

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400332

研究課題名(和文) 磁性体におけるヒッグスモードの理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical study of Higgs mode in magnetic materials

研究代表者

松本 正茂 (Matsumoto, Masashige)

静岡大学・理学部・教授

研究者番号：20281058

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：ヒッグスモードが期待される磁性体について、複合スピン系を中心として統一的な理論を構築し、それを具体的な物質に適用することで、磁性体におけるヒッグスモードに関する研究を実施した。国内外の実験グループと協力し、具体的な物質においてヒッグスモードの観測を目指した。その結果、中性子散乱では観測が困難とされていた2次元物質においても、ヒッグスモードが実際に観測されていることを確認した。また、ヒッグスモードは、電気磁気効果によるエレクトロマグノン励起として観測される可能性がある。この点に関する基礎理論を構築し、具体的な物質へ適用して、新たな方法によるヒッグスモードの観測に向けた理論を提出した。

研究成果の概要(英文)：We presented a generalized theory for magnetic excitations in interacting spin cluster systems and applied it to specific magnetic materials, such as spin dimer, trimer, and tetramers. Collaborating with experimental groups, we confirmed that a Higgs amplitude mode was actually observed by inelastic neutron scattering in a two-dimensional (2D) quantum spin system, while it has been believed to be difficult to observe it in 2D systems. The reason is that the Higgs amplitude mode is located at low-energy region in the vicinity of a quantum critical point and that it is protected from decaying into a pair of Nambu-Goldstone modes (NG-modes) by opening of a small energy gap in the NG-mode which originates from a weak easy-axis anisotropy. We also presented a theory of magnetoelectric effects to detect Higgs amplitude. We applied the theory to specific spin systems and confirmed the reliability of the theory.

研究分野：物性理論

キーワード：ヒッグスモード 振幅モード 磁気励起 量子スピン 量子相転移 電気磁気効果 エレクトロマグノン マルチフェロイクス

1. 研究開始当初の背景

標準理論の要となるヒッグス機構は、素粒子分野だけに留まらず、超伝導など、物性分野にも適用される普遍的な概念である。磁性体における秩序は、理論的にはボーズ粒子の凝縮体とみなすことができ、スピン波励起の縦モード(ヒッグスモード)は、ヒッグス粒子と類似の性質を持つ。特に、スピンドイマー系の先駆的な研究によって、その現実性が明らかになってきており、素粒子分野でのヒッグス粒子の発見と相まって、ヒッグス粒子の物理的性質を様々な角度から探るという機運が高まっている。ヒッグス粒子について未知の性質を解明することは最重要課題であるが、高エネルギー領域では多様な実験が困難である。したがって間接的ではあるが、実験に有用な磁性体を舞台として、ヒッグスモードの性質を探る研究は重要で、その定量的解析のための理論の確立は緊急な課題である。この状況を踏まえ、我々は磁性体中の電磁場について考察した。磁気的な性質は通常、光の磁場成分と結合するが、結晶の対称性によって、ヒッグスモードが電場成分と結合できることを見出した。本研究では、これまでの我々の研究を進展させ、物性におけるヒッグスモードの役割について、磁性体を舞台として総合的な理解を目指す。

2. 研究の目的

凝縮系物質で秩序が形成されると、秩序変数の位相と、大きさの揺らぎに対する励起が存在する。前者は南部・ゴールドストーンモード、後者はヒッグスモードと呼ばれ、CERN で発見されたヒッグス粒子と物理的に同等な励起粒子である。本研究では、磁性体に現れるヒッグスモードについて、光応答や崩壊過程も含め、その性質を明らかにする。また、実験的な検証方法と測定に適した物質を提案し、実験グループと協力して、物性におけるヒッグス粒子の役割と普遍性の解明を研究目的とする。

