

2021年10月27日

テルビウム系準結晶における強磁性秩序を理論的に発見

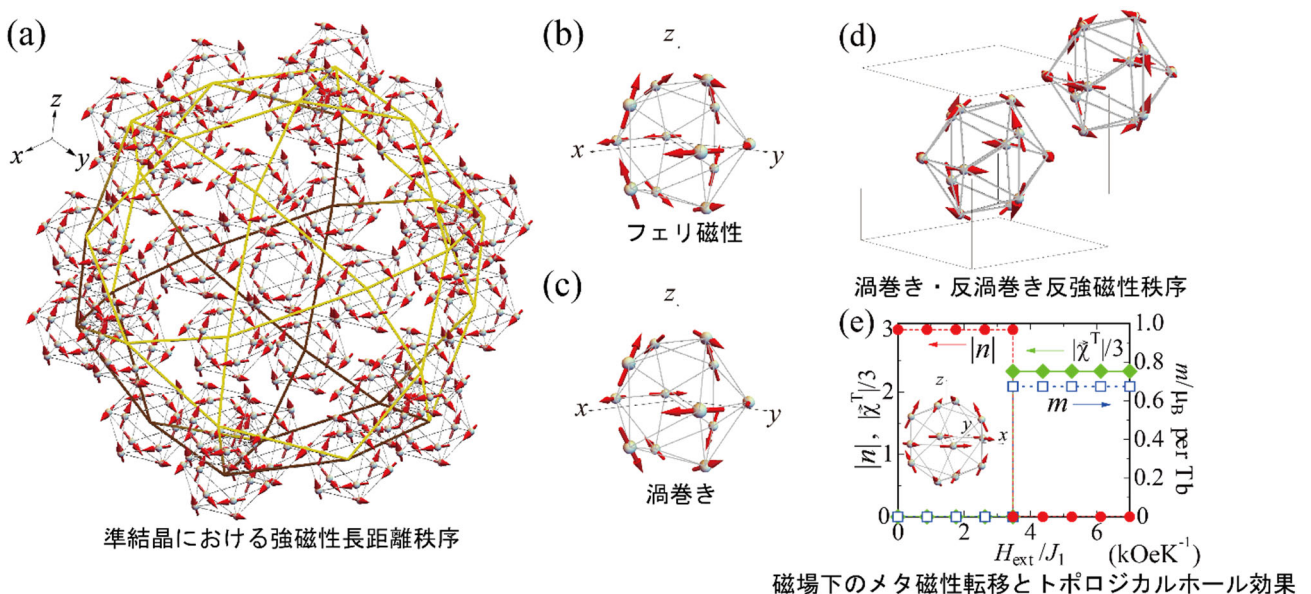
— 近似結晶におけるトポロジカルホール効果も発見 —

本学大学院工学研究院基礎科学研究系の渡辺真仁教授が主宰する固体物性理論研究室は、準結晶^{*1}における強磁性長距離秩序^{*2}を理論的に発見しました。また、準結晶と共通の局所原子構造と周期性をもつ近似結晶^{*3}におけるトポロジカルホール効果^{*4}も理論的に発見しました。この発見は、物性物理学における新しい研究成果であり、今後さらに研究が進展することで物質の新機能の開拓につながることも期待されます。

ポイント

- ✔ テルビウム系準結晶における結晶場を理論的に解明
- ✔ 準結晶における強磁性長距離秩序を理論的に発見
- ✔ 近似結晶において磁場中でトポロジカルホール効果が発現することを理論的に発見

通常の結晶では原子は周期的に配列していますが、周期性をもたない原子配列をもつ結晶が存在することが1984年に発見され、そのような新たな結晶構造をもつ物質群は準結晶とよばれています。準結晶の特異な結晶構造のもとで、どのような電子状態が実現するかはよくわかっておらず、その解明は物性物理学のフロンティアとして注目を集めています。特に、準結晶の3次元結晶構造のもとで磁気長距離



秩序が実現するか否かは未解明の重要な問題でした。今回の発見は、希土類元素のテルビウム (Tb) からなる準結晶 Au-SM-Tb (Au は金、SM は Si, Ge, Sn, Al などの元素) の Tb サイトにおける結晶場*5 を理論的に解明し、Tb の磁気異方性をとり入れた有効磁気模型を構築することによって得られました。

理論計算の結果、上図 (a) のように各 20 面体の頂点に位置する Tb の 4f 電子の磁気モーメントが図 (b) のようにフェリ磁性状態を形成し、それらが一様に配列した基底状態 (強磁性長距離秩序) が実現することがわかりました。また、Au-SM-Tb の Au と SM の組成比を変化させることで、図 (c) の渦巻き状態をはじめとする様々な磁性状態を生成できることもわかりました。さらに、この渦巻き状態は、近似結晶において図 (d) のように反強磁性長距離秩序を形成し、磁場をかけると磁化が急激に増加するメタ磁性転移*6 を示すと同時に、トポロジカルホール効果を示すこともわかりました (図 (e))。

この発見は、希土類系準結晶と近似結晶の磁性の研究にブレイクスルーをもたらすものと期待されます。特に、最近実験により発見された Tb 系準結晶の強磁性長距離秩序状態の理論解明や、新しい磁性の解明、ならびに物質の新機能の開拓につながることも期待されます。

なお、この研究成果は、2021 年 10 月 27 日 (水) 午前 4 時 (日本時間) に米国の科学誌「米国科学アカデミー紀要 (PNAS)」に掲載されます。

- *1 準結晶：周期結晶では許されない回転対称性をもつ結晶構造をもつ。準結晶は 1984 年にイスラエルの化学者・物理学者であるダニエル・シェヒトマンにより発見され、同氏はこの功績によりノーベル化学賞 (2011 年) を受賞している。
- *2 磁気長距離秩序：電子の磁気モーメントがある方向に揃って結晶全体にわたって秩序化した状態。周期結晶において磁気モーメントが一様に配列した強磁性秩序や、反平行に配列した反強磁性秩序が実現することはよく知られている。
- *3 近似結晶：準結晶と共通の局所原子構造をもち、かつ周期性をもつ結晶。近似結晶の単位胞のサイズを大きくしていき、無限大の極限が準結晶に対応する。図(d)の立方体は、1/1 近似結晶の単位胞を示す。
- *4 トポロジカルホール効果：磁性体中の磁気モーメントが非共面的に配列することによる創発磁場により生じるホール効果。図(e)の磁気カイラリティー χ_T が創発磁場を表しており、 $H_{\text{ext}}/J_1 = 3.47 \text{ kOeK}^{-1}$ 以上の磁場領域でこの量が有限になるので、この領域で有限のトポロジカルホール伝導度 σ_{xy}^T および σ_{yz}^T が現れる。
- *5 結晶場：結晶中の希土類イオンの位置に周りのイオンが作る静電場の総和を結晶場という。
- *6 メタ磁性：物質に磁場をかけると、ある磁場で磁化が急激に増加する現象。図(e)の $H_{\text{ext}}/J_1 = 3.47 \text{ kOeK}^{-1}$ 付近で磁化 m が 0 から不連続に跳びを示し、メタ磁性を示している (H_{ext} は印加した磁場、 J_1 は最近接 Tb 間の交換相互作用)。

論文の詳細情報

タイトル： Topological magnetic textures and long-range orders in terbium-based quasicrystal and approximant

著者名： Shinji Watanabe

雑誌： Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America

DOI： 10.1073/pnas.2112202118

※ 本研究は JSPS 科研費 JP18K03542, JP19H00648 の助成を受けたものです。

【取材報道に関するお問い合わせ】

国立大学法人九州工業大学総務課広報企画係

電話：093-884-3008 Mail：sou-kouhou@jimukyutech.ac.jp

【研究内容に関するお問い合わせ】

国立大学法人九州工業大学大学院工学研究院 教授 渡辺 真仁

電話：093-884-3442 Mail：swata@mns.kyutech.ac.jp