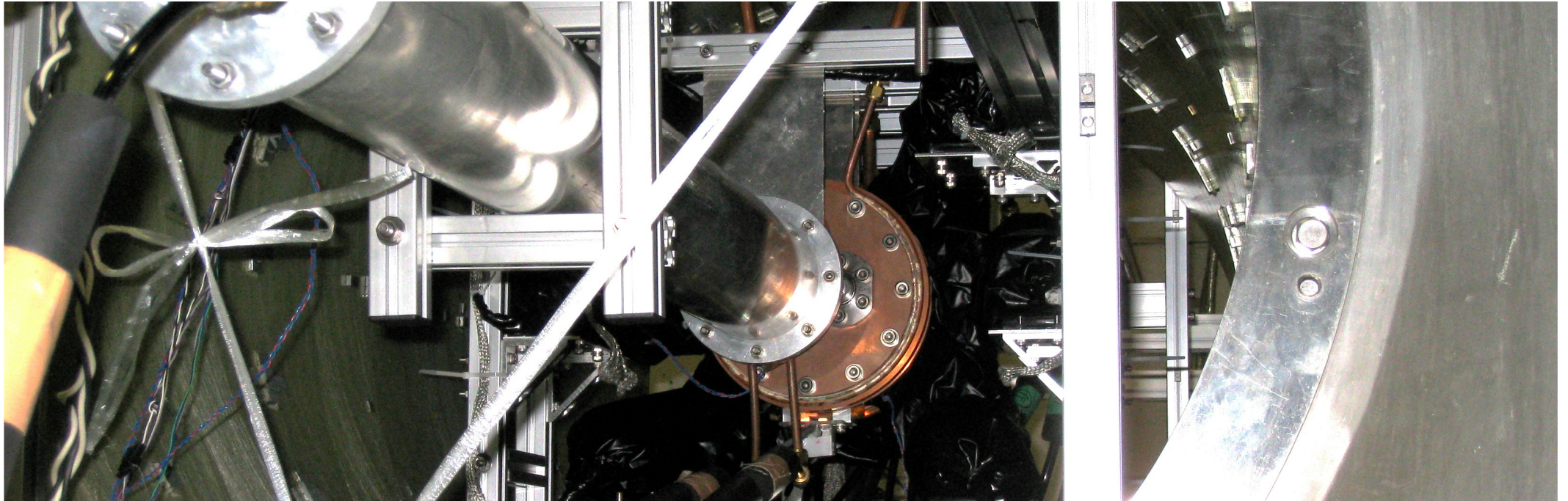


# ポジトロニウム超微細構造の 精密測定



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, 難波俊雄<sup>A</sup>, 浅井祥仁, 小林富雄<sup>A</sup>,  
斎藤晴雄<sup>B</sup>, 吉田光宏<sup>C</sup>, 田中賢一<sup>C</sup>, 山本明<sup>C</sup>

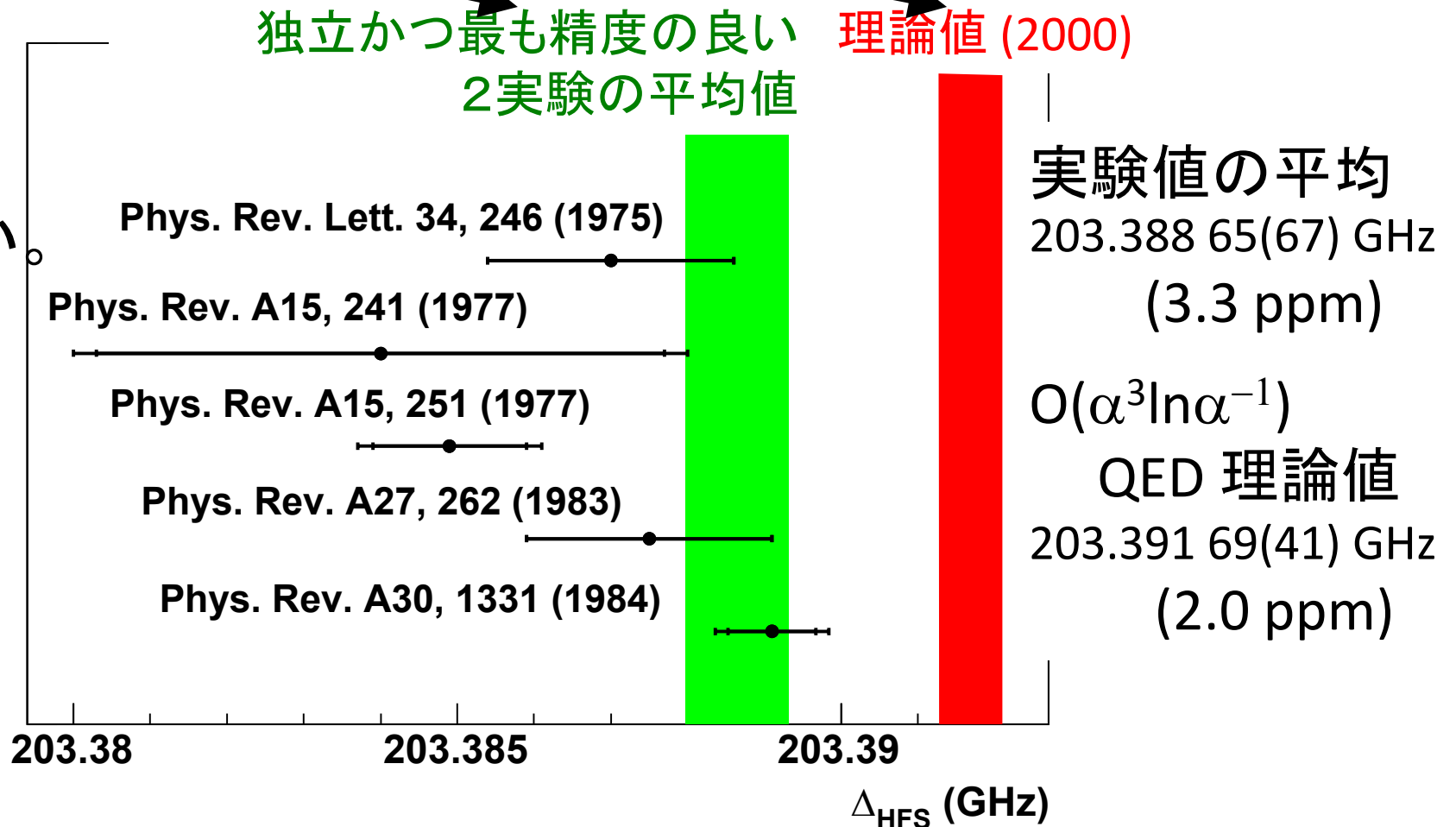
平成25年9月20日 日本物理学会 2013年秋季大会  
於高知大学朝倉キャンパス

# 目次

- インTRODダクシヨN  
(Ps-HFSのずれを検証する)
- Ps の熱化
- Ps 熱化測定の結果
- Ps-HFS 本測定の結果

# ポジトロニウム超微細構造は、 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

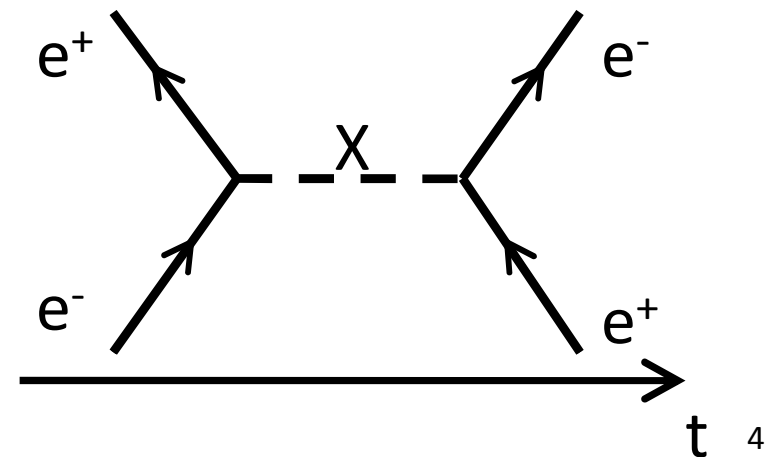
1. 磁場の非一様性。大きなPs生成領域内で、ppmレベルの一様磁場を供給するのは極めて困難。
2. 物質の効果の過小評価。熱化していない o-Ps は、特に低物質密度で大きな影響を及ぼす。

