

強磁場中 2 次元電子系の CDW と Wigner 結晶

東京大学 総合文化研究科 吉岡 大二郎¹

GaAs-AlGaAs ヘテロ接合で実現される 2 次元電子系は非常に純粋で易動度の高いものが作られようになった。この系は強磁場中で多様な基底状態を持つことが明かにされてきた。良く知られているのは整数及び分数量子ホール効果であるが、このほか、複合フェルミオンのフェルミ液体状態およびそのペアリング状態、CDW もしくは Wigner 結晶状態、SDW 状態などが知られている。ここでは、CDW 及び、Wigner 結晶に関する実験及び、理論の review を行う。

1 強磁場中の 2 次元電子系

磁場中の 2 次元電子系は Landau 準位に分かれ、各 Landau 準位は単位面積当り $1/2\pi l^2$ の縮重度を持つ。ここで $l = \sqrt{\hbar/eB}$ は磁気長である。強磁場中では各 Landau 準位は独立に扱え、また、完全に占有された準位は不活性であるので、系の基底状態は Fermi 準位での Landau 準位の占有率 ν で決定される。磁場中の運動は古典力学ではサイクロトロン運動であり、軌道が囲む面積は運動エネルギーに比例する。量子力学ではこの面積が量子化され、最低準位の半径はほぼ l となる。この軌道は既に局在しているので、平均電子間距離が l より十分に大きければ純粋な電子系の基底状態は Wigner 結晶となる。満たされた Landau 準位は不活性なので、各 Landau 準位で、その準位中の電子数または Landau 準位での空孔 (hole) の密度が低いときには同様に Wigner 結晶ができると期待できる。つまり、Landau 準位の占有率 $2\pi l^2 n$ が整数の近傍では Wigner 結晶が期待される。

一般の占有率での基底状態の先駆的な考察は 1979 年に Fukuyama 等によって行われ、平均場近似によって電荷密度波状態 (CDW) であるとされた [1]。彼等の結果は最低 Landau 準位では全ての占有率で CDW という結果であったが、この状態は Wigner 結晶と連続的につながることが吉岡等によって明かにされた [2, 3]。

ところが、実際の基底状態はこのようなものではないことが、1982 年の分数量子ホール効果の発見によって明かにされた [4]。吉岡等は数値対角化法により、分数量子ホール効果状態は非圧縮性の液体状態であることを明かにし [5]、Laughlin は試行関数法により、この状態の本質を明らかにした [6, 7]。

これらの研究によって、現在では基底状態は次のようなものと考えられている。まず、最低 Landau 準位が部分的に占有されているとき、(スピン縮重も入れて占有率が $0 < \nu < 2$ の範囲の場合には、) ν が整数に近い場合には Wigner 結晶状態であるが、その他は液体状態となる。 $\nu = p/q$

¹ E-mail:daijiro@toki.c.u-tokyo.ac.jp

の近傍は q が奇数の場合には励起スペクトルにギャップがある分数量子ホール効果状態であり、 q が 2 または 4 の場合には複合フェルミオンのフェルミ液体状態である。2 番目の Landau 準位、即ち $2 < \nu < 4$ では基本的に最低 Landau 準位で起きたことの繰り返しが起こるが、 $\nu = 5/2$ 及び $\nu = 7/2$ では分数量子ホール効果状態が起こる。これは電子のペアリング状態 (Pfaffian 状態) であると考えられている。3 番目以上の Landau 準位では基本的に CDW 状態が実現する、但し、準位の中央付近では stripe と呼ばれる Unidirectional CDW 状態ができ、これと Wigner 結晶状態の間には複数個の電子の集まりが格子を組む Bubble 状態と言われるものがあると考えられている。

以後、最低 Landau 準位の Wigner 結晶状態と 3 番目以上の Landau 準位での CDW 状態についてその証拠となる実験、理論について述べる。

2 最低 Landau 準位での Wigner 結晶

Wigner 結晶化の最初の証拠は縦抵抗率が低温で限りなく増大するという実験事実である [8]。但し、これだけでは不純物による Anderson 局在と区別がつかない。より良い証拠は敷居電場が存在し、それ以上では抵抗率が減少し、電流の雑音が増加すること [9, 10]、雑音は典型的な 1 次元系での CDW 状態のような狭帯域雑音ではないが、AC-DC 干渉実験から、洗濯板振動数が観測されること [11]、マイクロ波共鳴が観測されること [12, 13]、などから得られている。但し、マイクロ波共鳴の詳細は古典的な福山-Lee の理論 [14] や、その改良版の理論とは一致せず、実験の解釈は今後の課題として残されている。

