

# 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

(1)東大, (2)産総研, (3)KEK物構研, (4)量研高崎

石田 明<sup>1</sup>, 難波 俊雄<sup>1</sup>,

大島 永康<sup>2</sup>, オローク ブライアン<sup>2</sup>, 満汐 孝治<sup>2</sup>, 伊藤 賢志<sup>2</sup>,  
兵頭俊夫<sup>3</sup>, 望月 出海<sup>3</sup>, 和田 健<sup>3</sup>, 前川 雅樹<sup>4</sup>

<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 12 月 13 日

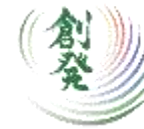
京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」

@ 京都大学複合原子力科学研究所 事務棟大会議室



# 謝辞

今回発表する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 Research 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

This work was performed under the approval of the Photon Factory Program Advisory Committee (Proposal No. 2017P009, 2018G100, 2020G101, 2020G631, 2022G087, 2023G157, 2024G143).

<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](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

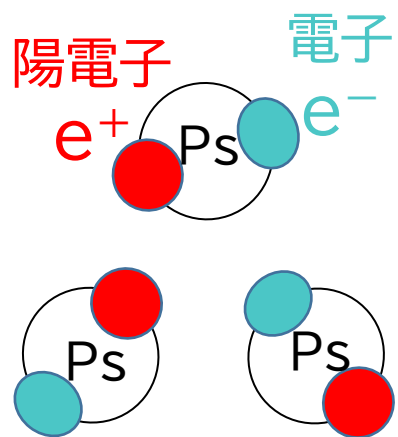
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 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)

$10^{15} \text{ cm}^{-3}$   
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)  
 $10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
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

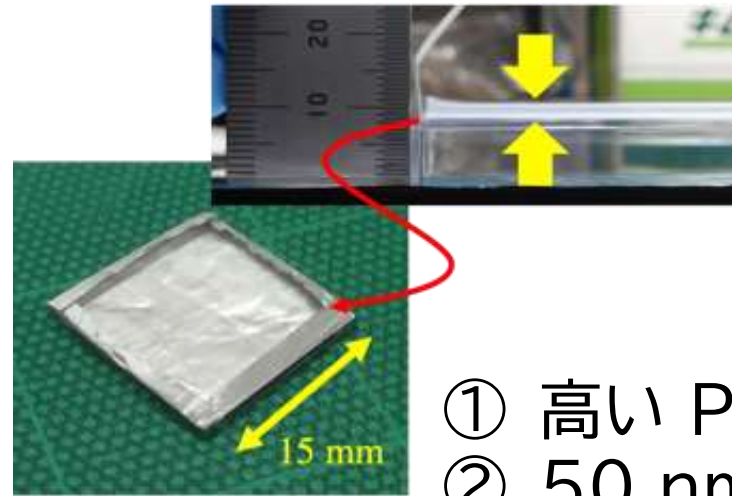
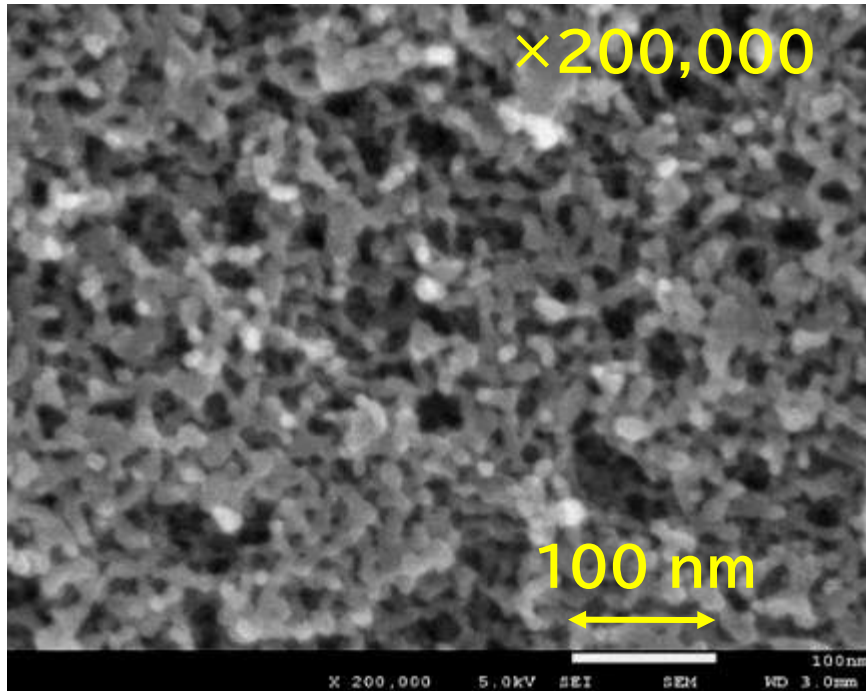
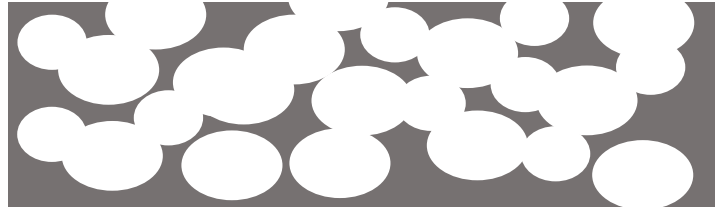
無機酸化物多孔体中の空孔

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 $\text{SiO}_2$ )エアロゲルを開発



シリカエアロゲル  
密度  $0.12 \text{ g cm}^{-3}$   
空孔径  $\approx 50 \text{ nm}$   
厚さ  $0.5 \text{ mm}$

- ① 高い Ps 生成率( $\approx 35 \%$ )
- ②  $50 \text{ nm}$  空孔
- ③  $243 \text{ nm}$  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

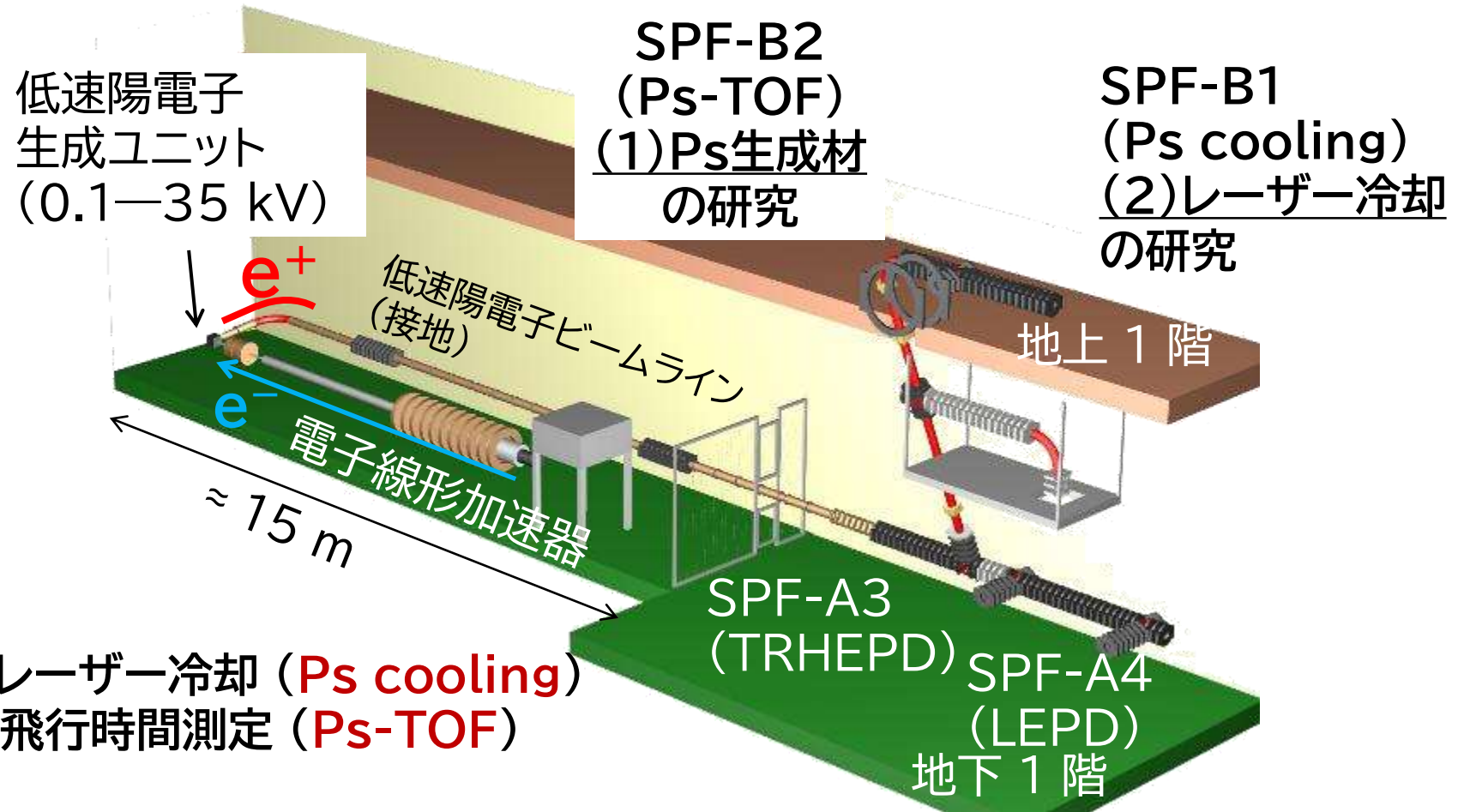
他に、ナノプロセッシング, ナノインプリント, 規則配列シリカナノ材料(以上シリカ), シリカ以外のナノ多孔質材料を試し中

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)

