

ボース・アインシュタイン凝縮実現を目指した ポジトロニウム冷却

周 健治, 村吉 諄之, 石田 明, 難波 俊雄^A,

浅井 祥仁, 吉岡 孝高^B, 五神 真,

大島 永康^C, オローク ブライアン^C,

鈴木 良一^C, 藤野 茂^D

東大理, 東大素セ^A, 東大工^B, 産総研^C, 九大GIC^D

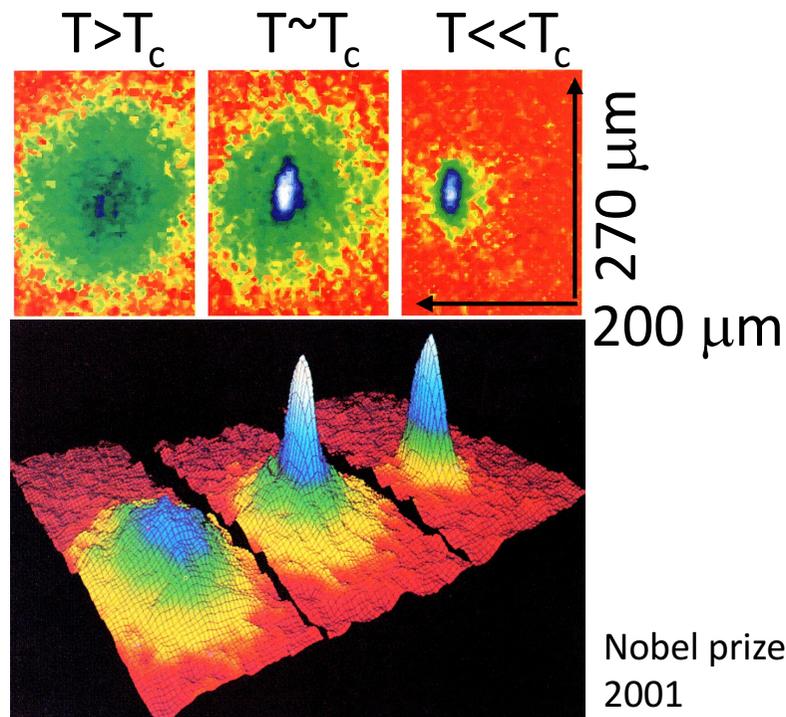


第60回放射線化学討論会
2017.09.27 @産業技術総合研究所

ボース・アインシュタイン凝縮

ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

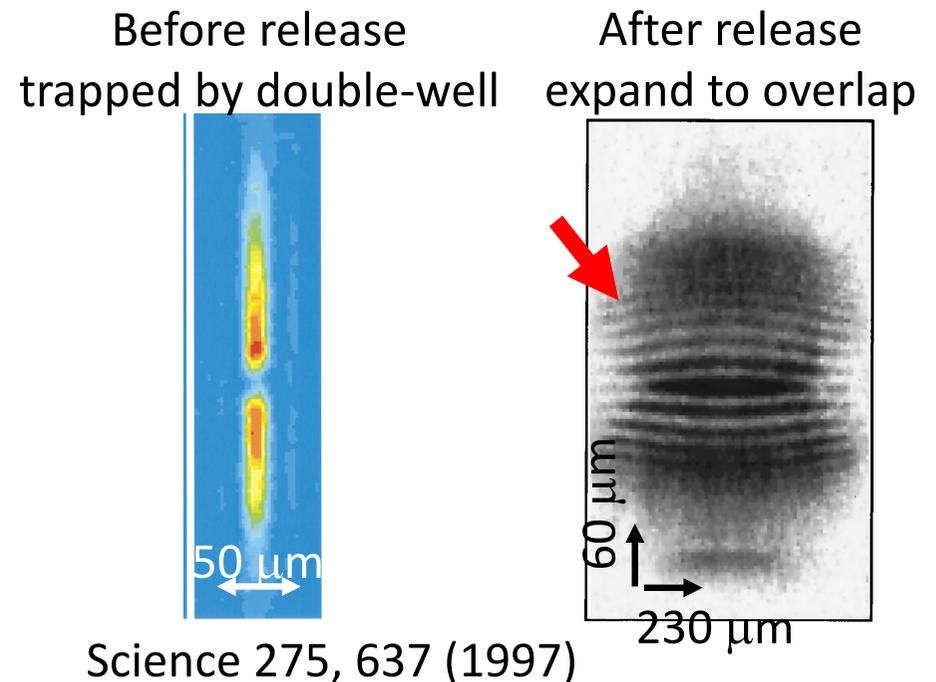
- ほとんどすべての粒子が単一量子状態を占める現象
- BECには高密度かつ低温が必要



^{87}Rb のBEC転移温度 (T_c) 付近での位置分布

特徴

- BECは原子レーザー
- コヒーレンシーによりミクロな量子効果がマクロなレベルで現れる
ex.) 原子波干渉
- 量子物理のブレイクスルー



ポジトロニウム (Ps) の BEC

ポジトロニウム (Ps)

