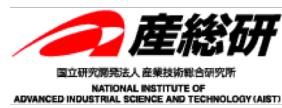


# ボース・アインシュタイン凝縮を 目指したポジトロニウム冷却 I

**周 健治**, 山田 恭平, 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, 東大素セ<sup>A</sup>, 東大工<sup>B</sup>, 産総研<sup>C</sup>, 九大GIC<sup>D</sup>, KEK<sup>E</sup>, 施研機構<sup>F</sup>



日本物理学会第74回年次大会（2019年）  
九州大学

# 反物質でできたレーザーを初めて作って 反物質研究を進めたい

## ボース・AINシュタイン凝縮 (BEC)

- 高密度かつ低温でほとんどすべての粒子が单一量子状態を占める
- 粒子でできたレーザー、コヒーレンスがある
  - ◆ まだ誰も反物質で作ったことがない

反物質BECを初めて実現し、  
反物質BECでしかできない実験を通して、  
反物質の謎を解明したい！

# BEC実現に 使う反物質はポジトロニウム

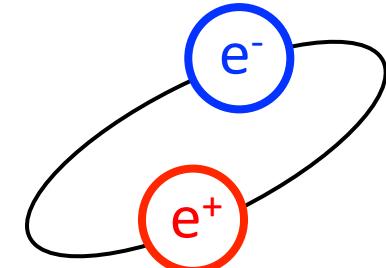
われわれはポジトロニウム (Ps)を使う  
電子と陽電子でできた束縛系

## BEC実現からみた良いところ

- 他の反物質より簡単 & たくさん作れる
- 質量が小さいためBEC臨界温度が高い

$$T < T_C = \frac{h^2}{2\pi m k_B} \left( \frac{n}{\zeta(\frac{3}{2})} \right)^{\frac{2}{3}}$$

BECには高密度・低温が必要だが  
Psなら条件がゆるい



ポジトロニウム (Ps)

