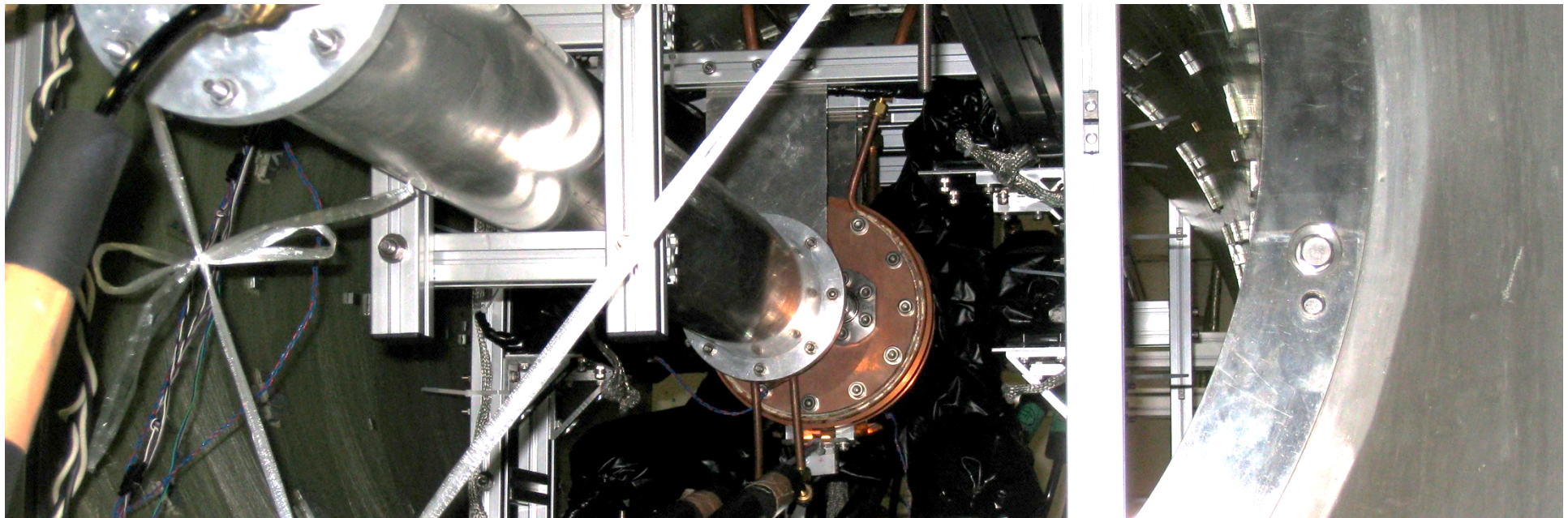


# ポジトロニウム超微細構造の 精密測定



東大院理,<sup>A</sup>東大素粒子物理,<sup>B</sup>東大院総合文化,<sup>C</sup>KEK

石田明, 末原大幹<sup>A</sup>, 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24年11月30日 京大原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」

# 目次

- イン트로ダクション
- 我々の新しい実験セットアップ
- 本測定 of 途中結果
- $Ps$  の熱化と超微細構造
- イソブタンガス中での  $Ps$  熱化測定
- 現状と今後の展望

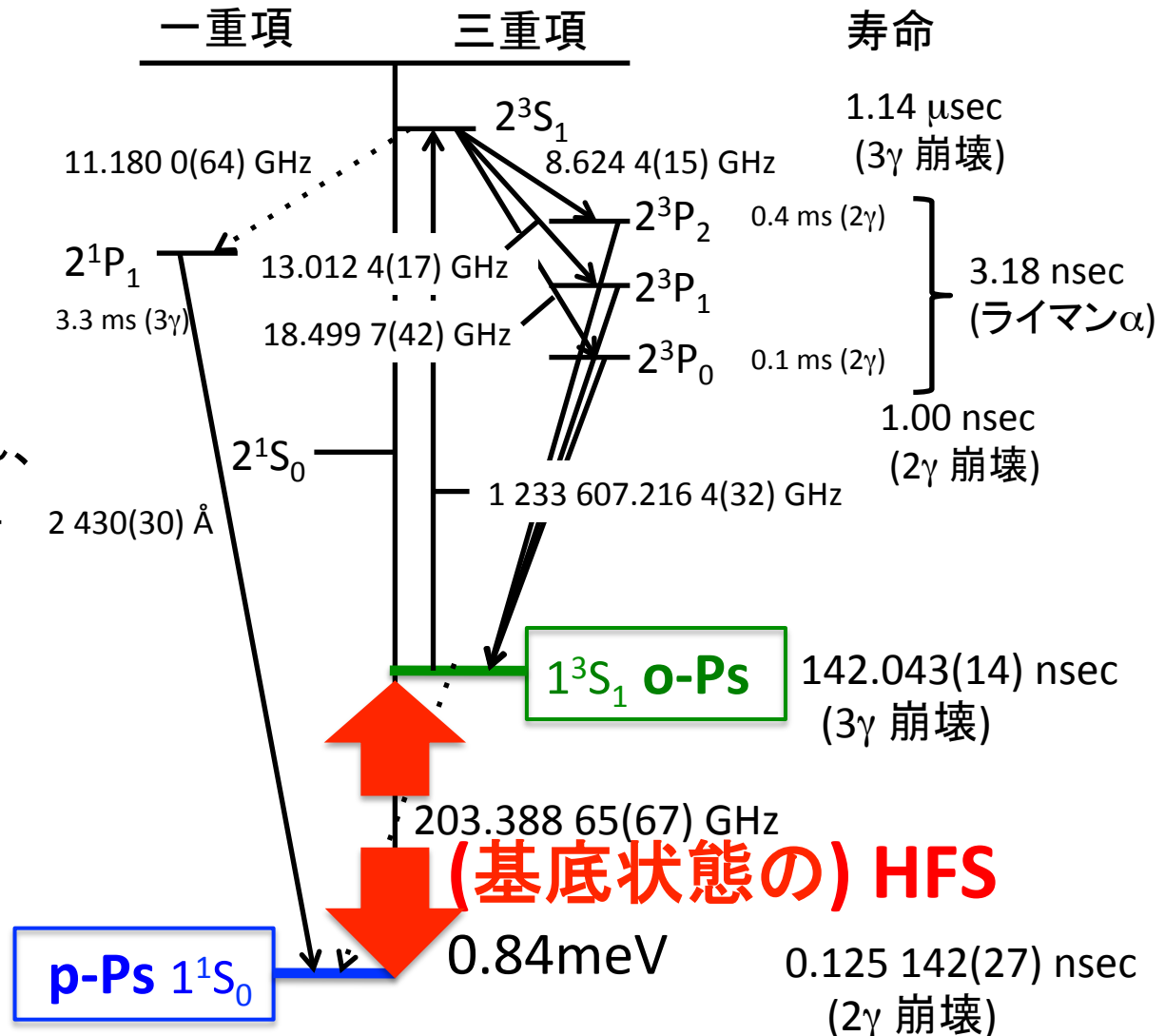
# ポジトロニウム超微細構造 (Ps-HFS)