- 電子と、その**反物質**である陽電子の束縛系

Ps-BECのモチベーション

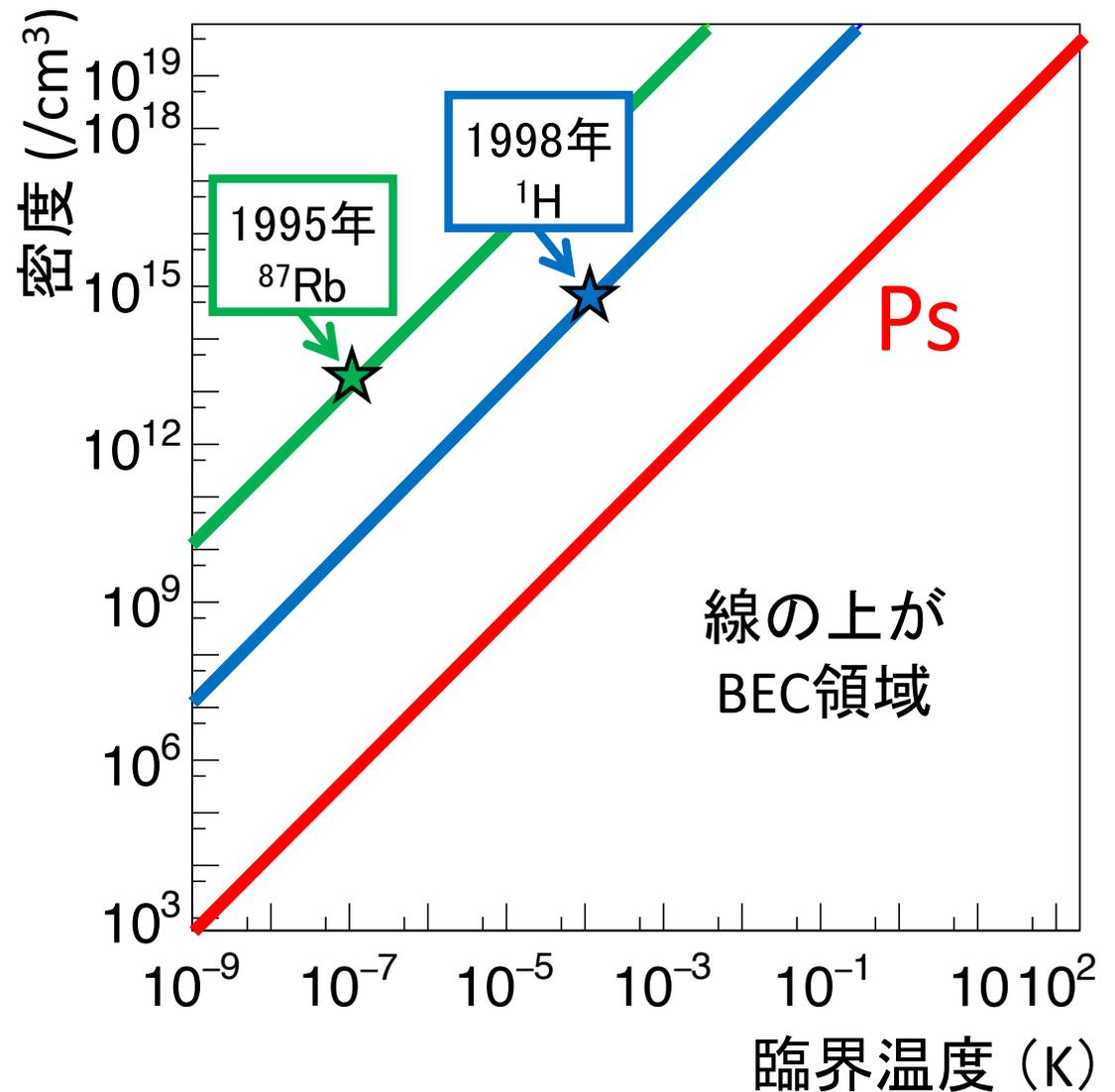
- 初の**反物質含む系**でBEC

特徴

- 軽くてBEC臨界温度が高い (水素よりも3桁)
- 寿命が短い (142 nsで γ 線に崩壊)

様々な応用

- 物質波干渉による **反物質重力**の精密測定
- 消滅 γ 線を利用した **511 keV γ 線レーザー**



Ps-BECに必要なチャレンジ

陽電子の超高密度化 & Ps高速冷却

BECに必要な条件

- 高密度
- 低温

しかしPsは短寿命 ($\tau=142\text{ns}$)

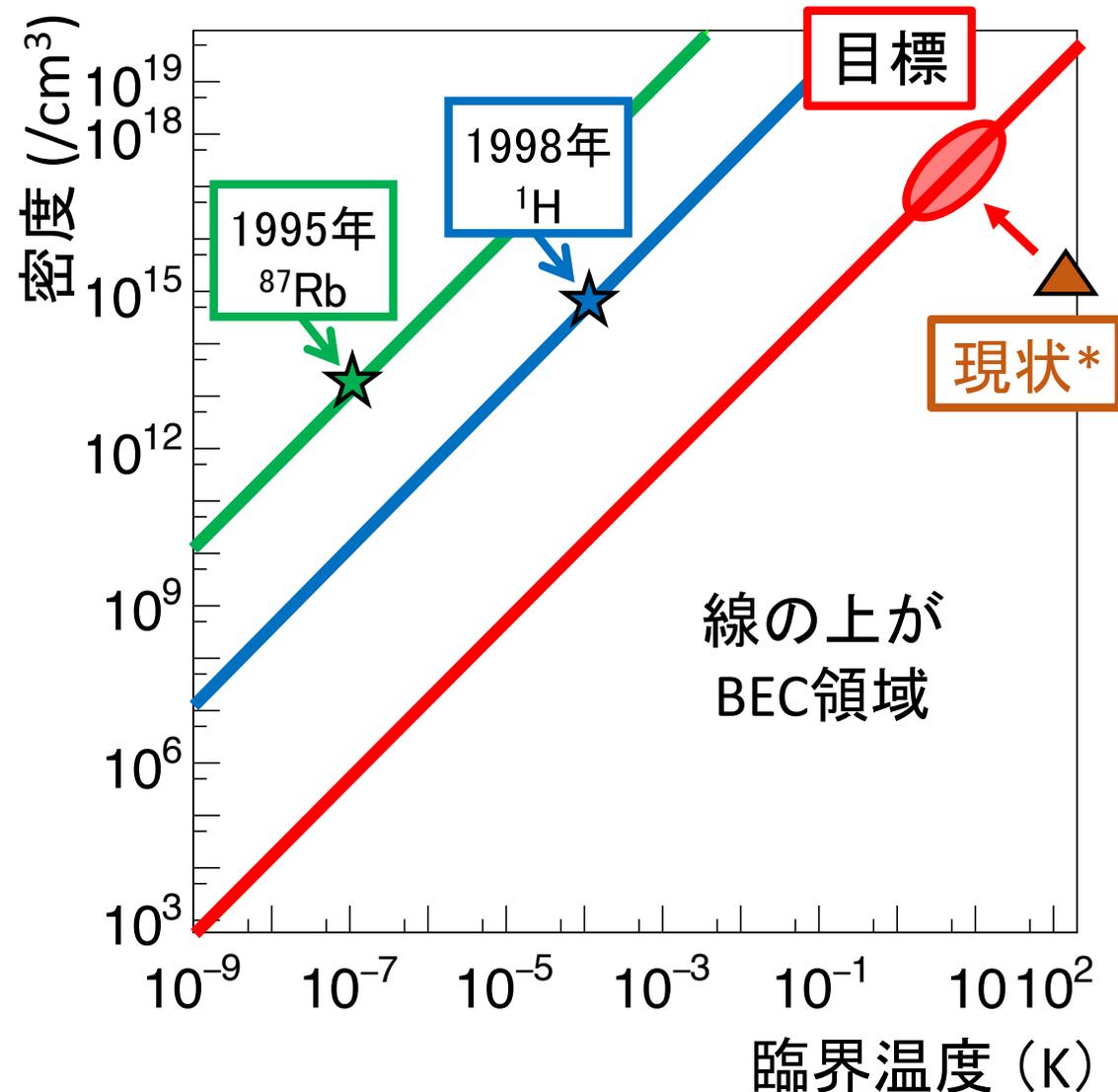
- ゆっくり溜めたり冷やしたりできない！まったく新しいBEC達成スキームが必要

冷却

10 K以下までの冷却を達成

高密度化

次のトーク



* : S. Mariuzzi *et al.* Phys. Rev. Lett. 104, 243401 (2010)

