

ポジトロニウムのレーザー冷却に向けた陽電子ビームの集束及び時間分解能改善

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、オローラ 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^F、和田 健^F 東大理、^A東大素粒子センター、^B東大工、^C産総研、^D九大 GIC、^E高エネ研、^F量研

ポジトロニウム

ポジトロニウム (Ps)

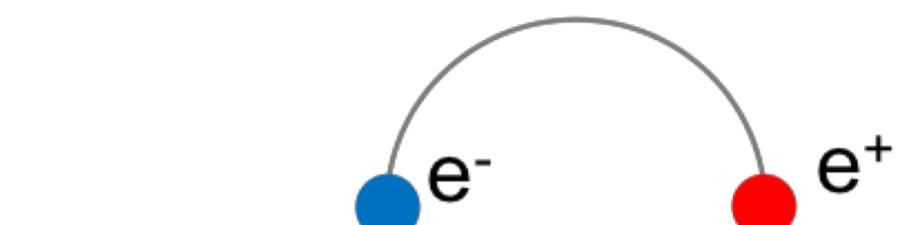
- 電子と陽電子の束縛系
- 水素様原子、純粋なレプトン系

反物質を含むシンプルな系

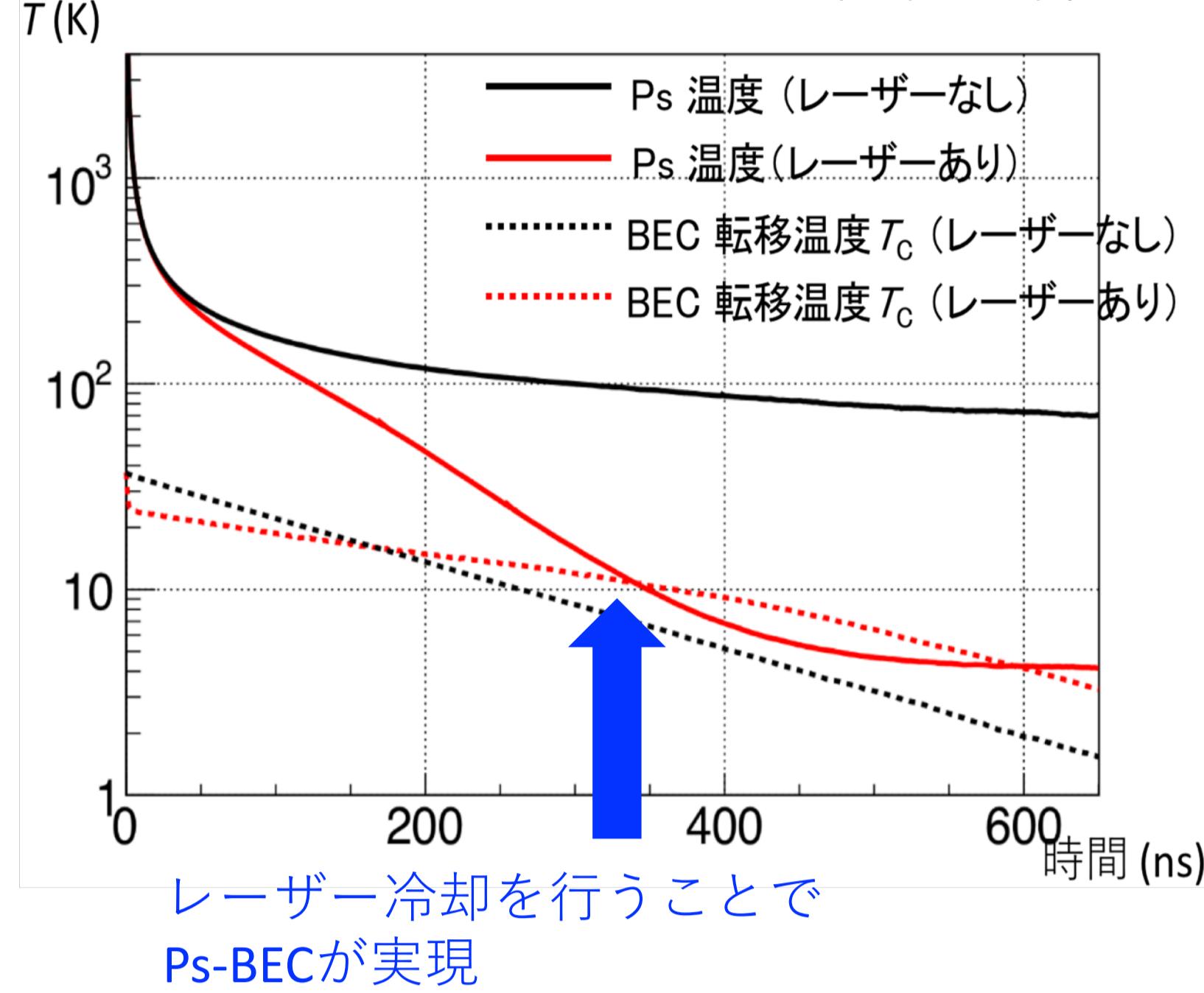
→基礎物理学の検証

→Psのエネルギー準位の精密測定による量子電磁力学の精密検証

ポジトロニウム



シミュレーションによるPs冷却の評価



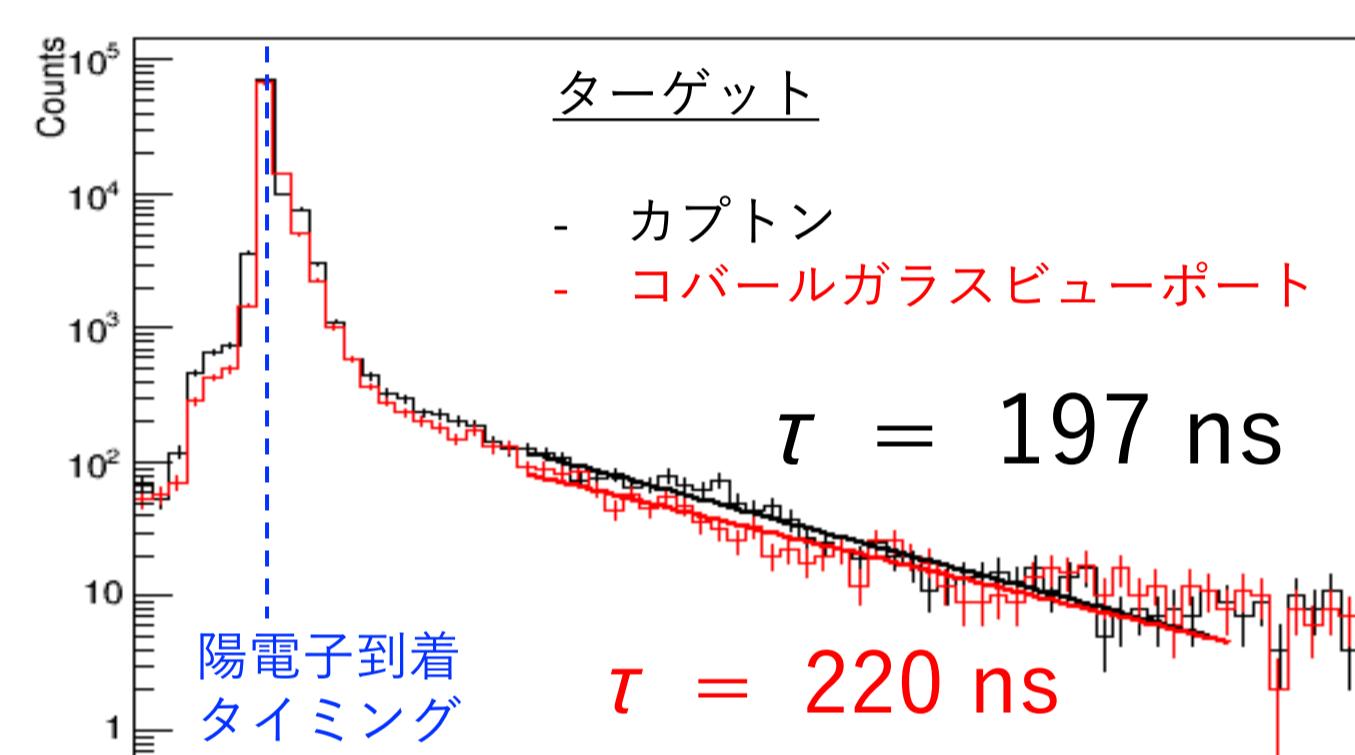
ポジトロニウムのレーザー冷却

- 世界初のPsレーザー冷却
- ドップラー効果の低減
- Psエネルギー準位の超精密測定
- Psのボース・アインシュタイン凝縮(冷却+高密度化)への第一歩
- Psの寿命が142 nsのため高速な冷却が必要
- 熱化(>200Kで高効率)とレーザー冷却(< 200Kで高効率)を組み合わせてPsを高速に冷却する。

2018G100課題: 陽電子ビーム改善①時間分解改善

時間幅の狭い陽電子が必要

- Psは寿命が短いため、効率良い冷却にはPsの瞬間的な生成(~50 ns)の上、高速な冷却(~300ns)が必要
- ポジトロニウムの生成はポジトロニウムの寿命142nsの時定数で崩壊したガンマ線から確認する。陽電子ビームが200nsの時定数の遅い成分を持っていることが判明。紛らわしいバックグラウンドとなるためテール成分を除きたい。
- Psの温度測定もPs崩壊ガンマ線量から測定する。



2018年5月のビームタイムで測定したKEK SPF-B1における陽電子の時間構造(5 keV, 短パルスモード)

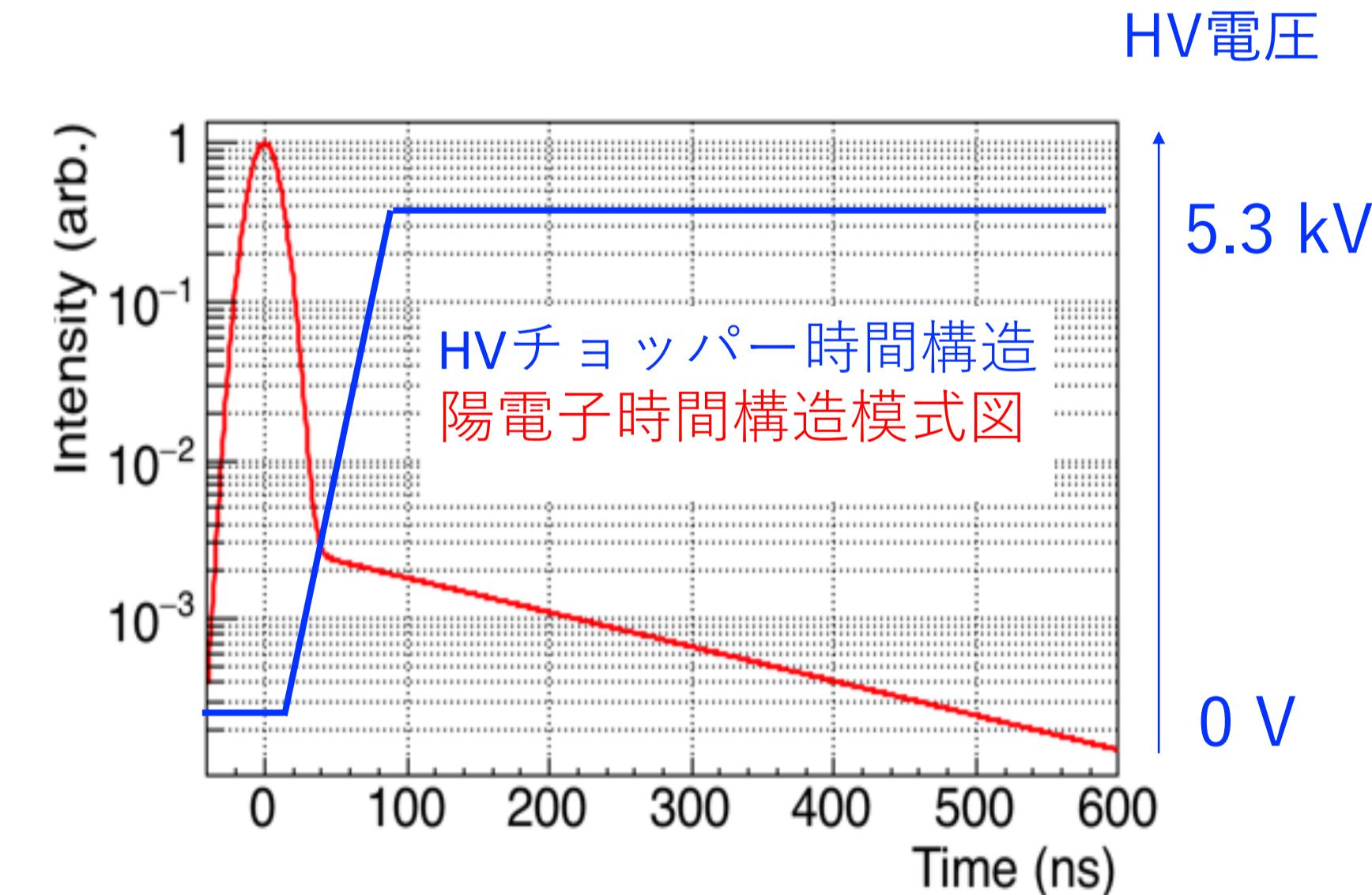
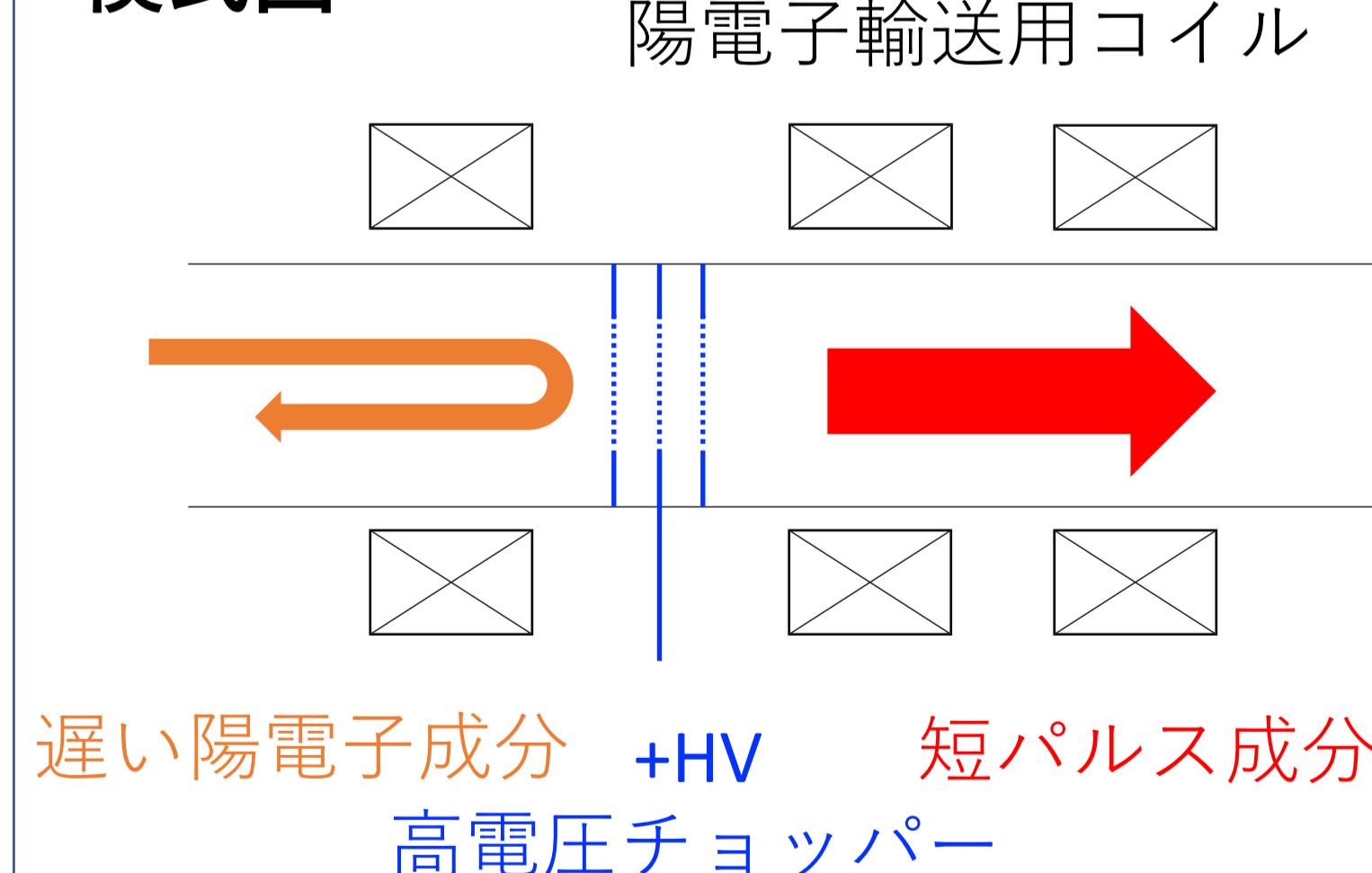
低速陽電子ビームライン KEK-SPF-B1

