

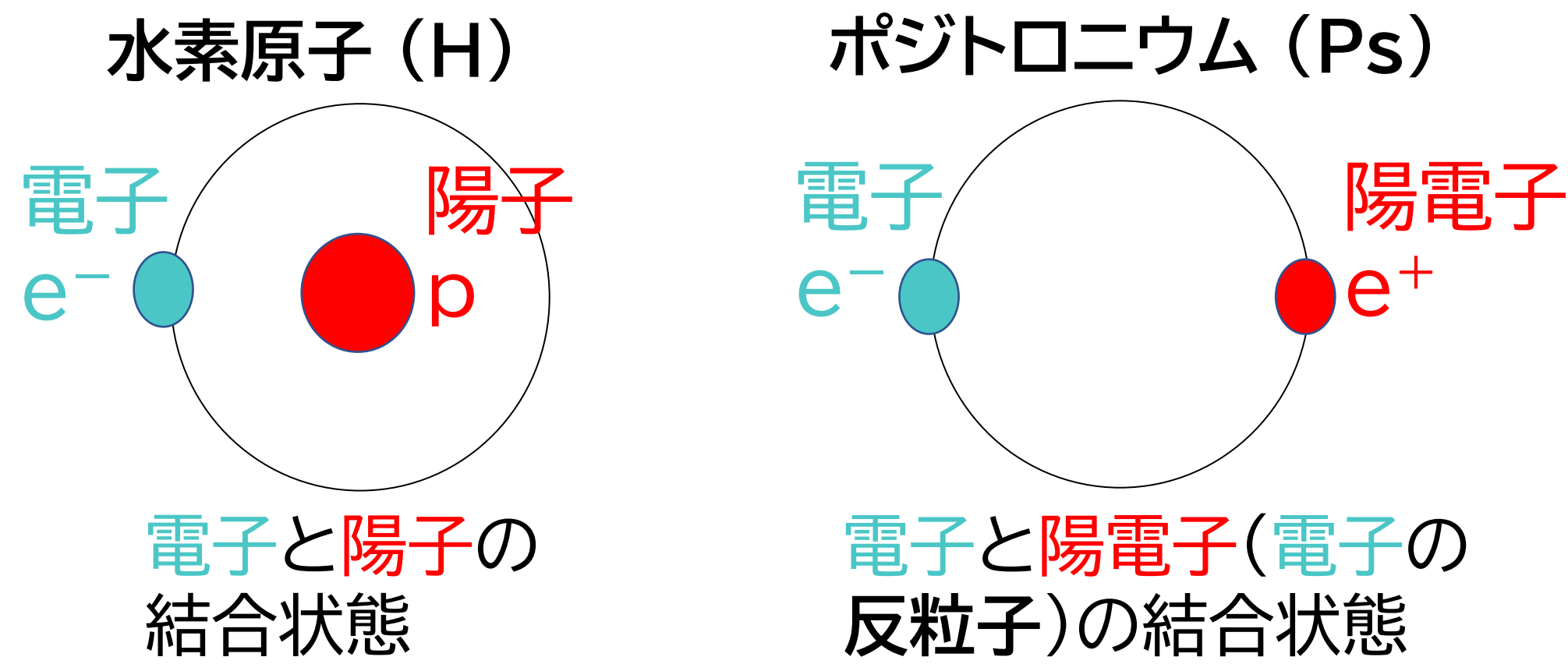
低温の多孔体表面から放出されるポジトロニウムのエネルギー分布測定 Measurement of positronium energy distribution emitted from the surface of porous materials at cryogenic temperatures

