

電気，電波，光って何だろう？

東京理科大学 創域理工学部 電気電子情報工学科 講師 高木 優香

■ 電気って何？

皆さんは「電気って何？」と聞かれたら何を連想するでしょうか。一般的に電気というと、部屋の蛍光灯もしくはエアコンやテレビなどの家電製品、さらに動力源としてのモータなどを思い浮かべる人が多いでしょうか。これらは電気をもつ様々な働きのうち、それぞれ特定の性質だけを利用しています。

皆さんの暮らしの中で利用されている電気は、照明器具として「光」に変換する、冷暖房機器のように「熱源」として利用する、モータを使った機器のように「動力」として利用する、電波や信号をつかって「情報を伝える」などです。それでは、「そもそも電気って何？」と聞かれるとどうでしょう。この疑問に正確に答えるのは意外にもむずかしく困ってしまいます。

■ 電気の真の姿は物質の構造にある

電気の真の姿を理解するための大切なポイント、それは、物質が何から構成されているか、ということです。それを知ることが、電気を知る第一歩です。すべての物質は、直径が約 10^{-10} m (=1Å: 1オングストロームと読みます) の原子がたくさん集まって出来ています。原子は物質を構成する基本的な要素で、原子核

とそのまわりを回っている電子によって成り立っています。原子核は、原子の中心にある重い粒子で、プラスの電気をもつ陽子と電氣的に中性な中性子が、いくつか結合した直径 10^{-15} m (原子より5桁小さい、5オーダー小さい) 程度の大きさをもっています。さらに、皆さんも化学 (や物理) の授業で勉強されているとおりで、原子核のまわりには陽子と同じ数のマイナスの電気をもった電子がそれぞれの軌道上で回っています。電子の軌道はたくさんありますが、原則として電子は、できるだけ内側の軌道に入りたいという性質があります。そして、1つの軌道に入れる電子の個数は決まっているので、個数が増えると徐々に外側に向かって軌道を埋めていきます。これらの軌道は、K, L, M, N... という名前で原子殻と呼ばれています。

ところで、これらの原子核と電子は、なぜつり合いが保たれているのでしょうか？ 実は、その力のもとが「電気」といえます。さっきの復習ですが、原子核はプラスの電気をもっていて、電子はマイナスの電気をもっています。そして、電気の量でいうと、陽子1個と電子1個は同じ大きさの電気量をもっています。電気の+と-は互いに引き合い、+と+、-と-は反発しあうのは、皆さんもよく知っている事実です。この+と-が同じ数ずつある場合は、ちょうど打ち消しあって (中和して) 全体的につり合っています。

ところが、原子が電子を失ってしまうと、陽子の方が多くなって、つまり+の電気が多くなって、その原子は+の電気をもつこととなります。逆に原子のまわりの電子が増えると、電子つまり-の電気が多くなって、その原子は-の電気を帯びるようになります。+または-の電気のことを「電荷」といい、電荷の量はクーロン [C] という単位で表されます。したがって、電気の真の姿、それは陽子と電子の電荷にあります。しかも、つり合いがとれていると、きれいに打ち消し合ってその姿は見えない

電子殻はなぜ「K」から始まるのか？

Kから始まるなんて中途半端な…。実は、この「K」に特別な意味はない。この「K」を最初に用いたのはイギリスの物理学者チャールズ・バークラの論文(1911)¹⁾であった。

原子に高エネルギーの電子などを当てると、原子の内殻にある電子が跳ね飛ばされてそこに空席ができる。外殻の電子はX線を放出すると同時に、その空席へと移る(遷移)。バークラは、この特殊なX線(特性X線)が発生することや、そのX線のスペクトルに2つの系列が存在することを発見した。

バークラは当初、特性X線の波長が短い系列を「A列」、波長が長い系列を「B列」とした。しかし、今後さらに短い波長の特性X線の系列がある可能性を考えて、「A列」ではなく、とりあえず中間ぐらいにある「K列」から始めたとのこと。

バークラはこの特性X線の発見により1917年にノーベル物理学賞を受賞しました。



<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1917/barkla/biographical/>

くなります。それが「電気」というものらしいです。ちなみに、原子核では陽子 (+) がたくさんくっついていますが、+同士で反発しあわないの？ 軌道にたくさんの電子が回っているらしいけど、これも反発しないの？ と気になり始めた方は大学で物理と一緒に勉強しましょう (お待ちしております!)。原子核に働く力は電気だけではありません。もっと強い力も働いています。

