

ポジトロニウム超微細構造の 精密測定

理学系研究科 物理学専攻 浅井研究室 D1

石田 明

平成23年2月18日

GCOE「未来を拓く物理科学結集教育研究拠点」第5回 RAキャンプ

於静岡県伊豆の国市長岡

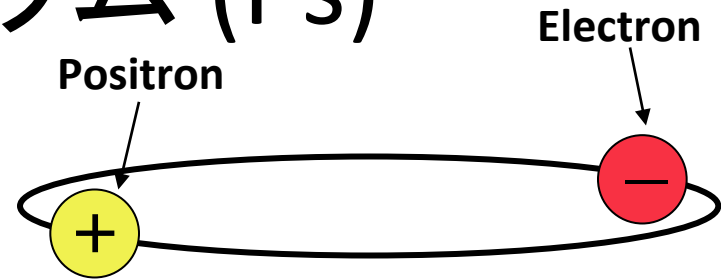
Ps HFS 精密測定

- 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
- 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

目次

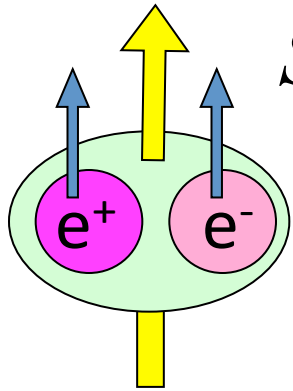
- インTRODクシヨン
- 我々の新しい実験セツアップ
- 測定の途中結果
- 今後の展望

ポジトロニウム (Ps)



- 電子陽電子束縛系
 - レプトン 2 個だけから成る、最も軽い「原子」
 - 粒子・反粒子 → 新しい物理に敏感
- 束縛系 QED によって記述
- 基底状態 ($1S$) は、スピンの状態に応じて 2 種類の状態
 - 1^3S_1 (triplet、spin=1): オルソポジトロニウム (o-Ps)
 - $\tau=142\text{ns}$ 、 3γ 、(5γ 、 $7\gamma\dots$) に崩壊
 - 1^1S_0 (singlet、spin=0): パラポジトロニウム (p-Ps)
 - $\tau=125\text{ps}$ 、 2γ 、(4γ 、 $6\gamma\dots$) に崩壊

2つのスピン固有状態

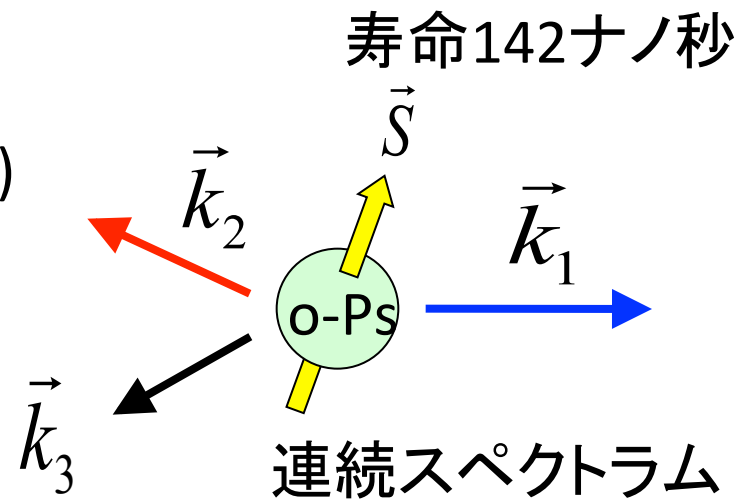


$\vec{S} = 1$ (三重項)

オルソポジトロニウム (o-Ps)

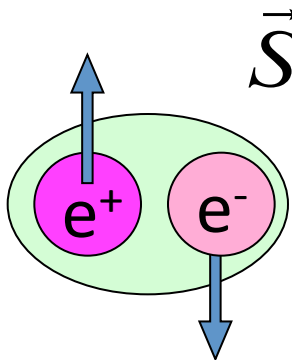
Spin=1 光と同じ量子数

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



寿命142ナノ秒

連続スペクトラム

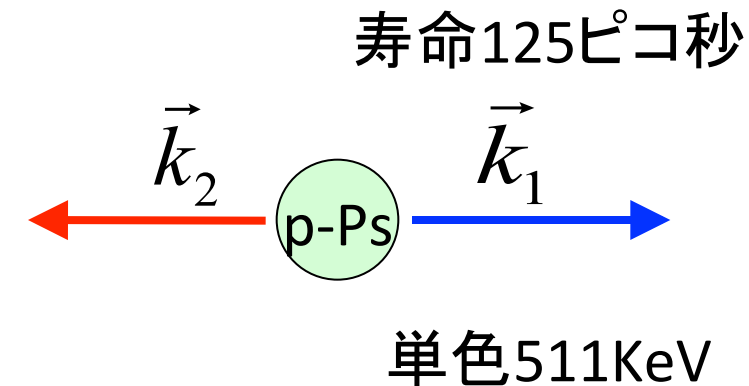


$\vec{S} = 0$ (一重項)

パラポジトロニウム (p-Ps)

Spin=0 スカラー粒子

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



寿命125ピコ秒

単色511KeV

エネルギー準位

- ・水素原子と同様、様々な準位
- ・基底状態の束縛エネルギー = 6.8 eV (水素原子の半分)

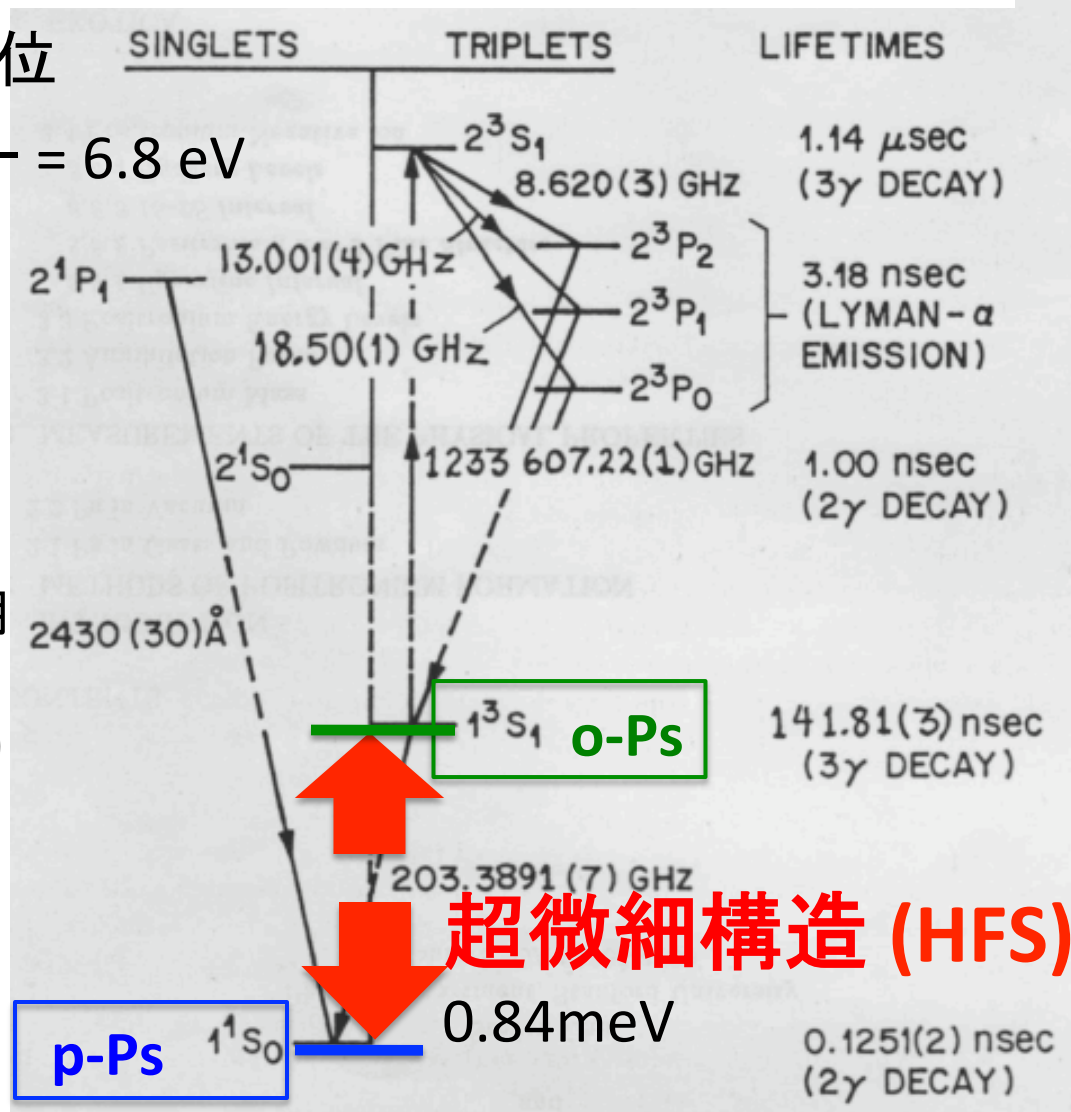
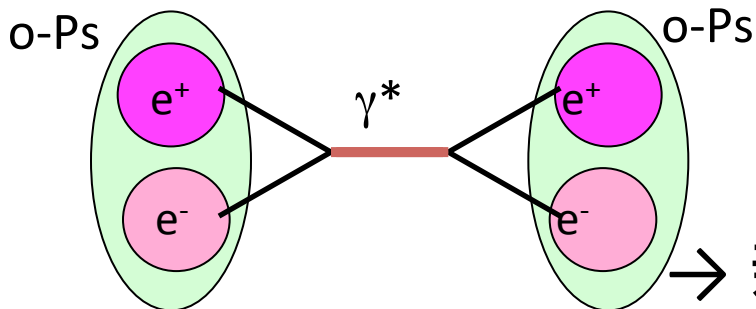
- ・大きな超微細構造 (HFS) 203 GHz (cf. H で 1.4 GHz)

