

スピン系準安定状態の緩和過程

京大教養 富田博之・宮下精二

キュリー温度以下の強磁性体に負方向の弱い磁場をかけておき、正方向に磁化した状態から出発すると、 $m = +m_s$ (自発磁化値)付近に典型的な準安定状態が現れる。この準安定状態の存在およびこの状態からの緩和の問題は、動的イジングモデルの計算機シミュレーションが実行されるようになった当初から、いろんなグループによって扱われており、もはや古典的な問題になりつつあるが、未だ正確な理解ができていないと言いがたい。今回、東大・鈴木研究室のグループで開発されたPC9801上で働くイジング専用マシン「m-TIS2」を1台提供していただいたのを機会に、その直接的な応用として上記の問題に適用し、専用マシンの利点を生かして緩和の統計的性質を詳しく解析してみた。例えば、緩和時間の分布の様子を得るには、同じパラメータに対して少なくとも1000回程程度の試行を繰り返す必要があったが、こんな計算は専用マシンでなければ、おそらく試す気になれなかったと思われる。

準安定状態から真の平衡状態すなわち負方向に磁化した状態への秩序化過程は、核形成過程として説明される。核形成理論においては、界面エネルギー(低温では近接間相互作用の強さ J)と負方向の磁場の強さ H で決まる臨界半径 $R_c \sim J/H$ という特性長が存在するため、弱い磁場のもとでの秩序化のダイナミクスはシステムサイズに大きく依存する。例えば、この臨界半径より小さい系では、核ができて成長するという形ではなく、揺らぎがシステムサイズに匹敵する大きさに達するという形で秩序化しなければならず、磁場0(臨界半径 ∞)の場合、 64×64 程度の2次元系ともなると、気の遠くなるような小さな確率でしか期待できない(宮下・高野1985)。したがって、核形成による秩序化過程を調べるためには、システムサイズが少なくとも臨界半径より大きくなるようにしておかなければならない。

我々は、2次元正方格子イジング系($L = 64 \sim 720; N = L^2$)で、磁場をパラメータとして、この臨界半径より少し大きいと思われる辺りを集中的に調べてみた。その結果、緩和のダイナミクスの特徴が明らかに異なる、確率論的領域(A)と決定論的領域(B)の2領域に分類できることが分かった。Aは(臨界半径よりは大きい)比較的小さい系あるいは小さい負磁場の領域であり、磁化が0になる時刻 $m(t_1) = 0$ で定義した準安定状態の寿命 t_1 は全く不確定で、その分布の分散と平均の比が1に近く、分布のヒストグラムは指数関数型を示す。Bはその逆で、 t_1 (したがって緩和曲線 $m(t)$ そのもの)

研究会報告

は確定的であり、その平均値はシステムサイズには依らず磁場の大きさだけで決まり、平均値の周りの分散は小さい。 $m-TIS^2$ ではクラスタ(スピン配置)の様子がリアルタイムでパソコンの画面に表示される。これをじっと眺めておれば、領域Aでは偶発的に発生した唯1個の核が成長して秩序が形成されるが、Bにおいては、系が十分広いため方々で核が発生し、成長・融合しながら秩序が形成される、いわゆるアブラミ過程であることが見てとれる。前者では核形成の確率性が系全体に直接反映されて確率論的であり、後者では、それぞれの核の発生は偶発的であるが、全体としては1つの系の中で多数の核形成過程が平均化された決定論的な振舞いになるわけである。平均的振舞いという意味では、前者においてもアンサンブル平均として与えられる緩和曲線 $\langle m(t) \rangle$ が考えられるが、これは強磁性微粒子系で観測される緩和に相当し、今の場合、指数関数形になる。

上記の振舞いは、1自由度ポテンシャル中の確率過程として説明できる。領域Aにおける寿命の指数分布は、まさにポテンシャル障壁がある場合のポアソンの崩壊の特徴そのものである。また、障壁通過後の緩和曲線 $m(t)$ は、各サンプルの時間を平行移動すれば綺麗に一本の曲線にのってしまい、核形成後の成長過程は決定論的であることが示された。さらに、ABの間で、寿命の分布形が1次元のショルダー型ポテンシャルでの初通過時間分布の解にぴったり一致する位置が見い出された。我々はこの境界点を、動的ポテンシャルの障壁したがって準安定極小が消える位置という意味で「動的スピノダル点」と名付けた。これは、もちろん平均場近似で与えられるスピノダル点とは全く違うが、熱力学的な自由エネルギーから定義されるものとも異なる。有限系の熱力学的自由エネルギーは、界面エネルギーに対応して中央に J/L 程度の山を持っており、磁場がかけられてポテンシャルが傾いていくとき、障壁が消える磁場の強さが定義される ($\sim J/Lm_s$) が、これは明らかに臨界半径とシステムサイズが同程度になる位置である。概念的にも、熱力学的自由エネルギーは与えられた磁化の値を持つという制限のもとでの全ての状態についての状態和から計算される量であるが、我々の動的ポテンシャルは(もし状態和の形で定義できるとすれば)ドロップレットの成長という、ずっと制限された状態についての和になるはずである。

詳細および参考文献については H. Tomita and S. Miyashita, Phys. Rev. B46 (Oct. 1992), in press.