પ્રકરણ અગિયાર

વિકિરણ અને દ્રવ્યની દ્વૈત પ્રકૃતિ (DUAL NATURE OF RADIATION AND MATTER)

11.1 પ્રસ્તાવના (INTRODUCTION)

વિદ્યુતચુંબકત્વ માટેના મેક્સવેલનાં સમીકરણો અને 1887માં વિદ્યુતચુંબકીય તરંગો ઉત્પન્ન કરવા અને તેમને પરખવા (Detection) માટેના હર્ટ્ઝના પ્રયોગોએ પ્રકાશના તરંગ સ્વરૂપને દૃઢપણે સ્થાપિત કર્યું હતું. તે જ સમયગાળા દરમિયાન 19મી સદીના અંત વખતે, ડિસ્ચાર્જ ટ્યૂબમાં નીચા દબાણે રહેલા વાયુઓમાંથી વિદ્યુત વિભાર (ઈલેક્ટ્રીક ડિસ્ચાર્જ)ના પ્રાયોગિક અવલોકનો ઘણી બધી ઐતિહાસિક શોધોખોળો તરફ દોરી ગયા. 1895માં રૉન્જન (Roentgen) દ્વારા X-Ray (ક્ષ-કિરણો), તથા 1897માં જે. જે. થોમસન દ્વારા ઈલેક્ટ્રૉનની શોધ, એ પરમાણુની રચના સમજવા માટેનાં અગત્યના માર્ગસ્તંભ હતા. એમ જાણવા મળ્યું હતું કે પારાના લગભગ 0.001 mm સ્તંભ જેટલા પુરતા ઓછા દબાણે, ડિસ્ચાર્જ ટ્યુબમાં રહેલા વાયુ પર બે ઈલેક્ટ્રૉડ્સ (વિદ્યુત અગ્રો) વચ્ચે વિદ્યુતક્ષેત્ર લાગુ પાડતાં ડિસ્ચાર્જ (વિદ્યુત વિભાર) ઉત્પન્ન થાય છે. કૅથોડની સામેની બાજુના કાચ પર પ્રસ્ફુરક (ફ્લોરેસન્ટ) ઝગારો (Glow) દેખાય છે. કાચ પરના પ્રસ્ફુરક (ફ્લોરેસન્ટ) પ્રકાશનો રંગ, કાચના પ્રકાર પર આધાર રાખતો હતો, જેમકે સોડા-કાચ પર પીળાશ પડતો લીલો રંગ હતો. આ પ્રસ્ફુરણ (ફ્લોરેસન્સ) માટે કૅથોડ પરથી આવતા વિકિરણને કારણભૂત માનવામાં આવ્યું હતું. કૅથોડ કિરણોની શોધ 1870માં વિલિયમ ક્રુક્સે (William Crookes) કરી હતી, જેમણે પછીથી 1879માં સૂચવ્યું હતું કે આ કિરણો ખૂબ ઝડપથી ગતિ કરતા ઋણ વિદ્યુતભારિત કણોના પ્રવાહના બનેલા છે. બ્રિટીશ ભૌતિકશાસ્ત્રી જે. જે. થોમસને (J. J. Thomson, 1856-1940) આ અધિતર્કની પુષ્ટિ આપી. ડિસ્ચાર્જ ટ્યૂબ પર પરસ્પર લંબ રૂપે વિદ્યુત અને ચુંબકીયક્ષેત્રો લગાડીને જે. જે. થોમસને સૌ પ્રથમ આ કૅથોડ કિરણોના કણોની ઝડપ અને વિશિષ્ટ વિદ્યુતભાર [વિદ્યુતભાર અને દ્રવ્યમાનનો ગુણોત્તર (e/m)]ના પ્રાયોગિક મૂલ્યો મેળવ્યા. તેઓ

(કૅથોડ કિરણોના કણો) પ્રકાશની ઝડપ (3×10^8 m/s)ના લગભગ 0.1 થી 0.2 ગણી ઝડપથી ગતિ કરતા માલુમ પડ્યા હતા. હાલમાં e/mનું સ્વીકારેલ મૂલ્ય 1.76×10^{11} C/kg છે. આ ઉપરાંત, e/mનું મૂલ્ય કૅથોડ (ઉત્સર્જક) માટે ઉપયોગમાં લેવાયેલા દ્રવ્ય/ધાતુના પ્રકાર પર, કે ડિસ્ચાર્જ ટ્યૂબમાં રાખેલા વાયુ પર, આધાર રાખતું ન હોવાનું માલુમ પડ્યું હતું. આ અવલોકન કૅથોડ રે કણોનું સાર્વત્રિકપણું (Universality) સૂચવે છે.

આ જ સમયગાળા દરમિયાન, 1887માં એવું જાણવામાં આવ્યું કે કેટલીક ધાતુઓ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરતાં, ઓછી ઝડપ ધરાવતા ઋણ વિદ્યુતભારિત કણો ઉત્સર્જિત થાય છે. આ ઉપરાંત, કેટલીક ધાતુઓને ઊંચા તાપમાને ગરમ કરતાં તે ઋણ વિદ્યુતભારિત કણો ઉત્સર્જિત કરતી હોવાનું માલુમ પડ્યું હતું. આ કણો માટે પણ e/mનું મૂલ્ય કૅથોડ રે કણો જેટલું જ જાણવા મળ્યું હતું. આ બધા અવલોકનોએ પ્રસ્થાપિત કર્યું કે આ બધા જ કણો, ભલે તે જુદી જુદી રીતે ઉત્પન્ન થયા હોય, એક સમાન પ્રકૃતિ ધરાવે છે, જેમને 1897માં જે. જે. થોમસને *ઈલેક્ટ્રૉન* (*Electrons*) એવું નામ આપ્યું, અને દર્શાવ્યું કે તેઓ દ્રવ્યનો મૂળભૂત, સાર્વત્રિક ઘટક છે. વાયુઓ વડે વિદ્યુત વહનના સૈદ્ધાંતિક અને પ્રાયોગિક નિરીક્ષણો દ્વારા ઈલેક્ટ્રૉનની યુગ પ્રવર્તક શોધ કરવા બદલ તેમને 1906માં ભૌતિકવિજ્ઞાન માટેનું નૉબેલ પારિતોષિક એનાયત થયું હતું. 1913માં, અમેરીકન ભૌતિકશાસ્ત્રી આર. એ. મિલિકને (R. A. Millikan, 1868-1953) ઈલેક્ટ્રૉનનો વિદ્યુતભાર ચોક્કસ રીતે માપવા માટે નવો જ, તેલના બુંદ (Oil-Drop)નો પ્રયોગ કર્યો. તેમને જાણવા મળ્યું કે તેલના ટીપા પરનો વિદ્યુતભાર હંમેશા પ્રાથમિક વિદ્યુતભાર, 1.602×10^{-19} Cના પૂર્ણાંક ગુણકમાં જ મળે છે. આમ, મિલિકનના પ્રયોગે સ્થાપિત કર્યું કે *વિદ્યુતભાર ક્વૉન્ટાઈઝ્ડ* (*ક્વૉન્ટમીકૃત*) હોય છે. વિદ્યુતભાર (e) અને વિશિષ્ટ વિદ્યુતભાર (e/m)ના મૂલ્ય પરથી, ઈલેક્ટ્રૉનનું દ્રવ્યમાન (m) શોધી શકાય.

11.2 ઈલેક્ટ્રૉનનું ઉત્સર્જન (ELECTRON EMISSION)

આપણે જાણીએ છીએ કે ધાતુઓ મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉન (ઋણ વિદ્યુતભારિત કણો) ધરાવે છે જે તેમની વાહકતા માટે જવાબદાર છે. આમ છતાં, મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉન સામાન્ય રીતે ધાતુની સપાટી પરથી છટકી શકતા નથી. જો કોઈ ઈલેક્ટ્રૉન ધાતુમાંથી બહાર નીકળવા પ્રયત્ન કરે, તો ધાતુની સપાટી ધન વિદ્યુતભાર પ્રાપ્ત કરે છે અને ઈલેક્ટ્રૉનને પાછો ધાતુમાં ખેંચી લે છે. આમ, આયનોના આકર્ષીબળોના કારણે મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉન ધાતુની સપાટીમાં પકડાઈ રહે છે. પરિણામ સ્વરૂપે, જો ઈલેક્ટ્રૉન આ આકર્ષી બળને ઓળંગી શકે (પહોંચી વળે) તેટલી પુરતી ઊર્જા ધરાવતો હોય તો જ તે ધાતુની સપાટીમાંથી બહાર નીકળી શકે. ધાતુની સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનને બહાર કાઢવા માટે અમુક ચોક્કસ લઘુત્તમ ઊર્જા આપવી પડે છે. ધાતુની સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનને છટકી જવા માટે જરૂરી એવી આ લઘુત્તમ ઊર્જાને તે ધાતુનું *કાર્ય વિધેય* (*Work Function*) કહે છે. તેને સામાન્ય રીતે ϕ_0 વડે દર્શાવાય છે અને તેને eV (electron Volt)માં માપવામાં આવે છે. ઈલેક્ટ્રૉનને 1 વોલ્ટના વિદ્યુત સ્થિતિમાન તફાવત વડે પ્રવેગિત કરતાં તેણે મેળવેલી ઊર્જાને એક ઈલેક્ટ્રૉન વોલ્ટ કહે છે, એટલે કે $1\ e\text{V} = 1.602 \times 10^{-19}$ J.

ઊર્જાના આ એકમનો ઉપયોગ સામાન્ય રીતે પરમાણ્વિક અને ન્યુક્લિયર ભૌતિકવિજ્ઞાનમાં થાય છે. કાર્ય વિધેય (ϕ_0), ધાતુના ગુણધર્મો અને તેની સપાટીના પ્રકાર પર આધાર રાખે છે. કેટલીક ધાતુઓના કાર્ય વિધેયના મૂલ્યો કોષ્ટક 11.1માં આપેલા છે. આ મૂલ્યો લગભગ છે કારણકે તે ધાતુની સપાટી પરની અશુધ્ધિ પ્રત્યે ખૂબ સંવેદી છે.

કોષ્ટક 11.1 પરથી નોંધો કે કાર્ય વિધેયનું મૂલ્ય પ્લેટિનમ માટે મહત્તમ ($\phi_0 = 5.65\ e$V) છે, જ્યારે સિઝિયમ માટે તે લઘુત્તમ ($\phi_0 = 2.14\ e$V) છે.

ધાતુની સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનના ઉત્સર્જન માટે જરૂરી લઘુત્તમ ઊર્જા, મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉનને નીચે આપેલી ભૌતિક પ્રક્રિયાઓમાંથી કોઈ પણ એક રીતે આપી શકાય :

(i) *તાપીય (થર્મીઓનિક) ઉત્સર્જન* : યોગ્ય રીતે ગરમ કરીને મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉનને પુરતી તાપીય (થર્મલ) ઊર્જા આપી શકાય કે જેથી તેઓ ધાતુ (ની સપાટી)માંથી બહાર નીકળી શકે.

કોષ્ટક 11.1 કેટલીક ધાતુઓનાં કાર્ય વિધેય

ધાતુ	કાર્ય વિધેય ϕ_0 (eV)	ધાતુ	કાર્ય વિધેય ϕ_0 (eV)
Cs	2.14	Al	4.28
K	2.30	Hg	4.49
Na	2.75	Cu	4.65
Ca	3.20	Ag	4.70
Mo	4.17	Ni	5.15
Pb	4.25	Pt	5.65

(ii) *ક્ષેત્રીય ઉત્સર્જન* : સ્પાર્ક પ્લગની જેમ, ધાતુ પર ખૂબ પ્રબળ વિદ્યુતક્ષેત્ર (10^8 Vm^{-1}ના ક્રમનું) લગાડીને, ઈલેક્ટ્રૉનને ધાતુની સપાટીમાંથી બહાર (ખેંચી) કાઢી શકાય.

(iii) *ફોટો-ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન* : જ્યારે યોગ્ય આવૃત્તિનો પ્રકાશ ધાતુ પર આપાત કરવામાં આવે ત્યારે ધાતુની સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનનું ઉત્સર્જન થાય છે. આ ફોટો (પ્રકાશ)-ઉત્સર્જિત ઈલેક્ટ્રૉનને *ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન* કહે છે.

11.3 ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર (PHOTO ELECTRIC EFFECT)

11.3.1 હર્ટ્ઝના અવલોકનો (Hertz's Observations)

વિદ્યુતચુંબકીય તરંગોના પ્રયોગો દરમ્યાન, 1887માં હેન્રી હર્ટ્ઝે (Heinrich Hertz, 1857-1894) ફોટો-ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જનની ઘટના શોધી હતી. સ્પાર્કના ડીસ્ચાર્જ દ્વારા વિદ્યુતચુંબકીય તરંગોના ઉત્સર્જનના પ્રાયોગિક અવલોકન દરમિયાન હર્ટ્ઝે અવલોકન કર્યું કે જ્યારે ઉત્સર્જક પ્લેટને આર્ક લૅમ્પના અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ વડે પ્રકાશિત કરવામાં આવે ત્યારે) ડીટેક્ટર લૂપની આસપાસ ઊંચા વોલ્ટેજના સ્પાર્ક વધુ તીવ્ર હતા.

ધાતુની સપાટી પર પ્રકાશ આપાત કરતાં મુક્ત, વિદ્યુતભારિત કણો તેમાંથી બહાર ભાગી છૂટતા હતા જેમને હવે આપણે ઈલેક્ટ્રૉન તરીકે ઓળખીએ છીએ. જ્યારે ધાતુની સપાટી પર પ્રકાશ આપાત થાય, ત્યારે (ધાતુની) સપાટી પાસેના કેટલાક ઈલેક્ટ્રૉન આપાત વિકિરણોમાંથી, પદાર્થની સપાટીમાં રહેલા ધન આયનોના આકર્ષણ બળને ઓળંગી શકાય એટલી, પુરતી ઊર્જા મેળવે છે. આપાત પ્રકાશમાંથી પુરતી ઊર્જા મેળવ્યા પછી ઈલેક્ટ્રૉન ધાતુની સપાટીમાંથી આસપાસના અવકાશમાં મુક્ત થાય છે.

11.3.2 હોલવાશ અને લેનાર્ડના અવલોકનો (Hallwachs' and Lenard's Observations)

વિલ્હેમ હોલવાશ અને ફીલીપ લેનાર્ડે 1886-1902ના ગાળામાં ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જનની ઘટનાનો અભ્યાસ કર્યો હતો.

લેનાર્ડે (1862-1947) અવલોકન કર્યું કે, જ્યારે બે ઈલેક્ટ્રૉડ (ધાતુની પટ્ટીઓ)ને સમાવતી શૂન્યાવકાશિત કાચની નળીમાં રહેલી ઉત્સર્જક પ્લેટ (પટ્ટી) પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ વિકિરણ આપાત કરવામાં આવે ત્યારે પરિપથમાં વિદ્યુતપ્રવાહ વહે છે (આકૃતિ 11.1). જ્યારે અલ્ટ્રાવાયોલેટ વિકિરણ આપાત કરવાનું બંધ કરવામાં આવે ત્યારે તરત જ વિદ્યુતપ્રવાહ પણ અટકી જાય છે. આ અવલોકનો દર્શાવે છે કે, જ્યારે ઉત્સર્જક પ્લેટ C પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ વિકિરણ પડે છે ત્યારે તેમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનનું ઉત્સર્જન

થાય છે, જે વિદ્યુતક્ષેત્ર દ્વારા ધન કલેક્ટર પ્લેટ A તરફ આકર્ષાય છે. ઈલેક્ટ્રૉન્સ શૂન્યાવકાશિત નળીમાંથી પસાર થાય છે અને પરિણામે વિદ્યુતપ્રવાહનું વહન થાય છે. આમ, ઉત્સર્જકની સપાટી પર આપાત થતા પ્રકાશના કારણે બાહ્ય પરિપથમાં વિદ્યુતપ્રવાહનું વહન થાય છે. હોલવાશ અને લેનાર્ડ કલેક્ટર પ્લેટના સ્થિતિમાન તથા આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ અને તીવ્રતા સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ કેવી રીતે બદલાય છે તેનો અભ્યાસ કર્યો હતો.

1888માં હોલવાશે વધુ અભ્યાસ કર્યો અને ઈલેક્ટ્રૉસ્કોપ સાથે ઋણ વિદ્યુતભારિત ઝિંક પ્લેટ જોડી. તેમને એવું જોવા મળ્યું કે જ્યારે ઝિંક પ્લેટ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરવામાં આવ્યો, ત્યારે પ્લેટે તેનો વિદ્યુતભાર ગુમાવ્યો. ઉપરાંત વિદ્યુતભાર રહિત ઝિંક પ્લેટ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરતાં, તે ધન વિદ્યુતભારિત બની. ધન વિદ્યુતભારિત ઝિંક પ્લેટ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરતા તેના પરનો ધનવિદ્યુતભાર વધ્યો આ અવલોકનો પરથી તેમણે તારવ્યું કે ઝિંક પ્લેટ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરતાં તેમાંથી ઋણ વિદ્યુતભારિત કણો ઉત્સર્જિત થાય છે.

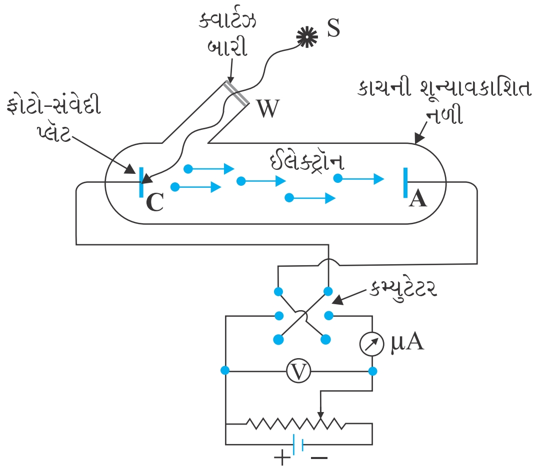
1897માં ઈલેક્ટ્રૉનની શોધ બાદ એ સ્પષ્ટ થયું કે, ઉત્સર્જક પ્લેટ પર પ્રકાશ આપાત કરતાં તેમાંથી ઈલેક્ટ્રૉન્સ ઉત્સર્જિત થાય છે. ઋણ વિદ્યુતભારના કારણે ઉત્સર્જિત ઈલેક્ટ્રૉન વિદ્યુતક્ષેત્ર દ્વારા કલેક્ટર પ્લેટ તરફ ધકેલાય છે. હોલવાશ અને લેનાર્ડ એ પણ અવલોકન કર્યું કે જ્યારે ઉત્સર્જક પ્લેટ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરીએ ત્યારે, આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ, અમુક લઘુત્તમ મૂલ્ય - જેને *થ્રેશોલ્ડ* (*સીમાંત*) *આવૃત્તિ* કહે છે તે - કરતાં ઓછી હોય તો એક પણ ઈલેક્ટ્રૉન ઉત્સર્જિત થતો નથી. આ લઘુત્તમ આવૃત્તિ ઉત્સર્જક પ્લેટના દ્રવ્યના પ્રકાર (પ્રકૃતિ) પર આધાર રાખે છે.

એવું જાણવા મળ્યું હતું કે ઝિંક, કેડમિયમ, મૅગ્નેશિયમ વગેરે જેવી કેટલીક ધાતુઓ સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનનું ઉત્સર્જન કરવા માટે ટૂંકી આવૃત્તિવાળા અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશને જ પ્રતિભાવ આપે છે. જો કે કેટલીક આલ્કલી ધાતુઓ જેમકે લિથિયમ, સોડિયમ, પોટેશિયમ, સિઝિયમ અને રૂબિડિયમ જેવી આલ્કલી ધાતુઓ દૃશ્ય પ્રકાશ માટે પણ સંવેદનશીલ છે. આ બધા જ *પ્રકાશ સંવેદી* (*ફોટો સેન્સિટીવ*) *દ્રવ્યો* પર પ્રકાશ આપાત કરતાં તે ઈલેક્ટ્રૉનનું ઉત્સર્જન કરે છે. ઈલેક્ટ્રૉનની શોધ થયા બાદ આ ઈલેક્ટ્રૉનને ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન કહેવામાં આવ્યા. આ ઘટનાને *ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર* કહે છે.

