



TOHOKU
UNIVERSITY

平成 28 年 10 月 3 日

報道機関 各位

東北大学多元物質科学研究所

スピン凍結状態における記憶効果とエネルギー構造 ～乱雑さに刻み込まれた「記憶」からエネルギーランドスケープを探る～

【概要】

東北大学多元物質科学研究所佐藤卓教授グループ、バージニア大学リー教授グループ、テネシー大学ツォウ助教グループらは共同でスピン凍結状態中の記憶効果を詳細に調べる事によりフラストレート磁性体^{*1}の示すスピンの凍結状態がランダム系のスピングラス^{*2}状態とは本質的に異なるエネルギー構造を持つことを明らかにしました。

ランダム相互作用を持つ磁性体において磁気モーメント（スピン）が低温でランダムに凍結する現象（スピングラス）は古くから知られていました。一方で、磁気モーメント間の相互作用がフラストレートする磁性体においても低温でスピン凍結が見られることが近年の研究によって明らかになっていました。本研究では、両者の凍結状態における記憶効果を磁気測定および数値シミュレーションにより詳細に調べる事により、両者のエネルギーランドスケープ^{*3}の複雑さに本質的な違いが存在することを明らかにしました。複雑なエネルギーランドスケープは磁性体のみならず、窓ガラスにはじまり社会現象にまで広く見られるものであり、本研究で切り拓かれた記憶効果を用いたエネルギーランドスケープ研究はこれらの対象の研究に対しても新しい手法を提供するものとして期待されます。

本研究は米国科学アカデミー紀要「Proc. Natl. Acad. Sci. USA」にて10月3日の週にオンライン公開の予定です。

問い合わせ先

（研究関連）

東北大学多元物質科学研究所
教授 佐藤卓（さとう たく）
電話：022-217-5348
E-mail：taku@tagen.tohoku.ac.jp

（報道関連）

東北大学多元物質科学研究所
総務課総務係
電話：022-217-5204
E-mail：soumu@tagen.tohoku.ac.jp

【詳細な説明】

1. 背景

我々の身の回りには互いに相互作用する非常に数多くの原子から構成されています。このような多体系においてはそのエネルギーランドスケープは時に非常に複雑な構造を持ちます。この複雑なエネルギーランドスケープは物質に限らず、脳の活動や、社会におけるネットワーク形成等、種々の多体系の理解にも用いられる極めて普遍的な概念です。

さて、複雑なエネルギーランドスケープを持つ典型的な物質の一つに磁気モーメント（スピン）が結晶中にランダムに配置したランダム磁性体があります（図1左）。ランダム磁性体においてはその相互作用のランダムさにより磁気モーメントは低温でランダムな向きを持ったまま凍結します。この状態はスピンのガラス的凍結状態ですので、スピングラス現象と呼ばれます。ランダム磁性体のエネルギーランドスケープは極めて多くの局所極小点をもつと考えられていますが、この為に温度降下に伴いランダム磁性体の状態は極小点に引っかかります。そのため温度降下時の履歴に依存する興味深い記憶効果（メモリー効果）を示す事も知られています。

他方、近年注目されている磁性体の一つにフラストレート磁性体があります（図1右）。このフラストレート磁性体では、磁気モーメント間の相互作用が打ち消し合うように働くため、それぞれの磁気モーメントが安定な方向を見つける事が出来ません。エネルギーランドスケープの言葉を用いると、最小エネルギー状態が連続的に存在します。このような磁性体に対しては温度をいくら下げても磁気モーメントは静止せず揺らぎ続けると考えられますが、予想に反してスピン凍結現象を見せるものが見いだされており、この現象がランダム磁性体におけるスピングラス現象と同じものか否かは大きな論争となっていました。

