

強磁場 ESR で明らかになった $S = 1/2$ 一次元反強磁性体の磁気励起状態

[1] 要旨

スピン量子数 $S = 1/2$ の一次元反強磁性体は、その基底状態や磁気励起状態に量子多対効果に起因した特徴的な現象が生じることが知られている。本研究では、Ising 型の磁気異方性をもつ $S = 1/2$ 一次元反強磁性体の良いモデル物質である CsCoCl_3 について、50 テスラを越すパルス強磁場下で電子スピン共鳴(ESR)測定を行ったところ、この系の磁場誘起による量子相転移に関係した磁気励起状態の興味深い振る舞いが観測された。

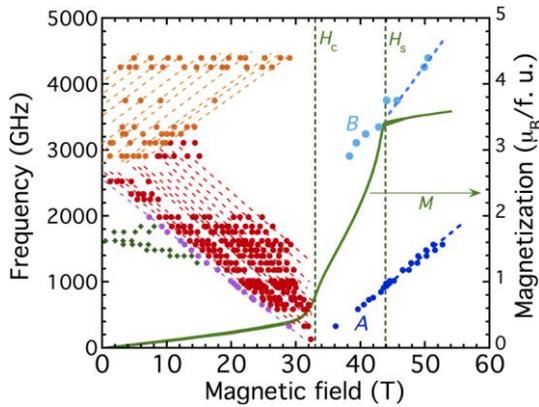
[2] 本文

一次元鎖上に並んだ量子数 $S = 1/2$ のスピンの最近接サイト間に反強磁性交換相互作用が働く $S = 1/2$ 一次元反強磁性体は、厳密解が得られる数少ない量子多体系として 1930 年代に始まる研究の歴史を持つ。厳密解に基づく解析をはじめとした理論計算とモデル化合物を用いた実験があいまって、 $S=1/2$ 一次元反強磁性体が極めてシンプルな系でありながら量子多体効果に起因する数々の興味深い振る舞いを示すことが、長い年月をかけて明らかにされてきた。

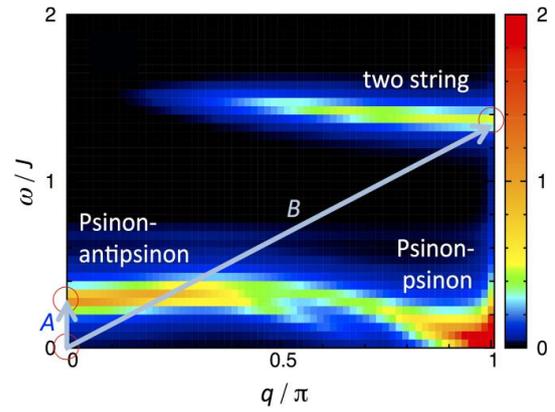
これまで、磁気異方性のない Heisenberg 型の相互作用を持つ系が良く調べられてきている。その系では量子力学的なゆらぎの効果によって最近接スピンの互いに反平行を向いて配列する古典的な Neel 秩序が破壊され、基底状態はスピン相関がべき関数的に減衰する量子臨界状態となっている。すなわち絶対零度において、Heisenberg 型 $S=1/2$ 一次元反強磁性体は長距離秩序する寸前のスピン相関長が発散した臨界状態にある。この量子臨界状態は粒子間に相関が働く一次元フェルミ粒子系の基底状態と同じ朝永 Luttinger 液体と呼ばれる普遍クラスに属している。その磁気励起状態は基底状態からスピンを反転させた際に生じる 2 つのドメイン壁が一次元鎖を伝搬するスピノン励起で記述されると考えられており、古典スピン波と異なったエネルギー連続帯を伴うスペクトルを持つ。さらに磁場を加えると、磁気励起エネルギーが零になるギャップレス点が逆格子空間で磁場の増加とともに連続的にシフトし、古典的な反強磁性体とは全く異なる振る舞いを示す。今世紀に入ってから磁気励起状態の新たな理解が進み、 $S = 1/2$ 一次元磁性体の量子状態を特徴づけるラピディティと呼ばれる量が複素数をとるストリング励起が、その励起スペクトルに大きく寄与することが明らかになってきている。

それに対し、今回の研究の対象である Ising 型 $S = 1/2$ 一次元磁性体の基底状態は、Heisenberg 型の場合と異なり、磁気異方性のため零磁場では Neel 秩序を保つ一方、磁化容易軸に磁場が印加されるとある転移磁場 H_c で量子臨界状態への相転移を起こす。

最近、東北大学金属材料研究所のメンバーを中心とする研究グループは、Ising 型の磁気異方性を持つ $S=1/2$ 一次元反強磁性体の良いモデル物質として知られる CsCoCl_3 に関し、50 テスラを越すパルス強磁場を磁化容易軸方向に印加して行った 130 GHz から 4400 GHz の広い周波数領域の電子スピン共鳴(ESR)測定と密度行列繰り込み群(DMRG)に基づいた解析から、その磁気励起状態を明らかにした。この成果は JPSJ の 2023 年 9 月号に掲載された。



CsCoCl₃ で観測された ESR 信号の
周波数磁場プロット



DMRG 計算から得られた $S = 1/2$
Ising 型一次元反強磁性体の量子臨
界状態における動的構造因子

本研究で得られた ESR モードは、CsCoCl₃ のスピノン励起のエネルギーが磁場の印加とともに分裂し、その励起エネルギーの下端が H_c においてソフト化することを明瞭に示した (図 1)。このことは、スピノンが H_c において基底状態に誘起されたため、磁気秩序が破壊され磁場誘起による量子臨界状態への相転移が起こることを示唆している。 H_c 以上の実験結果は、量子臨界状態で磁気励起状態のエネルギーギャップが再び逆格子空間の原点において開くこと及び、2900 GHz 以上の高周波数領域にもう一つの励起モードが現れることを示している。DMRG 計算によるとこの高周波数モードがストリング励起に由来する (図 2)。さらにこのストリング励起が、飽和磁場 H_s 以上で CsCoCl₃ の g 値から期待される値のほぼ 2 倍の傾きを持つ 2 マグノン束縛状態へと連続的に移り変わっていく振る舞いが観測されている。ストリング励起の多重マグノン束縛状態への移り変わりは過去に理論的に予想されていたものの、実験的には今回の広い磁場範囲とエネルギー領域での ESR 測定によって初めて観測された現象である。

Ising 型一次元反磁性体の量子臨界状態では、磁場の増加とともにスピノン鎖に発達する支配的なスピノン相関が、磁場に平行なスピノン成分の非整合で密度波的な相関から垂直成分の staggered な相関へとクロスオーバーする特徴的な振る舞いが厳密解によって理論的に示されている。高い結晶対称性を持つうえ、結晶内で一次元鎖が三角格子を組むため鎖間相互作用が互いに打ち消し合う CsCoCl₃ は、一次元反磁性体の量子臨界状態の性質を調べる上で大変適した物質となっており、今後の研究の発展が期待される。

原論文 (2023 年 7 月 28 日公開済)

[Magnetic Excitation in the \$S = 1/2\$ Ising-like Antiferromagnetic Chain CsCoCl₃ in Longitudinal Magnetic Fields Studied by High-Field ESR Measurements](#)

S. Kimura, H. Onishi, K. Okunishi, M. Akaki, Y. Narumi, M. Hagiwara, K. Kindo, and H. Kikuchi, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 094701 (2023).

< 情報提供 : 木村尚次郎 (東北大学金属材料研究所) >