## ➤ 反物質BECの最も良い候補

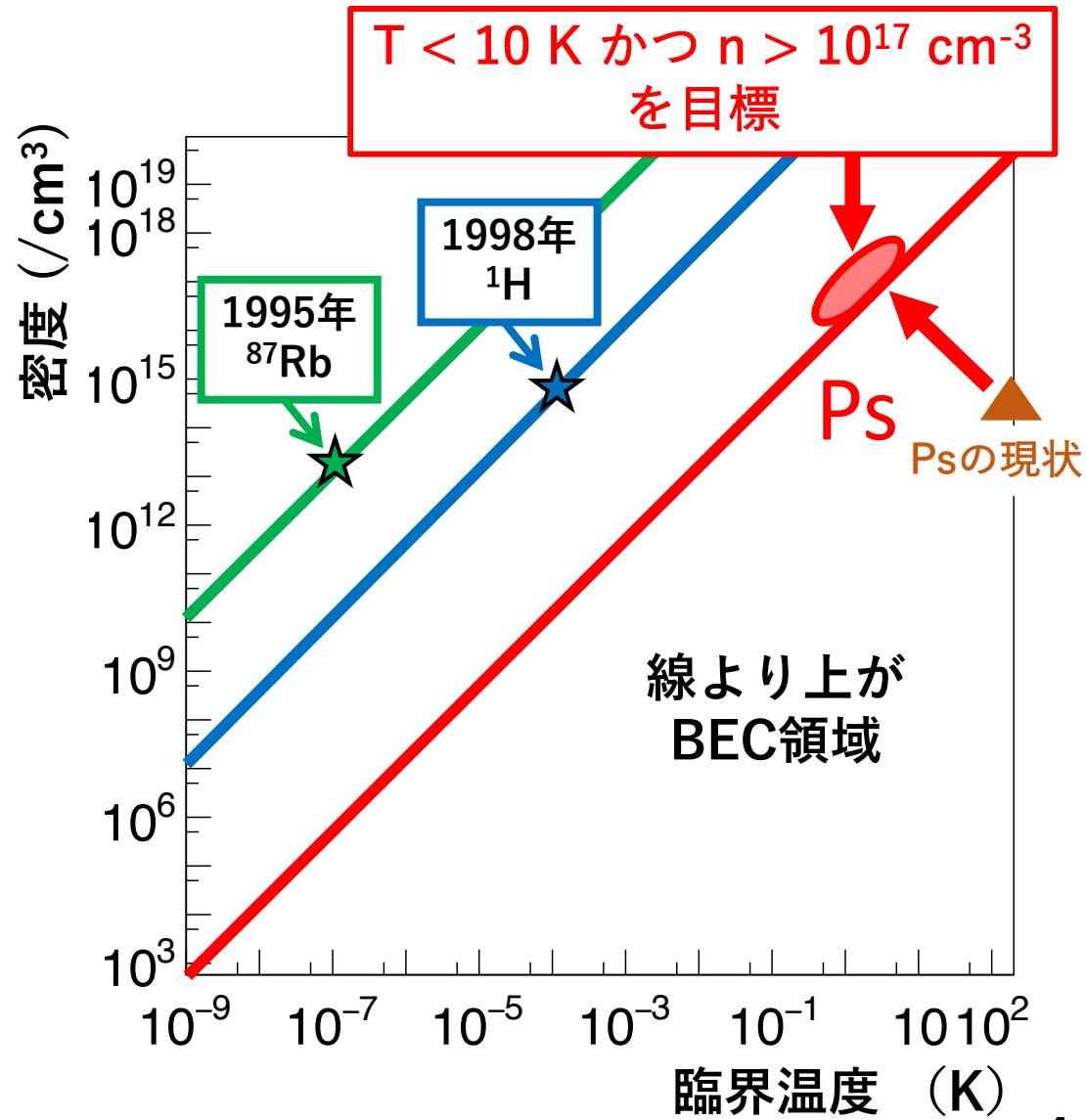
Ps-BECができれば、

- 原子干渉計で反物質にはたらく重力効果測定
- 511 keVガンマ線レーザーの実現による非破壊検査の高度化

# それでも、とても難しい

最大の問題は  
Psの寿命が短いこと  
( $\alpha$ -Psで142 ns)

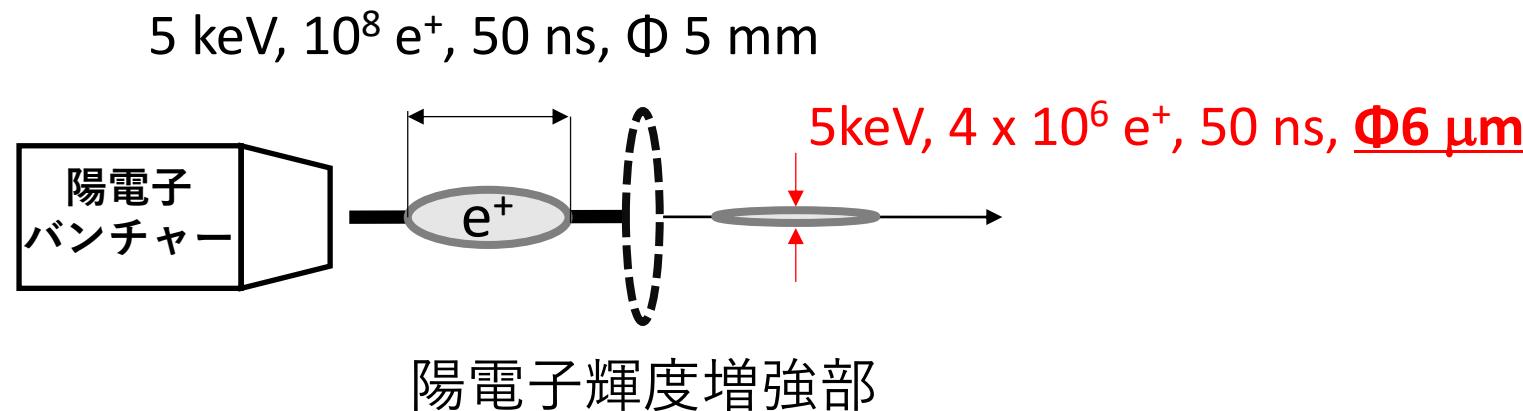
- この間に高密度化・高速冷却するのはとても難しく、現状の世界記録は密度、温度とも1~2桁足りない
- 新しい方法を考えた



