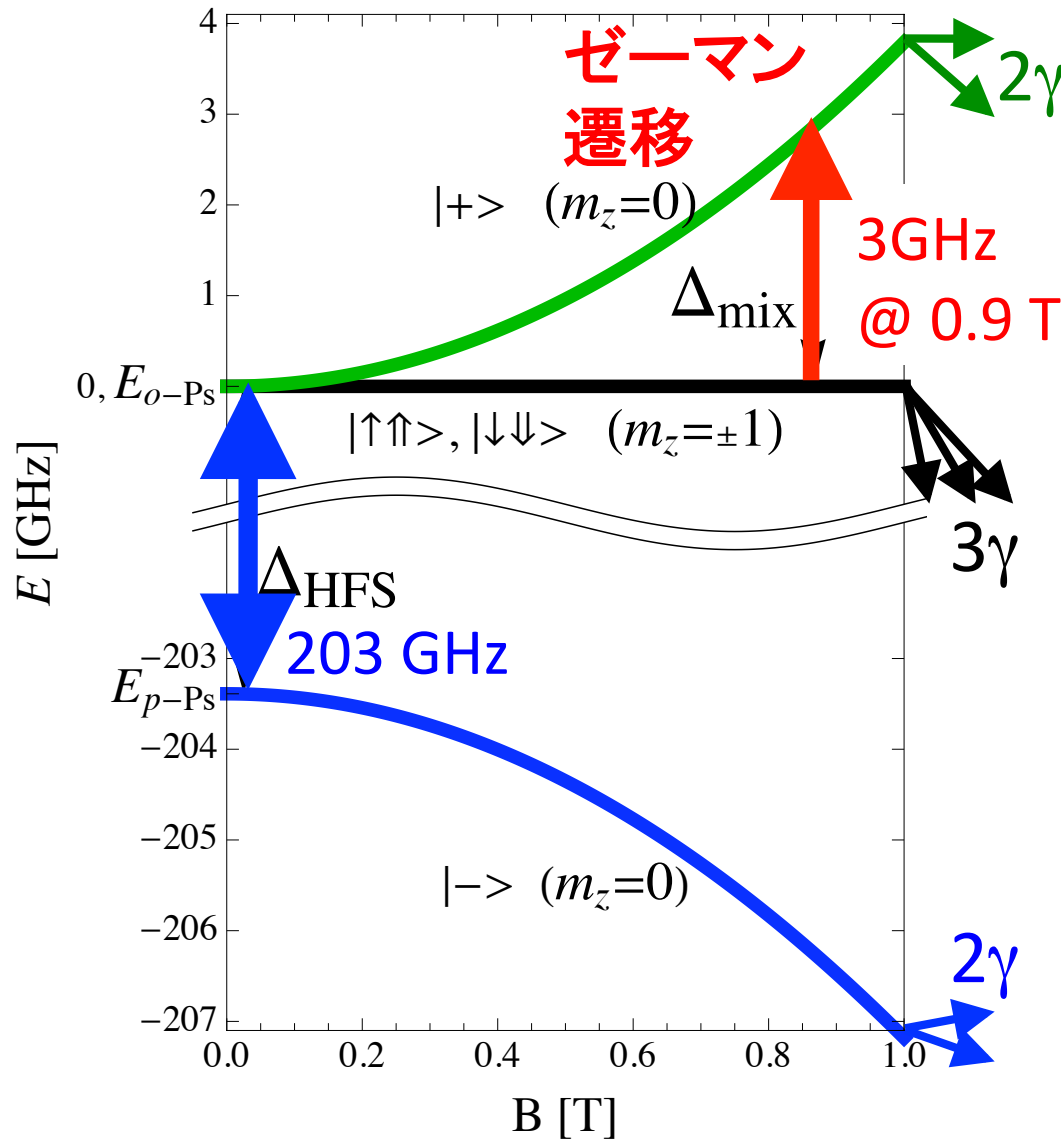
静磁場中では、**p-Ps** は **o-Ps** の $m_z=0$ 成分と混合する。(2 γ 崩壊).

Δ_{mix} を精密に測定し、
 Δ_{HFS} を以下の式で求める。

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

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

ゼーマン効果を用いた間接測定の方法



周波数が Δ_{mix} のマイクロ波を供給すると、 $o\text{-Ps}$ の $m_z=0$ と $m_z=\pm 1$ 成分の間で遷移が起こる。

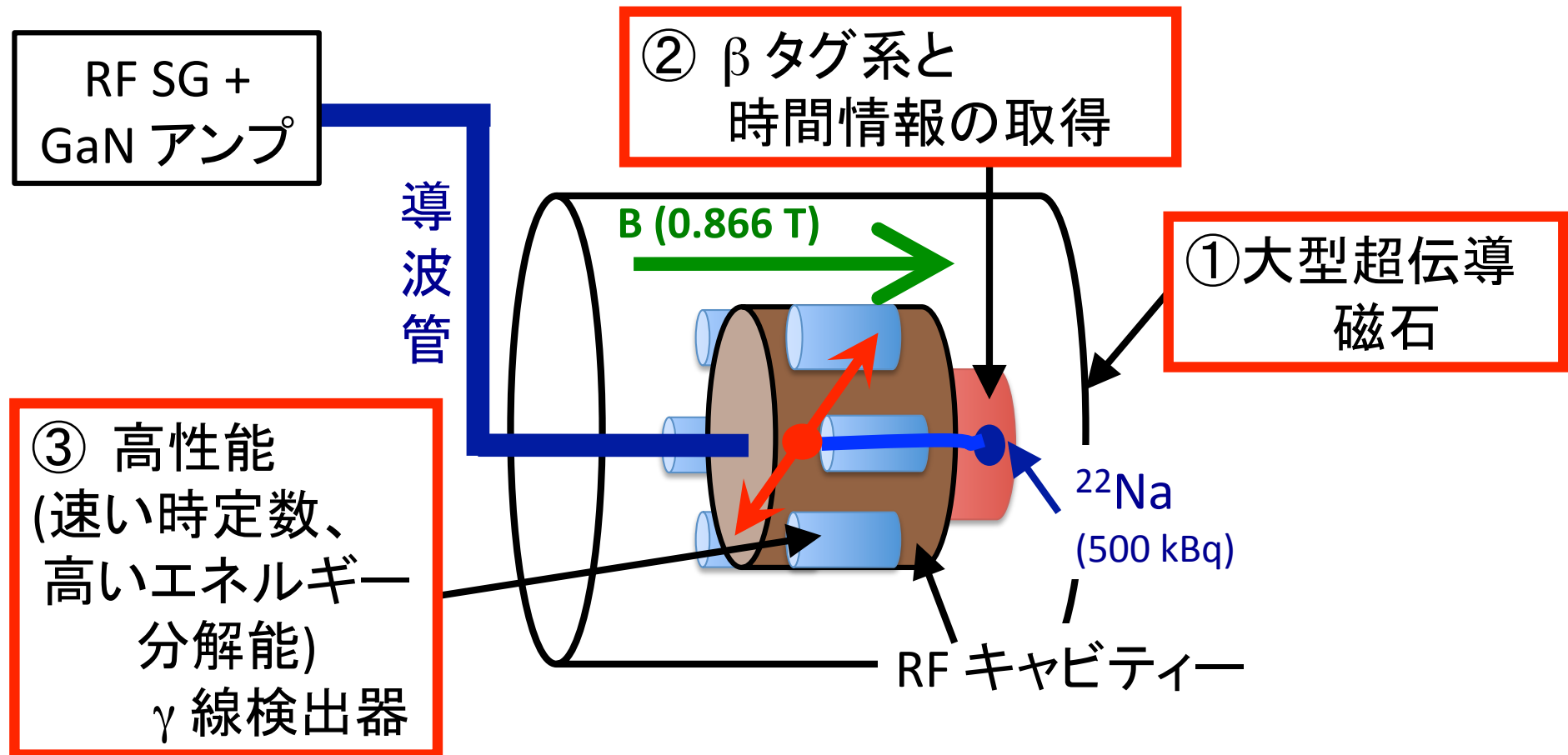
→ 2γ 崩壊(511 keV 単色) 率が大きくなる。
この崩壊率の変化が、実験のシグナルになる。

→ 過去の全ての実験と同じ方法

我々の新しい実験セットアップ

測定の原理は過去と同じ (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。

3つの新しいアイデアと技術を導入 1. 磁石 2. 時間 3. ガンマ線

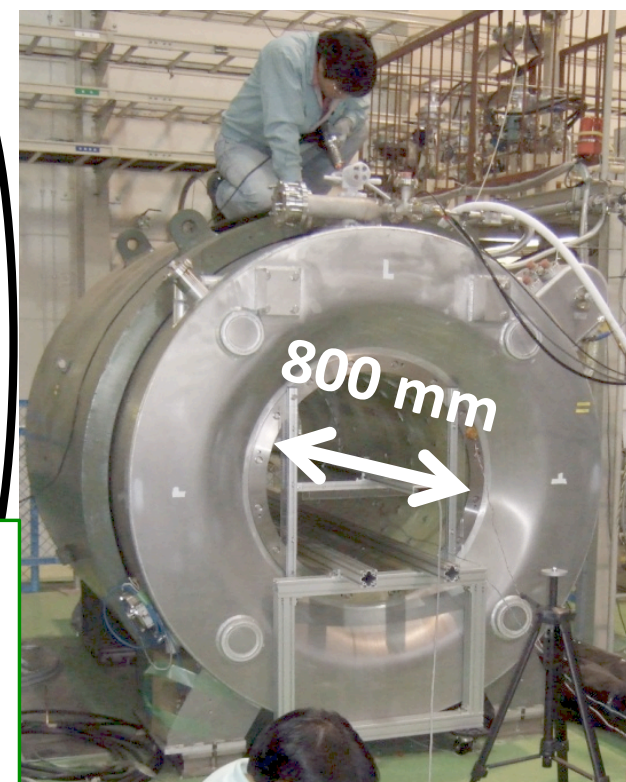
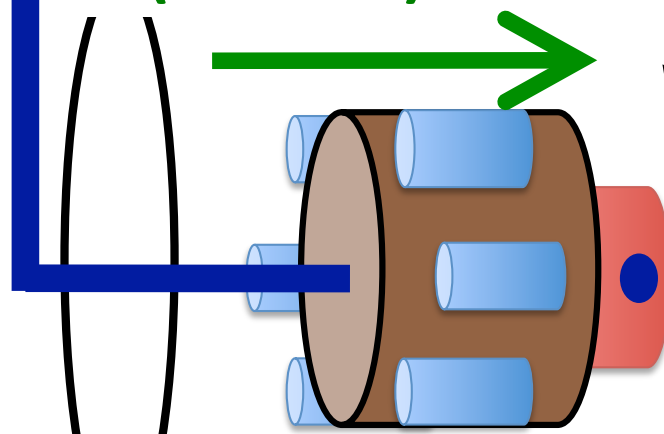


