理科教育第十四卷第四及び第五號別刷

# 光と物質との相似と相異

理化學研究所研究員　理學博士　仁　科　芳　雄

# 光と物質との相似と相異（一）

理化學研究所研究員理學博士　仁科芳雄

編輯子（本篇は本會創立滿十三周年記念講演會に於ける仁科博士の御講演の内容である。）

**要旨**　科學者の取扱ふ宇宙間に窮極的個性を有つて存在するものに二つある。光と物質とがこれである。此兩者は一見全く相異つて居つて、到底似てもつかぬものと從來は考へられて居た。然るに近頃の研究により此兩者の本質には著しく相通ずる點のある事が明にせられた。即ち光の波動性は物質もこれを有し、物質の粒子性は光も亦これを具へて居ると云ふ事である。然し更に立ち入つて檢べて見ると、これは兩者の自己表示が同じ樣な法則に支配せられるといふだけであつて、其存在の根本に於ては全くの別物である事恰も兩者の外觀の相異と同樣である。然らば此二つの異つた存在樣式の因つて來る源が何處にあるかは現今の物理學者の知らんと欲する所であつて而かも猶全く未解の謎である。

## 一、緒　言

吾々が此宇宙間に目を放つて個性的實在を認められるものは光と物質とを措いて他にない。此地上の生物は云ふに及ばず、地球や太陽やさては大空に輝く有ゆる星も、又其星の存在を吾々に告げるものも凡て此二つの範圍を出でぬものである。但し玆に光と云ふのは人の目に見ゆるものだけではなく、波長で云へば長い方はラヂオに用ふるものから、短い方はラヂウムの出すガンマ線をも皆一纏めにして光と呼んで置く。

さて此二つの物の本體が何であるか。これは古くから色々の人の思索を廻らし研究を重ねた大きな問題であつて、今後も尙幾度となく繰り返される疑問であらう。今日玆に申述べるのは、現今の物理學者の多くが此問題に對して抱いて居る見解の一端であつて、これは最近の物理學發達の結果として新しい階梯に置かれたものである。

## 二、舊　概　念

從來の概念よりすれば、光と物質とは其本質に於て少しの類似もない二個の實在と考へられて居つた。物質は一定の空間を滿し二つの物質は同時に同じ空間を占める事は出來な

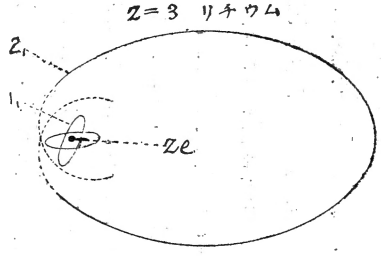
い。然るに光に於ては一つの光線の占めて居る空間にいくらでも他の光線を共存せしめ得るものである。又物質はこれが靜止して居る時一定の質量を有つて居るが、光にはこれに相應するものがない。是等の點は光と物質との根本的相異であつて、これが人をして光は個性を有つて居らぬ事恰も音響のエネルギー同樣のものであると考へしめるに至つた所以である。今此兩者の本性に關する舊來よりの觀念を述べて見よう。

## A　物　質

先づ物質より云へば、これは連續的の存在で、いくらでも小さく分ち得ると云ふのが舊物理學の概念であつた。然しDalton の原子說(一八〇二年)に依つて物質は凡て分ち得ぬ窮極の單位なる原子より成立するものと考へられた。然るにRöntgen の發見した(一八九五年)X線は Laue (一九一二年)の着想により此原子の存在を如實に示して呉れ、其大さが約 $10^{-8}$ cm の程度の微粒子である事が認められ、玆に百年前の假說は一躍して實在となつた。X線の威力はこれに止らなかつた。普通の光のスペクトルと協力して更に原子の內部構造迄も映し出して見せて呉れたものである。

是より先 J. J. Thomson(一八九七年)は水素原子の約一千八百分の一の質量を有し陰電氣を帶びた微粒子、卽ち電子の存在を實證し、玆に原子構造に關する理論に第一歩を踏み出した。然し今日認められて居る說の先驅をなしたものは吾が長岡博士(一九〇四年)の說であつて、これは原子が陽電氣を帶びた原子核と、これを中心として其周圍を廻つて運動する多くの電子とより成立する事、恰も土星の周圍を其衛星が運行して居る樣なものであらうとせられたものである。其後Rutherford(一九一二年)はラヂウムから出すアルファ線の物質による散亂結果よりして此說の正しい事、且つ全部の電子と原子核との電氣量は等しくて符號が反對で、從つて原子全體としては電氣的に中性であるが、其質量の大部分は核に存する事を實證した。Bohr(一九一三年)は此實驗事實に立脚し、後述の Planck(一九〇〇年)の發見した量子論を應用して水素原子構造に關する定量的理論を立てた。これによると電子は長岡博士の說同樣に水素原子の核の周圍に軌道運動をして居るもので、恰度太陽系に於ける遊星の運行に似て居るが、其軌道は量子論により指定せられるものだけが存在し夫れ以外のものは許されないとしたのである。此革命的理論は其後凡ての原子にも擴張せられ、前述の樣にX線及び普通の光のスペクトルによる實驗的支持を得て一般に信ぜられる樣

になり、これにより多くの實驗事實を解説し得た。殊に Moseley の色々の元素のX線スペクトルの實驗により、各元素の原子核はZeなる陽電氣を有ち其周圍にはZ個の電子が量子論で許された色々の定つた軌道運動をして居る事第一圖の様であると云ふ事になつた。但し $e=4.774\times10^{-10}$ 靜電單位であつて電子の有つ電氣量の絶對値である。又Zは原子番號と呼ばれるもので凡ての元素を略々原子量の順に列べて水素(Z=1)よりウラン(Z=92)に至る迄に付けた番號である。但し所々に原子番號と原子量の順とが一致せぬ事もある。此92個の元素の中尚未發見のものがZ=85, 87の二個ある。



