

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冷却I

石田 明,

周健治, 村吉諄之, 難波俊雄^A, 浅井祥仁, 蔡恩美^B, 吉岡孝高^B,
五神真, 大島永康^C, オロークブライアン^C, 満汐孝治^C, 伊藤賢志^C,
熊谷和博^C, 鈴木良一^C, 藤野茂^D, 兵頭俊夫^E, 望月出海^E, 和田健^F

東大理, 東大素セ^A, 東大工^B, 産総研^C, 九大GIC^D, 高工研^E, 量研^F

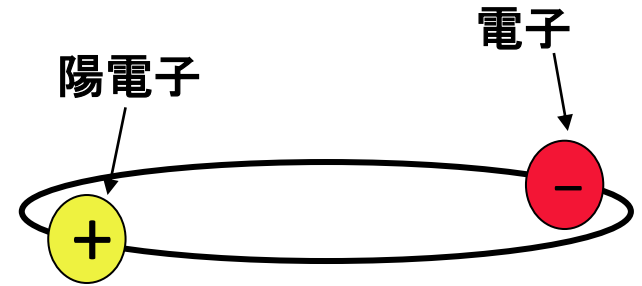


目次

- 緒言 – Ps-BEC の動機
 - 物質・反物質の非対称性 (重力測定)
 - ガンマ線レーザー
- Ps-BEC 実現のための新しいアイデア
 - パルス化した高密度陽電子ビーム + SiO_2 キャビティ
(→キャビティの開発: 次の講演)
 - 熱化 + レーザー冷却
- 低温環境での Ps 熱化測定
- Ps レーザー冷却
 - 特別なホームメイドレーザーシステムの開発
 - KEK-SPF で実現予定 (→テスト実験進行中: 次の講演)

ポジトロニウム (Ps) は 基礎物理学研究の良いプローブ

電子 (e^-) と陽電子 (e^+) の
束縛系



最も軽いエキゾチック原子

✓ 反粒子を含むエキゾチック原子

➤ 反物質の謎を解明するのによい系

✓ 純粋なレプトン系

➤ 実験と理論計算が、ハドロン相互作用の不定性なく高精度で比較できる。

目標：

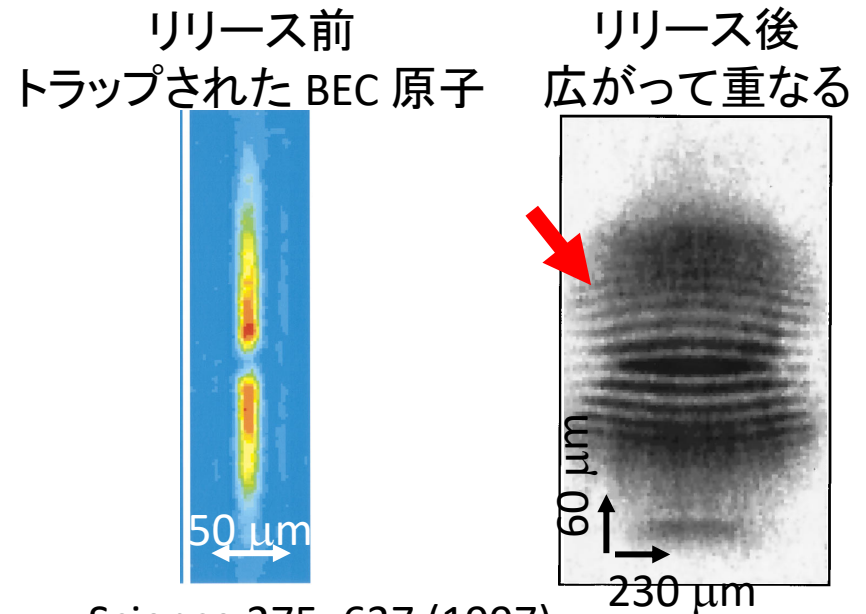
ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮

ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 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

重要な性質

- BEC は “原子レーザー”
- 静かでコヒーレント: ミクロな量子現象がマクロなスケールで観測できる(物質波干渉計)
- ミクロな世界の研究にブレークスルーをもたらす

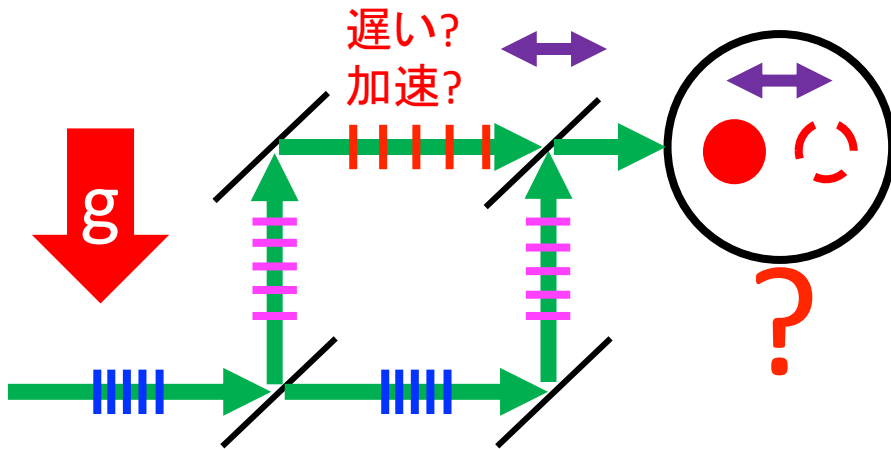


Science 275, 637 (1997)

Ps-BEC の応用

1. 反物質に働く重力を、原子干渉計を用いて測定する

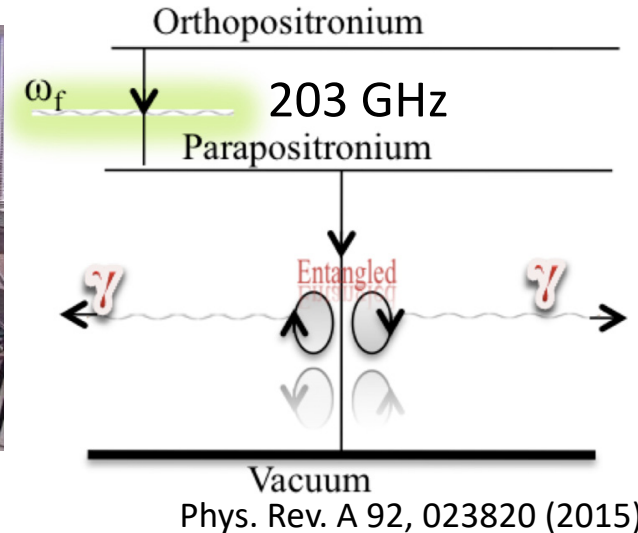
2つのパスの長さを変化させるとPsの強度が揺らめきうる



- 異なる経路を通るPsは、重力による減速などを受けて位相が異なりうる。
- 弱い等価原理を仮定すると、重力の効果を見るのに必要な経路長は 20 cm.

