

# ボース・アインシュタイン凝縮実現を目指した ポジトロニウム冷却 II

周 健治<sup>1</sup>, 山田 恭平<sup>1</sup>, 橋立 佳央理<sup>1</sup>, 石田 明<sup>1</sup>, 難波 俊雄<sup>2</sup>,  
浅井 祥仁<sup>1</sup>, 五神 真<sup>1</sup>, 田島 陽平<sup>3</sup>, 蔡 恩美<sup>3</sup>, 吉岡 孝高<sup>3</sup>, 大島 永康<sup>4</sup>,  
オローク ブライアン<sup>4</sup>, 満汐 孝治<sup>4</sup>, 伊藤 賢志<sup>4</sup>, 熊谷 和博<sup>4</sup>,  
鈴木 良一<sup>4</sup>, 藤野 茂<sup>5</sup>, 兵頭 俊夫<sup>6</sup>, 望月 出海<sup>6</sup>, 和田 健<sup>7</sup>, 甲斐健師<sup>8</sup>  
東大理<sup>1</sup>, 東大素セ<sup>2</sup>, 東大工<sup>3</sup>, 産総研<sup>4</sup>, 九大GIC<sup>5</sup>, KEK<sup>6</sup>, 量研<sup>7</sup>, 原子力機構<sup>8</sup>



日本物理学会 2019年秋季大会  
山形大学小白川キャンパス

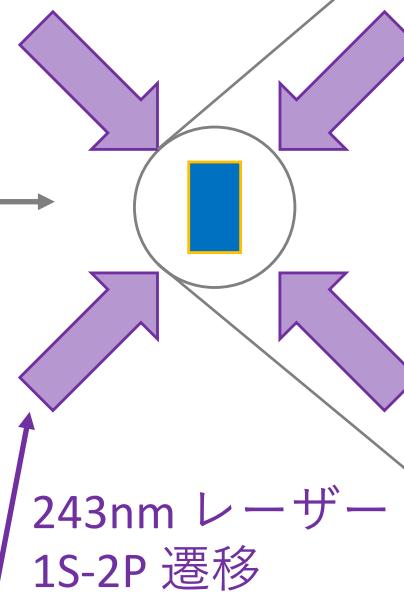
# 冷却の鍵は空孔に閉じ込めた Psを2P状態にすること

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

陽電子  
バンチャ

φ=6 μmまで収束

1. 陽電子収束システム

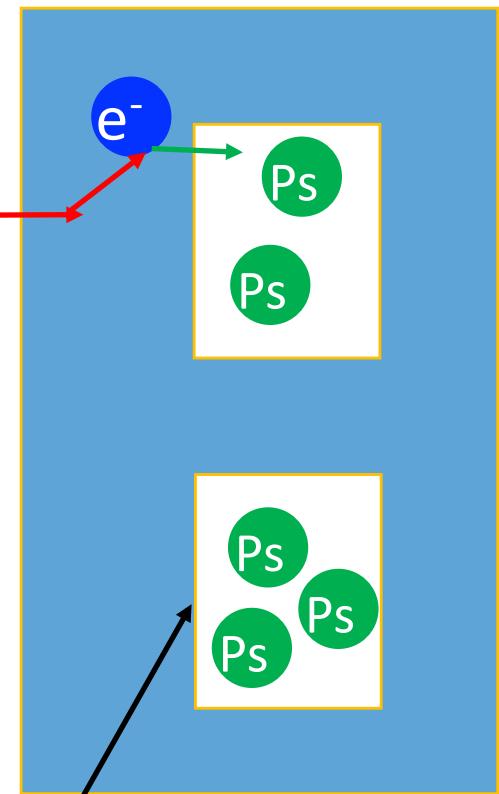


3. Ps冷却レーザー

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

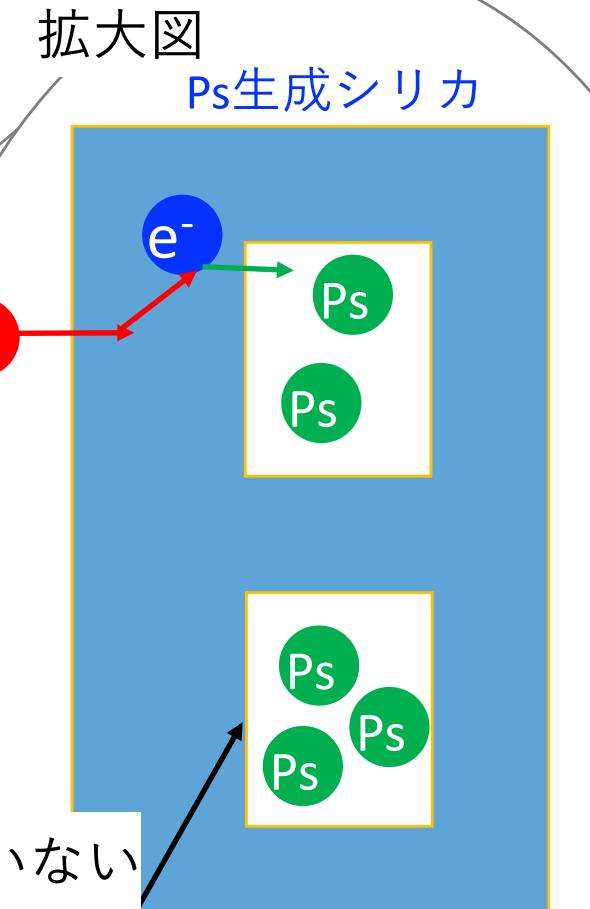
Ps生成シリカ



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

# シリカ空孔中のPsに 紫外レーザー照射実験を行った



物質に囲まれた中で2P状態の振る舞いは良く分かっていない

## ナノポーラスシリカを用いた過去の報告

遷移周波数がシフトし、幅が狭い D. B. Cassidy et al. PRL 106, 023401 (2011).

2P状態の消滅率が高く、遷移幅が広い B. S. Cooper et al. PRB 97, 205302 (2018).