Energy	0.1–35 keV
Highest Intensity	$10^6 e^+/pulse$
Repetition	50 Hz
Time width	16 ns
Size	$\Phi = 5 \text{ mm}$

方法: 高電圧(HV)チョッパー

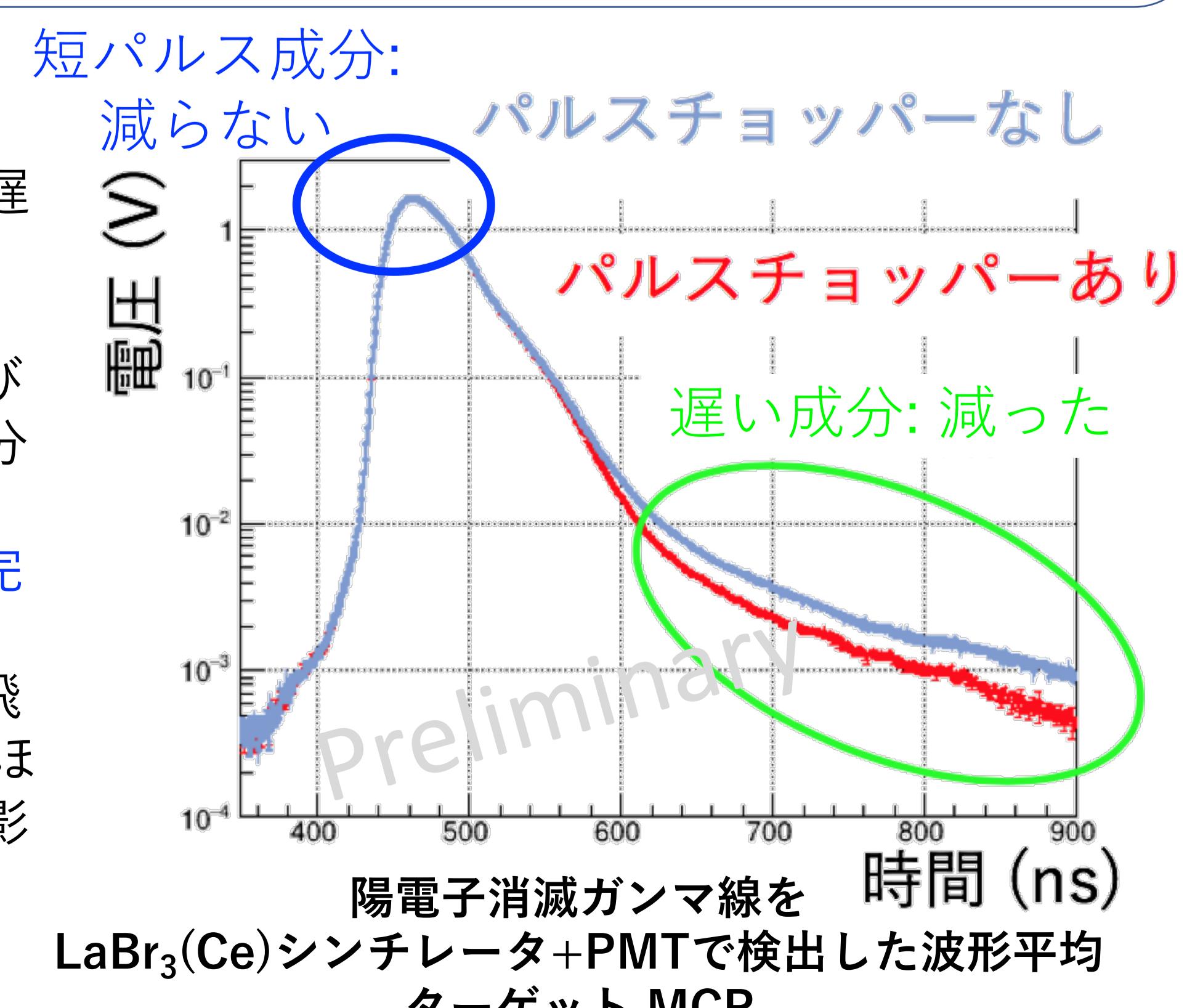
- KEK-SPF 陽電子ビーム 5keV
- 陽電子を5 kVメッシュで運動量の小さい遅い陽電子成分を反射し、短パルス成分のみを取り出す。

模式図



結果

- パルスチョッパーの駆動により遅い成分だけを約7割減らすことに成功
- 残りはサンプルからゆっくり飛び出す陽電子が作っていることが分かった
- ✓ 陽電子ビームの時間構造改善は完了
- ✓ 使用するサンプルではゆっくり飛び出す陽電子成分よりPs成分のほうが主であり、寿命・生成率に影響ないことは確認済み



