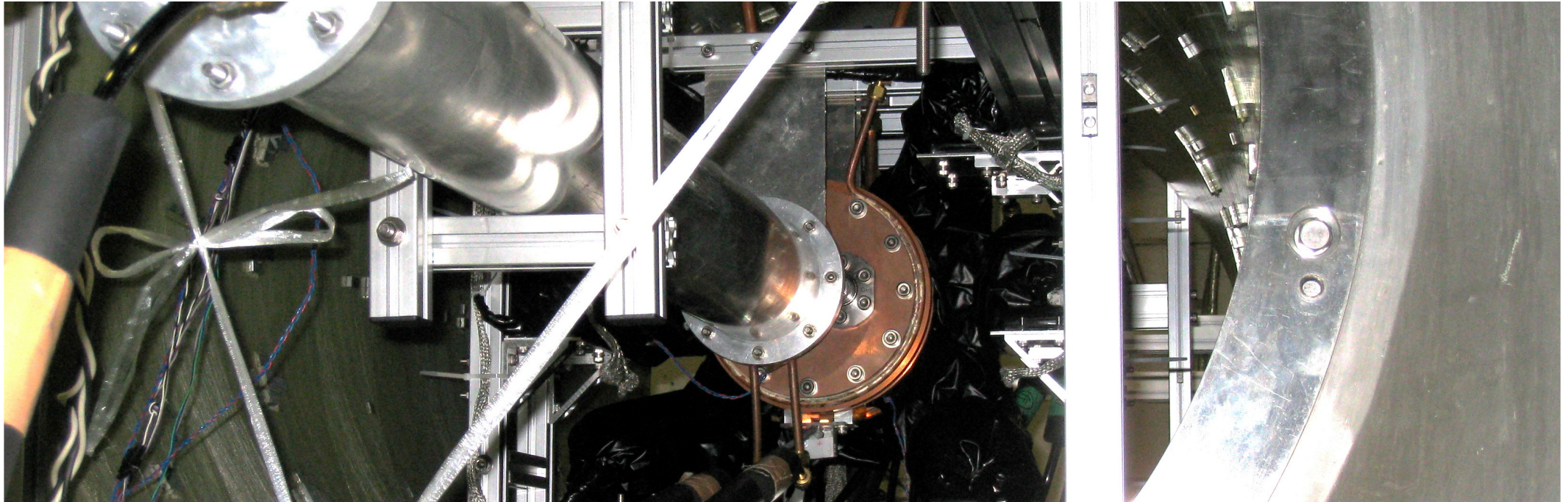


ポジトロニウム超微細構造の 精密測定



東大理, 東大素セ^A, 東大院総合文化^B, KEK^C

石田明, 末原大幹^A, 難波俊雄^A, 浅井祥仁, 小林富雄^A,
齋藤晴雄^B, 吉田光宏^C, 田中賢一^C, 山本明^C

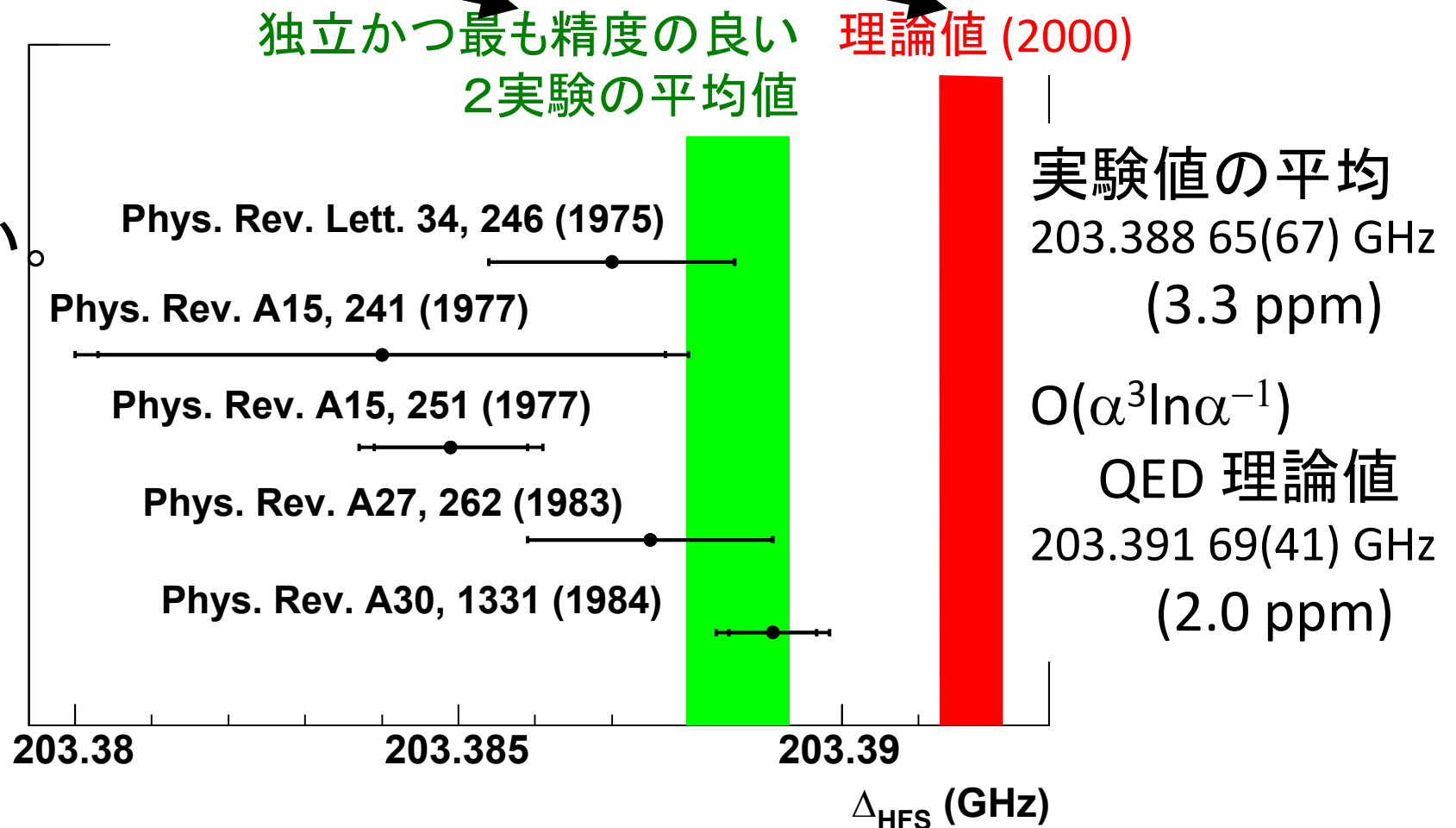
平成25年3月27日 日本物理学会 第68回年次大会
於広島大学東広島キャンパス

