

s-d 相互作用の Lower Divergent Term の起源 (Ⅲ)

— Spin Precession の効果 —

東大理^{*} 川 村 清

(9月4日受理)

§ 1. Introduction

筆者は、かつて超伝導体中の s-d 相互作用について考察した論文¹⁾において、s-電子の self-energy part が不純物スピンの operator のみを含む Green 関数のみで書けることを示した。その後その方法を、前の2つの論文^{2), 3)} (以下この2つをまとめて I と記す。)において、s-d 問題の高次の摂動計算をするために更に詳しく検討した。スピン operator の Green 関数 (以下では “spin Green 関数” と称する) の運動方程式を立てることによって、spin の dynamical な3つの性質が一つの方程式に表われて来た。3つの性質というのは、1) spin の classical な potential としての性質 (spin Green 関数の運動方程式において、この性質を表わす項を以下で “elastic scattering terms” と呼ぶ)。2) spin が平衡な方向から散乱によって傾くために s-電子の作る内部磁場の周囲を歳差運動するという性質 (以下で “spin precession term” と呼ぶ)。3) spin が量子化軸のまわりで揺らいでいるという性質 (“quantum fluctuation term” と呼ぶ)。

ところで self-energy part を (J/N) で展開したとき $(J/N)^n$ の係数で $(\log |\epsilon/D|)^{n-2}$ に比例する項を “most singular terms”, $(\log |\epsilon/D|)^{n-3}$ に比例する項を “next singular terms” 以下 $(\log |\epsilon/D|)^{n-4}$ に比例する項を second order etc. と呼ぶことにしよう。そうすると “most singular terms” は “quantum fluctuation term” のみから来ることが I で示された。更に “spin precession term” を無視するかぎり, “next

*) この仕事の一部は筆者が物性研に所属していた時に行われた。

川村 清

singular term”はなく、残りは全て second order 以下であることを示した。³⁾

この論文の目的は、spin precession term の一部がたしかに “next singular term” に寄与することを示し、それによって next divergent term までに関して厳密な解を求め得ることを示すことである。

この論文では

$$\sum_{p\uparrow}^{(2)}(i\epsilon) = -N_i(-J/N)^2 T \sum_{\epsilon_1 p_1} (i\epsilon_1 - \epsilon_{p_1})^{-1} \omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1) \quad (1.1)$$

及び

$$\begin{aligned} \sum_{p\uparrow}^{(3)}(i\epsilon) = & -N_i(-J/N)^3 T^2 \sum_{\epsilon_1 \epsilon_2} \sum_{p_1 p_2} (i\epsilon_1 - \epsilon_{p_1})^{-1} \\ & \times (i\epsilon_2 - \epsilon_{p_2})^{-1} \omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1, \epsilon_2) \end{aligned} \quad (1.2)$$

を考え、 $\omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1)$ 及び $\omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1, \epsilon_2)$ に対する Spin precession effect の低次の項を考える。(notation は全て I に準ずる)。

§ 2. Spin の dynamical susceptibility

$\sum_{p\uparrow}^{(2)}(i\epsilon)$ を計算するためには

$$\omega(\omega) \equiv \langle\langle (S \cdot \sigma)_{\uparrow\alpha}(\omega), (S \cdot \sigma)_{\alpha\uparrow}(-\omega) \rangle\rangle \quad (2.1)$$

を計算すればよい。ところで

$$\langle\langle S_z(\omega), S_z(-\omega) \rangle\rangle$$

は、localized spin の帯磁率を与える。⁴⁾ したがって (2.1) は zero field における dynamical susceptibility に他ならない。

static susceptibility の摂動計算は最初、Miwa⁵⁾ によって行われ、その表式中の積分の収斂性についても詳しく論じられている。ここでは、dynamical susceptibility について同程度の計算を行い、その中の積分の可能性についても調べておく必要がある。

$\omega \neq 0$ の時、(2.1) は

$$\mathcal{M}(\omega) = (-i\omega)^{-1} \llbracket [H, (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\uparrow \alpha}] (\omega), (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\alpha \uparrow} (-\omega) \rrbracket \quad (2.2)$$

と表わされる。一般に, $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ を c-number として

$$[(\mathbf{S} \cdot \mathbf{A}), (\mathbf{S} \cdot \mathbf{B})] = i\mathbf{S} \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) \quad (2.3)$$

が成立する。これを使うと

$$\begin{aligned} & [H, (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\uparrow \alpha}] \\ &= i(-J/N) \sum_{p', p''} (\boldsymbol{\sigma}_{\alpha\beta} \times \mathbf{S}) \cdot \mathbf{a}_{p''\gamma}^+ \boldsymbol{\sigma}_{\gamma\delta} \mathbf{a}_{p'\delta} \end{aligned} \quad (2.4)$$

(2.4) を (2.2) に代入する。更に

$$\begin{aligned} & \llbracket (S_1 \mathbf{a}_{p''\gamma}^+ \mathbf{a}_{p'\delta}) (\omega), S_2(-\omega) \rrbracket \\ &= T \sum_{\epsilon'} \llbracket (S_1 \mathbf{a}_{p''\gamma}^+) (\omega - \epsilon'), \mathbf{a}_{p'\delta}(\epsilon'), S_2(-\omega) \rrbracket \exp[i\epsilon' D] \\ &= T \sum_{\epsilon'} (-J/N) (i\epsilon' - \epsilon_{p'})^{-1} \sum_{p'''} \llbracket (S_1 \mathbf{a}_{p''\gamma}^+) (\omega - \epsilon'), \\ & \quad (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\delta\lambda} \mathbf{a}_{p'''\lambda}(\epsilon'), S_2(-\omega) \rrbracket \exp[i\epsilon' D] \\ &= T^2 \sum_{\epsilon', \epsilon''} (-J/N) (i\epsilon' - \epsilon_{p'})^{-1} \sum_{p'''} \llbracket (S_1 \mathbf{a}_{p''\gamma}^+) (\omega - \epsilon'), \\ & \quad (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\delta\lambda}(\epsilon' - \epsilon''), \mathbf{a}_{p'''\lambda}(\epsilon''), S_2(-\omega) \rrbracket \exp[i\epsilon' D] \\ &\cong -(-J/N) T^2 \sum_{\epsilon', \epsilon''} (i\epsilon' - \epsilon_{p'})^{-1} (i\epsilon'' - \epsilon_{p''})^{-1} \exp[i\epsilon' D] \\ & \quad \times \llbracket S_1(\omega - \epsilon' + \epsilon''), (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\delta\lambda}(\epsilon' - \epsilon''), S_2(-\omega) \rrbracket \end{aligned} \quad (2.5)$$

