

氏名・(本籍)	かき 柿	ざき 崎	あき 明	と 人
学位の種類	理 学 博 士			
学位記番号	理博第 424 号			
学位授与年月日	昭和50年3月25日			
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当			
研究科専門課程	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)物理学第二専攻修了			
学位論文題目	He <sup>3</sup> -He <sup>4</sup> 混合溶液における λ-転移の性質			
論文審査委員	(主査) 教 授	大塚泰一郎		教 授 都築俊夫 助教授 佐藤武郎 助教授

## 論 文 目 次

- I 序
- II 実 験
- III 実 験 結 果
- IV 考 察
- V 謝 辞

## 論文内容要旨

### I 序

液体  $\text{He}^4$  は、2.17K で相転移をして超流動液体となる。液体  $\text{He}^4$  は、純度のいい物質が得やすいこと、超流動転移温度  $T_\lambda$  の近くで、温度の制御が比較的容易であることの二つの主な理由によって、 $T_\lambda$  のごく近くの温度で物質を測定することが可能である。実際、液体  $\text{He}^4$  の比熱、熱膨張係数は、 $T_\lambda$  のごく近くで測定されていて、 $T_\lambda$  で発散すると信じられている。

一方、 $\text{He}^4$  の同位元素  $\text{He}^3$  との混合溶液、 $\text{He}^3 - \text{He}^4$  混合液も、 $\text{He}^3$  の濃度で決まる温度で超流動転移をすることが知られている。  $\text{He}^3 - \text{He}^4$  混合液では、 $\text{He}^3$  が超流動成分に関与しないことから、 $\text{He}^3 - \text{He}^4$  混合液の  $T_\lambda$  近傍での物理量の振舞いは、相転移に対する不純物の効果を考える立場からも興味を持たれている。

一般に、相転移に対する不純物の効果として、純粋な系の相転移点で発散する物理量は、不純物が入ることによって有限な値をとると考えられている。

$\text{He}^3 - \text{He}^4$  混合液では、液体  $\text{He}^4$  ほど温度の制御が容易ではないため、 $T_\lambda$  の近傍での実験にはむずかしい面がある。このため、 $T_\lambda$  のごく近くでの振舞いが知られているのは、比熱だけであり、今日まで、それをもとにして比熱の振舞いに対する不純物効果が論じられてきた。しかし、これまでに行われた測定には、比熱をはかるときの温度の上げ巾が大きいとか、測定時に試料の熱平衡状態が実現されているのかといった疑問がある。それに、過去の種々の例からして、相転移点近傍での熱力学的諸量の振舞いに関する実験報告には、誤りのある場合が多く、ただ一つの量の測定だけで、不純物の効果を論ずることは非常に危険であると考えられている。

液体  $\text{He}^4$  の場合には、 $T_\lambda$  の近傍での比熱、熱膨張係数などの熱力学的諸量が独立に測定されてそれらの間に、Pippard - Buckingham - Fairbank の式が成立することが確かめられている。この式が成立することは、独立な測定の間の一貫性を保証するので、この式が成立することで、液体  $\text{He}^4$  の比熱と熱膨張係数の  $T_\lambda$  での発散は信じられている。

したがって、 $\text{He}^3 - \text{He}^4$  混合液の場合にも、比熱だけではなく、熱膨張係数などの熱力学的諸量を独立に測定して、それらの測定量の間の一貫性を確かめた上で、 $T_\lambda$  の近傍での振舞いについて論ずるべきである。

このような観点から、本研究では、液体  $\text{He}^4$  をいくつかの  $\text{He}^3 - \text{He}^4$  混合液について、比熱、熱膨張係数、 $T_\lambda$  の圧力依存性などをそれぞれ独立に測定して、 $T_\lambda$  の近傍での振舞いに対する不純物の効果について考察する。

ところで、現在までのところ、 $T_\lambda$  を与える徴視的な理論式というのはなく、いくつかのモデルの現実性についてしらべることに意義がある。

本研究では、上に述べた、 $T_\lambda$  の近傍での熱力学的諸量の振舞いをしらべることと、 $T_\lambda$  とその圧力依存性に対する  $\text{He}^3$  不純物の効果をしらべることの2つの側面から、液体  $\text{He}^4$  の超流動転移に及ぼす不純物の影響について考察する。