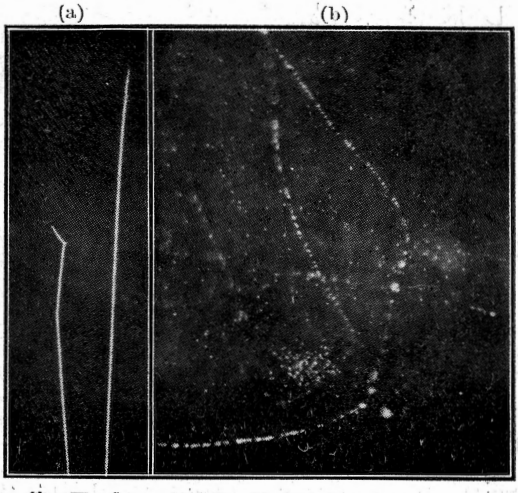

**第一圖** Bohr の原子模型の軌道

茲に於て凡ての物質は原子核と電子との二種類の微粒子より成立して居るものと云ふ事になり、是等は即ち物質の窮極的單位と考へられる様になつた。

然るに其後 Aston (一九一九年)は凡ての元素の原子量は水素を1とすれば大體に於て整數(詳しく云へば酸素を16とすれば他のものが大體整數となり此時の水素の原子量は1.00778となるものである。此基因に關する説に就いてはこれを省く)に依つて表はされると云ふ事を發見した。此結果に基いて、凡ての原子の核は水素原子の核から構成せられて居ると云ふ原子核の構造説が生れて來た。而して此窮極的單位なる水素原子核をプロトンと名付けた。これは嘗て Prout が凡ての元素は水素より成ると云ふ假説を立てた事に因んだものである。然に Rutherford と Chadwick (一九二一年)とは前に述べたアルファ線を物質に當て其原子核に衝突せしめると、アルファ線の有する異常なエネルギーの爲めにこれが破壞せられる事を示した。例へばアルミニウムの原子核からして水素の原子核を飛び出させた。これは明に上述の原子核の構造説の最も直接な實證であつて、原子はこれを分ち得ず永劫不變であると云ふ舊來の觀念を根本的に覆したものである。而して各元素の原子量は知れて居り又原子核がZeなる電氣量を有する事も判つて居るから、色々の元素の原子核は幾個のプロトンと幾個の電子とより構成せられて居らねばならぬかと云ふ事が知れる。今例を掲げてこれを示して見ると、Heは原子番號Z=2であつて核の周圍に二個の電子を有する。而して原子量は約4であるから其核は4個のプロトンを含ん

で居る。夫れだけでは核の電氣量は4eとなるが、其上に二個の電子を有つて居るから核全體としての電氣量は2eである。又Clは原子番號Z=17であつて、其原子量は35.457である。然るに Aston の實驗によれば此原子量は合成原子量と名付くべきものであつて、實は原子量 35 と 37 とを有つ別々の二種の原子の適當な混合物である。即ち一方のものの核は35個のプロトンを有し他方は 37 個を有する。而して前者は18個後者は 20 個の電子と合して核を構成して居る。夫れ故此兩者の原子核の有する質量は異つて居るが其電氣量は共に17e である。從つて核外にある電子の數も兩方共 17 個である。原子の物理的並に化學的性質は核外にある電子の數と配置とにのみ支配せられるものであるから、此兩者は共に全く同じ性質を有し、從つて普通の化學的性質を利用する分析では分離する事が出來ぬ。只異るのは核の質量だけであつて、其差を利用して始めて兩者の存在を認め得るものである。斯樣なものを同位元素と稱し、普通小數の付いた原子量を有つ元素の存するのは、大部分は整數原子量の異つたものの適當な割合に混合して居る爲めである。

以上に依つて有ゆる物質は結局電子とプロトンとの二つの窮極單位の合成に外ならぬと云ふ事が知れる。而して前者の質量は$9.0\times10^{-28}$瓦であつて後者は約其$\frac{1}{1800}$を有つて居る。又電氣量は其絕對値は等しいが一方は陰であり他方は陽である。而して此兩者共少くとも$10^{-13}$ cm 以下の大さを有つた微粒子と考へられた。此微粒子性を示す實驗は色々あるが其最も適切なものは次の C. T. R. Wilson のやつたものである。これは高速度の電子並に He 核が氣體分子を電離して行く其足跡を示すものであつて、第二圖(a)はラヂウムから放射されたα粒子即ちHe核の空氣中突進の狀を示し、同圖(b)は矢張りラヂウムから出たβ粒子即ち電子の飛躍の跡を示すものである。此圖を如何にして得たかと云ふ事はこれ

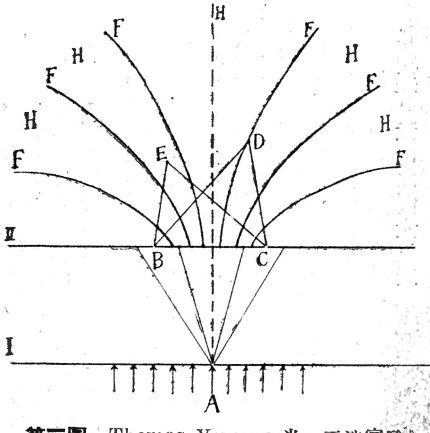



**第二圖**　(a)α—線突進の跡　(b)β—線飛躍の跡。

を省略するが、要するに此圖の白線並に白點はこれ等のものが進行の途上電離して作つた陽陰の空氣イオンに凝結した水蒸氣を示すもので、從つて其通過の足跡を表すものである。是等は恰度小銃の彈丸又は放拋した小石の進路と全く同樣の形であつて、これにより電子並にHe從つてプロトンが微粒子であると云ふ事が一目瞭然たるものがある。即ちこんな微粒子が二つ衝突する場合には、エネルギー並に運動量不滅の法則が常に成立する事、質點の運動と同樣である。

