

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

周 健治, 樊 星, 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

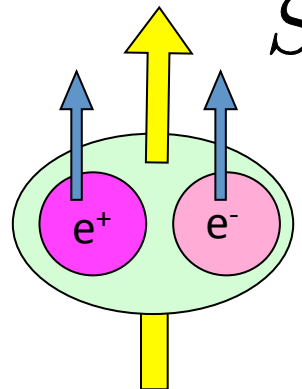
日本物理学会2015年秋季大会
2015.09.26 @大阪市立大学
26pSS-6

ポジトロニウム (o-Ps, p-Ps)

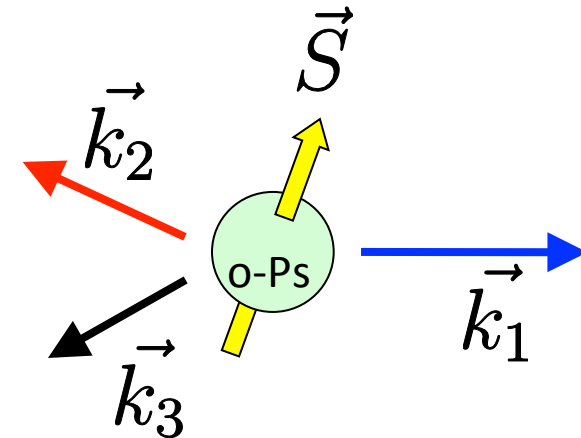
電子・陽電子束縛系粒子であり, 整数スピンをもつ(ボソン). 2つの状態が存在.

- オルソポジトロニウム (o-Ps)

$S = 1$ スピン3重項

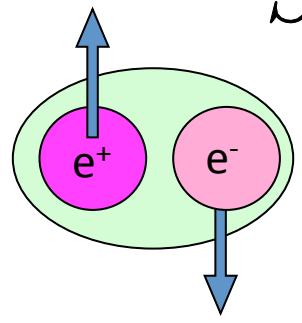


光子と同じ量子数
o-Ps $\rightarrow 3\gamma$ (, 5γ , ...)
長寿命142nsec
連続的なエネルギースペクトル

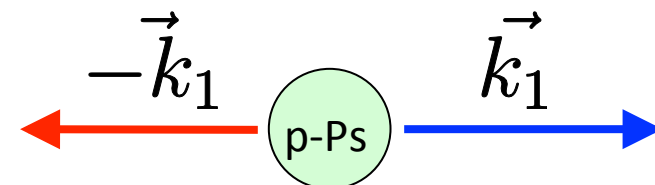


- パラポジトロニウム (p-Ps)

$S = 0$ スピン1重項



スカラー粒子
p-Ps $\rightarrow 2\gamma$ (, 4γ , ...)
短寿命0.125nsec
511keVの γ 線2本をback-to-backに放出



ボーズ・アインシュタイン凝縮

ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC)

➤ **高密度・低温**において、ほぼすべての粒子が基底状態に落ち込む現象

◇ 初観測: 1995年, Rb原子

それ以来様々な系で観測

原子 : アルカリ金属系 Rb, Na, Li,

: 他には水素原子など

さらに準粒子系でもBECを観測: マグノン(1999), ポラリトン(2006), エキシトン(2011)

ポジトロニウムでは?

