

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(1)

石田明(1),

橋立佳央理(1,4), 難波俊雄(2), 浅井祥仁(1), 五神真(1), 山田恭平(1), 田島陽平(3),
小林拓豊(3), 魚住亮介(3), 周健治(3), 蔡恩美(3,8), 吉岡孝高(3), 大島永康(4),
オロークブライアン(4), 満汐孝治(4), 伊藤賢志(4), 熊谷和博(4), 鈴木良一(4),
藤野茂(5), 兵頭俊夫(6), 望月出海(6), 和田健(6), 甲斐健師(7)

(1)東大理, (2)東大素粒子センター, (3)東大工, (4)産総研,

(5)九大GIC, (6)高エネ研, (7)原子力機構, (8)高麗大学理科大学物理学科



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12月11日

京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」

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 レーザー冷却実現に向けた実験の状況
- 2020 年度 KEK 低速陽電子実験施設 (SPF) における実験の結果速報

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

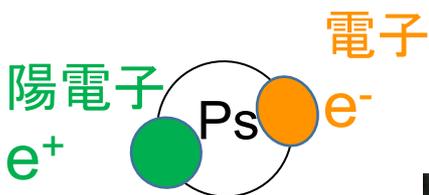
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 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 冷たく かつ 高密度

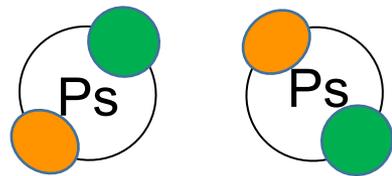
通常物質 :

- 超伝導
- 超流動

反物質は？

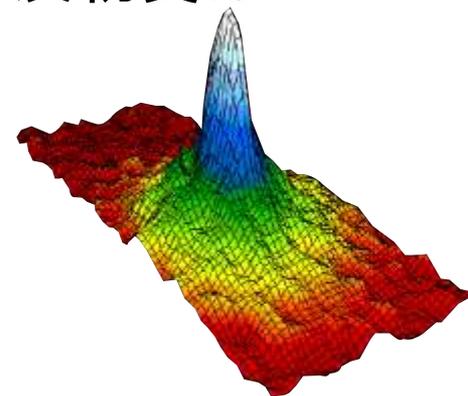
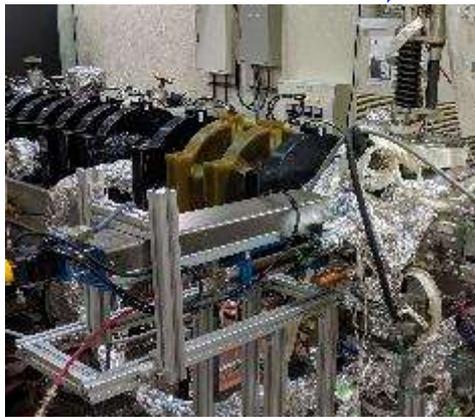
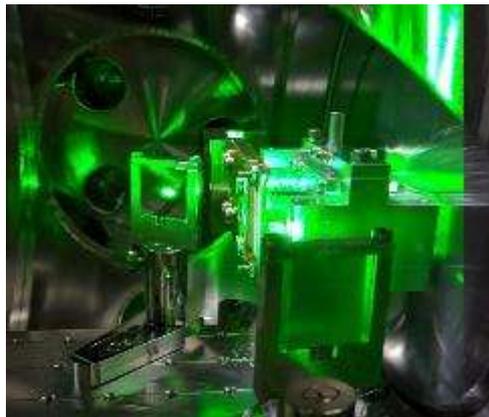


レーザー冷却 + 超高密度化



反物質

ポジトロニウム(Ps)
(古典極限系)



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)

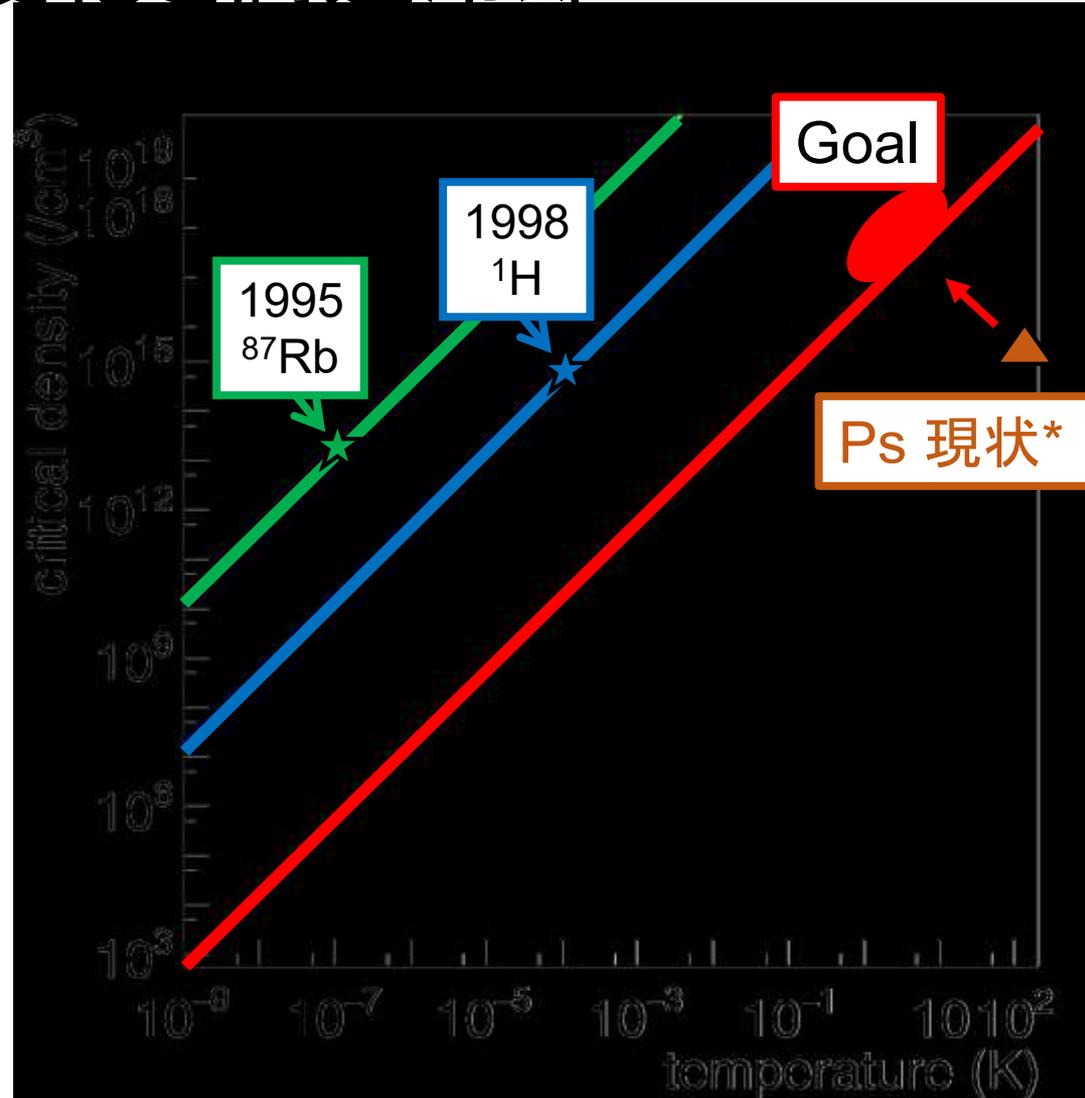
2つのチャレンジ: Ps の高密度化と高速冷却

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)



