低温シリカエアロゲルの ポジトロニウム飛行時間測定

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, 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 5 (2023) 年 9 月 18 日
第 78 回年次大会(2023 年) @ 東北大学

18aA102-5

謝辞

創発的研究支援事業
Fusion Oriented REsearch for disruptive Science and Technology

本研究の一部は以下の助成を受けたものです。

- JST 創発的研究支援事業 JPMJFR202L
- JSPS科研費 JP23H05462

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

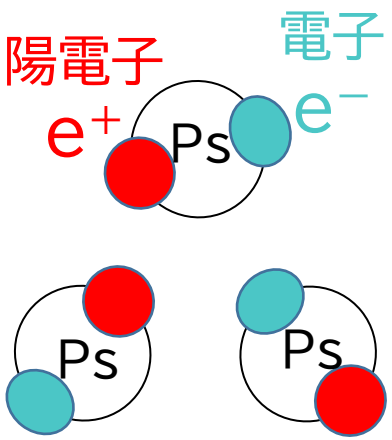
1. ポジトロニウム（Ps）のボース・アインシュタイン凝縮（BEC）
   - 反物質の新量子多体系である低温量子多体系凝縮相
     ＝反物質レーザーを実現

2. Ps-BEC 実現の必須要素技術：高密度Ps生成材

3. 低温シリカエアロゲルのポジトロニウム飛行時間測定（Ps-TOF）

4. Ps-TOF 解析のための Ps 放出シミュレーション

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



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

ボース・アインシュタイン凝縮（BEC）

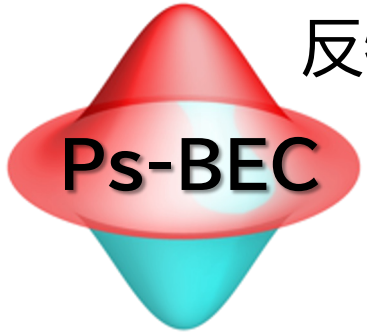
- 原子の多体系が 高密度 かつ 冷たい ときに起こる相転移
- 集団中のほぼすべての原子が単一の量子状態(基底状態)になる

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

通常の物質：
- 超伝導
- 超流動

反物質は？



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

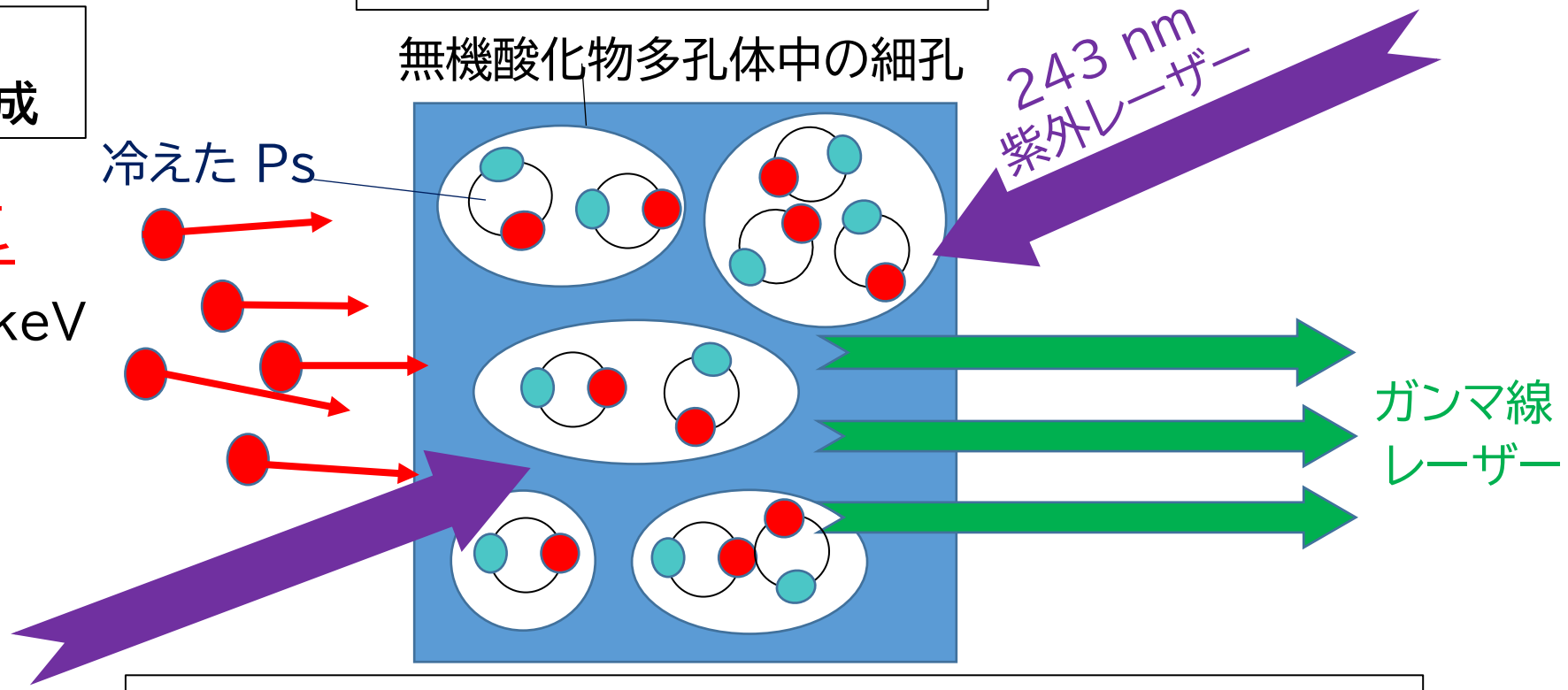
BEC: K. Shu *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **49**, 104001 (2016).
熱化: K. Shu *et al.*, Phys. Rev. A **104**, L050801 (2021)

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 Ps を生成する

機能① 陽電子から 高効率で Ps を生成

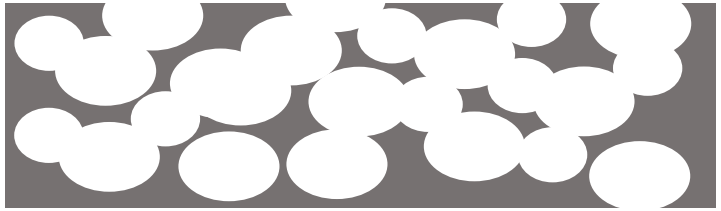
高密度偏極陽電子 (e^+) ナノ秒バンチ
1.5×10^8 e^+, 5 keV
を多段輝度増強
システムで
ø 6 μm に集束