# 多段陽電子集束と空孔中レーザー冷却で Ps-BEC実現

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

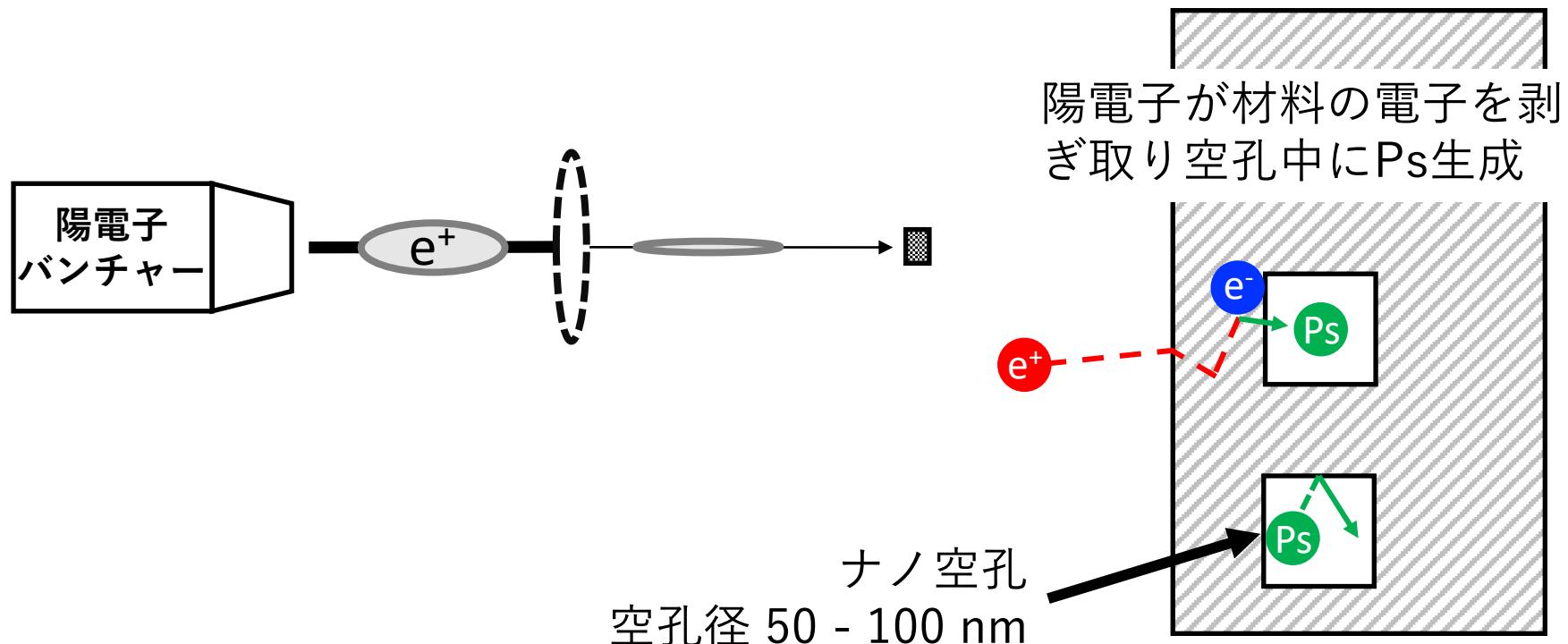
## 1. 50 nsバンチ陽電子を多段集束し高密度化する



# 多段陽電子集束と空孔中レーザー冷却で Ps-BEC実現

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

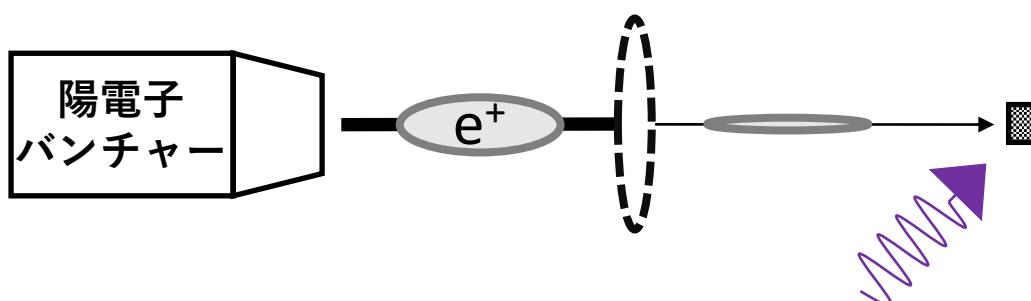
## 2. 多孔体に陽電子を打ち込み、高密度Psに変換する



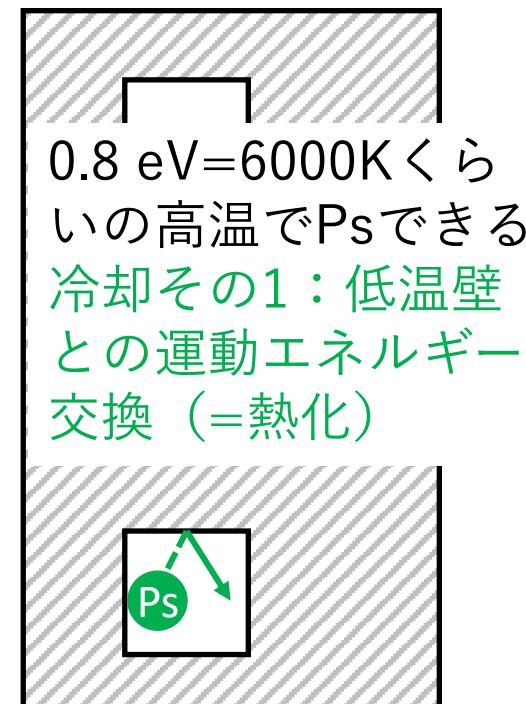
