

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

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16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
- Ps-BEC 実現スキーム
- KEK 低速陽電子実験施設 (SPF) における Ps の 1S→2P 遷移実験
- 真空中での Ps レーザー冷却実験に向けて

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

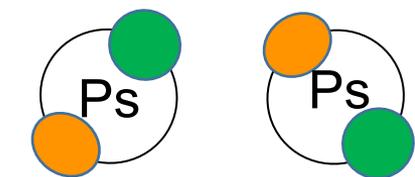
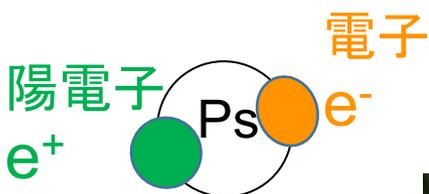
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 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

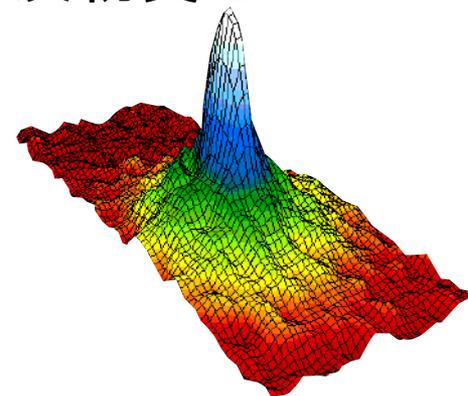
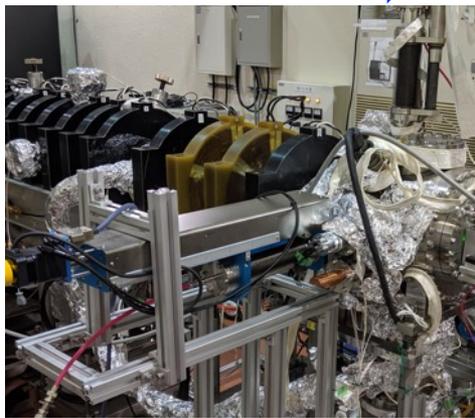
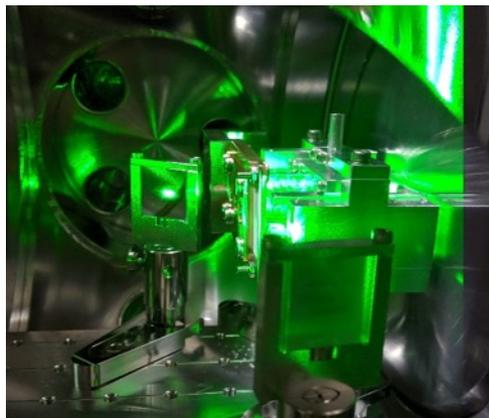
反物質は？