ポジトロニウム (Ps) 陽電子( $e^+$ )・電子( $e^-$ )の束縛系で、最も軽い水素様「原子」

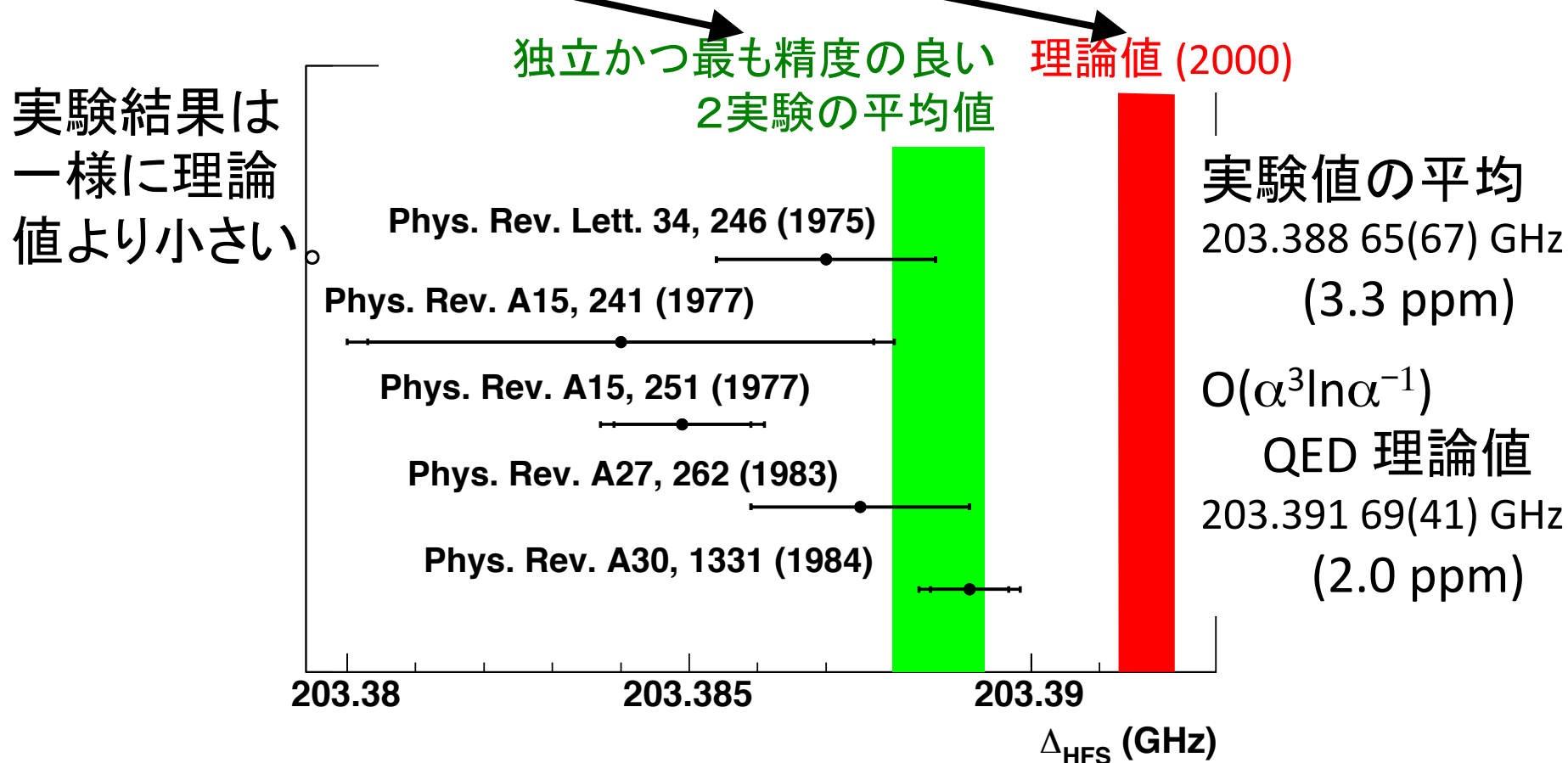
- レプトンのみから成るクリーンな系 (ハドロン of 不定性がない)
- 粒子・反粒子系 → 素粒子標準模型を超えた新しい物理現象に敏感
- 束縛系量子電磁力学 (QED) によって記述され、束縛系QEDの精密検証に適する。

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)



# ポジトロニウム超微細構造は、 実験と、理論でずれている



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

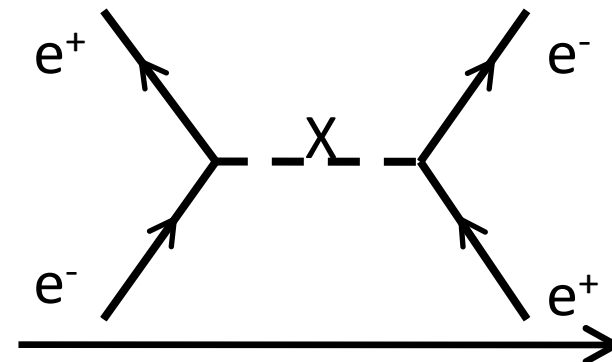
1. 磁場の非一様性。大きなPs生成領域内で、ppmレベルの一様磁場を供給するのは極めて困難。
2. 物質の効果の過小評価。熱化していない o-Ps は、特に低物質密度で大きな影響を及ぼす。

cf. オルソポジトロニウムの寿命問題 (1990年代)

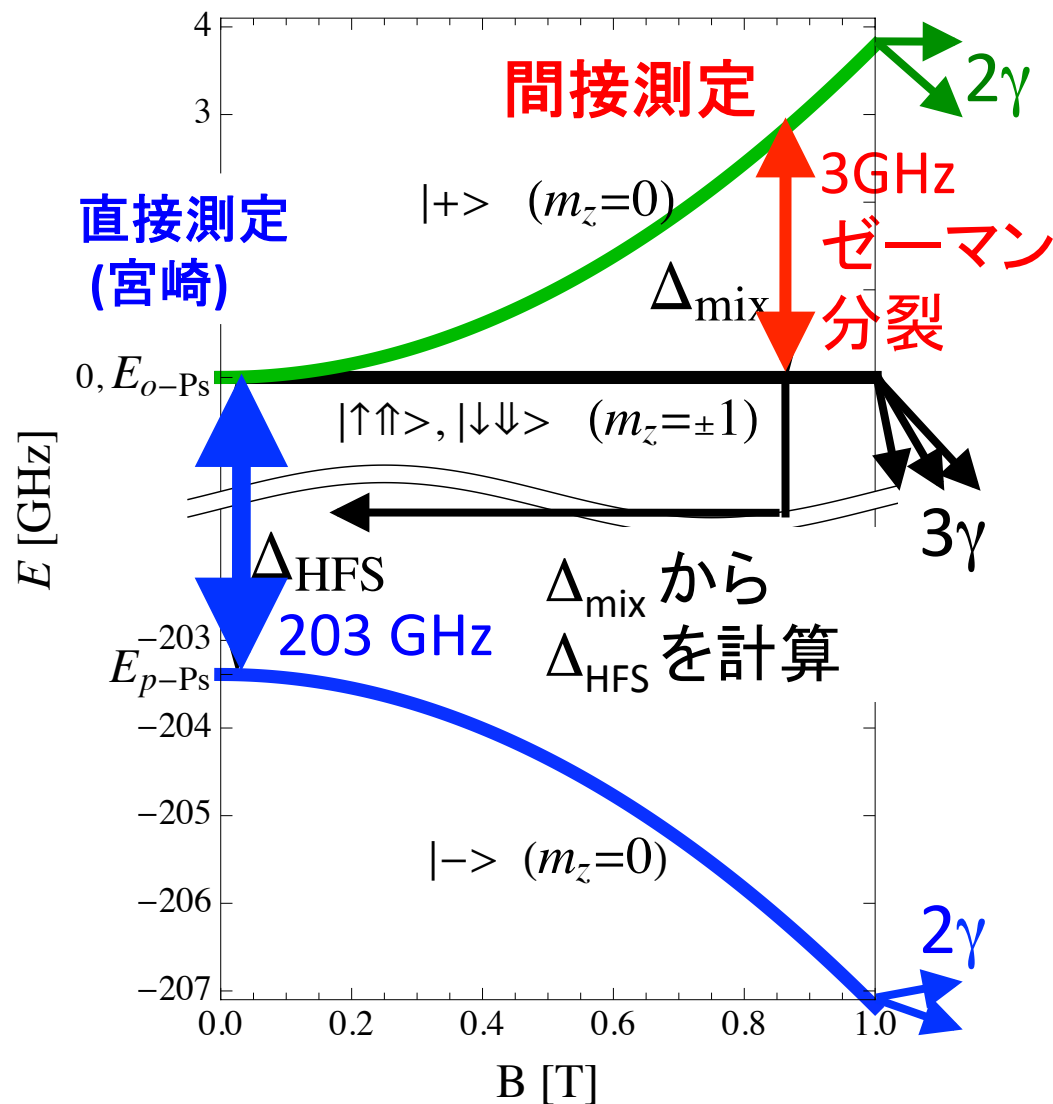
**我々は、上記の系統誤差を抑えた、新しい方法による精密測定を行い、ずれを検証する。**

