

Title	液体He中及び表面の電子
Author(s)	堀, 秀信
Citation	大阪大学低温センターだより. 18 P.7-P.10
Issue Date	1977-04
Text Version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/11094/8606
DOI	
rights	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/>

液体 He 中及び表面の電子

理学部 堀 秀 信 (豊中 2472)

電子は液体 He 中では He 原子を押しつけて気泡状の空間を作りいわゆる Bubble State を作り、その液面上で surface State を作る。ここでは我々の見出した Bubble と Vortex Ring との Crossover 効果、Bubble 伝導に於ける負性抵抗と振動現象等の話題とそれに加えて最近話題となっている二次元 Wigner 格子等について述べる。

超流動 He の特異な現象はいわゆる二流体モデルで現象論的によく説明されるが、そのミクロな理解を得る方法として Landau の分散関係すなわち Phonon や Roton 等の素励起の様子を調べる事に関心が寄せられて来た。特に粘性については物体が臨界速度 V_c ($\cong 60\text{m/sec}$) を越えた時物体により Roton が生成され運動量が交換されて生ずると考えられがちであった。他方 Landau の分散関係と似たデータが単原子分子の液体一般に観測され、液体が超流動になる条件はこの他にもある事が示唆された。

この条件の重要なものとして小さな運動量領域 (Roton 励起の運動量以下) で個々の He^4 原子の個別励起が許されず、Collective Motion のみしか励起出来ないため分散曲線がほとんど幅を持たない事ではないかと思われる。

このような性質を持つ超流動 He が物体との間で Roton や Phonon を生成する以外に運動量を交換し得ないかどうかの一つの興味ある問題となる。この事を調べるには回転円板で粘性を測るというようなマクロな測定法に加えて Roton や Phonon の影響を受けやすい分子レベルの大きさ物体の運動を研究する必要がある。

これは、超流動 He 中にイオンを作ってその運動を調べるといふ Carreri や Reif の方法によってかなりの前進を見たと言える。彼等及びその後の研究者達によって、液体 He 中では電子は Bubble を作ってその中に捕えられた状態で存在し、その Bubble は有効質量約 100He Mass の負イオンと考えてよい事が示された。又そのイオンの運動量やエネルギーの交換については次のような Process になっている事が明らかにされた。物体の運動を妨げるものは物体の速度が小さい時は、すでに熱的に励起されている Phonon や Roton による散乱 (生成ではない) が主で、速度が大きくなっていくと (約 50m/sec 以上で) Vortex Ring が作られこれに運動量やエネルギーが流れ込むという Process が主となる。我々の研究室でも超流動 He 中で Vortex Ring がどのように生成されてくるかという点を中心とした一連の研究を行って来た。図 1 は我々の実験結果を Schematic に示したものである。この図は電子を液体 He 中で生成する方法としていわゆる Hot Filament 法を使い、⁽¹⁾ 陰極であるタングステン線からの熱電子を陽極に電圧をかけて引き出し、その電流-電場特性を描いたものである。この方法は陰極から出たイオンは一度その極く近くにある乱流によって捕えられそれから超流動 He 中へ熱的、電氣的に飛び出して行くという特徴を持っている。図の領域 A でイオンは熱的に超流動 He 中へ飛び出しそれが He 中を Roton や Phonon と散乱しながら走る。領域 B から C にかけてはイオンが電場によって超流動 He

中へ引っぱり出される効果が強くなっていく領域で、領域Dに至ってイオンは乱流から超流動 He 中へ電場によって簡単に引き出されるがそれが Vortex Ring を生成しながら超流動 He 中を運動するようになってくる。領域Eでは Vortex Ring の多重生成及び Roton 生成がおこるようになる。以上のモデルは各素過程についての研究結果を基にして作られ確立された。

我々は、この実験結果を中心として特に次の点に注目した。それは Vortex 生成の臨界速度が一般に物体がよほど軽い限り ($\sim 1\text{He Mass}$ 以下) Roton のそれより小さくその意味で Vortex Ring の方が Roton よりも作りやすい事である。ではどうしてそのような事になっているのかを具体的に考察する必要がある。図2はこの説明のために我々が提案した図である。図2ではイオンの \vec{P}^2 (\vec{P} は運動量)

に比例する(すなわち自由粒子としての)分散曲線と Vortex Ring に捕えられたイオンの分散曲線(流体力学的考察からほぼ $\propto \ln|\vec{P}|$)とが描かれており、それ等は Crossover して Mixing が起きて分散曲線が図の実線のようにになると考える。そのため P が小さい時は Free Ion の速度で運動して行くが、 P の増加と共に 0 点近くからイオンを Trap した Vortex Ring の状態になって行く。こういう風に考えると今までの色々な結果が合理的に説明出来る。⁽²⁾特に 0 点に達する前にすでにイオンの速度(図の $d\varepsilon/dp$)が V_c を越えている時は、Roton 生成がおこる。このように物体と Phonon, Roton, Vortex Ring 生成等の間の色々な Process の関係をはっきりさせた点は超流動 He 中のイオンの研究の一つの成果と考えている。ところでこのような色々な Process を反映した Hot Filament の電流-電場特性で、特に約 10 KV/cm の電場領域で電流の増加が著しく小さい所が存在する。この領域は Negative Resistance に近い状態で Mobility が著しく減少している事が導びかれる。⁽³⁾この事を利用し我々は高い電場を階段関数的にかけるとその瞬間に電荷の Bunching がおこり空間的な粗密が出来、そのため振動電流が生ずる事を見出した。これは丁度半導体に於けるガン効果に対応する現象として興味のある事である。この振動は適当な温度、電場領域でしかおこらず、電場が強い程、又温度が低い程振動数が下ってくる。これは上記の電流-電場特性の異常な領域の温度依存性に起因している事が明らかにされている。⁽³⁾

話は変わるが液体 He 中の電子の研究途上で、その表面上に電子が捕えられ、それが非常に良い二次元電子系を作る事が発見された。そしてその状態についての詳しい実験や理論的研究が行われた。液体 He

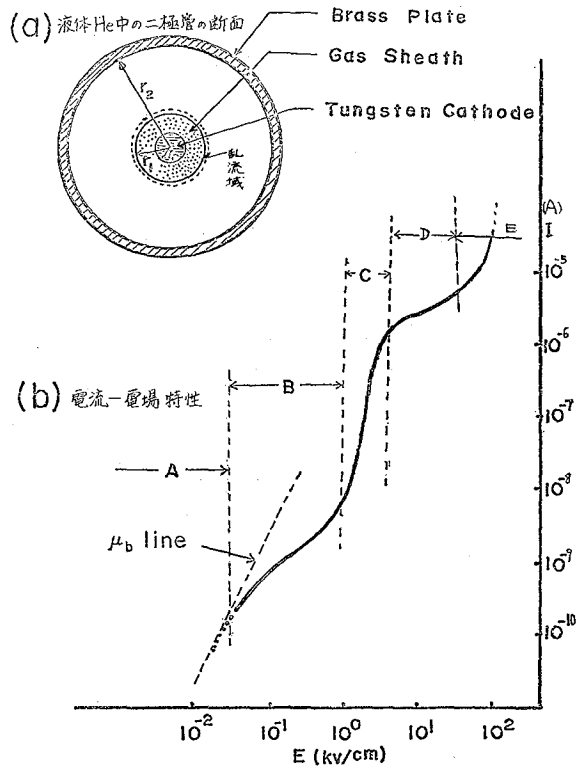


図1.

