

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 6 (2024) 年 9 月 17 日
日本物理学会 第79回年次大会(2024年)
@ 北海道大学(札幌キャンパス)

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 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, 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

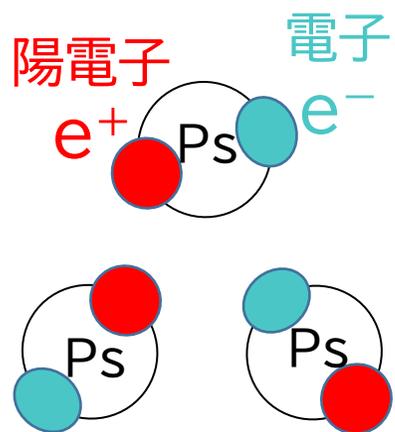
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 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

冷えた Ps

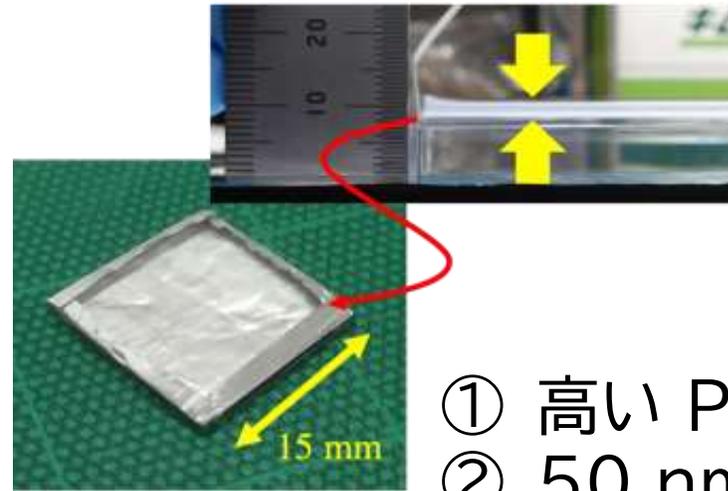
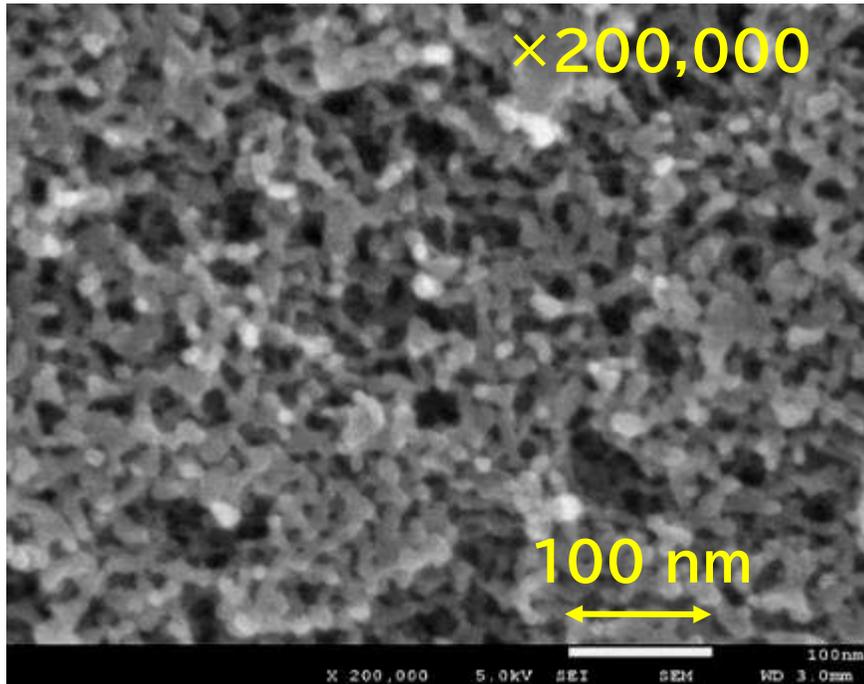
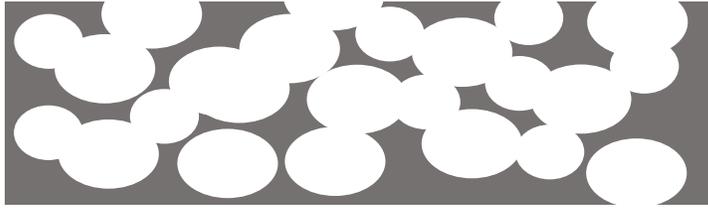
無機酸化物多孔体中の空孔

243 nm
紫外レーザー

ガンマ線
レーザー

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

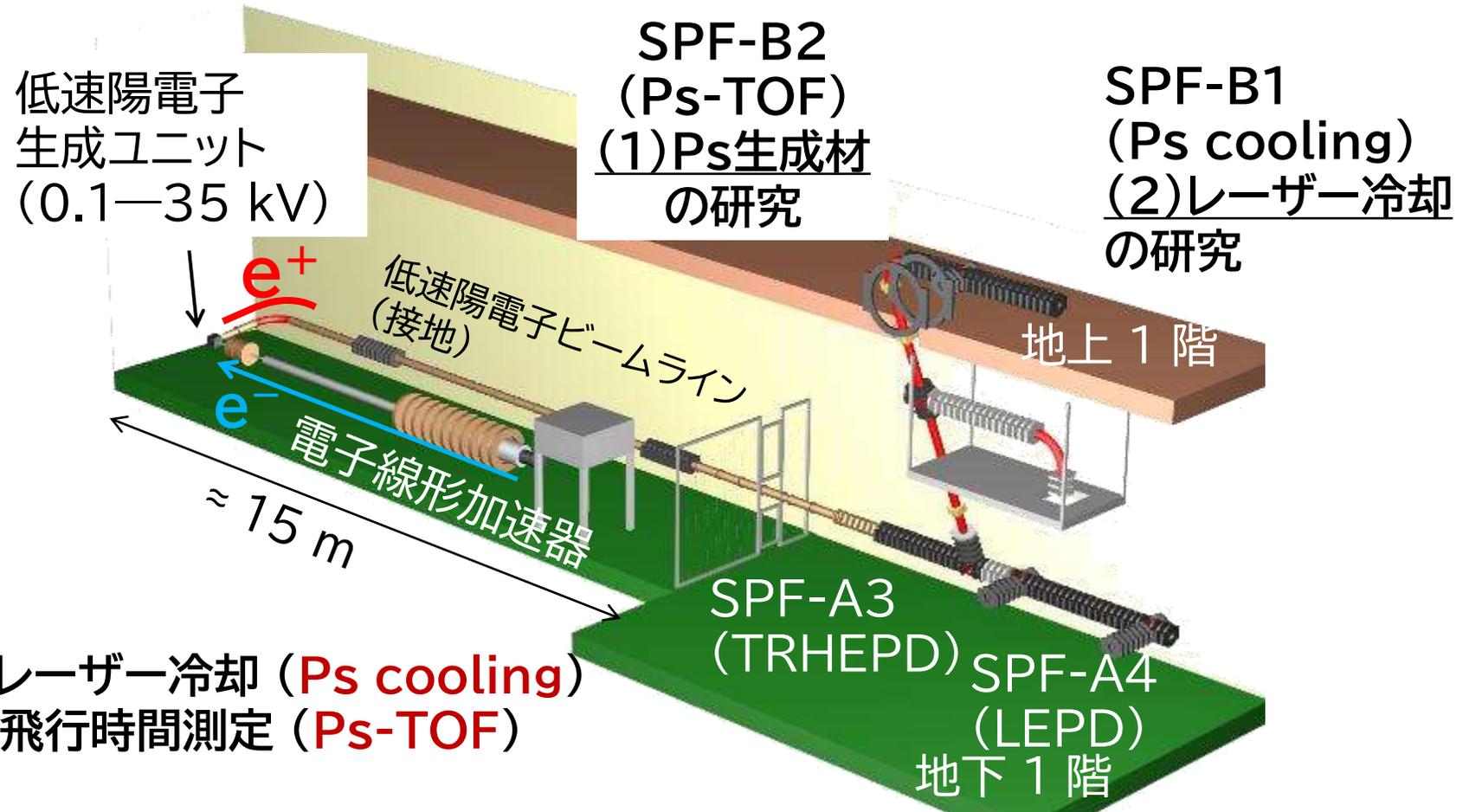
他に、ナノプロセッシング, ナノインプリント, 規則配列シリカナノ材料(以上シリカ), シリカ以外のナノ多孔質材料を試し中

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)

