

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, 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



日本物理学会第71回年次大会
2016.03.20 @東北学院大学

ポジトロニウム (Ps) の ボース・アインシュタイン凝縮 (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?

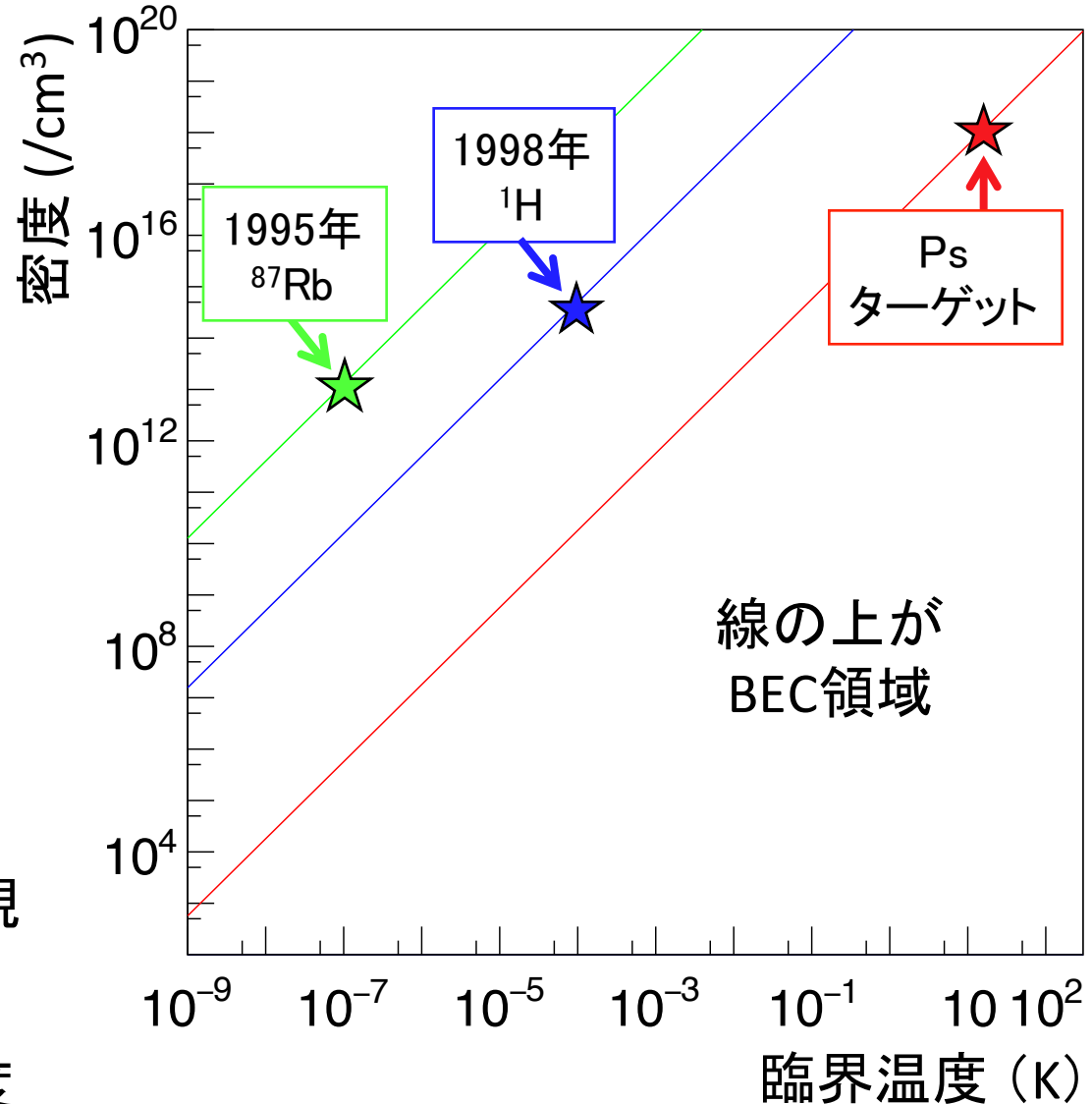
- 1995年BEC実現から初の
反物質を含む系でのBEC

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
511keV γ 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 @ $10^{18}/\text{cc}$)