Phys. stat. sol. 4, 3419 (2007)

2. 511 keV ガンマ線レーザー



- o -Ps BEC \rightarrow p -Ps を 203 GHz RF で
- p -Ps BEC は自己増幅でコヒーレントな 511 keV ガンマ線に
- 従来(X線)の 1/10 という短い波長による高精度イメージング
- マクロな量子もつれ

Phys. Rev. A 92, 023820 (2015)

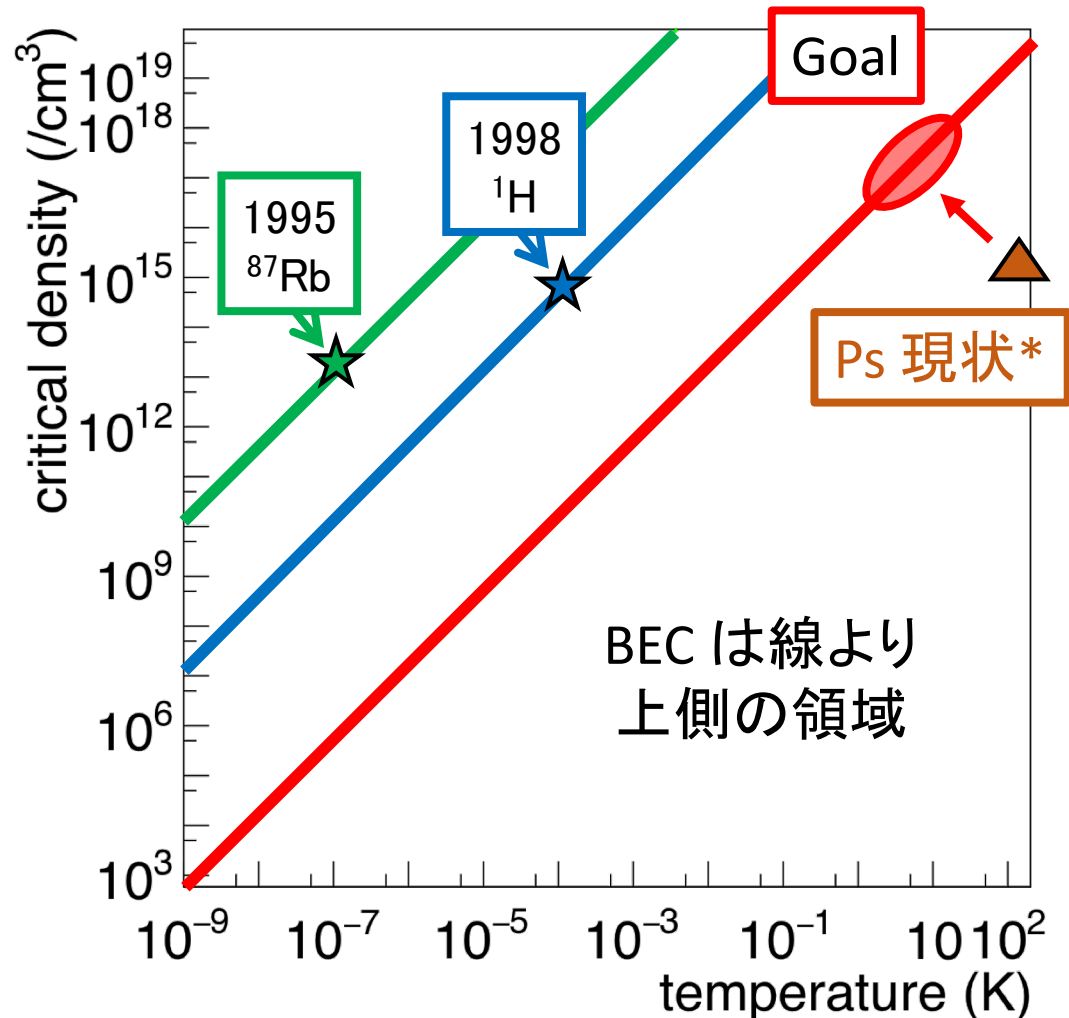
チャレンジ: 短時間に高密度かつ冷たい Ps を生成

Ps-BEC 実現の条件

- 高密度
- 低温
- Ps では, $T < 10 \text{ K}$ かつ $n > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
- Ps は軽いので転移温度 (T_c) が **とても高い**。しかし対消滅の寿命が **142 ns しかない (o-Ps)**

必要な技術

1. 瞬間的な (10 ns 程度) 高密度 Ps の生成
2. Ps の高速冷却 ($\sim 100 \text{ ns}$ の短時間で 10 K)



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

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

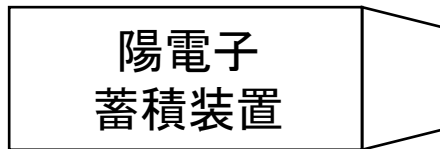
Ps-BEC 実現法

新しい手法を提案: K. Shu *et al.* J. Phys. B 49, 104001 (2016)

Ps-BEC 実現の第一の鍵:

高密度陽電子を生成し、高密度 Ps に一度に変換

- 10^8 個の偏極した陽電子
ナノ秒のバンチ、 $\sim \text{keV}$ のエネルギー



サブ μm ウェストに絞ったビーム
をシリカ (SiO_2) に入射

内部の空隙 = トラップ空間
 $\sim 75 \text{ nm} \times 75 \text{ nm} \times 75 \text{ nm}$

1700 個の Ps
を生成

$$n_0 = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

拡大図

Ps 生成材料 (シリカ)

