

ボース・AINシュタイン凝縮を目指した ポジトロニウム冷却 I

山田 恭平、周 健治、橋立佳央理、石田 明、難波 俊雄^A、浅井 祥仁、
五神 真、田島 陽平^B、蔡 恩美^B、吉岡 孝高^B、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、甲斐 健師^G

東大理、^A東大素セ、^B東大工、^C産総研、^D九大GIC、^E高エネ研、^F量研、^G原子力機構



第56回アイソトープ・放射線研究発表会
2019.7.4@東京大学 弥生講堂

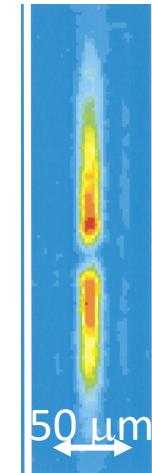
“反物質レーザー”で新しい反物質研究がしたい

ボース・AINシュタイン凝縮

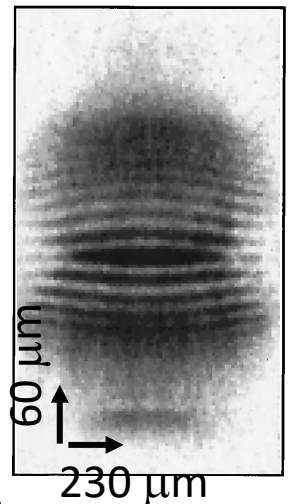
(Bose-Einstein Condensation: BEC)

- ほとんど全ての粒子が基底状態をとり、粒子集団が単一の波動関数を持つ
- ボース粒子集団を高密度かつ低温にすることがBEC相転移の条件
- コヒーレンシーを持ち、“物質波のレーザー状態”
- 反物質でのBECの例はない

トラップされた独立した二つのナトリウム凝縮体



解放、重ね合わせ
→



Science 275, 637 (1997)

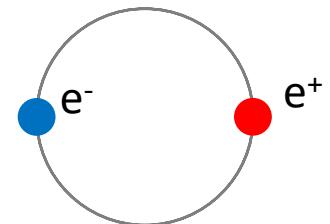
世界で初めて反物質BEC、“反物質レーザー”を作つて
反物質BECでしかできない実験により
反物質の謎を解明したい！

反物質BECの候補: ポジトロニウム

ポジトロニウム (Positronium, Ps)

- 最も簡単な反物質原子系、生成が容易
- 水素様原子・純粋なレプトン系と単純な構造
→束縛状態のQED等、基礎物理学検証に有用

ポジトロニウム

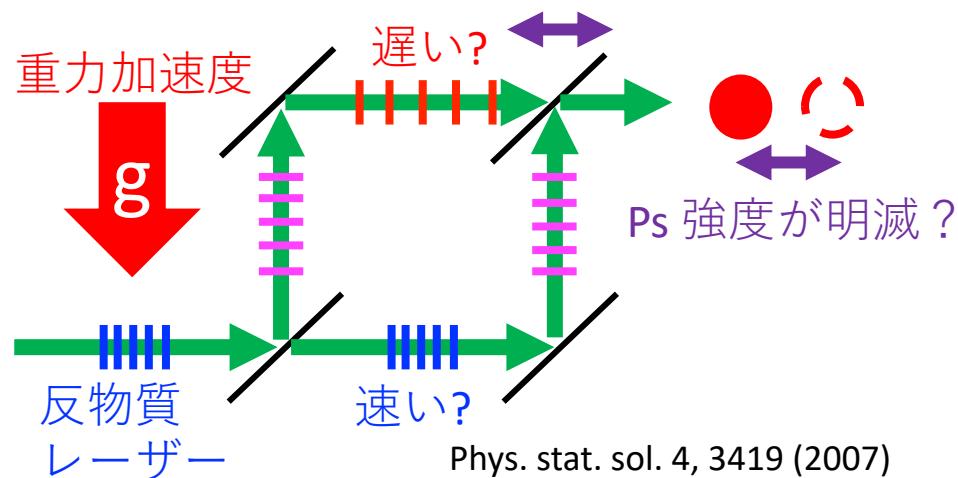


Ps-BEC

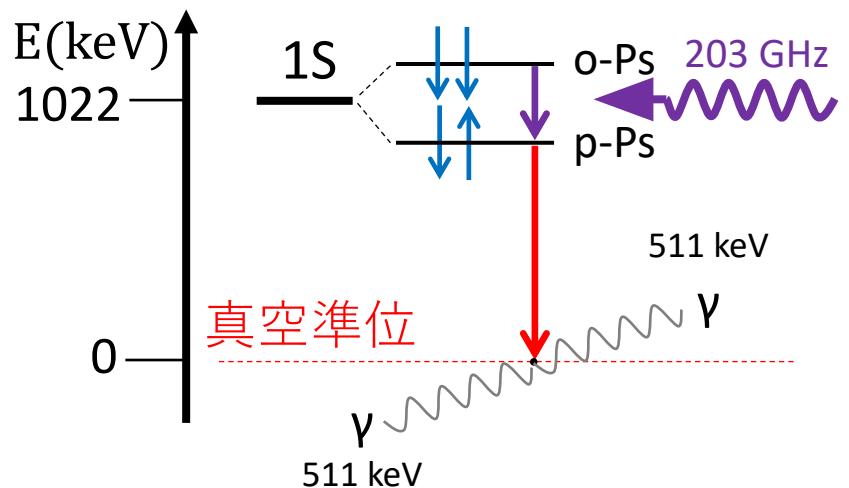
- Psが軽いため転移温度が高い($14\text{K} @ 10^{18} \text{cm}^{-3}$)
- 反物質を含む系で初のBECの有力候補

