

# 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

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>, 高工研<sup>E</sup>, 原子力機構<sup>F</sup>, (現所属)高麗大学理科大学物理学科\*

石田 明, 橋立佳央理, 難波俊雄<sup>A</sup>, 浅井祥仁, 五神 真, 山田恭平,  
田島陽平<sup>B</sup>, 小林拓豊<sup>B</sup>, 魚住亮介<sup>B</sup>, 周 健治<sup>B</sup>, 蔡 恩美<sup>B\*</sup>, 吉岡孝高<sup>B</sup>,  
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>, 兵頭俊夫<sup>E</sup>, 望月出海<sup>E</sup>, 和田 健<sup>E</sup>, 甲斐健師<sup>F</sup>



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

令和3年3月15日

日本物理学会第76回年次大会(2021年)@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 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

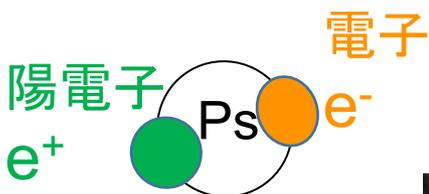
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 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

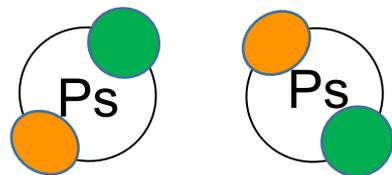
通常物質 :

- 超伝導
- 超流動

反物質は？

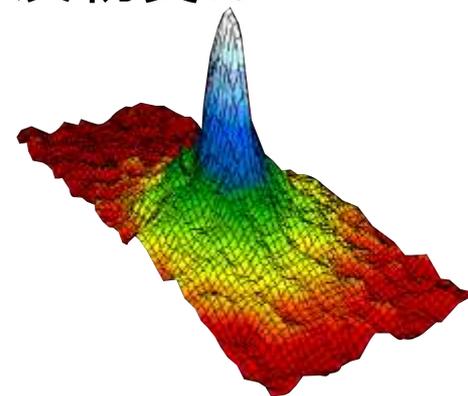
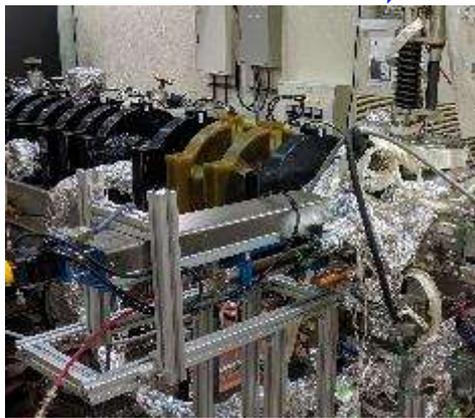
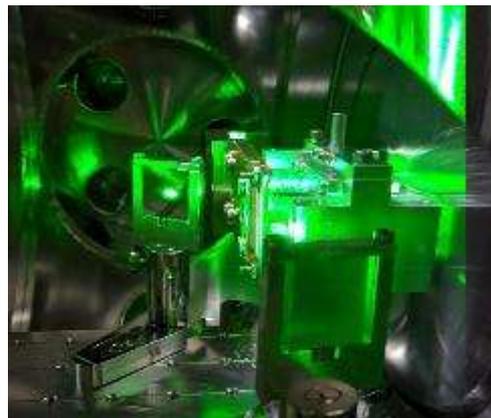


レーザー冷却 + 超高密度化



反物質

ポジトロニウム(Ps)  
(古典極限系)



反物質

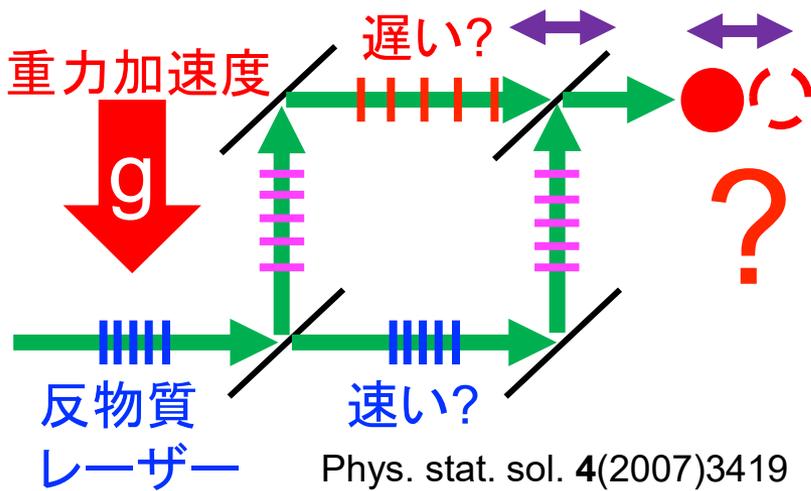
新量子多体系

Psのボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

# 基礎科学研究や次世代光源への応用可能性

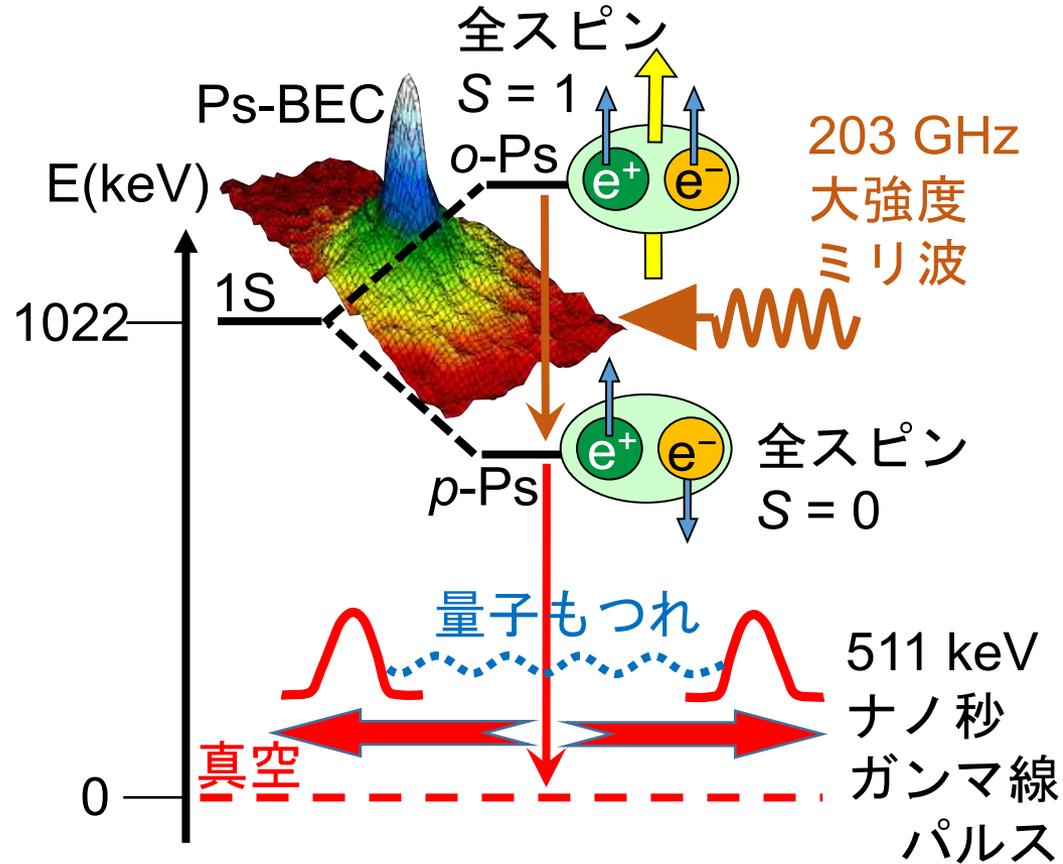
## 1. 反物質に働く重力を 原子干渉計を用いて測定

パスの長さを変化させると  
Ps の強度が明滅しうる



⇒ 重力 という 実験的に未探索 の切り口で物質・反物質の未知の非対称性を探り、  
「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

