

# 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<sup>A</sup>、浅井 祥仁、  
五神 真、田島 陽平<sup>B</sup>、蔡 恩美<sup>B</sup>、吉岡 孝高<sup>B</sup>、大島 永康<sup>C</sup>、  
オローク ブライアン<sup>C</sup>、満汐 孝治<sup>C</sup>、伊藤 賢志<sup>C</sup>、熊谷 和博<sup>C</sup>、  
鈴木 良一<sup>C</sup>、藤野 茂<sup>D</sup>、兵頭 俊夫<sup>E</sup>、望月 出海<sup>E</sup>、和田 健<sup>F</sup>

東大理、<sup>A</sup>東大素セ、<sup>B</sup>東大工、<sup>C</sup>産総研、<sup>D</sup>九大GIC、<sup>E</sup>高工ネ研、<sup>F</sup>量研



東京大学 大学院  
理学系研究科・理学部  
SCHOOL OF SCIENCE, THE UNIVERSITY OF TOKYO



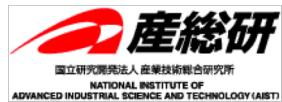
東京大学  
素粒子物理国際研究センター  
International Center for Elementary Particle Physics  
The University of Tokyo



**APSA**  
Advanced Photon Science Alliance



UT-PSC  
Photon Science Center of the University of Tokyo



国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
NATIONAL INSTITUTE OF  
ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)



京大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」  
2018.12.06

# ポジトロニウムの ボース・アインシュタイン凝縮(Ps-BEC)

## ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)

- 高密度低温のほとんど全ての粒子が单一量子状態を占める。
- 原子レーザー、コヒーレンスがある

## Ps-BEC

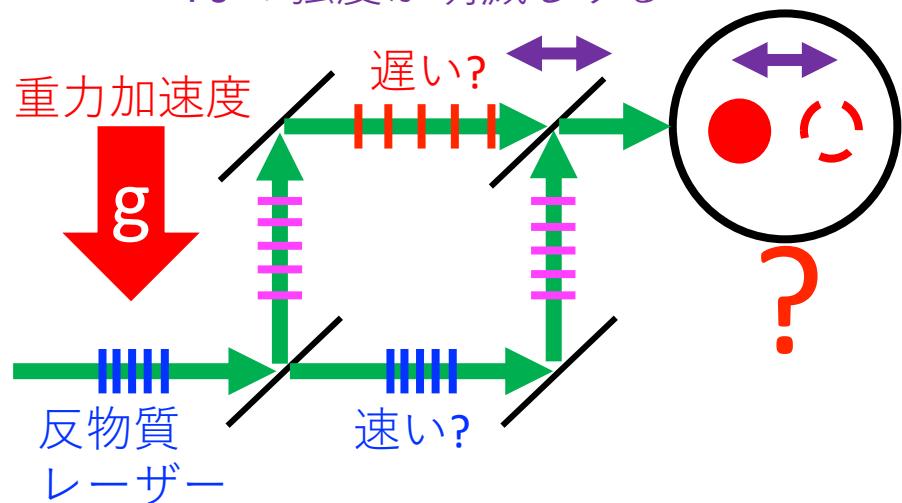
- Psは他の反物質系と比べて生成が容易
- 質量が小さくBEC臨界温度が高い( $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ で14 K)
- 反物質系で初のBECの有力候補
- Ps-BECは反物質レーザー

$$T_c = \frac{\hbar^2}{2\pi m k_B} \left( \frac{n}{\zeta(3/2)} \right)^{\frac{2}{3}}$$

# 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

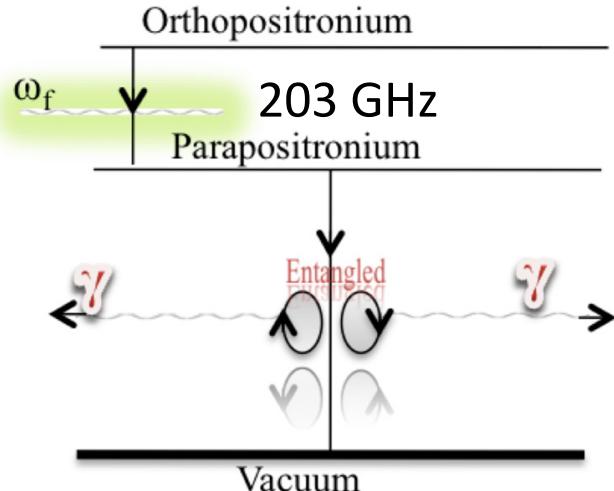
パスの長さを変化させると  
Ps の強度が明滅しうる



- 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。
- 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



Phys. Rev. A 92, 023820 (2015)

- $p\text{-Ps}$ が2本の511 keV  $\gamma$ 線に崩壊を利用する
- Ps-BEC(原子レーザー) $\rightarrow \gamma$ 線レーザー
- 従来のX線の1/10の波長による微細構造プローブ

