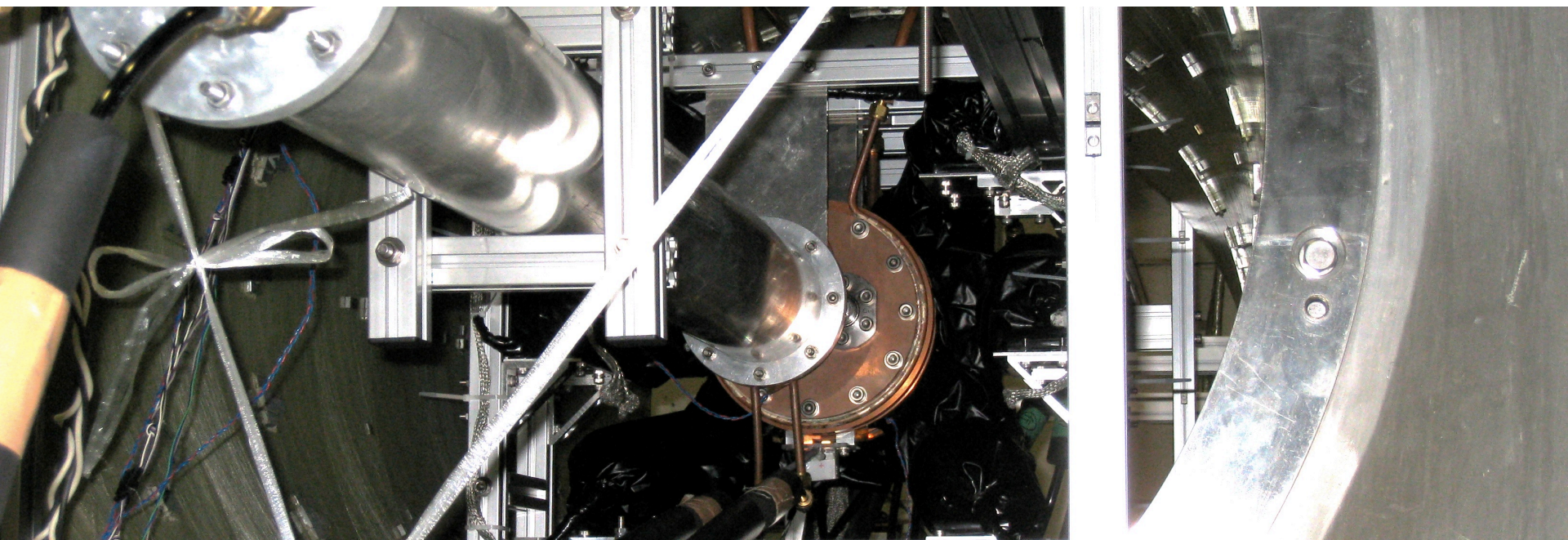


ポジトロニウム超微細構造の 精密測定



東京大学

石田明

平成24年2月21日

第18回東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム 於白馬

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)

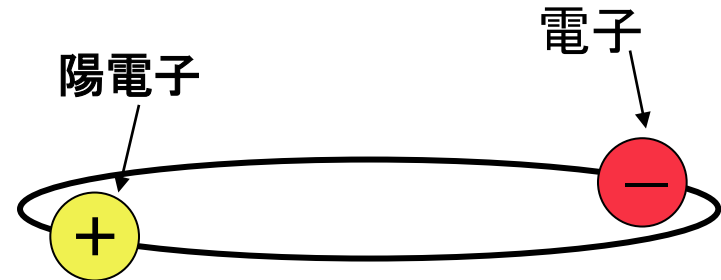
吉田光宏、田中賢一、山本明

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. まとめ

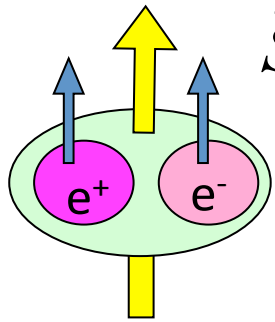
1. イン트로ダクション
2. 我々の新しい実験セットアップ
3. 測定の途中結果
4. 今後の展望
5. まとめ

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)

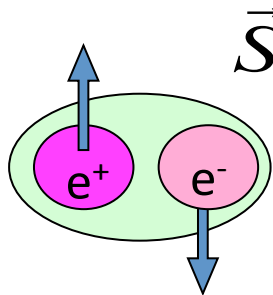
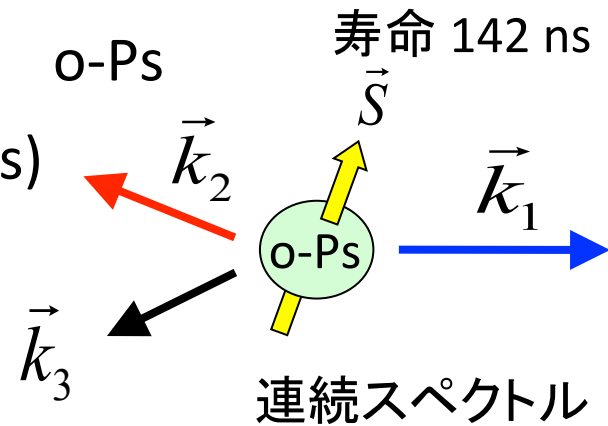


$\vec{S} = 1$ (スピン三重項)

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 3γ (, 5γ , ...)

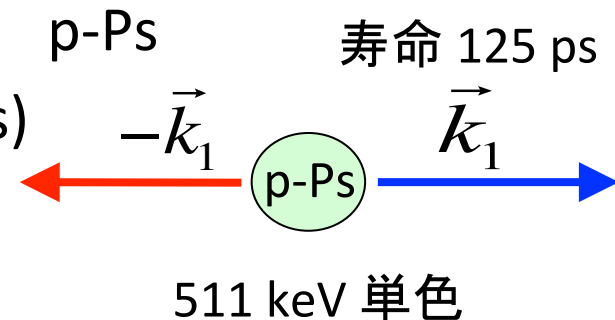


$\vec{S} = 0$ (スピンスinglet)

パラポジトロニウム (p-Ps)

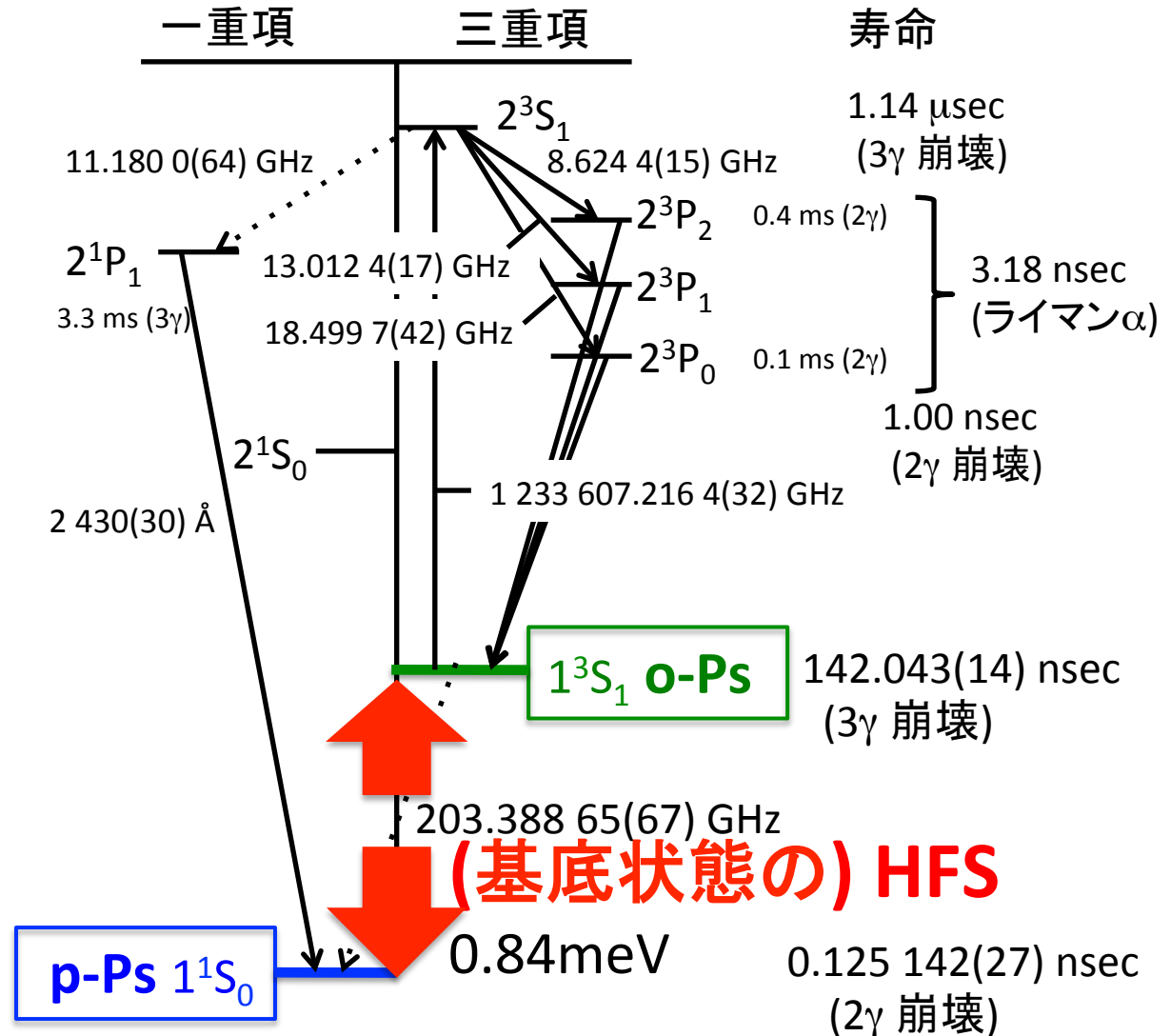
スピン=0 擬スカラー粒子

p-Ps \rightarrow 2γ (, 4γ , ...)



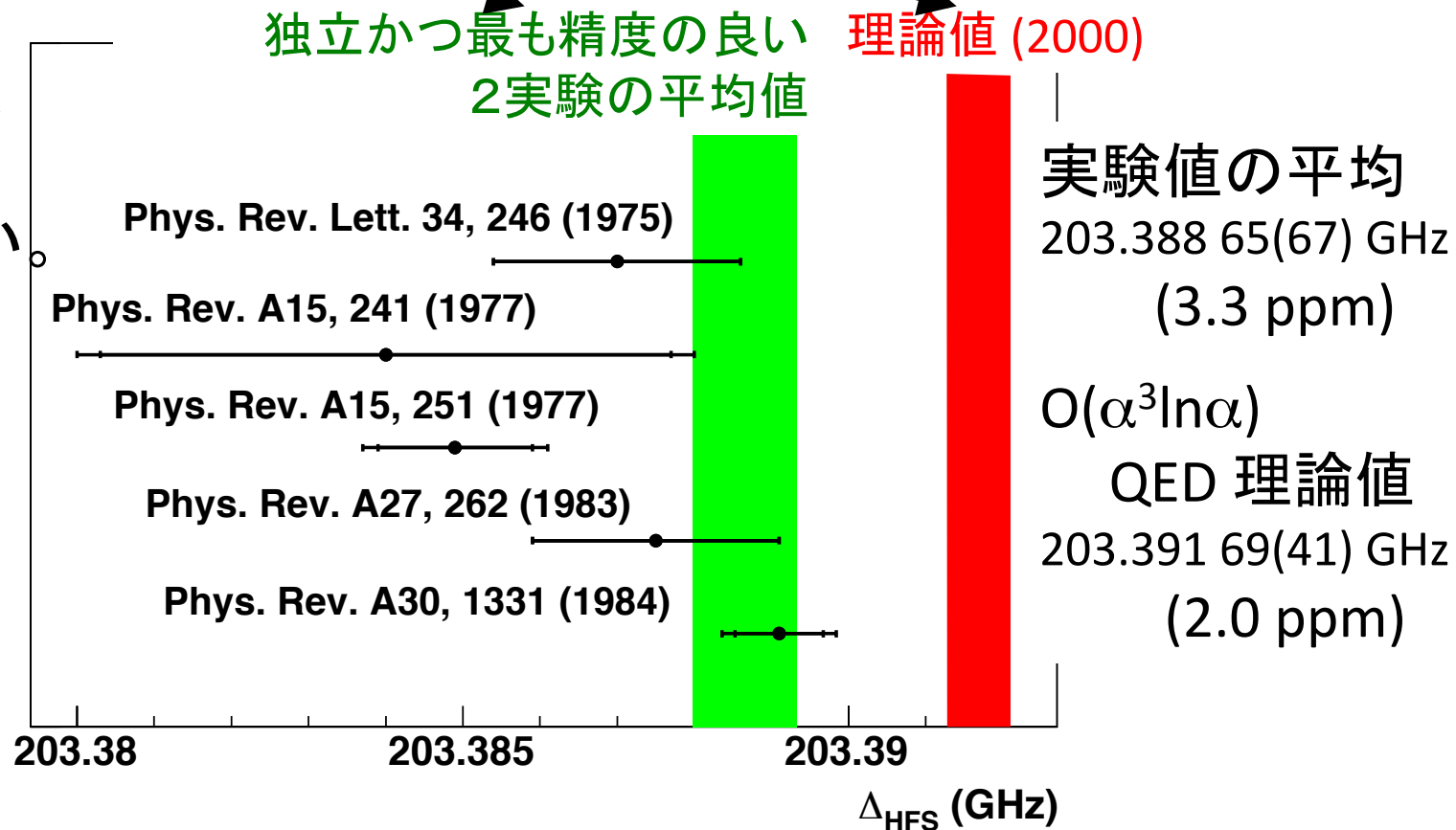
ポジトロニウム超微細構造 (Ps-HFS)