➤ 1994年に初めて検討された

➤ 現在に至るまで、実現を目指して精力的に研究されるも**未観測**

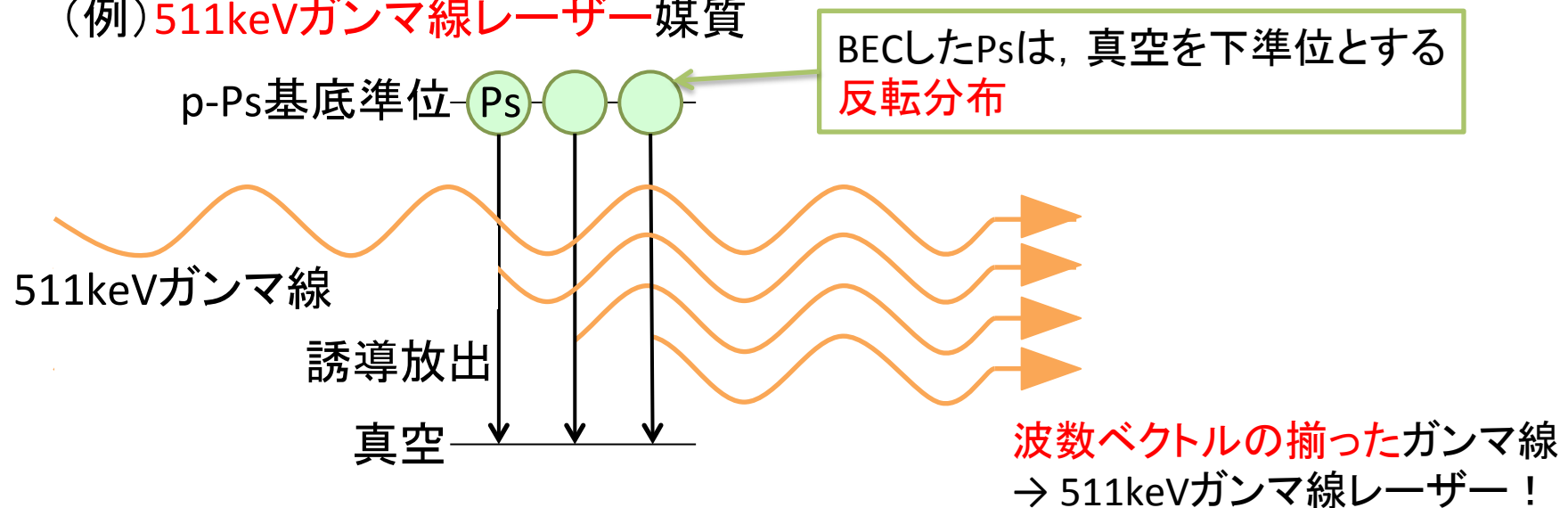
なぜポジトロニウムなのか

反物質を含んだBECは未観測

- BECしたPsは熱運動が非常に小さい
- 反物質の性質を精密に調べるのに性質の良いプローブとなる
e.g.): 反物質重力, ...

他にも, Psが電子と陽電子からできたエキゾチック系であることによる様々な応用がある

(例) 511keVガンマ線レーザー媒質



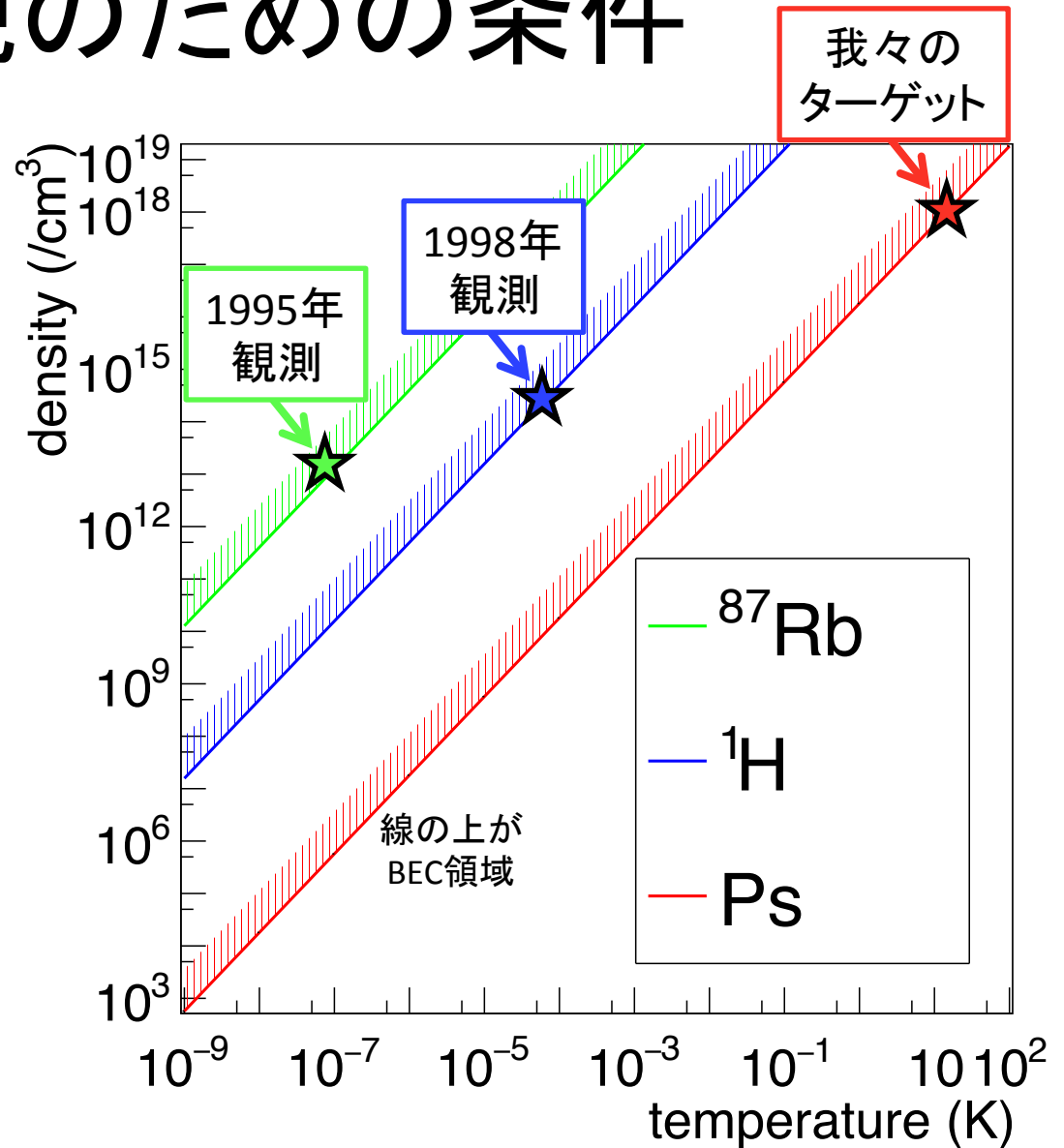
BEC実現のための条件

- ポジトロニウムは**最も軽い**原子 (水素原子の1/1000)
- このためド・ブロイ波長が長く, **BEC臨界温度が高い**(右図)
- 数Kというような「高温」において BEC相転移が可能
e.g.) **10K** @ $10^{18}/\text{cc}$