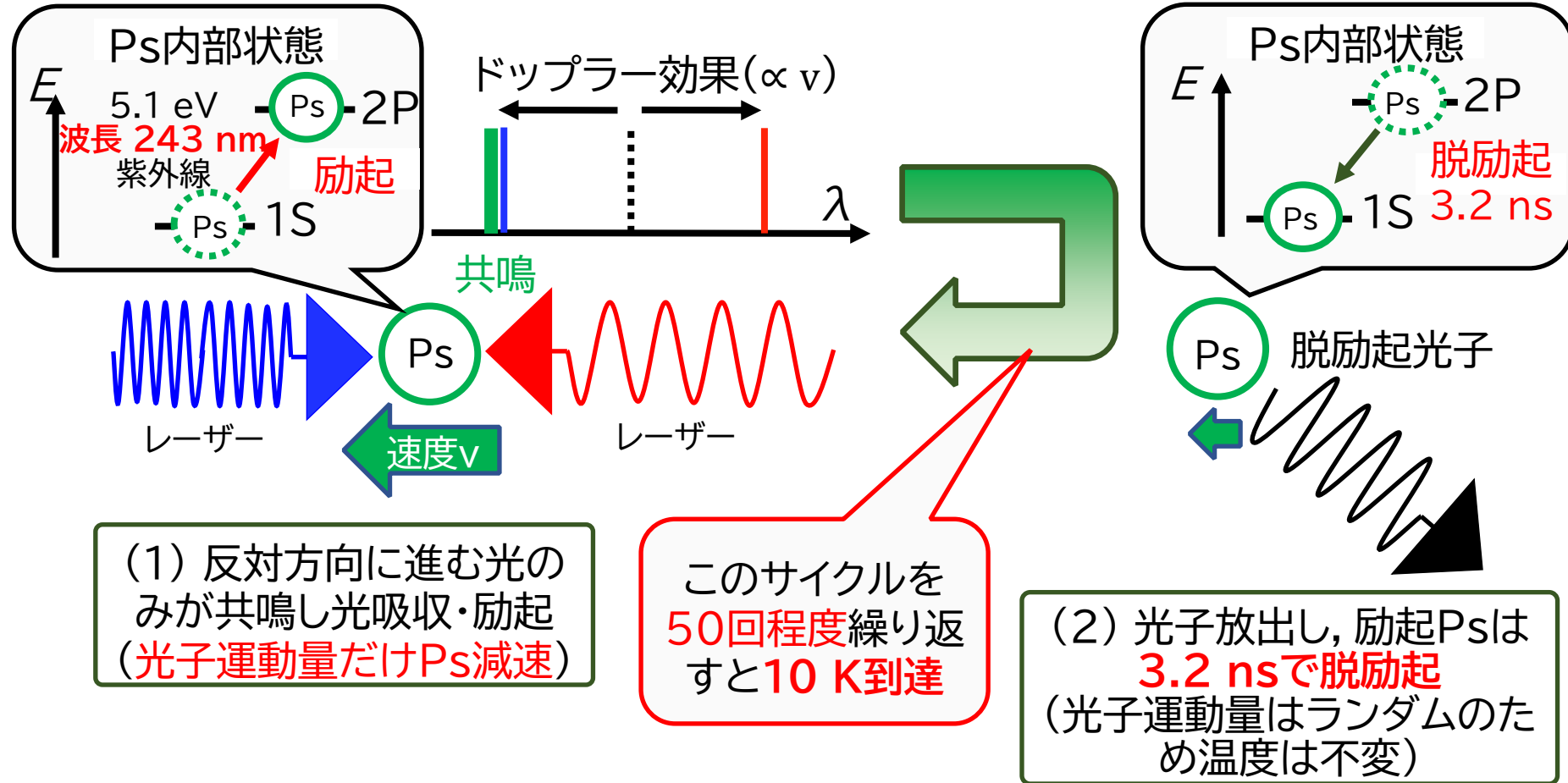


SPF  
@入射器コントロール棟

- 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)

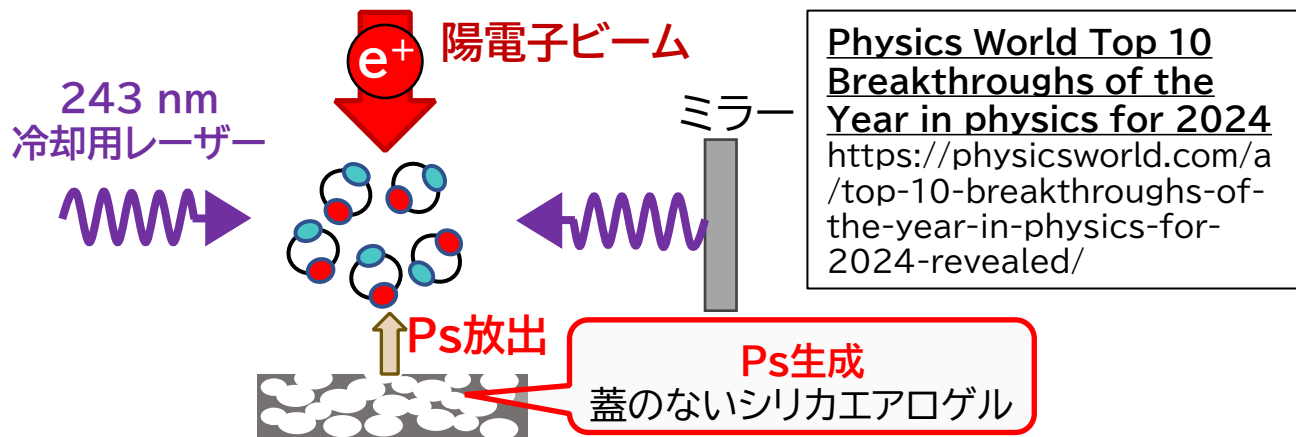


# Ps レーザー冷却の原理



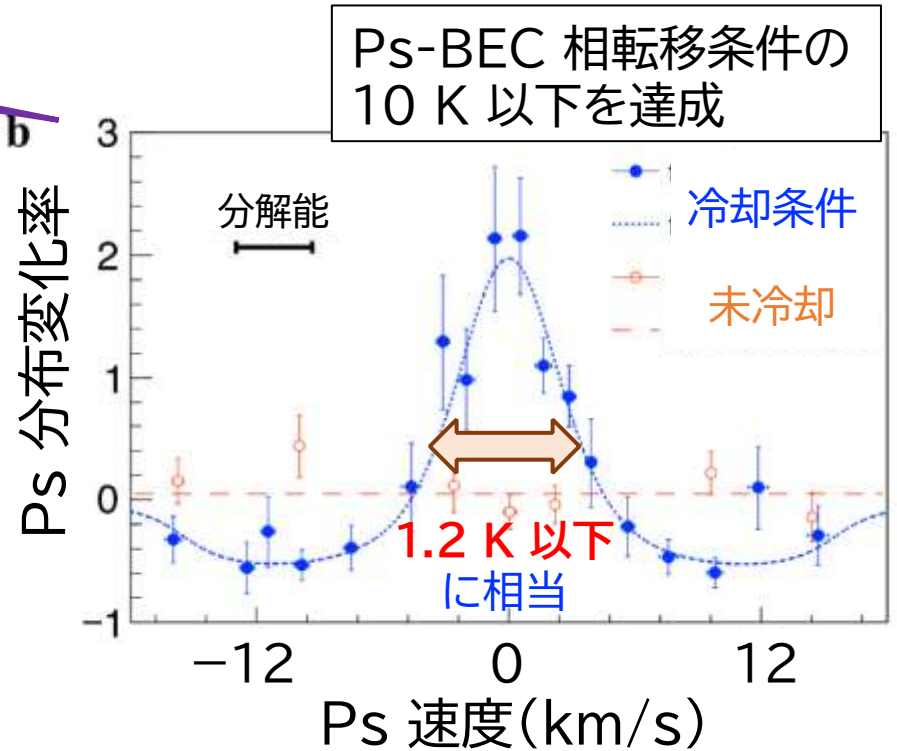
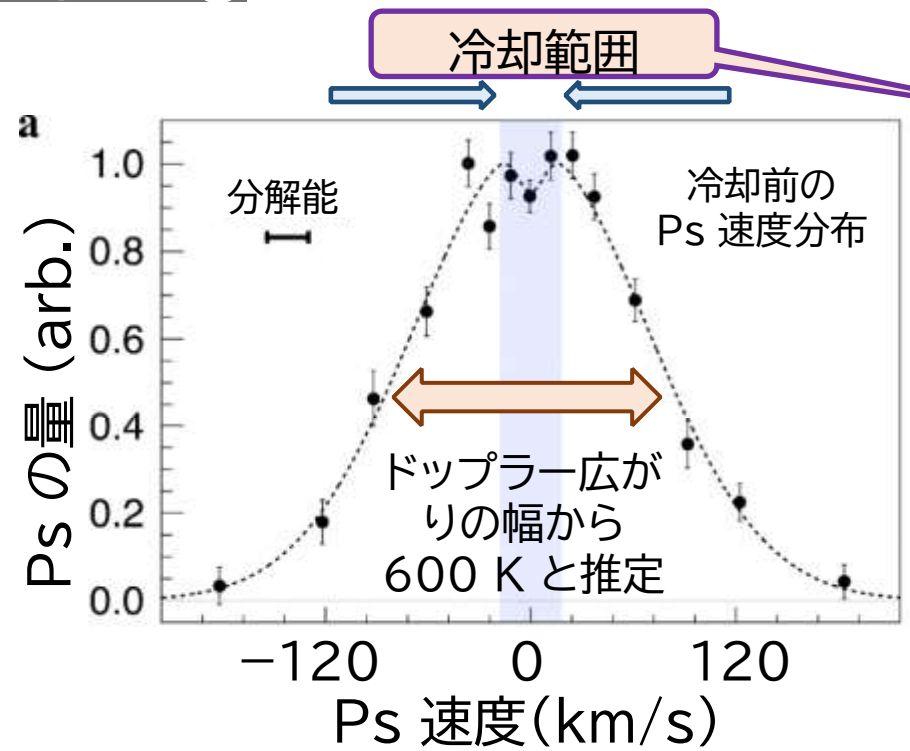


