

電子線ホログラフィーを用いた Aharonov-Bohm 効果の検証実験

ブルによって、対応する量子状態を代表させてゆくと便利である。アンサンブルはもちろん重畳できる。新統一体系物理学は新しい物理学の鉱床の発見であって、今後の発展を期待する。とくに光通信や分子生物学等、光速度の有限性を考えねばならなかったり、巨視的な不均一系で、不可逆過程が関係したりする際に、その応用と展開が期待される。なお γ マトリックスを駆使した既存の量子電磁力学は、新統一体系物理学と矛盾するものではなく、原子、分子のような小さい体系や、粒子の生成消滅を伴う高エネルギー領域の物理学の記述等に適した近似の枠組みであって、新統一体系物理学は、電子を不生不滅と見做すような超低エネルギーで、巨視的体系を扱わねばならない、物性物理学の分野に適した近似手段である。例えば磁気エネルギーと磁気誘導によるエネルギーの出入は Q.E.D. では陽に現わされていないが、新体系物理学では明瞭に意識して箇別的に追跡される。Q.E.D. は 10 桁といった精度の計算も行っているのであって、陽には現れないが、陰には、新体系物理学の考え方と矛盾しないことが証明される。トランスによる電磁エネルギーの移動は電磁誘導によるものであり、新体系物理学では陽に考えない訳には行かないことも理解されよう。

電子線ホログラフィーを用いた Aharonov-Bohm 効果の検証実験

日立中研 外 村 彰

§ 1. はじめに

Aharonov-Bohm 効果 (AB 効果) は、当初ごく限られた分野の人々にしか知られていなかったが、ゲージ理論にとって重要な意義をもつ様になってきたため、ごく最近になって広く知られる様になってきた。¹⁾ AB 効果は“電磁気はゲージ理論に従う”ことを直接的に示しているためである。古典的には、電磁気は場の強さ (E や B) だけで完全に記述できたが、量子力学ではポテンシャル $\{A_\mu\}$ (ゲージ場) が物理量として導入され、電磁気を必要十分に記述できる量は位相因子: $\exp \{ i \frac{e}{\hbar} \int A_\mu dx^\mu \}$ となる。AB 効果は、まさに、この位相因子を干渉縞として我々の目に見せてくれるのである (図 1)。²⁾ ソレノイドの両側を通る電子線の間、ソレノイドの磁束に比例した位相差が生じ、ソレノイド電流を on, off した時の干渉縞のずれとして位相因子が観測できる。

ところが、この効果に疑問を投げかける人も多く、これまで論争が続いていた。これまでの

外村 彰

実験³⁾に対しても疑問が投げかけられていたが、我々は電子線ホログラフィーという新手法を用いて、あいまいな点を除いた実験を行なった。

§ 2. 電子線ホログラフィーとは.

電子線ホログラフィーは“電子線と光を使った2段階の結像法”である。もともとは、電子顕微鏡の分解能の壁を破るために、D. Gaborによって1949年に考

案されたものだが、⁴⁾ 干渉性のよい波が必須であったために、レーザーの出現した光の分野でのみ発展を遂げてきた。ところが、筆者らによって干渉性のよい電子線が実現されたため、電子線ホログラフィーも実用の段階に足を踏み入れた⁵⁾

電子線ホログラフィーでは、まず電子線を使って物体のホログラム（物体波と参照波の干渉パターン）を作る。このホログラム乾板に平行光をあてると回折光の中に電子線の波面が光の波面として再生される。波の実体もちがい、波長の比も実に $6000 (\text{\AA}) / 0.03 (\text{\AA}) = 2 \times 10^5$ 倍も異なるにも拘わらず、電子波の様子が光で再現される。一旦、光に変換されてしまえば、光学技術が利用できるのです。位相分布の観察も容易になる。