3 3 番目以上の Landau 準位での CDW

高次の Landau 準位では電子のサイクロトロン半径が増大するために電子間の斥力の近距離部分は弱められ、分数量子ホール効果状態は期待できないことは Haldane 等の研究により明らかにされてきたが、そこでの基底状態が CDW 状態であり、平均場近似でほぼ記述されることをはじめに指摘したのは Fogler 達であった [15]。彼等は特に Landau 準位が半分占有されたときには stripe 状態ができることを予言した。この理論が公表された 1996 年には実験的な証拠は得られなかったが、近年非常に易動度の高い試料が作られるようになると、stripe が予想される領域で非常に非等方的な抵抗率が観測され [16, 17]、stripe が観測されたものと考えられている。この領域では非線型伝導も観測されている [16]。stripe の場合には stripe に沿った方向と直行する方向で抵抗率が異なることは自明ではあるが、今の系は強磁場中にあるので、stripe 相での抵抗率の計算は容易ではない。いくつかの計算があるが [18, 19]、細かい点で実験を再現できてはいない。

占有率がほぼ $1/2$ での stripe 相と、当該準位中の電子数又は正孔数が希薄な場合の整数量子ホール効果状態の間でも奇妙な相が見つかった。占有率を変化させたときに、一旦整数量子ホール効果が壊れたあとでまた復活するのである [17]。これを reentrant 相と呼ぶ。この相では depinning 的な I-V 特性が観測された [20]。このため、この相は複数個の電子の集まりが格子を組む bubble 相ではないかと考えられている。但し、この depinning 的伝導をどのように説明するのか、この相の両側、即ち通常の整数量子ホール効果状態を与える相と stripe 相の間で何が起きているのか、など残された問題は多い。

参考文献

- [1] H. Fukuyama, P. Platzman, and P. Anderson, *Phys. Rev. B* **19** (1979) 5211.
- [2] D. Yoshioka and H. Fukuyama, *J. Phys. Soc. Jpn.* **47** (1979) 394.
- [3] D. Yoshioka and P.A. Lee, *Phys. Rev. B* **27** (1983) 4986.
- [4] H.L. Stormer, D.C. Tsui, and A.C. Gossard, *Phys. Rev. Lett.* **48** (1982) 1559.
- [5] D. Yoshioka, B.I. Halperin, and P.A. Lee *Phys. Rev. Lett.* **50** (1983) 1219.
- [6] R.B. Laughlin *Phys. Rev. Lett.* **50** (1983) 1395.
- [7] 量子ホール効果全般については, 吉岡 大二郎, 量子ホール効果, 岩波書店 (1998).
- [8] H.W. Jiang, R.L. Willett, H.L. Stormer, D.C. Tsui, L.N. Pfeiffer, and K.W. West, *Phys. Rev. Lett.* **65** (1990) 633.
- [9] V.J. Goldman, M. Santos, M. Shayegan, and J.E. Cunningham, *Phys. Rev. Lett.* **65** (1990) 2189.
- [10] Y.P. Li, T. Sajoto, L.W. Engle, D.C. Tsui, and M. Shayegan, *Phys. Rev. Lett.* **67** (1991) 1630.
- [11] Y.P. Li, D.C. Tsui, L.W. Engel, M.B. Santos, and M. Shayegan, *Solid State Commun.* **99** (1996) 255.
- [12] C.-C. Li, L.W. Engel, D. Shahar, D.C. Tsui, and M. Shayegan, *Phys. Rev. Lett.* **79** (1997) 1353.
- [13] L.W. Engel, C.-C. Li, D. Shahar, D.C. Tsui, and M. Shayegan, *Solid State Commun.* **104** (1997) 167.
- [14] H. Fukuyama and P.A. Lee, *Phys. Rev. B* **18** (1978) 6245.
- [15] M.M. Fogler, A.A. Koulakov and B.I. Shklovskii, *Phys. Rev. B* **54** (1996) 1853.
- [16] M.P. Lilly, K.B. Cooper, J.P. Eisenstein, L.N. Pfeiffer, and K.W. West, *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 394.
- [17] R.R. Du, D.C. Tsui, H.L. Stormer, L.N. Pfeiffer, K.W. Baldwin, and K.W. West, *Solid State Commun.* **109** (1999) 389.
- [18] A.H. MacDonald and M.P.A. Fisher, *Phys. Rev. B* **61** (2000) 5724.
- [19] F.v. Oppen, B.I. Halperin, and A. Stern, cond-mat/9910132.
- [20] K.B. Cooper, M.P. Lilly, J.P. Eisenstein, L.N. Pfeiffer, and K.W. West, *Phys. Rev. B* **60** (1999) R11285.