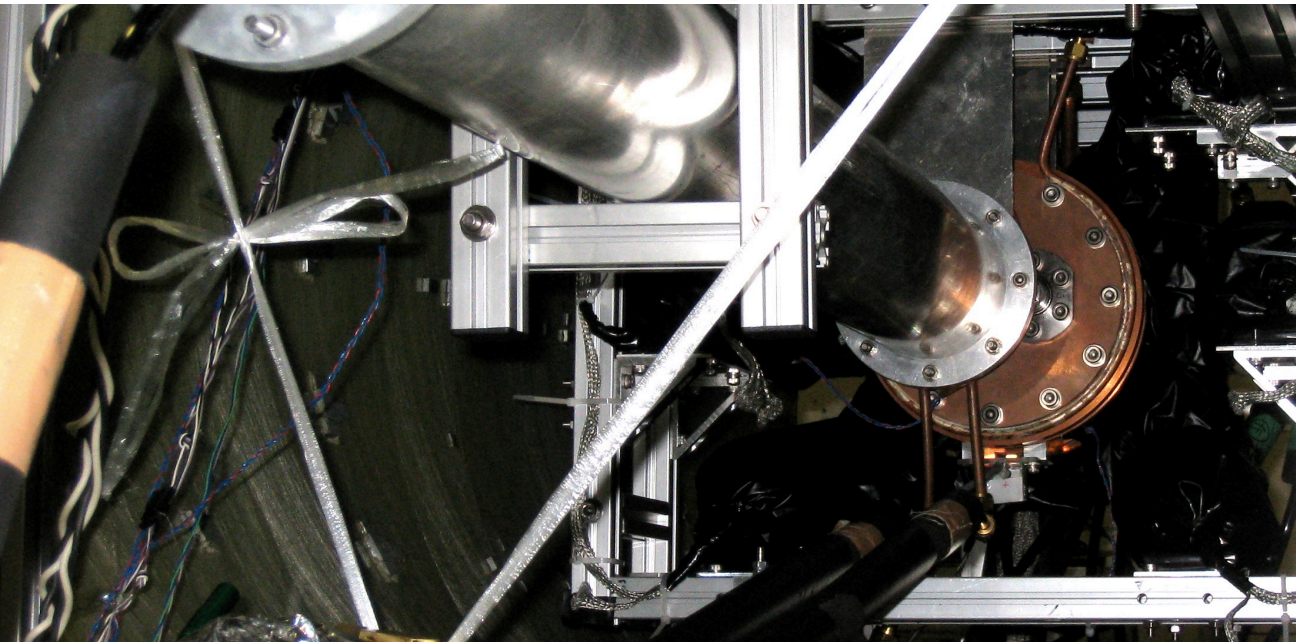


# ゼーマン効果を用いた ポジトロニウム超微細構造の 精密測定



東京大学大学院理学系研究科

石田明

平成23年10月20日 KEK超伝導低温工学センターセミナー

# メンバー

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻、  
東京大学素粒子物理国際研究センター (ICEPP)

石田明、  
末原大幹、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄

東京大学大学院総合文化研究科

斎藤晴雄

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

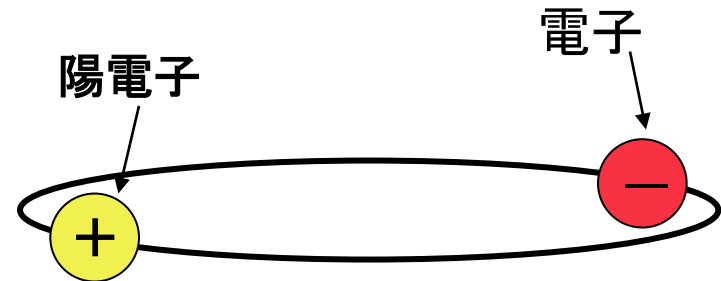
吉田光宏、田中賢一、山本明

# 目次

1. イントロダクション
2. 我々の新しい実験セットアップ
3. 測定の途中結果
4. 今後の展望
5.  $P_s$ の熱化について
6. まとめ

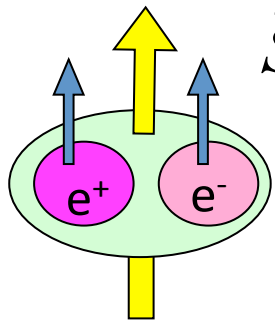
1. インTRODクシヨN
2. 我々の新しい実験セツトアツプ
3. 測定の途中結果
4. 今後の展望
5. Psの熱化について
6. まとめ

# ポジトロニウム (Ps)



- 電子 ( $e^-$ ) と陽電子 ( $e^+$ ) の束縛系
  - レプトンのみから成るクリーンな系 (ハドロンの不定性がない)
  - 最も軽い水素様「原子」
  - 粒子・反粒子系 → 標準理論を超えた物理に敏感。
  - 束縛系量子電磁力学 (QED) によって記述され、束縛系QEDの精密検証に適する。

# ポジトロニウム (Ps)

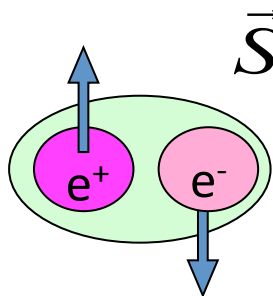
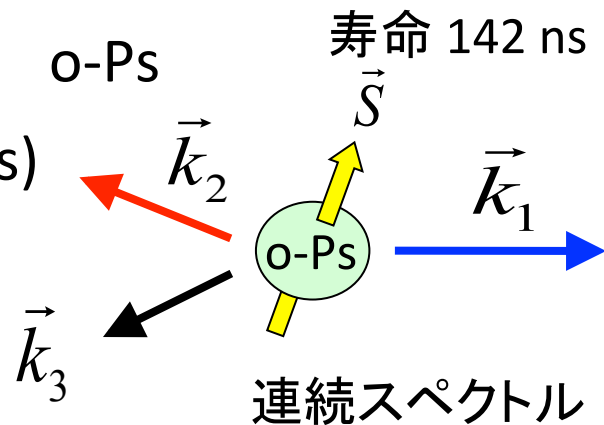


$\vec{S} = 1$  (スピン三重項)

オルソポジトロニウム (o-Ps)

スピン=1 光子と同じ量子数

o-Ps  $\rightarrow$   $3\gamma$  (,  $5\gamma$ , ...)

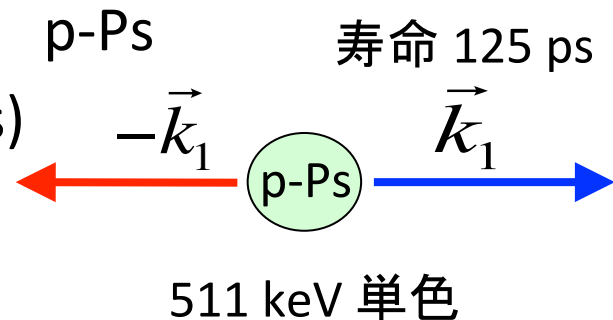


$\vec{S} = 0$  (スピンスinglet)

パラポジトロニウム (p-Ps)

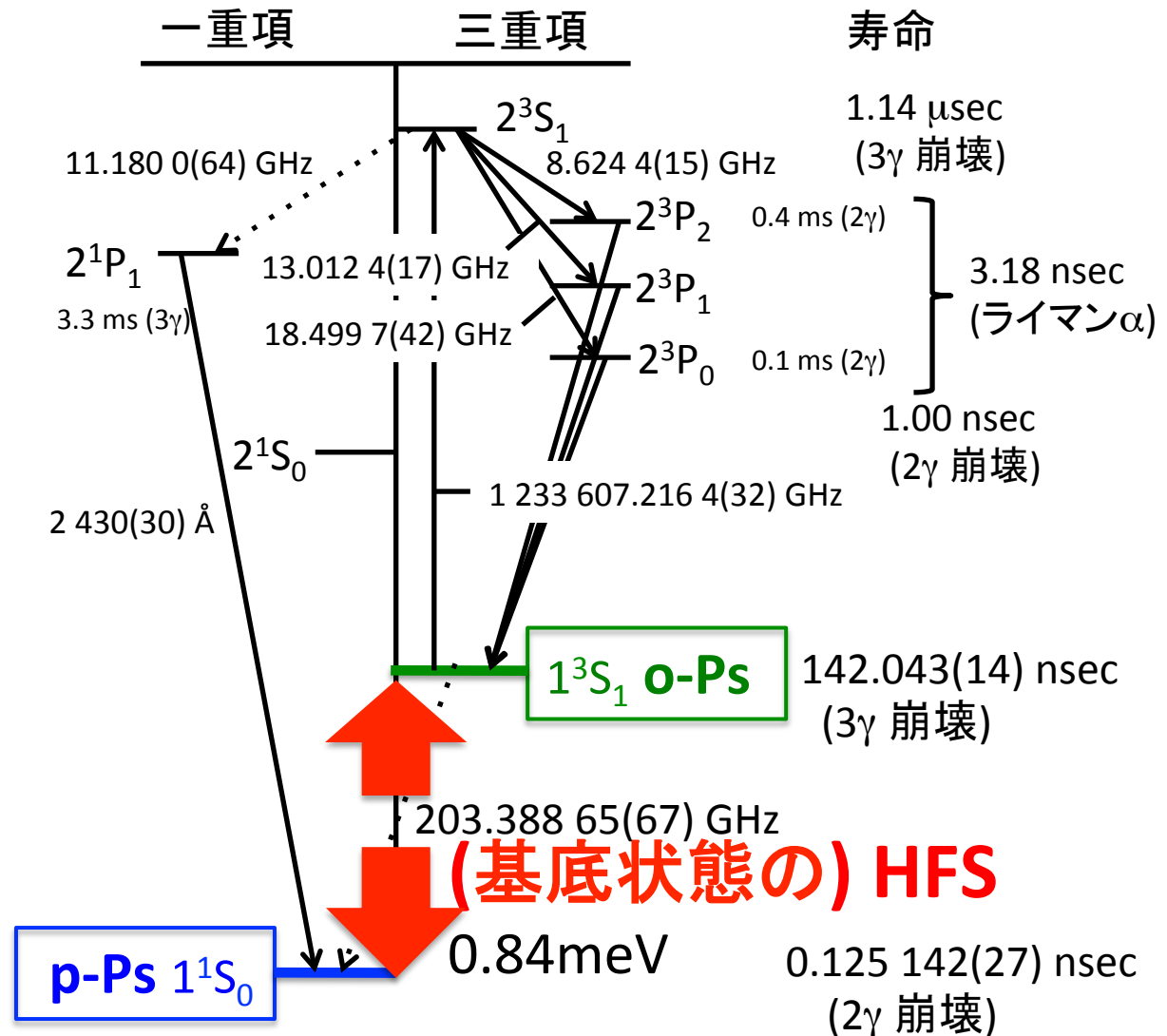
スピン=0 擬スカラー粒子

p-Ps  $\rightarrow$   $2\gamma$  (,  $4\gamma$ , ...)



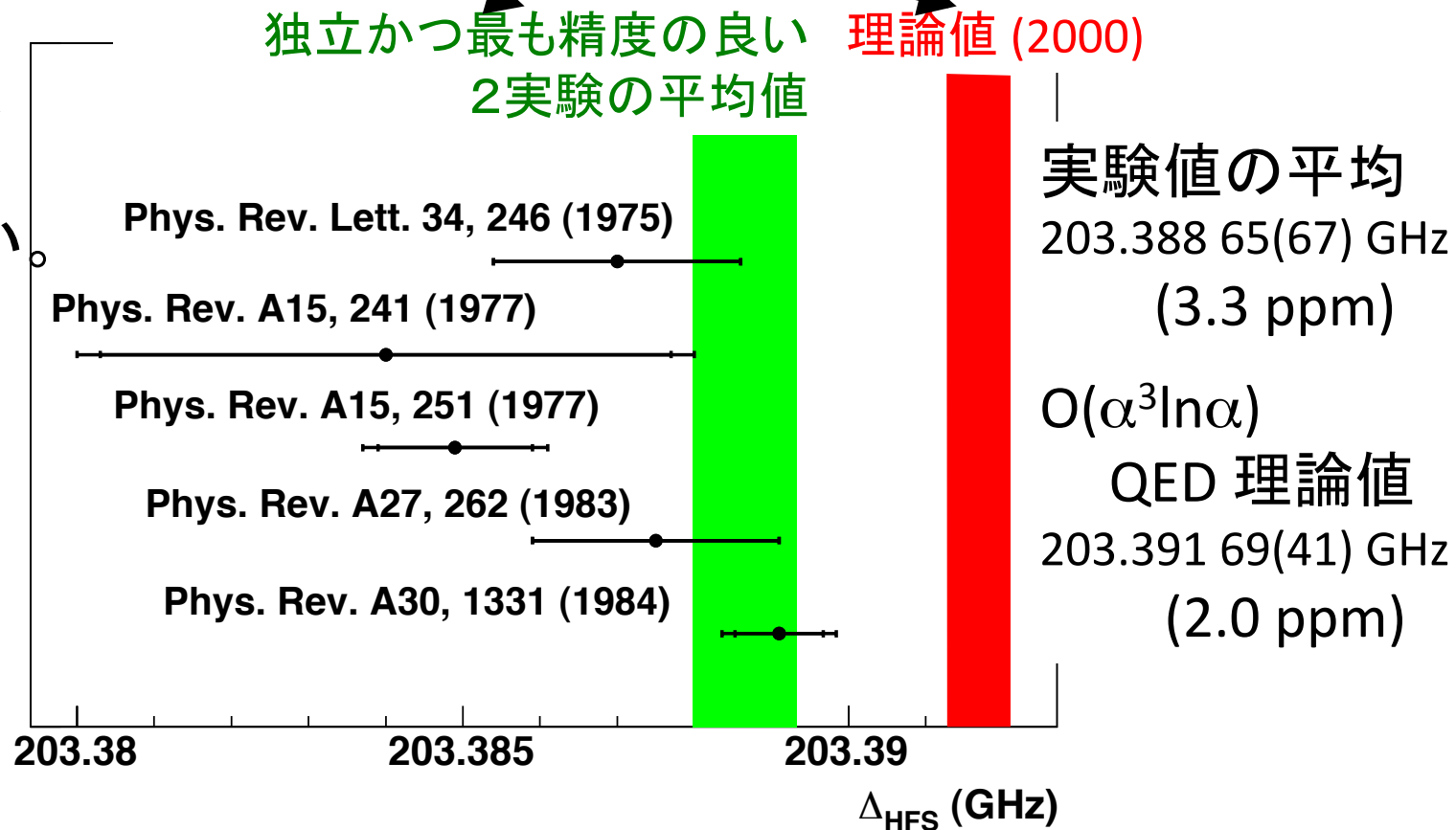
# ポジトロニウム超微細構造 (Ps-HFS)

基底状態における  
2つのスピン固有  
状態間のエネルギー  
準位差  
→ Ps-HFS (203 GHz)



# 実験と、理論でずれている

実験結果は  
一様に理論  
値より小さい。



15 ppm (3.9  $\sigma$ ) の有意なずれ



# 考えられるずれの原因

- 過去の実験に共通した系統誤差

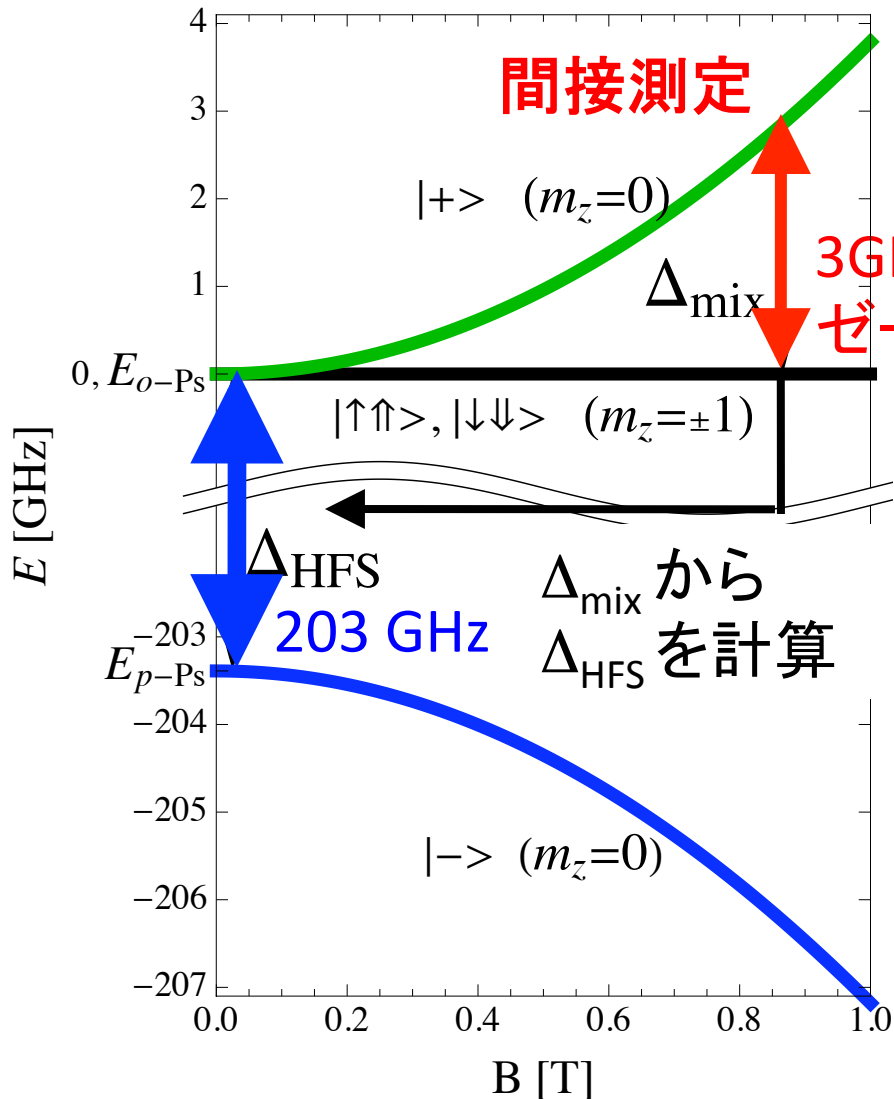
1. 磁場の非一様性。大きなPs生成領域内で、ppmレベルの  
一様磁場を供給するのは極めて困難。
2. 物質の効果の過小評価。熱化していない o-Ps は、特に低  
物質密度で大きな影響を及ぼす。

