

ヘリウムのラムダ点近傍における輸送係数¹⁾

東大・物性研 生 嶋 明

I. はじめに

比熱, 熱膨脹係数, あるいは超流動密度などの静的な物理量に比べて, ヘリウムのラムダ点近傍における動的な量の測定は, これまでやゝ手薄であった。ようやく最近になっていくつかの輸送係数が精密に測定されて, 超流動転移に関わる動的臨界現象の本質が実験の面からも明らかにされつつある。

ラムダ点近傍での動的臨界現象の研究では,

- (1) 動的スケール則
- (2) 普遍性

の2つのガイドラインが有ると考える。動的スケール則が測定された結果に適用出来るかどうかについては, この研究会でも発表されたように Ferrellらの考察が有るが, 後に述べるように, 少なくとも音波の吸収と熱伝導についてはかなり上手に実験結果が説明されているように見える。一方, (2)の普遍性は, ³Heを加え, あるいは圧力をかけてもラムダ点附近での臨界現象の様子が変わらないかどうかという問題で, こちらは静的な臨界現象と同じ興味である。

II. 超音波吸収

1970年に, Williams & Rudnick が 600 kHz ~ 3.17 MHz での超音波吸収係数 α を ⁴He のラムダ点の近くで測定し,

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{fl}^+ & : T > T_\lambda \\ \alpha_{fl}^- + \alpha_{rel} & : T < T_\lambda \end{cases}$$

とし, さらに

$$\alpha_{fl}^+(\varepsilon) = \alpha_{fl}^-(|\varepsilon|); \quad \varepsilon \equiv \frac{T - T_\lambda}{T_\lambda}$$

と仮定して実験結果を解析した。つまり, 吸収係数が音波と臨界揺動との結合から来るもの (α_{fl}) と, 音波が秩序パラメタの緩和をひきおこすことから来るもの (α_{rel}) との和で与えられること, および, α_{fl} が T_λ を境にしてその上下の温度で対称であることを仮定するのである。この解析結果は, 上記の周波数範囲で, α_{rel} に対してほゞ単一の緩和時間で記述出来る

生嶋 明

ピークを与え、且つその緩和時間の大きさが

$$\tau = \xi/u_2$$

(ξ は相関距離, u_2 は第2音波の速度)で与えられることを示した。

しかし、その後の Tozaki & Ikushima, Commins & Rudnick らの測定では、1 GHzに至る周波数で高周波など上記の解析が単純に過ぎ、ピークの型も緩和時間も不合理となることが明らかになった。この困難はかなり長い間の問題であったが、幸いなことに極く最近になって Ferrell & Bhattacharjee の理論的取扱いによってようやく解決されることになった。

Ferrell らの取扱い²⁾はくわしくは原論文を参照願いたい、要は周波数に依存する比熱という概念を導入したことに有る。

なお、 $T > T_\lambda$ での臨界揺動による音波の吸収は、10kHz ~ 1GHzの広い周波数範囲で1つのスケール関数を用いて、

$$\alpha_{fl} = A_{fl} \omega^{1+y} F(\omega/\Omega)$$

で記述されることが明らかになっている。ここで Ω が臨界揺動の特性周波数であって、実験データを上の式に合わせることによって動的スケール則の重要なパラメータ z が求められる¹⁾。これは圧力および ${}^3\text{He}$ の濃度の関数として精度良く求められており、 $3/2$ に近い値と見ることも出来る。ただし、これについては Ferrell が異論をとらえている³⁾。

なお、普遍性について、著者は少なくとも ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$ 系では非常によく成立していると考えている。

Ⅲ. 熱伝導

ラムダ点附近での熱伝導度の測定は、純粋な ${}^4\text{He}$ および約 33% の ${}^3\text{He}$ を含む ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$ 系で行われている¹⁾。 ${}^4\text{He}$ では、熱伝導度 κ_T は、 $\epsilon^{-1/3}$ で発散し、一方、 ${}^4\text{He}$ に僅かでも ${}^3\text{He}$ が加えられると、 κ_T は $T = T_\lambda$ で或る有限の値に止まる。これは、 κ_T を測定するために温度勾配を与えて熱流を作ると、丁度これと反対の向きに ${}^3\text{He}$ の質量流が生じ、質量拡散係数の $T \rightarrow T_\lambda$ での発散が κ_T と同じ(少なくとも leading term で)で、 κ_T の発散を打消しているためである。

${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$ 系でのこの現象自体はいくつかの興味深い事柄(たとえば $T = T_\lambda$ での κ_T と ${}^3\text{He}$ 濃度との関係)を含むが、一方では、我々が濃度勾配の無い状態での熱伝導度を直接測定することが不可能であることも意味している。このため、我々は、見掛けの熱伝導度、

$$\kappa_{\text{eff}} = - J_T / \text{grad } T$$

(J_T は熱流) を実測し, Ahlers & Pobell⁴⁾ の質量拡散係数の実験値を用いて, 濃度勾配の無いときの熱伝導度を得ている。この振舞いは, 予想通り $T \rightarrow T_\lambda$ で,

$$(\kappa_T)_{\text{grad } X_3=0} \propto \varepsilon^{-1/3}$$

で与えられる。且つ, この臨界指数の値 $1/3$ は ^3He 濃度にほとんど依存しない。

$^3\text{He}-^4\text{He}$ 系での熱伝導に関連しては, この他, 熱拡散係数と質量拡散係数の2つの自由度から決まる2つの eigenmodes のことなど幾つか重要なことが有るが, ここでは割愛させていただく。

文 献

くわしくは, 例えば,

- 1) A. Ikushima: Jpn. J. Appl. Phys. (Invited Paper) **19**, 2315 (1980).
- 2) R. A. Ferrell & J. K. Bhattacharjee: Phys. Rev. Lett. **44**, 403 (1980), および preprint.
- 3) R. A. Ferrell: 私信
- 4) G. Ahlers & F. Pobell: Phys. Rev. Lett. **32**, 144 (1974).

DYNAMIC SCALING IN NORMAL AND SUPERFLUID HELIUM

Richard A. Ferrell

Department of Physics and Astronomy, University of Maryland

The critical thermodynamics of the λ transition in liquid ^4He result from fluctuations of the two-component order parameter. The components correspond to the real and imaginary parts of the superfluid condensate wave function. The critical dynamics depend additionally on fluctuations