

# ポジトロニウムのレーザー冷却実験

**周 健治**, 田島 陽平, 小林 拓豊, 魚住 亮介, 蔡 恩美\*, 吉岡 孝高,  
石田 明<sup>A</sup>, 橋立 佳央理<sup>A</sup>, 難波 俊雄<sup>B</sup>, 浅井 祥仁<sup>A</sup>, 五神 真<sup>A</sup>,  
山田 恭平<sup>A</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>, 鈴木 良一<sup>C</sup>, 兵頭 俊夫<sup>D</sup>, 望月 出海<sup>D</sup>, 和田 健<sup>D</sup>

東大工, 東大理<sup>A</sup>, 東大素粒子センター<sup>B</sup>, 産総研<sup>C</sup>,  
KEK<sup>D</sup>, (現所属) 高麗大学理科大学物理学科\*

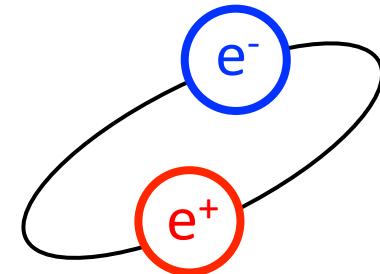


日本物理学会第76回年次大会 (2021年)  
オンライン開催

# 反粒子を含むシンプルな エキゾチック原子—ポジトロニウム—

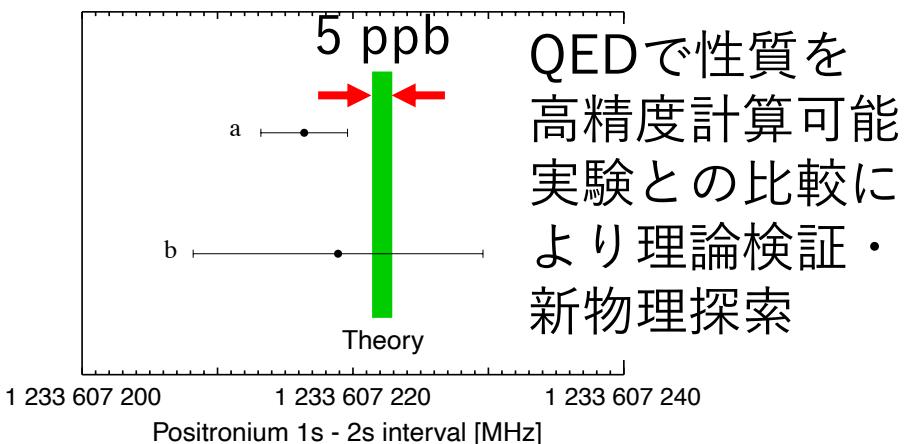
## ポジトロニウム

- 電子とその反粒子である陽電子からなる  
エキゾチック水素様原子

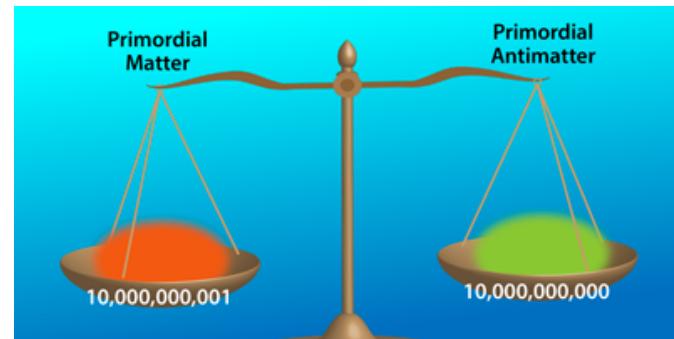


## 基礎物理学研究に有用な2つの特徴

### 1. シンプルな純レプトン原子



### 2. いまだ謎に包まれた反粒子を含む



- S. G. Karshenboim, Phys. Rep. 422, 1 (2005).  
[a] M.S. Fee *et al.*, Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 1397.  
[b] K. Danzmann *et al.*, Phys. Rev. A 39 (1989) 6072.

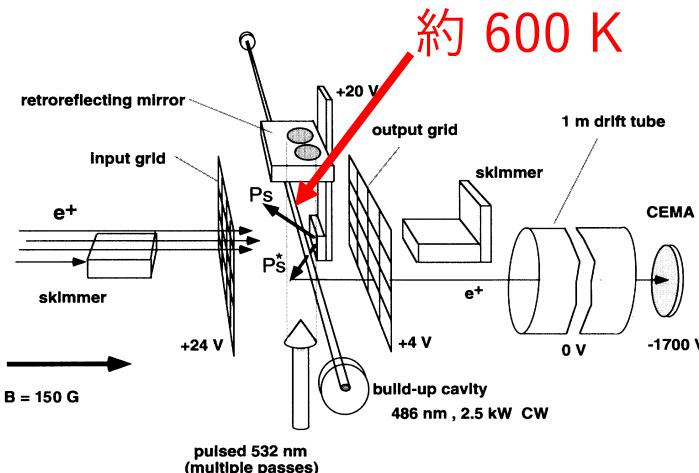
粒子・反粒子間の非対称性を探索し、  
宇宙から反物質が消えた謎を解く

# 冷却が次世代のPs研究の鍵

## Psを用いた分光測定において

速度が大きいことが不確かさの大きな要因

- Psは質量が電子2個分と最軽量の原子
- 単位運動量あたりの速度が大きい



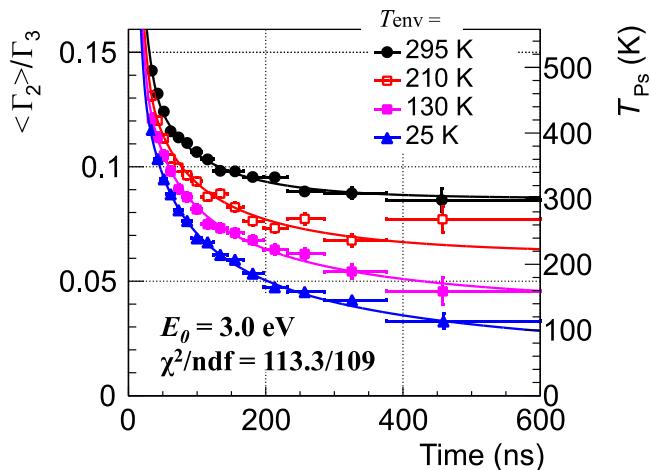
1S-2S遷移周波数の測定実験セットアップ図

M.S. Fee *et al.*, Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 1397.

## 冷やすことも難しい

- 142 ns の時定数（スピン3重項）で対消滅によりガンマ線へ崩壊
- 100 K 程度までの冷却しか得られていない
- 反粒子を含む初の BEC 実現を目指す上でも冷却が不十分

