



小島 英夫 (静岡大学) 訳

(Квант, 1984, No. 2, cc. 29-31; 1985, No. 2, cc. 26-28; No. 3, cc. 20-22)

1. 完全黒体 I.K. ベルキン

光と色 昼の光で (太陽光の下で) 周りがある、いろいろな物体を見ると、それが種々の色を帯びているのが分かる。草や木の葉は緑に、花は赤や青、黄色や紫に。また、黒や白や灰色の物もある。この事実は驚くべきことではないだろうか。すべてのものが、同じ光、つまり太陽光で照されているのではないだろうか。なぜそれらの色は違うのだろうか？ この疑問を解いてみよう。

光は電磁波であること、すなわち空間を伝わる交流の電場と磁場であることを、まず確認しておこう。太陽光の中には、種々の振動数で振動する電場と磁場の波が含まれている。

すべての物体は、互いに相互作用する荷電粒子を含む原子や分子からできている。粒子が電荷を持っていると、電場の作用の下で粒子は動かされ、交流電場の中では振動することができる。しかし、物体中の各粒子は一定の固有振動数を持っている。

この説明は、非常に正確と言う訳ではない。簡単な概念でありながら、光が物質と相互作用したときに起こる現象を理解するのに役立つ。

物体に光が当たった時、物体に〈加えられた〉電場はその中の荷電粒子を強制的に振動させる (光波の電場は振動している)。そのとき、物体中の粒子の中には固有振動数が光波の振動数に一致するものがあるかもしれない。そのような時には、共鳴現象が起こり、振動の振幅が著しく大きくなる。共鳴の際には、波のエネルギーは物体の原子に与えられ、最終的には物体を加熱することになる。振動数が物体の固有振動数と一致して共鳴した光は、物体によって吸収されることになる。

しかし、入射した光の中には共鳴しない波も存在するだろう。その波も物体中の粒子を振動させるが、その振幅は小さい。それらの粒子は、同じ振動数のいわゆる 2 次電磁波の源になる。2 次波は入射波と一緒に反射波および透過波を作り出す。

物体が不透明であると、吸収と反射という、物体に光が当たったときに起こる可能性のある現象がすべて起こる：共鳴を起こさない光は反射され、起こす光は吸収される。物体の色の〈秘密〉はここにある。例えば、照射された太陽光の中の赤い色に相当する成分が振動と共鳴したとすると、反射光の中には赤い色の成分は存在しない。ところが人間の眼には、赤い色が失われた太陽光を緑色と感ずるようになっている。不透明な物体の色は、このように照射光からどの振動数の光が反射に際して失われるかによって決まる。

物体によっては、その中の粒子が多く、固有振動数を持っていて、照射光のすべて、あるいは殆どすべての振動と共鳴するものがある。すると照射光はすべて吸収され、まったく反射が起こらない。そのような物体は黒体、すなわち黒い色の物体、と呼ばれる。実際には、黒は色ではなく、すべての色が失われた状態である。

また、照射光のどのような振動にも共鳴しない物体もあり、その場合には吸収はまったく起こらず、すべての光は反射される。そのような物体は白色であるという。白色も色ではなく、すべての色の総和である。

光の放射 すべての物体は、その自体光の源 (光源) であることが知られている (本誌、本号の論文 3 参照)。つまり、すべての物体は振動する荷電

粒子を含んでいるので、放射される波の源に成り得るのである。しかし、普通の条件—あまり温度が高くない—では、放射される波の振動数は比較的長く、その波長は可視光線の波長より著しく長い(赤外線)。温度が高くなると、物体中には振動数のより高い振動が〈組込まれ〉、それが可視光線を放射し始める。

温度が上がった時、どのような振動数の振動が〈組込まれ〉、物体はどのような色の光を放射するのだろうか？ 明らかに、固有振動数の振動だけが起こり得る。低温では高い固有振動数をもつ荷電粒子は少なく、その放射は目に見えない。温度が上がると、そのような粒子の数が増えて可視光線を放射するようになるのである。