- 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



# 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。

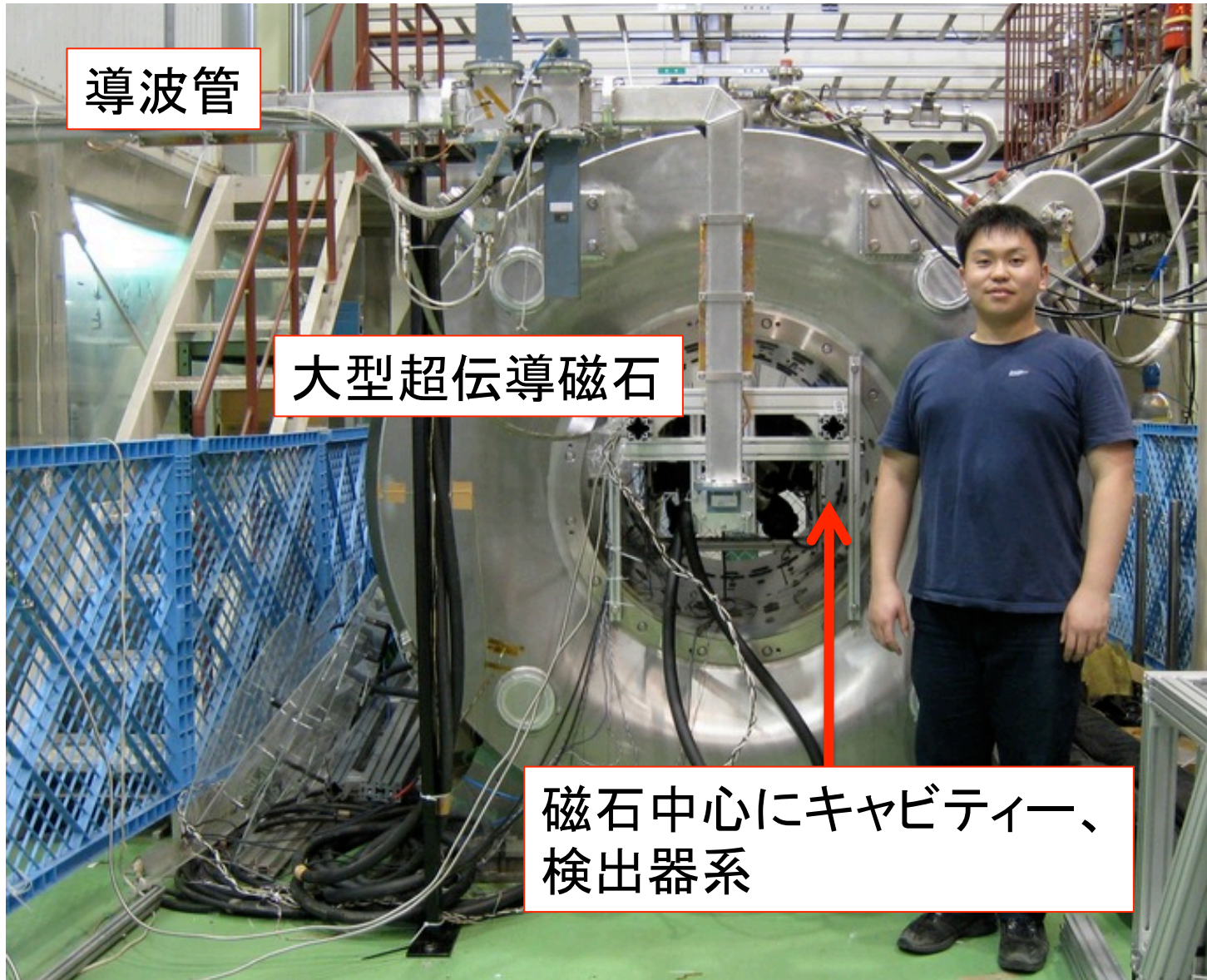
$\Delta_{mix}$  を精密に測定し、 $\Delta_{HFS}$  を求める。

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

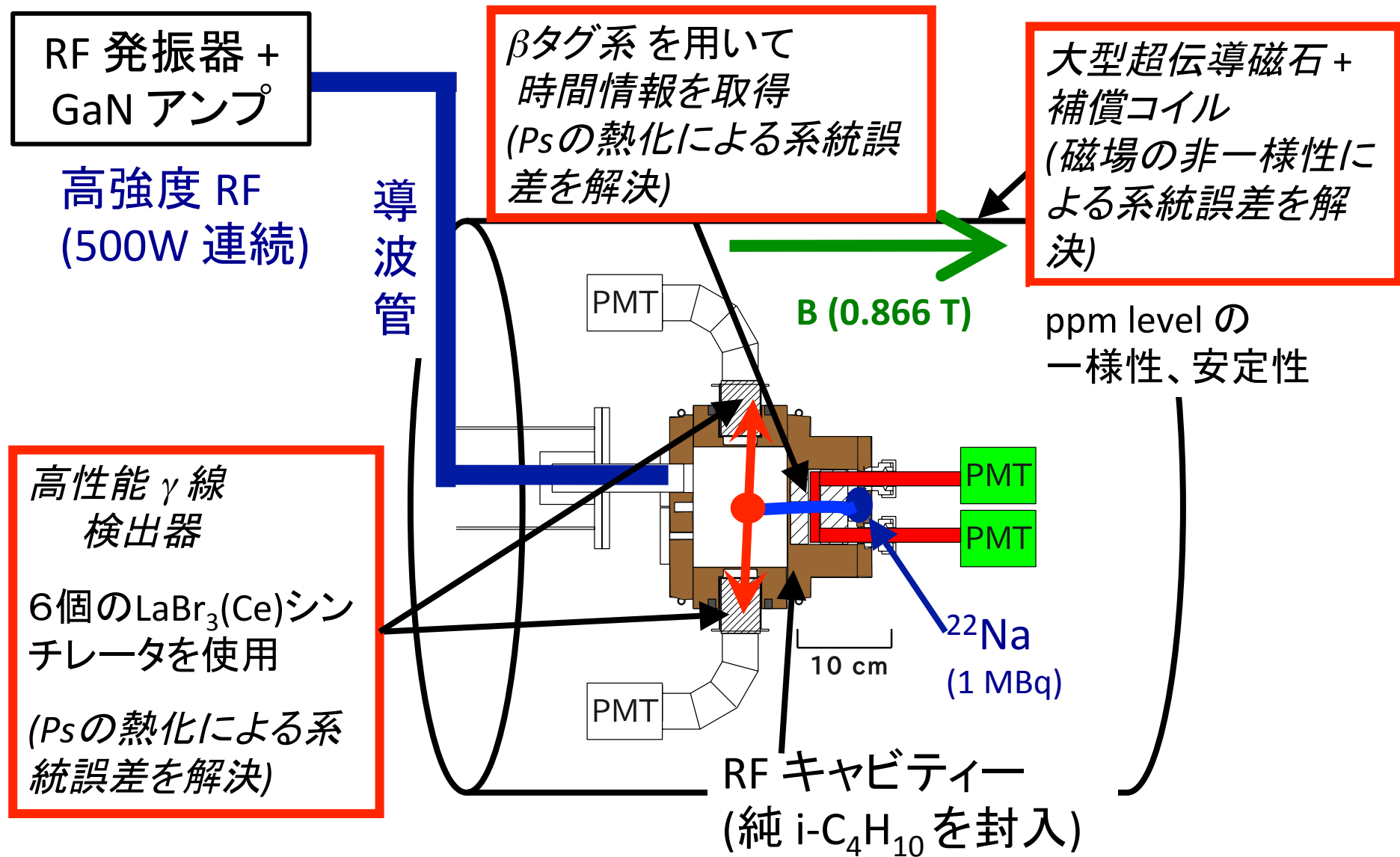
$$x = \frac{g' \mu_B B}{\Delta_{HFS}}.$$