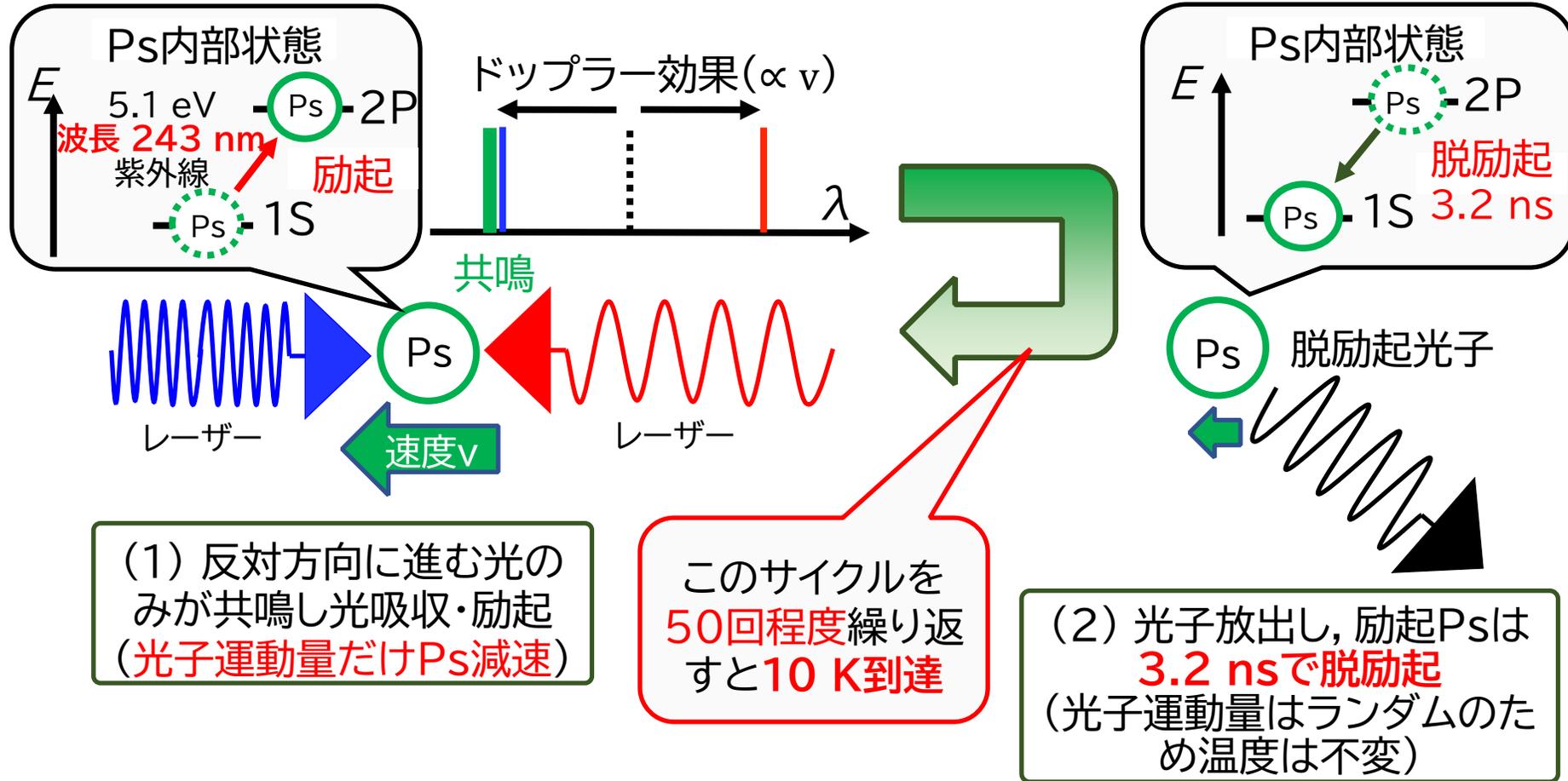


SPF
@入射器コントロール棟

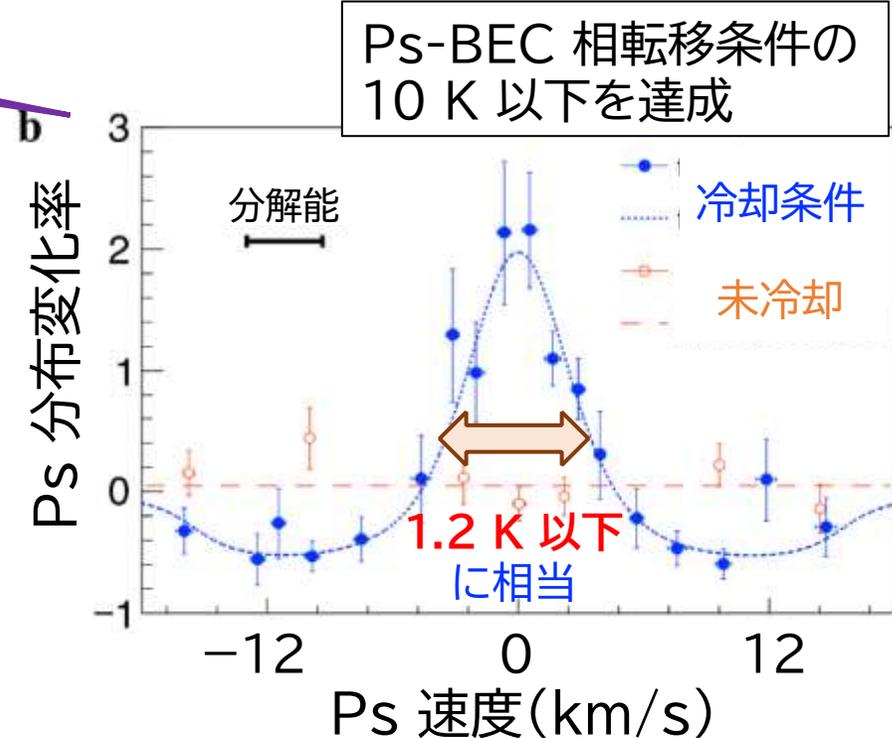
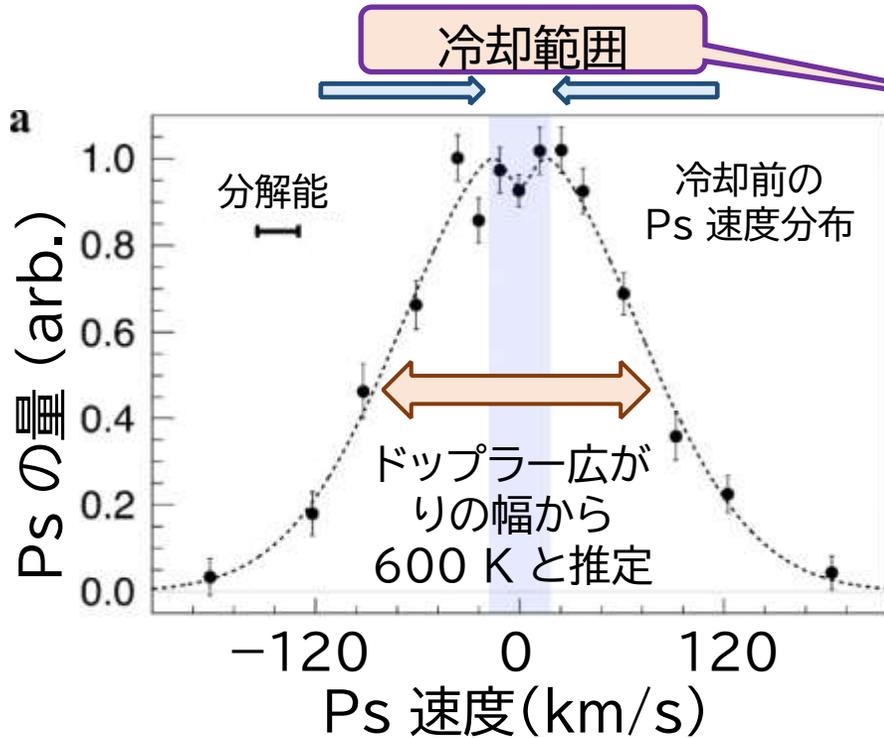
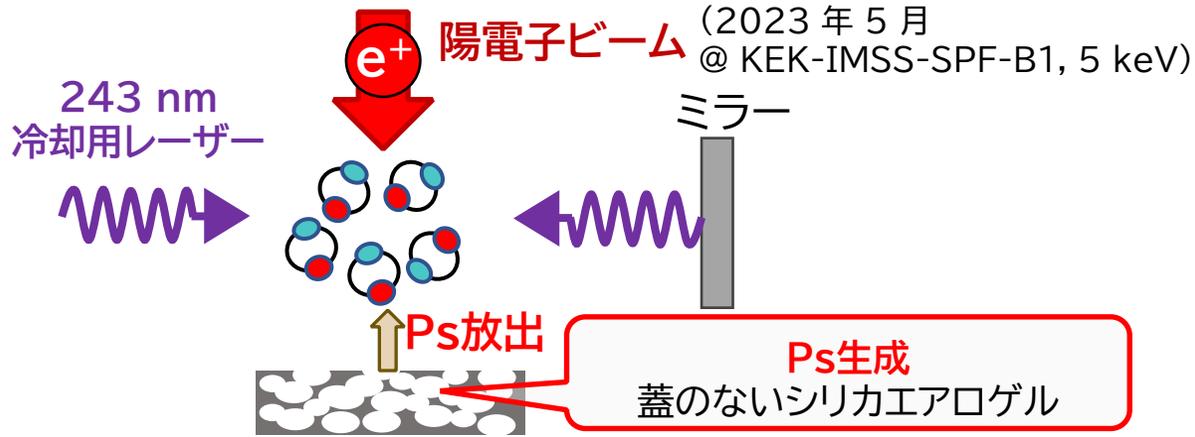
- 地上 1 階
SPF-B1: ポジトロニウムレーザー冷却 (Ps cooling)
SPF-B2: ポジトロニウム飛行時間測定 (Ps-TOF)



