

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材の開発

東大理, 東大素セ^A, 産総研^B, KEK物構研^C, 量研高崎^D

石田 明, 牧 和真, Randall W. Gladen, 難波 俊雄^A, 浅井 祥仁,
大島 永康^B, オローク ブライアン^B, 満汐 孝治^B, 伊藤 賢志^B,
兵頭俊夫^C, 望月 出海^C, 和田 健^C, 前川 雅樹^D



<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 3 月 20 日
日本物理学会 2024 年春季大会 @ オンライン

20aK1-5

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

Fusion Oriented Research 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 生成材
3. 現状と今後の方針

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

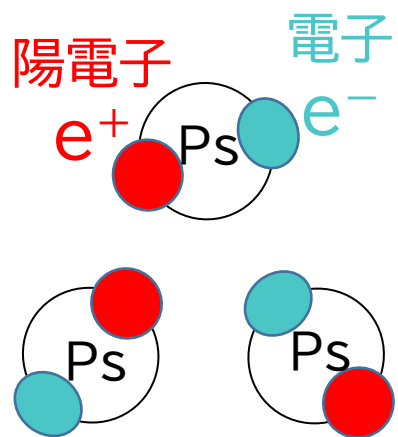
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 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?



反物質原子

ポジトロニウム(Ps)
(古典極限系)

10^{15} cm^{-3}
150 K

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

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} 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)

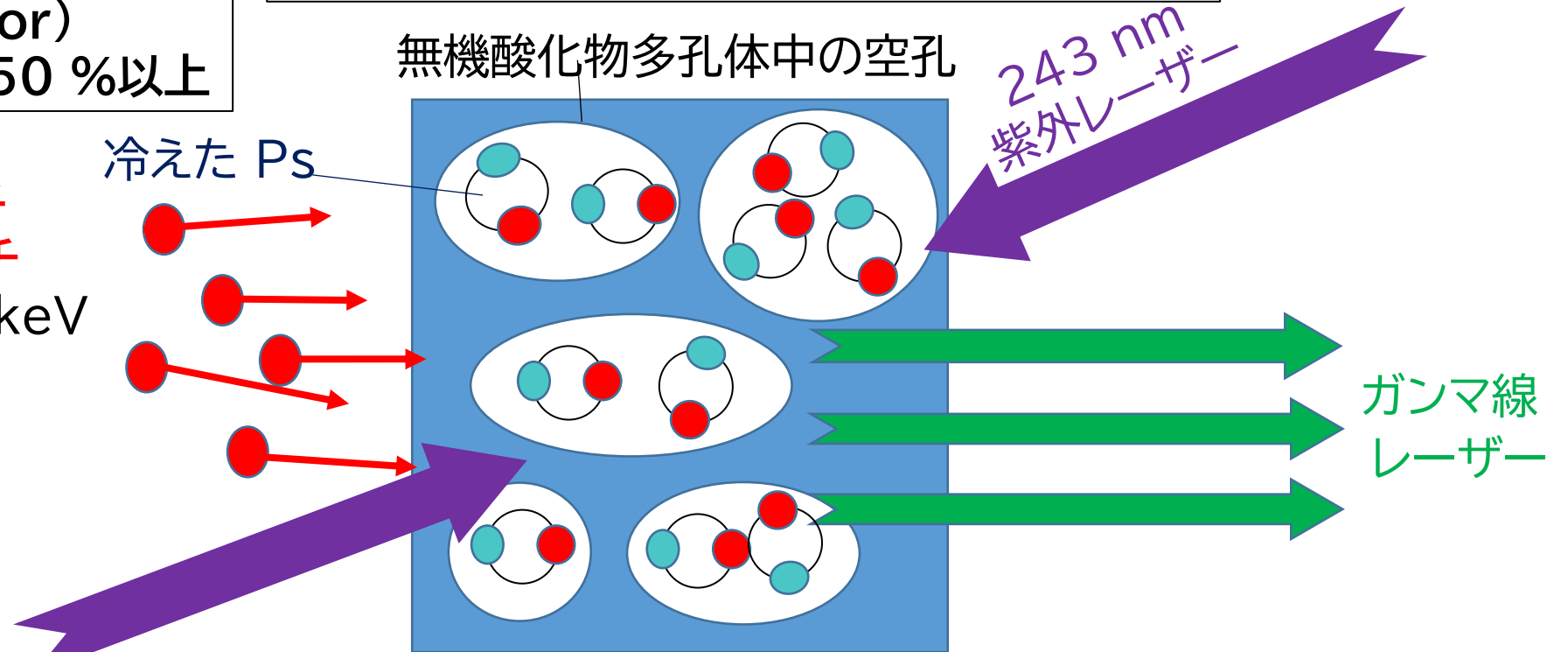
Ps 生成・濃縮・冷却の 3 機能をもつ

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

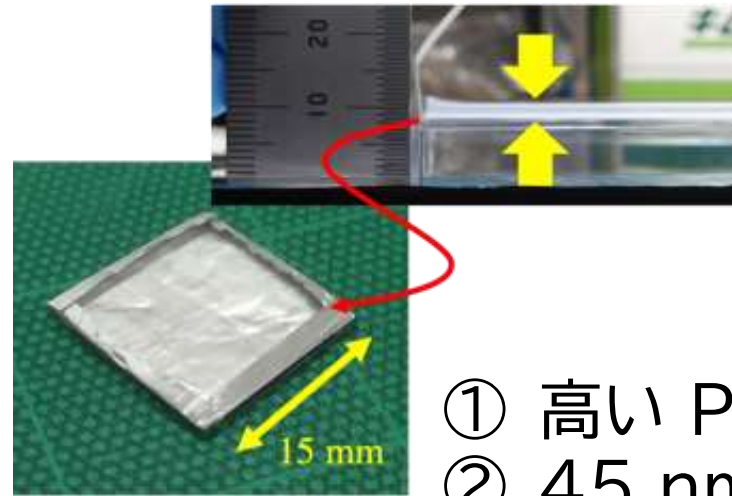
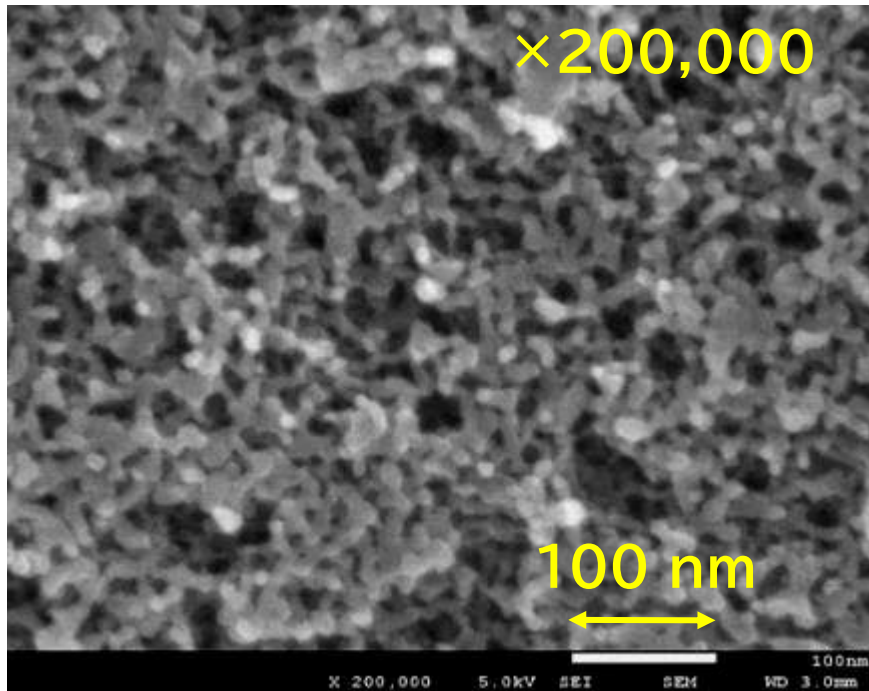
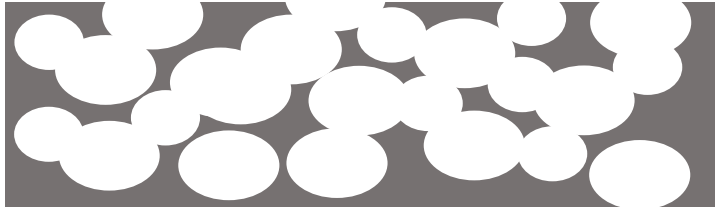
機能② Psを高密度に濃縮 (condenser)
→ 50 nm—100 nm 空孔

