

Zero Sound Attenuation in Normal Fermi Liquid

松本宏一

東京工業大学 理学部応用物理学科

1. 研究目的

ヘリウム3は核スピン1/2を持つフェルミ粒子であり、その液体は低温状態でフェルミ流体と呼ばれる。フェルミ流体中を伝播する波動はランダウのフェルミ流体論¹⁾によって研究され、十分低温(数mK)の状態においては密度波として通常の音波(第一音波)ではない別のモードの音波(第ゼロ音波)とスピン波の存在が予言され、今日までに実験的にもその存在が確認されている。

第ゼロ音波は、音波によって与えられた圧力変動がヘリウム3の準粒子による緩和よりも速いために、通常の音波と異なりフェルミ面が非等方に振動する波動であり、その吸収機構は液中に存在する準粒子との相互作用である熱的過程のみが見つかっている。第ゼロ音波はヘリウム3の準粒子の数が多いほど吸収が大きくなり、音波の吸収は温度の2乗に比例して変化する。しかし、温度が極めて低くなり熱励起される準粒子のエネルギーより音波のエネルギーが大きくなる領域では、新しい吸収機構が起こると考えられている。それは、音響フォノンが直接に準粒子を励起したり、準粒子からフォノンが放出される過程であり、これは熱的吸收過程ではなく量子吸収過程であるため吸収は温度に依存しないと予想される。本研究ではこの吸収過程の存在を検証することを目的とする。

2. 実験

ランダウ理論によれば量子吸収が現れるときの吸収係数は、温度 T と音波の振動数 ω により次のように表される。

$$\alpha = A_0 T^2 \{1 + (\hbar\omega/2\pi kT)^2\} \quad (1)$$

これより量子効果による吸収が熱過程による吸収と同程度になるためには(1)式の括弧中の第一項と第二項が同程度になることが必要であることが分かる。ヘリウム3は約2mK以下で超流動状態になりフェルミ面にギャップを生じるために、常流動状態の第ゼロ音波とは散乱機構が異なり(1)式で示されるような吸収係数とは異なった吸収を示

す。従って量子吸収効果を観測するためには、数mKの温度で（1）式の括弧中の第一項と第二項が同程度になることが必要であり、数百MHzの高周波のゼロ音波をヘリウム3中に伝播させることが不可欠となる。しかしながら、音波を発生させるトランスデューサとヘリウム3の音響インピーダンスは大きく異なるために音波は両者の界面においてほとんどが反射されてしまい、十分な強度の音波をヘリウム3中に入射することは非常に難しい。その困難さから現在まで行われた実験はほとんどが数十MHzまでであり、現在まで量子吸収効果の観測に成功した例はない²⁾。

我々は音波のトランスデューサと液体ヘリウムの間に2層の音波反射防止膜を設け、両者の音響インピーダンスの不整合を緩和しヘリウム3への透過率を反射防止膜のない場合の0.07%から約10%へと飛躍的に向上することに成功しこの問題を解決した。図1に示すように音波はパルスとして入射されヘリウム中を伝播した後、反射された信号を測定するシステムを作製し、400MHzという高周波の第ゼロ音波の観測に成功した。