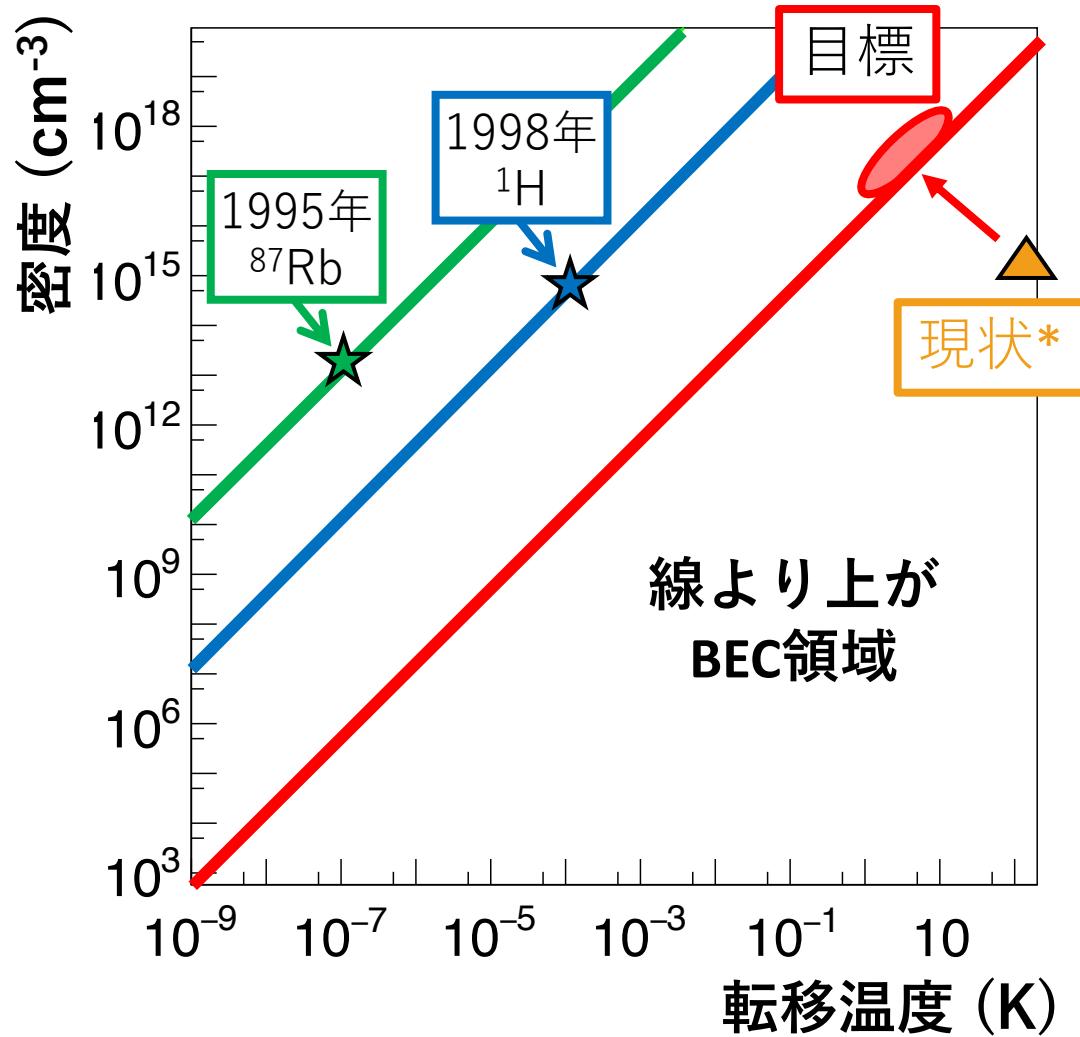
# 2つの課題: Psの高密度化と高速冷却

## 最大の問題

Psは寿命が142 nsと短い

## 2つの課題

1. 瞬間的(~10 ns)な高密度Psの生成
2. Psの高速冷却  
~100 nsで10 K到達



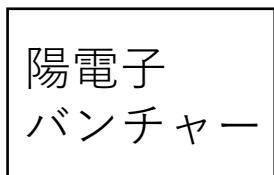
\* : S. Mariazzi *et al.* Phys. Rev. Lett. 104, 243401 (2010)

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

# Ps-BEC実現への開発要素

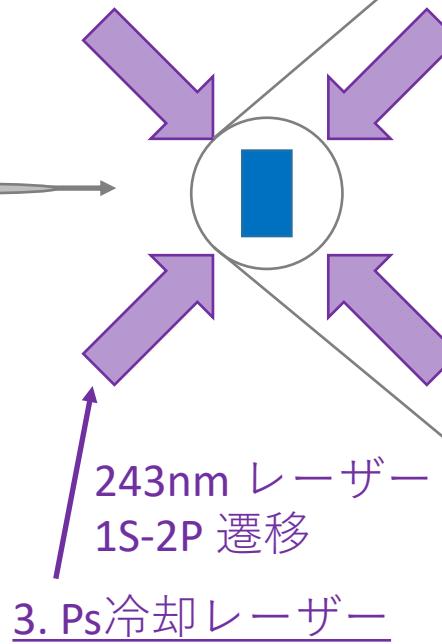
- 1.陽電子収束システム
- 2.Ps生成、濃縮、冷却材料
- 3.Ps冷却レーザー

