

# ボース・アインシュタイン凝縮を目指した 高密度・低温ポジトロニウム生成用ナノ材料の開発

1. 東大・院理, 2. 東大・素セ, 3. 産総研, 4. KEK・物構研, 5. 量研高崎

石田 明<sup>1</sup>, 牧 和真<sup>1</sup>, 難波 俊雄<sup>2</sup>,  
大島 永康<sup>3</sup>, オローク ブライアン<sup>3</sup>, 満汐 孝治<sup>3</sup>, 伊藤 賢志<sup>3</sup>,  
兵頭俊夫<sup>4</sup>, 望月 出海<sup>4</sup>, 和田 健<sup>4</sup>, グラデン ランドール<sup>1</sup>, 前川 雅樹<sup>5</sup>



<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/>  
<https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/psbec>  
<https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/psbec en>

令和 6 (2024) 年 7 月 4 日  
第61回アイソトープ・放射線研究発表会 @ 日本科学未来館

2C04-07-01

# 謝辞

今回発表する新規内容の一部は以下の助成を受けたものです。



創発的研究支援事業  
Innovation Oriented Support for disruptive Science and Technology

- JST 創発的研究支援事業 JPMJFR202L
- JSPS科研費 JP16H04526, JP17H02820, JP17H06205, JP17J03691, JP18H03855, JP23H05462
- 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

<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/>

<https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/psbec>

<https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/psbec/en>

# 目次

1. ポジトロニウム (Ps) のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)
  - 反物質の新量子多体系である低温量子多体系凝縮相  
= 反物質レーザーを実現
2. Ps-BEC 実現の必須要素技術:高密度・低温 Ps 生成用ナノ材料
  - A) Ps-TOF 測定による性能評価 @ KEK-SPF-B2
  - B) Ps レーザー遷移実験 @ KEK-SPF-B1
3. 現状のまとめと今後の展望

# ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮 Ps-BEC = 反物質レーザーを実現したい

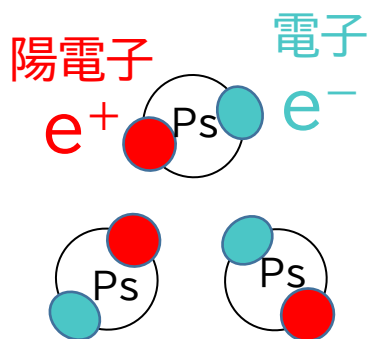
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 原子の多体系が高密度 かつ 冷たい ときに起こる相転移
- 集団中のほぼすべての原子が 単一の量子状態(基底状態) になる

通常の物質:

- 超伝導
- 超流動

反物質は?



Ps の寿命 142 ns 程度で  
超高密度化 +  
熱化冷却 & レーザー冷却



反物質原子

ポジトロニウム

(Ps)

(古典極限系)

$10^{15} \text{ cm}^{-3}$

150 K

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で測定
2. 511 keV ガンマ線レーザー

反物質レーザー

Ps-BEC  
(量子凝縮体)

$10^{18} \text{ cm}^{-3}$

10 K

BEC: K. Shu *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **49**, 104001 (2016).  
熱化: K. Shu *et al.*, Phys. Rev. A **104**, L050801 (2021)

# 目次

1. ポジトロニウム (Ps) のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)
  - 反物質の新量子多体系である低温量子多体系凝縮相  
= 反物質レーザーを実現
2. **Ps-BEC 実現の必須要素技術: 高密度・低温 Ps 生成用ナノ材料**
  - A) Ps-TOF 測定による性能評価 @ KEK-SPF-B2
  - B) Ps レーザー遷移実験 @ KEK-SPF-B1
3. 現状のまとめと今後の展望

# 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し, 高密度・低温 Ps を生成

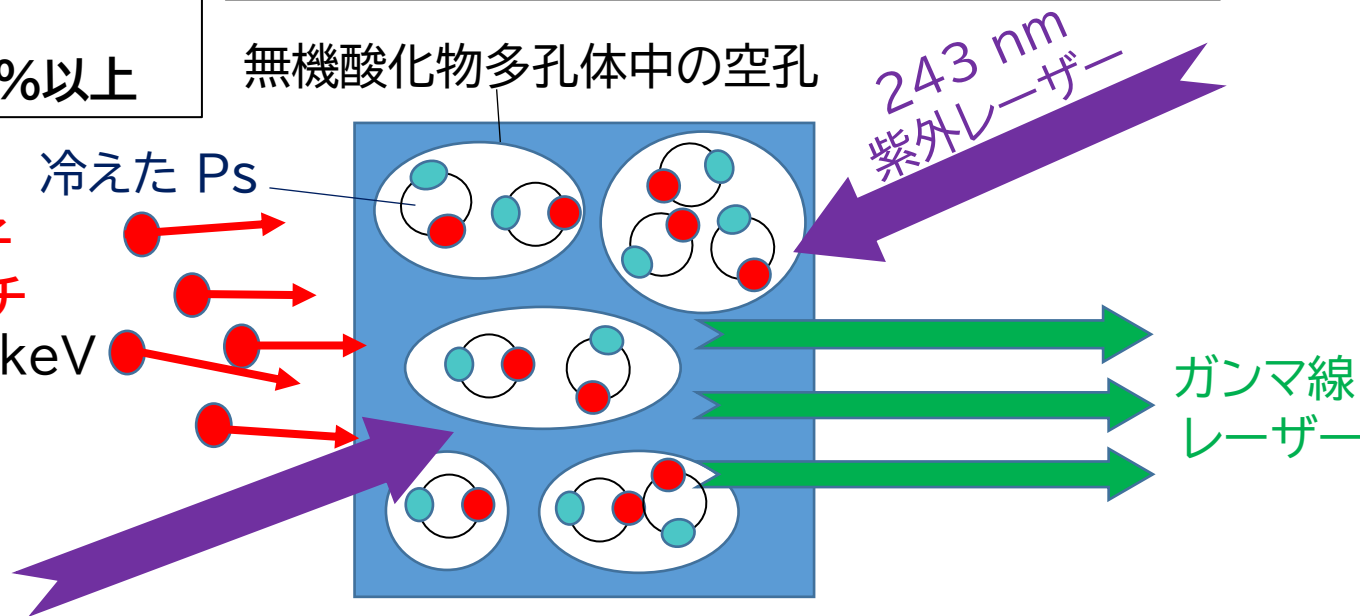
機能① 陽電子から  
高効率で Ps を生成  
(generator)  
→生成率 50 %以上

機能② Psを高密度に濃縮 (condenser)  
→ 50 nm—100 nm 空孔

無機酸化物多孔体中の空孔

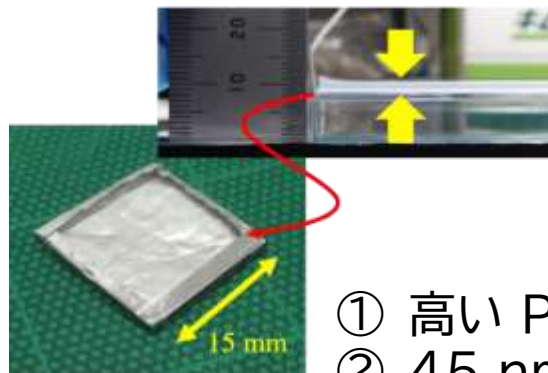
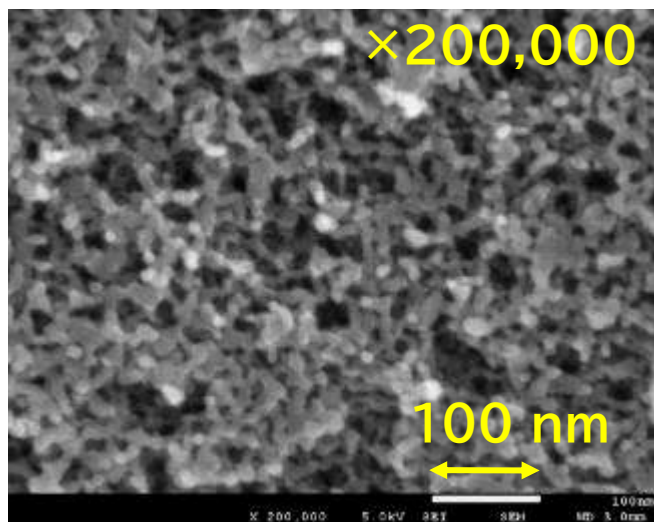
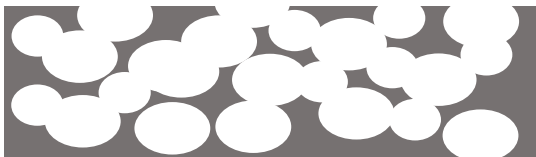
高密度偏極陽電子  
( $e^+$ ) ナノ秒バンチ  
 $1.5 \times 10^8 e^+$ , 5 keV  
を多段輝度増強  
システムで  
 $\phi 6 \mu\text{m}$  に集束

