〔特別講演 I〕

電子の波で見る量子の世界

外村 彰 ((株)日立製作所、理化学研究所)

The Quantum World Unveiled by Electron Waves

Akira Tonomura

ABSTRACT

By electron microscopy, the intensity of an electron beam transmitted through an object is observed. While by electron holography, the whole information, *i. e.* both intensity and phase of the electron beam can be observed. Therefore, higher resolution images are obtained by compensating for the lens aberrations, and hitherto-unobservable objects can be also observed using the phase information of an electron beam.

Keywords: Phase, Electron wave, Holography

1. 結論

電子線ホログラフィー¹⁾を使うと、電子波で見たミクロの世界が観察できる。電子顕微鏡では、電子線の強度分布だけが観察されるが、電子線ホログラフィーでは位相分布も同時に観測できる。このため、電子顕微鏡では見ることの出来なかった物体も観察可能になる。実例が磁力線である²⁾。磁力線の情報は電子線の位相分布に記録されているからである。電子線ホログラフィーでは、まず電子の波を試料にあて、散乱された電子波の様子をホログラムと呼ばれる特殊な写真に記録する。このホログラムフィルムに

レーザー光をあてると、“電子の目”で見た試料の姿が拡大されて、光の像として観察される。電子の波面の様子がそのまま光の波面に変換されるのである。

しかし、この画期的な結像法も Gabor³⁾によって考案された当初は、注目されるには至らなかった。ホログラフィーに必要な“波面の揃った波”が存在しなかったからである。ホログラフィーは1960年のレーザー光の出現と共に、光の分野で大きく発展を遂げるようになった。電子線ホログラフィーは、1978年我々が開発した電界放出電子線⁴⁾によって、干渉性が桁違いに向上し、実用の域に足を

表1 高輝度電界放出電子顕微鏡の開発と歴史

年 代	加速電圧	輝 度 (A/cm ² ・ster)	備 考
1968 年	100 k V (熱電子)	10 ⁶	・ 電子線ホログラフィーの可能性を実証
1972 年	50 k V	10 ⁷	
1978 年	80 k V	10 ⁸	・ 磁力線の観察)
1980 年	125 k V	2x10 ⁷	・ 多段加速管の利用
1982 年	250 k V	4x10 ⁸	・ AB 効果の検証
1989 年	350 k V	5x10 ⁹	・ 磁束量子の動的観察
2000 年	1000 k V	2x10 ¹⁰	・ 格子分解能記録 ・ 高温超電動体の観察

踏み入れることが出来た。その後も、電子線の干渉性が向上する毎に新しい可能性が拓けた（表 1）。

2. 電子線ホログラフィー

電子線ホログラフィーでは、電子の波の性質を使って、まず電子顕微鏡の中でホログラムがつくられ、ついでレーザー光を使って光学ベンチの上で像が再現される。あるいは計算によって再生が行われる。ホログラムを作るのに必要な干渉計は、Möllenstedt⁵⁾によって発明された。これは 2 枚の平行な接地電極と、中央に張った細いフィラメント電極から成っている。フィラメントに正の電位を印加すると、両側を通る電子線は引き寄せられて、下方で重なりあい、そこに干渉縞を生じる。ちょうど光のバイプリズムに対応するので電子線バイプリズムと呼ばれている。

再生像には、電子線の強度とともに位相も再生される。このため干渉計を組み合わせれば、干渉顕微鏡像としてこの位相情報を読み出すことが出来る。

観察対象によっては、しばしば位相変化が小さすぎて位相分布が測定できないことがある。ホログラフィーならではの手法を用いると位相分布を増幅することができる。

以下、電子線ホログラフィーの観察例を応用別に紹介する。

2.1 厚さ分布の測定

電子線の干渉顕微鏡では、試料の厚さ分布を測定することができる。厚さ分布は、電子顕微鏡写真の上に等高線の形で観察できる。

電子線の位相は、一体どこまで精度よく測定できるのだろうか？—高精度電子線と位相差増幅法を用いて単原子ステップ $\text{\AA}$ の厚さ変化を $1/100$ 波長のオーダーの位相変化として捉えることが出来るようになった。

2.2 磁力線の観察

磁場を観察した場合には、非常に直感的で定量的な解釈ができる。得られた等高干渉縞は磁力線そのものを示し、しかも隣りあう干渉縞の間には一定の微小磁束 h/e が流れているのである。

実例を見れば判りやすい。図 1 は磁気テープの磁力線の観察結果である⁶⁾。写真は薄膜を上から見たものであるが、膜は、途中で切れており上半分だけである。記録された磁化の方向は矢印で示してある。磁化された領域では磁力線は矢印の向きに沿って走っているが、境界領域でも磁力線の様子が詳しく観察できる。そこには、ちょうど正面衝突する水の流れのように、磁力線の渦まく領域ができています。膜の端近くでは、磁力線は蛇行しながら膜の外に流れだす様子が観察できる。