理由は 2 つ

1. 大きなスピン-スピン相互作用

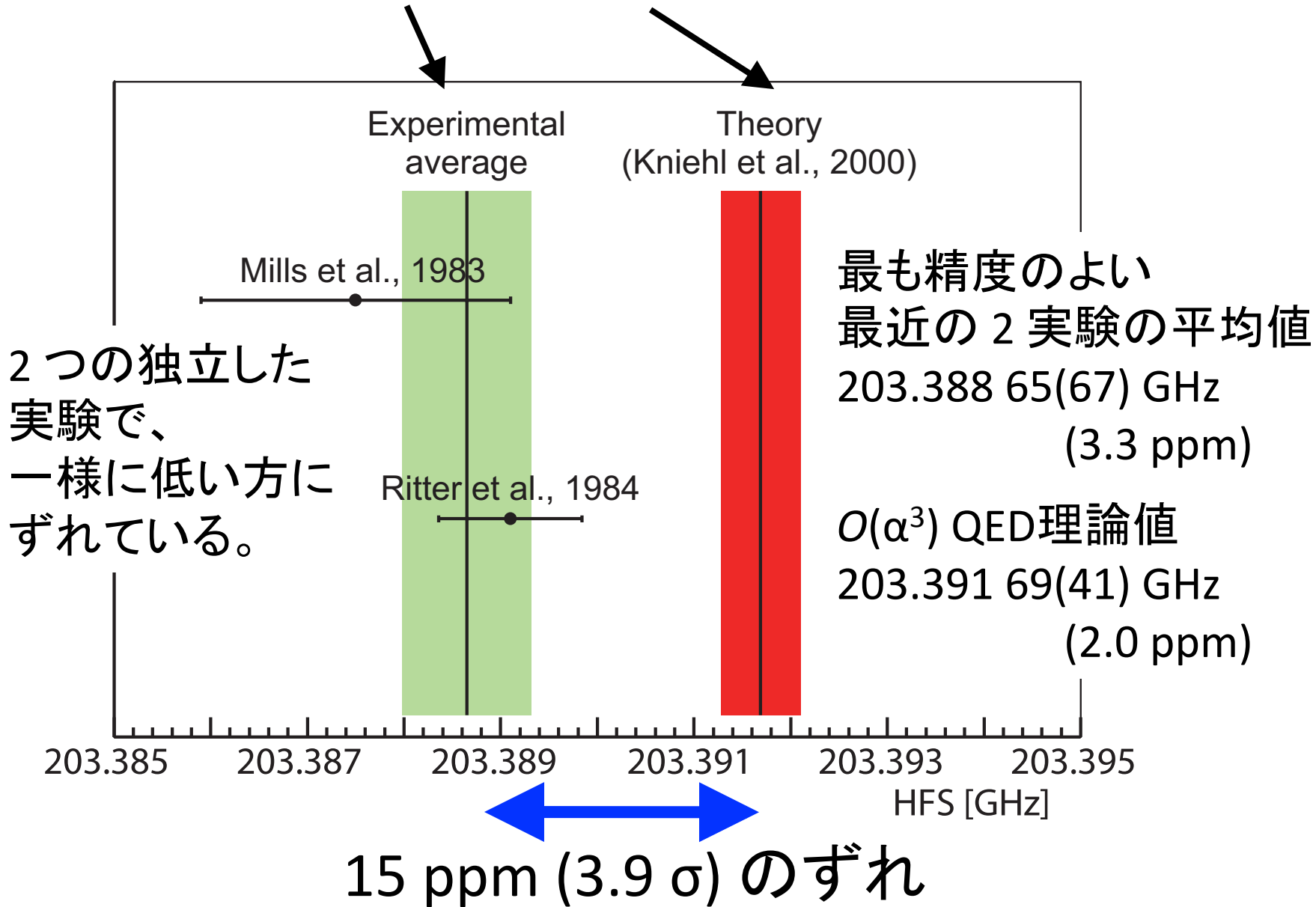
$$\vec{\mu} = \frac{e}{2m} \vec{\sigma} \quad (\text{質量が小さい})$$

2. 量子振動 (40%の寄与)



→ 新しい物理にsensitive

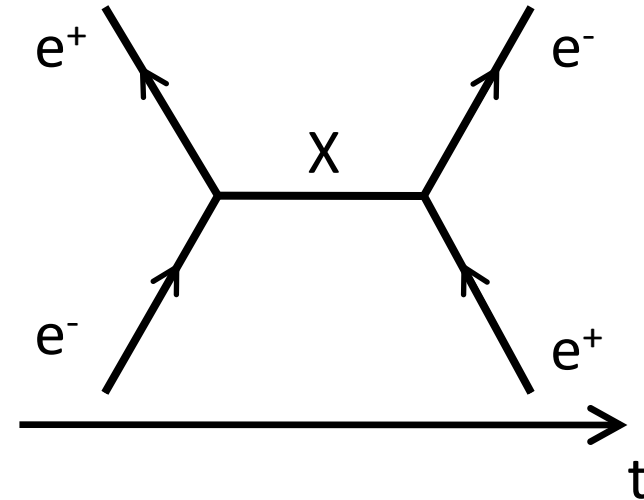
HFSは、実験と理論でずれている



ずれの原因は？

- 標準理論を超えた新しい物理

- 相互作用の弱い未知の粒子の介在
- 重い粒子には感度が低いが、 μ の $g-2$ と違い、s-channelの効果も見える。
(例 $O(\text{MeV})$, $\alpha \sim 10^{-8}$ の擬スカラー)
- o-Psは余剰次元にも感度

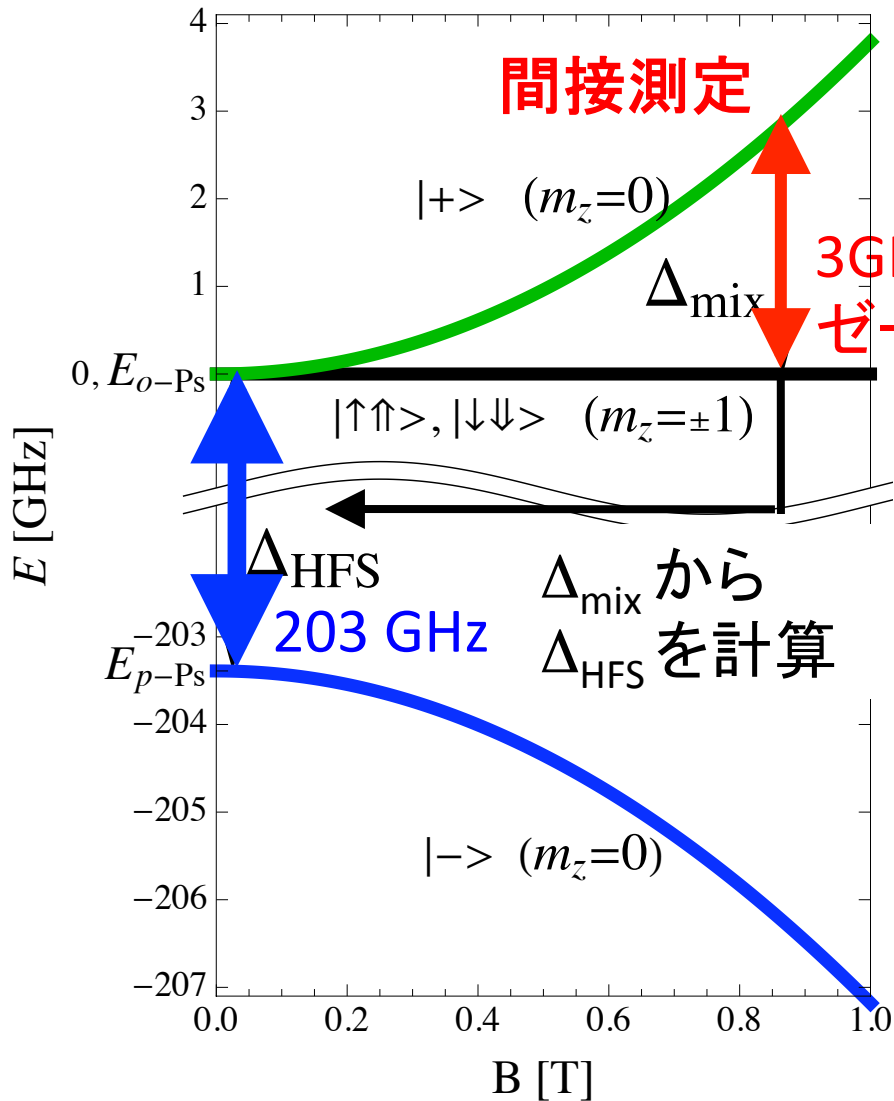


- 過去の実験に共通した系統誤差

- 物質の効果を過小評価していた可能性。熱化していない o-Psは特に低圧で大きな効果をもち、HFSをずらしている可能性がある。cf. o-Psの寿命問題 (1990年代)
- 磁場の非一様性。数cmの大きな領域で ppm の磁場制御をするのは難しい。過去の実験で最も大きな系統誤差。

