13.28 D–T પ્રક્રિયા (ડ્યુટેરિયમ-ટ્રિટિયમ સંલયન) વિચારો.

$${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4He + n$$

(a) નીચે આપેલ વિગતો પરથી વિમુક્ત થતી ઊર્જા MeVમાં ગણો.

$m({}_1^2\text{H}) = 2.014102\,u$

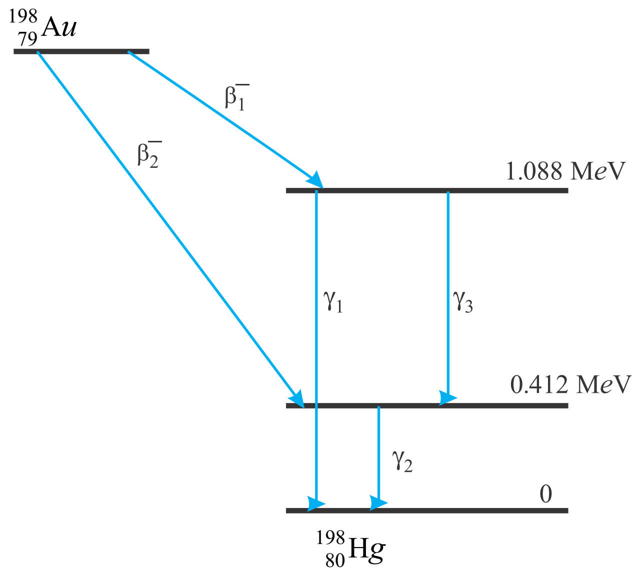
$m({}_1^3\text{H}) = 3.016049\,u$

(b) ડ્યુટેરિયમ અને ટ્રિટિયમ બંનેની ત્રિજ્યા લગભગ 2.0 *fm* ધારો. આ બે ન્યુક્લિયસ વચ્ચેના કુલંબ અપાકર્ષણને ઓળંગી જવા (પાર કરવા) માટે કેટલી ગતિઊર્જા જરૂરી છે ? આ ક્રિયા પ્રારંભ કરાવવા માટે વાયુને કેટલા તાપમાન સુધી ગરમ કરવો પડે ? (સૂચના : એક વિખંડન ઘટના માટે જરૂરી ગતિઊર્જા = આંતરક્રિયા કરતા કણો પાસે હોય તેવી સરેરાશ ઉષ્મીય ગતિઊર્જા = $2(3\,kT/2)$, k = બોલ્ટ્ઝમેનનો અચળાંક, T = નિરપેક્ષ તાપમાન)

13.29 આકૃતિ 13.6માં દર્શાવેલ ક્ષય પ્રક્રિયામાં β-કણોની મહત્તમ ગતિઊર્જા અને γ-ક્ષયની વિકિરણ આવૃત્તિઓ શોધો. તમને નીચેની વિગતો આપેલ છે.

$m({}^{198}\text{A}u) = 197.968233\,u$

$m({}^{198}\text{Hg}) = 197.966760\,u$



આકૃતિ 13.6

13.30 (a) સૂર્યમાં ઊંડે 1 kg હાઈડ્રોજનના સંલયનમાં અને

(b) વિખંડન રીએક્ટરમાં 1 kg ${}_{92}^{235}\text{U}$ ના વિખંડનમાં - વિમુક્ત થતી (બહાર પડતી) ઊર્જા ગણો અને સરખાવો.

13.31 ધારોકે ઈ.સ. 2020 સુધીમાં ભારતનું લક્ષ્ય 2,00,000 MW વિદ્યુતપાવર ઉત્પન્ન કરવાનું છે અને તેમાંથી દસ ટકા ન્યુક્લિયર પાવર પ્લાન્ટમાંથી મેળવવાનું છે. ધારોકે આપણને આપેલ છે કે સરેરાશપણે રીએક્ટરમાં ઉત્પન્ન થયેલી ઉષ્માઊર્જાના વપરાશની કાર્યક્ષમતા (એટલે કે વિદ્યુતઊર્જામાં રૂપાંતર) 25 % છે. તો 2020 સુધીમાં દેશને વિખંડનિય યુરેનિયમના કેટલા જથ્થાની જરૂર પડે ? ${}_{92}^{235}\text{U}$ ના દર વિખંડન દીઠ ઉષ્મા ઊર્જા લગભગ 200 MeV લો.

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 $1.76 \times 10^{11}\,\mathrm{C\,kg^{-1}}$ 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 $5.20 \times 10^{6}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ 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 $1.76 \times 10^{11}\,\mathrm{C\,kg^{-1}}$ 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 [$\sim10^{-2}$ 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 ? ($1\,\mathrm{BeV} = 10^{9}\,eV$)

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 ($\sim10^{-10}\,\mathrm{W\,m^{-2}}$) તેને અનુરૂપ આપણી આંખની કીકીમાં દર સેકંડે દાખલ થતા ફોટોનની સંખ્યા, આંખની કીકીનું ક્ષેત્રફળ આશરે $0.4\,\mathrm{cm^2}$ 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 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 :

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

તેમને અનુલક્ષીને માપેલા સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ અનુક્રમે આ મુજબ છે :

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

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

(*નોંધ :* તમે જોશો કે આપેલ માહિતી પરથી *h*ની ગણતરી કરવા માટે *e*ની 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 *e*ના મૂલ્યનો ઉપયોગ કરીને આઈન્સ્ટાઈનના ફોટોઈલેક્ટ્રીક સમીકરણની સત્યતા ચકાસી હતી અને તે સાથે જ *h*ના 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 ($27\ ^{o}C$) 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 kV 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 MeV)

11.35 ઓરડાના તાપમાને ($27\ ^{o}C$) 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 $27\ ^{o}C$ 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 ઓદ્યૌગિક 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 દૃઢતા 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.

પ્રકરણ બાર

પરમાણુઓ (ATOMS)

12.1 પ્રસ્તાવના (INTRODUCTION)

ઓગણીસમી સદી સુધીમાં દ્રવ્યના પરમાણુ અધિતર્ક (Hypothesis)ના પક્ષમાં ઘણા પુરાવા એકત્રિત કરાયેલા હતા. 1897માં વાયુમાંથી વિદ્યુતવિભાર (Electric Discharge) અંગે ઇંગ્લીશ ભૌતિકવિજ્ઞાની જે. જે. થોમસન (1856-1940) દ્વારા કરાયેલા પ્રયોગો એ દર્શાવ્યું કે વિવિધ તત્વોના પરમાણુઓ ઋણ વિદ્યુતભારિત ઘટકો (ઈલેક્ટ્રૉન) ધરાવે છે, જેઓ બધા પરમાણુઓ માટે એકસમાન (Identical) હોય છે. આમ છતાં સમગ્રપણે પરમાણુ વિદ્યુતીય રીતે તટસ્થ છે. આથી, ઈલેક્ટ્રૉનના ઋણ વિદ્યુતભારને તટસ્થ કરવા માટે પરમાણુ અમુક ધન વિદ્યુતભાર પણ ધરાવતો હોવો જોઈએ. પરંતુ પરમાણુની અંદર ધન વિદ્યુતભાર અને ઈલેક્ટ્રૉનની ગોઠવણ કેવી હશે ? બીજા શબ્દોમાં પરમાણુનું બંધારણ કેવું હશે ?

પરમાણુ અંગેનું સૌ પ્રથમ મૉડેલ 1898માં જે. જે. થોમસન દ્વારા પ્રસ્તાવિત (Proposed) થયું હતું. આ મૉડેલ અનુસાર, પરમાણુનો ધન વિદ્યુતભાર પરમાણુના સમગ્ર કદમાં નિયમિત રીતે (Uniformly) વિતરિત થયેલો છે અને ઋણ વિદ્યુતભારવાળાં ઈલેક્ટ્રૉન, તડબૂચમાંના બીજની જેમ, તેમાં જડાયેલાં (જકડાયેલાં) (Embedded) હોય છે. આ મૉડેલને પરમાણુનું *પ્લમ પુડીંગ (Plum Pudding) મૉડેલ* કહેવાયું હતું. આમ છતાં, આ પ્રકરણમાં હવે આગળ દર્શાવાશે તે મુજબ, ત્યારબાદના પરમાણુના અભ્યાસોએ દર્શાવ્યું કે આ મૉડેલમાં સૂચવેલ છે તે કરતાં ઈલેક્ટ્રૉન અને ધન વિદ્યુતભારોનું વિતરણ ઘણું અલગ છે.

આપણે જાણીએ છીએ કે ઘટ્ટ દ્રવ્ય (ઘન અને પ્રવાહી) અને ઘટ્ટ વાયુઓ, બધા તાપમાને વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણ ઉત્સર્જિત કરે છે, જેમાં ઘણી તરંગલંબાઈઓનું સતત વિતરણ હાજર હોય છે, જો કે તેમની તીવ્રતાઓ અલગ હોય છે. આ વિકિરણ પરમાણુઓના અને અણુઓના દોલનોને લીધે હોય છે અને તે દરેક પરમાણુ કે અણુની તેના પડોશીઓ સાથેની આંતરક્રિયા દ્વારા સંચાલિત થાય છે આના

કરતાં *તદ્દન વિરુદ્ધ*, ઓછી ઘનતાના વાયુને જ્યોતમાં ગરમ કરતાં અથવા જાણીતી નિયોન સાઈન અથવા મરક્યુરિ વેપર લાઈટની જેમ વિદ્યુતીય રીતે ઉત્તેજિત કરતાં તેમાંથી ઉત્સર્જિત પ્રકાશમાં ફક્ત કેટલીક ચોક્કસ (Descrete) તરંગલંબાઈઓ જ હાજર હોય છે. આ વર્ણપટ (Spectrum) પ્રકાશિત રેખાઓની શ્રેણી રૂપે દેખાય છે. આવા વાયુઓમાં પરમાણુ વચ્ચેની જગ્યા (અવકાશ) વધારે હોય છે. આથી, ઉત્સર્જિત વિકિરણ, પરમાણુઓ કે અણુઓ વચ્ચેની આંતરક્રિયાને બદલે, વ્યક્તિગત પરમાણુઓને લીધે હોવાનું માનીશકાય છે.

