

チャープする光パルス列による ポジトロニウムの急速レーザー冷却

吉岡 孝高
Yoshioka Kosuke

1. ポジトロニウムの低温化の意義

物理学には現在、ダークマターの正体や、この宇宙における反物質に対する物質優勢等、素粒子の相互作用を記述する標準模型では説明できない種々の問題が存在する。それらの解決を目指し、様々な時間・空間・エネルギースケールの物理系を舞台とする研究が進められている。その1つが、レーザー光を用いる低温の原子・分子を対象とした精緻な計測である。原子の遷移周波数や電子の電気双極子モーメント等を対象に、地球上の精密測定を通じた標準模型の検証やそれを超える現象の探求が進められている。

電磁波としてのレーザー光の 10^{14} Hz 以上の光周波数を 1 Hz 以下の水準まで制御することは、現在標準的な実験技術となりつつある。このような水準で周波数を制御した光を用いる原子の遷移周波数の絶対測定は、極めて精密に原子内の電子準位を把握する手段を提供している。その代表例は電子と陽子のクーロン力による二体束縛系である水素原子を対象としたものである。その遷移周波数の把握は量子電磁力学の厳密検証を可能とするが、そのためにはハドロンである陽子の電荷半径の影響を無視できないことが分かっている。すなわち、量子色力学を通じた精緻な陽子電荷分布の理論的把握という難しい課題が生じている。

ポジトロニウム (Ps) は、電子と、その反粒子である陽電子がクーロン引力作用によって束縛状態を形成した原子である。電子も陽電子も素粒子 (レプトン) である。すなわち 2 体の素粒子だけでできた

Ps は最も単純な原子であり、量子電磁力学を厳密に検証できる基本的な物理系として重要である。Ps のエネルギー状態をレーザーによる超精密測定によって正確に把握し、量子電磁力学による理論計算との比較をすることで、標準模型のうち電磁相互作用に関する記述の不備の有無や、理論の前提である粒子と反粒子の基本的な対称性の検証が可能と期待される。最も単純な原子としての Ps による量子電磁力学の厳密な検証は、前述の水素を代表とする原子系の電子状態把握を通じた原子核の精密な探査の手段を提供する可能性がある。1993 年には Ps の 1S-2S 遷移周波数を測定する先駆的な実験が報告された¹⁾。その後、束縛系量子電磁力学計算が進展すると、実験結果と計算が実験の不確かさに対して 1.8 倍の乖離を示すことが判明している。より小さな実験の不確かさのもとでこの乖離の検証を行う必要が生じている。

レーザーを用いた原子の分光においては、原子が運動すると測定精度の低下や系統的な測定値のシフトをもたらすため、原子を可能な限り静止状態に近くすることが重要である。Ps の質量は電子 2 個分ほどの極めて小さなものであり、その並進運動の速さは室温で毎秒約 70km にも及ぶ。したがって、減速すなわち低温化の実現が重要な課題であった。これまで、Ps の冷却の方法は低温の物質との熱接触に依存するものであったが、物質と Ps の質量比が大きいため冷却効率が悪い。そのうえ、Ps は基底状態のうちオルソ Ps については 142 ns、パラ Ps については 125 ps の自己崩壊寿命を持ち冷却時間が限られている。これらの理由で、100 K 程までの冷

却が限界となっていた。

1 K よりも低温の Ps を形成することができれば、遷移周波数測定における種々の系統誤差を格段に抑制でき量子電磁力学の厳密検証が可能となる。また、高密度の Ps の生成と併せることで反物質を含むボース・アインシュタイン凝縮体の形成のための大きな前進になるものと期待される。

2. 光パルス列による高速チャープ冷却方式の提案

レーザー冷却は、室温付近の原子気体を典型的には ms の時間スケールでサブミリケルビン領域に冷却できる技術であり、量子縮退した超低温原子気体の形成や前述の精密分光を代表とする多彩な学術分野を生み出し大成功を収めた。このレーザー冷却を Ps に適用することができれば、従来の低温の限界を突破し低速の Ps 気体を用意できるものと期待され、1988 年の理論提案以降、実現に向けた研究が進められてきた。

