

平成25年1月30日

電子の基本的な性質がまた明らかに

—らせん状の波面をもつ電子の物理的性質の解明—

概要

名古屋大学エコトピア科学研究所ナノマテリアル科学研究部門の齋藤晃准教授、田中信夫教授、長谷川裕也、情報科学研究科の谷村省吾教授、埼玉工業大学先端科学研究所の内田正哉准教授の研究グループは、電子の基本的な性質を明らかにしました。

物体の運動には、直進（並進）と回転があります。並進運動と回転運動の大きさは、それぞれ「運動量」と「角運動量」と呼ばれます。角運動量には、「スピン角運動量」と「軌道角運動量」があります。太陽をまわる惑星の運動でいえば、それぞれ惑星の自転運動と公転運動を表すものです。電子が自転していること、つまりスピン角運動量をもつことはすでに認識されています。ごく最近、自由空間を運動する電子が軌道角運動量もちうることが発見され、現在この電子の物理的性質の解明や計測技術への応用研究が世界的に行われています。

研究グループは、軌道角運動量の異なる2つの電子を生成し、それらを重ね合わせる実験を行いました。その結果、それらが互いに干渉し合うこと（波のように強め合ったり弱め合ったりすること）を世界で初めて証明しました。電子が発見されて100年以上も経った今、電子の基本的な性質がまたひとつ明らかになったこととなります。

本研究成果は、不確定性原理*や相補性*などの量子力学の基礎研究に資するものです。さらに革新的な電子顕微鏡の開発など幅広い分野に寄与するものとして期待できます。

本研究成果は、日本物理学会が発行する国際ジャーナル『Journal of Physical Society of Japan』に掲載されます。

1. 背景

電子は1897年に発見され、照明や通信、さらにはコンピューターなどわれわれの生活のなかで役に立つ働きをしています。空間中を伝わる光や電子は粒子としての性質と波としての性質をもつことが知られています。波であることを示す最も顕著な現象は「干渉」です。これは、波の山と谷が重なり合ったり弱め合ったりする現象です。いまから200年ほど前、英国のT. ヤングは2つのスリットを設けた板に光を入射し、後方のスクリーン上で干渉縞を観察しました。これは、光が波としての性質をもつ証拠となっています。1989年、外村はひとつひとつの電子が干渉することを電子顕微鏡のなかで確かめました。2つのスリットに電子をひとつずつ入射する操作を多数回繰り返したところ、スクリーン上に干渉縞が現れることを見出したのです[1]。

波だからといって必ず干渉現象を示すとは限りません。光には偏光方向*⁴が互いに垂直な2つの状態があります。2つのスリットに互いに異なる偏光状態だけを通すフィルター（偏光板）をそれぞれ設置すると干渉縞が消失します[2]。これは偏光状態の異なる光どうしは干渉しないことを示しています。同様にスピン（自転）の向きの異なる電子どうしも干渉しないと考えられています[3]。

2010年に、研究グループの内田と上述の外村により軌道角運動量もち自由空間を伝播する電子が作り出されました[4]。通常の電子の波面は平坦ですが、この電子は波面がらせん状であるという特徴をもって

います。そこで研究グループは「軌道角運動量の異なる電子は干渉するか？」という最も基本的な物理的性質の解明を目指しました。この問題を解決するために、さまざまな軌道角運動量をもつ電子を生成し、それらを重ね合わせ、干渉縞を観察する実験を行いました。

2. 実験手法

研究グループは、さまざまな軌道角運動量をもつ2つの電子による干渉実験をヤングの実験と同じレイアウトで行いました。軌道角運動量をもつ電子は特殊な形状含む回折格子により生成することができます。2重スリットの各スリット位置に回折格子を配置するため、研究グループはまず厚さ200nmの白金薄膜を作製し、FIB*⁵による微細加工を行いました。作製した回折格子を透過型電子顕微鏡*⁶中に挿入し、電子線を照射したところ、2つの回折格子それぞれから回折波として軌道角運動量をもつ電子波が生成されました。それら2つの電子波をスクリーン上で重ね合わせ、干渉現象を示すかどうかを観察しました。

同じ軌道角運動量をもつ電子の場合、ヤングの実験と同様に干渉を生じることが期待され、実験でもその期待通りに干渉縞がみられました。軌道角運動量が異なる場合、光の偏光や電子のスピンの場合の類推から干渉しないように思われましたが、本実験で干渉することが確認されました。この結果から、電子の軌道角運動量は電子のスピンや光の偏光とは性質の異なる物理量であることが初めて明らかになりました。

さらに、干渉する2つの電子の軌道角運動量の差を反映して、干渉縞の模様が変化することを発見しました。つまり、どちらか一方の軌道角運動量がわかっているならば、干渉縞から電子の軌道角運動量が決定できることを明らかにしました。

3. 研究の意義・今後の期待

今回の研究によって、異なる軌道角運動量をもつ電子が干渉することが初めて確認されました。量子力学では、干渉現象が生じるためには、測定する物理量の間にはハイゼンベルクが見出した不確定性関係が成り立つことが必要だとされています。今回の実験は軌道角運動量と位置あるいは軌道角運動量と並進運動量の不確定性関係を実験的に示したことになります。

また、本研究で示した軌道角運動量の計測法を応用することにより、軌道角運動量をモニターするまったく新しいタイプの電子顕微鏡法の開発等が期待されます。

ここで紹介した研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A) (課題番号 23241036) および三菱財団助成で行われました。

