

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, 難波俊雄^A,

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

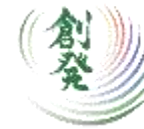
<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/>
<https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/psbec>
<https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/psbec en>

令和 7 (2025) 年 3 月 19 日
日本物理学会 2025年春季大会
@ オンライン開催



謝辞

本研究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 R&D search 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, JP19H01923, 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

実験は高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所放射光共同利用実験課題(課題番号: 2017P009, 2018G100, 2020G101, 2020G631, 2022G087, 2023G157, 2024G143)により実施しました。

<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. KEK 低速陽電子実験施設 (SPF) 地上のセットアップ改造
4. 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

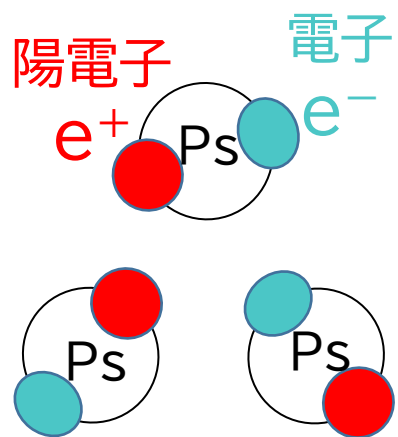
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 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)

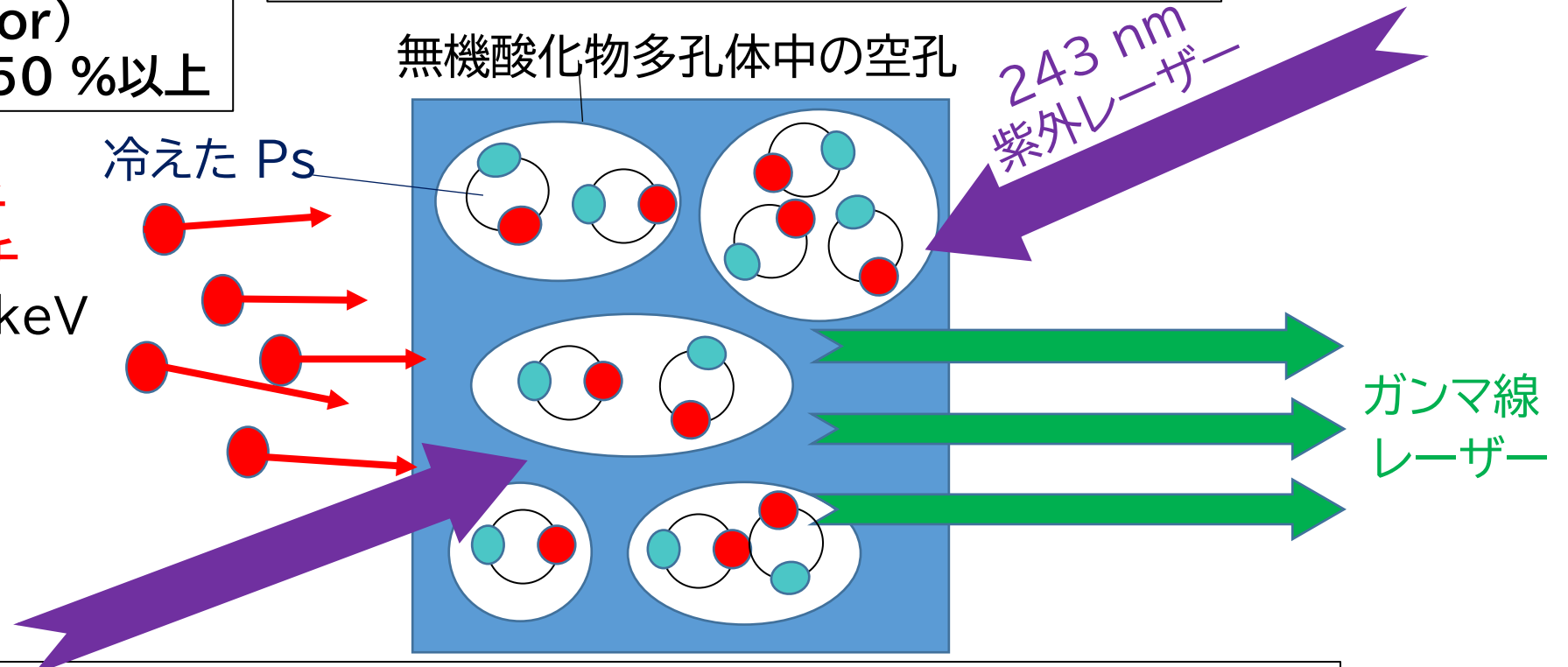
Ps 生成・濃縮・冷却の 3 機能をもつ

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

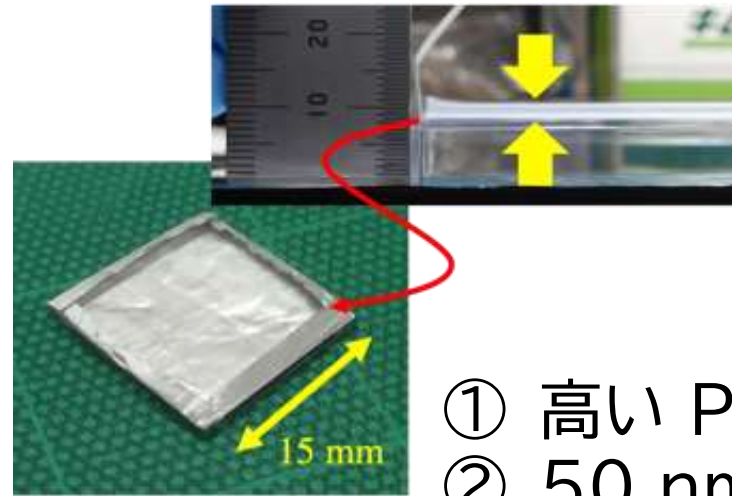
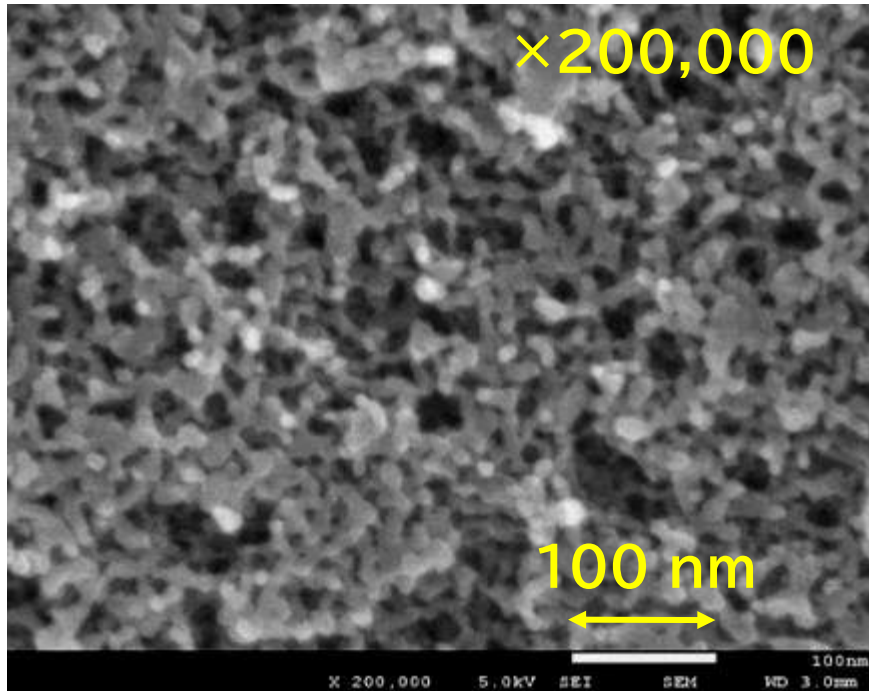
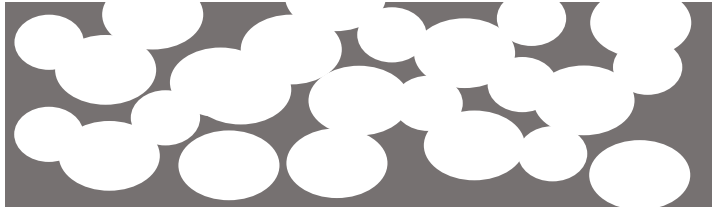
機能② Psを高密度に濃縮 (condenser)
→ 50 nm—100 nm 空孔