とくに、磁性薄膜や磁場を観察対象とした時には、干渉顕微鏡像の等高線は $h/e (= 4.1 \times 10^{-15} \text{ Wb})$ の磁束を単位とした磁力線に一致することが実証されている⁶⁾

§ 3. Aharonov-Bohm効果の検証実験

これまで行なわれた実験では、有限長のソレノイドが使われていたため、端から漏れた磁場によって位相差が生じていたのではないかという疑いがもたれていた。そこで、我々はソレノイドの代わりに漏れ磁場のないトロイド状強磁性体を作製し、その内外空間を通った電子線の位相差を測定した。その結果、強磁性体を流れる磁束に比例した位相差が干渉パターンの形で検出され（図2）、AB効果の存在が実証された⁷⁾ この時、強磁性体から漏れた磁場が充分小さいことは、干渉顕微鏡像によって確認した。

我々は、本実験によってAB効果の存在は決定的なものになったと確信しているが、その後さらに2つの問題が提出された。1つは、トロイド状強磁性体の磁束量子化の問題であり⁸⁾ 他は強磁性体中を電子線が透過する効果である⁹⁾ いずれも、AB効果の存否に関わってくるため、

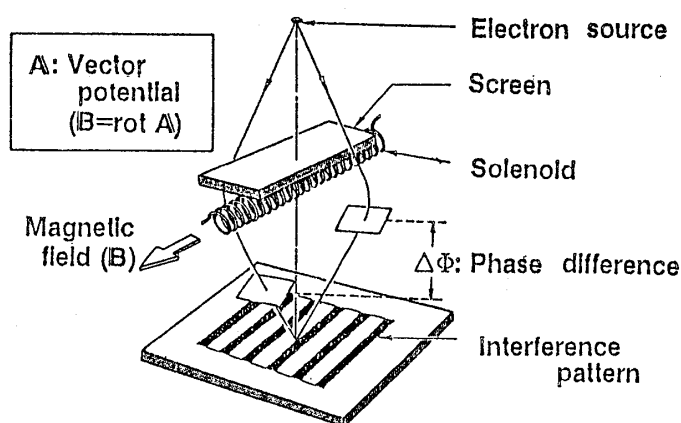


図1. アハラノフ・ボーム効果

それらを確かめるための実験を行なった。

まず、閉じた磁気回路をなす強磁性体の磁束が量子化されているかどうかを判定するために、きわめて磁気もれの少ないサンプルを作製した。もれ磁束を $h/10e$ まで小さくするために、矩形のトロイドを円形のトロイドにし、全磁束量を h/e 程度にした。このようなサンプルを透過した電子線の位相分布を表わす干渉写真を図3に示す。こ

の写真では、干渉縞1本分は $h/2e$ の磁束に対応している。内外の空間での干渉縞は端数分だけずれており、 h/e や $h/2e$ 単位で磁束が量子化している可能性は否定された¹⁰⁾

AB効果の実験では、電子線は本来磁場に触れてはならない。ところが、我々の実験では、電子線は部分的に磁性体に触れていた。こうしなければ、位相差の絶対値を測定できないためである。その代わり、これまでの実験と異なり磁性体にピントの合った像面で位相分布を測定し、磁性体の中を通った電子が外の空間を通った電子に影響を与えない様になっている。また、電子線の加速エネルギーを変えてみても位相差が一定である事実からも、同様のことが推論できる。電子線のエネルギーを小さくすると、磁性体にもぐり込む深さは急激に減少するが、位相差は変化しない。この極限は、電子線が磁場に触れない場合に対応する。

ところが、Bocchieriらは、検出された位相差は電子線が磁場に触れたために生じたローレンツ力の効果であるという論文を提出した⁹⁾。そこで、我々はトロイド状強磁性体の上に厚い金の蒸着膜をかぶせ、入射した電子線量の1%も磁性体に入り込まぬ様にして、前と同じ実験を行なった。この場合にも、内外の空間を通った電子線の間に位相差が検出できた¹¹⁾

