

ボース・アインシュタイン凝縮を目指した ポジトロニウム生成用ナノ材料開発

○石田 明¹、難波 俊雄²、浅井 祥仁¹、

田島 陽平³、小林 拓豊³、魚住 亮介³、周 健治³、吉岡 孝高³、
大島 永康⁴、オローク ブライアン⁴、満汐 孝治⁴、渡邊 亮太⁴、伊藤 賢志⁴、
兵頭俊夫⁵、望月 出海⁵、和田 健⁵、前川 雅樹⁶

(1. 東大・院理、2. 東大・素セ、3. 東大・院工、
4. 産総研、5. KEK・物構研、6. 量研高崎)




<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/>
https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110

令和5 (2023) 年7月6日

第60回アイソトープ・放射線研究発表会@日本科学未来館

謝辞

以下の研究助成を受けています。(終了済のものも含む)

- JST 創発的研究支援事業 JPMJFR202L  創発的研究支援事業
Innovation Oriented Research for Disruptive Science and Technology
- 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

<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/>
https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110

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凝縮相 = 反物質レーザーを実現
2. Ps-BEC 実現スキームと高密度Ps生成材
3. 飛行時間測定による試作ナノ材料の性能評価

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

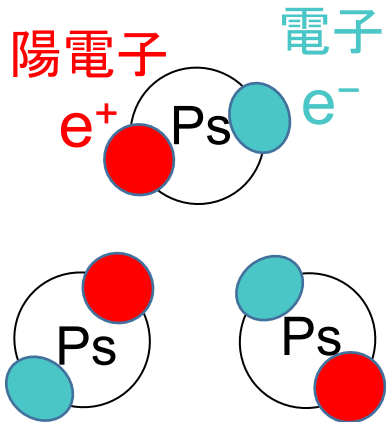
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 集団中のほぼすべての原子が 単一の量子状態になる
- 原子は 高密度 かつ 冷たい

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 & 高速レーザー冷却



反物質原子

ポジトロニウム(Ps)
(古典極限系)

10^{15} 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を用いて測定
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)

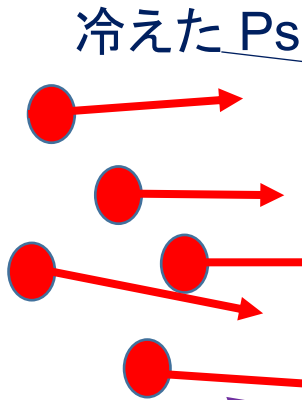
Ps 生成・濃縮・冷却の 3 機能をもつ 高度機能性無機酸化物ナノ反応器を開発し、 高密度 Ps を生成する

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)
(+ 熱化冷却) → 100 nm 細孔

無機酸化物多孔体中の細孔

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



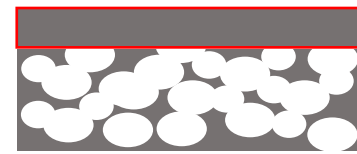
冷却用 243 nm
紫外レーザー

ガンマ線

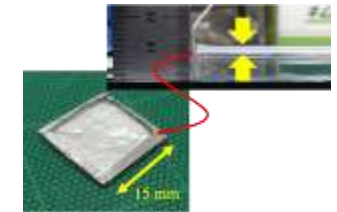
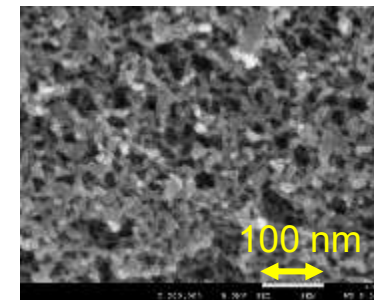
機能③ Ps 冷却 (cooler) (レーザー冷却)
→ 紫外光透過率 80 % 以上