3. 研究の方法

ヒッグスモードの観測が期待される磁性体では、秩序を起こした磁気モーメントの大きさが大きく縮んでいるという特徴がある。これが実現される系として、複数のスピンの強く反強磁性的に結合し、そのスピんクラスターが基本単位となって相互作用している、複合スピン系があげられる。この物質の場合、スピんクラスターがスピン多重項を形成する。この多重項に対してボーズ粒子を導入し、クラスター間相互作用でボーズ粒子のダイナミクスを記述して励起状態を求める方法を用いて磁気励起を計算する。動的スピン相関関数については、スピんクラスターの形状因子を導入し、クラスターを1つの原子のよ

うに取り扱って、見通しよく相関関数を計算する。この理論を用いることで、スピンドイマー、トライマー、テトラマーなど、様々な複合スピン系を統一的に取り扱うことが可能となる。

ヒッグスモードの観測が期待される電場によるエレクトロマグノン励起については、スピンの置かれた環境の対称性を群論的に考察し、スピンが関係した電気双極子を導出する。これによって、さまざまな環境に置かれたスピンによって引き起こされる電気磁気効果の解析が可能となる。

本研究においては、以上の理論を基本とし、具体的な物質への理論の適用を試み、磁性体におけるヒッグスモードについて、実験グループとも共同して研究を進める。

4. 研究成果

(1) ヒッグスモードの観測

アメリカの実験グループと共同で、DLCB と呼ばれるスピんラダー物質の磁気励起を調べた。この物質では、ラダー間相互作用が小さく、また、非弾性中性子散乱の実験から、スピんラダーが2次元的につながっていることが確認されている。さらに、ネール温度以下の磁気秩序相では、低温でも磁気モーメントが大きく縮んでいることがわかっている。これは、DLCB が量子臨界点に近い2次元物質であることを意味する。この場合、磁気モーメントの大きさの揺らぎで形成される振幅モード(ヒッグスモード)の存在が期待される。一方、2次元の場合、縦感受率による中性子散乱では、ヒッグスモードの観測は難しいことが理論的に指摘されている。しかし、DLCB の場合、弱い容易軸型の異方性があり、スピン波励起(横モード)に小さな励起ギャップが存在する。このため、ヒッグスモードからスピン波励起への崩壊が禁止され、ヒッグスモードの寿命が大きく伸びることがわかった。その結果、2次元物質において、ヒッグスモードが中性子散乱で明瞭に観測された初めての例として評価されている(論文[1])。一方、磁場を加えるとヒッグスモードのエネルギーが上昇し、スピン波励起への崩壊が可能となる。この場合、ヒッグスモードの線幅が急激に増大することが予想され、実験グループとの共同研究で、その現象が実際に観測された(論文[2])。

ヒッグスモードが予想される $S=1/2$ スピんテトラマー系物質 $\text{Cu}_2\text{CdB}_2\text{O}_6$ について、物材機構の実験グループと共同で磁気的性質を調べ、ヒッグスモードが存在していると解釈できる磁気励起を観測した(論文[11])。 $S=3/2$ スピンドイマー系物質 CrVMoO_7 についても、同様な磁気励起を観測している(論文[3])。さらに、 $S=1/2$ スピんテトラマー系物質 CuInVO_5 においては、磁化測定からヒッグスモードが存在する可能性が高いことを報告している(論文[6])。これらの実験では多結晶

資料が用いられており、今後、単結晶資料による実験によって、実験グループと協力して、様々な磁性体におけるヒッグスモードの特定につなげたい。

(2) 非等価スピンドイマー系のヒッグスモード

スピンドイマーが3種類存在すると考えられている NH_4CuCl_3 について、中性子散乱で提案されているダイマーの空間配置を仮定して調べた結果、磁気励起が中性子散乱で報告されている3種類のエネルギー領域に存在することを確認した。低エネルギー領域では実験データが取れておらず磁気励起は未解明であるが、その中にヒッグスモードが大気圧下で存在していることを明らかにした(論文[14])。さらに、磁気励起の磁場依存性を調べた結果、電子スピン共鳴で観測されているエネルギーの磁場依存性を定量的に再現することに成功した。この結果は、 NH_4CuCl_3 には3種類のスピンドイマーが存在し、それらの間の相互作用で磁気秩序を起こし、磁化曲線にプラトーを出現させていることを強く示唆するものである。

