

V字型二重スリットによる電子波干渉実験

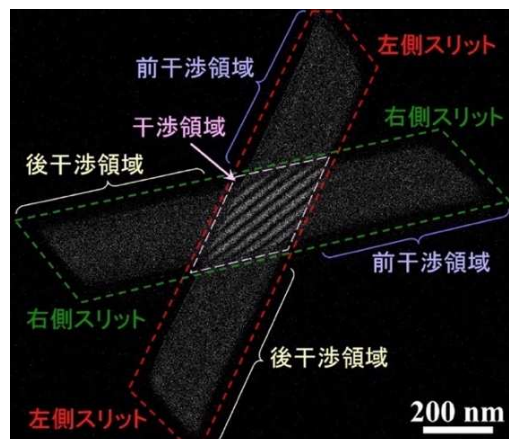
－「波動／粒子の二重性」の不思議の実証を一步進める－

理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター創発現象観測技術研究チームの原田研上級研究員、大阪府立大学大学院工学研究科の森茂生教授、名城大学理工学部児玉哲司教授らの共同研究グループ※は、株式会社日立製作所研究開発グループと共同で、最先端の実験技術と新しく開発したV字型二重スリット^[1]を用いて、「波動／粒子の二重性^[2]」に関する実験を行い、電子の経路情報と干渉^[3]の発現の関係を明らかにしました。

本研究成果は、量子力学が教える波動／粒子の二重性の不思議の実証を一步進め、電子の伝搬経路と干渉との関係の解明に貢献すると期待できます。

今回、共同研究グループは、ホログラフィー電子顕微鏡^[4]の結像光学系と電子波の干渉装置である電子線バイプリズム^[5]を利用して、V字型二重スリットを焦点の合った（伝搬距離ゼロ）干渉条件で観察することに成功しました。これにより、粒子として検出された電子の経路をさかのぼり、左右どちらのスリットを通過したかを明らかにできる場合があること、経路情報が不足し通過スリットを同定できない場合にのみ干渉縞^[3]が観察されることを確認しました。これは、二重スリットを通過して干渉した電子を分類する究極の実験「which-way experiment^[6]」への手がかりを得る結果といえます。

本研究は、日本応用物理学会の速報誌『*Applied Physics Express*』のオンライン版（1月6日付）に掲載されました。



V字型二重スリットの干渉像（経路が同定できない重畳領域でのみ、干渉縞が観察される）

※共同研究グループ

理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発現象観測技術研究チーム

上級研究員 原田 研 (はらだ けん)
 テクニカル・スタッフ | 鳶田 恵子 (しまだ けいこ)
 小野 義正 (おの よしまさ)

大阪府立大学大学院 工学研究科

教授 森 茂生 (もり しげお)

名城大学 理工学部

教授 児玉 哲司 (こだま てつじ)

株式会社日立製作所 研究開発グループ 基礎研究センタ

主任研究員 明石 哲也 (あかし てつや)

主任研究員 高橋 由夫 (たかはし よしお)

研究支援

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科研費基盤研究 (B) 「単一電子による電子波干渉の遡及計測 (研究代表者: 原田研)」 による支援を受けて行われました。

1. 背景

19世紀初頭に行われたヤングの「二重スリット実験」は、光の波動説を決定づけた実験として有名ですが、電子のような粒子を用いた二重スリット実験は、量子力学の基礎である「波動／粒子の二重性」を示す実験として、現在も継続的に研究されています。

それは量子コンピュータのような実用的な観点だけでなく、「1個の電子が二つのスリットを同時に通り抜け、波として干渉する」という、現実の世界では経験し得ない不思議な現象への好奇心、あるいは、現実離れしたその解釈への好奇心に根ざしていると思われる。多くの研究者が、粒子としての電子の伝搬経路を見だし、粒子の干渉とはいかなる現象なのか知りたいと考えています。しかし、量子力学によれば、自然は粒子と波動の確定的な同時計測を許していません。そのため、これまでの実験結果は「波動／粒子の二重性の不思議を見せる実験」とどまっていました。

共同研究グループは、波動／粒子の二重性の不思議の実証を前進させ、電子の伝搬経路と干渉現象との関係の解明を目指し、現在、世界で最も可干渉性^[7]の高い電子線が利用できるホログラフィー電子顕微鏡を用いて、2017年より実験を始めました。