3つの手法でPs生成サンプルを試作

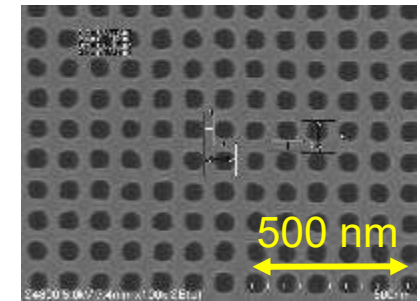
- ① シリカエアロゲルの表面に緻密なシリカ層をプラズマCVDで成膜したサンプルをシリカキャビティとして使用 ⇒ 別途行っているPsレーザー冷却実証実験にも用いる。Ps-TOFによるエネルギー分布と、レーザーによるドップラー分布測定で得られた速度分布を比較したい。



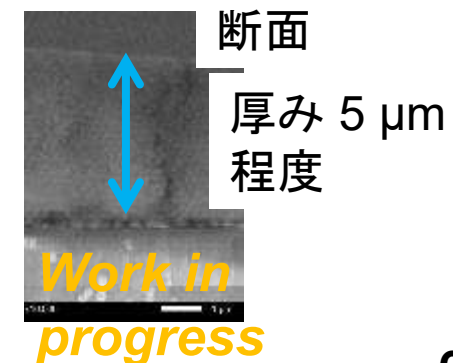
↑ CVD 膜厚 75 nm
↓ シリカエアロゲル
密度 0.12 g cm^{-3}
空孔径 45 nm
厚さ 0.5 mm