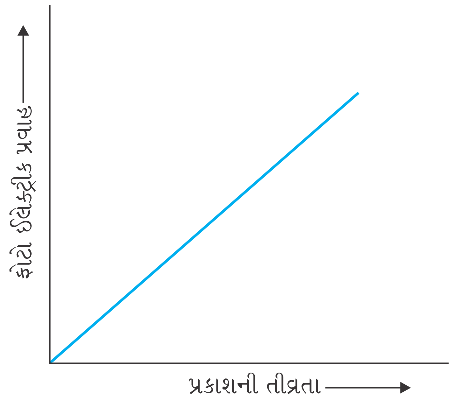
Simulate experiments on photoelectric effect
http://www.eo.ucar.edu/rainbows
http://www.atoptics.co.uk/bows.htm

11.4 ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરનો પ્રાયોગિક અભ્યાસ (Exprimental Study of Photoelectric Efect)

આકૃતિ 11.1માં ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરનો અભ્યાસ કરવા માટેની પ્રાયોગિક ગોઠવણીની રૂપરેખા દર્શાવી છે. તેમાં શૂન્યાવકાશિત કાચ/ક્વાર્ટઝની નળી (ટ્યૂબ)ની અંદર પ્રકાશ સંવેદી પ્લેટ C અને બીજી ધાતુની પ્લેટ A દર્શાવેલ છે. પ્રકાશ ઉદ્‌ગમ Sમાંથી પુરતી ઓછી તરંગલંબાઈવાળો એકવર્ણી (Monochromatic - એક રંગી) પ્રકાશ બારી Wમાં થઈને પ્રકાશ સંવેદી પ્લેટ (ઉત્સર્જક) C પર આપાત થાય છે. પારદર્શક ક્વાર્ટઝની બારીને કાચની ટ્યૂબ પર લગાડવામાં આવી હોય છે, જે તેમાંથી અલ્ટ્રાવાયોલેટ કિરણને પસાર થવા દે છે, જે ફોટો સેન્સિટીવ પ્લેટ C પર આપાત થાય છે. પ્લેટ Cમાંથી ઈલેક્ટ્રૉન ઉત્સર્જિત થાય છે અને બૅટરી વડે ઉત્પન્ન થયેલા વિદ્યુતક્ષેત્રના કારણે (કલેક્ટર) પ્લેટ A દ્વારા એકત્રિત થાય છે. બૅટરી, C અને A વચ્ચે વિદ્યુત સ્થિતિમાનનો તફાવત જાળવી રાખે છે, જે બદલી પણ શકાય છે. પ્લેટ C અને પ્લેટ Aની ધ્રુવત્વ (Polarity - ધન કે ઋણ) ને કમ્પ્યુટેટર દ્વારા ઊલટાવી શકાય છે. આમ, ઉત્સર્જક C ની સાપેક્ષે પ્લેટ A ને ઈચ્છિત ધન કે ઋણ સ્થિતિમાને રાખી શકાય છે. જ્યારે ઉત્સર્જક પ્લેટ Cની સાપેક્ષે કલેક્ટર પ્લેટ A ધન હોય, ત્યારે ઈલેક્ટ્રૉન તેના તરફ આકર્ષાય છે. ઈલેક્ટ્રૉનના ઉત્સર્જનના કારણે પરિપથમાં વિદ્યુતપ્રવાહનું વહન થાય છે. ઉત્સર્જક અને કલેક્ટર પ્લેટ વચ્ચે વિદ્યુત સ્થિતિમાનનો તફાવત વોલ્ટમીટર (V) વડે માપી શકાય છે. જ્યારે પરિપથમાં મળતો ફોટો



આકૃતિ 11.1 ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર સમજવા માટે પ્રાયોગિક ગોઠવણી



આકૃતિ 11.2 પ્રકાશની તીવ્રતા સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહનો ફેરફાર

વિદ્યુતપ્રવાહ માઈક્રોએમીટર (μA) વડે માપી શકાય છે. ઉત્સર્જક પ્લેટ Cની સાપેક્ષે કલેક્ટર પ્લેટ A પરનું સ્થિતિમાન બદલીને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ વધારી કે ઘટાડી શકાય છે. ઉત્સર્જક C અને કલેક્ટર A વચ્ચેના વિદ્યુત સ્થિતિમાનના તફાવત Vની જેમ આપાત પ્રકાશની તીવ્રતા અને આવૃત્તિ પણ બદલી શકાય છે.

આપણે આકૃતિ 11.1માં દર્શાવેલ પ્રાયોગિક ગોઠવણીનો ઉપયોગ કરીને (a) વિકિરણની તીવ્રતા, (b) આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ, (c) પ્લેટ A અને C વચ્ચે વિદ્યુત સ્થિતિમાનનો તફાવત, અને (d) પ્લેટ C માટે વપરાયેલ દ્રવ્યના પ્રકારની સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહના ફેરફારનો અભ્યાસ કરી શકીએ. ઉત્સર્જક C પર આપાત થતા પ્રકાશના માર્ગમાં યોગ્ય રંગના ફિલ્ટર કે રંગીન કાચ મૂકીને જુદી જુદી આવૃત્તિના પ્રકાશનો ઉપયોગ કરી શકીએ. પ્રકાશની તીવ્રતાને બદલવા માટે આપણે ઉત્સર્જક અને પ્રકાશ ઉદ્‌ગમ વચ્ચેનું અંતર બદલી શકીએ.

11.4.1 પ્રકાશની તીવ્રતાની ફોટો પ્રવાહ પર અસર (Effect of Intensity of Light on Photocurrent)

ઉત્સર્જક Cની સાપેક્ષે કલેક્ટર Aને ધન સ્થિતિમાને રાખવામાં આવે છે કે જેથી C પરથી ઉત્સર્જાયેલા ઈલેક્ટ્રૉન કલેક્ટર A તરફ આકર્ષાય. આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ અને સ્થિતિમાન અચળ રાખીને, વિકિરણની તીવ્રતા બદલવામાં આવે છે અને દરેક વખતે પરિણામી ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ માપવામાં આવે છે. આકૃતિ 11.2માં દર્શાવેલ આલેખ મુજબ પ્રકાશની તીવ્રતામાં થતા વધારા સાથે ફોટો પ્રવાહ રેખીય રીતે વધતો હોવાનું જણાય છે. ફોટો પ્રવાહ એક સેકન્ડમાં ઉત્સર્જાતા ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની સંખ્યાના સમપ્રમાણમાં હોય છે. આ દર્શાવે છે કે *એક સેકન્ડમાં ઉત્સર્જાયેલા ઈલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા આપાત પ્રકાશની તીવ્રતાના સમપ્રમાણમાં હોય છે.*

11.4.2 ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ પર વિદ્યુતદબાણની અસર (Effect of Potential on Photoelectric Current)

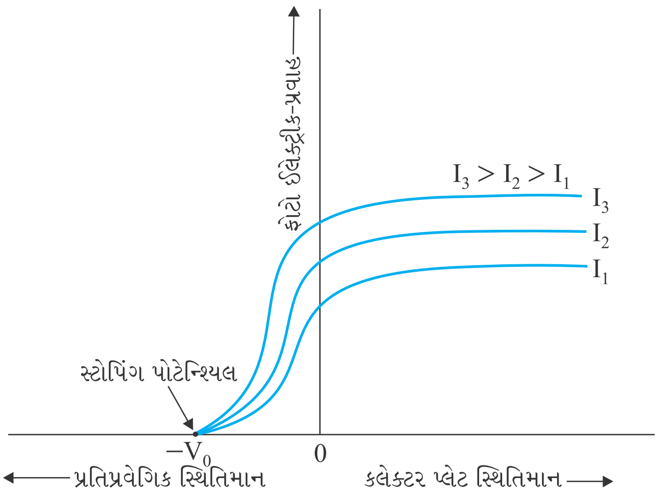
પ્રારંભમાં આપણે પ્લેટ Cની સાપેક્ષે પ્લેટ Aને કોઈ ધન સ્થિતિમાને રાખીએ તથા પ્લેટ C પર અચળ (ચોક્કસ) આવૃત્તિ ν અને અચળ તીવ્રતા I_1 નો પ્રકાશ આપાત કરીએ. ત્યાર બાદ આપણે પ્લેટ Aના ધન સ્થિતિમાનને ધીમે ધીમે બદલીએ તથા દરેક વખતે મળતો ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ માપીએ. એમ જાણવા મળે છે કે પ્રવેગક (ધન) સ્થિતિમાનના વધારા સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ પણ વધે છે. કોઈ એક તબક્કે પ્લેટ A પરના ચોક્કસ ધન સ્થિતિમાન માટે, ઉત્સર્જાયેલા બધા જ ઈલેક્ટ્રૉન પ્લેટ A પર પહોંચી જાય છે અને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ મહત્તમ બને છે અથવા સંતૃપ્ત (Saturate) થાય છે. જો આપણે પ્લેટ A પરનું પ્રવેગક સ્થિતિમાન હજી પણ વધારીએ તો ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ વધતો નથી. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહના આ મહત્તમ મૂલ્યને *સંતૃપ્ત પ્રવાહ* (*Saturation Current*) કહે છે. સંતૃપ્ત પ્રવાહ, ઉત્સર્જક પ્લેટ C પરથી ઉત્સર્જાયેલા બધા જ ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન કલેક્ટર પ્લેટ A પર પહોંચે તે કિસ્સાને અનુરૂપ છે (તે કિસ્સામાં મળે છે).

હવે આપણે પ્લેટ Cની સાપેક્ષે પ્લેટ A પર ઋણ (પ્રતિપ્રવેગક) સ્થિતિમાન લગાડીએ અને તેને ધીમે ધીમે વધુ ઋણ બનાવીએ. જ્યારે ધ્રુવત્વ ઊલટાવવામાં આવે ત્યારે ઈલેક્ટ્રૉન અપાકર્ષાય છે અને ફક્ત

પુરતી ઊર્જા ધરાવતા ઈલેક્ટ્રૉન જ કલેક્ટર પ્લેટ A સુધી પહોંચે છે. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ ઝડપથી ઘટતો જાય છે અને પ્લેટ A પરના ઋણ સ્થિતિમાનના ચોક્કસ રીતે વ્યાખ્યાયિત ક્રાંતિમૂલ્ય, V_0 માટે તે શૂન્ય થાય છે. આપાત પ્રકાશની કોઈ ચોક્કસ આવૃત્તિ માટે, *પ્લેટ A પર લગાડેલ લઘુત્તમ ઋણ (પ્રતિપ્રવેગી) સ્થિતિમાન V_0, કે જેના માટે ફોટો પ્રવાહ બંધ થઈ જાય કે શૂન્ય થાય, તેને કટ ઓફ કે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ કહે છે.*

ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનના સંદર્ભમાં આ અવલોકનનું અર્થઘટન સરળ છે. ધાતુમાંથી ઉત્સર્જાયેલા બધા જ ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા એક સમાન નથી હોતી. જ્યારે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ એટલું પુરતું હોય કે જે સૌથી વધુ ઊર્જાવાન ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન, કે જેમની મહત્તમ ગતિઊર્જા (K_{max}) હોય, તેમને પણ અપાકર્ષિત કરીને કલેક્ટર પર પહોંચવામાંથી રોકી શકે, ત્યારે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ શૂન્ય થાય છે, તેથી

$$K_{max} = eV_0 \qquad (11.1)$$

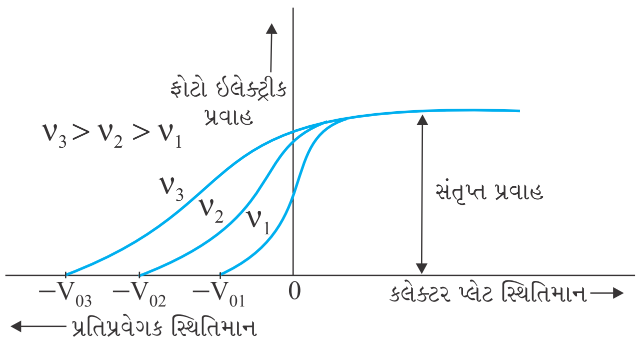


આકૃતિ 11.3 આપાત પ્રકાશની જુદી જુદી તીવ્રતાઓ માટે, કલેક્ટર પ્લેટ સ્થિતિમાન સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહનો ફેરફાર

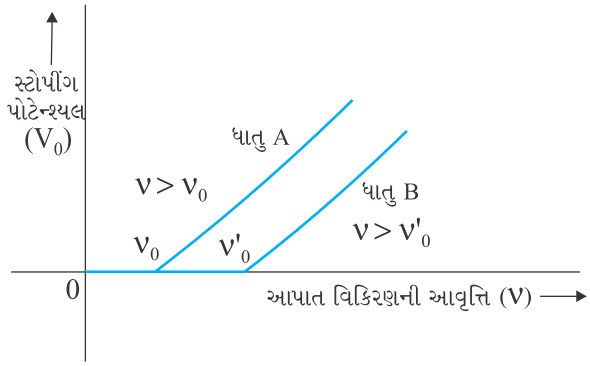
આપણે આ પ્રયોગને આપાત વિકિરણની તે જ આવૃત્તિ માટે, પણ વધુ તીવ્રતાઓ I_2 અને I_3 ($I_3 > I_2 > I_1$) માટે ફરીથી કરી શકીએ. આપણે એ નોંધીએ કે, સંતૃપ્ત પ્રવાહો (Saturation Currents) હવે વધારે ઊંચા મૂલ્યના મળે છે. આ દર્શાવે છે કે, આપાત વિકિરણની તીવ્રતાને સપ્રમાણ રીતે એક સેકન્ડ દીઠ વધુ ઈલેક્ટ્રૉન ઉત્સર્જિત થાય છે. પરંતુ આકૃતિ 11.3માં આલેખીય રીતે દર્શાવ્યા મુજબ સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલનું મૂલ્ય આપાત વિકિરણની તીવ્રતા I_1 માટે મળતું હતું તેટલું જ રહે છે. આમ, *આપાત વિકિરણની આપેલ આવૃત્તિ માટે, સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ એ તીવ્રતા પર આધાર રાખતું નથી.* બીજા શબ્દોમાં, ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા પ્રકાશની આવૃત્તિ અને ઉત્સર્જક પ્લેટના દ્રવ્ય પર આધાર રાખે છે, પરંતુ તે આપાત વિકિરણની તીવ્રતા પર આધાર રાખતી નથી.

11.4.3 આપાત વિકિરણની આવૃત્તિની સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ પર અસર (Effect of Frequency of Incident Radiation on Stopping Potential)

હવે આપણે આપાત વિકિરણની આવૃતિ ν અને સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ V_0 વચ્ચેનો સંબંધ સમજીશું. આપણે જુદી જુદી આવૃત્તિઓ માટે પ્રકાશના કિરણોની તીવ્રતા એક સરખી જ રાખીશું અને કલેક્ટર પ્લેટના સ્થિતિમાન સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રિક પ્રવાહના ફેરફારનો અભ્યાસ કરીશું. પરિણામે મળતો ફેરફાર આકૃતિ 11.4માં દર્શાવ્યો છે. આપણને આપાત વિકિરણની જુદી જુદી આવૃત્તિઓ માટે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલના જુદા જુદા મૂલ્યો મળે છે. પરંતુ સંતૃપ્ત પ્રવાહ (Saturation Current)નું એક સમાન મૂલ્ય જ મળે છે. ઉત્સર્જિત ઈલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા, આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ પર આધાર રાખે છે. આપાત વિકિરણની ઊંચી આવૃત્તિઓ માટે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ વધુ ઋણ હોય છે. આકૃતિ 11.4



આકૃતિ 11.4 આપાત પ્રકાશની જુદી જુદી આવૃતિઓ માટે કલેક્ટર પ્લેટ સ્થિતિમાન સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહનો ફેરફાર



આકૃતિ 11.5 આપેલ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્ય માટે આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ ν સાથે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ V_0નો ફેરફાર

પરથી નોંધો કે, જો આવૃત્તિઓ $\nu_3 > \nu_2 > \nu_1$ ક્રમમાં હોય તો સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ $V_{03} > V_{02} > V_{01}$ ક્રમમાં છે. આ દર્શાવે છે કે, આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ જેમ વધુ, તેમ ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની ગતિઊર્જા પણ વધુ. પરિણામ સ્વરૂપે, તેમને પુરેપુરા અટકાવવા માટે વધુ પ્રતિપ્રવેગક સ્થિતિમાન (Retarding potential)ની જરૂર પડે. જો આપણે જુદી જુદી ધાતુઓ માટે આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ અને તેને અનુરૂપ સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલનો આલેખ દોરીએ તો આપણને આકૃતિ 11.5માં દર્શાવ્યા મુજબ સીધી રેખા મળે. આલેખ દર્શાવે છે કે,

(i) આપેલ ફોટો સેન્સિટીવ (પ્રકાશ સંવેદી) દ્રવ્ય માટે આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ સાથે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ રેખીય રીતે બદલાય છે.

(ii) કોઈ ચોક્કસ લઘુત્તમ કટ ઑફ આવૃત્તિ ν_0 માટે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ શૂન્ય હોય છે.

આ અવલોકનો બે બાબતો સૂચવે છે :

(i) *ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ સાથે રેખીય રીતે બદલાય છે, પરંતુ તે તીવ્રતા પર આધાર રાખતી નથી.*

(ii) *જો આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ ν કટ ઑફ આવૃત્તિ ν_0 કરતાં ઓછી હોય તો તીવ્રતા ગમે તેટલી વધુ હોય તો પણ કોઈ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન થતું નથી.*

આ લઘુત્તમ કટ ઑફ આવૃત્તિ ν_0ને *થ્રેશોલ્ડ (સીમાંત) આવૃત્તિ* કહે છે. જુદી જુદી ધાતુઓ માટે તે જુદી જુદી હોય છે.

જુદા જુદા પ્રકાશ સંવેદી (ફોટો સેન્સિટીવ) દ્રવ્યો પ્રકાશને જુદો જુદો પ્રતિભાવ આપે છે. ઝિંક અને તાંબા કરતાં સૅલિનિયમ વધુ સંવેદનશીલ છે. એક જ પ્રકાશ-સંવેદી પદાર્થ જુદી જુદી તરંગલંબાઈના પ્રકાશને પણ જુદો જુદો પ્રતિભાવ આપે છે. ઉદાહરણ તરીકે અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ તાંબામાં ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર ઉપજાવે છે જ્યારે લીલા કે લાલ રંગનો પ્રકાશ આ અસર ઉપજાવતો નથી.

નોંધો કે ઉપરના બધા પ્રયોગોમાં, એ જાણવા મળ્યું છે કે, જો આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ કરતાં વધુ હોય તો જરા પણ દેખીતો સમય બગાડ્યા વગર (જવા દીધા વગર) ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન તત્કાળ શરૂ થઈ જાય છે, પછી ભલેને આપાત પ્રકાશની તીવ્રતા ઘણી ઓછી હોય. હવે એ જાણવા મળ્યું છે કે, 10^{-9} s કે તેથી ઓછા ક્રમના સમયમાં ઉત્સર્જન શરૂ થાય છે.

હવે આપણે આ વિભાગમાં દર્શાવેલી પ્રાયોગિક લાક્ષણિકતાઓ અને અવલોકનોનો સારાંશ જોઈએ.

(i) આપેલ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્ય અને આપાત વિકિરણની આપેલ આવૃત્તિ (થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ કરતાં વધુ) માટે, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ આપાત પ્રકાશની તીવ્રતાના સમપ્રમાણમાં હોય છે (આકૃતિ 11.2).

(ii) આપેલ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્ય અને આપેલ આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ માટે, સંતૃપ્ત પ્રવાહ આપાત વિકિરણની તીવ્રતાના સમપ્રમાણમાં હોય છે પરંતુ સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ તીવ્રતાથી સ્વતંત્ર હોય છે (આકૃતિ 11.3).

(iii) આપેલ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્ય માટે, આપાત પ્રકાશની એક ચોક્કસ લઘુત્તમ કટ ઑફ આવૃત્તિ હોય છે, જેને *થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ* કહે છે, તેના કરતાં ઓછી આવૃત્તિ માટે ગમે તેટલી ઊંચી તીવ્રતાનો પ્રકાશ હોય તો પણ, ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનનું ઉત્સર્જન થતું નથી. થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિથી વધુ આવૃત્તિ માટે, સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ અથવા સમતુલ્ય રીતે ઉત્સર્જિત ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા, આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ સાથે રેખીય રીતે વધે છે, પરંતુ તે તીવ્રતા પર આધારિત નથી (આકૃતિ 11.5).

(iv) ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન એ કોઈ પણ દેખીતો સમય બગાડ્યા વગર (જવા દીધા વિના) ($\sim 10^{-9}$ s કે તેથી ઓછા સમયમાં) થતી તાત્ક્ષણિક ઘટના છે, પછી ભલેને આપાત પ્રકાશની તીવ્રતા અતિશય ક્ષીણ હોય.