## II 実験

実験は、液体 $\text{He}^4$ と3.85%、10.0%、15.0%の3つの $\text{He}^3$ - $\text{He}^4$ 混合液について行った。

### II-A $T_\lambda$ の圧力依存性

$T_\lambda$ とその圧力 $P_\lambda$ の測定は、温度上昇曲線の折れ曲りが現れる温度と圧力から求めた。

温度計は、炭素抵抗(Allen-Bradley社の180 )を用い、圧力計はTexas Instrument社のFused Quartz Bourdon Tube使用のものを用いた。

### II-B モル体積の測定

モル体積は、誘電率の測定をして、Clausius-Mossottiの式を使って求めた。誘電率の測定には、トンネルダイオードを用いた液体He温度ではたらく高周波発振器を用いた。

熱膨張係数は、モル体積の測定値を使って算出した。

### II-C 比熱

比熱は、いわゆる熱パルス法で測定した。測定時に試料の熱平衡状態が実現されるように、試料を入れる容器の中に焼結銅を入れた。

## III 実験結果

### III-A $T_\lambda$ の圧力依存性

$T_\lambda$ の圧力依存性を $\alpha = (dp/dT)_\lambda$ で表わすと、 $\alpha$ の絶対値は、 $\text{He}^3$ 濃度の増加と共に大きくなる。液体 $\text{He}^4$ での値は、これまでに測定されたものとよく一致する。

### III-B モル体積と熱膨張係数

モル体積は、 $\text{He}^3$ の濃度の増加と共に大きくなり $T_\lambda$ の近傍での変化は小さくなる。また熱膨張係数は、 $\text{He}^3$ 濃度の増加と共に大きくなる。

### III-C 比熱

比熱は、 $T_\lambda$ の近傍では、 $T_\lambda$ に近づくに従って $\log |T - T_\lambda|$ に比例して大きくなる。

$T_\lambda$ 近傍での振舞いの大まかな様子は、これまでに測定されたものと同じ傾向である。

## IV 考察

### IV-A Pippard-Buckingham-Fairbankの式の検証

独立な測定によって得られた比熱と熱膨張係数の間には、 $10^{-4} \text{K} \leq |T - T_\lambda| \leq 10^{-2} \text{K}$ の温度範囲でPippard-Buckingham-Fairbankの式が成立する。

これによって、異なる測定の間の一貫性が保証されたと同時に、本研究で得た測定結果が信頼性の高いものであることが示された。

### IV-B $T_\lambda$ 近傍での比熱の振舞い

$T_\lambda$ 近傍での比熱の振舞いをまとめると次のようになる。

(1) 比熱は、 $T_\lambda$ に近づくと共に $\log |T - T_\lambda|$ に比例して大きくなる。

(2)  $\log |T - T_\lambda|$ 比例する項の係数の $T > T_\lambda$ と $T < T_\lambda$ での値をそれぞれ $A_{I'}$ 、 $A_{II'}$ とすると、そ

の間には次の関係がある。

(a) 液体  $\text{He}^4$  では  $A_{I'} = A_{II'}$  である。

(b)  $\text{He}^3 - \text{He}^4$  混合液では、 $|A_{I'}|$ ,  $|A_{II'}|$  共に液体  $\text{He}^4$  の値よりも小さく、しかも  $|A_{I'}| > |A_{II'}|$  である。

(3)  $T < T_\lambda$  での比熱と  $T > T_\lambda$  での比熱の差は、 $\text{He}^3$  の濃度の増加と共に小さくなる。

(1)~(3)は、 $T_\lambda$  での比熱の発散の度合が、 $\text{He}^3$  不純物の濃度の増加と共に小さくなることを示している。しかし、本研究では、 $\text{He}^3 - \text{He}^4$  混合液で、比熱の発散が止ることを確認することはできなかった。