- ② ナノプロセシング技術を駆使した手法 ⇒ 薄い細孔壁を達成するため、電子ビーム描画の条件出しを行っている。

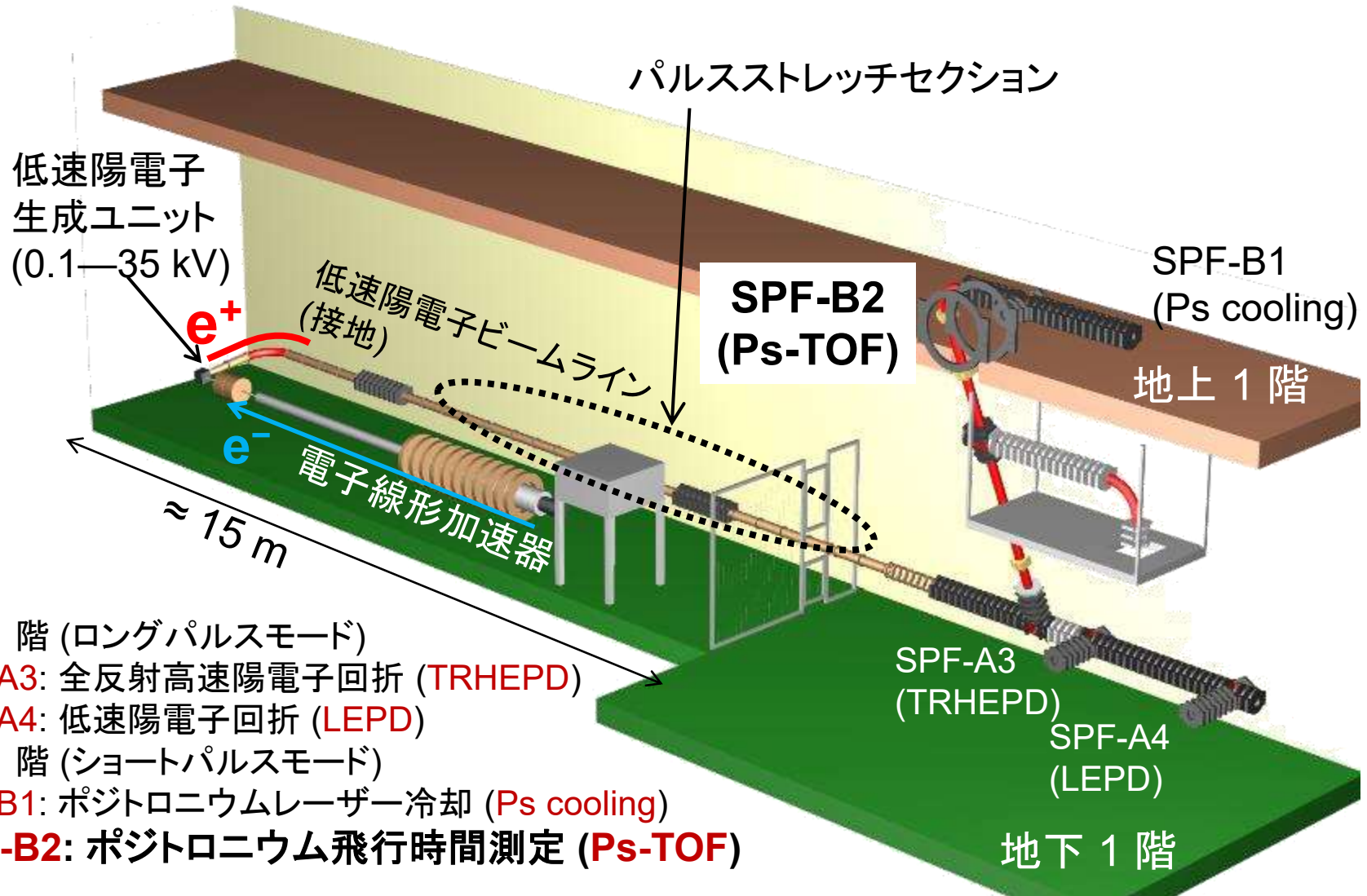


- ③ 規則配列シリカナノ粒子を用いた手法 ⇒ 粒径の揃った球状シリカナノ粒子の間隙をPs-BEC実現ナノ反応器として用いる。

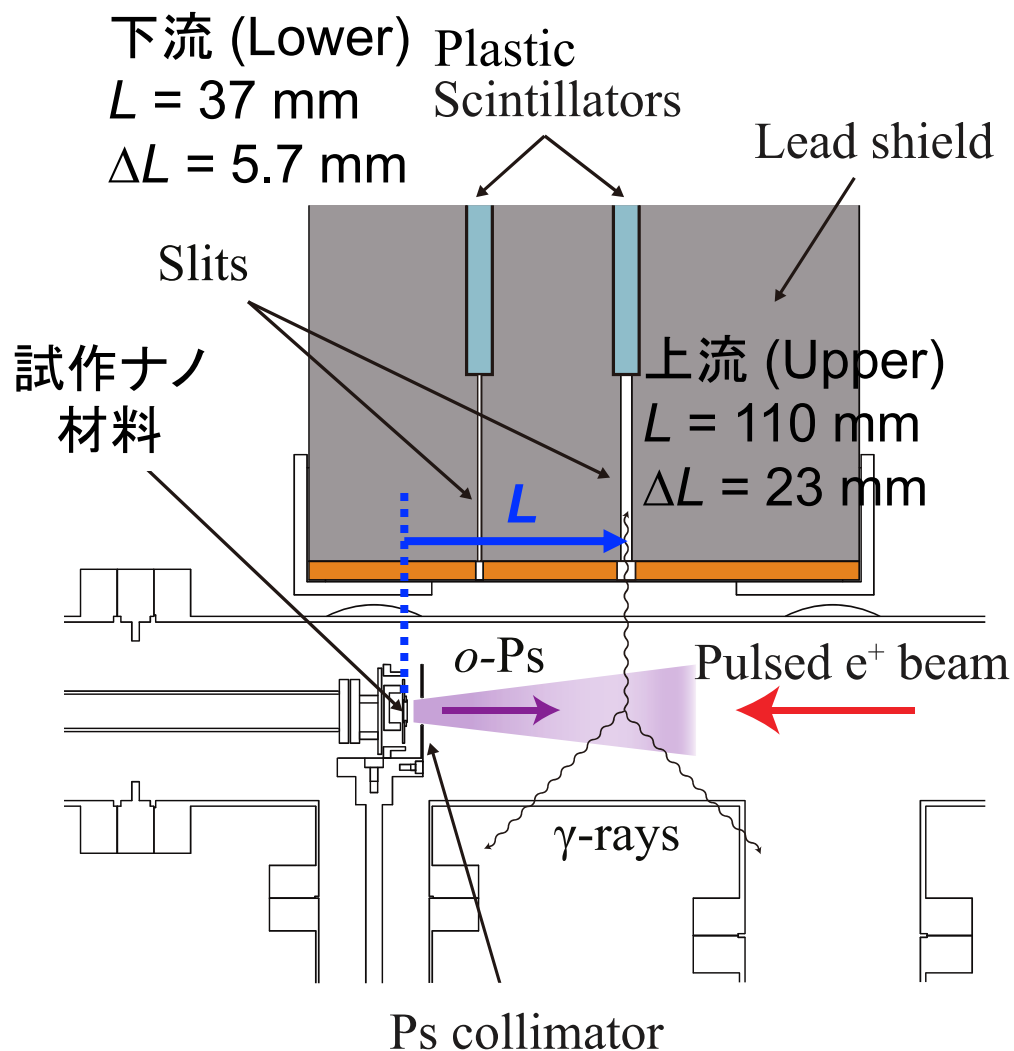


R. Watanabe et al., J. Colloid Interface Sci. 360 (2011) 1.

