

# 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 I

**周 健治**, 山田 恭平, 石田 明, 難波 俊雄<sup>A</sup>, 浅井 祥仁,  
田島 陽平<sup>B</sup>, 蔡 恩美<sup>B</sup>, 吉岡 孝高<sup>B</sup>, 五神 真,  
大島 永康<sup>C</sup>, オローク ブライアン<sup>C</sup>, 満汐 孝治<sup>C</sup>,  
伊藤 賢志<sup>C</sup>, 熊谷 和博<sup>C</sup>, 鈴木 良一<sup>C</sup>, 藤野 茂<sup>D</sup>, 川合 健太郎<sup>E</sup>  
兵頭 俊夫<sup>F</sup>, 望月 出海<sup>F</sup>, 和田 健<sup>G</sup>  
東大理, 東大素セ<sup>A</sup>, 東大工<sup>B</sup>, 産総研<sup>C</sup>, 九大GIC<sup>D</sup>, 阪大工<sup>E</sup>, KEK<sup>F</sup>, 量研機構<sup>G</sup>



# 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单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
  - ◆ まだ誰も反物質で作ったことがない

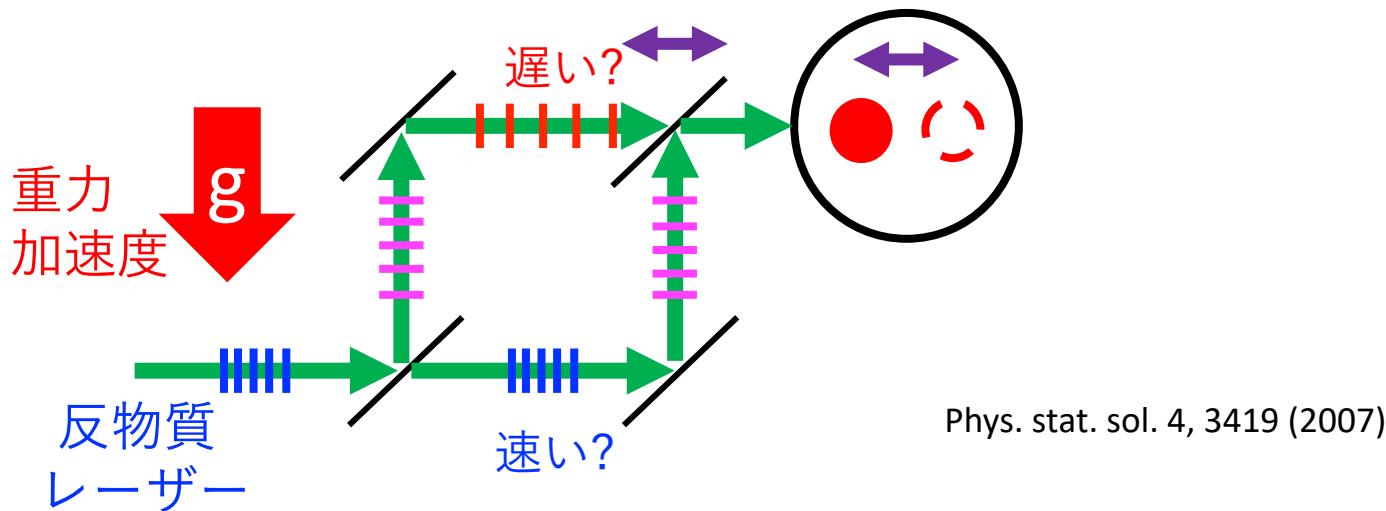
反物質BECを初めて実現し、  
反物質BECでしかできない実験を通して、  
反物質の謎を解明したい！

# やってみたいこと-1

## 反物質レーザー干渉実験で反物質重力を測る

反物質にはたらく重力は  
実験的によく分かっていない

パスの長さを変更することで明滅



- 重力によって2つのパスで波動関数の位相が変化
- 明滅する長さ周期から物質・反物質間にはたらく重力効果が分かる  
➤ 弱い等価原理の検証

# BEC実現に 使う反物質はポジトロニウム

われわれはポジトロニウム (Ps)を使う  
電子と陽電子でできた束縛系

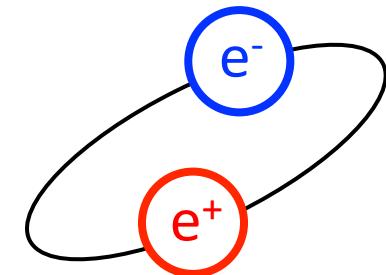
## BEC実現からみた良いところ

- 他の反物質より簡単 & たくさん作れる
- 質量が小さいためBEC臨界温度が高い

$$T < T_C = \frac{h^2}{2\pi m k_B} \left( \frac{n}{\zeta(\frac{3}{2})} \right)^{\frac{2}{3}}$$

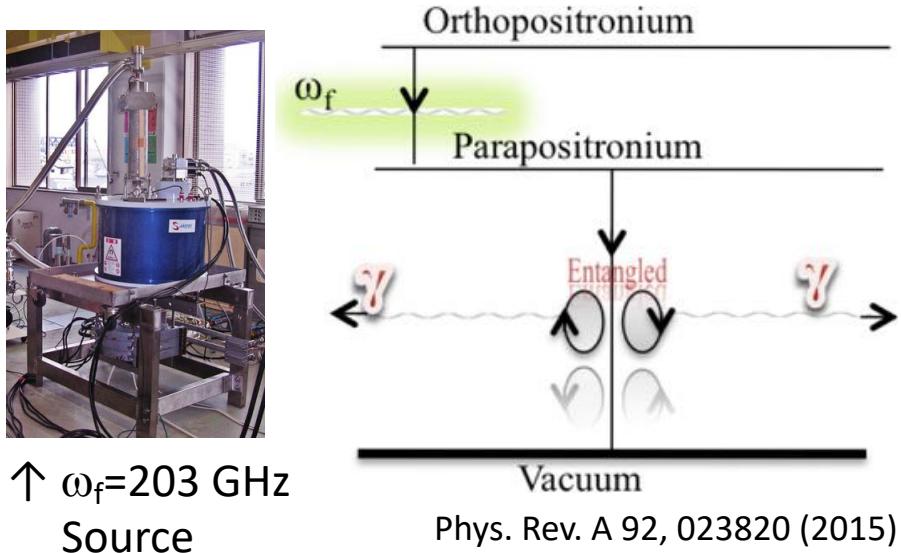
BECには高密度・低温が必要だが  
Psなら条件がゆるい

- 反物質BECの最も良い候補



ポジトロニウム (Ps)

