

ボース・アインシュタイン凝縮を目指した 高密度ポジトロニウム生成材料の開発

東大理, 東大素セ^A, 東大工^B, 産総研^C, 九大GIC^D, 高工研^E, 原子力機構^F

石田 明,

橋立佳央理, 難波俊雄^A, 浅井祥仁, 五神 真,

山田恭平, 田島陽平^B, 周 健治^B, 蔡 恩美^B, 吉岡孝高^B,

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^E, 甲斐健師^F



本研究はJSPS科研費 JP16H04526, JP17H02820, JP17H06205, JP17J03691, JP18H03855, JP19H01923, 公益財団法人 松尾学術振興財団、公益財団法人 三豊科学技術振興協会、公益財団法人 光科学技術研究振興財団、公益財団法人 三菱財団、TIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」TK17-046, TK19-016の助成を受けたものです。
https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110

令和2年9月8日

日本物理学会2020年秋季大会@オンライン開催

目次

- ポジトロニウム (Ps) のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) の目的:
反物質の新量子多体系である低温量子凝縮相
= 反物質レーザーを実現
- Ps-BEC 実現スキーム
- Ps生成・濃縮・冷却材開発状況
 1. シリカエアロゲル
 2. ナノインプリント、ナノプロセッシングを用いた手法による材料開発

反物質の新量子多体系である低温量子凝縮相 = 反物質レーザーを実現

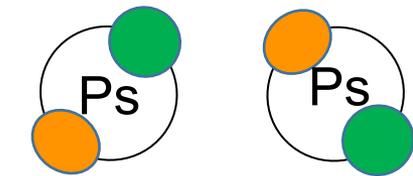
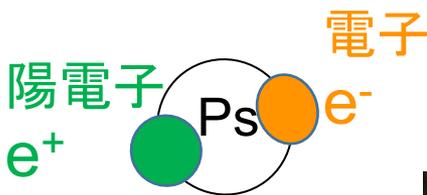
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 集団中のほぼすべての原子が 単一の量子状態になる
- 原子は 高密度 かつ 冷たい

通常の物質：

- 超伝導
- 超流動

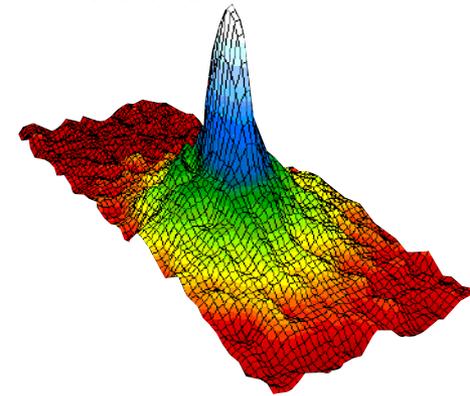
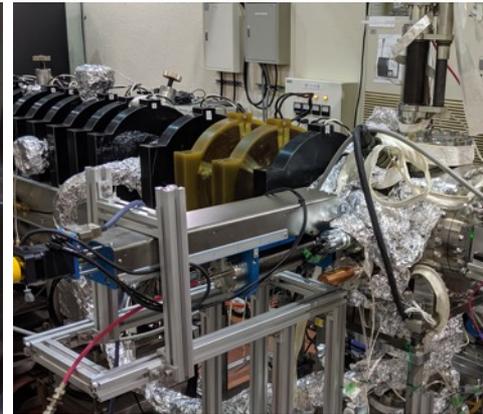
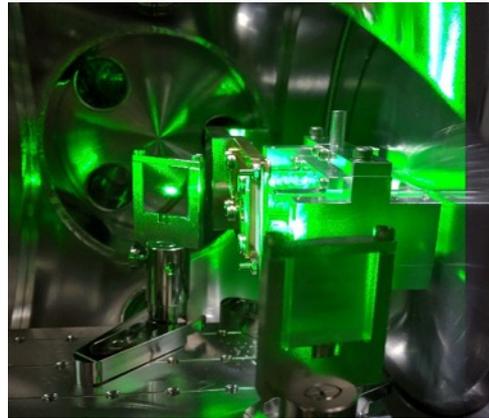
反物質は？



反物質

ポジトロニウム(Ps)
(古典極限系)