光放射と吸収の関係 吸収と放射は、互いに矛盾する現象である。そして、その間には共通のものは何もない。

吸収は光を〈受け取る〉ことであり、放射は〈与える〉ことである。ところで、光を吸収する時、物体はなにを〈受け取る〉のだろうか？ 明らかに、物体が受け取るのは、その粒子の固有振動数と同じ振動数の光である。物体が光を放射する時に与えるのはなんだろうか？ それは、振動の固有振動数に対応する光である。したがって、物体が光を放射する能力と吸収する能力の間には、密接な関係があるに違いない。そして、その関係は簡単なものである：放射する能力の大きい物体ほど、光をよく吸収する。したがって、最も明るく輝くのは、全ての振動数の光を吸収する黒体であることになる。この関係の数学的な表現は、1859年にドイツの物理学者 G. キルヒホフによって明らかにされた。

物体が光を放射する能力を、その表面の単位面積から単位時間に放射されるエネルギーで表わし、それを $E_{\lambda, T}$ と書こう。この能力は波長(λ)によっても、温度(T)によっても違うので、添字 λ と T を付けたのである。物体の光吸収能力を、単位時間に入射するエネルギーに対する吸収エネルギーの比と定義しよう。それを $A_{\lambda, T}$ と書くことにする。これも λ と T が違えば、違う値をもつ。

キルヒホフの法則は、全ての物体に対して放射能力と吸収能力の比が一定である、と表される：

$$\frac{E_{\lambda, T}}{A_{\lambda, T}} = C.$$

定数 C は物体の性質にはよらず、光の波長と物体の温度とに依存する： $C = f(\lambda, T)$ 。キルヒホフの法則によれば、ある温度で光をよく吸収する物体ほど、その光を強く放射することになる。

完全黒体 キルヒホフの法則は全ての物体に当てはまる。したがって、全ての波長の光を残らず吸収してしまう物体にも適用できる。そのような物体は完全に黒い物体(完全黒体)という。この物体にたいする吸収能力 $A_{\lambda, T}$ は、上の定義によって1であるから、キルヒホフの法則は次の形に書ける：

$$E_{\lambda, T} = C = f(\lambda, T).$$

この関係から、関数 $f(\lambda, T)$ の意味が明らかになる：これは完全黒体の光放射能力に等しい。関数 $C = f(\lambda, T)$ を見出す問題は、完全黒体の放射エネルギーの温度と波長とに対する依存性を見出す問題になる。40年後に問題は最終的に解決した。その解は、ドイツの物理学者 M. プランクによって与えられ、新しい物理学である量子物理学の出発点となった。

自然界には完全黒体は存在しないことを注意しておこう。今までに知られているものの内で、最も黒い物質であるカーボンブラック(煤)でさえ、入射する光のうち100%ではなく、98%しか吸収しない。したがって、完全黒体の実験をするには、人工的な装置を使うことになる。

完全黒体としては、小さな穴を開けた閉じた空洞が知られている(図1参照)。小穴に光線が入射すると、その光線は空洞の中で多くの反射を繰り返して、小穴から再び外へ出てくる確率は非常に小さい。(同じ理由で、家の開いた窓は明るい太陽の下でも暗く見える。)もし、そのような物体が加熱されると、小穴から放射される光は、完全黒体からの光と実質的に同じである。

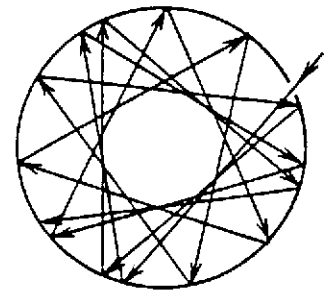


図1. 完全黒体

完全黒体の身代りには、一端を閉じたパイプ(管)を使うことも出来る。パイプを加熱すると、開いた方の端は完全黒体と同じ様に輝く。普通の温度では、空洞の小穴と同じ様に、それは完全に暗く見える。

2. 光電効果と量子 I. K. ベルキン

光電効果はドイツの実験物理学者 V. ハリファックスによって1888年に発見された¹。彼は負に帯電した導体に紫外線を照射すると、導体の電荷が急速に減少することを観察した。

光電効果は1888-1890年にロシアの科学者 A. G. ストレトフによって、少し後でドイツの科学者 F. レナートによって、詳しく研究された。その結果、1899年にレナートは、金属に紫外線(ときには可視光線)を照射すると、金属から負に帯電した粒子—電子—が放射されることを示した²。