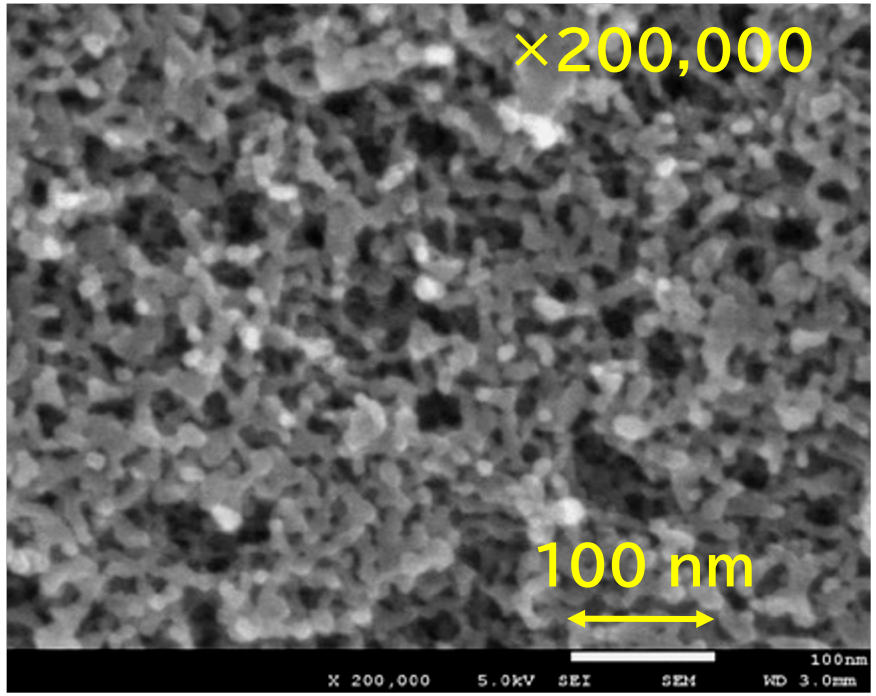
機能② Psを高密度に濃縮

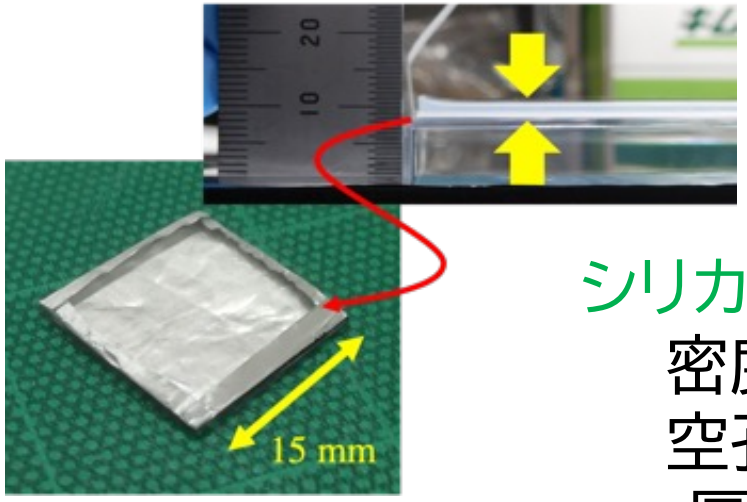


機能③ Ps 冷却 熱化冷却 → 熱化効率の高い組成・構造
レーザー冷却 → 243 nm 紫外光透過

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





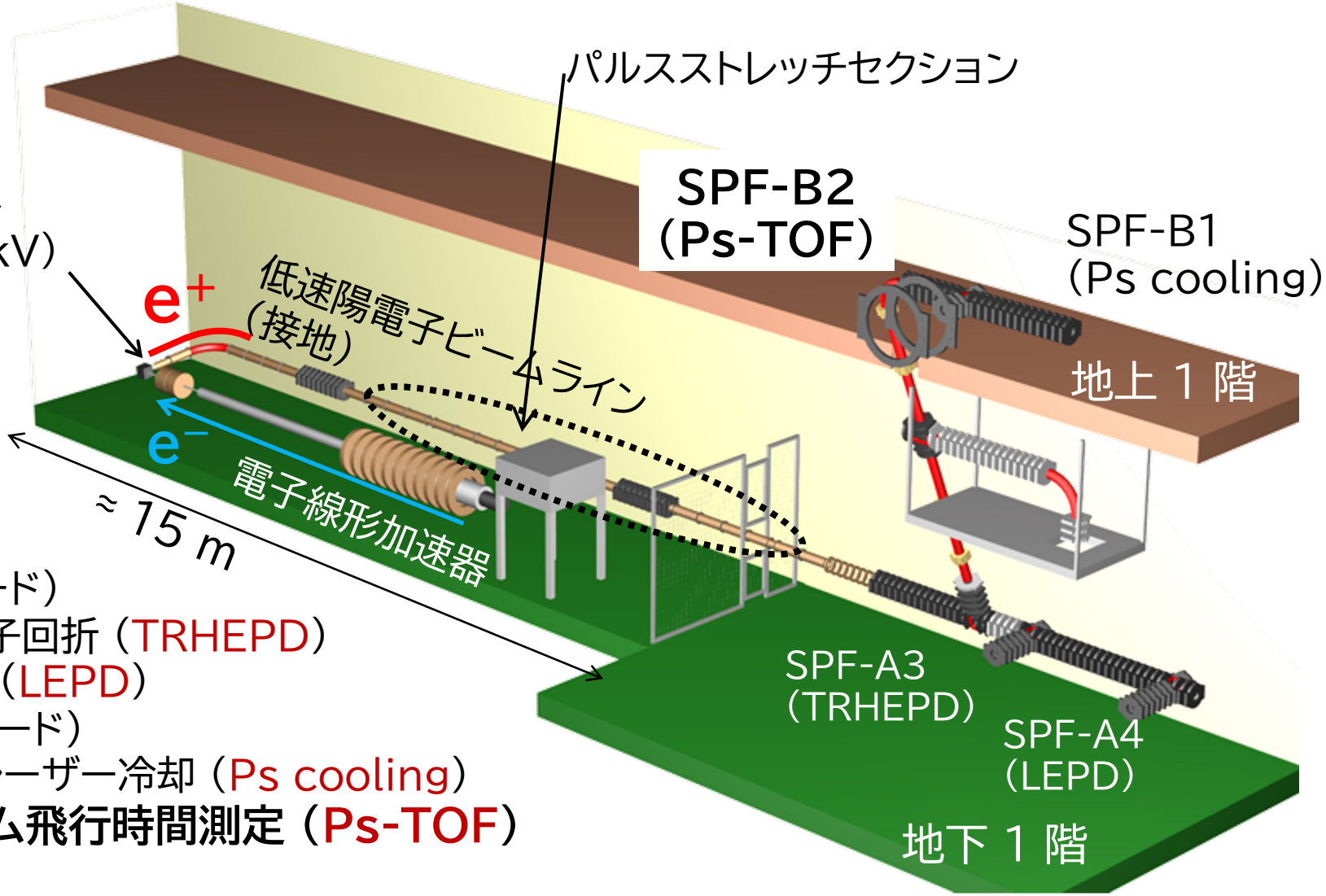


シリカエアロゲル

密度 0.12 g cm^{-3}
空孔径 45 nm
厚さ 0.5 mm

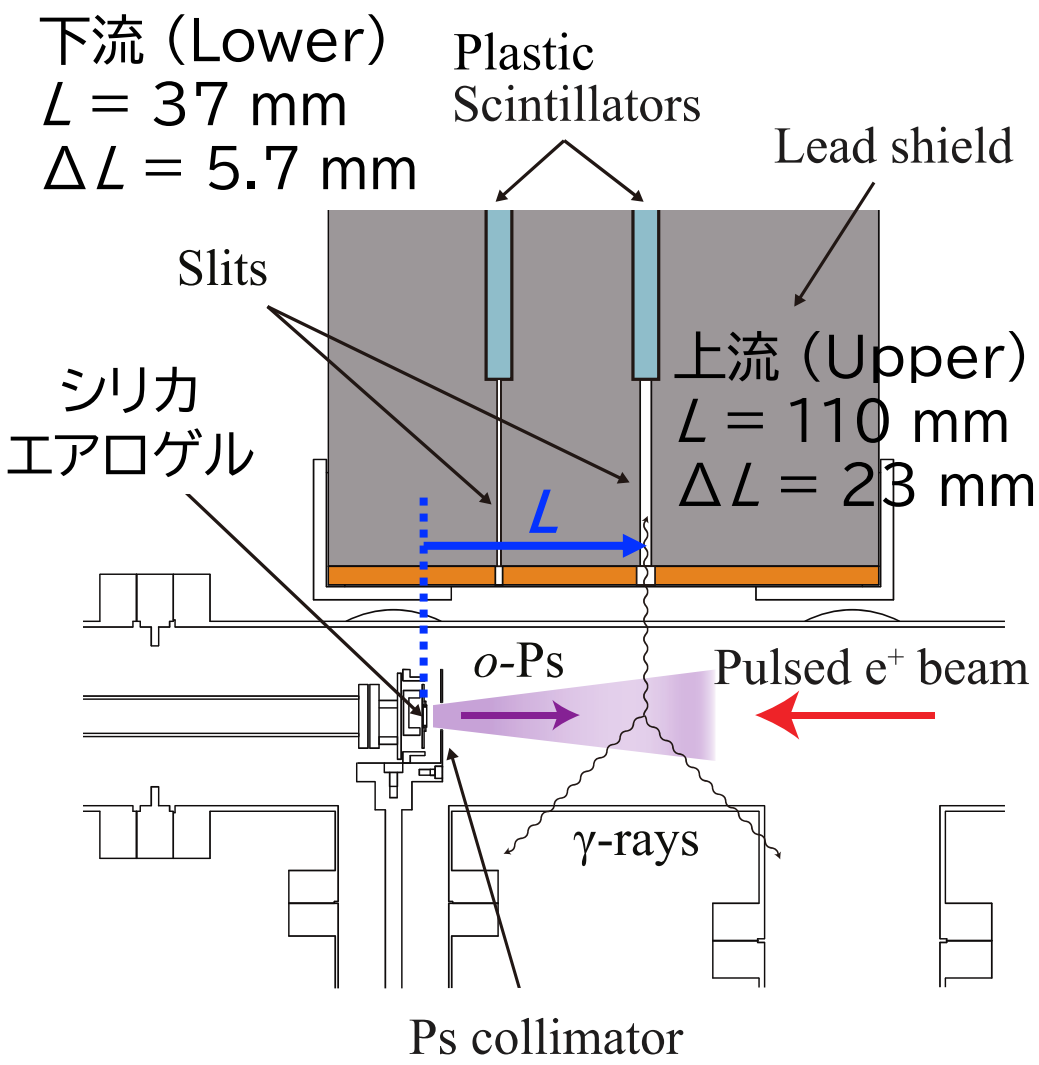
- 高い Ps 生成率(≈ 35 %)
- 45 nm の空孔径で期待される Ps 寿命 (≈ 130 ns)

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)



- 地下 1 階 (ロングパルスモード)
  - SPF-A3: 全反射高速陽電子回折 (TRHEPD)
  - SPF-A4: 低速陽電子回折 (LEPD)
- 地上 1 階 (ショートパルスモード)
  - 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）



S. Iida, K. Wada, I. Mochizuki, T. Tachibana, T. Yamashita, T. Hyodo and Y. Nagashima, J. Phys.: Condens. Matter **28** (2016) 475002.

- 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。
- 鉛スリットで制御した距離 L(Ps が検出されうる最短距離で記載)と時間 t から, Ps のエネルギー E が求まる。

