

## 電子線ホログラフィーとその応用

日立基礎研 外村 彰

電子線ホログラフィーは量子的波動性に支配されるミクロの世界を“電子の目”で観察することを可能にした。電子の波動性は電子線の干渉実験により示されるが、ホログラフィーを組み合わせることで電子線の強度のみならず位相情報をも再生することができる。AB効果の検証実験にその顕著な応用を見ることができる。

### 1 Aharonov-Bohm (AB) 効果

1959年、Aharonov と Bohm は、量子力学においては電磁ポテンシャルが波動関数の位相に直接現れることから、ベクトルポテンシャルはあるが電磁場の無い空間を通った電子線にも位相差が生じ、干渉効果が現れることを指摘した。このいわゆる AB 効果は、Wu-Yang によりゲージ理論を検証する実験として再認識される。彼らは、電磁気学は次の非可積分位相因子により完全に記述されることを主張した。

$$\exp\left\{-\frac{ie}{\hbar} \int_P^Q A_\mu dx^\mu\right\}$$

ここで  $A_\mu$  は電磁ポテンシャルであり、積分は2点  $P, Q$  間の経路に依存する。その後、AB効果をめぐる話題は、トポロジーを用いた記述やモノポールの理論を触発しただけでなく、AB効果自身の存否を問はず活発な議論を巻き起こす。ここに至って、AB効果の実験的に完全な検証が求められることになる。

AB効果の実験には、磁束が入射電子線の経路上で完全に0であることが要求される。外村等は1986年にこの要請を満たす実験を次のように行った。パーマロイ蒸着膜をトロイド状に切りだしたものを、9.2K以下で超伝導状態になるNbで包み込む。Nbの膜厚を磁場の侵入長よりも十分に厚くとると、パーマロイの作る磁場はマイスナー効果により完全に遮蔽される。一方、超伝導体に囲まれた磁束は  $h/2e$  の整数倍に量子化されるが、パーマロイの作る磁束も超伝導電流が補償することで同様に  $nh/2e$  に量子化される。従って、トロイドの内側と外側を通る経路に現れる位相差は0または  $\pi$  しか許されないはずである。電子線ホログラフィーによって位相差を高い精度で決定することにより、これらの事実が検証された。ここで、この実験が超伝導による磁束量子化とAB効果の双方を確認するものとなっていることは興味深い。この様な実験が可能になったのは、微細加工技術の進歩と以下に述べる干渉性の高い電子線源を用いた電子線ホログラフィー技術の発展による。

### 2 電子線ホログラフィー

ホログラフィーとは“レンズのいらない結像法”である。まず物体からの散乱波と参照波の干渉パターンを記録したホログラムを作る。但し、散乱波と参照波は同じ波源から作られた波の部分波からできていて、コヒーレントでなければならない。このホログラムに同じ参照波を当てると、散乱波が再生されると同時に位相を反転した共役像が得られる。実際には、ホログラムを作成する波と像の再生に用いる波の種類や波長が異なっても、ホログラフィーは可能である。1948年にGaborは電子線を用いて作ったホログラムを光で再生するという電子線ホログラフィーを提案した。この方法は、電子レンズには凸レンズしかないことからくる電子顕微鏡の限界を、光学系を組み合わせることで乗り越えようという画期的なものであった。しかし、コヒーレントな電子線が存在しなかったため、その実用化には干渉性の高い電界放出型電子線源の出現を待たねばならなかった。1968年、外村等、Möllenstedt 等により電子線ホログラフィーが実現された。

ホログラムには強度のみでなく位相情報も含まれているため、干渉顕微鏡として機能させることができる。再生時に参照波として共役像を重ねると位相差が2倍に増幅される。これが位相差増幅で

あり、多数回の増幅も可能である。この技術によって電子波長の1/50の距離を識別する解像度が得られ、表面ステップ等の原子スケールでの構造も観測されている。さらに前述のように、電子の位相には通過経路上の電磁場の情報が含まれている。例えば、物質の内部電位を用いて試料の厚さ分布を測定できる。また、物質中や空間中の磁力線を磁束量 $h/e$ の磁束として直接観測できる。この方法により、強磁性微粒子中の磁化の方向や薄膜上の磁区構造が決定された。

超伝導薄膜における磁束量子の観測は興味深い応用例である。孤立した磁束量子だけでなく、向きの違った磁束量子の対が見いだされたのである。Kosterlitz-Thoulessによると、2次元の第2種超伝導体では、ある転移温度 $T_c$ 以下で磁束量子が対としてしか存在しえなくなるという相転移がある。電子線ホログラフィーによるKT理論の検証の期待が持たれる。最近では、ホログラムを直接ビデオ画像として取り込み、それをコンピューターで実像に再生する方法により、磁束量子の運動も観測されている。そこでは、磁束量子の生成・消滅やビニングの様子も捉えられた。現在は、さらに空間・時間分解能の高い測定が計画されている。

講義ではスライドを使った説明の後、ビデオ映像によって解説及び最新の磁束量子の運動を見せていただいた。画像を駆使した明瞭で印象深い講義であった。

(文責 草部 浩一)

## 表面における動的過程

東京大学物性研究所 村田 好正

20年前「表面」サブゼミの第1回目に参加した時の話に始まり、自分の研究室での研究成果を中心とした、初心者にも分かりやすい話であった。

### 1 表面での相転移

#### 1.1 Si(001)の相転移

Si(001)表面では隣接原子間でダングリングボンドが結合することによりダイマーが形成されており、LEEDパターンは室温で $2 \times 1$ 、200K以下で $c(4 \times 2)$ が観察される。表面上の非対称ダイマーを $S = 1/2$ のスピンのなぞらえると、この表面は2次元のイジングスピン系として記述される。この系でスピン間の結合定数の異方性を強くして、ダイマー列に沿った方向の秩序が高温時にも保存される様にする、この表面はスピン無限大の1次元ハイゼンベルグ系として記述され、ダイマー列間での秩序・無秩序転移が $c(4 \times 2)$ と $2 \times 1$ との相転移として表される。これらの事象はLEEDにおける回折強度の測定や、STMによる観察の結果とよく一致した。

#### 1.2 表面吸着層の相転移 Cu(001)-K

表面吸着原子が再配列を起こす相転移の例として、Cu(001)上でのK原子吸着の場合を示し、LEEDパターンの変化を表面での現象に対応させて解釈した。

#### 1.3 吸着誘起相転移 Ag(001)-K、Au(001)-K

表面への吸着によって下地の原子配列が変化する場合の例として、Ag(001)-K、及びAu(001)-Kの2つの系について、LEEDパターンやEELSの温度依存性等の実験結果を示した。これらの系では、吸着に伴う表面電子密度の増減によって、fcc(110)面のような原子密度の低い面と、六方細密状のfcc(111)面のような原子密度の高い面との相転移が起こると考えられる。

### 2 吸着分子の紫外レーザー刺激脱離

表面における素過程を、下地という巨大な熱浴に伴われた熱平衡的な現象から分離して観測する試みとして、Pt(001)-NOを試料としたNOの脱離実験が紹介された。ここでは、エキシマレーザー