

ボース・アインシュタイン凝縮を目指した ポジトロニウム冷却 II

周 健治, 村吉 諄之, 樊 星, 石田 明, 難波 俊雄^A,
浅井 祥仁, 吉岡 孝高^B, 五神 真,
大島 永康^C, オロークブライアン^C, 鈴木 良一^C,
石坂 直之^D, 秋山 悟^D, 藤野 茂^E

東大理, 東大素セ^A, 東大工^B, 産総研^C,
九大総理工^D, 九大GIC^E



東京大学
素粒子物理国際研究センター
International Center for Elementary Particle Physics
The University of Tokyo



APSA
Advanced Photon Science Alliance

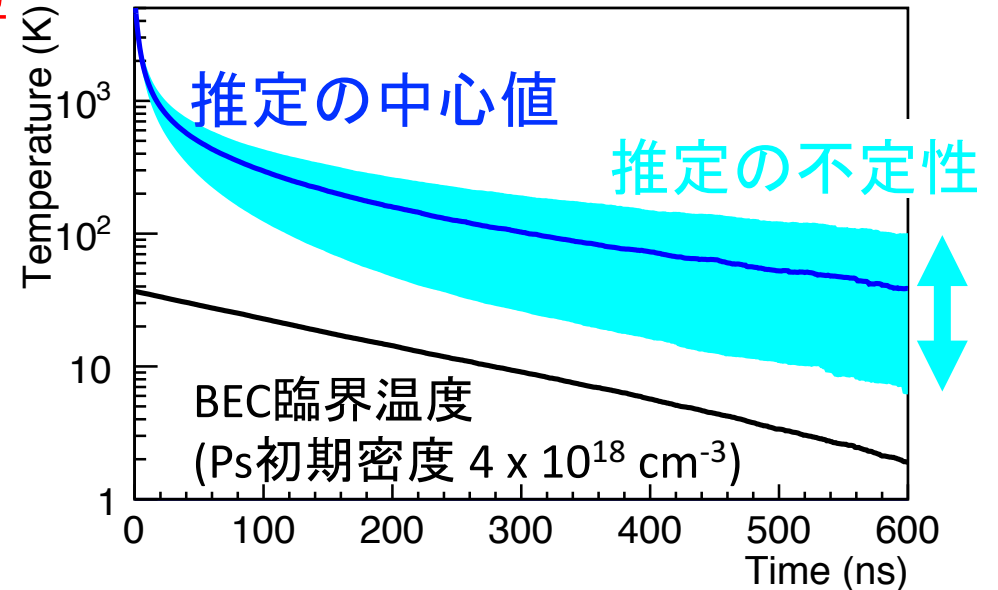
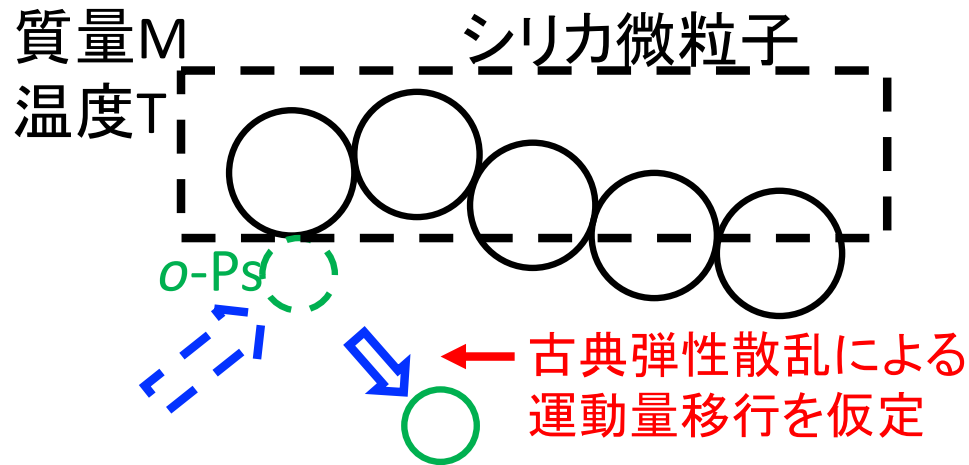


産総研
国立研究開発法人 産業技術総合研究所
NATIONAL INSTITUTE OF
ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

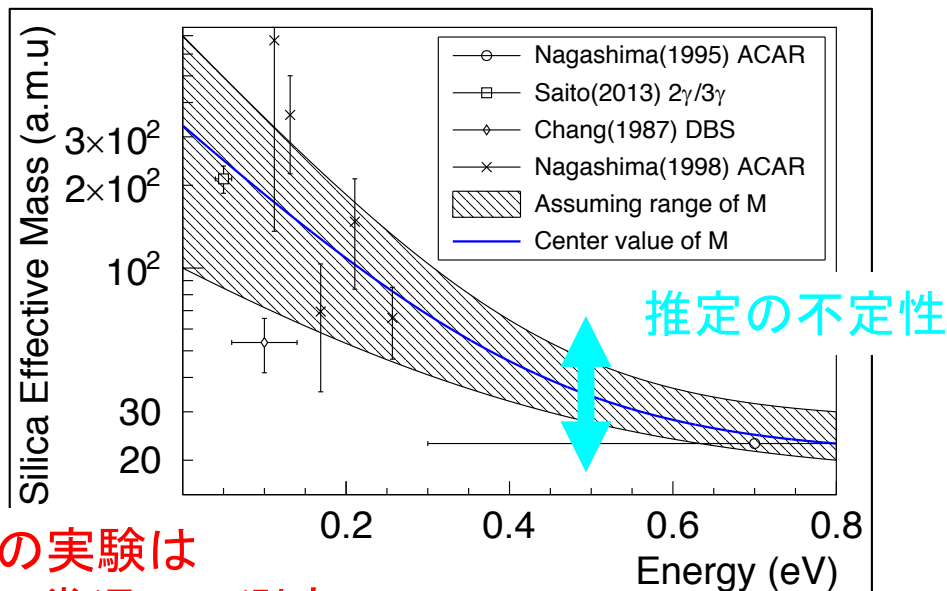
日本物理学会 第72回年次大会
2017.03.17 @大阪大学豊中キャンパス

熱化による冷却の推定

◆ Psの熱化は古典弾性散乱でモデル化



過去の実験結果を用いて
推定したPs温度時間発展
(モンテカルロシミュレーション)



