

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 I

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

東大理, 東大素セ^A, 東大工^B, 産総研^C



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



日本物理学会 2016年秋季大会
2016.09.24 @宮崎大学木花キャンパス

ポジトロニウム(Ps)-BEC

ポジトロニウム(Ps)

- 電子と陽電子の束縛系
- 世の中で最も軽い原子

Ps-BECのモチベーション

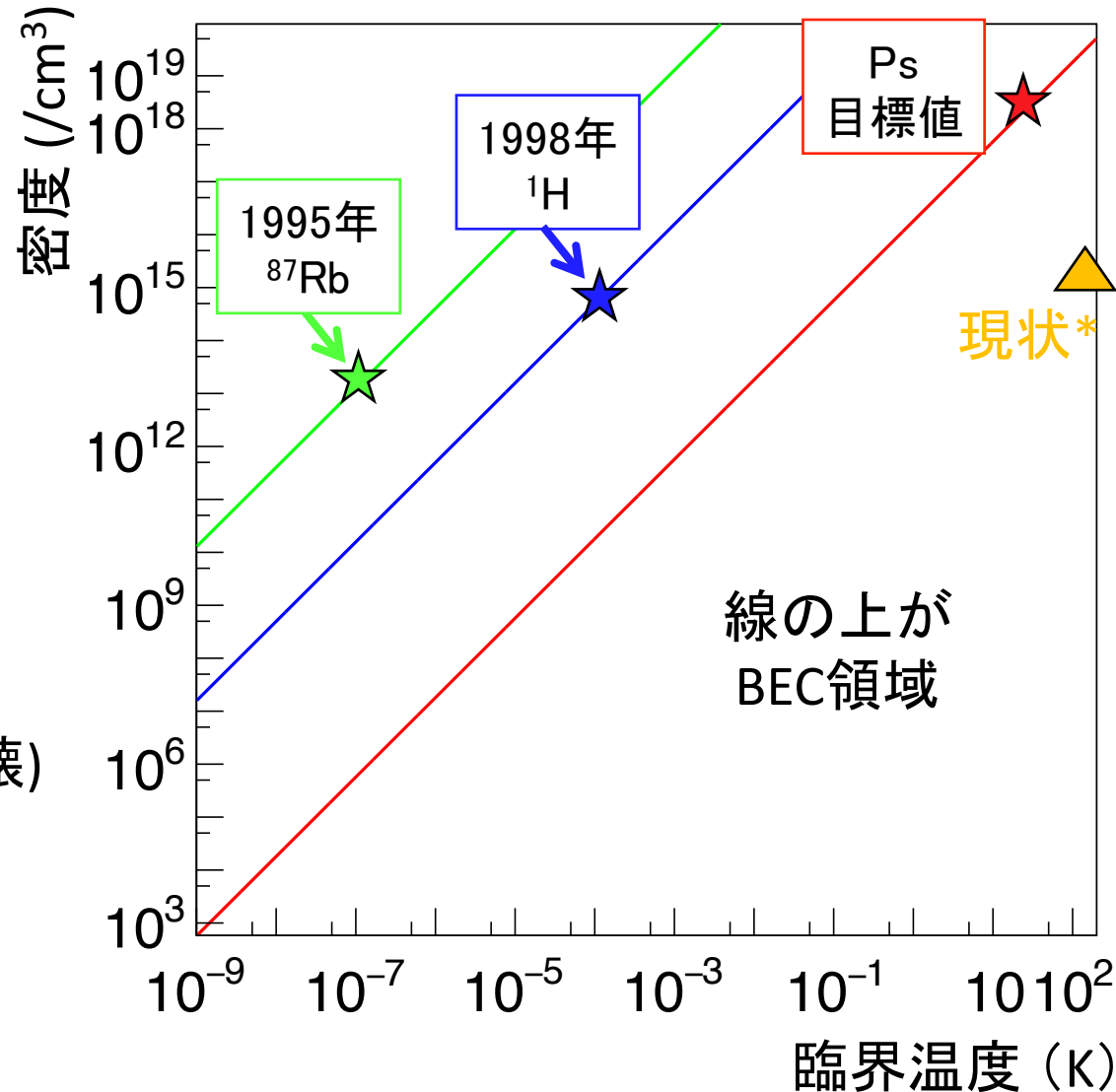
- 初の反物質含む系でBEC

特徴

- 軽くてBEC臨界温度が高い
(14 K @ $10^{18} / \text{cm}^3$)
- 寿命が短い
(オルソ・142 nsで γ 線に崩壊)

様々な応用

- 物質波干渉による
反物質重力の精密測定
- 消滅 γ 線を利用した
511 keV γ 線レーザー実現



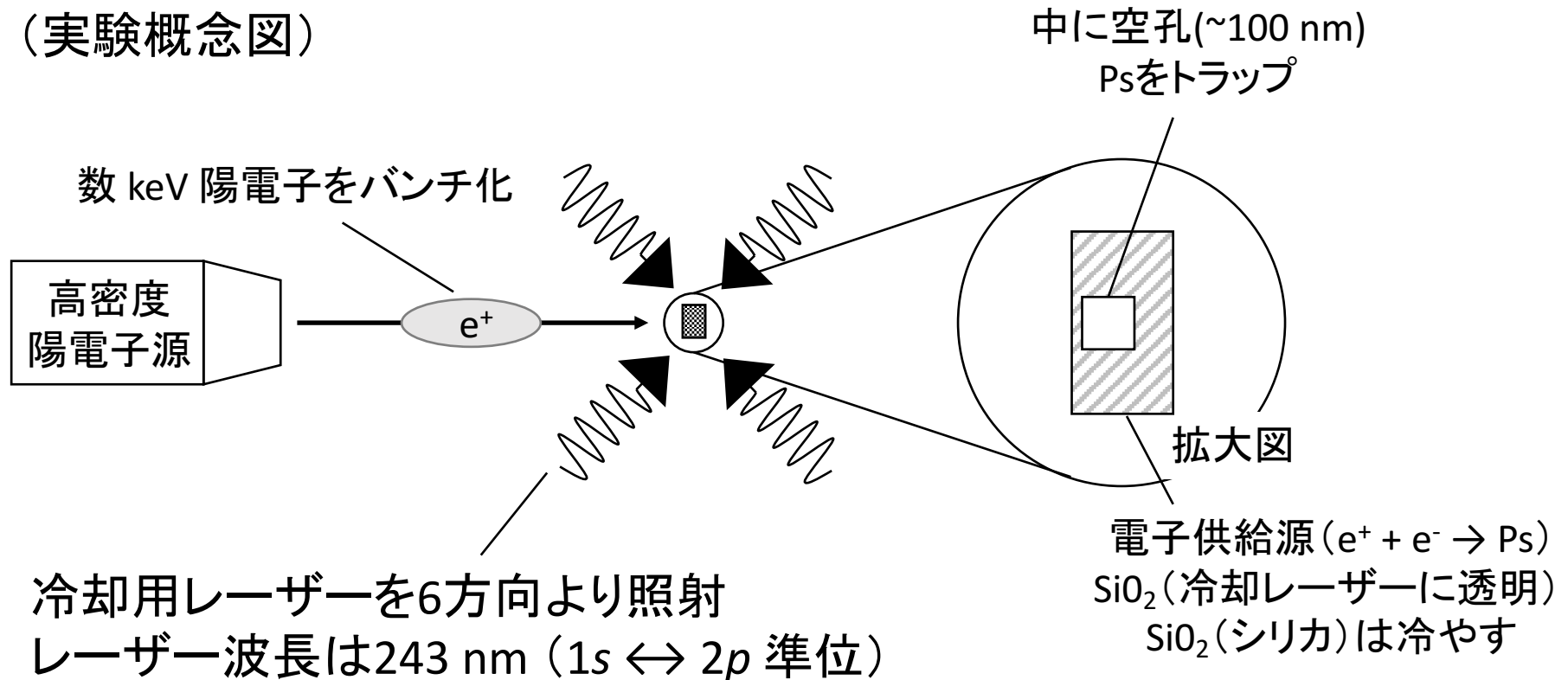
* : S. Mariuzzi *et al.* Phys. Rev. Lett. 104, 243401 (2010)

* : D. Cassidy *et al.* physica status solidi 4, 3419 (2007)

新しい方法: Ps 2段階冷却

新しいアイデア K. Shu *et al.* J. Phys. B 49, 104001 (2016)

(実験概念図)

