

氏名・(本籍)	あし だ まさ み 芦 田 正 巳
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 748 号
学位授与年月日	昭 和 57 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 物理学第二専攻
学位論文題目	超流動 ³ He-A 相の流体力学における異方性の効果
論文審査委員	(主査) 教 授 都 築 俊 夫 教 授 大 塚 泰 一 郎 助 教 授 高 木 伸

論 文 目 次

序 文

I 章 ³He-A の流体力学方程式

- § 1 ³He-A 相の性質
- § 2 流体力学方程式
- § 3 回転平衡状態について
- § 4 微視的な計算との関係

II 章 固有振動 その 1

- § 5 定式化
- § 6 第一音波
- § 7 第二音波
- § 8 横波
- § 9 この章のまとめ

III 章 固有振動 その 2

§10 定式化

§11 異方軸方向に進む横波

§12 異方軸と垂直な方向に進む横波

§13 この章のまとめ

IV章 零音波吸収の異方性に対する粘性の効果

§14 問題提起

§15 定常解の性質

§16 磁場と異方軸の関係

§17 零音波吸収における異方性

§18 $\nu^{(4)}$ と α の高次の効果

§19 この章のまとめ

結 語

謝 辞

付 録

参考文献

論文内容要旨

液体 ^3He は約2 mK以下で相転移し、超流動状態となる。超流動相には異方性を持つA相と、等方的なB相の2つが存在するが、本研究では異方性を持つ超流動状態に興味があり、A相に注目する。A相の異方的な効果については多くの研究者により様々な観点から、理論的、実験的に研究されてきたが、流体力学的な側面については、流体力学方程式の一般的な形が導かれた段階であり、具体的にどのような異方的な現象が生じるかということについては理論的にも実験的にもほとんど研究されていない。そこで本論文では ^3He -Aの流体力学的な側面に注目し、異方性の効果について研究した。

まずI章では本研究を進める基礎となる流体力学方程式を現象論的に吟味し、方程式をより完全なものとした。この流体力学方程式には ^3He -Aの異方性を反映して多くの異方性を持つ項が含まれるが、これらの異方的な項の具体的な効果についてはほとんど研究されていない。そこでII章以下では異方軸が空間的に一樣な場合について、線形近似の範囲で流体力学方程式を解くことにより、異方性の効果について調べ、実験的に異方性を測定する原理的な方法を提案した。以下に各章の内容をまとめる。

I章 ^3He -Aの流体力学方程式

この章では ^3He -Aの一般的な特徴を復習した後、本研究を進める為の基礎である流体力学方程式について考察した。

^3He -AはP波 triplet のクーパー対から成る超流動相であり、クーパー対のスピン量子化軸 \vec{d} と角運動量量子化軸 \vec{l} という2つの異方軸を持つ。スピン量子化軸 \vec{d} は磁気的な効果を考察する際には重要となるが、磁場が存在しない場合には、流体力学に注目する限り無視することができる。一方角運動量量子化軸 \vec{l} は超流動成分の密度や粘性に異方性を与え、流体力学に異方性をもたらす。よって本論文では主として異方軸 \vec{l} に注目する。

^3He -Aの流体力学方程式は現象論的には Graham, Hu and Saslow, Ho 等によって導かれ、微視的には Volovik and Mineev, Bhattacharyya et al, 永井等によって導かれた。現象論的には、流体力学方程式は以下の4つの条件を満たすように決定される。

- 1) ガリレイ変換性
- 2) 座標系の回転に対する変換性
- 3) 時間反転に関する対称性
- 4) (散逸関数) ≥ 0

通常の流体や超流動 ^4He ではこの条件だけで流体力学方程式が完全に決定されるが、 ^3He -Aでは異方軸が存在する為に自由度が増え、この条件だけでは完全には決まらない。そこで本論文ではHo-Merminによって提唱された回転平衡の概念を用いることにより、現象論的に流体

力学方程式が満たすべき条件を導き、流体力学方程式をより完全なものにした。

このようにして導かれた流体力学方程式を超流動 ^4He の2流体方程式と比較すると、 $^3\text{He-A}$ では異方軸 \vec{l} の運動方程式が付け加わるだけでなく、加速方程式やストレステンソルに異方性を持つ多くの項が付け加わる。これらの異方的な項は大別すると可逆過程の異方性を表わす項と、不可逆過程の異方性を表わす項とに分けられる。本論文の主目的はこれらの異方性や異方軸の運動が $^3\text{He-A}$ の流体力学にどのような特徴的な現象をもたらすかを調べることにある。尚、本論文では原則として現象論的に議論を進めるが、現実の系で重要となる項を予想する為に、§4で微視的な計算結果を用い、異方性の大きさを評価した。