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



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 SiO_2)エアロゲルを開発



シリカエアロゲル
密度 0.12 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

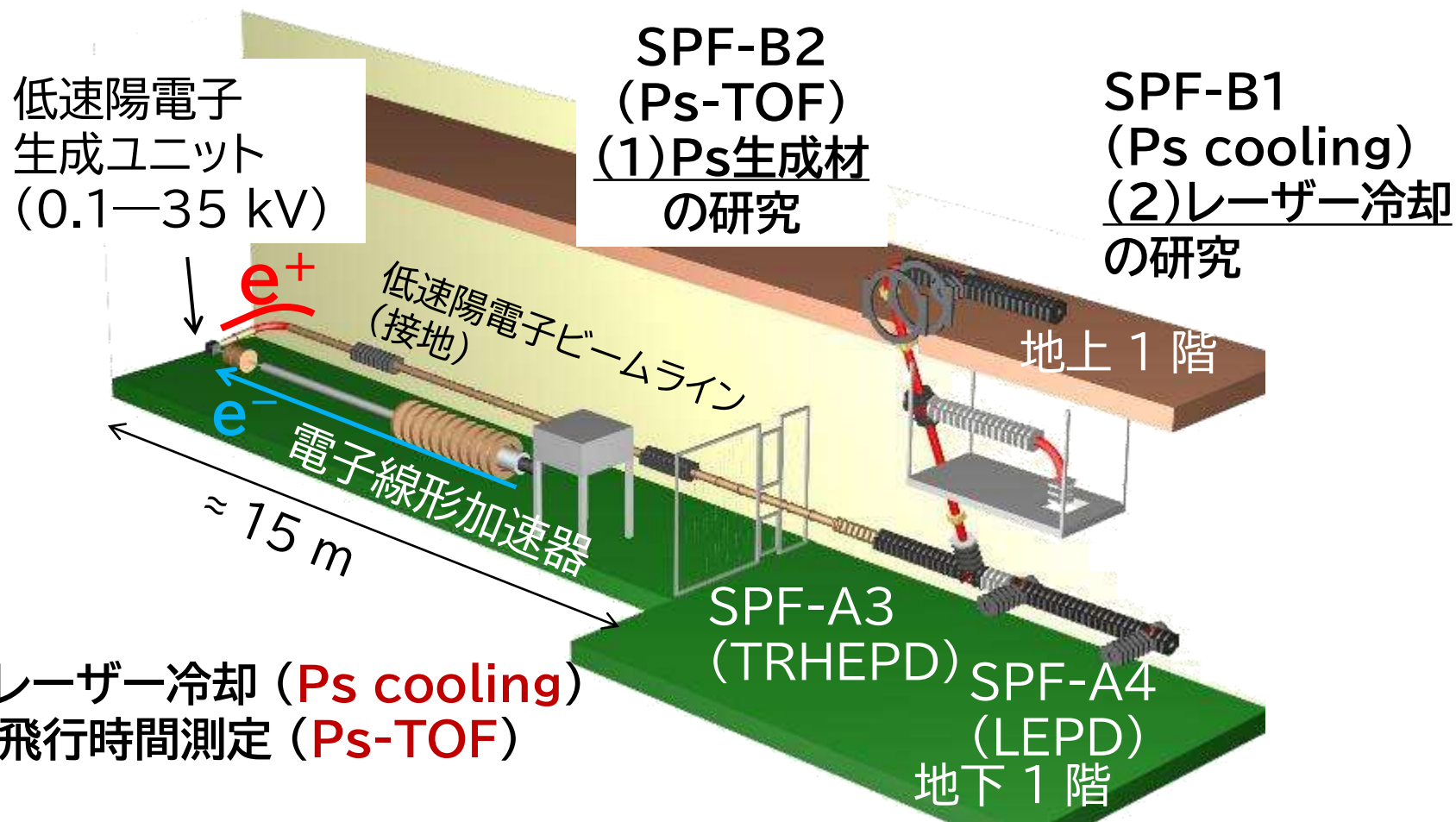
他に、ナノプロセッシング, ナノインプリント, 規則配列シリカナノ材料(以上シリカ), シリカ以外のナノ多孔質材料を試し中

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)



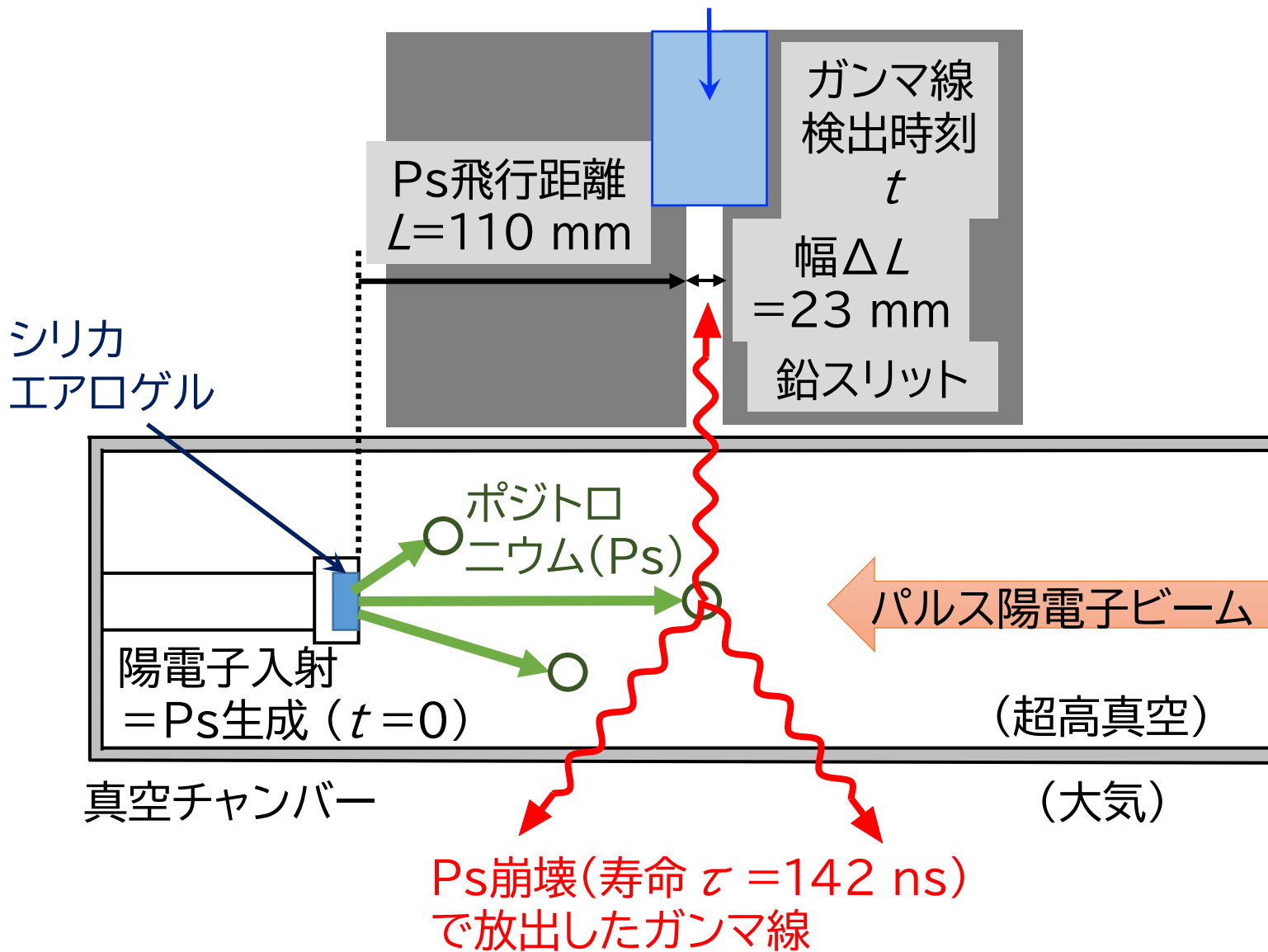
SPF
@入射器コントロール棟

- 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)



ポジトロニウム飛行時間測定 (Ps-TOF)

ガンマ線検出器(シンチレータ)



- 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)

