

カイラルガラス — スピングラスと超伝導セラミックス

京都工芸繊維大学工芸学部 川村 光

1. 序

連続自由度を持つ力学変数で記述される相互作用系が要素間の相互作用にフラストレーションを持つ場合には、フラストレーションがない通常の場合には見られない新たな自由度として所謂‘カイラル自由度’が現れる。磁性体（スピン系）の例で言うと、たとえば3角格子（層状3角格子）反強磁性体、ヘリカル磁性体、スピングラス等、フラストレートした磁性体でかつ磁性スピンのX Yスピンやハイゼンベルグスピンの様に連続自由度をもつ場合には、一般に秩序相でのスピン配列が互いに傾いた非線状 (*noncollinear*) ないしは非平面状 (*noncoplanar*) な構造を取り、その結果としてカイラル自由度が生じる。大ざっぱに言うと、カイラリティはフラストレーションの結果生じた非線状（非平面状）構造が右手系か、左手系か（あるいは右巻きか、左巻きか）を指定する様な離散的な変数である。最も単純な場合にはカイラリティはイジング的な擬スカラー量である（スカラーカイラリティ）。フラストレートしたベクトル磁性体におけるカイラリティという概念はVillainによって初めて導入された。¹ このようなカイラル自由度を持つような系の秩序化、相転移現象は通常の場合には見られなかった多くの新しい特質を持ち、ここ10年程の間に活発な研究が進められてきた。²

フラストレーションに加えてランダムネスが存在するような系のカイラル秩序の問題はそれ自体で大変興味深い問題であり、典型的な系としてスピングラス磁性体や超伝導セラミックスがある。筆者は近年、このような系ではスピン自由度自体は無秩序のままでカイラリティのみがランダムにオーダーした様な新しいタイプの秩序相 — ‘カイラルガラス相’ — が有限温度で安定な熱平衡相として存在するのではないかと考えている。²⁻⁵ 以下、まず主としてスピングラスの標準的な

統計モデルに対して行った数値シミュレーションの結果を示し、このようなカイラルガラス転移が存在すると考えられる証拠について触れ、次にこのようなカイラルガラスの存在がスピングラス磁性体⁶や超伝導セラミックス⁷の秩序化の問題に対してどのような結果をもたらすかを簡単に述べたい。

2. 3次元ベクトルスピングラスのカイラル秩序に関する数値シミュレーション²⁻⁶

X Y スピンやハイゼンベルグスピン等のベクトルスピン系のスピングラスについては、これまでの研究によりその下部臨界次元が3以上であり3次元では通常のスピングラス帯磁率の発散を伴うような有限温度相転移は起きない、と考えられている。ベクトルスピングラスでのカイラリティ自由度の重要性については古く1977年に Villain による指摘があるが、¹ カイラリティの秩序化に関する具体的な研究はその後長く行われなかった。筆者らは1985年以降モンテカルロシミュレーションやドメイン壁線り込み群等の数値的手法によりこの問題を扱い、少なくとも空間3次元でスピンの成分数2のX Y スピングラス ($d=3, n=2$) の場合には通常のスピノオーダーを伴わないカイラルガラスオーダーが有限温度で起きるらしい事、またこのカイラルガラス転移のユニヴァーサルリティクラスはイジングスピングラスのユニヴァーサルリティクラスになっているらしいことを明らかにした。^{3,4} 通常のスピングラスオーダーパラメーターを伴わないカイラルオーダーの出現は系の回転対称性を破らずにその鏡映対称性のみが破れたことに対応している。このX Y系に関する結果は後述の超伝導セラミックスの秩序化の問題に関して特に重要となる。

スピングラス磁性体の秩序化の問題に直接関連しては、むしろスピンの成分数3のハイゼンベルグスピングラス ($d=3, n=3$) の場合が重要であるが、この場合もやはり有限温度でのイジング的なカイラルガラス転移の存在を示唆するような結果が得られている。⁵ (ただしX Y系の場合に比べると現段階での数値的な

証拠はやや弱く、カイラルガラスオーダーが $T = 0$ のみで起きる可能性も今のところ残されている。)