*cf. オルソポジトロニウムの寿命問題 (1990年代)*

**我々は、上記の系統誤差を抑えた、新しい方法による精密測定を行い、ずれを検証する。**

- 束縛系QEDの計算に新しい発展が必要
- 素粒子標準模型を超えた新しい物理が存在

# ゼーマン効果を用いた間接測定の方法



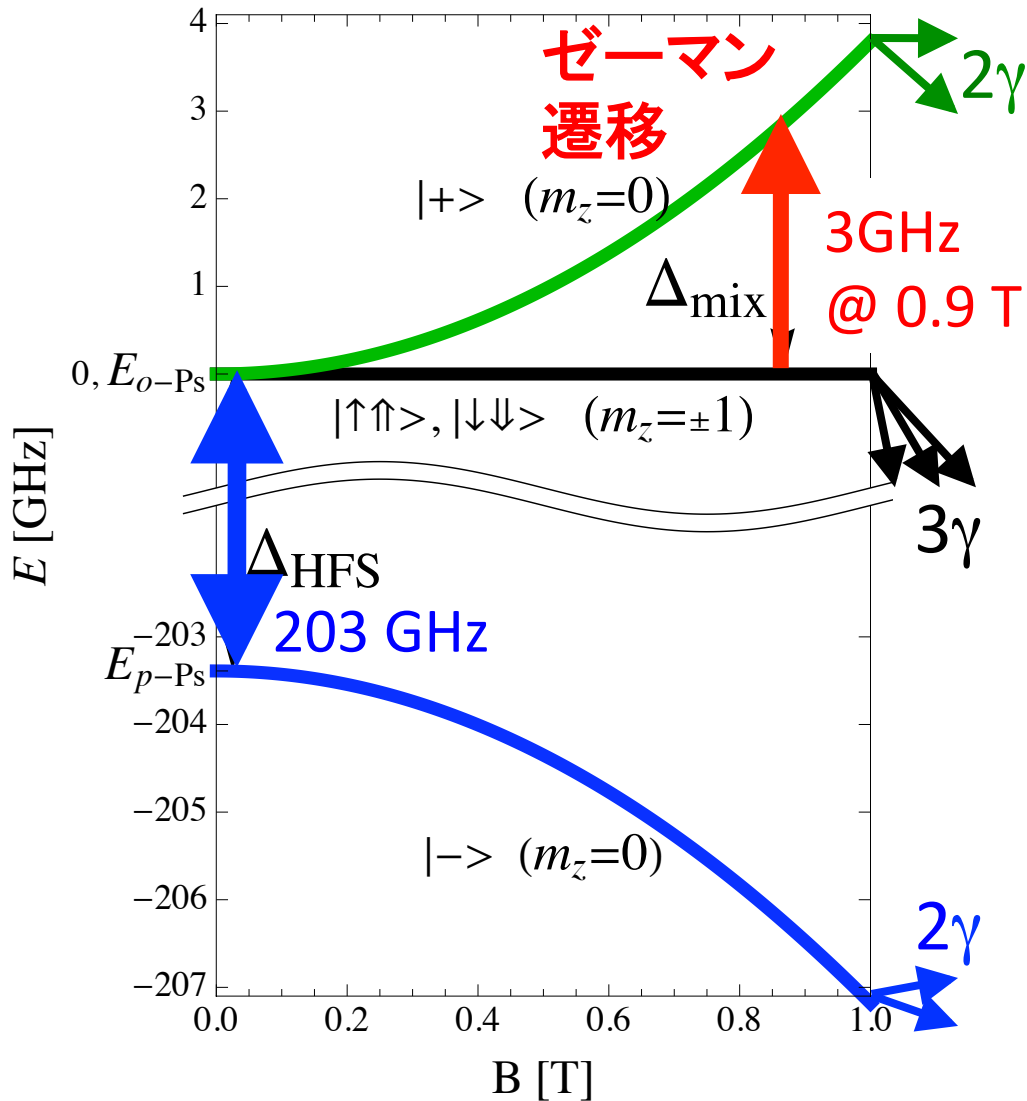
静磁場中では、**p-Ps** は  
**o-Ps** の  $m_z=0$  成分と  
 混合する。(2 $\gamma$  崩壊).

$\Delta_{mix}$  を精密に測定し、  
 $\Delta_{HFS}$  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



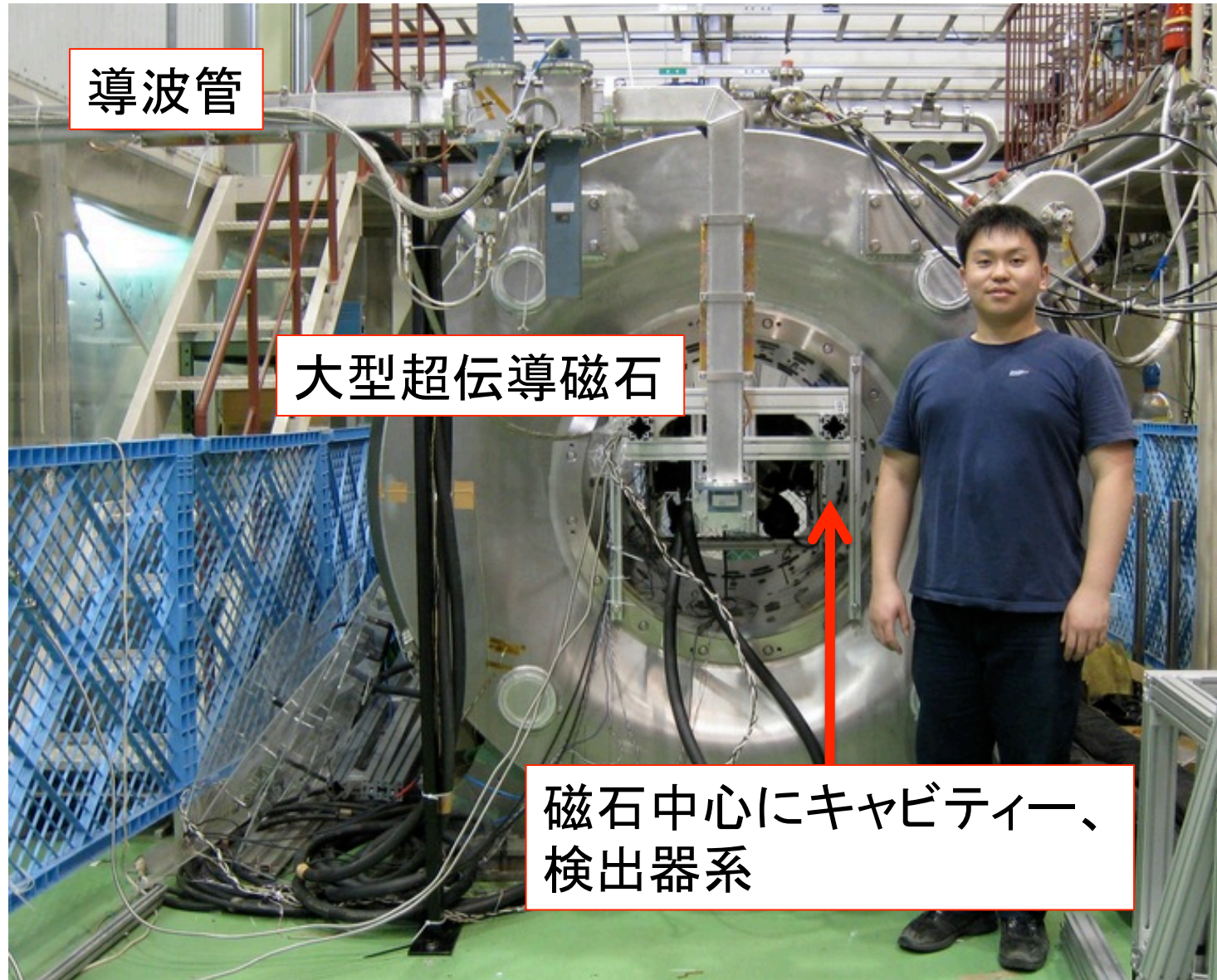
周波数が  $\Delta_{\text{mix}}$  のマイクロ波を供給すると、 $0\text{-Ps}$  の  $m_z=0$  と  $m_z=\pm 1$  成分の間で遷移が起こる。

