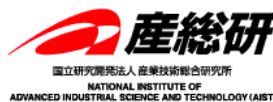


ボース・アインシュタイン凝縮実現を 目指したポジトロニウム冷却

周 健治, 石田 明, 難波 俊雄^A, 浅井 祥仁,
蔡 恩美^B, 吉岡 孝高^B, 五神 真,
大島 永康^C, オローク ブライアン^C, 満汐 孝治^C,
伊藤 賢志^C, 熊谷 和博^C, 鈴木 良一^C, 藤野 茂^D,
兵頭 俊夫^E, 望月 出海^E, 和田 健^F

東大理, 東大素セ^A, 東大工^B, 産総研^C, 九大GIC^D, KEK^E, 量研機構^F



第55回 アイソトープ・放射線研究発表会
@東京大学

お品書き

1. ポジトロニウムによるボース・アインシュタイン凝縮 (Ps-BEC) 実現の動機と手法
2. Ps-BEC実現の鍵となるPs生成材料開発の概要と進捗
3. 短パルス陽電子ビームラインにおけるPs冷却確認手法の検証
4. 今後の予定とまとめ

反物質でできたレーザーを初めて作って 反物質研究を進めたい

ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 高密度かつ低温でほとんどすべての粒子が単一量子状態を占める
- 原子でできたレーザー、コヒーレンスがある

Ps (ポジトロニウム)

- 電子とその反物質ペアである陽電子の束縛系

Ps-BECを反物質BECとして初めて実現し、
コヒーレンスを活かした研究を進めたい！

例えば

1. 【基礎】 Ps-BEC干渉計により
反物質にはたらく重力効果検証
 - 物質・反物質対称性を精密に調べ、宇宙に物質だけが残った機構を解明
2. 【応用】 消滅 γ 線を利用した
511 keV γ 線レーザーの実現
 - 物質超微細構造の非破壊検査

