

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

東大理, 東大素粒子センター^A, 東大光量子科学センター^B



第53回アイソトープ・放射線研究発表会
2016.07.07 @東京大学弥生講堂

ポジトロニウム(Ps)-BEC

ポジトロニウム (Ps)

- 世の中で最も軽い原子

Ps-BECのモチベーション

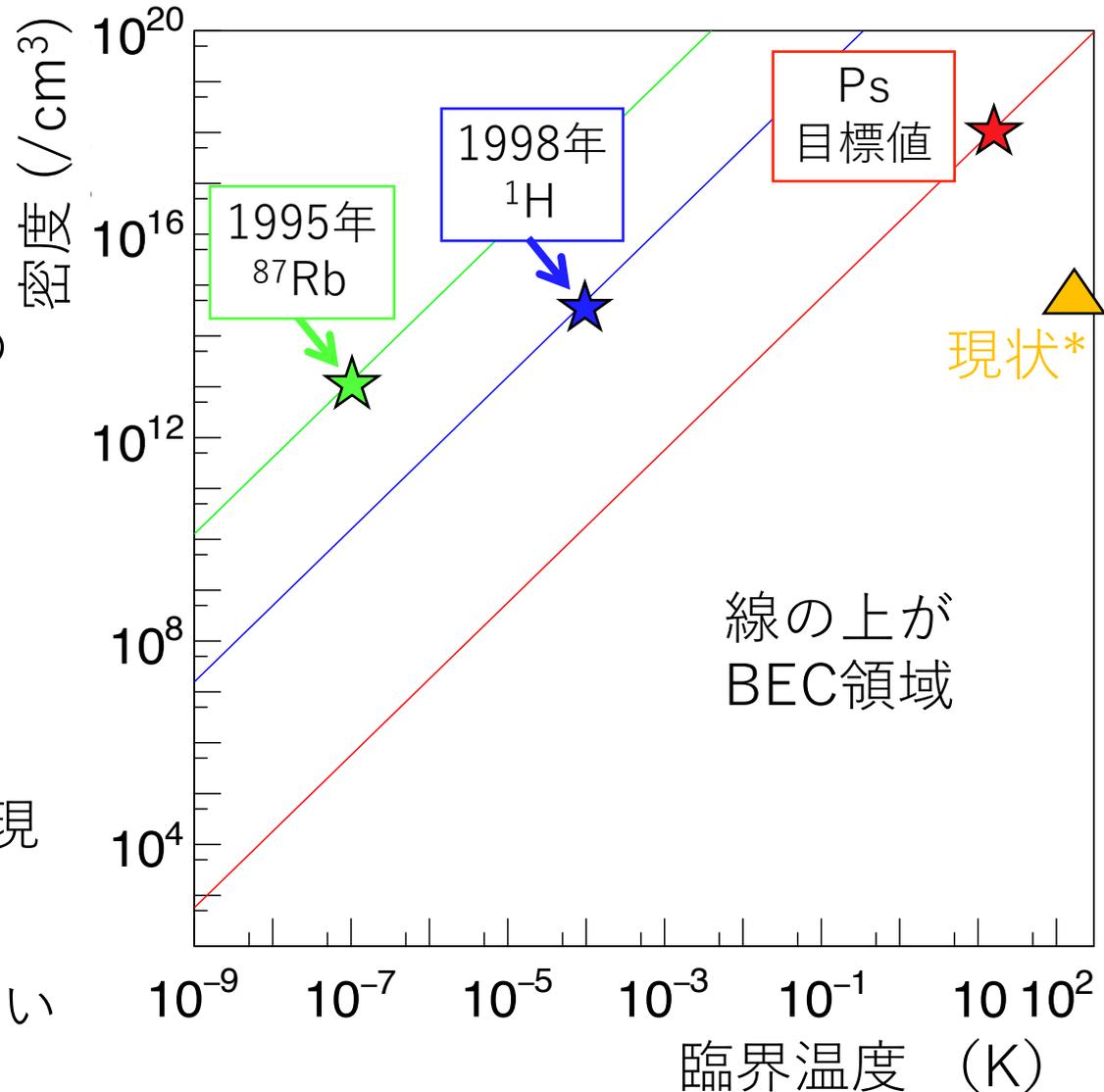
- 1995年BEC実現から初の反物質を含む系でのBEC

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

特徴

- 軽くてBEC臨界温度が高い(14 K @ 10^{18} /cm³)
- 寿命が短い