→  $2\gamma$  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。

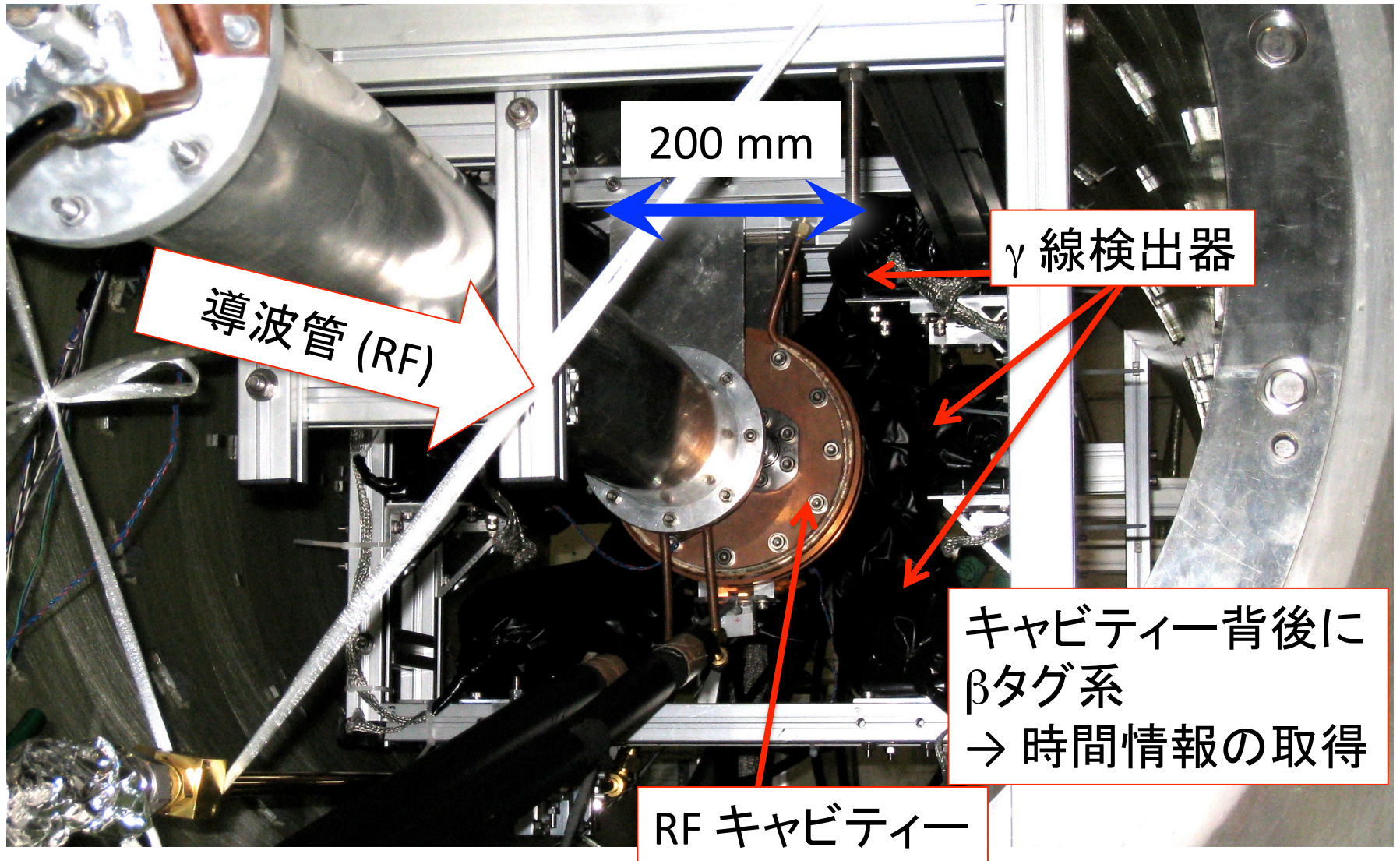
→ 過去の全ての実験と同じ方法

1. イントロダクション
2. 我々の新しい実験セットアップ
3. 測定の途中結果
4. 今後の展望
5. Psの熱化について
6. まとめ

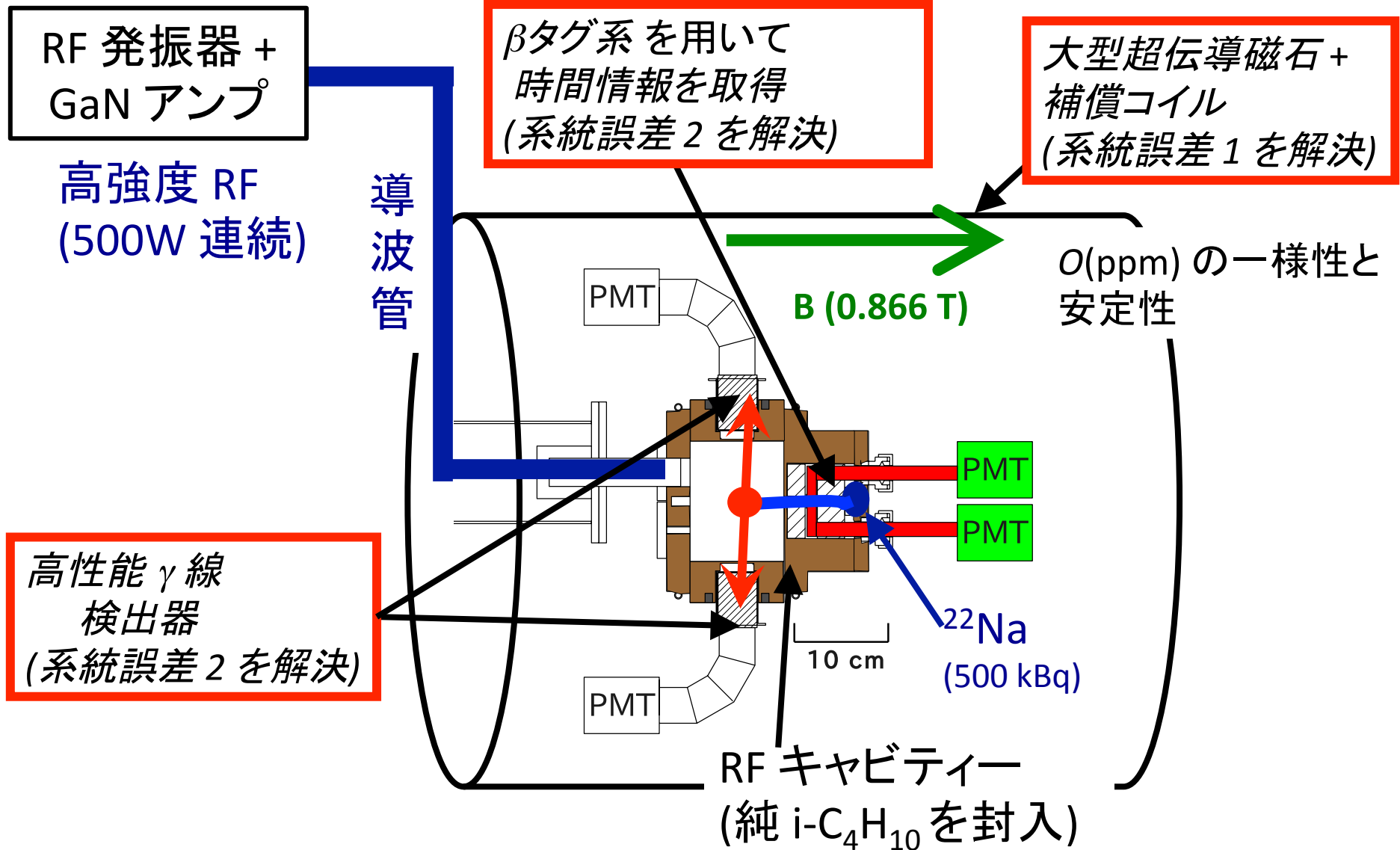
# 測定 @ KEK低温棟 平成22年7月～



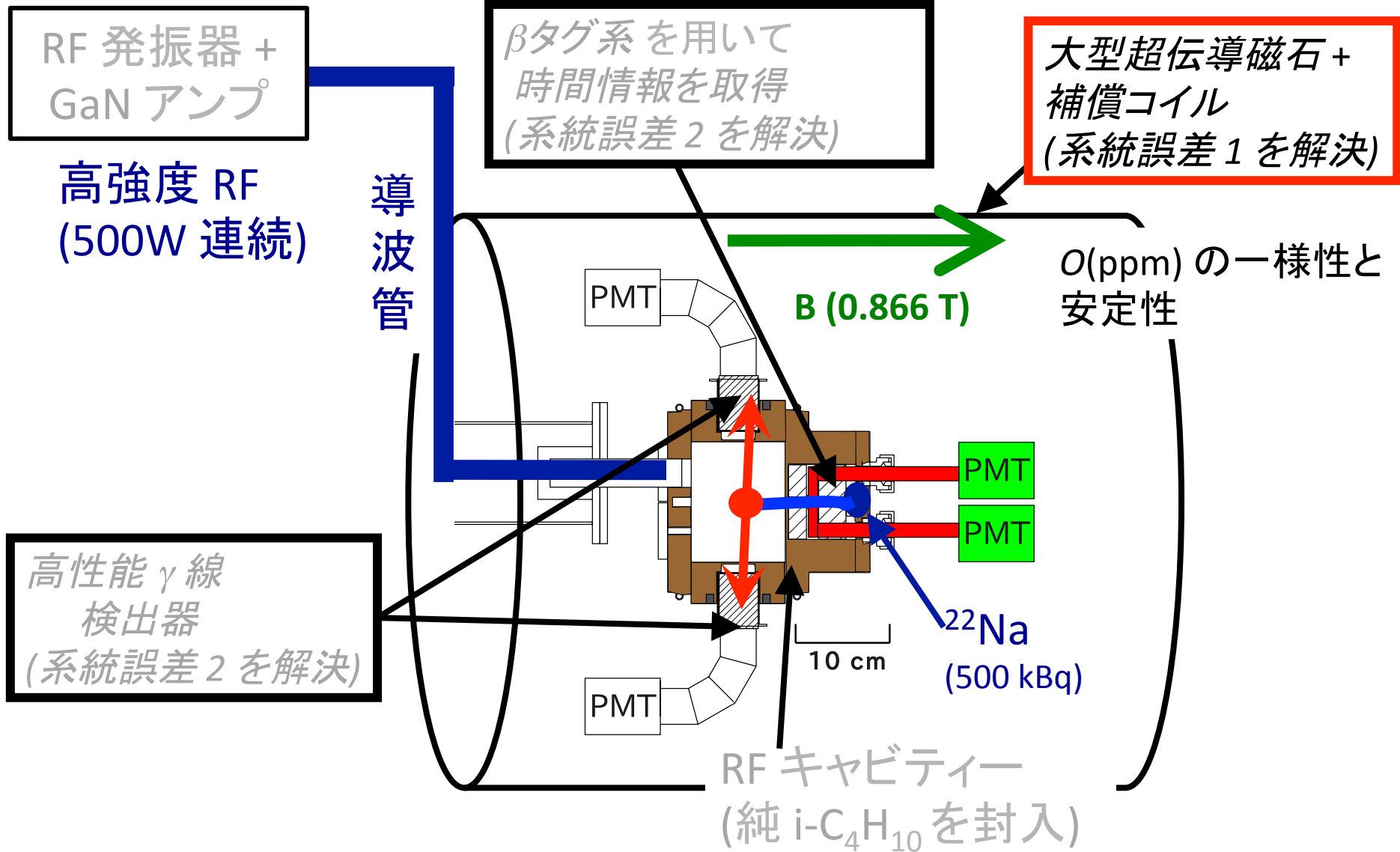
# 磁石中心部



# 我々の新しい実験セットアップ



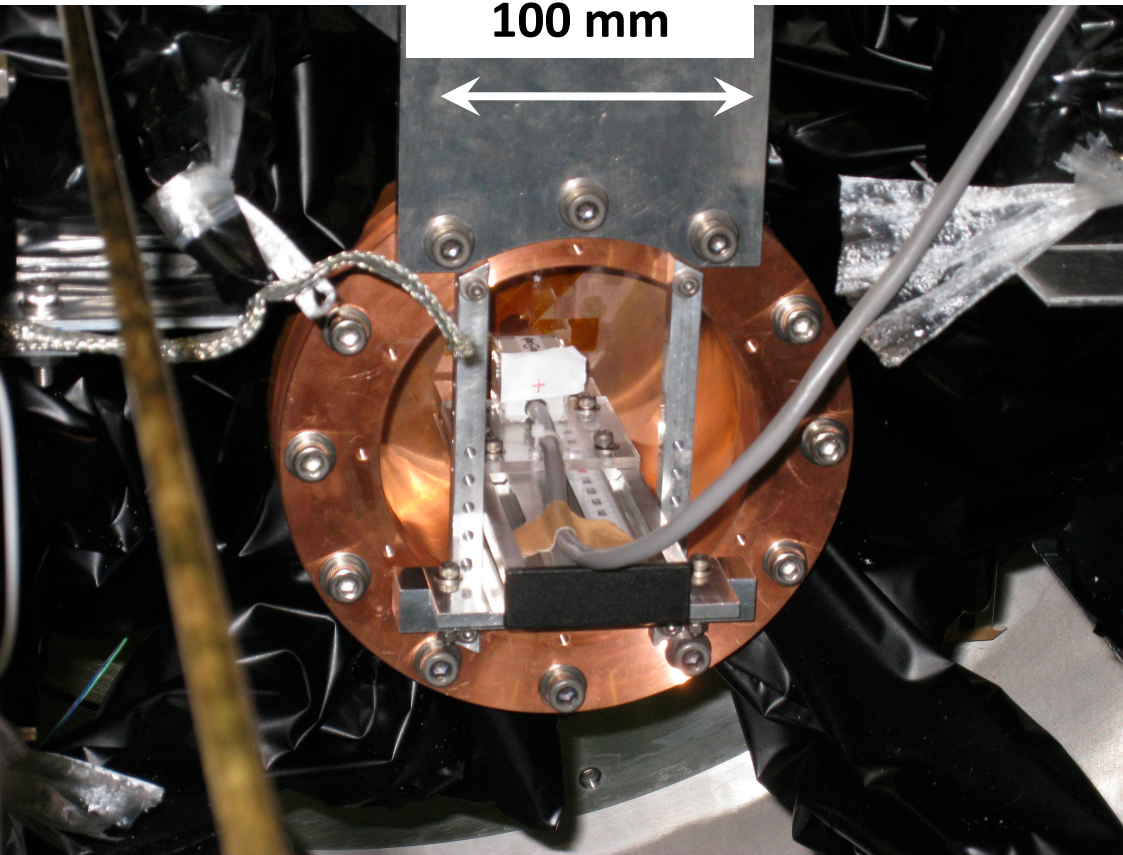
# 我々の新しい実験セットアップ



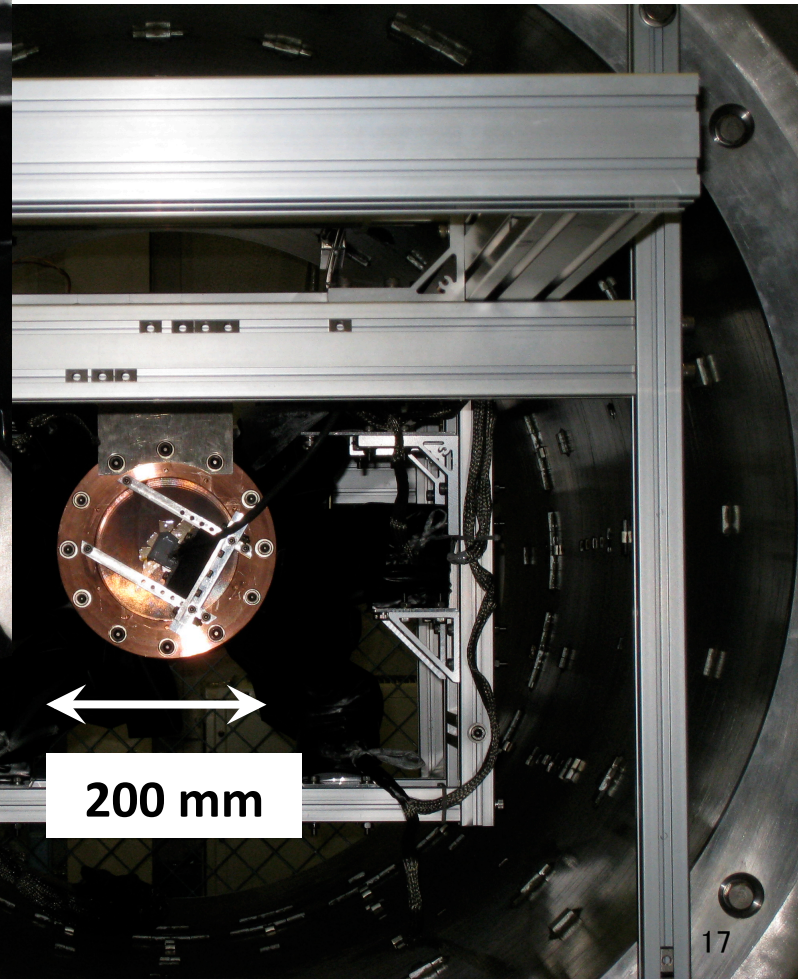


# 磁場測定

磁場を精密に測定した。  
キャビティー内で310点  
測定。NMRプローブ

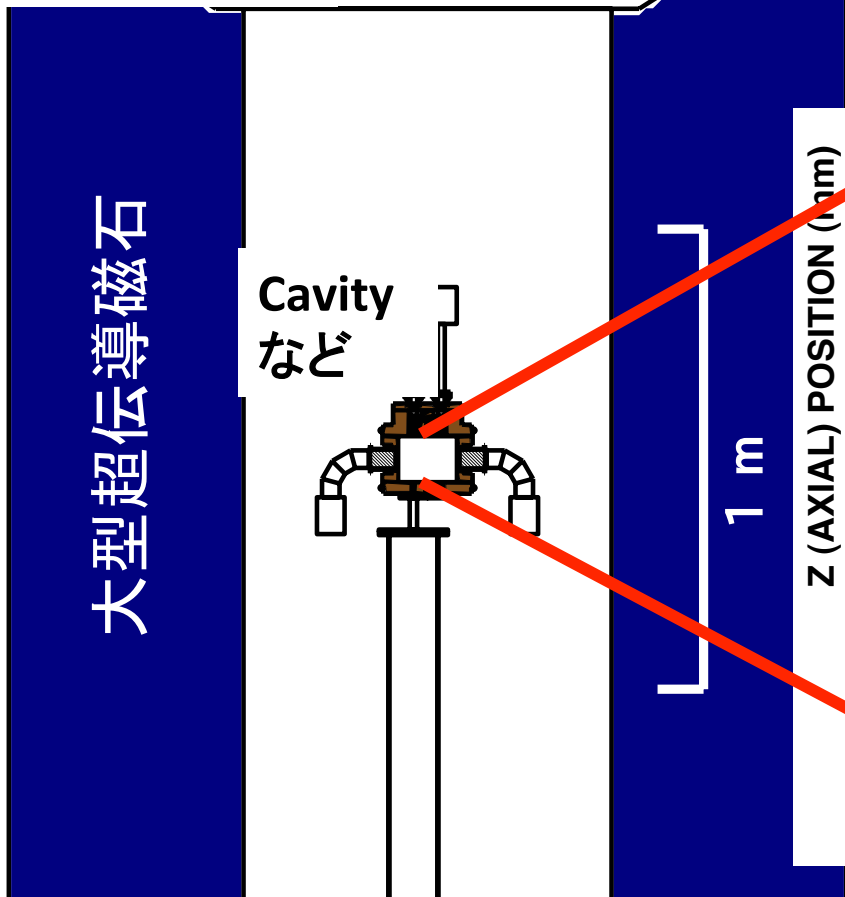


治具やPMTなどの  
効果も含めた、  
磁場分布を作成。



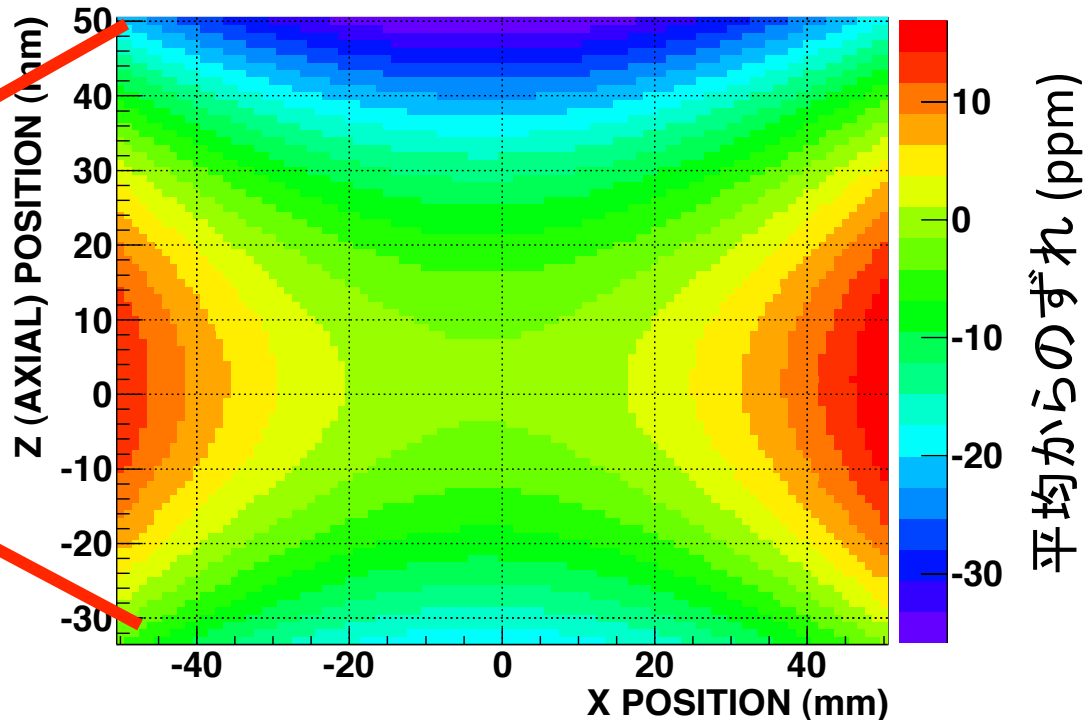
# 磁場の一様性

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)

●  $^{22}\text{Na}$

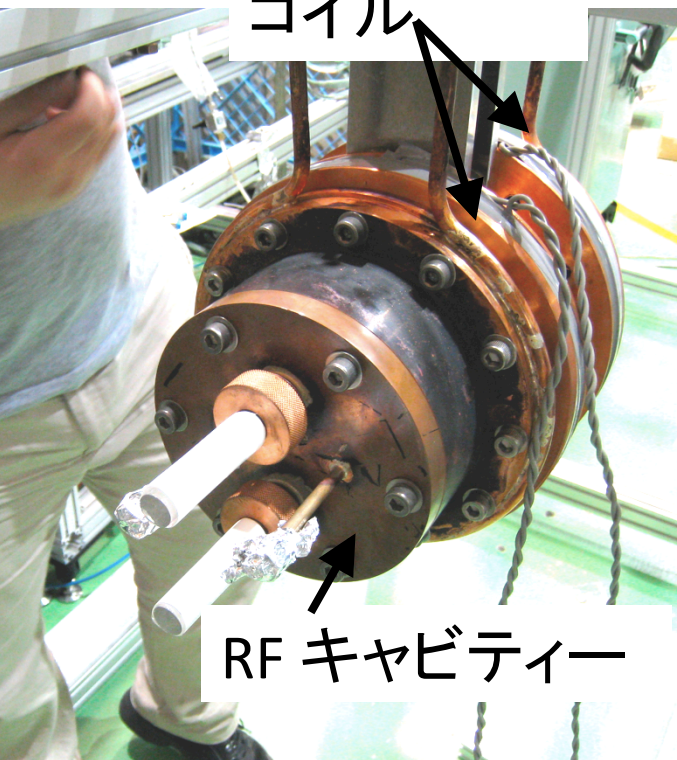


- ・ 大型超伝導磁石だけでは、まだ 10 ppm 程度の非一様性が残る。
- ・ PMT (強磁性体) や治具の影響も大きい。それらを含めて磁場の  
一様性を 0(ppm) で出せるよう、補償磁石を設計・製作した。

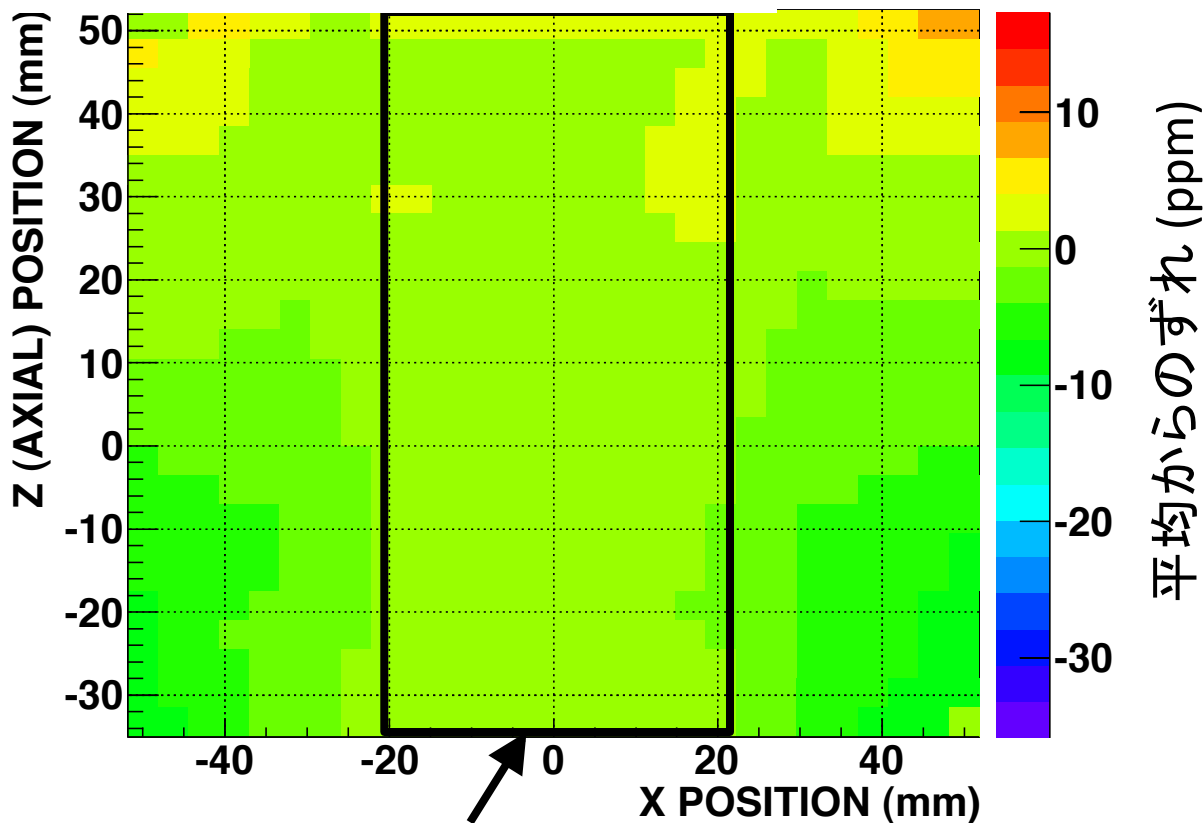
# 補償磁石

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)

●  $^{22}\text{Na}$



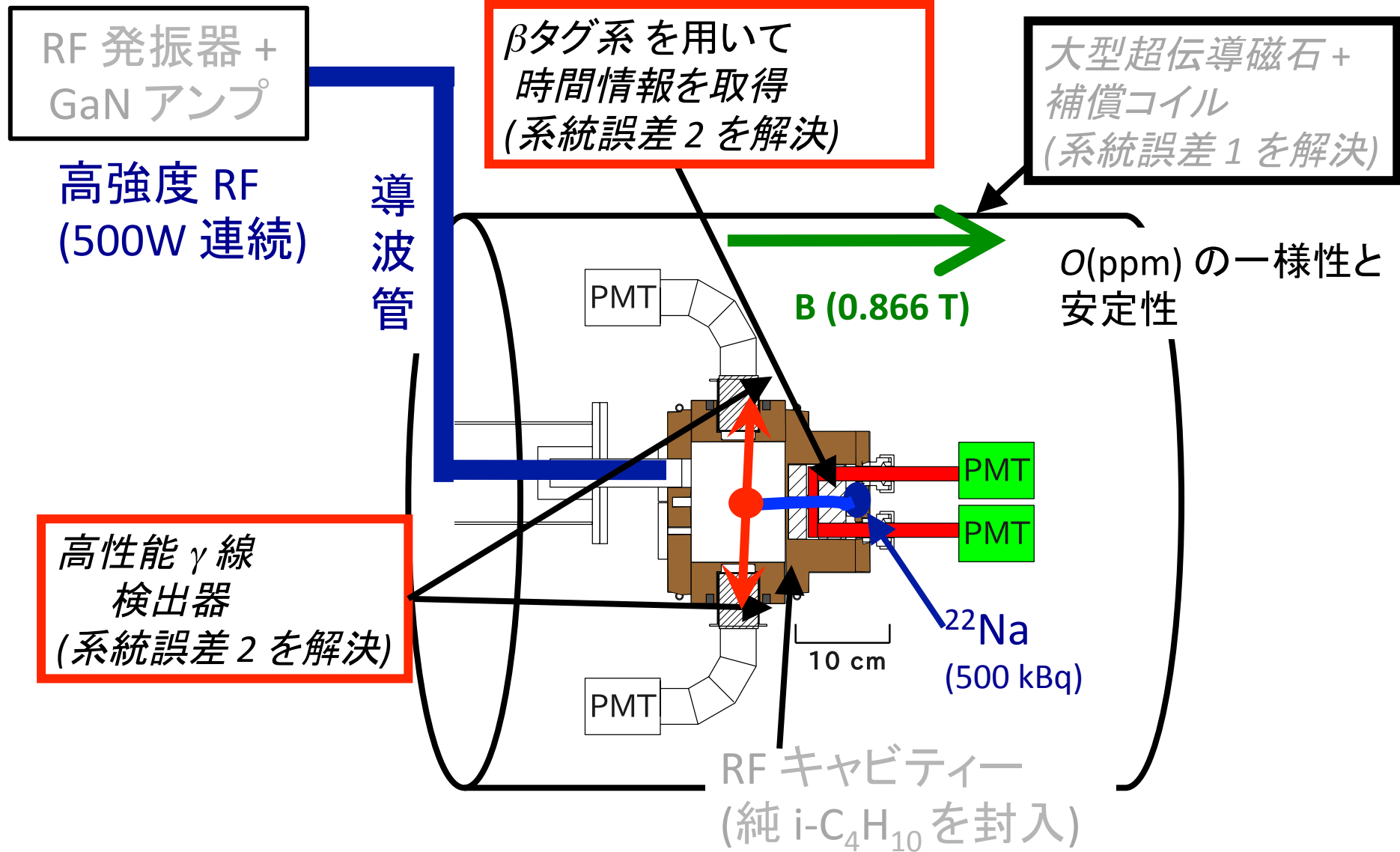
- ・ 2つの円形コイルをRFキャビティーのフランジに巻く。
- ・ 元の磁場と逆向きの磁場を作り、磁場勾配を小さくする。



