光電効果と光子の理論

filename=photon-text141020A
made by R. Okamoto(Emeritus Prof. of Kyushu Inst. of Tech.)
（＊印の項目は初回学習時にはスキップしてよい。）

1 光電効果とその特徴

紫外線や波長の短い可視光線を金属に照射すると、金属表面から電子が飛び出してくるという現象は光電効果（photoelectric effect）として 19 世紀末から知られていた。

光電効果に関する実験結果の特徴は以下のようにまとめられる。

1. 金属にあてる光の振動数 f がその金属に特有なある値（限界振動数）f_0 より小さいと、どんなに強い光をあてても電子は飛び出さない。

2. この限界振動数よりも大きい振動数の光を金属に当てると電子が飛び出す。飛び出した電子はいろいろな大きさの運動エネルギーをもつが、最大の運動エネルギー $K_{\mathrm{max}} = m_{\mathrm{e}}v_{\mathrm{max}}^2/2$ は、光の強さに無関係で光の振動数 f だけで決まり、
$$K_{\mathrm{max}} = hf - hf_0 \tag{1.1}$$
と表される。ここで h はプランク定数よばれる普遍定数である。

3. 金属にあて光を強くするすると、飛び出す電子の数はあてた光の強さに比例して増加。

4. どんなに弱い光でも、光の振動数が限界振動数 f_0 よりも大きければ、光をあてるとただちに電子が飛び出す。

光が波動であると考えると, 特徴 (3) は理解できるが, 特徴 (1),(2),(4）は理解できない。

2 光子仮説による光電効果の説明

ミクロな系（要素的過程）についてのアインシュタイン (A. Einstein, 1905) の考え

1. 振動数 f の光は hf という大きさエネルギーをもつ量子的粒子 (光子, フォトン、photon）の流れであって、光電効果ではこの光子が金属中の電子に衝突すると、そのエネルギーは一度に電子に吸収される。

2. 電子が金属表面から飛び出るのに必要な最小限のエネルギーを hf_0 とすると、振動数が hf_0 以下の光では必要なエネルギーを電子にいっぺんに与えることができないので光電効果は起こらない。

3. 金属内部の電子はさまざまなエネルギーをもっているが、その中で最大の運動エネルギーをもつ電子は光子から hf のエネルギーをもらい、f が f_0 よりも大きい場合には表面から飛び出るために hf_0 のエネルギーを使うので、残りのエネルギー $(hf - hf_0)$ を運動エネルギーとしてもらって金属の外に飛び出す。

（アインシュタインは光子仮説による光電効果という現象の理論的解明により，1921 年度のノーベル物理学賞を受賞した。）

3　光子のエネルギーと光の強さ

電磁的放射 (または電磁波）は光子と呼ばれる不連続なエネルギーをもつ量子的粒子の流れ (＝線束、beam) と見なされる。この電磁波の波長を λ とすると、その振動数 f は $f = c/\lambda$(c:真空中の光速)、角振動数 ω は $\omega = 2\pi f$ となる。プランク定数を h、ディラック定数を $\hbar \equiv h/2\pi$ とすると 1 個の光子のもつエネルギー E は

$$E \;=\; hf = \hbar\omega \tag{3.1}$$

である。この式を**アインシュタインの関係**という。定数とディラック定数の値はそれぞれ次のように与えられる。

$$h \;=\; 6.6260755 \times 10^{-34}\mathrm{J}\cdot\mathrm{s}, \tag{3.2}$$

$$\hbar \;\equiv\; \frac{h}{2\pi} = 1.05457266 \times 10^{-34}\mathrm{J}\cdot\mathrm{s}. \tag{3.3}$$

電磁波は光子の流れ (＝線束）と見なされると上で述べたが、巨視的世界の現象においては、プランク定数が非常に小さいので、その不連続性が目立たず、あたかも連続的であるかのように、解釈されてきた。

一方、アインシュタインの発表した特殊相対性理論 (1905 年）はその後、多くの実験事実を説明してきた。特殊相対性理論の結論の一つは質量 m、運動量 p をもつ粒子の相対論的エネルギー E は一般に

$$E \;=\; \sqrt{(mc^2)^2 + (cp)^2} \tag{3.4}$$

で与えられる。光子に対して、この結果を適用すれば、質量 $m = 0$ であるから

$$E \;=\; cp \to p = \frac{E}{c} \tag{3.5}$$

となる。(特殊相対論においては質量ゼロでも運動量をもつこと！）式 (3.5) に (3.1) を代入すると、次のように光子の運動量が得られる。

$$p \;=\; \frac{hf}{c} = \frac{\hbar\omega}{c}. \tag{3.6}$$

電磁波の強さ I(intensity) は単位時間に，電磁波の進行方向の単位面積あたり通過するエネルギーと定義される。電磁波を光子の線束（beam, ビーム）を解釈すれば、ビームが単色、すなわち単一の波長，振動数をもつなら、

$$\begin{aligned}(\text{ビームの強さ}) \;&=\; \frac{(\text{通過するエネルギー})}{(\text{面積}\,\mathrm{x}\,\text{時間})} \\ &=\; (\text{光子 1 個のエネルギー})\frac{(\text{光子の個数})}{(\text{面積}\,\mathrm{x}\,\text{時間})} \end{aligned} \tag{3.7}$$

となる。面積 A を通じて、Δt 時間に通過する光子数を ΔN とすれば

$$I \;=\; hf\frac{1}{A}\frac{\Delta N}{\Delta t} = \hbar\omega\frac{1}{A}\frac{\Delta N}{\Delta t} \tag{3.8}$$

と書ける。さらに、このビームの仕事率 (power)P、すなわち単位時間あたりに通過するエネルギーは

$$
\begin{aligned}
P &= I \times A \\
&= hf\frac{\Delta N}{\Delta t} = \hbar\omega\frac{\Delta N}{\Delta t}
\end{aligned} \tag{3.9}
$$

となる。

4　光電効果 (光の粒子性）の実例と応用

4.1　光化学反応（１）ー写真の原理ー

4.2　光化学反応（２）ー日焼けー

4.3　夜空の星はなぜ見えるか？

4.4　太陽電池の原理

参考文献

[1]