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)



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。

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

(m_{Ps} は Ps 質量 = $2 m_e$)

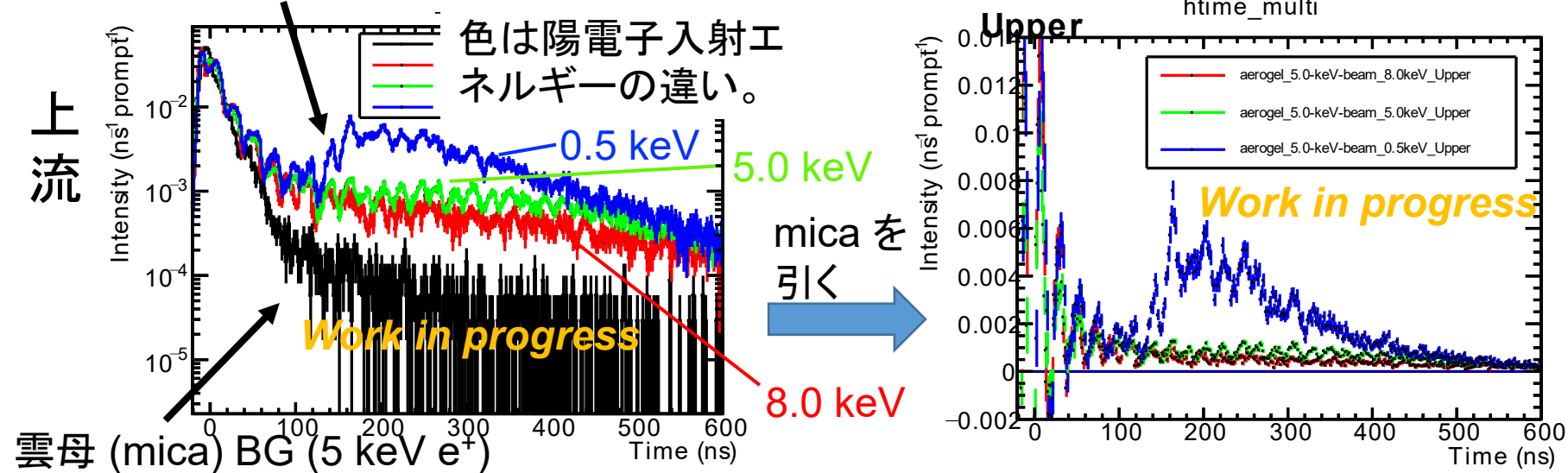
- 検出器が見込む長さ ΔL を飛行する間に崩壊した Ps だけが検出される。Ps 寿命を τ とすると, 以下の効率 ε がかかるので, 補正する。