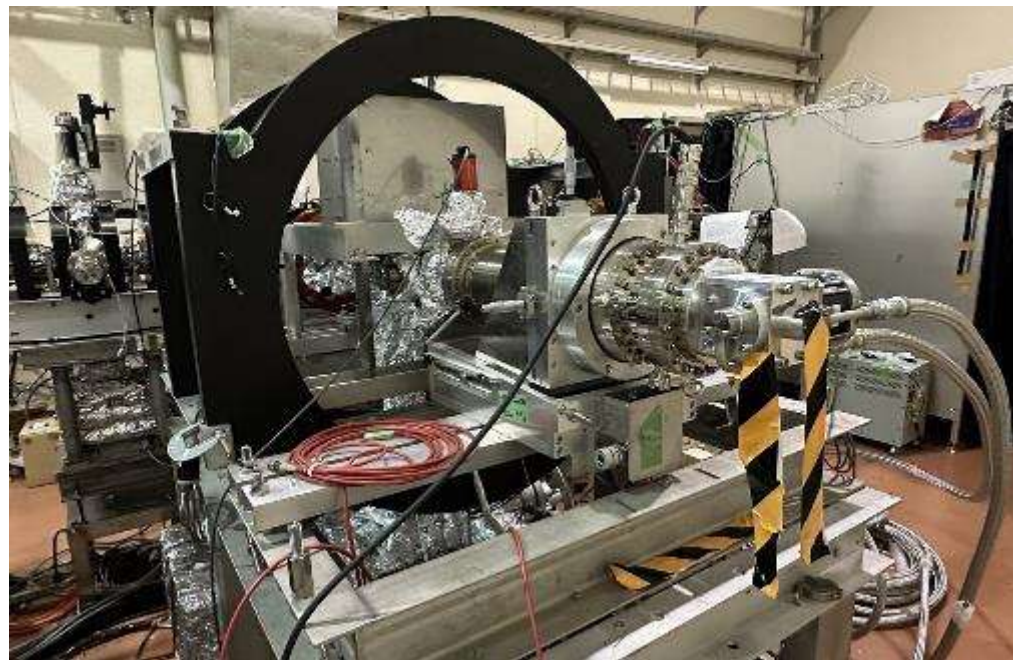
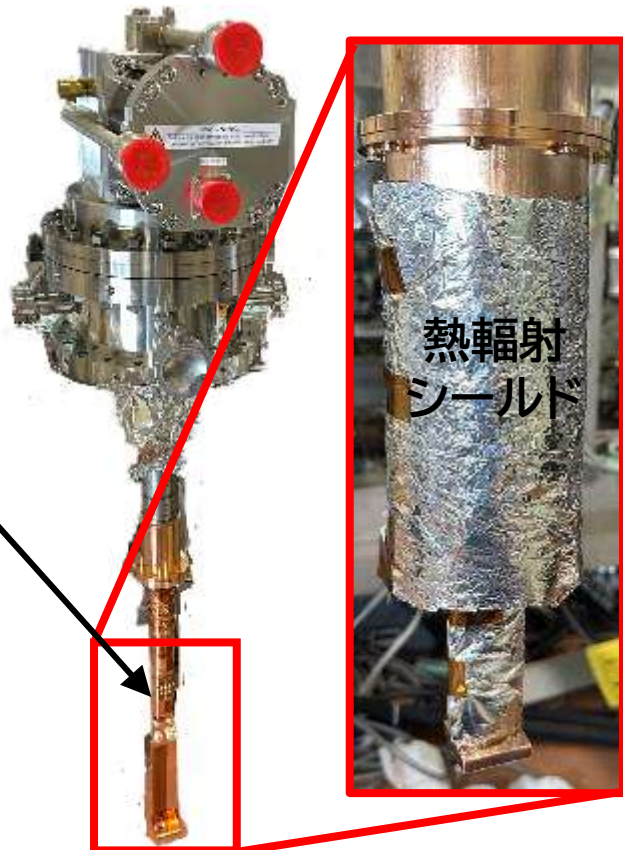
検出効率

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

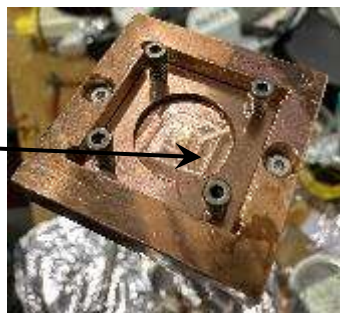
- 2020年に室温のナノ材料で測定。2023年から、冷凍機で冷却した試料による測定を開始。
- Ps-BECに最適な, Ps生成率が高く, 放出Psのエネルギーが低い材料を探索。**

冷凍機で冷却したシリカエアロゲルの Ps-TOF 測定
(2023 年 5 月—6 月, 11 月, 2024 年 2 月
@ KEK-IMSS-SPF-B2, 5 keV)

