

審査の結果の要旨

氏名 林田 翔平

本論文は5章からなり、第1章では研究背景、第2章では中性子散乱法の原理が説明されている。第3章では一重項基底状態を有するCsFeCl₃の圧力誘起量子相転移について、中性子散乱実験により得られた知見が述べられている。第4章では、古典カゴメ反強磁性体NaBa₂Mn₃F₁₁について、同じく中性子散乱実験により得られた知見が述べられている。第5章ではまとめと展望についてそれぞれ述べられている。

量子相転移の量子臨界点近傍では非自明な状態が出現することから、当該領域を実現する物質の研究は物理学の中心的テーマとなっている。中でも量子スピン系は、現実の物質内で理論モデルをかなり忠実に実現するため、量子相転移の研究対象として適している。たとえば容易面型異方性 D を有する $S=1$ スピンは $S^z=0$ の一重項基底状態をとり、それらが相互作用 J で結合した系では量子スピン液体が出現する。ここで、実験的に D/J をコントロールすることができれば量子スピン液体状態から磁気秩序状態への量子相転移が観測可能となる。最近スピン一重項三角格子反強磁性体CsFeCl₃において、圧力により D/J がコントロールされ量子相転移が誘起されることが報告された。申請者は当該物質において圧力下中性子回折実験と非弾性散乱実験を行い、量子臨界点近傍における静的および動的状態の研究を行った。

圧力下中性子回折実験では臨界圧力(P_c)以上の高圧下において $k=(1/3, 1/3, 0)$ を伝播ベクトルとする磁気ピークが観測された。既約表現解析とリートベルト解析を行うことで、三角格子面内における120度構造が明らかにされた。実験的に見積もられた秩序変数の臨界指数は、理論的に提案されている $U(1) \times Z_2$ のそれと矛盾しないことが確認された。この磁気秩序の量子臨界点近傍では、 Z_2 の対称性のみが破れるカイラル液体秩序の存在が予想されており、当該物質はその候補であることが提案された。

非弾性散乱実験では様々な圧力下での中性子スペクトルが測定された。 P_c 以下では、先行研究で用いられたエキシトンモデルにより実験データは説明された。 P_c 以上では、明瞭なギャップ的励起とギャップレスな連続励起が観測された。これらの励起は古典的な基底状態を仮定する線形スピン波では説明されないことと、基底状態をセルフコンシステントに決定するボンド演算子法により説明されることが明らかとなった。モード解析の結果ギャップレスな連続励起

はゴールドストーンモードに対応し、ギャップ的な励起は横揺らぎと縦揺らぎが混ざったT+Lモードであることが明らかとなった。T+Lモードは、フラストレーションを起因としたものであり、本研究が初めての観測であった。

幾何学的フラストレート磁性体では、マクロに縮退した基底状態が摂動項により解かれ非自明な状態が出現するため興味もたれている。NaBa₂Mn₃F₁₁は、新しいカゴメ格子古典ハイゼンベルグ反強磁性体であり、先行研究から2 Kで磁気転移することが報告されている。申請者は当該物質の中性子回折実験と非弾性散乱実験により、カゴメ格子磁性体の静的および動的状態の研究を行った。

中性子回折実験により低温の磁気構造は $k_0=(0, 0, 0)$ と $k_{1/3}=(1/3, 1/3, 0)$ に近い二つの格子不整合な磁気伝播ベクトルを有するマルチ k 構造であることが明らかとなった。既約表現解析とリートベルト解析の組み合わせにより、 k_0 構造はtail-chase型の120度構造であることが明らかにされた。基底状態の古典的計算を行い、近距離の磁気双極子相互作用が主要な摂動項として基底状態を決定していることが明らかにされた。双極子相互作用を起源とするtail-chase型の120度構造は、本研究が初めての実験的検証である。第三近接までのハイゼンベルグ相互作用を考慮すると、 $k_{1/3}$ 構造が出現すること、これに双極子相互作用を入れることにより k_0 と $k_{1/3}$ の二か所で基底エネルギーの極小が出現し、マルチ k 構造が許されることが明らかにされた。

非弾性散乱実験では、転移温度以下でフラットなギャップ的な励起が観測された。そのギャップのエネルギーは、最近接の双極子相互作用のエネルギーと一致していることが明らかとなった。線形スピン波によるスペクトル解析の結果、双極子相互作用を有するカゴメ反強磁性体であることが明らかとなった。

CsFeCl₃の研究ではスピン系の量子臨界点近傍における非自明な状態を静的および動的両面から観測することに成功した。NaBa₂Mn₃F₁₁の研究ではフラストレーション系における双極子相互作用の重要性が明らかにされた。いずれも、現代物理学の重要な知見を与えるものであり、学術的な意義は深い。本論文は、左右田稔氏、萩原雅人氏、栗田伸之氏、田中秀数氏、石川孟氏、岡本佳比古氏、廣井善二氏、上床美也氏、松本正茂氏、大久保毅氏、Pascal Manuel氏、Maxim Avdeev氏、Oksana Zaharko氏、Hannu Mutka氏、Gøran Nielsen氏、Tao Hong氏、益田隆嗣氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験、解析、考察を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。したがって、博士(科学)の学位を授与できると認める。

以上 2000 字