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

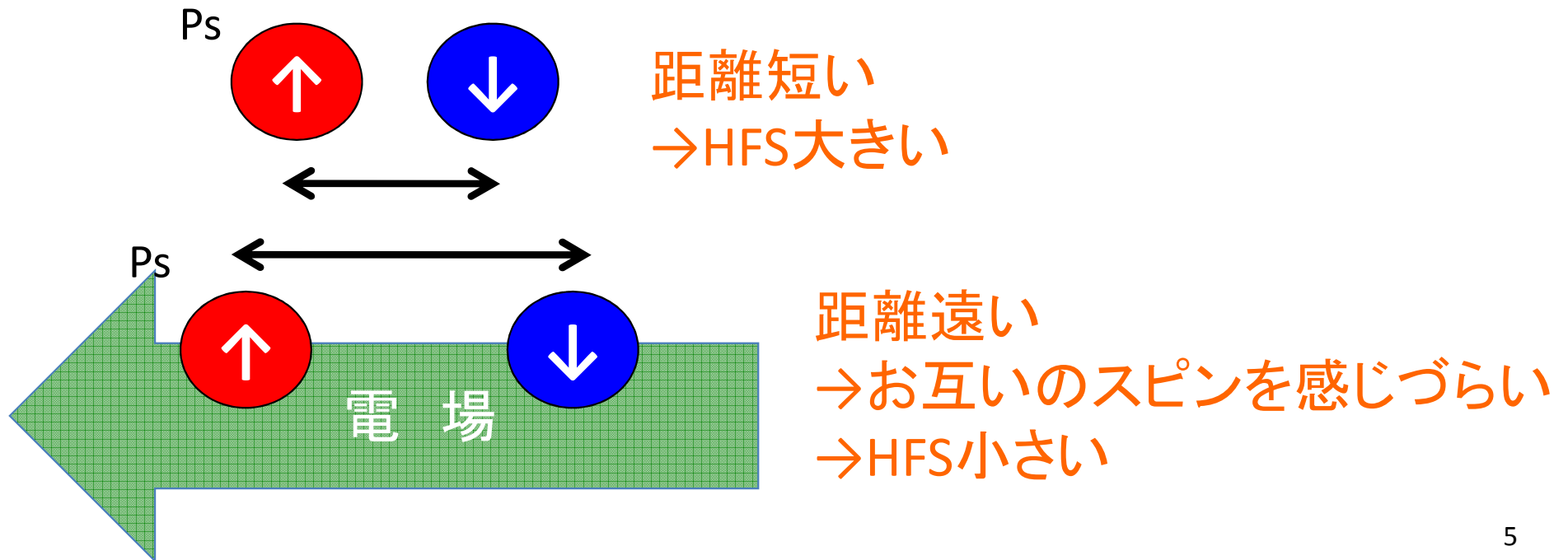
相互作用の弱い未知の粒子の介在



# 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)



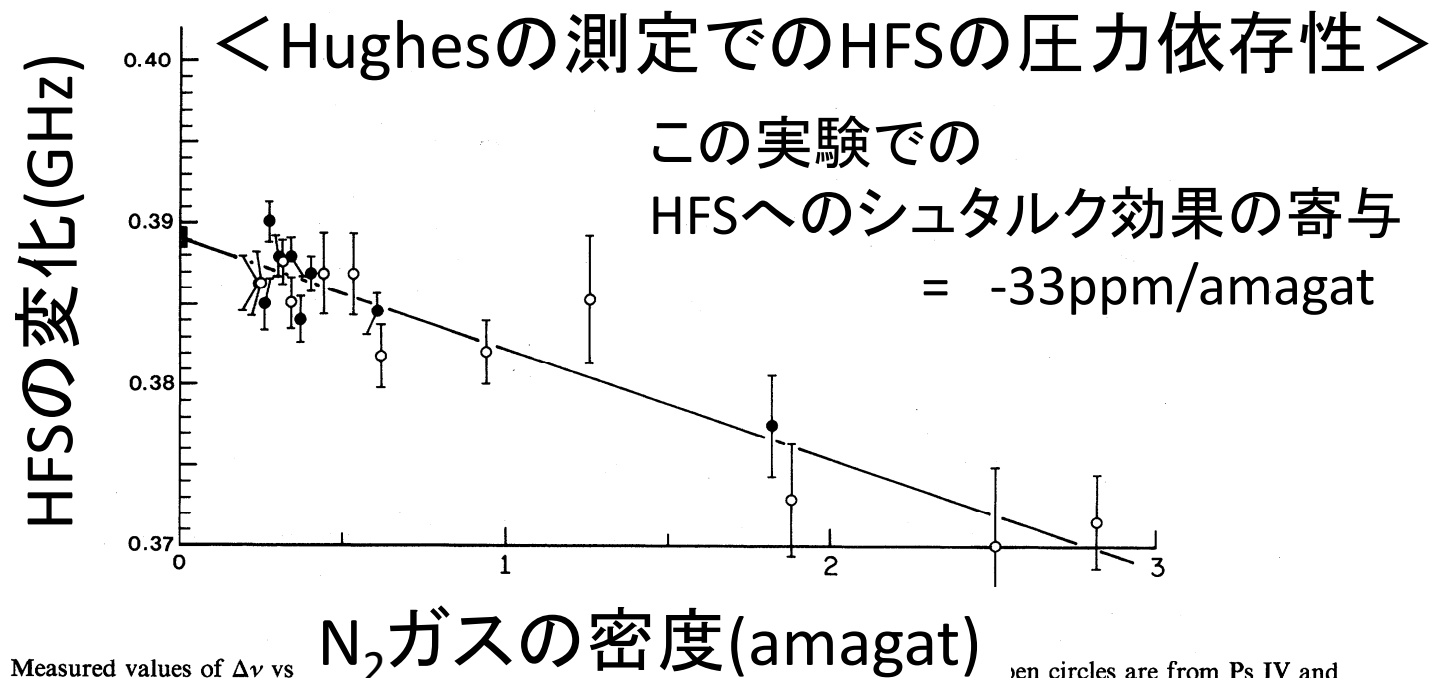
# 過去の実験での物質の効果の評価

- 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の速さ  $v$ )

→Ps速さ一定だと思えば、HFSはガス圧に比例してずれる

→過去の実験



Phys. Rev. A  
 1984 **30** 1331  
 Ritter, Egan, Hughes et al.

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).