10<sup>8</sup>個、ナノ秒  
バンチ陽電子数keVのエネルギー



$\phi=6 \mu\text{m}$ まで収束

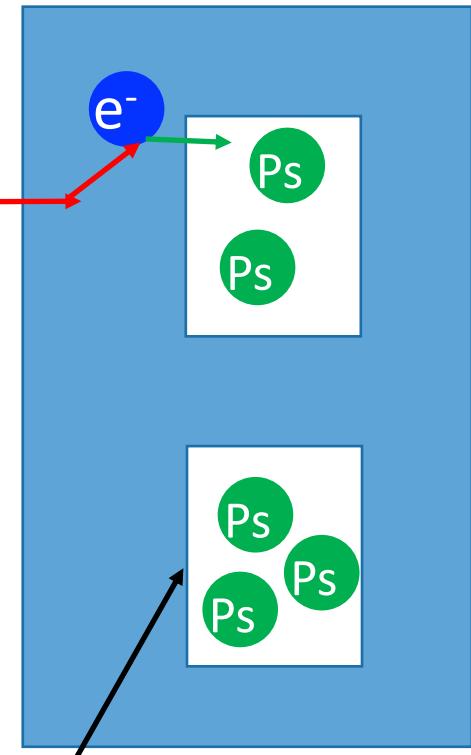
1. 陽電子収束システム



熱化とレーザー冷却を組み合わせて  
300 nsで10 Kまでの高速冷却を実現する

拡大図

Ps生成シリカ



ナノ空孔

$\Phi = 50-100 \text{ nm}$

$n = \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  まで濃縮

2.Ps生成、濃縮、冷却材料

# Ps-BECを実現する新たな冷却手法 熱化とレーザー冷却の2段階

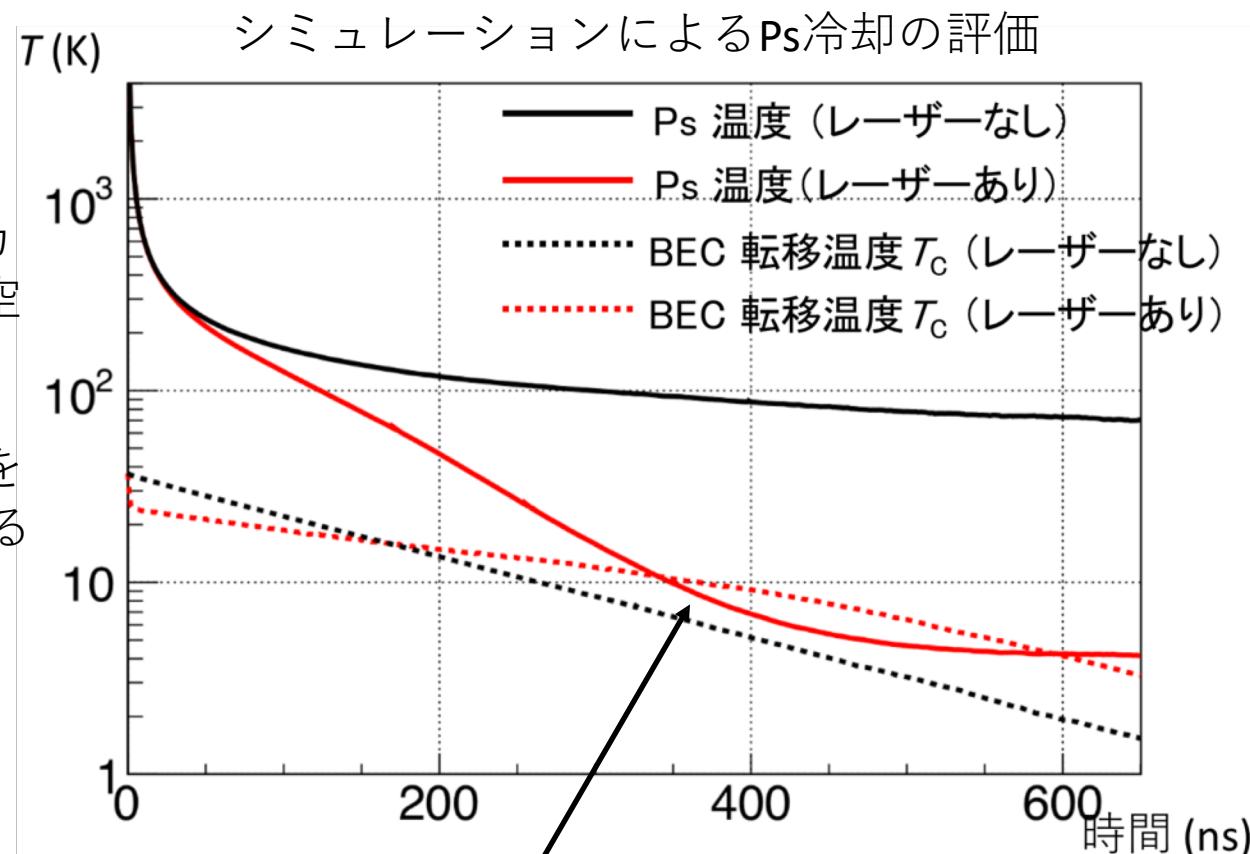