- これらの現象が生じるとレーザー冷却が難しい。  
性質の良いシリカ材料を製作し空孔中で2P状態へ励起する実験を行った

# シリカエアロゲルの表面に緻密なシリカ層を プラズマCVDで成膜したサンプルを シリカキャビティとして使用

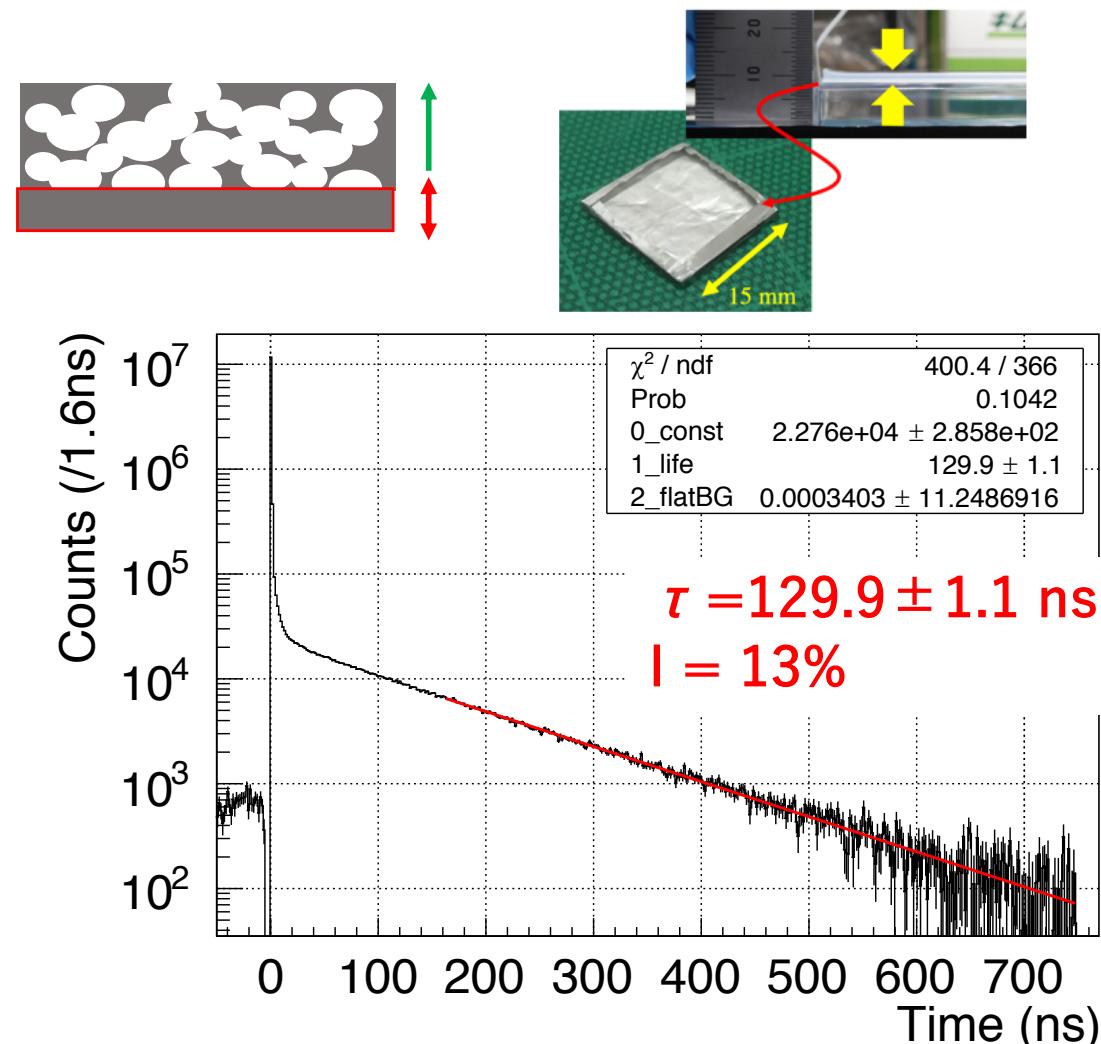
エアロゲル

密度  $0.1 \text{ g cm}^{-3}$   
空孔径  $50 \text{ nm}$

CVD膜厚  $75 \text{ nm}$

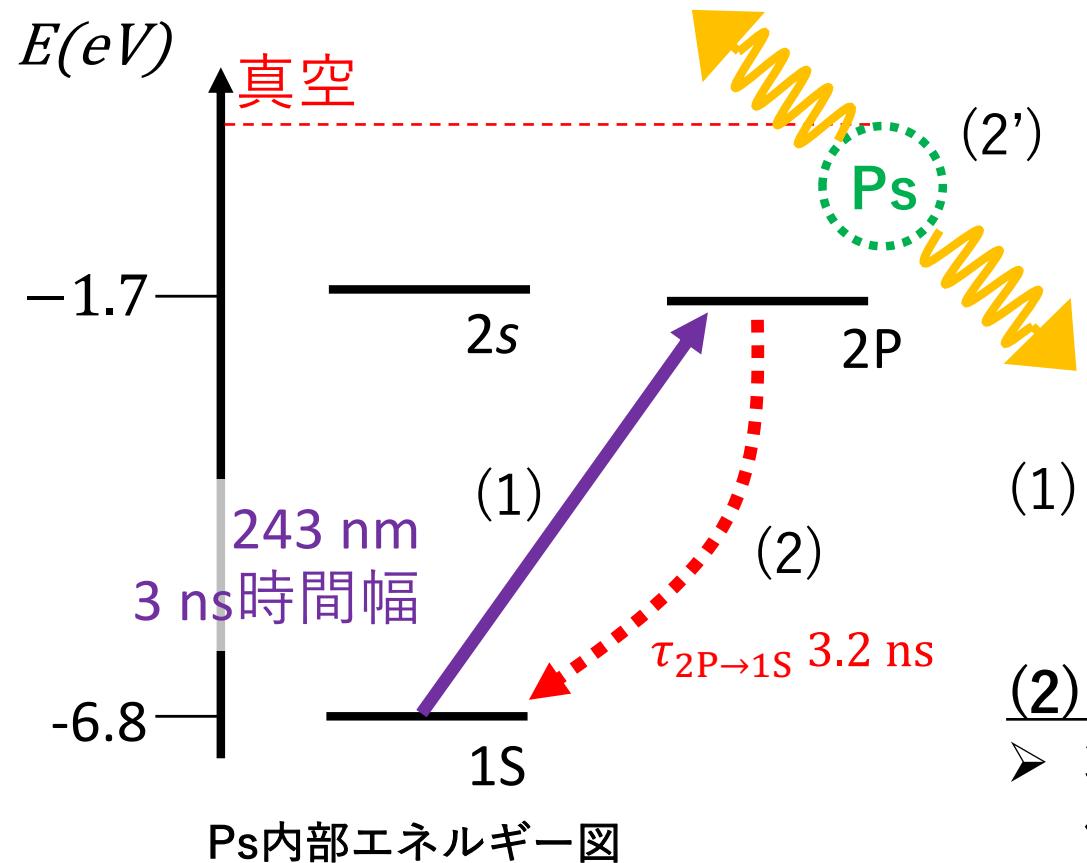
シリカエアロゲルに  $^{22}\text{Na}$  のベータ崩壊で出てきた陽電子を入射し  
Psの寿命・生成率を調べた

- $50 \text{ nm}$ の空孔に閉じ込めたとき  
期待される寿命が得られた
  - 高いPs生成率  
(止まった陽電子のうち50%)
- 期待通り、空孔中に飛び出した  $\alpha$ -Psが得られている



崩壊ガンマ線のタイミングスペクトル

# 243 nm, 3 ns幅の紫外レーザーで 2P状態に遷移させてみた

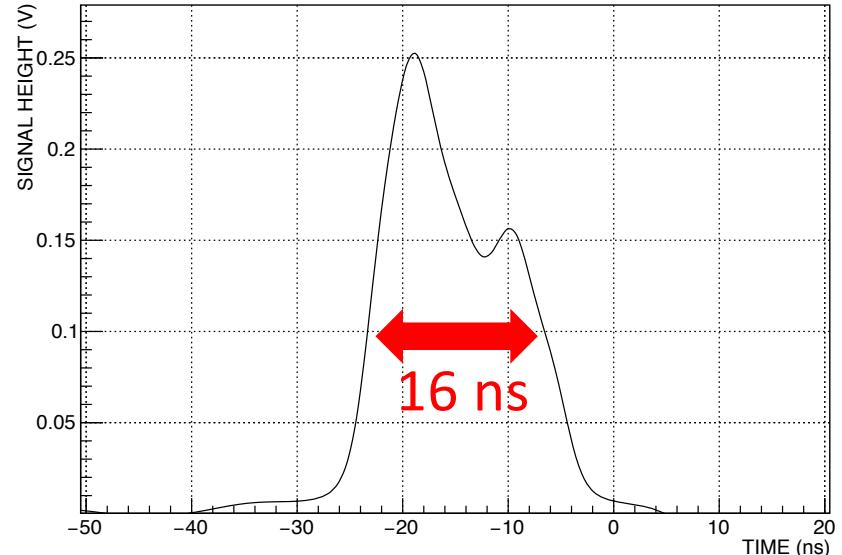
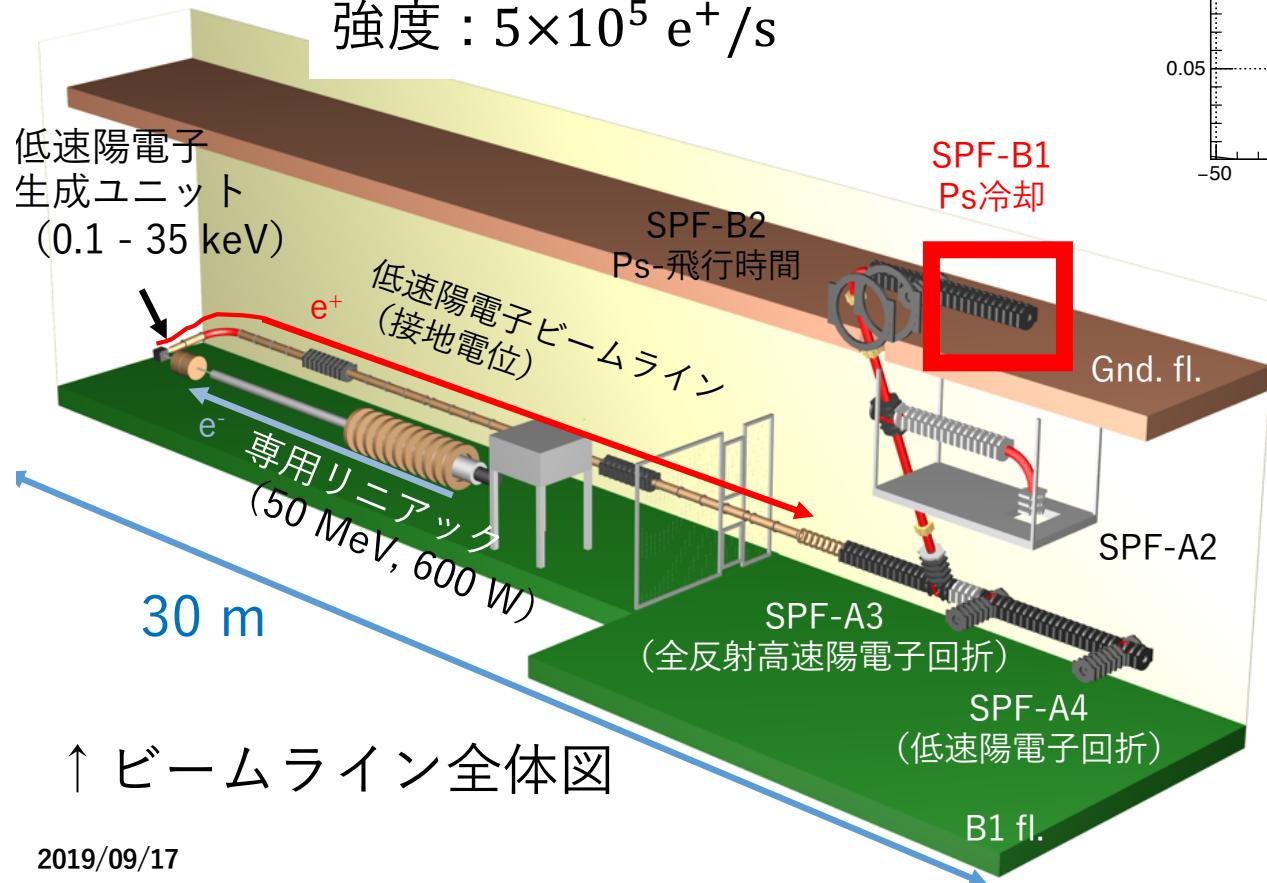


- (1) 243 nmの紫外レーザーを当て2P状態に遷移する
- (2) 何も悪い効果起きず期待通りなら**
  - 3.2 nsの時定数で1S状態に戻り、何も起きなかったように見える
- (2') 先行研究のように2Pの寿命が物質中で短いなら**
  - ガンマ線崩壊量が増える

