

第10章 波と粒子

私たちの世界は物質で構成されています。その物質について、私たちは何を知っているでしょうか。

10.1 原子論

物質は、見たままのとおり連続的なものである、という認識と、つぶつぶから構成されている、という認識とは、両方ともに古くからありました。人類が、物質はつぶつぶ（粒子）で構成されている、とはっきり認識したのは、おおよそ100年ほど前です。それ以前には、物質が粒子で構成されているということを前提に議論を組み立てた学者が、批判されて最後には自殺してしまう事件もあったくらいです。

しかし、やがて原子論・分子論が定着するようになります。それでは、どのような考えから原子論・分子論が支持されるようになったのでしょうか。実際の科学者の意図とは別に、私たちが慣れ親しんだABCで整理して示してみます。

- A 気体（例えば、水素と酸素）が反応して、別の気体（例えば水蒸気）を作るとき、温度と圧力をそろえると、体積の比率が簡単な整数比になるのはなぜか？
- B 気体は分子や原子でできているからである。
- C 気体が分子や原子でできているならば、...なはずなので、それを調べる。

このように考えることはできても、分子や原子が存在しているから起こる現象が、なかなか見つからなかったのが、確かめることができませんでした。逆に、次のように反撃されます。

- C 気体が分子や原子でできているならば、非常に小さな顕微鏡で見えるはずであるので、顕微鏡で観察してみる。

残念ながら、分子や原子は、基本的には見ることはできません。

しかし、やがて、分子や原子の存在は確かなものと考えられるようになります。最も決定的な研究は、次のような研究でした。

- A ?
- B 目に見えない細かな粒子が、乱雑に衝突するからである。
- C 分子が運動していることを前提に、がっつり理論計算して、理論計算と実験結果が一致するか確かめる。

ここで、Aは何でしょうか？実はブラウン運動です。

- A なぜブラウン運動が起こるのか？

仮説 B で述べていることは、こういうことです。顕微鏡で見える粒子に、顕微鏡では見ることができないもっと細かな粒子（分子）が衝突している。分子の運動はバラバラなので、時々、とても速い分子に衝突すると、その反動で揺らぐ。そういうことが起こっているのではないか、ということです。続いて、検証 C は、今まで知られている情報を基にして、理論計算すれば、その揺らぎの程度を計算できる。これお実験と比較しよう、というわけです。なお、がっつり理論計算したのは、前もお話したアインシュタインです。そして、アインシュタインの理論計算と比較できるような実験をペランが行いました。

世界は原子のような粒子で構成されています。粒子の運動は、ニュートンによる運動の法則で予知することができます。これが運命とどう関係あるか、については、物理学概論で議論することになります。興味のある人は受講してください。

10.2 波の例

粒子の運動とは別に、波の運動についての科学的な研究が行われてきました。それをお話する前に、まず、波にはどのようなものがあるのか、例をあげてみたいと思います。

- 水面を伝わる波
 - － 海面の波
 - － コップの表面に口で風を送ったときにできる波
海の波とは性質がやや異なります。
 - － 津波
- 真空中を伝わる波
 - － 光
 - － 電波（電磁波）
実際には、光も電磁波の一種です。
- 空気中や物質内部を伝わる波
 - － 音
 - － 大気の浮力による波
 - － 地震
 - － バネを伝わる波
 - － 好天・悪天の変化
寒波とか熱波とか呼ばれているものも広い意味での波です。
 - － 神経細胞からの信号

このように、わたしたちの身の周りには様々な波があることがわかります。それでは、人間にとって波はどのような役割を果たしているのでしょうか。ここでは2つの観点を紹介しましょう。

エネルギーを伝える波

波はエネルギーを伝えます。例えば、太陽から届く波である光（や電磁波）は、地球にエネルギーを届け、地球を温めます。近年注目を集めている太陽光発電も太陽から波として届くエネルギーを電気に変えるものです。

身近な所にも、電磁波を使ってエネルギーを伝えています。例えば電子レンジです。電子レンジでは、特別に水だけを温める電磁波を出します。この電磁波は電気によって作られます。電磁波を受けると、食品中の水が温まります。IH クッキングヒーターは、下から電磁波を出してフライパンに当て、フライパンを直接温めます。