2. 研究手法と成果

1) 二重スリットを用いた干渉光学系の検討

一般に、従来の二重スリットを用いた干渉実験では、二重スリットに可干渉な波を入射し、両スリットで分割・通過した二つの波がスリットを出た後、伝搬する過程で広がり自然に重なる性質を利用します (図 1a)。しかし、スリットが十

分に細い場合には、スリットを通過した波は急速に広がり互いに重なり合うため、どちらのスリットを通過した波かを区別するのは困難でした。

そこで今回は、対物レンズを用いて結像^[8]させる「結像光学系」を採用しました。図 1b に示した結像光学系では、物面に置いた二重スリットの像が焦点の合った状態で、像面で観察されます。対物レンズの性能が十分に高く、結像光学系の収差など像のひずみが無視できる状況では、物面でスリットを通過した波は全てスリットの像に収束しますが、物面の波と像面の波は区別できません。これを共役な関係^[8]と呼びます。そのため、例えば、左側のスリットを通過した波（赤色）は全て右側のスリットの像（赤色）に収束し、右側のスリットを通過した波（緑色）は左側のスリットの像（緑色）に収束します。左右が入れ替わるのは、対物レンズを 1 段だけ用いた結像の特徴であり、2 段結像すれば、元の左右の関係に戻すことができます。

図 1b の結像光学系では、二重スリットの像として、それぞれのスリットを通過した波を観察できますが、二つの波は重ならず、干渉を発現させることはできません。そこで、波を干渉させる装置の「バイプリズム」を用いて結像条件を保ったまま二つの波を重ね合わせ、干渉現象（干渉縞）を観察する光学系を考案しました（図 1c）。なお、この干渉結像系ではバイプリズムを 2 段用いていますが、これは二つの波を重ね合わせる条件を精密に制御するため、2 波を重ね合わせるだけならば、バイプリズムは 1 段でも実験は可能です。

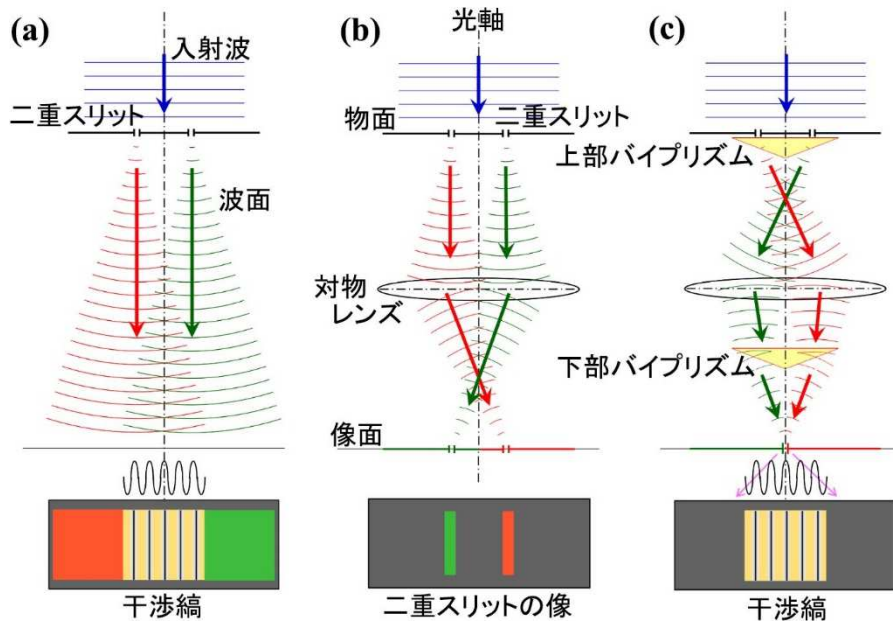


図 1 二重スリットを用いた干渉光学系

- (a) 従来の二重スリット干渉光学系。二重スリットに可干渉な波（青矢印）を入射し、両スリットで分割・通過した二つの波（赤と緑の矢印）は、急速に広がり互いに重なり合うため、それぞれがどちらのスリットを通過した波かを区別できない。
- (b) 二重スリットの結像光学系。対物レンズを用いることで、物面に置いた二重スリットの像が焦点の合った状態で、像面で観察される。
- (c) バイプリズムを用いた干渉結像系。2 段のバイプリズムにより、結像条件を保ったまま二つの波を重ね合わせ、干渉現象（干渉縞）を観察する。