石田明¹, 難波俊雄¹, 大島永康², オークブライアン², 満汐孝治², 伊藤賢志², 兵頭俊夫³, 望月出海³, 和田健³, 前川雅樹⁴

1 東京大学, 2 産総研, 3 KEK-物構研, 4 量研高崎

ポジトロニウム (Ps) を使った研究

宇宙から「消えた反物質」の謎を解明するために必須となる
未知の物質・反物質非対称性(新現象)を
反物質系の精密計測結果と理論のズレから探る



Ps 研究のポイント

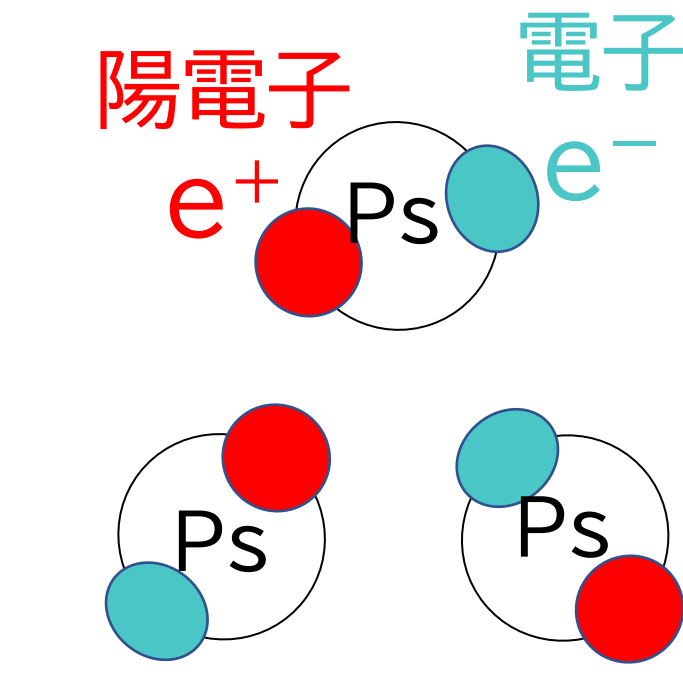
- 素粒子同士の束縛系なので、計測値と理論値の高精度比較が可能
- 142 ns(700万分の1秒)というきわめて短い寿命で消滅してしまう → チャレンジング

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?

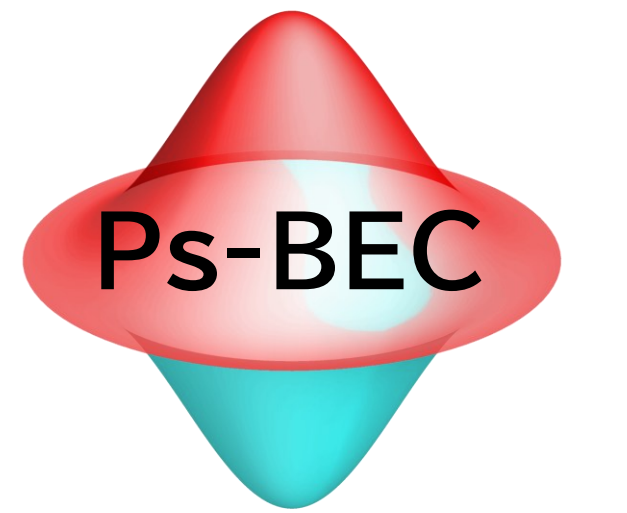


反物質原子
ポジトロニウム(Ps)
(古典極限系)
 10^{15} cm^{-3}
150 K

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
- 反物質に働く重力を原子干渉計で測定
 - 511 keV ガンマ線レーザー

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)



