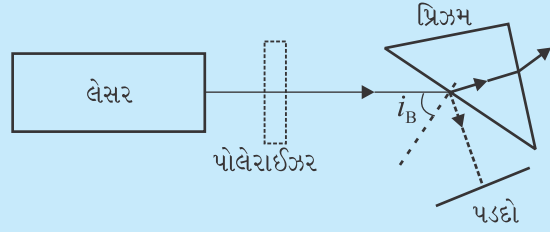


પૂર્ણ પારગમનનો એક ખાસ કિસ્સો

જ્યારે પ્રકાશ બે માધ્યમોની આંતર સપાટી પર આપાત થાય છે ત્યારે એવું જોવામાં આવ્યું છે કે તેનો કેટલોક ભાગ પરાવર્તન પામે છે અને અમુક ભાગનું પારગમન થાય છે. આને સંબંધિત સવાલ વિચારો : શું એવું શક્ય છે કે અમુક શરતોને આધિન સપાટી (કે જે સામાન્ય રીતે પરાવર્તક છે) પર આપાત એકરંગી પ્રકાશ કિરણપૂંજનું પરાવર્તન કર્યા સિવાય સંપૂર્ણ પારગમન થાય ? તમારા આશ્ચર્ય વચ્ચે, આનો જવાબ છે, હા.



એક સરળ પ્રયોગ ધ્યાનમાં લો અને શું થાય છે તે ચકાસો. લેસર, સારી ગુણવત્તા વાળો પોલરાઇઝર, એક પ્રિઝમ અને પડદાને અહીં દર્શાવેલ આકૃતિ મુજબ ગોઠવો.

ધારોકે લેસર ઉદ્ગમમાંથી ઉત્સર્જિત પ્રકાશ પોલરાઇઝરમાંથી પસાર થાય છે અને પ્રિઝમની સપાટી ઉપર બ્રુસ્ટર આપાત કોણ i_B એ આપાત થાય છે. હવે, પોલરાઇઝરને કાળજીપૂર્વક ભ્રમણ કરાવો અને તમે જોશો કે પોલરાઇઝરની કોઈ ચોક્કસ ગોઠવણ માટે પ્રિઝમ ઉપર આપાત પ્રકાશનું સંપૂર્ણ પણે પારગમન થાય છે અને પ્રિઝમની સપાટી પરથી કોઈ પ્રકાશનું પરાવર્તન થતું નથી. પરાવર્તિત ટપકું સંપૂર્ણપણે નાબુદ થાય છે.

10.7.2 પરાવર્તનથી ધ્રુવીભવન (Polarisation by Reflection)

આકૃતિ 10.23(b) દર્શાવે છે કે પારદર્શક માધ્યમ, ધારો કે પાણી, પરથી પ્રકાશનું પરાવર્તન થાય છે. અગાઉ જોયું તેમ, ટપકાં અને તીર સૂચવે છે કે આપાત અને વક્રીભૂત તરંગોમાં બંને પ્રકારના ધ્રુવીભવન હાજર છે. આપણે એક એવી સ્થિતિ દોરી છે કે જેમાં પરાવર્તિત તરંગ એ વક્રીભૂત તરંગને લંબરૂપે ગતિ કરતું હોય. પાણીમાં દોલન કરતા ઈલેક્ટ્રોન પરાવર્તિત તરંગ ઉત્પન્ન કરે છે. આ (બંને) માધ્યમમાં તરંગ વિકિરણ; એટલે કે વક્રીભૂત તરંગ, ને લંબદિશામાં ગતિ કરે છે. આકૃતિમાં દર્શાવેલ તીરો પરાવર્તિત તરંગને સમાંતર છે. આ દિશાની ગતિ એ પરાવર્તિત તરંગમાં ફાળો આપતી નથી. તેથી આકૃતિ દર્શાવે છે તેમ, પરાવર્તિત પ્રકાશ એ આકૃતિના સમતલને લંબ દિશામાં રેખીય ધ્રુવીભૂત હશે (ટપકાં વડે દર્શાવેલ છે). આની ચકાસણી પરાવર્તિત પ્રકાશને એનેલાઈઝર (વિશ્લેષક)માંથી જોઈને કરી શકાય. જ્યારે એનેલાઈઝરની અક્ષ એ આકૃતિના સમતલમાં, એટલે કે આપાત સમતલમાં, હશે તે વખતે પારગમન પામતી તીવ્રતા શૂન્ય હશે.

જ્યારે અધ્રુવીભૂત પ્રકાશ બે પારદર્શક માધ્યમોને છૂટી પાડતી સીમા (સપાટી) ઉપર આપાત થાય છે, ત્યારે પરાવર્તિત પ્રકાશ ધ્રુવીભૂત બને છે, જેમાં વક્રીભૂત અને પરાવર્તિત કિરણ એકબીજાને લંબ હોય તેવી સ્થિતિમાં વિદ્યુત સદિશ એ આપાત સમતલને લંબ હશે. આમ, આપણે જોયું કે જ્યારે પરાવર્તિત કિરણ વક્રીભૂત કિરણને લંબ હોય છે ત્યારે પરાવર્તિત તરંગ એ સંપૂર્ણ ધ્રુવીભૂત તરંગ બને છે. આ કિસ્સામાં આપાતકોણને બ્રુસ્ટર કોણ કહે છે અને તેને i_B વડે દર્શાવવામાં આવે છે. આપણે જોઈ શકીએ છીએ કે i_B એ ઘટ્ટ માધ્યમના વક્રીભવનાંક સાથે સંકળાયેલ છે. હવે, $i_B + r = \pi/2$ હોવાથી, આપણને સ્નેલના નિયમ પરથી નીચે મુજબ મળશે.

$$\mu = \frac{\sin i_B}{\sin r} = \frac{\sin i_B}{\sin (\pi/2 - i_B)}$$

$$= \frac{\sin i_B}{\cos i_B} = \tan i_B \quad (10.36)$$

જેને બ્રુસ્ટરનો નિયમ કહે છે.

ઉદાહરણ 10.9 અધ્રુવીભૂત પ્રકાશ એક સમતલ કાચની સપાટી પર આપાત થાય છે. પરાવર્તિત અને વક્રીભૂત કિરણો એકબીજાને લંબ થાય તે માટે કેટલો આપાતકોણ હશે ? ઉકેલ $i + r$ એ $\pi/2$ બરાબર થાય તે માટે, આપણે $\tan i_B = \mu = 1.5$ જોઈશું. જે $i_B = 57^\circ$ આપશે. આ હવા અને કાચ આંતરપૃષ્ઠ માટેનો બ્રુસ્ટર કોણ થશે.

ઉદાહરણ 10.9

સરળતા ખાતર, આપણે પ્રકાશના 90° એ થતા પ્રકીર્ણનની અને બ્રુસ્ટર કોણે થતા પરાવર્તનની ચર્ચા કરી. આ ખાસ પરિસ્થિતિમાં, વિદ્યુતક્ષેત્રના બેમાંથી એક લંબ ઘટક શૂન્ય હોય છે. બીજા કોઈ ખૂણે, બંને ઘટકો હાજર હોય છે પરંતુ તેમાંથી એક ઘટક બીજાની સરખામણીમાં પ્રબળ હોય છે. આ બે લંબ ઘટકો વચ્ચે કોઈ સ્થાયી કળા સંબંધ નથી હોતો, કારણકે આ બંને અધ્રુવીભૂત કિરણપૂંજના બે લંબ ઘટકોમાંથી મેળવેલા છે. જ્યારે આવા પ્રકાશને ભ્રમણ કરતા એનેલાઈઝર (પોલરોઈડ) માંથી જોવામાં આવે છે તો આપણને તીવ્રતામાં મહત્તમ અને ન્યૂનતમ દેખાય છે, પરંતુ તે સંપૂર્ણ અપ્રકાશિત દેખાતી નથી. આવા પ્રકારના પ્રકાશને અંશતઃ ધ્રુવીભૂત કહે છે.

ચાલો, આ પરિસ્થિતિને સમજવાનો પ્રયત્ન કરીએ. જ્યારે અધ્રુવીભૂત પ્રકાશ કિરણપૂંજ બે માધ્યમોને છૂટી પાડતી સપાટી પર બ્રુસ્ટર કોણે આપાત થાય ત્યારે ફક્ત જેના વિદ્યુતક્ષેત્ર સદિશ એ આપાત સમતલને લંબ હોય તેટલો જ પ્રકાશનો ભાગ પરાવર્તિત થાય છે. હવે, સારી ગુણવત્તાના પોલેરાઈઝરની મદદથી જો આપણે, જેનો વિદ્યુતક્ષેત્ર સદિશ આપાત સમતલને લંબ હોય તેવા બધા જ પ્રકાશને દૂર કરી દઈએ અને આવા પ્રકાશને પ્રિઝમની સપાટી પર બ્રુસ્ટર કોણે આપાત કરાવીએ તો તમે કોઈ પણ પ્રકારનું પરાવર્તન નહીં જુઓ અને પ્રકાશનું સંપૂર્ણ પારગમન થશે.

આપણે આ પ્રકરણની શરૂઆત એ વાત નોંધીને કરી કે કેટલીક ઘટનાઓ એવી છે જે ફક્ત તરંગવાદથી જ સમજાવી શકાય છે. યોગ્ય સમજણ મેળવવા માટે સૌપ્રથમ આપણે પરાવર્તન અને વક્રીભવન જેવી ઘટનાઓની ચર્ચા તરંગ પ્રકાશશાસ્ત્રના આધારે કરી કે જે પ્રકરણ-9માં કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્રના આધારે ભણ્યા હતા. ત્યારબાદ, આપણે યંગના બે-સ્લિટનાં પ્રયોગની ચર્ચા કરી કે જે પ્રકાશશાસ્ત્રના અભ્યાસમાં નિર્ણયાત્મક (Turning Point) સાબિત થઈ. અંતમાં આની સાથે સંકળાયેલા મુદ્દાઓ જેવાકે વિવર્તન, વિભેદન, ધ્રુવીભવન અને કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્રની માન્યતાની ચર્ચા કરી. હવે પછીના પ્રકરણમાં તમે નવા પ્રયોગો જોશો કે જે સદીના વળાંકે ઈ.સ. 1900ની આસપાસ નવા સિદ્ધાંતો તરફ દોરી ગયા.

