

一次元量子 sine-Gordon スピン系 KCuGaF_6 の素励起Elementary excitations in One-Dimensional Quantum Sine-Gordon Spin System KCuGaF_6 梅垣 いづみ¹⁾ 小野 俊雄¹⁾ 田中 秀数¹⁾ 脇本 秀一²⁾ 金子 耕士²⁾
山内 宏樹²⁾ 目時 直人²⁾ 加倉井 和久²⁾Izumi UMEGAKI Toshio ONO Hidekazu TANAKA Shuichi WAKIMOTO Koji KANEKO Hiroki YAMAUCHI
Naoto METOKI Kazuhisa KAKURAI¹⁾東工大 ²⁾原子力機構

中性子非弾性散乱実験により一次元量子スピン系 KCuGaF_6 の磁場中励起構造を調べた。その結果、量子 sine-Gordon モデルの素励起であるソリトン、反ソリトン、及びその束縛状態であるブリーザーの励起に伴う散乱が観測された。

キーワード：量子スピン系，一次元鎖，量子sine-Gordonモデル， KCuGaF_6 ，中性子非弾性散乱

1. 目的

$S=1/2$ の一次元ハイゼンベルグ反強磁性体の磁気励起はよく知られている一方で、一様な外部磁場の他に交替磁場が誘起される系の磁気励起については多くの関心が持たれ、研究が盛んに行われている。交替磁場の起源は、 g -テンソルの主軸が一次元鎖方向から傾いた成分の交替と、Dzyaloshinsky-Moriya (DM) 相互作用の \mathbf{D} ベクトルの交替が考えられている。場の理論研究からこのような系は量子 sine-Gordon (SG) モデルで記述できることが示されている [1]。量子 SG モデルの励起にはソリトン、反ソリトン、それらの結合状態であるブリーザーがある。ブリーザーは階層構造を持ち、次数があがるほど励起エネルギーが大きい。これらの素励起は従来の磁性体におけるスピン波励起とは全く異なる新奇な素励起である。

私たちはこれまでこの磁場中素励起に関して、ESR による波数 $Q=0$ における観測から、一次元量子スピン鎖 KCuGaF_6 の磁気励起が量子 SG モデルで記述されることを示してきた [2,3]。しかしながら磁場中素励起の構造の全容を解明するには、分散関係を得る必要がある。本研究の目的は、 KCuGaF_6 の磁場中素励起を高分解能で調べ、波数 $Q=\pi$ の周りでの素励起の構造を明らかにすることである。

2. 方法

一次元反強磁性体 KCuGaF_6 の結晶は $15\text{mm}\times 15\text{mm}\times 10\text{mm}$ の良質な単結晶が得られたので、これを用いて、三軸分光器 (TAS1, LTAS) で分散関係を調べた。 KCuGaF_6 の分散関係はこれまでに全く調べられていないので、まずゼロ磁場の分散関係を調べた。次に磁場中の分散関係を調べ、磁場によって誘起される素励起を調べた。

TAS1 では高いエネルギーまでの測定が可能であるのでゼロ磁場中の分散関係全体を把握した。LTAS ではマグネットを用い、素励起のエネルギーと同程度のエネルギー領域をゾーンセンター周辺について詳細に調べた。測定は 4 K 冷凍機を用いて低温で行った。

量子 SG モデルは数学的な研究が多くなされており、解析解が得られる。これまでに ESR [2,3] と比熱測定 [4] から、 KCuGaF_6 の磁気励起が量子 SG モデルで記述できることがわかっており、必要なパラメータは得られている。したがって中性子非弾性散乱実験の結果は、それらの理論計算と比較し定量的な議論をすることができた。