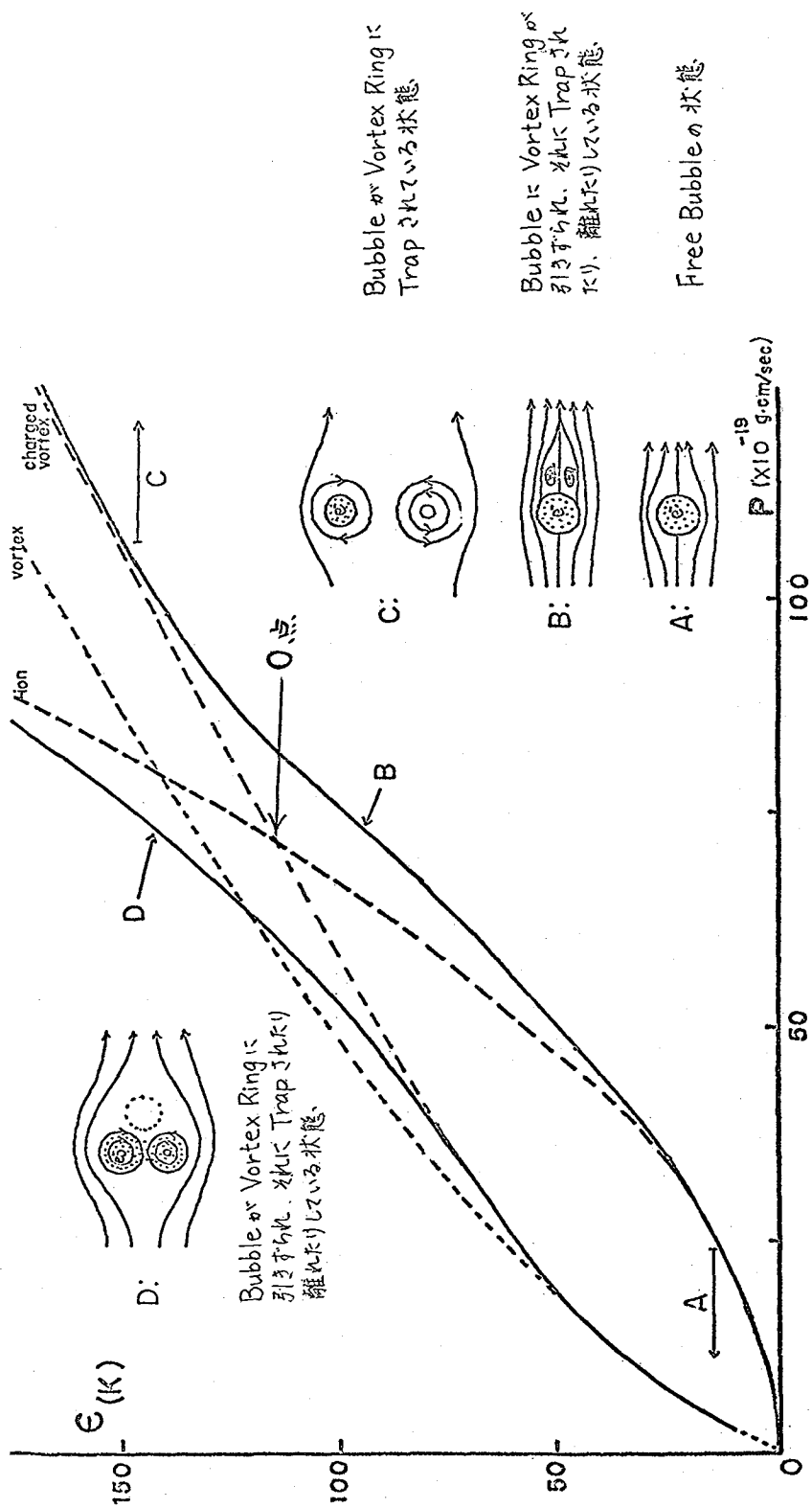


図-2. Vortex Ring と Bubble の Crossover 効果
 縦軸はエネルギー、横軸は運動量。
 領域A, B, C, Dは、それぞれ Vortex Ring とイオンが液体 He 中の流れの中で、どのような位置関係になっているかで分けられる。
 又この Schematic な図が、それぞれ描かれてあり、図の中で... がつけられている所に電子が存在する。

