

## 最近の実験について

東大・理・物理 高木 伸

全般的なまとめは真木先生がされたので、極く最近の実験データ ( $\chi$  と  $\rho_s$ ) について少々の補足をし、簡単な解析をする。東大で行われたレゲット教授の講義 (近日中に物性研究に講義録の掲載をお願いする予定) からもいくつかの引用をさせて頂く。

i)  $T_c$  近傍での  $\chi$  の異常

融解曲線上での加圧実験および超音波吸収の実験<sup>1)</sup>から、 $T_c$  が磁場によって分裂する ( $\sim 6 \mu\text{K}/\text{KG}$ ) ことが分かっている。これは、A相がスピン三重項のESPであることに対する一つの支持を与える。融解線より下の圧力では、今までにこの現象は観測されていなかった。ところで、A相がスピン三重項ESPであるとすると、磁化Mは図1のような振舞を示す。<sup>2)</sup> ただし、 $M_n$  は正常相での磁化、 $\alpha$  はオーダー1の数である。磁場  $H \rightarrow 0$  のとき、 $T_{c1}(H)$  および  $T_{c2}(H)$  は共に  $T_c \equiv T_c(0)$  に近づき、帯磁率  $\chi$  は図2のようなとびを示す。最近観測されたMの振舞<sup>3)</sup>はこの結果と定性的に合う ( $\alpha \approx 5$ )。したがって、融解線以下の圧力でも  $T_c$  の分裂を観測したことになる。ただし、実験では  $T_{c2} < T < T_{c1}$  でのMの変化が直線的でないように見える。これに関する詳しい考察はまだなされていない。

## ii) B相の性格

B相では横磁気共鳴線がラーマー周波数からずれない。また帯磁率は正常値より小さくなる。したがってB相がBCS型の相であるならば、スピン三重項のBW型か、スピナー重項であるか、のいずれかである。弱結合BCS理論にランダウのフェルミ液体理論に現われる相互作用を加味してやると、 $T=0$  の帯磁率は、

$$\text{一重項} : \chi/\chi_n = 0$$

$$\text{BW(P波)} : \chi/\chi_n = \frac{2}{3} \frac{1 + \frac{1}{4} Z_0}{1 + \frac{1}{4} \left( \frac{2}{3} Z_0 + \frac{1}{15} Z_2 \right)} \sim 0.37 \quad (1)$$

となる。ただし、 $Z_0$ 、 $Z_2$  はフェルミ液体パラメータで、最後の数値は、 $Z_0 \sim -2.8$ 、 $Z_2 = 0$  として評価したものにすぎない。（ $Z_0$  と  $Z_2$  のみが現われたのは、P 波を考えたからである。） $Z_0$  の値を正常相での値と等しく取ってよい保証は多分ないであろうし、また  $Z_2$  は今の所正常相での値すら知られていない。したがって、実験と上の式を比較してただちに結論を出す訳にはいかない。（ちなみに、今の所最低温度でのデータは、 $T \sim 0.8 T_c$  で  $\chi/\chi_n \sim 3.5$  である。） $T \simeq T_c$  では、秩序パラメータによる展開ができて、

$$\begin{aligned} \text{一重項} &: \chi/\chi_n = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{4} Z_0} \frac{7\zeta(3)}{4\pi^2} \left(\frac{\Delta}{T_c}\right)^2 \\ \text{BW} &: \chi/\chi_n = 1 - \frac{1}{3} \frac{1}{1 + \frac{1}{4} Z_0} \frac{7\zeta(3)}{4\pi^2} \left(\frac{\Delta}{T_c}\right)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

となる。一重項と BW の違いは  $\frac{1}{3}$  の因子だけである。これは、BW の場合には秩序パラメータの三つの成分のうちの一つだけが  $\chi$  の減少に寄与することによる。ところで、ポールソン等の実験<sup>3)</sup> は、いくつかの圧力で行われているが、各圧力での  $T_c(P)$  を単位とした温度スケールで整理すると、圧力によらない式

$$\chi/\chi_n \simeq 1 - 4.7 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) \quad (3)$$

