

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Quantum Effects on Ground States and Magnetic Excitations in Spin-1/2 Two-Dimensional Frustrated Antiferromagnets
著者(和文)	児島佑樹
Author(English)	Yuki Kojima
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11694号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:田中 秀数,大熊 哲,佐藤 琢哉,村上 修一,古賀 昌久
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11694号, Conferred date:2022/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第		号	学位申請者氏名	児島 佑樹	
論文審査 審査員		氏 名	職 名		氏 名	職 名
	主査	田中秀数	教授	審査員	古賀昌久	准教授
	審査員	大熊 哲	教授			
		佐藤琢哉	教授			
		村上修一	教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

スピン 1/2 の三角格子 Heisenberg 反強磁性体はフラストレーションと量子性を合わせ持つ典型的なフラストレート量子スピン系である。ゼロ磁場での基底状態は Anderson による singlet の液体状態に基づく resonating valence bond (RVB) 理論に端を発し、精力的な理論研究がなされた。現在のコンセンサスでは、基底状態は RVB 状態ではなく、古典スピン模型と定性的に同じ三角構造の秩序状態である。しかし磁場中ではフラストレーションと量子効果の相乗効果によって磁化曲線に飽和磁化の 1/3 に現れるプラトーなどの顕著な量子現象を示すことが知られている。また、モデル物質 $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ の強磁場実験から三角格子面間の弱い交換相互作用や磁気異方性によって新たな磁場誘起量子相転移が起こることが最近明らかになってきた。容易面型異方性が大きい場合に高磁場で安定化される新しい量子相など実験的に確認されていない量子相があり、磁気パラメーターが合致するモデル物質の開拓が望まれている。一方、磁気励起については、よく知られた線形スピン波理論から大きく異なることが理論的に知られていたが、理解は単一マグノン励起の一部にとどまっていた。しかし、 $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ を用いた実験的研究がなされ、磁気励起の全体像が分かり始めて来た。これに触発されて、理論研究が活発に展開されている。本論文は新規 $S=1/2$ 三角格子 Heisenberg 的反強磁性体 $\text{Ba}_2\text{La}_2\text{CoTe}_2\text{O}_{12}$ の開拓と $S=1/2$ 三角格子 Heisenberg 的反強磁性体を含む 2 つの subsystem からなる $\text{Ba}_2\text{CoTeO}_6$ の磁気励起に関する実験的研究をまとめたものである。

本論文は「Quantum Effects on Ground States and Magnetic Excitations in Spin-1/2 Two-Dimensional Frustrated Antiferromagnets」と題し、以下の 5 章からなる。

第 1 章「Introduction」では、スピンプラストレーションの概念の説明から入り、スピン 1/2 の三角格子 Heisenberg 反強磁性体のゼロ磁場での基底状態と量子揺らぎが安定化する磁化過程の説明が理論と実験結果を比較しながらなされている。そして大きい容易面型異方性が安定化する実験的に未発見の高磁場量子相があることを指摘している。次に磁気励起に関するこれまでの理論研究とモデル物質 $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ の実験結果のまとめを行なっている。続いて本研究で磁気励起を研究する $\text{Ba}_2\text{CoTeO}_6$ の結晶構造を説明し、この系が $S=1/2$ 三角格子 Heisenberg 的反強磁性体 (subsystem A) と強くフラストレートした蜂の巣格子 Ising 的反強磁性体 (subsystem B) の 2 つから構成されることの説明がなされている。また、先行研究の実験結果を説明し、2 つの subsystem が別々の相転移温度 ($T_{N1}=12\text{ K}$, $T_{N2}=3.0\text{ K}$) を有し、互いに殆ど独立していると考えられていることを述べている。次に、以上を踏まえてスピン 1/2 の三角格子 Heisenberg 的反強磁性体の磁場誘起量子相転移と磁気励起を総合的に理解するためには新しい物質を用いた研究が必要であり、そのために新規物質 $\text{Ba}_2\text{La}_2\text{CoTe}_2\text{O}_{12}$ の開拓を行い、 $\text{Ba}_2\text{CoTeO}_6$ の磁気励起の測定を行なったとの研究の動機と目的が述べられている。