- 理論計算の間違い

ゼーマン効果を用いた間接測定の方法



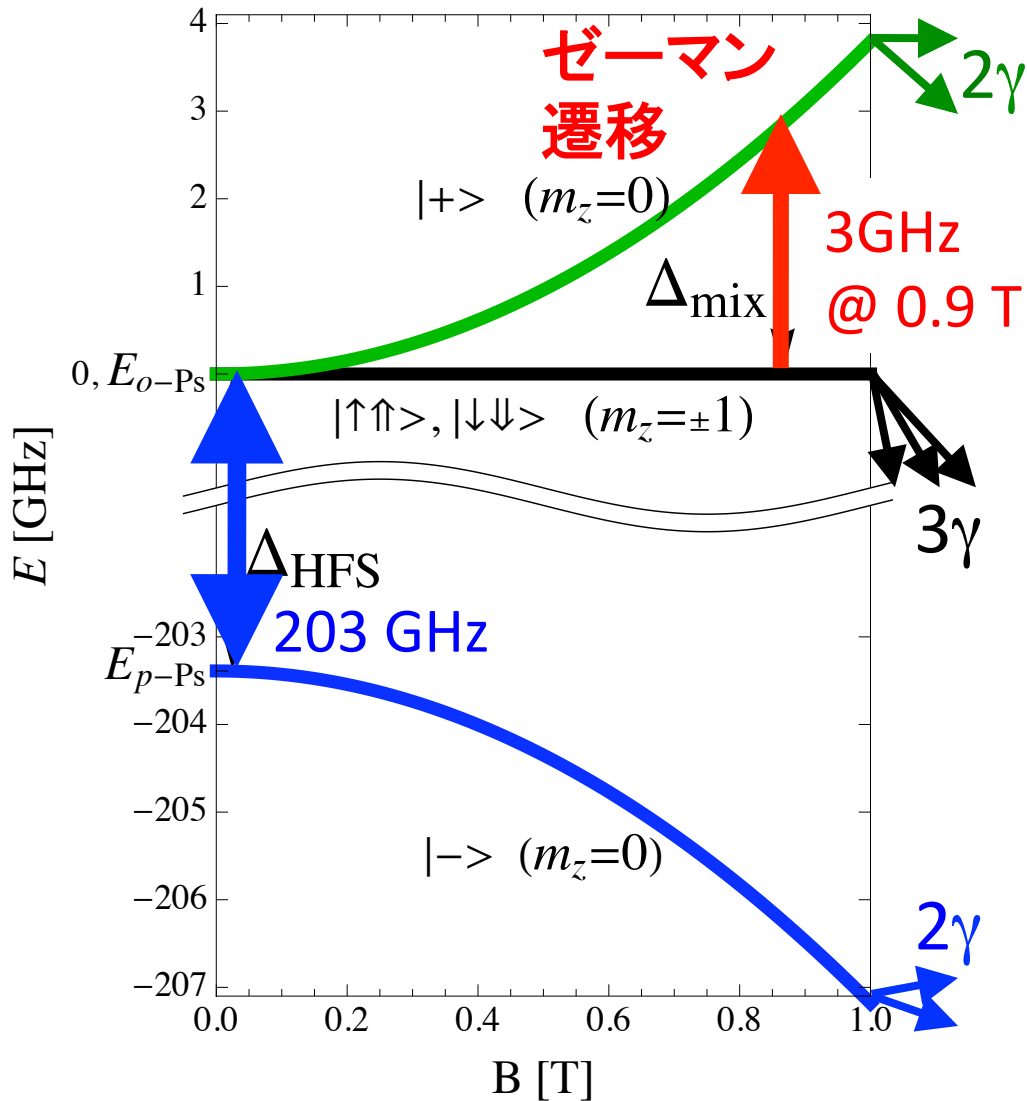
静磁場中では、**p-Ps** は **o-Ps** の $m_z=0$ 成分と混合する。(2 γ 崩壊).

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。

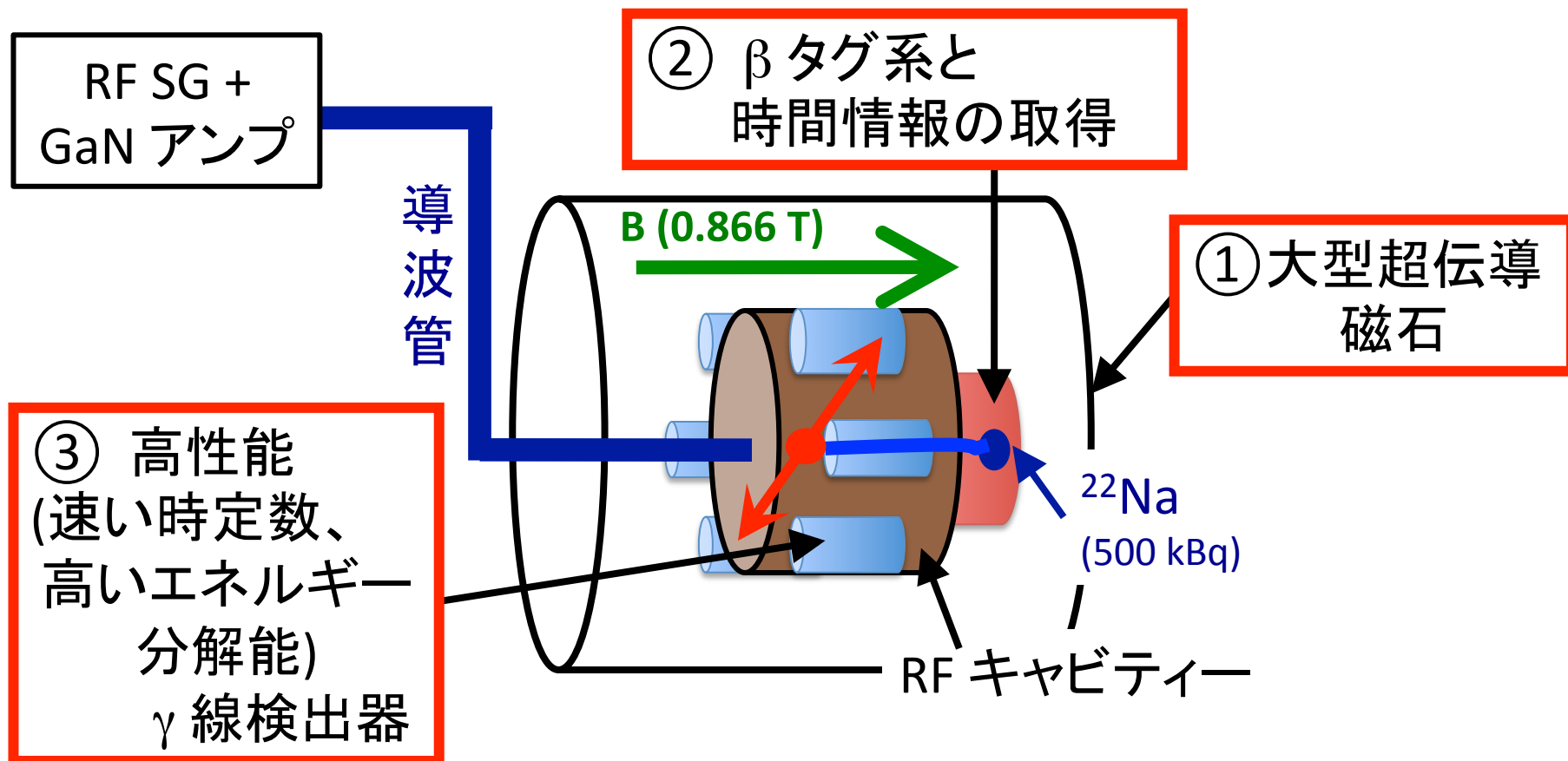
→ 2γ 崩壊 (511 keV 単色) 率が大きくなる。
この崩壊率の変化が、実験のシグナルになる。

→ 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

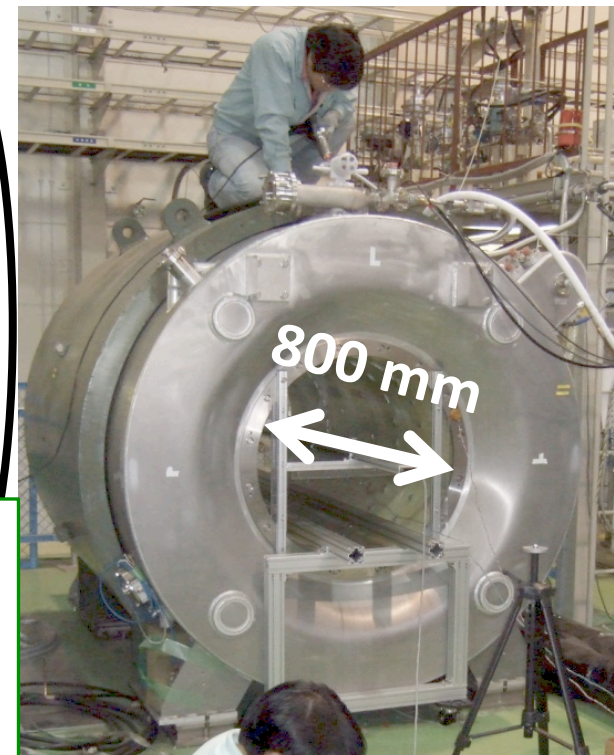
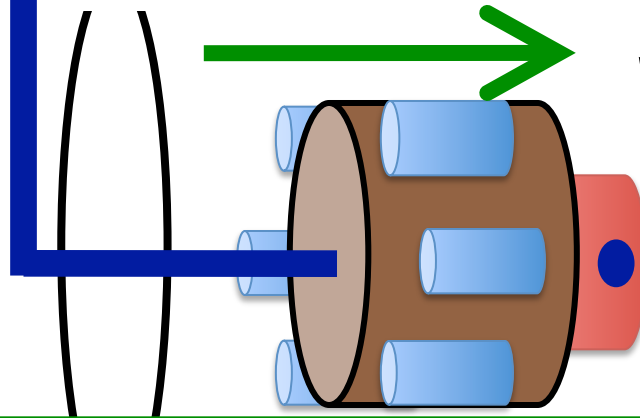