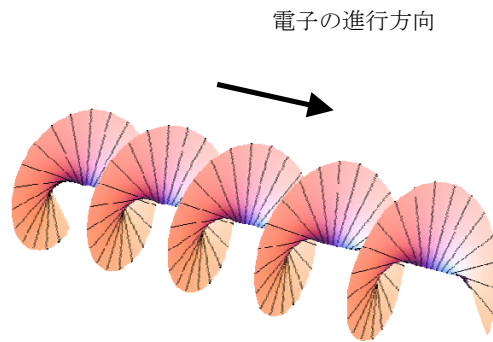


図1 軌道角運動量をもつ電子の波面。

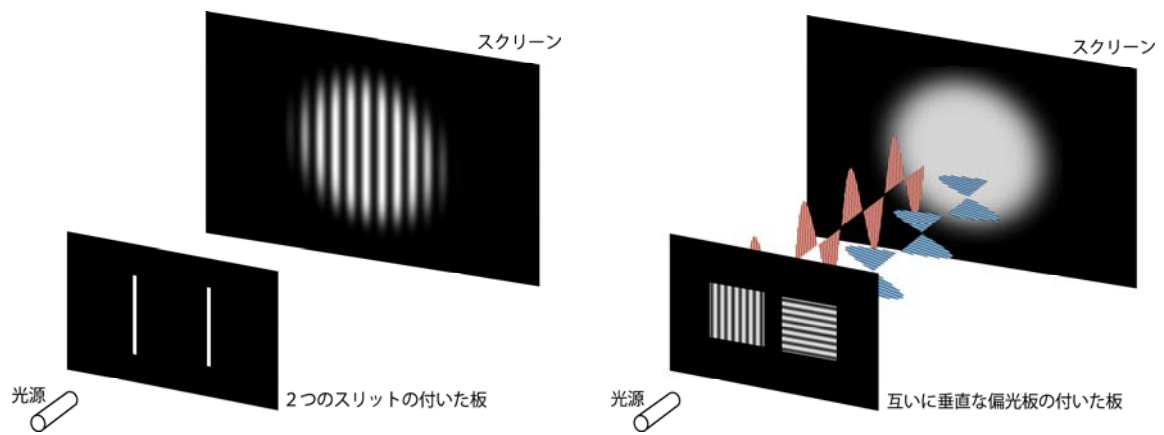


図2 2つのスリットを通過した光は互いに干渉し、スクリーン上に干渉縞をつくる。しかし、互いに垂直な直線偏光の光は干渉しない。

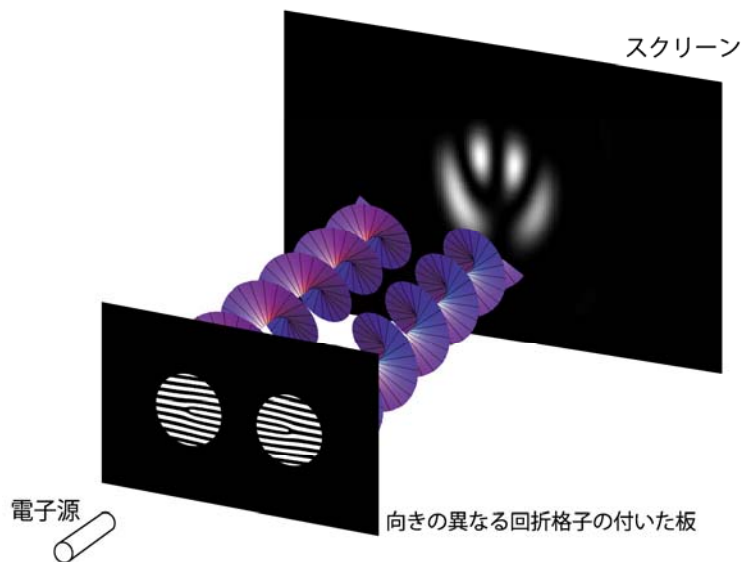


図3 本研究では互いに軌道角運動量の異なるらせん波を生成して重ね合わせた。その結果、それらが干渉していることを示す縞が確認された。

*1 軌道角運動量

粒子描像では、重心の移動をともなう回転運動による運動量である。波動描像では、伝播軸のまわりを一周する際の位相の変化量に対応する。位相の変化は 2π の整数倍に限られる。

*2 不確定性関係

量子力学では、たとえば位置と運動量を正確に同時決定できないとされている。このような物理量の対の間の関係を不確定性関係と呼ぶ。

*3 相補性

一つのが粒子と波動のように同時にはあり得ない二つの性質を併せもつこと。どちらか一方の性質を顕在化させるためには、他方の性質を抑制しなければならないような関係になっている。

*4 偏光

光は、電場と磁場が進行方向に対して垂直に振動しながら伝播する横波と考えられている。電場・磁場の振動方向は互いに垂直な2方向の成分に分解することができ、一般に任意の光は、それらの重ね合わせで記述される。一方向の振動だけからなる光は直線偏光と呼ばれる。2方向あることにともなって、互いに垂直な2つの直線偏光が存在する。

*5 FIB

Ga イオンの収束ビームによって試料を切削する装置。0.01 ミクロンレベルの加工が可能である。Focused ion beam 装置の略。

*6 電子顕微鏡

薄膜化した試料に高速電子線を照射し、透過した電子線を結像する装置。電子線の波長が極めて短いため、原子レベルの観察が可能である。

参考文献など

- [1] A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T. Kawasaki, and H. Ezawa: Am. J. Phys. 57 (1989) 117. この実験は『世界で最も美しい10の実験』（日経BP社、2006年）のひとつに選ばれている。
- [2] A. Fresnel and F. Arago: Ann. Chim. Phys. X (1816) 288, Series 2.
- [3] 2重スリット実験でもうひとつ大事な点は、どちらのスリットを通過したか特定できた場合、干渉縞は現れないということである。偏光板を設置することによりどちらのスリットを通過したかが特定可能となり、干渉縞が消える。
- [4] M. Uchida and A. Tonomura: Nature 464 (2010) 737.