しかし, 140nsで崩壊するPsに対しては, 以下のテクノロジーが必要:

1. **高速冷却**
2. Psを生成するための陽電子を高密度化

- 冷却手法として我々は
レーザー冷却を採用する



レーザー冷却の原理

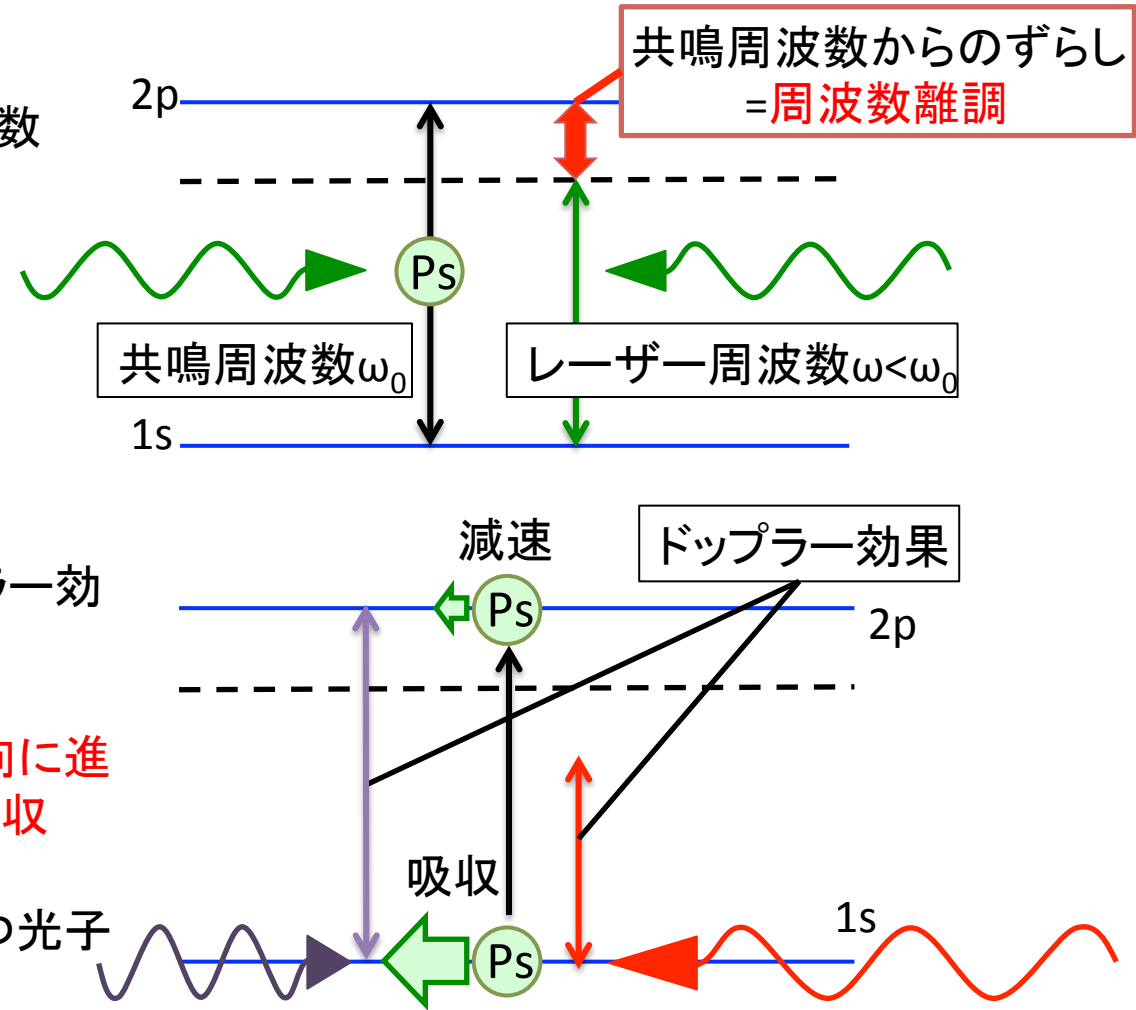
Psは水素原子などと同じように複数の束縛状態をもつ

準位間共鳴周波数より
小さい周波数をもつレーザー
を両方向から入射

運動する原子にとっては、ドップラー効果により光の周波数が変化

離調がある場合、自分と反対方向に進む光子のみ周波数が高くなり、吸収

その際、反対方向の運動量をもつ光子を吸収したので原子は減速



この後励起状態から自然放射で脱励起することで、減速サイクルを繰り返す。

ポジトロニウムのレーザー冷却

レーザー冷却に関するパラメータ:

- 1s-2p準位差: 波長243nm(紫外光)
- 自然放射の時定数(≡冷却サイクル1回分に必要な時間): 3.2ns

特徴として, Psは軽いため光子から受け取る反跳速度が大きい → **冷却が速い**

- Ps 300K → 1Kに必要なサイクル数は30回 → 96ns < 142ns
- 冷却に必要なサイクル数は v_m に比例

➤ 十分な強度・長い持続時間をもつレーザーを用いれば高速冷却が可能

しかし, 軽い分**ドップラー効果**が大きい**ため**, 異なる速度のPsを一気に冷やせるような様々な周波数の光が必要

e.g.) 300Kでドップラー広がり100GHz

➤ 次の2つの特徴を持つ光源を使用することでカバー

1. 長持続時間パルスレーザーとし**広い周波数帯域**を持たせる
2. 冷却と合わせて時々刻々と**中心周波数を変えていく**(=周波数変調)

レーザー光学の観点から, このような**長持続時間・広帯域**のパルスレーザーは特殊.
また特にこのような紫外光における大きな周波数変調は**まだない技術**.

➤ 新たな光源開発が必要

冷却用レーザー

- 現在検討している冷却用レーザーの概念図(下図)

半導体レーザーにより
729nm種光を生成

半導体レーザー
+
変調器(EOM,AOM)

729nm光
~1nJ

励起したTi:Sapphire
結晶によってアンプ



~10mJ

制御
ドライバー

Nd:YAG
ポンプレーザー

243nm光(3倍波)
~100μJ

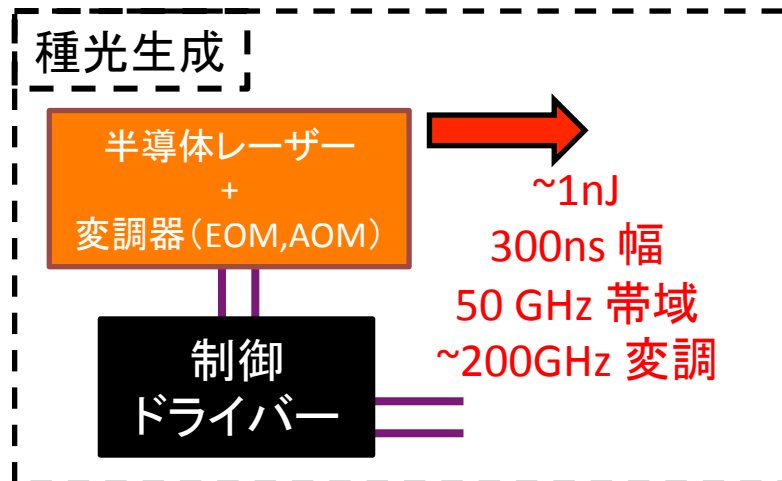
365nm光(2倍波)

和周波発生
(第3次高調波発生)

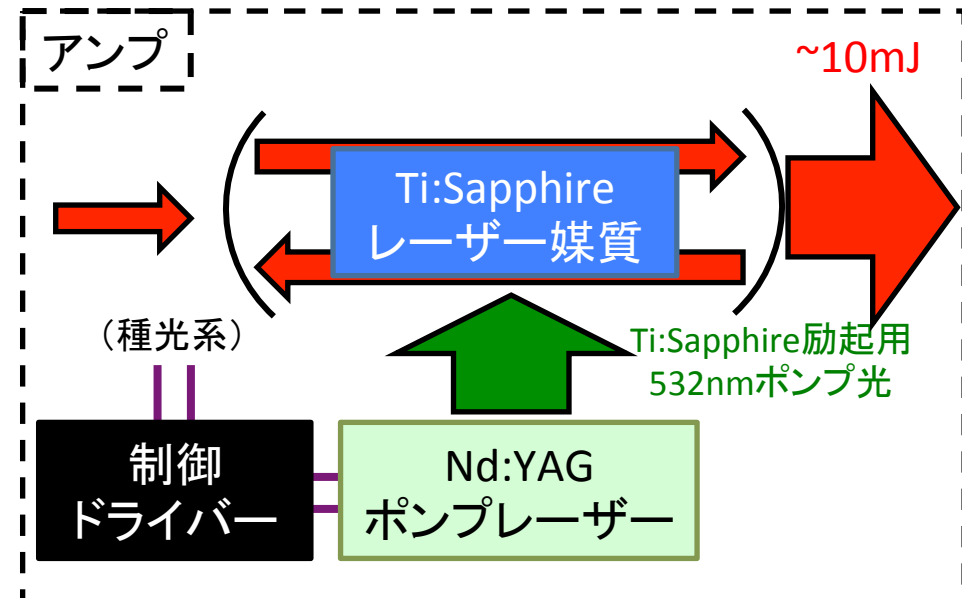
第2高調波発生

倍波・和周波発生により
周波数変換

レーザー構築のアイデア



- 半導体レーザー+変調器系は低出力ながらも周波数等を電流で制御可能
 - ミラーを力学的に制御する機構などと比較し**制御が高速・容易**
 - この段階で必要なスペクトルを持った光を作る
 1. 長い持続時間
 2. 広帯域を確保
 3. 周波数変調を制御
 - このような構成で~200GHzというような大きい変調の達成が新たなチャレンジ