સારાંશ

- હાઈગેન્સનો સિદ્ધાંત આપણને કહે છે કે તરંગઅગ્ર પરનું દરેક બિંદુ ગૌણ તરંગોનું ઉદ્ભવ છે, જેઓ એકબીજામાં ઉમેરાઈને પછીના સમયે તરંગઅગ્ર આપે છે.
- હાઈગેન્સની રચના આપણને કહે છે કે નવું તરંગઅગ્ર એ ગૌણ તરંગોના આગળની દિશામાંનું આવરણ (Envelope) છે. જ્યારે પ્રકાશની ઝડપ એ દિશાથી સ્વતંત્ર હોય ત્યારે ગૌણ તરંગો ગોળાકાર હશે. ત્યારે કિરણો બંને તરંગઅગ્રોને લંબ અને કોઈ પણ કિરણની દિશામાં માપેલો ગતિ માટેનો સમય સમાન હશે. આ સિદ્ધાંત એ બહુ જાણીતા પરાવર્તન અને વક્રીભવનના નિયમો આપે છે.

- જ્યારે પણ બે કે તેથી વધારે પ્રકાશ ઉદ્ગમો એક જ બિંદુને પ્રકાશિત કરતા હોય ત્યારે તરંગોના સંપાતીકરણનો નિયમ લાગુ પાડી શકાય છે. જ્યારે આપણે આ ઉદ્ગમોને કારણે આપેલ બિંદુ આગળ તીવ્રતાનો વિચાર કરીએ છીએ ત્યારે બે સ્વતંત્ર તીવ્રતાઓના સરવાળા ઉપરાંત એક વધારાનું વ્યતિકરણ-પદ આવે છે, પરંતુ આ પદ ફક્ત ત્યારે જ અગત્યનું બને છે જ્યારે તેની સરેરાશ અશૂન્ય હોય છે. પણ આવું ત્યારે જ બનશે જ્યારે ઉદ્ગમોને સમાન આવૃત્તિ હશે અને તેઓ વચ્ચે અચળ (સ્થાયી) કળા તફાવત હશે.
- યંગના પ્રયોગમાં, d જેટલું અંતર ધરાવતી બે સ્લિટો, સમાન અંતરે રહેલી અને λ/d જેટલું કોણીય અંતર ધરાવતી શલાકાઓ આપે છે. ઉદ્ગમ, સ્લિટોનું મધ્યબિંદુ અને મધ્યસ્થ પ્રકાશિત શલાકા એક જ રેખા પર આવેલા હોય છે. જો સ્લિટ આગળ આંતરેલ ખૂણાનું મૂલ્ય λ/d કરતા વધારે હોય તો વિસ્તૃત (Extended) ઉદ્ગમ શલાકાઓનો નાશ કરશે.
- a પહોળાઈ ધરાવતી એક સ્લિટ મધ્યસ્થ અધિકતમ સાથેની વિવર્તન ભાત આપે છે. $\pm \lambda/a$, $\pm 2\lambda/a$... વગેરે ખૂણાઓ આગળ તીવ્રતા ઘટીને શૂન્ય થાય છે, જેમાં વચ્ચે ક્રમિક નબળી તીવ્રતા ધરાવતા ગોણા અધિકતમો આવેલા હોય છે. વિવર્તન ટેલિસ્કોપના કોણીય વિભેદનને λ/D સુધી સિમિત કરે છે, જ્યાં, D એ વ્યાસ છે. આના કરતા નજીક આવેલા બે તારાઓ પ્રબળ રીતે એકબીજા પર આચ્છાદિત પ્રતિબિંબો આપે છે. તે જ રીતે, n જેટલો વક્રીભવનાંક ધરાવતા માધ્યમમાં કેન્દ્ર આગળ 2β જેટલો કોણ બનાવતો, માઈક્રોસ્કોપનો ઓબ્જેક્ટિવ $\lambda/(2n \sin \beta)$ અંતરે છૂટી પડેલી વસ્તુઓને જ અલગ જોઈ શકે છે, કે જે માઈક્રોસ્કોપની વિભેદન મર્યાદા છે. વિવર્તન એ પ્રકાશ કિરણના ખ્યાલની મર્યાદાઓ નક્કી કરે છે. તે વિવર્તનને કારણે ફેલાવવાનું શરૂ કરે તે પહેલાં, a પહોળાઈ ધરાવતું કિરણપૂંજ a^2/λ જેટલું અંતર કાપે છે; જેને ફેનલ લંબાઈ કહે છે.
- કુદરતી પ્રકાશ, દા.ત., સૂર્યમાંથી આવતો પ્રકાશ, એ અધ્રુવીભૂત હોય છે. આનો અર્થ એ થયો કે માપન દરમિયાન વિદ્યુત સંદિશો લંબ સમતલમાં શક્ય હોય તેવી બધી જ દિશાઓ ખૂબ ઝડપથી અને અસ્તવ્યસ્ત રીતે ધારણ કરે છે. પોલારોઈડ ફક્ત એક (કે જેની વિશિષ્ટ અક્ષને સમાંતર) ઘટકનું પારગમન કરે છે. પરિણામી પ્રકાશને રેખીય ધ્રુવીભૂત અથવા તલ ધ્રુવીભૂત કહે છે. જ્યારે આવા પ્રકારના પ્રકાશને બીજા પોલારોઈડમાંથી જોવામાં આવે છે કે જેની અક્ષને 2π કોણે પરિભ્રમણ કરાવવામાં આવે ત્યારે બે મહત્તમો અને ન્યૂનતમો જોવા મળે છે. ધ્રુવીભૂત પ્રકાશ કોઈ ચોક્કસ કોણે (જેને બ્રુસ્ટર કોણ કહે છે) પરાવર્તિત કરાવવાથી અને પૃથ્વીના વાતાવરણમાં $\pi/2$ જેટલા કોણે પ્રકીર્ણન કરાવવાથી પણ મેળવી શકાય છે.

ગહન વિચારણાના મુદ્દાઓ

- બિંદુવત્ ઉદ્ગમમાંથી નીકળતા તરંગો બધી જ દિશામાં ફેલાય છે, જ્યારે પ્રકાશ એ સાંકડા કિરણને સમાંતર ગતિ કરતો માલૂમ પડે છે. પ્રકાશની વર્તણૂકના બધા જ પાસાઓ સમજવા માટે હાઈગેન્સ, યંગ અને ફેનલના આંતરદર્શન અને પ્રયોગ અંગેની સમજણની જરૂર પડી હતી.
- યંગના પ્રયોગમાં દર્શાવ્યા મુજબ, તરંગો અંગેનું એક અગત્યનું નવું પાસું એ જુદા જુદા ઉદ્ગમોમાંથી નીકળતા કંપવિસ્તારોનું વ્યતિકરણ છે, જે સહાયક અને વિનાશક એમ બંને હોય છે.
- વિવર્તનની ઘટના એ કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્રની મર્યાદાઓ વ્યાખ્યાયિત કરે છે. માઈક્રોસ્કોપ અને ટેલિસ્કોપ માટે એકબીજાની ઘણી નજીક રહેલી વસ્તુઓને અલગ દર્શાવવાની ક્ષમતા એ પ્રકાશની તરંગલંબાઈ દ્વારા નક્કી થાય છે.
- મોટા ભાગની વ્યતિકરણ અને વિવર્તન અસરો સંગત તરંગો, જેવાકે હવામાં ધ્વનિતરંગો, માટે પણ જોવા મળે છે, પરંતુ ધ્રુવીભવન ઘટના એ લંબગત તરંગો જેવાકે પ્રકાશ તરંગોના ખાસ કિસ્સામાં જ જોવા મળે છે.

સ્વાધ્યાય

- 10.1** 589 nm તરંગલંબાઈ ધરાવતો એકરંગી પ્રકાશ હવામાંથી પાણીની સપાટી ઉપર આપાત થાય છે. તો (a) પરાવર્તિત અને (b) વક્રીભૂત પ્રકાશની તરંગલંબાઈ, આવૃત્તિ અને ઝડપ કેટલી હશે ? પાણીનો વક્રીભવનાંક 1.33 છે.
- 10.2** નીચેના આપેલા દરેક કિસ્સા માટે તરંગઅગ્રનો આકાર શું હશે ?
- (a) બિંદુવત્ત ઉદ્ગમમાંથી ફેલાતો પ્રકાશ.
- (b) બહિર્ગોળ લેન્સમાંથી નિર્ગમન પામતો પ્રકાશ કે જ્યારે બિંદુવત્ત ઉદ્ગમ તેના કેન્દ્ર ઉપર મૂકેલ હોય.
- (c) દૂર રહેલા તારાના પ્રકાશના તરંગઅગ્રનો પૃથ્વી દ્વારા આંતરાતો ભાગ.
- 10.3** (a) કાચનો વક્રીભવનાંક 1.5 છે. પ્રકાશની કાચમાં ઝડપ કેટલી હશે ?
(શૂન્યાવકાશમાં પ્રકાશની ઝડપ $3.0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ છે.)
- (b) શું પ્રકાશની કાચમાં ઝડપ પ્રકાશના રંગથી સ્વતંત્ર છે ? જો ના તો બે રાતા અને જાંબલી એ બે રંગોમાંથી કયો રંગ કાચના પ્રિઝમમાંથી ધીમે ગતિ કરશે ?
- 10.4** યંગના બે-સ્લિટના પ્રયોગમાં, બે સ્લિટો વચ્ચેનું અંતર 0.28 mm અને પડદો 1.4 m દૂર મૂકેલો છે. મધ્યસ્થ પ્રકાશિત શલાકા અને ચોથી પ્રકાશિત શલાકા વચ્ચેનું અંતર 1.2 cm જેટલું માપવામાં આવે છે. પ્રયોગમાં વપરાયેલ પ્રકાશની તરંગલંબાઈ શોધો.
- 10.5** λ જેટલી એકરંગી તરંગલંબાઈ ધરાવતા પ્રકાશ સાથે કરેલા યંગના બે-સ્લિટના પ્રયોગમાં, પડદા પરના જે બિંદુએ પથતફાવત λ જેટલો થાય ત્યાં તીવ્રતા K એકમ છે. જ્યાં પથ તફાવત $\lambda/3$ થાય તે બિંદુ આગળ પ્રકાશની તીવ્રતા કેટલી હશે ?
- 10.6** યંગના બે-સ્લિટ પ્રયોગમાં વ્યતિકરણ શલાકાઓ મેળવા માટે 650 nm અને 520 nm બે તરંગલંબાઈઓ ધરાવતા પ્રકાશ કિરણપૂંજનો ઉપયોગ કરવામાં આવે છે.
- (a) 650 nm તરંગલંબાઈ માટે પડદા પરની ત્રીજી પ્રકાશિત શલાકાનું મધ્યસ્થ અધિક્તમથી અંતર શોધો.
- (b) બંને તરંગલંબાઈઓને કારણે મળતી પ્રકાશિત શલાકાઓ એકબીજા પર સંપાત થાય તે માટેનું મધ્યસ્થ અધિક્તમથી ઓછામાં ઓછું અંતર શોધો.
- 10.7** બે-સ્લિટના પ્રયોગમાં 1 મી દૂર મૂકેલા પડદા પર એક શલાકાની કોણીય પહોળાઈ 0.2° મળે છે. વપરાયેલ પ્રકાશની તરંગલંબાઈ 600 nm છે. જો આખાય પ્રાયોગિક સાધનને પાણીમાં ડૂબાડવામાં આવે તો તે શલાકાની કોણીય પહોળાઈ કેટલી થશે ? પાણીનો વક્રીભવનાંક $4/3$ લો.
- 10.8** હવામાંથી કાચમાં જતા પ્રકાશ માટે બ્રુસ્ટર કોણ કેટલો હશે ? (કાચનો વક્રીભવનાંક = 1.5).
- 10.9** એક સમતલ પરાવર્તક સપાટી ઉપર $5000 \text{ \AA}$ તરંગલંબાઈનો પ્રકાશ આપાત થાય છે. પરાવર્તિત પ્રકાશની તરંગલંબાઈ અને આવૃત્તિ કેટલી હશે ? કયા આપાતકોણે, પરાવર્તિત કિરણ એ આપાતકિરણને લંબ હશે ?
- 10.10** 4 mm જેટલું અડચણ અને 400 nm તરંગલંબાઈ માટે અંતરનો અંદાજ માંડો કે જેના માટે કિરણ પ્રકાશવિજ્ઞાન એ સારી સંનિકટતા હોય.