# (Ps-BECで) やってみたいこと-2 511 keV ガンマ線レーザーを作る

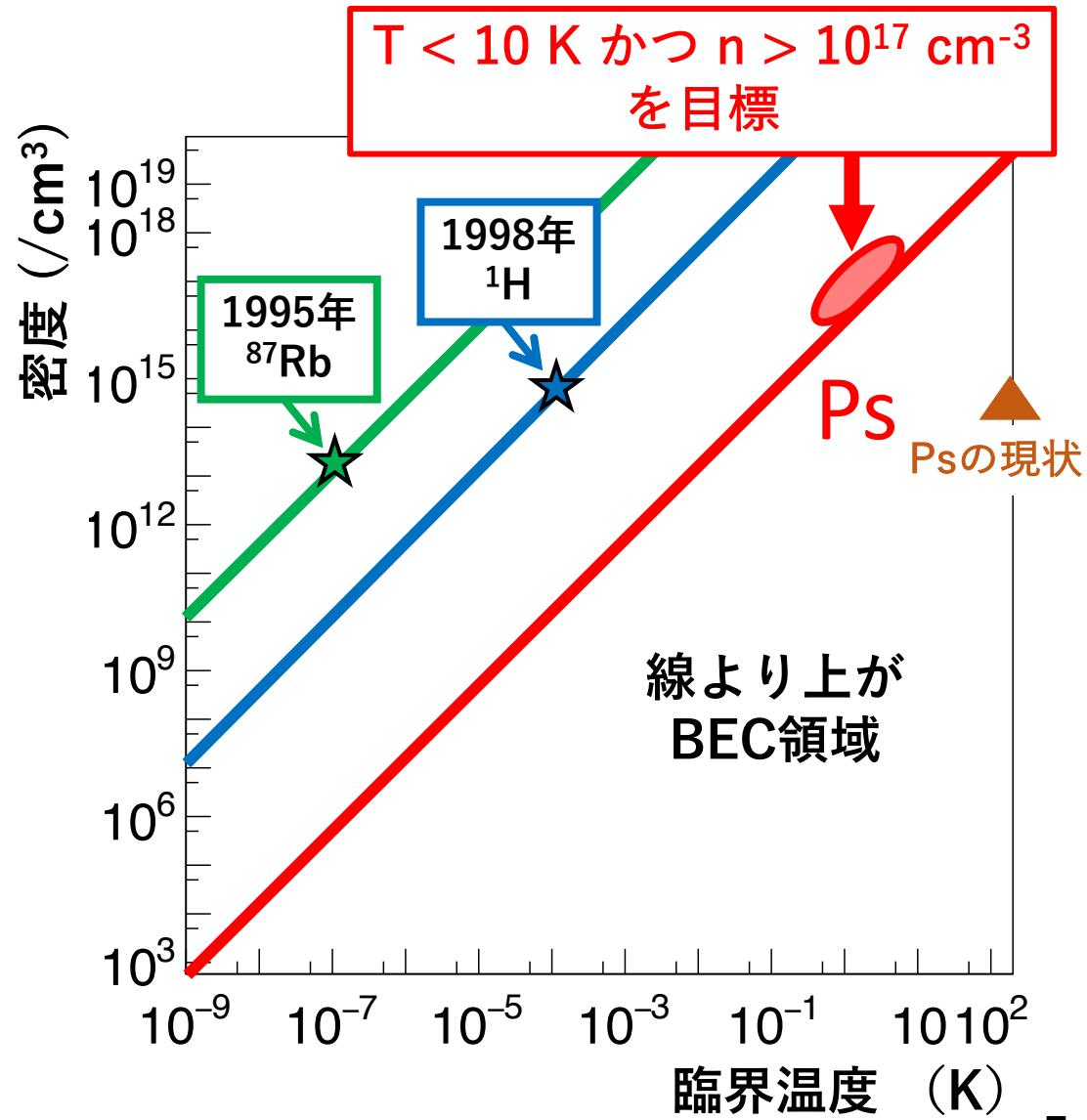


- Psが511 keVのガンマ線2本に対消滅することを利用する
- Ps-BEC(原子のレーザー) → 光のレーザー
  - ◆ 世界初のガンマ線レーザー
  - ◆ 既存のX線光源より10倍波長が短い微細構造プローブ
  - ◆ マクロなエンタングルメント

# とは言ってもとても難しい

最大の問題は  
Psの寿命が短いこと  
( $\alpha$ -Psで142 ns)

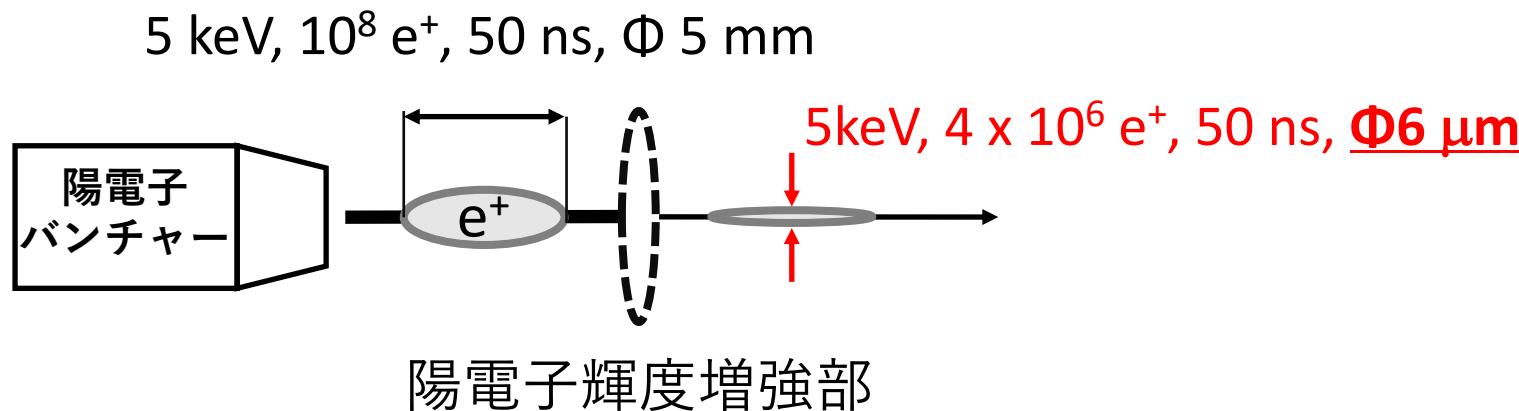
- この間に高密度化・高速冷却するのはとても難しく、現状の世界記録は密度、温度とも1~2桁足りない
- 新しい方法を考えた



