

30. 2次元量子スピン系の基底状態の理論の現状

東工大理 西森秀稔

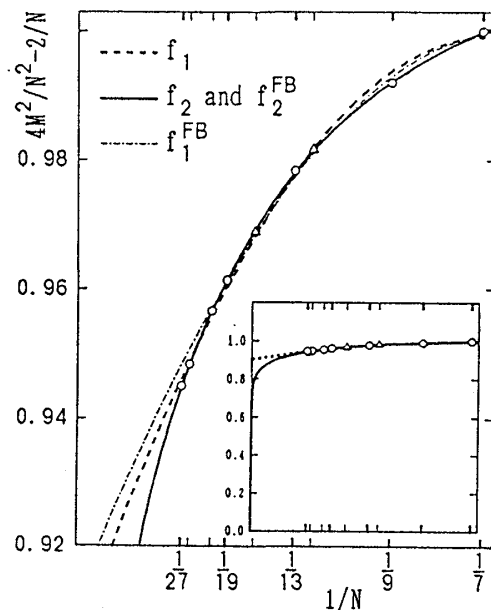
古典的な連続スピン系の基底状態においては、フラストレーションの有無によらず多くの場合、完全な長距離秩序が存在する。ところが量子スピン系では古典状態のまわりの量子揺らぎのために、絶対零度においても磁気的な長距離秩序が破壊される場合がある。1次元系ではこの傾向が顕著で、 $s = 1/2$ のXY模型、反強磁性的ハイゼンベルク模型のいずれにおいても、スピン相関関数は距離と共にべき乗則にしたがって減衰する。2次元になると相互作用するスピン数が増加するため、秩序化の傾向が強まり、古典的な長距離秩序状態がある程度の定量的な修正を受けるだけで、定性的な変更はないと従来は考えられていたが、最近、このような素朴な考え方に疑問が投げかけられている。

まず、古典状態が2次元でも本質的な変更を受けないという主張の一つの重要な根拠は、 s が大きい極限からの $1/s$ による展開 ($T = 0$ でのスピン波理論)の各項の係数に1次元では様々な異常が出るのに対し、2次元ではそれが無いことである。例えば、XY模型、反強磁性的ハイゼンベルク模型などの相関関数を

$$\langle S_a^x S_{r+x}^x \rangle / s^2 = 1 - f(r) / s + O(1/s^2)$$

と展開したとき、1次元では $f(r) \sim \log r$ と $r \rightarrow \infty$ において展開係数が発散するが、2次元以上では $f(r)$ は有限値におさまるのである。

これに対して、長距離秩序が量子効果で壊れるという結果は、おもに有限系の数値計算によるものである¹⁾。有限のスピン数をもつ量子スピン系(強磁性的あるいは反強磁性的XY模型、反強磁性的ハイゼンベルク模型など)の基底状態の波動関数を、ハミルトニアン行列の数値的対角化によって求め、秩序パラメータを計算してそれを無限系の極限 $N \rightarrow \infty$ へ外挿することにより、秩序の有無を調べようというものである。今までのところ、スピン数が27の場合までこのような計算がなされている。その結果によると、



$s = 1/2$ の三角格子上的 XY 模型は、強磁性的、反強磁性的いずれの場合にもスピン相関関数は距離と共にべき乗則で減衰する。有限系のデータの外挿の例を図に示した。実線が長距離秩序が存在しないとしたときの外挿関数 f_2 である。破線や鎖線で表された長距離秩序があるとする外挿 f_1 との差はわずかのように見えるが、有限系のデータとの整合性は f_2 の方がひと桁良い。一方、三角格子上の反強磁性的ハイゼンベルク模型では指数減衰が見られる。

このように、以上のいずれの模型でも、長距離秩序は存在しない。これは量子効果を摂動で取り入れる $1/s$ 展開（スピン波理論）では捉えられない非摂動効果といえる。特に、反強磁性的ハイゼンベルク模型においては、RVB と呼ばれる一重項スピン対の量子流体状態が基底状態の本質であるというアンダーソンの主張が注目を集めている折、相関関数が指数減衰し磁気的には常磁性であるという結果は興味深い。さらにフラストレーションのない正方格子上的反強磁性的ハイゼンベルク模型においても、有限温度での量子モンテカルロ法のデータの $T \rightarrow 0$ への外挿から、推定誤差は大きいものの、 $T = 0$ での長距離秩序が破壊される可能性が指摘されている²⁾。

このように、少なくとも $s = 1/2$ の XY 模型、反強磁性的ハイゼンベルク模型では長距離秩序がないという考え方がここ数年来支配的になっている。

文献

- 1) T. Oguchi et al., J. Phys. Soc. Jpn. 55 (1986) 323
 S. Fujiki and D.D. Betts, Can. J. Phys. 64 (1986) 876, 65 (1987) 76
 Prog. Theor. Phys. Suppl. No. 87 (1986) 268
 S. Fujiki, Can. J. Phys. 65 (1987) 489
 H. Nishimori and H. Nakanishi, J. Phys. Soc. Jpn. 57 (1988) 628
- 2) S. Miyashita, preprint