Ps-BECは基礎、応用研究にブレイクスルーを生む

1. 反物質に働く重力を 原子干渉計を用いて測定する



2. 511 keV ガンマ線レーザー



Phys. Rev. A 92, 023820 (2015)

- 反物質に働く重力効果、物質 e^- ・反物質 e^+ の非対称性をBECの特徴を用いて原子干渉計で検証

- レーザー状態のPsの崩壊によりPs-BEC(原子のレーザー) $\rightarrow \gamma$ 線レーザー
- 従来のX線の10倍短い波長
 \rightarrow 微細構造プローブ

2つの課題: Psの高密度化と高速冷却

最大の問題

Psは寿命が142 nsと短い

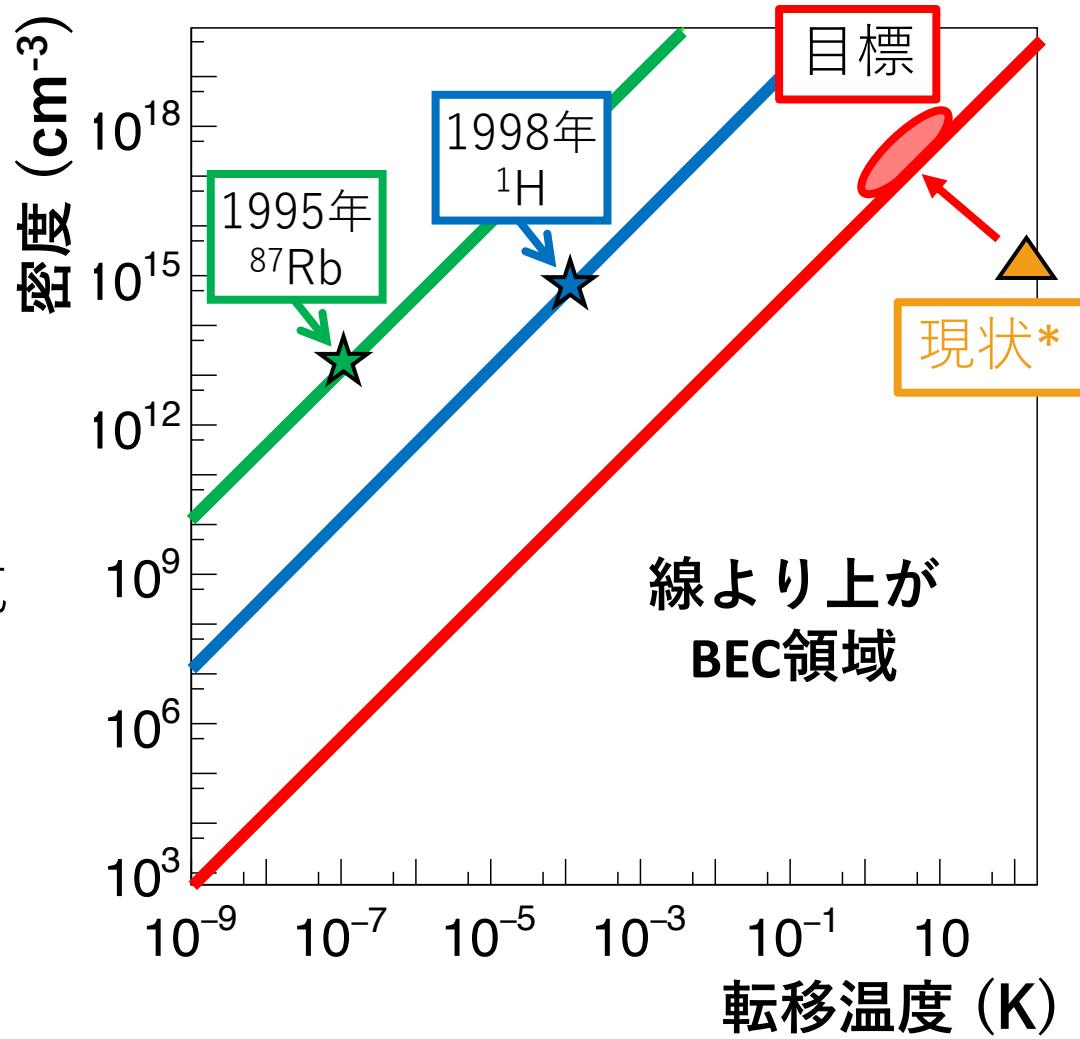
2つの課題

1. 瞬間的な高密度Psの生成

10^{17} cm^{-3} in $< 50 \text{ ns}$

2. Psの高速冷却

$< 10 \text{ K}$ in $\sim 300 \text{ ns}$



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

* : D. Cassidy *et al.* physica status solidi 4, 3419 (2007) 5

Ps-BEC実現方法

1. 高密度Psの生成

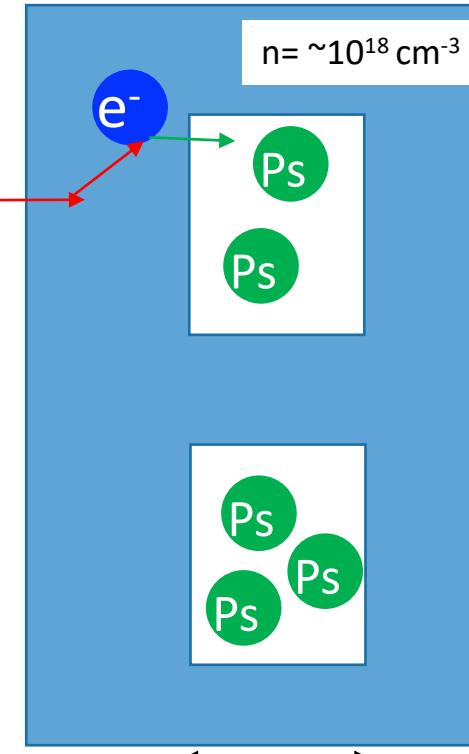
多孔物質に高密度陽電子を打ち込み
高密度Psに変換

ナノ秒バンチ陽電子

Ps生成材料
(多孔性物質)