目次

- インTROD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 本測定の暫定結果

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 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

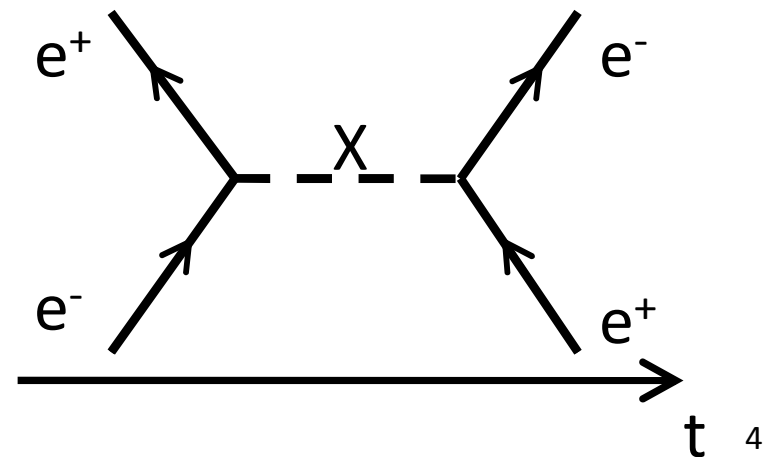
1. 磁場の非一様性。大きなPs生成領域内で、ppmレベルの一様磁場を供給するのは極めて困難。
2. 物質の効果の過小評価。熱化していない o-Ps は、特に低物質密度で大きな影響を及ぼす。