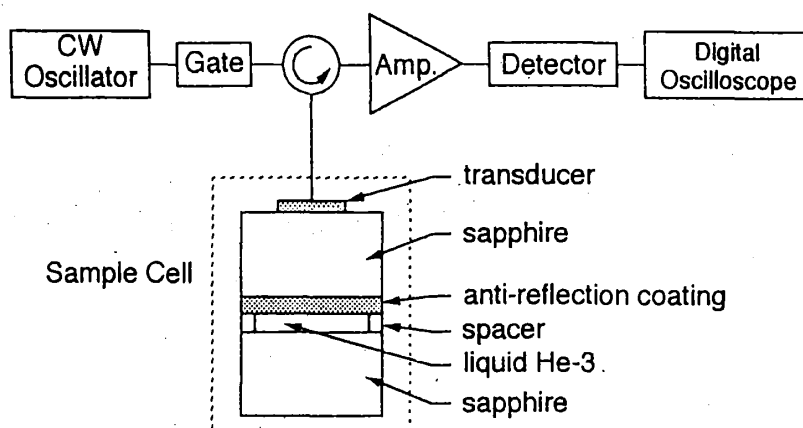


図1 第ゼロ音波測定系ブロック図

ゲートで切り出されたパルス波がヘリウム3中を伝播し反射体で反射された波を検波し、デジタルオシロスコープで観測する。

3. 吸収係数の評価

得られた第ゼロ音波の信号から（1）式で示した形の吸収係数を決定した。まず第ゼロ音波信号の10mKから2mKの温度変化を調べたところ（1）式のように温度の2乗に比例する変化をすることが示された。さらにその比例係数は $1.41 \cdot 10^6 (\text{cm}^{-1} \text{K}^{-2})$ であり、過去にAbel, et al. が低周波の実験で求められたもの $1.58 \cdot 10^6 (\text{cm}^{-1} \text{K}^{-2})$ とほぼ一致す

ることが分かった。

次に、量子効果の項であるが、これは全体の吸収から温度に依存する項を除いて求められる。しかし、測定信号には温度に依存しない吸収として量子吸収以外に測定系固有の吸収が存在するため、それらを定量評価した。そのひとつは信号伝送系の損失であり、トランスデューサでの内部反射から評価した。もう一つは、トランスデューサと反射体が平行からずれたりすることに由来する信号の損失であり、それを実質的に音波の吸収がゼロと見なせる超流動ヘリウム4での実験を行い定量評価した。その結果得られた量子吸収の大きさは 33cm^{-1} であった。ただし、誤差としてヘリウム3への音波の透過率の評価によるものが大きく、全体の誤差として $\pm 20\text{cm}^{-1}$ が見込まれる。以上の結果を温度変化も含めて図2に示す。点線は量子吸収がないとした場合の温度の2乗に比例した吸収の曲線であり、実線はランダウ理論を400MHzの音波の場合に適用したときの吸収曲線である。やや誤差が大きいのだが、有限の吸収が絶対0度まで存在することを示していて、量子吸収効果の存在が示された³⁾。

以上のように、音波の吸収では量子効果の存在が示されたが、フォノンの散乱に由来と異なる機構が存在するなら、音速にも変化があることが期待できる。そこで、位相検波による精密音速測定の研究へと現在進行中である。

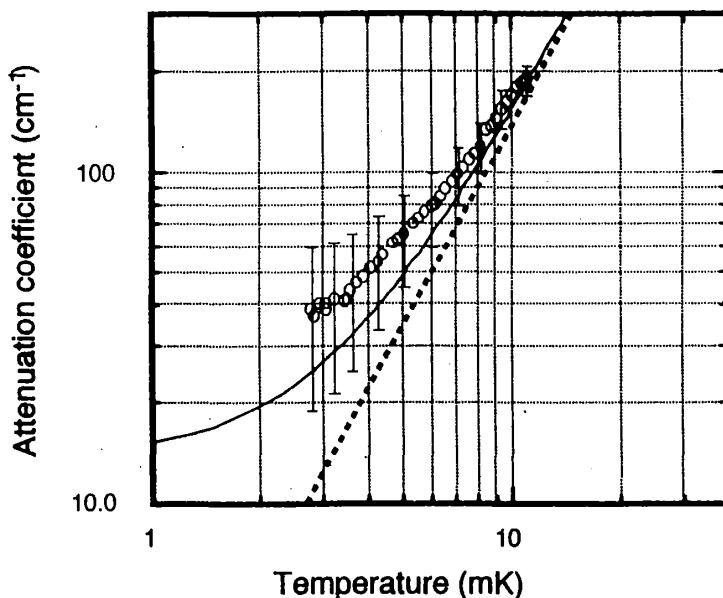


図2 400MHzの第ゼロ音波の吸収係数

・白丸が測定値、点線は温度の2乗、実線はランダウ理論の曲線
縦線は実験誤差

Reference

- 1) L.D. Landau ; JETP vol.5 (1957) p.175
- 2) W.R. Abel, A.C. Anderson and J.C. Wheatley ; Phys. Rev. Lett. vol.17 (1966) p.74
- 3) K. Matsumoto, T. Ikegami and Y. Okuda ; Physica B vol. 194-196 (1994) p.743