■ 自由電子, 電気を運ぶ担い手

どうやら、原子のもつ電荷が電気のもとになっているらしいです。そして、その電気が姿を現すためには、電子の配置構造が深く関係しています。

具体例として、銅原子 (Cu) に着目してみましょう。Cu は 29 個の電子を持っています。これらの電子は K (2 個), L (8 個), M (18 個) 殻... と内側から順番に埋まります。最後の 1 個, 29 個目の電子は最も外側の N 殻に入ります。この最も外側の N 殻の電子は、1 つだけなので不安定で、さらに原子核からも離れているので、原子核が引き付ける力が弱いのです。すると、熱などの外からの力によって、簡単に引き離され、ふらふらと原子核から離れて、原子間を自由に動き回る電子となります。このような電子を「自由電子」と呼んでいます。

たとえば、銅線には銅原子同士の結合の中にたくさんの自由電子がいます。これらの自由電子が金属の中

を移動すること、これが電流です。つまり、電荷が動くことで電流が生まれます。しかしながら、ただ自由電子がたくさんいるというだけでは電荷は動きません。つまり、電流もありません。どうすれば、電流が生まれるのでしょうか？

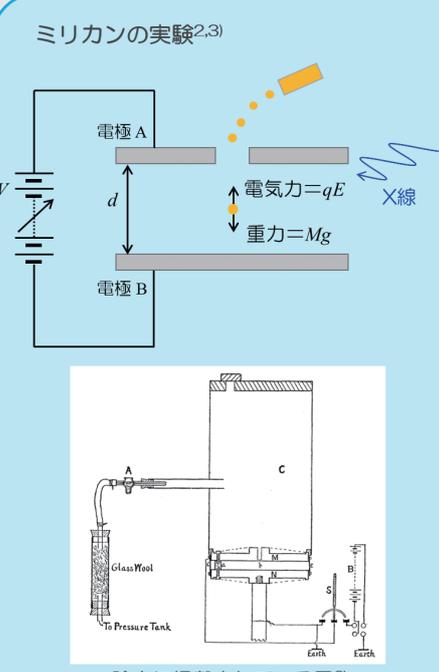
ここで、+と-の電荷をもつ 2 つのプール (物質) を銅線でつないでみます。そうすると、銅線の中の自由電子は-の電荷をもっているわけなので、+の電荷に吸い寄せられていきます。その不足分を-の電荷のプールから補充します。これらの一連の動作が途切れることなく続いて発生することで、電流が流れます。

電流の大きさは「ある一定時間に流れる電気量」で定義 (約束) されています。単位はアンペア [A]。電流の流れる向きは、自由電子が移動する方向とは反対です。つまり「プラスからマイナスに流れる」と約束されています【図 1】。

■ 電流と磁気の関係

電子が動くと電流が生まれます。それでは、電流が生まれると何が生まれるのでしょうか？ 1820 年 (たかだか 200 年前...) エルステッドという物理学者が、電流が流れている導線の近くに置いた方位磁針が振れることを発見しました【図 2】。これによって、電流が磁気を創り出していることが明らかになったのです。けっこうシンプルな実験だったわけですが、この発見がさらなる新しい発見を見出しました。その 1 つが

ミリカンの実験^{2,3)}



R. A. Millikanは電子の電荷の正確な測定を行い、さらに電子の電荷が電気量の基本単位であることを実験的に証明した。

左図はミリカンの実験装置の原理を示す。平行金属板電極ABを水平に置き、これに電圧をかけられるようにしておく。金属板Aには小さな穴をあけておき、上方から油を噴き出して油滴を入れる。

つぎに、AB間にX線をあてる。そうすれば、AB間に含まれている空気の分子は紫外線をつけて電子が飛び出し、いままで中性であった分子はイオン化してプラスまたはマイナスに帯電し、これが油滴に付着して油滴はプラスまたはマイナスまたは中性に帯電することになる。