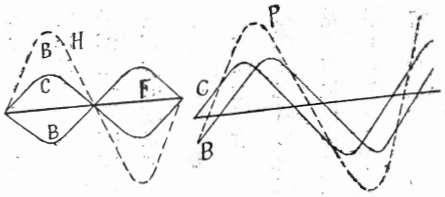
## B 光

次に光に就いての概念に移る。光の本性に關する說で實驗事實に立脚した眞面目なものは一六六〇——一六八〇年頃に始めて生れた。而して之れに二つの說があつた。其一つはNewtonの主唱した微粒子說であつて、光は發光體から放射する微粒子狀の物質であると云ふのである。人が物を見ると云ふのは此物質が目の盲膜に衝突して感覺を生ぜしめる爲めであると云ふ。他の說はHuygens（一六七八年）の波動說であつて、今日の言葉で云へば光はエーテルの波動であるとするものである。前者は光の直進性並に物體の鮮明な陰影を生ずる事實を極めて明瞭に說明し得る。然るに其當時の人々の考へでは、是等の事實は到底波動說では說明し得られぬとした。然し微粒子說でも凡ての實驗事實を容易に說明し得たと云ふのではない。殊に透明體の表面に於ける反射、屈折などの說明にはかなり無理があつたものである。然しNewtonの樣な大物理學者の唱へた說であるから其影響は大であつて波動說は殆ど顧られぬ狀態になつてゐた。然るに一八〇〇年頃にThomas Youngは光の干涉現象を發見した。これは次の樣な實驗である。第三圖のA及びB、Cは夫れ〳〵I及びIIの遮壁に穿つた小孔であつて、Aを通して單一色の光を入射せしめると、これは所謂廻折現象に依つて擴つてIIの遮壁に達しB、Cの小孔を通して上に出て來る。此時IIの上側には圖に示した樣にFなる双曲線狀の暗黑な場所と、其間に挾まれた明るい線條とを生ずるものである。これは光の微粒子說では全く說明の付かぬ現象である




**第三圖** Thomas Youngの光の干涉實驗。

何となれば遠く離れたBとCとを通る二つの微粒子が、お互に働く力によりHの部分にのみは行きFには行かないと云ふ様な相互作用の存在は、物質間には考へる事が出來ぬからである。然るに波動説によれば波動の干渉作用により此現象は次の様に極めて容易に且つ餘す所なく説明せられるものである。今光が一定の週期を有つたエーテルの波動だとすると、ある一點に多くの光が來た場合には、其點のエーテルの振動の變位は各の光による個々の變位の代數的和になるべきである。これを重疊の原理と云ふ。例へば今Ⅱの遮壁の上側にある一點Pに於てBの孔より來る光の振動の變位が第四圖のBで表はされ、Cの孔より來るものが同圖のCで表はされるとすると、P點のエーテルの振動は同圖のPで表はされる。そこでもしBとCとの曲線の位相が180°の差がある時は互に打消されて振動はなくなるからそんな點には光はない。又位相が一致する處は互に相强められるからこんな點の光の强度は最も强い譯である。前者に相當する點は第三圖のD點の様




第四圖　重疊の原理

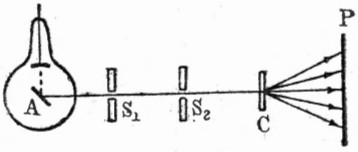
にBとCとからの距離の差が用ひた光の波長λの半分λ/2の奇數倍となる點で、後者に當る點は同圖E點の様に距離の差がλ/2の偶數倍である點である。これに依つてF及びHなる暗明の双曲線が出來るものである。これが御存じの通りの干渉と呼ばれる現象であつて、此實驗によつて當時顧みられなかつた波動説が復活し一般に間違ひのないものと信ぜられ微粒子説は倒れて了つた。

Young は初め其波動を音響と同様に縱波即ち振動方向が波の傳播の方向と一致するものと考へて居つた。然し御存じの通り光には偏光と云ふ現象がある。例へば硝子の表面に約57°の入射角を以てやつて來て反射された光、又は方解石で二重屈折を受けて分れた光などをニコルプリズムを通せば、光の進む方向とプリズムの軸の方向との相互位置に從つて通つて出る光の强さが異る。これは明に光の振動作用が其傳播方向に對し空間的に對稱を有たぬ事を示すものであつて即ち光は縱波でない事を示すものである。そこで Fresnel 並に Young は横波即ち振動の方向が傳播の方向に直角であるとした。これに依つて凡ての光の現象は殘る隅なく完全に説明し盡された。殊に光の直進性又は物の陰影の説明など微粒子説でなくては了解せられぬと考へられた現象も解説されて

了つた。此點は特に注意すべき事であつて、波動と粒子とが或る場合には全く同一の結果を生ずると云ふ事を示して居る。此密接な關係は Hamilton（一八二四年）の指摘した事であつて、波動の波長が問題に這入つて來る物體の寸法に比べて甚だ小さい時は、波動の傳播現象は粒子の進行と同樣の法則に從ふものである。百五十年間波動粒子の兩說が論爭の的となつた基因は玆にあつたのである。これで光が波動であると云ふ事は最早疑ふべからざる事實となつて來た。

其後更に Maxwell が光の本體はエーテルの電氣磁氣的波動であると云ふ事を明にしてから益々波動說の基礎は强固となつて、最早これが最後の決定的のものであると考へられた。廿世紀に入り Einstein の相對性原理が發見せられてからエーテルの存在は疑問となつたが、兎も角光が電磁氣的波動であると云ふ事には疑ふ餘地はないものとせられた。

以上は主として目に見ゆる光と同程度の波長を有つたものに就いて考へられた事であるが、X線も全く光と同じ本體であつて、只其波長が略々其 $\frac{1}{1000}$ であると云ふに過ぎない。從つてX線の干渉も全く光と同樣に、これを波動と見て完全に說明せられるものである。此干渉を始めて發見したのは Laue であつて、其干渉格子としては普通の光に用ひる人工の線格子の $\frac{1}{1000}$ 位の格子距離（格子の線間の距離）を有つたものを用ひる必要がある。それは到底人工で作る事は困難であるが自然が作つて呉れて居る。即ち諸種の結晶體はこれであつて、其內部に規則正しく配列せられた原子（又は分子）が立體格子として作用する。此點に Laue は着目して第五圖に示す樣な實驗を行つたものである。即ちX線管のAなる陽極から出たX線は $S_1$、$S_2$ の圓い細隙を通つて殆ど並行な線となり、之れがCなる薄い閃亞鉛鑛の結晶に當る。而してこれを透過したものがPなる寫眞乾板に像を印する樣にした。これで得られたものは第六圖に示すものであつて、(a)はX線が正立方體結晶の邊に並行な場合、(b)はX線が其對角線に並行な場合である。圖の中央の黑點はX線が其儘結晶を通して來た處で、周圍の點々が廻折干渉に依つて生じたものである。これはX線を波動と考へ閃亞鉛鑛の正立方體結晶の立體格子に依つて生ずる干渉點とよく一致する。これが前述の原子の存在を明にし又他方X線が光と全く同じ本體であると云ふ事を證明した實驗である。これは物質構造の研究に驚くべき進展

