

氏 名	ふく だ あきら 福 田 昭
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2431 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	ミリ波 ESR による, 液体ヘリウム 3-ヘリウム 4 混合液膜上に吸着された偏極原子状水素の再結合機構・冷却機構の研究

論文調査委員 (主 査)
教 授 水 崎 隆 雄 教 授 大 見 哲 巨 教 授 藪 崎 努

論 文 内 容 の 要 旨

完全に電子スピンの偏極した偏極原子状水素 ($H\downarrow$) 気体は, 結合して水素分子になれないので, 安定な気体である。 $H\downarrow$ 間の相互作用は極めて弱く, 且つ量子性が強いので, 絶対零度においても気体の状態で存在する唯一の量子気体である。低温で理想ボース量子気体として振るまい, 1998年 MIT グループによって Bose-Einstein 凝縮 (BEC) が観測された。本研究では, 液体ヘリウム上に吸着された 2 次元 $H\downarrow$ の超流動転移 (Kosterlitz-Thouless 転移) の探索を目標にして, BEC を造成する上で最も重要な 2 次元 $H\downarrow$ の再結合機構と冷却機構を解明した。

低温で水素分子を高周波放電を用いて解離させて水素原子を作り, 強磁場をかけてスピンを偏極させ $H\downarrow$ にし, 再結合を抑えて, 高密度の $H\downarrow$ を超低温に冷却する。このようにして作成した $H\downarrow$ 気体は貯蔵室に貯えられ, そこで再結合の選択性により, 電子スピンのみならず核スピンも偏極した 2 重偏極水素気体になる。貯蔵室の $H\downarrow$ (2 重偏極している) はキャピラリーを通じて一定量試料室に導入される。試料室中に冷却スポットといわれる他の部分より十分冷却された部分があり, $H\downarrow$ は集中的に冷却スポットに吸着され, 2 次元 $H\downarrow$ が形成される。この場合の 2 次元 $H\downarrow$ の面密度は導入される $H\downarrow$ のフラックスと 2 次元表面の再結合のバランスで決まり, 温度に殆どよらず, $H\downarrow$ のフラックスの導入量で実験的に制御出来るのが, 本方法の特徴である。尚, 水素原子作成の放電セルと, 低温の $H\downarrow$ の試料部は超流動 He の飽和膜でコートされている。He は非磁性であり, かつ $H\downarrow$ の吸着エネルギーが他の物質の表面に比べて最も小さいので, 表面再結合が最小になっている。本研究では $H\downarrow$ 観測に超高分解能の 120GHz のミリ波 ESR を製作し, かつ冷却スポット上の $H\downarrow$ を効率よく観測するために焦点を冷却スポットに置いたミラー型ファブリーペロー共振器を開発した。本研究の $H\downarrow$ 観測は ESR を用いて行った。

本研究の成果は, 1) 2 次元 $H\downarrow$ の表面密度の制御に成功し, 2 次元 $H\downarrow$ で起こる再結合で発生する熱 (1 分子当たり 50,000K) の 98% 以上は励起水素分子が試料室の 3 次元空間に運び去り, 冷却スポット上の 2 次元 $H\downarrow$ に再結合熱を残さない。この結果は, 2 次元 $H\downarrow$ は 3 次元 $H\downarrow$ に比べて再結合による発熱の影響が十分に少なく, 冷却が 3 次元 $H\downarrow$ より有利であることを意味しており, 重要な結果である。2) 0.1ppb と 0.6ppm³He 不純物を含む ⁴He 膜を用いた実験を行い冷却機構を研究した結果, 0.1ppb³He を含む超純度 ⁴He 膜の場合には 2 次元 $H\downarrow$ の冷却機構は, $H\downarrow$ は表面波 (リブロン) と強く結合し, リブロンと He 浴 (フォノン) 間の界面抵抗がネックになっているという Reynolds の理論と一致した。0.6ppm³He の膜において, 界面抵抗に極微量の ³He 不純物の影響があり, 界面抵抗が小さくなることを見出した。この結果は, ³He の極微量不純物がリブロンに強く影響していることを示している。⁴He 中の ³He 不純物は, 2 次元 $H\downarrow$ 冷却には望ましいことである。3) その結果を受けて, 3%³He を含む ³He—⁴He 混合液面上に吸着された 2 次元 $H\downarrow$ を冷却し, 界面抵抗が 2 次元 $H\downarrow$ の冷却のネックにならないことを見出した。リブロン—³He 準粒子浴間の界面抵抗を理論的に考察し, 実験結果を説明した。4) 3%³He を含む ³He—⁴He 混合液面上の 2 次元 $H\downarrow$ の再結合機構 (2 体再結合) を測定し, その解析から He 混合液面の $H\downarrow$ の吸着エネルギーを求めた。吸着エネルギーは, 200mK から 80mK の温度域

では0.5Kで一定であるが、それ以下で50mKまでの温度域で0.4Kまで減少する。この低温での吸着エネルギーの温度変化は、ヘリウム表面に補足された ^3He の表面の状態に第2励起状態が存在するというHallock等の実験結果と関連しているものと考えられるが、今後の理論的な考察が必要である。

論文審査の結果の要旨

本論文は、液体He主の吸着された2次元偏極原子状水素($\text{H}\downarrow$)の超流動転移探索を目的にして、そこに至る過程で $\text{H}\downarrow$ の冷却機構と再結合機構を研究したものである。熱平衡状態で ^4He 液体表面に吸着された2次元 $\text{H}\downarrow$ は、吸着エネルギーが約1Kであるので、1Kよりも低温では温度の低下と共に指数関数的に面密度が増加し、 $10^{14}/\text{cm}^2$ 程度の飽和密度に急激に近づく。このような高密度2次元 $\text{H}\downarrow$ は3体再結合機構によって爆発に結合し、安定に冷却することは出来ない。本研究で考案した方法は、比較的高温にした試料室の中に十分低温にした冷却スポットを設け、高密度の2次元 $\text{H}\downarrow$ を形成させるが、そこでの再結合を補うだけの $\text{H}\downarrow$ フラックスを試料室に供給することにより、冷却スポット上の $\text{H}\downarrow$ 密度を一定に保つ方法(冷却スポット方式)である。この方法は冷却スポットの面密度を温度と独立に $\text{H}\downarrow$ フラックスを調整することにより実験的に制御することが出来るところに特徴があり、 $10^{12}/\text{cm}^2$ オーダーの面密度の $\text{H}\downarrow$ を30mK程度まで冷却することに成功し、本方法の有用性を示したことは重要な成果である。

冷却スポット方式を用いて超流動を探索するうえで、2次元 $\text{H}\downarrow$ のシグナルを直接観測するための観測手段としてESRを導入し、 10^{-8} の分解能をもつ高分解能120GHzのmm波ESR分光器と、2次元 $\text{H}\downarrow$ のシグナルを効率良く観測するためにミラー型キャビティを開発した。残念ながら2次元 $\text{H}\downarrow$ のシグナルの観測に成功していないが、本研究を進める上で強力な手段となった。

本研究で2次元 $\text{H}\downarrow$ の物性について研究し、以下の重要な成果を挙げている。1) 発生する熱(1分子当り50,000K)の98%以上は励起水素分子が運び去り、2次元 $\text{H}\downarrow$ に再結合熱をほとんど残さない。この結果は、2次元 $\text{H}\downarrow$ を冷却する上で極めて重要な発見である。2) 2次元 $\text{H}\downarrow$ 冷却実験の熱解析から、純粋な ^4He 表面の場合は冷却のネックがリブロンとバルクHe浴との間の界面抵抗であることを明確に示した。又、0.6ppm ^3He 不純物を含む ^4He 膜を用いた実験から、界面抵抗は極微量の ^3He 不純物の影響を受け、抵抗が小さくなることを見出した。この結果は、 ^3He の極微量不純物がリブロンに強く影響していることを示しており、2次元 $\text{H}\downarrow$ 冷却には望ましいことである。He液面上の $\text{H}\downarrow$ の冷却のネックが何で決まるかということは重要であり、極微 ^3He の影響を見出したことは重要な成果である。3) 3% ^3He を含む ^3He — ^4He 混合液面上に吸着された2次元 $\text{H}\downarrow$ を冷却し、40mKの低温まで界面抵抗が2次元 $\text{H}\downarrow$ の冷却のネックにならないことを見出した。リブロン— ^3He 準粒子浴(バルクHe浴)間の界面抵抗を計算し、純粋な ^4He と比較して ^3He — ^4He 混合液の場合は界面抵抗が十分小さくなることを理論的に示し、実験結果を説明した。4) 3% ^3He を含む ^3He — ^4He 混合液面上の2次元 $\text{H}\downarrow$ の再結合機構の解析から求めた $\text{H}\downarrow$ の吸着エネルギーの低温側で見られた温度変化は興味深い結果である。本論文では、この温度変化は ^3He が液体の表面に拘束された状態の第2励起エネルギー状態が関連している可能性を指摘している。励起状態を考慮した理論が必要である。

本論文では、高分解能のミリ波ESRを開発し、それを用いた2次元 $\text{H}\downarrow$ の超流動探索を目指して行った研究で、超流動 ^4He 膜、及び ^3He — ^4He 混合液膜に吸着した $\text{H}\downarrow$ の冷却機構と再結合機構を解明した。 $\text{H}\downarrow$ と液体Heの界面抵抗やHeの表面物性に新しい知見をもたらした。2次元 $\text{H}\downarrow$ のシグナルを直接見るに至らなかったが、2次元超流動を達成する上で極めて重要な基礎研究である。従って、本論文は博士(理学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

論文に報告された研究業績を中心に、参考論文の内容ならびに、これらに関連した研究分野について口頭試問を行った結果、合格と認めた。