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

- 室温試料で測定した。今年度から, 冷凍機で冷却した試料による測定を行っている。

エッジ: Ps-TOF シリカエアロゲル:ガンマ線検出時間スペクトル

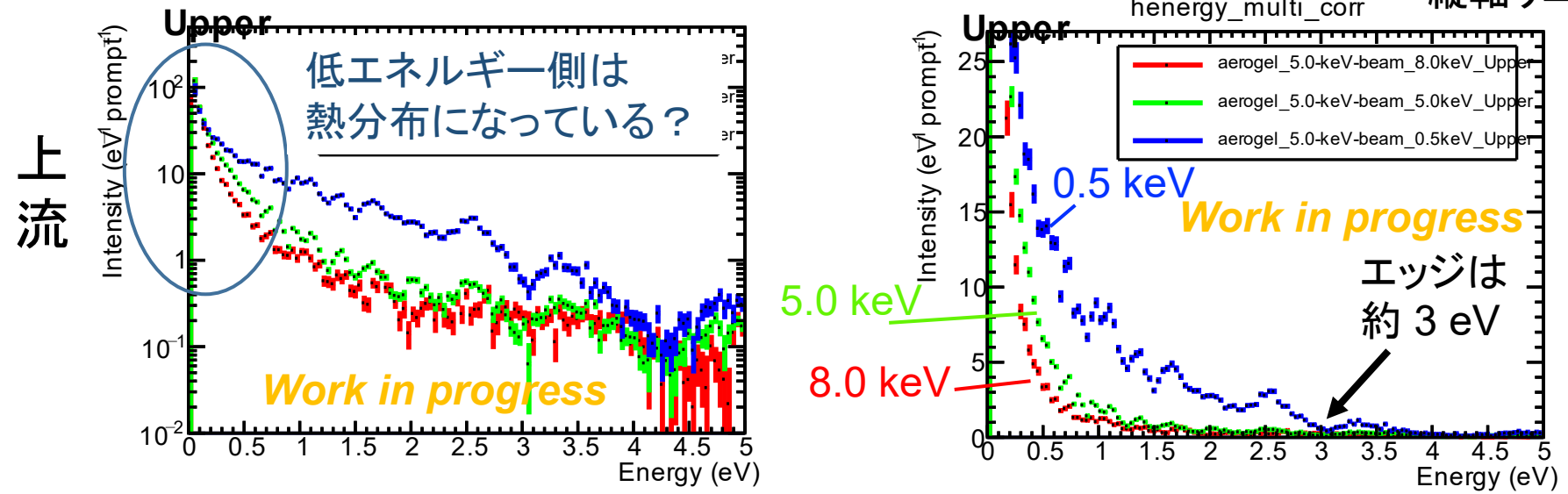
表面生成 Ps と期待



縦軸対数

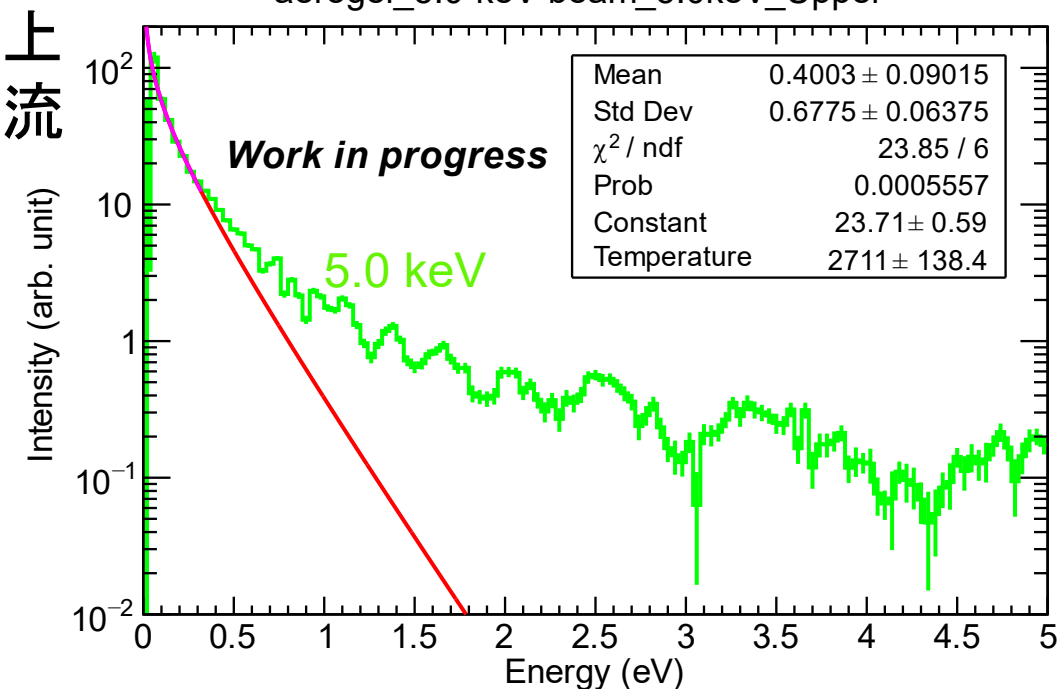
エネルギースペクトル

縦軸リニア



Ps-TOF シリカエアロゲル 低エネルギー側の熱分布フィット(暫定)

aerogel_5.0-keV-beam_5.0keV_Upper