過去の実験は
すべて常温での測定

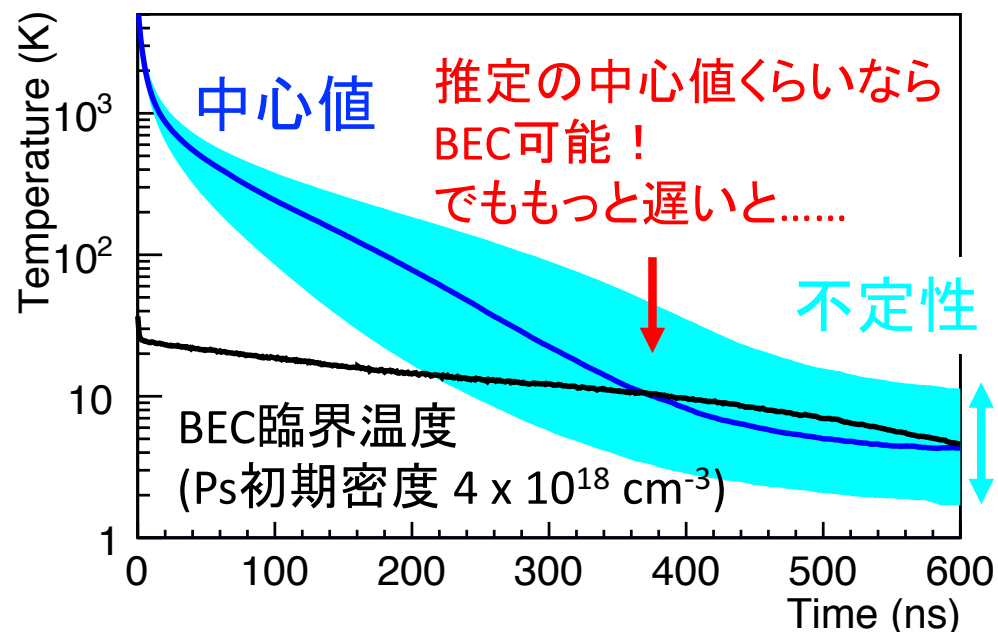
運動エネルギーの時間発展

$$\frac{dE_{av}}{dt} = -\frac{2}{LM} \sqrt{2m_{Ps}E_{av}} \left(E_{av} - \frac{3}{2}k_B T \right)$$

Y. Nagashima *et al.* Phys. Rev. A 52, 258(1995) 2

熱化不定性の影響

- 熱化の不定性はレーザー冷却してもかなり効いてくる
- また、Mの推定は過去の常温での測定結果を用いており、極低温までの外挿が正しいか分からない



レーザー冷却したときの
Ps温度時間発展
(モンテカルロシミュレーション)

➤ 新しく、極低温でポジトロニウムの熱化を測定する！

極低温におけるPs熱化の実測方法

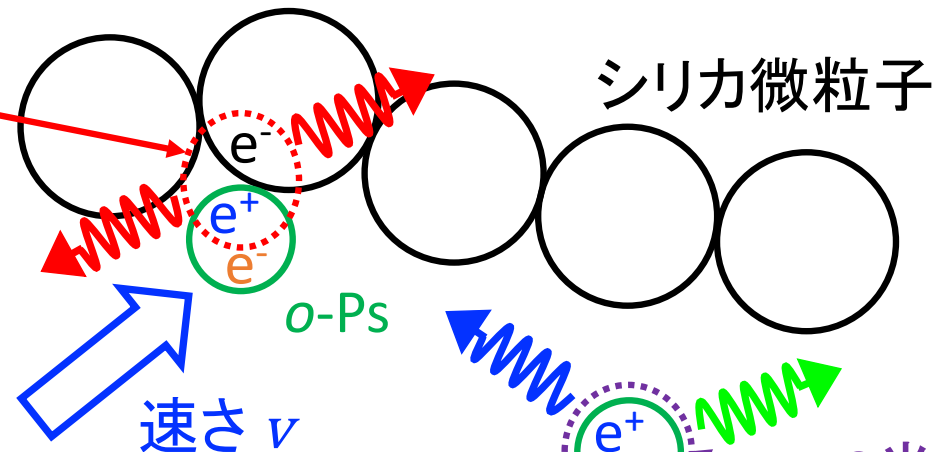
◆ Ps温度はどうやって測る？

➤ 速さの平均値が分かればよい → PsのPick-off 2光子崩壊を用いる

Ps → γ 線崩壊模式図 (2つのモード)

Pick-off 2光子崩壊

- Ps内の陽電子とシリカ内の電子が対消滅
- 511 keV 単色



3光子自己崩壊

- Ps内の陽電子と電子が対消滅
- 0 ~ 511 keV 連続スペクトル

Pick-off 崩壊率

$\propto$ シリカ中電子密度 $\times$ 断面積(v) $\times v$

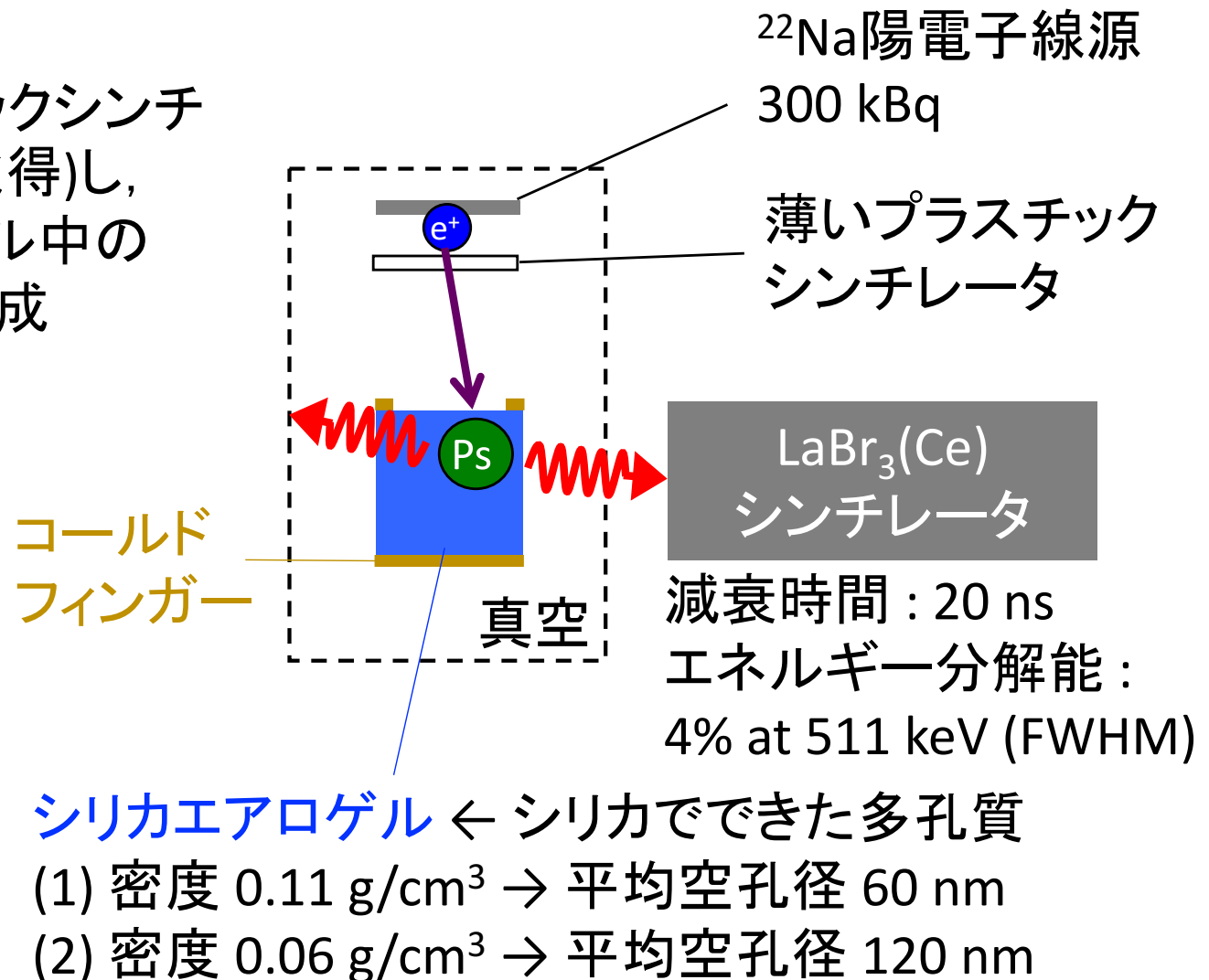
(古典的な, 衝突 → 消滅 モデル)

