ボーズ・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却の考察

周 健治, 村吉 諄之, 樊 星, 石田 明
山崎 高幸[A], 難波 俊雄[A], 浅井 祥仁,
吉岡 孝高, 五神 真

東大理, 東大素粒子センター[A]

APSA
Advanced Photon Science Alliance

22nd ICEPP シンポジウム
2016.03.02 @長野県白馬村

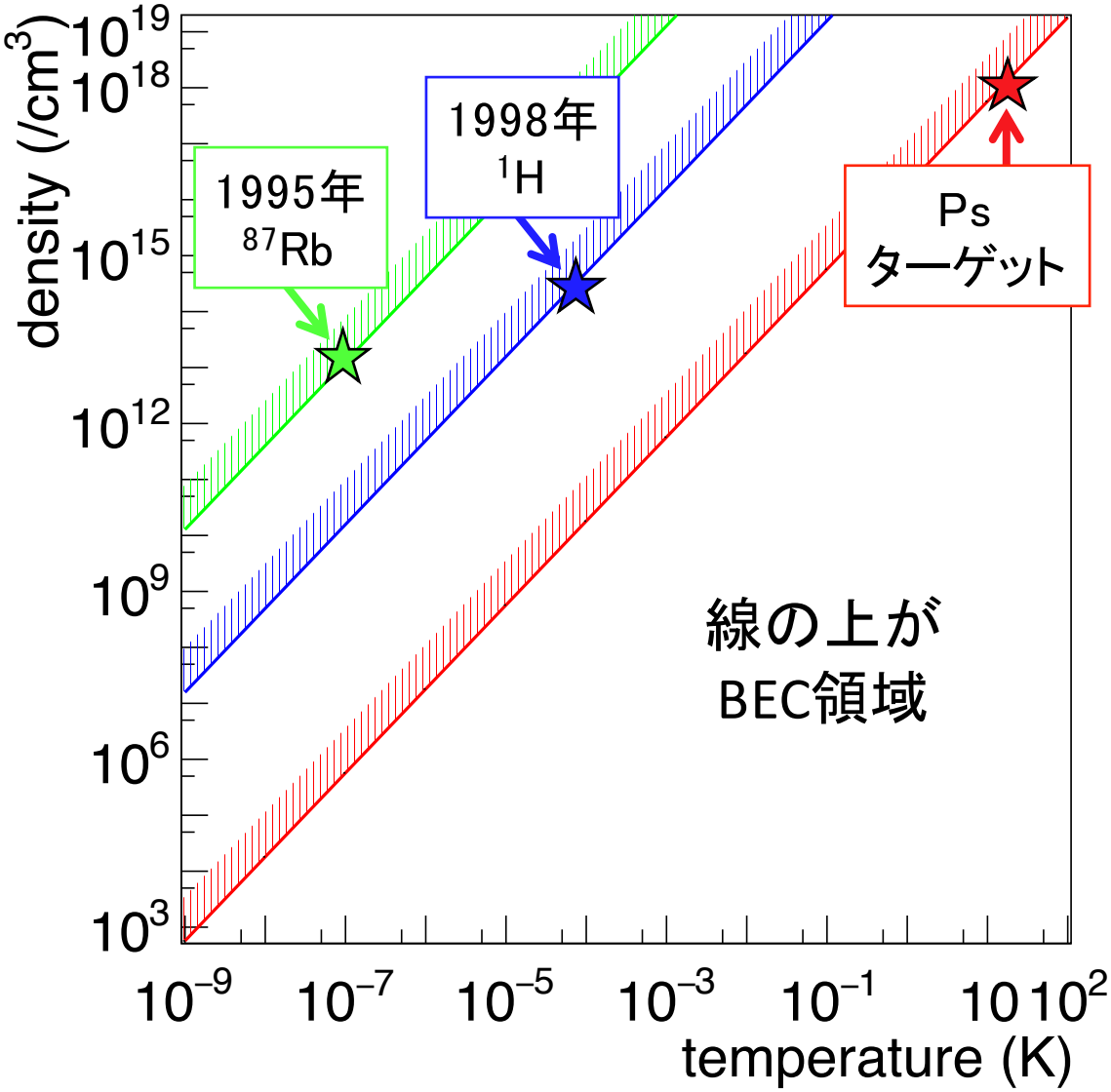
ポジトロニウム(Ps)–BEC

ポジトロニウム(Ps)
- 電子 - 陽電子 束縛系
- 世の中で最も軽い原子

なぜPs-BEC？
- 1995年BEC実現から初の反物質を含む系でのBEC

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511keVγ線レーザーの実現

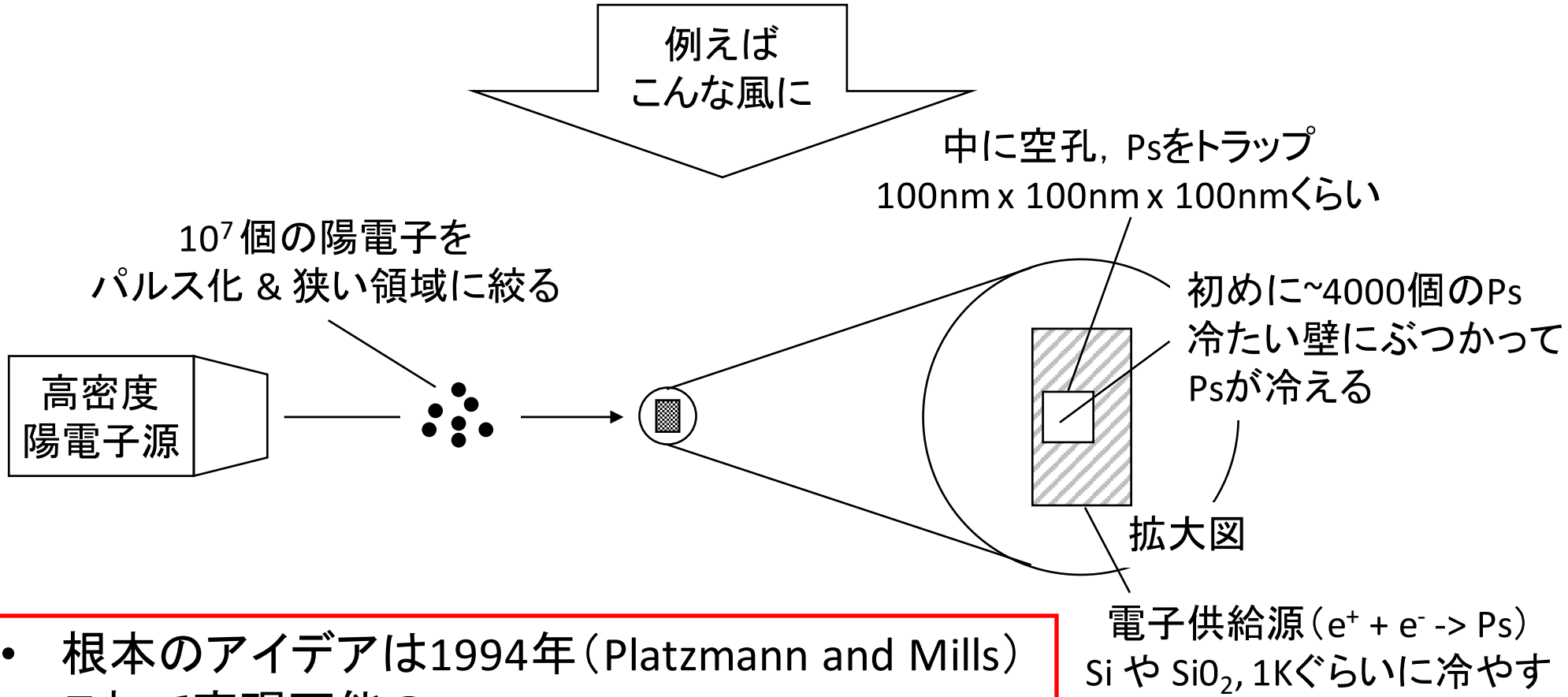
特徴
- Psは軽いのでBEC臨界温度が高い（14K @ 10^{18}/cc）



