

自然にある散逸により物質の量子状態の位相が揃う現象を発見

－ 量子技術を日常化するためのヒントとなる新しい原理 －

2019年6月24日

学習院大学

国立大学法人 電気通信大学, 日本大学生産工学部

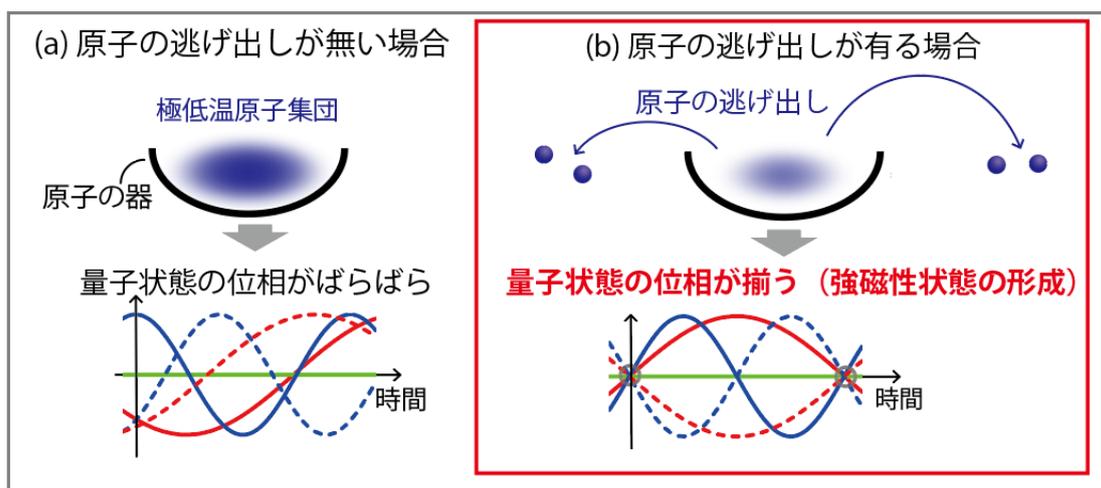
■ ポイント ■

- ・ 一般には乱されやすい量子状態の位相が自発的に揃いだす現象を発見
- ・ 磁化を持たない状態の極低温原子集団が選択的な損失によって強磁性状態に変化
- ・ 散逸のある自然な環境において位相が揃う原理は使いやすい量子技術に発展する可能性

■ 概要 ■

学習院大学は、国立研究開発法人 産業技術総合研究所、国立大学法人 電気通信大学、日本大学生産工学部と共同で、**極低温原子集団**から原子が選択的に失われるときに、量子状態の位相が揃い、強磁性状態が形成される現象を発見しました。これは、自然にある散逸により物質の量子状態の位相が揃うことを初めて実証した研究成果です。

一般に**量子状態の位相**は、環境との相互作用により簡単に乱れてしまいます。この乱れやすさが、量子現象の観測や量子技術の実現を困難にしている大きな要因の一つです。今回研究グループは、多数の原子から成る量子系と環境との結合が位相を乱すのではなく、むしろ自然に秩序が生み出されるという新奇な現象を世界で初めて観測しました。具体的には図のように、極低温原子集団から、原子が選択的に閉じ込め領域の外に逃げ出すことによって、量子状態を構成する5つの波の位相が揃う現象の観測に成功しました。この研究の詳細は、2019年6月21日に学術誌 Physical Review Letters でオンライン掲載されます。



原子の逃げ出しによって揃えられる位相。(a)原子が器から逃げ出さない場合には、量子状態を構成する波の位相はバラバラである。(b)原子の逃げ出しがある場合、5つの波の位相が揃う。