→ 2光子崩壊するPick-off 崩壊率の時間変化からPs温度の時間発展が分かる

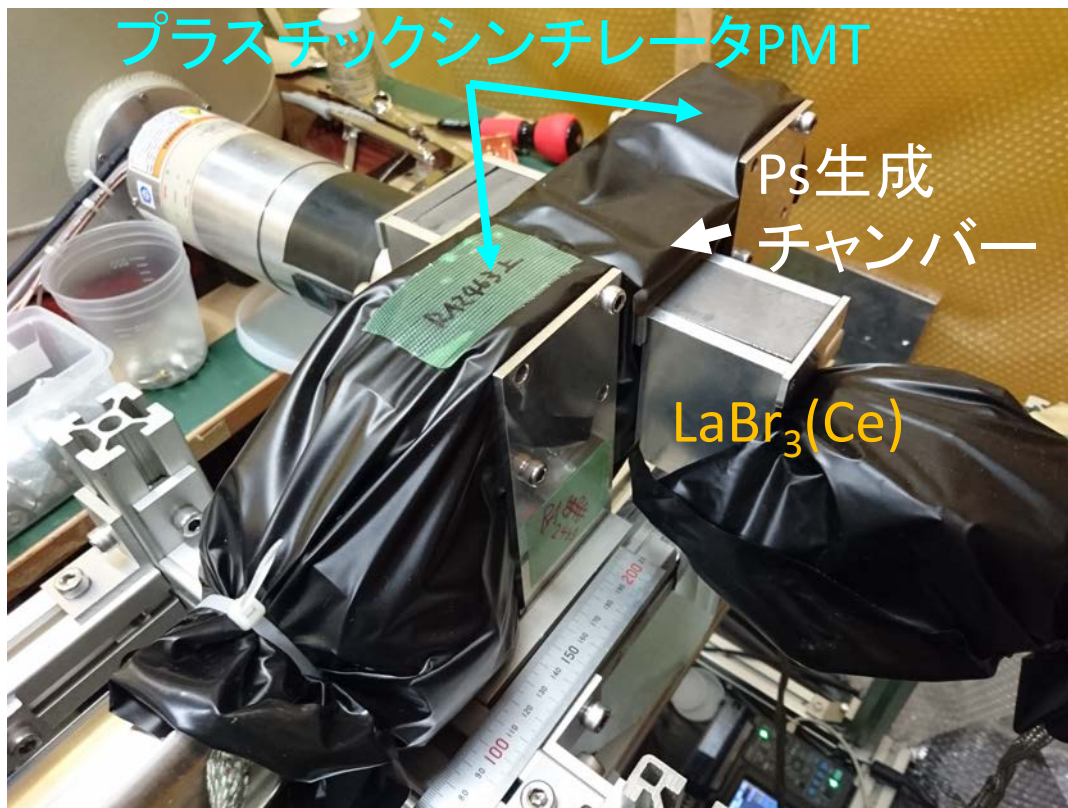
放射線源・シリカエアロゲルを用いたPs熱化測定

実験セットアップ

- 陽電子をプラスチックシンチレータでタグ($t=0$ 取得)し, 温度可変エアロゲル中の空孔(真空)にPs生成
- 崩壊 γ 線のエネルギーとタイミングを $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレータで測定し, Pick-off 崩壊率の時間発展測定



実験装置



液体窒素温度 (~100 K) より
上の温度で測る装置

- 2つ製作, 色々な温度で測り
Pick-off 崩壊率と温度を校正する

GM冷凍機

4 Kや50 Kで測れる装置

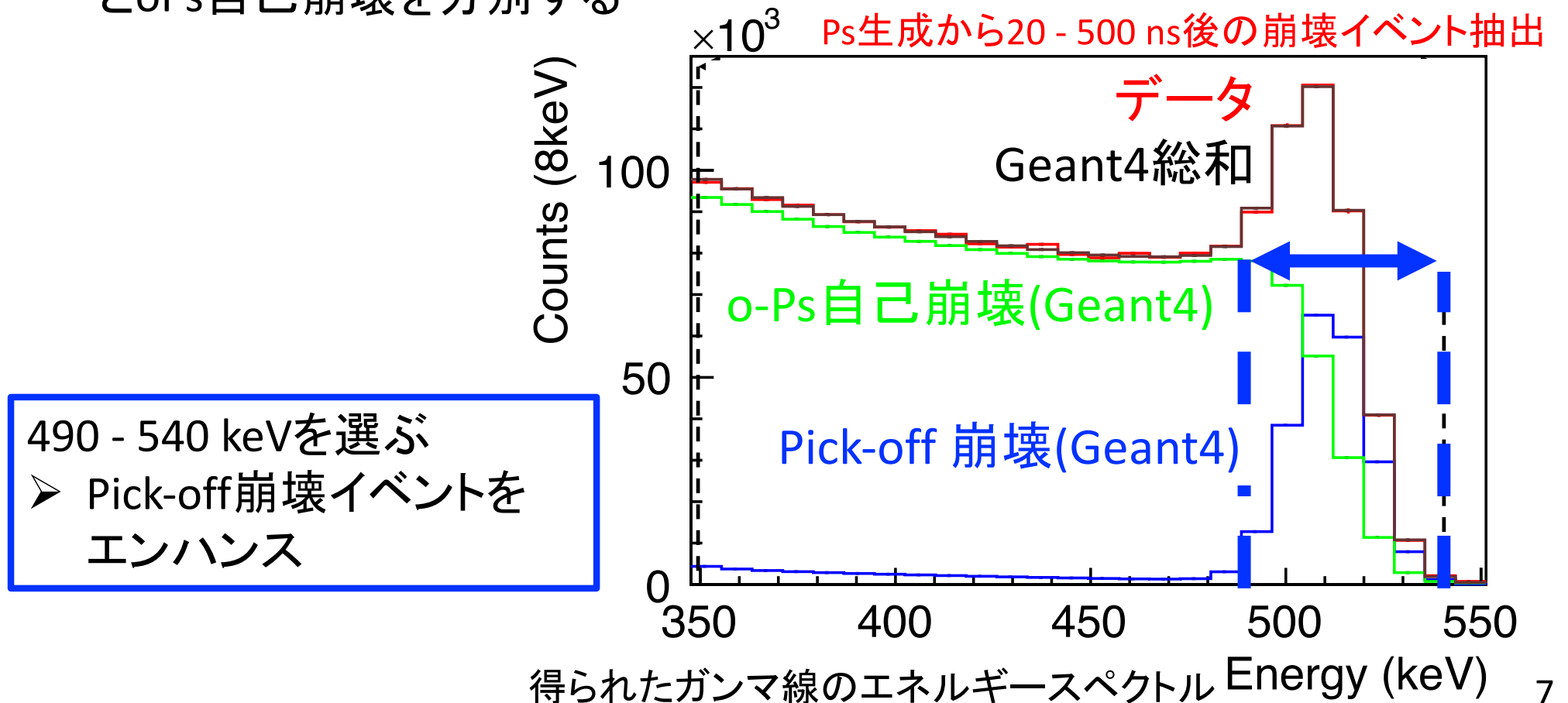


Pick-off 崩壊とo-Ps自己崩壊を分ける

Pick-off 崩壊 → 2光子崩壊 (511 keVが2本)

oPs自己崩壊 → 3光子崩壊 (511 keVまでならかな分布で3本)

