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

東大理, 東大素セ^A, 東大工^B, 産総研^C, 九大GIC^D, 高工研(物構研)E, 原子力機構F, 高麗大学G

石田 明,橋立佳央理,難波俊雄A,浅井祥仁,五神 真, 田島陽平B,小林拓豊B,魚住亮介B,周 健治B,蔡 恩美B,G,吉岡孝高B, 大島永康^c、オロークブライアン^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E, 和田 健E, 甲斐健師F



















https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110

令和3年9月17日

日本物理学会2021年秋季大会@オンライン開催

8機関、21名で共同研究

東大理・素粒子センター 石田など









吉岡など







|レーザー開発



• 産総研 分析計測標準研究部門

大島など

高輝度陽電子ビーム開発



産総研物質計測標準研究部門

伊藤など

九大工 藤野

Ps 生成·濃縮· 冷却材開発



• <u>KEK 物構研</u> 和田など

KEK-SPF における実験



• <u>日本原子力研究開発機構</u> 甲斐

高密度粒子MC



謝辞

以下の研究助成を受けています。(終了済のものも含む)

- JSPS科研費 JP16H04526, JP17H02820, JP17H06205, JP17J03691, JP18H03855, JP19H01923
- 公益財団法人 松尾学術振興財団
- 公益財団法人 三豊科学技術振興協会
- 公益財団法人 光科学技術研究振興財団
- 公益財団法人 三菱財団
- TIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」TK17-046, TK19-016

2021年度より、JST 創発的研究支援事業 の支援を受けています。

https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110

目次

ポジトロニウム (Ps) のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) の目的:

<u>反物質</u>の新量子多体系である低温量子凝縮相 =<u>反物質レーザー</u>を実現

- Ps-BEC 実現スキーム
- Ps レーザー冷却実現に向けた実験の状況
- KEK 物質構造科学研究所 (IMSS) 低速陽電子実験施設 (SPF) における実験

<u>反物質</u>の新量子多体系である低温量子凝縮相 =反物質レーザーを実現

ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

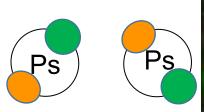
- ▶ 集団中のほぼすべての原子が 単一の量子状態になる
- ▶ 原子は 冷たくかつ 高密度

通常の物質:

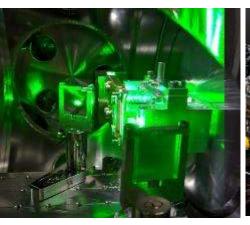
- 超伝導
- 超流動 反物質は?



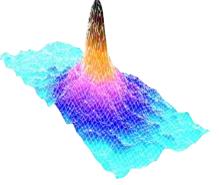
レーザー冷却 + 超高密度化



反物質 ポジトロニウム(Ps) (古典極限系)







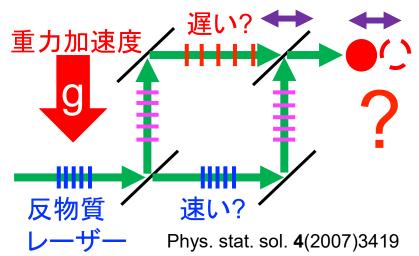
反物質 新量子多体系 Psのボース・アイン シュタイン凝縮

(BEC)