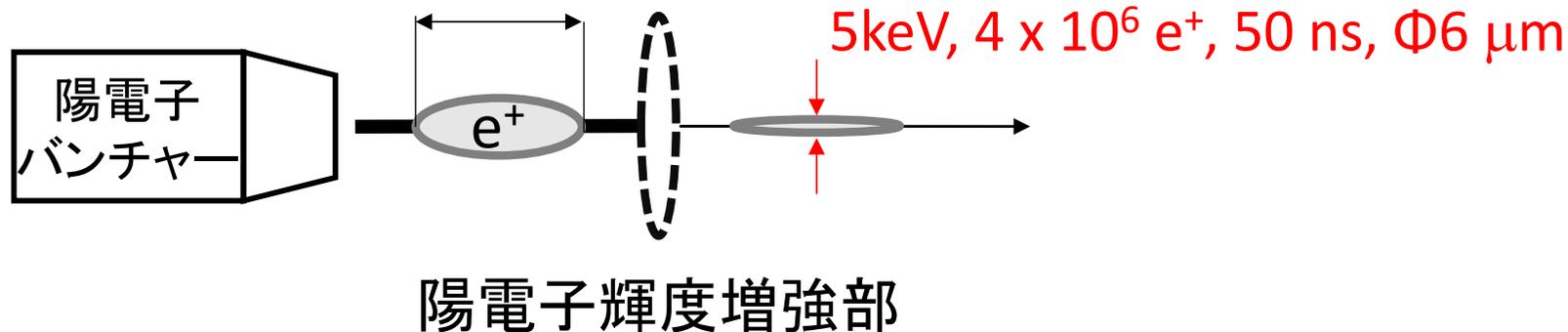
* : D. Cassidy *et al.* physica status solidi 4, 3419 (2007)

Ps-BEC実験の概念図

アイデア K. Shu *et al.* J. Phys. B 49, 104001 (2016)

1. 50 nsバンチ陽電子を集束し高密度化する
2. シリカ多孔体に陽電子を打ち込み、高密度Psに変換する
3. 低温シリカとの衝突とレーザー冷却を組み合わせ高速冷却する

5 keV, $10^8 e^+$, 50 ns, Φ 5 mm

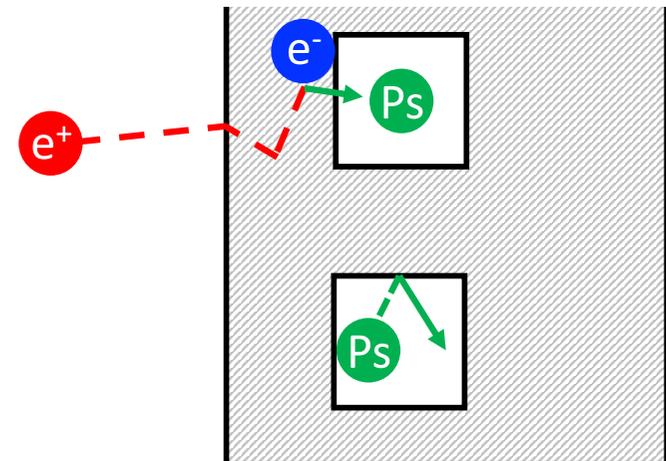
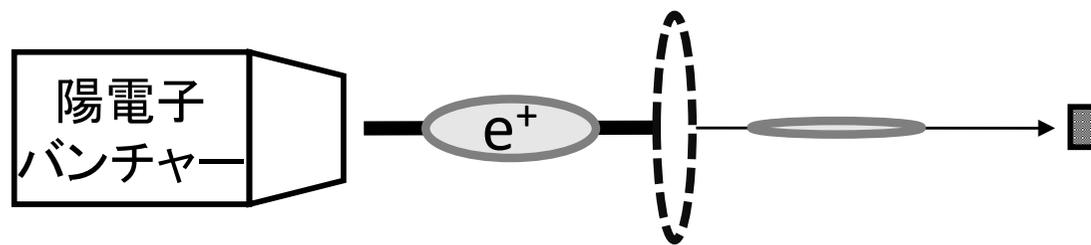


Ps-BEC実験の概念図

アイデア K. Shu *et al.* J. Phys. B 49, 104001 (2016)

1. 50 nsバンチ陽電子を集束し高密度化する
2. SiO_2 (シリカ) 多孔体に陽電子を打ち込み, 高密度Psに変換する
3. 低温シリカとの衝突とレーザー冷却を組み合わせ高速冷却する