ઓગણીસમી સદીના પ્રારંભમાં એમ પણ પ્રસ્થાપિત થયું હતું કે દરેક તત્વ સાથે વિકિરણનો લાક્ષણિક વર્ણપટ સંકળાયેલ છે, દાખલા તરીકે, હાઈડ્રોજન હંમેશા એવી રેખાઓનો સમૂહ આપે છે કે જેમનાં સ્થાનો વચ્ચે વિવિધ નિશ્ચિત અંતર છે એટલે કે તેઓ અમુક નિશ્ચિત સ્થાનો પર છે. આ હકીકતે એમ સૂચવ્યું કે પરમાણુના આંતરિક બંધારણ અને તેના દ્વારા ઉત્સર્જિત વર્ણપટ વચ્ચે ગાઢ સંબંધ છે. 1885માં જોહન જેકબ બામર (1825-1898) દ્વારા એક સરળ આનુભવિક/પ્રાયોગિક સૂત્ર મેળવવામાં આવ્યું જેણે પરમાણ્વિક હાઈડ્રોજન વડે ઉત્સર્જિત રેખાઓના એક સમૂહની તરંગલંબાઈઓ આપી હતી. જાણીતાં તત્વોમાં હાઈડ્રોજન સૌથી સરળ હોવાથી આપણે આ પ્રકરણમાં તેના વર્ણપટનો વિગતે વિચાર કરીશું.

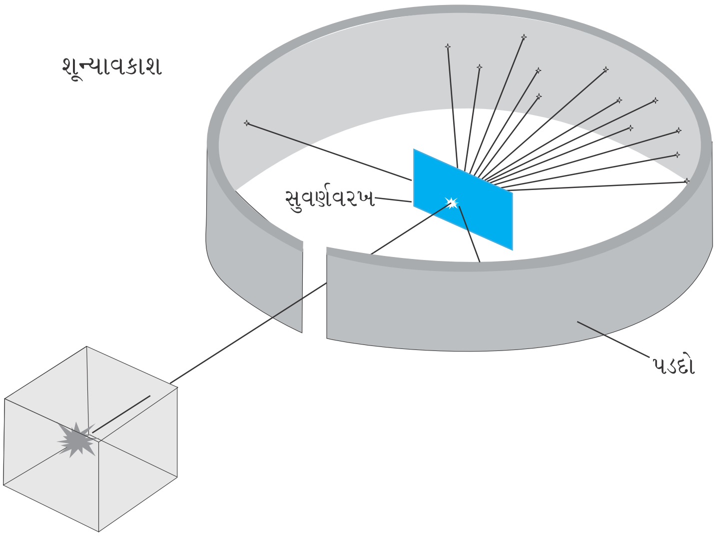
અર્નસ્ટ રધરફર્ડ (1871-1937), જે અગાઉ જે. જે. થોમસનનો સંશોધન વિદ્યાર્થી હતો તે કેટલાક રેડિયો એક્ટિવ તત્વોમાંથી ઉત્સર્જિત થયેલા α-કણો પરના પ્રયોગોમાં વ્યસ્ત હતો. 1906માં તેણે પરમાણુના બંધારણની જાણકારી મેળવવા માટે પરમાણુઓ વડે આ α-કણોના પ્રકીર્ણનના ઉત્કૃષ્ટ પ્રયોગનું સૂચન કર્યું. ત્યારબાદ 1911ની આસપાસ, હેન્સ ગેઈગર (1882-1945) અને અર્નસ્ટ માર્સ્ડન (1889-1970) જે માત્ર 20 વર્ષની ઉંમરનો વિદ્યાર્થી હતો અને હજી તેણે સ્નાતક (Bachelor)ની પદવી પ્રાપ્ત કરી ન હતી, તેમણે આ પ્રયોગ કર્યો. આ પ્રયોગની વિગતવાર ચર્ચા પરિચ્છેદ 12.2માં કરેલ છે. પરિણામોની સમજૂતીએ રધરફર્ડના પરમાણુ માટે ગ્રહો જેવા મૉડેલ (જેને *પરમાણુનું ન્યુક્લિયર મૉડેલ* પણ કહે છે)ને જન્મ આપ્યો. આ મૉડેલ મુજબ પરમાણુનો સમગ્ર ધન વિદ્યુતભાર અને લગભગ બધું દળ ન્યુક્લિયસ તરીકે ઓળખાતા નાના કદ (વિસ્તાર)માં સંકેન્દ્રિત થયેલું છે અને સૂર્યની આસપાસ ગ્રહોના પરિભ્રમણની જેમ ઈલેક્ટ્રૉન આ ન્યુક્લિયસની આસપાસ ભ્રમણ કરે છે.

અર્નસ્ટ રધરફર્ડ (1871-1937) બ્રિટીશ ભૌતિકવિજ્ઞાની જેણે રેડિયો એક્ટિવ વિકિરણ અંગે પાયારૂપ કાર્ય કર્યું. તેણે આલ્ફા-કિરણો અને બીટા-કિરણોની શોધ કરી. ફ્રેડરીક સૉડીની સાથે તેણે રેડિયોએક્ટિવીટીનો અર્વાચીન વાદ રચ્યો. તેણે થોરિયમની ઉત્પત્તિનો અભ્યાસ કર્યો અને નવો નિષ્ક્રિય વાયુ, રેડોનનો સમસ્થાનિક શોધ્યો જે અત્યારે થોરોન તરીકે ઓળખાય છે. ધાતુના દ્વારા આલ્ફા કિરણોના પ્રકીર્ણન પરથી તેણે પરમાણુ ન્યુક્લિયસની શોધ કરી અને પરમાણુનું ગ્રહો જેવું મૉડેલ રજૂ કર્યું. તેણે પરમાણુના પરિમાણનો લગભગ અંદાજ પણ મેળવ્યો.

રધરફર્ડનું ન્યુક્લિયર મૉડેલ, આપણે આજે પરમાણુને જે રીતે જોઈએ છીએ તે તરફનું એક મોટું કદમ હતું. આમ છતાં તે, પરમાણુઓ અમુક નિશ્ચિત તરંગલંબાઈનો જ પ્રકાશ કેમ ઉત્સર્જિત કરે છે તે સમજાવી શક્યું નહિ. હાઈડ્રોજન જેવો એકદમ સરળ પરમાણુ જે એક જ ઈલેક્ટ્રૉન અને એક જ પ્રોટોનનો બનેલો છે તે, નિશ્ચિત તરંગલંબાઈઓનો જટિલ વર્ણપટ કેવી રીતે આપે છે ? પરમાણુના પ્રચલિત (Classical) ચિત્રમાં, સૂર્યની આસપાસ ગ્રહો ભ્રમણ કરે છે તેની જેમ જ, ઈલેક્ટ્રૉન ન્યુક્લિયસની આસપાસ ભ્રમણ કરે છે. આમ છતાં, આપણે જોઈશું કે આવા મૉડેલને સ્વીકારવામાં કેટલીક ગંભીર મુશ્કેલીઓ છે.

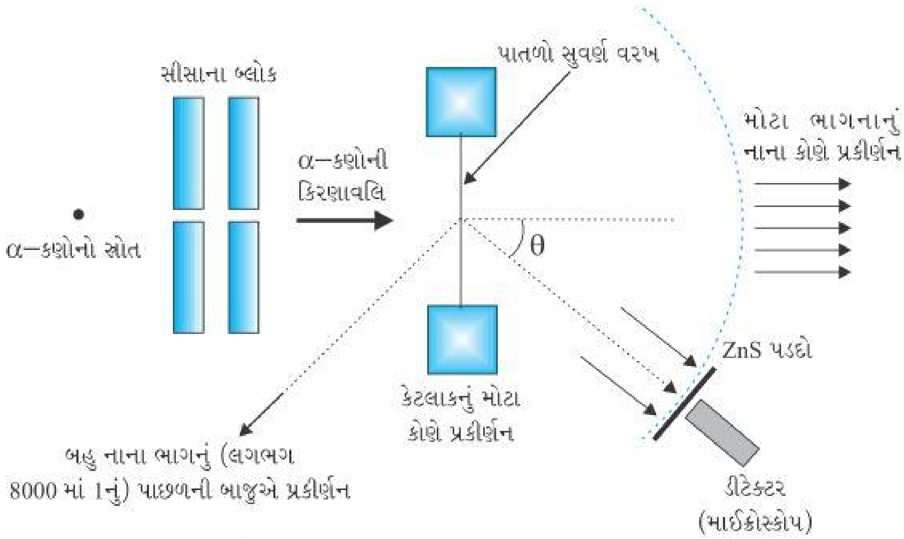
12.2 આલ્ફા-કણ પ્રકીર્ણન અને પરમાણુ અંગેનું રધરફર્ડનું ન્યુક્લિયર મૉડેલ (ALPHA-PARTICL SCATTERING AND RUTHERFORD'S NUCLEAR MODEL OF ATOM)

અર્નસ્ટ રધરફર્ડના સૂચનથી, 1911માં, એચ. ગેઈગર અને ઈ. માર્સ્ડન-એ કેટલાક પ્રયોગો કર્યા.



આકૃતિ 12.1 ગેઈગર-માર્સ્ડનનો પ્રકીર્ણનનો પ્રયોગ. સમગ્ર ઉપકરણને શૂન્યાવકાશ ધરાવતી ચેમ્બરમાં મૂકવામાં આવે છે. (તેને આ આકૃતિમાં બતાવેલ નથી.)

