

2024年3月14日

東京大学

東北大学

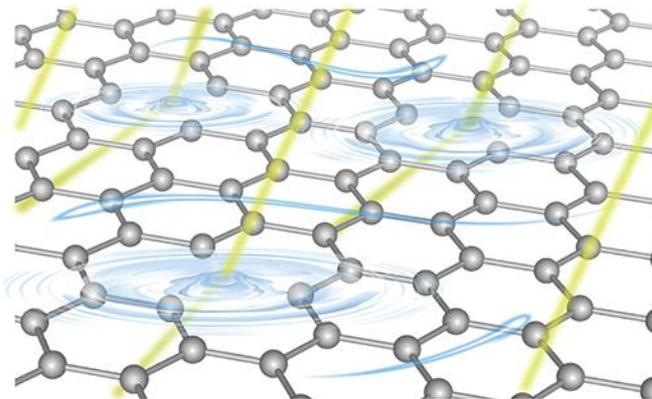
科学技術振興機構 (JST)

## 欠陥によって誘起されるマヨラナ粒子の局在状態を観測

——トポロジカル量子コンピューター実現の可能性を拓く——

### 発表のポイント

- ◆蜂の巣格子を持つ磁性絶縁体 $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  (塩化ルテニウム) はマヨラナ粒子が存在する舞台として盛んに研究がなされてきましたが、現実物質中に必ず存在する不純物や欠陥がマヨラナ粒子に与える影響は未解明でした。
- ◆今回、高エネルギーの電子線を照射することにより、人工的に導入した欠陥がマヨラナ粒子の局在状態を誘起することを明らかにしました。
- ◆欠陥がマヨラナ粒子に与える影響を明らかにしたことで、実際の物質中におけるマヨラナ粒子の安定性の解明につながり、現実物質におけるトポロジカル量子コンピューター実現の可能性が広がることが期待されます。



電子線（黄緑色）を照射して導入した欠陥により、マヨラナ粒子（水色）の局在状態が誘起される

### 概要

東京大学大学院新領域創成科学研究科の今村薫平大学院生、水上雄太助教（研究当時、現在東北大学大学院理学研究科准教授）、橋本顕一郎准教授、芝内孝禎教授、京都大学大学院理学研究科の松田祐司教授、学習院大学大学院自然科学研究科の山田昌彦研究員（研究当時、現在東京大学大学院理学系研究科特任講師）らの研究グループは、東京工業大学、仏エコールポリテクニークと共同で、環境ノイズに非常に強いトポロジカル量子コンピューター（注1）の実現の鍵となる「マヨラナ粒子（注2）」の局在状態が物質中の欠陥により誘起されることを明らかにしました。

これまで、磁性絶縁体 $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$ において、本研究チームの報告を始めとして、マヨラナ粒子が存在する証拠が得られています。しかし、現実の物質中においては、どんなにきれいな試料においても必ず不純物や欠陥が存在するため、それらがマヨラナ粒子に与える影響を明らかにすることが求められていました。

今回、高エネルギーの電子線を照射することにより人工的に導入した欠陥がマヨラナ粒子の局在状態を誘起し、マヨラナ粒子の数が変化することを観測しました。このことにより、物質中のマヨラナ粒子の不純物に対する安定性が明らかになると考えられます。マヨラナ粒子は磁場下において、非可換エニオン（注3）という特殊な粒子になり、トポロジカル量子コンピューターに応用可能と考えられています。そのため、本研究成果は物質中における非可換エニオンを用いたトポロジカル量子コンピューター実現の可能性を広げると期待されます。

本研究成果は2024年3月11日付けで、米国科学誌 *Physical Review X* にオンライン掲載されました。

## 発表内容

2006年にアレクセイ・キタエフにより理論的に提案された、蜂の巣格子上の量子スピン模型「キタエフ模型（注4）」において、量子力学的な揺らぎの効果により、低温ではスピンが秩序化しない量子スピン液体（注5）と呼ばれる状態が得られることが知られています。この量子スピン液体はキタエフ量子スピン液体（注5）と呼ばれ、理論的に取り扱いやすいことに加え、現実物質において実現することが予測されて以降、非常に注目されています。キタエフ量子スピン液体においてはマヨラナ粒子と呼ばれる素粒子物理の分野でその存在が予測された粒子が存在します（図1）。磁性絶縁体 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>においては、研究チームを始めとする多くの報告から、キタエフ量子スピン液体状態が実現しており、マヨラナ粒子が存在すると考えられています。

