

ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮 (高密度化・冷却の現状と今後の方針)

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, 牧 和真, 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 6 (2024) 年 3 月 20 日
日本物理学会 2024 年春季大会 @ オンライン

20pT2-3

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 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, 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
- 物質・反物質非対称性の探索
- ガンマ線レーザーの実現

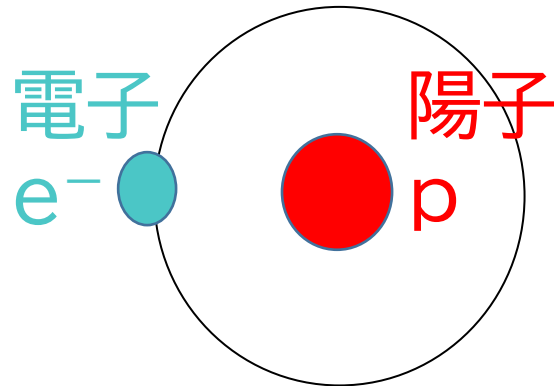
2. Ps-BEC 実現スキーム

3. 高密度化・冷却の現状と今後の方針

本講演 ⇒ 全体の概略
次の講演 ⇒ 最新の実験

ポジトロニウム (Ps) を用いた基礎物理学研究

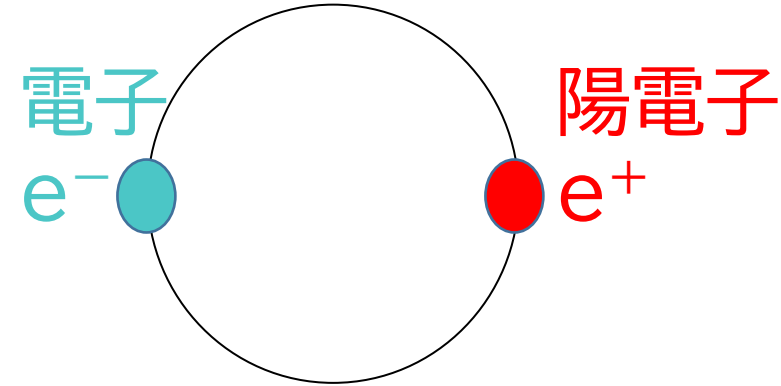
水素原子 (H)



電子と陽子の結合状態

真空中の寿命:無限

ポジトロニウム (Ps)



電子と陽電子(電子の反粒子)の結合状態

真空中の寿命(*o*-Ps):142 ns

消滅の際 511 keV 以下のガンマ線を放出

- 純粋なレプトン系かつ最も軽い原子
→ 束縛系量子電磁力学 (QED) の精密検証
- 反物質系 → 物質・反物質の未知の非対称性の探索

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

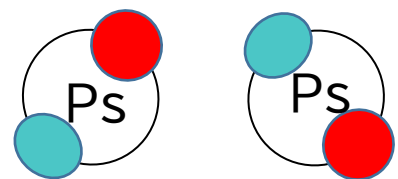
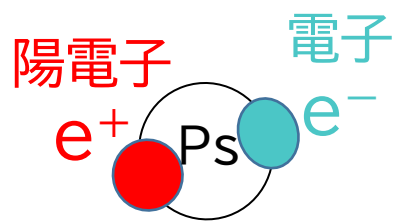
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 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?



10^{15} cm^{-3}
 150 K

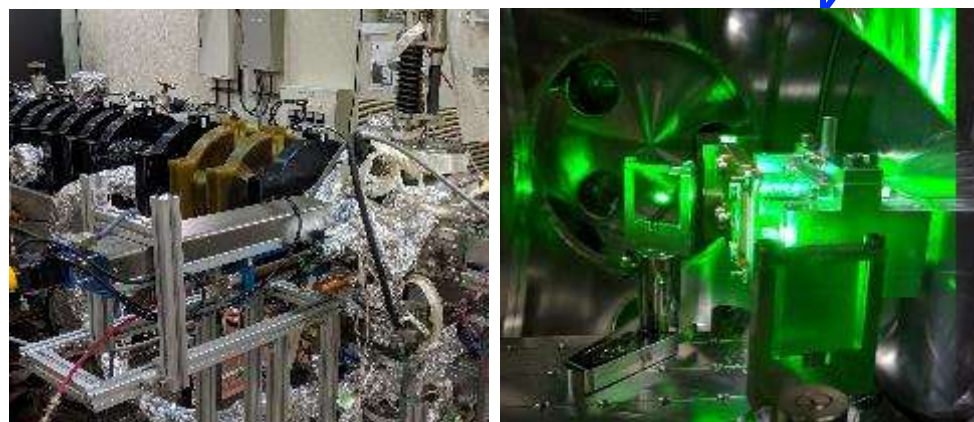
Ps 寿命 142 ns 以内
超高速 超高密度化 +
熱化冷却 & レーザー冷却

10^{18} cm^{-3}
 10 K

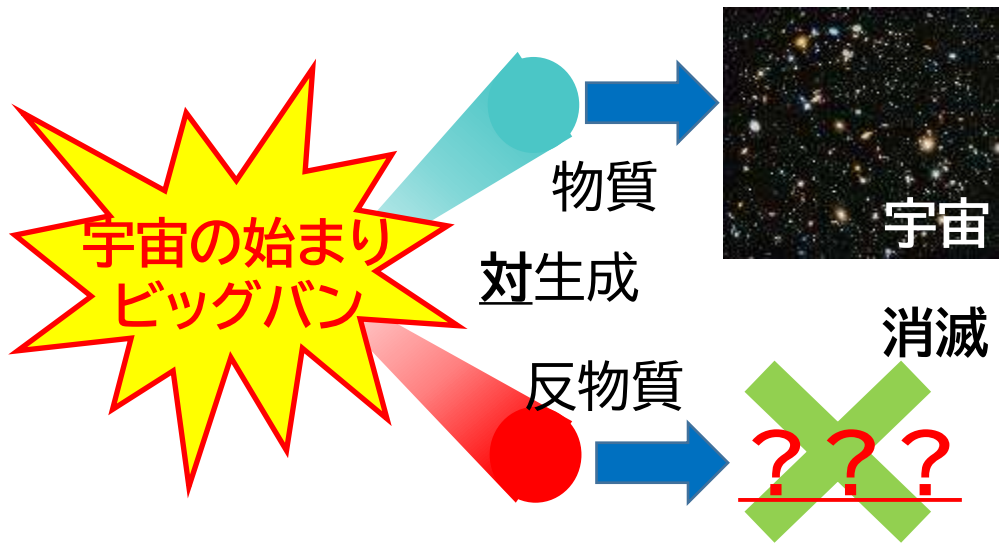


反物質原子
ポジトロニウム (Ps)
(古典極限系)

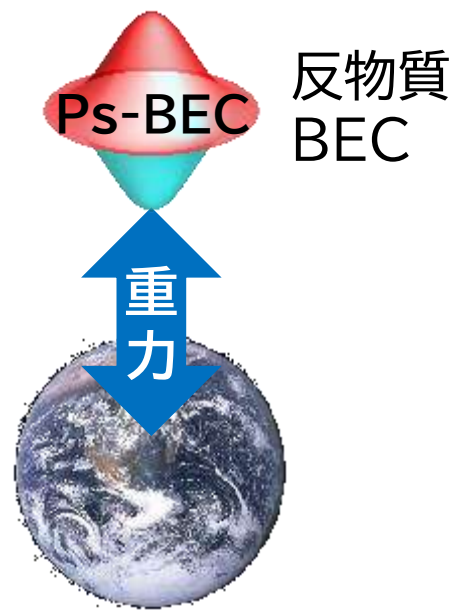
反物質レーザー
Ps-BEC
(量子凝縮体)



