### 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

<u>周健治</u>, 村吉 諄之, 石田 明, 難波 俊雄<sup>A</sup>, 浅井 祥仁, 吉岡 孝高<sup>B</sup>, 蔡 恩美<sup>B</sup>, 五神 真, 大島 永康<sup>c</sup>, 満汐 孝治<sup>c</sup>, オロークブライアン<sup>c</sup>, 鈴木 良一<sup>c</sup>, 藤野 茂<sup>D</sup>, 望月 出海<sup>E</sup>, 兵頭 俊夫<sup>E</sup>

東大理,東大素セ<sup>A</sup>,東大工<sup>B</sup>,産総研<sup>C</sup>,九大GIC<sup>D</sup>,KEK<sup>E</sup>





1

# ポジトロニウム(Ps) - BEC

- <u>ポジトロニウム(Ps)</u>
- 電子と、その反物質である 陽電子の束縛系
- <u> Ps-BECのモチベーション</u>
- 初の反物質含む系でBEC

#### <u>特徴</u>

- 軽くてBEC臨界温度が高い (水素よりも3桁)
- 寿命が短い (142 nsでγ線に崩壊)

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
2017/9/13
511 keV γ線レーザー





- BECに必要な条件
- 高密度
- 低温
- しかしPsは短寿命(T=142ns)
- ▶ ゆっくり溜めたり冷やしたり できない!まったく新しい BEC達成スキームが必要

<u>冷却</u> 10 K以下までの冷却を達成

<u>高密度化</u> 低速陽電子の多段集束で 10<sup>17</sup> Ps cm<sup>-3</sup> 以上を達成



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

3

## Ps-BEC実験の概念図

<u>アイデア</u> K. Shu *et al.* J. Phys. B 49, 104001 (2016)

- 1. 50 nsバンチ陽電子を集束し高密度化する
- 2. シリカ多孔体に陽電子を打ち込み,高密度Psに変換する
- 3. 低温シリカとの衝突とレーザー冷却を組み合わせて高速冷却する

5 keV, 10<sup>8</sup> e<sup>+</sup>, 50 ns, Φ 5 mm



陽電子は作れる量が少ない ▶ 数をあまり減らさず集束していく<u>陽電子輝度増強法</u>を用いる

N. Oshima et al. J. App. Phys. 103, 094916 (2008)



1. 進行方向磁場に陽電子を巻きつ けることでビーム発散を防ぎ、レ ンズまで導く

陽電子は作れる量が少ない ▶ 数をあまり減らさず集束していく<u>陽電子輝度増強法</u>を用いる

N. Oshima et al. J. App. Phys. 103, 094916 (2008)



2. レンズ前で消磁する。ビー ム径を適度に拡げる

陽電子は作れる量が少ない ➤ 数をあまり減らさず集束していく<u>陽電子輝度増強法</u>を用いる

N. Oshima et al. J. App. Phys. 103, 094916 (2008)



 レンズ磁場によるローレン ツカによって陽電子に対し て凸レンズ効果が働き、集 東される。



 集束による角度発散を抑 えるために、再減速材へ 入射する。



陽電子輝度増強を多段繰り返すことで、超高密度陽電子を実現する

# 空間荷電効果

陽電子同士の反発力による空間荷電効果が問題となる



ビームが拡がる力と磁場の巻きつけ力 がつりあう磁場の強さ = Brillouin Flow

このBrillouin flowがビーム輸送磁場
より小さくなければならない

➢ Brillouin flow < 1 kG = B<sub>max</sub>が必要

### 2. <u>ビーム進行方向の発散力</u>



再減速材から取り出す際,前に進めな くなってしまう

▶ <u>I < 3.3 x 10<sup>4</sup> A/m² = I<sub>Limit</sub></u>が必要

## 陽電子輝度増強部の検討

Ps生成率10%, 進行7 200 nmに停止を仮定 n <sub>Target</sub> = <b>1 x 10<sup>17</sup> Ps cm</b>	方向 1段 1 <sup>-3</sup>	8日 2段	日 集 集 す	終段 夏のみ
Beam Parameter	1次	2次	3次	最終
密度比 n/n <sub>Target</sub>	2.5 x 10 <sup>-5</sup>	5 x 10 <sup>-4</sup>	7 x 10 <sup>-3</sup>	0.7
制限電流比 I/I <sub>Limit</sub>	4.9 x 10 <sup>-4</sup>	9.9 x 10 <sup>-3</sup>	0.13 < 1	-
最大磁場比 B/B <sub>Max</sub>	7 x 10 <sup>-3</sup>	3.2 x 10 <sup>-2</sup>	0.12 < 1	-