_____は【用語の説明】参照



■ 研究の背景 ■

近年、量子技術に対する期待が高まっています。国内外で、将来の経済・社会に大きな変革をもたらす源泉・革新技術と位置づけられており、量子技術に対する投資が急拡大しています（内閣府量子技術イノベーション戦略（中間整理案）令和元年5月）。しかし、量子技術を実用化することは技術的に非常に困難な課題を解決する必要があると考えられており、その一つが量子状態の位相を保つことです。量子状態の位相は通常とても乱れやすく、位相が乱れると量子現象の観測や量子計算が出来なくなってしまうからです。量子状態の例として電子のスピンを考えてみます。電子のスピンはコマのようなものであり、磁場があるとその周りでのくると歳差運動をします。この回り方は、磁場に敏感であり、磁場が変動するとくるくる回る位相がすぐに変わってしまいます。磁場の変化以外にも、周囲の環境との接触や結合による粒子やエネルギーの出入りによっても、量子状態の位相は容易に乱れてしまいます。

一方、周囲の環境との接触によってエネルギーを失う場合であっても、量子状態の位相が保たれることもあります。顕著な例がレーザー光の量子状態です。レーザー光の量子状態は、通信路に損失があっても純粋なままに保たれます。このことは、異なる光子数の状態間の位相が損失によって保たれることを意味しています。レーザー光の量子状態がこのような性質を持つことは、レーザー光を用いた長距離光通信を可能にしているだけでなく、光が量子状態を遠方に送る唯一無二の媒体となっている理由でもあります。さらに、外部環境の影響がより強い生態系においても、近年量子効果が重要な役割を担っている可能性が示唆されています。例えば、光合成の効率的なエネルギー輸送や渡り鳥の磁気探知において、量子効果が有益な影響をもたらしている可能性が示唆されています。

しかしながら、環境との相互作用が着目している量子系にどんな影響をもたらすのかは、未だ分かっていない部分も多く、その解明は量子科学における重要な研究課題となっています。

■ 研究の経緯 ■

学習院大学は、電気通信大学と産業技術総合研究所と共同で、極低温原子気体における非平衡現象の解明に取り組んできました（科学研究費補助金「新学術領域研究」ゆらぎと構造の協奏）。また、私立大学戦略的研究基盤形成事業により、原子気体凝縮体における緩和過程の解明に取り組んでいます。本研究では、学習院大学の**ボース・アインシュタイン凝縮**した極低温原子集団を生成・観測する装置を用いて取得したデータをもとに、参画する各機関の連携によりデータ解析を行い、極低温原子集団における**原子数の損失**が、量子系の秩序形成を促進させることを明らかにしました。

本研究開発は、独立行政法人 科学技術振興機構 科学研究費補助事業（JP17K05595, JP17K05596, JP16K05505, JP15K05233, JP25103007）、さきがけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出（2017～2021年度）」（JPMJPR17G3）による支援を受けて行ったものです。

■ 研究の内容 ■

研究グループは、ボース・アインシュタイン凝縮した極低温ルビジウム原子集団を用いて、散逸のある量子系で磁化がどのように時間発展していくかを詳細に観測しました。この系における散逸は、原子スピンの状態に依存して、原子が閉じ込め領域から失われるという特徴があり、選択的な損失です。また、損失がないとき、原子スピン間の相互作用は、磁化しない状態に対して相互作用のエネルギーが最小であるという特徴を持ちます。後者の特徴は、この量子系が通常は自発的に磁化しないことを表します。

しかしながら、研究グループは、磁化のない状態に準備した極低温原子集団が、選択的な損失が本質的な役割を果たすことにより、自発的な対称性の破れを伴って強磁性状態へと自発的に発展することを見つめました。

この自発的な強磁性状態への発展は、あるルールのもと原子数の損失が生じているという事実から理解することができます。量子系における原子数の損失は、2つの原子の衝突によって生じますが、角運動量の保存則により、強磁性状態間の衝突は抑制されます。今、強磁性状態と非強磁性状態の2つの状態が同時に存在する場合を考えます。2つの状態が同時に存在する状況において、非強磁性状態が原子間衝突によって量子系から選択的に逃げ出すということは、強磁性状態が抽出されることになります。