を使うと,

$$\begin{aligned} \mathcal{M}(\omega) &= -i(-i\omega)^{-1} (-J/N)^2 T^2 \sum_{\epsilon', \epsilon''} \sum_{p', p''} (i\epsilon' - \epsilon_{p'})^{-1} (i\epsilon'' - \epsilon_{p''})^{-1} \\ & \quad \times \exp[i\epsilon' D] \llbracket \tilde{S}_1(\omega - \epsilon' + \epsilon''), \tilde{S}_2(\epsilon' - \epsilon''), S_3(-\omega) \rrbracket \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここで

川村 清

$$\begin{cases} \tilde{S}_1 = (\sigma_{\uparrow} \alpha \times \mathbf{S}) \cdot \sigma_{r\delta} , & \tilde{S}_2 = (\mathbf{S} \cdot \sigma)_{\delta r} \\ \tilde{S}_3 = (\mathbf{S} \cdot \sigma)_{\alpha\uparrow} \end{cases} \quad (2.7)$$

(2.6) に出て来た3体の spin Green 関数を計算する際に, I で self-energy part の most singular term を計算したのと同じ近似を使う。そうすると,

$$\begin{aligned} & \ll \tilde{S}_1(\omega - \epsilon' + \epsilon''), \tilde{S}_2(\epsilon' - \epsilon''), S_3(-\omega) \gg \\ &= (i\epsilon'' - i\epsilon')^{-1} [\ll [\tilde{S}_2, \tilde{S}_1](\omega), S_3(-\omega) \gg \\ & \quad + \ll \tilde{S}_1(\omega - \epsilon' + \epsilon''), [\tilde{S}_2, S_3](\epsilon' - \epsilon'' - \omega) \gg \\ & \quad \times (1 - \delta_{\epsilon', \epsilon''}) \\ & \quad - \delta_{\epsilon', \epsilon''} \sum_{\epsilon'' \neq \epsilon'} (i\epsilon'' - i\epsilon')^{-1} \ll \tilde{S}_1(\omega - \epsilon' + \epsilon''), \\ & \quad [\tilde{S}_2, \tilde{S}_3](\epsilon' - \epsilon'' - \omega) \gg \end{aligned} \quad (2.7)$$

(2.7) に $(i\epsilon' - \epsilon_{p'})^{-1} (i\epsilon'' - \epsilon_{p''})^{-1} \exp[i\epsilon' \Delta]$ をかけて, $\epsilon', \epsilon'', p', p''$ に関して和をとる。その際, ϵ' についての和が $\Delta = 0$ でも収斂することから, adiabatic factor は落してよいことが判る。また, (2.7) の右辺で $\ll [\tilde{S}_2, \tilde{S}_1](\omega), S_3(-\omega) \gg$ のある項は, われわれの簡単な band-shape すなわち

$$\rho(\epsilon_p) = \begin{cases} \rho & \text{for } |\epsilon_p| \leq D \\ 0 & \text{その他の場合} \end{cases}$$

を使うと, 消えるから, 結局,

$$\begin{aligned} & T^2 \sum_{\epsilon', \epsilon''} \sum_{p', p''} (i\epsilon' - \epsilon_{p'})^{-1} (i\epsilon'' - \epsilon_{p''})^{-1} \\ & \times \ll \tilde{S}_1(\omega - \epsilon' + \epsilon''), \tilde{S}_2(\epsilon' - \epsilon''), S_3(-\omega) \gg \\ &= -T^2 \sum_{\epsilon'} \sum_{\epsilon'' \neq \epsilon'} \sum_{p', p''} (i\epsilon' - \epsilon_{p'})^{-1} (i\epsilon' - \epsilon_{p''})^{-1} (i\epsilon'' - \epsilon_{p''})^{-1} \end{aligned}$$

$$\times \ll \tilde{S}_1(\omega - \epsilon' + \epsilon''), [\tilde{S}_2, \tilde{S}_3](\epsilon' - \epsilon'' - \omega) \gg \quad (2.9)$$

を得る。(2.9) の制限 $\epsilon'' \neq \epsilon'$ は, (2.8) を仮定すれば除ける。

(2.7) と (2.3) から

$$[\tilde{S}_2, \tilde{S}_3] = iS \cdot (\sigma_{\delta r} \times \sigma_{\alpha \uparrow}) \quad (2.10)$$

更に

$$\begin{aligned} & \ll \{(\sigma_{\uparrow \alpha} \times S) \cdot \sigma_{r \delta}\}(\omega), S \cdot (\sigma_{r \delta} \times \sigma_{\alpha \uparrow})(-\omega) \gg \\ &= 4 \ll (S \cdot \sigma)_{\uparrow \alpha}(\omega), (S \cdot \sigma)_{\alpha \uparrow}(-\omega) \gg \\ &\cong -4 S(S+1) \delta_{\omega, 0} / T + o(J^2) \end{aligned} \quad (2.11)$$

が成り立つ。(2.10), (2.11) を (2.9) に代入し, 更にそれを (2.6) に代入すると,

$$\begin{aligned} \omega(\omega) &= 4 S(S+1) (-i\omega)^{-1} (-J/N)^2 \\ &\times T \sum_{\epsilon'} \sum_{p', p''} (i\epsilon' - \epsilon_{p'})^{-1} (i\epsilon' - \epsilon_{p''})^{-1} (i\epsilon' - i\omega - \epsilon_{p''})^{-1} \end{aligned} \quad (2.12)$$