レーザー冷却 + 超高密度化



反物質

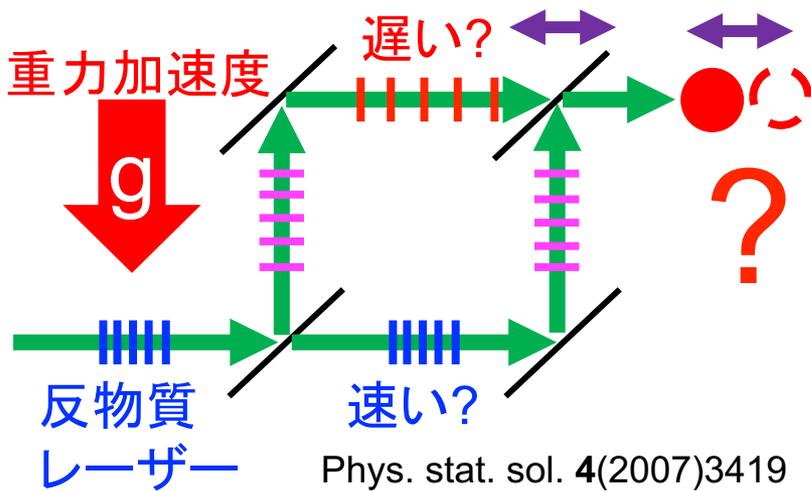
新量子多体系

Psのボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

基礎科学研究や次世代光源への応用可能性

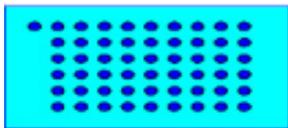
1. 反物質に働く重力を 原子干渉計を用いて測定

パスの長さを変化させると
Ps の強度が明滅しうる



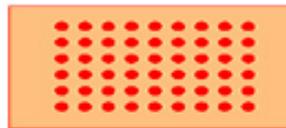
⇒「なぜ、宇宙に物質のみ残ったのか」という究極の問いに答える

物質の量



1,000,000,001

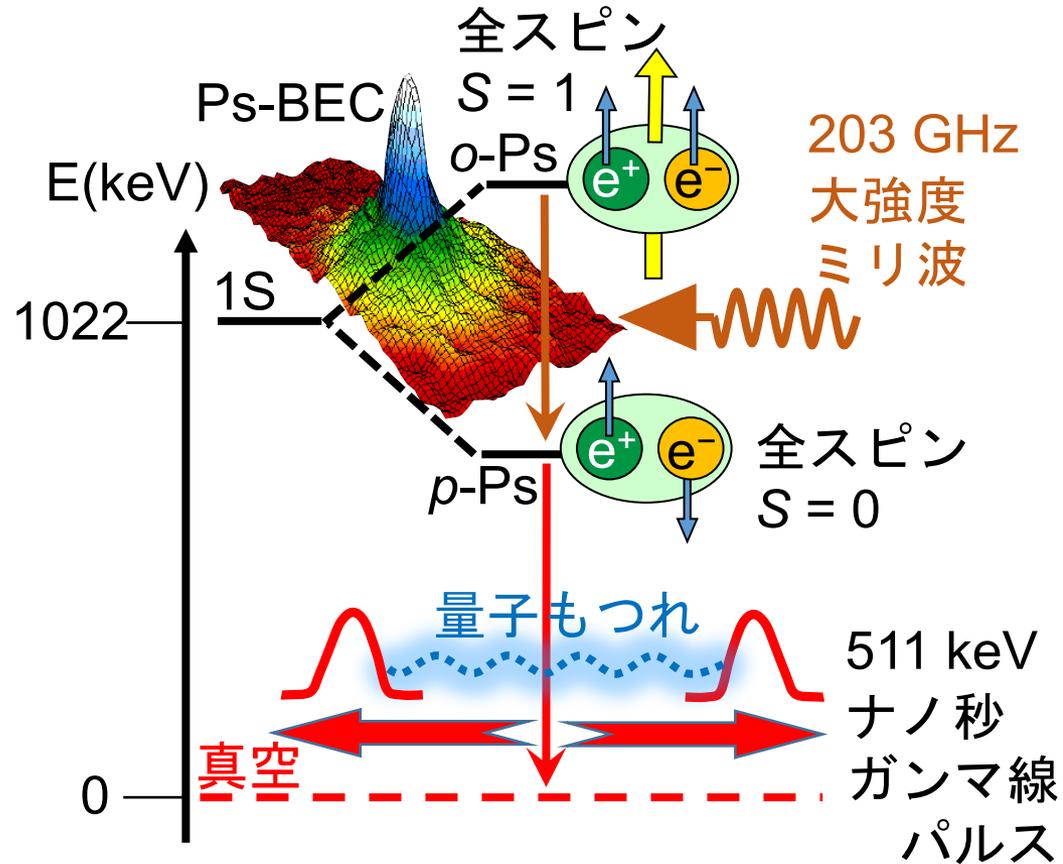
反物質の量



1,000,000,000



2. 511 keV ガンマ線レーザー



Phys. Rev. A 92(2015)023820

⇒産業・医療応用

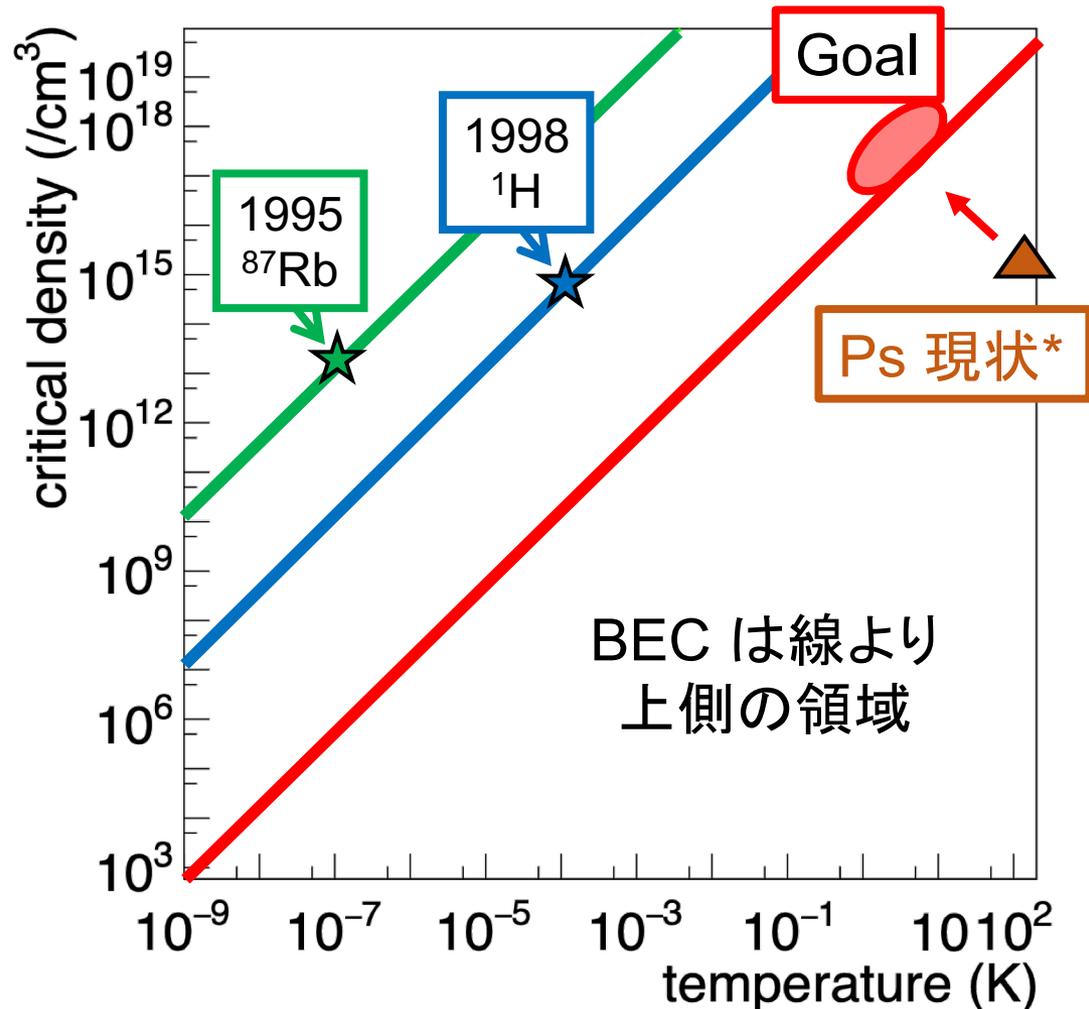
2つのチャレンジ: Ps の高密度化と高速冷却

最大の問題

Ps は寿命が142 ns と
短い

2つの課題

1. 瞬間的な高密度 Ps の生成