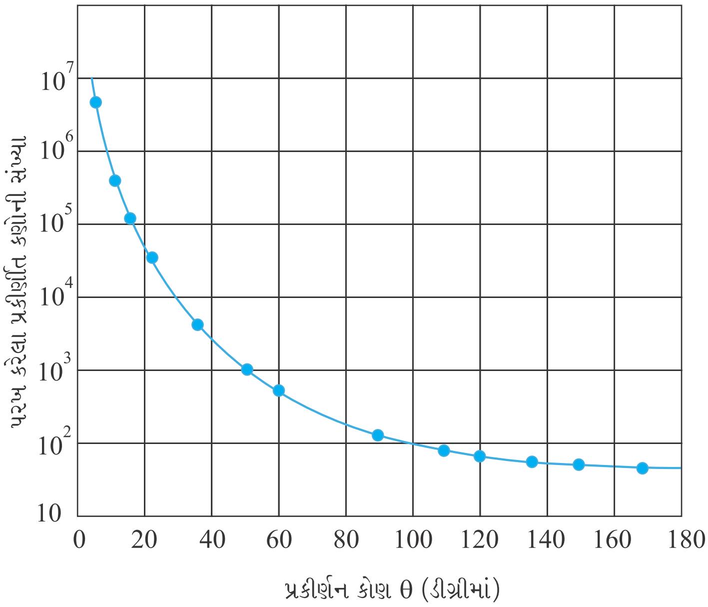
તેમના એક પ્રયોગમાં આકૃતિ 12.1માં દર્શાવ્યા મુજબ રેડિયોએક્ટિવ સ્રોત $^{214}_{83}Bi$ માંથી ઉત્સર્જિત થતા 5.5 MeV α-કણોની કિરણાવલિને સુવર્ણ (Gold)ના પાતળા વરખ (Foil) પર આપાત કરી. આકૃતિ 12.2 આ પ્રયોગની રેખાકૃતિ દર્શાવે છે. રેડિયોએક્ટિવ સ્રોત $^{214}_{83}Bi$ માંથી ઉત્સર્જિત થયેલાં α-કણોને સીસાના બ્લૉક વચ્ચેથી પસાર કરીને પાતળી કિરણાવલિ મેળવવામાં આવે છે. આ કિરણાવલિને 2.1×10^{-7} m જાડાઈના પાતળા સુવર્ણના વરખ પર આપાત કરવામાં આવે છે. પ્રકેરિત થયેલાં આલ્ફા કણોનું ઘુમાવી શકાય તેવા ઝીંક સલ્ફાઈડ પડદા અને માઈક્રોસ્કોપના બનેલા ડીટેક્ટરમાંથી અવલોકન કરવામાં આવે છે. પ્રકેરિત આલ્ફા કણો પડદા પર અથડાય ત્યારે ક્ષણિક પ્રકાશનો ઝબકારો એટલે કે Scintillation ઉત્પન્ન કરે છે. આ ઝબકારાને માઈક્રોસ્કોપમાંથી જોઈ શકાય છે અને પ્રકેરિત કણોની સંખ્યાના વિતરણનો પ્રકિર્ણન કોણના વિધેય તરીકે અભ્યાસ કરી શકાય છે.



આકૃતિ 12.2 ગેઈગર માર્સ્ડનના પ્રયોગની ગોઠવણની રેખાકૃતિ

જુદા જુદા કોણે આપેલા સમયગાળામાં પ્રકેરિત થયેલાં α-કણોની કુલ સંખ્યાનો એક લાક્ષણિક આલેખ આકૃતિ 12.3માં દર્શાવેલ છે. આકૃતિમાં ટપકાંઓ પ્રયોગથી મળેલ મૂલ્યો દર્શાવે છે અને સળંગ વક્ર એ લક્ષ્ય પરમાણુને સૂક્ષ્મ, ઘટ્ટ, ધન વિદ્યુતભારિત ન્યુક્લિયસ છે તેવી પૂર્વધારણા પર આધારિત સૈદ્ધાંતિક પૂર્વાનુમાન દર્શાવે છે. ઘણાં α-કણો વરખમાં થઈને પસાર થઈ જાય છે. તેનો અર્થ એ કે તેઓ કોઈ સંઘાત અનુભવતા નથી. ફક્ત લગભગ 0.14 % α-કણોનું 1° કરતાં વધારે પ્રકિર્ણન થાય છે અને લગભગ 8000માં 1નું વિચલન 90° કરતાં વધુ થાય છે. રધરફર્ડે એવી દલીલ કરી કે આમ α-કણનું પાછળની તરફ વિચલન થવા માટે તે મોટું અપાકર્ષણ બળ અનુભવતો હોવો જોઈએ. જો પરમાણુના

દળનો મોટો ભાગ અને તેનો ધન વિદ્યુતભાર તેના કેન્દ્ર પર ખીચોખીચ (Tightly - ચુસ્તપણે) કેન્દ્રિત થયેલો હોય તો આવું બળ લાગી શકે. આમ હોય તો આપાત થતો α-કણ ધન વિદ્યુતભારને ભેદ્યા વિના ખૂબ નજીક પહોંચી શકે અને આવો નજીકનો ગાઢ સંઘાત મોટા વિચલનમાં પરિણમી શકે. આ દલીલ ન્યુક્લિયર પરમાણુના અધિતર્કનું સમર્થન કરે છે. આ કારણથી ન્યુક્લિયસની *શોધ*નું બહુમાન રધરફર્ડને આપવામાં આવે છે.



આકૃતિ 12.3 આકૃતિ 12.1 અને 12.2માં દર્શાવેલ ગોઠવણનો ઉપયોગ કરીને ગેઈગર અને માર્સ્ડને મેળવેલ પાતળા વરખ દ્વારા વિવિધ કોણે થતા α-કણોના પ્રકીર્ણનના પ્રાયોગિક મૂલ્યો (ટપકાં વડે દર્શાવેલ છે). રધરફર્ડનું ન્યુક્લિયર મૉડેલ સળંગ વક્રનું અનુમાન કરે છે જે પ્રયોગ સાથે સારી રીતે મળતું આવે છે.

રધરફર્ડના પરમાણુ અંગેના ન્યુક્લિયર મૉડેલમાં પરમાણુનો સમગ્ર ધન વિદ્યુતભાર અને લગભગ બધું દળ ન્યુક્લિયસમાં કેન્દ્રિત થયેલું છે અને ઈલેક્ટ્રૉન ન્યુક્લિયસથી થોડા અંતરે દૂર છે. જેમ ગ્રહો સૂર્યની આસપાસ ભ્રમણ કરે છે તેમ ઈલેક્ટ્રૉન ન્યુક્લિયસની આસપાસ કક્ષામાં ભ્રમણ કરતા હશે. રધરફર્ડના પ્રયોગે ન્યુક્લિયસનું પરિમાણ 10^{-15} m થી 10^{-14} mનું હોવાનું સૂચવ્યું હતું. ગતિવાદ પરથી પરમાણુનું પરિમાણ 10^{-10}m હોવાનું જાણીતું હતું જે ન્યુક્લિયસના પરિમાણથી 10,000 થી 1,00,000 ગણું મોટું છે (જુઓ ધોરણ XI, ભૌતિકવિજ્ઞાનનું પાઠ્યપુસ્તક પ્રકરણ-11, પરિચ્છેદ 11.6). આમ પરમાણુનો મોટો ભાગ ખાલી અવકાશ (જગ્યા) છે. પરમાણુ મહદ્ અંશે ખાલી જગ્યા ધરાવતો હોવાથી મોટા ભાગના α-કણો પાતળી ધાતુની વરખમાંથી કેમ આરપાર જતા રહે છે તે સહેલાઈથી સમજી શકાય છે. આમ છતાં જ્યારે α-કણ ન્યુક્લિયસની નજીક આવે છે ત્યારે ત્યાંનું તીવ્ર વિદ્યુતક્ષેત્ર તેનું મોટા કોણે પ્રકિર્ણન કરે છે. પરમાણુના ઈલેક્ટ્રૉન ઘણા હલકા હોવાથી α-કણો પર ખાસ અસર કરતા નથી.

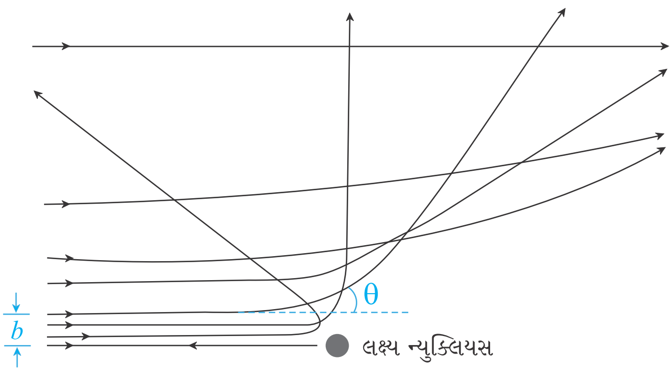
આકૃતિ 12.3માં દર્શાવેલ પ્રકિર્ણન પ્રયોગની વિગતોનું વિશ્લેષણ રધરફર્ડના પરમાણુ અંગેના ન્યુક્લિયર મૉડેલની મદદથી કરી શકાય છે. સુવર્ણ વરખ અત્યંત પાતળો હોવાથી આપણે એવું ધારી શકીએ કે તેમાંથી પસાર થવા દરમિયાન α-કણો એક કરતાં વધુ પ્રકિર્ણન અનુભવતા નહિ હોય. આથી, એક જ ન્યુક્લિયસ વડે થતા α-કણના પ્રકિર્ણનના ગતિપથ (Trajectory)ની ગણતરી પુરતી છે. આલ્ફા-કણો હિલિયમ પરમાણુઓનાં ન્યુક્લિયસ છે તેથી તેમને બે એકમ ધન વિદ્યુતભાર, 2 e છે અને દળ હિલિયમ પરમાણુ જેટલું છે. સુવર્ણના ન્યુક્લિયસનો વિદ્યુતભાર Ze છે જ્યાં Z પરમાણુનો પરમાણુ ક્રમાંક છે, સુવર્ણ (ગોલ્ડ) માટે Z = 79 છે. સુવર્ણનું ન્યુક્લિયસ α-કણ કરતાં લગભગ 50 ગણું ભારે હોવાથી, સમગ્ર પ્રકિર્ણન પ્રક્રિયામાં તે સ્થિર રહે છે તેમ માનવું વ્યાજબી છે. આ સંજોગોમાં ન્યૂટનના બીજા નિયમના ઉપયોગ તથા α-કણ અને ધન વિદ્યુતભારિત ન્યુક્લિયસ વચ્ચેના અપાકર્ષણના સ્થિતવિદ્યુત બળ માટેના કુલંબના નિયમના ઉપયોગથી α-કણના ગતિપથની ગણતરી કરી શકાય છે. આ બળનું માન

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{(2e)(Ze)}{r^2} \qquad (12.1)$$

છે, જ્યાં, r એ α-કણ અને ન્યુક્લિયસ વચ્ચેનું અંતર છે. આ બળની દિશા α-કણ અને ન્યુક્લિયસને જોડતી રેખા પર છે. α-કણ ન્યુક્લિયસ તરફ જાય અને પછી તેનાથી દૂર જાય તે દરમિયાન તેના પર લાગતા બળનું માન અને દિશા સતત બદલાતી રહે છે.