BEC臨界温度と密度の関係²

Ps-BECを実現するには

◆ *o*-Psはたったの**142ns**で
 γ 線に崩壊してしまう

この短い時間に

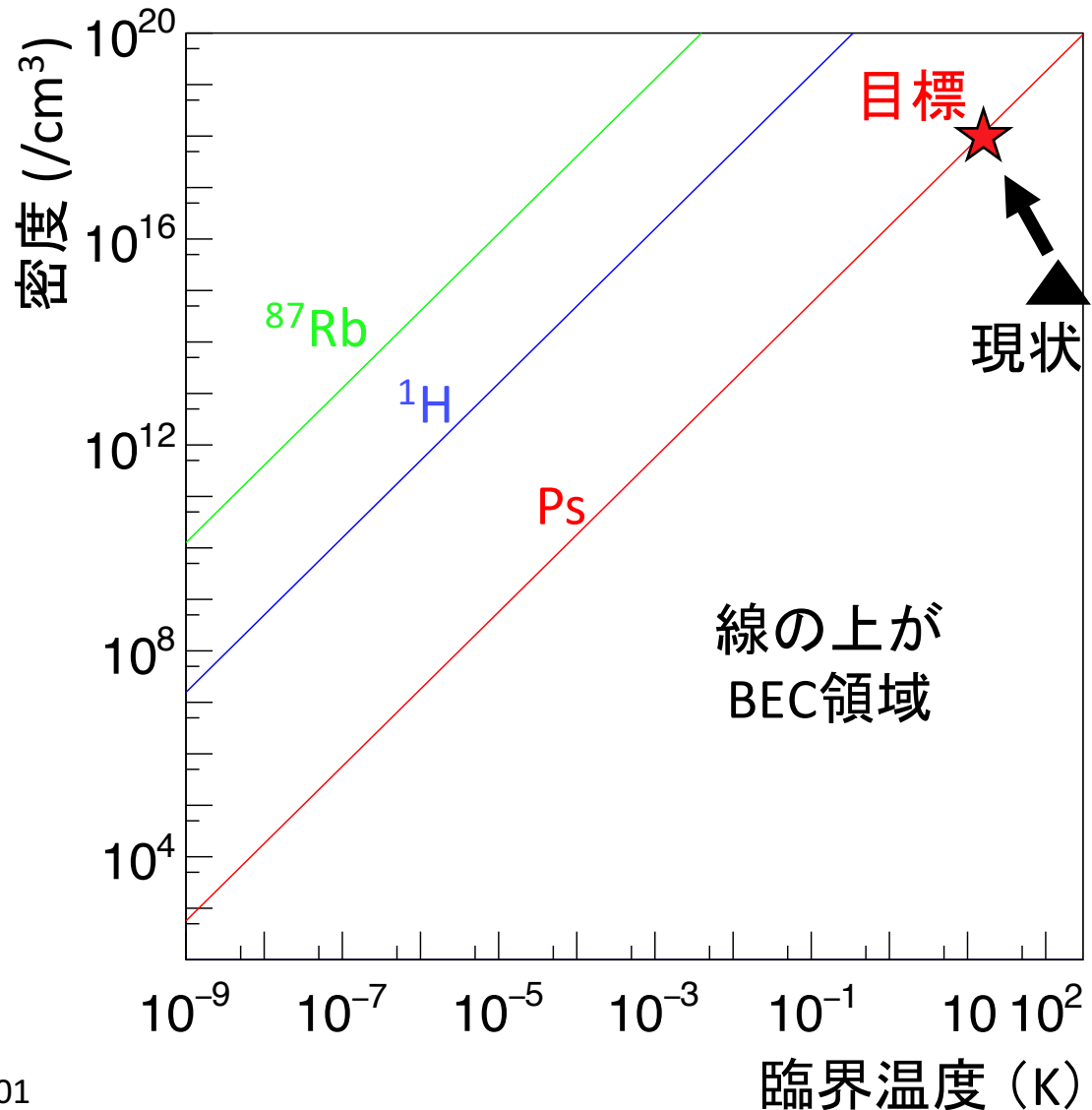
□ 高密度化 $10^{18}/\text{cm}^3$

□ 冷却 **10K**

がチャレンジ

(現状 $10^{15}/\text{cm}^3$ *1, 150K *2)