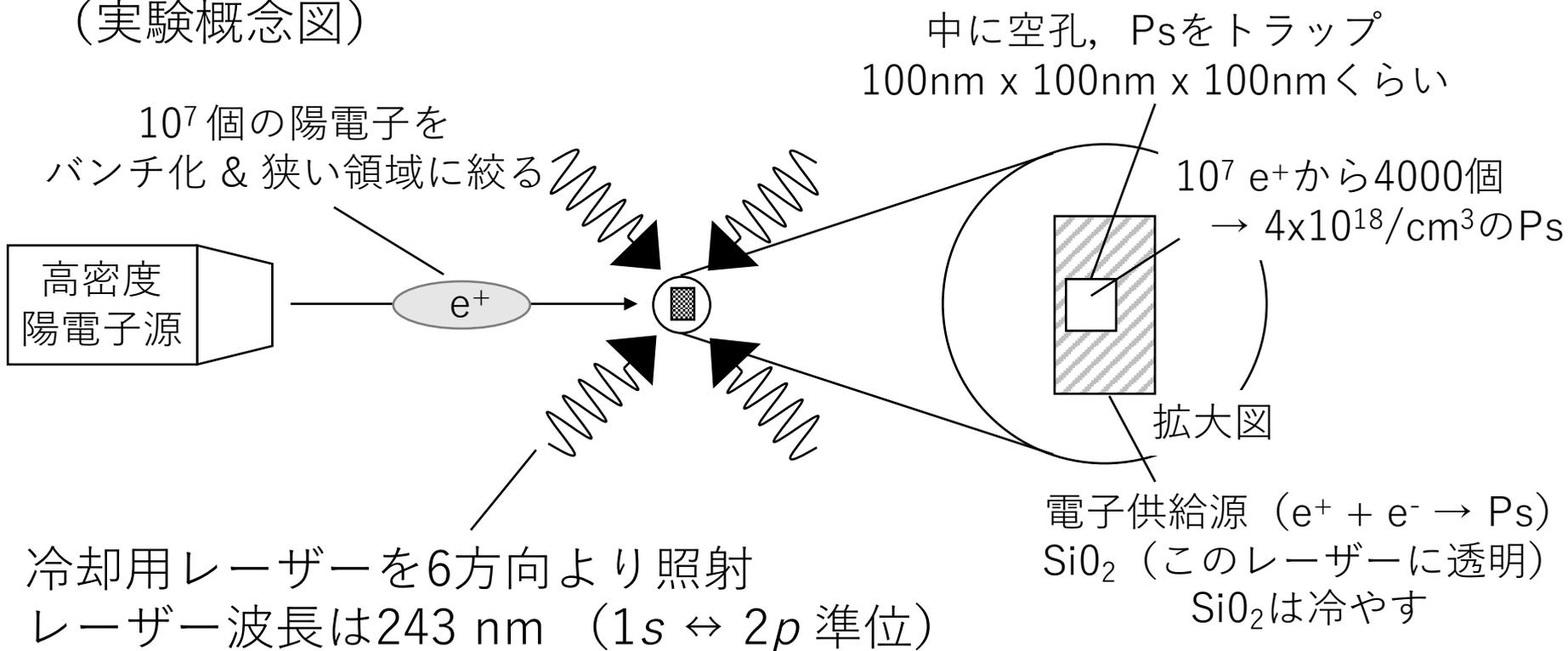
* : S. Mariuzzi *et al.* Phys. Rev. Lett. 104, 243401 (2010)

* : 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)

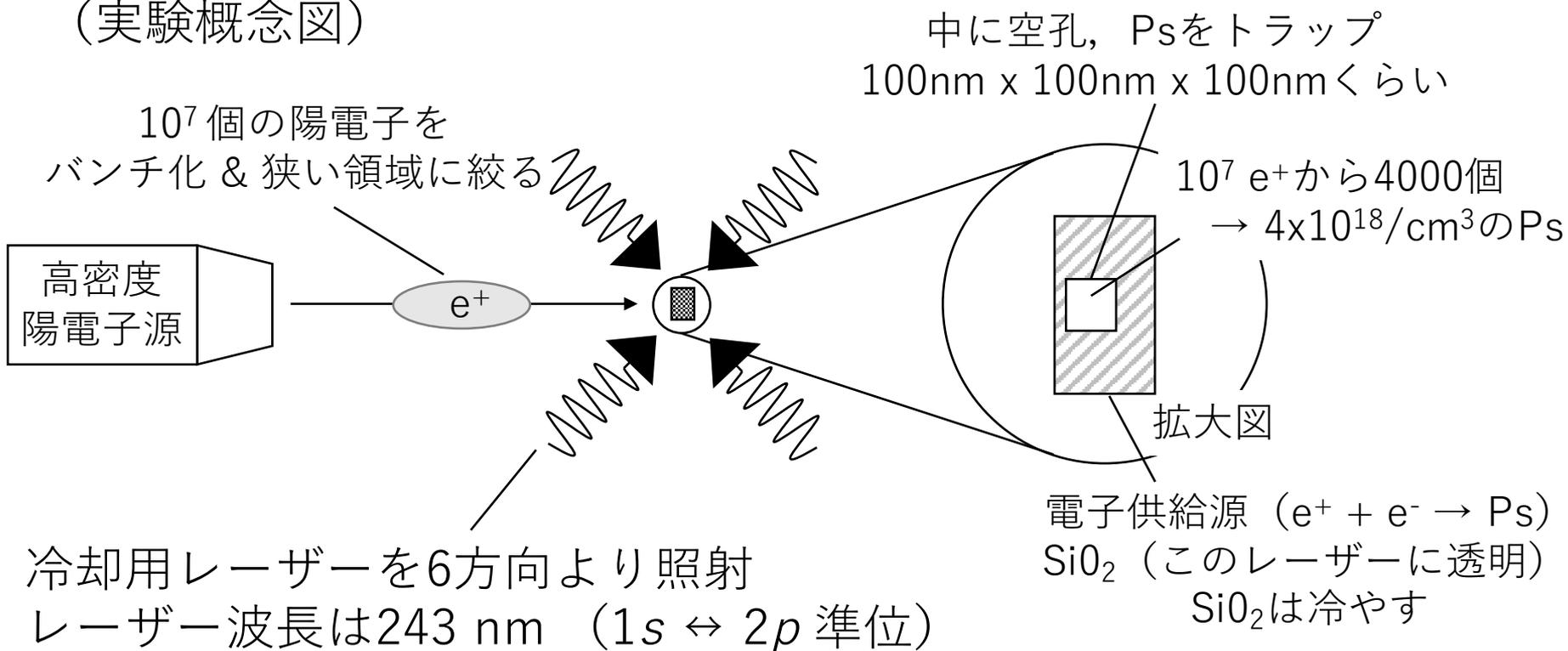


1. シリカ (SiO_2) でキャビティにPsをトラップ (高密度化)
2. シリカとの衝突 (熱化) と レーザー冷却 の2つで冷却 (高速冷却)

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)



特に, Psレーザー冷却自体まだ誰も成功していない新しいチャレンジ
Ps冷却用に最適化したオリジナルのシステムを開発中 (次の村吉)