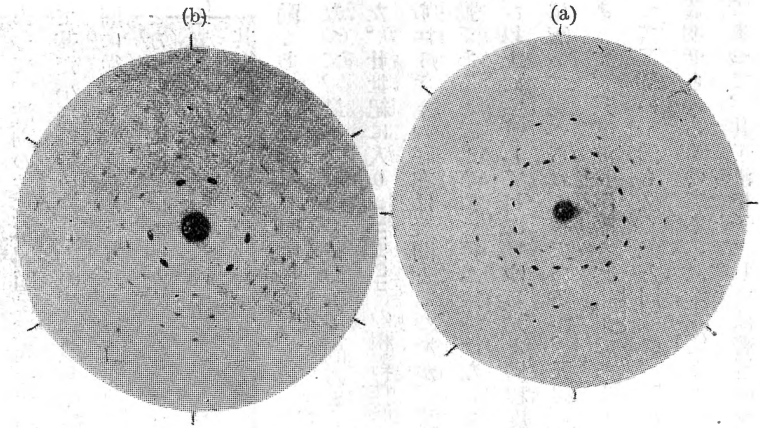


**第五圖** Laue のX-線干渉の實驗裝置

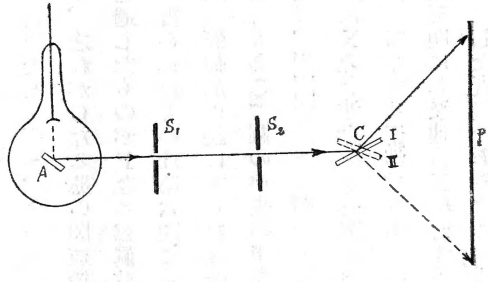
の道を開いたものである。

以上はX線の廻折であるがBragg父子は其發見後直ちに結晶によるX線の反射スペクトルを得る事に成功した。其原理は第七圖に示す通りであつて、Cは結晶Pは寫眞乾板である事第五圖同樣である。かくしてPに得られるものは第八圖の樣に、普通の光のスペクトルに似て居るが更に構造の簡單なX線スペクトルである。圖の中央の太い線は直線結晶を通過して來たもので、其左右にあるのは結晶を第七圖のIとIIとの對稱的位置に置いて生ずる二組のスペクトルである。これもX線を波動と考へCの結晶で出來た格子による反射干渉として全部解釋せられるものである。これがX線分光學であつて、これに依つて前述の樣にX線を生ずる物質の原子内の構造を研究する手段が得られたものである。

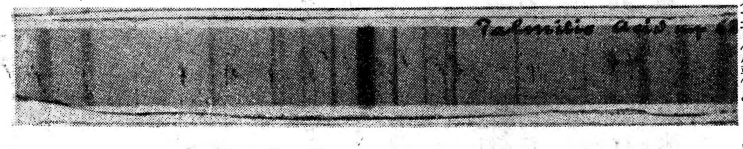
又 Debye と Scherrer は第五圖のCの位置に單一結晶の代りに結晶體の粉末を置いて同樣にX線を當てると、第九圖の樣な輪形の干渉縞を生ずる事を認めた。これは色々の位置にある小さな結晶片からの反射による干渉であつて、矢張りX線を波動と考へて理論的に求めたものと



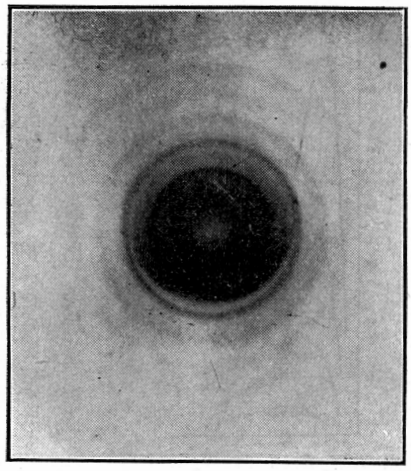

**第六圖**　閃亞鉛鑛結晶によるLaueのX-線干渉縞




**第七圖**　BraggのX線スペクトルを撮る實驗裝置。



**第八圖**　X線スペクトル



**第九圖**　酸化マグネシウムの細粉結晶によるX線の Debye-Scherrer 干渉縞

よく一致する。これも物質構造の研究に用ひらるる便利な方法である。

孰れにしても以上述べた實驗事實よりして、波長の大小を問はず、光の本體は電磁氣的波動であると云ふ結論に到達する事に異論はなかつたものである。かくて光と物質とは一方は波動他方は粒子であつて何の共通點もない二個の實在といふ事に決つたものであつた。（未完）

理科教育　第十四卷　第五號　別刷

# 光と物質との相似と相異（二）

理化學研究所研究員理學博士　仁科芳雄

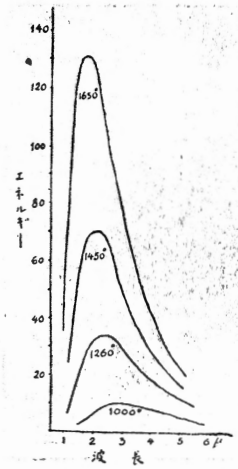
## 三、光と物質との相似

斯様にして確固たる基礎の上に築き上げられて少しの搖ぎもないと信ぜられた、光と物質との本性に關する概念も、前世紀の終末より今世紀に亘つて相次いで行はれた大發見により、其根底から建て直さるべき運命に立ち至つた。