ここではマイナスに帯電したと仮定する。まず電極に電圧をかけない場合を考えてみよう。

このとき、油滴は重力の作用 Mg (M : 質量、 g : 重力加速度) によって徐々に落下する。

一方、油滴の密度を ρ [kg/m^3]、半径を r [m]とすると

$$M = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho$$

であるから、顕微鏡などで油滴の半径 r を測定すれば、 M が求まる。つぎに、電極に電圧 V をかける。電極間の距離を d とすれば、電界の強さは $E = V/d$ [V/m]である。したがって、いま油滴が電荷 q をもっているとすれば、油滴には下向きの力の他に、 $qE = qV/d$ の上向きの力も同時に作用する。電圧をうまく調整すると油滴は停止する。

したがって、

$$\frac{qV}{d} = Mg$$

となるから、 q の値が求められる。

ミリカンはこのような実験を繰り返して、油滴の電荷は常に $q = 1.59 \times 10^{-19} \text{C}$ の整数倍であることを発見した。これは、イオン化によって作られるイオンの電荷が $1.59 \times 10^{-19} \text{C}$ の電気量を最小単位として持っていることを示している。

論文に掲載されている図²⁾

「アンペールの右ねじの法則」と「ビオ・サバルの法則」です。アンペールの右ねじの法則は、電流の方向を右ねじの進行方向にとると、生じる磁界は右ねじの回転方向に発生するというもの。(右手でイイね！をして、思い出してみてください) ビオ・サバルの法則(ビオ氏とサバル氏2人の名前)は、導線の周辺に発生する磁界の大きさを求めたものです。よって、これらの法則は、電気と磁気の関係の基礎になっています。

■ 電場と磁場

電気と磁気には深い関係があることが分かってきました。電気と磁気は空間に影響を与えることが出来ます。例えば、我々がいる空間には、皆さんがご存知のとおり重力が働いています。空間に重力という力が備わっています。この空間を「重力場」と表現したりします。電気や磁気も同じで、電気の力が備わっている空間を「電場」、磁気の力が備わっている空間を「磁場」と呼びます。「場」というワードは「界」と書いても構いません。よって、「電界」とか「磁界」と書いてある教科書や参考書もあるかと思えます。

■ 電波って何？

電気と磁気は切っても切り離せない仲であり、これら2つを上手く使って様々な技術が開発されてきました。モータ、発電機、変圧器などと聞くと電磁誘導という現象を思い出す人もいるかもしれません。ここでは、電波に着目してみましょう。電波は、テレビや

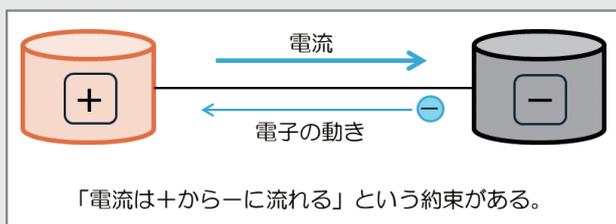
パソコン、スマホ、電子レンジなど我々の生活の中で多く利用されています。

電波とは何かを理解するために、1つ思考実験をしてみましょう。まず、【図3(a)】のように、導線をつないだコンデンサ(2枚の金属板を平行に置いたもの)に、時間的に一定の電圧(直流)を与えます。すると、コンデンサには、一定の電界ができますが電流は流れません。それでは、【図3(b)】のように、直流の代わりに時間的に正弦波状に変化する電圧(交流)を与えるとどうなるでしょうか。この場合は、電流が流れます。

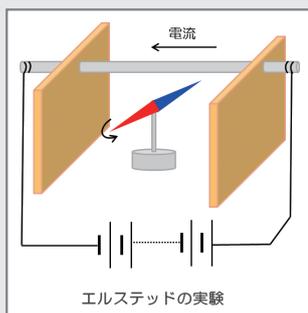
これは、どのように考えられるでしょうか。「導線部には電子の移動があるため電流が流れますが、コンデンサの部分では電子の移動がないはず(導線のようにつながっていないので)。しかしながら、結果として全体に電流が流れるのであれば、コンデンサには電子の移動ではない何やら異なる電流が生じているのだろう...」と考えるしかありません。さらに、「導線部分には電流が流れるので、磁界が生じます。でもコンデンサは導線のようにつながっていないので、磁気は生じない」という謎が残ります。しかし、実際には、コンデンサには変化する電界が生じていて、そのため、もしこの変動する電界が電流と同様に磁界をつくるなら「磁界は連続する」ことになるはずです。だいぶ、こんがらがってきましたね...