熱化の見積もり

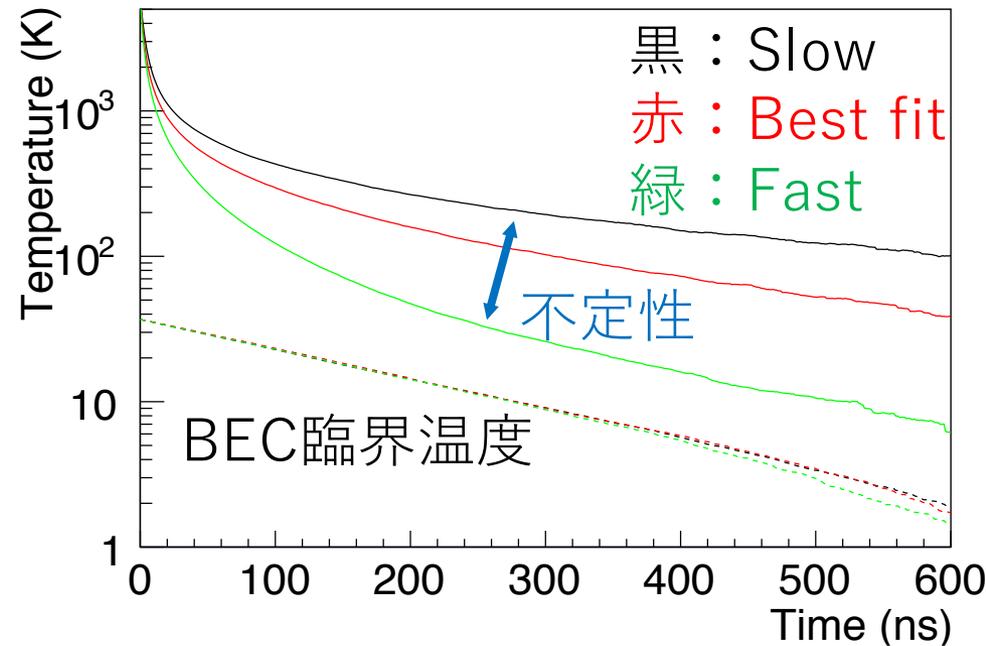
- 長嶋先生のモデル(Y. Nagashima *et al.* Phys. Rev. A, 52, 258(1995))を想定

初期条件

- Ps初期運動エネルギー：
0.8eV (6000 K)
Y. Nagashima *et al.* Phys. Rev. A 52, 258(1995)
- Ps初期生成数：4,000 個
- シリカキャビティ：
100nm × 100nm × 100nm, 1K

