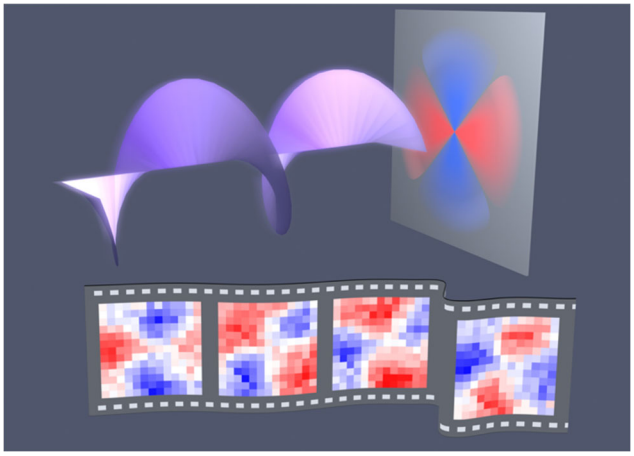
光渦の軌道角運動量を超伝導に転写することに成功
――巨視的量子状態の光操作に道を拓く――

発表のポイント

◆らせん状の波面を持つ光である光渦を用い、光渦が運ぶ軌道角運動量を超伝導体に転写することに成功しました。

◆超伝導体中の電子の集団的な振動であるヒッグスモードを光渦で揺らすことで、ヒッグスモードの回転運動を起こし、その振動の振幅と位相を観測することで超伝導体に軌道角運動量が転写されることを明らかにしました。

◆光の強度や周波数に加え、波面構造や角運動量が超伝導という巨視的な量子状態を操作する新たな手段となることを示したものであり、超伝導を利用した量子技術の発展や光による量子物質の制御技術の発展への貢献が期待されます。



光渦によって駆動された超伝導の「波」の振動（ヒッグスモード）の空間パターンとその回転のイメージ

概要

東京大学低温科学研究センターの島野亮教授（兼：同大学大学院理学系研究科）、同大学大学院理学系研究科の田中康太郎大学院生、京都大学大学院理学研究科の森本高裕教授らの研究グループは、らせん状の波面を持つ光渦(注 1)を超伝導体(注 2)に照射し、回転運動を特徴づける物理量である軌道角運動量(注 3)を、光から超伝導体に転写できることを明らかにしました。

超伝導状態では無数の電子が位相の揃った一つの波のように振舞い、巨視的な量子状態を形成します。その波の振幅の振動は、素粒子のヒッグス粒子との類似性からヒッグスモード(注 4)と呼ばれます。今回、研究グループはヒッグスモードの振動を効率よく起こすことが可能なテラヘルツ波(注 5)を、らせん状の波面を持つ光渦の状態に変換してから窒化ニオブ超伝導薄膜に照射し、ヒッグスモードの振動を位置と時間の両方について測定しました。その結果、ヒッグスモードの振動が実空間で回転する様子を観測しました。さらに、振動の振幅・位相の分布を理論的に解析し､回転するヒッグスモードが超伝導体の軌道角運動量を担うことを示しました。本成果は、光の波面構造を利用した超伝導状態の操作や量子物質(注 6)の超高速制御技術の発展に貢献することが期待されます。

本研究成果は、アメリカ物理学会（APS）が発行している国際科学雑誌「Physical Review Letters」（2026 年 11 月 23 日付：米国東部時間）に掲載されるとともに、注目論文として「Editors’ Suggestions」に選出されました。

発表内容

〈研究の背景と経緯〉

角運動量は物質の回転運動を特徴づける物理量です。外部から物体を回転する作用が加わらなければ系の角運動量は変化しないという物理学の基本法則（角運動量保存則）があります。つまり、ある系の角運動量を変化させるためには、他の系との受け渡しを行う必要があります。例えば、磁性体の磁化を変えると物体が回転するアインシュタイン・ド・ハース効果では、電子のスピンから物体の回転へと角運動量が受け渡されます。このように、様々な自由度の間で角運動量がどのようにやりとりされるかを理解することは物理学において基礎的にも応用上も重要な課題となっています。