# KEK低速陽電子施設にてパルスレーザーと同期した短パルス陽電子を得る

## 実験に使用したパラメータ

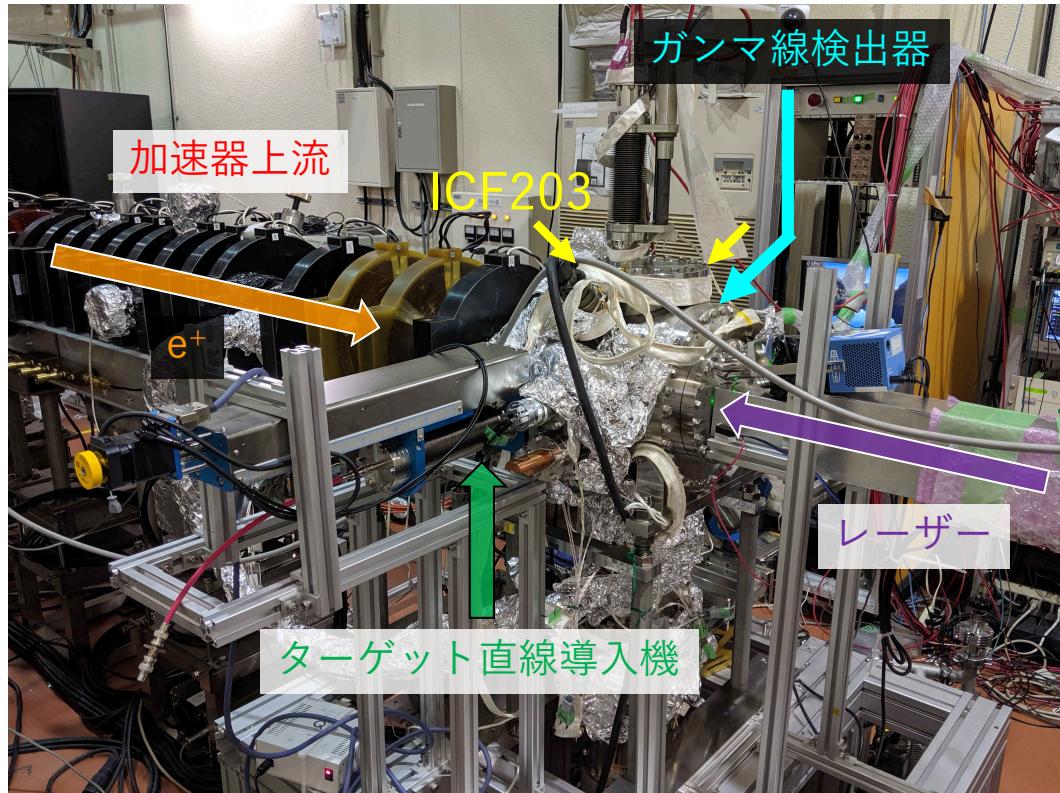
エネルギー : 5 keV  
強度 :  $5 \times 10^5 e^+ / s$



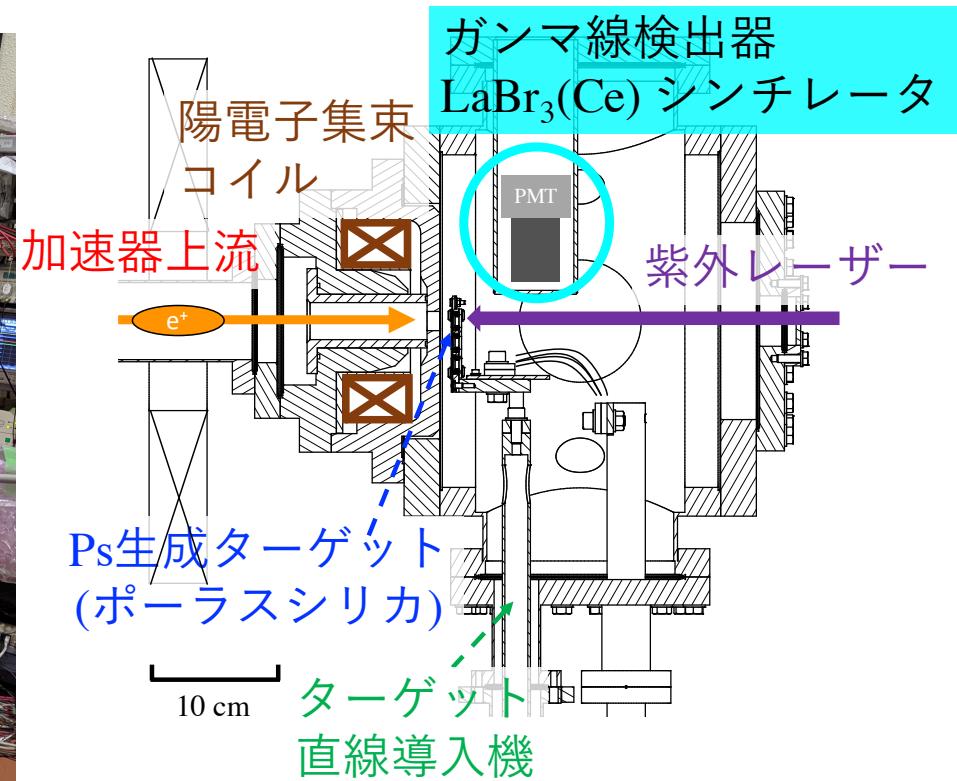
## 実際に取得した 陽電子の時間波形

- 約10,000個の陽電子
- 繰り返し 50 Hz  
で得られる
- 陽電子に同期して紫  
外レーザーを照射

# 陽電子と紫外レーザーを シリカエアロゲルに照射するシステムを構築



B1ビームラインの様子



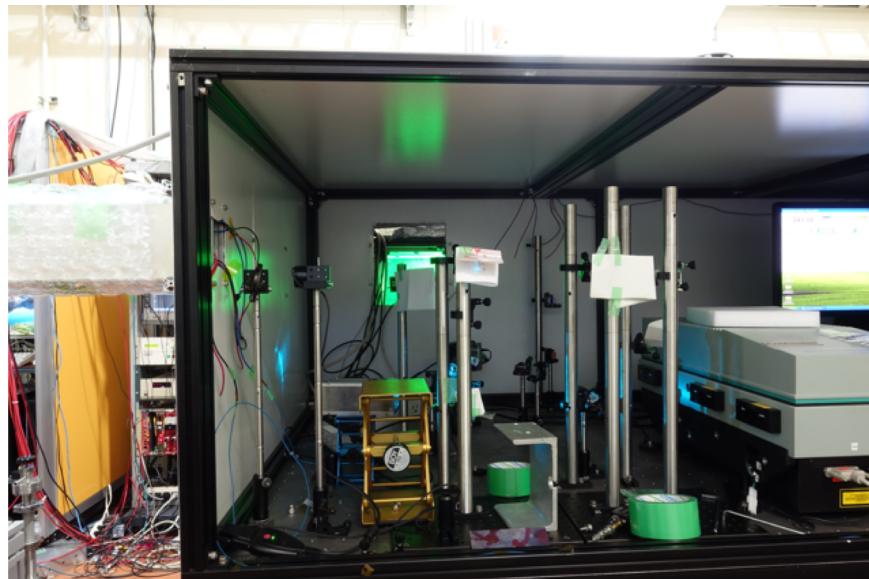
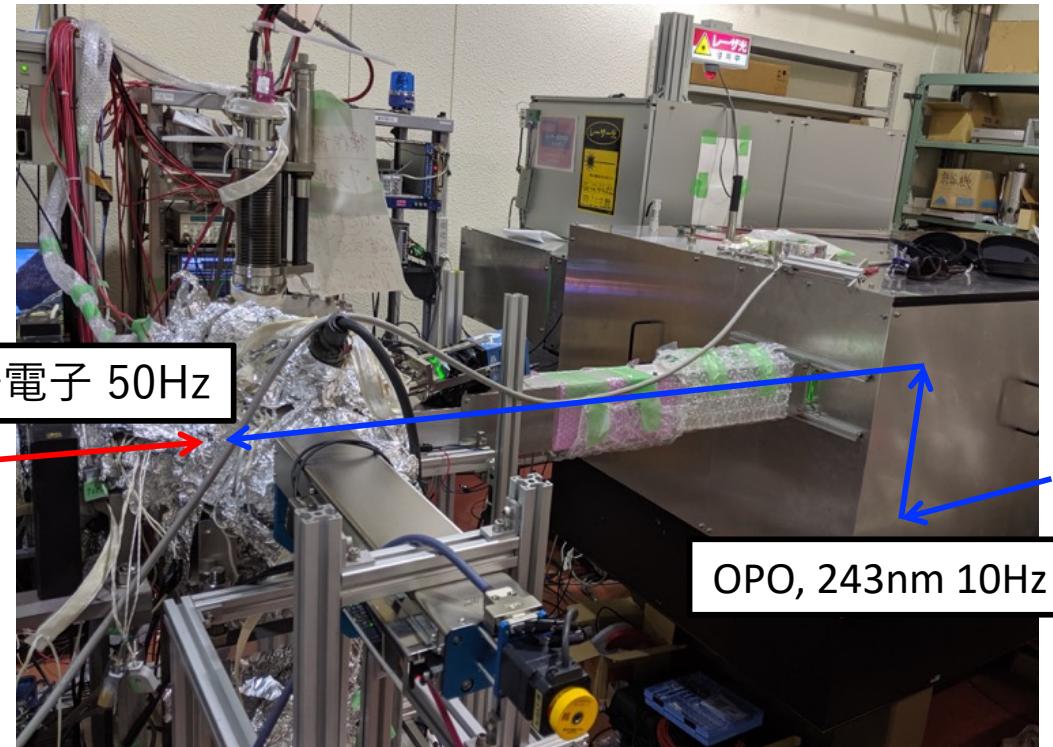
チャンバー断面図