冷えた Ps



機能③ Ps 冷却 (cooler) 熱化冷却 → 熱化効率の高い組成・構造  
レーザー冷却 → 243 nm 紫外光透過率 80 % 以上

# Ps 生成材として有望な多孔性ナノ材料： シリカ(二酸化ケイ素 $\text{SiO}_2$ )エアロゲルを開発



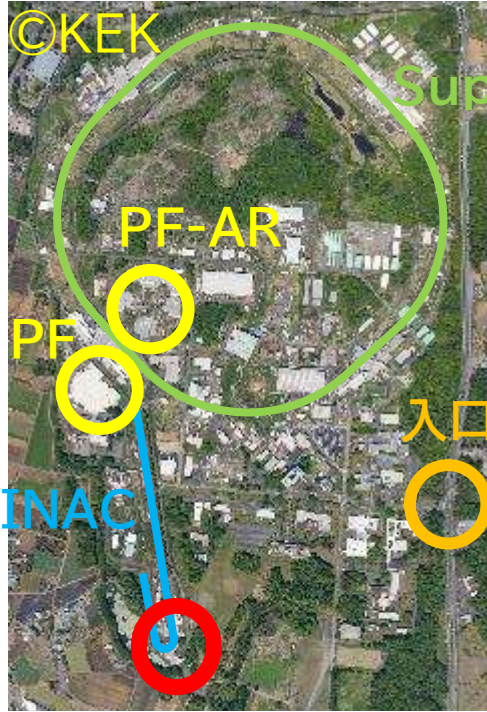
シリカエアロゲル  
密度  $0.12 \text{ g cm}^{-3}$   
空孔径 45 nm  
厚さ 0.5 mm

- ① 高い Ps 生成率( $\approx 35\%$ )
- ② 45 nm 空孔
- ③ 243 nm 紫外光透過率 85 %

- Ps 生成エネルギーなど性能評価
- レーザー冷却原理実証実験  
⇒ KEK 低速陽電子ビームラインで

他に、ナノプロセッシング、ナノインプリント、規則配列シリカナノ材料(以上シリカ)、シリカ以外のナノ多孔質材料を試し中

高エネルギー加速器研究機構(KEK)  
物質構造科学研究所(IMSS)  
低速陽電子実験施設(SPF)  
(茨城県つくば市)

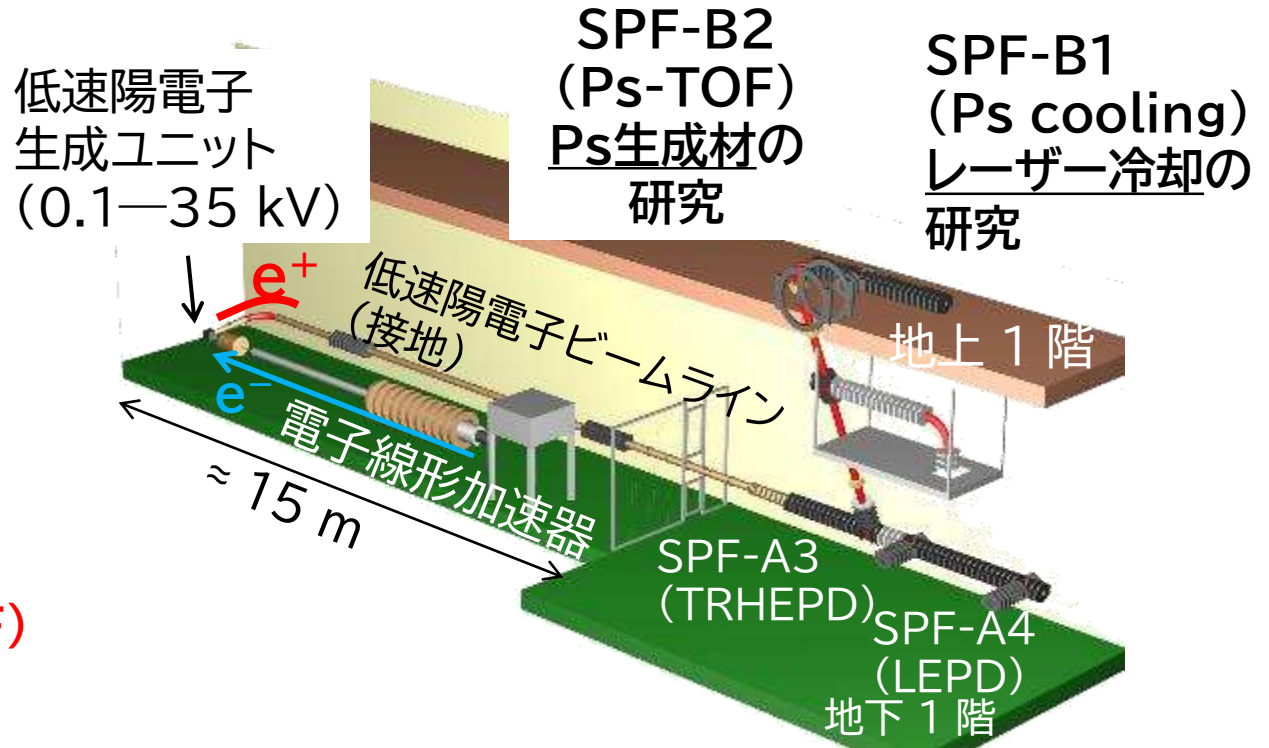


低速陽電子実験施設(SPF)

➤ 地上 1 階

**SPF-B1:** ポジトロニウムレーザー冷却 (**Ps cooling**)

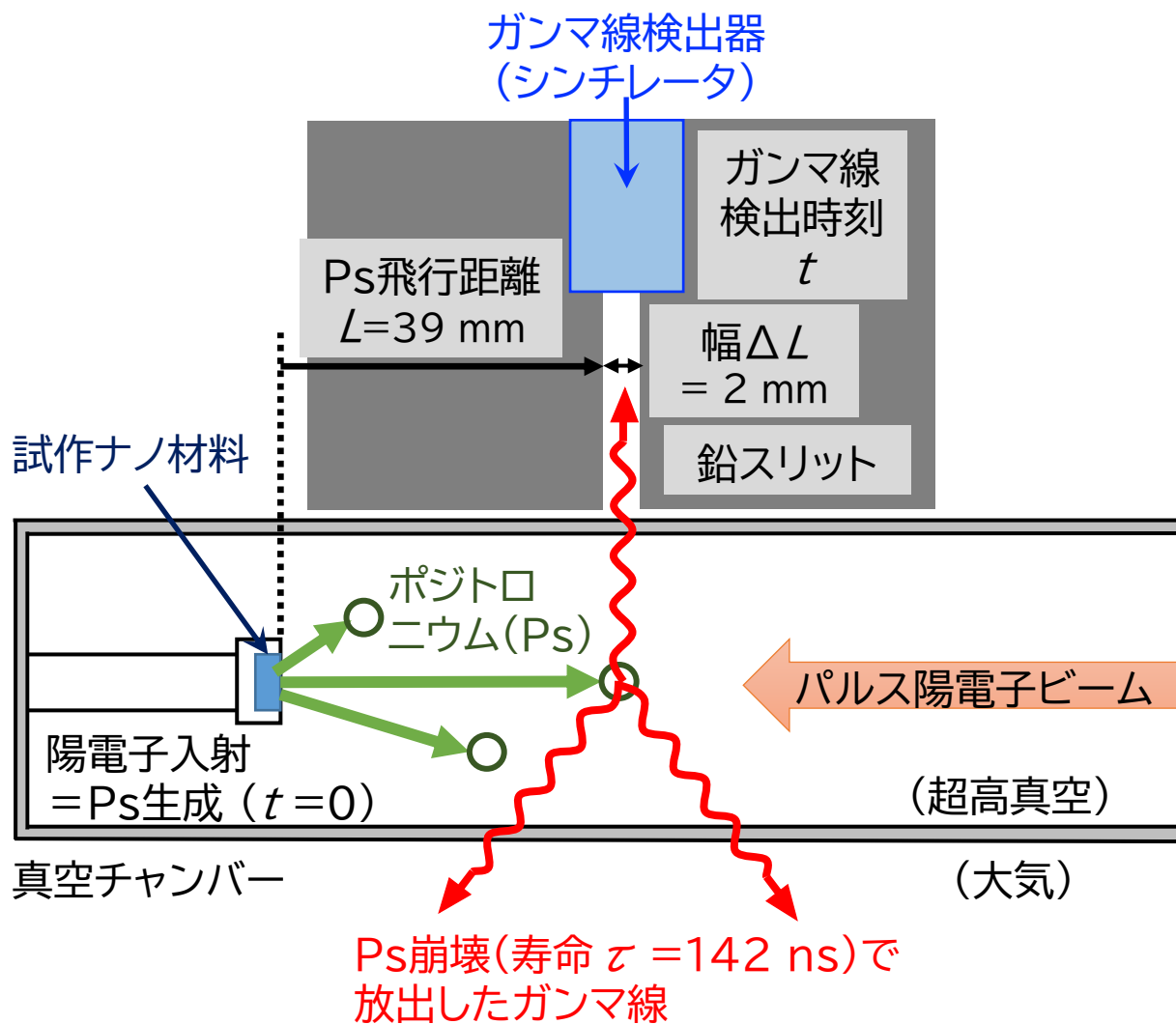
**SPF-B2:** ポジトロニウム飛行時間測定 (**Ps-TOF**)



