

・研究成果

1) 包括的修正スピン波理論の構築—低次元フェリ磁性体への応用—

Bloch の強磁性体研究に始まるスピン波理論は、基底状態に長距離秩序を仮定するが故に、量子揺らぎが本質的となる低次元系への適用性が疑問視されてきた。高橋實は、マグノン粒子数一定のボソン集団として記述することでこの難点を克服し、次元数2以下の強磁性また反強磁性模型の低温熱力学を精確に記述することに成功した。ボソン数を一定に保つ制約のことを“修正”と称し、高橋創始のこの理論、またこれに定性的・定量的改良を施したものを広く総称して、『修正スピン波理論』と呼ぶ。

強磁性体であれ反強磁性体であれ、これまでの修正スピン波理論はすべて、“修正条件”は1本、単一であった。ところが、その単一修正条件を異種スピンから成るフェリ磁性体に当てはめると、得られる熱力学・動力学は、必ずしも精確ではないことが分かってきた。その原因を一言で表現すれば、**フェリ磁性体では、1本の修正条件で副格子磁化を零に抑えることは不可能**だからである。そこで、これまで金科玉条であった単一修正条件という発想から脱し、複数の修正条件を導入することを試みた。勿論、修正条件は無尽蔵に導入すべきものではなく、そこには定量的ルールが存在すべきである。フェリ磁性体の特徴は“単位胞の内部自由度”である。 n 種類スピンが n 個の副格子を構成するフェリ磁性体では、 n 本の修正条件が適正であり、これにより、副格子磁化を全温度に渡って零に抑えることに成功した。熱力学量を低温展開することに成功し、比熱や帯磁率等の温度依存性を解析的な形で提示した。

少し話は込み入るが、“修正”の方法にはさらに自由度がある。修正条件すなわち化学ポテンシャル(Lagrange 未定乗数)を導入するタイミング(ハミルトニアン対角化時あるいは自由エナジ最小化時)によっても、結果は大きく変わる。またスピン波理論全体の問題として、スピン波間の相互作用を如何に取り扱うかという、Dyson に始まる深い議論がある。今回包括的修正スピン波理論を構築するにあたり、Hartree-Fock 近似に代わる Wick 分解による相互作用の取扱いを提案し、これにより、温度上昇と共に急速に顕在化する高橋修正スピン波理論の難点—人為的常磁性転移—の問題を解決した。記述温度領域に制約は無くなり、低温の精確・解析的熱力学記述から高温常磁性へ自然滑らかに接続する『包括的修正スピン波理論』の構築に成功した。

2) 幾何学的フラストレーションをもつ反強磁性体に対するスピン波記述改良の試み

籠目格子反強磁性体は、古典的基底状態に無限の縮退がある“本質的フラストレーション系 (fully frustrated system)”と呼ばれ、励起機構は勿論のこと基底状態に及んで、その記述は困難を極める。量子モンテカルロ法では負符号の問題、数値密度行列繰り込み群では1次元にマップしてなお残る劣悪な収束性の問題、大規模計算物理学の方法がこの系ではワークしない。

そこでスピン波による解析が広く行われているが、無限縮退の産物である零エナジ・フラット・バンドが、スピン波による熱力学記述を破綻に導く。帯磁率は絶対零度に向けて発散し、比熱は反強磁性特有の Schottky ピークを再現できない。そこで、この満身創痍の従来スピン波理論を“修

正”することを考えた。上述フェリ磁性体の“修正”とは本質的に異なる点は、フラストレーション系のスピン波理論では、丸いはずの Heisenberg スピン系で磁化がハミルトニアンと非可換になってしまふことである。これを可換に戻すことはすなわち、フラストレーションを零にすることであり、不可能である。しかしこの非可換性を軽減することはできる、出来ることに気付いた。従来スピン波では局所量子化軸周りの回転対称性さえ壊れていることを指摘し、これを回復する修正条件を提案、また副格子磁化を零ではない一定値に抑えることで、ハミルトニアンと磁化の非可換性を格段に小さく抑えることに成功;この 2 点をもって、フラストレーション系の熱力学を半定量的に再現することに成功した。

3) Kitaev 梯子模型に観る分数励起

異方的 Ising 型交換相互作用が周期的に空間変調する Kitaev 模型は、スピン液体状態を実現する“可解”理論模型として注目を集めている。近年では、Ir 酸化物や Ru 化合物などモデル物質も発見され、理論・実験一体となって活発な議論が展開されている。

Kitaev 模型は蜂の巣格子に設計されるものであるが、我々は梯子格子に Kitaev 可解模型を考え、その基底状態及び励起機構を Majorana フェルミオン記述を使って解析的に調べた。特に動的構造因子をさまざまなパラメタ領域で求め、低エナジに現れ得る分数励起を象徴するデルタ関数型ピークの発生条件を議論した。一次元化することで、分数背景場の単独励起は無くなり、必ずこれにマター・フェルミオンが付随することが分かりつつあり、現在研究を本格化しつつある。