基礎科学研究や次世代光源への応用可能性

1. <u>反物質に働く重力を</u> 原子干渉計を用いて測定

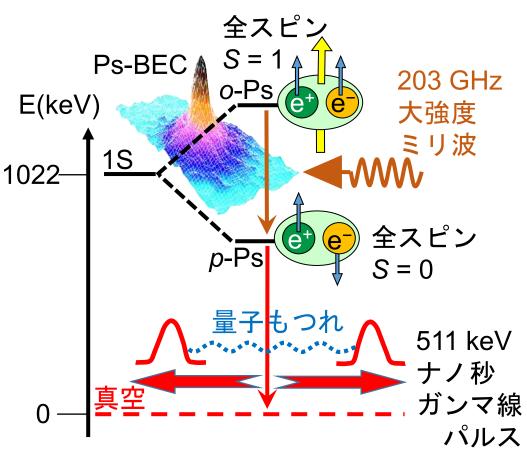
パスの長さを変化させると Ps の強度が明滅しうる



⇒<u>重力</u>という<u>実験的に未探索</u>の切り口で物質・反物質の未知の非対 称性を探り、

「なぜ、宇宙に物質のみ残ったのか」 という問いに答える

2. <u>511 keV ガンマ線レーザー</u>



Phys. Rev. A 92(2015)023820

⇒光科学研究、 産業·医療応用

2つのチャレンジ: Ps の高密度化と高速冷却

最大の問題

Ps は寿命が142 ns と 短い

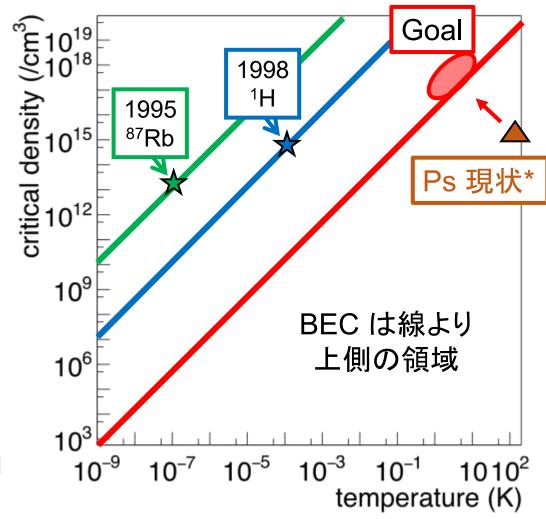
2つの課題

1. 瞬間的な高密度 Ps の 生成

> < 50 ns で > 10¹⁸ cm⁻³ (現状: 10¹⁵ cm⁻³)

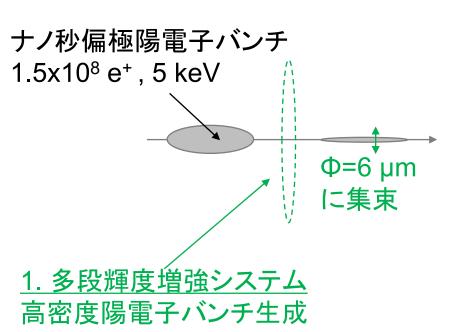
2. Ps の高速冷却

~300 ns で < 10 K に冷却 (現状: 150 K)

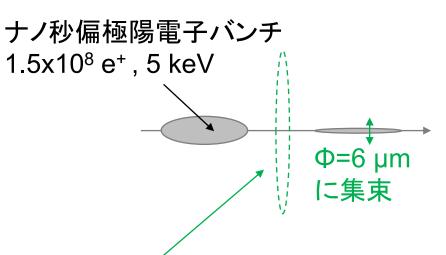


* : S. Mariazzi *et al.* Phys. Rev. Lett. **104**(2010)243401, D. Cassidy *et al.* physica status solidi **4**(2007)3419.