拡大図

e^+ が材料の陽電子を剥ぎ取り、空孔中にPs生成

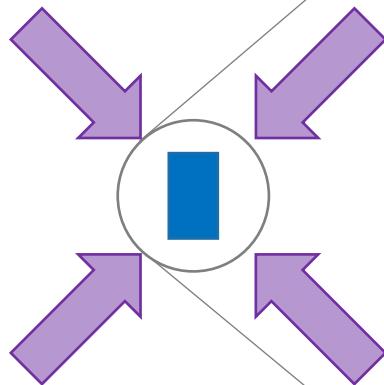


Ps-BEC実現方法

低温材料との衝突による
運動エネルギー交換(熱化)

2. Psの高速冷却

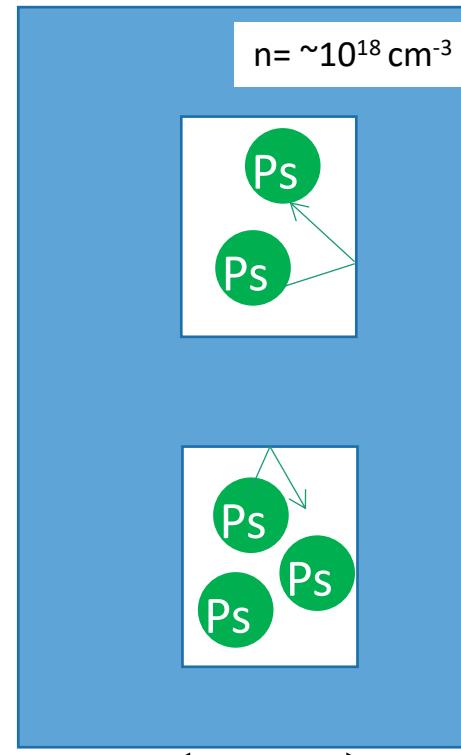
低温物質との熱化とレーザー冷却
の組み合わせ



Ps冷却に最適化した
243 nm 紫外レーザー

拡大図

冷凍機で4 Kまで冷却



熱化とレーザー冷却を組み合わせた Ps-BECを実現する新たな高速冷却手法

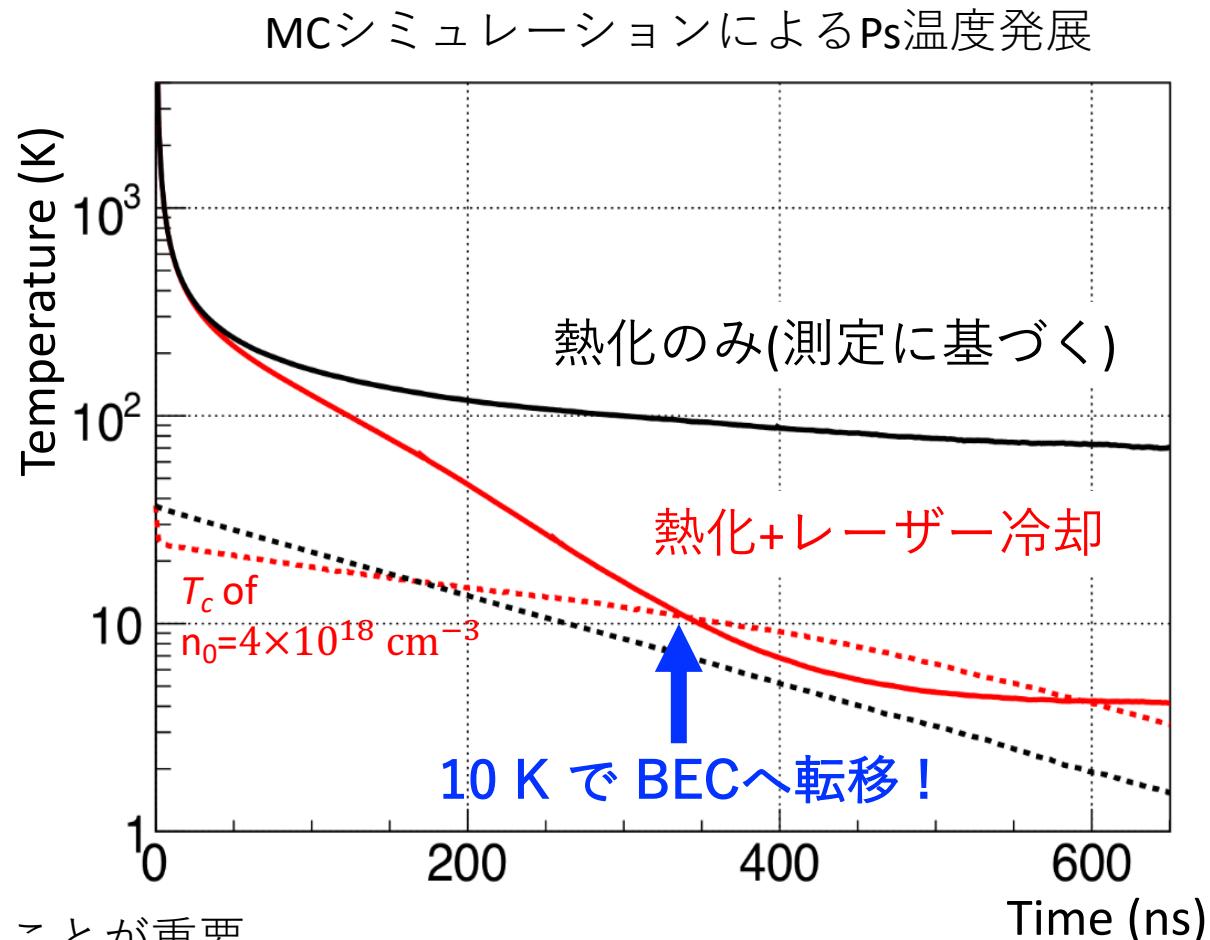
1. 热化

- 200 K 以上で高効率
- 冷たいシリカと衝突を繰り返し 100 K まで冷却可能

2. レーザー冷却

- 200 K 以下で高効率
- 10 Kまでの冷却が可能

2つの冷却手法を組み合わせることが重要



Ps-BEC実現のための開発要素

1. 陽電子集束システム
2. Ps生成、濃縮、冷却材料
3. Ps冷却レーザー

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