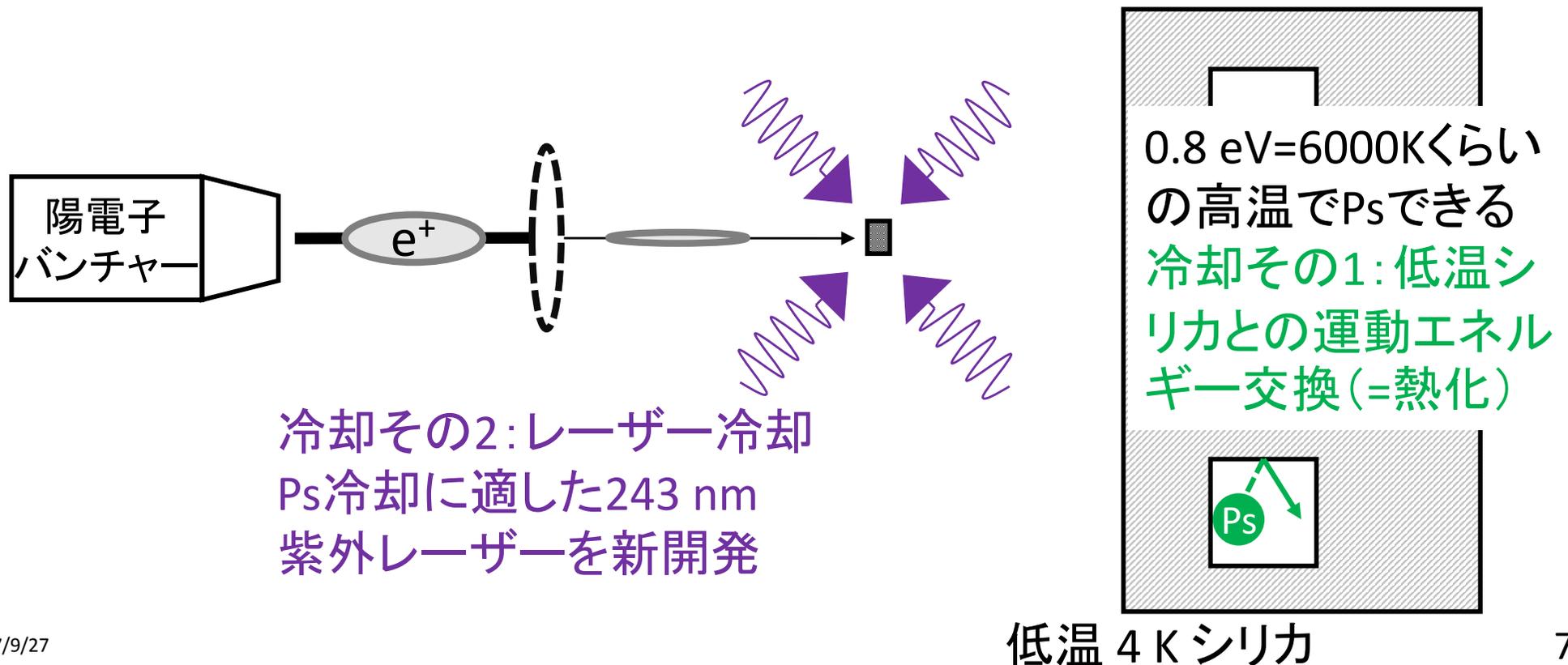
陽電子が SiO_2 の電子を剥ぎ取って空孔中にPs生成
Ps生成率10%で 10^{17} cm^{-3}
以上の高密度Ps生成



Ps-BEC実験の概念図

アイデア K. Shu *et al.* J. Phys. B 49, 104001 (2016)

1. 50 nsバンチ陽電子を集束し高密度化する
2. SiO₂ (シリカ) 多孔体に陽電子を打ち込み, 高密度Psに変換する
3. 低温シリカとの衝突とレーザー冷却を組み合わせ高速冷却する