# 真空中でPs 一次元レーザー冷却に成功



Physics World Top 10 Breakthroughs of the Year in physics for 2024  
<https://physicsworld.com/a/top-10-breakthroughs-of-the-year-in-physics-for-2024-revealed/>

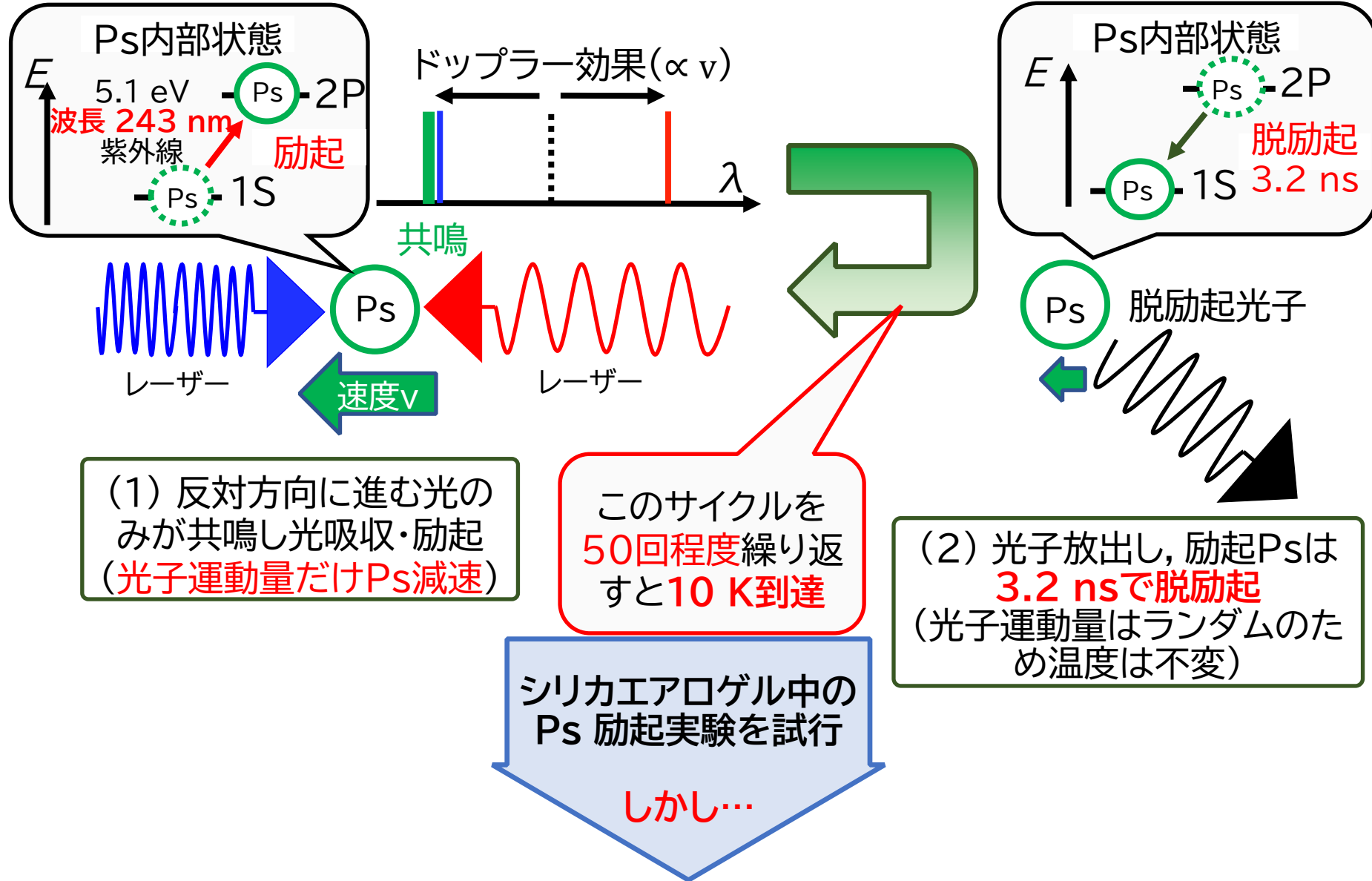
(2023年5月 @ KEK-IMSS-SPF-B1, 5 keV)



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

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 cooled<sup>1–3</sup>, allowing the precise measurements and control of quantum systems. This is essential

# 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〉

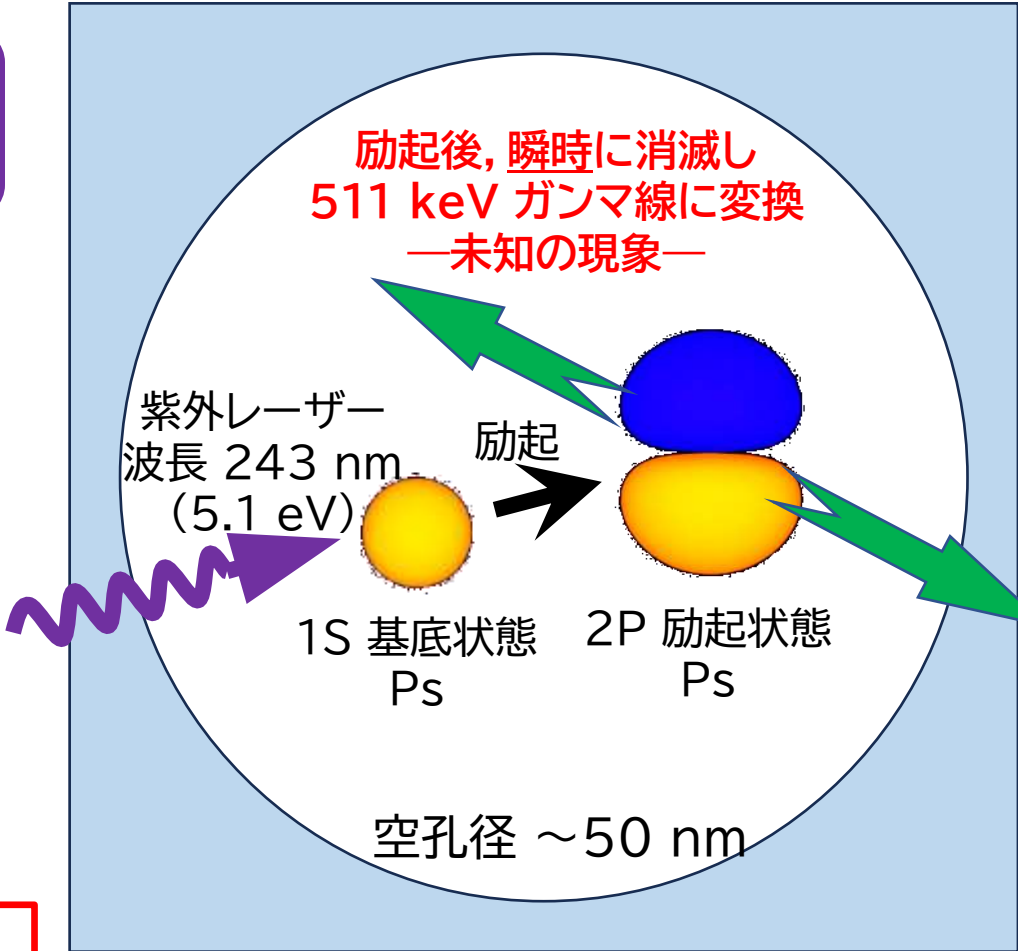
課題: Psが感じる空孔表面ポテンシャルの物理モデル構築と励起-消滅プロセスの解明