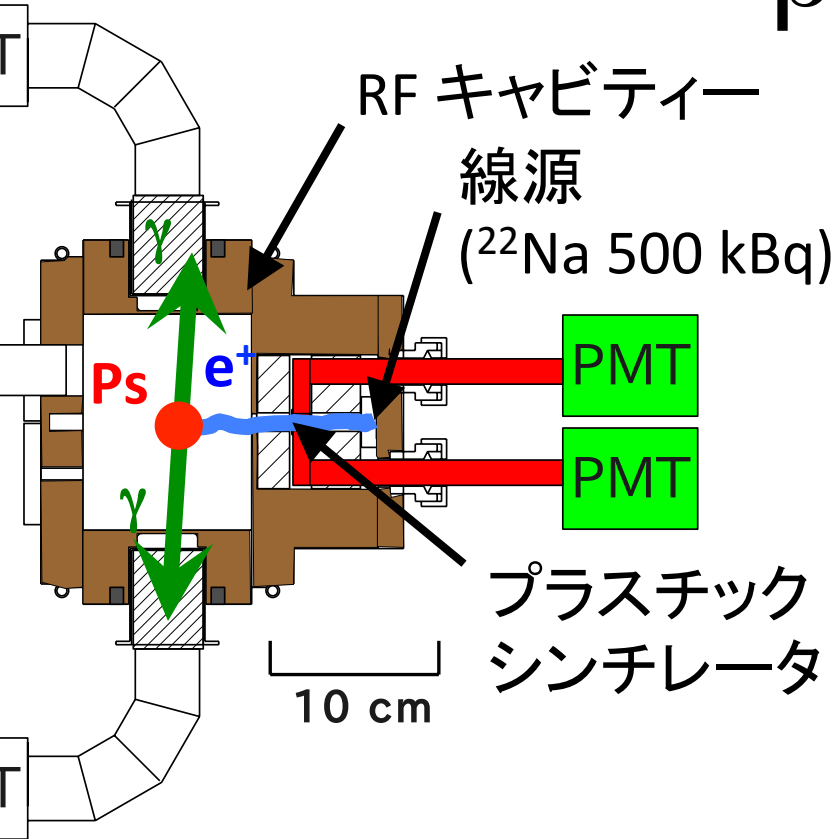
**0.9 ppm (RMS) の一様性** が、Ps 生成領域内で得られた。

→ 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



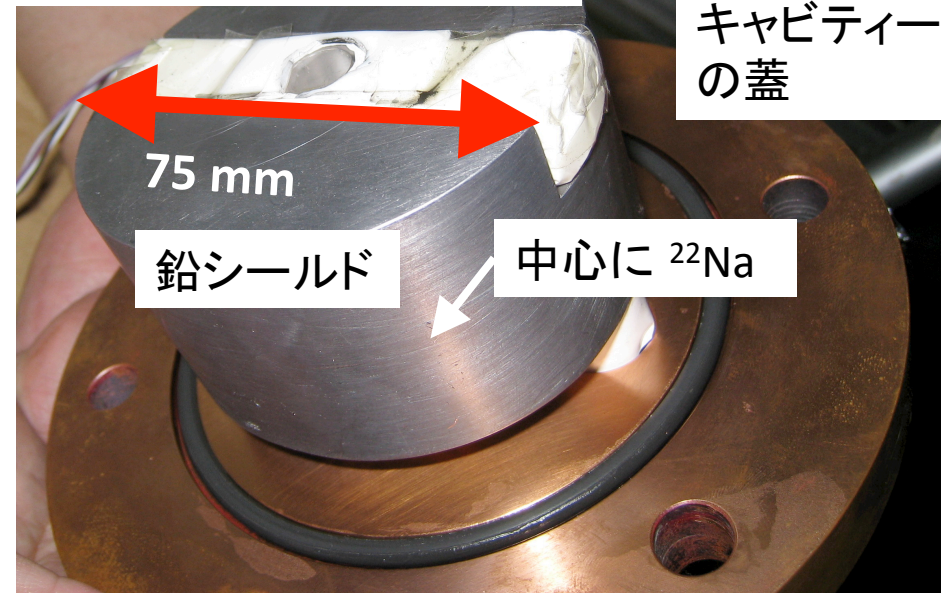
# $\beta$ タグ系



- 薄い (0.2 mm) プラスチックシンチレータを使って、 $^{22}\text{Na}$  から出てくる  $e^+$  をタグ

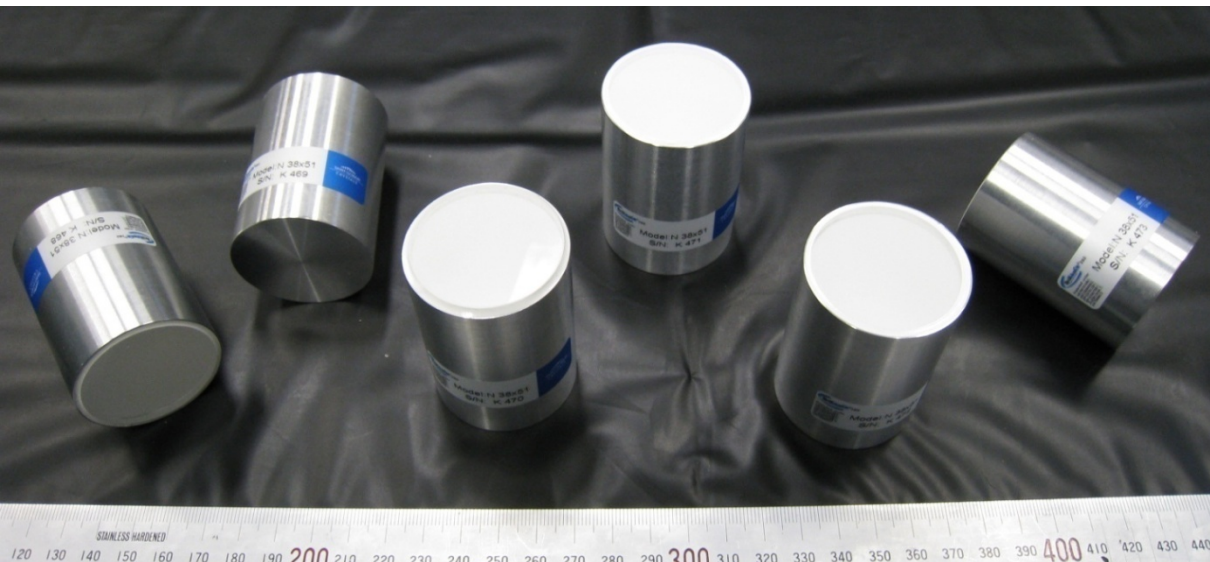
→  $t=0$

15 mm x 15 mm x 0.2 mm  
プラスチックシンチレータ



- DAQ のトリガーは、 $e^+$  タグと  $\gamma$  線検出のコインシデンスでかける。
- 2つの信号の時間差が、各イベントにおける  $\text{Ps}$  の寿命。

# ガンマ線検出器 ~LaBr<sub>3</sub>~



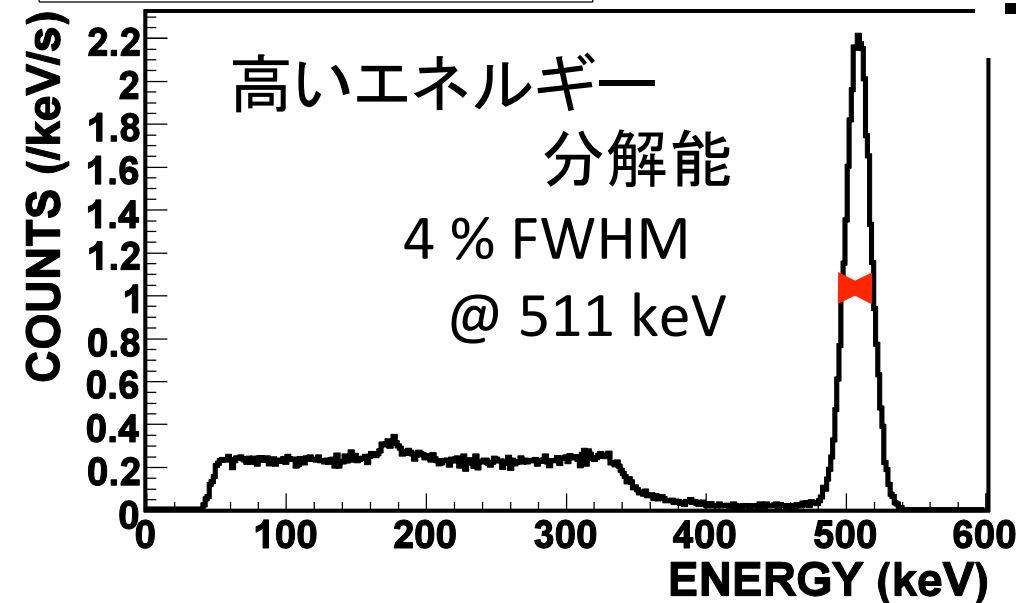
LaBr<sub>3</sub>(Ce)シンチレータ  
(直径1.5インチ、長さ2インチ)  
を6個使用