1. 多段階 輝度増強法

次の次のトーク
高密度Ps生成のための
陽電子集束について

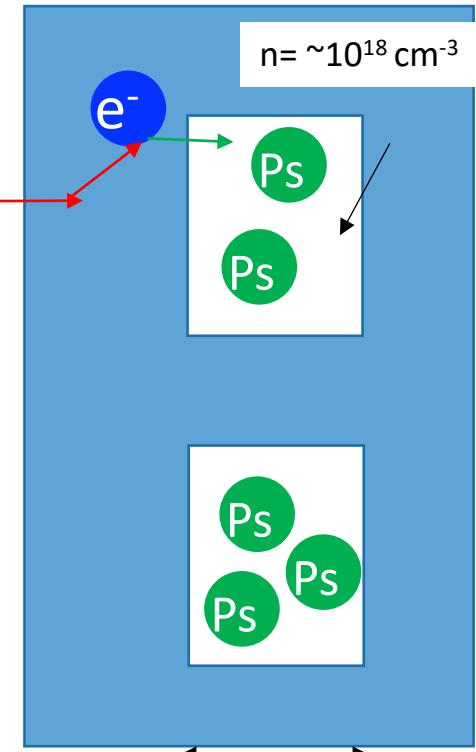
このトーク
Ps高速冷却方法と
そのためのレーザー冷却
光源の開発について

3. Ps 冷却レーザー 243nm UV

$\phi=6 \mu\text{m}$
まで集束

拡大図

冷凍機で4 Kまで冷却



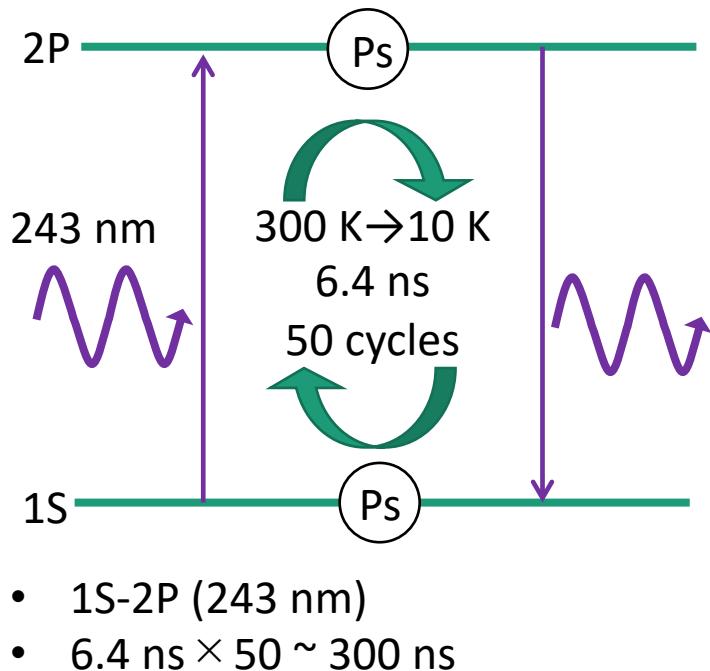
2. Ps 生成・濃縮・冷却材料

次のトーク
Ps生成材料(シリカ)中での
冷却遷移(1S-2P遷移)について

Psレーザー冷却(ドップラー冷却)の特徴

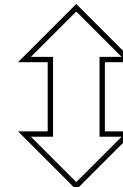
1. 高速冷却

∴ Ps寿命: 142ns



- **通常の原子のレーザー冷却**

連続発振レーザーや多数のナノ秒パルスレーザーで時間をかけて冷却できる



- **Psレーザー冷却**

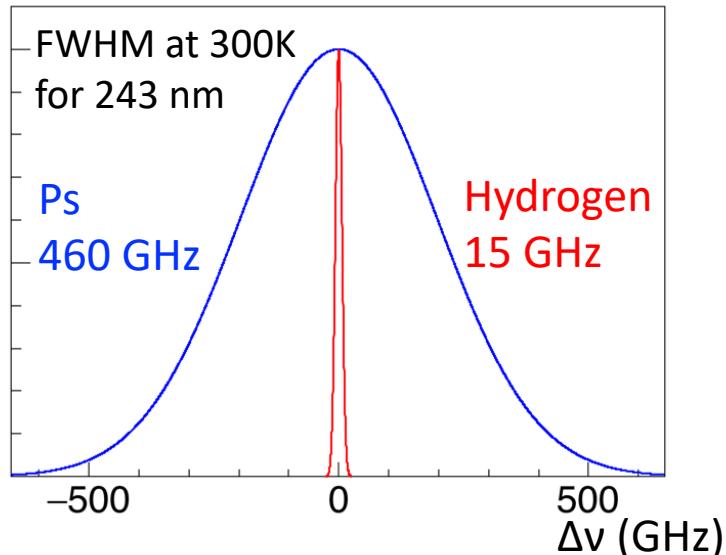
十分なエネルギーの**長パルス一発**で効率的に高速冷却する必要がある

→243 nm サブマイクロ秒(500 ns)長パルスレーザー

