

磁石の中で自然と現れる『止まった波』

—超放射相転移が起こる磁石を発見—

概要

葛飾北斎は大波が立ち上がった迫力の瞬間を、見事な筆致で写し取りました。現代では、そのような瞬間を写真として簡単に残すことができます。しかし、自然の中で波は移ろいゆくものであり、『止まった波』が実際に現れることはないというのが常識です。その常識に反するように、温度が下がっていくと電磁波が『止まった波』として自然と現れる、超放射相転移と呼ばれる現象が1973年に予言されていました。その後約50年にわたる研究者たちの努力にもかかわらず、常識を覆すこの現象の観測に成功した例はこれまでありませんでしたが、この度、エルビウムオルソフェライト (ErFeO_3) と呼ばれる磁性体 (磁石) の中で超放射相転移が初めて確認されました。

京都大学白眉センター 馬場基彰特定准教授、ライス大学 Xinwei Li 博士課程学生 (研究当時、現:カリフォルニア工科大学博士研究員)、Nicolas Marquez Peraca 同博士課程学生、河野淳一郎同教授の国際共同研究グループは、 ErFeO_3 の実験データから理論モデルを構築し、約4ケルビン (マイナス269度) で起こる相転移が、磁気的な波が止まった形で自然と現れる超放射相転移であることを見いだしました。この磁気的な波は、超放射相転移が起こった際に、特殊な量子論的な状態となることが知られています。今後、本研究で得られた知見をさらに発展させることによって、量子センシングや量子コンピューティングなどの量子技術への応用が期待されます。

本成果は、2022年1月10日 (現地時刻) に英国の国際学術誌「Communications Physics」にオンライン掲載されました。

超放射相転移が起こる磁性体を発見

超放射相転移では、静的で (時間的に振動しない) コヒーレントな光と物質の場が 熱平衡下で自発的に現れます

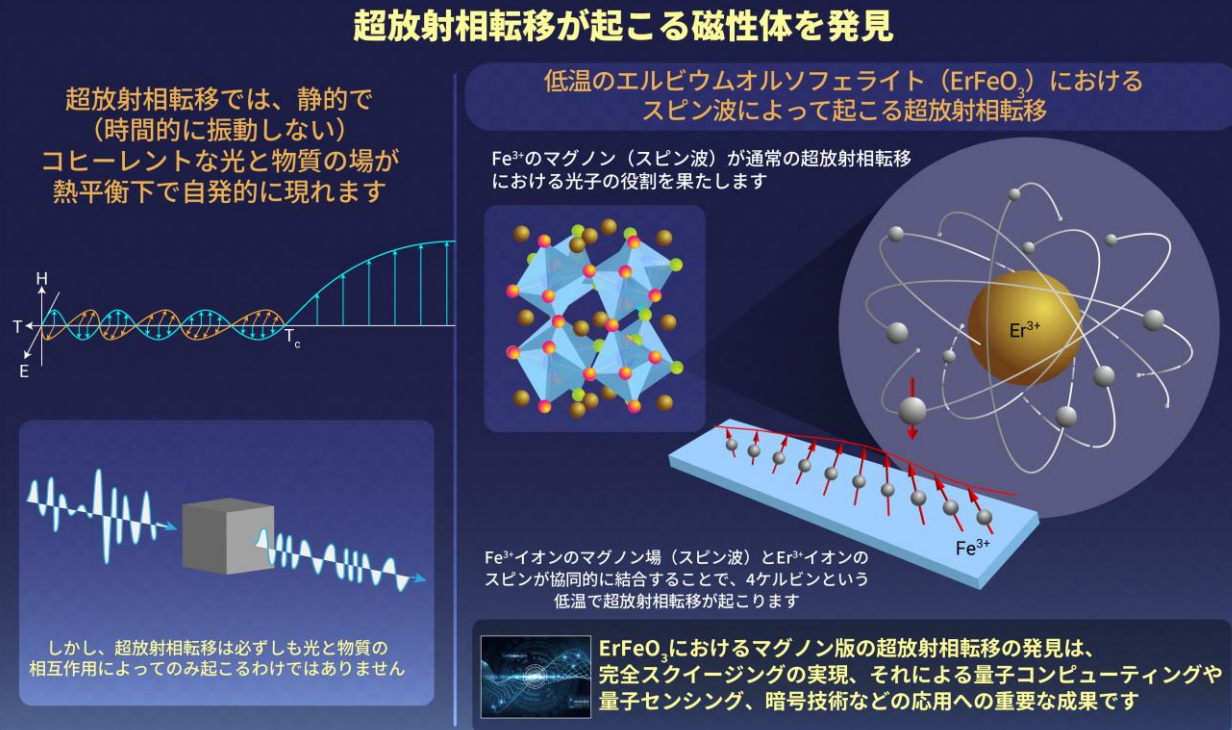
低温のエルビウムオルソフェライト (ErFeO_3) における スピン波によって起こる超放射相転移

Fe^{3+} のマグノン (スピン波) が通常の超放射相転移 における光子の役割を果たします

Fe^{3+} イオンのマグノン場 (スピン波) と Er^{3+} イオンの スピンが協同的に結合することで、4ケルビンという 低温で超放射相転移が起こります

しかし、超放射相転移は必ずしも光と物質の 相互作用によってのみ起こるわけではありません

ErFeO_3 におけるマグノン版の超放射相転移の発見は、 完全スクイージングの実現、それによる量子コンピューティングや 量子センシング、暗号技術などの応用への重要な成果です