海の波もエネルギーを伝えます。海の波を使った発電である波力発電も行われています。ただし、発電効率が低いためにあまり利用されていません。津波もエネルギーを伝えています。津波が陸上の物体を押し流すにはエネルギーが必要です。そのエネルギーは津波自身が運んでいます。

地震もエネルギーを伝えています。地震では、揺れる場所で岩盤が破壊されているわけではありません。岩盤が破壊される領域（震源域）はごく限られています。岩盤が破壊されたことによって発生したエネルギーが波として伝わります。震源から離れたところにある物体を動かすためのエネルギーは、地震の波が伝えています。

このように波にはある場所で発生したエネルギーを別の場所に伝える役割があります。

情報を伝える波

例えば、私たちが会話することを考えてみましょう。人が話すとき、声を出します。そして人は声を聞きます。こうして意志を伝えることができます。ところが声は音です。音という波に言葉をのせることで、思っていることを伝えることができるのです。

あるいは、私たちは物を見ることができます。光の無い真っ暗な中では物を見ることはできません。物が見えることは、物が光を浴びて、その表面からはねかえった光を目で受け止めていることなのです。物の形や色と言った情報を、光という波が伝えているわけです。

また、神経細胞を伝える情報も、波として伝わっています。私たちが「何かを感じる」のは、体の感覚器官から脳へ情報が伝わるからです。その情報を伝えるのは神経を伝える波です。このように、皆さんが外界を感じることができるのは、身のまわりに波があるだけでなく、その波を受けて、神経を伝える波の働きがあるからです。

また、波が信号を伝える性質を、人間は積極的に使ってきました。電磁波を用いてテレビやラジオの放送を行っているのは、電磁波には情報を伝える性質があるからです。ラジオの AM 波、FM 波、地上デジタル放送の波、BS 放送の波、携帯電話間の赤外線通信など、通信手段として利用しています。

10.3 波の性質

波には様々な性質があります。

10.3.1 反射

鏡は、どうして私たちの姿をうつしてくれるのでしょうか。

反射はよく知られた現象です。入射角と反射角が等しくなります。この性質を用いると波を集めることができます。BS 放送のアンテナとして利用されるパラボラ（放物面）はその例です。パラボラに平行光線が当たると、波は 1 点に集中するようになります。

このしくみは、ソーラークッカー（太陽熱を利用した調理器）や、より大規模な太陽炉と呼ばれる装置にも利用されています。

10.3.2 屈折

日が沈んで、太陽が地平線の下になると、私たちは太陽が見えなくなると信じています。しかし、実際には、ちょっと見えます。それは、なぜでしょうか。あるいは、蜃気楼はどうして生じるのでしょうか。

大気中の空気の密度(濃さ)は場所によって異なります。それに応じて光も屈折します。光が大気中で屈折することによって起こる現象の代表的な例は、上にあげた大気差(地平線に近い天体が、浮き上がって見える量)と蜃気楼です。

逃げ水と呼ばれる現象は蜃気楼の例です。夏の暑いときにアスファルトが濡れているように見えることがあります。ところが、近づいているとそこに水はありません。このような現象は「逃げ水」と呼ばれています。

屈折のために、普段は見えないようなところが見える現象があります。例えばコップの中に水を入れた状態と入れていない状態では、見える範囲が異なります。

屈折という現象は、波の速さと関連があります。空気中では、光の進む速さは真空中とあまり違いありません。ところが、水やガラスの中では、光の速さは数10%遅くなります。波の峰が線状に水面に突入することを想像してみましょう。すると、波の速さが異なるために、波の峰を結んだ線は曲がることが予想されます。これが屈折です。

10.3.3 回折

ここで、海の波を想像してみましょう。そして、堤防の隙間から入り込んだ波はどのようになるかを想像してみましょう。入り込んだ波はこのようになるでしょうか。実は、このようになります。堤防の影にも波が回り込むのです。