UVTライトガイドで光を導き、  
ファインメッシュPMTで、  
磁場中での読み出しを行う。

## ENERGY SPECTRUM

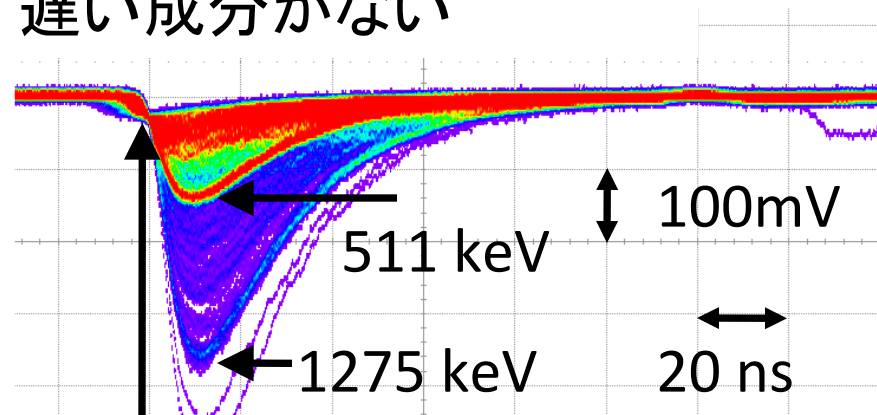
<sup>22</sup>Na

高いエネルギー  
分解能  
4 % FWHM  
@ 511 keV



- ・ 速い立ち上がり
- ・ 遅い成分がない

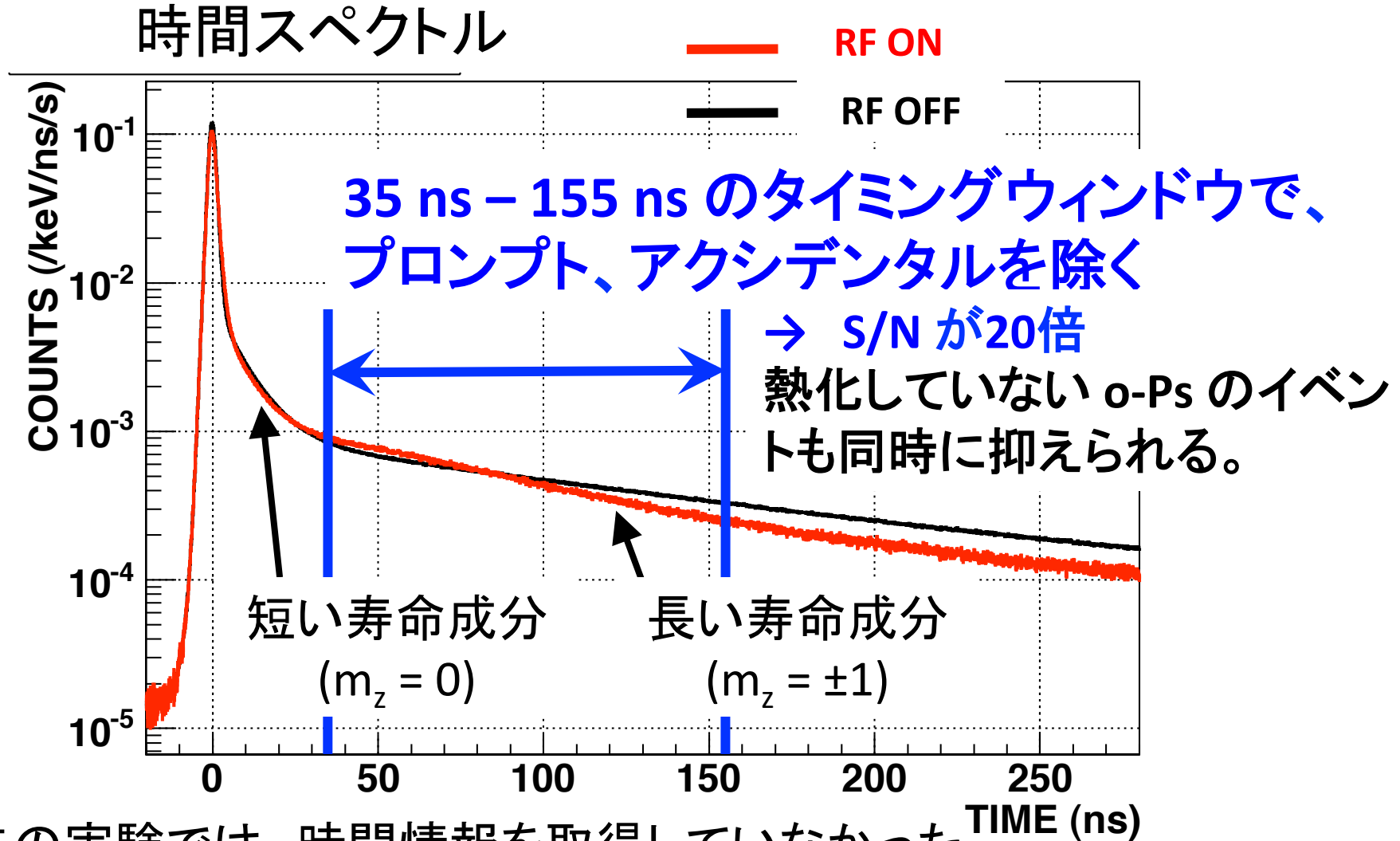
<sup>22</sup>Na



高い時間分解能

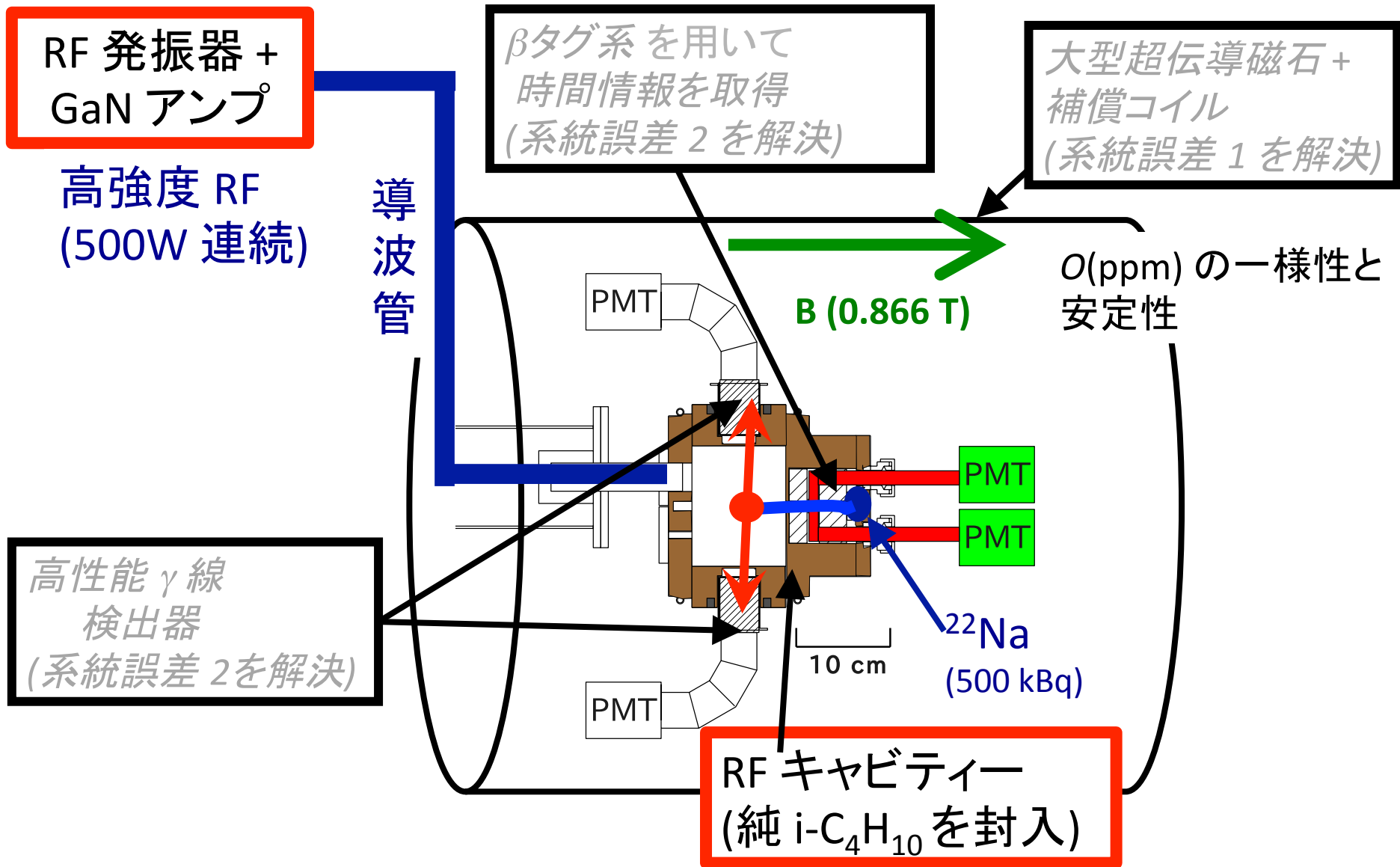
200 ps FWHM @ 511 keV

# 時間スペクトル



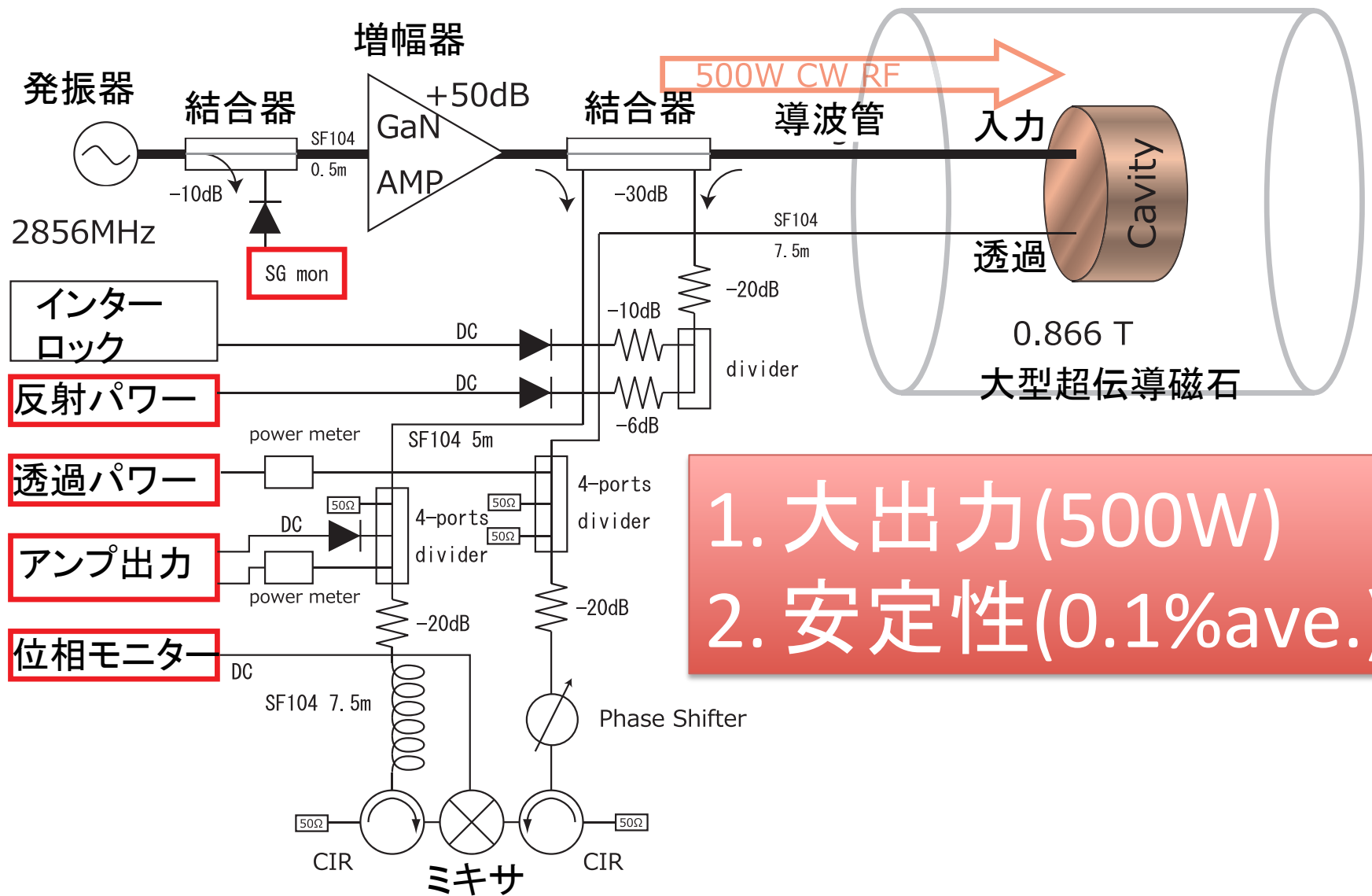
過去の実験では、時間情報を取得していなかった。  
→バックグラウンドが多かった。早い時間のイベントも取っていたため、熱化していないPsの影響が大きかった。

# 我々の新しい実験セットアップ



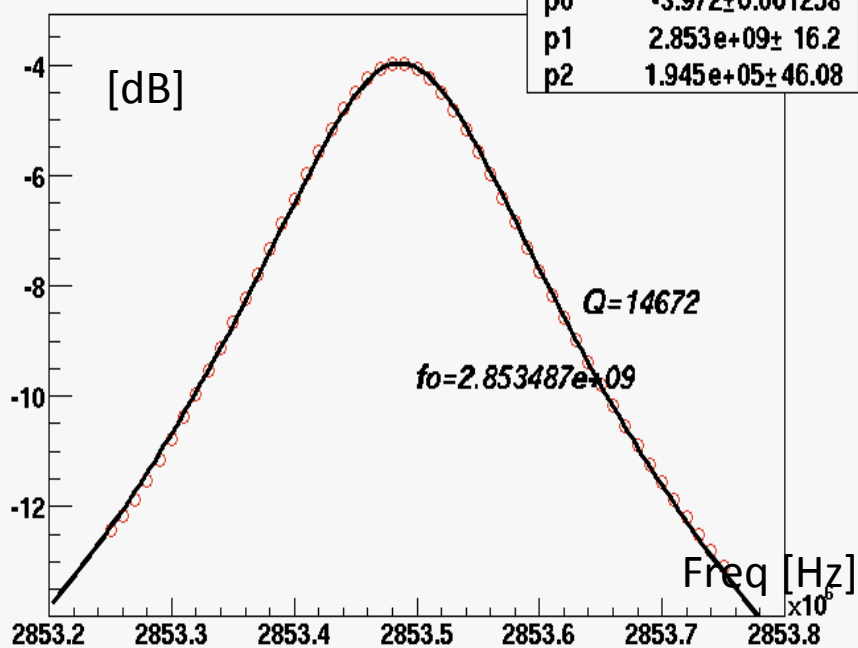
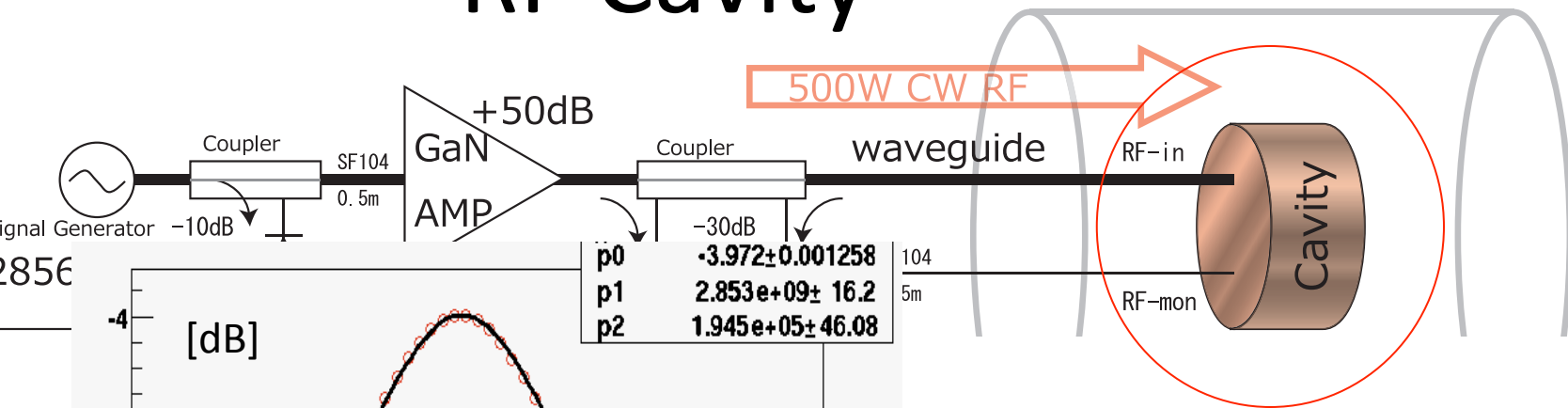


# RF回路の全体像

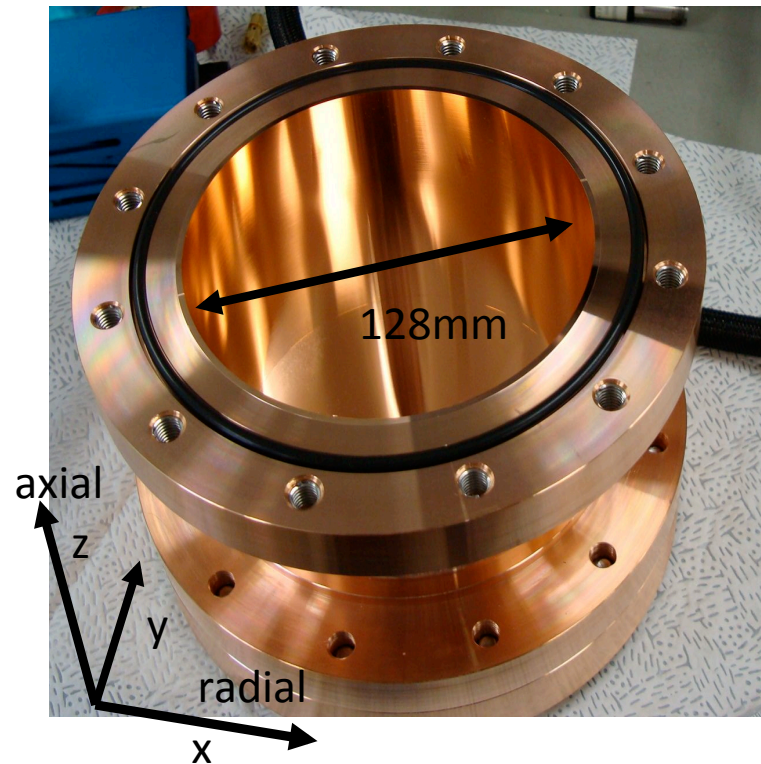


1. 大出力(500W)
2. 安定性(0.1%ave.)

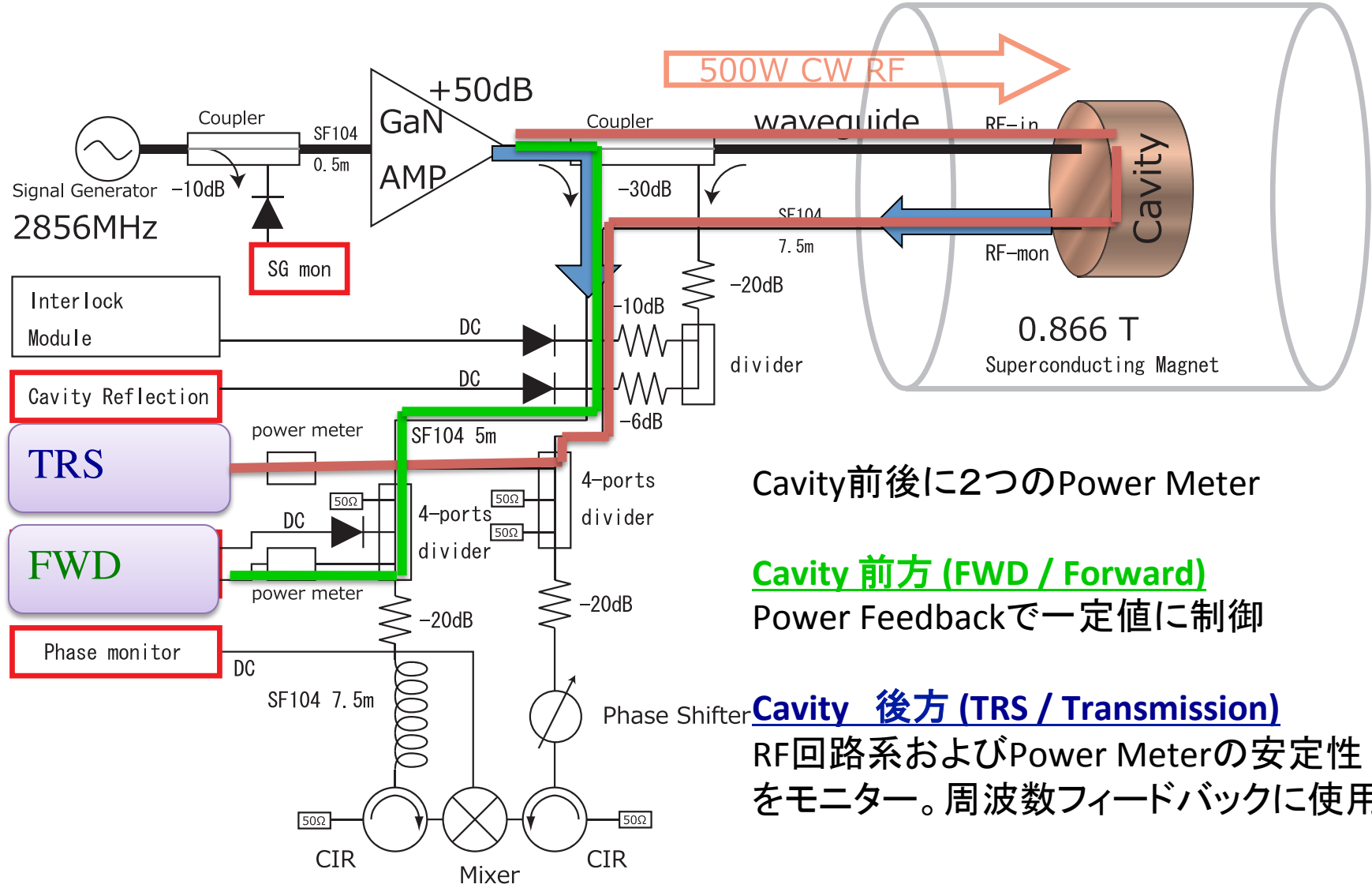
# RF Cavity



1. 共振周波数: 2856MHz
2. 共振モード:  $TM_{110}$
3. RF耐圧: 500W [CW]
4. 側面厚(Cu): 1.5 mm
5.  $Q \sim 13,000$



# 遷移RFの安定化 // 遷移RFのモニターと安定性



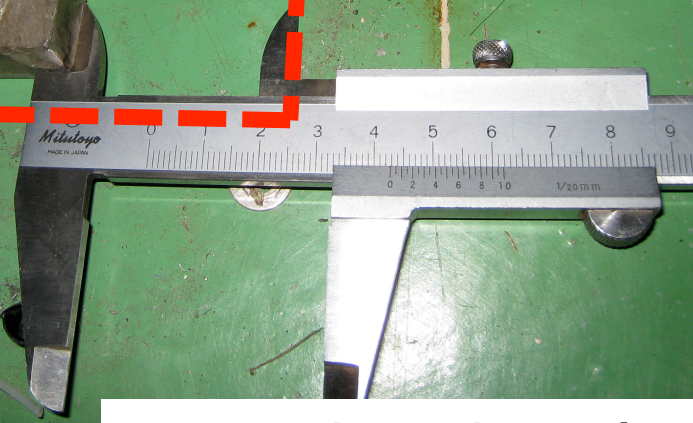
Cavity前後に2つのPower Meter

Cavity 前方 (FWD / Forward)  
Power Feedbackで一定値に制御

Cavity 後方 (TRS / Transmission)  
RF回路系およびPower Meterの安定性をモニター。周波数フィードバックに使用。

# 東北地方太平洋沖地震の影響

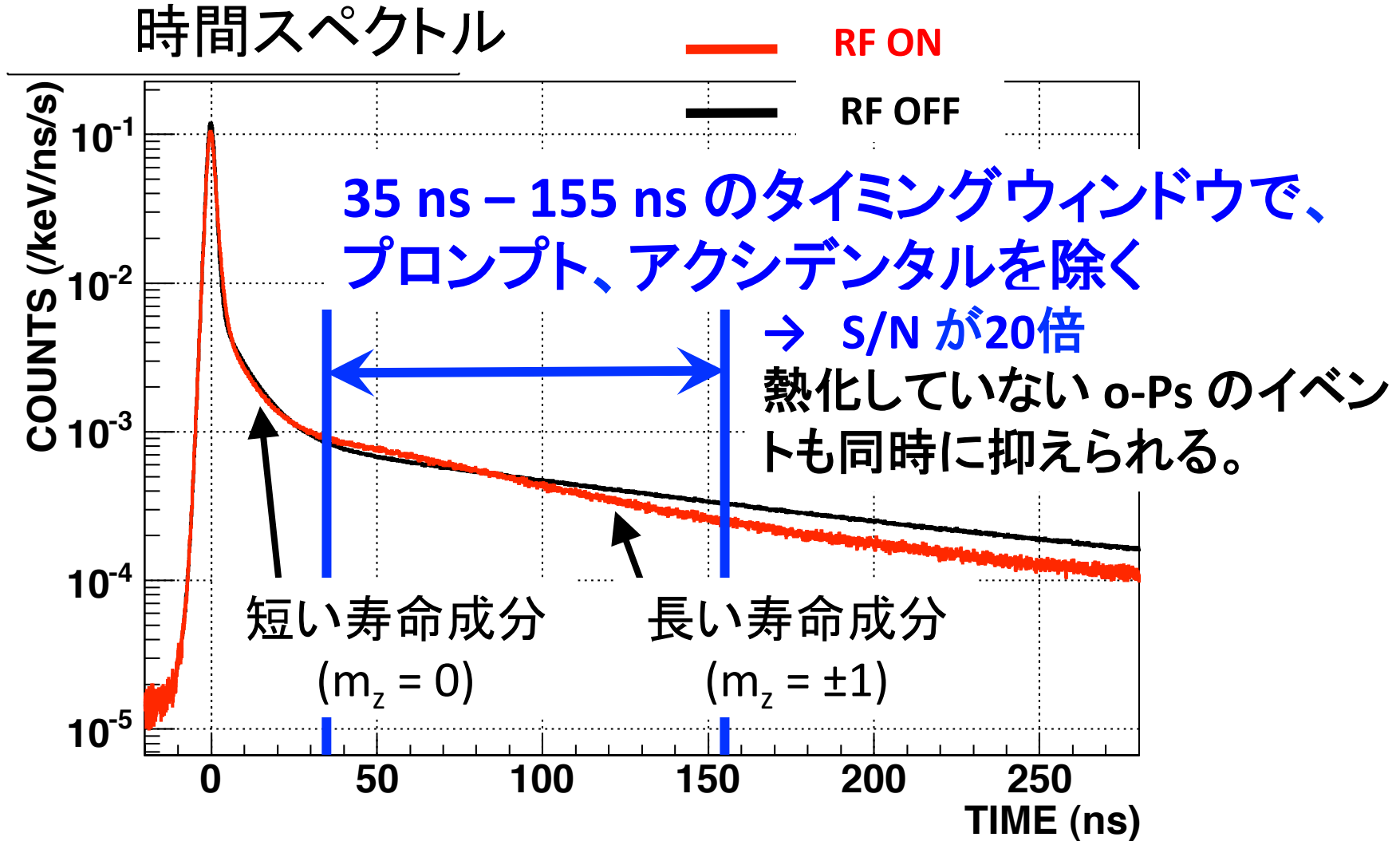
- 大型超伝導磁石 (13 t) が 4.3 cm 移動。
- 測定機器等に対する影響はなかった。