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

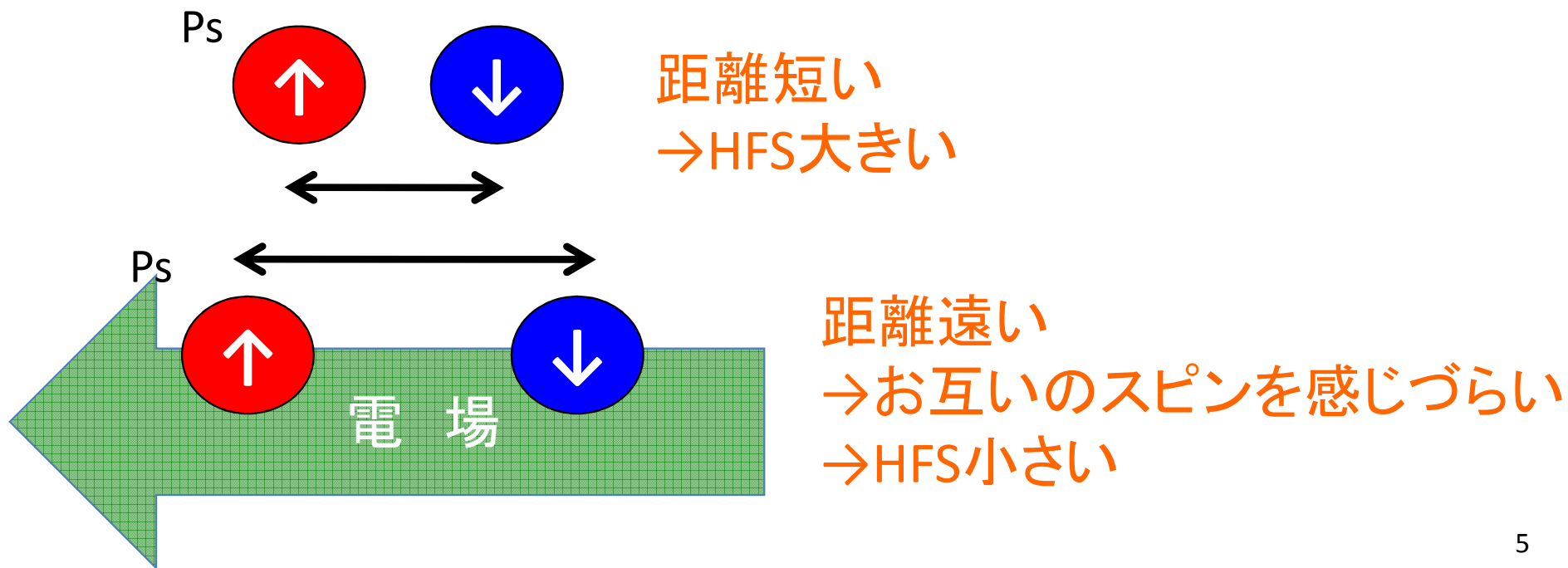
相互作用の弱い未知の粒子の介在



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)



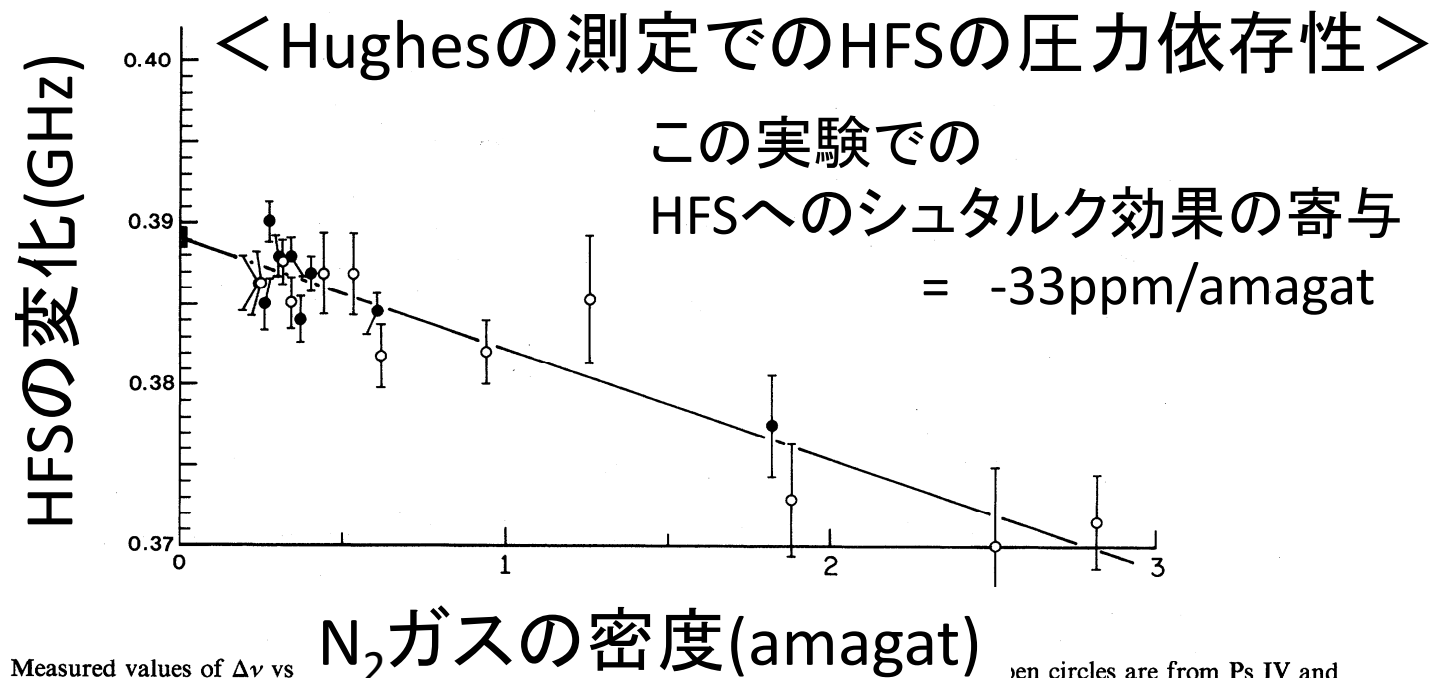
過去の実験での物質の効果の評価

- 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 ガスの密度(amagat). The 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 $v(t)$)