વધારાના સ્વાધ્યાય

- 10.11** એક તારામાં હાઈડ્રોજન દ્વારા ઉત્સર્જિત 6563nm ની H_{α} રેખા $15\text{ \AA}$ જેટલી Red-Shift થયેલી જણાય છે. તારાની પૃથ્વીથી દૂર જવાની ઝડપનો અંદાજ શોધો.
- 10.12** કણવાદ એ પ્રકાશની માધ્યમ, ધારોકે પાણીમાં ઝડપ, શૂન્યાવકાશમાં પ્રકાશની ઝડપ કરતા વધારે હોવાનું અનુમાન કેવી રીતે કરે છે ? તે સમજાવો. શું પ્રાયોગિક રીતે પાણીમાં મપાયેલ પ્રકાશની ઝડપ આ અનુમાનની પુષ્ટિ કરે છે ? જો ના, તો પ્રકાશ માટે બીજું કયું માનસચિત્ર એ પ્રયોગ સાથે સુસંગતતા ધરાવે છે ?
- 10.13** તમે પુસ્તકમાં ભણી ગયા કે કેવી રીતે હાઈગેન્સનો સિદ્ધાંત પરાવર્તન અને વક્રીભવનના નિયમો તરફ દોરી જાય છે. આ જ સિદ્ધાંતનો ઉપયોગ કરી એક સમતલ અરીસાની સામે રાખેલ બિંદુવત્ પદાર્થના આભાસી પ્રતિબિંબનું અરીસાથી અંતર, અરીસાથી વસ્તુ અંતર જેટલું હોય છે તેમ સાબિત કરો.
- 10.14** આપણે પ્રકાશ તરંગના પ્રસરણની ઝડપને શક્યતઃ અસર કરતા હોય તેવા કેટલાક મુદ્દાઓની સૂચિ બનાવીએ.
- ઉદ્ગમનો પ્રકાર
 - પ્રસરણ દિશા
 - ઉદ્ગમની અને/અથવા અવલોકનકારની ગતિ
 - તરંગલંબાઈ
 - તરંગની તીવ્રતા
- ઉપરના કયા મુદ્દાઓ પર
- શૂન્યાવકાશમાં પ્રકાશની ઝડપ;
 - માધ્યમ (ધારોકે કાચ અથવા પાણી)માં પ્રકાશની ઝડપ;
- આધાર (જો રાખતા હોય તો) રાખે છે ?
- 10.15** ધ્વનિ તરંગો માટે, બે પરિસ્થિતિઓ : (i) સ્થિર ઉદ્ગમ; અવલોકનકાર ગતિમાં અને (ii) ઉદ્ગમ ગતિમાં, અવલોકનકાર સ્થિર, માટે આવૃત્તિના ફેરફાર (Shift)નું સૂત્ર થોડુંક જુદું પડે છે. પરંતુ શૂન્યાવકાશમાં પ્રકાશ તરંગો માટે આ બંને પરિસ્થિતિઓમાં ડોપ્લર અસર માટેનાં સૂત્રો એક સમાન જ માલૂમ પડે છે. આવું શા માટે છે તે સમજાવો. પ્રકાશ જ્યારે માધ્યમમાં ગતિ કરતો હોય ત્યારે પણ તમે શું આ સૂત્રો સમાન હશે તેમ અપેક્ષા રાખો છો ?
- 10.16** 600 nm તરંગલંબાઈ ધરાવતા પ્રકાશની મદદથી કરેલ બે-સ્લિટ પ્રયોગમાં, દૂર રાખેલા પડદા પર મળેલ શલાકાની કોણીય પહોળાઈ 0.1° મળે છે. બે સ્લિટો વચ્ચેનું અંતર કેટલું હશે ?
- 10.17** નીચેના પ્રશ્નોના ઉત્તર આપો.
- એક સ્લિટથી થતા વિવર્તન પ્રયોગમાં, સ્લિટની પહોળાઈ મૂળ પહોળાઈ કરતા બમણી કરવામાં આવે છે. આ કેવી રીતે મધ્યસ્થ વિવર્તન પટ્ટાની જાડાઈ અને તીવ્રતાને અસર કરશે ?
 - બે-સ્લિટથી કરાતા પ્રયોગમાં કેવી રીતે દરેક સ્લિટથી મળતું વિવર્તન એ વ્યતિકરણ ભાત સાથે સંબંધ ધરાવે છે ?
 - દૂરના ઉદ્ગમમાંથી આવતા પ્રકાશના પથમાં જ્યારે નાનું વર્તુળાકાર અડચણ મૂકવામાં આવે ત્યારે અડચણના પડછાયાના કેન્દ્ર ભાગ આગળ એક તેજસ્વી ટપકું જોવા મળે છે. સમજાવો શા માટે ?
 - 10 m લાંબા રૂમમાં બે વિદ્યાર્થીઓ 7 m ના વિભાગ પાડતી (Partition) દિવાલથી અલગ કરેલા છે. જો પ્રકાશ અને ધ્વનિ એ બંને તરંગો અડચણની ધારથી વાંકા વળી શકતા હોય તો શા માટે વિદ્યાર્થીઓ એક બીજા સાથે વાતચીત કરી શકે છે પરંતુ એકબીજાને જોઈ શકતા નથી ?

- (e) કિરણ પ્રકાશવિજ્ઞાન એ પૂર્વધારણા પર આધારિત છે કે પ્રકાશ સુરેખામાં ગતિ કરે છે. વિવર્તન અસરો (જ્યારે પ્રકાશ નાના અડચણ / સ્લિટમાંથી પસાર થાય છે અથવા નાના અડચણથી વાંકું વળે છે ત્યારે જોવા મળે છે) આ પૂર્વધારણાનું ખંડન કરે છે. તેમ છતાં કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્ર પૂર્વધારણા સામાન્ય વપરાશના પ્રકાશીય ઉપકરણોમાં પ્રતિબિંબનું સ્થાન અને બીજા ગુણધર્મો સમજાવવા માટે વપરાય છે. આની પૃષ્ઠિ કેવી રીતે કરશો ?
- 10.18** બે ટેકરીઓ પર રહેલા બે ટાવરો એકબીજાથી 40 km દૂર છે. તેમને જોડતી રેખા બરાબર વચ્ચે આવેલી ટેકરીની 50 m ઉપરથી પસાર થાય છે. નોંધપાત્ર વિવર્તન અસરો સિવાય બે ટાવરો વચ્ચે મોકલી શકાય તેવા રેડિયો તરંગોની સૌથી વધુ તરંગલંબાઈ કેટલી હશે ?
- 10.19** 500 nm તરંગલંબાઈ ધરાવતું સમાંતર પ્રકાશ કિરણપૂંજ એક સાંકડી સ્લિટ પર પડે છે અને પરિણામી વિવર્તનભાત 1 m દૂર રાખેલા પડદા ઉપર જોવામાં આવે છે. એવું જોવા મળે છે કે, પ્રથમ ન્યૂનત્તમ પડદાના કેન્દ્રથી 2.5 mm અંતરે આવેલ છે. સ્લિટની પહોળાઈ શોધો.
- 10.20** નીચેના પ્રશ્નોના જવાબ આપો.
- (a) જ્યારે પ્રમાણમાં નીચી ઊંચાઈએ ઉડતું હવાઈ જહાજ માથા પરથી પસાર થાય છે ત્યારે આપણે ઘણી વખત ટીવી પડદા પરના ચિત્રમાં ધ્રુજારી થતી નોંધીએ છીએ. આની શક્ય સમજૂતી જણાવો.
- (b) તમે પુસ્તકમાં શીખી ગયાં છો તેમ તરંગના સ્થાનાંતર માટેના રેખીય સંપાતપણાનો સિધ્ધાંત એ વિવર્તન અને વ્યતિકરણ ભાતોના તીવ્રતા વિતરણ માટેનો આધાર છે. આ સિધ્ધાંતનું વ્યાજબીપણું શું છે ?
- 10.21** એક સ્લિટ વિવર્તન ભાત મેળવતી વખતે આપણે નોંધ્યું કે $n\lambda/a$ ખૂણાઓ આગળ તીવ્રતા શૂન્ય થાય છે. સ્લિટને યોગ્ય ભાગમાં વહેંચીને તીવ્રતાની થતી નાબૂદી દ્વારા આનું વ્યાજબીપણું દર્શાવો.