破綻は先づ光より起つた。御存じの通り物質は其溫度を高めると光を放散する。例へば熔鑛爐の中を見ると其溫度に從つて赤色や白色の光を出して居る。斯様に熱せられたものが如何なる波長のエネルギーをどれだけ出すかと云ふ事が、前世紀の終末頃に色々の實驗物理學者に依つて行はれたもので、其結果は第十圖に示された通りである。色々の理論物理學者はこれを從來の電磁力學で說明し様と試みたのであつたが夫れは皆水泡に歸した。これは根本的に從來の理論と相容れぬ點があつた爲めであつて、夫れを觀破したのが Planck（一九〇〇年）であつた。彼れは物質を構成する微粒子が熱の爲めに振動させられる時光を出すものと云ふ考へは從來通りに使つたのであるが、然し其光のエネルギーEは從來の概念の様に連續的で任意の値を採り得るものではなく

$$E = h\nu$$

なる分割し得ぬ一定量のものが間歇的に輻射されたり吸收されたりすると云ふのである。玆に$\nu$は微粒子の單位時間に於ける振動數であつて、夫れは卽ち光の振動數である。$h$は Planck の常數と呼ばれるものである。これが革命の第一聲であつて今日の量子論の誕生であつた。




**第十圖**　高溫度に於ける黑體の輻射エネルギーの分布

此頃光電効果といふ現象が發見せられた。それは短波長の光又はX線を物質殊に金屬に當てるとこれから電子を飛び出させる。而して其電子の有つ運動エネルギーはこれに當てる光の強さには無關係であつて、其波長だけに依つて決定せられるものである。即ち波長が短い程電子の有つエネルギーが大であつた。此實驗事實は又舊來の光の波動說ではどうしても了解する事が出來ない。又エネルギーの關係から云つても、光が波であり電子が粒子であるとすれば、光は空間に一樣に擴がつて居るから電子の樣な小さな空間を占めて居るものに、實驗で得られる位な大きな運動エネルギーを與へる樣なそんな光のエネルギー密度は有り得ないものである。即ち此事實は舊來の光の概念と根本的に相容れぬものであつた。

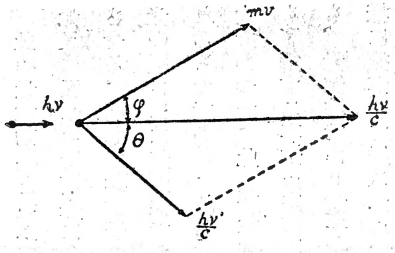
所が Einstein（一九〇五年）は上述の Planck の說を更に具象化して、光は波動ではなく、窮極的に分割し得ない

$$\left.\begin{array}{l} E=h\nu \\ P=h\sigma \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

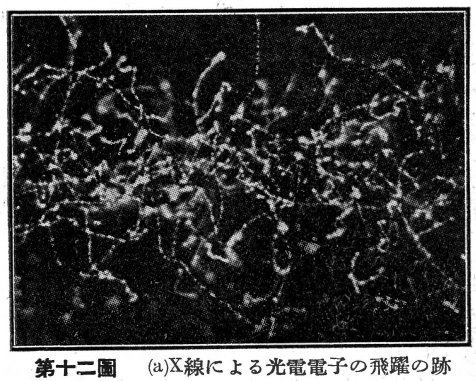
なるエネルギーEと運動量Pとを有つた微粒子である事恰も物質の窮極に電子又はプロトンがあると同樣であるとし、此微粒子を光量子と名付けた。これは光子とも呼ばれる。玆に $\sigma=\frac{n}{\lambda}$, $n$ は光の進行方向を表はす單位ヴェクトル、$\lambda$ は光の波長である。即ち此說に從へば發光體は此微粒子を一定の速度c（毎秒 $3\times10^{10}$ cm）を以て放射するものと考へる。これは或る意味に於いて Newton の微粒子說への逆戻りであつてこれが光量子說である。此說に依れば光電効果は極めて容易に說明する事が出來る。即ち此光量子が電子に衝突すると、恰度二つのピンポン玉の衝突の樣にして電子を飛び出させ自分は消えて無くなると考へるのである。此際エネルギー及び運動量不滅の法則に從つて電子の運動は決定せられる。即ち $h\nu$ なるエネルギーの一部分は電子を原子の羈絆から脫せしめるに用ひられ、殘りが電子の運動エネルギーとなるものである。これによつて上述の光の波長と電子の運動エネルギーとの關係も明に說明せられ、其他此說で豫言せられ得るエネルギー運動量に關する事は全部實驗で確證せられた。玆に於て再び光の波動說と微粒子說との論爭は復活せられ物理學上の大問題となつた。

其後又此光量子說の基礎を固める實驗事實が現はれて來た。これは Compton 効果である。それは光を物質に當てて散亂されて來るものの波長が方向により異ると云ふ實驗である。云はば一定の色の光を物質に當て、これから散亂されて來る光の色が見る方向で異ると云ふ現象である。然し事實に

於ては目に見える光では、此効果は極めて小さくて觀測は出來ぬものであるが、ガンマ線やX線の樣に波長の短いもので確證せられた。此事實は又波動說では到底說明し得ぬものである。何となれば此說では光が散亂されるのは、物質內の電子が入射する光の週期で振動する事によるものであるから、これを孰れの方向から見樣とも波長は元の光と同じであるべきである。然るに光量子說ではさうでない。$h\nu$なるエネルギーと$\frac{h\nu}{c}$なる運動量とを有つ光量子が電子に衝突して散亂されるものであるから、其衝突によりエネルギー及び運動量の一部分は電子に與へられ、殘りが散亂された光量子の所有するものとなり、それは當然方向に依つて異る。從つて波長も異る道理である。今これを圖に示せば第十一圖の通りであつて、$\frac{h\nu'}{c}$なる元の運動量の分解により電子は$mv$（$v$は電子の速度）、散亂された光量子は$\frac{h\nu'}{c}$なる運動量を有する事となる。從つて散亂の角$\theta$が大きい程$\nu'$は小さくなる、即ち波長は長くなる。$\theta$が零即ち散亂されぬ光に於ては$\nu'=\nu$で波長は元の儘である。即ち光量子說によれば光の散亂は全く二つの粒子の衝突の問題であつて、エネルギー及び運動量不滅の法則に依つて凡ては完全に解決せられる。依つて$\nu'$從つて散亂波長が$\theta$と共に如何に變るかを計算する事が出來る。これは完全に實驗と一致した。それのみならず同時に$mv$なる反動の運動量に依つて飛び出させられる電子の存在も實證せられ、玆に光量子說にも亦疑の餘地がなくなつた。一方又前述の樣に干涉現象の方では波動說の正しい事は動かすべからざる所であるから、玆に物理學は大なるデイレンマに惱んだのであります。即ち光といふものは一方に波動性を有すると共に、他方には物質によく似た粒子性をも示すものである。一つの實在で此兩性を具備して居るといふのは