# 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)

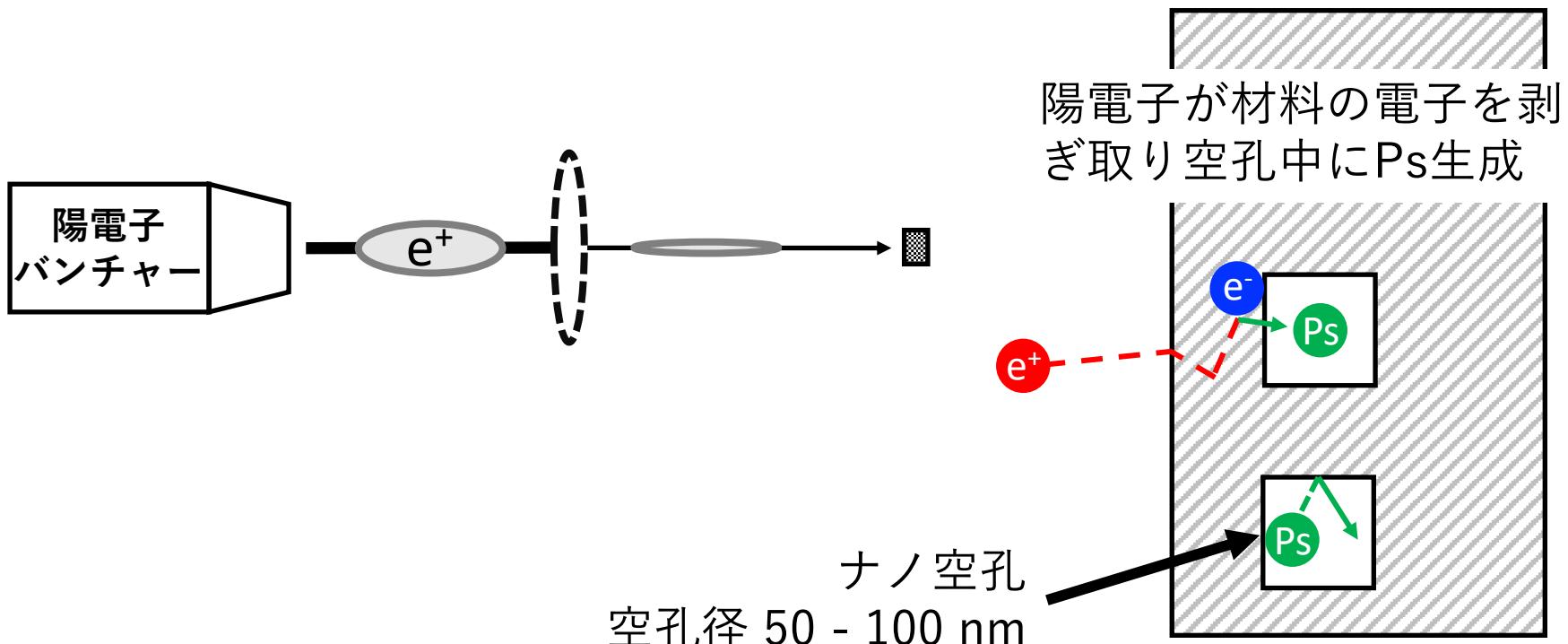
## 1. 50 nsバンチ陽電子を多段集束し高密度化する



# 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)

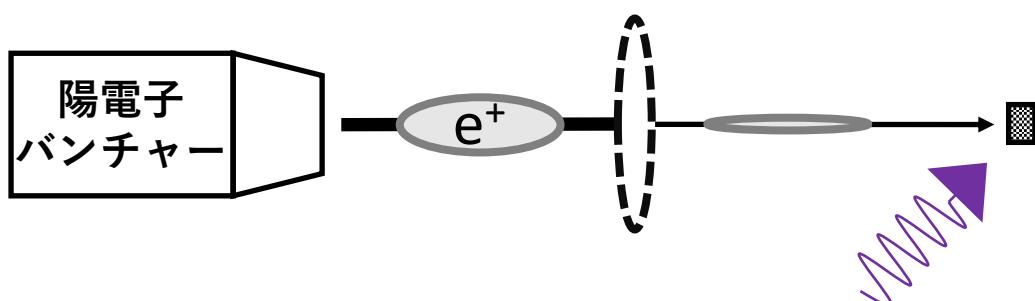
## 2. 多孔体に陽電子を打ち込み、高密度Psに変換する



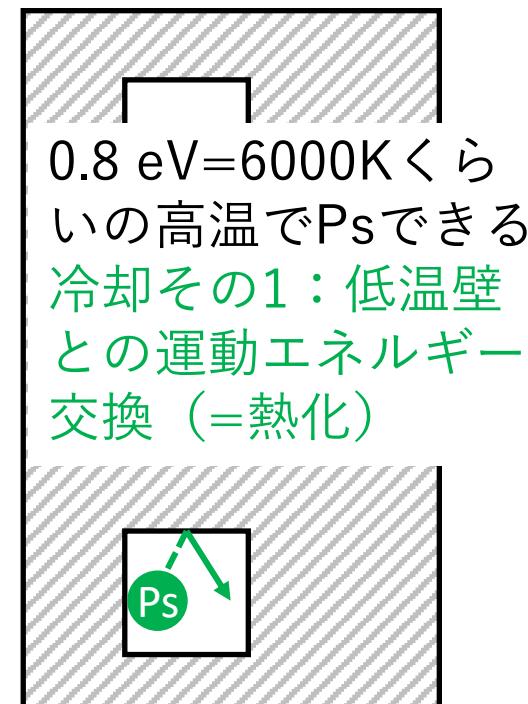
# 多段陽電子集束と空孔中レーザー冷却で Ps-BEC実現

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

## 3. 低温の壁との衝突とレーザー冷却を組み合わせて高速冷却



冷却その2：レーザー冷却  
Ps冷却に最適化した  
243 nm 紫外パルスレーザー



低温 4 K にする