11.5 ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર અને પ્રકાશનો તરંગવાદ (PHOTOELECTRIC EFFECT AND WAVE THEORY OF LIGHT)

ઓગણીસમી સદીના અંત સુધીમાં પ્રકાશ તરંગ સ્વરૂપે છે એ બાબત સ્થાપિત થઈ ગઈ હતી. વ્યતિકરણ, વિવર્તન અને ધ્રુવીભવન (Polarisation)ની ઘટનાઓ પ્રકાશના તરંગ સ્વરૂપ દ્વારા કુદરતી અને સંતોષજનક રીતે સમજાવી શકાઈ હતી. આ ખ્યાલ મુજબ પ્રકાશ એ વિદ્યુત અને ચુંબકીય ક્ષેત્રોથી બનતું વિદ્યુતચુંબકીય તરંગ છે અને તે અવકાશના જે વિભાગમાં વિસ્તરેલું હોય તે વિસ્તાર પર ઊર્જાનું સતત વિતરણ હોય છે. હવે આપણે એ જોવા પ્રયત્ન કરીએ કે પ્રકાશનું આ તરંગ સ્વરૂપ અગાઉના પરિચ્છેદમાં દર્શાવેલ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જનના અવલોકનો સમજાવી શકે છે કે નહી.

પ્રકાશના તરંગ સ્વરૂપ મુજબ, ધાતુની (જેના પર વિકિરણની કિરણાવલિ પડે છે તેની) સપાટી પર રહેલા ઈલેક્ટ્રૉન્સ વિકિરણની ઊર્જા સતત શોષે છે. આપાત વિકિરણની તીવ્રતા જેમ વધુ તેમ વિદ્યુત ચુંબકીય ક્ષેત્રોના કંપવિસ્તાર (Amplitude) વધુ હોય છે. પરિણામે તીવ્રતા જેટલી વધુ, તેટલી જ વધુ ઊર્જા દરેક ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા શોષાય છે. આ ચિત્ર મુજબ, સપાટી પરના ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા, પ્રકાશની તીવ્રતાના વધારા સાથે વધવી જોઈએ. વળી, (આપાત) પ્રકાશની આવૃત્તિ ગમે તે હોય તો પણ પુરતી તીવ્રતાવાળી વિકિરણની કિરણાવલિ (પુરતા સમયમાં) ઈલેક્ટ્રૉનને પુરતી ઊર્જા આપી શકવી જોઈએ કે જેથી તેઓ ધાતુની સપાટીમાંથી મુક્ત થવા માટે જરૂરી લઘુત્તમ ઊર્જા કરતાં વધુ ઊર્જા મેળવે. આથી થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિનું અસ્તિત્વ જરૂરી નથી. તરંગ સ્વરૂપની અપેક્ષાઓ પરિચ્છેદ 11.4.3ના અંતમાં મળેલ અવલોકનો (i), (ii) અને (iii)થી વિરુદ્ધ છે.

આ ઉપરાંત આપણે નોંધવું જોઈએ કે, તરંગવાદમાં ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા ઊર્જાનું શોષણ વિકિરણના સમગ્ર તરંગ અગ્ર પર સતત થવું જોઈએ. ખુબ મોટી સંખ્યાના ઈલેક્ટ્રૉન ઊર્જાનું શોષણ કરતાં હોવાથી એકમ સમયમાં ઈલેક્ટ્રૉન દીઠ શોષાયેલી ઊર્જા ઘણી ઓછી હોય છે. સ્પષ્ટ ગણતરીઓ પરથી અંદાજ મેળવી શકાય કે એક ઈલેક્ટ્રૉનને કાર્ય વિધેયથી વધુ પૂરતી ઊર્જા મેળવીને ધાતુની સપાટીમાંથી બહાર આવવા માટે ઘણા કલાકો કે તેથી વધુ સમયની જરૂર પડે. આ તારણ પણ તાત્ક્ષણિક ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન માટેના અવલોકન (iv)થી તદ્દન વિરુદ્ધ છે. ટુંકમાં તરંગ સ્વરૂપ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરના મૂળભૂત લક્ષણો સમજાવવા માટે અસમર્થ છે.

11.6 આઈન્સ્ટાઈનનું ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ : વિકિરણ ઊર્જાનો ક્વૉન્ટમ (Einstein's Photoelectric Equation : Energy Quantum of Radiation)

1905માં આલ્બર્ટ આઈન્સ્ટાઈને (1879-1955) ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર સમજાવવા માટે વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણનો નવો વાદ રજૂ કર્યો. આ વાદ મુજબ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન વિકિરણમાંથી ઊર્જાના સતત શોષણને કારણે થતું નથી. વિકિરણ ઊર્જા છુટા છવાયા (અસતત) એકમોની બનેલી હોય છે જેને *વિકિરણની ઊર્જાનો ક્વૉન્ટમ* કહે છે. વિકિરણ ઊર્જાના દરેક ક્વૉન્ટમની ઊર્જા $h\nu$ જેટલી હોય છે. જ્યાં, h એ પ્લાન્કનો અચળાંક છે અને ν પ્રકાશની આવૃત્તિ છે. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરમાં ઈલેક્ટ્રૉન

આલ્બર્ટ આઈન્સ્ટાઈન (Albert Einstein-1879-1955) સર્વકાલિન મહાન ભૌતિકવિજ્ઞાનીઓમાંના એક એવા આઈન્સ્ટાઈન, ઉલ્મ (Ulm), જર્મનીમાં જન્મ્યા હતાં. 1905માં તેમણે નવો ચીલો ચાતરતા ત્રણ લેખ પ્રકાશિત કર્યા. પહેલા લેખમાં તેમણે પ્રકાશના કણ સ્વરૂપ (જેને હવે ફોટોન કહીએ છીએ)નો ખ્યાલ રજૂ કર્યો અને તેમની લાક્ષણિકતાનો ઉપયોગ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર સમજાવવા માટે કર્યો. બીજા લેખમાં તેમણે બ્રાઉનીયનગતિ (Brownian Motion)નો સિદ્ધાંત વિકસાવ્યો. જે થોડા વર્ષો બાદ પ્રાયોગિક રીતે સાચો ઠર્યો અને તેણે દ્રવ્યના પરમાણુ સ્વરૂપનો સચોટ પુરાવો પુરો પાડ્યો. ત્રીજા લેખ દ્વારા વિશિષ્ટ સાપેક્ષવાદના સિદ્ધાંતની શોધ થઈ. 1916માં તેમણે સાપેક્ષવાદનો વ્યાપક (General) સિદ્ધાંત પ્રકાશિત કર્યો. આઈન્સ્ટાઈનના ત્યાર પછીના ખૂબ અગત્યના પ્રદાનો આ મુજબ છે : પ્લાન્કના સંપૂર્ણ કાળા પદાર્થ દ્વારા ઉત્સર્જાતા વિકિરણને બીજી રીતે સમજાવવા ઉદ્દીપ્ત ઉત્સર્જન (Stimulated Emission)ની કલ્પના, બ્રહ્માંડની ઉત્પતિ અંગે આધુનિક કોસ્મોલોજીની શરૂઆત કરનાર સ્થિત મોડલ, દળદાર બોઝોન્સના વાયુ માટે ક્વૉન્ટમ આંકડાશાસ્ત્ર (Quantum Statistics) અને ક્વૉન્ટમ યંત્ર શાસ્ત્રના પાયાના સિદ્ધાંતો માટેનું વિવેચનપૂર્ણ વિશ્લેષણ. 1921માં તેમને સૈદ્ધાંતિક ભૌતિકવિજ્ઞાન અને ફોટોઈલેક્ટ્રીક અસર માટે નૉબેલ પારિતોષીક એનાયત કરવામાં આવ્યું હતું.

આલ્બર્ટ આઈન્સ્ટાઈન (Albert Einstein-1879-1955)

વિકિરણના ($h\nu$) ઊર્જાના ક્વૉન્ટમનું શોષણ કરે છે. જો શોષાયેલા ક્વૉન્ટમની ઊર્જા, ઈલેક્ટ્રૉનને ધાતુની સપાટીમાંથી મુક્ત કરવા માટે જરૂરી લઘુત્તમ ઊર્જા (કાર્ય વિધેય ϕ_0) કરતાં વધુ હોય તો ઈલેક્ટ્રૉન મહત્તમ ગતિ ઊર્જા

$$K_{max} = h\nu - \phi_0 \qquad (11.2)$$

સાથે ઉત્સર્જન પામે છે.

વધુ પ્રબળ રીતે બંધીત ઈલેક્ટ્રૉન મહત્તમ ગતિઊર્જાથી ઓછી ઊર્જા સાથે બહાર નીકળશે. નોંધો કે આપેલ આવૃત્તિ માટે એક સેકન્ડમાં આપાત થતાં ફોટોનની સંખ્યા પ્રકાશની તીવ્રતાને નક્કી કરે છે. (પ્રકાશની) તીવ્રતા વધારતાં એક સેકન્ડ દીઠ ઉત્સર્જાયેલા ઈલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા પણ વધે છે. આમ છતાં ઉત્સર્જાયેલા ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા દરેક ફોટોનની ઊર્જા વડે નક્કી થાય છે.

સમીકરણ 11.2ને *આઈન્સ્ટાઈનનું ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ* કહે છે. આપણે હવે જોઈશું કે આ સમીકરણ પેટા પરિચ્છેદ 11.4.3ના અંતભાગમાં દર્શાવેલ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર માટેના બધા અવલોકનોને સરળતા અને સચોટતાપૂર્વક કેવી રીતે સમજાવે છે.

- સમીકરણ (11.2) મુજબ K_{max} , ν પર રેખીય રીતે આધારિત છે અને વિકિરણની તીવ્રતા પર આધાર રાખતી નથી, જે અવલોકન સાથે સહમતી દર્શાવે છે. આમ થાય છે કારણકે આઈન્સ્ટાઈનના સિદ્ધાંત મુજબ વિકિરણના એક ફોટોનના, એક ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા શોષણ દરમિયાન ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર ઉદ્ભવે છે. વિકિરણની તીવ્રતા (જે એકમ સમયમાં, એકમ ક્ષેત્રફળ પર આપાત થતા ઊર્જા ક્વૉન્ટમની સંખ્યાના સમપ્રમાણમાં હોય છે) આ મૂળ પ્રક્રિયામાં અસંગત (Irrelevant) (બિન અસરકારક) છે.
- K_{max} અ-ઋણ (non-negative)હોવું જોઈએ. આથી સમીકરણ (11.2) સૂચવે છે કે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન ત્યારે જ શક્ય બને કે જ્યારે

$h\nu > \phi_0$

અથવા $\nu > \nu_0$, જ્યાં

$$\nu_0 = \frac{\phi_0}{h} \qquad (11.3)$$

સમીકરણ (11.3) દર્શાવે છે કે જેમ કાર્ય વિધેય ϕ_0 વધુ હોય તેમ ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનને ઉત્સર્જિત કરવા માટે જરૂરી લઘુત્તમ કે થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ ν_0 વધારે ઊંચી હોય છે. આમ ધાતુની સપાટી માટે એક થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ $\nu_0(=\phi_0/h)$ હોય છે કે જેનાથી નીચેની આવૃત્તિ માટે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન શક્ય નથી, પછી ભલેને આપાત વિકિરણની તીવ્રતા ગમે તેટલી હોય કે ગમે તેટલા સમય સુધી તે સપાટી પર આપાત થાય.

- આ વાદમાં ઉપર નોંધ્યું તેમ વિકિરણની તીવ્રતા, એકમ સમયમાં એકમ ક્ષેત્રફળ પર આપાત થતા ઊર્જા ક્વૉન્ટમની સંખ્યાના સમપ્રમાણમાં હોય છે. જેટલી વધુ સંખ્યાનાં ઊર્જા ક્વૉન્ટમ મળતા હોય તેટલી વધુ સંખ્યાના ઈલેક્ટ્રૉન આ ઊર્જા ક્વૉન્ટમ શોષે અને પરિણામે ધાતુમાંથી ($\nu > \nu_0$માટે) વધુ સંખ્યાના ઈલેક્ટ્રૉન બહાર આવે (ઉત્સર્જિત થાય). આ બાબત $\nu > \nu_0$ માટે, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ તીવ્રતાના સમપ્રમાણમાં કેમ હોય છે, તે સમજાવે છે.

- આઈન્સ્ટાઈનના વાદ મુજબ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરમાં સંકળાયેલી પ્રાથમિક પ્રક્રિયા એ ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા પ્રકાશ ક્વૉન્ટમનું શોષણ છે. આ પ્રક્રિયા તાત્ક્ષણિક છે. આમ તીવ્રતા, એટલે કે એકમ સમયમાં એકમ ક્ષેત્રફળ દીઠ (આપાત) વિકિરણના ક્વૉન્ટમની સંખ્યા, કોઈ પણ હોય પણ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન તાત્ક્ષણિક હોય છે. તીવ્રતા ઓછી હોય એનો અર્થ એ નહીં કે ઉત્સર્જન મોડું થાય. કારણ કે મૂળભૂત પ્રાથમિક પ્રક્રિયા તો એ જ છે. તીવ્રતા ફક્ત એટલું જ નક્કી કરે છે કે આ પ્રાથમિક પ્રક્રિયા (એકલ ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા પ્રકાશ ક્વૉન્ટમનું શોષણ) માં કેટલા ઇલેક્ટ્રૉન ભાગ લઈ શકશે અને તેથી, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ રચશે.

  સમીકરણ (11.1)નો ઉપયોગ કરતાં, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ (11.2), આ મુજબ લખી શકાય.

  $$eV_0 = h\nu - \phi_0;\ \nu > \nu_0 \text{ માટે}$$

  $$\text{અથવા } V_0 = \left(\frac{h}{e}\right)\nu - \frac{\phi_0}{e} \tag{11.4}$$

આ એક અગત્યનું પરિણામ છે. તે દર્શાવે છે કે V_0 વિરુદ્ધ νનો વક્ર (આલેખ) સીધી રેખા છે. જેનો ઢાળ = (h/e) છે, જે દ્રવ્યના પ્રકાર પર આધાર રાખતો નથી. 1906-1916 દરમિયાન આઈન્સ્ટાઈનનું ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ ખોટું છે તે નક્કી કરવા, મિલિકને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર માટે શ્રેણીબધ્ધ પ્રયોગો કર્યા. તેમણે આકૃતિ 11.5માં દર્શાવ્યા મુજબ સોડિયમ માટે મળતી સીધી રેખાનો ઢાળ શોધ્યો. eના જાણીતા મૂલ્ય પરથી તેમણે પ્લાન્કના અચળાંક hનું મૂલ્ય શોધ્યું. તદ્દન જુદી રીતે મેળવેલ આ મૂલ્ય પ્લાન્કના અચળાંક ($h = 6.626 \times 10^{-34}$ J s)ના મૂલ્યની ખૂબ જ નજીકનું હતું. આ રીતે 1916માં આઈન્સ્ટાઈનના સમીકરણને ખોટું સાબિત કરવા જતા મિલિકને આ સમીકરણની સત્યતા સાબિત કરી.

પ્રકાશ ક્વોન્ટમના અધિતર્કનો ઉપયોગ કરીને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરની સફળતાપૂર્વકની સમજૂતી તથા h અને ϕ_0ના પ્રાયોગિક રીતે માપેલ મૂલ્યોની બીજા પ્રયોગો સાથે સામ્યતા દ્વારા આઈન્સ્ટાઈનની ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરની સમજૂતીને માન્યતા મળી. મિલિકને ઘણી બધી આલ્કલી ધાતુઓ માટે વિકિરણની ઘણી મોટી આવૃત્તિના અંતરાલ માટે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણની સત્યતા ઘણી ચોક્સાઈપૂર્વક ચકાસી.

11.7 પ્રકાશનું કણ સ્વરૂપ : ફોટોન (Particle Nature of Light : The Photon)

ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરે એવી વિચિત્ર હકીકતનો પૂરાવો આપ્યો કે, જ્યારે પ્રકાશ દ્રવ્ય સાથે આંતરક્રિયા કરે ત્યારે તે જાણે કે ઊર્જાના અમુક જથ્થાઓ કે ક્વૉન્ટમનો બનેલો હોય, જે દરેકની ઊર્જા $h\nu$ જેટલી હોય.

શું પ્રકાશના ક્વૉન્ટમની ઊર્જાને કણ સાથે સાંકળી શકાય ? આઈન્સ્ટાઈને એક અગત્યનું પરિણામ એ તારવ્યું કે પ્રકાશ ક્વૉન્ટમને વેગમાન ($h\nu/c$) સાથે સાંકળી શકાય. ઊર્જા અને વેગમાનનું ચોક્કસ મૂલ્ય સ્પષ્ટ રીતે દર્શાવે છે કે, પ્રકાશના ક્વૉન્ટમને કણ સાથે સાંકળી શકાય. આ કણને પછીથી *ફોટોન* નામ આપવામાં આવ્યું. પ્રકાશના કણ સ્વરૂપનો હજુ બીજો પુરાવો 1924માં, એ. એચ. કોમ્પ્ટન (A. H. Compton, 1892-1962)ના ઈલેક્ટ્રૉન્સ દ્વારા ક્ષ-કિરણોના પ્રકીર્ણનના પ્રયોગો દ્વારા મળ્યો. 1921માં આઈન્સ્ટાઈનને તેમના સૈદ્ધાંતિક ભૌતિકવિજ્ઞાન અને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર માટેના યોગદાન બદલ નૉબેલ પારિતોષિક એનાયત કરવામાં આવ્યું. 1923માં મિલિકનને પ્રાથમિક વિદ્યુતભાર (નું મૂલ્ય શોધવા બદલ) અને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર પરના કાર્ય બદલ નૉબેલ પારિતોષિક એનાયત થયું.

આપણે વિદ્યુત ચુંબકીય વિકિરણનાં ફોટોન સ્વરૂપને સંક્ષેપમાં આ રીતે દર્શાવી શકીએ.

(i) વિકિરણની દ્રવ્ય સાથેની આંતરક્રિયા દરમિયાન, વિકિરણ જાણે કે કણ હોય તેમ વર્તે છે જેને ફોટોન કહે છે.

(ii) દરેક ફોટોનની ઊર્જા E $(= h\nu)$ અને વેગમાન p $(= h\nu/c)$ છે, જ્યારે ઝડપ, પ્રકાશની ઝડપ c જેટલી છે.

(iii) ν જેટલી આવૃત્તિ, અને λ તરંગલંબાઈ ધરાવતા પ્રકાશના બધા જ ફોટોનની ઊર્જા E $(= h\nu = hc/\lambda)$ તથા વેગમાન p $(= h\nu/c = h/\lambda)$ છે, પછી ભલેને તીવ્રતા ગમે તેટલી હોય. આપેલ તરંગ લંબાઈના પ્રકાશની તીવ્રતા વધારતાં, એકમ સમયમાં આપેલ ક્ષેત્રફળમાંથી પસાર થતા ફોટોનની સંખ્યા વધે છે, આ દરેક ફોટોનની ઊર્જા સમાન હોય છે. આમ ફોટોનની ઊર્જા વિકિરણની તીવ્રતા પર આધાર રાખતી નથી.

(iv) ફોટોન વિદ્યુતની દૃષ્ટિએ તટસ્થ છે અને તેઓ વિદ્યુત કે ચુંબકીય ક્ષેત્રો વડે વિચલન અનુભવતા નથી.

(v) ફોટોન-કણ સંઘાત (અથડામણ) (જેમકે ફોટોન-ઈલેક્ટ્રૉન અથડામણ)માં કુલ ઊર્જા અને કુલ વેગમાનનું સંરક્ષણ થાય છે. આમ છતાં અથડામણ દરમિયાન ફોટોનની સંખ્યાનું સંરક્ષણ ન પણ થાય. ફોટોન કદાચ શોષાઈ જાય અથવા નવા ફોટોનનું ઉત્સર્જન પણ થાય.

ઉદાહરણ 11.1 લેસર વડે 6.0×10^{14} Hz આવૃત્તિનો એકરંગી પ્રકાશ ઉત્પન્ન થાય છે. ઉત્સર્જાયેલ પાવર 2.0×10^{-3} W છે. (a) પ્રકાશની કિરણાવલિ (beam) માં રહેલા ફોટોનની ઊર્જા કેટલી હશે ? (b) ઊર્જા સ્રોત દ્વારા સરેરાશ રીતે એક સેકન્ડ દીઠ કેટલા ફોટોન ઉત્સર્જાતા હશે ?

