

## スピンの波に現れる普通とは逆の量子効果

絶縁性の磁性体では、磁性原子に局在するスピンの磁性を担う。スピン間には量子力学的な交換相互作用が働き、スピンを平行（強磁性）、あるいは反平行（反強磁性）にするように作用する。スピン間の交換相互作用が反強磁性的であるとき、図 1(a)と(b)の一次元格子や正方格子の場合には、隣り合う全てのスピンを反平行に配置することができるので、古典的な意味（スピンを大きさが一定のベクトルと見なす）で全ての交換相互作用エネルギーを最低にすることができる。一方、図 1(c)の三角格子の場合には、隣り合う全てのスピンを反平行に配置することができないので、交換相互作用エネルギーを全て最低にすることができない。このような状況を幾何学的フラストレーションがあるという。

本研究の対象物質  $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$  では、磁性原子である銅が図 1(d)の籠目格子を形成し、大きさ 1/2 の銅のスピン間には反強磁性的交換相互作用が働く。このような籠目格子反強磁性体では、格子が三角形から構成されているので、強い幾何学的フラストレーションがある。更にスピンの大きさが 1/2 のように小さい場合には、量子効果が顕著に現れ、安定な状態は簡単には分からない。まして、磁気励起については、確立されたものがない状況である。そのため、スピンの小さい籠目格子反強磁性体は磁性分野の最前線として、理論と実験の両面で活発な研究が繰り返されている。

一般に、磁性体の磁気励起は、スピンの平衡状態のまわりの振動が波として伝搬するスピン波でよく表され、そのエネルギーと波数（単位長さあたりの波の数）の関係はスピン波理論で求められる。しかし、図 1(a)や(b)のようなフラストレーションのない反強磁性体では、スピン波のエネルギーは量子効果によってスピン波理論で求めた値よりも大きくなることが知られている。量子効果による励起エネルギーのスピン波理論からのずれは、スピンの大きさが小さく、系の次元が低いほど顕著になる。特にスピンの大きさが 1/2 の一次元反強磁性体では励起エネルギーの厳密な解があり、スピン波理論の解の  $\pi/2$  倍になることが分かっている。このように、フラストレーションのない反強磁性

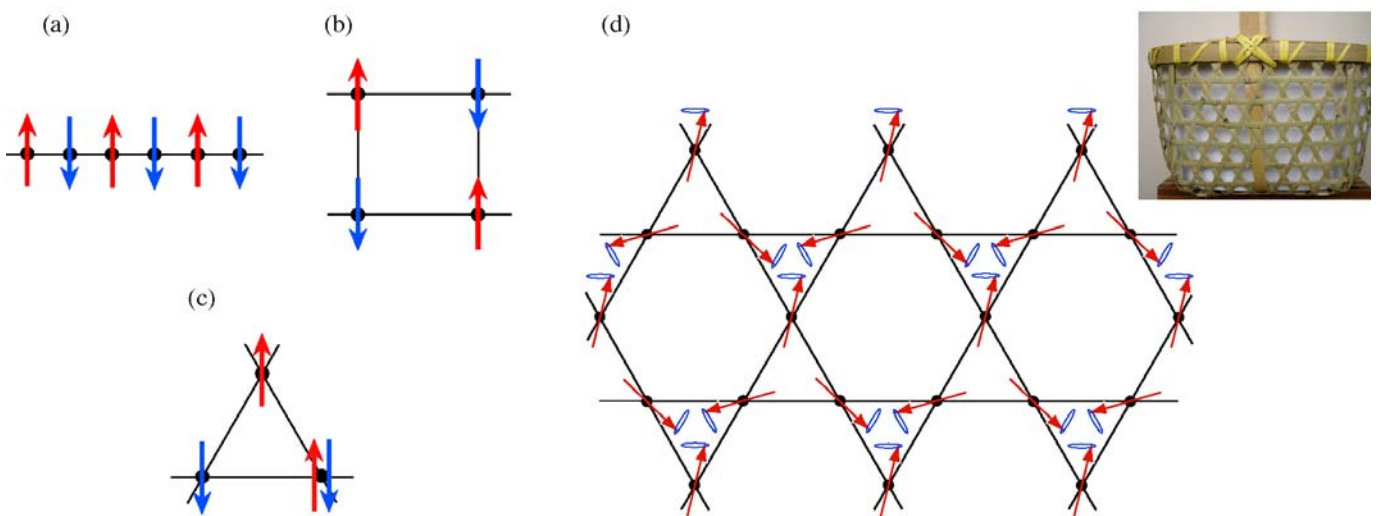


図 1. 一次元格子(a), 正方格子(b), 三角格子(c)上で反強磁性的な相互作用をするスピン。(d)は籠目格子反強磁性体のスピン配置（赤い矢印）と振動運動を表す。右上は籠目格子の名前の由来となった竹籠の編目。

体では、スピン波のエネルギーは量子効果によってスピン波理論の値よりも一般に大きくなる。これは励起エネルギーの量子再規格化 (quantum renormalization) とよばれている。一方、幾何学的フラストレーションと量子効果が強く働くスピン 1/2 の三角格子や籠目格子反強磁性体の励起エネルギーについては、詳しいことが分かっていなかった。

最近、大阪府立大学、タイ Mahidol 大学、東北大学、東京工業大学の研究グループは、東工大グループが開発したスピン 1/2 の籠目格子反強磁性体  $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$  の単結晶を用いた中性子散乱実験を行い、(1) この物質が磁気相転移を起こし、秩序相の磁気構造が図 1(d)の赤い矢印で示したような三角構造になることを明らかにし、(2) 磁気励起のエネルギーが、通常の量子効果とは逆に、スピン波理論で求めた値の約 60%にしかならないことを発見した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)の 2014 年 4 月号に掲載された。

磁気励起のエネルギーがスピン波理論で求めた値よりも大きく減少する「励起エネルギーの負の量子再規格化」は初めて実験的に観測された現象である。このような励起エネルギーの負の量子再規格化は、スピンの大きさが 1/2 の三角格子反強磁性体で、三角スピン構造と量子効果の相乗効果により、ある波数領域で部分的に起こることが理論的に指摘されていたが、本研究で発見されたスピン 1/2 の籠目格子反強磁性体の負の量子再規格化は、波数に依らず一律に起こる現象であることが注目すべき点である。本研究で見出された「励起エネルギーの負の量子再規格化」は磁気励起の新概念形成に資する重要な発見と位置づけられる。

本研究の対象物質  $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$  では、大きなジャロシンスキー・守谷 (DM) 相互作用のために、磁気相転移が起こるが、DM 相互作用が小さい場合には、磁気相転移は起こらず、スピンの液体状態が安定になることが理論的コンセンサスになっている。そのような場合の磁気励起が如何なるものかは全く分かっていない。このように、スピンの小さい籠目格子反強磁性体は未知の部分が非常に多く、新量子現象の発見が大いに期待される研究対象である。

原論文

Large Negative Quantum Renormalization of Excitation Energies in the Spin 1/2 Kagome Lattice Antiferromagnet

[Toshio Ono, Kittiwit Matan, Yusuke Nambu, Taku J. Sato, Kazuya Katayama, Satoshi Hirata and Hidekazu Tanaka: J. Phys. Soc. Jpn. \*\*83\*\*, 043701 \(2014\).](#)

問合せ先：田中秀数（東京工業大学大学院理工学研究科）

佐藤 卓（東北大学多元物質科学研究所）