- ❑ 熱化による冷却では
BEC臨界温度まで冷やせない

- レーザーによって
高速冷却することが重要

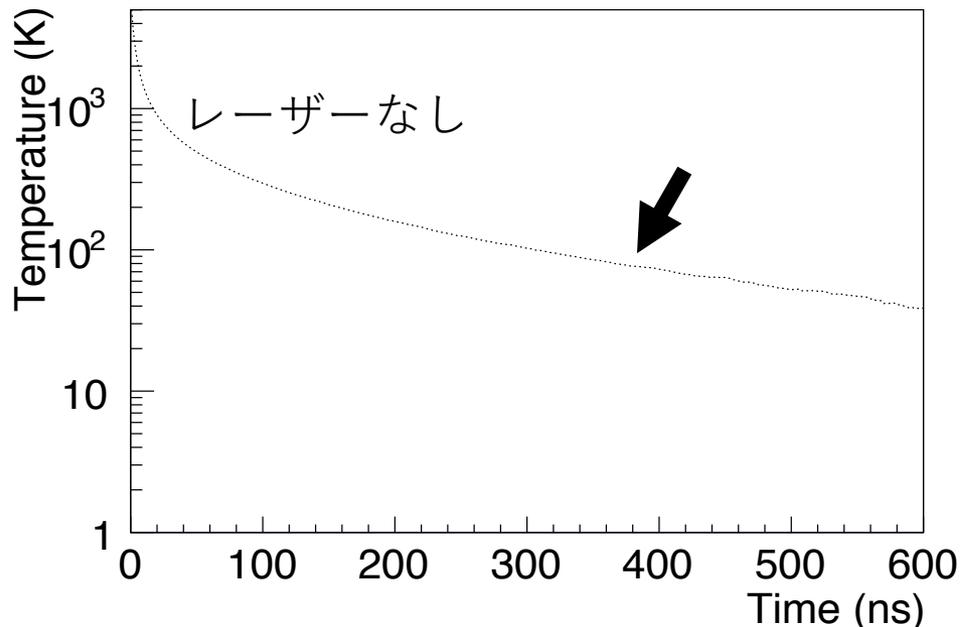


推定した熱化関数

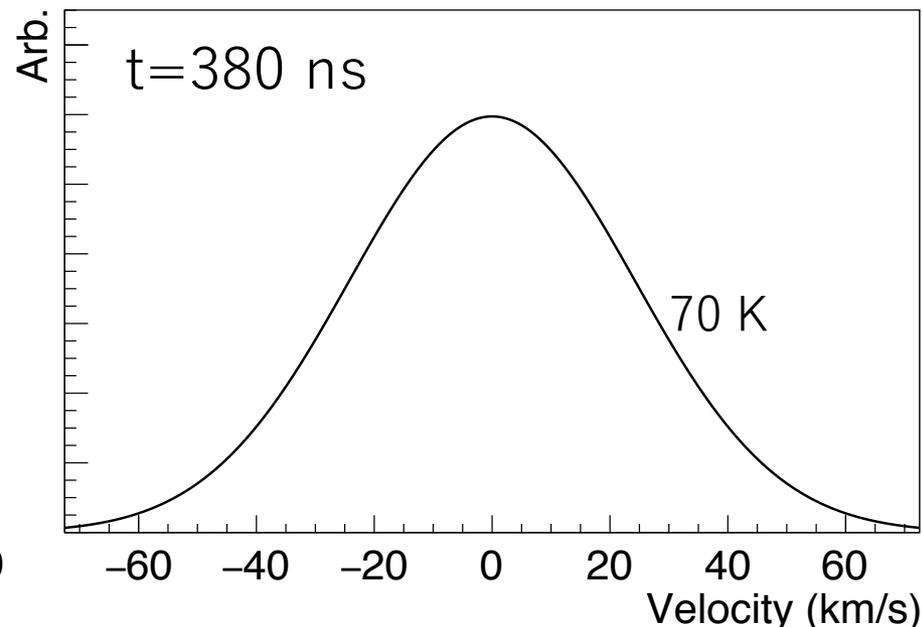
- ✓ 実験精度が制限されている
さらなる測定も重要

シミュレーションによる 冷却の評価

シリカキャビティとレーザーを組み合わせることで評価



Ps温度の時間発展

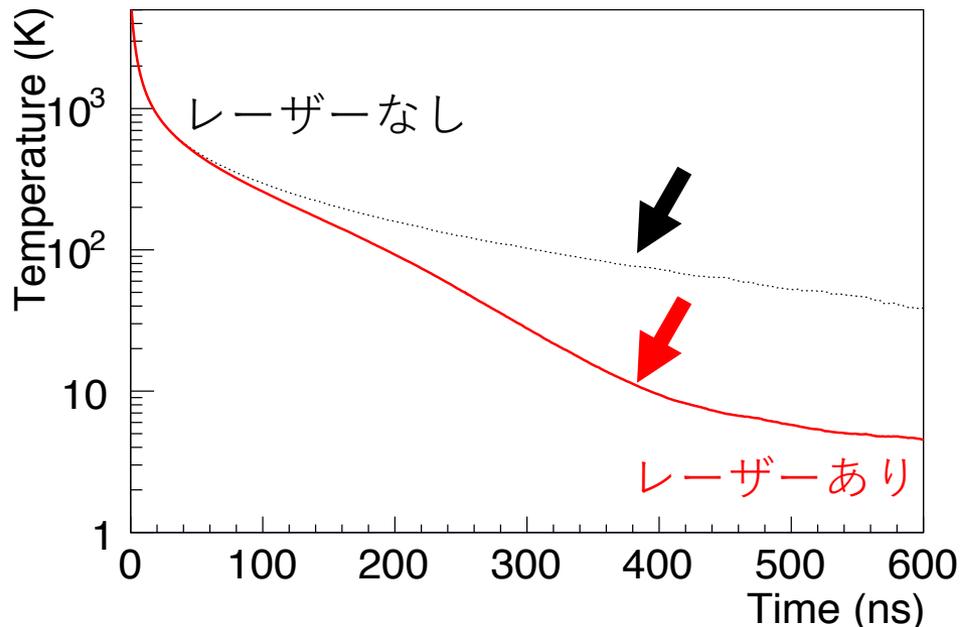