# 多段陽電子集束と空孔中レーザー冷却で Ps-BEC実現

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

## 3. 低温の壁との衝突とレーザー冷却を組み合わせて高速冷却



冷却その2：レーザー冷却  
Ps冷却に最適化した  
243 nm 紫外パルスレーザー

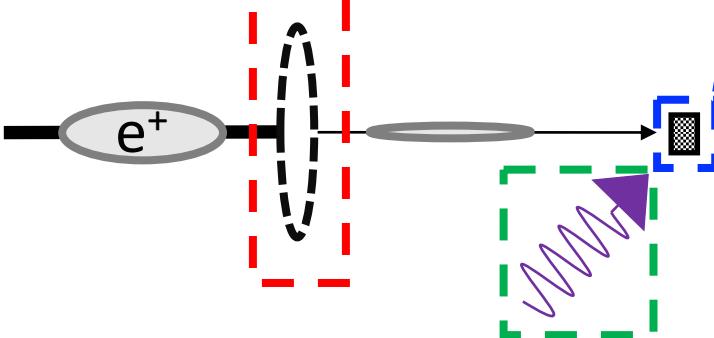


低温 4 K にする

# 3つの技術が必要

## 1. 陽電子集束システム

次の人（橋立）



## 2. Ps生成 & トラップ材料

私

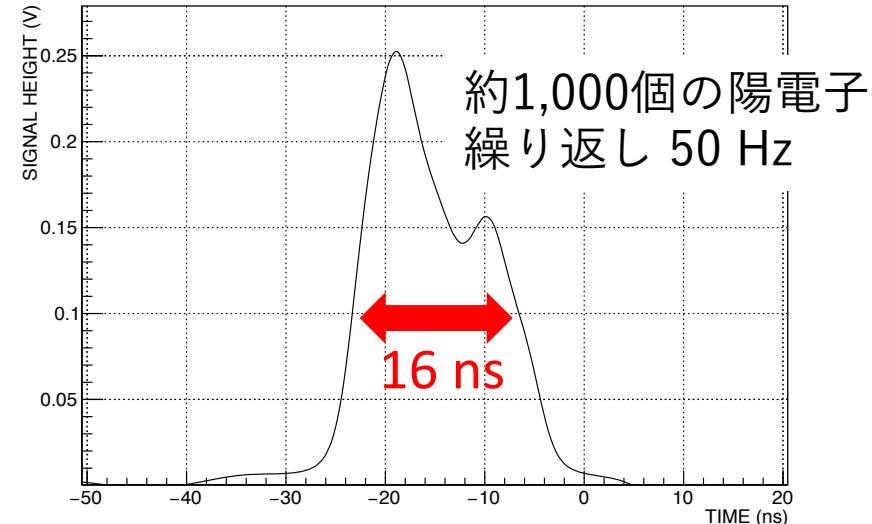
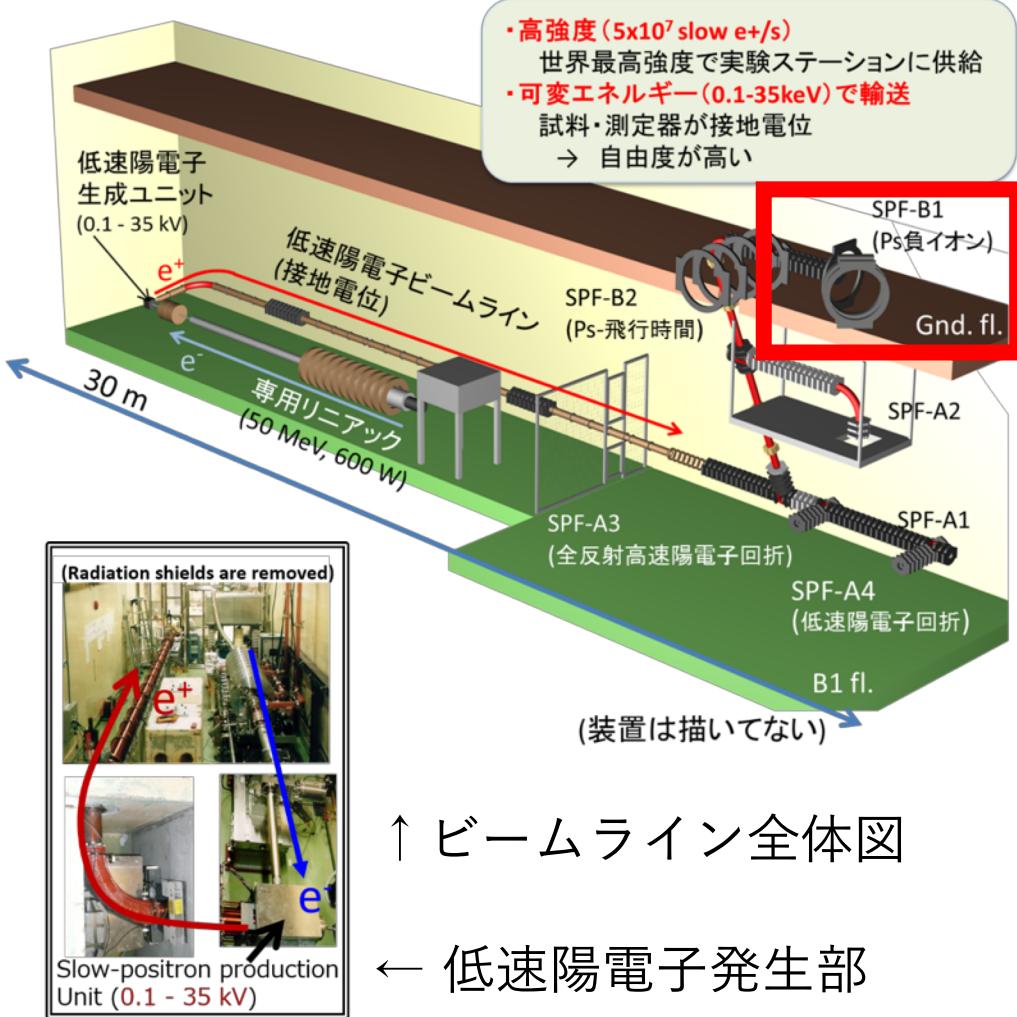
## 3. Ps冷却用レーザー光源