Psレーザー冷却(ドップラー冷却)の特徴

2. 広帯域レーザー

∴ Psの質量が $2m_e$ と軽い

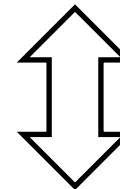


- ドップラー広がりは水素原子の30倍
→ 全てのPsを冷却するには広帯域レーザーが必要

→広帯域レーザー

- 通常の原子のレーザー冷却

ドップラー幅が狭い上、原子数に余裕があるため運動エネルギーの大きい原子を分離する冷却(蒸発冷却)も可能



- Psレーザー冷却

粒子数に制限があるので、できる限り全ての運動量のPsを逃さず冷却する必要がある

Ps冷却レーザーの3つの要求

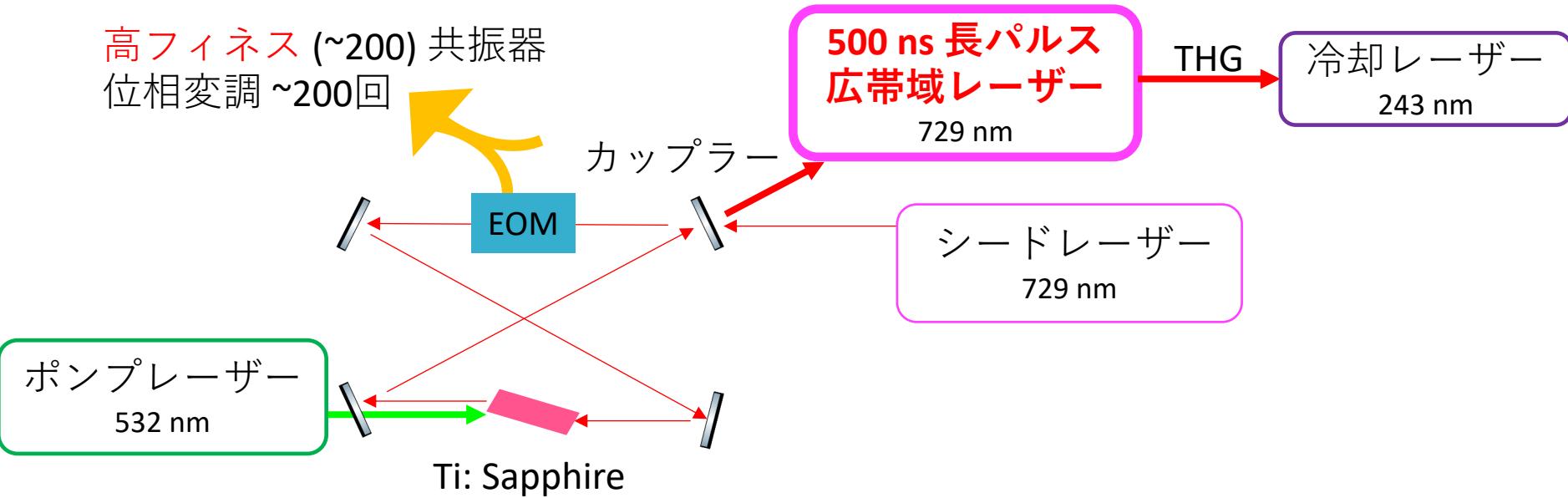
→243 nm 500 ns 長パルス広帯域レーザー

通常のレーザー光源(短パルス狭線幅)と相反する特徴(長パルス広帯域)をもつ

	時間幅	線幅	ピークパワー
自作	300 ns ○	150 GHz ○	125 W ○
製品1(CW) Toptica社	>> 300 ns ○	< 500 kHz ×	200 mW ×
製品2(pulsed) Amplitude社	5 ns ×	~ 150 GHz ○	75 kW ○

