

### 第3回「2次元系の電子的性質」国際会議から

九大教養 中山正敏

#### 1. はじめに

表記の会議が、1979年9月3日から6日迄、山中湖を見下すホテル・マウント富士において開かれた。この会議の主題は、MOS（金属-酸化物-半導体）接合界面電荷層、ヘリウム液面に捕えられた電子、半導体人工超格子等準2次元電子系の物理である。第1回は1975年 Providence (U. S. A), 第2回は1977年 Berchtesgaden (B. R. D.) で開かれた。今回の会議は、山田財団の援助により、第2回山田会議として開かれた。開会冒頭に山田財団代表の挨拶をされたのは江崎玲於奈氏であった。

会議参加者は、国外から約60名、国内から約50名であった。国外からの参加者は、この分野における研究のさかんな U. S. A., B. R. D., U. K., U. S. S. R. がほとんどを占めた。中国からは2名の参加者があった。

学習院大の川路紳治氏を中心に運営された会議は、まことに日本的によく組織され、毎日富士山を眺めて朝食後、8時半から単一会場で80あまりの講演がなされた。午後遠足をした日は、夕食後10時半迄講演があるという勉強ぶりであった。その内容の大部分は950ページにおよぶワークブックに収められているので、特に関心のある方にはそれを参照していただくことにして、以下いくつか筆者の印象に残ったことを記すことにする（ワークブック御希望の方は、学習院大物理川路紳治氏に御問合せ下さい）。なお、正式の報告は、Surface Science の特集号として刊行の予定である。ついでに記せば、過去の会議報告は、同誌の、58巻（1976、第1回）、73巻（1978、第2回）として刊行されている。

#### 2. He 液面上の電子

この種の会議の常として、前回会議以降の進展が報告されたわけであるが、そのハイライトはHe 液面上電子系における2次元ウイグナー格子の発見であろう。昨夏行なわれたこの研究の報告はすでに刊行されているが [Phys. Rev. Letters, **42**, 795(1979)], C.C. Grimes and G. Adams (ベル研究所) の “Crystallization of Electrons on the Surface of Li-

quid Helium”と題する総合報告は聞き応えのあるものであった。電子面密度 $(3\sim 9)\times 10^{10}\text{cm}^{-2}$ の系で $T_m = 0.37\sim 0.65\text{K}$ にわたる結晶化転移が観測された。その方法は、できた結晶を回折格子として利用した荷電 ripplon の励起によるもので、結晶格子は三角格子である事も確かめられた。融解の起る点でのパラメータ $\Gamma = e^2\sqrt{\pi N_s}/kT_m$ の値は $131\pm 7$ である。この結果は、2次元古典電子系に対する分子力学的計算機実験 (Morf) や Kost-erlitz-Thouless 流の扱いをした Halperin-Nelson の理論とよく一致している。定量的議論のためには、非調和項や転位対による弾性定数のくりこみの効果も重要である。2次元融解の理論は、B. I. Halperin (ハーバード大)により報告された。それによれば、(1) 2次元系では準長距離秩序(相関関数が $r^{-7}$ で減少する)が存在し、(2)位置と方位の2種類の準長距離秩序が2つとも存在する準結晶と2つとも存在しない等方液体の中間に、最近接結合の方位に関する準長距離秩序のみが存在する hexatic 相がありうる。これは液晶のようなもので、自由転位は存在するが自由 disclination は存在しない状態である。ウィグナー結晶も融解してこの相になると考えられる。

以上は古典論的系であるが、量子論的系については福山-吉岡(物性研)の報告があった。彼等は量子極限的強磁場がウィグナー結晶化に有利であることを示した。しかし、Si-MOS でも結晶化自体を実現するのは非常に困難である。それよりも、ハートリー-フォック近似で計算した CDW 転移温度が1桁大きいことが示すように、強相関効果が観測されることが期待される。B. A. Wilson 等ベル研究所のグループが報告した低密度強磁場下の Si-MOS における光吸収スペクトルは、ピン止めされた強磁場中 CDW のスペクトルの理論とよく一致しているようである。

He 液面上の電子に話を戻すと、電子面密度が増加するにつれて ripplon の分散はソフト化し、臨界密度ではある有限の波数で振動数が0になる。臨界密度を越えると、面に沿ってくぼみができ電子分布が不均一になる。P. Leiderer and M. Wanner (ミュンヘン工大)は、この過程を観察し、くぼみが規則的に配列して結晶を作ることを見出した。彼等の撮映した結晶の生成消滅の映画はまことに美しく、統計物理屋さんの新しいおもちゃと見受けられた。