高密度化・冷却ともに
難しく、これまでPs-BECは
実現していない



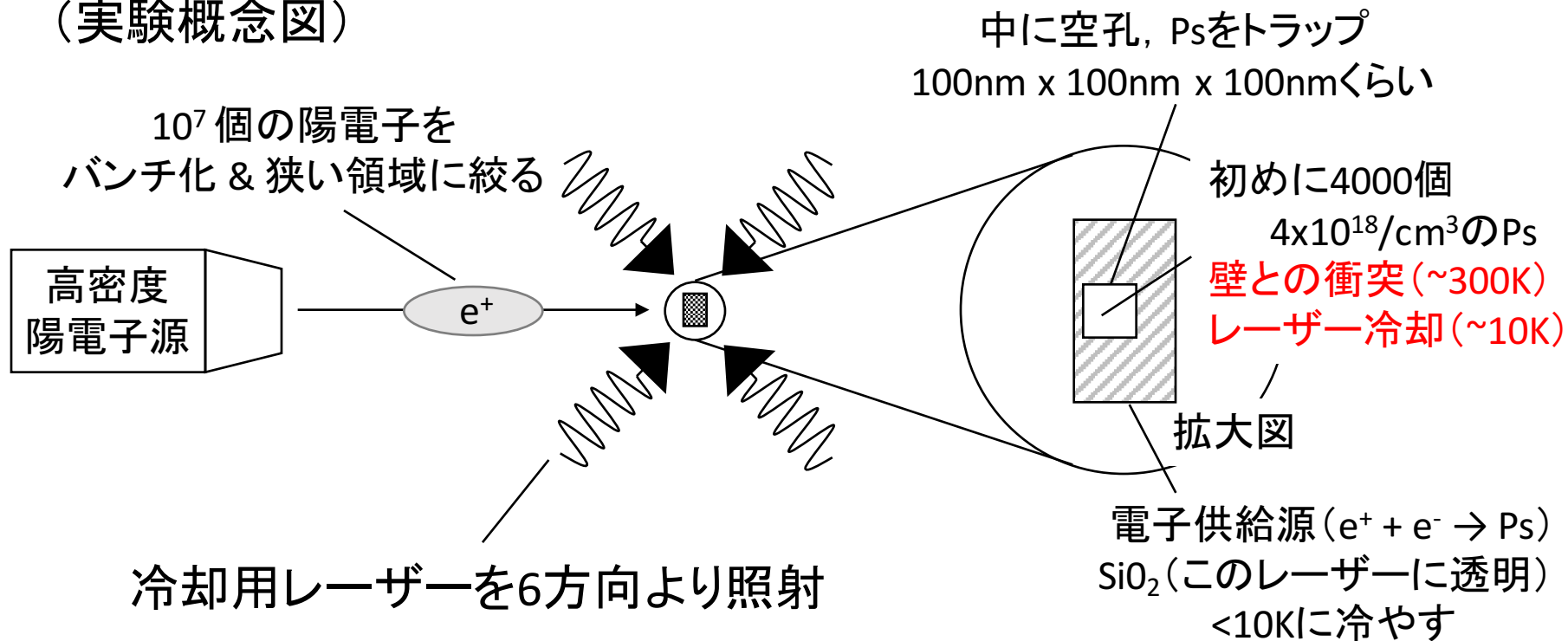
*1 : S. Mariuzzi *et al.* Phys. Rev. Lett. 104, 243401

*2 : D. Cassidy *et al.* physica status solidi 4, 3419

Ps-BECを実現するには

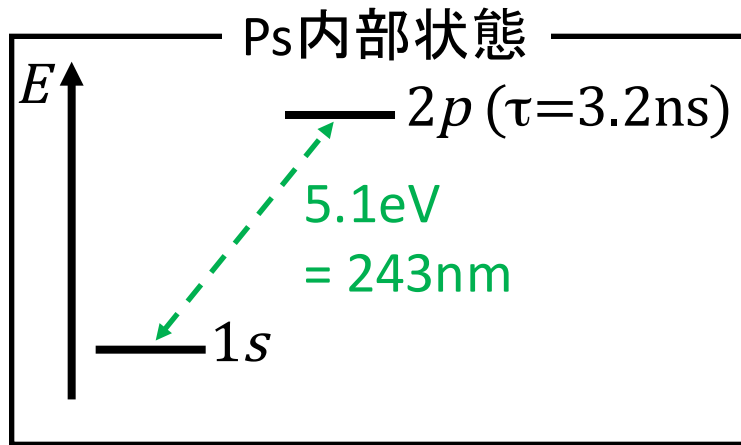
新しいアイデア (arXiv: 1511.07924, Accepted for publication in J. Phys. B)

(実験概念図)

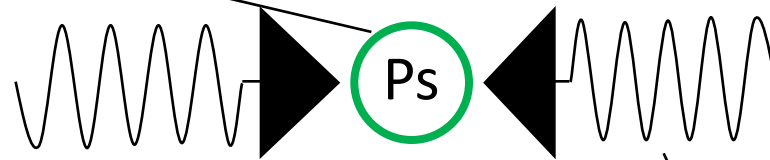


1. シリカ (SiO_2) でキャビティにPsをトラップ (高密度化)
2. 冷たいシリカとの衝突 (熱化) \rightarrow レーザー冷却 の二段階冷却 (高速冷却)
(Psレーザー冷却自体まだ誰も成功していない, 新しいチャレンジ)