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

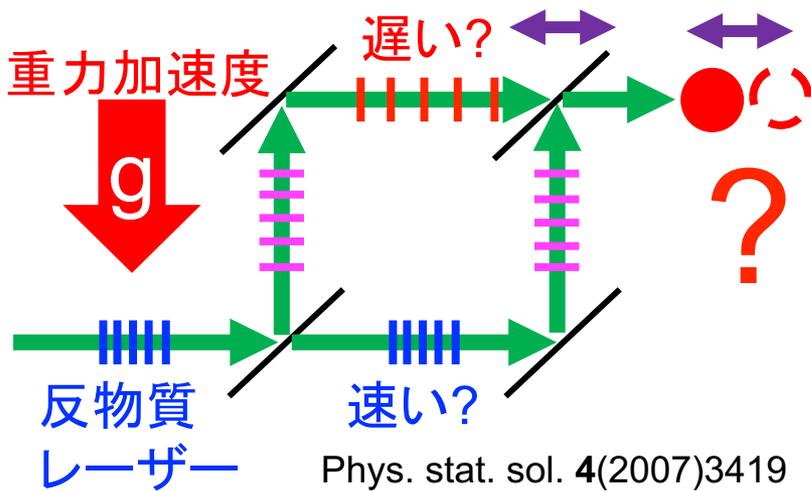
新量子多体系

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

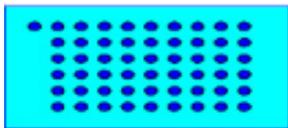
1. 反物質に働く重力を 原子干渉計を用いて測定

パスの長さを変化させると
Ps の強度が明滅しうる



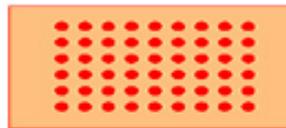
⇒「なぜ、宇宙に物質のみ残ったのか」という究極の問いに答える

物質の量

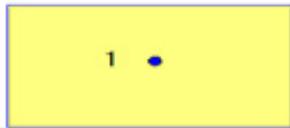


1,000,000,001

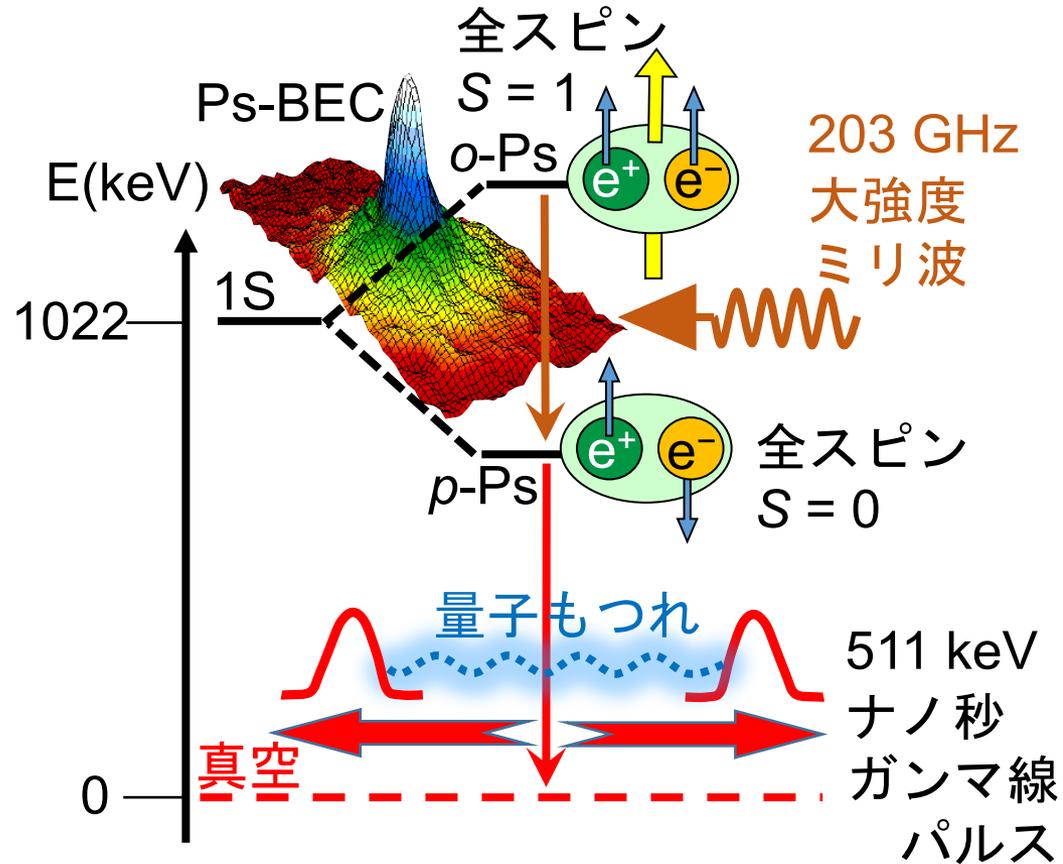
反物質の量



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

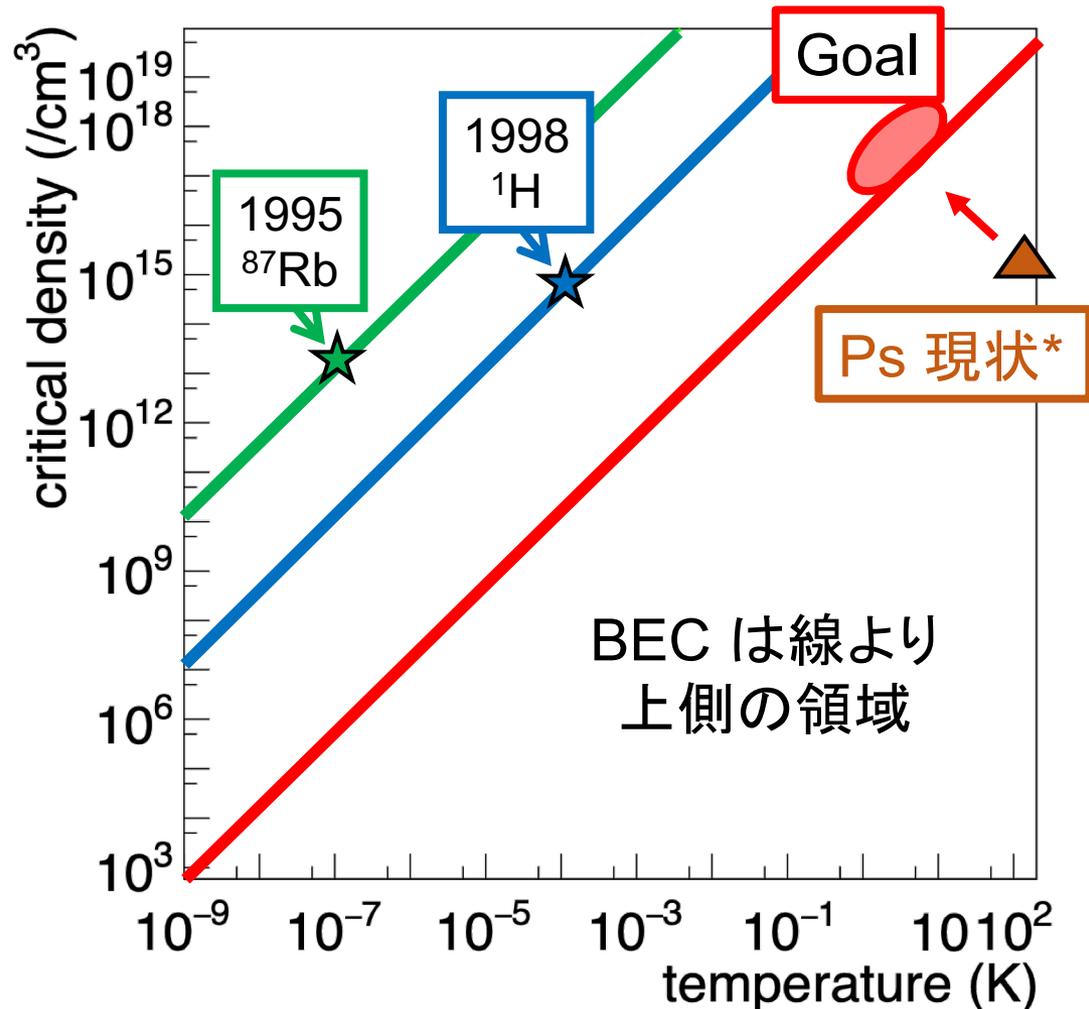
2つのチャレンジ: Ps の高密度化と高速冷却

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)

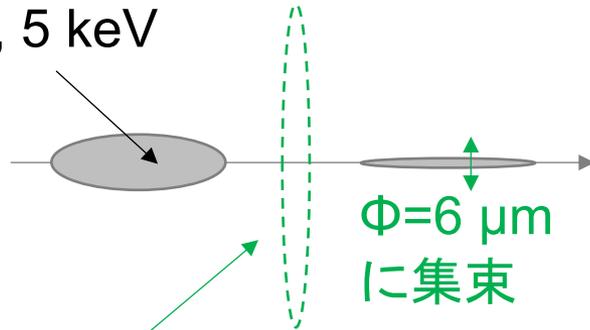


* : S. Mariuzzi *et al.* Phys. Rev. Lett. **104**(2010)243401,
D. Cassidy *et al.* physica status solidi **4**(2007)3419.