# 目次

1. ポジトロニウム (Ps) のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)
  - 反物質の新量子多体系である低温量子多体系凝縮相  
= 反物質レーザーを実現
2. Ps-BEC 実現の必須要素技術: 高密度・低温 Ps 生成用ナノ材料
  - A) **Ps-TOF 測定による性能評価 @ KEK-SPF-B2**
  - B) Ps レーザー遷移実験 @ KEK-SPF-B1
3. 現状のまとめと今後の展望

# ポジトロニウム飛行時間測定 (Ps-TOF)



- 陽電子照射 = Ps生成からガンマ線検出までの時間  $t$  を測定。

Ps 運動エネルギー

$$E = \frac{m_{Ps} L^2}{2t^2}$$

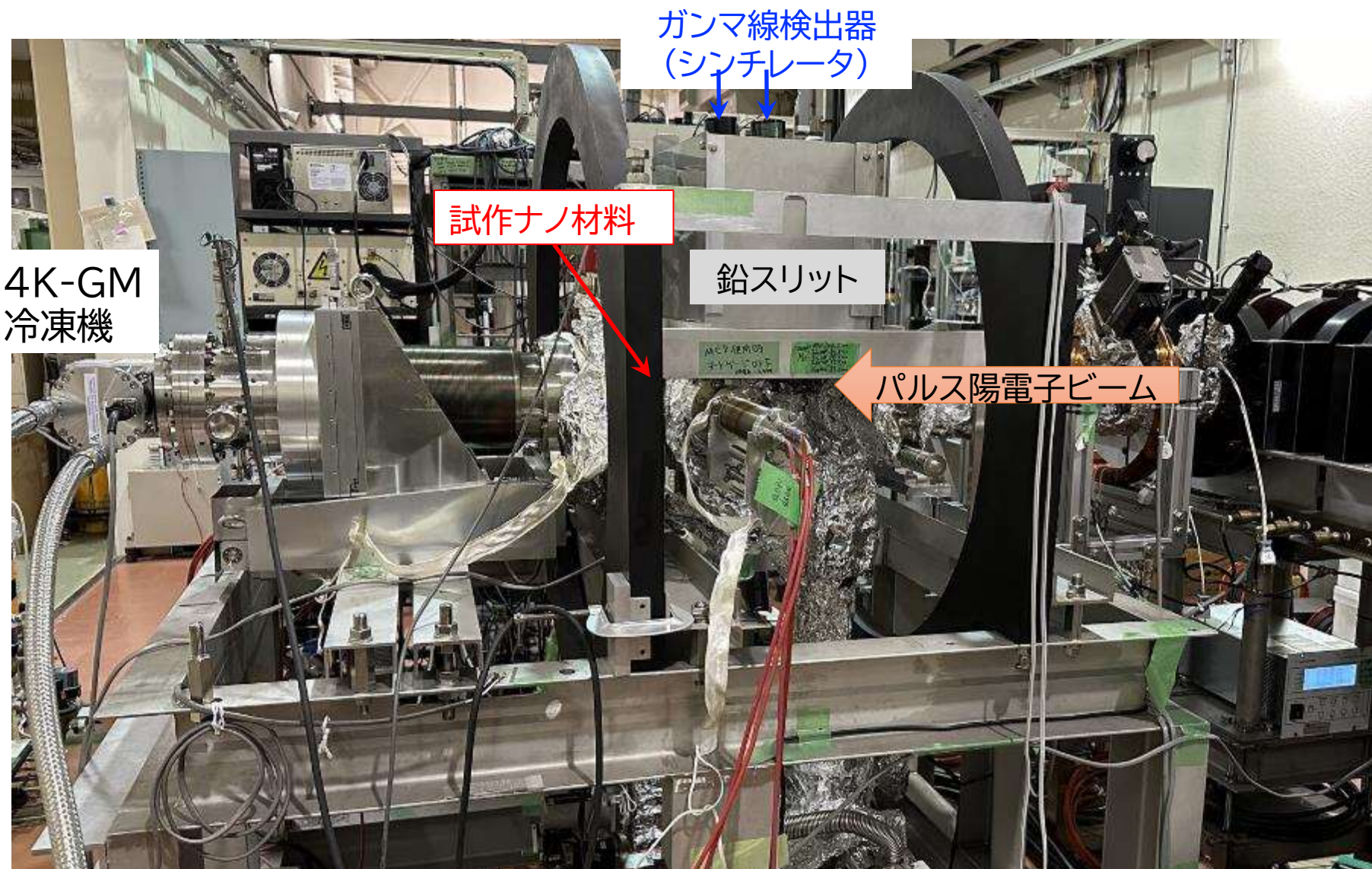
( $m_{Ps}$  はPs質量 =  $2 \times$  電子質量)

検出効率

$$\varepsilon \propto \frac{t \Delta L}{\tau L} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

- 2020年に室温のナノ材料で測定開始した。2023年から、冷凍機で冷却した試料による測定も行っている。
- Ps-BECに最適な, Ps生成率が高く, 放出Psのエネルギーが低い材料を探索