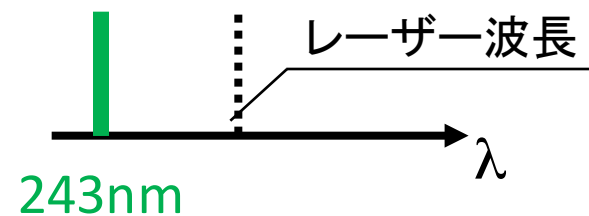
Psレーザー冷却の原理



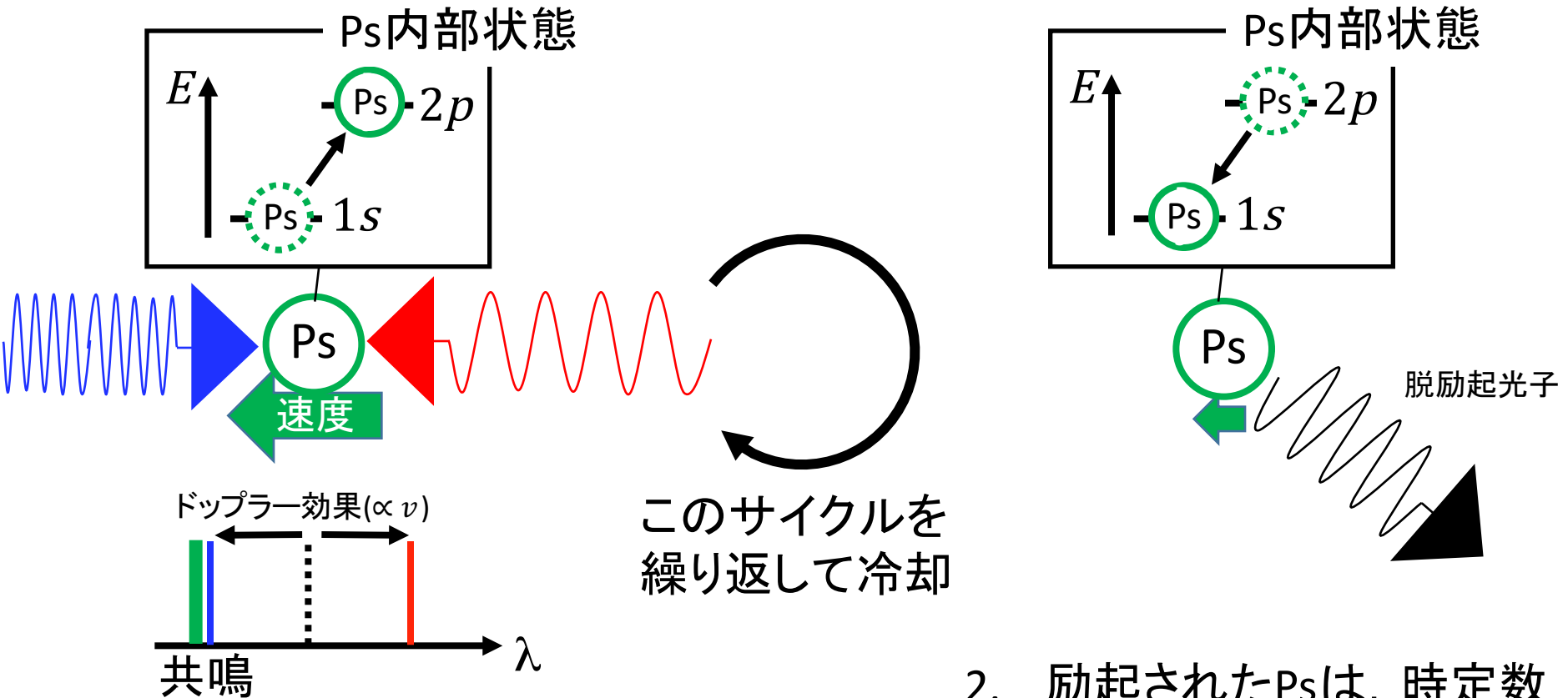
1s - 2p 準位間共鳴を利用



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



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)