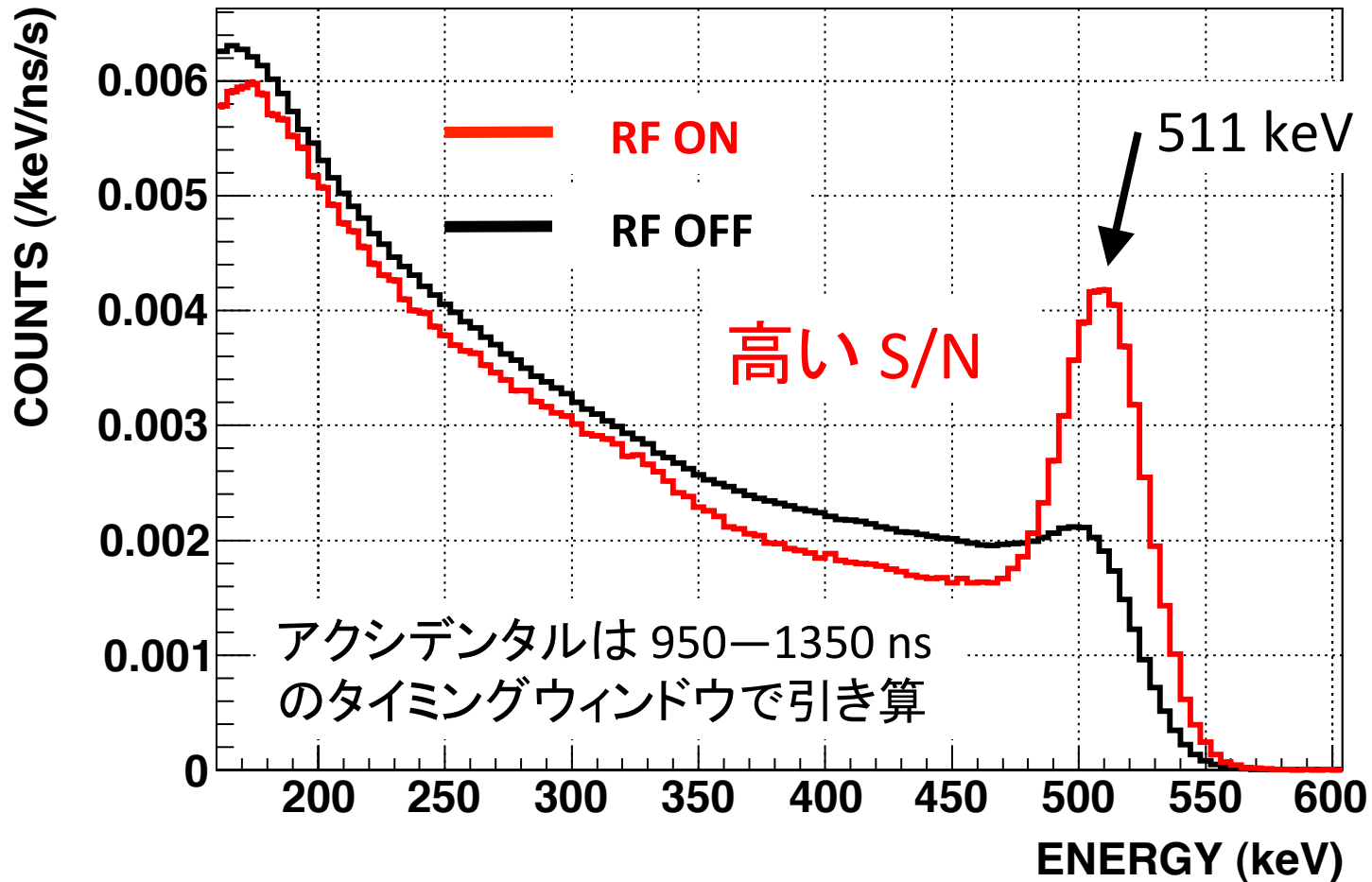
- 一時測定を停止していたが、5月中旬より復旧、調整等を行い、7月から測定再開。

1. イントロダクション
2. 我々の新しい実験セットアップ
- 3. 測定の途中結果**
4. 今後の展望
5. Psの熱化について
6. まとめ

# 時間スペクトル



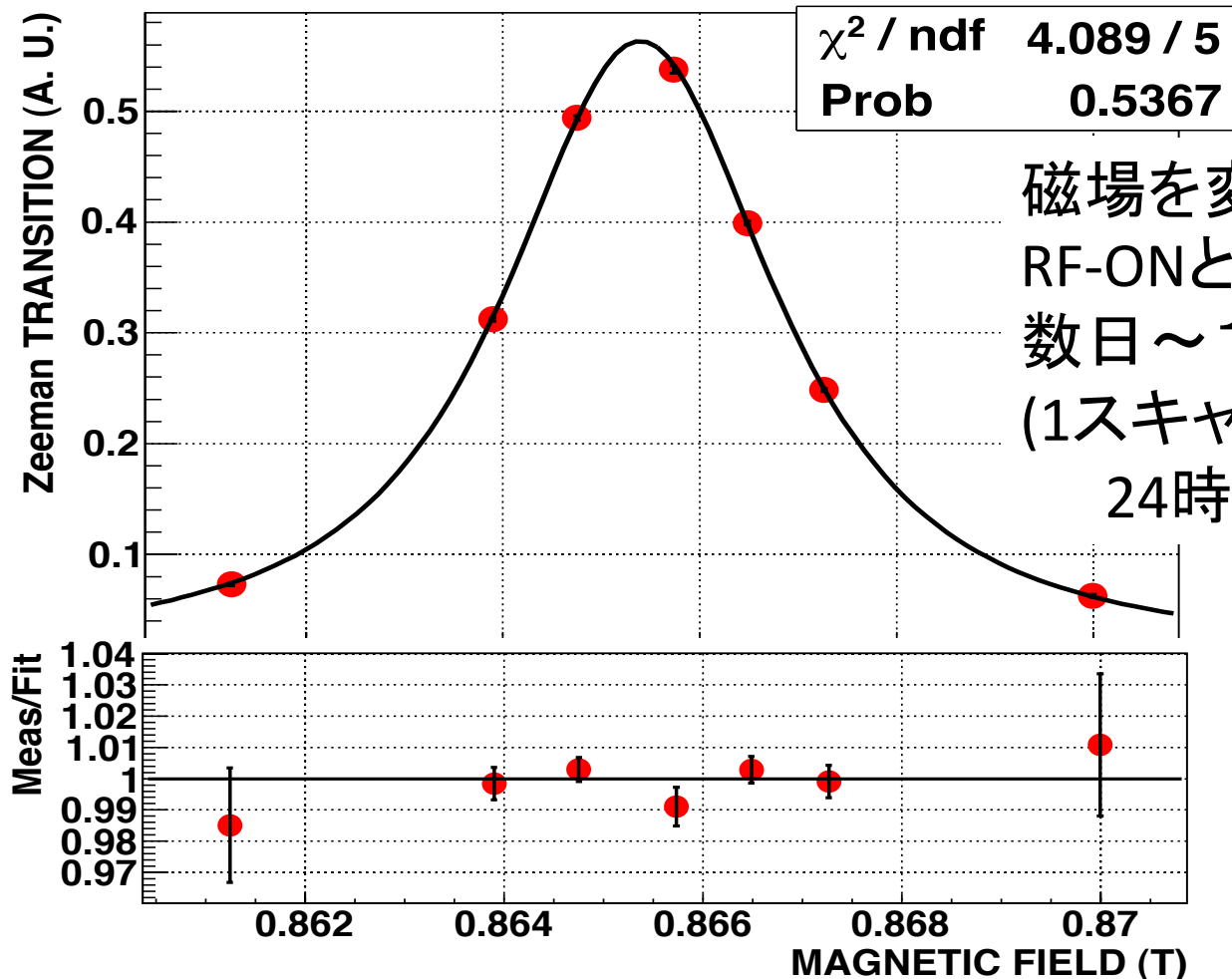
# 解析 (エネルギースペクトル)



ゼーマン遷移によって、 $2\gamma$  崩壊確率が大きくなった。  
ゼーマン遷移確率を、RF-ON と RF-OFF の差から計算。

# 共鳴曲線 (0.883 amagat)

RF の周波数、パワーを固定して、**磁場でスキャン**。



磁場を変えて、各点で  
RF-ONとOFFを測定  
数日～1週間/磁場点  
(1スキャン 1～2ヶ月  
24時間測定)

ハミルトニアン  
から求めた  
遷移曲線で  
フィット

$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.3506(20) \text{ GHz (9.8 ppm)}$$

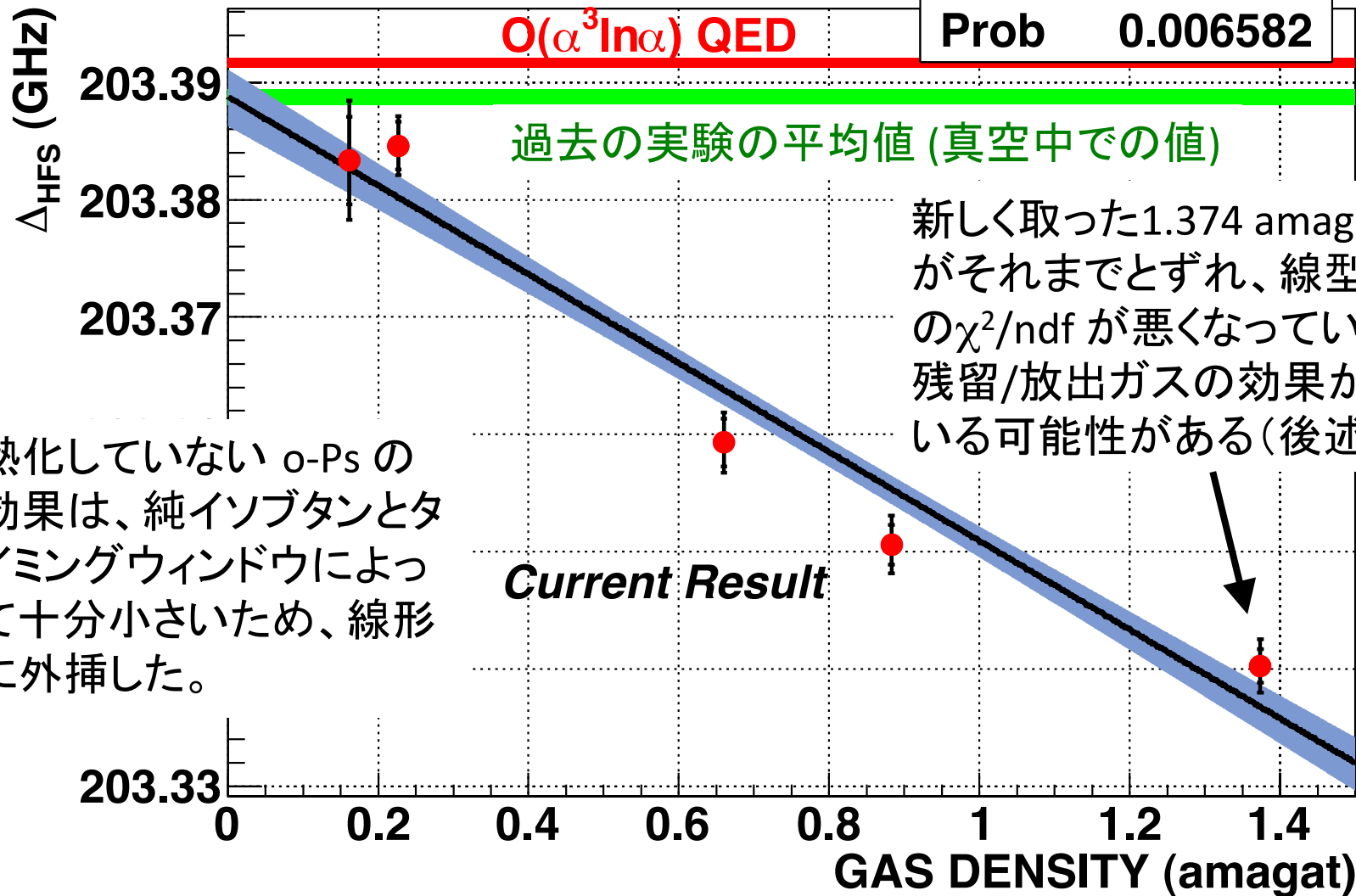
→ 密度依存性の補正をして、真空での値を求める。



# 圧力 (密度) 依存性

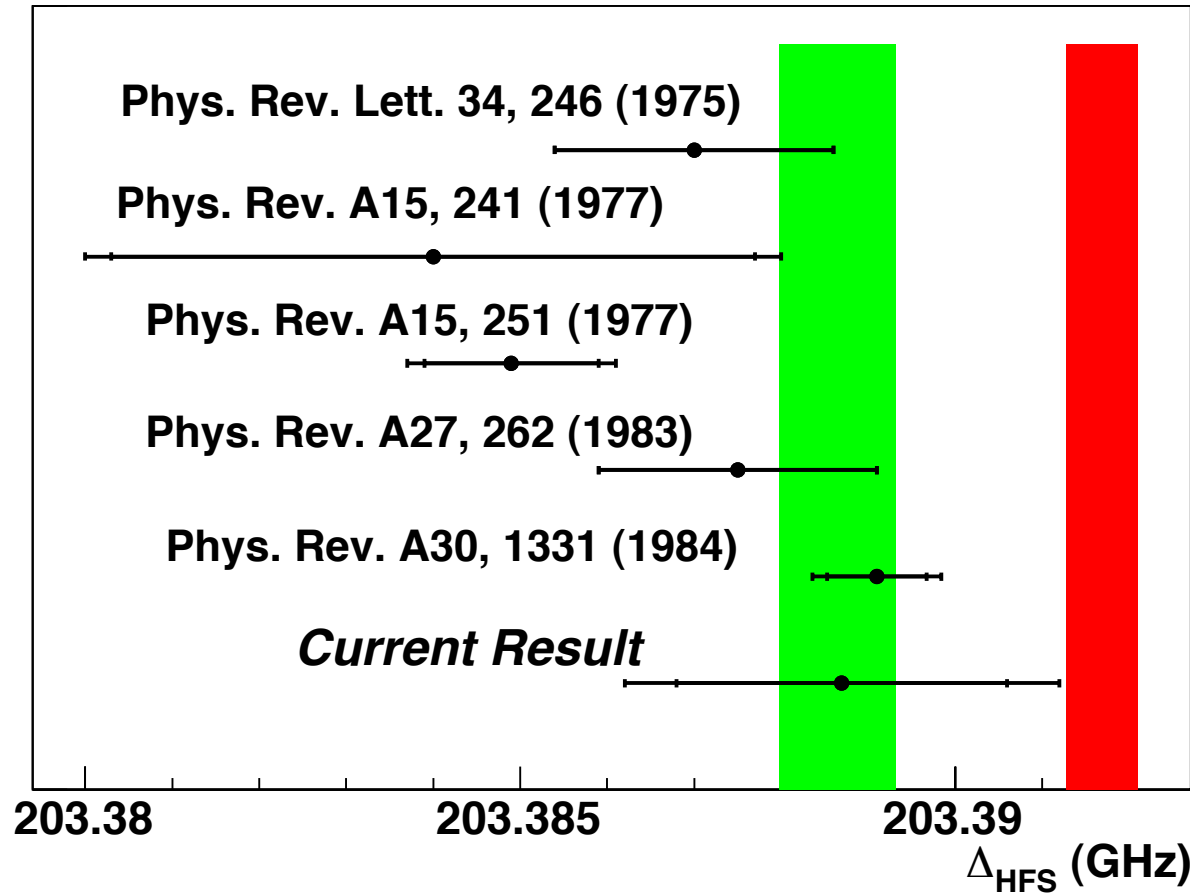
ガス圧を変えて、RF系を調整し、  
各ガス圧でスキャン(各ガス圧 1~2ヶ月)

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| $\chi^2 / \text{ndf}$ | 12.25 / 3 |
| Prob                  | 0.006582  |



熱化していない o-Ps の効果は、純イソブタンとタイミングウィンドウによって十分小さいため、線形に外挿した。

# 本測定 of 途中結果



本測定で得られた、超微細構造の途中結果

$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.3887 \pm 0.0019 \text{ (stat., 9.2 ppm)} \\ \pm 0.0016 \text{ (sys., 8.0 ppm) GHz}$$

# 系統誤差 (暫定)

| 系統誤差の要因               | 大きさ (ppm)  |
|-----------------------|------------|
| 非一様性                  | 1.8        |
| 補正と再現性                | 1.0        |
| NMR測定値                | 1.0        |
| MCを用いた評価              | 5.4        |
| ポジトロニウムの熱化            | 3.0        |
| RF パワー                | 1.9        |
| RF キャビティの $Q_L$ 値     | 4.5        |
| RF周波数                 | 1.0        |
| <b>Quadrature sum</b> | <b>8.0</b> |

