

● なぜ金属は最外殻電子への束縛が弱いのかを疑問に思いました。

→ 逆に考えてみましょう。最外殻電子への束縛が弱いから陽イオンになりやすかったり、固体となった場合の結合様式が（自由電子のように、一つの原子に束縛されないものを媒介とする）金属結合になりやすかったりする、というだけのことでないでしょうか。なお、電気陰性度が小さく、陽イオンになりやすい、つまり最外殻電子への束縛が弱い元素は、周期表の左下にあり、これが金属性の高いという表現になっています。

● 光電効果で、電子が飛び出した後、次の電子が飛び出すには数秒かかると聞きましたが、そんなに長い時間がかかるのですか。

→ 光電子を放出した原子の位置に、次の光子がやってくるまでに時間がかかるのです。参考書として指定している丸善の「光化学 I」（井上晴夫他）では、p 41 に**光当量則**（参考書の表記では光等量則）（すなわち、「1 個の分子が光と反応するとき、ただ 1 個の光量子と相互作用する」こと。つまり二光子過程はほとんど起きない）の説明があります。ここでは、通常の実験用のランプ光源からでてくる光子の数（光強度）を、およそ 10^{15} 個/cm²/s 程度であるものとしています。ベンゼン程度のサイズの分子を 25 \AA^2 ($25 \times 10^{-20} \text{ m}^2$) としてやると、光源からは 1 cm^2 あたり毎秒 10^{15} 個程度の光子が供給されるのですから、この分子 1 個当たりで計算すると、 $10E19 \times 25E-20 = 2.5$ です。ベンゼン程度の大きさの分子でも、毎秒 2~3 個の光子しか衝突しないのですから、原子 1 個あたりだと数秒に 1 個しか衝突できないですね。つまり、原子や分子のような小さな領域に、光を吸収した原子や分子の**光過程が完了するよりも短い時間内に 2 つ目の光子がやってくるのはごく稀**なのです。もちろん、レーザー光のような特殊な光源では、更に光強度が高くなり、二光子過程が見える場合があります。

● 光が電磁波になるのがよくわからなかった。電磁波は周波数をもって、波長も決まるから光と同様だということ？

→ いえ、光が電磁波になるというよりも、光と電磁波の区別はありません。ガンマ線、X 線、紫外線、可視光線、赤外線、電波、と、波長等により名称は異なっても、すべて電磁波として括ることができるものです。

電磁波のうち、波長がおおよそ 400 から 800 nm 程度のものが、ヒトの眼が検出することができ、光であると表現しているだけです。紫外線や赤外線など、ヒトの眼が検出できなくても、その電磁波を光であると表現することも多いですね。

● 実際にコンデンサーを開いて高周波の交流を流すとき、その周波数からアンテナのように機能するのか。

→ <http://www.oit.ac.jp/elc/~kumamoto/radio/03.pdf> など、分かりやすいんじゃないでしょうか。

● コンプトン効果で、入射 X 線が電子にぶつかって電子がエネルギーと散乱 X 線に光がわかれたということであっているのか。

→ 入射 X 線のもつエネルギーの一部が電子に与えられ、散乱 X 線はエネルギーを失っています。ただし、電子を飛び出させるために必要な最低のエネルギーに着目する光電効果の場合とは異なり、光子がまるまる吸収されるのではなく、エネルギーの一部を失った光子がいろいろな方向に散乱され、また、この散乱 X 線の失ったエネルギーの大きさは、元の X 線の波長や**物質の種類には依存せず**、散乱角にのみ依存します。これによる波長の変化は、散乱角を ϕ としたとき、「電子のコンプトン波長（という長さの次元をもつ定数） $\times (1 - \cos \phi)$ 」の式で表されます。つまり、入射 X 線と同じ方向に散乱する X 線は波長を変化せず、90 度の方向に散乱される光は、電子のコンプトン波長分だけ波長が長くなります。180 度の方向に散乱される光では、電子のコンプトン波長の 2 倍だけ長くなります。

このような現象を説明するときに、電子に対して光子（の粒）が玉突きのように衝突し、**電子と光子の間で、エネルギー保存および運動量の保存を考える必要がある**のです。つまり、**光子が運動量をもった粒である**としないと説明できません。光子のエネルギーおよび運動量は、 $E = h\nu$ 、 $p = h\nu / c$ で表されます。

● 光が波と粒子の二面性をもつということがわかって、何か人間が得したことはありますか。

→ 自然のあり方をより深く知ることができた、というのは得ではありませんか？

● 波にはなぜ縦波と横波の 2 つがあるのか。

→ 空間の中に広がっている媒質が、その位置周辺で振動し、その媒質の動きが周囲の媒質の動きを引き起こす形でその振動が伝播していくとき、波として観測されます。その媒質の揺れの方向が波の進行方向と直交している場合には、横波であるといいます。水面に広がる波のようなイメージです（厳密には、水面の波にも縦波成分が含まれています）。左右（横？）であろうと、上下（縦？）であろうと、媒質の振動の向きが進行方