(3) 表面に局在したヒッグスモード

ヒッグスモードが物質表面に局在するような、特殊な磁性体を理論的に提案した。具体的には蜂の巣構造をした2次元のスピンドイマー系を考え、ジグザグエッジの場合にはヒッグスモードが表面に局在して、1次元的な励起状態を形成することを示した(論文[9])。これは、トポロジカル絶縁体のスピン系バージョンに相当し、ボーズ粒子系におけるトポロジカル絶縁体という意味を持つ。蜂の巣構造のスピンドイマー物質は実際に発見されており、今後の実験において1次元的なヒッグスモードの観測が期待される。

(4) エレクトロマグノン励起によるヒッグスモードの観測

ヒッグスモードが現れる典型的なモデルとして、シングルイオン異方性のある $S=1$ のスピン系について調べた。ヒッグスモードの観測は難しいことが知られているが、これを検出する新たな実験として、対称的スピン依存電気分極によるマグノン励起を調べた。反転対称性の無いスピン間では、スピン演算子の積(スピンによる四極子)が電場と同じ対称性に分類され、スピン四極子を通じて光の電場成分と磁性が結合する。そのため、光の電場成分で励起されるエレクトロマグノン励起が可能となる。この励起プロセスはヒッグスモードだけを選択的に励起するため、エレクトロマグノン励起はヒッグスモードを観測するための良いプローブであること示した(論文[13,16])。今後の実験による研究成果が期待される。

(5) ヒッグスモードを有する磁性体の電気

磁気効果

容易面型の異方性が強く、ヒッグスモードが確認されている $\text{Ba}_2\text{CoG}_2\text{eO}_7$ では、電気磁気効果も観測されている。東大物性研の実験グループと共同で、電場による磁気モーメントの制御を実現した(論文[8])。また、ヒッグスモードが明瞭に観測されている TlCuCl_3 においても、電気磁気効果が期待される。東北大金研の実験グループと共同で、磁場誘起秩序相において観測された電気分極が、スピンドイマーに由来していることを確認した(論文[7])。

これらの研究を契機に、物質の対称性に基づいて、磁性で誘起される電気双極子の一般理論を提出した。この研究は様々な物質の磁性誘起電気双極子に適用可能であり、今後の応用が期待される(論文[5])。

また、ナノ領域で電気磁気効果が現れるモデルとして、近藤効果を利用した量子ドットの研究も行った(論文[4,10,12,15])。

以上のように、秩序変数の揺らぎで形成される励起粒子としてのヒッグスモードは、素粒子分野だけに限らず、様々な物質にも存在し、その性質を解明することで、物理の普遍性を明らかにする研究を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計17件)(全て査読あり)

[1] Tao Hong, M. Matsumoto, Y. Qiu, W. Chen, T. R. Gentile, S. Watson, F. F. Awwadi, M. M. Turnbull, S. E. Dissanayake, H. Agrawal, R. Toft-Petersen, B. Klemke, K. Coester, K. P. Schmidt, and D. A. Tennant, “Higgs amplitude mode in a two-dimensional quantum antiferromagnet near the quantum critical point” to be published in Nat. Phys. (2017) (掲載決定)

[2] S. Kimura, K. Kakihata, Y. Sawada, K. Watanabe, M. Matsumoto, M. Hagiwara, and H. Tanaka, “Magnetoelectric effect in the quantum spin gap system TlCuCl_3 ” Phys. Rev. B **95**, 184420 (2017) [7 pages]. DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.184420

[3] Tao Hong, Y. Qiu, M. Matsumoto, D. A. Tennant, K. Coester, K. P. Schmidt, F. F. Awwadi, M. M. Turnbull, H. Agrawal, and A. L. Chernyshev, “Field induced spontaneous quasiparticle decay and renormalization of quasiparticle dispersion in a quantum antiferromagnet” Nat. Commun. **8**, 15148 (2017) [8 pages]. DOI:10.1038/ncomms15148

[4] M. Hase, Y. Ebukuro, H. Kuroe, M.