# 測定 @ KEK低温棟 平成22年7月～

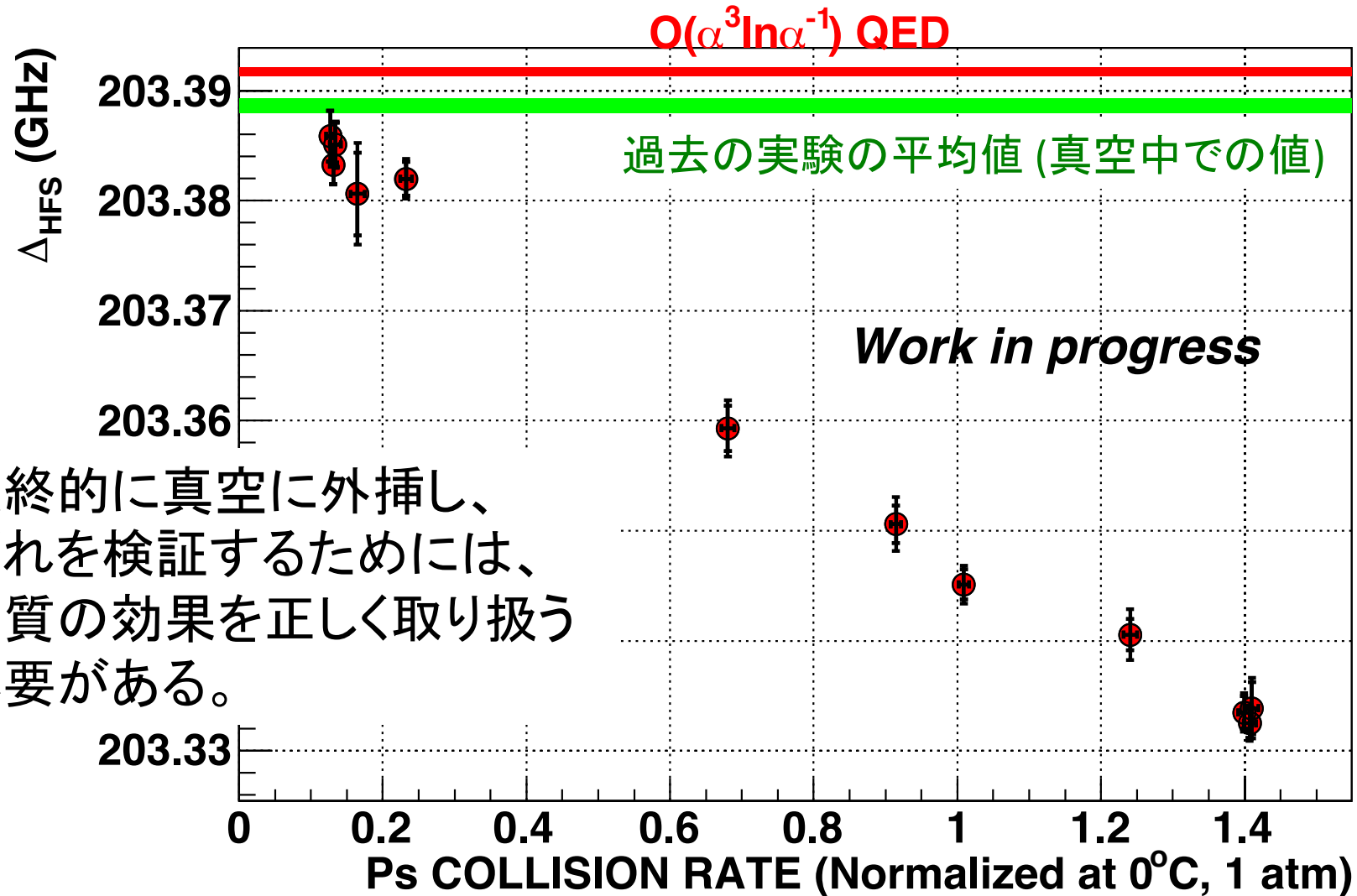


# 我々の新しい実験セットアップ





# 圧力 (密度) 依存性

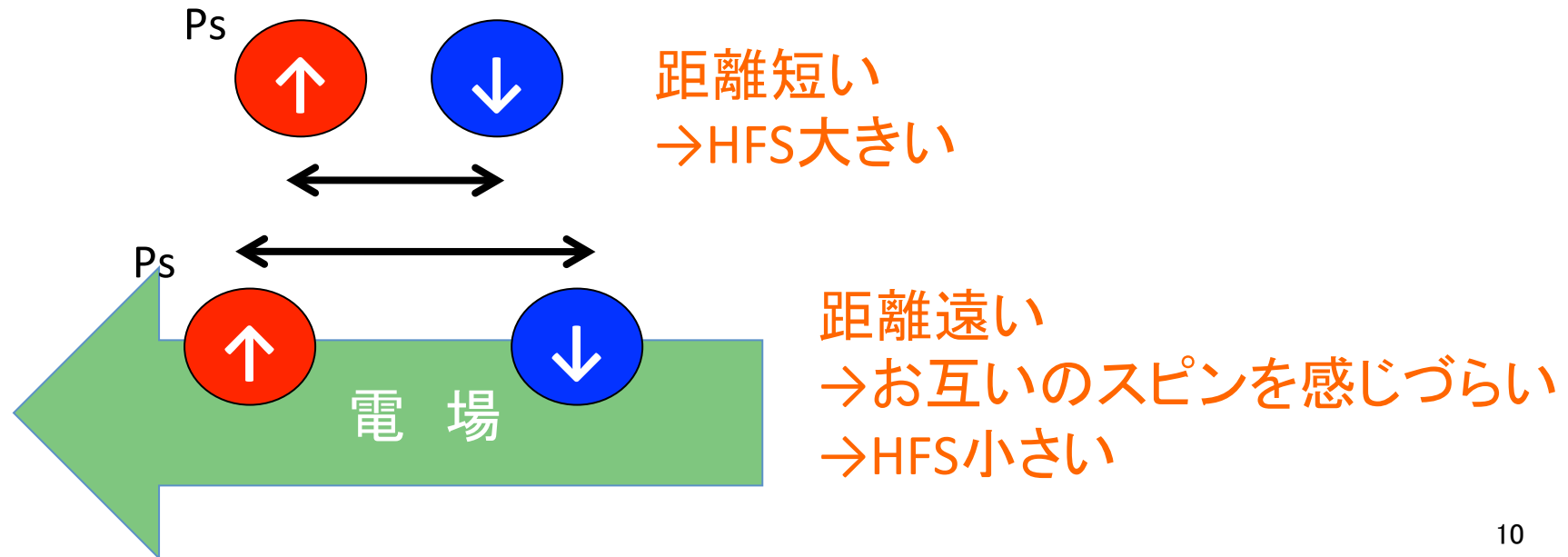


最終的に真空中に外挿し、  
ずれを検証するためには、  
物質の効果を正しく取り扱う  
必要がある。

# 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)



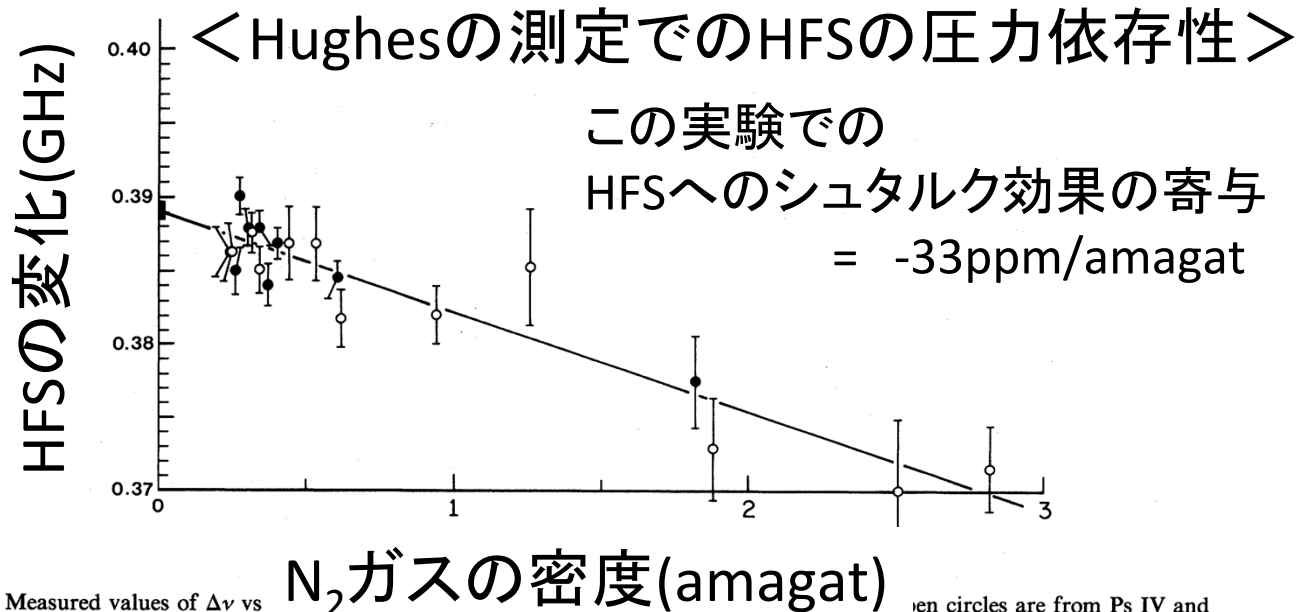
# 過去の実験での物質の効果の評価

- 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