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 (ઇલેક્ટ્રીક ડિસ્ચાર્જ)ના પ્રાયોગિક અવલોકનો ઘણી બધી ઐતિહાસિક શોધોનો તરફ દોરી ગયા. 1895માં રોન્ટ્જન (Roentgen) દ્વારા X-Ray (ક્ષ-કિરણો), તથા 1897માં જે. જે. થોમસન દ્વારા ઇલેક્ટ્રોનની 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 ટ્યૂબમાં રહેલા વાયુ પર બે ઇલેક્ટ્રોડ્સ (વિદ્યુત અગ્રો) વચ્ચે વિદ્યુતક્ષેત્ર લાગુ પાડતાં ડિસ્ચાર્જ (વિદ્યુત વિભાર) ઉત્પન્ન થાય છે. કેથોડની 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 પ્રસ્ફુરક (ફ્લોરેસન્ટ) માટે કેથોડ પરથી આવતા વિકિરણને કારણભૂત માનવામાં આવ્યું હતું. કેથોડ 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 અધિર્તકની પુષ્ટિ આપી. ડિસ્ચાર્જ ટ્યૂબ પર પરસ્પર લંબ રૂપે વિદ્યુત અને ચુંબકીયક્ષેત્રો લગાડીને જે. જે. થોમસને સૌ પ્રથમ આ કેથોડ કિરણોના કણોની ઝડપ અને વિશિષ્ટ વિદ્યુતભાર [વિદ્યુતભાર અને દ્રવ્યમાનનો ગુણોત્તર (e/m)]ના પ્રાયોગિક મૂલ્યો મેળવ્યા. તેઓ

(કેથોડ 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/m નું સ્વીકારેલ મૂલ્ય 1.76×10^{11} C/kg છે. આ ઉપરાંત, e/m નું મૂલ્ય કેથોડ (ઉત્સર્જક) માટે ઉપયોગમાં લેવાયેલા દ્રવ્ય/ધાતુના પ્રકાર પર, કે ડિસ્ચાર્જ ટ્યૂબમાં રાખેલા વાયુ પર, આધાર રાખતું ન હોવાનું માલુમ પડ્યું હતું. આ અવલોકન કેથોડ 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/m નું મૂલ્ય કેથોડ 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 ઈલેક્ટ્રોન (Electrons) એવું નામ આપ્યું, અને દર્શાવ્યું કે તેઓ દ્રવ્યનો મૂળભૂત, સાર્વત્રિક ઘટક છે. વાયુઓ વડે વિદ્યુત વહનના સૈદ્ધાંતિક અને પ્રાયોગિક નિરીક્ષણો દ્વારા ઈલેક્ટ્રોનની યુગ પ્રવર્તક શોધ કરવા બદલ તેમને 1906માં ભૌતિકવિજ્ઞાન માટેનું નોબેલ પારિતોષિક એનાયત થયું હતું. 1913માં, અમેરીકન ભૌતિકશાસ્ત્રી આર. એ. મિલિકને (R. A. Millikan, 1868-1953) ઈલેક્ટ્રોનનો 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 ક્વૉન્ટાઇઝ્ડ (ક્વૉન્ટાઇઝ્ડ) હોય છે. વિદ્યુતભાર (e) અને વિશિષ્ટ વિદ્યુતભાર (e/m)ના મૂલ્ય પરથી, ઈલેક્ટ્રોનનું દ્રવ્યમાન (m) શોધી શકાય.

11.2 ઈલેક્ટ્રોનનું ઉત્સર્જન (ELECTRON EMISSION)

આપણે જાણીએ છીએ કે ધાતુઓ મુક્ત ઈલેક્ટ્રોન (ઋણ વિદ્યુતભારિત કણો) ધરાવે છે જે તેમની વાહકતા માટે જવાબદાર છે. આમ છતાં, મુક્ત ઈલેક્ટ્રોન સામાન્ય રીતે ધાતુની સપાટી પરથી છટકી શકતા નથી. જો કોઈ ઈલેક્ટ્રોન ધાતુમાંથી બહાર નીકળવા પ્રયત્ન કરે, તો ધાતુની સપાટી ધન વિદ્યુતભાર પ્રાપ્ત કરે છે અને ઈલેક્ટ્રોનને પાછો ધાતુમાં ખેંચી લે છે. આમ, આયનોના આકર્ષાબળોના કારણે મુક્ત ઈલેક્ટ્રોન ધાતુની સપાટીમાં પકડાઈ રહે છે. પરિણામ સ્વરૂપે, જો ઈલેક્ટ્રોન આ આકર્ષાબળને ઓળંગી શકે (પહોંચી વળે) તેટલી પુરતી ઊર્જા ધરાવતો હોય તો જ તે ધાતુની સપાટીમાંથી બહાર નીકળી શકે. ધાતુની સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રોનને બહાર કાઢવા માટે અમુક ચોક્કસ લઘુત્તમ ઊર્જા આપવી પડે છે. ધાતુની સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રોનને 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. ઈલેક્ટ્રોનને 1 વોલ્ટના વિદ્યુત સ્થિતિમાન તફાવત વડે પ્રવેગિત કરતાં તેણે મેળવેલી ઊર્જાને એક ઈલેક્ટ્રોન વોલ્ટ કહે છે, એટલે કે $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$.

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 અશુદ્ધિ પ્રત્યે ખૂબ સંવેદી છે.

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

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

- તાપીય (થર્મીઓનિક) ઉત્સર્જન : યોગ્ય રીતે ગરમ કરીને મુક્ત ઈલેક્ટ્રોનને 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, ઇલેક્ટ્રોનને ધાતુની સપાટીમાંથી બહાર (ખેંચી) કાઢી શકાય.
- (iii) ફોટો-ઇલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન : જ્યારે યોગ્ય આવૃત્તિનો પ્રકાશ ધાતુ પર આપાત કરવામાં આવે ત્યારે ધાતુની સપાટીમાંથી ઇલેક્ટ્રોનનું ઉત્સર્જન થાય છે. આ ફોટો (પ્રકાશ)-ઉત્સર્જિત ઇલેક્ટ્રોનને ફોટો ઇલેક્ટ્રોન કહે છે.

11.3 ફોટો ઇલેક્ટ્રીક અસર (PHOTO ELECTRIC EFFECT)

11.3.1 હર્ટ્ઝના અવલોકનો (Hertz's Observations)

વિદ્યુતચુંબકીય તરંગોના પ્રયોગો દરમિયાન, 1887માં હેન્રી હર્ટ્ઝે (Heinrich Hertz, 1857-1894) ફોટો-ઇલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જનની ઘટના શોધી હતી. સ્પાર્કના ડિસ્ચાર્જ દ્વારા વિદ્યુતચુંબકીય તરંગોના ઉત્સર્જનના પ્રાયોગિક અવલોકન દરમિયાન હર્ટ્ઝે અવલોકન કર્યું કે જ્યારે ઉત્સર્જક પ્લેટને આર્ક લેમ્પના અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ વડે પ્રકાશિત કરવામાં આવે ત્યારે) ડિટેક્ટર 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 ઇલેક્ટ્રોન તરીકે ઓળખીએ છીએ. જ્યારે ધાતુની સપાટી પર પ્રકાશ આપાત થાય, ત્યારે (ધાતુની) સપાટી પાસેના કેટલાક ઇલેક્ટ્રોન આપાત વિકિરણોમાંથી, પદાર્થની સપાટીમાં રહેલા ધન આયનોના આકર્ષણ બળને ઓળંગી શકાય એટલી, પુરતી ઊર્જા મેળવે છે. આપાત પ્રકાશમાંથી પુરતી ઊર્જા મેળવ્યા પછી ઇલેક્ટ્રોન 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 ઇલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જનની ઘટનાનો અભ્યાસ કર્યો હતો.

લેનાર્ડે (1862-1947) અવલોકન કર્યું કે, જ્યારે બે ઇલેક્ટ્રોડ (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 ઇલેક્ટ્રોનનું ઉત્સર્જન

થાય છે, જે વિદ્યુતક્ષેત્ર દ્વારા ધન કલેક્ટર પ્લેટ A તરફ આકર્ષાય છે. ઈલેક્ટ્રોન્સ 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.

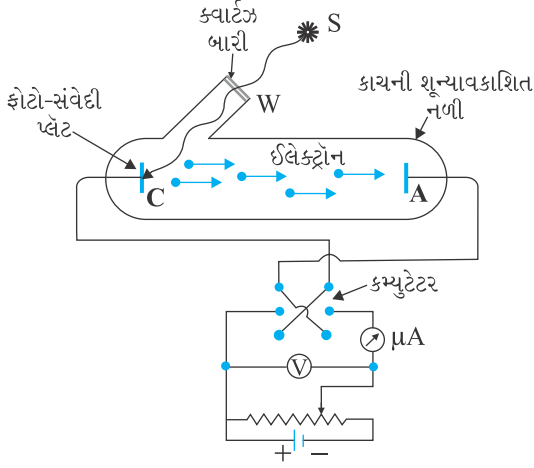
1888માં હોલવાશે વધુ અભ્યાસ કર્યો અને ઈલેક્ટ્રોસ્કોપ સાથે ઋણ વિદ્યુતભારિત ઝિંક પ્લેટ જોડી. તેમને એવું જોવા મળ્યું કે જ્યારે ઝિંક પ્લેટ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરવામાં આવ્યો, ત્યારે પ્લેટે તેનો વિદ્યુતભાર ગુમાવ્યો. ઉપરાંત વિદ્યુતભાર રહિત ઝિંક પ્લેટ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરતાં, તે ધન વિદ્યુતભારિત 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 ઈલેક્ટ્રોનની શોધ બાદ એ સ્પષ્ટ થયું કે, ઉત્સર્જક પ્લેટ પર પ્રકાશ આપાત કરતાં તેમાંથી ઈલેક્ટ્રોન્સ ઉત્સર્જિત થાય છે. ઋણ વિદ્યુતભારના કારણે ઉત્સર્જિત ઈલેક્ટ્રોન 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 ઈલેક્ટ્રોન ઉત્સર્જિત થતો નથી. આ લઘુત્તમ આવૃત્તિ ઉત્સર્જક પ્લેટના દ્રવ્યના પ્રકાર (પ્રકૃતિ) પર આધાર રાખે છે.