図1と2にXY、ハイゼンベルグスピングラス双方の場合について計算されたスピンおよびカイラリティのドメイン壁エネルギー、 W_s および W_c 、のサイズ依存性を示した。系のサイズ（一辺 L の単純立方格子）を増したとき対応するドメイン壁エネルギーが漸近的に増すか減るか、相転移が有限温度で起きるか、あるいは絶対零度で起きるかが判る。これらの図からスピンのオーダーは絶対零度のみで起きる絶対零度で起きるが、カイラリティのオーダーは有限零度で起きる事が示唆される。また図3には3次元XYスピングラス（最近接相互作用を持つ所謂 $\pm J$ モデル）に対するモンテカルロシミュレーションによって計算したカイラリティに対する Binder パラメーター g_{CG} のサイズ、温度依存性を示した。転移温度では異なったサイズの Binder パラメーターがクロスもしくはマージするのに対し、転移温度以上では Binder パラメーターの値はサイズとともに単調に減少する。図3からも通常のスピングラスオーダーを伴わないカイラルガラスオーダーが有限温度で起きていることが強く示唆される。またこれらのデータに対する有限サイズスケリングプロットからカイラルガラス転移に伴う臨界指数が評価でき、イジングスピングラスの臨界指数に極めて近い結果が得られた。より詳しくは引用論文を参照されたい。

3. スピングラス磁性体の秩序化

現実のスピングラス磁性体は第0近似的には等方的なハイゼンベルグ系に近く、弱い磁気双極子相互作用やジャロシンスキー-守谷相互作用の為に、僅かなイジング的な磁気異方性を持つタイプのものが殆どである。これらのスピングラス磁性体が平衡相転移を示すことは実験的には今や確立しているが、‘等方的なベクトルスピングラスが3次元では有限温度転移を示さない’という広く受け入れられて

いる理論的な結果との間の整合性をどう理解したらよいのかについては、未だ完全な解決には到っていない（説は色々ある）。特にこのように弱い摂動によって転移の性格が変わるような場合に通常期待されるようなクロスオーバー現象が実験的に全く観測されていない点は不思議である。今までの理論ではこの点を‘異方性の強さ D が 0 に行く極限で転移温度 T_{SG} も 0 に行くが、極めてゆっくり 0 に行くため現実的な D の値ではクロスオーバーの効果が見えない。’として説明してきた。筆者は最近実験的なスピングラス転移の本性に関する新しい仮説として、等方的なベクトルスピングラスに関するカイラルガラス描像に基づいたカイラリティメカニズム^{5,6}を提唱している。

このシナリオでは、1) 等方的なハイゼンベルグスピングラスも 3 次元で鏡映対称性の破れのみを伴うカイラルガラス転移を有限温度 T_{CG} で示す。 T_{CG} ではカイラルガラス帯磁率が発散するが、回転対称性は破れず通常のスピングラス帯磁率は発散しない。この転移は本質的にはイジング S G 的で、転移のオーダーパラメーターであるカイラリティの指数は通常のイジング S G の指数に一致する。2) $D > 0$ の場合には異方性の効果のためはスピンとカイラリティが混じり、カイラルガラス転移点で同時にスピングラス転移も起こる。臨界指数はスピン、カイラリティ共イジング的になるが、通常のシナリオとは異なり $D \rightarrow 0$ でも $T_{SG}(D) \rightarrow$ 有限である。3) $D > 0$ の時、スピングラス帯磁率は $t \equiv (T - T_{SG})/T_{SG}$ として $\approx (D/T)^4 t^{-\gamma} + [\text{non-diverging part}]$ の様に振舞う ($\gamma \sim 3$)。特に通常のシナリオと異なり異方性が弱い極限でも臨界指数に関するクロスオーバーは起きない。より詳しくは発表予定の文献を参照されたい。⁶