陽電子はレーザー径に合わせ  
4 mm径程度に集束

# 紫外レーザーは Nd:YAG でポンプした光パラメトリック共振器 (OPO) を使用

## 仕様

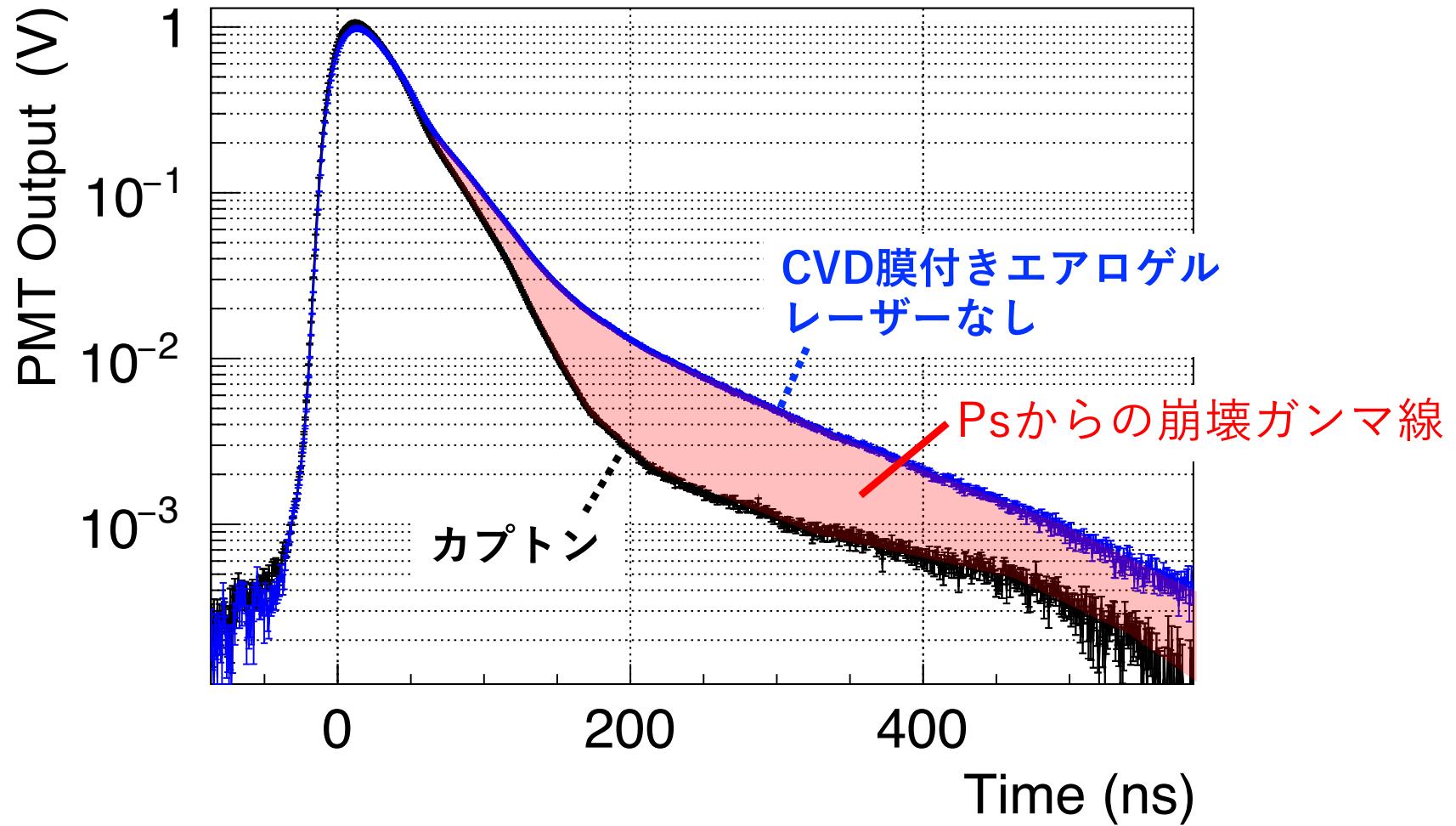
パルスエネルギー	300 $\mu$ J
243nmでの線幅	0.06 nm
ビーム径	5 mm
時間幅	3 ns
繰り返し	10 Hz



↑ ← レーザー周りの様子

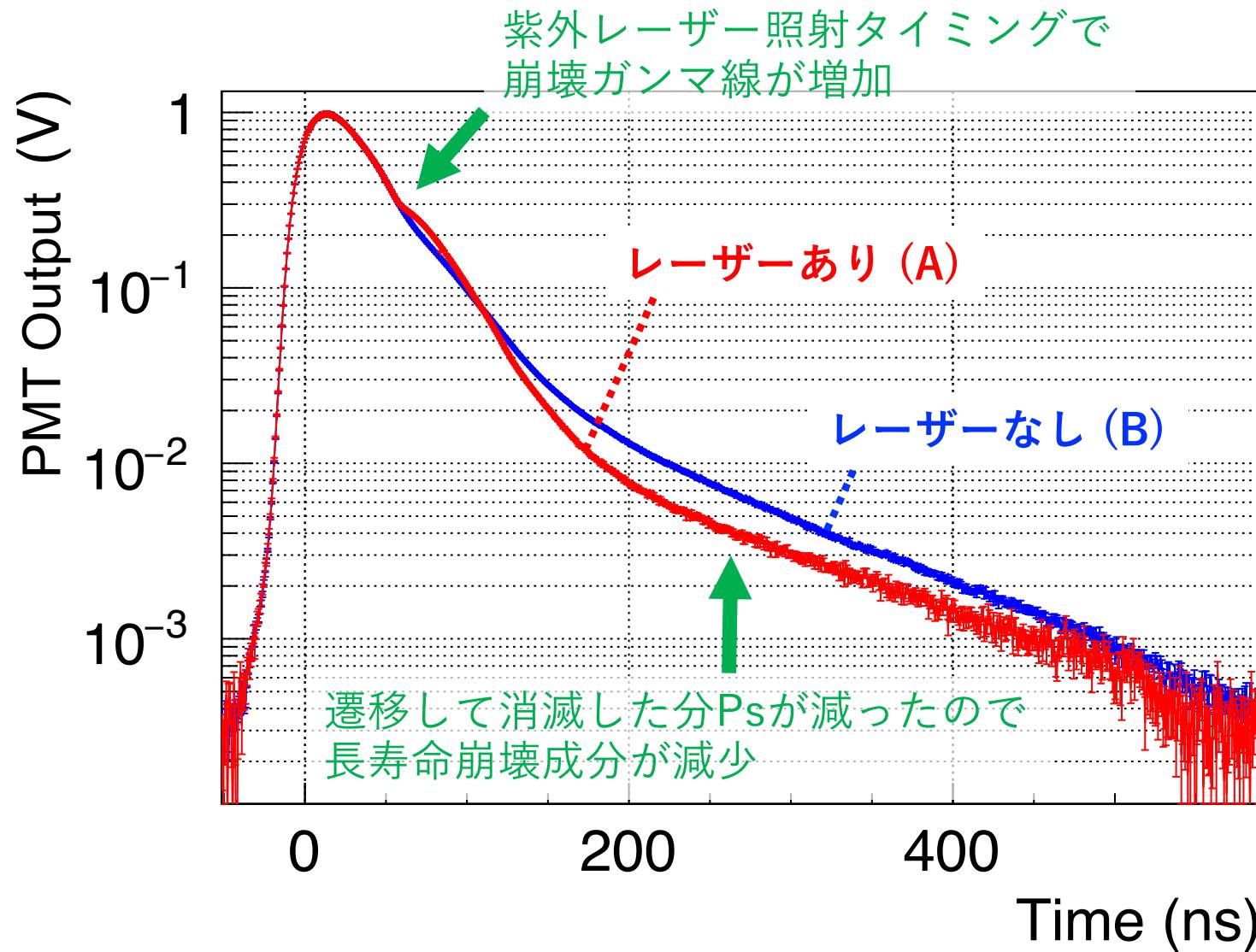
OPOは岡山大学吉村研究室より  
お借りしました。  
ご厚意に感謝します。

エアロゲルではPsからの崩壊ガンマ線が  
遅い成分として見える



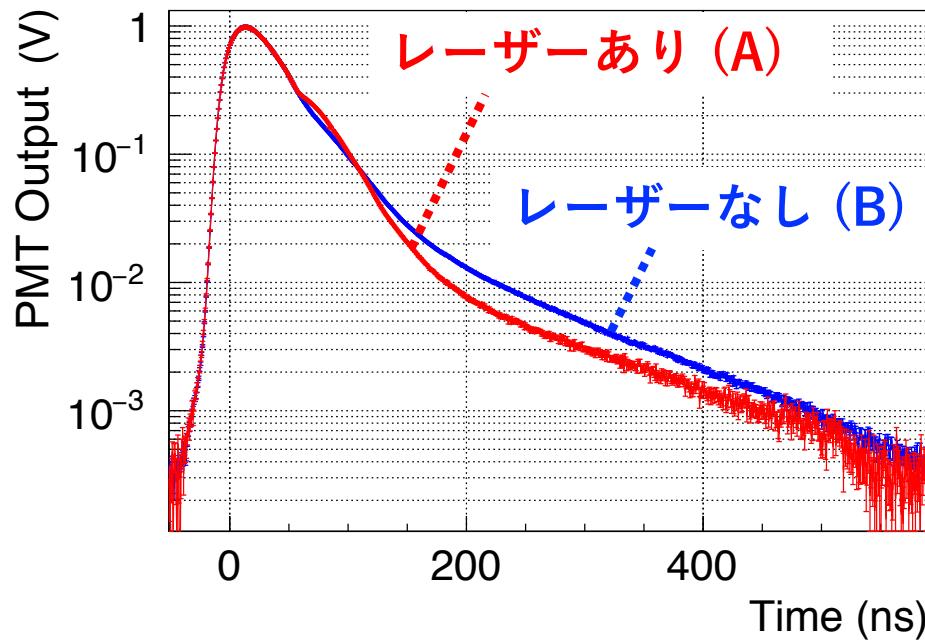
崩壊ガンマ線を $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレータで  
検出し得られたPMT信号の波形