LaBr₃(Ce)シンチレータ+PMTで検出した波形平均
ターゲット MCP

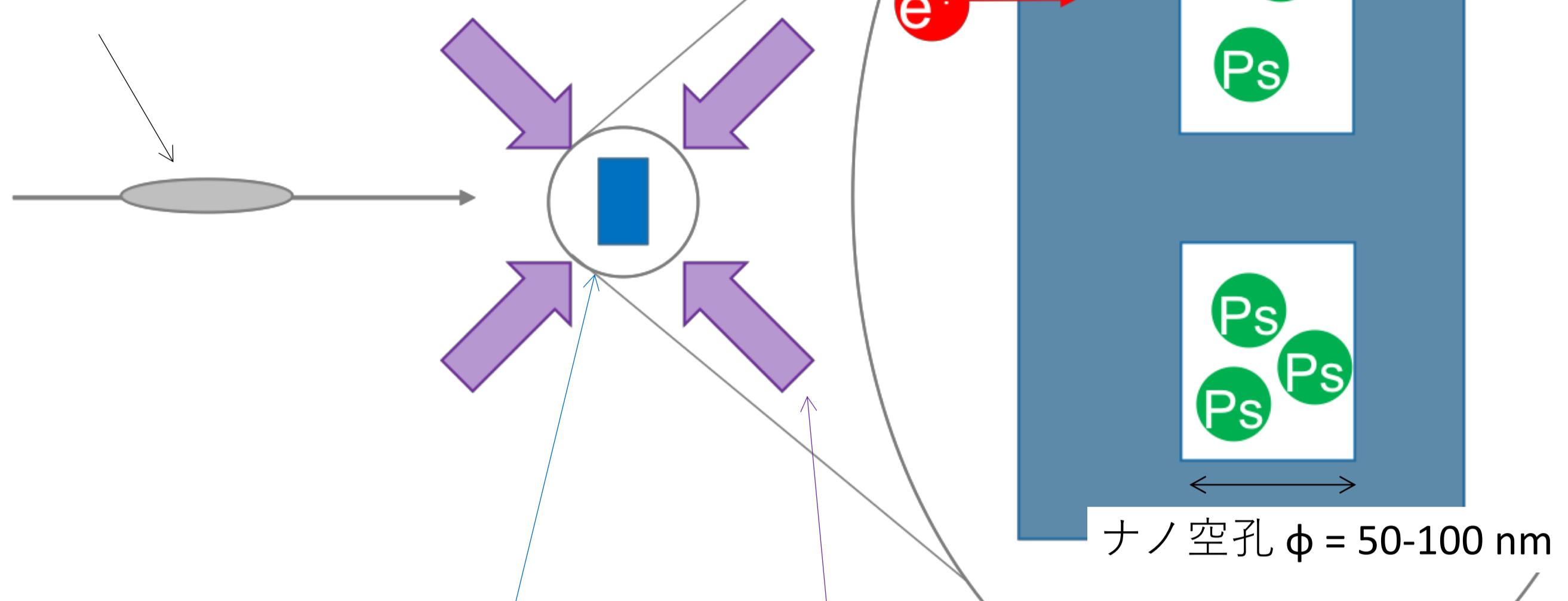
Psレーザー冷却実験 -3つの開発要素-

1. ナノ秒陽電子バンチ

KEK-SPF-B1

$10^6 e^+/pulse, 50\text{Hz}$

来年度に行う冷却実験のためこの陽電子バンチの性能改善を行った



2. Ps 生成、濃縮、冷却材料

シリカエアロゲル(SiO₂)を用いる

生成: Ps変換効率50%

濃縮: Psはナノ空孔に閉じ込められ濃縮

冷却: 材料を冷凍機で4Kまで冷やす。

生成されたPsは材料と相互作用し熱化

