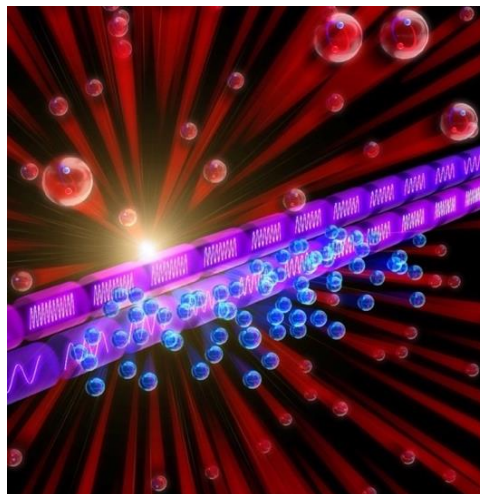


東京大学
高エネルギー加速器研究機構
産業技術総合研究所

最も単純な「原子」ポジトロニウムをレーザー光によって 1000 万分の 1 秒で極低温にすることに成功 ——反粒子を含む原子の精密科学によって物理学の謎にせまる大きな第一歩——

発表のポイント

- ◆ 電子とその反粒子である陽電子でできた「原子」であるポジトロニウムは、2 個の素粒子だけでできているという単純さから既存の理論による計算と実験データを緻密に比べて、理論を超えた未知の物理現象の探索実験ができます。そのためにはポジトロニウムを絶対零度近くまで冷やす必要がありますが、冷却が難しく、絶対零度にほど遠い 100 ケルビン程度までしか達成できていませんでした。
- ◆ 原子を絶対零度近くまで冷やす手法として、レーザー冷却と呼ばれる方法がありますが、ポジトロニウムは 1000 万分の 1 秒程度で「対消滅」という現象を起こしてなくなってしまうこともあり、これまでの方式が使えません。今回、独自の技術によって波長が急速に変化するパルス列のレーザー光を開発し、対消滅が起きるより早く 1 ケルビンまで急冷することに世界で初めて成功しました。
- ◆ 今後、光によるエネルギー準位や質量の精密な測定が可能となり、物理学の基礎理論の検証や反物質の性質の理解など、物理学が抱える謎を解くための研究分野が大きく進展します。



波長が高速に変化するレーザー光の列によって照射されたポジトロニウムが、真空中で瞬時に冷却される概念図。

概要

東京大学大学院工学系研究科の吉岡孝高准教授、周健治助教と、同大学大学院理学系研究科の石田明助教らによる研究グループは、高エネルギー加速器研究機構（KEK）物質構造科学研究

所、産業技術総合研究所と共同で、レーザー光によるポジトロニウム（注 1）の急速な冷却を世界で初めて実現しました。

独自に開発したレーザー光源を使用することで、理論提案から 30 年の間実現が待たれていたポジトロニウムのレーザー冷却（注 2）に成功し、わずか 1000 万分の 1 秒の間に、従来よりも桁違いに低温の気体にできることを証明しました。物理学は、宇宙に反粒子（注 3）がほとんど残っていないことや、暗黒物質の起源など、多くの謎を抱えています。これを解決するため、基礎理論の綻びがどこにあるのかを検証する研究が世界中で進められています。本研究成果は、電子とその反粒子だけでできた最も基本的な原子を使って、基礎理論が現実をどこまで正確に表現できているのか、さらには反粒子の質量や重力の影響を精密に調べる研究を可能とするもので、今後大きな学際的研究分野の形成が期待されます。

発表内容

〈研究の背景〉

現代の物理学は、暗黒物質の正体や宇宙に反物質がほとんど残っていない理由など、いくつもの重大な謎を抱えています。それらの謎を解く手がかりを得るため、既存の理論が網羅できていない現象の探索が世界中で進められています。その対象は宇宙で繰り広げられる現象だけでなく、地球上でも、大型加速器によって粒子同士を衝突させ宇宙誕生直後を模したような実験が行われています。このような実験のほかに、絶対零度近くまで低温にした原子や分子を、真空中に用意し、光を使って調べることで、未知の現象や粒子の存在によって生じるわずかな性質の変化を敏感にとらえる実験が行われています。このような研究は精密分光学と呼ばれています。