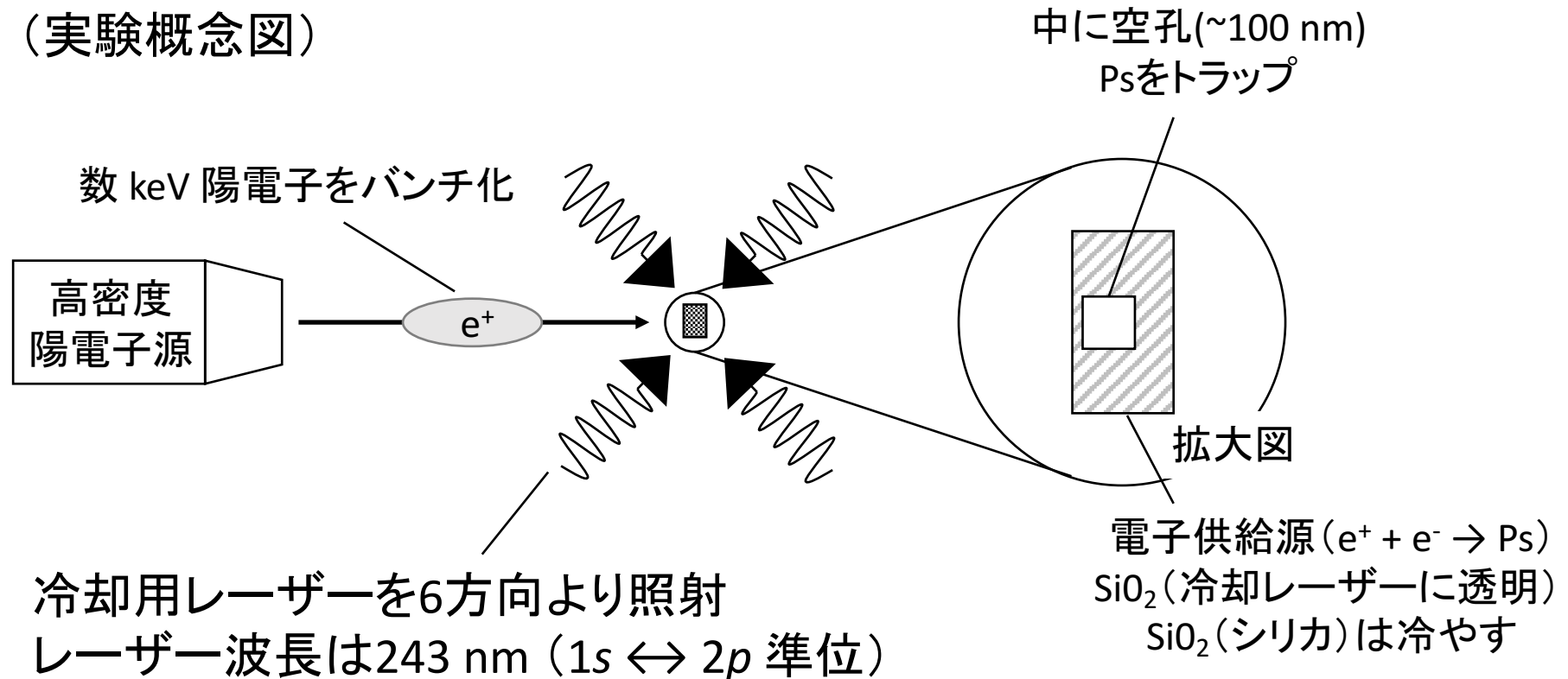


- ◆ Ps は約 1 eV = 8000 K の運動エネルギーをもって生成される
- ◆ シリカとの衝突(熱化)とレーザー冷却 の2つで10 Kまで高速冷却

新しい方法: Ps 2段階冷却

新しいアイデア K. Shu *et al.* J. Phys. B 49, 104001 (2016)

(実験概念図)



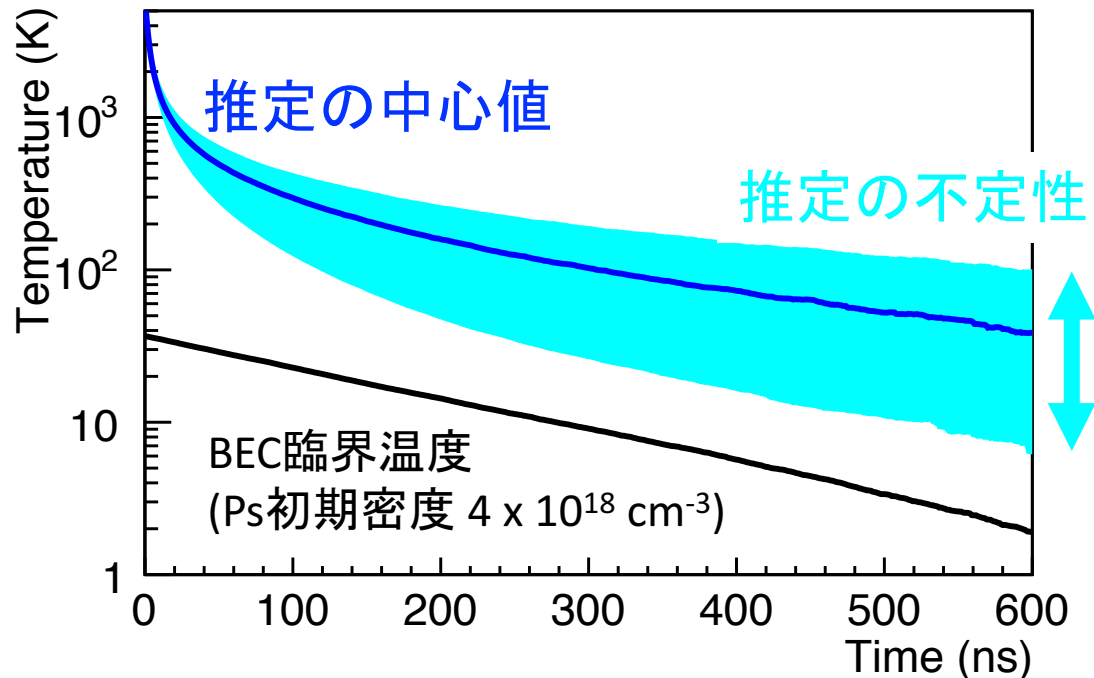
Ps (ほかあらゆる反物質系) レーザー冷却はまだ誰も成功していない挑戦
Ps冷却用に最適化したオリジナルの光源を開発中 (次の村吉)

熱化による冷却の見積もり

数 K でのPs冷却実験は行われたことがないため、
古典弾性散乱モデル(*)を使用して想定

用いた条件

- Ps初期運動エネルギー:
→ 0.8eV (6000 K) (*)
- シリカと衝突平均自由行程:
→ 100 nm
- シリカ温度:
→ 1 K



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)

- 過去の実験精度が制限されているため
推定到達温度の不定性大きい
- いずれの場合も、熱化のみによる
BEC実現は難しい

(*) Y. Nagashima *et al.* Phys. Rev. A 52, 258(1995) 5

レーザーによる冷却見積もり

冷却を加速しなければいけない

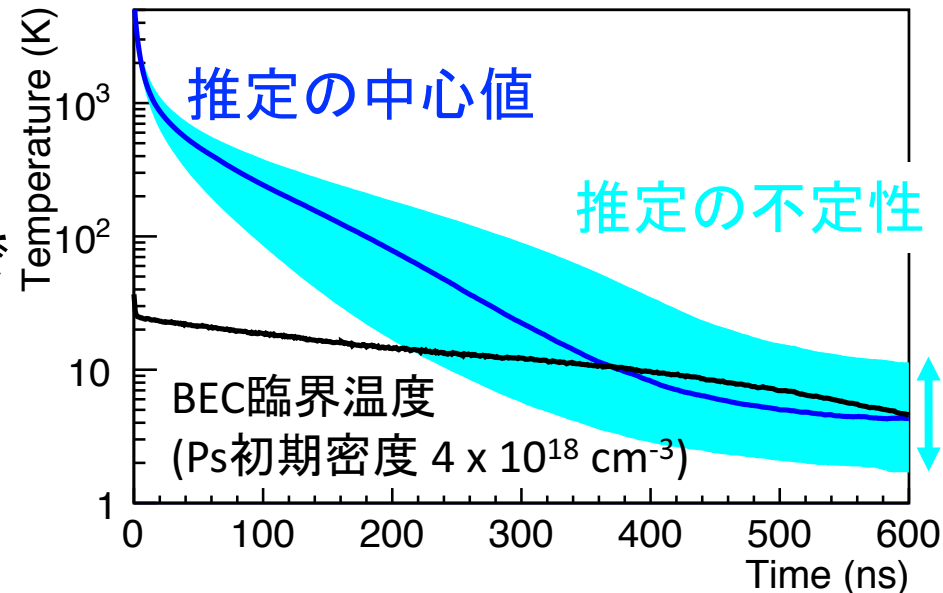
➤ レーザー冷却を用いる

- 現在開発中のPs冷却用レーザーでどれくらい冷えるのか推定
- BEC臨界温度以下にできる。
100 nsec. のスケールで十分な高速冷却が可能！

◆ BEC実現を目指して、まずは
10 KまでのPs冷却を実現する

やること

- 低温におけるPs熱化の実測
熱化が遅かった場合、実験システムの最適化が必要
- レーザー冷却用システムの開発
陽電子源・温度測定システム・レーザーそのもの



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)

