九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

ヘリウム液面電子を使った希薄ボース気体の2次元超 流動探索

新井, 敏一 京都大学低温物質科学研究センター

https://doi.org/10.15017/11065

出版情報:九州大学極低温実験室だより.5, pp.9-16, 2004-08. Cryogenic Laboratory, Faculty of Science, Kyushu University バージョン: 権利関係:

ヘリウム液面電子を使った希薄ボース気体 の2次元超流動探索

京都大学低温物質科学研究センター 新井敏一*

平成16年6月25日

1 はじめに

極低温実験室のいちんばん奥に「希釈冷凍機室」という部屋がある。部屋 の中にはさらに金属性の小屋があり、ドアには「超伝導マグネットがクエン チしたらすべてを放棄して逃げろ!!」と貼り紙がしてある。なにやら危険な 実験が行われているのではないかと怪しまれそうな雰囲気がある。金属性の 小屋というのは実は「シールドルーム」とよばれ、テレビや携帯電話などの 電磁波をシャットアウトして微小信号の測定に影響がでないようにするため のものである。超伝導マグネットのクエンチとは、何らかの理由でマグネッ トの超伝導が破れ、蓄えられていた磁場のエネルギーが一気に放出されてし まう事故のことをいう。クエンチがおこるとマグネットを冷やしていた液体 ヘリウムおよそ100リットルが一瞬にして気化し、デュワーびんの安全弁が 開いて噴水のように冷たいヘリウムガスが吹き出して部屋中真っ白になる。 なかなか見ることのできない光景ではあるが、見とれていると室内の空気は ヘリウムだらけになり、酸素濃度が急激に低下するので危険である。貼り紙 は、シールドルーム内で酸欠で倒れる前に逃げろという意味のものである。

この希釈冷凍機室で行われている研究は決して怪しいものではない。希釈 冷凍機を使って1K以下の低温を作り出し、液体ヘリウム表面に浮かぶ2次元 希薄ボース気体の超流動転移を観測することを目標に研究が進められている。

2 ヘリウム液面上の2次元希薄ボース気体 [1,2]

運動の自由度を制限して系の次元を下げると、量子力学が支配する世界で はしばしば3次元系には見られなかった興味深い物理が生まれる。それは、 低次元系ではゆらぎの効果が大きいため系の秩序がこわされてしまうことに 起因する。ここでとりあげる希薄ボース気体はその代表的な例である。一様

^{*}e-mail: toshikaz@scphys.kyoto-u.ac.jp

な理想ボース気体は、3 次元ならば有限温度でボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) をおこすけれども、2 次元だと絶対零度以外では BEC をおこさない。このことは統計力学の教科書などでとりあげられているのでよく知られている。これは、2 次元のゆらぎが秩序変数の位相の長距離秩序をこわすという見かたで説明することができる [3]。液体ヘリウム 4 や磁気光学トラップ中のアルカリ原子など、3 次元ボース粒子系の超流動現象は BEC と深い関係がある。それでは有限温度で BEC をおこすことができない 2 次元系は超流動状態にならないのかというと、そうではない。2 次元ボース粒子系を冷却すると、渦が対を形成することによって「幾何学的秩序」なるものが成長して有限温度で超流動状態になるということが Kosterlitz-Thouless (KT) 理論 [4] で指摘されている。液体ヘリウム 4 単分子膜の超流動は KT 転移によるものであると理解されている。しかしながら、より理想気体に近い希薄な 2 次元ボース気体ではまだ超流動転移は観測されていない。

本研究のねらいは、ボース粒子である水素原子 (H) を液体ヘリウム表面に うかべて2次元希薄ボース気体をつくり、これを冷却して2次元超流動状態 を実現し、さらに理論で言われているような渦対と超流動の関係を明らかに することである。

KT 転移温度 T_{KT} と H の面密度 σ_{H} の関係は次の式で与えられる。

$$T_{\rm KT} = \frac{2m_{\rm H}}{\pi\hbar^2 k_{\rm B}} \sigma_{\rm H} \tag{1}$$

 $m_{\rm H}$ は H 原子の質量である。この式を見ると $\sigma_{\rm H}$ を大きくすれば $T_{\rm KT}$ も高 くなって KT 転移は簡単に実現できそうである。ところが実際には面密度を 大きくしようすると、H 原子同士の衝突頻度が増して水素分子への再結合 H + H → H₂ が激しくなる。したがって面密度をあまり大きくすることはで きない。低密度で冷却することが必要である。希釈冷凍機で十分冷却可能な $T_{\rm KT} = 75$ mK において $\sigma_{\rm H} = 1 \times 10^{13}$ atoms/cm² を上回る密度にすればよ い。このあたりを目安として実験を進めている。

3 高感度センサー – 液面電子

2次元 H 気体を冷却して超流動になったかどうかをどうやって検出すれば よいか、これが問題である。これまでも KT 転移の条件(1)に達しているかも しれないという実験があるにもかかわらず超流動性を観測するまで至ってい ないのは、もし超流動になっていたとしてもそれを検出する適当なセンサー がなかったことが理由の一つとしてあげられる。

私たちの研究グループは、Hの2次元超流動を検出するために H が浮かん でいるのと同じ液面に電子もいっしょに浮かべてこれをセンサーにする。へ リウム液面電子は、例えば Wigner 結晶への転移や液面の素励起とカップル した振動モードの存在など、それ自体興味深い研究対象である [5]。近年の研



図 1: ヘリウム液面上の水素原子と電子の共存状態。水素原子の2次元超流 動を検出するためのセンサーとして液面電子を使う。

究でヘリウム液面付近の現象を感度良くとらえるセンサーとして液面電子が 有用であることがわかってきた [6]。私たちが関心のある1K以下という低温 ではすべての不純物は凍りついてしまうため、ヘリウム液面はとてもきれい な表面になっている。この状況下で液面電子の移動度を支配するものは、気 相の蒸気から飛んでくるヘリウム原子、液面の量子化されたさざ波(リプロ ン)、あるいは下地の液体が超流動ヘリウム3の場合はその内部からやって くる準粒子等、条件によって異なる。実際に移動度を測定すると、これらに よる違いが鮮明に映し出される。液面で2次元H気体が共存していれば、H 原子との散乱や、2次元超流動相内部の素励起との散乱が液面電子の移動度 を支配するようになるはずである。これにむけた予備的な実験と、これまで の成果を以下で紹介する。

4 水素原子による電子捕捉

最初の実験はヘリウム液面で電子と水素原子を共存させることから始めた [7]。装置等については文献 [7]を参考にしていただきたい。あらかじめ液面電子を用意しておいたサンプルセルに液面電荷を測定しながら水素原子を導入した。すると、水素原子を入れたことによる液面電荷の減少が観測された。そのデータのひとつを図2に示した。これは、水素原子が液面に吸着され、面内で電子と衝突することで電子捕捉反応 $H + e^- \rightarrow H^-$ が起こる。そして生成物の水素マイナスイオン H^- が液面上にとどまることができずに液の中に潜ったためである。この反応が起こることはある程度予想していた。水素原子は陽子のまわりを1個の電子がまわっているラジカルなので、もう1個電子を取り込んで H^- となる方が安定であろうと考えられるからである。実際、水素原子による電子捕捉反応がおこると電子親和力 0.75 eV のエネルギーを放出することがわかっている。

この反応について詳しく調べることは、次にあげるような意味で興味深い。 温度1K以下の超低エネルギー衝突による反応である。超流動へリウム表面



図 2: 水素原子導入後の液面電子減少。時刻 t = 0 で一定量の水素原子を入れ、 その後は導入を断切った。白まるが測定点、実線はフィットである。フィット の詳細は文献 [7] 参照。

という不純物のないきれいな2次元面内での反応である。類似の反応が太陽 表面や星間雲内で起きていて、宇宙における物質形成などと深いかかわり合 いがある。そしてもうひとつ、本研究の目的すなわち水素原子の2次元超流 動を液面電子を使って調べることを達成するためには、H と e⁻の液面共存 系が長時間反応しないでいてもらいたい。したがって反応のメカニズムを知 り、反応速度をできるだけ遅くする条件を見つけなければならない。

5 電子捕捉反応の磁場依存性

反応を起こりにくくして共存系を安定化するにはどうしたらいいだろうか? H⁻の電子状態はスピン・シングレットだから、強磁場をかけてスピン偏極さ せてやれば反応を抑えることができると考えた(図3)。磁場中では水素の再 結合も抑えられるので[1]、σ_Hを大きくすることも可能となり都合がよい。



図 3: 強磁場で電子スピンを偏極させると電子捕捉が起こりにくくなる。



図 4: 電子捕捉反応の磁場依存性測定データ。時刻 t = 0 から一定のスピード で H を供給し続けた。ドットが測定点、線がフィットである。強磁場で反応 速度を遅くすることができた。

実験は温度 0.3 K で t = 0 s から液面電子が完全になくなるまで一定のス ピードで H を供給し続けた。磁場 B = 0 T から 11 T まで液面電子が減少す る速度の磁場依存性を測定した。そのデータが図 4 である。強磁場中では液 面電子の減少速度が強く抑えられていることがわかる。

磁場中での反応メカニズムを知るために以下の解析をした [8]。電子捕捉反応はエネルギー保存のために第3体の寄与が必要で、いまの場合その役割をHがすることがわかっている [7]。反応式は $H + H + e^- \rightarrow H^- + H$ と表される。したがって電子数 N_e の速度式は N_e に関して1次、Hの数 N_H に関して2次となる。

$$\frac{dN_{\rm e}}{dt} = -K_{\rm e}N_{\rm e}(\alpha N_{\rm H})^2.$$
(2)

ここで $K_{\rm e}$ は速度係数、 α はサンプルセルの形状と温度できまる係数で、 $\sigma_{\rm H} = \alpha N_{\rm H}$ である。 $N_{\rm H}$ についての速度式は

$$\frac{dN_{\rm H}}{dt} = \phi - K_{\rm e} N_{\rm e} (\alpha N_{\rm H})^2 - K_{\rm s}^{\rm eff} (\alpha N_{\rm H})^2.$$
(3)

と表される。第1項は一定のスピード ϕ でHを供給し続けていることによる 項、第2・第3項はそれぞれ電子捕捉反応および再結合で失われることによ る項である。ここで K_s^{eff} はHの再結合速度係数で、 K_s^{eff} の温度および磁場 依存性は徹底的に調べられている。ここでの解析には K_s^{eff} として文献 [9]の 値を使った。(3)の右辺第2項は第3項に比べてきわめて小さいことがわかっ ているので [10] これを無視すると、(3) は N_{H} だけの微分方程式になる。す



図 5: 電子捕捉反応速度係数 K_eの磁場依存性。まるがデータ、実線は 1/B² に比例する線。

るとこれらは解析的に解くことができて、最終的に得られる Ne の解は

$$\frac{N_{\rm e}(t)}{N_{\rm e}(0)} = \exp\left[\frac{a}{b}\tanh(bt) - at\right] \tag{4}$$

となる。ただし、 $a = K_e \phi / K_s^{\text{eff}}$ 、 $b = \alpha \sqrt{\phi K_s^{\text{eff}}}$ である。 $N_e(t)$ を最初の電子 数 $N_e(0)$ で割ると、(4)の右辺は $N_e(0)$ によらないことに注意していただき たい。最初の電子数がいくつであっても温度・磁場等、他の実験条件が同じ であれば $N_e(0)$ でスケールした線は $N_e(0)$ によらなくなることがわかる。図 4 の縦軸はスケールしてプロットしてある。

(4) で、 $\phi \geq K_s^{\text{eff}}$ のふたつをフィッティングパラメタとしてデータをフィットさせた結果が図4の実線である。非常によくフィットできていて、私たちのモデルが正しいことがわかる。こうして得られた K_e を磁場Bに対してプロットしたのが図5である。B = 0Tの値と比べて強磁場中では K_e の値は8桁も小さくなっている。これは電子捕捉反応が磁場で強く抑制されることを意味する。ここでは詳しく述べないが、私たちはスピン偏極を考慮した理論的な考察から K_e は $1/B^2$ に比例するだろうと予想している[8]。図5の中で実線は $1/B^2$ に適当な係数をかけてデータに近くなるようにかいたものである。データは、私たちが考えている $K_e \propto 1/B^2$ となるメカニズムが正しいことを裏付けるものである。ただし、B > 8Tで K_e がふたたび大きくなっているようにも見える。非常に強い磁場中では何か他のメカニズムが機能しはじめているのかもしれない。このことは今後の課題として残しておく。

6 まとめ

電子を使って水素原子の2次元超流動状態を調べるために、電子と水素原 子のヘリウム液面2次元共存状態をつくった。これらの共存状態は、水素原 子が電子を捕捉するため不安定であることがわかったが、強磁場でスピン偏 極させることにより系を安定化することに成功した。同時に電子捕捉反応の メカニズムについてもかなりわかってきた。今後は電子の移動度測定から2 次元水素気体の状態に関する情報を得ることを行い、世界初の希薄ボース気 体の2次元超流動状態を研究していく。

7 謝辞

本稿の執筆を促してくれて、筆者がなかなか原稿を提出しないのをじっと 耐えてくださった浅野貴行先生に感謝いたします。実験は大量の寒剤を供給 し続けて下さる極低温実験室スタッフのみなさまに支えられて行うことがで きました。我々の超伝導マグネットが故障で修理に 2000 万円かかると聞いて 困っていたら、工学研究院の河江達也先生が快くマグネットを貸してくださ いました。強磁場のデータはそのマグネットを借りることができたからとれ たものです。

この研究は理学研究院の矢山英樹先生との共同研究です。筆者は2004年6 月より京都大学に異動となったが、矢山先生を中心として現在も研究が継続 されています。

最後になりましたが、九州大学在籍中にお世話になったすべてのみなさま に心より感謝とお礼を申し上げます。

参考文献

- I. F. Silvera and J. T. M. Walraven, in D. F. Brewer, ed., Prog. in Low Temp. Phys. Vol. X (Elsevier, Amsterdam, 1986), pp. 139–370.
- [2] J. T. M. Walraven, in J. Dalibard, J. M. Raimond, and J. Zinn-Justin, eds., Fundamental systems in quantum optics (Elsevier, Amsterdam, 1992), pp. 485-544.
- [3] 山田一雄 and 大見哲巨, 超流動 (培風館, 1995).
- [4] J. M. Kosterlitz and D. J. Thouless, J. Phys. C6, 1181 (1973).
- [5] E. Andrei, ed., Two-Dimensional Electron Systems on Helium and Other Cryogenic Substrates (Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1997).

- [6] 河野公俊, 日本物理学会誌 53, 737 (1998).
- [7] 新井敏一 and 河野公俊, 固体物理 38, 605 (2003).
- [8] T. Arai, T. Mitsui, and H. Yayama, J. Low Temp. Phys., submitted (2004).
- [9] T. Arai, M. Yamane, A. Fukuda, and T. Mizusaki, J. Low Temp. Phys. 112, 373 (1998).
- [10] T. Arai and K. Kono, Physica B 329-333, 415 (2003).