

ポジトロニウム超微細構造に対するシュタルク効果の評価

東大理, 東大素セ^A

佐々木雄一, 石田明,

難波俊雄^A, 浅井祥仁, 小林富雄^A

日本物理学会 第66回秋季大会

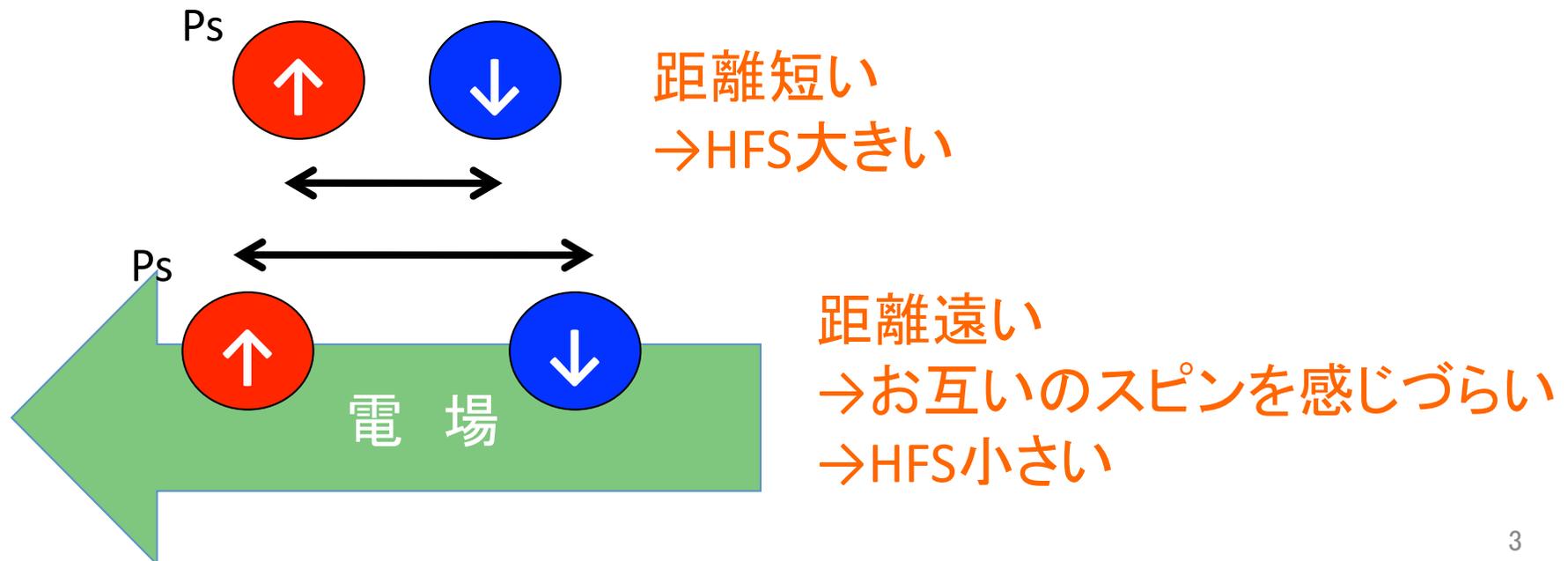
2010/10/14 九州工業大学

測定の目的

ポジトロニウムHFSに周囲の物質が与える影響

- Ps-HFSの第一項
= 電子陽電子のスピン-スピン相互作用
→ 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)



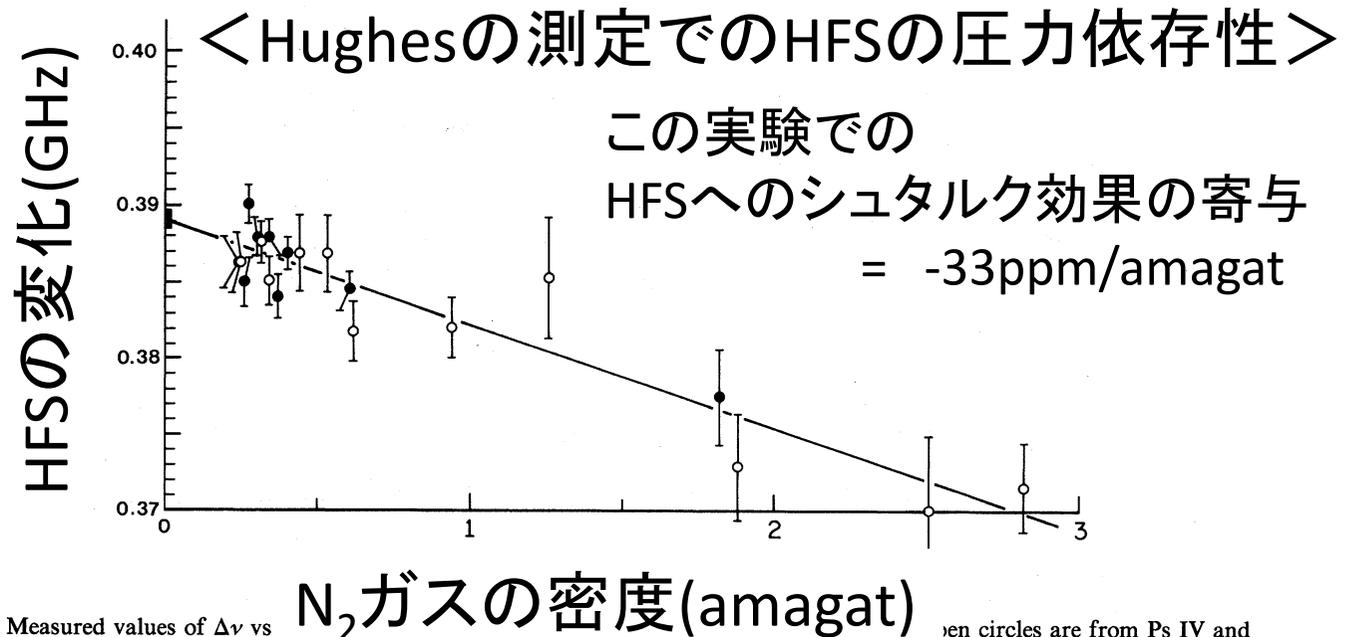
過去の実験での物質の効果の評価

- 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).