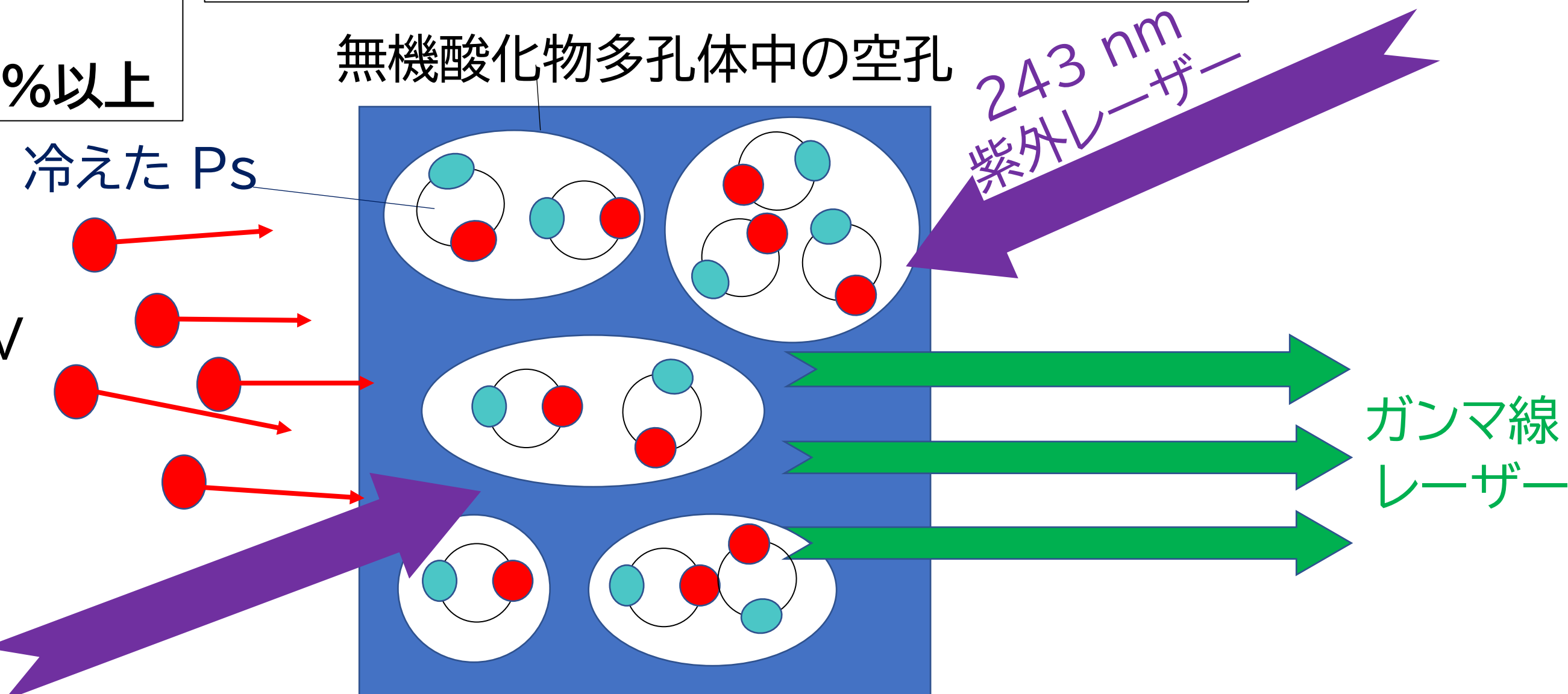
反物質レーザー
Ps-BEC
(量子凝縮体)
 10^{18} cm^{-3}
10 K

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
 $1.5 \times 10^8 \text{ e}^+$, 5 keV
を多段階増強システムで
φ 6 μm 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ナノ多孔質材料: シリカ(二酸化ケイ素 SiO₂)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 ~ 50 nm
厚さ 0.5 mm