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



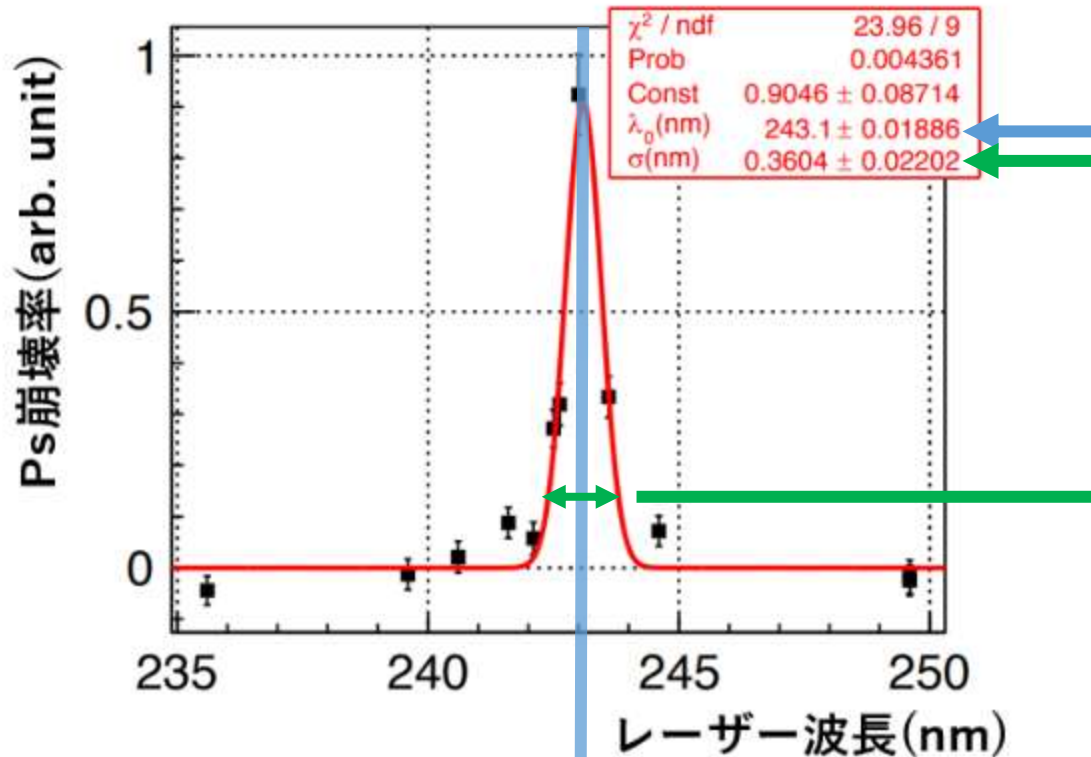
## シリカエアロゲル

- 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



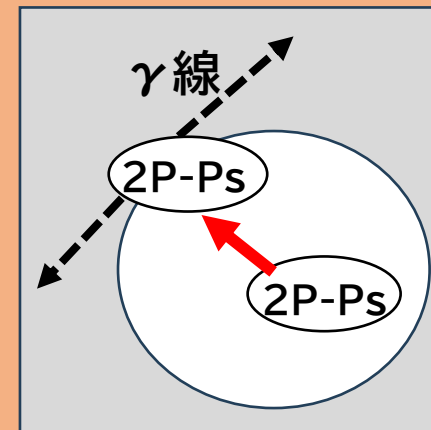
Psの1S-2P遷移エネルギーに対応する  
波長243 nmでPs崩壊率最大

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



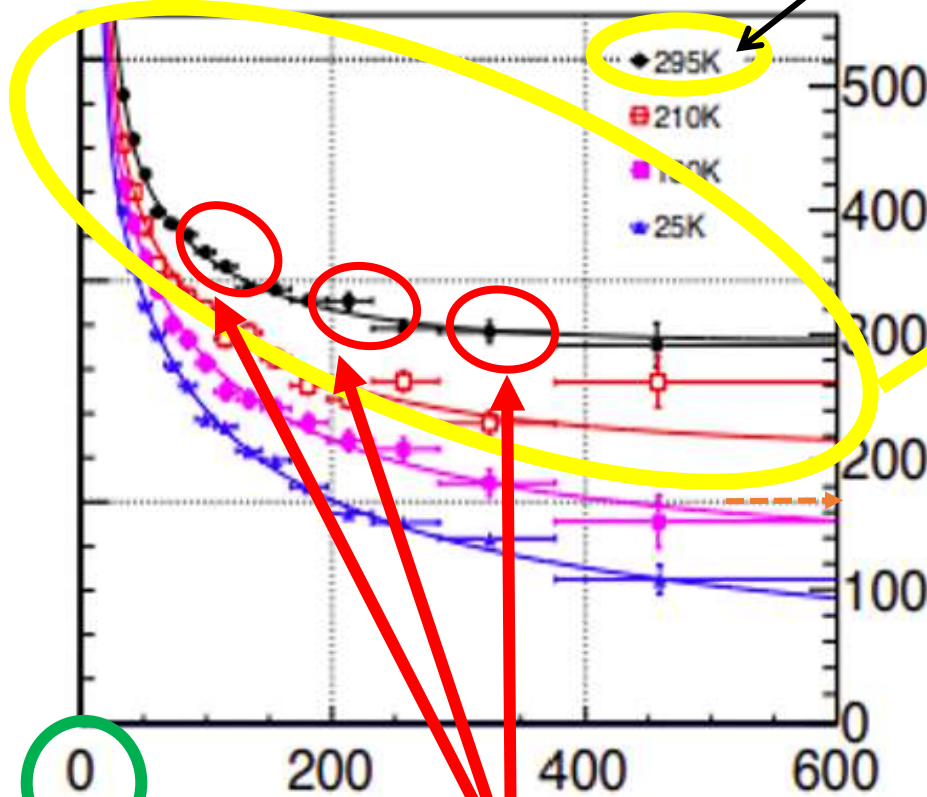
2P-Psがシリカエアロゲル中の  
空孔壁に衝突することで崩壊  
している可能性がある。

⇒ 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？

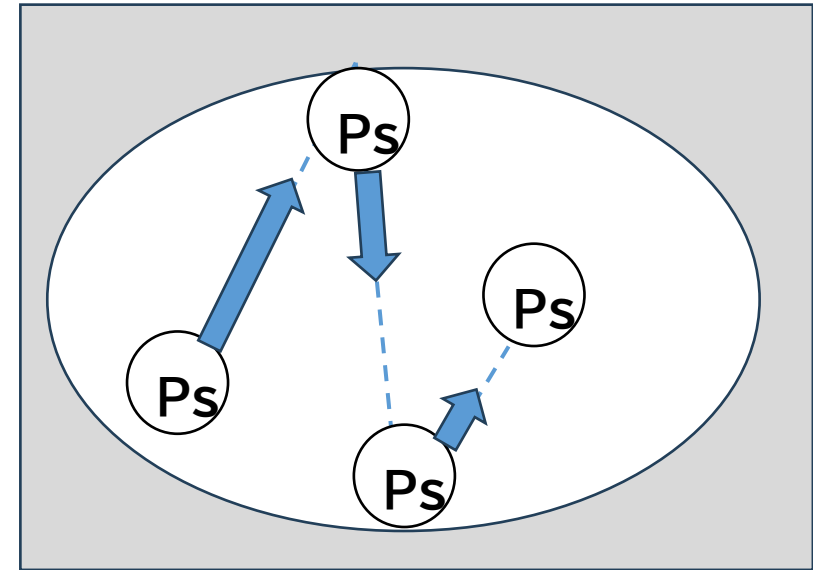
# 熱化によってシリカエアロゲル中のPsは温度を失う

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



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)