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

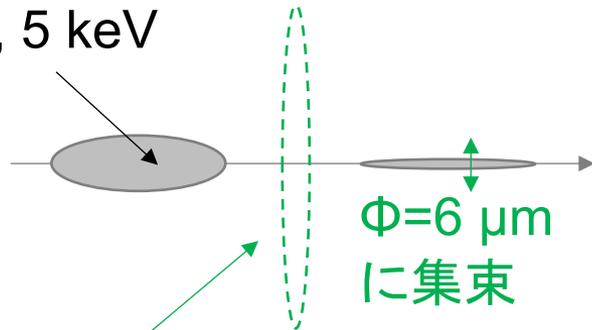


1. 多段輝度増強システム
高密度陽電子バンチ生成

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

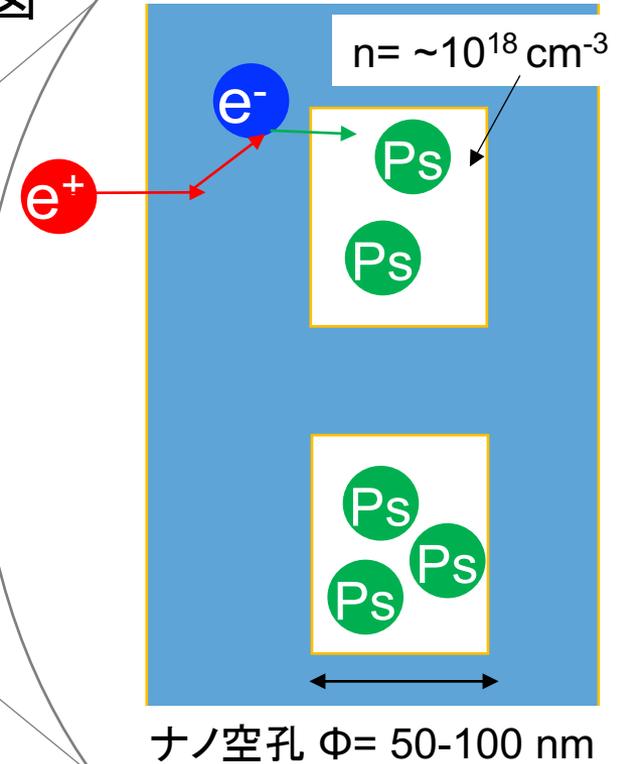
ナノ秒偏極陽電子バンチ
 $1.5 \times 10^8 e^+$, 5 keV



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

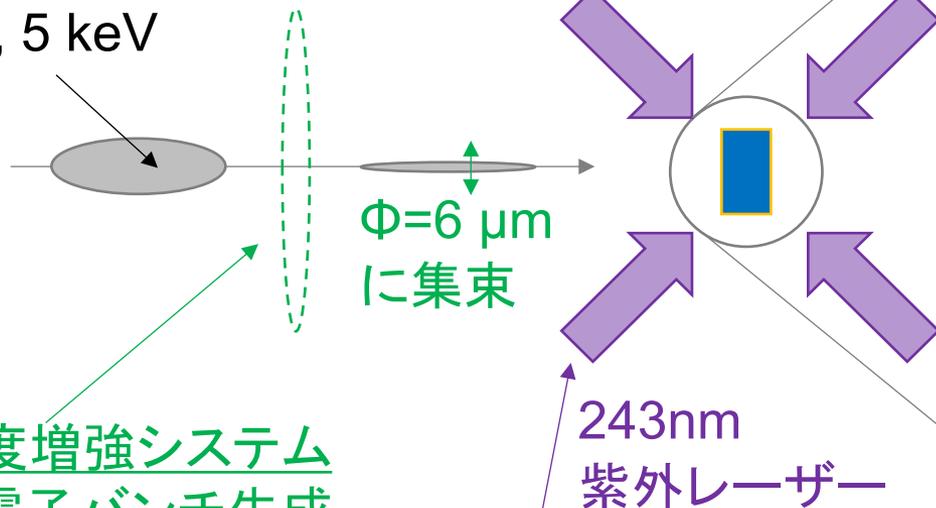


2. $e^+ \rightarrow \text{Ps}$ 生成・濃縮・冷却
無機酸化物多孔体

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

3. Ps レーザー冷却
(1S-2P 遷移を使用)

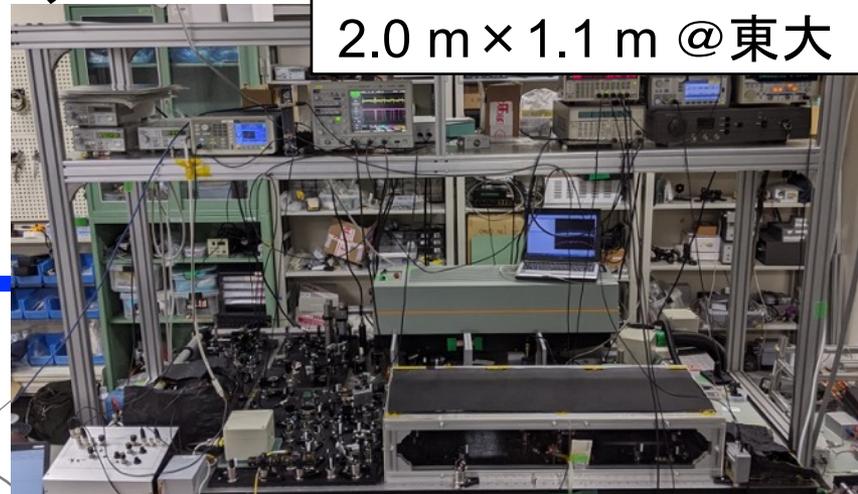
2. $e^+ \rightarrow \text{Ps}$ 生成・濃縮・冷却
無機酸化物多孔体

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。

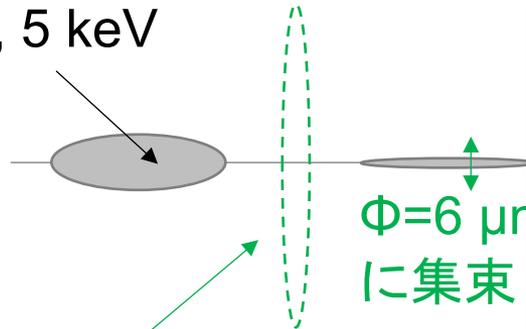
A. Ishida *et al.*,
JJAP Conf. Proc. 7(2018)011001,
K. Shu *et al.*,
J. Phys. B 49(2016)104001.

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

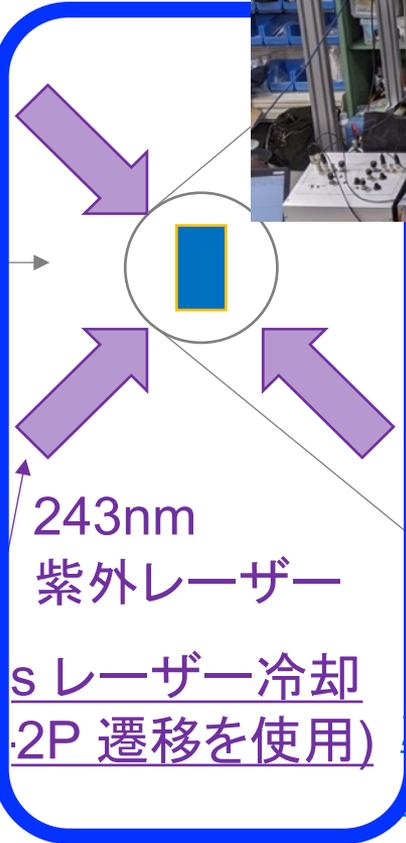


ナノ秒偏極陽電子バンチ
 $1.5 \times 10^8 e^+$, 5 keV



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
(次の講演、橋立佳央理)