2) 焦点の合った（伝搬距離ゼロ）の条件での二重スリット干渉実験を考案

図 2 に、今回実施した伝搬距離ゼロでの二重スリット干渉実験の光学系の概要を示します。スリットを通過した二つの波の重なり具合は、対物レンズの下に配置した下部バイプリズムで、二つの波の偏向角度（屈折角度）を変えて制御します。図 2a は下部バイプリズムによる二つの波への偏向角度が小さいために 2 波が重ならない、干渉を発現する前の条件（前干渉条件）、図 2b はスリットを通過した二つの波が重なり合い、干渉を発現している条件（干渉条件）、図 2c は二つの波への偏向角度が大きくなり、二つのスリット像の位置が左右入れ替わった条件です（後干渉条件）。後干渉条件では、像面の上方で交差・重なり合い、干渉を発現していたと考えられる二つの波が、その後分かれて個別に観察されることとなります。

また、図 2a では、物面上の左側のスリットを通過した波（赤色）が像面では右側のスリット像に収束し結像（赤色）し、物面上の右側のスリットを通過した波（緑色）が像面では左側のスリット像（緑色）に収束し、図 2c では図 2a の左右逆となりますが、それぞれの伝搬過程において、上下のバイプリズムのどちら側を通過したかが明らかです。すなわち、電子を粒子と見なした場合の伝搬経路を波面として赤色または緑色で表示した程度の範囲で同定することが可能です。

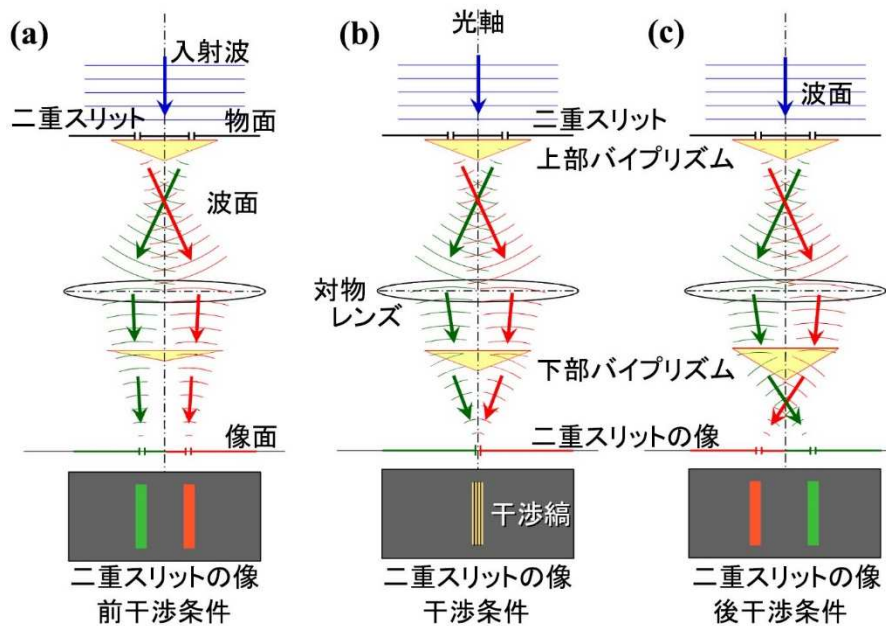


図 2 伝搬距離ゼロでの 2 波干渉の様子

焦点が合った状態で観察される二重スリットの左右の像の位置を、下部バイプリズムにより 2 波の偏向角度を変えて制御する。

- (a) 前干渉条件。下部バイプリズムによる二つの波への偏向角度が小さいために 2 波が重ならない、干渉を発現する前の条件。
- (b) 干渉条件。スリットを通過した二つの波が重なり合い、干渉（干渉縞）を発現している条件。
- (c) 後干渉条件。下部バイプリズムによる二つの波への偏向角度が大きくなり、二つのスリット像の位置が入れ替わった条件。