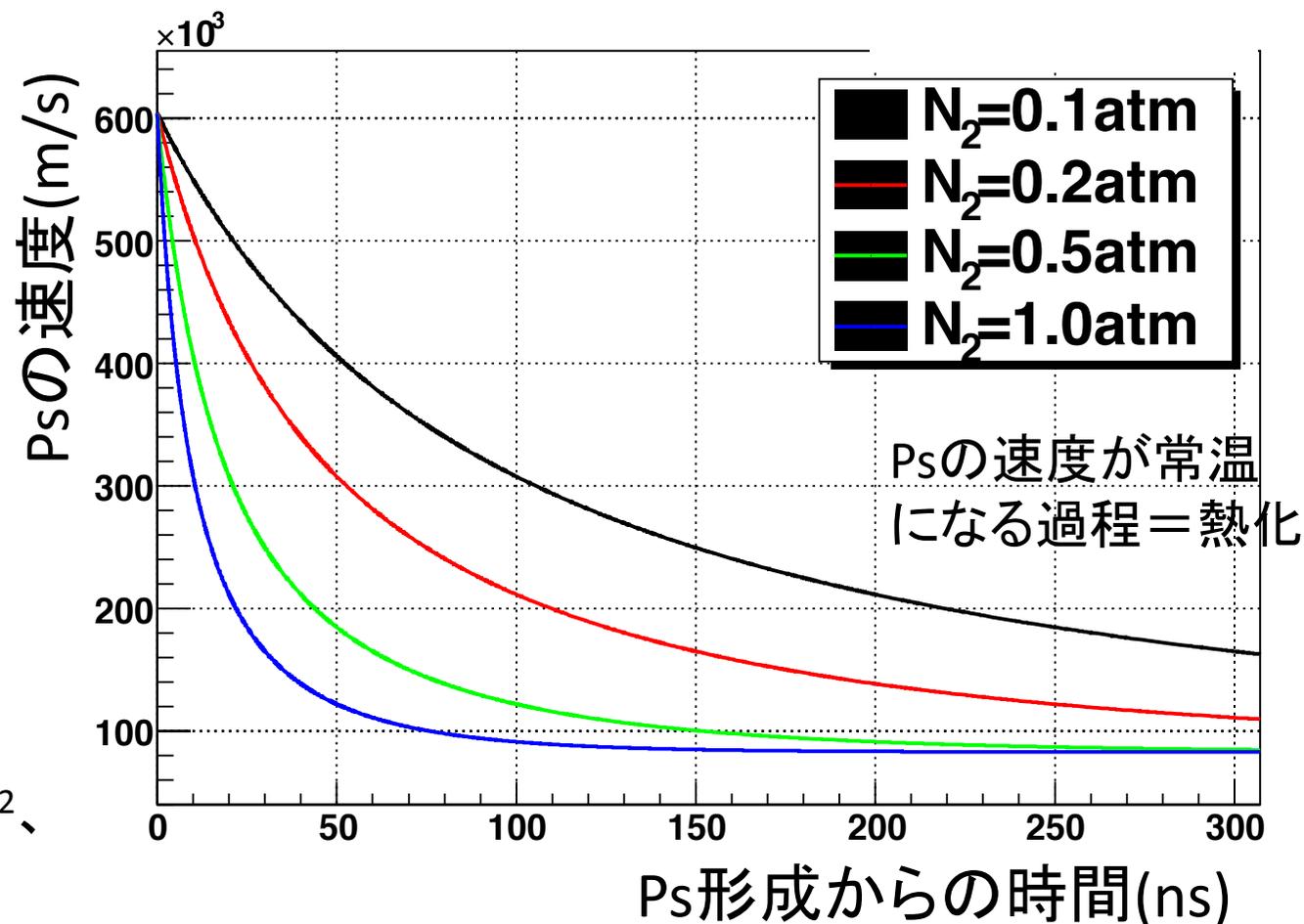
HFSに効くシュタルク効果の大きさ

\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)>

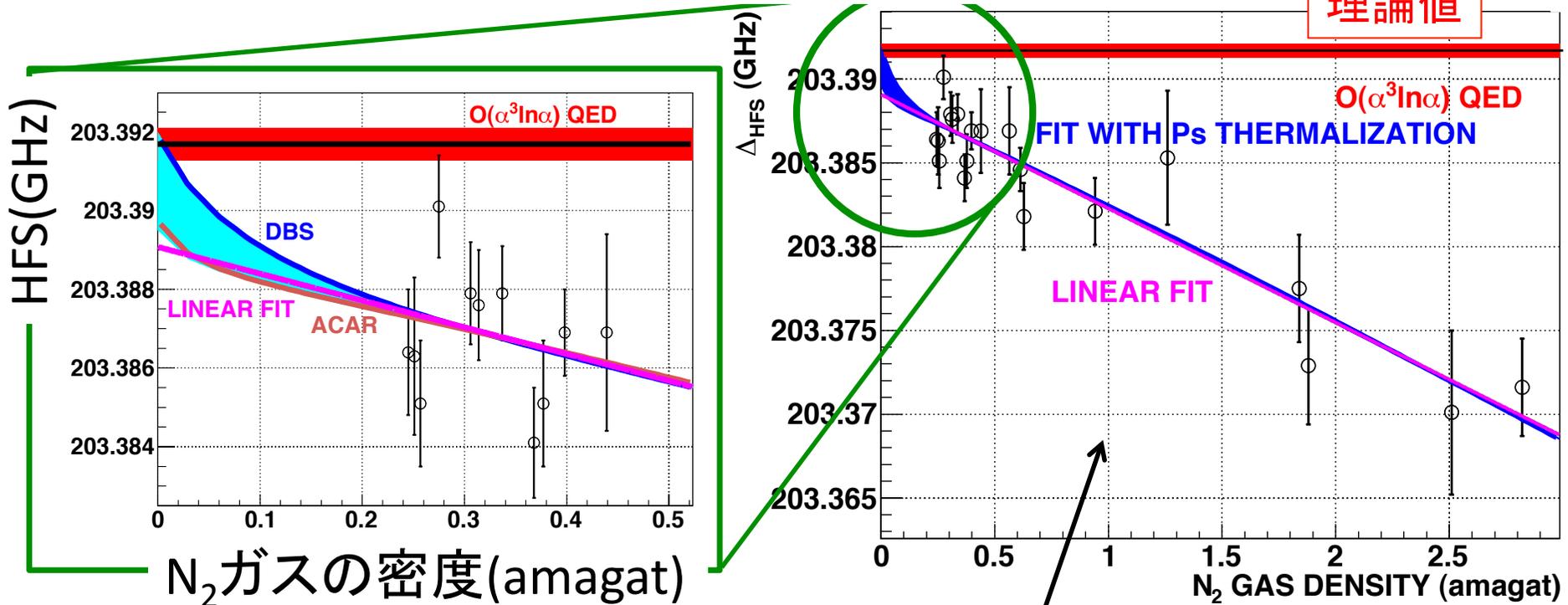


パラメーターは、
 $\sigma_m = 13.0 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ 、
 $E_0 = 2.07 \text{eV}$ を使用