4. 超伝導セラミックスの秩序化

近年一連の高温超伝導体が d 波であり、その間のジョセフソン結合が π 結合になる可能性が議論されている。また所謂‘セラミック’な系ではスピングラス的挙

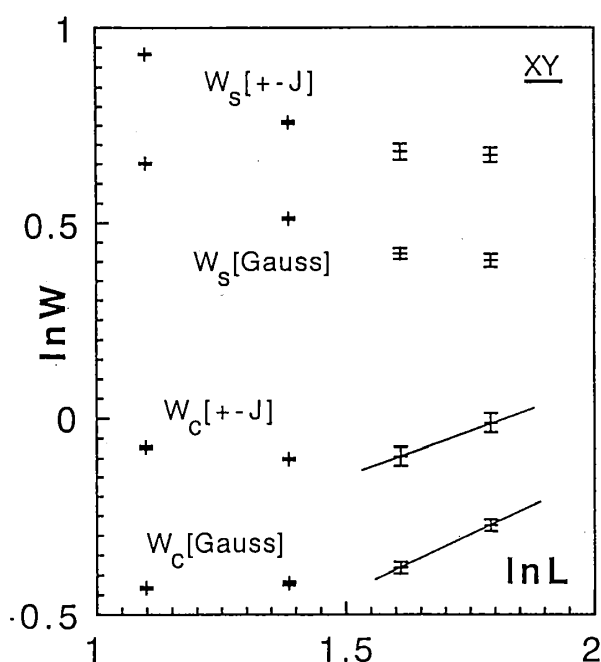
動が観測されることが実験的に知られており、また弱磁場の極限では常磁性的な挙動（Wohleben 効果）も見つかっている。ジョセフソン結合系の理論的解析には以前より超伝導オーダーパラメーターの位相の自由度に着目した XY モデルが使われてきた。通常の s 波超伝導体間ではお互いの位相を揃えようとする相互作用が働く為、隣接サイト間のカップリングは強磁性的になる ($J > 0$)。これはスピン系では強磁性体に相当し、超伝導体に磁場を印加しなければフラストレーションは生じない。他方、d 波超伝導体では波動関数の対称性の為、超伝導グレインの相対的向きにより、隣接サイト間のカップリングは強磁性的にも ($J > 0$) 反強磁性的にも ($J < 0$) なり得る。特に d 波セラミック系ではカップリングの符号は空間的にはほぼランダムに出現する事が期待され、そのモデルハミルトニアンは XY スピングラスのものと同一になる。この場合、s 波の場合と異なり零磁場でもフラストレーションが生じる。これは磁場中の第 2 種超伝導体（所謂ゲージグラス）で期待されるフラストレーションとは全く異なった機構によるものである。

3 次元 XY スピングラスのカイラルグラス転移に関する結果より、当然このような d 波セラミック超伝導体においても新しいタイプの秩序相—カイラルグラス相—の存在が予想される。特に超伝導体に印加した磁場は、磁性体の場合とはその意味が大きく異なり、むしろ磁性体の場合のカイラル磁場（カイラリティに共役な磁場）に対応している。即ち超伝導体の場合磁性体の場合と違って、帯磁率 χ や非線型帯磁率 χ_2 等の系の磁氣的応答を見る事によって、系のカイラル秩序を直接見ることが出来る。図 4 に d 波セラミック超伝導体のモデルと期待される 3 次元 $\pm J$ XY スピングラスに対してモンテカルロシミュレーションによって χ_2 を計算した結果を示す。⁷ カイラルグラス転移点での χ_2 の負の発散が観測された。他方、s 波に相当する強磁性的な場合には χ_2 は逆に正に発散することが見いだされた（図 5）。最近、松浦らによって、セラミックな YBCO 系で χ_2 の負の発散が観測されており、⁸ 今回の理論と結果と合わせると、これは一連の高温超伝導体がやはり d