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 $\approx 50 \text{ nm}$
厚さ 0.5 mm

- ① 高い Ps 生成率 ($\approx 35 \%$)
- ② 50 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

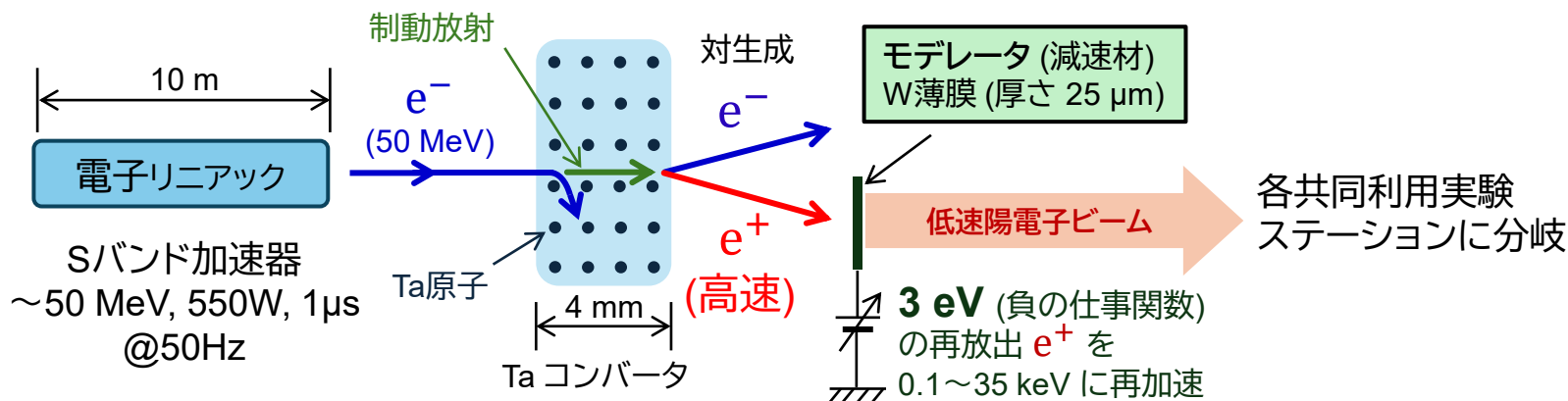
他に、ナノプロセッシング、ナノインプリント、規則配列シリカナノ材料(以上シリカ)、シリカ以外のナノ多孔質材料を試し中

低速陽電子実験施設

(KEK物構研 和田氏
よりスライド提供)



