



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

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

東大理, 東大素セ^A, 東大工^B, 産総研^C

石田明, 周健治, 村吉諄之, 樊星, 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

平成29年3月17日



APSA
Advanced Photon Science Alliance

日本物理学会第72回年次大会
大阪大学豊中キャンパス

目次

- ポジトロニウム (Ps) とそのボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) 実現の目的
- ポジトロニウム冷却の新しい方法: シリカ (SiO_2) との衝突による熱化とレーザー冷却の組み合わせ
- 冷却用レーザーシステムの開発状況
- まとめ

ポジトロニウム(Ps)-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
- 世の中で最も軽い原子

Ps-BECのモチベーション

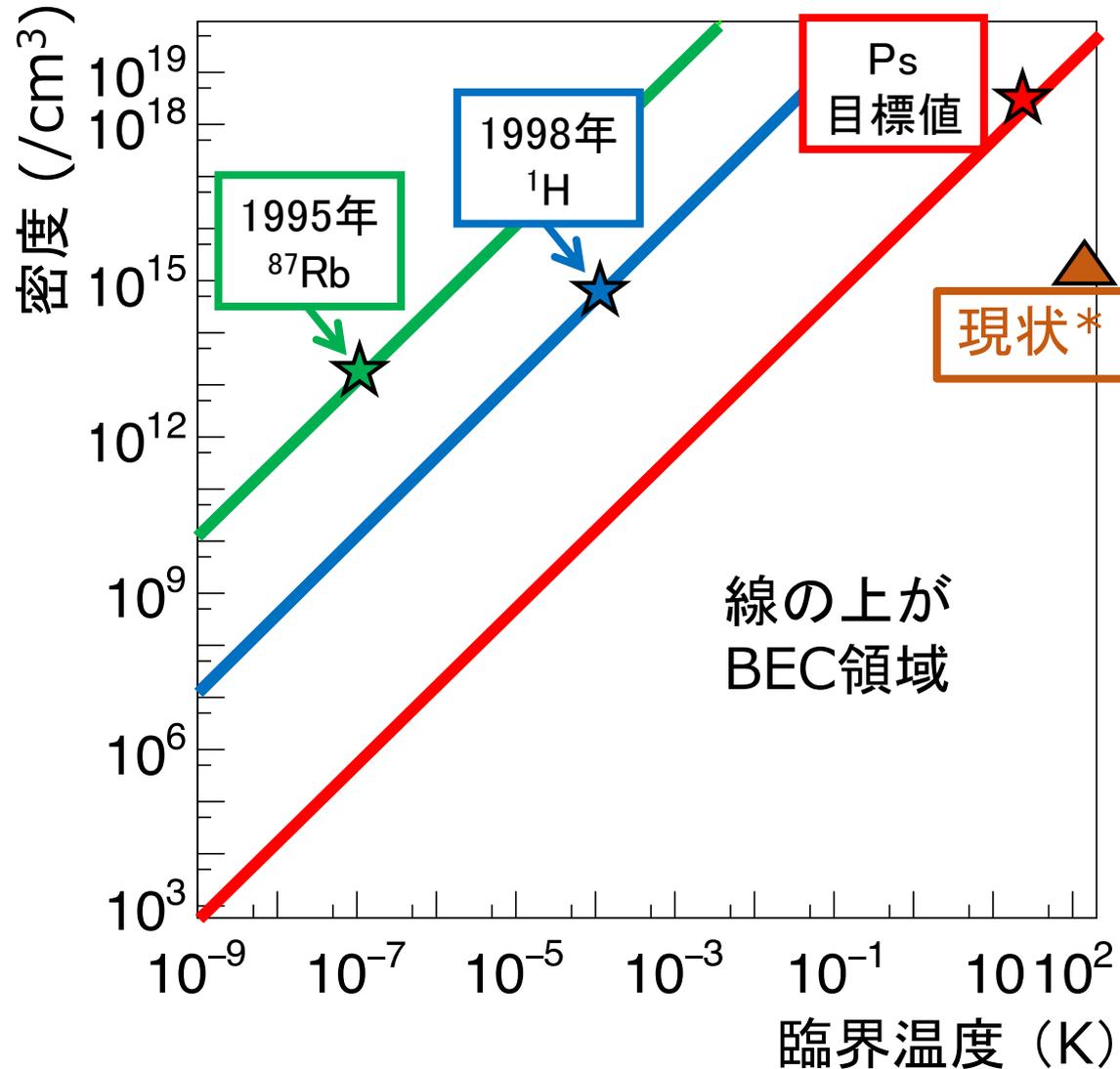
- 初の**反物質含む系でBEC**

特徴

- 軽くてBEC臨界温度が高い
(**14 K @ $10^{18} / \text{cm}^3$**)
- 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



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

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

冷却① 冷たいシリカとの衝突(熱化)

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

冷やしたシリカ (SiO_2)

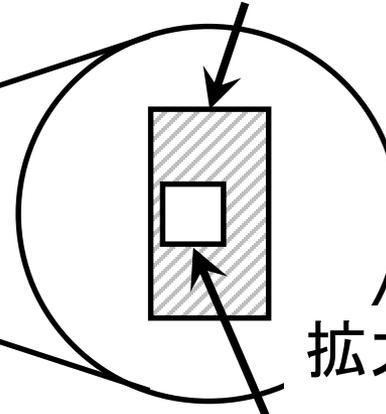
電子供給源 ($e^+ + e^- \rightarrow \text{Ps}$)

できたとき Ps 温度 8000 K

(実験概念図)

陽電子をバンチ化

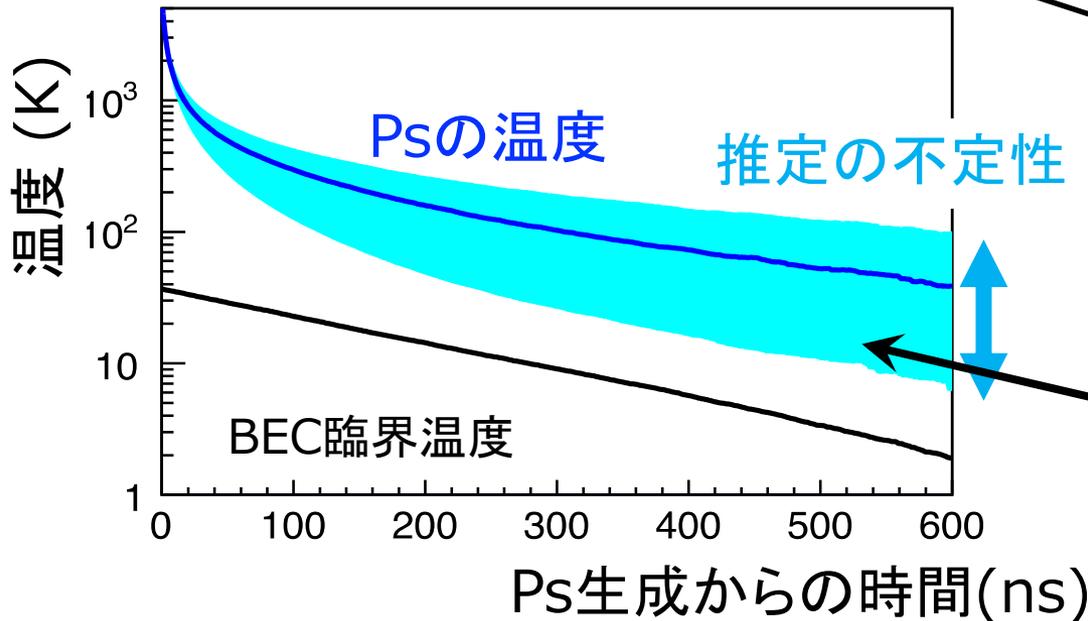
高密度
陽電子源



拡大図

中に空孔(~ 100 nm)