低温におけるPs熱化の実測方法

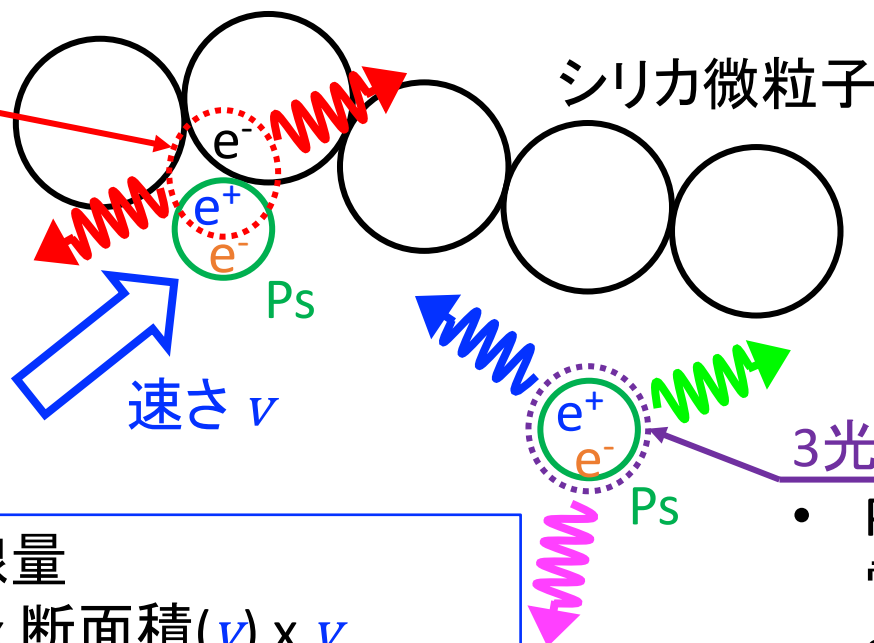
◆ Ps温度はどうやって測る？

➤ 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



Pick-off 2光子消滅 γ 線量

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

(古典的な, 衝突 $\rightarrow$ 消滅 モデル)

$\rightarrow$ 2光子消滅 γ 線量の時間変化から,
Ps温度の時間発展が分かる

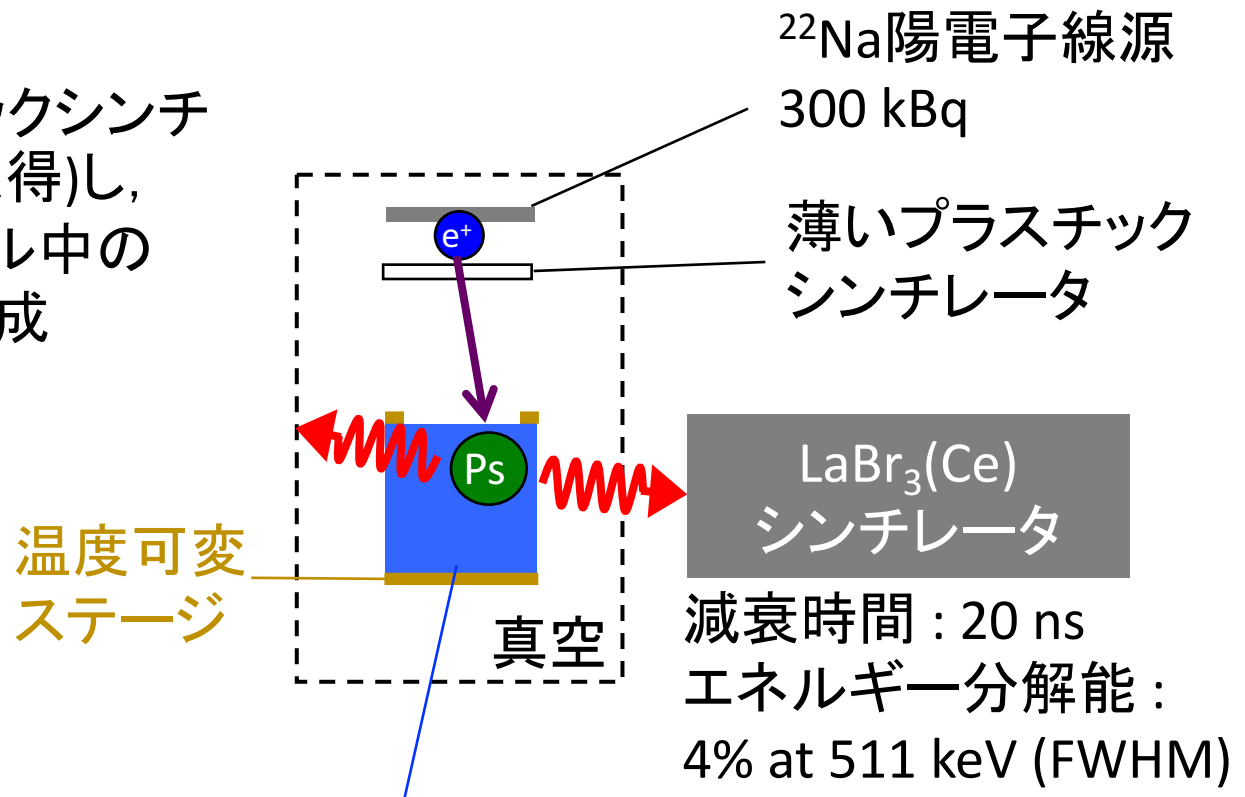
- Ps内の陽電子と電子が対消滅
- 0 ~ 511 keV 連続スペクトル

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

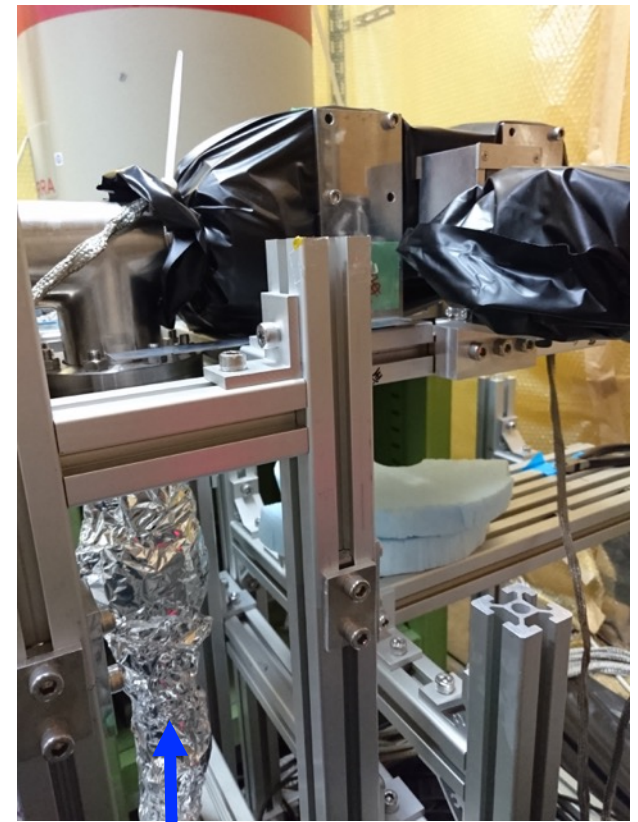
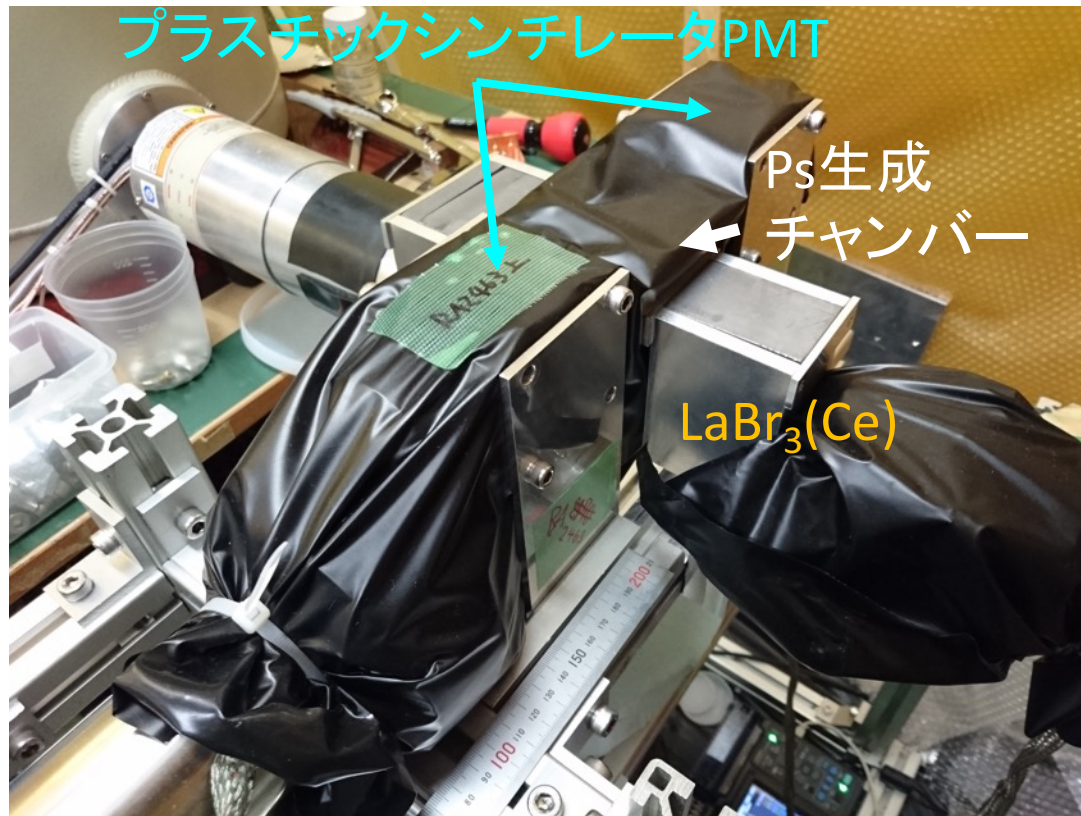