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  $v(t)$ )

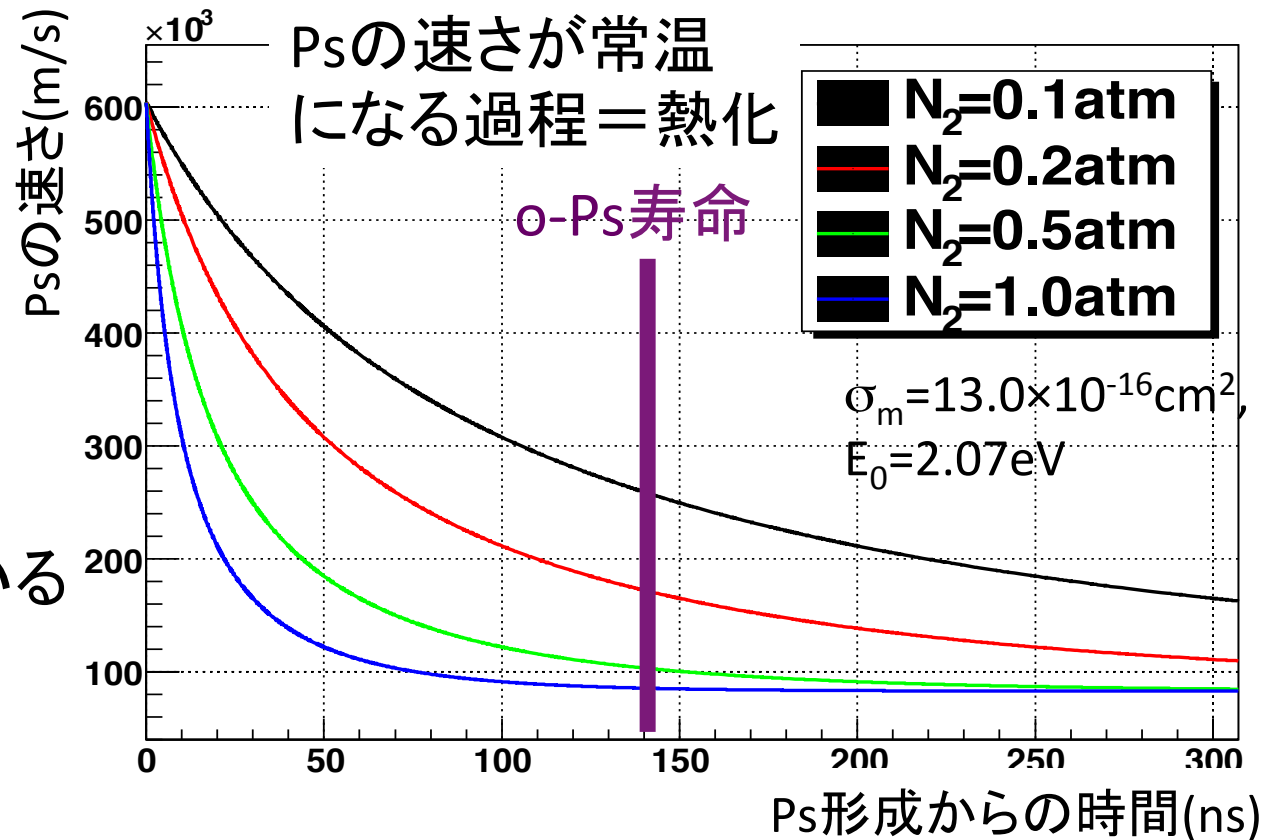
過去の実験では一定という扱い

< 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、補正する。

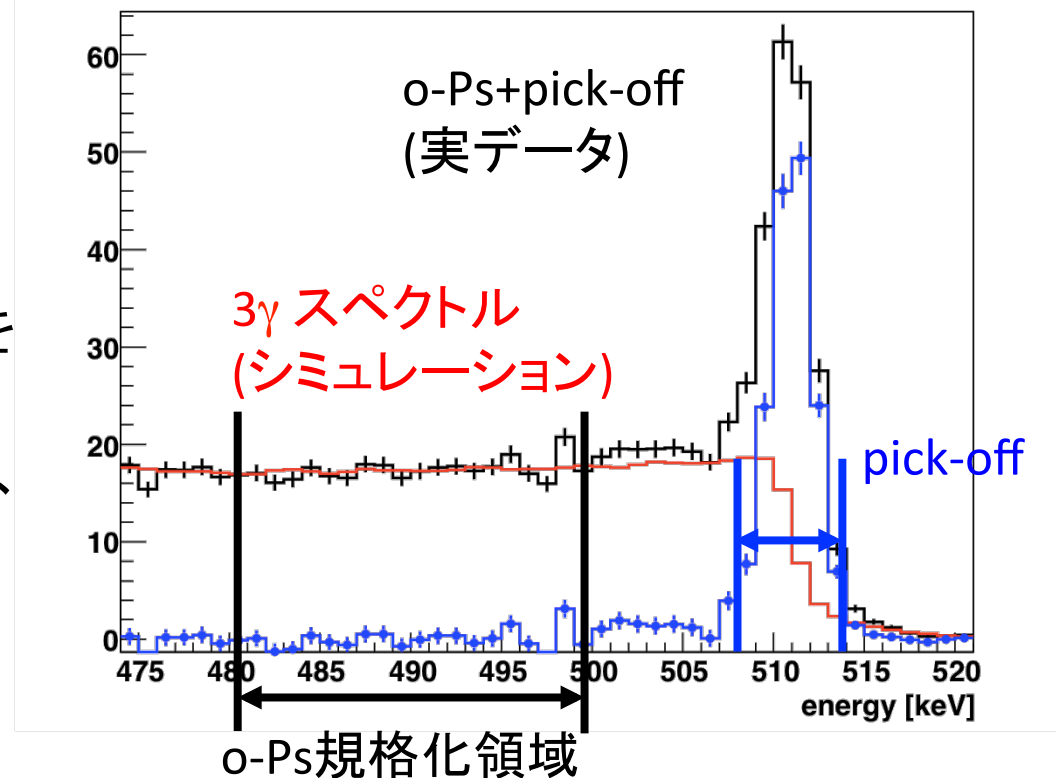


# どのようにして熱化を測定するか？

- 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)