ઉકેલ

(a) દરેક ફોટોનની ઊર્જા

$$E = h\nu = (6.63 \times 10^{-34}\,\text{J s})(6.0 \times 10^{14}\,\text{Hz})$$

$$= 3.98 \times 10^{-19}\,\text{J}$$

(b) જો ઉદ્‌ગમમાંથી એક સેકન્ડ દીઠ N સંખ્યાના ફોટોન ઉત્સર્જિત થતા હોય, તો કિરણાવલિમાંથી પસાર થતો પાવર; ફોટોન દીઠ ઊર્જા E ના N ગણો, જેથી P = N E. આથી,

$$N = \frac{P}{E} = \frac{2.0 \times 10^{-3}\,\text{W}}{3.98 \times 10^{-19}\,\text{J}}$$

$$= 5.0 \times 10^{15}\ \text{ફોટોન/સેકન્ડ}$$

ઉદાહરણ 11.1

ઉદાહરણ 11.2 સિઝિયમનું કાર્ય વિધેય 2.14 eV છે.

(a) સિઝિયમની થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ શોધો, અને (b) જો 0.60 Vના સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ દ્વારા ફોટો પ્રવાહ શૂન્ય થતો હોય તો આપાત પ્રકાશની તરંગલંબાઈ શોધો.

ઉકેલ

(a) કટ ઓફ કે થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ માટે, આપાત વિકિરણની ઊર્જા $h\nu_0$, કાર્ય વિધેય ϕ_0 જેટલી હોવી જોઈએ, જેથી

$$\nu_0 = \frac{\phi_0}{h} = \frac{2.14\,eV}{6.63 \times 10^{-34}\,\text{J s}}$$

$$= \frac{2.14 \times 1.6 \times 10^{-19}\,\text{J}}{6.63 \times 10^{-34}\,\text{J s}} = 5.16 \times 10^{14}\,\text{Hz}$$

આમ, આ થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ કરતાં ઓછી આવૃત્તિઓ માટે, ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન ઉત્સર્જિત થતા નથી.

(b) પ્રતિ પ્રવેગી સ્થિતિમાન V_0 દ્વારા eV_0 જેટલી સ્થિતિઊર્જા, ઉત્સર્જિત ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા જેટલી થાય ત્યારે ફોટો પ્રવાહ શૂન્ય થાય છે. આઈન્સ્ટાઈનનું ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ

ઉદાહરણ 11.2

$$eV_0 = h\nu - \phi_0 = \frac{hc}{\lambda} - \phi_0$$

અથવા $\lambda = hc/(eV_0 + \phi_0)$

$$= \frac{(6.63 \times 10^{34}\,\text{J s}) \times (3 \times 10^{8}\,\text{m/s})}{(0.60\ e\text{V} + 2.14\ e\text{V})} = \frac{19.89 \times 10^{-26}\,\text{J m}}{(2.74\ e\text{V})}$$

$$\lambda = \frac{19.89 \times 10^{-26}\ \text{J m}}{2.74 \times 1.6 \times 10^{-19}\text{J}} = 454\,\text{nm}$$

ઉદાહરણ 11.2

ઉદાહરણ 11.3 દશ્ય પ્રકાશ વિસ્તારમાં જાંબલી રંગની તરંગલંબાઈ 390 nm છે, પીળા-લીલા પ્રકાશ માટે લગભગ 550 nm (સરેરાશ તરંગલંબાઈ) અને લાલ રંગ માટે લગભગ 760 nm છે.

(a) દશ્ય પ્રકાશ વિસ્તારમાં (i) જાંબલી છેડે, (ii) પીળા-લીલા રંગની સરેરાશ તરંગલંબાઈ આગળ અને (iii) લાલ છેડે, ફોટોનની ઊર્જા (eV)માં કેટલી હશે ? ($h = 6.63 \times 10^{-34}$ J s અને 1 eV $= 1.6 \times 10^{-19}$ J લો.)

(b) કોષ્ટક 11.1માં દર્શાવેલ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્યોના કાર્ય વિધેયો અને (a)માં મેળવેલ (i), (ii) અને (iii)ના પરિણામો પરથી તમે એવી પ્રકાશ સંવેદી રચના બનાવી શકો કે જે દ્રશ્ય પ્રકાશ સાથે કાર્ય કરે ?

ઉકેલ

(a) આપાત ફોટોનની ઊર્જા, $E = h\nu = hc/\lambda$

$E = (6.63 \times 10^{-34}\,\text{J s})(3 \times 10^{8}\,\text{m/s})/\lambda$

$$= \frac{1.989 \times 10^{-25}\,\text{J m}}{\lambda}$$

(i) જાંબલી રંગ માટે $\lambda_1 = 390$ nm (ટૂંકી તરંગલંબાઈનો છેડો)

$$\text{આપાત ફોટોનની ઊર્જા, } E_1 = \frac{1.989 \times 10^{-25}\,\text{J m}}{390 \times 10^{-9}\,\text{m}} = 5.10 \times 10^{-19}\,\text{J}$$

$$= \frac{5.10 \times 10^{-19}\,\text{J}}{1.6 \times 10^{-19}\,\text{J/eV}} = 3.19\,e\text{V}$$

(ii) પીળા-લીલા પ્રકાશ માટે, $\lambda_2 = 550$ nm (સરેરાશ તરંગલંબાઈ)

$$\text{આપાત ફોટોનની ઊર્જા } E_2 = \frac{1.989 \times 10^{-25}\,\text{J m}}{550 \times 10^{-9}\,\text{m}}$$

$$= 3.62 \times 10^{-19}\,\text{J} = 2.26\,e\text{V}$$

(iii) લાલ પ્રકાશ માટે, $\lambda_3 = 760$ nm (મોટી તરંગલંબાઈનો છેડો)

$$\text{આપાત ફોટોનની ઊર્જા, } E = \frac{1.989 \times 10^{-25}\,\text{J m}}{760 \times 10^{-9}\,\text{m}}$$

$$= 2.62 \times 10^{-19}\,\text{J} = 1.64\,e\text{V}$$

(b) ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સાધનના કાર્ય માટે, આપાત પ્રકાશની ઊર્જા E, દ્રવ્યના કાર્યવિધેય ϕ_0 જેટલી કે તેથી વધુ હોવી જોઈએ. આમ, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સાધન જાંબલી પ્રકાશ (ઊર્જા $E = 3.19\,e$V) સાથે પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્યો Na (જેનું $\phi_0 = 2.75\,e$V), K (જેનું $\phi_0 = 2.30\ e$V) અને Cs (જેનું $\phi_0 = 2.14\ e$V) માટે જ કાર્ય કરશે. તે પીળા-લીલા પ્રકાશ ($E = 2.26\,e$V) સાથે ફક્ત Cs (જેનું $\phi_0 = 2.14\,e$V) માટે જ કાર્ય કરશે. પરંતુ, લાલ પ્રકાશ (જેની $E = 1.64\ e$V) માટે તે આમાંથી એક પણ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્યો માટે કાર્ય કરશે નહીં.

ઉદાહરણ 11.3

11.8 દ્રવ્યનું તરંગ સ્વરૂપ (WAVE NATURE OF MATTER)

આ પ્રકરણ અને આગળના પ્રકરણોમાં આપણે શીખ્યા તે મુજબ, પ્રકાશ (વ્યાપક રૂપે, વિદ્યુત ચુંબકીય વિકિરણ) દ્વૈત (તરંગ-કણ) સ્વરૂપ ધરાવે છે. વ્યતિકરણ, વિવર્તન અને ધ્રુવીભવનની ઘટનાઓમાં પ્રકાશનું તરંગ સ્વરૂપ જણાય છે. બીજી બાજુ, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર અને કોમ્પ્ટન અસર, જેમાં ઊર્જા અને વેગમાનના ફેરફાર સંકળાયેલા હોય, તેમાં વિકિરણ, ફોટોન્સ-કે જે કણોના જથ્થામાં હોય તે રીતે વર્તે છે. કોઈ પ્રયોગને સમજવા માટે કણ-કે તરંગ સ્વરૂપનો ઉપયોગ કરવો તે પ્રયોગના પ્રકાર પર આધાર રાખે છે. ઉદાહરણ તરીકે, કોઈ પણ પદાર્થને આપણી આંખ દ્વારા જોતી વખતે, બંને પ્રકારનાં વર્ણનો અગત્યનાં છે. આંખની કીકી દ્વારા પ્રકાશનું એકત્રિત થઈને કેન્દ્રીત થવાની પ્રક્રિયા એ તરંગ સ્વરૂપ દ્વારા સારી રીતે સમજી શકાયેલ છે. પરંતુ (આંખના રેટીના-પડદા)માં રહેલી સળીઓ (Rods) (રેશાઓ) તથા શંકુ આકારની ગ્રંથિઓ (Cones) દ્વારા તેનું શોષણ સમજવા માટે પ્રકાશના ફોટોન (કણ) સ્વરૂપની જરૂર પડે છે.

કુદરતી રીતે એક પ્રશ્ન થાય : જો વિકિરણને દ્વૈત (તરંગ-કણ) સ્વરૂપ હોય તો કુદરતમાં રહેલા કણો (જેમકે ઈલેક્ટ્રૉન, પ્રોટોન વગેરે) પણ તરંગ સ્વરૂપ કેમ ન દર્શાવે ? 1924માં ફ્રેન્ચ ભૌતિકવિજ્ઞાની લ્યુઈસ વિકટર ડિ બ્રોગ્લી (Louis Victor de Broglie) (de Broy એમ ઉચ્ચાર થાય છે) (1892-1987) એ સાહસિક (હિંમત ભર્યો) અધિતર્ક રજૂ કર્યો કે દ્રવ્યના ગતિ કરતા કણો યોગ્ય પરિસ્થિતિઓમાં તરંગ જેવી પ્રકૃતિ ધરાવતા હોવા જોઈએ. તેમણે કારણ એ આપ્યું કે પ્રકૃતિ સંમિતિ ધરાવે છે અને બે પ્રાકૃતિક ભૌતિક સ્વરૂપો-દ્રવ્ય અને ઊર્જા, પણ સંમિતિ ધરાવતા હોવા જોઈએ. જો વિકિરણ દ્વૈત રૂપ ધરાવતું હોય તો દ્રવ્ય માટે પણ તેમ થવું જોઈએ. ડિ બ્રોગ્લીએ દર્શાવ્યું કે p વેગમાન ધરાવતા કણ સાથે સંકળાયેલ તરંગલંબાઈ λ, આ મુજબ હોય છે.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\upsilon} \tag{11.5}$$

જ્યાં m એ કણનું દ્રવ્યમાન અને υ તેની ઝડપ છે. સમીકરણ (11.5)ને *ડિ બ્રોગ્લીનું સમીકરણ* કહે છે. અને *દ્રવ્ય તરંગ*ની તરંગ લંબાઈ λને *ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ* કહે છે. દ્રવ્યની દ્વૈત પ્રકૃતિ ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણમાં દેખાઈ આવે છે. સમીકરણ (11.5)ની ડાબી બાજુ, λ એ તરંગ સાથે સંકળાયેલી છે જ્યારે જમણી બાજુ વેગમાન p, કણ સાથે સંકળાયેલું છે. પ્લાન્કનો અચળાંક h આ બંનેને સાંકળે છે.

દ્રવ્ય કણ માટે સમીકરણ (11.5) ફક્ત અધિતર્ક (અનુમાન) છે. જેની સત્યતા પ્રયોગ દ્વારા જ ચકાસી શકાય. છતાં અગત્યની વાત એ છે કે તે ફોટોન માટે પણ સાચું છે. ફોટોન માટે આપણે જોયું હતું કે,

$$p = h\nu / c \tag{11.6}$$

આથી,

$$\frac{h}{p} = \frac{c}{\nu} = \lambda \tag{11.7}$$

એટલે કે સમીકરણ (11.5) વડે દર્શાવવામાં આવેલી ફોટોનની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણની એ તરંગ લંબાઈ સાથે સંકળાયેલી છે. જેનો ફોટોન એ ઊર્જા અને વેગમાનનો ક્વૉન્ટમ છે.

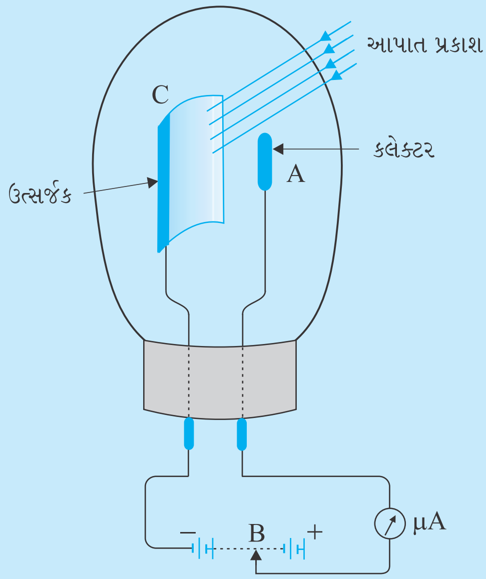
સ્પષ્ટ રૂપે સમીકરણ (11.5) પરથી ભારે કણ (મોટું m) માટે કે વધુ ઊર્જાવાન કણ (મોટો ν) માટે, λ નાની હોય છે. ઉદાહરણ તરીકે 0.12 kg દ્રવ્યમાન અને 20 m s^{-1} ઝડપ ધરાવતા બૉલ માટે ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ સહેલાઈથી ગણી શકાય :

ફોટો સેલ (PHOTO CELL)

ફોટોસેલ એ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરનો ટેક્નોલૉજીકલ ઉપયોગ છે. આ એવું સાધન છે કે જેના વિદ્યુત ગુણધર્મો પ્રકાશ દ્વારા અસર પામે છે. તેને ક્યારેક વિદ્યુતિય આંખ (Electric Eye) પણ કહે છે. ફોટો સેલ એક શૂન્યાવકાશિત કરેલા કાચ કે ક્વાર્ટઝના ગોળા (Bulb)માં ટેકા પર રાખેલ અર્ધનળાકાર પ્રકાશ સંવેદી ધાતુની તક્તી C (ઉત્સર્જક) અને તારના ગૂંચળા (Loop) A (કલેક્ટર)નો બનેલો હોય છે. તેને આકૃતિમાં દર્શાવ્યા મુજબ બાહ્ય પરિપથમાં ઊંચુ વીજદબાણ ધરાવતી (High-tension) બૅટરી B સાથે અને માઈક્રોએમીટર (μA) સાથે જોડેલ હોય છે. કેટલીક વખત, પ્લેટ Cની જગ્યાએ, પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્યનું પાતળું સ્તર બલ્બની અંદર લગાડેલું હોય છે. ગોળાનો કેટલોક ભાગ ચોખ્ખો (પારદર્શક) રહેવા દેવામાં આવે છે કે જેમાંથી પ્રકાશ અંદર દાખલ થઈ શકે.

જ્યારે યોગ્ય તરંગલંબાઈનો પ્રકાશ ઉત્સર્જક C પર આપાત થાય ત્યારે ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન ઉત્સર્જિત થાય છે. આ ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન ક્લેકટર પ્લેટ A પર આકર્ષાય છે. ફોટો સેલ દ્વારા થોડાક માઈક્રોએમ્પિયરના ક્રમનો વિદ્યુતપ્રવાહ સામાન્ય રીતે મળે છે.

ફોટોસેલ પ્રકાશની દીપ્તિતીવ્રતાના ફેરફારને ફોટો પ્રવાહના ફેરફારમાં રૂપાંતરિત કરે છે. આ પ્રવાહનો ઉપયોગ કેટલીક નિયંત્રણ પ્રણાલીઓ અને પ્રકાશ માપતા સાધનોના પ્રચાલનમાં (Operate) થઈ શકે છે. લેડ સલ્ફાઈડનો ફોટો સેલ ઈન્ફ્રારેડ પ્રકાશ માટે સંવેદનશીલ હોય છે જેનો ઉપયોગ ઈલેક્ટ્રૉનીક ઈગ્નીશન પરિપથમાં થાય છે.



ફોટો સેલ

વૈજ્ઞાનિક કાર્યમાં, જ્યાં પણ પ્રકાશની તીવ્રતા માપવી જરૂરી હોય ત્યાં ફોટોસેલનો ઉપયોગ થાય છે. ફોટોગ્રાફીના કેમેરાઓમાં વપરાતા લાઈટ મીટર્સ આપાત પ્રકાશની તીવ્રતા માપવા માટે ફોટોસેલનો ઉપયોગ કરે છે. દરવાજામાં પ્રકાશ વિદ્યુત પરિપથમાં ફોટોસેલનો ઉપયોગ સ્વચાલિત દરવાજા ખોલવા માટે થાય છે. દરવાજા તરફ જતો વ્યક્તિ ફોટોસેલ પર પડતા પ્રકાશની કિરણાવલિની વચ્ચે આવે છે. ફોટો પ્રવાહમાં અચાનક થતા ફેરફારનો ઉપયોગ દરવાજો ખોલવા માટેની મોટર ચાલુ કરવા માટે કે એલાર્મ વગાડવા માટે થઈ શકે. તેમનો ઉપયોગ (સંખ્યાની) ગણતરી કરતા ગણક સાધનોમાં થાય છે જે પ્રકાશના બીમના માર્ગમાં આવતા (ખલેલ કરતા) માણસ કે કોઈ વસ્તુની નોંધ (રેકોર્ડ) કરતું હોય. આમ, ફોટોસેલનો ઉપયોગ ઑડિટોરિયમમાં દાખલ થતા માણસોની ગણતરી કરવા માટે થાય છે, જો તેઓ હોલમાં એક પછી એક દાખલ થતા હોય તો. તેમનો ઉપયોગ વાહન વ્યવહારના નિયમોનો ભંગ કરતા લોકોને પકડવા માટે થાય છે : જ્યારે પણ (*અદૃશ્ય*) પ્રકાશની કિરણાવલિમાં અડચણ આવે ત્યારે એલાર્મ વાગે. (અદૃશ્ય) એલાર્મમાં દરવાજા પર સ્થાપિત કરેલા ફોટોસેલ પર પારજાંબલી (Ultraviolet) પ્રકાશ સતત આપાત થાય તેવી ગોઠવણ કરેલી હોય છે. ફોટો પ્રવાહમાં થતા અચાનક ફેરફારનો ઉપયોગ વિદ્યુત-ઘંટડી (Bell) વગાડવામાં થાય છે. આગ ફાટી નીકળવાની ઘટનામાં પ્રકાશ કિરણો ફોટોસેલ પર આપાત થાય છે. આ વિદ્યુત-ઘંટડી અથવા સાઈરન સાથેના પરિપથને પૂર્ણ કરે છે જે ચેતવણી સૂચક (Warning Signal) તરીકે કાર્ય કરવાનું શરૂ કરે છે.

ચલચિત્રમાં ધ્વનિના પુનઃ ઉત્પાદનમાં અને ટેલિવિઝન કેમેરામાં દ્રશ્યોના સ્કેનીંગ અને ટેલિકાસ્ટીંગમાં ફોટોસેલ વપરાય છે. ઉદ્યોગોમાં ધાતુના પતરામાં નાની તિરાડ કે છિદ્રોની પરખ કરવામાં ફોટોસેલ વપરાય છે.

$$p = mv = 0.12\,\text{kg} \times 20\,\text{m s}^{-1} = 2.40\,\text{kg m s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.63 \times 10^{-34}\,\text{Js}}{2.40\,\text{kg ms}^{-1}} = 2.76 \times 10^{-34}\,\text{m}$$

તરંગ લંબાઈ એટલી નાની છે કે તે માપી શકાય નહીં. આ કારણથી જ રોજબરોજના જીવનમાં ઉપયોગી એવા સ્થૂળ પદાર્થો તરંગ જેવા ગુણધર્મો દર્શાવતા નથી. બીજી બાજુ, પરમાણુથી નાના વિસ્તારમાં કણોનું તરંગ સ્વરૂપ માપી શકાય તેવું અને મહત્વનું છે.

લુઈસ વિક્ટર ડી બ્રોગ્લી (Louis Victor de Broglie 1892-1987)

લુઈસ વિક્ટર ડિ બ્રોગ્લી (Louis Victor de Broglie 1892-1987) ફ્રેન્ચ ભૌતિકવિજ્ઞાની જેમણે દ્રવ્યના તરંગ સ્વરૂપનો ક્રાન્તિકારી ખ્યાલ આપ્યો. આ ખ્યાલ ઈરવીન શ્રોડિન્જરે પૂર્ણ કક્ષાના ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્ર, જેને તરંગ યંત્રશાસ્ત્ર પણ કહે છે, તેમાં આગળ ધપાવ્યો. 1929માં તેમને ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ સ્વરૂપની શોધ માટે નૉબેલ પારિતોષિક એનાયત થયું હતું.