レーザービームは、周波数や伝搬方向等すべての性質が揃った大量の光子が束となったものであり、原子に固有の遷移周波数近傍の光周波数にすることで原子はレーザーの光子を吸収する。光子を吸収した原子は光子の運動量分の反跳をレーザービームの進行方向に受ける。したがって、原子の運動方向に対向するレーザービームを吸収させると、原子はわずかに減速することになる。光子を吸収し励起された原子は、光子を放出して元の状態に戻り（自然放出）、そのとき放出した光子とは反対方向に再び反跳を受けるがその方向はランダムであることが吸収過程との重要な違いである。レーザービームの吸収と自然放出を繰り返すと、前者による反跳は積み重なり、後者による反跳は平均ゼロになるため、結果的に減速される。これがレーザー冷却の原理である。

原理的には、波長 243 nm、励起状態寿命 3.2 ns の 1S-2P 遷移を用いて Ps もレーザー冷却可能であるが、長年実現できなかった。Ps（以下、オルソ Ps のことを指す）の寿命は 142 ns であり、生成からこの寿命の間に対消滅により γ 線を放出して真空に戻り、その数が 3 分の 1 程になる。つまり光子の吸収と自然放出の冷却サイクルを寿命、すなわち約 1000 万分の 1 秒の間に次々と起こす必要がある。加えて、Ps の質量の小ささのため、たった 1 回の

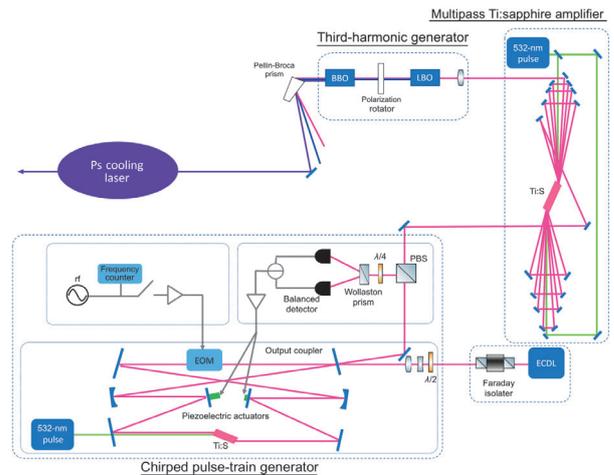


図 1 チャープする光パルス列の発生と光増幅、非線形波長変換の構成図²⁾

冷却サイクルに伴い毎秒 1.5 km の減速を受ける。ドップラー効果を考慮すると、この減速後に再びレーザー光の光子を吸収させるには光周波数が約 6.2 GHz も変化する必要がある。Ps の寿命で制限されるわずかな時間の間に、1S-2P 共鳴周波数よりも低周波側から共鳴周波数に向かって幅広く光周波数を変化させることができれば、いわゆるチャープ冷却¹⁾の方式により高速な成分から低速な成分へと順々に減速が進行し、低速の成分が急増することになる。しかし、これほどに高速な光周波数の変調法はこれまで存在しておらず、Ps のレーザー冷却は未実現の状況であった。

筆者らは、従来レーザー冷却にひろく使用されてきた定常レーザー光とは異なり、光パルスの列を用いる方式を提案した²⁾。短い時間に次々と発生する光パルスの中心周波数が順次大きく変化すれば、Ps のチャープ冷却を実施することが可能となる。 μ s 程の持続時間のパルス光を発振するレーザー共振器の中に、共振器の縦モード間隔と同一の周波数で駆動する電気光学変調器を導入することで（図 1）、このユニークな光パルス列を得ることができる。これはいわゆる「EO コム」の概念をパルス発振に拡張したものと解釈できる。このようにして得たパルス列を適切に増幅し、光周波数を 3 倍にする非線形変換を通じて、Ps の冷却が可能な波長 243 nm の高速チャープ光パルス列を繰り返し周波数 10 Hz で

