

複合スピン系における中性子散乱の理論

松本 正茂
静岡大学・理学部

Theory for Neutron Scattering in Interacting Spin Cluster Systems

Masashige Matsumoto
Department of Physics, Shizuoka University

磁性体の性質を理解するためには、熱力学的な測定に加え、磁気励起の状態を知ることも重要である。量子スピン系の場合、中性子散乱によってスピン間相互作用の情報を得ることができるため、中性子散乱は磁性を理解するうえで強力な実験手段となっている。磁気秩序を起こす磁性体の場合、磁気励起を計算するためには、通常、平均場理論で磁気モーメントを決定した後、ホルシュタイン・プリマコフによるスピン波理論を適用するのが一般的である。秩序を示す磁性体では、中性子散乱による磁気励起の分散関係はこのスピン波理論でよく説明でき、スピン間相互作用も実験から見積もることができる。一方、低次元の磁性体や、複数スピンが強く結合して基本単位となりそれらが相互作用している磁性体（複合スピン系）においては、通常のスピン波理論で実験を説明することが難しくなる。特に後者の磁性体では、量子効果によって磁気モーメントが大きく縮み、量子相転移をともなう場合もある。近年、このような磁性体の研究が盛んで、量子相転移を有する磁性体の開発・研究が進められている。量子相転移の特徴は転移の前後における磁気励起の変化に現れ、それを観測できる中性子散乱は、量子相転移を理解するうえでも重要な測定手段となっている。

本発表では、量子相転移をともなう磁性体の例として複合スピン系をとりあげ、その特徴を反映したスピン波理論について説明をおこなう。複合スピン系とは、磁性体の中で強く相互作用をしている部分（スピクラスタ）と、弱く相互作用している部分（クラスタ間相互作用）に分けることができる磁性体のことである。スピクラスタが2量体の場合はスピンドイマー系、3量体の場合はトライマー系、4量体の場合はテトラマー系、などと呼ばれている。クラスタ内の強いスピン間相互作用が反強磁性的であれば、合成スピンの大きさが小さい順（エネルギーの小さい順）に、スピン多重項が形成される。孤立したスピクラスタを考えると、基底状態では合成スピンが小さくなっていることがわかる。偶数個のスピンによるクラスタ（ダイマー系やテトラマー系）では、合成スピン $S=0$ （シングレット）の基底状態と、 $S=1$ （トリプレット）の第一励起状態が実現する。この場合、基底状態では磁気モーメントは完全に消失している。スピクラスタ間に相互作用があると、スピン多重項に相互作用が生じ、圧力や磁場を加えることで磁気秩序が安定化され、非秩序状態から秩序状態への量子相転移が引き起こされる。

このような複合スピン系においては、1つのスピンを基本単位として構成された通常のスピン波理論では説明できない磁気励起が現れる。複合スピン系においては、クラスタのスピン多重項を基本単位とした理論が有効で、①スピクラスタを単位とした平均場理論で磁気モーメントとスピン多重項を求め、②多重項に対応したボーズ粒子を導入し、③クラスタ間相互作用でボーズ粒子のダイナミクスを記述する方法がある。非弾性中性子散乱強度は、動的スピン相関関数で表される。スピクラスタの磁気形状因子を導入するとクラスタをあたかも1個の原子のように取り扱えるようになり、スピン相関関数を見通し良く計算できる。また、圧力誘起磁気秩序の場合、量子臨界点近傍の秩序相でモーメントは大きく縮んでおり、通常のスピン波励起（横モード）に加え、モーメントの大きさのゆらぎによる縦モードが低エネルギーに存在する。これは Higgs 粒子との類似性から、近年では Higgs amplitude モードとも呼ばれており、上記の理論で記述される。当日は、具体的な物質を例にあげ、複合スピン系における磁気励起の理論を詳しく説明する予定である。