(電子の発見については、本誌、1996年 No. 2 参照)。光の作用によって金属から電子が放射される事実自体は、驚くべきことではなかった。当時概に、光は電磁波であることが知られていた。つまり、金属表面に光を照射するという事は、交流電場を加えることである。その電場中で金属内の電子は振動し、振幅が十分大きくなると、正に帯電した粒子の引力を振切って金属から飛出す(振幅は振動のエネルギーを決定することを思い出そう)。飛出すまでの電子の〈往復運動〉には一定の時間がかかる(計算によれば、分の程度になる)ことが予想される。放出される電子の数は、明らかに、照射光の強さに依存する(つまり、光に垂直な方向の単位面積を単位時間に通過するエネルギーに依存する)。したがって、投光器の強い光は、当然、懐中電燈の光より多くの電子を放出させる。また、放出される電子のエネルギーも照射光の強さに依存するだろう。

そういう訳で、光の波動論によれば、次のような予測ができる：

1. 任意の光、つまり任意の波長の光は、交流電場を伴っているから、金属から電子を放出させることができる。

2. 金属から電子を放出させるには、一定の時間が必要である。それゆえ、光電子(光によって放出される電子)は光を照射してからある時間たつて現れる。

3. 放出される電子の数とそのエネルギーは光の強さに比例するに違いない(つまり、光波の振幅の2乗に比例する)。

ところが、ストレトフ、ハリファックス、レナート達の研究は、光電効果の法則がそれとは全く

違うことを示した。その結果は次のとおりである：

1. すべての光が金属から電子を放出させる訳ではない。それぞれの金属には一定の最小振動数(臨界振動数) ν_{min} (最大波長 λ_{max}) があり、それより振動数の小さな(波長の長い)光は、電子を全く放出させない。光波の振動数がその臨界振動数より小さいと、どんなに強力な投光器で光を照射しても、一個の電子も放出させることはできない。ところが、振動数が ν_{min} より大きいと、小さな懐中電燈でも電子を放出させることができる。この最小振動数(最大波長)を光電効果の赤色端と言う。

2. 金属からの電子の放出は、光照射とほとんど同時に起こる。この作用が瞬時に起こることが、種々の自動装置への応用において、光電効果を重要なものにしていく。

3. 光によって放出された電子は、種々の値の運動エネルギー -0 に近い最小値から、ある最大値 $mv^2_{max}/2$ までの $-$ を持つ。光電子のこの最大エネルギーは、照射する光の振動数に依存し、光の強さには依存しない。光の強さは放射される電子の数に比例する(これを光電効果についてのストレトフの法則と言うことがある)。

このようにして、当時、光の色には関係するが、光波のエネルギーには全く関係ないと思われていた、光の振動数の重要な役割が明らかになった。光電効果の法則は、光の波動論と矛盾することがはっきりした。

光電効果を理論的に解明する仕事は、1905年に、A. アインシュタインによってなされた。彼は、光電効果において光が波としてではなく、エネルギーが等式 $E= h\nu$ で与えられる粒子—光量子—の流れとして振る舞うことを示した。この関係は、5年前にプランクが全く違う過程を説明するために導入したものだった。

光電効果は、光量子が金属の電子と衝突し、そのエネルギーと運動量を相手に与えることによって起こる(光量子そのものは消えてしまう)。照射された光の量子のエネルギーが、正に帯電した物質中の粒子からの引力に打ち勝つために電子が必要とする仕事より大きければ、電子は金属から放出される。量子のエネルギーがその仕事(金属から電子を取り出す仕事、金属の仕事関数とい

う)より小さければ、金属からは一個の電子も放出されない。

臨界振動数、つまり光電効果の赤色端、の意味が明らかになった：金属から電子を放出させるためには、光量子のエネルギーは $h\nu_{min}$ より大きくなければならない。このエネルギーはその金属の仕事関数 A に等しい。照射光のエネルギー $h\nu$ が A より大きいと、放出される電子の最大運動量は、差 $h\nu - A$ に等しい：

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = h\nu - A.$$

これが光電効果にたいするアインシュタインの公式である。ふつう、この式は次のように書かれる：

$$h\nu = A + \frac{mv_{max}^2}{2}.$$

光の強さは、どんな役割もしないのだろうか？ そんなことはない。光が光電効果を起こす時、単位時間に放出される電子の数は光の強さに比例する。光の強さは、光波の振動振幅には関係せず、光源から単位時間に放出される量子の数に関係する。2倍<強い>ランプは、2倍の数の量子を放出する；そのランプの光は2倍の数の電子を金属から放出させる。しかし、放出された電子のエネルギーはランプの光の強さには依存しないで、その光の色に依存する。

