

2023年ノーベル物理学賞解説：

人類が観察できる究極の速さの世界—アト秒の世界の開拓

この世界には”カメの歩み”と言われるようなゆっくりとした運動もあれば、ランナー、自動車、新幹線、飛行機…のような、目にもとまらぬ速さの運動もあります。こうした目では追いつけない高速な運動を見るにはどのようにすればよいのでしょうか？

スマホのカメラでもスローモーション撮影をすれば、走っている人をコマ送りで撮影できるかもしれません。新幹線のような速い運動も、テレビ局などが使うハイスピードカメラを使えばまるで静止画のように撮影することができるでしょう。ではさらに、もっと、もっと速い運動はどのようにすれば見ることができるのでしょうか？

物質を作っている原子、分子の世界では、ナノ秒 (10^{-9} 秒=0.000000001 秒)、ピコ秒 (10^{-12} 秒=0.000000000001 秒)、さらにはフェムト秒 (10^{-15} 秒=0.000000000000001 秒) といった極めて速い「超高速」な時間の間に運動が終わってしまいます。科学者たちはこうした「超高速」な世界を調べるのに、一瞬だけ点灯する光を使用します。フラッシュ撮影 (ストロボ撮影) を思い浮かべてみてください。照明の下で残像しか見えないような速い物体も、暗い中で一瞬だけフラッシュを照らせば、その瞬間の像だけを見ることができます。同じように、一瞬だけ光る光 (「パルス光」と言います) を物質に当てれば、当たったその瞬間に原子、分子がどのようにになっているかを知ることができるわけです。

レーザー光源の発達によって、そのような極めて短い時間だけ光る光が得られるようになり、原子や分子の世界で極めて短い時間に起こる高速な運動・現象を詳しく調べられるようになりました。そして現在、人類が到達できる最も高速な領域はフェムト秒を越えて、「アト秒 (10^{-18} 秒=0.000000000000000001 秒)」の領域に至っています。2023年ノーベル物理学賞は、こうしたアト秒の時間だけ光るパルス光を生み出すにはどのようにすればよいかを発見、開発した Pierre Agostini 博士、Ferenc Krausz 博士、Anne L’Huillier 博士の3氏に対して贈られました。

* * *

アト秒のパルス光を作るには、端的には

- ①高エネルギーで (少し難しい言い方をすれば波長が短くて)、かつ
- ②いろいろな色 (波長) を含む

ような光を作り出す必要があります。このような光を何かから直接得ることが難しいため、「高次高調波発生」と呼ばれる現象を使って、低エネルギーな光を高エネルギーな光に変換することによって作り出します。この現象は以前から知られていましたが、欲しい光が高エ

エネルギーになればなるほど急激に弱くなってしまおうと考えられていました。しかし 1983 年に L'Huillier 博士らは、従来の実験よりもより低エネルギーな光を用いて高次高調波を発生させたところ、十分に高エネルギーな高次高調波も弱まることなく出力されることを明らかにしました。そのメカニズムは L'Huillier 博士らを始めとした様々な物理学者によって解明され、アト秒パルス生成の手法が示されました。

さらに、このようにして得られた光は、具体的にどれくらいの時間光っているのかを確認する必要があります。Agostini 博士らは、元の低エネルギーの光と組み合わせることによって、光っている時間を測定する手法「RABBIT」を開発し、彼らが得たアト秒パルス光がわずか 250 アト秒の時間だけ光っていることを確認しました。

またこのようにして得られたアト秒パルス光は普通 1 回だけ光るのではなく、短い時間の中に繰り返し何度も光っていることが知られています。これでは原子・分子の世界の本当の「1 コマ」のみを観察することができません。Krausz 博士らは、発生に用いる低エネルギーな光を巧みに制御することによって、1 回しか光らないアト秒パルスの生成を可能にしました。

* * *

以上のように、今回のノーベル賞を受賞した 3 氏、そしてそれ以外にも多くの科学者たちによって、人類はアト秒という究極の速さの世界を観察できるようになりました。しかし、これによって我々は何を知ることができるのでしょうか？

原子は中心にある原子核とその周りをまわる電子によってできています。原子と原子が結合していくと、多種多様な分子や結晶を作り、それらが私たちの体をはじめ、身の回りの物を形作っています。電子はこの結合をつかさどっており、また物質の多くの性質が電子の運動によって決まっています。ですから、この電子の運動の様子を知ることは、物質の性質を理解し、さらに人類にとって有益な新しい材料を設計・開発していくうえで重要であると言えます。

そしてこの電子の運動が、実はアト秒程度の時間で起こっているのです。一例をあげると、かの有名な物理学者・アインシュタインがノーベル賞を受賞した業績である「光電効果」があります。これは物質に光をあてると電子が飛び出てくるという現象です。この現象は極めて高速に起こり、これまでは観測することができなかつたため、物理学者たちも「一瞬でおこっている」とし理解できていませんでした。しかし、Krausz 博士や L'Huillier 博士らによって、この現象がアト秒の時間で起こっている様子が明らかにされたのです。

アト秒という極めて短い時間の中に起こる現象は、まだまだ未解明なことが沢山あります。現在、アト秒の研究は物理学に留まらず、化学、材料科学、生物学などは幅広い分野へと広がりながら、引き続き全世界（※）で研究が行われ続けています。

※日本では東大、理研、NTT などの研究機関で実験的研究が行われています。横浜国立大学先端光科学グループでも、NTT のチームと共同でアト秒の研究に取り組んでいます。

(文章)

横浜国立大学 理工学部／大学院理工学府

先端光科学グループ (武田・片山・玉置・草場研究室)

助教 草場 哲