Psをトラップ



ある程度 $O(100\text{K})$ まで冷えるが、これだけでは BEC には不十分

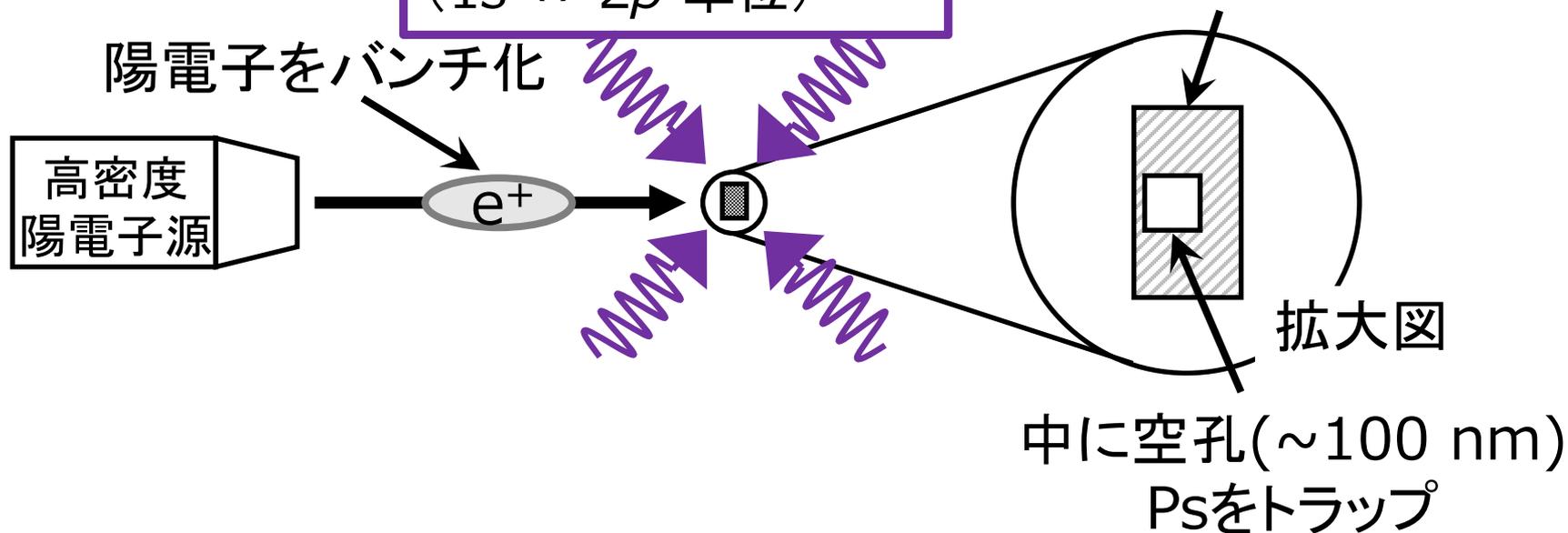
冷却② レーザー冷却

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

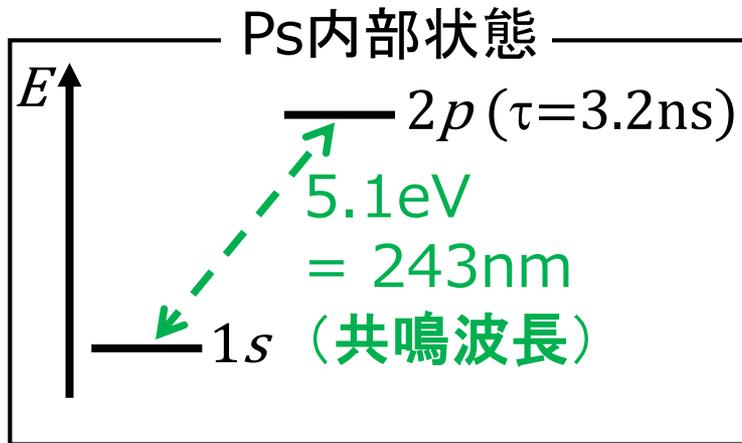
(実験概念図)

冷却用レーザー6方向
波長 243 nm
($1s \leftrightarrow 2p$ 準位)

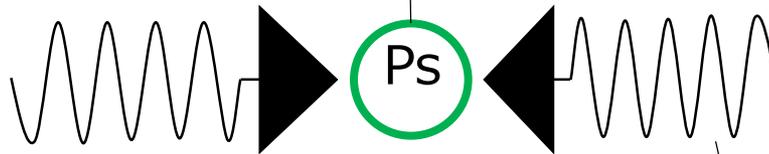
冷やしたシリカ (SiO_2)
冷却用レーザーに透明



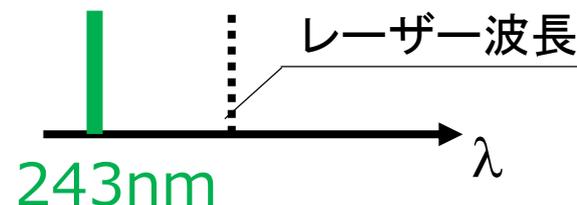
レーザー冷却の原理



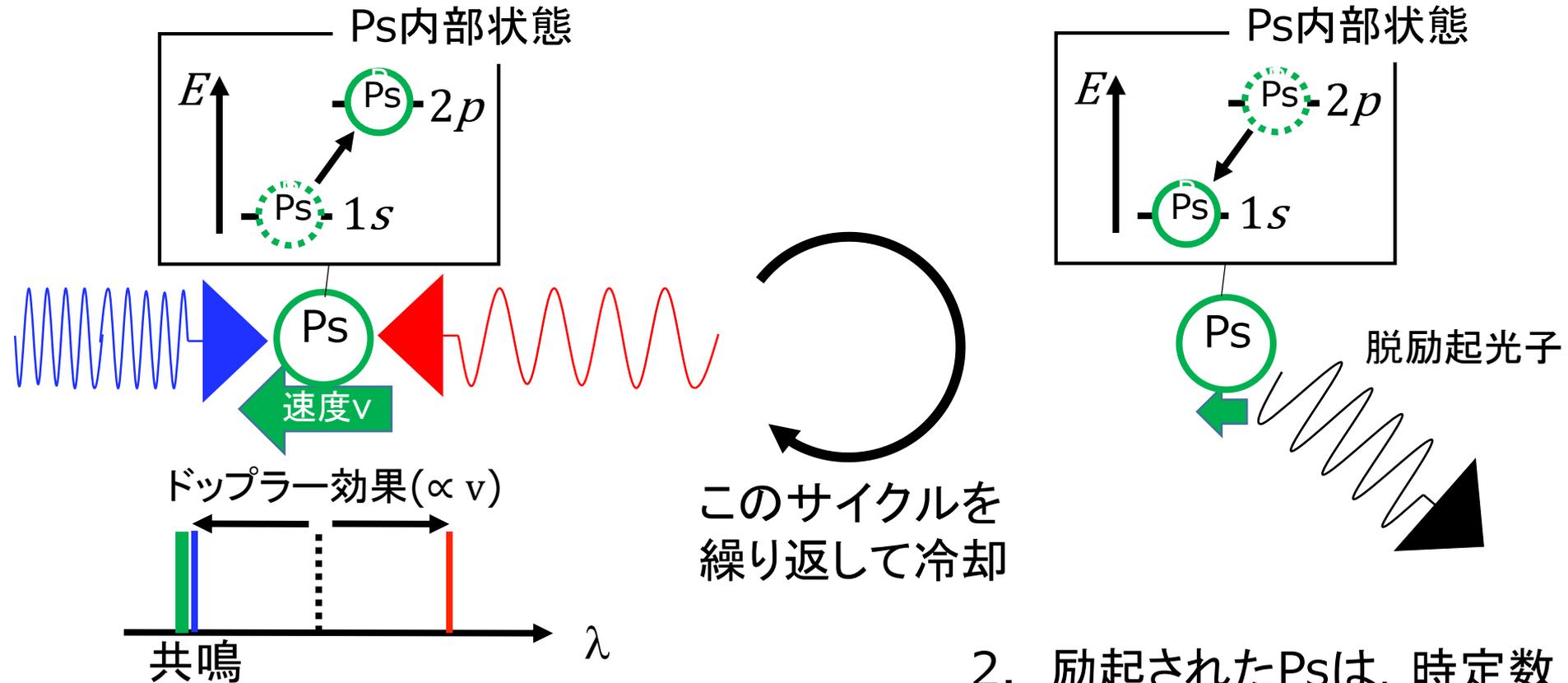
1s - 2p 準位間共鳴を利用:
Psは共鳴波長243nmぴったりの光子を吸収して2p状態に励起
→時定数3.2nsで脱励起



