

仁科記念講演

量子の世界を見る

外村 彰

株式会社 日立製作所 フェロー

2000年 12月

量子の世界を見る

2000年12月2日 東京理科大学における仁科記念講演

©2001 Nishina Memorial Foundation



量子の世界を見る

外村 彰

株式会社 日立製作所 フェロー

仁科記念講演会は、実に40年という長い歴史があります。講演記録を紐解くと、朝永振一郎、湯川秀樹、ハイゼンベルグ、シュヴィンガー、ファインマンといった著名な方々が名を連ねています。今日私がお話できますことは、大変名誉なことと感激しております。

今日の話の主役である“電子”は、マイナスの電荷を持った非常に小さな粒子です。電子は質量が小さいくせに、それに比べて、べらぼうに大きな電荷を持っているので、電磁場をかけると非常に素早く反応します。たとえば8万ボルトの電圧をかけると、静止していた電子が加速され、あっという間に光速の1/2というスピードにまで達してしまいます。これだけ素早く反応してくれるものは他にはありません。今日の文明は、この素早い電子を利用することによって成り立っているといっても過言ではありません。

その割に、我々は電子をあまり身近に感じていません。一つには、電子があまりに小さくてじかに見えないからだだと思います。そこで「電子とはどんなものか？」を、この目で実感していただくことから始めましょう。まず、沢山の電子が走っている様子を実際に見ていただきます。

電子線の軌道を見る実験

真空ガラス管（図1）の中には陰極があり、それを熱して電圧をかけると、その表面から電子が飛び出てきます。ガラス管の周りにコイルがありますが、それに電流を流すと、その電子に磁場がかかるようになっていきます。

ガラス管の中は、完全な真空ではなくて、ヘリウム・ガスが入っています。電子がヘリウム・ガスにあたると、光を出すので、電子の通り道がネオンサインのように光って見えます。電子は、まっすぐ上に進んでいますが、電場や磁場をかけると、電子の通り道を自由自在にコントロールすることが出来ます。電子が電気を帯びているからです。それでは、実際にコ

イルに電流を流して磁場をかけてみましょう。…電子は次第に曲がっていきます。そして…とうとう円軌道を描いてしまいました(図1)。

この電子の振舞いは、電子が“電気をもった粒子”であると考えれば、完全に説明できません。つまり、電子が磁場によって進行方向と垂直に力を受けて、円軌道を描く訳です。ところが、ミクロの世界、量子の世界では、電子は“波”として振舞うというのです。



図1. 電子線の軌道を見る実験

電子は波でもある

電子が波であることを最初に実験的に示したのは、デビッソン、ガーマー、G. P. トムソンそして日本の菊池正士です。図2がその証写真で、理化学研究所の菊池正士が昭和3年という大昔に得たものです。細い電子線を雲母の薄い膜に入射させると、電子の波が雲母の原子にあたって回折現象を起こし、特定の方向に分かれて、このように沢山のスポットを生じたものです。規則正しく並んだ各原子から波紋が生じ、波紋の山と山が重なる方向にだけ電子線がやってきます。

「本当に原子にあたって波紋が生じているの？」と疑う人もいるかもしれませんが、私が30年以上前に撮影した電子の波紋の写真(図3)をお目にかけましょう。私は大学の学部を出ると、すぐに日立中央研究所の電子顕微鏡の研究室に入りました。そして、多少やりたいたことがやれるようになった頃に撮影した電子の波紋が、この写真です。小さな穴が点々とあいた薄膜に電子線をあてると、小さな穴で生じた電子の波紋が、こんなきれいな同心円を描くのです。この写真が撮れた時、「量子の世界も、池の波紋と同じで、きれいなんだなあ。」

と見とれてしまいました。正確に言うと、これは電子の波紋そのものではありません。電子の波紋は我々には見えないのです。そこで、その波紋に“周りを通った平面波”を重ねて、干渉縞の形で観察します。2つの波の、山と山が重なったところが黒くなり、山と谷が重なると白く見える訳です。

ここにリップルタンクがあるので、水面で波紋を作ってみましょう。確かに、そっくりの波紋が生じます。電子は波であることに疑いはありません。

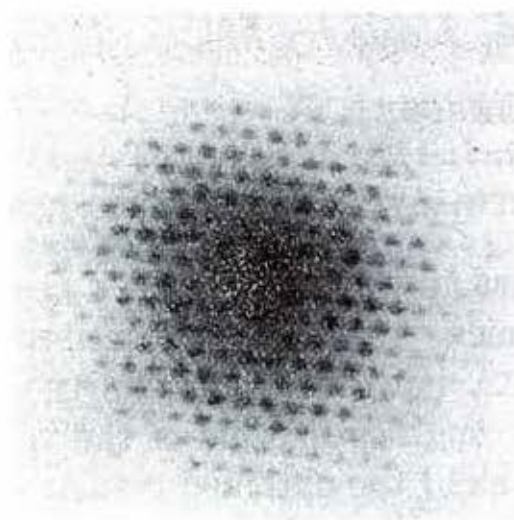


図2. 菊地正士が得たマイカの電子回折パターン

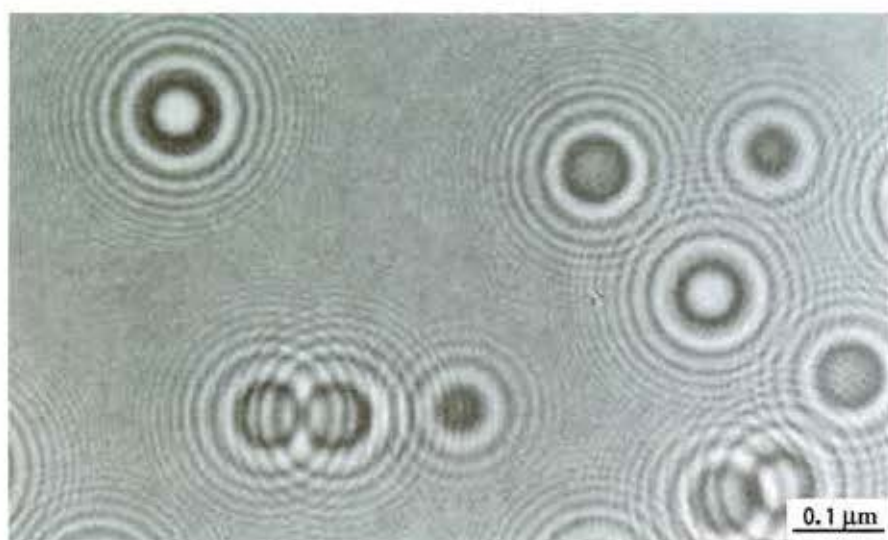


図3. 電子を小さな穴のあいたコロジオン薄膜にあてた時に生じる電子の波紋

しかし、一体何故“粒子”のはずの電子が波になってしまったのでしょうか。波というのは、水面の波紋のように空間的に広がっていて、それが時間的に振動しながら周りに伝わっていきます。ですから、電子が一点に存在する粒子だということなら、たとえば電子がたくさん並んで、全体として波を形作ると考えるしかありません。ところが、不思議なことに、電子1ヶでも、“波の性質”を持っているのです。その動かぬ証拠があります。説明は後にして、そのことを如実に示す実験を、まず見ていただきましょう。見るたびに不思議に思うので、いつも私の講演で紹介しています。

二重スリットの実験

図4は電子顕微鏡の内部を示した図です。電子源から出た電子線を電子線パイプリズムに入れます。中央の細いフィラメントにはプラスの電気がかかっているため、マイナスの電気をもった電子が、その左右いずれかを通ると中央に引き寄せられます。電子は、感度の高い検出器で観測され、モニター上に表示されます。この検出器は、フィルムと同じ仕組みで、やってきた電子が時間とともに積算されます。

電子線の強度が強い時には、図4に示したような干渉縞がすぐに姿を現わします。さて、電子線の強度を極めて弱くしたらどうなるのでしょうか？ 波であれば、いくら強度を弱くしたとしても、かすかではあっても、初めから干渉縞が姿を現わすはずですが。それでは、実際の実験をスタートさせてみましょう。

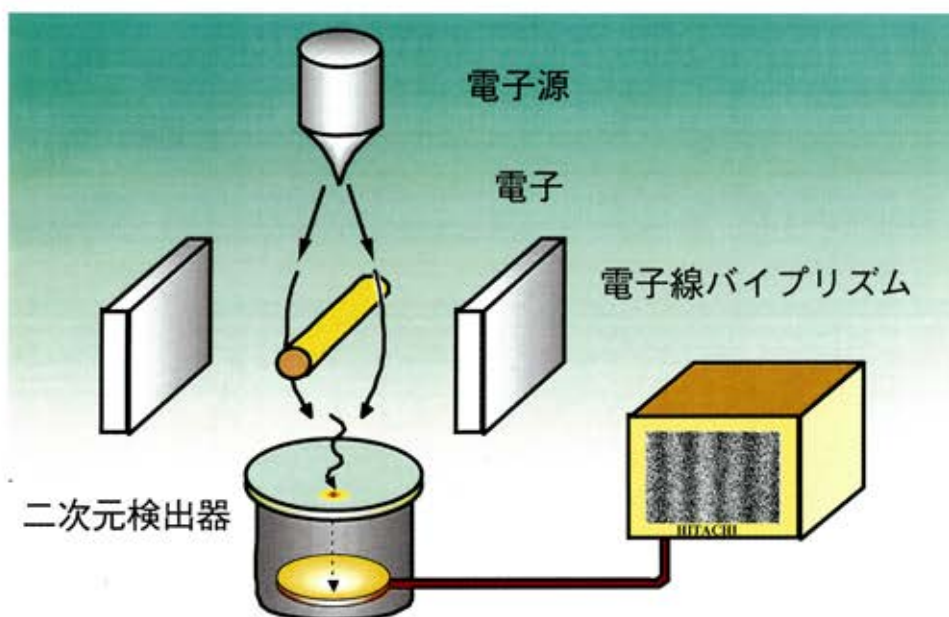


図4. 二重スリットの実験の配置

モニター上で検出面を見ていると、明るい輝点がポツン・ポツンと現われます。とても干渉縞には見えません。実はこの輝点1つ1つは、電子なのです。電子は粒子で、しかもランダムな位置にやって来ます（図5(a)）。