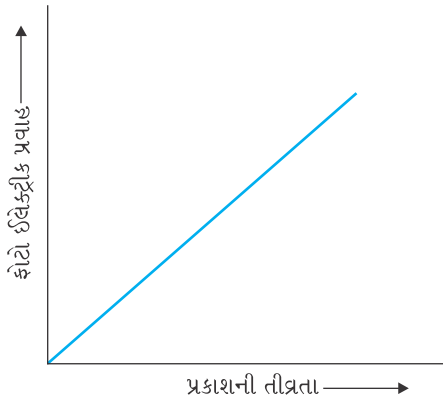
એવું જાણવા મળ્યું હતું કે ઝિંક, કેડમિયમ, મેગ્નેશિયમ વગેરે જેવી કેટલીક ધાતુઓ સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રોનનું ઉત્સર્જન કરવા માટે ટૂંકી આવૃત્તિવાળા અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશને જ પ્રતિભાવ આપે છે. જો કે કેટલીક આલ્કલી ધાતુઓ જેમકે લિથિયમ, સોડિયમ, પોટેશિયમ, સિઝિયમ અને રૂબિડિયમ જેવી આલ્કલી ધાતુઓ દૃશ્ય પ્રકાશ માટે પણ સંવેદનશીલ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

11.4 ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરનો પ્રાયોગિક અભ્યાસ (Experimental Study of Photoelectric Effect)

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 ઈલેક્ટ્રોન ઉત્સર્જિત થાય છે અને બેટરી વડે ઉત્પન્ન થયેલા વિદ્યુતક્ષેત્રના કારણે (કલેક્ટર) પ્લેટ A દ્વારા એકત્રિત થાય છે. બેટરી, 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 કમ્યુટેટર 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 ઈલેક્ટ્રોન તેના તરફ આકર્ષાય છે. ઈલેક્ટ્રોનના 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 ઇલેક્ટ્રીક અસર સમજવા માટે પ્રાયોગિક ગોઠવણી



આકૃતિ 11.2 પ્રકાશની તીવ્રતા સાથે ફોટો ઇલેક્ટ્રીક પ્રવાહનો ફેરફાર

વિદ્યુતપ્રવાહ માઈક્રોએમીટર (μA) વડે માપી શકાય છે. ઉત્સર્જક પ્લેટ Cની સાપેક્ષે કલેક્ટર પ્લેટ A પરનું સ્થિતિમાન બદલીને ફોટો ઇલેક્ટ્રીક 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 ઇલેક્ટ્રીક 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 ઇલેક્ટ્રોન કલેક્ટર A તરફ આકર્ષાય. આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ અને સ્થિતિમાન અચળ રાખીને, વિકિરણની તીવ્રતા બદલવામાં આવે છે અને દરેક વખતે પરિણામી ફોટો ઇલેક્ટ્રીક 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 ઉત્સર્જતા ફોટો ઇલેક્ટ્રોનની સંખ્યાના સમપ્રમાણમાં હોય છે. આ દર્શાવે છે કે એક સેકન્ડમાં ઉત્સર્જાયેલા ઇલેક્ટ્રોનની સંખ્યા આપાત પ્રકાશની તીવ્રતાના સમપ્રમાણમાં હોય છે.

11.4.2 ફોટો ઇલેક્ટ્રીક 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 ઇલેક્ટ્રીક પ્રવાહ માપીએ. એમ જાણવા મળે છે કે પ્રવેગક (ધન) સ્થિતિમાનના વધારા સાથે ફોટો ઇલેક્ટ્રીક પ્રવાહ પણ વધે છે. કોઈ એક તબક્કે પ્લેટ A પરના ચોક્કસ ધન સ્થિતિમાન માટે, ઉત્સર્જાયેલા બધા જ ઇલેક્ટ્રોન પ્લેટ A પર પહોંચી જાય છે અને ફોટો ઇલેક્ટ્રીક પ્રવાહ મહત્તમ બને છે અથવા સંતૃપ્ત (Saturate) થાય છે. જો આપણે પ્લેટ A પરનું પ્રવેગક સ્થિતિમાન હજી પણ વધારીએ તો ફોટો ઇલેક્ટ્રીક પ્રવાહ વધતો નથી. ફોટો ઇલેક્ટ્રીક પ્રવાહના આ મહત્તમ મૂલ્યને સંતૃપ્ત પ્રવાહ (Saturation Current) કહે છે. સંતૃપ્ત પ્રવાહ, ઉત્સર્જક પ્લેટ C પરથી ઉત્સર્જાયેલા બધા જ ફોટો ઇલેક્ટ્રોન 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 ઇલેક્ટ્રોન અપાકર્ષાય છે અને ફક્ત

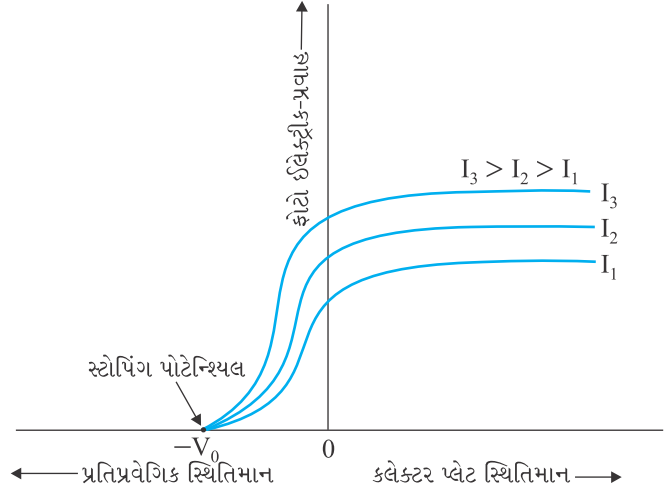
વિકિરણ અને દ્રવ્યની દ્વિત પ્રકૃતિ

પુરતી ઊર્જા ધરાવતા ઈલેક્ટ્રોન જ કલેક્ટર પ્લેટ A સુધી પહોંચે છે. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ ઝડપથી ઘટતો જાય છે અને પ્લેટ A પરના ઋણ સ્થિતિમાનના ચોક્કસ રીતે વ્યાખ્યાયિત કાંતિમૂલ્ય, 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 ઈલેક્ટ્રોનના સંદર્ભમાં આ અવલોકનનું અર્થઘટન સરળ છે. ધાતુમાંથી ઉત્સર્જાયેલા બધા જ ફોટો ઈલેક્ટ્રોનની ઊર્જા એક સમાન નથી હોતી. જ્યારે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ એટલું પુરતું હોય કે જે સૌથી વધુ ઊર્જાવાન ફોટો ઈલેક્ટ્રોન, કે જેમની મહત્તમ ગતિઊર્જા ($K_{\max}$) હોય, તેમને પણ અપાકર્ષિત કરીને કલેક્ટર પર પહોંચવામાંથી રોકી શકે, ત્યારે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ શૂન્ય થાય છે, તેથી

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

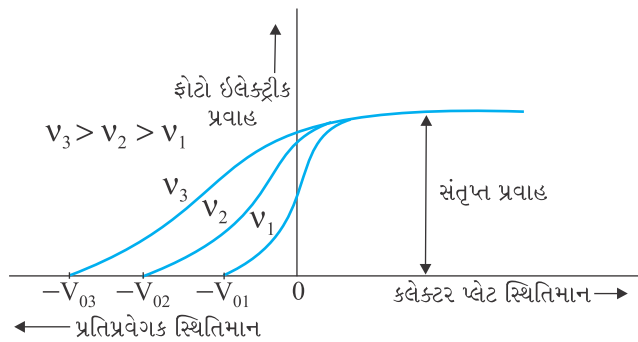
આપણે આ પ્રયોગને આપાત વિકિરણની તે જ આવૃત્તિ માટે, પણ વધુ તીવ્રતાઓ I_2 અને I_3 ($I_3 > I_2 > I_1$) માટે ફરીથી કરી શકીએ. આપણે એ નોંધીએ કે, સંતૃપ્ત પ્રવાહો (Saturation Currents) હવે વધારે ઊંચા મૂલ્યના મળે છે. આ દર્શાવે છે કે, આપાત વિકિરણની તીવ્રતાને સપ્રમાણ રીતે એક સેકન્ડ દીઠ વધુ ઈલેક્ટ્રોન ઉત્સર્જિત થાય 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 ઈલેક્ટ્રોનની મહત્તમ ગતિઊર્જા પ્રકાશની આવૃત્તિ અને ઉત્સર્જક પ્લેટના દ્રવ્ય પર આધાર રાખે છે, પરંતુ તે આપાત વિકિરણની તીવ્રતા પર આધાર રાખતી નથી.



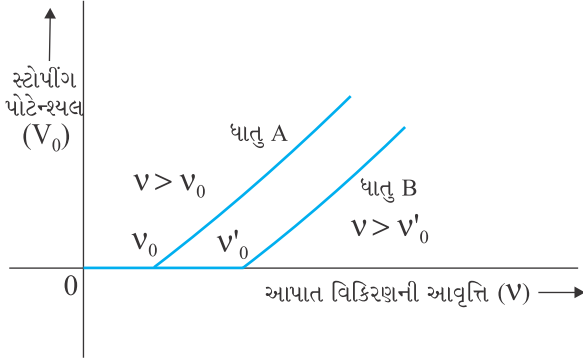
આકૃતિ 11.3 આપાત પ્રકાશની જુદી જુદી તીવ્રતાઓ માટે, કલેક્ટર પ્લેટ સ્થિતિમાન સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહનો ફેરફાર

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

હવે આપણે આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ 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 ઈલેક્ટ્રીક 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 ઈલેક્ટ્રોનની 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 આવૃત્તિઓ માટે કલેક્ટર પ્લેટ સ્થિતિમાન સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહનો ફેરફાર



આકૃતિ 11.5 આપેલ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્ય માટે આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ V સાથે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ V_0 નો ફેરફાર

પરથી નોંધો કે, જો આવૃત્તિઓ $V_3 > V_2 > V_1$ ક્રમમાં હોય તો સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ $V_{03} > V_{02} > V_{01}$ ક્રમમાં છે. આ દર્શાવે છે કે, આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ જેમ વધુ, તેમ ફોટો ઇલેક્ટ્રોનની ગતિઊર્જા પણ વધુ. પરિણામ સ્વરૂપે, તેમને પુરેપુરા અટકાવવા માટે વધુ પ્રતિવેગક 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,

- આપેલ ફોટો સેન્સિટીવ (પ્રકાશ સંવેદી) દ્રવ્ય માટે આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ સાથે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ રેખીય રીતે બદલાય છે.
- કોઈ ચોક્કસ લઘુત્તમ કટ ઓફ આવૃત્તિ V_0 માટે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ શૂન્ય હોય છે.

આ અવલોકનો બે બાબતો સૂચવે છે :

- ફોટો ઇલેક્ટ્રોનની મહત્તમ ગતિઊર્જા આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ સાથે રેખીય રીતે બદલાય છે, પરંતુ તે તીવ્રતા પર આધાર રાખતી નથી.
- જો આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ V કટ ઓફ આવૃત્તિ V_0 કરતાં ઓછી હોય તો તીવ્રતા ગમે તેટલી વધુ હોય તો પણ કોઈ ફોટો ઇલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન થતું નથી.

આ લઘુત્તમ કટ ઓફ આવૃત્તિ V_0 ને 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 સેલિનિયમ વધુ સંવેદનશીલ છે. એક જ પ્રકાશ-સંવેદી પદાર્થ જુદી જુદી તરંગલંબાઈના પ્રકાશને પણ જુદો જુદો પ્રતિભાવ આપે છે. ઉદાહરણ તરીકે અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ તાંબામાં ફોટો ઇલેક્ટ્રીક 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 ઇલેક્ટ્રીક 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.