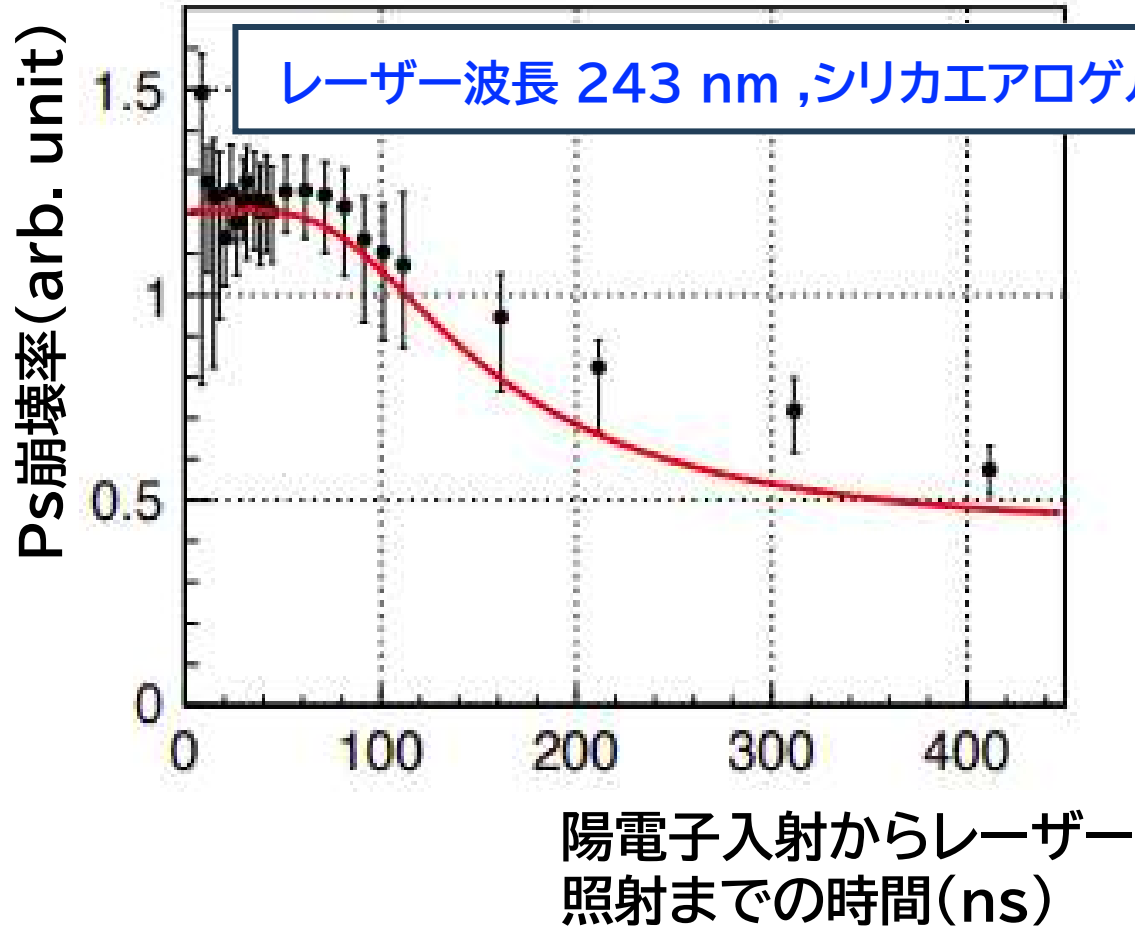
各タイミングでレーザーを照射すると2P-Ps崩壊率はどのようになるか？

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

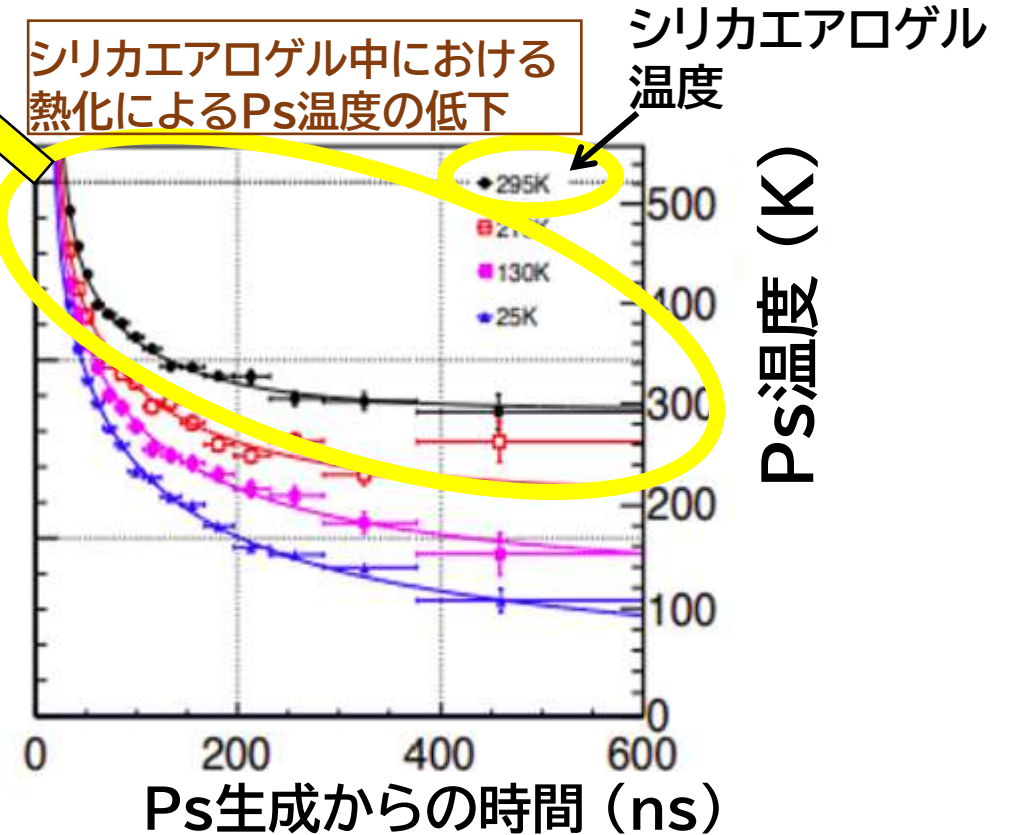
# レーザー照射タイミングを遅らせるほど2P-Ps崩壊率が減少

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

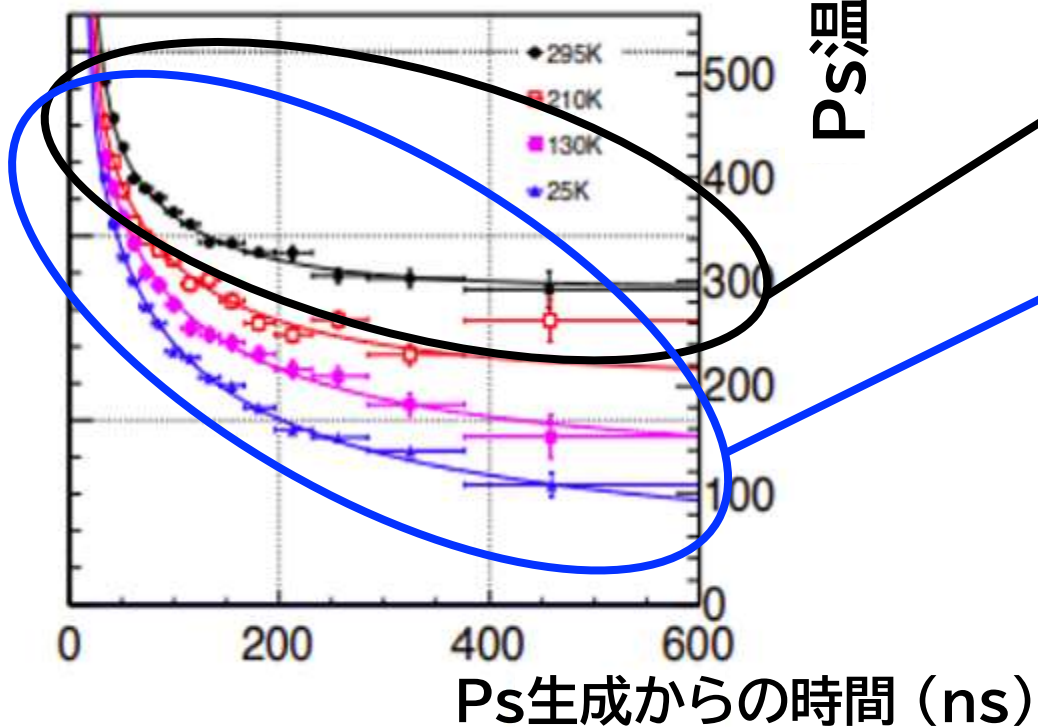


熱化によってPs温度が低下することで2P-Psの崩壊率が減少している可能性がある



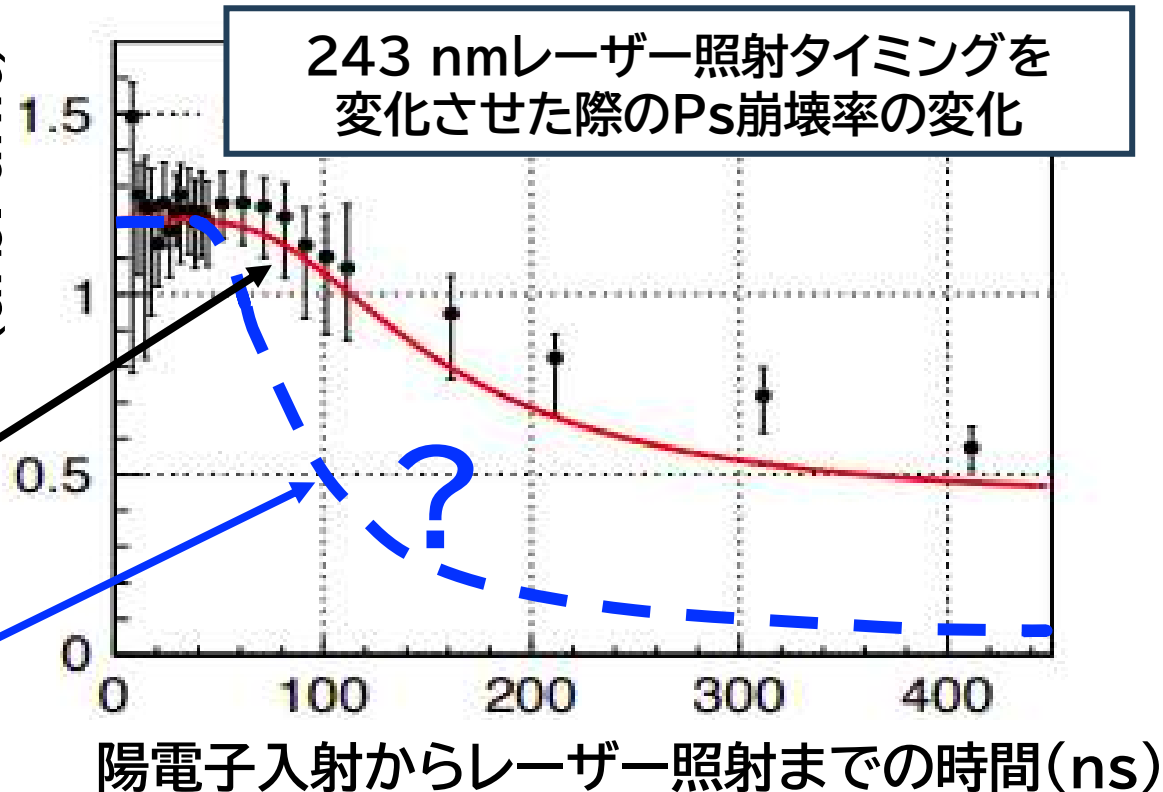
# 本実験の目的

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。

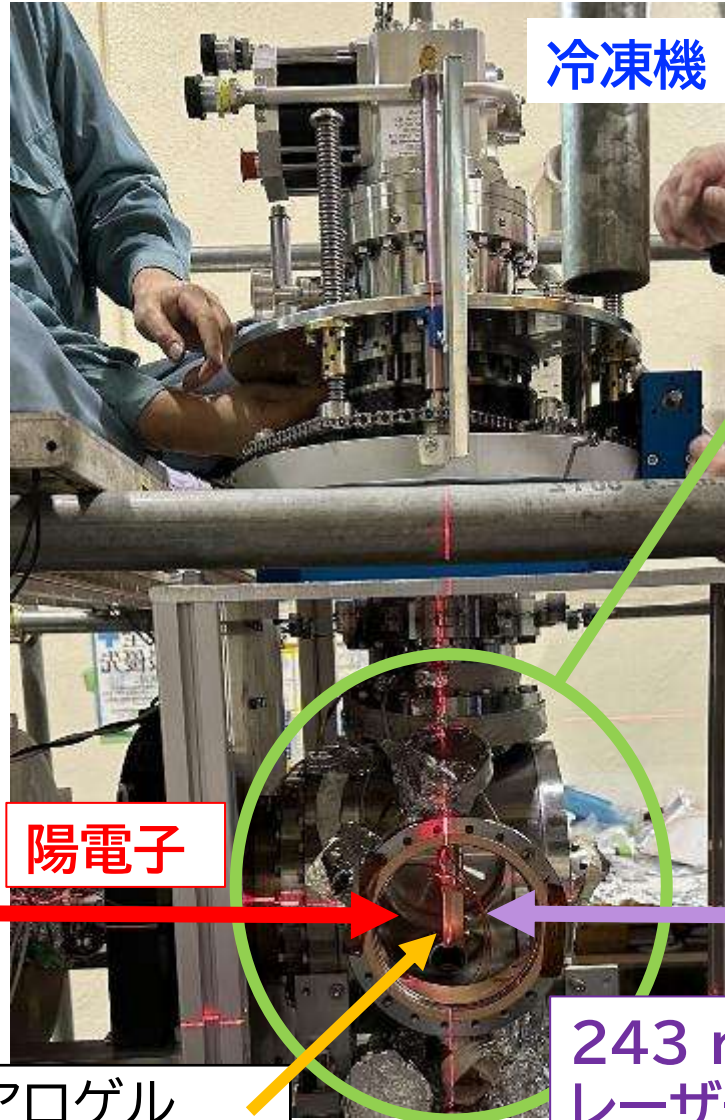
Ps崩壊率 (arb. unit)