## 2. 511 keV ガンマ線レーザー



Phys. Rev. A **92**(2015)023820

⇒ 光科学研究、  
産業・医療応用

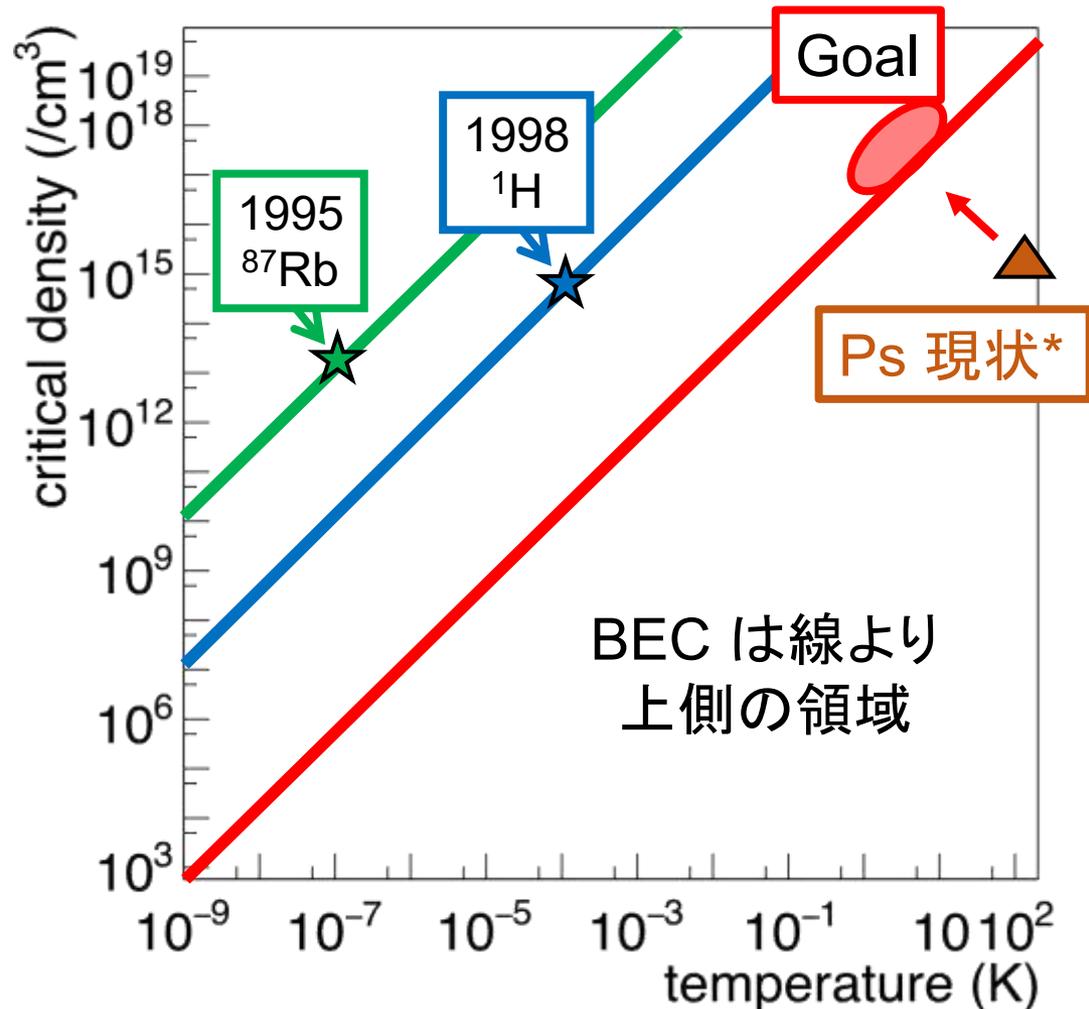
# 2つのチャレンジ: Ps の高密度化と高速冷却

## 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:  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )
2. Ps の高速冷却  
~300 ns で  $< 10 \text{ K}$  に冷却  
(現状: 150 K)



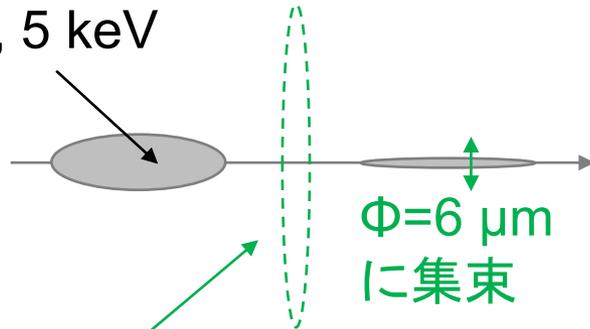
\* : S. Mariuzzi *et al.* Phys. Rev. Lett. **104**(2010)243401,  
D. Cassidy *et al.* physica status solidi **4**(2007)3419.

