

## 強磁場中エキシトニック相の一問題点

九州共立大・工 長 井 達 三

## § 1. 序

物質の一基底状態として、長距離秩序をもつ電子－正孔対の凝縮した状態であるエキシトニック相が予言されてから、一昔以上になる。C<sub>r</sub> 以外には、長い間、実験的に見い出されていなかったが、最近、強磁場下でその可能性を暗示する実験結果が報告された。<sup>1,2)</sup> ここでは、今までに為された理論的研究の一つの問題点について述べる。

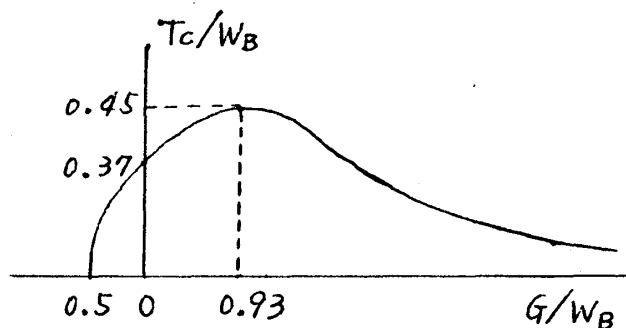
転移温度  $T_c$  は、分子場近似で次のように求められる。<sup>3)</sup> 今、indirect band overlap (gap) をもつ 2-band model を取る (a: 伝導帯, b: 価電子帯)。強磁場のため、各バンド共、最底のランダウ準位 ( $n=0$ ) だけが、フェルミ準位の近傍にあり、 $n=0$  だけを考えればよいものとする。このとき、量子数は  $\alpha = (X, p)$  となる ( $X$ : サイクロトロン運動の中心座標,  $p$ : 磁場方向の運動量)。a, b 電子は  $V_0 (>0)$  で相互作用しているものとすれば、ハミルトニアンは次のように書ける。

$$\mathcal{H} = \sum_{\alpha} [E_{\alpha}^a a_{\alpha}^{\dagger} a_{\alpha} + E_{\alpha}^b b_{\alpha}^{\dagger} b_{\alpha}] + \sum_{\mathbf{k}} V_0 \rho_a(\mathbf{k}) \rho_b(-\mathbf{k}), \quad (1)$$

ただし、 $E_{\alpha}^a = p^2/2m - G = -E_{\alpha}^b \equiv \xi_p$  ( $p$  は、各バンドの極値から測る)、 $\rho_a(\mathbf{k}) = \sum_{\alpha\alpha'} \langle \alpha | e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} | \alpha' \rangle a_{\alpha}^{\dagger} a_{\alpha'}$ 。G は磁場  $H$  により変えることができる。超伝導理論との類似から、秩序パラメタは、 $\Delta = V_0 \sum_{\alpha} \langle a_{\alpha} b_{\alpha}^{\dagger} \rangle$  と定義できて、 $T_c$  は  $\Delta$  の消失する温度として求まる。

$$1 = \frac{V_0}{2} \sum_{px} \frac{1}{\xi_p} \cdot \tanh \left( \frac{\xi_p}{2k_B T_c} \right). \quad (2)$$

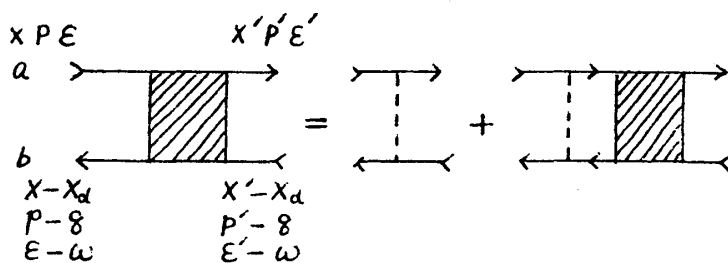
数値計算の結果は、 $T_c$  は、第 1 図のようになる。電子－正孔対の束縛エネルギー  $W_B \equiv (V_0 \sqrt{mL} \cdot \rho_x / 2\hbar)^2$  で、スケールしている ( $L^3$ : 体積,  $\rho_x \equiv L^2 / 2\pi\ell^2$ :  $X$  の縮退度,  $\ell \equiv \sqrt{\hbar c / eH}$ : サイクロトロン半径)。



第 1 図 転 移 温 度

## § 2. 問 題 点

散乱振幅の極は，束縛エネルギーを表わす。摂動論の立場から見ると，この極は vertex part の極に一致するので，対形成の問題は vertex part の singularity を調べる問題に帰着する。前節の分子場近似は，vertex part を，第 2 図のように，反平行の ladder を無限に集めたもので近似することに対応する。