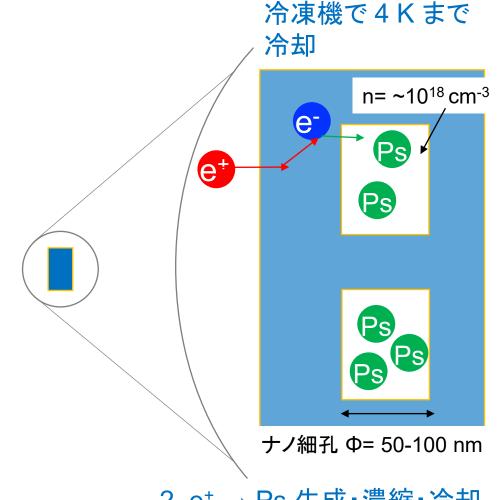
1. 陽電子集束システム



- 1. 陽電子集束システム
- 2. Ps 生成·濃縮·冷却材



1. 多段輝度増強システム高密度陽電子バンチ生成



2. e⁺ → Ps 生成•濃縮•冷却 無機酸化物多孔体

拡大図

- 1. 陽電子集束システム
- 2. Ps 生成·濃縮·冷却材
- 3. Ps レーザー冷却

ナノ秒偏極陽電子バンチ

1.5x10⁸ e⁺, 5 keV

1. 多段輝度増強システム

高密度陽電子バンチ生成

A. Ishida et al.,

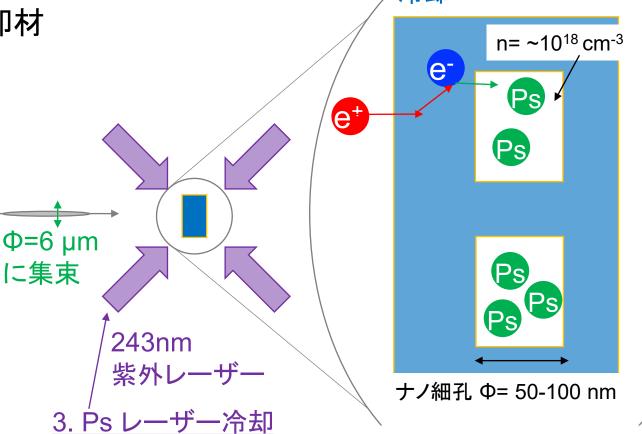
JJAP Conf. Proc. 7(2018)011001,

K. Shu et al.,

J. Phys. B **49**(2016)104001.

拡大図

冷凍機で4Kまで 冷却



(1S-2P 遷移を使用) 2. e⁺ → Ps 生成•濃縮•冷却 無機酸化物多孔体

熱化 とレーザー冷却 を組み合わせて Ps を 300 ns で

Ps-BEC 転移温度を下回る 10 K まで冷却可能(シミュ

<u>レーション)</u> 1

17aT2-6

10

1. 陽電子集束システム ←2020年秋

2. Ps 生成•濃縮•冷却材 ← 領域10, 21pK2-2

Ф=6 μm

に集束

3. Ps レーザー冷却 ←本日

ナノ秒偏極陽電子バンチ 1.5x10⁸ e⁺, 5 keV

1. 多段輝度増強システム 高密度陽電子バンチ生成

A. Ishida *et al.*, JJAP Conf. Proc. **7**(2018)011001,

K. Shu et al.,

J. Phys. B **49**(2016)104001.

243nm 紫外レーザー 3. Ps レーザー冷却 (1S-2P 遷移を使用) 2

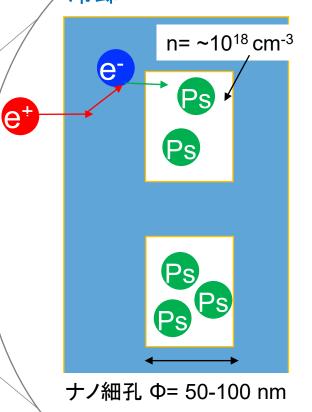
(1S-2P 遷移を使用) 2. e⁺ → Ps 生成・濃縮・冷却 無機酸化物多孔体