圧力+熱化を含めた物質の効果がHFSへ及ぼす影響

<圧力と熱化によるHFS補正のシミュレーション>

理論値



N₂でO(10ppm)の補正:

- 実験値と理論値の差を埋める向き
- 目標精度に対して、無視できない大きな補正
- 熱化測定手法による差が大きい
 - 系統誤差の要因
 - 独自に測定を行う

(σ_m, E_0) =

DBS: $(13.0 \times 10^{-16} \text{cm}^2, 2.07 \text{eV})$

ACAR: $(37 \times 10^{-16} \text{cm}^2, 2.07 \text{eV})$

RF周波数=2.32GHz、

RF振動磁場=10Gauss、静磁場=0.78Tesla

実験値はHughes et al. (1984)、

理論値はKniehl et al. (2000)

イソブタン中での熱化を 測定する実験

イソブタンを用いる長所

- 我々の実験では、 N_2 ではなくイソブタンを使用する。

長所1: ポジトロニウムの生成率が N_2 の2倍程度良い。
(N_2 で生成率20%、イソブタンでは>40%)

長所2: 陽電子がガス中で静止しやすい。

長所3:

低速陽電子を速やかに対消滅させる働きが大きい。

運動エネルギーが小さすぎてPsを作れない陽電子

N_2 中で寿命170ns

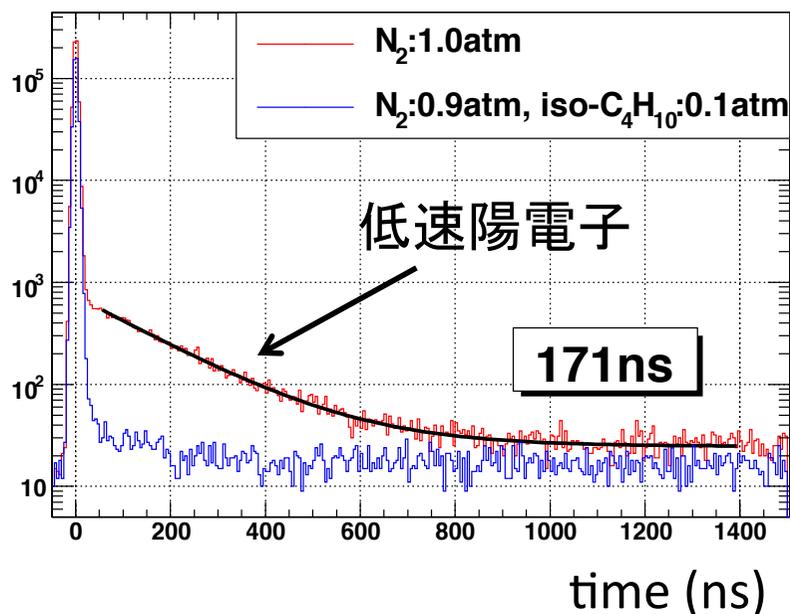
2 γ 崩壊なのでBGとなる

右図:

511 \pm 3keVでカットをした、
Ps崩壊タイミングスペクトラム

赤: イソブタンなし(N_2 のみ)