# ポジトロニウムの速度変化

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の速度  $v(t)$ )

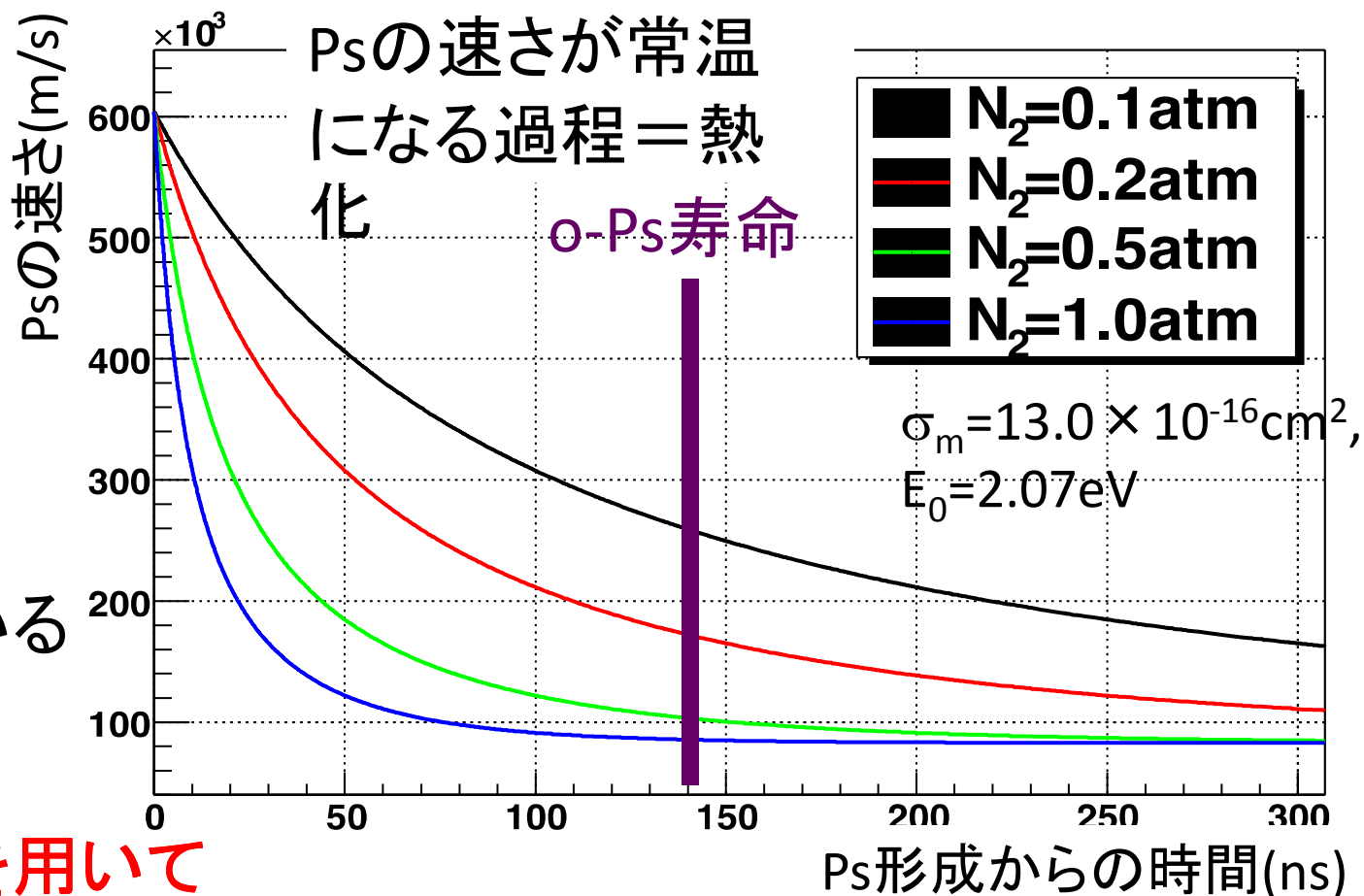
過去の実験では一定という扱い

<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)>

低密度では熱化に時間がかかり、物質の効果が大きい

→ 線型での外挿がO(10ppm)の大きな系統誤差になっている可能性

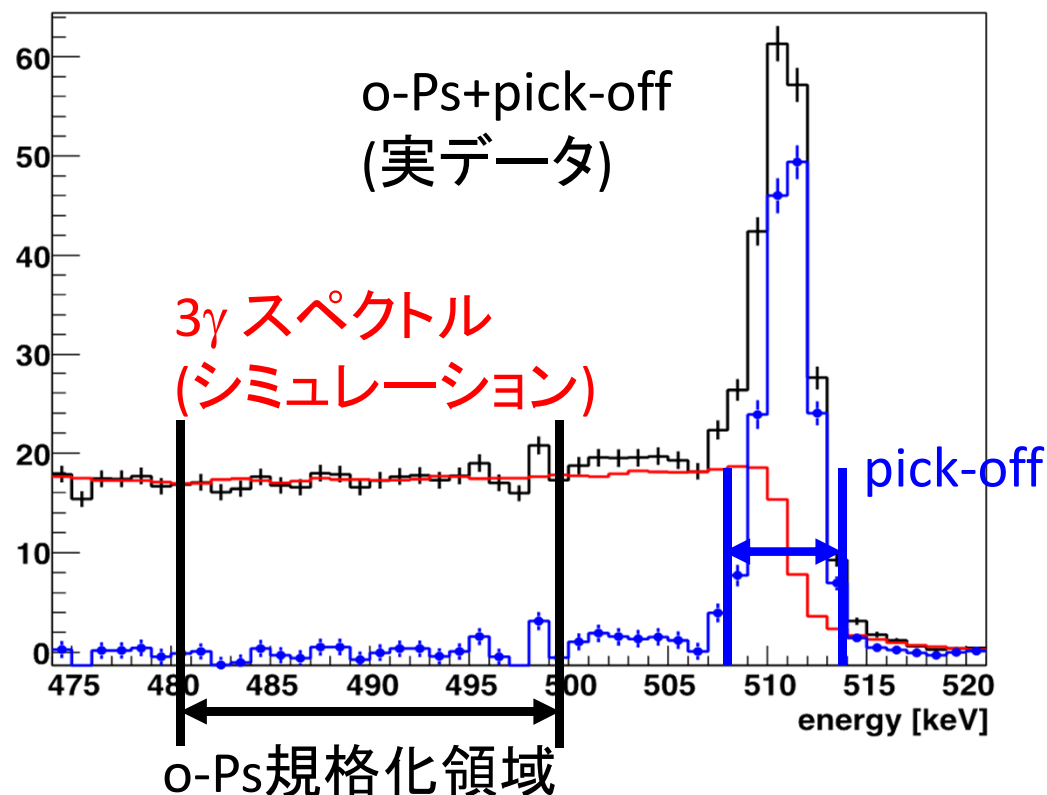
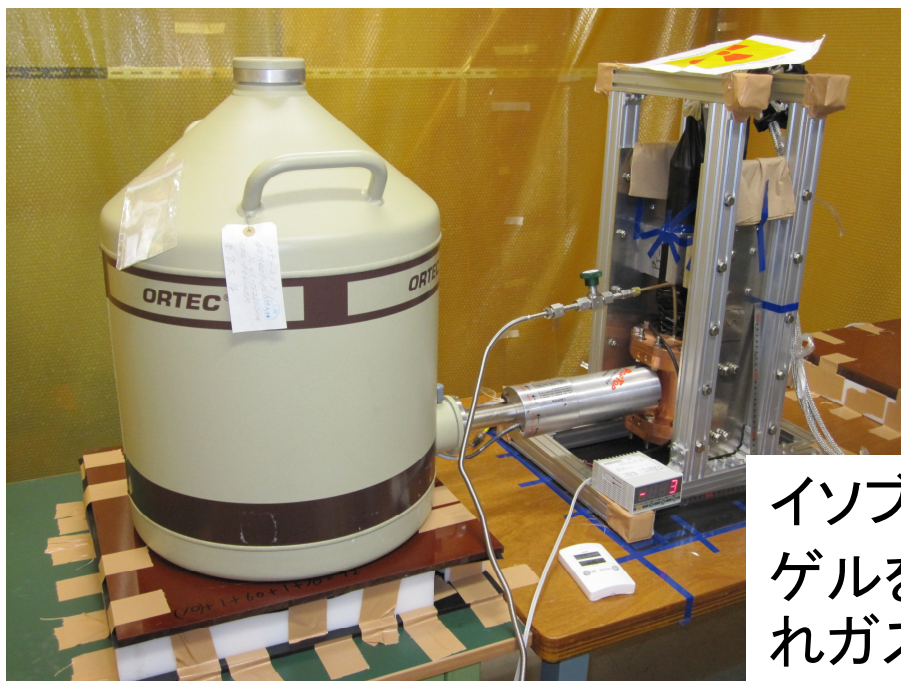
→Ps 熱化を独自に測定し、その結果を用いて超微細構造を求める。