温度計の表示は
7 K
シリカエアロゲル
の温度は検証中。

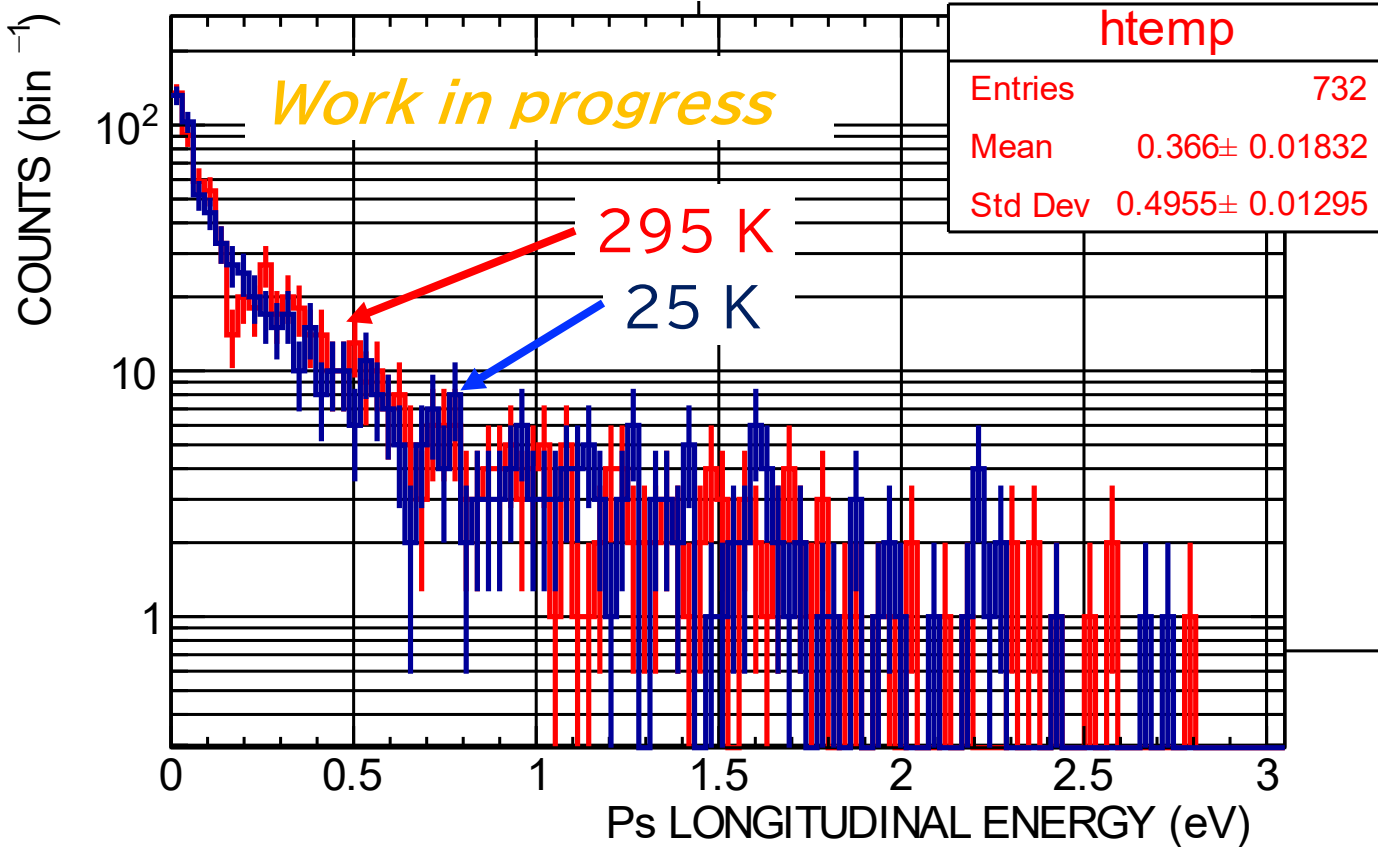


シリカ
エアロゲル



試料冷却効果のシミュレーションによる評価

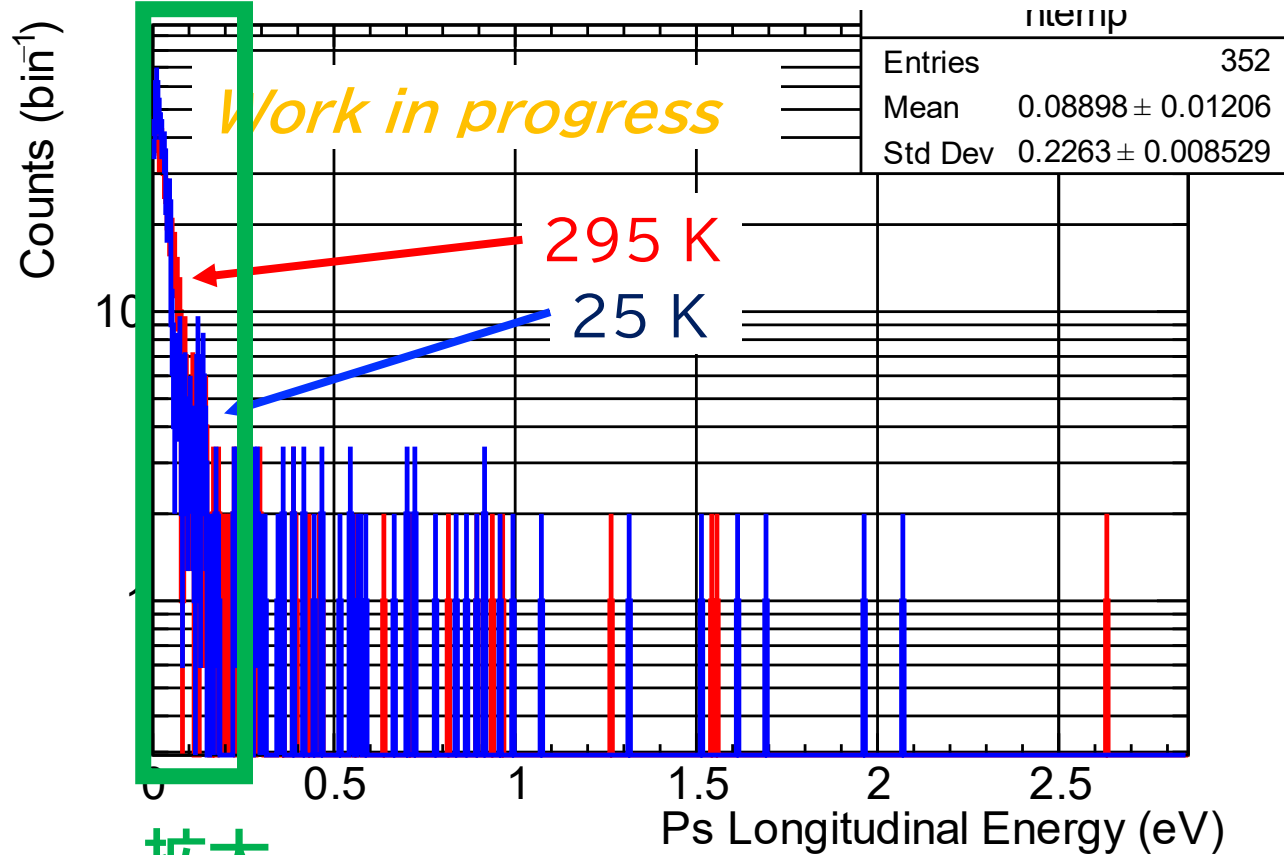
5 keV 陽電子ビームでの Ps-TOF 測定シミュレーション



試料の冷却による効果を見るのは
5 keV 陽電子では難しい
→ 陽電子ビームエネルギーを上げれば冷却の効果が見える可能性。
(概算例)
エネルギー : 5 keV → 15 keV
Ps 生成深さ: 4.4 μm → 26 μm
Ps 放出率 : 82 % → 37 %
Ps 放出時間: 12 ns → 56 ns
Ps 温度: 1,000 K 以上 → 270 K

試料冷却効果のシミュレーションによる評価

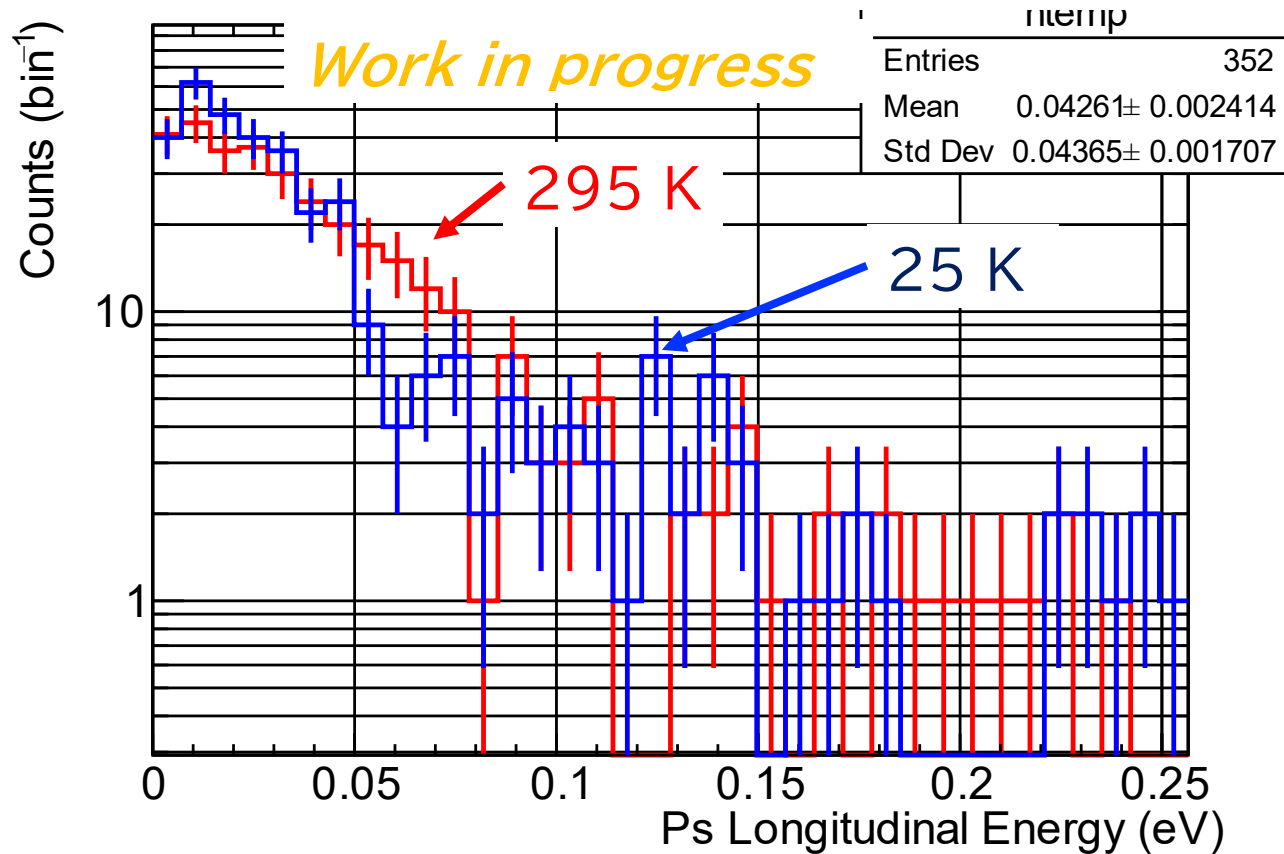
15 keV 陽電子ビームでの Ps-TOF 測定シミュレーション



試料の冷却による効果を見るのは
5 keV 陽電子では難しい
→ 陽電子ビームエネルギーを上げれば冷却の効果が見える可能性。
(概算例)
エネルギー : 5 keV → 15 keV
Ps 生成深さ: 4.4 μm → 26 μm
Ps 放出率 : 82 % → 37 %
Ps 放出時間: 12 ns → 56 ns
Ps 温度: 1,000 K 以上 → 270 K

