

論文内容の要旨

論文題目 Slow Dynamics in Frustrated Magnetic Systems
(フラストレートした磁性体における遅い緩和現象の研究)

氏名 田中 宗

フラストレート系においては非常に多くの縮退状態があるため、温度や磁場などの外部パラメータに大きく依存した興味深い現象が発現される。その中で私は以下の4点に着目した。

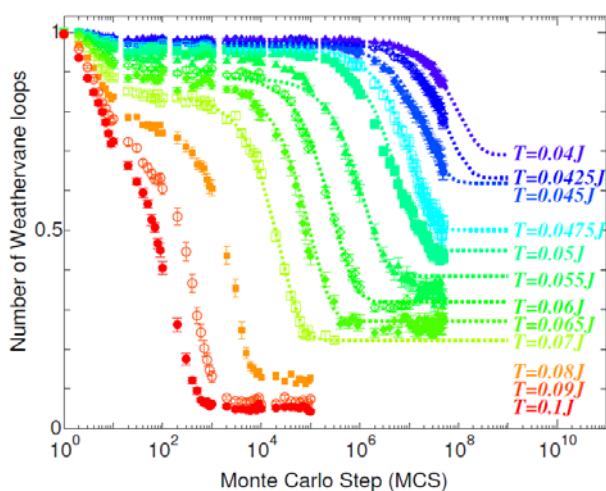
- ・ランダムネスの無いカゴメ格子反強磁性体の異常強磁性相における遅い緩和現象
- ・エントロピー起源による遅い緩和現象
- ・フラストレーションが内在する系における物理量の非単調な緩和現象
- ・非整合らせんスピン構造上における電子の局在・非局在問題

①ランダムネスの無いカゴメ格子反強磁性体の異常強磁性相における遅い緩和現象

遅い緩和現象は、スピングラスのような内部エネルギーが複雑な構造を持つ場合に生じることはよく知られている。ところが近年のカゴメ格子反磁性体の実験により、ランダムネスが無くても遅い緩和現象が生じることが明らかとなった。私はその微視的起源を明らかにするために、容易軸異方性のある連続スピン系から構成されるカゴメ格子反強磁性体の緩和過程を、モンテカルロシミュレーションを用いて解析した。

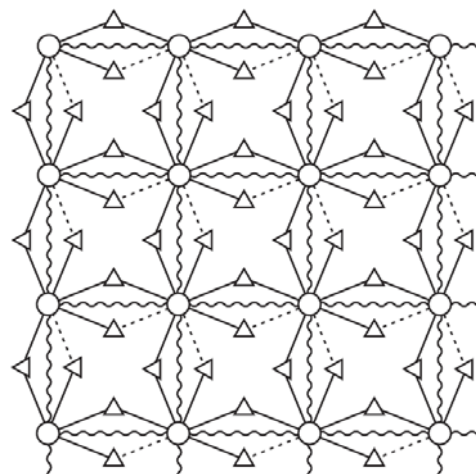
この系は非常に強くフラストレートしているため、 $q=0$ 構造、 $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 構造をはじめとする非常に多くの縮退状態があることが知られている。また、この系は長距離秩序が無いにもかかわらず、自発磁化を伴う相転移を示す。この相転移は2次元強磁性イジングモデルと同じユニヴァーサルティークラスに属するということが知られている。

非常に多くの縮退状態が存在するため、スピン構造は非自明である。私はスピン構造の緩和過程を定量的に取り扱うために、「風見鶏ループ」と呼ばれる概念を導入した。本研究では、風見鶏ループの本数を数え上げることによりスピン構造を定義した。その結果、磁化やエネルギーなどの熱力学量の緩和に比べて風見鶏ループの本数（スピン構造）の緩和が非常に長いことを明らかにした。また、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造を初期状態としたときに、スピン構造は2段階の緩和を示すことも明らかにした。つまり風見鶏ループの本数は、まずはじめに熱力学量が緩和するタイムスケールである状態に緩和し、続いて一定値を取り、再びある時間から緩和が始まることを発見した（下図）。特に2段階目の緩和については、アーレニウス則に従うことを明らかにした。そのエネルギースケールは相互作用の大きさ程度であることが分かった。