1 レーザー冷却の一種。時間とともに変化する特定の周波数範囲の光（チャープ光）を原子に照射することで原子の運動エネルギーを減らし温度を下げる技術。

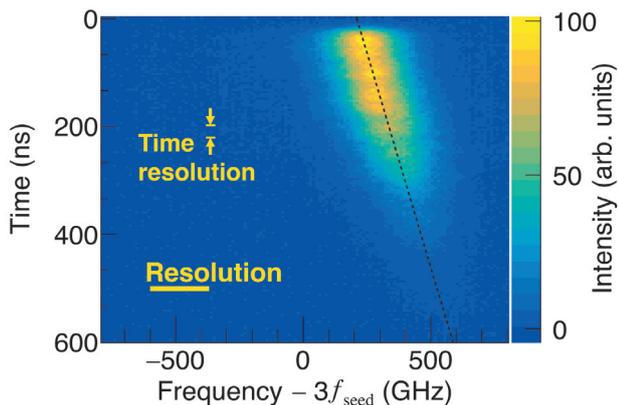


図2 Psのレーザー冷却を実現する波長243 nmのパルス列の時間周波数特性³⁾

発生させた(図2)³⁾。これによって、はじめにPsの高速な速度領域で光吸収を誘起し、自然放出が完了するのを待機し、次のパルスがより低速な速度領域のPsに光吸収を誘起する、という順序で冷却が進む超高速チャープ冷却が期待できる。

3. Psの1次元レーザー冷却の実証

筆者らは高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所の低速陽電子実験施設(Slow Positron Facility, SPF)において年3回のビームタイムの提供を受け実験を実施している。東京大学で開発した冷却のためのレーザーを実験期間にあわせて当該施設に運搬し、集中的に準備とデータ取得を行う。陽電子バンチが実験のための真空容器内に配置されたPsの生成材料(シリカエアロゲル)に入射し、直後に温度約600 KのPsが真空中に放出される。このPs集団にタイミングを合わせ、冷却パルス列を照射した(図3)。レーザービームを真空内に配置したミラーによって同軸に打ち返すことで、100 nsの間、1次元方向のレーザー冷却を実施する。冷却直後に別のパルスレーザーを照射してPsの速度の分布をドップラー分光と呼ばれる方法で評価した。

図4は、600 Kの速度分布のうち、ゼロ速度付近の分布の変化の割合を測定した結果である。縦軸の値の減少は、光周波数が掃引され高速なPsから低速なPsへと順次減速された結果、当該速度領域のPs数が減少したことを意味しており、中央付近の値の増加は、冷却効果を受けたPsがゼロ速度付近に集中したことを意味している。その幅は、ベスト

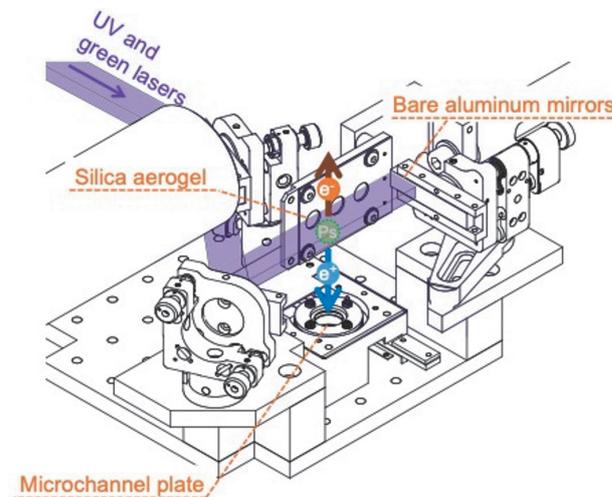


図3 (上図)陽電子ビームラインに設置した真空容器、(下図)真空容器内のPs発生位置と光照射、信号検出の配置

フィットの結果で0.8 K相当の速度分布であり、本レーザー冷却法によって従来よりも桁違いに低速のPs集団を形成できたことを証明している。

この結果は第一原理的な数値シミュレーションによる速度分布の変化の予想と合致している⁴⁾。本実験においては、実験時間の範囲内でレーザー冷却の証明を行うため速度分布の計測上の分解能をあえて下げることで信号量が増す工夫を施した。シミュレーションによると、55 mK相当の極めて低速なPsも形成されており、今後の分解能の向上によりこの超低速成分を検出できる可能性がある。