$T \sum_{\epsilon'}$ を解析接続の方法で計算すると,

$$\begin{aligned} \omega(\omega) &= 4 (-J/N)^2 S(S+1) (-i\omega)^{-1} \\ &\times \sum_{p', p''} (\epsilon_{p'} - \epsilon_{p''})^{-1} (\epsilon_{p'} - i\omega - \epsilon_{p''})^{-1} [f(\epsilon_{p'}) - f(\epsilon_{p''})] \end{aligned} \quad (2.13)$$

(2.13) の p', p'' についての積分は $\omega \neq 0$ である限り収斂している。後の便利の為に, (2.13) を次のように書きかえる。

$$\begin{aligned} \omega(\omega) &= -4 (-J/N)^2 S(S+1) \sum_{p', p''} [f(\epsilon_{p'}) - f(\epsilon_{p''})] \\ &\times \{ (i\omega)^{-1} + (\epsilon_{p'} - i\omega - \epsilon_{p''})^{-1} \} (\epsilon_{p'} - \epsilon_{p''})^{-2} \end{aligned} \quad (2.14)$$

(2.14) の $\{ \quad \}$ の中の2つの項の寄与を別々に計算すると, それは, 発散する。しかし, (2.13) が収斂することから, その困難は,

$$(\varepsilon_{p'} - \varepsilon_{p''})^{-2} \rightarrow (\varepsilon_{p'} - \varepsilon_{p''})^{-1} \mathcal{P}(\varepsilon_{p'} - \varepsilon_{p''})^{-1}$$

とおきかえて、除ける。ここで $\mathcal{P}$ は、積分の主値をとることを意味する。

(2.8) の band shape を仮定すると、

$$\begin{aligned} \mathcal{S}(\omega) &= -4(-J\rho/N)^2 S(S+1) \\ &\times \mathcal{P} \iint_{-D}^D \frac{f(\varepsilon') - f(\varepsilon'')}{(\varepsilon' - i\omega - \varepsilon'')(\varepsilon' - \varepsilon'')^2} d\varepsilon' d\varepsilon'' \end{aligned} \quad (2.15)$$

(2.15) は $i\omega \neq 0$ として求めたが、 $\omega = 0$ の時の $\mathcal{S}(\omega)$ は、次の sum-rule によって決る。

$$\begin{aligned} T \Sigma_{\omega} \mathcal{S}(\omega) &= \lim_{\tau' \rightarrow \tau} \ll \{ (S \cdot \sigma)(\tau), (S \cdot \sigma)(\tau') \}_+ \gg \\ &= -S(S+1) \end{aligned} \quad (2.16)$$

一見 (2.15) を ω で加えるとその和は発散しそうだが、実際は

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \mathcal{S}(\omega) \propto \frac{1}{i\omega} \mathcal{P} \iint_{-D}^D \frac{f(\varepsilon') - f(\varepsilon'')}{(\varepsilon' - \varepsilon'')^2} d\varepsilon' d\varepsilon''$$

で積分は消えるから、

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \mathcal{S}(\omega) \propto \omega^{-(1+\alpha)} \quad \alpha > 0$$

である。[(2.14) にもどれば $\alpha = 1$ である] そこで

$$\begin{aligned} T \Sigma_{\omega \neq 0} (\varepsilon' - i\omega - \varepsilon'')^{-1} \\ = \frac{1}{2} \coth \{ (\varepsilon' - \varepsilon'') / 2T \} - T(\varepsilon' - \varepsilon'')^{-1} \end{aligned} \quad (2.17)$$

(2.17) を使って (2.15) から

$$\begin{aligned} T \Sigma_{\omega \neq 0} \mathcal{S}(\omega) &= -4(-J\rho/N)^2 S(S+1) \\ &\times \mathcal{P} \iint_{-D}^D \frac{f(\varepsilon') - f(\varepsilon'')}{(\varepsilon' - \varepsilon'')^2} \left[\frac{1}{2T} \coth \left\{ \frac{\varepsilon' - \varepsilon''}{2T} \right\} - \frac{1}{(\varepsilon' - \varepsilon'')} \right] d\varepsilon' d\varepsilon'' \end{aligned} \quad (2.18)$$

そこで

$$\begin{aligned} \omega(\omega=0) &= -S(S+1)/T \\ &+ 4 \left(-\frac{J\rho}{N}\right)^2 S(S+1) \mathcal{D} \iint \left\{ \frac{f(\epsilon')(1-f(\epsilon''))}{T(\epsilon' - \epsilon'')^2} + \frac{2f(\epsilon')(1-f(\epsilon''))}{(\epsilon' - \epsilon'')^3} \right\} d\epsilon' d\epsilon'' \end{aligned} \quad (2.19)$$

(2.18) から判るように, (2.19) の積分は Miwa の指摘どおり収斂する。

(2.15) と (2.19) から ω の値のいかにかわらず,

$$\begin{aligned} \omega(\omega) &= -S(S+1)(\delta_{\omega,0}/T) \\ &+ \left(\frac{2J\rho}{N}\right)^2 S(S+1) \frac{\delta_{\omega,0}}{T} \mathcal{D} \iint \frac{f(\epsilon')(1-f(\epsilon''))}{(\epsilon' - \epsilon'')^2} d\epsilon' d\epsilon'' \\ &+ \left(\frac{2J\rho}{N}\right)^2 S(S+1) \mathcal{D} \iint \frac{f(\epsilon') - f(\epsilon'')}{(\epsilon' - i\omega - \epsilon'')(\epsilon' - \epsilon'')^2} d\epsilon' d\epsilon'' \end{aligned} \quad (2.20)$$

(2.20) で $\omega \neq 0$ のときは, $\mathcal{D}$ -記号で積分は収斂し, $\omega = 0$ のときは, 第 2, 第 3 項の和の積分は収斂している。