# 2P状態はすぐガンマ線に崩壊する

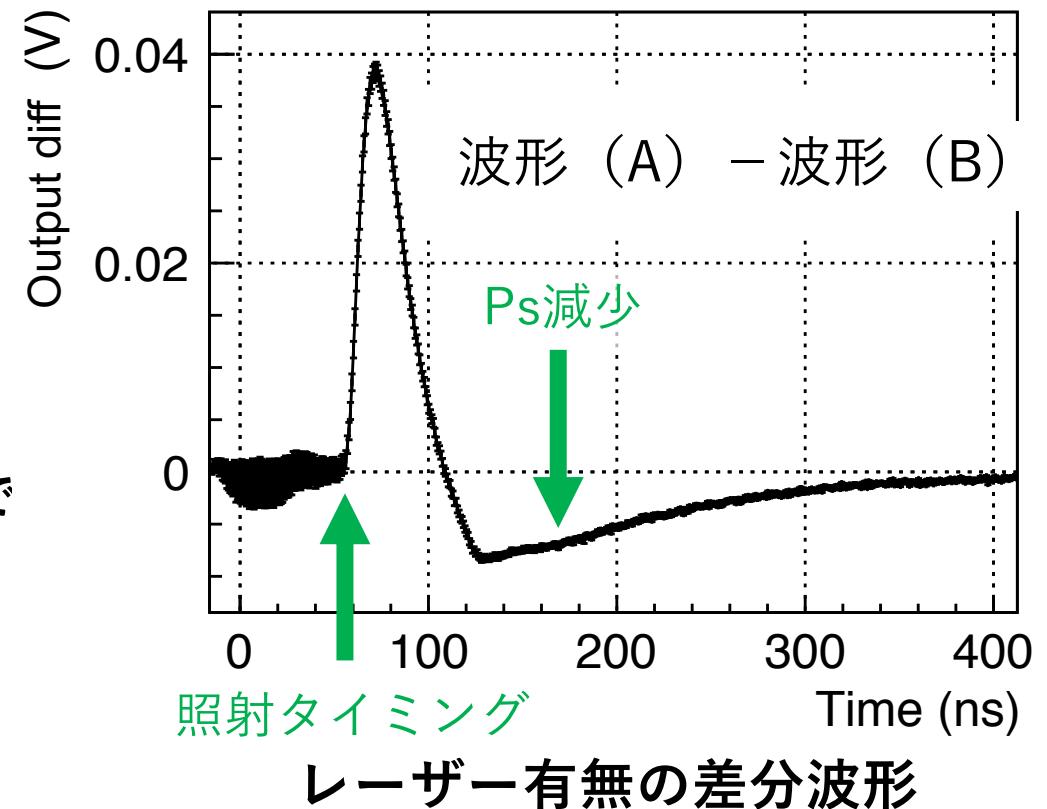


崩壊ガンマ線を $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレータで  
検出し得られたPMT信号の波形

# 2P状態はすぐガンマ線に崩壊する

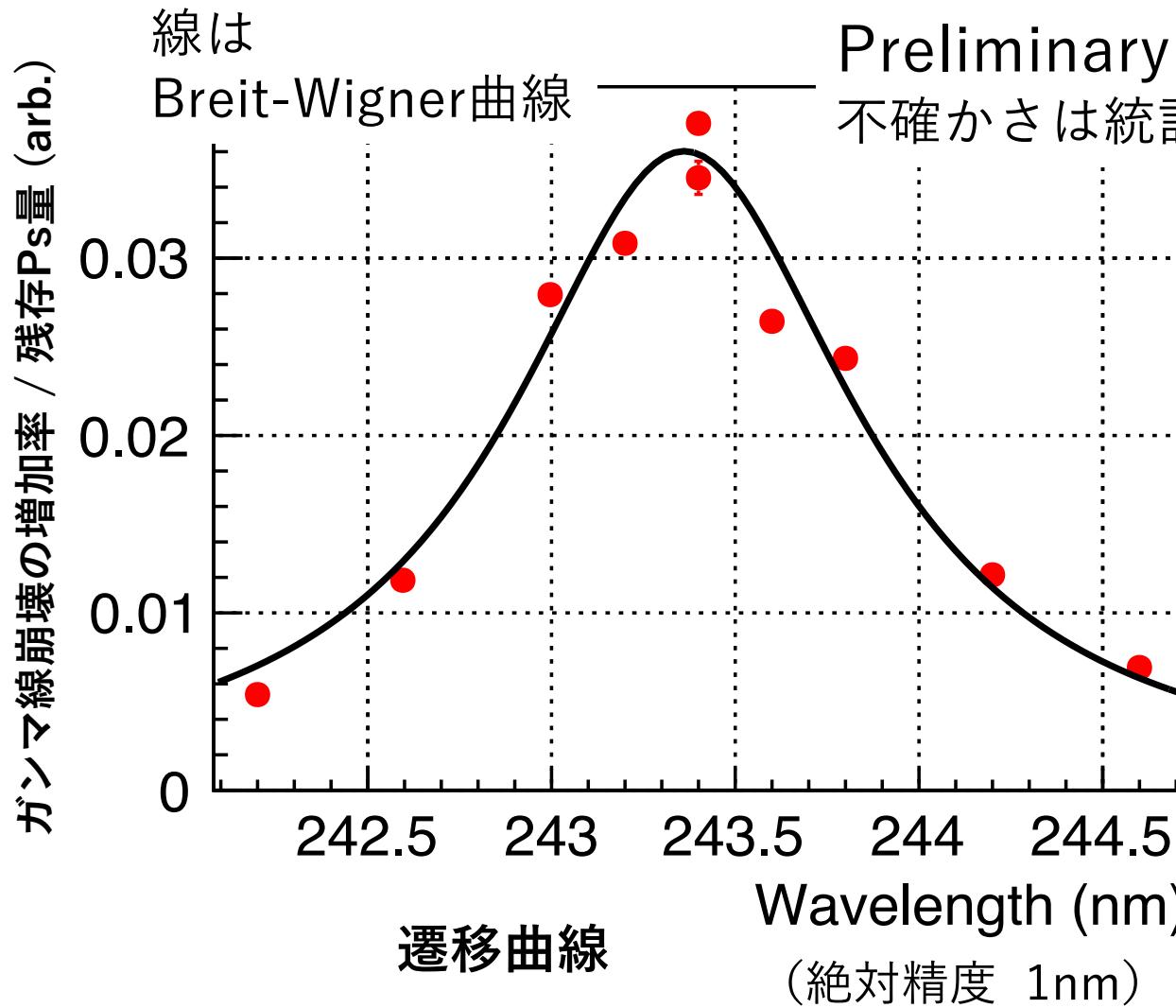


崩壊ガンマ線を $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレータで  
検出し得られたPMT信号の波形



300  $\mu\text{J}$ の紫外レーザーだけで2P状態がガンマ線に崩壊している  
2P状態のガンマ線崩壊寿命が短い (5 ns 以下)

# 遷移の共鳴幅が広い



# 幅が広いことと寿命が短いこと 別々の機構によると仮説を立てている

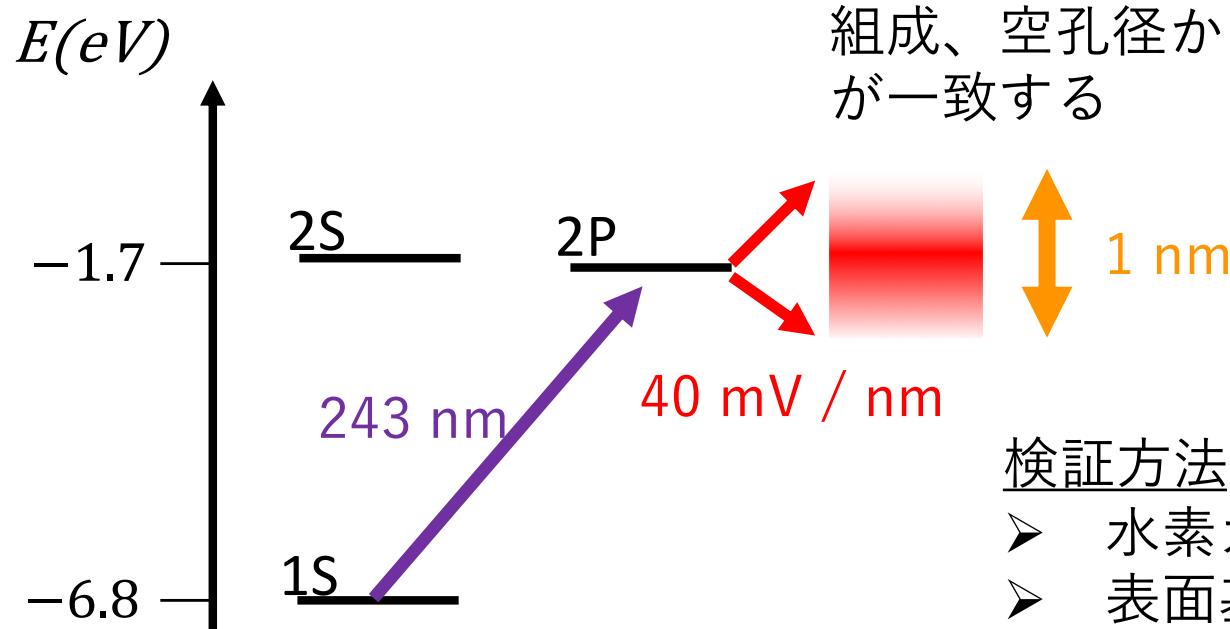
## 幅が広いこと

物質の効果で1S - 2Pのエネルギー差が変化し、

空孔内の効果分布により幅が生じる

(東大教養 斎藤教授)

- シュタルク効果であれば、最大40 mV / nm 程度の残留電場で1 nmの幅を説明できる
- 電場の強さはシリカエアロゲルの表面基組成、空孔径からの見積もりとオーダーが一致する



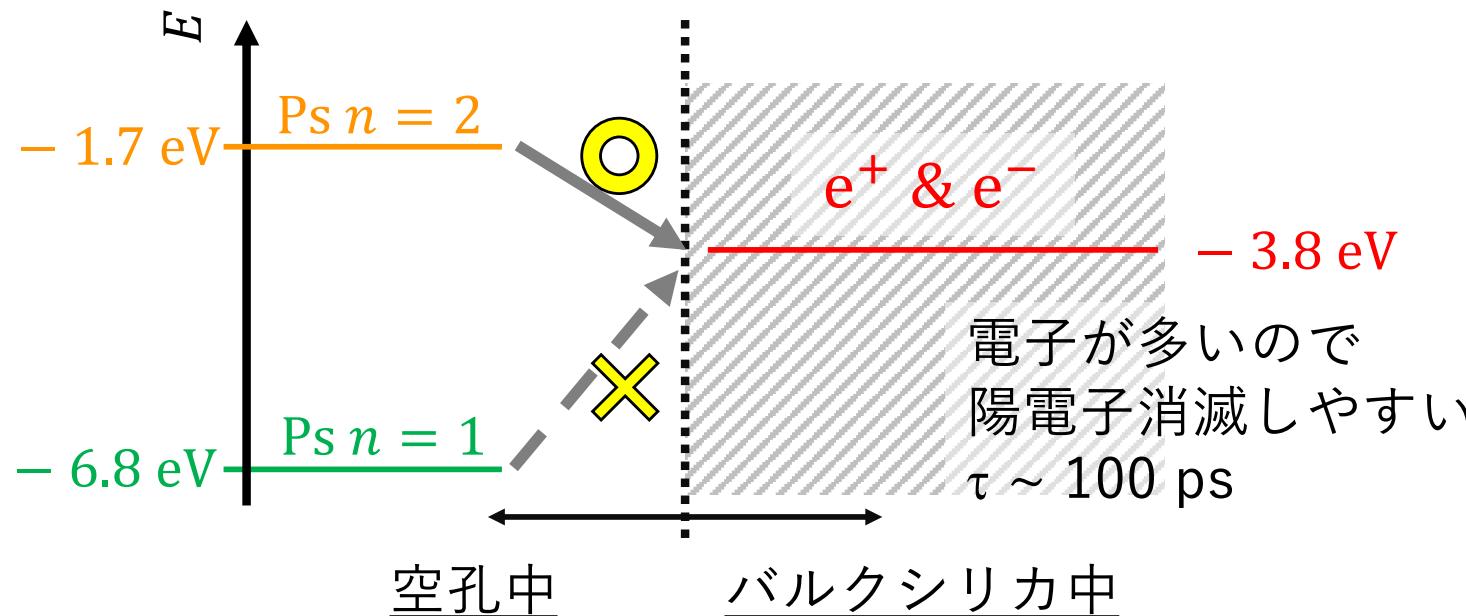
## 検証方法

- 水素ガスの空孔中遷移幅を測定
- 表面基を大きく変えてみる

幅が広いことと寿命が短いこと  
別々の機構によると仮説を立てている

### 寿命が短いこと

1.  $n = 2$  の束縛エネルギーが小さいので物質中に入り込む



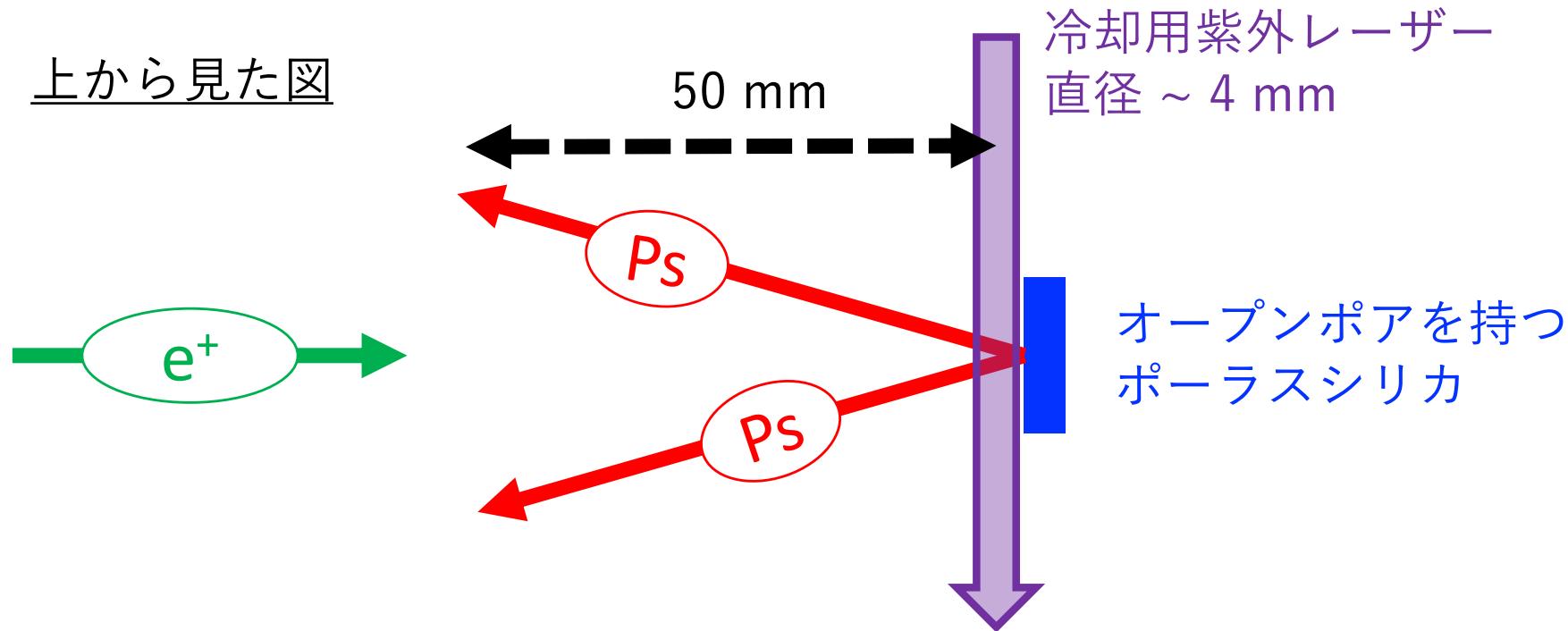
2. シリカエアロゲルの表面に活性種が存在する

### 検証方法

- 束縛エネルギーの小さいタンクステンなど別の物質や、別の製法で多孔シリカを製作し、材料中でPsを励起する

# まずは真空中でのPsレーザー冷却を行う

上から見た図



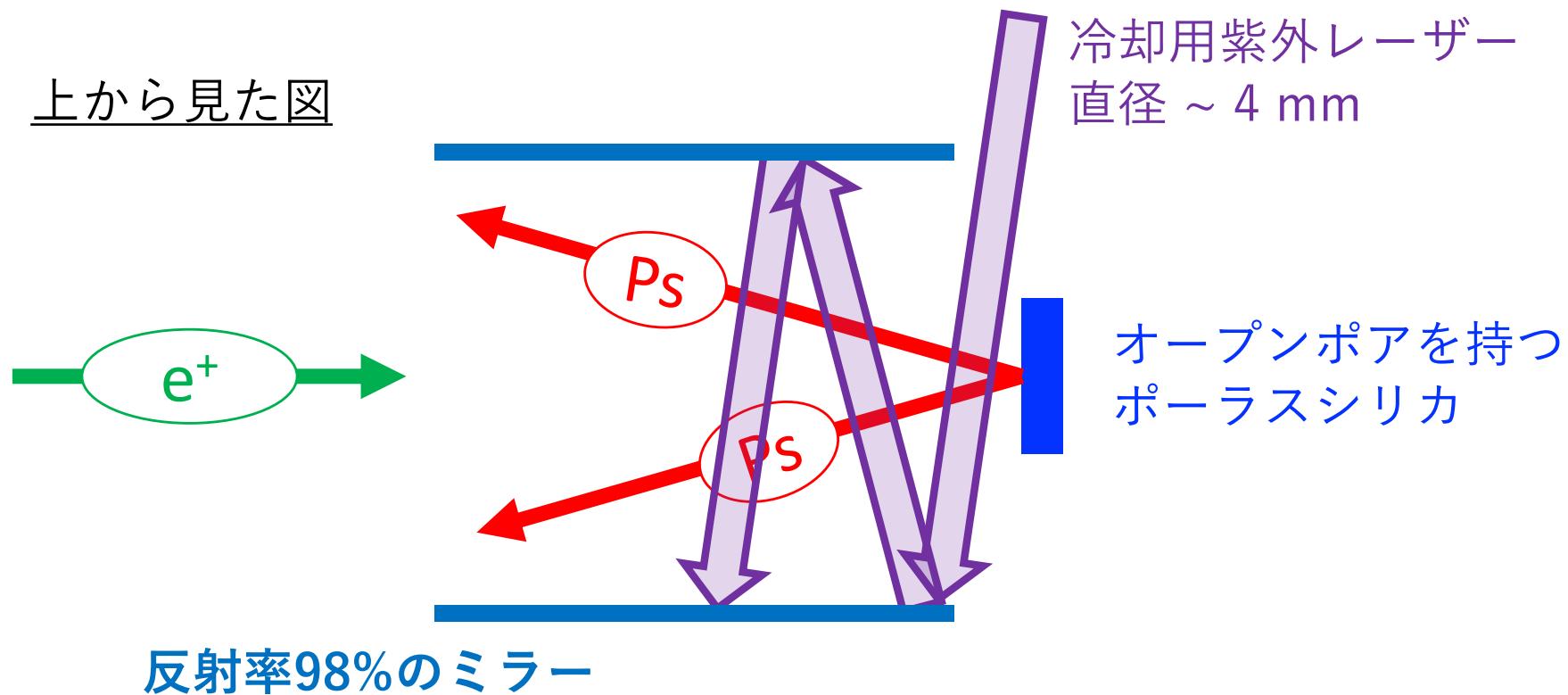
- 完成間近の紫外レーザーを用いて、実際に冷却を行ってみる
- 11、12月に実験を行う予定