# Ps-BEC 実現スキーム

## 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



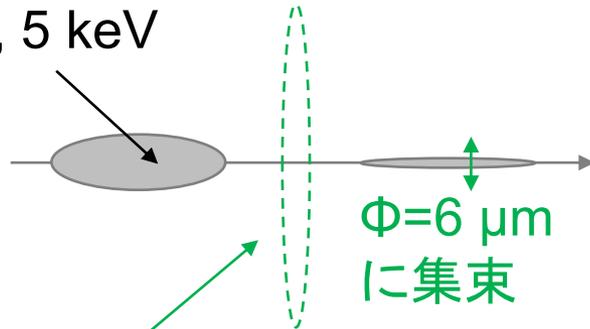
1. 多段輝度増強システム

高密度陽電子バンチ生成

# Ps-BEC 実現スキーム

1. 陽電子集束システム
2. Ps 生成・濃縮・冷却材

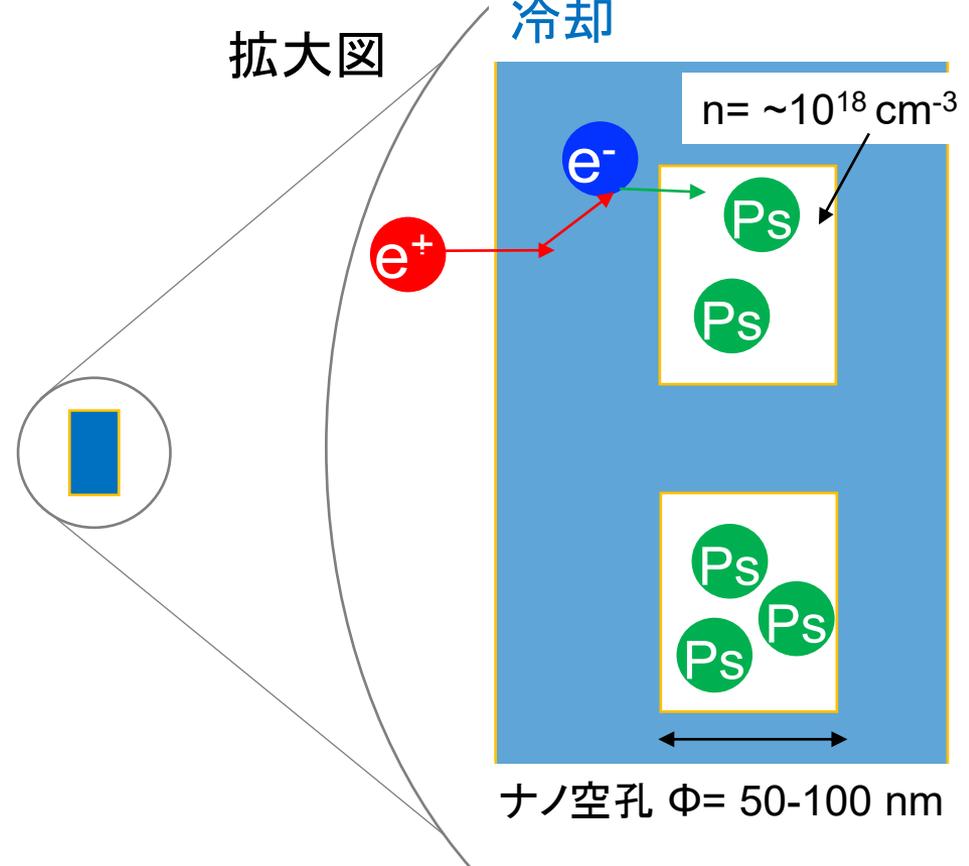
ナノ秒偏極陽電子バンチ  
 $1.5 \times 10^8 e^+$ , 5 keV



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

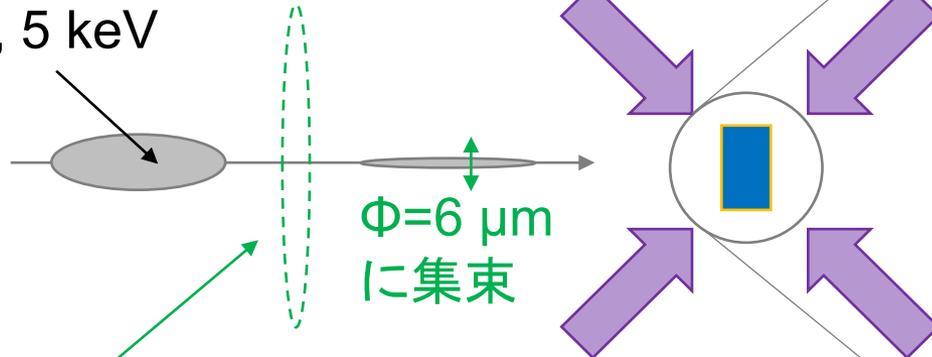


2.  $e^+ \rightarrow$  Ps 生成・濃縮・冷却  
無機酸化物多孔体

# Ps-BEC 実現スキーム

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



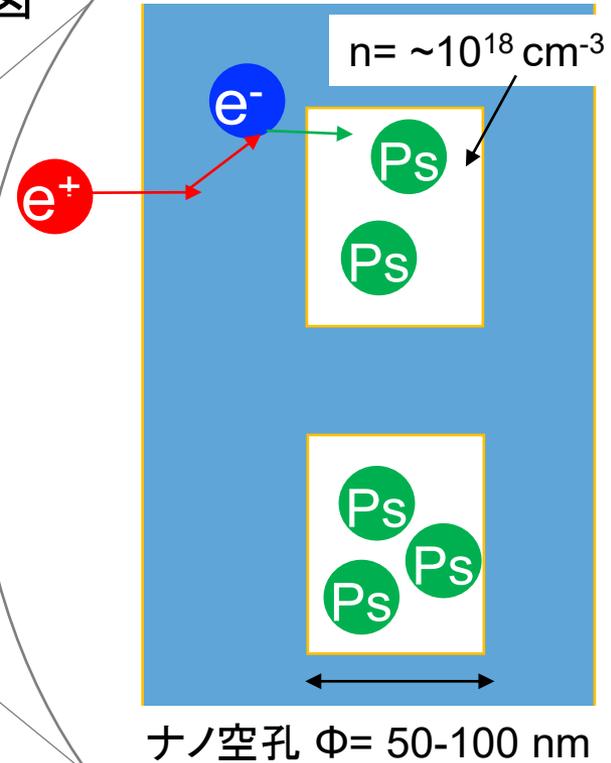
1. 多段輝度増強システム  
 高密度陽電子バンチ生成

3. Ps レーザー冷却  
 (1S-2P 遷移を使用)

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

冷凍機で 4 K まで  
 冷却

拡大図



ナノ空孔  $\Phi = 50-100$  nm

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

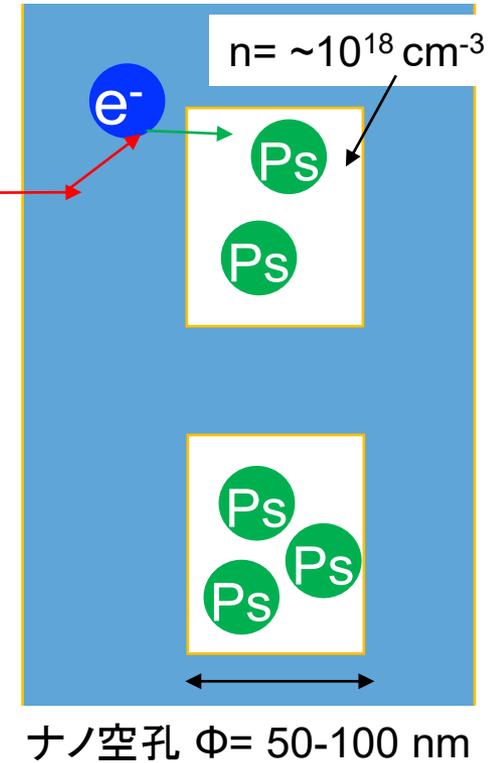
熱化とレーザー冷却を組み合わせる Ps を  
300 ns で Ps-BEC 転移温度を下回る 10 K まで  
冷却可能である(シミュレーション)。

# Ps-BEC 実現スキーム

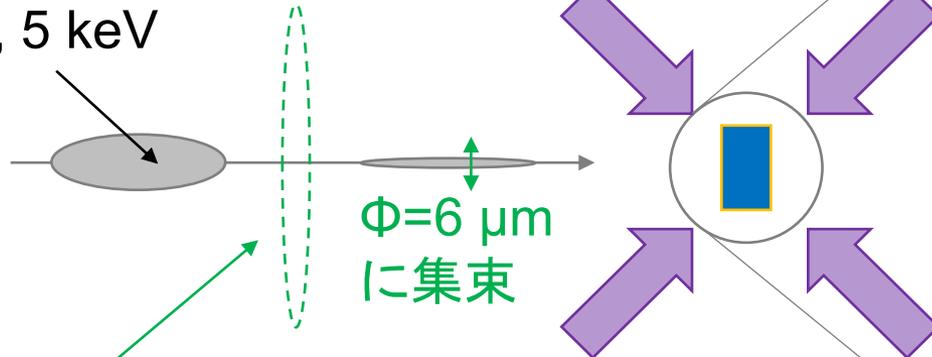
1. 陽電子集束システム ← **2020年秋**
2. Ps 生成・濃縮・冷却材 ← **2020年秋**
3. Ps レーザー冷却 ← **領域1, 13aA2-08 周**

冷凍機で 4 K まで冷却

拡大図



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.  $e^+ \rightarrow$  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.