簡単の為, 以下で $\mathcal{D}$ -記号は, 省略する。

§ 3. $\Sigma^{(2)}(i\epsilon)$ の計算

(2.20) を (1.1) に代入すると,

$$\begin{aligned} \Sigma_{p \uparrow}^{(2)}(i\epsilon) &= N_1 (J/N)^2 \Sigma_{p_1} (i\epsilon - \epsilon_{p_1})^{-1} S(S+1) \\ &- N_1 (2J/N)^4 S(S+1) \Sigma_{p_1} (i\epsilon - \epsilon_{p_1})^{-1} \Sigma_{p', p''} \\ &\quad f(\epsilon_{p'}) [1 - f(\epsilon_{p''})] (\epsilon_{p'} - \epsilon_{p''})^2 \\ &- N_1 (2J/N)^4 S(S+1) T \Sigma_{\epsilon_1} \Sigma_{p_1} \Sigma_{p', p''} (i\epsilon_1 - \epsilon_{p_1})^{-1} \\ &\quad \frac{f(\epsilon_{p'} - i\epsilon + i\epsilon_1 - \epsilon_{p''})}{(\epsilon_{p'} - i\epsilon + i\epsilon_1 - \epsilon_{p''})^2} \\ &\quad \times (\epsilon_{p'} - \epsilon_{p''})^{-2} [f(\epsilon_{p'}) - f(\epsilon_{p''})] \end{aligned} \quad (3.1)$$

川村 清

(3.1) で ϵ_1 -sum を行くと,

$$\begin{aligned} & T \sum_{\epsilon_1} (i\epsilon_1 - \epsilon_{p_1})^{-1} (\epsilon_{p'} - i\epsilon + i\epsilon_1 - \epsilon_{p''})^{-1} \\ &= -\frac{1}{2} \left[\text{th}(\epsilon_{p_1}/2T) - \text{cth}\{(\epsilon_{p''} - \epsilon_{p'})/2T\} \right] \\ & \quad (\epsilon_{p_1} - i\epsilon + \epsilon_{p_1} - \epsilon_{p''})^{-1} \\ &= [N(\epsilon_{p''} - \epsilon_{p'}) + f(\epsilon_{p_1})] (\epsilon_{p'} - i\epsilon + \epsilon_{p_1} - \epsilon_{p''})^{-1} \end{aligned}$$

したがって, (3.1) から

$$\begin{aligned} \sum_{p \uparrow}^{(2)} (i\epsilon) &= (J/N)^2 N_1 S(S+1) \sum_{p_1} (i\epsilon - \epsilon_{p_1})^{-1} \\ &- N_1 (2J/N)^4 S(S+1) \sum_{p_1} (i\epsilon - \epsilon_{p_1})^{-1} \sum_{p', p''} (\epsilon_{p'} - \epsilon_{p''})^{-1} \\ & \quad (\epsilon_{p'} - i\epsilon + \epsilon_{p_1} - \epsilon_{p''})^{-1} \times f(\epsilon_{p_1}) [1 - f(\epsilon_{p''})] \\ &- N_1 (2J/N)^4 S(S+1) \sum_{p_1} \sum_{p', p''} (\epsilon_{p'} - \epsilon_{p''})^{-2} (\epsilon_{p'} - i\epsilon + \epsilon_{p_1} - \epsilon_{p''})^{-1} \\ & \quad f(\epsilon_{p_1}) [f(\epsilon_{p'}) - f(\epsilon_{p''})]. \quad (3.2) \end{aligned}$$

(3.2) で $i\epsilon \rightarrow \epsilon + i\delta$ とおいて, 右辺の imaginary part で $(2J/N)^4$ に比例する項は,

$$- \pi (2J/N)^4 S(S+1) \rho^3 I(\epsilon)$$

になる。ここで,

$$I(\epsilon) = \int \int d\epsilon' d\epsilon'' f(\epsilon - \epsilon' + \epsilon'') [f(\epsilon') - f(\epsilon'')] (\epsilon' - \epsilon'')^{-2} \quad (3.3)$$

$T=0$ で, この積分は, 次のようになる。

$$I(\epsilon) = I_1(\epsilon) + I_2(\epsilon)$$

$$I_1(\epsilon) = \int_{-D}^D \int_{-D}^D d\epsilon' d\epsilon'' \frac{f(\epsilon - \epsilon' + \epsilon'')}{(\epsilon' - \epsilon'')^2} f(\epsilon') [1 - f(\epsilon'')]$$

$$I_2(\epsilon) = - \int_{-D}^D d\epsilon' d\epsilon'' \frac{f(\epsilon - \epsilon' + \epsilon'')}{(\epsilon' - \epsilon'')^2} f(\epsilon'') [1 - f(\epsilon')]$$

として, $\epsilon < 0$ ならば

$$I_1(\epsilon) = \int_0^{-\epsilon} d\epsilon'' \int_{\epsilon'' + \epsilon}^0 d\epsilon' (\epsilon' - \epsilon'')^{-2}$$

$$= -1 - \int_0^{\epsilon} (\epsilon'')^{-1} d\epsilon''$$

$$I_2(\epsilon) = - \int_{-D}^0 d\epsilon'' \int_0^D d\epsilon' (\epsilon' - \epsilon'')^{-2}$$

$$= \log 2 + \int_{-D}^0 (\epsilon'')^{-1} d\epsilon''$$

これをあわせて,

$$I(\epsilon) = \log |\epsilon/D| \quad (3.4)$$

故に

$$\begin{aligned} \mathcal{J}_m \sum_{p \uparrow}^{(2)} (\epsilon + i\delta) &= -\pi \rho N_1 S(S+1) \\ &\times [1 - (2J\rho/N)^2 \log |\epsilon/D| + \dots] \end{aligned} \quad (3.5)$$