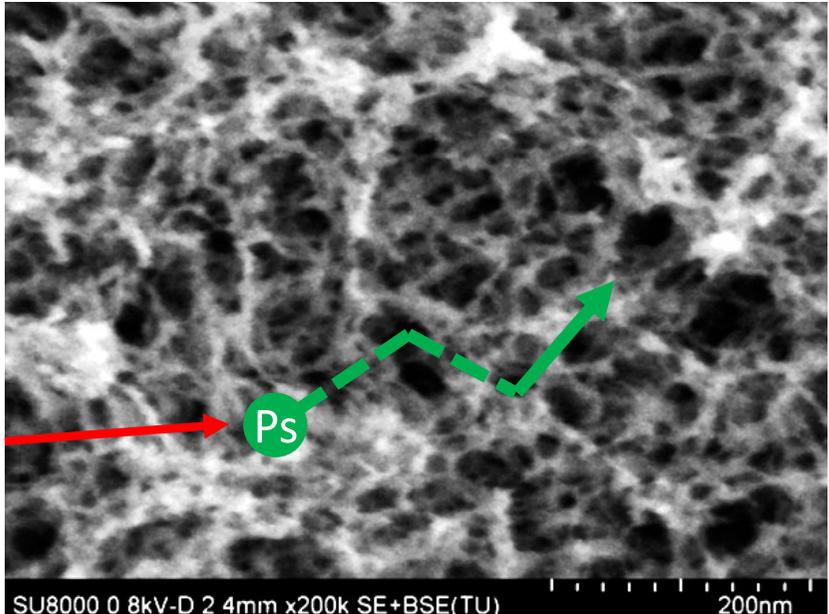


低温ポーラスシリカ中熱化による 冷却過程の初測定

4K GM冷凍機
コールドフィンガー

線は
ヒーター

20 ~ 300 K
温度可変



^{22}Na

e^+

Ps

SU8000 0 8kV-D 2.4mm x200k SE+BSE(TU) 200nm

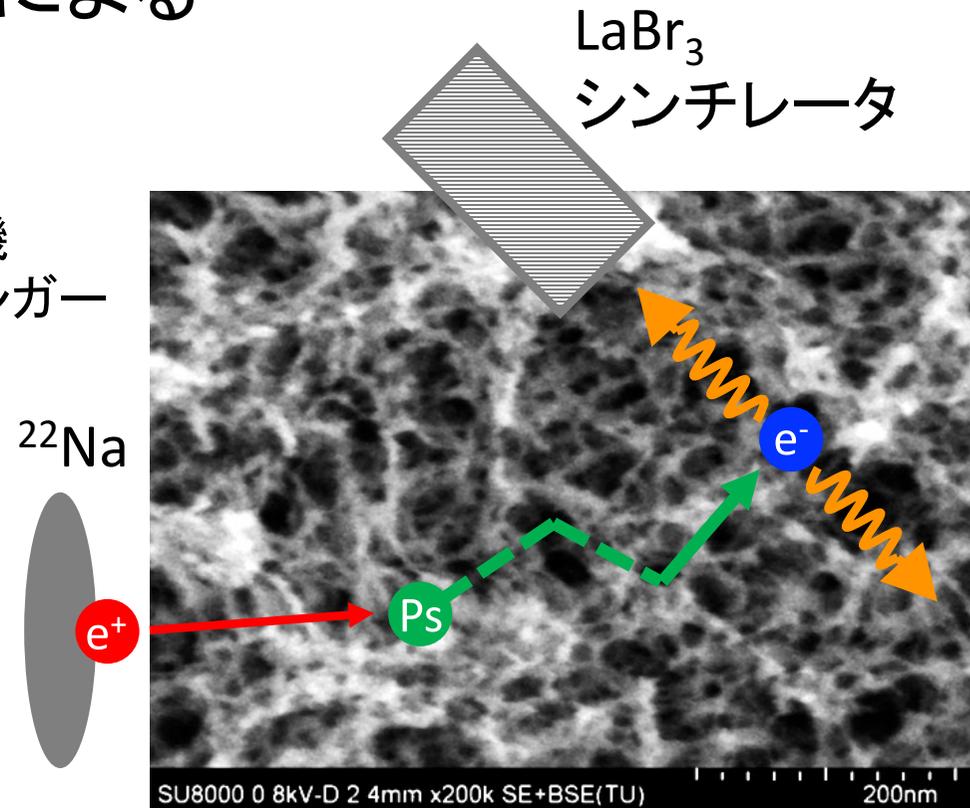
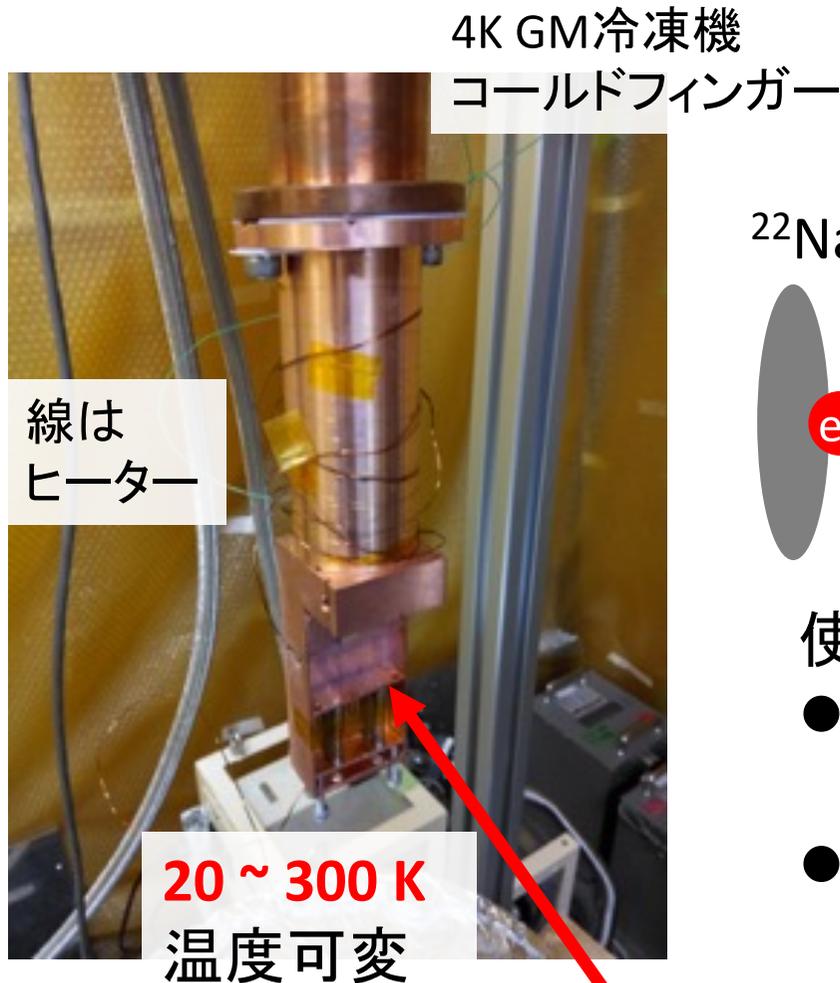
使用したシリカエアロゲルのSEM写真

- 空孔中にできたPsは、低温のシリカ骨格と衝突しながら冷える
- 衝突の際、Psとシリカ中電子との対消滅が起こるので、その崩壊率からPs温度測定

密度 0.11 g cm^{-3} のシリカエアロゲル

SiO_2 でできた多孔質で、Psの平均自由行程38 nm (BET法で測定)

低温ポーラスシリカ中熱化による 冷却過程の初測定



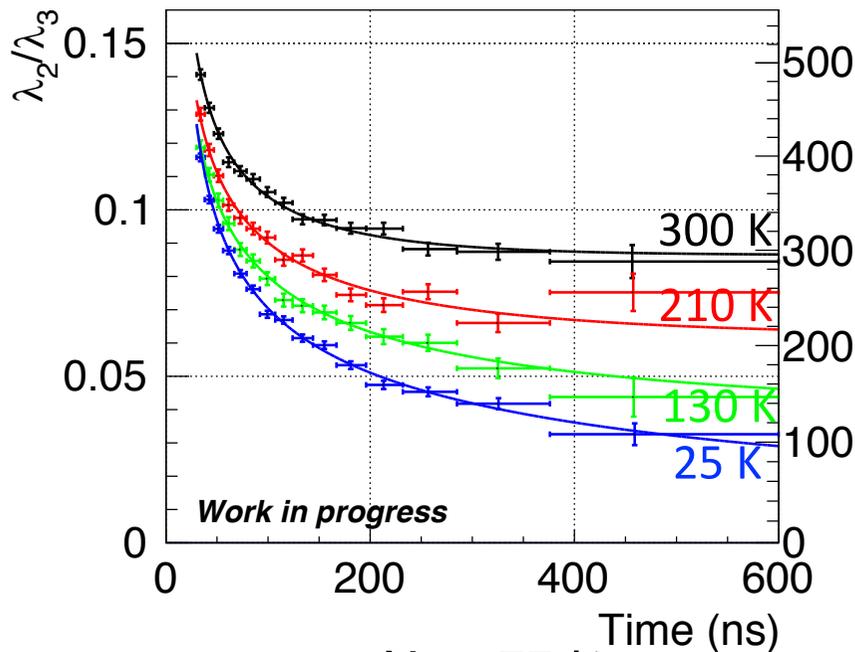
使用したシリカエアロゲルのSEM写真

- 空孔中にできたPsは、低温のシリカ骨格と衝突しながら冷える
- 衝突の際、Psとシリカ中電子との対消滅が起こるので、その崩壊率からPs温度測定

密度0.11 g cm⁻³ のシリカエアロゲル

SiO₂でできた多孔質で、Psの平均自由行程38 nm (BET法で測定)