次の次の人（山田）

いずれも新しいチャレンジがあり、開発中

3つの技術を組み合わせ、まずはレーザー冷却実現に取り組んでいる  
BECはもちろん、低温Psを使った精密測定による基礎物理検証も可能

# Psレーザー冷却実験を KEK低速陽電子施設で行っている



実際に取得した  
陽電子の時間波形

レーザー冷却にはパルスレーザーを用いる（詳細は山田トーク）

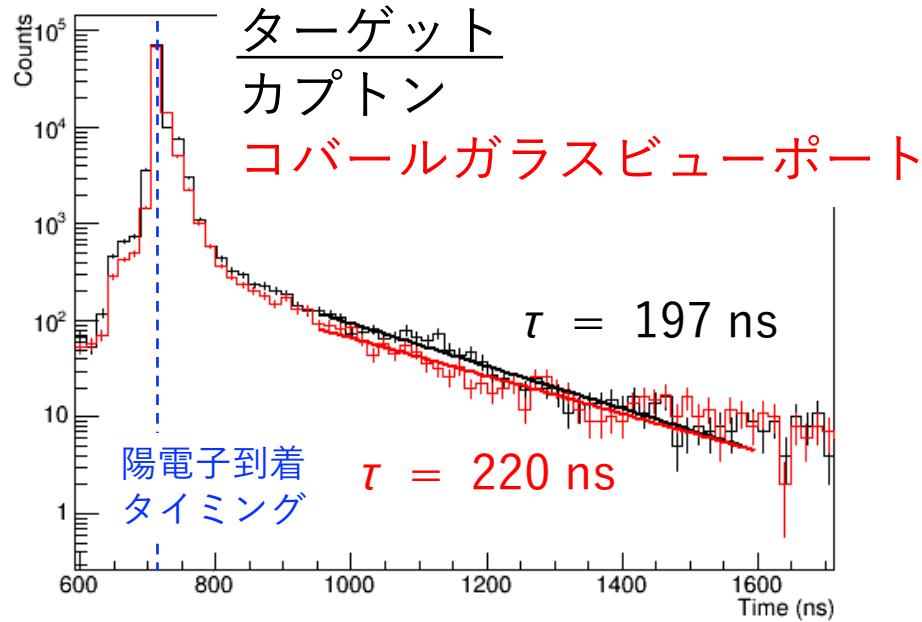
レーザーと同期した  
短パルス陽電子が必要

# Psレーザー冷却実現に向けた ビーム改善・材料開発・レーザー開発

1. レーザー冷却実験に向けた陽電子の性質最適化
  - a. 時間プロファイル – 邪魔になる遅い成分をなくす
  - b. 空間プロファイル – 集束して陽電子とレーザーとを重ねる  
次のトーケ（橋立）
2. 空孔内にPsを閉じ込め、かつ高い紫外光透過率を持つことで  
Psレーザー冷却を可能とする材料開発  
(前の物理学会で発表、シリカエアロゲル+CVD膜)
3. 冷却用レーザー開発【次の次のトーケ（山田）】