# どのようにして熱化を測定するか？

- 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)

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



イソブタンガスのみの場合と、Ps生成用にエアロゲルを用い、そこにガスを足した場合で、それぞれガス圧を変化させながら、2 $\gamma$ /3 $\gamma$ 比を測定する。



# 熱化測定解析

- プロンプトのなだれ込みの影響を避けるため、40 – 800 ns の時間範囲で解析する。フィットには次の式を用いる。

求めたいパラメータ:  $\sigma_m$ : イソブタンとPsの断面積

エアロゲルの効果を記述する項

$$\frac{d}{dt} E_{av}(t) = -\sqrt{2m_{Ps}E_{av}(t)} \left( E_{av}(t) - \frac{3}{2}k_B T \right) \left( \frac{8}{3} \sqrt{\frac{2}{3\pi}} \frac{2\sigma_m n}{M} + \alpha \left( \frac{E_{av}(t)}{k_B T} \right)^\beta \right)$$

$m_{Ps}$ : Psの質量

$n$ : イソブタンの数密度

$M$ : イソブタンの質量

式は J. Phys. B **31** (1998) 329 Y. Nagashima, et al.

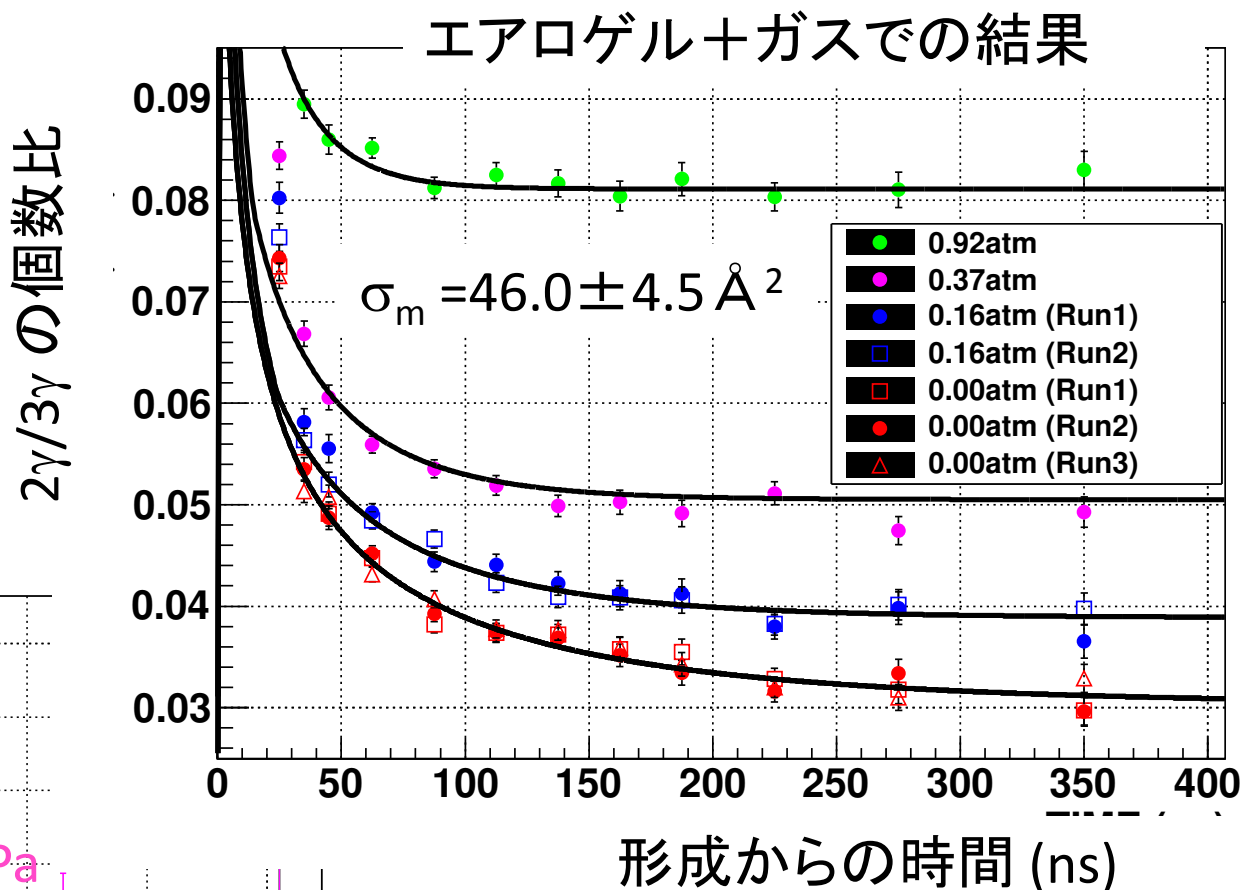
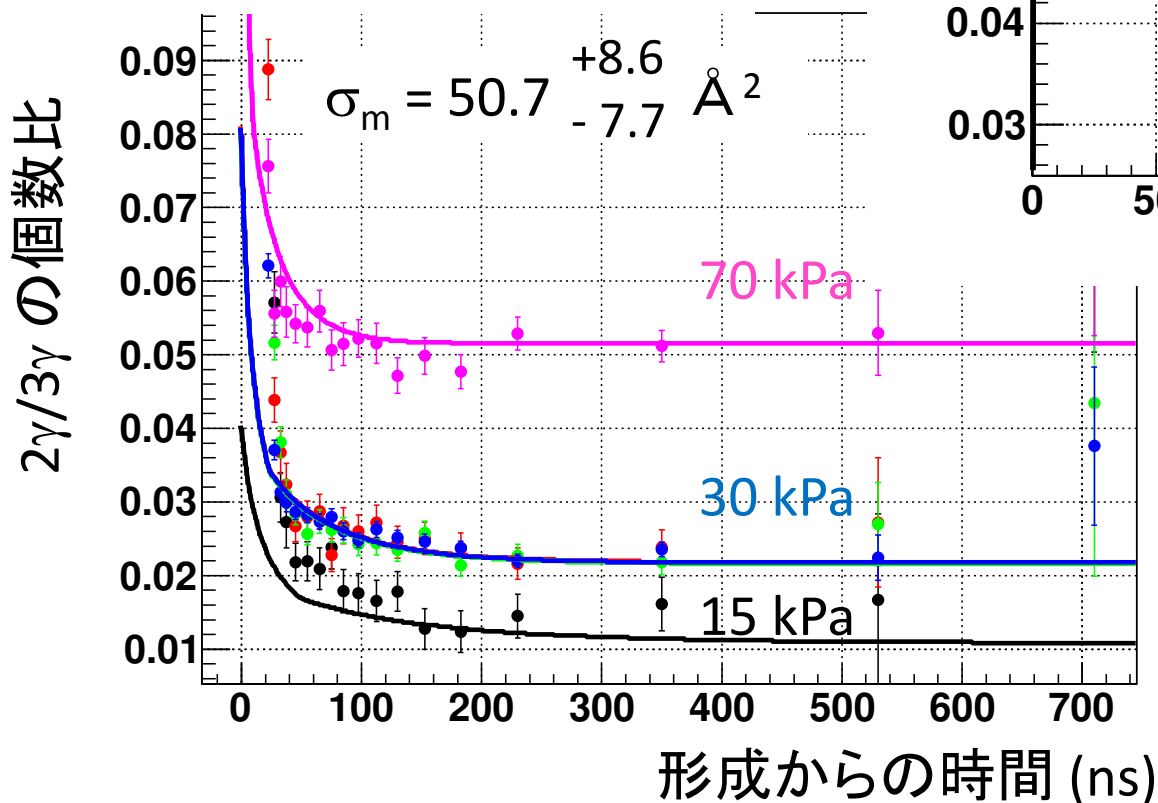
- 40 ns より前の、エネルギーが高い状態での熱化は、ドップラー拡がり法 (DBS) で  $\sigma_m = 146 \pm 11 \text{ \AA}^2$ ,  $E_0 = 3.1^{+1.0}_{-0.7} \text{ eV}$  (初期エネルギー) と測定されている。  
DBS: Phys. Rev. A **67**, 022504 (2003)
- イソブタンには 0.17 eV に振動準位があり、それより高いエネルギー (DBS) と低いエネルギー (我々の pickoff) では、 $\sigma_m$  が異なることが予想される → 初期エネルギーを 3.1 eV とし、0.17 eV で  $\sigma_m$  を変えてフィットする。