§ 5. おわりに

Aharonov-Bohm効果は、その提案以来多くの議論を呼んできた。ところが、ごく最近になってその存在すら疑う人々が現われ、理論・実験の両面からはげしい論争が続けられてきた。

我々は、電子線ホログラフィー手法を使って、この論争で問題となっている点を明確にした形での実験を行なった。即ち、従来の実験では実測できなかった浮遊磁場の効果、磁束量子化

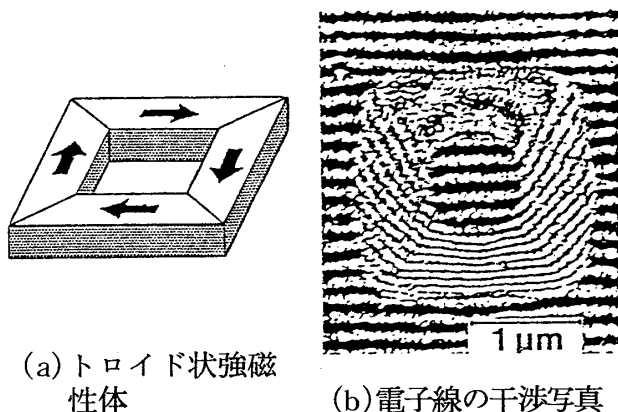


図2. AB効果の検証実験

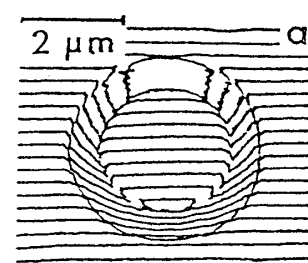


図3 磁束量子化の実験

永宮健夫

の可能性ならびに磁性体中への電子線の侵入の効果である。これまでの実験では、あいまいにされていたこれらの問題点を除いた実験を行なった結果、AB効果はまさしく存在することが実証された。

参考文献

- 1) H. J. Bernstein and A. V. Philips : Scientific American **245** (July, 1981) 95.
- 2) T. T. Wu and C. N. Yang : Phys. Rev. D **12** (1975) 3845.
- 3) たとえば, R. G. Chambers : Phys. Rev. Lett, **5** (1960) 3; G. Möllenstedt and W. Bayh : Phys. Bl, **18** (1962) 299.
- 4) D. Gabor : Proc. R. Soc. London A**197** (1949) 454.
- 5) A. Tonomura et al : J. Electron Microsc. **28** (1979) 1.
- 6) A. Tonomura et al : Phys. Rev. Lett. **44** (1980) 1430.
- 7) A. Tonomura et al : Phys. Rev. Lett. **48** (1982) 1443. 外村彰 : 科学**52** (1982年9月号) 552.
- 8) O. Costa de Beauregard et al : Lett. Nuovo Cimento **33** (1982) 79.
- 9) P. Bocchieri et al : Lett. Nuovo Cimento **35** (1982) 370.
- 10) A. Tonomura et al : Phys. Rev. Lett. **51** (1983) 331.
- 11) N. Osakabe et al : 投稿中

AB 効果 の 問 題 点

永 宮 健 夫

AB効果に興味と疑問をもっていましたので、基研の研究会に1日押しかけて行っただけですが、私のコメントは下記の2つのことです。第1のことは外村氏の実験に関係していて、話したこと大体そのままです。訂正する必要はないと考えています。第2のことは、研究会の後にも考えて、疑問の諸点を書き記し、高橋秀俊さんに意見を求め、明快な返答をえまして疑問点を解消できたと考えますので、その要点を記します。

1. はじめに厚さ a の平板状の一樣磁場を考える。 $z = -a/2$ から $z = a/2$ までの間に y 方向の一定磁場 B があるとする。これに $z = -\infty$ の方から電子波が来て、磁場を通り抜け、 $z > a/2$