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

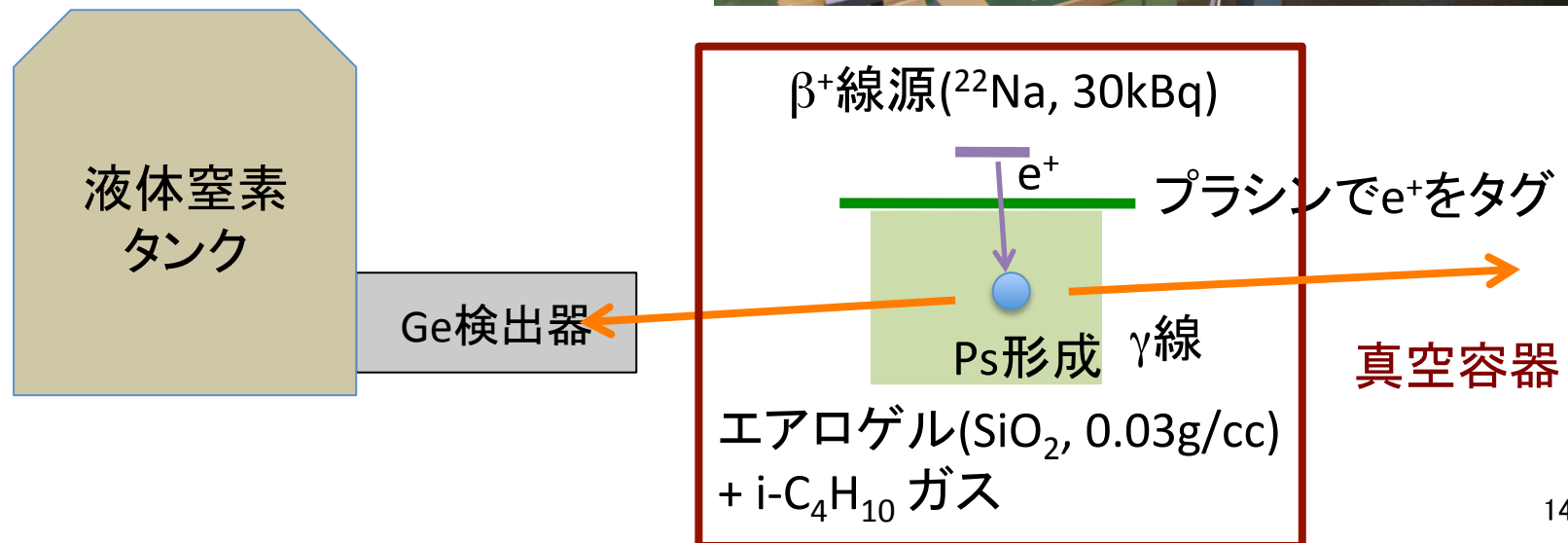
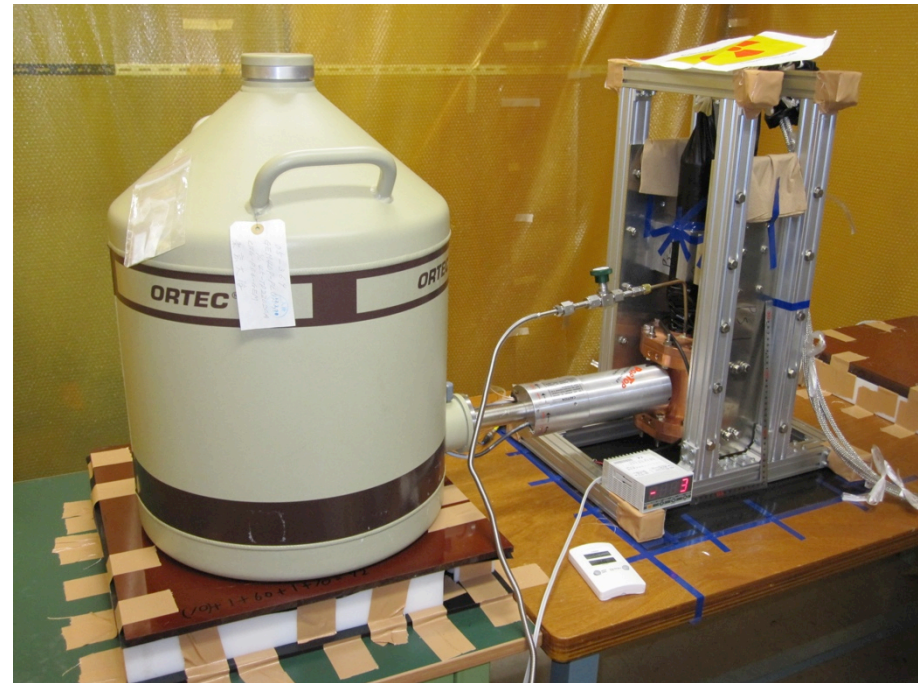
エネルギー分解能の高い Ge 検出器を用いて、 $2\gamma/3\gamma$  個数比をエネルギースペクトルから求める。それを時間の関数として見ることで、熱化パラメータを決定する。  
o-Ps, Pick-off量の efficiency、なだれ込みの量はシミュレーションで補正。





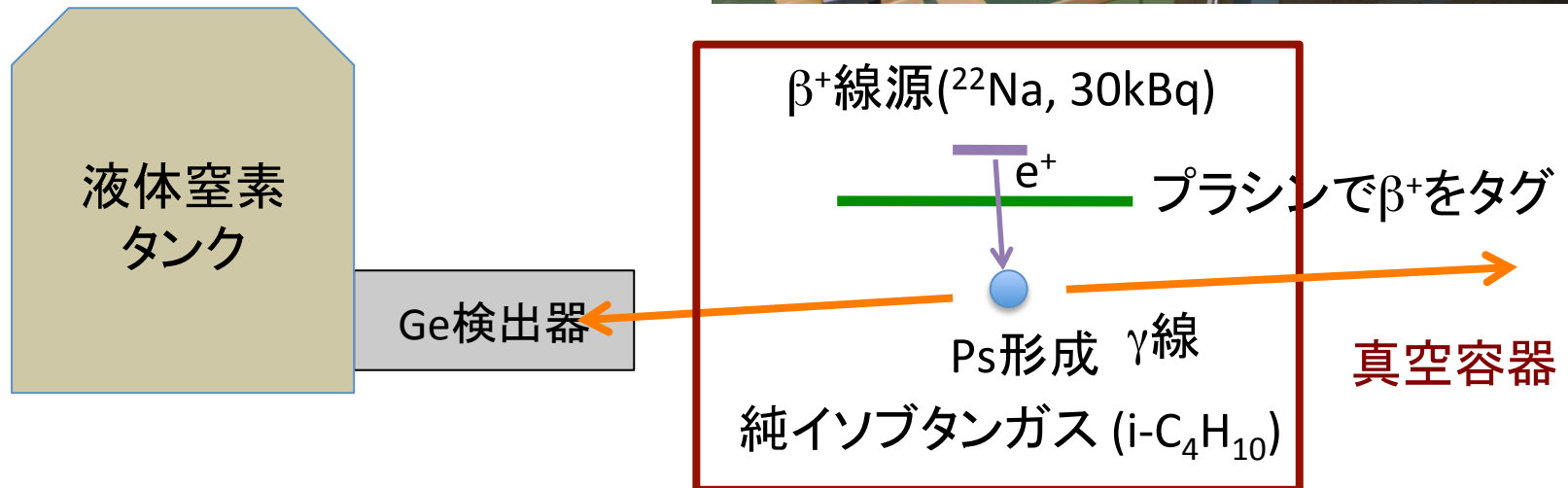
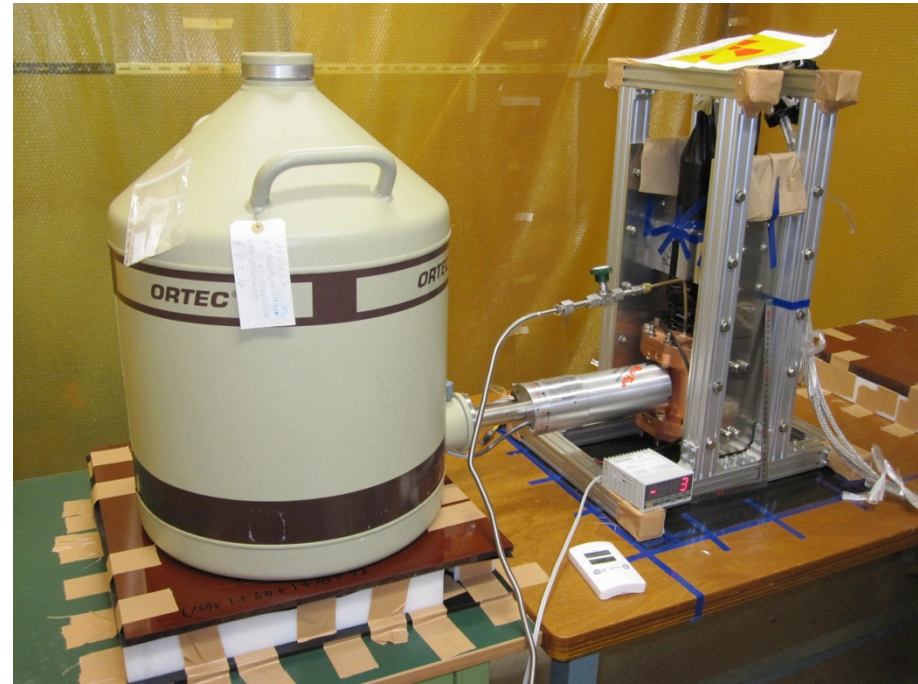
# 熱化 (エアロゲル+ガス) セットアップ