3) 伝搬距離ゼロでのV字型二重スリットによる電子波干渉実験の電子光学系

実験では、「V字型二重スリット」を用いることで、三つの干渉条件（前干渉条件、干渉条件、後干渉条件）を一つの視野で同時に観察する電子光学系を考案しました（図3）。V字型二重スリットを上部電子線バイプリズム（電子波を干渉させる装置）上に結像させることで、二重スリットの波と上部電子線バイプリズムの波は共役な関係となり、図2に示したように二重スリットと上部電子線バイプリズムとは、光学的には同一平面上に配置されたこととなります。そして、第二拡大レンズの下側に配置した下部電子線バイプリズムへの印加電圧により、二つの波の重なり具合を制御しました。

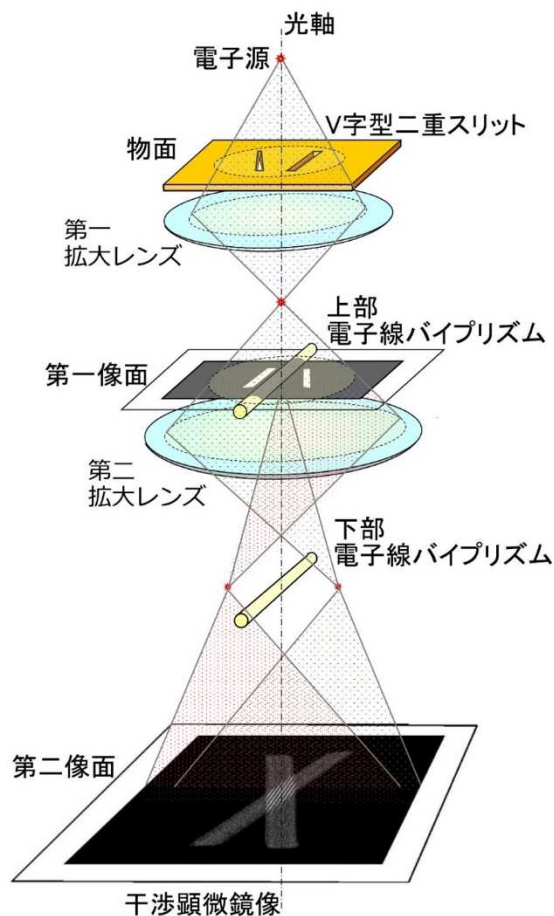


図3 伝搬距離ゼロでの二重スリットによる電子波干渉実験の光学系

V字型二重スリットの像を上部電子線バイプリズム上の第一像面に結像させることで、二重スリット上の電子波と上部電子線バイプリズム上の電子波は区別できない共役な関係となり、光学的にはV字型二重スリットと上部電子線バイプリズムとは同一平面上に配置されたことになる。そして、第二拡大レンズの下側に配置した下部電子線バイプリズムへの印加電圧の大きさにより、第二像面に結像される二つのスリットを通過した電子波の重なり具合を制御する。

4) 実験結果

実験はホログラフィー電子顕微鏡を用いて、電子を一つずつ検出できるくら

いに電子の数を少なくした低密度照射条件 (0.015 電子/画素/秒) で実験を行いました。その結果、下部電子線バイプリズムへの印加電圧が大きくなるに従い、V字型二重スリットの像が下側から重なり始め、中央部で重なり、スリット上部で重なった後、二つのスリット像が入れ替わりました (図4)。両スリットの像が重なった領域でのみ干渉縞が観察され、その前後の領域では干渉縞は観察されず、一様な電子分布となりました。