レーザー冷却を初めてPsに適用する



多孔質シリカ中で測定した  
Ps温度の時間発展

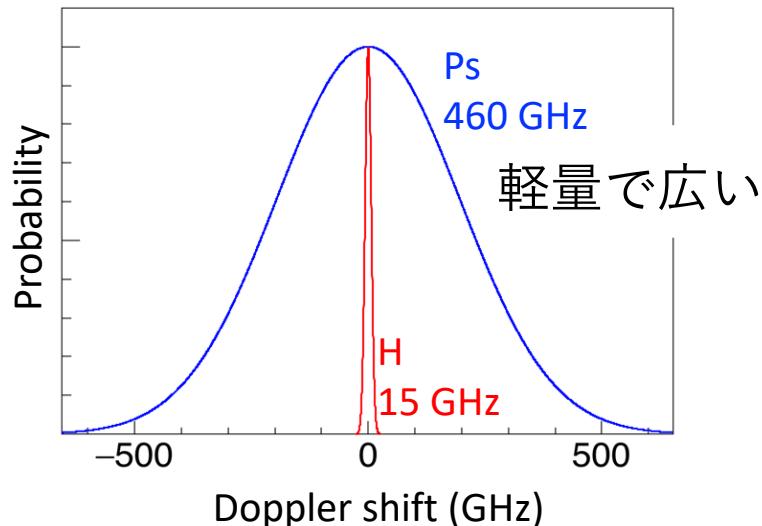
K. Shu *et al.*, In preparation. 3

# ポジトロニウムの ドップラー冷却には特殊な光源が必要

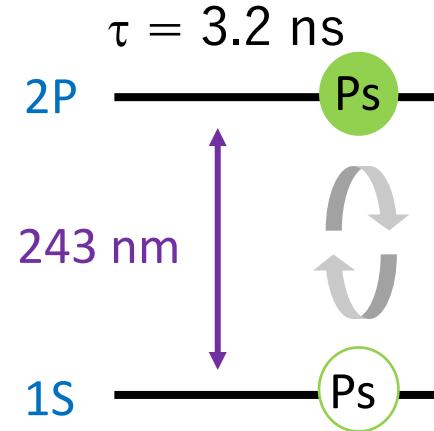
Psの軽量・短寿命という性質から今までにないレーザー光源が必要

## 2つの要求

1. 周波数シフトを有する広帯域



2. 長い持続時間



## Lyman- $\alpha$ 遷移

### 300 K でのドップラーシフト分布

- 光も広帯域にして多くのPsを冷却
- 冷却に追随するためにアップチャープ

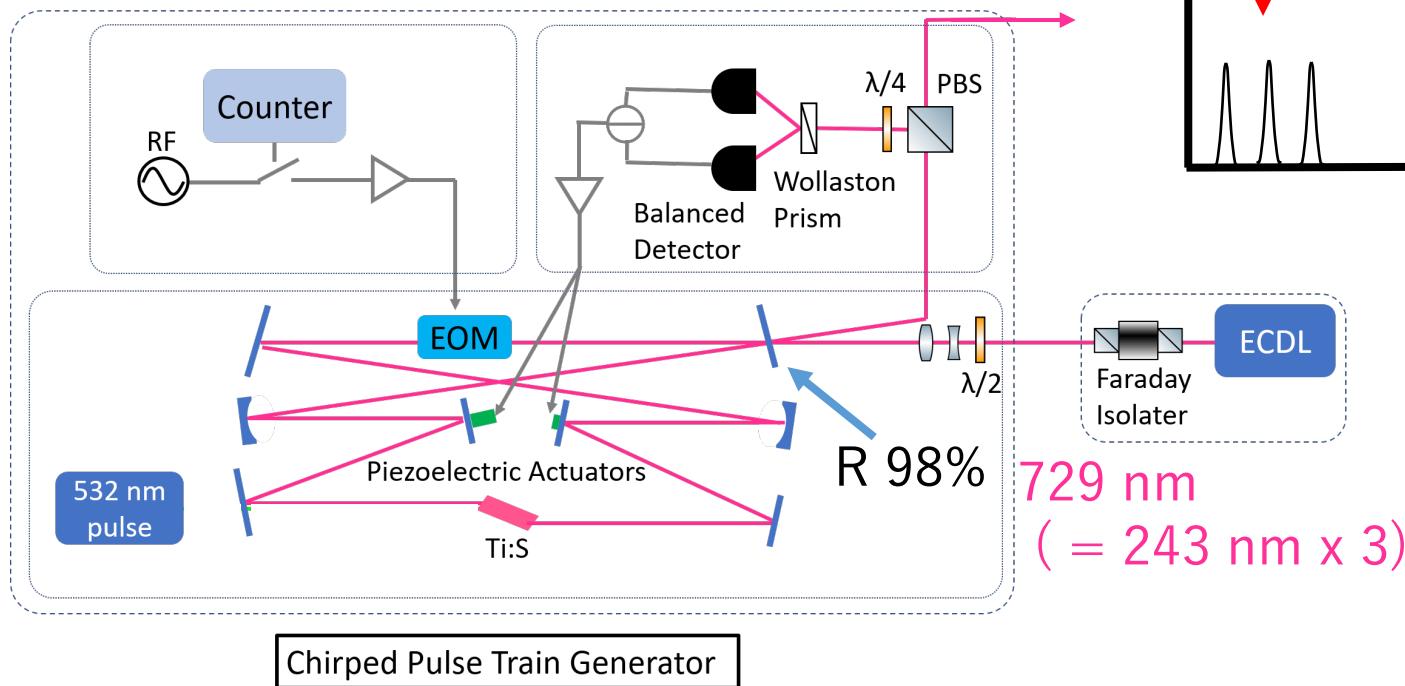
- 遷移が飽和すると  $6.4 \text{ ns}$  ごとに  $1.5 \text{ km s}^{-1}$  の反跳を受けて減速
- 300 K から冷やすには  $300 \text{ ns}$

# 要求を満たす 新しいレーザーを開発

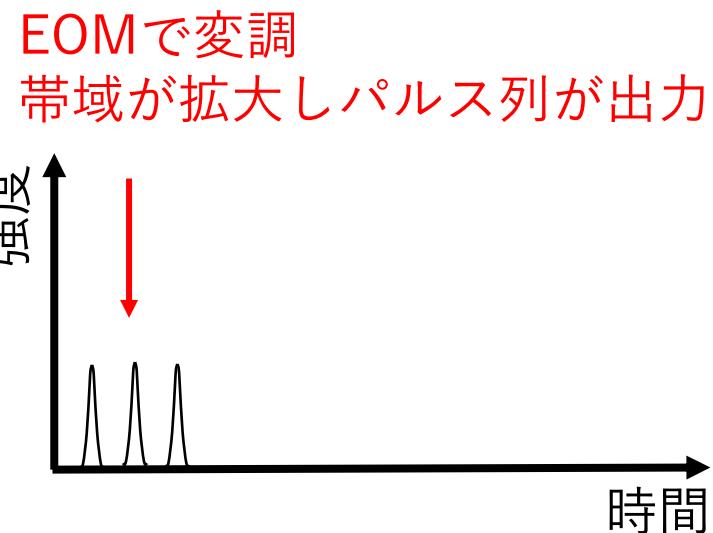
電気光学変調器と組み合わせたパルス励起  
注入同期Ti:Sapphireレーザーを提案・開発

K. Shu *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **49**, 104001 (2016).

K. Yamada, Y. Tajima, *et al.*, Submitted to *Phy. Rev. A*.



電気光学変調器と組み合わせた  
パルス励起注入同期Ti:Sapphireレーザーの模式図

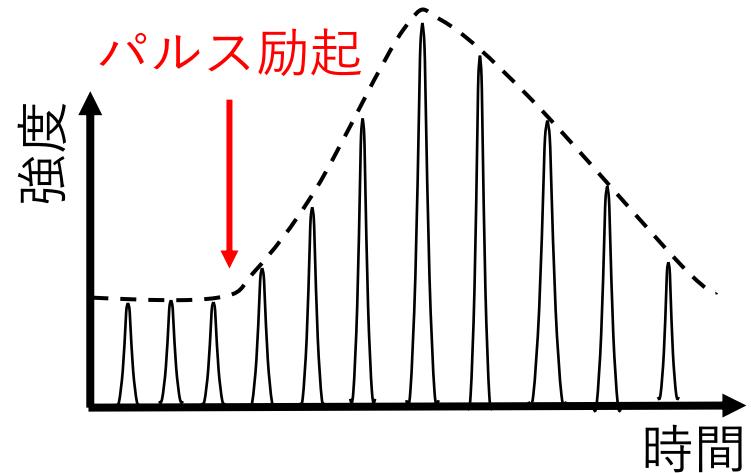
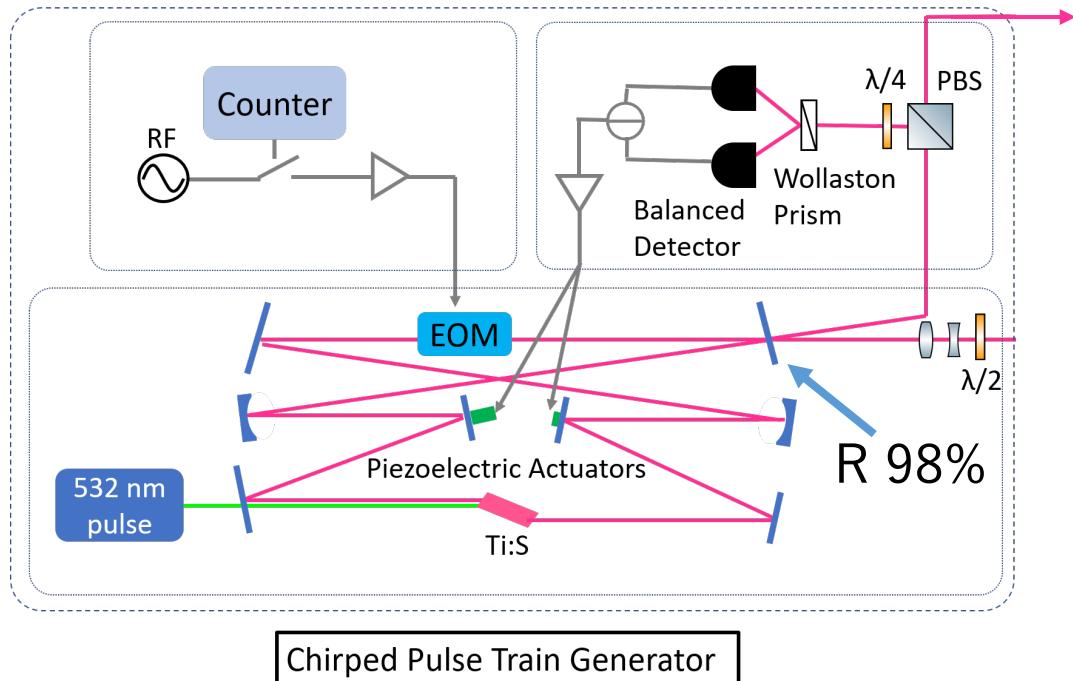