# 2 $\gamma$ /3 $\gamma$ 比のフィット結果

イソブタン中での  
pickoff の速さ依存性  
 $\propto v^{3/5} (= E^{3/10})$

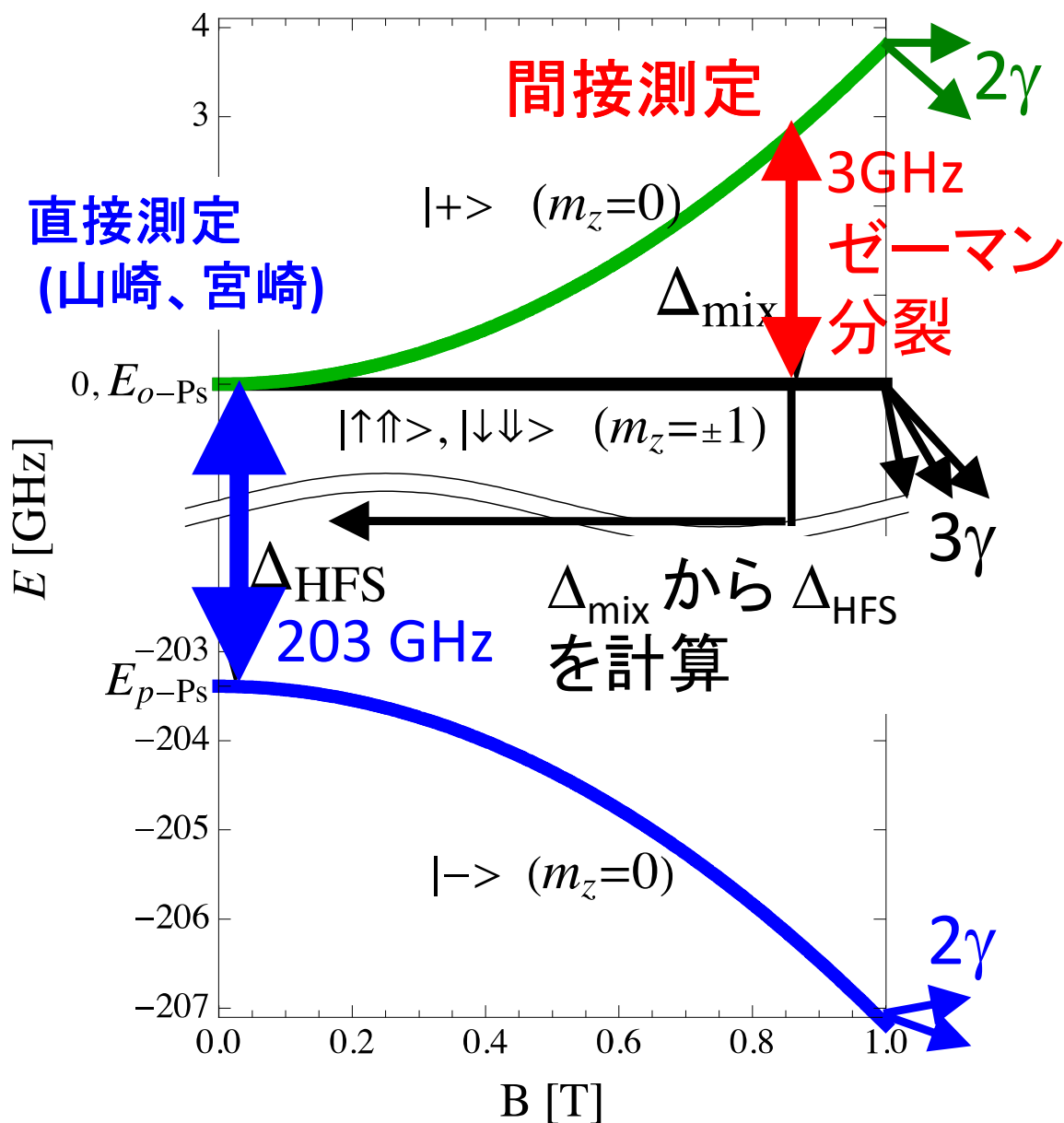
全ガス圧を同時フィット

ガスのみでの結果



ガスのみと、エアロゲル  
+ガスでの結果は一致。  
平均して、  
 $\sigma_m = 47.2 \pm 3.9 \text{ \AA}^2$   
と求まった。

# 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).

ゼーマン遷移させると、 $2\gamma$  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。

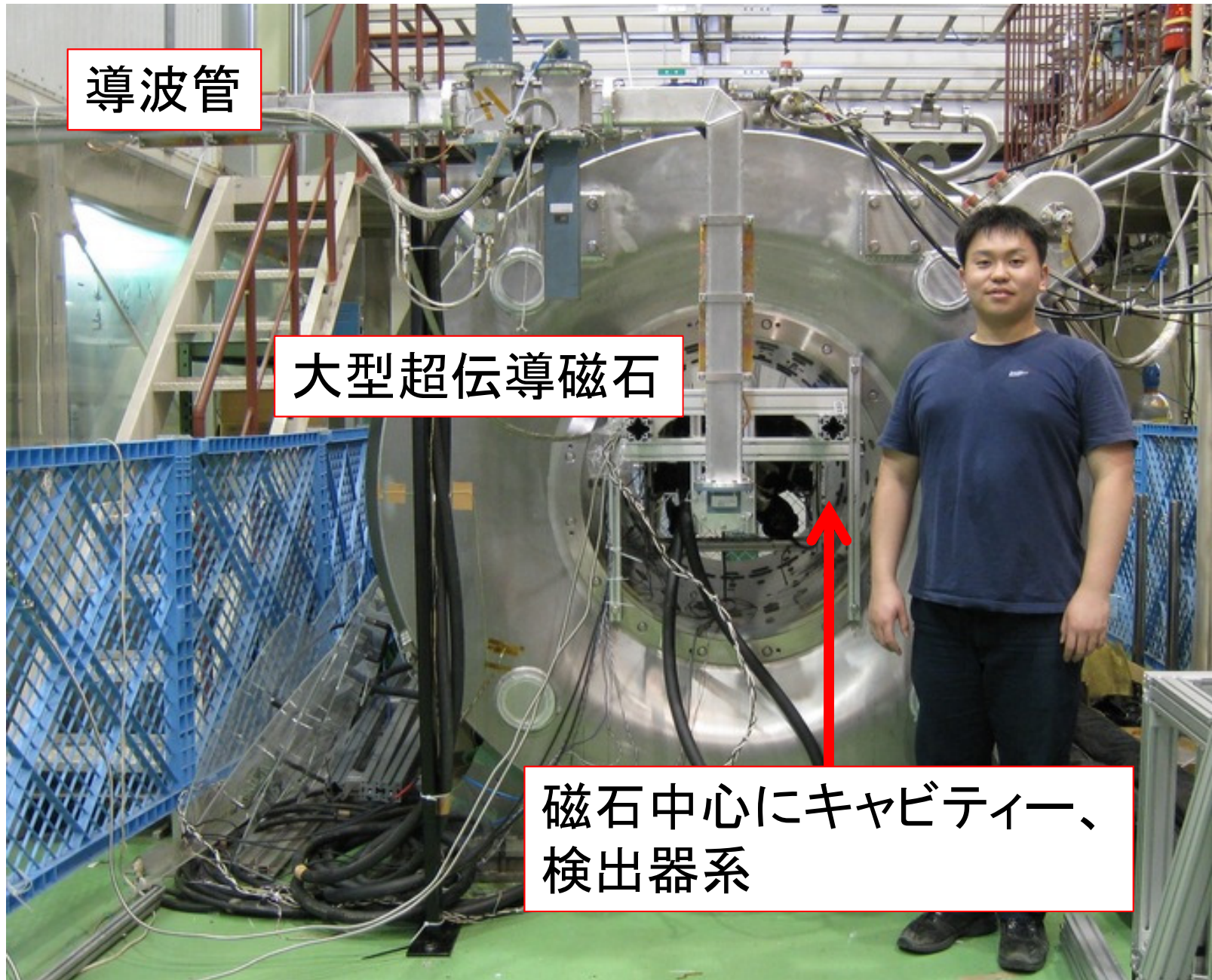
$\Delta_{\text{mix}}$  を精密に測定し、 $\Delta_{\text{HFS}}$  を求める。