12.2.1 આલ્ફા-કણનો ગતિપથ (Alpha-Particle Trajectory)

α-કણનો ગતિપથ ન્યુક્લિયસ સાથેની અથડામણના સંઘાત પ્રાચલ (Impact Parameter) b પર આધાર રાખે છે. *સંઘાત પ્રાચલ* એ α-કણના પ્રારંભિક વેગ સદિશ અને ન્યુક્લિયસના કેન્દ્ર વચ્ચેનું અંતર છે (આકૃતિ 12.4). α-કણોની આપેલ કિરણાવલિમાં સંઘાત પ્રાચલ b જુદા જુદા (એટલે કે સંઘાત પ્રાચલનું વિતરણ) હોય છે. આથી, કિરણાવલિ જુદી જુદી સંભાવનાઓથી જુદી જુદી દિશાઓમાં પ્રકીર્ણન પામે છે (આકૃતિ 12.4). (કિરણાવલિમાં બધાં કણોની ગતિઊર્જા લગભગ સમાન હોય છે.) એમ જણાયું છે કે જે α-કણ ન્યુક્લિયસની નજીક (નાનો સંઘાત પ્રાચલ) હોય તે મોટું પ્રકીર્ણન અનુભવે છે. સન્મુખ (Head-on) સંઘાતના કિસ્સામાં સંઘાત પ્રાચલ લઘુત્તમ હોય છે અને α-કણ પાછો ફેંકાય છે (Rebounds Back) ($\theta \cong \pi$). મોટા સંઘાત પ્રાચલ માટે α-કણ લગભગ વિચલન પામ્યા વિના જતો રહે છે અને આવર્તન ઘણું નાનું ($\theta \cong 0$) હોય છે.



આકૃતિ 12.4 લક્ષ્ય ન્યુક્લિયસના કુલંબ ક્ષેત્રમાં α-કણનો ગતિપથ. સંઘાત પ્રાચલ b અને પ્રકિર્ણન કોણ θ પણ દર્શાવ્યાં છે.

આપાત કણોની સંખ્યાનો ખૂબ નાનો અંશ જ પાછો ફેંકાય (Rebound) છે, એ હકીકત એમ દર્શાવે છે કે સન્મુખ (Head-on) સંઘાત અનુભવતા α-કણોની સંખ્યા નાની છે. આનો અર્થ એ છે કે પરમાણુનું દળ નાના કદમાં કેન્દ્રિત થયેલું છે. આથી રધરફર્ડના પ્રકીર્ણન પ્રયોગ, એ ન્યુક્લિયસના પરિમાણની ઉચ્ચ સીમા નક્કી કરવા માટે એક શક્તિશાળી રીત છે.

ઉદાહરણ 12.1 જેમ પૃથ્વી સૂર્યની આસપાસ કક્ષામાં ભ્રમણ કરે છે તેમ પરમાણુ અંગેના રધરફર્ડના ન્યુક્લિયર મૉડેલમાં ન્યુક્લિયસ (ત્રિજ્યા લગભગ 10^{-15} m) સૂર્યના જેવો છે જેની આસપાસ ઈલેક્ટ્રૉન કક્ષામાં (ત્રિજ્યા 10^{-10} m) ભ્રમણ કરે છે. જો સૂર્યમંડળના પરિમાણના પ્રમાણ પરમાણુના જેવા હોય તો પૃથ્વી સૂર્યથી અત્યારે છે તે કરતાં વધારે નજીક કે દૂર હોત ? પૃથ્વીની કક્ષાની ત્રિજ્યા 1.5×10^{11} m છે. સૂર્યની ત્રિજ્યા 7×10^{8} m લેવાય છે.

ઉકેલ

ઈલેક્ટ્રૉનની કક્ષાની ત્રિજ્યા અને ન્યુક્લિયસની ત્રિજ્યાનો ગુણોત્તર (10^{-10} m) / (10^{-15} m) = 10^5 છે, એટલે કે ઈલેક્ટ્રૉનની કક્ષાની ત્રિજ્યા ન્યુક્લિયસની ત્રિજ્યા કરતાં 10^5 ગણી મોટી છે. જો પૃથ્વીની કક્ષાની ત્રિજ્યા સૂર્યની ત્રિજ્યા કરતાં 10^5 ગણી મોટી હોત તો પૃથ્વીની કક્ષાની ત્રિજ્યા $10^5 \times 7 \times 10^8$ m = 7×10^{13} m હોત. આ મૂલ્ય પૃથ્વીની વાસ્તવિક કક્ષીય ત્રિજ્યા કરતાં 100 ગણાથી પણ વધારે છે. આમ, પૃથ્વી સૂર્યથી ઘણી વધારે દૂર હોત. આનો અર્થ એ છે કે આપણા સૂર્યમંડળમાં છે તે કરતાં પરમાણુ ખાલી અવકાશનો ઘણો વધુ અંશ ધરાવે છે.

ઉદાહરણ 12.1

ઉદાહરણ 12.2 ગેઈગર-માર્સ્ડનના પ્રયોગમાં 7.7 MeV α-કણ ક્ષણિક સ્થિર બનીને તેની દિશા ઉલટાવે તે અગાઉ ન્યુક્લિયસથી તેનું નજીકતમ અંતર (Distance of Closest Approach) કેટલું હશે ?

ઉકેલ અત્રે ચાવીરૂપ ખ્યાલ એ છે કે, પ્રકીર્ણનની સમગ્ર પ્રક્રિયા દરમિયાન α-કણ અને સુવર્ણના ન્યુક્લિયસથી બનેલા તંત્રની કુલ યાંત્રિક ઊર્જા સંરક્ષિત (અચળ) રહે છે. કણ અને ન્યુક્લિયસ આંતરક્રિયા કરે તે અગાઉ તંત્રની પ્રારંભિક યાંત્રિક ઊર્જા E_i છે અને જ્યારે α-કણ ક્ષણિક સ્થિર થાય ત્યારે તંત્રની યાંત્રિક ઊર્જા E_f છે. પ્રારંભિક ઊર્જા E_i તો આપાત કણની માત્ર ગતિઊર્જા K છે. અંતિમ ઊર્જા તંત્રની ફક્ત વિદ્યુત સ્થિતિઊર્જા U છે. સ્થિતિઊર્જા U સમીકરણ (12.1) પરથી ગણી શકાય છે.

જ્યારે α-કણ તેના થોભક (અટકવાના) બિંદુએ પહોંચે ત્યારે α-કણના અને સુવર્ણના ન્યુક્લિયસના કેન્દ્રો વચ્ચેનું અંતર, ધારોકે d છે.

આપણે ઊર્જાનું સંરક્ષણ $E_i = E_f$ ને

$$K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(2e)(Ze)}{d} = \frac{2Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 d}$$

તરીકે લખી શકીએ છીએ. આમ α-કણનું સુવર્ણના ન્યુક્લિયસથી નજીકતમ અંતર

$$d = \frac{2Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 K}$$

જેટલું છે. નૈસર્ગિક ઉદ્‌ગમ ધરાવતાં α-કણોની મહત્તમ ગતિઊર્જા 7.7 MeV અથવા 1.2×10^{-12} J છે. આથી $1/4\pi\varepsilon_0 = 9 \times 10^9$ N m^2/C^2 અને $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C મૂલ્યોનો ઉપયોગ કરતાં,

$$d = \frac{(2)(9.0\times10^9\,\text{Nm}^2/\text{C}^2)(1.6\times10^{-19}\,\text{C})^2(\text{Z})}{1.2\times10^{-12}\,\text{J}}$$

$$= 3.84\times10^{-16}\,(\text{Z})\,\text{m}$$

વરખના દ્રવ્ય (સુવર્ણ)નો પરમાણુ ક્રમાંક Z = 79 છે, તેથી $d(Au) = 3.0 \times 10^{-14}$ m = 30 *fm* [1 *fm* (એટલે કે ફર્મિ) = 10^{-15} m]

આથી સુવર્ણ (ગોલ્ડ)ના ન્યુક્લિયસની ત્રિજ્યા 3.0×10^{-14} m કરતાં ઓછી છે. આ મૂલ્ય અવલોકિત પરિણામ સાથે સારી સંમતિ દર્શાવતું નથી, કારણ કે સુવર્ણના ન્યુક્લિયસની વાસ્તવિક ત્રિજ્યા 6 *fm* છે. આ ત્રુટિનું કારણ એ છે કે ન્યુક્લિયસથી નજીકતમ અંતર d, સુવર્ણના ન્યુક્લિયસ અને α-કણની ત્રિજ્યાઓના સરવાળા કરતાં ખાસ્સું મોટું છે. આમ, α-કણ સુવર્ણ (ગોલ્ડ) ન્યુક્લિયસનો સ્પર્શ પણ કર્યા વિના પોતાની દિશા ઉલટાવે છે.