Ps速度ベクトルの1方向成分分布
(シミュレーション結果より計算)

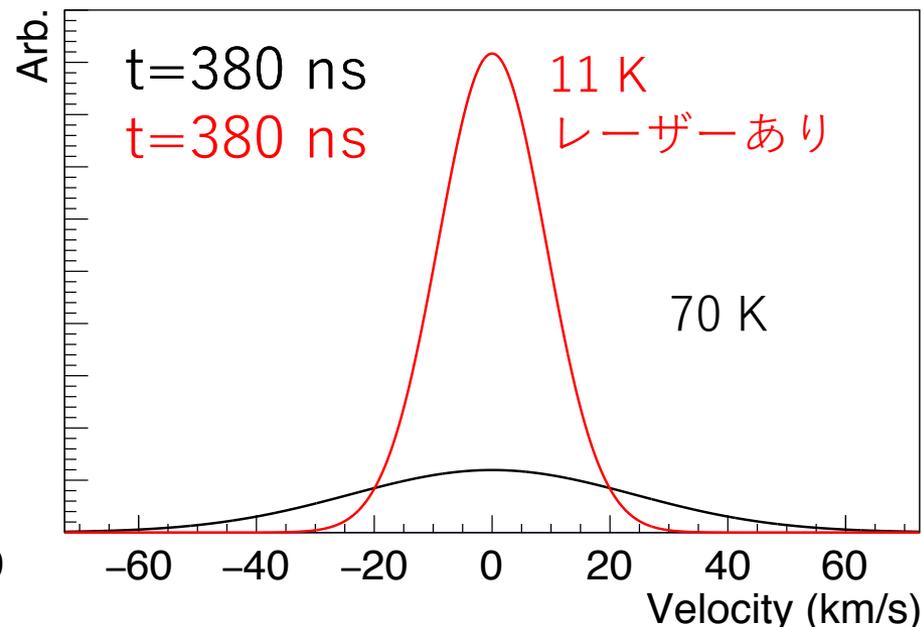
- レーザなしではなかなか冷えない (熱化はBest fitを使用)

シミュレーションによる 冷却の評価

シリカキャビティとレーザーを組み合わせる評価



Ps温度の時間発展

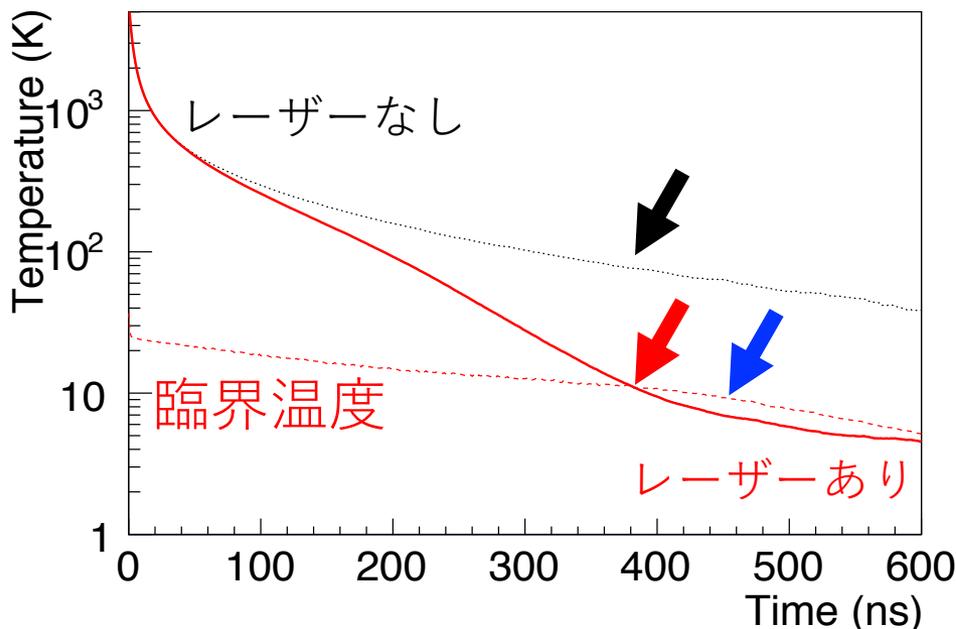


Ps速度ベクトルの1方向成分分布
(シミュレーション結果より計算)