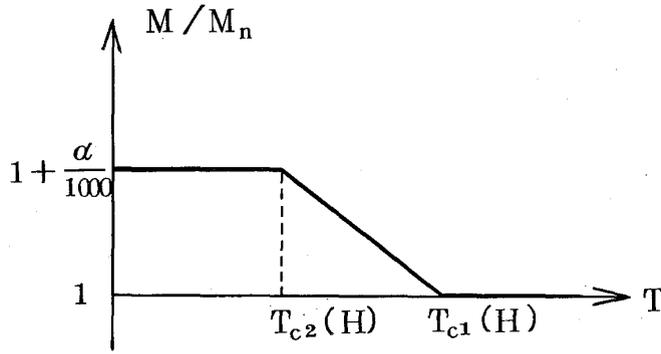
を得る。(2) と (3) を比べるには、 $\Delta^2$  の温度依存性を知らねばならないが、弱結合 BCS 理論から得られる  $\Delta^2$  を用いたのでは比熱のとびを過小評価してしまう。そこで、比熱のとびに合うように

$$\Delta^2 \rightarrow \frac{(\Delta C)_{\text{EXP}}}{(\Delta C)_{\text{BCS}}} \Delta_{\text{BCS}}^2 \sim 1.3 \Delta_{\text{BCS}}^2$$

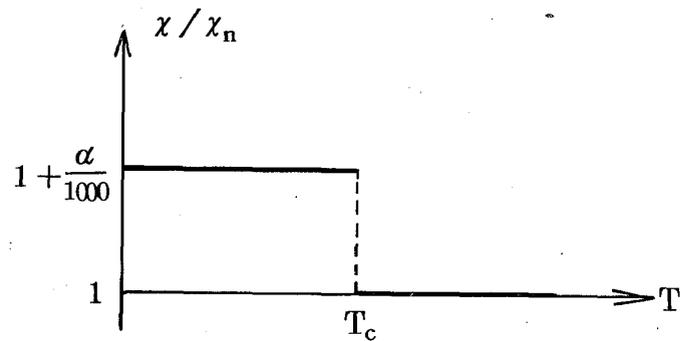
とおいてやると、

$$\begin{aligned} \text{一重項 (D波)} &: \chi/\chi_n = 1 - 6.1 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) \\ \text{BW (P波)} &: \chi/\chi_n = 1 - 2.9 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

となり、実験値(3)はこの中間にくる。もう少し確実な評価をするために、超流体密度  $\rho_s$  のデータと組合わせてみよう。 $\rho_s$  もやはり  $T_c(P)$  でスケールすると圧力によらない温



(図1)



(図2)

度依存性を示し,

$$\frac{\rho_s / \rho}{1 - x/x_n} \approx 0.1 \quad (5)$$

が得られている。一方, (2)に対応する理論式は

$$\rho_s / \rho = \frac{1}{1 + \frac{1}{3} F_1} \frac{7 \zeta(3)}{4 \pi^2} \left( \frac{\Delta}{T_c} \right)^2 \quad (6)$$

( $\rho_s$ は本来テンソルであるが, ここではその方向平均のみを問題にする。)したがって

$$\text{一重項} : \frac{\rho_s / \rho}{1 - x/x_n} = \frac{1 + \frac{1}{4} Z_0}{1 + \frac{1}{3} F_1} \approx 0.05 \quad (7)$$

$$\text{BW} : \frac{\rho_s / \rho}{1 - x/x_n} = \frac{3 (1 + \frac{1}{4} Z_0)}{1 + \frac{1}{3} F_1} \approx 0.15$$

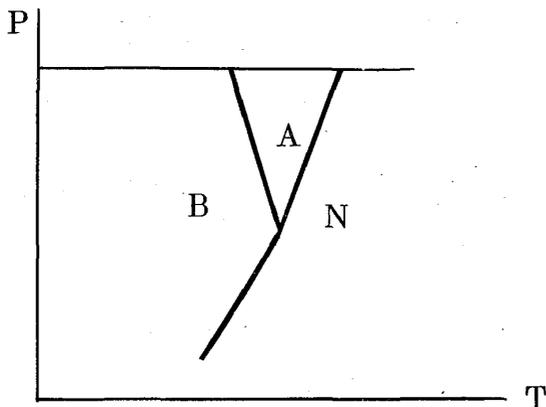
となり、やはり(5)の両側に来てしまう。(  $T_c$  近傍に話を限っているから、現われるパラメータは  $Z_0$  と  $F_1$  だけになり、しかも正常相での値をそのまま使ってよい。)