青: イソブタンあり

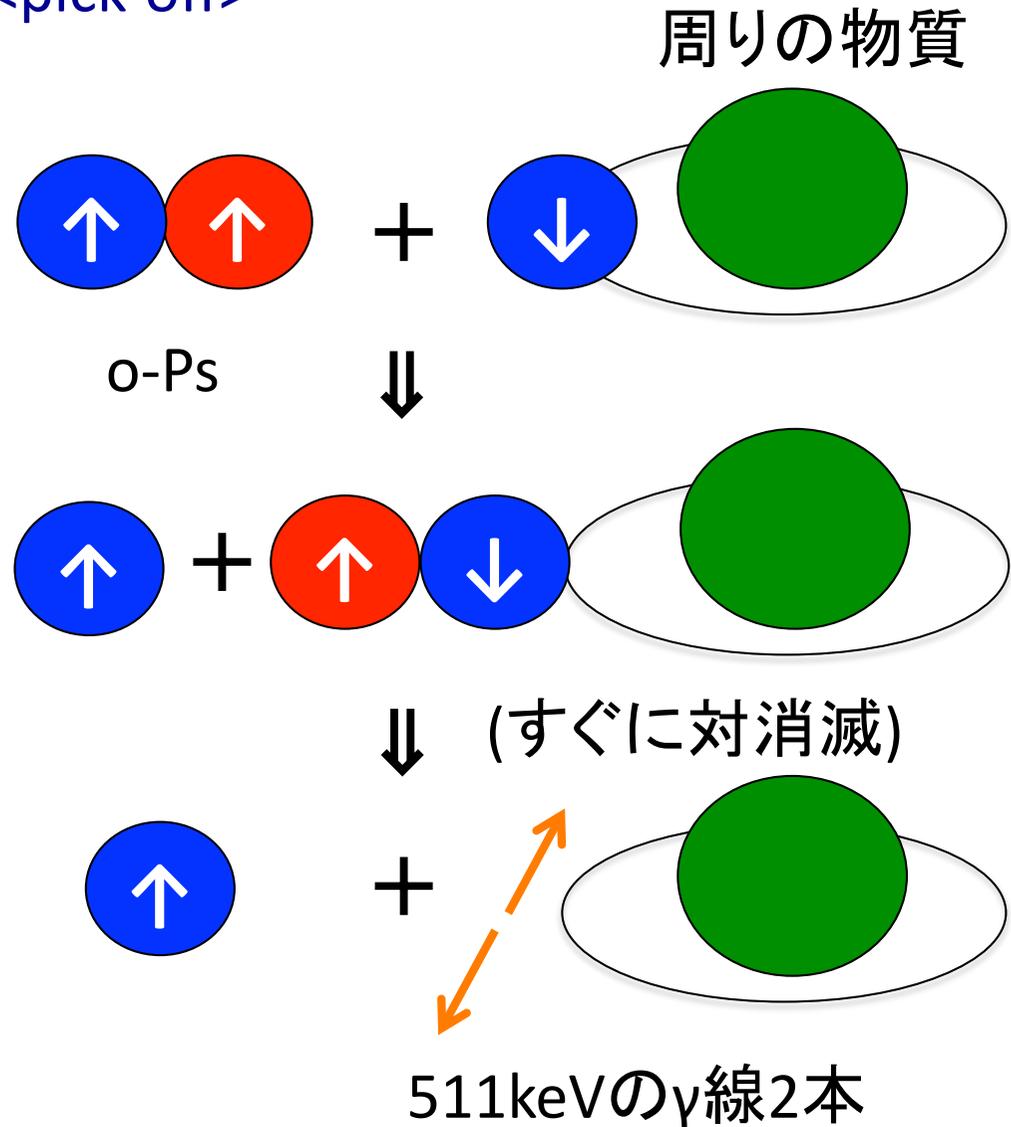


どのようにしてポジトロニウムの $v(t)$ を測定するか？

- 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)
× $v(t)$

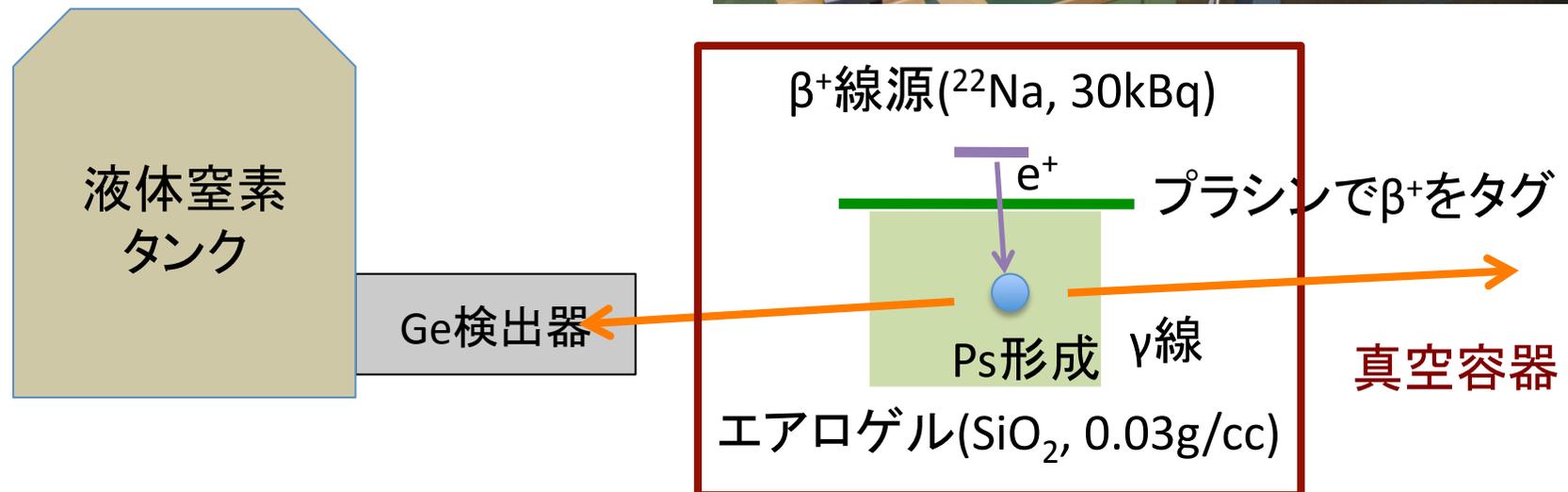
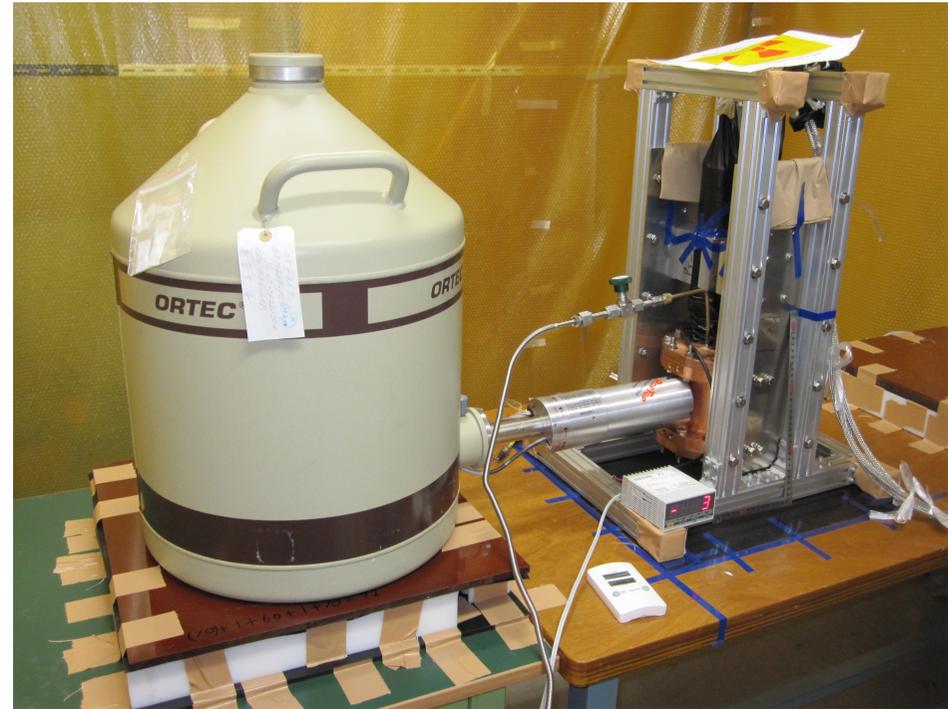
$$v(t) = \frac{\text{pick-offの量}(2\gamma\text{崩壊})}{\text{o-Psの量}(3\gamma\text{崩壊})}$$

<pick-off>



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
- 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