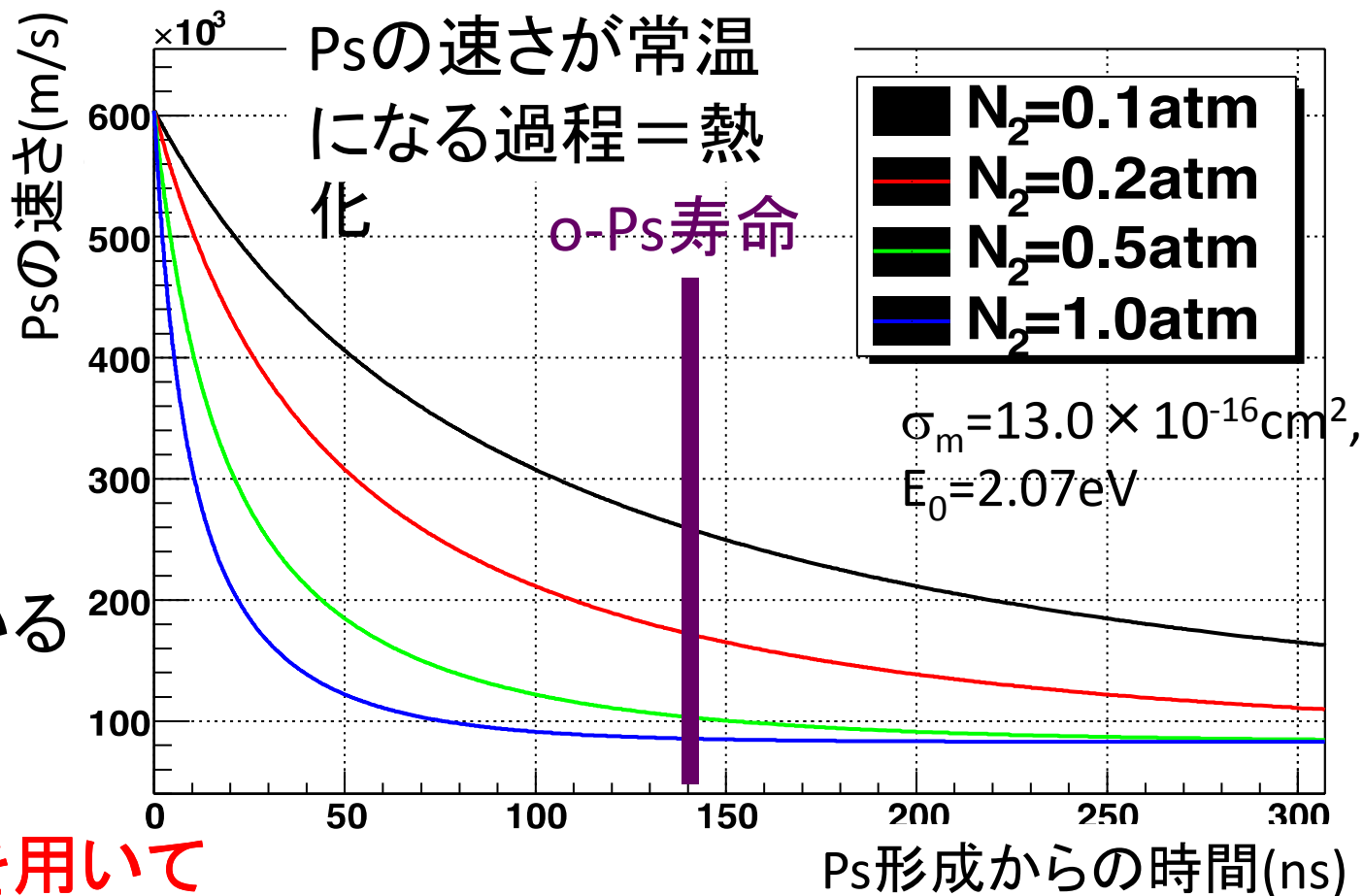
過去の実験では一定という扱い

< 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) >

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

