第7章　電磁波というモノ

光は物語や書き物の中で人に希望を与えるものとしてどれほど語られたことだろう。まさしくヒトにとっての光明である。物理的世界を語るこの書物でも、光は光り輝く存在である。

7.1　光は電磁波である

マクスウェルは彼の方程式から、電場と磁場の変動が空間を進む波となることを発見した。方程式 (**??**) と (**??**) は、ある場所で電場が時間とともに変化すれば磁場を生じ、その磁場も時間とともに変化すると電場を生じる—と言っている。そしてその電場と磁場の変動はとなりの場所との差異をもたらし、次々に空間的に波及していくだろうことを主張している。電流のない ($\boldsymbol{i} = 0$) 真空中の出来事として考え、誘電率を ε_0、透磁率を μ_0 と表わそう。ある座標 x で、電場が y 方向に変位 E_y の振動をし、磁場が z 方向に変位 H_z の振動をしているとすると、(**??**) 式と (**??**) 式は次のように書ける。

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t}, \tag{7.1}$$

$$-\frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}. \tag{7.2}$$

表現が簡単になったから、磁場と電場が時間的に変化すれば電場と磁場の空間的な差異を生む—ということが見やすくなった。(7.1) 式を x で微分すると $\frac{\partial^2}{\partial x^2} E_y = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial x}\frac{\partial}{\partial t} H_z$ という式が得られ、(7.2) 式を t で微分すると $-\frac{\partial}{\partial t}\frac{\partial}{\partial x} H_z = \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_y$ という式が得られる。後ろの式を前の式に代入すれば、E_y に関する

$\frac{\partial^2}{\partial x^2}E_y = \varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2}{\partial t^2}E_y$ という関係式を得る。同様にして、H_z に対する関係式 $\frac{\partial^2}{\partial x^2}H_z = \varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2}{\partial t^2}H_z$ を得る。

得られた 2 つの式を書き換えて次のように表わそう。

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = c^2\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2}, \quad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}, \tag{7.3}$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2} = c^2\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2}. \tag{7.4}$$

これらは**??**ページで見た波動方程式になっている。すなわち、電場と磁場の変位 E_y と H_Z は空間を渡る波になっているのだ。この波を**電磁波**という。それを**??** ページの波動の形に表現したい。後に見るように、真空中を走る電磁波の速さ c は自然界で最も普遍的な定数であり、電磁波を特徴づける量は振動数 ν なので、この波を速さ c と振動数 ν で表わそう。振動数 ν は周期 T の逆数であり、波長 λ は速さ c を振動数 ν で割ったものであるという関係式 ($\frac{1}{T} = \nu$、$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$) を (**??**) 式に入れればよい。一般に波は周期関数であればよいのだが、ここでも (**??**) 式と同じく見やすい正弦波で表現しておく。

電磁波
$$E_y(x,t) = E_0 \sin\{2\pi\nu(t - \frac{x}{c})\}, \tag{7.5}$$

$$H_z(x,t) = H_0 \sin\{2\pi\nu(t - \frac{x}{c})\}. \tag{7.6}$$

この波が (7.1) 式と (7.2) 式を満足することが確認できる。たしかにマクスウェル方程式の解となっているのだ。

こうして、互いに垂直な電場と磁場の変位が一組になって同期しながら、2 つの変位と垂直な方向に進む横波の存在が告げられた。もう一度方向に注意すれば、電場が y 軸方向に振動し、磁場が z 軸方向に振動する場合、電磁波の進行方向は $+x$ 方向である。この波は真空中を速さ $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ で進む。真空の誘電率

ε_0 と透磁率 μ_0 の値を入れて電磁波の速さ c を求めると、それは観測されていた光速 3×10^8m/s と一致する。しかも電磁波は光と同じく何もない真空中を進むことのできる横波である。H.R. ヘルツが電気振動から放射される電磁波を実験的にとらえて電磁波の存在を実証し、やがてヒトの光明である光が電磁波だということが確立した。今では物理学者は光と電磁波という言葉を区別しない。(7.5) と (7.6) の電磁波 = 光が空間を進むようすを図 7.1 に描いておこう。

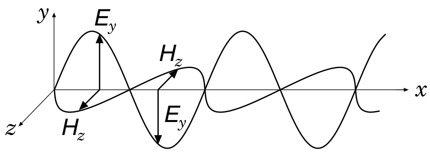


図 7.1: sin の形の電磁波.