電子線を非常に弱くした時には、干渉縞は見えなくなって一様な分布になってしまうのでしょうか？

電子線を非常に弱くしたので、電子を1ヶ1ヶ送ったことに対応しています。電子の速度は、およそ光の速さの2分の1。1mほどの装置の中はあっという間に通りすぎ、光源から出たと思

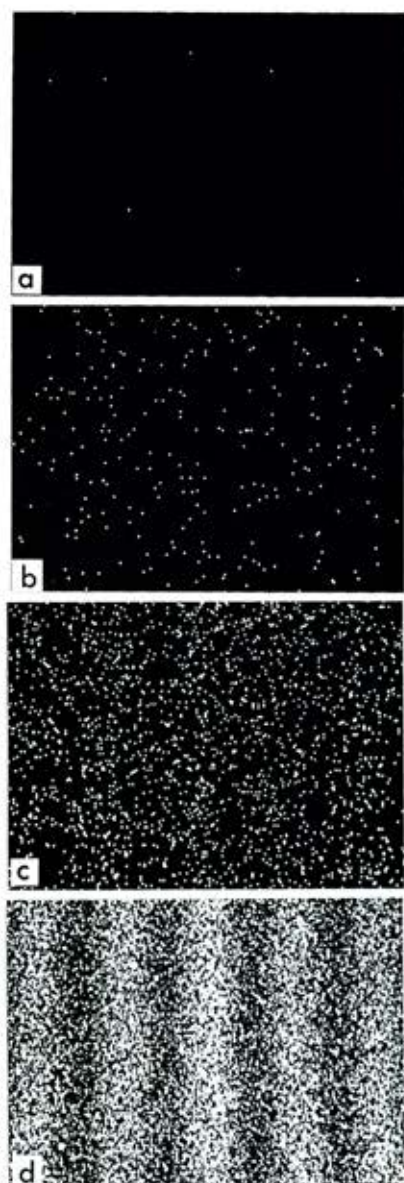


図5. 二重スリットの実験の写真
検出される電子の数が増えていくにつれて干渉縞が見えてくる。

ったらすぐに検出されます。ですから、このようにポツポツやってくる条件では、電子は装置の中にはほとんどいません。時々パッと通り過ぎるだけです。まして2個以上の電子が同時に存在することなどありえません。電子は検出してみると、確かに1ヶ1ヶの粒子だし、装置の中に1ヶしかない条件なので、フィラメントのどちらか一方を通った電子がランダムにやってきて、やがて一様な分布になるだろうと思われることでしょう。それでは実験の続編を見てみましょう。

電子が集まってくると(図5(b))、何やら縦縞のようなものが見え始めます(図5(c))。実験は、20分以上もかかりますので、ビデオを早送りすると、まさしくきれいな縦縞が見えてきます(図5(d))。これは、まさに“干渉縞”です。どうやら、1ヶの電子も、波の性質を持っていると考えなければならないようです。朝永振一郎先生は、この不思議な振舞いを、電子ではなく光子の場合について「光子の裁判」という本の中でみごとに描いています。

朝永先生と一緒にノーベル賞を受賞したアメリカのファインマンは、「この二重スリットの実験は、“量子力学の神髄”を表しているが、頭の中で考える思考実験で、実行するのは不可能である」と言っています。さらに、どうして、そんなことが起るかなどと考えたりしない方が、身のためだと論じています。泥沼にはまってしまうからです。

しかし電子で干渉縞を得たり、電子1ヶ1ヶを100%に近い検出感度で検出できる先端技術のお蔭で、この実験が“目の当たり”に見えるようになると、やはりファインマンの忠告を振り切ってでも、考えてみたい気にもなります。

互いに相容れない粒子性と波動性を、妥協させるための方策をボルンが考え出しました。しかし、それは“誰にでもすんなりと受け入れられる内容”とは言えませんでした。事実、アインシュタインもドブロイもシュレディンガーもこの説に激しく抵抗しました。

ボルンの解釈

ボルンの解釈によれば、電子はミクロの世界では“波”として振舞います。しかし、この場合には、水面の波紋のように、波が伝わっていく様子を見ることは出来ません。波を見ようとすると、波の形が急に崩れて、1ヶの粒子として検出されてしまうからです。しかし検出しない限り波なので、たとえ1ヶの電子であってもフィラメントの両側を通ります(図6)。

それなら波の様子は見えないのかというと、そうではありません。2つの波を重ね、沢山の電子を積算すると、干渉縞が観察できます。電子が1ヶ検出される度に波は収縮してしましますが、どの点に収縮するかは確率分布は、波の振幅の絶対値の2乗で与えられます。この場合に、干渉縞の確率で電子が検出されることになります。こうして同じ状態の電子が沢山検出されると、干渉縞が次第に姿を現わします。ただ、波がどのようにして、何故、収縮するのかについての見解は、人様々です。

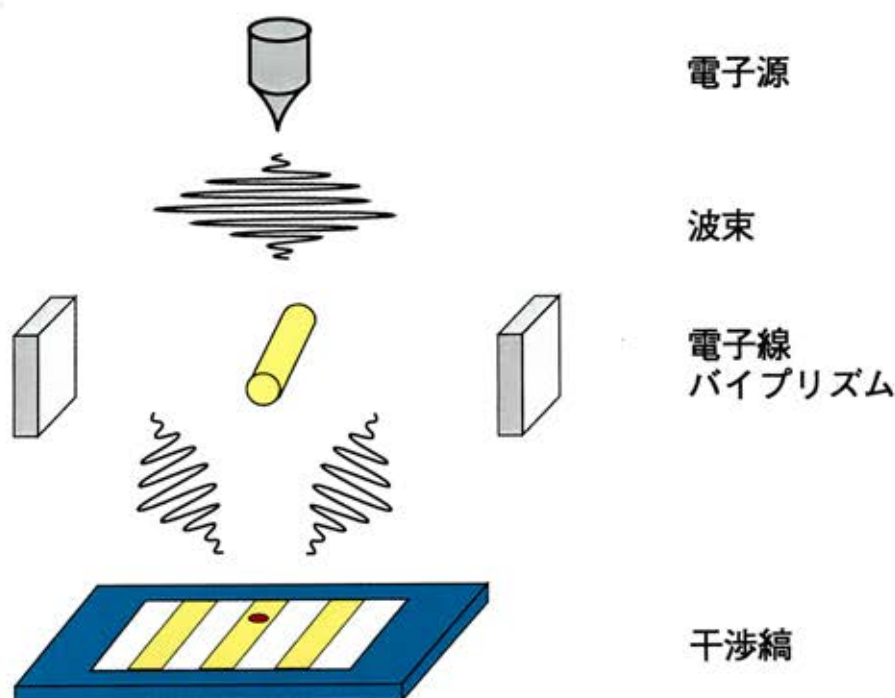


図6. 干渉縞の形成プロセス

1ヶの電子が波となってバイプリズムの両側を通り、検出器にあたると1ヶの電子として検出される。

偉大な数学者であるフォン・ノイマンは、波の収縮はシュレディンガー方程式からは導くことは出来ないことを示しました。しかし、ボーアが考えていたように、電子がマクロな装置で検出された途端に収縮するというのも変です。マクロな装置もやはり原子や電子から出来ているので、シュレディンガー方程式に従って良いはずだからです。

このように突き詰めて考えたフォン・ノイマンは、「人間が意識した時に波が収縮する」としか考えようがない」と結論付けました。しかしペンローズは、「そんな主観的なものではなくて、脳の中で客観的に収縮が起る」と考えます。どちらも理解しにくい内容です。

量子力学の予測は実験的には完璧で、文句をつけられる筋合いはないのですが、量子の世界が直接見えるようになってくると、もっとすっきりした解釈を求める人達が増えてきています。たとえば、こんな考え方をする人がいます。

電子を波だと考えれば、干渉縞は理解できることは百も承知している。だが、電子は、実際に1ヶの粒子として検出されているので、粒子と考えるべきである。1ヶの粒子は、プリズムの片側しか通り得ない。だが、この電子も干渉縞の谷の位置にはどうしても到達できないので、反対側に通る道があることを、誰かが知らせてくれなければならない。その誰かは実在しているに違いない。実在しない者が、干渉縞を作るように指図出来るはずがない。

こうして、或る人達は別の世界が存在すると考えます。1つの世界の中では、赤い電子がフィラメントの右側を通り、別の世界では白い電子が左側を通る（図7）。全く別の世界だが、電子が干渉性を保ったまま検出器に到着した時にだけ、別々の世界は影響し合い干渉縞を作るのだと。

荒唐無稽な別の世界を作って、それに押し付けてしまっただけではないかと言われるかもしれませんが、このような考え方をすれば、“観測による波の収縮”や“猫が死んでいる状態と生きている状態を同時に取ることが出来るシュレディンガーの猫”などの量子力学特有の現象を、無理なく説明しようと主張します。

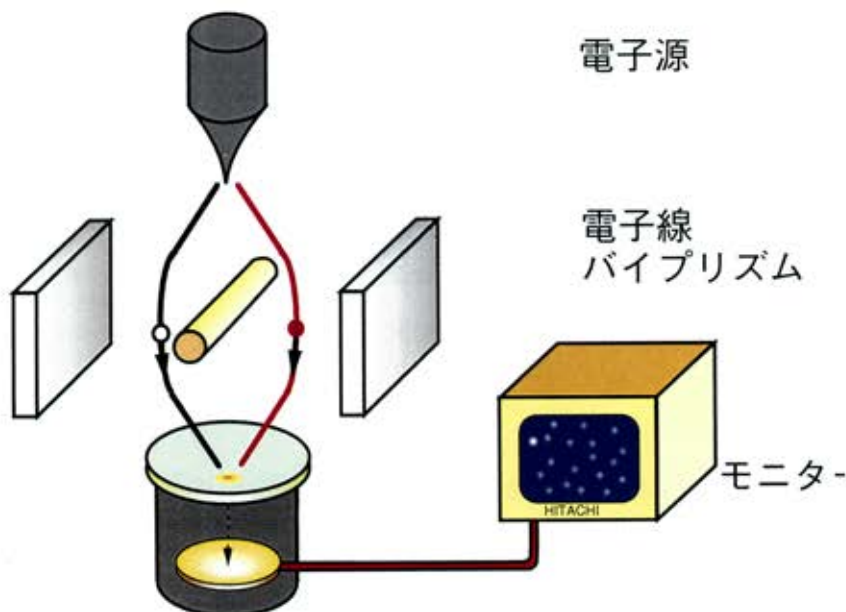


図7. 量子力学の多世界解釈

今、欧米で、量子コンピューターの可能性が議論されています。別々の世界で、計算を同時に併行して進めようというものです。これが実現できれば、世界が沢山あることが証明されたことになるかと主張する人もいます。