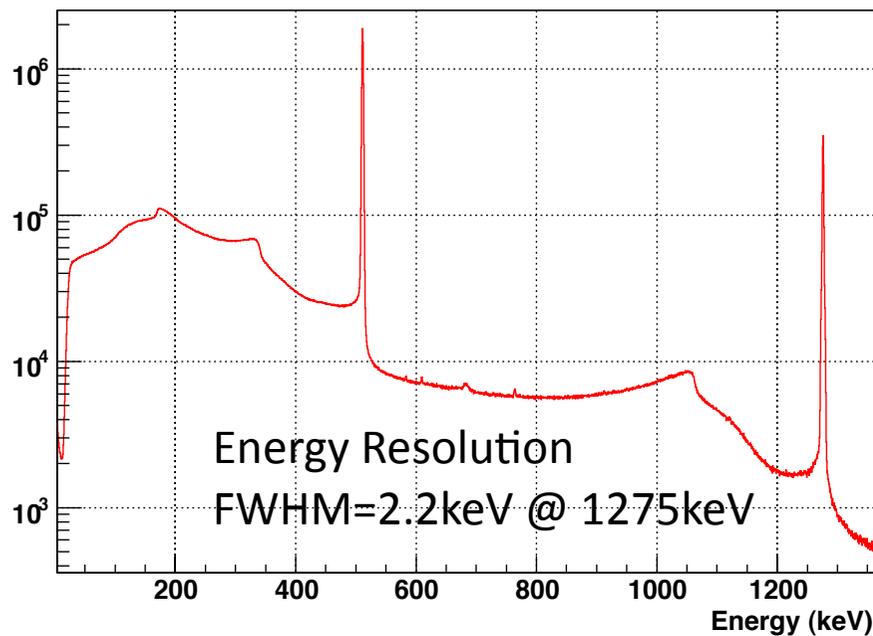


セットアップ(ガンマ線検出器)

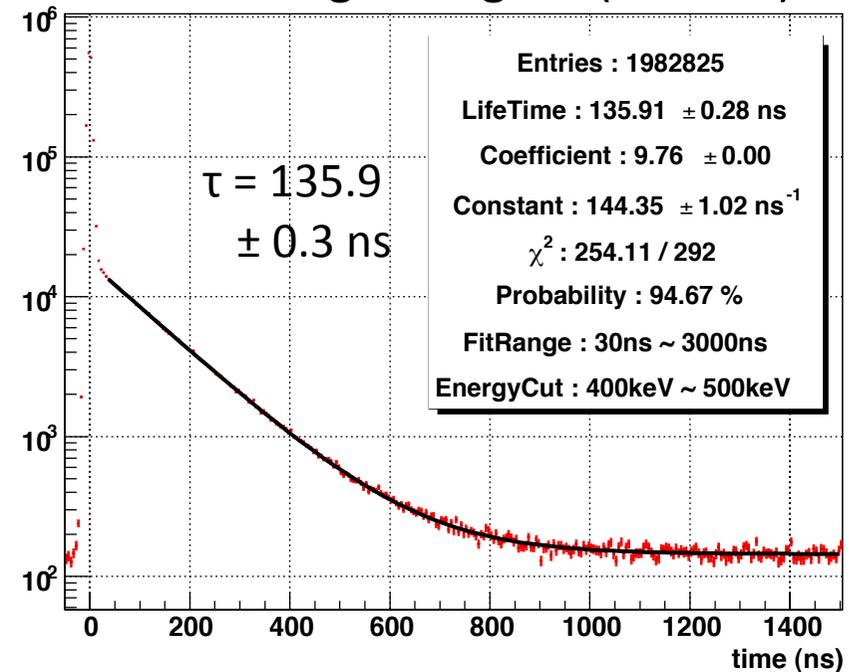
- Ge検出器(Ortec GEM 38195-P-plus series)
- 2段階のthresholdによって遅い成分をカットし、時間の補正を掛けた

＜シリカエアロゲル(0.03g/cc) + イソブタン(0.16atm)での測定の様子＞

Energy Histogram

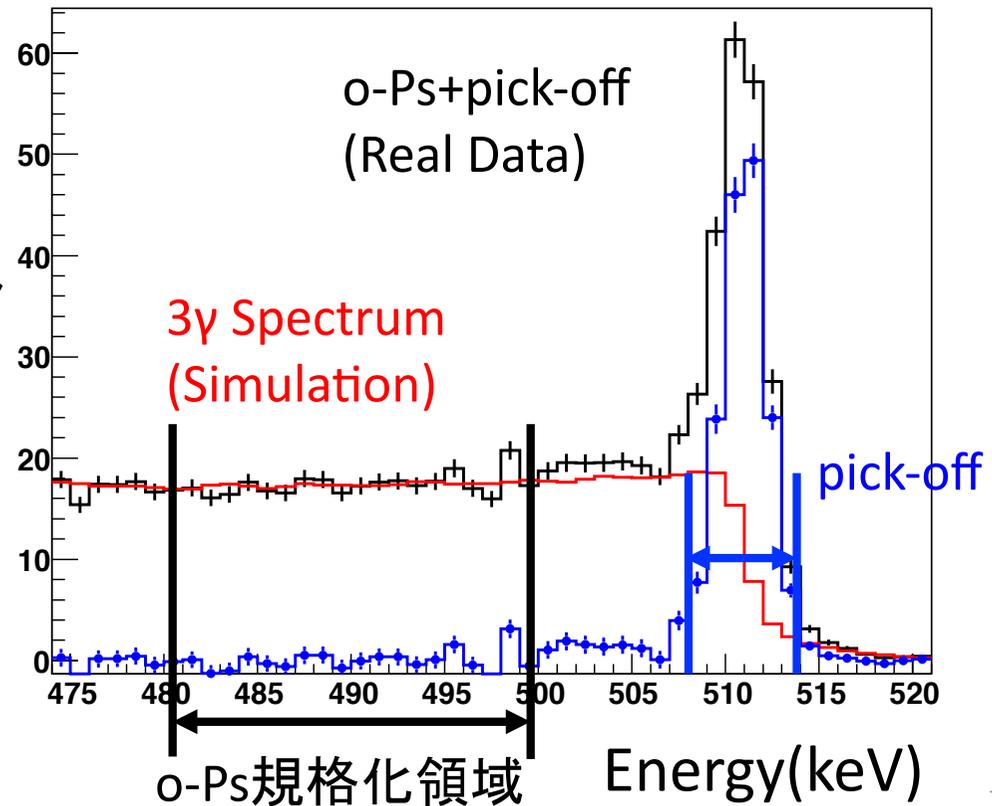
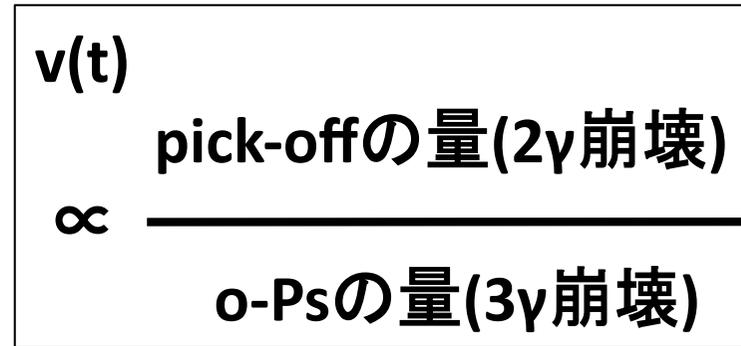