シミュレーションによる冷却の評価

シリカキャビティ & レーザー
で <10K の冷却ができるか？

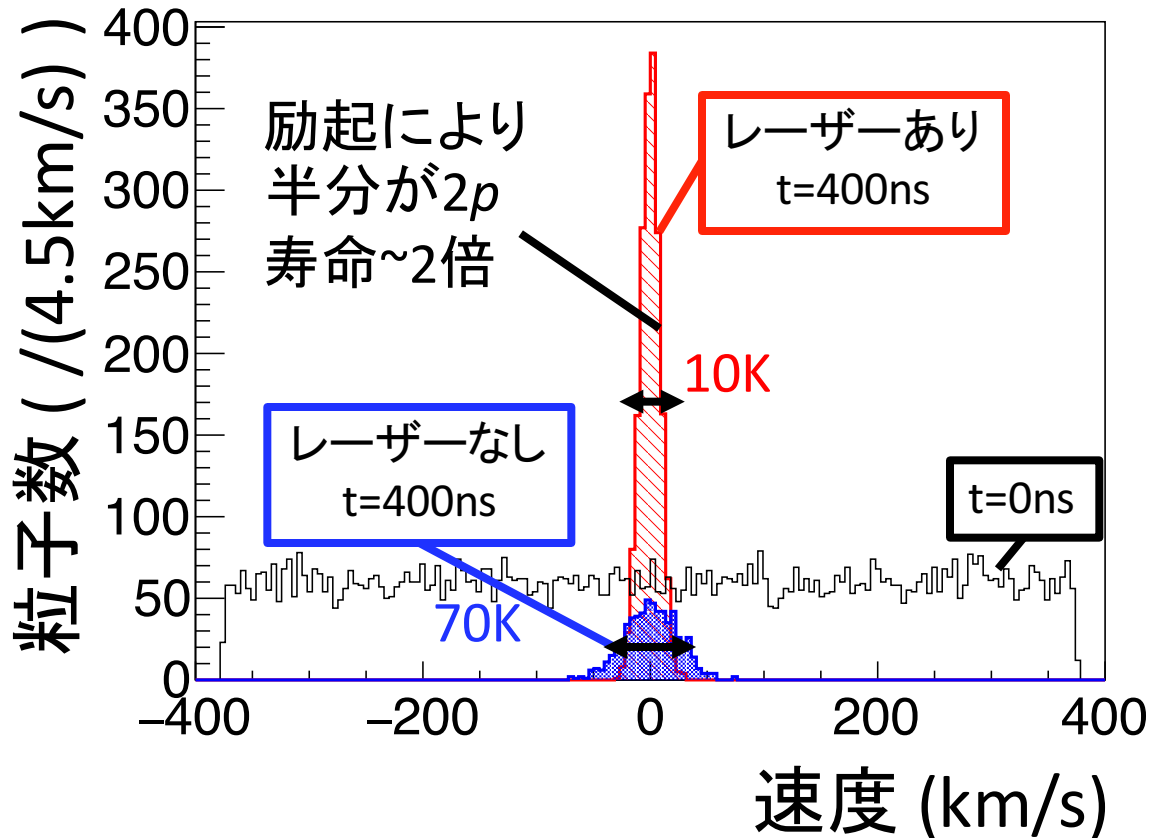
➤ シミュレーションで評価

初期条件

- 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

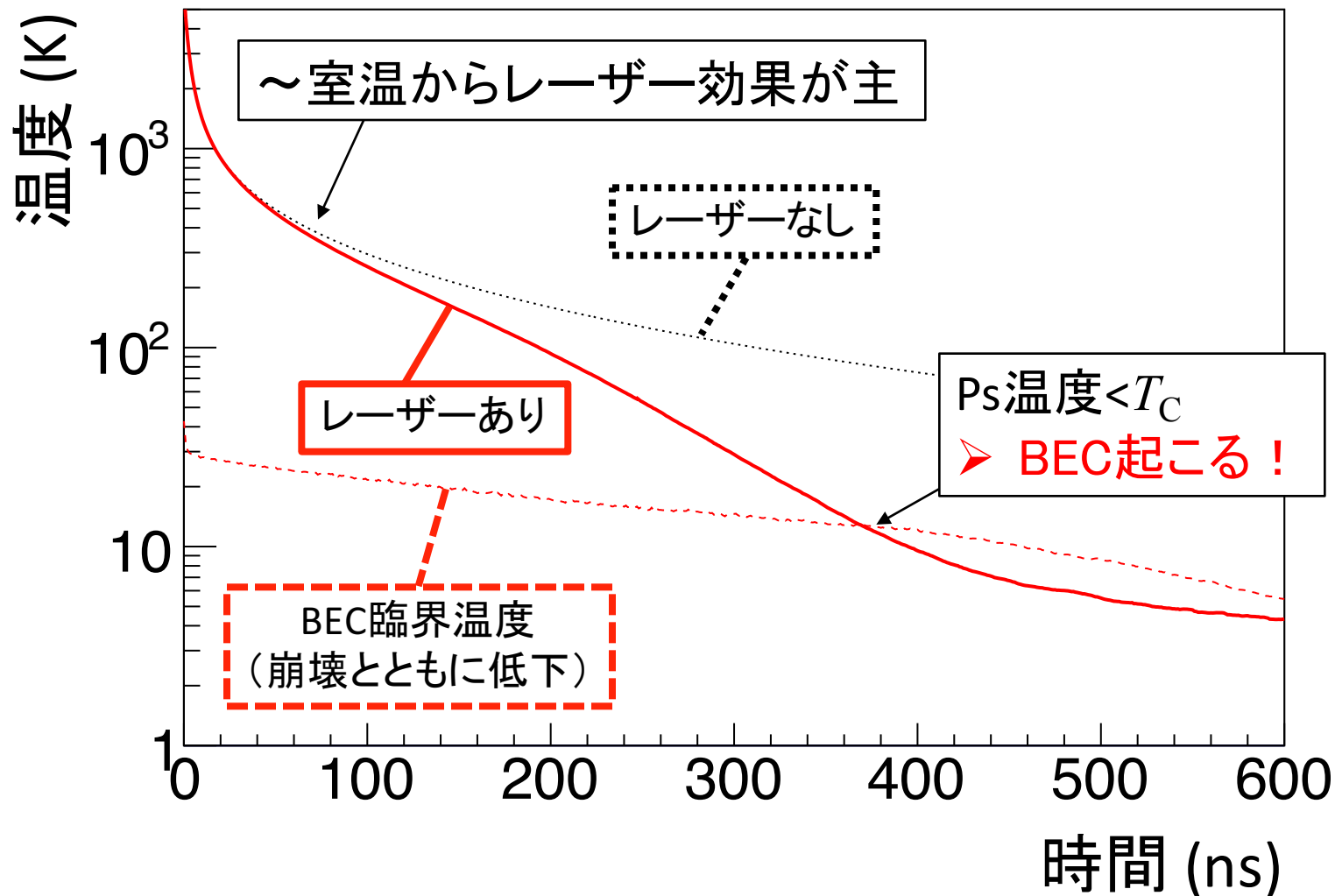
相互作用

- 熱化
- Ps - Ps 二体散乱
- レーザー冷却
(レーザースペックは次の村吉)



速度 (のx成分) の分布