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 σ) 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

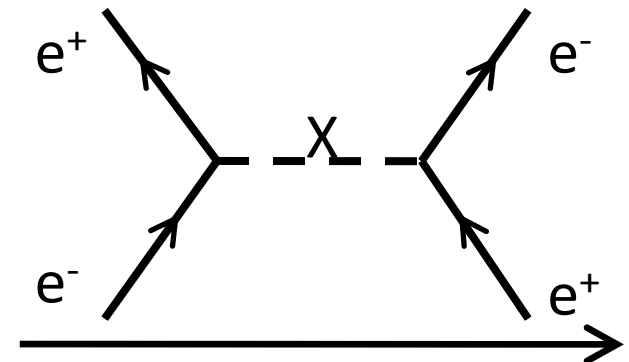
1. 磁場の非一様性。大きなPs生成領域内で、ppmレベルの一様磁場を供給するのは極めて困難。
2. 物質の効果の過小評価。熱化していない o-Ps は、特に低物質密度で大きな影響を及ぼす。

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

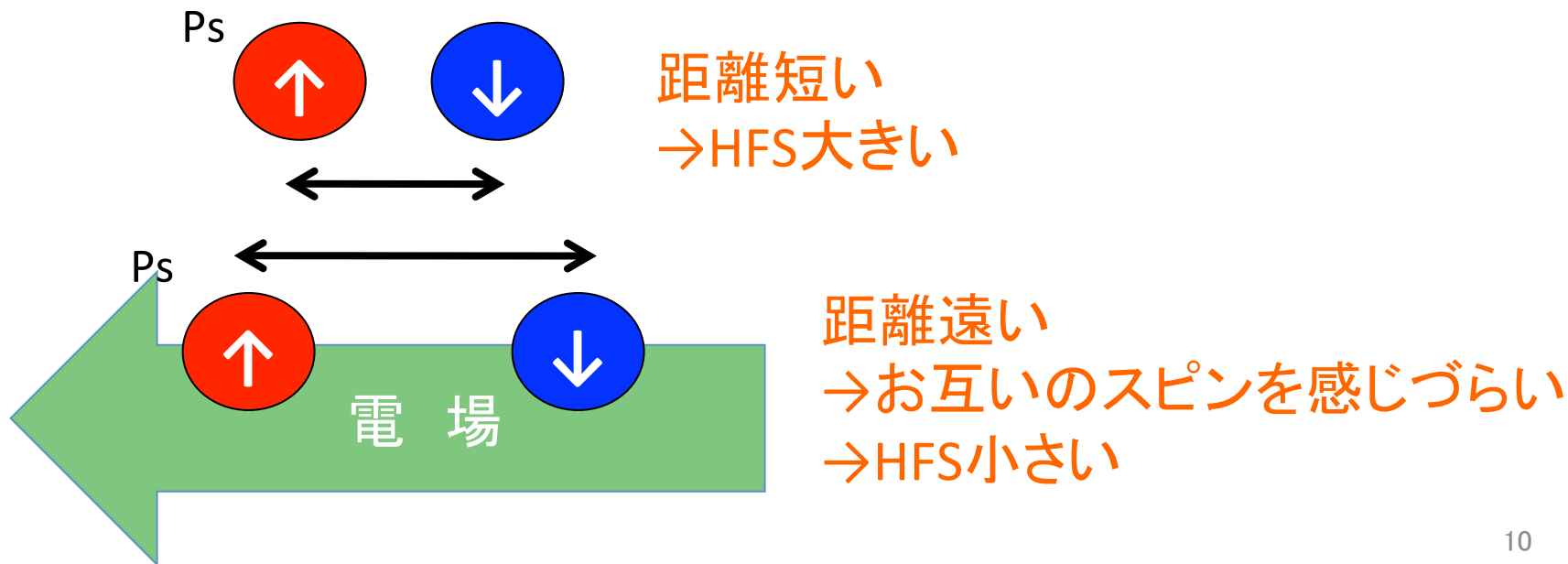
- 相互作用の弱い未知の粒子の介在
- 重い粒子には感度が低いが、 μ のg-2と違い、s-channelの効果も見える。
(例 O(MeV), $\alpha \sim 10^{-8}$ の擬スカラー)
- o-Psは余剰次元にも感度



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)



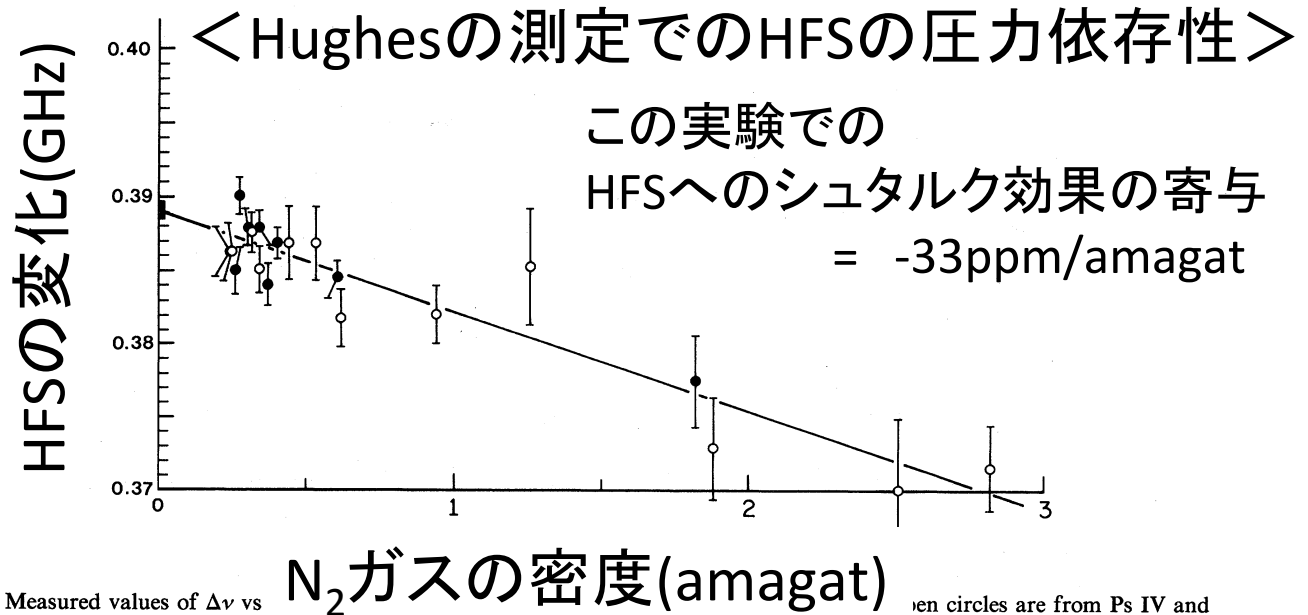
過去の実験での物質の効果の評価

- 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速度一定だと思つと、HFSはガス圧に比例してずれる

→過去の実験



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

Ritter, Egan, Hughes et al.

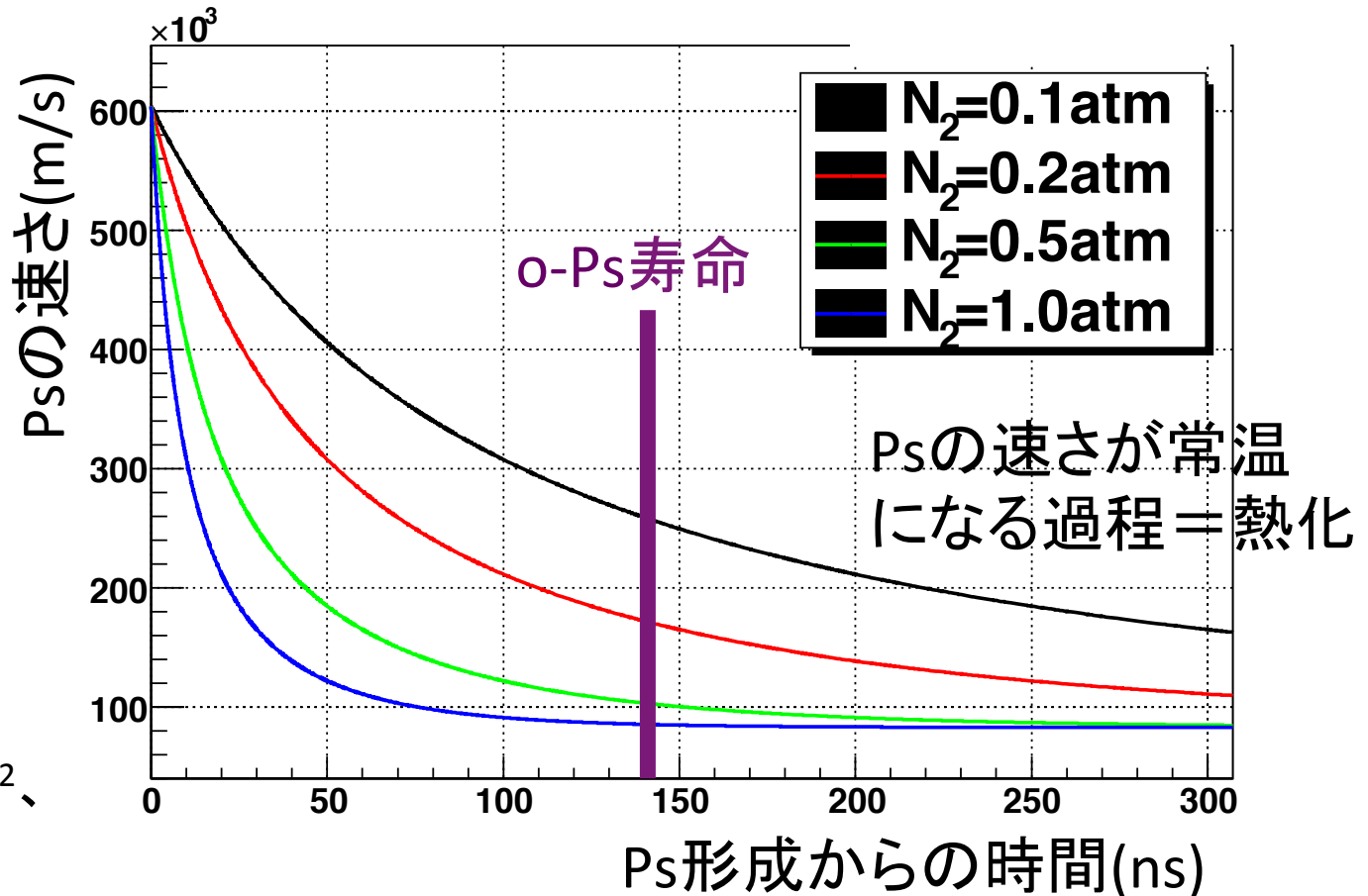
FIG. 7. Measured values of $\Delta\nu$ vs N_2 ガスの密度(amagat) open circles are from Ps IV and the closed circles are from the present work. The straight line is the best fit described in Eq. (14).

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 $v(t)$)