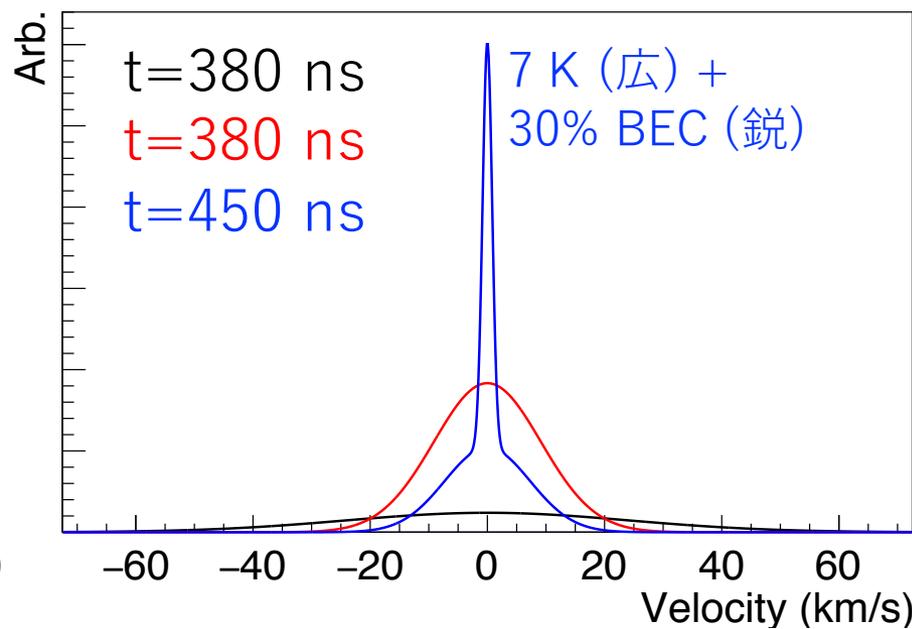
- レーザーなしではなかなか冷えない (熱化はBest fitを使用)
- 冷却レーザーがあると冷却を促進できる

シミュレーションによる 冷却の評価

シリカキャビティとレーザーを組み合わせる評価



Ps温度の時間発展



Ps速度ベクトルの1方向成分分布
(シミュレーション結果より計算)

- レーザーなしではなかなか冷えない (熱化はBest fitを使用)
- 冷却レーザーがあると冷却を促進できる
- BEC臨界温度と比較すると, 400 nsでPs温度が下回る

➤ Ps-BECが起こる！

Ps-BECへのロードマップ

1. Ps温度の精密測定 (<2年間)

- Ps熱化を精密測定し，前述の不定性をなくす
- レーザー冷却した冷たい10 K Psの温度測定方法を新しく開発

2. Psレーザー冷却の実現 (<4年間)

- Psが特殊な粒子だからレーザーも特殊・新たに開発 (次の話)

3. 陽電子ビームの開発

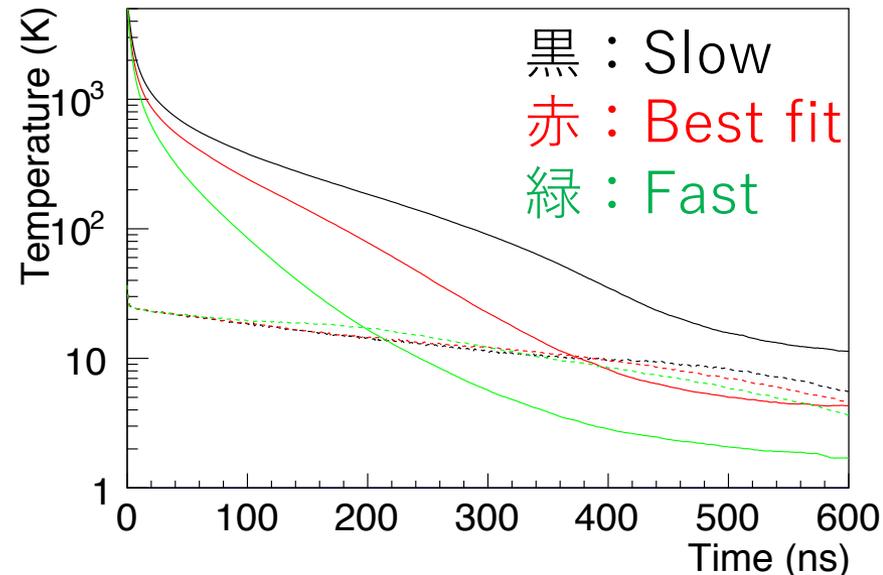
- 10^7 個の陽電子/数ナノ秒時間幅/100 nm径 は非常にチャレンジ
- 産総研陽電子プローブグループ 大島さん・オロークさん・鈴木さんと共同研究で開発

4. Ps-BECの実現

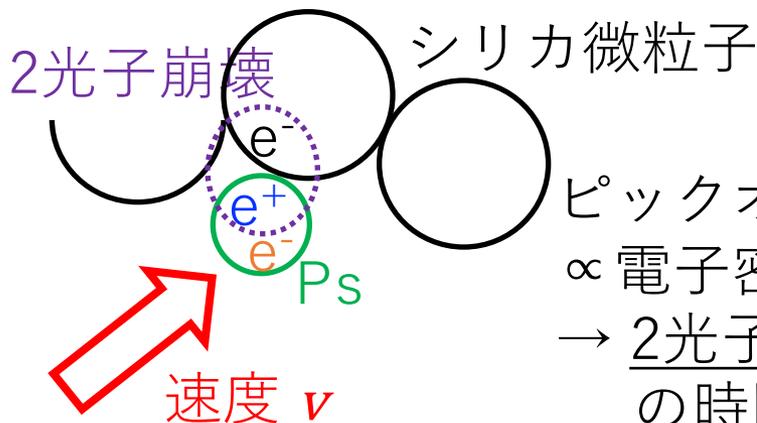
Ps熱化測定実験

冷シリカ中でのPs熱化を決定

- (右図) 熱化不定性の効果大
- 実験最適化のために必要
- ^{22}Na 線源・シリカエアロゲルを使ってピックオフ崩壊率の時間変化を測定する実験を行っている (お手軽)