$\sim 50\%$ の変換効率

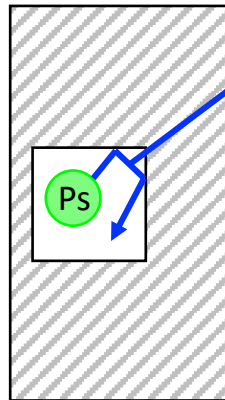
→ 材料開発は次の講演

- 10^9 個の陽電子蓄積は世界では既存の技術。サブ μm ウェストのビームを達成するための陽電子集束について研究中。

Ps-BEC 実現の第二段階: Ps 冷却 1. 熱化

1つめの冷却

冷たいシリカ壁との衝突による冷却
= 熱化



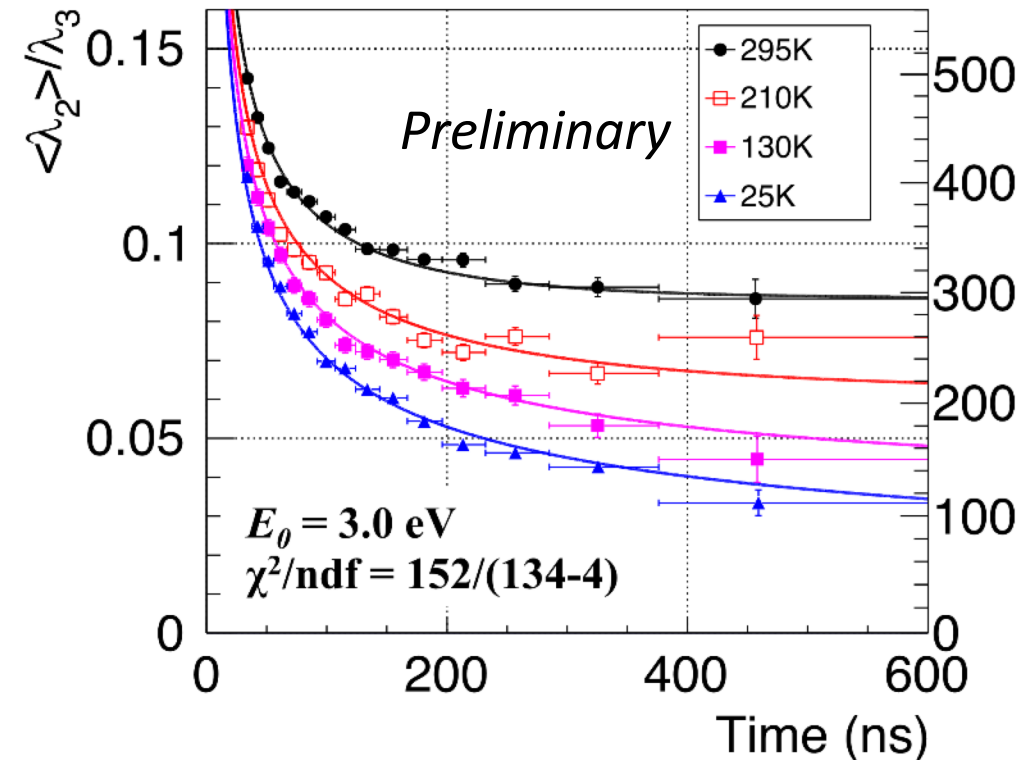
冷たいシリカ < 10 K

低温環境における Ps 熱化の測定がなかった。

→ 我々が最初に測定

100 K までの Ps 熱化を観測

様々なシリカ温度における
Ps 熱化関数



- 低温への Ps 熱化が明確に観測された。

RTE モデルを用いて pick-off 崩壊確率を温度に換算

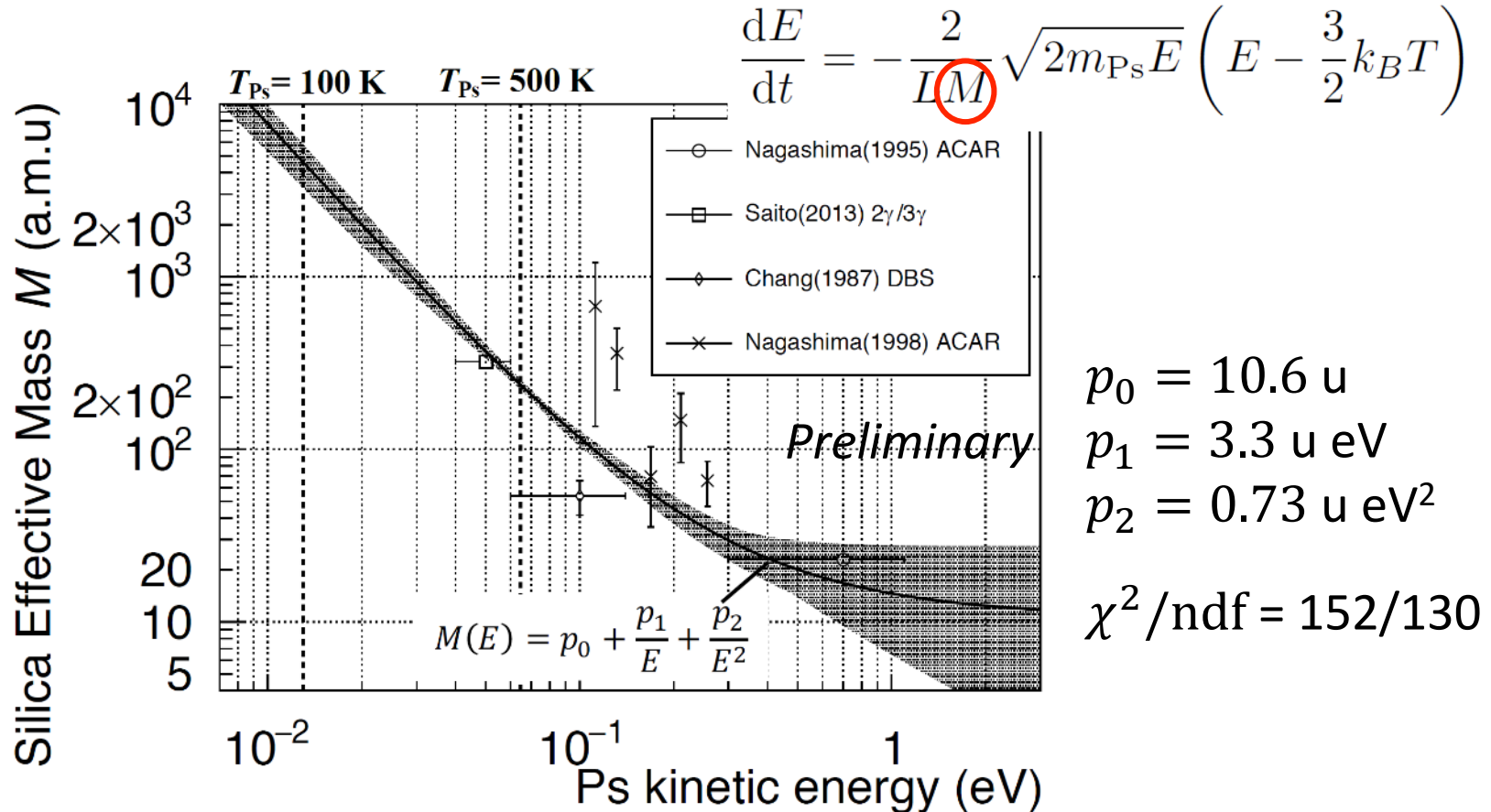
(T. L. Dull *et al.*, *J. Phys. Chem. B* **105**, 4657 (2001).)

弾性散乱モデル (Y. Nagashima *et al.*, *PRA* **52**, 258 (1995)) によってフィット。シリカの有効質量 M をエネルギーに依存した関数として扱った。

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{2}{LM} \sqrt{2m_{\text{Ps}} E} \left(E - \frac{3}{2} k_B T \right)$$

Ps 熱化は、低温で遅くなる

運動エネルギーの時間変化 $\propto -1 / (\text{シリカ有効質量 } M)$



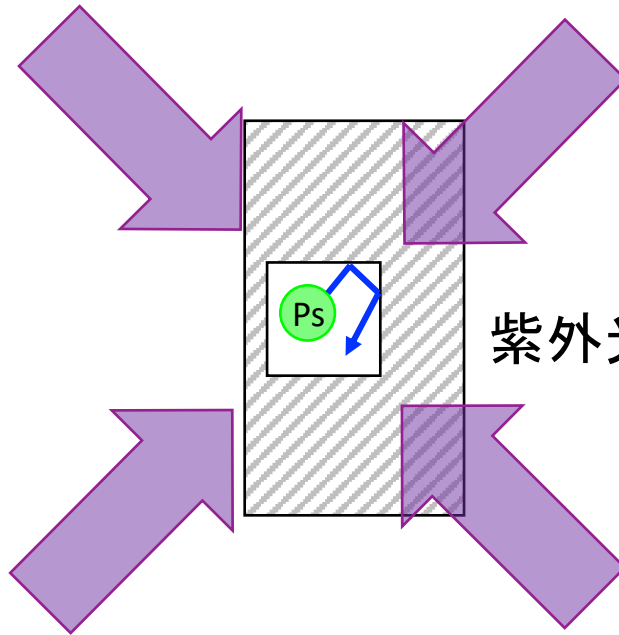
- 高温で過去の実験と無矛盾。
- 熱化によって Ps は 100 K まで冷却されるが、Ps-BEC には冷却が不十分。 更なる冷却: 10 K までのレーザー冷却