レーザー冷却:
共鳴波長243nmより
少し波長の長い光を
あらゆる方向より入射



レーザー冷却の原理



1. 反対方向に進む光のみが共鳴し光吸収・励起
Psは光子の運動量分だけ減速

2. 励起されたPsは、時定数 3.2ns で自然に光子を放出し脱励起する
(光子の運動量方向はランダム, 平均すれば温度は変わらない)

冷却② レーザー冷却

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

(実験概念図)

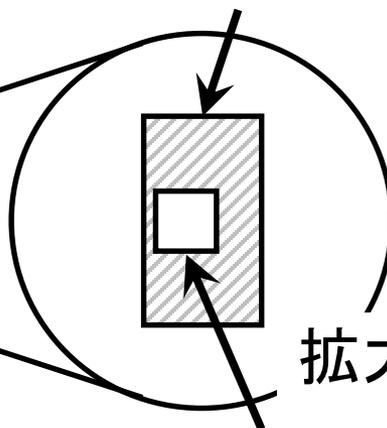
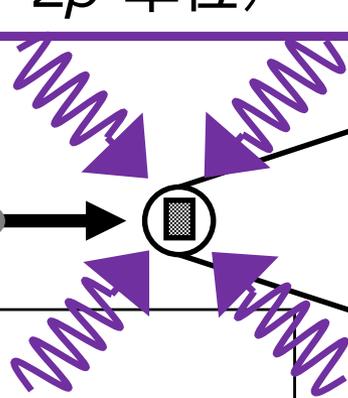
冷却用レーザー6方向
波長 243 nm
($1s \leftrightarrow 2p$ 準位)