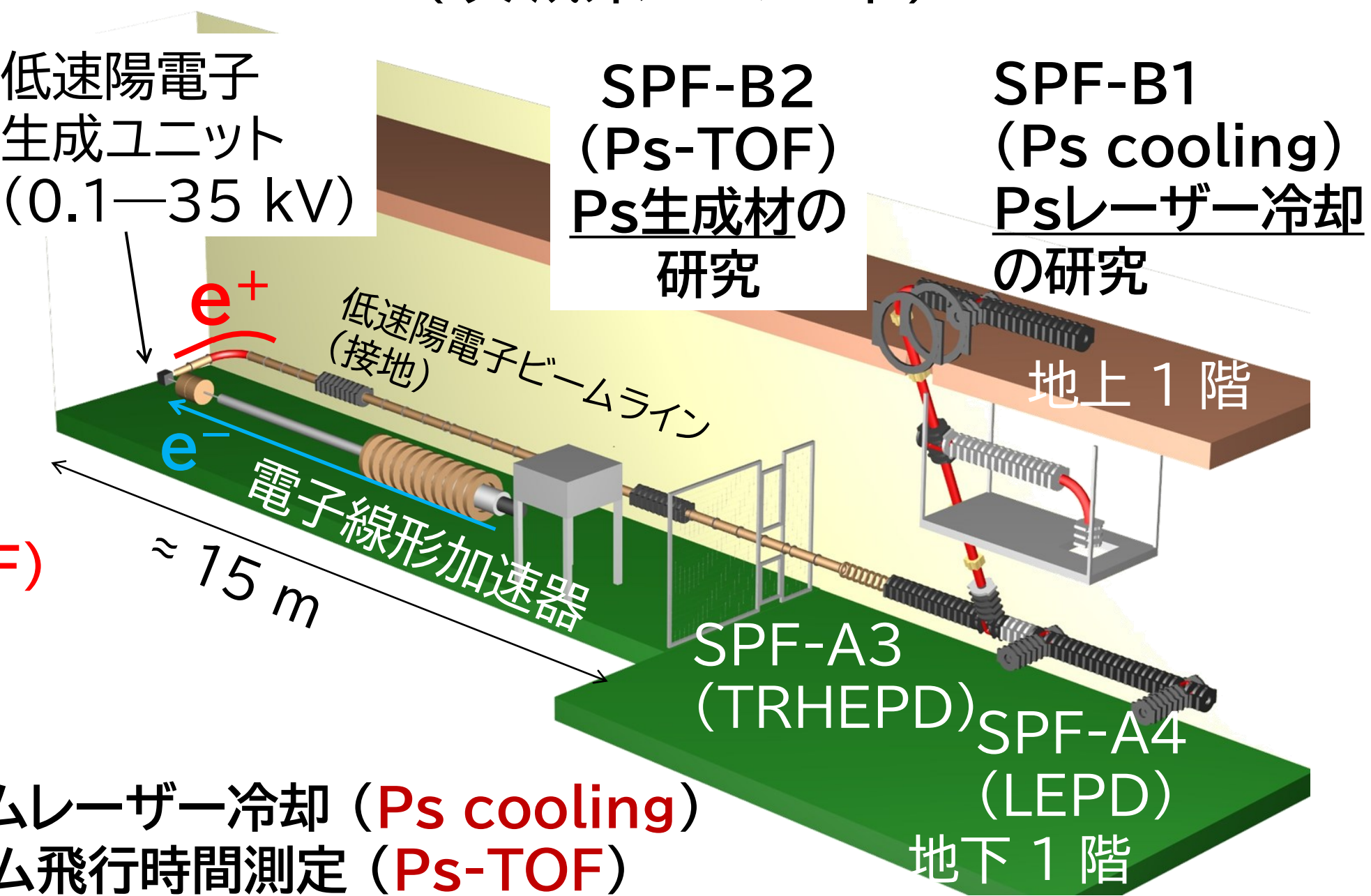
- 高い Ps 生成率 (~ 35%)
- 50 nm 空孔
- 243 nm 紫外光透過率 85%

- Ps 生成エネルギーなど性能評価
- レーザー冷却原理実証

⇒ KEK 低速陽電子ビームラインで実験

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) @ 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)

Ps飛行距離 $L=39 \text{ mm}$

ガンマ線検出時刻 t

幅 $\Delta L=2.2 \text{ mm}$

鉛スリット

シリカエアロゲル

ポジトロニウム(Ps)

陽電子入射 = Ps生成 ($t=0$)

Ps崩壊(寿命 $\tau=142 \text{ ns}$) で放出したガンマ線

真空チャンバー (大気)

パルス陽電子ビーム (超高真空)