- આપેલ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્ય અને આપાત વિકિરણની આપેલ આવૃત્તિ (થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ કરતાં વધુ) માટે, ફોટો ઇલેક્ટ્રીક પ્રવાહ આપાત પ્રકાશની તીવ્રતાના સમપ્રમાણમાં હોય છે (આકૃતિ 11.2).
- 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).
- આપેલ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્ય માટે, આપાત પ્રકાશની એક ચોક્કસ લઘુત્તમ કટ ઓફ આવૃત્તિ હોય છે, જેને થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ કહે છે, તેના કરતાં ઓછી આવૃત્તિ માટે ગમે તેટલી ઊંચી તીવ્રતાનો પ્રકાશ હોય તો પણ, ફોટો ઇલેક્ટ્રોનનું ઉત્સર્જન થતું નથી. થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિથી વધુ આવૃત્તિ માટે, સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ અથવા સમતુલ્ય રીતે ઉત્સર્જિત ફોટો ઇલેક્ટ્રોનની 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 નહીં.

પ્રકાશના તરંગ સ્વરૂપ મુજબ, ધાતુની (જેના પર વિકિરણની કિરણાવલિ પડે છે તેની) સપાટી પર રહેલા ઈલેક્ટ્રોન્સ 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 ઈલેક્ટ્રોન દ્વારા શોષાય છે. આ ચિત્ર મુજબ, સપાટી પરના ફોટો ઈલેક્ટ્રોનની મહત્તમ ગતિઊર્જા, પ્રકાશની તીવ્રતાના વધારા સાથે વધવી જોઈએ. વળી, (આપાત) પ્રકાશની આવૃત્તિ ગમે તે હોય તો પણ પુરતી તીવ્રતાવાળી વિકિરણની કિરણાવલિ (પુરતા સમયમાં) ઈલેક્ટ્રોનને 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 ઈલેક્ટ્રોન દ્વારા ઊર્જાનું શોષણ વિકિરણના સમગ્ર તરંગ અગ્ર પર સતત થવું જોઈએ. ખુબ મોટી સંખ્યાના ઈલેક્ટ્રોન ઊર્જાનું શોષણ કરતાં હોવાથી એકમ સમયમાં ઈલેક્ટ્રોન દીઠ શોષાયેલી ઊર્જા ઘણી ઓછી હોય છે. સ્પષ્ટ ગણતરીઓ પરથી અંદાજ મેળવી શકાય કે એક ઈલેક્ટ્રોનને 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 ઈલેક્ટ્રોન



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 ઉત્સર્જિત વિકિરણને બીજી રીતે સમજાવવા ઉદ્દીપ્ત ઉત્સર્જન (Stimulated Emission)ની કલ્પના, બ્રહ્માંડની ઉત્પત્તિ અંગે આધુનિક કોસ્મોલોજીની શરૂઆત કરનાર સ્થિત મોડલ, દળદાર બોઝોન્સના વાયુ માટે ક્વોન્ટમ આંકડાશાસ્ત્ર (Quantum Statistics) અને ક્વોન્ટમ યંત્ર શાસ્ત્રના પાયાના સિદ્ધાંતો માટેનું વિવેચનપૂર્ણ વિશ્લેષણ. 1921માં તેમને સૈદ્ધાંતિક ભૌતિકવિજ્ઞાન અને ફોટોઈલેક્ટ્રીક અસર માટે નોબેલ પારિતોષીક એનાયત કરવામાં આવ્યું હતું.

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

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

સાથે ઉત્સર્જન પામે છે.

વધુ પ્રબળ રીતે બંધીત ઈલેક્ટ્રોન 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 ઈલેક્ટ્રોનની સંખ્યા પણ વધે છે. આમ છતાં ઉત્સર્જાયેલા ફોટો ઈલેક્ટ્રોનની 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 ઈલેક્ટ્રોન દ્વારા શોષણ દરમિયાન ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર ઉદ્ભવે છે. વિકિરણની તીવ્રતા (જે એકમ સમયમાં, એકમ ક્ષેત્રફળ પર આપાત થતા ઊર્જા ક્વોન્ટમની 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

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

સમીકરણ (11.3) દર્શાવે છે કે જેમ કાર્ય વિધેય ϕ_0 વધુ હોય તેમ ફોટો ઈલેક્ટ્રોનને ઉત્સર્જિત કરવા માટે જરૂરી લઘુત્તમ કે શ્રેણીલ આવૃત્તિ ν_0 વધારે ઊંચી હોય છે. આમ ધાતુની સપાટી માટે એક શ્રેણીલ 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 ક્વોન્ટમની સંખ્યાના સમપ્રમાણમાં હોય છે. જેટલી વધુ સંખ્યાનાં ઊર્જા ક્વોન્ટમ મળતા હોય તેટલી વધુ સંખ્યાના ઈલેક્ટ્રોન આ ઊર્જા ક્વોન્ટમ શોષે અને પરિણામે ધાતુમાંથી ($\nu > \nu_0$ માટે) વધુ સંખ્યાના ઈલેક્ટ્રોન 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 ઈલેક્ટ્રોન દ્વારા પ્રકાશ ક્વોન્ટમનું શોષણ છે. આ પ્રક્રિયા તાત્ક્ષણિક છે. આમ તીવ્રતા, એટલે કે એકમ સમયમાં એકમ ક્ષેત્રફળ દીઠ (આપાત) વિકિરણના ક્વોન્ટમની 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 ઈલેક્ટ્રોન દ્વારા પ્રકાશ ક્વોન્ટમનું શોષણ) માં કેટલા ઈલેક્ટ્રોન ભાગ લઈ શકશે અને તેથી, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ રચશે.

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

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

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

આ એક અગત્યનું પરિણામ છે. તે દર્શાવે છે કે V_0 વિરુદ્ધ ν નો 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. h ના જાણીતા મૂલ્ય પરથી તેમણે પ્લાન્કના અચળાંક h નું મૂલ્ય શોધ્યું. તદ્દન જુદી રીતે મેળવેલ આ મૂલ્ય પ્લાન્કના અચળાંક ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$)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_0 ના 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 ચોક્કસાઈપૂર્વક 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 ક્વોન્ટમનો બનેલો હોય, જે દરેકની ઊર્જા $h\nu$ જેટલી હોય.

શું પ્રકાશના ક્વોન્ટમની ઊર્જાને કણ સાથે સાંકળી શકાય ? આઈન્સ્ટાઈને એક અગત્યનું પરિણામ એ તારવ્યું કે પ્રકાશ ક્વોન્ટમને વેગમાન ($h\nu/c$) સાથે સાંકળી શકાય. ઊર્જા અને વેગમાનનું ચોક્કસ મૂલ્ય સ્પષ્ટ રીતે દર્શાવે છે કે, પ્રકાશના ક્વોન્ટમને 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 ઈલેક્ટ્રોન્સ દ્વારા ક્ષ-કિરણોના પ્રકીર્ણનના પ્રયોગો દ્વારા મળ્યો. 1921માં આઈન્સ્ટાઈનને તેમના સૈદ્ધાંતિક ભૌતિકવિજ્ઞાન અને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર માટેના યોગદાન બદલ નોબેલ પારિતોષિક એનાયત કરવામાં આવ્યું. 1923માં મિલિકનને પ્રાથમિક વિદ્યુતભાર (નું મૂલ્ય શોધવા બદલ) અને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર પરના કાર્ય બદલ નોબેલ પારિતોષિક એનાયત થયું.



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

- વિકિરણની દ્રવ્ય સાથેની આંતરક્રિયા દરમિયાન, વિકિરણ જાણે કે કણ હોય તેમ વર્તે છે જેને ફોટોન કહે છે.
- દરેક ફોટોનની ઊર્જા $E (= h\nu)$ અને વેગમાન $p (= h\nu/c)$ છે, જ્યારે ઝડપ, પ્રકાશની ઝડપ c જેટલી છે.
- 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 ભલે તે 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.
- ફોટોન વિદ્યુતની દૃષ્ટિએ તટસ્થ છે અને તેઓ વિદ્યુત કે ચુંબકીય ક્ષેત્રો વડે વિચલન અનુભવતા નથી.
- ફોટોન-કણ સંઘાત (અથડામણ) (જેમકે ફોટોન-ઇલેક્ટ્રોન 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. ઉત્સર્જિત 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 ઉત્સર્જિત થશે?

ઉકેલ

- (a) દરેક ફોટોનની ઊર્જા

$$E = h\nu = (6.63 \times 10^{-34} \text{ Js})(6.0 \times 10^{14} \text{ Hz}) \\ = 3.98 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- (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 $P = NE$. 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 11.2 સિઝિયમનું કાર્ય વિધેય 2.14 eV છે.

- (a) સિઝિયમની થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ શોધો, અને (b) જો 0.60 V ના 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

$$\nu_0 = \frac{\phi_0}{h} = \frac{2.14 \text{ eV}}{6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}} \\ = \frac{2.14 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}} = 5.16 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

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

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

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

$$\text{અથવા } \lambda = hc/(eV_0 + \phi_0)$$

$$= \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})}{(0.60 \text{ eV} + 2.14 \text{ eV})} = \frac{19.89 \times 10^{-26} \text{ Jm}}{(2.74 \text{ eV})}$$

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

ઉદાહરણ 11.3 દૃશ્ય 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) દૃશ્ય પ્રકાશ વિસ્તારમાં (i) જાંબલી છેડે, (ii) પીળા-લીલા રંગની સરેરાશ તરંગલંબાઈ આગળ અને (iii) લાલ છેડે, ફોટોનની ઊર્જા (eV)માં કેટલી હશે ? ($h=6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$ અને $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 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 દૃશ્ય પ્રકાશ સાથે કાર્ય કરે ?

ઉકેલ

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

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

$$= \frac{1.989 \times 10^{-25} \text{ Jm}}{\lambda}$$

- (i) જાંબલી રંગ માટે $\lambda_1 = 390 \text{ nm}$ (ટૂંકી તરંગલંબાઈનો છેડો)

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

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

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

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

$$= 3.62 \times 10^{-19} \text{ J} = 2.26 \text{ eV}$$

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

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

$$= 2.62 \times 10^{-19} \text{ J} = 1.64 \text{ eV}$$

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



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 ઈલેક્ટ્રોન, પ્રોટોન વગેરે) પણ તરંગ સ્વરૂપ કેમ ન દર્શાવે ? 1924માં ફ્રેન્ચ ભૌતિકવિજ્ઞાની લ્યુઈસ વિક્ટર 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.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (11.5)$$

જ્યાં m એ કણનું દ્રવ્યમાન અને v તેની ઝડપ છે. સમીકરણ (11.5)ને ડિ બ્રોગ્લીનું સમીકરણ કહે છે. અને દ્રવ્ય તરંગની તરંગ લંબાઈ λ ને 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,

$$p = h\nu / c \quad (11.6)$$

આથી,

$$\frac{h}{p} = \frac{c}{\nu} = \lambda \quad (11.7)$$

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 બોલ માટે ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ સહેલાઈથી ગણી શકાય :

વિકિરણ અને દ્રવ્યની દ્વૈત પ્રકૃતિ

ફોટો સેલ (PHOTO CELL)

ફોટોસેલ એ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરનો ટેકનોલોજીકલ 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 ઊંચું વીજદબાણ ધરાવતી (High-tension) બેટરી 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.