十分長い時間幅・広い線幅・大きなパワーの3つを備えるレーザー光源は商用では存在しない

500 ns 長パルス広帯域レーザーの生成



500 ns 長パルス

→長い光子寿命の共振器を用いる

1. 長い共振器長 (3.8 m)
2. 高いフィネス~200

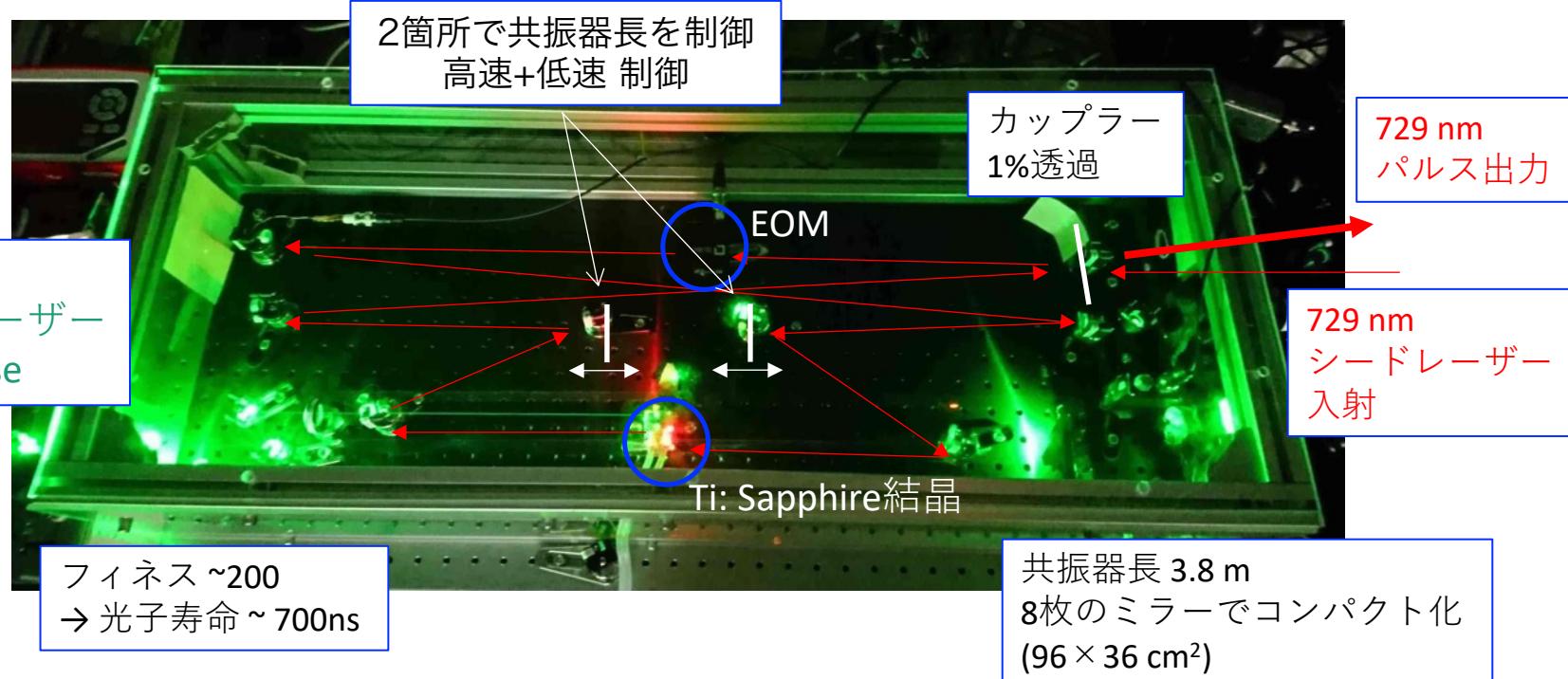
広帯域化

1. EOM: サイドバンド生成
2. 高フィネス (~200) 共振器

EOMが位相変調を~200回行い、サイドバンドを高次まで生成
→実効的な広帯域化

ロング & 高フィネス 共振器

冷却レーザー系心臓部



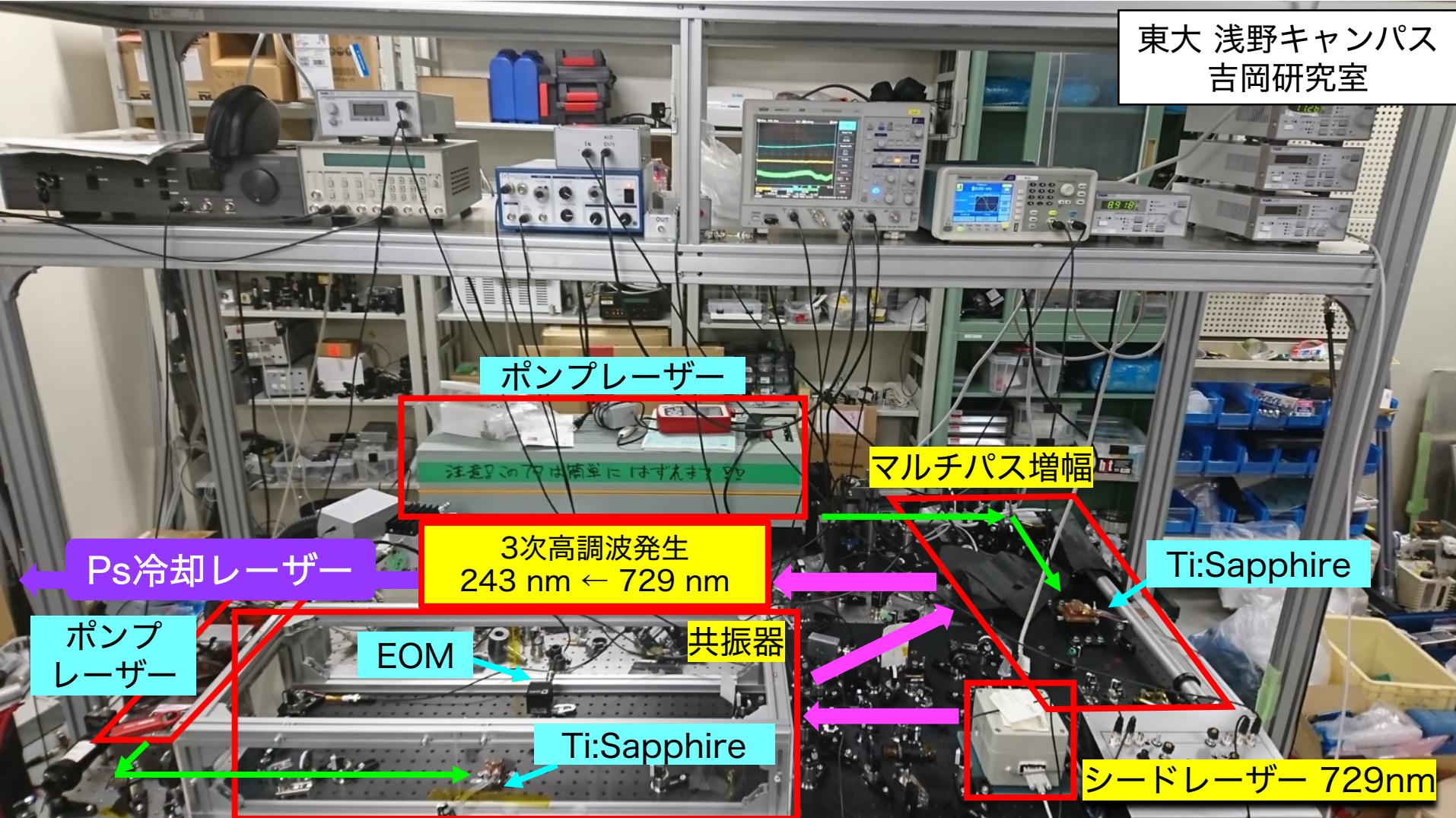
冷却レーザー系をKEKの実験室に合うよう コンパクトに組んでいる (2.0 m×1.1 m)