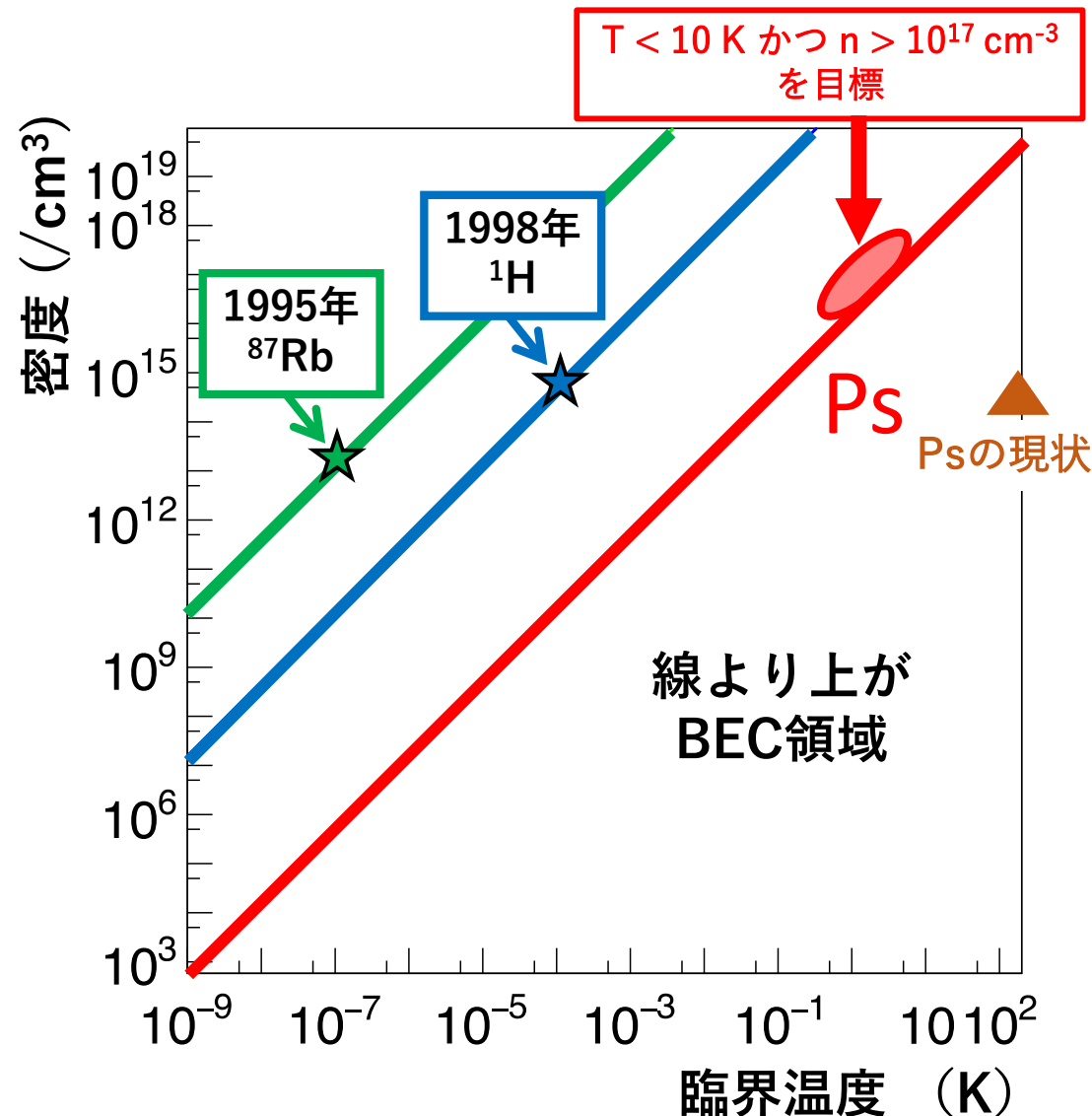
高密度化・高速冷却が難しい

質量が小さいため、
臨界温度が高い（右図）

➤ 反物質BECの最も良い候補

しかし寿命が短い
（*o*-Psで142 ns）

- この間に高密度化・高速冷却するのはとても難しい
- 新しい方法を考えた

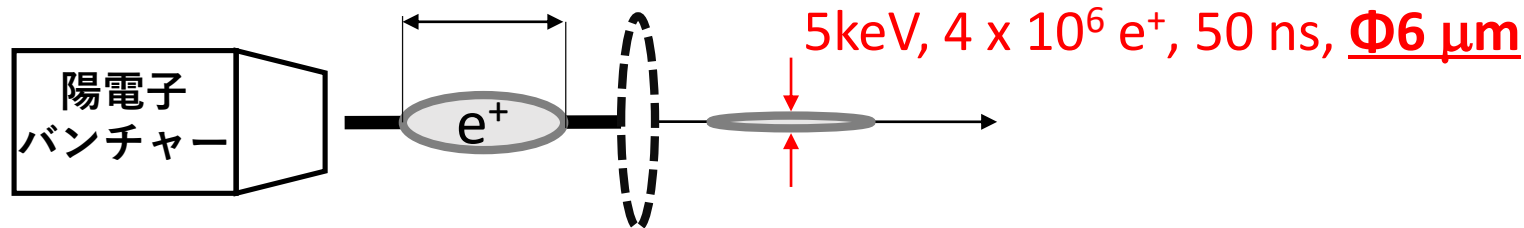


多段陽電子集束と空孔中レーザー冷却で Ps-BEC実現

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

1. 50 nsバンチ陽電子を多段集束し高密度化する
2. シリカ (SiO_2) 多孔体に陽電子を打ち込み, 高密度Psに変換する
3. 低温シリカとの衝突とレーザー冷却を組み合わせ高速冷却