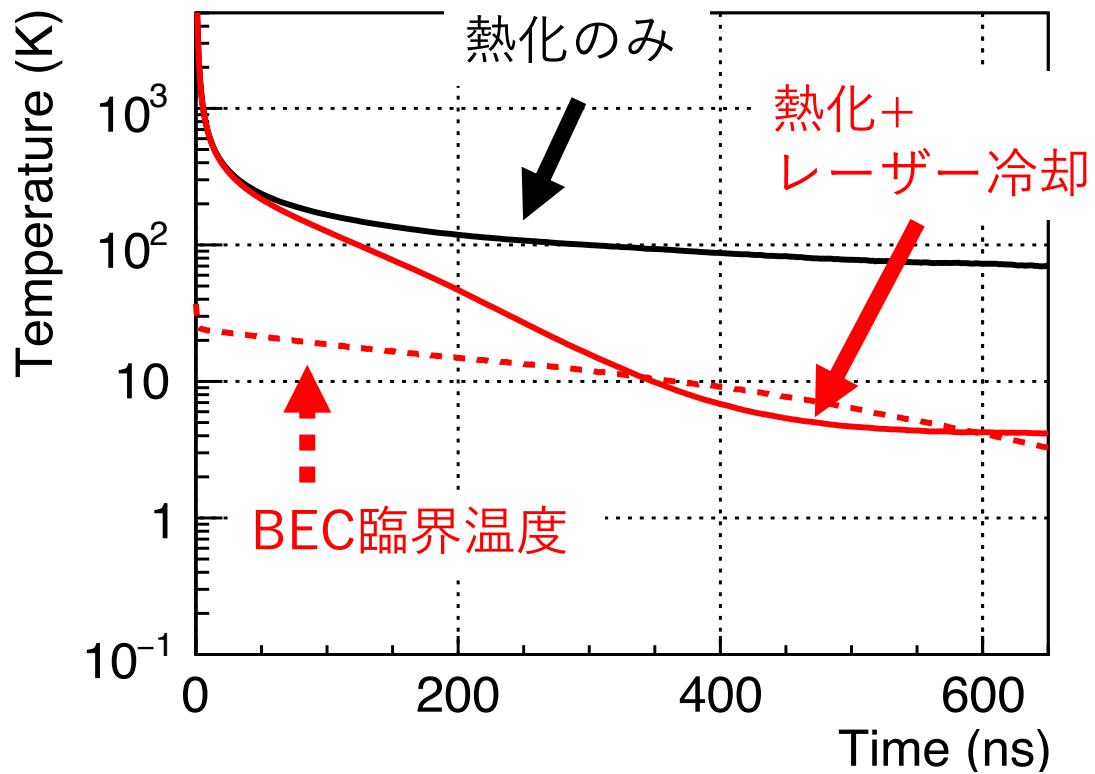
# 空孔中での熱化+レーザー冷却で 高速冷却可能

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

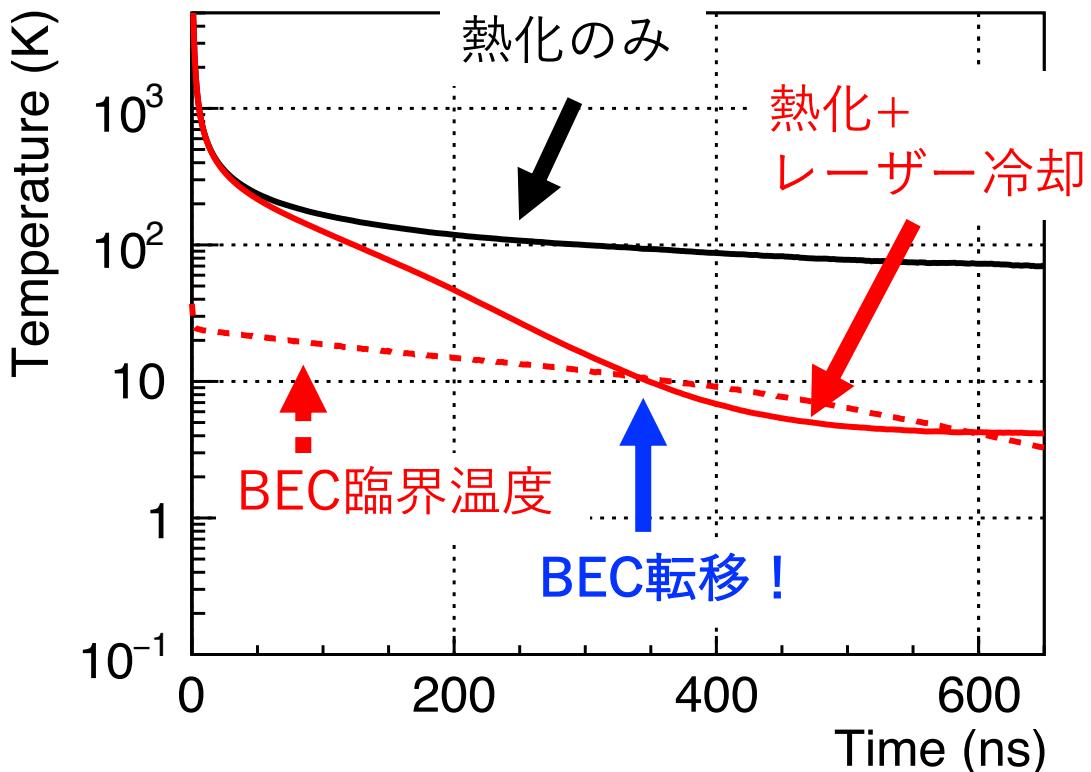
熱化による冷却

~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

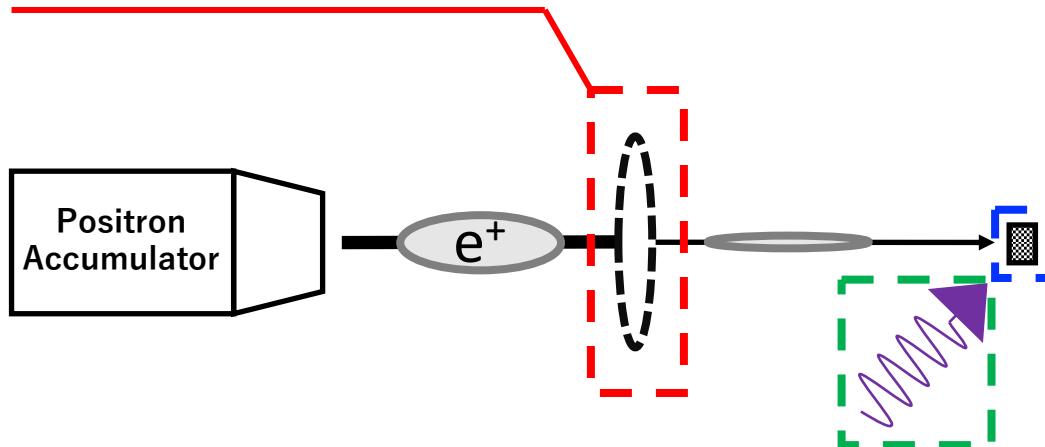
➤ 組み合わせることで  
Ps-BEC実現可能



シミュレーションによるPs冷却の評価

# 3つの技術が必要

## 3. 陽電子集束システム



## 1. Ps生成 & トラップ材料

## 2. Ps冷却用レーザー光源

いずれも新しいチャレンジがあり、開発中

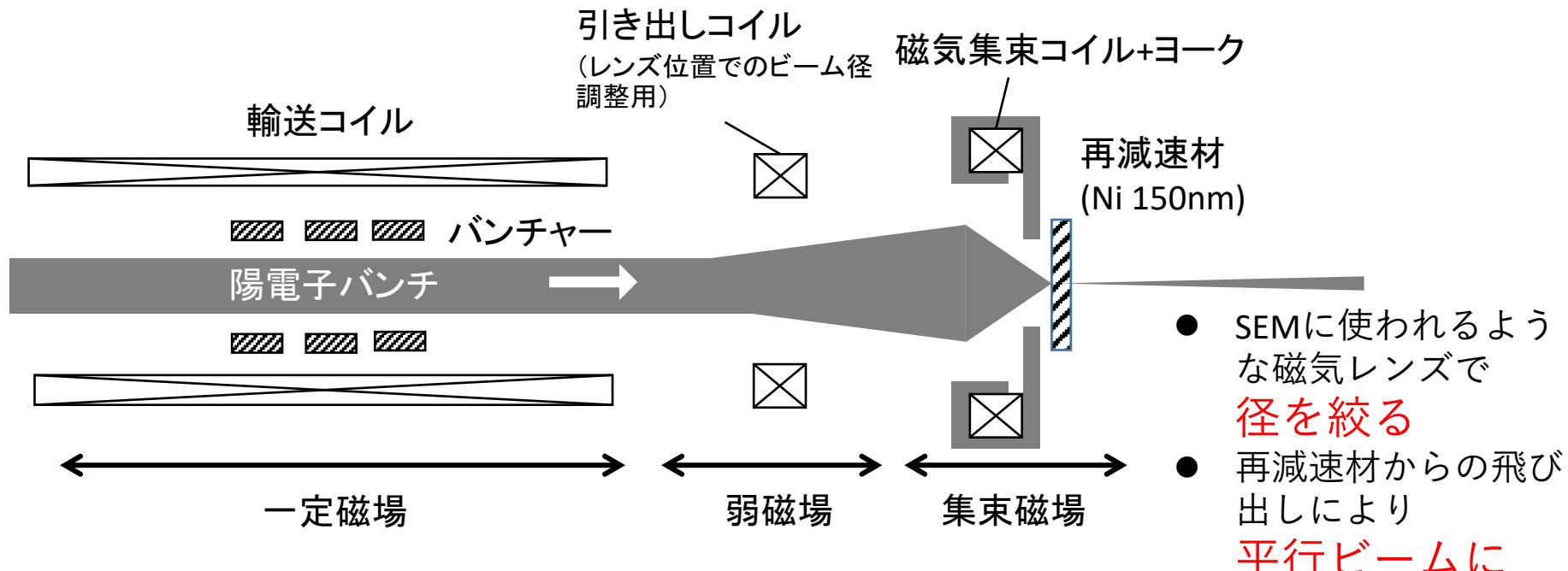
まず、材料、光源を開発し、冷却を実現する  
最後に高密度陽電子と組み合わせBEC