電波の父と呼ばれるマクスウェルは、このように変動する電界(=変位電流とも呼ぶ)によっても、導線を通る電流と同じように、磁界が生じるという大胆な仮説を立てました。これは、ビオとサバルによって、電流から作られる磁界を定式化したアンペールの法則を拡張した仮説として、重要な意味をもっています。なぜなら、この仮説は変動する磁界から電界がつけられるというファラデーの電磁誘導の法則と組み合わせると、何も無い空間に変動する電界によって変動する磁界がつくれ、その変動する磁界によって新たに変動する電界がつけられるという連鎖反応が生じることを示すのです。マクスウェルはこのようにして、変動

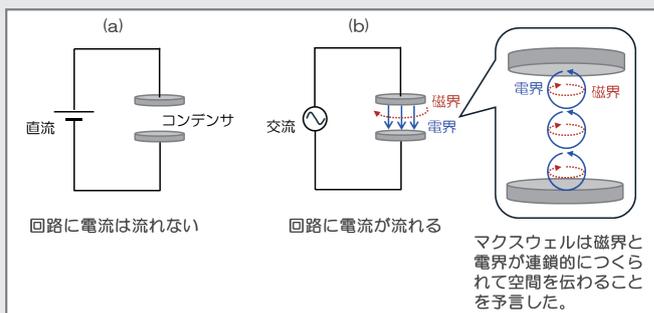
する電界と磁界に考えを巡らせて、「電波(電磁波)」の存在を予言しました。そして、さらには速さも理論的に求めてしまい、皆さんがよく知っている $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ (30万 km/s) であることも示しています。



【図1】電流の向きの約束



【図2】エルステッドの実験



【図3】マクスウェルの思考実験 (a) 直流電流の場合 (b) 交流電流の場合

電荷、電流のお話から始まりましたが、ここからは「波」の話に突入していきます。ここで、波の性質を思い出しておきましょう。自然界には、たくさんの波がありますが、大きくは縦波と横波に分けられます。波の方向と垂直に振動しながら進むものが横波です。たとえば、紐を振ったときにできる波です。もう一つは、波の方向と同じ向きに振動しながら進むのが縦波です。音波がその代表例です。「音は縦波、疎密波」と勉強されているとおりです。そして、電波はというと、横波です。1回振動したときの距離を波長、1秒間に振動する回数を周波数（振動数）と呼び、周波数は速さ / 波長で表すことができます。

ここで、もう一度、マクスウェルの仮説の話に戻します。マクスウェルの予言した電波の存在を実験によって確認したのはヘルツです。しかし、現在と比べると19世紀は実験技術が未熟であったと考えられますし、速度が速い電界と磁界からつくられる電波をどうやって調べていたのか気になるところです...

それでは、ヘルツの行った実験を再現してみましょう。まず、【図4(a)】に示すように、2枚の金属板の代わりに、2個の金属球（ヘルツダイポール）のできた火花発生装置と、同じ金属球をもつループ状の導線火花検出器を準備します。このとき、金属球の間に火花を飛ばすと、離れた検出器にも火花が飛びます。しかし、これを電波が空間を伝わった証拠と言い切るには、ちょっと説得力が足りませんね。そこで、先ほど波の性質で述べた、紐の振動の考え方を取り入れてみます。たとえば、紐の一端を固定して、もう一つの端を振ってみます。すると、紐は波打って固定された端のほうに伝わります。これを進行波と呼び、これに対して固定された紐をうまく振動させると進行しない波、定在波と呼ばれるものができます。これは進行波と、固定された端からの反射波が重なってできる波で、同じところで振動します。つまり、【図4(b)】のように、これらの状態をつくって実験を行えば、火花の変化によって電波の存在を説明できることになります。

ここで、「電磁波」と「電波」という言葉を区別しておきましょう。電磁波は、すべての波長に使われますが、電波は通信に使われる波長（0.1 mm 以上）に対する呼び方です。

ところで、先ほどお話しに出てきたヘルツという人物、優れた実験で電磁波の存在を明らかにしましたが、優れた理論家でもあり、ヘルツダイポールからの電磁波発生メカニズムも明らかにしています。