5 keV, $10^8 e^+$, 50 ns, Φ 5 mm



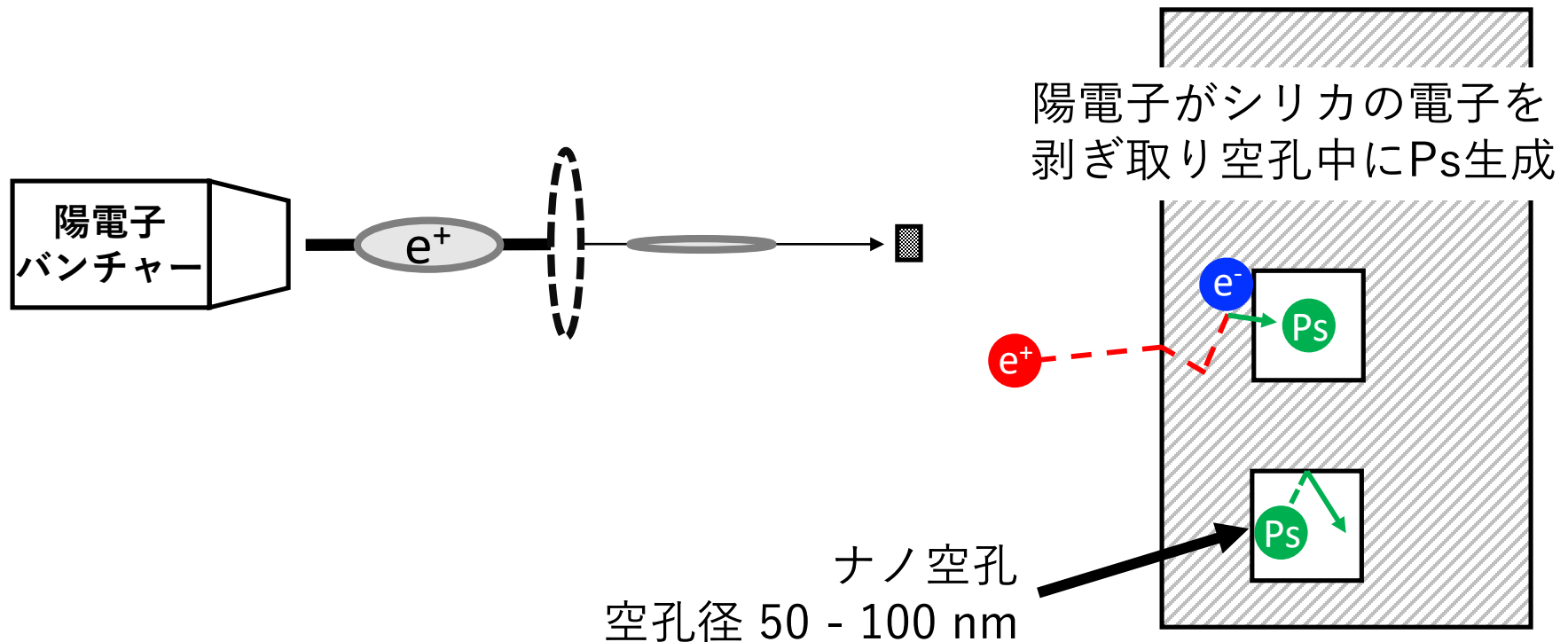
陽電子輝度増強部

➤ 輝度増強を多段に組み合わせる

多段陽電子集束と空孔中レーザー冷却で Ps-BEC実現

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

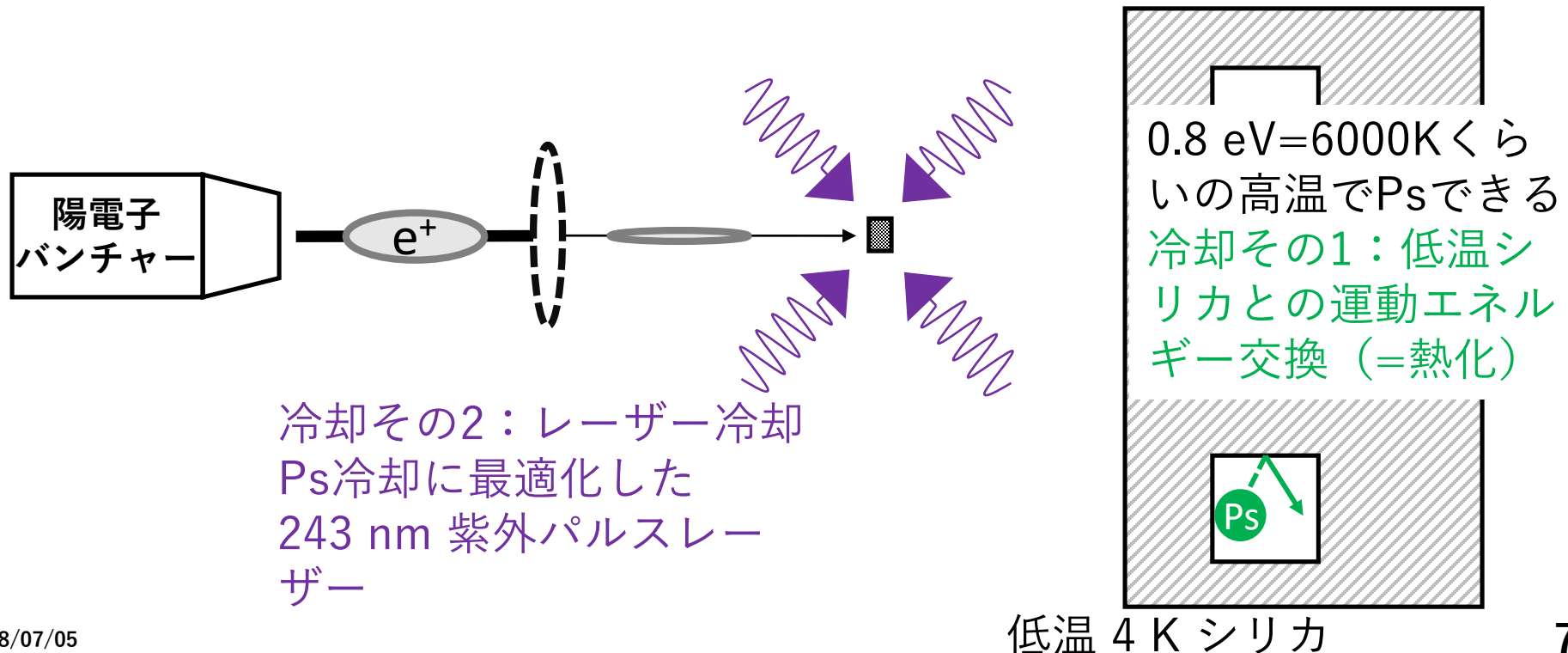
1. 50 nsバンチ陽電子を多段集束し高密度化する
2. シリカ (SiO_2) 多孔体に陽電子を打ち込み, 高密度Psに変換する
3. 低温シリカとの衝突とレーザー冷却を組み合わせ高速冷却



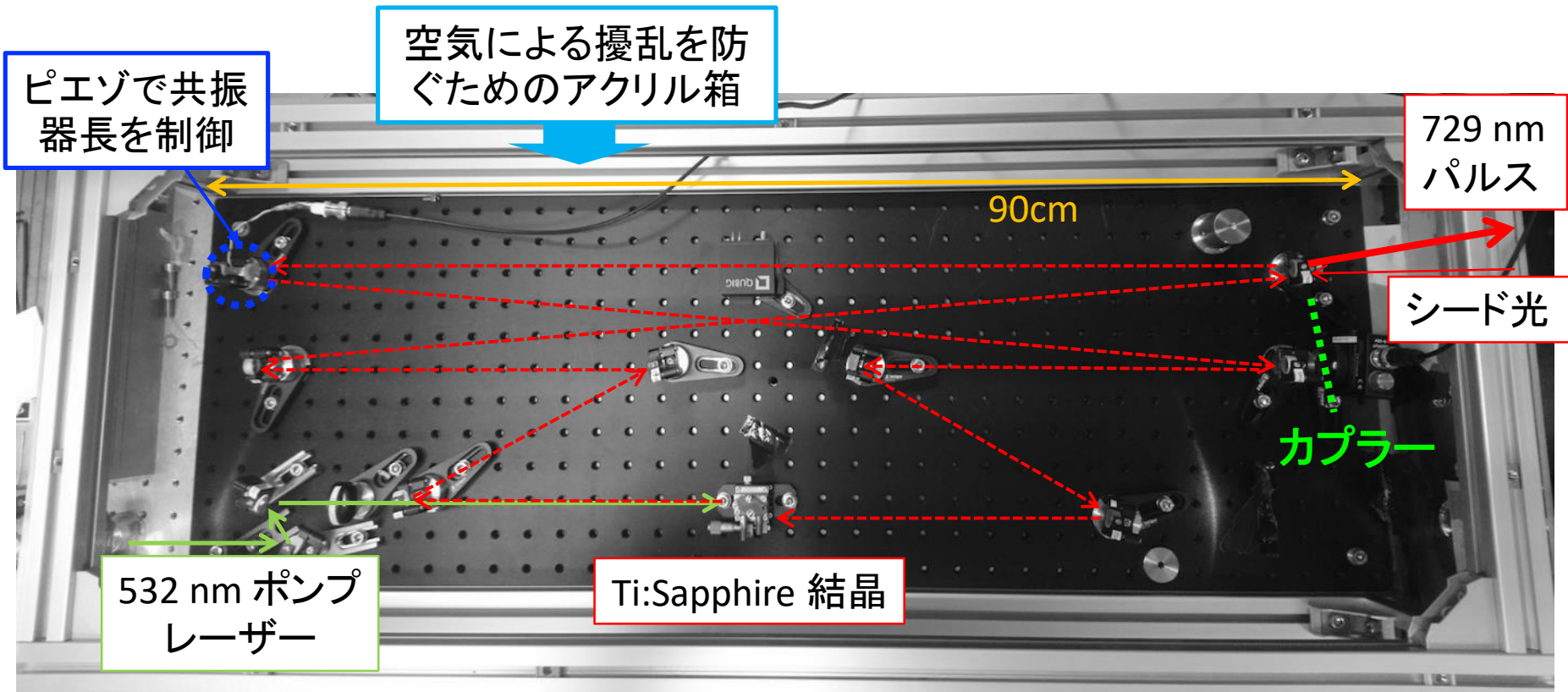
多段陽電子集束と空孔中レーザー冷却で Ps-BEC実現

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

1. 50 nsバンチ陽電子を多段集束し高密度化する
2. シリカ (SiO_2) 多孔体に陽電子を打ち込み，高密度Psに変換する
3. 低温シリカとの衝突とレーザー冷却を組み合わせ高速冷却



