

論文審査の結果の要旨

氏名 塚 本 光 昭

本論文は4章からなる。第1章は、序論であり、本研究で展開される量子モンテカルロ法の研究背景、および今回の研究で用いられる向き付きループアルゴリズムが説明されている。第2章は、容易軸異方性があるハイゼンベルクモデルの磁場中相転移に関する量子モンテカルロ法による研究が述べられている。まず、本研究の動機となったスピングャップをもつ低次元量子スピン系においてギャップが磁場で壊される場合に生じる横方向の磁化の秩序化に関する磁場誘起相転移に関するマグノンのポーズ・アインシュタイン凝縮に関する紹介と、関連する実験が紹介されている。そして、この問題に量子モンテカルロ法を適応する場合に状態更新を効率よく行うためにいくつかのアルゴリズムを比較し、状態更新に用いるワームと呼ばれる更新点の運動に関する効率のよいアルゴリズムを見いだしている。この方法を用いて、対象をモデル化した3次元の容易面異方性をもつ $S = 1$ ハイゼンベルクモデルの相転移を調べ、相転移が3次元XYモデルと同じユニバーサリティクラスに属していることを確認し、さらに磁化過程を調べ、対応する実験の値を再現することに成功している。さらに、圧力依存性に関連すると考えられるパラメータ依存性についても明らかにし、臨界温度のパラメータ依存性における対数補正についても議論している。

第4章は、4体相互作用があるハイゼンベルクモデルに関する量子モンテカルロ法による研究が述べられている。2次元反強磁性ハイゼンベルクモデルにおいて多体のスピン相互作用が加わった場合に、二体力が有効な場合でネール状態と4体相互作用がある場合のVBS状態の間の相転移は、対称性が異なるため、通常のLandau-Ginzburg-Wilsonの現象論的描像では一次相転移が予想されるのに対し、非閉じこめ臨界現象と呼ばれる二次相転移が予想されている。この問題に関しては、いくつかの先行研究があるが、扱ったサイズが小さいなどのこともあって、詳しい性質が知られていなかった。特に、正方格子上ではシングレットボンド、あるいは4体シングレット状態が四重に縮退し、それらの分布が重要な役割をする。本論文では、4体相互作用がある場合に、量子モンテカルロ法の技法の一つであるループアルゴリズムを工夫し、効率の良い計算方法を考案している。そして、これまでに調べられているより2倍大きな系での計算を可能にした。それによって、この系の秩序変数であるダイマー秩序

のヒストグラムを丁寧に調べた。その結果、秩序変数の空間的な性質から4つの離散的な値を取ると考えられるのに対し、得られたヒストグラムは連続的な分布を示し、この系の新しい側面が明らかになった。秩序変数の相関関数のサイズ依存性からは、長距離秩序の存在を示唆するような結果が得られているがその場合に考えられる転移点での相関関数の緩和のべき指数が通常の場合に予想されるものとは大きく異なり、この系の相転移の異常さが示された。また、秩序変数がヒストグラムから示唆されるように、連続的な対称性を持つ場合には、ゆらぎの赤外発散によって自発的な対称性の破れが起きないいわゆるコストリッツ・サウレス転移が起きると考えられるが、そのような兆候は見つかっていない。このように、相転移に関しては断定的な結論は得られていないが、これらの議論は今回の新しいアルゴリズムによって詳しいデータが得られたことで、このような新しいタイプの相転移の可能性が議論できるようになった。その意味で、本研究の計算物理学での成果は評価に値するものとする。

第4章は、全体のまとめに当てられている。

なお、第2章は Cristian Batista・川島直輝、第3章は川島直輝・原田建自との共同研究であるが、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。