

スピンの1/2の三角格子反強磁性体の磁化過程と量子多体効果

田中 秀数 〈東京工業大学大学院理工学研究科〉

栗田 伸之 〈東京工業大学大学院理工学研究科〉

松尾 晶 〈東京大学物性研究所国際超強磁場科学研究施設〉

金道 浩一 〈東京大学物性研究所国際超強磁場科学研究施設〉

絶縁性磁性体は、磁性原子（或はラジカル）に局在したスピンの磁性を担うので、スピン系として記述される。スピン間には交換相互作用が働き、系の基底状態と励起状態を決める。通常の磁性体では、スピンを量子力学的交換関係を無視した古典的ベクトルのように考えても、磁性の多くを理解できる。これは古典的基底状態が一意的に決まり、量子揺らぎが古典的基底状態を覆すことが殆どないからである。これに対して、スピンの小さい三角格子反強磁性体では、多体効果である幾何学的フラストレーション（隣接するスピンを全て反平行に配置することができない状況）とスピンの小さい場合に顕著な量子効果によって、古典スピンモデルでは説明が難しい基底状態が生まれる。以下に述べるように、量子効果は特に磁場で顕著に現れる。

交換相互作用が等方的な Heisenberg 模型 ($\mathbf{J}_i \cdot \mathbf{S}_j$) の場合に、三角格子反強磁性体のゼロ磁場の基底状態は、量子効果が最も顕著な $S=1/2$ の場合でも古典スピンモデルの結論と同じく、スピンの互いに 120° をなす三角構造であると考えられている。しかし、古典スピンモデルでは、磁場中の基底状態は一意的に決まらず、古典的基底状態には連続的な縮退が残る。この縮退は量子揺らぎによって解け、ある特定のスピン状態が安定化されることが理論的に知られている。象徴的な量子効果は、3つの部分格子スピンのうちの2つが磁場と平行になり、残る1つが反平行になる *up-up-down* 状態が有限の磁場範囲で安定化され、磁化曲線に飽和磁化の $1/3$ の位置にプラトーが現れることである。これは古典スピンモデルでは説

明できない巨視的量子効果である。しかし、この量子磁化プラトーを含む磁化過程全体の実験的検証は殆どなく、 $S=1/2$ の場合では、歪んだ三角格子をもつ Cs_2CuBr_4 で狭い磁化プラトーや逐次量子相転移が観測されたのみであって、理論の検証は定性的な範囲に限られていた。

$\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ は、有効スピン $1/2$ をもつ Co^{2+} が正規の三角格子を形成する反強磁性体である。最近、我々は $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ の粉末試料と単結晶試料の強磁場磁化測定を行い、量子磁化プラトーを含む磁化過程全体の実験的検証を初めて行った。実験で得られた磁化曲線は厳密対角化や結合クラスター法による高精度の計算結果と定量的に一致する。これらの実験を通して、 $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ では、 Co^{2+} 化合物としては例外的に交換相互作用が Heisenberg 模型に近いこと、また、2次元性が良いことが実証された。一方、磁化プラトー相の高磁場側に量子揺らぎが安定化する新しい高磁場相も観測された。この高磁場相の起源として、磁気異方性や三角格子面間の相互作用の効果が理論的に考えられている。

$S=1/2$ 三角格子反強磁性体の磁気励起では、励起エネルギーの負の量子再規格化などの新奇な量子効果が予言されている。中性子散乱でこれを検証するうえで、 $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ は格好のモデル物質となる。

—Keywords—

磁化過程と磁化プラトー：磁性体に磁場 (H) を印加したときの磁気分極を磁化 (M) といい、磁場掃引に対する磁化の応答 $M(H)$ を磁化過程という。磁化は強磁性体を除いて低磁場領域で $M \propto H$ が成り立ち、原点から直線的に立ち上がるが、物質固有の安定磁気相があるときなどに線形関係から外れ、磁化が磁場に対して平坦な領域が現れる。これを磁化プラトーといい、量子揺らぎの強い非自明磁気相の存在を示唆する有力な手がかりを与える。

古典スピンと量子スピン：スピンの各成分を可換な変数とみなせるスピンを古典スピンという。古典スピン系の各状態は矢印の配位によって記述される。一方、スピン成分の非可換性があらわとなるものを量子スピンという。