さて、これまで干渉縞、干渉縞といってきましたが、「干渉縞が出来たら、何故それが波であるという証拠になるのでしょうか？」よく理解されている方がほとんどだとは思いますが、電子の波がどのようにして干渉縞を作るのか、そこでどんなことが起きているのかを、具体的に頭に思い浮かべてみたいと思います。ただ、電子の波を見ることは出来ませんので、水面の波紋を使って考えてみましょう。

干渉縞の実体は何だろう？ —水面の波紋で作る干渉縞—

透明なプラスチックで出来たタンク（図8）をオーバーヘッド・プロジェクターの上に乗せ、下から光で照らしてスクリーンに投影すると、波紋を見ることが出来ます。

水面を指で触れても波紋が生じますが、指の代わりに、真っ直ぐな板を上下に振動させても波を作ることが出来ます。この時生じる波紋は直線です。波の山が次から次へと伝わっていくのが見えます。先程の実験で電子線バイプリズムに入射させた電子線も、こんな波でした。

さて、直線の板をV字形に曲げてみましょう。発生する波面も、直線からV字形へと、変化していきます。これは、“電子線バイプリズムを通して出てきた電子の波”に対応しています。波面は、板の近くでは、2つの直線ですが、下の方では2つの波が重なり合い、そこでは、これまでとは違った新しいパターンが出来ています。これが、“2つの波の干渉パターン”なのです。

板をもっと早く振動させたら、どうなるでしょう？ —波面の間隔、“波長”が短くなり、干渉パターンも変わってきます。干渉パターンは、同じ形を保ったまま下の方に移動していきます。この動きにつれて、目線を動かしてもらえると見えますが、良く見えないという方のために、ストロボで見ていただきましょう。波が、ある点にやって来る度に周期的にシャッターを開けば、止まって見えるという訳です。ちょっと、チラチラしますが、干渉パターンが静止して見えます。瞬間写真（図9）を撮れば、もっときれいに見えます。

複雑なパターンのように見えますが、実は簡単に解釈できます。丸印をつけた中央の明るい点では、“一方の波の山”が“他方の波の山”と重なって“より高い山”になっています。その真下の暗いところは、谷と谷が重なり合って、“もっと深い谷”になっています。しかし、実際の波は静止している訳ではなく、次の瞬間に山は谷に谷は山になります。つまり、この中央の線上では、水面が激しく上下振動をしているのです。

この直線は両側の板から等しい距離にあるので、2つの波が、ある時には山と山、ある時には谷と谷といった具合に同じ状態で重なるために、上下に激しく振動するのです。これと全く同様に、激しく振動する場所があります。中央の線に平行な上下を向いた線上です。この時には両側の板からやってくる波が、波長の整数倍だけ距離が異なっています。

これらの直線の間では、どうなっているのでしょうか？ —ここでは、1つの波が“山”だと思えば、もう一方の波は“谷”になるので、波はお互いに打ち消し合ってしまう。このため、水面の上下振動は全く起こりません。水平方向には、振動が強くなったり、なくなったりが周期的に繰り返されることになります。

“電子の波”の場合には、水面の波の様に波面を直接見ることは出来ません。しかし、その代わり干渉の結果を振動の強度分布として、写真フィルムに撮影することが出来ます。

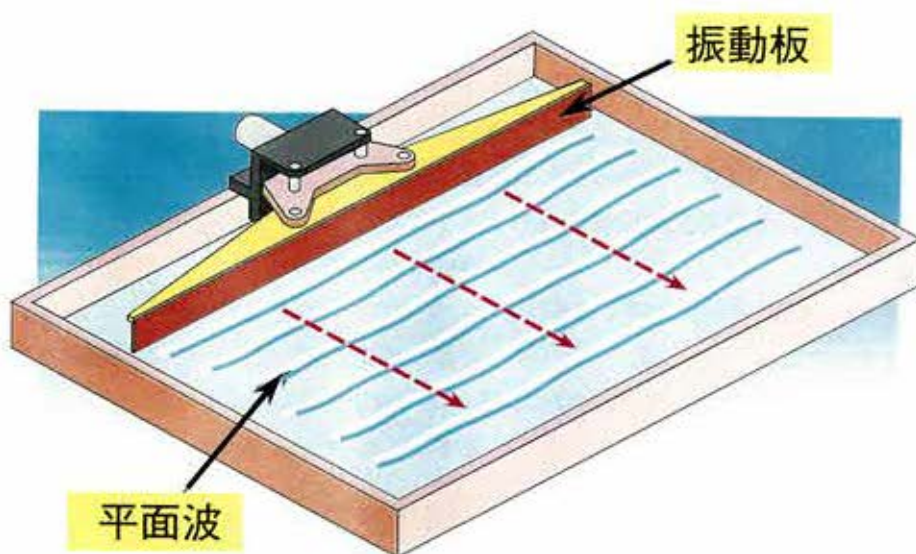


図8. 水面の波を観察する装置

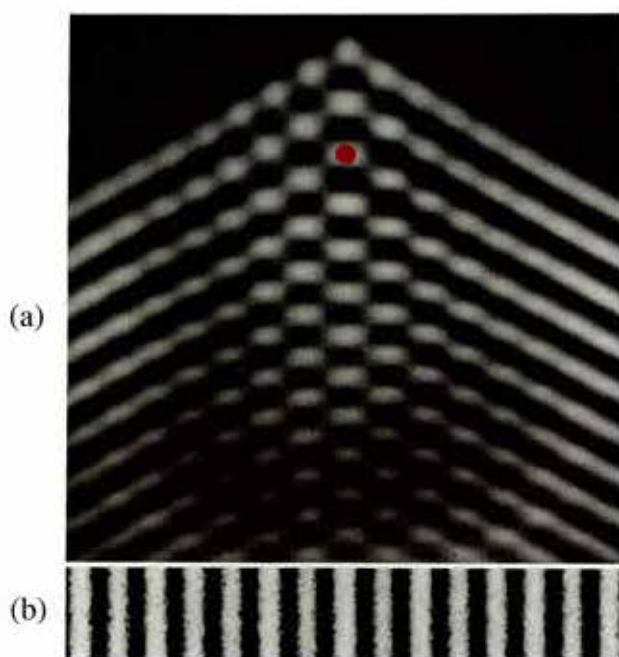


図9. 水面の波の干渉パターン

図9の下の写真がそれです。振動が激しいところは、フィルムが強く感光し、振動していないところは感光しません。このためフィルム上に規則正しい白黒の縞が得られます。それが、“干渉縞”なのです。干渉縞の実体は、実はこんな振動現象だったのです。こんなことは、粒子が重なったのでは起こるはずはありません。電子は波として振舞っているのに違いありません。

ここまで、“水面の波”を使って干渉縞がどのようにして作られるのかを考えてきました。しかし電子の波は、本当のことをいうと水面の波のように“連続的な波”ではありません。電子は、電子顕微鏡の中を時たま通り過ぎるだけなのです。1ヶの電子の波の進行方向の長さは、わずか $1\mu\text{m}$ 、横方向には $100\mu\text{m}$ 位の波の塊で、“波束”と呼ばれています。

電子の波束が時々通り過ぎる状況をイメージすると次のようになります(図6)。1ヶの電子が針先から飛び出して波となり、電子線パイプリズムで2つの波に分かれて後方で重なります。検出器にあたると、波は1ヶの粒子として検出されます。しばらく経って次の電子が飛び出して同じことが繰り返されます。沢山の電子が検出されると、やがて干渉縞が形成されるという訳です。

さて、ここでちょっと別の実験をしてみましょう。一方の波の中に、物体を置いて水深が浅くなるようにしてみます。一体どうなるのでしょうか？ — 物体によって波面が乱される様子が観察できます。その影響は干渉縞にも現れ、縞の強度が変化したり、縞の間隔がずれたりしています。

“水面の波”の場合には波面の乱れた様子を直接観察することができます。しかし“電子の波”の場合には、波面は観察できませんが、干渉縞なら観察できます。そして、その“干渉縞の乱れ”から、“波面の乱れの様子”を間接的に知ることが出来るのです。理由は、既にお分かりのことと思います。干渉縞には、“乱された波面”が“基準の波面”に対して、どれだけずれているかが、記録されているからです。

この事実に気づいたのは、ガボールです。彼はこの原理を使って、干渉縞から“乱された波の波面”を再生することを思い付き、1948年“ホログラフィー”を発明し、後にノーベル賞を受賞しました。ホログラフィーで三次元的に像が再生されるのは、こんな理由によります。

干渉性のよい電子線

さて次に、きれいな干渉縞を得るには、“どんな電子線”を使えばよいのかを考えましょう。電子線の波面は、図8で見たように、きれいにそろっていなければなりません。波は波面に垂直に進むので、平面波を作るには電子線を平行にしなくてはなりません。電子の波長が短いので、少しでも方向の違ったものが混ざっているとすぐに波面が崩れてしまいます。もう1つ、電子の波面の間隔、つまり波長が同じでなければなりません、それには電子線の速度を揃

える必要があります。テレビのブラウン管の中の熱電子線は明るいのですが、平行にしたり速度を揃えたりすると、電子線が極端に暗くなってしまう干渉縞を観察することは出来ません。一体どうしたら良いのでしょうか？熱電子よりも“輝度の高い電子線”を使えば良いのです。

そこで、私たちは“熱電子”ではなくて、避雷針の原理を用いた電界放出電子を使うことにしました。電子源となる針の走査型電子顕微鏡像を図10に示します。この針はタングステンで出来ています。針の太さは0.1mmで先端は $0.1\mu\text{m}$ と非常に尖っています。この針に、数kVの電圧をかけると、針先の電界が異常に強くなって、タングステン内部の電子をトンネル効果で引っ張り出します。熱電子に比べて5桁も高い電流密度が得られます。明るく、かつ非常に小さな点電子源が得られる訳です。電子源を白熱する必要もないので、出てくる電子の速度が揃っています。明るい点光源であることと、電子の速度が揃っていること、これら2つの特徴によって、干渉縞が容易に見えるようになる訳です。

