



2018年2月14日

報道関係各位

量子コンピュータの新たな設計指針 ～カムチャッカ半島産の鉱物の中に量子ビットを発見～

東京理科大学

【要旨】

東京理科大学理学部第一部物理学科の藤原 理賀 助教、満田 節生 教授 および 応用物理学科の杉本 貴則 助教、遠山 貴巳 教授等の研究グループは、カムチャッカ半島のトルバチク火山で発見された鉱物 $K_2Cu_3O(SO_4)_3$ (鉱物名: Fedotovite) を人工合成し、実験・理論の両側面から、その内部磁気状態を調べました。この結果、同物質の低温磁気状態が、一次元的に強い量子もつれ [1] を持った状態であることを発見しました。この状態は、ホールデン (Haldane) 状態 [2] と呼ばれ、強い量子もつれを利用した量子コンピュータへの応用が期待されています。本研究では、同物質から得られた知見を一般化して、ホールデン状態を人工的に再現する指針についても示しました。

本研究成果は、アメリカ物理学会が発行する英文誌 *Physical Review Letters* に 2018 年 2 月 12 日 (米国時間) に掲載されました。また、編集部による注目論文 (Editors' Suggestion) にも選ばれました。

【研究の背景】

F. Duncan M. Haldane は、物質の低温状態として出現するトポロジカル相に関する研究で、2016 年にノーベル賞を受賞しました。この研究では、スピン [3] と呼ばれる電子の角運動量の自由度が、一次元的に相互作用する場合は考察されています。結論として、スピンの大きさが、半奇数の場合 ($\hbar/2, 3\hbar/2, 5\hbar/2, \dots$) と整数の場合 ($\hbar, 2\hbar, 3\hbar, \dots$) で、定性的に異なる状態となることが、初めて示されました。この研究に敬意を表し、スピンの大きさが整数の場合の低温状態を、ホールデン状態と呼びます。この状態では、スピン間に強い量子もつれがあり、一次元鎖の両端に位置する 2 つのスピンに、2 量子ビット [4] に相当する自由度が現れることが分かっています。また、この状態を積極的に活用した量子コンピュータの開発が、基礎科学・工学応用の両側面から期待されています。一方で、ホールデン状態を再現するためには、整数スピンが必要であり、これを実現する元素は非常に限られているため、これまで積極的に応用への試みがなされて来ませんでした。