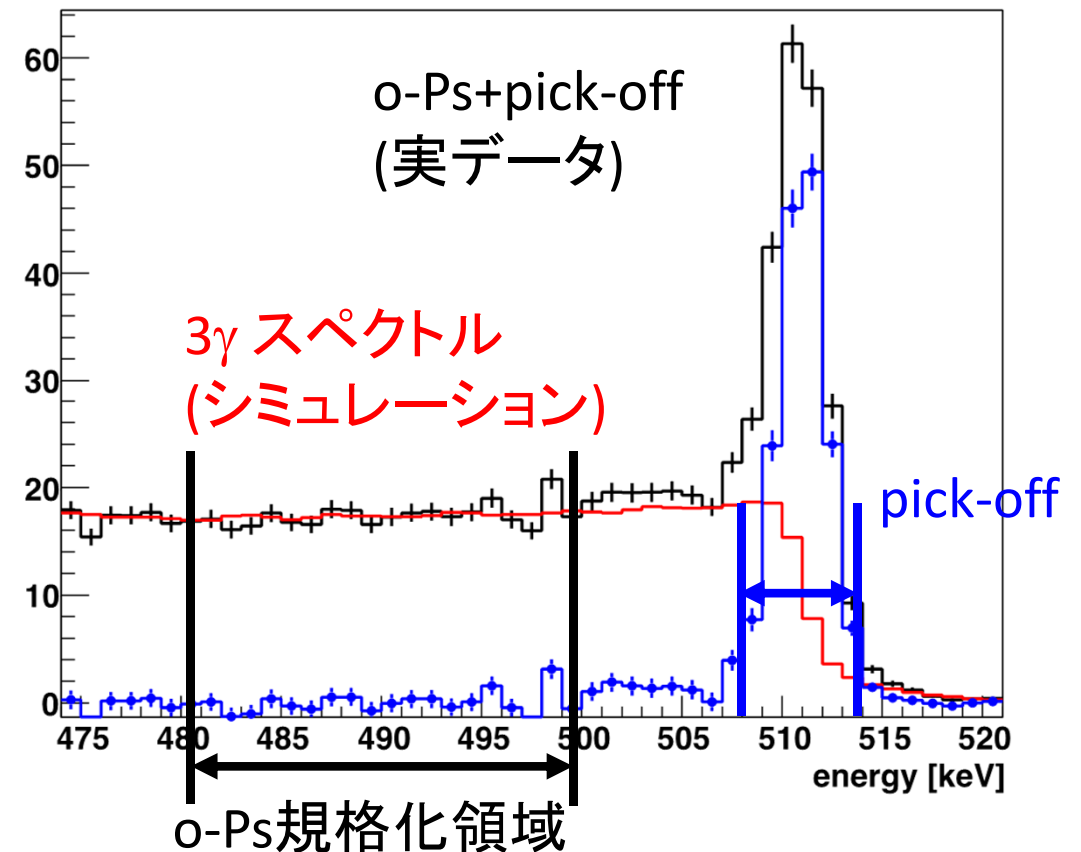
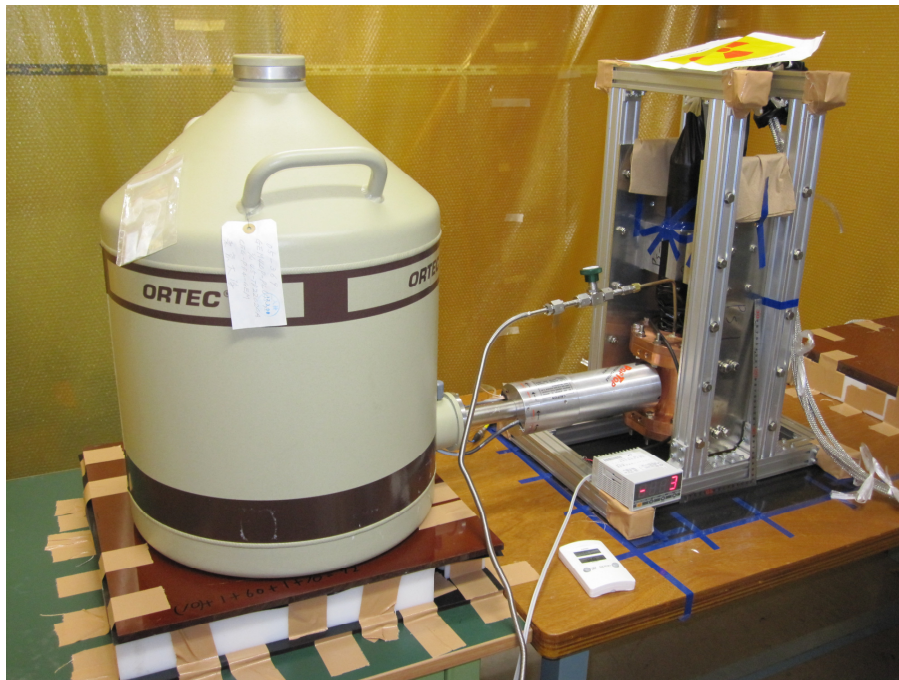
→ Ps 熱化を独自に測定し、その結果を用いて超微細構造を求める。