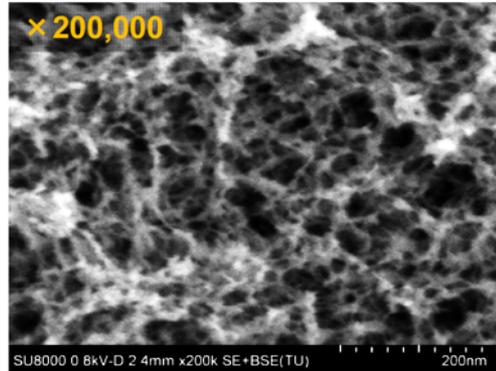
Ps レーザー冷却用
243 nm 紫外パルス
レーザーシステム
(300 ns 長パルス、140 GHz 広帯域、200 GHz/ μ s 高速シフト)
⇒光学的にチャレンジング。
プロトタイプを完成 (春の学会で発表済み)

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

3つの手法によるシリカ (SiO₂) 多孔体開発を並行

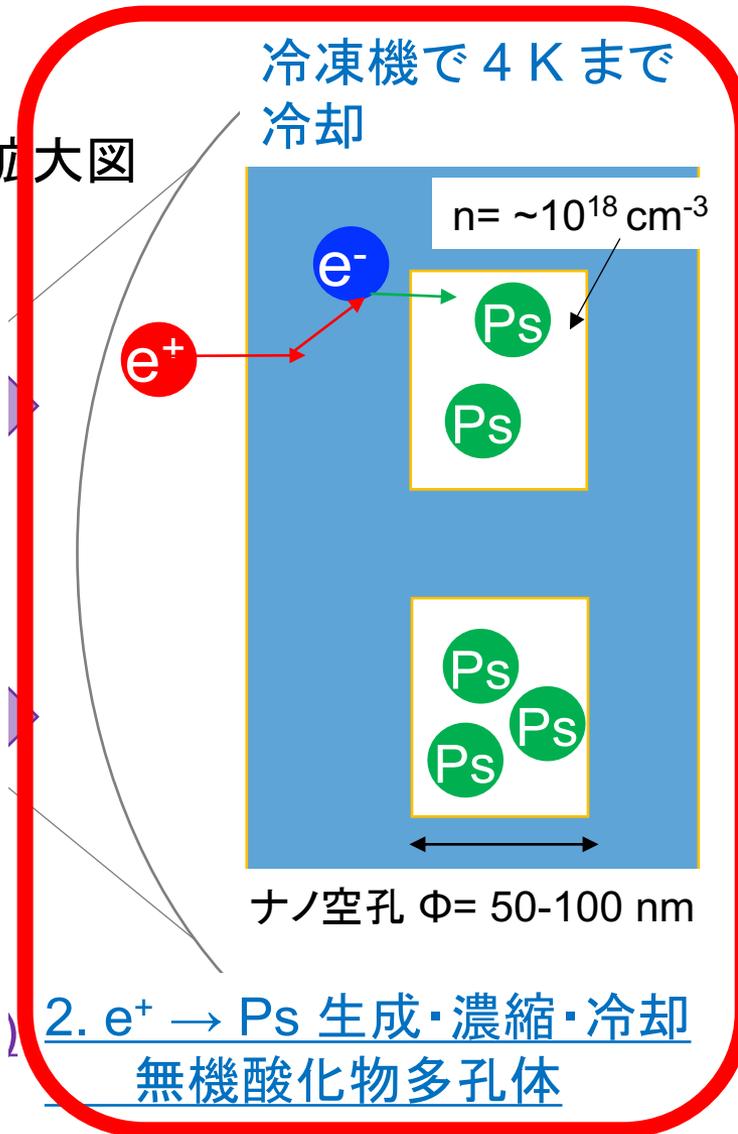
- ① シリカエアロゲル
(細孔径 50 nm,
厚さ 0.5 mm)



- ② ナノインプリントによるトップダウンの開発
⇒ SiO₂/PVA が重合した成形体表面研磨の条件出しを終え、今後インプリントのテストを行う。
- ③ ナノプロセッシングを駆使した手法による開発
⇒ 10 nm の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。

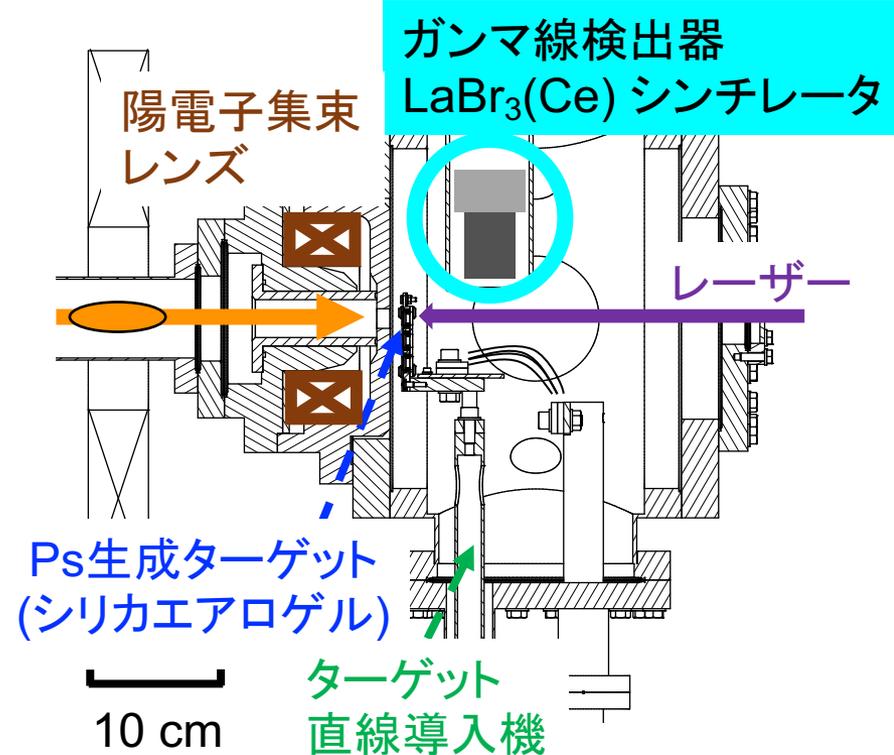
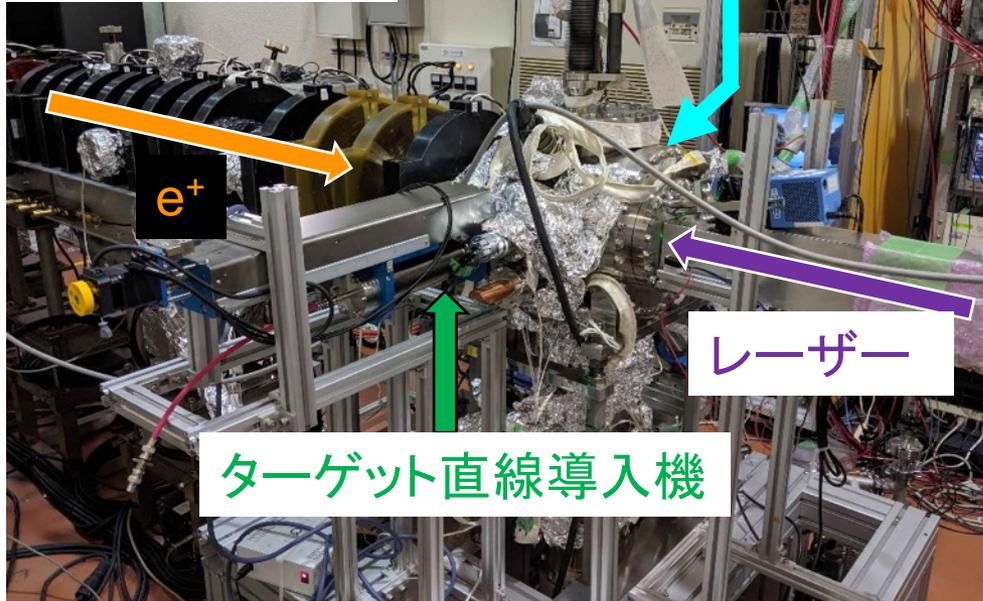
- ②, ③ → 詳細は 8aK1-2
(領域10:陽電子、石田明) で発表済み