東大 浅野キャンパス
吉岡研究室



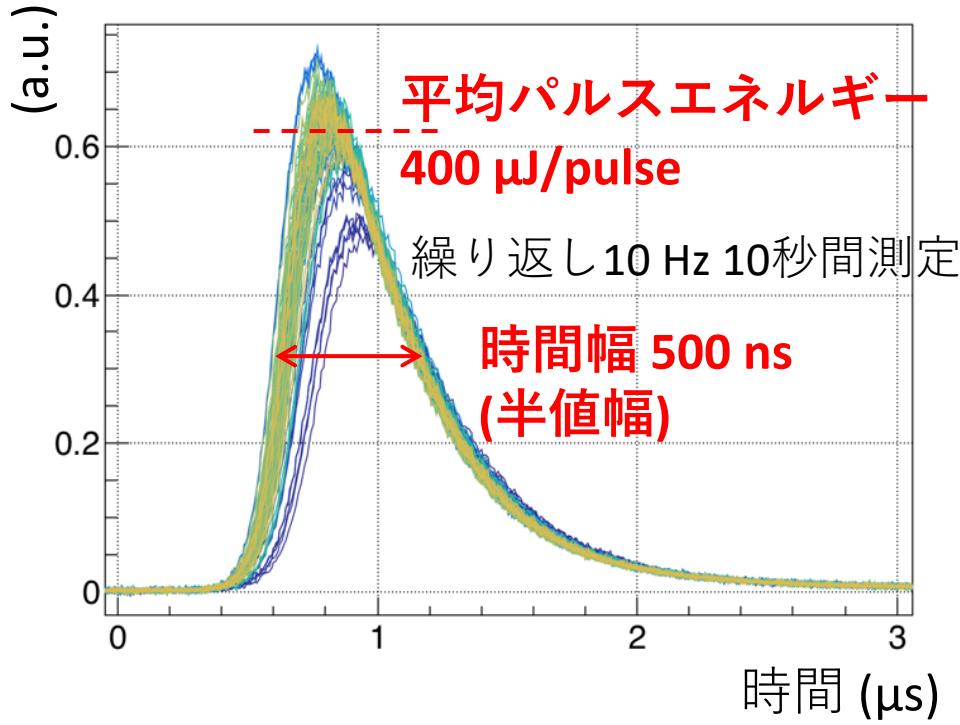
冷却レーザー系をKEKの実験室に合うよう コンパクトに組んでいる (2.0 m×1.1 m)