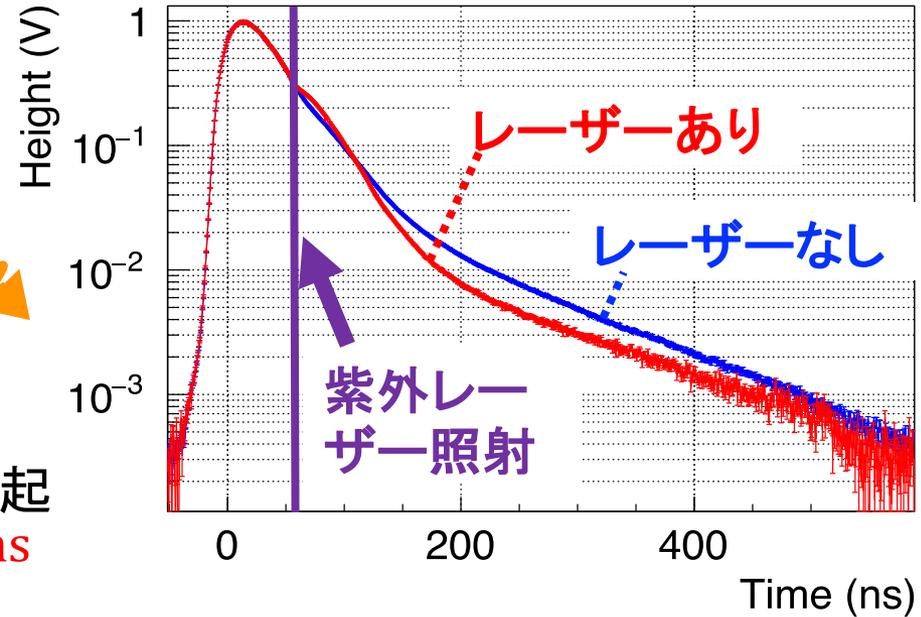
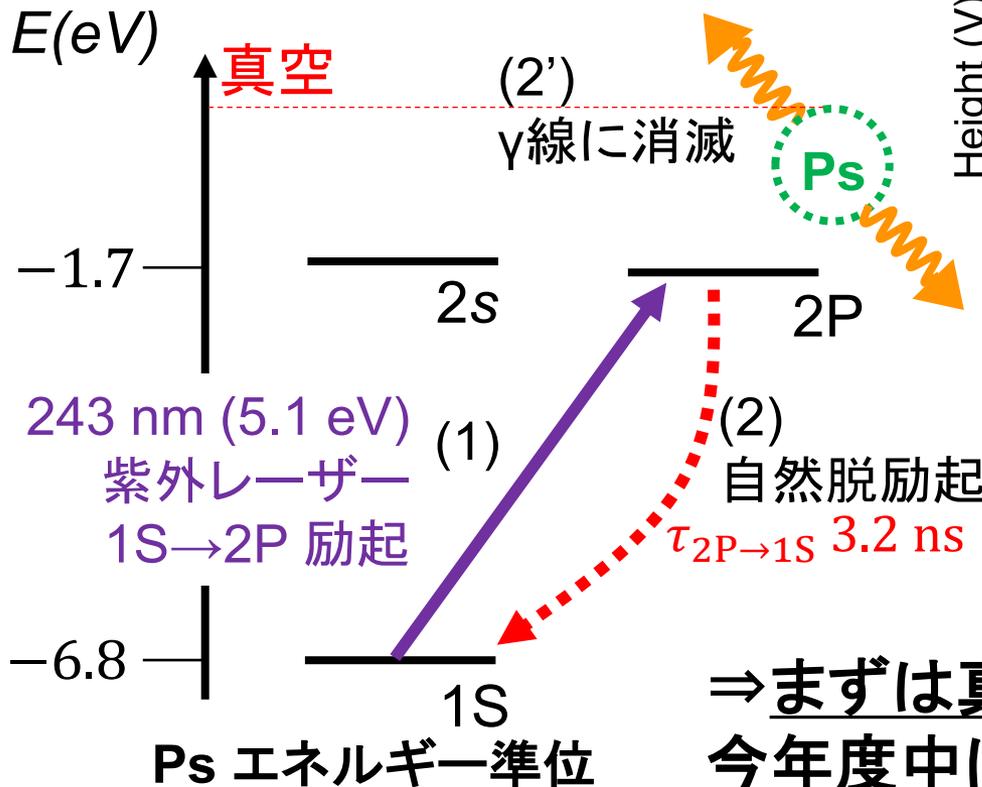
熱化とレーザー冷却を組み合わせる Ps を  
300 ns で Ps-BEC 転移温度を下回る 10 K まで  
冷却可能である(シミュレーション)。

# 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  $\gamma$  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

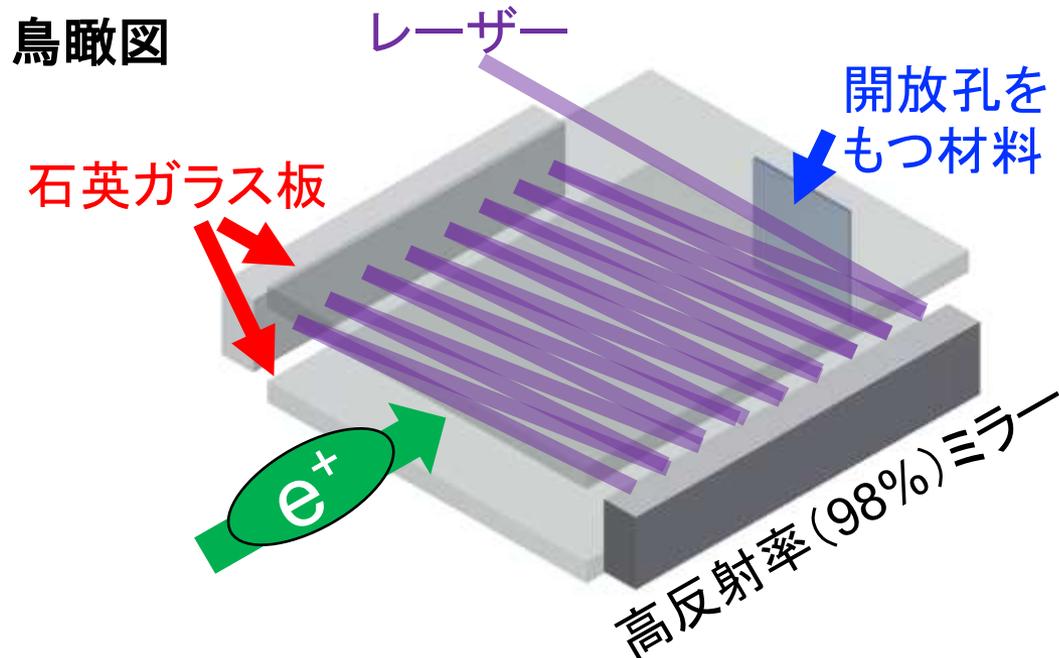
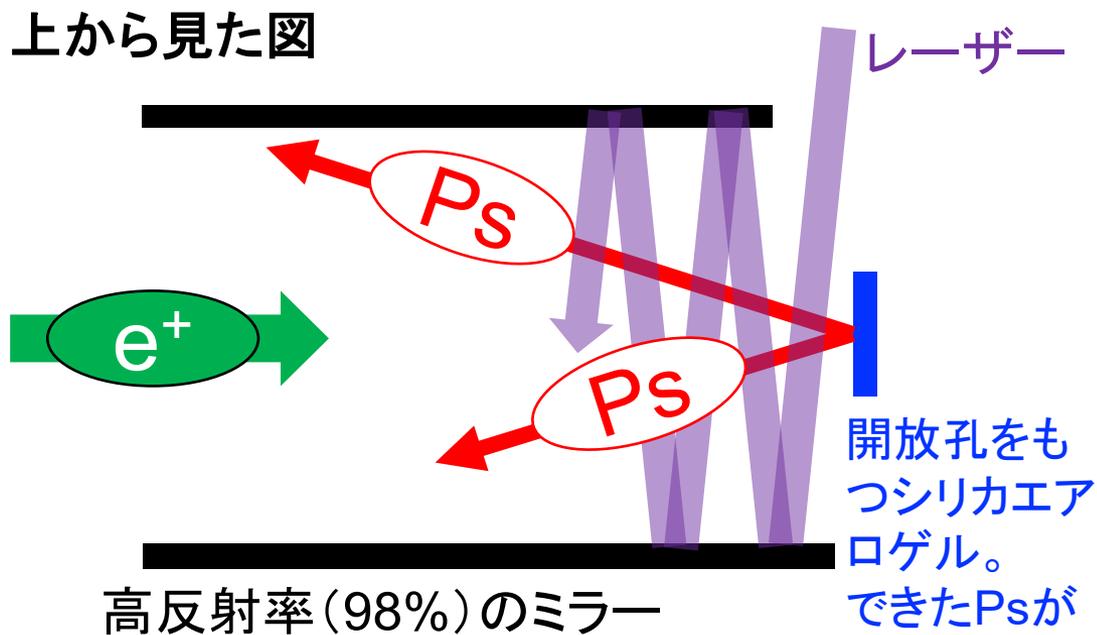