## 1. 熱化

Ps生成材料(シリカ)の電子を奪って生成されたPsはシリカの仕事関数 $0.8 \text{ eV} = 6000 \text{ K}$ で空孔に飛び出す

冷たいシリカ( $< 10 \text{ K}$ )と衝突を繰り返し $100 \text{ K}$ まで冷却される

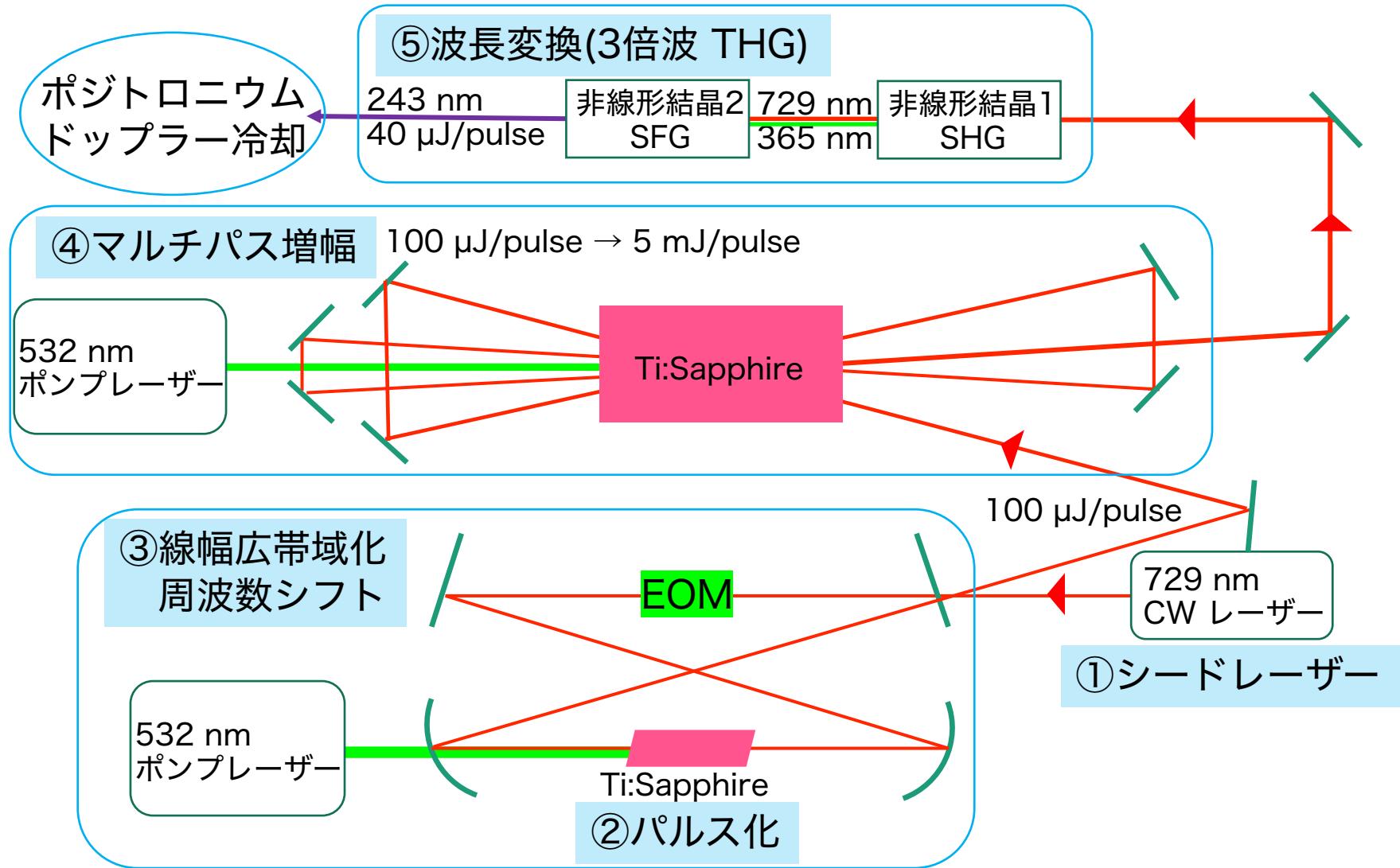
## 2. レーザー冷却

243 nm レーザーを照射して  
Psを $10 \text{ K}$ まで冷却  
Psの $1S-2P$ 遷移を用いる



熱化とレーザー冷却を組み合わせることで  
Ps-BEC転移温度を下回る

# 要求スペックを満たすレーザー光学系を 最先端技術を組み合わせ設計



# 要求スペックを満たすレーザー光学系を 最先端技術を組み合わせ設計

ポジトロニウム  
ドップラー冷却

⑤波長変換(3倍波 THG)