我々の新しい実験セットアップ

RF SG +
GaN アンプ

・大型超伝導磁石
+ 補償磁石

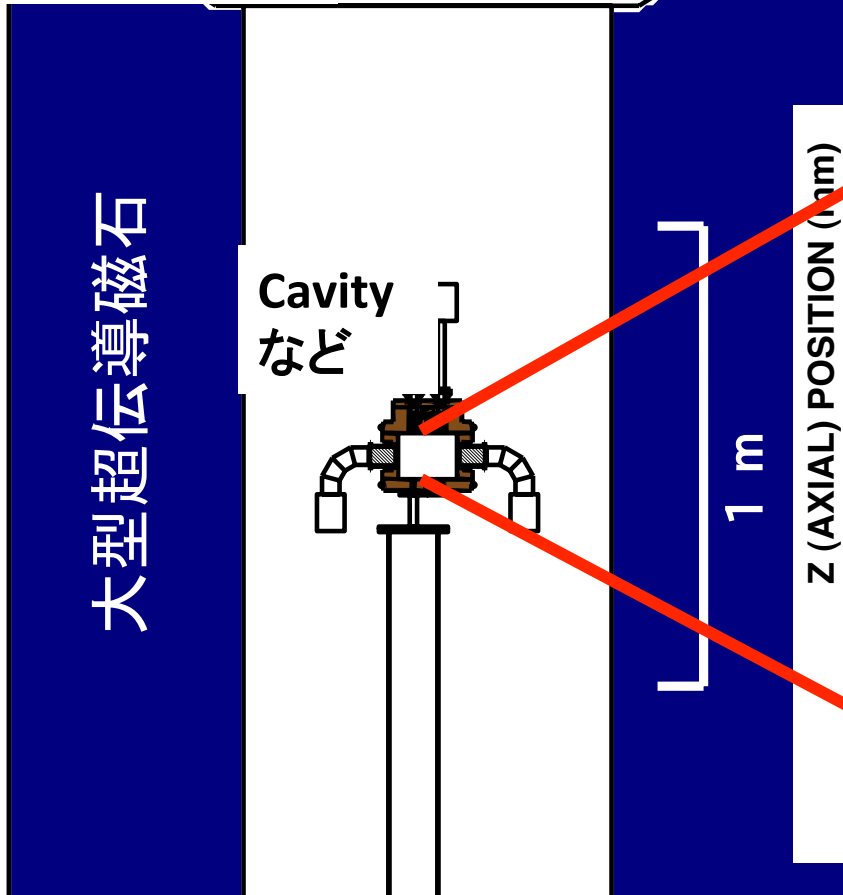
静磁場
B (0.866 T)



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

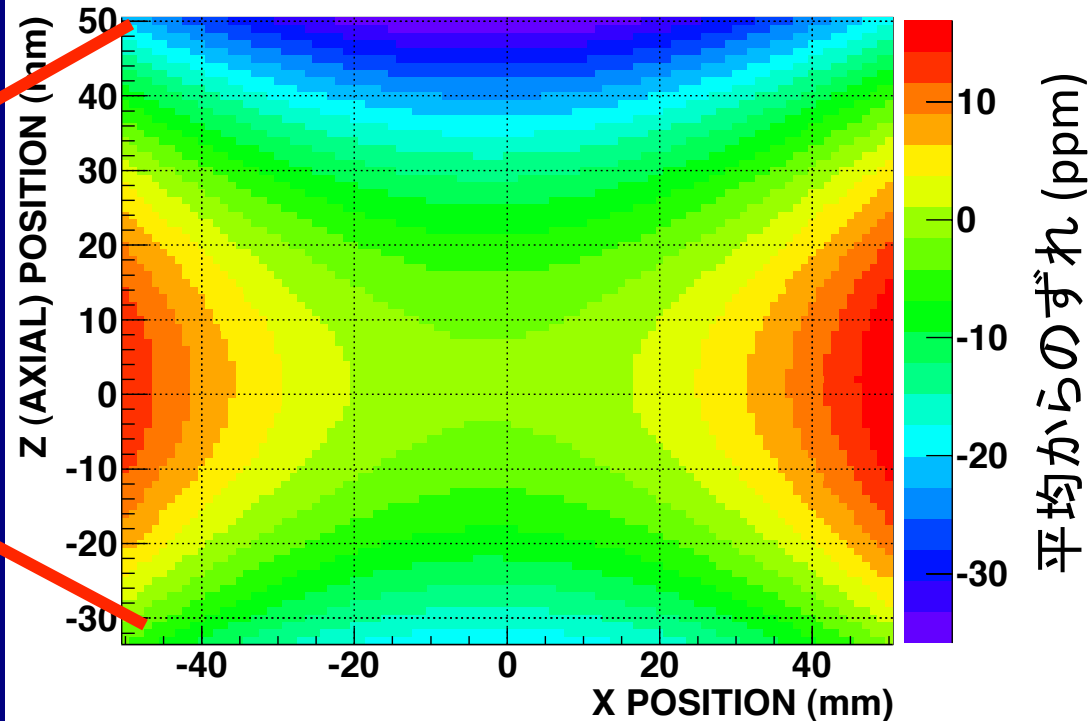
磁場の非一様性

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

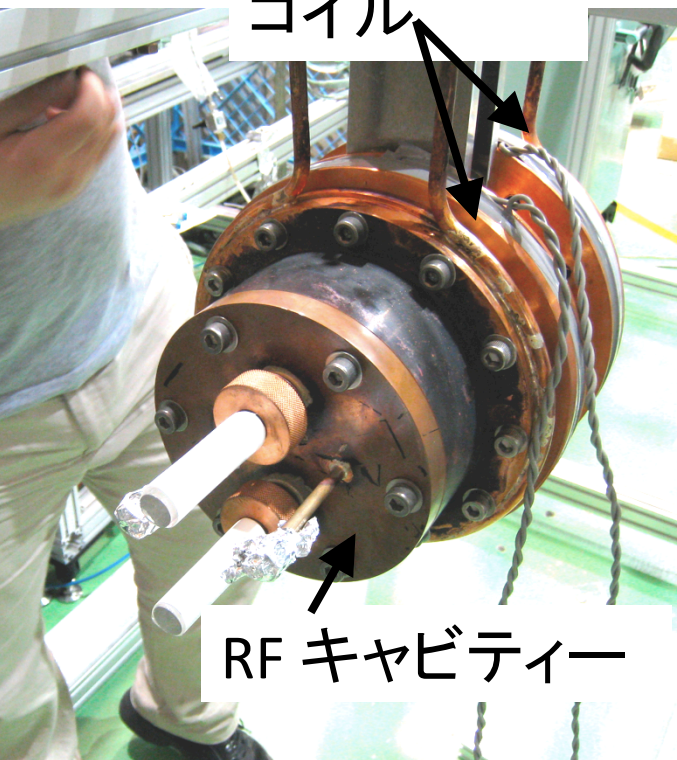


- ・ 大型超伝導磁石だけでは、まだ 10 ppm 程度の非一様性が残る。
- ・ PMT (強磁性体) や治具の影響も大きい。それらを含めて磁場の
一様性を 0(ppm) で出せるよう、補償磁石を設計・製作した。