ઉદાહરણ 12.2

PHYSICS

Simulate Rutherford scattering experiment
http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/nucleus/nucleus6_1.htm

12.2.2 ઈલેક્ટ્રૉન કક્ષાઓ (Electron Orbits)

પ્રચલિત ખ્યાલોનો ઉપયોગ કરનારું રધરફર્ડનું પરમાણુ અંગેનું ન્યુક્લિયર મૉડેલ પરમાણુનું એવું ચિત્ર રજૂ કરે છે કે પરમાણુ, તેના કેન્દ્રમાં ખૂબ નાના, દળદાર અને ધન વિદ્યુતભારિત ન્યુક્લિયસ અને તેની આસપાસ ગતિક રીતે સ્થાયી એવી અનુરૂપ કક્ષાઓમાં ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉનનો બનેલો, વિદ્યુતીય રીતે તટસ્થ ગોળો છે. ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉન અને ન્યુક્લિયસ વચ્ચેનું સ્થિત વિદ્યુત આકર્ષણ બળ F_e, તેમને કક્ષામાં ગતિશીલ રાખવા માટેનું જરૂરી કેન્દ્રગામી બળ (F_c) પુરું પાડે છે. આમ, હાઈડ્રોજન પરમાણુમાં ગતિકીય રીતે સ્થાયી કક્ષા માટે

$$F_e = F_c$$

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \qquad (12.2)$$

આમ, કક્ષીય ત્રિજ્યા અને ઈલેક્ટ્રૉનના વેગ વચ્ચેનો સંબંધ

$$r = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 m\upsilon^2} \tag{12.3}$$

છે. હાઈડ્રોજન પરમાણુમાં ઈલેક્ટ્રૉનની ગતિઊર્જા (K) અને સ્થિતવિદ્યુત સ્થિતિઊર્જા (U)

$$K = \frac{1}{2} m\upsilon^2 = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} \quad \text{અને} \quad U = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \quad \text{છે.}$$

(Uમાંનું ઋણ ચિહ્ન સૂચવે કે સ્થિત વિદ્યુતબળ $-r$ દિશામાં છે.) આમ, હાઈડ્રોજન પરમાણુમાં ઈલેક્ટ્રૉનની કુલ ઊર્જા E

$$E = K + U = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

$$= -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} \tag{12.4}$$

છે. ઈલેક્ટ્રૉનની કુલ ઊર્જા ઋણ છે. આ એ હકીકતનું સૂચન કરે છે કે ઈલેક્ટ્રૉન ન્યુક્લિયસ સાથે બંધિત છે. જો E ધન હોત તો ઈલેક્ટ્રૉન ન્યુક્લિયસની આસપાસ બંધ કક્ષામાં ન ફરતો હોત.

ઉદાહરણ 12.3

ઉદાહરણ 12.3 પ્રાયોગિક રીતે એમ જણાયું છે કે હાઈડ્રોજન પરમાણુને પ્રોટોન અને ઈલેક્ટ્રૉનમાં છૂટા પાડવા માટે 13. 6 eV ઊર્જાની જરૂર છે. હાઈડ્રોજન પરમાણુમાં ઈલેક્ટ્રૉનની કક્ષીય ત્રિજ્યા અને વેગની ગણતરી કરો.

ઉકેલ હાઈડ્રોજન પરમાણુમાં ઈલેક્ટ્રૉનની કુલ ઊર્જા $-13.6\ e$V.

$-13.6\ e\text{V} = -13.6 \times 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J} = -2.2 \times 10^{-18}\ \text{J}$ છે. આમ, સમીકરણ (12.4) પરથી આપણને,

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} = -2.2 \times 10^{-18}\ \text{J} \text{ મળે.}$$

આ પરથી કક્ષીય ત્રિજ્યા,

$$r = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 E} = -\frac{(9\times10^9\ \text{N m}^2/\text{C}^2)(1.6\times10^{-19}\ \text{C})^2}{(2)(-2.2\times10^{-18}\ \text{J})}$$

$$= 5.3 \times 10^{-11}\ \text{m}$$

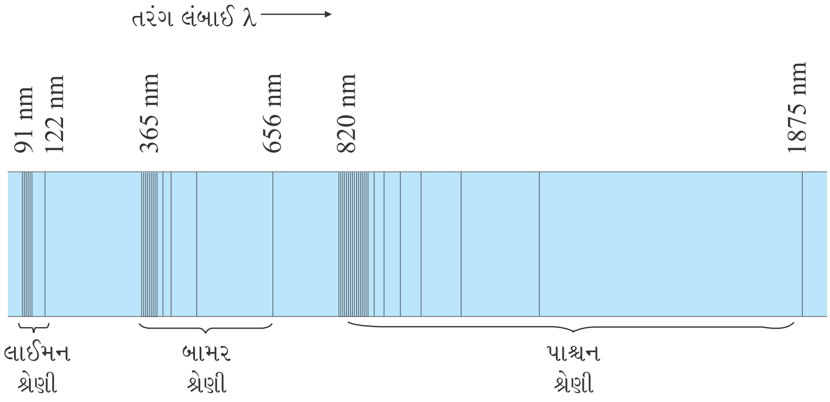
ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉનનો વેગ, $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg લઈને સમીકરણ (12.3) પરથી ગણી શકાય.

$$\upsilon = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0 mr}} = 2.2 \times 10^6\ \text{m/s}$$

12.3 પરમાણુ વર્ણપટ (Atomic Spectra)

પરિચ્છેદ 12.1માં જણાવ્યા મુજબ, દરેક તત્વને તેના દ્વારા ઉત્સર્જિત વિકિરણનો લાક્ષણિક વર્ણપટ હોય છે. નીચા દબાણે પરમાણુક વાયુ કે બાષ્પમાંથી સામાન્ય રીતે વિદ્યુતપ્રવાહ પસાર કરીને તેને ઉત્તેજિત કરવામાં આવે છે ત્યારે ઉત્સર્જિત વિકિરણના વર્ણપટમાં અમુક નિશ્ચિત તરંગલંબાઈઓ જ હોય છે. આ પ્રકારના વર્ણપટને ઉત્સર્જન રેખીય વર્ણપટ કહે છે અને તે અંધકારમય (અંધારી)

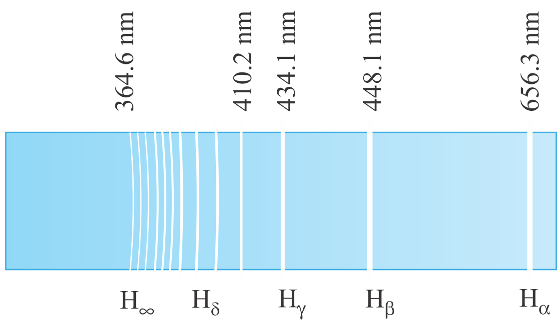
પાર્શ્વભૂમિમાં પ્રકાશિત રંગીન રેખાઓનો બનેલો છે. પરમાણુક હાઈડ્રોજન વડે ઉત્સર્જિત વર્ણપટ આકૃતિ 12.5માં દર્શાવેલ છે. આથી, કોઈ વાયુના ઉત્સર્જિત રેખીય વર્ણપટનો અભ્યાસ તે વાયુની ઓળખ માટે 'અંગુલિછાપ' (Fingerprint) જેવું કામ કરે છે. જ્યારે શ્વેત પ્રકાશ આ વાયુમાંથી પસાર થાય અને આપણે તેમાંથી નિર્ગમિત પ્રકાશનું સ્પેક્ટ્રોમીટરની મદદથી વિશ્લેષણ કરીએ ત્યારે આપણને વર્ણપટમાં કેટલીક કાળી (અપ્રકાશિત) રેખાઓ દેખાય છે. આ અપ્રકાશિત રેખાઓ બરાબર તે જ તરંગલંબાઈઓને અનુરૂપ છે કે જે આ વાયુના ઉત્સર્જન વર્ણપટમાં જોવા મળતી હતી. આ અપ્રકાશિત રેખાઓથી બનતા વર્ણપટને વાયુના દ્રવ્યનો શોષણ વર્ણપટ કહે છે.



આકૃતિ 12.5 હાઈડ્રોજનના વર્ણપટમાં ઉત્સર્જન રેખાઓ

12.3.1 વર્ણપટ શ્રેણીઓ (Spectral Series)

આપણે કદાચ એવી અપેક્ષા રાખીએ કે કોઈ ચોક્કસ તત્વ વડે ઉત્સર્જિત પ્રકાશની આવૃત્તિઓ કોઈ ચોક્કસ નિયમિતતા ધરાવતી હશે. હાઈડ્રોજન સૌથી સાદો પરમાણુ છે અને તેથી તેનો વર્ણપટ સૌથી સાદો છે. આમ છતાં, અવલોકિત વર્ણપટમાં, પ્રથમ નજરે, વર્ણપટ રેખાઓમાં કોઈ વ્યવસ્થા કે નિયમિતતા જેવું દેખાતું નથી. પરંતુ હાઈડ્રોજન વર્ણપટના કેટલાંક સમૂહો (Sets)માંની રેખાઓ વચ્ચેનું અંતર નિયમિત રીતે ઘટતું જાય છે (આકૃતિ 12.5). આ દરેક સમૂહને *વર્ણપટ શ્રેણી* કહે છે. 1885માં આવી પ્રથમ શ્રેણી સ્વીડનના શાળાના શિક્ષક જોહ્‌ન જેકબ બામર (1825-1898) દ્વારા હાઈડ્રોજન વર્ણપટના દૃશ્ય વિભાગમાં જોવામાં આવી હતી. આ શ્રેણીને *બામર શ્રેણી* (આકૃતિ 12.6) કહે છે. લાલ રંગના વિભાગમાં દેખાતી મહત્તમ તરંગલંબાઈ 656.3 nmની રેખાને H_α રેખા, તેની પછીની બ્લુ-ગ્રીન વિભાગમાં દેખાતી 486.1 nm તરંગલંબાઈની રેખાને H_β રેખા, ત્રીજી જાંબલી વિભાગમાં દેખાતી 434.1 nm તરંગલંબાઈની રેખાને H_γ રેખા વગેરે કહે છે. જેમ તરંગલંબાઈ ઘટતી જાય તેમ રેખાઓ એકબીજાની વધુ નજીક આવેલી અને ઓછી તીવ્રતા ધરાવતી જણાય છે. અવલોકિત તરંગલંબાઈઓ માટે બામરે એક સરળ આનુભવિક (Empirical) સૂત્ર



આકૃતિ 12.6

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right) \qquad (12.5)$$

મેળવ્યું. જ્યાં, λ તરંગલંબાઈ છે, R અચળાંક છે, જેને *રીડબર્ગનો અચળાંક* કહે છે અને *n*ને પૂર્ણાંક મૂલ્યો 3, 4, 5 વગેરે હોય છે. Rનું મૂલ્ય $1.097 \times 10^7\ m^{-1}$ છે. આ સમીકરણને બામરનું સૂત્ર કહે છે.