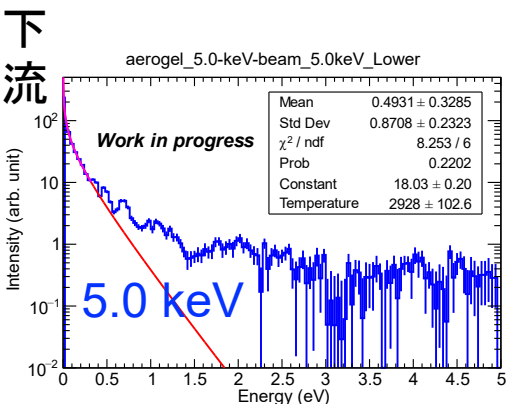


- 低エネルギー側が温度 T の Maxwell-Boltzmann 分布になっていると仮定し、以下で暫定フィット。

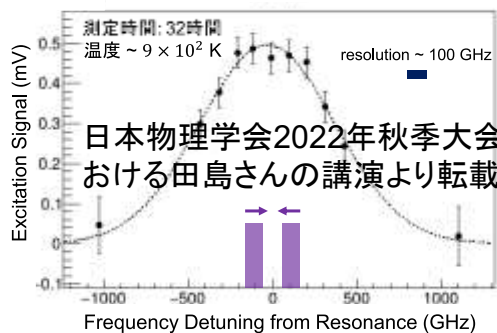
$$f(E) = \frac{\text{const}}{\sqrt{\pi E k_B T}} \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right).$$

(k_B はボルツマン定数)

- 0 eV—0.32 eV でフィットした暫定結果は、上下流で一致。
上流: $T = 2710 \pm 140$ K,
下流: $T = 2930 \pm 100$ K.