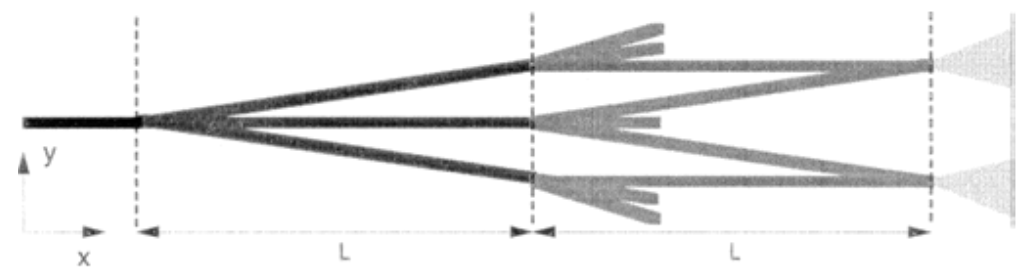
「なぜ宇宙に物質のみ残ったのか」 重力相互作用における物質・反物質非対称性の探索



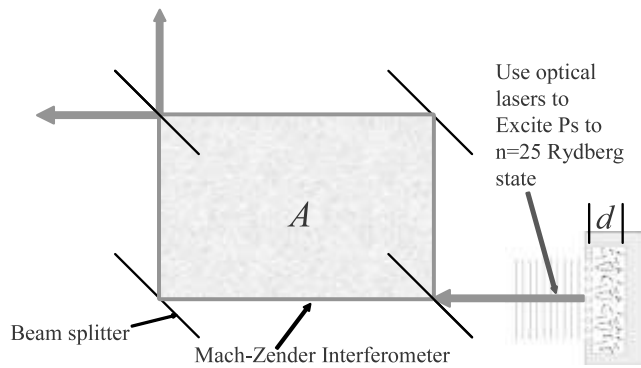
Ps は反粒子を含む反物質系なので、反物質重力測定に使える。ただし軽いので重力の効果が小さく、工夫が必要。



干渉計(自由落下の効果測定)



T. J. Phillips: *Hyperfine Interact.* **109** (1997) 357.



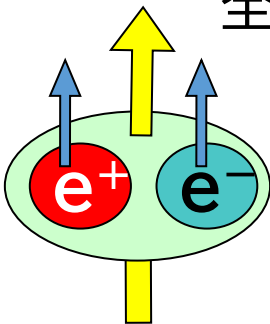
Ps-BEC を使う

D. B. Cassidy and A. P. Mills, Jr: *phys. stat. sol. (c)* **4** (2007) 3419.

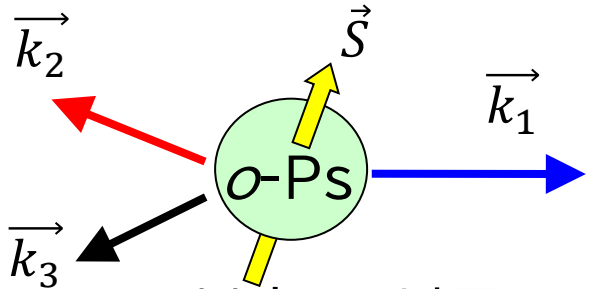
2つのスピン固有状態とガンマ線レーザー

光や真空と同じ量子数をもつ Ps

全スピン 1 (スピン三重項)
オルソポジトロニウム (*o*-Ps)
光と同じ量子数
“質量をもつ光”
 $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ (, 5γ , ...)



o-Ps 寿命 142 ns



511 keV 以下の連続スペクトル

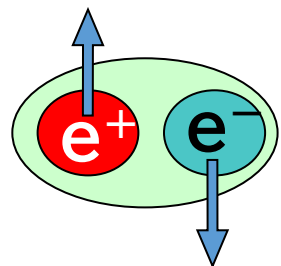
Ps のボース・
アインシュタイン凝縮
(BEC) は
o-Ps で作る

BEC状態で
 $o\text{-Ps} \rightarrow p\text{-Ps}$
遷移

511 keV
ガンマ線レーザー

⇒ 光科学研究,
ガンマ線・ガンマ線
衝突型素粒子実験,
産業・医療応用

全スピン 0 (スピン一重項)

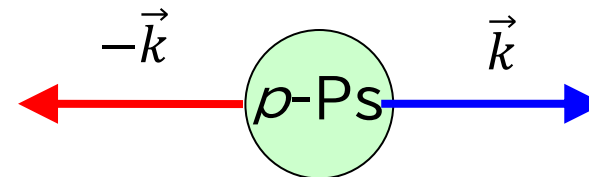


パラポジトロニウム (*p*-Ps)

真空と同じ量子数
“質量をもつ真空”

$p\text{-Ps} \rightarrow 2\gamma$ (, 4γ , ...)

p-Ps 寿命 125 ps

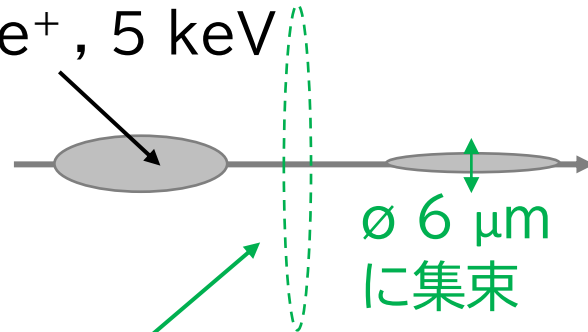


511 keV 単色

Ps-BEC 実現スキーム

1. 陽電子集束システム

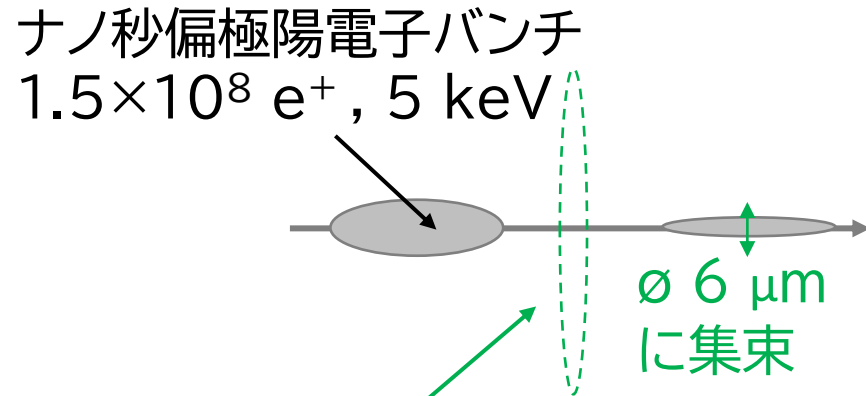
ナノ秒偏極陽電子バンチ
 $1.5 \times 10^8 e^+$, 5 keV