BEC臨界温度と密度の関係

Ps-BECを実現するには

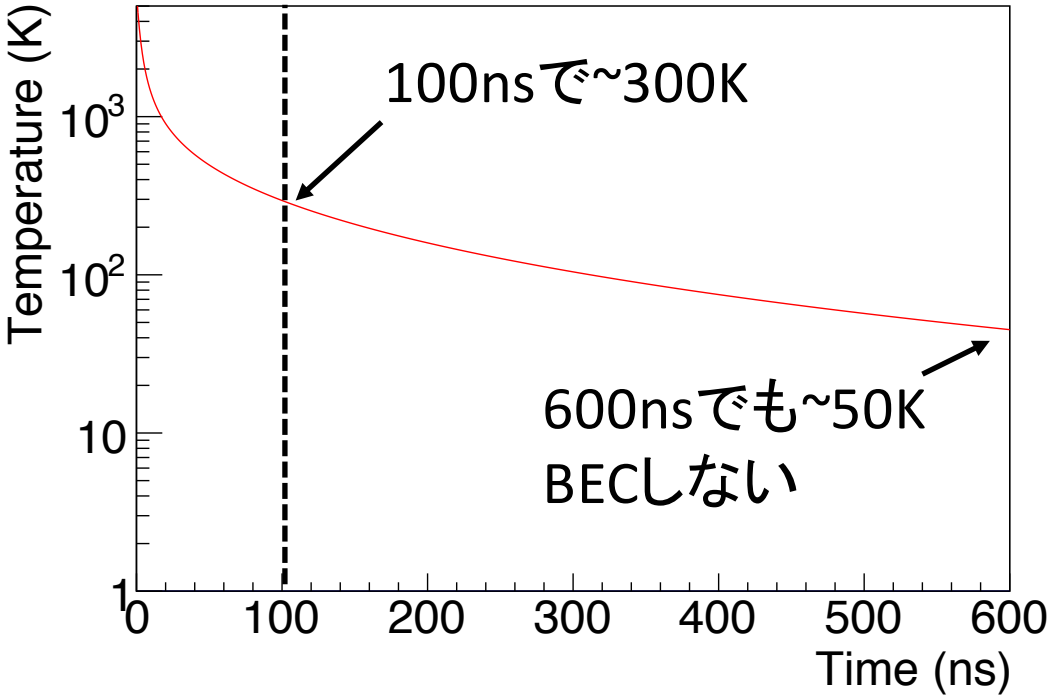
- *o*-Psは寿命142nsでγ線に崩壊する → 次の2点がキーポイント
  1. 高密度の陽電子を作り一気にPsへ変換，高密度Psを生成（$10^{18}/cm^3$）
  2. *O*(100ns)で~10KまでPsを高速冷却



- 根本のアイデアは1994年（Platzmann and Mills）
- これで実現可能？

冷たい物質中でのPs冷却

- Ps初期温度：6000K(=0.8eV)
- 昔は，すぐに周りの温度と同じ温度になる（=熱化する）と考えられていた
- しかし，室温でのPs熱化が実測され，
  空孔中での熱化は遅い
  ことが分かった
- 様々な実験結果(@室温)より
  100nm空孔，1K 中にPsでの
  Ps熱化を予想（右図）