3. 研究成果

ゼロ磁場においては、des Cloizeaux Pearson (dCP) モードとして知られる [4], 一次元ハイゼンベルグ反強磁性体 (AFHC) の最も低いエネルギー励起を反映した励起が観測された。ESR や比熱, 帯磁率測定から得られている交換相互作用 $J/k_B=103$ K [2,3] を用いた, AFHC の低エネルギー励起の理論計算と比較すると, dCP モードを再現していることがわかる。低エネルギーでの測定ではゾーンセンターの2つの dCP モードに囲まれた領域に2-スピノンの連続体励起による励起と考えられる散乱強度の増加が観測された。しかしさらに高いエネルギーの領域では, バックグラウンドとの有為差は認められず, 連続体励起の上限は観測できなかった。

磁場中の測定では, 量子 SG モデルで予想されるソリトンと反ソリトンの励起に対応する散乱を観測することができた。 $H \perp (110)$ ではギャップがある程度大きいために, 磁場を増加させると励起ギャップのエネルギーが増加する様子も観測された。 $H // a$ では測定時, 4K 冷凍機で温度が約 5.3K (~ 0.46 meV) までしか冷えなかった為, ピークがぼやけて, 定量的な議論までは至らなかったが, 定性的には理論で予想される素励起が観測された。また量子 SG モデルの枠内には存在しない新しいモードも観測された。

4. 結論・考察

ゼロ磁場での KCuGaF_6 の分散関係に関しては, 理論的に求められている AFHC の低エネルギー励起である dCP モードを反映した励起を観測することができた。このことは ESR, 比熱測定と磁気測定 [2,3] と同様, KCuGaF_6 の一次元性の良さと交換相互作用の大きさ $J/k_B=103$ K が適当であることを示している。また dCP モードより高エネルギーで観測された散乱強度増加は, 2-スピノン連続体励起によるものと考えられる。しかしながらそれ以上のエネルギー範囲ではバックグラウンドとの有為差は認められず, 連続体励起の上限は散乱強度が弱く観測されなかった。

磁場を加えると, ゾーンセンターにエネルギーギャップが生じたことがわかった。ゾーンセンターにほど近い不整合波数にはソリトン, 反ソリトンの励起に対応する散乱が観測された。ESR で観測された励起モードのエネルギーから得られたソリトン質量の計算値を用いると, ソリトンと反ソリトンのエネルギースペクトルとしてほぼ説明することができた。ゾーンセンターで最も強度が強い散乱は, エネルギー, 波数ともに広範囲にわたって広がっている。これは理論計算と比較すると, 2次, 3次のブリーザーとソリトン共鳴のエネルギーに対応しており, これらの励起が重なっているのではないかと考えられる。測定温度の 5.3K (~ 0.46 meV) がブリーザー励起と同程度のエネルギーである為, 励起が明瞭には観測できなかったと考えられる。また量子 SG モデルで予想されているモード以外に励起に対応する散乱が観測された。ESR では量子 SG モデルの枠内では説明できないモードが観測されており [3], また比熱測定では量子 SG モデル以外の熱的な寄与があることがわかっている [6]。

今回の中性子非弾性散乱実験で観測された KCuGaF_6 の低エネルギー励起は, 量子 SG モデルから予想される素励起に伴う散乱として定性的に理解できることがわかった。しかしながらさらに定量的な議論をするには, 励起エネルギーに対して十分低温での測定が不可欠である。

5. 引用(参照)文献等

- [1] M. Oshikawa and I. Affleck: Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 2883.
- [2] R. Morisaki, T. Ono, H. Tanaka, and H. Nojiri.: J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 063796.
- [3] I. Umegaki, H. Tanaka, T. Ono, H. Uekusa, and H. Nojiri.: Phys. Rev. B **79** (2009) 184401.
- [4] I. Umegaki, T. Ono, H. Tanaka, M. Oshikawa, and H. Nojiri: Physica E **43** (2011) 741.
- [5] J. des Cloizeaux and J. J. Pearson: Phys. Rev. **128** (1962) 2131.
- [6] I. Umegaki, T. Ono, H. Tanaka, M. Oshikawa, and K. Sakai.: unpublished