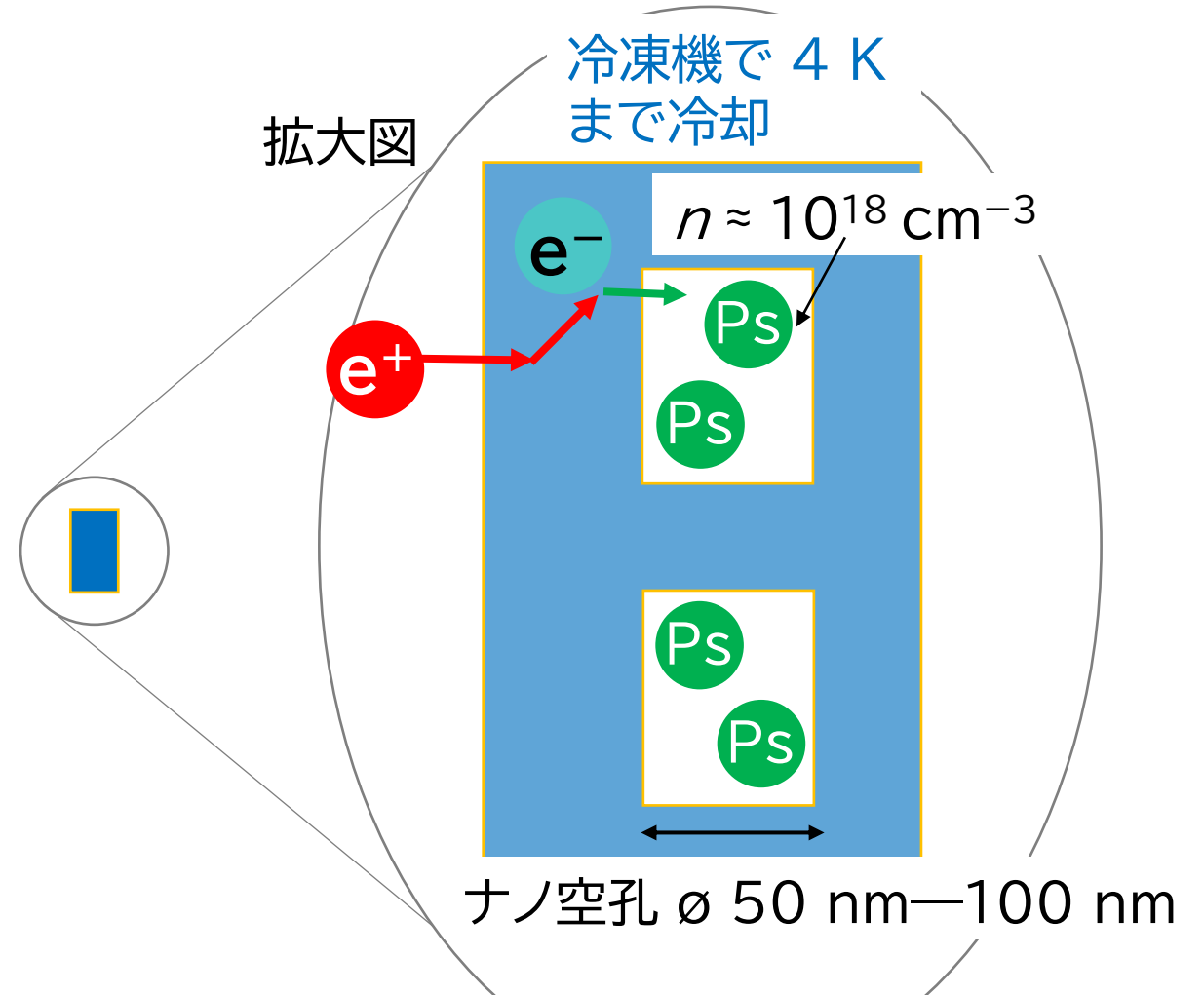
1. 多段輝度増強システム
高密度陽電子バンチ

Ps-BEC 実現スキーム

1. 陽電子集束システム
2. Ps 生成・濃縮・冷却材



1. 多段輝度増強システム
高密度陽電子バンチ



2. $e^+ \rightarrow \text{Ps}$ 生成・濃縮・冷却
無機酸化物多孔体

Ps-BEC 実現スキーム

1. 陽電子集束システム
2. Ps 生成・濃縮・冷却材 ←本日
3. Ps レーザー冷却 ←レーザーは開発完了

ナノ秒偏極陽電子バンチ
 $1.5 \times 10^8 e^+$, 5 keV

1. 多段輝度増強システム
高密度陽電子バンチ

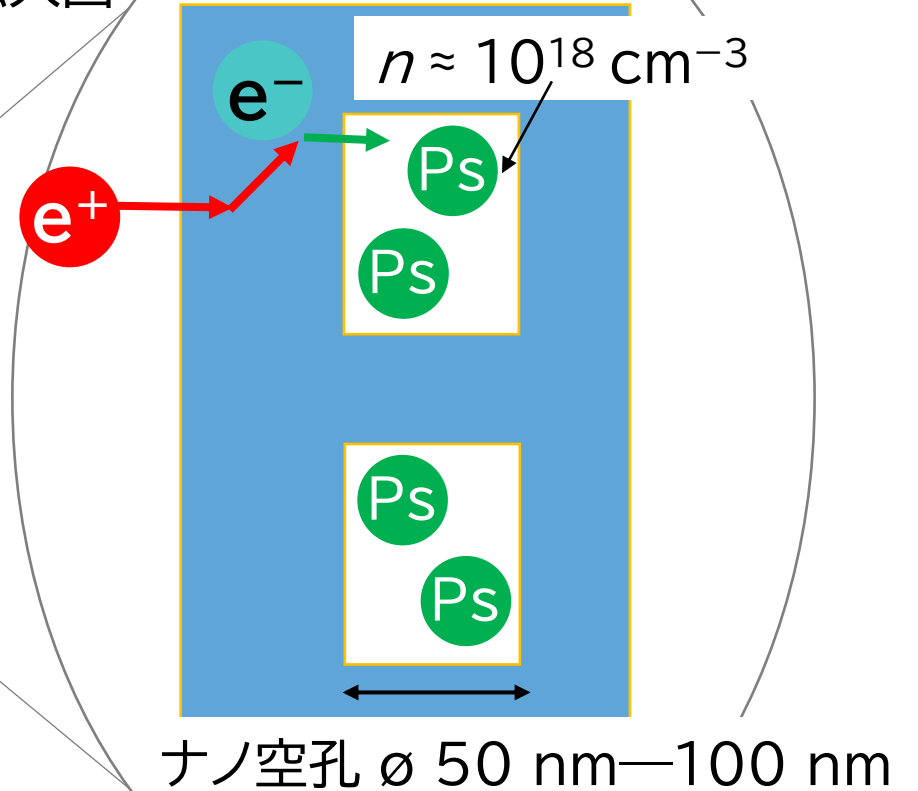
$\phi 6 \mu\text{m}$
に集束

波長 243 nm
紫外レーザー

3. Ps レーザー冷却
($1S-2P$ 遷移)

拡大図

冷凍機で 4 K
まで冷却



ナノ空孔 $\phi 50 \text{ nm} - 100 \text{ nm}$

2. $e^+ \rightarrow \text{Ps}$ 生成・濃縮・冷却