II章 固有振動 その1

この章では固有振動に対する不可逆過程の異方性(主として粘性の異方性)の効果について考察した。ここで用いた仮定は以下の3つである。

- 1) 異方軸 \vec{l} は空間的に一様であり、固定されている。
- 2) 可逆過程の異方性を無視する。
- 3) $\frac{\nu}{\rho}k \ll u_2 \ll u_1$

但し、 u_1 、 u_2 は各々第一音波、第二音波の音速、 ρ は ^3He の密度、 ν は粘性係数、 \vec{k} は波数ベクトルである。

この仮定の下で流体力学方程式を解くことにより、固有振動としては超流動 ^4He と同様に第一音波、第二音波、横方向の減衰振動が存在することを示し、各々のmodeの特徴を調べた。その結果、この章の仮定の下では、 $^3\text{He-A}$ の固有振動の特徴は常流動成分の速度 v_n 、超流動成分の速度 v_s の振動の様子と、振動の減衰とに現われることが判った。即ち、 $^3\text{He-A}$ では超流動成分の密度がテンソルで表わされ、異方性を持つ為に、第二音波と横方向の減衰振動では v_n と v_s の縦成分と横成分とが結合するのである。又、粘性係数の異方性は固有振動の減衰に異方性をもたらす。本論文では各々の固有振動の減衰定数と粘性係数の関係を明らかにし、原理的には固有振動の減衰を測定することによって粘性係数の異方性を知ることができることを示した。

III章 固有振動 その2

この章では固有振動に対する可逆過程の異方性の効果と異方軸の振動の効果について考察した。ここで用いた仮定は以下の3つである。

- 1) 平衡状態では異方軸 \vec{l} は空間的に一様
- 2) $\frac{\nu}{\rho}k \ll u_2 \ll u_1$
- 3) $\vec{l} \parallel \vec{k}$ 又は $\vec{l} \perp \vec{k}$

このとき固有振動としては第一音波、第二音波、 \vec{l} のみが振動するmode、運動量密度の横波と

異方軸 \vec{l} とが結合した mode の 4 種類が存在する。

先づ第一、第二音波は微視的な計算結果を用いて評価すると、異方軸の運動や可逆過程の異方性に影響されないことが判る。従って II 章の結論に帰着する。

一方、運動量密度の横波は一般に異方軸 \vec{l} の振動と結合する。可逆過程の異方性はこの mode の分散関係に実部を与え、 \vec{l} の微小変化 $\delta\vec{l}$ や \vec{v}_n を \vec{l} の回りに回転させるように働く。その為、粘性を無視すれば \vec{l}/k のとき、 \vec{v}_n や $\delta\vec{l}$ は \vec{l} の回りに回転する円偏向波となる。しかしながら、微視的な結果を用いて異方性の大きさを評価すると、この mode では減衰が大きいためこのような効果は見られず、可逆過程の異方性は $\delta\vec{l}$ の振動面を \vec{l} の回りに $\delta \sim \sqrt{1-T/T_c}$ 程度回転させるに留まる。このとき運動量密度の横波に対応する mode の減衰定数は \vec{l} に働く粘性によって補正される。

$\delta\vec{l}$ のみの振動 mode は $\vec{l} \perp \vec{k}$ のときにのみ存在し、可逆過程の異方性の効果によって振動面が \vec{l} の回りに角度 $\delta \sim \sqrt{1-T/T_c}$ 回転している。

$\delta\vec{l}$ の振動面のずれ δ は可逆過程の異方性パラメータと粘性係数との比で決り、 $\vec{l} \rightarrow -\vec{l}$ の変換で符号を変える。従って δ を測定することによって \vec{l} と $-\vec{l}$ とを実験的に区別することができる。それにより、 \vec{l} の時間反転に関する対称性を確認することができる。