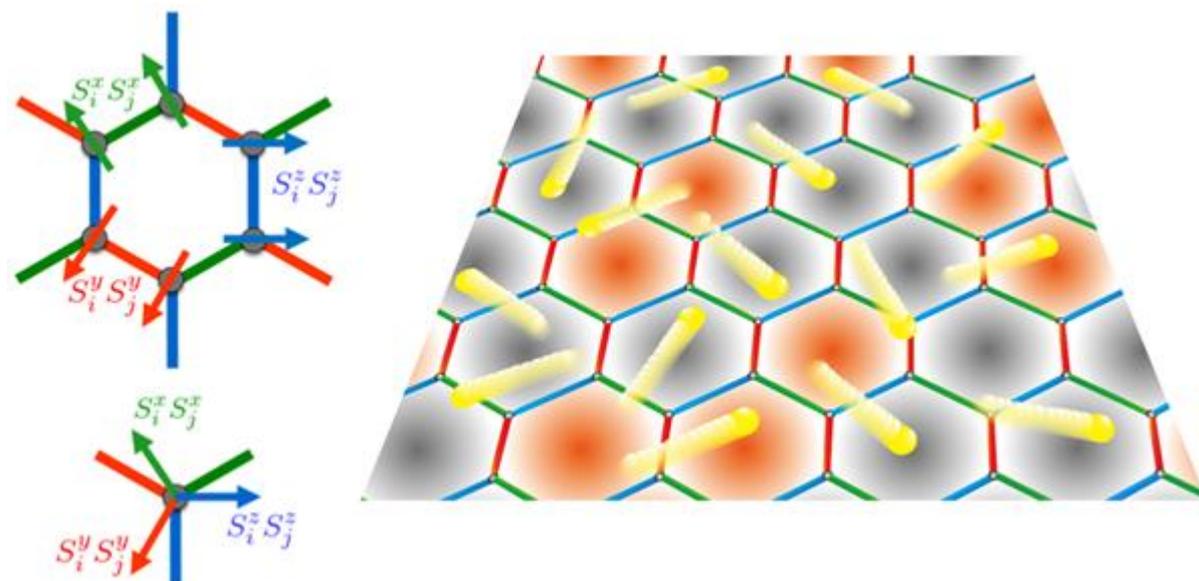


図1：キタエフ模型（左図）とキタエフ量子スピン液体（右図）の模式図

一つのスピンに対して隣接する三つのスピンが結合しているが、三つの隣接するスピンからは、それぞれスピンを異なる方向に向かせる相互作用（緑、赤、青）が働き、スピンはそのフラストレーションのために秩序化できず、量子スピン液体状態となる。キタエフ量子スピン液体においては、スピンが分裂し、マヨラナ粒子（黄色）が動き回る状態が実現する。

しかし、キタエフ量子スピン液体におけるマヨラナ粒子が不純物などの乱れから受ける影響については未だ解明されていませんでした。現実物質においては、どんなにきれいな試料においても不純物が存在するため、欠陥などの不純物から影響を受けることは避けられません。そ

のため、研究チームは人工的に不純物を導入し、マヨラナ粒子が不純物から受ける影響を明らかにしようと考えました。

今回、 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>に対して電子線を照射し、人工的に0.6%程度のわずかな量の欠陥を導入し、その影響を調べました。Kitaエフ量子スピン液体におけるマヨラナ粒子の状態の変化を正確に観測するために、約500 mK（ミリケルビン）（およそマイナス273度）までの極低温において比熱の精密測定を行いました。

欠陥などの不純物が入っていないKitaエフ量子スピン液体は、磁場をa軸方向（蜂の巣格子のボンドに垂直な方向）にかけた際には、ギャップ（禁制帯）が開いています（図2(a)）。そのため、マヨラナ粒子の比熱を温度で割ったものは、低温において励起がないためフラットな振る舞いになります（図2(b)の青）。しかし、欠陥を導入するとギャップが開いているのにも関わらず、図2(b)の赤色で表現されているように比熱が低温においても大きくなることがわかりました。これはマヨラナ粒子の局在状態が欠陥により誘起され、低温でマヨラナ粒子の数が増加した結果と考えられます。さらに、低温でのマヨラナ粒子の比熱はギャップの大きさと特別なスケーリングの関係（比例関係）があることがわかりました（図2(c)）。これは理論的に予測されたマヨラナ粒子のアンダーソン弱局在（注6）の振る舞いとよく一致した結果になっています。