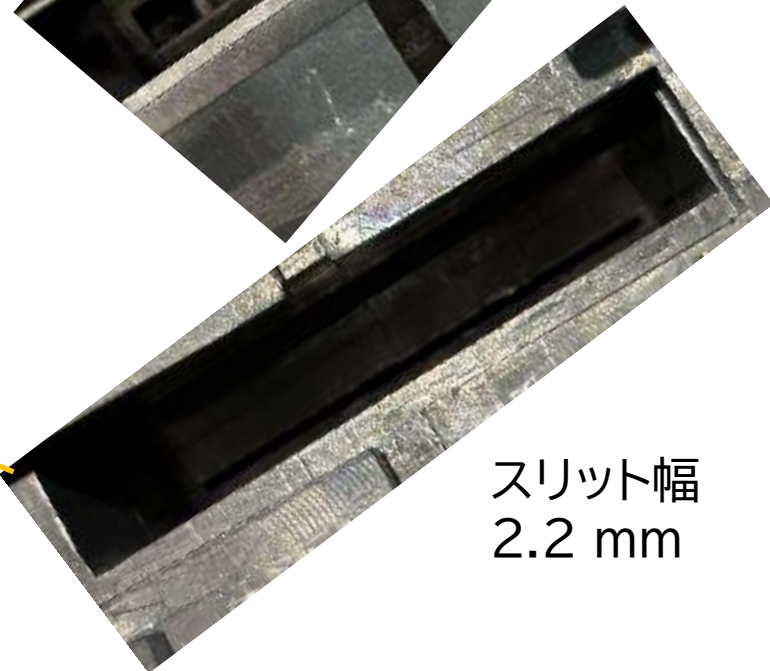
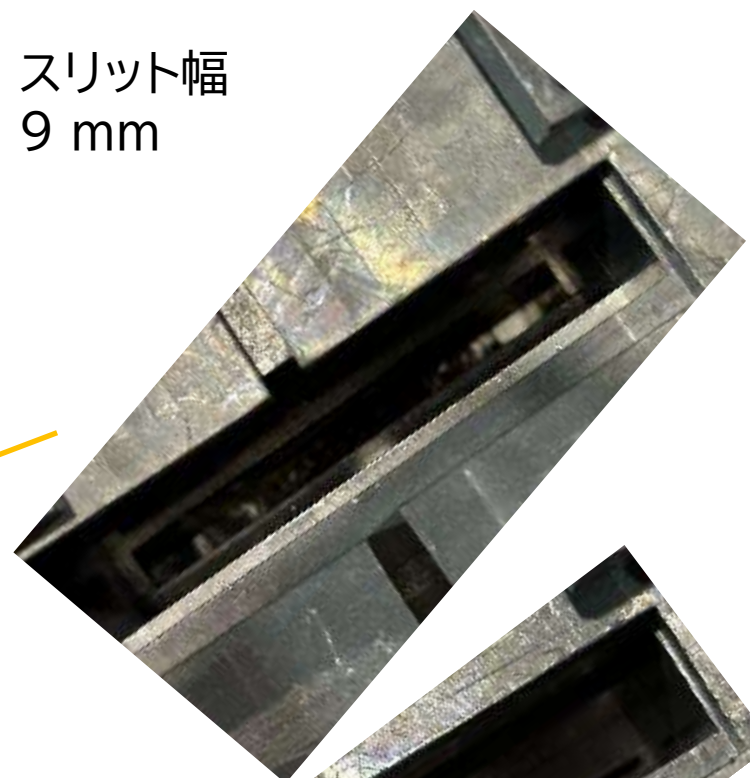
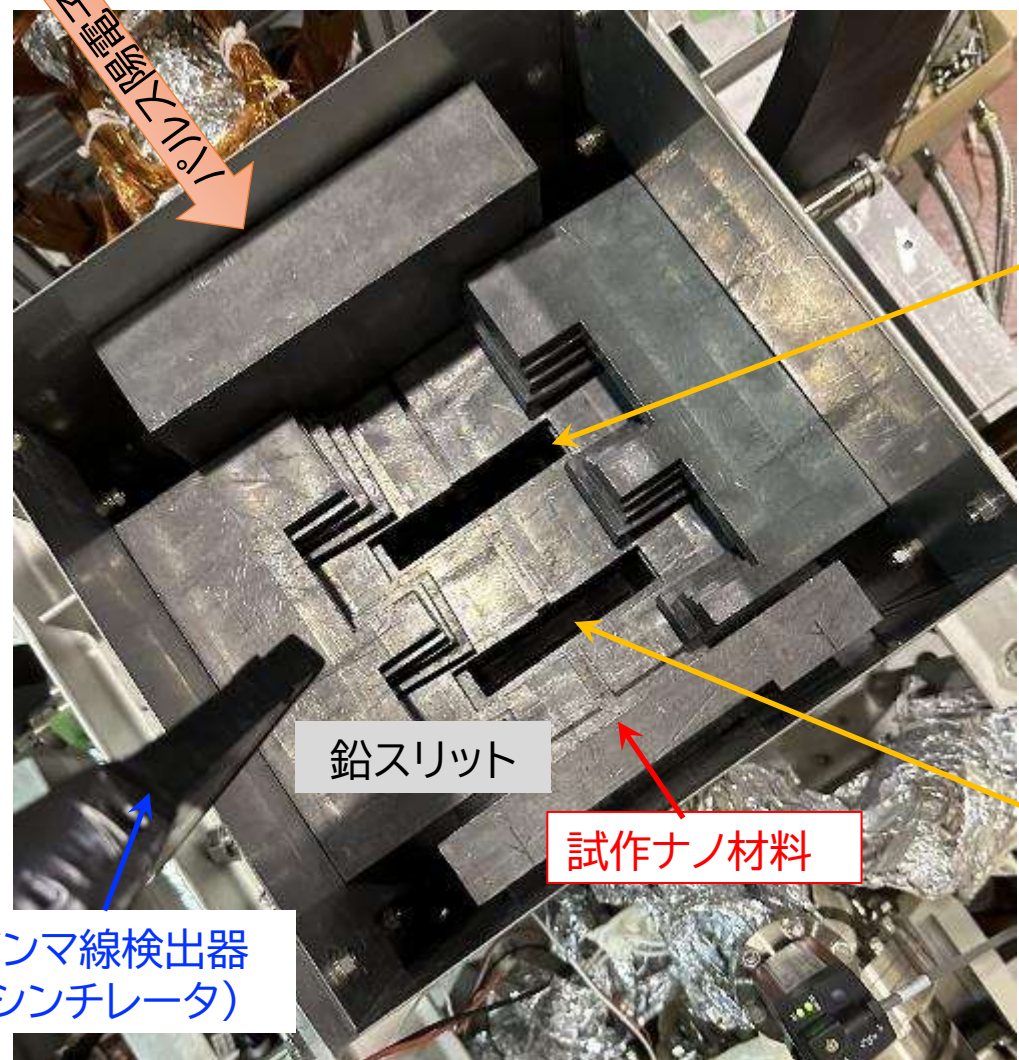
# Ps-TOF 装置外観



# Ps-TOF 装置外観

γ線検出器

スリット幅  
9 mm



スリット幅  
2.2 mm

ガンマ線検出器  
(シンチレータ)