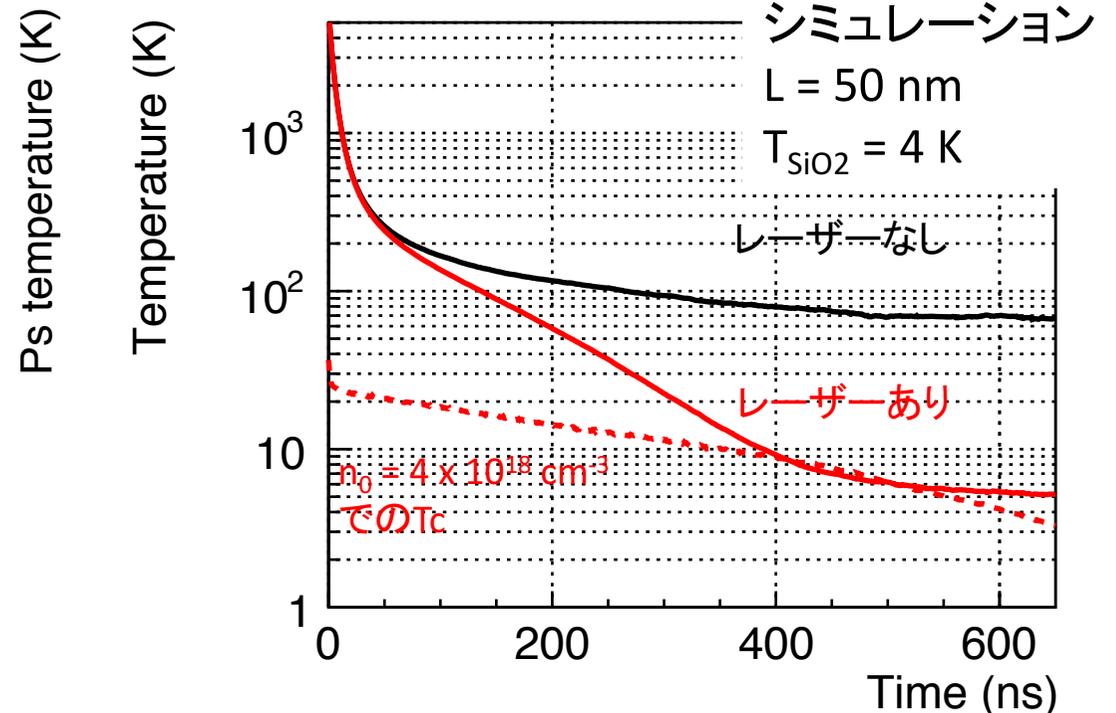
得られた熱化関数とシリカ有効質量M



熱化関数

左縦軸: pick-off消滅率

右縦軸: RTE modelによる温度換算



Monte Carloによる温度発展

- 低温環境で100 Kまでの熱化過程を初めて観測, Mを測定
- 高温域で過去の実験とコンシステント
- 熱化によって100 K程度まで冷やせることが分かった

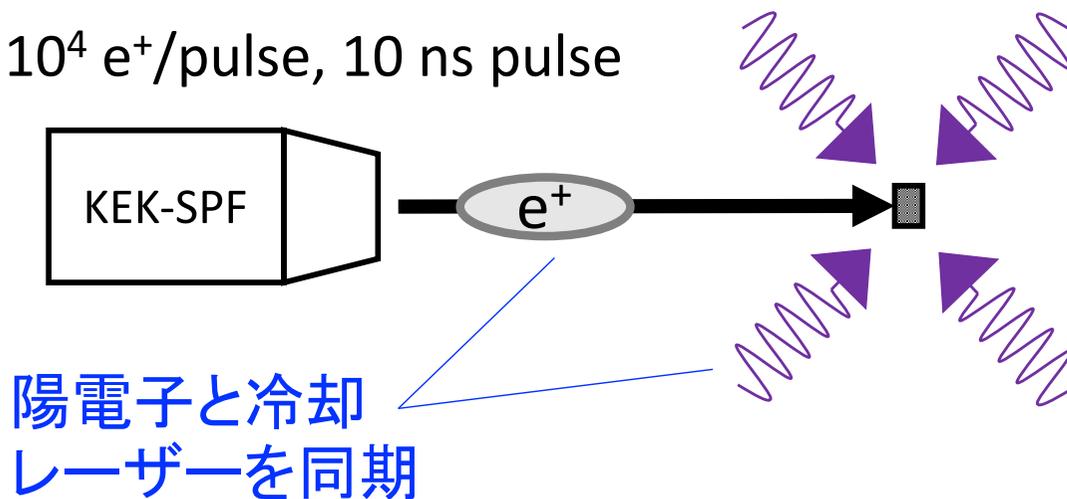
➤ 次のステップはレーザー冷却で10 K以下に

KEK-SPFでの Psレーザー冷却実験

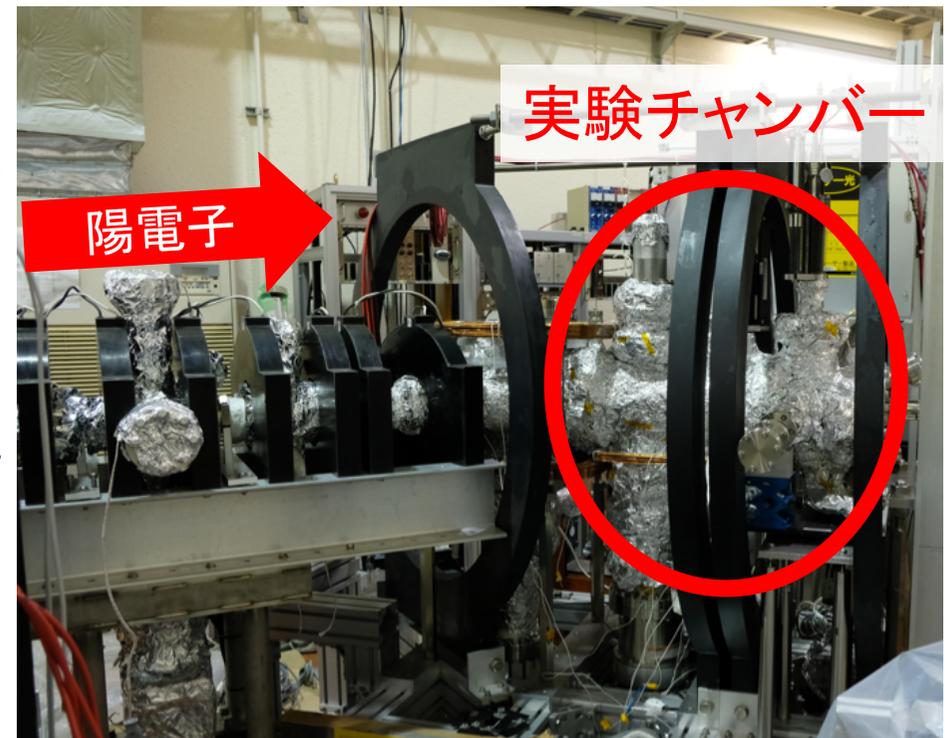
Psレーザー冷却にはパルスレーザーを用いる

- 高密度/短パルス(数十ns)陽電子が必要
- 現在日本で唯一そのような陽電子が得られる共同利用施設KEK-低速陽電子実験施設(SPF)でPs冷却実験を行う予定(予備実験承認済)。
- 反物質で初めてのレーザー冷却/冷却Psによる精密測定