拡大図



KEK 低速陽電子実験施設 (KEK-SPF) における Ps の 1S→2P 遷移実験セットアップ

KEK-SPF B1
ビームライン

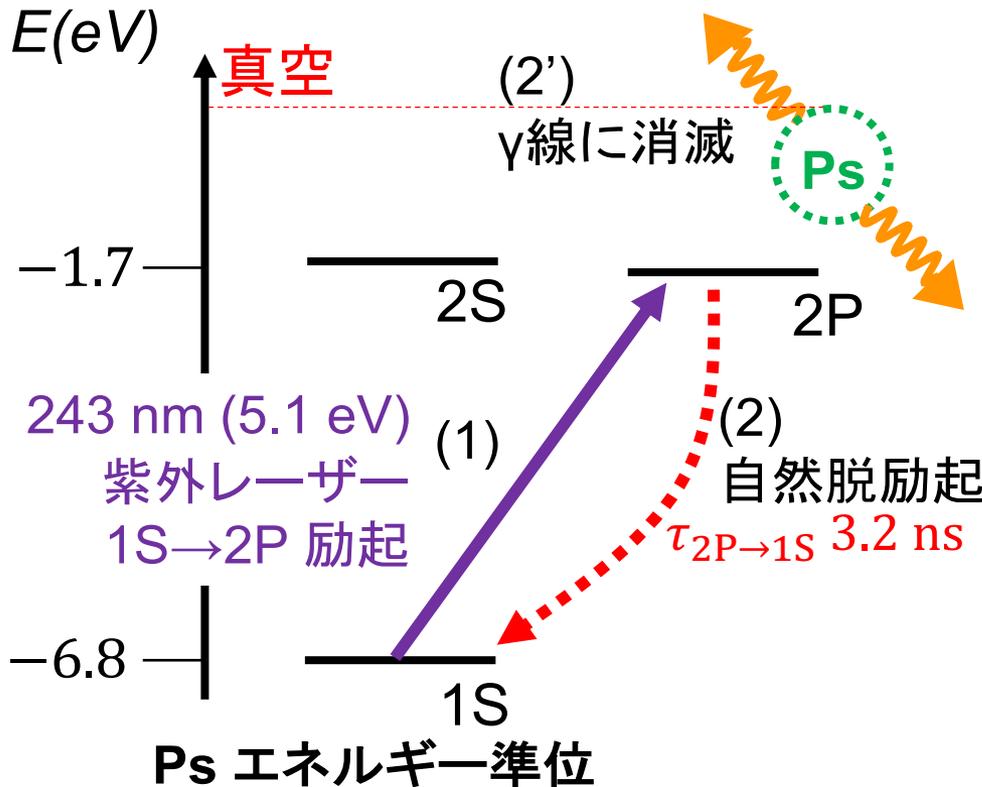


真空チャンバー

エネルギー	5 keV
ビーム強度	$\sim 10^6 \text{ e}^+ / \text{s}$
繰り返し	50 Hz
パルス幅	11 ns FWHM
ビームサイズ	$\Phi \sim 10 \text{ mm}$