どのようにして熱化を測定するか？

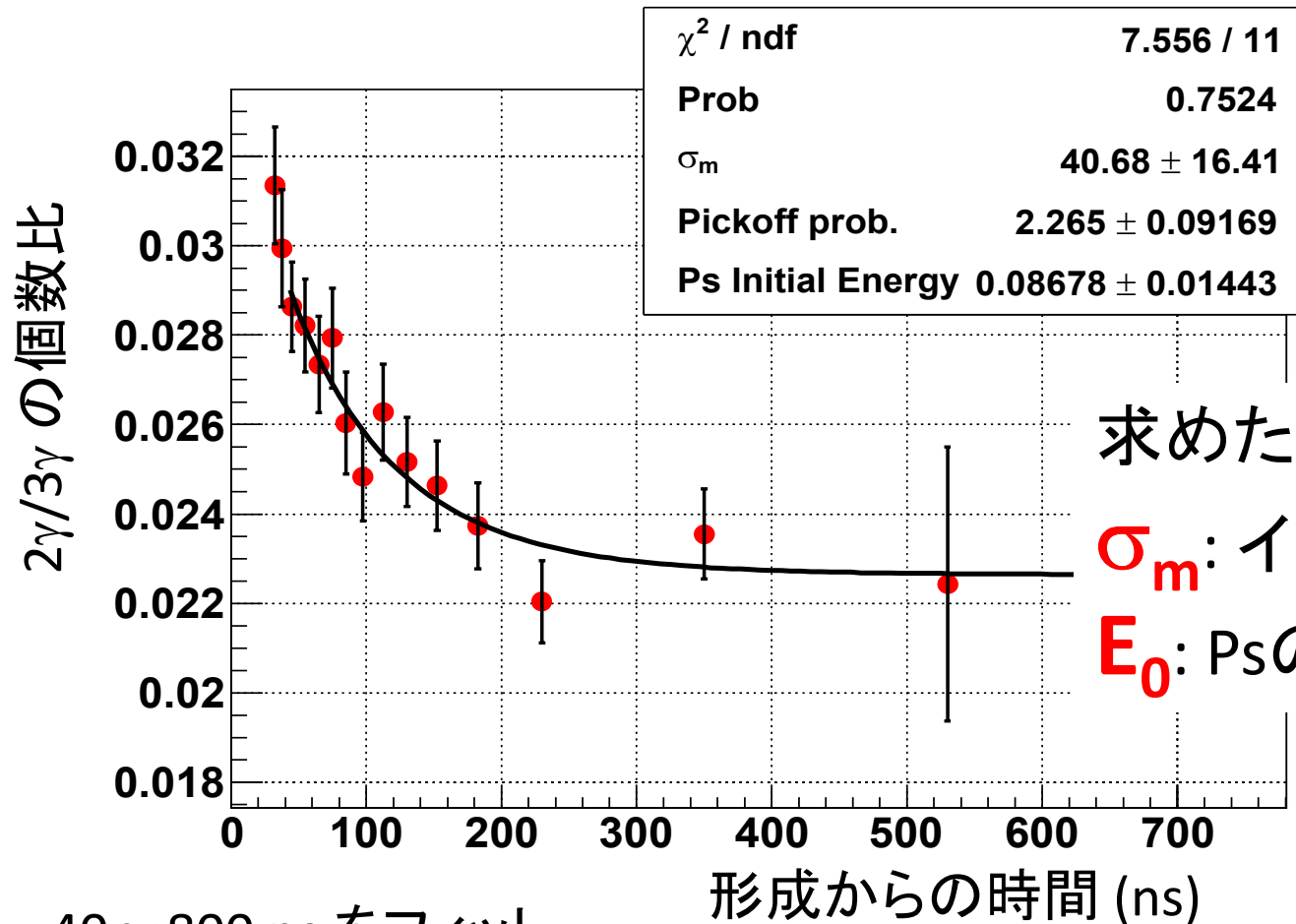
- o-Psのpick-offを用いて測定
- pick-offの量(t)
= pick-offの断面積 × 物質の密度 × o-Psの量(t) × v(t)

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



2 γ /3 γ 比のフィット結果

ガス 30 kPa のみでの結果



求めたいパラメータ:

σ_m : イソブタンとPsの断面積

E_0 : Psの初期運動エネルギー

40~800 ns をフィット

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

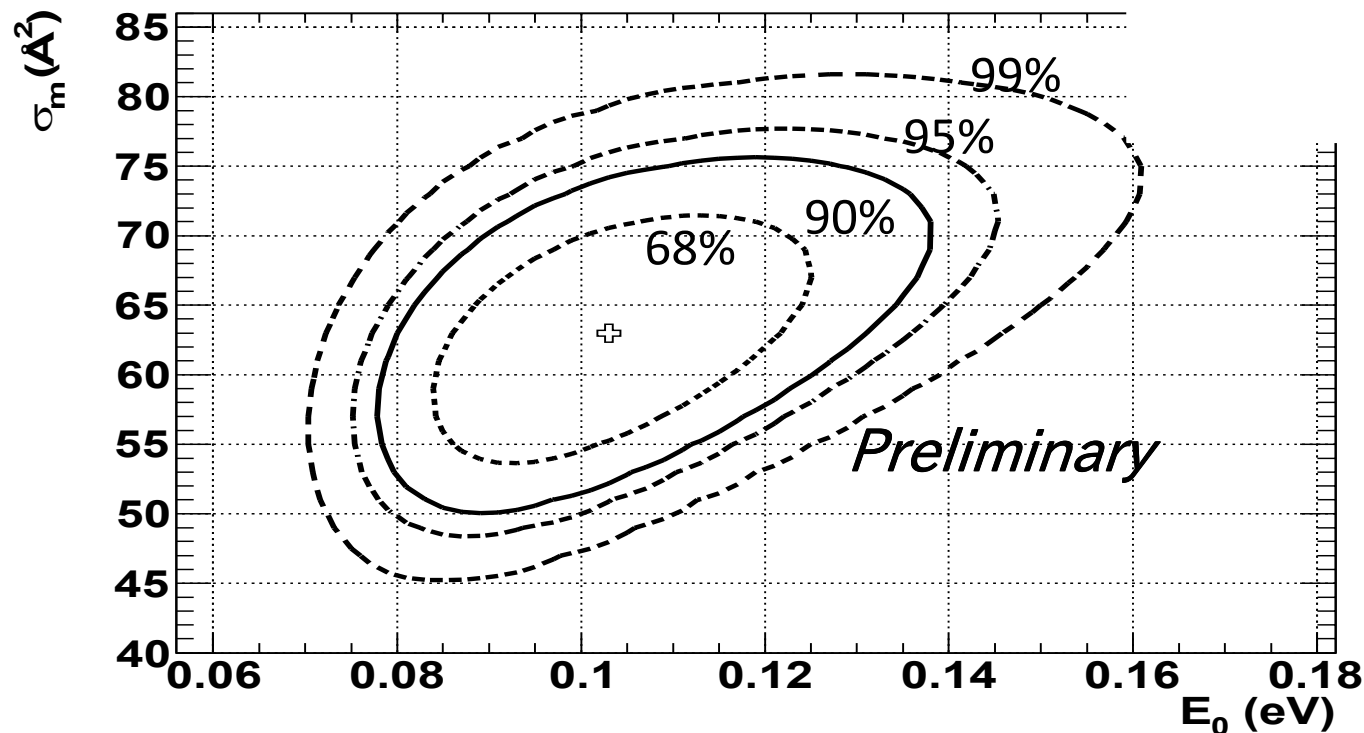
式は J. Phys. B 31 (1998) 329 Y. Nagashima, et al.