ポジトロニウムは、1 個の電子と 1 個の陽電子がお互いを引き付けあってできた「原子」です。水素をはじめとする他のほとんど全ての原子が持つ原子核は多くの素粒子が集まってできています。一方で、ポジトロニウムは 2 個の素粒子だけでできた原子であり、その単純さから、通常の原子と異なり既存理論による計算と実験データを緻密に比べることが可能です。このため、ポジトロニウムを絶対零度近くまで冷やすことができれば、精密分光学の技術を通じて既存の物理理論の範囲を超えた現象の有無を調べることができます。さらに、陽電子は電子の反粒子であることから、未だ多くの謎に包まれている反粒子の性質を明らかにすることが可能になります。つまり、ポジトロニウムを低温にすることが研究進展のための重要な鍵となっていました。

真空中にポジトロニウムを用意する方法の一つは、人工的に生成した陽電子を固体の物質に照射することです。本研究ではシリカエアロゲルを使用しました。ポジトロニウムを作るための物質を冷却しておくと、真空中に放出されるポジトロニウムの気体の温度も下がりますが、100 ケルビン程度が限界であることが知られており、絶対零度からは程遠いものでした。その一方で原子にレーザー光を吸収させ、その後原子が光を放つという過程を繰り返すと、気体を構成する原子を遅くする、つまり気体を冷やすことができます。これをレーザー冷却といい、ポジトロニウムにもこの技術を適用できれば絶対零度近くまで冷却できるものと期待されていました。

互いに反粒子である電子と陽電子は、接触するとある確率でガンマ線になって消滅します。これは対消滅と呼ばれ、ポジトロニウムの場合、対消滅によって約 100 ナノ秒（1000 万分の 1 秒）の間に数が半減します。したがってその冷却は、このような短い時間の間に完了する必要があります。また、ポジトロニウムは非常に軽いため、光を吸収したり放出したりする際の変化の速度が大きく、通常の原子の冷却に使われている方法のままでは、ドップラー効果によっ

てレーザー冷却を続けることができなくなります。ポジトロニウムのレーザー冷却の可能性は約 30 年前に理論的に議論されましたが、これらの問題点を解決できるレーザー光を実現することができていませんでした。

〈研究の内容〉

吉岡准教授らのグループでは、従来の常識を超える速さでレーザー光の波長を変化させる方法を開発してきました。このレーザーは約 2 億分の 1 秒ごとに強い紫外線の光を放ち、そのフラッシュごとにポジトロニウムの減速にあわせて波長が変化します。このような独自開発の光を使う新方式のレーザー冷却を行うことで、ポジトロニウムの多くが対消滅する前に急冷することができるはずと考えました。

実験は高エネルギー加速器研究機構（KEK）、産業技術総合研究所（産総研）と共同で実施しました。レーザー冷却の実証実験（図 1）は KEK 物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設で行われました。まず、主に東京大学大学院理学系研究科・素粒子物理国際研究センターが真空装置およびポジトロニウムの生成量と寿命の計測装置を開発しました。KEK の研究者は高強度な低速陽電子ビームバンチを供給し、ポジトロニウムをつくる材料に陽電子を照射して瞬間的にポジトロニウムを発生させました。このとき、陽電子の輸送に欠かせない磁場の空間分布を周到に設計することで、レーザーを照射する空間における磁場を非常に小さくすることに成功しました。これはポジトロニウムの寿命を短縮しないようにするために重要でした。また、産総研の研究者は、陽電子ビームの収束装置と、高い効率でポジトロニウムをつくるための材料を開発しました。これらはレーザー冷却を明確に証明するのに十分な信号量を得るために重要な役割を果たしました。