< 50 ns で $> 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
(現状: 10^{15} cm^{-3})
2. Ps の高速冷却
~300 ns で $< 10 \text{ K}$ に冷却
(現状: 150 K)

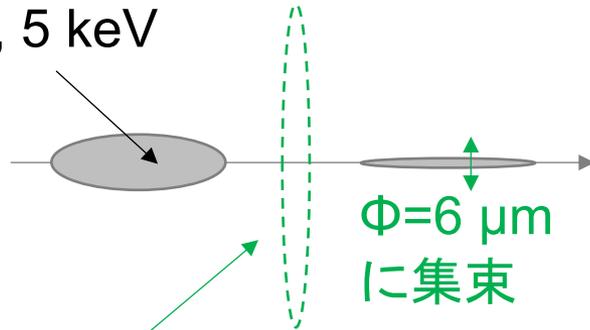


* : S. Mariuzzi *et al.* Phys. Rev. Lett. **104**(2010)243401,
D. Cassidy *et al.* physica status solidi **4**(2007)3419.

Ps-BEC 実現の新しいアイデア

1. 陽電子集束システム

ナノ秒偏極陽電子バンチ
 $1.5 \times 10^8 e^+$, 5 keV



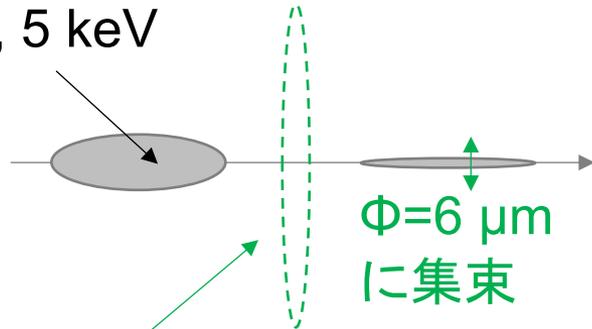
$\Phi = 6 \mu\text{m}$
に集束

1. 多段輝度増強システム
高密度陽電子バンチ生成

Ps-BEC 実現の新しいアイデア

1. 陽電子集束システム
2. Ps 生成・濃縮・冷却材

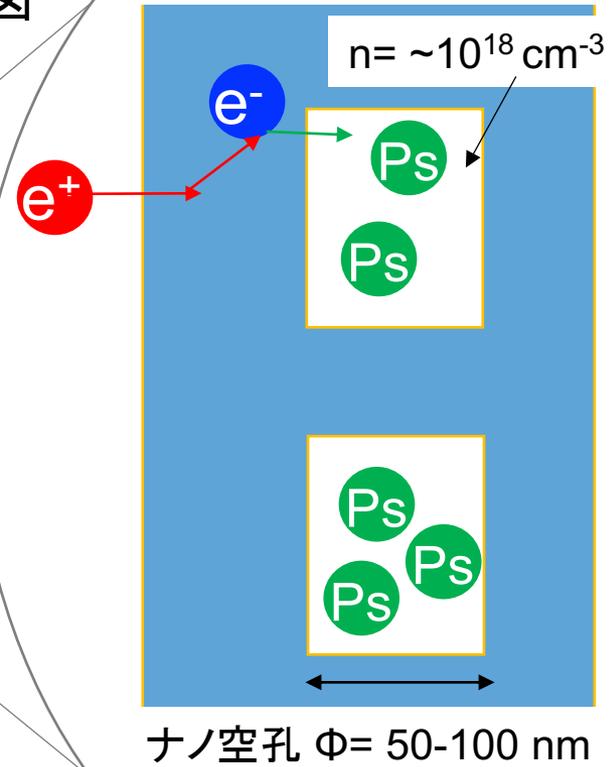
ナノ秒偏極陽電子バンチ
 $1.5 \times 10^8 e^+$, 5 keV