Ps-BEC 実現の第二段階: Ps 冷却

2. レーザー冷却

2つめの冷却

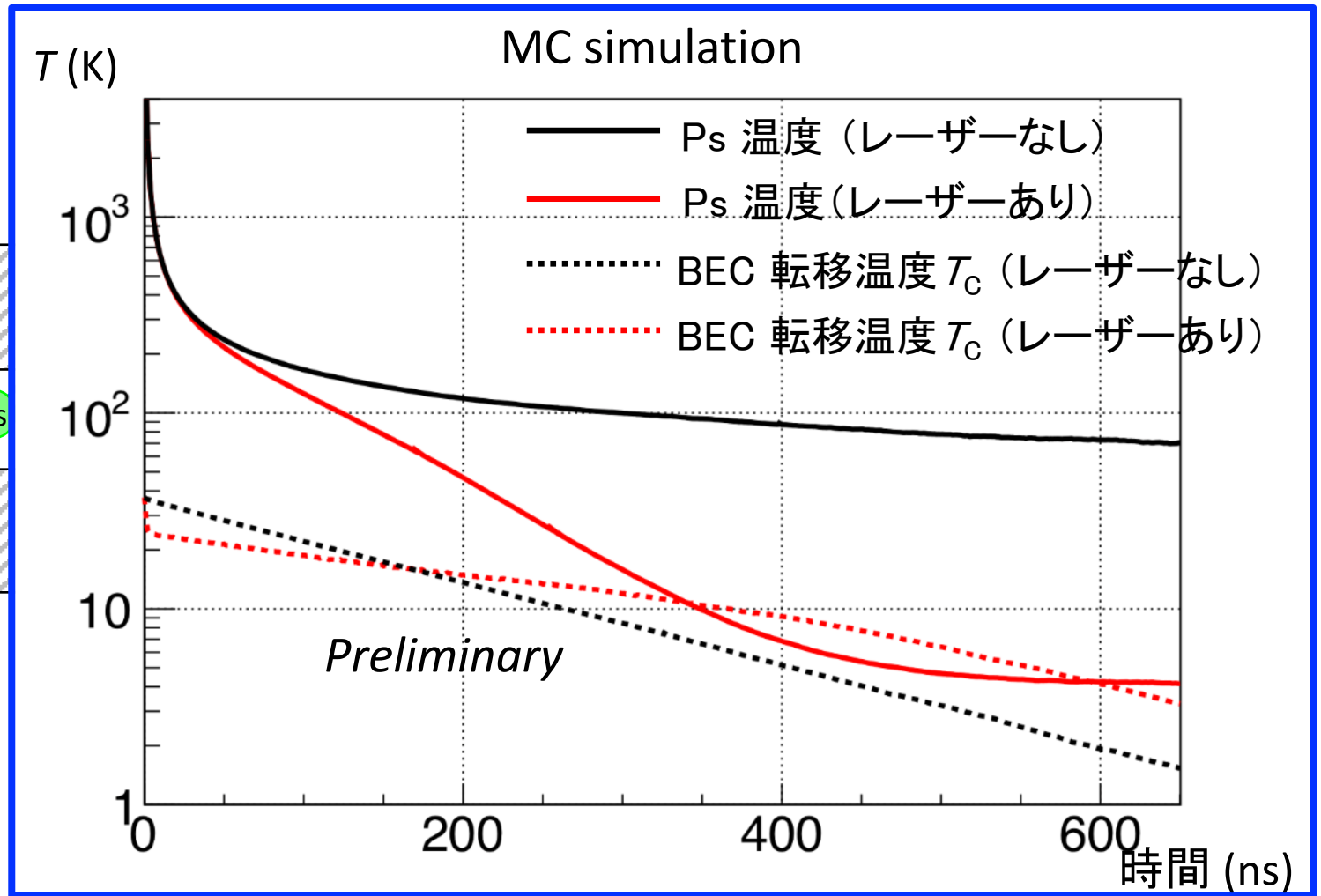
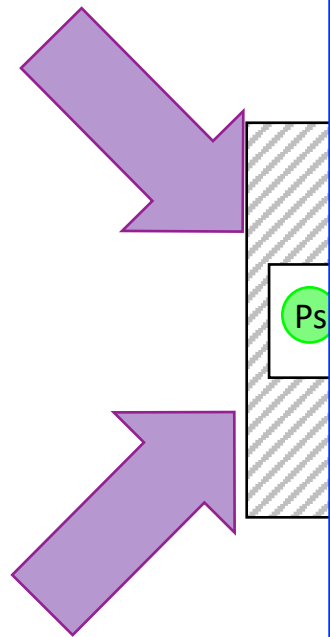
243 nm 紫外レーザーを照射して
Ps を 10 K まで冷却。
1S-2P 遷移を利用。



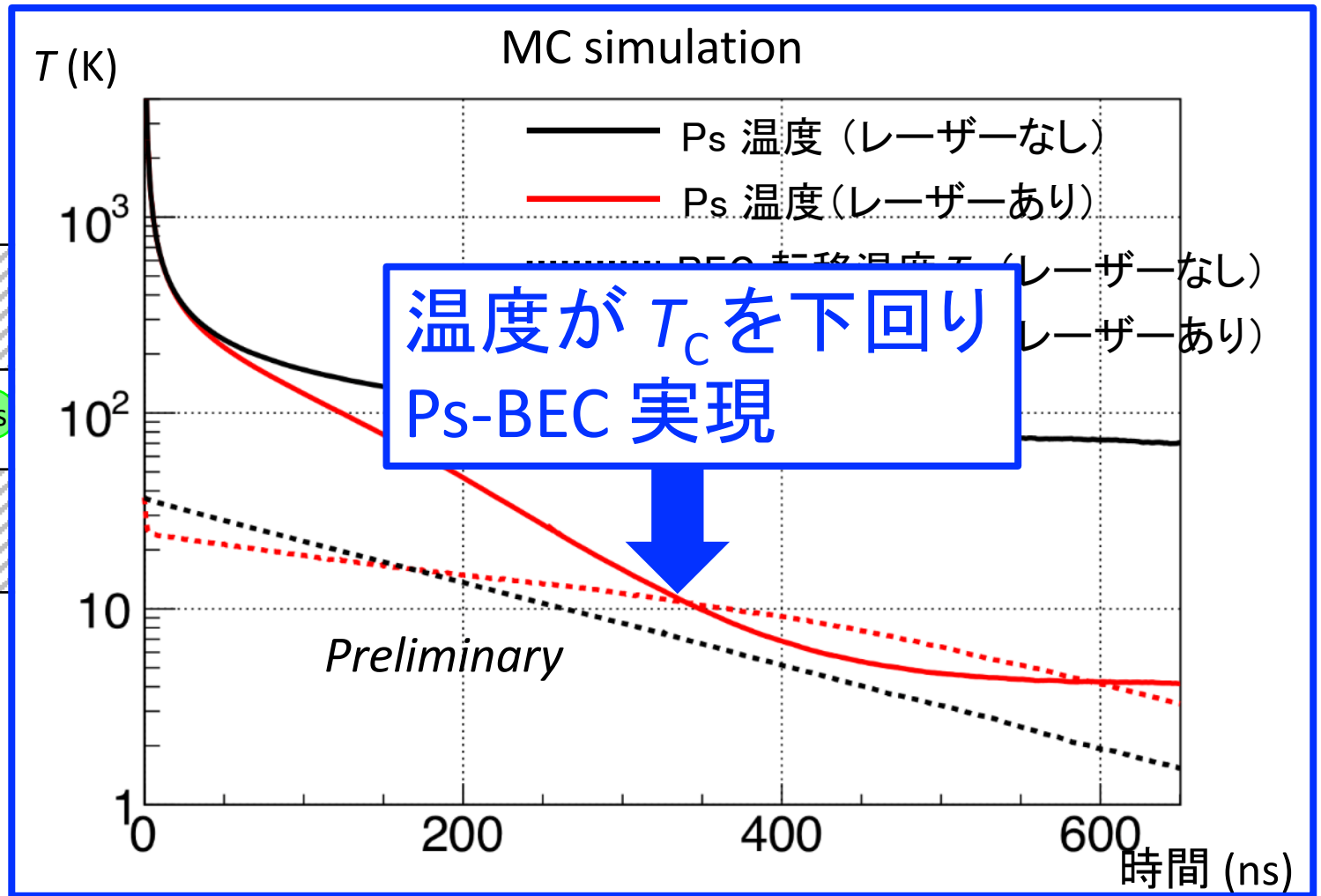
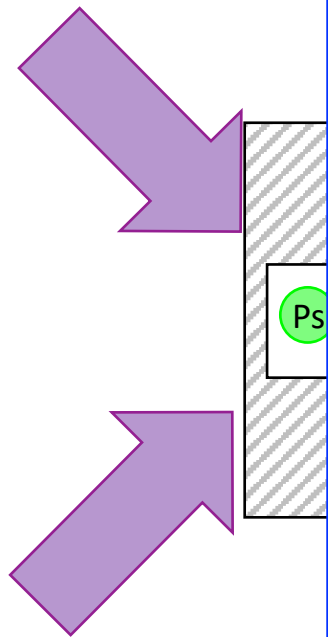
紫外光にシリカは透明