<u>熱化 とレーザー冷却 を組み合わせて Ps を 300 ns で Ps-BEC 転移温度を下回る 10 K まで冷却可能(シミュ</u>

<u>ノーション)</u> 17aT2-6

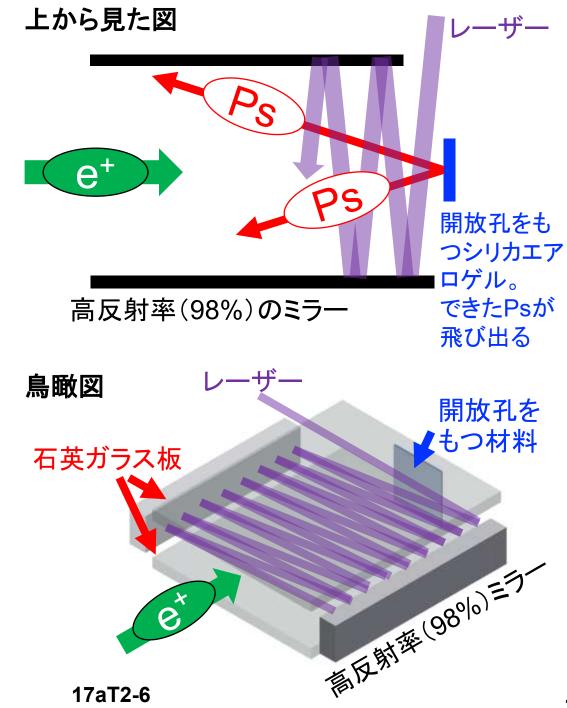
拡大図

冷凍機で4Kまで 冷却



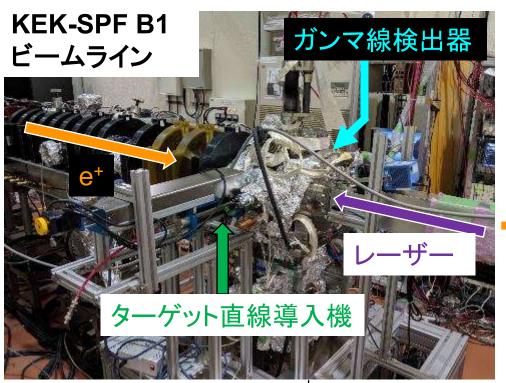
まずは真空中で Ps のレーザー 冷却を実証する

- 開放孔をもつ Ps 生成材(シリカエアロゲル: SiO₂)から真空中に放出された Ps にレーザーを照射
- レーザーと Ps の相互 作用領域を確保する ため、レーザーは高反 射率ミラーで多重反射
- 2 枚の石英ガラス板で Ps を閉じ込め



