

数理物理学研究室

1. メンバー

教授	：山本 昌司	011-706-2681	yamamoto@phys.sci.hokudai.ac.jp
講師	：大原 潤	011-706-3668	ohara@phys.sci.hokudai.ac.jp
研究員	：乗木 優作	011-706-3667	noriki@phys.sci.hokudai.ac.jp
DC3	：井上 天	011-706-3668	tinoue@phys.sci.hokudai.ac.jp
DC3	：木村卓	011-706-3667	kimutaku@phys.sci.hokudai.ac.jp
DC1	：内藤岳	011-706-3667	naito@phys.sci.hokudai.ac.jp
MC2	：田所龍人	011-706-3667	ryuto@phys.sci.hokudai.ac.jp
MC1	：王シユ	011-706-3667	sheyou@phys.sci.hokudai.ac.jp
B4	：柯キンヤク	011-706-3668	kinyaku@phys.sci.hokudai.ac.jp
B4	：志津直人	011-706-3668	naotoshizu@eis.hokudai.ac.jp

2. 研究成果

1) 四方逆プリズム型 8 配位遷移金属錯体にみる光誘起磁気相転移現象の解明

四方逆プリズム Mo 錯体を構築素子とする 8 配位シアノ架橋錯化合物 $\text{Cu}_2[\text{Mo}(\text{CN})_8]$ は、可視光誘起の多段磁気相転移で知られている。照射光波長による磁化制御、発現磁化の長寿命と温度耐性などの機能性光への期待は高いが、物理機構は未解明であった。

我々はまず、有効軌道を抽出して遍歴電子モデルを設定し、群論を用いた解析により可能な磁性・非磁性状態を同定した。そこでは、観測されている常磁性状態をはじめ、電子偏在状態、強磁性状態、反強磁性状態など多様な電子相が現れ得ることが分かった。これらの間に起こり得る光誘起相転移を時間依存 Schrödinger 方程式を解いて数値シミュレーションした。その際、磁化や電子密度などの基礎的物理量に加え、光学伝導スペクトルや角度分解光電子分光スペクトルといった観測量も計算し、光誘起ダイナミクスの可視化を行った。基底状態電子相の分散関係と光誘起電子相の分散関係を詳細に比較したところ、“異なる波長の光照射による磁化増減往復過程での電子の移動は 2 つの状態の間の往復である”との先入観に反し、“光照射前後では磁化は同じでも電子の状態は変化している”ことを明らかにした。光照射によって行き着く非磁化状態は、Cu サイトへの電子偏在状態であり、これは初期常磁性状態とは異なり熱平衡状態では安定に存在できない。光照射により“隠れた電子状態”が現れている可能性を示した。

一方、Mo を W で置換した類似物質 $\text{Cu}_2[\text{W}(\text{CN})_8]$ が存在しており、こちらでは光磁性は発現しないという観測実験があった。我々はこれに対し、照射光エネルギーの調整により磁化は発現し得ることを同様の計算により明らかにした。巨視的な磁化発現には、 Γ 点付近の電子励起、すなわち光励起による空間一様な電荷揺らぎが重要である。

2) Kitaev スピン・ボールにおける Raman 散乱の拡張対称操作群による解析

異方的 Ising 型交換相互作用が周期的に空間変調する Kitaev 模型は、スピン液体状態を実現する“可解”理論模型として注目を集めている。近年では、Ir 酸化物や Ru 化合物などモデル物質も発見され、理論・実験一体となって活発な議論が展開されている。本研究は、多面体型 Kitaev 模型、そしてそこに現れる量子スピン液体状態の光学応答、すなわち Raman 散乱過程を、対称性の観点から精緻に記述することを目指した。動機の一つは、Raman 散乱の先行研究における、「偏光依存性がないことが長距離秩序をもたない量子スピン液体状態の特徴である」というナイーブな考えを是正することにある。

実対称性の観点から、量子スピン液体状態の変更依存性について議論した。量子スピン液体状態を実現する籠目反強磁性体や Kitaev 蜂の巢格子模型は偏光依存性が見られない。本研究では、3つの異なる格子点群をもつ Kitaev スピン・ボールの偏光依存性を網羅的に調べた。その結果2次元格子模型で示された偏光無依存性が、格子のもつ3重回転対称性によるものであることを示すと同時に、強い偏光依存性をもつ量子スピン液体状態が実際に存在する例を示した。この結果により、量子スピン液体状態の Raman 散乱過程における偏光依存性が量子スピン液体状態というよりはむしろ格子点群に依存することが明らかになった。