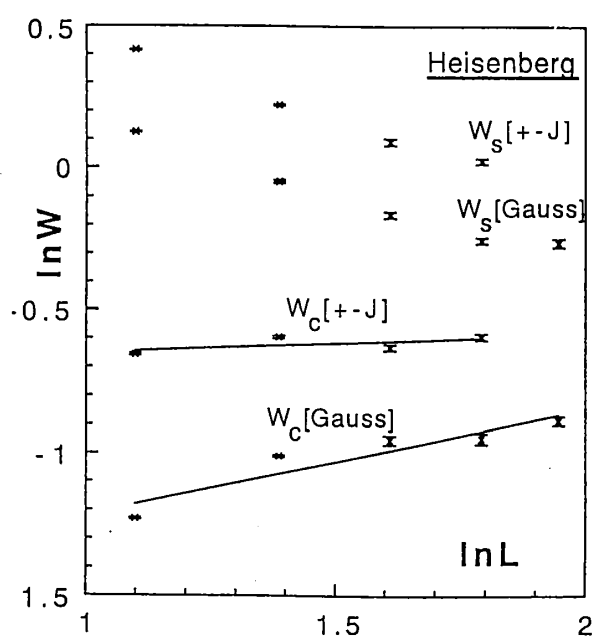
波であることを示唆しているように見える。

文献

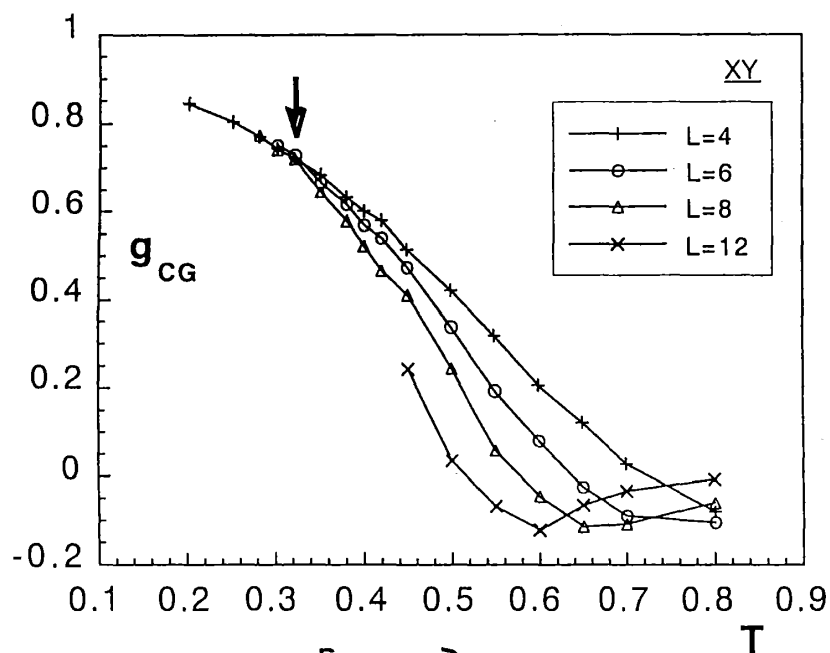
- 1 J.Villain: J. Phys. C10 (1977) 4793.
- 2 H. Kawamura: Computer Aided Design of New Materials II, 395 (1993).
- 3 H. Kawamura and M. Tanemura: J. Phys. Soc. Jpn. 60 (1991) 608; および
プレプリント。
- 4 H. Kawamura: J. Phys. Soc. Jpn. 61 (1992) 3062 ; およびプレプリント。
- 5 H. Kawamura: Phys. Rev. Letters 68 (1992) 3785; および発表予定。
- 6 H. Kawamura: 発表予定。
- 7 H. Kawamura: 発表予定。
- 8 M. Matsuura *et al*: 1994 年日本物理学会年会、および発表予定。



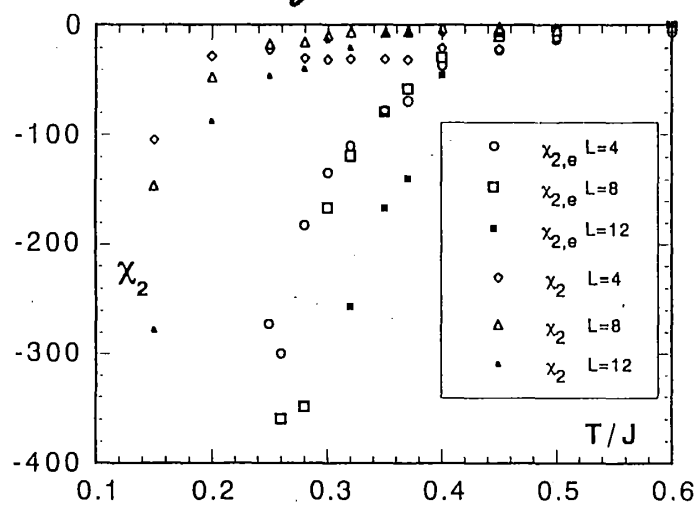
[Fig. 1]



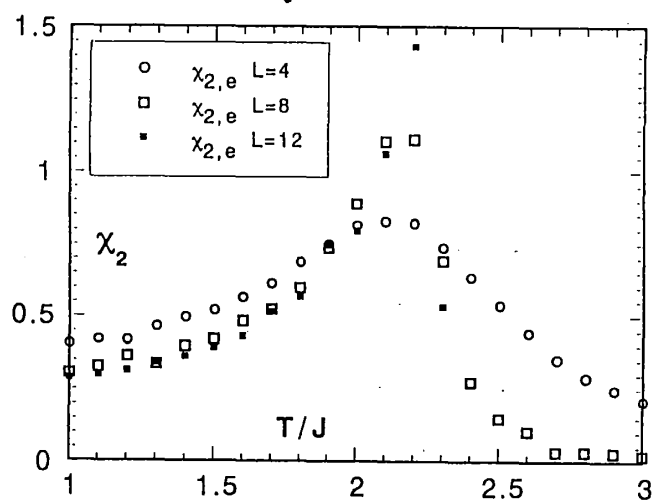
[Fig. 2]



[Fig. 3]



[Fig. 4]



[Fig. 5]