

論文審査の結果の要旨

氏名 張 昊

本論文は5章および付録としての6章からなる。

第1章は、序論であり、本研究で展開されるハニカム格子上での反強磁性ハイゼンベルク模型の基底状態に関する研究テーマが紹介され、概要が述べられている。特に、本研究の主題であるフラストレートした量子スピン系での無秩序基底状態を紹介するとともに、ハニカム格子上で起こりうるいろいろな VBC (Valence Bond Crystal) 状態とその対称性を説明し、さらに動機となった $\text{Bi}_3\text{Mn}_4\text{O}_{12}(\text{NO}_3)$ の実験の紹介、本論文で扱う2層ハニカム格子でいろいろな相互作用に関して先行研究で得られている研究成果を概観し、さらに本論文で主に用いる Schwinger boson の方法の位置づけについて記述がされている。

第2章は、単層のハニカム格子上でフラストレーションがある最近接、次近接相互作用 J_1, J_2 をもつ場合の相互作用の比に関する相図に関して、Schwinger boson の方法を用いて得た相図を、古典的な場合との比較、先行研究で得られている相図などとの比較を行い、総合的な立場からこの問題を整理している。特に、複雑な構造をもつこの系での Schwinger boson 模型の導出を丁寧に行い、他の方法で得られた結果との比較について詳しい検討を行っている。結果としては、 J_2/J_1 が小さいときは単純なネール秩序をもち、大きな値では螺旋構造に相当する状態が現れるのは古典的な場合と同じであるが、中間的な値で、いわゆるエネルギー構造にギャップをもつ磁氣的無秩序相が現れ、その相もスピン液体相と交替的 VBC 相の2つに分かれることを系の持つ C_3 の対称性の破れや低エネルギー励起スペクトルなどの議論から明らかにし、これまでの多くの先行研究との比較検討も行っている。また、著者達の研究成果はすでに発表されており、その波及効果についてもまとめられている。

第3章は、層状のハニカム格子を考え、層間の相互作用 J_{\perp} による層間ダイマー形成の効果を明らかにしている。この系では、秩序変数の構造がさらに複雑になるため、多くの変数をもつ Schwinger boson 模型を考えなくてはならないが、その方法を丁寧に説明している。新しい発見として、相互作用 J_{\perp} のため、ネール状態が基底状態になる領域が J_{\perp} に関してリエントラント的な構造を持つことを明らかにしている。さらにスピン波近似などを用いて J_{\perp} によるネール基底状態領域のスピンのおおきさ依存性なども明らかにしている。

第4章は、層状のハニカム格子を考え、層間の相互作用にフラストレーションがある次近接相互作用 J_x を導入し、複雑な構造での基底状態相図を調べている。このモデルでは秩序変数の構造はさらに複雑になり、Schwinger boson平均場法の定式化も複雑になるが丁寧な導出を行っている。このフラストレート2層構造では、 J_x/J_\perp と J_1/J_\perp が等しいとき、interlayer dimer phase (IDP)とよばれる状態が厳密な基底状態になることに注目し、それを含めた相図をSchwinger bosonの方法で求め、その結果と対角化法、摂動展開法、ボンド演算子の方法などいろいろな方法で求められた結果と比較し、定性的に一致した結果を得ている。

第5章はまとめと展望に当てられている。

本研究では、フラストレーションがある量子スピン系での特異な基底状態をSchwinger boson平均場法によって統一的立場から研究し、重要な知見が得られている。なお、Schwinger boson平均場法の結果の検討のため、いろいろな方法での結果との比較が必要であり、厳密対角化法ではC. A. Lamas氏、級数展開法ではM. Arlego氏、W. Brenig氏らと共同で研究を行っている。それらの成果は3篇の国際誌に発表されている。いずれも、論文提出者が主体となって研究推進したものであり、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(理学)の学位を授与できると認める。