アインシュタインの理論は、実験的に綿密に検証された。特に正確な測定が、1916年にアメリカの物理学者 P. ミリカンによってなされた。その研究の結果を、電子の最大運動エネルギーの光の

3. 見えないものを見る I. K. ベルキン

自然は、虹を構成するすべての色で彩られた周囲の世界を見ることの出来る視力を、無償でわれわれに贈ってくれた。しかし、われわれの視覚には限界があることも認めなければならない。まず、非常に小さいものや、非常に遠方の物体はよく見えない。次に、肉眼で見るのできる光の波長は、ほぼ $0.4-0.8\mu\text{m}$ に限られている。この領域は、自然界に存在する電磁波の波長領域のうち、ほんの僅かな部分にしかすぎない。

自然はある種の生物にはたいして、人間よりも豊かな視力を、他のものには貧しい視力を与えた。鷲は非常な高度を飛びながら地上のネズミを見つることができ、フクロウは暗闇でも見るこ

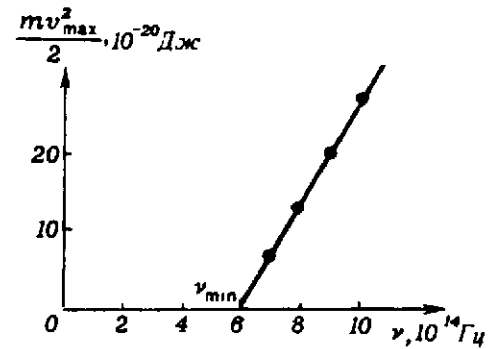


図2. 光電効果と量子

振動数に対するグラフとして図に示した（図参照。この図は金属バリウムにたいするものである）。このグラフに、アインシュタインの理論の要点がすべて含まれている。このグラフから、次のことが分かる；光の振動数が臨界値 ν_{min} より小さいと、電子のエネルギーは零である。運動エネルギーは、アインシュタインの式に従って、振動数 ν に（正確には振動数の差 $\nu - \nu_{min}$ に）比例して増加する。グラフの勾配（勾配の角の正接）はプランク定数 h の値を決める。

光電効果の発見とその研究の結果、光の波動論と並んでもう一つの理論—光の量子論—の存在することが分かった。1921年に、重要な物理—数学的研究、特に光電効果の法則の発見によって、アインシュタインはノーベル賞（科学的な業績に対する最高の国際的な賞）を授賞した。1923年には、ノーベル賞が素電荷と光電効果の領域における研究に対してノーベル賞が P. ミリカンに与えられた。

とができるが、モグラは夜でも昼でも殆ど目が見えない。

科学と技術が進んだ結果、人間は視力を<武装>するようになった。まず、可視光線の領域で視力を<敏感に>した。既に17世紀に顕微鏡と望遠鏡が作られ、微生物を発見し、月の山を観察した。20世紀は、質的に新しい可能性を開いた。新しい量子物理学の急激な発展で特徴付けられる。例えば、光電効果（本誌、本号、前論文）を使うと、人間の目で<見える>光の波長領域を広げることができる。この問題を少し詳しく考察しよう。

30年代に、V. ホルストをリーダーとするオランダの物理学者のグループが、弱い光で撮影した

写真の質を改良する問題に取り組んだ。彼等が用いた方法は単純なものであった。普通の写真乾板は、被写体から反射してきた可視光線に感応するようにできている。他方で、被写体自身は(絶対零度以外の温度では)熱線と呼ばれる、長い波長の電磁波の発信源である。ところで、この電磁波の波長は、放射されるエネルギーの分布の最大値に対応する波長であり、それは温度に依存する。

(図1のグラフ参照。横軸は波長で、縦軸は単位波長の中に放射されるエネルギーである)。物体の温度が高いと、基本的に可視領域の光が放射される。室温で、普通に写真撮影が行