我々の新しい実験セットアップ

RF SG +
GaN アンプ

・大型超伝導磁石
+ 補償磁石

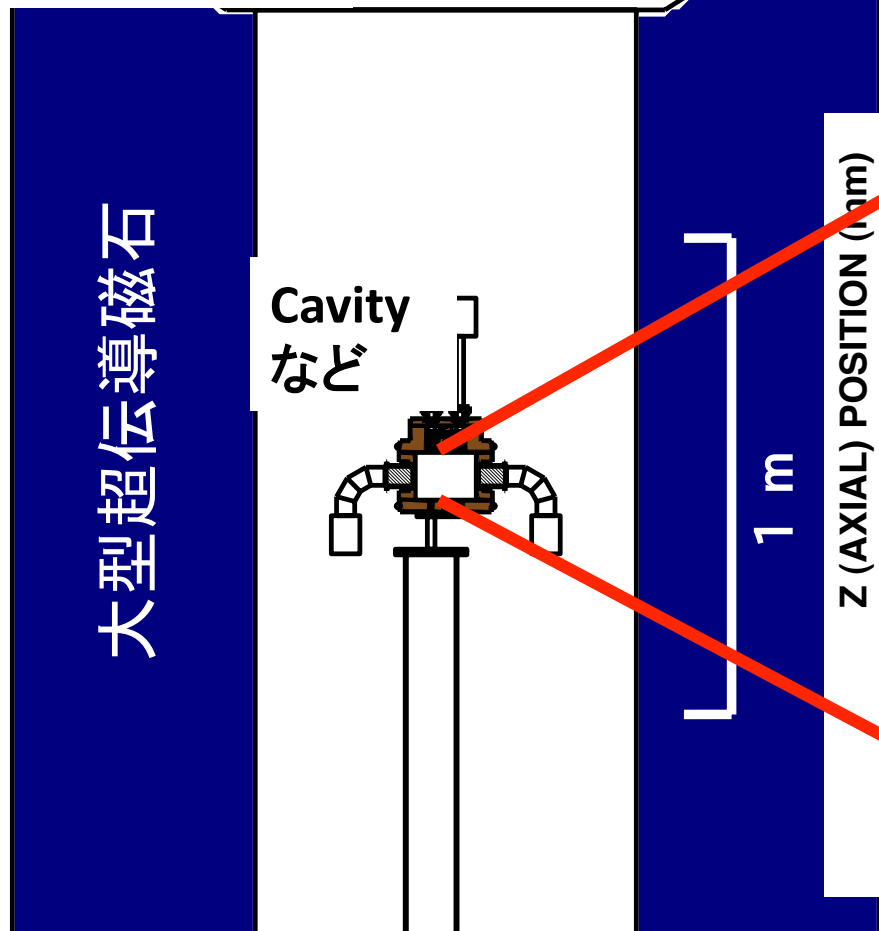
静磁場
B (0.866 T)



大型 → 大きな領域で一様磁場
(超伝導磁石だけで 10.4 ppm RMS)
永久電流モード → 安定した磁場

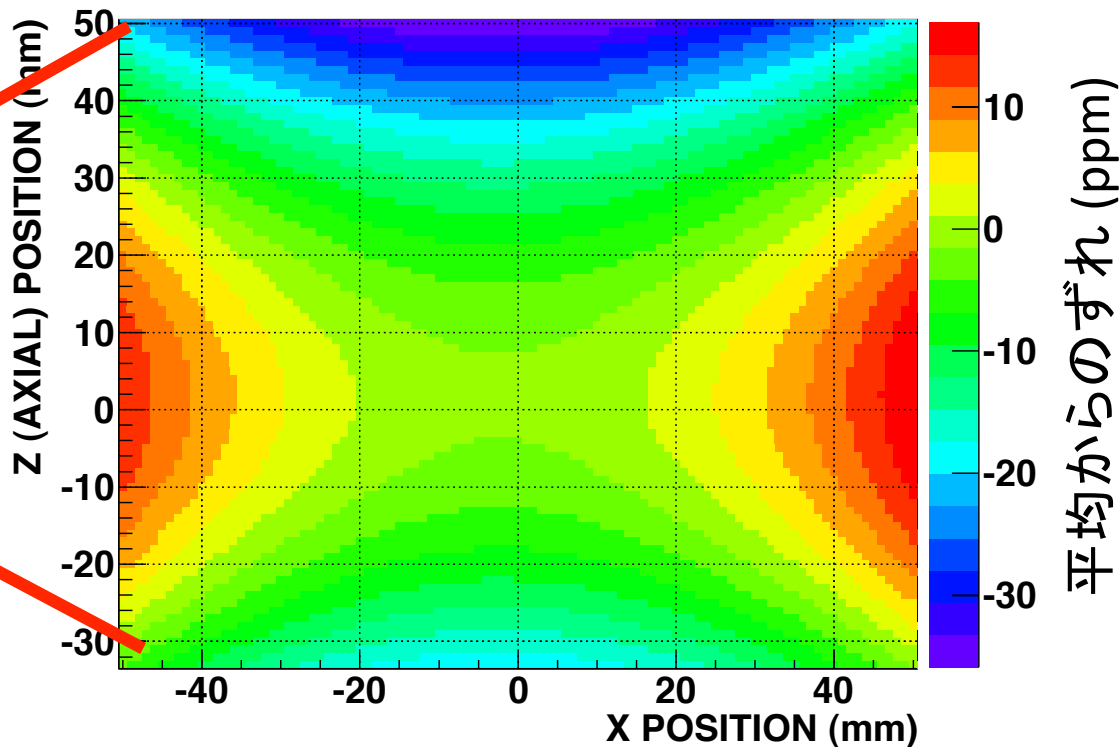
磁場の非一様性

上から見た図



キャビティー内磁場分布(水平面)
(キャビティーの中心が原点)

● ^{22}Na

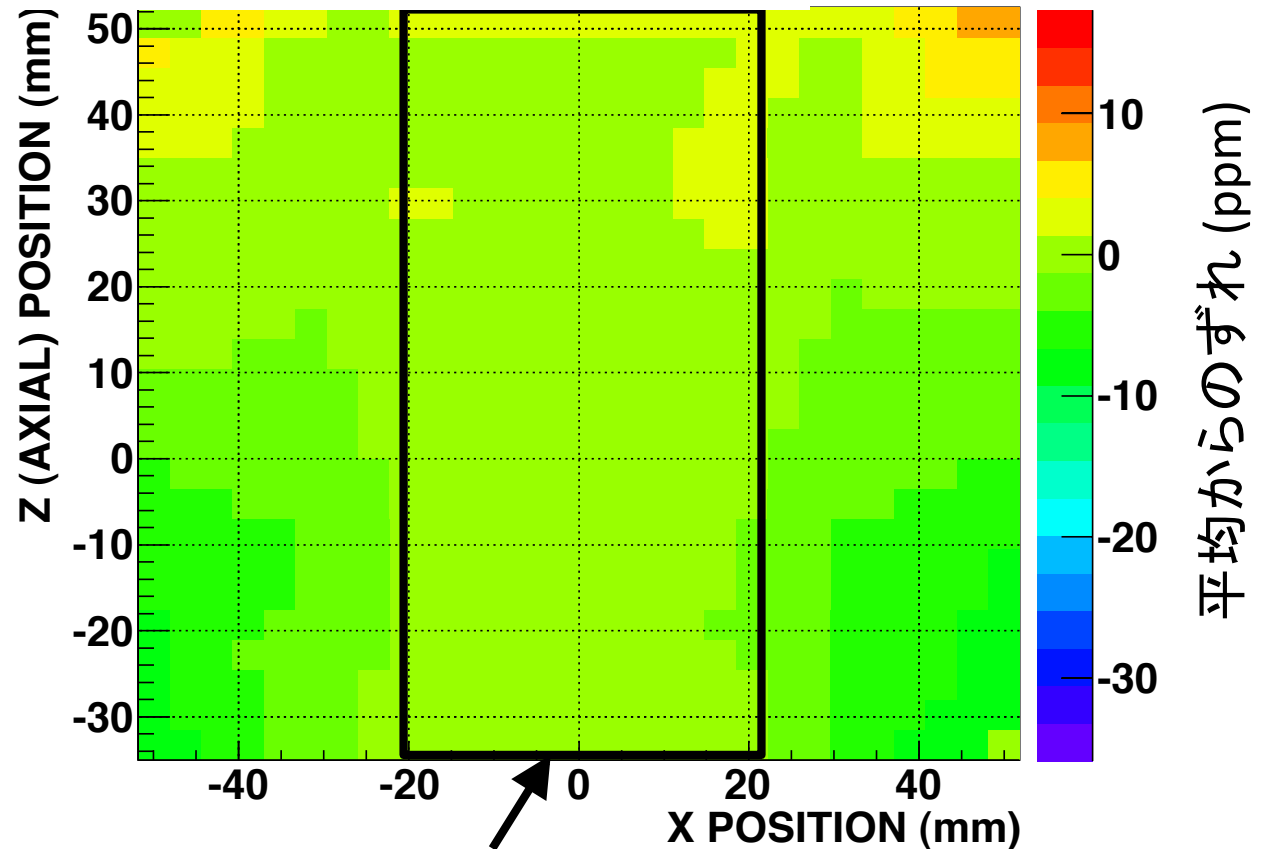


- 大型超伝導磁石だけでは、まだ 10 ppm 程度の非一様性が残る。
- PMT (強磁性体) や治具の影響も大きい。それらを含めて磁場の
一様性を 0(ppm) で出せるよう、補償磁石を設計・製作した。