# 要求を満たす 新しいレーザーを開発

電気光学変調器と組み合わせたパルス励起  
注入同期Ti:Sapphireレーザーを提案・開発

K. Shu *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **49**, 104001 (2016).

K. Yamada, Y. Tajima, *et al.*, Submitted to *Phy. Rev. A*



- パルスを増幅しながら周回
- 周回の度に変調をうけるため、周波数がシフトする

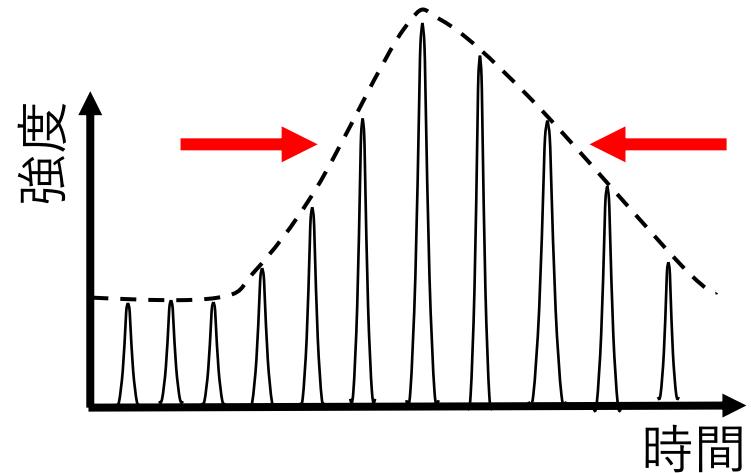
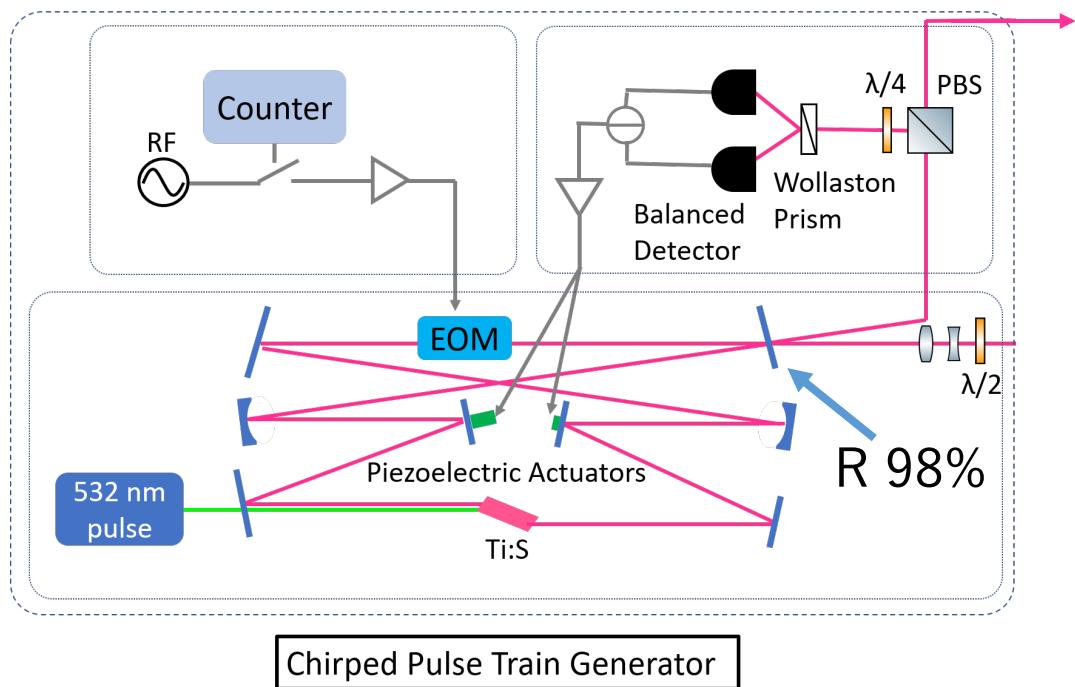
電気光学変調器と組み合わせた  
パルス励起注入同期Ti:Sapphireレーザーの模式図

# 要求を満たす 新しいレーザーを開発

電気光学変調器と組み合わせたパルス励起  
注入同期Ti:Sapphireレーザーを提案・開発

K. Shu *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **49**, 104001 (2016).

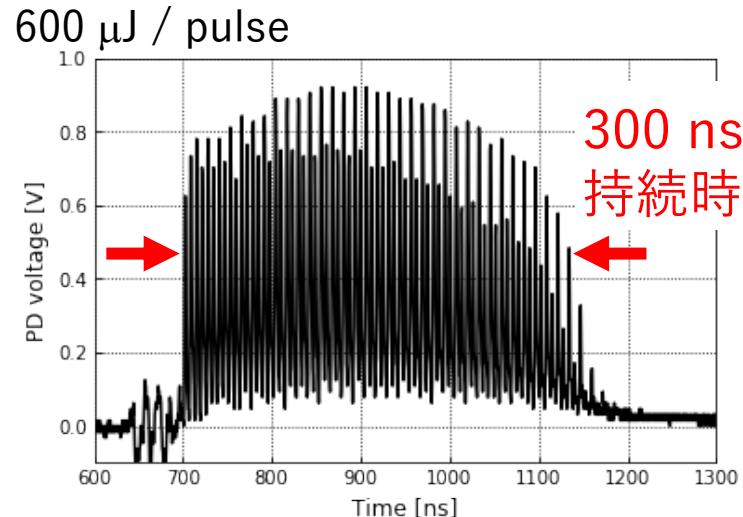
K. Yamada, Y. Tajima, *et al.*, Submitted to *Phy. Rev. A*



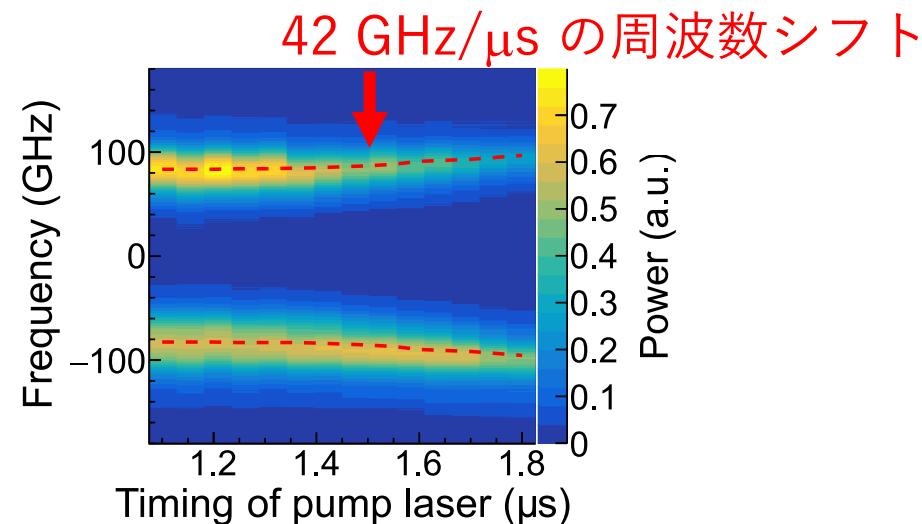
- パルス光源としては  
高いQ値のレーザー共振器  
とすることで長い持続時間  
を実現
- レーザー出力を増幅・  
非線形光学効果による波長  
変換で 243 nm の光を得る