ધારો કે સ્થિર રહેલો એક ઈલેક્ટ્રૉન (દ્રવ્યમાન m, વિદ્યુતભાર e) વીજદબાણ V વડે પ્રવેગિત થાય છે. ઈલેક્ટ્રૉનની ગતિઊર્જા K, વિદ્યુતક્ષેત્ર વડે તેના પર થયેલા કાર્ય (eV) જેટલી હોય છે.

$$K = eV \tag{11.8}$$

હવે $K = \frac{1}{2} m\upsilon^2 = \frac{p^2}{2m}$. આથી

$$p = \sqrt{2\,m\,K} = \sqrt{2\,m\,eV} \tag{11.9}$$

આથી ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2\,m\,K}} = \frac{h}{\sqrt{2\,m\,eV}} \tag{11.10}$$

છે. h, m, eના સંખ્યાત્મક મૂલ્યો મુકતાં,

$$\lambda = \frac{1.227}{\sqrt{V}}\ \text{nm} \tag{11.11}$$

મળે, જ્યાં V એ વોલ્ટમાં પ્રવેગક સ્થિતિમાનનું મૂલ્ય છે. 120 V જેટલા પ્રવેગક સ્થિતિમાન માટે, સમીકરણ (11.11) પરથી $\lambda = 0.112$ nm મળે છે. આ તરંગ લંબાઈ સ્ફટિકોમાં પરમાણુઓના સ્તરો વચ્ચેના અંતરના ક્રમની છે. આ સૂચવે છે કે ઈલેક્ટ્રૉન સાથે સંકળાયેલા દ્રવ્ય તરંગોની સત્યતા ક્ષ-કિરણોના વિવર્તનની જેમ સ્ફટિક દ્વારા થતા વિવર્તનના પ્રયોગોથી ચકાસી શકાય. ડિ-બ્રોગ્લીના અધિતર્કની સત્યાર્થતા ચકાસવા માટેના પ્રયોગનું વર્ણન આપણે હવે પછીના પરિચ્છેદમાં કરીશું. 1929માં ડિ બ્રોગ્લીને ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ સ્વરૂપની શોધ કરવા બદલ ભૌતિકવિજ્ઞાનનું નૉબેલ પારિતોષિક એનાયત કરવામાં આવ્યું હતું.

તરંગ-કણ સ્વરૂપ બહુ જ અદ્ભૂત રીતે *હાઈઝનબર્ગના અનિશ્ચિતતાના સિદ્ધાંત*ને સમાવે છે. આ સિદ્ધાંત મુજબ, કોઈ ઈલેક્ટ્રૉન (કે બીજા કણ)નું સ્થાન અને વેગમાન *બંને એક જ સમયે (એક સાથે)* ચોક્કસાઈથી માપી શકાય નહીં. હંમેશાં, સ્થાનના વર્ણનમાં અમુક અનિશ્ચિતતા (Δx) અને વેગમાનના વર્ણનમાં અમુક અનિશ્ચિતતા (Δp) રહેલી હોય જ છે. Δx અને Δpનો ગુણાકાર $\hbar$ * ના ક્રમનો હોય છે (જ્યાં $\hbar = h/2\pi$), એટલે કે,

$$\Delta x\,\Delta p \approx \hbar \tag{11.12}$$

સમીકરણ (11.12)માં Δx શૂન્ય હોઈ શકે, પરંતુ તે પરિસ્થિતિમાં Δp અનંત (મૂલ્યનું) હોવું જોઈએ કે જેથી ગુણાકાર શૂન્ય ન થાય. તે જ રીતે જો Δp શૂન્ય હોય, તો Δx અનંત થવું જોઈએ. સામાન્ય રીતે Δx અને Δp શૂન્ય હોતા નથી, જેથી તેમનો ગુણાકાર $\hbar$ ના ક્રમનો હોય.

હવે, જો ઈલેક્ટ્રૉન ચોક્કસ વેગમાન p ધરાવતો હોય (એટલે કે $\Delta p = 0$), ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણ મુજબ, તો તેને ચોક્કસ તરંગલંબાઈ λ હોય, કોઈ ચોક્કસ (એક જ) તરંગલંબાઈ ધરાવતું તરંગ અનંત અવકાશમાં પથરાયેલું હોય છે. બોર્ન (Born's)ના સંભાવનાત્મક અર્થઘટન મુજબ આનો મતલબ એ કે

* વધુ ઊંડાણ પૂર્વકની ગણતરી $\Delta x\,\Delta p \geq \hbar/2$ આપે છે.

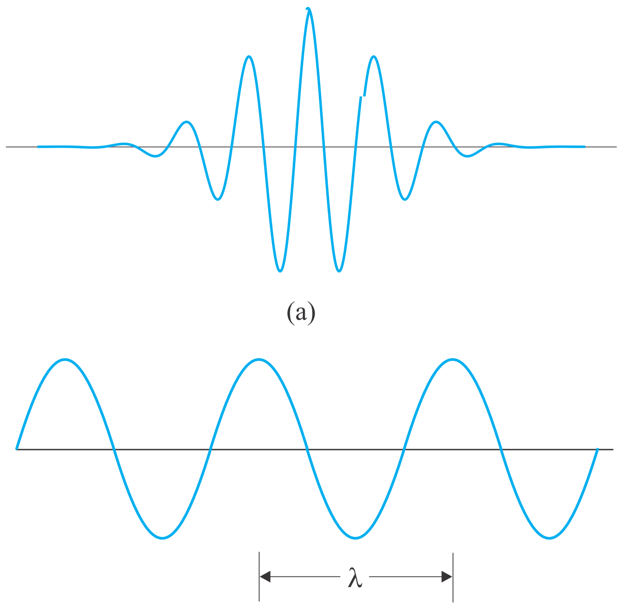
ઈલેક્ટ્રૉન અવકાશમાં કોઈ ચોક્કસ વિસ્તાર પૂરતો સિમિત નથી. એટલે કે તેના સ્થાનની અનિશ્ચિતતા અનંત ($\Delta x \to \infty$) છે, જે અનિશ્ચિતતાના સિદ્ધાંત સાથે મળતું આવે છે.

સામાન્ય રીતે, ઈલેક્ટ્રૉન સાથે સંકળાયેલ દ્રવ્ય તરંગ અનંત અવકાશમાં પથરાયેલું હોતું નથી. તે અવકાશના કોઈ પરિમિત વિસ્તારમાં પથરાયેલું એક તરંગ પડીકું (પેકેટ) હોય છે. આ પરિસ્થિતિમાં Δx અનંત નથી હોતું પરંતુ તેને કોઈ ચોક્કસ મૂલ્ય હોય છે જે તરંગ પેકેટના વિસ્તાર પર આધાર રાખે છે. આ ઉપરાંત, તમારે જાણવું જોઈએ કે પરિમિત અવકાશમાં પથરાયેલા (વિસ્તરેલા) તરંગ પેકેટને કોઈ એક ચોક્કસ તરંગલંબાઈ હોતી નથી. તે કોઈ મધ્યમાન તરંગલંબાઈની આસપાસના વિસ્તારની તરંગલંબાઈઓનું બનેલું હોય છે.

આમ, ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણ મુજબ ઈલેક્ટ્રૉનના વેગમાનનો પણ કોઈ ગાળો (વિસ્તાર) હશે-જેની અનિશ્ચિતતા Δp હોય. અનિશ્ચિતતાના સિદ્ધાંત પરથી આ અપેક્ષિત છે. એવું દર્શાવી શકાય કે તરંગ પેકેટ વર્ણન સાથે ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણ અને બોર્નના સંભાવનાત્મક અર્થઘટન પરથી હાઈઝનબર્ગનો અનિશ્ચિતતાનો સિદ્ધાંત પુનઃસ્થાપિત થાય છે.

પ્રકરણ-12માં, આપણે જોઈશું કે ડિ બ્રોગ્લીનું સમીકરણ કેવી રીતે પરમાણુના, ઈલેક્ટ્રૉનના કોણીય વેગમાનના ક્વૉન્ટાઈઝેશન (ક્વૉન્ટમીકરણ) માટેના બ્હોરના સિદ્ધાંતને અનુમોદન આપે છે.

આકૃતિ (11.6)માં (a) પરિમિત અવકાશમાં પથરાયેલું તરંગ પેકેટ, અને (b) એક ચોક્કસ તરંગલંબાઈ ધરાવતા વિસ્તરેલ તરંગ,ની રૂપરેખા દર્શાવી છે.



આકૃતિ 11.6 (a) ઈલેક્ટ્રૉનનું તરંગ પેકેટ વર્ણન. તરંગ પેકેટ મધ્યમાન તરંગલંબાઈની આસપાસના વિસ્તારની તરંગલંબાઈઓનું બનેલું હોય છે (અને તેથી ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણ મુજબ, વેગમાનનો કોઈ ગાળો પણ ધરાવતું હોય છે.) પરિણામ સ્વરૂપે તે, સ્થાનમાં અનિશ્ચિતતા (Δx) અને વેગમાનમાં અનિશ્ચિતતા (Δp) ધરાવે છે. (b) ઈલેક્ટ્રૉનના કોઈ એક ચોક્કસ વેગમાન માટે દ્રવ્ય તરંગ અનંત (સમગ્ર) અવકાશમાં પથરાયેલું હોય છે. આ સ્થિતિમાં $\Delta p = 0$ અને $\Delta x \to \infty$.

ઉદાહરણ 11.4 (a) 5.4×10^6 m/sની ઝડપથી ગતિ કરતા ઈલેક્ટ્રૉન અને (b) 30.0 m/sની ઝડપથી ગતિ કરતા 150 g ના બૉલ, સાથે સંકળાયેલ ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ કેટલી હશે ?

ઉકેલ

(a) ઈલેક્ટ્રૉન માટે :

દ્રવ્યમાન $m = 9.11 \times 10^{-31}$ kg, $\upsilon = 5.4 \times 10^6$ m/s.

આથી વેગમાન $p = m\upsilon = 9.11 \times 10^{-31}$ (kg) $\times 5.4 \times 10^6$ (m/s)

$p = 4.92 \times 10^{-24}$ kg m/s

ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ $\lambda = h/p$

$$= \frac{6.63 \times 10^{-34}\ \text{Js}}{4.92 \times 10^{-24}\ \text{kg m/s}}$$

$\lambda = 0.135$ nm

(b) બૉલ માટે :

દ્રવ્યમાન $m' = 0.150$ kg, ઝડપ $\upsilon' = 30.0$ m/s

આથી વેગમાન $p' = m'\upsilon' = 0.150$ (kg) $\times$ 30.0 (m/s)

$p' = 4.50$ kg m/s

ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ $\lambda' = h/p'$

ઉદાહરણ 11.4

ઉદાહરણ 11.4

$$= \frac{6.63 \times 10^{-34}\,\text{Js}}{4.50\ \text{kg m/s}}$$

$$\lambda' = 1.47 \times 10^{-34}\ \text{m}$$

ઈલેક્ટ્રૉન માટેની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ ક્ષ-કિરણોની તરંગલંબાઈ સાથે સરખાવી શકાય તેવી છે. પરંતુ, બૉલ માટે તે પ્રોટોનના પરિમાણ કરતાં 10^{-19} ગણી નાની છે, જે પ્રાયોગિક રીતે માપવી શક્ય નથી.

ઉદાહરણ 11.5

ઉદાહરણ 11.5 એક ઈલેક્ટ્રૉન, એક α કણ અને એક પ્રોટોનની ગતિઊર્જાઓ સમાન છે. આમાંથી કયા કણની ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ સૌથી ટૂંકી હશે ?

ઉકેલ

કણ માટે ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ, $\lambda = h/p$

ગતિઊર્જા, $K = p^2/2m$

આથી, $\lambda = h/\sqrt{2mK}$

સમાન ગતિઊર્જા K માટે, આપેલ કણ સાથે સંકળાયેલી ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ તેમના દ્રવ્યમાનના વર્ગમૂળના વ્યસ્તપ્રમાણમાં છે. ઈલેક્ટ્રૉન કરતાં પ્રોટોન $\left({}^{1}_{1}\text{H}\right)$ લગભગ 1836 ગણો ભારે હોય છે, અને α-કણ $\left({}^{4}_{4}\text{He}\right)$ પ્રોટોન કરતાં 4 ગણો ભારે હોય છે. આથી, α-કણની ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ સૌથી ટૂંકી હશે.

દ્રવ્ય તરંગોનું સંભાવનાત્મક અર્થઘટન (PROBABILITY INTERPRETATION OF MATTER WAVES)

કણ (દા. ત. ઈલેક્ટ્રૉન) સાથે સંકળાયેલ દ્રવ્ય તરંગનો અર્થ શું છે તે જાણવા થોડુંક રોકાઈએ. ખરેખર તો દ્રવ્ય અને વિકિરણના દ્વૈત સ્વરૂપની સંતોષ જનક સમજૂતી હજી સુધી મળી નથી. ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રની શરૂઆત કરનાર મહાન વૈજ્ઞાનિકો (નિલ્સ બોહ્ર, આલ્બર્ટ આઈન્સ્ટાઈન અને બીજા ઘણા) એ આ અને તેની સાથે સંકળાયેલ ઘણા પાસાઓ સમજવા અથાગ પ્રયત્નો કર્યા. આમ છતાં ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રનું ગહન ભૌતિક અર્થઘટન હજી પણ સક્રિય સંશોધનનો વિષય છે. આમ છતાં, આધુનિક ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રમાં દ્રવ્ય તરંગનો વિચાર ગાણિતિક રીતે ખૂબ સફળતાપૂર્વક દાખલ થયો છે. આ બાબતમાં મૅક્સ બોર્ન (1882-1970) એ આપેલું દ્રવ્ય તરંગના કંપવિસ્તારનું સંભાવનાત્મક અર્થઘટન એ અગત્યનો માર્ગસ્તંભ હતો. આ મુજબ, કોઈ બિંદુએ દ્રવ્ય તરંગની તીવ્રતા (કંપવિસ્તારનો વર્ગ), તે બિંદુએ કણ હોવાની સંભાવના ઘનતા નક્કી કરે છે. સંભાવના ઘનતાનો અર્થ, એકમ કદ દીઠ સંભાવના. આમ, જો કોઈ બિંદુએ તરંગનો કંપવિસ્તાર A હોય, તો $|A|^2 \Delta V$ એ આ બિંદુની આસપાસના સૂક્ષ્મ કદ ΔVમાં કણની હોવાની સંભાવના દર્શાવે છે. આમ, જો કોઈ વિસ્તારમાં દ્રવ્ય તરંગની તીવ્રતા વધુ હોય તો, ત્યાં કણને શોધવાની સંભાવના, જ્યાં ઓછી તીવ્રતા હોય ત્યાંની સરખામણીમાં, વધુ હોય છે.

ઉદાહરણ 11.6

ઉદાહરણ 11.6 એક કણ ઈલેક્ટ્રૉનની ઝડપ કરતા 3 ગણી ઝડપે ગતિ કરે છે. કણ અને ઈલેક્ટ્રૉનની ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈનો ગુણોત્તર 1.813×10^{-4} છે. કણનું દ્રવ્યમાન શોધો અને તે કયો કણ હશે તે ઓળખો.

ઉકેલ

m દ્રવ્યમાન અને v વેગ ધરાવતા કણની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ

$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\upsilon}$

દ્રવ્યમાન $m = h/\lambda\upsilon$

ઈલેક્ટ્રૉન માટે, દ્રવ્યમાન $m_e = h/\lambda_e\upsilon_e$

પરંતુ, $\upsilon/\upsilon_e = 3$ આપેલ છે અને

$\lambda/\lambda_e = 1.813 \times 10^{-4}$

આથી, કણનું દ્રવ્યમાન $m = m_e\left(\frac{\lambda_e}{\lambda}\right)\left(\frac{\upsilon_e}{\upsilon}\right)$

$m = (9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg}) \times (1/1.813 \times 10^{-4}) \times (1/3)$

$m = 1.675 \times 10^{-27}\ \text{kg}$

આમ, આ દ્રવ્યમાન વાળો કણ પ્રોટોન કે ન્યૂટ્રૉન હોઈ શકે.

ઉદાહરણ 11.6

ઉદાહરણ 11.7 100 વોલ્ટના વિદ્યુત સ્થિતિમાનના તફાવત વડે પ્રવેગિત થયેલા ઈલેક્ટ્રૉન સાથે સંકળાયેલી ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ કેટલી હશે ?

ઉકેલ

પ્રવેગક સ્થિતિમાન V = 100 V. ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ

$\lambda = h/p = \frac{1.227}{\sqrt{V}}\ \text{nm}$

$\lambda = \frac{1.227}{\sqrt{100}}\ \text{nm} = 0.123\ \text{nm}$

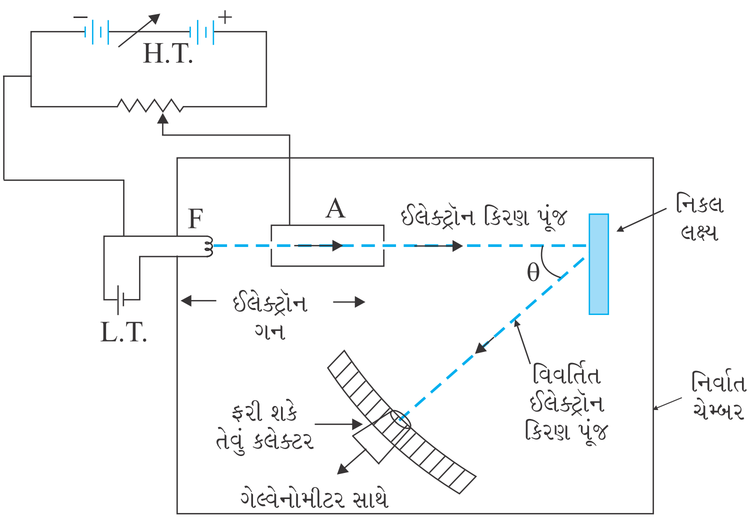
આ કિસ્સામાં ઈલેક્ટ્રૉન સાથે સંકળાયેલી ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ ક્ષ-કિરણોની તરંગલંબાઈના ક્રમની છે.

ઉદાહરણ 11.7

11.9 ડેવિસન અને ગર્મરનો પ્રયોગ (DAVISSON AND GERMER EXPERIMENT)

ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ સ્વરૂપની પ્રાયોગિક ચકાસણી પ્રથમ સી. જે. ડેવિસન અને એલ. એચ. ગર્મરે 1927માં, અને સ્વતંત્ર રીતે જી.પી. થોમસને 1928માં કરી હતી, જેમણે સ્ફટિકો વડે ઈલેક્ટ્રૉન કિરણાવલિના પ્રકીર્ણન દ્વારા વિવર્તનની ઘટનાઓનું અવલોકન કર્યું. ડેવિસન અને થોમસનને સ્ફટિકો દ્વારા ઈલેક્ટ્રૉનના વિવર્તનની પ્રાયોગિક શોધ બદલ 1937માં સંયુક્ત રીતે (સરખા ભાગે) નૉબેલ પારિતોષિક મળ્યું હતું.

ડેવિસન અને ગર્મરની પ્રાયોગિક ગોઠવણીની રૂપરેખા આકૃતિ 11.7માં દર્શાવી છે. તેમાં એક ઈલેક્ટ્રૉન ગન હોય છે, જેના ટંગસ્ટનના ફિલામેન્ટ F પર બેરીયમ ઑક્સાઈડનું પડ ચઢાવેલું હોય છે અને તેને નીચા વીજદબાણના પાવર સપ્લાય (L. T. અથવા Battery) દ્વારા ગરમ કરવામાં આવે છે. ફિલામેન્ટમાંથી ઉત્સર્જાયેલા ઈલેક્ટ્રૉનને ઈચ્છિત વેગ સુધી પ્રવેગિત કરવા ઊંચા વીજ-દબાણવાળા પાવર સપ્લાય (H. T. કે



આકૃતિ 11.7 ડેવિસન-ગર્મરની ઈલેક્ટ્રૉન વિવર્તન ગોઠવણી

Battery)માંથી, યોગ્ય વીજદબાણ/વોલ્ટેજ લગાડવામાં આવે છે. તેમને સૂક્ષ્મ છિદ્રોવાળા નળાકારમાંથી તેની અક્ષની દિશામાં પસાર કરી, સાંકડી સંગઠિત કિરણાવલિ (Beam) મેળવી શકાય છે. આ બીમને નિકલના સ્ફટિકની સપાટી પર આપાત કરવામાં આવે છે. સ્ફટિકના પરમાણુઓ દ્વારા ઈલેક્ટ્રૉન બધી દિશાઓમાં પ્રકેરિત થાય છે. આપેલ દિશામાં પ્રકીર્ણન પામેલા ઈલેક્ટ્રૉન બીમની તીવ્રતા, ઈલેક્ટ્રૉન ડીટેક્ટર (કલેક્ટર) વડે માપવામાં આવે છે. આ ડીટેક્ટરને વર્તુળાકાર માપપટ્ટી (સ્કેલ) પર ફેરવી શકાય છે અને તેની સાથે સંવેદનશીલ ગેલ્વેનોમીટર જોડેલું હોય છે; જે વિદ્યુતપ્રવાહ નોંધે છે. ગેલ્વેનોમીટરનું કોણાવર્તન કલેક્ટરમાં દાખલ થતા ઈલેક્ટ્રૉન બીમની તીવ્રતાના સમપ્રમાણમાં હોય છે. આ સાધનને શૂન્યાવકાશિત ચેમ્બરમાં રાખવામાં આવે છે. વર્તુળાકાર સ્કેલ પર ડીટેક્ટરને જુદા જુદા સ્થાને ફેરવીને જુદા જુદા પ્રકીર્ણન કોણ θ કે, જે આપાત અને પ્રકીર્ણન પામતા ઈલેક્ટ્રૉન બીમ વચ્ચેનો કોણ છે, તેને માટે પ્રકીર્ણન પામેલ ઈલેક્ટ્રૉન બીમની તીવ્રતા માપવામાં આવે છે. જુદા જુદા પ્રકીર્ણન કોણ θ માટે પ્રકીર્ણન પામેલા ઈલેક્ટ્રૉનની તીવ્રતા (I)નો ફેરફાર જુદા જુદા પ્રવેગક વોલ્ટેજ (વીજદબાણ) માટે માપવામાં આવે છે.