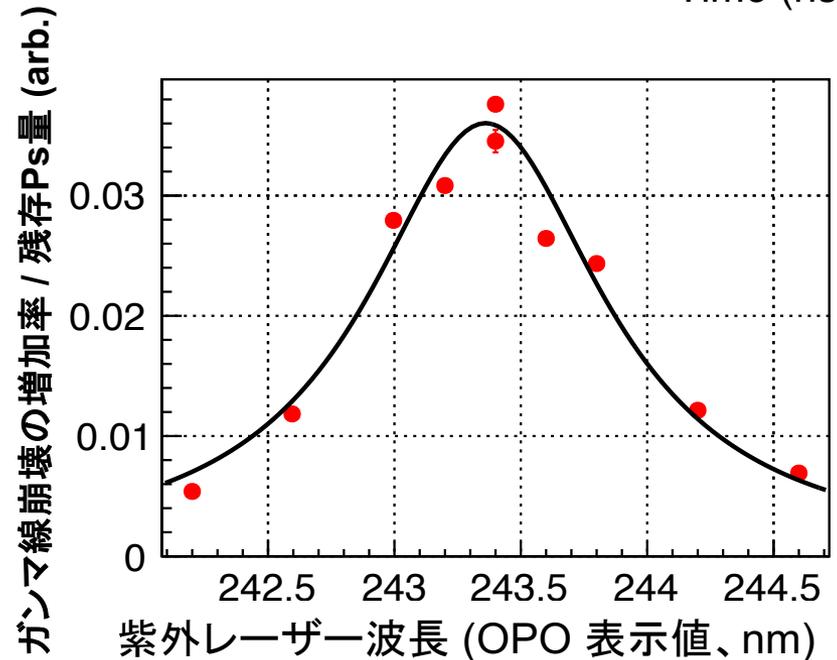
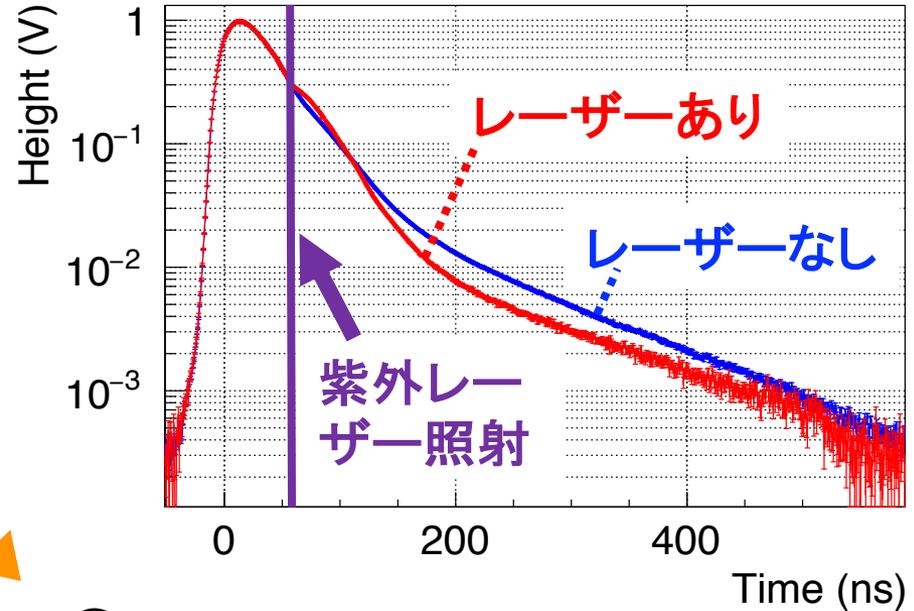
シリカエアロゲル中での Ps レーザー冷却は困難！

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



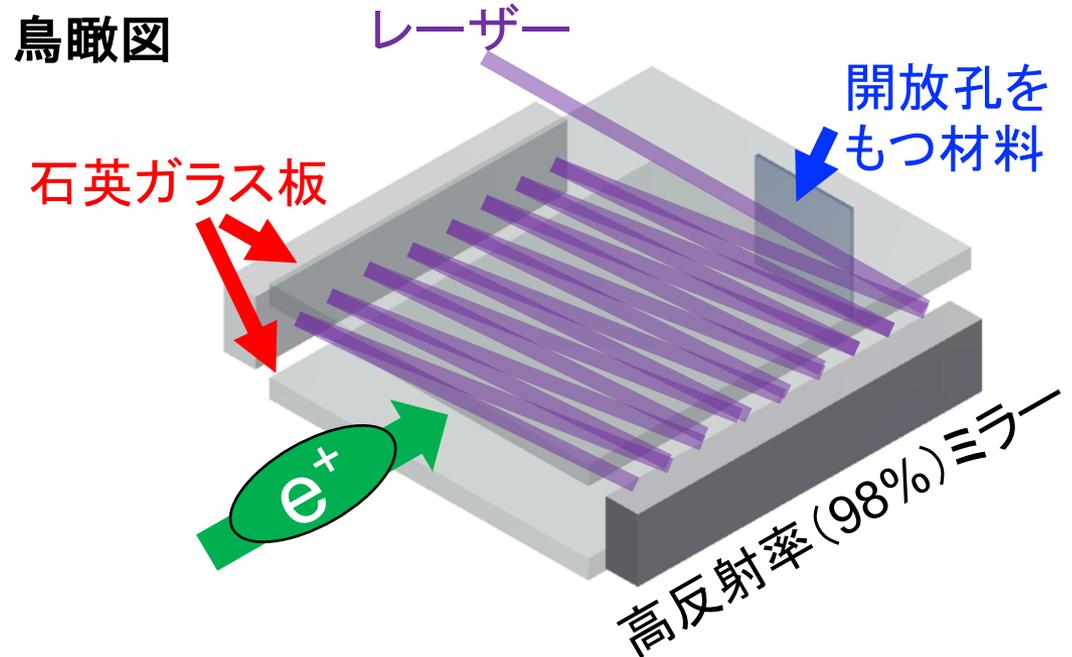
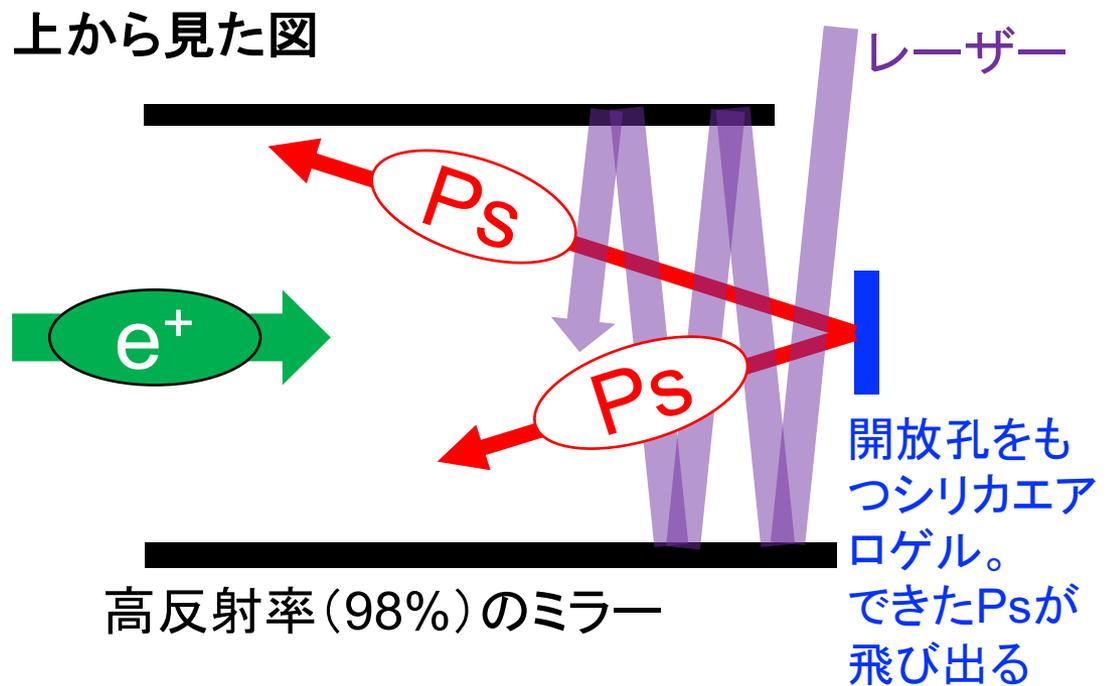
シリカエアロゲル細孔中では、(1)→(2')
と瞬時にγ線に消滅してしまった！

Photon Factory Activity Report 37(2020)201.