ピックオフ2光子崩壊模式図



熱化パラメータの違いによる
Ps温度時間発展の変化
(レーザーあり)

ピックオフ2光子消滅 γ 線量

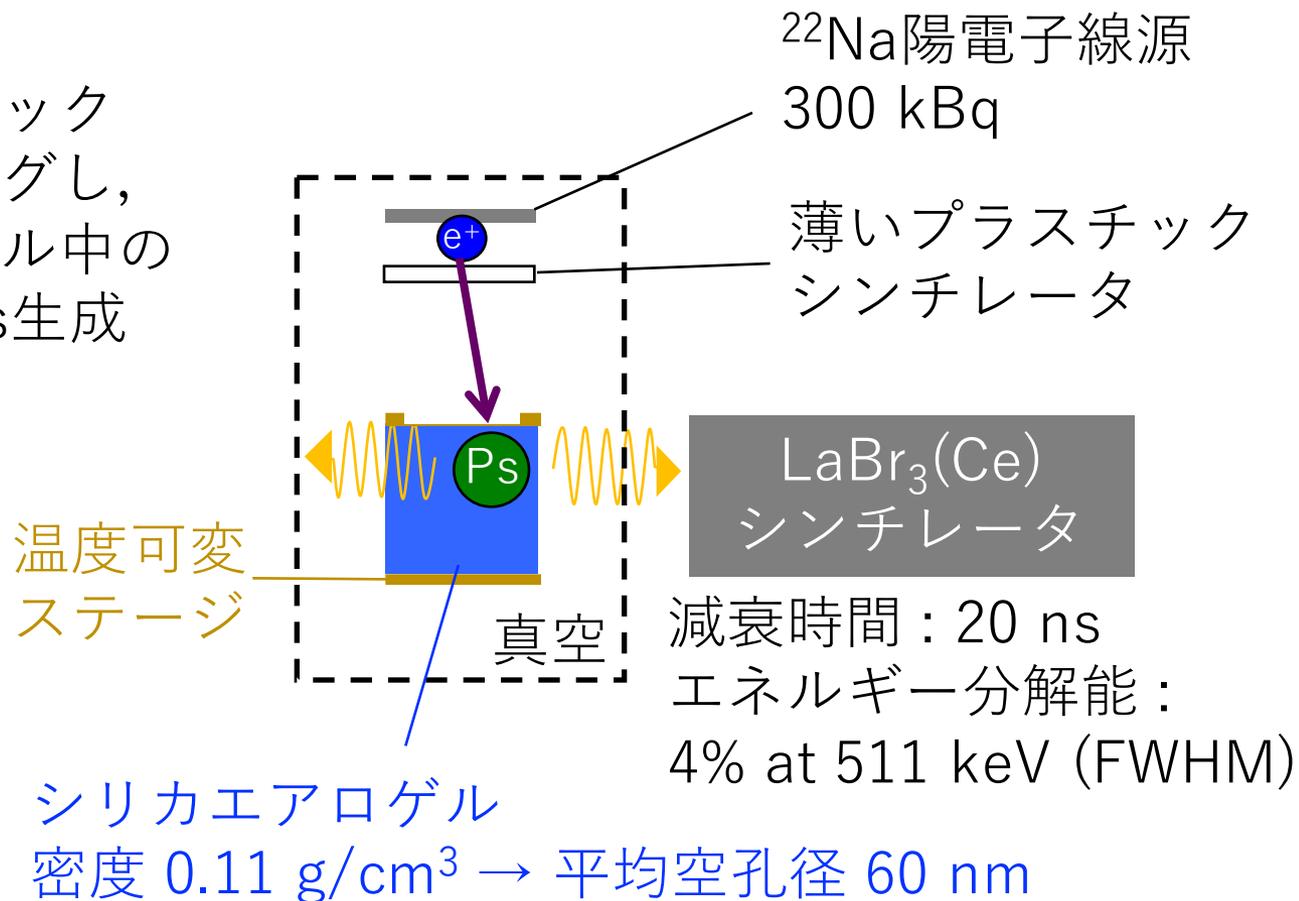
\propto 電子密度 \times 断面積(v) $\times v$

\rightarrow 2光子消滅 γ 線の時間変化から, Ps速度の時間変化 (=熱化関数) が分かる

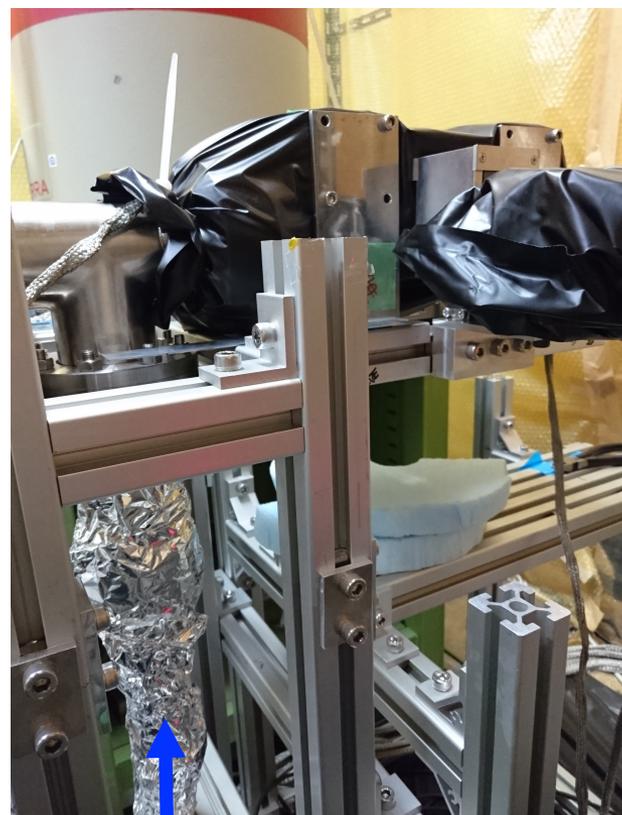
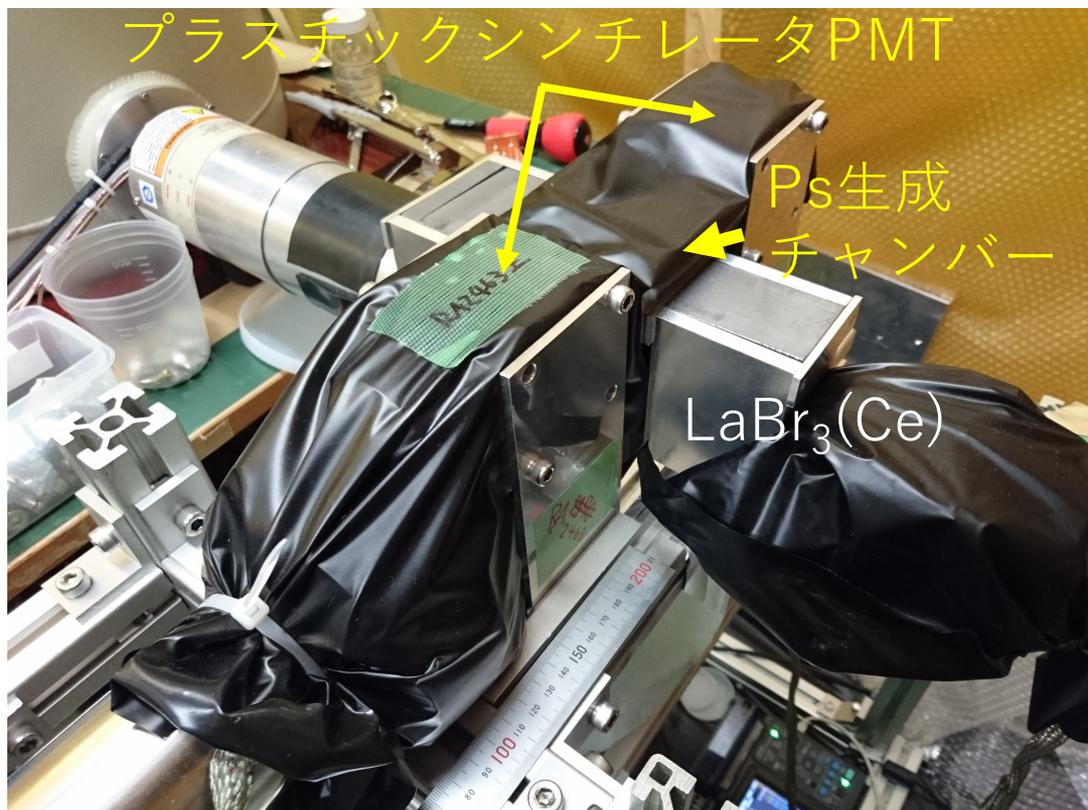
放射線源・シリカエアロゲルを用いたPs熱化測定

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 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレータで精度よく測定し、ピックオフ崩壊率の時間発展を測定