この電磁波をとらえてヒトの眼は見ることができる。ただしヒトの眼が検出できるのは、電磁波のうちのある範囲の振動数のものだけだ。その代わり、振動数の微妙な差異を色で区別して彩色した画像を見るという幸福を味わう。ところで、電磁波は波であるから干渉を起こし、干渉が生み出す明暗の縞模様を観察することができる。その干渉縞の間隔を測ると電磁波の波長を測定することができる。そういう経緯もあって、電磁波を振動数で区別する代わりに、波長で区別することが多い。ヒトの見る可視光は波長が 810 - 380nm(ナノ・メートル、10^{-9}m) ぐらいのもので、ヒトはそれを赤から紫までの色で識別する。可視光の波長はとても短い。

電磁波は、可視光よりももっと振動数が大きくうんと波長の短いものから、振動数が小さく波長が数千 m 以上のものまであり、振動数によってその性質が大きく違う。波長が赤色光よりも長い領域に赤外線がある。眼には見えないけれど皮膚で温かく感

じる熱線である。それよりも波長が長くなると、通信に使われるマイクロ波、さらにテレビの電波、ラジオの電波がある。可視光の紫よりも波長の短い領域にはまず紫外線がある。後で話すように振動数が大きくなるとエネルギーが大きくなる。紫外線とそれより振動数の大きい電磁波は生物にとって危険である。X 線は医療などに使われるが、さらに振動数が大きく危険度は増す。もっと振動数の大きい電磁波は γ 線と呼ばれ、放射性元素などから放射される。

広い意味の光はさまざまな物質から色々のやり方で放射される。原子や分子は興奮すると、X 線から赤外線までの電磁波のうち、それぞれの原子や分子固有の一連の決まった振動数の光 (スペクトル) を出す。そのことはまたふれるだろう。また一般に物質は、ある範囲のすべての振動数の光スペクトルを放射する。その範囲と、振動数ごとにどのような強度の電磁波を出すかという強度分布の形は、物質の温度に応じて変化する。物質の温度が上昇すると、強度分布はしだいに振動数の大きい方へ広がる。室温でヒトや家具の出す電磁波は可視光より振動数の小さい赤外線を主に放射するから、赤外線カメラで撮影できる。晴れた夜に地表から逃げて放射冷却を起こすのも、赤外部を中心とする電磁波だ。モノの温度が上がると振動数の大きい赤い光を出し始め、高温になるにつれて赤から紫までの光も出すようになる。モノを熱すると最初赤熱し、しだいに白熱するのはこういうわけである。もっと高温になって太陽の表面温度ぐらいの 6000 度になると γ 線までの幅広い振動数の電磁波を出すようになるが、強度のピークは可視光のあたりにある。ヒトの眼は、太陽光のうち最も強度の強い振動数の電磁波を検出するようにできているのだ。あなたが旧約聖書創造説の信奉者でなければ、ヒトの進化

論の傍証と認めるだろう。

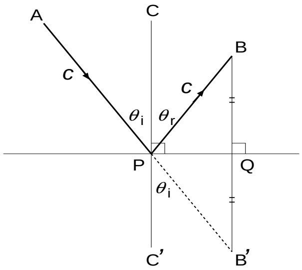
7.2 光の幾何学

中世ヨーロッパですでにレンズが作られ眼鏡として使われていた。そのレンズを組み合わせて望遠鏡が発明され、ガリレイが月や火星を観測した話を、あなたは聞いたことがあるだろう。光学機器の発展とともに、光線がどのように進んでレンズが像を結ぶかなどが解明されていった。この分野は光の進路の幾何学にかかわっているので、幾何光学と呼ばれている。

光の反射と屈折の法則を、C. ホイヘンスは光が波であるとして導いた。彼は、それぞれの場所に波面が到達するとそこからまた波が球面を描くように広がり、それらの重ね合わせによって次の波面が形成されると考えた。この本では、光線の進み方についてのフェルマーの原理を 53 ページの変分原理のところですでに話したので、それから反射と屈折の法則を導いてみよう。