シリカエアロゲル ← 密度の異なる2種類

(1) 密度 0.11 g/cm^3 → 平均空孔径 60 nm

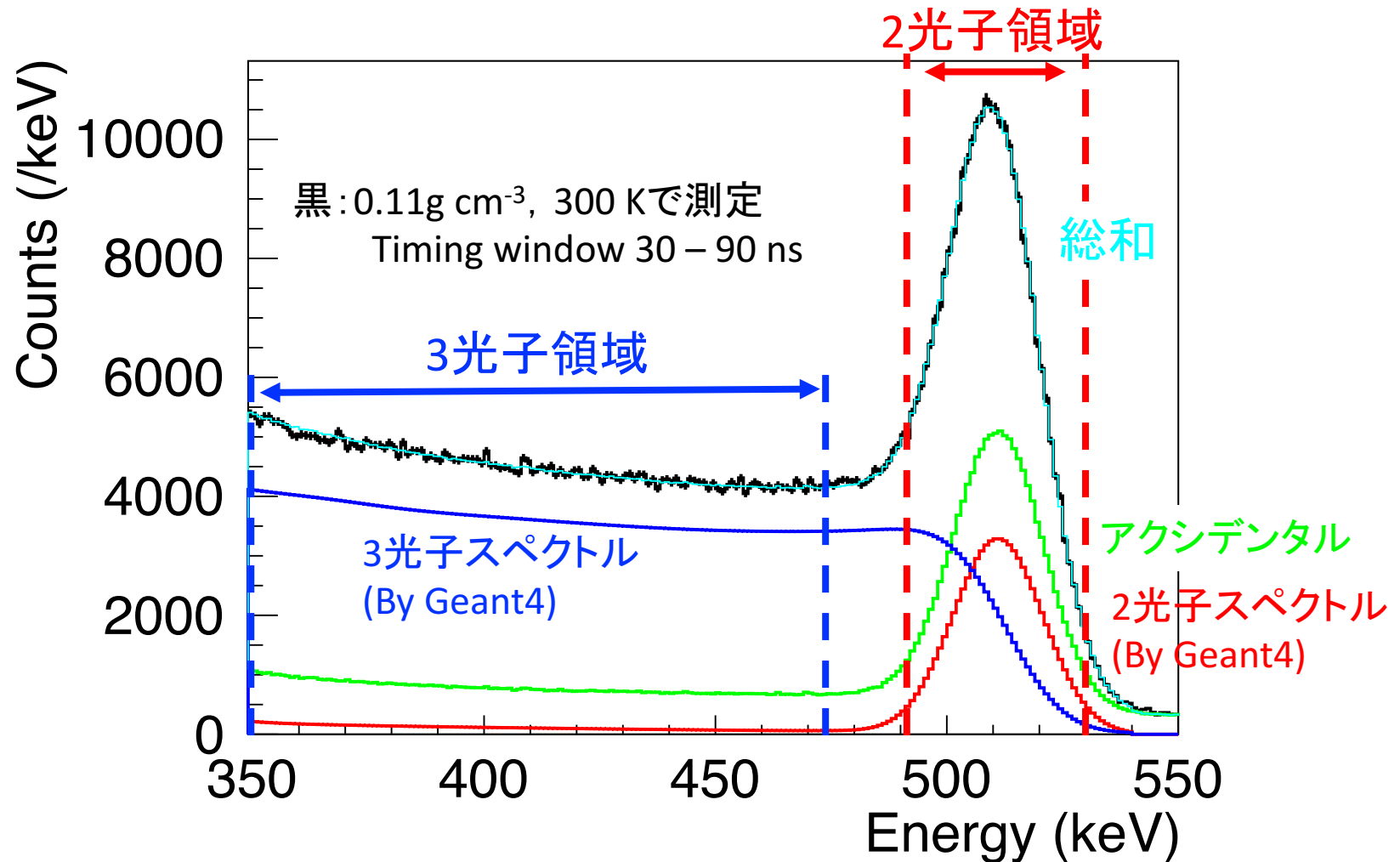
(2) 密度 0.06 g/cm^3 → 平均空孔径 120 nm

実験装置



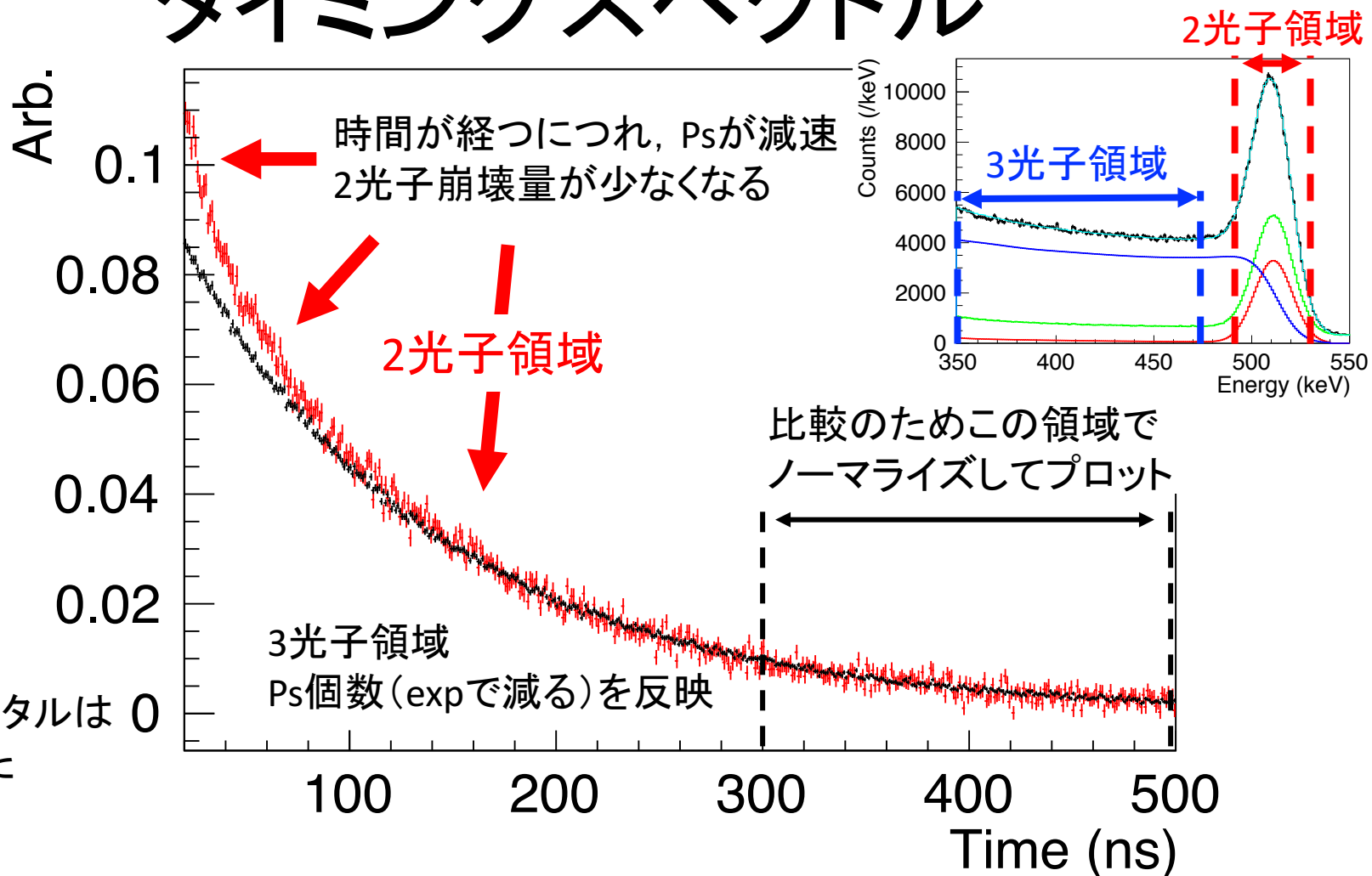
ヒーターや寒剤で温度可変
至エアロゲルステージ

γ 線エネルギースペクトル



◆ 2・3光子領域で、 Ps 生成 - γ 線崩壊時間差タイミングスペクトルを作成

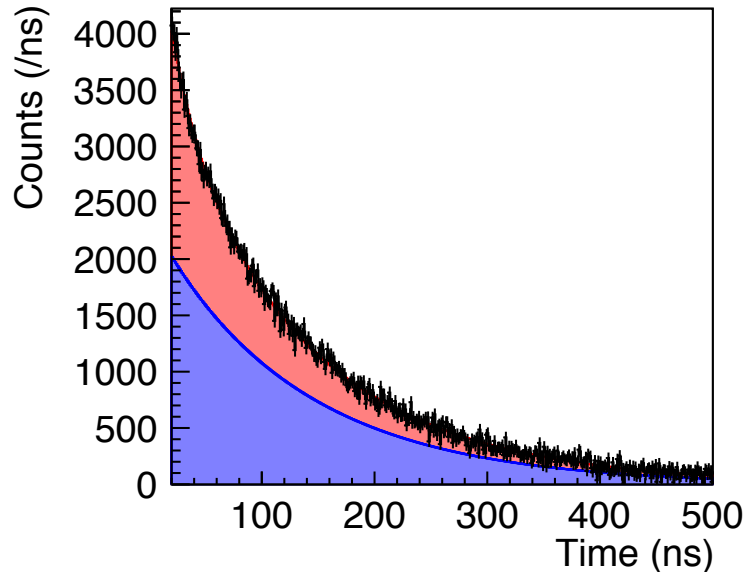
γ 線崩壊 タイミングスペクトル