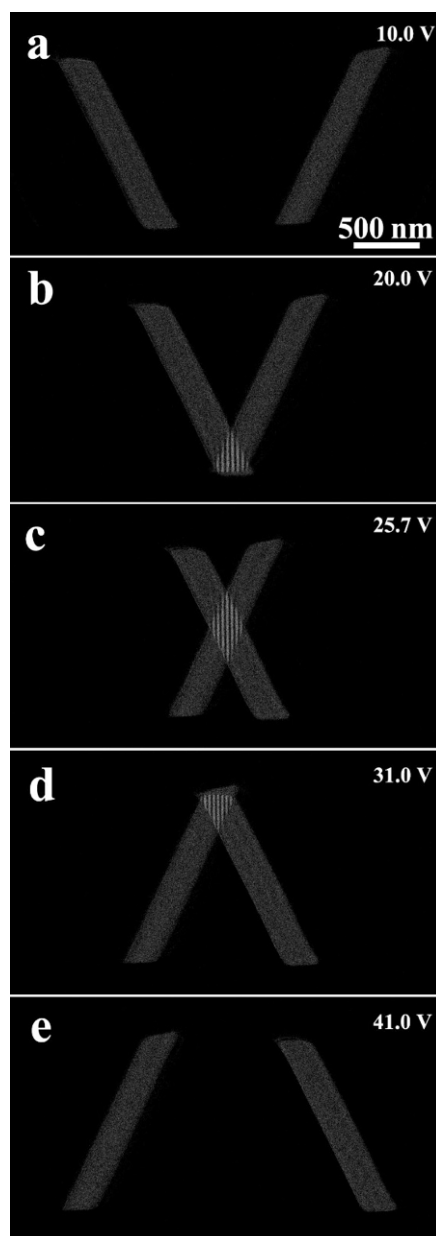


図4 V字型二重スリットによる干渉実験の様子

下部電子線バイプリズムへの印加電圧が 10.0V から大きくなるに従い、V字型二重スリットの像が下側から重なり始め (b)、25.7V では中央部で重なり (c)、31.0V においてスリット上部で重なった後、二つのスリット像が入れ替わった (e)。

5) 実験結果の考察

図5に図4cの拡大像を示します。それぞれの一つの点が検出された一つの電子に対応しており、スリット像が重ならず単スリット像となっている部分では、一様な点の分布が見られます。一方、二つのスリット像が重なった部分では、点の分布が縞模様を形成しています。この縞模様が、電子が波として干渉していることを示しています。

図中、赤の破線と緑の破線で、左右どちらのスリットを通過した電子によるスリット像かを示しています。前干渉領域、後干渉領域いずれにおいても、それぞれのスリット像で点として検出された電子は、図2で示したように経路をさかのぼることが可能で、電子線バイプリズムのどちら側を通過し、どちらのスリットを通過したかを同定できます。しかし、両スリット像が重なった干渉領域では、実験者が二つの電子の経路を決める情報を持っていないことから、電子を点として検出できていても、どちらのスリットを通過し、電子線バイプリズムのどちら側の経路を通過してきたのかは決定できません。そして、この場合にのみ、干渉縞が観察され、あたかも、電子が両方のスリットを同時に通過し、電子線バイプリズムの両側の経路を同時に通過してきたかのように見えるわけです。

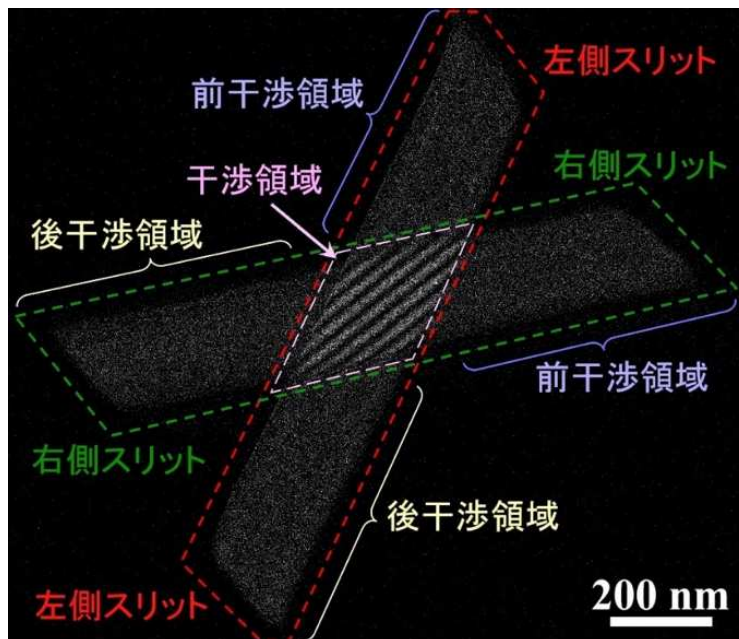


図5 V字型二重スリットによる電子波干渉の様子（図4cの拡大図）

前干渉領域、後干渉領域いずれにおいても、左右それぞれのスリット像で点として検出された電子は、経路をさかのぼることが可能で、電子線バイプリズムのどちら側を通過し、どちらのスリットを通過したかを同定できる。一方、両スリット像が重なった干渉領域（干渉縞）では、電子を点として検出できていても、どちらの経路を通過してきたのかは決定できない。