冷却レーザーを照射するため243 nmに対して透明

3. Ps 冷却レーザー

Ps 1S-2P遷移(243 nm)を利用。以下の特徴を持つ。

1. 150 GHz広帯域

Psは軽くドップラー広がりが水素原子の30倍

2. 300 nsの長パルス

Psの寿命が142 nsと短いため一つの300 nsパルスで高速冷却する

2018G100課題: 陽電子ビーム改善②集束

集束された陽電子が必要

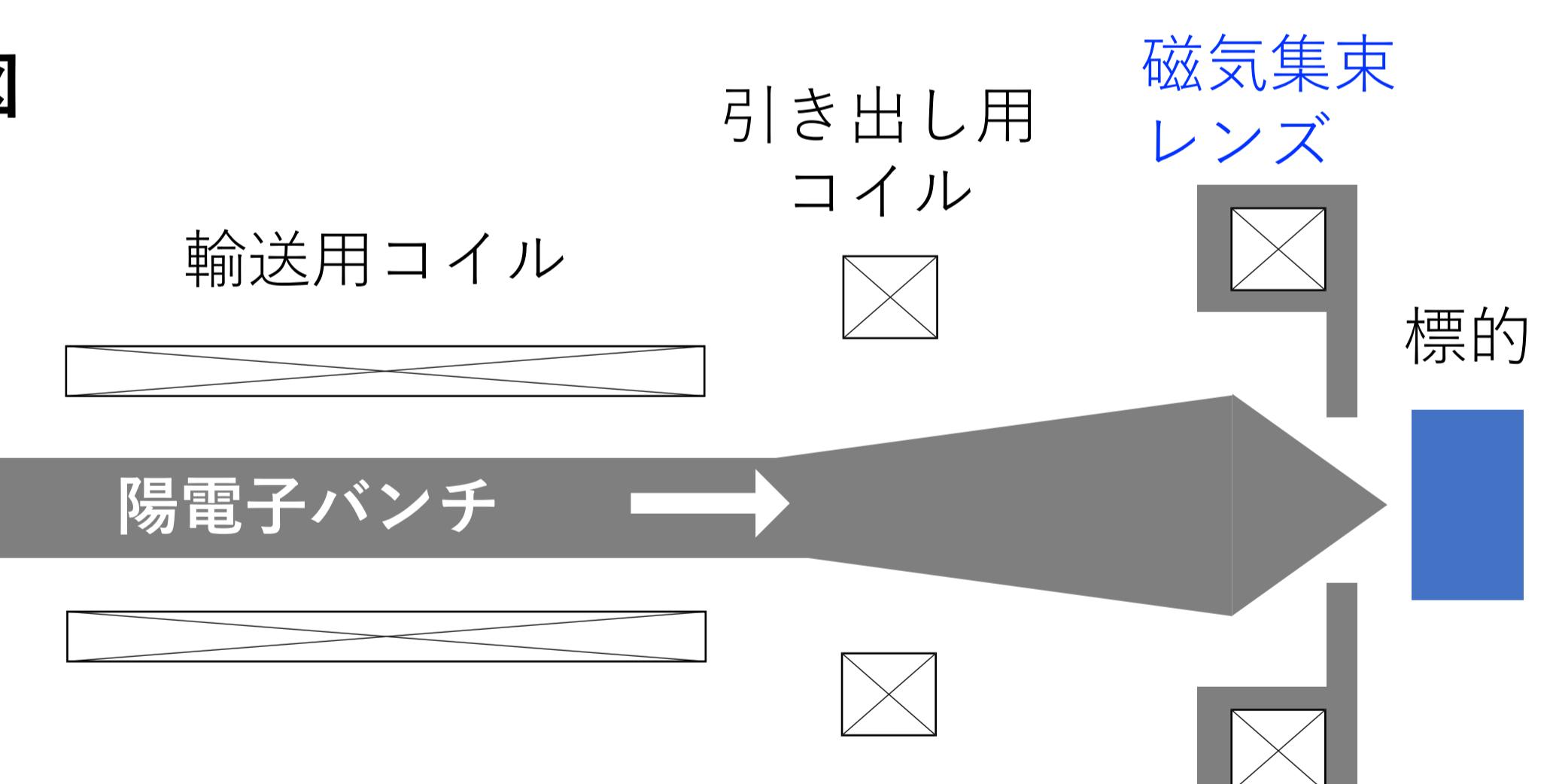
- Psをレーザー冷却(1S-2P遷移を飽和)させるためには十分なレーザーの強度(単位面積あたりのパワー)必要である。陽電子を収束し、レーザーの強度を稼ぐ。

- ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮を目指すにはPsの高密度化は必須。本格的な陽電子集束に向けてテスト

方法: 磁気収束レンズ

- 下図の3種類のコイルを使って陽電子バンチを集束する。コイルに流す電流を調節し、陽電子の集束テストを行った。
- 集束した陽電子をMCPに入射し、MCPをCCDカメラで撮影し陽電子径を評価する。

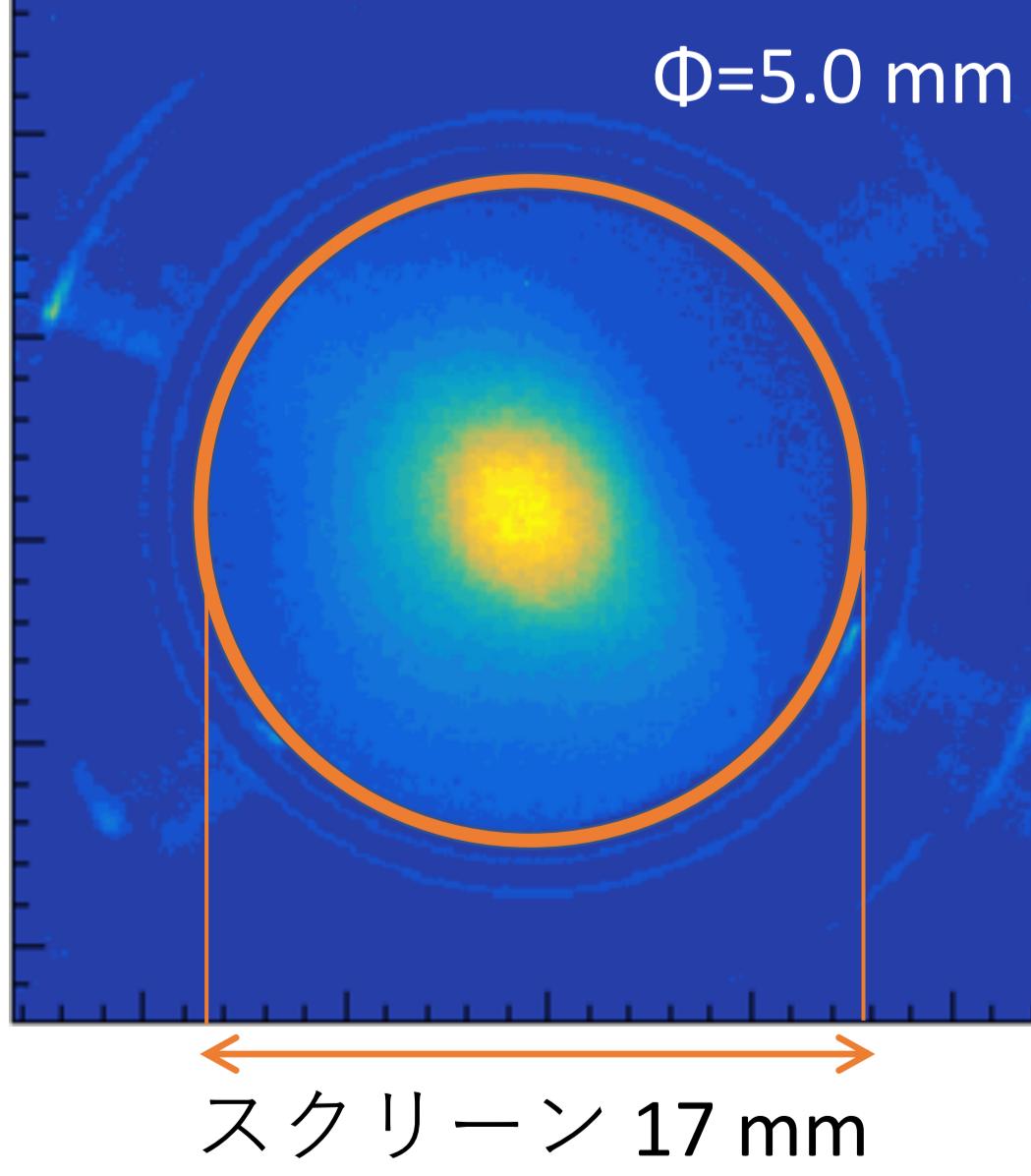
模式図