試料冷却効果のシミュレーションによる評価

15 keV 陽電子ビームでの Ps-TOF 測定シミュレーション



試料の冷却による効果を見るのは
5 keV 陽電子では難しい
→ 陽電子ビームエネルギーを上げれば冷却の効果が見える可能性。

(概算例)

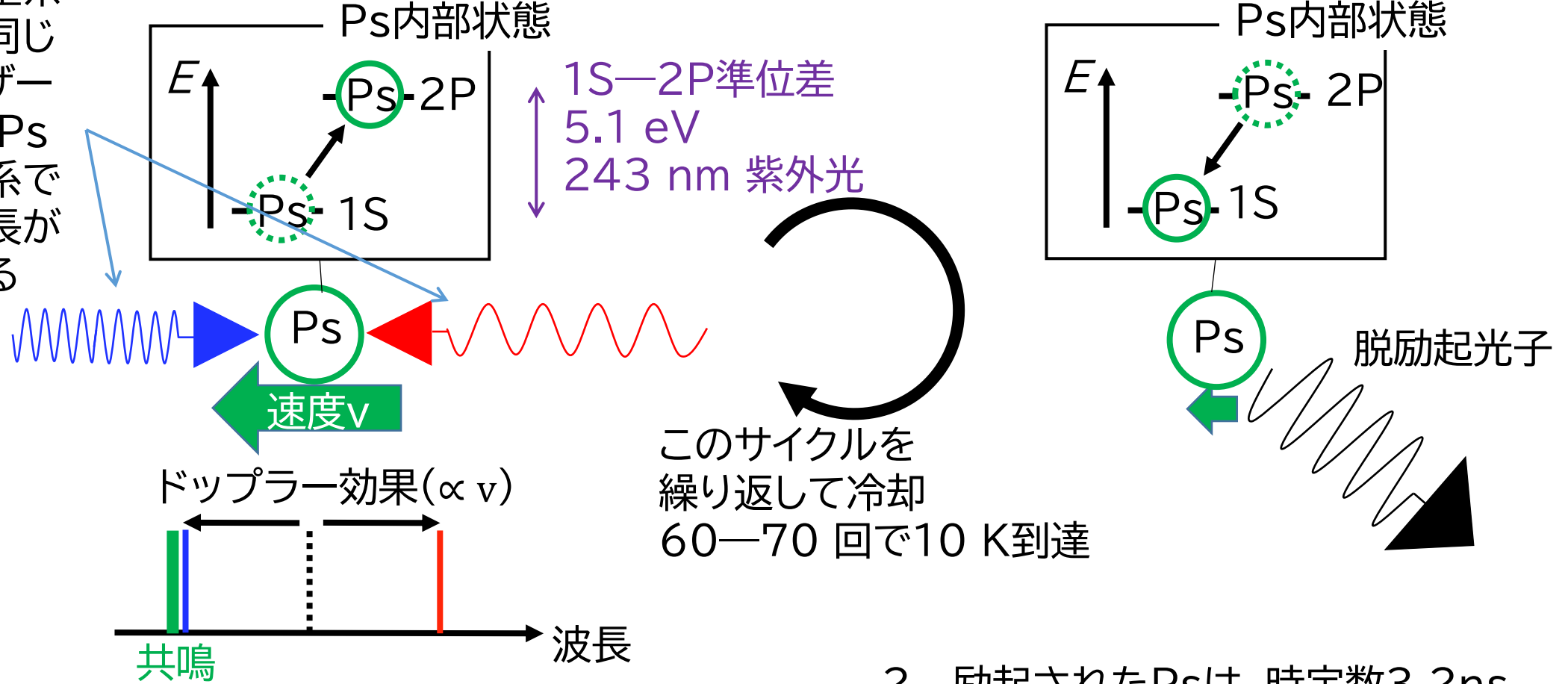
エネルギー : 5 keV → 15 keV
Ps 生成深さ: 4.4 μm → 26 μm
Ps 放出率 : 82 % → 37 %
Ps 放出時間: 12 ns → 56 ns
Ps 温度: 1,000 K 以上 → 270 K

→ 2月のビームタイムで、15 keV 陽電子ビームを用いて室温と低温のサンプルの差を確認する予定だったが、ビームラインのトラブルによりビーム強度が低く、測定できなかった。

→ セットアップの改善を検討中

Ps レーザー冷却の原理

実験室系では同じレーザーだがPs静止系では波長が異なる



1. 反対方向に進む光のみが共鳴し
光吸収・励起
Psは光子の運動量分だけ減速

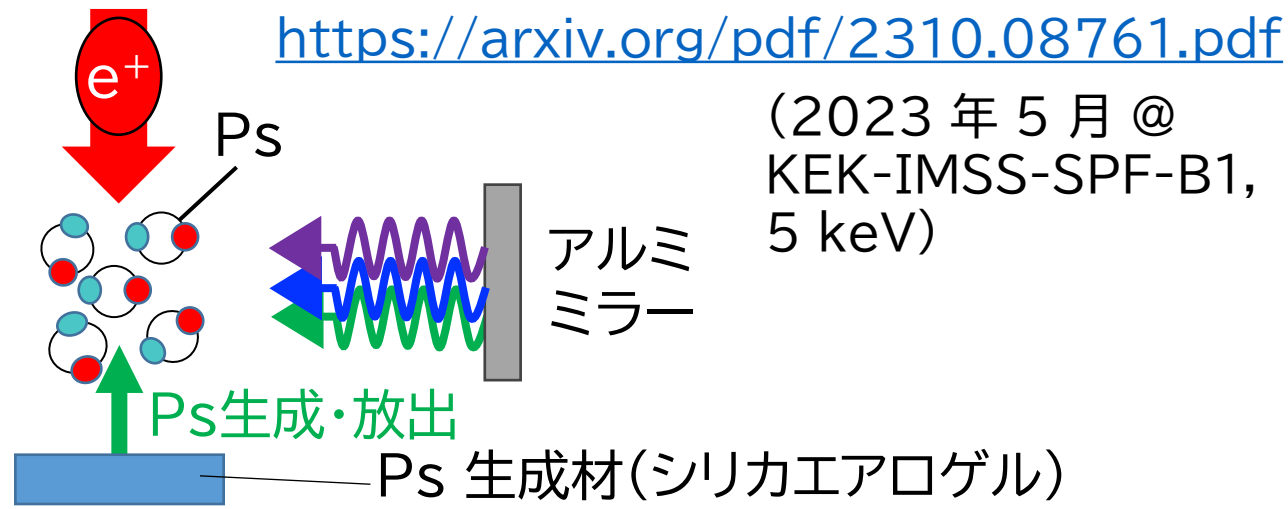
2. 励起されたPsは、時定数3.2ns
で自然に光子を放出し脱励起
(光子の運動量方向はランダム、平均すれば温度は変わらない)

真空中でPs 一次元レーザー冷却

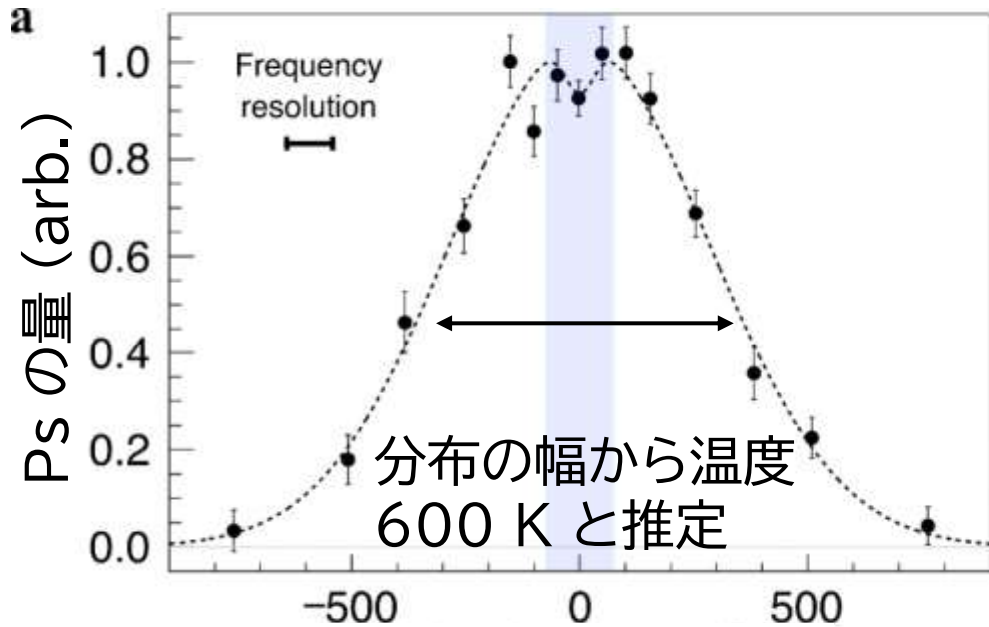
(論文紹介)