これは、粒子による干渉の不思議さをあらためて教えてくれる結果です。二つのスリット像を重ね合わせるか否かは、図3に示したように今回の光学系では一番下に位置する下部電子線バイプリズムが与える偏向角度によります。その

偏向角度の大きさは実験者が決めています。さらに、この偏向角度は、電子がV字型二重スリットを通過し、上部電子線バイプリズムを通過した後で加えられたものです。電子は、下部電子線バイプリズムを通過するまで自分の行先を知らないはずですが、その行先によって干渉の有無、すなわち両方のスリットを通過したと振る舞うのか、どちらか片方のスリットを通過したと振る舞うのかが変わるのです。

通常、量子力学では、どちらのスリットを通過するか見分ける実験を行うと、その実験が与える影響によって電子の軌道が乱されてしまい、干渉が発現せず、干渉縞が観察されないと説明されます。今回の研究では、どちらのスリットを通過したかを判定する実験は行っていません。電子を検出した後に、検出位置からさかのぼって、電子の経路と通過したスリットの同定を試みたものです。しかし、結果は従来と同じで、どちらのスリットを通過したか見分けられた場合には干渉は発現せず、見分けられなかったときにだけ干渉が発現しました。

以上の結果から、「電子がどちらのスリットを通過し、どちらの経路を通ったかの情報が不足している場合にのみ干渉が発現する」という解釈ができます。これは、近年光学の分野で偏光^[9]を用いて実施されている量子光学実験と符合する結果です。

3. 今後の期待

今回、共同研究グループは、量子力学の基礎である波動／粒子の二重性への理解を進め、電子の伝搬経路と干渉現象との関係の解明への手掛かりを得たと考えています。今後、電子検出器の時間分解能を上げるなど、現在の電子線技術をさらに発展させることで、不確定性原理^[10]と干渉現象の関係を実験的に捉える「which-way experiment」など、量子力学の根幹に迫りたいと考えています。

4. 論文情報

<タイトル>

Electron interference experiment with optically zero propagation distance for V-shaped double slit

<著者名>

Ken Harada, Tetsuya Akashi, Yoshio Takahashi, Tetsuji Kodama, Keiko Shimada, Yoshimasa A. Ono, and Shigeo Mori

<雑誌>

Applied Physics Express

<DOI>

[10.35848/1882-0786/abd91e](https://doi.org/10.35848/1882-0786/abd91e)

5. 補足説明

[1] 二重スリット

19世紀初頭に行われたヤングの「二重スリット」の実験は、光の波動説を決定づけた実験として有名である。20世紀に量子力学が発展した後は、粒子を用いた場合には、量子力学の基礎である「波動／粒子の二重性」を示す実験として、朝永振一郎やR. P. ファインマンにより提唱された。朝永やファインマンの時代に思考実験として考えられていた電子による二重スリットの実験は、その後の科学技術の発展に伴い、電子だけでなく、光子や原子、分子でも実現が可能となり、さまざまな実験装置・技術を用いて繰り返し実施されている。どの実験も量子力学が教える波動／粒子の二重性の不思議を示す実験となっている。

[2] 波動／粒子の二重性

量子力学が教える電子などの物質が「波動」としての性質と「粒子」としての性質を併せ持つ物理的性質のこと。電子などの場合には、検出したときには粒子として検出されるが、伝搬中は波として振る舞っていると説明される。二重スリットによる干渉実験と密接に関係しており、単粒子検出器による干渉縞の観察実験では、単一粒子像が積算されて干渉縞が形成される過程が明らかにされている。電子線を用いた単一電子像の集積実験は、『世界で最も美しい10の科学実験（ロバート・P・クリス著、日経BP社刊）』にも選ばれている。

[3] 干渉、干渉縞

波を山と谷といううねりとして表現すると、干渉とは、波と波が重なり合うときに山と山が重なったところ（重なった時間）ではより大きな山となり、山と谷が重なり合ったところ（重なった時間）では相殺されてうねりが消えてしまう現象のことをいう。この干渉の現象が、二つの波の間で空間的・時間的にある広がりを持って発生したときには、山と山の部分、谷と谷の部分が線上に並んで配列する。これを干渉縞と呼ぶ。