向と直交していれば横波です。媒質の振動の向きが波の進行方向と一致している場合に、縦波であると言います。隣の粒子との間の距離が変わる(詰まったり開いたりする)ような揺れなので、縦波は粗密波となります。音の波などがこれに当たります。地震の振動も、横揺れと縦揺れがあるとされていますね。

一般的に横波を表す場合も、縦波を表す場合も、その位置に対する変位を、横軸(空間的な分布、または時間変化のいずれか)に対して表しますので、**グラフは同じもの**として考えることができます。すなわち、多くの場合、単純化するために、 x, y, z, t などの次元の中からいずれかひとつを選びとり、一次元の空間に対して広がっている波として表します。この次元を独立変数に取り、 x 軸で表し、その点の「変位の大きさ」を従属変数として y 軸方向に表します。**この y 軸は空間の y 方向を指すものではありません**(もし、独立変数として三次元の空間の位置をとり、 x, y, z で表すなら、これらに対し直交した4本目の座標をとる必要があります)。この時にグラフが、いわゆる波の形になっています。

光の波の場合は、媒体があるというわけではないので、上記の議論の範疇では横波であるとも縦波であるとも言えませんが、(細かい議論は飛ばしますが) 光の電磁波は横波であるということになっています。

● 光は捕まえられるのか。

→ なにをもって光を捕まえると表現するのでしょうか。ヒトの眼の中の視細胞中のある分子は可視光の光子を吸収して電気エネルギー(つまり神経の興奮)の形で脳に伝えます。写真のフィルムやデジカメのフィルム面の素子も、同様に光子を吸収してエネルギーに変換します。これも、ある意味では光子を捕まえていますね。分子が光を吸収するのも同じです。また、光に限らず、電波をアンテナで受信するのも同じことです。

光子を「極微小領域へ強く閉じ込める」ためにフォトリソグラフィという構造を利用できます。京大工学部の野田研究室のウェブページ (<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.php> より「研究内容」) のフォトリソグラフィの構造の説明が分かりやすいのではないのでしょうか。大雑把にいうと、**光の波長程度の空間的な繰り返し構造が、その波長の光の進入を阻むことができる**ということに由来します。そのような素材で空間を区切ってやると、その波長の光子が入り出できないはずであるという発想になる(のだと思う)のです。イメージとして、単なる思考実験でよければ、内部が完全に光を反射する鏡でできた箱を用意して、開口部から光子を中に進入させた後に蓋を綴じてあげればよろしいということになります。

● 物質波が波動方程式に対応する波、というのがよくわからなかった。

● シュレディンガーの波動方程式について理解できないところ、忘れていたところが多かった。

● 光の波は電磁波で考える場合と物質波で考える場合があるということか。

→ 電子などの物質波(ド・ブロイ波)を表す関数、定常波の形は、ピンと張った糸の振動を式で表すのと同様に、ポテンシャルの形に応じたシュレディンガーの方程式の解(微分方程式の解なので関数の形になっている)として求めることができます。定常波ではない場合も時間依存のシュレディンガー方程式から導かれます。この波動関数(または状態関数)と呼ばれる式に、対応する演算子を作用させると、その粒子の位置(というか空間内の確率密度分布)やエネルギー、運動量などを求めることができます。原子核からの静電引力などのポテンシャルによってある狭い空間内に閉じ込められた電子は、その空間内で物質波として定常波をつくっているものとして解釈することができ、その波の関数の二乗が空間のその位置の存在確率になるわけです。

光子の場合は、頭々に物質波として議論されることは少ないです。が、粒子として考えながら、その一方、単一の粒子が二重スリットで干渉していることなどを考えると、電子と同様に物質波として非局在化しているイメージを同時に持った方がよいと思いましたので、あえてそのように説明しました。

結果的には、光子の場合は物質波として考える波と、電磁波としての波は関数が同じものになるようです。

● 前に光の粒子性を理由してタイムマシンの様なものをつくる実験をしていましたが、関係ありますか。

→ なんのことでしょうか。よくわかりません。

2011年にニュートリノの移動速度が光速を超えたかもしれないという実験結果が発表されました。「質量を持つ物質は光速を超えない」とするアインシュタインの特殊相対性理論に相反するため世界的な論争を呼んだのですが、結果的には、翌年に、ケーブルの接続不良かなにかの実験条件の不備に起因する間違いであったという結論に至り、取り消されていたと思います。

2013年には東京大学の古澤教授らの研究グループが、光の粒子に乗せた情報をほかの場所に転送する完全な「量子テレポーテーション」に世界で初めて成功したと発表しています。ただ、これも情報の伝達速度が光速を超えることは無かったと思いますので、タイムマシンとは関係なさそうです。

他になにかあったかなあ。

● ビッグバン以前に光は存在したのか。

→ さあ。よくわかりません。光子も素粒子の一つですからビッグバンと同時にできたんだと思いますけどね。