1. 多段輝度増強システム
高密度陽電子バンチ生成

拡大図

冷凍機で 4 K まで
冷却

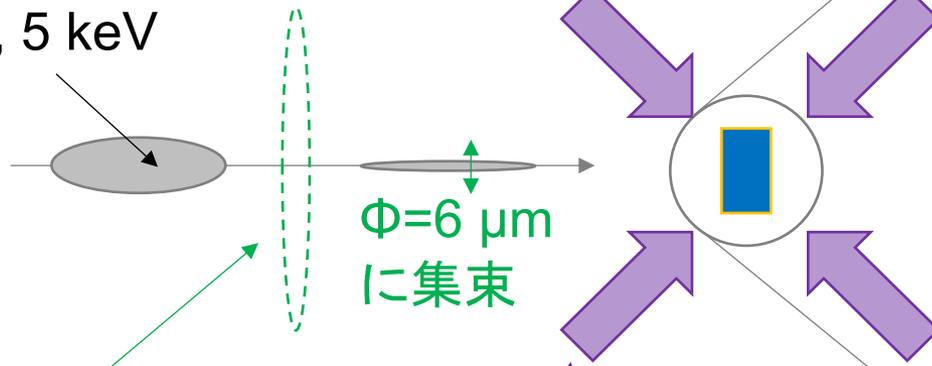


2. $e^+ \rightarrow$ Ps 生成・濃縮・冷却
無機酸化物多孔体

Ps-BEC 実現の新しいアイデア

1. 陽電子集束システム
2. Ps 生成・濃縮・冷却材
3. Ps レーザー冷却

ナノ秒偏極陽電子バンチ
 $1.5 \times 10^8 e^+$, 5 keV



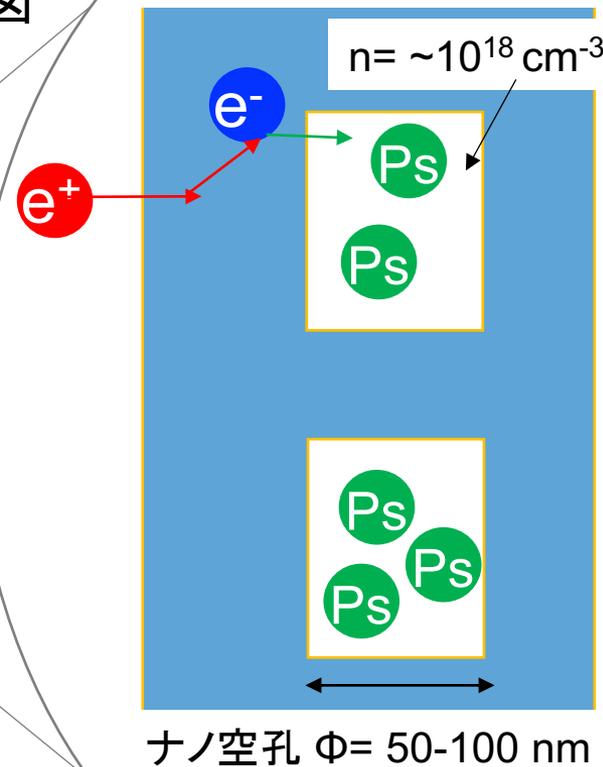
1. 多段輝度増強システム
高密度陽電子バンチ生成

243nm
紫外レーザー

3. Ps レーザー冷却
(1S-2P 遷移を使用)

冷凍機で 4 K まで
冷却

拡大図



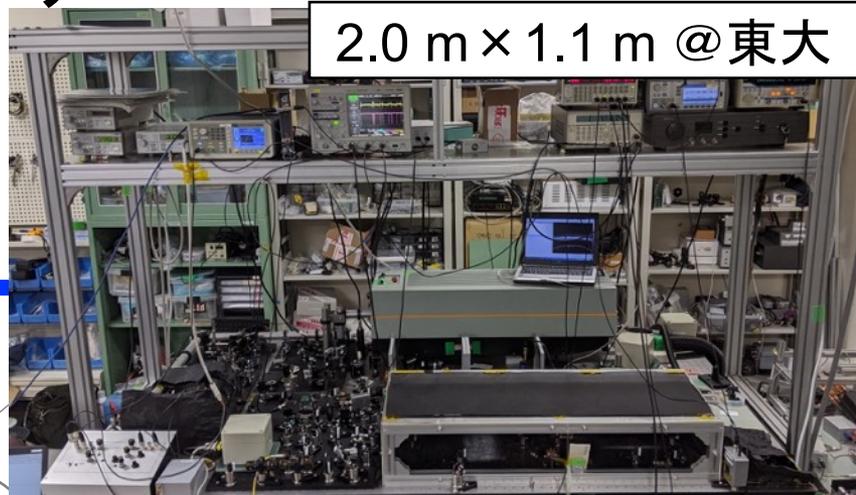
2. $e^+ \rightarrow$ Ps 生成・濃縮・冷却
無機酸化物多孔体

A. Ishida *et al.*,
JJAP Conf. Proc. 7(2018)011001,
K. Shu *et al.*,
J. Phys. B 49(2016)104001.

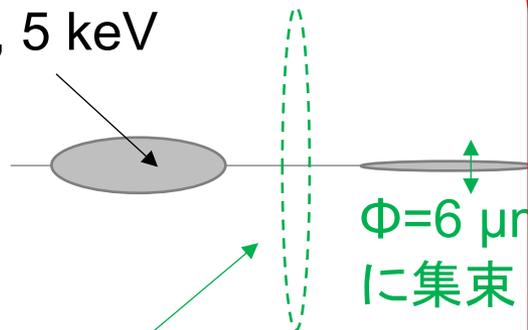
熱化とレーザー冷却を組み合わせる Ps を
300 ns で Ps-BEC 転移温度を下回る 10 K まで
冷却可能であることをシミュレーションで示した。