第 2 章「Experimental Details」では、 $\text{Ba}_2\text{La}_2\text{CoTe}_2\text{O}_{12}$ の粉末試料と $\text{Ba}_2\text{CoTeO}_6$ の単結晶試料の合成・育成法を述べ、本研究で用いた磁化測定、比熱測定、X 線回折、中性子散乱実験の

原理と実験条件を簡潔に説明している。

第3章「Crystal Structure and magnetic Properties of $\text{Ba}_2\text{La}_2\text{CoTe}_2\text{O}_{12}$ 」では、まず、新たに合成したスピン 1/2 の三角格子 Heisenberg 的反強磁性体 $\text{Ba}_2\text{La}_2\text{CoTe}_2\text{O}_{12}$ の結晶構造と磁性がまとめられている。 $\text{Ba}_2\text{La}_2\text{CoTe}_2\text{O}_{12}$ は格子定数のみの報告があるだけで、詳しい結晶構造と磁性の研究がされていない物質である。まず、結晶構造を粉末 X 線・中性子回折実験と Rietveld 解析で精密に決定した結果が記されている。次に磁化率測定から本物質ではこれまで知られていた同型物質の $\text{Ba}_2\text{La}_2\text{CoW}_2\text{O}_{12}$ などに比べて三角格子内の交換相互作用が十分大きく 2 次元性の良い三角格子反強磁性体であることを示し、それが非磁性陽イオン Te^{6+} と W^{6+} の最外殻電子状態の違いから来ることを述べている。続いて強磁場磁化過程の実験結果を示し、スピン 1/2 の三角格子 Heisenberg 的反強磁性体に特徴的な 1/3 磁化プラトーが明瞭に観測されたことを記している。また、磁化過程の解析から g 値と交換相互作用の異方性が $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ に比べて大きいことを導いている。続いて比熱測定で磁気相転移温度を特定し、中性子回折実験で秩序相の磁気構造を決定している。

第4章「Magnetic Orderings and Elementary Excitations in $\text{Ba}_2\text{CoTeO}_6$ 」では、J-PARC 物質・生命科学実験施設に設置された冷中性子チョッパー分光器 AMATERAS を用いて測定された $\text{Ba}_2\text{CoTeO}_6$ の弾性散乱と非弾性散乱実験の結果と考察がまとめられている。まず、弾性散乱により蜂の巣格子 Ising 的反強磁性体である subsystem B が秩序する T_{N1} 以下の温度での subsystem B のストライプ秩序を確認している。続いて、 $S=1/2$ 三角格子 Heisenberg 的反強磁性体である subsystem A が秩序する T_{N2} 以下の温度で、三角格子面に垂直な方向に鋭い streak を観測し、三角格子面内では三角秩序があるが、格子面に垂直な方向には長距離秩序がなく、2 次元性が非常に良いことを結論している。次に非弾性散乱実験で得られた磁気励起スペクトルを示し、subsystem A からの励起が低エネルギーに subsystem B からの励起が高エネルギーに明瞭に分離していることを示している。また、励起スペクトルの温度依存性から両 subsystem からの励起が独立であることを示し、両 subsystem が殆ど完全に分離していることを結論している。次に subsystem A の励起スペクトルと $\text{Ba}_3\text{CoSb}_2\text{O}_9$ で観測された励起スペクトルを比較し、単一マグノン励起の分散関係に現れる M 点の極小構造 (rotonlike minimum) や連続励起の構造が極めてよく一致することから、両者で観測された励起スペクトルは $S=1/2$ 三角格子 Heisenberg 的反強磁性体に普遍的なものであることを結論している。続いて、ストライプ秩序をする subsystem B の分散関係を競合する 3 種類の交換相互作用を取り入れた XXZ 模型に基づき線形スピン波理論で解析し、相互作用パラメーターを決定している。

第5章「Conclusion and Future Perspective」では、上記の研究を総括し、今後の研究の方向性について述べている。

以上のように申請者は、自ら試料を作成し、磁化測定、比熱測定、X 線回折、中性子散乱実験とその解析から上記の重要な結果を得ている。本研究はフラストレーションの強い量子スピン系の基底状態と磁気励起に関する新局面を切り開くもので、フラストレート量子磁性体の量子多体を理解する重要な指針を与える研究として高く評価される。これは申請者の研究能力の高さと学識の深さを表しており、本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値を有すると判断される。