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

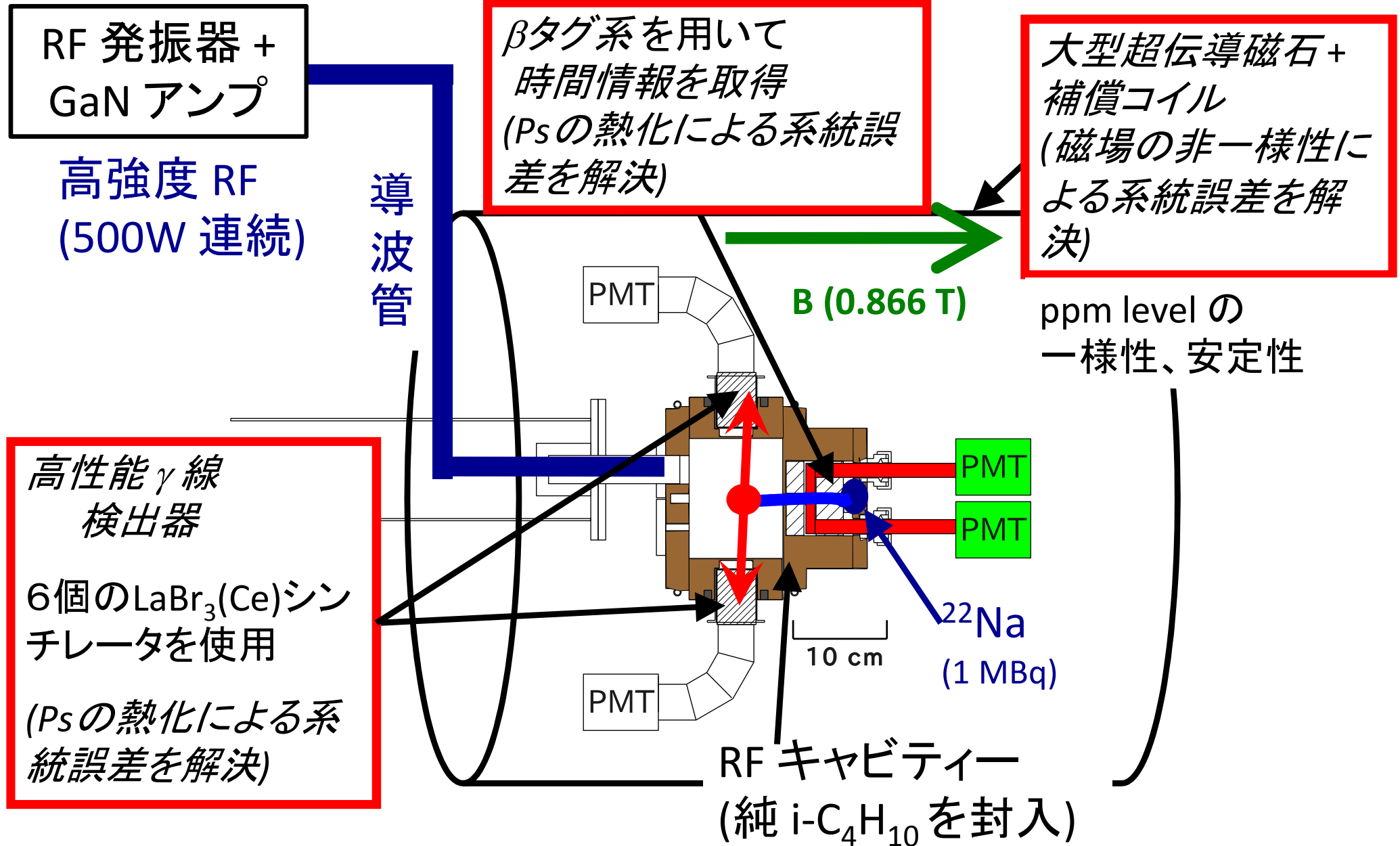
$$x = \frac{g' \mu_B B}{\Delta_{\text{HFS}}}.$$