上記の現象を、量子状態の位相という観点から考えると、非常に興味深い結論を導き出すことができます。量子状態の時間発展は、図 1(a)から図 1(b)のように表すことができます。ここで、対象となる量子系は、**磁気副準位** m でラベリングされた5つの量子状態とその位相によって記述することができます。初期には、 $m = 0$ の量子状態のみを占有します(図 1(a))。これは、全く磁化を持たない状態です。ここでは当然、 $m = 0$ 以外の量子状態の位相は確定していません。一方、強磁性状態は、原子が5成分すべてを占有し、かつ5つの量子状態の位相が揃った状態として表されます(図 1(b))。そのため、強磁性状態に時間発展するという事は、「原子の選択的な損失」によって位相が揃うということができます。逆に、もし「原子の選択的な損失」が起こらない場合には、量子状態間の位相は揃うことなく、量子秩序の形成が起こりえないことを、数値シミュレーションから示しました。

本研究では、選択的な原子の損失が、量子状態の位相を揃え、強磁性状態の秩序形成を促進する作用をもつことを明らかにしました。この選択的な原子の損失は、この量子系に元々内在する自然な散逸現象です。本研究の重要性は、たとえ量子系に散逸があっても、その散逸に構造があれば、むしろ散逸により量子状態の位相が揃うことを物質系で明確に示したことです。この成果は、量子技術を日常化するためのヒントとなる新しい原理を提示するものであり、さらに、生体内の複雑な量子現象の解明などに繋がると期待できます

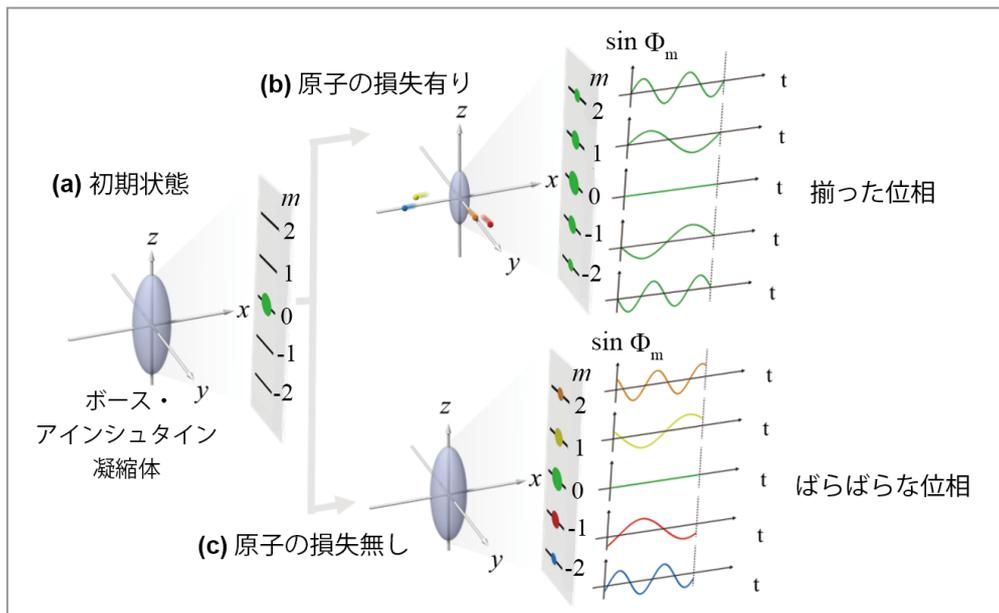


図1 観測したボース・アインシュタイン凝縮体の量子状態の発展。(a)初期状態、(b)原子数損失がある場合の発展、(c)原子数損失がない場合の発展。



■ 今後の予定 ■

今後は、量子技術を用いた精密磁場計測などへの応用可能性を探索する予定です。

■ 発表雑誌 ■

雑誌名:「Physical Review Letters」

論文タイトル:Dissipation-Assisted Coherence Formation in a Spinor Quantum Gas

著者:Yujiro Eto, Hitoshi Shibayama, Kosuke Shibata, Aki Torii, Keita Nabeta, Hiroki Saito, and Takuya Hirano