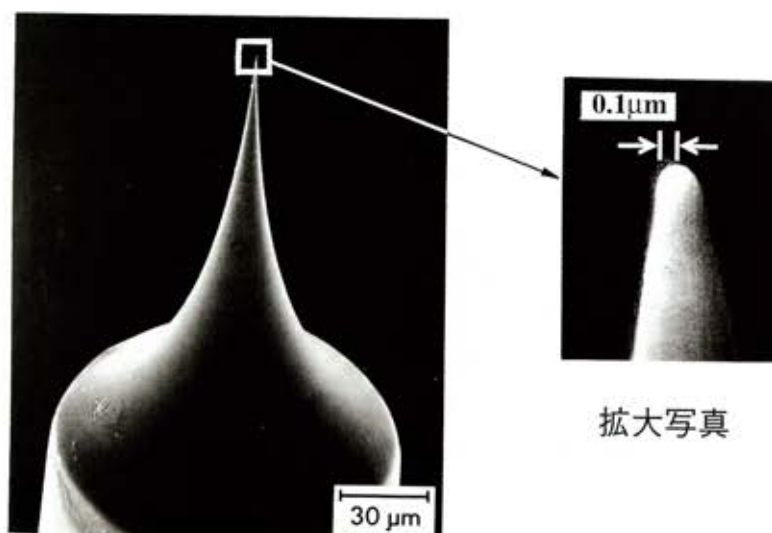


図10. 電界放出用のタングステンの針

電界放出電子線を備えた電子顕微鏡を図11に示します。今、説明した電界放出の針が装置の一番上にあり、電子線パイプは真中あたりにあります。一番下に干渉縞をフィルムに記録する検出装置があります。

この電子線を開発する以前、電子線で干渉縞を観察するのは、容易なことではありません



図11. 電界放出電子線を備えた電子顕微鏡

でした。1968年に図3の電子の波紋を撮影するのに、実に10分以上の露出時間を要しました。恰も暗い星を撮影するのと同じで、暗闇の中で長時間露光を余儀なくされました。干渉縞を沢山得るには、今では電子線を 10^{-8} radという平行度にします。今私が使っているこのレーザーポインターも平行ですが、それでも 10^{-3} radですから、この十万分の平行度になければなりません。

これだけ平行度が良いので、ちょっとしたことが起こっても、平行度が乱されてしまいます。針の先がごくわずかに振動してもいけません、周辺に交流磁場がごくわずかにただよっていても、電子線が乱されてしまうのです。

このレーザー・ポインターで、電子線が交流磁場によってどのように乱されてしまうのかを、お目にかけましょう。水平方向の交流磁場でふられると、電子は上下に振動し、こんな具合に一点だったものが上下に細長くなってしまいます。もともと細長い光源ではないことは、水平に素早く動かしてみると分かります。もしも細長い光源なら、どんなに早く動かしても細長いままですが、見て下さい。サイン・カーブを描くのです。光源はある一瞬をとれば点光源ですが、上下に非常に早く振動しているので、細長く見えているだけなのです。

交流磁場が、水平方向にも垂直方向にもかかっていたりすると、二次元のパターンを描きます。ここでは円形ですが、一般には、複雑なりサジュー図形を描きます。わずかに地球磁場の千分の1という弱い磁場が電子顕微鏡の中に侵入しただけでも、こんなになってしまうので、これを取り除くのが大変で、本来の点光源にするのに10年もの期間がかかってしまったのです。

こうした努力の結果、昔はどうやっても全体で200本しか撮影できなかった干渉縞が、現在では3000本以上得られる様になりました。さらに、電子線が非常に明るくなったために、蛍光板の上で、肉眼で直接干渉縞を観察することが出来る様になりました（図12）。あたかも、レーザー光を使って観察しているかの様です。

この“干渉性の良い電子線”によって、電子線ホログラフィーが実現できるようになりました。ホログラフィーの原理は水面の波の実験で触れましたが、立体写真としてクレジット・カードにも使われているので、よくご存知のことと思います。

電子線ホログラフィー

電子線ホログラフィーは図13のようにして行います。まず物体のホログラム、つまり物体波と参照波の干渉縞を電子線で作ります。このホログラムにレーザー光をあてると、電子の波面が光の波面として再現されます。電子の像が光の像に姿を変えて三次元的に再現されるのです。

レンズも使っていないのに、像が結ばれるのは大変不思議です。水面の波の実験で説明したように、ホログラムには物体波の波面の情報が干渉縞の形で記録されているので、そのフ

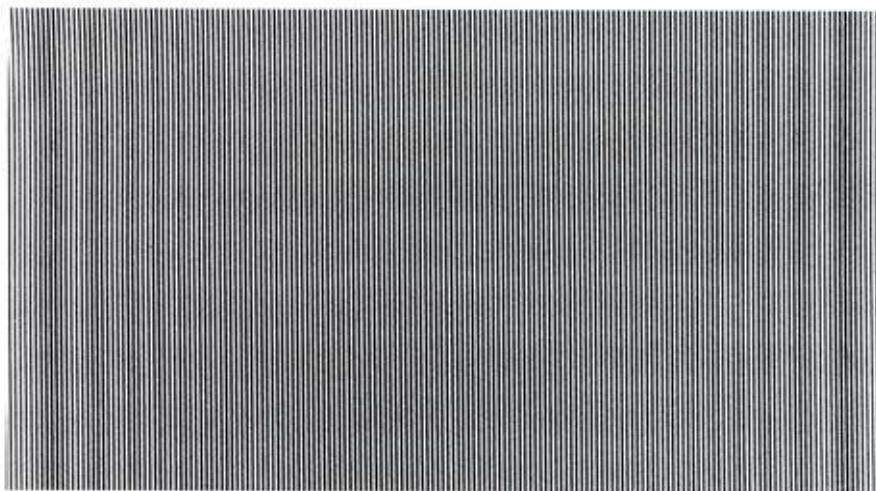


図12. 電子線ハイブリズム干渉縞

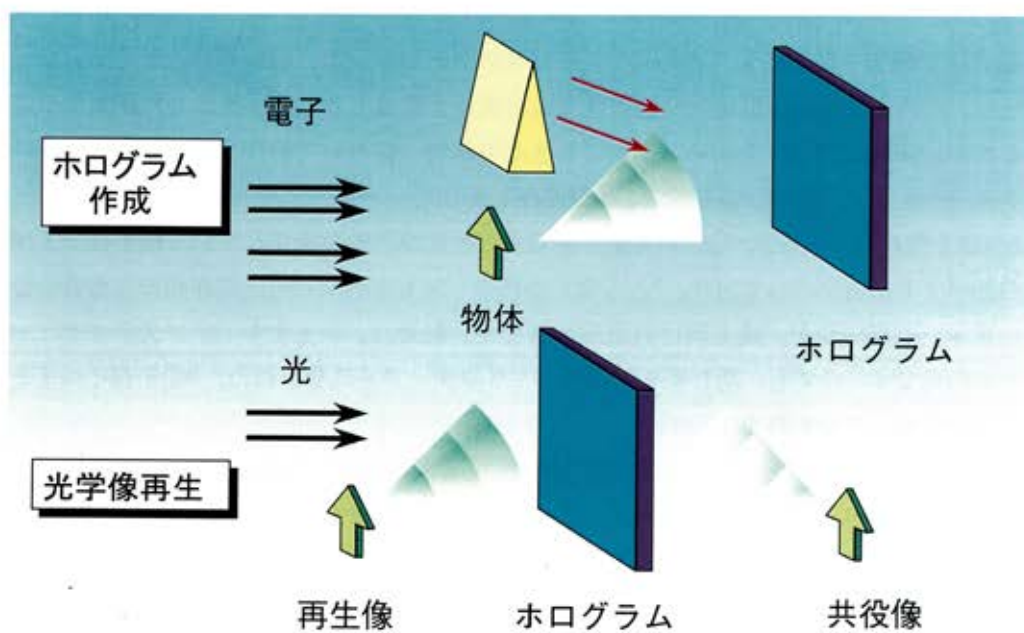


図13. 電子線ホログラフイーの原理

イルムに光を当てれば、波面が再現されるのです。

電子の波面が光の波面に変換されてしまえば、あとはしめたものです。光学画像処理技術を駆使出来るので、電子顕微鏡の中では出来なかったことも可能になります。普通の電子顕微鏡では、電子線の強度が観察されます。いわば物体のシルエットが観察されるにすぎません。ところが、電子線ホログラフィーでは、強度も観察できますが、同時に電子の波面も観察できます。波面が物体でどのように乱されるかで描いた像は“干渉顕微鏡像”と呼ばれます。

電子の干渉顕微鏡像では、一体何が新たに見えるようになるのでしょうか？ — 実例をお見せしましょう。

図14はU字形磁石のように見えますが、スケールを見て下さい。太さわずか $1\mu\text{m}$ で、“磁気バブルメモリ”の部品の電子顕微鏡写真です。磁気バブルは、この磁石からの磁力線によって転送されます。この小さな磁石を電子の波を使って干渉顕微鏡として観察してみたのが図15です。磁石からの磁力線が見えます。磁力線は、私たちの目で見えることは出来ません。電子顕微鏡を使っても見えませんでした。しかし、電子の波を使うと磁力線が見えるようになるのです。

ファラデーの金曜講話

磁力線概念を最初に見つけたのはイギリスのファラデーで、1831年のことです。ファラデーは、これを手始めに電磁気学の基礎現象を次々と発見しました。彼は大変偉大な研究者でしたが、同時に、科学を広めることにも熱心でした。彼のいた研究所ロイヤル・インスティテューションで一般向け講演会を2種類創設しました。

1つは子供向けのクリスマス・レクチャーです。ファラデーが講演している様子は、イギリスの20ポンド紙幣ののっており、“ろうそくの科学”でも有名なので、ご存知の方も多いかと思います。もう一つが、成人向けの金曜講話です。聴衆は、ロイヤル・インスティテューションの会員です。今でも、話し手も聞き手もブラック・タイに身を固め、160年前そのままという古式に則って行われます。

私は、1994年11月に、この金曜講話に招かれ、「電子の波を使うと、ファラデーが考えた磁力線が目あたりに見えるようになる」という話をしてきました。その時、まだこんな世界があるのかと思う様な大変珍しい体験をして来ましたので、その様子をちょっと紹介しましょう。