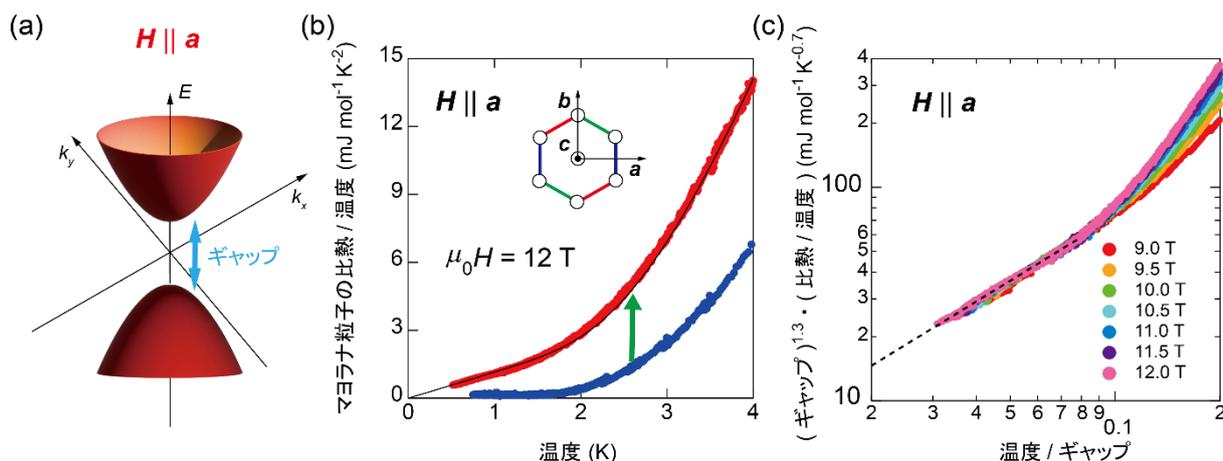


図2：欠陥によるマヨラナ粒子の局在状態を示す比熱とそのスケーリング

(a) 磁場  $H$  を  $a$  軸方向にかけた際に生じるマヨラナ粒子のギャップの概念図。

(b) マヨラナ粒子の比熱を温度で割ったものについて、欠陥を導入した試料（赤色）と欠陥のない試料（青色）との比較。

(c) 欠陥を導入した試料において、低温領域の比熱がマヨラナ粒子のギャップに対して特別なスケーリングの関係があることを示すプロット。

今回の結果は、欠陥がKitaエフ量子スピン液体におけるマヨラナ粒子に与える影響を明らかにしたことに加えて、マヨラナ粒子のアンダーソン弱局在という理論的に予測されていた現象を初めて観測したと考えられます。磁場中でのマヨラナ粒子は、非可換エニオンという特別な粒子を形成し得ます。この非可換エニオンは、環境ノイズに非常に強いトポロジカル量子コンピューターを実現するうえでのワイルドカードになると期待されている粒子です。本研究成果によって、物質中における非可換エニオンの不純物等への安定性が明らかになり、トポロジカル量子コンピューターの実現への可能性が広がることが期待されます。

## ○関連情報：

プレスリリース「磁性絶縁体内部で現れるマヨラナ粒子の性質を解明」(2022/2/1)

<https://www.k.u-tokyo.ac.jp/information/category/press/8826.html>

## 発表者・研究者等情報

東京大学大学院新領域創成科学研究科

今村 薫平 博士課程

水上 雄太 助教（研究当時）

現：東北大学大学院理学研究科 准教授

田中 桜平 博士課程

橋本 顕一郎 准教授

芝内 孝禎 教授

京都大学大学院理学研究科

松田 祐司 教授

東京工業大学理学院物理学系

栗田 伸之 助教

田中 秀数 教授

学習院大学大学院自然科学研究科

山田 昌彦 研究員（研究当時）

現：東京大学大学院理学系研究科 特任講師

## 論文情報

雑誌名： Physical Review X (2024年3月11日付け)

題名： Defect-induced low-energy Majorana Excitations in the Kitaev magnet  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$

著者名： K. Imamura\*, Y. Mizukami, O. Tanaka, R. Grasset, M. Konczykowski, N. Kurita, H. Tanaka, Y. Matsuda, M. G. Yamada, K. Hashimoto and T. Shibauchi\*