補償磁石

キャビティー内磁場分布 (水平面)
(原点はキャビティー中心)

● ^{22}Na



- ・ 2つの円形コイルをRFキャビティーのフランジに巻く。
- ・ 元の磁場と逆向きの磁場を作り、磁場勾配を小さくする。

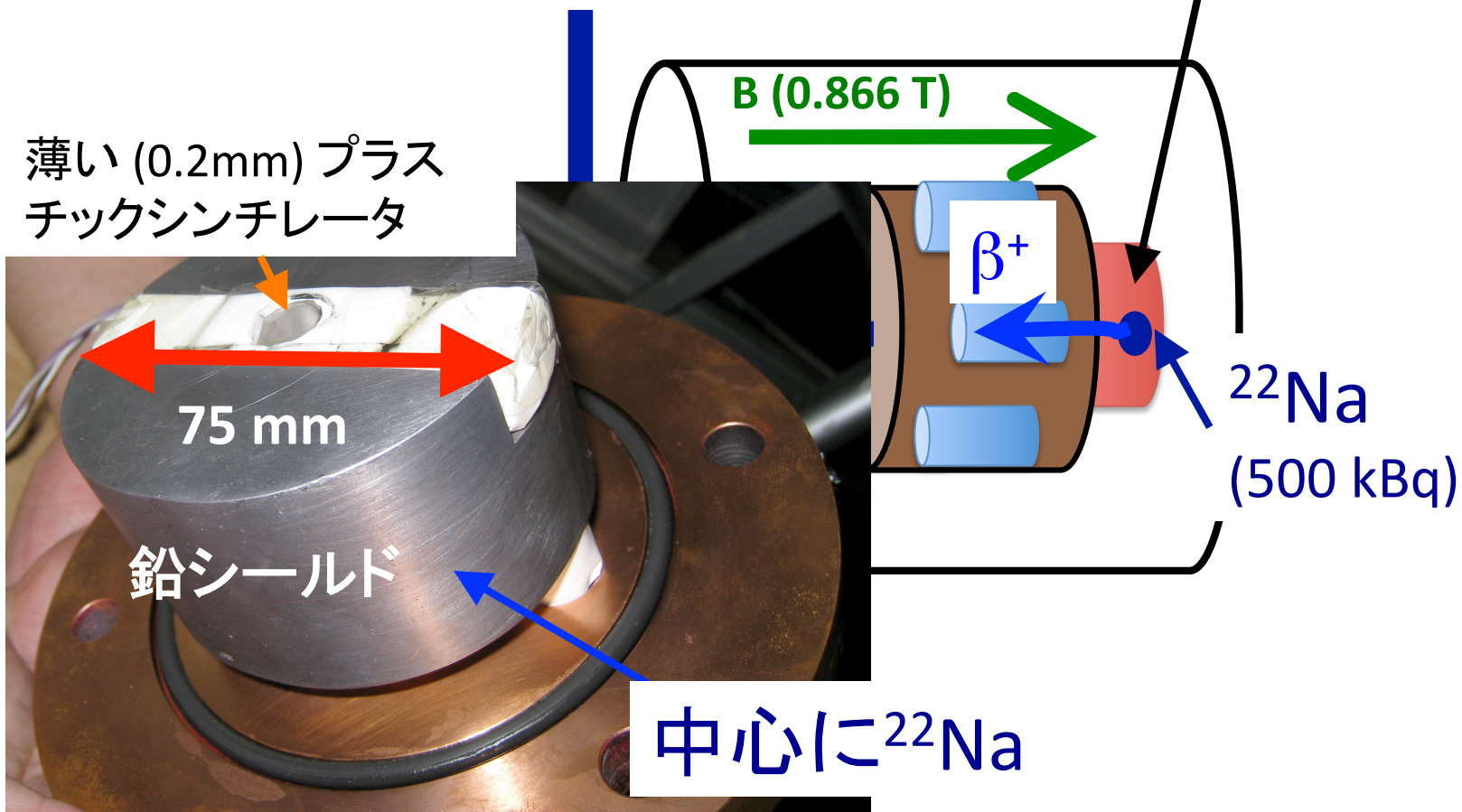
0.9 ppm (RMS) の一様性 が、Ps 生成領域
内で得られた。

→ 最終測定の設定アップに導入。

我々の新しい実験セットアップ

・ β タグ系と時間情報の取得

- (1) 高い S/N (20倍に高める)
- (2) Psの熱化を直接測れる (次の佐々木)

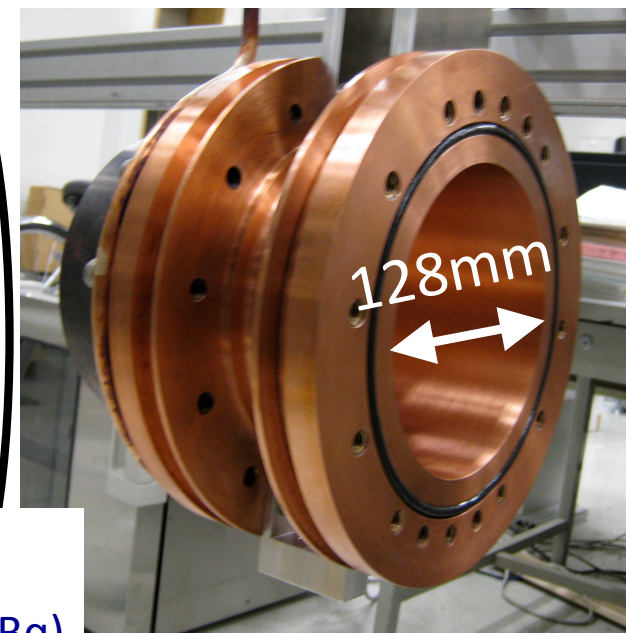
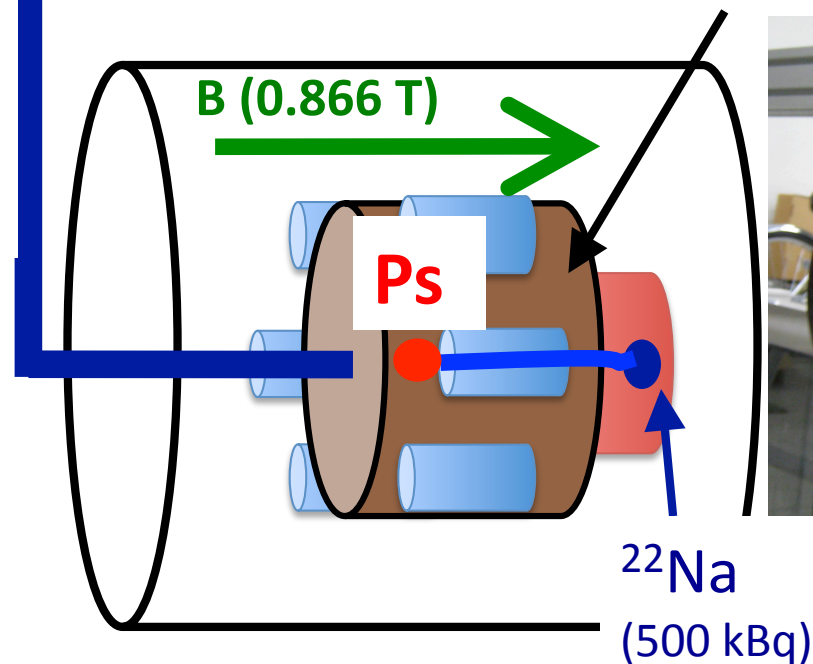