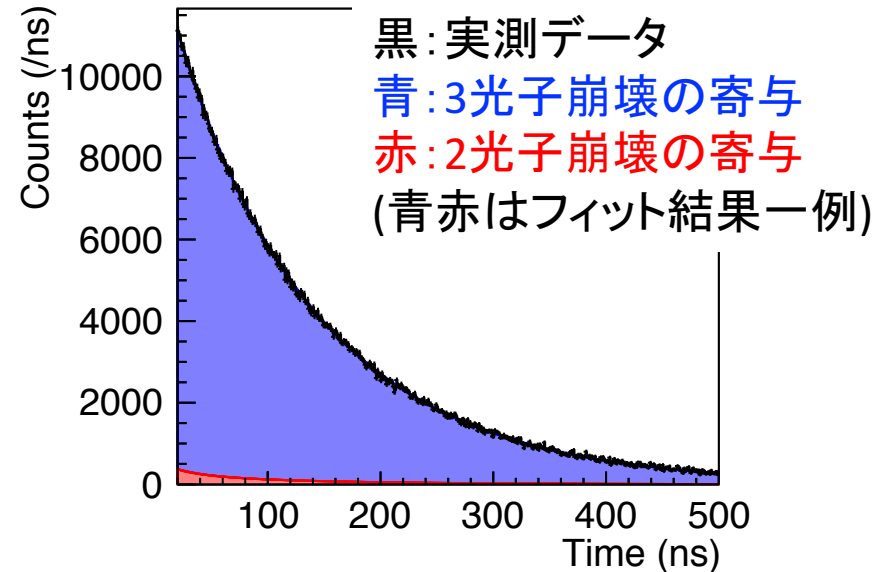
※ アクシデンタルは 0
差し引いた

- ✓ 3光子崩壊量に対し, 2光子崩壊量が変化していくのが分かる
2つの崩壊量の比から, Ps平均速さ(温度)の時間発展を求める

Ps温度発展を求める



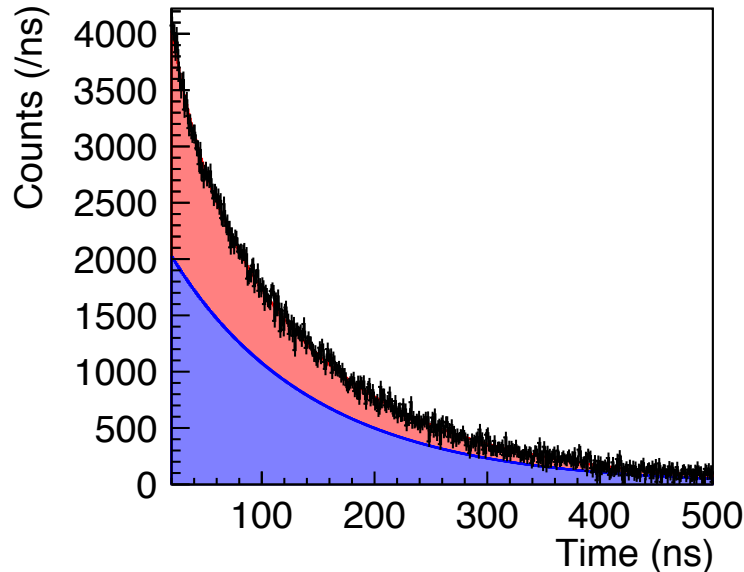
2光子領域 : $I_2(t)$



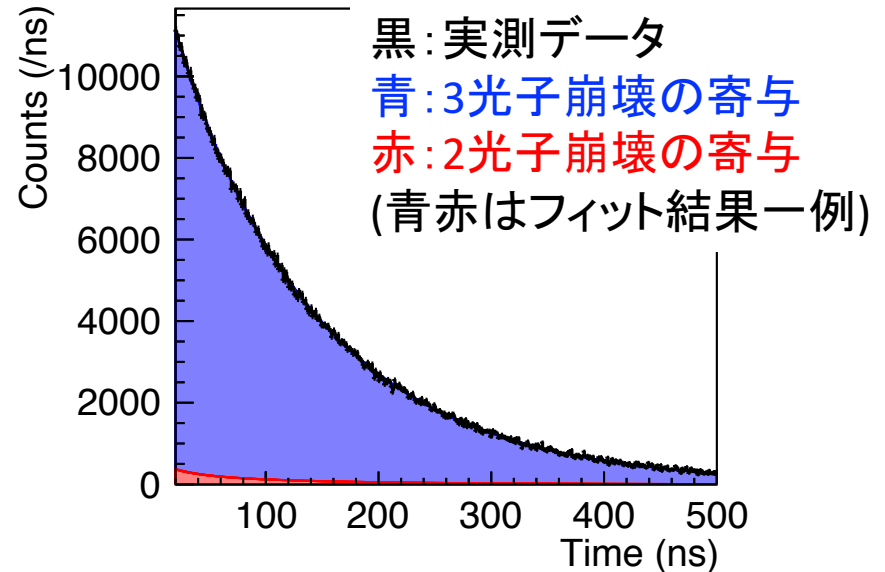
3光子領域 : $I_3(t)$

- ◆ 2つのタイミングスペクトルを,
 - γ 線の検出効率 (フリーパラメータ)
 - 3光子崩壊率 (過去の精密測定で既知)
 - 2光子崩壊率 (t)を入れてフィット