(3.5) は Miwa の与えた式からも得られる。⁵⁾

§ 4. $\Sigma^{(3)}(i\epsilon)$ の計算

(1.2) の spin Green 関数は次のように計算出来る。²⁾

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1, \epsilon_2) &= \{ 2(i\epsilon_2 - i\epsilon_1)^{-1} (1 - \delta_{\epsilon_1 \epsilon_2}) [\mathcal{A}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_2) - \mathcal{A}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1)] \\ &\quad + (i\epsilon_2 - i\epsilon_1)^{-1} \ll (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\uparrow\alpha}(\epsilon - \epsilon_1), [\mathbf{H}, (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\alpha\beta}] (\epsilon_1 - \epsilon_2), \\ &\quad (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\beta\uparrow}(\epsilon_2 - \epsilon) \gg \} (1 - \delta_{\epsilon_1 \epsilon_2}) \end{aligned}$$

$$- \delta_{\varepsilon_1 \varepsilon_2} \sum_{\varepsilon_2 \neq \varepsilon_1} \omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\varepsilon, \varepsilon_1, \varepsilon_2) \quad (4.1)$$

(2.6) を求めたのと同様の手続きで

$$\begin{aligned} & \ll (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\uparrow\alpha}(\varepsilon - \varepsilon_1), [H, (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\alpha\beta}](\varepsilon_1 - \varepsilon_2), (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\beta\uparrow}(\varepsilon_2 - \varepsilon) \gg \\ &= -i(-i\omega)^{-1}(-J/N)^2 T^2 \sum_{\varepsilon' \varepsilon''} \sum_{p' p''} (i\varepsilon' - \varepsilon_{p'})^{-1} (i\varepsilon'' - \varepsilon_{p''})^{-1} \\ & \quad \times \exp[i\varepsilon' \Delta] \ll S_1(\varepsilon - \varepsilon_1), \tilde{S}_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon' - \varepsilon''), \tilde{S}_3(\varepsilon'' - \varepsilon'), \\ & \quad S_4(\varepsilon_2 - \varepsilon) \gg \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{cases} S_1 = (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\uparrow\alpha} & \tilde{S}_2 = (\boldsymbol{\sigma}_{\alpha\beta} \times \mathbf{S}) \cdot \boldsymbol{\sigma}_\tau \\ \tilde{S}_3 = (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\delta\tau} & S_4 = (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\beta\uparrow} \end{cases} \quad (4.3)$$

(2.7) を経て (2.9) が得られる手続きで (4.2) の summation は

$$\begin{aligned} & - T^2 \sum_{\varepsilon'} \sum_{\varepsilon''} \sum_{p' p''} (i\varepsilon' - \varepsilon_{p'})^{-1} (i\varepsilon' - \varepsilon_{p''})^{-1} (i\varepsilon'' - \varepsilon_{p''})^{-1} \\ & \times [\ll [\tilde{S}_3, S_1](\varepsilon - \varepsilon_1 + \varepsilon'' - \varepsilon'), \tilde{S}_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon' - \varepsilon''), S_4(\varepsilon_2 - \varepsilon) \gg \\ & + \ll S_1(\varepsilon - \varepsilon_1), \tilde{S}_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon' - \varepsilon''), [\tilde{S}_3, S_4](\varepsilon'' - \varepsilon' + \varepsilon_2 - \varepsilon) \gg] \\ &= T^2 \sum_{\varepsilon'} \sum_{\varepsilon'' \neq \varepsilon' - \varepsilon_2 + \varepsilon_1} (i\varepsilon' - \varepsilon_{p'})^{-1} (i\varepsilon' - \varepsilon_{p''})^{-1} (i\varepsilon'' - \varepsilon_{p''})^{-1} \\ & \quad \times (i\varepsilon' - i\varepsilon_2 + i\varepsilon_1 - \varepsilon_{p''})^{-1} [\ll [\tilde{S}_2, [\tilde{S}_3, S_1]](\varepsilon - \varepsilon_2), S_4(\varepsilon_2 - \varepsilon) \gg \\ & \quad + \ll S_1(\varepsilon - \varepsilon_1), [\tilde{S}_2, [\tilde{S}_3, S_4]](\varepsilon_1 - \varepsilon) \gg] \\ & - T^2 \sum_{\varepsilon'} \sum_{\varepsilon'' \neq \varepsilon' - \varepsilon_2 + \varepsilon_1} (i\varepsilon' - \varepsilon_{p'})^{-1} (i\varepsilon' - \varepsilon_{p''})^{-1} (i\varepsilon'' - \varepsilon_{p''})^{-1} \\ & \quad \times (i\varepsilon'' - i\varepsilon' + i\varepsilon_2 - i\varepsilon_1)^{-1} [\ll [\tilde{S}_3, S_1](\varepsilon - \varepsilon_1 + \varepsilon'' - \varepsilon'), \\ & \quad [\tilde{S}_2, S_4](\varepsilon' - \varepsilon'' + \varepsilon_1 - \varepsilon) \gg \\ & \quad + \ll [\tilde{S}_2, S_1](\varepsilon - \varepsilon_2 + \varepsilon' - \varepsilon''), [\tilde{S}_3, S_4](\varepsilon'' - \varepsilon' + \varepsilon_2 - \varepsilon) \gg] \end{aligned} \quad (4.4)$$

(2.3) を使うと, (4.4) の $\tilde{S}_2$ を含まない commutator は, すぐに計算出来る。 $\tilde{S}_2$ を含む commutator は,

$$\begin{aligned} (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\alpha\beta} (\boldsymbol{\sigma}_{\beta r}) &= \mathbf{S} \delta_{\alpha r} - i(\mathbf{S} \times \boldsymbol{\sigma})_{\alpha r} \\ (\boldsymbol{\sigma}_{\alpha\beta}) (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma})_{\beta r} &= \mathbf{S} \delta_{\alpha r} + i(\mathbf{S} \times \boldsymbol{\sigma})_{\alpha r} \end{aligned} \quad (4.5)$$

及び

$$\begin{aligned} (\mathbf{S} \times \mathbf{A}) \cdot (\mathbf{S} \times \mathbf{B}) &= (\mathbf{S} \times \mathbf{A}) \cdot (\mathbf{S} \times \mathbf{B}) \\ &= [(\mathbf{S} \cdot \mathbf{A}), (\mathbf{S} \cdot \mathbf{B})] \end{aligned} \quad (4.6)$$