⇒ まずは真空中で Ps のレーザー冷却を今年度中に実証すべく、準備を進めている

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。

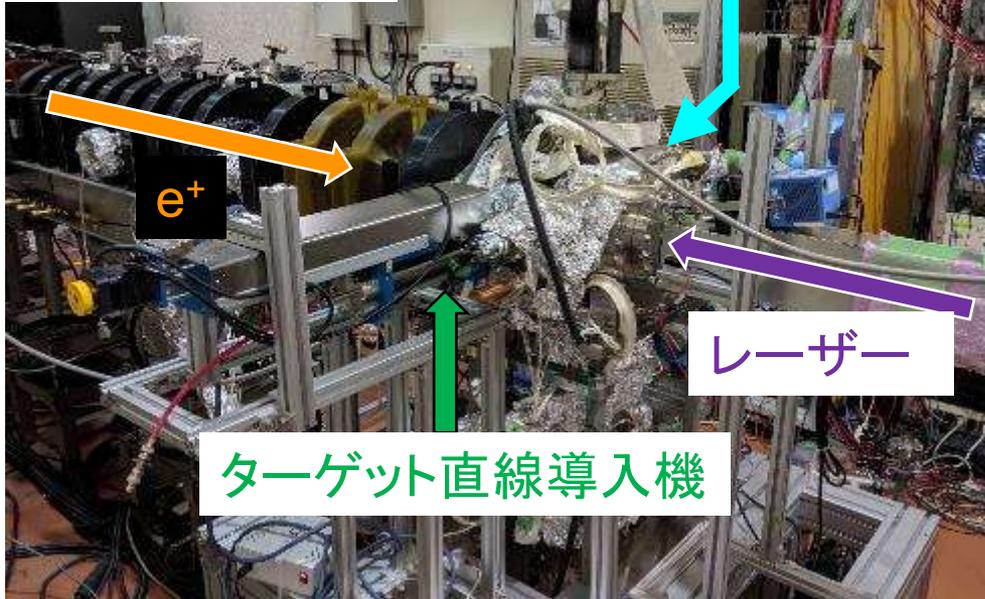
# まずは真空中で Ps のレーザー 冷却を実証する

- 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 低速陽電子実験施設 (KEK-SPF) における Ps レーザー冷却実験セットアップ

