

光のエネルギーと温度について

Comment on Energy and Temperatures of a Light

石塚 互, 宮永健史, 神田和香子
Wataru ISIZUKA, Takeshi MIYANAGA, Wakako KANDA

1. はじめに

電磁波のなかで、その波長がおよそ4000~7000Åほどの範囲に入っているものが可視光線、つまり目に見える光である。光は重要な教材の一つとして、小学校から高校までの理科の中でくりかえし扱われているが、たとえば鏡面による反射、回折・干渉、光電効果などのように、それぞれの段階に応じて直進性や波動性、粒子性といった、光の持つ一つの側面だけを強調して取り上げられる。

最近の指導要領の改定に伴って、とくに高校では幾何光学が復活し、また同時に（簡単にではあるが）、原子の分野でクォーク模型まで加えられた。理科（とくに物理の分野）で学習する項目は、量的にも質的にも、一貫して増加している。それで生徒も、教師の方でも、新しいことを追いかけていくのがやっと、という状況に置かれているのではないだろうか。「多くの現象の中に潜む、共通性を明らかにする」という物理学の本来の面白さに触れる余裕が持たなくなっているのでは、という危惧を覚える。そして、何人かの現職の教員の方に伺ったところでも、この懸念は当たっているように思われる。

改めて述べるまでもなく、「電磁波と光」「熱と温度」「エネルギー」「量子論」などは、お互いに何本もの糸で繋がっている。そして、この繋がりの発見こそが物理学を深めてきた。これはいわゆる「教科書の範囲」を越えるのかもしれない。しかし「統一」を目指すというのが物理学の基本的な態度である以上は、少なくとも教師の側では、この繋がりを常に意識しながら授業を展開するのが望ましい。そのことが、生徒の興味を喚起する助けにもなるに違いない。

本研究では、一つの典型的な例として「電磁波」から「温度」に伸びている糸に光を当ててみる。実際の授業に直ちには役立たないにしても、とくに電磁波の本質について教える際の参考にさせていただきたい。

2. 光の「質」と「量」

私たちが肉眼で捉えられる電磁波が「可視光線（狭義の光）」であるが、私たちの目（というよりも脳）は光の波長の違いを、色の違いとして認識する。波長が短い〔長い〕ものが青く〔赤く〕見える。一方で光の振幅の大きさは、光の明るさを決める。そこで、光の波長と振幅とを、それぞれ光の「質」と「量」として考えることもできるだろう。

凸レンズで太陽の光を集めて、紙を燃やしたことがあると思う。レンズの代わりに大きな反射鏡を使ったものが太陽炉で、これで鉄を蒸発させることができる。しかし、どんなに巨大な太陽炉を使っても、水素原子をイオン化してプラズマを造ることはできない。太陽の表面温度は約

5000度で、これは鉄の沸点の約3000度よりも高いが、水素のイオン化エネルギーの13.6 [eV]よりも低い。鏡やレンズは、基本的には元の物と同じ物、つまり「像」を造る。太陽炉の焦点の位置にできるのは、そこに連れて来られた太陽の表面である。ただし大きな太陽炉を使えば、大量の鉄を蒸発させることはできる。

ところで私たちに身近な波として、光（電磁波）の他に、音（音波）があるが、こちらにも同じような質と量の、つまり波長と振幅の違いがある。それぞれの違いは、音の高低と、強弱の違いとして現れる。私たちの耳に聞こえる波長を持つ音波が、可聴域にあるわけで、可視光線に対する可聴音波にあたる。このように波長と振幅と、波が持っている別々の性質を反映する。

電磁波や音波に限らず波は一般にエネルギーを運ぶ。先にあげた太陽炉の例を思い出して、これを「熱エネルギー」としよう。すると、波長が「温度」に振幅が「熱量」に相当すると看做すことができる。熱力学の言葉では、温度は「示性値」で熱量は「示量値」である（同じ物を2つ合わせたときに、温度は変わらない。熱量は2倍になる）。電磁波の波長 λ とエネルギー E （の質、つまり温度）の間の関係が、次のプランクの式に他ならない。

$$(1) \quad E = hc / \lambda .$$

ここで c は光速（ 3.0×10^8 [m/sec] ）、 h はプランク定数（ 6.6×10^{-34} [J・sec] ）である。

3. 光の波長と温度

地学の天文分野で扱う内容なのだが、恒星の色と（表面の）温度の間には、簡単な関係がある。赤い星はおよそ3000度で、青い星は10000度以上とされている。温度が高ければ、そこからやって来る電磁波の波長が短い。式(1)によれば、これはエネルギー（の質）が高い電磁波である。しかし恒星は遙かに遠いために、そこから届くエネルギー（の量）は小さい。

私たちの太陽の表面温度は約5000度で、この温度に対応する波長の光の色は黄色である（実際には、あらゆる波長領域の電磁波が放射されているのだが、その中で黄色の可視光線のエネルギー強度（エネルギーの「量」）が最大になっているのである。「最大強度の電磁波の波長」が温度とともに短波長側にシフトしていくことは、ウィーンの変位則として知られている。なお、放射されるすべての電磁波のエネルギー（の量） E と、温度 T との関係は、次のステファン・ボルツマンの式で表わされる。

$$(2) \quad E = \sigma T^4$$

$\sigma = 5.6 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴] は定数である。

太陽光は強度のピークは黄色の可視光線の波長位置にあるが、電波から（微量だが）X線までのすべての波長の電磁波を含んでいる。つまり黄色の「量」が比較すれば最大だが、他の色（つまり「質」）も備えている。太陽の光を「暖かい」と感じるのは、その中の赤外線のおかげであり、メラニン色素が沈殿して色が黒くなるのは紫外線のためである。赤外線では火傷はしないが（赤外線の「量」にもよるが）、紫外線は皮膚をつくる分子を燃やしてしまう。