このトーク：陽電子集束と材料  
次の山田さん：レーザー光源開発

# 陽電子集束システム

- ◆ 輝度増強法を用いる

N. Oshima et al. J. App. Phys. **103**, 094916 (2008)



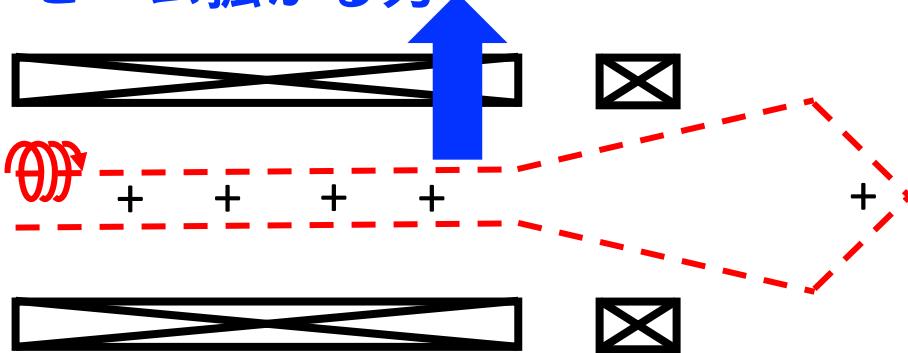
## 新しい挑戦

- この輝度増強法を繰り返して  $6\text{ }\mu\text{m}$  の陽電子径まで集束する
- 高密度になると、陽電子同士の空間荷電効果で反発する

# 空間荷電効果

## 1. ビーム径方向の発散力

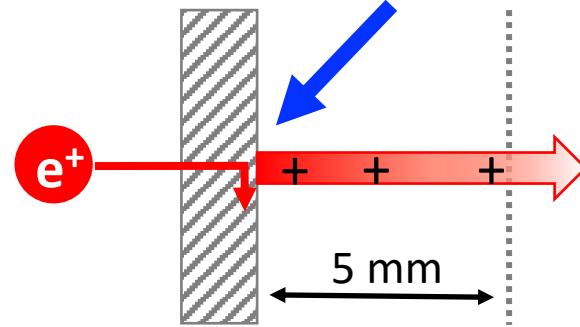
ビーム拡がる力



ビームが拡がる力と磁場の巻きつけ力  
がつりあう磁場の強さ = Brillouin Flow  
➤ このBrillouin flowがビーム輸送磁場  
より小さくなければならない  
➤ Brillouin flow < 1 kG =  $B_{max}$  が必要

## 2. ビーム進行方向の発散力

再減速材直後では低速  
陽電子が最高密度



W, Ni      -5 kV  
100 nm foil      メッシュ  
再減速材      で再加速

再減速材から取り出す際、前に進め  
なくなってしまう

➤  $I < 3.3 \times 10^4 \text{ A/m}^2 = I_{Limit}$  が必要

# 制限の範囲内で目標密度に到達可能

Ps生成率10%, 進行方向  
200 nmに停止を仮定

$$n_{\text{Target}} = 1 \times 10^{17} \text{ Ps cm}^{-3}$$



Beam Parameter	1次	2次	3次	最終
密度比 $n/n_{\text{Target}}$	$2.5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-3}$	0.7
制限電流比 $I/I_{\text{Limit}}$	$4.9 \times 10^{-4}$	$9.9 \times 10^{-3}$	0.13	-
最大磁場比 $B/B_{\text{Max}}$	$7 \times 10^{-3}$	$3.2 \times 10^{-2}$	0.12	-