電気光学変調器と組み合わせた  
パルス励起注入同期Ti:Sapphireレーザーの模式図

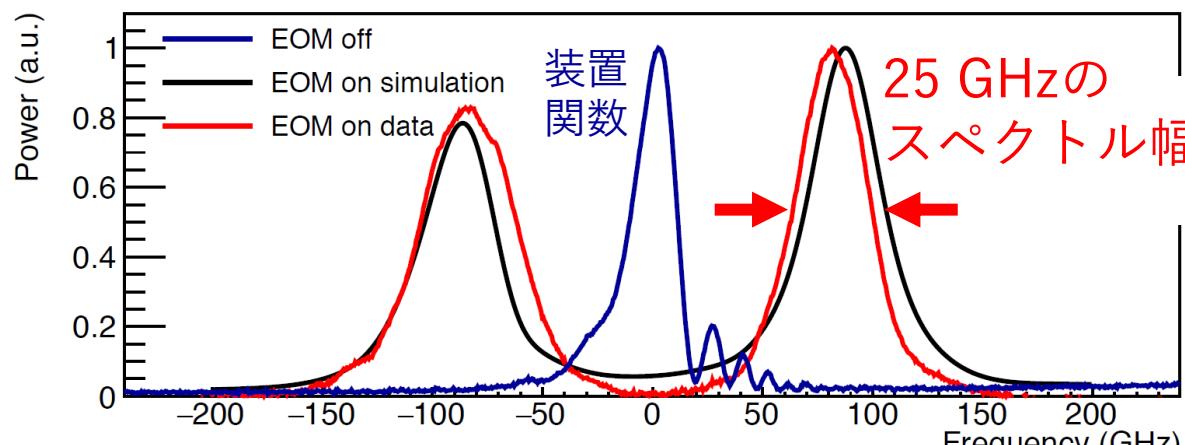
# プロトタイプ機を製作し ドップラー冷却に必要な特性を確認



レーザー出力強度の時間変化



レーザー出力の時間分解スペクトル

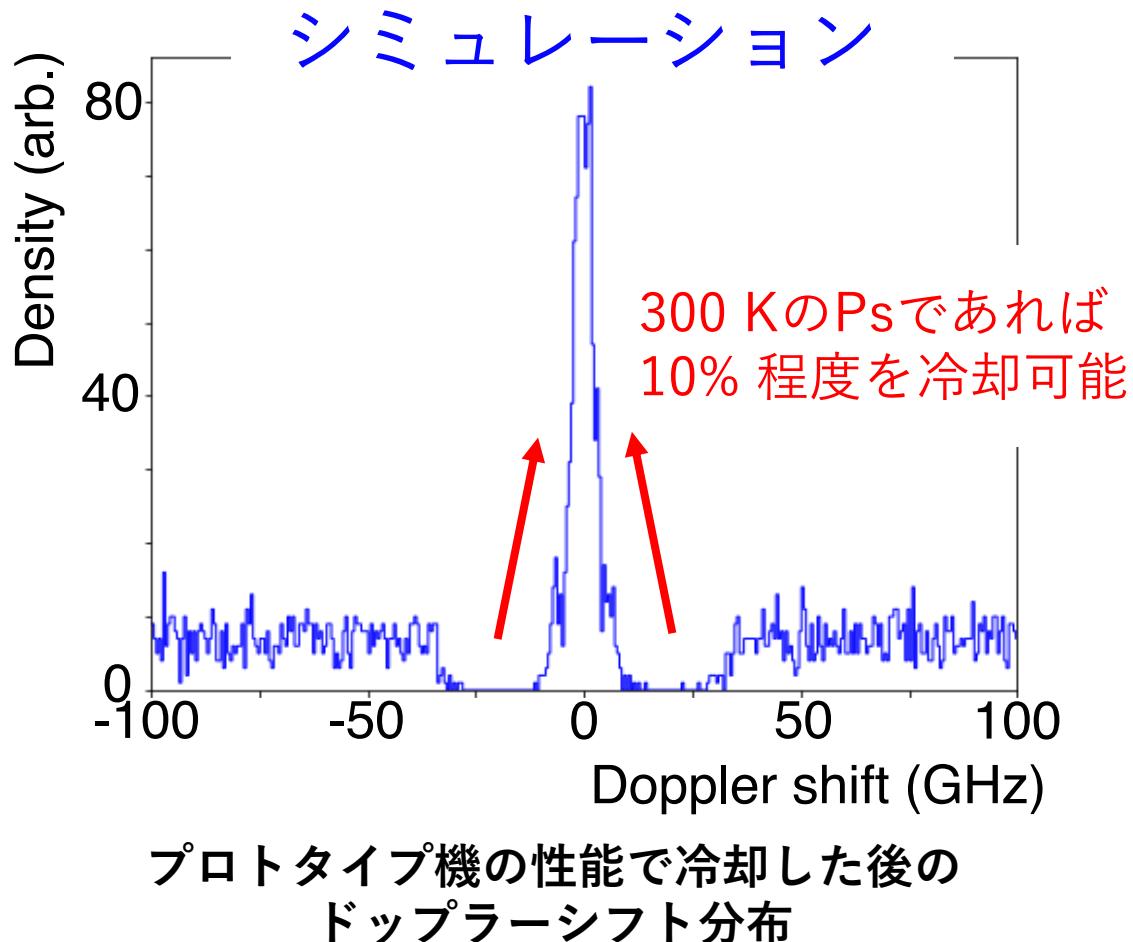


レーザー出力の時間積算スペクトル

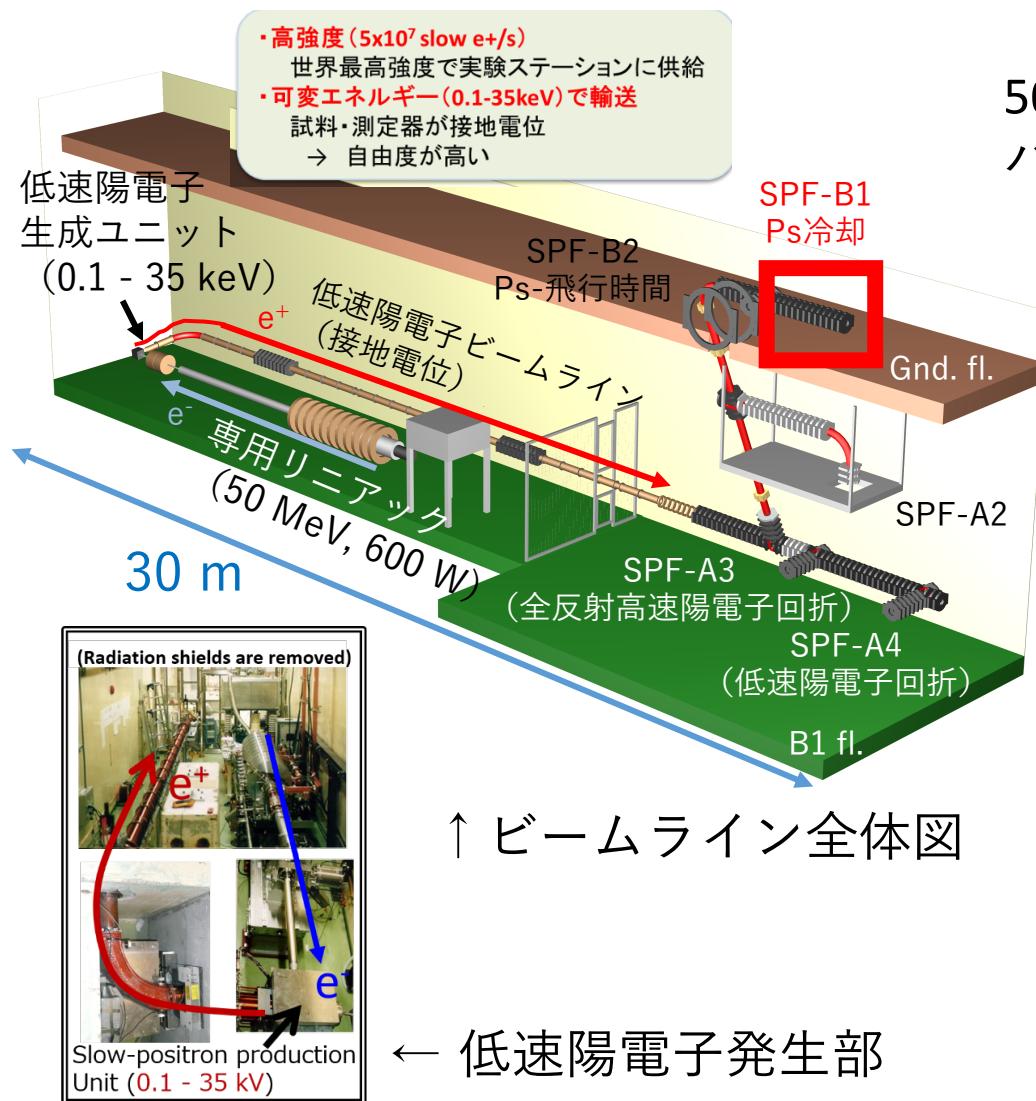
- 243 nmに変換後評価し、冷却に必要な特性を確認

# ドップラー冷却の実証に 十分な性能が得られている

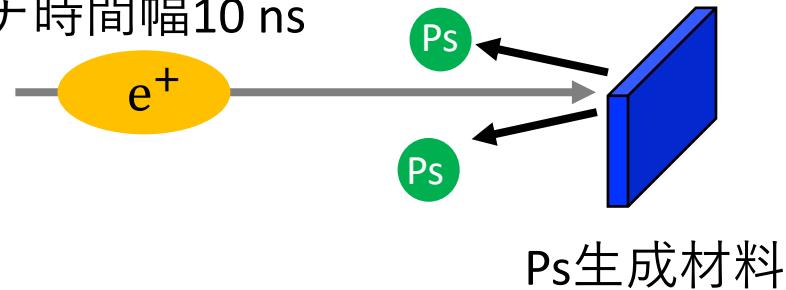
- プロトタイプ機の性能で冷却効率をシミュレート
- 冷却の実証が十分可能な効率が得られた
- 光源のアップグレードと並行し、レーザー冷却の実証実験を行った