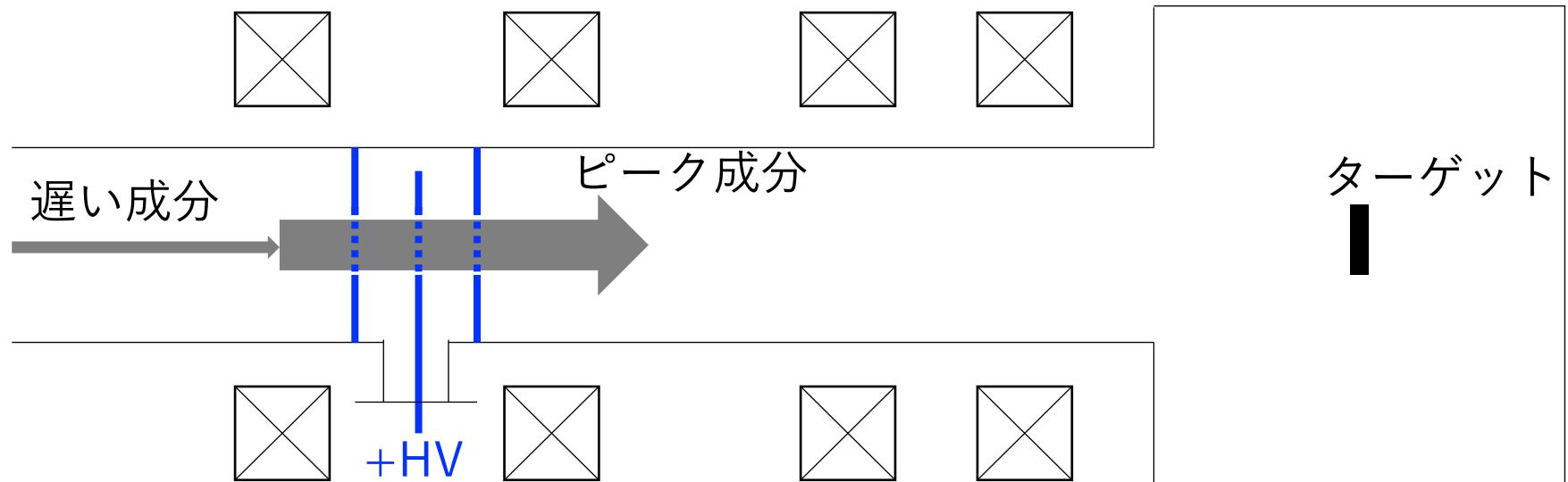
# 陽電子時間プロファイルの改善 遅い成分が問題

- 16 nsの短パルスの後、約200 nsの時定数をもつ遅い陽電子成分があることが分かった
- Psが生成されたは、140 nsの寿命で崩壊したガンマ線を検出することで確認。また、Psの温度も崩壊ガンマ線量から測定。
- 遅い陽電子成分は 紛らわしいバックグラウンドになる