DOI 番号:10.1103/PhysRevLett.122.245301

アブストラクト URL:

<https://journals.aps.org/prl/accepted/9b073Y67L7e1d85d89ed04a93bd412de069683c69>

■ 注意事項 ■

本リリースについて情報公開日の制限はありません。

■ 本件問い合わせ先(研究に関すること) ■

学習院大学 理学部物理学科

教授 平野 琢也 (ひらの たくや)

TEL:03-5904-9373 FAX:03-5992-1029

E-mail:takuya.hirano@gakushuin.ac.jp

産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門

主任研究員 衛藤 雄二郎 (えとう ゆうじろう)

TEL:029-861-5532

E-mail:yujiro.eto@aist.go.jp

電気通信大学 情報理工学研究科 基盤理工学専攻

教授 斎藤 弘樹 (さいとう ひろき)

TEL:042-443-5461

E-mail:hiroki.saito@uec.ac.jp

日本大学生産工学部 教養・基礎科学系

助教 柴山 均

TEL 047-474-2875

E-mail:shibayama.hitoshi@nihon-u.ac.jp

【取材に関する窓口】

学校法人 学習院 総合企画部広報課(担当:湯元)

〒171-8588 東京都豊島区目白1-5-1

TEL:03-5992-1008 FAX:03-5992-9246

E-mail:koho-off@gakushuin.ac.jp



【用語の説明】

◆磁気副準位 / 強磁性状態

本研究では、質量数が87のルビジウム原子を用いている。ルビジウム原子の基底状態は、合成スピンの1と2の超微細準位を持つ。磁気副準位とは、磁場中での超微細準位の分裂によって生じた準位のことを意味している。実験では、合成スピン2の超微細準位を持つ原子のみを用いている。そのため、関心のある量子系は、磁場中において $m = +2, +1, 0, -1, -2$ の5つの磁気副準位を持つ。ここで m の値が大きいということは、磁場によるエネルギーの分裂が大きいということの意味している。強磁性状態とは、5つの磁気副準位から成る量子状態において、磁化が最大となる状態のことを意味している。つまり、磁化の向きに沿って測定する軸を設けた場合、 $m = +2$ もしくは、 $m = -2$ のみを全ての原子が占有している状態が強磁性状態である。

◆量子状態の位相

量子状態は、波動関数を使って記述されることから分かるように、波としての性質を持つ。波は振幅と位相により特徴づけることができ、量子状態を特徴づけるうえでは、位相が重要な役割を担っている。量子状態の例として、スピンの大きさが $1/2$ の量子系を考える。スピンは、上向きか下向きのどちらかの状態を取ることができる。さらに、量子力学では、上向きと下向きが同時に存在するような状態も取ることができる。このような奇妙な量子状態は、上向きと下向きの2つの波とその間の位相の差によって記述される。この位相の差を乱さずに保つことが、量子現象の観測や量子技術の実現において非常に重要である。

◆極低温原子集団 / ボース・アインシュタイン凝縮

極低温原子集団とは、レーザー冷却技術によって絶対零度の付近まで冷却された原子の集団のことを意味する。一方、ボース・アインシュタイン凝縮とは、ある相転移温度以下で巨視的な数の粒子が最低エネルギー状態を占める現象のことである。本実験では、数百ナノケルビンという極低温まで原子集団を冷却することによって、ボース・アインシュタイン凝縮を実現している。

◆原子数の損失

多数の原子から成る量子系において、時間の経過とともに原子が閉じ込め領域の外に飛び出し、原子の総数が減少することを意味する。