સમીકરણ (12.5)માં $n = 3$ લેતાં, H_α રેખાની તરંગલંબાઈ મળે છે.

$$\frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{3^2}\right)m^{-1}$$

$= 1.522 \times 10^{6}\ m^{-1}$

એટલે કે $\lambda = 656.3$ nm

n = 4 માટે H_β રેખાની તરંગલંબાઈ મળે, વગેરે. $n = \infty$ માટે શ્રેણીની સીમા (Limit) λ = 364.6 nm મળે છે. બામર શ્રેણીની આ સૌથી ટૂંકી (લઘુત્તમ) તરંગલંબાઈ છે. આ સીમાથી આગળ કોઈ સ્પષ્ટ રેખા દેખાતી નથી, પણ તેના બદલે ઝાંખો સતત વર્ણપટ દેખાય છે. ત્યારપછી હાઈડ્રોજન માટે બીજી વર્ણપટ શ્રેણીઓ શોધાઈ હતી. તેમને શોધનારના નામ પરથી આ શ્રેણીઓને લાઈમન, પાશ્ચન, બ્રેકેટ અને ફંડ શ્રેણીઓ કહે છે. તેમને નીચેના સૂત્રો દ્વારા રજૂ કરાય છે :

લાઈમન શ્રેણી :

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 2, 3, 4... \qquad (12.6)$$

પાશ્ચન શ્રેણી :

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 4, 5, 6... \qquad (12.7)$$

બ્રેકેટ શ્રેણી :

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 5, 6, 7... \qquad (12.8)$$

ફંડ શ્રેણી :

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 6, 7, 8... \qquad (12.9)$$

લાઈમન શ્રેણી પારજાંબલી (Ultraviolet) વિભાગમાં છે તથા પાશ્ચન, બ્રેકેટ અને ફંડ શ્રેણીઓ પારરક્ત (Infrared) વિભાગમાં છે.

આપણે બામરનું સૂત્ર સમીકરણ (12.5), પ્રકાશની આવૃત્તિના પદમાં લખવા માટે

$c = \nu\lambda$

અથવા $\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$ યાદ કરીએ.

આમ, સમીકરણ (12.5)

$$\nu = Rc\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (12.10)$$

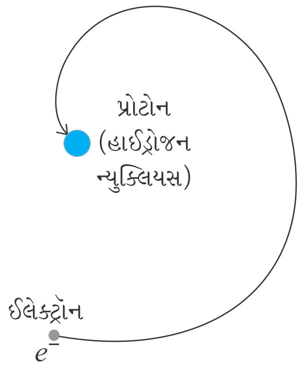
બને છે. બહુ ઓછાં તત્વો (હાઈડ્રોજન, સીંગલી આયોનાઈઝ્ડ (Singly Ionised) હિલિયમ અને ડબલી આયોનાઈઝ્ડ (Doubly Ionised) લિથિયમ) એવાં છે કે જેમના વર્ણપટ સમીકરણ (12.5), સમીકરણ (12.6) જેવાં સરળ સૂત્ર દ્વારા રજૂ કરી શકાય.

સમીકરણ (12.5) - (12.9) ઉપયોગી છે કારણ કે તેઓ હાઈડ્રોજન પરમાણુ દ્વારા ઉત્સર્જન કે શોષણ પામતી તરંગલંબાઈઓ દર્શાવે છે. આમ છતાં, આ પરિણામો આનુભવિક (પ્રયોગથી મળેલ) છે અને હાઈડ્રોજન વર્ણપટમાં માત્ર અમુક જ તરંગલંબાઈઓ શા માટે દેખાય છે તેનું કોઈ કારણ આપતા નથી.

12.4 હાઈડ્રોજન પરમાણુનું બોહ્ર મૉડેલ (Bohr Model of the Hydrogen Atom)

રધરફર્ડે સૂચવેલું પરમાણુનું મૉડેલ એવું ધારી લે છે કે તે જેનું અનુકરણ કરે છે તે, સૂર્ય-ગ્રહ તંત્રની જેમ કેન્દ્રમાં ન્યુક્લિયસ અને ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉનનું બનેલું પરમાણુ સ્થાયી (Stable) છે. આમ છતાં, આ બે પરિસ્થિતિઓ વચ્ચે કેટલાક મૂળભૂત તફાવત છે. ગ્રહોનું તંત્ર ગુરુત્વાકર્ષણ બળથી

પકડાયેલું રહે છે, જ્યારે ન્યુક્લિયસ-ઈલેક્ટ્રૉનનું તંત્ર, તેઓ વિદ્યુતભારિત હોવાથી, બળ અંગેના કુલંબના નિયમથી આંતરક્રિયા કરે છે. આપણે જાણીએ છીએ કે વર્તુળાકારે ગતિ કરતો પદાર્થ સતત પ્રવેગ ધરાવે છે. આ પ્રવેગ કેન્દ્રગામી પ્રકારનો છે. પ્રચલિત વિદ્યુતચુંબકીય વાદ (સિદ્ધાંત) અનુસાર પ્રવેગિત થતો વિદ્યુતભાર વિદ્યુતચુંબકીય તરંગોના રૂપમાં વિકિરણનું ઉત્સર્જન કરે છે. આથી, પ્રવેગિત ઈલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા સતત ઘટવી જોઈએ. આવો ઈલેક્ટ્રૉન અંદર તરફ સર્પિલ ગતિ કરીને અંતે ન્યુક્લિયસમાં પડી જાય (આકૃતિ 12.7). આમ, આવો પરમાણુ સ્થાયી (Stable) ન જ હોઈ શકે. આ ઉપરાંત, પ્રચલિત વિદ્યુતચુંબકીય વાદ અનુસાર ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉન વડે ઉત્સર્જિત વિદ્યુતચુંબકીય તરંગોની આવૃત્તિ, પરિભ્રમણની આવૃત્તિ જેટલી હોય છે. ઈલેક્ટ્રૉન જેમ-જેમ અંદર તરફ સર્પિલ ગતિ કરે, તેમ તેમ તેનો કોણીય વેગ અને તેથી આવૃત્તિ સતત બદલાયા કરે અને તેથી ઉત્સર્જિત પ્રકાશની આવૃત્તિ પણ સતત બદલાય. આમ, તે સતત વર્ણપટ ઉત્સર્જિત કરે, જે હકીકતમાં જોવા મળતા રેખીય વર્ણપટથી વિરુદ્ધ છે. સ્પષ્ટ રીતે, રધરફર્ડ મૉડેલ તો વાર્તાનો એક જ ભાગ આપણને જણાવે છે. એનો અર્થ એ છે કે પરમાણુનું બંધારણ સમજાવવા માટે પ્રચલિત ખ્યાલો પુરતા નથી.



આકૃતિ 12.7 પરમાણુનો પ્રવેગિત ઈલેક્ટ્રૉન જેમ ઊર્જા ગુમાવે તેમ સર્પિલ ગતિથી ન્યુક્લિયસમાં જવો જોઈએ.

નીલ્સ હેનરીક ડેવીડ બોહ્ર (Niels Henrik David Bohr)

નીલ્સ હેનરીક ડેવીડ બોહ્ર (Niels Henrik David Bohr) (1885-1962) : ડેન્માર્કનો ભૌતિકવિજ્ઞાની જેણે ક્વૉન્ટમ વિચારોની મદદથી હાઈડ્રોજનનો વર્ણપટ સમજાવ્યો. તેણે ન્યુક્લિયસના પ્રવાહી બુંદ મૉડેલ પર આધારિત ન્યુક્લિયર વિખંડનનો વાદ આપ્યો. બોહ્રે ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રમાં સૈદ્ધાંતિક કોયડાઓની સ્પષ્ટતામાં ખાસ કરીને પૂરક સિદ્ધાંત (Complementary Principle)નું સૂચન કરીને ફાળો આપ્યો.

ઉદાહરણ 12.4

ઉદાહરણ 12.4 હાઈડ્રોજન પરમાણુમાં પ્રોટોનની આસપાસ ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉન વડે ઉત્સર્જિત પ્રકાશની પ્રારંભિક આવૃત્તિ, પ્રચલિત વિદ્યુતચુંબકીય વાદ અનુસાર ગણો.

ઉકેલ ઉદાહરણ 12.3 પરથી આપણે જાણીએ છીએ કે હાઈડ્રોજન પરમાણુમાં પ્રોટોનની આસપાસ 5.3×10^{-11} m ત્રિજ્યાની કક્ષામાં ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉનનો વેગ 2.2×10^{6} m/s છે. આથી, પ્રોટોનની આસપાસ ઈલેક્ટ્રૉનના ભ્રમણની આવૃત્તિ

$$\nu = \frac{\upsilon}{2\pi r} = \frac{2.2 \times 10^{6}\,\mathrm{m\,s^{-1}}}{2\pi(5.3 \times 10^{-11}\,\mathrm{m})}$$

$$\approx 6.6 \times 10^{15}\ \mathrm{Hz}$$

પ્રચલિત વિદ્યુતચુંબકીય વાદ અનુસાર, આપણે જાણીએ છીએ કે ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉન વડે ઉત્સર્જિત વિદ્યુતચુંબકીય તરંગોની આવૃત્તિ, ન્યુક્લિયસની આસપાસના તેના ભ્રમણની આવૃત્તિ જેટલી હોય છે. આમ, ઉત્સર્જિત પ્રકાશની પ્રારંભિક આવૃત્તિ 6.6×10^{15} Hz છે.