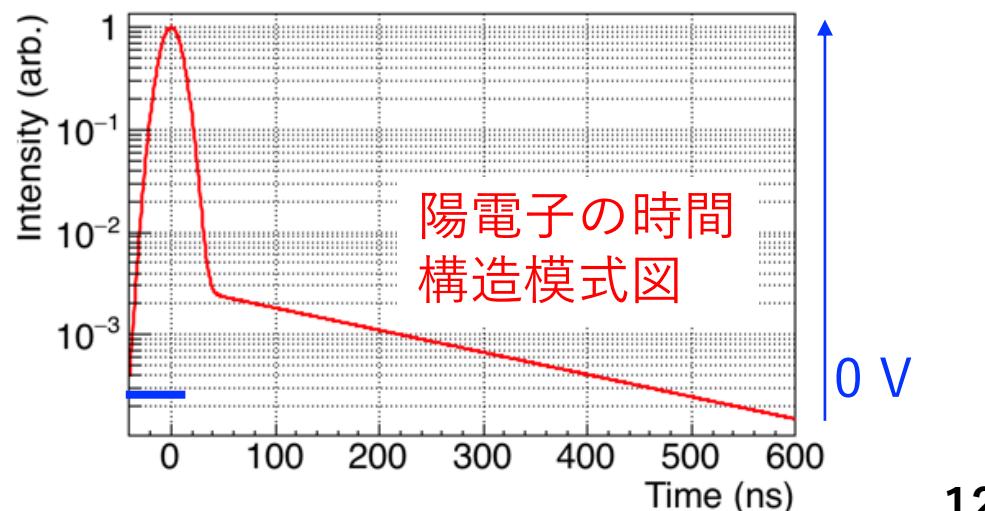


2018年5月のビームタイムで測定した  
5 keV陽電子 崩壊ガンマ線の  
タイミングスペクトル

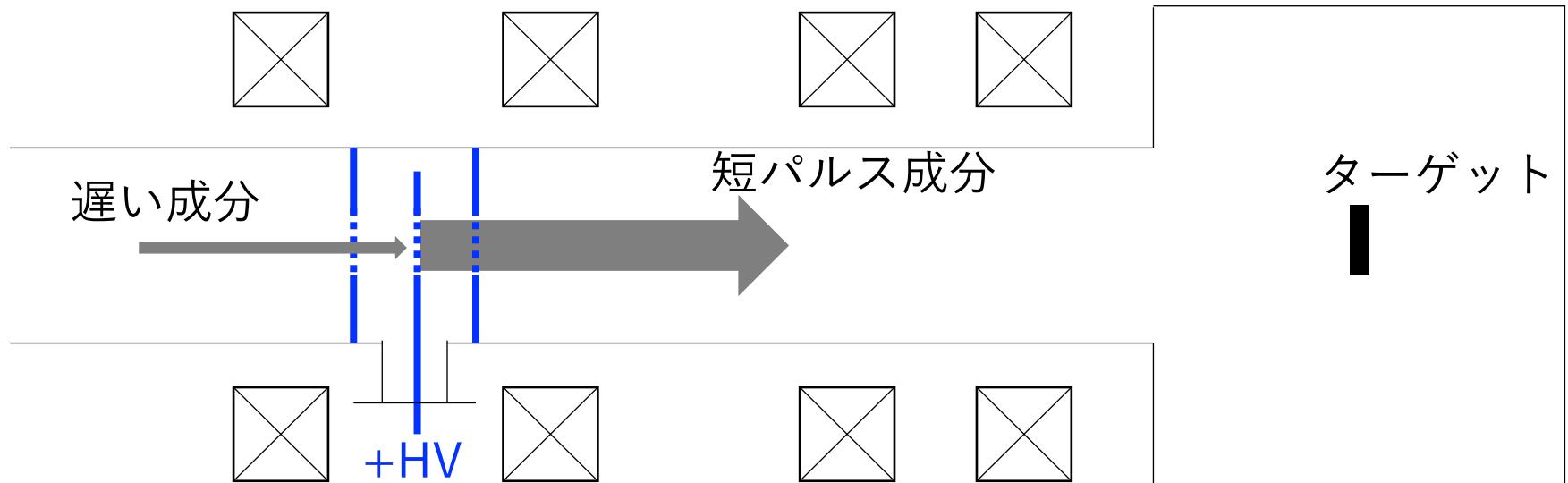
# 高電圧パルスチョッパーで遅い成分をおとす



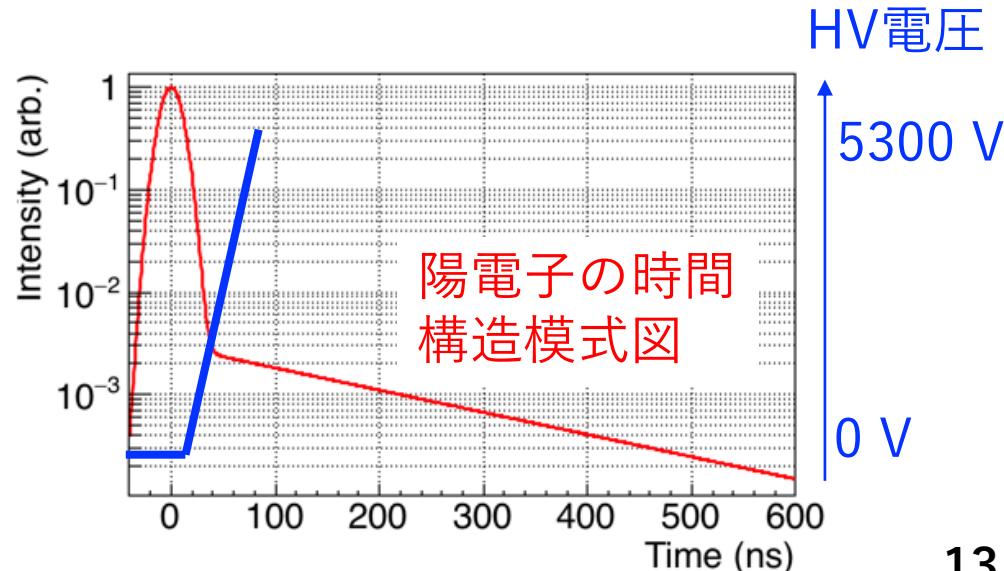
1. 短パルス成分を通過させる



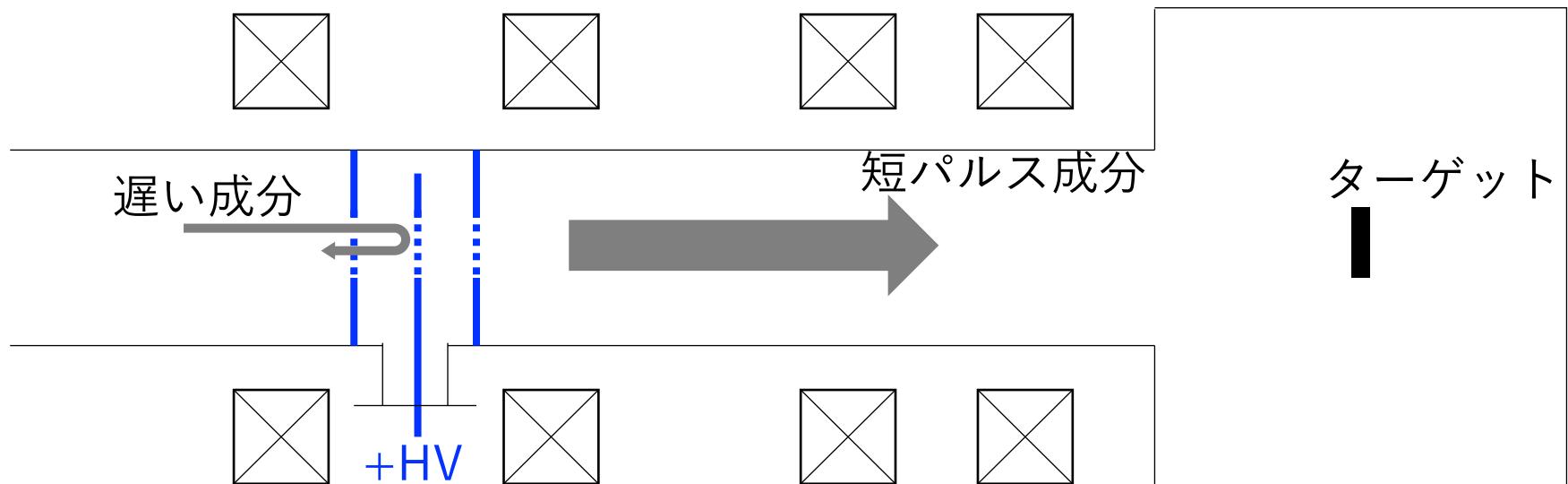
# 高電圧パルスチョッパーで遅い成分をおとす



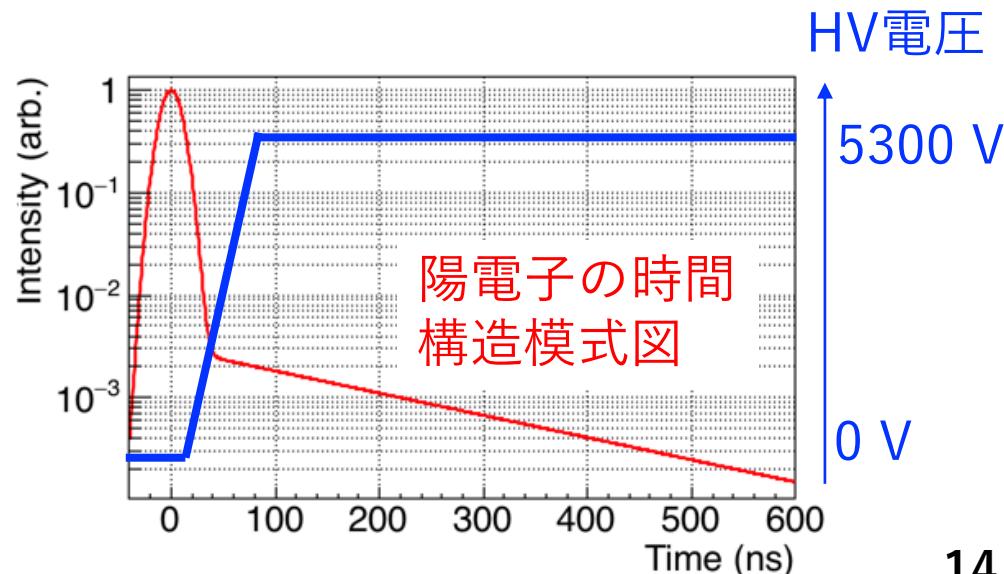
1. 短パルス成分を通過させる
2. パルス的に高電圧をかける



# 高電圧パルスチョッパーで遅い成分をおとす



1. 短パルス成分を通過させる
2. パルス的に高電圧をかける
3. 遅い成分が反射され  
短パルス成分のみ得られる



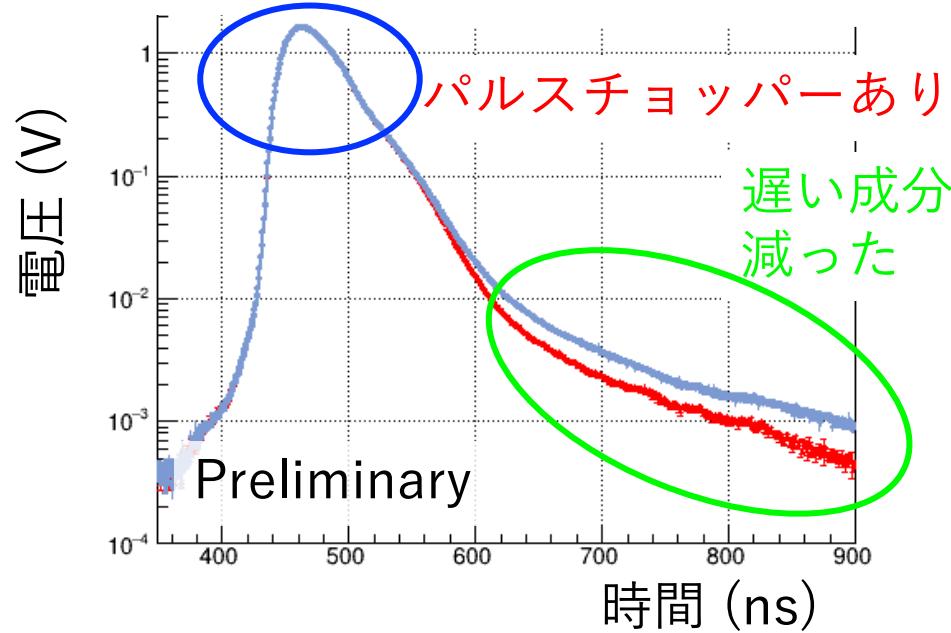
# 上流から来る遅い陽電子を なくすことができた

- パルスチョッパーの駆動により、邪魔な遅い成分だけを約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、遅い成分のターゲット依存性・エネルギースペクトルなどから分かった
- 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

短パルス成分

減らない

パルスチョッパーなし



陽電子消滅ガンマ線を $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレータ+PMTで検出した波形平均  
ターゲット MCP のとき

# まとめ

- 物質・反物質非対称性の検証やガンマ線レーザーの開発を目指し、初の反物質BECをPsで実現することに取り組んでいる。必要なPs高密度化・冷却は、温度10 K以下、密度 $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上である。
- Psの高密度化・冷却のために、多段陽電子集束と空孔中レーザー冷却を用いた新しい手法を提案し、各要素の開発を進めている。
- Ps-BEC実現の鍵となるレーザー冷却実験に取り組んでいる。
- Psの生成確認や温度測定に邪魔なバックグラウンドとなる遅い陽電子成分を除去するために、高電圧パルスチョッパーを導入、遅い成分を7割減少することに成功した。