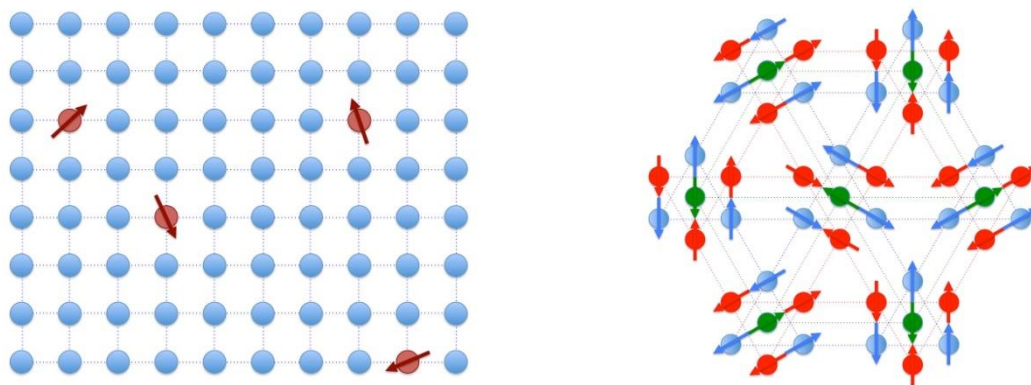


図1: (左) ランダム磁性体と (右) フラストレート磁性体の模式図。ランダム磁性体では磁気モーメントは結晶中にランダムに配置するため磁気モーメント間の相互作用もランダムになる。このためスピンのガラス凍結状態（スピングラス状態）が生じると考えられている。一方、フラストレート磁性体には本質的な乱雑さは無いが、相互作用がフラストレートするため最低エネルギー状態が一つに定まらない。右図の磁気モーメント配置は多く存在する最低エネルギー状態のうちの一つの例。

2. 研究手法と成果

今回我々はランダム系に特有な記憶（メモリー）効果に着目しました(図 2)。典型的スピニングラス現象を示すランダム磁性体においては温度降下に伴いスピン凍結温度(T_f)において磁気モーメントがランダムな向きを持ったまま凍結します。この凍結状態を保ったままさらに温度を下げ最低温度から温度を上げながら磁化を測定すると、 T_f において磁化はピークを示しこの温度でスピンの凍結が解消された事が実験的に確認できます。さて、凍結状態中で温度降下を行う際に、途中の温度 (T_w) で一定時間 (t_w) 待つと何が起きるでしょう？通常の磁性体では待ち時間は以後の測定に影響しません。典型的スピニングラス現象を示すランダム磁性体においても T_w 以下の温度での磁化は待ち時間の有無に依存しません。即ち T_w 以下の低温状態では一見全く同じ乱雑状態にあるように見えます。しかしながら温度を T_w まで上昇させると磁化が急激に減少します。しかもその減少の度合いは t_w に依存します。すなわち、一見同じスピンの乱雑な凍結状態にあるように見えながらも、その中には待ち温度や待ち時間の情報が刻み込まれているのです。このメモリー効果はスピニングラスのエネルギーランドスケープが温度降下とともに階層的に複雑化する事に起因すると考えられています。

実験では典型的スピニングラス現象を示す CuMn (Mn 2 at. %) ランダム磁性体とフラストレート磁性体である $\text{SrCr}_{9p}\text{Ga}_{12-9p}\text{O}_{19}$ (SCGO) ($p = 0.97$) および $\text{BaCr}_{9p}\text{Ga}_{12-9p}\text{O}_{19}$ (BCGO) ($p = 0.96$) のメモリー効果を詳細に測定し両者を比較しました。その結果、フラストレート磁性体のメモリー効果は CuMn に比較して極めて小さい事が明らかになりました。また、CuMn のメモリー効果は T_f の 70% 程度の温度において最大化する一方で、フラストレート物質ではメモリー効果の温度依存性はそれほど大きくない事も判明しました。数値計算を併用する事により、このような弱いメモリー効果はフラストレート物質のエネルギーランドスケープの底がおおよそ平坦であり、量子効果による僅かな凸凹が存在するというモデルで説明出来る事が示されました (図 3)。

3. 今後の展望

今回の研究はランダム磁性体とフラストレート磁性体に見られるスピン凍結現象の本質的な差異をエネルギーランドスケープの観点から示したものであり、スピン凍結現象の今後の研究に有為な知見を与えるものです。さらに、複雑なエネルギーランドスケープは物性物理学の範囲を超え多くの複雑接続性の研究に普遍的に見られるものであるため、メモリー効果からエネルギーランドスケープを探る今回の方法論はそれらの研究対象に対しても新しい手法を提供するものと期待されます。