以上、 $\chi$  と  $\rho_s$  の実験からは、今の所、B相が一重項かBWかを明確に断定することは出来ない。

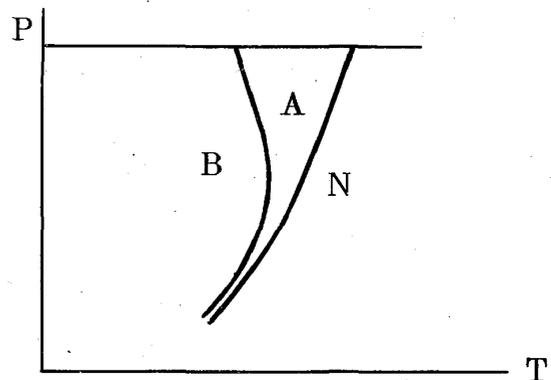
上述の考察で  $\rho_s$  のデータを用いた。ところで、 $\rho_s$  のデータは、A相とB相の間の境界(一次転移)でとびを示していない。したがって、実験はA相だけしか見ていないという意見もある。一方、B相は大きな過熱現象を示し、B相の臨界温度はA相のそれと非常に近く、両相の熱力学的性質はよく似ている。そのため、たとえとびがあっても、実験誤差の範囲になっている可能性がある。ここでは後者の見解を採った。

B相の性格を決める鍵の一つは、 $T_c$  の圧力依存性がA相のそれとなめらかにつながるかどうかにある。以前の報告<sup>5)</sup>では、なめらかでない可能性が指摘されていた(図3)が、最近の実験によると、非常に近い磁場( $\sim 400$  G)のもとでA相とB相の境界線が大きく裾を引くことが分かった(図4)。したがって、なめらかである可能性の方が強くなったように思われる。いずれにせよ、(図3)は熱力学に不自然であり、なめらかであるとすれば(図5)のようになることが理論的に期待される<sup>6)</sup>

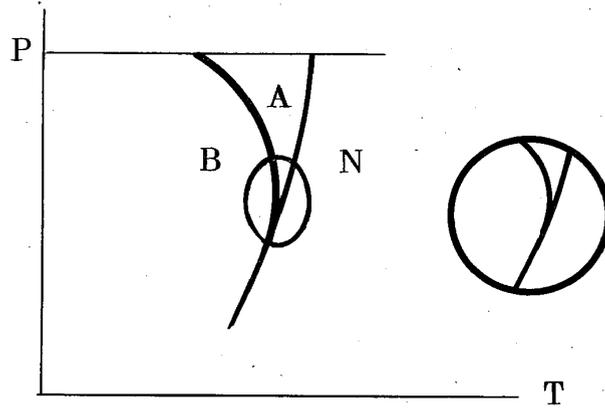
B相について決定的な実験として待たれるのは、やはり縦磁気共鳴の実験であろう。



(図3)  $H=0$



(図4)  $H \neq 0$



( 図 5 )  $H = 0$

文 献

- 1) W. J. Gully, D. D. Osheroff, D. T. Lawson, R. C. Richardson, D. M. Lee, Phys. Rev. A 8 (1973), 1633.
- 2) S. Takagi, Prog. Theor. Phys. to be published.
- 3) D. N. Paulson, H. Kojima, J. C. Wheatley, preprints.
- 4) H. Kojima, D. N. Paulson, J. C. Wheatley, Phys. Rev. Lett. 32 (1974), 141.
- 5) T. J. Greytak, R. T. Johnson, D. N. Paulson, J. C. Wheatley, Phys. Rev. Lett. 31 (1973), 452.
- 6) A. J. Leggett, Prog. Theor. Phys. to be published.