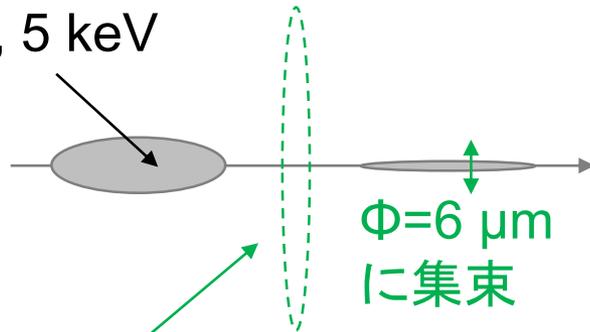
* : S. Mariuzzi *et al.* Phys. Rev. Lett. **104**(2010)243401,
D. Cassidy *et al.* physica status solidi **4**(2007)3419.

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



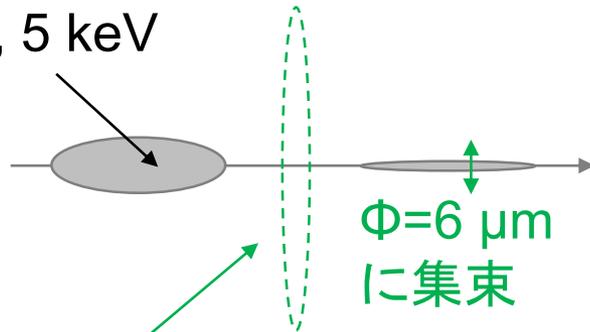
$\Phi = 6 \mu\text{m}$
に集束

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

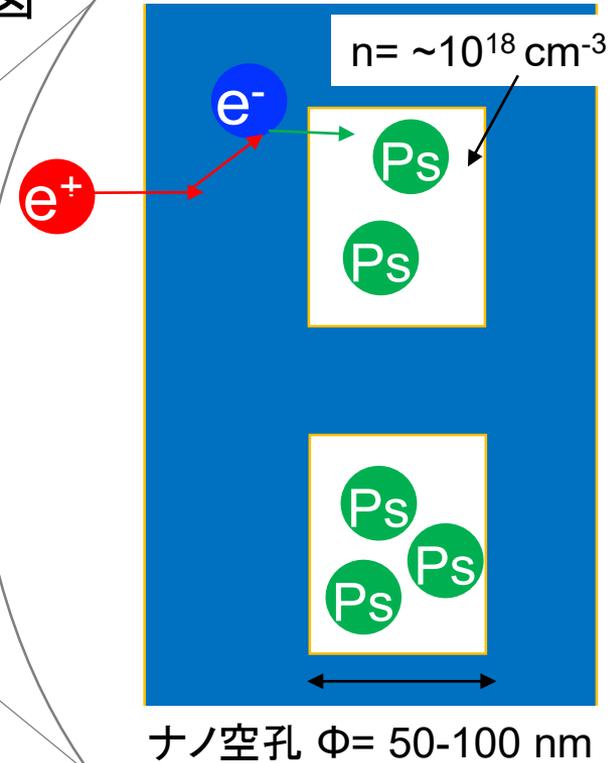
ナノ秒偏極陽電子バンチ
 $1.5 \times 10^8 e^+$, 5 keV



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

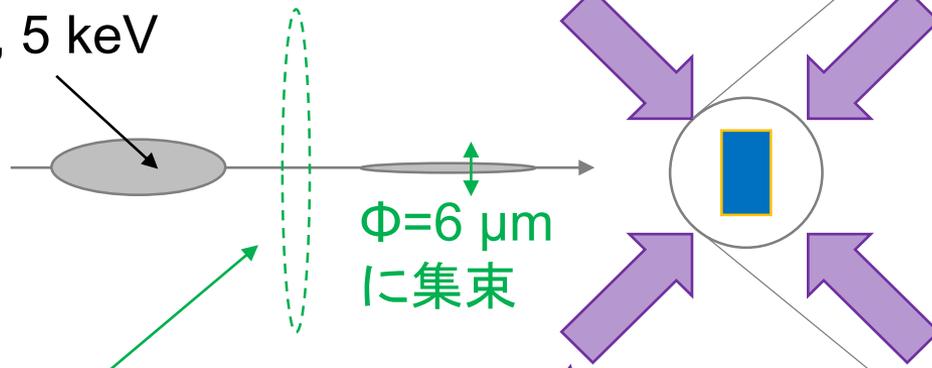


2. $e^+ \rightarrow \text{Ps}$ 生成・濃縮・冷却
無機酸化物多孔体

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



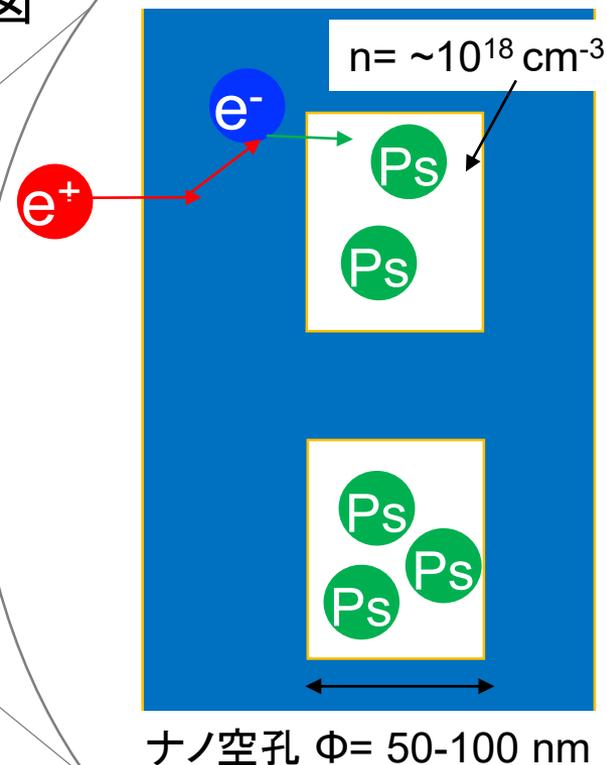
1. 多段輝度増強システム
高密度陽電子バンチ生成

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.