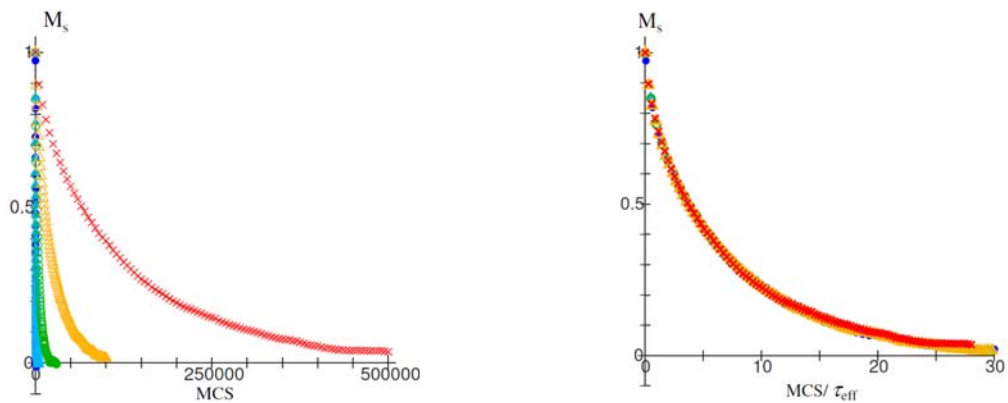
②エントロピー起源による遅い緩和現象

スピングラスのように相互作用の大きさがランダムに分布している系を巨視的に見ると、秩序化しやすい部分と非常に揺らぐ部分とに分けることができる。前者は秩序を促す相互作用に、また後者は内部自由度を多く含むモデルに置き換えることができる。そのため、この状況を最も単純にした飾りボンドモデル（右図）を用いて緩和現象を解析した。飾りボンドモデルとは、システムスピンと飾りスピンの2種類からなり、上の2種類の寄与を有効的に取り込んだモデルである。



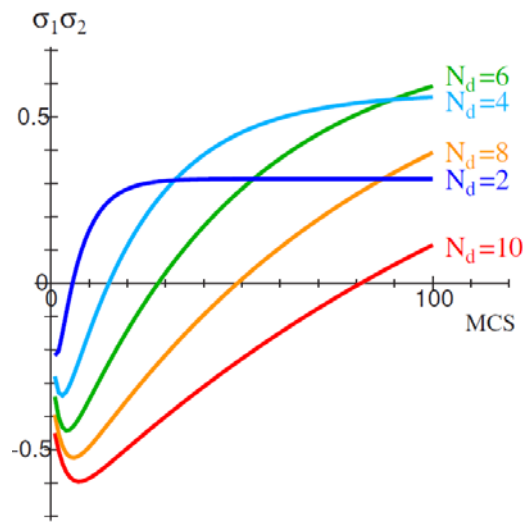
この場合、飾りスピンの数がフラストレーションの強さを表すことになり、縮退の数（エントロピー）を表すことになる。また、飾りスピンをトレースアウトした場合が有効モデルとなる。

今回我々は有効モデルが強磁性モデルとなる場合を考えた。エントロピー起源の遅い緩和現象を解析するため、初期状態を完全秩序状態とし、強磁性転移温度より高い温度でモンテカルロシミュレーションを行い、磁化の振舞を調べた。その結果、常磁性相であるにもかかわらず遅い緩和が生じることが明らかとなった。また、その緩和時間を確率過程の手法を用いて解析し、その緩和時間で完全にスケールされることを発見した（下図）。これは無秩序状態から秩序状態に遷移する際に生じる臨界緩和遅延や、エネルギー構造が複雑なために生じる遅い緩和現象とは質的に異なる種類に属する、新しいタイプの緩和遅延現象である。