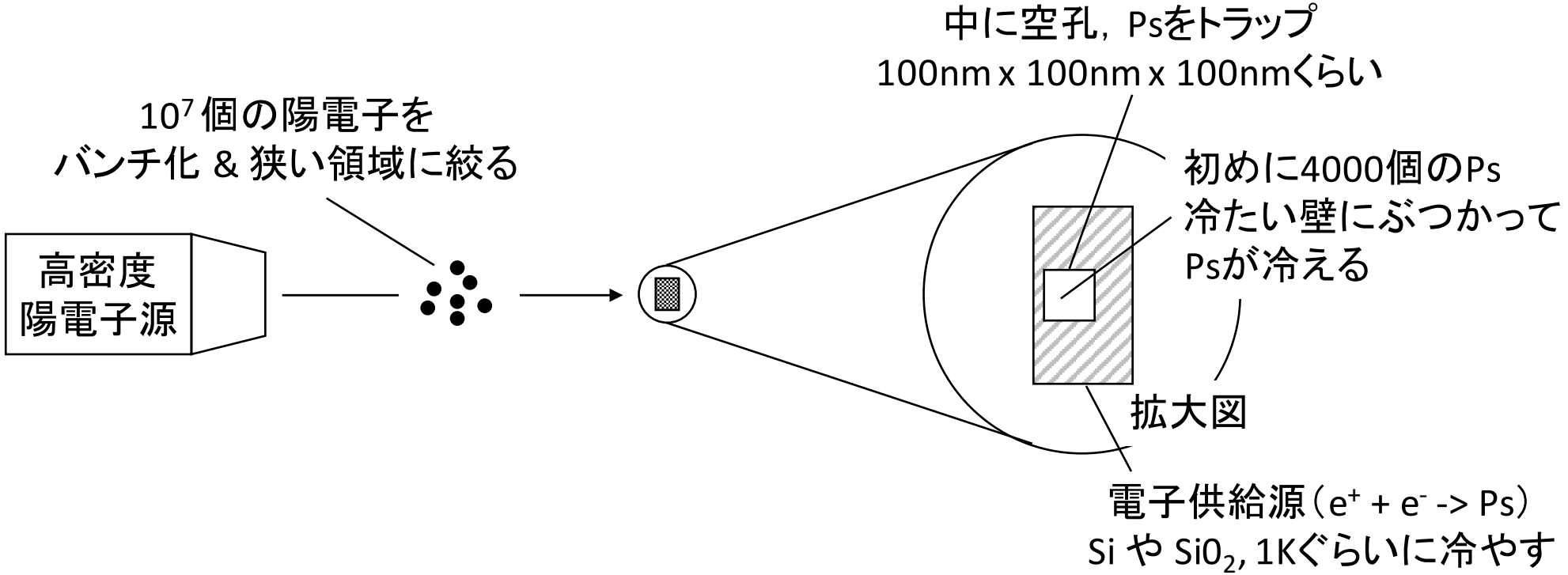
100nm空孔, 1K SiO_2中でのPs熱化
（シミュレーション結果）

✓ 冷たい物質に入れるだけではだめ
✓ 冷却を効率化する``何か''が必要

レーザーによる高速冷却

そこで，Psを高密度にトラップしつつ，
熱化 & レーザー冷却を組み合わせる
ことを考えた

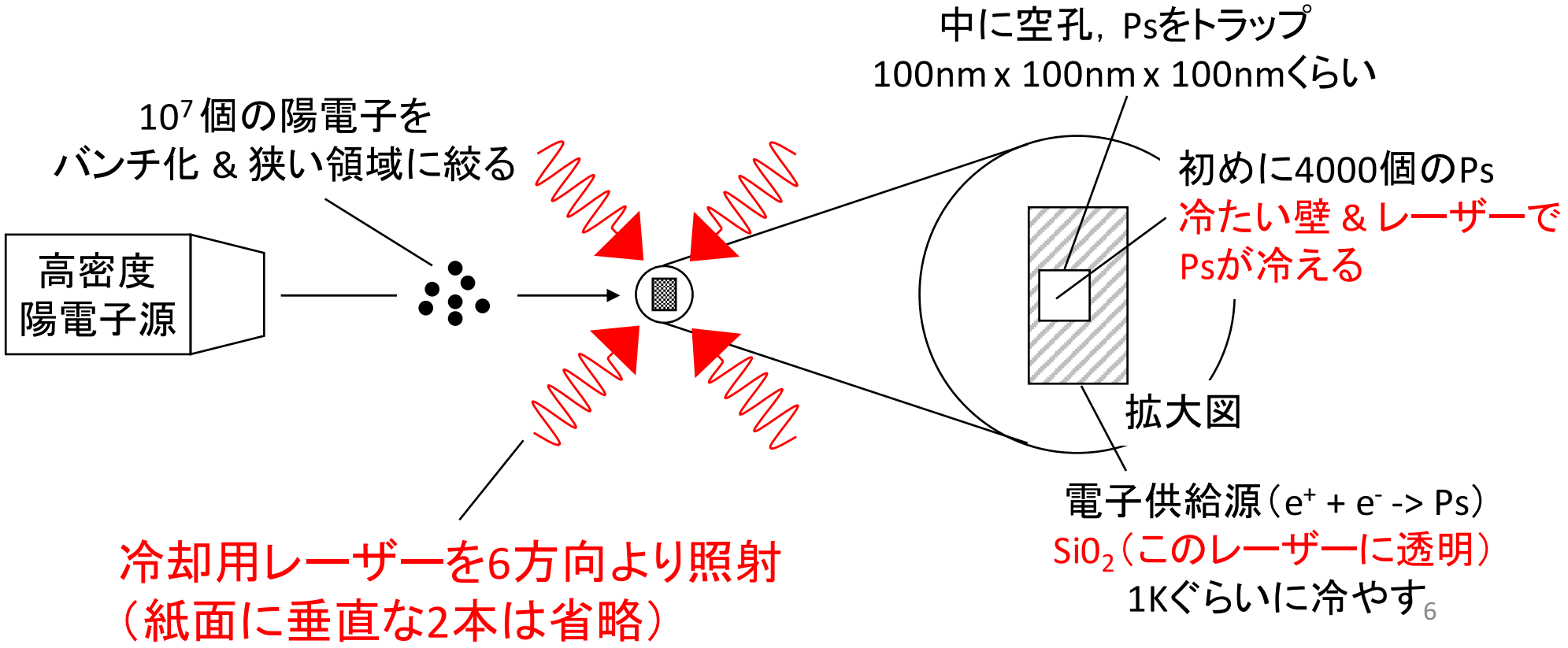
<u>従来のアイデア</u>



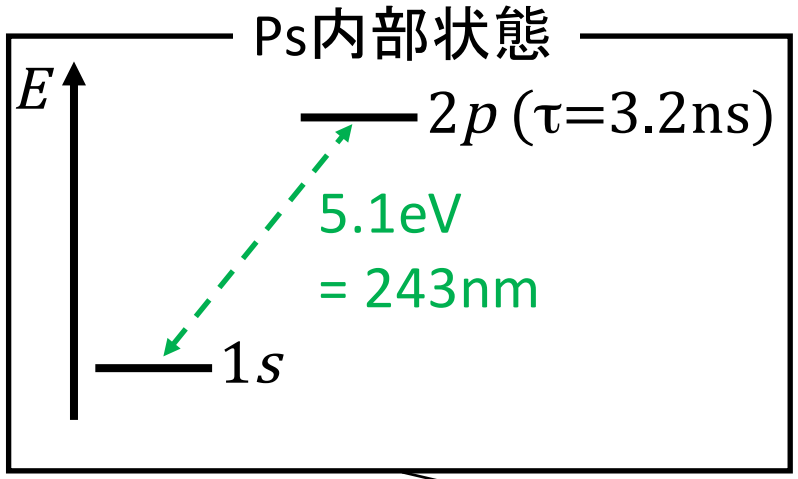
レーザーによる高速冷却

そこで，Psを高密度にトラップしつつ，
熱化 & レーザー冷却を組み合わせる
ことを考えた
（Psレーザー冷却自体まだ誰も成功していない，新しいチャレンジ）

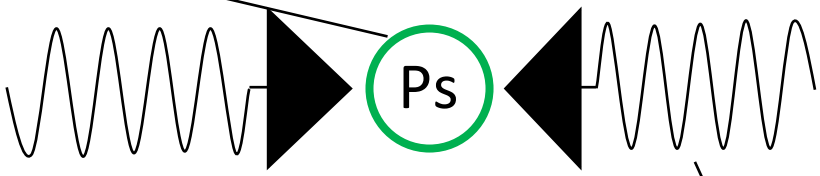
新しいアイデア (arXiv: 1511.07924, submitted to J. Phys. B)