# レーザー冷却実験は KEK-SPFで実施

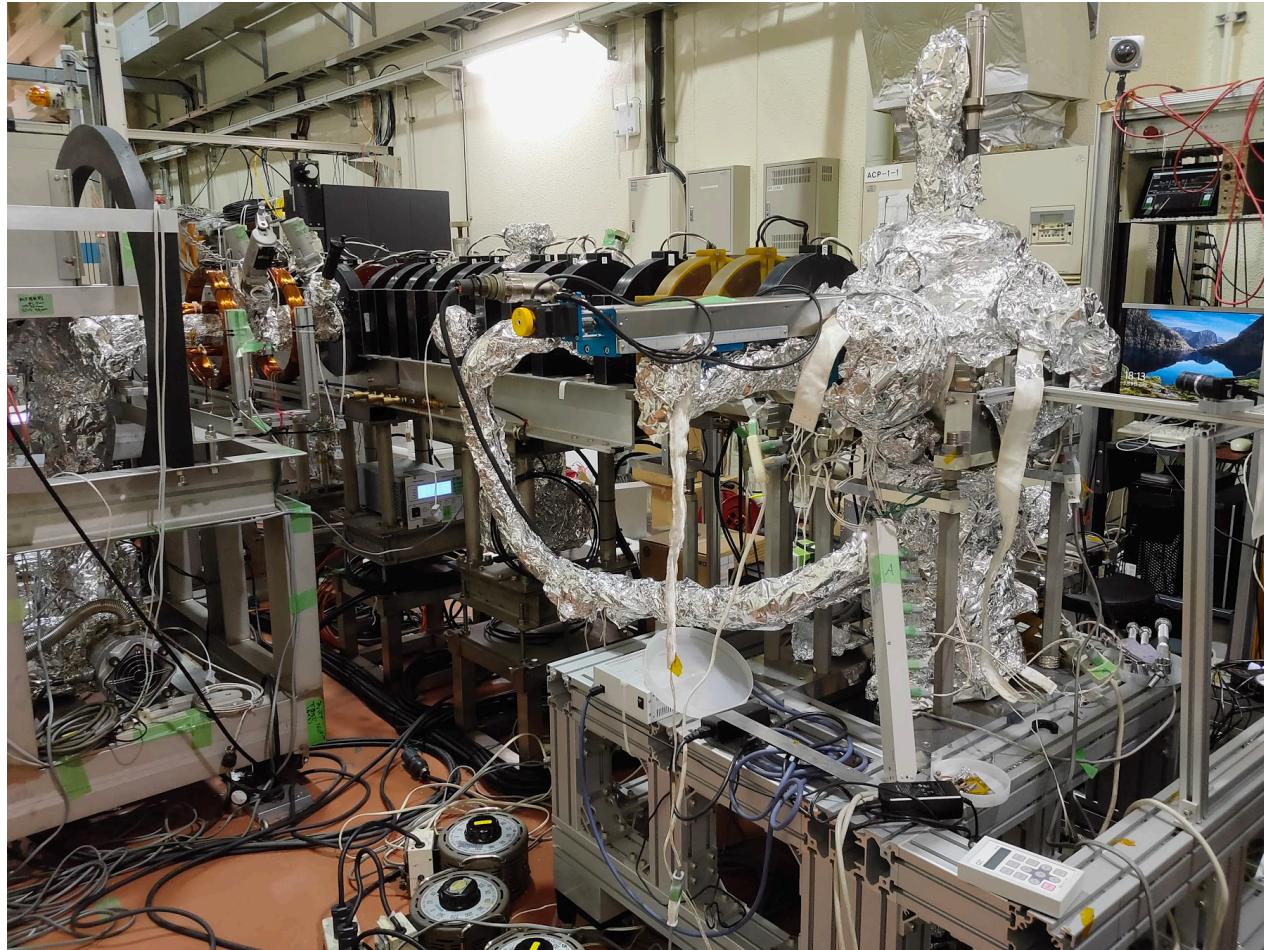


50 Hz 陽電子バンチ  
バンチ時間幅 10 ns



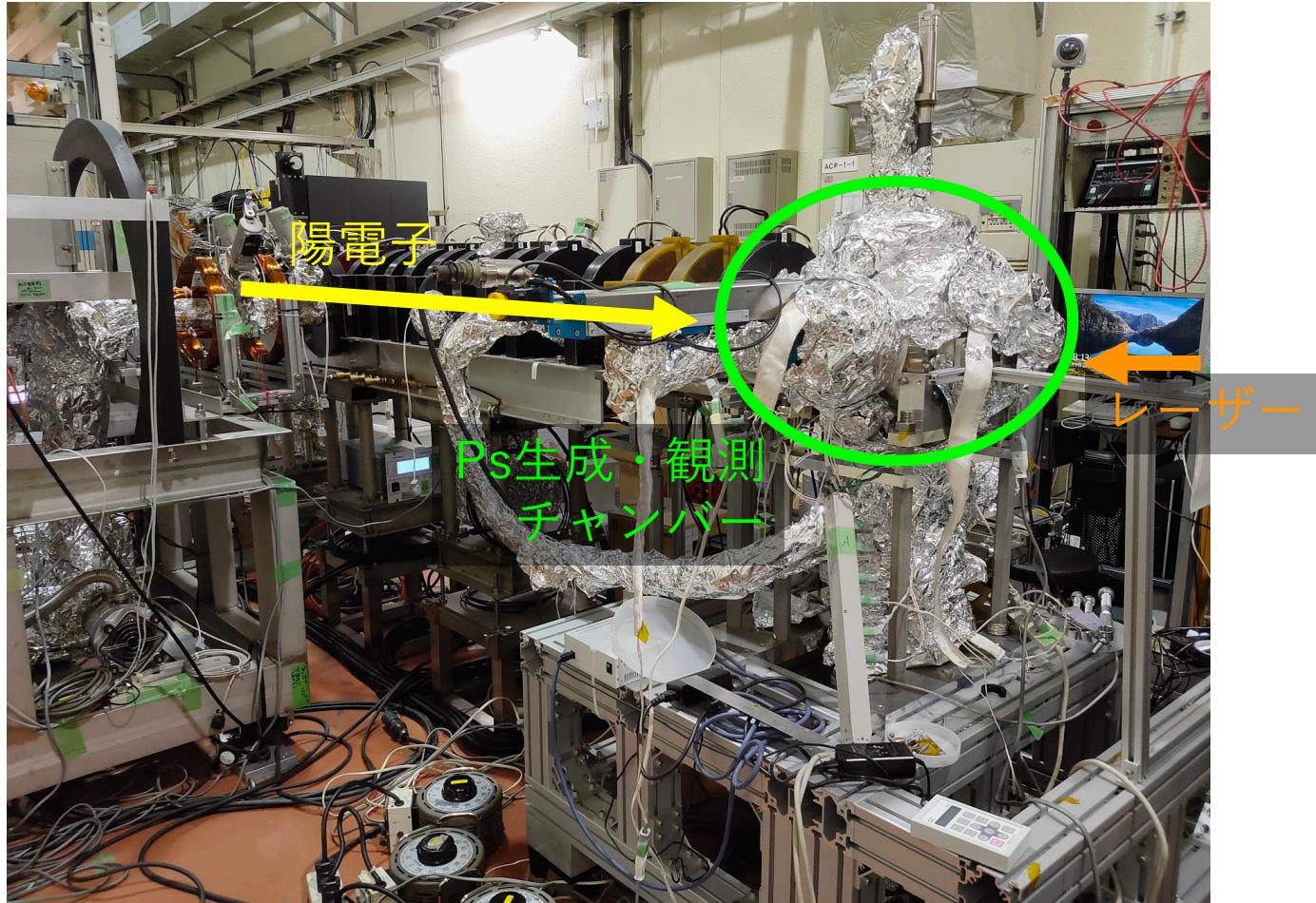
- 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所低速陽電子実験施設のビームタイムを取得し実験
- パルスレーザーと同期できるバンチ陽電子が得られる共同利用施設