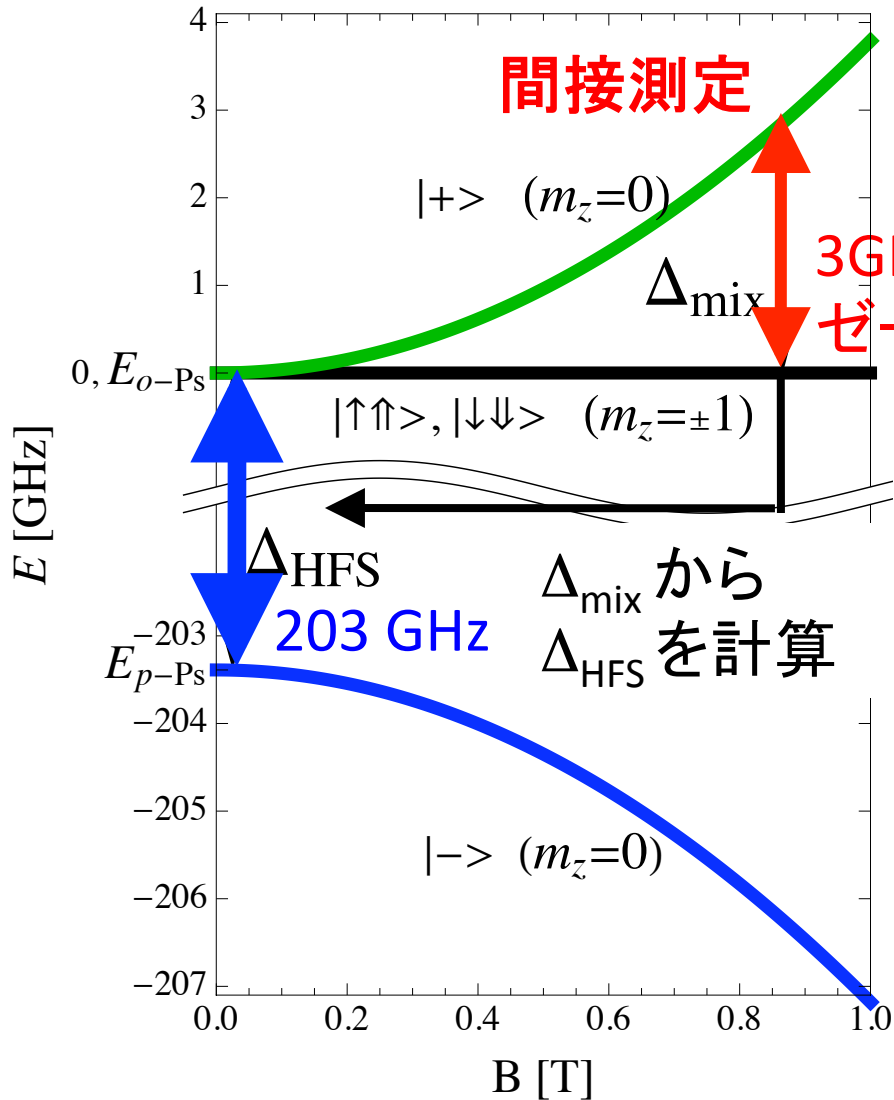
過去の実験では一定という扱い

<PsがN₂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

ゼーマン効果を用いた間接測定の方法



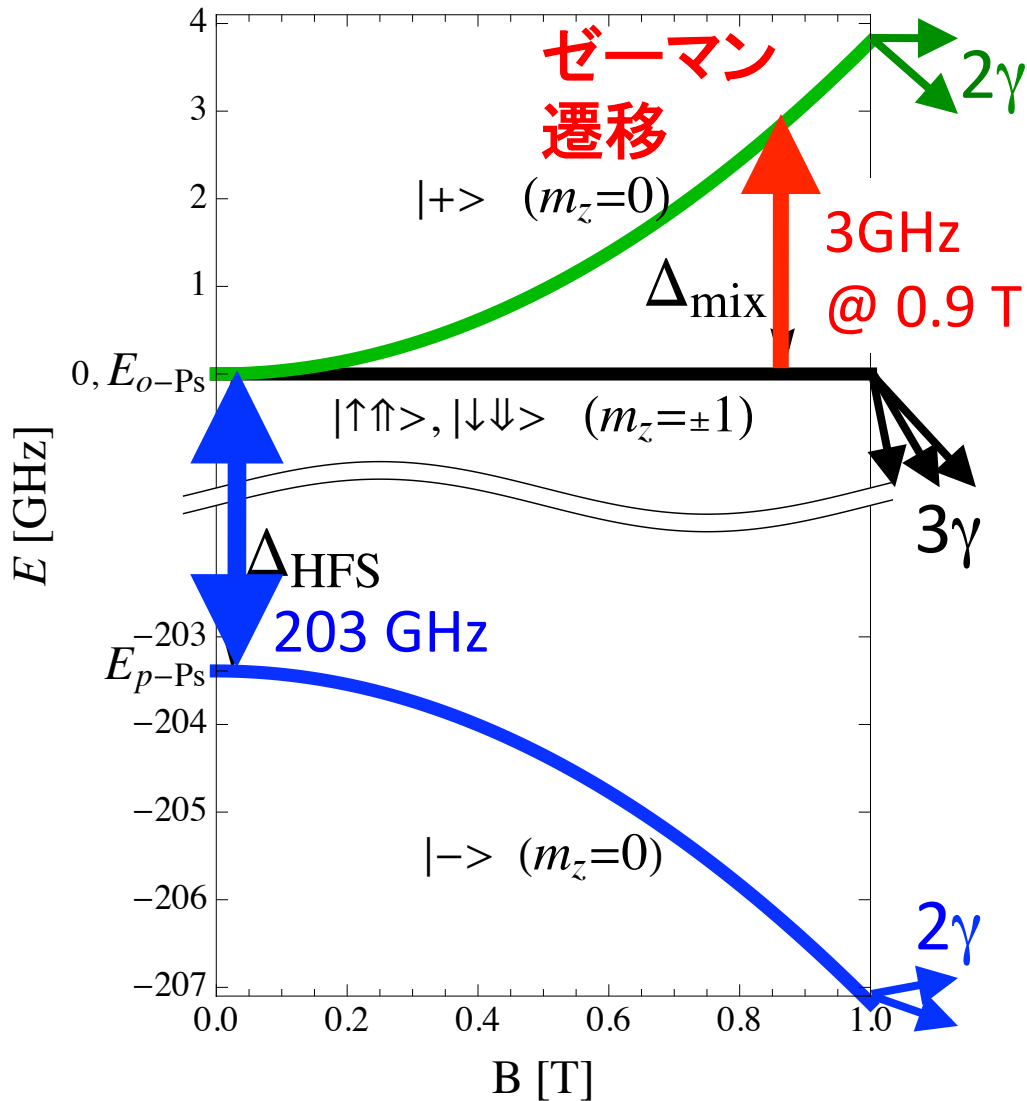
静磁場中では、**p-Ps** は
o-Ps の $m_z=0$ 成分と
 混合する。(2 γ 崩壊).

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



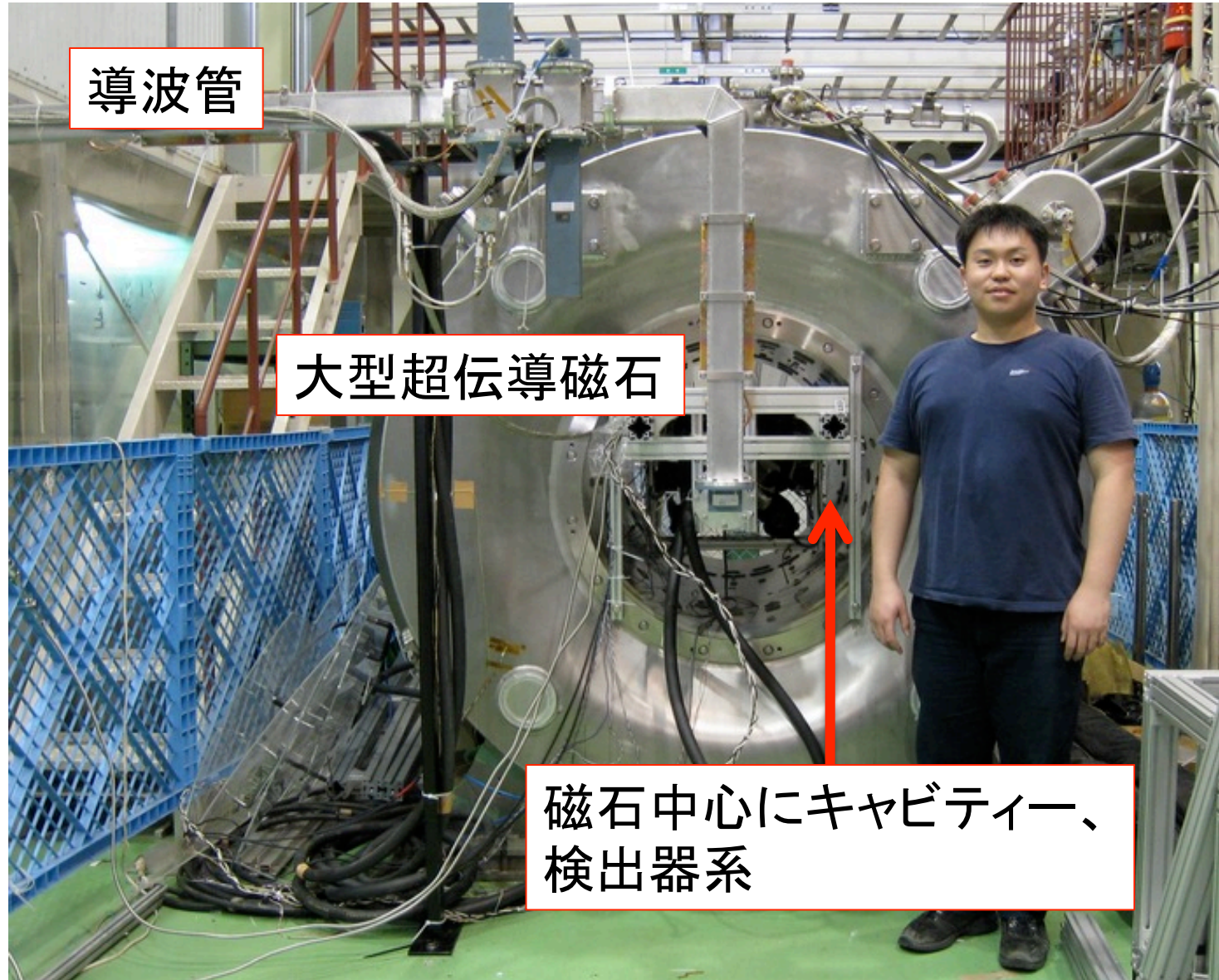
周波数が Δ_{mix} のマイクロ波を供給すると、 $o\text{-Ps}$ の $m_z=0$ と $m_z=\pm 1$ 成分の間で遷移が起こる。

