

液体ヘリウム表面上の束縛電子

東大理 梶田 晃 示

液体ヘリウムの表面上に電子の浅い束縛状態が存在することがM. W. ColeとM. H. Cohen¹⁾によって予想されて以来、実験的にこの束縛電子系の性格を明らかにする努力がはらわれてきた。ヘリウム面上の電子は、その散乱体が希薄なヘリウム気体のみという単純性のゆえに、二次元伝導体の性格を研究する際のすぐれたモデル物質となる。面内での電子の易動度は低温 ($T \sim 1 \text{ K}$) では $10^6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ をこえるほど大きくなり²⁾、この点では、易動度が $10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ 程度にしかないMOS等に比較して、より理想的な系であるといえる。ただし、ヘリウム液面上の電子は正電荷のバックグラウンドを持っていない特異な系であることに注意する必要がある。

以下、現在迄に知られている実験事実について簡単に紹介する。

図1に、ヘリウム液面上の電子に対するポテンシャル曲線とエネルギー準位の概略図を示す。液体外の電子は、液体ヘリウムと気体の誘電率の差に起因する $-\frac{e^2}{X}$ に比例したポテンシャルを受ける。一方電子が液中に入るには、約 1 eV の余分なエネルギーが必要である。この二種類のポテンシャルによって液面外に電子の浅い束縛状態が作られる。エネルギーはほぼ

$$E_n = -\frac{Z^2}{n^2} \frac{me^4}{Z\hbar^2} \quad (n=1, 2, \dots) \quad (1)$$

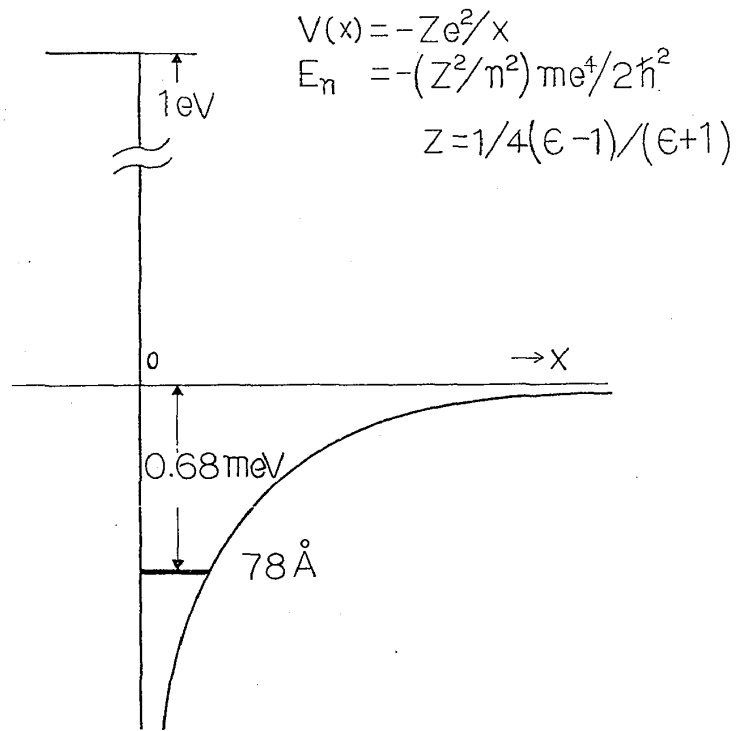


図 1

ヘリウム液面近傍の電子に対するポテンシャルと $n=1$ のエネルギー準位。 $X > 0$ が気体 $X < 0$ が液体の領域である。

液体ヘリウム表面上の束縛電子で与えられる。 $Z = \frac{1}{4} (\epsilon - 1) / (\epsilon + 1)$ 。 ϵ は液体の誘電率である。気体の誘電率はほぼ1と仮定する。 m は電子の面に平行な方向の質量である。

最近、 $n = 1$ の準位から $n = 2$ 、 $n = 3$ の準位への遷移による光吸収（マイクロ波領域である）が観測された³⁾。（図2）ヘリウム面上の電子は、1 K以上の温度では、