243 nm 紫外パルスレーザー 2018年度中完成を目指して独自開発中



自作した共振器

Ps冷却に最適化した強度・時間幅・周波数構造を実現するよう最新の光学技術を駆使して設計

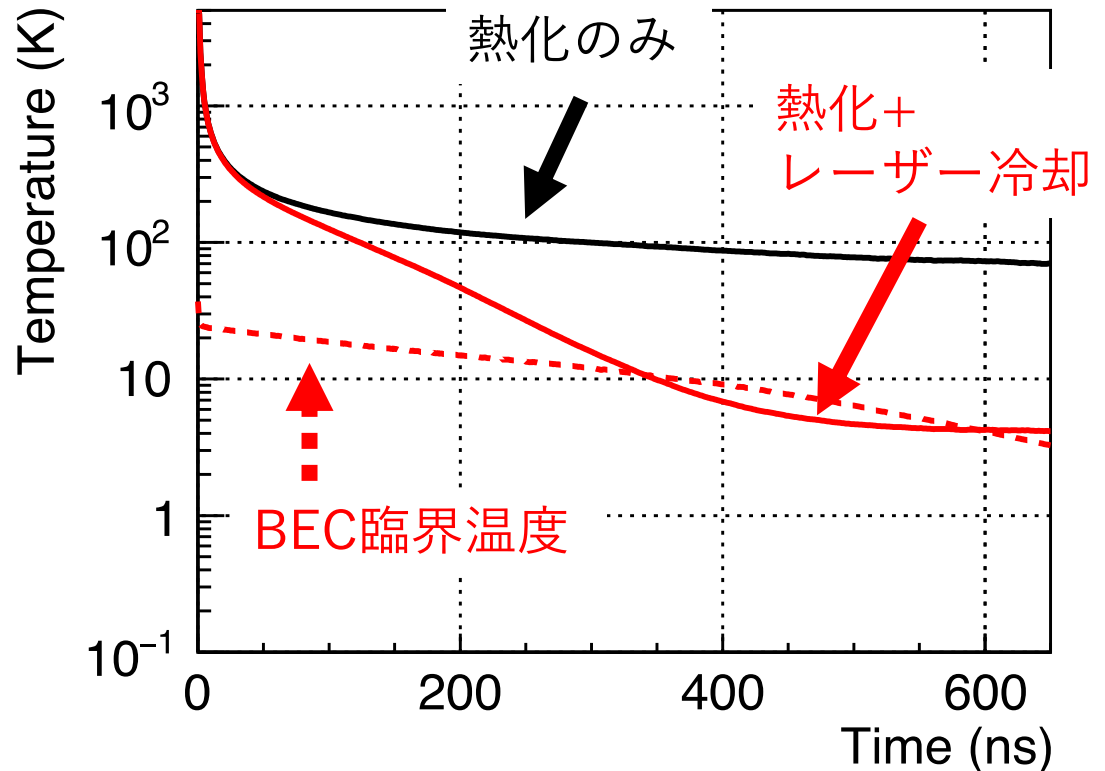
空孔中での熱化+レーザー冷却で 高速冷却可能

熱化による冷却

~200 K以上で効率良い

レーザーによる冷却

~200 K以下で効率良い



シミュレーションによるPs冷却の評価

空孔中での熱化+レーザー冷却で 高速冷却可能

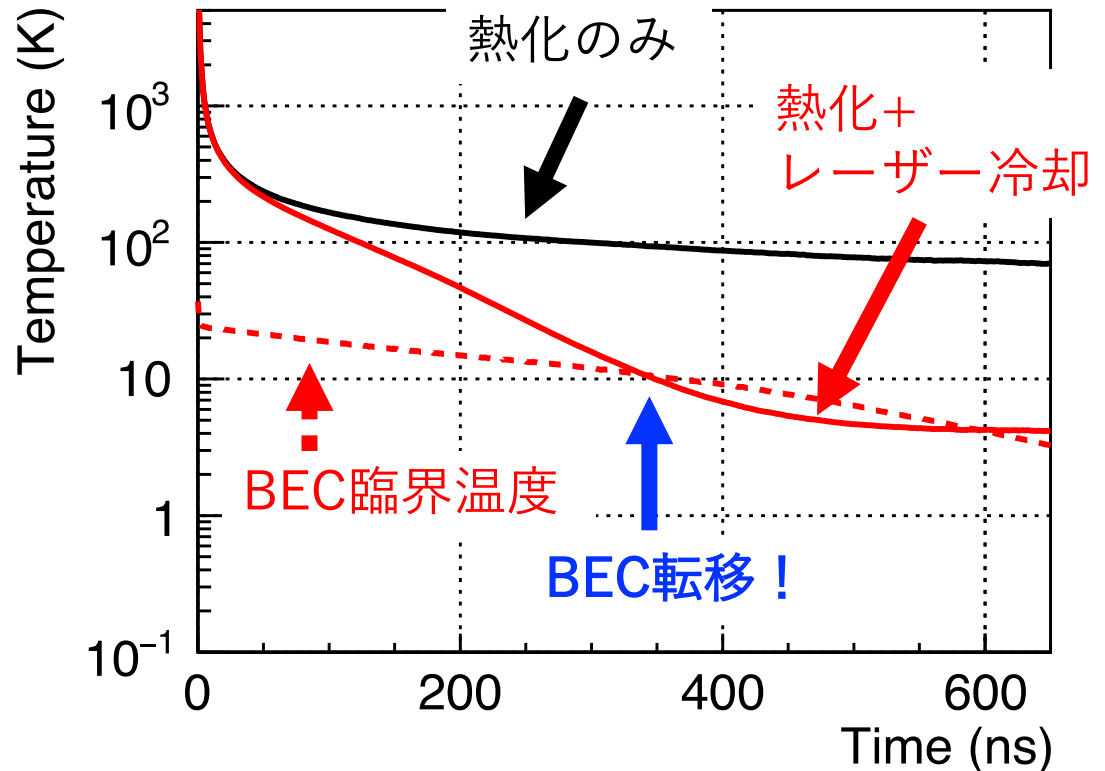
熱化による冷却

~200 K以上で効率良い

レーザーによる冷却

~200 K以下で効率良い

- 組み合わせることで
Ps-BEC実現可能



シミュレーションによるPs冷却の評価

お品書き

1. ポジトロニウムによるボース・アインシュタイン凝縮 (Ps-BEC) 実現の動機と手法
2. Ps-BEC実現の鍵となるPs生成材料開発の概要と進捗
3. 短パルス陽電子ビームラインにおけるPs冷却確認手法の検証
4. 今後の予定とまとめ

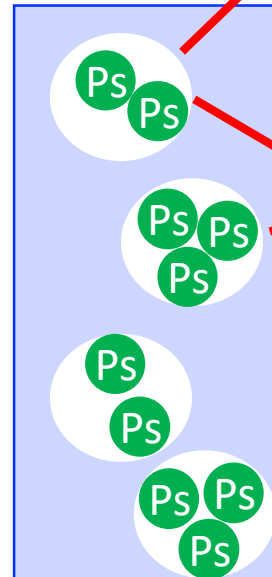
空孔中でのPsレーザー冷却には 適切なPs生成材料が必要

熱化とレーザー冷却を組み合わせた
冷却を実現するにはPs生成材料に
4つの機能が必要

冷却用紫外レーザーに
対して透明

243 nm

高いPs生成率



Ps生成材料

空孔径 50 - 100 nm

空孔径大きすぎると...