Ps-BEC 実現の新しいアイデア

1. 陽電子集束システム
2. Ps 生成・濃縮・冷却材
3. Ps レーザー冷却

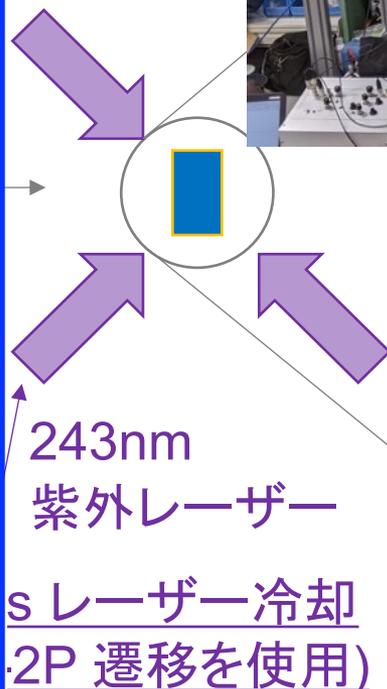


ナノ秒偏極陽電子バンチ
 $1.5 \times 10^8 e^+$, 5 keV



1. 多段輝度増強システム
高密度陽電子バンチ生成

KEK 低速陽電子実験施設 (SPF)
で陽電子磁気集束レンズを使った
陽電子ビーム集束実験を行った。
→16pSE-2
(素粒子実験、橋立佳央理)

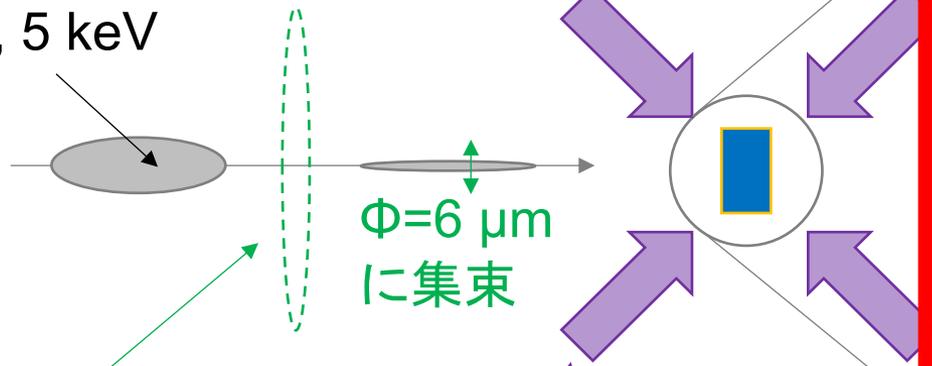


Ps レーザー冷却用
243 nm 紫外パルス
レーザーシステム
(300 ns 長パルス、140
GHz 広帯域、200 GHz/ μ s
高速シフト)
⇒光学的にチャレンジング。
プロトタイプを完成 (春の学
会で発表)