低速陽電子ビームの作り方@SPF

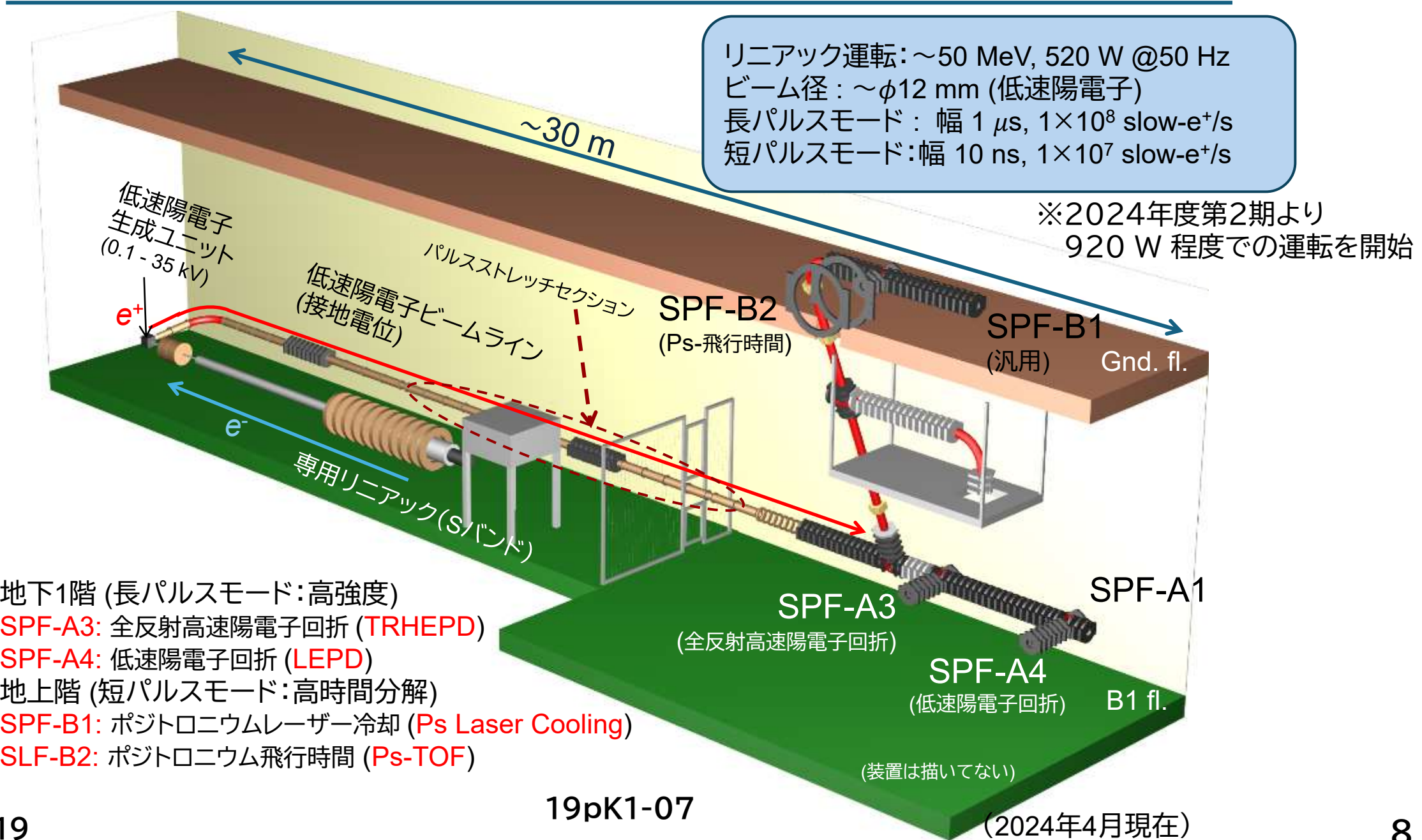


※2024年度第2期
より 920 W 程度
での運転を開始

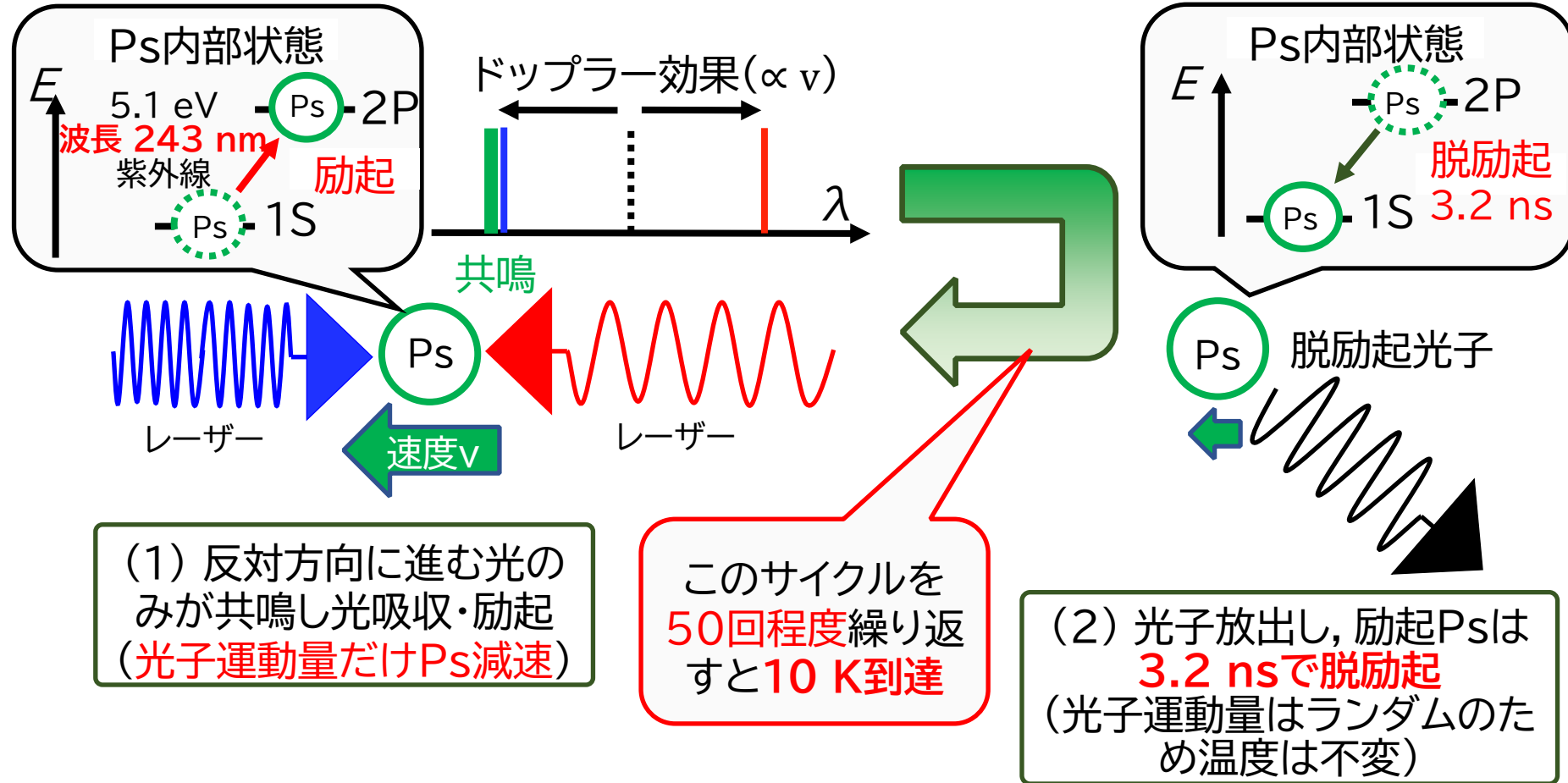
2025/03/19

KEK物構研 低速陽電子実験施設

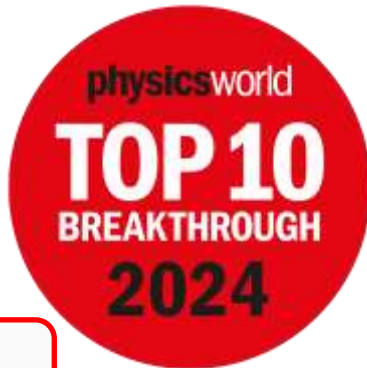
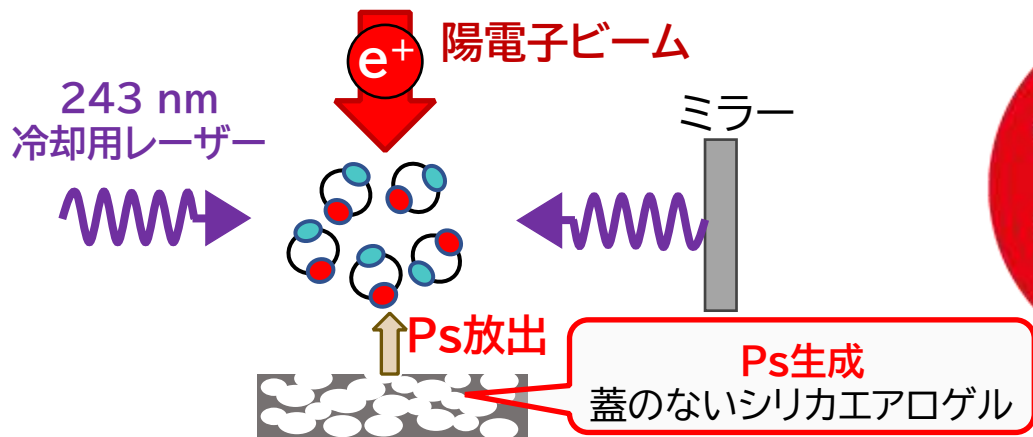
(KEK物構研 和田氏
よりスライド提供)



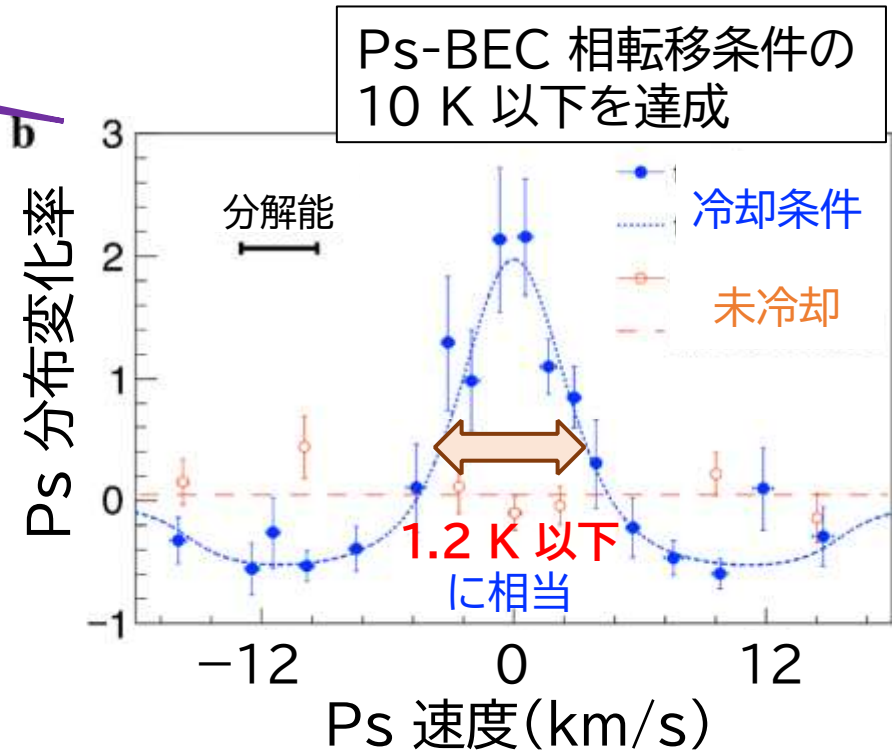
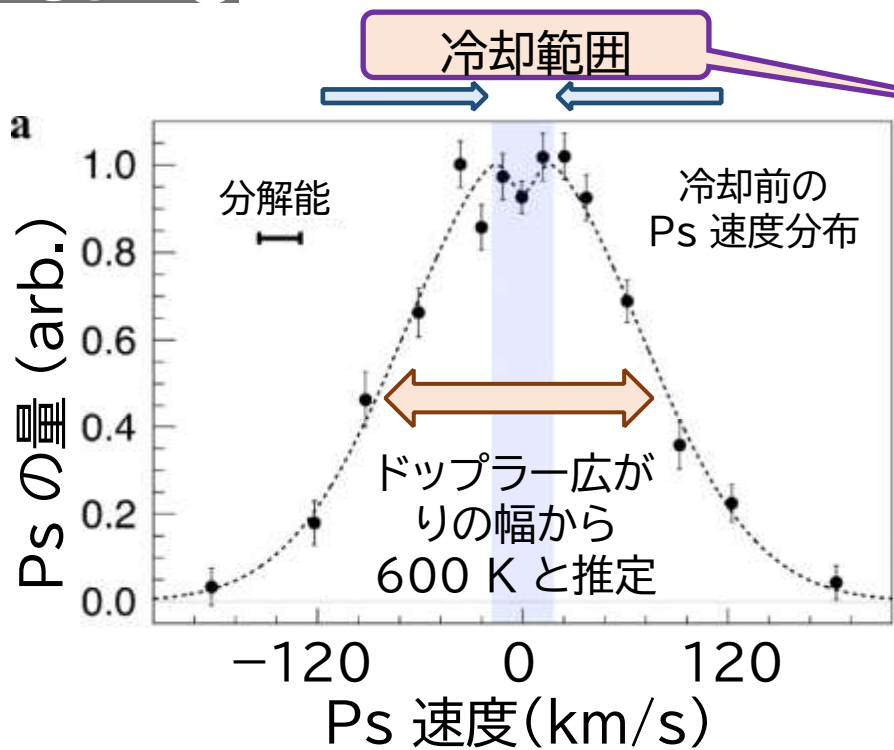
Ps レーザー冷却の原理