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。

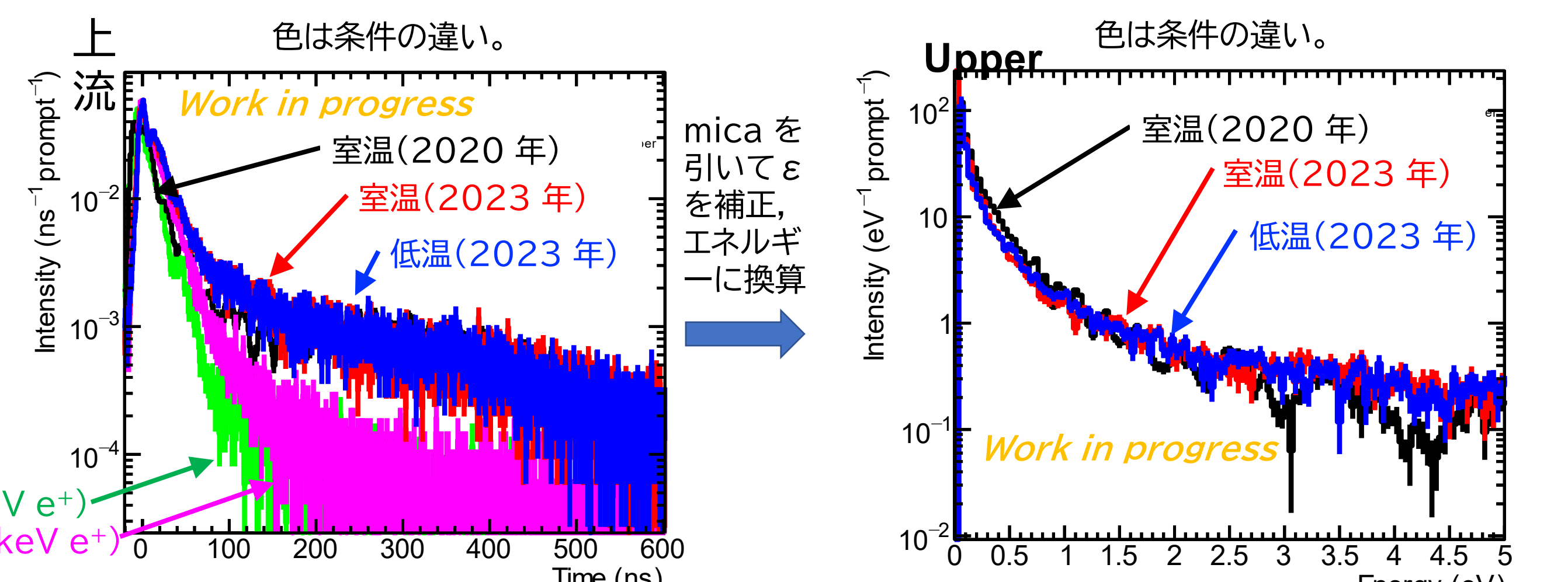
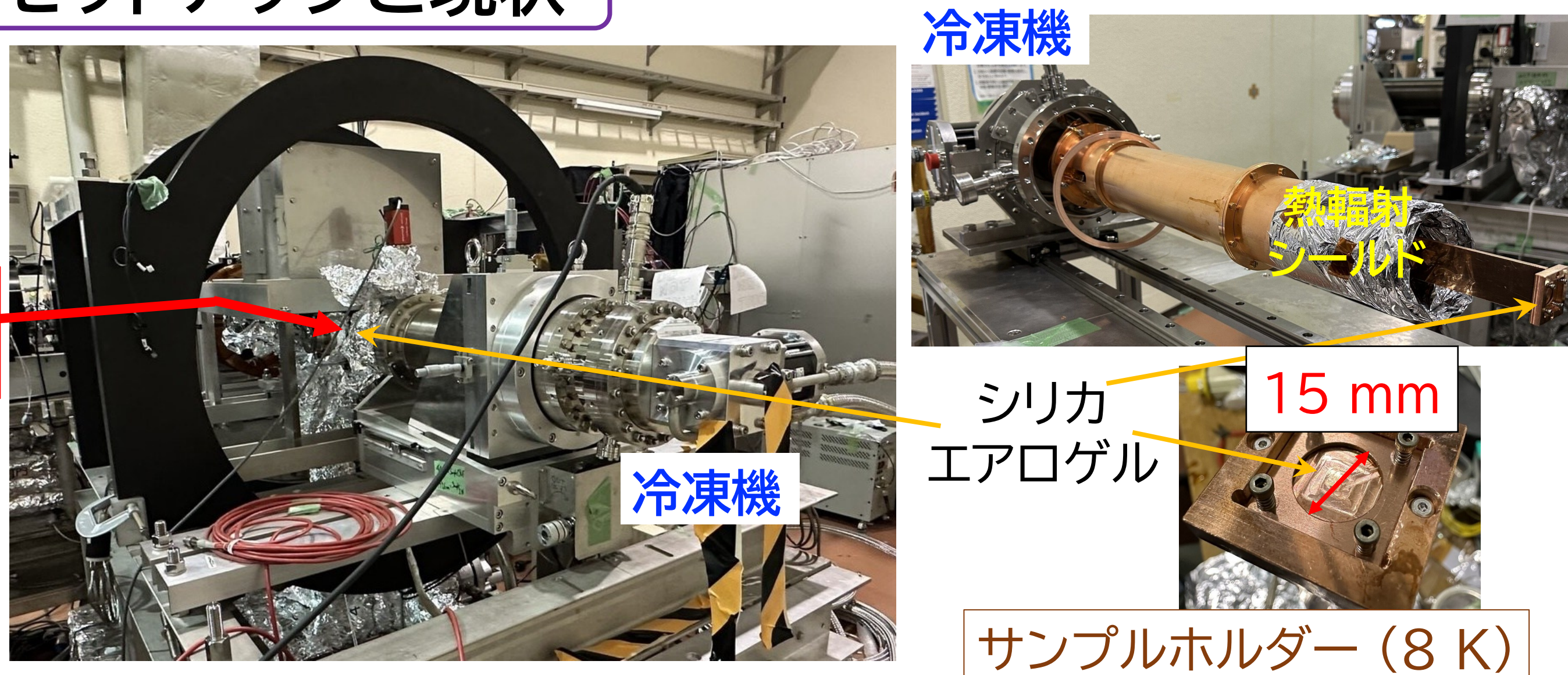
Ps 運動エネルギー
 $E = \frac{m_{Ps} L^2}{2t^2}$
(m_{Ps} はPs質量 = 2 × 電子質量)

