

解禁 新聞:平成 22 年 9 月 13 日(月)朝刊以降
インターネットなど:平成 22 年 9 月 13 日(月)午前2時以降



平成 22 年 9 月 10 日

大学記者会 御中
文部科学省記者クラブ 御中
文部科学省科学記者会 御中

東京大学物性研究所長
家 泰 弘

東京工業大学広報センター長
大 倉 一 郎

“スピンの量子引きこもり現象”を解明 籠目格子磁性体を中性子散乱で観察

【発表概要】

東京工業大学の小野俊雄助教，元東京大学物性研究所のキットウィット・マタン特任研究員（現タイ・マヒドール大学講師），東京理科大学の福元好志准教授らの研究グループは，籠目格子反強磁性体の非磁性状態におけるミクロな構造と励起構造を解明することに成功した。東工大が開発した籠目格子反強磁性体「フッ化ルビジウム銅スズ」($\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$)を中性子散乱によって観察し，電子スピン対のシングレット状態が風車のように配列した構造を持ち，磁気が完全に消える磁性体の新しい基底状態“スピンの量子引きこもり現象”を確かめた。

籠目格子反強磁性体での強いフラストレーションと量子力学的効果によるスピンの引きこもり現象は理論的に予測されていたが，ミクロの構造についてはさまざまな理論があり，統一見解はなかった。今回は観察によって構造を明らかにしたもので，磁気研究のフロンティアを開くことはもとより，籠目格子反強磁性体を母体とする新奇電子物性の開拓にもつながると期待される。

この成果は 12 日発行の英国学術誌「ネイチャーフィジックス」(Nature Physics) 電子版に掲載される。

● 研究の背景

磁石に代表される磁性体の磁気は負の電荷を持った電子の自転運動（スピン）（用語 1）によって生ずる。絶縁性の磁性体ではこのスピンの局在し、互いに交換相互作用（用語 2）と呼ばれる量子力学的な力を及ぼし合っている。交換相互作用はスピンを平行、あるいは反平行にする働きをもつので、多くの磁性体は温度を下げると、スピンの平行に揃った強磁性状態や反平行に揃った反強磁性状態になる。

ところが図 1 のように、磁性原子が三角形の格子点に位置し、スピン間に反強磁性的な交換相互作用が働く場合には事情が異なる。どれか 2 つのスピンを反平行に置くと、残りのスピンはどの方向を向いてもエネルギーが変らないので、安定な配置が決まらない。このようなスピン間に強いフラストレーション（用語 3）がある状況で、量子力学的効果が強く働く場合には、物質全体の磁気が完全に消えた非磁性状態が最も安定になる場合があることが理論的に予想されていた。これはフラストレーションを強く受けるスピンの示す量子力学的引きこもり現象に例えることができる磁性体の新しい基底状態（用語 4）である。

図 2 のように、格子点が竹籠の編目をなすように配置した格子は籠目格子（用語 5）と呼ばれ、英語では **kagome lattice** と表記される。籠目格子反強磁性体は籠目格子上に配置したスピンの互いに反強磁性的な交換相互作用をする物質をいう。籠目格子は三角形で構成された格子であるので、交換相互作用が反強磁性的な場合には、図 1 に示したような強いフラストレーションがスピン間に働く。このような籠目格子反強磁性体では、基底状態は従来から良く知られている強磁性状態や反強磁性状態にはならない。籠目格子独特の幾何学的原子配置と磁性原子のスピンの小さい場合強く現れる量子力学的効果によって、磁気が完全に消えた新しい状態が基底状態になることが理論的に予想されている。

2 つのスピンを量子力学的に合成すると、磁気が消えたシングレット状態（用語 6）を作ることができる。籠目格子反強磁性体の基底状態は、このスピン対のシングレット状態からできていると考えられているが、そのミクロな構造については様々な理論があり、理論的統一見解はない。このようにスピンの小さい籠目格子反強磁性体は磁気研究のフロンティアである。

● 今回の研究内容

実験面では籠目格子反強磁性体の粉末物質は報告されていたが、実験に適した単結晶が得られる物質がなく、隔靴搔痒の状態が最近まで続いていた。このような中で、単結晶が得られる籠目格子反強磁性体 $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ を東京工業大学が開発した。この物質は磁気を担う銅イオンが少し歪んだ籠目格子を形成しているが、スピンの大きさが最も小さい $1/2$ であるために、量子力学的効果が強く現れ、基底状態は理論で予想されていた非磁性状態であることが分かった。

ここで解明すべき重要な問題が非磁性基底状態におけるスピン構造である。スピン対がシングレット状態を形成し、その姿を完全に消しているため、通常

の磁気測定ではスピン構造を決定することができない。一方、励起状態（用語 4）では、スピン対が磁気をもつトリプレット状態（用語 6）を作り、粒子のように（準粒子）物質中を運動するので、その運動を調べることにより非磁性基底状態におけるスピン構造を解明できる可能性がある。

そこで本研究グループでは、この非磁性基底状態から励起したトリプレット準粒子の運動を、中性子散乱法（用語 7）を用いて詳細に測定することでこの問題に挑戦した。実験には日本原子力研究開発機構研究用原子炉 JRR-3 に設置された東京大学物性研究所の中性子散乱分光器 GPTAS および HER が用いられた。中性子散乱実験で得られたトリプレット準粒子の運動状態を理論計算と詳細に比較することにより、この物質の基底状態が図 3 のように、スピン対のシングレット状態が風車のように配置した構造をもつことを明らかにした。