水がためられて空気と水が水平な境界面で接している場合を例にとる。光が物質中を進む速さは、例の 30 万 km/s という真空中の光速 c よりも遅い。しかし空気中の速さは 4 桁目まで c に等しいから、ほとんど同じと言ってよい。水に入ると光の速さは約 3/4 に落ちる。このことを知った上で、「光は最短時間となる経路を進む」というフェルマーの原理を適用すれば、反射と屈折の仕方を理解できる。まず、均質な物質中を進む光の速さは一定だから、最短時間となる経路は直線だということが確認できる。つまり光は直進しようとする。

最初反射を考えよう。図 7.2 の左で、「A を出た光が一度水面まで行った後、最短時間で B に至る経路はどんなものか」という



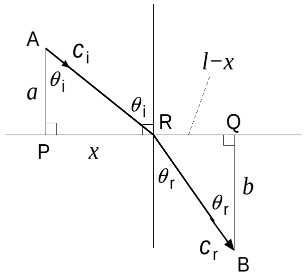


図 7.2: 光の反射と屈折.

問題だ。そのあいだ光は一定速度で走る。すると、A を出た光は B の鏡像 B′ を目指して直線コースをとり、水面に至ったら折り返し B を目指して直進すればよいことになる。鏡像 B′ は、B から水面に対して垂線を下ろした BQ=QB′ の位置にあり、APB′ は直線をなす。幾何学から、∠APC= ∠B′PC′ = ∠BPC だから、$\theta_i = \theta_r$ が得られる。すなわち、入射角と反射角が等しくなるように反射が起きる。**反射の法則**だ。

屈折は、図 7.2 右で、「光が A から B へ進むのに、どのような道筋をたどれば最短時間になるか」という問題である。水中を進む光の速さ c_r は空気中を進む速さ c_i よりも遅いから、境界面を通過する点 R をできるだけ B に近づけて距離 RB を短くすれば、RB を進む時間を短縮できる。しかし距離 AR が長すぎるとこんどはそちらの時間がかかりすぎる。両者のかねあいで最短時間が決まることになる。点 R は AB を結ぶ直線と水面との交点よりも右側になるだろう。

A と B から水面に垂線を引き、水面との交点をそれぞれ P と Q としよう。A と B の 2 点が与えられると、AP 間, BQ 間, PQ 間の距離が定まる。その距離をそれぞれ a, b, l と書こう。点 R

がどこになるかを P からの距離 x で表現すると、距離 AR は $\sqrt{x^2+a^2}$ と書け、距離 RB は $\sqrt{(l-x)^2+b^2}$ と書ける。光が走る時間は距離を速さで割ればよいから、A から B まで進むのにかかる時間 $f(x)$ は、$f(x)=\sqrt{x^2+a^2}/c_i+\sqrt{(l-x)^2+b^2}/c_r$ ということになる。フェルマーの原理は、$f(x)$ が最小になる道筋を探せと言う。高等学校の数学を思い出すと、関数 $f(x)$ が最小値をとるのは微係数 $df(x)/dx$ が 0 になるところである。
$\Downarrow$ ここで出てくる微分は $d\sqrt{X}/dX=1/(2\sqrt{X})$ と $d(x^2+a^2)/dx=2x$ と $d((l-x)^2+b^2)/dx=-2(l-x)$ の 3 つである。それを使えば、次のように計算できる。$d\sqrt{x^2+a^2}/dx=x/\sqrt{x^2+a^2}=\sin\theta_i$ と $d\sqrt{(l-x)^2+b^2}/dx=-(l-x)/\sqrt{(l-x)^2+b^2}=-\sin\theta_r$ である。すると微係数は、$df(x)/dx=\sin\theta_i/c_i-\sin\theta_r/c_r$ と求まる。$\sin\theta_i/c_i=\sin\theta_r/c_r$ であれば、$df(x)/dx=0$ となって時間 $f(x)$ が最小になる。
$\gg$ こうして、フェルマーの原理から**屈折の法則**が得られる。

$$\text{屈折の法則}\quad \frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_r}=\frac{c_i}{c_r}. \tag{7.7}$$