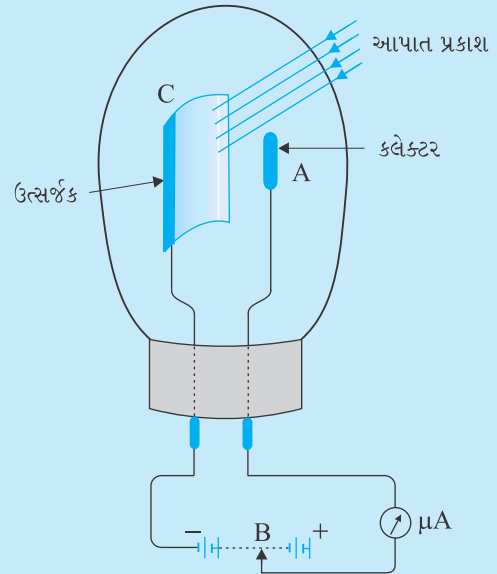
જ્યારે યોગ્ય તરંગલંબાઈનો પ્રકાશ ઉત્સર્જક C પર આપાત થાય ત્યારે ફોટો ઈલેક્ટ્રોન ઉત્સર્જિત થાય છે. આ ફોટો ઈલેક્ટ્રોન કલેક્ટર પ્લેટ A પર આકર્ષાય છે. ફોટો સેલ દ્વારા થોડાક માઈક્રોએમ્પિયરના કમનો વિદ્યુતપ્રવાહ સામાન્ય રીતે મળે છે.

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 ઈલેક્ટ્રોનિક ઈન્ગીનિયરિંગ પરિપથમાં થાય છે.

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 (રેકૉર્ડ) કરતું હોય. આમ, ફોટોસેલનો ઉપયોગ ઓડિટોરિયમમાં 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.



ફોટો સેલ

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

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

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

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

$$K = eV \quad (11.8)$$

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

$$p = \sqrt{2 m K} = \sqrt{2 m eV} \quad (11.9)$$

આથી ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2 m K}} = \frac{h}{\sqrt{2 m eV}} \quad (11.10)$$

છે. h , m , e ના સંખ્યાત્મક મૂલ્યો મુકતાં,

$$\lambda = \frac{1.227}{\sqrt{V}} \text{ nm} \quad (11.11)$$

મળે, જ્યાં V એ વોલ્ટમાં પ્રવેગક સ્થિતિમાનનું મૂલ્ય છે. 120 V જેટલા પ્રવેગક સ્થિતિમાન માટે, સમીકરણ (11.11) પરથી $\lambda = 0.112 \text{ nm}$ મળે છે. આ તરંગ લંબાઈ સ્ફટિકોમાં પરમાણુઓના સ્તરો વચ્ચેના અંતરના ક્રમની છે. આ સૂચવે છે કે ઈલેક્ટ્રોન 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 ઈલેક્ટ્રોનના તરંગ સ્વરૂપની શોધ કરવા બદલ ભૌતિકવિજ્ઞાનનું નોબેલ પારિતોષિક એનાયત કરવામાં આવ્યું હતું.

તરંગ-કણ સ્વરૂપ બહુ જ અદ્ભૂત રીતે હાઈઝનબર્ગના અનિશ્ચિતતાના સિદ્ધાંતને સમાવે છે. આ સિદ્ધાંત મુજબ, કોઈ ઈલેક્ટ્રોન (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 Δp નો ગુણાકાર $\hbar$ * ના ક્રમનો હોય છે (જ્યાં $\hbar = h/2\pi$), એટલે કે,

$$\Delta x \Delta p \approx \hbar \quad (11.12)$$

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 ઈલેક્ટ્રોન 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.

વિકિરણ અને દ્રવ્યની દ્વિત પ્રકૃતિ

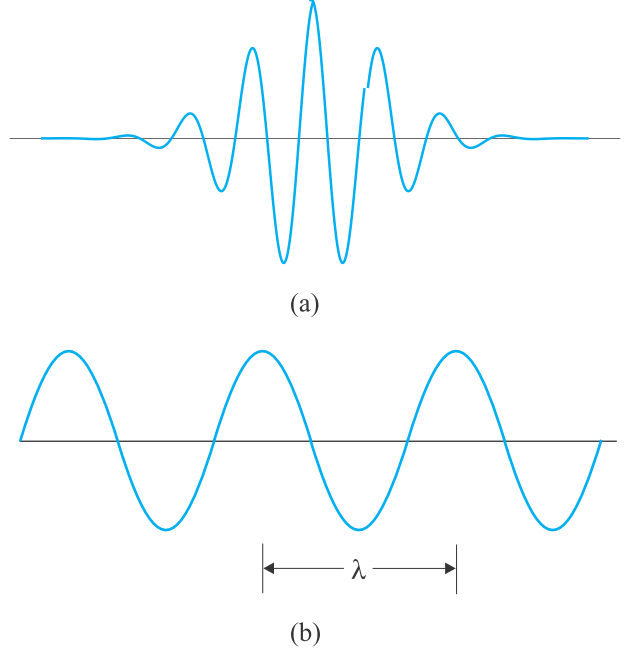
ઇલેક્ટ્રોન અવકાશમાં કોઈ ચોક્કસ વિસ્તાર પૂરતો સિમિત નથી. એટલે કે તેના સ્થાનની અનિશ્ચિતતા અનંત ($\Delta x \rightarrow \infty$) છે, જે અનિશ્ચિતતાના સિદ્ધાંત સાથે મળતું આવે છે.

સામાન્ય રીતે, ઇલેક્ટ્રોન સાથે સંકળાયેલ દ્રવ્ય તરંગ અનંત અવકાશમાં પથરાયેલું હોતું નથી. તે અવકાશના કોઈ પરિમિત વિસ્તારમાં પથરાયેલું એક તરંગ પેકેટ (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 મૂજબ ઇલેક્ટ્રોનના 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, ઇલેક્ટ્રોનના કોણીય વેગમાનના ક્વોન્ટાઈઝેશન (ક્વોન્ટમીકરણ) માટેના બહોરના 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) ઇલેક્ટ્રોનનું 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) ઇલેક્ટ્રોનના કોઈ એક ચોક્કસ વેગમાન માટે દ્રવ્ય તરંગ અનંત (સમગ્ર) અવકાશમાં પથરાયેલું હોય છે. આ સ્થિતિમાં $\Delta p = 0$ અને $\Delta x \rightarrow \infty$.

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

ઉકેલ

(a) ઇલેક્ટ્રોન માટે :

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

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

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

$$\text{ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ } \lambda = h/p$$

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

$$\lambda = 0.135 \text{ nm}$$

(b) બોલ માટે :

$$\text{દ્રવ્યમાન } m' = 0.150 \text{ kg, } \text{ઝડપ } v' = 30.0 \text{ m/s}$$

$$\text{આથી વેગમાન } p' = m' v' = 0.150 \text{ (kg)} \times 30.0 \text{ (m/s)}$$

$$p' = 4.50 \text{ kg m/s}$$

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



ઉદાહરણ 11.4

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

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

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

ઉદાહરણ 11.5

ઉદાહરણ 11.5 એક ઇલેક્ટ્રોન, એક ∞ 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. ઇલેક્ટ્રોન કરતાં પ્રોટોન (${}^1_1\text{H}$) લગભગ 1836 ગણો ભારે હોય છે, અને α -કણ (${}^4_2\text{He}$) 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. ઇલેક્ટ્રોન) 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. ક્વોન્ટમ 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 ક્વોન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રનું ગહન ભૌતિક અર્થઘટન હજી પણ સક્રિય સંશોધનનો વિષય છે. આમ છતાં, આધુનિક ક્વોન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રમાં દ્રવ્ય તરંગનો વિચાર ગાણિતિક રીતે ખૂબ સફળતાપૂર્વક દાખલ થયો છે. આ બાબતમાં મેક્સ 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 ΔV માં 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 ઇલેક્ટ્રોનની ઝડપ કરતા 3 ગણી ઝડપે ગતિ કરે છે. કણ અને ઇલેક્ટ્રોનની 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

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

$$\text{દ્રવ્યમાન } m = h/\lambda v$$

$$\text{ઇલેક્ટ્રોન માટે, દ્રવ્યમાન } m_e = h/\lambda_e v_e$$

$$\text{પરંતુ, } v/v_e = 3 \text{ આપેલ છે અને}$$

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

$$\text{આથી, કણનું દ્રવ્યમાન } m = m_e \left(\frac{\lambda_e}{\lambda} \right) \left(\frac{v_e}{v} \right)$$

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

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

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

ઉદાહરણ 11.6

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

ઉકેલ

પ્રવેગક સ્થિતિમાન $V = 100 \text{ V}$. 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 ઇલેક્ટ્રોન સાથે સંકળાયેલી ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ ક્ષ-કિરણોની તરંગલંબાઈના ક્રમની છે.

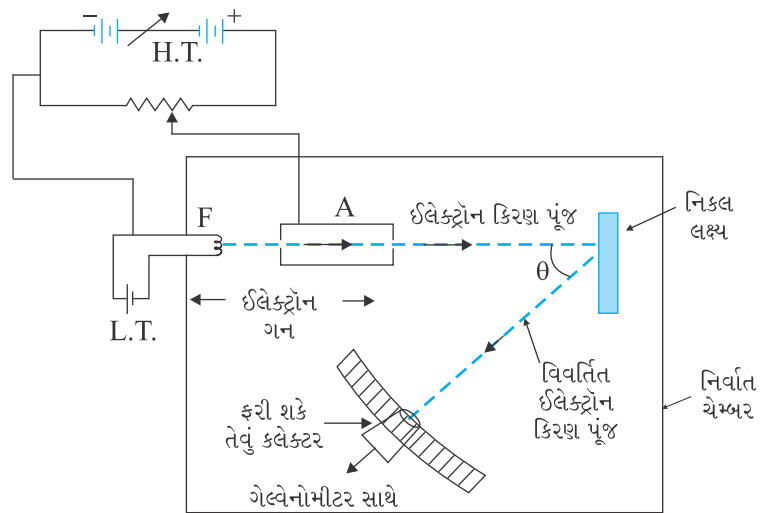
ઉદાહરણ 11.7

11.9 ડેવિસન અને ગર્મરનો પ્રયોગ

(DAVISSON AND GERMER EXPERIMENT)

ઇલેક્ટ્રોનના 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 ઇલેક્ટ્રોન કિરણાવલિના પ્રકીર્ણન દ્વારા વિવર્તનની ઘટનાઓનું અવલોકન કર્યું. ડેવિસન અને થોમસનને સ્ફટિકો દ્વારા ઇલેક્ટ્રોનના વિવર્તનની પ્રાયોગિક શોધ બદલ 1937માં સંયુક્ત રીતે (સરખા ભાગે) નોબેલ પારિતોષિક મળ્યું હતું.