### 3. MOS 界面電荷層

前述の2次元系の準長距離秩序に対応して、不規則ポテンシャルの効果が2次元では

中山正敏

特異な様相を示すことが最近 E. Abrahams 等によって論じられた [Phys. Rev. Letters, 42 ('79) 673]. 彼等によれば, 2次元系では指数関数的局在から対数関数的局在へのゆるやかな移行が起こり, 移動度端は存在しない。D. C. Tsui 等(ベル研究所)は; Si-MOS のコンダクタンスを低電子面密度, 低温 (0.05–10 K) で測定した結果を報告した。それによると, 試料パラメータによらずに, コンダクタンスは  $10^{-4}$  mho 以下では  $\exp [-(T_0/T)^{1/3}]$  則にしたがうが,  $10^{-4}$  mho 以上では  $\log(T/T_0)$  的な変化をする。普遍的な極小金属伝導率はない。また, 非オーム性は強く,  $T = 50\text{mK}$  でのコンダクタンスは電場に対数的に依存する。これらの特徴は, Abraham 等の理論と良く合致している。

この他にこの分野では 50 余の報告があったが, ここでは筆者にとって大きな関心のある, 谷縮退と谷分裂に話題を限ることにする。電荷層の電子状態が Si の伝導帯により構成されている場合を考えよう。Si の伝導帯の極小点はブリュアン帯の立方軸上の等価な 6 個の点にある。各極小点の近傍領域を谷といい。立方軸の方向によって  $-x$  谷, のように呼ぶことにしよう。有効質量の異方性を考慮した単純な有効質量近似の範囲では, 基底サブバンドは界面の方位により, 2重(001), 4重(110), 6重(111)に縮退していると考えられる。また, (001) 界面の試料に 1 軸性の歪みを加えて行くと, 谷の上下シフトに伴ないある条件下では 4 重縮退が期待される。ところが, P. J. Stiles (ブラウン大) が総合報告したように, ごく最近までシュブニコフド・ハース振動の解析はすべての場合に谷縮退度 2 を与えていた。この謎を説明するために, (111) 界面試料では異常に大きな歪みが界面近くにかかっているとか, フォノンを媒介とした谷間引力相互作用により CDW が作られている (Kelly-Falicov) という説があった。最近 Stiles は (110) 界面試料で 4 重縮退の場合を観測した。また, D. C. Tsui and G. Kaminsky (ベル研究所) の報告によると, (111) 界面でも 6 重縮退の試料があり, これに (110) 方向に外歪を加えると予想通り縮退度は 4 となる。さらに, G. Abstreiter (マックス・プランク研究所, グルノーブル) 等の (001) 界面試料に外歪をかけたサイクロトロン共鳴の実験報告によると, 常に上下 2 つの谷に付随した 2 本の共鳴が観測された。これらの新事実により, CDW は普遍的には存在していないと結論される。問題は, 試料による縮退度の違いを説明することである。最近届いたプレプリントで B. Vinter と A. W. Overhauser は, ランダウ準位の巾と歪み等による谷のエネルギー差との

第3回「2次元系の電子的性質」国際会議から  
大小関係による説明を試みている。巾が大きければ(111)界面で6重縮退が観測され、  
逆に巾よりも大きなエネルギー差があれば2重縮退が観測される。この説明は、大きな  
内歪を必要としないので、妥当なものであろう。また、谷のエネルギー差は、歪みによ  
らなくても、界面の対称性の乱れによっても生じるであろう。

谷分裂に話を進めよう。界面に平行に同じ波数を持つ谷、例えば(001)界面の $+z$   
と $-z$ 谷、は界面障壁ポテンシャルによって混じり合い、2重縮退は除かれる。この分  
裂はシュブニコフド・ハース振動によって観測されているが、裸の分裂の推定は、値そ  
のものが小さく大きな多体効果があるために困難である。この会議を終った時点でも、  
川路等(学習院大)の推定値と、Nicholas(オックスフォード大)やKöhler(ウルツ  
ブルク大)等の値との間には、2倍ほどの差がある。さらに、Nicholasは強磁場中で  
 $N=1$ のランダウ準位が6~8個のピークに分裂することを観測した。また、G.  
Landwehr(マクス・プランク研, グルノーブル)は、6重縮退が観測されている(111)  
界面の試料で谷分裂を観測した。これらの実験結果のある部分は、界面構造に起因する  
ものであろう。実際、筆者が報告したLCAO法による谷分裂の計算結果は、極めて粗  
っぽい界面模型に対するものであるが、谷分裂が界面パラメータに非常に敏感であるこ  
とを示唆している。一方、L. J. Sham(カリフォルニア大, サン・ディエゴ)等は、自  
発谷分極の可能性を検討して報告した。それによると、電子密度 $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 以下で  
は電子は一方の谷のみを占める。彼等は、実際には $+z$ 谷と $-z$ 谷の分域が作られると  
して、活性化型伝導と全電子数に対応するホール効果の2つの実験事実の説明を試みた。  
分域の存在、構造は興味ある今後の課題であろう。界面が(001)から数度傾くと異常  
に大きな谷間結合によるギャップが生ずる。これに伴う伝導率の異常は安藤(筑波大)  
の谷間散乱を考慮した計算により説明された。成田等(阪大)は、ギャップの大きさを  
種々の方法により測定した。その説明は理論家の宿題である。

#### 4. 人工超格子とヘテロ接合

成分の異なる化合物半導体を100 Å程度の厚さで交互に分子線成長させて作った人  
工超格子系が、これ迄IBMを中心に研究されて来た。この系も、サイズ量子効果のため  
に、準2次元系と共通な物性を示す。会議では、まずL. L. Chang and 江崎(IBM)が、  
InAs-GaSb系超格子について総合報告した。この系の接合では、InAsの伝導帯の底が

中山正敏

GaSb の価電子帯の頂上より下にあるために、層の厚さを変えて行くと半導体-半金属転移が起ることが期待される。彼等は、有効質量の小さい InAs 層の厚さが  $100\text{\AA}$  を越すと担体密度が急増することを観測した。超格子のもう一つの話は、R. Dingle 等（ベル研究所）による変調ドーピング法の開発であろう。彼等は、ドナー不純物を GaAlAs 層にのみドーピングし、電子が GaAs 層にあるような超格子を作った。この電子移動度は、試料を一様にドーピングした場合に比べて格段に大きく、そのことを利用して種々の精密測定が可能になる。森（東大）と安藤は、電子状態と分布を自己無撞着的に計算した。それによると、単純な井戸型ポテンシャルからのずれの効果は大きい。また、変調ドーピングの場合の移動度は一様ドーピングの場合に比べてたしかに大きい、実験値との定量的比較にはまだ問題がある。第3の進展は、E. Burstein（ペンシルバニア大）、G. Abstreiter（マクス・プランク研究所、グルノーブル）、J. M. Worlock 等（ベル研究所）によって報告されたラマン散乱分光法の応用であろう。サブバンド間励起がスピン反転を伴う遷移と伴わない遷移の両方について観測された。この方法は、今後ともこの系の物理を解明する有力な手段となろう。

以上のように、この系の研究は急速な進展をとげつつある。多層超格子の基礎をなす2層のみのヘテロ接合に関する研究も行なわれている。界面およびその両側の物質構造が良く制御されていること、化合物半導体を利用していることから、Si-MOS に比べてより精細かつ多彩な物理の展開が期待される。

## 5. 終りに

前回の会議では、ホスト国ドイツの沢山のグループによる実験的研究の報告が印象的であった。理論は外人部隊に任せておけば良い、といった気風さえ感じられたのである。その会議の後、安藤さんと「日本でやる時には、どれくらい実験の報告があるだろうか」と語り合ったのだが、不幸にしてその危倶は的中した。もちろん、川路研究室の若林による  $\sigma_{xy}$  の実験、川口によるフォノン散乱移動度の決定、河野等（東大）による He 液面からの電子脱出率の研究等、いずれも長年にわたる蓄積に基づいた立派な研究である。しかし、数年前に比べると、新しい系、新しい現象、新しいアイデアを目ざした研究に対する日本の寄与が少なかったのは、淋しいことである。

1976 年 2 月、基研で開かれた研究会で、ウィグナー結晶について活発な議論があっ

第3回「2次元系の電子的性質」国際会議から  
た事を思い出す。そのきっかけは、川路-若林による次のような実験事実であった。強  
磁場中で、あるランダウ準位にごく少数の電子が存在するような場合にはその電子が動  
かないように見える。これをピン止めされたウイグナー結晶と見る理論が塚田、福山に  
よって提出された。福山-吉岡のピン止めされたCDW相の素励起の理論も、その原型  
はこの研究会で論じられた。He液面電子系の事も話題になった。フォノンのUmklapp  
励起によりウイグナー結晶を検出する、というアイデアも論じられた。ついでに言えば、  
He液面の ripplon 不安定性の話も出た。それから約3年経った。川路-若林の実験結  
果は、その後不規則ポテンシャルの効果が大きいのではないかと考えられているようだ  
が、まだはっきりとした説明はない。一方、その他のことは、第2節で述べたように、  
今回の会議で外国勢により次々と報告された。喜ぶべきであるが、やはり残念でもある。  
ベル研究所には、所詮かなわないのだろうか。 Leiderer のくぼみの結晶や、 Khaikin  
(科学アカデミー、モスクワ)お得意のHe液面上の電子の一生のような楽しい研究も  
日本では無理なのだろうか。

この会議に引き続いて基研で Summer Institute があった。こちらは低次元系の統計  
物理が主題で、ほとんど理論家ばかり 90 名近く集ったが、山中湖会議と両方に出席し  
た人は少なかった。 Summer Institute の講師でもあった Sham 氏は、若い統計力学屋  
の大群に驚いていたが、「なぜ彼等は山中湖の会議には来ないのか」と不思議がってい  
た。筆者も、物理学会の度毎に物性基礎論・統計力学の分科が2会場にわたって行なわ  
れるような状況は異常だと思う。このような理論家の姿勢も、実験的研究のあり方に大  
いに影響があると思うのである。