Ps温度発展を求める



2光子領域 : $I(t)$



3光子領域 : $I(t)$

- ◆ 2つのタイミングスペクトル
 - γ 線の検出効率 (フリ)
 - 3光子崩壊率 (過去)
 - 2光子崩壊率 (t)
- を入れてフィット

◆ Ps温度(速さ平均)に依存

- Ps・シリカ間衝突による冷えやすさ
 - Pick-off 断面積のPs速度依存性(べき乗)
- などフリーパラメータ

取得したデータとフィット妥当性

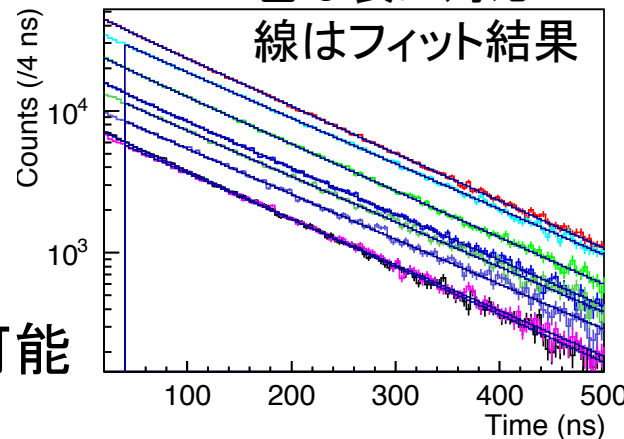
測定時のエアロゲル温度

密度 0.11 g cm^{-3} での温度 (K)	密度 0.06 g cm^{-3} での温度 (K)	温度を変えた 方法
360	360	リボンヒーター
300	300	室温
220	230	ドライアイス
130	150	液体窒素

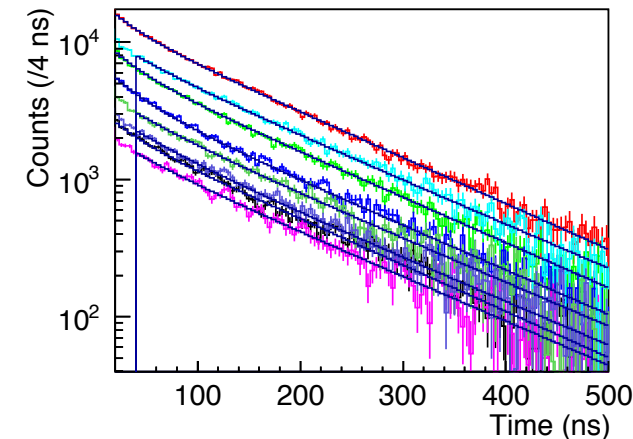
- ◆ 2種類異なる密度・様々な温度のエアロゲルで測定し、グローバルにフィット
- ✓ Pick-off 崩壊率 $\leftrightarrow$ Ps温度の較正ができる

色は表に対応

線はフィット結果



3光子領域



2光子領域

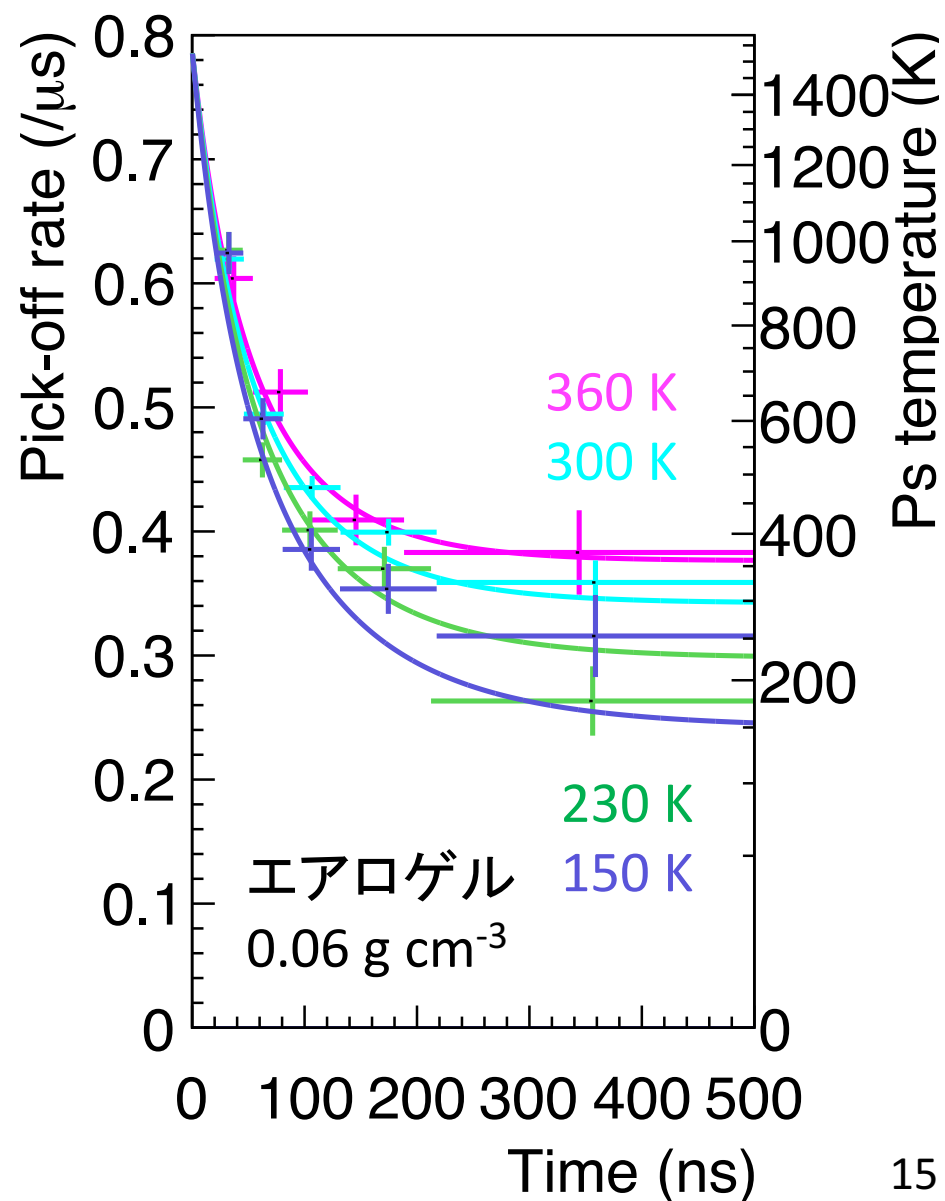
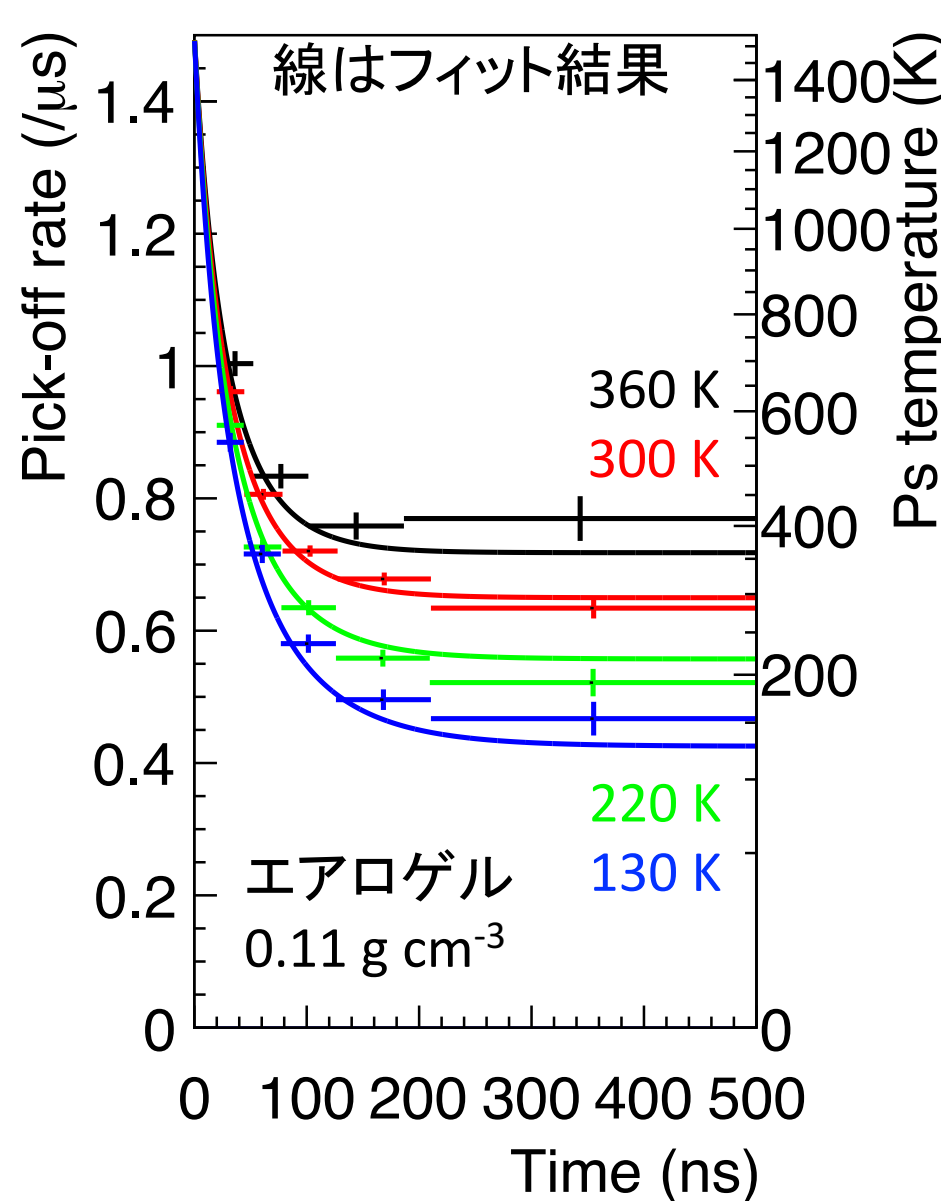
スペクトルフィット結果