無機酸化物多孔体

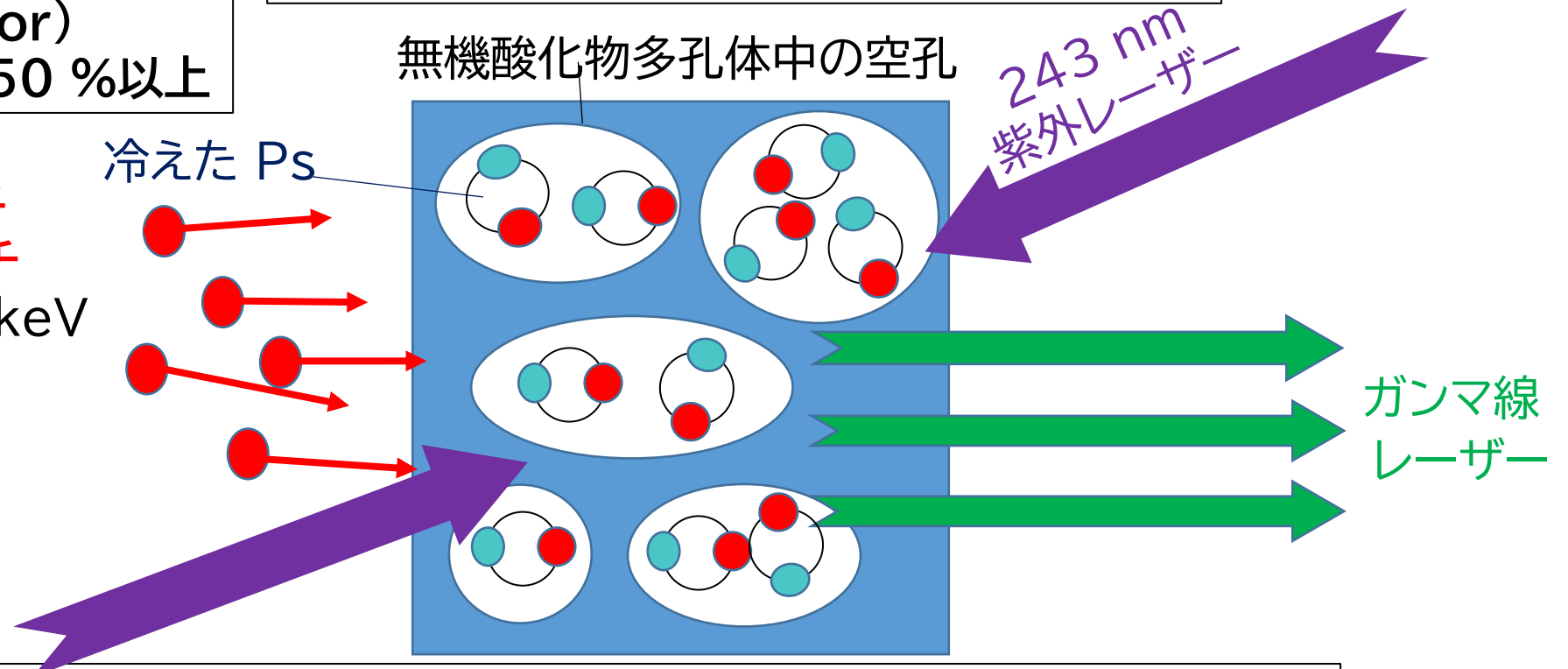
Ps 生成・濃縮・冷却の 3 機能をもつ

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

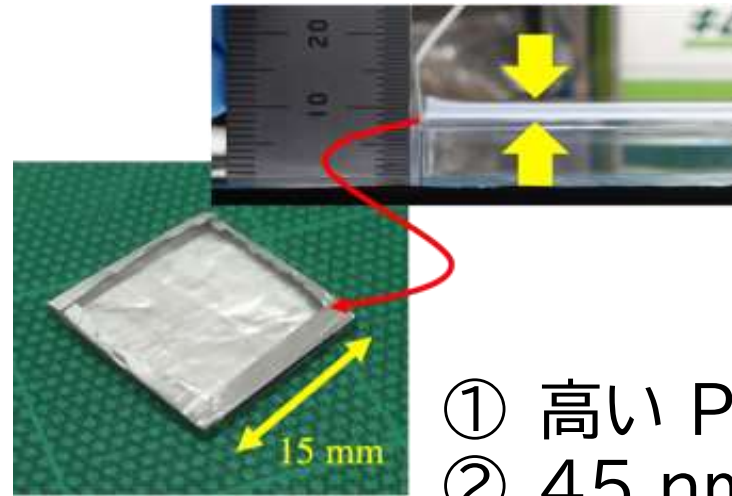
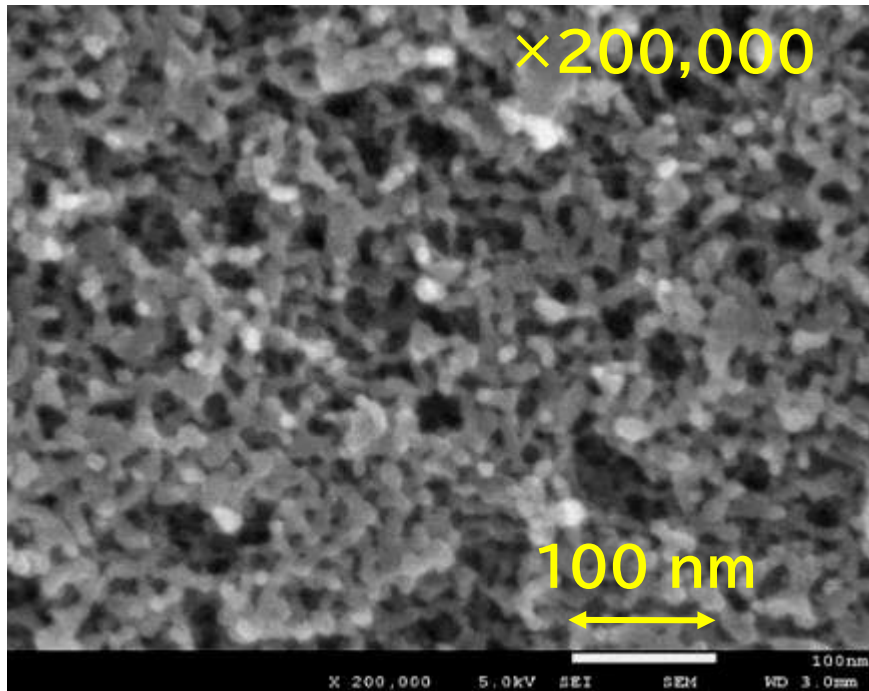
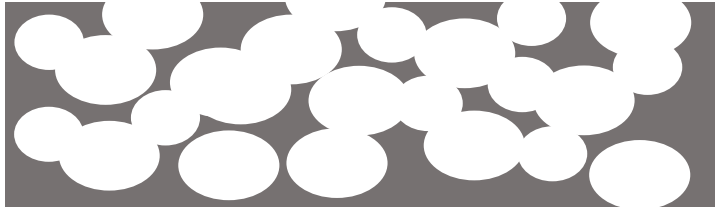
機能② Psを高密度に濃縮 (condenser)
→ 50 nm—100 nm 空孔

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



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 45 nm
厚さ 0.5 mm

- ① 高い Ps 生成率($\approx 35\%$)
- ② 45 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