DOI: 10.1103/PhysRevX.14.011045

URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevX.14.011045>

## 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 CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」（研究代表者：松田祐司）[JPMJCR19T5]、科学研究費新学術領域研究（研究領域提案型）「量子液晶の物性科学」（領域代表：芝内孝禎）[JP19H05824]等の助成を受けて行われました。

## 用語解説

### (注1) トポロジカル量子コンピューター

従来の量子コンピューターとは異なる物理系を用いて、量子計算を行う次世代型の量子コンピューターである。外乱に対して強いトポロジカルな性質を利用するため、周囲の環境の変化に強く、本質的にエラーを起こしにくいコンピューターになると期待される。

### (注2) マヨラナ粒子

1937年にエッソーレ・マヨラナにより理論的に提案された素粒子である。一般的に、電子等に代表される粒子には、その電荷などの性質が反対となる反粒子が存在する。例えば電子の場合は、陽電子がその反粒子である。これに対し、マヨラナ粒子は、粒子と反粒子が同一となる性質を持つ。

### (注3) 非可換エニオン

通常の三次元空間において粒子はボーズ粒子とフェルミ粒子に分けられる。数学的には、ボーズ粒子においては、二つの粒子の入れ替え操作に対してその波動関数に1がかかり、フェルミ粒子においては、-1がかかる。一方、二次元空間においては、より一般的に二つの粒子の入れ替え操作により波動関数に±1以外の複素数がかけられる粒子が考えられ、これはエニオンと呼ばれる。通常のエニオンにおける粒子の入れ替え操作は、波動関数の位相が変化するのみとみなせるが、これに対して粒子の入れ替え操作により、もとの状態と全く異なる状態になってしまう場合があり、これを非可換エニオンという。

### (注4) キタエフ模型

2006年にアレクセイ・キタエフにより理論的に提案されたスピン模型。蜂の巣格子上に配置された1/2スピンの、三つの隣接するスピンの、互いに異なる方向を向くような相互作用を持つ(図1)。これにより、スピンがある特定の方向を向けないフラストレーションが生じ、スピンの秩序化しない量子スピン液体状態が実現される。この状態は、1/2スピンの分裂し、マヨラナ粒子が動き回る描像で記述することができることが厳密に示された。

### (注5) 量子スピン液体、キタエフ量子スピン液体

物質中のスピンは多くの場合、何かしらの相互作用により、低温で向きが揃ったり、特定のパターンを示したりする磁気秩序状態を示す。これは、スピンの自由度が凍結した一種の固体状態とみなせる。一方で、スピンの量子力学的な揺らぎが強く働く場合、低温であってもスピンの秩序化が阻害されることがある。このように、量子力学的な効果に起因してスピンの自由度が凍結しない、いわば液体のような状態が実現される。この状態のことを量子スピン液体と呼ぶ。量子スピン液体においては、新奇な粒子が存在する可能性が提案されている。キタエフ模型は、基底状態に厳密解としてこのような量子スピン液体状態(キタエフ量子スピン液体)を持つことが知られている。従来の量子スピン液体に比べ、理論的に厳密に扱うことができることに加え、マヨラナ粒子という特殊な粒子の存在から非常に注目されている。

### (注6) アンダーソン弱局在

量子力学に従う粒子は波動的な性質を持つため、乱れたポテンシャルによる波動の干渉効果により、粒子が空間的に局在する現象である。例えば、金属を極低温まで冷やすと、電子が不純物などにより散乱され、その散乱波同士が量子干渉を起こすことにより、電子が空間的に局在

し、絶縁体となることがある。絶縁体になる前の前駆的な現象を弱局在とよび、弱局在領域では、特殊なスケーリングが成り立つことが知られている。

## 問合せ先

### 【研究に関すること】

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 物質系専攻

教授 芝内 孝禎（しばうち たかさだ）

Tel/Fax : 04-7136-3774 E-mail : shibauchi[at]k.u-tokyo.ac.jp

研究室ウェブサイト : <http://qpm.k.u-tokyo.ac.jp>

### 【JST 事業に関すること】

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

安藤 裕輔（あんどう ゆうすけ）

Tel : 03-3512-3531 E-mail : crest[at]jst.go.jp

### 【報道に関すること】

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 広報室

Tel : 04-7136-5450 E-mail : press[at]k.u-tokyo.ac.jp

東北大学 大学院理学研究科 広報・アウトリーチ支援室

Tel : 022-795-6708 E-mail : sci-pr[at]mail.sci.tohoku.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp