

論文内容の要旨

論文題目 超流動 ^3He 自由表面下に束縛されたイオンの研究

氏名 椎野俊之

1 はじめに

超流動 ^3He は異方的な P 波クーパー対をもつため壁などの境界があると対破壊が起こり、境界近傍の性質は液体内部とは大きく異なっていると考えられる。特に、超流動 ^3He の自由表面は不純物がなく P 波超流体の理想的な境界になっており、多彩な境界効果が起きると予想される。この境界効果としてはオーダーパラメータの異方的な空間変化やアンドレーエフ反射、さらにアンドレーエフ束縛状態などがあり興味深い。

しかし、これまでに自由表面を調べる研究はほとんど行われていない。これは、液体 ^3He が電氣的に中性であり、なおかつ超低温で実験を行う必要があることから、適切な研究手段を確立できなかったためと考えられる。そこで、本研究では自由表面下に形成されるイオンの古典的な準二次元系をプローブとして用い、自由表面の物性解明を目指した。

液体 ^3He 中には正、負の電荷を持つ二種類のイオンが存在する。正イオンは、 He_2^+ イオンの代わりに ^3He 原子が凝固した固体球になっていると理解されている。負イオンは空洞の中に電子が束縛されたものである。これらのイオンは、表面からの鏡像力と外部からかけられる電場により、表面下の深さが超流動 ^3He のコヒーレンス長程度の位置に束縛される。このことから、表面下に束縛されたイオンが自由表面の研究のための有効なプローブになるのではないかと期待される。バルクな液体中のイオンの輸送現象はよく調べられていて、これと表面下に束縛されたイオンの輸送現象を比較することによって境界効果を明らかにできると予想される。本研究では常流動、超流動 ^3He 自由表面下にイオンを束縛し、その移動度測定を行った。

2 実験方法

移動度測定に用いたサンプルセルの模式図を図 1 に示す。コルビノ電極は二枚の同心円盤から成り、イオンを駆動したり、その応答を観測するための電極である。下側電極は、イオンを表面

方向に押しつける電場をかけるためのものである。この電極にはグリッドがあり、その下にイオンを生成するためのタングステンティップがセットされている。コルビノ電極の同心円上に表面下のイオンが外側に逃げないようにバイアス電圧をかけるガードリングを用意した。

表面下にイオンを生成するには、まず自由表面がコルビノ電極と下側電極の間に位置するように液体 ^3He の導入を行った。次に、正イオンの場合 700 ~ 900 V、負イオンの場合 -200 ~ -300 V 程度の電圧をタングステンティップにかけると、イオンが放出し表面下に束縛される。

液体 ^3He の超低温までの冷却は希釈冷凍機と核断熱消磁法を用い、核ステージに取り付けられている炭素抵抗温度計、 ^3He 融解圧温度計および Pt - NMR 温度計を用いて温度計測を行った。

金属の壁と液体 ^3He の間にはカピッツア抵抗と呼ばれる熱抵抗があり、低温ではこの熱抵抗が非常に大きくなる。このためサンプル液体への熱流入により、サンプル液体が核ステージの温度からういてしまう状況が起こりうる。そこで、銀の微粒子から成る 30 m^2 程度の表面積をもつ熱交換器を製作した。

束縛されたイオンの移動度測定は、イオンとコルビノ電極との容量結合を利用して行う。コルビノ内側電極にかかる入力電圧と、イオンの応答により外側電極に流れた出力電流 $I(t)$ を時間の関数として図 2 に示す。

表面下に正イオンが束縛されているとき、コルビノ内側電極に -2 V かかると、正イオンが内側電極の下の領域にひきつけられるため、内側電極の下と外側電極の下の領域でイオン密度に差が生じる。この状態から $t = 0$ で内側電極を 0 V とすると、コルビノ電極の下側の領域全体が一樣なイオン密度になるようにイオンが運動する。この結果、動径方向に電流が流れ、容量結合を介してコルビノ外側電極に変位電流が流れ込む。この変位電流は、イオンの受ける抵抗 R とイオンとコルビノ電極とが形成する容量 C で決まる時定数 CR で指数関数的に減衰する。容量 C は温度変化せずセルの形状だけで決まるため、時定数 CR の温度変化から移動度 $\mu \propto 1/R$ の温度依存性を知ることができる。

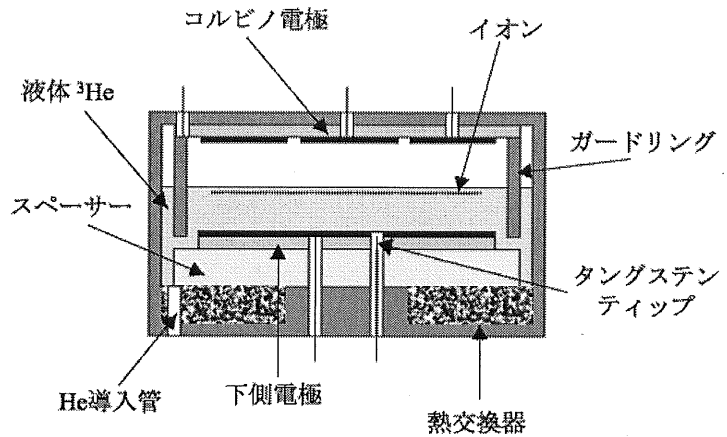


図 1：サンプルセルの模式図。

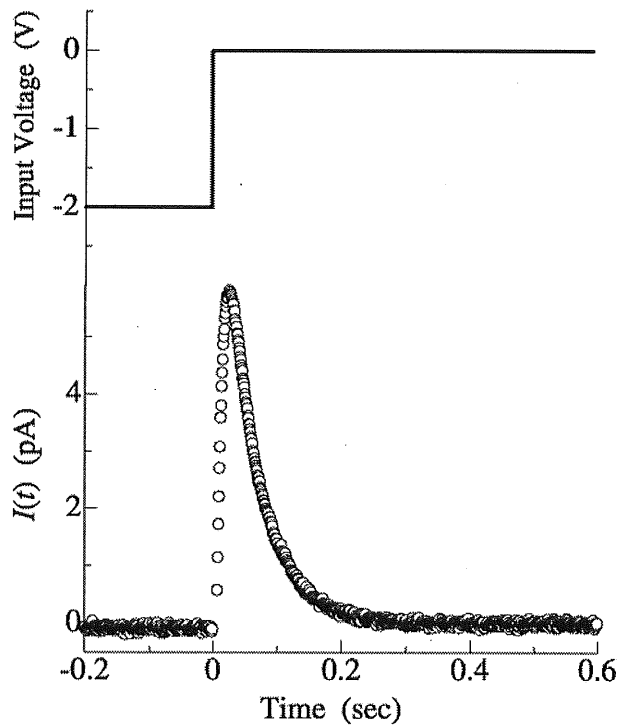


図 2：コルビノ内側電極にかかる矩形の入力電圧と外側電極からの出力電流 $I(t)$ 。

3 結果及び考察

常流動 ^3He 自由表面下のイオン 常流動 ^3He 表面下の正イオン、負イオンの移動度を図3に示す。正イオンの移動度は、約 300 mK から温度が下がるに従い増加し、約 40 mK より低温ではほぼ $\log(1/T)$ に比例して増加する。負イオンに対しては、温度が下がるに従い緩やかに減少して、約 20 mK より低温では温度依存性を失い一定になる。

正イオンの方が負イオンより移動度が大きいのは、正イオンの方が負イオンに比べて軽い有効質量を持つためとして定性的には理解できる。本研究の測定温度領域において負イオンの移動度はほぼ一定であるのに対して、正イオンの移動度は温度の降下とともに増加する。これは、正イオンの方が有効質量が軽いために ^3He 準粒子との衝突の際に受ける反跳効果が重要になるためと考えられる。このような正、負イオンの移動度の温度依存性は、バルクな液体中にあるイオンとよく一致した。

超流動 ^3He 自由表面下のイオン ゼロ磁場、飽和蒸気圧下で超流動 ^3He -B 相が出現する超流動転移点 T_c より低温では、正、負イオンの移動度が急激に増加した。超流動転移点 T_c での移動度 μ_c で規格化した μ/μ_c を、 T_c で規格化した温度の逆数 T_c/T の関数として示したのが図4である。

常流動状態では、正イオンに比べると負イオンの移動度の温度依存性は緩やかであった。超流動状態では、移動度の絶対値は正イオンの方が約一桁大きい、変化の割合は負イオンの方が大きいことが図4から分かる。この振る舞いはバルクな超流動 ^3He 中のイオンと一致する。

図4中の実線は液体内部からバリスティックに飛来する準粒子の数に比例するフェルミ因子 (逆数) である。正イオンの規格化した移動度は T_c から $0.5 T_c$ まではフェルミ因子とだいたい一致しているの、正イオンの運動はバルクから飛来する ^3He 準粒子との衝突によって決まると考えられる。 $0.5 T_c$ より低温では μ/μ_c の温度依存性が緩やかになりフェルミ因子からずれる。

図4中の点線はバルクな超流動 ^3He 中の負イオンの規格化した移動度である。このデータは圧力 29.3 bar で得られたものである。この結果と表面下に束縛された負イオ

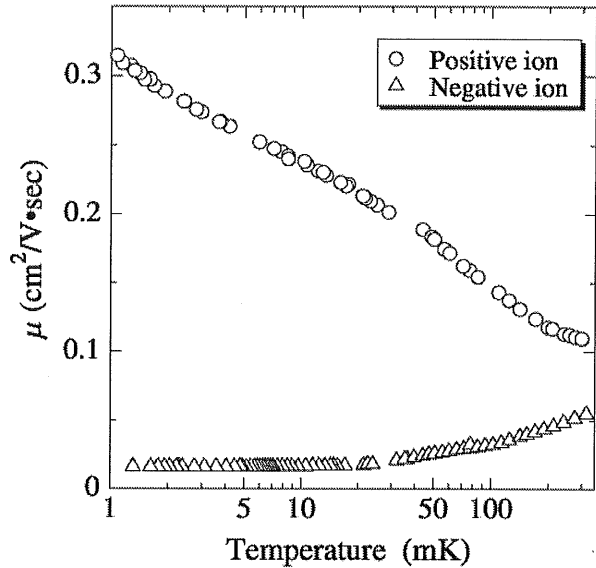


図3: 常流動状態における正、負イオンの移動度の温度依存性。

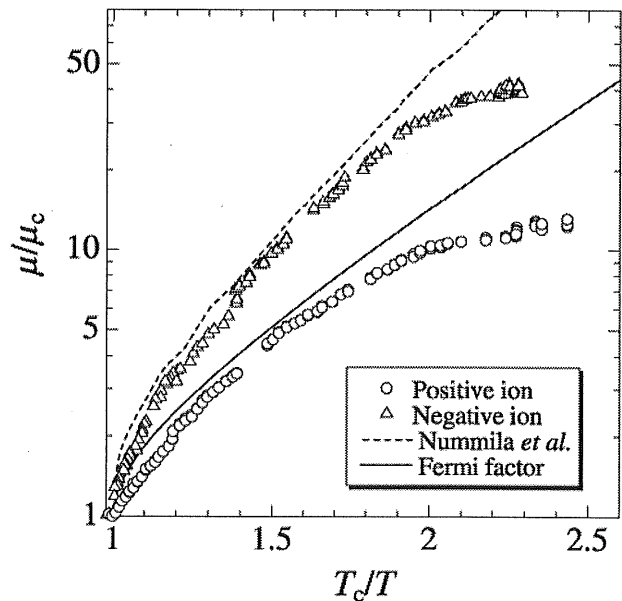


図4: 規格化した移動度の温度依存性。

ンの μ/μ_c とを比較すると、 T_c から $0.5 T_c$ まではバルクな液体中の負イオンの μ/μ_c とよく一致するのでバルク液体中の ^3He 準粒子との相互作用により表面下に束縛された負イオンの移動度が決まると考えられる。しかしながら、より低温では移動度の温度依存性が緩やかになり正イオンと同様にバルクな液体中の負イオンの振る舞いからずれる。バルクの値からずれ始める温度が正イオンとほぼ同じであるから、正イオンと同様の原因で温度依存性が緩やかになっていると考えられる。

このように移動度の増加が緩やかになるのは、バルクから飛来する ^3He 準粒子以外の散乱の原因があることを示唆している。その可能性として、表面を伝播する表面張力波の量子リプロンと表面に形成されるアンドレーエフ束縛状態がある。

これまでに、超流動 ^3He 自由表面でリプロンの観測はなされていないが、リプロンからの散乱の寄与を見積もるとずれに対して 10^{-8} 程度と非常に僅かな寄与しかなく低温での温度依存性を説明できない。

アンドレーエフ束縛状態の波動関数は、絶対零度において 3000 \AA 程度で減衰する包絡関数とフェルミ波長で振動する関数の積で書き表される。イオンの束縛されている深さは $\sim 300 \text{ \AA}$ であり、アンドレーエフ束縛状態の波動関数と重なっている。このため、アンドレーエフ束縛状態とイオンとの相互作用により、イオンの運動に対する抵抗が存在すると考えられる。簡単な見積もりから、アンドレーエフ束縛状態からの移動度に対する寄与は $1/\mu_{\text{AB}} \sim T^2$ と予想される。実験値からバルクの寄与を差し引いて求めた $1/\mu_{\text{AB}}$ は予想と異なり、むしろ温度の低下とともに増大する振る舞いを示している。

超低温において測定値の温度依存性が緩やかになる原因として、サンプル液体と壁に温度差がついている可能性もあり、この点を改善することは今後の課題である。

4 まとめ

本研究では、はじめて液体 ^3He 自由表面下にイオンを束縛して、その移動度を測定することに成功した。

常流動 ^3He 自由表面下のイオンの移動度は、バルクな液体中の正、負イオンの移動度とほぼ一致した。表面下のイオンは古典的な二次元系であるのでウィグナー結晶を組んでいると考えられるが、予想された転移点で移動度の振る舞いに異常は見出せなかった。これはイオンの有効質量やリプロンとの相互作用を考えれば理解することができる。

超流動状態において負イオンの移動度は、転移点から $T \sim 0.5 T_c$ まではバルクな液体中の負イオンの移動度とよく一致した。一方、正イオンはフェルミ因子の温度依存性とおおよそ一致した。これらのことから、 $0.5 T_c$ より高温側では液体内部からバリスティックにやってくる ^3He 準粒子とイオンとの相互作用により、自由表面近傍にあるイオンの移動度が決まることが明らかになった。

$0.5 T_c$ より低温側ではバルク液体中のイオンの振る舞いよりも緩やかな温度依存性が観測された。このことは、余剰な散乱があることを示唆している。余剰な散乱はリプロンとの相互作用では説明できない。アンドレーエフ束縛状態の影響について考察した結果、余剰な散乱が低温で増大するという逆の傾向を示すことが分かった。したがって、この研究からは余剰な散乱の原因について断定することはできなかった。緩やかな温度依存性の原因としてサンプル液体の温度が核ステージの温度からういてしまっていることも考えられ、液体とセルの熱接触を改善した追試が望まれる。さらに、アンドレーエフ束縛状態との相互作用について定量的な計算との比較も必要である。