- 熱化が遅くなる

空孔径小さすぎると...

- Ps寿命が短くなる
- レーザー波長243 nmより
空孔径が小さくなりすぎ
るとDicke narrowing効果
により冷却できなくなる

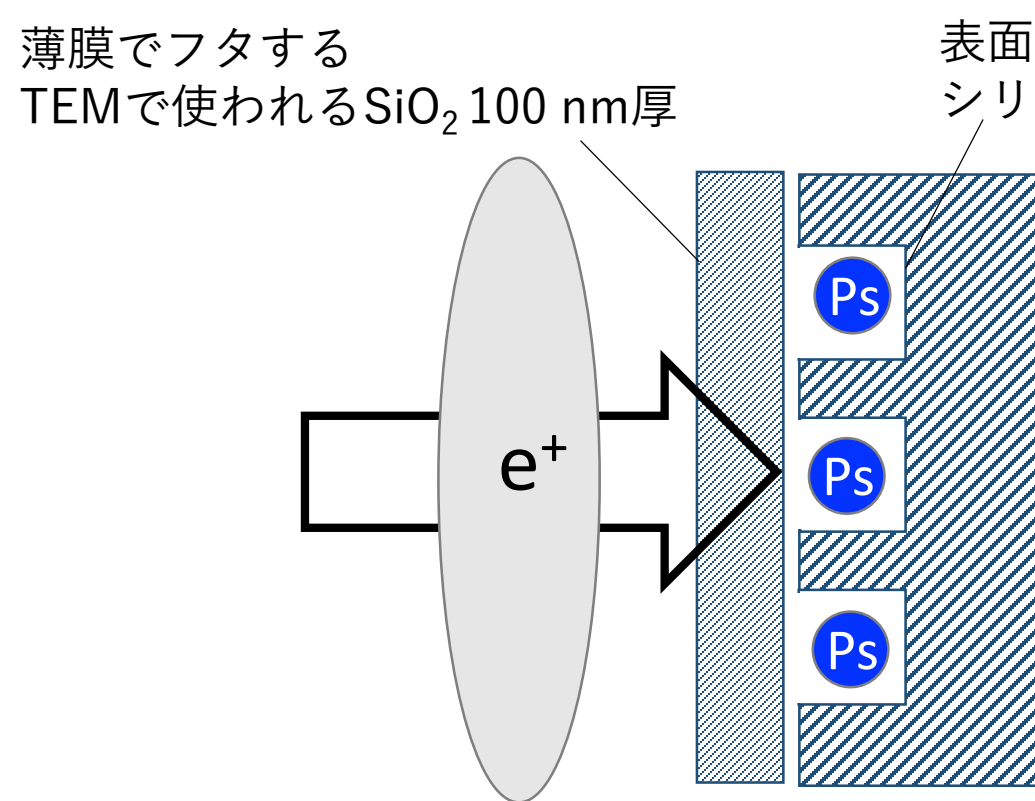
高い空隙率 > 8割

- ◆ 4つの要求を満たす材料を検討
- ◆ 空孔中でのレーザー冷却の
可能性を検証

デバイスのアイデア1

微細穴加工したシリカガラス

透明なシリカガラス表面に微細な穴加工を行い、
穴の上からシリカの薄膜でフタをして空孔を作る



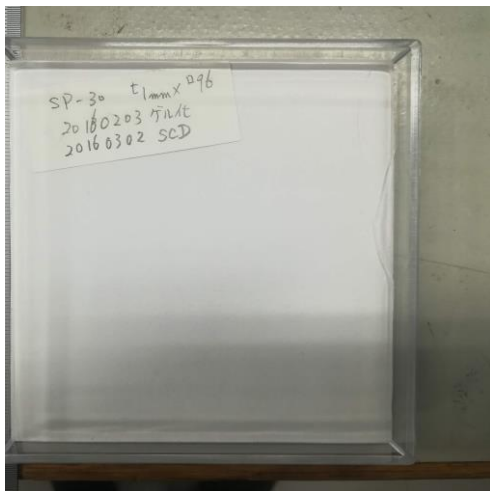
良いところ

- ✓ 母材は高いPs生成率（8割）
- ✓ ガラスは紫外領域まで透明
- ✓ ナノテク微細加工技術で自在に均一な空孔が作れる

デバイスの製作、評価を
進めている

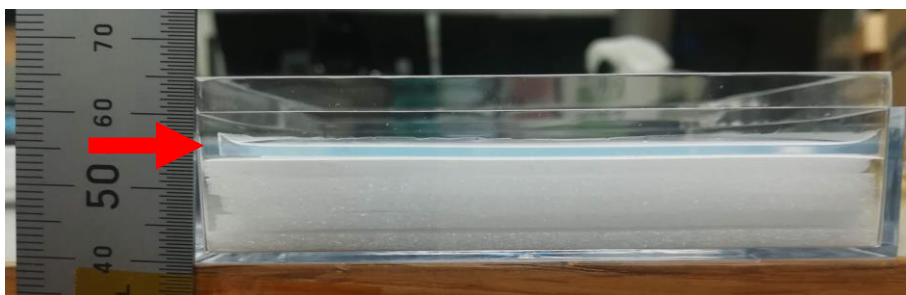
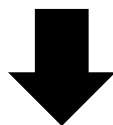
デバイスのアイデア2