シミュレーションによる冷却の評価



温度の時間発展

BEC実現に向けたロードマップ

1. ~100K Psの冷却実験

- 100K シリカ中でPsを作り, 熱化でどこまで冷えるか検証

2. ~10K Psの温度測定方法の確立

- 光学遷移を用いた新たな手法を検討中

3. 冷却用レーザー光源の開発

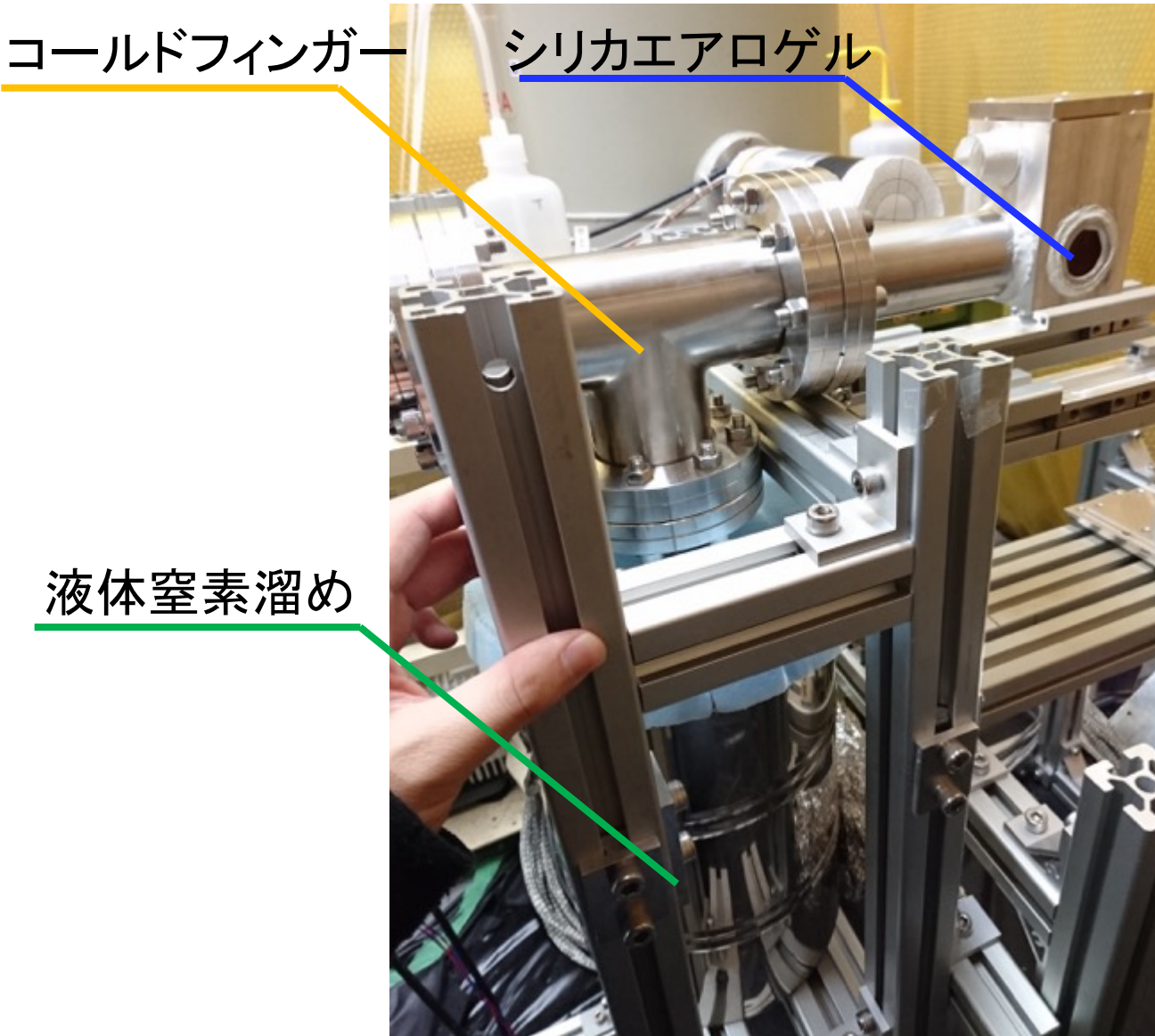
- まずは世界で初めてのレーザー冷却実現を目指す
- これまでにはなかった特徴が必要なため新たな光学系を開発中
(村吉・次のトーク)