# Ps冷却用のセットアップを構築



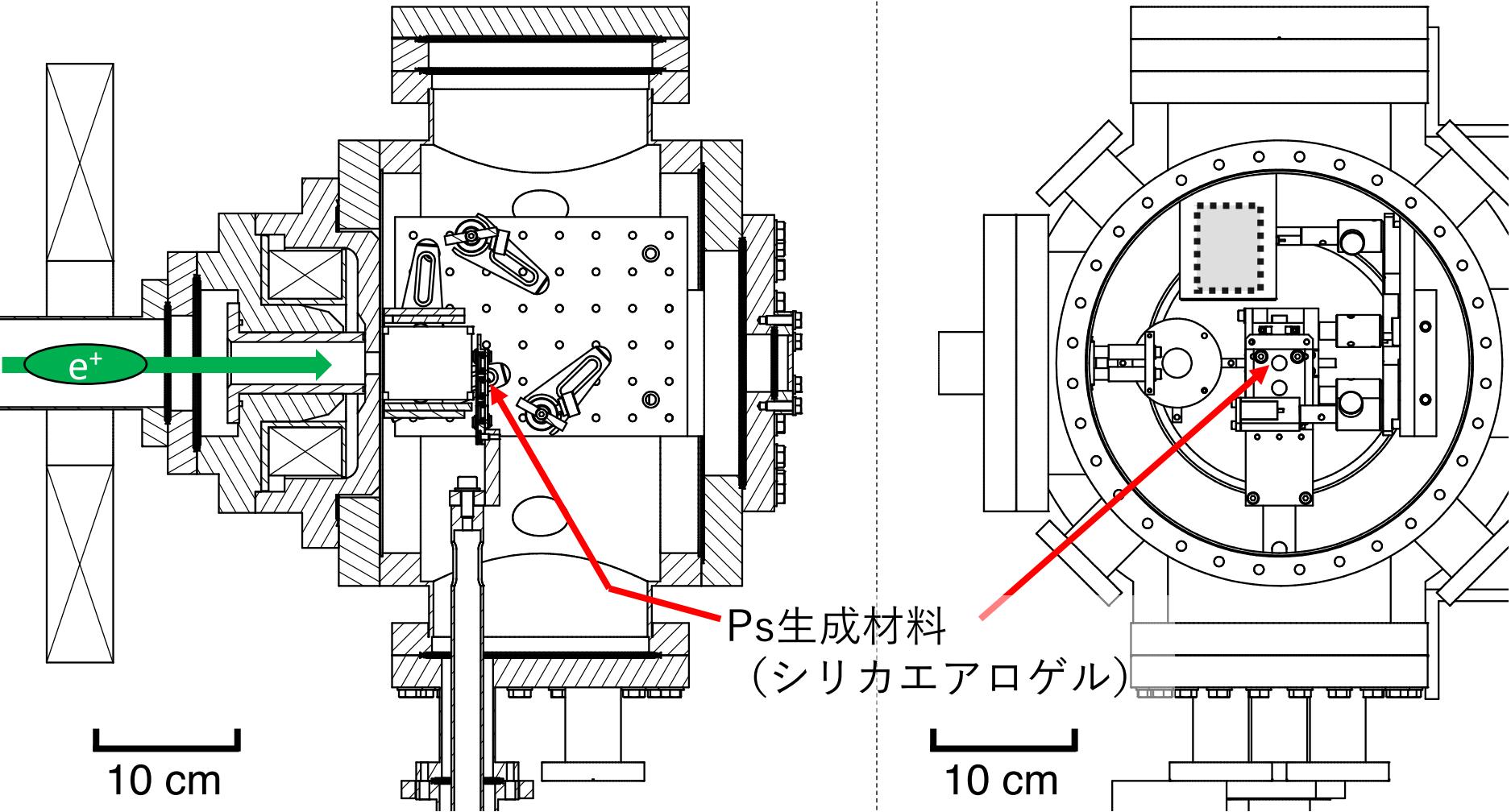
Ps冷却実験を実施しているKEK-SPF B1ビームラインの様子

# Ps冷却用のセットアップを構築

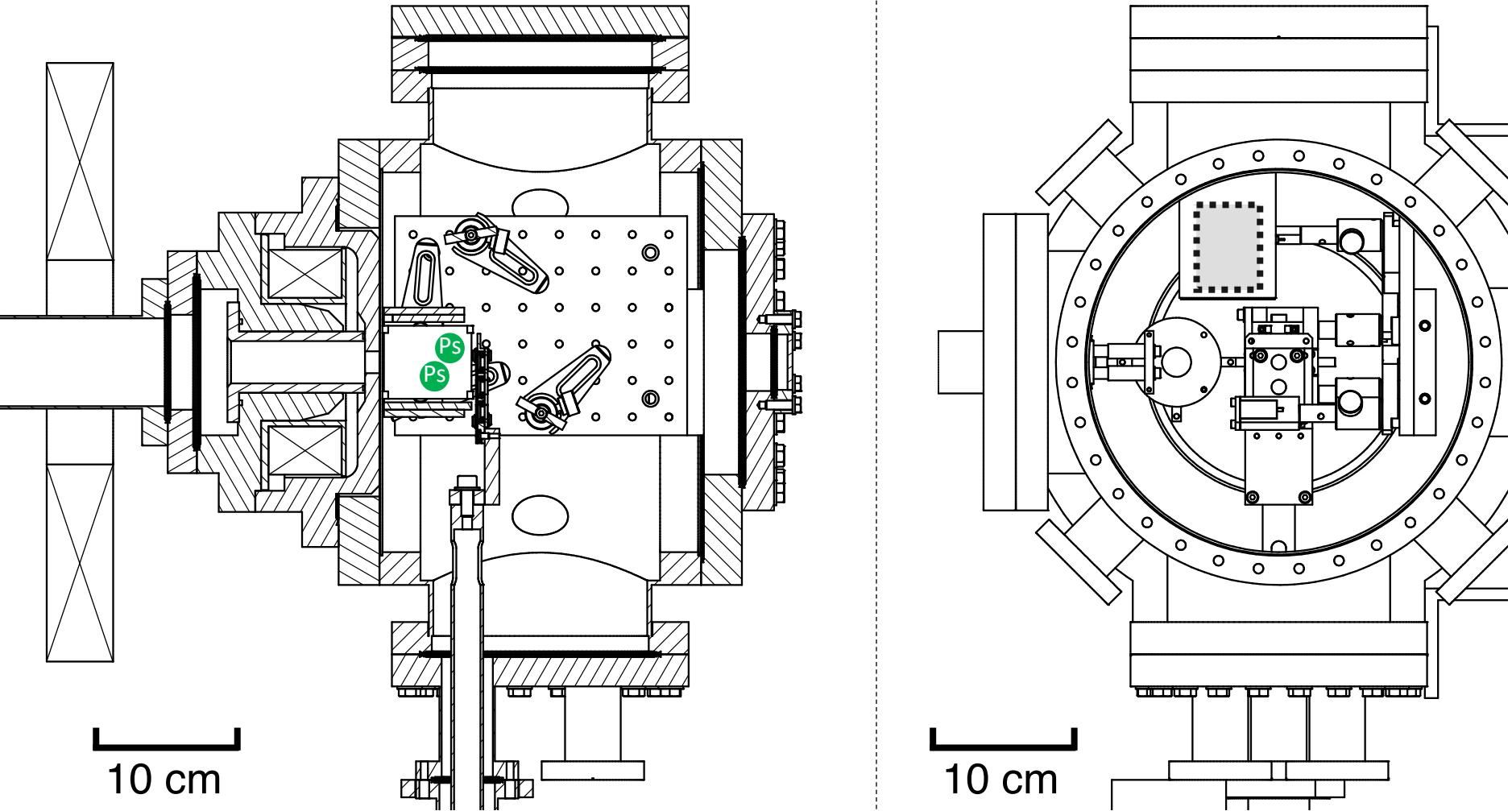


Ps冷却実験を実施しているKEK-SPF B1ビームラインの様子