薄いシリカエアロゲル



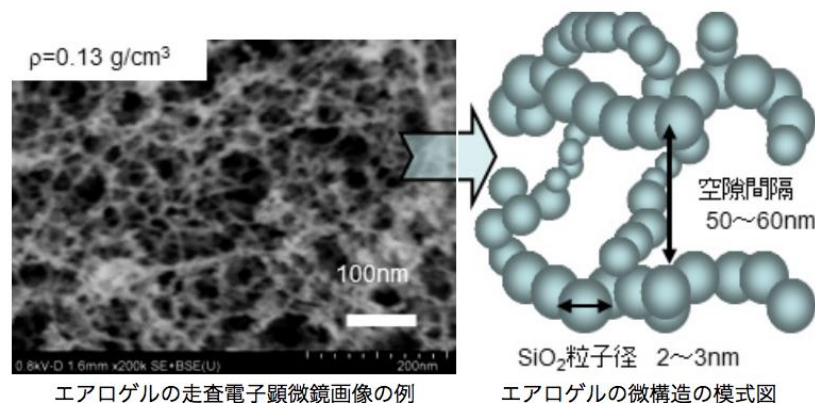
← 上から

横から



1 mm 厚のシリカエアロゲル

一般財団法人ファインセラミックスセンターより提供



エアロゲルの走査電子顕微鏡画像の例

エアロゲルの微構造の模式図

空孔径は 50 - 60 nm

一般財団法人ファインセラミックスセンター

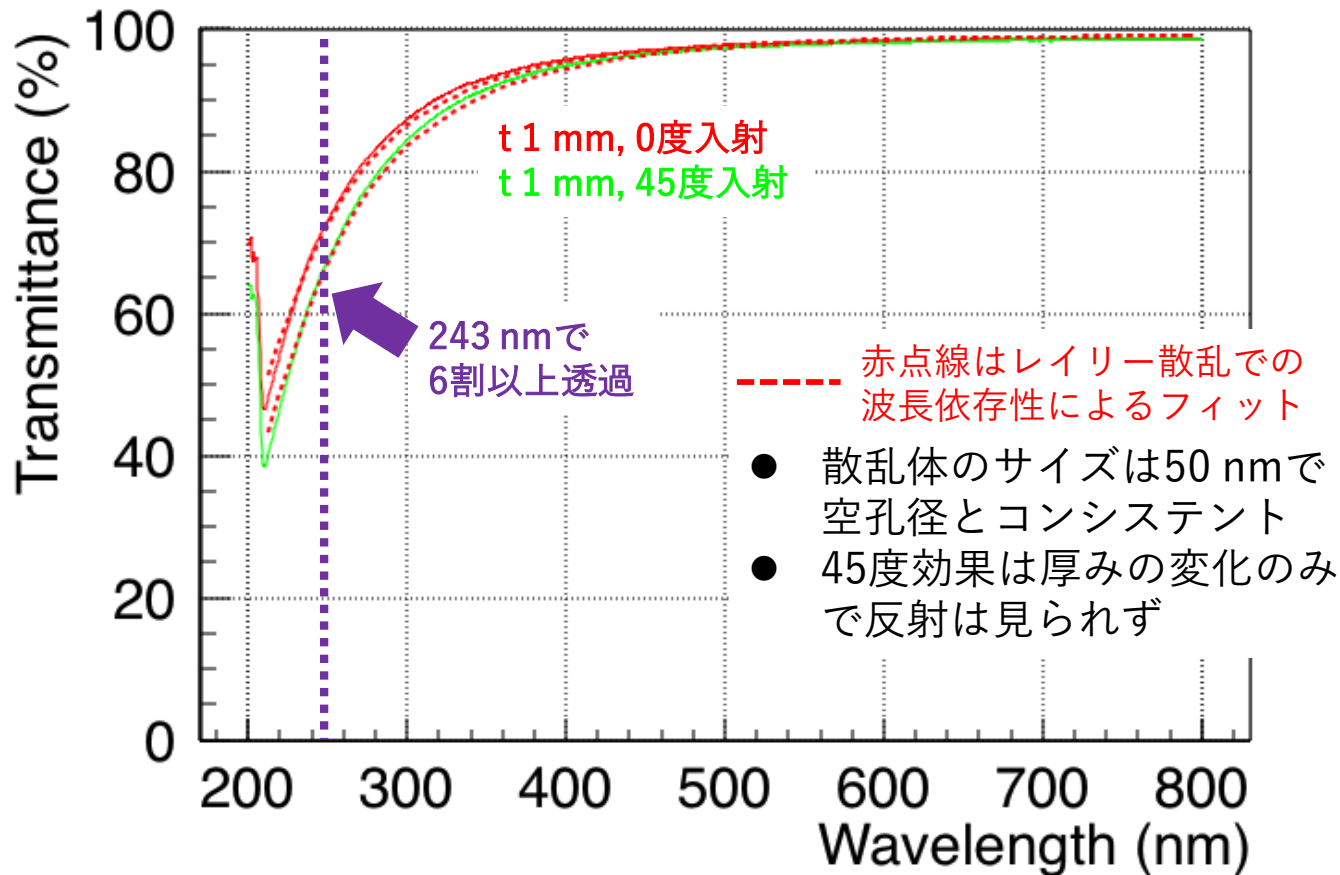
web page http://www.jfcc.or.jp/23_develop/13t20.html より

良いところ

- ✓ 高いPs生成率（～5割）
- ✓ 空隙率が9割以上と高いため材料のどこに当ててもPsできる
- ～1 mm 程度に集束した陽電子ビームを使い、まずこの材料で空孔中でのレーザー冷却がうまくいくか検証