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

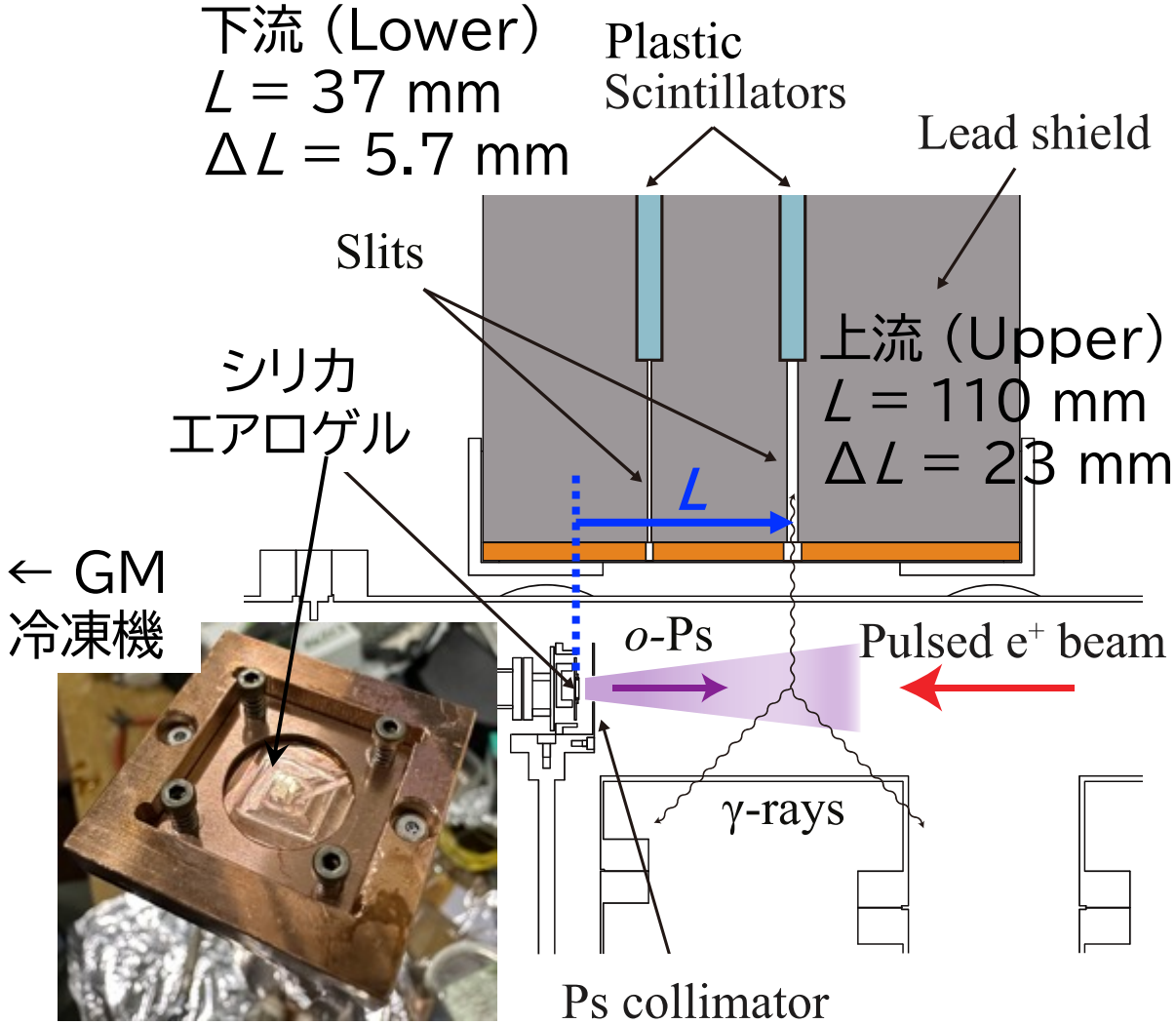
（m_{Ps} は Ps 質量 = 2 m_{e}）

- 検出器が見込む長さ ΔL を飛行する間に崩壊した Ps だけが検出される。Ps 寿命を τ とすると, 以下の効率 ε がかかるので, 補正する。

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

- 2020 年に室温のシリカエアロゲルで測定した。2023 年から, 冷凍機で冷却した試料による測定を開始した。

ポジトロニウム飛行時間測定（Ps-TOF）



S. Iida, K. Wada, I. Mochizuki, T. Tachibana, T. Yamashita, T. Hyodo and Y. Nagashima, J. Phys.: Condens. Matter **28** (2016) 475002.

- 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。
- 鉛スリットで制御した距離 L(Ps が検出されうる最短距離で記載)と時間 t から, Ps のエネルギー E が求まる。