Ps-BEC 実現の新しいアイデア

1. 陽電子集束システム
2. Ps 生成・濃縮・冷却材
3. Ps レーザー冷却

ナノ秒偏極陽電子バンチ
 $1.5 \times 10^8 e^+$, 5 keV



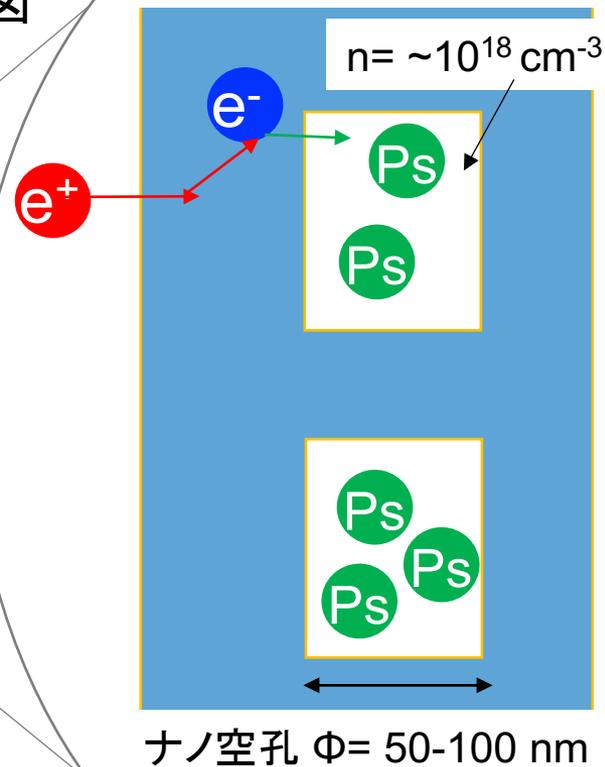
1. 多段輝度増強システム
高密度陽電子バンチ生成

243nm
紫外レーザー

3. Ps レーザー冷却
(1S-2P 遷移を使用)

拡大図

冷凍機で 4 K まで
冷却



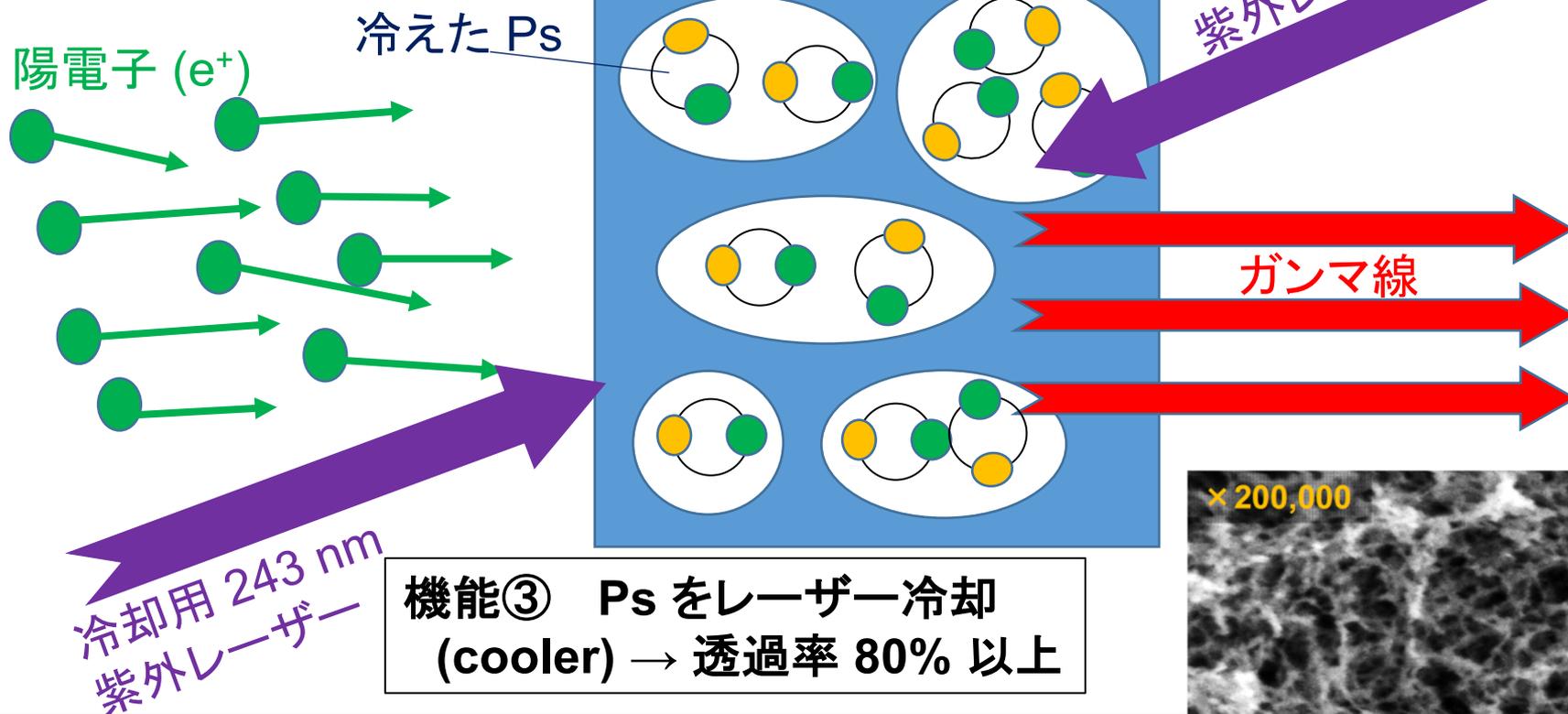
2. $e^+ \rightarrow$ Ps 生成・濃縮・冷却
無機酸化物多孔体

Ps 生成・濃縮・冷却の3機能をもつ 高度機能性無機酸化物ナノ反応器を開発する

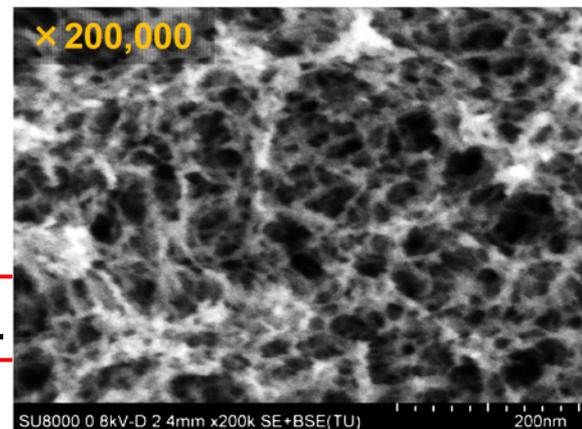
機能① 陽電子から
高効率で Ps を生成
(generator)
→生成率 50%以上

機能② Psを高密度に濃縮
(condenser) → 100 nm 細孔

無機酸化物多孔体中の細孔



有力候補としてシリカ (SiO_2) エアロゲルを開発したが.....