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

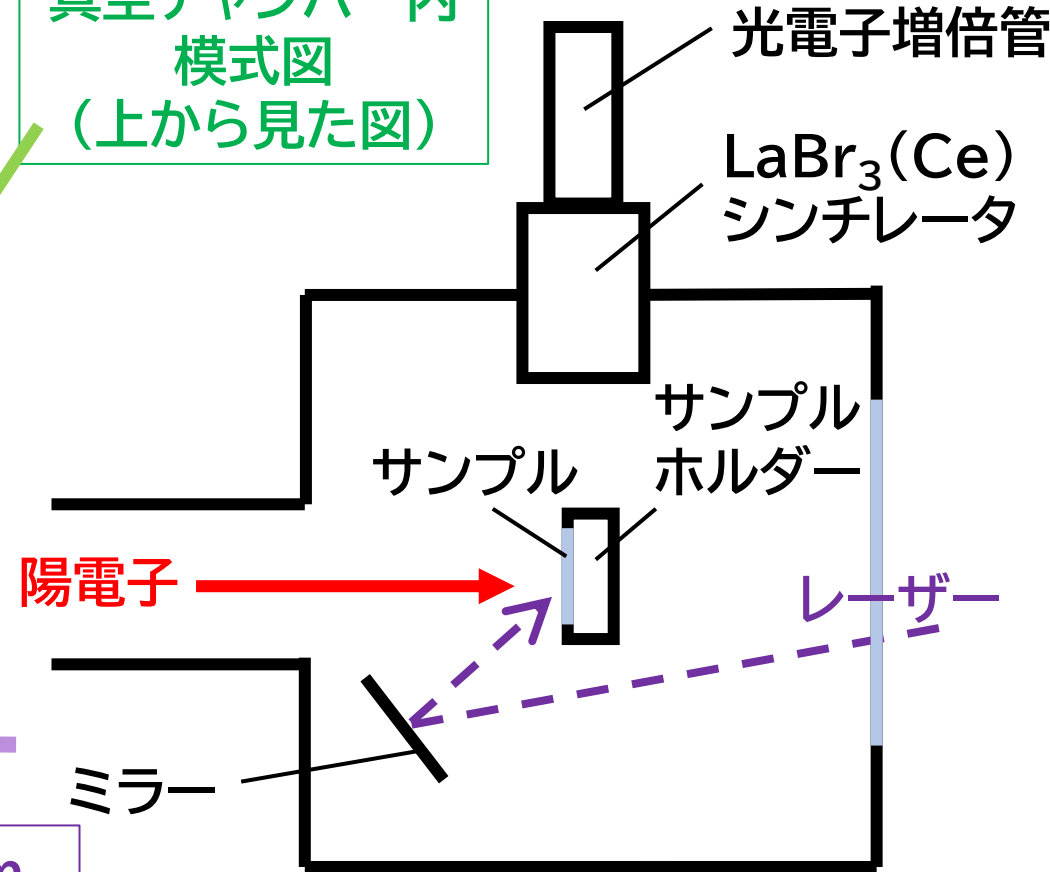
# 冷凍機で冷却したシリカエアロゲルの Ps レーザー遷移実験 (2024年6月 @ KEK-IMSS-SPF-B1, 7.5 keV)

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

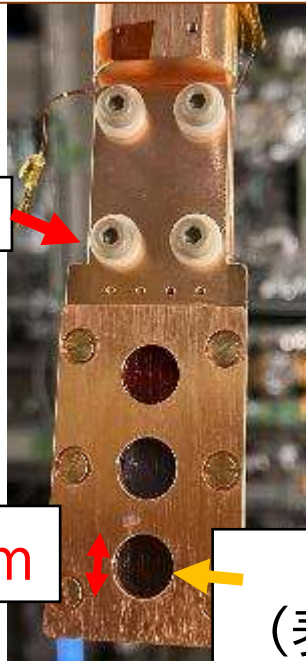


冷凍機

真空チャンバー内  
模式図  
(上から見た図)



サンプルホルダー



8 K

11 mm

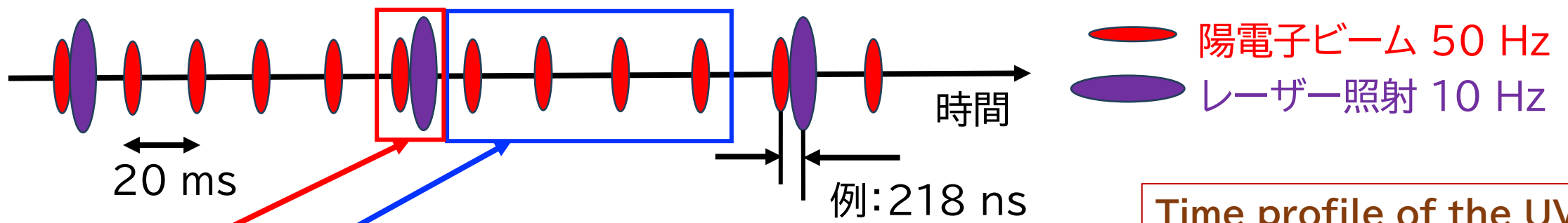
陽電子

243 nm  
レーザー

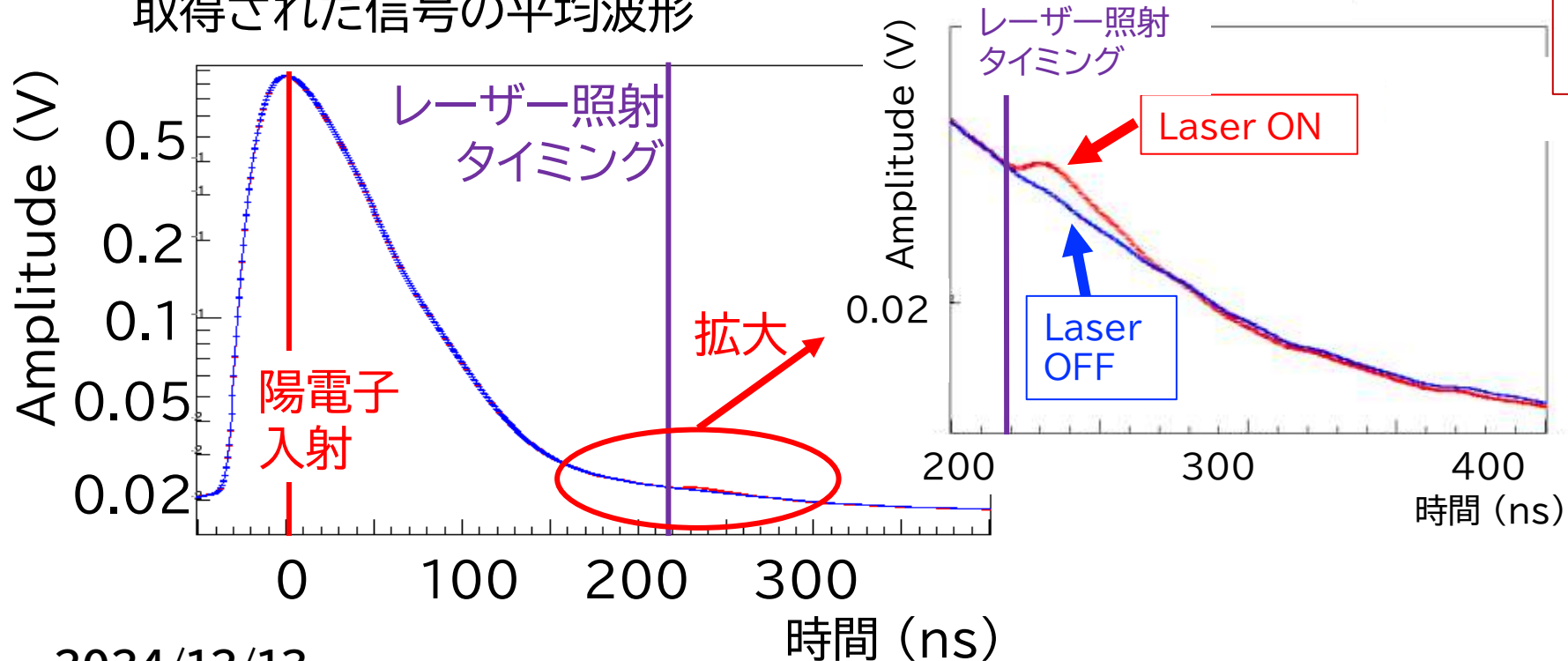
シリカエアロゲル  
(表面にプラズマCVD  
緻密シリカ層 103 nm)