表面上の電子の存在状態については他の解説にゆずる事とし、⁽⁴⁾ここでは最近注目されている二次元電子系の「Wigner 結晶」についての話をしたい。Wigner 結晶の問題が物理学の基本的問題の一つと言われているのはおそらく次の点によると思われる。それは「一般に零点振動の大きい斥力のみしか持たない電子系が、有限の大きさの容器の中で電子密度を小さくして行くだけでなぜ結晶化して格子を作るのか？」という点である。Wigner 結晶存在の根拠になっているのは、「電子間斥力によって他の電子を押し除けた空間に出来る Potential が電子を Trap するように働き、その大きさは電子密度を小さくしていくと電子の運動エネルギーより大きくなりそこに電子を局在させるようになる。」という事である。これに対して次の疑問が残る。Wigner 結晶は零点振動が大い点で量子固体の一種と考えられる。典型的な量子固体である固体 He の場合には、He 原子が自分自身の性質で決まる固有の引力 Potential を持っている。これに対し電子系の場合は、他の電子を押し除けて作られる Potential で、まわりの電子配置で自由に変形出来る。このため Wigner 結晶は固体 He の融解の場合のように、ある一定の融解温度で一斉に Potential の非線型部分の影響が出て来て、各格子点の原子の復元力が失われて融解するという相転移が可能かどうかは必ずしも明らかではない。つまり $T = 0^\circ\text{K}$ で格子を作ったとしても温度の増加とともに徐々に不規則な格子配置になって行ったり、電子系の空間配置の時間変動が増加して行ったりして明確な相転移温度が定まらない可能性が有り得る。今の所この点に関する答は計算機実験でその存在が示された事が一番有力なものであろう。又実験的には液体 He 表面の他、MOS 反転層に出来た二次元電子系でも行われ、その存在を示唆する報告がなされている。最近では Wigner 格子が存在する事を前提として色々な計算がなされている。たとえば長波長極限での横波の存在を固体の特徴とし、Potential の非線型部分により復元力がなくなる温度を求め相転移点を計算する事や、⁽⁵⁾磁場中の励起モード等が計算されている。我々も液体 He 中の電子の研究の初期に、液面近くで異常な電荷分布を見出した事もあって二次元電子系の研究に興味を持ち、Wigner 格子存在の可能性を電氣的にチェックする実験を計画している。我々は相転移が起ればそれは誘電率の変化として観測出来るであろうと考え交流誘電率を観測する計画を立てた。誘電率を測る Cell の Capacitance は約 0.1 pF で、我々の手持の装置は 10^{-7} pF まで観測出来る。従って ϵ はほぼ 10^{-6} 倍位までの観測が可能である。ねらいは Wigner 格子の「かたさ」を交流誘電率測定で調べようというものである。我々は Capacitance 測定用の交流電場を二次元面に平行にかける。電子はガスの時には空間を自由に動け、Wigner 格子の時はほとんど動かない。このため Capacitance は、前者の場合は電極の極く近くに分布する電子で容量が決まり約 1 pF 位、他方 Wigner 結晶の場合は最大 1 格子間隔ほど変化したとして $\sim 10^{-4}$ pF 位の変化であり相転移点では、この差約 1 pF 位の容量の変化が予想出来る。又もし Wigner 結晶が出来たとして、その格子点の復元力が温度の上昇とともに $2 \sim 8$ 倍位になると予想され⁽⁵⁾ておりそれによる誘電率の温度変化も観測可能かも知れない。なお参考文献は非常に多く、すべてを紹介するのは繁雑となるのでなるべく総合解説的なものを選ぶ事とし、より詳しい事はそれ等の引用文献を参考願いたい。

- (1) 伊達 宗行 他：物性, 13 巻 661 頁 (1972)。
- (2) M. CATE et al. : J. phys. Soc. Japan 39 553 (1975)。
- (3) K. TOYOKAWA : J. phys. Soc. Japan 39 460 (1975)。
- (4) 植村 泰忠 : 日本物理学会誌 29 巻 98 頁及び 221 頁 (1974)。
- (5) 福山 秀敏 : 物性, 15 巻 544 頁 (1974)。