આ પ્રવેગક વોલ્ટેજને 44 V થી 68 V સુધી બદલીને પ્રયોગ કરવામાં આવ્યો હતો. એવું નોંધવામાં આવ્યું હતું કે, 54 V જેટલા પ્રવેગક વીજદબાણ અને પ્રકીર્ણન કોણ $\theta = 50^\circ$ માટે, પ્રકીર્ણન પામેલ ઈલેક્ટ્રૉન બીમની તીવ્રતા (I)માં મહત્તમ ઊછાળો (વધારો) જોવા મળ્યો હતો.

સ્ફટિકના જુદા જુદા સ્તરો પરથી પ્રકીર્ણન પામેલા ઈલેક્ટ્રૉનના સહાયક વ્યતિકરણના કારણે ચોક્કસ દિશામાં મહત્તમ (ઊંચુ) મૂલ્ય મળે છે. ઈલેક્ટ્રૉનના વિવર્તન અંગેના માપન પરથી, દ્રવ્ય તરંગોની તરંગલંબાઈ 0.165 nm જેટલી મળી હતી.

$$\lambda = h/p = \frac{1.227}{\sqrt{V}} \text{ nm}$$

$$\lambda = \frac{1.227}{\sqrt{54}} \text{nm} = 0.167 \text{ nm}$$

આમ, ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈના પ્રાયોગિક મૂલ્ય અને સૈદ્ધાંતિક રીતે મેળવેલ મૂલ્ય વચ્ચે ખૂબ જ સંમતિ જોવા મળે છે. આ રીતે ડેવિસન-ગર્મરનો પ્રયોગ ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ સ્વરૂપ અને ડિ બ્રોગ્લી સમીકરણને સ્પષ્ટ રીતે અનુમોદન આપે છે. તાજેતરમાં, 1989માં, ઈલેક્ટ્રૉન બીમના તરંગ સ્વરૂપનું પ્રાયોગિક નિદર્શન, પ્રકાશના તરંગ સ્વરૂપ માટે વપરાય છે તેવા બે સ્લિટના પ્રયોગ દ્વારા, કરવામાં આવ્યું હતું. આ ઉપરાંત, 1994માં એક પ્રયોગ દરમિયાન, ઈલેક્ટ્રૉન કરતાં લાખો ગણા ભારે એવા આયોડિનના અણુઓના બીમ દ્વારા વ્યતિકરણની શલાકાઓ મેળવવામાં આવી હતી.

આધુનિક ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રના વિકાસમાં ડિ બ્રોગ્લીનો સિદ્ધાંત પાયારૂપ છે. તે ઈલેક્ટ્રૉન ઑપ્ટીક્સ (Optics) ના ક્ષેત્ર તરફ પણ દોરી ગયેલ છે. ઈલેક્ટ્રૉન માઈક્રોસ્કોપની રચનામાં ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ સ્વરૂપનો ઉપયોગ કરવામાં આવ્યો છે. જે દૃશ્ય (પ્રકાશ) માઈક્રોસ્કોપ કરતાં વધુ વિભેદન શક્તિ ધરાવે છે.

Development of electron microscope
http://www.nobelprize.org

PHYSICS

સારાંશ

1. ધાતુની સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનને બહાર નીકળવા માટે જરૂરી લઘુત્તમ ઊર્જાને તે ધાતુનું કાર્ય વિધેય કહે છે. ઈલેક્ટ્રૉનને ધાતુની સપાટીમાંથી બહાર કાઢવા માટે જરૂરી ઊર્જા (કાર્ય વિધેય ϕ_0 કરતાં વધુ), યોગ્ય રીતે ગરમ કરીને કે પ્રબળ વિદ્યુતક્ષેત્ર લાગુ પાડીને અથવા યોગ્ય આવૃત્તિનો પ્રકાશ આપાત કરીને આપી શકાય.
2. જ્યારે ધાતુ પર યોગ્ય આવૃત્તિનો પ્રકાશ આપાત કરવામાં આવે ત્યારે તેમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનના ઉત્સર્જનની ઘટનાને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર કહે છે. કેટલીક ધાતુઓ અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ માટે, જ્યારે કેટલીક દ્રશ્ય પ્રકાશ માટે પણ સંવેદી (સંવેદનશીલ) હોય છે. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરમાં પ્રકાશ ઊર્જાનું વિદ્યુતઊર્જામાં રૂપાંતર થાય છે. તે ઊર્જા સંરક્ષણના નિયમનું પાલન કરે છે. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર તાત્ક્ષણિક અસર છે અને તે કેટલીક વિશિષ્ટતાઓ ધરાવે છે.
3. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ, (i) આપાત પ્રકાશની તીવ્રતા, (ii) બે ઈલેક્ટ્રૉન વચ્ચે લગાડેલ સ્થિતિમાનના તફાવત, અને (iii) ઉત્સર્જન પદાર્થના પ્રકાર (પ્રકૃતિ), પર આધાર રાખે છે.
4. સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ (V_0), (i) આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ, અને (ii) ઉત્સર્જક દ્રવ્યના પ્રકાર, પર આધાર રાખે છે. આપાત પ્રકાશની આપેલ આવૃત્તિ માટે, તે તીવ્રતા પર આધાર રાખતું નથી. સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ ઉત્સર્જાયેલા (ફોટો) ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા સાથે પ્રત્યક્ષ સંકળાયેલું હોય છે : $eV_0 = (1/2)\, m\upsilon^2_{max} = K_{max}$.
5. દ્રવ્ય માટે લાક્ષણિક એવી, એક ચોક્કસ આવૃત્તિ (થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ) ν_0 થી ઓછી આવૃત્તિ માટે, તીવ્રતા ગમે તેટલી વધુ હોય તો પણ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન થતું નથી.
6. પ્રચલિત તરંગવાદ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરની લાક્ષણિકતાઓ સમજાવી શકતો નથી. વિકિરણમાંથી ઊર્જાનું સતત શોષણ દર્શાવતો તેનો સિદ્ધાંત, K_{max}નું તીવ્રતા પર આધારિત ન હોવું, ν_0 (થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ)નું અસ્તિત્વ અને (ફોટોઈલેક્ટ્રીક) ઘટનાનું તાત્ક્ષણિકપણું સમજાવી શકતો નથી. આઈન્સ્ટાઈને આ લાક્ષણિકતાઓને પ્રકાશની ફોટોન પ્રકૃતિના આધારે સમજાવી હતી. આ મુજબ, પ્રકાશ, ઊર્જાના અમુક જથ્થાઓ (પેકેટ)નો બનેલો છે, જેમને ક્વૉન્ટમ કે ફોટોન કહે છે. દરેક ફોટોનને ઊર્જા E $(= h\nu)$ અને વેગમાન $p\ (= h\ \lambda)$ હોય છે જે આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ (ν) પર આધાર રાખે છે, પણ તીવ્રતા પર નહીં. ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા ફોટોનના શોષણના કારણે ધાતુની સપાટીમાંથી ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન થાય છે.
7. આઈન્સ્ટાઈનનું ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ, ઊર્જા સંરક્ષણના નિયમને સુસંગત છે જે ધાતુમાં રહેલા ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા ફોટોનના શોષણ પર લાગુ પડે છે. ફોટોનની ઊર્જા ($h\nu$)માંથી લક્ષ્ય ધાતુનું કાર્ય વિધેય $\phi_0\ (= h\ \nu_0)$ બાદ કરતાં (ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની) મહત્તમ ગતિઊર્જા $(1/2)m\upsilon^2_{max}$ મળે છે.
   $$\frac{1}{2}m\upsilon^2_{max} = V_0 e = h\nu - \phi_0 = h(\nu - \nu_0)$$
   આ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ, ફોટોઈલેક્ટ્રીક અસરની બધી જ લાક્ષણિકતાઓ સમજાવે છે. મિલિકનના પ્રથમ ચોક્કસ માપનોએ આઈન્સ્ટાઈનના ફોટોઈલેક્ટ્રીક સમીકરણની સત્યતાને સમર્થન પુરું પાડ્યું અને પ્લાન્કના અચળાંક hનું ચોક્કસ મૂલ્ય મેળવ્યું, જે આઈન્સ્ટાઈને રજૂ કરેલા વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણના કણ કે ફોટોન વર્ણનની સ્વીકૃતિ તરફ દોરી ગયું.
8. વિકિરણ દ્વૈત પ્રકૃતિ ધરાવે છે : તરંગ અને કણ. કોઈ પ્રયોગના પરિણામને સમજવા પ્રકાશનું તરંગ કે કણ, કયું સ્વરૂપ ધ્યાનમાં લેવું શ્રેષ્ઠ છે તે પ્રયોગના પ્રકાર પરથી નક્કી થાય છે. પ્રકૃતિમાં વિકિરણ અને દ્રવ્ય સંમિતિ ધરાવે છે. એવા તર્ક પરથી લ્યુઈસ વિક્ટર ડિ બ્રોગ્લીએ દ્રવ્ય (દ્રવ્ય કણો)ને તરંગ-પ્રકૃતિ સાથે સાંકળ્યા. ગતિ કરતા દ્રવ્ય કણો સાથે સંકળાયેલા તરંગોને દ્રવ્ય તરંગો કે ડિ બ્રોગ્લી તરંગો કહે છે.

9. ગતિમાન કણ સાથે સંકળાયેલી ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ (λ) તેના વેગમાન p સાથે આ મુજબ સંબંધિત છે : $\lambda = h/p$. દ્રવ્યનું દ્વૈતપણું ડિ બ્રોગ્લી સમીકરણમાં રહેલું છે. જે તરંગવિભાવના (λ) અને કણ વિભાવના (p) ને સમાવે છે. ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ દ્રવ્ય કણના વિદ્યુતભાર અને તેની પ્રકૃતિ પર આધાર રાખતી નથી. તે ફક્ત પરમાણુથી નાના કણો જેમકે ઈલેક્ટ્રૉન, પ્રોટોન વગેરે માટે જ (તેમના સૂક્ષ્મ દળ અને તેથી સૂક્ષ્મ વેગમાનના કારણે) ચોક્કસ રીતે માપી શકાય તેવા અંતરના (સ્ફટિકોમાંના પરમાણ્વિક સ્તરો વચ્ચેના અંતરના) ક્રમના હોય છે. આમ છતાં તે રોજિંદા જીવનમાં જોવામાં આવતા, સ્થૂળ પદાર્થો માટે માપી ન શકાય તેટલી નાની હોય છે.
10. ડેવિસન અને ગર્મર, અને જી. પી. થોમસન, તથા ત્યારબાદના બીજા ઘણા ઈલેક્ટ્રૉન વિવર્તનના પ્રયોગો દ્વારા ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ સ્વરૂપની ચકાસણી તથા સત્યતા સાબિત થઈ છે. દ્રવ્ય તરંગો માટેનો ડિ બ્રોગ્લીનો સિદ્ધાંત, બ્હોરના સ્થિર કક્ષાઓના ખ્યાલને સમર્થન આપે છે.

ભૌતિક રાશિ	સંજ્ઞા	પરિમાણ	એકમ	વિશેષ નોંધ
પ્લાન્કનો અચળાંક	h	$[ML^2T^{-1}]$	J s	$E = h\nu$
સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ	V_0	$[ML^2T^{-3}A^{-1}]$	V	$eV_0 = K_{max}$
કાર્ય વિધેય	ϕ_0	$[ML^2T^{-2}]$	J; eV	$K_{max} = E - \phi_0$
થ્રેશોલ્ડ (સીમાંત) આવૃત્તિ	ν_0	$[T^{-1}]$	Hz	$\nu_0 = \phi_0/h$
ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ	λ	[L]	m	$\lambda = h/p$

ગહન વિચારણાના મુદ્દાઓ

1. ધાતુમાં રહેલા ઈલેક્ટ્રૉન ધાતુની અંદર અચળ વિદ્યુત સ્થિતિમાનમાં ગતિ કરી શકે છે તે અર્થમાં મુક્ત છે (આ એક સંનિકટતા છે). તેઓ ધાતુની સપાટીમાંથી બહાર નીકળવા માટે મુક્ત નથી. તેમને ધાતુમાંથી બહાર કાઢવા માટે વધારાની ઊર્જાની જરૂર પડે છે.
2. ધાતુમાં રહેલા બધા જ મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા સમાન હોતી નથી. વાયુ પાત્રમાં રહેલા વાયુના અણુઓની જેમ, આપેલ તાપમાને આ ઈલેક્ટ્રૉનને પણ એક ચોક્કસ ઊર્જા વિતરણ (Distribution) હોય છે. આ વિતરણ એ તમે વાયુના ગતિવાદમાં ભણ્યા એ મેક્સવેલના વિતરણથી અલગ છે. તમે આગળના અભ્યાસક્રમમાં તેના વિશે ભણશો, પરંતુ આ તફાવત, ઈલેક્ટ્રૉન પાઉલીના અપવર્જન (Exclusion) ના સિદ્ધાંતનું પાલન કરે છે તે હકીકત સાથે સંબંધિત છે.
3. ધાતુમાં ઈલેક્ટ્રૉનના ઊર્જા વિતરણના કારણે, જુદા જુદા ઈલેક્ટ્રૉન માટે ઈલેક્ટ્રૉનને ધાતુમાંથી બહાર નીકળવા માટે જરૂરી ઊર્જા જુદા જુદા ઈલેક્ટ્રોન માટે જુદી જુદી હોય છે. વધુ ઊર્જા ધરાવતા ઈલેક્ટ્રોનને ઓછી ઊર્જા ધરાવતા ઈલેક્ટ્રોન કરતાં બહાર નીકળવા માટે ઓછી ઊર્જાની જરૂર પડે છે. કાર્યવિધેય એ ધાતુમાંથી ઈલેક્ટ્રોનને બહાર નીકળવા માટે જરૂરી લઘુત્તમ ઊર્જા છે.

4. ફોટોઈલેક્ટ્રીક અસરના અવલોકનો દર્શાવે છે કે, દ્રવ્ય અને પ્રકાશની આંતરક્રિયા દરમિયાન, *ઊર્જાનું શોષણ વિભક્ત (છુટાછુટા) જથ્થાઓ $h\nu$ ના એકમોમાં થાય છે.* આનો અર્થ એ નથી કે પ્રકાશ $h\nu$ ઊર્જાવાળા કણોનો બનેલો છે.
5. સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ (જે તીવ્રતા પર આધાર રાખતું નથી પરંતુ આવૃત્તિ પર આધાર રાખે છે) ના અવલોકનો ફોટોઈલેક્ટ્રીક અસરના તરંગ-સ્વરૂપ અને ફોટોન સ્વરૂપ વચ્ચેનો નિર્ણાયક ભેદ દર્શાવે છે.
6. $\lambda = h/p$ વડે અપાતી દ્રવ્ય તરંગની તરંગ લંબાઈનું ભૌતિક મહત્વ છે, પરંતુ તેના કળા વેગ υ_p (Phase Velocity)નું કોઈ ભૌતિક મહત્વ નથી. આમ છતાં, દ્રવ્ય તરંગનો સમૂહ વેગ (Group Velocity) કે જે કણના વેગ જેટલો હોય છે તે ભૌતિક રીતે અર્થપૂર્ણ છે.

સ્વાધ્યાય

11.1 30 kVના ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા ઉત્પન્ન થતા ક્ષ-કિરણોની
(a) મહત્તમ આવૃત્તિ, અને
(b) લઘુત્તમ તરંગલંબાઈ શોધો.

11.2 સિઝિયમ ધાતુનું કાર્ય વિધેય 2.14 eV છે. જ્યારે 6×10^{14} Hzનો પ્રકાશ આ ધાતુની સપાટી પર આપાત થાય, ત્યારે ઈલેક્ટ્રૉનનું ફોટો ઉત્સર્જન થાય છે.
(a) ઉત્સર્જિત ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા,
(b) સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ, અને
(c) ઉત્સર્જિત ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ઝડપ, કેટલી હશે ?

11.3 એક પ્રયોગમાં ફોટોઈલેક્ટ્રીક કટ-ઓફ વોલ્ટેજ 1.5 V છે. ઉત્સર્જાયેલા ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા કેટલી હશે ?

11.4 હિલિયમ-નિયોન લેસર વડે 632.8 nm તરંગલંબાઈનો એકરંગી (Monochromatic) પ્રકાશ ઉત્પન્ન થાય છે. ઉત્સર્જિત પાવર 9.42 mW જેટલો છે.
(a) પ્રકાશ પૂંજમાં રહેલા દરેક ફોટોનની ઊર્જા અને વેગમાન શોધો.
(b) આ પૂંજ વડે પ્રકાશિત લક્ષ્ય (ટાર્ગેટ) પર સરેરાશ રીતે એક સેકન્ડ દીઠ કેટલા ફોટોન આપાત થતા હશે ? (પૂંજનો આડછેદ સમાન અને લક્ષ્યના ક્ષેત્રફળ કરતાં નાનો છે તેમ ધારો), અને
(c) ફોટોનના વેગમાન જેટલું વેગમાન ધરાવવા માટે હાઈડ્રોજન પરમાણુએ કેટલી ઝડપથી ગતિ કરવી જોઈએ ?

11.5 પૃથ્વીની સપાટી પર આવતા સૂર્યપ્રકાશની ઊર્જાનું ફ્લક્સ 1.388×10^3 W/m^2 છે. પૃથ્વીની સપાટી પર એક ચોરસ મીટરમાં દર સેકન્ડ દીઠ (લગભગ) કેટલા ફોટોન્સ આપાત થતા હશે ? સૂર્યપ્રકાશના ફોટોનની સરેરાશ તરંગ લંબાઈ 550 nm છે એમ ધારો.

11.6 ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરના એક પ્રયોગમાં, કટ ઓફ વૉલ્ટેજ વિરુદ્ધ આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિનો ઢાળ 4.12×10^{-15} V s જેટલો મળે છે. પ્લાન્કના અચળાંકનું મૂલ્ય શોધો.

11.7 100 Wનો એક સોડિયમ લૅમ્પ બધી દિશાઓમાં સમાન રીતે ઊર્જાનું ઉત્સર્જન કરે છે. આ લૅમ્પને એક મોટા ગોળાના કેન્દ્ર પર રાખેલો છે. ગોળો તેના પર આપાત થયેલ બધા જ સોડિયમ પ્રકાશનું શોષણ કરે છે. સોડિયમ પ્રકાશની તરંગ લંબાઈ 589 nm છે.
(a) સોડિયમ પ્રકાશ માટે એક ફોટોન દીઠ કેટલી ઊર્જા સંકળાયેલી હશે ?
(b) ગોળા પર કેટલા દરથી ફોટોન આપાત થતા હશે ?

11.8 એક ચોક્કસ ધાતુ માટે થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ 3.3×10^{14} Hz છે. જો આ ધાતુ પર 8.2×10^{14} Hz આવૃત્તિનો પ્રકાશ આપાત થતો હોય તો ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન માટે કટ ઓફ વોલ્ટેજનું મૂલ્ય શોધો.

11.9 એક ધાતુનું કાર્ય વિધેય 4.2 eV છે. શું આ ધાતુ 330 nm તરંગલંબાઈના આપાત વિકિરણ માટે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન કરશે ?

11.10 એક ધાતુની સપાટી પર 7.21×10^{14} Hz તરંગલંબાઈનો પ્રકાશ આપાત થાય છે. તેની સપાટીમાંથી 6.0×10^{5} m/sની મહત્તમ ઝડપ ધરાવતા ઈલેક્ટ્રૉન ઉત્સર્જિત થાય છે. ઈલેક્ટ્રૉનના ફોટો ઉત્સર્જન માટે થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ કેટલી હશે ?