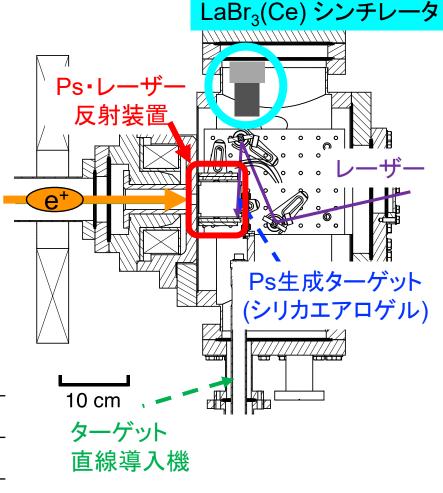
2021/09/17

KEK 低速陽電子実験施設 (KEK-SPF) における Ps レーザー冷却実験セットアップ



エネルギー	5 keV
ビーム強度	~10 ⁶ e ⁺ / s
	50 Hz
	11 ns FWHM
ビームサイズ	Φ ~10 mm

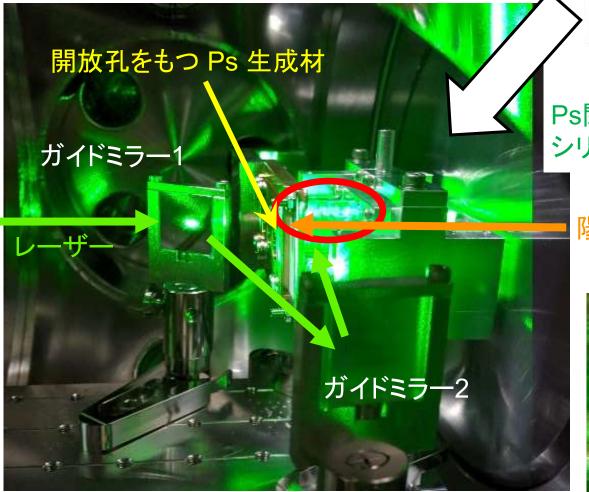
2021/09/17

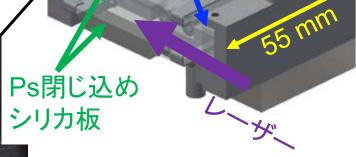


真空チャンバー

KEK-SPF にて真空中 で Ps の 1S→2P 遷 移を確認した

真空チャンバー内





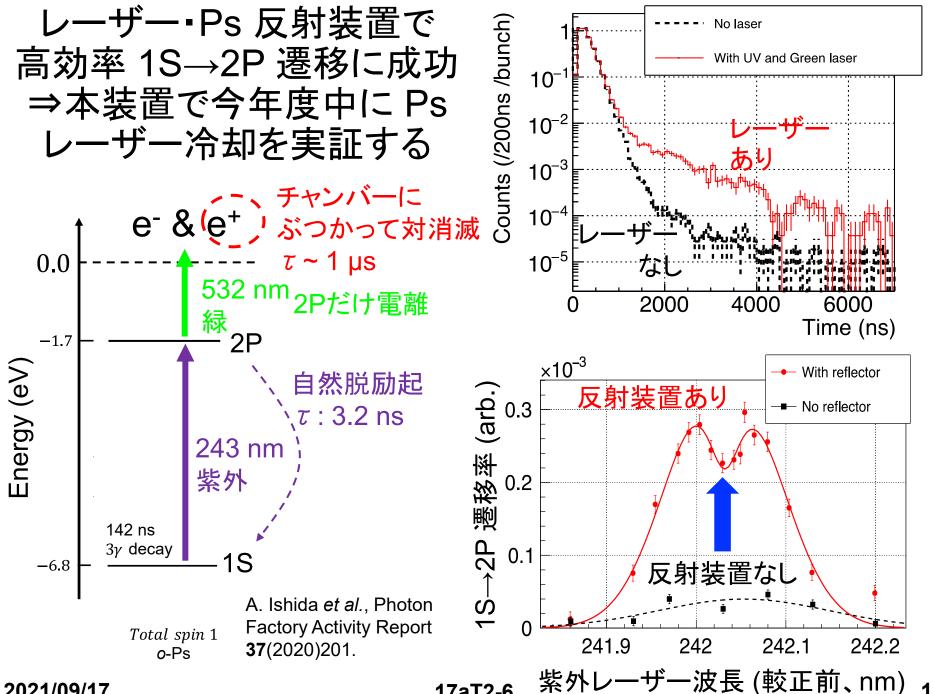
ーザー多重反射ミラー

陽電子



レーザー・Ps

反射装置

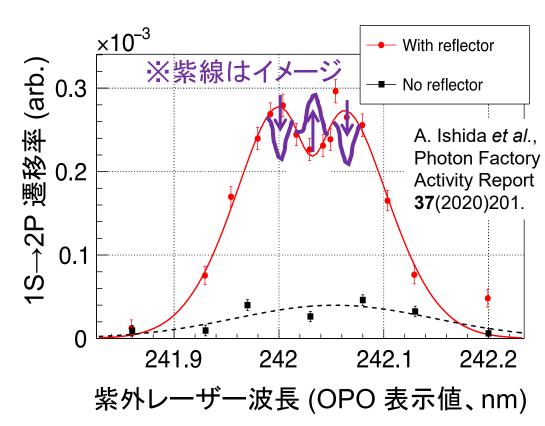


2021/09/17

17aT2-6

プロトタイプレーザーによる Ps 冷却実験

- プロトタイプのPs冷却用レーザー (K. Yamada et al., Phys. Rev. Applied 16(2021)014009) で部分的に冷却してみる
 - →Ps全体を冷却するには線幅が足りないが、一部でも冷却されれば効果が見えるはず!
- これまでのビームタイムで以下 を達成:
 - □ レーザー光学系のモニ ター・制御システムの自動 化・高度化
 - □ レーザーを使った Ps 温度 測定を安定的に行うシステ ムを自動化
 - □ 冷却効果が見えない条件 で、測定系全体における 冷却レーザーの影響調査



Ps レーザー冷却の早期実現に向け、 着々と準備を進めています。 今後の進展にご期待ください!

