



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Theory on inelastic photon and neutron scattering in two-dimensional quasiperiodic Heisenberg antiferromagnets [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	井上, 天
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第15271号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89402
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Takashi_Inoue_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（理 学） 氏 名 井上 天

学 位 論 文 題 名

Theory on inelastic photon and neutron scattering in
two-dimensional quasiperiodic Heisenberg antiferromagnets
(2次元準周期 Heisenberg 反強磁性体における
光子及び中性子の非弾性散乱理論)

本学位論文は2次元準周期格子上に設定した Heisenberg 反強磁性体における磁気 Raman 散乱の数理的研究である。並進対称性を伴わない長距離秩序と従来の結晶学的には禁止されている回転対称性を併せ持つ構造として定義される準結晶では、周期系ともアモルファスとも異なる新奇な物理現象が期待される。準結晶を舞台とする研究は多岐に渡るが、準周期磁性体は特に興味深い研究対象であり、理論的側面からは典型的な2次元準結晶である Penrose 格子及び Ammann-Beenker 格子上の反強磁性 Heisenberg 模型が注目される。格子の対称性を強く反映する磁気 Raman 散乱は準周期磁性体の磁気励起を調べる上で有力なプローブであると考えられる。

本学位論文は5つの章から構成される。第1章では序論として先に述べた内容について記述した。代表的な準結晶である2次元 Penrose 格子及び Ammann-Beenker 格子を具体的に作成する方法として、高次元周期格子の射影により作成する切断射影法と、自己相似変換を用いる方法の二通りについて説明した。また、Penrose 格子及び Ammann-Beenker 格子の幾何学的な特性についての基礎的な解説を行った。

第2章では磁気 Raman 散乱を記述する有効演算子を導出した。強相関極限にある遍歴 Hubbard 模型において電子と光子との相互作用を考え、摂動展開を行う。2次摂動からはペア交換相互作用で表される所謂 Loudon-Fleury 磁気 Raman 演算子が導出される。一方、4次摂動からはスカラー・カイラリティ項やリング交換項といった、新たな励起が可能となることを示した。

第3章では準周期格子上の反強磁性 Heisenberg 模型に対するスピン波理論解析を記述した。Holstein-Primakoff 変換を用いてスピン演算子をボソン化し、さらに並進対称性を持たない系に対応する実空間表示の Bogoliubov 変換を与え、スピン波ハミルトニアンを対角化を定式化した。また、磁気 Raman 演算子に対しても同様に Holstein-Primakoff 変換及び Bogoliubov 変換を行い、スピン波描像においては磁気 Raman 散乱が2個ないし4個のマグノンにより媒介されることを示した。

第4章では磁気 Raman 散乱強度の計算を説明した。初めにスピン波理論及び Lanczos 厳密対角化法により Raman 散乱強度を計算する式を示した。次に格子の点群対称性に基づき磁気 Raman 演算子を既約分解し、5回対称 Penrose 格子及び8回対称 Ammann-Beenker 格子における磁気 Raman スペクトルの偏光依存性を明らかにした。群論に基づく考察を行い、Loudon-Fleury 2次摂動の範囲内では、 E_2 対称性が唯一の Raman 活性モードとなることから散乱強度が直線偏光に対し偏光依存性を持たないことを示した。さらにこれは全ての2次元準周期格子に対し一般化されることも示した。4次摂動まで考慮すると E_2 対称性に加えて A_1 及び A_2 対称性も Raman 活性となり、強い偏光依存性が現れる。特に A_2 対称モードスペクトルは動的スピン・カイラリティ揺らぎを検出するため、実験的にも興味深いと思われる。直線偏光に加えて円偏光も考慮することで3つの各 Raman 活性既約表現モードスペクトルを分離抽出できることを示した。また、磁気 Raman 散乱にマグノン-マグノン相互作用の効果を取り入れた。本学位論文では二通りの手法、具体的にはマグノン Green 関数を用いた摂動繰り込み法と、配位間相互作用(CI)による変分法を用いてマグノン-マグノン相互作用を取り入れた。

初めに Green 関数による摂動繰り込みについて記述した。2 マグノン媒介 Raman 散乱は 2 マグノン Green 関数、4 マグノン媒介 Raman 散乱は 4 マグノン Green 関数によりそれぞれ記述される。2 マグノン Green 関数は広く知られているように、はしご近似 Bethe-Salpeter 方程式を解くことで求解する。一方で 4 マグノン Green 関数を直接求解することは困難を極め、少数マグノン Green 関数への近似が必要となる。具体的には 4 マグノン Green 関数を 2 マグノン Green 関数二つの積として扱う近似と、3 マグノン Green 関数及び 1 マグノン Green 関数の積として扱う近似の二つである。2 マグノン Green 関数への分解による求解は、2 マグノン散乱を計算する際に現れるはしご近似 Bethe-Salpeter 方程式とその類似方程式を解くことで達成される。一方 3 マグノン Green 関数は 3 本はしご Bethe-Salpeter-like 方程式を定式化し、それを解いて求めた。次に CI 法により変分的にマグノン-マグノン相互作用を取り入れる方法を解説した。基底状態であるマグノン真空に、2 マグノン励起状態と 4 マグノン励起状態を加えて完全系を構成し、それにより行列表示したハミルトニアンを対角化することで CI 法により補正された固有状態を得る。そうして求めた固有状態によりマグノン-マグノン相互作用が取り入れられた磁気 Raman スペクトルを計算した。最後に各手法による計算結果を評価するために、少数クラスタ格子における Lanczos 厳密対角化計算と、Green 関数摂動法、CI 変分法の各スペクトルを比較検討した。その結果、Green 関数摂動法による 4 マグノン散乱の非直接的な取り扱いでは多重マグノン散乱の寄与を過小評価する一方、CI 変分法ではこれを定性的、半定量的に再現することを示した。これにより多重マグノン散乱を低次散乱項に分解せずに扱う CI 法の方法論的優位性を示した。

第 5 章では本学位論文の概括と、マグノン CI 変分波動関数による手法の展望について記述した。特に、CI 法は 6 マグノン以上の高次マグノン散乱に対しても系統的な拡張が可能である。また、準周期反強磁性体における動的スピン構造因子に対するスピン波理論解析の適用についても言及する。