- ① 243 nm (冷却時)
- ② 243 nm (検出時)
- ③ 532 nm (検出時)

①照射で冷却後, ②③同時照射で测温

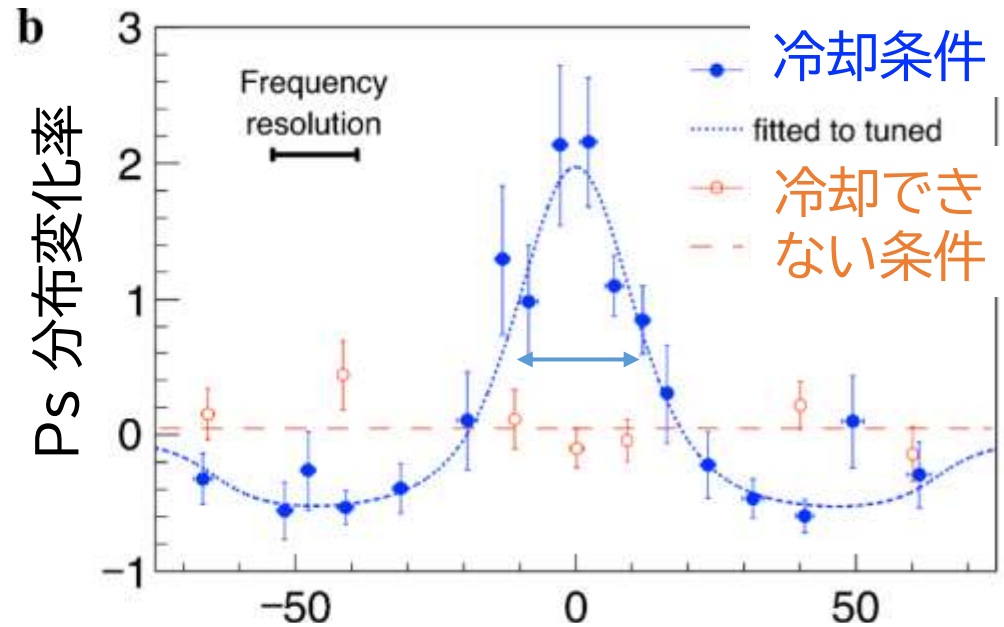


冷却前 b図の範囲:ここを冷却



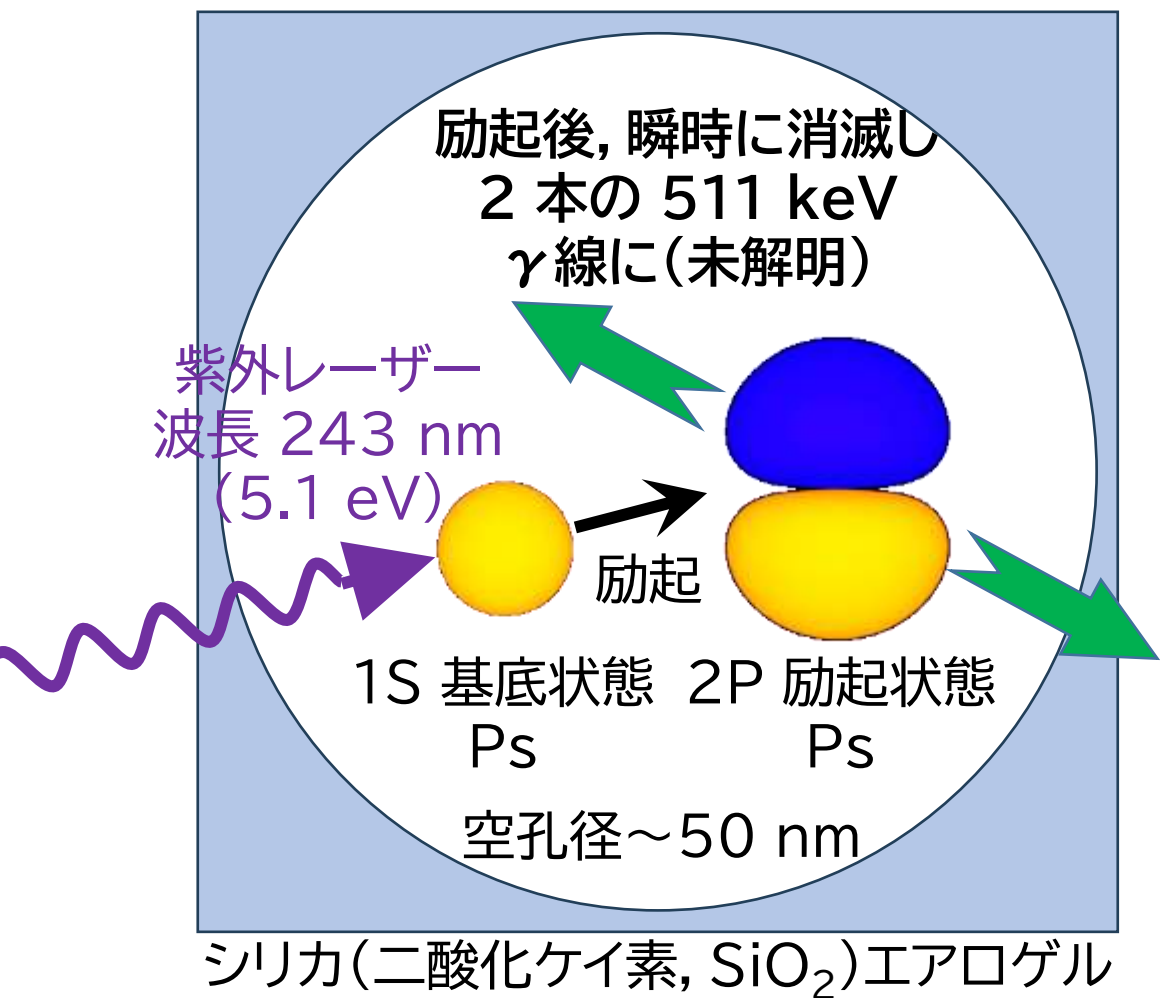
レーザー②の周波数(相対値, GHz) = Ps速度に対応

冷却後 1.2 K 以下に相当



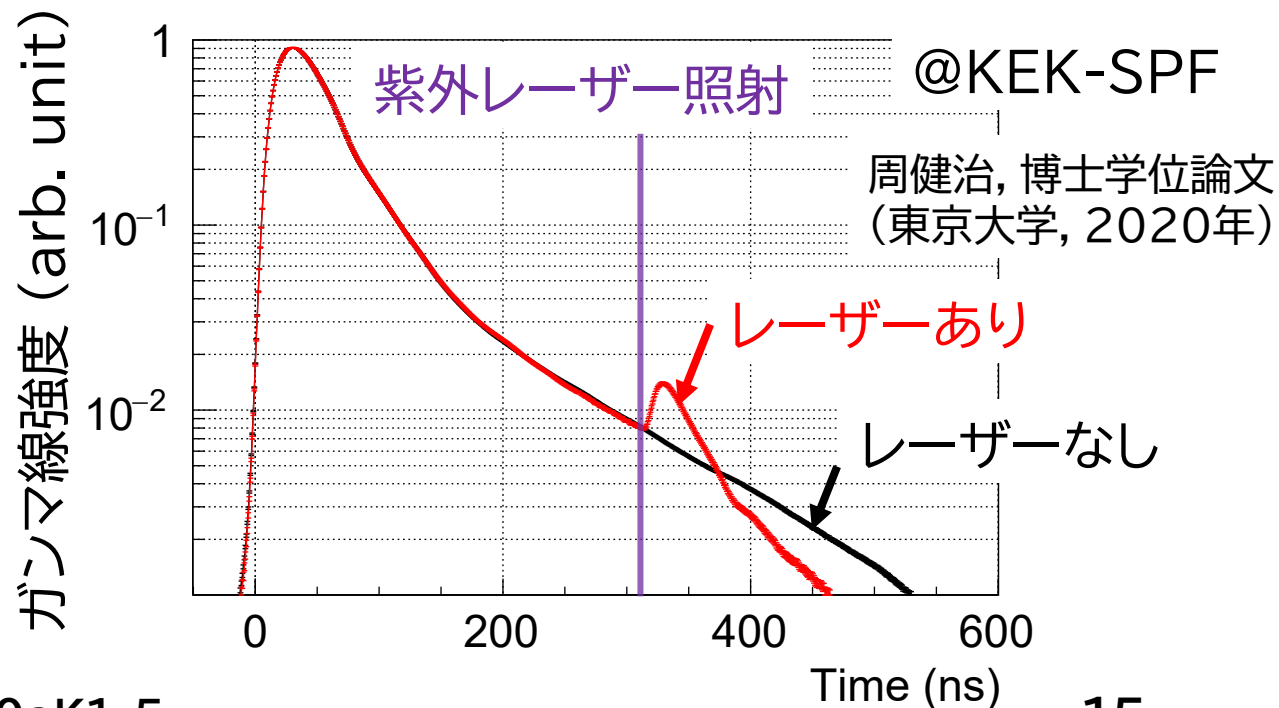
レーザー②の周波数(相対値, GHz)