我々の新しい実験セットアップ

RF SG +
GaN アンプ
2.9 GHz
500 W CW

導波管

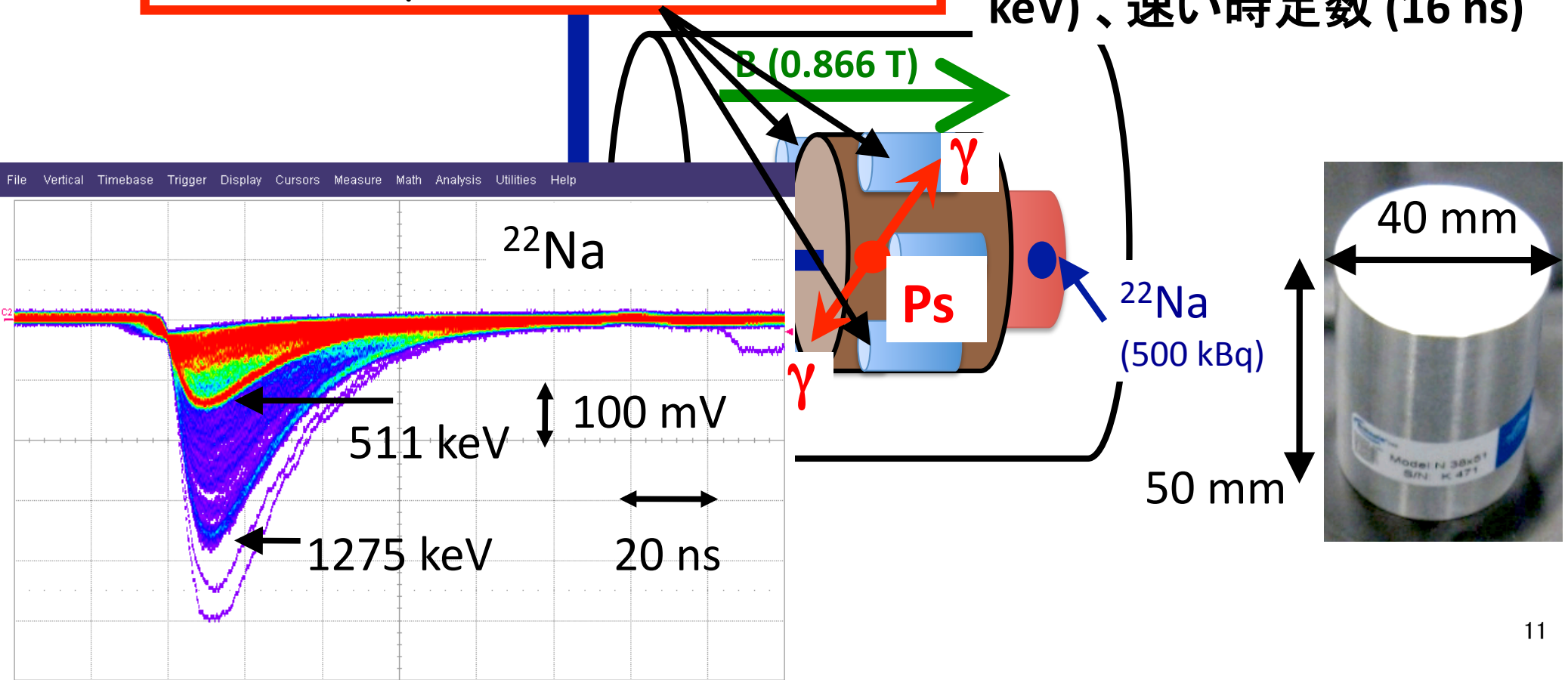
RF キャビティー
TM₁₁₀ モード, $Q_L=10,300$
ガスを充填
(イソブタン 100%)



我々の新しい実験セットアップ

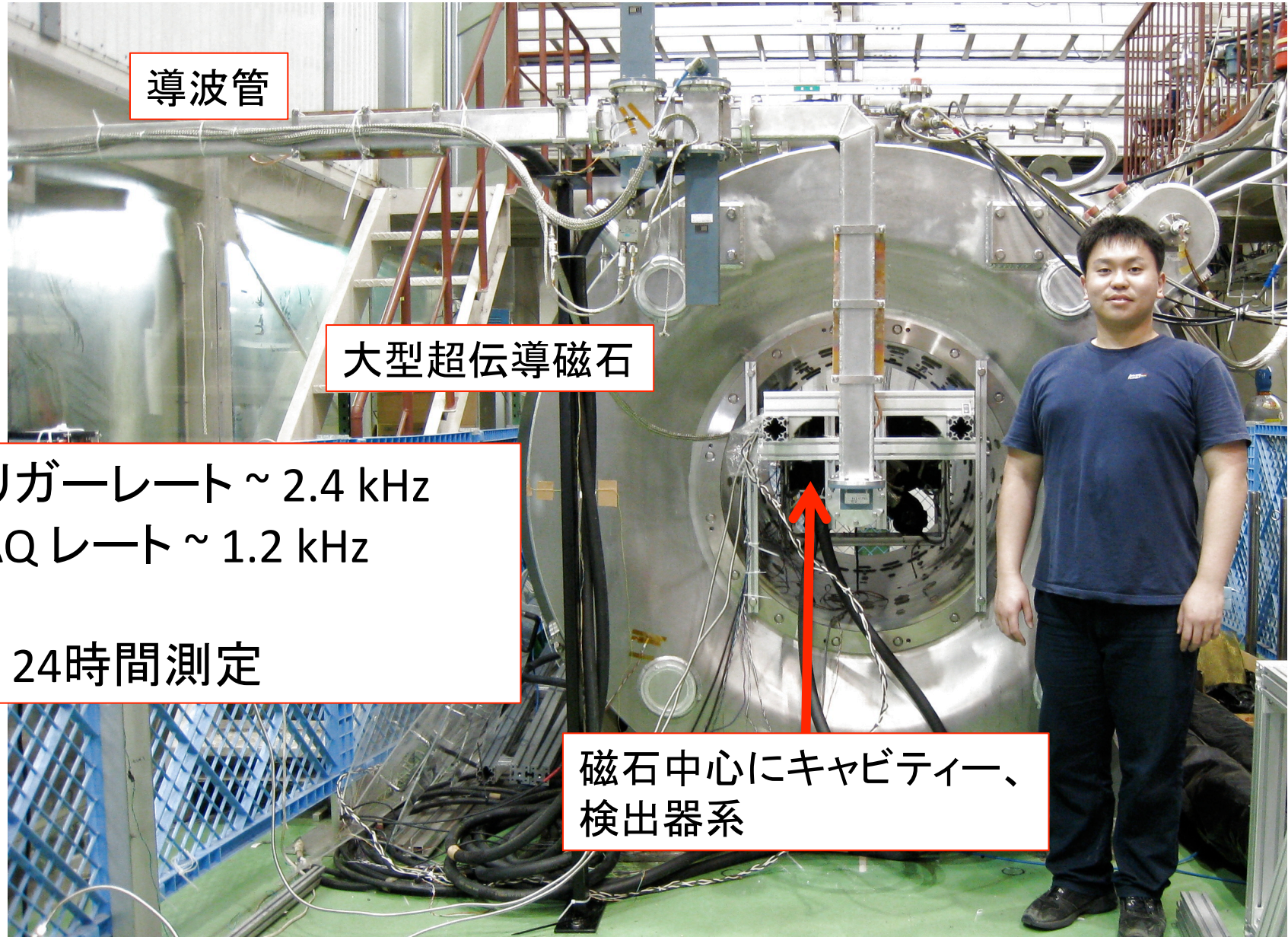
- 高性能 (速い時定数、高いエネルギー分解能)
 γ 線検出器

- LaBr₃(Ce) シンチレータ x 6
- 高いエネルギー分解能(4% FWHM @ 511 keV)、時間分解能 (200 ps FWHM @ 511 keV)、速い時定数 (16 ns)



