# ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮I (全体像と高密度ポジトロニウム生成)

東大理,東大素セ<sup>A</sup>,東大工<sup>B</sup>,高麗大学<sup>C</sup>,産総研<sup>D</sup>,

九大GIC<sup>E</sup>, KEK物構研<sup>F</sup>, 原子力機構<sup>G</sup>

<u>石田明</u>, Randall W. Gladen, 難波俊雄<sup>A</sup>, 浅井祥仁, 五神真, 田島陽平<sup>B</sup>, 小林拓豊<sup>B</sup>, 魚住亮介<sup>B</sup>, 周健治<sup>B</sup>, 蔡恩美<sup>C</sup>, 吉岡孝高<sup>B</sup>, 大島永康<sup>D</sup>, オロークブライアン<sup>D</sup>, 満汐孝治<sup>D</sup>, 伊藤賢志<sup>D</sup>, 熊谷和博<sup>D</sup>, 鈴木良一<sup>D</sup>, 藤野茂<sup>E</sup>, 兵頭俊夫<sup>F</sup>, 望月出海<sup>F</sup>, 和田健<sup>F</sup>, 甲斐健師<sup>G</sup>



https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/ https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page\_id=110

令和4年9月7日 日本物理学会 2022年秋季大会 @岡山理科大学



http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/

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)

• JST 創発的研究支援事業 JPMJFR202L



- 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
- 【文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)】 JPMXS0118067246

https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/ https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page\_id=110

# 目次

- 1. ポジトロニウム (Ps) のボース・アインシュタイン 凝縮 (BEC)
  - <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
  - 物質・反物質非対称性の探索
  - 精密分光による素粒子標準理論の検証 (2S-2P準位差には 4.2σもの乖離)
- 2. Ps-BEC 実現スキーム
- 3. 高密度 Ps 生成の現状

# ポジトロニウム (Ps)

- ・純粋なレプトン系かつ最も軽い原子
   →束縛系量子電磁力学 (QED) の精密検証
- 反物質系 → 物質・反物質の未知の非対称性の探索
- 水素原子 (H)



電子と陽子の結合状態

真空中の寿命:無限

ポジトロニウム (Ps)



電子と陽電子(電子の反粒子)の 結合状態

真空中の寿命(o-Ps):**142 ns** 消滅の際 511 keV 以下のガンマ 線を放出する。

2022/9/7

2つのスピン固有状態  
光や真空と同じ量子数をもつ系  
全スピン1(スピン三重項)  
オルソポジトロニウム(o-Ps)  
光と同じ量子数  
"質量をもつ光"  
o-Ps 寿命 142 ns  

$$\vec{k_2}$$
  
 $\vec{k_2}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_2}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_2}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_2}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_2}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_2}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_2}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_2}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_2}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_2}$   
 $\vec{k_1}$   
 $\vec{k_1}$ 

2022/9/7



2022/9/7

「なぜ宇宙に物質のみ残ったのか」 重力相互作用における物質・反物質非対称性の探索



T. J. Phillips: Hyperfine Interact. **109** (1997) 357.

D. B. Cassidy and A. P. Mills, Jr: phys. stat. sol. (c) **4** (2007) 3419.

7pA431-6

反物質

BEC

**Ps-BEC** 

### BEC 状態の Ps が崩壊する際, コヒーレントかつ量子もつれ状態にある2本のガンマ線を放出: <u>ガンマ線レーザー</u>の世界初実現



H. K. Avetissian *et al.*: Phys. Rev. A **92** (2015) 023820.



### 2022/9/7

## 【Ps-BEC 実現の目標値】 超高密度 (<u>10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>)</u> かつ 低温 (<u>10 K</u>)



\* : S. Mariazzi *et al.*: Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 243401.

\* : D. Cassidy *et al*.: physica status solidi **4** (2007) 3419.

- ・Ps は <u>高密度</u> かつ <u>低温</u> であ る必要がある
- ・Ps は軽いので, 他の原子系に 比べて<u>高い転移温度</u>をもつ (14 K @ 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>)
- ・<u>反物質系 BEC 世界初実現</u>の 最有力候補の一つ。
- ・最大の問題は, <u>Ps の寿命が</u> <u>142 ns と短い</u>こと。

・2つの課題:

- ◆瞬間的な高密度 Ps の生成: ≈ 50 ns で 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>
- ◆Psの高速冷却:≈300 nsで 10 K に冷却