金曜日の夜の8時に、聴衆が集まって来ます。玄関ホールで室内楽を聴いたり、展示品を見ながら小1時間を過ごし、15分前に会場に通されます。私の方は、ファラデーが使っていたという小さな部屋に閉じ込められてしまいます。



図14. 磁気バブルメモリー用の小さな磁石

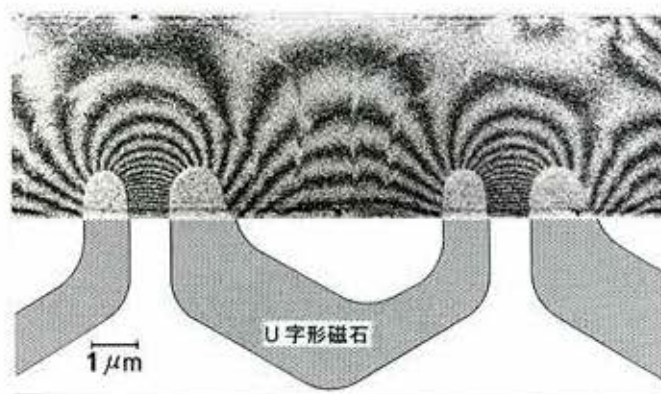


図15. 電子線の干渉顕微鏡像で見た磁石からの磁力線

何故こんなことをするのか、そのいわれを デイ所長から説明されました。昔ホイットストーン・ブリッジで有名なホイットストーンが、講演の直前に、緊張のあまり集まった聴衆をほったらかしにして逃げ出してしまう、急遽ファラデーが代わりに講演をしたという故事に由来するそうです。

私の講話は、ビデオに収録されBBCで放映されました。様子を知るには一番なので、ちょっとだけお目にかけましょう。

ー金曜講話のビデオー

アハラノフ・ボーム効果

さて、また話を元に戻しましょう。我々がミクロの磁力線の観察に夢中になっていた1980年頃、量子力学の分野で論争が起きました。それは、アハラノフ・ボーム効果と呼ばれる電子線の干渉実験です。今でこそ、二重スリットの実験と並ぶ量子力学の神髄を示す現象と見なされるようになりましたが、1980年頃、量子力学の基礎分野で、その存在をめぐって論争が起きました。

それは、こんな現象です（図16）。コイルに電流を流すと、両端がN極とS極の電磁石になり、外に磁場が発生します。ただ、コイルを無限に長くすると磁極が無限の彼方に行ってしまうので、外部の磁場はなくなります。

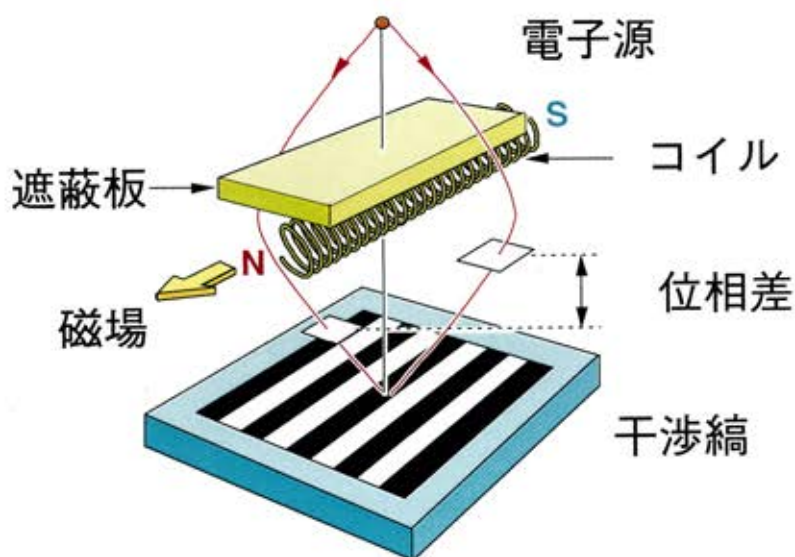


図16. アハラノフ・ボーム効果

電子源から出た電子をコイルの両側に通し、パイブリズムで重ね合わせると、干渉縞が観察できます。シュレディンガー方程式を解いて、電子の振舞いを調べたアハラノフとボームは、「コイルの左右を通った電子線の間、位相差が生じて干渉縞がずれてしまう」という驚くべき結果を得たのです。

つまり、電子の波は、電場も磁場も無い所を通っているのにも拘わらず、物理的な影響を受けるという訳です。

なぜ波面がずれてしまうのか？ —アハラノフとボームはこんな説明をしました。磁場は、コイルの中には存在するけれども、外部には存在しない。しかし、“ベクトル・ポテンシャル”という量ならば、コイルの外にも存在し、コイルの周りを取り囲む形でぐるぐる回っている（図17）。このベクトル・ポテンシャルはコイルの右と左で上下逆方向を向いているので、これが電子の波面を逆方向にずらしたというのです。

ベクトル・ポテンシャル

「ベクトル・ポテンシャルって一体何だ？」と聞かれても、説明は容易ではありません。「磁力線の周りを渦状に取り巻いている」という位にしか言えません。

でも安心して下さい。“ベクトル・ポテンシャル”が分かりにくいのは、我々だけではありません。ファラデーもマックスウェルも、この渦の正体は何なのか悩みました。そして、その後100年以上にわたってベクトル・ポテンシャルは議論的でした。そこで、少しその経緯を少しご紹介します。

話は、またファラデーから始まります。ファラデーは1831年、金属リングに磁石を近づけると電流が流れるという電磁誘導を発見します。磁石で電流を発生させたのです。そしてファラデーは、電場と磁場は独立な物理量ではなく、その背後に“もっと基本的な量”があるに違いないと考えました。

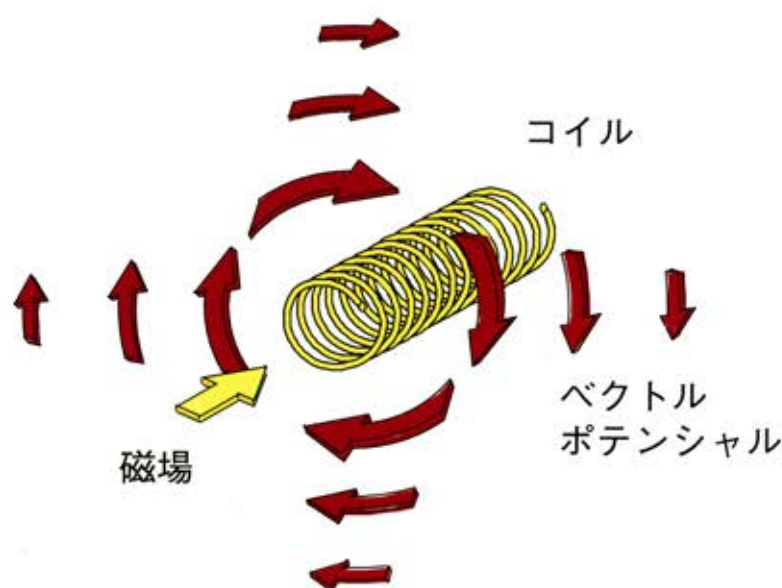


図17. コイルの周りをまわるベクトル・ポテンシャル

リングは、近くに磁場があると、何か特別な、“緊張した状態” “Electrotonic State” になる。この状態が変化しなければ何も起らないが、磁石を近づけて、その“緊張の度合い”を変化させると、電流が流れると・・・。

これを引き継いだのがマックスウェルです。彼は、ベクトル・ポテンシャルこそがElectrotonic Stateを表すことを突き止めます。そして、1856年にElectrotonic Stateの理論を作ります。

$$B = \text{rot } A$$

$$E = - \frac{dA}{dt}$$

図18. Electrotonic stateの理論

Maxwell

$$E = - \frac{dA}{dt} - \text{grad } \phi \quad B = \text{rot } A$$

$$\text{rot } H = i + \frac{dD}{dt} \quad \text{div } D = \rho$$

Heaviside- Hertz

$$\text{rot } E = - \frac{dB}{dt} \quad \text{div } B = 0$$

$$\text{rot } H = i + \frac{dD}{dt} \quad \text{div } D = \rho$$

図19. マックスウェル方程式

図18を見て下さい。Bが磁場、Eが電場ですが、それ以外にベクトル・ポテンシャルAが入っています。これら2つの式は、電場と磁場がベクトル・ポテンシャルを通して互いに関連していることを示しています。すなわちAの分布にrotation、つまり渦があるとBが生じ、Aが時間的に変化するとEが生じるという訳です。

マクスウェルは、Aの正体を物理量と考えました。どんな物理量かというと、この式は、「力は運動量の時間変化に等しくなる」というニュートンの運動方程式と似ています。実際、マクスウェルはベクトル・ポテンシャルAを“電磁気的な運動量”と呼んでいます。

1861年、マクスウェルは変位電流を見つけて、マクスウェル方程式を完成します。これを図19に示しました。ところが、下の式を見て下さい。ここにはAが入っていません。私たちが大学などで習ったのは、この方程式です。実は、これは、マクスウェルの30年後、ヘビサイドやヘルツが、物理的意味を持つのは電場、磁場だけであるとして、難解なマクスウェル方程式からAを消し去ったのです。以来、ベクトル・ポテンシャルは、数学的な量だと考えられるようになりました。

話は今世紀に移り、アインシュタインが登場します。アインシュタインは、マクスウェル方程式の意味を深く考えて相対性理論に至ります。この理論によれば、重い物体が存在すると、ちょうどトランポリンに人が乗った時のように、周りの時間・空間がへっこみます(図20)。近くの物体は、へっこんだ所に引き寄せられますが、それが“重力”の由縁だという訳です。こうして重力も電磁気と同様に、場が伝わって行って力を及ぼすと考えられるようになりました。

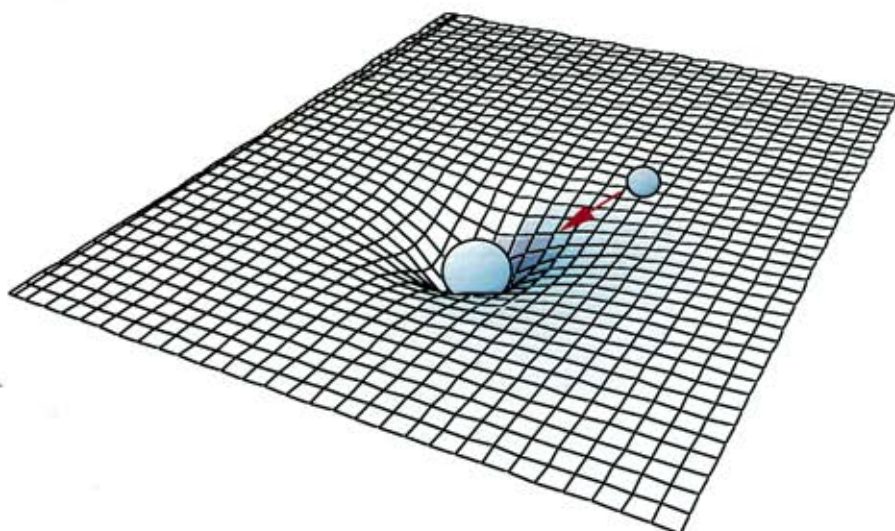


図20. アインシュタインによる重力の説明

アインシュタインは、さらに“重力と電磁気を統一する理論”の構築を目指しました。この重力と電磁気が統一できるはずだという強い信念は、実は既にファラデーが抱いていたものです。

ファラデーは、それまで、別物と思われていた電気現象と磁気現象が互いに関係があることを突き止めただけに飽きたらず、“重力”までもが、電磁現象と同じではないかと考えます。ロイヤル・インスティテューションで、重たいものを落としては、電気が発生しないかを調べる実験をやっているのです。電気は起こりませんでしたが、その論文の最後で、こんなことを言っているのです。

Here end my trials for the present. The results are negative; they do not shake my strong feeling of an existence of a relation between gravity and electricity, though they give no proof that such a relation exists.