→ 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。

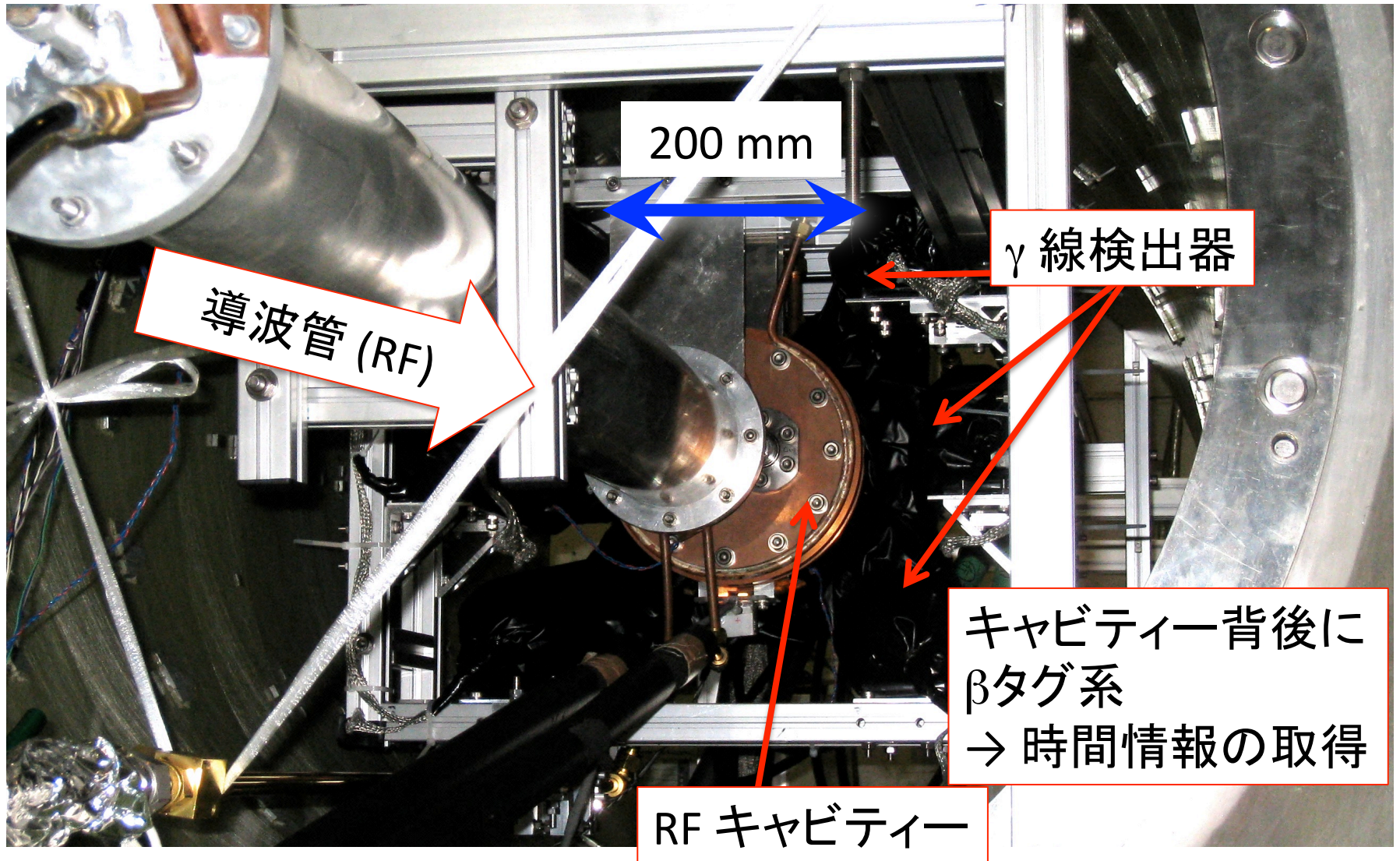
→ 過去の全ての実験と同じ方法

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. まとめ

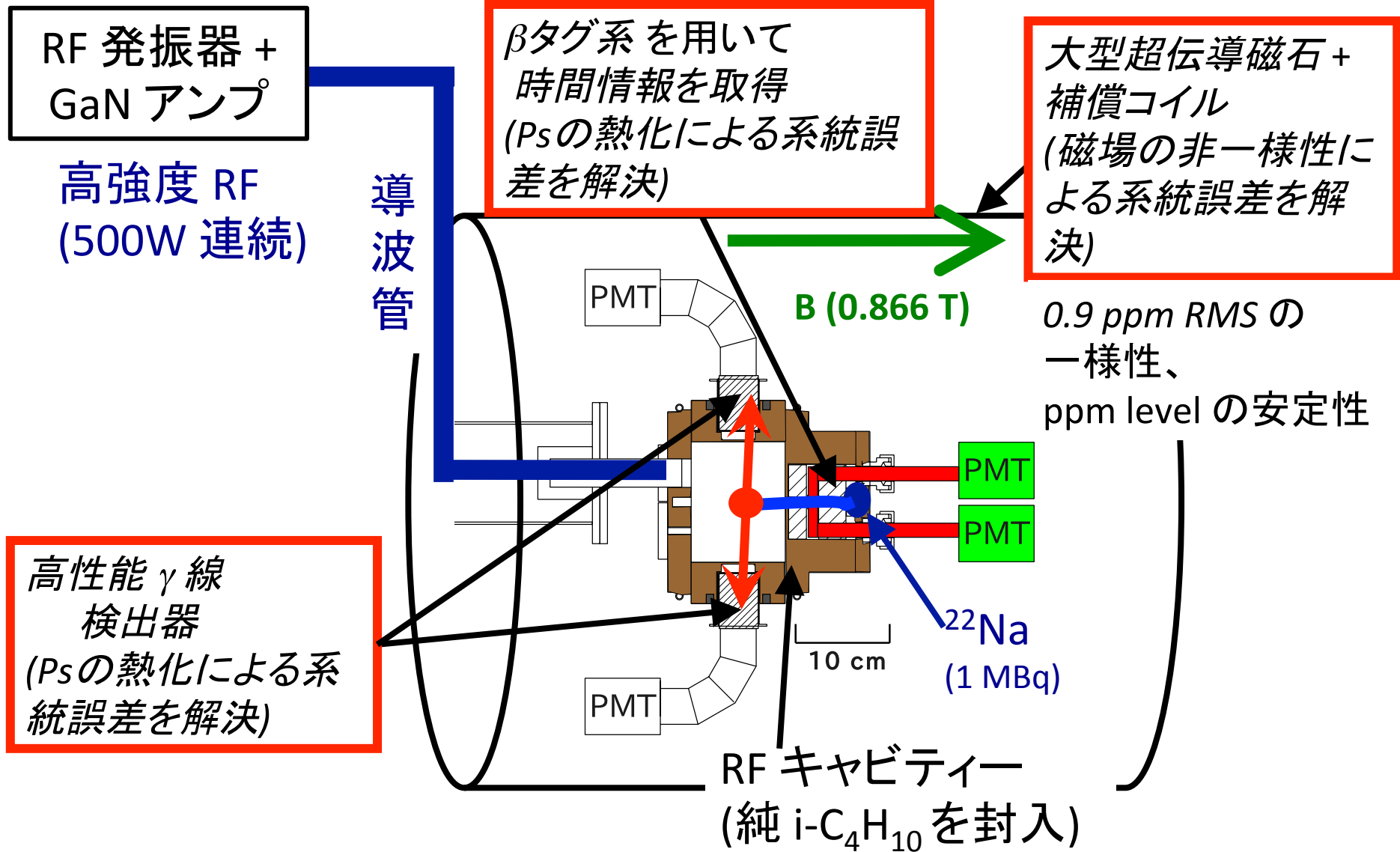
測定 @ KEK低温棟 平成22年7月～



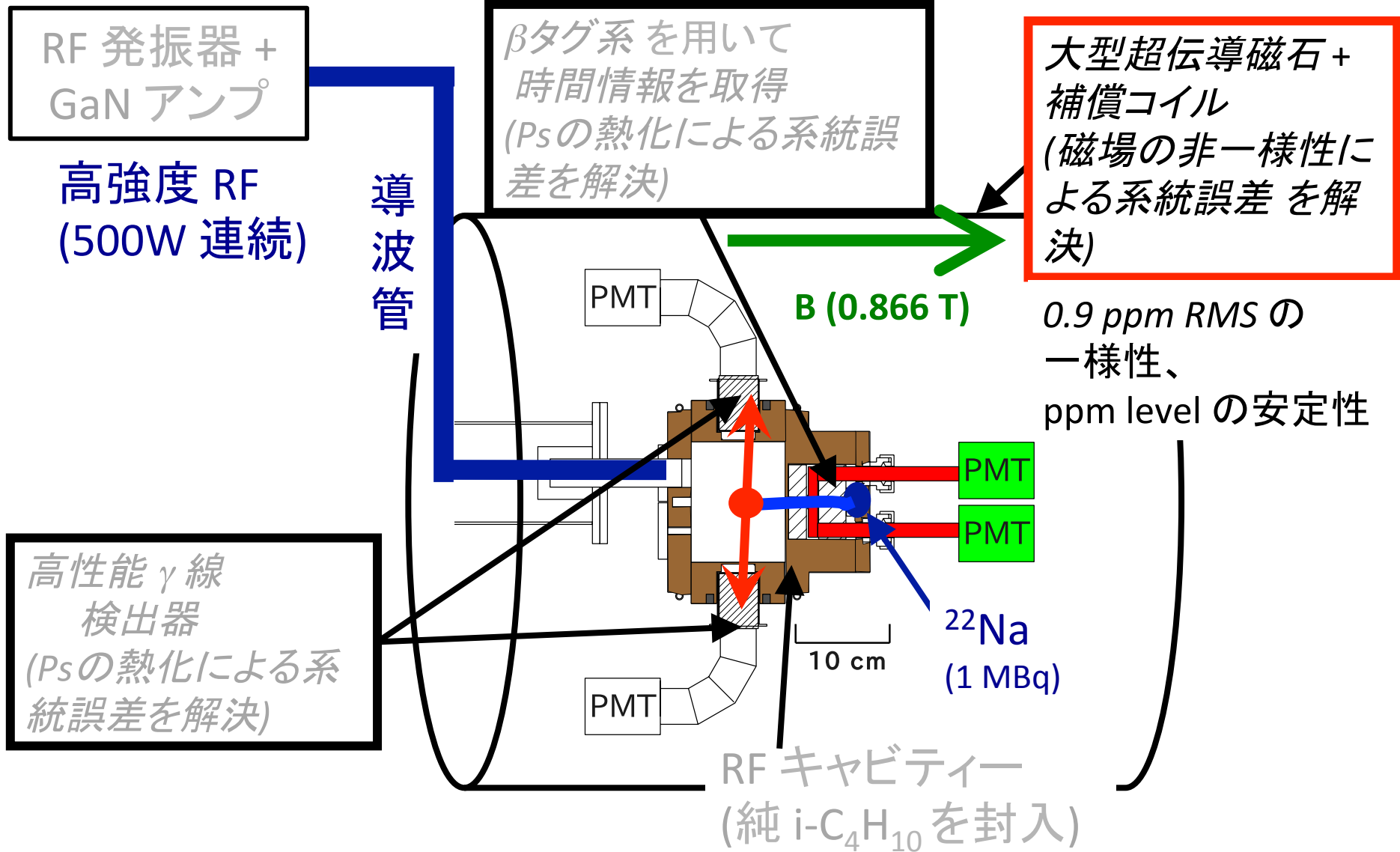
磁石中心部



我々の新しい実験セットアップ

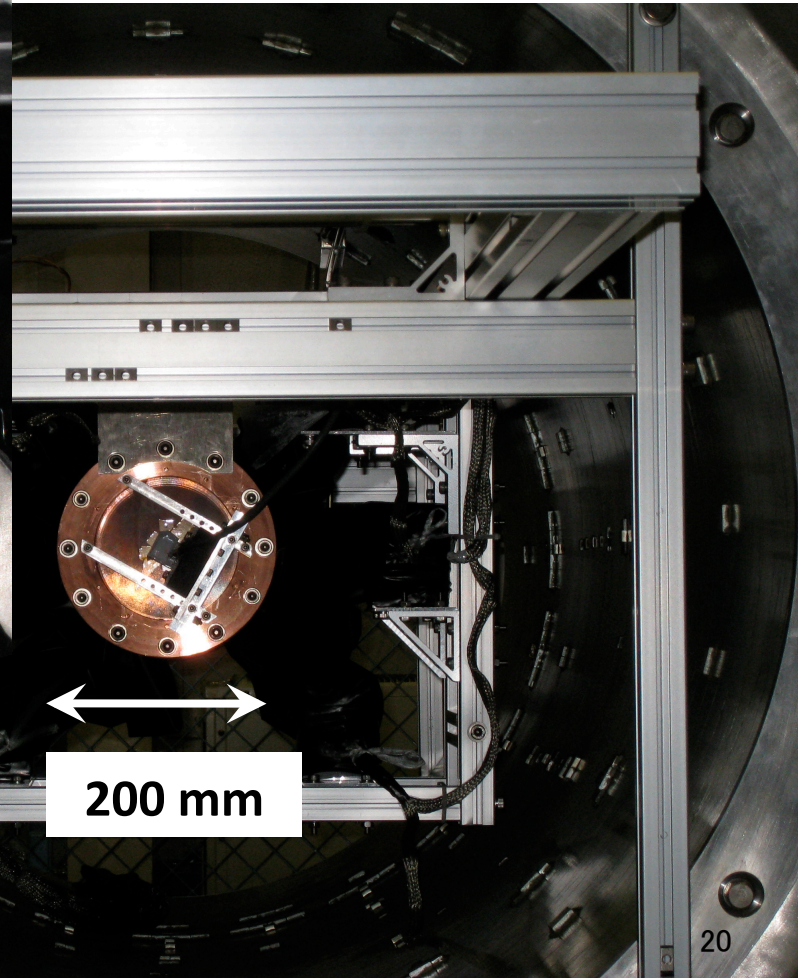
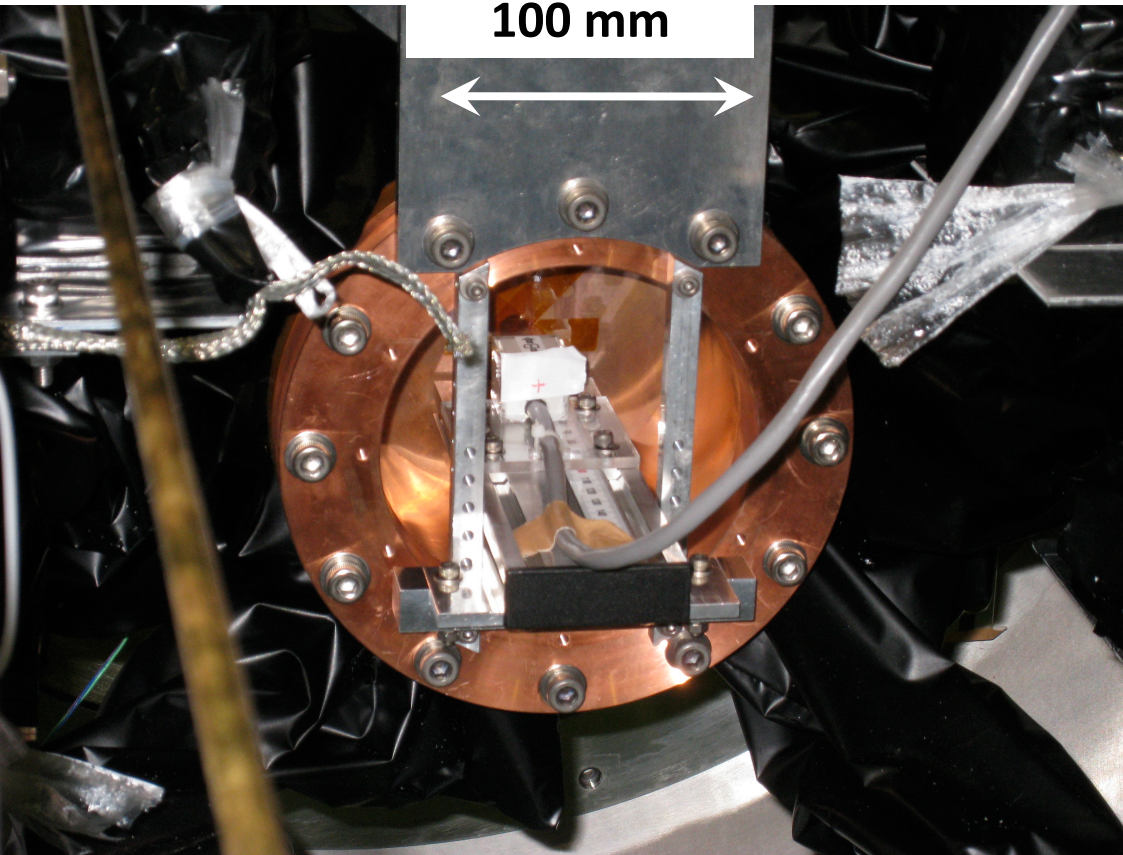