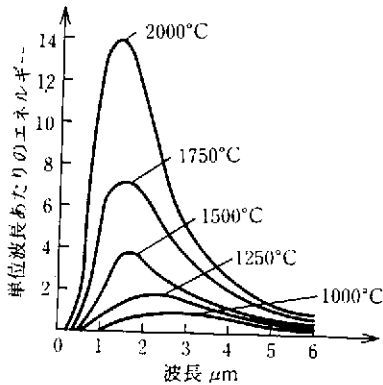


図1 熱放射エネルギーの波長にたいする分布

われるときには、放射光のエネルギーの最大値は目に見えない赤外線領域にある。この目に見えない赤外線をもっと波長の短い、写真乾板に写る光に変換することができれば、弱い光の下でも、あるいは暗闇でも写真を撮ることができよう。

このような変換器が作られ、電子光学変換器と名付けられた。その基本的な素子は、光電陰極—アルカリ金属(セシウム、ルビジウムまたはカリウム)の原子を含む物質で出来た透明な薄膜—である。これらの材料の光電効果の長波長端 λ_{max} は赤外領域にあり、この薄膜に、波長 λ が条件 $\lambda < \lambda_{max}$ を満たす赤外線が当たると、そこから電子が飛出す。光電効果で放出される光電子を補うために、非常に薄く、透明な金属層をこの薄膜に被せてある。

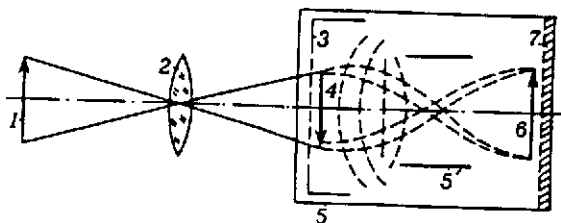


図2 電子光学変換器の概念図

1. 被写体；2. 対物レンズ；3. 光電陰極；
4. 被写体1の像；5-5'. 集束電極；6. 電子による像
7. 蛍光物質をうけた陽極

電子光学変換器の概念図を、図2に示した。赤外線を発する被写体1の像が光電陰極3にできる。上に述べたように、薄い金属層は光線には影響せず、光電陰極にできた被写体の像の位置から、反対側に光電子が飛出す。光電陰極から一定の距離に陽極7があり、その表面は発光性物質で覆われている(この部分は普通のテレビの画面と同じである)。陽極と陰極の間には高電圧がかけられ(数万ボルトの)、光電陰極から出た光電子を加速する。すると、電子は陰極から陽極に向かって流れ、条件を整えると陽極面上の電子の分布が被写体の形を再現するようになる。陽極に当たった電子はそこで発光を起こす。光電陰極が赤色光線および赤外光線に敏感であれば、陽極のルミネッセンスは青、紫の光線あるいは紫外光線でさえ発光することができる。換言すれば、目に見えない赤外線の像が光電陰極に投影されると、陽極には目に見える像が生ずるのである。

ここでは、1933年にホルストが仲間と一緒に作った電子光学変換器の動作の基本原則だけを説明した。彼等の実験によって、光電効果を使うと、目に見えない長波長の光を、目に見える波長の短い光に変換できることが示された。

この50年間に光電変換技術は非常に進歩した。それは現在写真だけでなく、科学研究、兵器開発、技術、宇宙飛行などに応用されている。

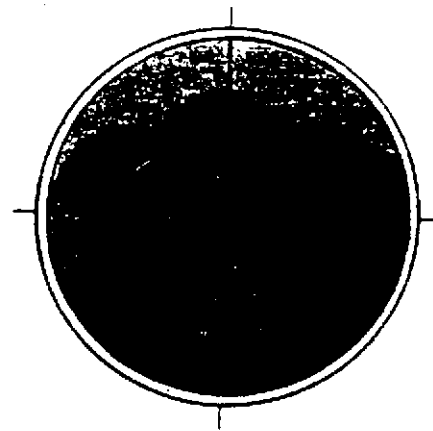


図3 赤外線(熱線)で写した暗闇の中の人のシルエット

- 1) それより前に、ドイツの物理学者 G. ヘルツは、二つの電極の間の火花間隙に紫外線を照射すると、火花放電がより活発に成ることを観察していた。
- 2) 正確に言うと、固体あるいは液体から電子が放射される現象は、外部光電効果と言われる(光の作用で物体内の電子の状態が変化する、内部光電効果と区別するために)。

(訳 こじま ひでお)