真空中でPs 一次元レーザー冷却に成功



(2023年5月
@ KEK-IMSS-
SPF-B1, 5 keV)



Ps-BEC 相転移条件の
10 K 以下を達成

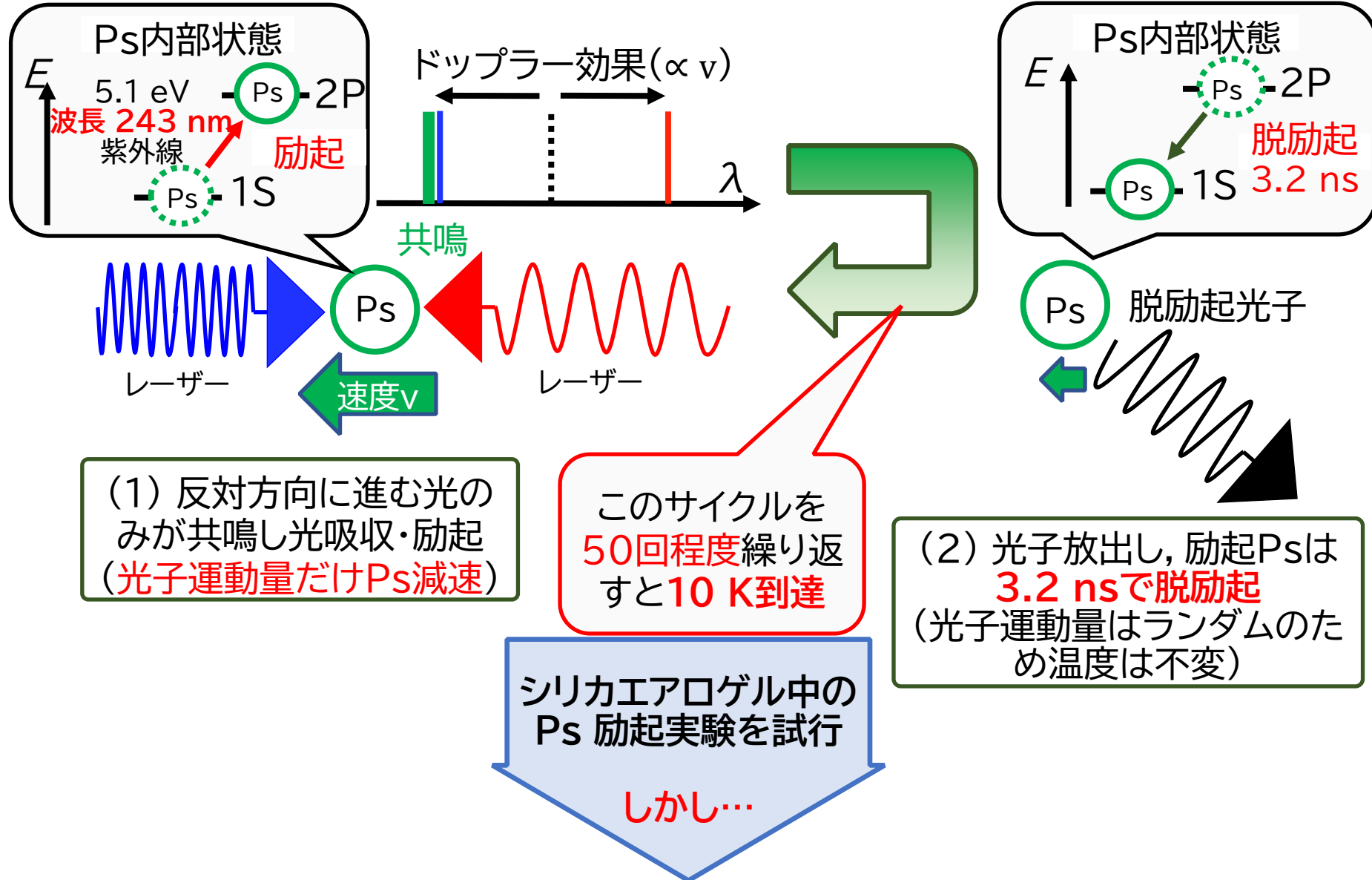
Article
Cooling positronium to ultralow velocities with a chirped laser pulse train

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07912-0>
Received: 13 October 2023
Accepted: 6 August 2024
Published online: 11 September 2024
Open access

When laser radiation is skilfully applied, atoms and molecules can be cooled¹⁻³, allowing the precise measurements and control of quantum systems. This is essential

Nature 633, 793 (2024).
<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07912-0>