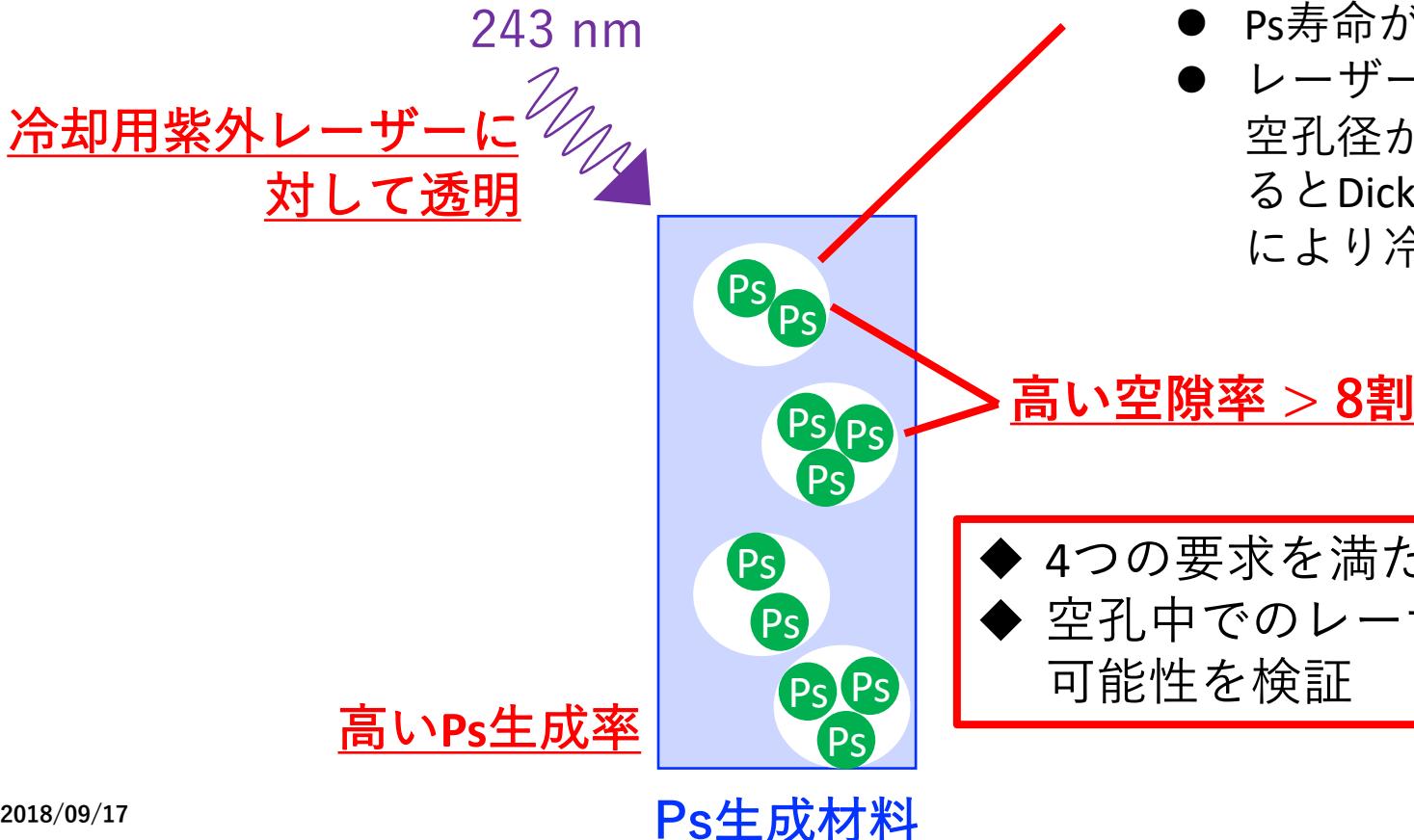
空間荷電効果  
による制限

空間荷電効果を取り入れたビーム径方程式で、多段集束時の密度、各制限内に収まっているか確認（京大複合研 葛谷 佳広氏と協力）

- 空間荷電効果を考慮して光学系をデザインし、目標の密度を原理的に達成可能であることを示した
- 現在プロトタイプ機を設計

# 空孔中の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



## 空孔径 50 - 100 nm

空孔径大きすぎると...

- 热化が遅くなる

空孔径小さすぎると...

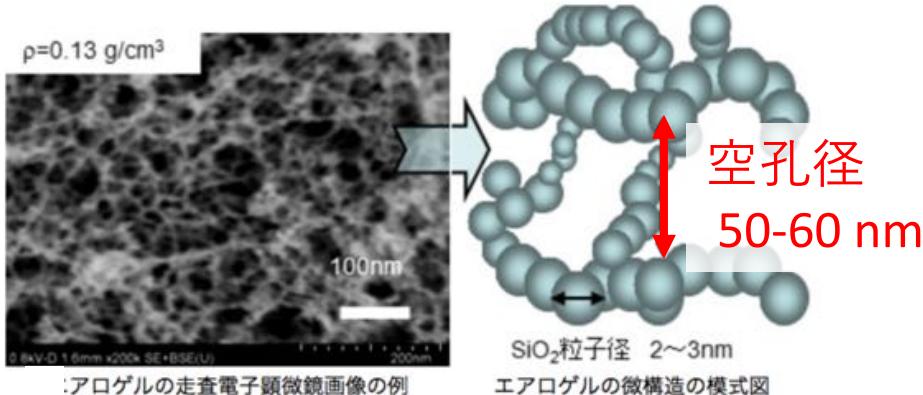
- Ps寿命が短くなる
- レーザー波長243 nmより空孔径が小さくなりすぎると Dicke narrowing効果により冷却できなくなる

高い空隙率 > 8割

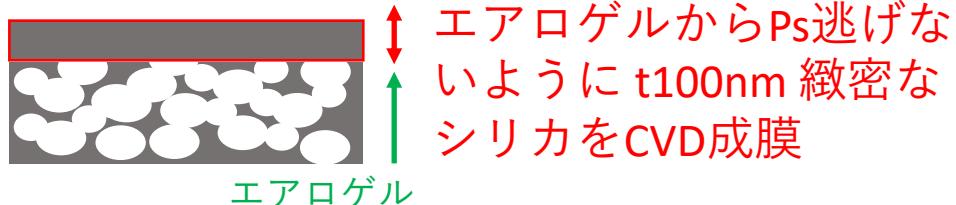
- ◆ 4つの要求を満たす材料を検討
- ◆ 空孔中のレーザー冷却の可能性を検証