我々の新しい実験セットアップ



磁場測定

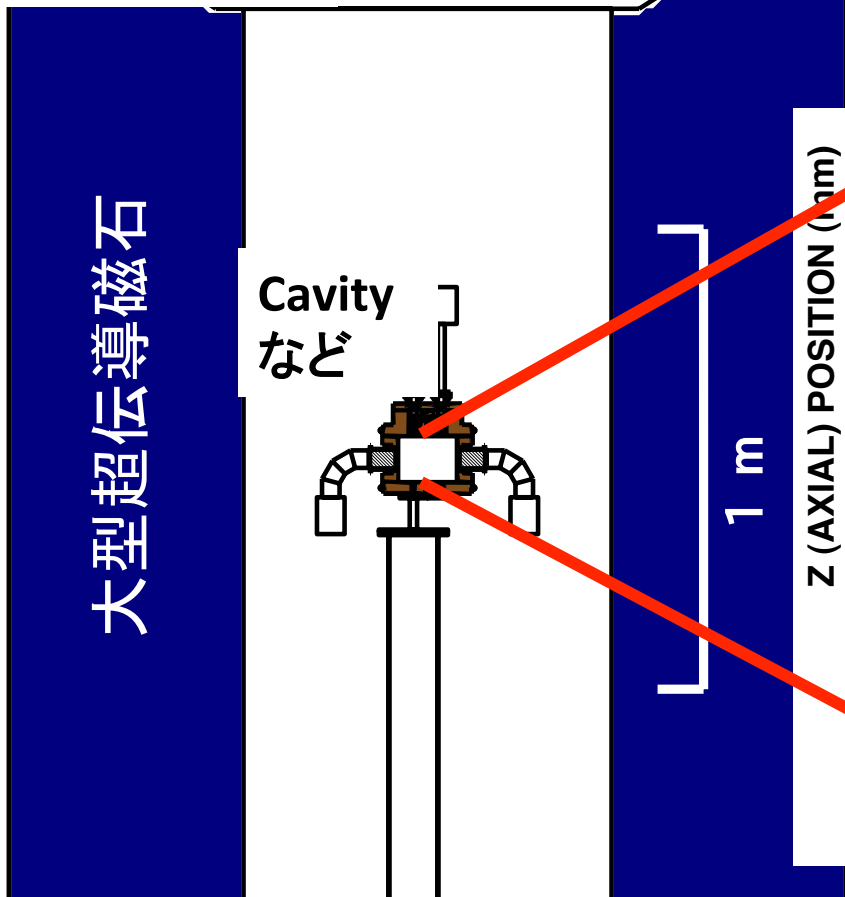
磁場を精密に測定した。
キャビティー内で310点
測定。NMRプローブ



治具やPMTなどの
効果も含めた、
磁場分布を作成。

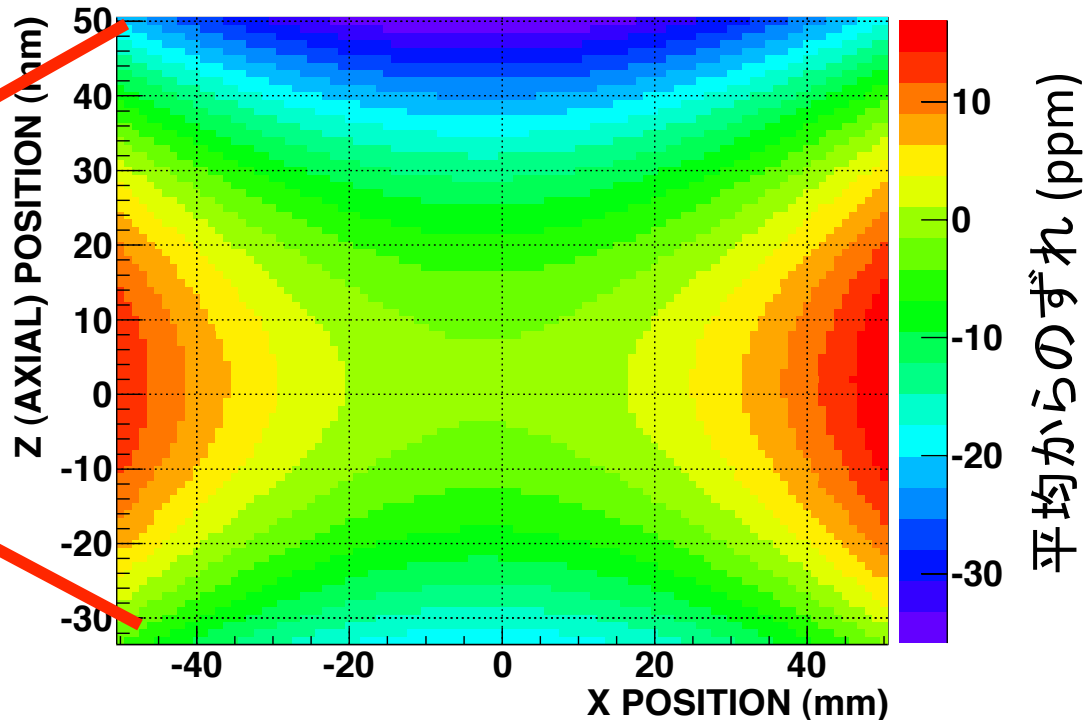
磁場の一様性

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}Na

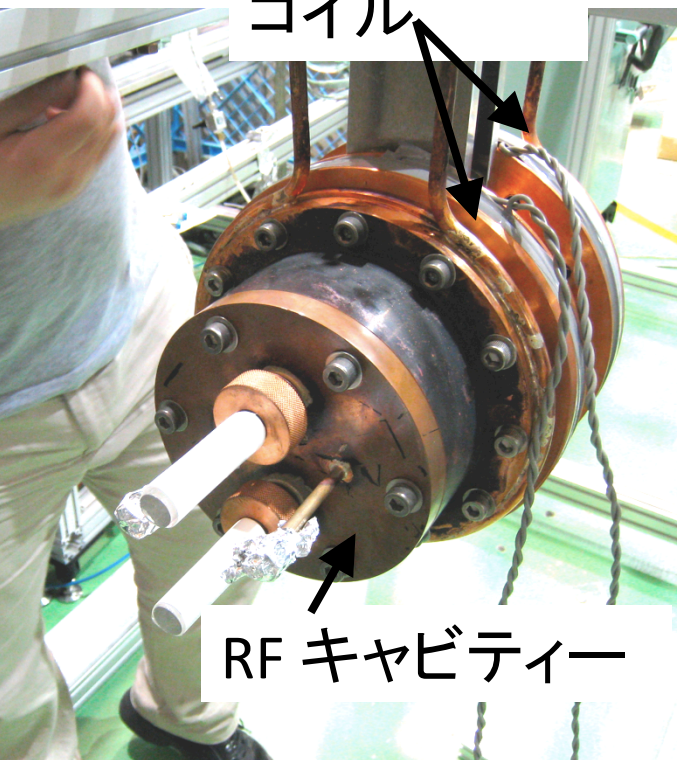


- ・ 大型超伝導磁石だけでは、まだ 10 ppm 程度の非一様性が残る。
- ・ PMT (強磁性体) や治具の影響も大きい。それらを含めて磁場の
一様性を 0(ppm) で出せるよう、補償磁石を設計・製作した。

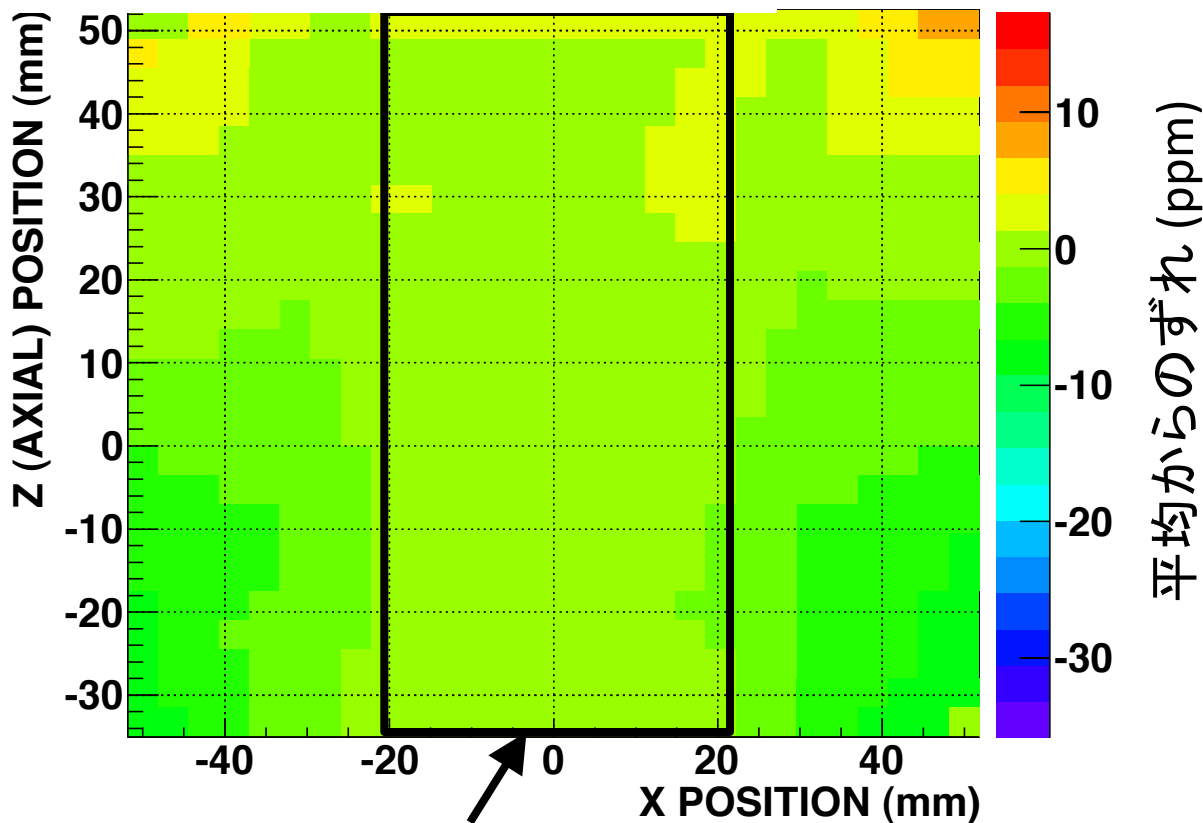
補償磁石

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



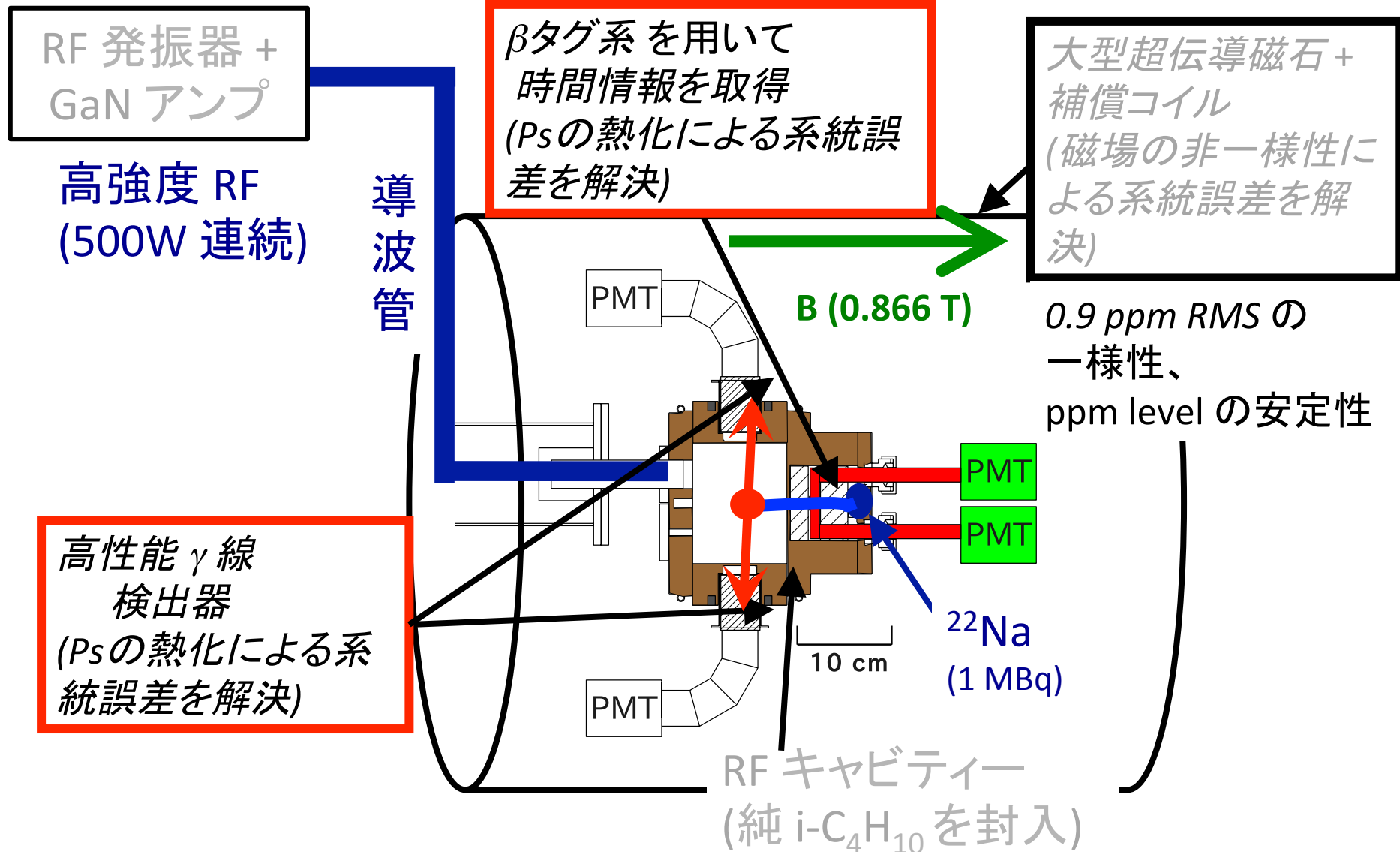
- ・ 2つの円形コイルをRFキャビティーのフランジに巻く。
- ・ 元の磁場と逆向きの磁場を作り、磁場勾配を小さくする。