第十一圖　Compton 效果の解說



第十二圖　(a)X線による光電電子の飛躍の跡を示す C. T. R. Wilson の寫眞　線的擴大比 1:6

(b) X線による Compton 效果の反動電子を示す C. T. R. Wilson の寫眞

全く不可解な謎であるといふのである。

今上記の光電効果及び Compton 効果の現象を目に見る樣に表はして呉れるものを示せば第十二圖の C. T. R Wilson の寫眞である。これは前述の第二圖を撮ると同樣の裝置を用ひたものであつて、(a)は直徑2ミリメートルのX線が圖の左より右に通つた其直後に起つた電離狀態を撮つて擴大したものであつて、曲折した白い點々の連續はX線の光電効果に依つて生じた電子の飛躍の狀を示すもので、こんなに小さな電子に大きなエネルギーを與へるのは光が物質の樣に微粒子性を有する證據であつて、それが電子に衝突する爲めに生ずる現象である。

(b)はやはりX線を左から右に通した場合に、Compton 効果に依つて生ずる反動電子の足跡を示すもので、不連續的の太い點々は即ちこれである。此場合X線の波長は(a)の場合に比べて著しく短い事が必要である。此現象を生ずるには前述の通り光が物質の有する粒子性を有つて居なくてはならぬ。夫れ故此二つの圖は第二圖が物質の粒子性を描き出すと同じ樣に、光も亦同じく粒子性を有する事を明示するものであつて、此點に於て光と物質とは全く相通じて居ると云ふべきである。

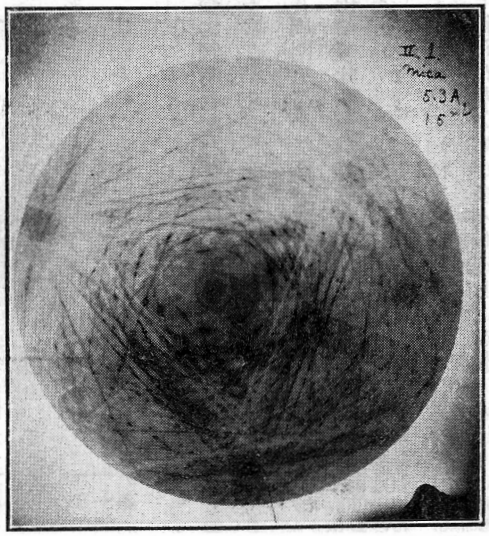
處がそれのみではなく更に物質の方も亦光の有つ波動性を有つて居つて、これにより二重の共通點のある事が最近に至つて判明した。今これを述べやう。

前にも云つた通り Bohr の說によれば、原子は中心の核と其周圍を巡つて軌道運動をする電子とより成るものである。依つて此粒子の體系に舊力學を應用して得る計算結果はどうであるかと云ふに、種々の點に於いて實驗事實に反するといふ事が次第に知れて來た。其他電子の運動は舊物理學で了解し得られない點が多々あるといふ事が時と共に明瞭になり、これが又物理學の大なる惱みであつた。

然るに L. de Broglie（一九二四年）は玆に極めて氣拔で

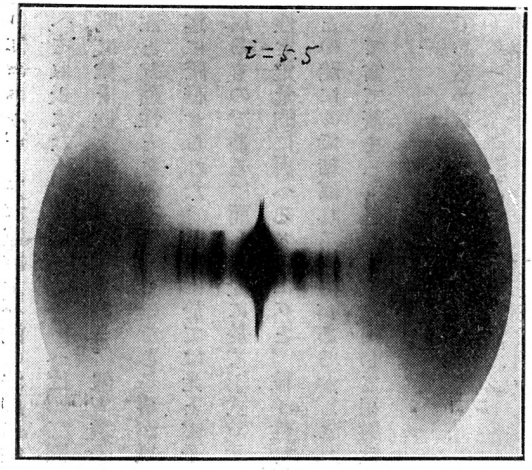
且つ劃期的な說を立てた。それは電子は粒子でなくて波動であると云ふのである。そして原子內の電子は核の周圍に定常波を形成して居る事恰度盥の中の水の定常波に似て居るものとした。此理論は其當時は餘り人の注意を惹かなかつたが、二年ばかり經つて Schrödinger（一九二六年）が此電子の波に對する波動方程式（粒子に對する運動方程式に相當するもの）を提唱し、これを原子に應用するに及んで實驗と一致する結果が何の無理もなく出て來て、玆に物質の波動說は物理學界の驚歎の的となつた。これは他方 Heisenberg の發見した量子力學と相俟つて、前述の舊力學で說明のつかなかつた電子、原子、分子、光に關する困難を快刀亂麻を斷つの觀を以て解決して行つた。そこで物質は光と同樣に波動性を帶びたものであるといふ事が次第に認められて來た。處が Davisson と Germer は更に此說を直截簡明に實證した。それは電子をニッケルの結晶に當てて反射せしめ其干涉する事を示したものであつて、これはX線の干涉と同樣に物質の波動性を何等疑ひの餘地なき迄に確立したものである。其後 Thomson Rupp 又我國では西川、菊池の諸氏が電子波の廻折、反射の干涉を極めて鮮明に求める事に成功し、X線の干涉と同樣に物質構造の研究に應用せられる樣になつた。