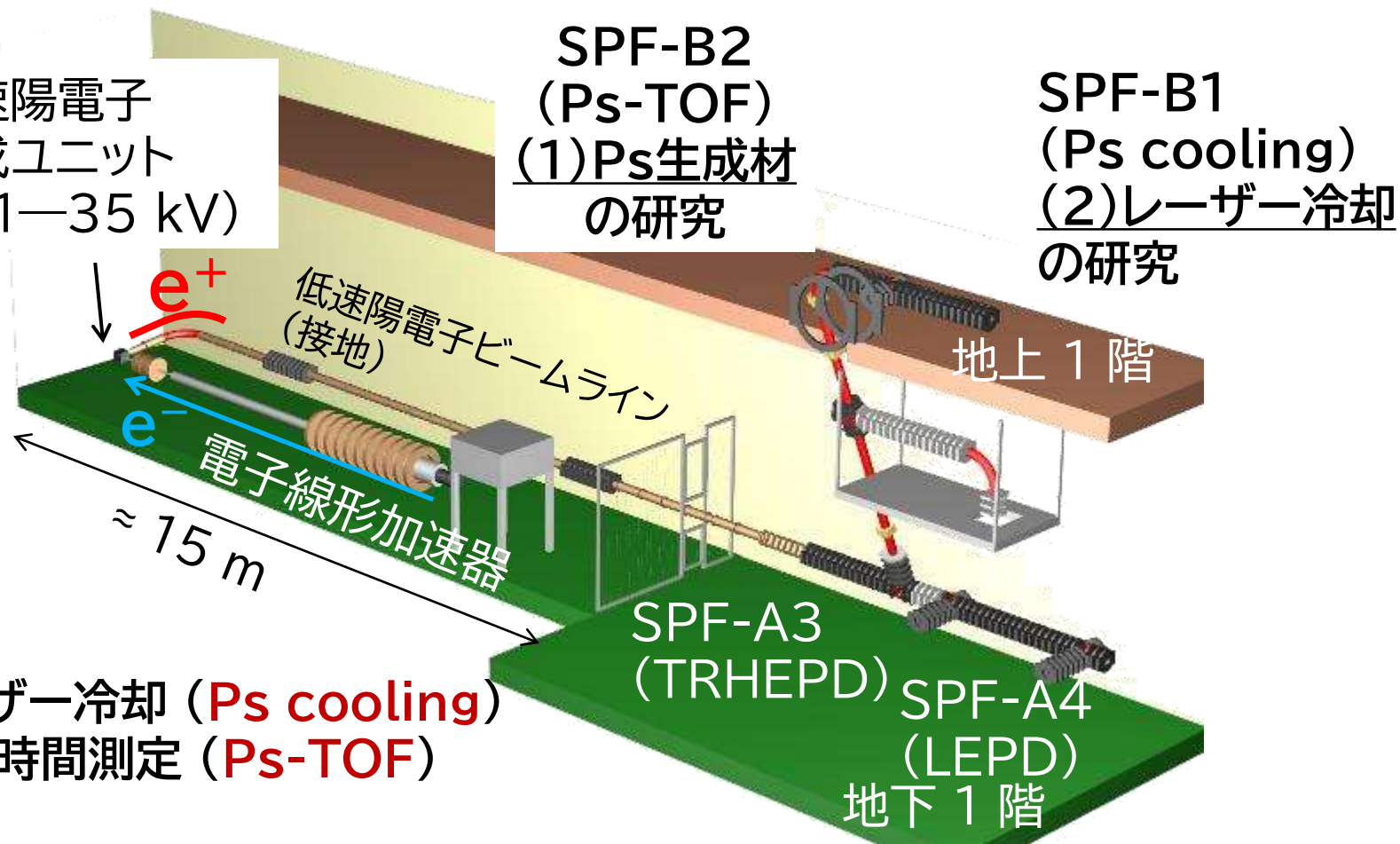
他に、ナノプロセッシング, ナノインプリント, 規則配列シリカナノ材料(以上シリカ), シリカ以外のナノ多孔質材料を試し中

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)

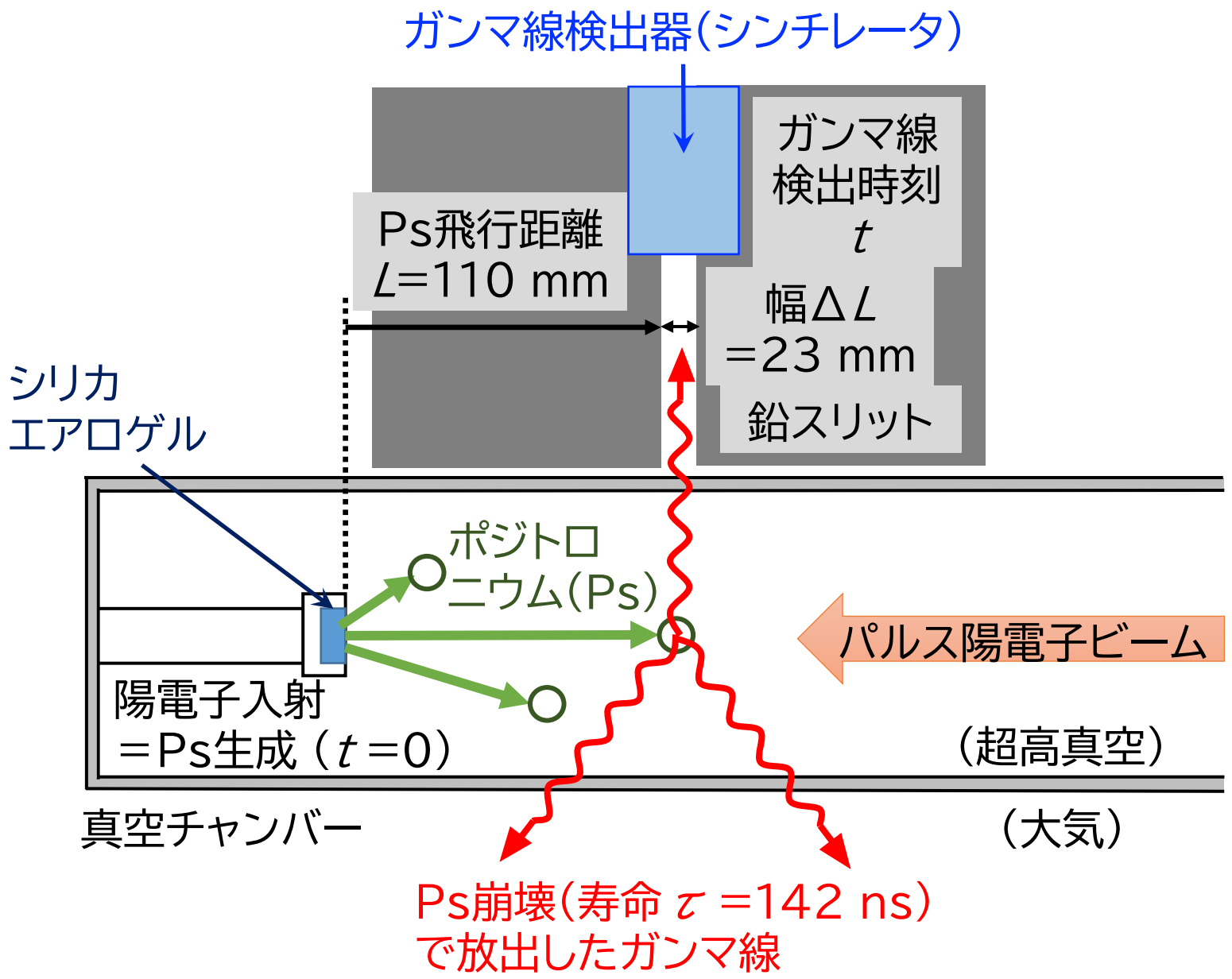


SPF
@入射器コントロール棟

- 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)



ポジトロニウム飛行時間測定 (Ps-TOF) (詳細は領域10 で 20aK1-5)



- 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 = $2 \times$ 電子質量)