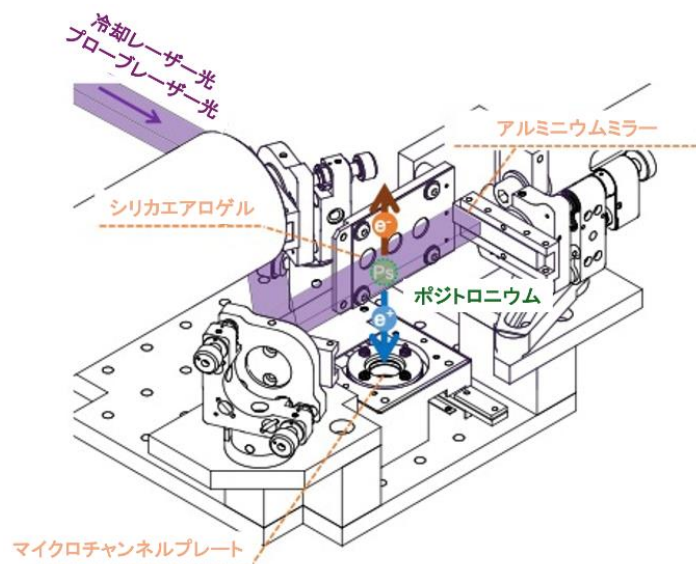


図 1：真空容器内の実験配置の概要

ポジトロニウムの速度を測定した実験結果（図 2）は、時々刻々と波長が変化する光によって高速のポジトロニウムが減少し、これまでに観測されたことのない非常に低速なものへと効率よく冷却されたことを証明しています。さらに、シミュレーションによると、この特別なレーザー光によって、本実験結果には観測が難しいほどに低速な、ほとんど静止した成分があることも示されており、1 ケルビンという冷却限界に迫る従来よりも桁違いの低温を実現することができました。

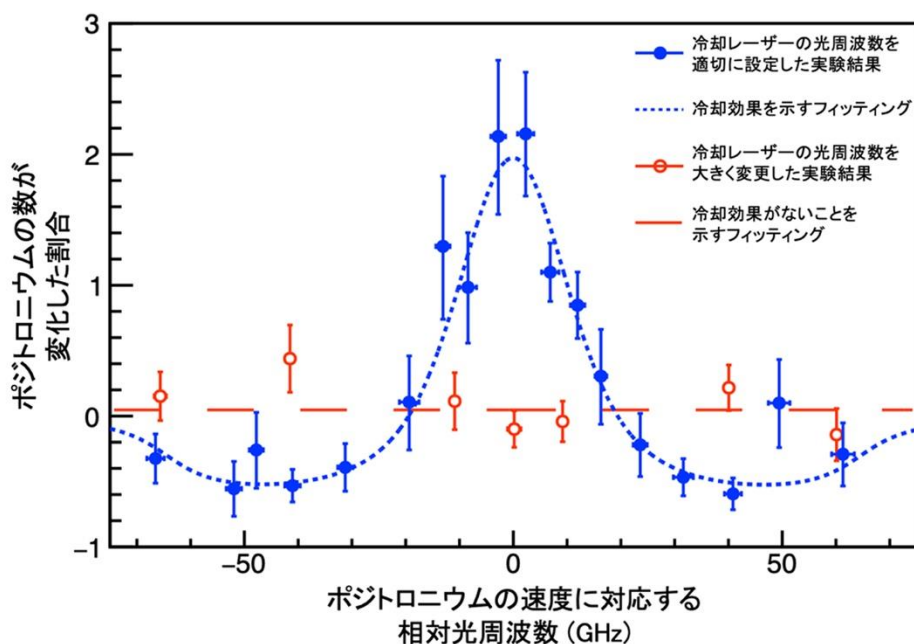


図 2：ポジトロニウムのレーザー冷却の結果

図の横軸中央はポジトロニウムが静止していることを表し、中央から離れるほど速度が大きくなる。レーザー冷却によって高速なポジトロニウムが非常に低速なものに冷却されたことを示している。