IV 章 零音波吸収の異方性に対する粘性の効果

この章では定常的な熱流と磁場が存在する系を理論的に考察することにより、異方軸 \vec{l} の方向や常流動成分の速度 \vec{v}_n を決定する上で粘性の異方性が重要な役割を果していることを示した。即ち、磁場によって異方軸 \vec{l} の方向が変化すると、粘性の異方性の効果によって \vec{v}_n の方向や大きさが変化する。 \vec{v}_n の変化は流れの異方性エネルギーを通して \vec{l} の方向に影響を与え、全体としてエネルギーが極小となるように \vec{l} の方向や \vec{v}_n が決定されるのである。このようなメカニズムを考慮すると、熱流の方向に磁場をかけると(熱流方向の)温度差が小さくなることが示される。又、零音波吸収係数は \vec{l} の方向に依存するので、この系では零音波吸収係数が磁場に依存することになる。

以上の結果は定性的に、又、ほぼ定量的にも実験結果と一致している。本研究では理論と実験結果とを比較することにより、粘性係数の異方性の大きさの上限と下限とを定めた。又、粘性係数の異方性の大きさを決定する為に成されるべき実験の拡張を示唆した。

以上の研究により $^3\text{He}-A$ の流体力学方程式がより完全なものとなり、粘性の異方性と固有振動の減衰の関係、可逆過程の異方性の効果、定常的な熱流と磁場が存在する系での粘性の異方性の役割が明らかとなった。それにより、粘性の異方性を実験的に決定する方法を提案することができた。

論文審査の結果の要旨

本研究は、 ^3He —A 相の流体力学について、 ^3He —A 相の超流動状態を特徴づける秩序度の性質に由来する異方性の効果に焦点をあてて、その基礎的側面および応用を現象論的に論じたものである。

超流動 ^4He の二流体力学の一般化としての ^3He —A 相の流体力学の定式化に関する研究は、既にいくつかなされているが、流体力学方程式に現われる係数、特に異方性を表わす係数間の関係についての理論があいまいなままに残されていた。本研究では、回転平衡状態の概念に基づく議論を拡張して、このあいまいさを取り除き、流体力学方程式系を完成した。

次に、異方性の効果を具体的に調べた。結果の概略は、以下の通りである。

まず、線形波動を徹底的に調べた。これにより、一般に縦波と横波が超流体密度の異方性を通して結合すると、そのために超流動 ^4He の場合にも存在する第一音波、第二音波といえども超流動 ^4He の理論を安易に ^3He —A 相に援用することが出来ないことを示した。さらに、各線形波の減衰定数を波数ベクトルと異方軸 \vec{l} (クーパー対の角運動量の方向を示すベクトル) との間の角度の関数として陽に計算し、線形波の観測から異方性に関するいかなる知見が得られるかを明らかにした。現在、実験は皆無に近いが、本研究によって、今後この分野の実験が促されるであろう。

^3He —A 相に特有の波動を見出した。もし、減衰が無視できるならば、 \vec{l} はらせん状に振動し、同時に常流体速度は円偏向振動するという波である。微視的理論を用いて評価すると、現実の ^3He —A 相では減衰効果が大きいと推定されるので、この波動は \vec{l} の振動面のわずかな回転として観測されることを指摘し、回転角の表式を異方性パラメータによって表わす式を導いた。また、平衡状態での \vec{l} の方向を逆転すると、回転の向きが逆になることを示した。これは、極めて重要な結果である。既存の実験結果には \vec{l} と $-\vec{l}$ とを区別しうるものがない。流体力学的実験によって秩序度の基本的な微視的性質のひとつを確認可能であるとの指摘の意義は大きい。

次いで、本研究は定常的熱流のもとで温度差と零音波吸収係数の磁場依存性を測定した実験に着目し、流体力学に基づいて、初めて統一的説明を与えた。これは熱流、即ち常流体の流れと拡散の存在により、粘性や熱伝導における異方性の効果が重要になってくることを十分な理論的根拠のうえに明らかにしたものであり、本研究の独創的な点のひとつである。更に、定量的議論により、実験データから粘性係数の異方性の大きさに対する上限と下限を見積るとともに、もっと広い磁場領域で実験を行うことにより異方性の大きさを決定できることを指摘した。

超流動 ^3He —A 相の流体力学的研究は、その重要性にもかかわらず、今日まで、ほとんどなされていなかった。本研究は、このような研究に極めて意義のある寄与をするものである。また新たな興味ある実験研究を促すことであろう。

本研究は、論文提出者が主体的に研究を進めたものであり、自立して研究活動を行うに必要な

な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、芦田正巳提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。