

## 不純物を含む液体ヘリウム 3 中の音波

市川 貴之

広島大学大学院生物圏科学研究科

Acoustics in impure liquid  $^3\text{He}$ 

Takayuki ICHIKAWA

Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University,  
Higashi-Hiroshima 739-8521, Japan

## 要 旨

$^3\text{He}$ 原子はスピン $\frac{1}{2}$ のFermi粒子であり、レナードジョーンズ型の相互作用ポテンシャルを持つため液体状態においてはハードコアの斥力によって強く相互作用しているが、十分低温ではLandauによって記述された理想的なFermi流体の系を実現し、有効質量 $m^*$ を持つ準粒子の描像で記述される。準粒子間には、更に低温でスピンゆらぎを媒介とする引力相互作用が働くと考えられており、P波三重項(3P状態)のクーバー対が形成され、これによって超流動相が安定な状態となる。このような内部自由度を持つ対が形成される場合、超流動相には複数の安定な相が実現する。更に、液体 $^3\text{He}$ は極めて純度が高く理論と実験の精密な比較が可能であることから、古くより盛んに研究がなされ、今もなおその研究対象としての興味が失われていない。また、最近発見された超伝導体 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 、 $\text{UPt}_3$ などでは、3P状態のクーバー対が形成されていると考えられ、これらの研究において超流動 $^3\text{He}$ はモデル物質としての役割を果たしている。

このように極めて純粋な系をなす液体 $^3\text{He}$ において、最近、エアロジェル中での振舞いが注目されている。エアロジェルとはシリカ( $\text{SiO}_2$ )を原料とした寒天状の固体であるが、非常に低密度の多孔性物質である。ミクロな立場から見るとシリカが鎖状ネットワークをなし、複雑なフラクタル構造を持つ事が知られている。このエアロジェル中 $^3\text{He}$ の超流動状態を用いた実験はPorto and Parpia<sup>[1]</sup>によって初めて行なわれ、純粋な液体 $^3\text{He}$ での結果に比べて超流動転移温度が低くなる事が報告された。この転移温度の抑制は、 $^3\text{He}$ がP波のクーバー対を形成するため、不純物散乱による対破壊効果によって生じると考えられている。実際、Abrikosov and Gorkovの理論を用いてS波超伝導体における磁性不純物散乱と同様の議論を行なった場合、超流動転移温度と不純物散乱による輸送平均自由行程との関係を求めることができる。この関係から得られる輸送平均自由行程は、幾何学的に評価される平均自由行程と同程度になる。

最近 Northwestern 大学のグループによるエアロジェル中 $^3\text{He}$ での超音波吸収の実験結果<sup>[2]</sup>が報告された。この報告では、エアロジェルが不純物の役割を果たしていると思われるにもかかわらず、吸収の絶対値は純粋な系の場合とあまり変わらないものとなっている。しかし吸収の温度依存性

は、純粋な系で見られる振る舞いとは異なり、5[mK]以下の低温域ではほぼ一定で、10[mK]程度から減少し、数10[mK]以上の高温域では再び一定の値となっている。また超流動相では純粋な系で観測される秩序パラメータの集団励起に起因する吸収ピークも対破壊に起因する吸収ピークも観測されなかった。

したがって本研究の目的は、微視的立場からエアロジェル中 $^3\text{He}$ の超音波の伝播と吸収を考察し、常流動相、超流動相にわたってエアロジェルの不純物効果を明らかにすることにある。

まず、常流動相において不純物効果を微視的理論に取り入れるために考え付くことは、Boltzmann方程式の衝突項に不純物散乱の項を付け加えることである。不純物散乱は準粒子間散乱と異なり、散乱の前後で $^3\text{He}$ の運動量を保存しないために、音波の伝播に伴う流れを減衰させる効果を与える。この効果は非常に大きく、幾何学的に評価される平均自由行程を用いて計算すると、吸収の値は純粋な $^3\text{He}$ の場合に比べ数百倍になる。しかし、エアロジェル中の $^3\text{He}$ で観測された吸収は純粋な系での値と同程度であるという事実から、不純物散乱を通常に扱うだけでは、実験とは大幅に異なる結果になる事が明らかとなった。この問題を解決するため、本研究では衝突項において散乱体であるエアロジェルの運動を取り入れ、これをエアロジェルの運動方程式と連立させることによって音波の伝播を調べ、実験結果をよく再現する結果を得た。エアロジェルが $^3\text{He}$ と一緒に動く可能性はすでに指摘されているが、微視的な立場からその機構を明らかにしたのは本研究が初めてである<sup>[3]</sup>。

次に、超流動相で伝播する音波は、密度の揺らぎとクーパー対の構造揺らぎが結合するため、その両方を追う必要がある。純粋な $^3\text{He}$ 系では、行列形式の分布関数を用いる方法が確立しているが、不純物散乱効果を正しく取り入れるには難点がある。したがって本研究ではKeldysh形式で書かれたGreen関数理論に基づくP波超流動体のダイナミクスの定式化とその解析を行い、不純物散乱に関してはセルフコンシステント T-matrix 近似に対応するダイアグラムを考慮して、対応するパーテックス補正の評価を行ない、全ての集団励起の自由度を取り入れた理論を完成した。これにより、超流動相における超音波吸収の温度依存性を定量的に説明することが可能になった。

本論文は以下のように構造される。

## 第1章 序論

最近注目されているエアロジェル中 $^3\text{He}$ の性質を紹介し、同時に古くより液体 $^3\text{He}$ を研究する手段として用いられた音波の実験について紹介を行った。また、最近報告されたエアロジェル中 $^3\text{He}$ での超音波吸収の実験をもとに、本研究で行なう不純物を含む液体 $^3\text{He}$ 中を伝播する音波の議論の目的と意義を述べた。