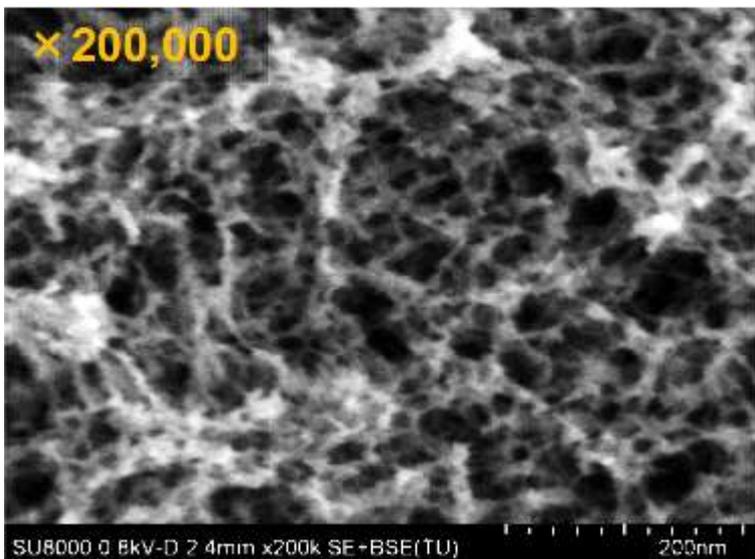
熱化とレーザー冷却を組み合わせる Ps を
300 ns で Ps-BEC 転移温度を下回る 10 K まで
冷却可能であることをシミュレーションで示した。

Ps-BEC 実現の新しいアイデア

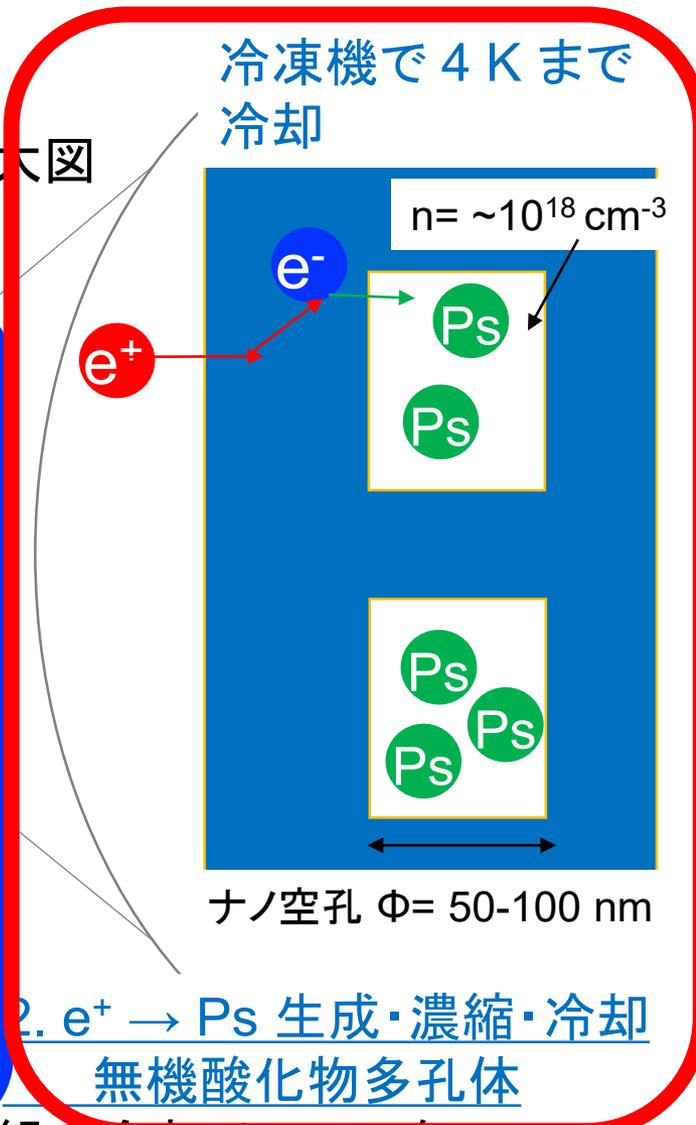
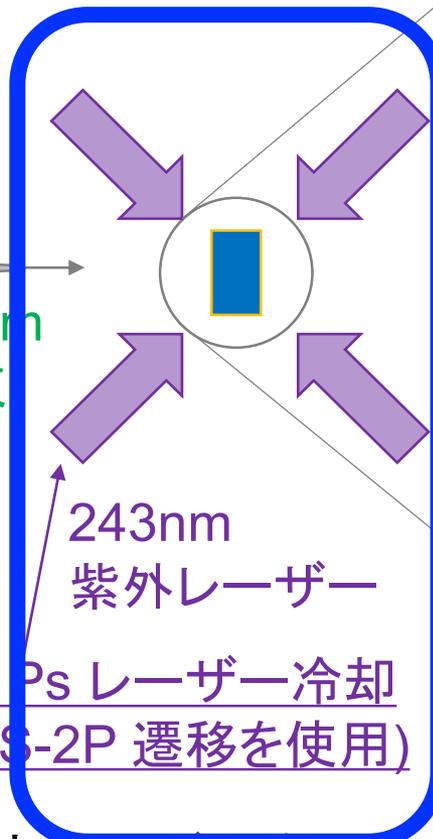
1. 陽電子集束システム

2. Ps 生成・濃縮・冷却材

3. Ps レーザー冷却



Ps生成・濃縮・冷却材の有力候補として シリカエアロゲル (細孔径 50 nm, 厚さ 0.5 mm) を開発した
→Psレーザー冷却したいが.....