Timing Histogram(補正後)



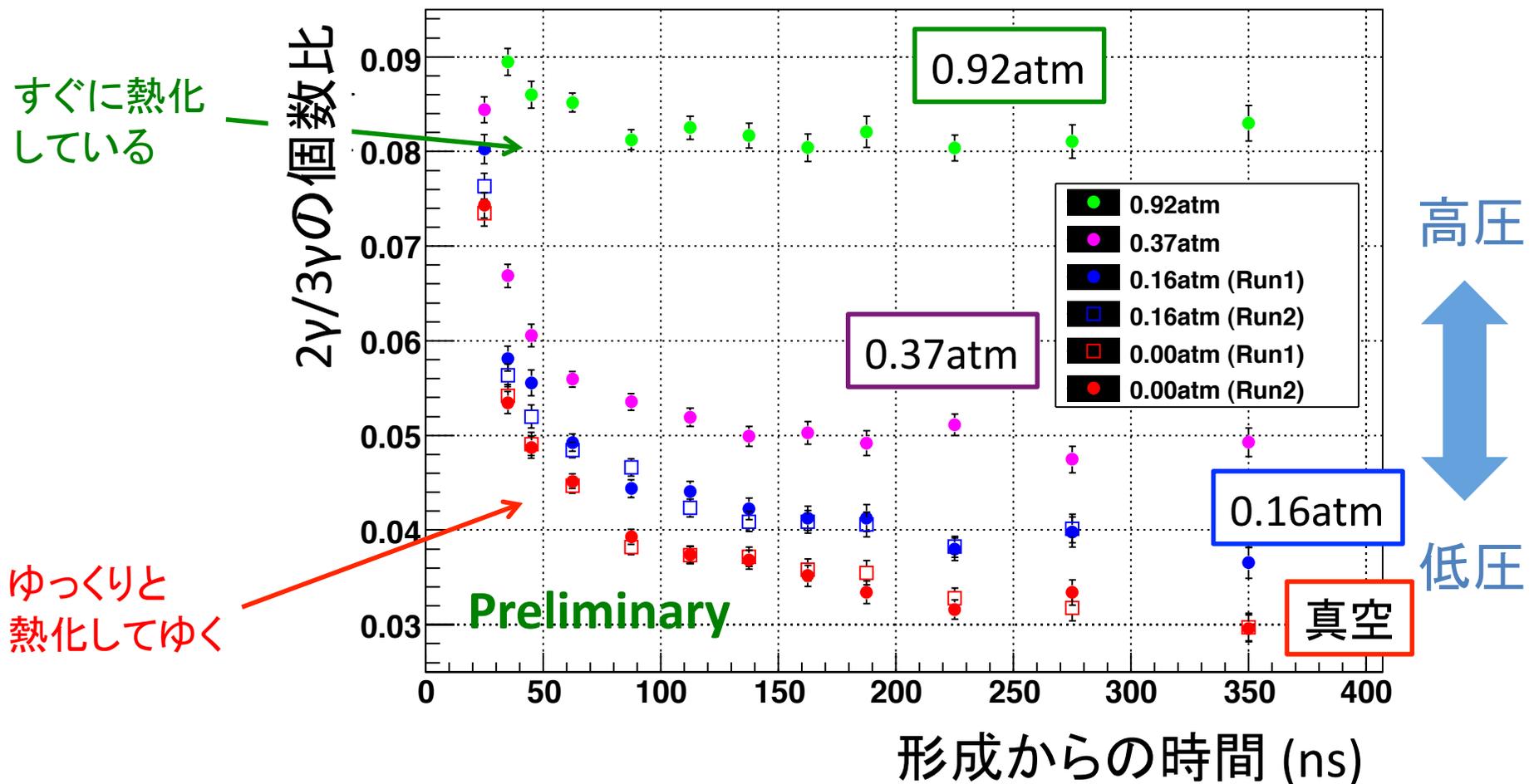
o-Ps、pick-off量の見積もり方

- 1, 時間を区切ってエネルギー
ースペクトラムを作る
- 2, o-Psはスペクトラムの連
続部分(480~500keV)で
規格化
- 3, pick-offは 511 ± 3 keV
- 4, 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



2 γ /3 γ 比の測定結果

- イソブタン圧力を変化させて2 γ /3 γ 比を出した。
- 2 γ /3 γ 比 \propto (Psの速度) \times (ガス圧)
- イソブタン圧力が高いほど熱化が早く進む様子が分かる。