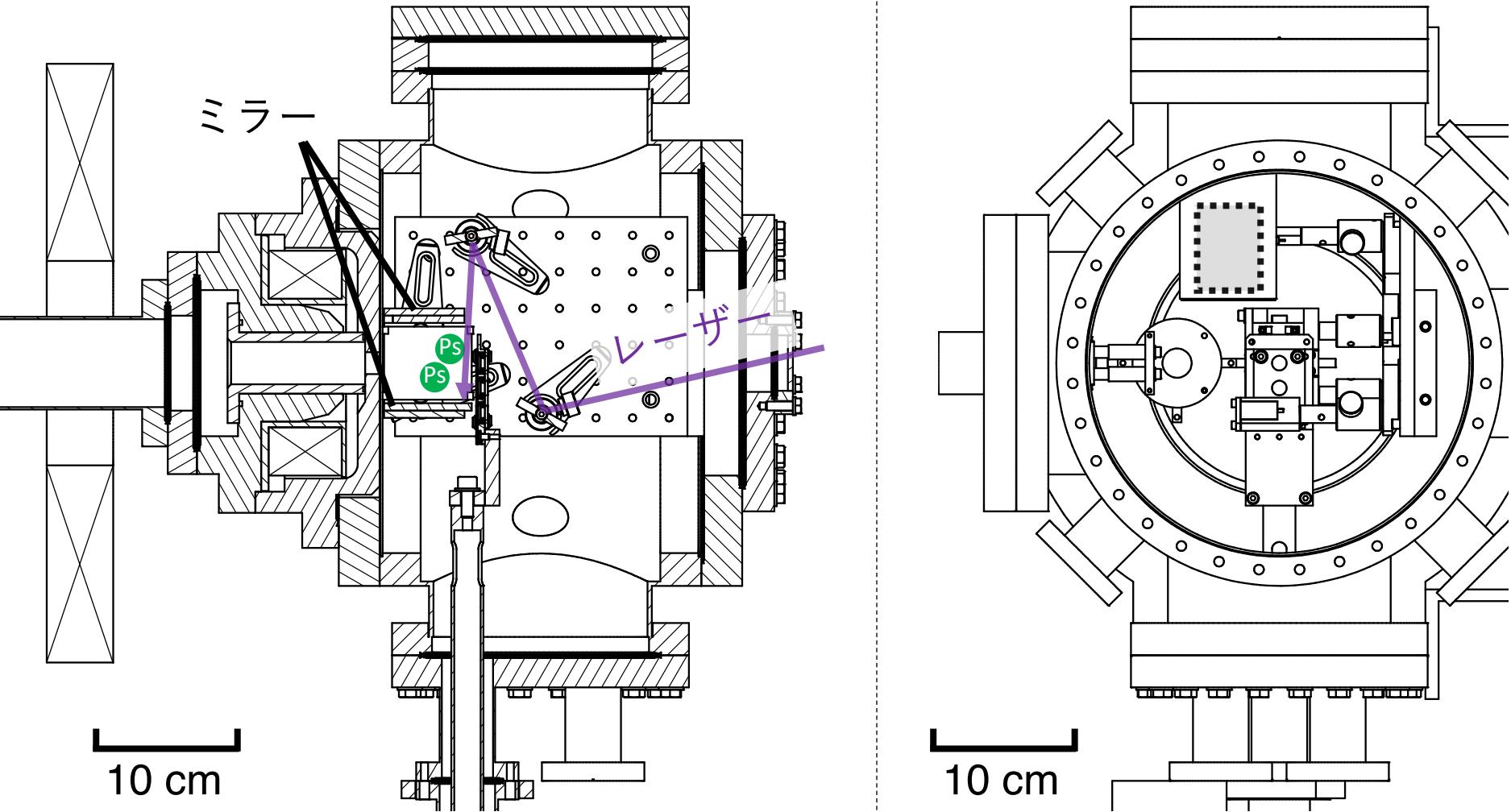
# Ps生成・観測チャンバーの内部拡大 Psを冷却し、ガンマ線を検出する



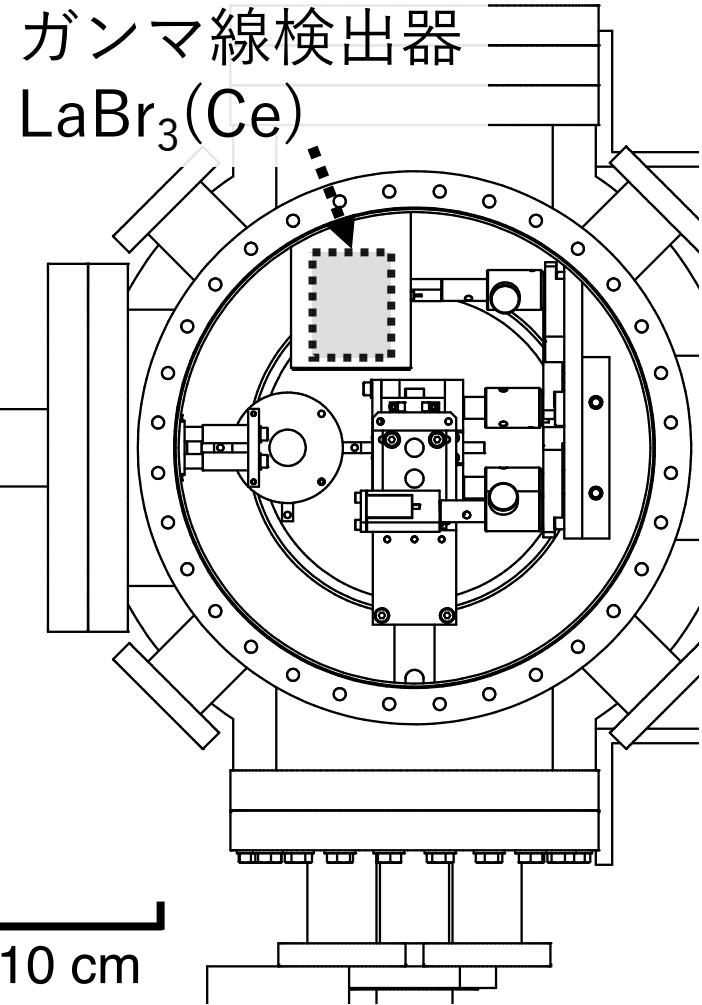
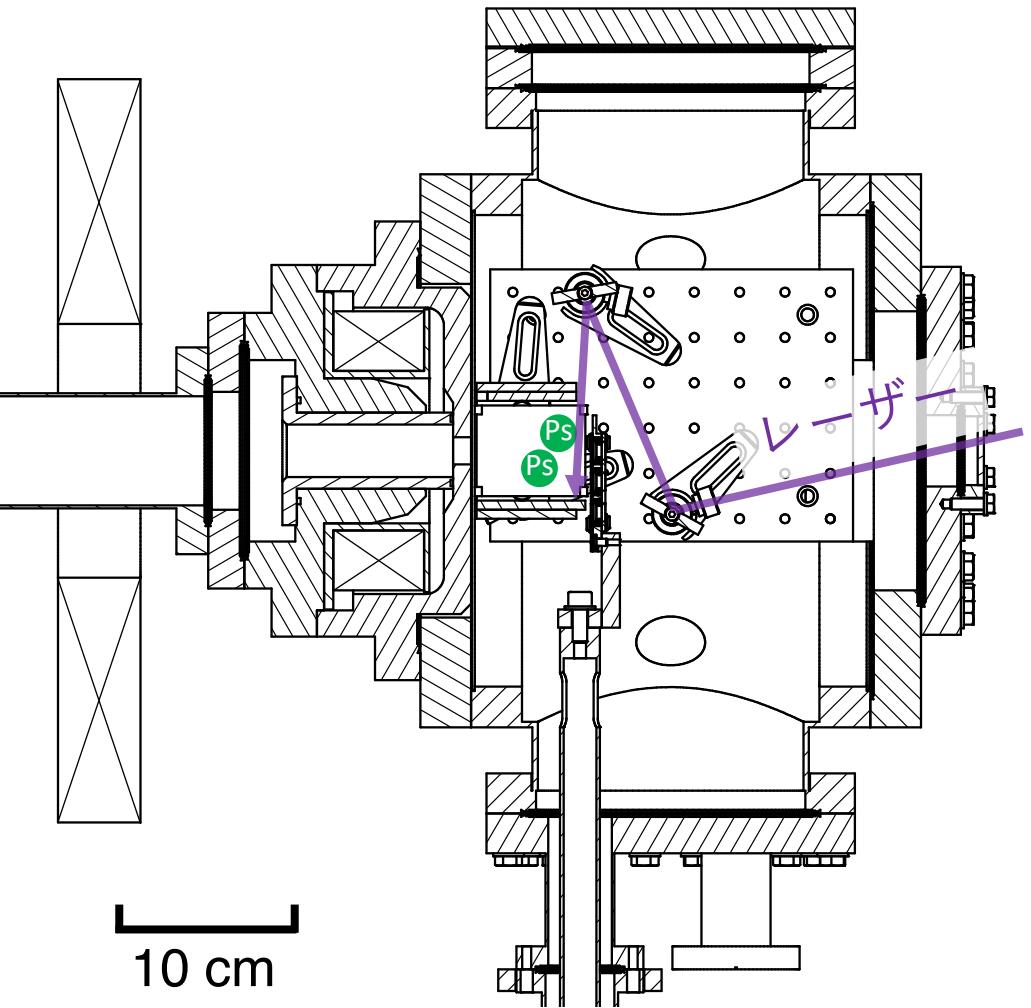
# Ps生成・観測チャンバーの内部拡大 Psを冷却し、ガンマ線を検出する



