

スピ液晶が示す異方的なスピダイナミクス

磁性体の新奇相として、スピンの向きを表す矢印から矢尻を除いた棒状自由度が秩序化する「スピ液晶」が注目を集めている。本研究では、磁場中フラストレート強磁性鎖モデルのスピ励起スペクトルを数値計算により調べて、スピ液晶の特徴がスピ励起スペクトルの磁場平行成分と磁場垂直成分の顕著な異方性に現れることを明らかにした。本研究の結果は、スピ液晶の実在を検証する上で大きな役割を果たすと期待される。

物質の磁性は、物質中の電子が微小磁石としての性質である「スピン」を持つことに由来している。例えば、日常的に馴染み深い磁石では、多数の微小磁石「スピン」の向きが同じ方向に揃うことで、物質全体が磁石として振る舞う[図 1(a)]。このような磁性が生じるメカニズムは、相互作用し合うスピン集団の協力現象として一定の理解が得られている。通常、スピン間には、お互いの向きを平行（強磁性）あるいは反平行（反強磁性）にする交換相互作用と呼ばれる量子力学的な力が働いており、系全体のスピン秩序は、全交換相互作用エネルギーが最低となるスピン配置として強磁性や反強磁性に定まる。ところが、スピン間相互作用が競合している場合、全ての交換相互作用を満足するようにスピンを配置できず、磁気的なフラストレーションが生じる[図 1(b)]。フラストレーション系では、スピン秩序が破壊され、全く新しい相として、スピンの向きが定まらずに液体のように揺らいだ「スピ液体」が実現することが予想されており、その特異なスピン物性に興味を持たれている。フラストレーション系のスピ液体の挙動解明は、磁性分野の中心課題のひとつとして活発な研究が繰り広げられている。

本論文で議論されている「スピ液晶」は、スピン秩序が無いという意味でスピ液体の一種であるが、隠れた秩序として、スピンの向きを表す矢印から矢尻を取り除いた棒状の自由度の配向が揃った風変りな状態である[図 1(c)]。スピン空間の回転対称性が一部破れた状態で、スピンの秩序化した固体と秩序の無い液体の中間的な状態である。棒状分子が配向秩序を持つネマティック液晶のスピン版であることから、スピ液晶、スピネマティックなどと呼ばれる。理論的には、スピンを双極子と見なして、スピンの二次の積で表される四極子の秩序として記述される。近年、スピ液晶が実現する系として、最近接スピン間の強磁性交換相互作用と次近接スピン間の反強磁性交換相互作用とが競合するフラストレート強磁性鎖に磁場を印加したモデルが提案され、高い注目を集めている。現実の物質では LiCuVO_4 や $\text{NaCuMoO}_4(\text{OH})$ など一連の擬一次元銅酸化物が典型物質として知られ、スピ液晶を探索する実験が行われている。しかし、スピ液晶を特徴付ける四極子の相関は四体スピン相関で表され、そのような多体スピン相関を実験で直接検出することは困難であるため、スピ液晶の実在を検証する有効な手段は確立していない。

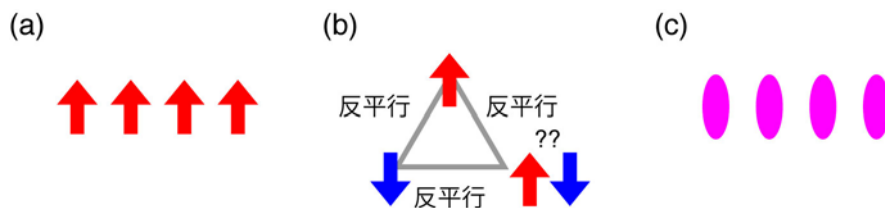


図 1: (a) スピン秩序. (b) スピンのフラストレーション. (c) スピ液晶秩序.

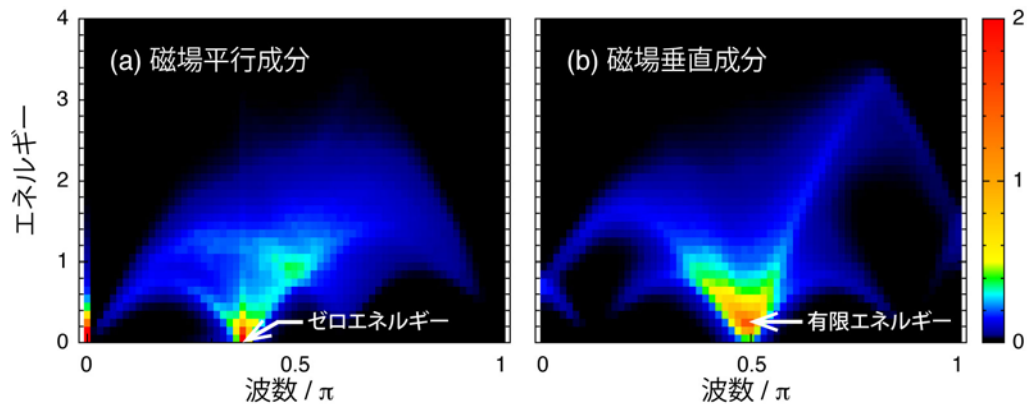


図 2: スピン液晶でのスピン励起スペクトルの磁場平行成分[(a)]と磁場垂直成分[(b)]. スピン液晶相中で低磁場領域での計算結果. スピン液晶相は飽和磁場まで広がっている.

最近、日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センターの研究グループは、スピン液晶の特性をスピンドYNAMIXの観点から解明することを目的として、磁場中フラストレート強磁性鎖モデルのスピン励起スペクトルを数値的に調べた。その結果、スピン励起スペクトルの磁場平行成分と磁場垂直成分とで際立った違いが生じることを明らかにした[図 2]。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2015 年 8 月号に掲載された。

図 2 は、スピン液晶でのスピン励起スペクトルの強度をカラープロットで示している。強度ピークのエネルギー位置に着目すると、磁場平行成分はゼロエネルギーピークを持つものに対して、磁場垂直成分は有限エネルギーにピークを持つことが分かる。特に、磁場垂直成分では、スピン液晶では 2 マグノン束縛状態が形成されることを反映して、束縛エネルギーに相当する有限のギャップが開く。さらに、このギャップの波数位置の磁場依存性を詳細に調べた結果、低磁場では図 2(b) のように $\pi/2$ 付近にギャップが生じるが、磁場の増加とともに波数位置がシフトしていき、飽和磁場では古典的な螺旋スピン構造のピッチアングルと一致するという特徴が見出された。この振る舞いは非弾性中性子散乱実験により検証可能であり、スピン液晶を探索するための道標として大きな役割を果たすと期待される。

従来の有効理論は、適用範囲が低エネルギーかつ長波長極限に限られていたが、本研究では、動的密度行列繰り込み群法を駆使した大規模数値シミュレーションを遂行することでそのような制限を克服し、これまでアクセス不可能だった幅広いエネルギー・波数領域のフルスペクトルの様相が初めて明らかとなった。さらに今後、スピン液晶での 2 マグノン束縛状態を反映したスピンドYNAMIXとスピン輸送特性の関連、およびその制御について知見が得られれば、新規磁性材料の開発に繋がる可能性も考えられる。

原論文

[Magnetic Excitations of Spin Nematic State in Frustrated Ferromagnetic Chain](#)

[Hiroaki Onishi, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 083702 \(2015\).](#)

問合せ先：大西 弘明（日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター）