

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1 K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こと、そうではない。2次元ボース粒子系を冷却すると、渦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。

$$T_{KT} = \frac{2m_H}{\pi\hbar^2 k_B} \sigma_H \quad (1)$$

m_H は H 原子の質量である。この式を見ると σ_H を大きくすれば T_{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 $H + H \rightarrow H_2$ 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 $T_{KT} = 75 \text{ mK}$ において $\sigma_H = 1 \times 10^{13} \text{ atoms/cm}^2$ 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。ヘリウム液面電子は、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

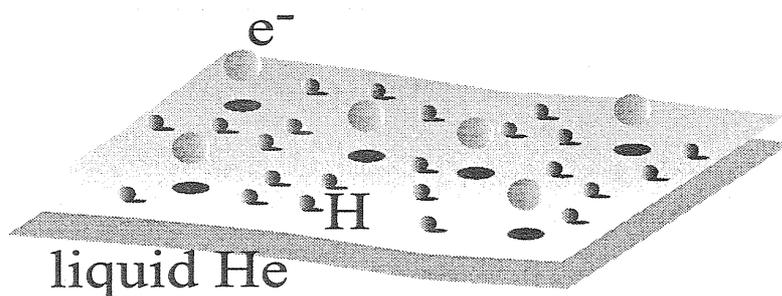


図 1: ヘリウム液面上の水素原子と電子の共存状態。水素原子の 2 次元超流動を検出するためのセンサーとして液面電子を使う。

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 1 K 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 (リップル)、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] を参考にさせていただきたい。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 1 K 以下の超低エネルギー衝突による反応である。超流動ヘリウム表面

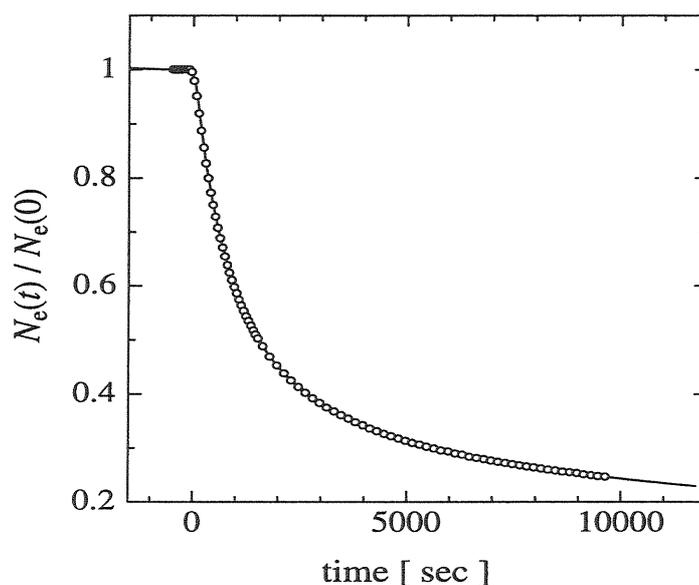


図 2: 水素原子導入後の液面電子減少。時刻 $t = 0$ で一定量の水素原子を入れ、その後は導入を断切った。白まるが測定点、実線はフィットである。フィットの詳細は文献 [7] 参照。

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あらいたい。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。

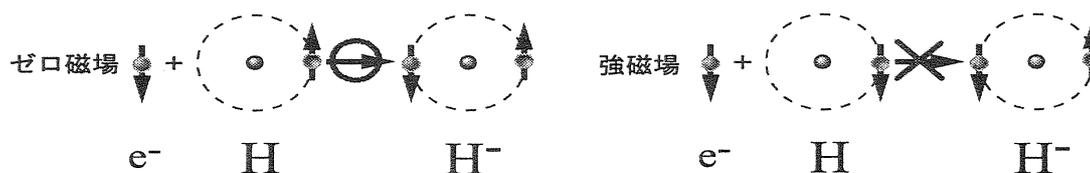


図 3: 強磁場で電子スピンを偏極させると電子捕捉が起こりにくくなる。

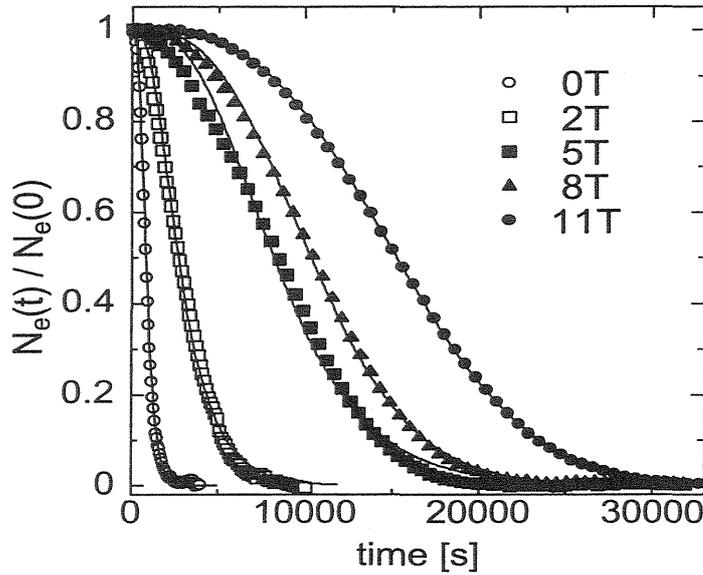


図 4: 電子捕捉反応の磁場依存性測定データ。時刻 $t = 0$ から一定のスピードで H を供給し続けた。ドットが測定点、線がフィットである。強磁場で反応速度を遅くすることができた。

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。

$$\frac{dN_e}{dt} = -K_e N_e (\alpha N_H)^2. \quad (2)$$

ここで K_e は速度係数、 α はサンプルセルの形状と温度で定まる係数で、 $\sigma_H = \alpha N_H$ である。 N_H についての速度式は

$$\frac{dN_H}{dt} = \phi - K_e N_e (\alpha N_H)^2 - K_s^{\text{eff}} (\alpha N_H)^2. \quad (3)$$

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ため [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

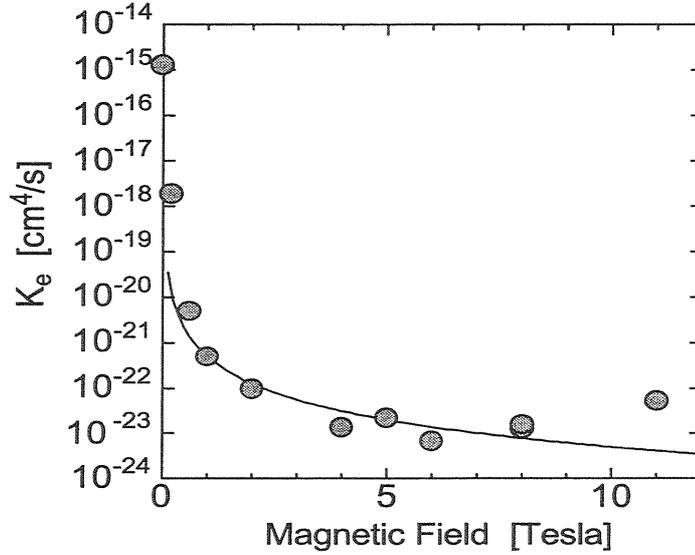


図 5: 電子捕捉反応速度係数 K_e の磁場依存性。まるがデータ、実線は $1/B^2$ に比例する線。

るとこれらは解析的に解くことができ、最終的に得られる N_e の解は

$$\frac{N_e(t)}{N_e(0)} = \exp \left[\frac{a}{b} \tanh(bt) - at \right] \quad (4)$$

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、 ϕ と K_s^{eff} のふたつをフィッティングパラメー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。 $B = 0$ T 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、 $B > 8$ T 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

- [1] 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).