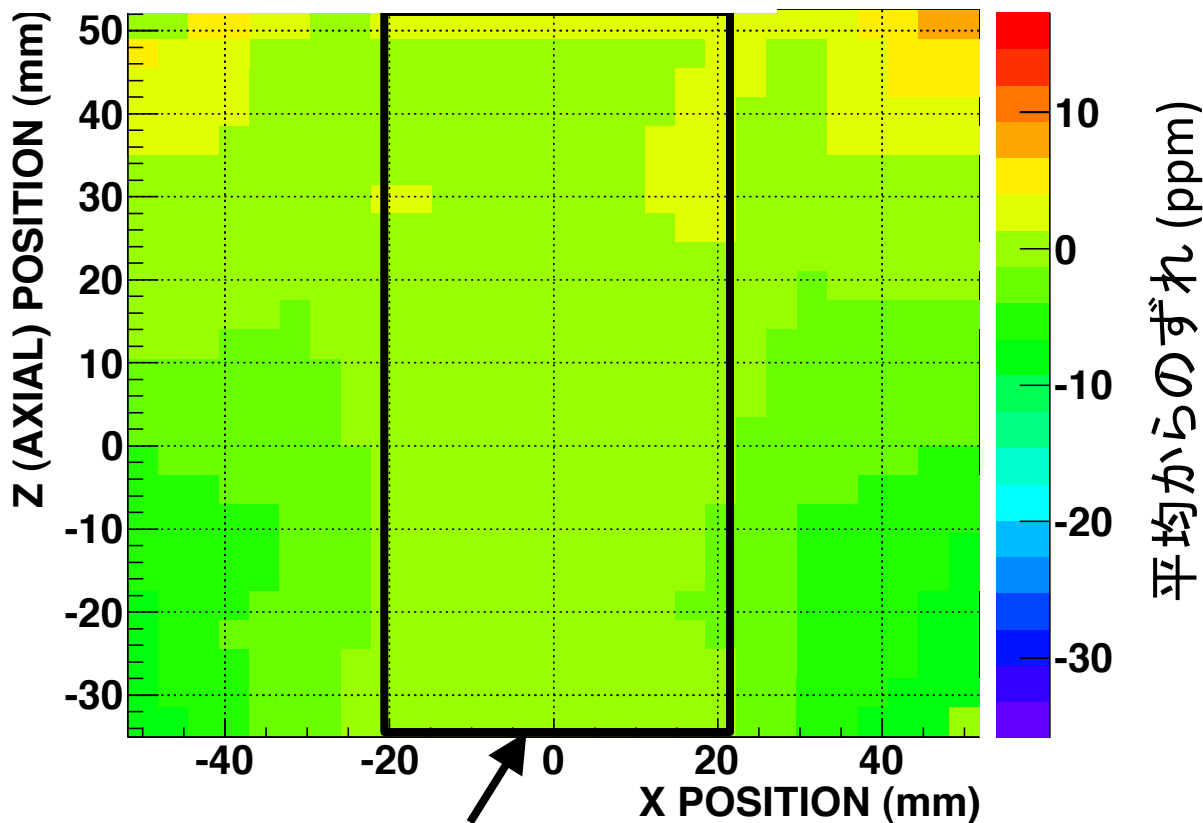
補償磁石

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。



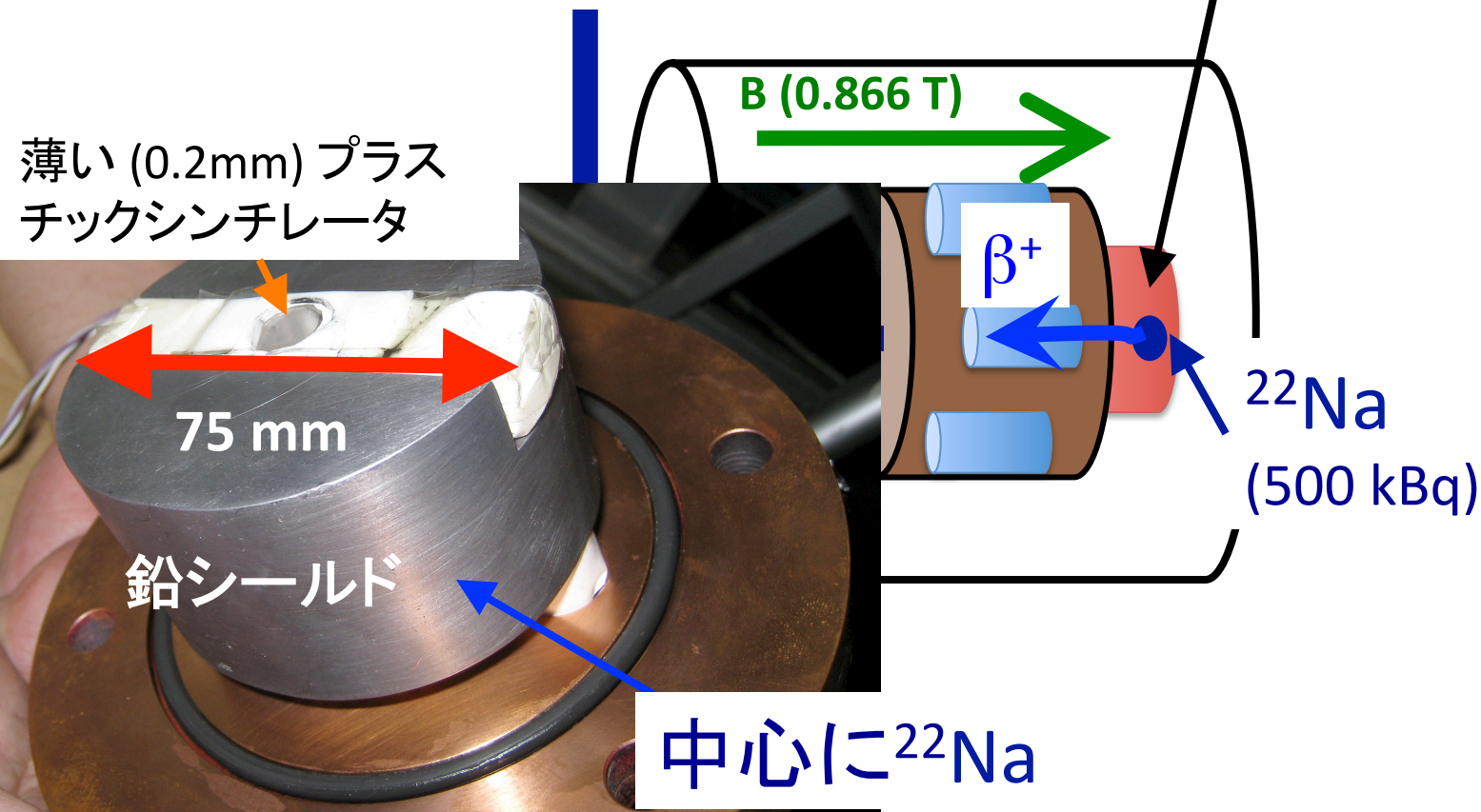
0.9 ppm (RMS) の一様性 が、Ps 生成領域内で得られた。

→ 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

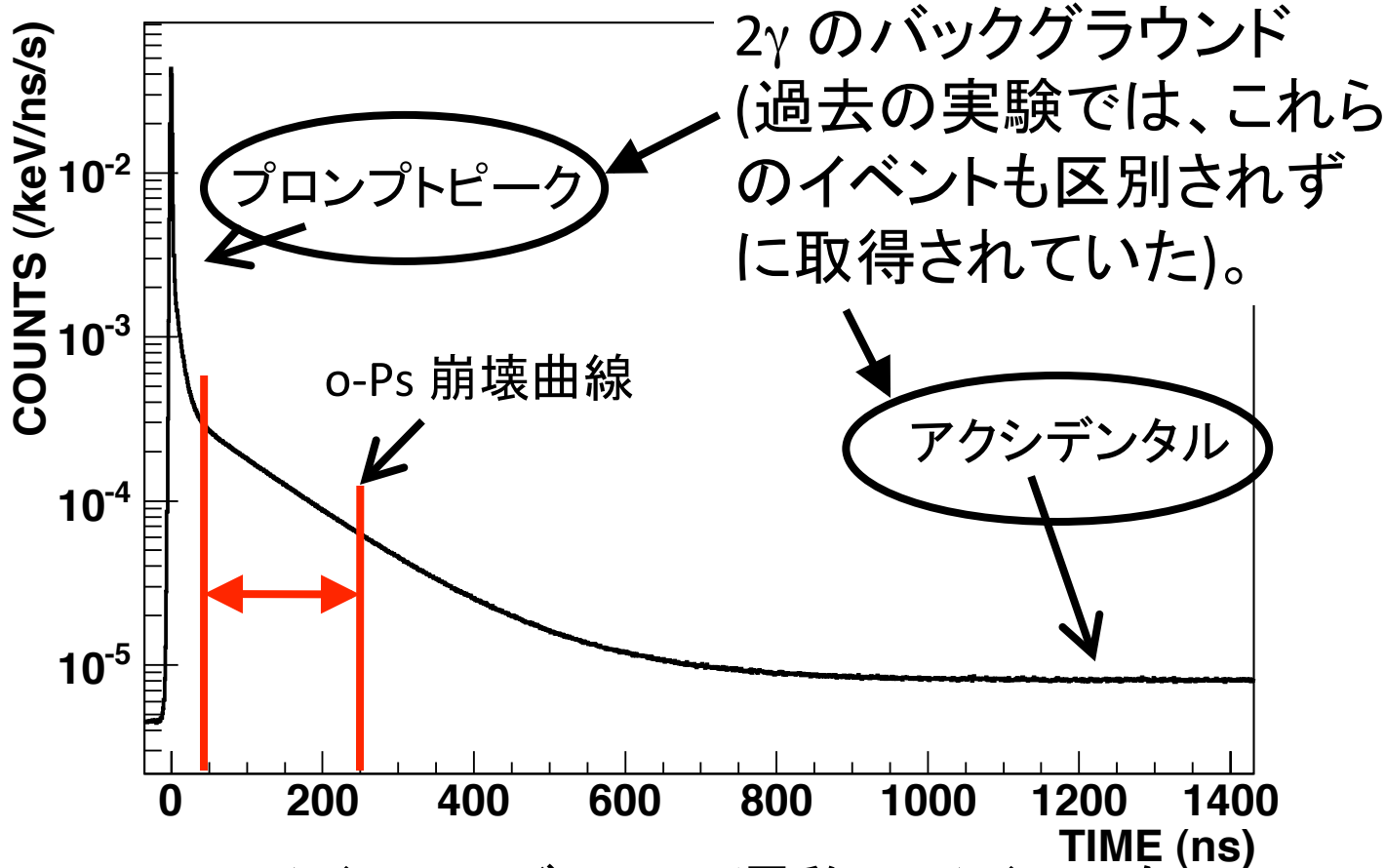
- (1) 高い S/N (20倍に高める)
- (2) Psの熱化を直接測れる



時間情報と S/N

高い S/N

Ps 崩壊曲線



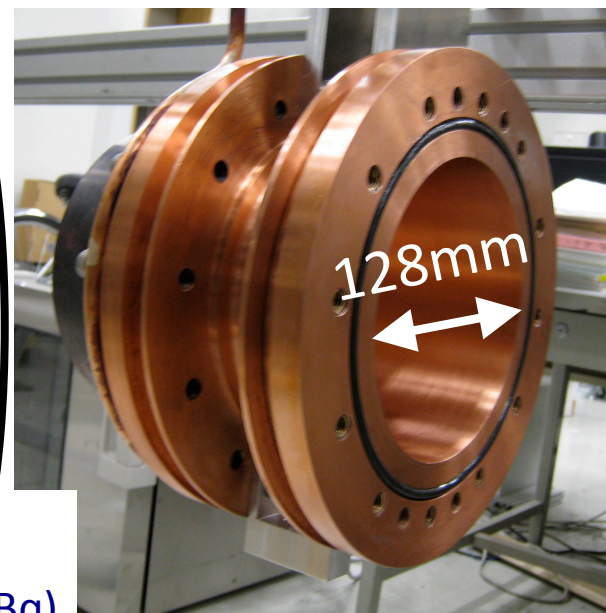
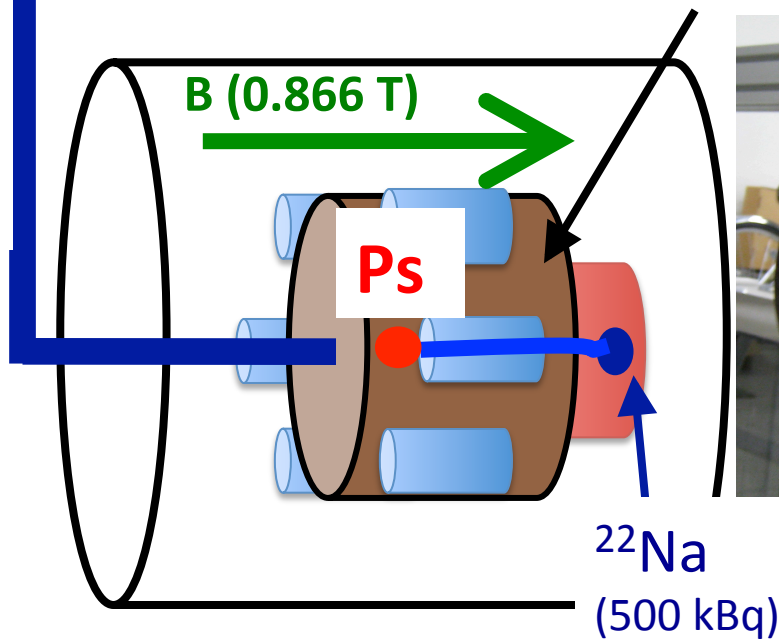
o-Ps のイベント、ゼーマン遷移のイベントを、
タイミングウィンドウによって選択 → 約20倍 S/N を高める。