- 崩壊でてくるガンマ線のエネルギーが異なることから, Pick-off 崩壊とoPs自己崩壊を分別する

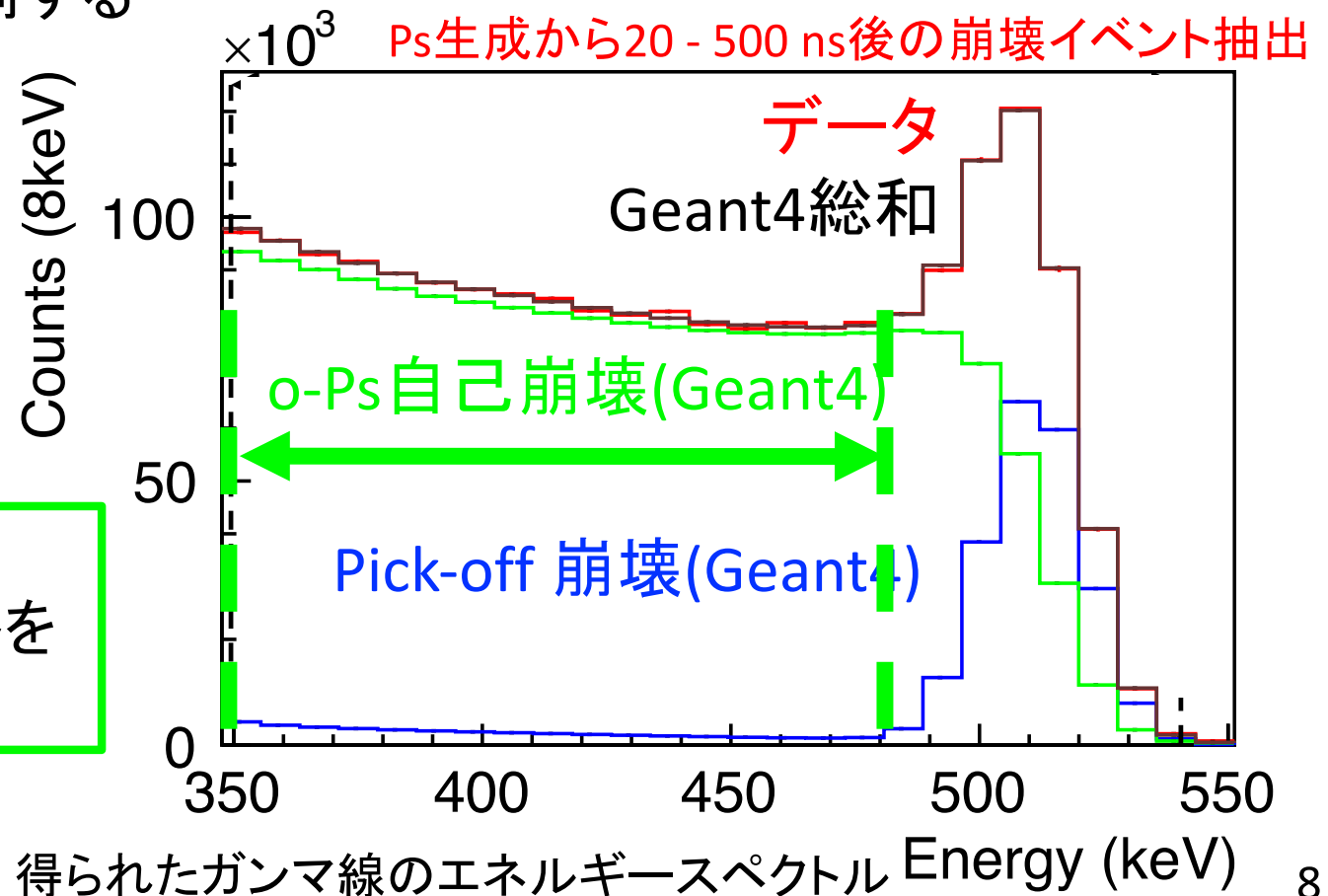


Pick-off 崩壊とoPs自己崩壊を分ける

Pick-off 崩壊 → 2光子崩壊 (511 keVが2本)

oPs自己崩壊 → 3光子崩壊 (511 keVまでならかな分布で3本)

- 崩壊でてくるガンマ線のエネルギーが異なることから, Pick-off 崩壊とoPs自己崩壊を分別する

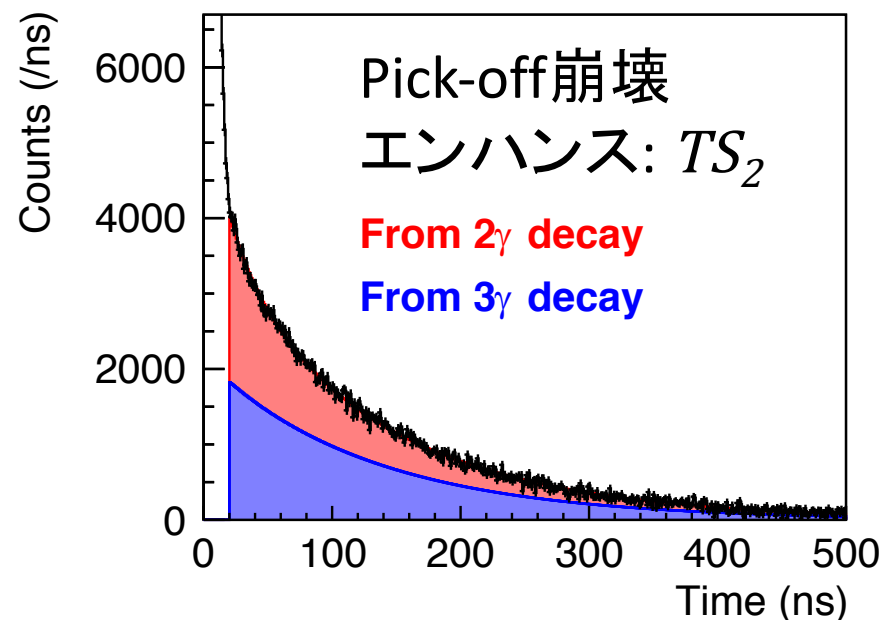
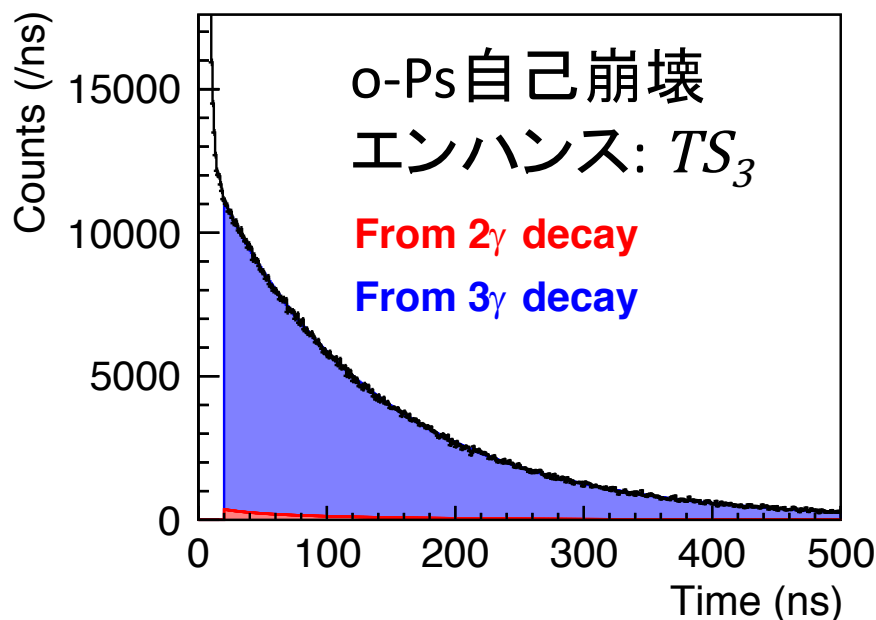