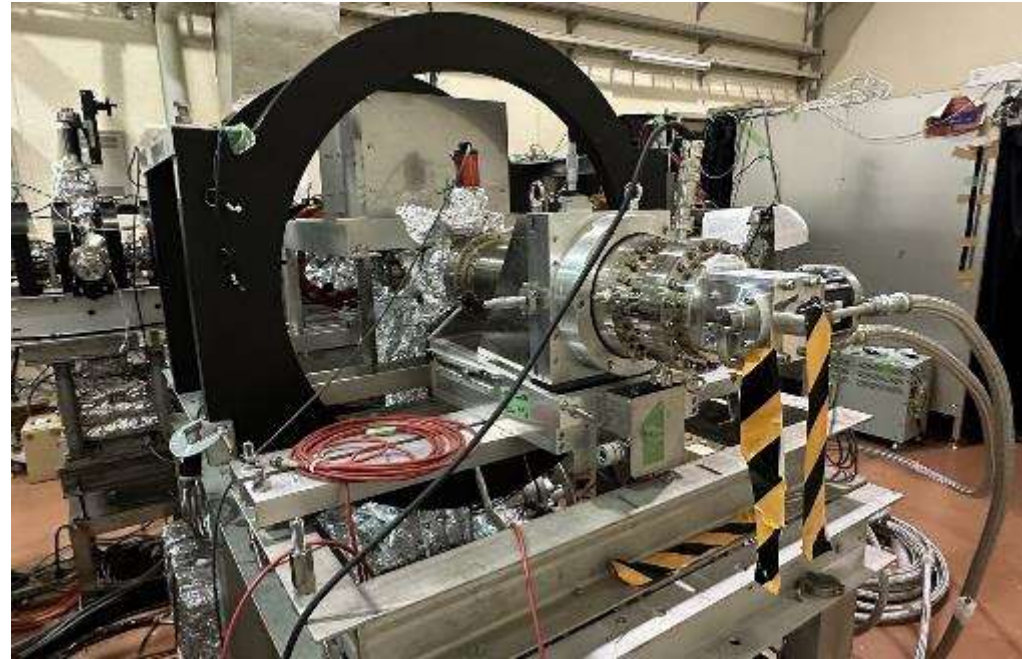
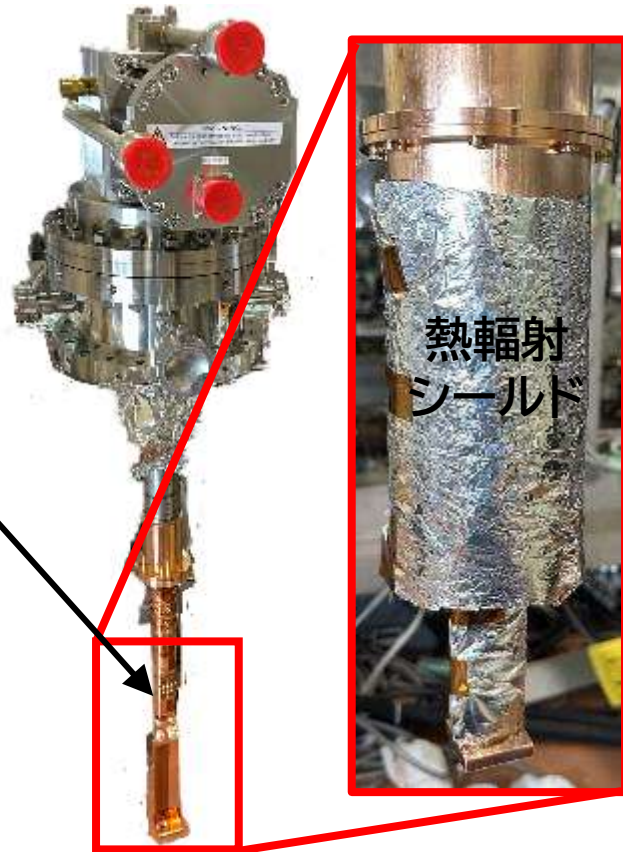
検出効率

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

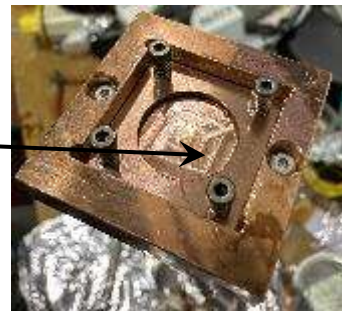
- 2020 年に室温のナノ材料で測定。2023 年から、冷凍機で冷却した試料による測定を開始。
- Ps-BECに最適な, Ps生成率が高く, 放出 Ps のエネルギーが低い材料を探索。**

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, 11 月, 2024 年 2 月
@ KEK-IMSS-SPF-B2, 5 keV)