✓ ここまでできたら, 世界初Psレーザー冷却の実現

4. 陽電子源の開発

- 10^7 という数のバンチ化(時間幅ns)と100nmフォーカス
- 産総研陽電子プローブグループ(鈴木さん大島さんオロークさん)と協力して, ビームラインのデザイン

～100K Ps冷却実験



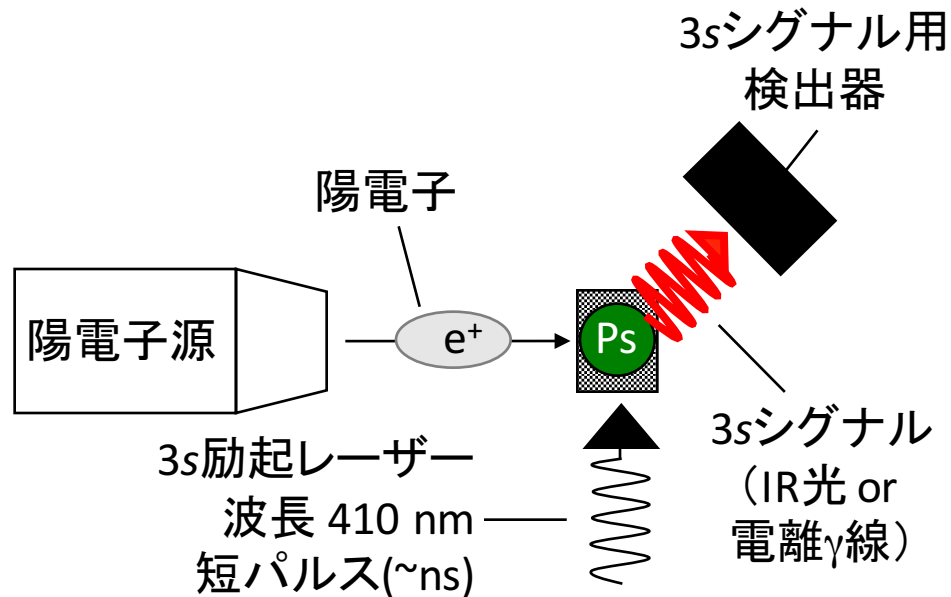
液体窒素でシリカエアロゲルを冷やし, Psを生成するための実験装置

シリカエアロゲルを120Kまで冷やせることを確認した

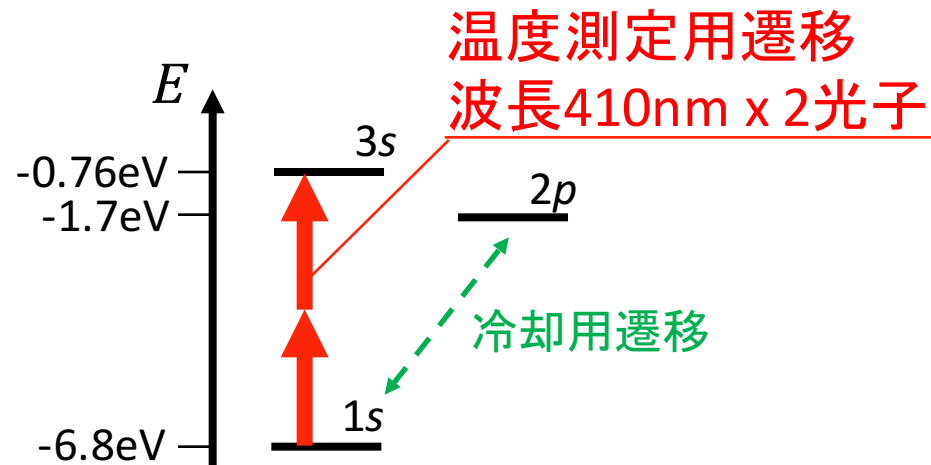
DBS や pickoff $2\gamma/3\gamma$ 比の測定といった手法でPsの温度を確認する予定

～10K Ps温度測定方法

1s – 3s 2光子分光でドップラー幅を測る ○精度, ○バンチ陽電子



- ◆ レーザーの波長を変えることで励起するPsの運動量を選択可能 (byドップラー効果)
→ 波長スキャンで運動量分布=温度測定



- ◆ レーザー冷却とは別遷移を使うことで、冷却中でも温度測定可
- ◆ 3sへの励起未観測・新しい方法

- 必要なレーザースペックの見積もりを行い、現実的な光学系で実験可能だと分かった
- 現在、検出方法の最適化を行っている

陽電子源

必要スペック

陽電子数	10^7 e ⁺ /バンチ
バンチ時間幅	<5 ns
陽電子エネルギー	<10 keV