350 - 480 keVを選ぶ

- o-Ps自己崩壊イベントを
エンハンス

Pick-off 崩壊率を求める

先程のエネルギーカットをかけて、Pick-off 崩壊, o-Ps 自己崩壊それぞれを
エンハンスした崩壊タイミングスペクトルを作る



それぞれのタイ
ミングスペクトルを,
崩壊率の時間変
化や検出効率を考
慮してフィット

$$TS_2(t) = \left[\epsilon_{3 \text{ in } R_{2\gamma}} \lambda_o + \epsilon_{2 \text{ in } R_{2\gamma}} \lambda_2(t) \right] N_0 \exp \left(- \int_0^t (\lambda_o + \lambda_2(t')) dt' \right)$$

$$TS_3(t) = \left[\epsilon_{3 \text{ in } R_{3\gamma}} \lambda_o + \epsilon_{2 \text{ in } R_{3\gamma}} \lambda_2(t) \right] N_0 \exp \left(- \int_0^t (\lambda_o + \lambda_2(t')) dt' \right)$$

$\epsilon_{n \text{ in } R_{m\gamma}}$

$\lambda_o (= 7.04 \mu\text{s}^{-1})$

$\lambda_2(t)$

: m 光子崩壊が n 光子領域に入る検出効率 (フリーパラメータ)

: Ps 自己崩壊率 (過去の精密測定で既知)

: Ps 生成から t 経過したときの Pick-off 崩壊率

Pick-off 崩壊率を求める

先程のエネルギーカットをかけて、Pick-off 崩壊, o-Ps自己崩壊それぞれを

工 Pick-off 崩壊率 $\lambda_2(t)$:

$$\lambda_2(t) = \frac{c}{L} \times v^\gamma \quad \dots \quad \text{Pick-off 崩壊率はPs速度のべき乗に比例と仮定}$$

c : 定数, L : Ps-シリカ間衝突の平均自由行程

v : Psの平均速度, γ : Pick-off 崩壊率の速度依存性

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{2}{LM} \sqrt{2m_{Ps}E} \left(E - \frac{3}{2}k_B T\right) \quad \dots \quad \text{Ps運動エネルギーは古典弾性散乱モデル}$$

M : Psからみたシリカ微粒子の有効質量,

T : シリカエアロゲルの温度

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m_{Ps}}} \quad \dots \quad E: \text{Psの平均エネルギー}, m_{Ps}: \text{Ps質量}$$

それぞれのタイミングスペクトルを、崩壊率の時間変化や検出効率を考慮してフィット

$$TS_2(t) = \left[\epsilon_{3 \text{ in } R_{2\gamma}} \lambda_o + \epsilon_{2 \text{ in } R_{2\gamma}} \lambda_2(t) \right] N_0 \exp \left(- \int_0^t (\lambda_o + \lambda_2(t')) dt' \right)$$

$$TS_3(t) = \left[\epsilon_{3 \text{ in } R_{3\gamma}} \lambda_o + \epsilon_{2 \text{ in } R_{3\gamma}} \lambda_2(t) \right] N_0 \exp \left(- \int_0^t (\lambda_o + \lambda_2(t')) dt' \right)$$

$\epsilon_{n \text{ in } R_{m\gamma}}$

$\lambda_o (= 7.04 \mu\text{s}^{-1})$

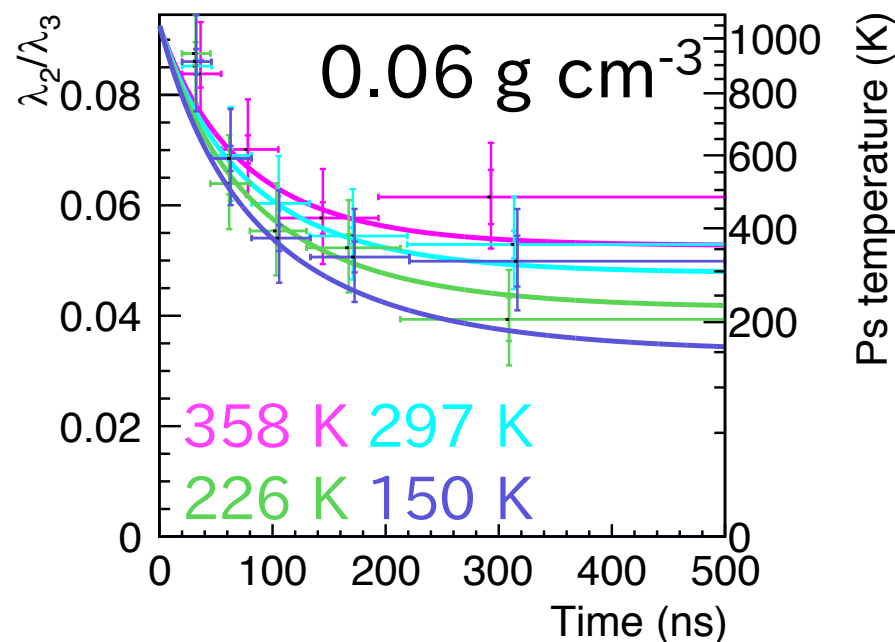
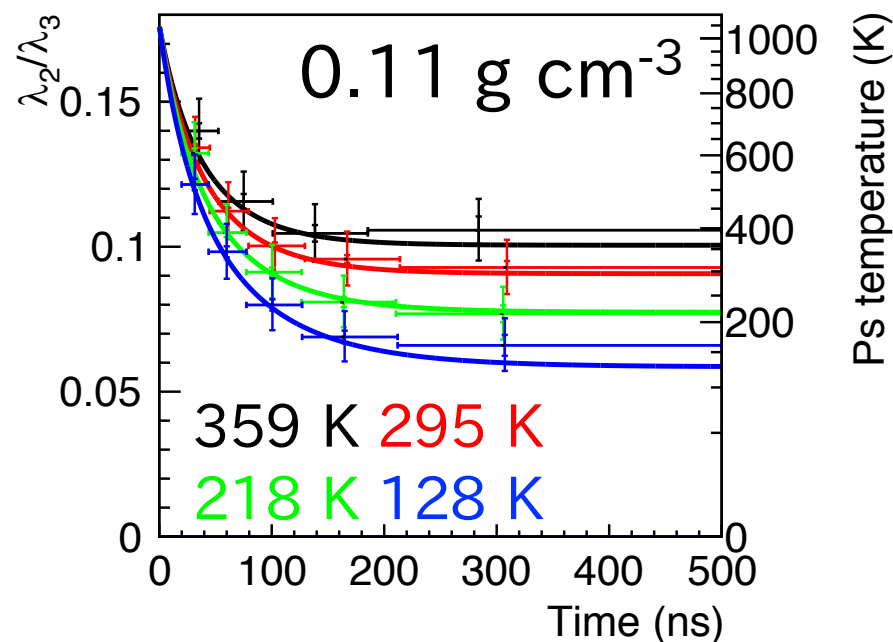
$\lambda_2(t)$