鉛スリット

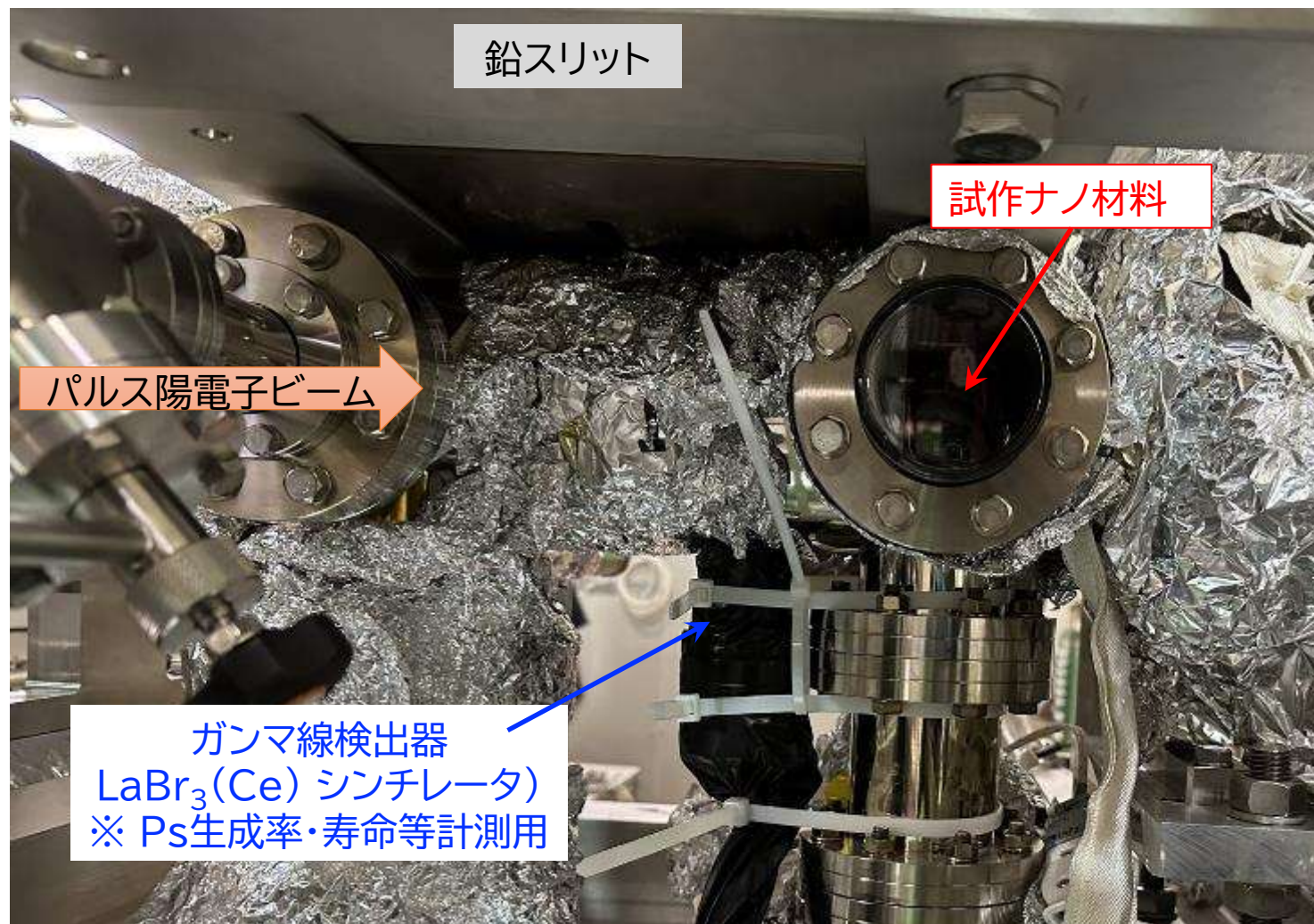
試作ナノ材料

# Ps-TOF 装置外観

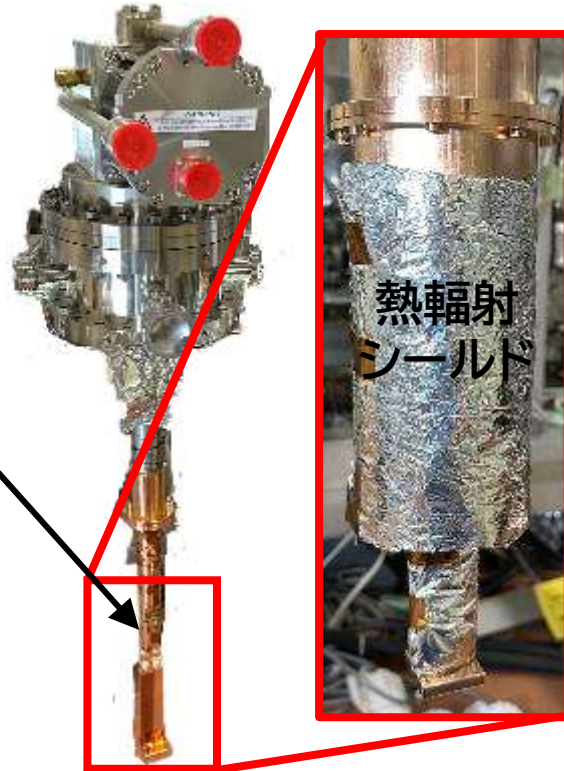


ガンマ線検出器  
(プラスチックシンチレータ)

# Ps-TOF 装置外観

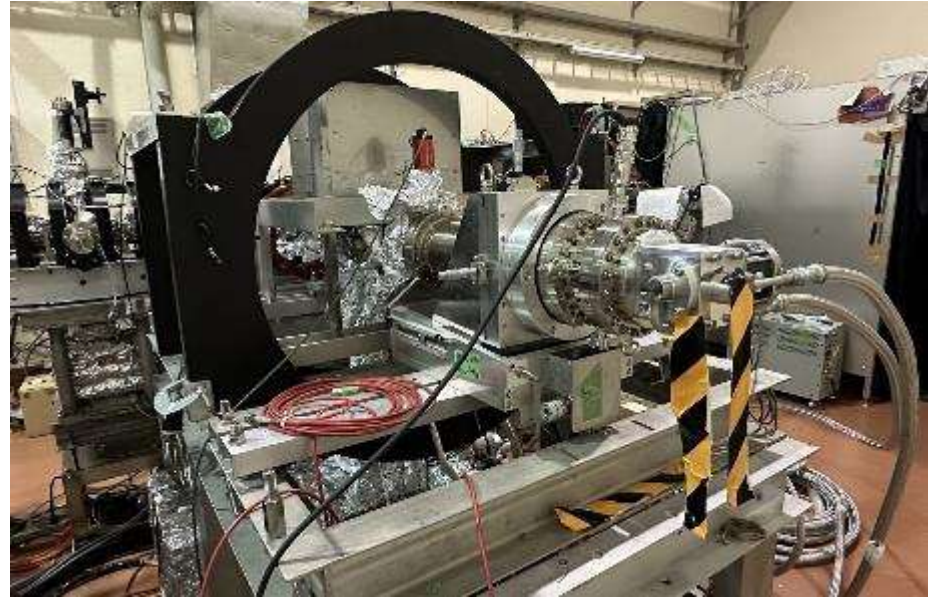
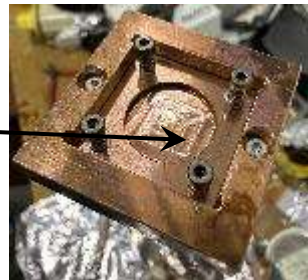


# 冷凍機で冷却したシリカエアロゲルの Ps-TOF 測定 (2024 年 5 月—6 月 @ KEK-IMSS-SPF-B2, 15 keV)



温度計の表示は  
8 K.  
シリカエアロゲル  
の温度は検証中。

シリカ  
エアロゲル

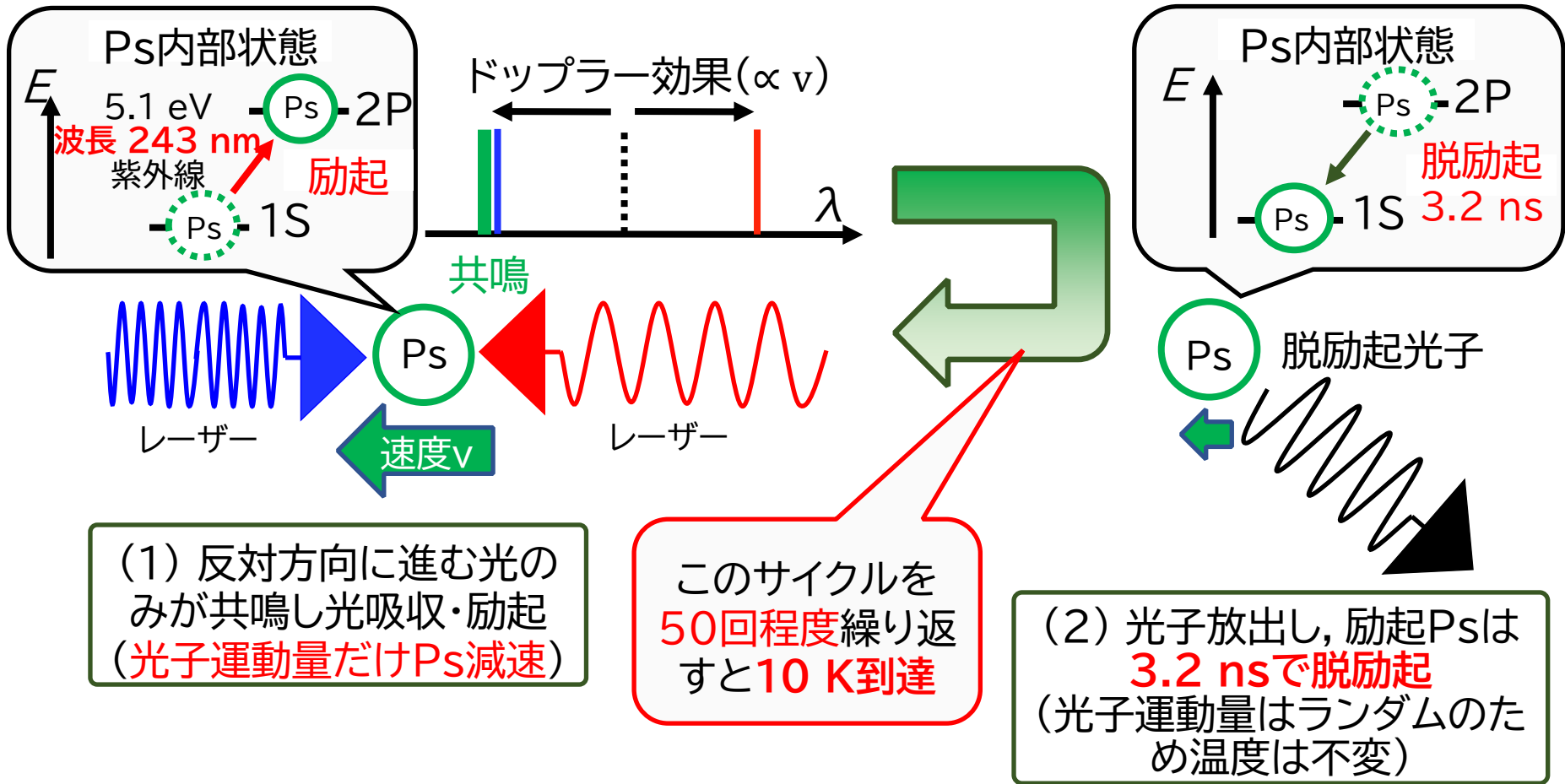


※ 現在, データの詳細な  
解析を進めている。

# 目次

1. ポジトロニウム (Ps) のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)
  - 反物質の新量子多体系である低温量子多体系凝縮相  
= 反物質レーザーを実現
2. Ps-BEC 実現の必須要素技術: 高密度・低温 Ps 生成用ナノ材料
  - A) Ps-TOF 測定による性能評価 @ KEK-SPF-B2
  - B) Ps レーザー遷移実験 @ KEK-SPF-B1**
3. 現状のまとめと今後の展望