検出効率
 $\epsilon \propto \frac{\Delta L}{L} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$. ($t = \tau$ で最大)

- 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。

実験セットアップと現状

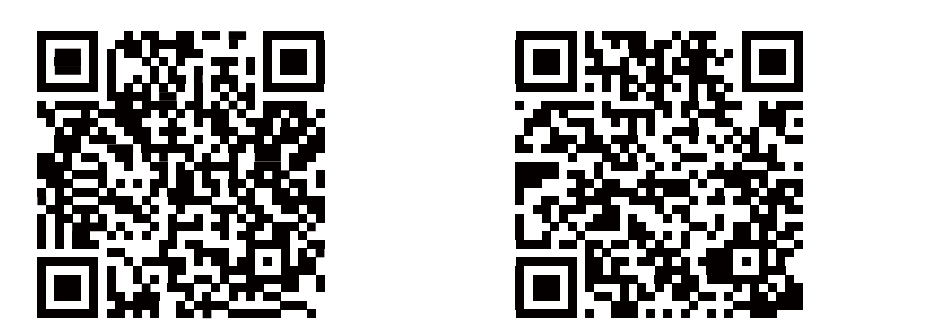
Ps-TOF 低温シリカエアロゲル: 時間およびエネルギースペクトル



スペクトルへの 5 keV 以下での陽電子入射エネルギー依存性において室温と低温では差がなかった。数値シミュレーションから入射エネルギーが低く、計測感度が不足していることが示唆された。10 keV での Ps-TOF 結果(解析中)に基づき低温 Ps 感度向上のためセットアップ改良を検討中。

謝辞
本研究の一部は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の助成を受けたものです。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)により実施しました。

創発的研究支援事業
Fusion Oriented R&D for disruptive Science and Technology



研究成果 研究グループ