熱化測定の結果

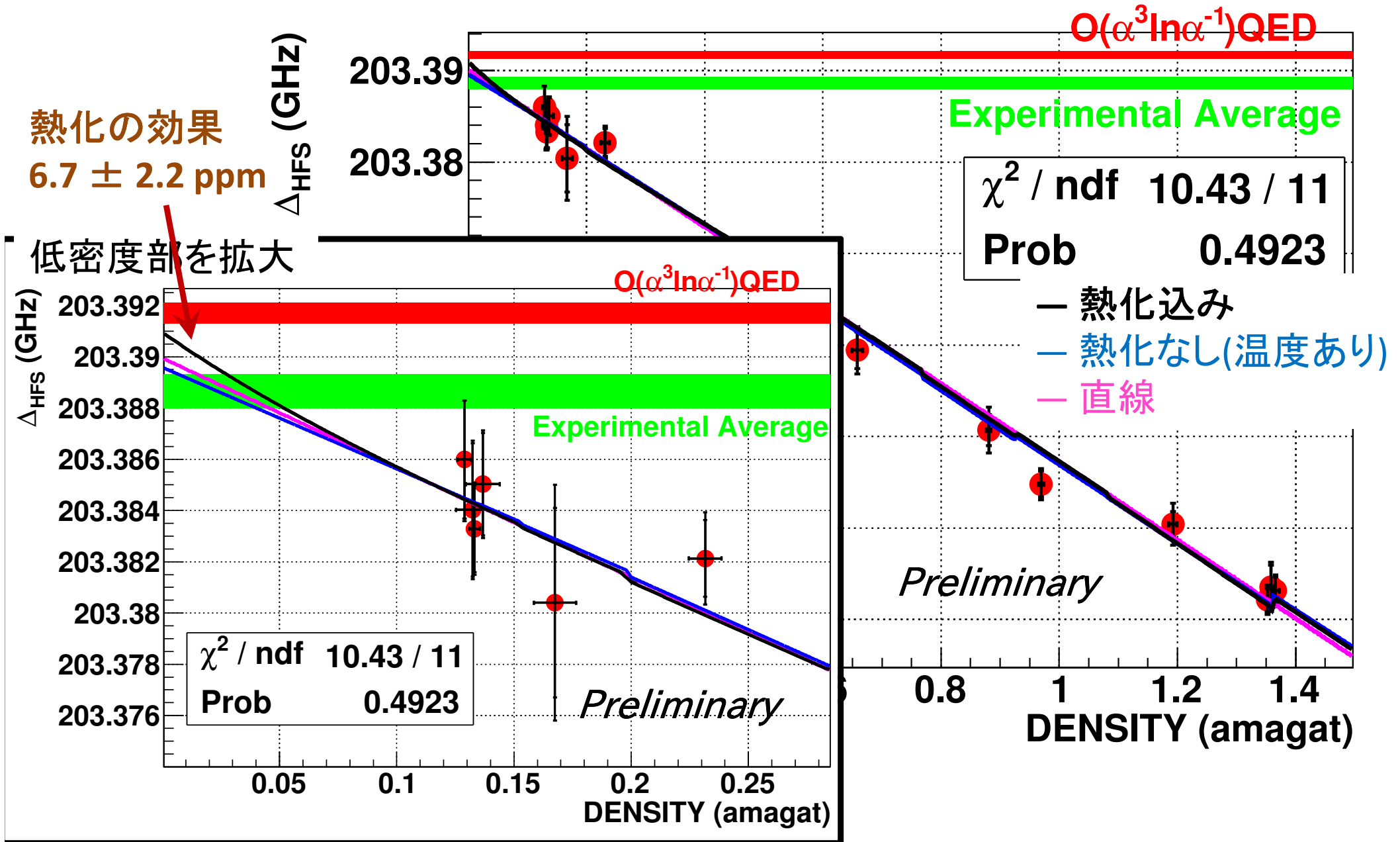
- $\sigma_m = 63^{+8}_{-9} \text{ \AA}^2$, $E_0 = 0.103^{+0.022}_{-0.019} \text{ eV}$ (68% C.L., 統計誤差のみ) の結果 (Preliminary) を得た。
- この結果を HFS の補正、不定性の評価に用いる。
- 角度相関法 (ACAR) の $\sigma_m < 160 \text{ \AA}^2$ とコンシステントだが、ドップラー広がり法 (DBS) の $\sigma_m = 146 \pm 11 \text{ \AA}^2$, $E_0 = 3.1^{+1.0}_{-0.7} \text{ eV}$ とは異なる結果が得られた。