243 nm  
40  $\mu\text{J}/\text{pulse}$

非線形結晶2  
SFG

729 nm  
365 nm

非線形結晶1  
SHG

④マルチパス増幅  $100 \mu\text{J}/\text{pulse} \rightarrow 5 \text{ mJ}/\text{pulse}$

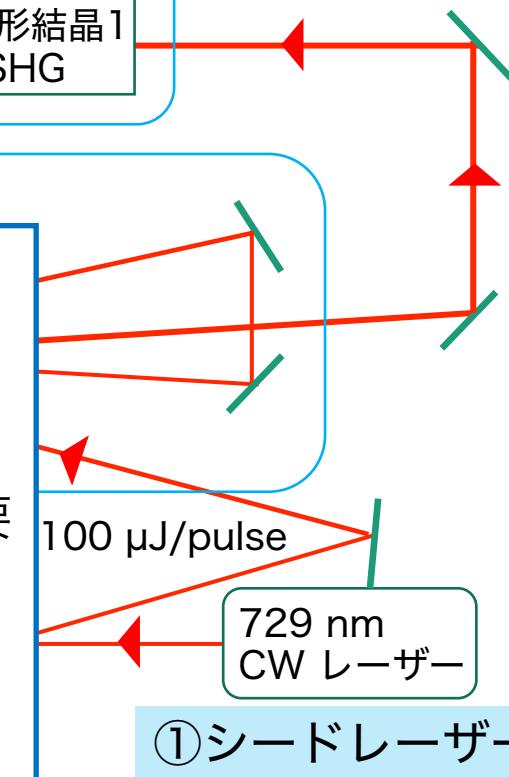
## Psレーザー冷却の課題

1. Psは軽いためドップラー効果を大きく受ける
2. 寿命が短い(142 ns)ため高速冷却が必要

300 nsで10 Kまでの高速冷却には以下の5つの特性が必要  
商用では実現不可のため自作

## Ps冷却用レーザーの要求スペック ①波長: 243 nm

Psの1S-2P遷移(243 nm)を用いてドップラー冷却を行う  
729 nm  $\rightarrow$  243 nm に波長変換  
非線形素子により3倍波



# 要求 最先端

ポジトロニ  
ドップラー

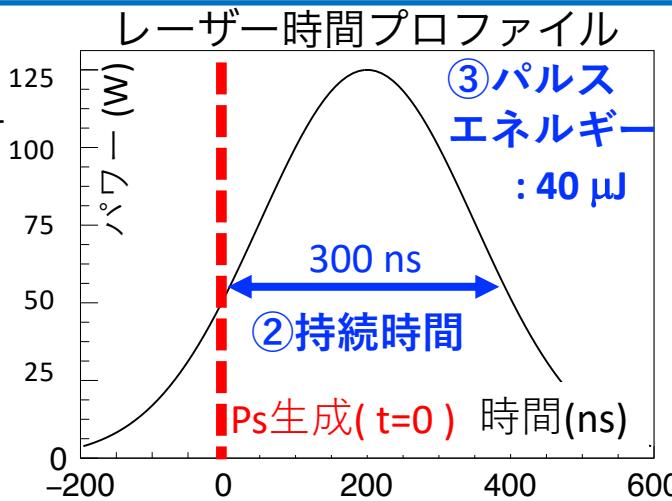
## Ps冷却用レーザーの要求スペック

②持続時間: 300 ns

→ Psの寿命: O(100 ns)にわたり冷却

③パルスエネルギー: 40 μJ

→ ピークパワー 125 W (CWでは困難)