243 nm 紫外レーザー

Ps レーザー冷却



Ps レーザー冷却

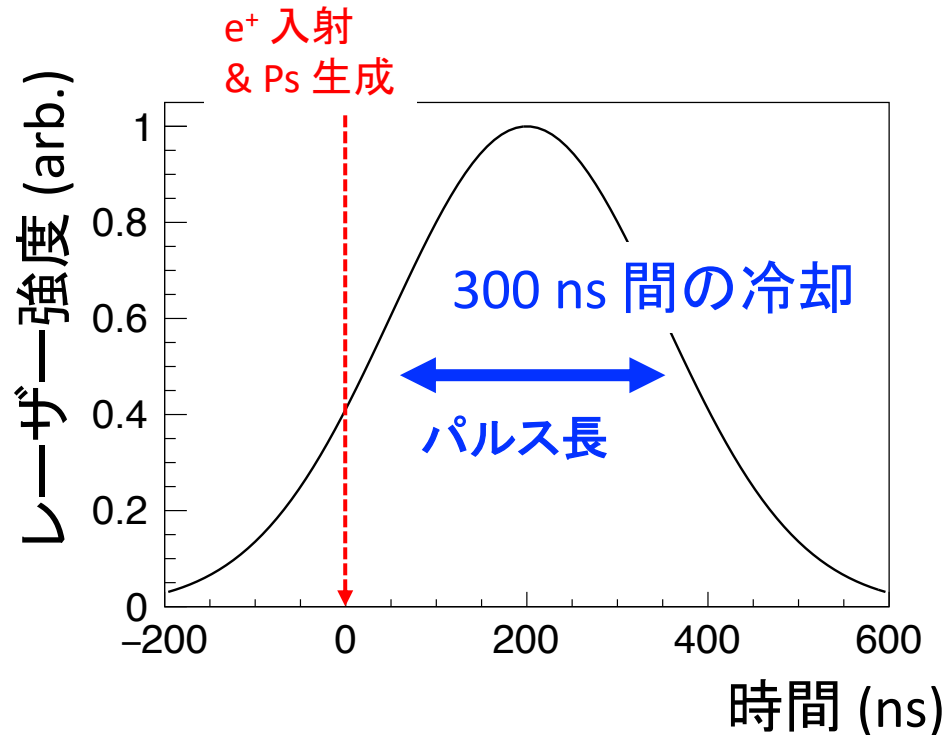


冷却レーザーの要求性能

1. 長いパルス長

世界初の Ps レーザー冷却 (あらゆる反物質系で世界初)
Ps (軽く、寿命が短い) の冷却には, いくつかの特殊な性能が要求される。

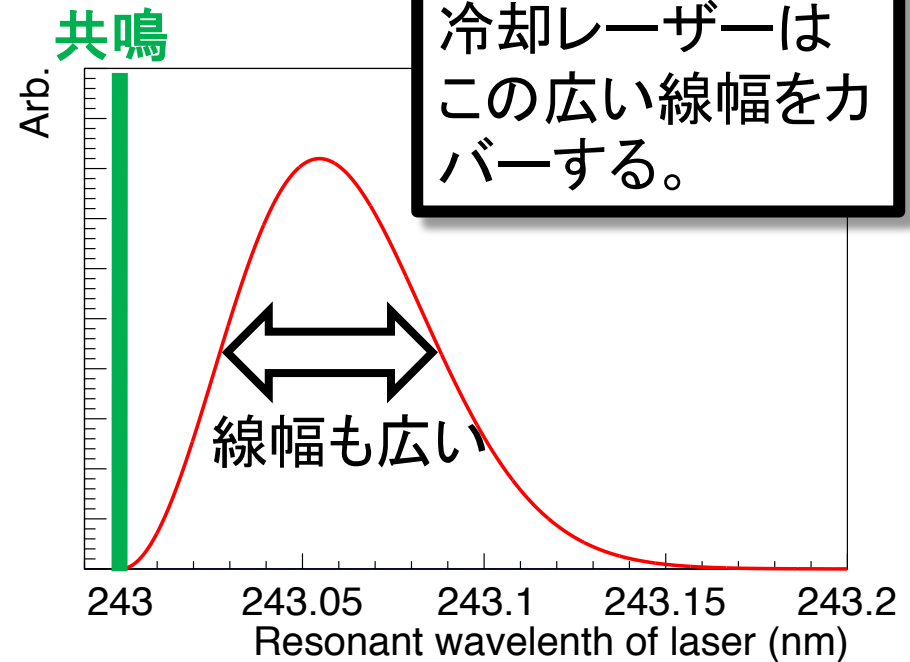
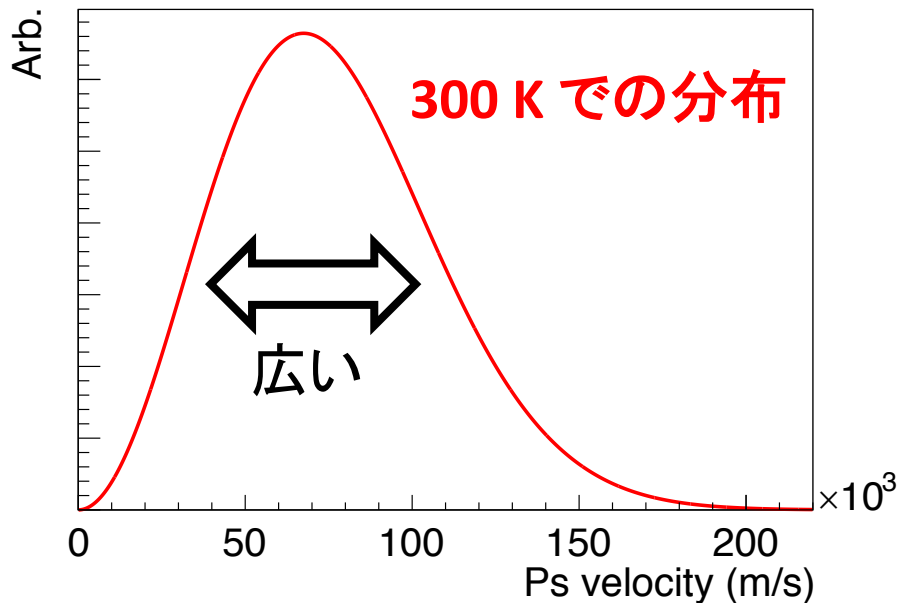
- 300 ns の時間にわたる継続的な冷却
(300 ns ~ 1S-2P 遷移が飽和しているときの Ps 寿命)