フィット関数

- Psが形成されてからt後のエネルギー $E_{av}(t)$ は以下の微分方程式で書ける。

σ_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。

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

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

m_{ps} : Psの質量

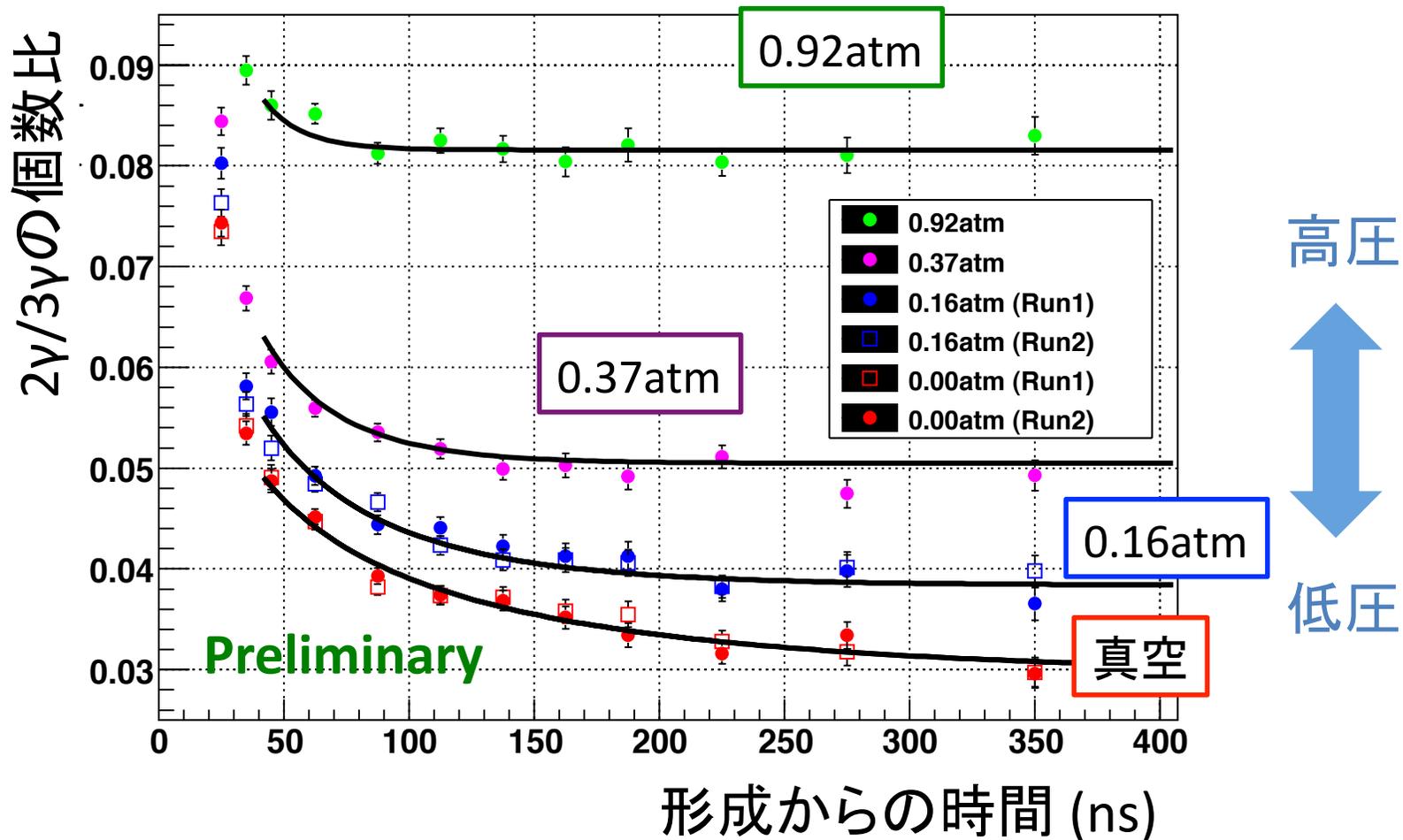
n : イソブタンの数密度

M : イソブタンの質量

- エアロゲルの効果は微分方程式の中に含めておく。
- σ_m (イソブタンとPsの断面積)が熱化を決定する重要な量。
- 他に、 $E_0(t=0)$ での $E_{av}(t)$ 、エアロゲル・イソブタンのPick-off割合がフィッティングに使うパラメータ。

2 γ /3 γ 比のフィット結果

- すべての測定点を同時にフィットした。
- フィッティング範囲は40~800nsを使用。



2 γ /3 γ 比のフィット結果

- フィット結果は以下の通り。
- 詳細な解析はこれからなので、暫定的な結果。
- $\sigma_m = 66 \pm 6 \text{ \AA}^2$ を得た。これはSkalseyが別の手法(※)で測定した値($146 \pm 11 \text{ \AA}^2$)より2倍小さい。

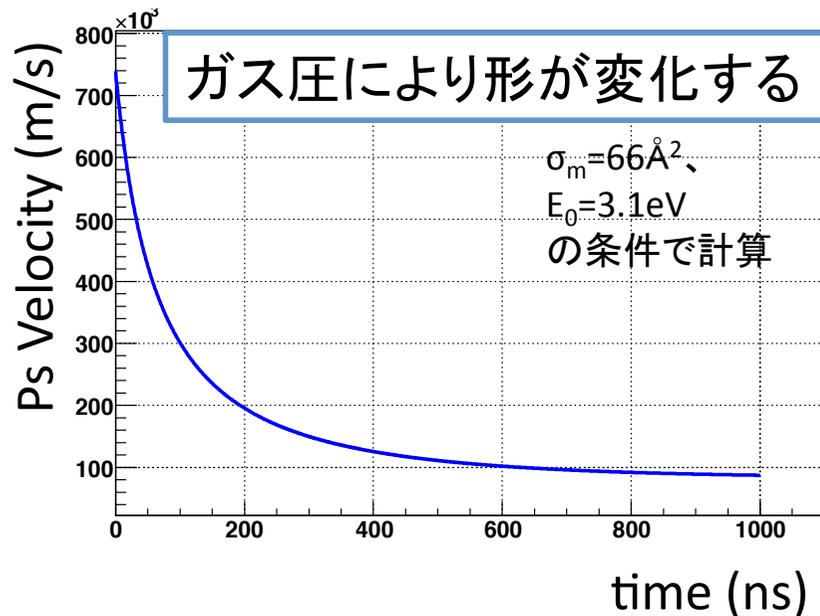
※Phys. Rev. A **67** (2003) 022504 M. Skalsey, et al.