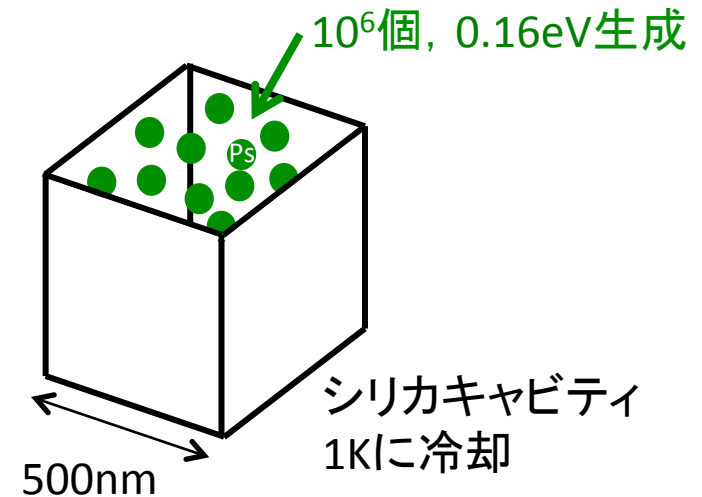
- Ti:Sapphire 結晶を用いてアンプ
- ポンプレーザーの制御を種光と電氣的に同期
 - 増幅回数やポンプのタイミング調整によりゲインを時間的に分配, **長い持続時間を維持**
- アンプ方式は再生増幅 or 注入同期を用いることで種光の周波数スペクトルをそのまま維持
 - Ti:Sapphire を用いた長いパルス幅の維持が新たなチャレンジ

現在, スタディ・開発を行っている

冷却シミュレーション

冷却効率を評価するためにモンテカルロシミュレーションを行った。

- ✓ 10^6 個のPsを初期エネルギー0.16eV ($\approx 1200\text{K}$)で生成
- ✓ Psは1Kにした $(500\text{nm})^3$ のシリカキャビティ中にトラップ
- ✓ 次の3つの相互作用を組み込み粒子を追跡
 1. Ps – シリカ壁 collision
 2. Ps – Ps 二体弾性散乱
 3. Ps – レーザー相互作用
- ✓ 上の相互作用に加え,
 1. $1s\text{-oPs} \rightarrow 3\gamma$ 崩壊 (寿命142 ns)
 2. $2p\text{-oPs} \rightarrow 2\gamma$ 崩壊 (寿命100 μs)
 3. $2p\text{-oPs} \rightarrow 1s\text{-oPs} + \gamma$ 自然放射 (寿命3.2 ns)の3つの自発的な遷移レートを考慮し
モンテカルロシミュレーション

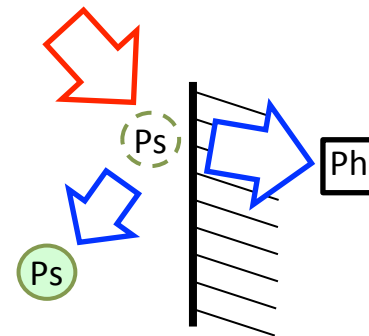


各種相互作用

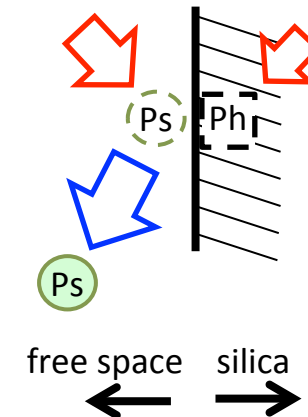
1. Ps – シリカ壁 collision

- 壁の付近でシリカの格子振動(=フォノン)を励起または吸収する相互作用
- 熱化(=熱平衡へ至る)へ寄与する
- 相互作用のレートは,
 - フォノンエネルギーEに比例
 - キャビティサイズLに反比例
- フォノンのボーズ統計性より誘導放出が起こる. 高温で熱化が速い.
- モデルのフリーパラメータは
 1. Ps初期エネルギー
 2. Ps – Phonon 結合定数

- 300Kでの熱化測定実験※
に合うようパラメータを決定
※K. Shibuya et al. PRA 88, 042517



Phonon放出
 $Ps(E1) \rightarrow Ps(E1-E) + \text{Phonon}(E)$
Rate $\propto E/L \times [1 + g_{eq}(E)]$