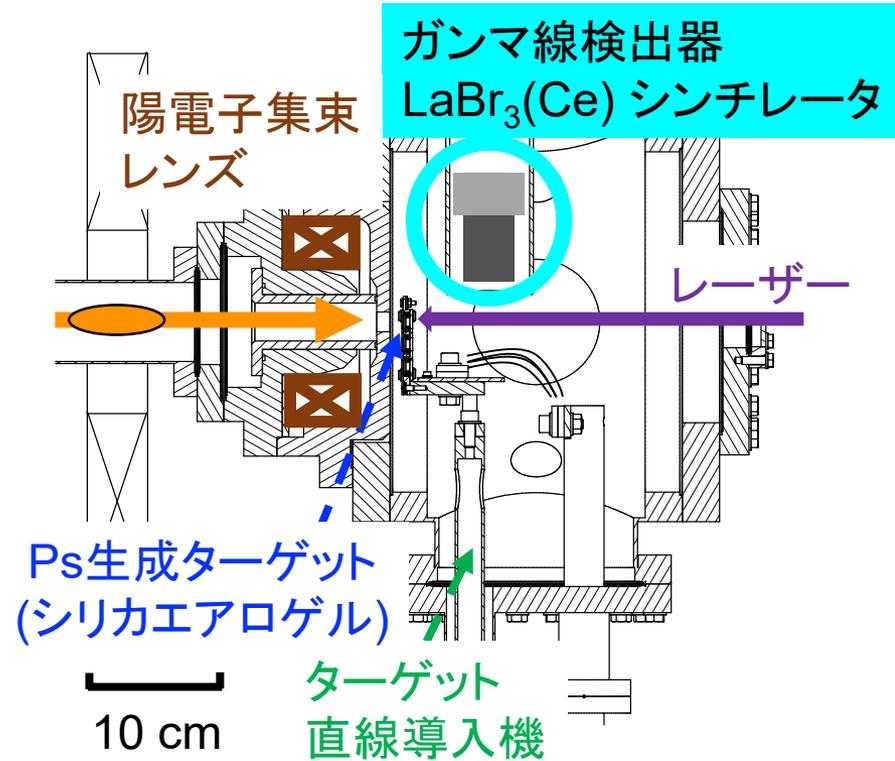
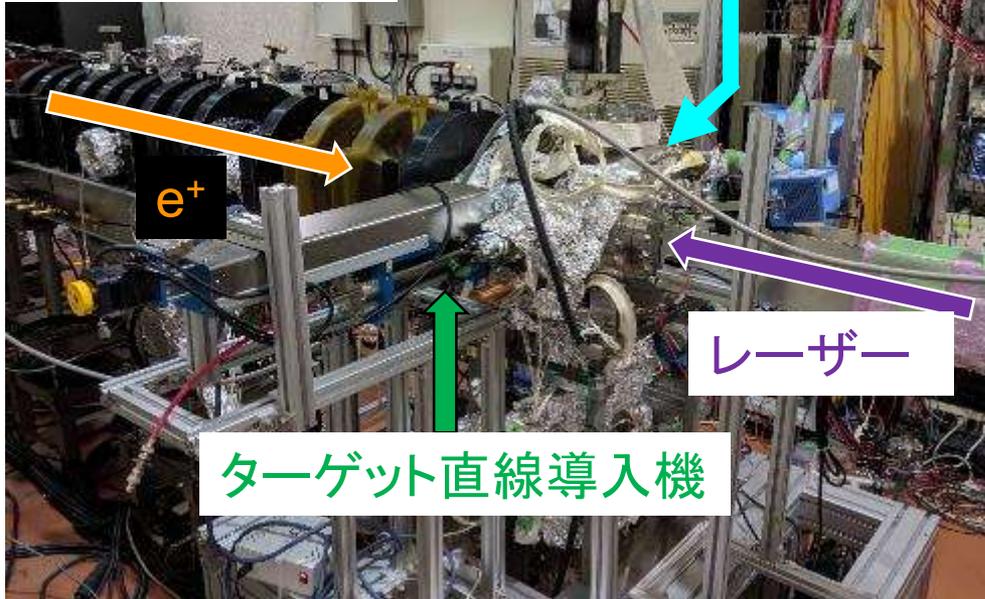


2. $e^+ \rightarrow \text{Ps}$ 生成・濃縮・冷却
無機酸化物多孔体

とレーザー冷却を組み合わせると 10 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。

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

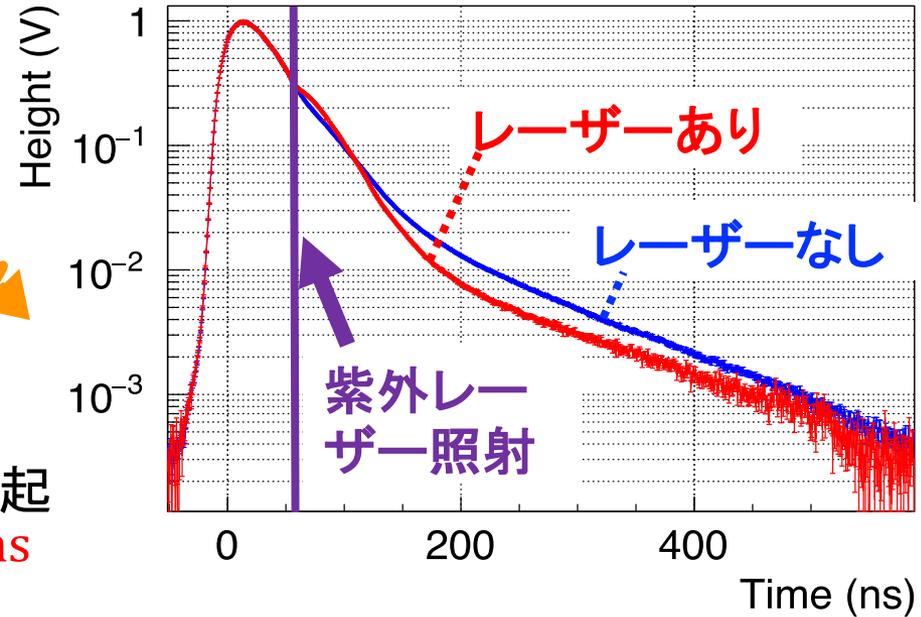
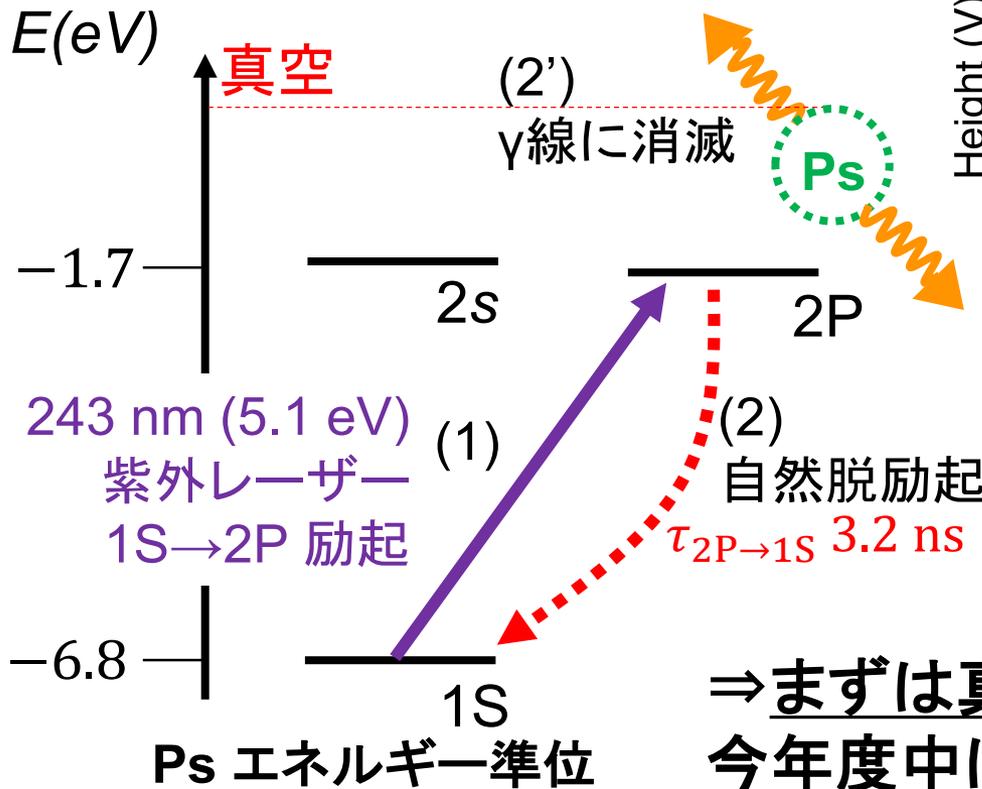
エネルギー	5 keV
ビーム強度	$\sim 10^6 \text{ e}^+ / \text{s}$
繰り返し	50 Hz
パルス幅	11 ns FWHM
ビームサイズ	$\Phi \sim 10 \text{ mm}$