③フラストレーションが内在する系における物理量の非単調な緩和現象

ある温度に十分に保った後に急冷すると、磁化などの物理量が非単調に振舞うことがスピングラスの実験及びシミュレーションによって調べられた。これは通常の場合に生じる単調関数での緩和とは大きく異なる結果である。こうした非単調緩和はランダムスピン系のみならず、2次元電子系などのランダムネスを有する系においてしばしば観測される。一方でフラストレート系において、相関関数や磁化などの物理量の平衡値が温度に対して非単調に振舞う（リエントラント）ことがよく知られている。



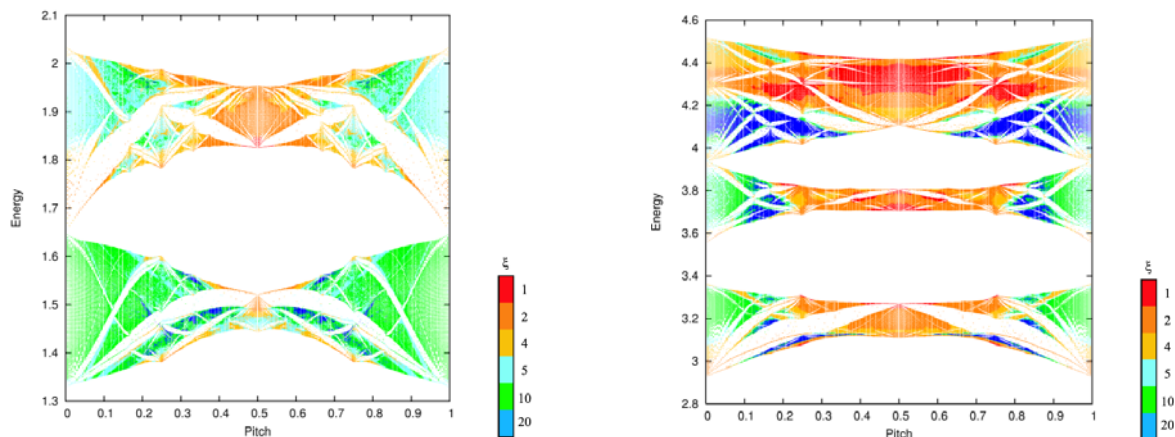
我々はリエントラント現象が非単調緩和の起源であるという予想から、リエントラントを示すフラストレート系における急冷過程を確率的時間発展の方法を用いて解析した。このモデルの場合は十分ゆっくり冷やした場合は物理量は熱平衡値を追跡するため、非単調な振舞をする。ところが我々の解析の結果、急冷過程においても非単調緩和が起こりうるということが明らかになった（右上図）。この場合の緩和過程は様々な緩和モードの足し合わせで表現することができ、それによって非単調緩和が生じていることが明らかになった。

④非整合らせんスピ構造上における電子の局在・非局在問題

ランダム系，非整合系，準結晶系などの非周期系における電子状態の局在・非局在性は，その特異な伝導性などに対する興味から古くから多くの研究がなされてきた。我々は，らせんスピ構造をもつ遷移金属酸化物系において，らせんピッチの非整合性に起因する電子状態の局在・非局在性に関して研究した。

我々は、(A)非整合らせんスピ構造による平均場，(B)スピ軌道相互作用，(C)立方対称配位子場，(D)酸素を介しての電子の飛び移りの4つの微視的效果を全て取り込んだ多軌道のモデルを用いて解析を行った。その結果スピ軌道相互作用が強い場合には、(i)軌道の種類，(ii)らせんのピッチ，(iii)スピ回転面の方向などに依存して、電子状態はらせん軸方向に局在-非局在の複雑な様相を示すことが明らかになった（下図）。

また有効的なスピ・軌道多重項ごとのモデルを導出することにより、 Γ_7 に対応する状態については、ゲージ変換によって非整合性が消去できるため、広がった波動関数となる。ところが、 Γ_8 に対応する状態については同様の操作を用いて非整合性を消去することができないため、局在した状態が生じうることを明らかにした。



図： Γ_7 （左）， Γ_8 （右）に対応するエネルギー密度。色は局在長を表し，赤が局在している状態，青が広がっている状態を表す。