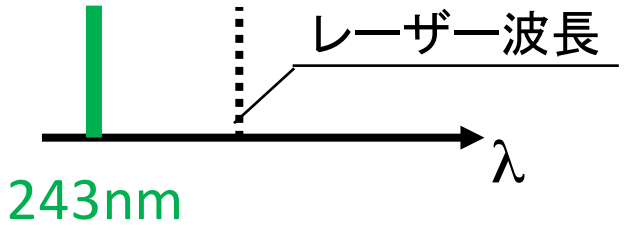
Psレーザー冷却の原理



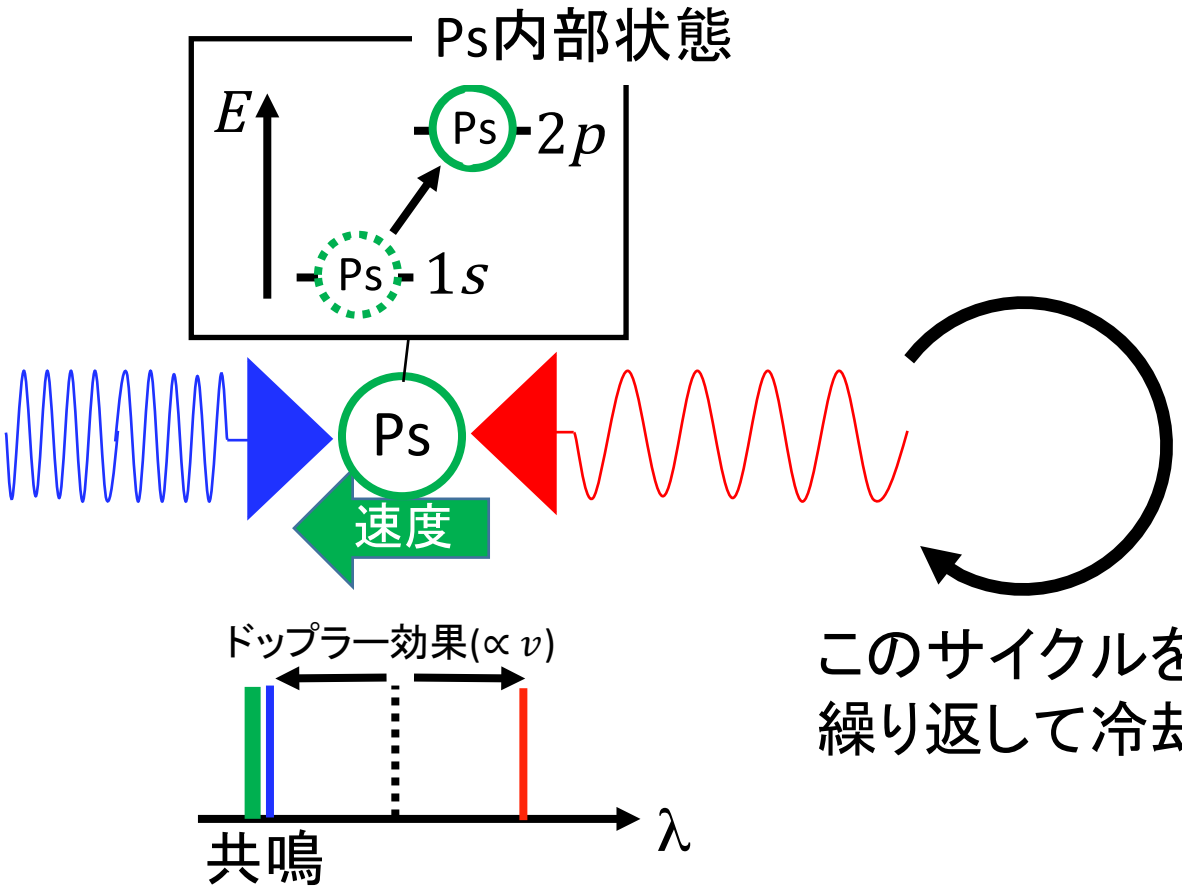
$1s-2p$ 準位間共鳴を利用



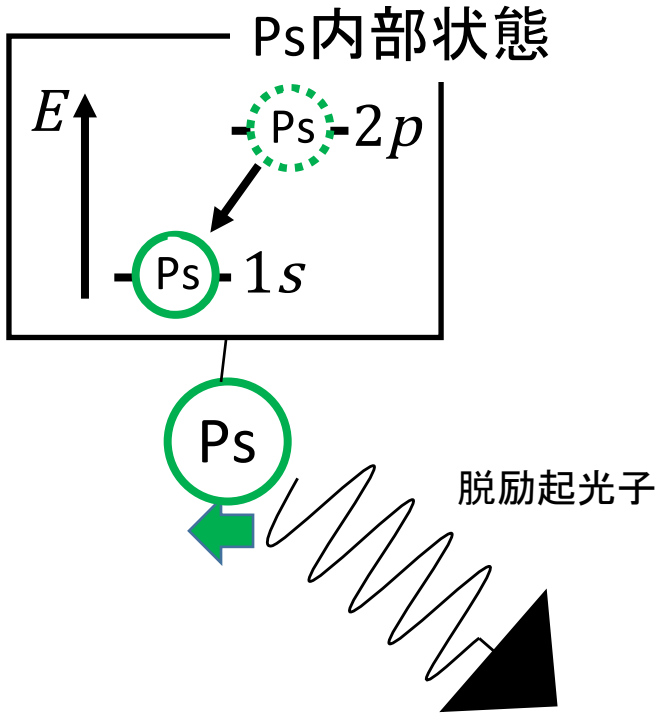
共鳴波長243nmより
少し波長の長い光を
両方向より入射



Psレーザー冷却の原理



このサイクルを
繰り返して冷却



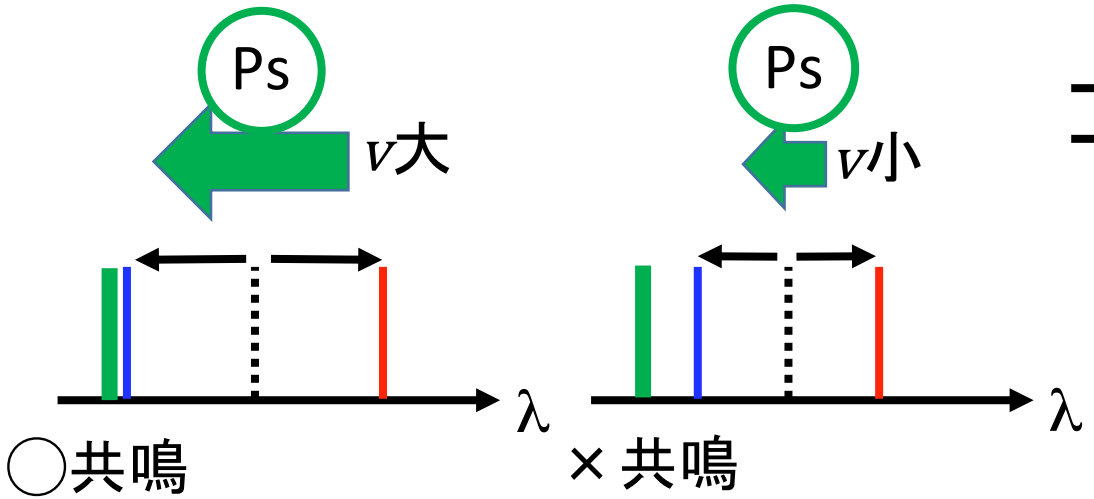
1. 反対方向に進む光のみ
が共鳴し光吸収
Psは光子の運動量分だけ
減速・励起される

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）

Ps冷却用レーザー

Psの特徴

1. 軽いため，ドップラー効果大



必要なレーザー

- ◆ 速度によって必要なレーザー波長が大きく異なる
- ◆ 様々な速度のPsを効率よく冷却するために，
  1. 様々な波長を一度に照射（=広線幅）
  2. 冷えていくPsに追随し波長を高速シフト