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！

KEK 低速陽電子実験施設 (SPF) における 1S→2P 遷移実験結果

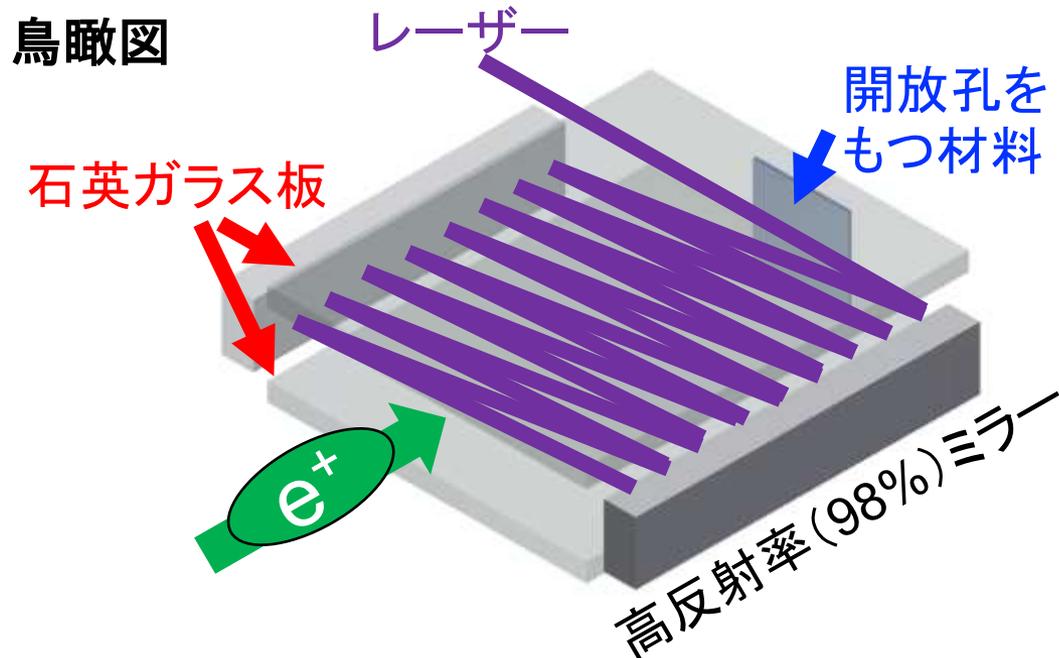
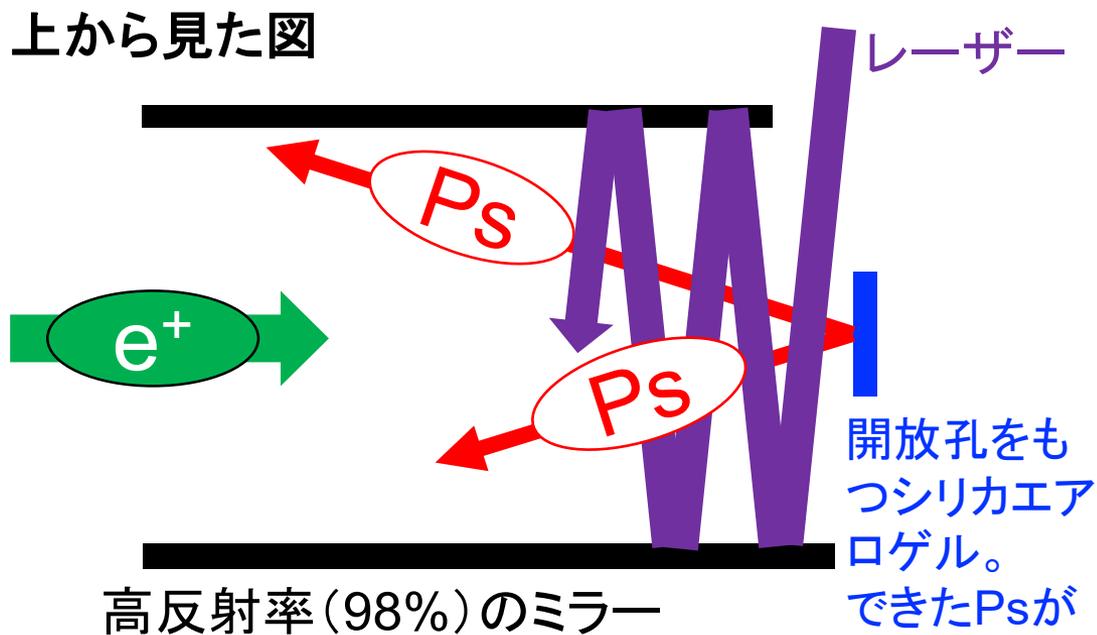


