

7.2 プランク、アインシュタイン、エネルギーと光子

プランク式

一片の金属を加熱します、金属は温度に依存した波長の電磁放射線を放出します。初めの色は鈍い赤です。温度が上がると赤色が輝きを増し、更に高温になると、その赤さが光輝く白色光に変わります。例えばトースターの加熱部分は赤熱で、電球のフィラメントは白熱色に輝きます。

目は電磁波スペクトルの可視領域で起こっている加熱された金属からの放射を見ているわけです。けれどもこれらは金属が放出している光の唯一の波長ではありません。放射は可視光よりも短い(紫外)及び長い(赤外)波長でも起こっています。すなわち電磁放射はある波長では他の波長よりも強く発光しているのです(Fig. 7.5)。金属が加熱されると、光強度対波長の曲線の関係がますます紫外領域にシフトします、輝いている物体の色が赤から黄に、最後には白熱色に輝きます。

Fig. 7.5 熱せられた物体からの放射光のスペクトル。赤線は、強度最大の波長が赤い波長にあることから、赤熱物体のスペクトルです。物体の温度が上がると、最も強い放射の波長が短波長側に (紫外に向かって)移動し、物体の色はオレンジ色から黄色になります。非常に高温では物体は白熱状態になり、可視スペクトルの全波長領域でほぼ同じ放射強度になります。

19世紀の終わり、科学者は熱物体の発光の性質を説明しようとしていました。熱物体の中で振動する原子が電磁振動(光波)を引き起こして発光し、その光波は、連続的に変化する領域ではどんな周波数(振動数)も取れると考えました。古典的波動理論は物体が熱くなり、エネルギーを受け取ると、色は青側にシフトし、最後には紫、更に大きくシフトすると。しかし現実はそうではありませんでした。これは“紫外の悲劇的結末”として知られるようになりました。

1900年、Max Planck (1858-1947)は熱い物体のスペクトルの解釈を提出しました。この解釈には科学的思想の革命の種が含まれていました。彼は当時としては信じがたい仮定を行いました：物体が放射線を出す場合、常に放出される最小量のエネルギーが必要だと。すなわち小さなエネルギーの束があり、それより少量では放出されません、丁度原子が元素の最小の束であるように。プランクはこのエネルギーの束を**量子(quantum)**と名付けました。さらに量子のエネルギーが次式のように放射線の周波数(振動数)に関係づけられることを示しました。

$$E_{\text{quantum}} = h \cdot \nu_{\text{radiation}} \quad (7.2)$$

比例定数 h は今では**プランク定数(Planck's constant)**と呼びます。その値は $6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ です。

この章の始めに、625nm のオレンジ色の光の周波数(振動数)が $4.80 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$ と計算しました。ここでオレンジ色の光の1量子のエネルギーを計算することが出来ます。

$$E = h\nu = (6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(4.80 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}) = 3.18 \times 10^{-19} \text{ J}$$

プランクの研究に基づいた理論を**量子論(quantum theory)**と呼びます。この理論を使って、プランクは熱せられた物体が発する光の各周波数(振動数)の量子数を計算しました。秒当たりの量子の数は放射の強さを表し、周波数(振動数)が波長に関係しているので、熱い物体のスペクトルを計算することが出来ました。その結果は実験的に測定したスペクトルと非常に良く一致しました。

アインシュタインと光電効果

理論やモデルが実験事実を正確に予測する場合、普通、その理論は正しいとみなされます。驚いたことに、プランクの理論は初めは余り受け入れられませんでした、主にエネルギーが量子化されるという急進的な仮定のためでした。しかし Albert Einstein (1879-1955)が光電効果の説明に、その理論を用いた後は、プランクの量子理論はしっかりと受け入れられました。

光電効果(photoelectric effect)は光が金属の表面に衝突し、電子が飛び出した時に起こります(Fig. 7.6)。光によって光電陰極から飛び出した電子は、正に帯電した陽極に動き、その結果、電池に電流が流れます。光が電流の流れを引き起こすので、光電管は光起動スイッチとして働きます。商店やエレベーターの自動開閉扉はこの方式で行われています。

Fig. 7.6 光電効果。(a) 光電管は光電効果によって作動します。光電管の主要部分は光電(光増感)陰極です。これは、十分なエネルギーの光子が当たると電子を放出する材料、普通は金属です。放出された電子は陽極に移動し、光電管に電流が流れます。このようなデバイスを電気回路のスイッチに用います。(b) 入射光の周波数が増すと、ある臨界周波数に届くまで、電流は観測されません。それ以上の高い周波数の光は光電

陰極の表面から電子を放出させるエネルギーを充分持ちます。高強度の光、すなわち光子密度の高い光では、より多くの電子が表面から放出される効果のみが見られます；電流の流れ始めは低光強度の場合と同じ周波数からです。最低よりも高い周波数の光を用いた場合、光子の過剰のエネルギーは単に電子を原子からより大きな速度で離れさせるだけです。