④マルチパス増幅

100 μJ/pulse → 5 mJ/pulse



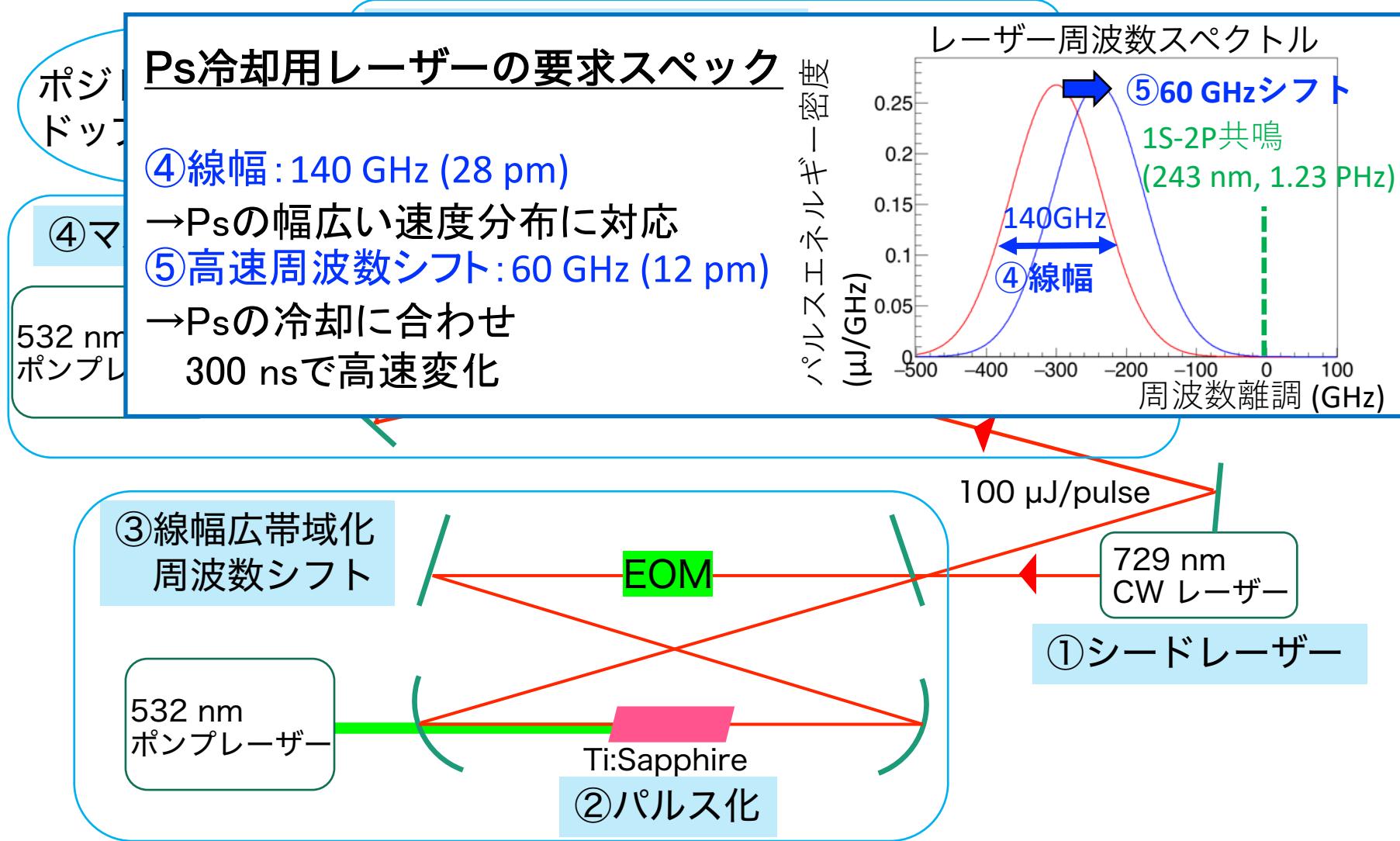
532 nm  
ポンプレーザー

②パルス化

729 nm  
CW レーザー

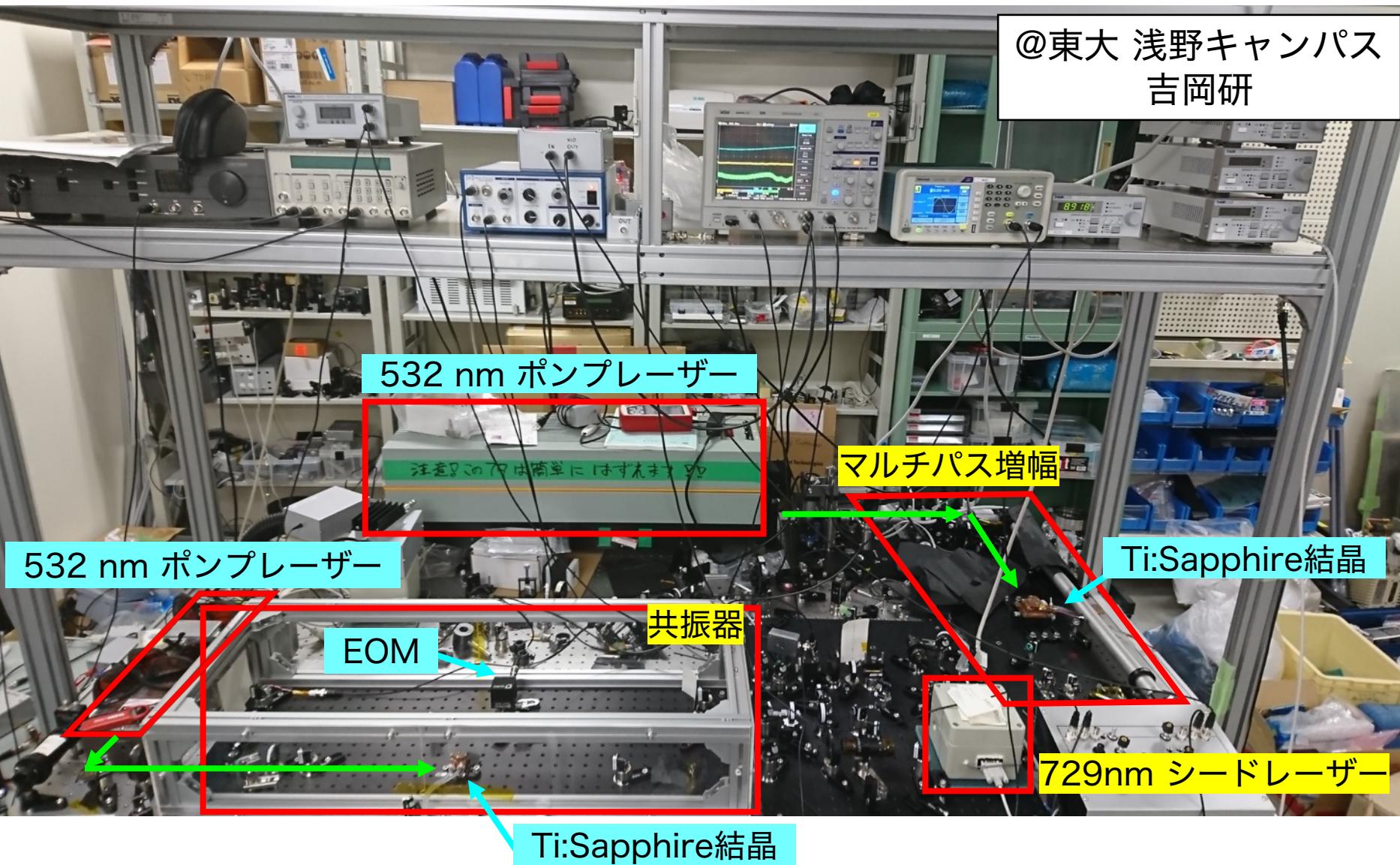
①シードレーザー

# 要求スペックを満たすレーザー光学系を 最先端技術を組み合わせ設計

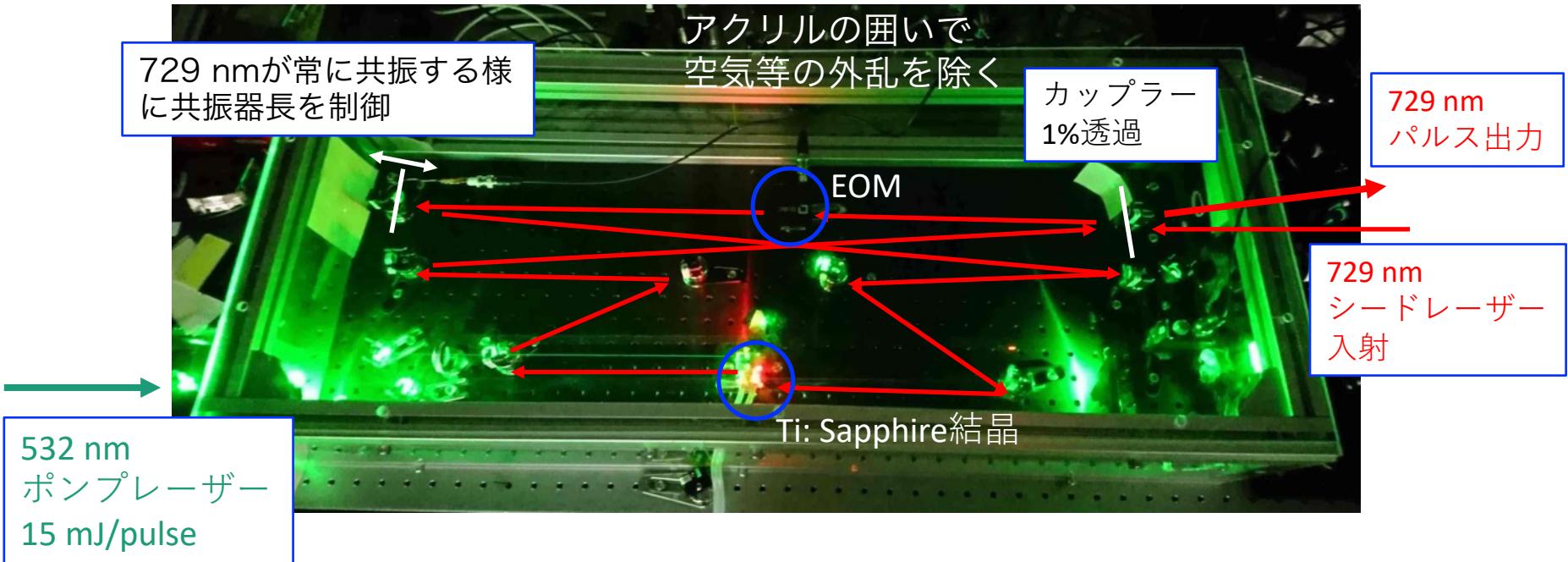


# 冷却レーザー系をKEKの実験室に合うよう コンパクトに組んでいる (2.0 m × 1.1 m)

@東大 浅野キャンパス  
吉岡研

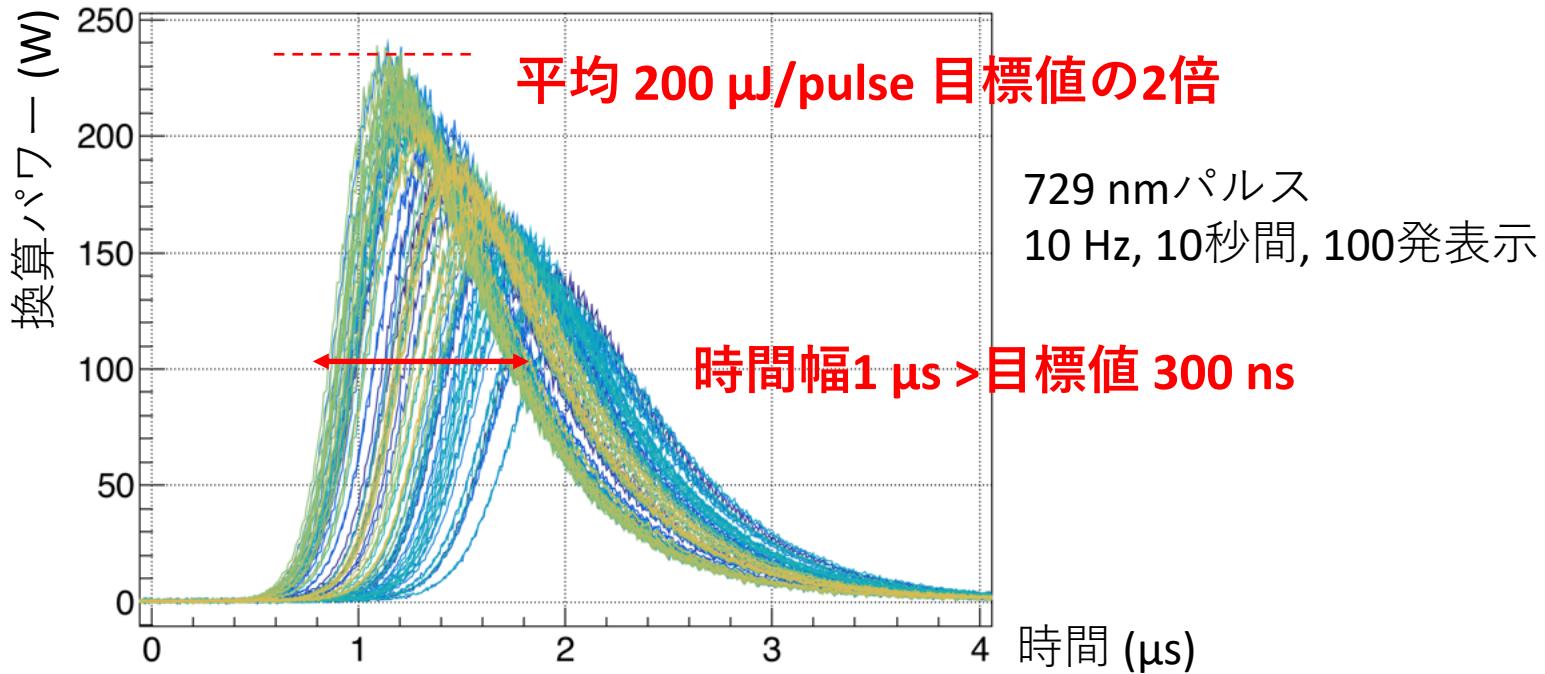


# パルス化・線幅広帯域化のための共振器を作成中



- 共振器長3.8 mを8個のミラーでコンパクトに折り畳んでいる  
(全体で96 cm × 36 cm)
- 長時間幅のパルス発振のため729 nmで高反射のミラーを使用  