冷却レーザーの要求性能

2. 広い線幅

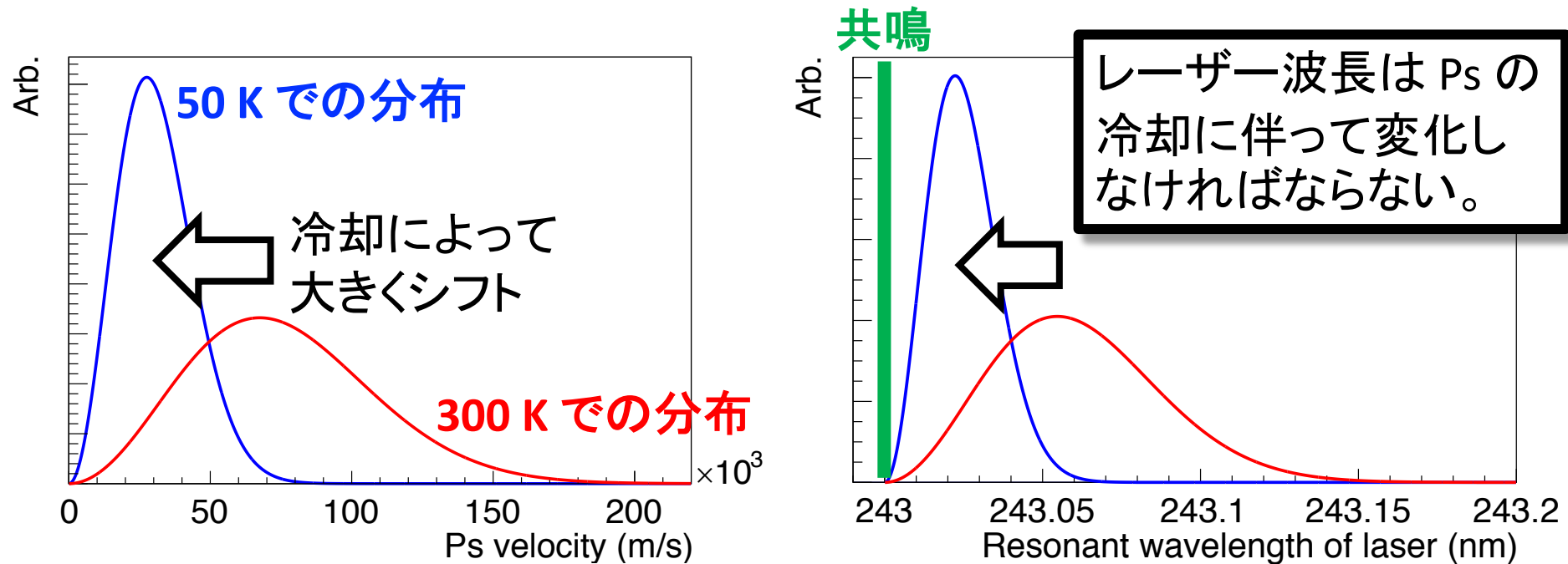
- Ps は質量が軽いためドップラー効果が大い。レーザーの線幅もそのドップラー幅をカバーできるように広くないといけない。



冷却レーザーの要求性能

3. 速い周波数シフト

- 共鳴波長は Ps が冷却されるに伴って大きく変化する。
パルスレーザーの速い周波数シフトは成功すれば世界初の技術。



Ps 冷却レーザーは特殊

	Ps 冷却レーザー	商用レーザー
パルス幅	300 ns	CW / パルス幅 10ns / 100 fs
線幅	28 pm	2 pm 以下 / 10 nm 以上
波長シフト	12 pm を 300 ns で	例なし

- レーザー光学はかなり発達してきているが、Ps 冷却レーザーは現在でも特殊な性能を要求する。
- 現在の優れた最新光学技術を組み合わせて、新しいレーザーシステムを設計した。

特殊なホームメイドレーザーシステム

Ps 冷却レーザーを 5 つのステップで達成:

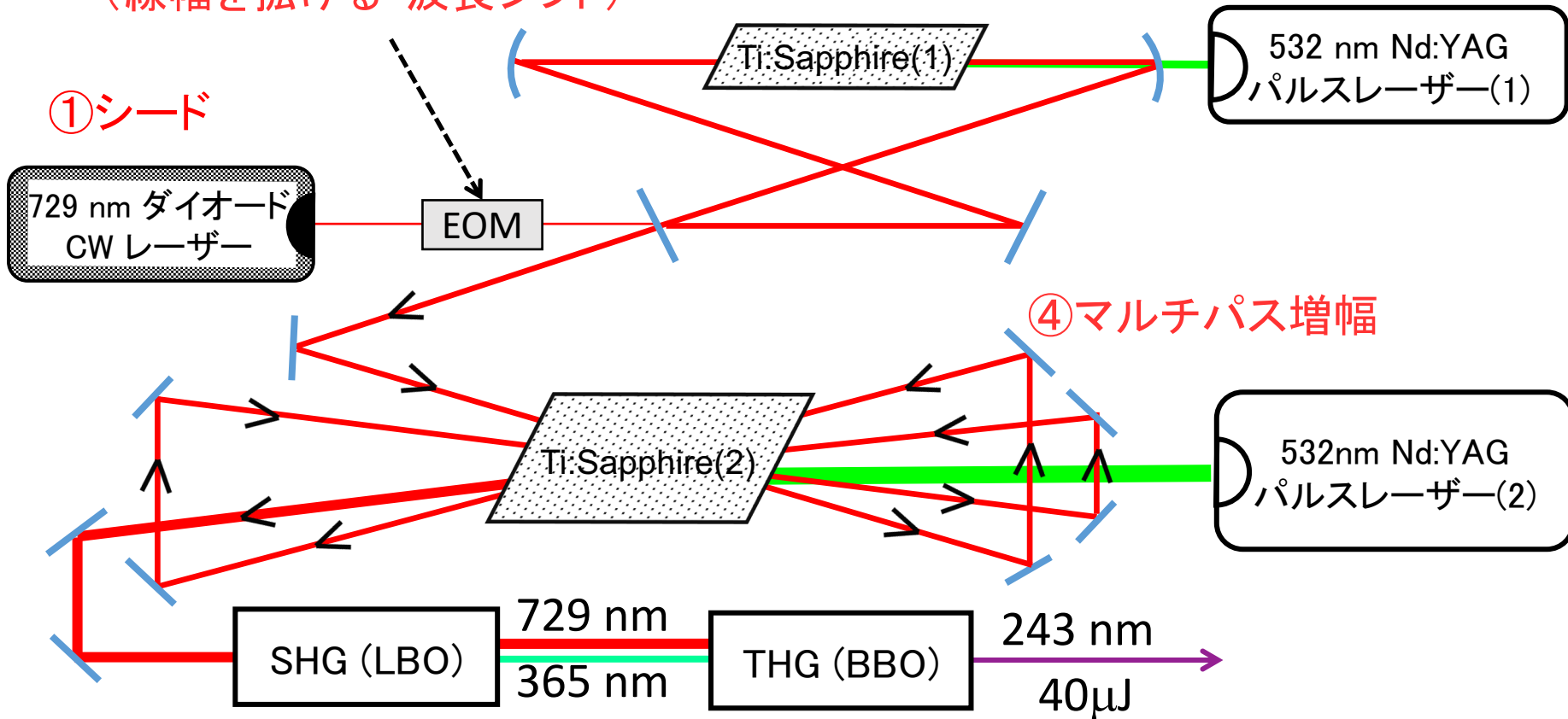
- ①シード (729 nm)→②波長操作→③パルス化→
- ④増幅→⑤三次高調波発生