KEK-SPF B1  
ビームライン

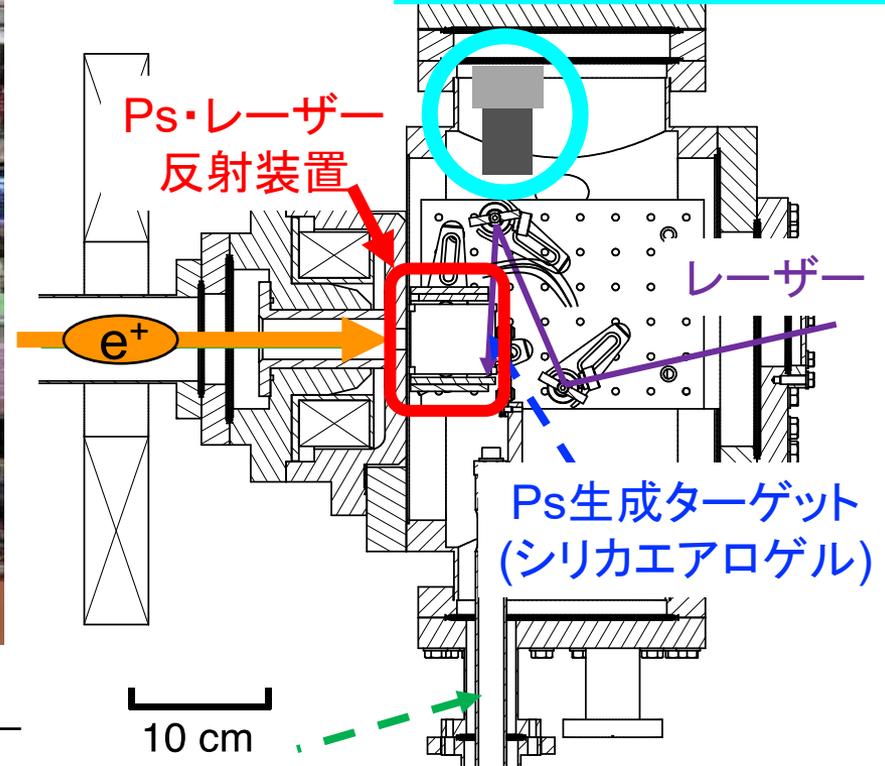


ガンマ線検出器

レーザー

ターゲット直線導入機

ガンマ線検出器  
LaBr<sub>3</sub>(Ce) シンチレータ



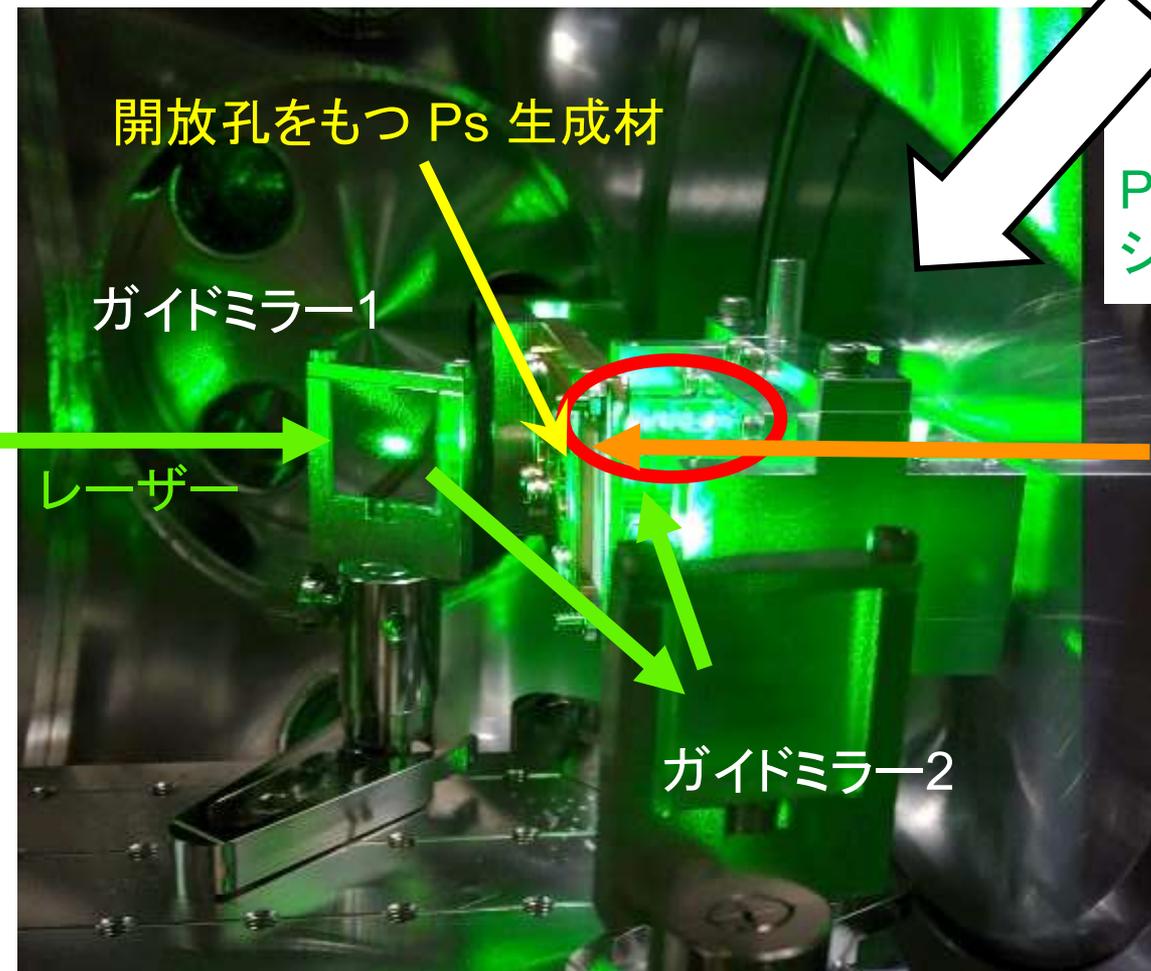
10 cm  
ターゲット  
直線導入機

真空チャンバー

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