スピーカが物陰に隠れていても音が聞こえたり、スカイツリーが見えないところでもテレビを見ることができたりするのは、波が物体の物陰に回り込んだり、狭い隙間を通るとそこから広がって伝わるからです。このような現象は回折と呼ばれています。

光の回折はレーザーポインタでも示すことができます。レーザーポインタの前に指をかざして、指の間にレーザー光線を通します。指の間隔を狭めると、レーザーポインタの光が広がる様子が観察されます。

10.3.4 干渉

波の性質のもう1つの例として、干渉を挙げたいと思います。「干渉」は、複数の波が重なり合ってお互いに強め合ったり弱め合ったりする現象のことをいいます。例として、今、ここで音を出してみます。音は、教室内の2つのスピーカから出しますので、その近くでは音が大きいと考えられます。しかし、必ずしもそうではなく、場所によって音が大きくなったり小さくなったりするのがわかると思います。今、自分のいる場所から少しだけ体を動かして耳の位置を動かしてみてください。音の大きさが変わるのがわかると思います。

模式図で示すとこのようになります。ここにあるのが音源-スピーカ-だと思ってください。そこから広がる2つの音波は場所によっては強めあい、場所によっては弱めあいます。その結果、波が強められるところと弱められるところが発生します。

この仕組みは、ノイズキャンセリングヘッドホンなどに使われています。この図はソニーのヘッドホンについての図です。ここにマイクがあり、外部からの音を拾っています。拾った波をちょう

ど打ち消すような音波も同時に出すことで、耳の中に広がる音はヘッドホンステレオの音源だけで、外部からの雑音は打ち消されることになります。

10.3.5 ドップラー効果

さて、これまで学んだような波の特徴を表す言葉がわかれば、ドップラー効果について理解することができます。ドップラー効果については NHK が作製したテレビ番組のビデオを見てみましょう。このような実験は、なかなか普段行うことができません。NHK の教育番組ならではと言えます。

さて、このようなドップラー効果はどのように理解したらいいでしょうか。これを考えるためには、このような図で理解するといいと思います。音を出しながら音源が移動している場合、前方では波の波長が短くなるのが観察されます。そのため、音源の前方で音を聞くと、短い時間にたくさん振動することになります。これは音が高くなったことに対応します。一方、後方では、逆に波長が長くなります。そこで、音源の後方で観察すると、同じ時間でも振動の回数が減り、音が低くなります。まとめると、

- 前方：波長が短く、振動数は大きい 高い音
- 後方：波長が長く、振動数は小さい 低い音

となります。

ドップラー効果が起こるのは波の特徴です。そこで、光の場合にもドップラー効果が起こります。

10.3.6 大気中の光学現象

この様な波の性質は大気中の諸現象に関連しています。

虹

虹の成因について、子供のころに反射と屈折が原因であること、また、屈折は光の波長によってことなるために虹の七色が分解されて現れることを教わったかもしれません。

しかし、話はそう単純ではありません。それが証拠にこのような虹が観測されます。これは過剰虹と呼ばれる現象です。実際には干渉も重要な役割を果たしています。

幻日

幻日は太陽が2つとか3つとかに見える現象です。これは雲を形成する氷の中に太陽光が入って、氷の中で反射と屈折をし、射出された光が干渉して見られる現象です。

彩雲

真珠のように輝く雲は彩雲と呼ばれています。彩雲は、細かい雲粒のまわりを回り込む光の回折と干渉が重要な現象です。

10.4 波の特徴を表わすもの

これから波の性質や、その性質を利用した様々な現象を見ていきます。しかし、その前に、波の特徴を表わすためにどのような点に注意すべきか、いくつかの点を挙げます。

振動数

● 振動数とは

次に、1秒間に何回振動するかを表わしたものを振動数と言っています。単位はHz(ヘルツ)と言います。たとえば、20Hzは、1秒間に20回振動することを意味します。440Hzは、1秒間に440回振動するという訳です。10kHzという表現では、「k」が1000を意味するので、1秒間に10000回振動する、といった具合です。

