

Surface State Electrons for Studying the Surface of Liquid Helium

東大物性研 河野公俊

電子が液体ヘリウム表面近傍に近づくと、ヘリウムの静電分極による引力を受け、液体ヘリウム外表面近傍に束縛される。この状態の電子をSurface State Electronsといい、ここでは液面電子と呼ぶ。十分低温で電子は表面と垂直な方向の運動に関して量子化されたレベルの基底状態に分布し、表面に沿った方向には連続な並進対称性を有するので、平面波的に自由に運動する。液面電子は強い異方性を持ち、理想的な2次元系と言える。

液面電子の温度を下げて行くとクーロン相互作用により電子系はウィグナー結晶状態に転移する。電子は格子点近傍に局在するので、格子点下のヘリウム液面は局所的に強い圧力を受け、液面は変形し格子点の下に凹みができる。電子の運動はこの凹みを伴うので、低周波数領域では有効質量の増大として効果が現われる。この現象はウィグナー結晶とリプロンの相互作用に起因するが、その数学的形式は固体中の電子とフォノンの結合によるポーラロンの問題と類似している。それゆえ、ヘリウム液面電子のウィグナー結晶化に伴って現われる、ヘリウム液面の凹みを伴ったウィグナー結晶状態をポーラロンのウィグナー結晶と呼ぶ。

ウィグナー結晶の出現に伴って、電気伝導度に異常が生じることはよく知られているが、ポーラロンのウィグナー結晶自身の電気伝導については不思議と研究されていない。ポーラロンのウィグナー結晶の運動には応答時間の異なる2つの自由度、電子系とリプロンがかかわるために、多彩な現象の出現が予想される。ポーラロンのウィグナー結晶の動的な特性は、電子固体と量子流体表面が強く結合した特異な系の物理として、さらに詳細に研究されるべきである。

ヘリウム液面電子の動的な特性の研究は、単に特異な2次元電子系の物性の解明というだけでなく、液体ヘリウムの物理、特に量子液体の表面物理という観点からも、興味深く、また有力な研究手段と成りうることを指摘することができる。ヘリウム-4における表面励起については、絶対零度までリプロンを考えるだけで宜しいということで、共通の理解が得られるが、ヘリウム-3における表面励起については、それほど自明ではない。ヘリウム-3の粘性率はフェルミ液体の基本的な性質によって、温度の低下とともに T^{-2} に比例して増大する。その結果、長波長の流体力学的なモードは減衰が大きくなる。この状況はバルクな液体ヘリウム-3における、第1音波から第0音波へのクロスオーバーに顕著に現われる。Fominによって、表面に局在した第0音波の存在の可能性も議論されているが、実験的な研究は今後の課題である。液体ヘリウム-3の表面励起を研究する手段として、液面電子は最有力候補の1つである。液体ヘリウム-3の表面励起の研究では興味ある温度域が超低温領域に及び、必然的にポーラロンのウィグナー結晶を扱うことになるので、その動的特性の理解は避けて通れない。

最近我々は、ポーラロンのウィグナー結晶の磁場中電気伝導を測定するために、コルビノ型

の同心円電極を用いた実験を行なっている最中に、伝導度測定のために印加する交流電圧を上げて行くと、あるしきい値電圧で伝導度にジャンプが現われることを発見した。この現象では、しきい値電圧が統計的にばらついたり、電圧の増大時と減少時とでジャンプの起こる電圧に履歴現象が現われるなどの複雑さがある一方で、しきい値電圧が周波数に反比例して減少する；電子系に垂直に印加した磁場を大きくするとそれにほぼ反比例する形でしきい値電圧が減少する；電子系に垂直に印加した直流電場の大きさに比例してしきい値電圧が増加する；電子密度の1.5乗に比例してしきい値電圧が増大するという系統的な振る舞いが明らかになった。このような現象に関する報告はこれまでに一つもなく、新しい現象であることがわかった。ジャンプという急激な変化として観測され、きれいな規則性が存在し、まったく新しい現象という点で、顕著な発見である。

上述の実験事実は物理的説明を必要とするが、ポーラロンのウィグナー結晶の基本的な性質を理解することでそれはほぼ達成される。つまり、ヘリウム液面がウィグナー結晶の格子間隔で周期的に凸凹しているので電子の感ずるポテンシャルも同様に周期的に凸凹する。この状況は電荷密度波のスライディングのときに考えられた洗濯板剛体模型に類似している。つまり、周期的に凸凹したポテンシャルを一様に傾けて行き、ポテンシャルの極小が消失した時点で電子系が滑りだすと考えるのである。ポテンシャルの凸凹が電子の運動とは独立に常に存在している電荷密度波の場合と違ってポーラロンのウィグナー結晶では電子がポテンシャルの凸凹を越えて一旦動きだすと、ヘリウム液面は凸凹を保ち続ける力を失い、平らな状態に戻ってしまう。剛体模型に基づいてしきい値電圧を計算してみると、先に述べた系統的な振る舞いを自然に説明できることがわかった。また、計算によって求められるしきい値電圧の上限は観測値の10倍以内となり、この解釈の妥当性を裏付ける。電子系に垂直に磁場が存在すると、電子は静電ポテンシャルの最大降下線に対して直角にドリフトするので剛体模型の議論が成り立たないのではないかという疑念が生じる。しかし、静電ポテンシャルの極小が消失する時、全ての等電位線は無限遠に延びており、磁場中の電子は等電位線に沿ってドリフトするので、やはり磁場がないときと同様にこの時凸凹から抜け出すと考えられる。ここでの説明はさらに精密化を必要とするかもしれないが、現象の基本的な部分はこれで理解できると考えている。

伝導度にジャンプが現われる電圧より低い電圧において、既に非線形な伝導や特異な磁場依存性がみられ、ポーラロンのウィグナー結晶の動的性質には追究すべき課題がなお多い。今後、超低温下のヘリウム-3でこれらの現象を調べることによって常流動および超流動ヘリウム-3表面の変形に対する動的な応答について、量子液体特有の新しい知見を得ることができるものと期待している。