一方、ゲージ拡張対称性の観点から、Majorana 粒子の対称性がいかに Raman 散乱強度に現れるかを議論した。基底状態 Kitaev スピン・ボールの離散 Majorana 励起スペクトルをゲージ拡張対称操作群で記述し、その励起スペクトルを拡張対称操作群で記述した。Kitaev 模型における Raman 散乱は Majorana スピノン 2 粒子が媒介するものであり、Raman 散乱強度は拡張対称操作群の積表現によって表される対称性を反映することを示した。Raman 散乱強度の偏光依存性を詳細に解析することで、Majorana 励起スペクトル及び Raman 散乱強度の完全な理解のためには、格子点群の完全な点群対称性、すなわち $O(3)$ 群のゲージ拡張対称操作群を考慮する必要があることを強く示唆する。

3) 正方格子反強磁性体の Raman 散乱理論— dp 模型に基づく解析—

正方格子反強磁性体 La_2CuO_4 の Raman 散乱スペクトルにおける、 B_{1g} モード高エネルギー・スペクトルの起源および A_{2g} モード・スペクトルの起源解明を目指し理論解析を行った。 dp 模型を出発点とし、強相関摂動展開により有効スピン Hamiltonian と磁気 Raman 演算子を導出し、スピン波理論を用いて散乱スペクトルを記述した。マグノン間の相互作用を精確に考慮するために、Hartree-Fock 近似を超え、配位間相互作用を取り込んだ。磁気 Raman 演算子の導出において、4次摂動[いわゆる Laudon-Fleury(LF)演算子]を超えて、8次摂動まで考慮することにより、LF 演算子型の補正に加え、カイラル演算子型およびリング交換演算子型の寄与が現れる。 A_{2g} モードは、この内のカイラル項に起因する。また、超 LF 機構を考慮することで、 B_{1g} モードのスペクトルが高エネルギー領域へシフトすることも確認した。観測結果とのより定量的な比較を目指す。

3. 成果発表

〈原著論文〉

- 1) Photoinduced bidirectional magnetism against monodirectional electronics in square-antiprismatic octacyanometalates.
J. Ohara and S. Yamamoto:
* J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 093706, 1-5 (2020).
- 2) Projective symmetry group analysis of inelastic light scattering in Kitaev spin balls.
T. Kimura and S. Yamamoto:
* Phys. Rev. B **101**, 214411, 1-18 (2020).
- 3) Raman scattering polarization and single spinon identification in two-dimensional Kitaev quantum spin liquids.
S. Yamamoto and T. Kimura:
* J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 063701, 1-5 (2020).

4.1 学術講演 (国際学会・国際シンポジウム)

4.2 学術講演 (国内学会・国内その他)

〈一般講演〉

《口頭発表》

- 1) Bimagnon excitations probed by inelastic X-ray scattering in triangular-lattice antiferromagnets
*大原潤, 山本昌司
2020年 日本物理学会第75回年次大会 現地(名古屋大学)開催中止
- 2) Magnetic Raman scattering beyond the Loudon-Fleury mechanism in triangular-lattice antiferromagnets
*山本昌司, 大原潤
2020年 日本物理学会第75回年次大会 現地(名古屋大学)開催中止
- 3) Possible magnetic Raman Scattering of A_2 symmetry in insulating planar cuprates
*乗木優作, 山本昌司
2020年 日本物理学会第75回年次大会 現地(名古屋大学)開催中止
- 4) リング交換 Penrose 格子反強磁性体の Raman スペクトル
*井上天, 山本昌司
2020年 日本物理学会第75回年次大会 現地(名古屋大学)開催中止

5) Modified spin-wave analysis of inelastic neutron scattering spectra for Kagome antiferromagnets

*山本昌司, 大原潤

2020年9月8日(火)~11日(金) 日本物理学会 2020年秋季大会 オンライン

6) Raman scattering theory of the square-lattice antiferromagnet La_2CuO_4 based on a dp model

*乗木優作, 山本昌司

2020年9月8日(火)~11日(金) 日本物理学会 2020年秋季大会 オンライン

7) オクタシアノ架橋 CoW 錯化合物の基底状態電子相とその光励起状態

*大原潤, 山本昌司

2020年9月8日(火)~11日(金) 日本物理学会 2020年秋季大会 オンライン

7. 科研費・助成等の取得状況

8. その他