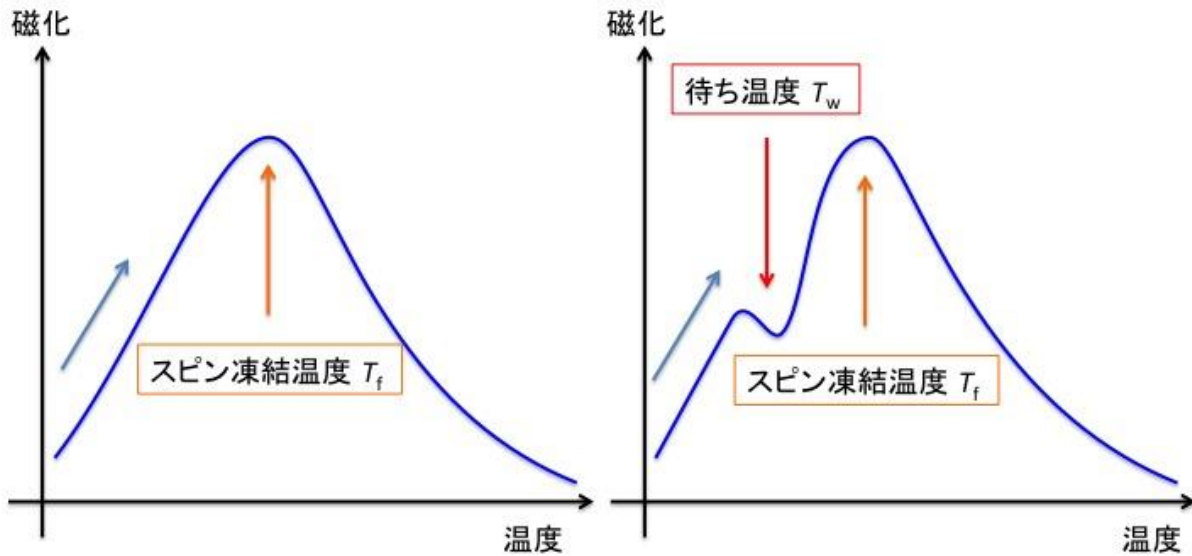


図 2： 典型的スピングラス現象を示すランダム磁性体が無磁場下で冷却した後、温度上昇と共に磁化を測定した場合の磁化の温度変化の模式図。(左) 冷却時、単調に温度降下させた場合、(右) 冷却時ある「待ち温度 T_w 」にて一旦冷却を停止し一定時間待った後冷却を再開した場合。低温での磁化は両者一致し一見同じ状態にあるように見えるが、後者では待ち温度 T_w で磁化の減少が生じる。即ち、冷却時の「待ち温度」を記憶している。この減少は待ち時間の増大に伴い増加する為、減少幅から待ち時間を知ることが出来る。即ち待ち温度だけではなく待ち時間をも記憶している。

