

フラストレート量子磁性体における ヒッグス振幅モードと位相モードのハイブリッド励起

益田 隆嗣 <東京大学物性研究所, 東京大学トランススケール量子科学国際連携研究機構, 高エネルギー加速器研究機構
masuda@issp.u-tokyo.ac.jp>

林田 翔平 <スイス連邦工科大学チューリッヒ校 shoheih@phys.ethz.ch>

松本 正茂 <静岡大学理学部 matsumoto.masashige@shizuoka.ac.jp>

粒子の運動状態を理解することは物理学の普遍的なテーマであり、特に固体中の何らかの秩序からの励起状態として現れる準粒子の振る舞いはこれまで盛んに研究されてきた。その準粒子の運動は、秩序変数の位相と振幅の揺らぎに対応する2つのモードで記述される。位相モードは南部-ゴールドストーンモードともよばれ、結晶の音響フォノンや磁性体のマグノンがよく知られている(用語解説の図参照)。振幅モードは結晶の光学フォノンが古くより有名であるが、ヒッグス素粒子の発見に触発されて、近年では量子臨界点近傍の磁性体においてヒッグス振幅モードの実験的検証が数多く行われるようになった。一方、これらのモードが混成した状態は、CsNiCl₃においてその存在が理論的に指摘されていたが、大気圧下で磁気秩序が生じるため、量子臨界点への実験的なアクセスが不可能であった。また当時の分光器性能では詳細なモード解析は困難であった。このため、最新の分光器と新しいモデル物質によるハイブリッド励起の実験的研究が待たれていた。

本研究では、系統的な圧力下中性子非弾性散乱を用いて、フラストレート磁性体CsFeCl₃の量子臨界点近傍においてヒッグス振幅モードと位相モードのハイブリッド励起の存在を検証した。低圧の量子無秩序状態では、自発的対称性の破れが無いことを反映し、2つのモードの区別はなく、縮退したスペクトルが予想される。一方量子臨界点から十分離れた高圧の秩序状態では、位相モードは音響的な低エネルギー励起と

して、ヒッグス振幅モードは光学的な高エネルギー励起として、それぞれ独立に存在すると予想される。これら2つの対照的なスペクトルが、圧力によりどのように移り変わっていくのかを調べるため、臨界圧力近傍の秩序状態で中性子スペクトルを測定した。すると、2つのモードはエネルギー的に接近しているものの、交差することはなく、反発していることが観測された。このことは、位相モードとヒッグス振幅モードが混成していることを示している。量子臨界点近傍でモード間の混成は強く、臨界点を跨いだスペクトルの連続的変化が保たれている。

低圧の量子無秩序相ではスピン波にギャップが存在し massive であるのに対し、高圧の秩序相ではギャップは消失し massless となっていることが観測された。つまり、量子臨界点を跨ぐことでスピン波の速さが大きく変化している。このことは、圧力によるスピン流や熱流の制御の可能性を示唆するものである。

ハイブリッド励起は磁性体のみならず、電荷密度波系、スピン密度波系、冷却原子系など自発的対称性が破れた系一般に存在しうるものであり、今後様々な系での検証が期待される。さらにスペクトルの詳細形状を解析することにより、混成効果が励起の寿命に与える影響についても検証可能である。今後、理論・実験両面で、混成状態に関する研究が大きく進展することが期待される。

用語解説

量子臨界点 (QCP) :

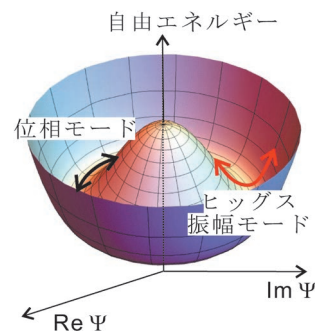
圧力や磁場等のパラメータの変化により秩序化が抑制される場合、転移温度が絶対0度になる相空間上の点を量子臨界点とよぶ。量子臨界点近傍では、強い量子揺らぎにより非自明な状態が期待される。

ヒッグス振幅モード :

準粒子の運動状態は、秩序変数の位相揺らぎと振幅揺らぎで記述される。自発的にゲージ対称性の破れた真空における振幅モードがヒッグス粒子であることのアナロジーから、近年では磁性体の振幅揺らぎはヒッグス振幅モードとよばれている。

フラストレート磁性体 :

幾何学的理由によりスピン相互作用に競合が発生し、基底状態にマクロな縮退が生じる磁性体のこと。実際には小さな摂動のために非縮退な基底状態となるが、非自明な状態が出現することが多く興味をもたれている。



位相モードとヒッグス振幅モード。