Ps レーザー冷却の原理



レーザー冷却を阻害する現象の発見と課題

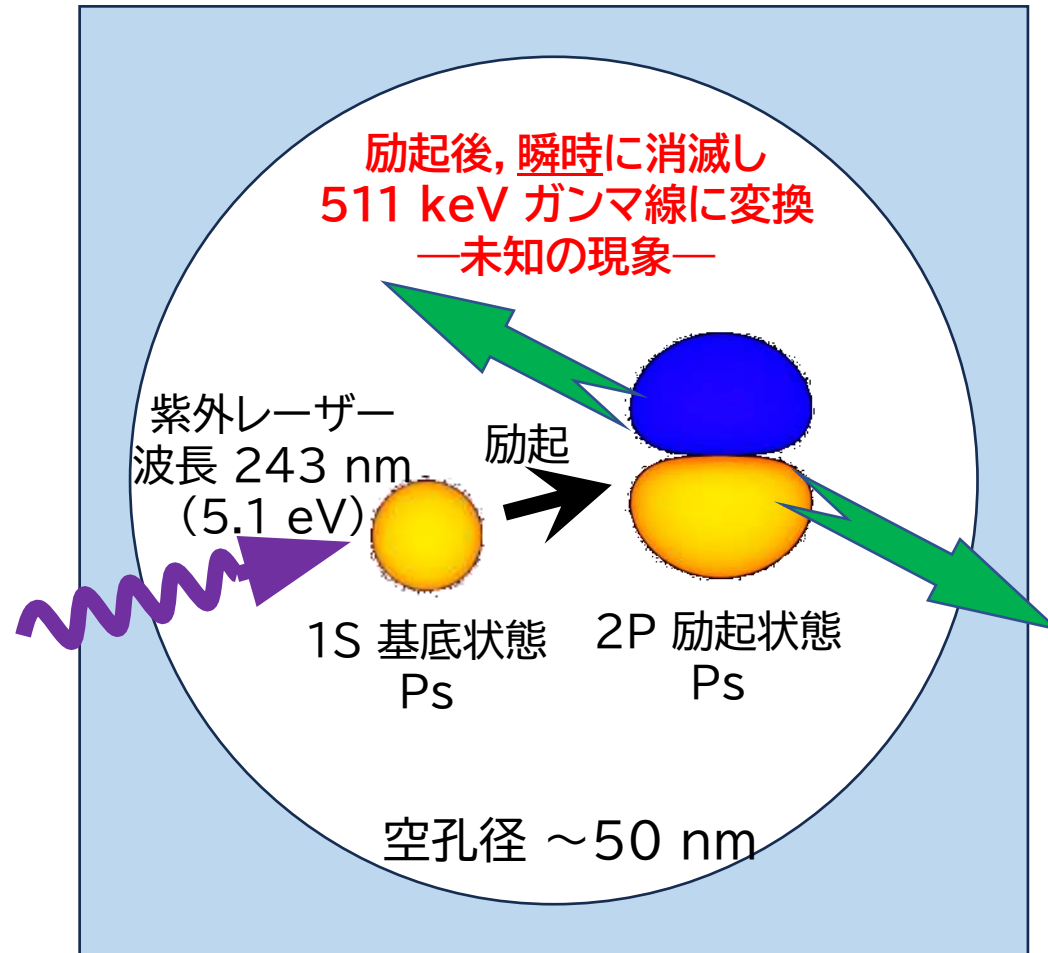
適切な組成と構造をもつ
新規材料開発が急務となった

【課題】

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

【室温での測定で判明したこと】

- レーザー波長243 nm付近でのみ
消滅 → 2P状態になって消滅
- 共鳴幅から計算される寿命 ~
数100 fs ~ 空孔中のPs平均自由
時間 → 空孔壁との衝突が関与？
- Ps生成から2P励起までの時間が
長いほど、消滅率が小さい

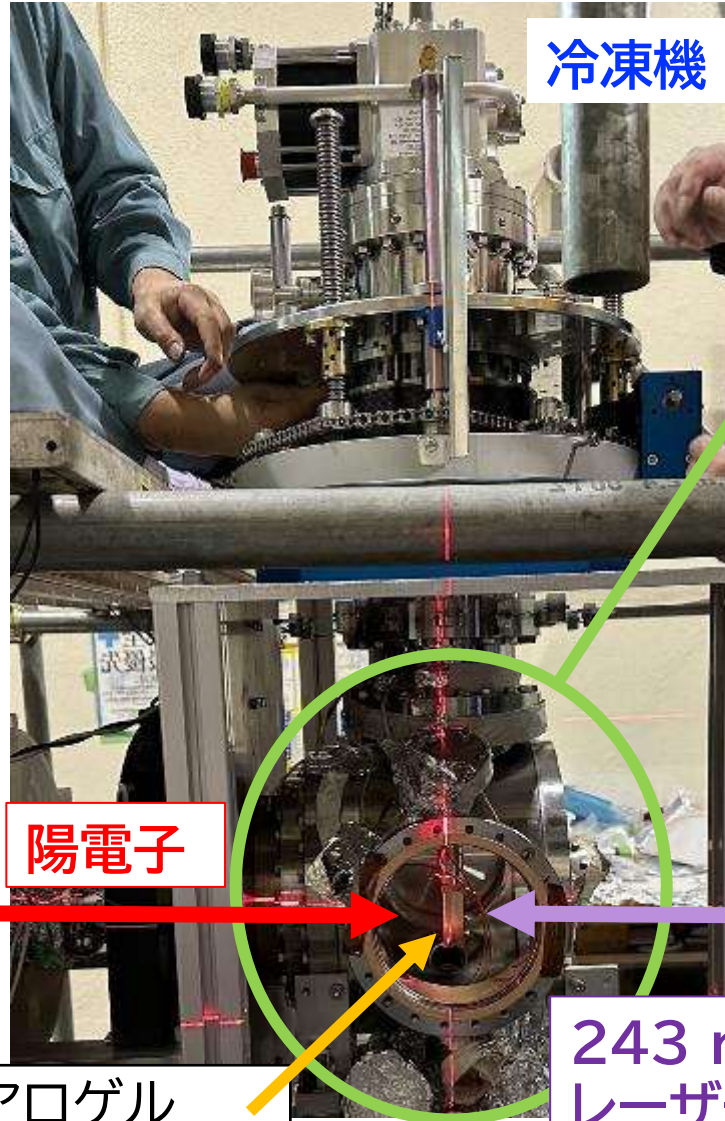


シリカエアロゲル

- 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の Ps レーザー遷移実験 (2024 年 6 月 @ KEK-IMSS-SPF-B1, 7.5 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



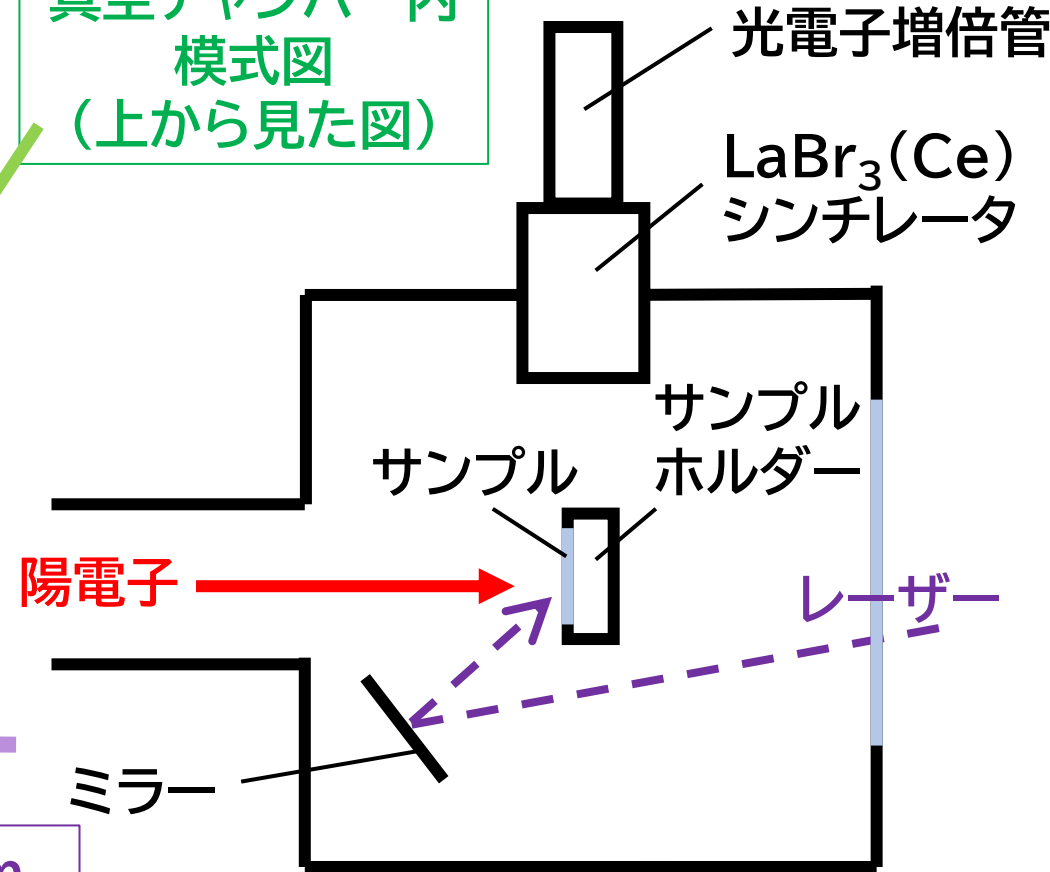
サンプルホルダー
(8 K)



11 mm

シリカエアロゲル
(表面にプラズマCVD
緻密シリカ層 103 nm)