真空中の光速 c とある物質中の光の速さ c' の比 c/c' を、その物質の屈折率という。物質中では光の速さは真空中での速さ c よりも遅いから、屈折率は 1 よりも大きい。今の場合、c_i はほとんど c に等しいから近似的に $c_i/c_r=c/c_r$ で、(7.7) 式の右辺はほぼ水の屈折率 4/3 に等しいということになる。屈折率の小さい物質から屈折率の大きい物質に入る場合、図 7.2 のように、屈折角 θ_r が入射角 θ_i よりも小さくなるように折れ曲がる。逆に屈折率の大きい物質から屈折率の小さい物質に入る場合、たとえばガラスから空気中へ出て行く場合には $\theta_r>\theta_i$ となるように屈折する。ところが θ_r は 90° 以上にはなれないから、θ_i は 90° よりも小さいある臨界の角度を越えることができない。つまり θ_i がそ

の臨界角を越えると、光は屈折して外に出て行くことができず、すべて境界面で反射することになる。光ファイバーはこの全反射を利用して、光の強度を落とさずに信号を送るのである。臨界角は内外の屈折率の比で決まる。屈折率が 2 を越えるダイヤモンドを上手にカットすれば、入ってきた光はなかなか外に出て行けずきらきら輝くことになる。

反射の法則と屈折の法則を見た。ヒトの眼球や、鏡・球面鏡・眼鏡・望遠鏡・顕微鏡などの光学機器でどのような像が見られるかは、光が均質な物質中で直進することと物質の境界面での反射と屈折の法則に基づいて理解することができる。さまざまの光学機器で反射・屈折が起きるたびに、図 7.2 のように作図していけばよいのである。言わば、ユークリッドが幾何学を公理から出発して論理を重ねて展開したように、これらの法則から出発して幾何光学を展開することができる。ここでその話をしてあなたを退屈させることを恐れ、またページ数も増やしたくない。話を打ち切ることにする。

7.3　光の物理

光の波動性

この章は光が電磁波であるという話から始めたけれども、光はその性質を明かすのに長い曲折の光路をたどった。ニュートンは光の粒子と振動する媒質エーテルというような考え方をして、ホイヘンスなど光を波と考えた人たちと対立していた。その粒子説主流の時代が続いた後、光が干渉を起こすことを発見したのは T. ヤングである。光は、69, 70 ページで出た干渉や回折という波の性質を示すのである。**ヤングの実験**は、光の波動説を進展さ

せ、光が波であることを疑いえないものにした。電磁波が予言される以前のことである。

ヤングの実験の原理を示そう。暗室に図 7.3 のような装置を置く。一方向に窓を開けた光源の前に細長い切れ目 (スリット) のある「ついたて」を置き、光源を出た光がそのスリットを通り抜けて、さらに前方にある別のついたての 2 つのスリット A と B に向かうように設計する。すると回折によって 2 つのスリットを通過した光が、前方のスクリーン (あるいはフィルム) 上の Q で出会って、干渉を起こす。光路 AQ と光路 BQ の距離の差が波長 λ の整数倍、すなわち BQ−AQ= $\pm n\lambda,\quad n = 0, 1, 2 \ldots$ であれば、2 つの光路から来た波は、山には山、谷には谷が出会って重なり、強めあう。つまりその場所の光量が多くなり明るくなる。逆に AQ と BQ の距離の差が半波長 $\lambda/2$ のずれをもつ、すなわち BQ−AQ= $\pm n\lambda + \lambda/2$ であれば、いつも正負逆符号の波が出会い、打ち消しあってその場所は暗くなる。明暗を分ける 2 つの条件は幾何学的に決まるから、角度 ∠QOP がその条件を満たすたびに、スクリーン上に明暗が繰り返されるだろう。スリットの長さの明暗の縞模様がスクリーン上に現われるのである。スクリーンの代わりにネガ・フィルムを置いて撮影すれば、図 7.3 の右にスケッチされたようなパ