નવા જ વિકાસ પામતા ક્વૉન્ટમ અધિતર્કનો ઉમેરો કરીને નીલ્સ બોહ્ર (1885-1962) દ્વારા આ મૉડેલમાં કેટલાક ફેરફારો કરવામાં આવ્યા. 1912માં નીલ્સ બોહ્રે રધરફર્ડની પ્રયોગશાળામાં કેટલાક મહિનાઓ માટે અભ્યાસ કર્યો હતો અને રધરફર્ડના ન્યુક્લિયર મૉડેલના વાજબીપણા અંગે તેમને ખાતરી હતી. ઉપર ચર્ચેલ દ્વિધાનો સામનો કરતાં, 1913માં બોહ્ર એવા નિર્ણય પર પહોંચ્યા કે સ્થૂળ માપક્રમ (મોટા માપક્રમ) પરની ઘટનાઓને સમજાવવામાં વિદ્યુતચુંબકીય વાદ સફળ હોવા છતાં તે પરમાણુ માપક્રમ પરની પ્રક્રિયાઓને લાગુ પાડી શકાતો નથી. એ સ્પષ્ટ થયું કે સ્થાપિત થયેલા પ્રચલિત યંત્રશાસ્ત્રના અને વિદ્યુતચુંબકત્વના સિદ્ધાંતોથી મૂળભૂત રીતે સારા એવા જુદા પડતા ખ્યાલોની, પરમાણુનું બંધારણ અને તેનો પરમાણુ વર્ણપટ સાથેનો સંબંધ સમજવા માટે જરૂર છે. બોહ્રે પ્રચલિત અને પ્રારંભના ક્વૉન્ટમ ખ્યાલોને સંયોજિત કરીને તેનો વાદ ત્રણ સ્વીકૃતિઓના સ્વરૂપમાં આપ્યો. આ સ્વીકૃતિઓ આ પ્રમાણે છે :

(i) બોહ્રની પ્રથમ સ્વીકૃતિ એ હતી કે *પરમાણુમાં ઈલેક્ટ્રૉન કેટલીક સ્થાયી કક્ષાઓમાં વિકિરણ ઊર્જાનું ઉત્સર્જન કર્યા વિના ભ્રમણ કરી શકે છે.* આ બાબત વિદ્યુતચુંબકીય વાદના અનુમાનો કરતાં વિરૂદ્ધ છે. આ સ્વીકૃતિ અનુસાર દરેક પરમાણુ કેટલીક ચોક્કસ સ્થાયી અવસ્થાઓમાં હોઈ શકે છે અને દરેક શક્ય અવસ્થા ચોક્કસ મૂલ્યની ઊર્જા ધરાવે છે. આ અવસ્થાઓને પરમાણુની સ્થાયી અવસ્થાઓ કહે છે.

(ii) બોહ્રની બીજી સ્વીકૃતિ આ સ્થાયી અવસ્થાઓને વ્યાખ્યાયિત કરે છે. આ સ્વીકૃતિ જણાવે છે કે ન્યુક્લિયસની આસપાસ *ઈલેક્ટ્રૉન માત્ર એવી જ કક્ષાઓમાં ભ્રમણ કરે છે કે જેમાં તેનું કોણીય વેગમાન $h/2\pi$ના કોઈક પૂર્ણાંક ગુણાંક જેટલું હોય,* જ્યાં h એ પ્લેન્કનો અચળાંક ($= 6.6 \times 10^{-34}$ J s) છે. આમ, કક્ષીય ઈલેક્ટ્રૉનના કોણીય વેગમાન (L)નું ક્વૉન્ટમીકરણ થયેલ (Quantised) છે. એટલે કે

$$L = nh/2\pi \tag{12.11}$$

(iii) બોહ્રની ત્રીજી સ્વીકૃતિ દ્વારા પ્લૅન્ક અને આઈન્સ્ટાઈન દ્વારા વિકસિત કરેલા પ્રારંભિક ક્વૉન્ટમ ખ્યાલોનો પરમાણુવાદમાં સમાવેશ કરેલ હતો. તે જણાવે છે કે *ઈલેક્ટ્રૉન તેની એક વિકિરણ ઉત્સર્જિત ન કરતી કક્ષામાંથી નિમ્ન ઊર્જાની બીજી કક્ષામાં સંક્રાંતિ કરી શકે છે. જ્યારે તે આવું કરે છે ત્યારે એક ફોટોનનું ઉત્સર્જન થાય છે જેની ઊર્જા પ્રારંભિક અને અંતિમ અવસ્થાઓની ઊર્જાઓ વચ્ચેના તફાવત* જેટલી હોય છે. આ પરથી ઉત્સર્જિત ફોટોનની આવૃત્તિ (ν, ન્યુ એમ વંચાય)

$$h\nu = E_i - E_f \tag{12.12}$$

સૂત્ર દ્વારા મળે છે, જ્યાં E_i અને E_f એ પ્રારંભિક અને અંતિમ અવસ્થાઓની ઊર્જાઓ છે અને $E_i > E_f$.

હાઈડ્રોજન પરમાણુ માટે સમીકરણ (12.4) વિવિધ ઊર્જા સ્તરોની ઊર્જાઓ નક્કી કરવાનું સૂત્ર આપે છે. પરંતુ આ સમીકરણમાં ઈલેક્ટ્રૉનની કક્ષાની ત્રિજ્યા rની જરૂર છે. rની ગણતરી કરવા માટે બોહ્રની બીજી સ્વીકૃતિ, જે ઈલેક્ટ્રૉનના કોણીય વેગમાનની ક્વૉન્ટમીકરણની શરત છે, તેનો ઉપયોગ કરવામાં આવે છે. કોણીય વેગમાન L,

$$L = m\upsilon r$$

પરથી મળે છે.

બોહ્રની ક્વૉન્ટમીકરણની બીજી સ્વીકૃતિ [સમીકરણ (12.11)] જણાવે છે કે કોણીય વેગમાનના માન્ય મૂલ્યો $h/2\pi$ના પૂર્ણાંક ગુણાંકો છે.

$$L_n = m\upsilon_n r_n = \frac{nh}{2\pi} \tag{12.13}$$

જ્યાં, n એ પૂર્ણાંક છે, r_n એ n-મી શક્ય કક્ષાની ત્રિજ્યા છે અને υ_n એ n-મી કક્ષામાં ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉનની ઝડપ છે. માન્ય કક્ષાઓને nના મૂલ્ય અનુસાર 1, 2, 3, ... એવો ક્રમ અપાયેલ છે, જેને તે કક્ષાનો *મુખ્ય ક્વૉન્ટમ અંક (Principal Quantum Number)* કહે છે.

સમીકરણ (12.3) પરથી, υ_n અને r_n વચ્ચેનો સંબંધ

$$\upsilon_n = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0 m r_n}}$$

છે. તેનું સમીકરણ (12.13) સાથે સંયોજન કરતાં, આપણને υ_n અને r_nનાં સૂત્રો મળે છે.

$$\upsilon_n = \frac{1}{n}\,\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{1}{(h/2\pi)} \tag{12.14}$$

અને

$$r_n = \left(\frac{n^2}{m}\right)\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \frac{4\pi\varepsilon_0}{e^2} \tag{12.15}$$

સમીકરણ (12.14) દર્શાવે છે કે n-મી કક્ષામાં કક્ષીય વેગ ઘટીને n-મા ભાગનો થાય છે. સમીકરણ (12.15)નો ઉપયોગ કરીને સૌથી અંદરની કક્ષા ($n = 1$)નું પરિમાણ

$$r_1 = \frac{h^2\varepsilon_0}{\pi m e^2}$$

મળે છે. આ *ત્રિજ્યાને બોહ્ર ત્રિજ્યા* (*Bohr Radius*) કહે છે અને તેને પ્રતિક a_0 તરીકે રજૂ કરાય છે.

$$a_0 = \frac{h^2\varepsilon_0}{\pi m e^2} \tag{12.16}$$

h, m, ε_0 અને eનાં મૂલ્યો અવેજ કરતાં $a_0 = 5.29 \times 10^{-11}$ m મળે છે. સમીકરણ (12.15) પરથી એ પણ જોઈ શકાય છે કે કક્ષાઓની ત્રિજ્યાઓ n^2 મુજબ વધે છે.

હાઈડ્રોજન પરમાણુની સ્થાયી અવસ્થાઓમાં ઈલેક્ટ્રૉનની કુલ ઊર્જા, સમીકરણ (12.4)માં કક્ષીય ત્રિજ્યાનું મૂલ્ય અવેજ કરીને નીચે મુજબ મેળવી શકાય છે.

$$E_n = -\left(\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0}\right)\left(\frac{m}{n^2}\right)\left(\frac{2\pi}{h}\right)^2\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)$$

અથવા $$E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2} \tag{12.17}$$

સમીકરણ (12.17)માં યોગ્ય મૂલ્યો મૂકતાં,

$$E_n = -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{n^2}\text{ J} \tag{12.18}$$

મળે છે.

પરમાણુ ઊર્જાઓ Joule માં દર્શાવવાને બદલે ઘણીવાર ઈલેક્ટ્રૉન વોલ્ટ (eV)માં દર્શાવવામાં આવે છે.

1 eV = 1.6×10^{-19} J હોવાથી, સમીકરણ (12.18)ને નીચે મુજબ લખી શકાય છે.

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}\ e\text{V} \tag{12.19}$$

કક્ષામાં ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉનની કુલ ઊર્જાનું ઋણ મૂલ્ય એમ સૂચવે છે કે ઈલેક્ટ્રૉન ન્યુક્લિયસ સાથે બંધિત (Bound) છે. આમ, હાઈડ્રોજન પરમાણુમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનને તેના ન્યુક્લિયસથી (અથવા હાઈડ્રોજન પરમાણુ માટે પ્રોટોનથી) અનંત અંતરે દૂર કરવા માટે ઊર્જાની જરૂર પડશે.

સમીકરણો (12.17) થી (12.19) સાધિત કરવામાં એવી પૂર્વધારણા રહેલી છે કે ઈલેક્ટ્રૉનની કક્ષાઓ વર્તુળાકાર છે. જો કે વ્યસ્ત વર્ગના બળની અસર હેઠળ કક્ષાઓ વ્યાપકરૂપે દીર્ઘવૃત્તિય આકાર (Elliptical)ની હોય છે. (ગ્રહો સૂર્યના વ્યસ્ત વર્ગના ગુરુત્વ બળની અસર હેઠળ દીર્ઘવૃત્તિય કક્ષાઓમાં ભ્રમણ કરે છે.) આમ છતાં, જર્મન ભૌતિકવિજ્ઞાની આર્નોલ્ડ સોમરફેલ્ડ (1868-1951) દ્વારા એમ દર્શાવાયું કે વર્તુળાકાર કક્ષાઓનું નિયંત્રણ હળવું (Relax) કરવામાં આવે તો આ સમીકરણો દીર્ઘવૃત્તિય કક્ષાઓને પણ લાગુ પડે છે.