# シリカ ( $\text{SiO}_2$ ) を用いた2つのアイデア 薄いエアロゲル / ナノ微細加工

## アイデア1：薄いシリカエアロゲル



ファインセラミックスセンター (JFCC) 提供



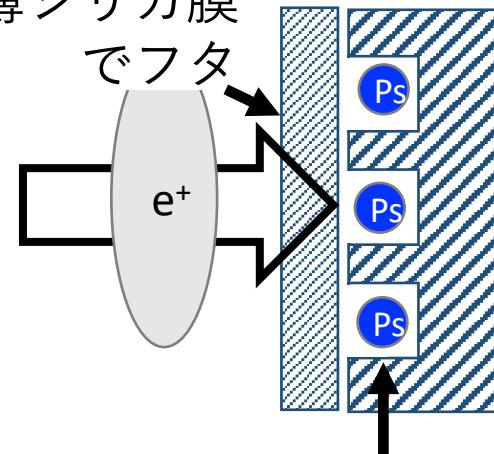
## 良いところ：

- 高空隙率による高いPs生成率 ~50%
- 薄膜化により高い光透過率

## アイデア2：シリカガラスウェハー 上にナノ微細加工

100 nm薄シリカ膜

でフタ



表面にナノ穴をたくさん空ける

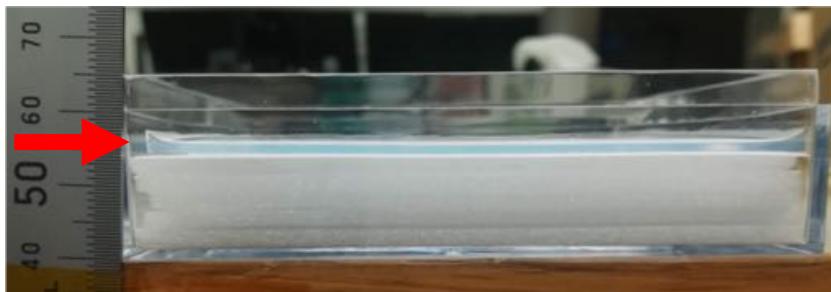
## 良いところ：

- 高い紫外光透過率 > 95%
- 穴のサイズ、数を自在にコントロールし最適化できる

# シリカ ( $\text{SiO}_2$ ) を用いた2つのアイデア 薄いエアロゲル / ナノ微細加工

それぞれ利点・欠点があるので並行して開発中

## アイデア1：薄いシリカエアロゲル

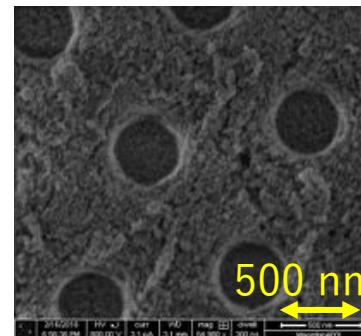


1 mm厚エアロゲル  
JFCC提供

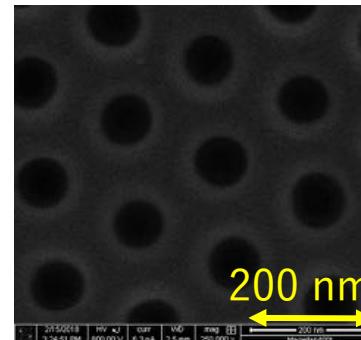


エアロゲルについてはレーザー冷却実験に必要な性能をもつことを確認した

## アイデア2：シリカガラスウェハー 上にナノ微細加工



$\text{SiO}_2$ -PVA 成形体にイン  
プリント & 焼成  
電子ビームリソグラフィ & エッティング

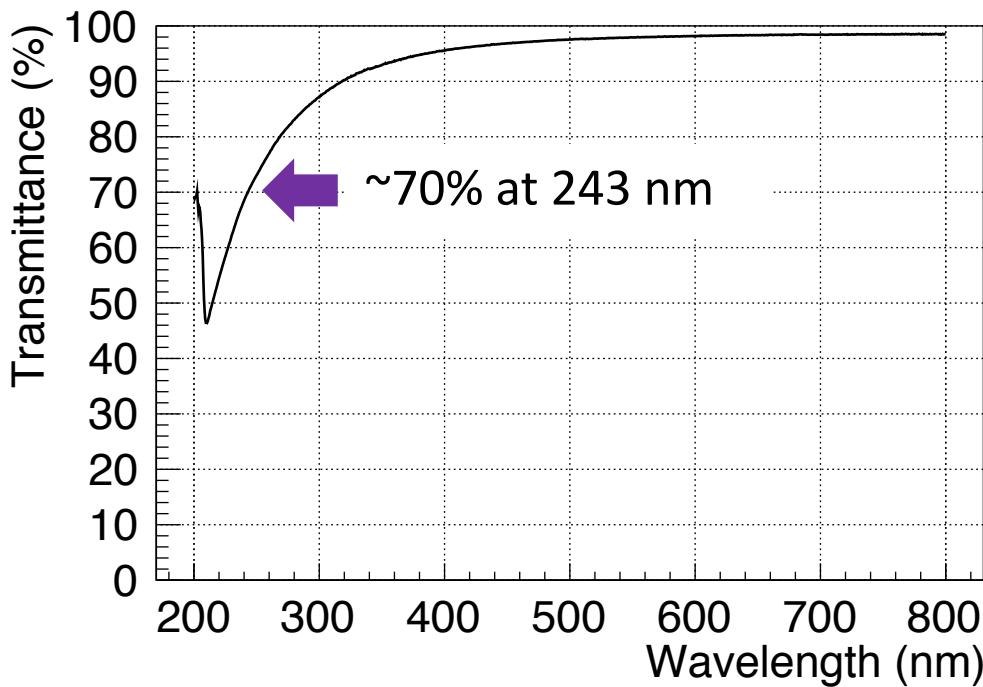


異なる手法で2つのプロトタイプ  
デバイスを作成、現在試験中



# シリカエアロゲルの試験： 紫外光透過率 70%

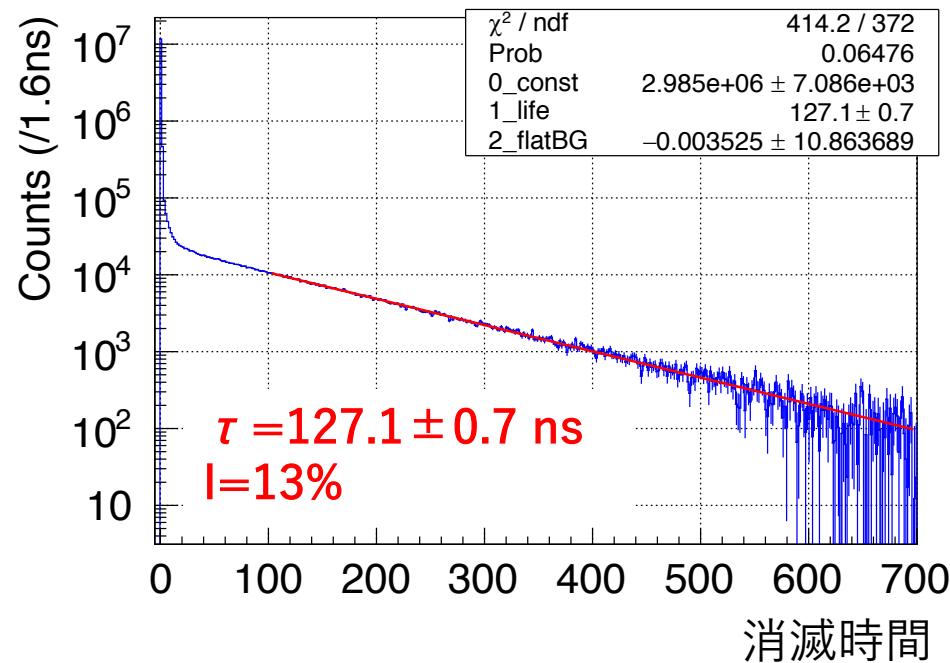
- シリカエアロゲルの微細構造によりレイリー散乱されるため薄膜化が必須
- $t=1\text{mm}$ により透過率70%
- ◆ レーザー冷却実験を行い冷却効率の定量的評価など可能
- 透過率向上のために  $t=0.5\text{mm}$ 品も製造、試験中



**$t=1\text{mm}$  エアロゲルの平行光線透過率  
分光光度計で測定**

# シリカエアロゲルの試験： $\text{o-Ps}$ 生成率 50%

- $\text{o-Ps}$ 生成率を測定するために、  
Na-22放射性同位体からの陽電子  
がシリカエアロゲル中で消滅す  
る時間を測定
- 寿命127 nsの成分が得られた。全  
体の崩壊のうち13%。  
⇒ シリカエアロゲルで停止した  
陽電子の50%が  $\text{o-Ps}$ を形成し  
50 nm 空孔中にいる
- ◆ 十分高いPs生成率を確認できた



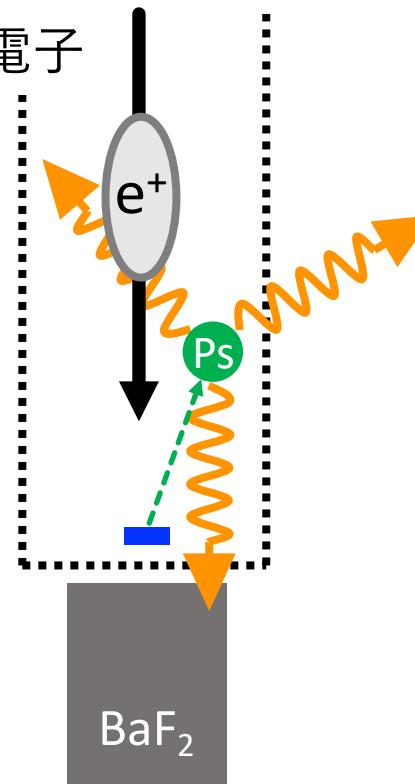
寿命スペクトル

# シリカエアロゲルの試験： *o*-Ps閉じ込めに成功

- レーザー冷却実験では 5 keV の同期可能な低速陽電子を用いる  
⇒ Na-22 では  $E_{\max} \sim 550$  keV
- 低速陽電子はエアロゲル最表面 ( $\sim 2 \mu\text{m}$ ) で停止、エアロゲルが同程度の距離を拡散するので閉じ込めの膜が必要