冷やしたシリカ (SiO_2)
冷却用レーザーに透明

陽電子をバンチ化

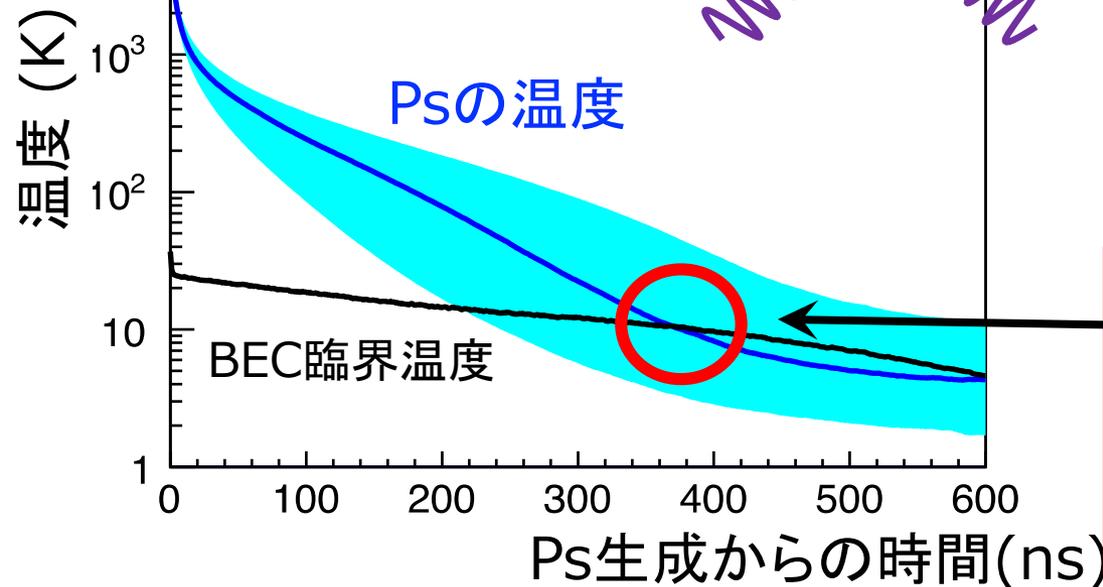
高密度
陽電子源

e^+



拡大図

中に空孔(~ 100 nm)
Psをトラップ

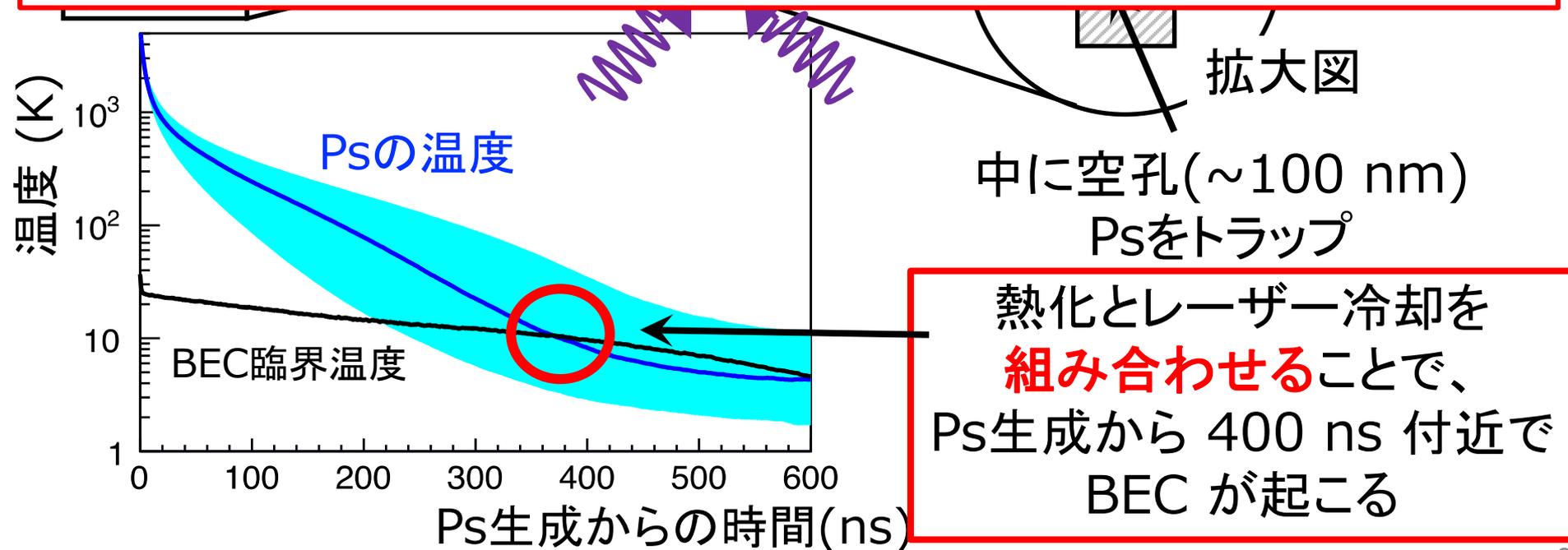


熱化とレーザー冷却を
組み合わせることで、
Ps生成から 400 ns 付近で
BEC が起こる

冷却② レーザー冷却

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

Ps(ほかあらゆる**反物質**系)レーザー冷却は
まだ誰も成功していない挑戦
Ps冷却用に最適化したオリジナルの光源を
開発中

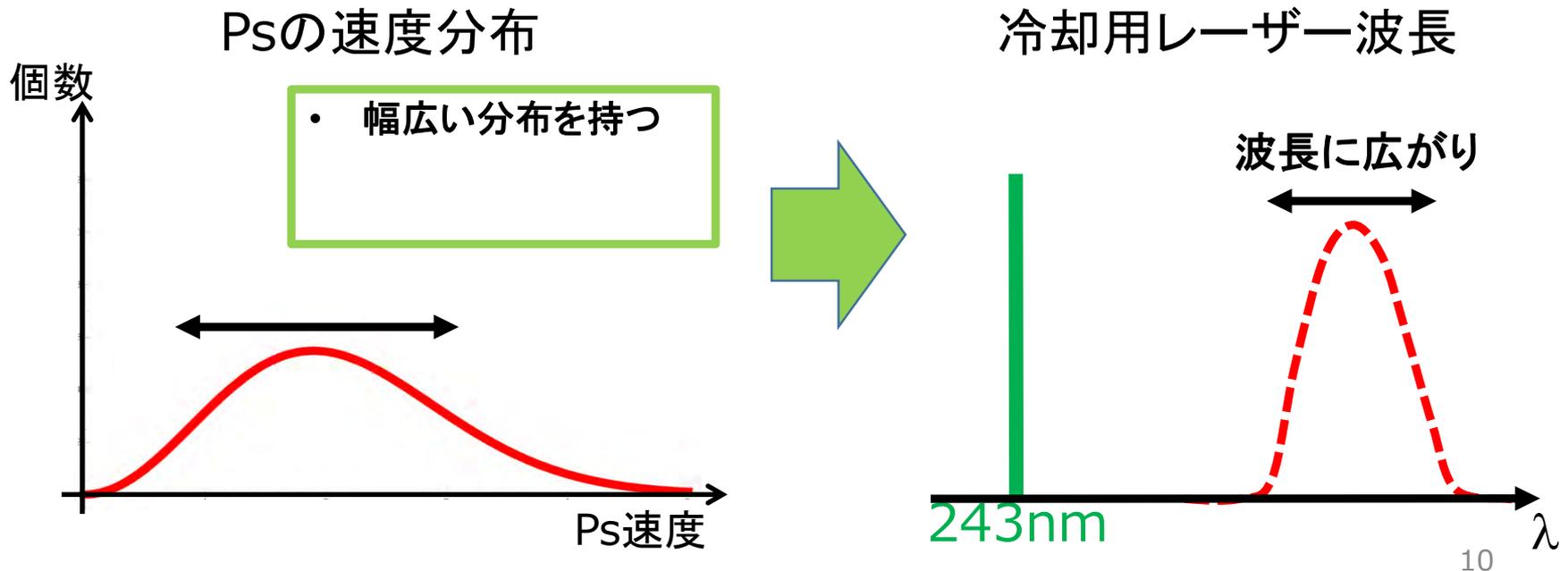


Ps冷却用レーザー

Psは非常に軽い原子(水素の $\sim 1/1000$)であり**ドップラー効果大**

→Psならではの特殊なスペック

- 非常に幅広い速度分布を持つため、様々な波長を同時に入射
 - **広線幅**(広い波長スペクトル)

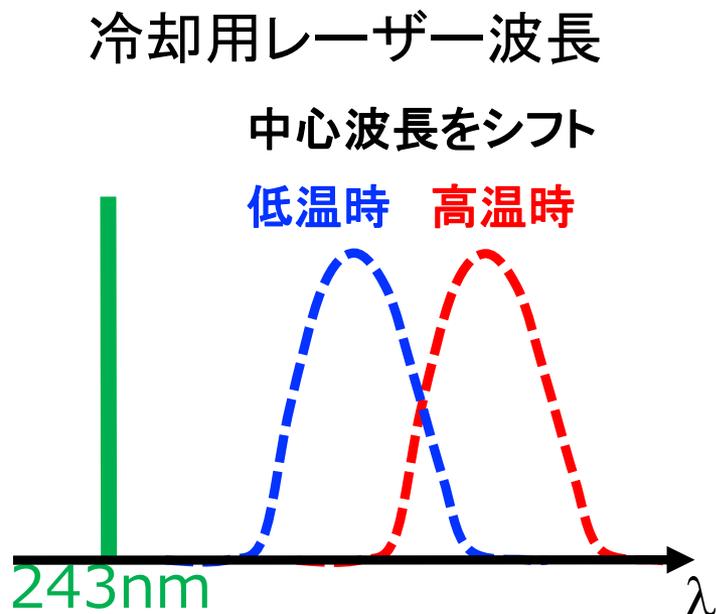
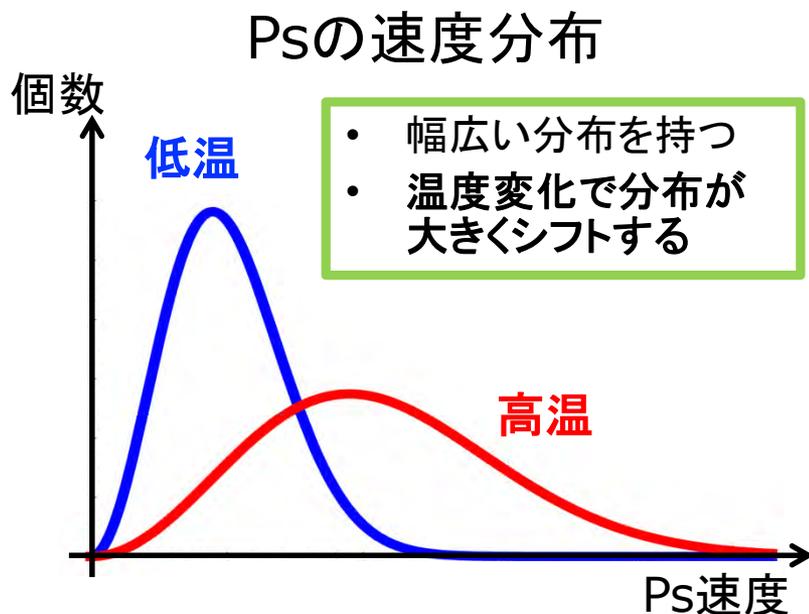


Ps冷却用レーザー

Psは非常に軽い原子(水素の $\sim 1/1000$)であり**ドップラー効果大**

→Psならではの特殊なスペック

- 非常に幅広い速度分布を持つため、様々な波長を同時に入射
 - **広線幅**(広い波長スペクトル)
- 速度分布が温度により大きく変化
 - Psの温度に合わせて**レーザー波長をシフト**



必要なレーザー特性

Ps-BEC 実現のためには高速かつ十分な冷却が必要

→以下の特性を持つ243nm紫外光レーザー作成を目指す

①持続時間: 300ns

→ Ps寿命=142 ns

②強度: $40\mu\text{J}$

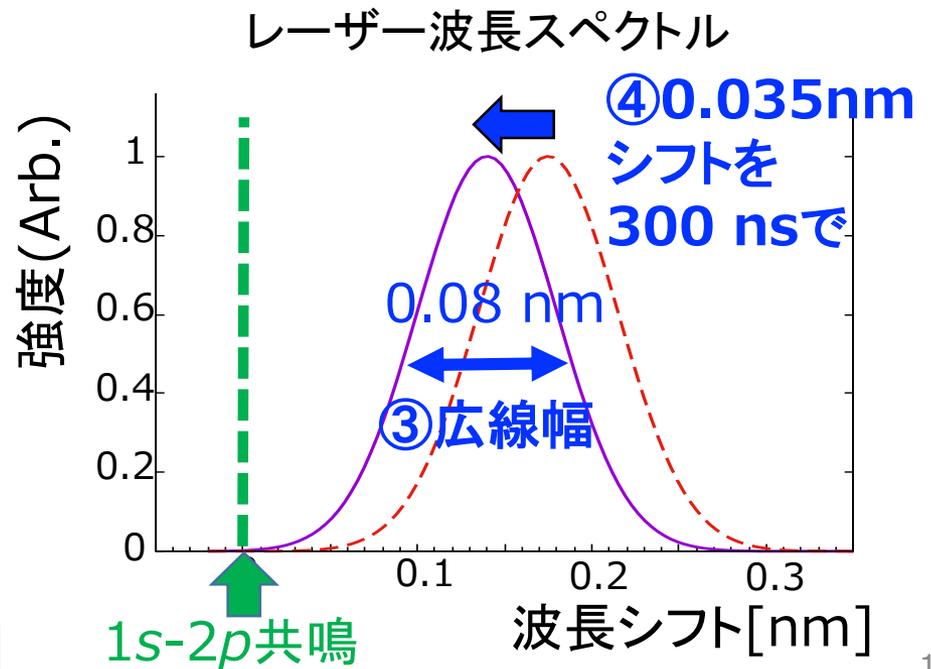
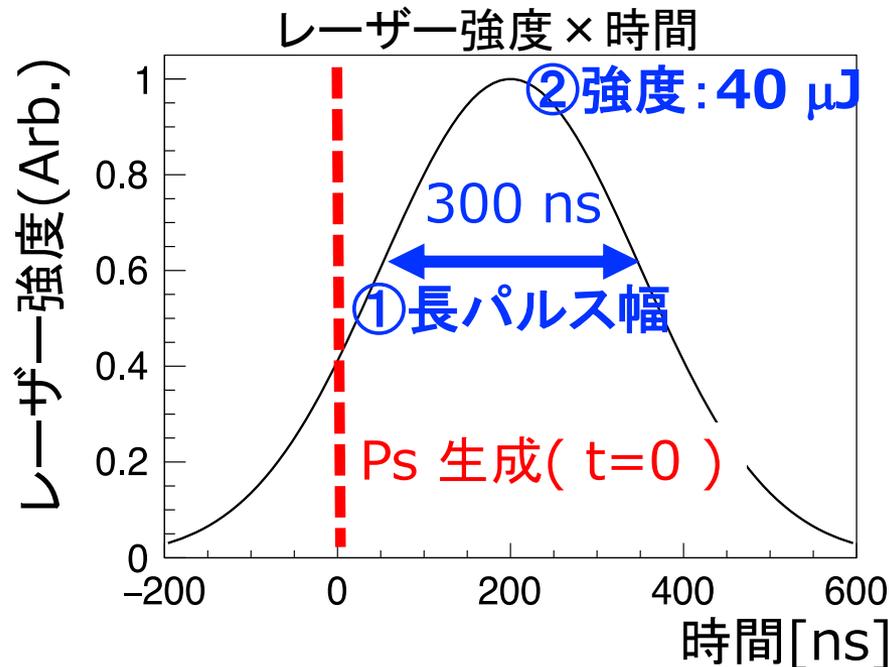
→冷却サイクルを飽和