# 測定 @ KEK低温棟

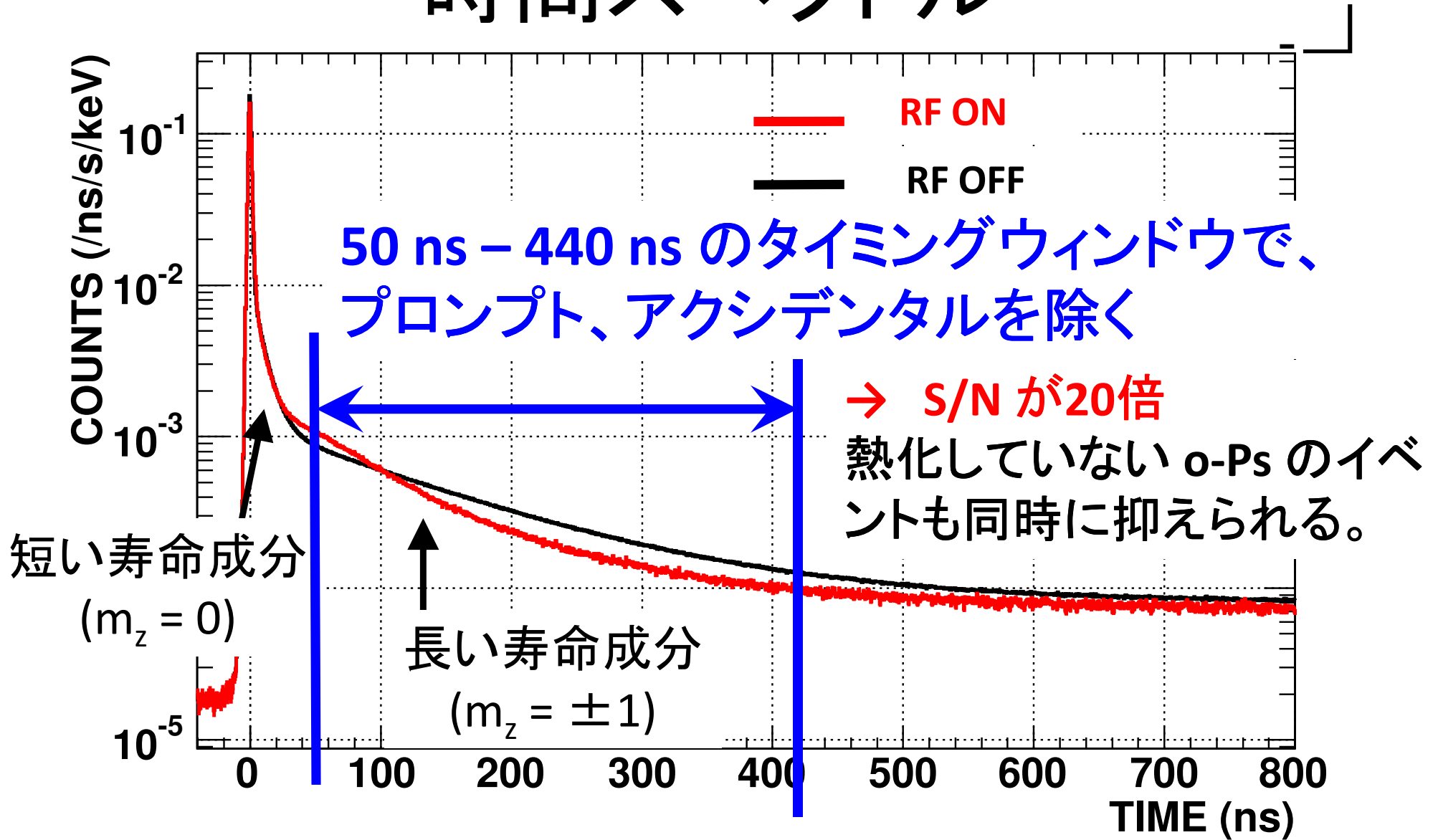
平成22年7月～平成25年3月14日



# 我々の新しい実験セットアップ



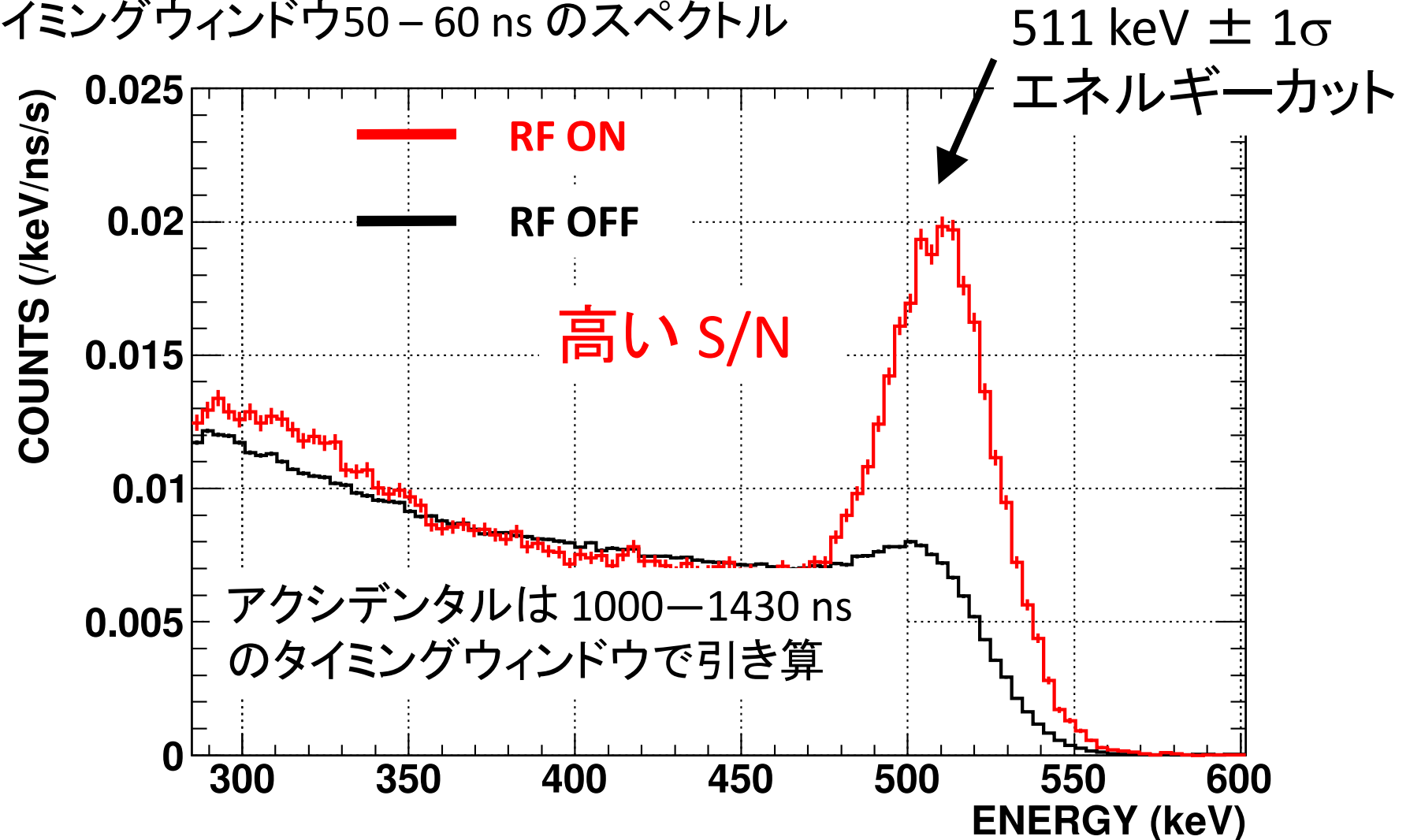
# 時間スペクトル



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。

# 解析 (エネルギースペクトル)

タイミングウィンドウ50–60 ns のスペクトル



ゼーマン遷移によって、 $2\gamma$  崩壊確率が大きくなった。

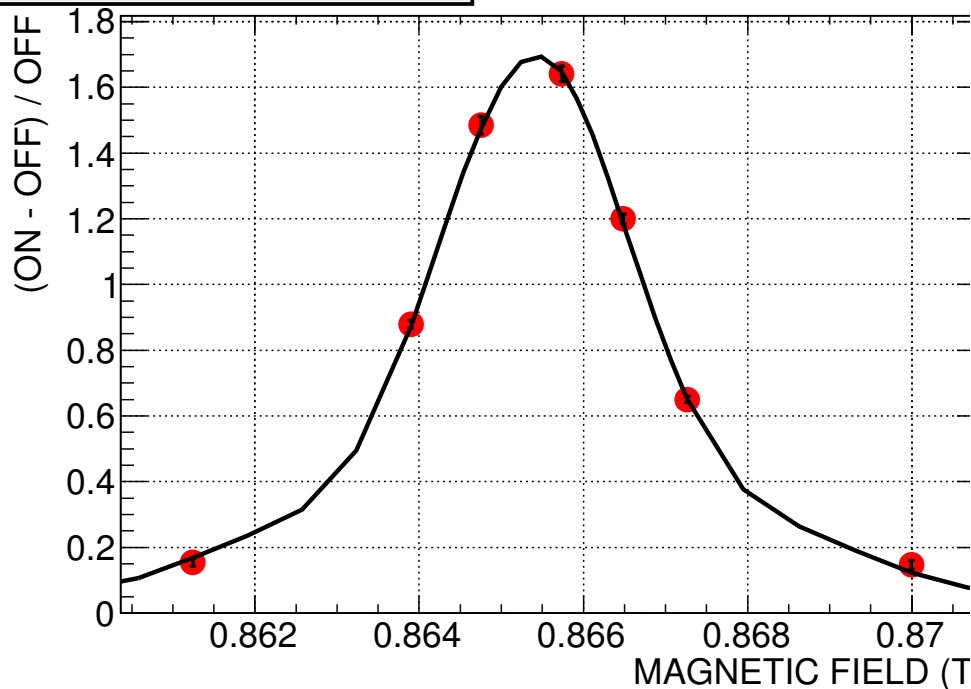
511 keV  $\pm$  1s のカウントレートについて、

(RF-ON - RF-OFF) / RF-OFF を計算し、遷移曲線を作成

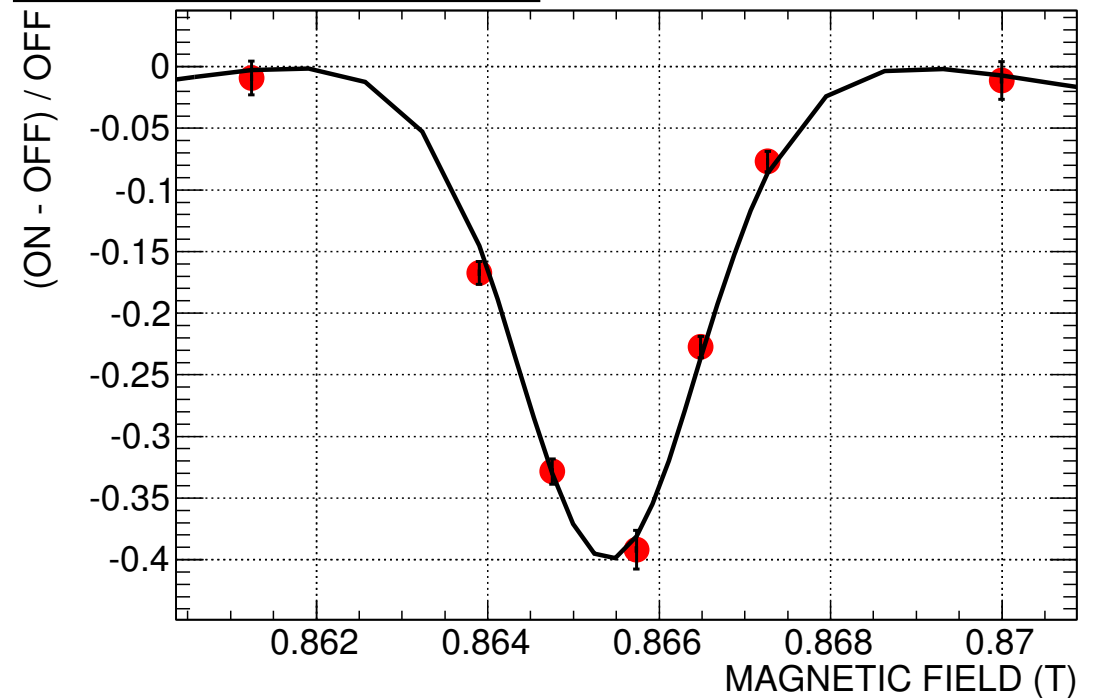
# 共鳴曲線

- RF の周波数、パワーを固定して、**磁場でスキャン**
- 50—440 ns を、11個のタイミングウィンドウに分け、全ガス圧・全磁場点・全タイミングウィンドウを同時フィット
- 熱化により、 $\Delta_{\text{HFS}}$  が時々刻々変化 ( $\propto nv^{3/5}$ ) する効果も入れた。

0.881 amagat, 50--60 ns



0.881 amagat, 260--440 ns

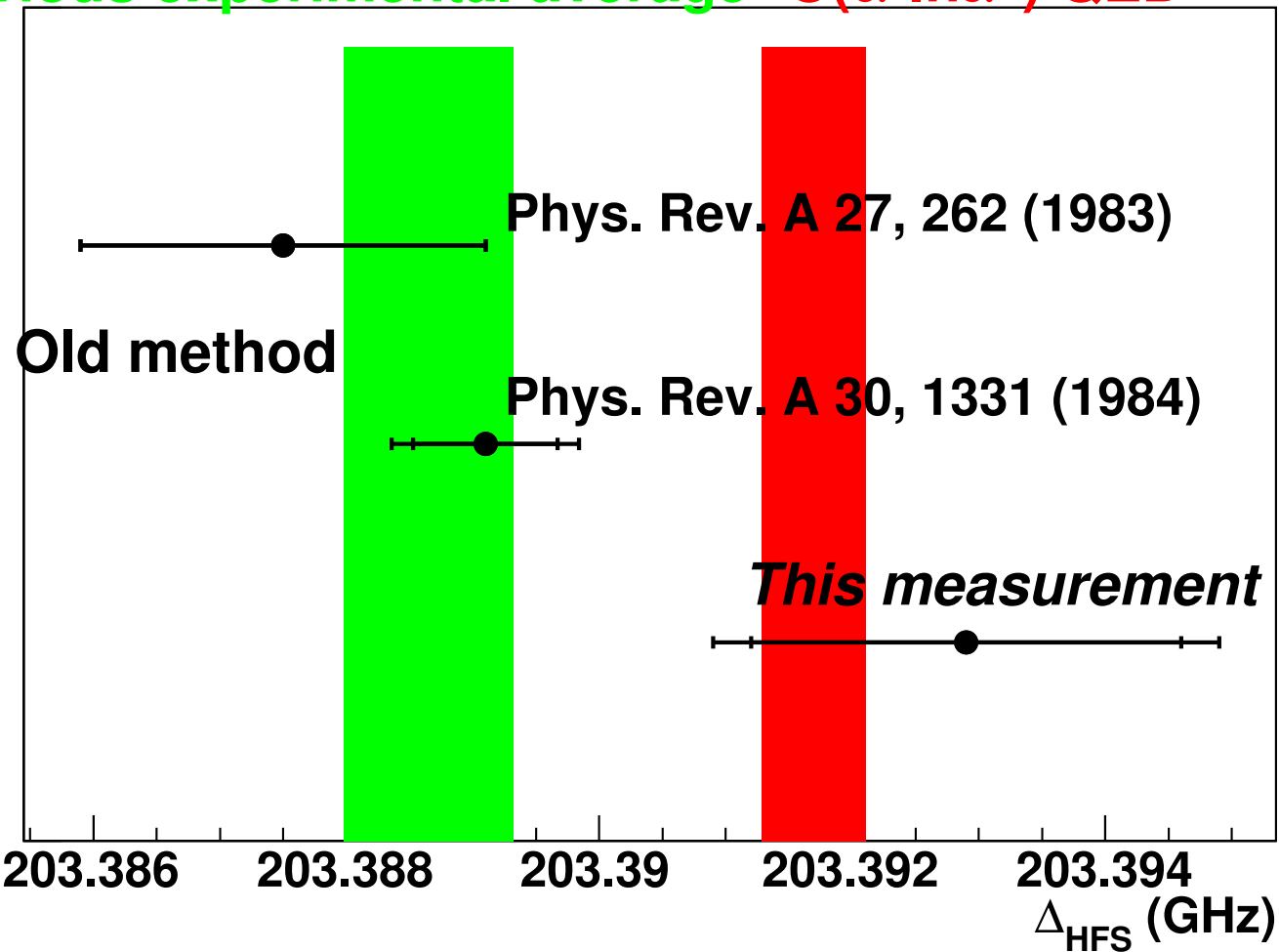


$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.3929(18) \text{ GHz (8.8 ppm)} \quad \chi^2/\text{ndf} = 641.7 / 592 \quad (p = 0.077)$$