[4] ホログラフィー電子顕微鏡

電子線の位相と振幅の両方を記録し、電子線の波としての性質を利用する技術を電子線ホログラフィーと呼ぶ。電子線ホログラフィーを実現できる電子顕微鏡がホログラフィー電子顕微鏡である。ミクロなサイズの物質の内部や空間中の微細な電場や磁場の様子を計測できる。

[5] 電子線バイプリズム

電子波を干渉させるための干渉装置。光軸上にフィラメント電極（直径1 μm 以下）と、その両側に配された並行平板接地電極から構成される。フィラメント電極に印加された電圧により生じる円筒電界により、電子線は互いに向き合う方向、あるいは互いに離れる方向に偏向される。二つのプリズムを張り合わせた光学素子として作用するため、バイプリズムと呼ばれている。

[6] which-way experiment

不確定性原理によって説明される「波動／粒子の二重性」と、それを明示する二重スリットの実験結果は、日常の経験とは相容れないものとなっている。粒子としてのみ検出される1個の電子が、二つのスリットを同時に通過するという説明（解釈）には、

感覚的にはどうしても釈然としないところが残る。そのため、粒子（光子を含む）を用いた二重スリットの実験において、どちらのスリットを通過したかを検出（粒子性の確認）した上で、干渉縞を検出（波動性の確認）する工夫を施した実験の総称を which-way experiment という。しかし、いまだに本当の意味での成功例はないと考えられている。

[7] 可干渉性

コヒーレンス度ともいう。複数の波と波とが干渉するとき、その波の状態が空間的、時間的に相関を持っている範囲では、同じ干渉現象が空間的な広がりを持って、時間的にある程度継続して観測される。この範囲、程度によって波の相関の程度を計測できる。この波の相関の程度が大きいときを、可干渉性が高い、あるいは可干渉であると表現している。

[8] 結像、共役な関係

物体（試料）をフォーカス（焦点）の合った状態で像として観察することを結像と呼び、その光学系を結像光学系という。顕微鏡や望遠鏡、カメラなど一般に対象物を観察する光学系は、結像光学系である。このとき、観察対象である物体とその像は、共役な関係にあると表現する。収差など像のひずみを伴わない結像光学系では、物体から発した光（波動）と像を結ぶ光（波動）とは区別がつかず、同じものとして議論できる。今回の研究では、結像光学系のこの性質を利用して、V字型二重スリットの像を観察し、実効上の伝搬距離ゼロを実現した。

[9] 偏光

光は電界や磁界が進行方向に垂直な方向に振動しながら伝搬する電磁波であるが、この振動方向に偏りがある場合、あるいは規則的に時間的に変化する場合、この光を偏光と呼ぶ。自然光は、無規則にあらゆる方向に振動しながら伝搬する電磁波である。

[10] 不確定性原理

1927年、ハイゼンベルグにより提唱された量子力学の根幹を成す原理。電子などの素粒子では、その位置と運動量の両方を同時に正確に計測することはできないという原理のこと。これは計測手法に依存するものではなく、粒子そのものが持つ物理的性質と理解されている。「位置と運動量」の組み合わせのほかに、「エネルギーと時間」や「粒子数と位相」など複数の不確定性ペアが知られている。

6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。
理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発現象観測技術研究チーム
上級研究員 原田 研（はらだ けん）
TEL：049-296-7240 FAX：049-296-7247
E-mail：kharada[at]riken.jp

大阪府立大学大学院 工学研究科
教授 森 茂生（もり しげお）



名城大学 理工学部
教授

児玉 哲司（こだま てつじ）

<機関窓口>

* 今般の新型コロナウイルス感染症対策として、理化学研究所および大阪府立大学では
在宅勤務を実施しておりますので、メールにてお問い合わせ願います。

理化学研究所 広報室 報道担当

E-mail : ex-press[at]riken.jp

大阪府立大学 広報課

E-mail : koho[at]osakafu-u.ac.jp

名城大学 渉外部 広報課

TEL : 052-838-2006 FAX : 052-833-9494

E-mail : kouhou[at]ccmails.meijo-u.ac.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。