● 振動数と人間の感覚

振動数は人間の感覚と結びついています。最初に音について調べてみましょう。

この音を聞いてみてください。皆さんは音に高さがあるのを知っていると思います。次の音はやや高い音です。音をどんどん高くしていくと、やがて人間には聞こえなくなってしまいます。それを実際に試してみましょ。ここで、ちょっと、皆さんに目を閉じてもらって、音が聞こえている間だけ手を挙げてもらいたいと思います。

このように、高い音になると人間には音が聞こえなくなります。人間が音を感じる範囲を「可聴範囲」といいます。一般に、20Hz(ヘルツ)から15kHz(ヘルツ)程度であると言われていいます。しかし、個人差もあります。また、同じ人でも、年齢と共に段々聞こえなくなってきました。例えば、この音は聞こえるでしょうか。聞こえる人もいますが、私には聞こえません。

● 音色

ここで教材として利用している音は、機械が発生している音で「正弦波」と呼ばれる波の形をしています。そこで、ただ一つの振動数をきちんと決めることができます。しかし、一般的に音を発生させようとする、どうしても色々な振動数の音が混ざって発生します。その混ざり具合は、楽器の種類によっても、違いますし、楽器一つ一つでも微妙に違います。それが「音色」になります。これを人工的に組み合わせさせて発生させるのが「シンセサイザー」と呼ばれる機械です。シンセサイザーは、楽器の音色になるように、わざといろいろな振動数の音を混ぜています。

● 色

光も人間の感覚と対応しています。(光の場合には、振動数ではなく、波長を用いることが多いです。)

人間は、振動数の違いを色として感じます。振動数が大きいほど紫に、小さいほど赤に近い色に感じます。

速さ

一般に全ての波には、波の伝わる速さがあります。

この映像を見てみましょう。これを見ると、音がある速さをもって伝わっていることがわかります。これは皆さんも経験したことがあるのではないのでしょうか。例えば、大きな野球場やサッカー場に行ったことがある人もいるでしょう。そのような広い場所では、1つの歌を歌おうとすると、タイミングがずれてしまって、うまく合わないことを経験します。これは、音の速度がそれほど速くなく、野球場やサッカー場を横切るのにかかる時間は、歌のタイミングがずれるには十分な時間であることを意味しています。

波の速さは概ね次のような値です。

- 音：340m/s (温度によって変わります。)
- 光：30万 km/s (真空中の値。物質中ではこれよりも遅くなります。)

東海道新幹線には、「こだま」と「ひかり」が(現在は「のぞみ」も)あります。しかし、実際には音と光の速さは格段に異なります。光の速さ非常に速いです。これを表現するのに、よ

く、「1秒間で地球を7回半回る速さ」と言ったりします。地球1周はだいたい4万kmなので、7周半で30万kmになるからです。

この速さの違いを日常生活でも体験することがあります。遠くの花火は、見えてから音が響くまでに相当な時間がかかります。これは光に比べて音が遅いことの現れです。また、雷が近くで落ちると、光と音をほとんど同時に感じます。しかし、遠くで落ちると、稲光がしてしばらく経ってから雷鳴を聞くことになります。これも同様に音が遅いことを表しています。この速さの違いから、落雷が地点と自分との距離を見積もることもできます。光については、あまりに速いので、同時と考えてもいいです。一方、音速は340[m/s]程度でした。そこで、稲光を見てから、何秒後に雷鳴が聞こえたか調べ、その秒数に340[m/s]を掛け合わせれば、距離がわかることになります。

なお、光の速さについては、重要な性質があります。光は、光の進む向きに走りながら観察しても、速さが変わらない、という特別な性質があります。

どうして光はこのような性質を持つのか？これについて、皆さんはどんなABCを考えるでしょうか？

10.5 波と粒子

これまで、波の性質について学んできました。ところが、現代の物理学では、驚くべきことが認識されています。それは、物質はすべて、波の性質を持っている、ということです。

残念ながら、今回は波の性質ばかり述べてしまって、詳しく物質と波の関係について述べることはできませんでした。

機会をみつけてお話できればと思っています。