②波長操作

(線幅を広げる・波長シフト)

③パルス化 (長いパルス長)

①シード

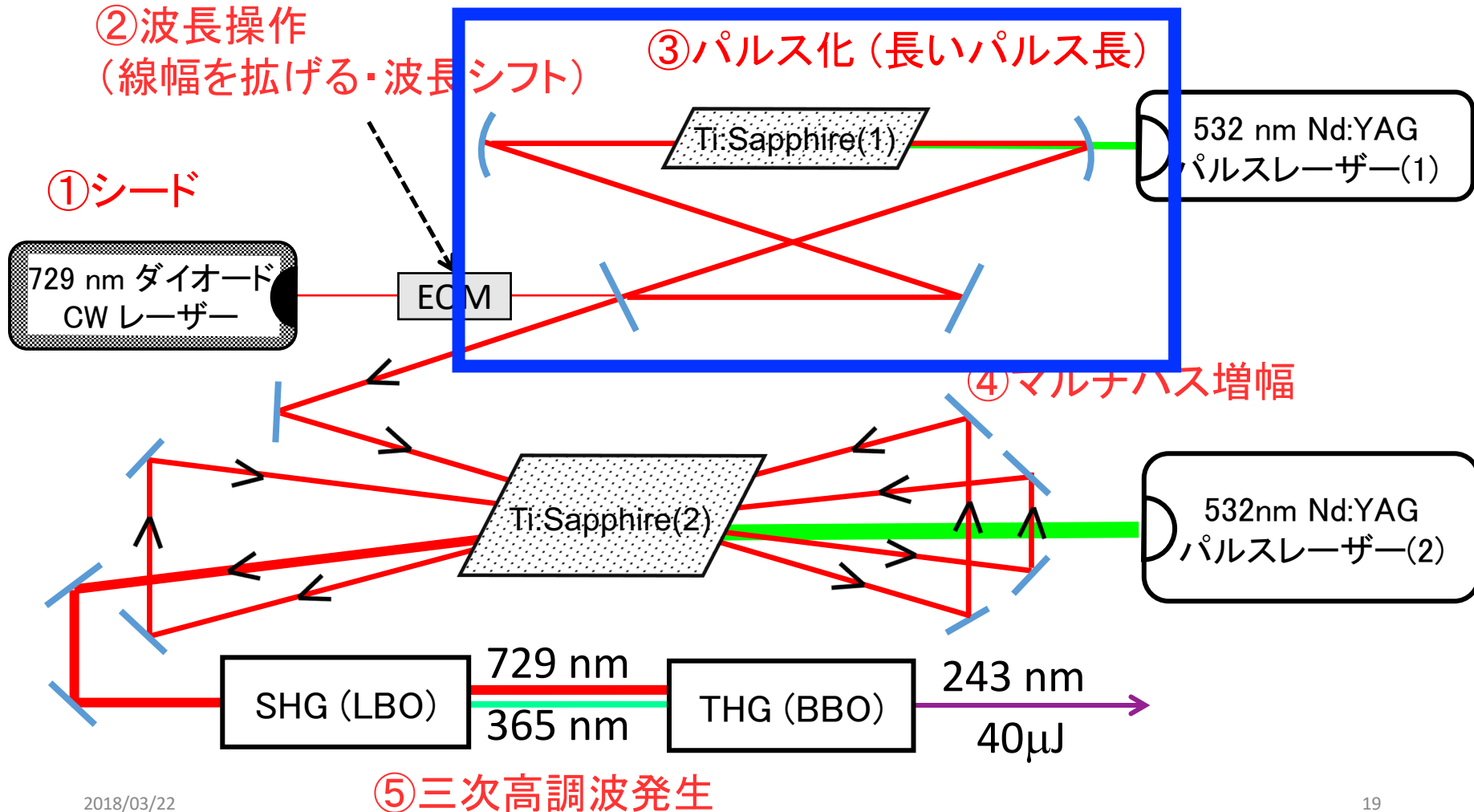


⑤三次高調波発生

特殊なホームメイドレーザーシステム

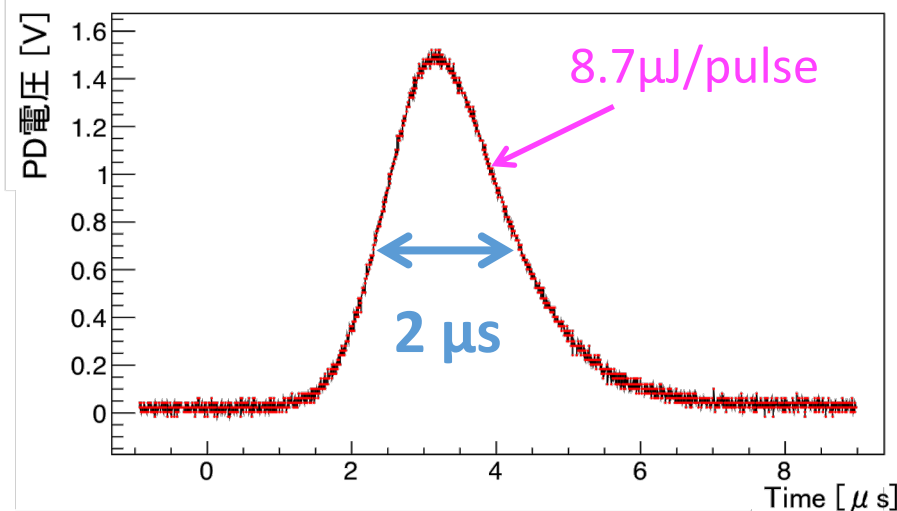
Ps 冷却レーザーを 5 つのステップで達成:

- ①シード (729 nm)→②波長操作→③パルス化→
- ④増幅→⑤三次高調波発生



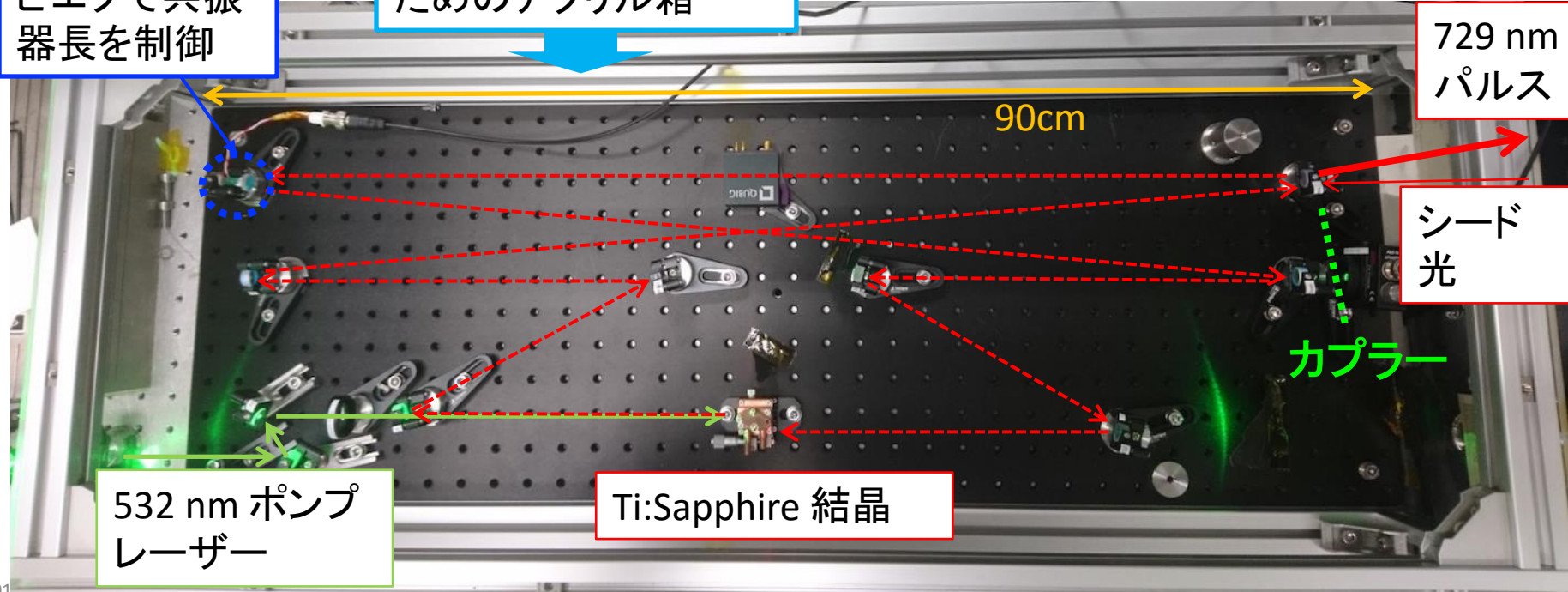
Ps 冷却レーザー ③ パルス化: プロトタイプ of Ti:Sapphire 共振器により $2\ \mu\text{s}$ の長いパルスを発振

- 共振器長を 3.8 m と長くした。
- 1 周あたりたった 1.4% のロス。
- 波長選択性ミラーで 729 nm の光のみを選択的に発振。

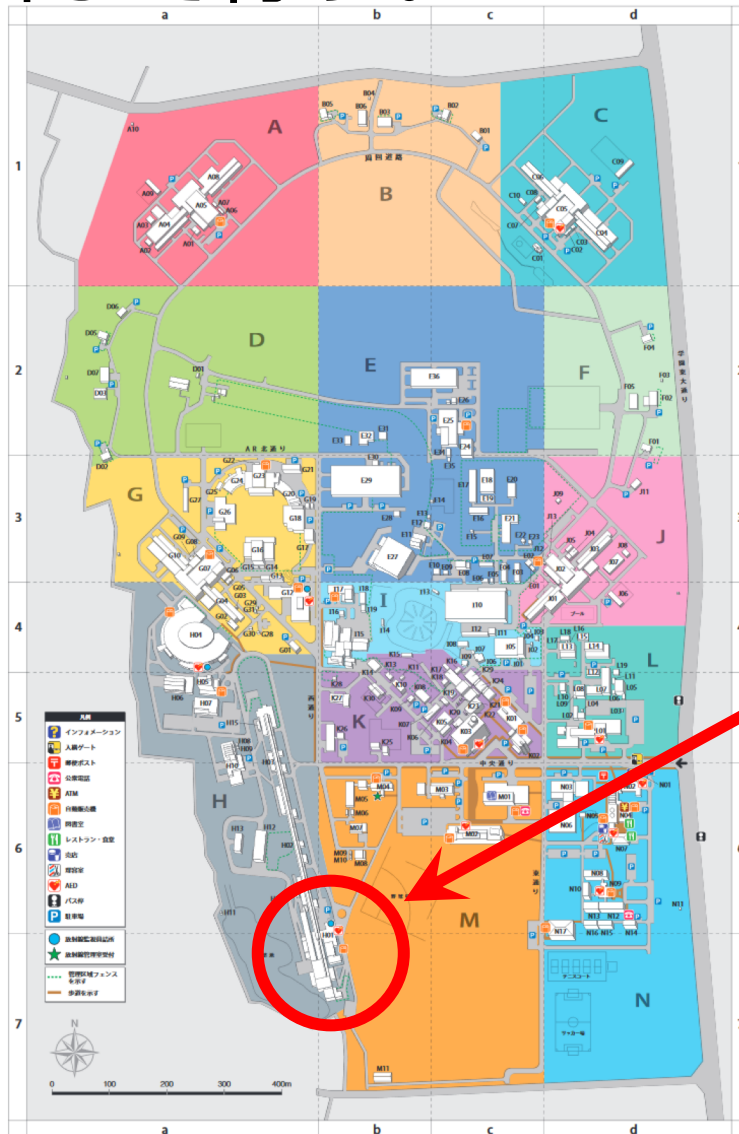


ピエゾで共振器長を制御

空気による擾乱を防ぐためのアクリル箱



Ps レーザー冷却実験は、KEK-SPF (低速陽電子施設 : Slow Positron Facility) で2年以内を目指して行う。



KEK-SPF
低速陽電子施設

現在、テスト実験中
→次の講演

まとめ

- Ps-BEC は反物質を含む系で世界初の BEC として最有力候補の一つである。
- Ps-BEC は重力や量子力学などの基礎物理研究及びガンマ線レーザーなどの応用に役立つ。
- 高密度陽電子を用意し、熱化+レーザー冷却による Ps 冷却を行うという新しい Ps-BEC 実現手法を提案した。
- 高密度で集束された陽電子ビームの開発可能性について研究を進めている。
- 低温環境での Ps 熱化関数を世界で初めて測定した。その結果、Ps レーザー冷却と組み合わせることで、Ps-BEC 実現に十分な冷却効果を得られることが判明した。
- Ps 冷却レーザーは特殊な光学性能を要求するため、新しいシステムを作成中。プロトタイプ共振器で 729 nm で 2 μ s もの長さのパルス発振に成功した
- 世界初の Ps レーザー冷却を KEK-SPF で2年以内に達成し、BEC 実現に向けてさらに研究を進める。