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



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

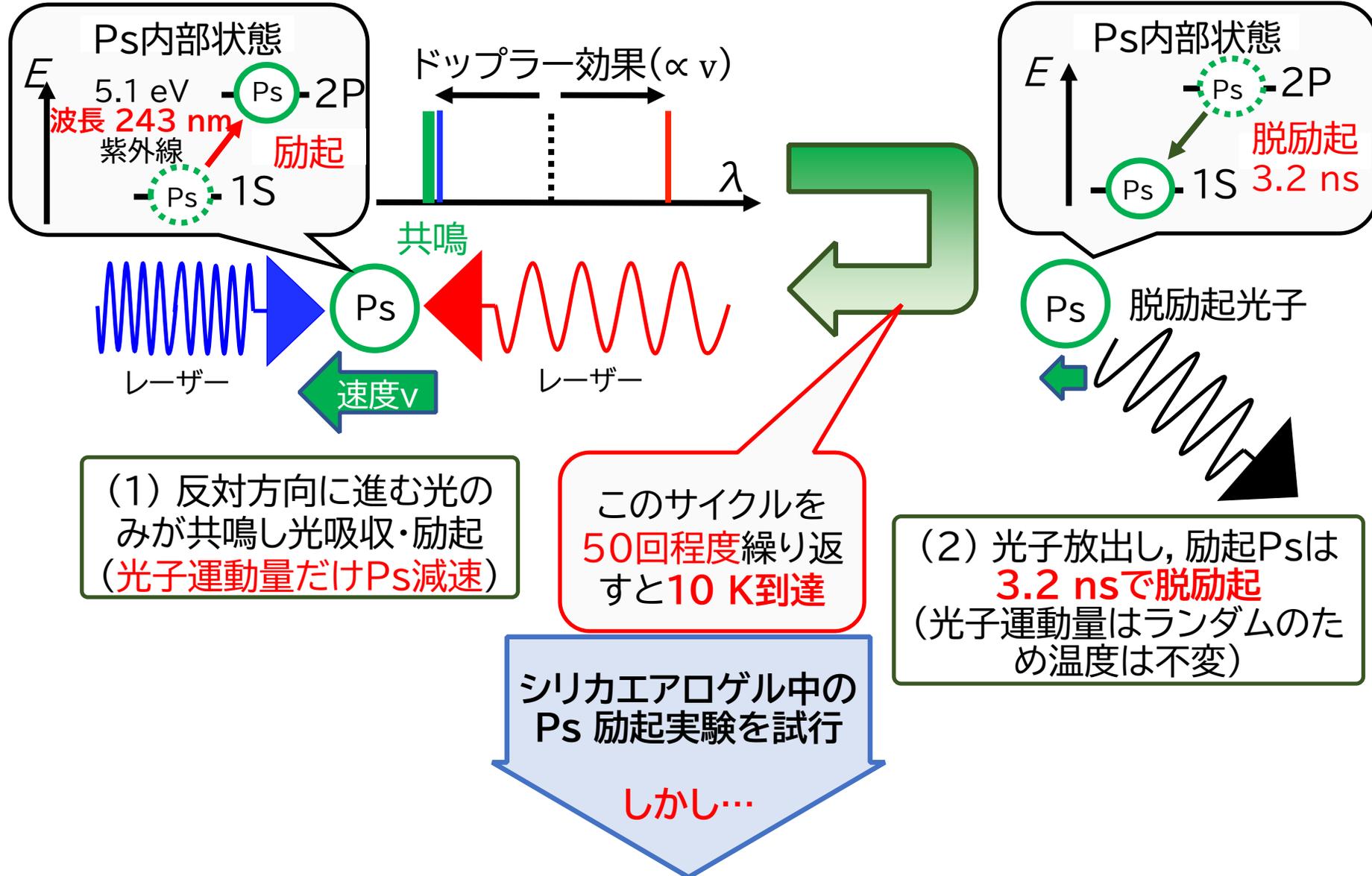
K. Shu^{1,2}, Y. Tajima², R. Uozumi², N. Miyamoto², S. Shiraishi², T. Kobayashi², A. Ishida^{3,✉}, K. Yamada³, R. W. Gladen³, T. Namba³, S. Asai³, K. Wada³, I. Mochizuki³, T. Hyodo⁵, K. Ito⁶, K. Michishio⁶, B. E. O'Rourke⁶, N. Oshima⁶ & K. Yoshioka^{1,2,✉}

When laser radiation is skilfully applied, atoms and molecules can be cooled^{1–3}, allowing the precise measurements and control of quantum systems. This is essential

Nature (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解決策

適切な組成と構造をもつ
新規材料開発が急務となった

〈課題と方策〉

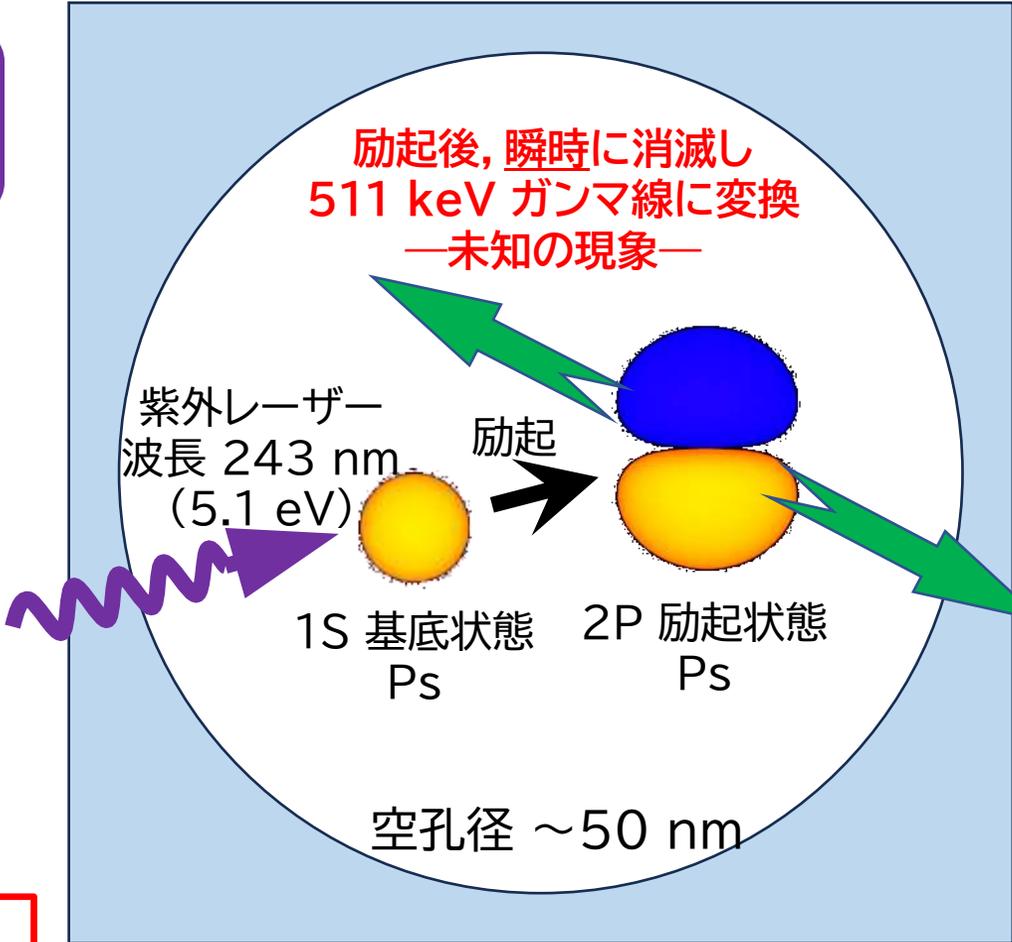
課題: Psが感じる空孔表面ポテンシャルの物理モデル構築と励起-消滅プロセスの解明

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

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



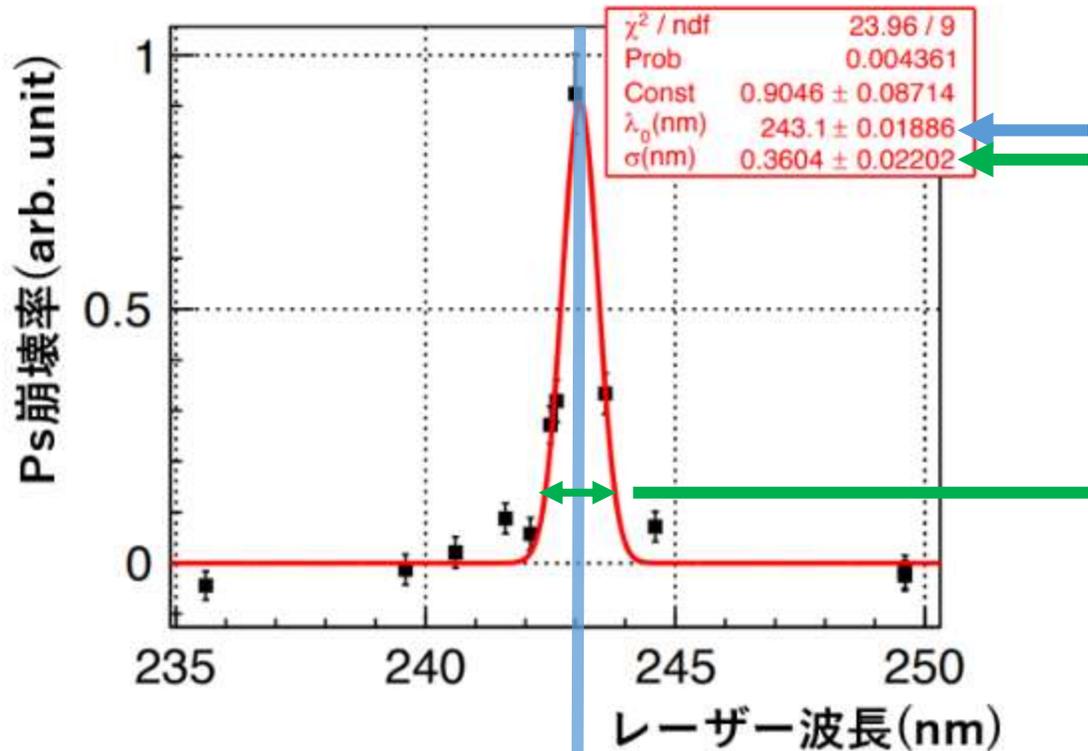
シリカエアロゲル

- 周ほか, 陽電子科学 第16号, 31 (2021).
- K. Shu, Ph.D. thesis (UTokyo, 2020).