Phonon吸収
 $Ps(E1) + \text{phonon}(E) \rightarrow Ps(E1+E)$
Rate $\propto E/L \times [g_{eq}(E)]$

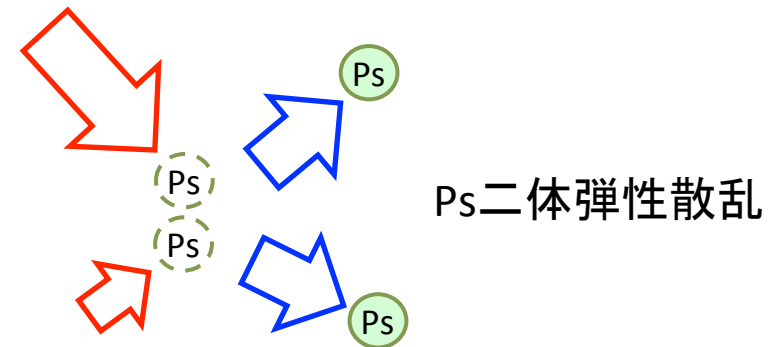
(g_{eq} : フォノンのボーズ分布)

各種相互作用

2. Ps – Ps 弾性散乱

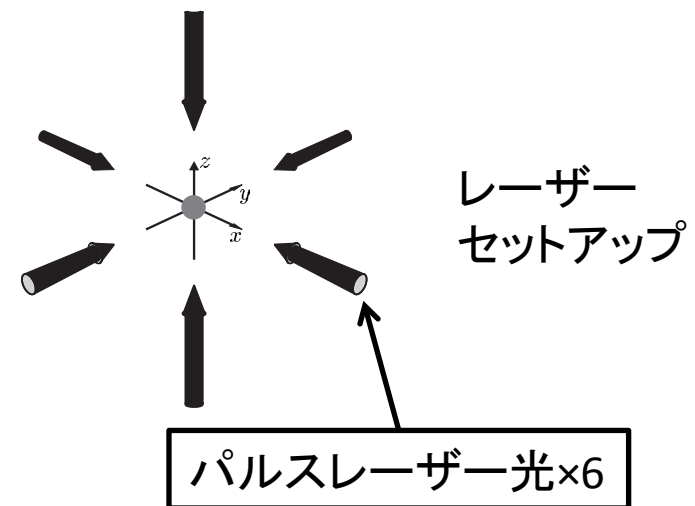
- ポジトロニウムの二体弾性散乱
- 相互作用断面積は 3.2 \AA (※理論計算)
- エネルギーを平均化・マクスウェル-ボルツマン分布へ収束するよう働く
- 高密度では非常に多くの衝突が起こる

※Phys. Rev. A 65, 022704(2002)



3. Ps – レーザー相互作用

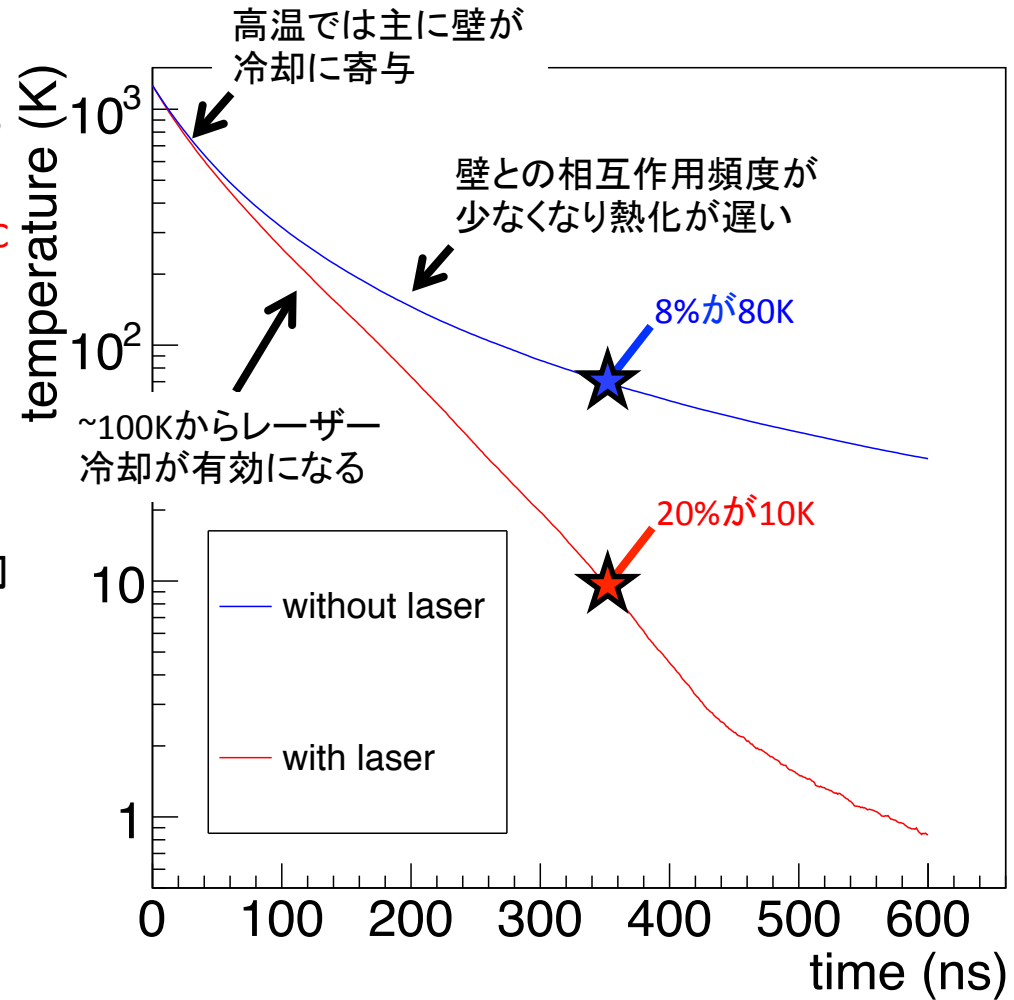
- 先ほどのレーザーを分割し6方向より入射
- 想定されるレーザーパラメータとドップラー効果を加味した相互作用断面積より励起レートを計算
- レートに従いPsの状態を変化
光子反跳による速度変化を計算