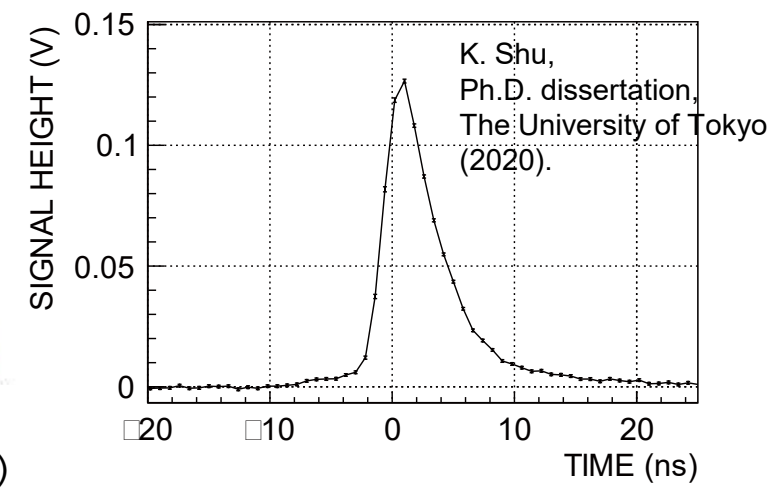
紫外レーザー照射による 2P-Ps のガンマ線への崩壊を確認。  
過去の室温データの再現性や、低温における崩壊率の変化を解析中。



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)



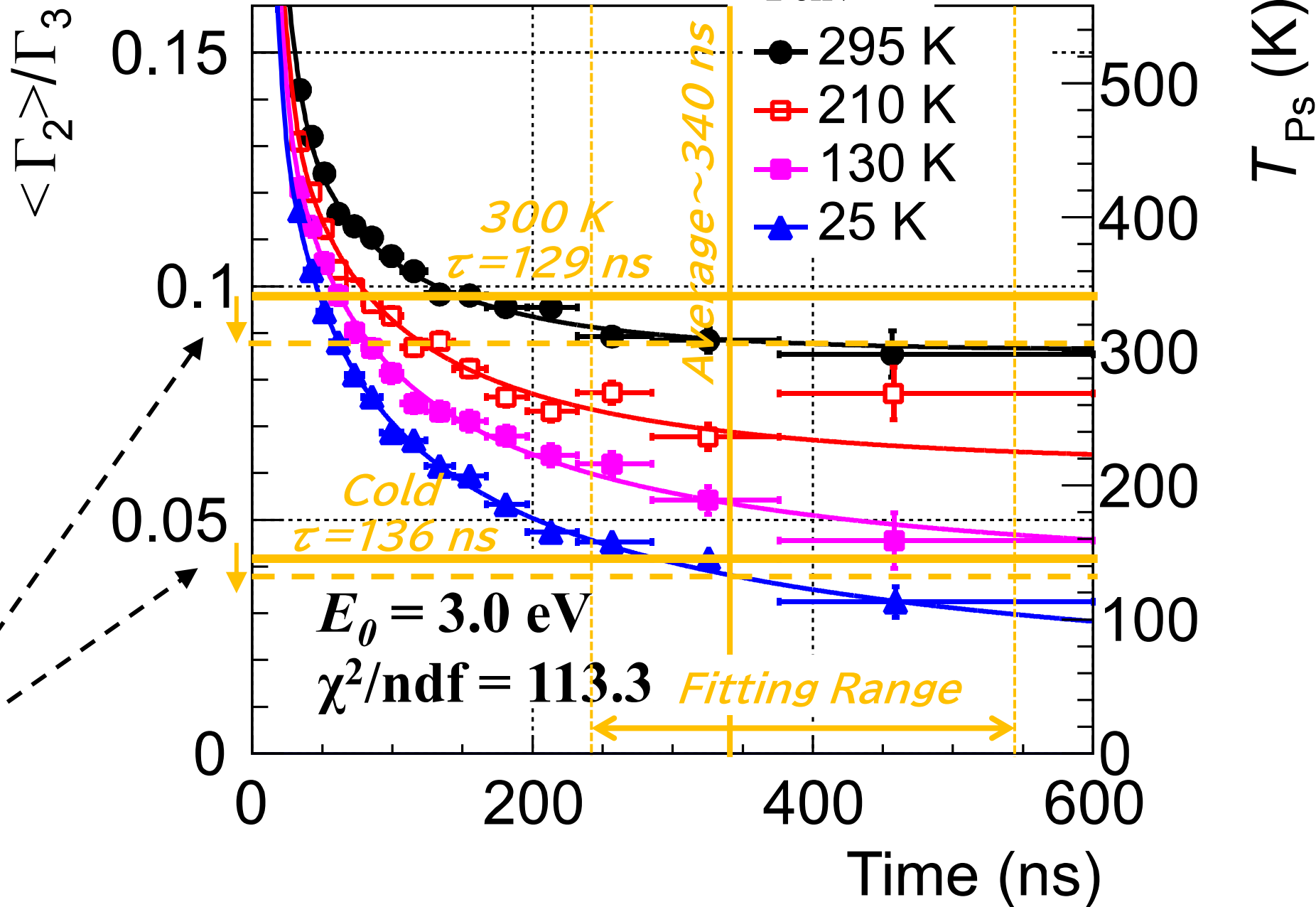
# 室温・低温での Ps 寿命

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

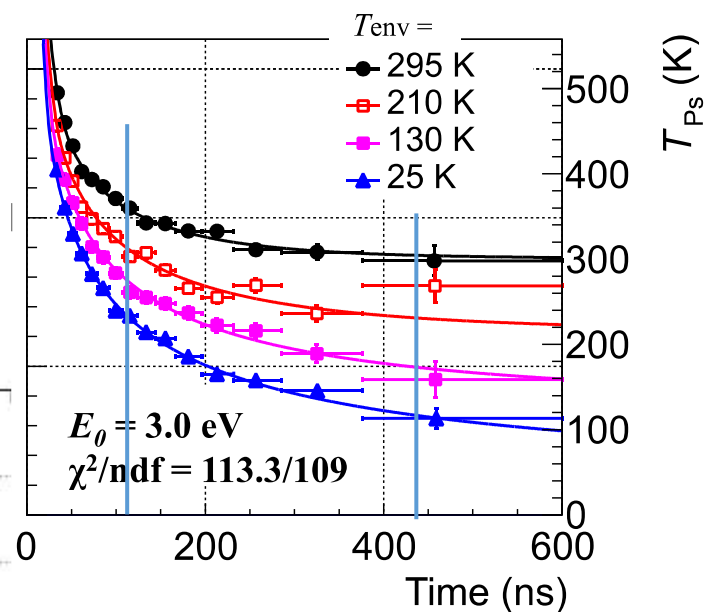
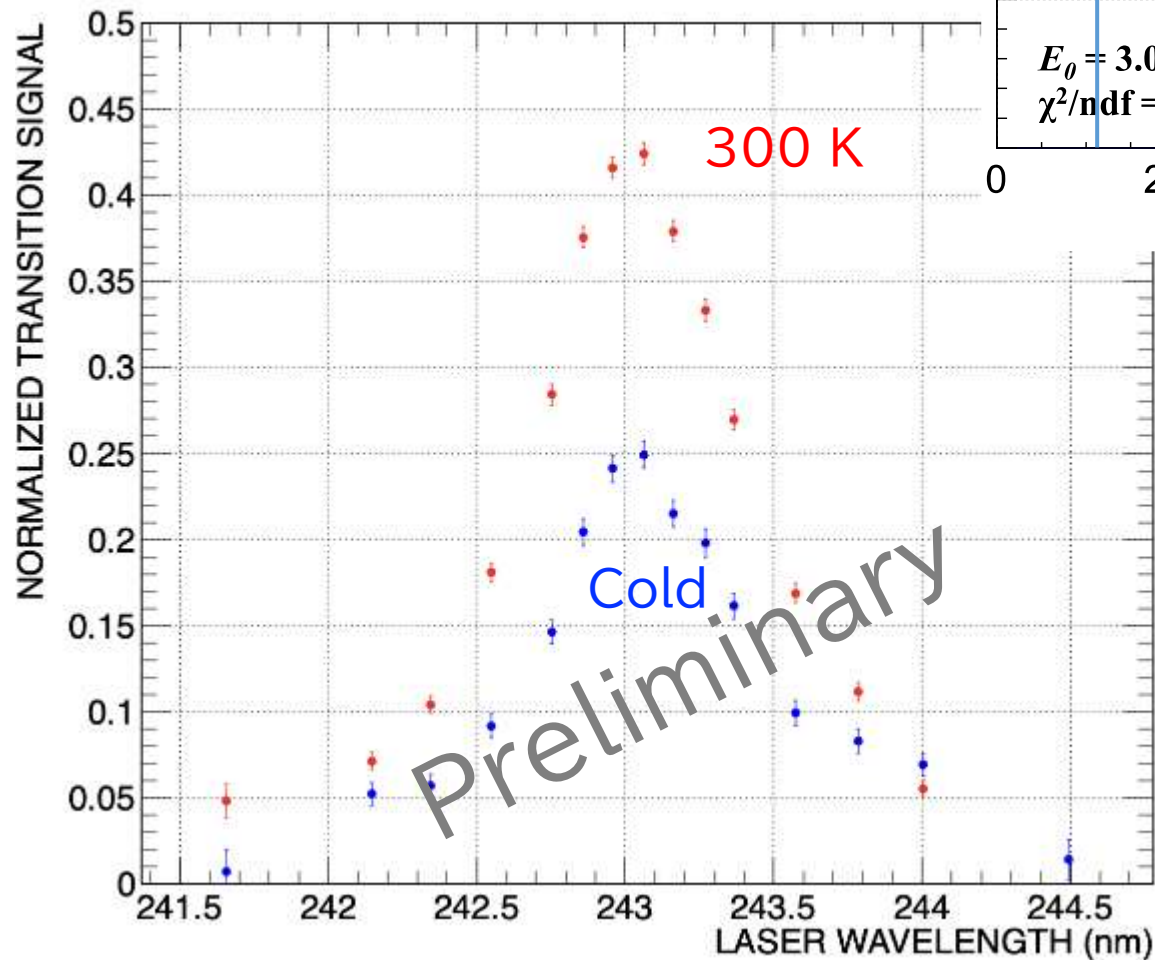
今回の方が 12 %  
程度 pick-off が  
大きいはず