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

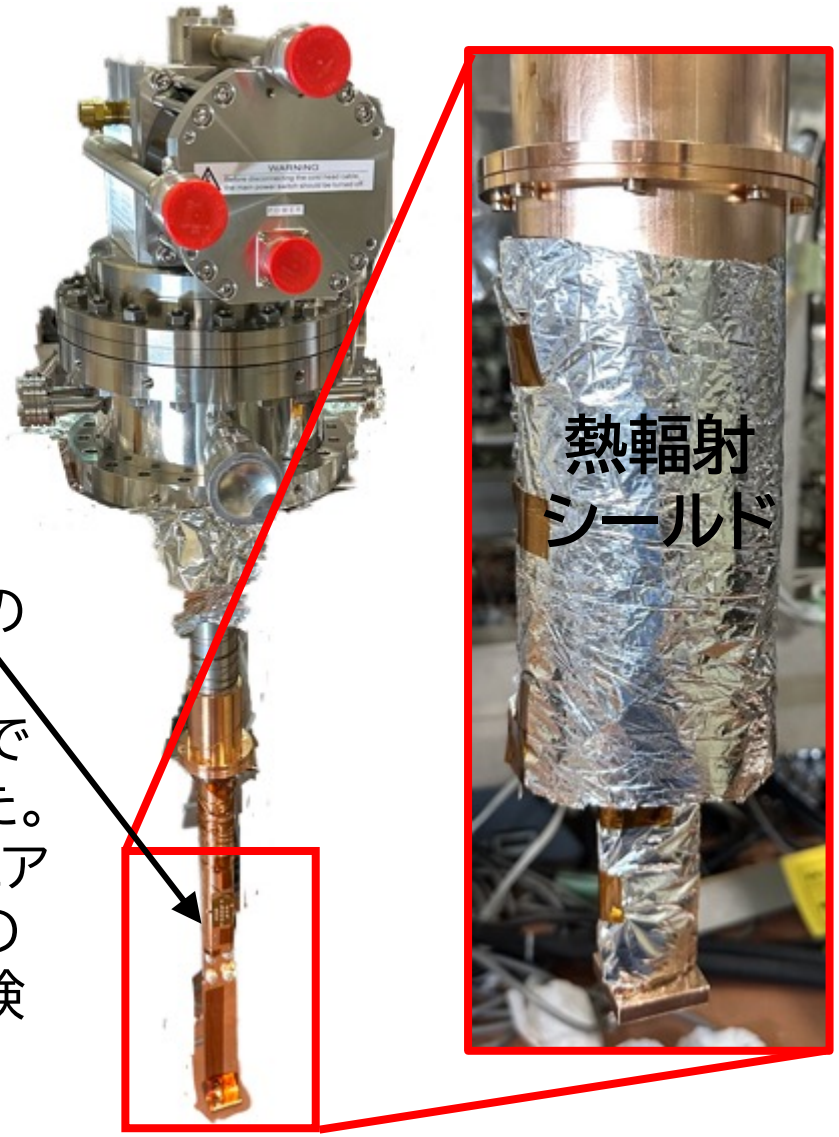
（m_{Ps} は Ps 質量 = 2 m_{e}）

- 検出器が見込む長さ ΔL を飛行する間に崩壊した Ps だけが検出される。Ps 寿命を τ とすると, 以下の効率 ε がかかるので, 補正する。

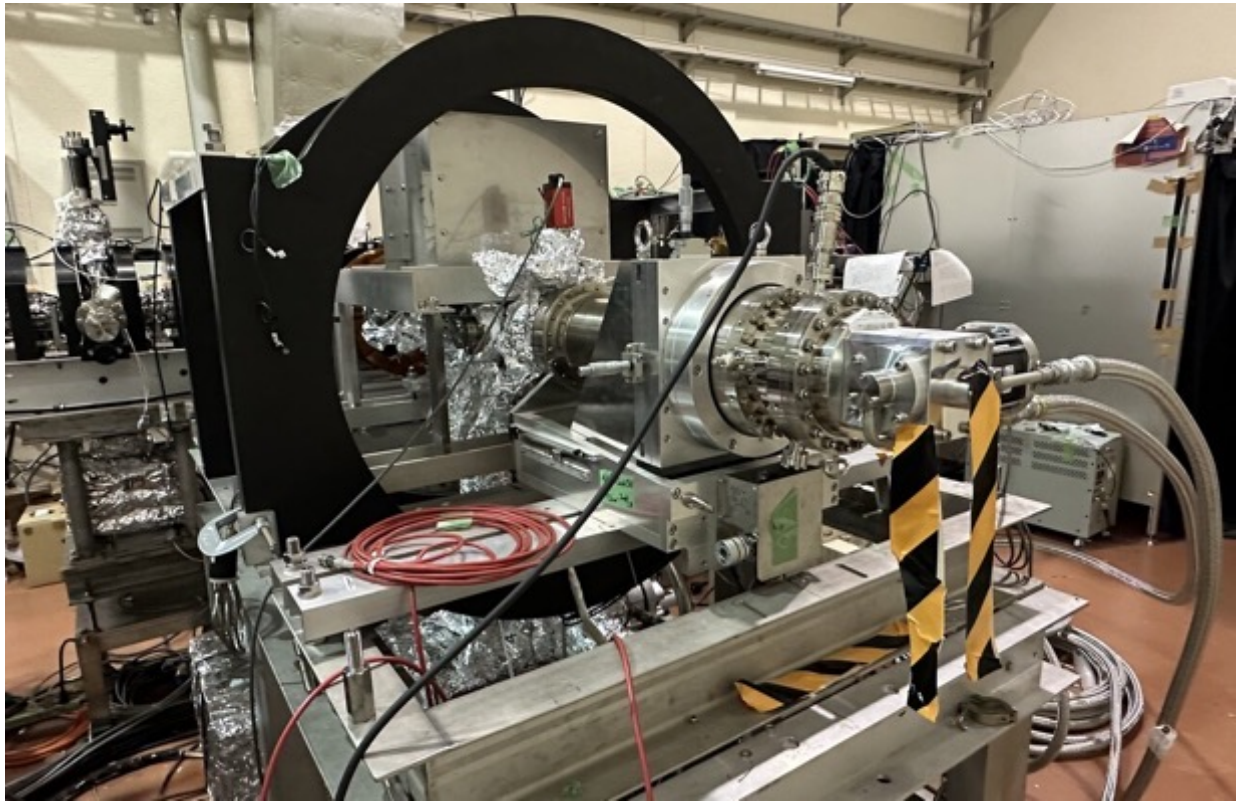
$$\varepsilon = \frac{t}{\tau}\frac{\Delta L}{L}\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