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

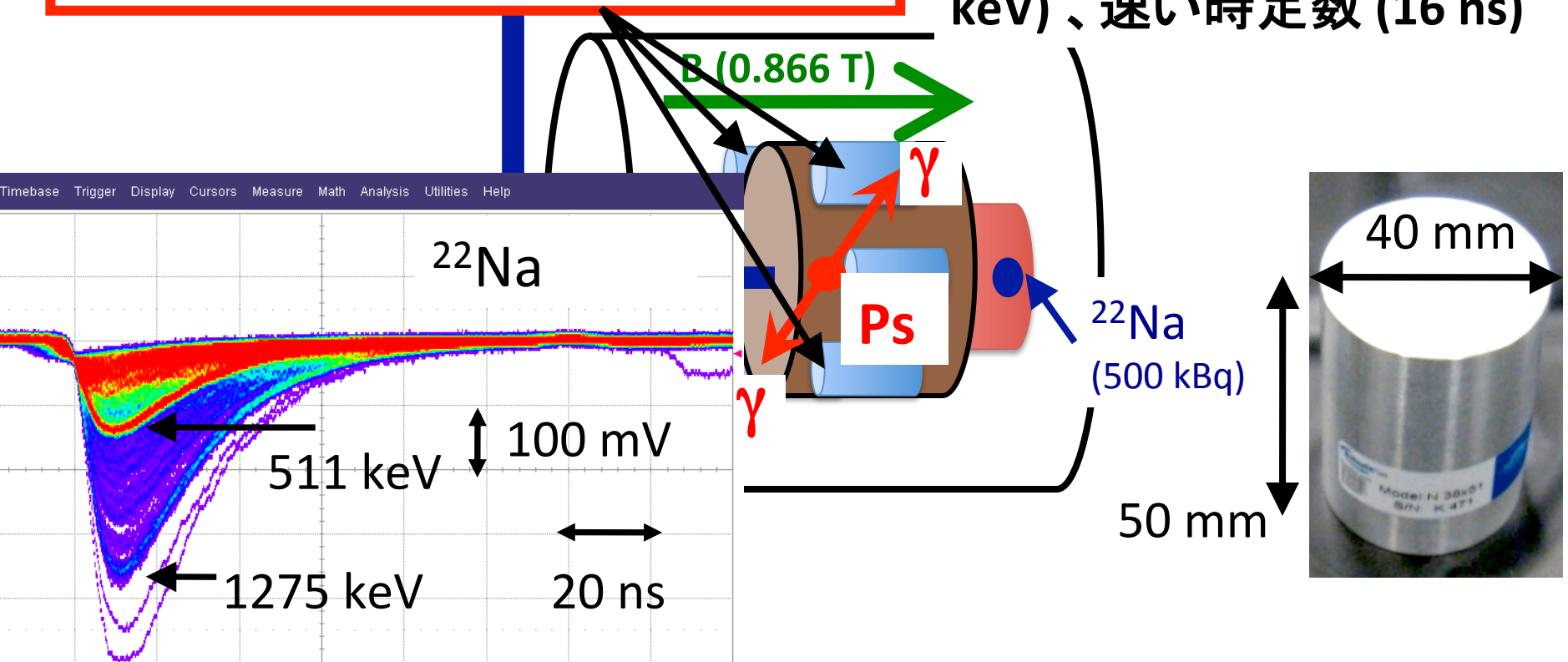
RF キャビティ
TM₁₁₀ モード, $Q_L=11,000$
ガスを充填
(イソブタン 100%)