: m 光子崩壊が n 光子領域に入る検出効率 (フリーパラメータ)

: Ps自己崩壊率 (過去の精密測定で既知)

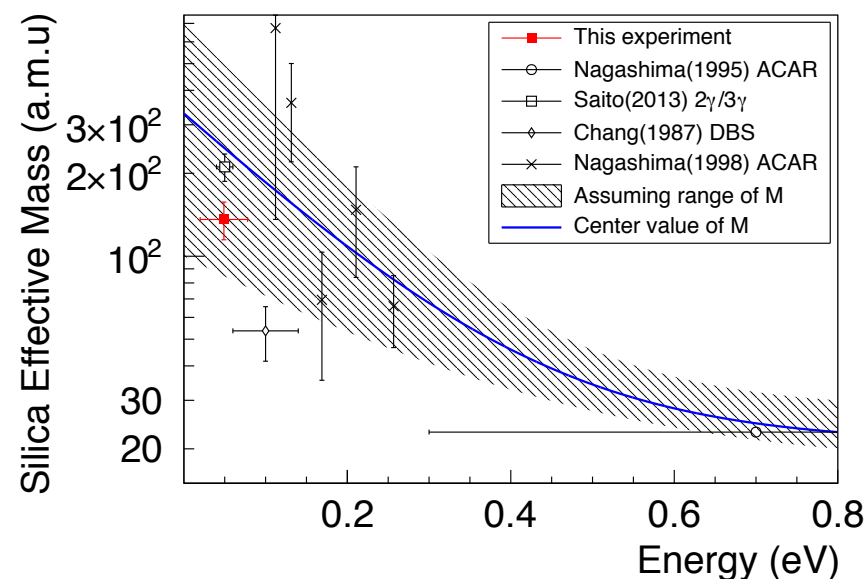
: Ps生成から t 経過したときのPick-off 崩壊率

ポジトロニウムの温度発展



まずは液体窒素で冷やせる方の結果

- シリカエアロゲル温度によって、Pick-off 崩壊率の違いが見えている
- 160 Kまで冷えるのがみえた(青線)
- ↑ 温度発展を実測したPsとして、世界最低温
- Mの値は、冷却に十分だった

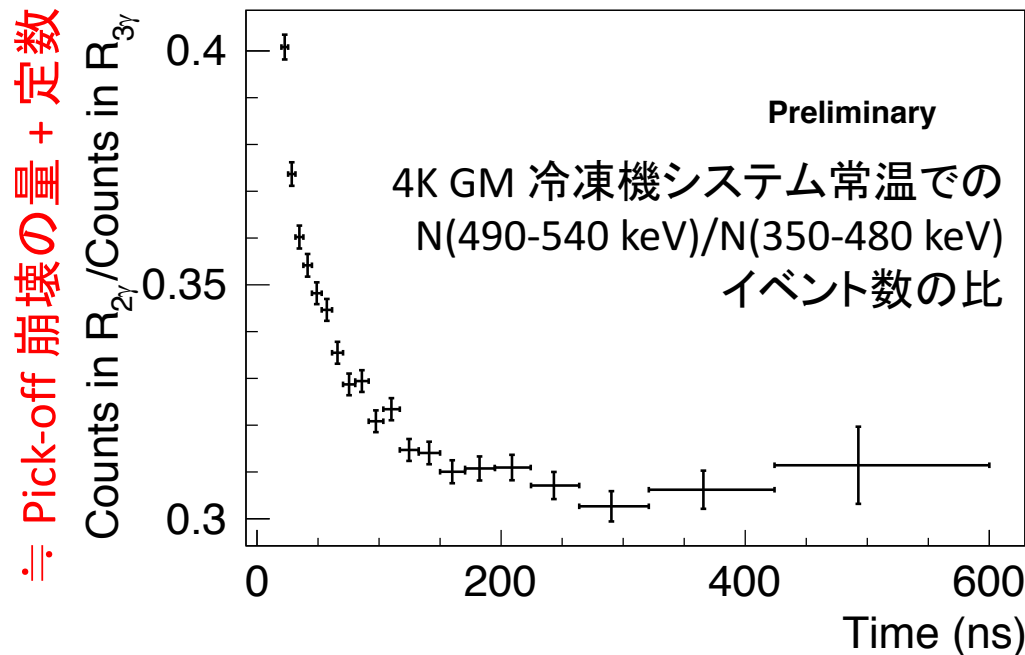
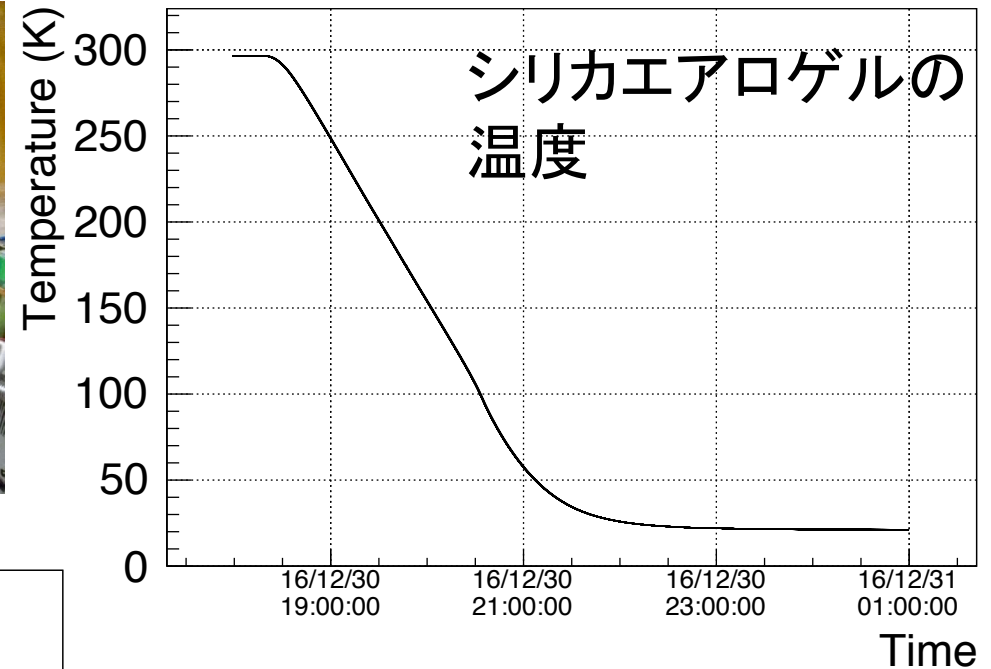