⇒ まずは真空中で Ps のレーザー冷却を今年度中に実証すべく、準備を進めている

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。

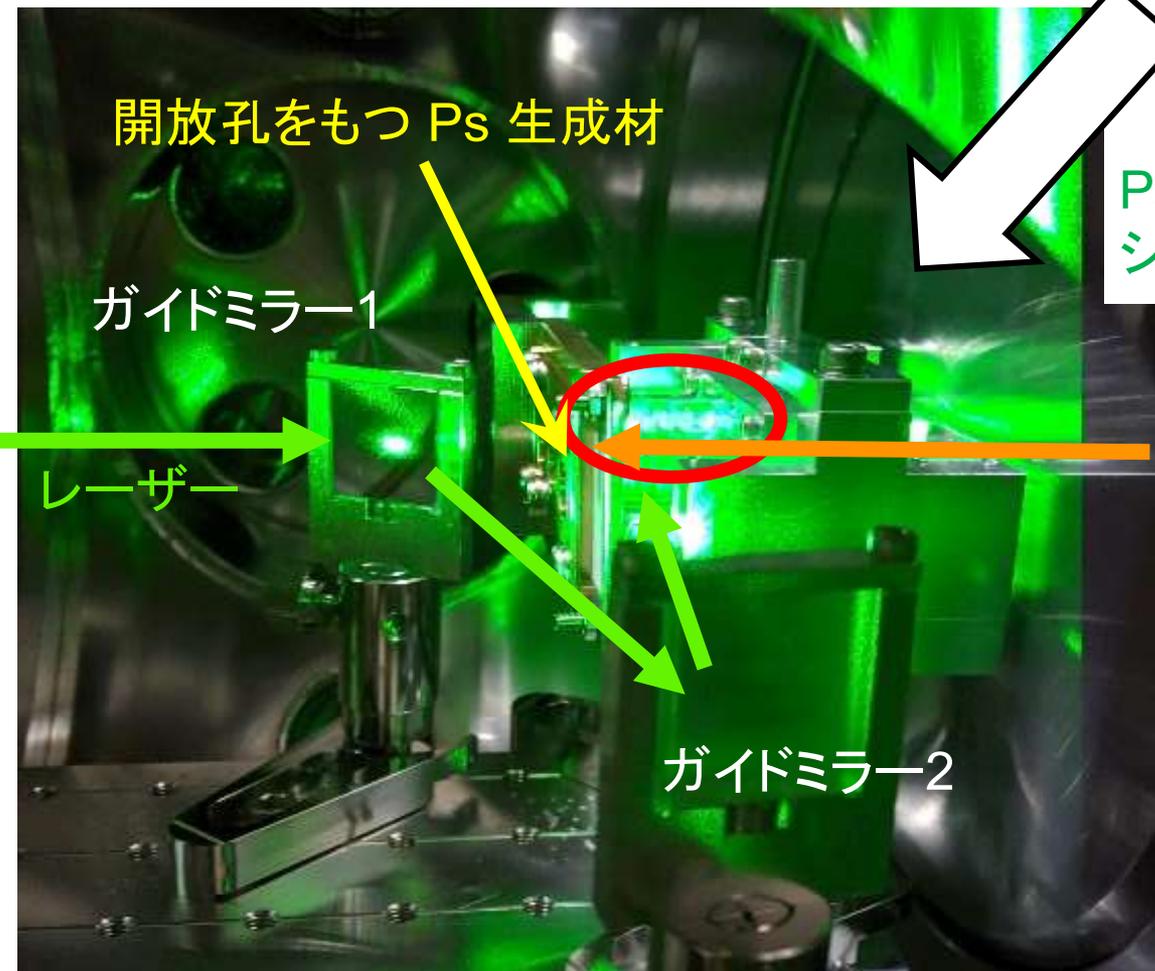
まずは真空中で Ps のレーザー冷却を実証する

- 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