ACAR: Phys. Rev. A **52**, 258 (1995)

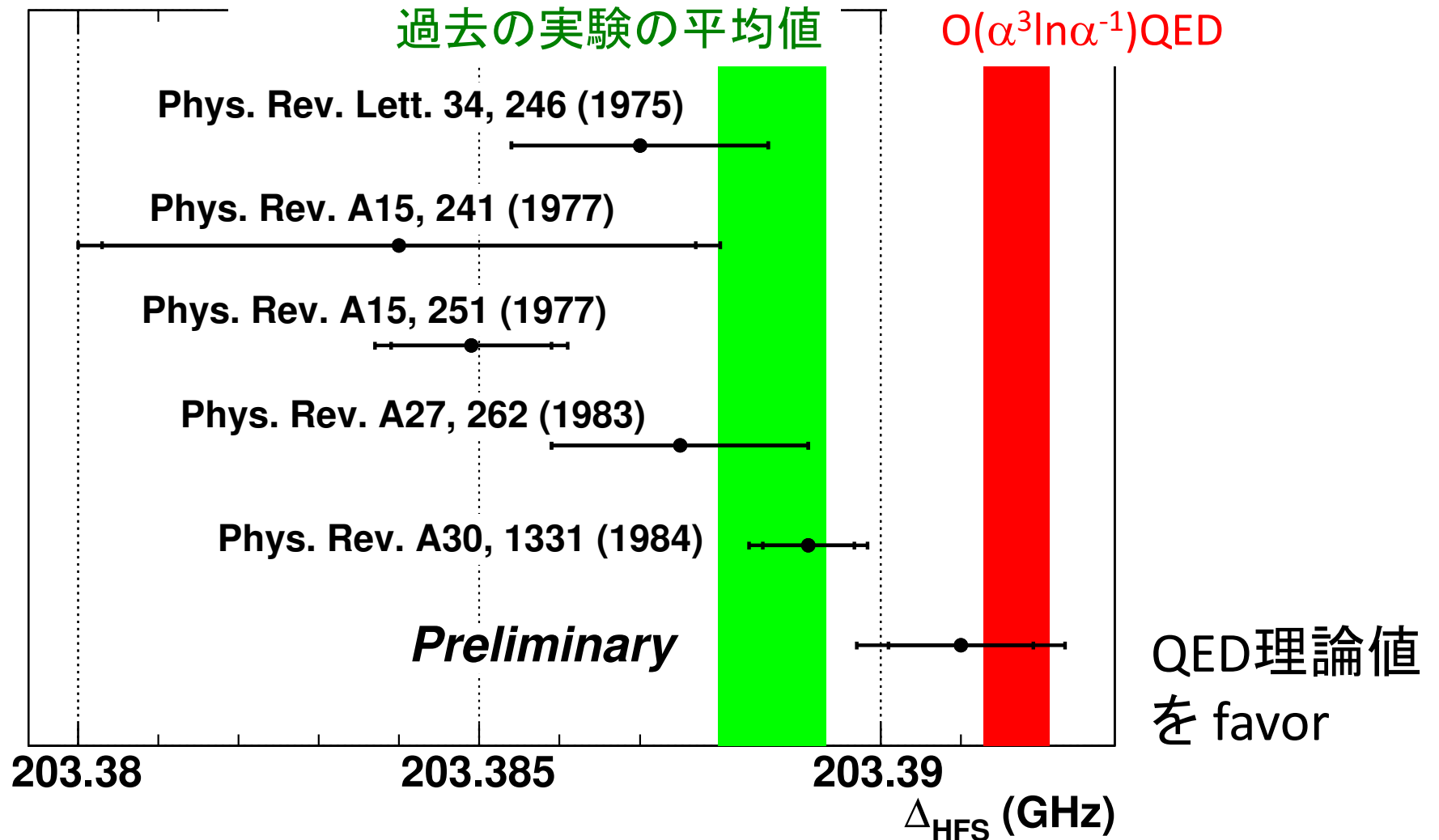
DBS: Phys. Rev. A **67**, 022504 (2003)



超微細構造のガス密度依存性



暫定結果



本測定で得られた、超微細構造の暫定結果

$$\Delta_{\text{HFS}} = 203.3910 \pm 0.0009 \text{ (stat., 4.7 ppm)} \\ \pm 0.0009 \text{ (sys., 4.6 ppm) GHz}$$

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
検出効率	MCを用いた評価	1.6
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
Quadrature sum		4.6

統計誤差 4.7 ppm と合わせて、
 $\Delta_{\text{HFS}} = 203.3910(13) \text{ GHz (6.6 ppm)}$.

まとめ

ポジトロニウム超微細構造は、実験と理論の間に 3.9σ 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。その結果、熱化による効果は、 6.7 ± 2.2 ppmと見積もられた。
- 6.6 ppmの精度で、QED理論値を favor する暫定結果が得られた。