極低温での ポジトリウム温度発展

4K GM 冷凍機を使ったシステムも、シリカエアロゲルを20 Kまで冷やせることを確認



- まずは常温で測定, 解析を行っている



液体窒素で冷やせる方の常温と合うか比較し, その後極低温で測定する

光透明シリカキャビティの開発

次のステップはレーザー冷却

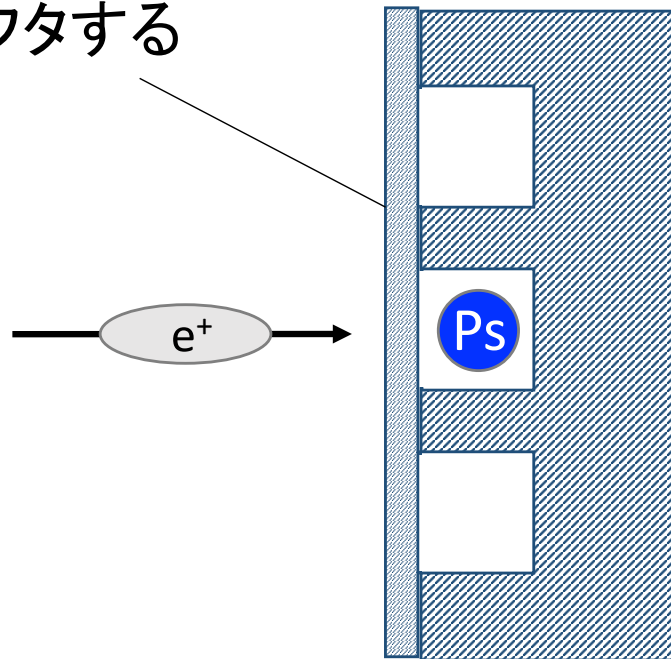
光に透明なPs生成・閉じ込めキャビティが必要

➤ 100 nm 微細加工可能な機能性シリカガラスが候補

必要要求

1. 高いポジトロニウム生成率

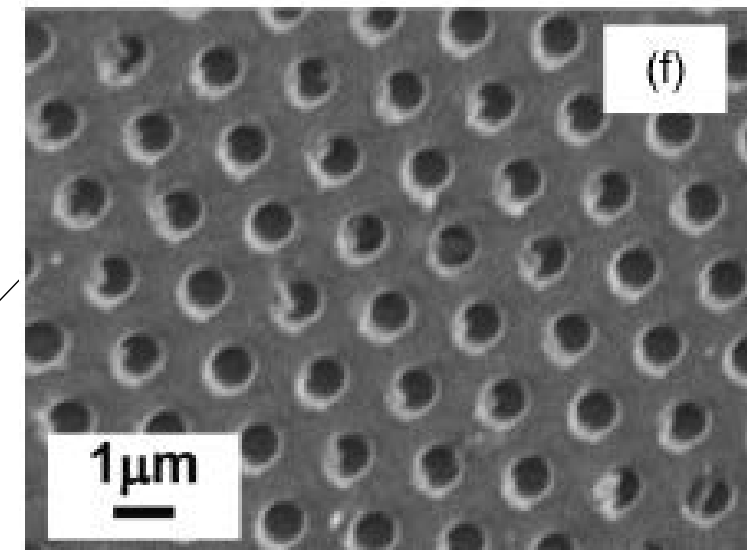
薄フィルムで
フタする



表面穴加工した
シリカガラス

100 nmオーダーの穴加工できる

(表面)



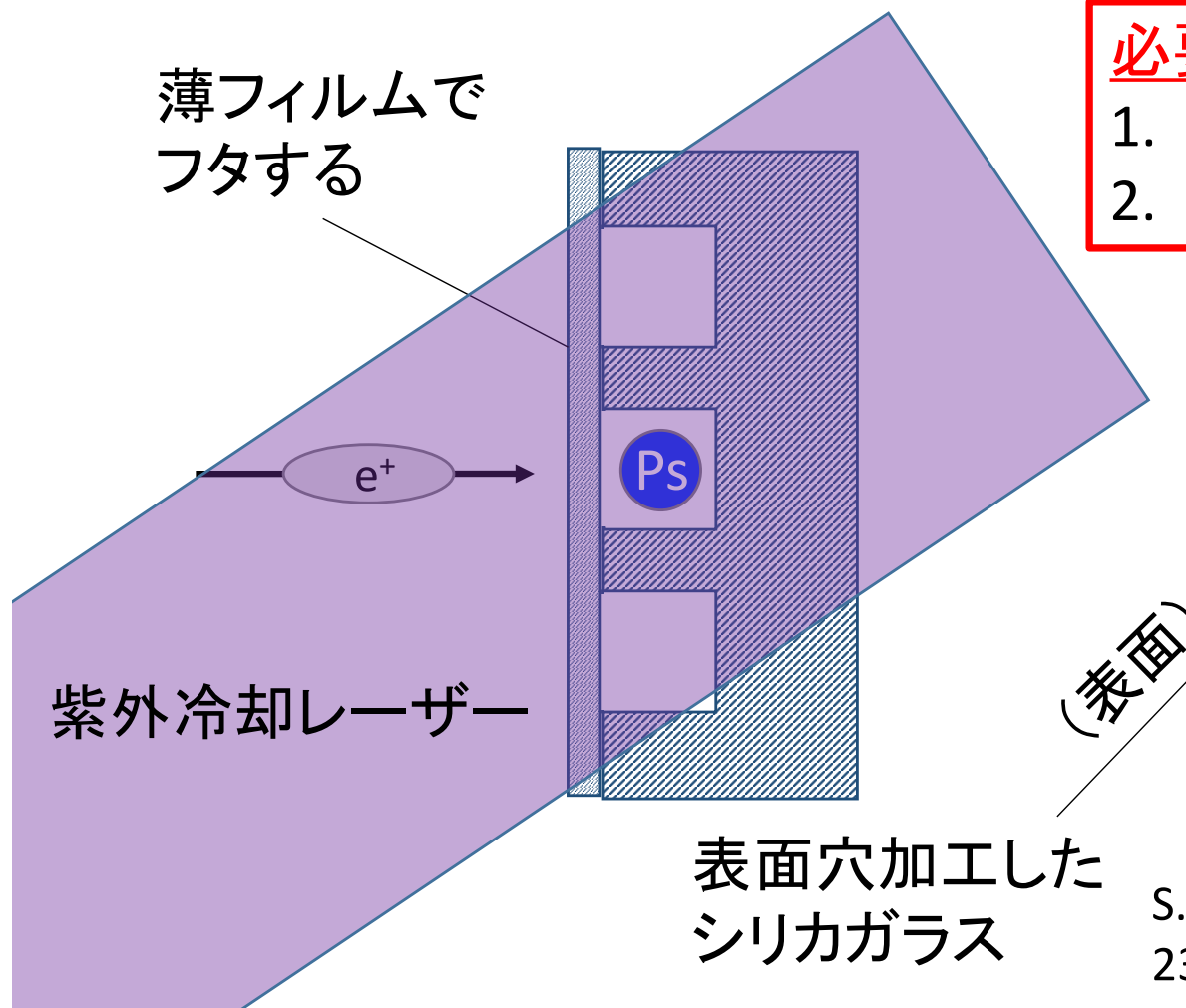
S. Fujino *et al.* J. Am. Ceram. Soc., Vo.94[8]
2319-2322 (2011)