崩壊は波長243 nm付近でのみ生じる 2P状態になって崩壊している

レーザー波長を変化させた際の
Ps崩壊率の変化

■ 取得データ — Lorentzian Fit

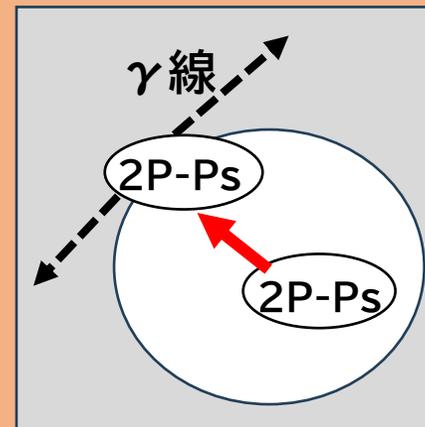


共鳴幅から計算される2P-Ps寿命 ~数100 fs



同程度？

シリカエアロゲル中のPsが空孔壁に衝突するまでの
典型的な時間 ~100 fs



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
している可能性がある。

⇒ Psの温度が変化するとき、
2P-Psの崩壊率はどのように
変化するか？

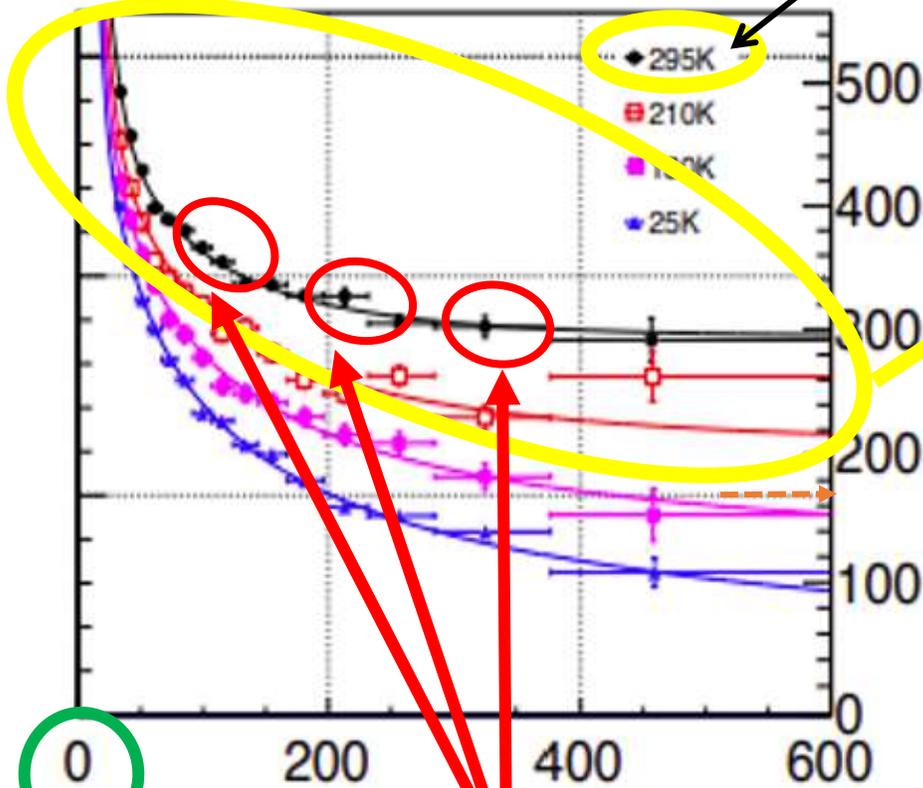
Psの1S-2P遷移エネルギーに対応する
波長243 nmでPs崩壊率最大

熱化によってシリカエアロゲル中のPsは温度を失う

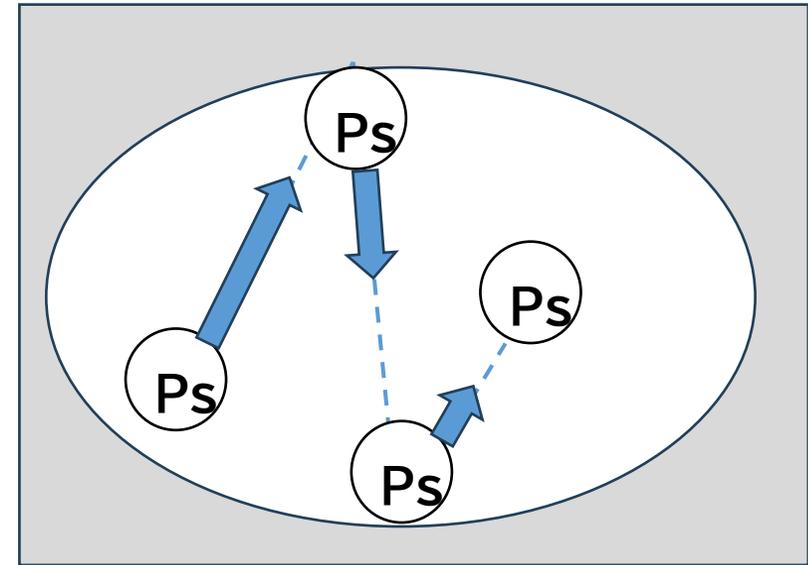
シリカエアロゲル中における熱化によるPs温度の低下 (実線: 理論値)

シリカエアロゲル
温度

Ps温度 (K)



シリカエアロゲル中の空孔壁に衝突してPsが運動量を失う様子



Ps生成時刻

Ps生成からの時間 (ns)