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



આકૃતિ 11.7 ડેવિસન-ગર્મરની ઇલેક્ટ્રોન 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 ઇલેક્ટ્રોન બધી દિશાઓમાં પ્રકેરિત થાય છે. આપેલ દિશામાં પ્રકીર્ણન પામેલા ઇલેક્ટ્રોન બીમની તીવ્રતા, ઇલેક્ટ્રોન 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 ઇલેક્ટ્રોન 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 ઇલેક્ટ્રોન બીમ વચ્ચેનો કોણ છે, તેને માટે પ્રકીર્ણન પામેલ ઇલેક્ટ્રોન બીમની તીવ્રતા માપવામાં આવે છે. જુદા જુદા પ્રકીર્ણન કોણ θ માટે પ્રકીર્ણન પામેલા ઇલેક્ટ્રોનની 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 ઇલેક્ટ્રોન બીમની તીવ્રતા (I)માં મહત્તમ ઊછાળો (વધારો) જોવા મળ્યો હતો.

સ્ફટિકના જુદા જુદા સ્તરો પરથી પ્રકીર્ણન પામેલા ઇલેક્ટ્રોનના સહાયક વ્યતિકરણના કારણે ચોક્કસ દિશામાં મહત્તમ (ઊંચું) મૂલ્ય મળે છે. ઇલેક્ટ્રોનના 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 ઇલેક્ટ્રોનના તરંગ સ્વરૂપ અને ડિ બ્રોગ્લી સમીકરણને સ્પષ્ટ રીતે અનુમોદન આપે છે. તાજેતરમાં, 1989માં, ઇલેક્ટ્રોન 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, ઇલેક્ટ્રોન કરતાં લાખો ગણા ભારે એવા આયોડિનના અણુઓના બીમ દ્વારા વ્યતિકરણની શલાકાઓ મેળવવામાં આવી હતી.

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

સારાંશ

1. ધાતુની સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રોનને બહાર નીકળવા માટે જરૂરી લઘુત્તમ ઊર્જાને તે ધાતુનું કાર્ય વિધેય કહે છે. ઈલેક્ટ્રોનને 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 ઈલેક્ટ્રોનના 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 તાત્કાલિક અસર છે અને તે કેટલીક વિશિષ્ટતાઓ ધરાવે છે.
3. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ, (i) આપાત પ્રકાશની તીવ્રતા, (ii) બે ઈલેક્ટ્રોન 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 ઉત્સર્જ્યેલા (ફોટો) ઈલેક્ટ્રોનની મહત્તમ ગતિઊર્જા સાથે પ્રત્યક્ષ સંકળાયેલું હોય છે : $eV_0 = (1/2) m v_{\max}^2 = K_{\max}$.
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, V_0 (થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ)નું અસ્તિત્વ અને (ફોટોઈલેક્ટ્રીક) ઘટનાનું તાત્કાલિકપણું સમજાવી શકતો નથી. આઈન્સ્ટાઈને આ લાક્ષણિકતાઓને પ્રકાશની ફોટોન પ્રકૃતિના આધારે સમજાવી હતી. આ મુજબ, પ્રકાશ, ઊર્જાના અમુક જથ્થાઓ (પેકેટ)નો બનેલો છે, જેમને ક્વોન્ટમ 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. ઈલેક્ટ્રોન દ્વારા ફોટોનના શોષણના કારણે ધાતુની સપાટીમાંથી ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન થાય છે.
7. આઈન્સ્ટાઈનનું ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ, ઊર્જા સંરક્ષણના નિયમને સુસંગત છે જે ધાતુમાં રહેલા ઈલેક્ટ્રોન દ્વારા ફોટોનના શોષણ પર લાગુ પડે છે. ફોટોનની ઊર્જા ($h\nu$)માંથી લક્ષ્ય ધાતુનું કાર્ય વિધેય $\phi_0 (= h\nu_0)$ બાદ કરતાં (ફોટો ઈલેક્ટ્રોનની) મહત્તમ ગતિઊર્જા $(1/2)mv_{\max}^2$ મળે છે.
$$\frac{1}{2} m v_{\max}^2 = V_0 e = h\nu - \phi_0 = h(\nu - \nu_0)$$
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 h નું 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 બ્રોગલીએ દ્રવ્ય (દ્રવ્ય કણો)ને તરંગ-પ્રકૃતિ સાથે સાંકળ્યા. ગતિ કરતા દ્રવ્ય કણો સાથે સંકળાયેલા તરંગોને દ્રવ્ય તરંગો કે ડિ બ્રોગલી 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 ઈલેક્ટ્રોન, 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 રોજંદા 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 ઈલેક્ટ્રોન વિવર્તનના પ્રયોગો દ્વારા ઈલેક્ટ્રોનના તરંગ સ્વરૂપની ચકાસણી તથા સત્યતા સાબિત થઈ છે. દ્રવ્ય તરંગો માટેનો ડિ બ્રોગ્લીનો સિદ્ધાંત, બહોરના 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 ઈલેક્ટ્રોન 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 ઈલેક્ટ્રોનની ઊર્જા સમાન હોતી નથી. વાયુ પાત્રમાં રહેલા વાયુના અણુઓની જેમ, આપેલ તાપમાને આ ઈલેક્ટ્રોનને 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, ઈલેક્ટ્રોન પાઉલીના અપવર્જન (Exclusion) ના સિદ્ધાંતનું પાલન કરે છે તે હકીકત સાથે સંબંધિત છે.
3. ધાતુમાં ઈલેક્ટ્રોનના ઊર્જા વિતરણના કારણે, જુદા જુદા ઈલેક્ટ્રોન માટે ઈલેક્ટ્રોનને 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 v_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 ઈલેક્ટ્રોન દ્વારા ઉત્પન્ન થતા ક્ષ-કિરણોની
 - (a) મહત્તમ આવૃત્તિ, અને
 - (b) લઘુત્તમ તરંગલંબાઈ શોધો.
- 11.2 સિઝિયમ ધાતુનું કાર્ય વિધેય 2.14 eV છે. જ્યારે $6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ નો પ્રકાશ આ ધાતુની સપાટી પર આપાત થાય, ત્યારે ઈલેક્ટ્રોનનું ફોટો ઉત્સર્જન થાય છે.
 - (a) ઉત્સર્જિત ઈલેક્ટ્રોનની મહત્તમ ગતિઊર્જા,
 - (b) સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ, અને
 - (c) ઉત્સર્જિત ફોટો ઈલેક્ટ્રોનની મહત્તમ ઝડપ, કેટલી હશે ?
- 11.3 એક પ્રયોગમાં ફોટોઈલેક્ટ્રીક કટ-ઓફ વોલ્ટેજ 1.5 V છે. ઉત્સર્જાયેલા ફોટો ઈલેક્ટ્રોનની 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 $1.388 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ 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 વોલ્ટેજ વિરુદ્ધ આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિનો ઢાળ $4.12 \times 10^{-15} \text{ V s}$ જેટલો મળે છે. પ્લાન્કના અચળાંકનું મૂલ્ય શોધો.
- 11.7 100 Wનો એક સોડિયમ લેમ્પ બધી દિશાઓમાં સમાન રીતે ઊર્જાનું ઉત્સર્જન કરે છે. આ લેમ્પને 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 ઇલેક્ટ્રીક 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 ઇલેક્ટ્રીક 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 ઇલેક્ટ્રોન ઉત્સર્જિત થાય છે. ઇલેક્ટ્રોનના ફોટો ઉત્સર્જન માટે થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ કેટલી હશે ?
- 11.11** આર્ગન લેસર વડે ઉત્પન્ન થયેલ 488 nmના પ્રકાશનો ઉપયોગ ફોટો ઇલેક્ટ્રીક અસરમાં થયો છે. જ્યારે આ વર્ણપટ રેખાનો પ્રકાશ ઉત્સર્જક પર આપાત થાય ત્યારે ફોટો ઇલેક્ટ્રોનનું સ્ટોપિંગ (કટ ઓફ) પોટેન્શિયલ 0.38 V છે. ઉત્સર્જક જે દ્રવ્યમાંથી બનેલ છે તેનું કાર્ય વિધેય શોધો.
- 11.12** 56 V વિદ્યુત સ્થિતિમાનના તફાવત વડે પ્રવેગિત ઇલેક્ટ્રોન માટે
(a) વેગમાન, અને
(b) ડિબ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો.
- 11.13** 120 eV જેટલી ગતિઊર્જા ધરાવતા ઇલેક્ટ્રોનનું
(a) વેગમાન,
(b) ઝડપ અને
(c) ડિબ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ કેટલા હશે ?
- 11.14** સોડિયમના ઉત્સર્જન વર્ણપટ રેખાના પ્રકાશની તરંગલંબાઈ 589 nm છે.
(a) ઇલેક્ટ્રોન અને
(b) ન્યૂટ્રોનની કઈ ગતિઊર્જા માટે આટલી તરંગલંબાઈ મળશે ?
- 11.15** આપેલ કિસ્સાઓ માટે ડિબ્રોગ્લી 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 બોલ,
(c) 2.2 m/sની ઝડપથી ગતિ કરતો 1.0×10^{-9} kg દળ ધરાવતો ધુળનો રજકણ.
- 11.16** એક ઇલેક્ટ્રોન અને ફોટોન બંનેની તરંગલંબાઈ 1.00 nm છે. તેમના માટે
(a) તેમના વેગમાન,
(b) ફોટોનની ઊર્જા અને
(c) ઇલેક્ટ્રોનની ગતિઊર્જા શોધો.
- 11.17** (a) ન્યૂટ્રોનની કેટલી ગતિઊર્જા માટે તેની સાથે સંકળાયેલ ડિબ્રોગ્લી 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 ન્યૂટ્રોન માટે ડિબ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો.
- 11.18** દર્શાવો કે વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણની તરંગલંબાઈ તેના ક્વોન્ટમ (ફોટોન)ની ડિબ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ જેટલી હોય છે.
- 11.19** હવામાં 300 K તાપમાને રહેલા નાઈટ્રોજન અણુની ડિબ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ કેટલી હશે ? અણુ આ તાપમાને અણુઓની સરેરાશ વર્ગિત ઝડપના વર્ગમૂળ જેટલી ઝડપથી ગતિ કરે છે તેમ ધારો (નાઈટ્રોજનનું પરમાણુદળ = 14.0076 u).