t 1 mm エアロゲルでは 紫外平行光線透過率6割以上

分光光度計でエアロゲルの平行光線透過率を測定

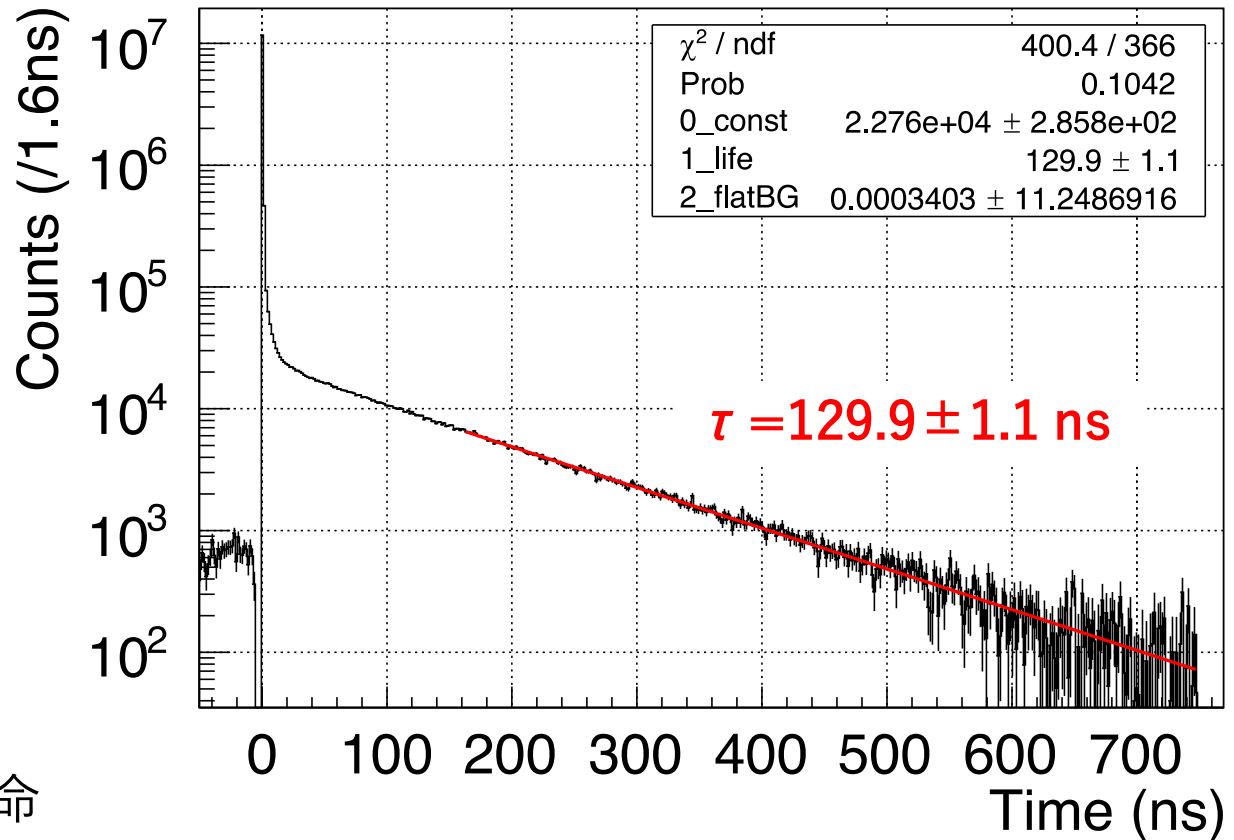


- 6割以上の透過率があれば冷却の有無や効率を確認可能
- 8割以上の透過率を目指して t 0.5 mm 品の製造を
一般財団法人ファインセラミックスセンターに依頼中

空孔中での *o*-Ps生成も確認

タイミングスペクトルを
指数関数でフィット

シリカエアロゲルが持つ
50 - 60 nm空孔中での寿命
(RTEモデル) で崩壊する
o-Psが観測できている



^{22}Na を用いた t 1 mm シリカエアロゲルの
バルクPALS測定タイミングスペクトル

➤ 次は実際に用いる低速ビームで寿命・Ps生成率を測定

短パルス陽電子での Ps観測手法の有用性を確認

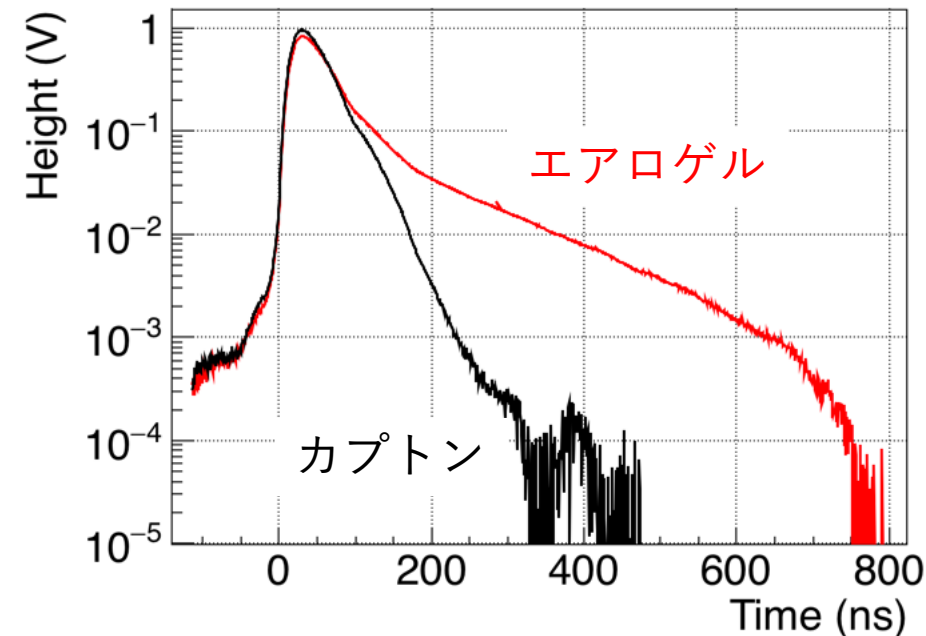
レーザー冷却実験は、冷却用パルスレーザーと同期した短パルス陽電子が使えるKEK-SPF-B1で行う