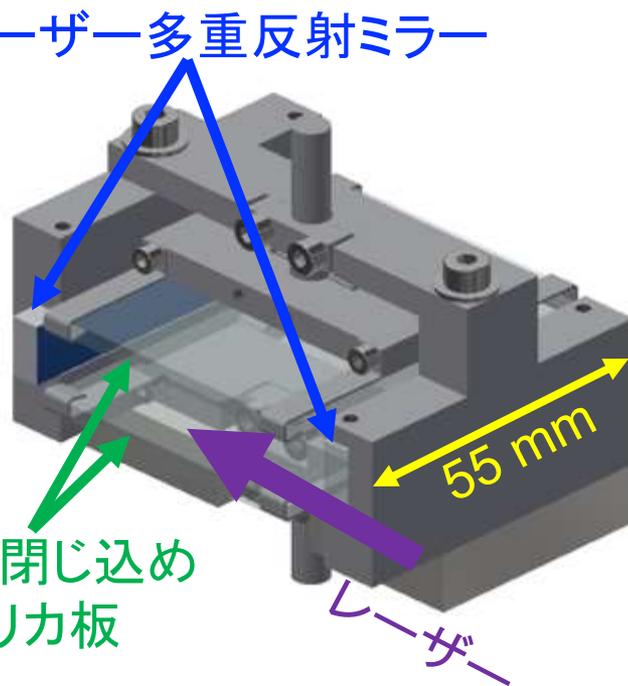


KEK-SPFにて真空中 でPsの1S→2P遷 移を確認した

真空チャンバー内



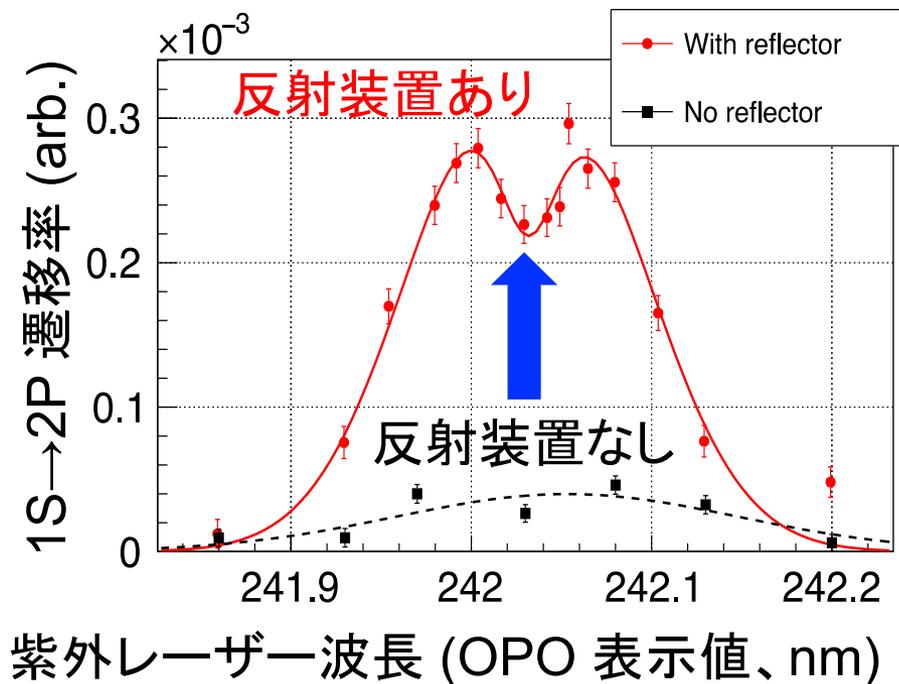
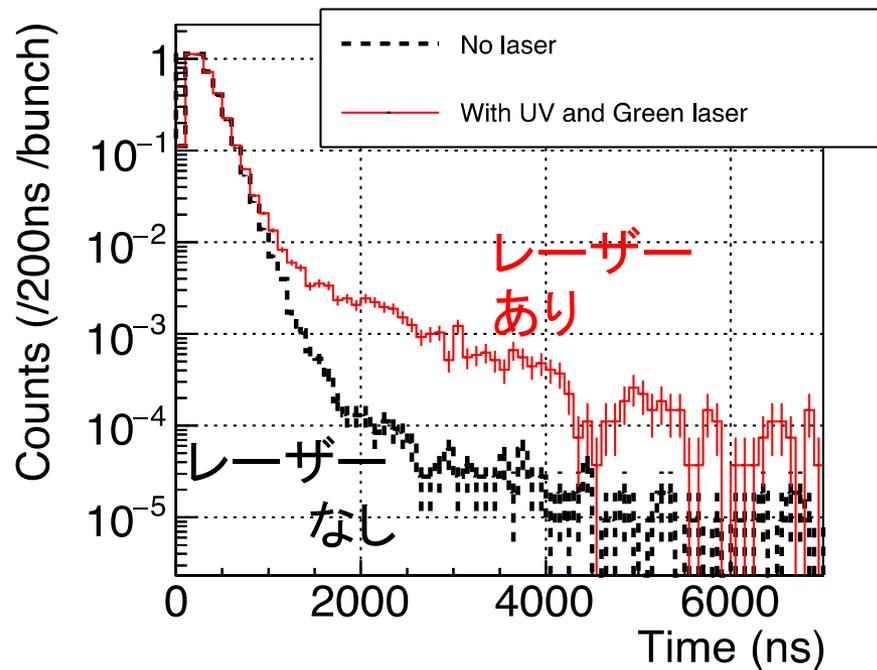
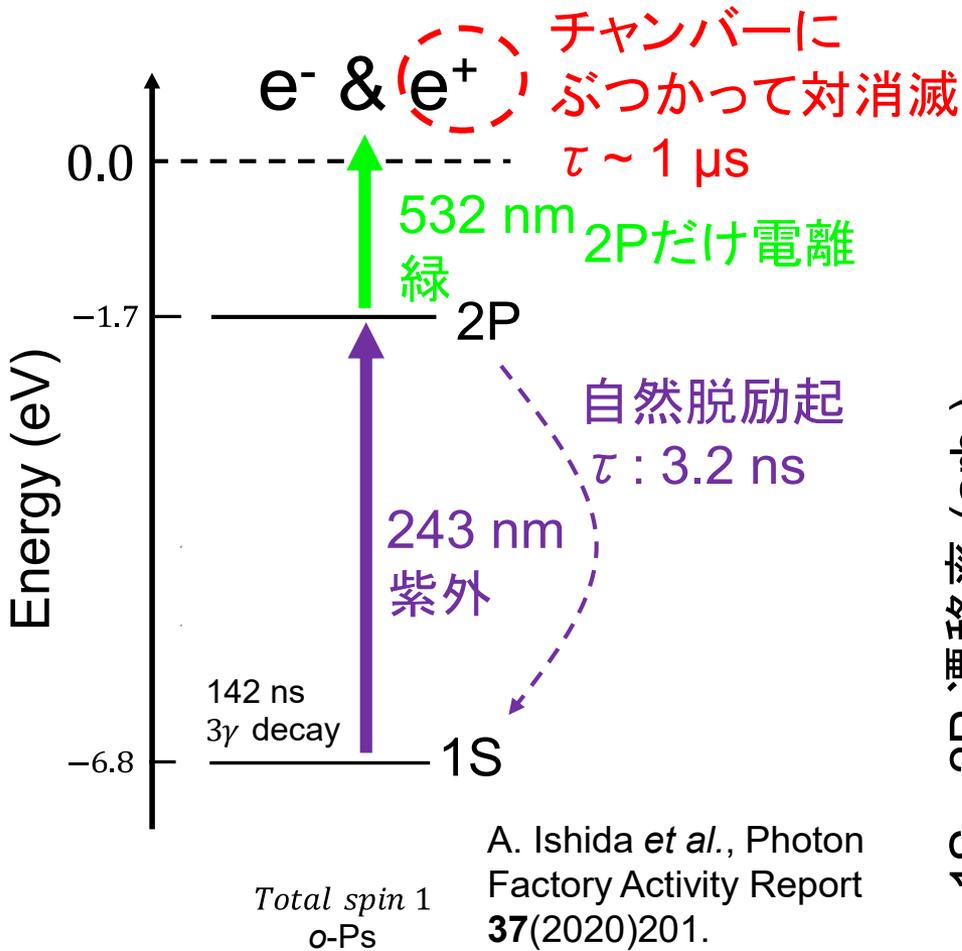
レーザー・Ps
反射装置