第十三、十四、十五圖に示すものは理化學研究所の西川研究室に於て得られた電子干涉の型である。第十三圖は第五圖に示したと同樣の實驗を電子に就いて行つた結果であつて、即ち電子が雲母結晶の極めて薄い膜を通つた時生ずる廻折干涉である。これは第六圖に示したX線の干涉點に相應するものであるが、電子は點よりも主として線狀の干涉縞を生ぜしめる。然し互に共通點のある事が知れる。第十四圖は第七圖の實驗を電子に就いて行つた結果であつて、一定の波長を有つた電子波を雲母結晶で反射干涉させて得られたスペクトル



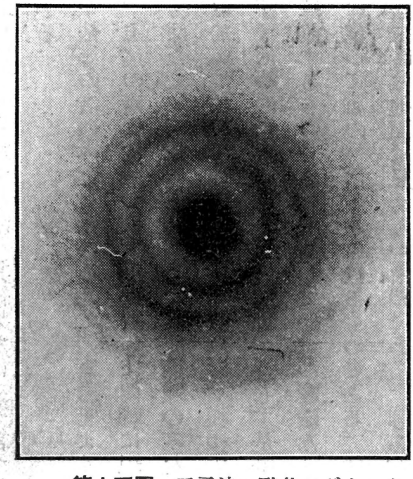

**第十三圖**　電子波の雲母結晶による廻折干涉

である。これも第八圖のX線スペクトルと全く同性質のものである事が見られるであらう。又第十五圖はDebye-Scherrerの實驗同樣の事を電子に就いて行つた結果であつて第九圖に相應するものである。面白いのは兩者共に同じ酸化マグネシウムの粉末による干渉縞である。兩者が如何によく似て居るかが見られるであらう。要するに是等の圖は皆電子を波動と考へて、結晶格子による廻折又は反射による干渉縞を理論的に求めたものとよく一致する。即ち電子がX線同樣に波動性を有する事は此圖により一目瞭然たるものがある。




**第十四圖**　電子波のスペクトル（雲母結晶）

然らば何故以前に電子を粒子と考へて其傳播をある程度迄は說明し得たかと云ふに、それは前に光の場合に述べたHamiltonの理論により明である。即ち波長が問題で取扱ふ物體の大さに比し小さい時は、波動の傳播現象は粒子の進行と全く同樣に取扱ひ得るからである。然るに原子、分子の樣な小さいものとなると、其大さが電子の波長と大體同程度のものとなるから、これは粒子としては取扱ひ得ぬ問題であつて、波動として始めて其現象が了解し得られるものである。



**第十五圖**　電子波の酸化マグネシウムの細粉結晶による干渉縞（Debye-Scherrer の方法）

然し光に光量子說でなくては說明し得られぬ現象があると同樣に、電子にも波動說では說明のつかぬ場合がある。例へば電子と電子、原子、又は光との間の衝突の問題では、矢張

り其エネルギー及び運動量不滅の法則に從ひこれを粒子と考へて取扱はなくてはならぬ。例へば第二圖に示す樣な現象は明に粒子性を表はすものである。即ち電子も光と同樣に粒子性と波動性とを兼有するものである事が疑を容れる餘地なき迄に確證せられた。此點に於ては光と電子とは全く相似して居るものである。而して光に於て(1)式で示した樣に、其波動性を定量的に與へる$\nu$並に$\sigma$と、粒子性を指定せるE並にPとの間に$h$で結ばれる關係があるが、これは直ちに電子に移して當て嵌まるものである。而して相對性原理により

$$E=mc^2 \qquad P=mv$$

であるから

$$\left.\begin{aligned} mc^2&=h\nu \\ mv&=h\sigma \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

從つて

$$\lambda=\frac{h}{mv}$$

これが電子波の波長を與へるものである。

以上は主として電子に就いて述べたが、プロトンに就いても此點は全く同樣であつて、上式には質量だけが入つて居り其電氣量は問題とならぬから、プロトン波の波長は其速度が等しい時は電子波の場合の約 $\frac{1}{1800}$ となる譯である。此プロトン波並にプロトン及び電子の集合より成るHe波の干渉は Stern, Johnson, 及び Dempster などがこれを求め、矢張り電子同樣に波動性を有つて居る事を實證した。

斯樣にして此の宇宙に存在する凡てのものの窮極の單位をなす光量子、電子、プロトンの本性に就いて、物理學は根本的に板挟みの狀態に陷つた。一つの實在が波動と粒子との兩方の性質を有つて居るといふ事は、從來の觀念よりすれば大きな矛盾である。此の問題が Bohr 教授に依つて今日如何に解決せられて居るかといふ事に就いては、本題目外の事であるからこれを省略するが、其結果だけを一言すれば次の通りである。

今是等の者の本性を定める凡ての實驗をよく點檢して見ると、上述の兩性は一つの實驗に於いて同時に現はれて來るものではなくて、或る事情の下には波動性のみを表はし他の問題に於いては粒子性のみを示すもので、從つて此兩性を有する事は何等の矛盾でなく、此兩者が合して是等のものの本性を構成するものである。而して吾々の實驗なるものは場合々々に依つて盾の一面のみを見るものである。從つて一面を見て居る時は他面は見えないものである。即ち粒子性が認められるのはエネルギーと運動量とが問題となる場合であつて、此場合は電子、光量子等が何時何處に居るかと云ふ事は全く

問題になつて來ない。又これを問題とする事が意味のないものであるといふ事が量子論の方から判る。例へば光量子の散亂の問題（Compton 効果）に於いては、それが何時何處で電子と衝突するかと云ふ事は全然問題に入つて來ず、只其エネルギー並に運動量だけが題目となるものである。從つて粒子性によつて問題は解かれる。次に波動性の表はれるのは時間とか空間とかが問題となる場合であつて此時にはエネルギー又は運動量は問ふ處ではない。例へば電子又は光等の廻折或は干渉等の場合には、それが空間の何處に來るかと云ふ事が問題であつて從つて波動性の支配する處である。而して此時はエネルギー又は運動量は議論に入つて來ない。從つて粒子性は表はれて來ぬ。此半面表示性は量子論の原理に合致して居るもので正に然るべきである事が知れる。從つて此各々の性質が場合を異にして表はれると云ふ事は何等の矛盾ではない。それであるから宇宙間に存在するものは皆波から出來て居るとも云へ同時に悉く粒子から成立して居るとも云へる。

