



Title	Randomness-induced universal quantum spin liquids in frustrated magnets — Cooperation of frustration and randomness in quantum magnets —
Author(s)	上松, 和樹
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/76406
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (上松和樹)	
論文題名	Randomness-induced universal quantum spin liquids in frustrated magnets — Cooperation of frustration and randomness in quantum magnets — (フラストレート磁性体におけるランダムネス誘起の普遍的量子スピン液体状態 — 量子磁性体におけるフラストレーションとランダムネスの協奏 —)
論文内容の要旨	
多くの磁性体は低温において、相互作用のエネルギーを最小化するために何かしらの秩序化を起こす。しかし量子スピン液体と呼ばれるものでは、その強い量子揺らぎのために対称性の自発的破れや磁気秩序を示さないまま、相互作用のエネルギースケールよりもはるかに低温までスピンの液体的な揺らぎが持続する。その特異な性質から、量子スピン液体の研究は、量子情報、トポロジカル物質、非従来型超伝導、場の量子論などの近隣分野とも相互に関係しながら発展してきている。 量子スピン液体的振る舞いを実験的に実現する試みも、特に量子効果を増強できるフラストレート磁性体を対象として盛んに行われてきており、90年代後半以降、二次元の幾何学的フラストレート磁性体を中心に現実の物質でも観測されてきた。代表的なものとして、有機三角格子反強磁性体κ-(ET)₂Cu₂(CN)₃、EtMe₃Sb[Pd(dmit)₂]₂、κ-(Cat-EDT-TTF)₂などや、無機カゴメ格子反強磁性体ハーバートスミサイトZnCu₃(OH)₆Cl₂、あるいはグラファイト表面に吸着した³Heが示す核磁性などが挙げられる。これらの物質は極めてよく似た磁性を示し、その中の一つに低温の磁気比熱が温度に比例するという性質がある。最近では量子スピン液体候補物質は以前より多彩になっており、正方格子混晶反強磁性体Sr₂Cu(Te_{1-x}W_x)O₆やハニカム格子反強磁性体6HB-Ba₃NiSb₂O₉のような、幾何学的フラストレーションではなく次近接相互作用に由来したフラストレーションを有する二次元の磁性体、さらにはパイロクロア格子反強磁性体Lu₂Mo₂O₅N₂のような三次元のフラストレート磁性体など、その実現範囲を拡張しながら、より普遍的な状態としての性格が確立しつつある。一方で、これらの物質においてかなり普遍的に実現する量子スピン液体的振る舞いの本質的理解に関しては、未だ議論が続いている。 近年、フラストレーションや量子力学的な効果に加えて、物質中に内在するランダムネスや不均一性の効果が量子スピン液体的な振る舞いを誘起する上で重要な要素となりうることで、二次元の幾何学的フラストレート磁性体に対する理論研究によって提案された。これらの研究で報告されたランダムネス誘起のギャップレスな量子スピン液体状態—ランダムシングレット状態—は、大まかにはランダムに分布したシングレットの敷き詰め状態として理解できるが、ランダム性に由来したシングレットの敷き詰め方に対するマクロな縮退のために、シングレットを組み損なった「オーファンスピン」や局所的な共鳴構造を有している。ランダムシングレット状態は、現実の量子スピン液体候補物質と同様、温度に比例する低温比熱を示し、帯磁率や中性子散乱などの物理量においても実験と整合する振る舞いを示す。 本博士論文では、様々なタイプのフラストレートした量子ハイゼンベルグモデルに対して、ランダムネスの効果を厳密対角化法によって解析し、ランダムネスによって誘起される量子スピン液体状態の安定性と普遍性を調べた。その結果、フラストレート磁性体において生じるランダムシングレット状態は、相互作用の詳細や格子形状、さらには格子の空間次元にも依らず、ある程度のフラストレーションとランダムネスが存在する限りは実現し、その物性はこれらの変化に対しても定性的には変わらない普遍的なものだと分かった。また、ランダムシングレット状態の低エネルギー励起は、シングレットがトリプレットへ壊れる励起に留まらず、近隣のシングレットの組み換えを伴うオーファンスピンの拡散や、シングレットの局所的な共鳴構造の生成消滅など多彩であり、一次元非フラストレート系で実現する、シングレット-トリプレット励起しか持たない「非フラストレートランダムシングレット状態」とは本質的に異なることが分かった。本編では、フラストレート磁性体において生じるランダムシングレット状態と近年観測されている量子スピン液体候補物質との関係性など、実験的な側面についても議論する。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (上松 和樹)			
論文審査担当者	(職)		氏 名
	主 査	教授	川村 光
	副 査	教授	花咲 徳亮
	副 査	教授	萩原 政幸
	副 査	教授	中澤 康浩
	副 査	准教授	谷口 年史
論文審査の結果の要旨 磁性物理学分野では、磁氣的相互作用のエネルギースケールより遥かに低温まで、スピングラスの凍結も含め何らの磁気長距離秩序化や自発的対称性の破れを示さずに揺らぎ続ける、いわゆる「スピン液体状態」の可能性が長年議論されてきた。今世紀に入って、現実の磁性体でその候補物質が報告されるようになり、今では相当数のスピン液体物質が知られている。その安定化機構として、強い量子揺らぎと並んで相互作用の競合 ― フラストレーション ― が重要であると広く考えられている。量子スピン液体の大多数は、低温で、絶対温度に比例する磁気比熱を始めとする、相互に類似したギャップレスの振舞いを示すことが知られているが、その物理的起源に関しては未だ十分解明されたとは言い難い状況である。その中であって、最近、系に内在するランダムネスや不均一性が、量子揺らぎやフラストレーションと並んで、多くの量子スピン液体の出現に本質的な役割を果たしているのではないという提案が理論的になされ、注目されている。このようなランダムネス誘起の量子スピン液体は「ランダムシングレット状態」と呼ばれ、主に2次元の3角格子やカゴメ格子といった幾何学的フラストレート磁性体を対象に、近年研究が展開されてきている。 このような状況下で、上松和樹君は、量子ハイゼンベルグスピンモデルに対する厳密対角化の手法を駆使して、ランダムネス誘起の量子スピン液体状態の可能性を、2次元の幾何学的フラストレート系からさらに普遍化・一般化させる方向での一連の理論研究を展開した。具体的には、従前の幾何学的なフラストレーションを、最近接相互作用と次近接以降の相互作用間の競合、あるいは2体交換相互作用と多体交換相互作用間の競合へと拡張し、また系の空間次元についても、従前調べられてきた2次元系を、3次元系や1次元系へと拡張した。その結果、ある程度のフラストレーションとランダムネスがあれば、極めて普遍的に、ランダムネス誘起のギャップレスの量子スピン液体状態が安定化されることを見出した。合わせて、ランダムシングレット状態のミクロな描像を明確化するための理論解析を行い、フラストレートしたランダムシングレット状態特有の動的性格の強い非局所的低エネルギー励起 ― “orphan spin”やシングレットダイマー・クラスターの生成消滅 ― を同定することに成功した。これらの結果は、これまで見出された量子スピン液体候補物質に対する多くの実験結果とも調和的なもので、凝縮系の取り得る熱力学的状態の概念を一層豊かにするものと評価される。			