〈今後の展望〉

本研究では、3次元空間の速度の分布のうち、1次元分のレーザー冷却を実証しました。今後これを3次元のレーザー冷却に拡張することで、精密分光学に沿った研究を推進できるようになります。具体的には、素粒子物理学の標準理論の重要な一角をなす量子電磁力学（注 4）の精密な検証、反粒子の質量の正確な測定、反物質にはたらく重力の効果の測定を実現できます。また、ポジトロニウムの密度を高めることで、反物質を含む集団のボース・アインシュタイン凝縮（注 5）の観測や宇宙誕生後の反物質の振る舞いの理解につながる可能性があります。本研究は、反粒子を含む「原子」を用いた精密物理学という、工学、光科学、素粒子物理学を網羅する学際分野の発展のための大きな第一歩です。

○関連情報：

「プレスリリース：世界最低温の励起子に生じたボース・アインシュタイン凝縮体を可視化することに成功」（2022/09/16）

<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/8081/>

発表者・研究者等情報

東京大学

大学院工学系研究科

吉岡 孝高 准教授

周 健治 助教

田島 陽平 博士課程：研究当時

魚住 亮介 博士課程

宮本 尚樹 修士課程

白石 蒼馬 修士課程

小林 拓豊 修士課程：研究当時

大学院理学系研究科

浅井 祥仁 教授：研究当時

石田 明 助教

山田 恭平 博士課程：研究当時

Randall Wayne Gladen 特任研究員：研究当時

素粒子物理国際研究センター

難波 俊雄 助教

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

和田 健 准教授

望月 出海 助教

兵頭 俊夫 協力研究員（東京大学名誉教授）

産業技術総合研究所

伊藤 賢志 総括研究主幹

大島 永康 研究グループ長

オローク ブライアン 主任研究員

満汐 孝治 主任研究員

論文情報

雑誌名：Nature

題名：Cooling positronium to ultra-low velocities with a chirped laser pulse train

著者名：K. Shu, Y. Tajima, R. Uozumi, N. Miyamoto, S. Shiraishi, T. Kobayashi, A. Ishida*, K. Yamada, R. W. Gladen, T. Namba, S. Asai, K. Wada, I. Mochizuki, T. Hyodo, K. Ito, K. Michishio, B. E. O'Rourke, N. Oshima, K. Yoshioka*

DOI：10.1038/s41586-024-07912-0

URL：<https://www.nature.com/articles/s41586-024-07912-0>

謝辞

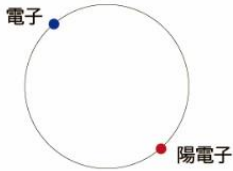
本研究は、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）JPMXS0118067246、科学技術振興機構創発的研究支援事業（課題番号：JPMJFR202L）、日本学術振興会科研費（課題番号：JP16H04526、JP17H02820、JP17H06205、JP17J03691、JP18H03855、JP19H01923、JP21K13862、JP22KJ0637、JP24H00217）、住友財団基礎科学研究助成、松尾学術振興財団、三豊科学技術振興協会、光科学技術研究振興財団、三菱財団の助成を受けたものです。実験はフォトンファクトリー共同利用実験課題 2020G101、2022G087、2023G660 によって、KEK 物質構造科学研究所 低速陽電子実験施設の SPF-B1 ステーションにおいて実施しました。

用語解説

(注 1) ポジトロニウム：

電子と陽電子（電子の反粒子）が、電子と陽子でできた水素と同じように電磁相互作用によって引きつけ合い、「原子」となったものはポジトロニウムと呼ばれています。1951 年に実験的に発見されました。電氣的に中性で電子 2 個分の質量をもつ最も軽い原子です。また、電子も陽電子もレプトンと呼ばれる素粒子であるため、ポジトロニウムは最も単純な原子でもあります。陽子は、3 つのクォークが強い力によって結びついた複合粒子であり、素粒子ではありません。なおポジトロニウムには、電子と陽電子のスピンの関係により、寿命が約 100 億分の 1 秒のpara・ポジトロニウムと寿命が約 1000 万分の 1 秒のortho・ポジトロニウムがあります。本研究で冷却したのは寿命の長いortho・ポジトロニウムです。