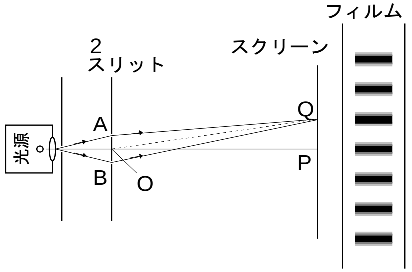


図 7.3: ヤングの実験. 作図の都合上、図の縦方向は横方向に比べて拡大してある。またフィルム上の明暗の縞模様は別の尺度で描かれている。

ターンになる。ネガ・フィルムだから、光の来たところが黒く示してある。想像力豊かに、背景が暗く黒い部分が明るいポジの写真を思い浮かべてほしい。

言うまでもなく、2 つのスリットの一方をふさげば干渉は起きず、明暗の縞模様はできない。もし光が粒子なら、当然どちらかのスリットを通ってスクリーンに到達するはずで、干渉は起きないだろう。この干渉縞を見たら、あなたは光が波であることを疑わないだろう。そしてすぐに、ヤングの実験は光の波の波長 λ まで教えてくれることに気づく。先ほどの幾何学から、スリット AB 間とそこからスクリーンまでの距離 OP が設定された装置で、距離 QP または角度 $\angle$QOP を測定すれば波長 λ を求めることができる。ここではこれ以上の数式は要らないだろう。このやり方で、可視光の波長がどのくらいのものか、どんなに短いかを知ることができる。

上の話では、図 7.3 の最初のスリットがなぜ必要なのか説明されていない。実はこのスリットなしに光源の光が全部 2 つのスリットを通過するようにしたら、干渉縞がはっきりしなくなる。光路が大きく違うと干渉しなくなり、また異なる光源から出た光も干渉を起こさない。2 つの電磁波はいつも関係をとり結び相互に干渉するとはかぎらないのである。関係をもって相互に干渉するときコヒーレントな光という。コヒーレントな 2 つの光が出会うと、それぞれの光の強度の時間平均の和と 2 つを合成した強度の時間平均との間に差が出るが、コヒーレントでない 2 つの光の場合にはその差が出ないのである。電磁波は第 4 章で見た媒質の変位として伝わる波とどこか違う、空間と時間での局在の仕方が風変わりだ、ということを示唆している。

光が回折・干渉する波であることが、光学機器の性能に制約を

課す。ここで一言ふれておこう。光の回折を縮めて言えば、光線が幅をもつように広がるということである。顕微鏡で微小なモノを見ている場合、1 点から出た光は針のようなピークではなく、山なりに広がってあなたの眼に到達する。別の点から出た光も山なりの広がりをもってやって来る。それが近接しすぎると、山なりの強度分布の重ね合わせが 2 つの山のピークを覆ってしまい、1 つのピークをもつ大きな山のようになってしまう。すると 2 点は区別して見ることができなくなる。顕微鏡の場合には光の出た 2 点間の距離が近すぎると、望遠鏡では 2 方向からくる光のなす角度が小さすぎると、区別がつかなくなるのだ。この距離や角度を区別して見分ける限界能力を、光学機器の**分解能**という。仮に倍率をとても大きくできたとしても、分解能という限界のために対象を細かく識別することができなくなるのである。

その分解能は、顕微鏡では対象との距離に対する対物レンズの大きさの比率およびレンズの屈折率に依存し、望遠鏡では対物レンズの口径に依存する。性能のよい天体望遠鏡の口径がとても大きいことをあなたは知っているだろう。しかし分解能は波の回折によって生じるのだから、機器の設計上の問題とは別に、波長の長短が大枠を決定している。第 4 章の波のところで、波長が長いほど回折しやすいことを既に話した。波長が短いほど分解能がよいのである。光学機器の用いる可視光の波長は数百ナノ・メートルで、ずいぶん短い。ところが物質はもっと小さいモノから構成されているのであった。だから、細菌よりも小さいウィルスを光学顕微鏡で見ることはできず、物質の微細構造や分子を見ることはできない。電子顕微鏡があるではないかという声が聞こえてきそうだ。その話は第 9 章でしよう。

分光

ヤングの実験のところでは、漠然と振動数 (波長) の決まった単色の光を考えていた。ところが太陽や電灯の出すいわゆる白色光は、連続的に振動数の異なる非常に波長域の広い光の束である。その光を最初に**分光**して見せたのはニュートンであった。しかし可視光以外の光はヒトの眼に見えないから、可視光だけを考えておこう。

暗室で図 7.4 のように、光源を出て 1 つのスリットを通過した白色光を、3 角形をしたガラスのプリズムに導く。すると、光はプリズムに入るとき屈折し、再びガラスから空気中に出るとき屈折する。

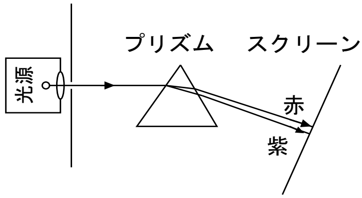


図 7.4: プリズムによる分光.