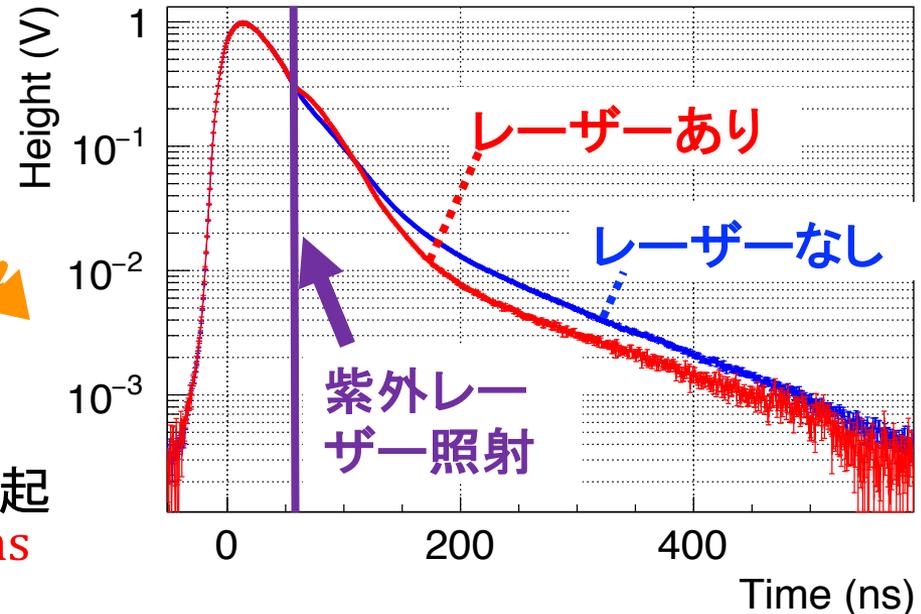
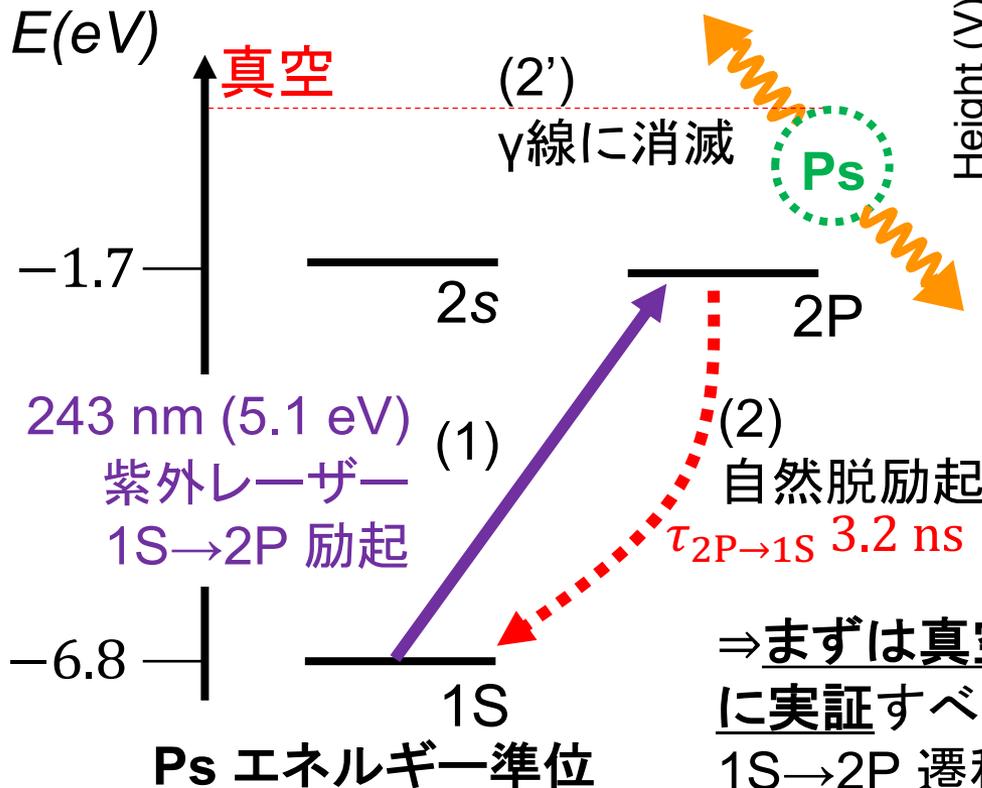


シリカエアロゲル中での Ps レーザー冷却は困難！

Ps レーザー冷却：
(1)→(2)→(1)→(2)...
サイクルを 50 回繰り返す

シリカエアロゲル細孔中では、(1)→(2') と瞬時に γ 線に消滅してしまった！

KEK 低速陽電子実験施設 (SPF) における 1S→2P 遷移実験結果



⇒ まずは真空中で Ps のレーザー冷却を今年度中に実証 すべく、準備を進めており、既に真空中で 1S→2P 遷移を十分高い効率で起こすことに成功 → 16pSE-1 (素粒子実験、石田明)