を使って計算出来て, 次の式を得る。

$$\begin{aligned} & T^2 \sum_{\epsilon'' \epsilon'} \sum_{p' p''} (i\epsilon' - \epsilon_{p'})^{-1} (i\epsilon'' - \epsilon_{p''})^{-1} \\ & \times \langle\langle S_1(\epsilon - \epsilon_1), \tilde{S}_2(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon' - \epsilon''), \tilde{S}_3(\epsilon'' - \epsilon'), S_4(\epsilon_2 - \epsilon) \rangle\rangle \\ & = iT^2 \sum_{\epsilon'} \sum_{\epsilon'' \neq \epsilon' - \epsilon_2 + \epsilon_1} \sum_{p' p''} (i\epsilon' - \epsilon_{p'})^{-1} (i\epsilon' - \epsilon_{p''})^{-1} (i\epsilon'' - \epsilon_{p''})^{-1} \\ & \times (i\epsilon' - i\epsilon_2 + i\epsilon_1 - \epsilon_{p''})^{-1} \\ & \times [\langle\langle \{(\boldsymbol{\sigma}_{\uparrow\beta} \times \mathbf{S}) \cdot \boldsymbol{\sigma}_{r\delta}\} (\epsilon - \epsilon_2 + \epsilon' - \epsilon''), \\ & \quad \{(\boldsymbol{\sigma}_{\beta\uparrow} \times \mathbf{S}) \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\delta r}\} (\epsilon'' - \epsilon' + \epsilon_2 - \epsilon) \rangle\rangle \\ & - \langle\langle \{(\boldsymbol{\sigma}_{\uparrow\alpha} \times \mathbf{S}) \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\delta r}\} (\epsilon - \epsilon_1 + \epsilon'' - \epsilon'), \\ & \quad \{(\boldsymbol{\sigma}_{\alpha\uparrow} \times \mathbf{S}) \cdot \boldsymbol{\sigma}_{r\delta}\} (\epsilon_1 - \epsilon'' + \epsilon' - \epsilon) \rangle\rangle] \\ & - 4iT^2 \sum_{\epsilon'} \sum_{\epsilon'' \neq \epsilon' - \epsilon_2 + \epsilon_1} \sum_{p' p''} (i\epsilon' - \epsilon_{p'})^{-1} (i\epsilon' - \epsilon_{p''})^{-1} (i\epsilon'' - \epsilon_{p''})^{-1} \\ & \times (i\epsilon'' - i\epsilon' + i\epsilon_2 - i\epsilon_1)^{-1} \\ & \times [\mathcal{A}_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_2) - \mathcal{A}_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1)] \end{aligned} \quad (4.7)$$

解析接続の方法と (2.11) を使って, (4.7) の ϵ'' の和を計算して, (4.2) を求め, (4.1), (2.1) から,

川村 清

$$\sum_{p \uparrow}^{(3)} (i\epsilon) = \sum_{p \uparrow}^{(3)'} (i\epsilon) + \sum_{p \uparrow}^{(3)''} (i\epsilon), \quad (4.8a)$$

$$\begin{aligned} \sum_{p \uparrow}^{(3)'} (i\epsilon) &= 2(-J/N)^3 N_i T \sum_{\epsilon_1} \sum_{p_1} \{ (i\epsilon_1 - \epsilon_{p_1})^{-1} \\ &\times \mathcal{A}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1) \} \sum_{p_2} (\epsilon_{p_1} - \epsilon_{p_2})^{-1} \text{th}(\epsilon_{p_2}/2T), \end{aligned} \quad (4.8b)$$

$$\begin{aligned} \sum_{p \uparrow}^{(3)''} (i\epsilon) &= -4N_i S(S+1)(-J/N)^5 T^2 \sum_{\epsilon_1, \epsilon_2} \sum_{p_1, p_2} (i\epsilon_2 - \epsilon_{p_2})^{-1} \\ &\times (\epsilon_{p_2} - \epsilon_{p_1})^{-1} (i\epsilon_1 - \epsilon_{p_1})^{-1} T \sum_{\epsilon'} \sum_{p'p''} (i\epsilon' - \epsilon_{p'})^{-1} (i\epsilon' - \epsilon_{p''})^{-1} \\ &\times (i\epsilon' - i\epsilon_2 + i\epsilon_1 - \epsilon_{p''})^{-1} \\ &\times [(\delta_{\epsilon, \epsilon_2}/T) \text{th}(\epsilon_{p''}/2T) + (i\epsilon' - i\epsilon_2 + i\epsilon - \epsilon_{p''})^{-1}] \end{aligned} \quad (4.9)$$

(4.8b) の $\mathcal{A}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1)$ は, §§ 2~3 の方法で計算出来るから $\sum_{p \uparrow}^{(3)''} (i\epsilon)$ の方が興味がある。(4.9) の $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon'$ について和をとると, $\delta_{\epsilon, \epsilon_2}/T$ に比例する項からの寄与は

$$\begin{aligned} I_1 &= \sum_{p_1 p_2 p' p''} (i\epsilon - \epsilon_{p_2})^{-1} (\epsilon_{p_2} - \epsilon_{p_1})^{-1} (i\epsilon - \epsilon_{p_1} + \epsilon_{p''} - \epsilon_{p'})^{-1} \\ &\times (\epsilon_{p'} - \epsilon_{p''})^{-1} \text{th}(\epsilon_{p''}/2T) \\ &\times [f(\epsilon_{p'}) \{1 - f(\epsilon_{p''})\} f(\epsilon_{p_1}) + \{1 - f(\epsilon_{p'})\} \{1 - f(\epsilon_{p_1})\} f(\epsilon_{p''})] \end{aligned} \quad (4.10)$$