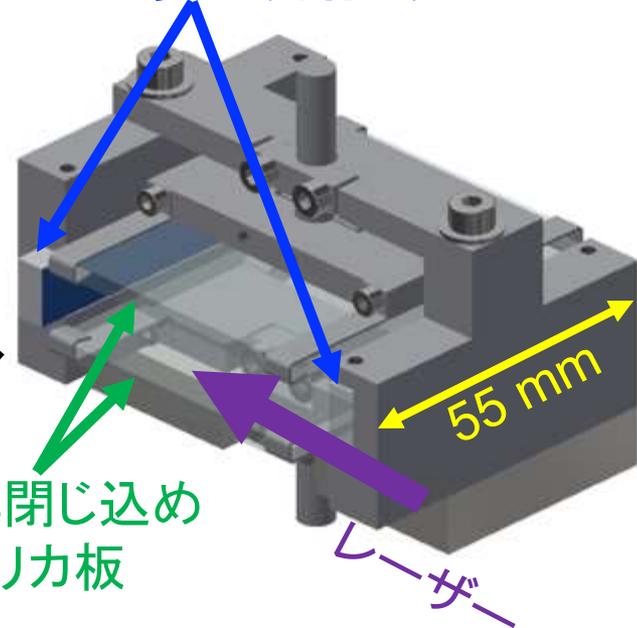
# KEK-SPFにて真空中でPsの1S→2P遷移を確認した

真空チャンバー内



レーザー・Ps  
反射装置

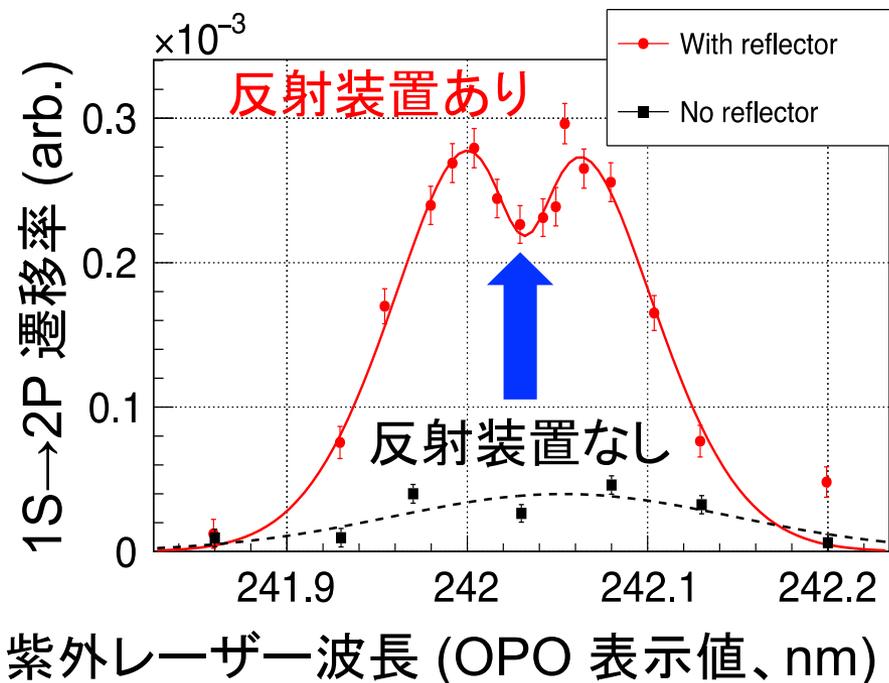
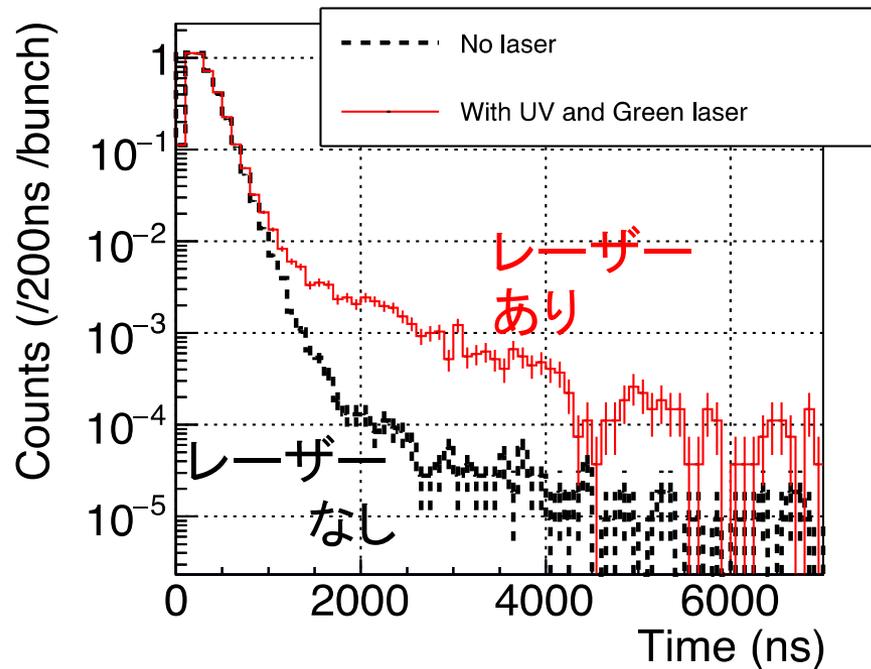
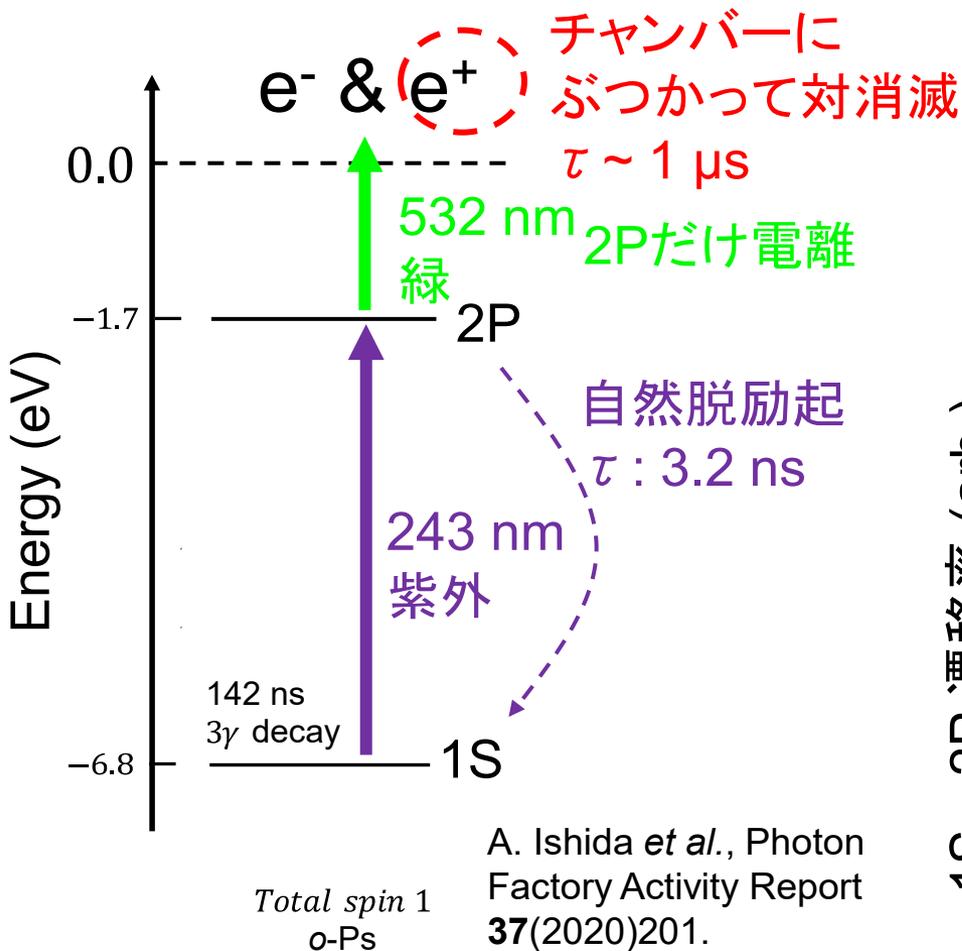
レーザー多重反射ミラー