本測定

平成22年7月1日から測定中 @KEK低温棟



導波管

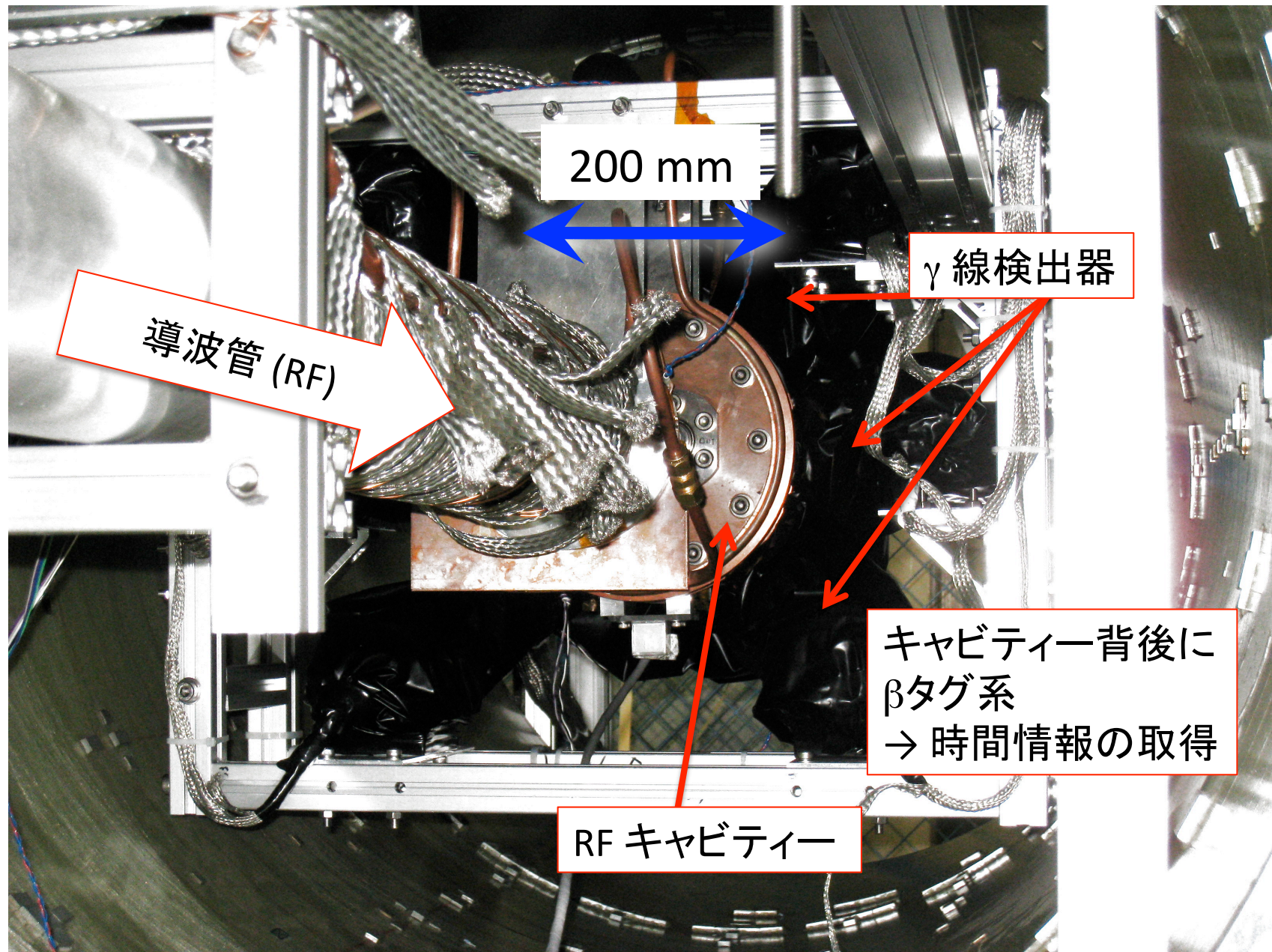
大型超伝導磁石

トリガーレート ~ 2.4 kHz
DAQ レート ~ 1.2 kHz

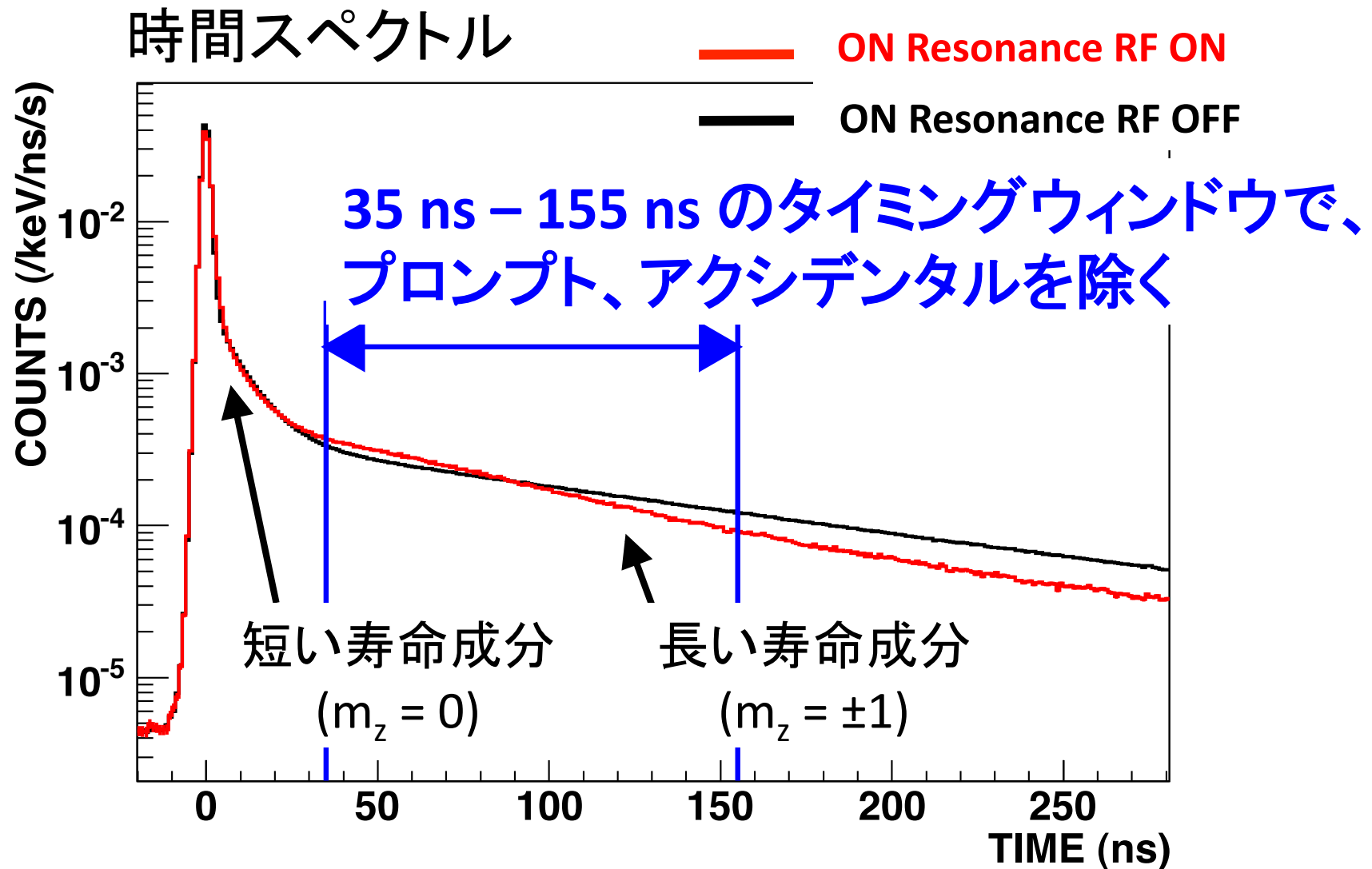
24時間測定

磁石中心にキャビティー、
検出器系

磁石中心部



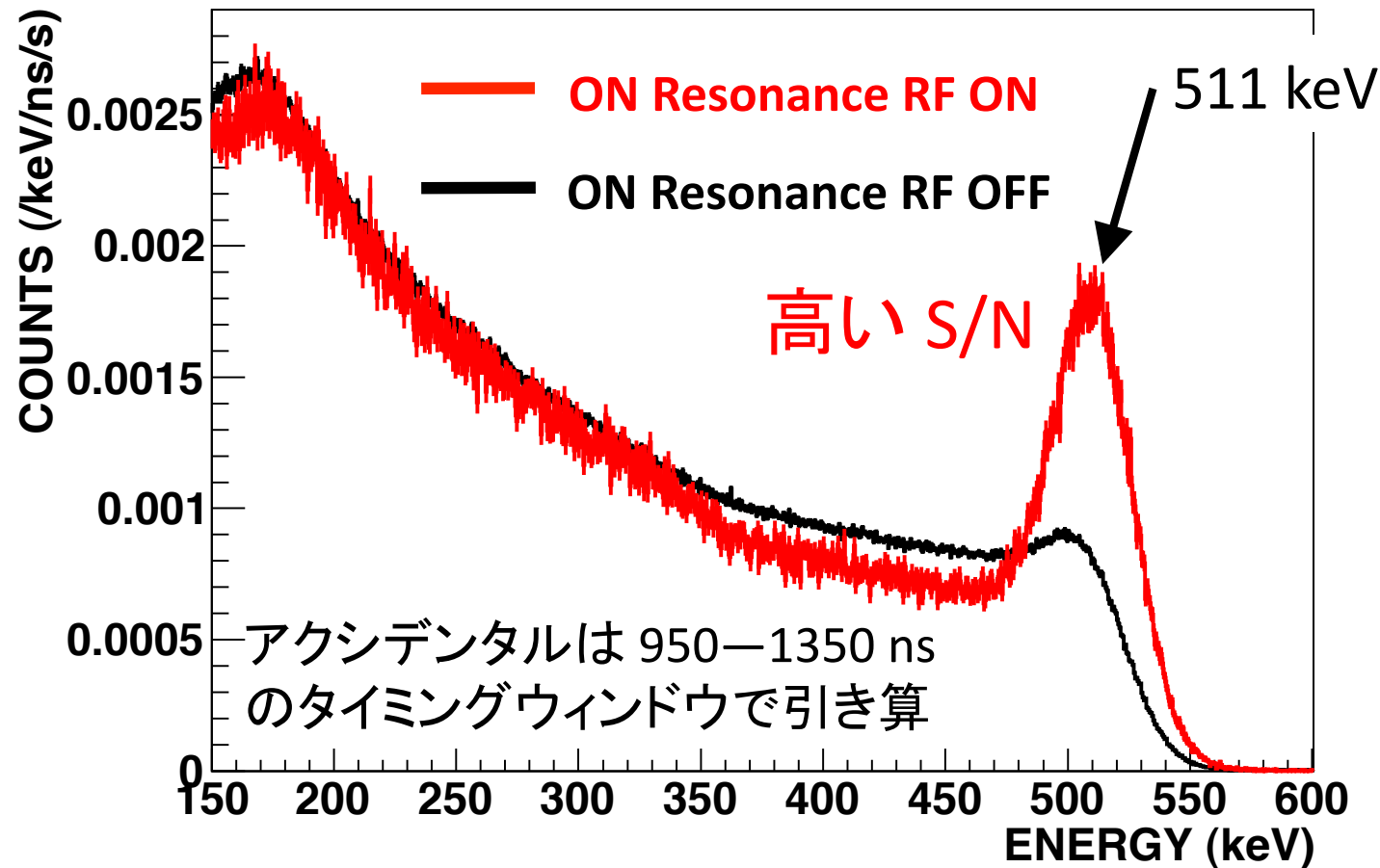
解析 (時間スペクトル)