③線幅: 0.08nm (140GHz)

→Psは軽いので広い速度分布

④波長シフト: 0.035nm (60GHz)

→Psの減速に合わせ300nsで



必要なレーザー特性

Ps-BEC 実現のためには高速かつ十分な冷却が必要

→以下の特性を持つ243nm紫外光レーザー作成を目指す

①持続時間: 300ns

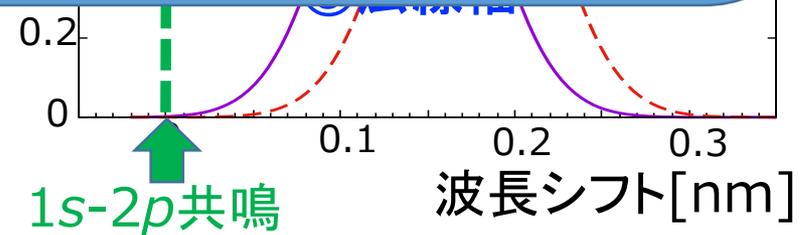
③線幅: 0.08nm (140GHz)

② 広波長域・長持続時間のパルスレーザーは光学的に非常に特殊

・紫外線領域での大幅な波長シフトはまだない技術

➤非常にチャレンジングなスペックであり、新しい光源開発が必要

レーザー強度(Arb.)

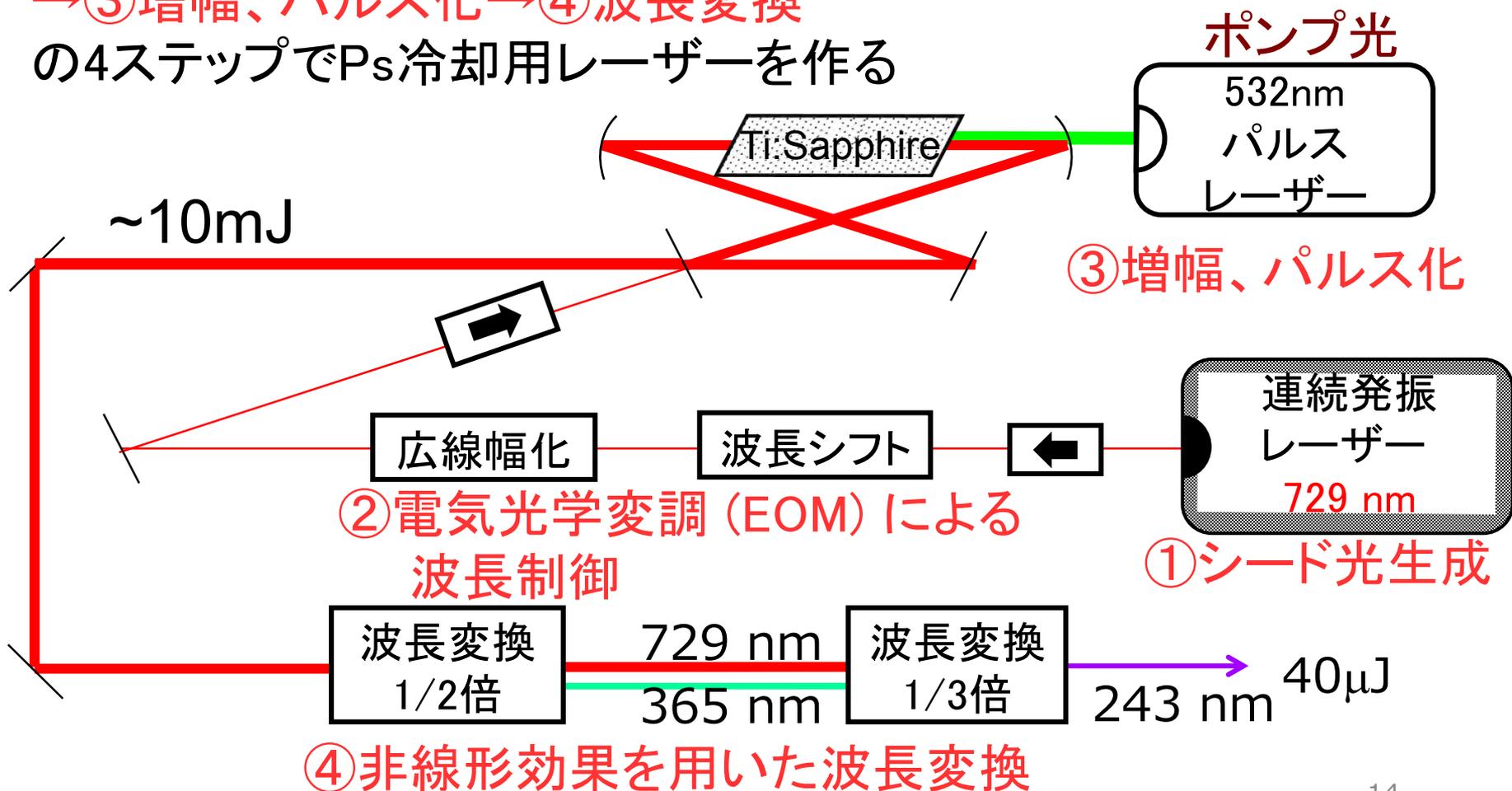


Ps冷却用レーザーシステムの設計

必要スペックを達成するため、既存の技術を組み合わせて

- ①シード光生成
- ②波長制御
- ③増幅、パルス化
- ④波長変換

の4ステップでPs冷却用レーザーを作る



Ps冷却用レーザーシステムの設計

必要スペックを達成するため、既存の技術を組み合わせて

シード光の要求スペック:

- 連続発振(CW)
- 波長729nm
- 強度数 mW以上
- 線幅1.8pm(1GHz)以内
- 波長のドリフト1.8pm以内

換

ポンプ光

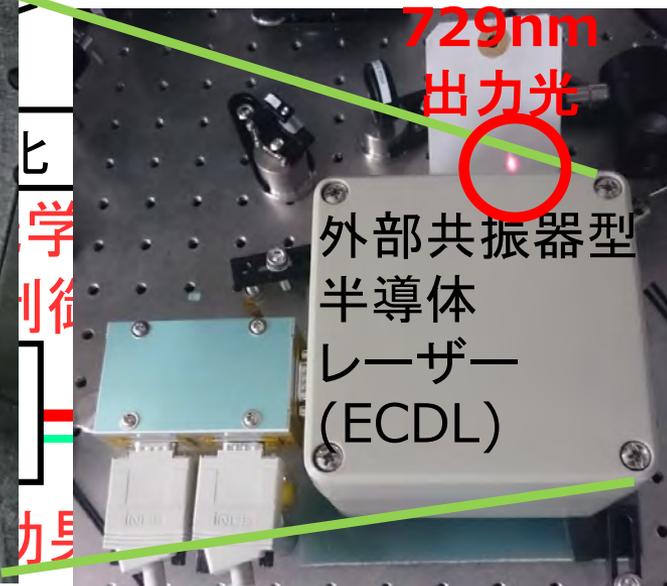
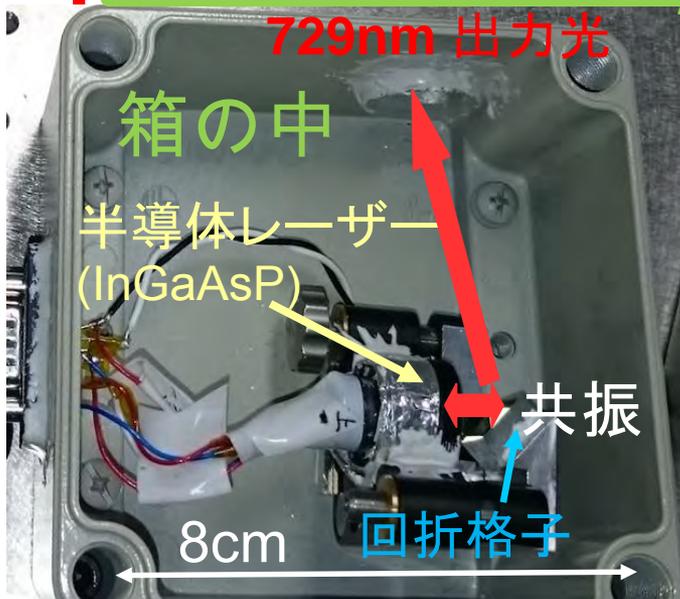
ここは完成

③パルス化

連続発振
レーザー

729 nm

①シード光生成



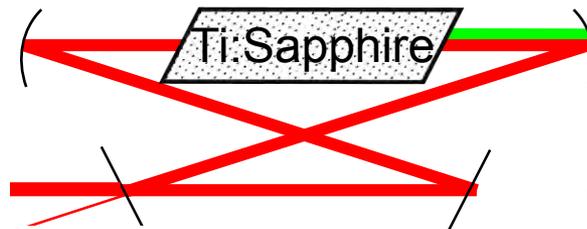
243 nm 40 μ J

Ps冷却用レーザーシステムの設計

必要スペックを達成するため、既存の技術を組み合わせて

- ① 波長制御
 - ② 波長制御
 - ③ 波長変換
 - ④ 波長変換
- 冷却用レーザーを作る

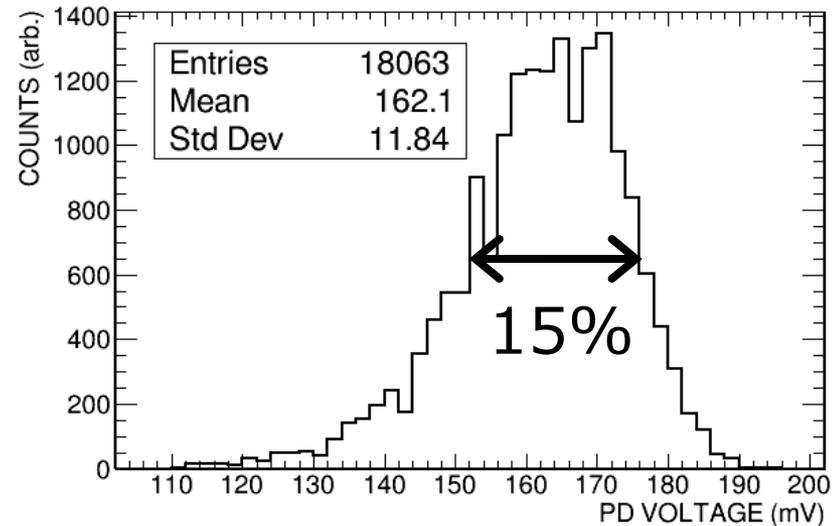
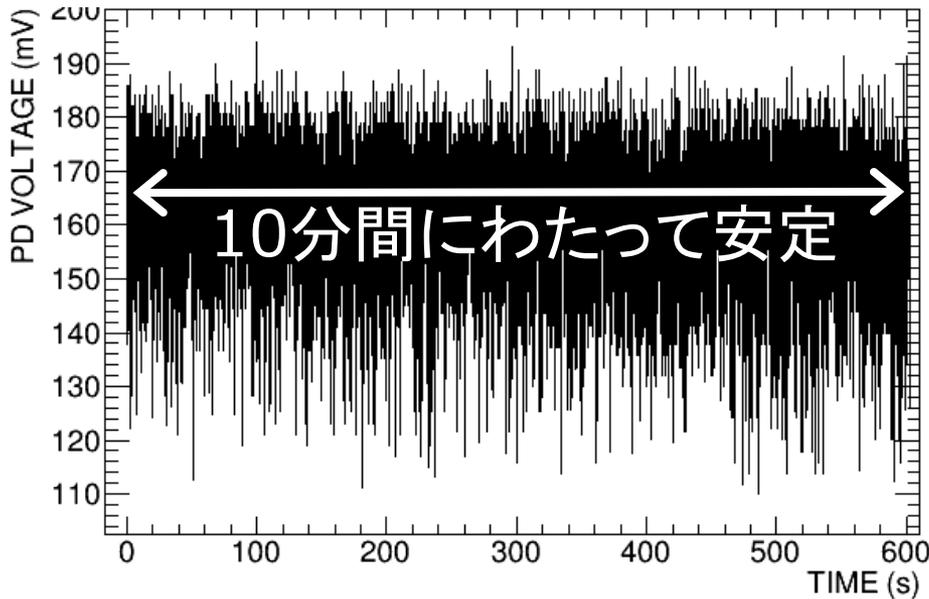
この部分
のプロトタイプは完成