真空中ではレーザー冷却可能になったが, Ps-BEC のために必要な, 「ナノ材料空孔中におけるレーザー冷却」には重大な阻害要因



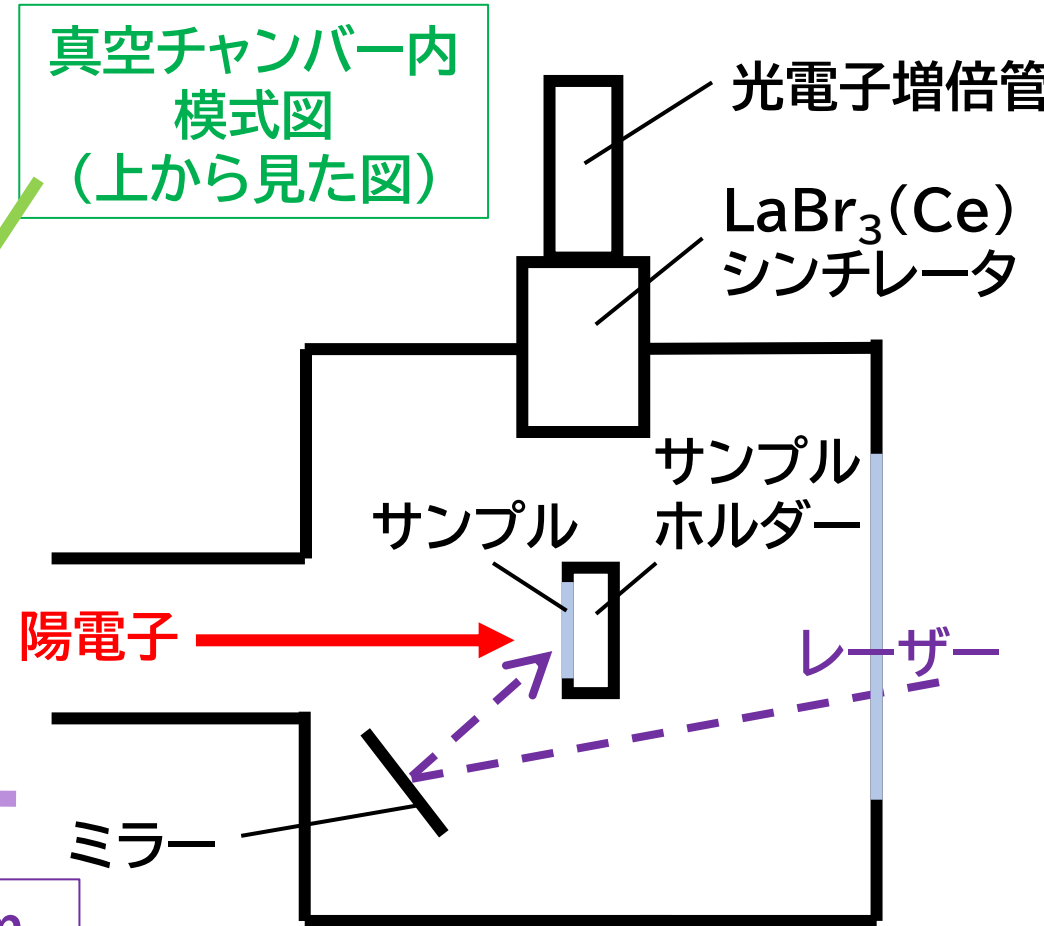
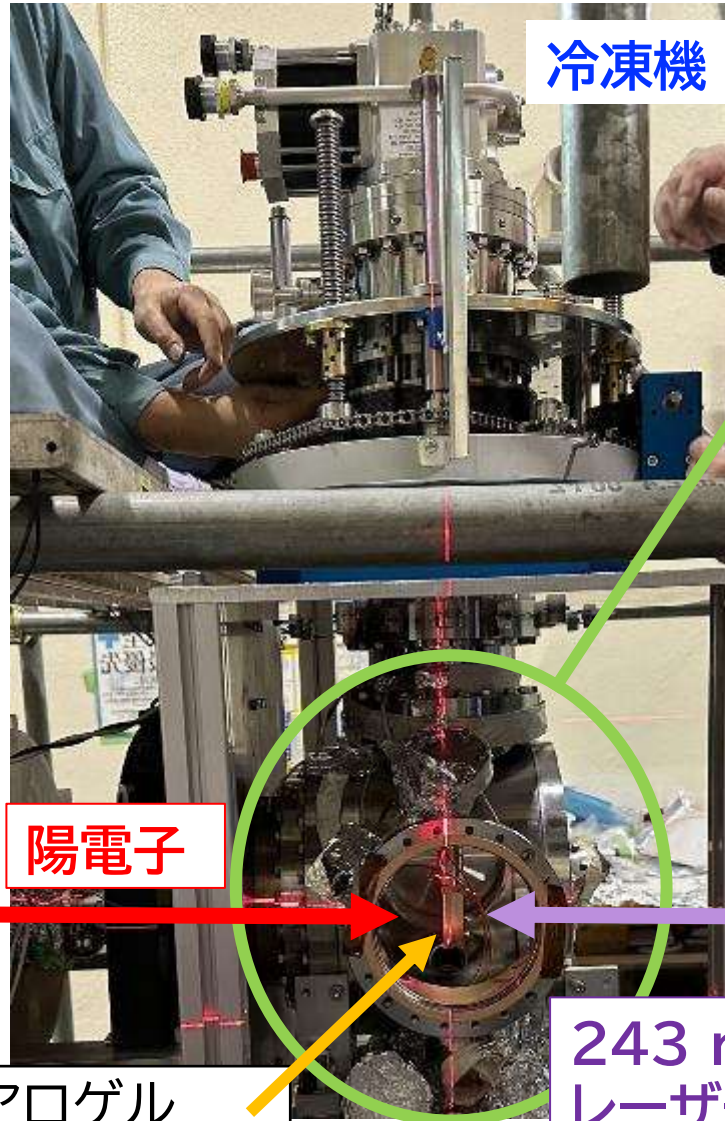
シリカエアロゲル細孔中では, $2P$ 状態に遷移した Ps が瞬時にガンマ線に消滅!
→レーザー冷却($1S \rightarrow 2P \rightarrow 1S$ を繰り返す)が不可能

今のところ原因不明。Ps 運動エネルギー依存性から, レーザー冷却前に熱化で十分 Ps を冷却できれば, レーザー冷却できる可能性 → **冷却した材料で実験**

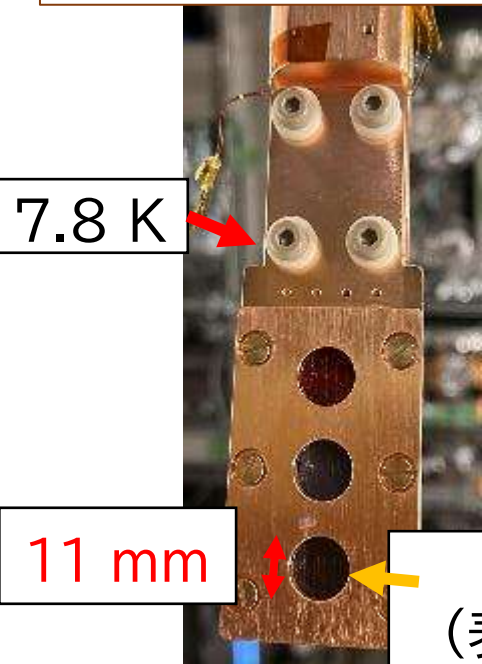


冷凍機で冷却したシリカエアロゲルの Ps レーザー遷移実験 (2023年12月, 2024年2月 @ KEK-IMSS-SPF-B1, 5 keV)