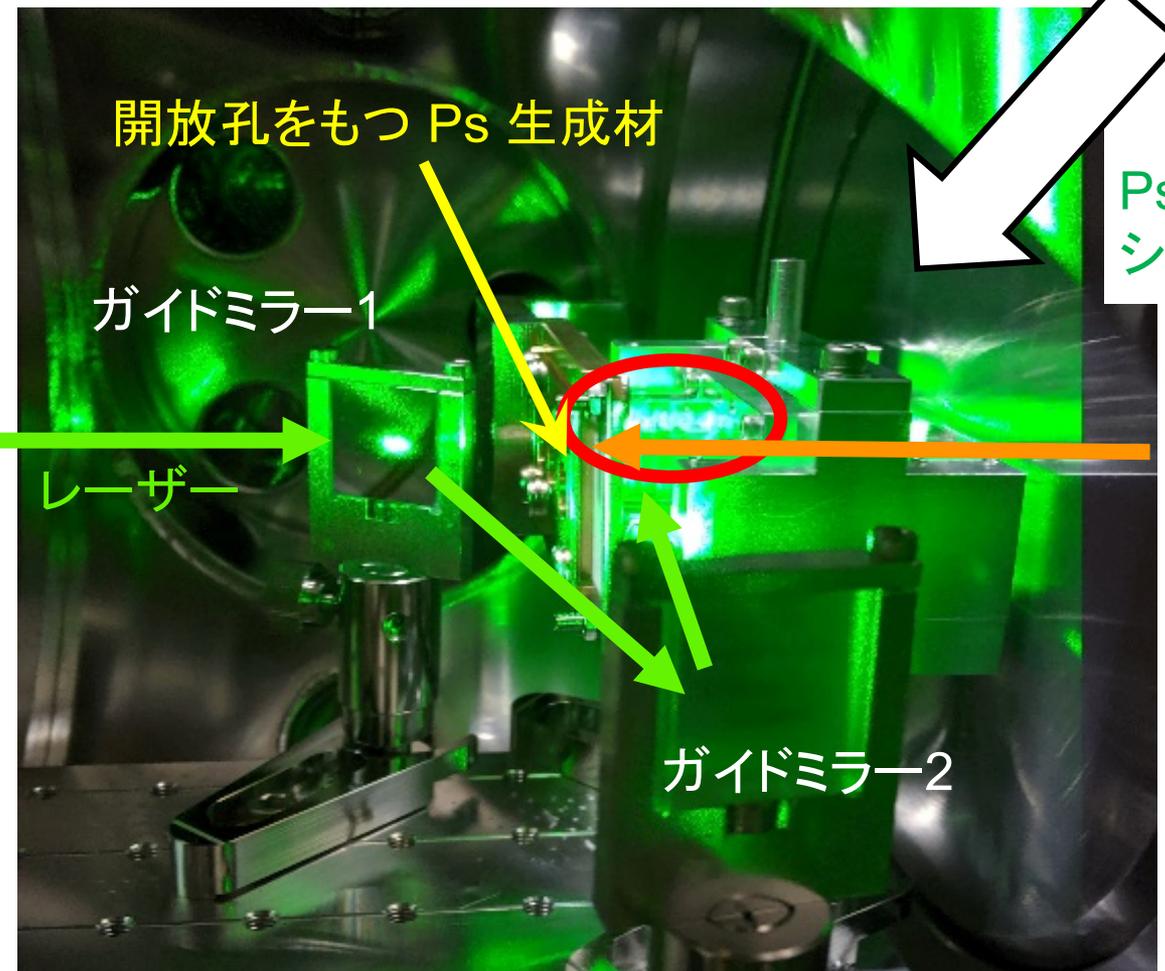
まずは真空中で Ps のレーザー冷却を実証する

- 開放孔をもつ Ps 生成材 (シリカエアロゲル) から真空中に放出された Ps にレーザーを照射
- レーザーと Ps の相互作用領域を確保するため、レーザーは高反射率ミラーで多重反射
- 2 枚の石英ガラス板で Ps を閉じ込め