## 工夫

- Psは冷却にかかる 300 nsの間に50 mm程度も飛行する
- 紫外レーザーのパワーを保つために径は4 mm程度に抑えたい

# まずは真空中でのPsレーザー冷却を行う

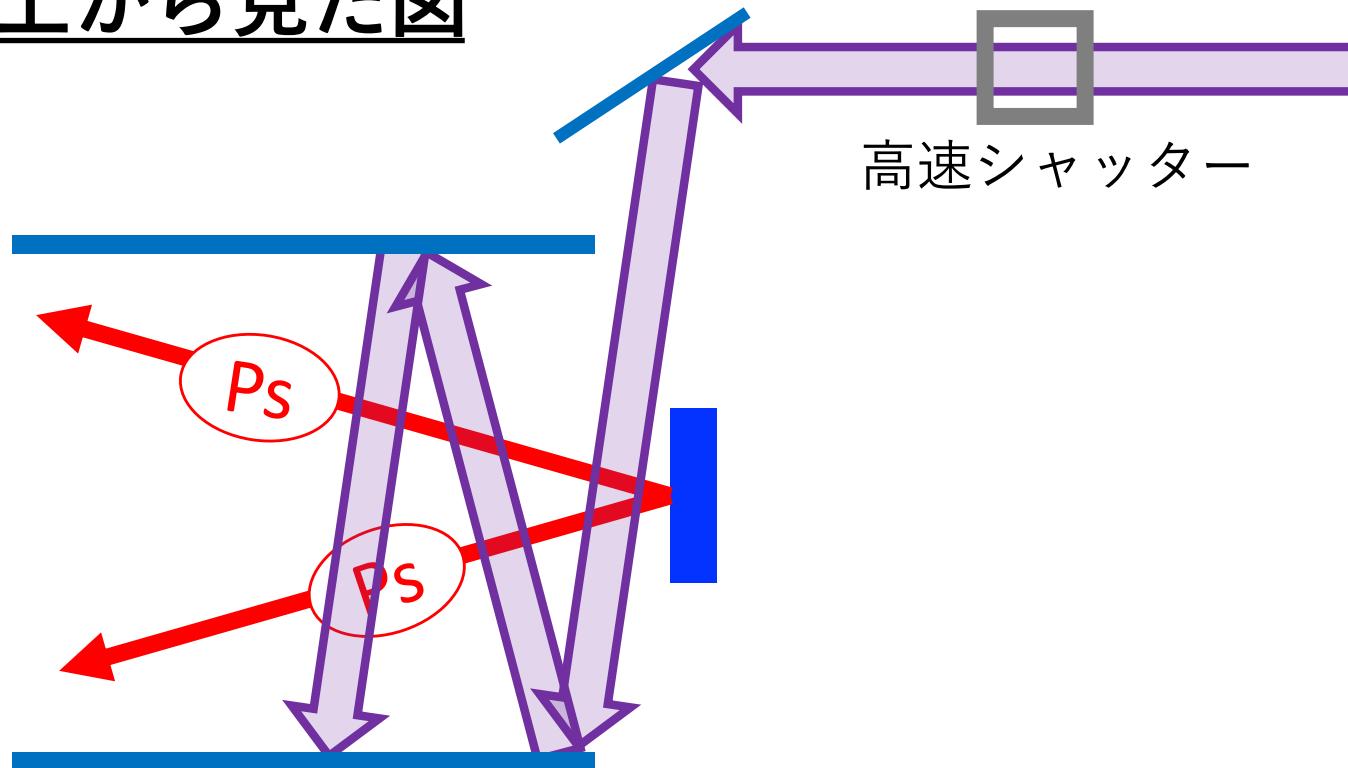
上から見た図



- 紫外光を $2.5^\circ$  入射、25回反射してPsの飛行領域に光を充満させ、Psと光の相互作用時間を確保する

# 温度は挾線幅紫外レーザーを使って測定

## 上から見た図

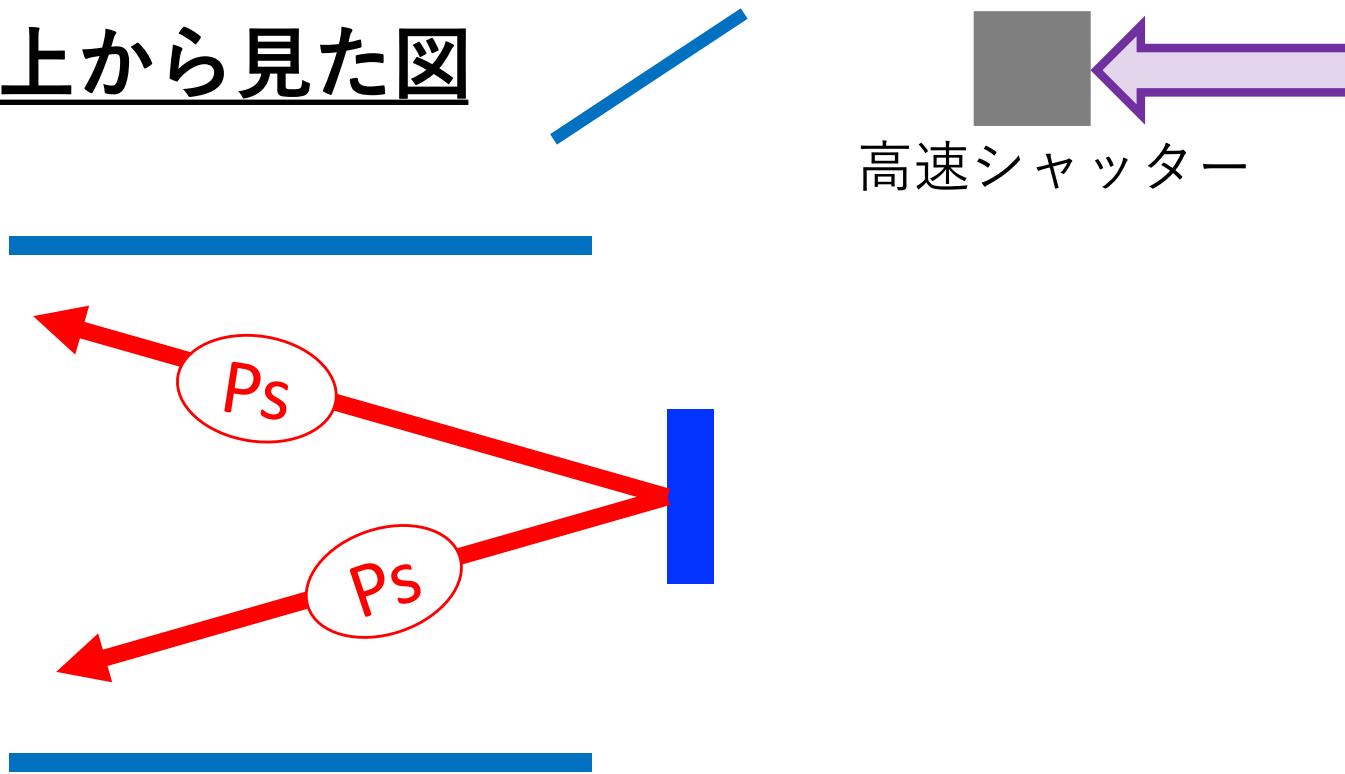


## $P_s$ 温度の測り方

1. 冷却用紫外レーザーを照射する

# 温度は挿線幅紫外レーザーを使って測定

## 上から見た図

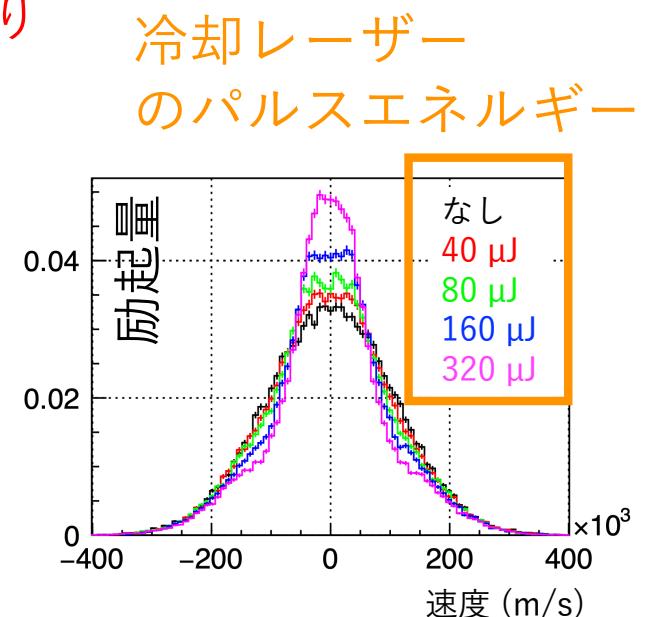
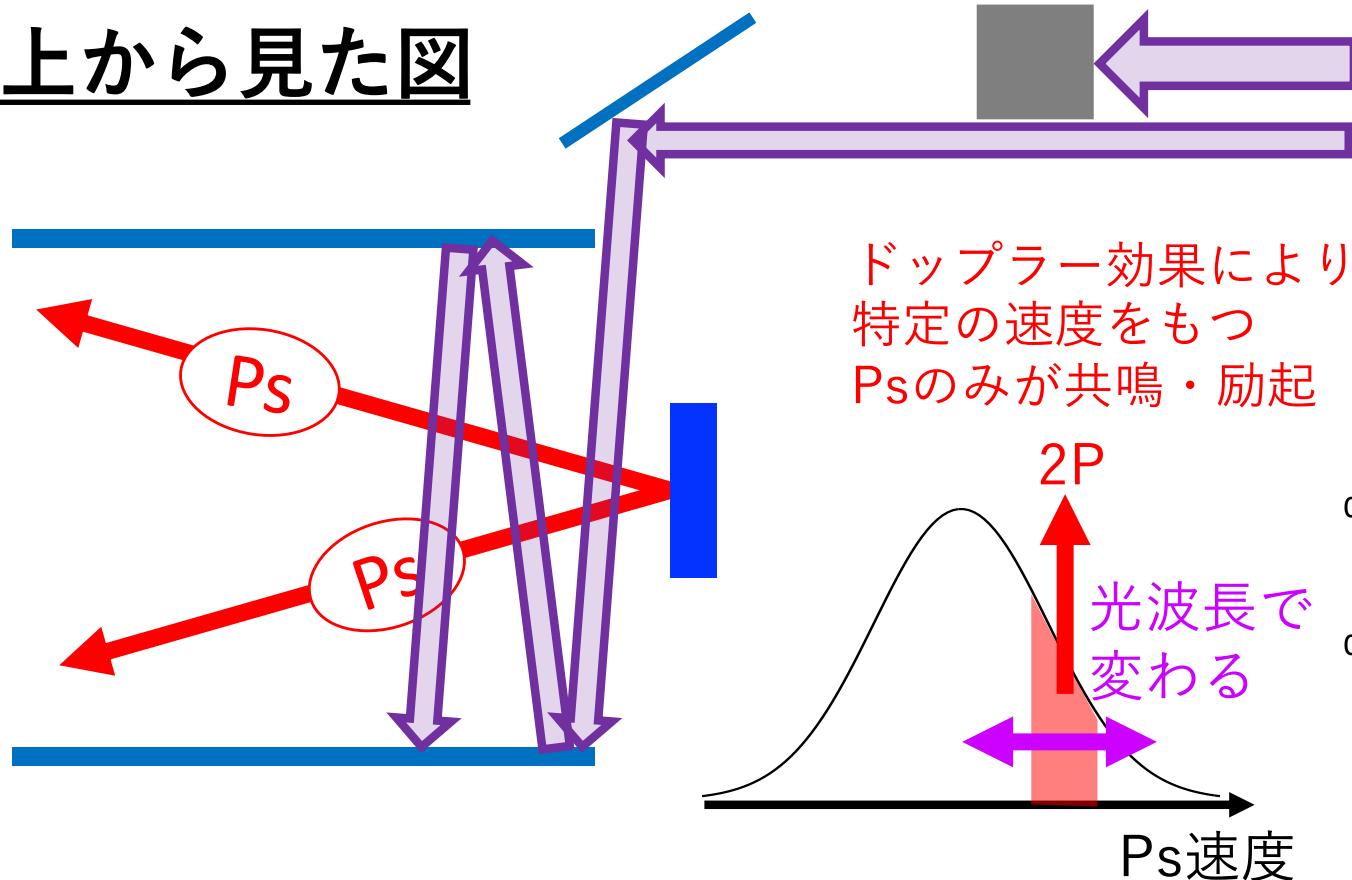


### Ps温度の測り方

1. 冷却用紫外レーザーを照射する
2. 300 ns 経ったら、高速シャッター（ポッケルスセルなど）により冷却用紫外レーザーを遮断する

# 温度は挿線幅短パルス紫外レーザーを使って測定

## 上から見た図



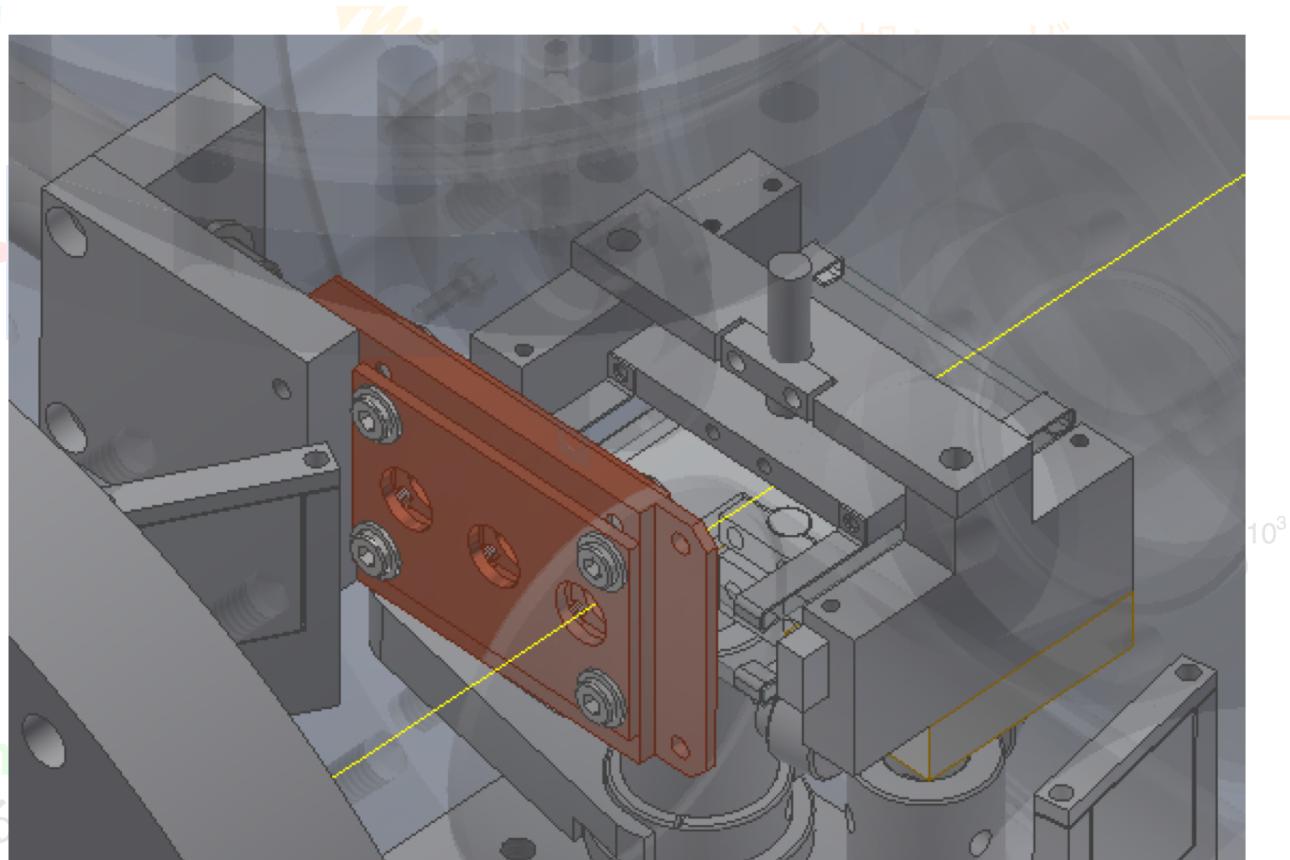