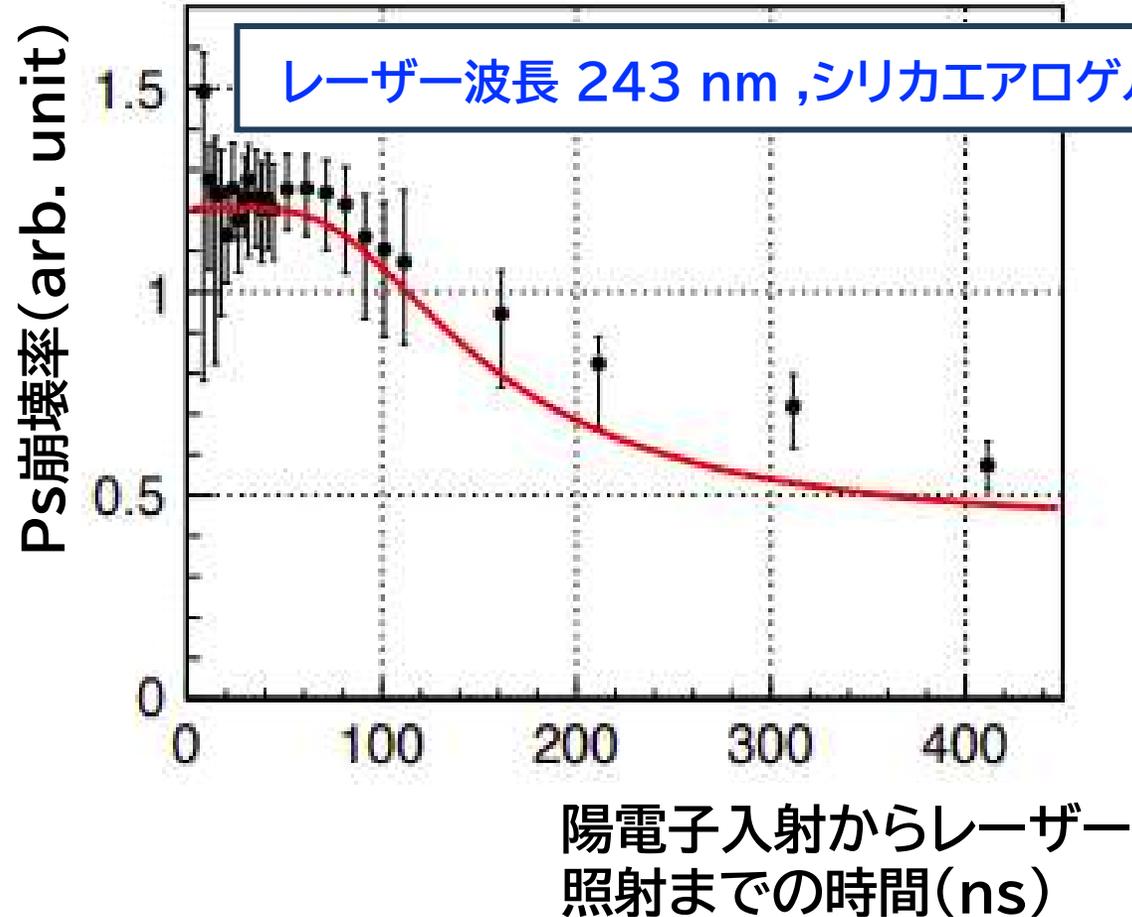
各タイミングでレーザーを照射すると2P-Ps崩壊率はどのようになるか？

牧ほか, 日本物理学会2024年春季大会
20pT2-4 (2024) より

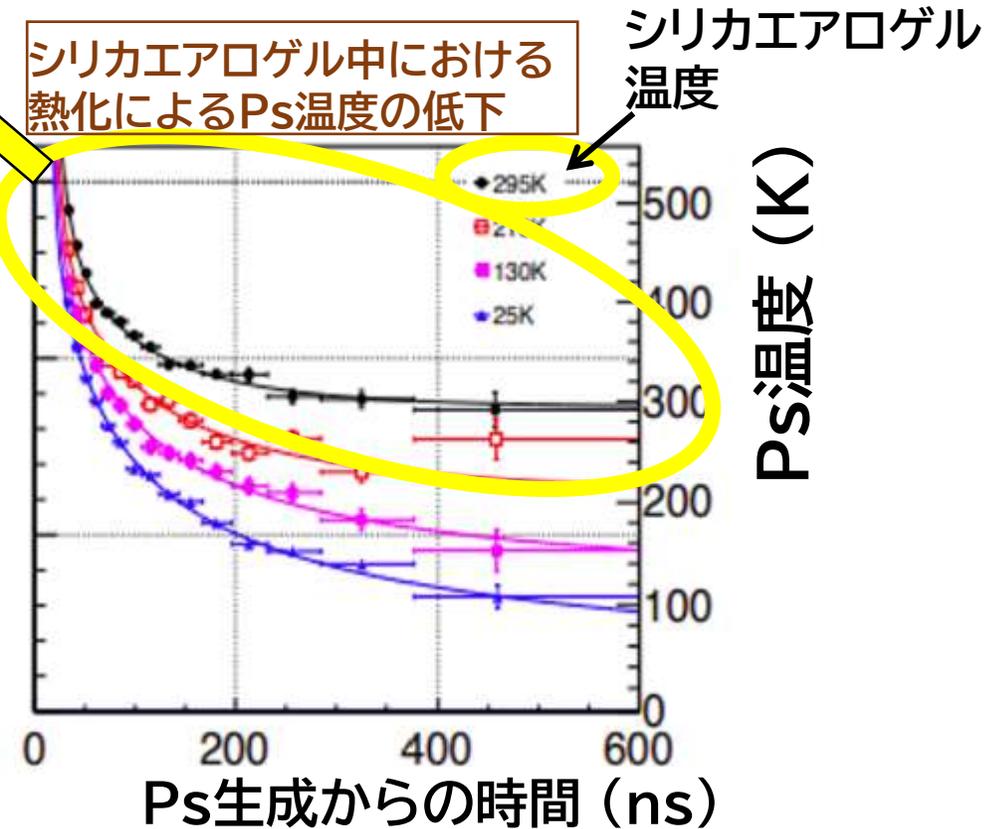
レーザー照射タイミングを遅らせるほど2P-Ps崩壊率が減少

レーザー照射タイミングを変化させた際のPs崩壊率の変化

■ 取得データ — Model Function Fit

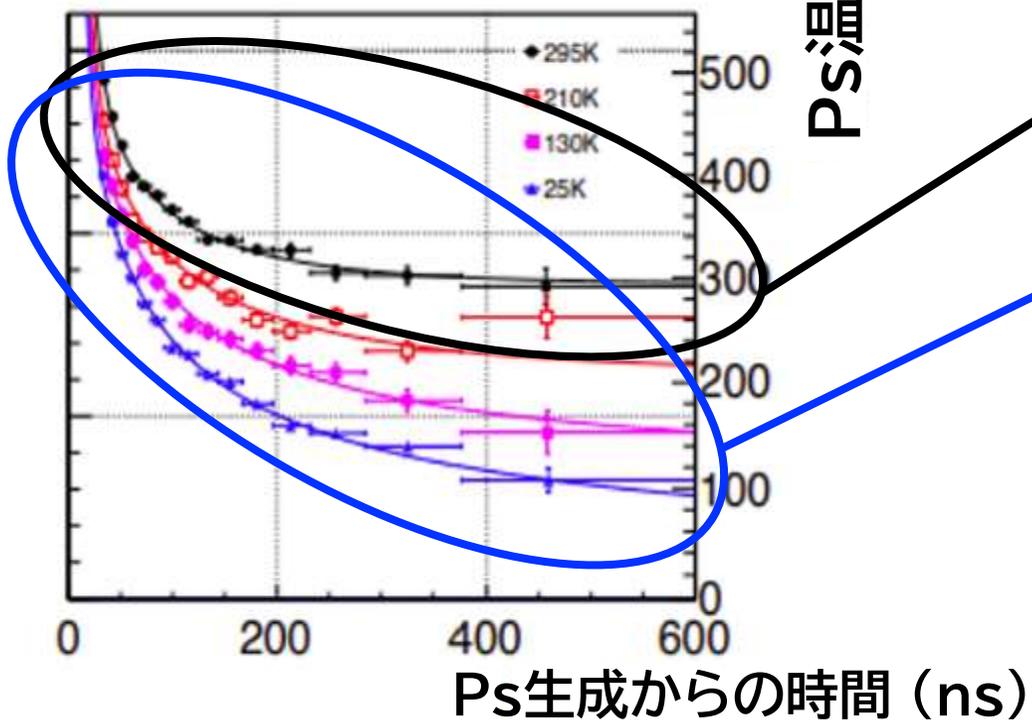


熱化によってPs温度が低下することで2P-Psの崩壊率が減少している可能性がある



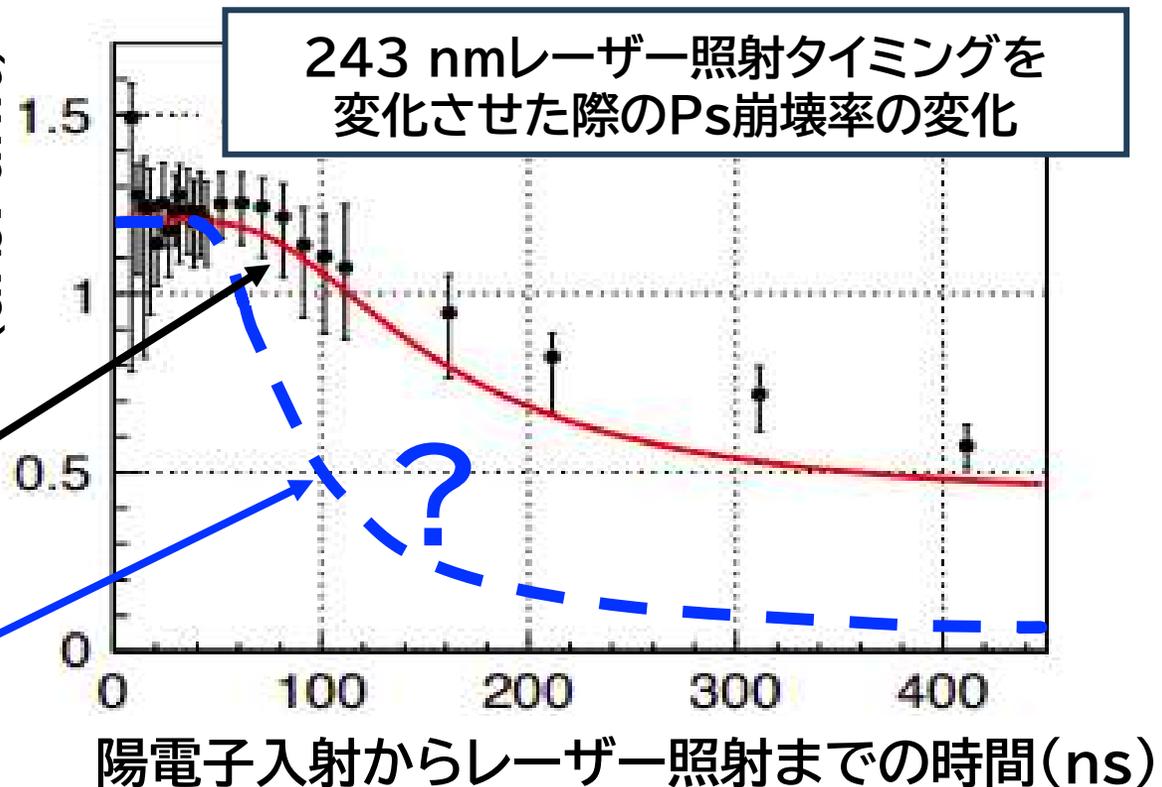
本実験の目的

シリカエアロゲル中における熱化によるPs温度の低下



シリカエアロゲルを冷却することで熱化によりPs温度が低下する。

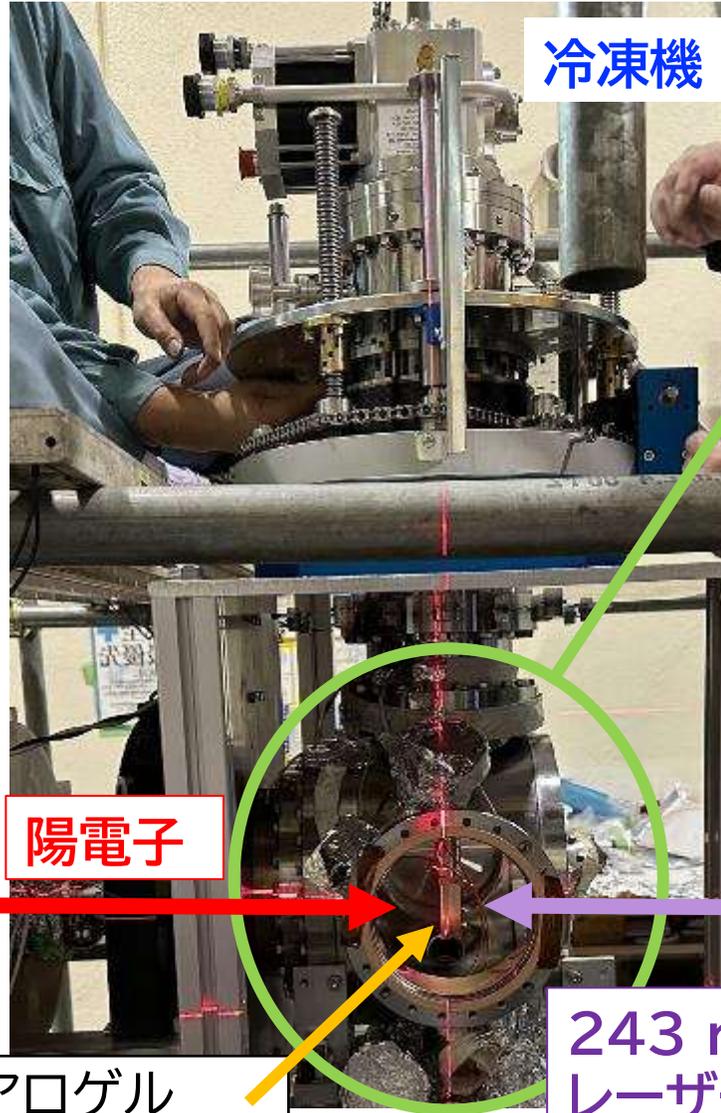
Ps崩壊率 (arb. unit)