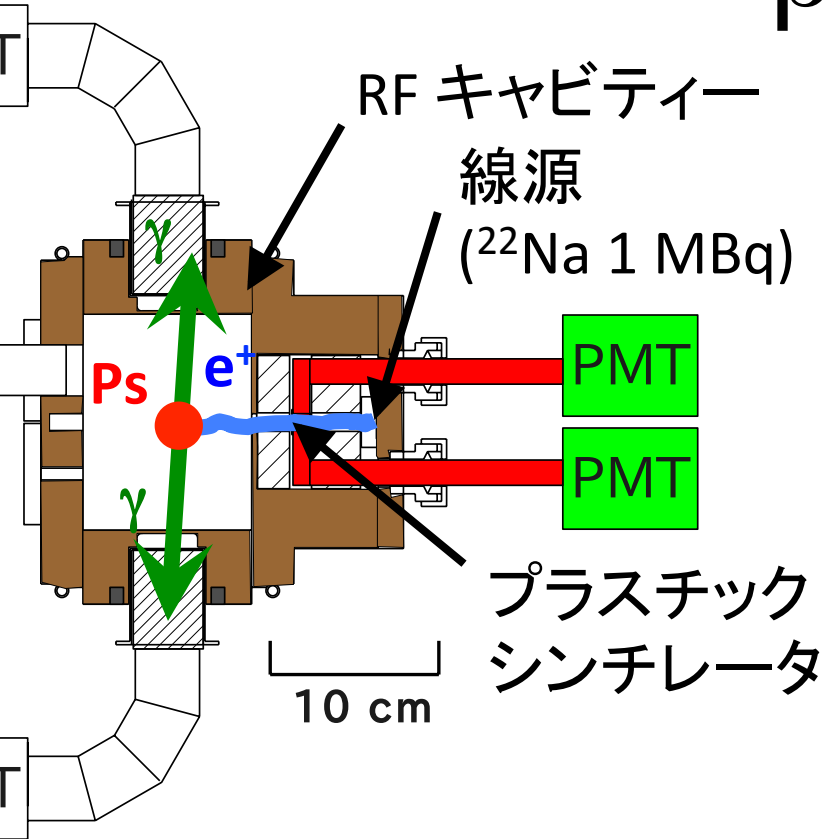
0.9 ppm (RMS) の一様性 が、Ps 生成領域内で得られた。

→ 測定のセットアップに導入。

我々の新しい実験セットアップ



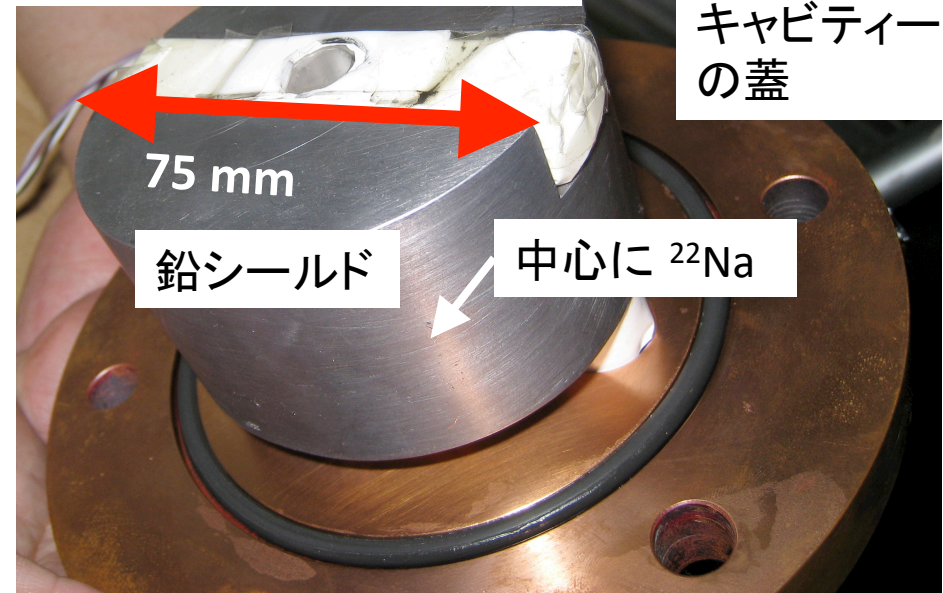
βタグ系



- 薄い (0.1 mm) プラスチックシンチレータを使って、 ^{22}Na から出てくる e^+ をタグ

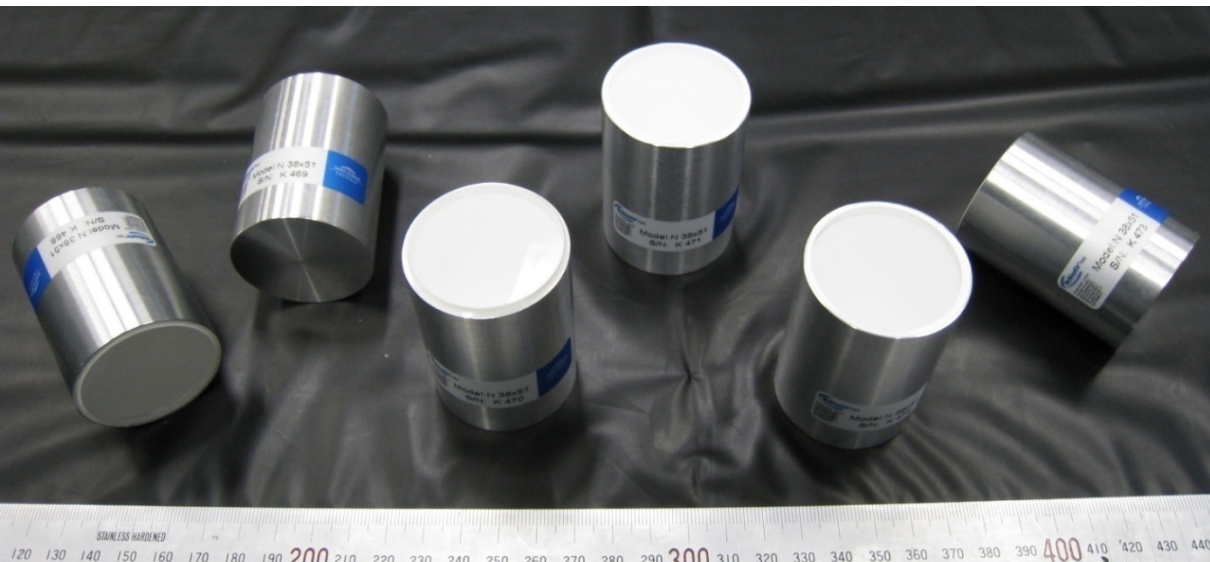
→ $t=0$

ϕ 10 mm x 0.1 mm
プラスチックシンチレータ



- DAQ のトリガーは、 e^+ タグと γ 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 Ps の寿命。