## 第2章 液体 $^3\text{He}$

液体 $^3\text{He}$ の常流動、超流動およびエアロジェル中 $^3\text{He}$ の性質について概観した。まず、LandauによるFermi液体理論の概要を述べ、次にP波三重項の超流動に関する一般化されたBCS理論について延べ、最後に、エアロジェルの性質と近年のエアロジェル $^3\text{He}$ に関する研究についてふれた。

### 第 3 章 液体 $^3\text{He}$ における音波

液体  $^3\text{He}$  中を伝播する音波についての従来理論と実験結果について概観した。まず、液体  $^3\text{He}$  常流動相に関しては、純粋な系における第 1 音波と第 0 音波、および横波の伝播について述べ、Northwestern のグループによって行なわれた、エアロジェル中  $^3\text{He}$  常流動相での最近の縦波の報告に関する報告もふれた。次に超流動相に関しては、初めにクーパー対の変形に伴う集団励起を BW 状態および ABM 状態について紹介し、これらの集団励起が音波に与える影響について紹介を行った。また、最近報告された B 相での横波の観測についても紹介した。

### 第 4 章 Landau-Boltzmann 輸送理論

エアロジェルを一様に分布した不純物の散乱体にとらえ、不純物散乱を取り入れた Landau-Boltzmann 理論に基づいて、Northwestern グループによって行なわれた実験の解析を行った。最終的に、 $^3\text{He}$  とエアロジェルが衝突を介して力を及ぼしあいながら一緒に動く Collision drag 効果を取り入れることで、実験結果が定量的にも再現されることを示した。

### 第 5 章 Keldysh 形式におけるグリーン関数理論

不純物を含む超流動状態での音波を理論的に記述するために、実時間、非平衡系の議論において Feynman ダイアグラムの手法を使える Keldysh 形式による準古典的グリーン関数の方法を用いて定式化を行った。不純物散乱を考察するに当たり、本研究ではセルフコンシステント T-Matrix 近似に基づく摂動展開を行うと同時に不純物を含む系での線形応答を議論しているため、このとき取り込んだ Feynman ダイアグラムの詳細について詳しく説明した。

### 第 6 章 純粋な超流動 $^3\text{He}$ -A 相における横波

第 5 章で定式化した方法に基づき、その理論の応用例として純粋な ABM 状態を想定し、具体的に横波の伝播について議論を行なった。A-相では  $\mathbf{Q}$ -ベクトルの存在により、自発的に 1 軸性の異方性が生じているため、オーダーパラメータの集団励起の自由度も取り入れた議論においては、外部磁場等が無くても、異方性が現れる。これにより、横波の分極方向が  $\mathbf{Q}$ -ベクトルと平行か垂直かによって音速の違いが生じ、横波の伝播と共に分極ベクトルがリサージュ図形を描くことが期待され、結果として磁場等が無くても音響 Faraday 効果が生じる可能性を示した。

### 第 7 章 不純物を含む超流動 $^3\text{He}$ -相における縦波

第 5 章で定式化した方法に基づいて、不純物を含む BW 状態を想定し縦波の伝播について議論を行なった。まず初めに、バーテックスの補正項を BW 状態を想定して形式的に得た後、集団励起の影響も取り入れた形で具体的に応答関数を得た。最終的には音波の伝播について、不純物効果および集団励起の効果を全て同時に考慮した音速の表式を得て、音波の吸収の振動数依存性および温度依存性の議論を行なった。結果として、吸収は強く振動数依存性を示し、エアロジェル中  $^3\text{He}$  超流動相における超音波吸収の実験で観測されているように、温度の低下と共に吸収が単調に減少する振動数領域が存在することを示した。

## 第8章 まとめと考察

本研究では、Northwestern グループによるエアロジェル中の縦波伝播の実験結果に注目し、不純物を含む常流動 $^3\text{He}$  および超流動 $^3\text{He}$  中を伝播する音波についてその理論的評価を行なった。

まず、常流動相における吸収の評価は Landau-Boltzmann 理論に基づき、微視的な立場から散乱を考慮して、不純物の揺れすなわち Collision Drag 効果を取り入れることにより超音波吸収の温度依存性をよく再現する結果を得た。

次に、超流動相における超音波吸収の評価は Keldysh 形式における準古典的グリーン関数の方法を用いて行い、不純物に対して T-Matrix 近似に基づいた展開を用いることで不純物効果の評価を行った。これにより、エアロジェル中 $^3\text{He}$ -B 相における吸収の温度依存性を定量的に説明する結果を得た。

さて、常流動相において実験結果を再現する平均自由行程は、超流動転移温度等から見積もられる平均自由行程と比べて数倍小さな値となった。平均自由行程の見積もりは、その他の実験からの見積もりにおいても、それぞれが異なる結果となっており、一致した見解は得られておらず、今後の課題としても検討が必要である。また、超流動状態における議論において、Collision Drag 効果を取り入れた議論は行なっておらず、今後の課題として超流動相での Collision Drag 効果を取り入れた定式化を行なう必要がある。

## 参考文献

- [1] J.V. Porto and J.M. Pappas, Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 4667
- [2] R. Nomura, G. Gervais, T.M. Haard, Y. Lee, N. Mulders and W. P. Halperin, Phys. Rev. Lett. **87** (2000) 4325
- [3] T. Ichikawa, M. Yamamoto, S. Higashitani and K. Nagai, J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 3483