

Title	Low-energy Physics in Low-dimensional Gapped Quantum Spin Systems
Author(s)	上田, 宏
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/59091
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	上田 宏
博士の専攻分野の名称	博士(理学)
学位記番号	第 24904 号
学位授与年月日	平成23年9月20日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 基礎工学研究科物質創成専攻
学位論文名	Low-energy Physics in Low-dimensional Gapped Quantum Spin Systems (励起ギャップを持つ低次元量子スピン系の低エネルギー物理)
論文審査委員	(主査) 教授 北岡 良雄 (副査) 教授 田中 秀和 教授 芦田 昌明 准教授 草部 浩一

論文内容の要旨

本論文の目的は、様々な境界開放条件下における有限長の低次元量子スピン系のエネルギースペクトルに対して、励起準粒子を記述する有効模型の提案及びそれに基づいた有限サイズスケリング (FSS) の適用を行い、熱力学的極限における低エネルギー状態に関連する物理量を高精度に評価することである。ここで「低エネルギー状態に関連する物理量」とは、励起エネルギー、励起準粒子の速度、励起準粒子間の散乱長、そして励起準粒子の境界散乱長である。

境界開放条件下の相互作用系がもつ特徴として、励起準粒子が系の境界で非自明な散乱及び反射の影響を受けることがある。この影響はしばしば境界付近の相互作用強度を調整することで低減されてきたが、どのような系に対してもこの方法が上手く働く訳ではない。そのため従来の調整された境界開放条件下でのFSSでは $S=2$ 反強磁性ハイゼンベルグ (AFHB) 模型という単純な系の励起ギャップですら精度よく求めるのが困難であった。そこで本論文では以下の2つのFSSを構築した。(1) 励起準粒子の境界における非自明な散乱及び反射を極めて低減できる格子変形(双曲変形)を新たに導入し、変形下での励起スペクトルに関するFSSを同じく双曲変形下での有効1体模型から構築した。(2) 「低エネルギー状態に関連する物理量」がすべて含まれたFSSを、調整された境界開放条件下における非線形 σ 模型に基づく考察から構築した。

本論文により構築されたFSS (1) を $S=1$ AKLT鎖および1軸異方性を持つ $S=1$ AFHB鎖、FSS (2) を $S=1$ 及び $S=2$ AFHB鎖に対して適用したところ「低エネルギー状態に関連する物理量」がいずれの相互作用模型でも高精度に評価された。特に、FSS (2) は、非可換密度行列繰り込み群法と組み合わせることで既知のどの手法よりも高精度に $S=2$ AFHB鎖の励起ギャップを見積もることが明らかとなった。有限長の低次元量子スピン系のエネルギースペクトルは、標準的なワークステーション上でFortran 90により独自にコーディングされた密度行列繰り込み群法および非可換密度行列繰り込み群法により得た。

これにより本論文の解析が従来の手法で特定困難な有限の励起ギャップを持つ相の解析に有効であることが示された。また、本論文によって与えられた様々な境界開放条件下での励起ギャップを持つ励起準粒子に対する詳細な解析結果は、励起ギャップの開いた次元鎖において相互作用する準粒子模型を解析する際に重要となる境界効果に対する知見を与えた。

論文審査の結果の要旨

量子スピン系の励起ギャップに関するハルデン予想は、場の理論の予想としては自然であるが、スピン波理論で常識とされた分散関係を覆しており、その後実験的検証を経て成立した。これまでは、数値対角化法、量子モンテカルロ法を超え得る密度行列繰り込み群法 (DMRG) によっても、このハルデンギャップを高精度に数値評価する方法が確立していなかった。本論文の著者は、新しいプログラムの提供と、有限サイズスケール解析の確立によってこの課題を解決した。まず、非アーベル型DMRG (NADMRG) を高い計算効率で実行できるアルゴリズムとプログラムが示されている。次に、精度を保障する開いた境界条件を調整して用いるため、励起準粒子の境界散乱効果を取り扱う2つの新しい方法が提示されている。最初の方法は、ハミルトニアンに双曲変形を施して励起準粒子を系の中ほどに閉じ込めることにより、境界補正を減少させる方法である。新しい有限サイズスケール公式の導出と検証を経て、励起ギャップと準粒子速度が高い精度で求められた。次のものは、調整された開いた境界条件に対する境界散乱長を含めた有限サイズスケール公式の提案である。バルク物理量である励起ギャップ、準粒子速度、マグノン間散乱長が調整パラメータに依存しないことが示されている。その結果、非常に高い精度で励起ギャップが求められた。この方法は、基底状態の相関長増大とともにマグノンサイズが大きくなっても、常に使うことができる。NADMRGと組み合わせることで、 $S = 2$ ハイゼンベルグスピン鎖の励起ギャップが現時点の世界最高精度で評価されている。よって、実験的に検証可能な各種の低次元量子スピン系やオプティカル格子などの研究を推進する契機をも与えており、この論文は博士 (理学) の学位論文として価値のあるものと認める。