1. 背景

1973年、『超放射相転移』と呼ばれる現象が予言されました。超放射相転移とは、電磁波（光）と物質との結合強度（相互作用の強さ）がある閾値を超えると、臨界温度 T_c よりも低い温度において、静的な（時間的に振動しない）横波の電磁場と電磁気分極（物質場）が、熱平衡下で自発的に現れる現象です。つまり、温度を下げることで『止まった電磁波』が自然と現れます。

典型的な電磁波（光）の研究では、時間的に振動する電磁波と電磁気分極のダイナミクスを主に扱うのに対し、超放射相転移では熱平衡下において静的な波（止まった波）が生じることが特徴です。これまでの研究で、レーザー光で駆動される冷原子系で超放射相転移が時間的に振動する形で観測されたことはありましたが、時間的に振動しない熱平衡下での超放射相転移は観測された例がありませんでした。

近年、電磁場と物質とが結合する系の基底状態において生じるスクイーミング（電磁場と物質場の量子ゆらぎの抑制）の最大値を探索する研究が理論的に行われ、超放射相転移の臨界点において、『完全スクイーミング』^{注1}と呼ばれる理想的な状態が得られることが明らかになりました。従来の時間的に振動する電磁波を用いて生成される典型的なスクイーミングとは対照的に、時間的に振動しない熱平衡下における超放射相転移臨界点での量子スクイーミングは本質的に安定で、ノイズに対して堅牢であり、暗号通信、量子コンピューティング、重力波検出における高精度な測定などへの応用が期待されます。

2. 研究手法・成果

本研究では、 ErFeO_3 にて約4ケルビンの臨界温度 T_c で生じる相転移（『低温相転移』と呼ばれます）が、マグノン^{注2}版の超放射相転移であることを理論的に示しました。すなわち、超放射相転移が予言された当初に想定された電磁場の代わりに、 Fe^{3+} イオンのマグノン場（スピン波）と Er^{3+} イオンのスピンの協同的に結合することで、低温相転移が起こることを明らかにしました。

具体的には、磁化測定で得られた相図やテラヘルツ磁気分光で得られた吸収スペクトルを再現する ErFeO_3 の理論モデルをまず構築しました。このモデルを用いて、 Er^{3+} 間の直接的な相互作用が存在しない場合でも、 Er^{3+} -マグノン結合によって低温相転移が起こることを発見しました。さらに、 Er^{3+} -マグノン結合によって、 Er^{3+} 間の直接的な相互作用のみがある場合よりも、低温相転移の臨界温度 T_c や臨界磁場が高まることが確認されました。

これらの結果は、部分的には Er^{3+} 同士の相互作用も寄与しているものの、 Fe^{3+} マグノンと Er^{3+} スピンとの結合が ErFeO_3 の低温相転移を引き起こしていることを示唆しており、 ErFeO_3 が熱平衡下で超放射相転移を実現できる物理システムであることが明らかになりました。これは、熱平衡下において超放射相転移が確認された初めての例となります。

3. 波及効果、今後の予定

光のスクイーミングという量子ゆらぎの抑制によって、古典的な限界を超えた精密な測定や、量子コンピューティングの実行が可能になることが知られており、数十年にわたって大きな関心を集めています。しかし、既存のプロトコルの多くで生成されるスクイーミング状態は一過的であるため、ノイズなどによってすぐに消えてしまい、その特性を十分に活かすことができません。一方、超放射相転移臨界点におけるスクイーミングは、熱平衡下で安定的に現れることから、ノイズに強いという特徴があります。このような安定性から、超放射相転移臨界点におけるスクイーミングを利用した、量子センシングやノイズに強い連続量変数量子コンピューティングなどへの応用が今後期待されます。同時に、本研究は、光学、熱力学、そして物質科学を繋ぐ重要な現

象である超放射転移を理解し、活用していくための学術的な基盤となります。

4. 研究プロジェクトについて

本研究の実施にあたり、馬場基彰特定准教授は科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業さきがけ（JPMJPR1767）から、河野淳一郎教授はアメリカ陸軍研究所（W911NF-17-1-0259）およびアメリカ国立科学財団（DMR-1720595）から助成を受けました。

<用語解説>

注1 **完全スクイーミング**：一般に、光場を表現する変数（電場、磁場、またはそれらの重ね合わせなど）の1つでの量子ゆらぎが小さくなると、その代わり、それに共役な変数では Heisenberg の不確定性を満たすように量子ゆらぎが大きくなります。完全スクイーミングは、ある変数の量子ゆらぎがゼロになり、それに共役な変数の量子ゆらぎが無限大になることを意味します。

注2 **マグノン**：結晶格子中のスピン波を量子化した準粒子。

<研究者のコメント>

新しい現象が見つかるたびに、科学は発展していきます。今回の発見も、私たちを取り巻く世界についての理解を深めると同時に、量子コンピューティングなどの技術への活用を通じて、人類の幸せや社会の持続性に寄与すると、私たちは信じています。今後も、さまざまな分野の世界中の研究者と協働し、物質と相互作用する電磁場で生じる新たな現象を見出していきたいと考えています。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Magnonic superradiant phase transition（マグノン版の超放射相転移）

著者：Motoaki Bamba, Xinwei Li, Nicolas Marquez Peraca, Junichiro Kono

掲載誌：Communications Physics DOI：10.1038/s42005-021-00785-z