- タイミング: プラシンのスタート、Geでストップ
- シリカエアロゲルで $e^+$ 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



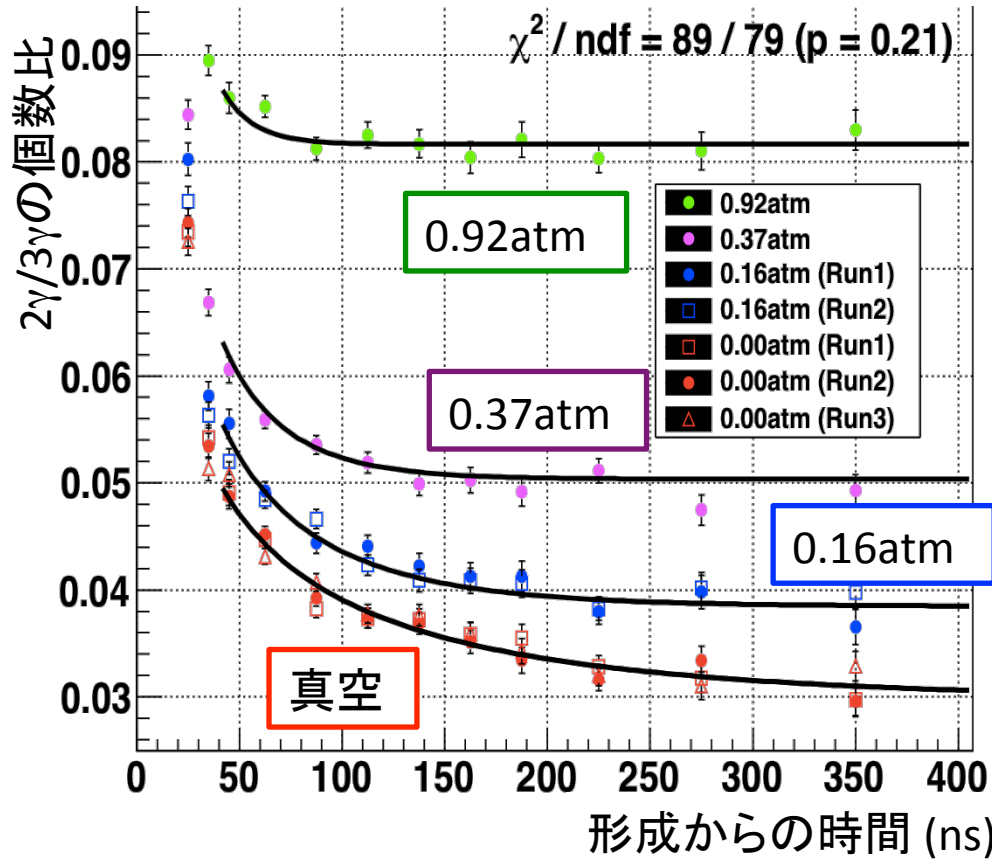
# 熱化 (ガスのみ) セットアップ (全体の様子)