光電池の実験が示すように、表面から電子が飛び出るのはある最小の周波数(振動数)の光が用いられた場合です。周波数(振動数)がその最小よりも低いと、光の強度(明るさ)には無関係に、光電効果は起こりません。周波数(振動数)が最小値よりも大きいと、光の強度が強いほど、多くの電子が放出されます。アインシュタインは、これら全ての観察結果がエネルギー量子のプランクの考え方と、光が波の性質を持っているだけでなく粒子としての性質を持つものとしての認識を組み合わせることで説明できると結論しました。アインシュタインはこれらの質量のない粒子を**光子(photon)**と呼び、それはプランクの法則によって駆動されるエネルギーを持っています(Eq. 7.2)；すなわち光子の流れの中の各光子のエネルギーは、その波の周波数(振動数)に比例します。

光電効果は、アインシュタインの提案を用いて容易に説明されます。原子に電子を失わせるには、高エネルギーの粒子が原子の中に飛び込まねばならないことは容易に想像できます。ある最小量のエネルギーさえ用いれば、電子が原子から引き離される考え方も合理的に受け入れられます。もし電磁放射もアインシュタインが言うように、光子の流れと考えますと、光の強度が大きくなると、より多くの光子が存在します。従って、金属が何百万の光子に衝突されても、個々の光子が原子から電子を移動させるだけのエネルギーがなければ、金属表面の原子は電子を失うことはありません。一度臨界エネルギー(すなわち最小の光周波数(振動数))を越えると、各光子のエネルギー含量は金属原子から電子を十分移動させます。この最小エネルギーが与えられれば、十分なエネルギーを持ったより多くの光子がより多くの電子を追い出します。このように最小エネルギーを越えた後は、光の強度と放出される電子の数には関係が生じます。

エネルギーと化学：プランク式を用いて

CD プレーヤーは波長 685nm の赤色光を発するレーザーを用います。この光の 1 光子のエネルギーはいくらですか？その光の 1 モルの光子のエネルギーはいくらですか？第一段階は波長を周波数(振動数)に変換することです、そしてこれを光子当たりのエネルギーの計算に使うことです。最後に 1 モルの光子のエネルギーは光子当たりのエネルギーにアボガドロ数を掛けると得られます。

$$\begin{aligned} \lambda, \text{ nm} &\rightarrow \lambda, \text{ m} \rightarrow \nu, \text{ s}^{-1} \rightarrow E, \text{ J/photon} \rightarrow E, \text{ J/mol} \\ &\quad \times 10^{-9} \text{ m/nm} \quad \nu = c/\lambda \quad E = h\nu \quad \text{Avogadro's number} \\ 685 \text{ nm} (10^{-9} \text{ m/nm}) &= 6.85 \times 10^{-7} \text{ m} \\ \nu &= (2.998 \times 10^8 \text{ m/s}) / (6.85 \times 10^{-7} \text{ m}) = 4.38 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} \\ E = h\nu &= (6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s/photon})(4.38 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}) = 2.90 \times 10^{-19} \text{ J/photon} \\ E &= (2.90 \times 10^{-19} \text{ J/photon})(6.022 \times 10^{23} \text{ photons/mol}) = 1.75 \times 10^5 \text{ J/mol} \end{aligned}$$

赤色光の光子 1 モルのエネルギーは 175 kJ に相当します、青色光($\lambda=400 \text{ nm}$)の光子 1 モルは約 300 kJ のエネルギーを持っています。これらのエネルギーは原子間の結合に影響を与える領域にあります。それ故、光が化学過程に結びつくことは驚くべきことではありません。例えば日光が塗料や色素を退色させたり、衣料を分解する場合を見たことがあるでしょう。

前出の計算が示すように、放射の周波数(振動数)が増えると、放射のエネルギーは増加します(Fig. 7.3 参照)。

$$\text{Energy} = \text{プランク定数} \cdot \text{周波数}$$

同様に放射の波長が短くなると、エネルギーは増加します。

$$E = h \cdot \nu = (h \cdot c) / \lambda$$

それ故、紫外放射の光子は—可視光よりも短い波長を持った—可視光よりも高いエネルギーを持ちます。可視光が原子間の結合に影響を与えるだけ充分のエネルギーを持っているわけですから、紫外光も同様の働きをすることは明かです。日焼けを避けようとするなら、紫外光を避ける必要があるのはこのためです。反対に、赤外放射の光子は—可視光よりも長い波長を持った—可視光よりも低いエネルギーを持ちます。それを電気ストーブの輝く火口からの熱として感じるでしょう。

例題 7.2 光子エネルギーの計算を行う

練習問題 7.3 光子エネルギー

問題を解く鍵と考え方

7.1 エネルギー、周波数(振動数)、及び波長