圧倒的に状態数の多い三次元的状態に逃げてしまうので、実験に際しては、液面内に電極を設けて、液方向に電子を引きつけるような電場を印加しておく。図2には $n = 1$ から $n = 2$ 、 $n = 1$ から $n = 3$ への遷移のエネルギーが印加電圧によって変化する様子が示されている。電圧を零に近づけた時、 $n = 1$ から $n = 2$ への遷移のエネルギーは0.25

meV、 $n = 1$ から $n = 3$ へのそれは0.62 meVに到達する。これらは、単純なモデルでは、各々0.51 meV、0.604 meVと計算されるもので、一致は相当良い。

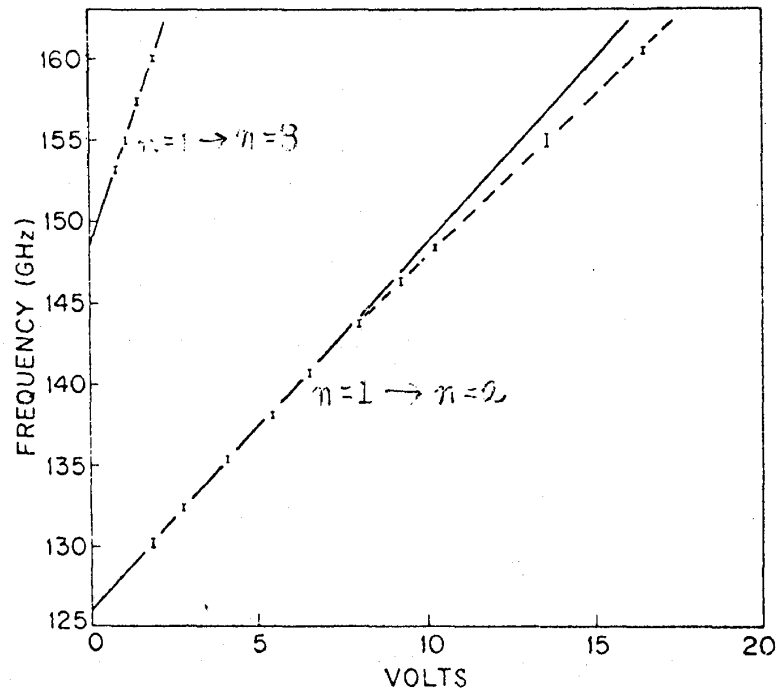


図2 束縛電子の準位間遷移のエネルギーの電場依存性。

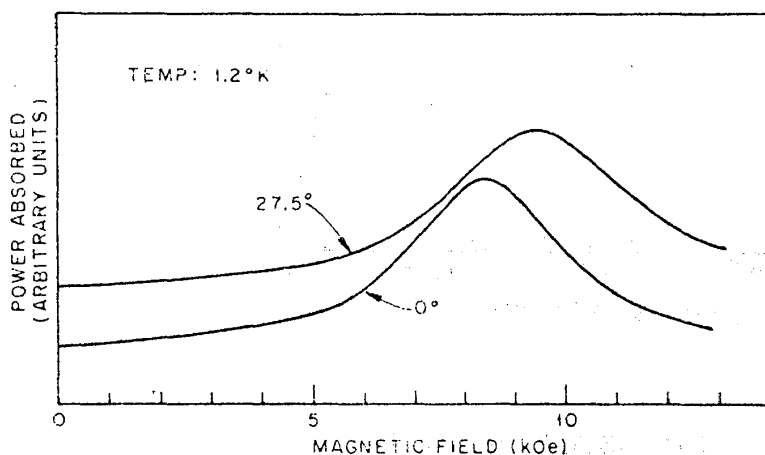


図3 ヘリウム液面上の電子によるサイクロトロン共鳴吸収。角度は磁場と液面の法線との間の角を示す。

ヘリウム面上電子によるサイクロトロン共鳴吸収がT. R. BrownとC. C. Grimesによって観測されている⁴⁾。（図3）面に平行な方向での質量はほぼ自由電子のそれに等しいことが明らかになった。磁場を液面に垂直な方向から傾けた場合、

梶田晃示

吸収線のピークの位置が高磁場側に移動する。これは、磁場の、液面に垂直な成分が、電子のサイクロトロン運動の有効磁場になることに因るものであり、電子系が二次元的であることを示している。