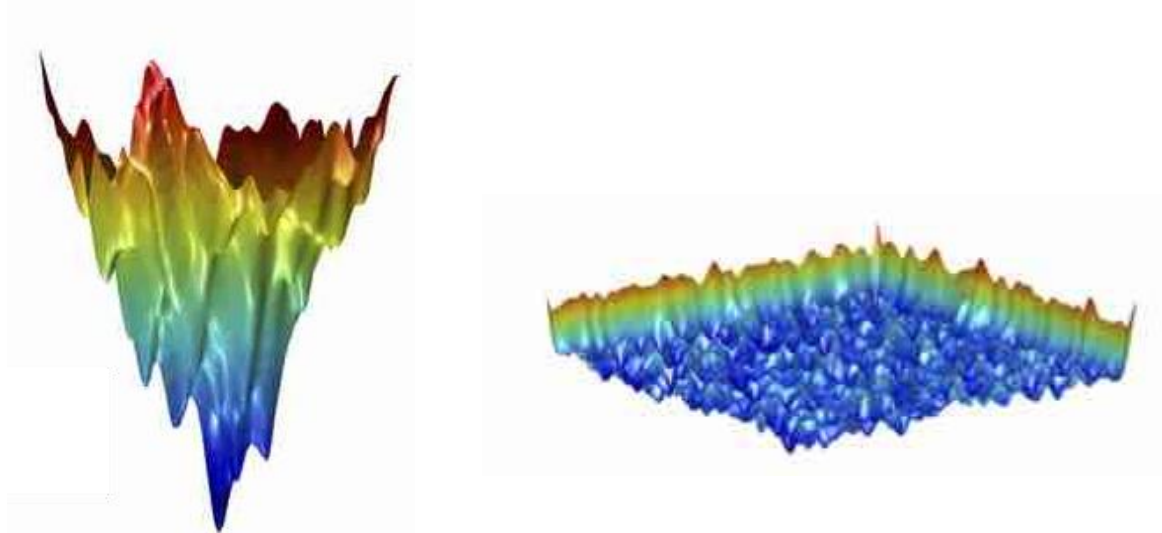


図 3： (左) 典型的なスピングラスおよび、(右) フラストレート磁性体に対するエネルギーランドスケープ。

【用語解説】

*1 フラストレート磁性体

磁性体の中でも相互作用が拮抗し最低エネルギー状態が一つに定まらない磁性体をフラストレート磁性体と呼ぶ。典型的な例は三角格子上的イジング反強磁性体である。簡単のため一つの三角形のみを取り出して考えても、すべてのスピンの反平行を向く要請を完全に満たす状態は存在せず、図4に示す6種類の最低エネルギー状態が競合する。

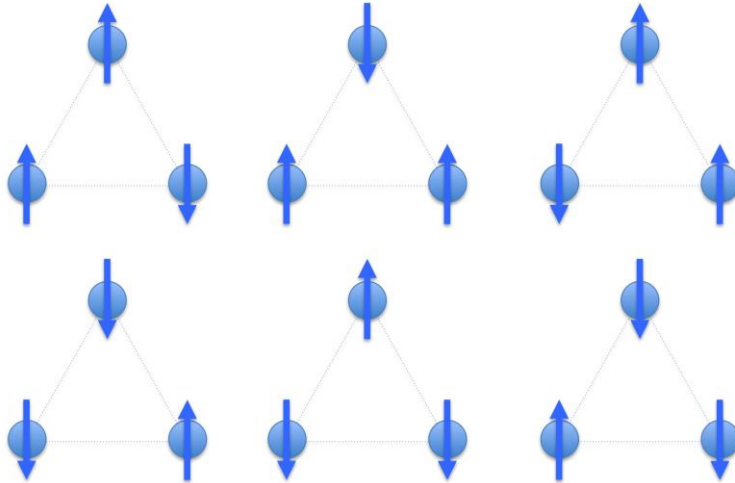


図4: 三角系上のイジングスピンに対する最低エネルギー状態。6種類の最低エネルギー状態が存在する。

*2 スピングラス

磁性体中の磁気モーメント間の相互作用の乱雑さに起因して磁気モーメントが低温でランダムな配向を持ちながら凍結する現象。液体中の原子がランダムな配置を持ちながら凍結するガラス化現象との類似からスピングラスと呼ばれる。

*3 エネルギーランドスケープ

相互作用する多体系のエネルギーを内部自由度（もしくはその適当な組み合わせ）の関数としてあらわした場合の様相。単純な磁性体（例えば強磁性体）に対してはその磁気秩序状態を中心とする単純な谷が一つ存在するが、フラストレート磁性体では複数の谷、もしくはそれらがつながった連続的最低エネルギー構造を持つことがある。

【論文情報】

A. M. Samarakoon, T. J. Sato, T. Chen, G-W. Chern, J. Yang, I. Klich, R. Sinclair, H. D. Zhou, S.-H. Lee, Aging, memory, and nonhierarchical energy landscape of spin jam. *Proceedings of the National Academy of Sciences of U. S. A.*