磁場

検出効率

物質の効果

RF

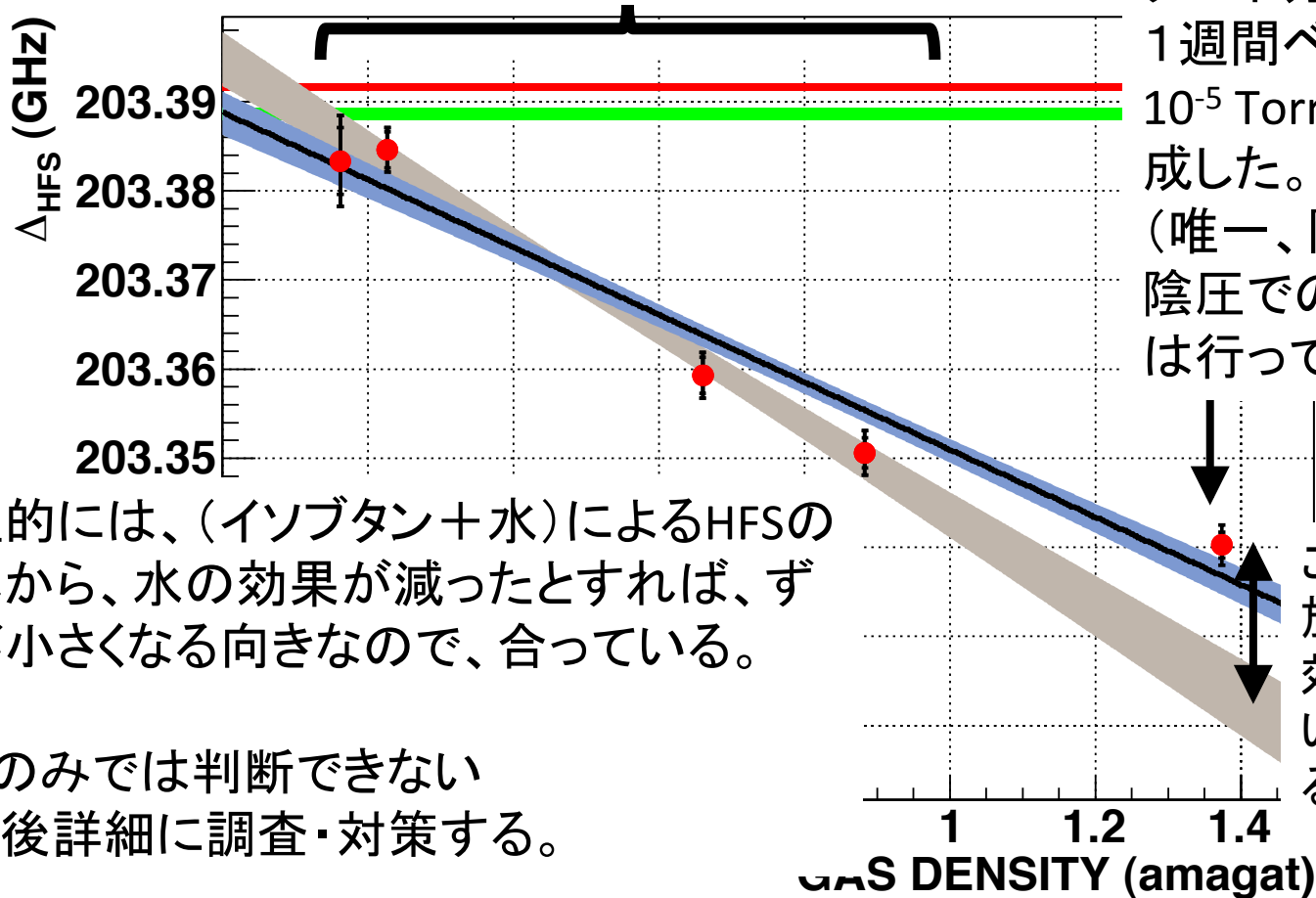
まだ大きい系統誤差があるが、後で述べるように対策して ppm レベルにする。

# 残留/放出ガスの効果

残留/放出ガスとしては、大部分が水。

→双極子モーメントが大きいいため、HFSをずらす可能性がある。

油回転ポンプで30分程度の真空引き、ベーキングなし



1.374 amagat の点では、残留/放出ガスの効果を抑えるため、ターボ分子ポンプを用い、1週間ベーキングして、 $10^{-5}$  Torr の真空度を達成した。

(唯一、陽圧ではあるが、陰圧でのHeリークテストは行っている)

この差が、残留/放出ガス(水)の効果として見えている可能性がある。

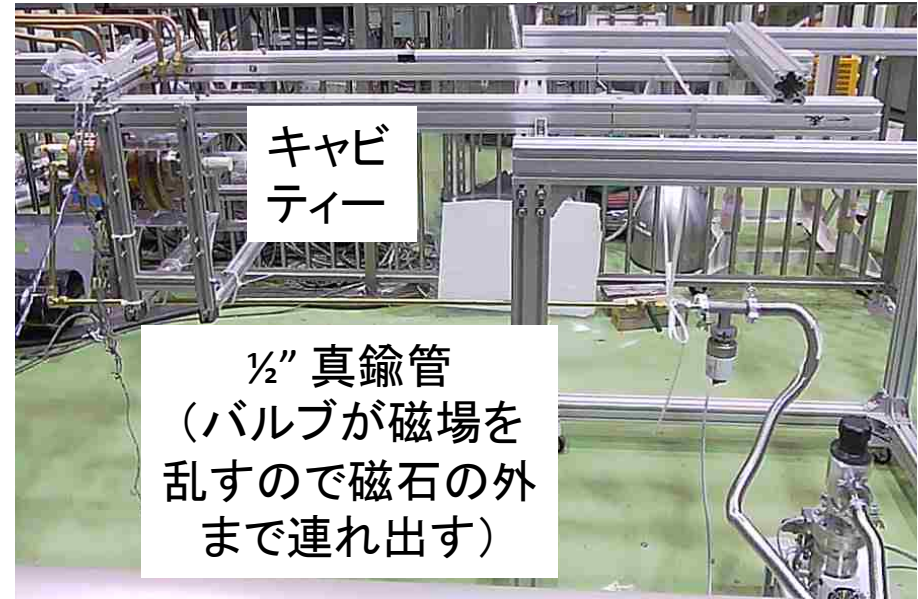
定性的には、(イソブタン+水)によるHFSのずれから、水の効果が減ったとすれば、ずれが小さくなる向きなので、合っている。

1点のみでは判断できない  
→今後詳細に調査・対策する。

# 残留/放出ガスへの対策

- ターボ分子ポンプの使用、ベーキングの徹底 (ガス圧変更前に1週間程度)。
- ガス系の設計変更 (コンダクタンスを大きく)。
- ライトガイドの材料として、アクリル(ガス放出速度が大きい)の代わりに、石英を用いる。
- スキャンの間ガス封じきりでなく、各磁場点毎に入れ替え。

ベーキング用の湯を流す



ターボ分子  
ポンプ

上記対策により、残留/放出ガスを減らし、変化を調べる。

1. イントロダクション
2. 我々の新しい実験セットアップ
3. 測定の途中結果
- 4. 今後の展望**
5. Psの熱化について
6. まとめ

# 今後の展望

- 残留/放出ガスの効果：残留/放出ガスを抑えた測定で、効果の有無や大きさを調べる。
- 検出効率：現状、モンテカルロ・シミュレーションを用いて評価。実データを基にした評価にし、ppm level を達成していく。  
→ ポジトロニウム生成位置の分布など (これから)
- 物質の効果：現状、HFSがガス密度に線型に依存すると仮定している。しかし、熱化していないポジトロニウムの影響が大きいと、これは非線型になる。過去の熱化測定 (Skalsey *et al.*) によれば、熱化の効果は  $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$  ガスで 3 ppm 以下と見積もられる。現在、ポジトロニウムの熱化関数を別の手法で精密に測定している。
- RF：温度管理、性質の更なる理解で ppm level を達成する。
- 統計誤差：今のところ 9.2 ppm

来年度末までに、**0(ppm)** の精度を達成する。

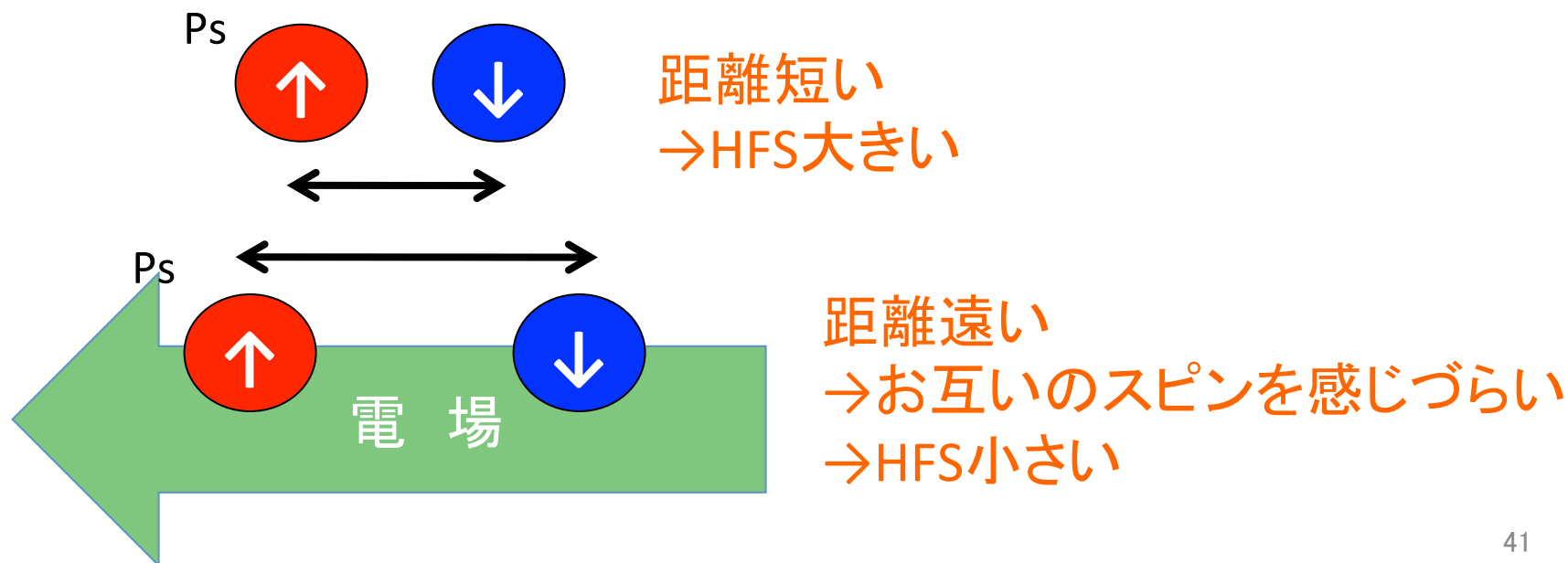
1. イントロダクション
2. 我々の新しい実験セットアップ
3. 測定の途中結果
4. 今後の展望
5. **Psの熱化について**
6. まとめ



# ポジトロニウムHFSに周囲の物質が与える影響

- Ps-HFS  
= スピン-スピン相互作用 + 量子振動  
→ 両者の距離によって変化する
- 周囲の物質の電場  
→ 電子陽電子間の距離が変化

→ HFSの変化 (シュタルク効果)



# 過去の実験での物質の効果の評価

- Psが周りの原子に近づく  
→電場を感じてシュタルク効果が始まる

HFSに効くシュタルク効果の大きさ  
 $\propto$  周りの分子との衝突頻度  
 $\propto$  (周りの分子の密度)  $\times$  (Psの速度  $v$ )

→Ps速度一定だと思えば、HFSはガス圧に比例してずれる

→過去の実験

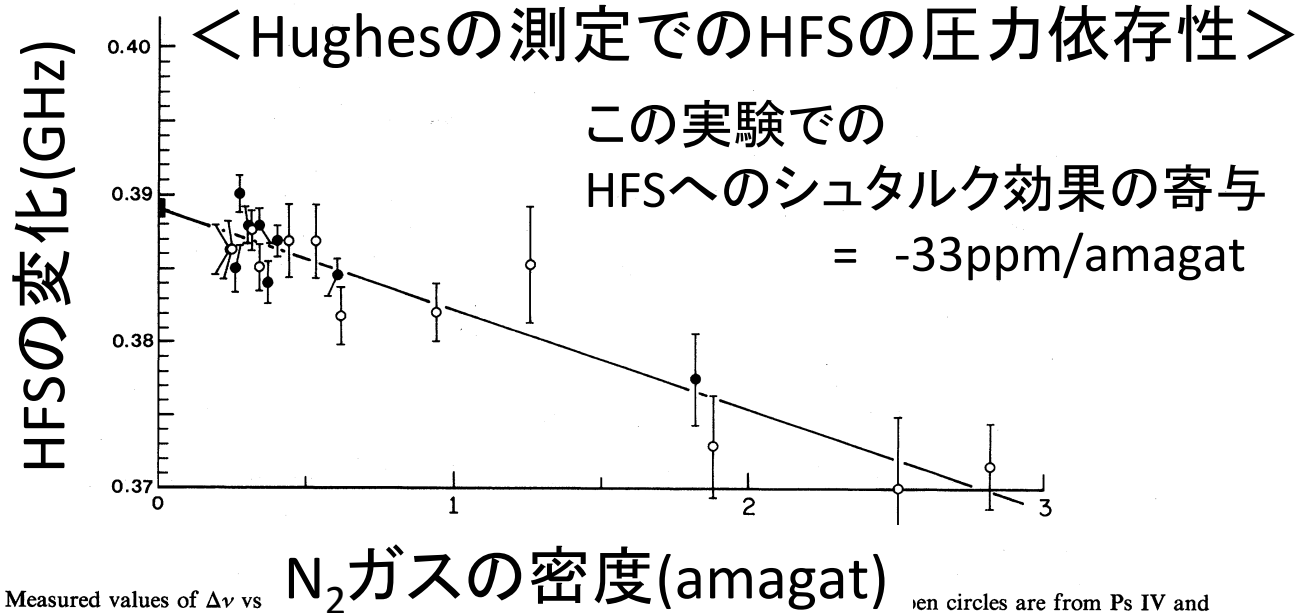


FIG. 7. Measured values of  $\Delta\nu$  vs  $N_2$  gas density. Open circles are from Ps IV and the closed circles are from the present work. The straight line is the best fit described in Eq. (14).

Phys. Rev. A  
1984 **30** 1331

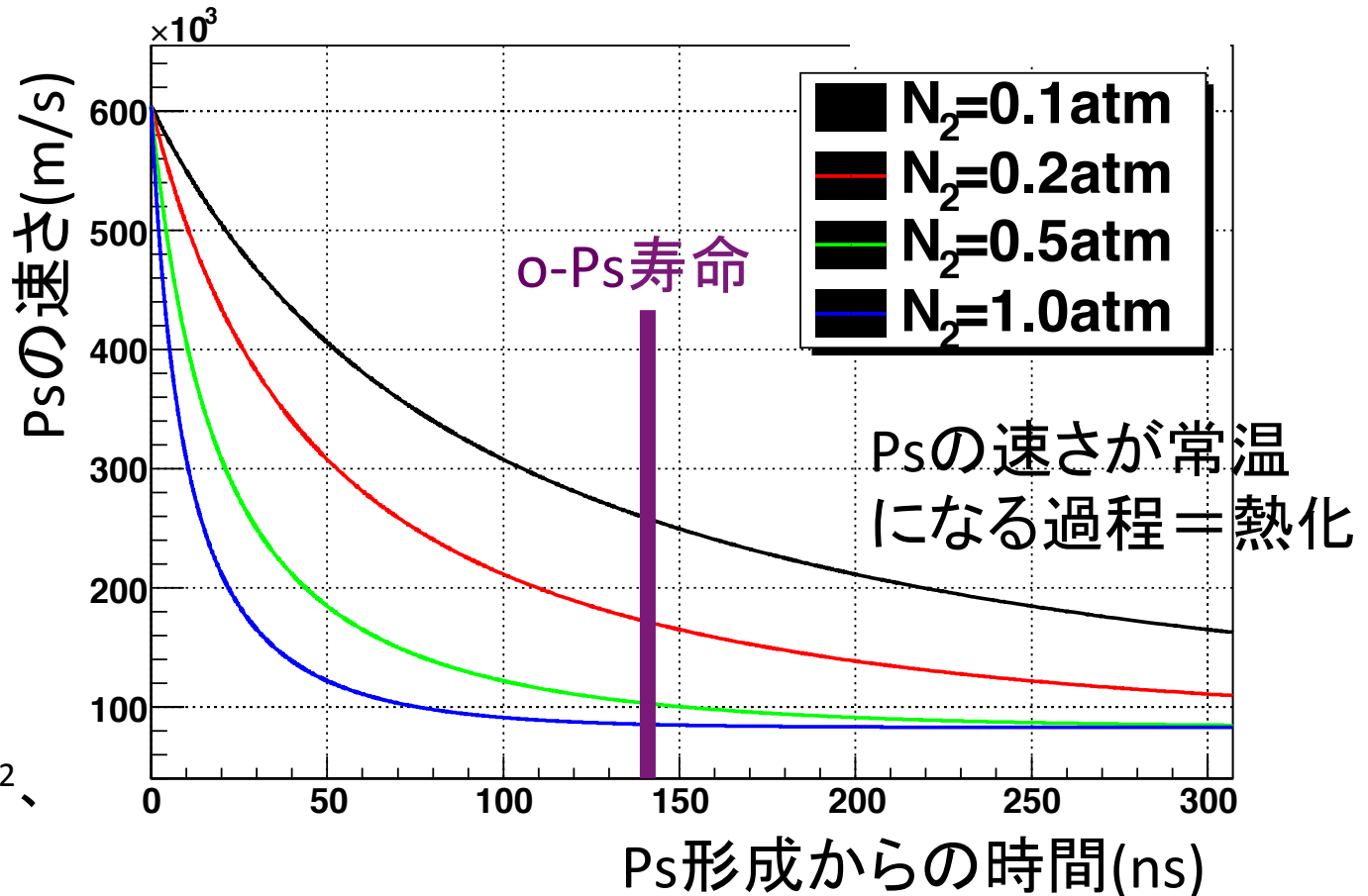
Ritter, Egan, Hughes et al.

# ポジトロニウムの速さ変化

HFSに効くシュタルク効果の大きさ  
 $\propto$  周りの分子との衝突頻度  
 $\propto$  (周りの分子の密度)  $\times$  (Psの速さ  $v(t)$ )

過去の実験では一定という扱い

<PsがN<sub>2</sub>ガス中で形成された時の減速の様子(シミュレーション)>

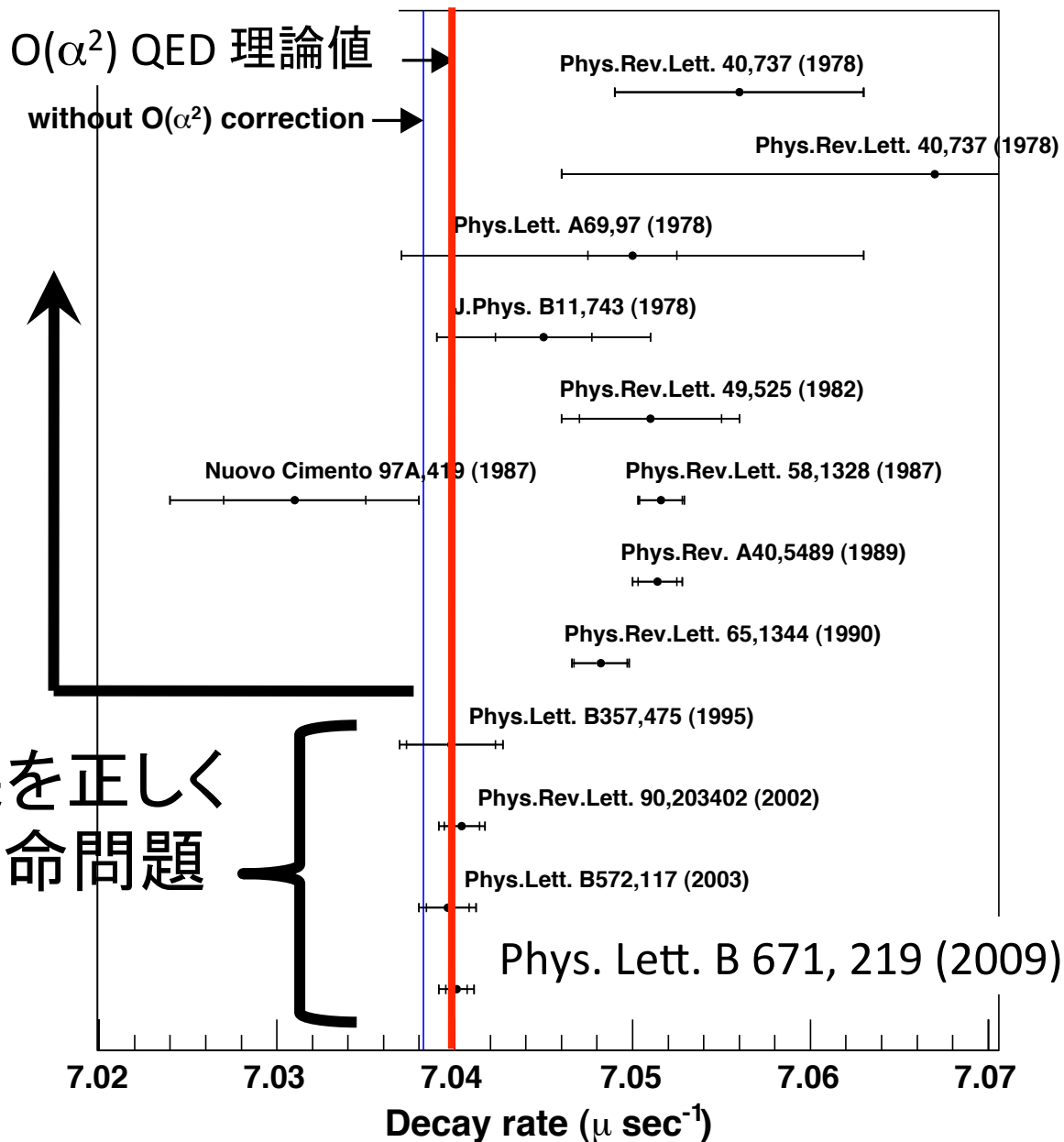


パラメーターは、  
 $\sigma_m = 13.0 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ 、  
 $E_0 = 2.07 \text{eV}$  を使用