実験はうまくいかなかったけど、私の信念は微動だにしないということです。150年も前のファラデーの強烈な信念が、今もって“物理の最前線のテーマ”であることには驚嘆してしまいます。

さて、その夢に挑戦したのが、数学者ワイルです。彼はベクトル・ポテンシャルをアインシュタインの重力理論に組み込んで、電磁気との統一を図りました。彼の理論によれば、ベクトル・ポテンシャルが存在すると時間空間の各点で“ものさし”——英語でいうと“ゲー

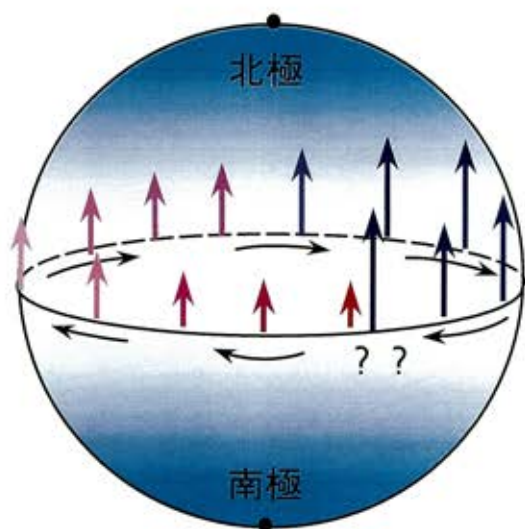


図21. ワイルのゲージ理論によれば、ものさしが地球を1周すると長さが変わってしまう。

ジ” — が変化するというのです。逆に言うと、各点の“ものさし”に違いがあると、そこに電磁場が生じるというのです。

この論文はアインシュタインの所に送られました。アインシュタインは、理論そのものには大変感激しますが、1mの物差しを持って磁石の周りを一回りすると2mになってしまうことがある（図21）ので、物理にはなり得ないと一蹴したのです。この統一理論は失敗でした。

当時は、まだ量子力学が出来ていませんので、電子が波であることも、ベクトルポテンシャルの役割もはっきり分かっていませんでした。量子力学が完成し30年経った1954年、ヤンとミルズによって統一理論への第一歩が踏み出されます。このゲージ理論では、ベクトル・ポテンシャルを基本的な物理量“ゲージ場”に据え、“各点で長さを変える量”ではなく、“電子の波動関数の位相を変える量”とします。

「アインシュタインの反論が、この場合どうなるのか？」と気になさる方もいると思います。今度は、ものさしの代わりに、電子を磁石の周りを一周させます。すると、今度は電子の位相が元通りにならない訳です。

実はこれはアハラノフ・ボーム効果（図16）に他なりません。図21の矢印の長さが、位相を表わしますので、磁石の周りををぐるっと一周すると、電子の位相が元の値と一致しないことになります。

アハラノフ・ボーム効果の検証実験

ところが、長い間ベクトル・ポテンシャルは数学的な量であると考えられてきたこともあって、それに根強く反対する人もいて論争が起こりました。すでに実験もありますが、コイルの両端から出た磁場の効果で、検証にはなっていないというのです。

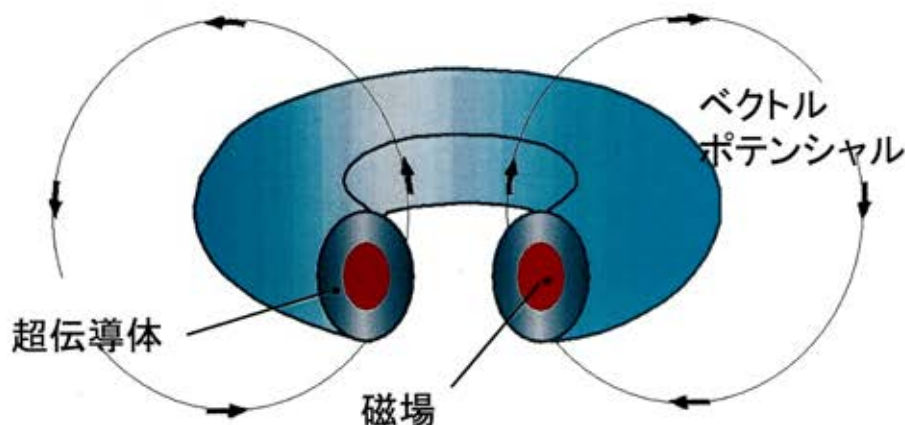


図22. アハラノフ・ボーム効果検証実験用のサンプル

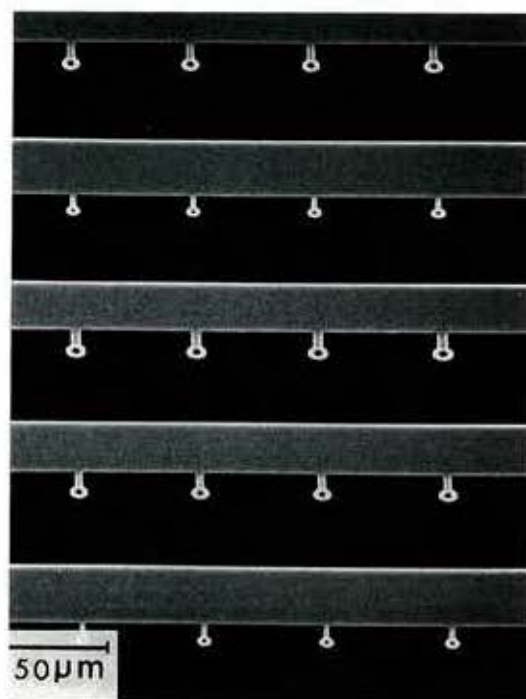


図23. サンプルの走査電子顕微鏡像

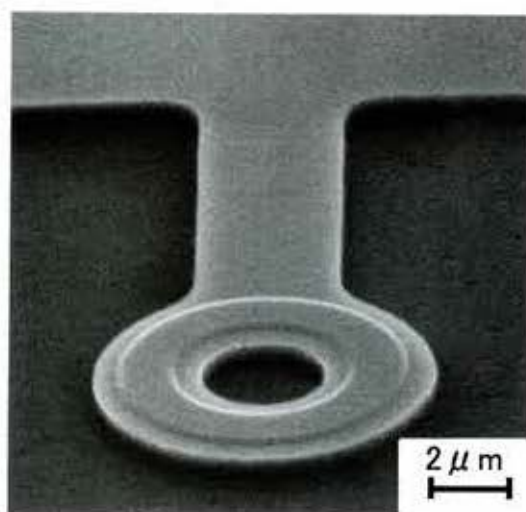


図24. 超伝導体で囲んだドーナツ状の磁石

“3年経っても続く理論上の論争”に決着をつけるために、確固たる実験事実を確立する意外にない我々は考えました。しかし有限の長さのコイルや棒磁石からは、どうしてもN極とS極が生じて、磁場が外に漏れてしまうので、純粹にベクトル・ポテンシャルだけの効果を調べる実験は出来ません。磁場が全く漏れないようにするには、どうしたら良いでしょうか？無限に長い磁石を作ることは、実験では不可能です。しかし、棒磁石をぐるっと曲げて、N極とS極をくっ付けてしまえば、磁場は外に出ません（図22）。さらに、磁石から漏れるわずかな磁場も完全に除くために、ドーナツ状の磁石を超伝導体でくるみました。外に出ようとする磁場は、マイスナー効果によって内部に閉じ込められます。

しかし、こんなサンプルをどうやって作るかが問題でした。何しろ電子線の干渉実験を行うには、サンプルは極めて小さくなくてはなりません。電子の波長や干渉領域が極めて短いからです。サンプルの大きさはせいぜい $10\mu\text{m}$ が限度です。ここで、半導体の回路を作る時に使う微細加工技術が活躍してくれました。

図23を見て下さい。こんなにたくさんのドーナツを作ったのです。ほとんどは失敗したのですが、全部で10万個も作ったのでしょうか？良く見ると、ドーナツの外径も穴の径もまちまちです。コイルなら電流を変えて磁束を変えることが出来ますが、磁石ではそれが出来ないで、いろいろな大きさの磁石を作って実験を行ったのです。

図24が、サンプルを拡大して見たものです。外径が $6\mu\text{m}$ です。ドーナツ状のパーマロイで出来た磁石の周りは、ニオブという超伝導体で完全に囲まれています。このドーナツに電子線をあてて、通ってきた電子線に斜めから平面波を当てて、孔の中と外で波面がずれている