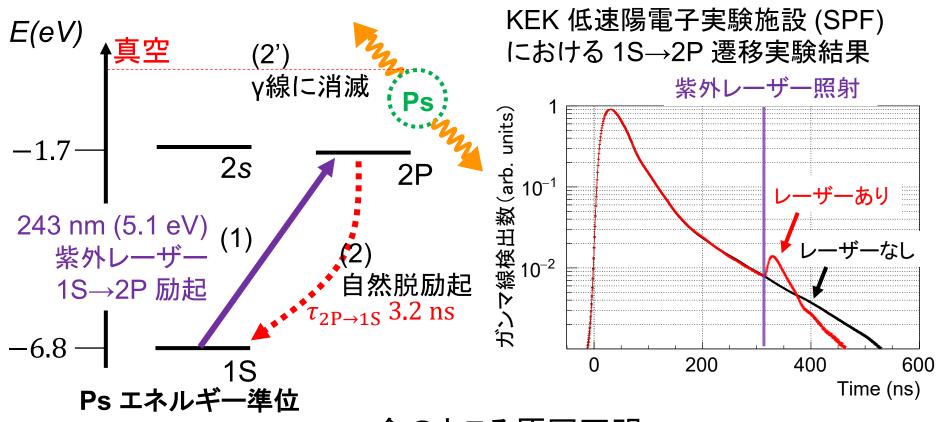
シリカ細孔中での Ps レーザー冷却可能性について

Ps レーザー冷却 : (1)→(2)→(1)→(2)... サイクルを 50 回繰り返す

シリカエアロゲル細孔中では、(1)→(2')と瞬時にγ線に消滅してしまった!

→<u>レーザー冷却できない</u>

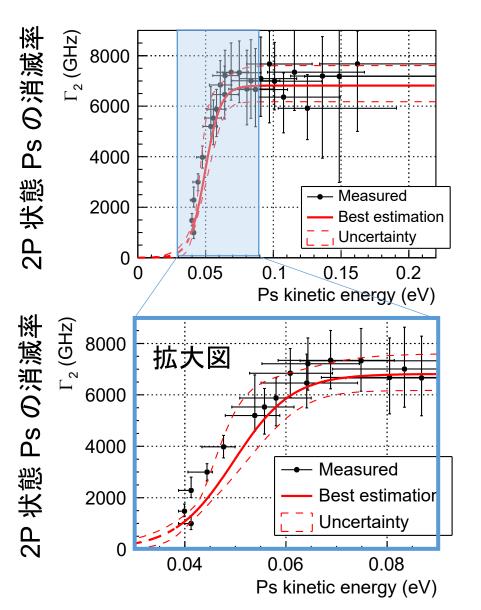
周健治、博士学位論文 (東京大学、2020年)



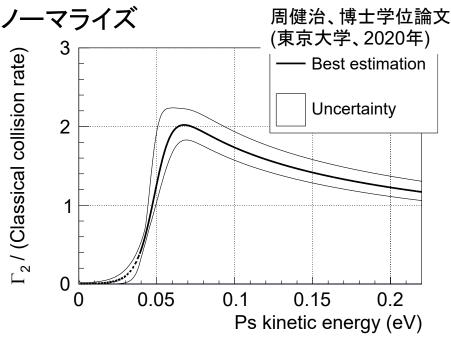
今のところ原因不明

Ps エネルギー依存性や物質依存性を調査して解明する

Ps エネルギーが小さいほど、消滅率も低い



Ps と細孔壁との古典的な衝突頻度で



- 古典的衝突率と同程度で消滅
- レーザー冷却前に、熱化で十分 Ps を冷却できれば、レーザー冷 却できる可能性

→低温にしたシリカエアロゲル中で 実際に低温領域での消滅率を測定 予定

17aT2-6

まとめ

- 1. Ps-BEC を実現して世界初の反物質レーザーを作りたい。
 - 反物質系低温量子凝縮相の研究
 - 「なぜ、宇宙に物質のみ残ったのか」を解明
 - ガンマ線レーザーの実現
- 2. ナノ細孔中で Ps をレーザー冷却する Ps-BEC 実現スキーム。
- まず真空中での Ps レーザー冷却を実証(今年度中を目指す)。高効率で Ps の 1S→2P 遷移は達成済み。
- 4. 現在、プロトタイプのPs冷却用レーザーによるPs冷却実験に挑戦している。

https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110