さらに 350kV 電子顕微鏡を用いて、磁束量子の姿を捉えることも可能になった⁷⁾。磁場が弱い場合、マイスナー効果によって、鉛の薄膜の内部はマイスナー効果によって磁場は排除されるが、強くなると、細い糸となって膜を通過する。これは磁束量子と呼ばれる。超伝導のメカニズムや基本特性に深く関わっているにも拘らず、サイズ（太さ： $0.1\mu\text{m}$ ）、磁束量（ $h/2e$ ）ともに、あまりにも小さいために直接観察することは出来なかった。

この鉛の中の磁束量子から発生した磁力線に直角に電子線をあてて干渉顕微鏡として観察した結果が図 2 である。2 倍の位相増幅をしているので、干渉縞 1 本がちょうど磁束量子に対応している。孤立した磁束量子の他に、向きの違った磁束量子の対も見出された。何故印可した磁場の方向と反対向きの磁束量子ができたのか明確ではない。だが 1 つの可能性として、コスタリッツ・サウレス理論が予言している磁束量子対⁸⁾が、冷却過程で凍結され、固定されて観測されたものと考えられる。

図 1. 磁気テープの干渉顕微鏡像

図2. 結束量子の干渉顕微鏡（2倍位相差増幅）

3. ローレンツ顕微鏡法

電子線ホログラフィーで動的観察を行う試みも行われているが、対象によってはローレンツ顕微鏡法が簡便である。実際、ローレンツ法では磁束量子が図3のように小さなスポットとして観察できるため⁹⁾、その動きを捉えることが出来るようになった。

所が、高温超伝導体の磁束量子の観察を行う場合には、困難が伴う。磁束量子の太さが直径 $0.5\mu\text{m}$ もあるため、それよりも薄い膜では磁束量子の性質が変わってしまうので、厚い膜の観察が必要になるためである。だが、1 MV 電子顕微鏡¹⁰⁾の実現によって、観察可能な膜の厚さが大幅に増したために、高温超伝導体材料特有の層状構造を反映した不可思議な磁束量子の様子を観察できるようになった^{11,12,13)}。

磁束量子の配列に現れた、高温超伝導体特有の振動の例を示す¹³⁾。磁束量子は、棒磁石のようなもので、互いに反発するが、磁場をかけると押し込められて、通常三角格子のちゅう密構造をとる。ところが、磁場を高温超伝導体の層面すれすれに傾けると、不思議な配列を取ることが、1991年、Bell研究所のGammelらによって見出された。図4に示したビット写真を見ると、磁束量子が一行に並んでいる、とりわけ YBCO ではすべての磁束量子がチェーン状に並び、チェーンの間には、すきまがいっぱいあいている。ちゅう密構造とはほど遠い配列をしている。どうしてこんな配列になってしまうのか？何か、はっきりとした理由があるはずである。一方、異方性の大きな

図4. 磁場を傾けた時の磁束量子のビット写真:(a) YBCO; (b) Bi-2212

図5. 磁場を傾けていった時の YBCO の中の磁束量子のローレンツ像 : (a) $\theta=75^\circ$; (b) $\theta=82^\circ$; (c) $\theta=83^\circ$

Bi-2212 ではチェーンが周期的に生じている。これは、もっと不思議である。

YBCO の配列に対しては、こんな説明がなされていた。磁場が傾くと磁束量子も傾き、傾斜方向の磁束量子同士、チェーン状に並ぶというものである。しかし、“表面の状態”しかわからないビット写真では、内部で傾いているかどうかはわからない。

図3. ニオブ薄膜中の磁束量子のローレンツ顕微鏡像

そこで、1 MV ホログラフィー電子顕微鏡で YBCO 薄膜の透過像を観察した結果、案の定、磁場の傾きを増やしていくにつれて、磁束量子の像が細長くなり、チェーン状につながっていく様子が直接撮影できた¹³⁾ (図5)。まさしく、予測されていたとおりに、磁束量子が傾いていくにつれて、磁束量子がチェーン状に並んでいく様子がとらえられる。

しかし、不可能なのは Bi-2212 の方である。三角格子の中ごろにチェーンが現れている。この配列については、これまでいろいろな説が出されていた。しかし、納得のいく説はなく、10 年間にわたって謎のままであった。

Bi-2212 のローレンツ像を、1 MV の電子顕微鏡でいろいろな条件下に撮影した結果、チェーンを作る磁束量子も、その間の三角格子の磁束量子も、いずれも傾いたりせずに、層面に垂直に立っていることがわかった¹³⁾。傾いていれば磁束量子の像が細長くコントラストが低くなるのでそれとわかるはずである。

