

V 液体 He^3 の素励起

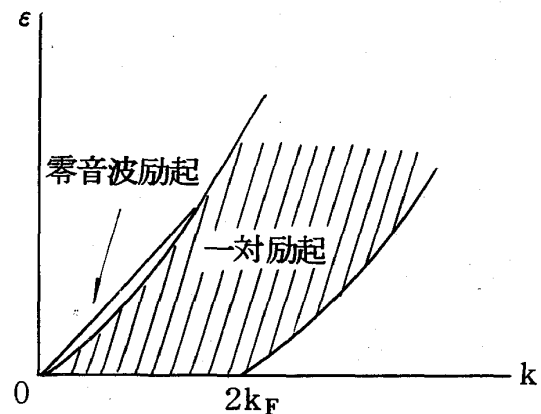
東教大理 宗田敏雄

(8月1日受理)

液体 He^3 の比熱, 帯磁率, 粘性, 熱伝導率の低温での性質は縮退理想フェルミ気体の性質に類似している。しかし, He^3 原子間の相互作用は極めて強く, 平均原子間距離にいる時でも, He^3 原子は隣接の原子の相互作用の到達範囲内にいる。この相い矛盾した状況を調和して説明する為に出現したのが, Landau¹⁾ による液体 He^3 の素励起を惹き起す準粒子の概念と, 準粒子の従う法則と素励起を記述するフェルミ液体の理論である。液体 He^3 では原子が互いに強い相互作用を及ぼし合って, 衝突によってひんばんに運動量やエネルギーを交換し合っている。ある特定の個別粒子を孤立したものとして運動量やエネルギーを考えることは意味がない。従って裸の He^3 原子は隣接の He^3 原子との相互作用で生ずる自己無撞着な場の中を運動する云わば衣を着た真の粒子となる。この真の粒子を準粒子と呼び, 液体 He^3 は準粒子の気体の集団となっている。この準粒子はスピンと運動量の量子数を与えれば唯一つに定まり, 裸の孤立した He^3 原子とは一対一に対応し, その総数は考えている系の He^3 原子の総数と同じである。

液体 He^3 の素励起は, 準粒子の作るフェルミ球で生ずる準粒子・準空孔の一対の個別励起と, その coherent な重ね合わせで生ずる (一種の集団運動である) 零音波励起並びに二対, ……多対個別励起からなっている。前二者の運動量 k とエネルギー ϵ の関係を図示すると次の様になる。

k_F はフェルミ運動量である。フェルミ球で表わされる基底状態からの準粒子の励起と, 準粒子間の相互作用とから種々の熱力学的, 輸送的性質を導くのがフェルミ液体の理論である。準粒子間のフェルミ面での相互作用を各角運動量状態に



第 1 図

投射して表わした Landau のパラメーターが導入される。パラメーターの値はこの理論から求められる比熱，帯磁率，拡散係数，音速等の量を実験値に等しく置くことによって求められるので，現象論的な理論と呼ばれる。そして実験との一致は凡そ極めて良い。

このフェルミ液体のパラメーターはいろいろな実験からきめられる余分の自由度があるし，自己無撞着かどうか解る様になっている。通常は各角運動量状態の展開の最初の数項だけで合わせている訳だから，もし異なる実験から定めたパラメーターの最初の数項で不一致の時はさらに展開の先の方の項を持って来て合わせれば，前述の展開の先の方迄取る自由度がない様であるけれども，実際にはそうではなくて物理量は同様な展開項をもっているので，異なる主要項があれば，もうそこで不一致として自己撞着性が問題になる。この例が He^3 の有効質量²⁾と低温での比熱の振舞い³⁾である。前者の例では，比熱よりの有効質量が約 $2.5 m_{\text{He}^3}$ であるのに，帯磁率と拡散係数から求めたそれは約 $9.2 m_{\text{He}^3}$ に及ぶ。後者の例では温度 T に比例する項の他に T^2 または $T^3 \ln T$ に比例する項がある。

この不一致をフェルミ液体の破産と見て登場したのが，スピンの揺らぎを導入し，その素励起をパラマグノンと呼ぶ，殆ど強磁性的フェルミ液体の理論⁴⁾である。このパラマグノンは上向きと下向きの相反するスピンを持ち δ 関数的な相互作用をする粒子と空孔の対励起である。このスピン密度波のゆらぎをハートレーホックで計算して，帯磁率を求めて実験値に合う様に前記相互作用の大きさを求める。そしてパラマグノンによる比熱のずれをスピン密度のバブルダイアグラムの繰返しについて計算すると T に比例する項の他として $T^3 \ln T$ の項が表われ，この係数を前記帯磁率によって求めた相互作用の大きさを求めると， $1.0 \text{ m}^\circ \text{K}$ 迄は Wheatley の実験³⁾と合わせることが出来る。このパラマグノン理論に対して三沢⁵⁾が帯磁率の計算に有効質量を持った粒子空孔の相互作用のバブルの繰返しを計算すべきだと異論を唱えたが，これは高密度電子ガスの R P A の計算で裸の質量の電子空孔の励起を計算する代りに有効質量の電子空孔の励起を計算せよと云うことと同じで一般的には受入れられていない。

このパラマグノンと準粒子の相互作用を取入れてフェルミ液体の理論を拡張したのが，Kane, Wagner と Amit⁶⁾の理論だがくりこまれた $B S$ 方程式を用いての理論であるが，比熱を求めるのに計算不可能な係数が $T^3 \ln T$ に表われて不完全な状態である。またパラマグノンを用いないで，確井のフェルミ液体の理論の拡張を用いて説明しようとする三沢⁷⁾の試みがある。

最近の仕事としては He^3 のスピン波の理論が Ma, Beal Monod と Fredkin⁸⁾ によ

って試みられまだ実験的に検証が得られていないのと、筆者による高運動量の零音波励起の対による Raman 散乱の理論⁹⁾があるが、まだ実験の温度が高いので検証されるに到っていない。

- 1) L.D.Landau, JETP 3 (1957) 920, 5 (1957) 101.
- 2) Keller, $He^3 - He^4$ (1969) Plenum Press N.T.
- 3) A.C.Mota, R.P.Platzeck, R. Rappand J.C. Wheatley, Phy. Rev. 177 (1969) 166.
- 4) S.Doniach and S.Engelsberg, P.R.L. 17 (1966) 750.
N.F.Berk and J.R. Schrieffer, P.R.L. 17 (1966) 433.
W.F.Brinkman and S. Engelsberg P.R. 169 (1968) 417.
- 5) S.Misawa Prog, Theor. Phys. 38 (1967) 1207.
- 6) D.J.Amit, J.W.Kane and H. Wagner P.R. 175 (1968) 313, 326.
- 7) S.Misawa, Phys. Letts 32A (1970) 153.
- 8) S.Ma, M.T. Beal. Monod. and D.R.Fredkin P.R. 174 (1968) 227.
- 9) T.Soda, preprint (1971)