陽電子

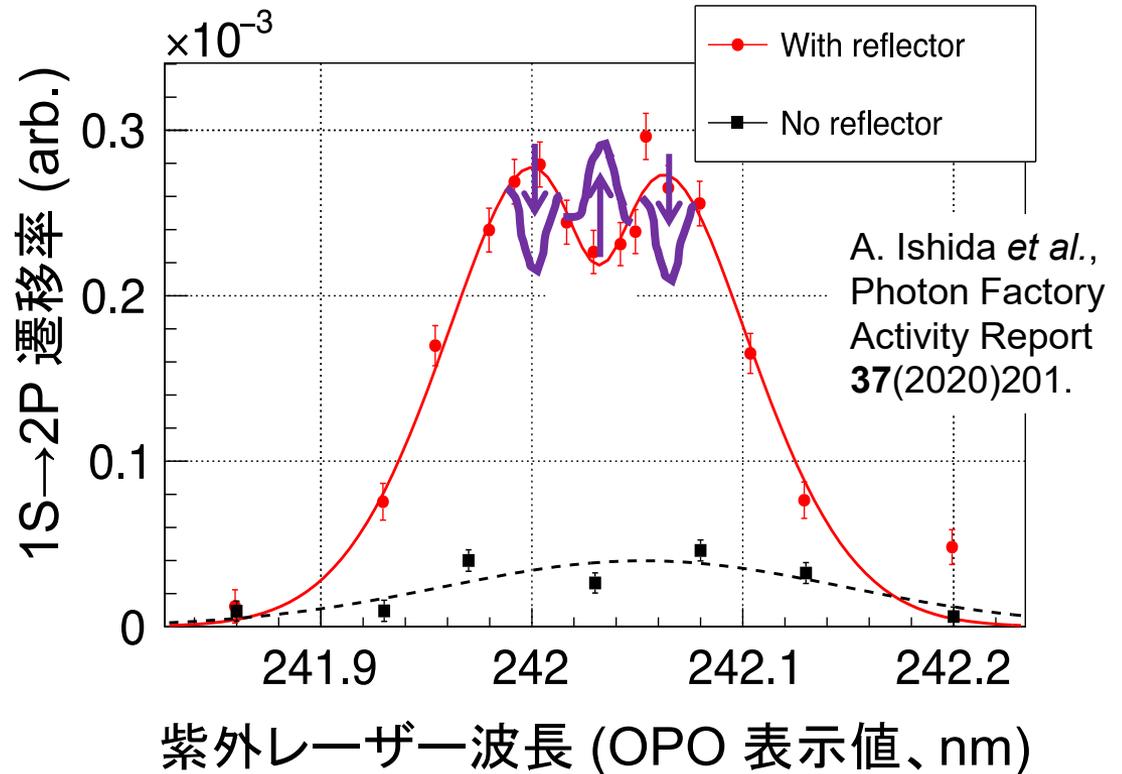


# レーザー・Ps 反射装置で 高効率 1S→2P 遷移に成功 ⇒本装置で今年度中に Ps レーザー冷却を実証する

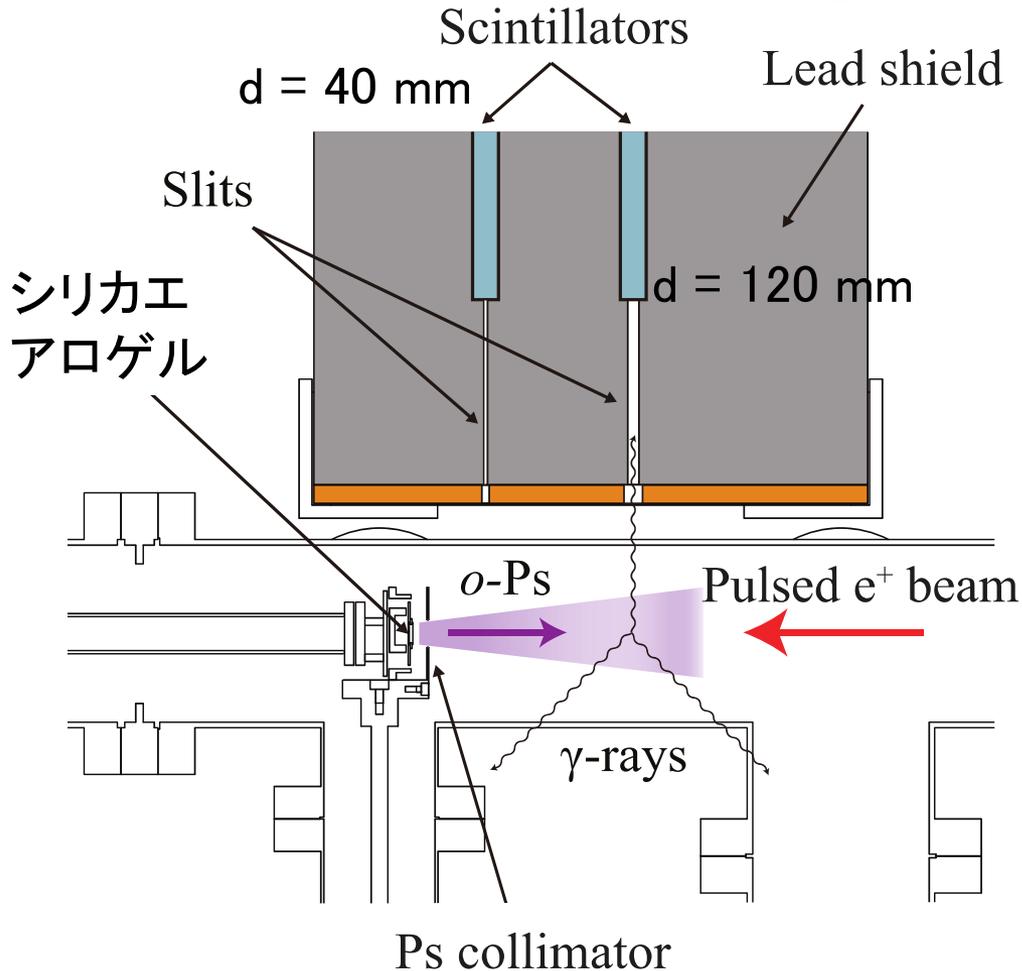


# 2020 年度 KEK-SPF (SPF-B1, SPF-B2) における実験

- $1S \rightarrow 2P$  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 (Time-of-Flight) 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  
→ Ps 全体を冷却するには線幅が足りないが、一部でも冷却されれば見えるはず！  
→ 現在、鋭意測定中！



# Ps-TOF



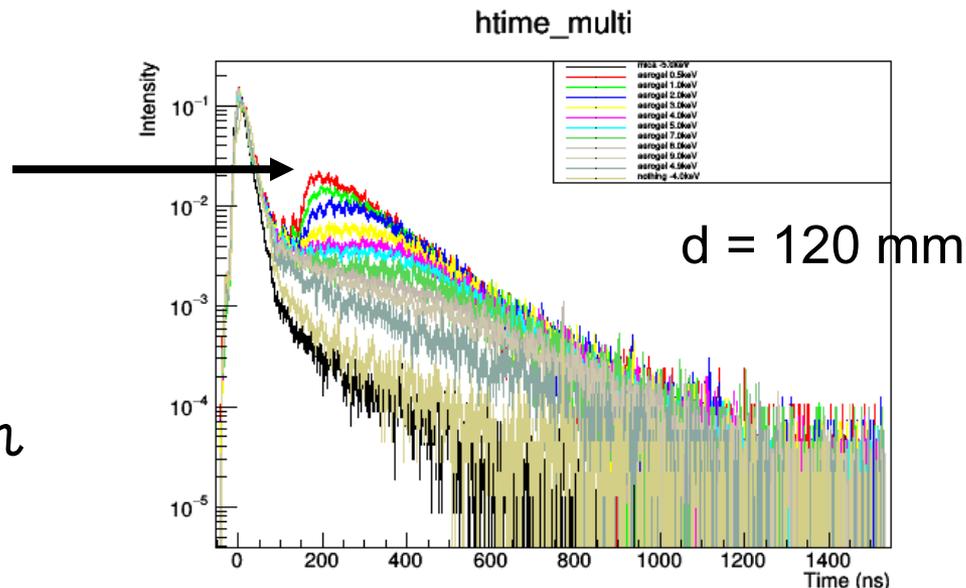
- 陽電子照射 = Ps生成からガンマ線検出までの時間を測定
- 鉛スリットで限られた領域内で崩壊した Psのみ検出可能に
- スリットで制御した距離とガンマ線検出までの時間分布から、Psの速さ分布を求める。
- 実際には $o$ -Psの寿命や放出角分布、検出効率の位置・Ps速さ依存性を考慮する必要がある

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

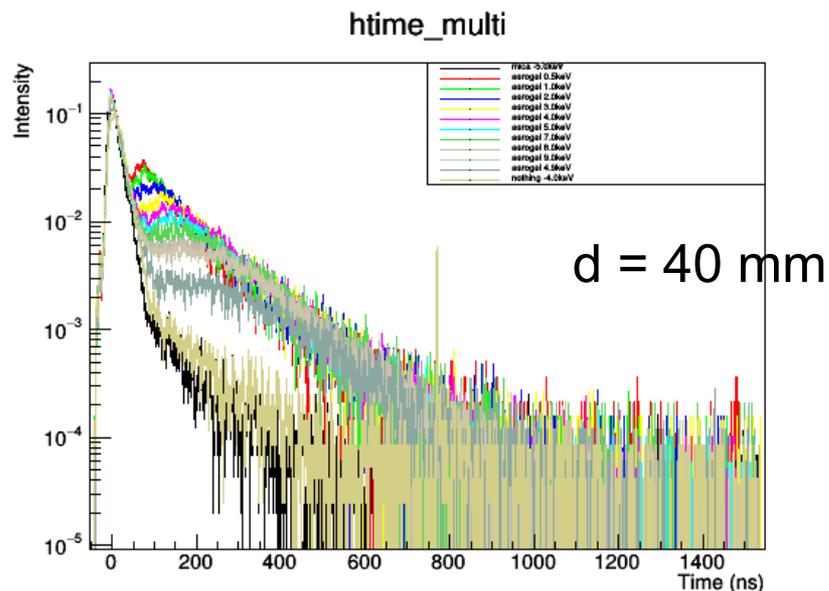
緑: 1.0 keV

青: 2.0 keV

など。

図は 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. 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。
4. 2020年度のKEK-SPFにおける測定で、Ps-TOFデータを取得した。
5. 現在、プロトタイプ of Ps冷却用レーザーによるPs冷却実験に挑戦している。

[https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page\\_id=110](https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110)