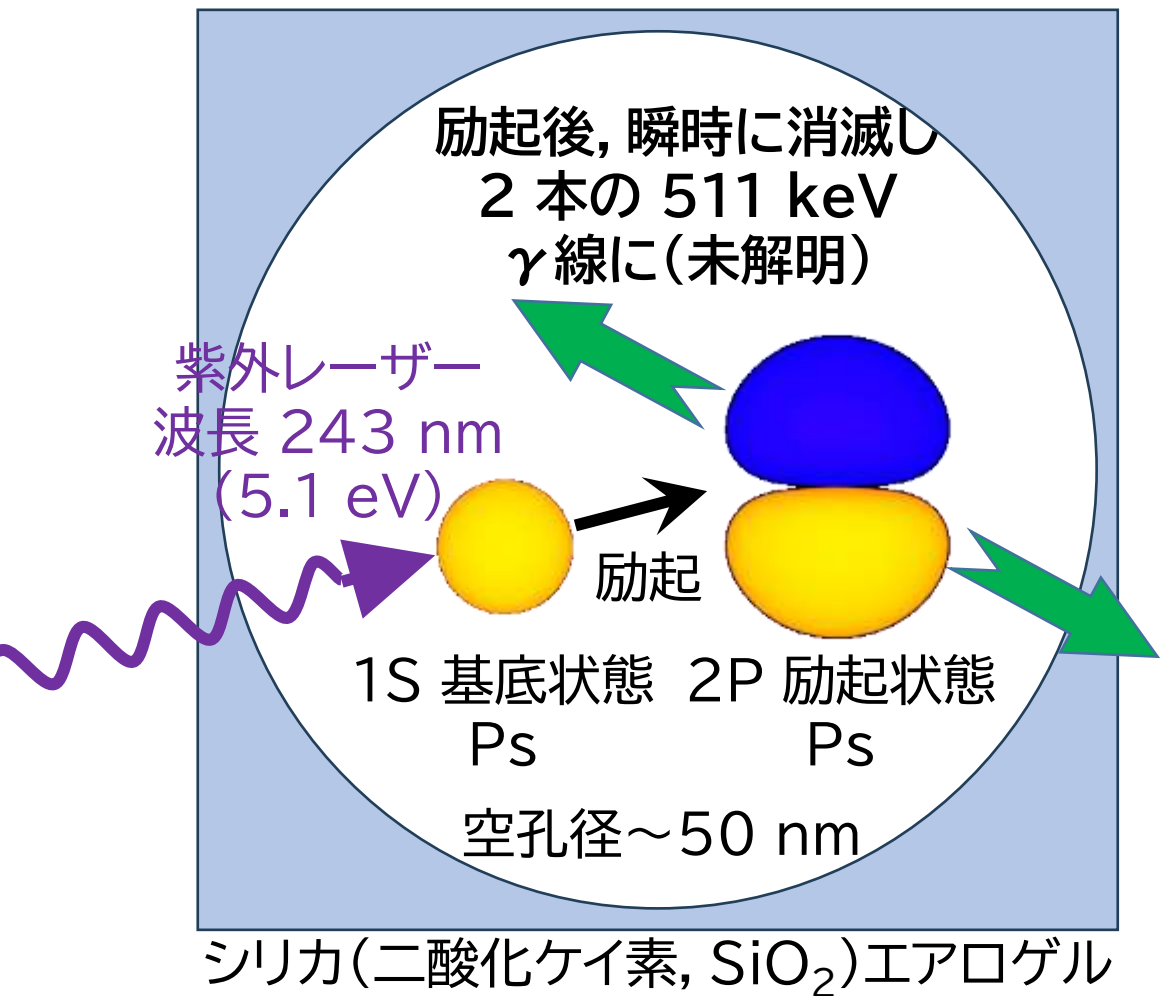
温度計の表示は
7 K
シリカエアロゲル
の温度は検証中。



シリカ
エアロゲル

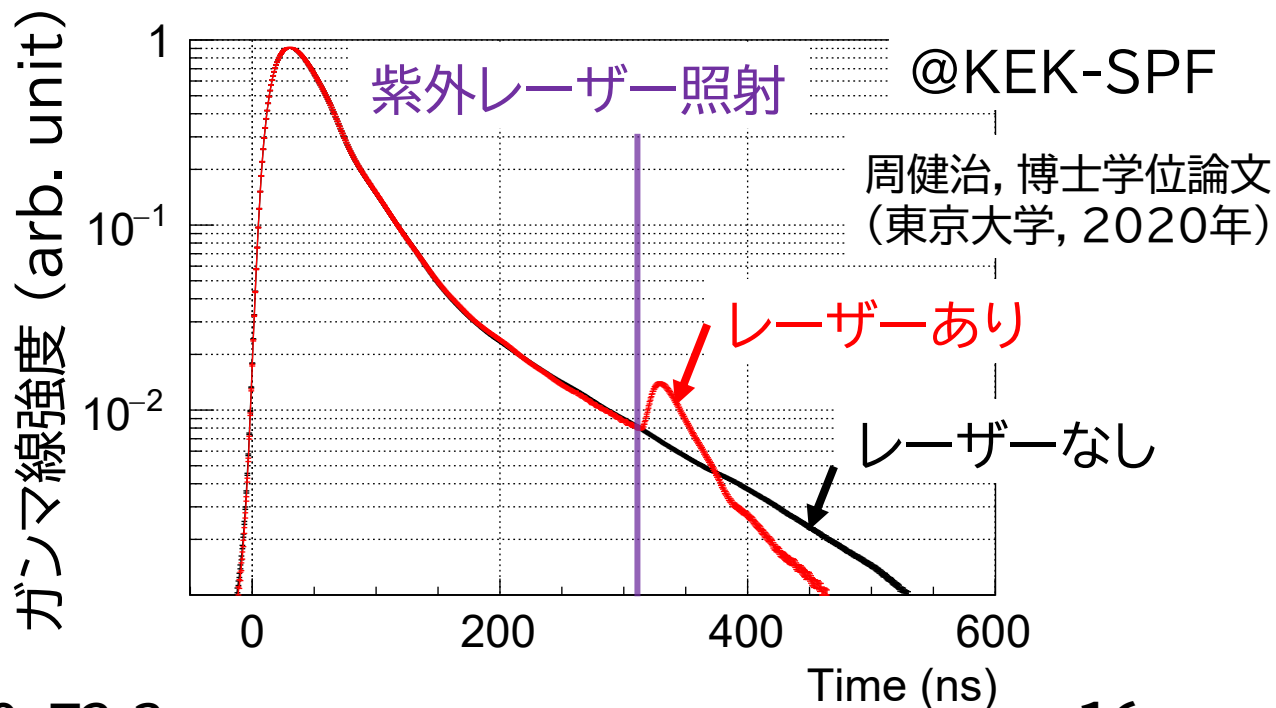


真空中ではレーザー冷却可能になったが, Ps-BEC のために必要な, 「ナノ材料空孔中におけるレーザー冷却」には重大な阻害要因



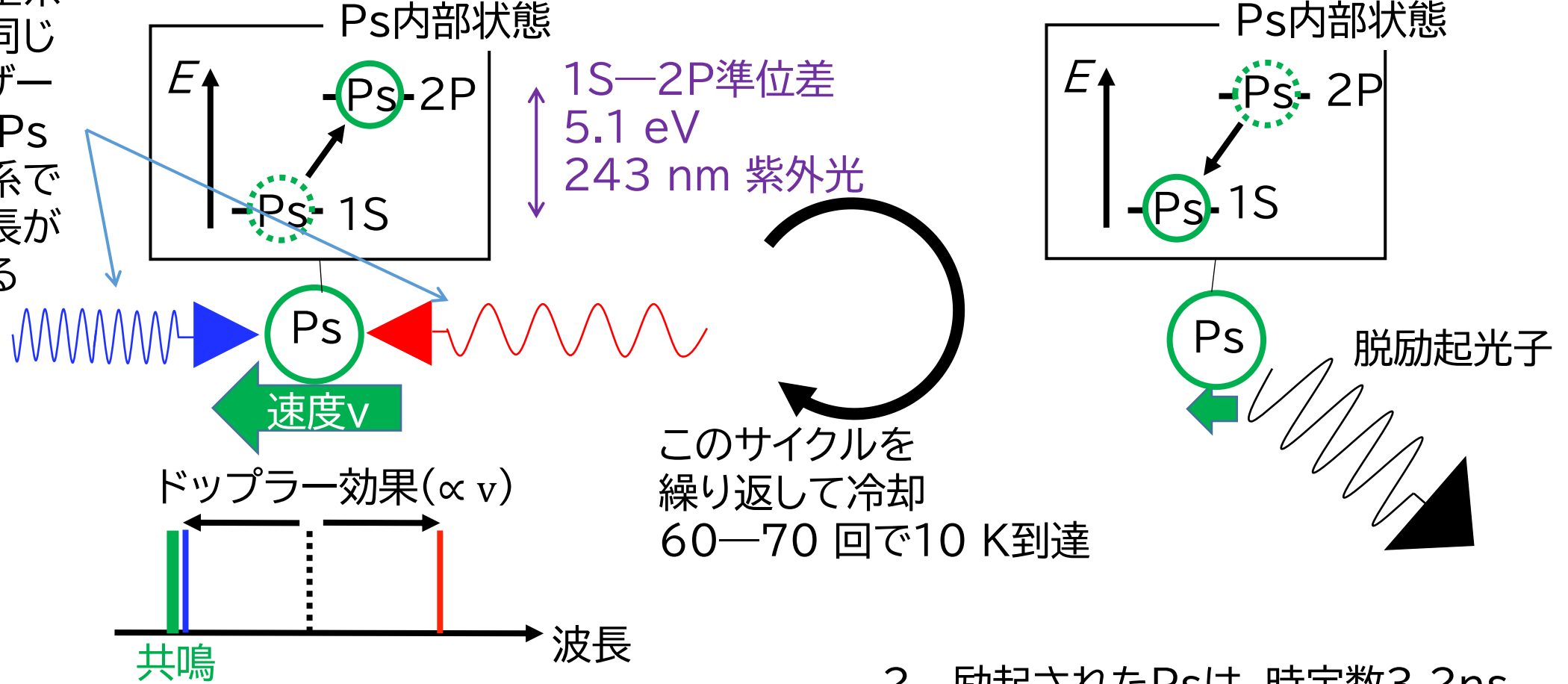
シリカエアロゲル細孔中では, 2P 状態に遷移した Ps が瞬時にガンマ線に消滅!
→レーザー冷却(1S→2P→1Sを繰り返す)が不可能