ところが光の物質中での速さは、振動数の大きいものほど遅くなる。したがって屈折の法則 (7.7) から、振動数の大きい光ほど大きく屈折する。可視光のうち振動数が小さい赤い光の屈折の角度は小さく、振動数が増えるにつれて大きく屈折するようになり、振動数が最も大きい紫の光が最も大きく屈折することになる。多色の光は分光されて、スクリーン上に虹が現われるのである。もしスクリーンとの間にもう一つ同じ規格のプリズムを 180° 反転させて置くと、最初のプリズムでの屈折とちょうど逆の屈折が起きて、多色の光は集まって 1 つの光の束に戻る。何色に見えるだろうか。やってきた光の束と同じになるのだから、もちろん無色に戻る。こうしてヒトの眼は、振動数のちがう可視光を異なる色として見分け、多色の光の束は無色として見ることが分かった。雨上がりに見える美しい虹も、太陽光が水滴に入射するとき屈折したのち、一度水滴の内面で反射されて、ふたたび水滴を出ると

き屈折して分光されるのである。

連続した波長域の可視光の束が分光されると、赤から紫まで連続的に色あいが微妙に変化する虹となる。これは連続スペクトルというものだ。もし数えられる数ほど異なる振動数の光の束がプリズムに入ってくれば、その数だけの色のちがう線が図 7.4 のスクリーン上に現われることになる。これが**線スペクトル**である。興奮した原子はその原子固有のいくつもの振動数の光を出す。プリズムで分光すれば、その原子固有の色の取り合わせとパターンをもつ線スペクトルを観察することができる。

プリズムが異なる振動数で波長のちがう光を分光するように、ヤングの実験装置を改良して白色光を入射させれば、図 7.3 で黒く描いた光の来た部分に多色の色模様が生じる理屈になる。なぜなら、スクリーン上で光が強めあう位置は波長 λ ごとに違うはずだから。赤と紫の光はスクリーン上の別の場所で明るくなるだろう。実際に多数のスリットをもつ回折格子というものが作られる。ガラスの板に 1cm 当たり数千本の線を刻めば、光は線を刻まなかったところだけを通過し、数千本のスリットが出来上がる。これを先ほどの 2 本のスリットの代わりに用いれば、回折・干渉によって光のスペクトルが波長ごとに分光される。図 7.3 と同様にセットして原子の出す光を回折格子に通せば、細く分別された線スペクトルを観察できる。すると先ほどと同様の幾何学から、線スペクトルの各々の波長を測定することができる。それから振動数も求まる。この方法は直接に波長を測定できるという利点をもつ。原子の線スペクトルの話は第 9 章で続きを語ろう。

光の粒子性

今日光は、電磁波という名のほかに光子 (こうし) という名を授けられて、素粒子に列せられている。光が電磁波であるという

ことが分かった後に、もう一つの物語がくり広げられたのだ。

物質がある温度にあるとき、その温度に対応してさまざまの振動数をもつ電磁波が異なる強度で放射される—という話をこの章の初めの方でした。この熱した物質が電磁波を放射する熱放射の実験から新しい進展が生まれた。小さな窓をもつ空洞の内面を黒く塗って一定温度に保つと、内部を行き交う電磁波は一度は壁に吸収され、その温度に応じた強度分布をもつ一定量の電磁波が空洞内を行き交う平衡状態になる。そこで小窓を開けて出てくる電磁波を測定すれば、その温度での熱放射のエネルギー強度と振動数の関係を示す強度分布曲線を知ることができる。ところが観測された強度分布曲線は、光を普通の波のように取り扱ったのでは説明できなかった。