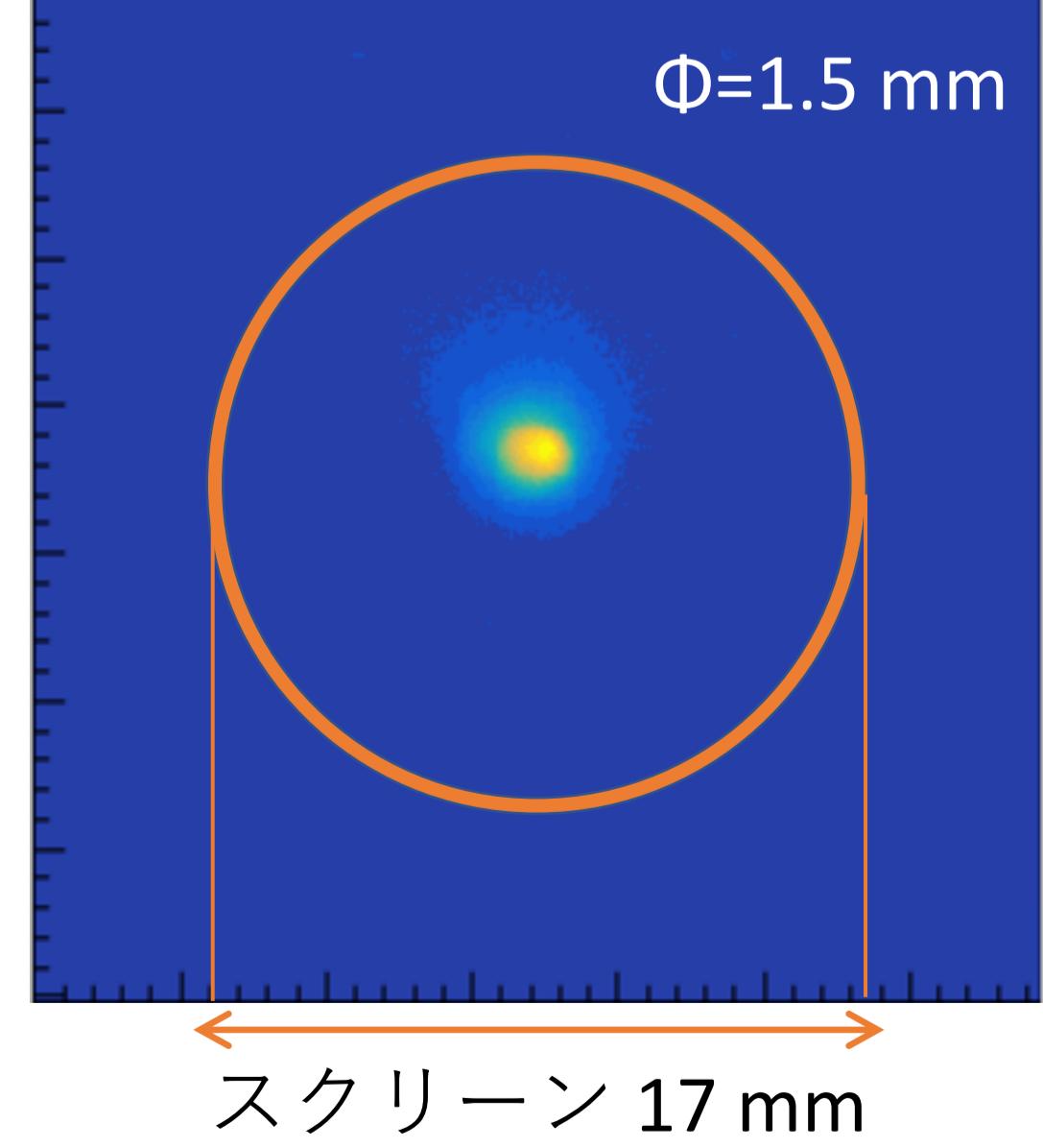
結果

- 陽電子径(FWHM)を $\Phi = 5 \text{ mm} \rightarrow 1.5 \text{ mm}$ に集束することに成功
- Psレーザー冷却に十分な陽電子径が得られた。

集束レンズ導入前



集束レンズ導入後



今後

- 改善された陽電子ビームを用いて、今月1S-2PドップラーフィルターによるPs温度測定実験を行う。
- 2019年中に世界初のPsレーザー冷却実験を行う予定である。