今回、研究グループは量子力学的な効果が巨視的なスケールで現れる超伝導現象に着目しました。超伝導状態では無数の電子があたかも位相の揃った一つの波のように振舞います。その巨視的な波（正確には波動関数）の振幅の振動は、素粒子のヒッグス粒子との類似性からヒッグスモードと呼ばれています。研究グループはこれまでの研究で、テラヘルツ波を用いると超伝導のヒッグスモードの振動が効率的に引き起こされることを明らかにしていました。そこで、テラヘルツ波をらせん状の波面を持つ光渦の状態、つまり角運動量を持つ光の状態にしておいてから、超伝導のヒッグスモードの振動を引き起こす実験を行いました。

〈研究の内容・成果〉

テラヘルツ周波数帯の光渦（ポンプ光）を窒化ニオブ超伝導薄膜に照射し、誘起されたヒッグスモードの振動を別のテラヘルツ波（プローブ光）で読み取る、ポンププローブ分光系(注 7)を構築しました（図 1）。ポンプ光よりも小さく集光したプローブ光の位置を固定し、ポンプ光の集光に用いるレンズを動かして照射位置を上下左右に掃引することで、ヒッグスモードの振動が空間的にどのように変化しているかを測定しました。

その結果、ヒッグスモードの振動の山と谷に対応する 4 つの領域がビームの中心の周りに交互に現れ、その配置が時間とともに回転する様子を観測しました（図 2）。光渦が巻く方向を反転させるとヒッグスモードの回転の向きも反転することも観測できました。ヒッグスモードをテラヘルツ波で強制振動させると、その振動の大きさはテラヘルツ波の電場の 2 乗に比例し、振動の周波数はテラヘルツ波の周波数の 2 倍になります。その結果、光渦の回転方向の位相の変化も 2 倍になってヒッグスモードに転写されます。実際に一周で位相が 2π変化する光渦で実験をしてみると、ヒッグスモードの振動の位相がビームの中心の周りで連続的に変化し、一周で 4π変化することも確認できました。

さらに、時間依存ギンツブルグ・ランダウ理論(注 8)と呼ばれる理論に基づく数値計算によって、この回転パターンを再現しました。実測した振動の振幅・位相分布を同理論に基づいて解析した結果、確かにヒッグスモードが光渦の巻き方向に応じた軌道角運動量を担い、超伝導状態に光の軌道角運動量が転写されることに相当していることを明らかにすることができました。

〈波及効果、今後の展開〉

今回の実験結果は、光の強度や周波数に加え、波面構造や角運動量を巨視的な量子状態である超伝導状態の操作に用いることが可能であることを示したものであり、他の手法では困難な新たな超伝導状態の実現や、それを用いた量子技術の発展に貢献すると考えられます。さらに、光による量子物質の超高速制御や新しい量子相の生成に貢献することが期待されます。



図 1：テラヘルツ光渦を用いた超伝導体への軌道角運動量の転写実験の模式図。テラヘルツ光渦で引き起こされたヒッグスモードの振動を、より小さい領域に集光した別のテラヘルツ光（プローブ）を用いて計測する。プローブの位置を固定したまま、励起光である光渦の集光レンズを上下左右に動かして試料上の照射位置をずらすことで、光渦の各位置に対応する試料の応答を測定する。

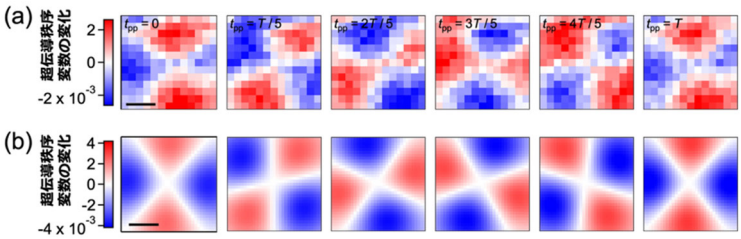


図 2：光渦によって駆動されたヒッグスモードの時空間ダイナミクス。(a) 測定結果。(b) 時間依存ギンツブルグ・ランダウ理論による計算結果。赤色と青色は、それぞれ振動の山と谷に対応する領域を表す。時間とともに 4 つの領域の配置が回転する様子が見られ、計算でもこの特徴が再現されている。Tはヒッグスモードの振動周期を表す。スケールバーは 2 ㎜。