フィットは妥当？

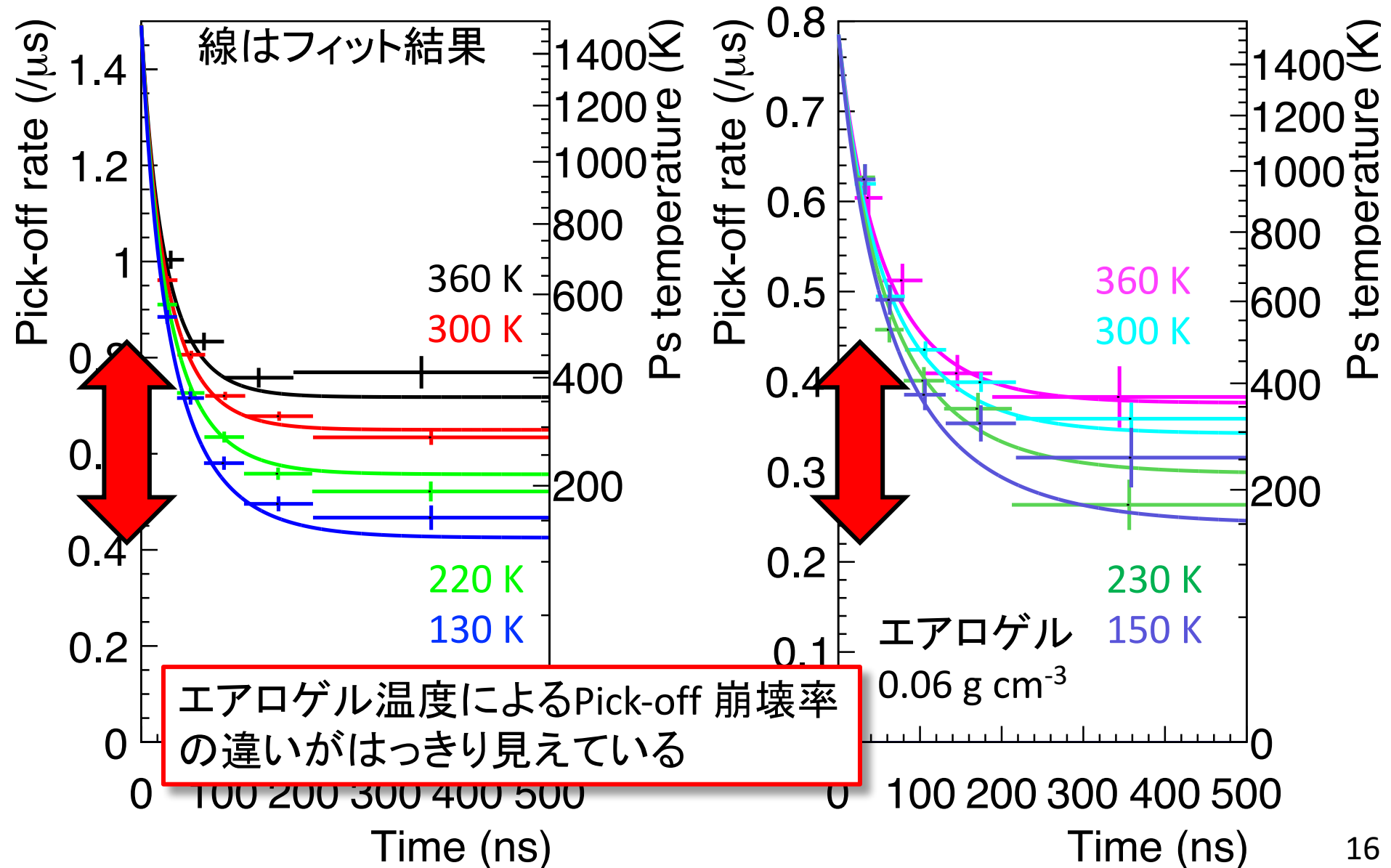
- ◆ $\chi^2/\text{ndf} = 15109/15025$
p-value = 0.31

- ✓ 古典モデルでフィット可能

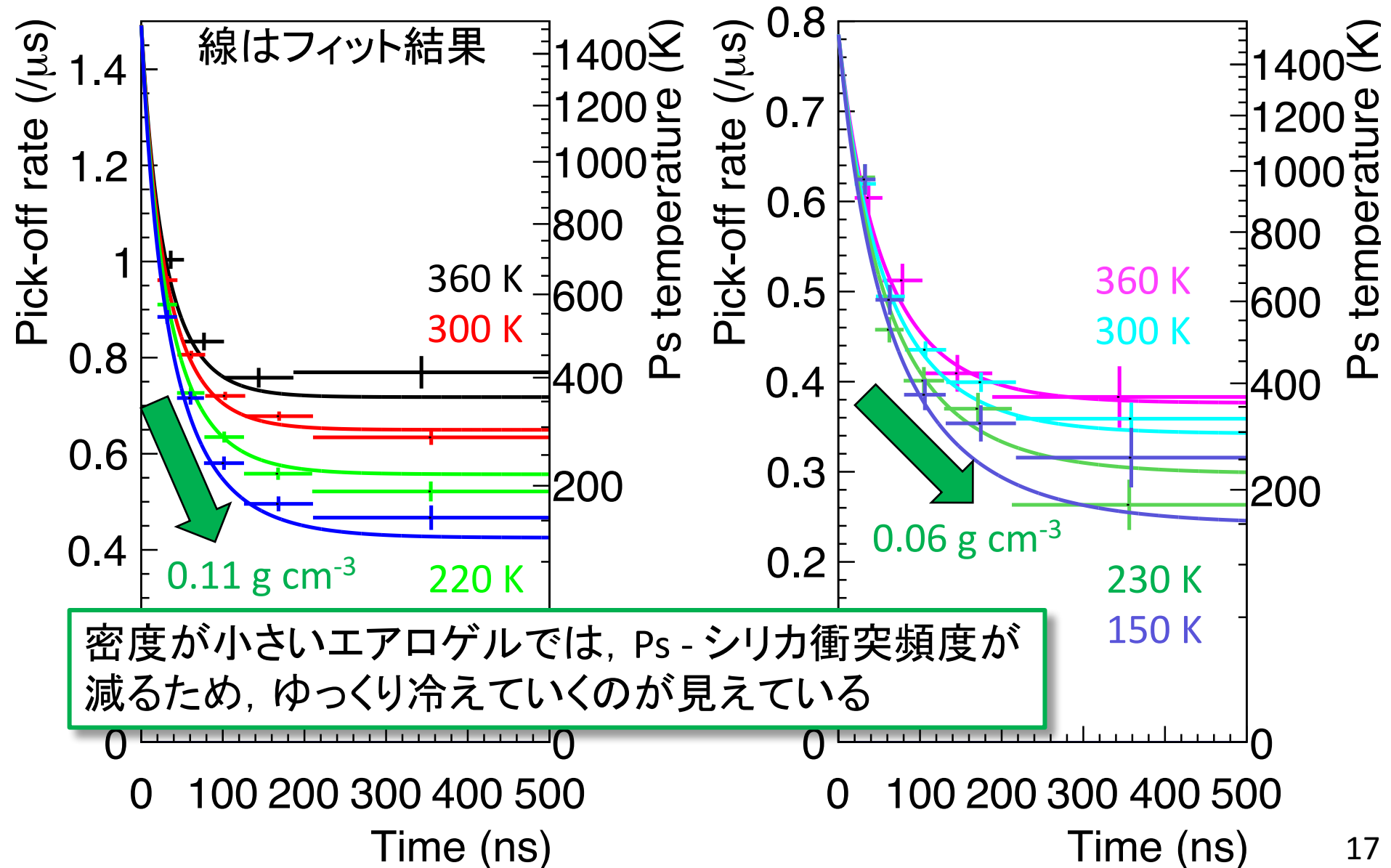
フィット結果 (Pick-off 崩壊率・Ps温度)