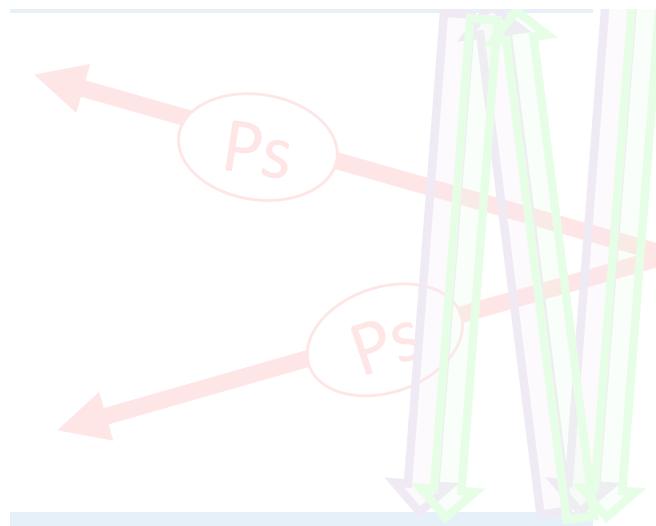
## Ps温度の測り方

3. 挿線幅・短パルスの紫外レーザー（先述のOPO）を照射すると、ドップラー効果により一部の速度を持ったPsを励起し、Psの速度分布を測定する。遅いPs量の増加分を見る。

# 温度は挿線幅短パルス紫外レーザーを使って測定

しふか日々の

- ▶ これらの試みが実現すれば世界初のPsレーザー冷却銳意準備を進めている



## Ps温度の測り方

1. 同時に強い **532 nm** のレーザーと  
しガンマ線を発する。この組合せで  
の速度分布が得られる。遅い成分量が増えるかどうか確認。

# まとめ

- Ps-BEC実現を目指した冷却のためには、シリカ空孔中にいるPsを2P状態に遷移させる事が必要
- 空孔中の2P状態のふるまいは良く分かっていないため、シリカエアロゲル中のPsを紫外レーザーで励起する実験を行った
- シリカエアロゲル中で2P状態の寿命が短く、遷移曲線の幅が1 nmと予想される値より広いことが分かった。これら現象が生じる機構の解明を進めている。
- 真空中に飛び出したPsのレーザー冷却実験にも取り組んでいる