

学 位 審 査 報 告 書

(ふりがな) 氏 名	すぎもと たかのり 杉本 貴則
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学 専攻
(学位論文題目) Dynamical Properties in Low-Dimensional Quantum Spin Systems (低次元量子スピン系における動的性質)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 遠山 貴巳 教授 前野 悦輝 教授 川上 則雄 教授

京都大学	博士（理学）	氏名	杉本 貴則
論文題目	Dynamical Properties in Low-Dimensional Quantum Spin Systems		
（論文内容の要旨） 本論文では、低次元量子スピン系における動的な性質の研究を行った。低次元量子スピン系における性質は、強い量子揺らぎと低次元性のために理解されていない部分が多く、精力的に研究が進められている。これまでの研究により、朝永・ラッティンジャー液体やダイマー相、カイラル相などの古典系には見られない興味深い状態が基底状態に存在することが示された。特に、カイラル相においては、ベクトル・カイラリティと呼ばれる非自明な秩序変数が長距離相関を示すことが示された。これまで、ベクトル・カイラリティの絶対零度の振る舞いは調べられてきたが、実験との対応や応用を考える上では有限温度の性質を明らかにする必要がある。そこで、申請者はベクトル・カイラリティの有限温度における性質を、カイラル相が存在する最も単純なモデルである、スピン $1/2$ J_1-J_2 モデルを用いて調べた。ベクトル・カイラリティの励起状態の研究は、Dzyaloshinsky-Moriya相互作用が存在するような系では、電子分極と結合を持つため、マルチフェロイック物質などの内部で起こる現象の理解を深めるためにも重要であると言える。 一方、スピン $1/2$ J_1-J_2 モデルがフォノンと結合する場合、フラストレートしたスピン・パイエルズモデルとなる。このモデルでは、ある温度でスピンのダイマー化とボンド交替、フォノンのソフト化を伴う、スピン・パイエルズ転移を起こすことが以前より知られていた。現実の物質としては、有機物質であるTTF-TCNQ系の他に、無機物質としてCuGeO₃が知られている。CuGeO₃では、転移温度以下での励起ギャップがフォノン・エネルギーに比べ小さいことから、従来のスピン・パイエルズ転移では異なる現象が期待される。近年の理論的研究により、フォノン・エネルギーが大きい場合、スピン・フォノン結合定数が小さいところではスピン・パイエルズ転移が起こらず、スピンと結合しているフォノンが転移温度でもソフト化せずに存在することが示された。CuGeO₃においては、この理論によって説明されるような従来型のスピン・パイエルズ転移が起こらず、フォノンが転移温度以下でもソフト化せずに存在している可能性がある。そこで、申請者はフラストレートしたスピン・パイエルズモデルにおける、ソフト化されないフォノンのスピン励起に関する研究を行った。これは、現在J-PARCで行われている、中性子散乱実験に対する理論的な示唆を与える上でも重要な研究であると言える。 手法としては数値計算手法の一つである、密度行列繰り込み群法が用いられた。この手法は、1次元量子系において強い力を発揮し、厳密対角化に比べ大きな系を取り扱うことができ、また量子モンテカルロ法のように負符号問題を生じない点で、本論文中で扱われている、フラストレーションを持つ系での長距離相関の議論には適していると言える。 スピン $1/2$ J_1-J_2 モデルでは、カイラル相とそれに隣接するダイマー相について、ベクトル・カイラリティの有限温度における性質がそれぞれ調べられた。カイラル相については、絶対零度で存在していたベクトル・カイラリティの長距離相関が、有限温度効果によって壊されることを示した。これは、1次元量子系における有限温度の一般的な理解と一致しており、その一例を示している。一方、ダイマー相においては、ある特徴的な温度でベクトル・カイラリティの相関が増加する振る舞いを見つけた。絶対零度でギャップを開いていたベクトル・カイラリティの励起は、この特徴的な温度においてギャップを閉じる。これは、ダイマー相で励起状態とし			

(続紙 2)

て、ベクトル・カイラリティの相関の強い状態が存在することを示唆しており、絶対零度の性質からは予想されない新しい結果である。

スピン・パイエルス模型では、絶対零度におけるソフト化されないフォノンによるスピン励起に与える影響が調べられた。密度行列繰り込み群法の計算により、高エネルギー領域にフォノンに誘起されたスピン励起構造が示された。この新しいスピン励起の物理を理解するために、スピンのz成分の相互作用を落としたXYスピン・パイエルス模型が使われた。この模型は、Jordan-Wigner変換を用いることで、スピンレスなSu-Schrieffer-Heeger模型と等価になる。この模型は、自由フェルミオンとフォノンが結合した系であり、摂動計算が容易である。そこで、申請者は、密度行列繰り込み群法の計算と摂動計算を比べることにより、この新しいスピン励起がフォノンを介した、Jordan-Wignerフェルミオンの粒子・正孔励起に対応することを示した。また、スピンとの結合による、フォノンの励起状態に現れる変化も本論文では示された。これらの結果は、現在J-PARCで行われているCuGeO₃に対する中性子散乱実験に対する理論的な示唆を与えると考えられる。

(論文審査の結果の要旨)

申請者は、低次元量子スピン系の代表として、具体的に2つの模型、スピン1/2 J_1 - J_2 模型とフラストレートしたスピン・パイエルス模型について、その動的性質の研究を行った。前者の模型では、カイラリティの有限温度における性質を調べ、特にダイマー相においては、ある特徴的な温度でベクトル・カイラリティの相関が増加するという非自明な結果を得た。この研究により示された結果は、マルチフェロイック物質などの内部で起こる現象を理解するためには重要であり、実験や応用を考える上でも評価されるべき内容である。

他方、フラストレートしたスピン・パイエルス模型では、ソフト化されないフォノンがスピン励起に与える影響について研究が行われた。無機スピン・パイエルス物質CuGeO₃内部では、フォノンが転移温度以下でもソフト化されない可能性があり、実験との対応を考える上でも、この問題設定は意味があると言える。本論文においては、この問題設定のもと、ソフト化されないフォノンに誘起された新しいスピン励起構造が2スピノンの連続準位より高エネルギー側に現れることを示した。同時に、より単純化した模型を用いて、数値計算と解析計算を比較することにより、この励起の正体が、フォノンを介した、Jordan-Wignerフェルミオンの粒子・正孔励起に対応することを示した。また、この研究は、現在J-PARCで行われているCuGeO₃に対する中性子散乱実験への理論的な示唆を与えることを念頭にしており、実験グループとの相補的なコミュニケーションを行っている上でも意味のある内容であると言える。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年1月12日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降