4. まとめと今後の展望

中心光周波数がパルス毎に急速に変化する光パルス列を発生させ、これを用いたチャープ冷却法によりPsのレーザー冷却に世界で初めて成功した。

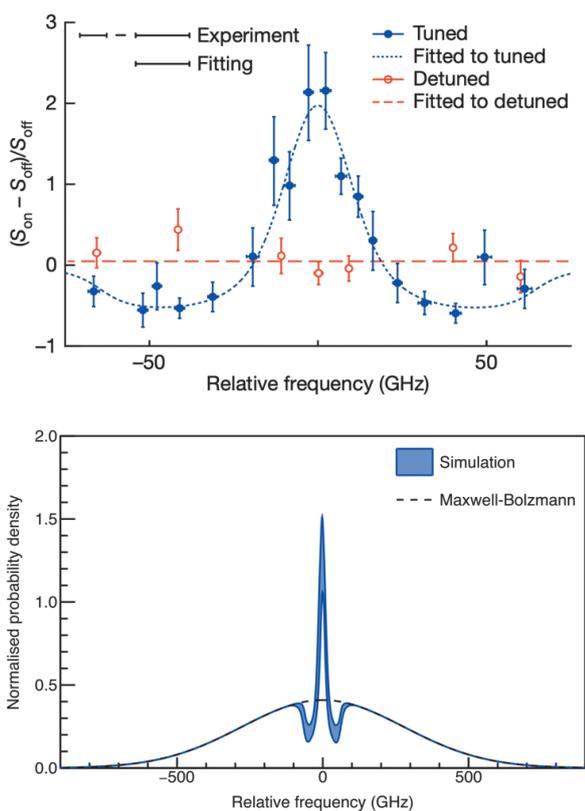


図4 (上図) レーザー冷却に伴うPsのドップラープロファイルの変化⁴⁾, (下図) 測定結果を再現する数値シミュレーションから想定される冷却後のドップラープロファイルの全体像⁴⁾

100 ns 間の冷却によって3次元速度分布のうち1次元分について、従来の冷却限界の約100分の1となる約1 K相当の非常に低速なPsの形成が可能となった。実際には更なる低速成分が形成されている可能性がある。今後、3次元的に光照射を行い、真空中

で急減速したPsを形成していく。なお、Psの寿命の時間スケールで実現できる冷却サイクルの回数には上限があり、3次元方向にこれを分配するため冷却の制限が加わる。それでもなお、1S-2S遷移周波数計測における系統誤差を大幅に低減できる見込みであり、光の絶対周波数の決定を実現する光周波数コムに基づく測定の準備を進めている。冷却したPsによる今後の精密分光計測によって、現代の物理学の謎の解明にとって足がかりとなる、電磁相互作用や物質反物質の対称性に関する重要な知見が得られるものと期待される。量子電磁力学計算との協調によって、Psに基づく微細構造定数やRydberg定数の決定も可能と考えられる。また、レーザー冷却の最適化やPsの生成密度の向上、原子間散乱の追求によって反物質を含むボース・アインシュタイン凝縮体の形成を議論できる時代が訪れるかも知れない。このような量子縮退した気体の実現によって、初期宇宙の物質反物質の挙動の理解につながる可能性も考えられる。このように未踏の地が広がる低温の二体レプトン系の実験を更に追求していきたい。

参考文献

- 1) M. S. Fee., *et al.*, *Physical Review Letters.*, **70**, 1397 (1993)
- 2) K. Yamada., *et al.*, *Physical Review Applied.*, **16**, 014009 (2021)
- 3) K. Shu., *et al.*, *Physical Review A.*, **109**, 043520 (2024)
- 4) K. Shu., *et al.*, *Nature.*, **633**, 793 (2024)

(東京大学大学院工学系研究科)