### 熱化冷却では、10 K に到達できない → より高速な冷却が必要: Ps レーザー冷却の実現



#### Observation of orthopositronium thermalization in silica aerogel at cryogenic temperatures

Kenji Shu<sup>®</sup>,<sup>\*</sup> Akira Ishida<sup>®</sup>,<sup>†</sup> Toshio Namba, and Shoji Asai<sup>®</sup>

Department of Physics, Graduate School of Science, and International Center for Elementary Particle Physics, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Nagayasu Oshima<sup>®</sup>, Brian E. O'Rourke<sup>®</sup>, and Kenji Ito<sup>®</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba-Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

### 2022/9/7

## 熱化とレーザー冷却を組み合わせた超高速冷却によって、 Ps-BEC実現に必要な超高速冷却を達成する計画。



K. Shu et al., J. Phys. B 49, 104001 (2016), A. Ishida et al., JJAP Conf. Proc. 7, 011001 (2018).



### 2021 年秋までに紹介した 3 手法のうち, 2 手法について, KEK-SPF にて Ps 生成を確認。

- 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 ⇒シリカエアロゲル細孔中では、2P 状態に遷移した Ps が瞬時にガンマ線に消滅したため、そのままではレーザー冷却が不可能。原因究明および改善案確認のための実験を行う予定。
- ② <u>ナノインプリント</u>によるトップダウン的 開発⇒表面研磨の条件出しを終え, 今後インプリントのテストを予定。
- ③ <u>ナノプロセシング</u>技術を駆使した手法による開発⇒薄い細孔壁を達成するため、電子ビーム描画の条件出しを行っている。





×200,000









# ポジトロニウム飛行時間測定 (Ps-TOF)



- 陽電子照射 = Ps生成から
   ガンマ線検出までの時間を
   測定
- 鉛スリットで限られた領域
   内で崩壊した Psのみ検出
   可能に
- スリットで制御した距離とガンマ線検出までの時間分布から, Psの速さ分布を求める。
- 実際にはo-Psの寿命や放 出角分布,検出効率の位 置・Ps速さ依存性を考慮す る必要がある

S. Iida, <u>K. Wada</u>, <u>I. Mochizuki</u>, T. Tachibana, T. Yamashita, <u>T. Hyodo</u> and Y. Nagashima, J. Phys.: Condens. Matter **28** (2016) 475002.

Ps-TOF データを取得し, 鋭意解析中。追加情報は 12(月) 領域 10 で ナノプロセシング シリカエアロゲル Ps 生成を確認。シリ Intensity Intensity 10 カエアロゲルに比べる きれいなエッジ と生成領域が小さい 10-2 ため数は少ない。 d = 120 mm 10<sup>-3</sup> 生成率を評価中。  $10^{-3}$ 表面でできたPs d = 120 mm のエネルギーが 10-4 見えると期待され 10-5 る  $10^{-4}$ 200 400 1000 1200 1400 500 1000 1500 600 800 Time (ns) Time (ns) htime multi htime multi 色は陽電子入射エ Intensity ntensity nica 4.2keV-beam 4.2keV ネルギーの違い。 10<sup>-1</sup> ca 4.2keV-beam 4.2keV 10-1 erNPF 4.2keV-beam 4.2keV (左図) WoferNPE 1116eV 1.1ke SiWaferNPF 2628eV 2.6ke 赤:0.5 keV  $10^{-2}$  $10^{-2}$ d = 40 mm禄:1.0 keV 青:2.0 keV  $10^{-3}$ d = 40 mmなど。 10 図は9 keV まで。 10-黒は雲母(マイカ)に 10<sup>-5</sup>

2022/9/7

200

600

800

1000

1200

1400

Time (ns)

7pA431-6

500

1000

よる測定

Time (ns)

### 【手法④】 規則配列シリカナノ粒子 on ガラス基板 詳細は, 9/12(月)の領域 10 で。



渡邉 亮太 博士(産総研)らの手法 R. Watanabe *et al.*, J. Colloid Interface Sci. **360** (2011) 1. <a href="https://whitps://w

https://www.sigmaaldrich.com/JP/ja/product/sial/a5006 https://www.tcichemicals.com/JP/ja/p/T0100

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。
- 3. 高密度 Ps 生成材について,以下の開発を並行して進めている。
  - シリカエアロゲル
  - ナノインプリント
  - ナノプロセシング
  - 規則配列シリカナノ粒子

関連講演:次の講演(Ps レーザー冷却)

9/12(月)領域10:12aW323-11(Ps-TOFの詳細),

12aW323-12(機械学習を用いた検出器信号の解析)

9/14(水)領域1:14pW933-2(レーザー冷却)

https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/ https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page\_id=110

**Ps-BEC**