レーザー冷却を行わなかった場合の
Psのドップラープロファイル

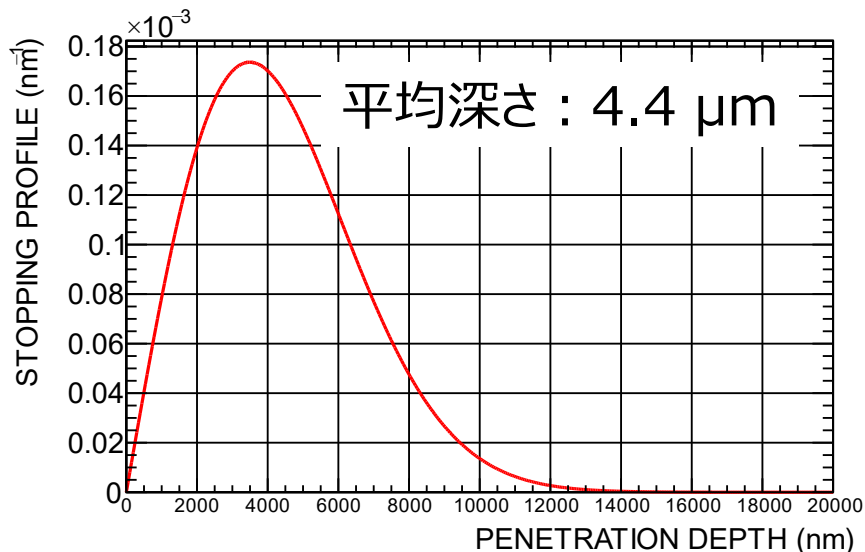


日本物理学会2022年秋季大会における田島さんの講演より転載

- サンプル表面と平行な向きにレーザーを照射してドップラー分布を測定した結果は、約 900 K(左図)。モンテカルロ・シミュレーションにより、2手法の違いを説明できるか検証している。

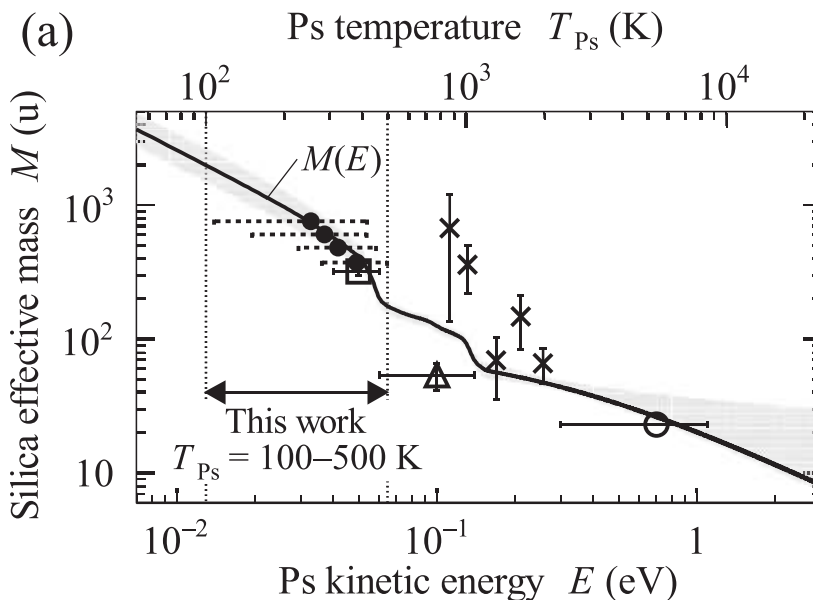
シリカエアロゲルの Ps-TOF エネルギースペクトル解釈のため モンテカルロ・シミュレーションを用いた解析を進行中

(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)



(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 温度の解釈に取り組んでいる。

冷凍機で冷却したシカエアロゲルの Ps-TOF 測定を開始 (2023 年 5 月, 6 月@KEK-SPF-B2)



グラデン ランドールさん（東大・院理）と協力して装置を改造した。結果は解析中。開発中のモンテカルロ・シミュレーションを基に設計をさらに改善する計画。

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. ナノ細孔中で Ps をレーザー冷却する Ps-BEC 実現スキーム。
3. 高密度 Ps 生成材について, 以下の手法により試作したナノ材料の Ps-TOF 測定を行い, いずれの材料でも Ps 生成を確認した。
 - シリカエアロゲル(本日紹介)
 - ナノプロセッシング
 - 規則配列シリカナノ粒子
4. データのさらなる解析や, 試料を低温にした場合の測定を行っている。試作ナノ材料の詳細な性能評価を行い, 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/?page_id=110