ゼーマン遷移によって、Ps崩壊確率が大きくなった。

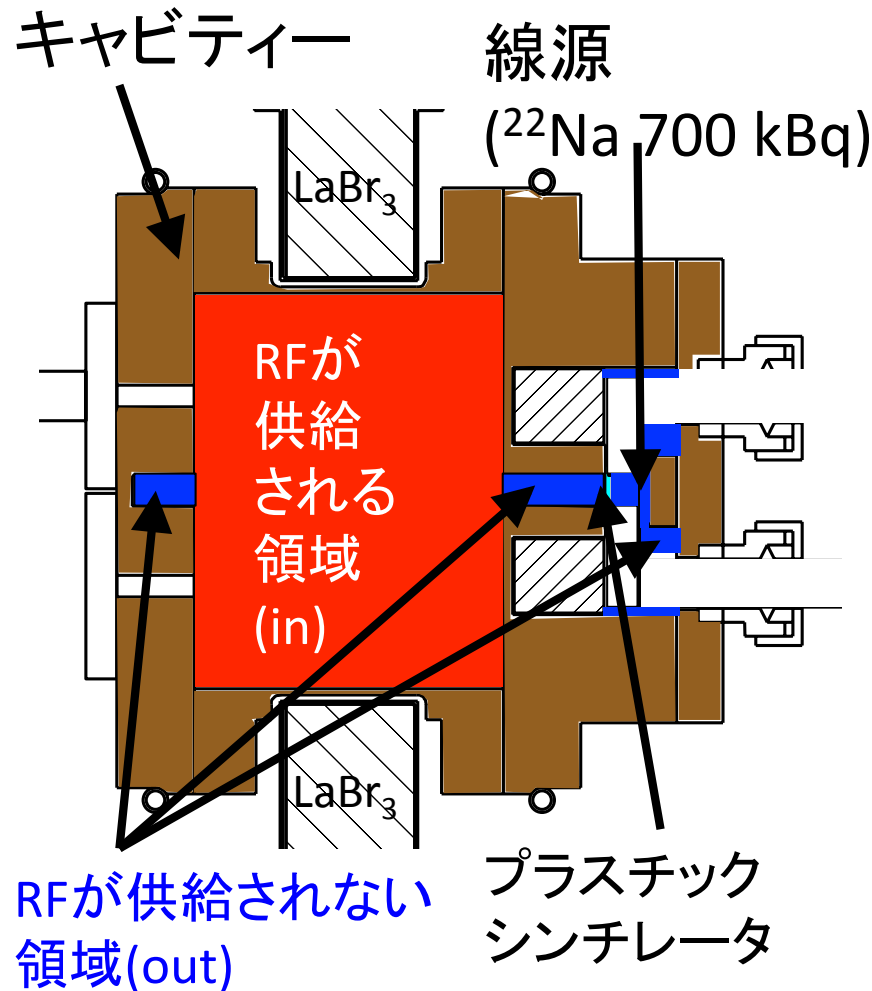
解析 (エネルギースペクトル)

エネルギースペクトル



ゼーマン遷移によって、 2γ 崩壊確率が大きくなった。
遷移確率を求めるには、検出効率が必要。その見積りは暫定的に、
MCシミュレーションでエネルギースペクトルをフィットして行う。

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

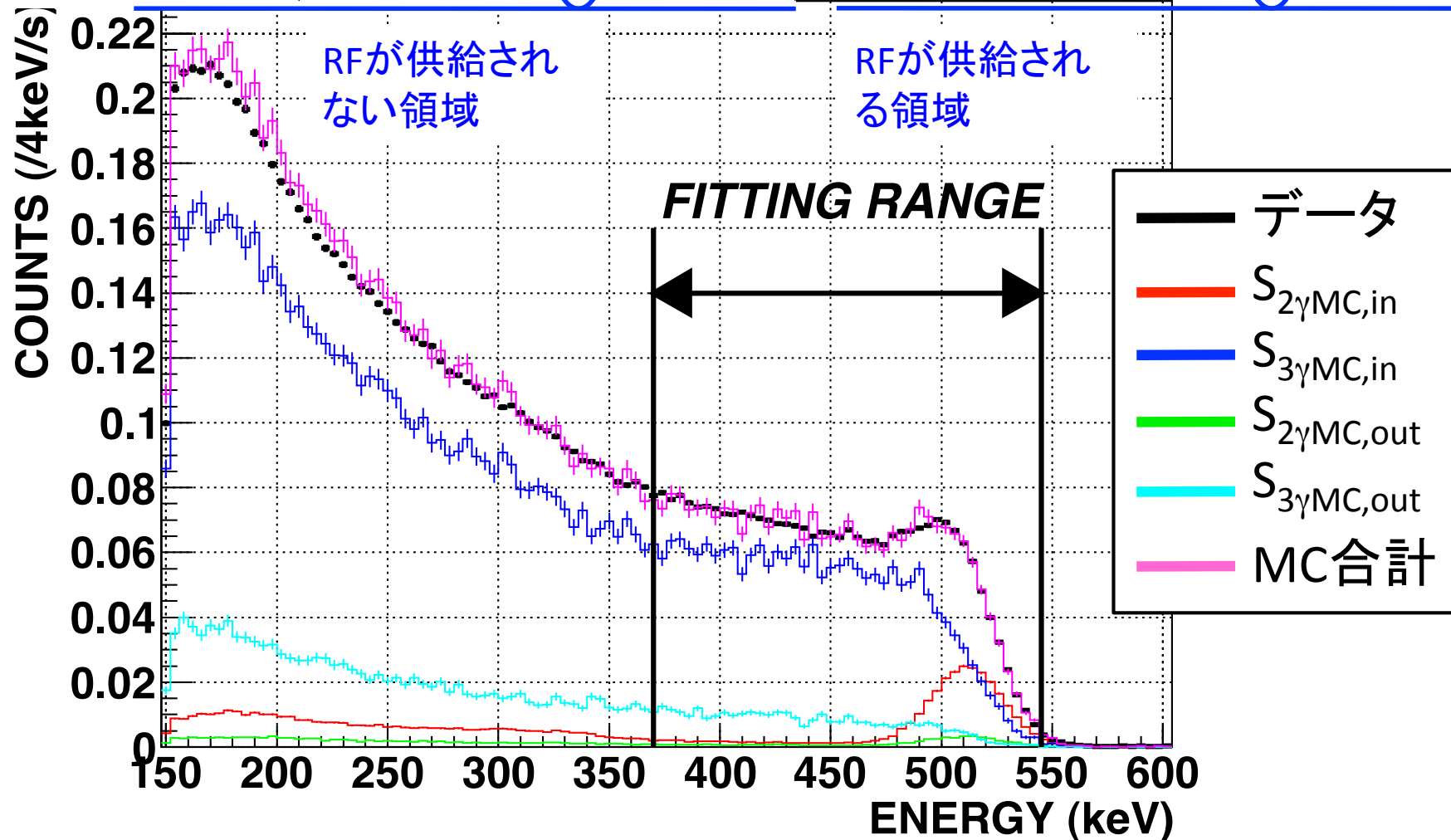
$$S_{ON} = \frac{A_{OFF} (S_{3\gamma MC, out} + \beta S_{2\gamma MC, out})}{A_{ON} (S_{3\gamma MC, in} + \Gamma S_{2\gamma MC, in})}$$

RFが供給されない領域
RFが供給される領域

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

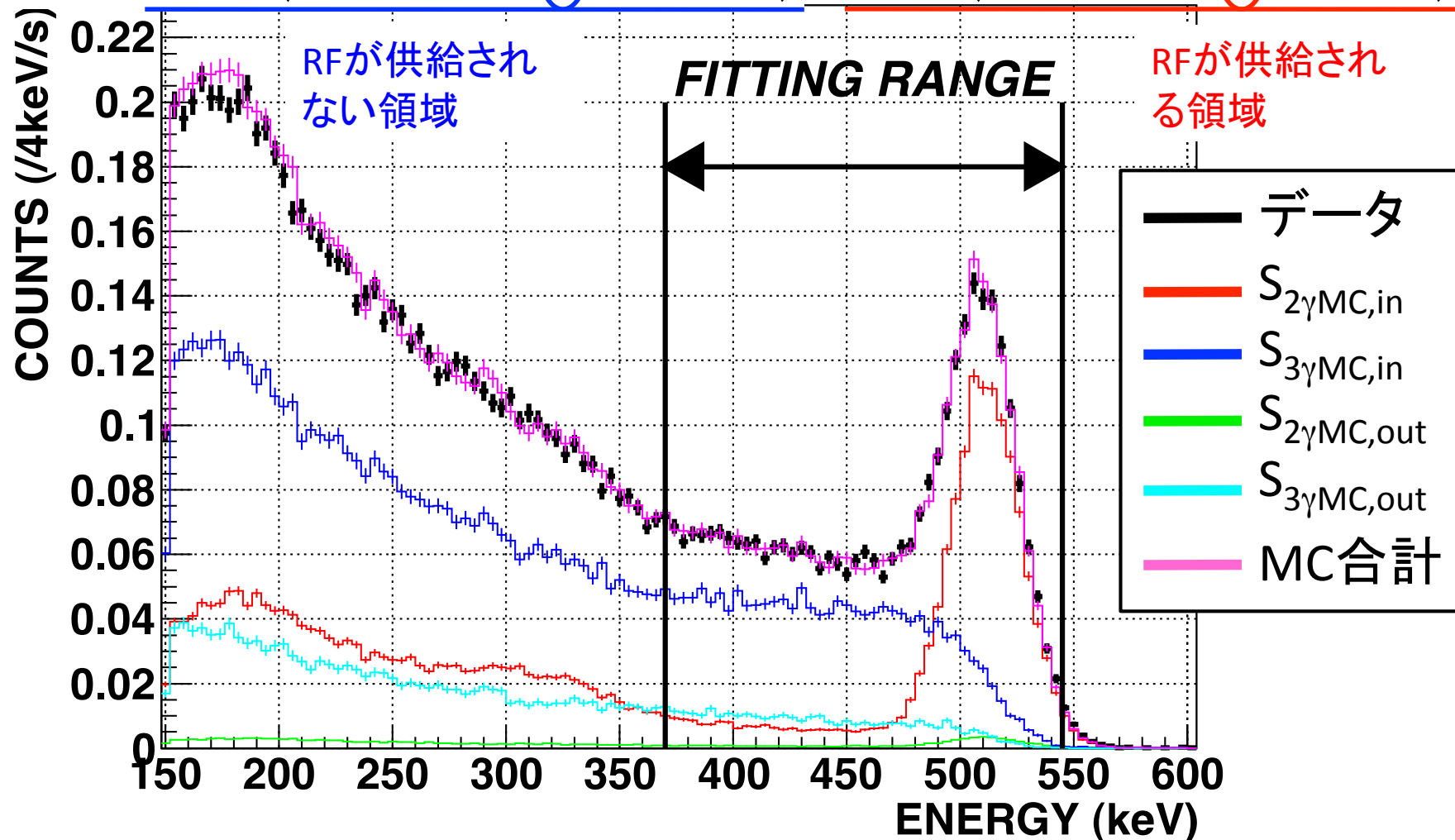
モンテカルロ・シミュレーションによる エネルギースペクトルのフィット (RF-OFF)