フィット結果 (Pick-off 崩壊率・Ps温度)



フィット結果 (Pick-off 崩壊率・Ps温度)

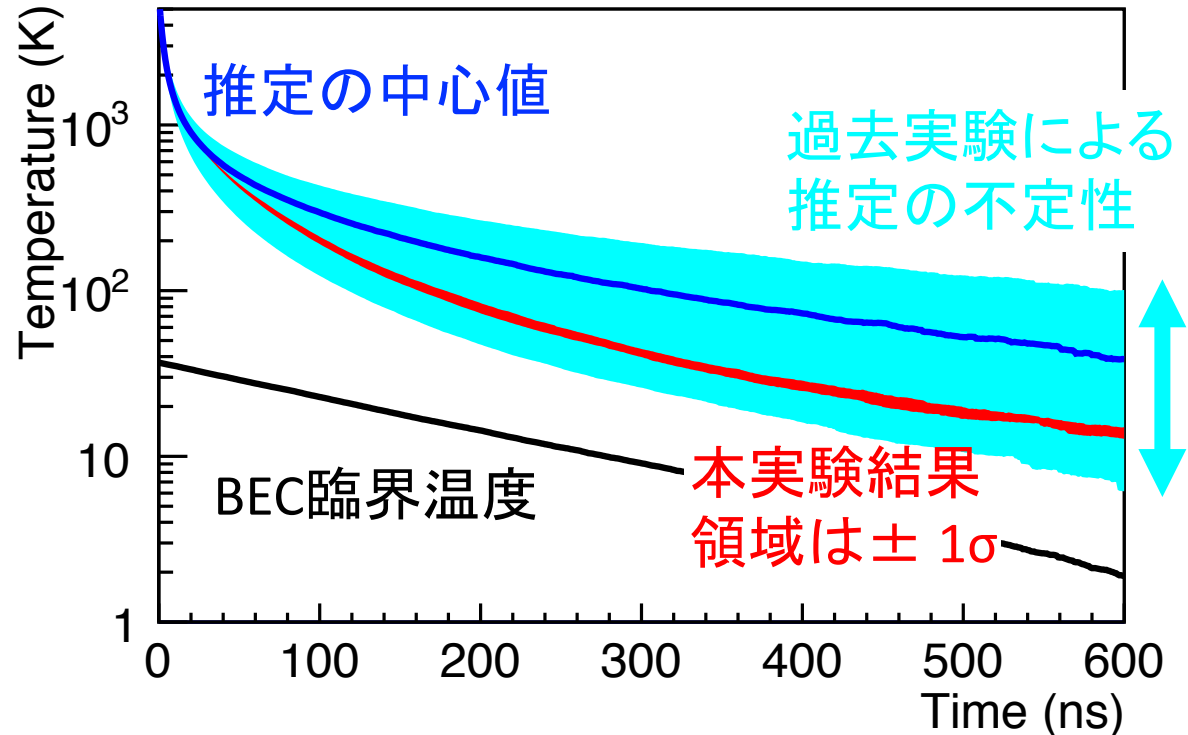


測定の結果

◆ 異なる密度のエアロゲルで、コンシステントな測定結果が得られた

◆ 室温～低温での測定によって、Pick-off 崩壊率 - 温度間較正ができた

◆ 今回の測定 (130 ~ 360 K) では、
過去推定の中心値より
熱化が速いという結果が得られた



Ps温度の推定 (T=1 K, L=100 nm)

今後の展望

◆ Ps熱化測定

- 今後は目標の10 K以下である4 Kで測定を行い、極低温でのPs温度発展を実測する(現在構築中)

◆ レーザー冷却

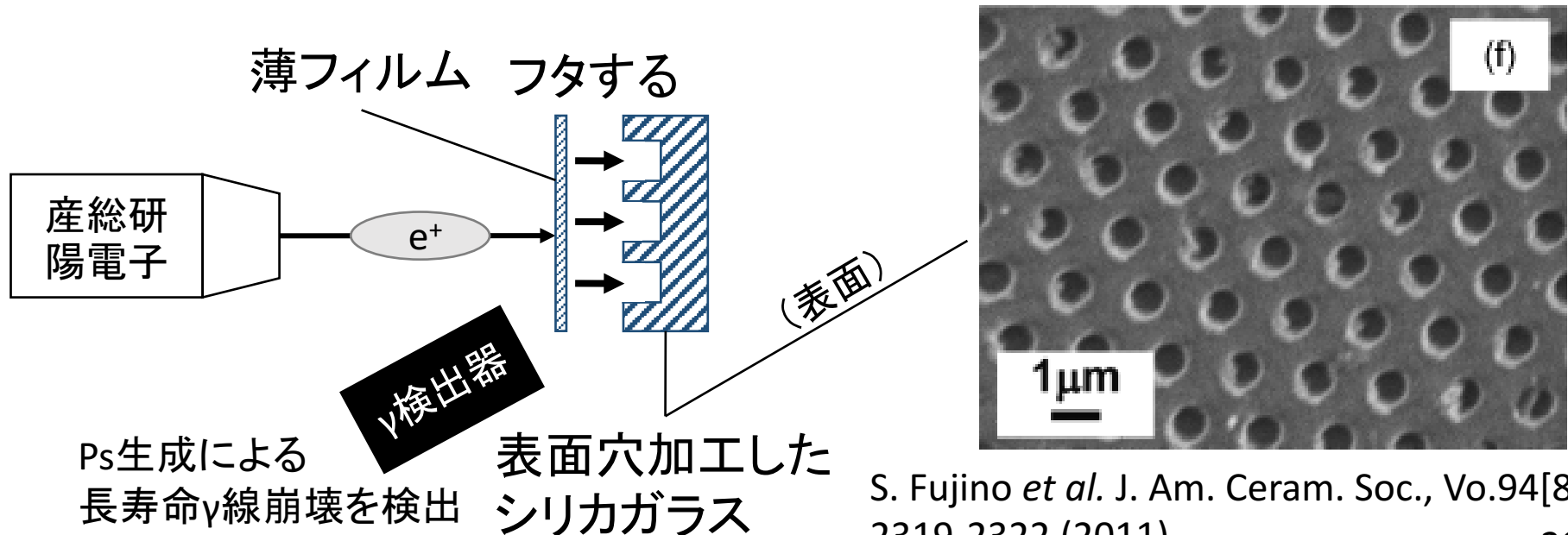
- 光に透明なPs キャビティを開発する
- レーザー冷却には約100 nsec. 時間幅パルスを用いるので、陽電子源も同期したパルス陽電子になる
- パルス陽電子に対する極低温Ps温度測定方法の開発をすすめる(γ 線のパイルアップ)

◆ BEC実現に向けた陽電子・ポジトロニウム収束

- BECを実現するには、約4000 個のPsを100 nm領域に閉じ込めが必要(世界記録の3桁上の密度)
- 陽電子を絞る、さらにポジトロニウムを絞る方法を検討していく

光透明シリカキャビティの開発

- 熱化による冷却
 - レーザー冷却
 - ポジトロニウムのトラップ(高密度を保ちBEC実現させるため)
- をすべて実現するには、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
↑九州大 藤野教授グループが開発・共同研究へ
 - 今年度中に、産総研陽電子ビームラインにてPs生成テストを行う予定



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

まとめ

- 電子とその反物質である陽電子の束縛系, ポジトロニウム (Ps) のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) 実現を目指している
- Ps -BEC が実現すれば, 反物質重力測定や, 511 keV ガンマ線レーザーに用いることができる
- 冷たいシリカにトラップし, 壁との衝突による冷却 (熱化) と, レーザー冷却を組み合わせることで Ps -BEC を実現する新しい手法を提案した
- Ps レーザー冷却初の実現を目指し, オリジナルの光源を開発中 (次の講演・村吉)
- 熱化については, 過去の実験に不定性が大きかったが, Pick-off 崩壊率を用いた測定により, 精度よく求めることができた。今後4 K での熱化を測定する。
- 陽電子ビーム開発を進めるとともに, 3~4年後をメドに世界初の反物質レーザー冷却を実現し, Ps -BEC の早期実現を目指す。