#### IV-C 微視的モデルとの比較

理想ボーズ気体モデルでは、 $T_\lambda$  の  $\text{He}^3$  濃度  $x$  依存性は、 $T_\lambda(x) = T_\lambda^0 (1-x)^{2/3}$  と表わされる。 $T_\lambda^0$  は液体  $\text{He}^4$  の  $T_\lambda$  である。飽和蒸気圧と、600mmHg の圧力をかけた状態での  $T_\lambda$  について、測定値と理想ボーズ気体モデルから予想される値とを較べると、両者はよく一致する。しかし、このモデルでは、 $T_\lambda$  の圧力依存性を説明することはできない。

一方、格子模型では、液体に圧力をかけることは、格子点が粒子によって占められている割合  $\rho$  が増加することで表わされる。 $T_\lambda$  の変化に対する  $\rho$  の変化  $d\rho/dT_\lambda$  は、 $dV_\lambda/dT_\lambda$  と書きなおすことができ、これは実験によって求めることのできる量である。 $V_\lambda$  は  $T_\lambda$  でのモル体積である。そこで、 $T_\lambda$  でのモル体積  $V_\lambda$  を測定し、格子模型を分子模型を分子場近似で解いた式から得られる  $dV_\lambda/dT_\lambda$  と比較したところ、 $dV_\lambda/dT_\lambda$  の  $\text{He}^3$  濃度依存性まで含めて、両者は定性的に一致することがわかった。

本研究で得た測定結果は、今後  $T_\lambda$  を与える表式が考えられたとき、その定量的な検定に使えるものと期待される。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は液体  $\text{He}^4$  の超流動転移に対する同位元素  $\text{He}^3$  の不純物効果を次の二つの面から調べたものである。

(1) 超流動転移点  $T_\lambda$  近傍での定圧比熱  $C_p$  および熱膨張係数  $\beta$  の振舞いに対する  $\text{He}^3$  不純物の効果。

(2) 超流動転移点およびその圧力依存性に対する  $\text{He}^3$  不純物の効果。

従来  $\text{He}^3$ - $\text{He}^4$  混合液における超流動転移点 ( $\lambda$  点) 近傍での熱力学量として比較的詳しく測定されているのは定圧比熱  $C_p$  のみであるが、精度的に問題があり、又種々の例からみて、相転移点近傍の熱力学量の振舞を論ずるには唯一の熱力学量の測定のみでは不十分である。この観点から本論文では液体  $\text{He}^4$  および  $\text{He}^3$  を 3.85%, 100%, 15.0% 含んだ  $\text{He}^3$ - $\text{He}^4$  混合液について定圧比熱の他に、モル体積、熱膨張係数、 $\lambda$  点の圧力依存性を独立に測定し Pippard の関係式を用いてそれらの測定量の間の一貫性のあることを確認した上で  $\lambda$  点近傍での熱力学量の振舞いに対する  $\text{He}^3$  不純物の効果を論じている。この結果  $\lambda$  点近傍  $10^{-4} \leq |T - T_\lambda| \leq 10^{-2}$  の範囲内で測定量間の一貫性があって高い信頼度を持つてることを明らかにでき、かつ定圧比熱および熱膨張係数の振舞いが  $\text{He}^3$  を添加するに従って系統的に変化してゆくことが見出された。この結果は相転移を議論する上で非常に重要なものである。

一方  $T_\lambda$  とその圧力依存性に対する  $\text{He}^3$  不純物の効果は、未だ明らかにされていない液体  $\text{He}^4$  における超流動転移を解明するための実験的アプローチとして重要である。本論文では上説と同様の試料を用い、混合液ではまだ測られたことのない  $T_\lambda$  の圧力依存性を詳しく測定し、さらに  $\lambda$  点におけるモル体積  $V_\lambda$  の圧力依存性を測定して、 $\lambda$  転移の格子模型とよばれているモデル計算の結果と比較している。その結果、格子模型が定性的に実験結果を説明しうることを明らかにした。

以上の如く本論文は独立測定量間の一貫性を確認し、従って従来にない高い信頼性をもった測定量を通じて貴重なデータを提供し、また  $T_\lambda$  と  $V_\lambda$  の圧力依存性の測定結果は  $T_\lambda$  を与える理論を考えるに当って重要な知見を与るものである。よって柿崎明人提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。