金属球の間に正弦波状に変化する交流を与えると、

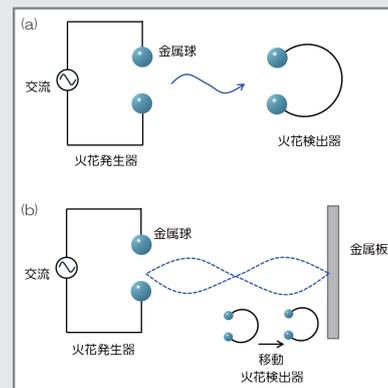
上下の金属球にそれぞれプラスとマイナスの電荷がたまっていき、下向きの電気力線が増えていきます。そして、ピークを迎えた後、金属球の電荷が少なくなると、電気力線も減っていきます。次に、金属球には、当初とは逆の電荷がたまっていき、上向きの電気力線が出てきます。この電気力線は、先の電気力線の後に続いて広がっていき、以後、同じことが繰り返されます。また、金属球の間には、等価的な電流が存在するので、磁力線は円形に形成され、その向きを電気力線と同じように変えながら広がっていきます。このように、複雑に変化する電磁波も、発生源から離れると、先程示したような電界と磁界の直交した単純な形に表すことができます。

ところで、皆さんは電磁波や電波というと何を思い浮かべるでしょうか。ここでは、電磁波を効率よく放射、もしくは吸収する素子、アンテナについて考えてみましょう。ヘルツの用いた2つの金属球もアンテナですが、代表的なものは半波長ダイポールアンテナです。

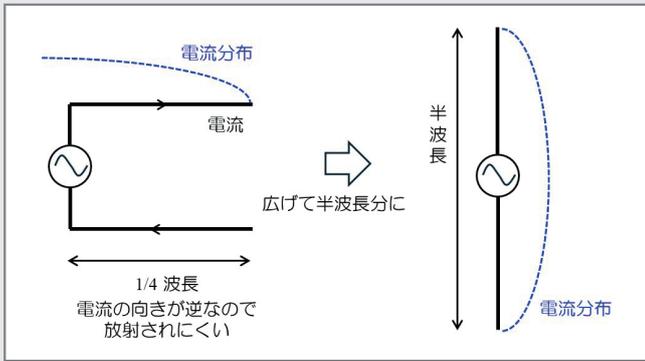
先端を開放した1/4波長の平行導線に交流を与えると、導線上の電流分布は開放端がゼロの定在波になります。しかし、導電の電流の向きが上下逆なので、放射される電磁波は弱くなります。そこで、放射をよくするために、平行導線を広げて直線状にしたものがダイポールアンテナです⁴⁾【図5】。このアンテナは、導線に対して垂直方向に強く電磁波を放射します。そして、導体板（あるいは導体棒）を置くと、それと反対方向にさらに強くなります。

それでは、アンテナの長さよりも短い導体板（もしくは導体棒）を置くとどうなるでしょうか。この場合、短い導体板の方向に強く放射され、この原理を用いたアンテナが、八木・宇田アンテナと呼ばれるものです【図6】。テレビ放送の受信のために世界中で使われている、日本人の誇れる発明の1つです。

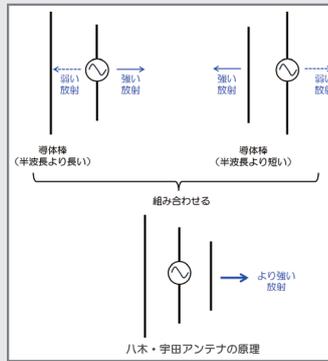
ところで、先ほどから話題のヘルツですが、電波の速さが光と同じであるというだけでなく、反射など光と同じ性質を示すことも検証し、マクスウェルが提唱した光の電磁波説の正しさを明らかにしました。電磁波と光の研究は、歴史的には別々