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



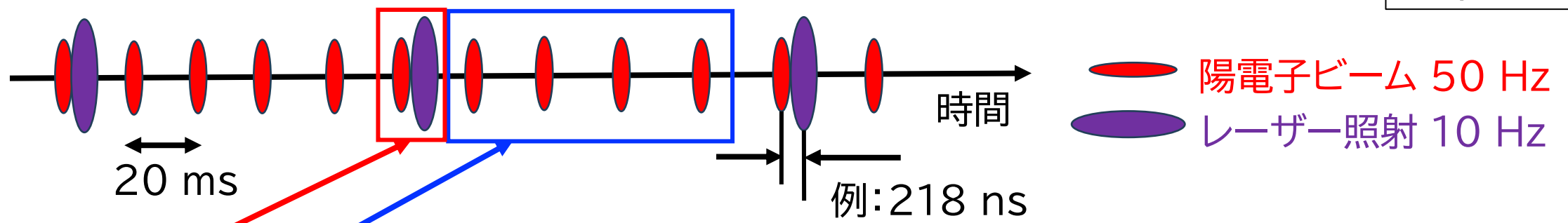
サンプルホルダー



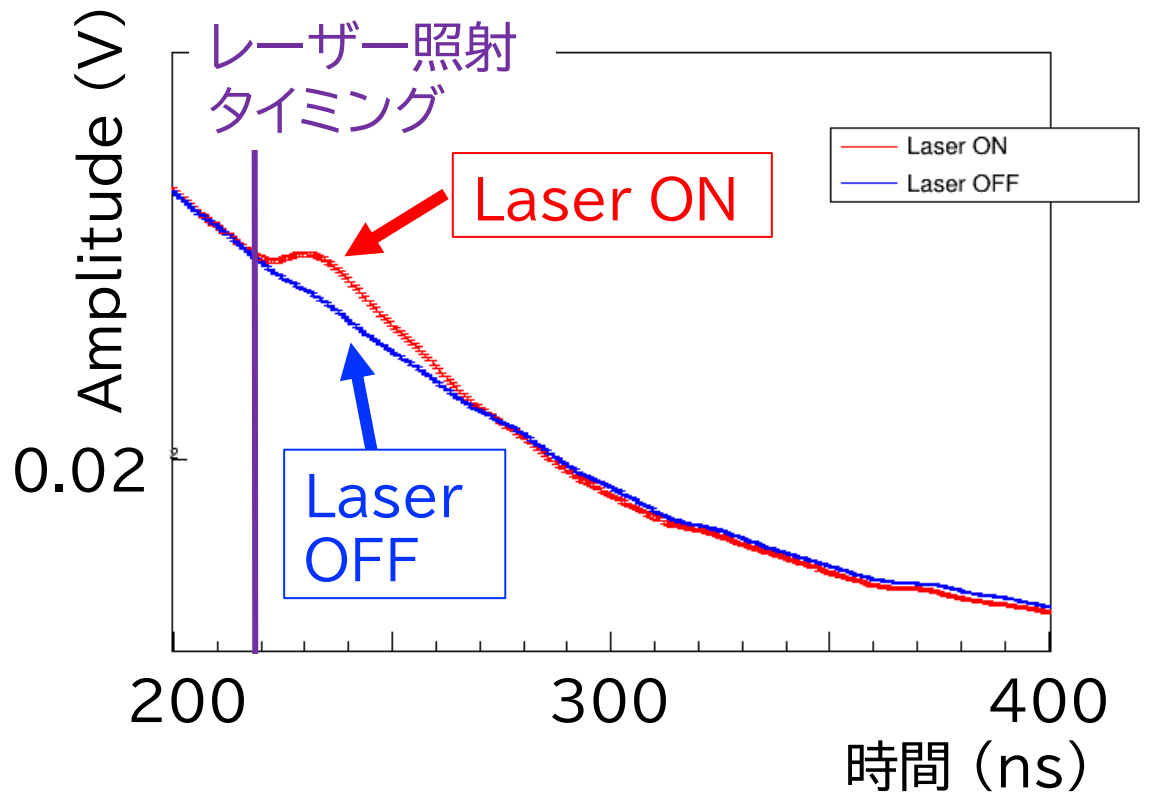
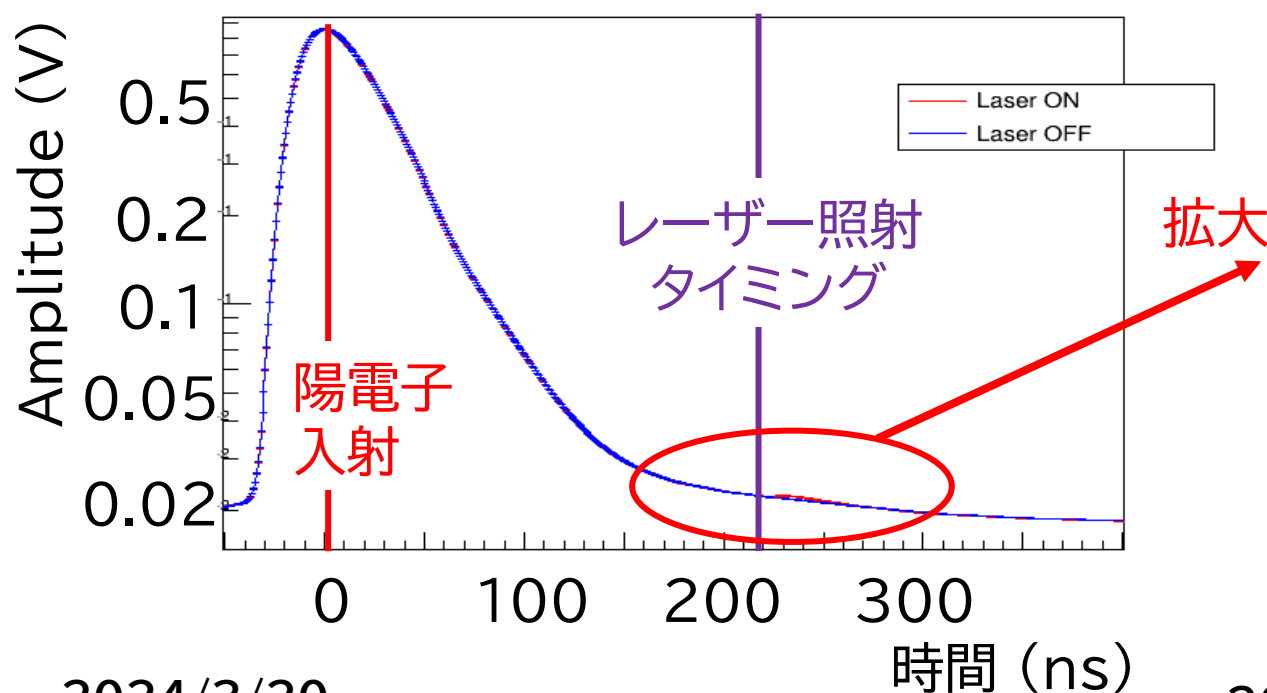
シリカエアロゲル
(表面にプラズマCVD
緻密シリカ層 103 nm)

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。

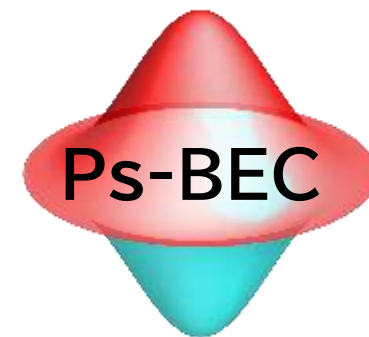
詳細は、
素粒子実験領域
20pT2-4(牧)



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



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。
- 超高密度陽電子ビーム生成に向けて, 高効率陽電子蓄積・輝度増強・パルス圧縮技術を開発。

<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>