スピングラスにおけるKohlraush則

筑波大学物理学系　福島孝治、吉野　元、根本幸児、高山　一

スピングラスにおけるスピン緩和過程はスローダイナミックスの典型である。実験的には、時間に対する対数関数型、べき関数型、あるいは、引き延ばされた指数関数型（Kohlraush則）など、種々の緩和則が種々の物質、異なる時間・温度領域で観測されており、いずれにしても低温側スピングラス相では、緩和時間がミクロスケールからマクロスケールにおよぶ範囲で分布する緩和過程が存在しているものと考えられている。我々は、このようなスローダイナミックスの理解こそがスピングラス問題の本質であると以前から考えていたが[1]、この1,2年は、最近接相互作用が$\pm J$型の2Dイジングスピングラス(ISG)と3D等方的ハイゼンベルグスピングラス(IHSG)におけるスピン緩和過程を、シミュレーションを主体とした解析で調べている。両系とも有限温度では相転移は存在しないが、対応する強磁性体はそれぞれ$T = T_c^{\rm pure} \simeq 2.27$, および,1.45（単位は$J$）で相転移を示す。$T = T_c^{\rm pure}$以下の温度での存在が示唆されている'Griffiths相'をスローダイナミックスの観点から探り、スピングラス相の緩和過程に関する糸口を見いだそうというのが本研究の目的であり、その際、スピン自由度の違い（ISGとIHSG）が緩和過程の違いとしてどのように現われるのかも興味深い。

数値解析は、通常の熱浴法のモンテカルロ・シミュレーションを採用し、おもにスピン自己相関関数

$$q(t) \equiv N^{-1} \sum_i \langle \vec{S}_i(t_0) \cdot \vec{S}_i(t_0 + t) \rangle, \tag{1}$$

を調べた（$\vec{S}_i \to \pm 1$ (ISG)）。現在までに得られている結果を以下に述べる。

2DISG:　最大で400^2までのサイズの系における、$t \leq 10^3$(単位はスピンあたりのMCステップ）の$q(t)$を解析した。この時間内に、高温側$5.0 \geq T \geq 1.6$では$q(t)$値は10^{-3}以下まで減衰する。低温側$T = 1.2, 1.0, 0.8$では$q(t)$はそれぞれ約0.03, 0.2, 0.5までしか減衰しないが、得られた$q(t)$を$\ln t$でプロットしたとき、各Tのデータ点を横軸方向に$\ln\tau(T)$だけ'シフト'し、横軸スケールを$A(T)$倍だけ'ストレッチ'すれば、全てのTのデータ点が単一曲線上に載ること、即ち、$q(t)$は

$$q(t) = Q((\frac{t}{\tau})^A), \tag{2}$$

のようにスケールされることを見いだした。スケーリング関数には、それ自体を'シフト'し、'ストレッチ'できるという任意性があるが、その範囲で $Q(z) \simeq \exp(-z)$ がよい近似で成立しており、$q(t)$ は Kohlrausch 則に従うと結論される。そのときの指数 $A(T)$ は $T = T_c^{\rm pure}$ あたりで緩やかな変化（クロスオーバー）を示し、'Griffiths 相' では T にほぼ比例して減少する。一方、緩和時間 τ は Arrhenius 則に従い、その障壁エネルギーは T にほぼ反比例して増大する[2]。

3DIHSG: 最大で 20^3 までのサイズの系における、$t \leq 10^2 \sim 10^4$ の $q(t)$ を解析した。2DISG と異なって、この系の $q(t)$ は明らかなサイズ依存性を示し、それは低温側ほど顕著に現れる。短い時間範囲ではサイズに依らず、緩やかに緩和してきた $q(t)$ がある時間以上になると急激に減少する。共通曲線から離れ始める時間は小さなサイズの系ほど小さい。この急激な減少は、低温で増大したスピン相関長より小さな差渡ししかない系において、全スピンが相関を保って緩和している結果と理解される。以下の結果は、このようなサイズ依存性を示すデータ点を除いた解析から得られた、バルクの $q(t)$ の性質と期待されるものである。