- 2020 年に室温のシリカエアロゲルで測定した。2023 年から, 冷凍機で冷却した試料による測定を開始した。

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 @ KEK-SPF-B2, 5 keV）

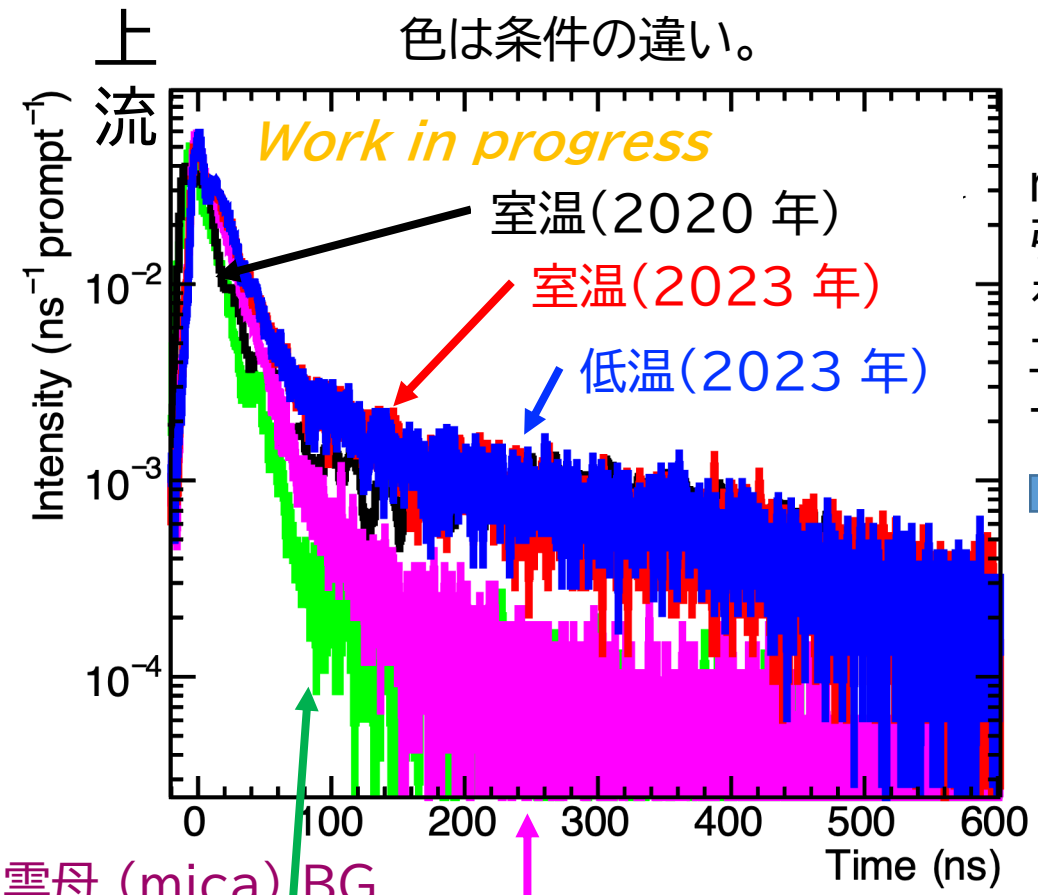


温度計の表示は６Ｋまで下がった。シリカエアロゲルの温度は検証中。

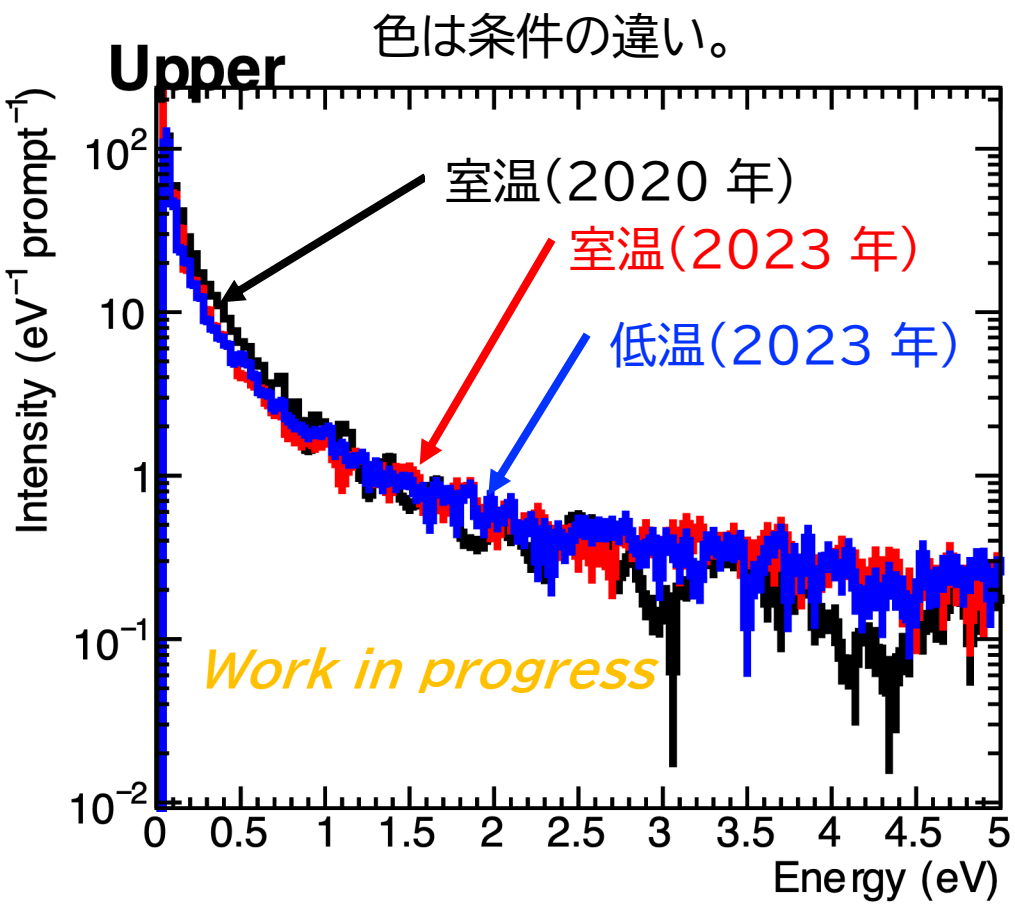


既存装置を改造して測定した。結果は解析中。後述のモンテカルロ・シミュレーションを基に設計をさらに改善する計画。

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



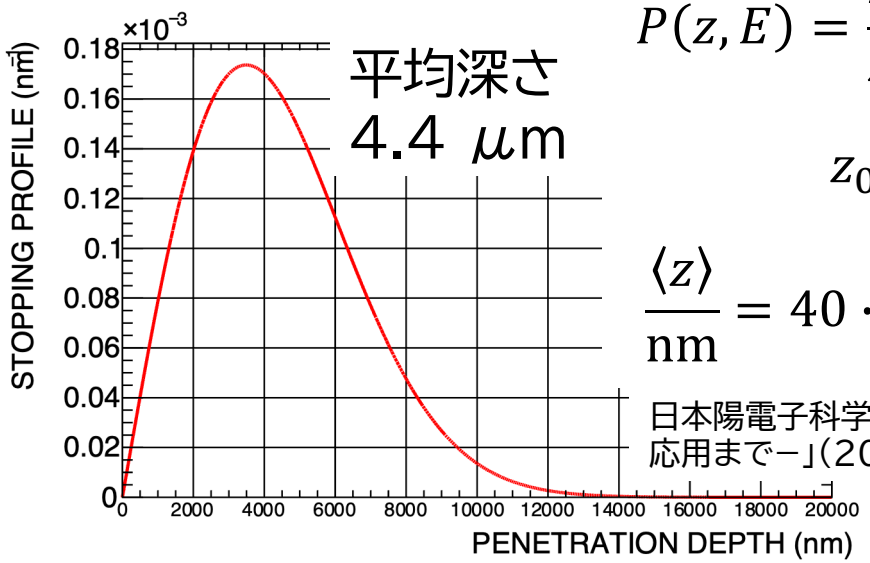
mica を引いてεを補正, エネルギーに換算



- 2020 年と 2023 年で形状が少し異なる。セットアップの変更に伴う検出効率の変化か → 検出系のシミュレーションで検証
- 室温と低温で変化なし。実際に変化がないのか, 試料が冷えていなかったのか → Ps 放出シミュレーションや試料温度の評価

シリカエアロゲルの Ps-TOF エネルギースペクトル解釈のため Ps 放出についてのモンテカルロ・シミュレーションを開発中

(A) 密度 0.12 g cm^{-3} のシリカエアロゲルにおける, 5 keV 低速陽電子ビームの入射深さ分布 (Makhov profile)



$$P(z,E) = \frac{2z}{z_0^2}\exp\left[-\left(\frac{z}{z_0}\right)^2\right],$$

$$z_0 = \frac{2\langle z\rangle}{\sqrt{\pi}},$$

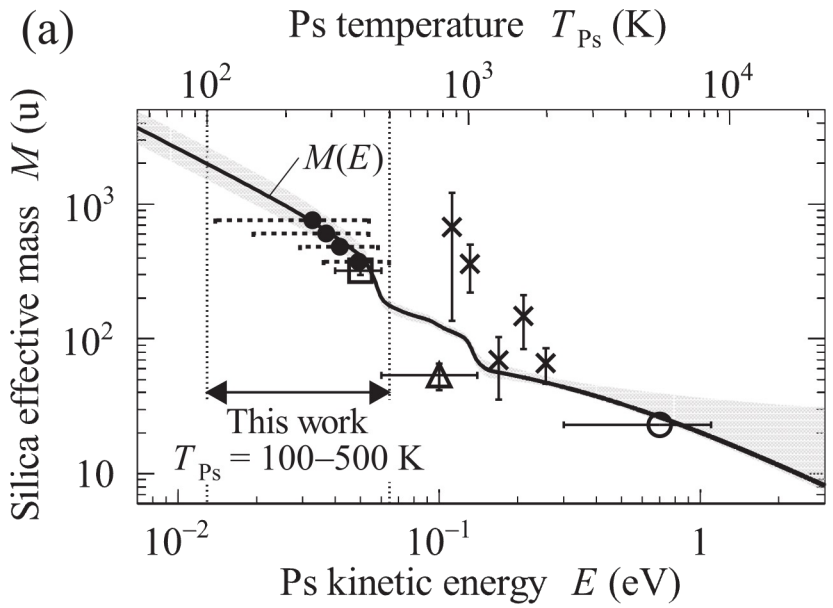
$$\frac{\langle z\rangle}{\mathrm{nm}} = 40\cdot\frac{\mathrm{g\,cm^{-3}}}{\rho}\left(\frac{E}{\mathrm{keV}}\right)^{1.6}$$

日本陽電子科学会「陽電子科学－基礎から応用まで－」(2021).

Geant4 との比較 Dryzek, Horodek, NIM B **266**, 4000 (2008).

(B) シリカ有効質量 M の Ps エネルギー依存性

K. Shu, A. Ishida et al., Phys. Rev. A 104, L050801 (2021).



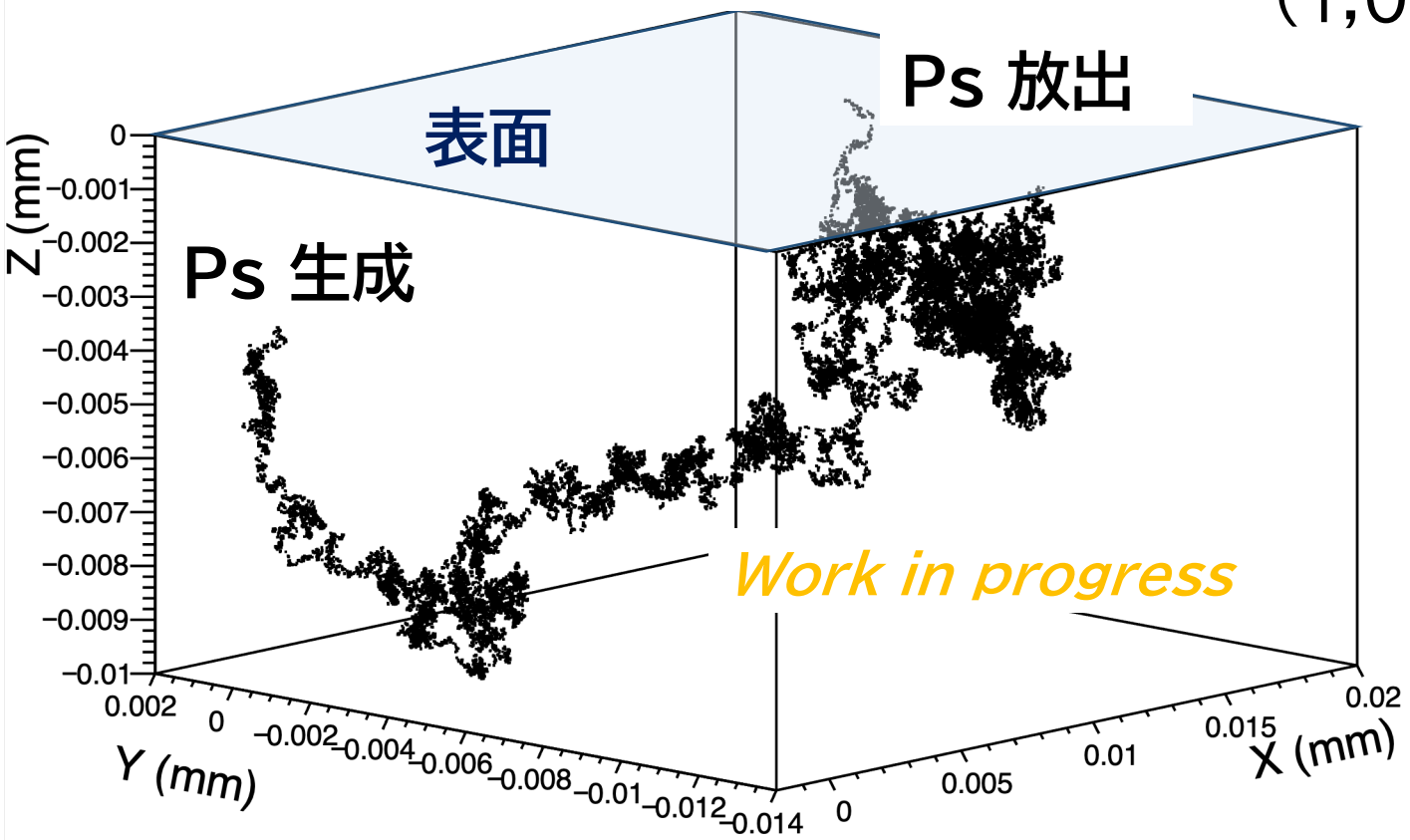
(C) 空孔径 45 nm(平均自由行程 34 nm)