ポジトロニウムと水素原子の比較

	ポジトロニウム	水素原子
		
構成	電子と陽電子	電子と陽子
質量	0.0011 原子質量 (1.84×10^{-30} kg) (水素原子の 900 分の 1)	1 原子質量 (1.66×10^{-27} kg)
崩壊	電子と陽電子が対消滅して ガンマ線になる	崩壊しない
寿命	142 ナノ秒 (ortho・ポジトロニウム) 125 ピコ秒 (para・ポジトロニウム)	無限大
特徴	素粒子 2 個だけの最も簡単な「原子」である ため実験と理論との厳密な比較が可能	陽子はクォークが 3 個集まった複合粒子で あるため、高精度の理論計算が困難

(注 2) レーザー冷却：

原子は、固有の波長の光子を吸収した後に、光子を放って元の状態に戻るという性質があります。光子は運動量を持ちますので、これらの過程の際に、吸収される光子や放出される光子とは反対方向への反跳の運動量が原子に加わります。レーザー光は定まった方向に伝わる揃った光子の集まりであり、原子にその運動に対して逆向きに進むレーザー光を吸収させると、減速します。一方で、原子が光子を放つ際の向きはランダムになるため、レーザー光の吸収とその後の光子の放出を繰り返すことで原子の減速が進むことになります。これがレーザーによる原子の冷却の原理です。実際には原子の運動の速度に応じて、原子が吸収する光子の波長がドップラー効果によって異なることを考慮に入れる必要があります。原子のレーザー冷却やトラップの確立には 1997 年にノーベル物理学賞が授与されています。

(注 3) 反粒子：

電子をはじめとする素粒子や、陽子のように複数の素粒子で構成される複合粒子には、質量とスピンが等しいものの電荷が反対の粒子が存在し、これらを反粒子といいます。電子の反粒子

が陽電子であり、1932年にアンダーソンによって実験的に発見され、1936年のノーベル物理学賞が授与されています。

（注4）量子電磁力学：

電子や陽電子のように電荷を持つ粒子の間の相互作用（電磁相互作用）を、場の量子論という枠組みを使って記述する物理学の理論です。今までに知られている現象の範囲では、実験による測定結果と精密に一致する計算結果を得ることができる最も正確な理論です。現在物理学が抱える謎を解く手がかりを得るために、さまざまな物理系の精密な測定結果とこの理論を比較し、理論のモデルに取り込むことができていない「何か」を探す研究が世界中で進められています。量子電磁力学の確立に際しては、1965年にノーベル物理学賞を受賞した朝永振一郎博士らの研究が大きく貢献しました。

（注5）ボース・アインシュタイン凝縮：

絶対零度に近い低温の世界では、物質の波としての性質が顕著に表れ、粒子がボース粒子なのかフェルミ粒子なのかによって、気体などの粒子の集団の振る舞いが劇的に異なります。電子と陽電子はフェルミ粒子ですが、それらが結合したポジトロニウムは複合ボース粒子です。ボース粒子の場合、物質の波としての広がりや粒子間距離が同程度になると、粒子の間に引力がなくても巨視的な数の粒子が集団の中の最もエネルギーが低い状態を占有し凝縮状態を形成します。この現象を、ボース・アインシュタイン凝縮と呼びます。アインシュタインが予想したこの量子統計力学に基づく相転移は超流動や超伝導と密接な関係があります。希薄な原子気体を用いてこの凝縮体を実現した研究に対して2001年にノーベル物理学賞が授与されました。

問合せ先

（研究内容については発表者にお問合せください）

東京大学大学院工学系研究科
准教授 吉岡 孝高（よしおか こうすけ）

〈報道に関する問合せ〉
東京大学大学院工学系研究科 広報室

東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室

高エネルギー加速器研究機構 広報室

産業技術総合研究所 ブランディング・広報部 報道室