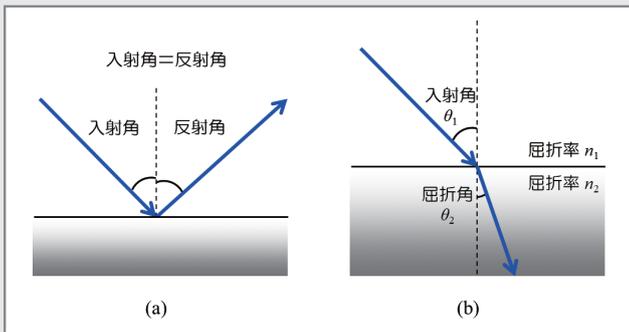
【図4】 (a) ヘルツの実験 (b) 改良後のヘルツの実験



【図5】半波長ダイポールアンテナ



【図6】八木・宇田アンテナの原理



【図7】(a) 反射の法則 (b) 屈折の法則

に進められてきたのですが、19世紀末ごろによく1つにまとまりました。

■ 光って何？

私たちの身の回りには様々な光であふれています。光のおかげで物を見ることが出来、様々な色を感じることが出来ます。眼鏡を使えば、ぼんやりしか見えないものをくっきりと見る事が出来ます。照明器具はもちろんのこと、カメラなどの光学機器も日々使います。光ファイバーのように、目にする機会も少なくても陰で情報化社会を支えている技術もあります。つまり、私たちの生活と光は切っても切り離せません。

光には3つの姿が考えられます。「波として」の性質は先ほどまでに述べた電磁波です。あとの2つは「光線として」、それから「粒子として」です。それでは、「光線として」見たときの光から考えてみましょう。

■ 光線としての光：光は直進する

光は一様な媒質の中を直進します。真空は物質という観点でみると媒質と言えない気がするかもしれませんが、光学的には「屈折率が1」の媒質となります。光は均一な空気の中、均一な水の中、均一なガラスの中を直進します。昼間、太陽光の下で影が見えるのは、光が直進しているからです。

また、光線が平らな面に当たると反射します。入射角と反射角が等しくなり、これを「反射の法則」と呼びます【図7(a)】。さらに、光は異なる媒質に入射すると屈折します。光線が空気中から水中に入射したときなどが身近にある例の1つです。入射角

と反射角には「スネルの法則」(屈折の法則、【図7(b)】)が成り立っています。光の直進、反射、屈折の3つの原理によって、光線の軌跡を追いかけることができます。多くの光学機器(レンズなど)は光線追跡を有力なツールとして設計・開発されています。

■ 粒子としての光

電磁波も光線も実は、光を波として見たときの性質です。光のほとんどの振る舞いは波としての性質によって説明できます。しかしながら、光を粒子として扱わないと説明できない分野もあるのです。

溶鉱炉の中の赤く溶けた鉄を想像しましょう。物体は高温になると光を放射します。放射するスペクトル分布【図8】は、温度によって異なりますが物質の種類は関係ありません。このスペクトル分布を理論的に導出するために多くの人が研究を進め、「黒体放射の問題」と名付けられています。その中で大きな成果を出したのが、ウィーンです。ウィーンは、気体の運動論を元に理論式を導きました。「放射強度が最大となる波長が温度に反比例する」というウィーンの法則です。しかし、この理論では、波長と強度の関係については短波長側では実験と一致しましたが、長波長側では一致しませんでした。これに続いて、レーリー・ジーンズは光を電磁波ととらえて、すべての波長にわたって等しいエネルギーをもつとして理論式を導きました。この式では、長波長側は正しく説明できましたが、短波長側の説明がうまくいきませんでした。当時、光を波として見る事が当たり前な時代に、それでは上手く説明できない問題に突き当たったのです。この問題を解決したのが、プランク定数でおなじみのプランクという人です。プランクは振動数 ν の光のエネルギーは、振動数 ν に比例した値の整数倍しかとらないという仮説を提唱しました。ここで出てくる比例定数がプランク定数 h です。この仮説に基づいて黒体放射の問題が解け、すべての波長域にわたって実験と一

致する結果を得ることができました。光のエネルギーが整数倍のとびとびの値しかとらないという特徴が、光が粒子として見られる理由です。

さらに、有名なアインシュタインも登場します。アインシュタインというと、相対性理論を思い出す人が多いでしょうか。アインシュタインは「光量子仮説」と「光電効果理論」も提唱しました。「光量子仮説」は振動数が ν の光は $h\nu$ を単位とするエネルギーのかたまりごとに金属の中の電子に衝突しエネルギーを受け渡すというものです。さらに「光電効果理論」では、電子は光からもらったエネルギー $h\nu$ が金属物質で決まる一定のエネルギー W (仕事関数) より大きい場合のみ外部に放出されます。 W は金属から外に飛び出すための障壁の高さと考ええると良さそうです。外に飛び出した電子の運動エネルギーの最大値は光からもらったエネルギー $h\nu$ から飛び出すために費やされるエネルギー W を引いたもの ($=h\nu - W$) となります【図9】。このように、光のことを $h\nu$ のエネルギーをもった粒子と考え、光量子 (光子) と名付けました。光子と電子の間の衝突によってエネルギーの受け渡しが行われるという仮説によって、当時実験で得られていた結果 (レーナルトの実験) を見事に説明したわけです。また、物質の仕事関数という考えを導入することによって、光のエネルギーがある値 (仕事関数) よりも小さいときには電子が飛び出さなくなる現象も説明しました。