【研究の内容と成果】

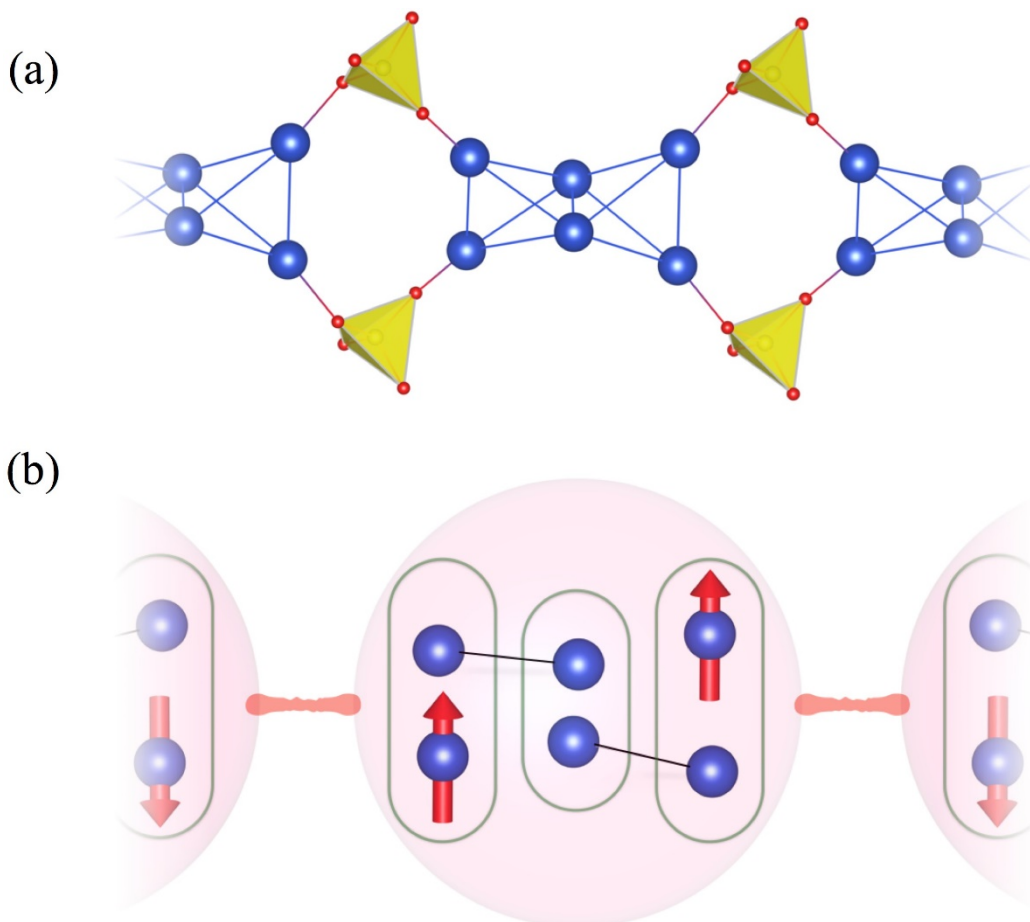


図 1 : (a) $\text{K}_2\text{Cu}_3\text{O}(\text{SO}_4)_3$ の銅イオンの周りの構造。青丸が銅イオン、黄色の四面体が硫酸イオンを示す。(b) $\text{K}_2\text{Cu}_3\text{O}(\text{SO}_4)_3$ で実現するホールデン状態の概念図。クラスタ内端の不对半奇数スピン ($\hbar/2$) が有効的な整数スピン (\hbar) を創り出す。それぞれのクラスタは硫酸イオンにより一次元的な相互作用 (赤線) を持つためホールデン状態が実現する。

$\text{K}_2\text{Cu}_3\text{O}(\text{SO}_4)_3$ (鉱物名 : Fedotovite) は、カムチャッカ半島のトルバチク火山で発見された鉱物です。同物質の磁気的な性質は、半奇数スピン ($\hbar/2$) を持つ 2 個の銅イオン Cu^{2+} の構造 [図 1 (a)] により決定されます。同物質では、銅イオンは 6 個で一つの辺共有四面体クラスタを形成し、それぞれのクラスタは硫酸イオンで b 軸方向に繋がれています。この構造の特徴から、我々はこの物質を、「辺共有四面体量子スピクラスタ鎖」と名付け、実験・理論の両面から、内部磁性に関する研究を続けてきました。

本研究ではまず、室温付近の磁気状態を調べ、これが銅イオン構造と同様の、辺共有四面体量子スピクラスタの振る舞いを示すことを明らかにしました。さらに、理論的な解析を行った結果、このクラスタの低温磁性は、有効的な整数スピン (\hbar) により記述されることが分かりました。もし、このクラスタが、銅イオン構造と同様に、一次元的に相互作用するなら、半奇数スピクラスタから、ホールデン状態を構成することができます。

この仮説を検証するため、本研究チームは、4K以下の低温磁気状態も調べました。その結果、同物質の低温状態は、予想通り、ホールデン状態になっていることが分かりました。

本研究では、さらにこの知見を拡張し、ホールデン状態が出現し得るスピクラスタ鎖の条件について考察し、この結果、クラスタ内の辺共有四面体の数 (N_{tetra}) が奇数の場合と偶数の場合で定性的に異なる状態になり、辺共有四面体の数 (N_{tetra}) が偶数の場合のみ、低温状態としてホールデン状態が出現する可能性があることが分かりました。

【今後の展望】

本研究では、半奇数スピクラスタを用いて、ホールデン状態が出現し得る条件を明らかにしました。本研究と、これまでの整数スピンのホールデン状態出現条件の研究を合わせると、より柔軟に、量子コンピュータの設計指針を立てることができると期待されます。

【論文について】

掲載雑誌：Physical Review Letters

論文名：Cluster-Based Haldane State in an Edge-Shared Tetrahedral Spin-Cluster Chain: Fedotovite $\text{K}_2\text{Cu}_3\text{O}(\text{SO}_4)_3$

著者：M. Fujihala, T. Sugimoto, T. Tohyama, S. Mitsuda, R. A. Mole, D. H. Yu, S. Yano, Y. Inagaki, H. Morodomi, T. Kawae, H. Sagayama, R. Kumai, Y. Murakami, K. Tomiyasu, A. Matsuo, and K. Kindo

【用語】

[1] 量子もつれ：量子力学では、古典的な状態の重ね合わせが許される。量子もつれとは、状態の重ね合わせによって現れる、古典力学では存在しえない、異なる量子間の相関効果である。

[2] ホールデン状態：整数スピンの反強磁性的相互作用で、一次元的に結合した時に、絶対零度の磁気状態として現れる。この状態では、隠れた秩序（ストリング秩序）が実現して、両端スピン以外の、スピン観測量が消失する。

[3] スピン：量子力学における角運動量を表す物理量。スピンの大きさは、量子力学における不確定性原理により、半奇数 ($\hbar/2, 3\hbar/2, 5\hbar/2, \dots$)、もしくは整数 ($\hbar, 2\hbar, 3\hbar, \dots$) しか持ちえない。ここでは、1イオンに属する電子集団の全角運動量を合計した物理量の意味で用いた。

[4] 量子ビット：量子力学的2状態 ($|0\rangle, |1\rangle$) で構成される、量子計算を行うための情報の最小単位。従来のビットとは異なり、2状態の重ね合わせ ($|0\rangle$ であり $|1\rangle$ でもある状態) が存在する。

～本件に関するお問い合わせ～

東京理科大学 研究戦略・産学連携センター

〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3

TEL : 03-5228-7440 FAX : 03-5228-7441