ポンプ光
532nm
パルス
レーザー

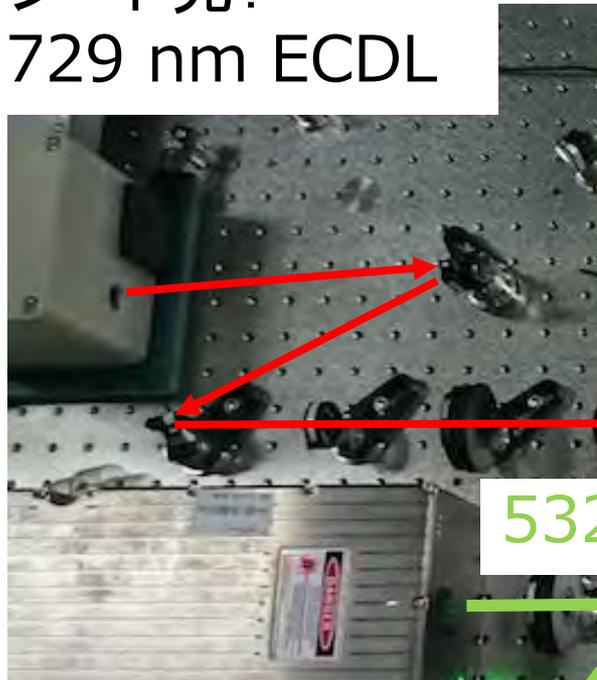
③増幅、パルス化

出力パワーの時間変動



増幅・パルス化の プロトタイプ光学系

シード光:
729 nm ECDL



ウォラストン
プリズム

偏光解析法による
フィードバック制御

$\lambda/4$ 波長板

729 nm
出力光

532 nm

ピエゾ

ポンプ光:
532 nm Nd:YAG
パルス 1.5kHz,
 $\sim 460\mu\text{J}/\text{pulse}$

Ti:Sapphire結晶と
共振器で増幅・パルス化

Ps冷却用レーザーシステムの設計

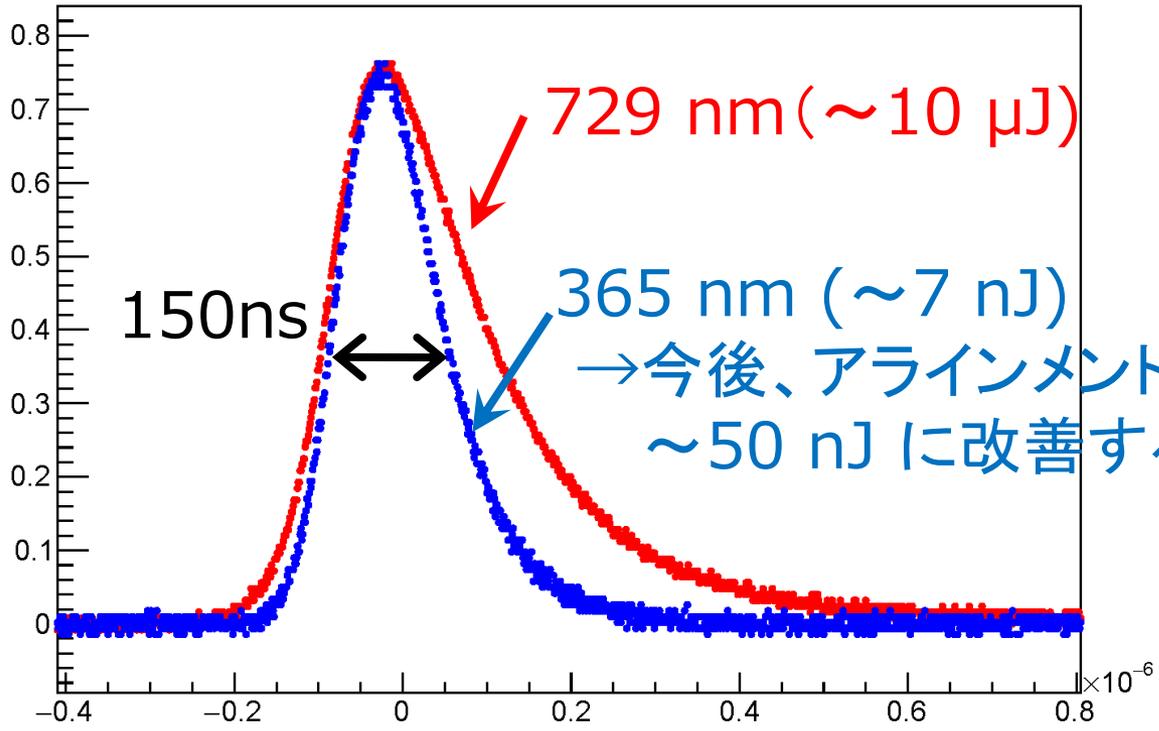
必要スペックを達成するための設計

必要な仕様を達成するための設計 F0026

- ①シード光生成
- ③増幅、パルス整形
- の4ステップでPs冷却

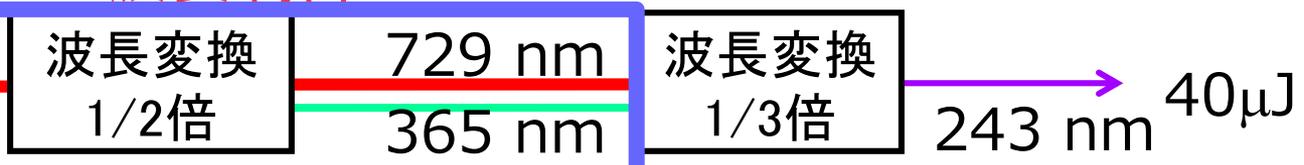
この部分を製作中

PD 電圧 (arb.)



②電

波長制御



④非線形効果を用いた波長変換

729 nm → 365 nm 光学系

- 729nmパルスを集光してLBO結晶に入れて365nmパルス生成
- ダイクロイックフィルター、誘電体ミラーなどで 365 nm と 729 nm を分離、PDに入射

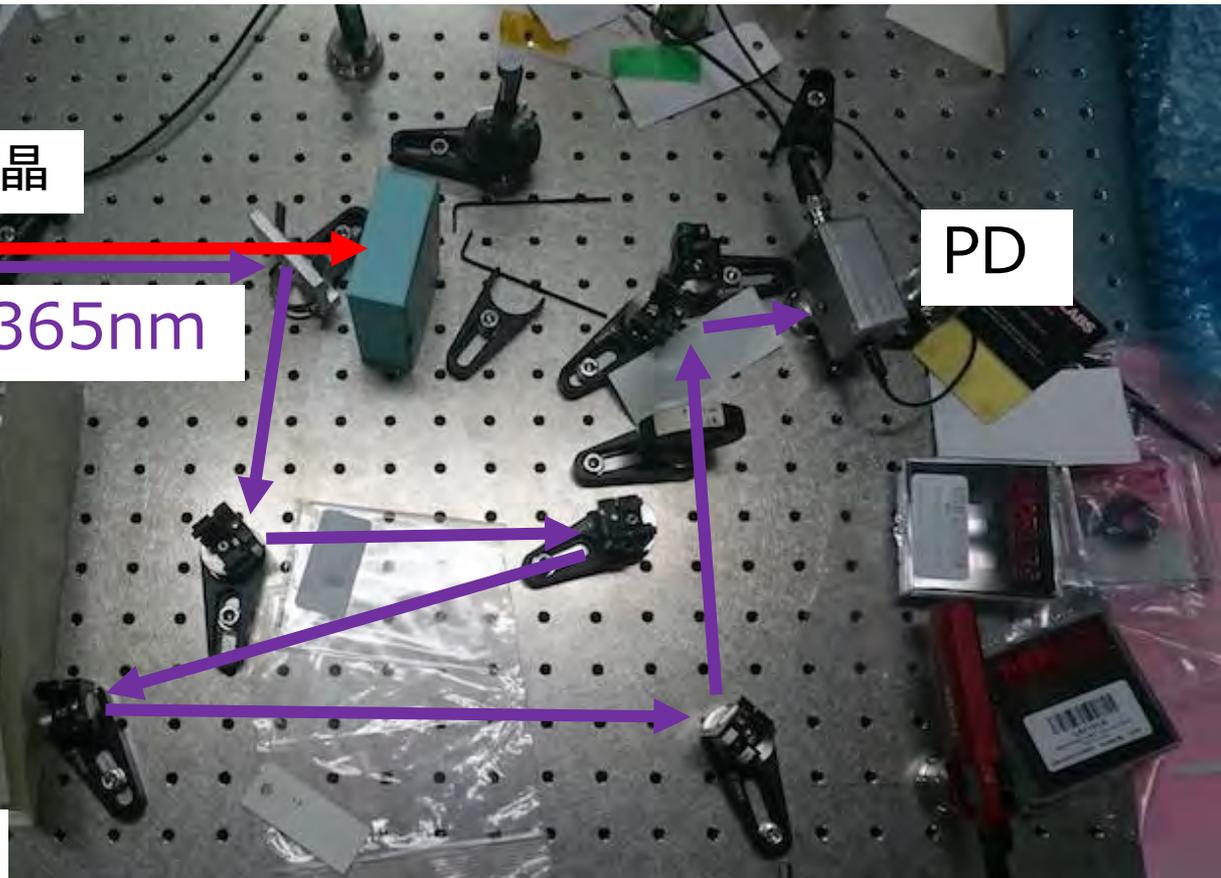
729nm
パルス

LBO結晶

365nm

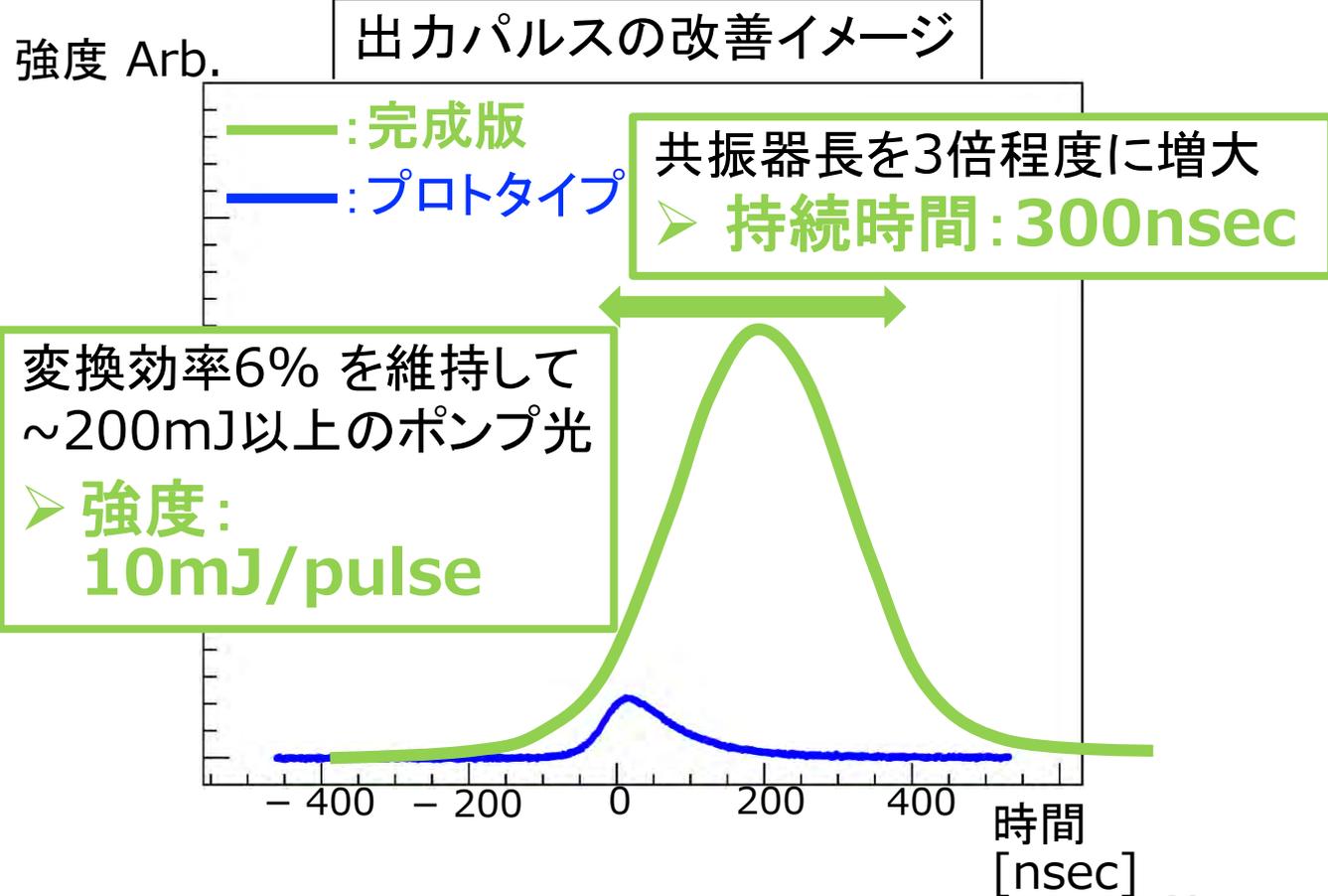
PD

LBO直後
紙に当てたとき



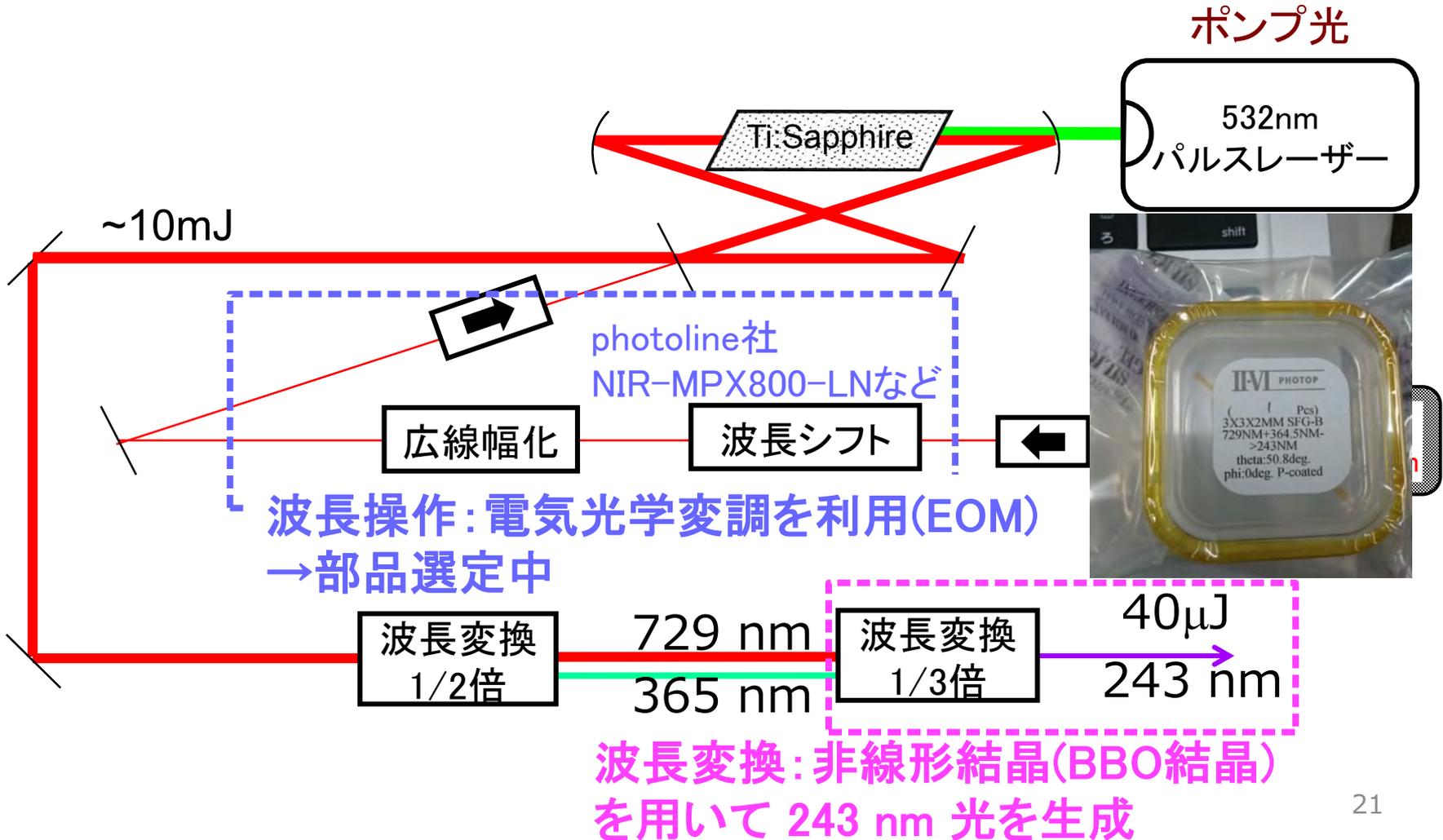
完成版に向けて

- 完成版ではより**強力なポンプレーザー**を導入→**強度の増加**
- セットアップを大型化し、**共振器長を伸ばす**→**持続時間の増大**(出力パルスの時間発展が遅くなる)



今後の展望

- 波長変換に加え、全体の光学系についても設計を進めている



まとめ

- 電子とその反物質である陽電子の束縛系、ポジトロニウム (Ps) のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) 実現を目指している。
- Ps-BEC が実現すれば、反物質重力測定や、511 keV ガンマ線レーザーに用いることができる。
- 冷たいシリカにトラップし、壁との衝突による冷却（熱化）と、レーザー冷却を組み合わせることで Ps-BEC を実現する新しい手法を提案した。
- Ps 冷却用レーザーシステムを開発中。729 nm の CW シード光は完成し、パルス増幅部のプロトタイプが完成した。現在、波長変換部を開発中。
- 今後、波長の変換効率を上げるとともに、広線幅化、波長シフトを電気光学変調で実現するシステムを開発する。また、高パワーポンプ光を用いたシステムを開発する。
- 陽電子ビーム開発を進めるとともに、3～4年後をメドに世界初の反物質レーザー冷却を実現し、Ps-BEC の早期実現を目指す。