2P-Ps の消滅がシリカエアロゲル特有の現象である可能性があるため、シリカエアロゲル以外の材料開発も進めている。

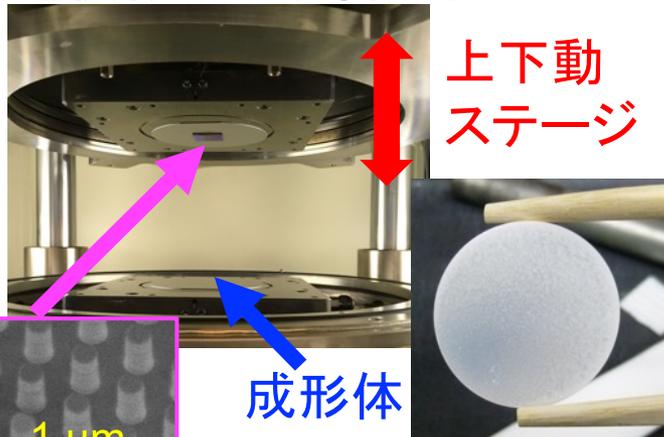
【シリカエアロゲル以外の手法による開発状況①】

ナノインプリントによるトップダウン的开发

⇒表面研磨の条件出しを終え、今後インプリントのテスト

① SiO₂/PVA が重合した柔らかい成形体に柱付金型を押し付けて、穴を転写(インプリント)。

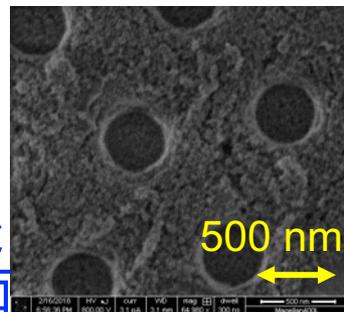
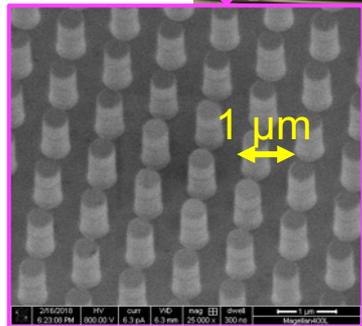
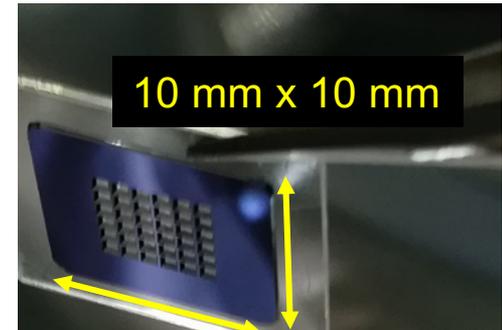
→細孔径を機械的に制御可能



② インプリント後の成形体を焼成。透明なシリカガラスに。



③ SiO₂ 薄膜でフタをしてPsを細孔中に閉じ込め

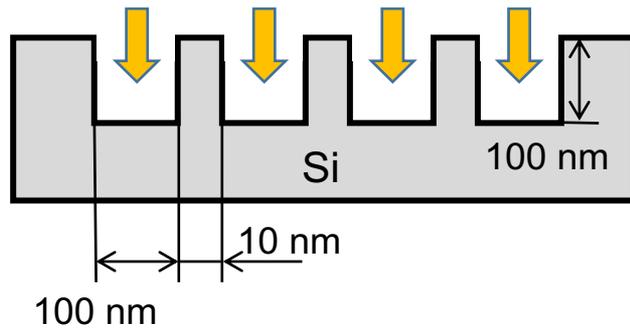


インプリント後の成形体表面

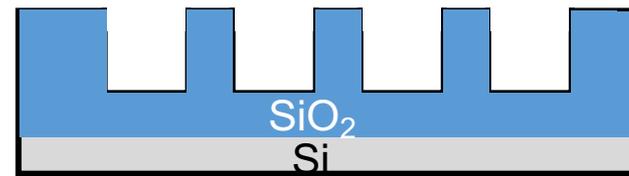
プロトタイプ作成により、成形体の表面研磨が重要であることが判明した。表面研磨法によって焼成後の透明度が変化したため、焼成試験をしながら表面研磨の条件出しを行った。

【シリカエアロゲル以外の手法による開発状況②】 ナノプロセッシング技術を駆使した手法による開発 ⇒薄い細孔壁を達成するため、 電子ビーム描画の条件出しを行っている

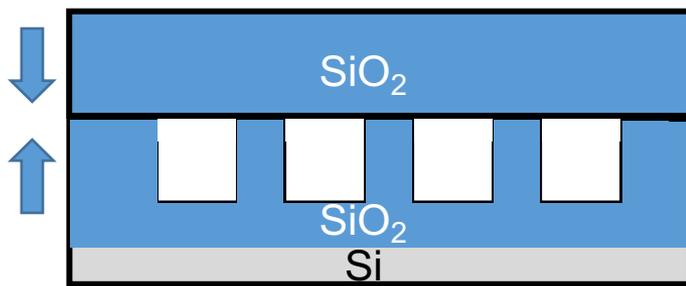
①シリコン基板に電子ビーム描画によって細孔構造を生成



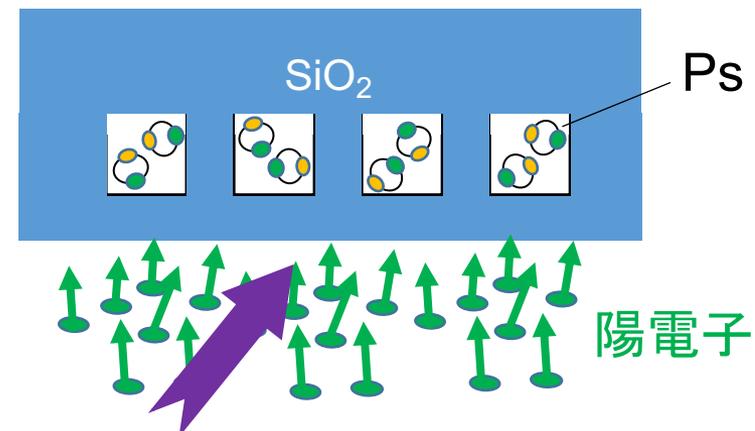
②熱酸化を行いシリカ層を生成



③シリカ基板と接合



④シリコンを研磨及びエッチングで除去



まとめ

1. Ps-BEC を実現して世界初の反物質レーザーを作りたい。
 - 反物質系低温量子凝縮相の研究
 - 「なぜ、宇宙に物質のみ残ったのか」を解明
 - ガンマ線レーザーの実現
2. ナノ細孔中で Ps をレーザー冷却するという、新しい Ps-BEC 実現スキームを提案した。
 - 陽電子集束システム
 - Ps生成・濃縮・冷却材
 - Psレーザー冷却
3. Ps生成・濃縮・冷却材として有力だったシリカエアロゲル細孔中では、Ps レーザー冷却が困難と判明した。今年度中にまず真空中での Ps レーザー冷却を実証すべく、準備を進めている。
4. ナノインプリント、ナノプロセッシングを用いた Ps 生成・濃縮・冷却材開発も並行して進めている。

https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110