# 結果

Previous experimental average  $O(\alpha^3 \ln \alpha^{-1})$  QED



本測定で得られた、超微細構造の結果  
 $\Delta_{\text{HFS}} = 203.3929 \pm 0.0017$  (stat., 8.2 ppm)  
 $\pm 0.0008$  (sys., 4.0 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	3.0
		補正と再現性	1.0
		NMR測定値	1.0
物質の効果		ポジトロニウムの熱化	2.2
RF	}	RF パワー	0.8
		RF キャビティの $Q_L$ 値	1.1
		RF周波数	1.0
		<b>Quadrature sum</b>	<b>4.0</b>

統計誤差 8.2 ppm と合わせて、  
 $\Delta_{\text{HFS}} = 203.3929(20) \text{ GHz (9.7 ppm)}$ .

# まとめ

ポジトロニウム超微細構造は、実験と理論の間に  $3.9\sigma$  の有意なずれがあり、これを検証するため、新しい実験を行った。

- 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。
- 物質の効果を正しく取り扱うため、Ps 熱化関数の測定を行った。超微細構造が熱化によって時間に依存する効果も取り入れた。
- 9.7 ppmの精度で、QED理論値を favor する暫定結果が得られた。現在、統計精度を改善するため、解析方法の最後の検討を行っている。