Matsumoto, A. Matsuo, K. Kindo, J. R. Hester, T. J. Sato, and H. Yamazaki, “Magnetism of the antiferromagnetic spin-3/2 dimer compound CrVMoO_7 having an antiferromagnetically ordered state”
Phys. Rev. B **95**, 144429 (2017) [7 pages].
DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.144429

[5] M. Koga, M. Matsumoto, and H. Kusunose, “Antisymmetric Spin-Orbit Coupling Effect on Kondo-Induced Electric Polarization in a Triangular Triple Quantum Dot”
J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 054703 (2017) [10 pages].
DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.054703

[6] M. Matsumoto, K. Chimata, and M. Koga, “Symmetry Analysis of Spin-Dependent Electric Dipole and Its Application to Magnetoelectric Effects”
J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 034704 (2017) [25 pages].
DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.034704

[7] M. Hase, M. Matsumoto, A. Matsuo, and K. Kindo, “Magnetism of the antiferromagnetic spin-1/2 tetramer compound CuInVO_5 ”
Phys. Rev. B **94**, 174421 (2016) [7 pages].
DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.174421

[8] S. Kimura, K. Kakihata, Y. Sawada, K. Watanabe, M. Matsumoto, M. Hagiwara, and H. Tanaka, “Ferroelectricity by Bose-Einstein condensation in a quantum magnet”
Nat. Commun. **7**, 12822 (2016) [5 pages].
DOI:10.1038/ncomms12822

[9] M. Soda, S. Hayashida, B. Roessli, M. Mansson, J. S. White, M. Matsumoto, R. Shiina, and T. Masuda, “Continuous control of local magnetic moment by applied electric field in multiferroics $\text{Ba}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$ ”
Phys. Rev. B **94**, 094418 (2016) [7 pages].
DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.094418

[10] R. Sakaguchi and M. Matsumoto, “Edge Magnon Excitation in Spin Dimer Systems”
J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 104707 (2016) [15 pages].
DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.104707

[11] M. Koga, M. Matsumoto, and H. Kusunose, “SU(2)-SU(4) Kondo Crossover and Emergent Electric Polarization in a Triangular Triple Quantum Dot”
J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 063702 (2016) [5 pages].
DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.063702

[12] M. Hase, K. Nakajima, S. Ohira-Kawamura, Y. Kawakita, T. Kikuchi, and M. Matsumoto, “Magnetic excitations in the spin-1/2 tetramer substance $\text{Cu}_2^{114}\text{Cd}^{111}\text{B}_2\text{O}_6$ obtained by inelastic neutron scattering experiments”

Phys. Rev. B **92**, 184412 (2015) [9 pages].
DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.184412

[13] M. Koga, M. Matsumoto, and H. Kusunose, “Kondo-induced electric polarization modulated by magnetic flux through a triangular triple quantum dot”
J. Phys. Conf. Ser. **592**, 012142 (2015) [6 pages].

[14] M. Matsumoto, “Electromagnon excitation and longitudinal mode studied on the basis of symmetric spin-dependent electric polarization”
J. Phys. Conf. Ser. **592**, 012123 (2015) [6 pages].

[15] M. Matsumoto, “Theoretical Study of Magnetic Excitation in Interacting Inequivalent Spin Dimer System NH_4CuCl_3 ”
J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 034701 (2015) [16 pages].
DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.034701

[16] M. Koga, M. Matsumoto, and H. Kusunose, “Magnetic Flux Effect on a Kondo-Induced Electric Polarization in a Triangular Triple Quantum Dot”
J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 084707 (2014) [5 pages].
DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.084707

[17] M. Matsumoto, “Electromagnon as a Probe of Higgs (Longitudinal) Mode in Collinear and Noncollinear Magnetically Ordered States”
J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 084704 (2014) [10 pages].
DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.084704

〔学会発表〕(計 14 件)