ビーム径(@焦点)	<100 nm

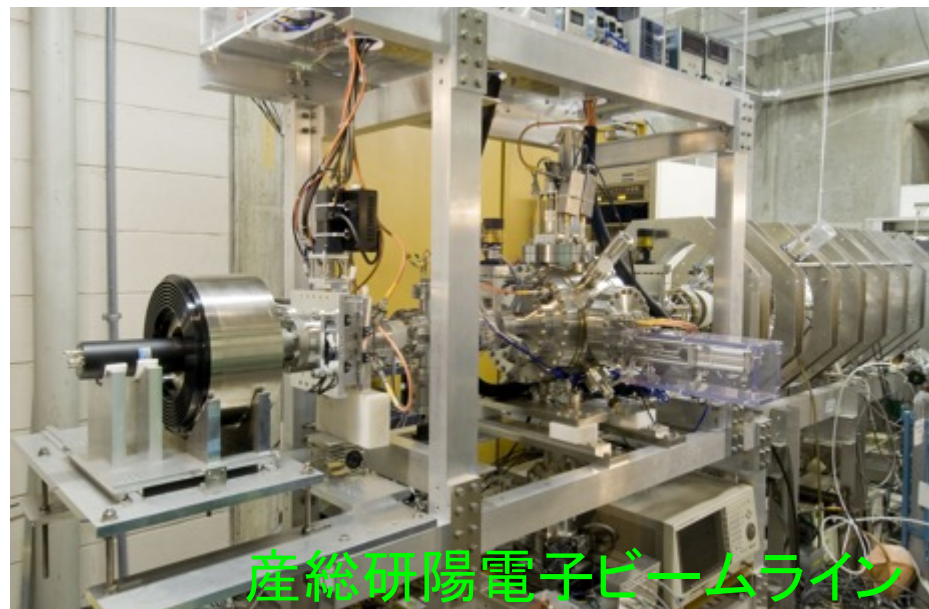
大量の陽電子を極限まで絞るという
新たなチャレンジ

- ✓ バンチャー(蓄積&短パルス化)
- ✓ 再減速材(フォーカス→輝度増)
など導入を考えている

- 現在, 産総研と協力して検討を進めている
- まずはバンチ化で温度測定,
レーザー冷却

産総研ビームラインのスペック*

陽電子数	10^4 e ⁺ /バンチ
バンチ時間幅	~ μs
陽電子エネルギー	0.5 ~ 30 keV
ビーム径(@焦点)	25 μm



http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2008/pr20080828_2/pr20080828_2.html より

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
- 実験の第一段階として、~100K Psの冷却実験を行っている
シリカエアロゲルを冷やせることを確認した。今後Psを生成し、熱化の評価を進めていく
- ~10K Psの温度を測る方法が確立されていないため、光学遷移を使った精密温度測定の検討を進めている
- 高密度陽電子源について、 $10^7 e^+/\text{bunch}$ (バンチ幅 ~ns) と100nmフォーカスの実現にむけ、産総研と協力して、ビームラインのデザインを進めている