ガンマ線検出器 ~LaBr₃~



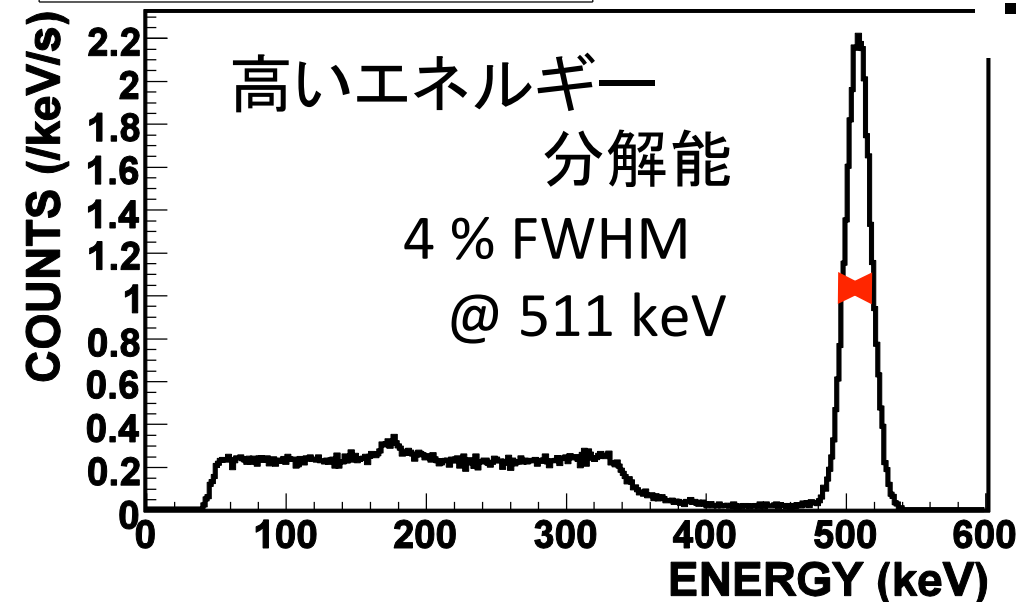
LaBr₃(Ce)シンチレータ
(直径1.5インチ、長さ2インチ)
を6個使用

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

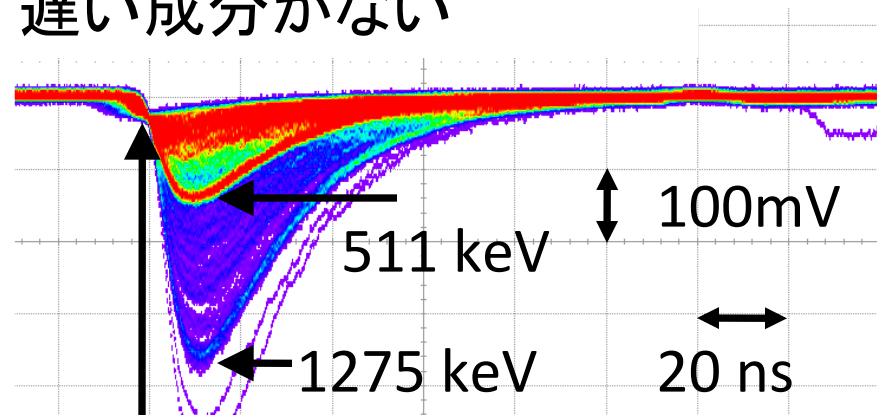
²²Na

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

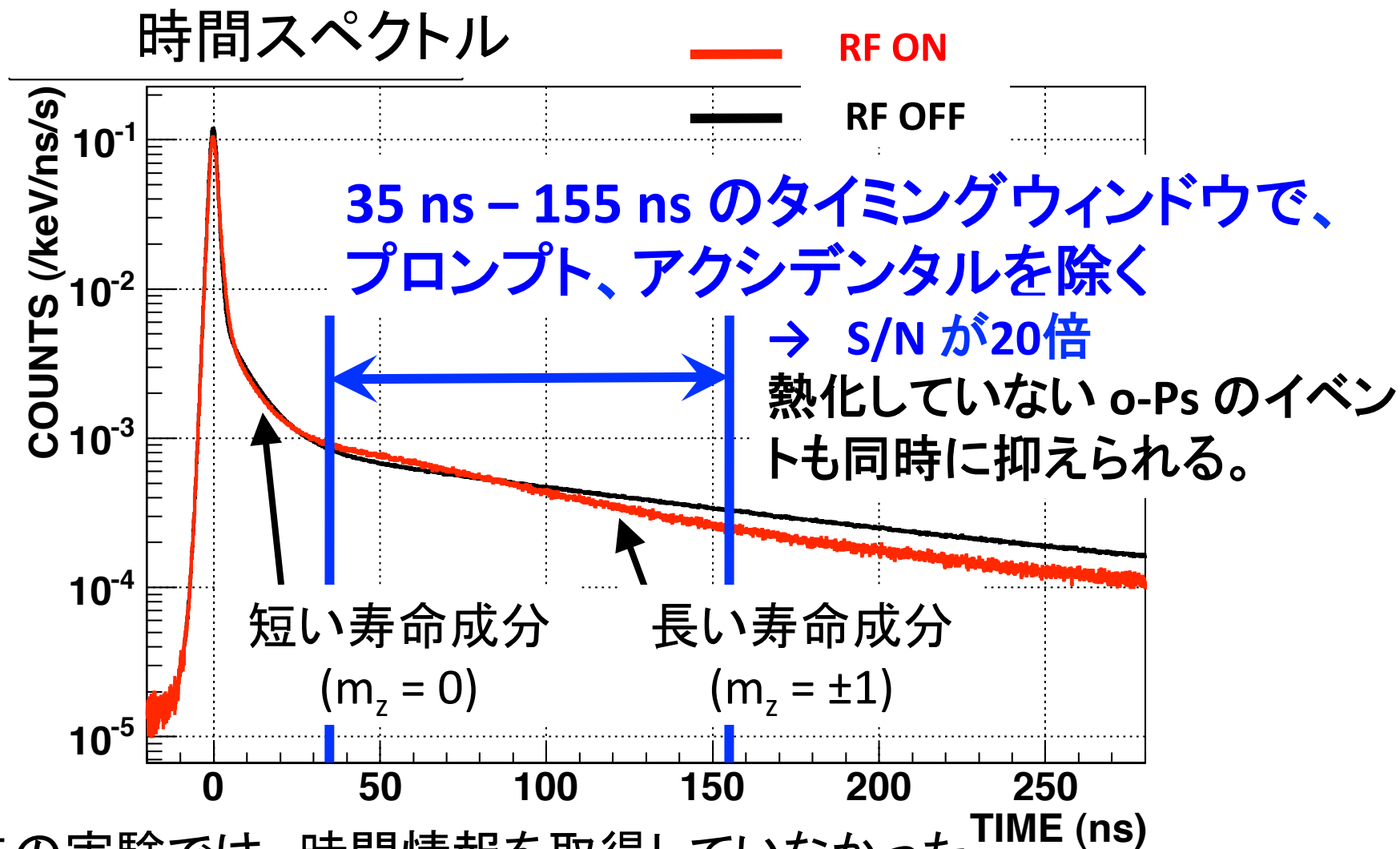
²²Na



高い時間分解能

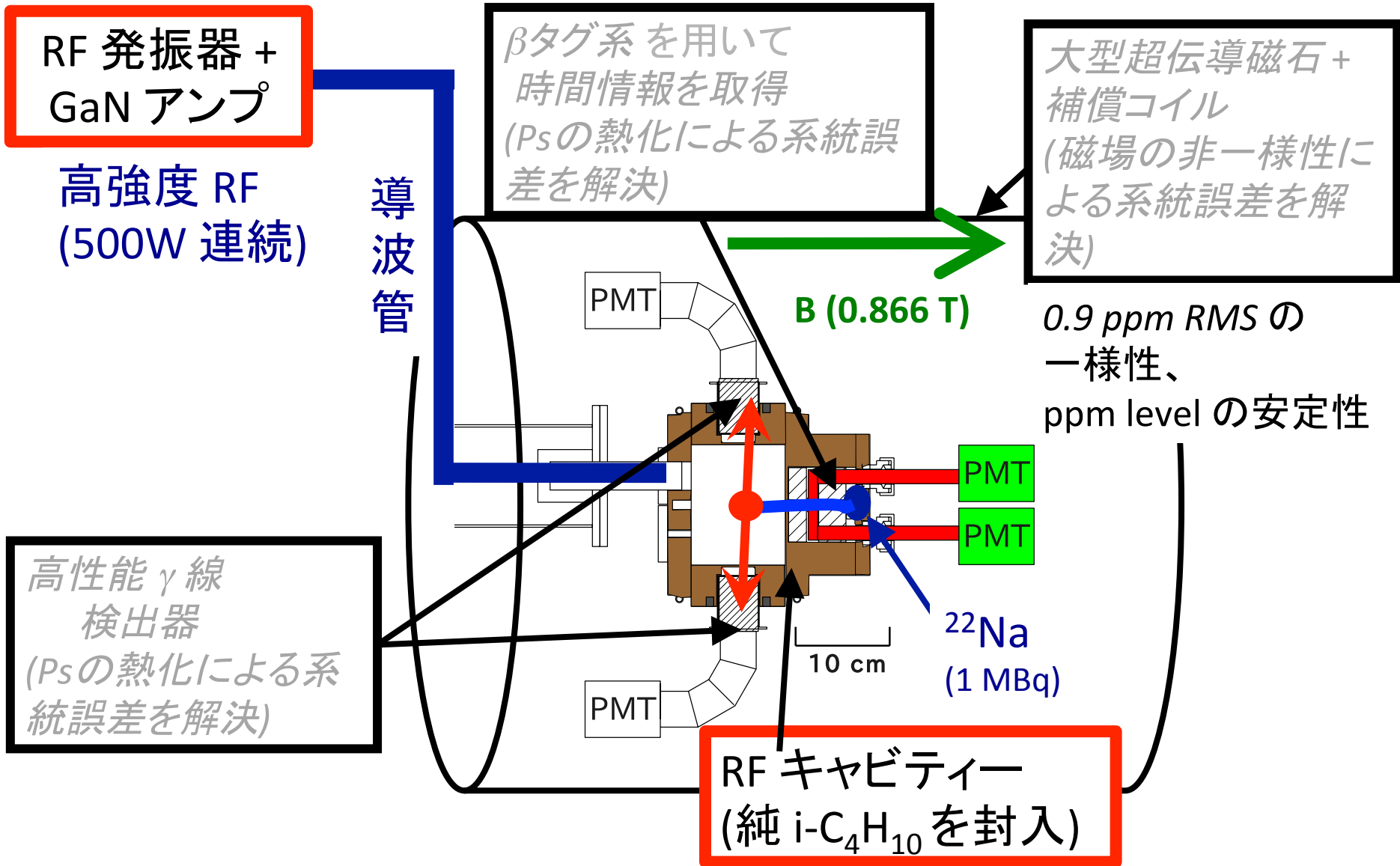
200 ps FWHM @ 511 keV

時間スペクトル

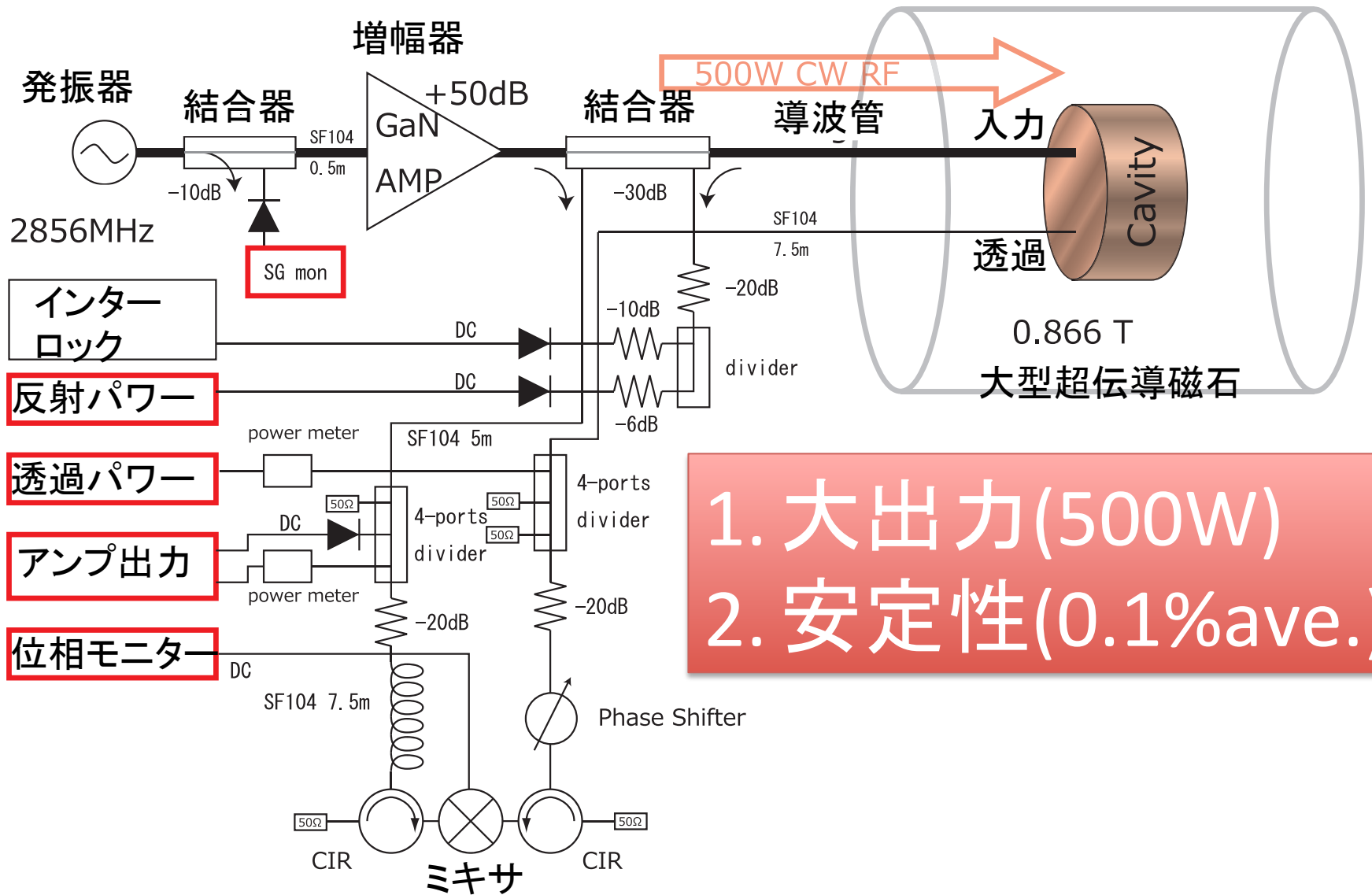


過去の実験では、時間情報を取得していなかった。
→バックグラウンドが多かった。早い時間のイベントも取っていたため、熱化していないPsの影響が大きかった。

我々の新しい実験セットアップ

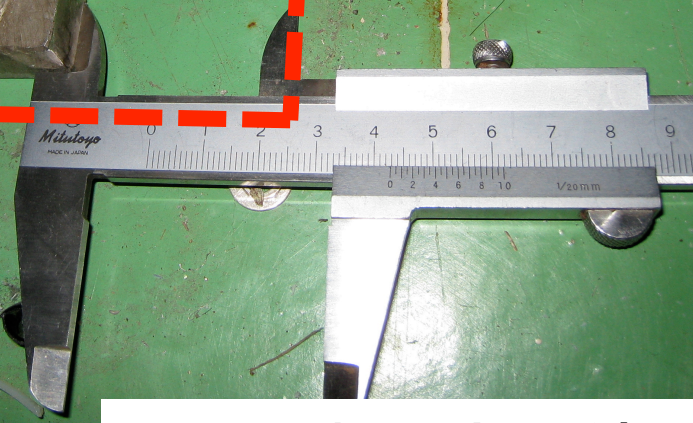


RF回路の全体像



東北地方太平洋沖地震の影響

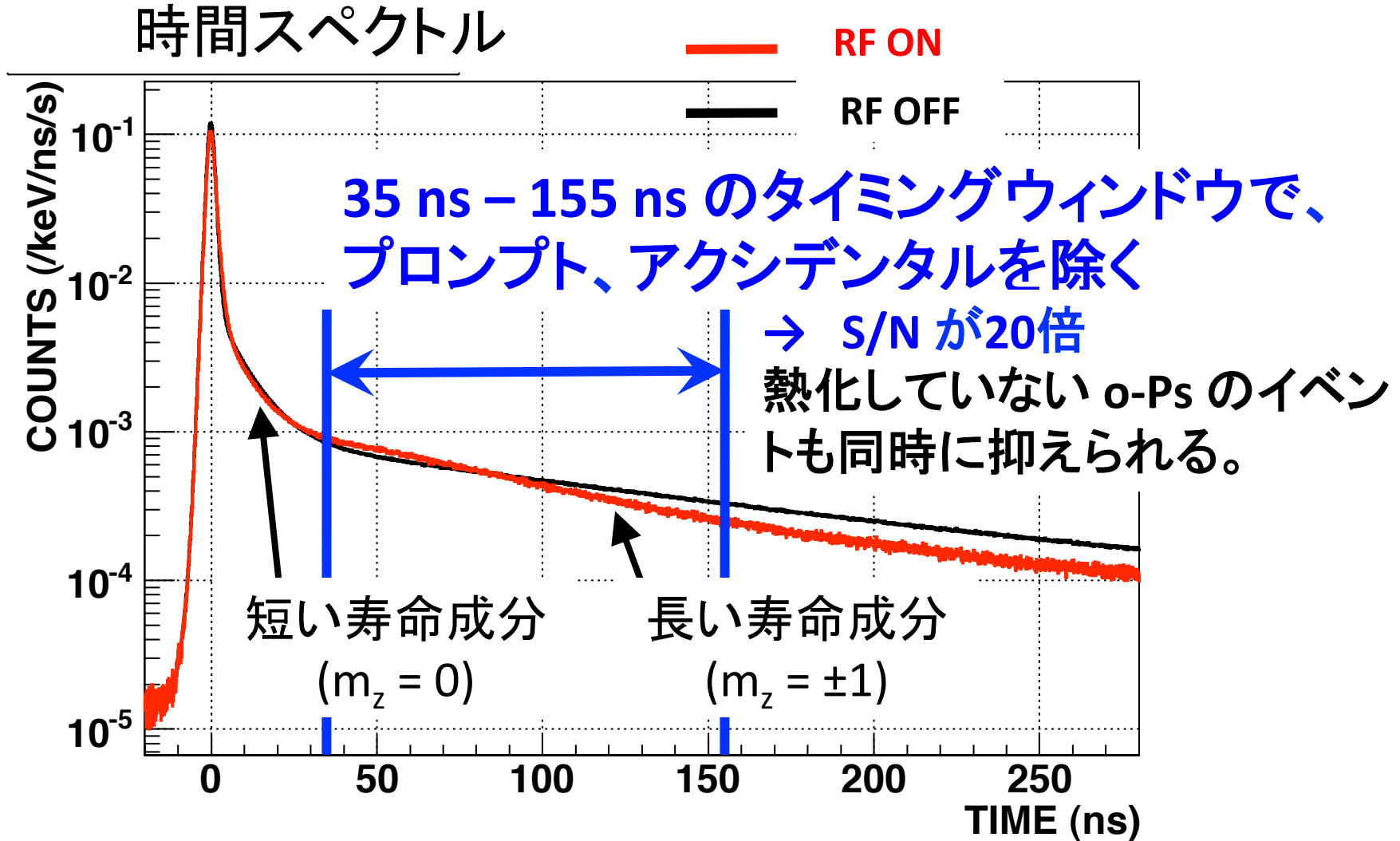
- 大型超伝導磁石 (13 t) が 4.3 cm 移動。
- 測定機器等に対する影響はなかった。



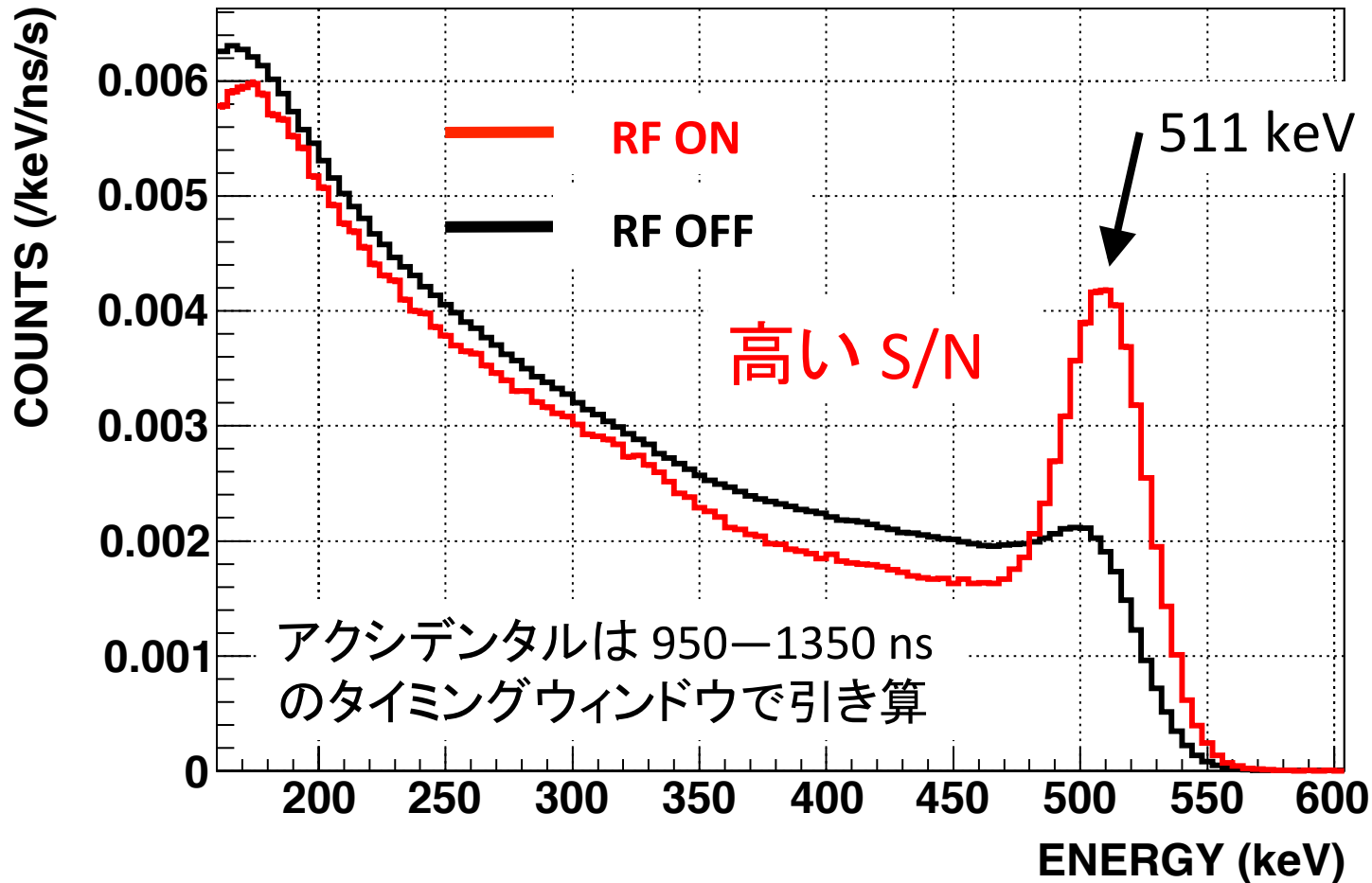
- 一時測定を停止していたが、5月中旬より復旧、調整等を行い、7月から測定再開。