ということは、磁束量子が板と板の間を扁平な形になって貫き、それと垂直に交差する磁束量子が密に並んでチェーンを作っているという Koshchev が提出している説¹⁴⁾ が正しいことがわかった。

高温超伝導物質の層状効果によって、このように不思議な磁束量子の 3 次元的な配置が実現していることがわかった。また、チェーンを作る磁束量子はジョセフソン磁束量子の位置にいれば安定なので、磁束量子の動きもチェーンに沿って動くことも観測された。

4. おわりに

電子線ホログラフィーの可能性が干渉性の良い電子線の出現によって開かれたため、電子の波動関数の位相分布が 1/100 波長という高い精度で測定可能になった。その応用は、ここで紹介した実用分野のみならず物理学の基礎分野にも及ぶ。それは波動関数を直接観察できる技術と微細加工技術の利用によって、これまで仮想実験ですら実証の道が開かれたからである。事例は AB 効果の検証実験¹⁵⁾ である。この実験によって、かつて物理的実在と確信されていた電磁場が変わってゲージ場 (ベクトル・ポテンシャル) がより本質的な物理的実在であることが実証された。

電子線ホログラフィーは、まだ緒についた所である。今後、先端技術から物理学の基礎知識に至る広範な分野で極限的計測ツールとして発展していくものと思う。

参考文献

- 1) 外村 彰: “ゲージ場を見る” ブルーボックス (講談社、1996)、外村 彰: “量子力学への招待” 岩波講座 物理の世界、量子力学1、岩波書店、2001 年 11 月 26 日、A. Tonomura: Rev. Mod. Phys., 59, (1987) 639.
- 2) A. Tonomura: Physics Today 22, (April 1990) 22.
- 3) D. Gabor: Proc. R. Soc. London, Ser. A197, (1949) 45.

- 4) A. Tonomura, T. Matsuda, J. Endo, H. Todokoro and T. Komoda: J. Electron Microscopy, 28, (1979) 1.
- 5) G. Möllenstedt and H. Düker: Z. Physik 145, (1954) 377.
- 6) N. Osakabe, K. Yoshida, Y. Horiuchi, T. Matsuda, H. Tanabe, T. Okuwaki, J. Endo, H. Fujiwara and A. Tonomura: Appl. Phys. Lett. 42 No.8 (1983) 746-748.
- 7) T. Matsuda, S. Hasegawa, M. Igarashi, T. Kobayashi, M. Naito, H. Kajiyama, J. Endo, N. Osakabe, A. Tonomura and R. Aoki: Phys. Rev. Lett. 62 No.21 (1989) 2519-2522.
- 8) B. I. Halperin and D. R. Nelson: J. Low Temp. Phys., 36, (1979) 599.
- 9) K. Harada, T. Matsuda, J. Bonevich, M. Igarashi, S. Kondo, G. Pozzi, U. Kawabe and A. Tonomura: Nature 360 (1992) 51.
- 10) T. Kawasaki, T. Yoshida, T. Matsuda, N. Osakabe, A. Tonomura, I. Matsui and K. Kitazawa: Appl. Phys. Lett. 76 (2000) 1342.
- 11) A. Tonomura, H. Kasai, O. Kamimura, T. Matsuda, K. Harada, Y. Nakayama, J. Shimoyama, K. Kishio, T. Hanaguri, K. Kitazawa, M. Sasase and S. Okayasu: Nature 412 (2001) 620. ビデオ映像は日立製作所のホームページ <http://www.lqrd.hitachi.co.jp/em/index.cfm> で公開されている。
- 12) T. Matsuda, O. Kamimura, H. Kasai, K. Harada, T. Yoshida, T. Akashi, A. Tonomura, Y. Nakayama, J. Shimoyama, K. Kishio, T. Hanaguri, K. Kitazawa: Science 294 (2001) 2136.
- 13) A. Tonomura, K. Kasai, O. Kamimura, T. Matsuda, K. Harada, T. Yoshida, T. Akashi, J. Shimoyama, K. Kishio, T. Hanaguri, K. Kitazawa, T. Masui, S. Tajima, N. Koshizuka, P. L. Gammel, D. Bishop, M. Sasase and S. Okayasu: Phys. Rev. Lett. 88, (2002) 237001-237005.
- 14) A. E. Koshchev: Phys. Rev. Lett. 83, No. 1, (1999) 187-190.
- 15) A. Tonomura, N. Osakabe, T. Matsuda, T. Kawasaki, J. Endo, S. Yano and H. Yamada: Phys. Rev. Lett. 56 No.8, (1986) 792-795.