変数	値	
χ^2 / NDF	$75.6 / 66 = 1.145$	(Prob.=20%)
$\sigma_m [\text{\AA}^2]$	66 ± 6	
$\alpha [\text{eV c}^{-2} \text{ cm}^{-1}]$	$(5.5 \pm 1.7) \times 10^{-7}$	} エアロゲルを 記述する変数
β	0.6 ± 0.2	
$E_0 [\text{eV}]$	0.30 ± 0.13	
Pick-off 割合 (イソブタン)[atm^{-1}]	$(5.71 \pm 0.08) \times 10^{-2}$	} Pick-offの量を 記述する変数
Pick-off 割合 (エアロゲル)	$(2.94 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	

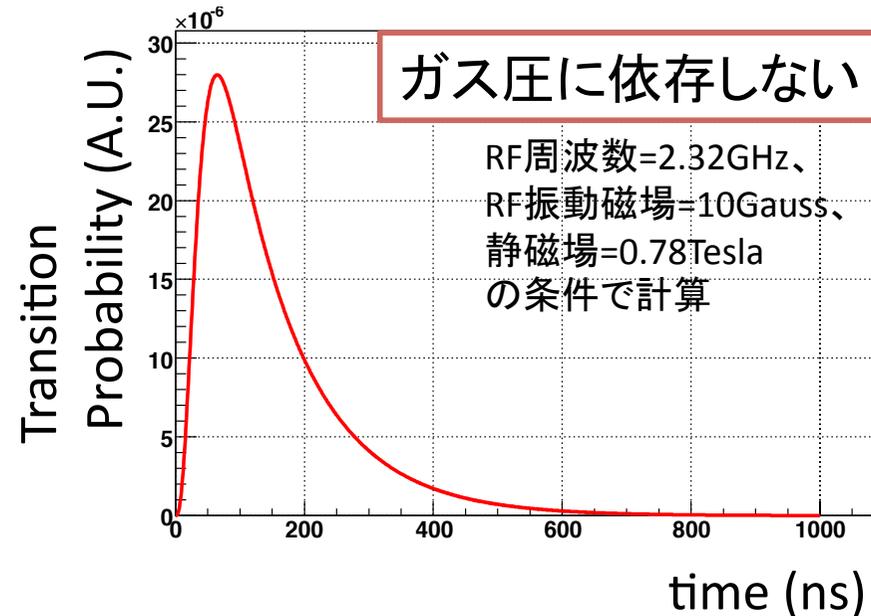
熱化パラメータからHFS補正量への焼き直し

- 測定した σ_m の値からシュタルク効果補正量の計算を行った。

<熱化曲線@0.05atm>



<遷移曲線>



- シュタルク効果の大きさは (Ps Velocity) \times (ガス圧力) に比例。
- 2γ への遷移への影響は、さらに o-Ps $\rightarrow 2\gamma$ の遷移確率が掛かる。

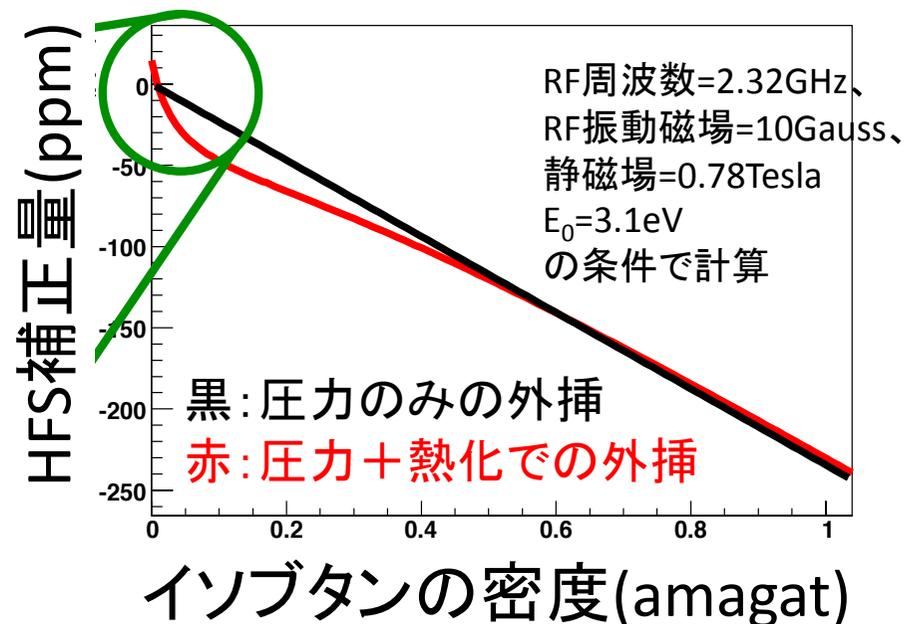
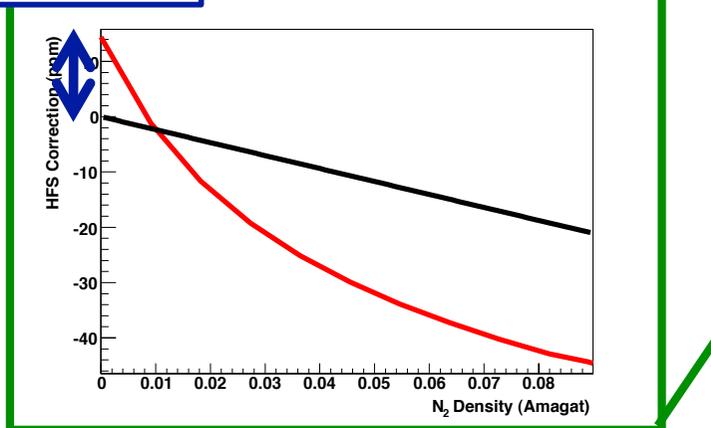
$$\text{HFS補正量} = (\text{Ps Velocity}) \times (\text{ガス圧力}) \times (\text{遷移確率}) \text{ の全時間積分}$$

イソブタン中での熱化によるHFS補正量

- シュタルク効果によるHFSの圧力依存性は、
-254 ppm/amagat (暫定的な実測値)。
- 熱化によるHFS補正量(非線形効果)は 14 ± 3 ppmと求められる(暫定)
 - 1、目標とする0(ppm)の精度に対して、不可欠な補正となる。
 - 2、これを取り入れて、最終的なHFSを導く予定。

<HFS補正のシミュレーション>

14ppmの補正



HFSに対する熱化の影響評価のまとめ

- ポジトロニウムのHFSはシュタルク効果によって変化する

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 (P_s の速度 $v(t)$)

- 過去の実験では、 P_s の速度の変化(熱化)を考慮していなかった→正しく補正する必要がある。
- 補正に必要な熱化パラメータの測定は、pick-offによる 2γ 崩壊の量を見ることによって行った。
- 現在までの測定によれば、イソブタンを用いたHFS測定での熱化補正量は14ppmで、目標とする0(ppm)の精度では重要な補正
→HFS測定結果の補正に使用する。
- 今後イソブタンのみでの測定を行う予定。