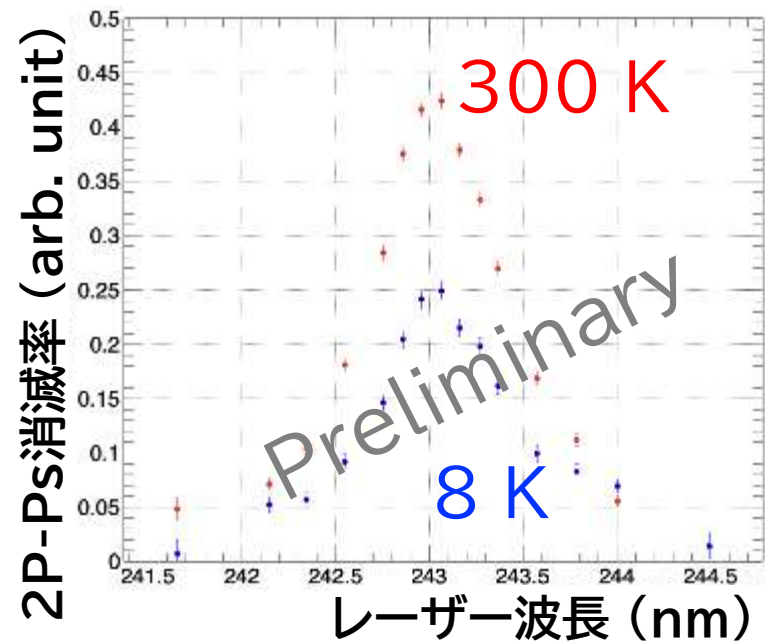
真空チャンバー内
模式図
(上から見た図)



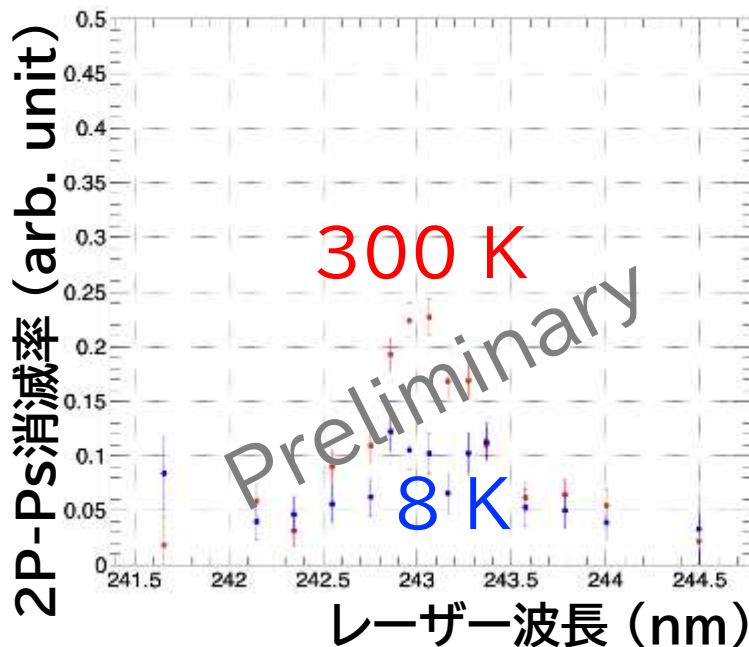
19pK1-07

ナノ空孔中における2P励起状態ポジトロニウムの消滅現象の研究 (暫定結果と今後)

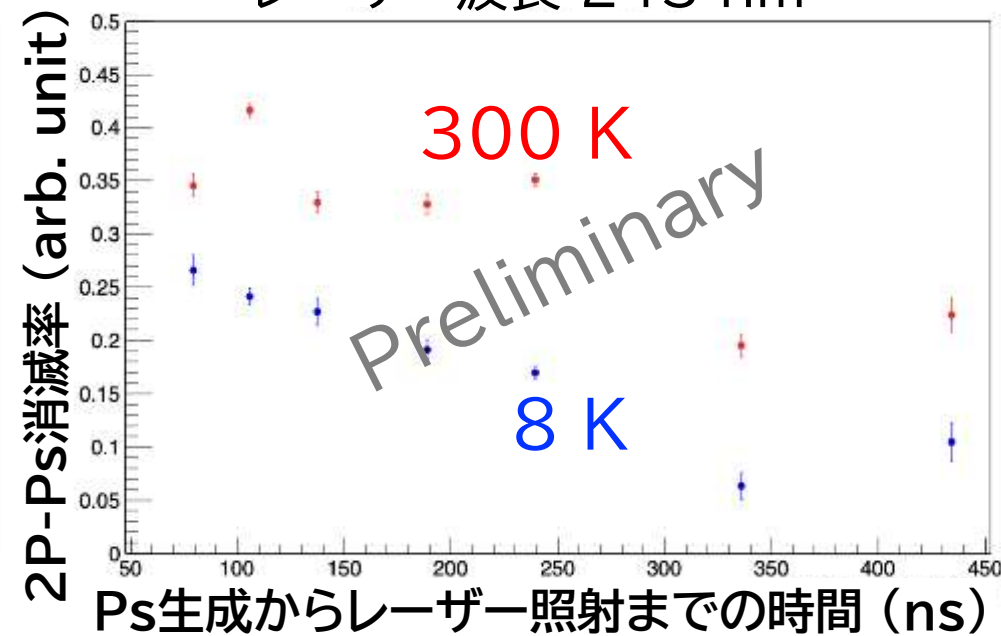
レーザー照射までの時間 110 ns



レーザー照射までの時間 430 ns



レーザー波長 243 nm



- 室温より低温の方が、2P-Psの消滅率が小さい
- 室温・低温とも、レーザー波長243 nm付近でのみ消滅
- 室温・低温とも、Ps生成から2P励起までの時間が長いほど、消滅率が小さい

ナノ空孔中における2P励起状態ポジトロニウムの消滅現象の研究 (暫定結果と今後)

2P-Psがシリカエアロゲル中の空孔壁に衝突することで崩壊しており、熱化によってPs温度が低下することで2P-Psの崩壊率が減少している可能性がある

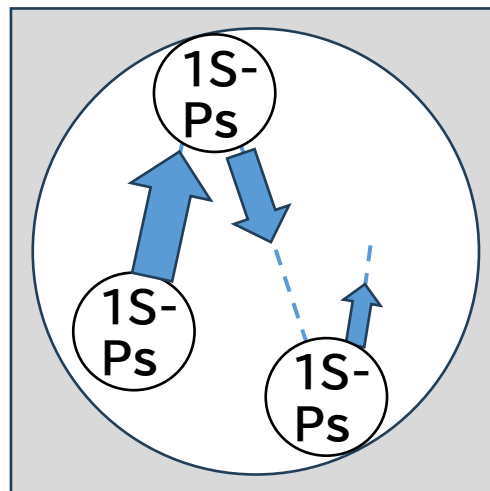
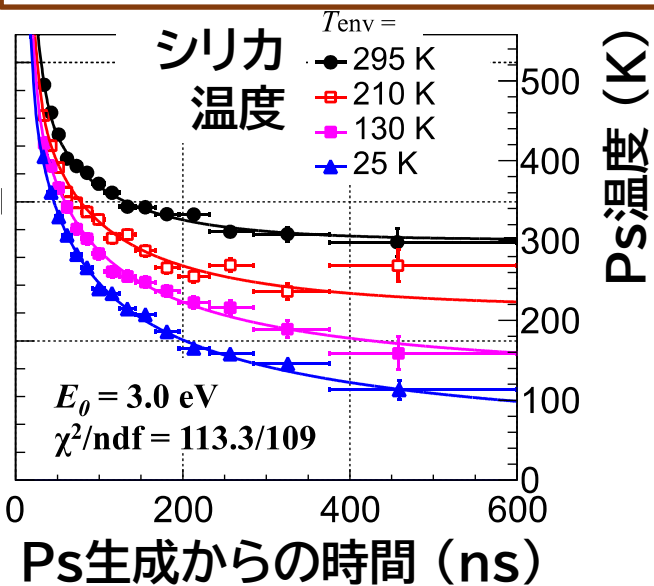
【今後の方策】

要素のパラメータ化と
2P-Ps崩壊率計測

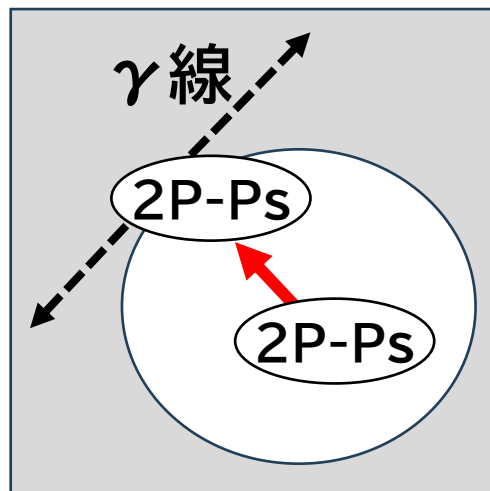
予想される要素:

- Ps温度
(運動エネルギー)
- 空孔構造
- 化学組成

シリカエアロゲル中における 熱化によるPs温度の低下



〈1S-Psの熱化〉



〈2P-Psの消滅〉

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

SPF地上階実験室レーザーブース整備

(KEK物構研 和田氏
よりスライド提供)

レーザー実験用
間仕切り

北方向

※ SPF-B1,B2
ビームラインは
記載省略

エレベーター

定盤

エア

<南側>
レーザーブース
運用時出入口

<北側>
レーザーブース
運用時非常口

2024/11/22に以下を実施

- 安衛室による安全確認
- 施設部による安全確認
- PF運転当番への説明会
- PFレーザー使用安全審査

19pK1-07

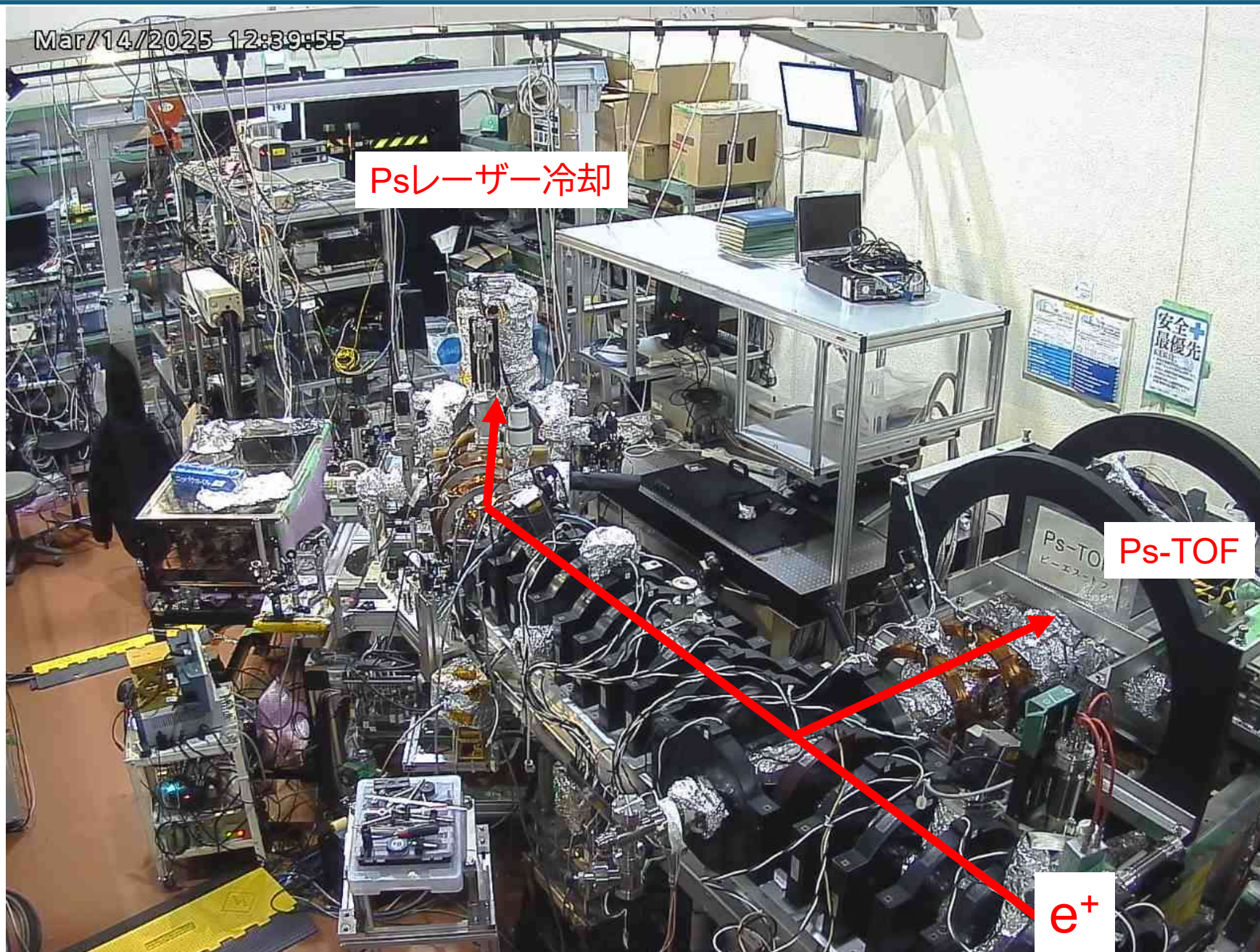
SPF地上階実験室レーザーブース整備

(KEK物構研 和田氏
よりスライド提供)



SPF地上階実験室レーザーブース内の様子 (2025.3.14)

(KEK物構研 和田氏
よりスライド提供)



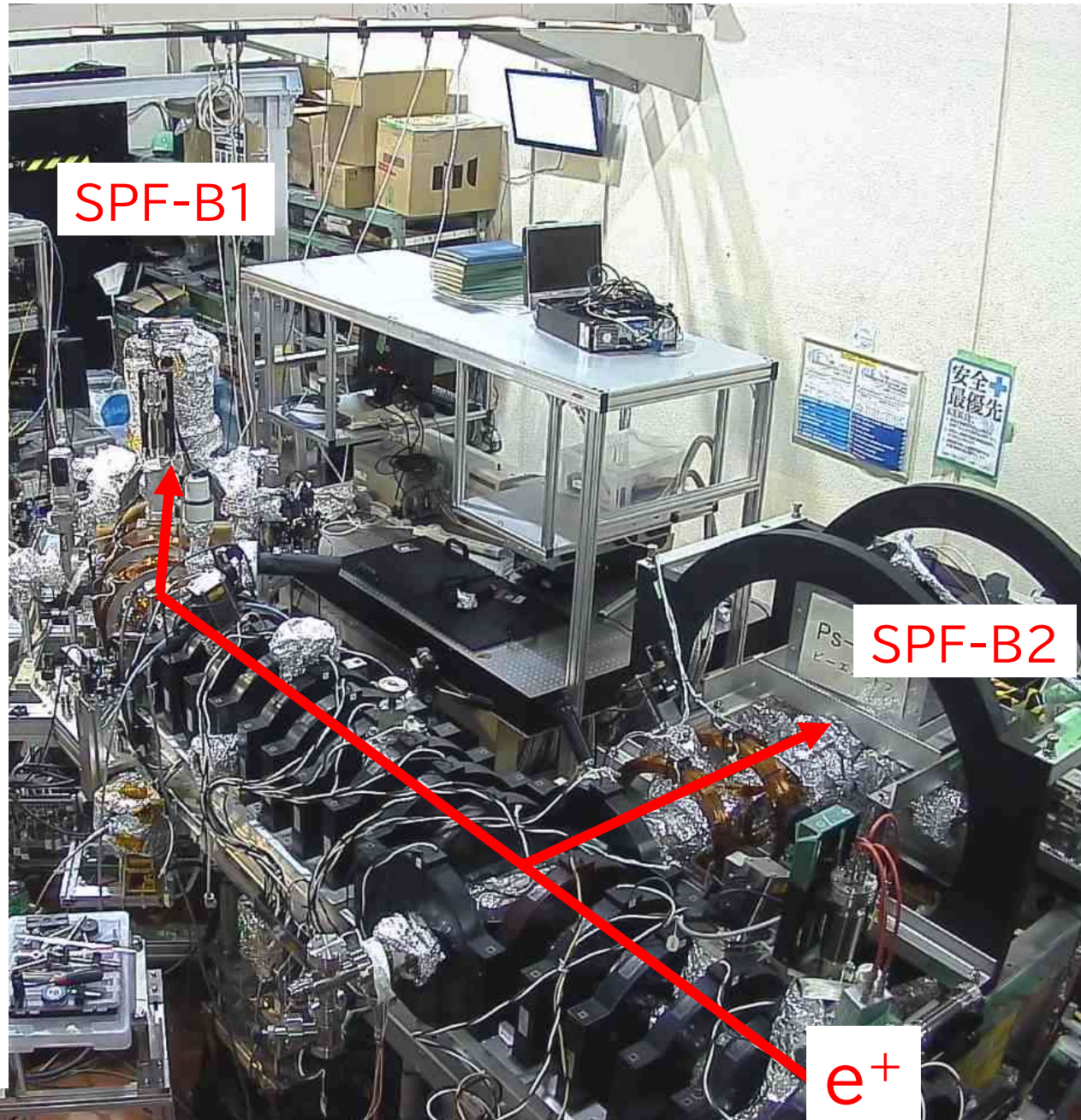
Ps-BEC を目指した研究推進のための改造(2024年11月以降, 継続中)