〇関連情報：

「プレスリリース 超伝導体中の“ヒッグス粒子”の性質を解明 ― マクロな量子状態を光で制御する新たな可能性を拓く―」(2014/8/7)

https://www.crc.u-tokyo.ac.jp/press/1401.html

発表者・研究者等情報

東京大学
大学院理学系研究科　物理学専攻
田中　康太郎　大学院生（博士課程）
吉川　尚孝　助教（研究当時）
現：北海道大学　大学院工学研究院　准教授

大学院工学系研究科　物理工学専攻
姜　大模　大学院生（博士課程）

低温科学研究センター　研究開発部門
島野　亮　教授
兼：同大学　大学院理学系研究科　物理学専攻　教授
関口　文哉　特任助教

京都大学　大学院理学研究科　物理学・宇宙物理学専攻
森本　高裕　教授

情報通信研究機構 未来 ICT 研究所
寺井　弘高　上席研究員

論文情報

雑誌名：Physical Review Letters
題　名：Imprinting macroscopic orbital angular momentum onto the superconducting Higgs mode using a terahertz vortex beam
著者名：Kotaro Tanaka, Daemo Kang, Naotaka Yoshikawa, Fumiya Sekiguchi, Hirotaka Terai, Takahiro Morimoto, and Ryo Shimano
DOI：10.1103/lwp9-xjym
URL：https://doi.org/10.1103/lwp9-xjym

研究助成

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 チーム型研究（CREST）（課題番号：JPMJCR19T3）、科学研究費 学術変革領域（A）（課題番号：JP25H01251，24H02231）、基盤研究（B）（課題番号：23K25816，24K00568）および科学技術振興機構（JST）次世代研究者挑戦的研究プログラム（SPRING）（課題番号：JPMJSP2108）等の助成を受けて行われました。

用語解説

（注 1）光渦
光の進行方向を軸として、その周りで位相が連続的に変化し、らせん状の波面を持つ光。位相とは、波の振動が一周期のどの段階にあるかを表す量で、波面は位相が等しい点を結んだ面を指す。光渦は、中心が暗いドーナツ状の強度分布を示し、波面の巻き方向と巻き数に応じた軌道角運動量を持つ。

（注 2）超伝導体
ある温度以下で電気抵抗がゼロになり、内部から磁場を排除する性質を示す物質。超伝導状態では電子 2 個が組になったクーパー対をつくり、多数の対が協調して運動する。超伝導体では無数の電子が巨視的なスケールで位相の揃った一つの波のように振舞い、量子力学的な効果が巨視的なスケールで現れる。

（注３）軌道角運動量
物体や波の回転運動を特徴づける物理量。光も軌道角運動量を持つことができ、光渦では、ビームの中心の周りで変化する位相構造に由来する。円偏光に伴う光のスピン角運動量とは区別される。

（注４）ヒッグスモード
巨視的な量子状態である超伝導では､無数の電子が一つの位相の揃った波で特徴つけられる(巨視的波動関数とも呼ばれる)。その波の振幅振動は超伝導状態の固有振動であり、素粒子物理学におけるヒッグス粒子と理論的に共通する構造を持つことから、ヒッグスモードと呼ばれる。本研究で測定した「ヒッグスモードの振動の位相」は、この振幅の振動が一周期のどの段階にあるかを表し、もとの巨視的波動関数の位相そのものとは区別される。

（注５）テラヘルツ波
およそ 0.1～10 テラヘルツの周波数を持つ、電波と赤外光の間に位置する電磁波。1 テラヘルツは 1 秒間に 1 兆回の振動に相当する。結晶を構成しているイオンの振動や、分子間の振動、磁性体のスピンの歳差運動、超伝導に関係する励起などを調べ、制御するために用いられる。

（注６）量子物質
電子などが持つ量子力学的な性質が、物質全体の特徴として現れる物質の総称。超伝導体はその代表例であり、多数の電子が協調することで、個々の電子だけでは生じない性質を示す。

（注７）ポンププローブ分光
励起用の光パルス（ポンプ光）で物質の状態を変化させ、その応答を別の光パルス（プローブ光）で読み取る測定手法。二つのパルスが試料に到達する時間差を変えることで、励起後の変化を時間分解して調べる。本研究では、さらに励起光の照射位置を動かすことで、応答の空間分布も測定した。

（注８）時間依存ギンツブルグ・ランダウ理論
超伝導などの秩序状態を秩序変数で表し、その時間変化や空間分布を記述する理論。本研究では、ヒッグスモードの振動を記述できる形の運動方程式を用い、光渦によって駆動される秩序変数の変化と、それに伴う軌道角運動量を解析した。