アインシュタインが光量子仮説を提唱した後も、光を本当に粒子として考えられるの？ ちょっと上手く想像できないんですけど... という疑いは絶えませんでした。そんなとき、コンプトンが散乱実験によって、光量子仮説を裏付けしました【図10】。物質にX線を当てるとX線は散乱して方向を変えます。散乱前後のX線のエネルギーを調べてみると、前後で振動数が減少していることがわかりました。この現象を「コンプトン効果」といいます。X線も光と同じく電磁波なのですが、X線を波として考えると、この現象を説明することができ

ません。X線も粒子 (光子) であると考え、衝突の問題 (力学で見かけるような) として、エネルギー保存則、運動量保存則を適用して、コンプトンの実験結果を定量的に説明することができました。光子が原子内の電子と衝突したために、光子のエネルギーの一部が失われ、振動数が小さくなるのです。

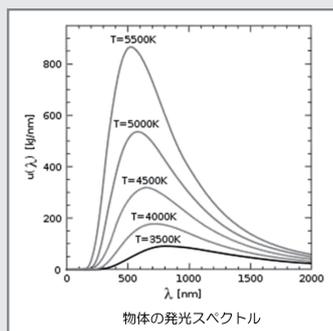
皆さんも「素粒子」というワードは一度は聞いたことがあるのではないのでしょうか。光子も素粒子の一つです。電子とはちがって、質量や電荷をもたない粒子です。しかし、運動量と運動エネルギーはもっています。太陽から大量に降り注ぐ光子をうまく利用しようという技術が太陽電池です。太陽電池は地球上だけではなく、宇宙でも使われています。ソーラーセイル (宇宙帆船) IKAROS など検索してみてください。

しかしながら、以上の学問分野では説明できない様々な光学現象も見つかっています。電磁気学の集大成と言われているマクスウェル方程式だけでは太刀打ち出来ず量子効果を取り入れなければならない領域が出てきました。このような分野は量子光学と呼ばれます。当初は新しい物理学の領域でしたが、現在は通信や情報処理のエンジニアリング、特に量子コンピュータや量子暗号の実用化のため研究が進められています。

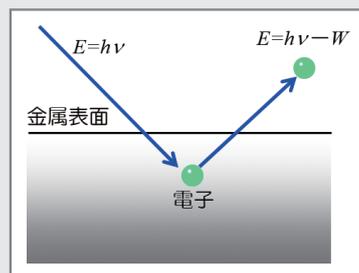
新たな研究や技術開発を担うのはこれからの皆さんです。皆さんは、ご自身もまだ発掘できていない多くの可能性と魅力を必ずもっています。大学は仲間や教員と一緒に勉強や研究などを通してトレーニングをする場所です。皆さんが社会に出た後に大いに活躍できるようにいっぱいサポートしつつ心より応援しています！

参考文献

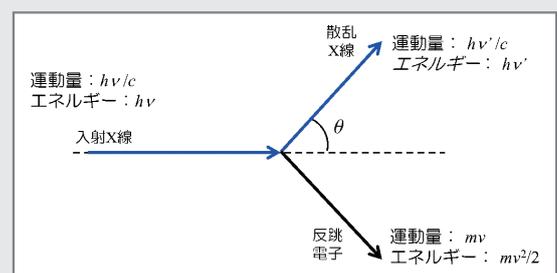
- 1) R. J. Stephenson, *Am. J. Phys.* 35, 140 (1967).
- 2) R. A. Millikan, *Phys. Rev.* (I) 32, 349 (1911).
- 3) 下村 武 (2001)「電子物性の基礎とその応用」コロナ社
- 4) 遠藤 雅守 (2014)「電磁波の物理」森北出版株式会社
- 5) X. Yang, *et al. Sci. Rep.* 6, 37214 (2016).



【図8】物体の発光スペクトル⁵⁾



【図9】光電効果と仕事関数 W



【図10】コンプトンの散乱実験