以上のような、太陽のような「黒体」から放射される電磁波と対象的なものが、レーザーである。レーザーは波長（と位相）が揃った特殊な電磁波なのだが、教科書的な意味では典型的な電磁波と行うことができるだろう。これは「きれいな」波であり、空間を伝わって行く電界と磁界の強さが正弦波で表わされる。

4. 量子としての光

量子論は、現代の物理学・化学・工学の基礎であり、電磁波の量子、つまり光子（光量子）は教科書にも現れる。その例は光電効果やコンプトン散乱などであり、ここでは光が持つ「粒子性」の説明がされる。言い替えれば、光子は電磁波の「1単位」なのである。実際、電磁場の量子論によると、電磁波の強度（エネルギーの量）は、その電磁波を造っている光子の数に比例する。光子を電磁波として見たときには、したがって振幅は「1」に等しい。

そこで、光子の性質は波長だけで決まることになる。波長が可視光線よりも更に長くなると赤外線・マイクロ波・電波、逆に短くなっていくと、紫外線・X線・ガンマ線などのように呼ばれる。式(1)は実は、光子の波長と光子のエネルギーの関係を表わす。容易に確かめられるように、可視光線の光子のエネルギーは、1エレクトロンボルト（1 [eV] $\cong 1.6 \times 10^{-19}$ [J]）程度である。

5. エネルギーと温度

エネルギーEと温度Tの関係を、直接的に表わしているのが、古典統計力学から得られる（したがって「めやす」ではないが）、次の式である。

$$(3) \quad E = k_B T$$

k_B (1.4×10^{-23} [J/deg]) はボルツマン定数である。これによれば、1 [eV] は、約10000度にあたる。

普通の化学反応に関わる温度（熱量ではなく）は、数100～数1000度だろう。式(3)と式(1)から、この温度に相当する波長を持つ光子は、主に赤外線～可視光線であることが分かる。化学反応では、分子・原子の間での組み替えが行われる。そのためには数100～数1000度まで温度を上げるのだが、代わりに、この波長領域の光を照射してもよい（先にあげた、凸レンズ・太陽炉の例）。

温度さらに上げていくと、原子が原子核と電子に分解する（イオン化）。水素のイオン化エネルギーは13.6 [eV] である。したがって、これを熱エネルギーとして供給するためには10万度以上の高温にしなければならないが、波長が約900 [Å] の電磁波をあててもよい（式(1)で $E = 13.6$ [eV] とする）。これは紫外線である。

原子の中の原子核と電子が完全に分かれしまうと、プラズマの状態になる。プラズマの中には電磁波（光子）も必ず入っていて、原子核・電子と交じり合って「熱平衡」の状態になっている。つまり光子にも温度があって、可視光線の温度は数千～1万度ほど、紫外線では数万度になる。もっと高温の（エネルギーの高い）光子がX線やガンマ線で、1億度以上にもなる。

原子核が壊れる（本体の原子核から、陽子や中性子が「蒸発」する）温度は数兆度。陽子・中

性が「溶けて」、クォークが現れるには、10兆度以上の温度が必要になる。このような高温度（高エネルギー）の状態は、素粒子の実験装置である巨大な加速器の中で作り出される。原子・原子核・素粒子のように小さなものを壊すのは、「質」の面で、大きなものを壊すことよりも難しい。

6. おわりに

本稿で論じた内容に関わる授業の際に、説明の助け（あるいは演示実験）に使えるような小道具の例をあげておこう。波長の長い順に、あるいはエネルギーの低い（「少ない」ではない）順に、液体窒素（カップ麺の容器にも入れられる）・レーザーポインター・簡易型ガンマ線測定器である。

液体窒素からは沸点の -196 〔 $^{\circ}\text{C}$ 〕に対応する、可視光線に比べれば波長の長い電磁波が出ているはずである。むろん目に見えるわけではないが、これは遠赤外線にあたる。液体窒素は、それ自身が生徒の興味をかきたてるのに有効な素材だろう。

スライドを使用するとき便利なレーザー・ポインターは、可視光領域の「きれいな」電磁波を作ってくれる。放射される光子は、可視光線の赤色のところに波長が揃っている。この光の「エネルギーの質（つまり温度）」は赤色の約3000度だが、電源は2個の乾電池で、エネルギー量は小さい。

ガンマ線測定器は、例えば（財）放射線計測協会などから貸し出しを受けられるが、これを使って電磁波の「粒子性」を実感することができる。ガンマ線は、装置の中に「ポツ・ポツ」と入って来るのであり、その個数が表示される。

いずれも、生徒の手に持たせて行うことができるもので、その効果については自明だろう。

温度と光の波長、そしてエネルギーに関わる研究が、量子論に始まる現代物理学の出発点であったことを思えば、本稿で示したような「光」から広がる教材間の関連付けは、ダイナミックな物理の姿を示すのに格好の方法であると思う。