- 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

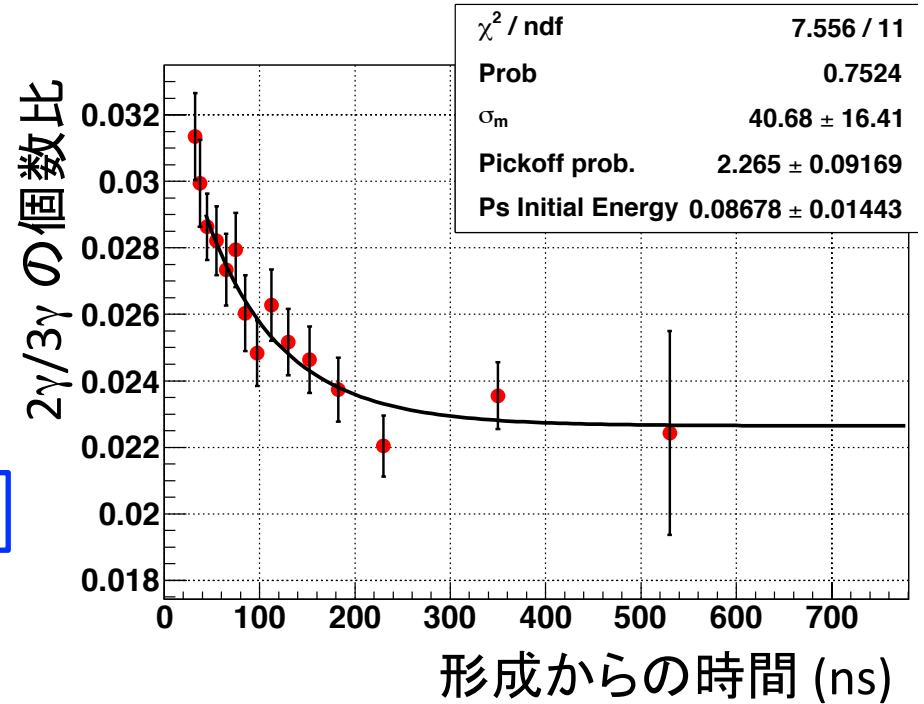


# 2γ/3γ 比のフィット結果

ガス+エアロゲル 0.03 g/cc での結果



ガス 30 kPa のみでの結果



40~800 ns をフィット

$\sigma_m$ : 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

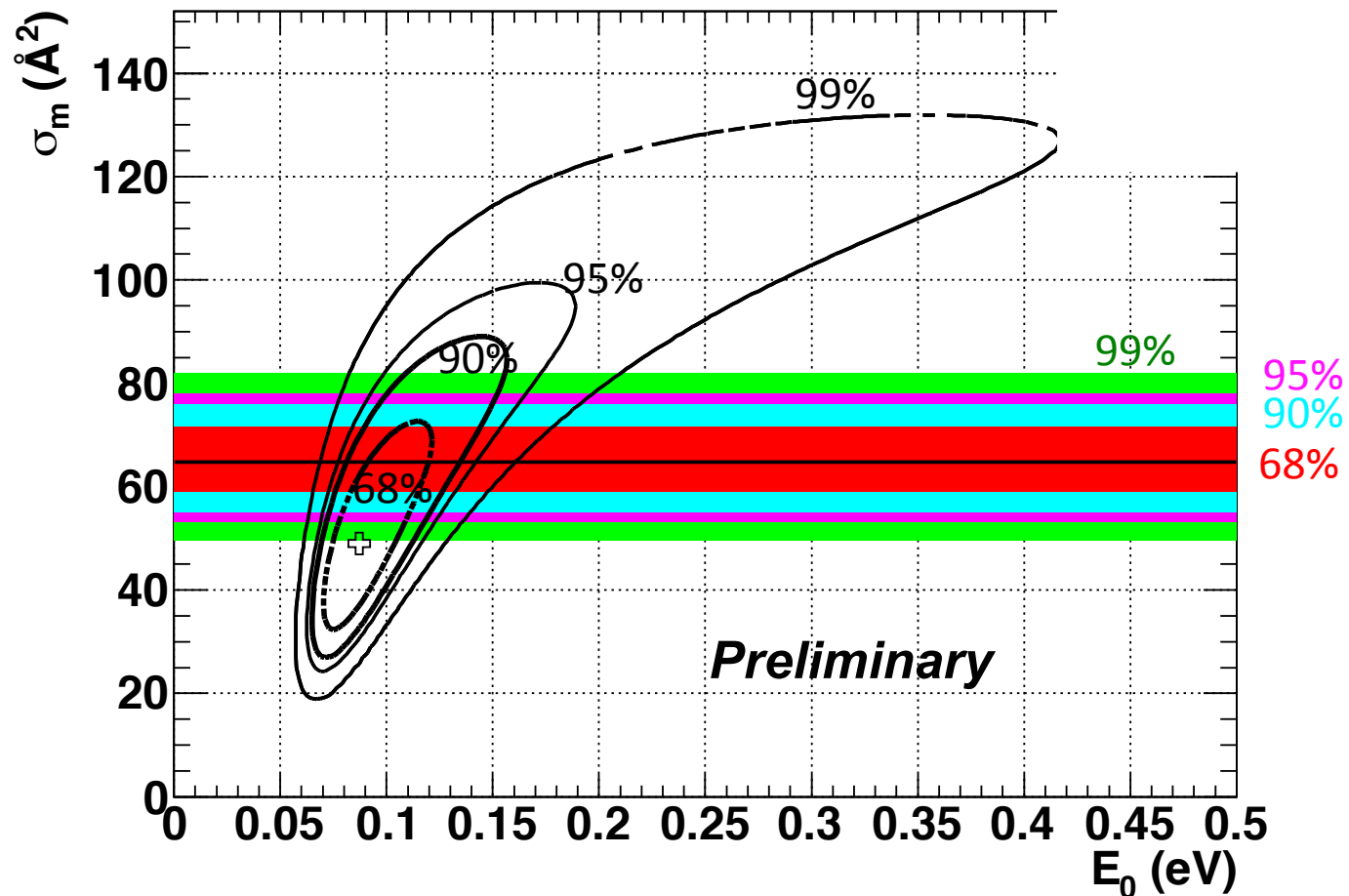
$n$ : イソブタンの数密度

$M$ : イソブタンの質量

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

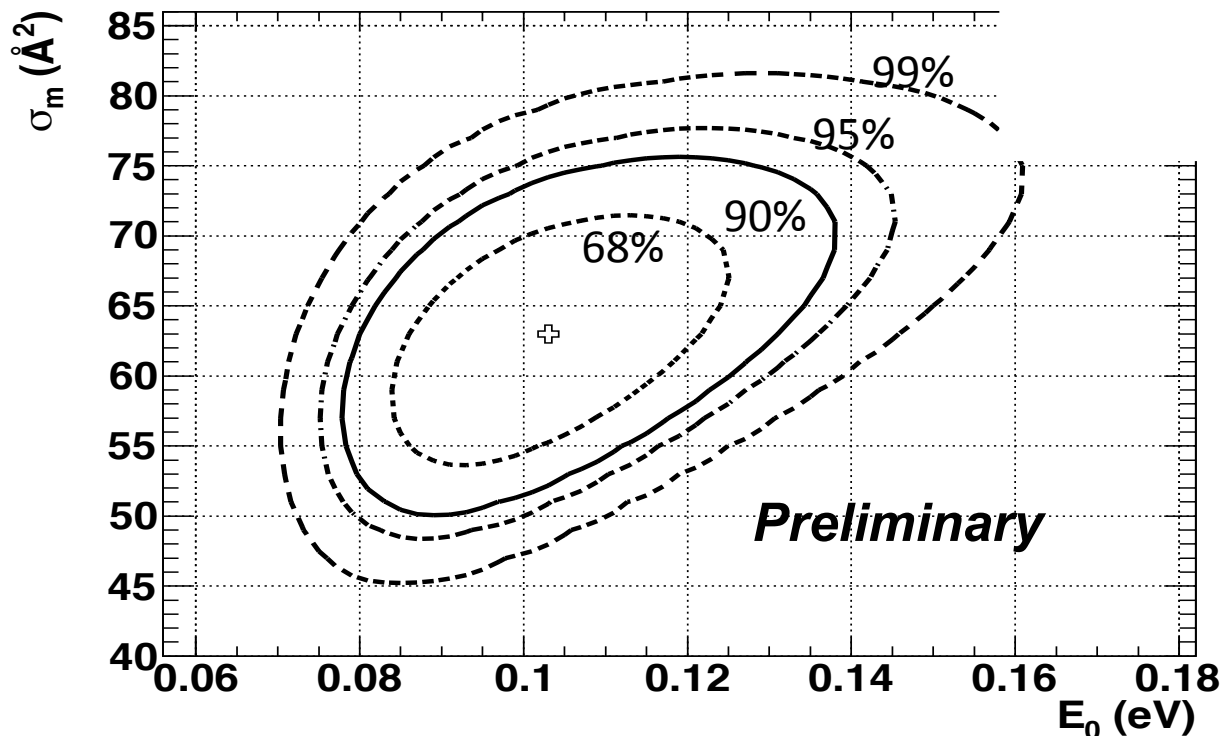
# エアロゲル+ガスとガスのみとの比較

- エアロゲル+ガスを色帯 ( $E_0$ は不定)、ガスのみを線で示した。
- エアロゲル+ガスとガスのみとの結果はコンシステント。



# 熱化測定の結果

- エアロゲル+ガスの結果と、ガスのみをcombine。
- $\sigma_m = 63^{+8}_{-9} \text{ \AA}^2$ ,  $E_0 = 0.103^{+0.022}_{-0.019} \text{ eV}$  (68% C.L., 統計誤差のみ) の結果 (Preliminary) を得た。
- この結果を HFS の補正、不定性の評価に用いる (現在、鋭意解析中)





# 現状と今後の展望

- 物質の効果：

- 熱化の効果を補正するため、別の実験で熱化関数を精密に測定した。
- 熱化の効果を入れた、真空への外挿の精査中。

- 系統誤差：

磁場、RF系の誤差が主で、4 ppm 程度。  
現在精査中。

- 統計誤差：

- 5 ppm 以下を達成済み。
- 現在、低圧での統計を増やしている。

**熱化も含めて 5 ppm 程度での最終結果が、  
近いうちに得られる見込み**

# 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、新しい実験を行っている。

- 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。
- 物質の効果を正しく取り扱うため、 $P_s$  熱化関数の測定を行い、イソブタンガス中での熱化パラメータとして  $\sigma_m = 63 +8 -9 \text{ \AA}^2$ ,  $E_0 = 0.103 +0.022 -0.019 \text{ eV}$  (68% C.L.) (Preliminary, 統計誤差のみ) の結果を得た。
- 5 ppm 程度の結果となる見込みであり、鋭意精査中。