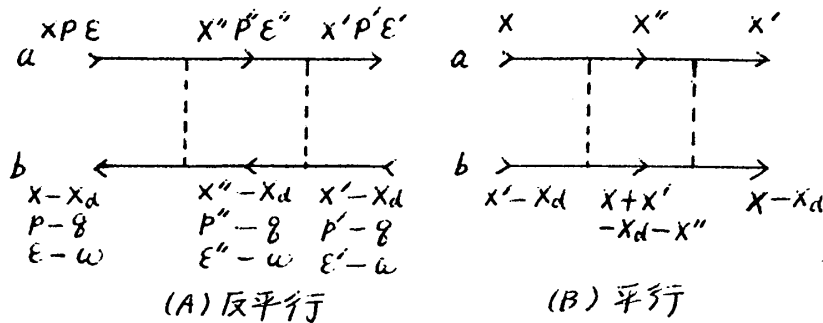


第 2 図 vertex part

これには，二つの問題点がある。

1)  $E_\alpha^i$  が一次元的なので，singular element は反平行だけでなく，平行線を持つものもあり，共に logarithmic singularity を示す。これは，parquet 方程式に導く。

Abrikosov は、一次元モデルで  $G \gg W_B$  の場合に、この問題を議論した。<sup>4)</sup> しかし、横方向の運動の自由度  $X$  は、重要で、相互作用を通じて入ってくる。その行列要素(第2図の第1項)は、 $J(X-X', X_d) \equiv (L/\sqrt{2\pi} \cdot \ell) \cdot \exp[-\{(X-X')^2 + X_d^2\}/2\ell^2]$  のように、横の自由度に依存する。このため秩序パラメタのゆらぎは、三次元的になる。<sup>3)</sup> このように、相互作用により、横方向に動けるということが、ゆらぎを抑え相転移を可能にしている。<sup>5)</sup> Brazovskii は、Abrikosov のモデルに  $X$  の効果を入れて、反平行線をもつ singular element が最も重要であるという結論を得た。<sup>6)</sup> これは、次のような事情による。第3図の(A)に示す反平行線を持つ singular element は、量子数  $X$  に関して、 $J(X-X'', X_d) \cdot J(X''-X', X_d)$  なる、たたみ込み型であるのに対し、(B)の平行線を持つものは、 $J(X-X'', X_d - X' + X'') \cdot J(X''-X', X_d - X + X'')$  とたたみ込み型にならない。そのため、vertex part を求める積分方程式で、Fourier 成分について、反平行型は分離できるが、平行型は積分が残ってしまう。その結果、平行型の singularity は弱められる。この Brazovskii の結果は、本質は分子場近似で尽されるということを意味する。



第3図 Singular element

2) logarithmic singularity が存在するのは、 $G \gg W_B$  の場合だけであるから、 $|G| \lesssim W_B$  で分子場近似による結論が正しいという保証はない。事実、第3図(A)の element II anti は、 $q = 0$ ,  $G \gg |\omega|$  のとき、次のような singularity を示す。

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{anti}}(X-X', X_d; \omega) = V_0^2 \sum_{X''} J(X-X'', X_d) J(X''-X', X_d) \\ \cdot \frac{L}{\pi \hbar} \sqrt{\frac{m}{2G}} \left[ \ln \left| \frac{8G}{\omega} \right| + i \frac{\pi}{2} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

第2図の vertex part  $\Gamma(X-X', X_d, q; \omega)$  を, 変数  $(X-X')$  について Fourier 展開し, その成分の複素上半面での最大の極は, (3) 式を使って次のようになる。

$$\omega = i 8G \cdot \exp \left[ -\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2G}{W_B}} \right]. \quad (4)$$

従って, (3) 式を得る条件  $|\omega| \ll G$  を満たすためには,  $G \gg W_B$  でなければならない。即ち, 反平行線を持つ element は,  $G \gg |\omega|$  ならば, 常に logarithmic singularity を持つが, それで組み立てられる vertex part が極を持つのは,  $G \gg W_B$  に限られる。

以上より, §1 の相関 (第1図) は,  $G/W_B \gg 1$  では正しいが,  $|G|/W_B \lesssim 1$  の領域では正当化されない。そこでは, 電子 - 正孔対の気体から出発すべきだろう。この事情は, 磁場がないときも同じであり, これからの問題である。

#### 参 考 文 献

- 1) S.Mase and T.Sakai, J.Phys. Soc. Japan 31, 730 (1971).  
T.Sakai, N.Goto, and S.Mase, J.Phys. Soc. Japan 35, 1064 (1973).
- 2) N.B.Brandt and S.M.Chudinou, J.Low Temp. Phys. 8, 339 (1972).
- 3) H.Fukuyama and T.Nagai, J.Phys. Soc. Japan 31, 812 (1971).  
T.Nagai and T.Tsuzuki, J.Low Temp. Phys. 投稿中.
- 4) A.A.Abrikosoov, J.Low Temp. Phys. 2, 37 (1970).
- 5) H.Fukuyama, T.Tsuzuki, and S.Nakajima, J.Phys. Soc. Japan 39, 1439 (1975).
- 6) S.A.Brazovskii, JETP, 34, 1286 (1972);  
JETP, 35, 433 (1972).