---

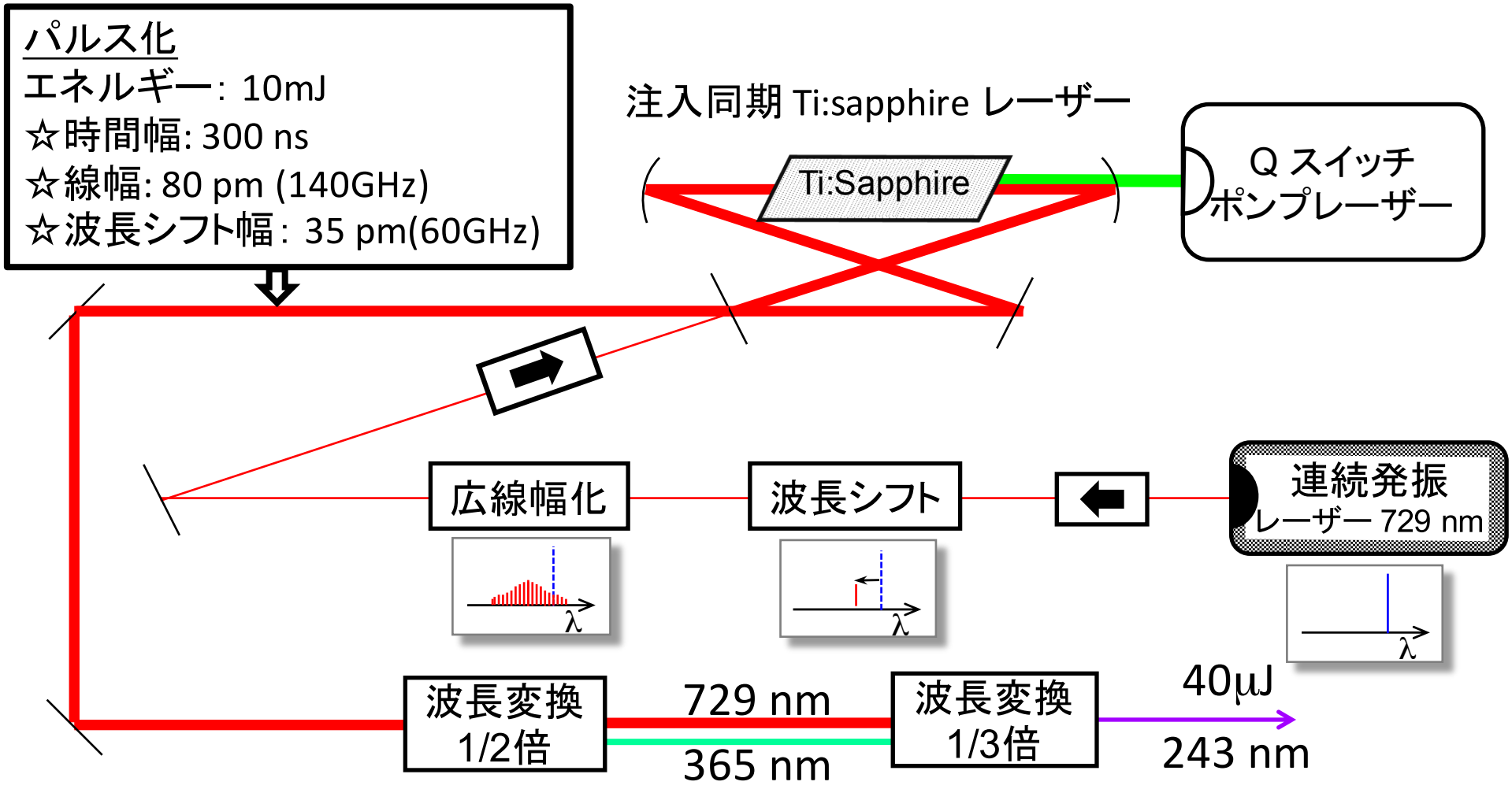
2. 寿命が100ns超

⇒ ◆ O(100ns)の持続時間をもつパルスレーザーに光を集中させる

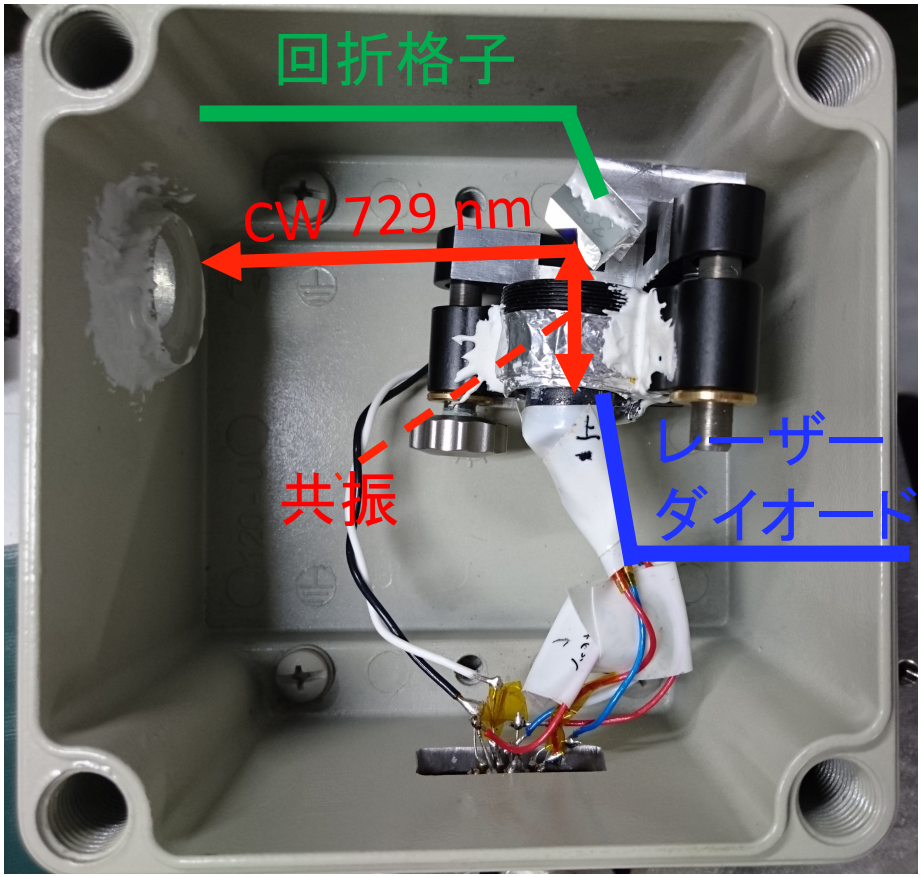
広線幅，波長高速シフト，長持続時間が特殊

Ps冷却用レーザー

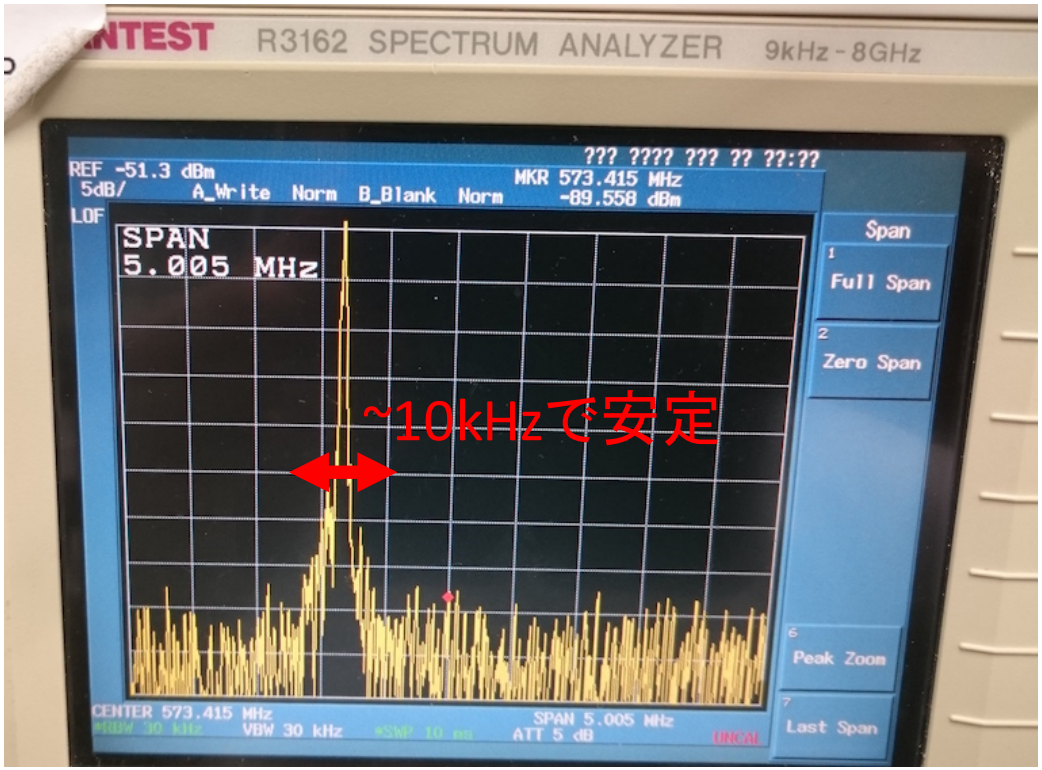
特殊なスペックを満たすため，Ps冷却用に新たにデザイン



実験の様子 - レーザー制作



外部共振器型レーザーダイオード(ECDL)
729nm = 410THzで発振



周波数スペクトル

同じECDLを2つ作り，その和をとってビートを測定

