

3次元凝縮系の相転移と Defect

— 液晶 Smectic-Nematic 転移を例にとって —

京大・理 池 田 隆 介

連続自由度をもつ系の相転移を考えるのに、topological-defect の無視できない case がしばしばある。その典型的なのが2次元(2D) XY 系での Kosterlitz-Thouless (KT) 理論だが、3 DXY でも (line) defect の励起が相転移の原因になりうる例として、Smectic-Nematic (N) 液晶転移¹⁾がある。通常の3 DXY model で転移の際の vortex-loop の成長を考えると、その core の臨界的成長も無視できない²⁾ため、defect (vortex) による記述は意味をなさないが、Smectic 液晶での dislocation line は有限な energy (per unit length) をもつという理由により、この困難を免れて単に dislocation-loop の臨界成長という記述³⁾が物理的に許される。実は、この

立場が脚光を浴びた理由はむしろ別にあつて、Fig.1 の Smectic A (SmA) (そこで、director の平均的方向 $\hat{n}_0$ は layer に垂直) と N 間の転移が 2nd order という実験事実を、

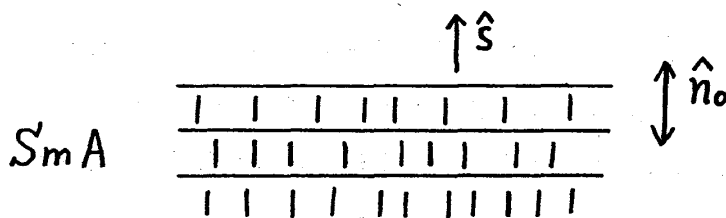


Fig.1

この dislocation-loop 理論に至って初めて理論的に説明できたのである。この理論は、(特別な状況での) Smectic C (SmC) melting に対して拡張が試みられた⁴⁾。この場合、SmC (Fig.2) で layer-normal

vector $\hat{s}$ と $\hat{n}_0$ が平行でないという事実に起因して、translational Symmetry とともに $\hat{s}$ の orientational order をも伴った中間相 (N') が SmC と

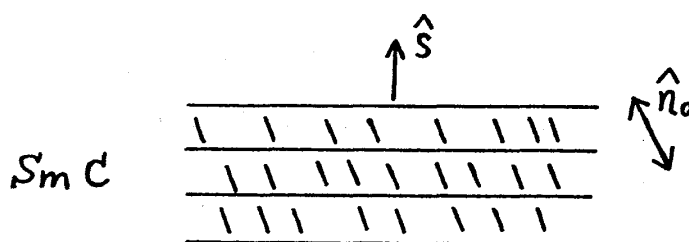


Fig.2

N との間に存在することが期待される。しかるに、この議論は SmC-N' 転移が 2nd order であることが示されてない等、完備されていない。SmC-melting へのこの拡張は最近、より整備された形で一般的な場合も含めて定式化された⁵⁾。以下ではその解説と結果を簡潔に与える。

Smectic-N 転移を現象論的に考えるのに、通常、Smectic translational-order を density-wave の立場でみて、Landau 理論をつくるのが自然である。この立場で、SmA-N, SmC-N 両転移を統一的に満足できる形で記述できる唯一のモデルとして、Chen-Lubensky model⁶⁾ というのがある。ここから、SmA, SmC 各々に適当な elastic free energy を導出するのは単純で、前者はよく知られた de Gennes model⁷⁾ になる。後者の SmC に対するモデルは次の形をとる。

$$F_c = \int d^3r [B((\partial_z u - t^{-1} \Delta n)^2 + (\partial_x u - t \Delta n)^2) + K(\partial_y^2 u)^2] + F_n$$

ここで、 u は Smectic-layer の displacement field, Δn は director $\hat{n}$ と layer-normal $\hat{S}$ とのなす角のゆらぎ、パラメーター B, K, t は正で温度依存性は無視できるとする。さらに F_n は通常の Frank free energy を意味する。この表式からわかるように、外場によって director $\hat{n}$ が長波長で固定されないなら、SmC はいわゆる (translational) quasi-long range order をもち、その結果として、dislocation-line energy は単位長さ当たり有限(つまり、log 的なサイズ依存性をもたない)ということになる。この側面は SmA, さらには、2DXY model に類似で、実際この系が dislocation-loop の臨界成長で有限温度での転移を起こすことは、KT 理論と同様、energy と entropy のつりあい³⁾ から説明できる。