(D) Ps 初期エネルギー 3.0 eV

(A)—(D) を満たすようなシリカ「ガス」中での Ps 拡散および表面からの放出をシミュレーションし, エネルギースペクトルや Ps 温度の解釈に用いる。

シミュレーション暫定結果:Ps の拡散例

1 イベント(このときの Ps 寿命は約 10 ns)を描画



表面からの放出率は 73.2 ± 1.4 %
(1,000 イベントのシミュレーション)

Cassidy *et al.*, PRA **82**, 052511 (2010) に従い,
300 K の Ps で概算すると,
Ps の表面放出率 Y は, 平均生成深さ $\langle z \rangle$ と Ps 崩壊率 γ に依存し,

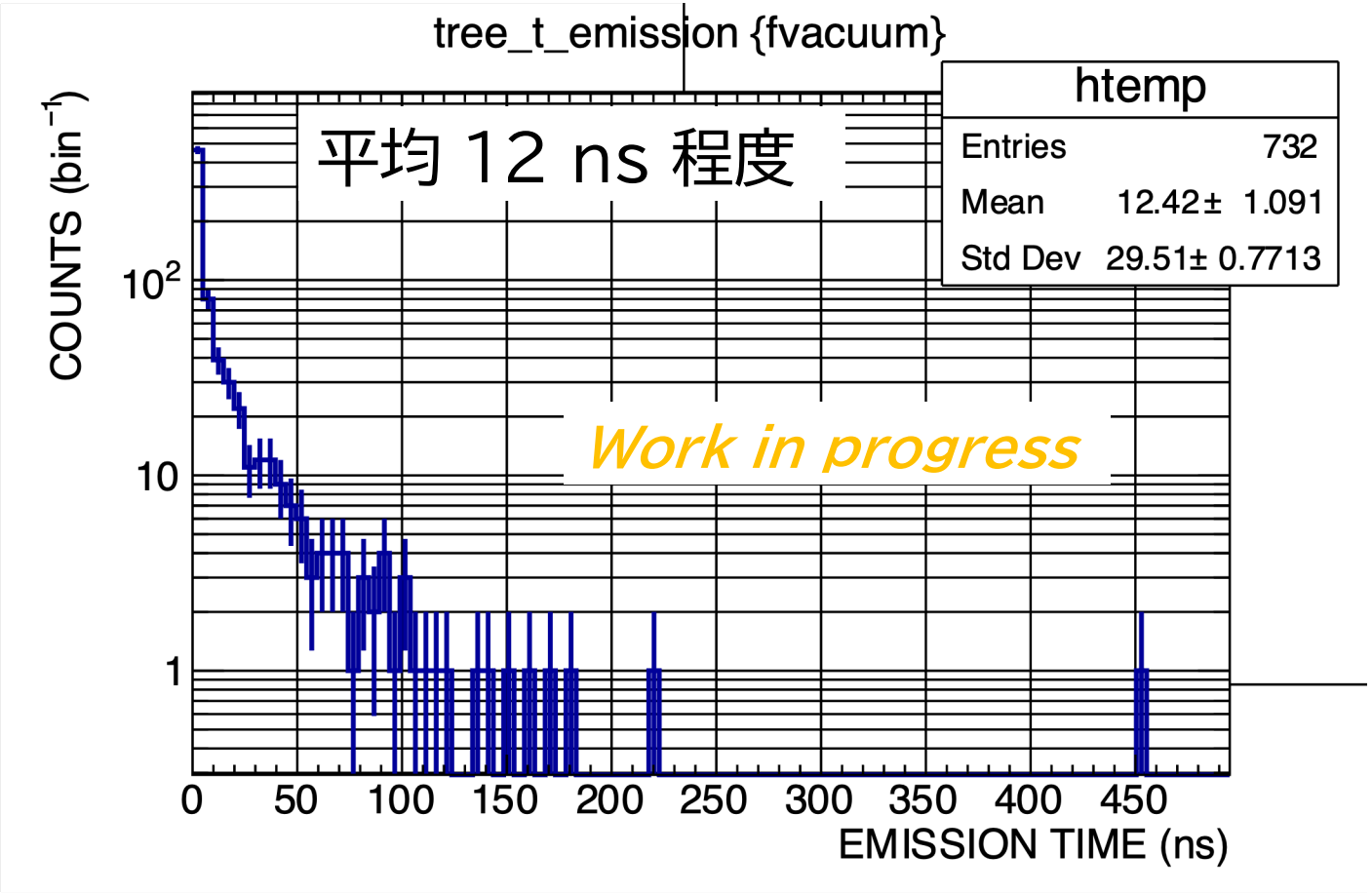
$$Y(\infty, u) = 1 - \sqrt{\pi\gamma u}e^{\gamma u}\mathrm{erfc}(\sqrt{\gamma u}),$$

$$u = \frac{\langle z \rangle^2}{\pi D} \sim \frac{\langle z \rangle^2}{\pi d \langle v \rangle} \sim 1.7\ \mathrm{ns}, \gamma \sim 7.7\ \mu\mathrm{s}^{-1}$$

(D は Ps の拡散定数, d は空孔径, $\langle v \rangle$は Ps 平均速さ)
より, Ps の表面放出率 $Y(\infty, u) \sim 0.82$.

大体合っている。シミュレーションは熱化前の高温 Ps を扱うため少し値がズレる

シミュレーション暫定結果(Ps 生成から放出までの時間)



Cassidy *et al.*, PRA **82**, 052511 (2010) に従って 300 K の Ps で概算すると, Ps 生成から放出までの平均時間 $<t>$ は,

$$\langle t \rangle = \frac{\frac{1}{2}\gamma^{-1}\sqrt{\pi\gamma u}\exp(\gamma u)\,\mathrm{erfc}(\sqrt{\gamma u})}{1-\sqrt{\pi\gamma u}\exp(\gamma u)\,\mathrm{erfc}(\sqrt{\gamma u})} - u$$

$$\sim 12\ \mathrm{ns}.$$

シミュレーションと解析解がある程度一致 → 解析解では得にくい他の分布を調べていく。

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。
2. Ps-BEC の必須要素技術である Ps 生成・濃縮・冷却の 3 機能を持つ多孔性ナノ材料を開発中。
3. 材料性能評価のため, 低温におけるシリカエアロゲルの Ps-TOF 測定を行った。
4. データのさらなる解析のためシミュレーションを開発している。

【今後の展望】

11 月のビームタイムで低温での Ps-TOF 測定・解析手法を確立する。各種試作ナノ材料の詳細な性能評価を行うことにより, BEC 実現に最適な Ps 生成材を開発する。

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