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



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)

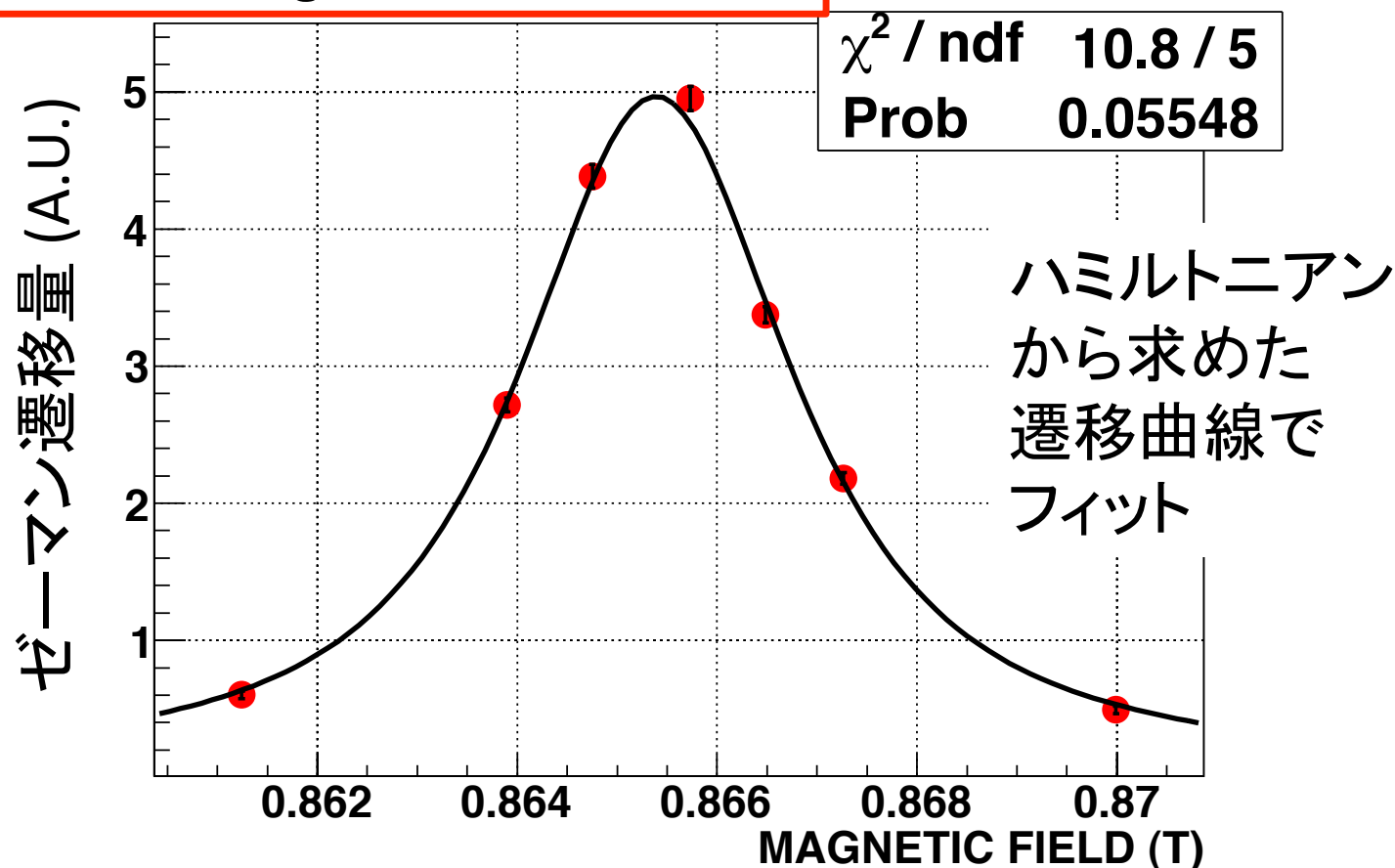
$$S_{ON} = A_{OFF} \left(S_{3\gamma MC, out} + \beta S_{2\gamma MC, out} \right) + A_{ON} \left(S_{3\gamma MC, in} + \Gamma S_{2\gamma MC, in} \right)$$



共鳴曲線 (0.8952 amagat)

RFを固定して、**磁場でスキャン**。
 $2\gamma/3\gamma$ 崩壊比 $((\Gamma - \beta)/\beta)$ を
ゼーマン遷移量とした。

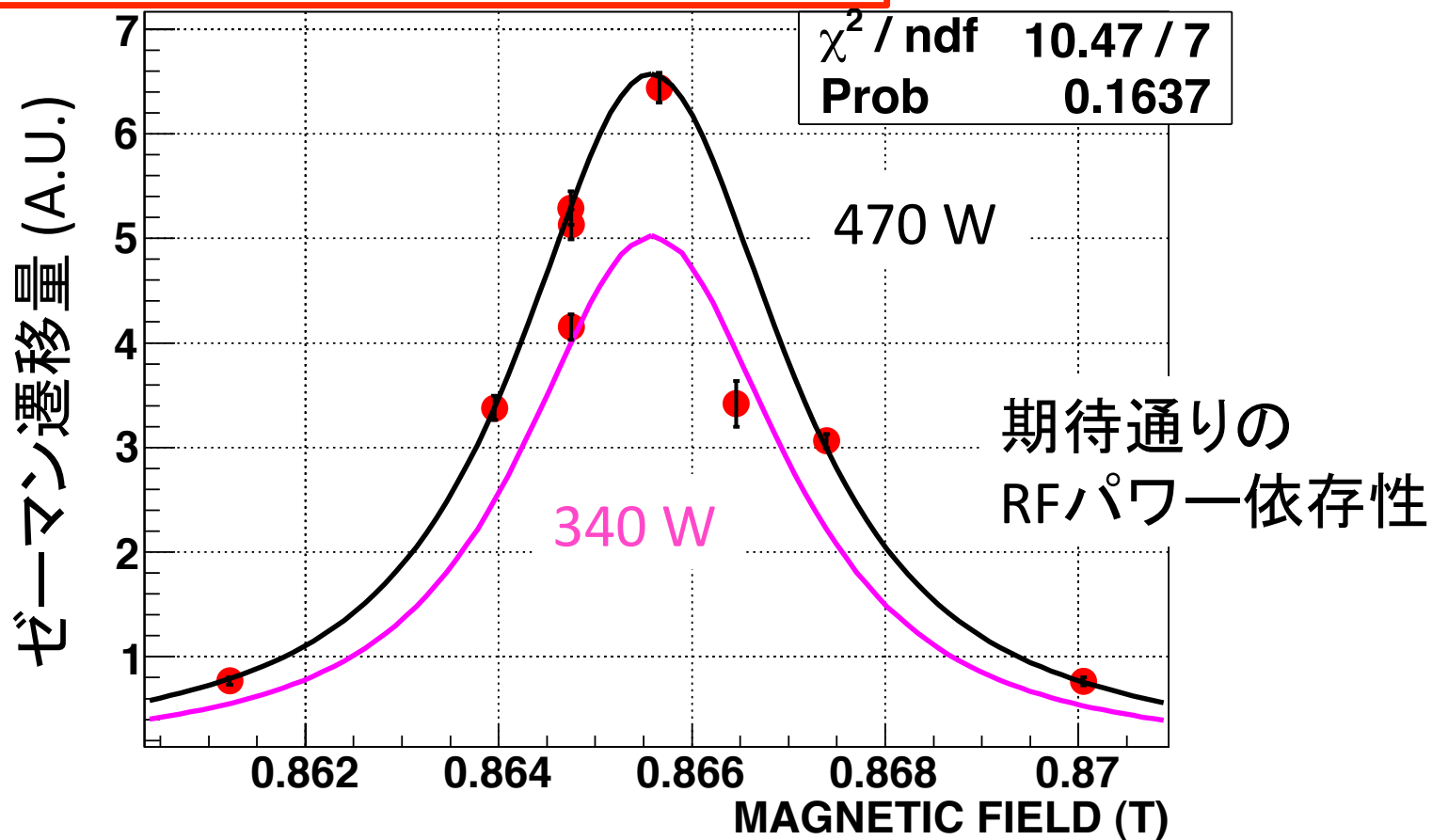
0.8952 amagat での共鳴曲線



$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.3460(75) \text{ GHz (37 ppm) (MC統計, P, Qのエラー含む)}$$

共鳴曲線 (0.6730 amagat)