光透明シリカキャビティの開発

次のステップはレーザー冷却

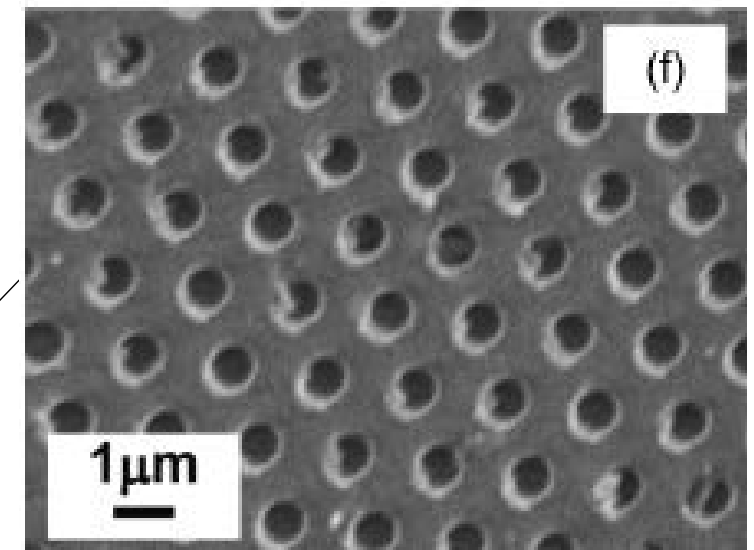
光に透明なPs生成・閉じ込めキャビティが必要

➤ 100 nm 微細加工可能な機能性シリカガラスが候補



必要要求

1. 高いポジトロニウム生成率
2. 極低温で高い紫外光透過率

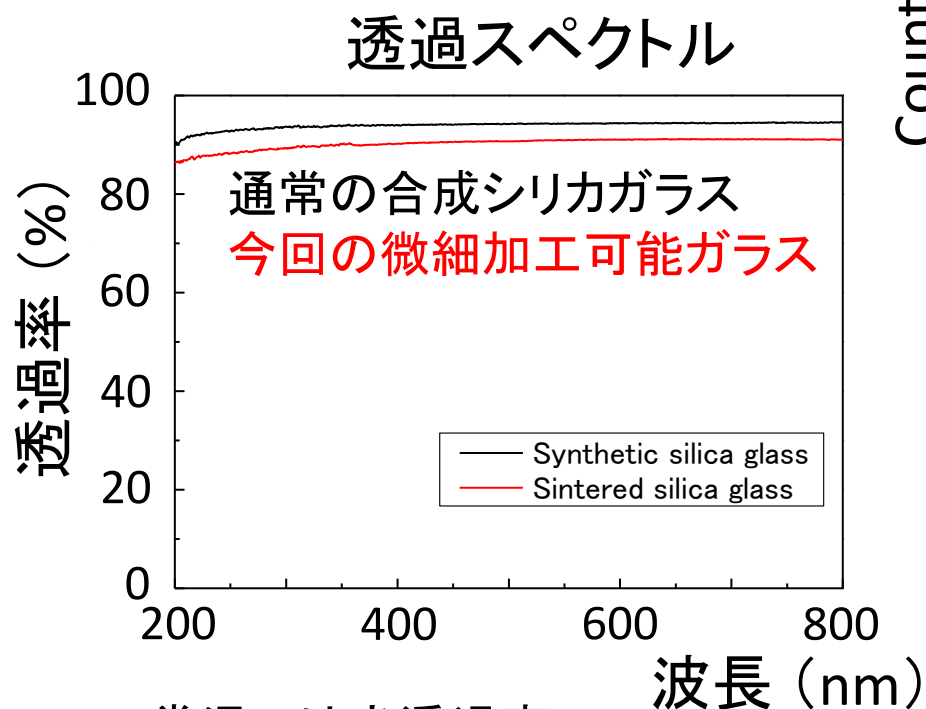


S. Fujino *et al.* J. Am. Ceram. Soc., Vo.94[8]
2319-2322 (2011)

機能性シリカガラスの性質

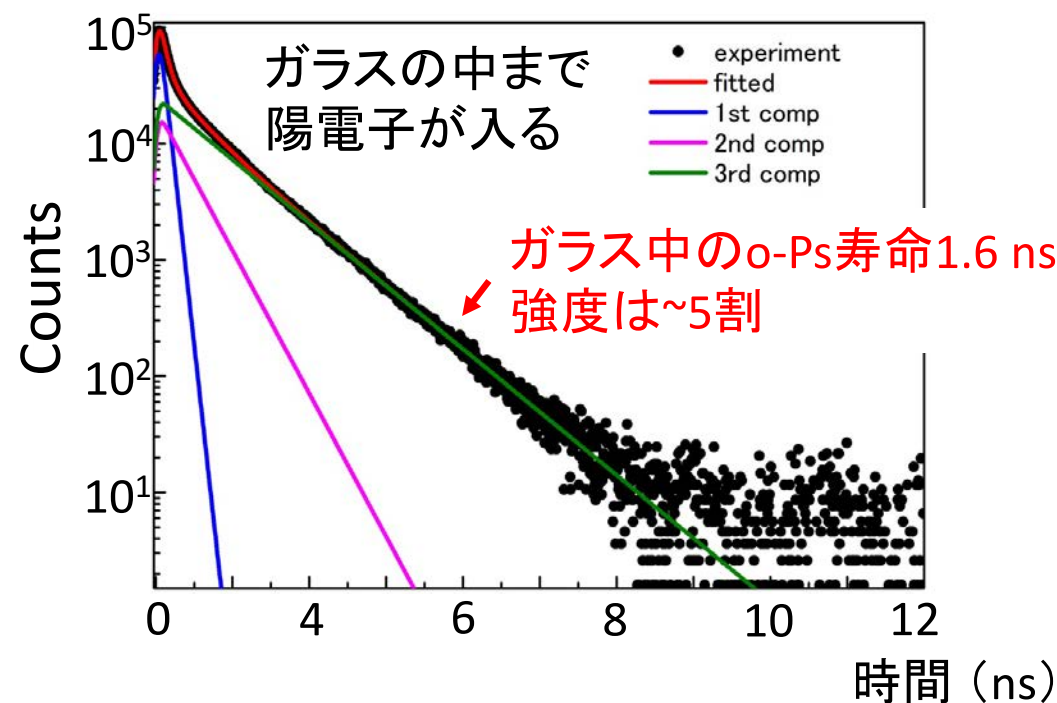


作ったガラス



常温では光透過率OK
極低温でも実測する

- ^{22}Na 由来の陽電子(数百 keV)を入射したときの崩壊寿命



通常のシリカガラスと同程度の高いo-Ps
生成率(5割以上)を確認
現在、産総研にて、低速陽電子(数keV)を
入射して、ガラス表面から飛び出すPs生成
の確認実験を実施中

まとめ

- 熱化による冷却効率の不定性は大きな影響があるので、実際に極低温で新たにポジトロニウムの熱化を測定する
- これまで、160 Kまでのポジトロニウム温度発展測定に成功しており、この領域ではポジトロニウム熱化の効率はBEC実現するのに十分良かった
- 極低温環境下で熱化を測定するシステムも製作完了しており、現在測定と解析を行っている
- 高密度ポジトロニウムレーザー冷却に必要なシリカガラスキャビティの試験を行っている。微細加工可能機能シリカガラスが候補であり、常温での紫外光透過性、シリカガラス中でのポジトロニウム生成率を測定し、問題ないことを確認した。次のステップとして、さらに実際の冷却実験の状況で使用可能か検証していく。