→その補正を入れ  
ると(破線)一致

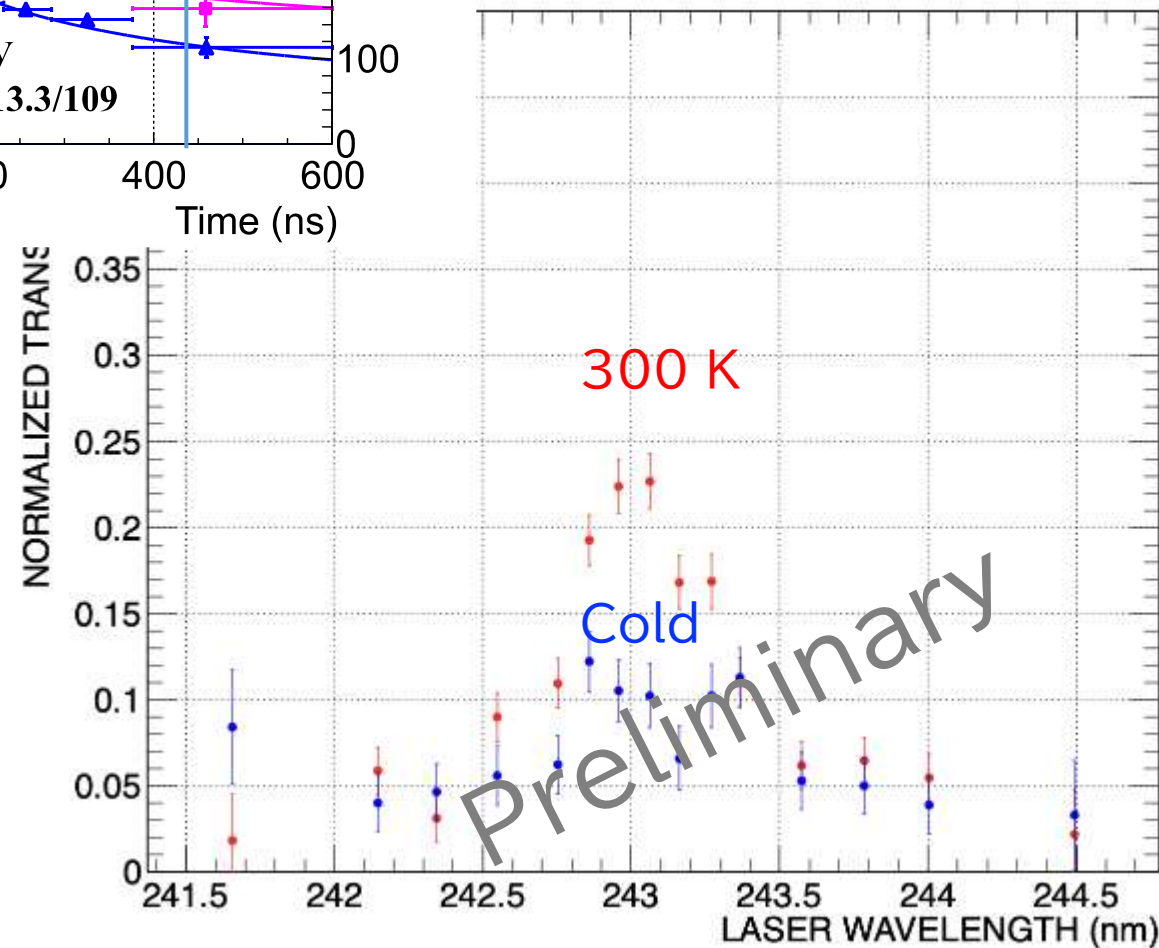


# Some preliminary results (by simple analysis)

Laser timing = 110 ns

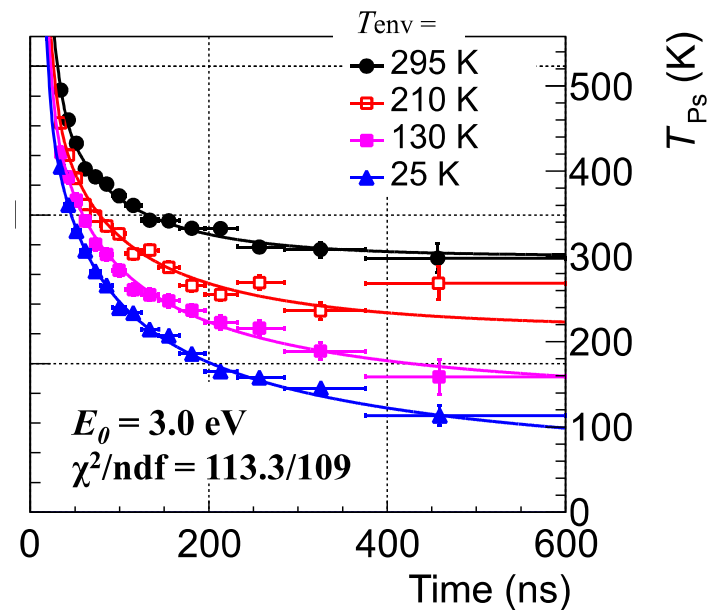
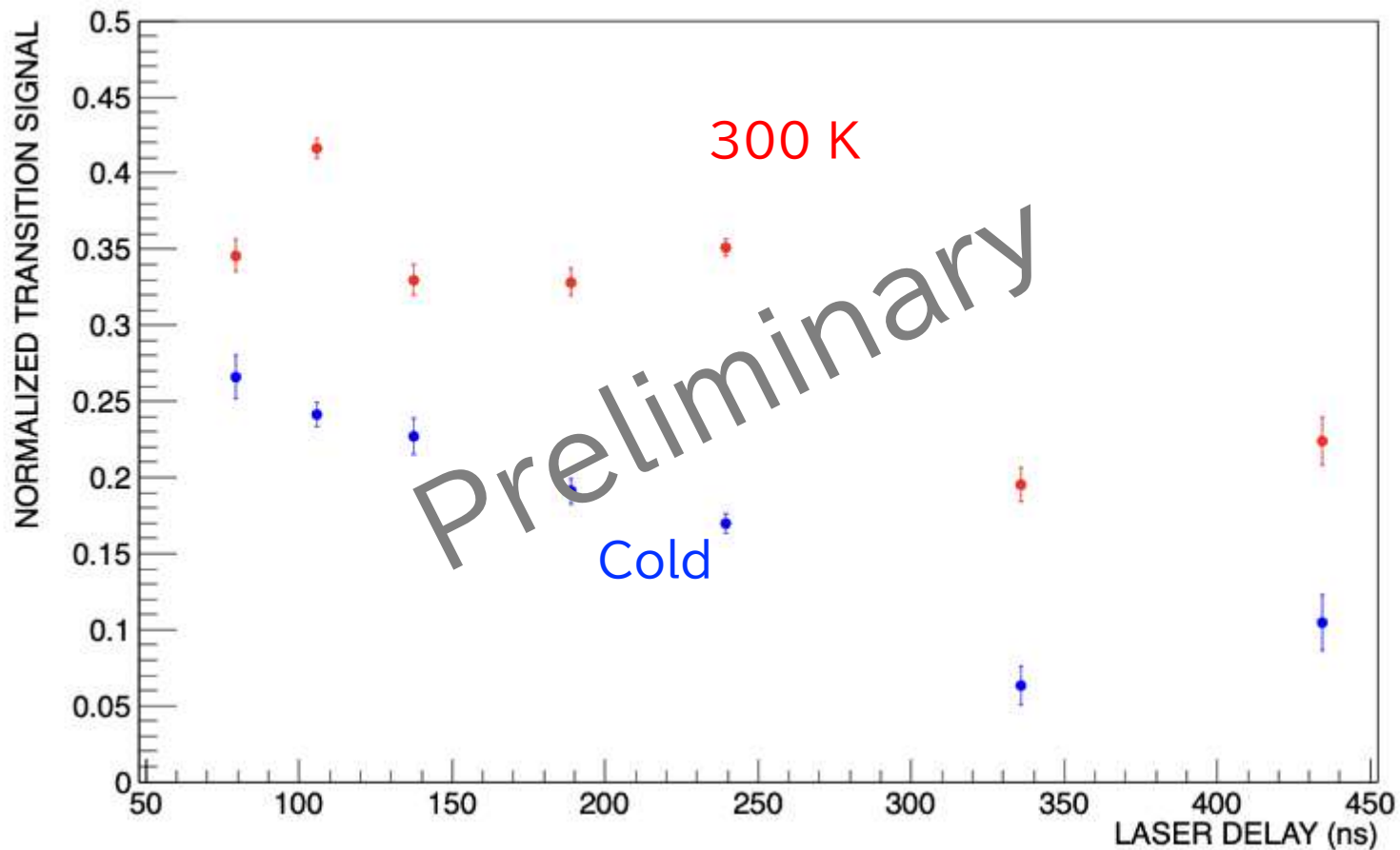


Laser timing = 430 ns

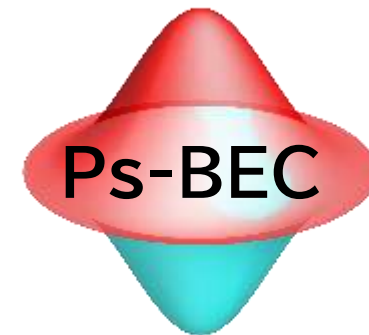


# Some preliminary results (by simple analysis)

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>