尚よく吟味して見ると、粒子性又は波動性と云つてもそれは舊來の言葉の意味でのものではなく、粒子にして粒子ならず波動にして波動ならぬものである。例へば粒子性を表はす場合には其エネルギー及び運動量は明確に與へられて居るが、それが存在する時間並に位置は全く不明であるから、其容積が小さなものか大きなものかそれは全く不明である。從つて從來の概念に從ふ粒子の樣にエネルギー、運動量を小さな空間に限定して有つて居る樣なものと考へる事は出來ぬ。只其個性を失はぬ事が粒子同樣であると云ふに過ぎぬ。又波動と云つても舊來の波動とは異つたものである。何となれば今電子の或る時間に於ける位置が定つたとし、これを波動と考へれば、長い時間を經た後には此波動は廣い空間に擴がつて了ふべきであるが、事實はさうでなく矢張り小さな空間に限られた $-e$ なる電氣量を有つた電子を捕へ得る。此點は光に於ても同樣であつて、一個の光量子は何處迄も一定のエネルギー及び運動量を有つたものとして觀測せられ、決して空間に擴がつて了はぬものである。即ちこれ等のものは何處迄も個性を失はないものである。これが緒言に於いて個性なる言葉を用ひた所以である。以上で知れる通り是等窮極單位の示す本性は舊來の概念による粒子並に波動の性質の一部分宛を夫々の場合に從つて表はす樣な實在であると云ふ事が知れる。

尚最後に光と物質との相似に就いて更に一言する。前に光には偏光現象のある事を述べた。これは光を波動と考へれば其振動の方向がある一定の平面内にあると云ふ事によつて定義

された概念である。然し光を粒子と考へる時には之れは左様に描出し易いものではない。然し兎も角光子の狀態を定める一つの要素である事は、振動數$\nu$が光子のエネルギーを定める要素である事と同様である。さて光と物質とは上述の様に相並行する性質を有つて居る。然らば此偏光に對應するものが物質の方にあるかと云ふに矢張り存在する。それは電子並にプロトンの固有磁率(從つてこれに相當する固有角運動量)である。即ち是等のものはこれを粒子と考へた時に、只の質點ではなくて或る軸の方向に磁率を有つた小さな磁石と考へられる様な作用を及ぼすものである。而して其磁率の大さは$\frac{eh}{4\pi mc}$である。但し$m$はそれが電子であるかプロトンであるかに從つて各其質量を用ひれば好い。此磁石の軸が一定の方向を有つと云ふ事が、光が一定の偏光狀態にあると云ふ事に對應するものである。從つて物質の場合には此概念は波動としてよりは粒子としての方が判り易い。

## 四、光と物質との相異

以上に於て光と物質とが極めて相似した性質を有つて居る事を述べた。然らば此共通點は何處迄も存在するかと云ふに、それは時間、空間、及びエネルギー、運動量の問題に於いて、一には波動性他には粒子性を表はすと云ふ點に於いて互に相對應して居ると云ふに過ぎず、其根本に於いては全く異つて居るものである。其最も顯著な點は前にも述べた通り物質に於いてはそれが電子にせよプロトンにせよ一定の質量並に電氣量を有つて居るが、光量子にはこれが無い。又後者は常に一定の速度cを有つて居るが、前者はc以下の勝手な速度を有ち得る。是等の差は明に上記の干渉現象などに表はれて居つて、例へば第六圖と第十三圖の如きも其干渉に於いて著しい相異がある。

此外更に次に述べる重要な點に於いて、此兩者の間に根本的の差異のある事が量子論の發達によつて明となつた。これは恐らく光と物質との存在の根柢に觸れる問題であらう。即ち今一定の空間内に多くの電子、プロトン又は光量子があつたとする。而して其位置の座標を$x$、$y$、$z$とし運動量の此方向に於ける成分を夫れ〳〵$p_x$、$p_y$、$p_z$とする。今此空間内の$x$、$y$、$z$なる座標を有つ一定點に於て、$x$と$x+\Delta x$との間、$y$と$y+\Delta y$との間、$z$と$z+\Delta z$との間にある容積$\Delta x\Delta y\Delta z$なる空間を考へる。而して此空間内に於いて運動量が$p_x$と$p_x+\Delta p_x$との間、$p_y$と$p_y+\Delta p_y$との間、$p_z$と$p_z+\Delta p_z$との間にある様な値を有つ微粒子の數が幾個在り得るかと云ふ事を檢べて見る。但し$\Delta x$ $\Delta y$ $\Delta z$ $\Delta p_x$ $\Delta p$ $\Delta p_z$は任意のもので

はあり得ないで次の關係があるものとする

$$\Delta x\Delta p_x=\Delta y\Delta p_y=\Delta z\Delta p_z=h$$

さうすると光量子は幾個でも無制限に存在し得るが、電子又はプロトンは $2\Delta x\Delta y\Delta z$ 以上はあり得ないものである。即ち單位容積に二個又は二個以下の割合である。而して二個あつた場合には前述の固有磁率が互に逆並行の位置になくてはならぬ。これは光及び物質の表はす現象の根柢に横はる原理であつて、これあるが爲めに一方原子並に分子も今日吾人が自然界に見る樣なものを生じ、從つて是等に依つて築かれた物質界も吾等の周圍に見る樣なものを生ずるのであつて、若し此原理がなかつたならば自然界は根本から異つたものとなつたであらう。又他方光に於ても此原理がある事により、前述の高溫度にある物體より生ずる光のエネルギー分布も第十圖に示す樣なものとなり、其他今日光の現象として觀測されるものも、此原理なくしては生じて來ないものが多い。

斯んな大切な原理、しかも光と物質とでは全く異つて居る原理が、何に基因して生じて來るかと云ふ事は、今日未だ全く不明の問題であつて、物理學者の將來解くべき謎である。これは恐らく光とか物質（電子、プロトン）とかが何故存在するかと云ふ深い問題に關聯するものであらう。而してこれが解ければ上述の質量、電氣量等の有無、速度の變、不變性なども自ら判るものではないかと思はれる。而して光と物質との關係が今一層深い基礎の上に置かれるであらう。（終）