# Ps レーザー冷却の原理



(1) 反対方向に進む光のみが共鳴し光吸収・励起  
(光子運動量だけPs減速)

このサイクルを50回程度繰り返すと10 K到達

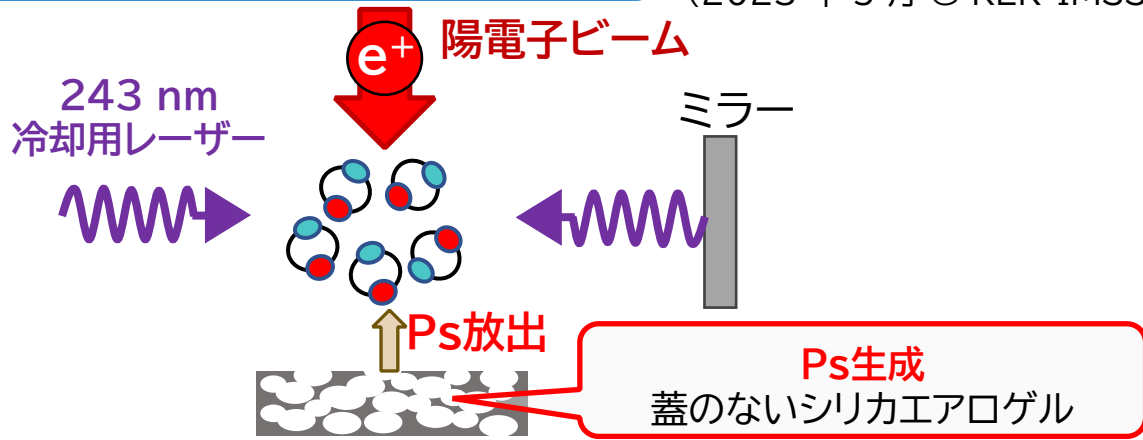
(2) 光子放出し, 励起Psは3.2 nsで脱励起  
(光子運動量はランダムのため温度は不変)

# 真空中でPs 一次元レーザー冷却

(論文紹介)

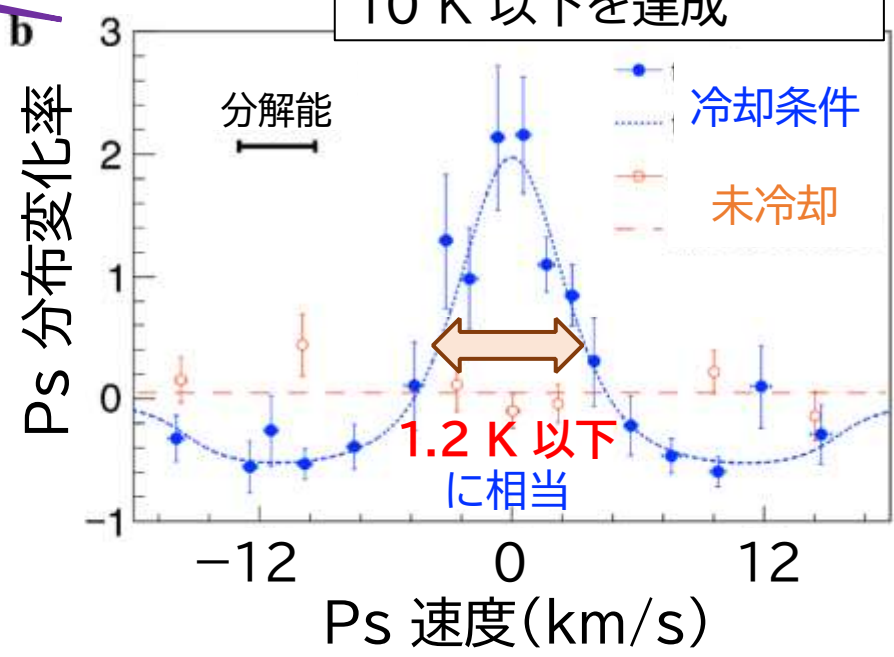
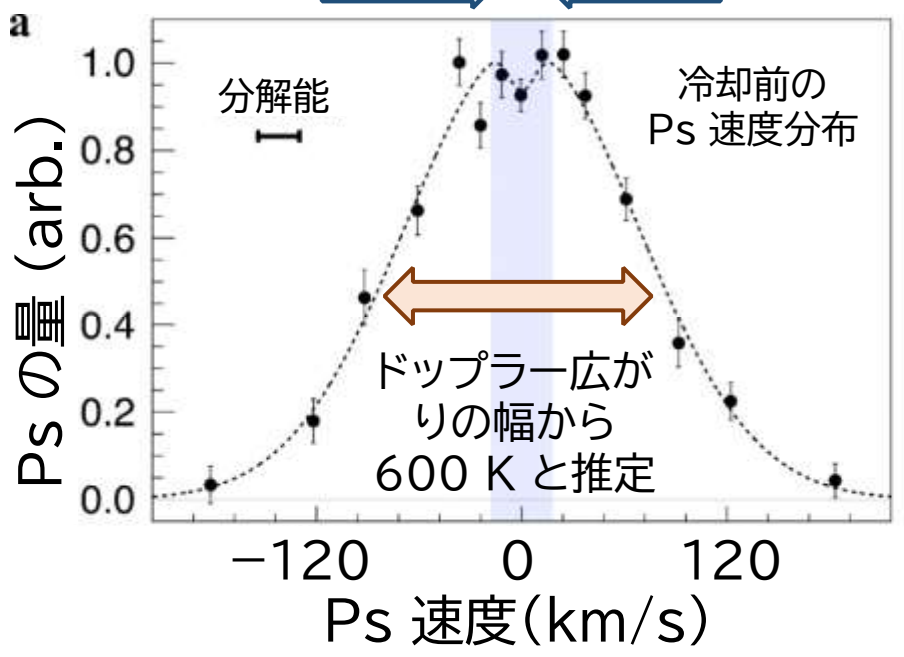
<https://arxiv.org/pdf/2310.08761.pdf>

(2023年5月 @ KEK-IMSS-SPF-B1, 5 keV)