冷却の評価

シリカキャビティ＆レーザーで<10Kの冷却ができるか？

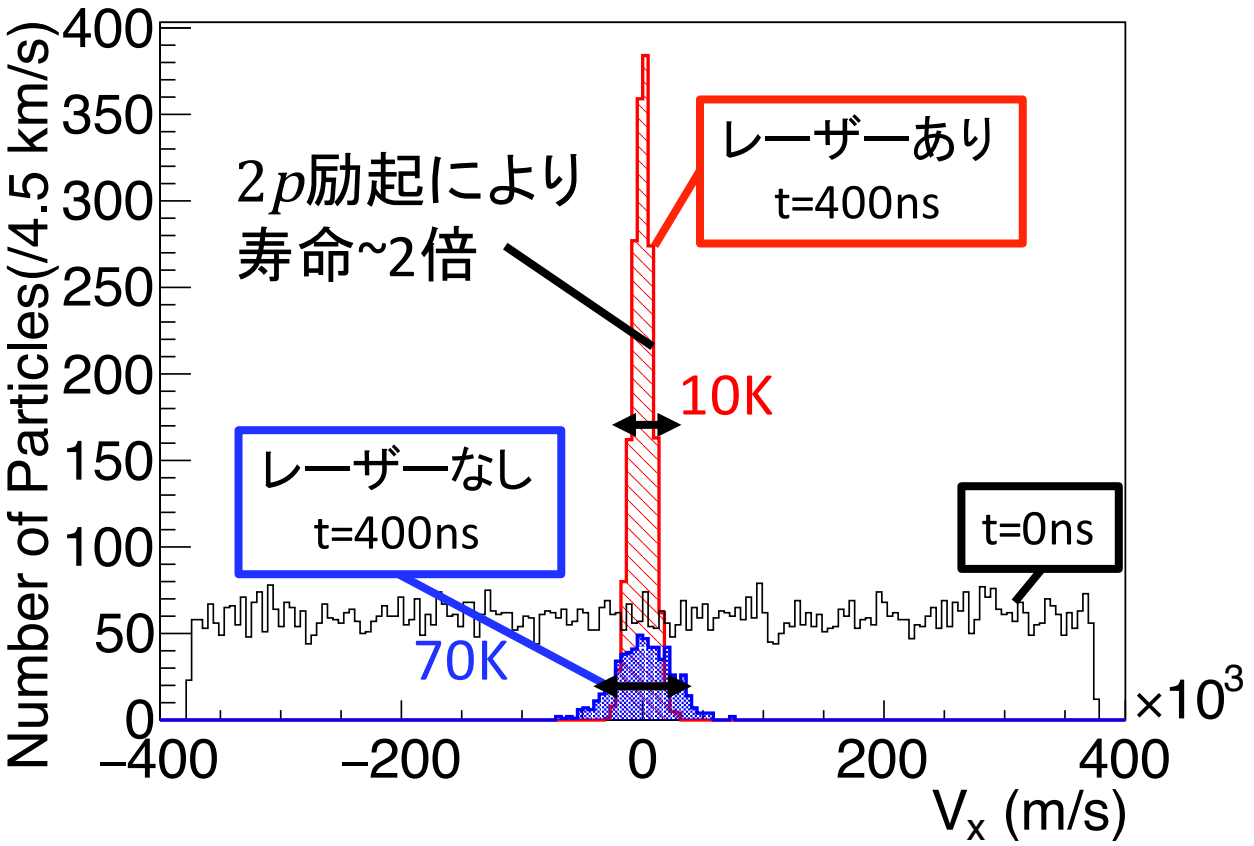
➢ シミュレーション

<u>初期条件</u>

- Ps初期温度：6000 K
- Ps初期生成数：4000 個
- シリカキャビティ：
  100nm×100nm ×100nm
  1K

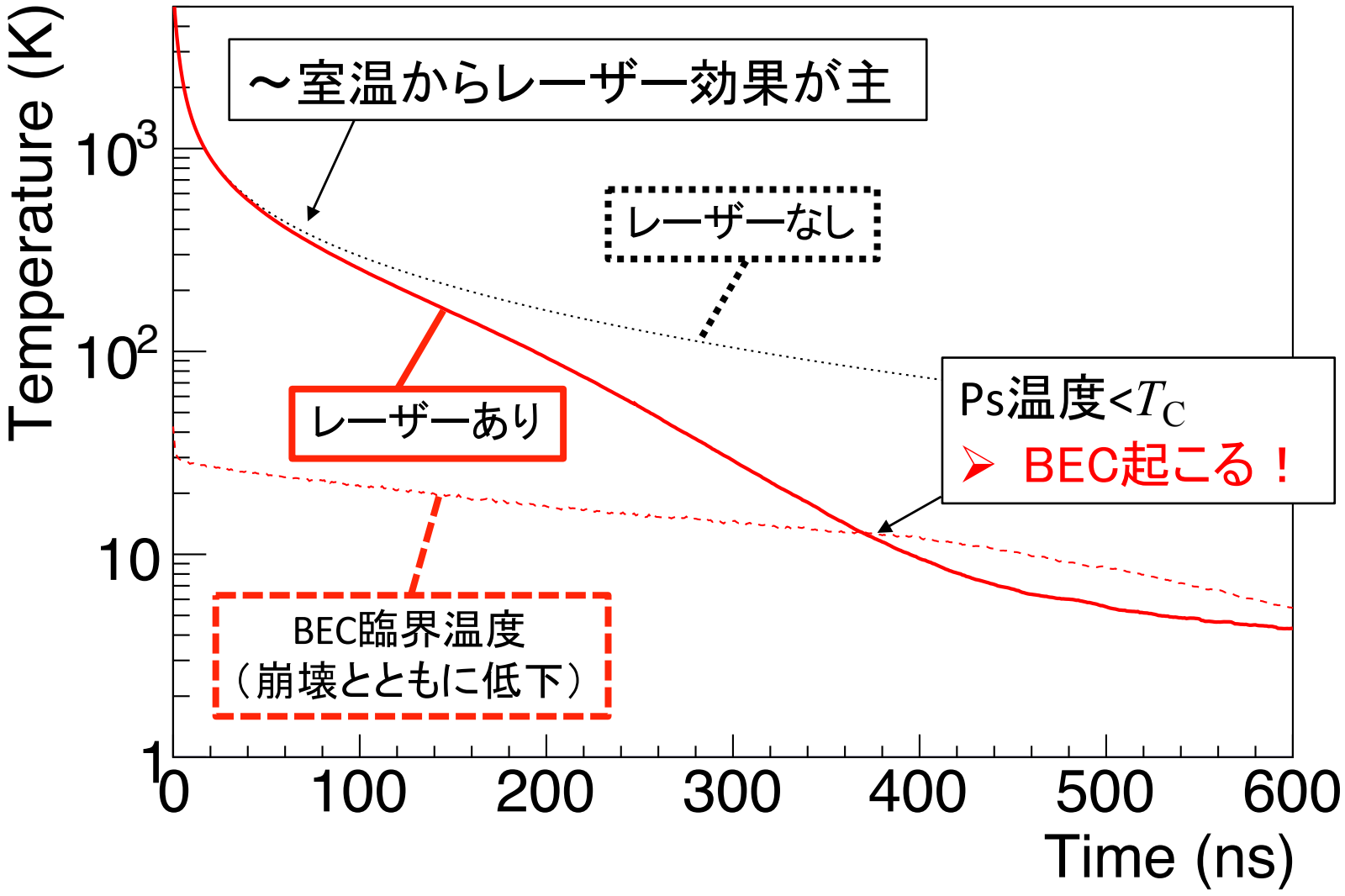
<u>相互作用</u>

- 熱化
- Ps – Ps二体散乱
- レーザー冷却



速度（のx成分）の分布

冷却の評価



温度の時間発展

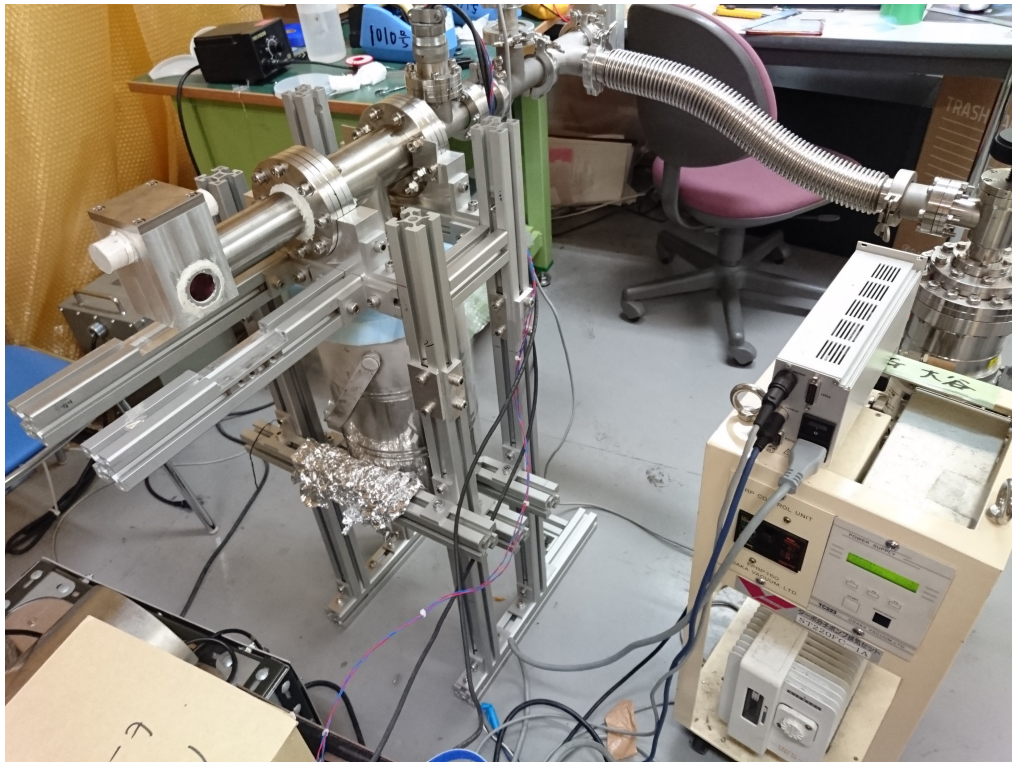
BEC実現に向けたロードマップ