2DISG と同様に、この系の温度範囲 $2.2 \geq T \geq 0.1$ の $q(t)$ も (2) 式のようにスケールされ、かつ、$Q(z) \simeq \exp(-z)$ がよい近似で成立し、3DIHSG の $q(t)$ もまた Kohlrausch 則に従うと結論される。しかも、その指数 $A(T)$ については、$T = T_c^{\rm pure}$ あたりでクロスオーバーを示し、'Griffiths 相' では T にほぼ比例して減少する、という点も 2DISG と共通している。緩和時間 τ の T-依存性も Arrhenius 則にフィットできる。ただし、この場合の障壁エネルギーは $V_0 - vT$ となる（V_0, v は正の定数)。

以上の結果についての解釈であるが、2DISG について同様な結果を得ている高野・宮下の解釈は次の通りである（本研究会の前の講演)。希釈強磁性体の Griffiths 相においては、サイズ（従って緩和時間）の異なるスピンクラスターが存在しており、それぞれが互いに独立に、熱活性化によって反転する過程が合わさった結果、$q(t)$ の $t \to \infty$ の漸近極限として、イジング希釈強磁性体では $\ln q(t) \sim -(\ln t)^{d/(d-1)}$ 型の緩和が理論的に導かれる[3]。ところが、シミュレーションによる有限時間内の $q(t)$ は一見 Kohlrausch 則にフィットできるが、それは漸近極限に向かう過渡的な $q(t)$ の振舞いを近似的に見ているに過ぎない、ということが明らかにされた。2DISG の 'Griffiths 相' における $q(t)$ のシミュレーションの結果に対しても、同様な解釈が妥当であるという見解である。

スローダイナミックスに関するシミュレーションでは、理論的な漸近評価が当てはま

る時間領域をシミュレートできているかどうかが問題になる。しかも、スピングラスの場合、正しいと確信できる理論が確立されていないので問題はさらに難しい。高野・宮下が解析したスピンクラスターはスピングラスの場合、フラストレーションが局所的にほとんどない領域のスピンの集合であるが、希薄強磁性体の場合と違って、これらのクラスターが互いに独立に熱ゆらぎによる反転しているという保証はない。それらが弱くではあるが互いに相関を及ぼし合っている場合、さらにその結果、クラスターがフラクタル的な構造を持ち、その反転に対する障壁エネルギーがクラスターサイズに対数的に依存すると仮定した場合、$q(t)$ の漸近評価は Kohlrausch 則となり、しかも、そのときの指数 A は $T/(2J+T)$ で与えられ[4]、我々の得た結果と定性的に合っている。

我々の得た 3DIHSG の結果もフラクタル的なクラスター描像に符合する。即ち、この描像は我々の結果と同様に、指数 A の T-依存性を含めて、スピンおよび空間の次元に依らない $q(t)$ の緩和則を与える。一方、独立クラスター描像によるとハイゼンベルグ希釈強磁性体に対しては、温度に依らず $\ln q(t) \sim -t^{(1/2)}$ 型の緩和を与え[5]、A が顕著な T-依存性を示す我々の結果とは合わない。実験的にも、磁気異方性の小さな 3DHSG 系と見なされる RKKY スピングラスでも、また、イジングス系と見なされる絶縁体ピングラスでも Kohlrausch 則の観測例が報告されており（但し、前者はスピングラス相における熱残留磁化の緩和[6]、後者はスピングラス転移温度近傍の磁化緩和[7]）、我々が得た、2DISG と 3DIHSG に共通する $q(t)$ の Kohlrausch 則はたいへん示唆的である。但し、問題点も残されている。2DISG のτの Arrhenius 則における障壁エネルギーが T にほぼ反比例して増大すること、3DIHSG についてはτが Arrhenius 則に従うこと自体など、今後さらに解析が必要である。

1. K. Nemoto and H. Takayama: J. Phys., **C16** (1983) 6835.
2. K. Hukushima and K. Nemoto: J. Phys.: *Condens. Matter*, to appear.
3. M. Randeria, J.P. Sethna and R.G. Palmer: Phys. Rev. Lett. **54** (1985) 1321.
4. R. Rammal: J. de Phys., **46** (1985) 429.
5. A.J. Bray: Phys. Rev. Lett. **60** (1988) 720.
6. M. Alba, M. Ocio and J. Hammann: Europys. Lett. **2** (1986) 45.
7. K. Gunnarsson, P. Svedlindh, P. Nordblad, L. Lundgren, H. Aruga and A. Ito: Phys. Rev. Lett. **61** (1988) 754.