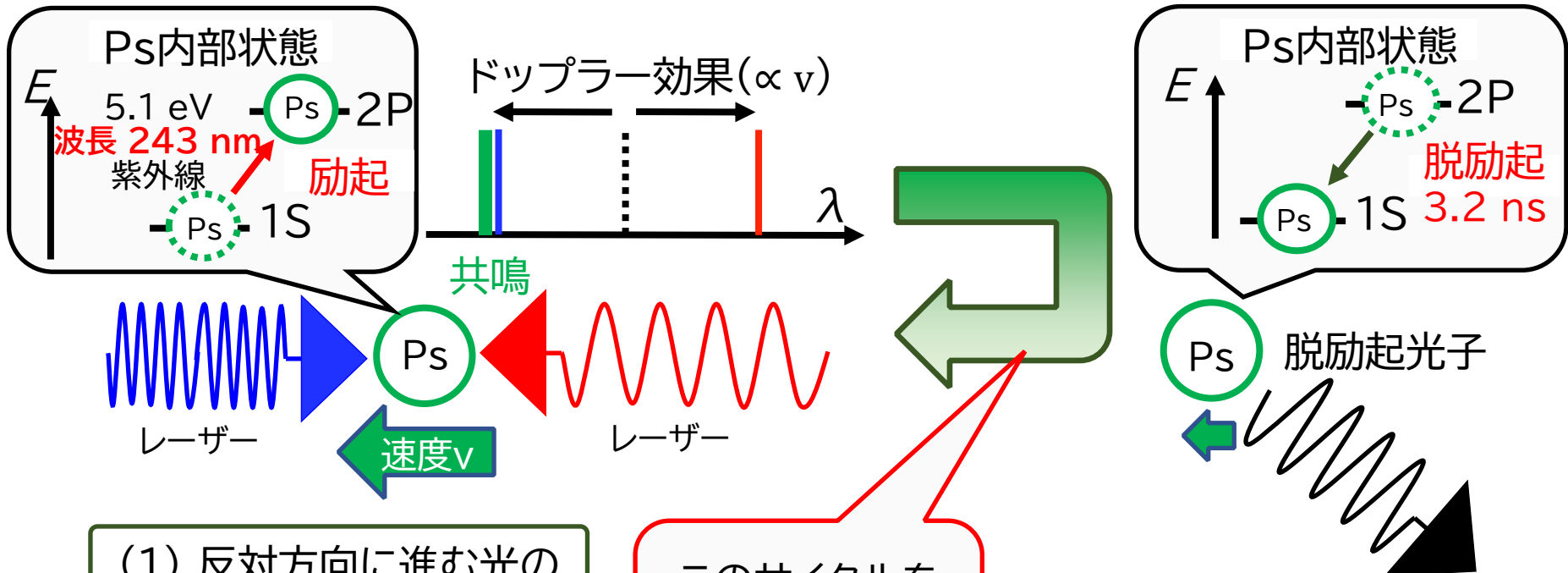


冷却範囲

Ps-BEC 相転移条件の  
10 K 以下を達成



# Ps レーザー冷却の原理



(1) 反対方向に進む光のみが共鳴し光吸収・励起  
(光子運動量だけPs減速)

このサイクルを50回程度繰り返すと10 K到達

(2) 光子放出し, 励起Psは3.2 nsで脱励起  
(光子運動量はランダムのため温度は不変)

シリカエアロゲル中のPs 励起実験を試行  
しかし...

# レーザー冷却を阻害する現象の発見と解決策

適切な組成と構造をもつ  
新規材料開発が急務となった

## 〈課題と方策〉

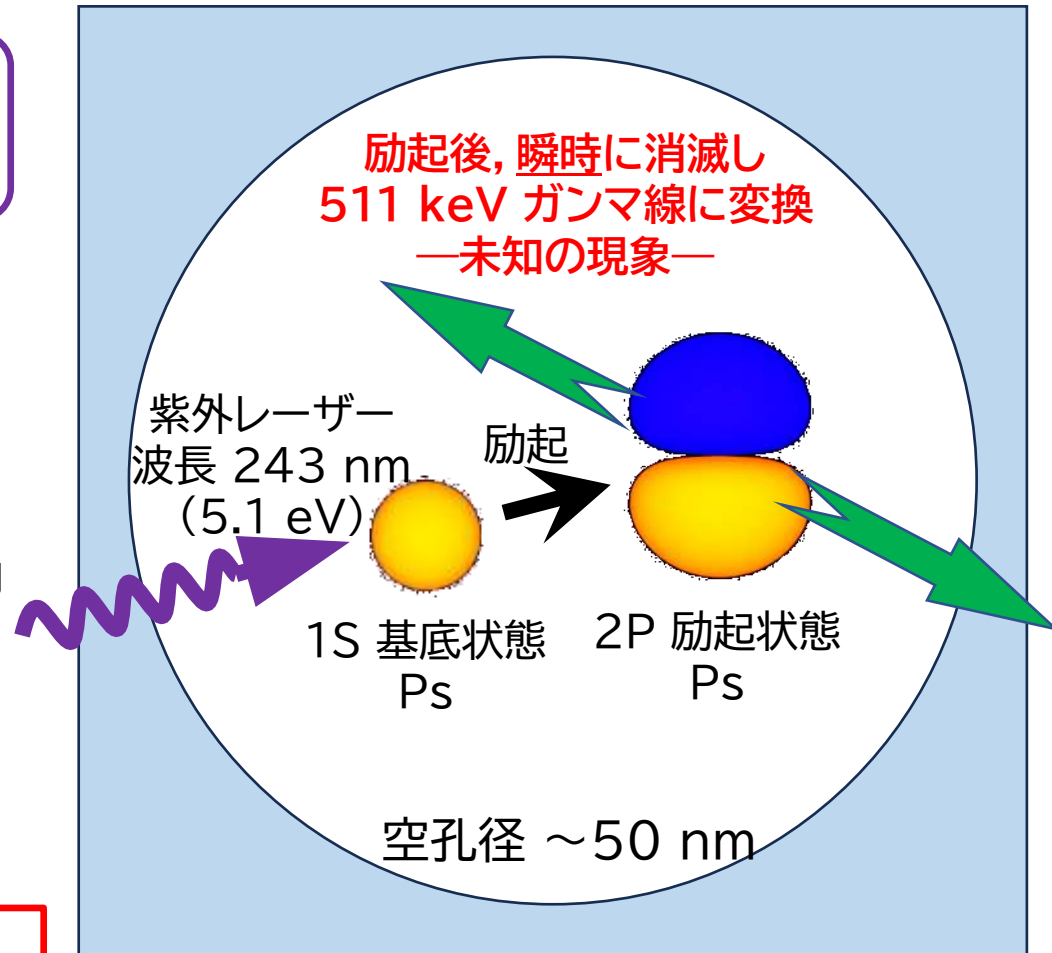
課題: Psが感じる空孔表面ポテンシャルの物理モデル構築と励起-消滅プロセスの解明

方策: 要素のパラメータ化と2P-Ps崩壊率計測

予想される要素:

- Ps温度(運動エネルギー)
- 空孔構造, 化学組成

→ 励起Psをプローブに活用した新規表面分析手法にも展開  
物質科学研究への応用を期待

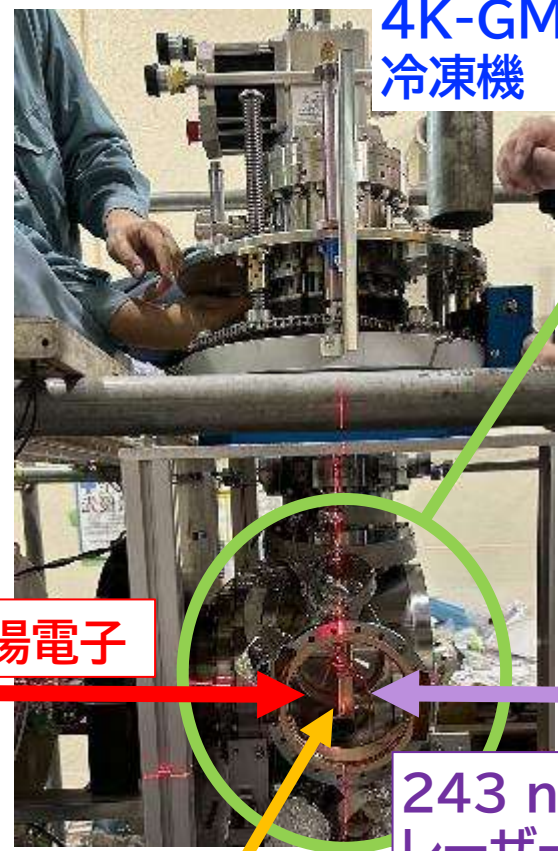


## シリカエアロゲル

- 周ほか, 陽電子科学 第16号, 31 (2021).
- K. Shu, Ph.D. thesis (UTokyo, 2020).