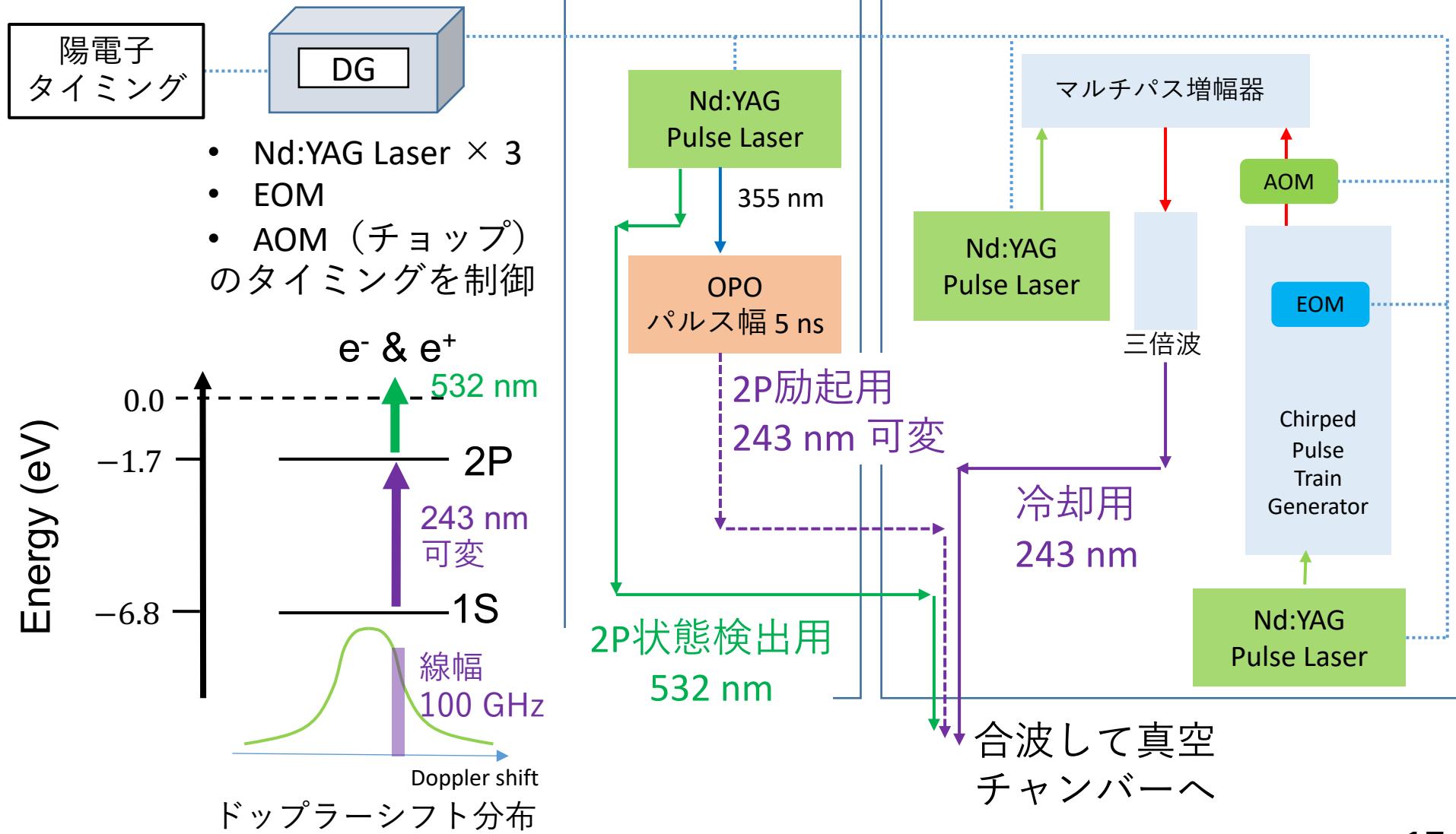
# Ps生成・観測チャンバーの内部拡大 Psを冷却し、ガンマ線を検出する



# Ps生成・観測チャンバーの内部拡大 Psを冷却し、ガンマ線を検出する



# Lyman- $\alpha$ 遷移のドップラー プロファイルを測定し温度を評価



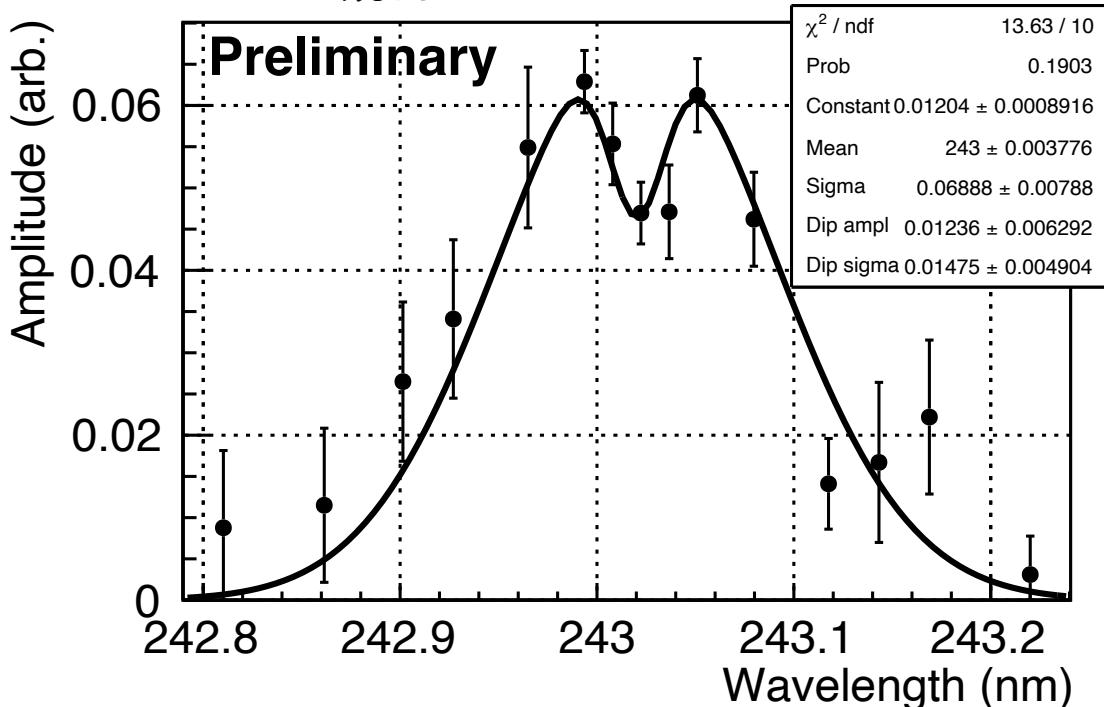
# ドップラープロファイル測定に成功 冷却効果を解析中

- Ps生成から 250 ns 後測定

冷却レーザーを照射しない場合

- Lyman- $\alpha$ 遷移周波数に共鳴を観測
- $(1.0 \pm 0.2) \times 10^3 \text{ K}$  のドップラー幅
- 遷移中心・幅ともに妥当ドップラープロファイルの測定に成功
- 冷却レーザーを照射した場合のデータも取得済みプロファイル変化を解析中

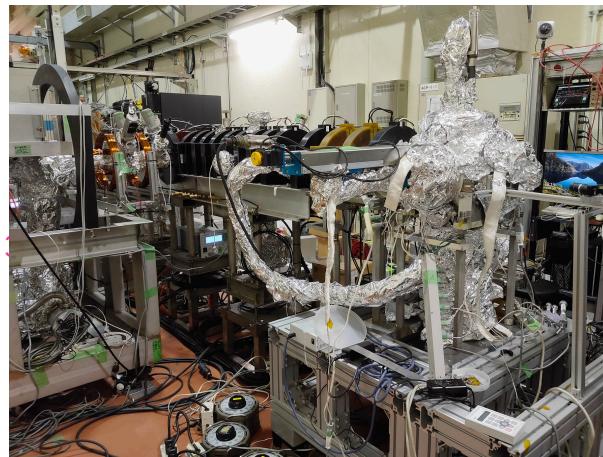
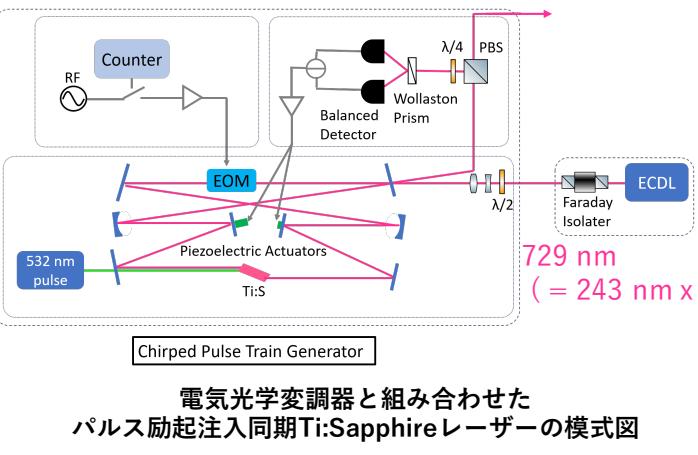
光を対向して照射しているためラムディップを観測



冷却レーザーを照射しなかった場合のPs生成から 250 ns 後のドップラープロファイル

# まとめ

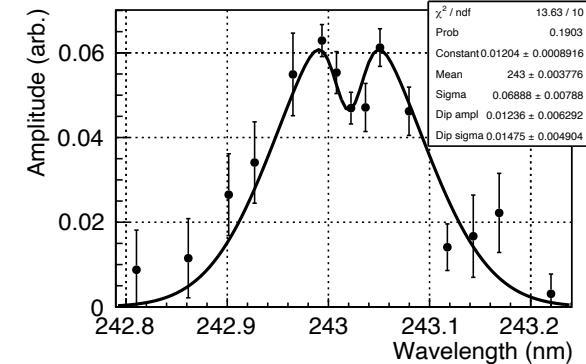
- Psは基礎物理学検証に有用な系であり、冷却が重要な課題である。
- レーザー冷却で桁違いに低い温度を実現すべく、実験を進めている



Psの軽量・短寿命性に  
最適化したレーザー光源  
を独自に開発

KEK-SPFにて  
実証実験を実施

近日中にレーザー冷却実証実験の結果報告を目指している



冷却効果の評価方法を確立  
現在結果を解析中