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. まとめ

時間スペクトル



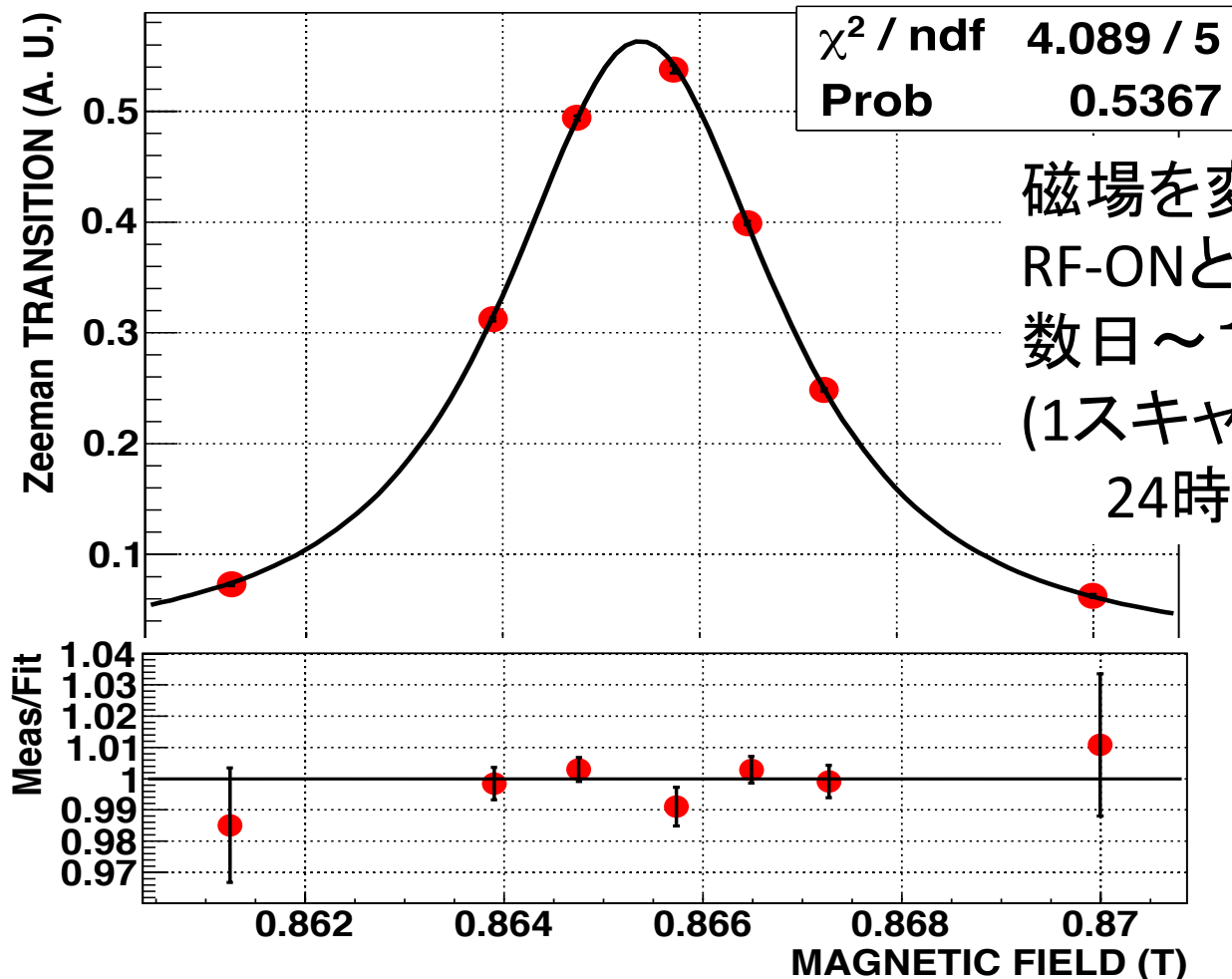
解析 (エネルギースペクトル)



ゼーマン遷移によって、 2γ 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)

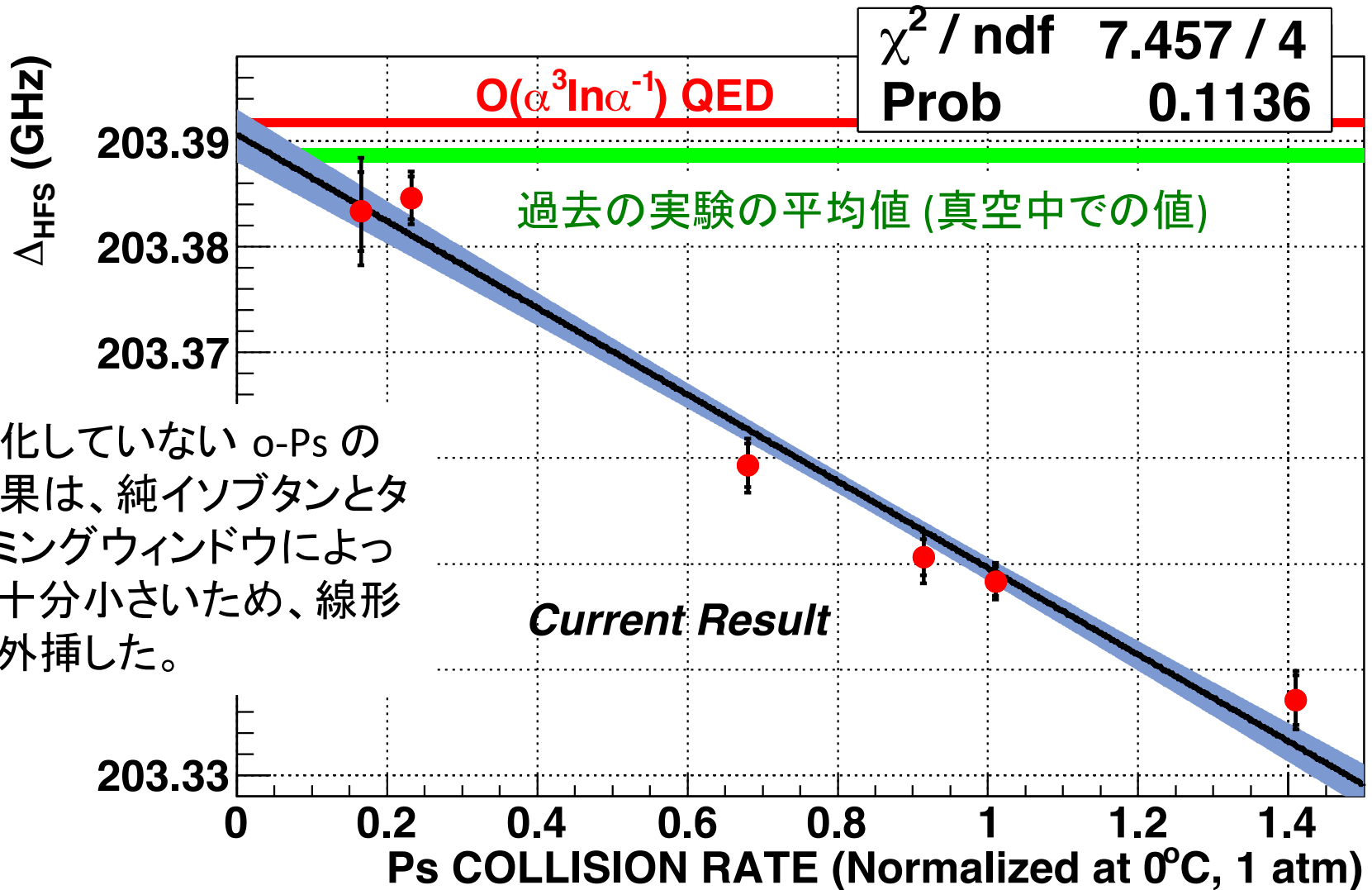
ハミルトニアン
から求めた
遷移曲線で
フィット

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

→ 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

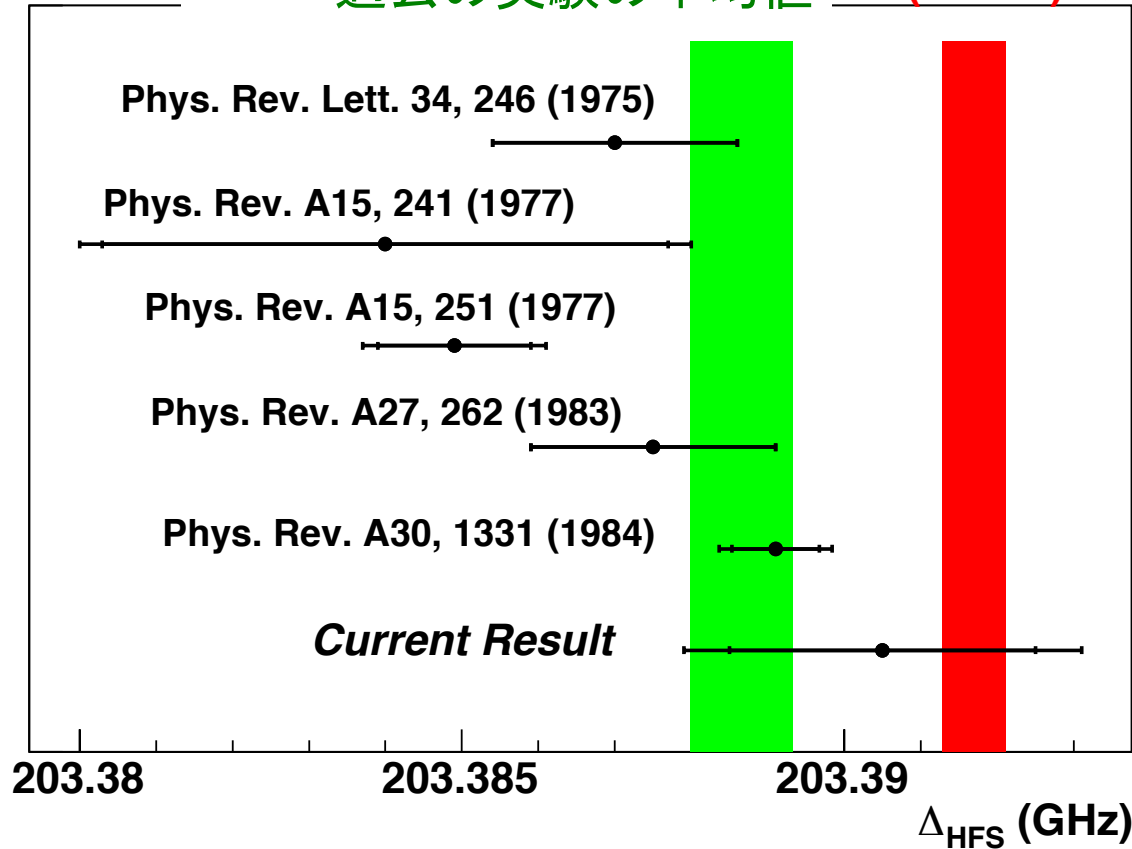
ガス圧を変えて、RF系を調整し、
各ガス圧でスキャン(各ガス圧 1~2ヶ月)



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。

本測定の途中結果

過去の実験の平均値 $O(\alpha^3 \ln \alpha^{-1})$ QED



本測定で得られた、超微細構造の途中結果

$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.3905 \pm 0.0020 \text{ (stat., 9.9 ppm)} \\ \pm 0.0017 \text{ (sys., 8.3 ppm) GHz}$$

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	2.6
RF キャビティの Q_L 値	4.2
RF周波数	1.0
Quadrature sum	8.3

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。

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. まとめ

今後の展望

- 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 9.9 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. まとめ

まとめ

本測定 of 途中結果

$$\text{HFS} = 203.3905 \pm 0.0020 \text{ (stat., 9.9 ppm)} \\ \pm 0.0017 \text{ (sys., 8.3 ppm) GHz}$$

- 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・Ps の熱化による効果) を小さくする。
- O(ppm) の結果が1年程度で得られる見込み。これによって HFS のずれの検証を行う。