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

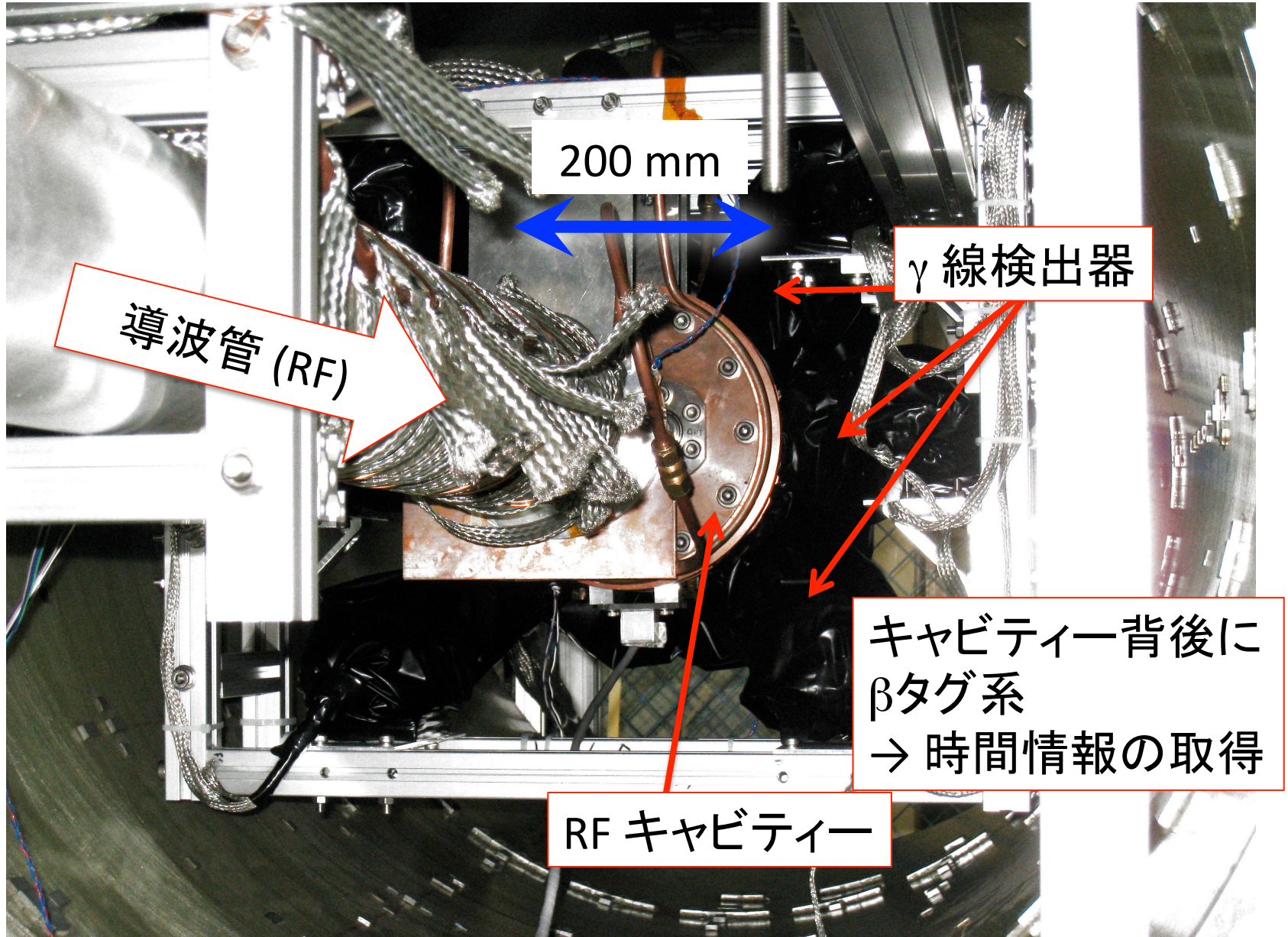
大型超伝導磁石

トリガーレート ~ 2.4 kHz
DAQ レート ~ 1.2 kHz

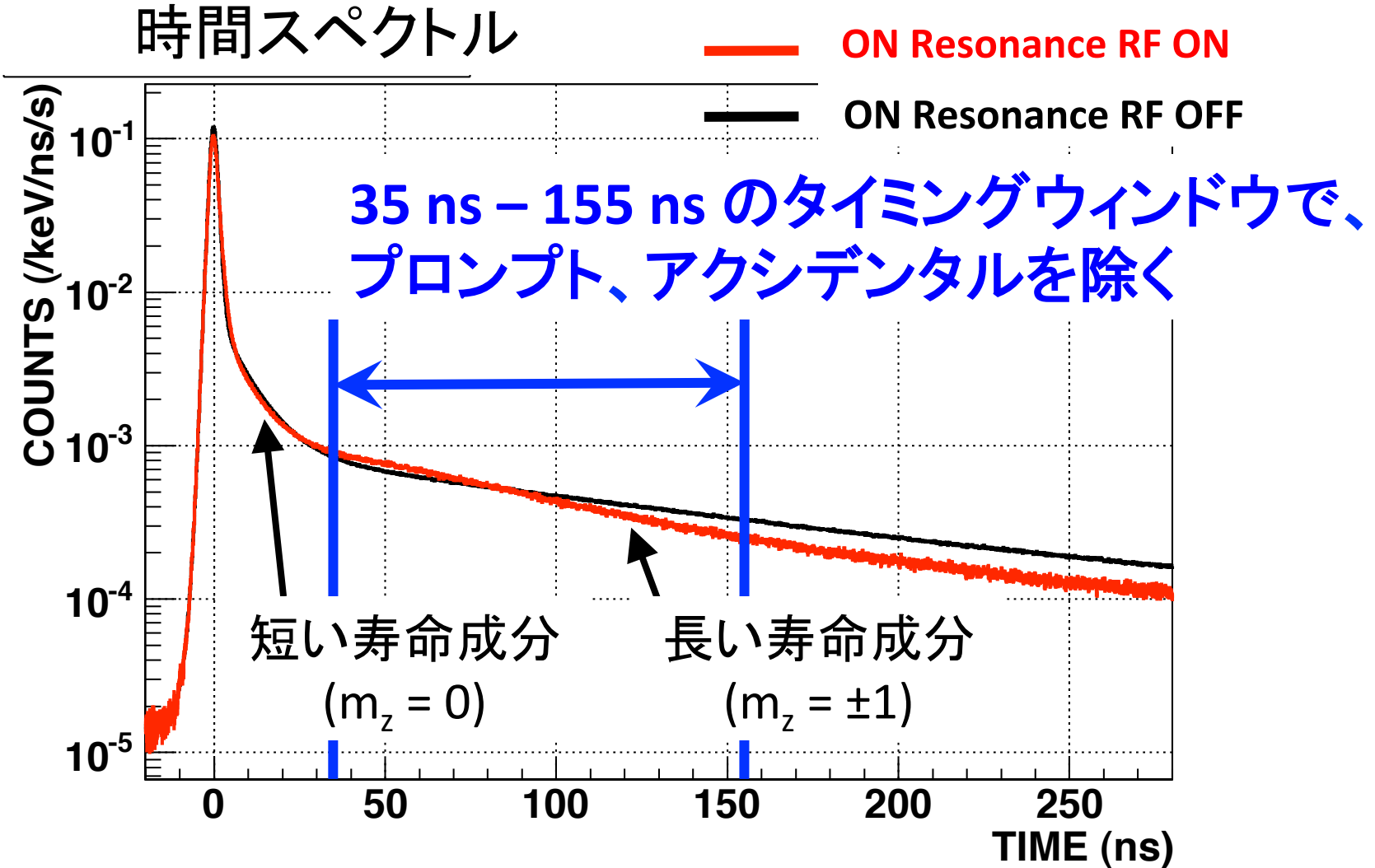
24時間測定

磁石中心にキャビティー、
検出器系

磁石中心部



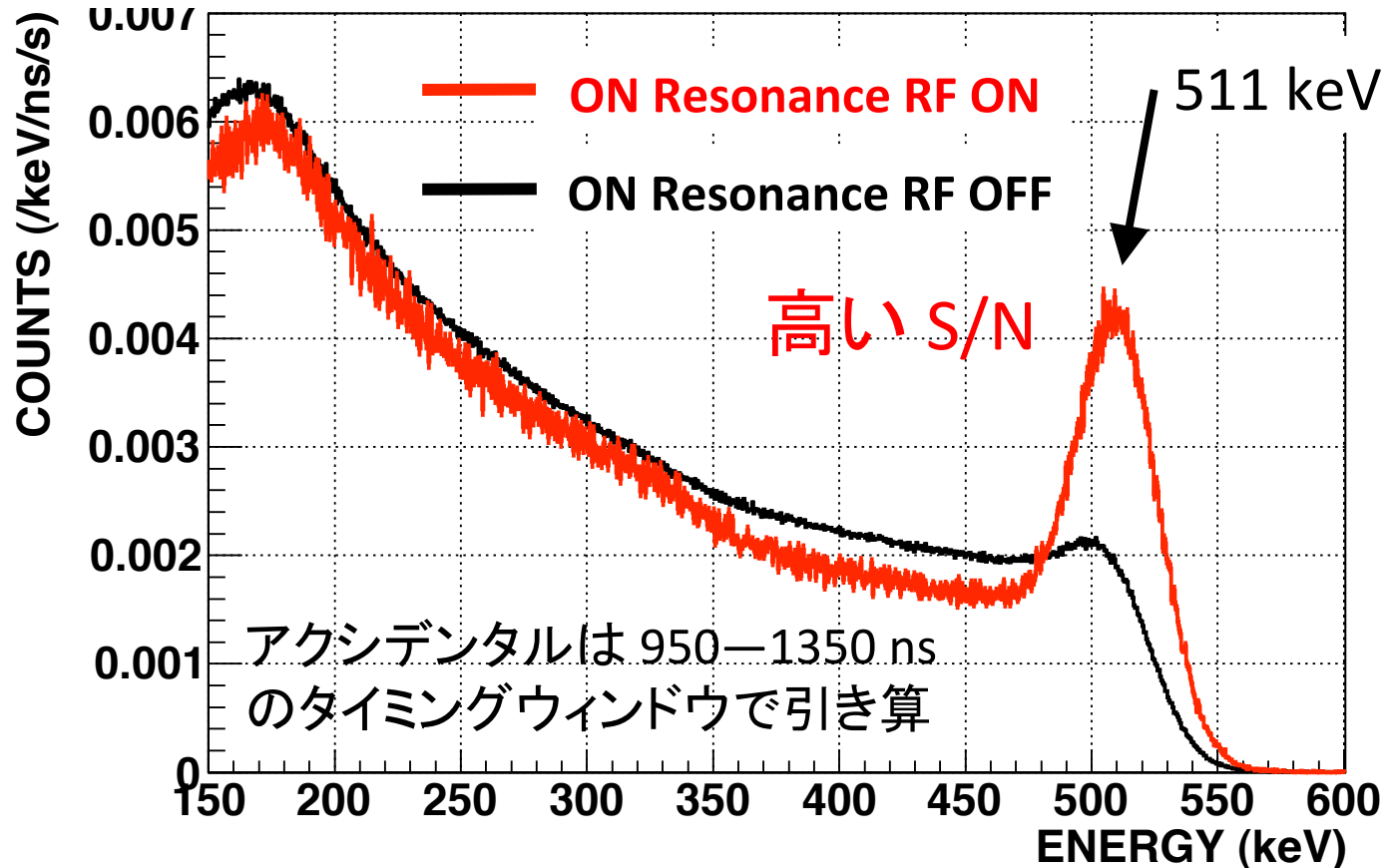
解析 (時間スペクトル)



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

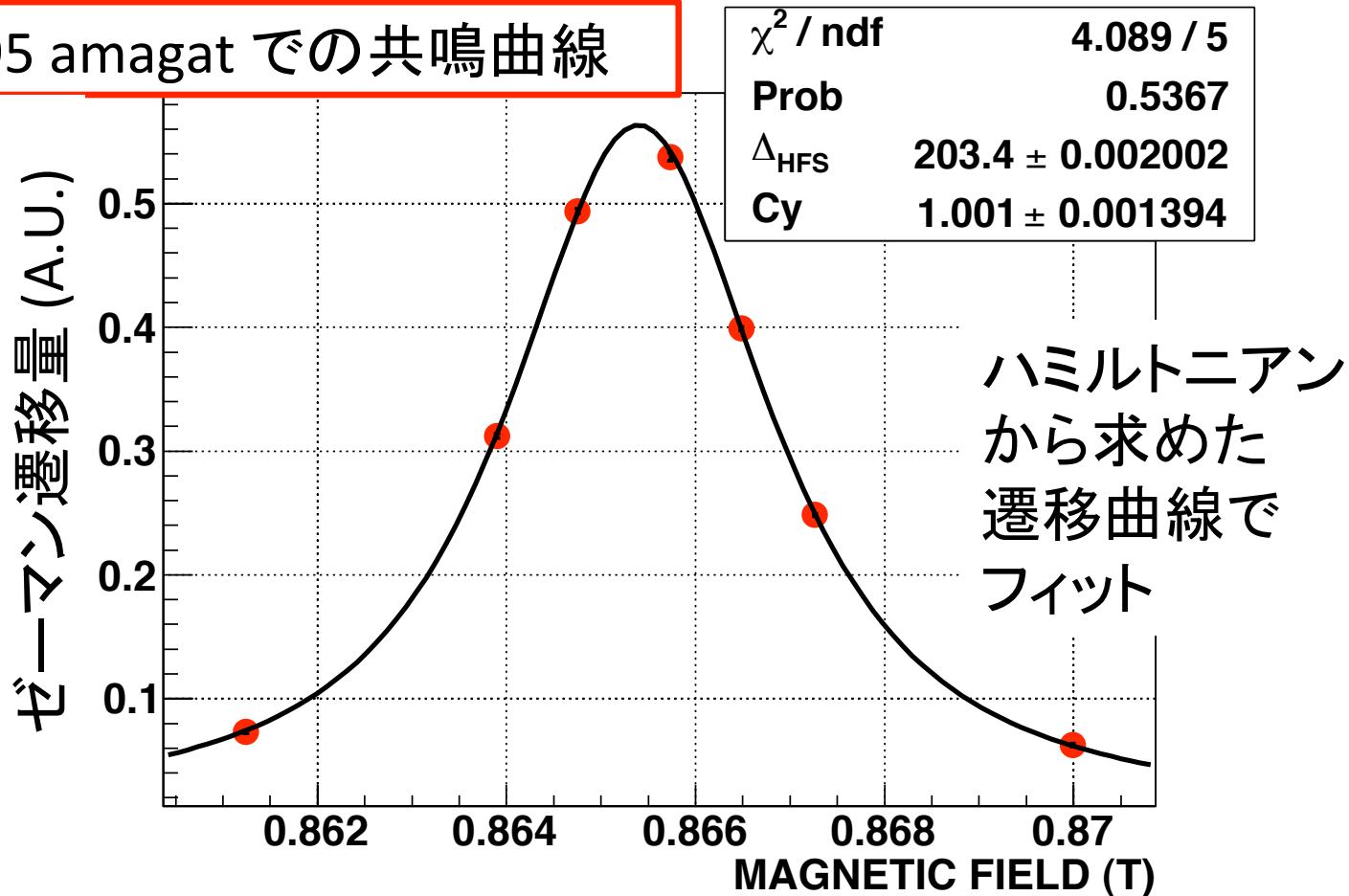


ゼーマン遷移によって、 2γ 崩壊確率が大きくなった。
遷移確率を求めるには、検出効率が必要。その見積りは暫定的に、
MCシミュレーションでエネルギースペクトルをフィットして行う。