一周あたりのロス=0.6%、フィネス=200

# パルスエネルギー $200 \mu\text{J}/\text{pulse}$ かつ時間幅 $1 \mu\text{s}$ の長パルスの出力に成功



	目標値	達成値
時間幅	$> 300 \text{ ns}$	$1 \mu\text{s}$
パルスエネルギー	$> 100 \mu\text{J}/\text{pulse}$	$200 \mu\text{J}/\text{pulse}$
パルスエネルギー安定性	$< 5\%$	50 %
タイミングジッター	$< 20 \text{ ns}$	$1 \mu\text{s}$

- 不安定性とジッターの原因  
ポンプレーザーのふらつき
- 対策: ポンプレーザー安定化  
またはTi: Sapphire結晶の十分な飽和

# Ps冷却レーザー開発状況

		要求値	達成状況	今後
シードレーザー 完成		強度 数mW パルスエネルギー <1 GHz 周波数ドリフト < 1 GHz	達成 25 mW 達成 <50 kHz 達成 0.8 GHz	-
共振器	パルス化	時間幅 >300 ns パルスエネルギー 100 μJ	達成 1 μs 達成 平均200 μJ	安定化のみ
	広線幅化	線幅 50 GHz	実験中	線幅の測定、評価
マルチパス増幅		パルスエネルギー 5 mJ	-	実験を進める
波長変換		パルスエネルギー 40 μJ	-	実験を進める
高速周波数シフト		300 nsで60 GHz	-	冷却実験の結果を踏まえ、最適化

# まとめ

- Ps-BECは反物質系で世界初のBECの最有力候補
- Ps-BECは重力などの基礎物理学への応用や、ガンマ線レーザーといった応用がある
- Ps冷却レーザーは特殊な性能を要求するため、新しいレーザーシステムを作成中。729 nmのパルスエネルギー200  $\mu\text{J}$ かつ時間幅1  $\mu\text{s}$ のパルス発振に成功。今年度中の完成を目指す
- 世界初のPsレーザー冷却をKEK-SPFで来年度中に実現することを目指している。結果を踏まえPs冷却レーザーの最適化を行う