- 繰り返し：50 Hz
- 時間幅：20 ns
- 強度： 10^4 e⁺/pulse

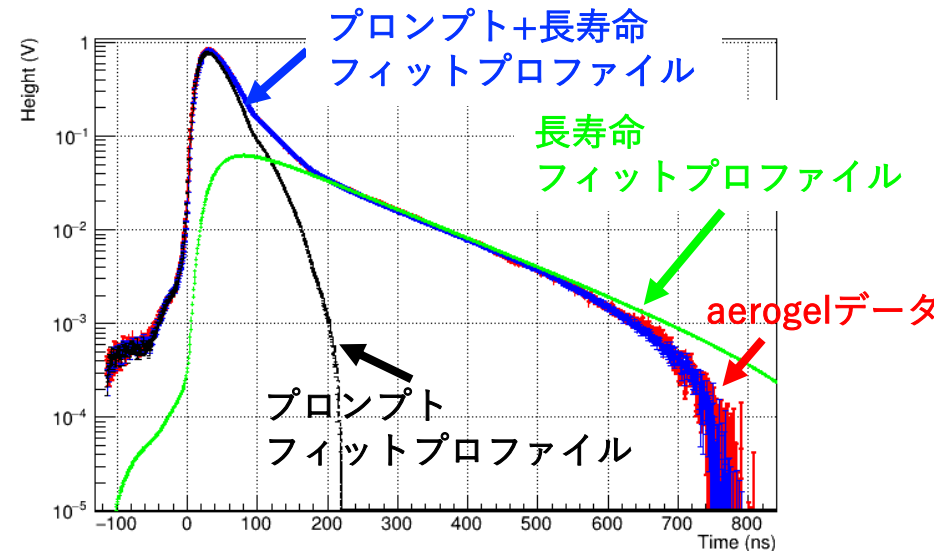
Psをレーザー冷却し温度を定量的に評価するには、Psからの崩壊ガンマ線量、タイミングを正しく測定することが必要

ガンマ線がパイルアップする状態で正しく測定するシングルショット法を検証する実験を行った

課題番号：2017P009, 2018G100

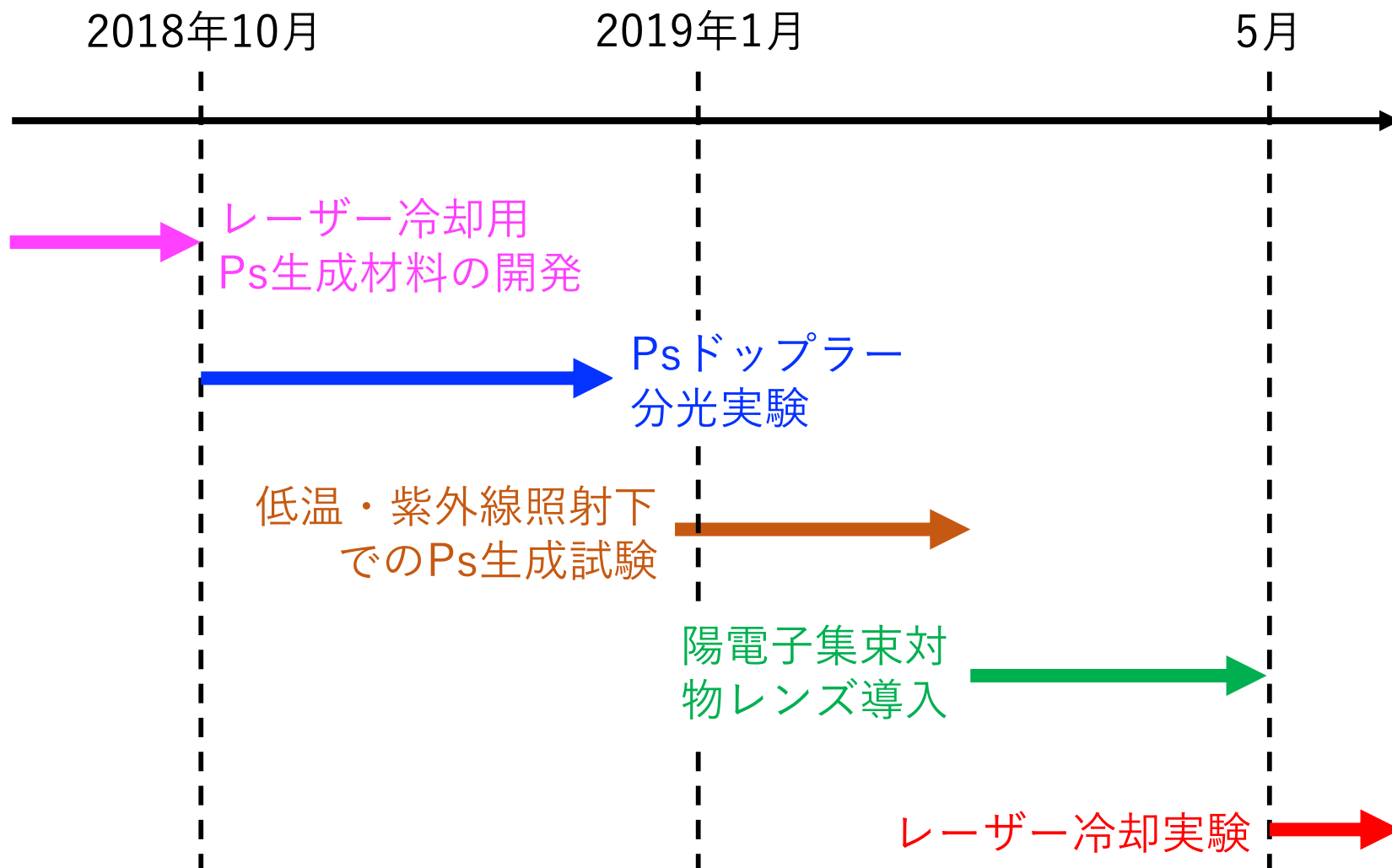


LaBr₃(Ce) + R6041-PMT出力波形平均



- 平均波形をフィットすることで寿命を求めると141.5 ns
- 今回は検出効率を下げ従来のTAC方式でも解析可能、結果はコンシステント

今後の予定



BEC向けのPs生成材料開発、陽電子多段集束装置開発も進め、5年ほどでのBEC実現を目指す

まとめ

- 反物質BECとして初となるPs-BECの実現を目指し、Ps高密度化・冷却に取り組んでいる。目標は、温度10 K以下、密度 10^{17} cm^{-3} 以上である。
- Psの高密度化・冷却のために、多段陽電子集束と空孔中レーザー冷却を用いた新しい手法を提案し、各要素の開発を進めている。
- 空孔中でのレーザー冷却に使用可能なPs生成材料の検討、製作、試験を行っている。微細加工シリカガラスと薄シリカエアロゲルの2種類を進めている。薄シリカエアロゲルについては、紫外光透過率、バルク中Ps生成についてポジティブな結果が得られており、レーザー冷却実験に向け、低速陽電子でのPs生成検証を行う。
- KEK-SPFでの実験も進めており、冷却を定量的に評価する手法を開発中。
- 2019年度中でのレーザー冷却世界初実現を目指している。