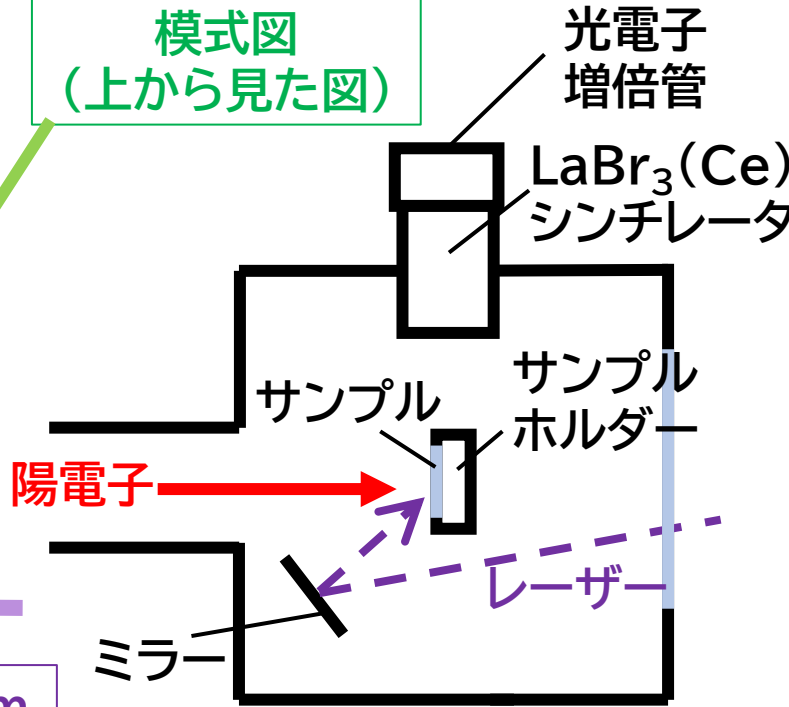
# 冷凍機で冷却したシリカエアロゲル中の Ps レーザー遷移実験 (2024年6月 @ KEK-IMSS-SPF-B1, 7.5 keV)

陽電子	$10^5 e^+ /$
ビーム強度	pulse
繰り返し	50 Hz
パルス幅	11 ns
ビーム径	10 mm

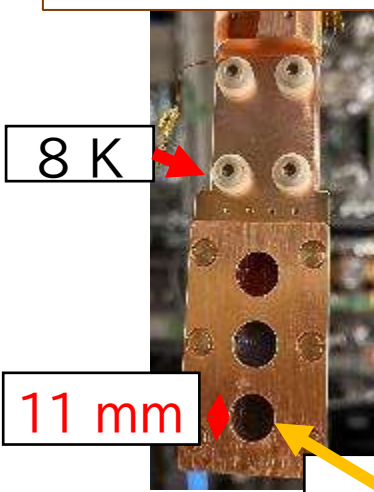


4K-GM  
冷凍機

真空チャンバー内  
模式図  
(上から見た図)



サンプルホルダー



8 K

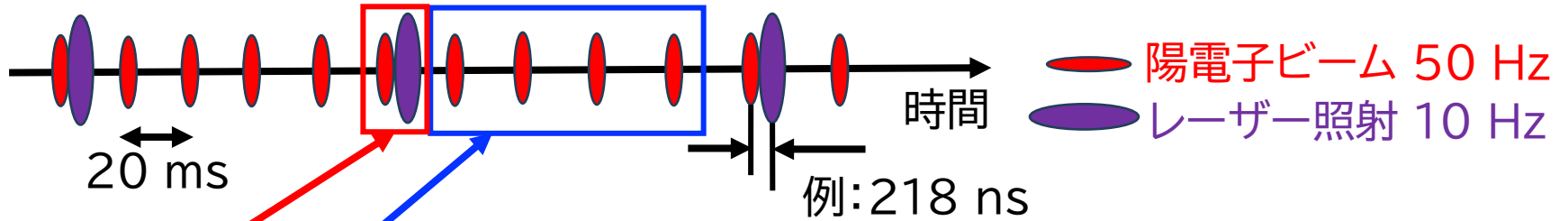
11 mm

陽電子

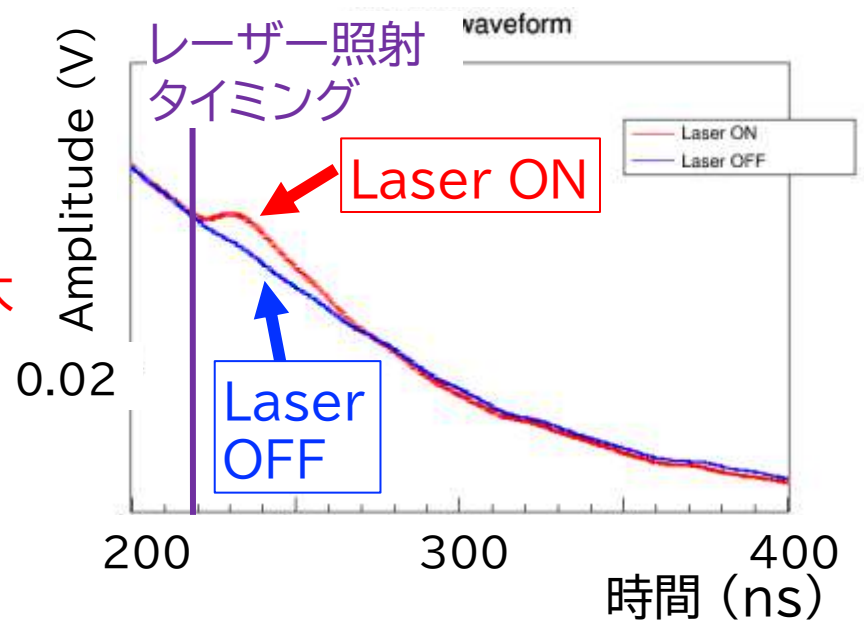
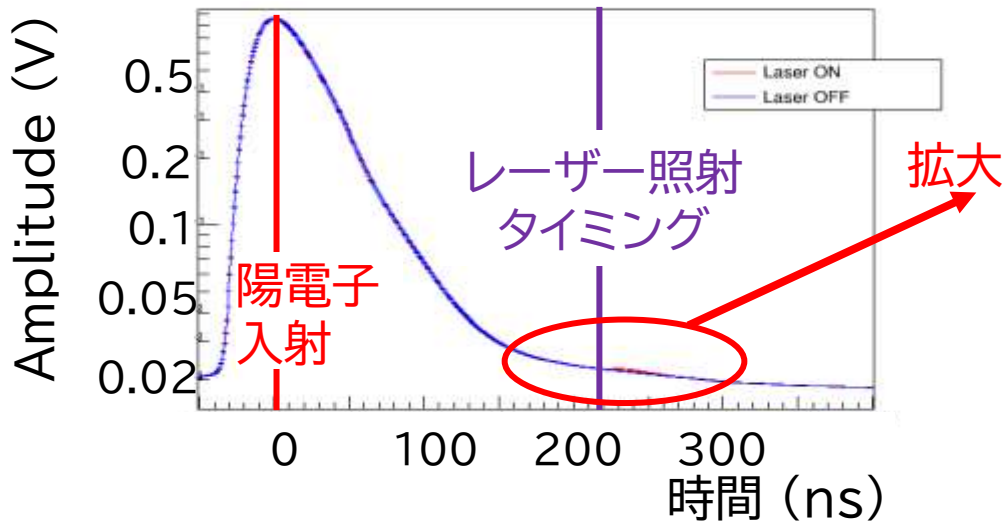
243 nm  
レーザー

シリカエアロゲル  
(表面にプラズマCVD  
緻密シリカ層 103 nm)

紫外レーザー照射による 2P-Ps のガンマ線への崩壊を確認。  
過去の室温データの再現性や, 低温における崩壊率の変化を解析中。



Laser ON と OFF のときにシンチレータで  
取得された信号の平均波形



# 目次

1. ポジトロニウム (Ps) のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)
  - 反物質の新量子多体系である低温量子多体系凝縮相  
= 反物質レーザーを実現
2. Ps-BEC 実現の必須要素技術:高密度・低温 Ps 生成用ナノ材料
  - A) Ps-TOF 測定による性能評価 @ KEK-SPF-B2
  - B) Ps レーザー遷移実験 @ KEK-SPF-B1
3. 現状のまとめと今後の展望

# 現状のまとめと今後の展望



1. Ps-BEC を実現して世界初の反物質レーザーを作りたい。
2. Ps 生成・濃縮・冷却の 3 機能を持つ多孔質ナノ材料を開発中。
3. 材料性能評価や, ナノ空孔中での Ps レーザー冷却実現に向けた研究を進めている。

## 【今後の展望】

- 低温 Ps-TOF 測定による各種試作ナノ材料の詳細な性能評価, 低温材料のナノ空孔中での Ps レーザー遷移実験により, BEC 実現に最適な Ps 生成材を開発。

<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/>

<https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/psbec>

<https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/psbec en>