11.11 આર્ગન લેસર વડે ઉત્પન્ન થયેલ 488 nmના પ્રકાશનો ઉપયોગ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરમાં થયો છે. જ્યારે આ વર્ણપટ રેખાનો પ્રકાશ ઉત્સર્જક પર આપાત થાય ત્યારે ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનનું સ્ટોપિંગ (કટ ઑફ) પોટેન્શિયલ 0.38 V છે. ઉત્સર્જક જે દ્રવ્યમાંથી બનેલ છે તેનું કાર્ય વિધેય શોધો.

11.12 56 V વિદ્યુત સ્થિતિમાનના તફાવત વડે પ્રવેગિત ઈલેક્ટ્રૉન માટે
(a) વેગમાન, અને
(b) ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો.

11.13 120 eV જેટલી ગતિઊર્જા ધરાવતા ઈલેક્ટ્રૉનનું
(a) વેગમાન,
(b) ઝડપ અને
(c) ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ કેટલા હશે ?

11.14 સોડિયમના ઉત્સર્જન વર્ણપટ રેખાના પ્રકાશની તરંગલંબાઈ 589 nm છે.
(a) ઈલેક્ટ્રૉન અને
(b) ન્યૂટ્રૉનની કઈ ગતિઊર્જા માટે આટલી તરંગલંબાઈ મળશે ?

11.15 આપેલ કિસ્સાઓ માટે ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો.
(a) 1.0 km/sની ઝડપથી ગતિ કરતી 0.040 kg દળની બુલેટ,
(b) 1.0 m/sની ઝડપથી ગતિ કરતો 0.060 kg દળ ધરાવતો બૉલ,
(c) 2.2 m/sની ઝડપથી ગતિ કરતો 1.0×10^{-9} kg દળ ધરાવતો ધુળનો રજકણ.

11.16 એક ઈલેક્ટ્રૉન અને ફોટોન બંનેની તરંગલંબાઈ 1.00 nm છે. તેમના માટે
(a) તેમના વેગમાન,
(b) ફોટોનની ઊર્જા અને
(c) ઈલેક્ટ્રૉનની ગતિઊર્જા શોધો.

11.17 (a) ન્યૂટ્રૉનની કેટલી ગતિઊર્જા માટે તેની સાથે સંકળાયેલ ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ 1.40×10^{-10} m હશે ?
(b) આ ઉપરાંત 300 K તાપમાને દ્રવ્ય સાથે તાપીય સંતુલનમાં રહેલા (3/2) kT જેટલી સરેરાશ ગતિઊર્જા ધરાવતા ન્યૂટ્રૉન માટે ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો.

11.18 દર્શાવો કે વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણની તરંગલંબાઈ તેના ક્વૉન્ટમ (ફોટોન)ની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ જેટલી હોય છે.

11.19 હવામાં 300 K તાપમાને રહેલા નાઈટ્રોજન અણુની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ કેટલી હશે ? અણુ આ તાપમાને અણુઓની સરેરાશ વર્ગિત ઝડપના વર્ગમૂળ જેટલી ઝડપથી ગતિ કરે છે તેમ ધારો (નાઈટ્રોજનનું પરમાણુદળ $= 14.0076\,u$).

વધારાના સ્વાધ્યાય

11.20 (a) શૂન્યાવકાશિત નળીમાં તપાવેલા ઉત્સર્જક પરથી ઉત્સર્જાયેલા અને ઉત્સર્જકની સાપેક્ષે 500 V સ્થિતિમાનના તફાવતે રહેલા કલેક્ટર પર આપાત થતા ઈલેક્ટ્રૉનની ઝડપ શોધો. ઈલેક્ટ્રૉનની પ્રારંભિક અલ્પ ઝડપ અવગણો. ઈલેક્ટ્રૉનનો *વિશિષ્ટ વિદ્યુતભાર* એટલે કે તેના e/mનું મૂલ્ય 1.76×10^{11} C kg^{-1} આપેલ છે.

(b) (a)માં તમે ઉપયોગ કરેલા સમીકરણ પરથી 10 MV જેટલા કલેક્ટર સ્થિતિમાન માટે ઈલેક્ટ્રૉનની ઝડપ શોધો. તમને શું ખોટું જણાય છે ? આ સૂત્રમાં કયો સુધારો કરવો જોઈએ ?

11.21 (a) એક સરખી ઊર્જા ધરાવતા 5.20×10^{6} m s^{-1} જેટલી ઈલેક્ટ્રૉનની ઝડપ ધરાવતા ઈલેક્ટ્રૉન બીમ (કિરણાવલી) પર વેગને લંબરૂપે 1.30×10^{-4} T જેટલું ચુંબકીયક્ષેત્ર લગાડેલ છે. આ બીમ વડે આંતરેલા વર્તુળાકાર માર્ગની ત્રિજ્યા કેટલી હશે ? ઈલેક્ટ્રૉન માટે e/mનું મૂલ્ય 1.76×10^{11} C kg^{-1} આપેલ છે.

(b) શું (a)માં તમે ઉપયોગમાં લીધેલ સૂત્ર, 20 MeV ઈલેક્ટ્રૉન બીમના માર્ગની ત્રિજ્યાની ગણતરીમાં ઉપયોગ કરી શકો ? જો ના તો, તેમાં શું સુધારો કરવો જોઈએ ?

[*નોંધ* : સ્વાધ્યાય 11.20(b) અને 11.21(b) તમને સાપેક્ષવાદીય યંત્રશાસ્ત્ર તરફ દોરી જાય છે. જે આ પુસ્તકની મર્યાદા બહાર છે. અહીંયા તેમનો ઉપયોગ કરવાનો આશય એ બાબત તરફ ધ્યાન દોરવાનો છે કે સ્વાધ્યાયના ભાગ (a)માં તમે જે સમીકરણોનો ઉપયોગ કરો છો તે ખૂબ ઊંચી ઝડપ અને ઊર્જાઓ માટે લાગુ પડતા નથી. ખૂબ ઊંચી ઝડપ અને ઊર્જા એટલે શું તે સમજવા માટે અંતમાં આપેલા ઉકેલ જુઓ.]

11.22 100 V જેટલો કલેક્ટર વોલ્ટેજ ધરાવતી એક ઈલેક્ટ્રૉન ગન, નીચા દબાણે [$\sim 10^{-2}$ mm Hg] રહેલા હાઈડ્રોજન વાયુ ભરેલા ગોળાકાર બલ્બમાં ઈલેક્ટ્રૉન છોડે છે. 2.83×10^{-4} T જેટલું ચુંબકીયક્ષેત્ર ઈલેક્ટ્રૉનના માર્ગને 12.0 cm ત્રિજ્યાની વર્તુળાકાર કક્ષામાં વાળે છે. (આ માર્ગ એટલા માટે જોઈ શકાય છે કે માર્ગમાં આવતા વાયુના આયનો ઈલેક્ટ્રૉનને આકર્ષીને બીમને કેન્દ્રિત કરે છે, તથા ઈલેક્ટ્રૉન પ્રાપ્ત (Capture) કરીને પ્રકાશનું ઉત્સર્જન કરે છે, આ રીતને 'ફાઈન બીમ ટ્યૂબ' પદ્ધતિ કહે છે) આપેલ માહિતી પરથી e/m શોધો.

11.23 (a) એક ક્ષ-કિરણની ટ્યૂબ સતત વર્ણપટના વિકિરણો ઉત્સર્જિત કરે છે જેમની સૌથી ટૂંકી તરંગલંબાઈ 0.45Å છે. આ વિકિરણમાં ફોટોનની મહત્તમ ઊર્જા કેટલી હશે ?

(b) તમારા (a)ના જવાબ માટે (ઈલેક્ટ્રૉન) ટ્યૂબમાં પ્રવેગક વોલ્ટેજ કેટલા ક્રમનો હોવો જોઈએ ?

11.24 ઈલેક્ટ્રૉનની પોઝિટ્રૉન સાથેની ઉચ્ચ ઊર્જા અથડામણો માટેના એક્સિલેટર (પ્રવેગક) પ્રયોગમાં કોઈ ઘટનાનું અર્થઘટન 10.2 BeVની કુલ ઊર્જાના ઈલેક્ટ્રૉન-પોઝિટ્રૉન જોડકાંના પૂર્ણ નાશ દ્વારા સમાન ઊર્જાના બે γ-કિરણોના ઉત્સર્જન તરીકે થાય છે. દરેક γ-કિરણ સાથે સંકળાયેલી તરંગ લંબાઈ કેટલી હશે ? (1 BeV = 10^{9} eV)

11.25 નીચેની બે સંખ્યાઓનો અંદાજ મેળવવો રસપ્રદ રહેશે. પહેલી સંખ્યા તમને એ કહેશે કે શા માટે રેડિયો એન્જિનિયરોએ ફોટોન વિશે બહુ ચિંતા કરવી જરૂરી નથી ! બીજી સંખ્યા એ કહેશે કે ભલેને માંડ પારખી શકાય તેવો પ્રકાશ હોય તો પણ શા માટે આપણી આંખ ક્યારેય ફોટોનની ગણતરી કરી શકતી નથી.

(a) 500 m તરંગલંબાઈના રેડિયો તરંગો ઉત્સર્જિત કરતા 10 kW પાવરના મિડિયમ વેવ ટ્રાન્સમીટરમાંથી એક સેકન્ડ દીઠ ઉત્સર્જાતા ફોટોનની સંખ્યા,

(b) સફેદ પ્રકાશની ન્યૂનતમ તીવ્રતા જેનો મનુષ્યો અહેસાસ કરી શકે ($\sim 10^{-10}$ W m^{-2}) તેને અનુરૂપ આપણી આંખની કીકીમાં દર સેકંડે દાખલ થતા ફોટોનની સંખ્યા, આંખની કીકીનું ક્ષેત્રફળ આશરે 0.4 cm^{2} લો અને સફેદ પ્રકાશની સરેરાશ આવૃત્તિ આશરે 6×10^{14} Hz લો.

11.26 100 Wના મર્ક્યુરી બલ્બમાંથી નીકળતો 2271 Å તરંગલંબાઈનો અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ મોલિબ્ડેનમ ધાતુમાંથી બનેલા ફોટોસેલને પ્રકાશિત કરે છે. જો સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ –1.3 V હોય, તો ધાતુનું કાર્યવિધેય શોધો. આ ફોટોસેલ He-Ne લેસરમાંથી ઉત્સર્જાયેલ 6328 Å ના ઊંચી તીવ્રતા ($\sim 10^5$ W m^{-2}) ધરાવતા લાલ પ્રકાશ પ્રત્યે કેવો પ્રતિભાવ આપશે ?

11.27 સિઝિયમનું પ્રકાશ-સંવેદી દ્રવ્ય લગાડેલા ટંગસ્ટન, નિયોન બલ્બમાંથી આવતા 640.2 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9}$ m) તરંગલંબાઈના એકરંગી પ્રકાશ વડે પ્રકાશિત થાય છે. સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ 0.54 V માપેલ છે. પ્રકાશના આ ઉદ્ગમની જગ્યાએ આયર્ન ઉદ્ગમ મુકવામાં આવે છે જેની 427.2 nm (તરંગલંબાઈની) વર્ણપટ રેખા આ ફોટોસેલને પ્રકાશિત કરે છે. નવું સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ શોધો.

11.28 ફોટા ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જનના આવૃત્તિ પરના અવલંબન (આધાર, Dependence) ના અભ્યાસ માટે મર્ક્યુરી લૅમ્પ યોગ્ય ઉદ્ગમ છે, કારણ કે તે UVથી લઈને દશ્ય પ્રકાશના વર્ણપટના લાલ છેડા સુધીની ઘણી બધી વર્ણપટરેખાઓ આપે છે. રૂબિડિયમ ફોટોસેલ સાથેના આપણા પ્રયોગ દરમિયાન, મર્ક્યુરી ઉદ્ગમની નીચે આપેલ વર્ણપટરેખાઓનો ઉપયોગ થયો હતો :

$\lambda_1 = 3650 \text{ Å}, \lambda_2 = 4047 \text{ Å}, \lambda_3 = 4358 \text{ Å}, \lambda_4 = 5461 \text{ Å}, \lambda_5 = 6907 \text{ Å}$

તેમને અનુલક્ષીને માપેલા સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ અનુક્રમે આ મુજબ છે :

$V_{01} = 1.28 \text{ V}, V_{02} = 0.95 \text{ V}, V_{03} = 0.74 \text{ V}, V_{04} = 0.16 \text{ V}, V_{05} = 0 \text{ V}$

પ્લાન્કના અચળાંક h નું મૂલ્ય, આપેલ દ્રવ્ય માટે થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ અને કાર્યવિધેય શોધો.

(*નોંધ :* તમે જોશો કે આપેલ માહિતી પરથી hની ગણતરી કરવા માટે eની જરૂર પડશે (જે તમે 1.6×10^{-19} C લઈ શકો). Na, Li, K વગેરે પર મિલિકને આવા પ્રયોગો કર્યા હતા જેમાં તેમણે (ઓઈલ ડ્રોપ પ્રયોગ-Oil Drop Experiment પરથી) મેળવેલ eના મૂલ્યનો ઉપયોગ કરીને આઈન્સ્ટાઈનના ફોટોઈલેક્ટ્રીક સમીકરણની સત્યતા ચકાસી હતી અને તે સાથે જ hના મૂલ્યનો સ્વતંત્ર અંદાજ આપ્યો હતો.)

11.29 નીચેની ધાતુઓનું કાર્યવિધેય આ મુજબ આપેલ છે :

Na : 2.75 eV, K : 2.30 eV, Mo : 4.17 eV, Ni : 5.15 eV.

આમાંથી કઈ ધાતુ ફોટોસેલથી 1 m અંતરે મૂકેલા He-Cd લેસરમાંથી આવતા 3300 Å તરંગલંબાઈના વિકિરણ માટે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન નહીં આપે ? જો લેસરને પાસે લાવીને 50 cm અંતરે મુકવામાં આવે તો શું થશે ?

11.30 10^{-5} W m^{-2} તીવ્રતાનો પ્રકાશ, 2 cm^2 જેટલું સપાટીનું ક્ષેત્રફળ ધરાવતા સોડિયમ ફોટોસેલ પર પડે છે. સોડિયમના ઉપરના 5 સ્તરો આપાત પ્રકાશનું શોષણ કરે છે તેમ ધારીને વિકિરણની તરંગ પ્રકૃતિ મુજબ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન માટે કેટલો સમય લાગશે તે નક્કી કરો. ધાતુનું કાર્યવિધેય લગભગ 2 eV જેટલું આપેલું છે. તમારો જવાબ શું સૂચવે છે ?

11.31 સ્ફટિક દ્વારા વિવર્તનના પ્રયોગો, ક્ષ-કિરણો કે યોગ્ય વોલ્ટેજ દ્વારા પ્રવેગિત કરેલા ઈલેક્ટ્રોન વડે કરી શકાય છે. કયા શોધક (Probe) (કિરણ)ની ઊર્જા વધુ હશે ? (માત્રાત્મક સરખામણી માટે, શોધક/કિરણની તરંગલંબાઈ 1 Å લો, જે લેટિસના આંતર પરમાણ્વિક અંતરોના ક્રમની છે.) ($m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg)

11.32 (a) 150 eV ગતિઊર્જા ધરાવતા ન્યુટ્રૉનની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો. સ્વાધ્યાય 11.31માં તમે જોયું તે મુજબ આ ઊર્જા ધરાવતું ઈલેક્ટ્રૉન બીમ સ્ફટિક દ્વારા વિવર્તનના પ્રયોગો માટે યોગ્ય છે. શું આટલી જ ઊર્જા ધરાવતું ન્યુટ્રૉનનું બીમ એટલું જ યોગ્ય છે ? સમજાવો. ($m_n = 1.675 \times 10^{-27}$ kg)

(b) ઓરડાના તાપમાને (27 °C) રહેલા થર્મલ ન્યુટ્રૉન સાથે સંકળાયેલી ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો. તે પરથી સમજાવો કે શા માટે ન્યુટ્રૉન વિવર્તનના પ્રયોગો કરતાં પહેલાં ઝડપી ન્યુટ્રૉન બીમને પર્યાવરણ જેવી જ ઉષ્મીય સ્થિતિમાં લાવવું (Thermalise કરવું) જરૂરી છે.

11.33 એક ઈલેક્ટ્રૉન માઈક્રોસ્કોપ 50 *k*V વોલ્ટેજ વડે પ્રવેગિત થયેલ ઈલેક્ટ્રૉનનો ઉપયોગ કરે છે. આ ઈલેક્ટ્રૉન સાથે સંકળાયેલ ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો. જો બીજાં પરિબળો (જેવા કે, ન્યુમેરીકલ એપર્ચર, વગેરે) લગભગ એના એ જ લેવામાં આવે તો ઈલેક્ટ્રૉન માઈક્રોસ્કોપની વિભેદન શક્તિ અને પીળા પ્રકાશનો ઉપયોગ કરતા ઓપ્ટીકલ માઈક્રોસ્કોપની વિભેદનશક્તિ વચ્ચે સરખામણી કરો.

11.34 કોઈપણ બંધારણની ઉંડાણપૂર્વક માહિતી મેળવવા માટે ઉપયોગી તરંગલંબાઈ તેના બંધારણના આશરે પરિમાણનું માપ દર્શાવે છે. પ્રોટોન અને ન્યુટ્રૉનના ક્વાર્ક બંધારણમાં 10^{-15} m કે તેથી ઓછી લંબાઈના અતિસૂક્ષ્મ માપક્રમના અંતરે જણાય છે. આ બંધારણ વિશે પ્રથમ તપાસ 1970ના સમયગાળામાં, સ્ટેનફોર્ડ, USAમાં રેખીય પ્રવેગક (Linear Accelerator) વડે ઉત્પન્ન કરેલા ઉચ્ચ ઊર્જાના ઈલેક્ટ્રૉન બીમ વડે કરાઈ હતી. કલ્પના કરો કે આ માટે ઈલેક્ટ્રૉન બીમની ઊર્જા કયા ક્રમની હશે ? (ઈલેક્ટ્રૉનની સ્થિર દળ ઊર્જા = 0.511 M*e*V)

11.35 ઓરડાના તાપમાને (27 °C) અને 1 atm દબાણે રહેલા હિલીયમ વાયુમાં હિલિયમ પરમાણુ સાથે સંકળાયેલી ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો, તથા તેને આ પરિસ્થિતિમાં બે પરમાણુઓ વચ્ચેના સરેરાશ અંતર સાથે સરખાવો.

11.36 કોઈ ધાતુમાં 27 °C તાપમાને રહેલા ઈલેક્ટ્રૉનની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈની ગણતરી કરો અને તેને ધાતુમાં રહેલા બે ઈલેક્ટ્રૉન વચ્ચેના સરેરાશ અંતર સાથે સરખાવો જે લગભગ 2×10^{-10} m જેટલું આપેલ છે.

(***નોંધ :*** સ્વાધ્યાયો 11.35 અને 11.36 દર્શાવે છે કે સામાન્ય પરિસ્થિતિઓમાં વાયુના અણુઓ સાથે સંકળાયેલા તરંગ પેકેટ સંપાત થતા નથી, જ્યારે ધાતુમાં ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ પેકેટ એકબીજા પર પ્રબળ રીતે સંપાત થયેલા હોય છે. આ દર્શાવે છે કે, સામાન્ય વાયુમાં વાયુના અણુઓને એકબીજાથી અલગ પાડી શકાય છે, જ્યારે ધાતુમાં રહેલા ઈલેક્ટ્રૉનને એકબીજાથી અલગ પાડી શકાતા નથી. આ અભેદપણું ઘણા પાયાના અનુમાનો તરફ દોરી જાય છે જે તમે આગળ ઉપર ભૌતિકશાસ્ત્રના ઉચ્ચ અભ્યાસમાં જાણશો.

11.37 નીચે આપેલા પ્રશ્નોના જવાબ આપો :

(a) પ્રોટોન અને ન્યુટ્રૉનમાં રહેલા ક્વાર્કસ અપૂર્ણાંક વિદ્યુતભારો [(+2/3)*e*; (−1/3)*e*] ધરાવતા હોવાનું માનવામાં આવે છે. આવું મિલિકનના પ્રયોગો દરમિયાન કેમ જોવામાં ન આવ્યું ?

(b) e/m એ જોડાણમાં ખાસ નવું શું છે ? શા માટે આપણે એકલા e કે m વિશે વાત કરતા નથી ?

(c) શા માટે સામાન્ય દબાણે વાયુઓ અવાહક અને ખૂબ ઓછા દબાણે વાહક બનવા લાગે છે ?