$10^4 e^+/\text{pulse}$, 10 ns pulse



実験概念図

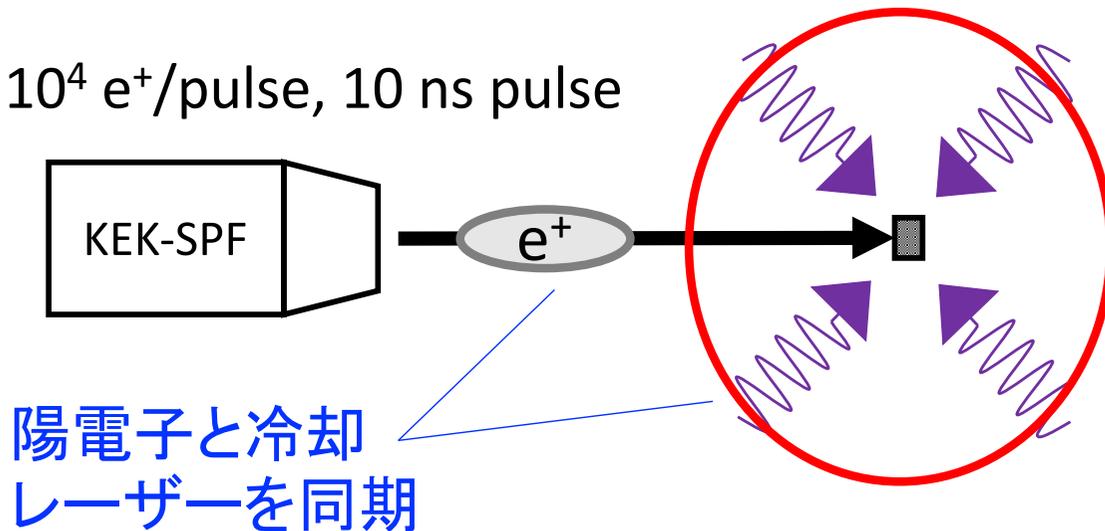


KEK-SPFでの Psレーザー冷却実験

Psレーザー冷却にはパルスレーザーを用いる

- 高密度/短パルス(数十ns)陽電子が必要
- 現在日本で唯一そのような陽電子が得られる共同利用施設KEK-低速陽電子実験施設(SPF)でPs冷却実験を行う予定(予備実験承認済)。
- 反物質で初めてのレーザー冷却/冷却Psによる精密測定

$10^4 e^+/\text{pulse}$, 10 ns pulse



実験概念図

閉じ込めたPsをレーザー冷却
するため、紫外光に透明なシリ
カキャビティが必要

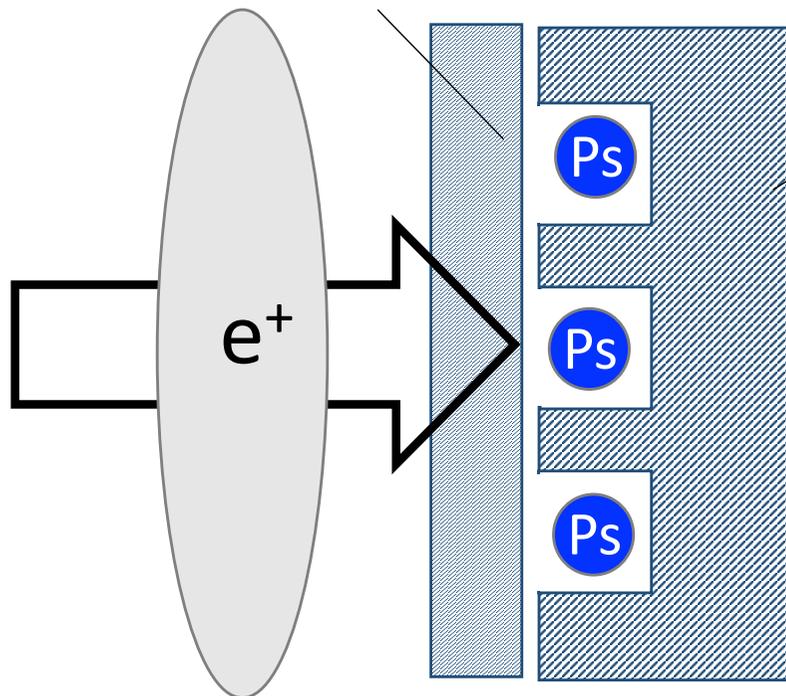
- このようなPs生成材料はな
いため、新しく開発する

光透明シリカキャビティの開発

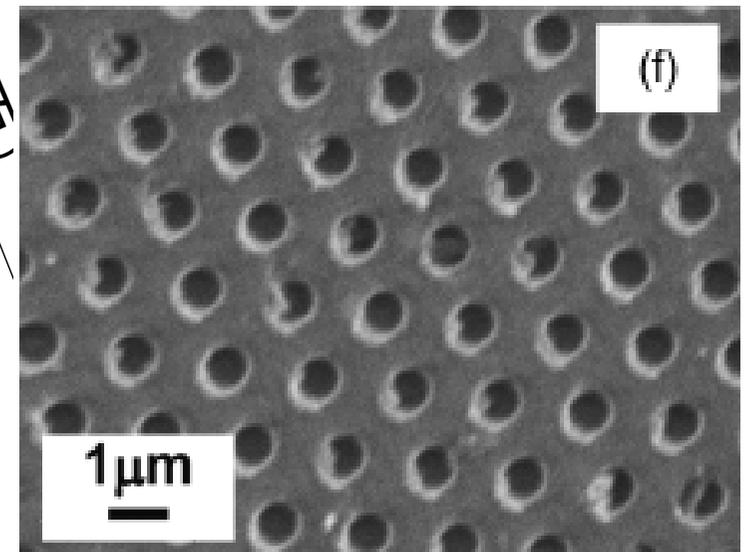
- ◆ 閉じ込めたPsをレーザー冷却するため、紫外光に透明なシリカキャビティが必要
- 微細加工可能な新しい機能性シリカガラスで開発・試験中

