

磁場に対して強固なスピングラス

物質中のスピン間に働く相互作用 J が正であればスピンは同じ方向に揃い強磁性状態が実現し、負であれば互いに反平行な反強磁性状態が実現する。正負の相互作用がランダムに混在した物質、例えば、磁性原子をランダムに希釈した希薄磁性合金(Au(Fe), Ag(Mn), Cu(Mn), etc.)や混晶物質($\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{TiO}_3$)では、強いランダムネスとフラストレーションの効果により、特定の周期をもったスピン配列をとる事は出来ず、スピングラス状態は、スピンの向きはランダムであるが時間的には変化しない、(強磁性や反強磁性と同じく)ある種の秩序を持った状態になっている。このスピングラス秩序を特徴付ける重要な概念の一つに、「レプリカ対称性の破れ(Replica-Symmetry-Breaking, RSB)」がある。RSB は、スピングラスの平均場モデルの解析によって得られた概念で、RSB 状態では、物質の自由エネルギー F をスピン配列 $\{S_i\}$ の関数として見た時、図 1(a)に示すように無数の極小(熱的準安定)状態を持つ。一方、常磁性や(反)強磁性状態の様な通常のレプリカ対称(RS)な状態では、極小が一つないし二つしかない単純な構造をとる(図 1(b))。平均場モデルの下では、スピングラスのガラス様振舞は無数の準安定状態をとる RSB 状態に起因している。

スピングラス理論は、最適化問題や神経回路網など、幅広く応用されている。ここでは、スピングラスの平均場モデル同様の、自由エネルギーの多谷構造を持つモデルが重要な役割を果たしている。一方、現実のスピングラス物質への平均場モデルの適用には限界がある。平均場モデルではスピン間の相互作用はその距離に関係なく等価に働くが、現実の物質中のスピン間相互作用は距離に強く依存する。短距離相互作用モデルを基にした半現象論的な「液滴模型」で現れるスピングラス相では、スピンはランダムに凍結した状態をとる事は同じでも、その自由エネルギーは強磁性などと同様な単純な二谷構造をとっており、RSB は起こっていない。現実のスピングラス物質で RSB が起こっているか否かは、現在でも論争中の大きな問題である。RSB の有無を実験的に検証するのは非常に難しいが、その方法の一つに磁場中でのスピングラスの安定性を見る方法がある。RSB スピングラス状態は磁場に対して安定で、磁場中スピングラス相は存在する。一方、液滴模型の RS スピングラス状態は磁場に対して脆く、有限磁場中ではスピングラス相は存在出来ない。磁場中でスピングラスが安定に存在できるかという問いは、スピングラス状態の本質に関わる重要な問いかけになっている。

磁場中でスピングラス相が存在するか？一見すると簡単に実験で確認できそうなものだが、一筋縄ではいかない難しい問題である。実験的にスピングラス転移を決定する方法は、幾つかある。最も簡単で良く使われるのは、零磁場冷却磁化と磁場中冷却磁化を測定し、その両者が一致しなくなる温度をスピングラス転移温度とするものであるが、これは平衡相転移としてのスピングラス転移を決めるには余り良い方法ではない。スピングラス物質の様なランダム磁性体では、(スピングラス転移などが無くても)一般に低温で緩和時間が長くなり、零磁場冷却磁化と磁場中冷却磁化が一致しなくなることがままある。零磁場でのスピングラス転移であれば、磁化 M を磁場 H で展開したときの高次(3次)項の係数である非線形磁化率 χ_2 の発散を見ると良いが、 χ_2 の発散は磁場で抑えられてしまうため、磁場中相転移を見る方法としては使えない。普通の2次相転移であれば比熱の異常を観測すれば良いが、スピングラ

