

## 2次元 Wigner 結晶の電磁応答, 集団運動およびその検出法

九大教養 中山正敏

東北大理 福山秀敏

1. 一般に表面 2次元電子系の電磁応答や集団運動は, self-consistent-field approach の方法により, クーロン縦波成分相互作用を除いて計算した 2次元電気伝導率  $\sigma_{\alpha\beta}^{(2D)}$  とマクスウエル方程式を組合せてしらべることができる。<sup>1,2)</sup> 若干の簡単化により, これは境界面  $z = 0$  での境界接続条件

$$H_x(+0) - H_x(-0) = \frac{4\pi}{c} i_y^{(2D)} \quad (1)$$

$$H_y(+0) - H_y(-0) = -\frac{4\pi}{c} i_x^{(2D)} \quad (2)$$

を考慮して電磁場を解くことに帰着する。集団運動は, 外源なしでの固有解の中で, (a) 面に垂直方向には減衰波 ( $\exp[-\alpha_i |z|]$ ), (b) 面に平行方向には進行波 ( $\exp[i(kx - \omega t)]$ ) の 2つの性格を兼備えたモードである。

2. Wigner 結晶に適用する。フォノン計算<sup>3)</sup>を参照しつつ求めた  $\sigma^{(2D)}$  (この時,  $\omega_t$  を与える相互作用のみを取る。したがって, この段階では縦波の周波数も  $\omega_t$ ) を用いて, 分散式は次のようになる。

I. 外磁場 = 0

(i) S-偏光 ( $E_y, H_x, H_z$ )

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \frac{i4\pi\omega}{c^2} \sigma_{yy}^{(2D)} = -\frac{4\pi n e^2}{m c^2} \cdot \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega_t^2} \quad (3)$$

$$\alpha_i = \sqrt{k^2 - \epsilon_i \omega^2 / c^2} \quad (4)$$

(□) P-偏光 ( $E_x, E_z, H_y$ )

$$\frac{\epsilon_1}{\alpha_1} + \frac{\epsilon_2}{\alpha_2} = \frac{4\pi\sigma_{xx}^{(2D)}}{i\omega} = \frac{4\pi ne^2}{m} \cdot \frac{1}{\omega^2 - \omega_t^2} \quad (5)$$

(3), (5)を解けば, 電磁波-表面分極波結合モードの遅延効果も含めた分散が得られる。特に, 準静電近似 ( $\omega \gg ck$ ) では,

$$S\text{-偏光: } \omega = \omega_t \quad (6)$$

$$P\text{-偏光: } \omega = \omega_t = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{m(\epsilon_1 + \epsilon_2)} k^2 + \omega_t^2} \quad (7)$$

となる。(7)式は, 2次元分極波に対する Lyddane-Sachs-Teller 関係式である。導出法から明らかなように,  $k \rightarrow 0$  で  $\omega \propto k^{1/2}$  となるモードの存在は, 強束縛系を除いて, 極めて一般的なことである。なお, 両側が半無限でなく,  $z = D$  に導体板がある場合には P-偏光分散が  $\omega \propto \sqrt{D}k$  となることも, 生井沢氏達のような鏡像電荷列格子和の計算<sup>4)</sup>を行なう迄もなく, マクスウェル方程式を解いて容易に導くことができる<sup>1)</sup>。

II. 外磁場のある場合, この場合は S-, P-偏光に分れない。準静電近似の分散式は,

$$\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{k} = \frac{4\pi ne^2}{m} \cdot \frac{\omega^2 - \omega_t^2}{(\omega^2 - \omega_t^2)^2 - \omega_c^2 \omega^2} \quad (8)$$

となる。これは, (7)式と組み合わせれば, 格子力学的計算による式<sup>3)</sup>

$$(\omega^2 - \omega_t^2)(\omega^2 - \omega_l^2) - \omega_c^2 \omega^2 = 0 \quad (9)$$