今のところ原因不明。Ps 運動エネルギー依存性から, レーザー冷却前に熱化で十分 Ps を冷却できれば, レーザー冷却できる可能性 → **次の講演**



Ps レーザー冷却の原理

実験室系では同じレーザーだがPs静止系では波長が異なる



1. 反対方向に進む光のみが共鳴し
光吸収・励起
Psは光子の運動量分だけ減速

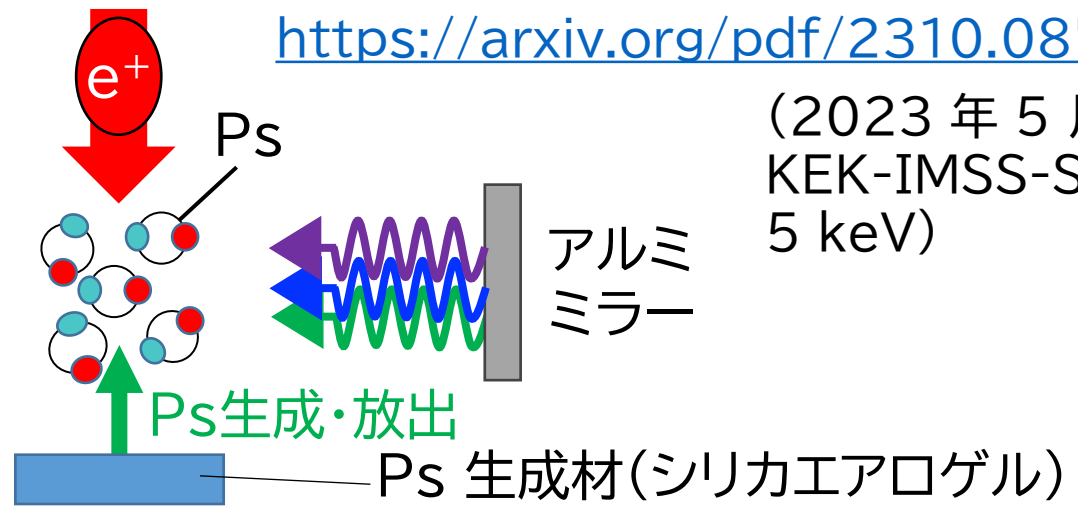
2. 励起されたPsは、時定数3.2ns
で自然に光子を放出し脱励起
(光子の運動量方向はランダム、平均すれば温度は変わらない)

真空中でPs 一次元レーザー冷却

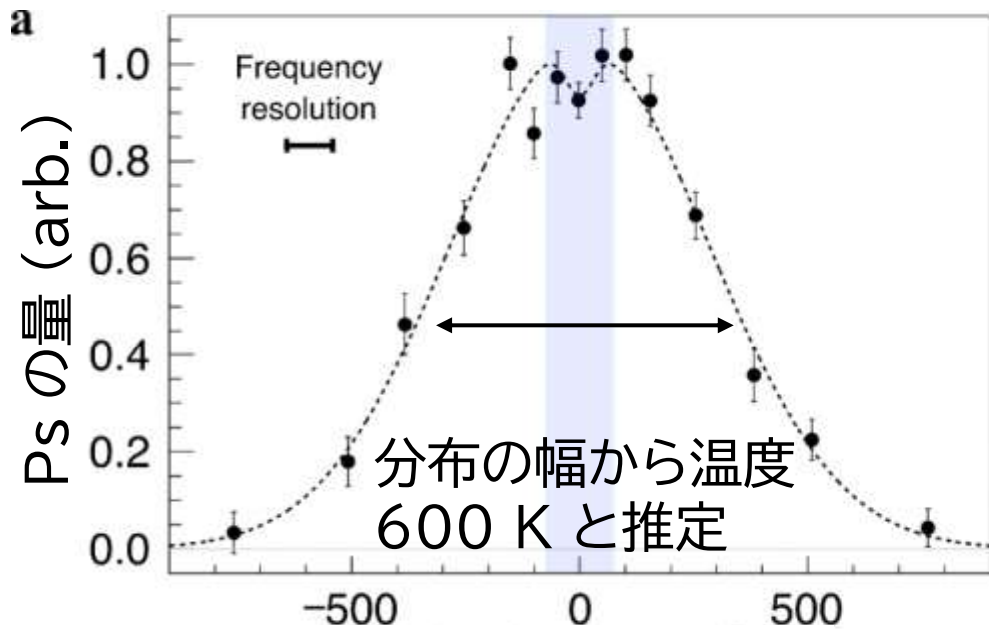
(論文紹介)

- ① 243 nm (冷却時)
- ② 243 nm (検出時)
- ③ 532 nm (検出時)

①照射で冷却後, ②③同時照射で测温

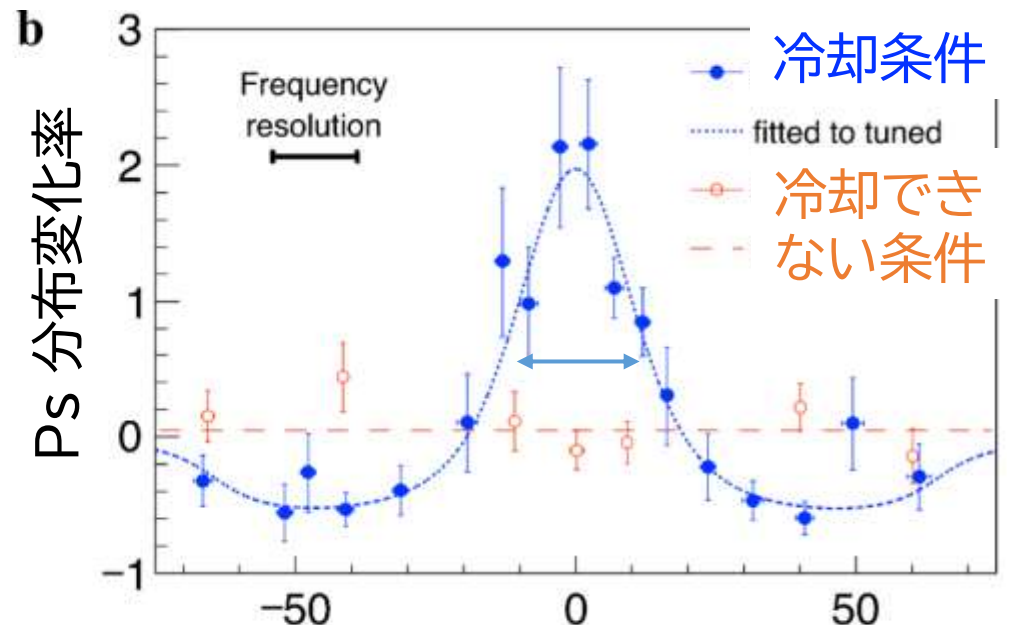


冷却前 b図の範囲:ここを冷却



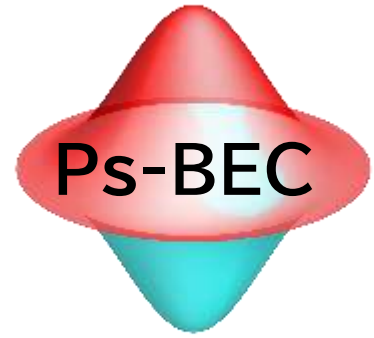
レーザー②の周波数(相対値, GHz) = Ps速度に対応

冷却後 1.2 K 以下に相当



レーザー②の周波数(相対値, GHz)

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。

- 反物質系低温量子凝縮相の研究
- 「なぜ、宇宙に物質のみ残ったのか」を解明
- ガンマ線レーザーの実現

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. 材料性能評価や, 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>