



## ナノの世界を電子波で見る

外村 彰

(株) 日立製作所 フェロー

これまで電子線を波として使う電子顕微鏡を、繰り返し開発してきました。電子線の干渉性が高まるたびに、新しい可能性が生まれるからです。問題は電界放出電子線の電子源が 50 オームストロング (Å) と非常に小さいため、針が揺れたり、電子線が交流磁場によって揺れたりすると、干渉性が台無しになることでした。こうした揺れを取り除いて、電子線の輝度を 2 桁上げたとき、電子顕微鏡では見えなかったものが見えるようになりました。

磁気バブルメモリーの部品 (永久磁石のようなもの) に電子の波を当てて、波面の変化を観察すると、定量的な磁力線が確認できます。この手法で量子力学の基礎的実験が可能になりました。その実例の一つがアハラノフ・ボーム (AB) 効果という現象です。無限に長いコイルの外側には電場も磁場もありません。電子線がこの両側を通過して干渉するとき、電場も磁場もないところを通過しているにもかかわらず、内部の磁束に比例したような波面のずれが生じ、干渉縞の位置にもずれが生じます。これが AB 効果です。ところが、AB 効果を否定する人が現れ (1978 年)、論争が起きました。決着をつけるには実験で実証するしかない、1982 年から 6 年かけて実験を行いました (外径 6 ミクロンのドーナツ型装置で実験)。

AB 効果の理論の重要性は近年、いっそう増えています。アインシュタインの生誕 125 周年の昨年、生誕地ドイツ・ウルムのウルム大学で、ノーベル賞受賞者の C.N. ヤーン先生の市民講演会が開催されました。余談ですが、先生は 82 歳という年

齢の割に非常にお若い。なんとこの 6 カ月後に 28 歳の女性と結婚されました。

アインシュタインの夢はすべての力を統一的に記述する理論の構築でした。彼は「物理現象はすべて幾何学で表せる」と考え、時間・空間の歪みによって重力が生じることを示し、後続の研究者が電磁気現象も時間・空間の性質で説明できることを AB 効果によって実証しました。

AB 効果が身近な問題にも関わることが、その後明らかになってきました。たとえば、細いリングの回路をつくります。右を通る電子、左を通る電子が干渉して、100 個入れても 90 個や 110 個になって出てきます。この中に磁場を加えて、電流を測ると波面が山と山になるか、山と谷になるかによって電流が変化することが実測されました。カーボンナノチューブでも、1 点から 1 点へ流れる電流は直進、右回り、左回りのルートがあり、ここに磁場をかけると、AB 効果によって電子の波が山になったり谷になったりして電流が変化します。最近では金属のカーボンナノチューブに磁場をかけると、半導体が変わってしまう、つまり金属がバンド構造まで変えてしまうことがわかりました。AB 効果によって位相ファクターが変わり、金属にこのような現象が起こるのです。こうして AB 効果は量子力学の真髄を表す現象だとみなされるようになりました。

超伝導体の量子現象も 350kg ほどの電子顕微鏡を使って 1989 年、初めて見ることができました。超伝導体を貫く磁束量子が生き物のように動き回る様子を捉えることに成功したのです。2000 年には

100 万ボルトの電子顕微鏡を開発しました。これは非常に大きな装置になりましたが、電子線の輝度も従来より 4 桁向上して、格子分解能記録が得られました。層状構造を持っている高温超伝導体の磁束量子のさまざまな不思議な振る舞いも、この装置を使って明らかになっています。応用はこれにとどまらず、高分解能への道も開きました。

ナノの世界を制御するには原子、分子の姿を捉える必要があります。1 Å ぐらいあるので、これを見るには 0.1 Å がほしいところです。ところが、今までは電子顕微鏡も STM (走査プローブ顕微鏡) も

1 Å が限界でした。しかし、電子の波長は原理的には 1 Å の 100 分の 1 ぐらいになります。技術開発に工夫と努力を惜しまなければ、もっと限界まで行けるはず。望遠鏡と同様、巨大な装置になるでしょうが、ナノ世界の観察は研究者の好奇心だけではなく、実用化を進めるためにも必要になってきます。このような装置を尾身先生が進められている沖縄大学院大学でぜひ開発していただき、日本のお家芸である電子顕微鏡の伝統を伝承していくことを希望しております。10 年、20 年かかることですから、次の世代の方に期待をかけています。

外村 彰 (とのむら・あきら)

1942 年生まれ。1965 年、東京大学理学部物理学科卒業。同年 4 月、(株) 日立製作所中央研究所入社。以来、電子線装置の開発及び応用研究に従事。電子線エネルギー損失の実験、電界放出電子銃の開発等を経て、1974 年から電子線の干渉性を利用した電子線ホログラフィーの研究に本格的に従事。現在、(株) 日立製作所フェロー、理化学研究所グループ・ディレクター、沖縄大学院大学先行的研究事業 代表研究者併任。1982 年仁科記念賞、1987 年朝日賞、1991 年日本学士院・恩賜賞、1999 年ベンジャミン・フランクリン・メダル物理学賞 (Franklin Institute) 受賞。2002 年文化功労者顕彰 現在に至る。