冷却効率の評価

- レーザー冷却により生成から350ns後にPsを10Kまで冷却可能
- 残ったPsは20%, 密度は $1.6 \times 10^{18}/\text{cc}$
- BEC相転移が起こる

- シミュレーション結果よりレーザー冷却は~100Kから有効であることが分かる
- 生成時の>1000Kから~100Kまでの初期熱化速度が重要



ポジトロニウムの温度 vs 時間

熱化測定実験

シミュレーションにより、レーザー冷却は初期熱化速度に大きく影響を受けることが分かった

しかしこれまで、室温以下にした環境で熱化時間発展を測定した実験はない

➤ 低温での熱化測定実験を行い実測する必要がある

そこで我々はドップラー広がり分光法 (DBS法)を用いたPs温度測定実験を行っている

DBS法

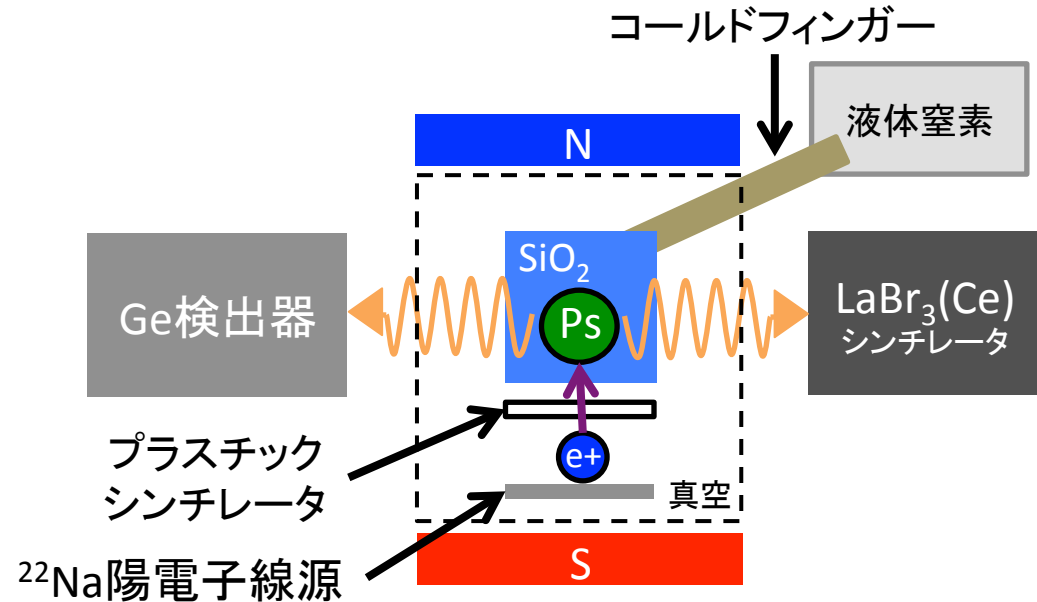
- Ps熱運動によって生じた崩壊ガンマ線スペクトルのドップラー幅より温度を算出する方法
- エネルギー分解能の良い検出器を用いることが重要

➤ 低温(70K)における熱化曲線を測定すること、また最終的にはレーザー冷却後の温度測定を可能にすることを目標にしている

DBS実験

DBS実験のセットアップ:

1. 陽電子をシリカエアロゲルに打ち込みPsを生成, その際プラスチックシンチレータで生成時間を測定
2. 液体窒素によって冷却されたシリカ中でPsは熱化
3. 磁場をかけるとZeeman効果により長寿命のo-Psがp-Psと混合, 70 nsの寿命で2 γ 511keV崩壊
4. 511keV崩壊ガンマ線をGe検出器とLaBr₃(Ce)シンチレータで測定
LaBr₃: 崩壊時間測定とエネルギーカット
Ge: エネルギー精密測定