に比例し, 残りは

$$\begin{aligned} I_2 &= \sum_{p_1 p_2 p' p''} (\epsilon_{p'} - \epsilon_{p''})^{-1} (\epsilon_{p_2} - \epsilon_{p_1})^{-1} (\epsilon_{p_1} - \epsilon_{p_2} + \epsilon_{p'} - \epsilon_{p''})^{-1} \\ &\times (i\epsilon - \epsilon_{p_2} + \epsilon_{p'} - \epsilon_{p''})^{-1} \\ &\times [\{1 - f(\epsilon_{p'})\} f(\epsilon_{p''}) \{1 - f(\epsilon_{p_1})\} f(\epsilon_{p_2}) \\ &- f(\epsilon_{p'}) \{1 - f(\epsilon_{p''})\} f(\epsilon_{p_1}) \{1 - f(\epsilon_{p_2})\}] \end{aligned} \quad (4.11)$$

$i\epsilon \rightarrow \epsilon + i\delta$ とおくと,

$$\mathcal{J}_m I_2(\varepsilon + i\delta)$$

$$\propto \int \cdots \int_{-D}^D d\varepsilon_1 d\varepsilon_2 d\varepsilon' (\varepsilon - \varepsilon_1)^{-1} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^{-1} (\varepsilon - \varepsilon_2)^{-1} \\ \times \left[\{1 - f(\varepsilon')\} f(\varepsilon - \varepsilon_2 + \varepsilon') \{1 - f(\varepsilon_1)\} f(\varepsilon_2) \right. \\ \left. - f(\varepsilon') \{1 - f(\varepsilon - \varepsilon_2 + \varepsilon')\} f(\varepsilon_1) \{1 - f(\varepsilon_2)\} \right] \quad (4.12)$$

仮に $\varepsilon > 0$ とすると [] の第一項だけが残る, ε' についての積分は $\varepsilon - \varepsilon_2$ に比例するから,

$$\mathcal{J}_m I_2(\varepsilon + i\delta) \\ = \int_0^D d\varepsilon_1 \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon} \left[\log \left| \frac{\varepsilon_1}{D} \right| - \log \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon}{D} \right| \right] \quad (4.13)$$

ここで

$$\int_0^D d\varepsilon_1 \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon} \log \left| \frac{\varepsilon_1}{D} \right| d\varepsilon_1 \cong \iint_0^D \frac{d\varepsilon_1 d\varepsilon_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon)(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \\ = -\frac{1}{2} \iint_0^D \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon} \frac{1}{\varepsilon_2 - \varepsilon} d\varepsilon_1 d\varepsilon_2 = -\frac{1}{2} \log^2 \left| \frac{\varepsilon}{D} \right|$$

を使うと, (4.13) は消える。故に

$$\mathcal{J}_m I_2(\varepsilon + i\delta) \cong 0$$

次に $\mathcal{J}_m I_1(3 + i\delta)$ を計算する。

$$\mathcal{J}_m I_1(\varepsilon + i\delta) = J_1(\varepsilon) + J_2(\varepsilon)$$

$$J_1(\varepsilon) = \int \cdots \int_{-D}^D (\varepsilon - \varepsilon_1)^{-1} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^{-1} (\varepsilon - \varepsilon_2)^{-1} \\ \times \{ f(\varepsilon - \varepsilon_1 + \varepsilon'') [1 - f(\varepsilon'')] f(\varepsilon_1) \\ + [1 - f(\varepsilon - \varepsilon_1 + \varepsilon'')] [1 - f(\varepsilon_1)] f(\varepsilon'') \} d\varepsilon_1 d\varepsilon_2 d\varepsilon'' \quad (4.14a)$$

$$\begin{aligned}
J_2(\varepsilon) &= \int \cdots \int_{-D}^D (\varepsilon' - \varepsilon'')^{-1} (\varepsilon - \varepsilon_1)^{-1} (\varepsilon - \varepsilon_1 + \varepsilon'' - \varepsilon')^{-1} \\
&\quad \times \{f(\varepsilon') [1 - f(\varepsilon'')] f(\varepsilon_1) + [1 - f(\varepsilon')] [1 - f(\varepsilon_1)] f(\varepsilon'')\} \\
&\quad \times d\varepsilon' d\varepsilon_1 d\varepsilon'' \quad (4.14b)
\end{aligned}$$

(4.14a) で ε'' についての積分を行うと,

$$\begin{aligned}
J_1(\varepsilon) &= - \int_{-D}^D d\varepsilon_2 \int_{-D}^0 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^{-1} (\varepsilon - \varepsilon_2)^{-1} \\
&\quad + \int_{-D}^D d\varepsilon_2 \int_0^D (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^{-1} (\varepsilon - \varepsilon_2)^{-1} \\
&= 2 \int_{-D}^D \log \left| \frac{\varepsilon_2}{D} \right| (\varepsilon - \varepsilon_2)^{-1} d\varepsilon_2 \quad (4.15)
\end{aligned}$$

(4.15) は, $\varepsilon \rightarrow 0$ でも non-singular である。 $J_2(\varepsilon)$ は少し複雑で

$$\begin{aligned}
J_2(\varepsilon) &= \int_{-D}^0 d\varepsilon_1 \int_{-D}^0 d\varepsilon' \int_0^D d\varepsilon'' \frac{1}{(\varepsilon - \varepsilon_1)(\varepsilon' - \varepsilon'')(\varepsilon - \varepsilon_1 + \varepsilon'' - \varepsilon')} \\
&\quad + \int_0^D d\varepsilon_1 \int_0^D d\varepsilon' \int_{-D}^0 d\varepsilon'' \frac{1}{(\varepsilon - \varepsilon_1)(\varepsilon' - \varepsilon'')(\varepsilon - \varepsilon_1 + \varepsilon'' - \varepsilon')} \quad (4.16)
\end{aligned}$$

部分分数に分解して ε_1 について積分すると

$$\begin{aligned}
J_2(\varepsilon) &= - \left\{ \int_{-D}^0 d\varepsilon' \int_0^D d\varepsilon'' - \int_0^D d\varepsilon' \int_{-D}^0 d\varepsilon'' \right\} \\
&\quad \left[\log \left| \frac{\varepsilon}{D} \right| - \log \left| \frac{\varepsilon + \varepsilon'' - \varepsilon'}{D} \right| \right] \frac{1}{(\varepsilon' - \varepsilon'')^2} \quad (4.17)
\end{aligned}$$