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

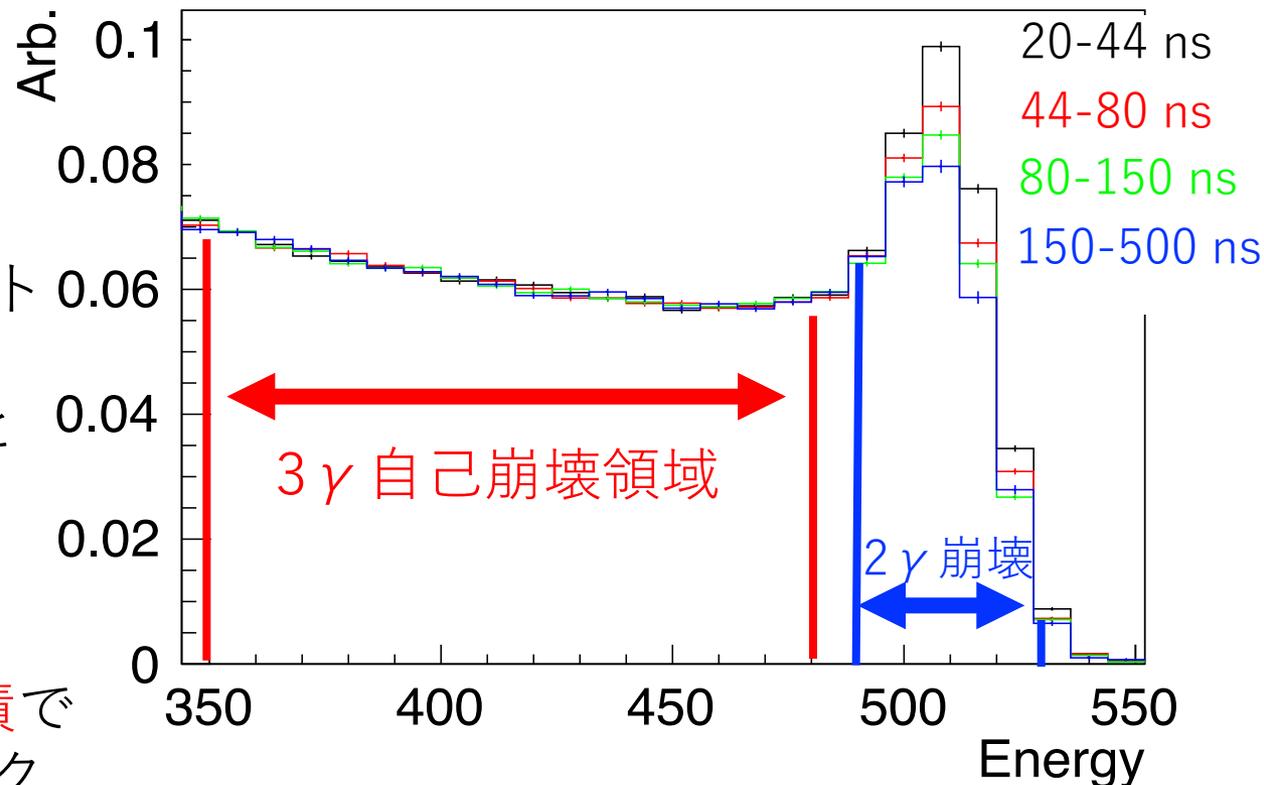
γ 線スペクトル

300 Kのデータ

1. 崩壊時間ごとに
 γ 線エネルギー
スペクトルを作成

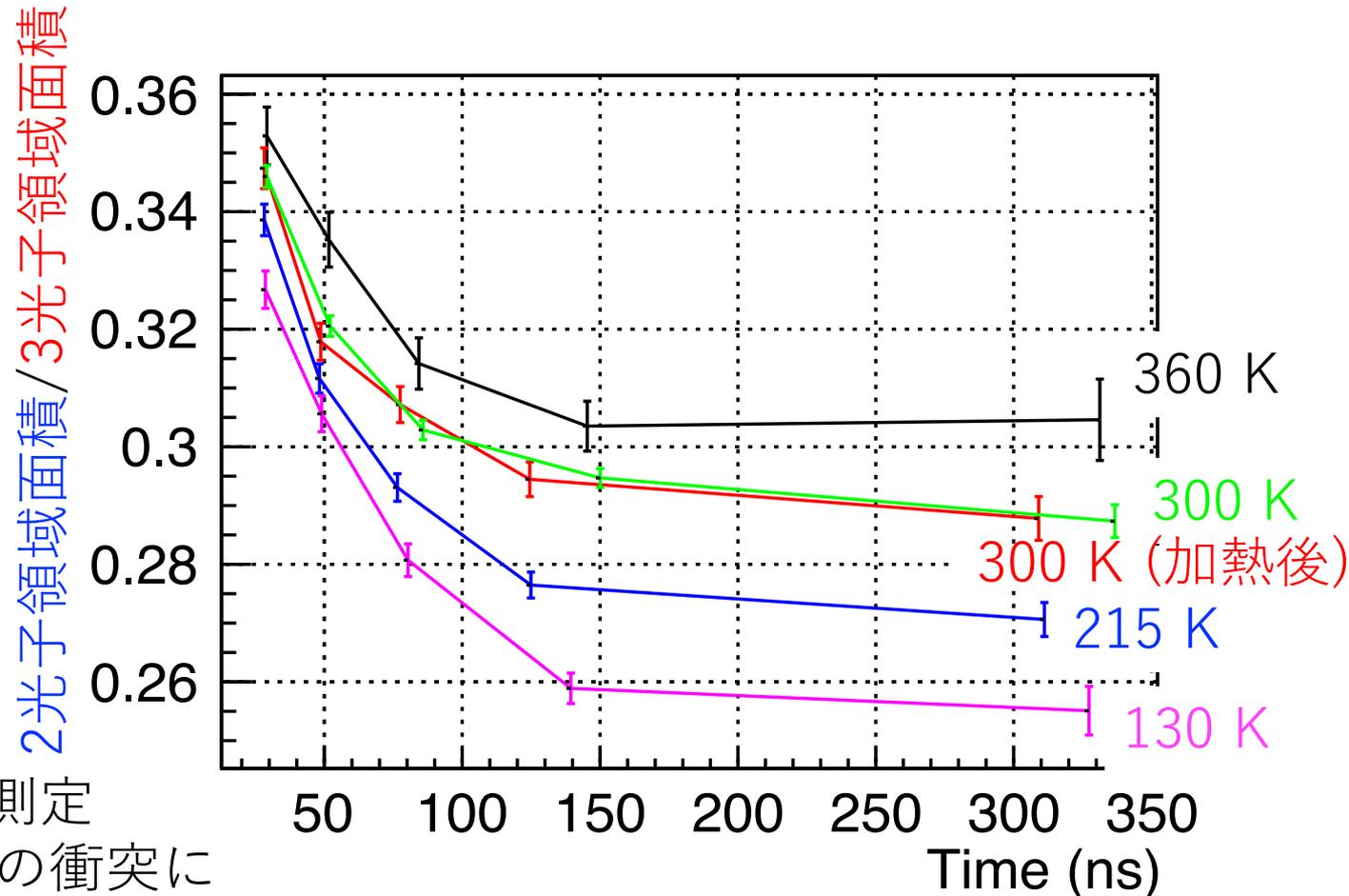
2. それぞれのスペクトルから,
3光子自己崩壊量と
2光子ピックオフ
崩壊量を計算

3. 青の面積/赤の面積で
崩壊時間毎のピック
オフ崩壊率と自己崩
壊率の比を求める



3 γ 自己崩壊領域で規格化した
 γ 線エネルギースペクトル
(崩壊時間毎に作成)

2 γ / 3 γ 比 (解析中)



- 様々な温度で測定
- Psがシリカとの衝突によって減速していくのが見えている

➤ 現在熱化パラメータを求めるために解析中

まとめ

- 冷却シリカキャビティとの熱化+レーザー冷却を組み合わせることでPs-BECを実現する実験を進めている。
- シリカキャビティによる冷却を、陽電子線源を使い実測している。測定したピックオフ崩壊率の時間発展から、熱化関数の決定に取り組んでいる。
- 冷却用レーザーには特殊な光源が必要なため、新しく開発している。→ 次の村吉のトーク

今後の課題

- 10 KまでのPsレーザー冷却実験のために、低温Psの温度測定方法を確立
- 高密度陽電子源について、 10^7 陽電子/バンチ・バンチ幅 数ナノ秒・100nm ビーム径の実現にむけ、産総研と協力して、ビームラインのデザインを進めている。