低温でのDBS実験セットアップ模式図

➤ 現在装置の設計を終え, 組立中
10月よりDAQを開始する予定

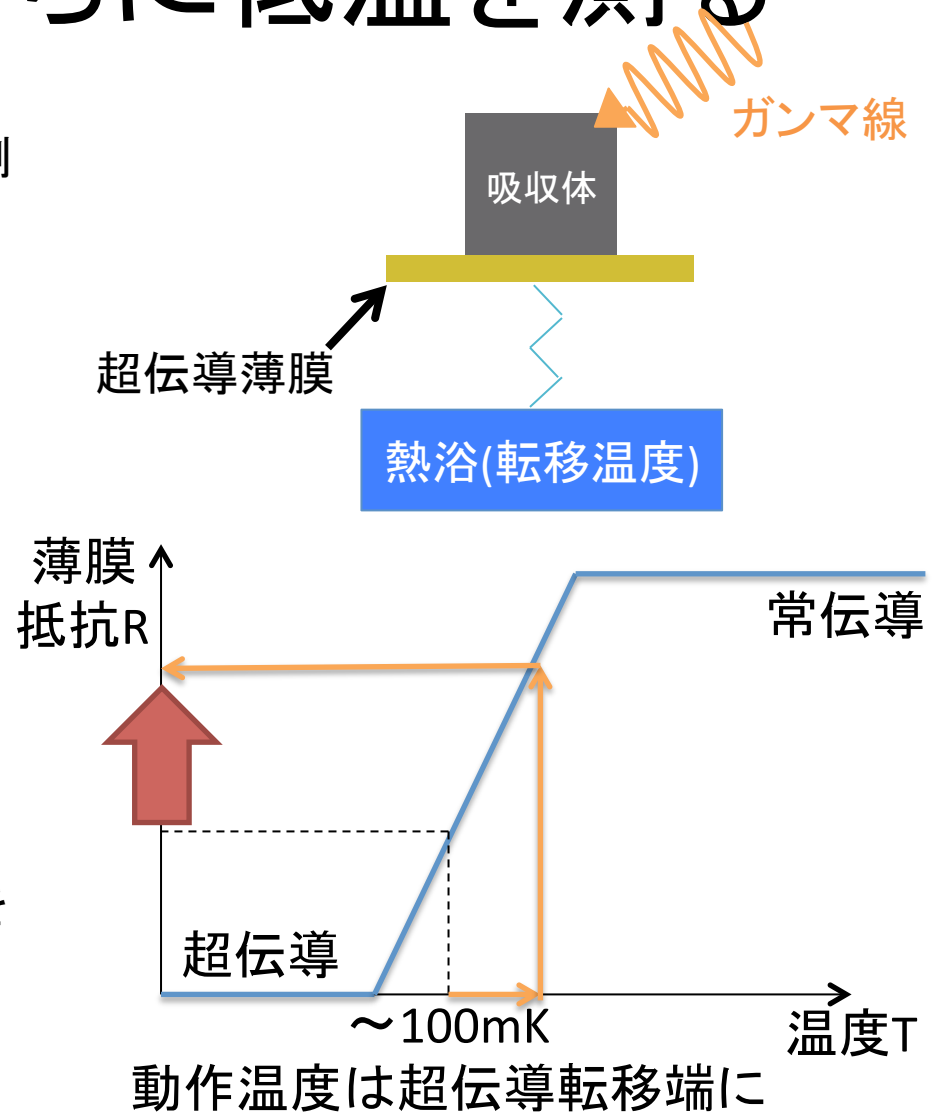
DBS実験 – さらに低温を測る

レーザー冷却後の10K程度の温度を測定するにはGe検出器よりもさらに良いエネルギー分解能が必要

- そのような検出器としてガンマ線用TES型カロリメータの使用を検討している

ガンマ線用TES型カロリメータ

- 東大工学部高橋・大野研究室にて開発
- 分解能として780eV@662keVを達成している



まとめ

- 反物質のBECは未観測. 初観測に向けて, Psは軽いため臨界温度が高く, 重要な候補. 反物質重力精密測定や γ 線レーザーなど様々な応用が期待できる.
- BEC実現には $\sim 10\text{K}$ までの高速冷却技術が必要. レーザー冷却が有効だが光学の分野でも特殊かつ難しい光源が必要. 制御が容易な半導体レーザー+変調器系で周波数等の調整を行い, Ti:Sapphireにて長時間アンプするという構成で開発を進めている.
- シリカキャビティ中での熱化, Ps二体散乱を含めたシミュレーションを行うことで, 10K までの高速冷却が可能, BEC相転移が起こると予想. $\sim 100\text{K}$ までの初期熱化速度が重要であることが分かった.
- 低温における熱化測定実験を計画している. 窒素温度 70K における実験について設計を完了し現在装置を組立中. 10月より測定開始予定.
- レーザー冷却後のさらに低温においては, TES型カロリメータでの測定を検討.