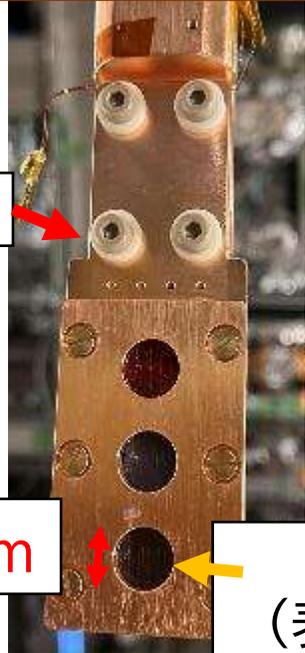
冷凍機を用いてシリカエアロゲルを冷却したとき、常温のシリカエアロゲルを用いた時と比べてレーザー照射時の2P-Ps崩壊率が変化するかを調査する

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

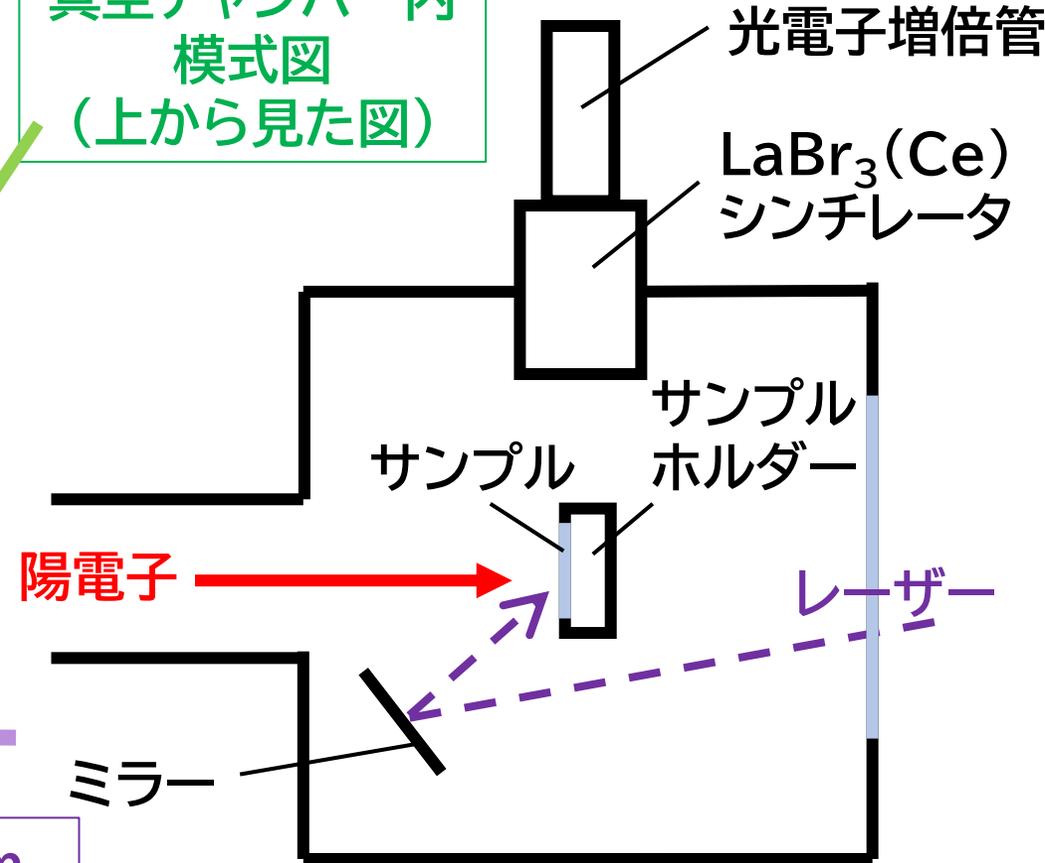


サンプルホルダー

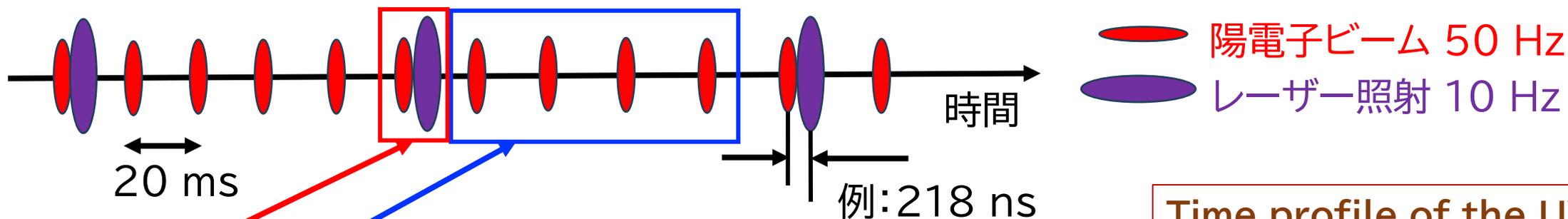


シリカエアロゲル
(表面にプラズマCVD
緻密シリカ層 103 nm)

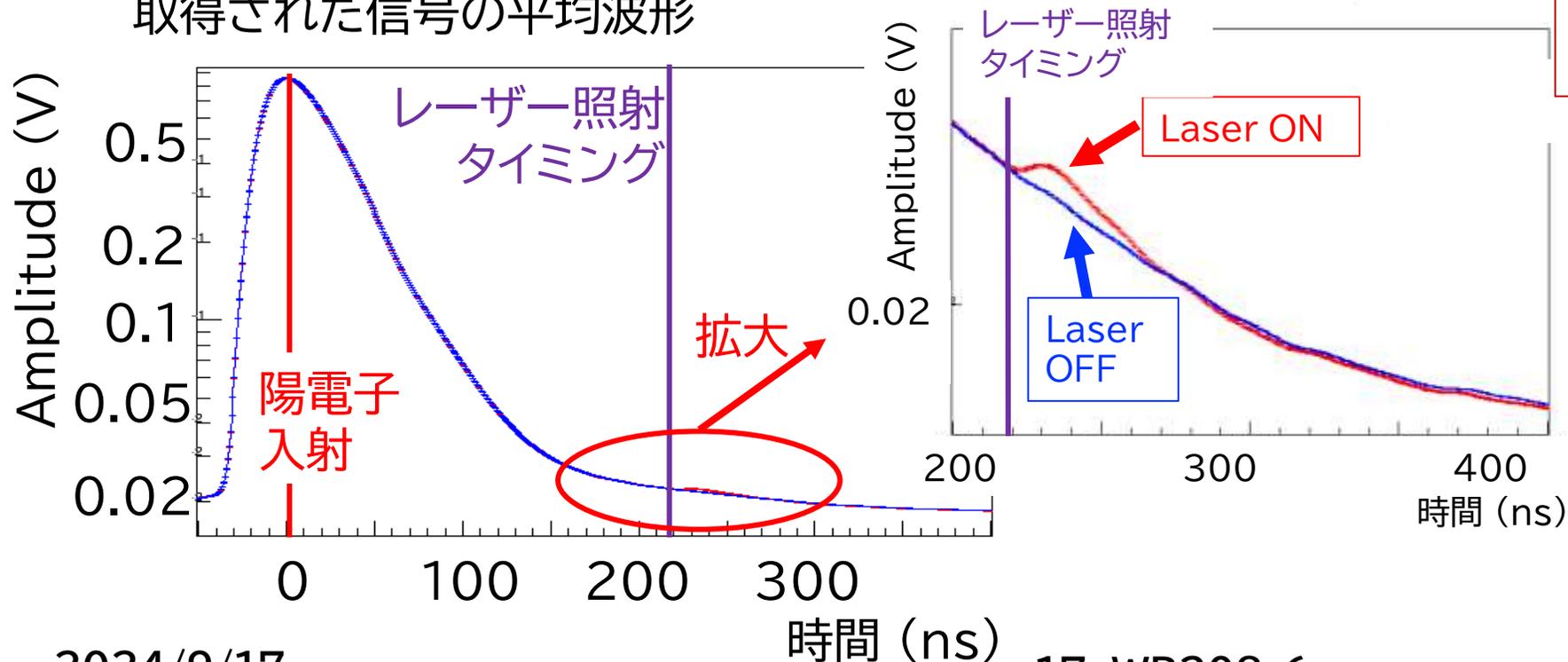
真空チャンバー内
模式図
(上から見た図)



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。

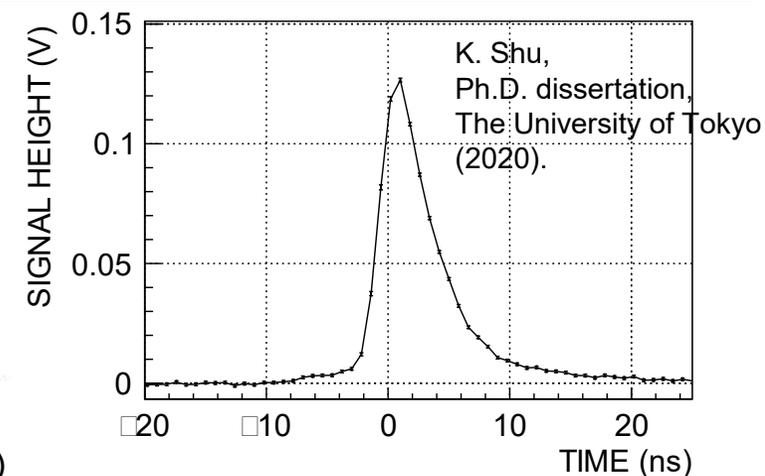


Laser ON と OFF のときにシンチレータで
取得された信号の平均波形



Time profile of the UV
laser.