(d) દરેક ધાતુને એક ચોક્કસ કાર્યવિધેય હોય છે. જો આપાત પ્રકાશ એકરંગી હોય તો શા માટે બધા ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન સમાન ઊર્જા સાથે બહાર નીકળતા નથી ? શા માટે ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન ઊર્જા વિતરણ ધરાવે છે ?

(e) ઈલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા અને વેગમાન, તેમની સાથે સંકળાયેલ દ્રવ્ય તરંગની આવૃત્તિ અને તરંગલંબાઈ સાથે આ સમીકરણો વડે સંકળાયેલા છે :

$$E = h\nu, \; p = \frac{h}{\lambda}$$

અહીં λનું ભૌતિક મહત્વ હોવા છતાં, νનાં મૂલ્ય (અને તેથી ફેઝ (કલા) ઝડપ, $\lambda\nu$)નું કોઈ ભૌતિક મહત્વ નથી. શા માટે ?

પરિશિષ્ટ (APPENDIX)

11.1 તરંગ-કણ દ્વિધા (ફ્લીપ-ફ્લોપ)નો ઈતિહાસ (The History of Wave-Particle Flip-Flop)

પ્રકાશ શું છે ? આ સવાલ માનવજાત માટે લાંબા સમયથી અનુત્તર હતો. પરંતુ આશરે ચાર સદી પહેલાં વિજ્ઞાન અને ઓદ્યોગિક યુગના પ્રારંભ સાથે વિજ્ઞાનીઓએ આયોજનબદ્ધ પ્રયોગો કર્યા. આ જ અરસામાં, પ્રકાશ શેનો બનેલો છે તેના સૈદ્ધાંતિક ખ્યાલો (મૉડેલો)નો વિકાસ થતો ગયો. વિજ્ઞાનની કોઈ પણ શાખામાં મૉડેલ બનાવવા માટે એ જરૂરી છે કે તે સમયગાળા દરમિયાન ઉપલબ્ધ બધાં પ્રાયોગિક અવલોકનોને તે સમજાવતું હોવું જોઈએ. આથી, સત્તરમી સદીમાં મળેલા કેટલાક અવલોકનોનો સારાંશ જાણવો યોગ્ય રહેશે.

એ સમયે પ્રકાશના જે ગુણધર્મો જાણીતા હતા તેમાં (a) પ્રકાશનું સીધી રેખામાં પ્રસરણ, (b) સમતલ અને વક્ર સપાટીઓ પરથી પરાવર્તન, (c) બે માધ્યમોની સીમા પાસે વક્રીભવન, (d) જુદા જુદા રંગમાં વિભાજન, (e) વધુ ઝડપનો સમાવેશ થાય છે. પ્રથમ ચાર ઘટનાઓ માટે યોગ્ય નિયમો ઘડવામાં આવ્યા હતા. ઉદાહરણ તરીકે, સ્નેલ દ્વારા 1621માં વક્રીભવન માટેનો નિયમ તારવવામાં આવ્યો હતો. ગૅલિલિયોના સમયથી શરૂ કરીને કેટલાય વિજ્ઞાનીઓએ પ્રકાશની ઝડપ માપવા માટે પ્રયત્ન કર્યો હતો. પરંતુ તેઓ તેમ કરી શક્યા ન હતા. એમણે ફક્ત એટલો જ નિષ્કર્ષ કાઢ્યો કે તે (પ્રકાશનો વેગ) તેમની માપનની સીમાથી વધુ હતો.

સત્તરમી સદીમાં પ્રકાશના બે મૉડેલ પણ આપવામાં આવ્યા હતા. સત્તરમી સદીના શરૂઆતના દશકાઓમાં ડેસ્કાર્ટસે (Descartes) સૂચવ્યું હતું કે પ્રકાશ કણોનો બનેલો છે, જ્યારે હાઈગેન્સે (Huygens) આશરે 1650-60ની આસપાસ સૂચવ્યું કે પ્રકાશ તરંગોનો બનેલો છે. ડેસ્કાર્ટસનું સૂચન એ ફક્ત તત્વજ્ઞાનનું મૉડેલ હતું જે કોઈ પ્રયોગ કે વૈજ્ઞાનિક તર્ક ધરાવતું ન હતું. ત્યારબાદ તરત 1660-70 ના ગાળામાં ન્યૂટને ડેસ્કાર્ટસના કણ સ્વરૂપ મૉડેલને આગળ ધપાવ્યું, જે *કોર્પસ્ક્યુલર* (*Corpuscular Theory*) *સિદ્ધાંત* તરીકે જાણીતું છે; તેને વૈજ્ઞાનિક સિદ્ધાંતોના આધારે વિકસાવ્યું અને તેના આધારે કેટલાક જાણીતા ગુણધર્મો સમજાવ્યા. પ્રકાશના તરંગ કે કણ સ્વરૂપના આ મૉડેલ્સ, એક અર્થમાં તો એકબીજાથી તદ્દન વિરુદ્ધ પ્રકારના છે. પરંતુ બંને મૉડેલ પ્રકાશના જાણીતા ગુણધર્મો સમજાવી શકતા હતા. બંનેમાંથી કયું માનવું તે વિચારવું જરૂરી ન હતું.

ત્યાર પછીની સદીઓમાં આ મૉડેલોના વિકાસનો ઈતિહાસ રસપ્રદ છે. 1669માં બાર્થોલીનસે (Bartholinus) કેટલાક સ્ફટિકો દ્વારા પ્રકાશના દ્વિ-વક્રીભવન (Double refraction) ની શોધ કરી, અને 1678માં હાઈગેન્સ (Huygens) એ ઝડપથી તેમના પ્રકાશનું તરંગ સ્વરૂપ દર્શાવતા સિધ્ધાંતના આધારે તેની સમજૂતી આપી. આમ છતાં, લગભગ સો વર્ષ સુધી, ન્યૂટનનું કણ સ્વરૂપ મૉડેલ દઢતા પૂર્વક માનવામાં આવતું હતું અને તરંગ મૉડેલની સરખામણીમાં વધુ સ્વીકારાયું હતું. તેનું અશતઃ કારણ આ મૉડેલની સરળતા અને અંશતઃ કારણ ન્યૂટનનું તે સમયના ભૌતિકવિજ્ઞાન પર પ્રભૂત્વ પણ હતું.

ત્યારબાદ 1801માં, યંગે બે-સ્લીટનો પ્રયોગ કર્યો અને વ્યતિકરણ શલાકાઓ મેળવી. આ ઘટના ફક્ત તરંગ સ્વરૂપ વડે સમજાવી શકાઈ હતી. તે પણ ખ્યાલમાં આવ્યું કે વિવર્તન પણ એવી ઘટના છે કે જે ફક્ત તરંગ સ્વરૂપ વડે જ સમજાવી શકાય છે. હકીકતમાં, તે પ્રકાશના માર્ગમાં દરેક બિંદુ પોતે પણ ગૌણ તરંગો ઉત્પન્ન કરે છે તેવા હાઈગેન્સના સિધ્ધાંતની કુદરતી ફલશ્રુતિ રૂપે મળે છે. પ્રકાશને કણોનો બનેલો ધારીને આ પ્રયોગો સમજાવી શકાતા નથી. 1810ની આસપાસ બીજી એક ઘટના ધ્રુવીભવનની શોધાઈ અને તે પણ ફક્ત તરંગ સ્વરૂપ દ્વારા સમજાવી શકાઈ. આમ, હાઈગેન્સનો તરંગ સ્વરૂપનો સિદ્ધાંત આગળ વધ્યો જ્યારે ન્યૂટનનો કણ સ્વરૂપનો સિદ્ધાંત પાછળ ધકેલાઈ ગયો. આ પરિસ્થિતિ લગભગ એક સદી સુધી રહી.

ઓગણીસમી સદીમાં પ્રકાશની ઝડપ શોધવા માટે વધુ સારા પ્રયોગો થયા. વધુ ચોક્કસાઈભર્યા પ્રયોગો દ્વારા શૂન્યાવકાશમાં પ્રકાશની ઝડપ માટે 3×10^8 m/s મૂલ્ય મળ્યું. 1860ની આસપાસ મેક્સવેલે વિદ્યુત ચુંબકત્વ માટેના સમીકરણો આપ્યા અને એમ જાણવા મળ્યું કે તે વખતે જાણીતી દરેક વિદ્યુતચુંબકીય ઘટનાને મેક્સવેલના ચાર સમીકરણો વડે સમજાવી શકાય છે. ત્યારે જ મેક્સવેલે દર્શાવ્યું કે વિદ્યુત અને ચુંબકીયક્ષેત્રો ખાલી અવકાશ (શૂન્યાવકાશ)માં વિદ્યુત ચુંબકીય તરંગોના રૂપમાં પ્રસરણ પામે છે. તેમણે આ તરંગોની ઝડપની ગણતરી કરી અને 2.998×10^8 m/s જેટલું સૈદ્ધાંતિક મૂલ્ય મેળવ્યું. આ મૂલ્યની પ્રાયોગિક મૂલ્ય સાથેની ગાઢ સંમતિએ દર્શાવ્યું કે પ્રકાશ વિદ્યુત ચુંબકીય તરંગોનો બનેલો છે. 1887માં હર્ટ્ઝે આ તરંગોની ઉત્પત્તિ અને તેમને પરખવા (તેમનું અસ્તિત્વ જાણવા)નું નિદર્શન કર્યું. આનાથી પ્રકાશના તરંગ સ્વરૂપના સિદ્ધાંતનો પાયો મજબૂત બન્યો. આપણે કહી શકીએ કે જો અઢારમી સદી પ્રકાશના કણ સ્વરૂપના મૉડેલની હતી, તો ઓગણીસમી સદી પ્રકાશના તરંગ સ્વરૂપના મૉડેલની હતી.

1850-1900ના ગાળા દરમિયાન ઉષ્મા અને તેને લગતી ઘટના કે જે ભૌતિકવિજ્ઞાનના તદ્દન અલગ ક્ષેત્રો છે તેને સંબંધિત ઘણા પ્રયોગો થયા. (વાયુનો) ગતિવાદ અને થર્મોડાયનેમિક્સ જેવા સિદ્ધાંતો અને મૉડેલો રજૂ થયા જેમણે, એક સિવાયની બીજી બધી ઘટનાઓ ખૂબ સફળતાપૂર્વક સમજાવી.

પરિશિષ્ટ

કોઈ પણ તાપમાને ($T \neq 0$ K) રહેલો દરેક પદાર્થ વિવિધ તરંગલંબાઈના વિકિરણોનું ઉત્સર્જન કરે છે. તે તેના પર આપાત થતા વિકિરણનું શોષણ પણ કરે છે. જે પદાર્થ તેના પર આપાત થતા બધા જ વિકિરણોનું શોષણ કરે તેને *કાળો પદાર્થ* કહેવાય. બિંદુવત દ્રવ્યમાન કે નિયમિત ગતિની જેમ આ પણ ભૌતિકવિજ્ઞાનનો એક આદર્શ ખ્યાલ છે. કાળા પદાર્થ વડે ઉત્સર્જાયેલા વિકિરણની તીવ્રતા વિરુદ્ધ તરંગ લંબાઈનો આલેખ *કાળા પદાર્થનો વર્ણપટ* (*Black Body Spectrum*) કહેવાય છે. એ દિવસો દરમિયાન કોઈ પણ સિદ્ધાંત કાળા પદાર્થના સંપૂર્ણ વર્ણપટને સમજાવી શક્યો ન હતો.

1900માં પ્લાન્ક ને એક નવો જ વિચાર સૂઝ્યો. તેમણે સૂચવ્યું કે જો આપણે વિકિરણનું ઉત્સર્જન, તરંગમાં જેમ સતત થાય છે, તેને બદલે શક્તિના અમુક જથ્થાઓના રૂપમાં થાય છે તેમ ધારી લઈએ તો કાળા પદાર્થના વર્ણપટને સમજાવી શકીએ. પ્લાન્કે પોતે પણ આ ક્વૉન્ટમને પ્રકાશના ગુણધર્મ તરીકે નહિ પણ ઉત્સર્જન કે શોષણના ગુણધર્મ તરીકે ગણ્યા હતા. તેમણે એક સૂત્ર તારવ્યું જે સમગ્ર વર્ણપટ સાથે સહમત હતું. આ એક ગૂંચવી નાખે તેવું તરંગ અને કણ સ્વરૂપનું મિશ્રણ હતું. જેમાં વિકિરણનું ઉત્સર્જન કણ સ્વરૂપે થાય છે, તે તરંગ તરીકે પ્રસરણ પામે છે અને પાછું કણ સ્વરૂપે શોષાય છે ! આ ઉપરાંત, આ સ્વરૂપે ભૌતિક વિજ્ઞાનીઓને પણ ગૂંચવણ ભરી પરિસ્થિતિમાં મૂક્યા. શું આપણે એક જ ઘટનાને સમજાવવા ફરીથી પ્રકાશના કણ સ્વરૂપને સ્વીકારવું જોઈએ ? તો પછી વ્યતિકરણ અને વિવર્તનની ઘટનાઓનું શું, જે પ્રકાશના કણ સ્વરૂપ વડે સમજાવી શકાતી નથી ?

પરંતુ ત્યાર બાદ તરત જ 1905માં, આઈન્સ્ટાઈને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરને પ્રકાશનું કણ સ્વરૂપ ધારીને સમજાવી. 1907માં ડીબાય (Debye) એ નીચા તાપમાને રહેલા ઘન પદાર્થોની વિશિષ્ટ ઉષ્માને ઘન સ્ફટીકમાં લેટાઈસ દોલનો (Lattice Vibrations)ના કણ સ્વરૂપ વડે સમજાવી. ભૌતિકવિજ્ઞાનના તદ્દન ભિન્ન ક્ષેત્રોમાં આવતી આ બંને ઘટનાઓ ફક્ત કણ સ્વરૂપ વડે સમજાવી શકાય છે, તથા તરંગ સ્વરૂપ વડે સમજાવી શકાતી નથી. 1923માં, કોમ્પ્ટનના ક્ષ-કિરણોનું વિવર્તન દર્શાવતા પ્રયોગોની સમજૂતી પણ કણ સ્વરૂપ તરફ દોરી ગઈ. આમ ગૂંચવાડો વધતો ગયો.

આ રીતે 1923 સુધી ભૌતિક વિજ્ઞાનીઓએ નીચે મુજબની પરિસ્થિતિઓનો સામનો કરવો પડ્યો. (a) એવી કેટલીક ઘટનાઓ હતી, જેમકે રેખીય પ્રસરણ, પરાવર્તન, વક્રીભવન, જે કણ સ્વરૂપ કે તરંગ સ્વરૂપ વડે સમજાવી શકાય છે. (b) એવી કેટલીક ઘટનાઓ જેમકે વિવર્તન અને વ્યતિકરણ, જે ફક્ત તરંગ સ્વરૂપ વડે જ સમજાવી શકાય છે પરંતુ કણ સ્વરૂપ વડે *નહીં.* (c) એવી કેટલીક ઘટનાઓ પણ છે, જેમકે કાળા પદાર્થનું વિકિરણ, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર અને કોમ્પ્ટન પ્રકીર્ણન જે ફક્ત કણ સ્વરૂપ વડે સમજાવી શકાય છે, જ્યારે તરંગ સ્વરૂપ વડે *નહીં.* તે સમય ગાળામાં કોઈ કે એવી યોગ્ય ટીપ્પણી પણ કરી હતી કે સોમવાર, બુધવાર અને શુક્રવારે પ્રકાશ કણ સ્વરૂપે વર્તે છે અને મંગળવાર, ગુરુવાર અને શનિવારે તે તરંગ સ્વરૂપે વર્તે છે, જ્યારે રવીવારે આપણે પ્રકાશ વિશે કોઈ વાત જ કરી શકતા નથી !

1924માં ડિ બ્રોગ્લીએ તરંગ-કણ દ્વૈત વિષેનો નવો સિદ્ધાંત આપ્યો, જેમાં તેમણે દર્શાવ્યું કે ફક્ત પ્રકાશના ફોટોન જ નહીં, પરંતુ દ્રવ્યના 'કણો' જેમ કે ઈલેક્ટ્રૉન અને પરમાણુઓ પણ દ્વૈત પ્રકૃતિ ધરાવે છે, જે ક્યારેક કણ સ્વરૂપે અને ક્યારેક તરંગ સ્વરૂપે વર્તે છે. તેમણે તેમના દ્રવ્યમાન, વેગ, વેગમાન (કણ ગુણધર્મો)ને તેમની તરંગ લંબાઈ અને આવૃત્તિ (તરંગના ગુણધર્મો) સાથે સાંકળતું સમીકરણ પણ આપ્યું ! 1927માં થોમસન, અને ડેવિસન અને ગર્મરે, અલગ અલગ પ્રયોગો દરમ્યાન, દર્શાવ્યું કે ઈલેક્ટ્રૉન તરંગ સ્વરૂપે વર્તતા હતા, જે ડિ બ્રોગ્લી દ્વારા દર્શાવવામાં આવેલી તરંગ લંબાઈનું સમર્થન કરતા હતા. તેમનો પ્રયોગ ઘન સ્ફટીકો વડે ઈલેક્ટ્રૉનના વિવર્તનનો હતો, જેમાં પરમાણુઓની સુવ્યવસ્થિત ગોઠવણી ગ્રેટીંગ તરીકે કામ કરે છે. ત્યાર બાદ તરત જ, બીજા 'કણો', જેમકે ન્યુટ્રૉન અને પ્રોટોનના વિવર્તનના પ્રયોગો પણ થયા અને તે પણ ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણને સમર્થન આપતા હતા. આમ, તરંગ કણ દ્વૈત સ્વરૂપને ભૌતિકવિજ્ઞાનના સ્થાપિત સ્વરૂપ તરીકે માન્યતા મળી. આ એવો સિદ્ધાંત હતો, કે જે ભૌતિક વિજ્ઞાનીઓએ વિચાર્યું હતું તે મુજબ ફક્ત પ્રકાશ જ નહીં પરંતુ કણો માટે પણ દરેક ઘટનાઓને સમજાવી શકતો હતો.

પરંતુ હજી સુધી તરંગ કણ દ્વૈત સ્વરૂપ માટે કોઈ સૈધ્ધાંતિક આધાર નહોતો. ડિ બ્રોગ્લીએ આપેલ સિદ્ધાંત ફક્ત કુદરતમાં મળી આવતી સંમિતિ (Symmetry)ના આધારે કરેલો ગુણાત્મક તર્ક હતો. તરંગ-કણ દ્વૈત સ્વરૂપ વધુમાં વધુ એક સિદ્ધાંત હતો, પરંતુ તે કોઈ મજબૂત મૂળભૂત વાદની ફલશ્રુતિ ન હતો. એ સત્ય છે કે બધા જ પ્રયોગો ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણનું સમાધાન કરે છે. પરંતુ ભૌતિકવિજ્ઞાન તે રીતે ચાલતું નથી. એક તરફ પ્રાયોગિક અનુમોદન જોઈએ અને બીજી તરફ રજુ કરેલ મૉડેલને સમજાવવા મજબુત વાદ પણ જોઈએ. ત્યારબાદના બે દશકાઓમાં આ બાબતમાં પ્રગતિ થઈ. 1928માં ડિરાકે વિકિરણ વિશે એક સિદ્ધાંત આપ્યો અને 1930માં હાઈઝનબર્ગ અને પાઉલીએ તેને મજબૂત ટેકો પૂરો પાડ્યો. તોમોનાગા (Tomonaga), સ્વિંગર (Schwinger) અને ફિનમેને (Feynman) 1940ના અંત ભાગમાં બીજા સુધારા કર્યા અને સિદ્ધાંતમાં રહેલી કેટલીક અસંગતતાઓ દૂર કરી. આ બધા જ સિદ્ધાંતોએ તરંગ-કણ દ્વૈત સ્વરૂપને સૈદ્ધાંતિક પાયો પુરો પાડ્યો.

જોકે આ વાત હજી આગળ જાય છે, જે હજી વધુ અઘરી (સંકિર્ણ) બનતી જાય છે અને તે આ નોંધની મર્યાદા બહાર છે. પણ જે કંઈ બન્યું તેની જરૂરી નોંધ આપણે કરી અને હાલ આપણે તેનાથી સંતોષ માનીએ. હવે ભૌતિકવિજ્ઞાનનાં હાલના સિદ્ધાંતોના આધારે નૈસર્ગિક રીતે એ સ્વીકારવામાં આવ્યું છે કે જુદા જુદા પ્રયોગોમાં વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણ તથા દ્રવ્યના કણો તરંગ અને કણ દ્વૈત સ્વરૂપના ગુણધર્મો દર્શાવે છે, અને ક્યારેક એક જ પ્રયોગ દરમિયાન જુદા જુદા વિભાગમાં તે દ્વૈત સ્વરૂપ દર્શાવે છે.