共鳴曲線 (0.895 amagat)

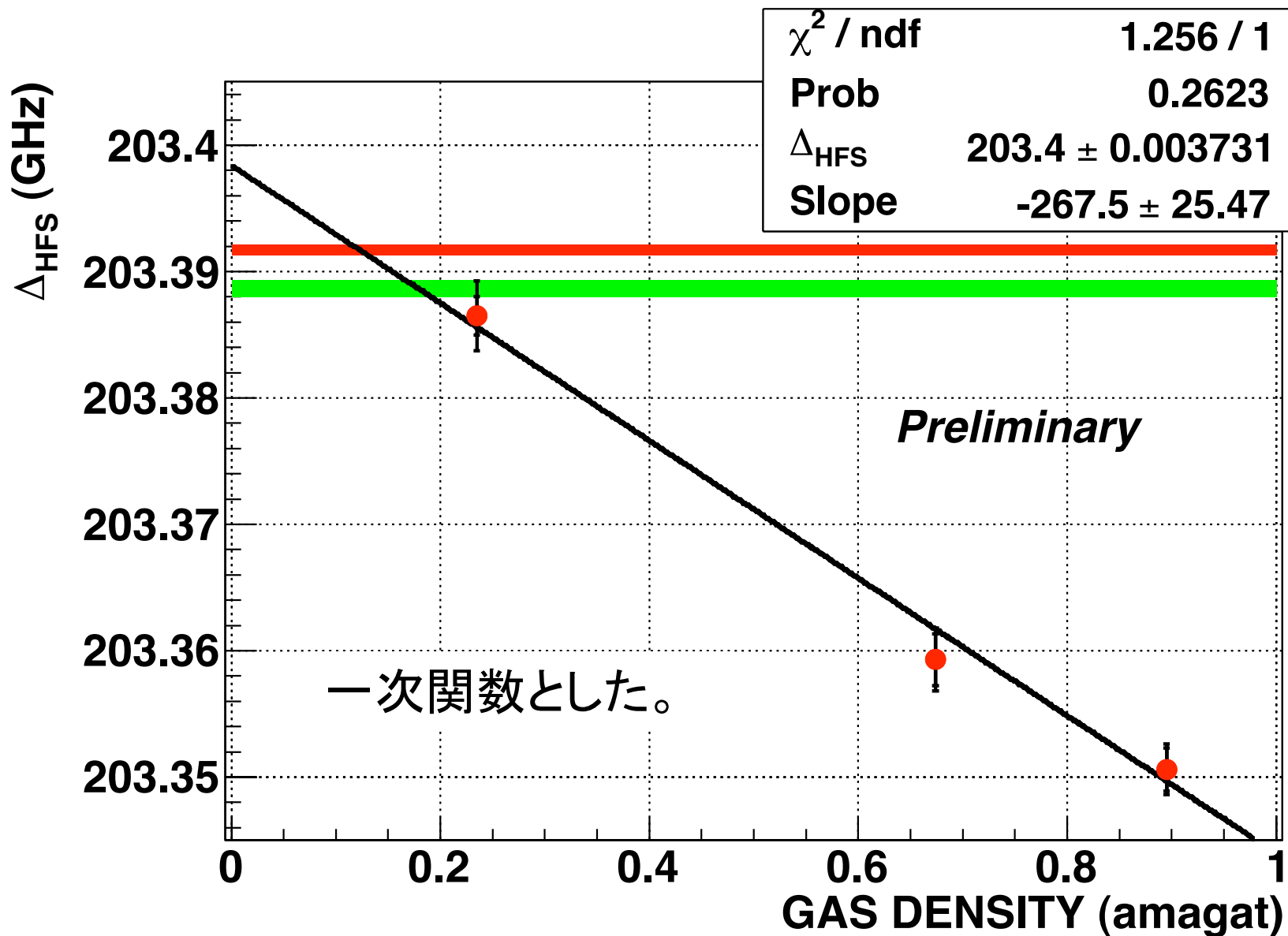
RFを固定して、**磁場でスキャン**。

0.895 amagat での共鳴曲線

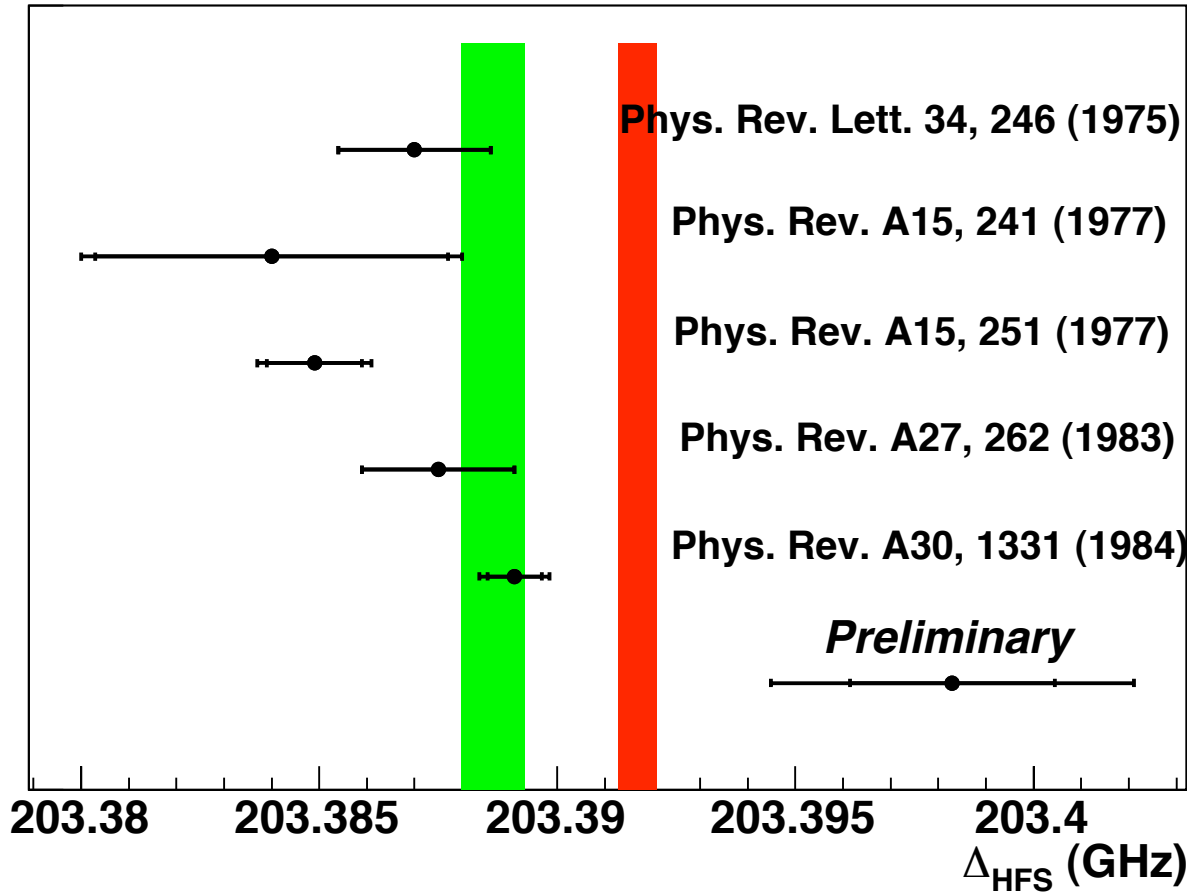


$\Delta_{\text{HFS}} = 203.3506(20)$ GHz (9.8 ppm) (MC統計,P,Qのエラー含む)
→ 密度依存性の補正をして、真空での値を求める。

圧力 (密度) 依存性



本測定の暫定結果



- 暫定値:
実験値 + 2.5σ
理論値 + 1.7σ

本測定で得られた、超微細構造の暫定値

$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.3983 \pm 0.0022 \text{ (stat., 11ppm)} \\ \pm 0.0032 \text{ (sys., 15 ppm) GHz}$$

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	1
検出効率	MCを用いた評価	6
物質の 効果	RF印加時のガスの性質	13
	ポジトロニウムの熱化	3
RF	RF パワー	3.1
	RF キャビティのQ値	1.6
	RF周波数	1
Quadrature sum		15

今後の展望

- **磁場** : 0.9 ppm (RMS) の一様性で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
 - ガスの理解 → ガスとRFに関する理解 (分解、放電など)
- **RF** : 温度管理して0(ppm)を達成。
- **統計誤差** : 今のところ 11 ppm
 - 1~2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。
 - ポジトロニウム生成位置の分布など (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。
- 昨年7月より、本測定を開始。
- 本測定の暫定結果として、19 ppmの値が得られた。
- ガスに関する不定性など、いくつか残る系統誤差を抑え、1~2年程度で、物質の効果を入れて $O(\text{ppm})$ の精度を達成し、ずれの検証を行う。