[1] 街健祐, 松本正茂, 古賀幹人 「対称性による磁性誘起電気双極子の分類と電気磁気効果への応用」
日本物理学会 (大阪大学(大阪府・豊中市), 2017年3月20日)

[2] 古賀幹人, 松本正茂, 楠瀬博明 「近藤誘起電気分極における反対称スピン軌道相互作用の効果」
日本物理学会 (大阪大(大阪府・豊中市)学, 2017年3月19日)

[3] 木村尚次郎, 渡辺和雄, 赤木暢, 萩原政幸, 松本正茂, 田中秀数 「量子スピギャップ系 KCuCl_3 の電場励起 ESR」
日本物理学会 (大阪大学(大阪府・豊中市), 2017年3月18日)

[4] Tao Hong, M. Matsumoto, 他 13 名 “Direct observation of the Higgs amplitude mode in a two-dimensional quantum antiferromagnet near the quantum critical point”
アメリカ物理学会 March Meeting
(New Orleans, USA, 2017年3月15日)

[5] 長谷正司, 松本正茂, 松尾晶, 金道浩一

「スピン 1/2 テトラマー物質 CuInVO₅ の磁性」

日本物理学会（金沢大学（石川県・金沢市），2016年9月13日）

[6] 阪口諒, 松本正茂 「スピндаイマー系における磁気励起の境界効果」

日本物理学会（東北学院大学（宮城県・仙台市），2016年3月19日）

[7] 浅野貴行, 市村収太, 稲垣祐次, 河江達也, 松尾晶, 金道浩一, 松本正茂, 菊池彦光 「ダイヤモンド鎖 Cu₃(CrO₄)₂(OH)₂(C₅H₅N)₂ の強磁場磁化過程」

日本物理学会（関西大学（大阪府・吹田市），2015年9月16日）

[8] 松本正茂 「非等価スピндаイマー系 NH₄CuCl₃ における磁気励起の理論」

日本物理学会（早稲田大学（東京都・新宿区），2015年3月22日）

[9] 古賀幹人, 松本正茂, 楠瀬博明 「三角形三重量子ドットループ内磁束による近藤誘起電気分極の制御」

日本物理学会（早稲田大学（東京都・新宿区），2015年3月22日）

[10] 浅野貴行, 松浦圭介, 松尾晶, 金道浩一, 松本正茂 「三量体 Cs₂Cu₃P₄O₁₄ の磁化過程におけるフラストレーション効果」

日本物理学会（早稲田大学（東京都・新宿区），2015年3月21日）

[11] M. Koga, M. Matsumoto, H. Kusunose, "Kondo and magnetic flux controlled electric dipole in a triangular triple quantum dot" International Conference on Strongly Correlated Electron Systems（Grenoble, France, 2014年7月9日）

[12] M. Soda, M. Matsumoto, M. Mansson, S. Ohira-Kawamura, K. Nakajima, R. Shiina, Takatsugu Masuda, "Existence of Spin-Nematic Interaction in the Multiferroic Compound Ba₂CoGe₂O₇" International Conference on Strongly Correlated Electron Systems（Grenoble, France, 2014年7月7日）

[13] M. Matsumoto, "Electromagnon excitation and longitudinal mode Studied on the basis of symmetric spin-dependent electric polarization" International Conference on Strongly Correlated Electron Systems（Grenoble, France, 2014年7月7日）

[14] Masashige Matsumoto, "Higgs mode in quantum spin systems"

京都大学基礎物理学研究所 研究会

"Higgs Modes in Condensed Matter and

Quantum Gases"（京都大学（京都府・京都市），2014年6月23日）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 正茂（MATSUMOTO, Masashige）

静岡大学・理学部・教授

研究者番号：20281058

(2) 研究分担者

古賀 幹人（KOGA, Mikito）

静岡大学・教育学部・教授

研究者番号：40324321

(3) 連携研究者

長谷 正司（HASE, Masashi）

物材機構・中性子散乱グループリーダー

研究者番号：40281654

黒江 晴彦（KUROE, Haruhiko）

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：40296885

増田 隆嗣（MASUDA, Takatsugu）

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号：90313014