Laser pulse width: 2 ns-5 ns
(including a rise time of a
digitizer)



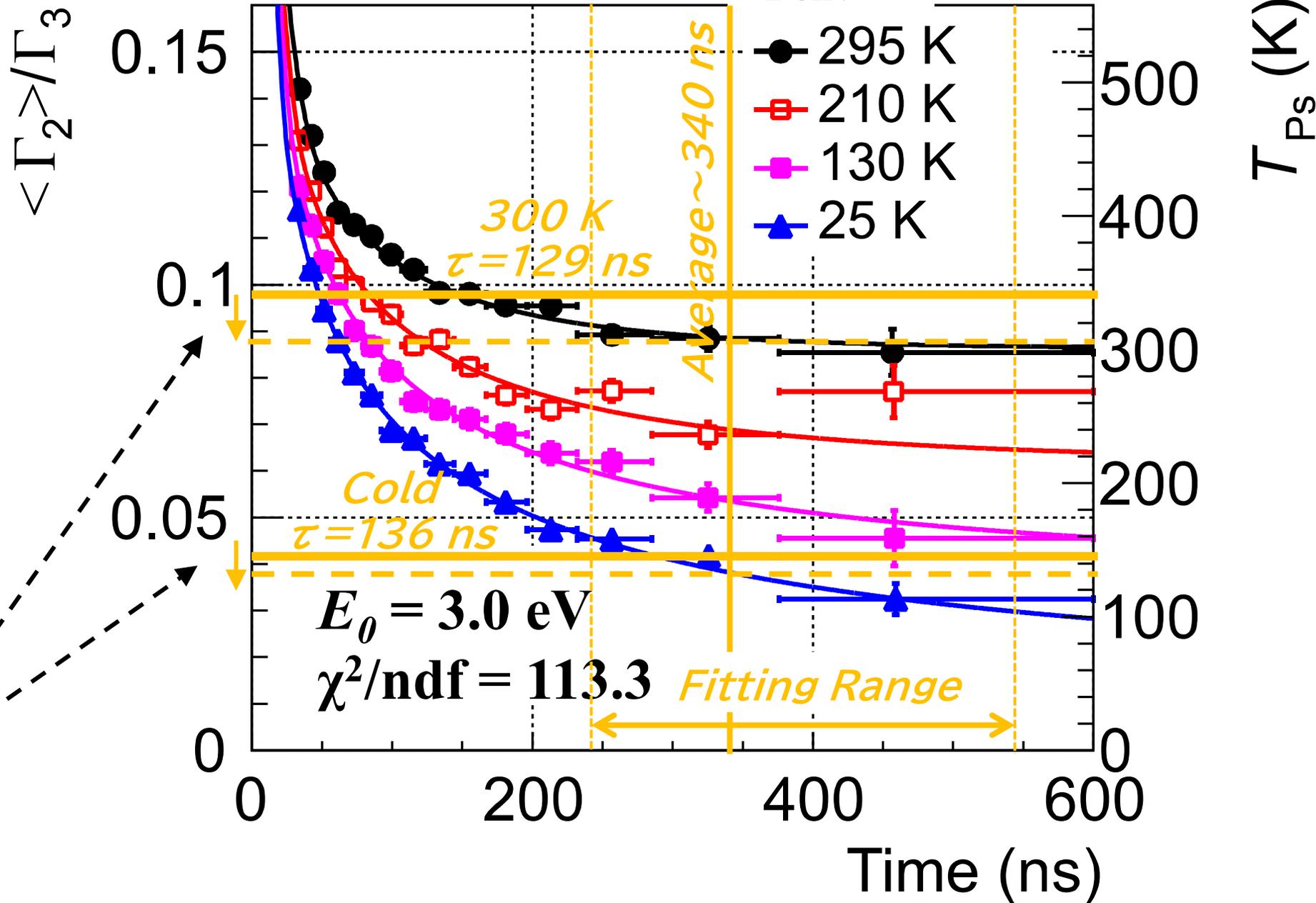
室温・低温での Ps 寿命

熱化曲線測定時の
シリカエアロゲルの
平均自由行程
38.5 nm

今回用いた
シリカエアロゲルの
平均自由行程
34.0 nm

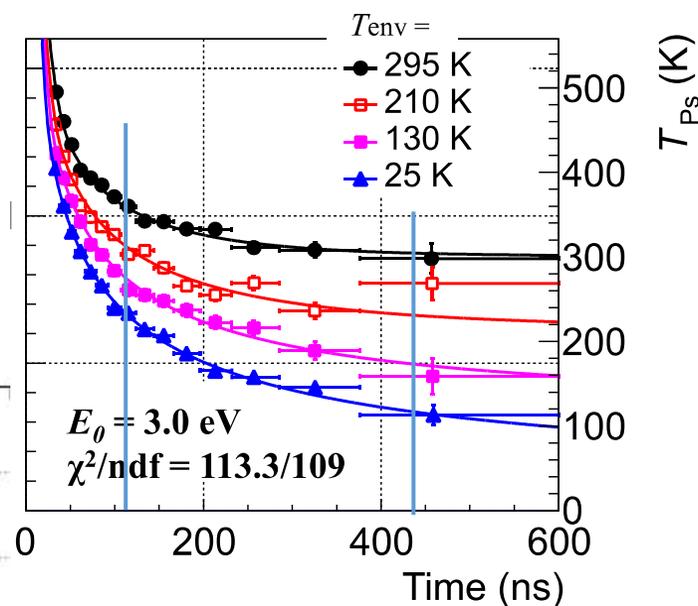
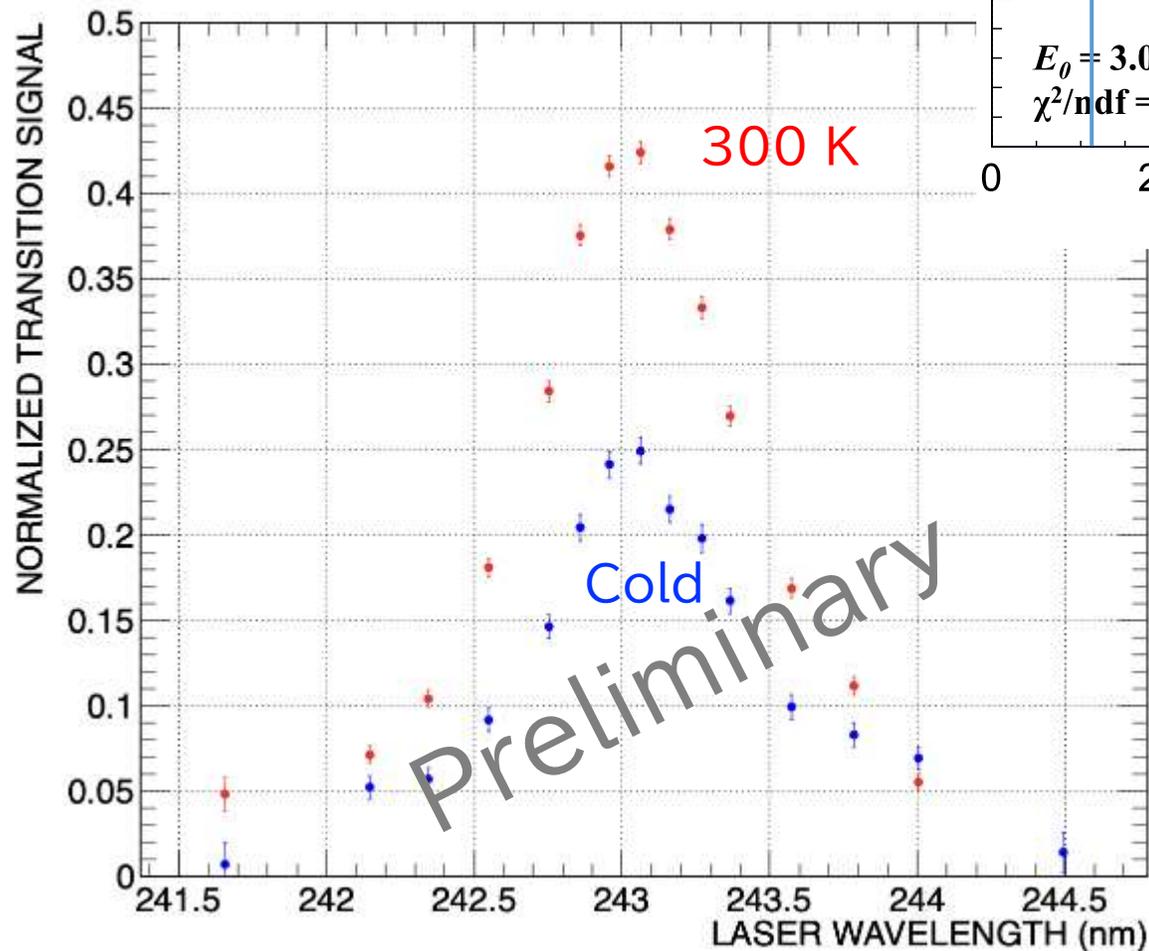
今回の方が 12 %
程度 pick-off が
大きいはず

