

液体ヘリウム上の二次元電子系¹⁾

講師 東北大理 福山秀敏

金属電子論でよく知られているように、3次元では平均の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーはそれぞれ r_s^{-2} , r_s^{-1} に比例するので、 $r_s \rightarrow 0$ ではフェルミ球を有するいわゆる electron gas を形成し、 $r_s \rightarrow \infty$ では Wigner crystal と云われる結晶格子を形成する。²⁾ この crystal - fluid transition は $r_s \sim 20$ で起こると予想されるが、これに対応する粒子数密度 n は semiconductor で $n \sim 0.2 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ と見積られ、純度の点から実験的に作ることは不可能である。

ところが誘電体の表面上に電子をためると、鏡像力により表面に垂直な方向に対して離散的な束縛状態が生じ、實際上2次元的な電子系が得られる。また外部電場を適当に加えることにより、 n を $10^5 \sim 10^{10} / \text{cm}^2$ の範囲でコントロールできる。従って Wigner crystal から electron gas まで連続的に観測できる可能性がある。誘電体としては、滑らかな表面が得られることなどから液体ヘリウムが最も望ましい。

実際に2次元電子系が形成されていることは、サイクロトロン共鳴³⁾ マイクロ波吸収に対する Stark 効果⁴⁾ などにより、実験的に確められている。

短距離相互作用の場合2次元では結晶が生存できないことは、Mermin⁵⁾ が Bogoliubov 不等式を使って証明しているが、これはクーロン相互作用の場合にはあてはまらず、相関関数

$$\begin{aligned} & \langle [\vec{u}(\vec{R} + \vec{a}) - \vec{u}(\vec{R})][\vec{u}(\vec{a}) - \vec{u}(0)] \rangle \\ &= \frac{2}{Nm} \sum_{\vec{k}} \cos \vec{k} \cdot \vec{R} (1 - \cos \vec{k} \cdot \vec{a}) \frac{1}{\omega_{\vec{k}}^2} \end{aligned}$$

(但し、 $\vec{u}$ は変位、 a は格子定数) が有限であることから、directional long range order は存在することがわかる。Hockney と Brown⁶⁾ は、 10^4 個の電子、 $n = 10^{10} / \text{cm}^2$ の場合で、computer simulation を行い、melting point と思われる 3.1 K で比熱に λ -type の singularity を得ている。

2次元Wigner crystal は3角格子を組むことが知られており、調和近似による計算では、2つの phonon modeが存在し、 $\omega_l \propto \sqrt{k}$ $\omega_t \propto k$ という結果が得られる⁷⁾。

磁場中では $\omega_+ \simeq \omega_c$, $\omega_- \simeq \frac{\omega_l \omega_t}{\omega_c} \propto k^{3/2}$ ($\omega_c = eH/mc$) となり、 ω_- すなわち、transverse modeは softening をおこす⁸⁾。

Wigner crystal も charge density wave の一種であり、conductivity がどうか興味がある。

2次元電子系として他にMOS反転層があるが、impurityによる localization が問題になる。

- 1) reviewとして M.W.Cole : Rev. mod. Phys. 46 451 (1974)
福山秀敏：物性 11 544 (1974)
- 2) E.P.Wigner : Phys. Rev 46 1002 (1934)
- 3) T.R.Brown and C.C.Grimes : Phys. Rev. Lett. 29 1233 (1972)
- 4) C. C.Grimes and T. R. Brown : Phys. Rev. Lett 32 280 (1974)
- 5) N. D. Mermin Phys. Rev. 176 250 (1968)
- 6) R. W. Hockney and T.R.Brown : J. Phys. C8 1813 (1975)
- 7) P. M. Platzman and H. Fukuyama : Phys. Rev. B10 3150 (1974)
- 8) H. Fukuyama : Solid State Comm.

文責 筑波大 堀 英二郎