# 「オルソポジトロニウムの寿命問題」の解決

Ps の熱化が正しく  
考慮されてい  
なかった。  
実験値と理論値に  
有意な差があった。

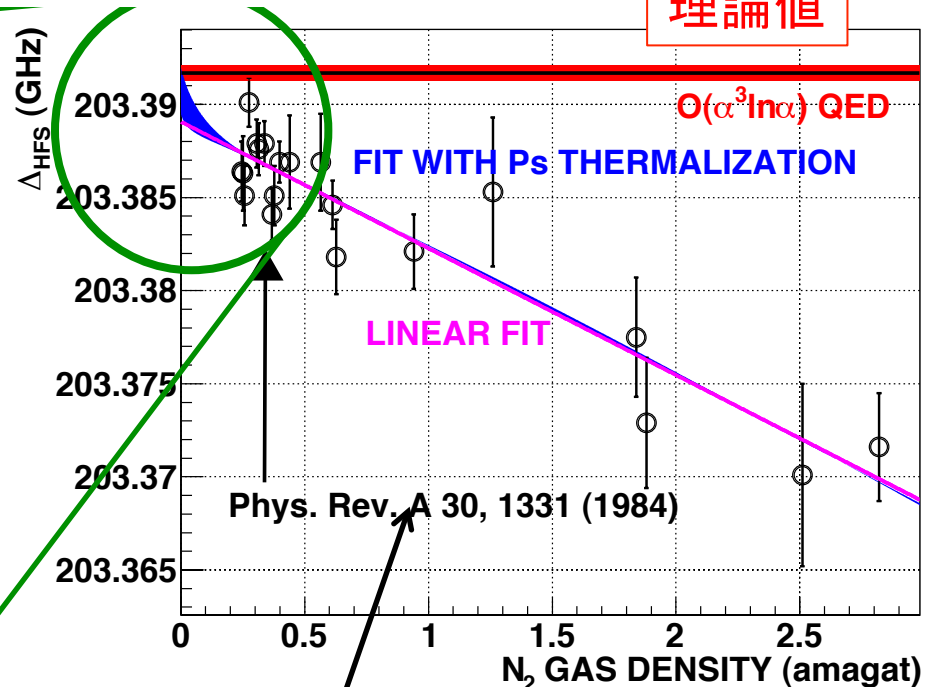
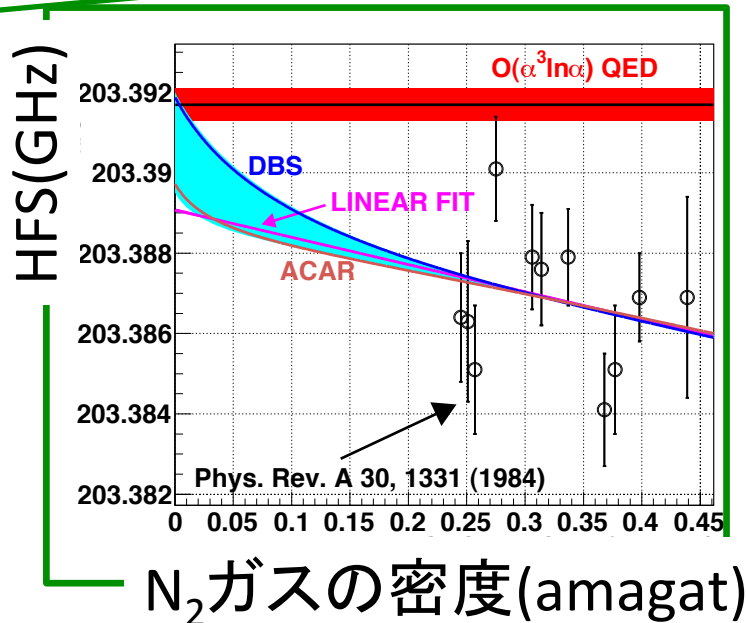
Ps の熱化による効果を正しく  
取り入れることで、寿命問題  
は解決した。



# 圧力＋熱化を含めた物質の効果がHFSへ及ぼす影響

＜圧力と熱化によるHFS補正のシミュレーション＞

理論値



$N_2$ でO(10ppm)の補正：

- 実験値と理論値の差を埋める向き
- 目標精度に対して、無視できない大きな補正
- 熱化測定手法による差が大きい
  - 系統誤差の要因
  - 独自に測定を行う

$(\sigma_m, E_0) =$   
 DBS:  $(13.0 \times 10^{-16} \text{cm}^2, 2.07 \text{eV})$   
 ACAR:  $(37 \times 10^{-16} \text{cm}^2, 2.07 \text{eV})$   
 RF周波数=2.32GHz、  
 RF振動磁場=10Gauss、静磁場=0.78Tesla  
 実験値はHughes et al. (1984)、  
 理論値はKniehl et al. (2000)

# イソブタンを用いる長所

- 我々の実験では、 $N_2$ ではなくイソブタンを使用する。

長所1: ポジトロニウムの生成率が $N_2$ の1.5倍程度良い。  
( $N_2$ で生成率20%、イソブタンでは30%)

長所2: 陽電子がガス中で静止しやすい。

統計

長所3:

低速陽電子を速やかに対消滅させる働きが大きい。  
運動エネルギーが小さすぎてPsを作れず $2\gamma$ 崩壊する $e^+$   
 $N_2$ 中で寿命170ns (BGになる) → イソブタン中で 0.3 ns

S/N

長所4: Psの熱化が速い (Skalsey *et al.* によれば、  
イソブタン中では  $N_2$  中の約5倍速い)。

熱化

# どのようにしてポジトロニウムの $v(t)$ を測定するか？

- o-Psのpick-offを用いて測定

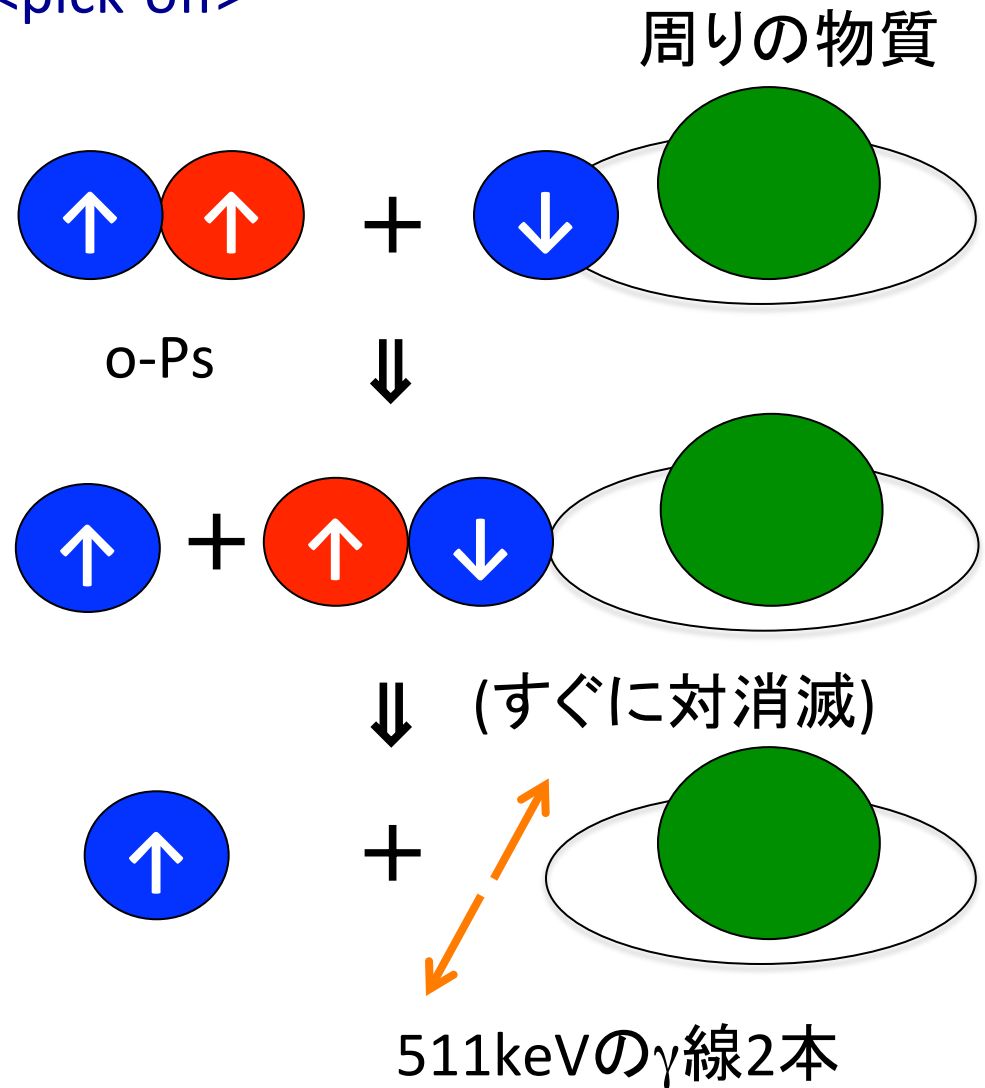
- pick-off の量(t)  
= pick-offの断面積  
× 物質の密度  
× o-Psの量(t)  
×  $v(t)$

$v(t)$   
pick-offの量(2 $\gamma$ 崩壊)  
 $\infty$  

---

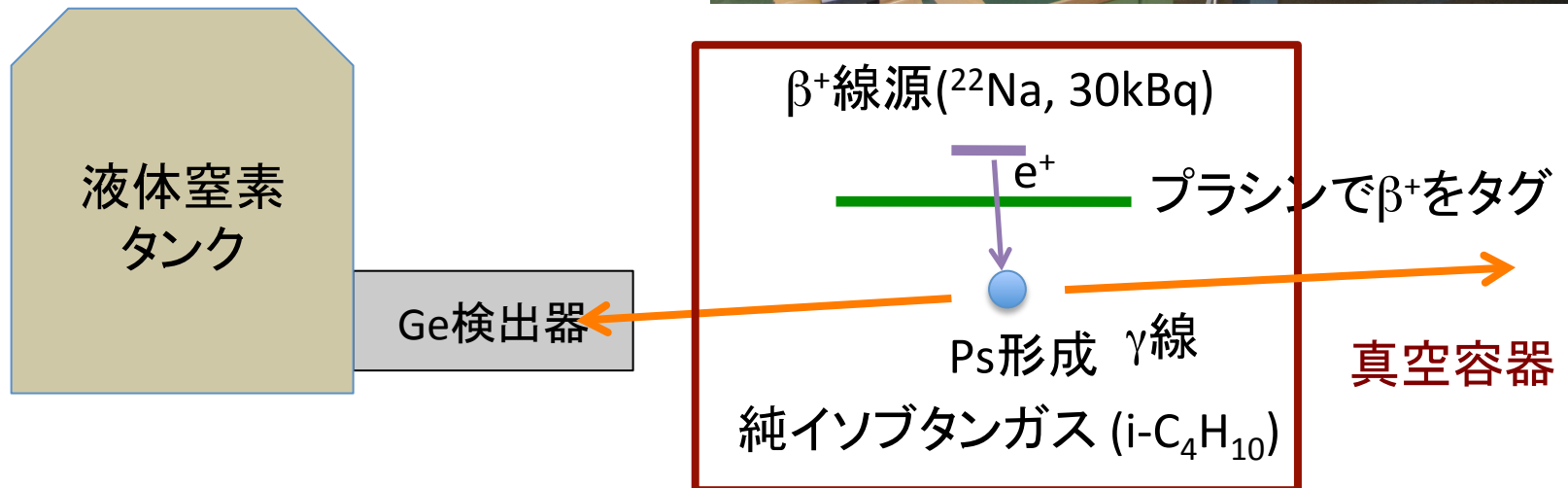
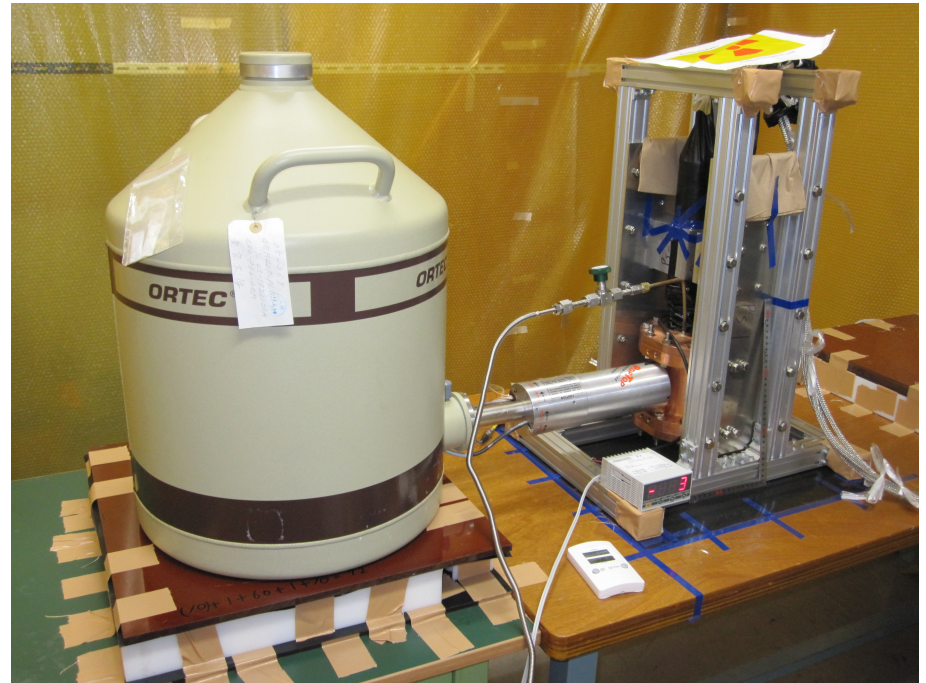
 o-Psの量(3 $\gamma$ 崩壊)

<pick-off>



## セットアップ(全体の様子)

- タイミング: プラシんでスタート、Geでストップ
- イソブタンガス中で $e^+$ を止めてPsを作る
- ソース周りは真空容器に入れてある
- ガス圧を変化させて測定を行う



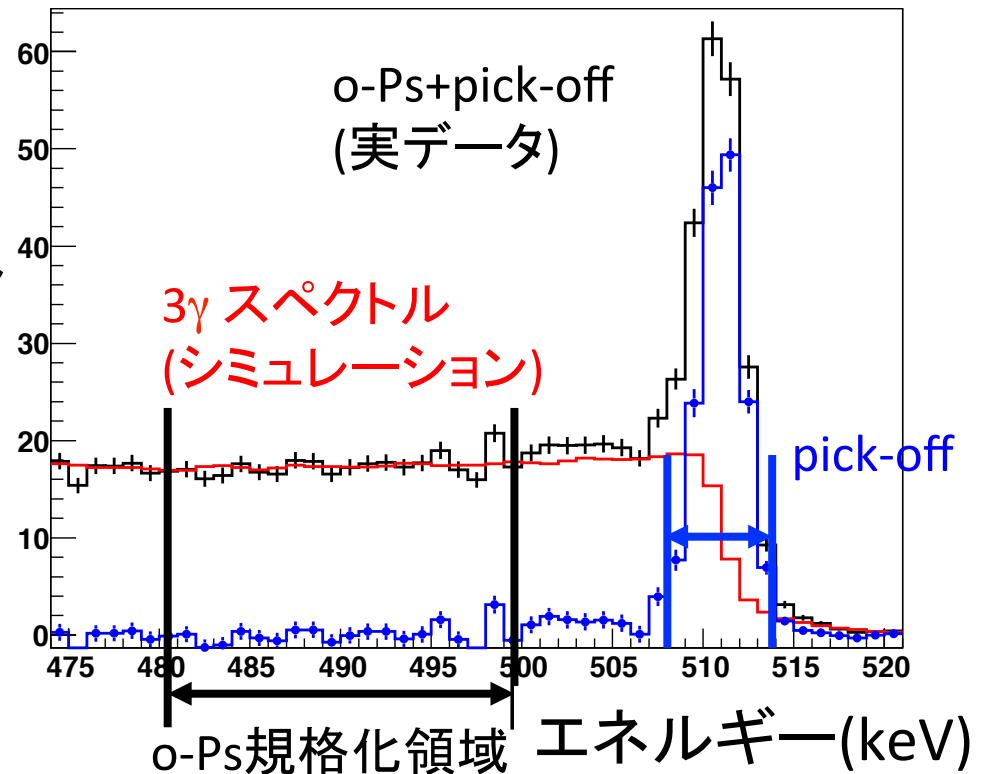


## o-Ps、pick-off量の見積もり方

- 1, 時間を区切ってエネルギースペクトラムを作る
- 2, o-Psはスペクトラムの連続部分(480~500keV)で規格化
- 3, pick-offは $511 \pm 3$ keV
- 4, o-Ps, Pick-off量の efficiency、なだれ込みの量はシミュレーションで補正

$$v(t) = \frac{\text{pick-offの量}(2\gamma\text{崩壊})}{\text{o-Psの量}(3\gamma\text{崩壊})}$$

現在測定中



1. イントロダクション
2. 我々の新しい実験セットアップ
3. 測定の途中結果
4. 今後の展望
5. Psの熱化について
6. まとめ

# まとめ

## 本測定 of 途中結果

$$\text{HFS} = 203.3887 \pm 0.0019 \text{ (stat., 9.2 ppm)} \\ \pm 0.0016 \text{ (sys., 8.0 ppm) GHz}$$

- 我々の新しい精密測定は、過去の実験において考えられる共通の系統誤差 (磁場の非一様性・ $P_s$  の熱化による効果) を小さくする。
- 上記途中結果は、残留/放出ガスの効果が見えている可能性があり、今後調査・対策する。
- 0(ppm) の結果が来年度末までに得られる見込み。これによって HFS のずれの検証を行う。