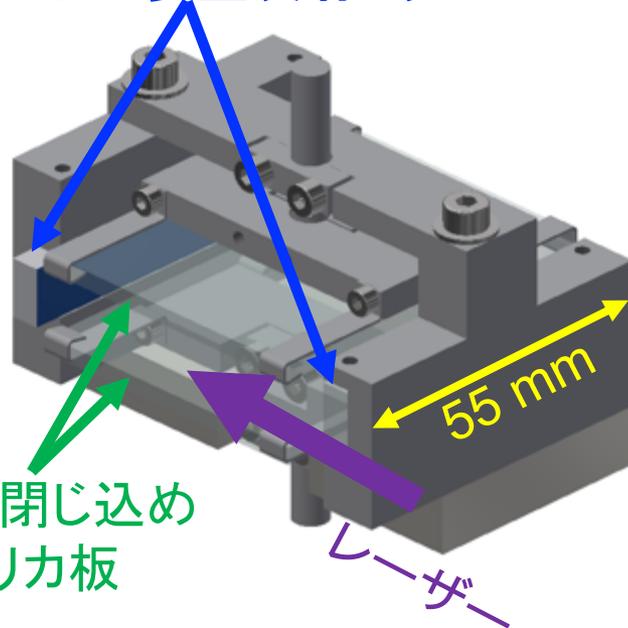
KEK-SPFにて真空中 でPsの1S→2P遷 移を確認した

真空チャンバー内



レーザー・Ps
反射装置

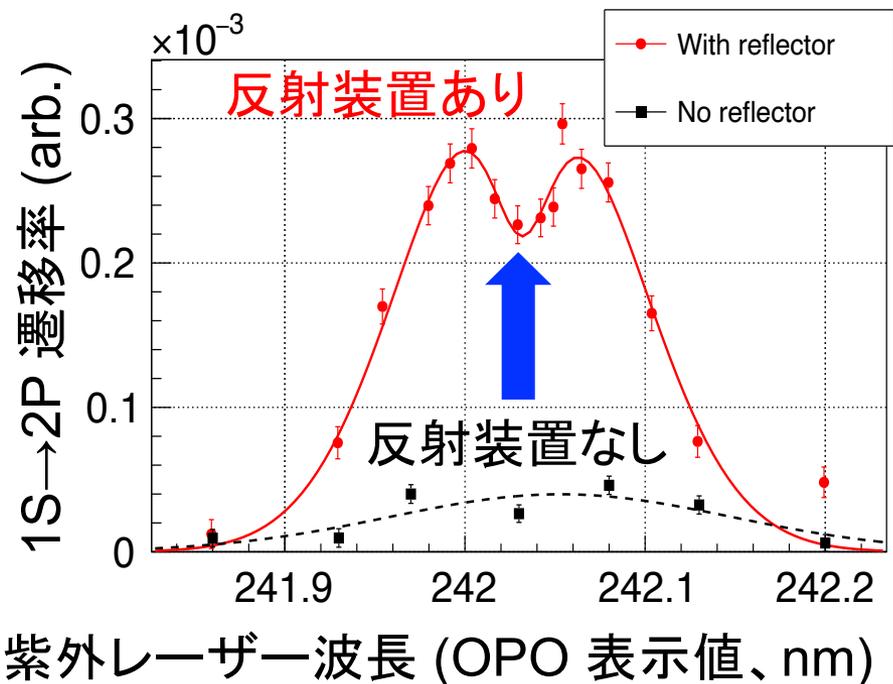
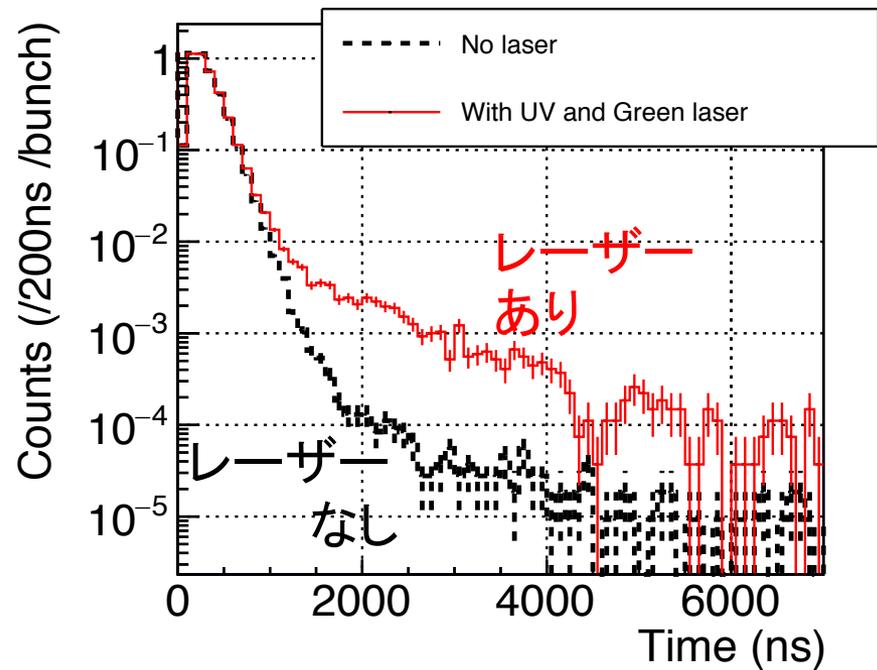
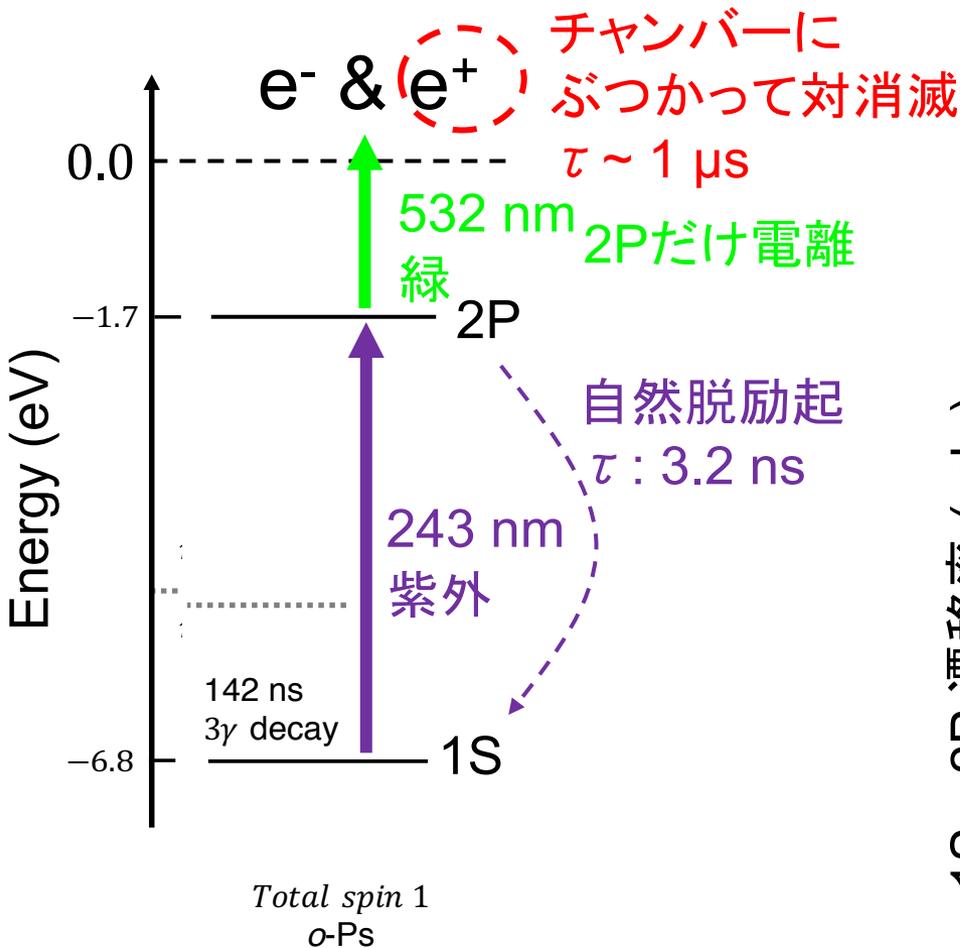
レーザー多重反射ミラー



陽電子



レーザー・Ps 反射装置で 高効率 1S→2P 遷移に成功 ⇒本装置で今年度中に Ps レーザー冷却を実証する



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。
4. 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、準備を進めており、既にレーザー・Ps 反射装置を使って高効率で Ps の $1S \rightarrow 2P$ 遷移を起こすことに成功した。

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