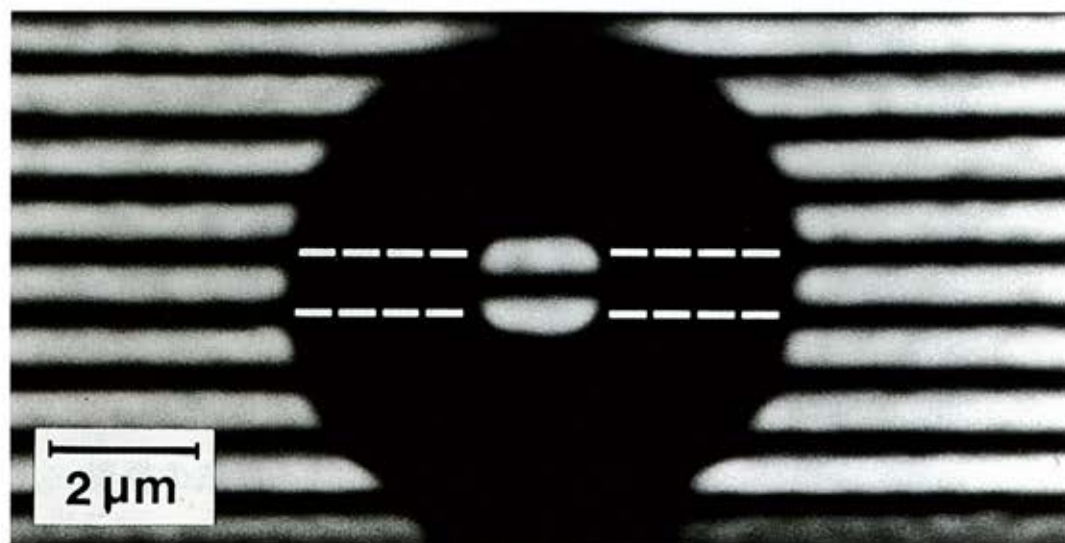


図25. アハラノフ・ボーム効果を示す電子線の干渉パターン

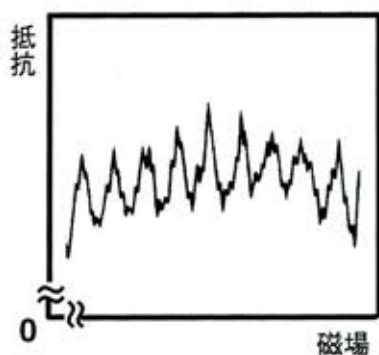
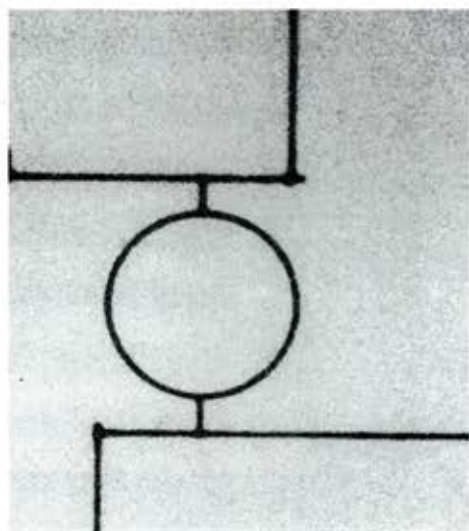
かどうかを干渉縞の形で調べました。

結果は、図25の写真で明らかになりました。孔の中と外で、干渉縞は1/2波長だけずれています。電子は全く磁場のない所を通っているにもかかわらず、ベクトル・ポテンシャルによって波面がずれたのです。かつて頭の中だけで想像するだけの思考実験と考えられたアハラノフ・ボーム効果が、先端技術の進展により実験可能になり、この一枚の写真でその存在が実証され、論争に決着がつきました。こうして、150年前マックスウェルが物理量と考えたベクトル・ポテンシャルは、実験的に蘇ったことになります。

マクロな領域でも成り立つ量子力学

こうして、真空中を走る電子を使ってアハラノフ・ボーム効果の存在が実証されました。その後、金属中の電子もアハラノフ・ボーム効果を示すことが、IBMのウェットたちによって見出されました。極めて細いリング状の回路（図26）に電流を流すと、リングの右を通る電子と左を通る電子が出会った時に干渉を起すというのです。

これまで、100ヶの電子を入れたら、たとえ二股に分かれたとしても、下からは100ヶの電子が出てくるのが当然のことでした。ところが、ここでは1ヶの電子が波となり2つに分かれ、出会った時に波の山と山が重なれば干渉して110ヶになり、山と谷が重なると90ヶになったりするということです。実際、磁場を加えてアハラノフ・ボーム効果によって電子の位相差を変化させると、全体の電流が大きくなったり小さくなったりすることが実測されたのです。



干渉による抵抗の振動

図26. 金属中の電子が示すアハラノフ・ボーム効果

リード線がこれだけ細くなると、中を通る電子は恰も導波管の中を通る波のようになってしまいます。これまで抵抗という概念は、リード線のトポロジーに依存したり、リングの中も磁場が通ってようがいまいが変わるはずはありませんでした。ところが今や、電子は波となり電流が干渉して、抵抗が変化してしまうのです。これまでの抵抗の概念は、根本から覆されてしまった訳です。

最近、カーボン・ナノチューブでもアハラノフ・ボーム効果が検出され、ネイチャーに報告されました。二点間の電流といっても、チューブですから直線状の道もあれば、右回りの道も、左回りの道もあり、磁場がかかるとそれらの道で位相差が生じて電流が変化するので、す。

これまで紹介してきたのは、電子の干渉でしたので、小さな素粒子なので、「そんな不思議なこともあるのかなあ」という感じでしたが、最近では、もっと大きな原子や分子までが干渉するようになりました。

ウィーン大学のツァイリンガーは、C60の粒子を送った時に、波となって回折を起こすという実験を行い、これも昨年ネイチャーに発表されました。C60といえば、サッカーボールと呼ばれ、電子顕微鏡でも観察できるマクロな粒子です。「こんなに大きなものが、粒子ではなく波の形になって広がって、二つのスリットをも通ってしまう」と考えるだけで不思議な気がします。

今後、量子現象はさらにマクロなスケールでも観測できるようになり、ひょっとすると化学や生物の領域にも見い出されるのではないかと思います。実際、生体中でもコヒーレントな量子状態が存在しアハラノフ・ボーム効果でそれを調べる事が出来るはずだという人もいます。

磁束量子を見る

最近、電子の位相を利用して新しい量子現象の観察の道が開けました。超伝導体のミクロな構造が見えるようになったのです。

超伝導体は抵抗無しに電流を流すことの出来る材料ですから、無損失の送電線として使ったり、強力なマグネットを作ってリニアモーターカーに利用することも出来ます。ところが、超伝導体は、実は大変微妙で、その実用化は容易ではありません。電流を流すと、不思議な現象が起こって超伝導状態が壊れてしまうのです。

1998年9月、アメリカ全土を覆ってしまうほどの大きなハリケーン“フロイド”が発生しましたが、超伝導体に磁場がかかった時にも同様の渦が発生します。超伝導体中の渦は、風が渦巻いている訳ではなく電流が波の形をとってぐるぐる回っています。電磁石を形作っていますので磁場が発生します。ハリケーンには大きなものから小さなものまでいろいろありますが、超伝導体中の渦は非常に小さくて、最近まで我々はこれをじかに見る事が出来ません

でした。この渦は、磁場の総量、“磁束”が一定で量子化されています。波が渦を一周した時、波の山が元の波の山と重ならないといけないためです。このため、“磁束量子”とも呼ばれています。この渦にも台風の目があり、そこは超伝導が破れています。

このハリケーンは、ジェット・ストリームによって、はるばるニューヨークまで北上し、ケネディ空港が閉鎖されました。これと同じ現象は、超伝導でも起こります。電流を流すと、磁束量子が力を受けて動き始めるのです。ところが、磁束量子が動くと、ファラデーの電磁誘導の法則によって電圧が発生し、ゼロ抵抗ではなくなってしまい、やがて超伝導が破れてしまいます。超伝導を保つためには、磁束量子を動かない様に固定する必要があります。

一体どうやったら磁束量子をピン止めすることができるのでしょうか？ハリケーンが動かないようにするのは容易ではありませんが、磁束量子を固定する方法は見つかっています。超伝導体中に超伝導が弱くなる小さな欠陥を入れればよいのです。磁束量子が欠陥の所に来ると、台風の目が欠陥の中に落ち込んで動きがとれなくなってしまうのです。ただし、このピン止め現象は、何しろミクロの世界のことなので、その詳しいことはよく分かっていません。材料開発は経験と経験と試行錯誤で行っているというのが実状です。

この磁束量子を一つ一つ見て、しかもピン止めしている欠陥をも同時に見る（図27）。これが、我々・電子顕微鏡屋の30年来の夢でした。何しろ、磁束の最小の単位ですし、この小さな磁束量子の振る舞いが実用化の鍵を握っているので、誰もがその姿を直接捉えなかったのです。この夢が、干渉性のよい電子線を使って達成できました。

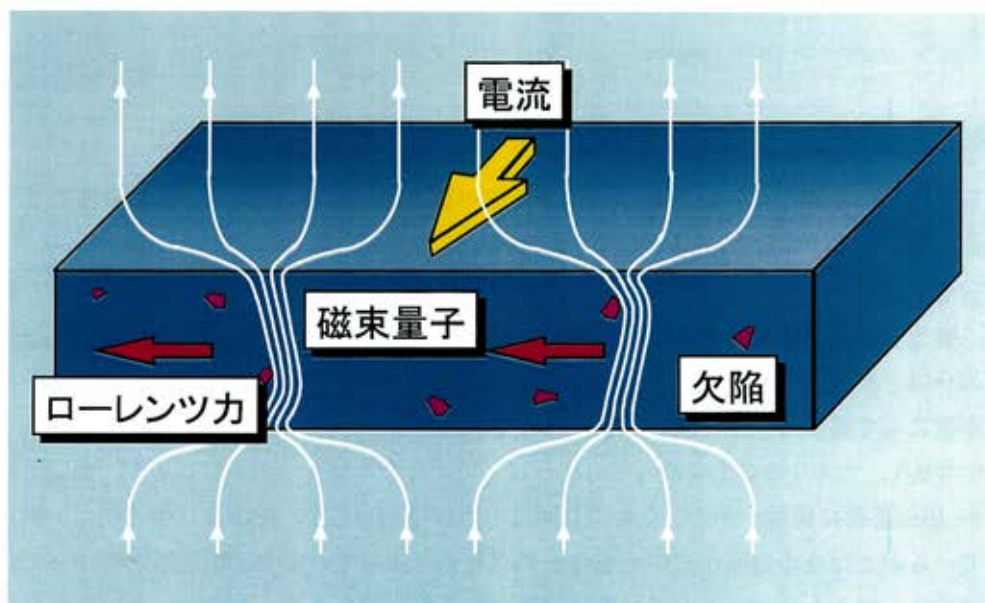


図27. 小さな欠陥でピン止めされる磁束量子

まずは結果の写真（図28）を見ていただきましょう。サンプルは、ニオブの薄膜です。小さな点々が磁束量子で、磁束量子を薄膜の上から見た姿が観察できます。黒い縞は、磁束量子とは関係ありません。点々の1つ1つを良く見て下さい。白い部分と黒い部分の対から出来ています。磁束量子が何故こんなふうに見えるのか説明しましょう。