ε'' について積分すると

$$\begin{aligned}
J_2(\varepsilon) &= \int_{-D}^D \frac{d\varepsilon'}{\varepsilon'} \left\{ \log \left| \frac{\varepsilon}{D} \right| - \log \left| \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{D} \right| \right\} \\
&\quad + \int_{-D}^D \frac{d\varepsilon'}{\varepsilon} \left\{ \log \left| \frac{\varepsilon'}{D} \right| - \log \left| \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{D} \right| \right\} \quad (4.18)
\end{aligned}$$

この二つは, 明らかに ε に関して non-singular である。

以上のように, $\mathcal{J}_m \sum_{p \uparrow}^{(3)} (\epsilon + i\delta)$ は, 少くともわれわれの簡単な band - shape では non-singular である。

§ 5. Discussion

$\sum_{p \uparrow}^{(2)}$ 及び $\sum_{p \uparrow}^{(3)}$ の計算から判ったこと, あるいは推測されることは次のようなものである。すなわち, I で導びいた spin Green 関数に対する運動方程式

$$\begin{aligned}
 & \omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n) \\
 &= (i\epsilon_n - i\epsilon_{n-1})^{-1} [\ll \dots, [H, S_n](\epsilon_{n-1} - \epsilon_n), S_{n+1}(\epsilon_n - \epsilon) \gg \\
 &+ \ll \dots, S_{n-1}(\epsilon_{n-2} - \epsilon_{n-1}), [S_n, S_{n+1}](\epsilon_{n-1} - \epsilon) \gg \\
 &+ \ll \dots, [S_n, S_{n-1}](\epsilon_{n-2} - \epsilon_n) S_{n+1}(\epsilon_n - \epsilon) \gg \\
 &+ \dots \\
 &+ \ll [S_n, S_1](\epsilon - \epsilon_1 + \epsilon_{n-1} - \epsilon_n) \dots, S_{n-1}(\epsilon_{n-2} - \epsilon_{n-1}), \\
 &S_{n+1}(\epsilon_n - \epsilon) \gg] (1 - \delta_{\epsilon_n \epsilon_{n-1}}) \\
 &- \delta_{\epsilon_n \epsilon_{n-1}} \sum_{\epsilon_n \neq \epsilon_{n-1}} \omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n) \\
 &- (\delta_{\epsilon_n \epsilon_n} \delta_{\epsilon_n \epsilon_{n-1}} / T^2) S(S+1) \omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_{n-2})
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

まず I で示したことは, (5.1) 右辺最後の elastic scattering term は second order 以下であること, 及び, $m \leq n-2$ で $[S_n, S_m]$ を含む項も second order であることだった。

一方, 今の論文で示したことは, $[H, S_n]$ を含む項が $n=1$ なら next singular term に効くが, $n=2$ では効かないということである。そこで spin Green 関数の運動方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1, \dots, \epsilon_n) \\
 &= [2(i\epsilon_n - i\epsilon_{n-1})^{-1} \omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1, \dots, \epsilon_{n-2}, \epsilon_n) \\
 &+ 2(i\epsilon_{n-1} - i\epsilon_n)^{-1} \omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1, \dots, \epsilon_{n-2}, \epsilon_{n-1})] (1 - \delta_{\epsilon_n \epsilon_{n-1}}) \\
 &- \delta_{\epsilon_n \epsilon_{n-1}} \sum_{\epsilon_n \neq \epsilon_{n-1}} \omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1, \dots, \epsilon_{n-2}, \epsilon_{n-1}) \\
 &\text{for } n \geq 2 \quad (5.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1) &= (i\epsilon_1 - i\epsilon)^{-1} \ll [H, S_1](\epsilon - \epsilon_1), S_2(\epsilon_1 - \epsilon) \gg \\
 &- S(S+1) \delta_{\epsilon \epsilon_1} / T \quad (5.3)
 \end{aligned}$$

(5.2) は I で示したように $\omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_m)$ ($1 \leq m \leq n$) を使って解けて,

$$\begin{aligned}
 & T^n \sum_{\epsilon_1, \dots, \epsilon_n} \sum_{p_1, \dots, p_n} \prod_{j=1}^n (i\epsilon_j - \epsilon_{p_j})^{-1} \omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1, \dots, \epsilon_n) \\
 &= n T \sum_{\epsilon_1} \sum_{p_1} (i\epsilon_1 - \epsilon_{p_1})^{-1} \omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1) \left\{ \sum_{p_2} \text{th}(\epsilon_{p_2}/2T) (\epsilon_{p_2} - \epsilon_{p_1})^{-1} \right\}^{n-1} \\
 &\quad (5.5)
 \end{aligned}$$

したがって self-energy part は

$$\begin{aligned}
 \Sigma_{p\uparrow}(i\epsilon) &= -N_1 T \sum_{\epsilon_1} \sum_{p_1} \frac{\omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1)}{i\epsilon_1 - \epsilon_{p_1}} \frac{1}{[1 - (2J\rho/N)g(\epsilon_{p_1})]^2} \\
 g(\epsilon) &= \mathcal{P} \int \frac{\text{th}(\epsilon'/2T)}{\epsilon' - \epsilon} d\epsilon' \quad (5.6)
 \end{aligned}$$

$\omega_{\uparrow\uparrow}^{(1)}(\epsilon, \epsilon_1)$ としては, たとえば § 2, § 3 で求めたものを使えばよいが, 完全を期するためには, dynamical susceptibility を most singular terms に関して, 完全に集めなくてはならない。また, § 2 では (2.11) を使ったが self-consistent に扱うためには, (2.11) の $o(J^2)$ と書いた項もキチンと求めるべきであろう。これに関しては, 後にゆずる。

文 献

- (1) K.Kawamura ; Prog. Theor. Phys. 30 (1968), 1375
- (2) 川村 清 ; 物性研究 10 (1968), 282
- (3) 川村 清 ; 物性研究 10 (1968), 297
- (4) R.Kubo ; J. Phys. Soc. Japan. 12 (1957), 570
- (5) H.Miwa ; Prog. Theor. Phys. 34 (1965), 1040