東大 浅野キャンパス
吉岡研究室

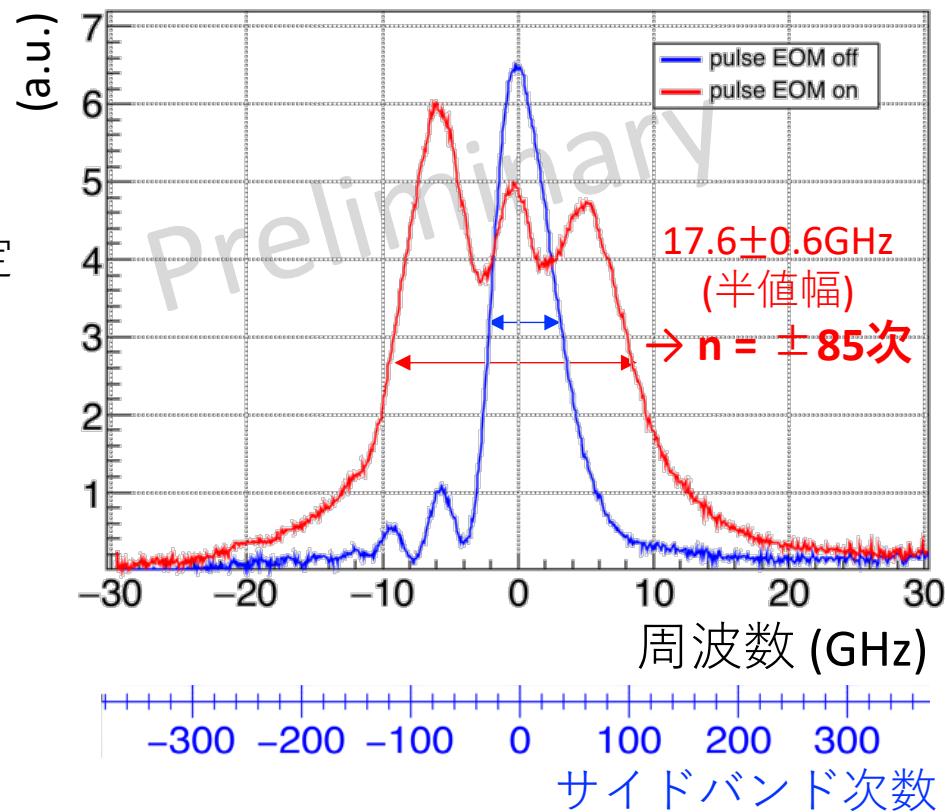


長パルス発振とその広帯域化に成功

729 nm パルスの時間波形



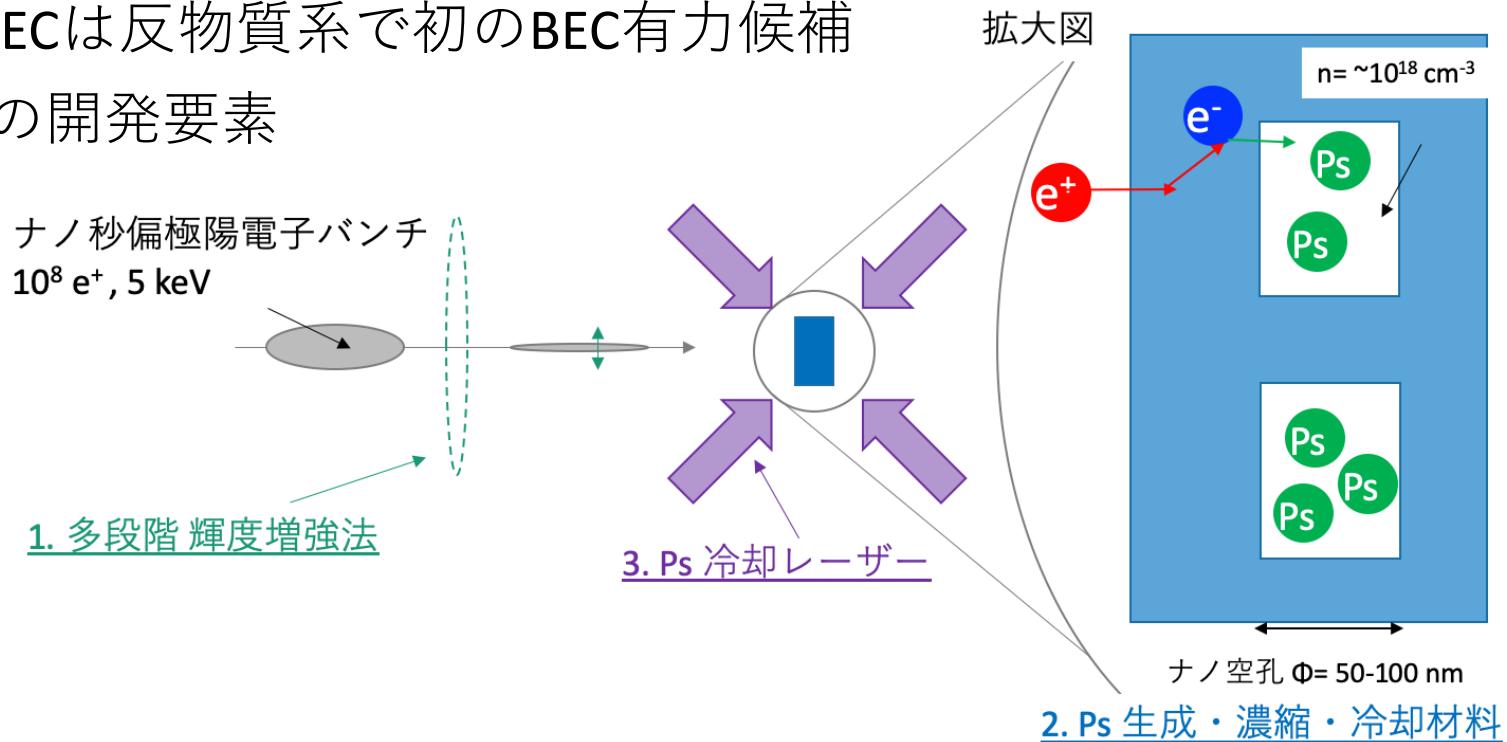
729 nm パルスのスペクトル



- ✓ パルスレーザーでの初めての高次サイドバンド生成。
- ✓ 冷却レーザー光源の最重要部の開発に成功。

まとめ

- Ps-BECは反物質系で初のBEC有力候補
- 3つの開発要素



- Psレーザー冷却に最適化した光源を開発中。729 nm広帯域500 ns長パルス発振に成功。KEK-SPFへ移設予定。
- レーザー帯域改善を行い、世界初のPsレーザー冷却をKEK-SPFで実現することを目指している。