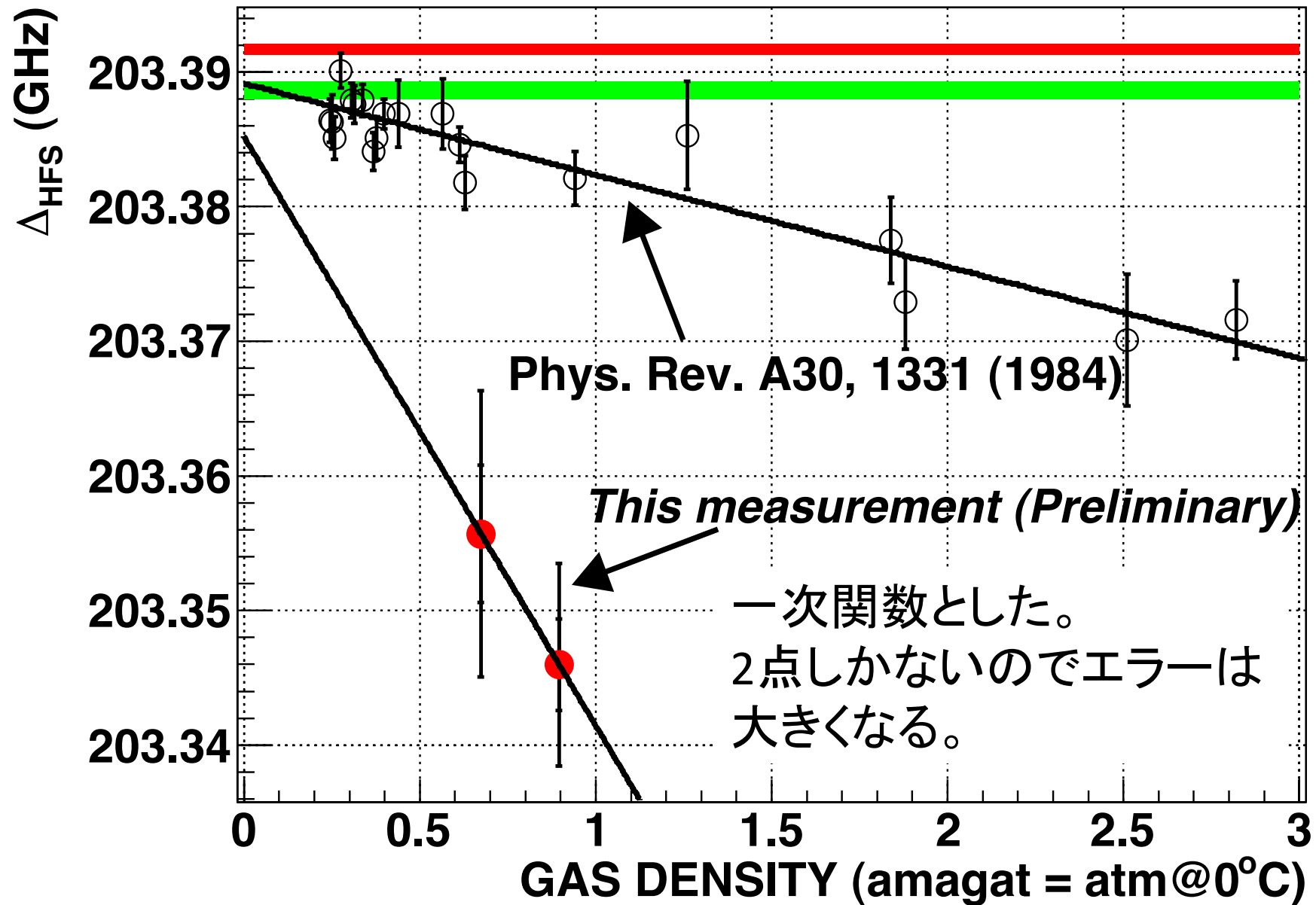
0.6730 amagat での共鳴曲線



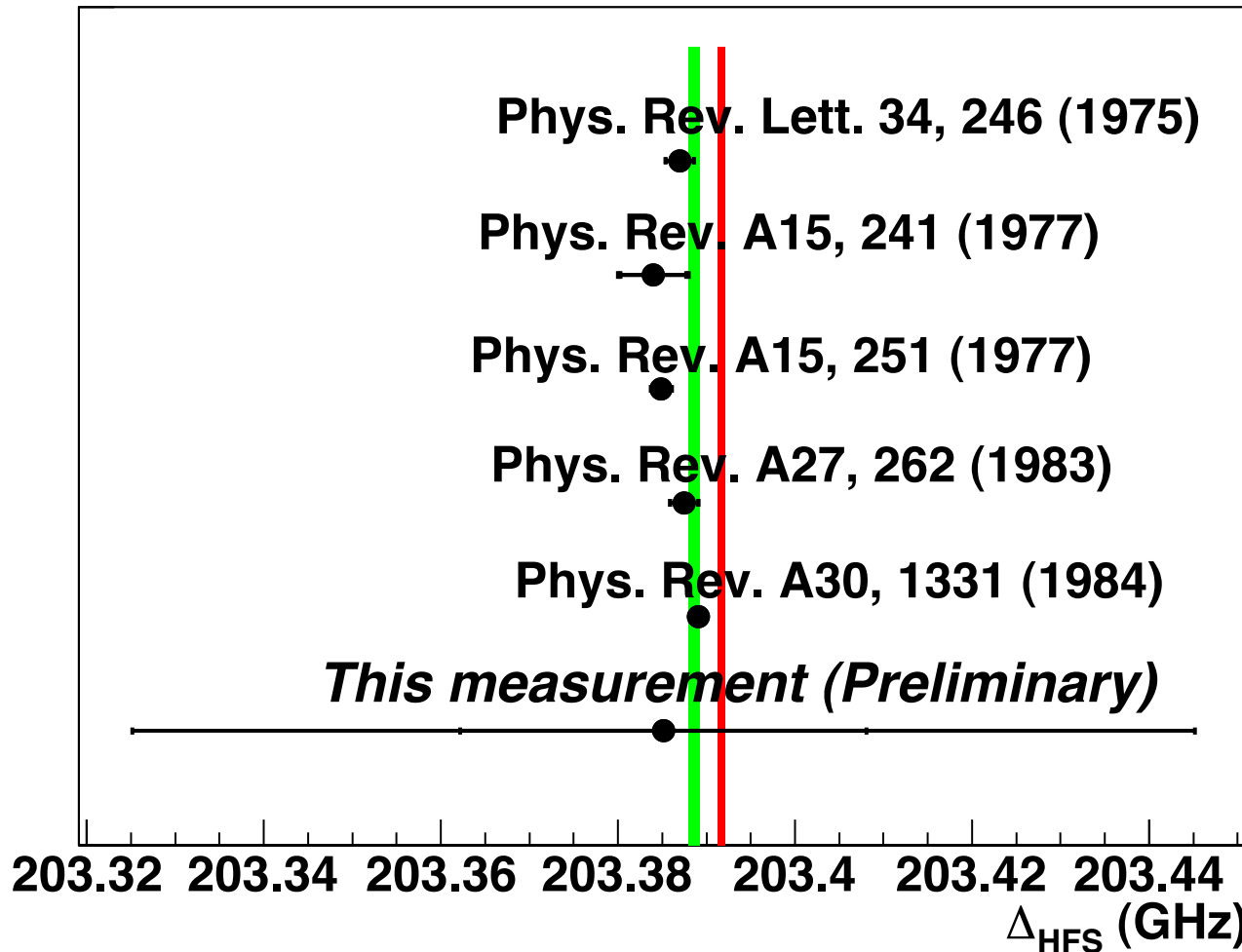
$\Delta_{\text{HFS}} = 203.356(11)$ GHz (52 ppm) (MC統計, P, Qのエラー含む)

→ 密度依存性の補正をして、真空での値を求める。

圧力 (密度) 依存性



本測定の暫定結果



• 純イソブタンで初めて測定。

• 測定の暫定結果は、過去の実験値・理論値と無矛盾。

本測定で得られた、超微細構造の暫定値

$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.385 \pm 0.023 \text{ (stat., 110 ppm)} \\ \pm 0.055 \text{ (sys., 270 ppm) GHz}$$

系統誤差 (暫定)

系統誤差の要因		大きさ (ppm)
磁場	非一様性	1.8
	補正	1
	NMR測定値	2
検出効率 の評価	評価法	170
	モンテカルロ・シミュレーションの統計	210
物質の効果	ポジトロニウムの熱化	14
RF	RF キャビティの Q_L	13
	RF パワー P	12
	RF周波数	1
Quadrature sum		270

まだ2点しかデータがないため、誤差が大きくなっている。

今後の展望と現状

- 磁場 : **OK**
- 物質の効果 : 様々なガス密度でHFSを測定
→ シュタルク効果の見積もり
ポジトロニウムの熱化関数を精密に測定 (→佐々木)
- RF : 温度管理して0(ppm)を達成。
新フィードスルーで性能向上予定。
- 統計誤差 : 今のところ 110 ppm
(ただし、まだ2点しかないことが大きく、
2年程度で 0(ppm) まで向上できる。)
- 検出効率 : 実データを基にして評価する。
→ 0(ppm) の系統誤差に抑える。(これから)

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 3.9σ ずれている。
- 時間情報を取得する、新しい精密測定を行う。
- 我々の新しい精密測定は、過去の実験で考えられる共通の系統誤差 (磁場の非一様性、 P_s の熱化) を小さくする。
- 本年7月より、本測定を開始。
- 本測定の暫定結果は、過去の実験値、理論値と無矛盾。
- 2年程度で、物質の効果を入れて $0(\text{ppm})$ の精度を達成し、ずれの検証を行う。