以上のような、面上電子の二次元性の検証に先だって、電子の易動度がW. T. SommerとD. J. Tammerによって測定されて、電子が低温で非常に高い易動度をもつことが知られた。(図4) さらに、我々の所でも、time-of-flight法によって、易動度

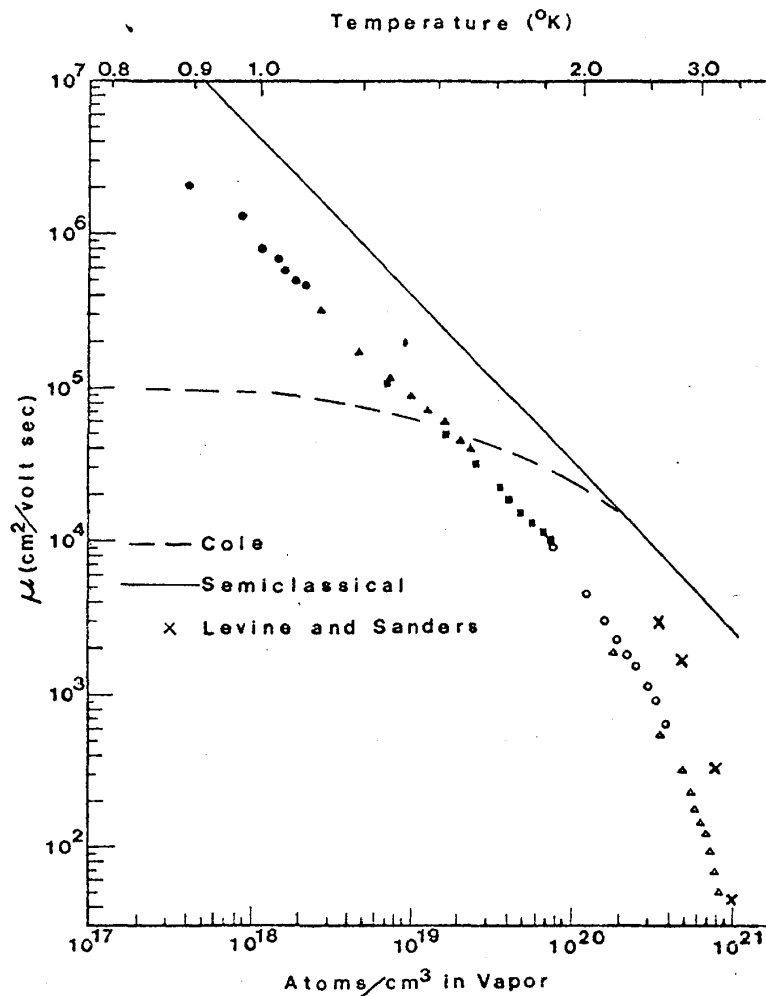


図4 ヘリウム液面上の電子の易動度

の直接測定及び磁気抵抗効果の測定を行う目的で実験をはじめている。我々による易動

液体ヘリウム表面上の束縛電子度の測定結果は W. T. Sommer 等の結果とほぼ一致している。磁場効果に関しては、液面に平行な磁場の印加によっては磁気抵抗効果があらわれないことを確かめたが、現在、面に垂直な磁場による効果を観測中である。

以上のように、ヘリウム面上の二次元電子の系の性格は次第にあきらかになりつつある。この系では、電子の Wigner-crystallization のおきる可能性もあり理論的検討が行なわれている^{5) 6)}が実験的には今後の問題であって非常に興味深い。

参考文献

- 1) M. W. Cole, M. H. Cohen, Phys. Rev. Letters 23 1238 (1969)
- 2) W. T. Sommer, D. J. Tanner, Phys. Rev. Letters 27 1345 (1971)
- 3) C. C. Grimes, T. R. Brown, Phys. Rev. Letters 32 280 (1974)
- 4) T. R. Brown, C. C. Grimes, Phys. Rev. Letters 29 1233 (1972)
- 5) P. M. Platzman, H. Fukuyama, Phys. Rev. B
- 6) 福山, 物性 15 544 (1974)