実験で得られた強度分布曲線を再現する関数形は、M. プランクによって見つけ出された。彼はさらに、電磁波のエネルギーを連続的な量ではない**エネルギー量子**と呼ばれるもので数えるという新仮説を立て、統計力学を使ってその関数形を導出することに成功した。空洞内の電磁波は連続的に異なる振動数をもつのだが、ある振動数 ν の電磁波を数えられる数の電磁波の集まりとし、「振動数 ν の 1 つの電磁波は、振動数に定数 h を掛けたエネルギー量 $h\nu$ をもつ」とするのである。つまり、電磁波のエネルギーを $h\nu$ というエネルギー量子でディジタルに数えるのである。定数 h はどんな振動数 ν にも共通の定まった値で、観測データと比較して決定された。h は**プランク定数**と呼ばれ、真空での光速 c と並んで物理学で最も普遍的な定数の 1 つとなった。その値がとても小さいということだけを言っておこう。こうして、プランクが空洞から放射される光の秘密を明るみに出し、量子力学の曙光が見えた。20 世紀初頭のことである。

量子の考えを一押しして光の粒子説を復活させたのは、あのアインシュタインである。特殊相対性理論を提出した同じ年、彼は光電効果を光量子というとらえ方で説明して見せた。光電効果は、金属に紫外線を照射すると、その金属が正に帯電したり、あらかじめ負に帯電させておいたらその負電荷を失うなどの現象として発見された。19 世紀末に J.J. トムソンによってその負電荷を荷なう電子が発見されて、光電効果は紫外線によって電子がはじき出されるのだということが明らかになった。ところが、入射光の強度を強くすると飛び出す電子の数が増えるのは当然としても、照射する電磁波の振動数 ν を小さくしてたとえば可視光にすると、光量をいくら増やしても光電子は飛び出さない—という実験事実は理解不可能であった。しかも、飛び出す電子の最大エネルギーは、振動数とともに大きくなるという事実も理解が困難であった。光は波だから、海岸に繰り返し打ち寄せて岩壁を穿つ波のように、少しずつエネルギーを電子に与えれば、電子は金属から飛び出すのに十分なエネルギーを得ることができるはずではないか。

この難問をアインシュタインは、プランクの熱放射に関するエネルギー量子の考えを拡張して解決した。振動数 ν の電磁波は、エネルギー $h\nu$ の粒子として振舞うとすればよい。これが**光量子**仮説である。金属原子の一番外側の電子は、1 つの原子から自由になって金属の内部を動ける状態になっている。ただしその自由電子と呼ばれる電子は、金属全体の束縛から自由になったのではない—ということも前章でふれた。言わば、自由電子はその束縛分ほどエネルギーの負債をもつ。光がその負債分より多いエネルギーを与えれば、それを受け取った電子は金属から飛び出すことができるだろう。このとき、光は 1 個の粒子として電

子にぶつかり、1 度にエネルギーを与えるのである。電子の負債は各電子ごとにわずかずつ違う。一番負債の少ない電子のエネルギー負債を W_0 としよう。光からもらうエネルギー $h\nu$ が W_0 よりも小さければ、どの電子も金属の外に出ていけない。だから、光の振動数 ν がある大きさよりも大きくなければ電子は飛び出せない。光から同じ量のエネルギー $h\nu$ をもらっても、一番負債の少ない電子が金属を飛び出したとき最大のエネルギーをもつことも明らかだ。それを数式で書けば、光電子の最大エネルギーは $E_{\mathrm{max}} = h\nu - W_0$ である。最大エネルギーは振動数 ν とともに大きくなっている。上に述べた実験事実を見事に説明する。測定データをグラフに描けば、$E_{\mathrm{max}} = h\nu - W_0$ という直線に乗るはずだ。その後の精密な測定がこの考え方の正しいことを証明した。グラフの傾き h はプランク定数の値と一致する。こうして、光が粒子として振舞うという考えがよみがえった。後に、粒子的にふるまう光に光子 (フォトン) というよび名がついた。

　ここには矛盾が横たわっている。光を波とすると、ヤングの実験は波の干渉として理解できるが、光電効果が説明できない。光が粒子なら、ヤングの実験で粒子は 2 つのスリットの一方を通過するはずで、干渉縞がなぜ出来るのか理解困難だ。ところがヤングの実験で、光度を十分に落してある時間に 1 個の光子しか出ていない程度にしても、干渉縞はできるのである。光子は同時に 2 つのスリットを通過する! そうなると、光は波でありしかも粒子的にふるまうという奇妙なモノになる。何とわれわれの波と粒子というイメージに反していることだろう。この矛盾は、波と粒子についてわれわれの常識の転換を要求しているのではないか。20 世紀になって物理学は画期的な展開を始めた。