薄膜でフタする
TEMで使われるSiO₂ 100 nm厚

表面穴加工した
シリカガラス (本番では100 nm径)

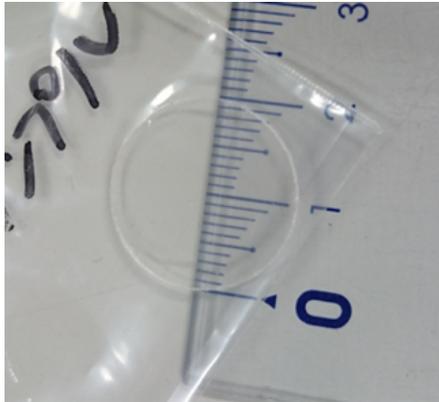


(表面)

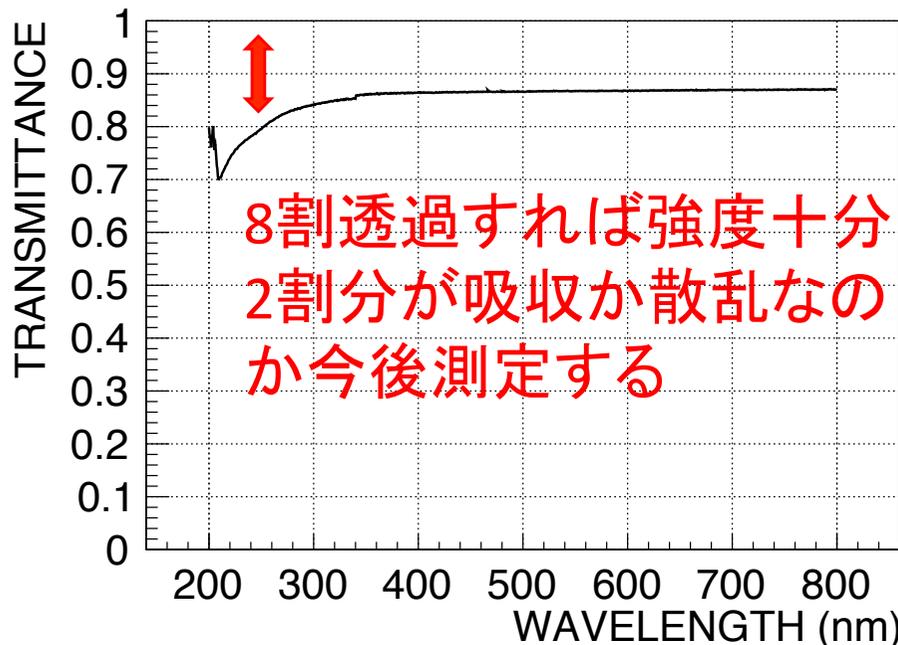


S. Fujino *et al.* J. Am. Ceram. Soc., Vo.94[8]
2319-2322 (2011)

機能性シリカガラスの性質 透過率とPs生成率

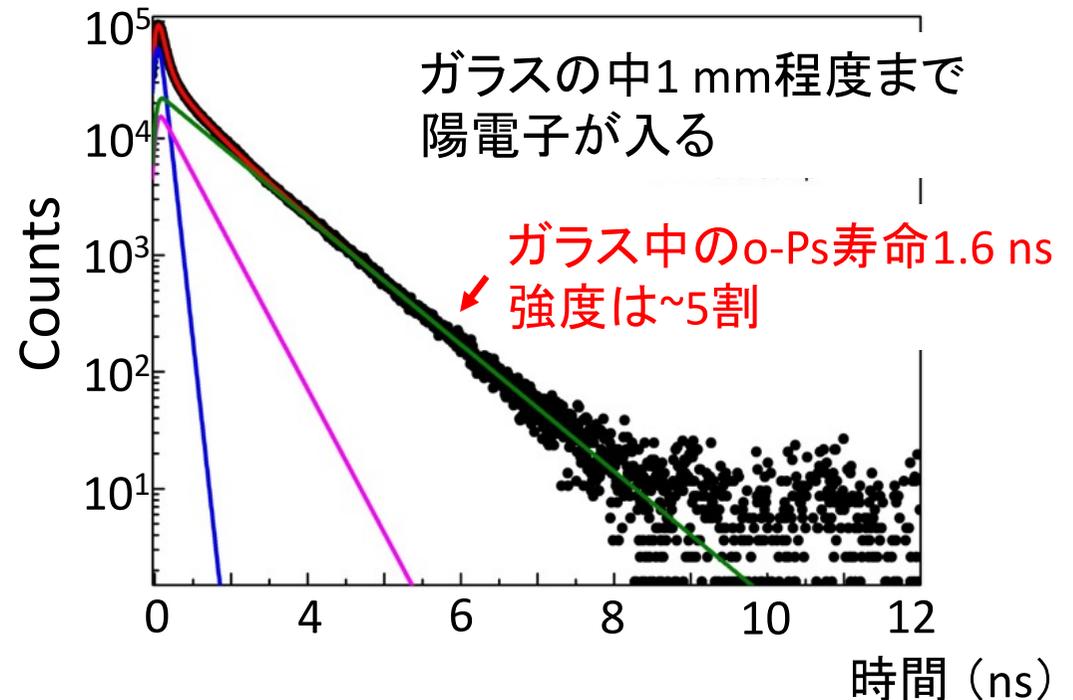


作ったガラス



分光光度計で測定した透過スペクトル

- ^{22}Na 由来の陽電子 (0~530 keV) を入射したときの崩壊寿命



- ✓ 機能性シリカガラス材料自体は高いPs生成率をもつことを確認
- 次は低速陽電子を当ててキャビティ中に生成/生成率を確認

まとめ

- Ps-BECの実現を目指してPs高密度化・冷却に取り組んでいる。目標は、温度10 K以下、密度 10^{17} cm^{-3} 以上である。
- 冷却について、低温環境での熱化を初測定し、100 K程度まで冷やせることを確認した。
- 10 Kまでの冷却を実現するレーザー冷却実験をKEK-SPFで行う。レーザー冷却のキーテクノロジーとなる、紫外透明シリカ多孔キャビティの試験を予備実験で行う。