【改造前】

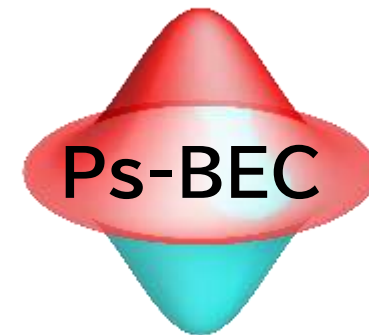
- SPF-B1 で Ps レーザー遷移実験, SPF-B2 で Ps-TOF 測定
- ビームライン間で冷凍機を移設しながら, 冷却試料での実験
- レーザー照射は SPF-B1 のみ

【改造後】

- Ps レーザー遷移実験と Ps-TOF 測定を SPF-B2 に集約
- レーザー光学系を解体, よりコンパクトな非磁性定盤を新たに導入し, Ps 遷移用レーザーを SPF-B2 ビームライン直近に移設
- 冷凍機ヘッドも2台体制とし, 冷却した試料での Ps レーザー遷移実験と Ps-TOF 測定の切り替えを容易に
- 低温 Ps に対する Ps-TOF 測定感度向上のため, レーザー電離 Ps-TOF (LEPTOF) システムを 2025 年度以降に構築(共同利用実験課題 2025G151 採択済であり, 調査研究を実施中)



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. 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おり, 研究推進のため KEK-IMSS-SPF 地上階実験室レーザーブース整備に合わせ, セットアップの改造を行っている。

【今後の展望】

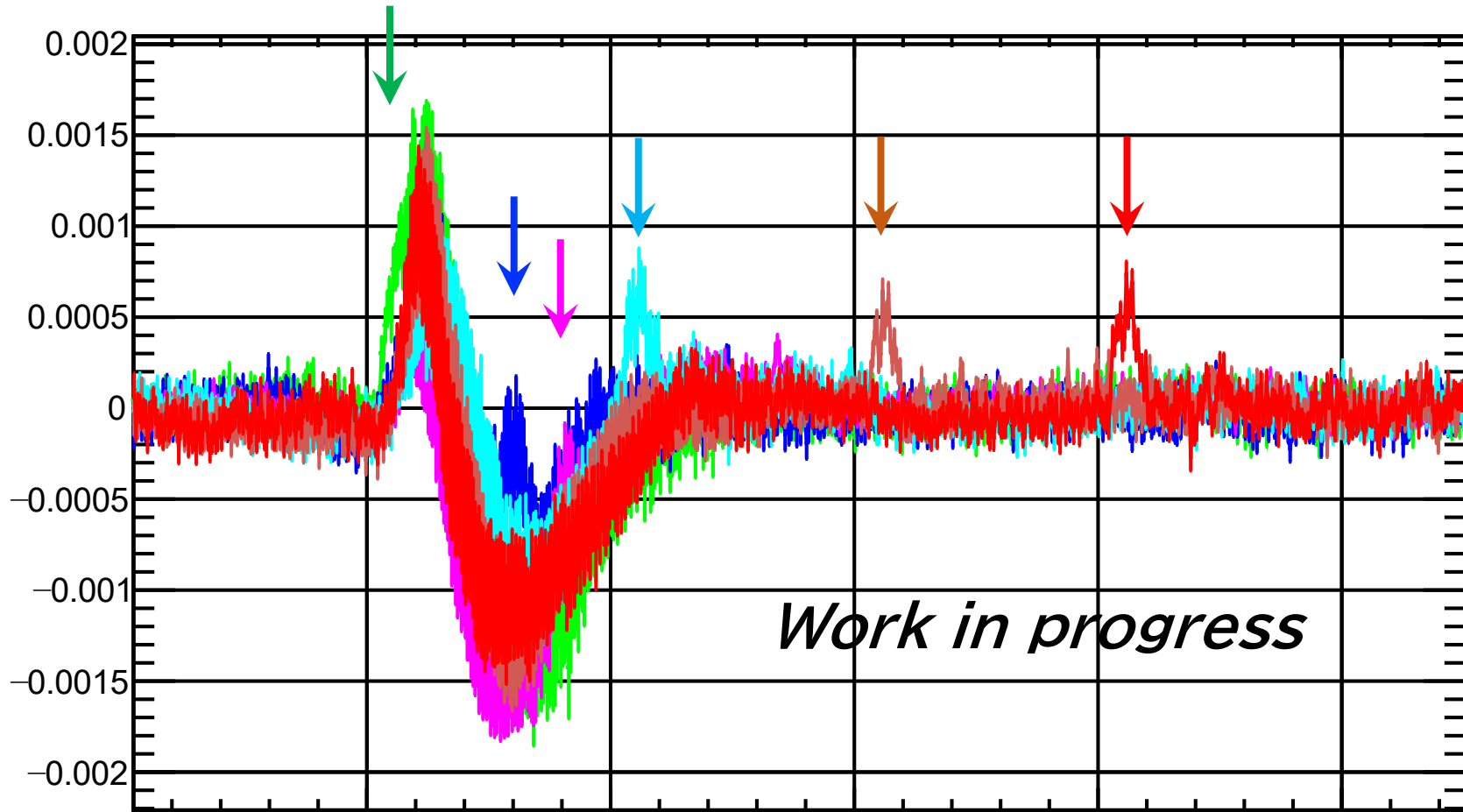
- 低温 Ps-TOF 測定による各種試作ナノ材料の詳細な性能評価, 低温材料のナノ空孔中での Ps レーザー遷移実験により, BEC 実現に最適な Ps 生成材を開発。
- 超高密度陽電子ビーム生成に向けて, 高効率陽電子蓄積・輝度増強・パルス圧縮技術を開発。

<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>

バックアップ

レーザー電離 Ps の信号を示唆するデータを得た (2024年11月)

レーザー照射によるガンマ線強度変化
(光電子増倍管信号強度の差, ON-OFF (V))



0

50

70

100

200

300

Ps 生成からレーザー照射
までの時間 (ns)