ス転移では異常が弱く、実験ではほとんど観測できない。反強磁性を見る上でこの上ない方法である中性子回折実験も、空間的な周期構造を持たないスピングラスには使えない。

最近、京都大学大学院工学研究科材料工学専攻のメンバーを中心とするグループは、希土類イオンを磁性原子としたスピングラス物質 $\text{Dy}_x\text{Y}_{1-x}\text{Ru}_2\text{Si}_2$ において、交流磁化率の周波数依存性からスピンの特性緩和時間 $\tau(T,H)$ を見積り、その温度依存性が臨界発散の式、

$$\tau(T,H) = [T/T_g(H) - 1]^{-z\nu} \quad (1)$$

に従うか否かを調べ、磁場中スピングラス転移が存在する事を実験的に示した。特性緩和時間 $\tau(T,H)$ はスピングラス転移があれば、その温度 T_g で発散する物理量であり、それは磁場中でも同じである。従って、磁場中でも $\tau(T,H)$ が式(1)に従う事を示せば、磁場中スピングラス転移の存在を示した事になる。図 1(c) の $\tau(T,H)$ の $T/T_g(H)-1$ 依存性を見ると、有限磁場中でも式(1)が成り立っている事が分かる。これは、このスピングラス物質において **RSB** が起こっている事を強く示唆する結果である。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 2010 年 12 月号に掲載された。

$\tau(T,H)$ の温度依存性による磁場中相転移の判定は、過去に短距離相互作用スピングラスのモデル物質である $\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{TiO}_3$ でも行われており、磁場中相転移は無いとの結論が得られている。今回、京都大学のグループが実験を行った $\text{Dy}_x\text{Y}_{1-x}\text{Ru}_2\text{Si}_2$ は、長距離相互作用である伝導電子を媒介とした **RKKY** 相互作用が働く系であり、長距離相互作用スピングラスのモデル物質になっている。この結果の重要な点は、現実のスピングラス物質でも **RSB** が生じている場合があり得る事を示した点にある。今後、様々なタイプのスピングラスに関する研究が進む事が期待される。

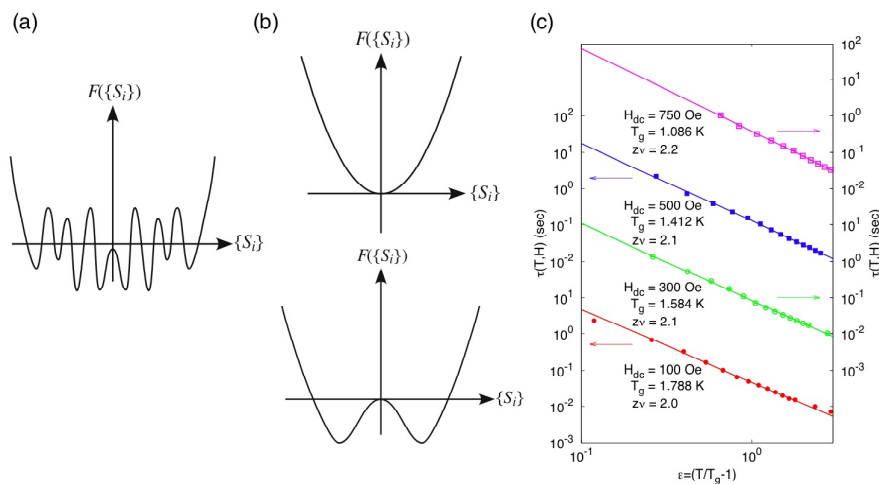


図 1. (a) RSB 状態、(b) RS 状態での自由エネルギーの構造。(c) $\text{Dy}_x\text{Y}_{1-x}\text{Ru}_2\text{Si}_2$ の特性緩和時間 $\tau(T,H)$ の温度依存性 ($\log \tau(T,H)$ vs. $\log [T/T_g(H)-1]$ プロット)。

論文掲載誌 *J. Phys. Soc. Jpn.* **79** (2010) No.12, p. 123704

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/79/123704> (11 月 25 日公開済)

< 情報提供：田畑吉計 (京都大学大学院工学研究科) >