## 閉じ込めの確認実験 セットアップ

5 keV 低速陽電子

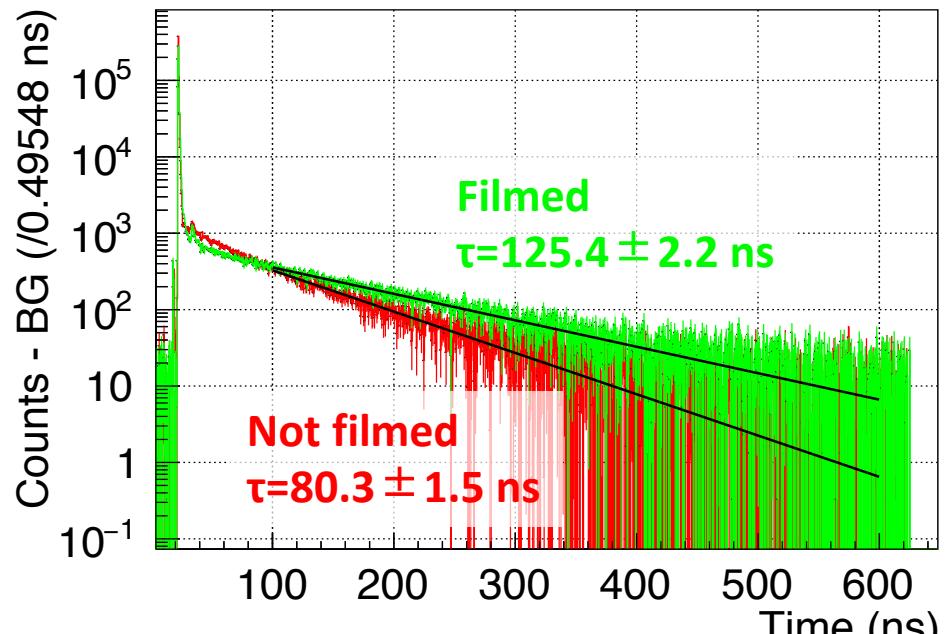


もし *o*-Ps が逃げると ...

ガンマ線の検出効率がどんどん小さくなっていく  
➤ 寿命が短くなったように見える

# シリカエアロゲルの試験： *o*-Ps閉じ込めに成功

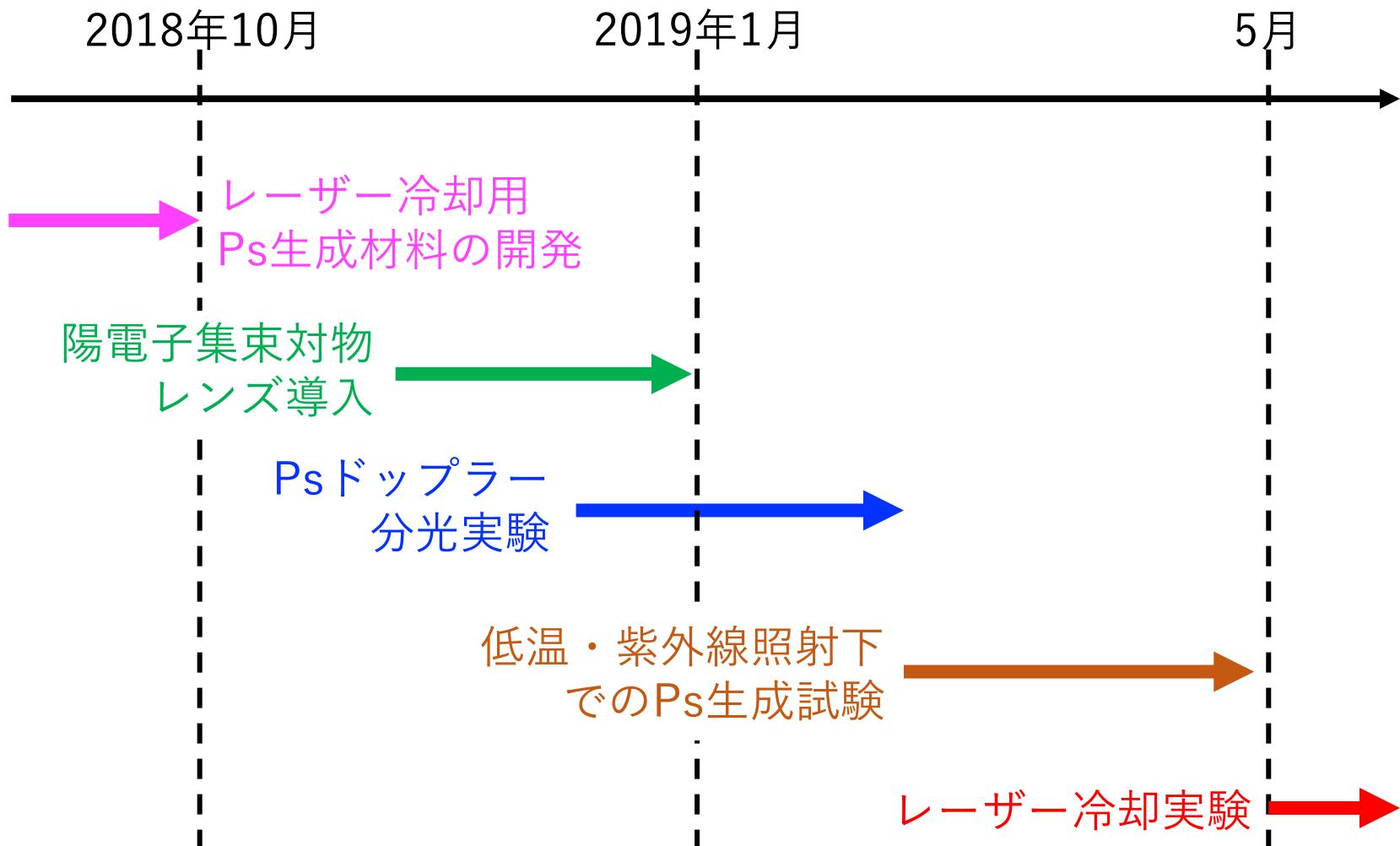
- CVD膜フタ無しでは *o*-Ps が逃げて寿命が短くなっているが、CVD膜により元の空孔中での寿命に戻っている
- ◆ *o*-Ps閉じ込めに成功



得られた寿命スペクトル

まずはシリカエアロゲルでレーザー冷却実験を行う予定

# 今後の予定 KEK低速陽電子実験施設にて



BEC向けのPs生成材料開発、陽電子集束装置  
開発も進め、5年間でBEC実現を目指す

# まとめ

- 反物質の謎を解明するために、初の反物質BECをPsで実現することを目指している。必要なPs高密度化・冷却は、温度10 K以下、密度 $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 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、基本的な性能を評価し、レーザー冷却実験に使用可能であることを確認した。
- 2019年度中でのレーザー冷却世界初実現を目指している。

# Backup