→その補正を入れ
ると(破線)一致

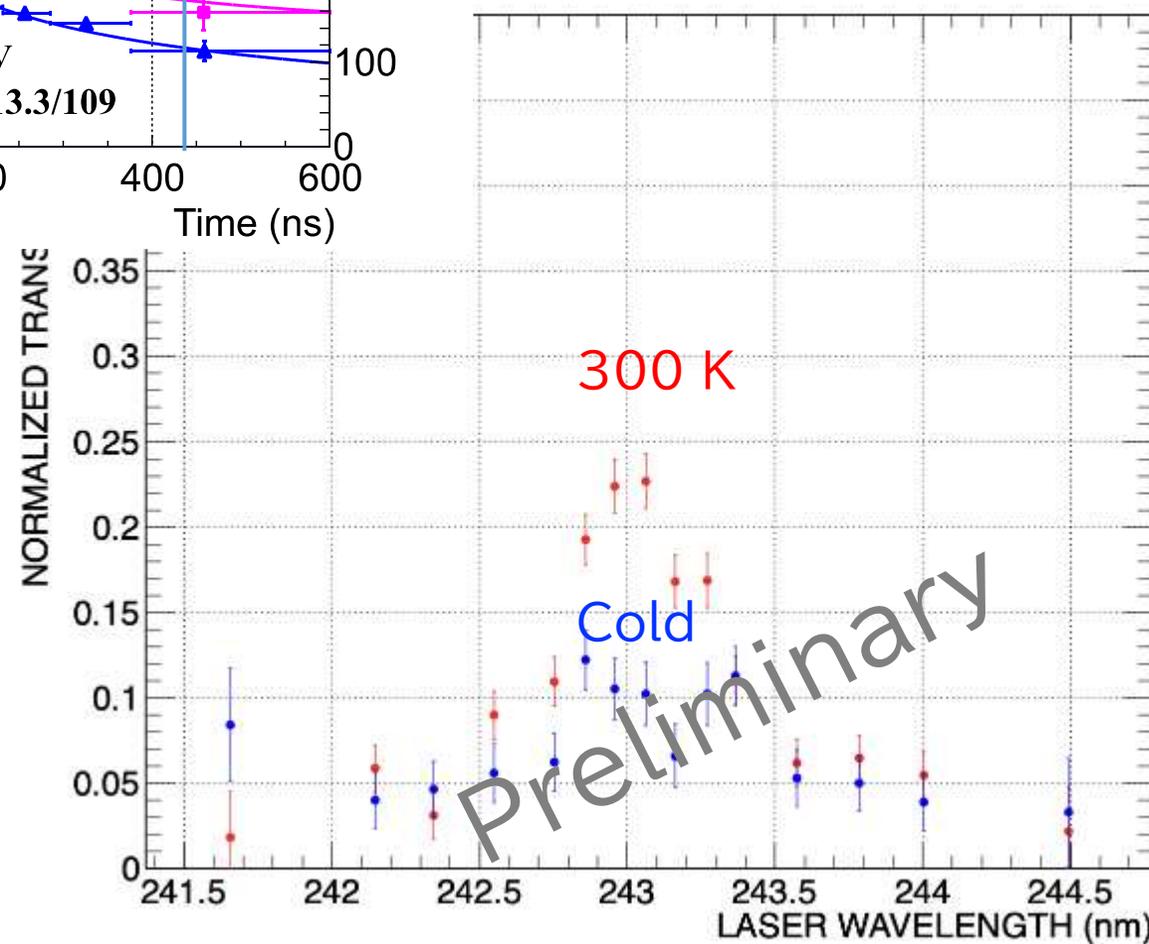


Some preliminary results (by simple analysis)

Laser timing = 110 ns

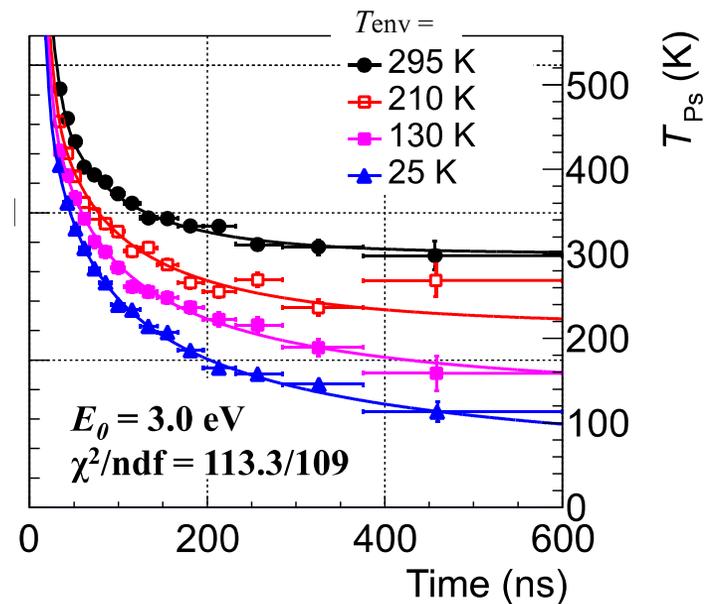
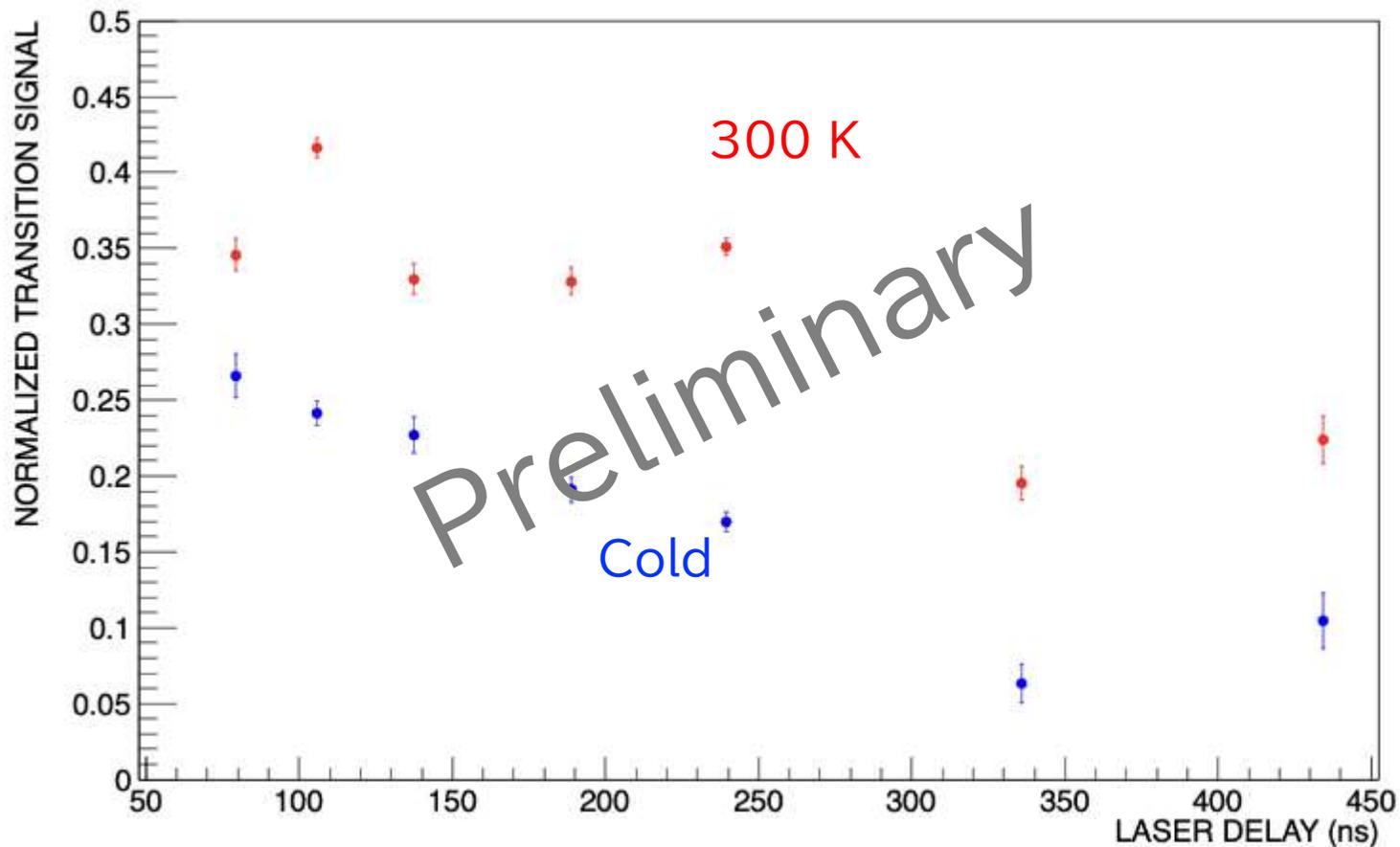


Laser timing = 430 ns



Some preliminary results (by simple analysis)

Laser wavelength = 243 nm



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>