陽電子

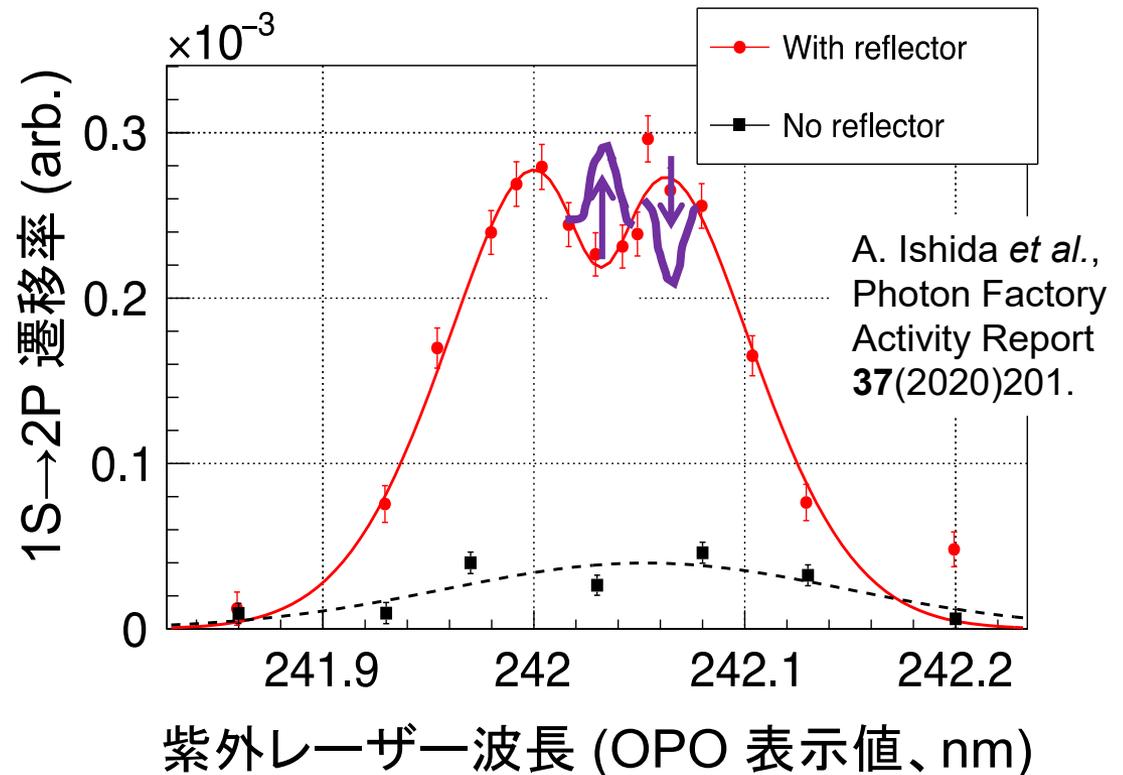


レーザー・Ps 反射装置で 高効率 1S→2P 遷移に成功 ⇒本装置で今年度中に Ps レーザー冷却を実証する

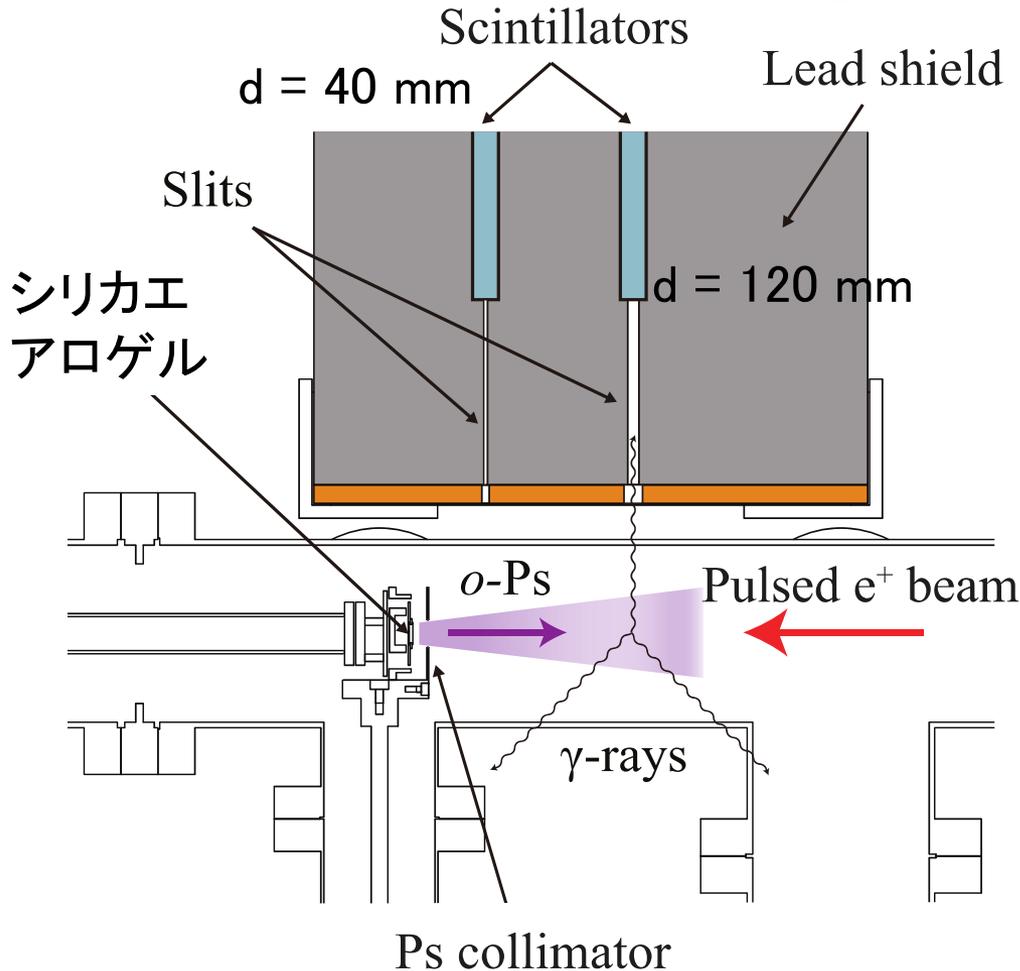


2020 年度 KEK-SPF ビームタイム 2020/11/21—25 (SPF-B2), 11/29—12/7 (SPF-B1) における実験

- 1S→2Pの遷移幅が Ps 温度を反映したドップラー幅になっているはずだが、本当に Ps の運動エネルギー分布を反映しているか？
→Ps-TOFで確認
- プロトタイプのPs冷却用レーザーで部分的に冷却してみる
→線幅は足りないが、一部でも冷却されれば見えるはず！ →次の講演



Ps-TOF



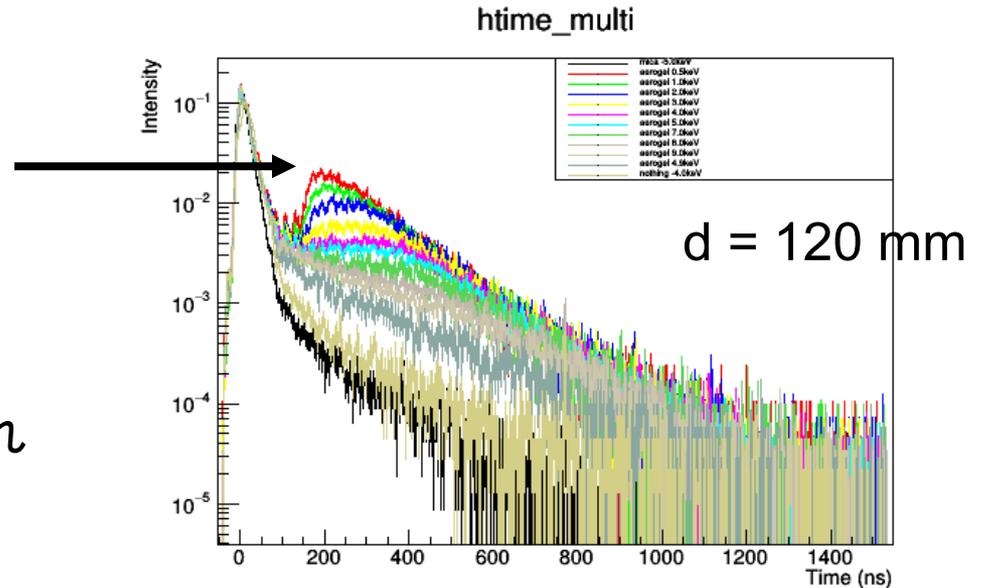
- 陽電子照射 = Ps生成からガンマ線検出までの時間を測定
- 鉛スリットで限られた領域内で崩壊した Psのみ検出可能に
- スリットで制御した距離とガンマ線検出までの時間分布から、Psの速さ分布を求める。
- 実際にはo-Psの寿命や放出角分布、検出効率の位置・Ps速さ依存性を考慮する必要がある

S. Iida, K. Wada, I. Mochizuki, T. Tachibana, T. Yamashita, T. Hyodo and Y. Nagashima, J. Phys.: Condens. Matter **28** (2016) 475002.

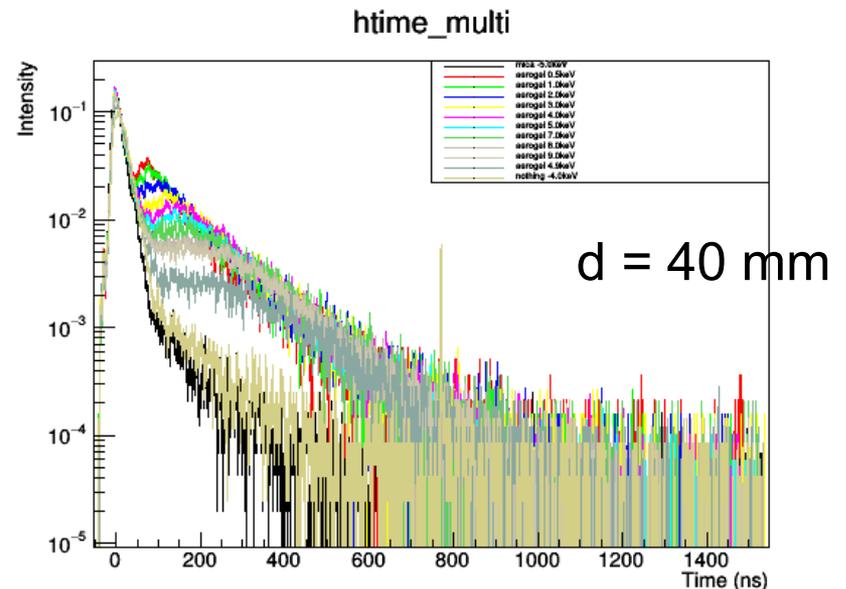
TOF 測定データを取得 1S→2P レーザー遷移結果と比較すべく解析中

きれいなエッジ

表面でできたPs
のエネルギーが
見えると期待され
る



色は陽電子入射エネルギーの違い。
赤: 0.5 keV
緑: 1.0 keV
青: 2.0 keV
など。
⊗は 9 keV まで。
黒はマイカによる測定



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。
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、準備を進めている。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。
5. 2020年度のKEK-SPFにおける測定で、Ps-TOFデータを取得し、プロトタイプのPs冷却用レーザーによるPs冷却実験に挑戦した→冷却実験の詳細は次の講演

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