空間荷電効果を取り入れたビーム径方程式で,多段集束時の密度,各制 限内に収まっているか確認(京大原子炉実験所 葛谷 佳広氏と協力)

- ▶ 目標 1 x 10<sup>17</sup> Ps cm<sup>-3</sup> の7割まで, 空間荷電効果による制限範囲内で高 密度化できることが分かった。制限にはまだ余裕があるため, 原理的 には目標も到達可能。
- ▶ 目標達成に向け,光学系最適化,プロトタイプ設計製作中

## Ps-BEC実験の概念図

<u>アイデア</u> K. Shu *et al.* J. Phys. B 49, 104001 (2016)

- 1. 50 nsバンチ陽電子を集束し高密度化する
- 2. SiO<sub>2</sub>(シリカ)多孔体に陽電子を打ち込み,高密度Psに変換する
- 3. 低温シリカとの衝突とレーザー冷却を組み合わせて高速冷却する



## Ps-BEC実験の概念図

<u>アイデア</u> K. Shu *et al.* J. Phys. B 49, 104001 (2016)

- 50 nsバンチ陽電子を集束し高密度化する 1
- SiO<sub>2</sub>(シリカ)多孔体に陽電子を打ち込み,高密度Psに変換する 2.
- 低温シリカとの衝突とレーザー冷却を組み合わせて高速冷却する 3



## 低温ポーラスシリカ中熱化による 冷却過程の初測定



<sup>22</sup>Na  $e^+$ **L** i i i I SU8000 0 8kV-D 2 4mm x200k SE+BSE(TU) 使用したシリカエアロゲルのSEM写真 ● 空孔中にできたPsは、低温のシリ カ骨格と衝突しながら冷える ● 衝突の際, Psとシリカ中電子との 対消滅が起こるので、その崩壊率 からPs温度測定

密度0.11 g cm<sup>-3</sup> のシリカエアロゲル SiO<sub>2</sub>でできた多孔質で, Psの平均自由行程38 nm(BET法で測定) <sub>14</sub>



SiO<sub>2</sub>でできた多孔質で, Psの平均自由行程38 nm(BET法で測定) 15



右縦軸: RTE modelによる温度換算

- 低温環境で100 Kまでの熱化過程を初めて観測, Mを測定
- 高温域で過去の実験とコンシステント
- 熱化によって100 K程度まで冷やせることが分かった

▶ 次のステップはレーザー冷却で10 K以下に



Psレーザー冷却にはパルスレーザーを用いる

- 高密度/短パルス(数十ns)陽電子が必要
- 現在日本で唯一そのような陽電子が得られる共同利用施設<u>KEK-低速</u> <u>陽電子実験施設(SPF)</u>でPs冷却実験を行う予定(予備実験承認済)。
- ▶ 反物質で初めてのレーザー冷却/冷却Psによる精密測定





Psレーザー冷却にはパルスレーザーを用いる

- 高密度/短パルス(数十ns)陽電子が必要
- 現在日本で唯一そのような陽電子が得られる共同利用施設<u>KEK-低速</u> <u>陽電子実験施設(SPF)</u>でPs冷却実験を行う予定(予備実験承認済)。
- ▶ 反物質で初めてのレーザー冷却/冷却Psによる精密測定



光透明シリカキャビティの開発

- ◆ 閉じ込めたPsをレーザー冷却するため, 紫外光に透明なシリカキャビ ティが必要
- ▶ 微細加工可能な新しい機能性シリカガラスで開発・試験中







まとめ

- Ps-BECの実現を目指してPs高密度化・冷却に取り組んでいる。目標は、 温度10 K以下、密度10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>以上である。
- 高密度Ps生成のための陽電子高密度化について, 高密度で問題となる空間荷電効果の影響を検討した。原理的10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>が達成可能であることを示し, 現在具体的な光学系の設計を進めている。
- 冷却について、低温環境での熱化を初測定し、100 K程度まで冷やせることを確認した。
- 10 Kまでの冷却を実現するレーザー冷却実験をKEK-SPFで行う。レー ザー冷却のキーテクノロジーとなる,紫外透明シリカ多孔キャビティの 試験を予備実験で行う。