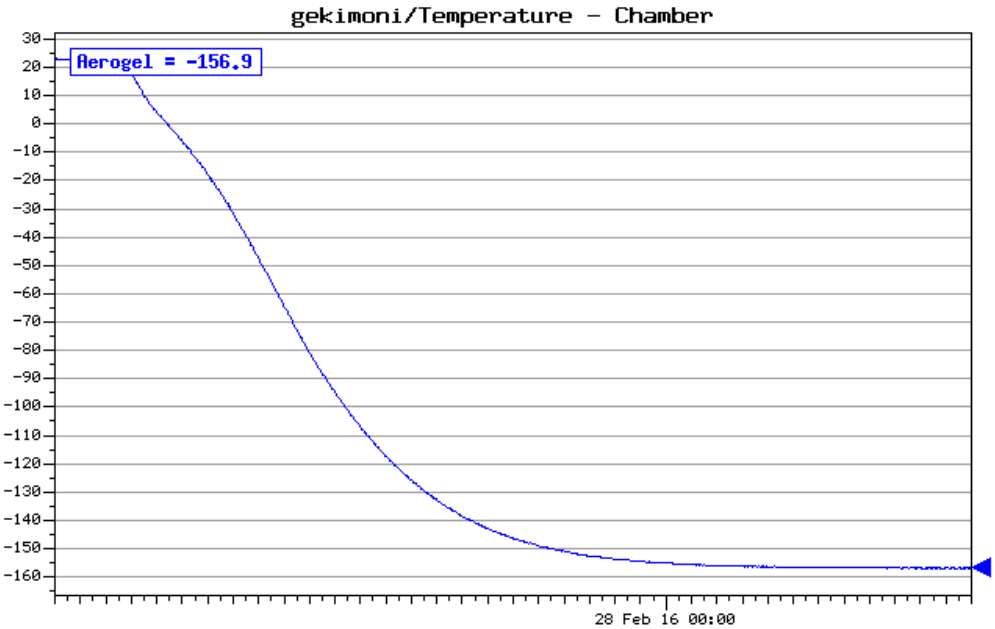
1. シリカ中での熱化による冷却を確認
   - 低温における熱化関数の測定（← 手法が確立していない）
     - ~100KのPs崩壊γ線（511keV）のドップラー幅を測定する実験を進めている
     - <10Kの温度測定を可能とするために，レーザーを利用した高精度温度測定実験を検討・準備中

2. 冷却用レーザー光源の開発
   - まずは世界で初めてのレーザー冷却実現を目指す
   - これまでにはなかったいくつかの特徴が必要なため，新たな光学系を開発中

3. 陽電子源の開発
   - 10^7という数のバンチ化と100nmフォーカスの組み合わせ
     - 陽電子ビームのプロと協力して，ビームラインのデザイン

低温Psの熱化関数測定





- 冷やしたシリカエアロゲル中でのPs熱化関数を測定しようとしている
- これは崩壊γ線のドップラー幅を測る実験セットアップ

まとめ

- Ps-BEC実現のために，冷却シリカキャビティとの熱化+レーザー冷却を組み合わせることを提案

- シミュレーションによって冷却効率を評価した。10Kまでの冷却が可能であり，冷却の面からはPs-BECが実現可能であることが分かった

- Psレーザー冷却は未だ達成されておらず，特殊なレーザーが必要。新しい光学系をデザインし，開発を進めている。

- 低温におけるPsの温度を測る方法が確立されていないため，γ線のドップラー幅測定やレーザーを使った精密温度測定を進めている