その相転移を統計力学的に定式化するには、XY-class に特有な duality の考察、さらに、転移の性質を調べる目的で、U(1)-gauge 不変な ϕ^4 -model への変換が必要であった。その詳細については、文献5を参照していただきたい。ここでは、重要な結論を列挙するにとどめよう。

- 1). SmC の melting temperature は、現象論的に導入された dislocation-loop の core energy (per unit length) E_c を用いて、 $E_c/3k_B$ で与えられる。その数値を具体的にみることはできないが、適当なオーダー ($\sim 10^2$ (K)) をもっていることは評価できる。
- 2). その転移は 2nd order で、XY-duality が反映して、inverted XY⁸⁾ という universality class になる。つまり、free dislocationの存在が秩序パラメータの有限な状態を意味するような 3DXY モデルに相当する。
- 3). 既に述べたように、この転移の上側の相はNでなく、別の中間相(N')になっている必要がある。そこでは、director field $\hat{n}$ とともに、layer-normal vector $\hat{S}$ が orientational long range order をもつことが示せる。従って、さらに N'-N 転移 (XY-class であると期待される⁴⁾) の存在が要求され、その転移温度の荒い評価から、N'相の存在する温度巾は高々

～数 (K) と予想される (N相とN'相の違いは, Fig.3 をみれば明らかだろう)。

結局上の議論では, dislocation-line element のエネルギーが有限, つまり, line element間の相互作用が転移の性質に影響しないことが本質的で, SmA-N転移¹⁾での議論と特に変わりはない。SmC 相の melting-temperature がSmA のそれとはあまり変わらないと期待されることから, 実験での検証が望まれる。

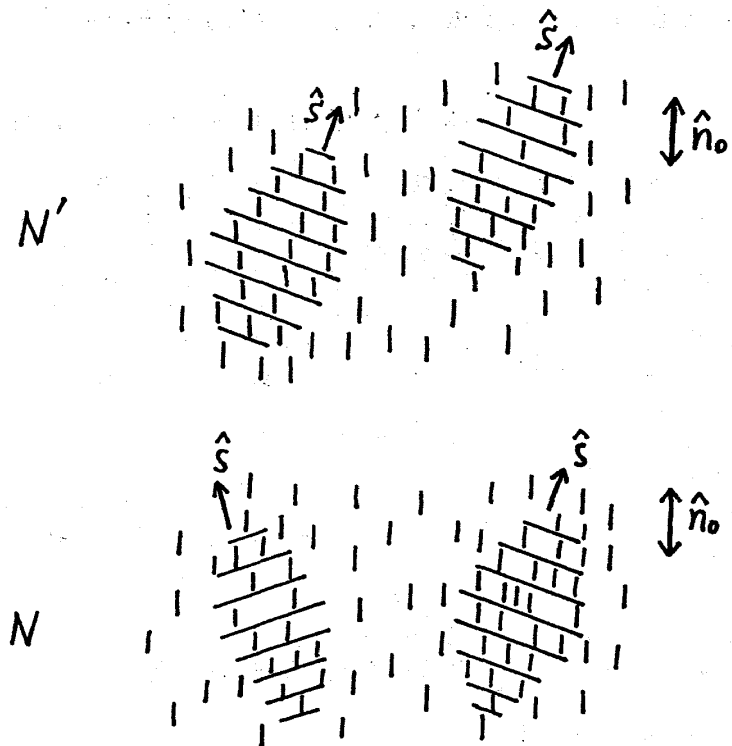


Fig.3

参考文献

1). 包括的なレビューとして, 例えば

T.C.Lubensky, J.Chim.Phys. (Paris) **80** (1983) 31.

2). 例えば, 次の文献をみよ。

G.Williams, Phys. Rev. Lett. **59** (1987) 1926.

3). W.Helfrich, J.Phys. (Paris) **39** (1978) 1199 ; D.R.Nelson and J.Toner, Phys. Rev. B **24** (1981) 368.

4). G.Grinstein, T.C.Lubensky, and J.Toner, Phys. Rev. B **33** (1986) 3306.

5). R.Ikeda, Phys. Rev. A **39** (1989) 312.

6). J.H.Chen and T.C.Lubensky, Phys. Rev. A **14** (1976) 1202.

7). P.G.de Gennes, Solid State Commun. **10** (1972) 753.

8). C.Dasgupta and B.I.Halperin, Phys. Rev. Lett. **47** (1981) 1556.