と一致する。

3. Wigner 結晶の検証には, 集団運動の素過程励起による検出が, 有力な直接手段である。大別して3つの方向について考える。

I.  $z$  方向から入射する電磁波, すでに述べたように, 集団モードは固有モードの一つであるから, 別の固有モード ( $z$  方向進行波) と結合させるには, 系の構造を乱さねばならぬ。半無限表面プラズモン, ポラリトン等の検出に有効であった Attenuated-Total-Reflection 法や grating 法<sup>5)</sup> がこの場合も原理的には用いるが, 現実の He 面や MOS 界面に適用するには工夫が必要である。

II.  $x$  方向から入射する電磁波。面内の境界外からの電磁波と結合させれば, 共鳴反射・回折等の方法により, 観測可能である。He 液面上 2次元電子プラズモン励起の実験が, 最近行なわれた。<sup>6)</sup> この方法は, 横波励起も可能であり, 結晶存否の有効な判定手段である。

III. 表面近くを通る音波。He 内の音波や ripplon, Si 内の音波との相互作用を考える。ここで注意すべき点は, 外部音波 (波数  $\vec{q}$ ) による Wigner 結晶集団モード (波数  $\vec{k}$ ) の励起の際の波数保存則は,

$$\vec{q} = \vec{k} + \vec{K}_h \quad (10)$$

で与えられることである。 ( $\vec{K}_h$  は, Wigner 結晶の逆格子ベクトル)。したがって, 第一ブリュアン域内では不可能にみえても,<sup>3)</sup> 拡張ブリュアン域を考えれば必ず励起可能となる。 $\vec{K}_h \neq 0$  の励起が観測されれば, 縦波であっても結晶存在の証拠となる。

4. このように  $\sigma^{(2D)}$  と電磁気学を組合せる方法は, 現象の理解, 実験の企画等の見通しをよくし, 理論計算の集中すべきポイントを明らかにする。このことは, もちろん Wigner 結晶の場合に止まらない。

#### 参 考 文 献

- 1) M. Nakayama, J. Phys. Soc. Japan, **36** ('74) 393.
- 2) M. Nakayama, J. Phys. Soc. Japan, **39** ('75) 265.  
中山正敏, 固体物理 **10** ('75) 209.
- 3) H. Fukuyama, Solid State Commun. **17** ('75) 1323.

- 4) 生井沢 寛, 本研究会報告
- 5) B. Fischer et al. Surface Science 34 ('73) 50  
潮田資勝, 物性 15 ('74) 587.
- 6) C. G. Grimes and G. Adams, Phys. Rev. Letters, 36 ('76) 145.

## Wigner 格子? (コメント)

東大理 植 村 泰 忠

研究会の席上, 川路・塚田・福山三氏の報告があったところで座長の戸谷先生からコメントをせよとのことでしたが, 時間がせまっていたので, “Wigner 格子は現在のところ依然として?” とだけ簡単に申しました。ここで少々蛇足をつけさせていただきます。

現在注目されている対象は, He 表面上に集められた二次元電子系と MOS 反転層の二次元電子系ですが, これらの系で電子の個別運動ではなく集団運動がはっきり観測されたと考えてよい実験は, 前者におけるプラズマ振動の他はないというのが現状です。その意味で, 川路さんの MOS に関する実験から? つきの提案があったことはまことに興味深いことで, 多くの “理論や” が何か一言したくなるのももったもなことです。しかし MOS の場合には広義の不整によるポテンシャルの場が大きい影響をもっていますので, それによる個々の電子の局在化やいわゆる不純物伝導的な現象が同時に存在することをさげ得ません。従って  $\sigma_{xx} \approx 0$  の領域での微小な電流の I-V 特性, その温度変化, 高周波電流の様相 etc. などをさらに実験的に追及するのが着実な前進への方向だと思います。しかし塚田さんも指摘したように, 強磁場極限では電子相関が顕在化するのも明らかであって, このことは必ずしも整然たる Wigner 格子とはならないまでも, 局在化や不整ポテンシャルに対する広義のスクリーニング的な効果に対し, 電子相関がまことに重要な役割を果たしていることを意味します。塚田さんの報告はこの問題に平均場的な発想から極めて単純化された模型を提出したものと考えられます。ところで相関を無視して, いわゆる Anderson 局在化を理論的に調べる研究は多々あるわけ