● 研究成果の発展

高温超伝導等の電子の集団が示す巨視的量子現象にはスピンの重要な役割を担っていることが知られている。本研究は単に磁気研究のフロンティアを拓くだけでなく、籠目格子反強磁性体を母体とする新奇電子物性の開拓にもつながると期待される。

【用語説明】

- [1] **スピン** 粒子の自転運動に対応する物理量で、電子は大きさが $1/2$ のスピンをもっている。そのため、電子は小さな磁石として振る舞う。磁性原子の中で磁気に関与する電子のスピンを全て足し合わせたものが磁性原子の持つスピンになり、その値は半奇数か整数になる。
- [2] **交換相互作用** 電子のスピン間に働く相互作用で、近接する磁性原子上の電子が互いに位置を交換し合うことによって生ずる。交換相互作用は電子のスピンを平行、或は反平行にする働きをもつ。磁性原子のスピンを平行にする交換相互作用をもつ物質を強磁性体、反平行にする交換相互作用をもつ物質を反強磁性体という。
- [3] **フラストレーション** 幾何学的配置や相互作用の競合によって、すべての相互作用エネルギーを最低にすることができない状況を物理学ではフラストレーションがあるという。
- [4] **基底状態、励起状態** 全体のエネルギーが最も低い安定な状態を基底状態という。物質は絶対零度で基底状態になる。また、基底状態よりもエネルギーの高い状態は励起状態と呼ばれる。
- [5] **籠目格子** 籠目格子 (kagome lattice) は、物理学者であり政治家でもあった故伏見康治氏によって名付けられた。
- [6] **シングレット状態、トリプレット状態** スピン対からなるシングレット状態は小さな磁場を加えても磁気が現れない状態で、スピンをベクトルのように

考えると説明ができない，量子力学的状態である。同じスピン対からはシングレット状態の他に，磁気をもつトリプレット状態もできる。

[7] **中性子散乱** 中性子は電荷を持たないがスピンをもち，小さな磁石として振る舞う。このため，磁性体中に入射すると，磁性原子のスピンと相互作用をして散乱される。この性質を利用したものが中性子散乱実験である。散乱の前後で中性子のエネルギーが変わらない場合が弾性散乱で，エネルギーが変化する場合が非弾性散乱である。本研究では中性子で準粒子を励起する非弾性散乱実験が行われた。図4に中性子非弾性散乱分光器の例を示す。

【添付資料】

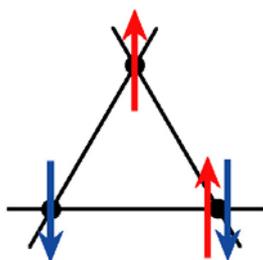


図1：スピンのフラストレーション。矢印の向きはスピンの向き（右回りか左回り）を表す。

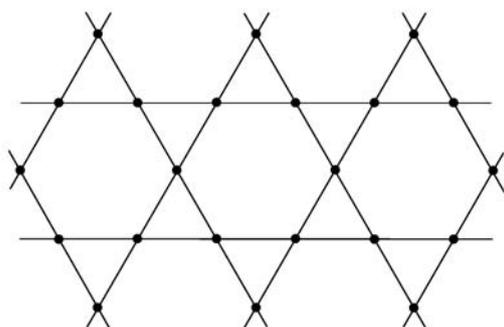


図2：籠目格子（左）と名前の由来となった竹籠の編目（右）。

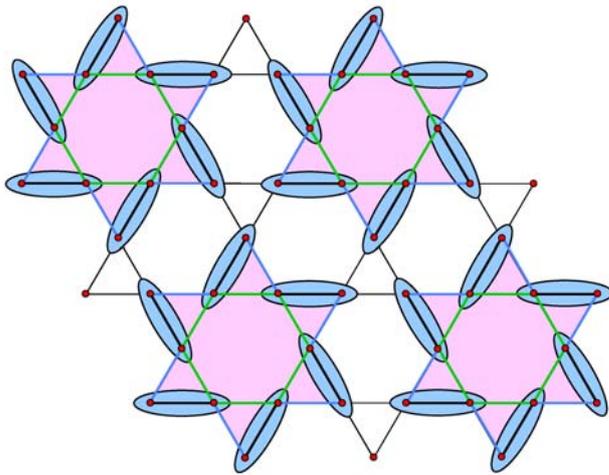


図 3：中性子散乱実験で決定された $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の基底状態。スピン対のシングレット状態（青色の楕円）が風車のように配列している。



図 4：中性子非弾性散乱分光器の一つである日本原子力研究開発機構 JRR-3 研究用原子炉に設置された東大物性研所有の GPTAS 分光器。

【電子資料 URL】

http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/issp_wms/DATA/OPTION/ISSP-TokyoTech-release.pdf

【発表論文】

K. Matan, T. Ono, Y. Fukumoto, T. J. Sato, J. Yamaura, M. Yano, K. Morita and H. Tanaka: Pinwheel valence-bond solid and triplet excitations in the two-dimensional deformed kagome lattice; Nature Physics (2010)

【注意事項】

「Nature Physics」のオンライン版に掲載予定のため、報道の解禁時間は日本時間平成22年9月13日（月）午前2時以降となります。
新聞掲載は平成22年9月13日（月）朝刊以降解禁となりますのでご注意ください。

【問い合わせ先】

佐藤 卓（東京大学物性研究所 准教授）

田中 秀数（東京工業大学大学院理工学研究科 教授）