図28. ニオブ薄膜中の磁束量子の像

入射電子は、磁束量子内部の強い磁場線によって曲げられます（図29）。とはいえ、曲がる角度はごくわずかです。ですから普通の電子顕微鏡では何も見えません。そこで、膜の厚さの10万倍もずらした下の面で観察します。すると、磁束量子の部分を通して曲げられた電子が、磁束量子の真下には来なくなり、少し向こう側にやって来ることになります。こうして、磁束量子は白黒のスポットとして見えた訳です。

我々は、こうした手法を用いて、この磁束量子が動く様子をビデオに捉えることが出来ました。これまで、静止している姿だったら観察する方法もありましたが、動いている様子を見た人は誰もいません。実際にその動きを見ると、まるで“生き物”であるかの様に、面白い振舞いをします。

さて、それでは初めて見る“磁束量子が動くシーン”のいくつかをお見せしましょう。

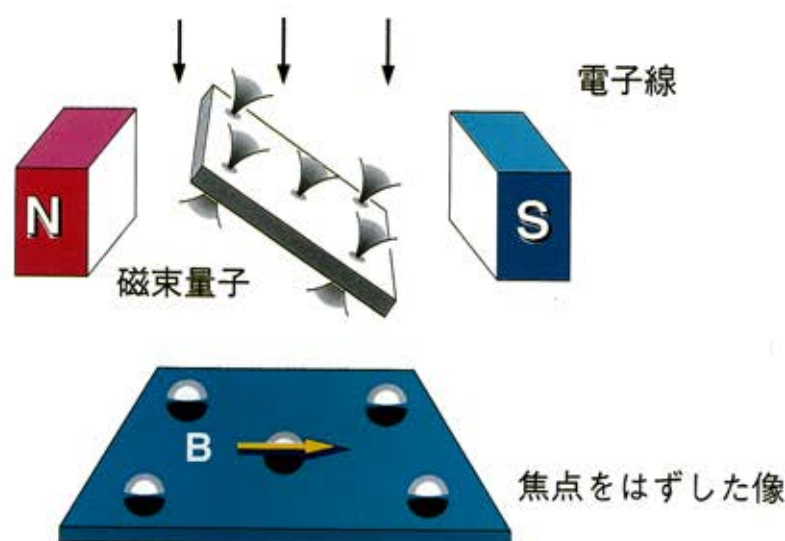


図29. 磁束量子の観察法

磁束量子の動きを示すビデオ

100ガウスの磁場を突然切ると、磁束量子の90%はただちに膜の外に出てしまい、10%だけが欠陥にピン止めされて残ります。静止しているのかと思うと、下に向かって欠陥の間をビヨンビヨンと飛び移っていきます。画面の下に、膜穴があいており、そこに向かっていているのです。磁束量子は、恰も決まったルートがあるかの様にビヨンビヨン動きます。

さて、ここで、逆向きの磁場をかけてみます。元々の磁束量子は、あわてて膜の外へと出ていこうとします。それを待ち切れずに、逆向きの磁束量子が、縁から侵入し始め、2つの流れの先端で衝突を始めます。互いに逆向きであることは、上半分の磁束量子の像は、下が黒く、下半分にいる磁束量子の像は、上が黒くなっていることから分かります。磁束量子は、超伝導体中では、これ以上分割出来ないという意味で“素粒子”です。我々は、粒子と反粒子の衝突を見ていることになります。

磁束量子が、ある距離まで近づくと、突然磁束量子と反磁束量子の対が衝突して消えてしまいます。この距離からピン止め力を知ることが出来ます。

さて、次は薄膜の表面に段差、つまりステップがある時、磁束量子がどんな動きをするかを観察したものです。磁束量子は一方向に流れようとしています。しかし磁束量子がステップに到着すると、そこを乗り越えることが出来ないために、向きを変えてステップに沿って流れ始めます。ステップの交差点まで流れてくると、ある時は上のステップに沿って、ある時は下のステップに沿って流れていく様子が捉えられています。

人工的な欠陥がある時の磁束量子のビデオ

超伝導体中に強い欠陥がある場合には、もっと面白い振舞いをします。ここでご紹介する例では、細いイオンビームを超伝導体にあてて、点欠陥を四角格子状に並べて作ります。磁場を変化させて磁束量子の密度を変えると、特定の磁場で磁束量子が動きにくくなり臨界電流が大きくなるというピーク効果が見出されています。この現象をミクロに見たビデオをお見せしましょう。

欠陥が格子状に並んでいます（図30）。磁場をかけると、磁束量子が上方の膜の端から発生し侵入してきて、あっという間に最前列の欠陥が磁束量子で埋め尽くされます。ところが、続く磁束量子は、なかなかそこを通り抜けることが出来ません。ついに通り抜けたと思ったら、勢いあまって遠いところまで行ってしまいます。

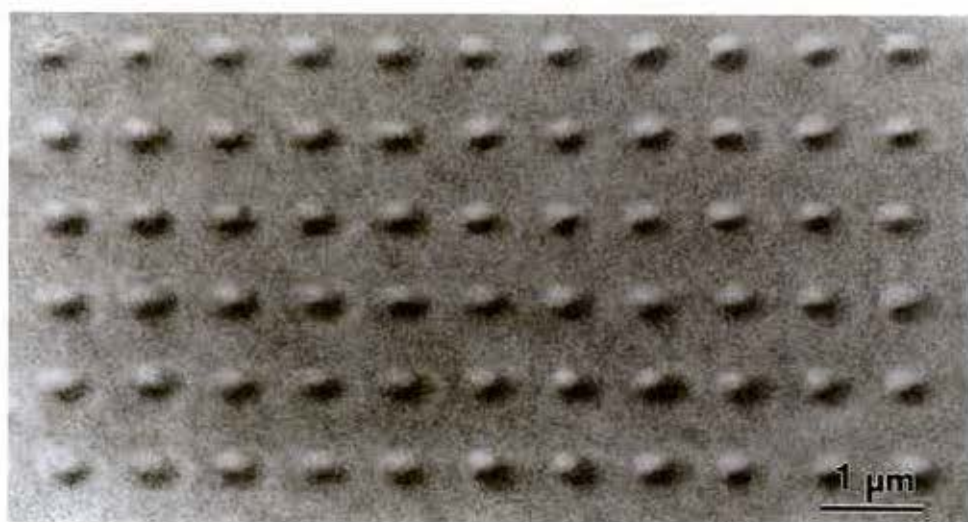


図30. 欠陥に捕捉された磁束量子

やがて近い欠陥も全てが埋まってしまうと（図30）、磁束量子はまた入りにくなりますが、さらに力がかかると、隙間にも入ってきます。磁束量子は、隙間から隙間へ、ピョンピョン飛び移りながら、侵入してきます。隙間に入った磁束量子は上から力を受けているため、隙間の真ん中ではなくて下の方に押し付けられています。“隙間”に空席がある限り、このようなホッピングによって磁束量子は移動し続けます。ところが空席が完全に埋まってしまうと、全体としてのピン止め力が強くなって、容易に動けなくなります。それでも、力を強くし続けると、これまでと全く異なった流れが生じます。

磁束量子は飛び移る空席が無いと、一列になって一斉に流れ始めるのです。この列、この列、そしてこの列です。コマ送りで見ると磁束量子が一斉に動いていることが分かります。流れはどんどん速くなっていきます。

ここまでお見せしたのは、ニオブの磁束量子の振る舞いです。こうした映像を高温超伝導体について得たいと思っています。実用化されたら、世の中がすっかり変わってしまう程の期待がかけられた高温超伝導体は、思ったようには実用化が進んでいません。渦がピン止めされずに動き回ってしまうからです。何故動きやすいのでしょうか？ — 温度が高いことはもちろんですが、層状構造をもっていることも一因です。このため磁束量子がジグザグになったり、絡み合ったり、液体のように溶けてしまったりと、いろいろ面白そうなことが言われています。しかし、磁束量子の太さが一桁も大きいために、層状構造を反映した挙動を観察するには、それに応じてサンプルを厚くしなければなりません。これまでの300kVの電子線では、そんな厚いサンプルを見ることは出来ませんでした。

このため、我々は加速電圧が1MVで、しかも干渉性の良い電子線をもった電子顕微鏡（図31）を開発したところです。電子線の干渉性は、良くなったとは言え、レーザーに比べてみれば、まだまだで足元にも及びません。考えてみれば当然です。軍事的な狙いもあって、アメリカはレーザーに、驚くほどの研究者の数と予算を投資しました。干渉性の良い電子線は我々がやってきただけで、まだ投資していないにも等しいと言えましょう。やっと立ち上がり始めたこの分野を、さらに飛躍させるには、技術を再び向上させる時だと考えて、こんな大きなものを6年がかりで開発したところです。

輝度の高い光源が、科学技術にもたらす大きな波及効果は、今更、言うまでもありません。レーザーの出現によって光の分野は蘇りました。そして現在、明るい放射光や中性子線源によって、新しい可能性が開かれつつあります。

1968年、私が電子線ホログラフィーをやり始めた電子の波紋を10分以上もかけて撮影した時、こんな巨大な装置を作るまでに至るとは夢にも思いませんでした。その時に比べると電子線の輝度は、実に4桁も向上しました。さらにこの装置で0.5Åを切る格子分解能記録も更新できました。

この装置は、高温超伝導以外にも、ミクロの世界の極限的な観察・計測手段として、様々な可能性を開いてくれるものと思われます。百分の一波長に至る位相情報を検出することによって、局所化された磁場や電場が観測可能です。さらに、いろいろな量子現象がじかに観察出来るようになると思います。5年10年かかるかもしれませんが、ご期待と同時にご支援いただけたらと思います。



図31. 1MVホログラフィー電子顕微鏡