પરમાણુમાં ઈલેક્ટ્રૉનની કક્ષા વિરૂદ્ધ અવસ્થા (કક્ષીય ચિત્ર)

ભૌતિકવિજ્ઞાનના અભ્યાસમાં એક યા બીજા સમયે આપણને પરમાણુના બોહ્ર મૉડેલની ઓળખ થયેલી છે. આ મૉડેલનું ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રના ઈતિહાસમાં અને વિશેષ કરીને પરમાણુનું બંધારણ સમજાવવામાં, આગવું સ્થાન છે. પ્રચલિત ખ્યાલો મુજબ તો પ્રવેગિત કણને વિકિરણનું ઉત્સર્જન કરવાની જરૂર છે, તેનાથી વિપરિત (વિરૂદ્ધ) બોહ્રે ઈલેક્ટ્રૉન માટે નિશ્ચિત ઊર્જા કક્ષાઓનો ક્રાંતિકારી વિચાર રજૂ કર્યો તે એક સિમાચિહ્ન બની ગયેલ છે. બોહ્રે નિશ્ચિત કક્ષાઓમાં ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉનના કોણીય વેગમાનના ક્વૉન્ટમીકરણ (Quantisation)નો ખ્યાલ રજૂ કર્યો. આમ, તે પરમાણુના બંધારણ અંગેનું અર્ધ-પ્રચલિત (Semi Classical) ચિત્ર હતું.

હવે, ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રનો વિકાસ થતાં આપણે પરમાણુના બંધારણ અંગે વધુ સારી સમજણ ધરાવીએ છીએ. શ્રોડિંજર (Schrodinger)ના તરંગ સમીકરણના ઉકેલો પ્રોટોનના આકર્ષણ બળોને લીધે પરમાણુમાં બંધિત ઈલેક્ટ્રૉનનો તરંગ જેવો પ્રકાર દર્શાવે છે.

બોહ્ર મૉડેલમાં ઈલેક્ટ્રૉનની કક્ષા, ન્યુક્લિયસની આસપાસ ઈલેક્ટ્રૉનની ગતિનો વર્તુળાકાર પથ છે. પરંતુ ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્ર મુજબ પરમાણુમાં ઈલેક્ટ્રૉનની ગતિ સાથે કોઈ નિશ્ચિત માર્ગ (પથ) આપણે સાંકળી શકીએ નહિ. આપણે માત્ર, ન્યુક્લિયસની આસપાસ અમુક નિશ્ચિત વિસ્તારમાં ઈલેક્ટ્રૉનને શોધવાની સંભાવના (Probability)ની જ વાત કરી શકીએ. આ સંભાવના એક - ઈલેક્ટ્રૉન તરંગવિધેય જેને *Orbital* કહે છે તેના પરથી નક્કી કરી શકાય છે. આવું વિધેય ઈલેક્ટ્રૉનના ફક્ત યામો પર જ આધારિત છે.

આથી, એ જરૂરી છે કે આપણે આ બે મૉડેલ વચ્ચે રહેલો માર્મિક (સૂક્ષ્મ, Subtle) તફાવત સમજીએ :

- બોહ્ર મૉડેલ એક ઈલેક્ટ્રૉન પરમાણુઓ/આયનો માટે જ માન્ય છે, આ મૉડેલમાં દરેક કક્ષાને અપાતું ઊર્જાનું મૂલ્ય મુખ્ય ક્વૉન્ટમ અંક પર આધારિત છે. આપણે જાણીએ છીએ કે એક - ઈલેક્ટ્રૉન પરમાણુ/આયન માટે પરમાણુની સ્થાયી અવસ્થા સાથે સંકળાયેલ ઊર્જાનું મૂલ્ય માત્ર n પર આધારિત છે. બહુ-ઈલેક્ટ્રૉન પરમાણુ/આયન માટે આ સાચું નથી.
- હાઈડ્રોજન જેવા પરમાણુઓ/આયનો માટે શ્રોડિંજરના તરંગ સમીકરણના ઉકેલ જેને તરંગ વિધેય કહે છે તે, ન્યુક્લિયસની આસપાસ વિવિધ વિસ્તારોમાં ઈલેક્ટ્રૉનને શોધવાની સંભાવના અંગે માહિતી આપે છે. આ *Orbital*ને બોહ્ર મૉડેલમાં ઈલેક્ટ્રૉન માટે વ્યાખ્યાયિત કરેલ *કક્ષા* (*Orbit*) સાથે કોઈ સામ્યતા નથી.

ઉદાહરણ 12.5

ઉદાહરણ 12.5 પૃથ્વીની આસપાસ 10 kgનો એક ઉપગ્રહ (સેટેલાઈટ) 8000 km ત્રિજ્યા ધરાવતી વર્તુળ કક્ષામાં દર બે કલાકે એક વખત ભ્રમણ કરે છે. બોહ્રનો કોણીય વેગમાનનો અધિતર્ક, હાઈડ્રોજન પરમાણુમાંના ઈલેક્ટ્રૉનની જેમ જ ઉપગ્રહને પણ લાગુ પડે છે એમ ધારીને ઉપગ્રહની કક્ષાનો ક્વૉન્ટમ અંક શોધો.

ઉકેલ

સમીકરણ (12.13) પરથી આપણને

$m\upsilon_n r_n = nh/2\pi$

મળે. અત્રે $m = 10$ kg અને $r_n = 8 \times 10^6$ m. આપણને ભ્રમણ કરતા ઉપગ્રહનો આવર્તકાળ T તરીકે 2 h મળે છે. એટલે કે T = 7200 s

આમ, વેગ $\upsilon_n = 2\pi r_n / T$. ઉપગ્રહની કક્ષાનો ક્વૉન્ટમ અંક $n = (2\pi r_n)^2 \times m/(T \times h)$ યોગ્ય મૂલ્યો અવેજ કરતાં,

$n = (2\pi \times 8 \times 10^6 \text{ m})^2 \times 10/(7200 \text{ s} \times 6.64 \times 10^{-34} \text{ J s})$

$= 5.3 \times 10^{45}$

એ નોંધો કે ઉપગ્રહ માટેનો ક્વૉન્ટમ અંક અત્યંત મોટો છે ! હકીકતમાં આવા મોટા ક્વૉન્ટમ અંકો માટે ક્વૉન્ટમીકરણની શરતોનાં પરિણામો પ્રચલિત ભૌતિકવિજ્ઞાનથી મળતાં પરિણામો જેવાં હોય છે.

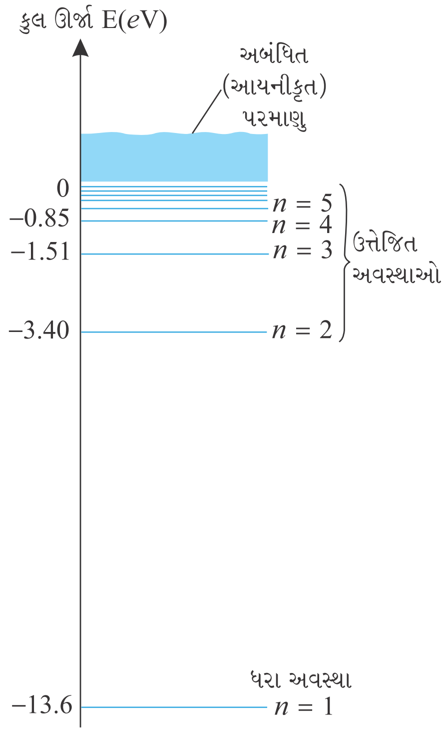
ઉદાહરણ 12.5

12.4.1 ઊર્જા સ્તરો (Energy Levels)

જ્યારે ઈલેક્ટ્રૉન, ન્યુક્લિયસની સૌથી નજીકની એટલે કે જેને માટે $n = 1$ હોય તેવી કક્ષામાં ભ્રમણ કરતો હોય ત્યારે પરમાણુની ઊર્જા લઘુત્તમ (મહત્તમ ઋણ મૂલ્ય) હોય છે. $n = 2, 3, \ldots$ માટે ઊર્જાનું નિરપેક્ષ મૂલ્ય નાનું હોય છે, આથી બહારની કક્ષાઓમાં ઊર્જા ક્રમશઃ વધુને વધુ હોય છે. પરમાણુની *નિમ્નતમ* (*Lowest*) અવસ્થાને *ધરા અવસ્થા* કહે છે અને તેમાં ઊર્જા લઘુત્તમ હોય છે, તેમજ ઈલેક્ટ્રૉન સૌથી નાની ત્રિજ્યા (બોહ્ર ત્રિજ્યા a_0)ની કક્ષામાં ભ્રમણ કરે છે. આ અવસ્થા ($n = 1$)ની ઊર્જા E_1, -13.6 eV છે. આથી, હાઈડ્રોજન પરમાણુની ધરા અવસ્થામાંથી ઈલેક્ટ્રૉનને મુક્ત કરવા માટે જરૂરી ઊર્જા 13.6 eVછે. તેને હાઈડ્રોજન પરમાણુની *આયનીકરણ* (*Ionisation*) *ઊર્જા* કહે છે. બોહ્ર મૉડેલનું આ પૂર્વાનુમાન (Prediction) આયનીકરણ ઊર્જાના પ્રાયોગિક મૂલ્ય સાથે ઉત્તમ સામ્યતા ધરાવે છે.

ઓરડાના તાપમાને મોટાભાગના હાઈડ્રોજન પરમાણુઓ *ધરા અવસ્થા*માં હોય છે. જ્યારે હાઈડ્રોજન પરમાણુ, કોઈ ઈલેક્ટ્રૉન સંઘાત (અથડામણ) જેવી પ્રક્રિયાથી ઊર્જા પ્રાપ્ત કરે છે ત્યારે પરમાણુ ઈલેક્ટ્રૉનને ઉચ્ચ અવસ્થાઓ પર લઈ જવા માટે શક્તિમાન બને છે. આ સ્થિતિમાં પરમાણુ *ઉત્તેજિત અવસ્થા*માં હોવાનું કહેવાય છે. સમીકરણ (12.19) પરથી $n = 2$ માટે, ઊર્જા E_2, -3.40 eV છે. આનો અર્થ એ કે હાઈડ્રોજન પરમાણુમાં ઈલેક્ટ્રૉનને તેની પ્રથમ ઉત્તેજિત અવસ્થા સુધી ઉત્તેજિત કરવા માટે જરૂરી ઊર્જા $E_2 - E_1 = -3.4\ eV - (-13.6\ eV) = 10.2\ eV$ છે. તે જ પ્રમાણે $E_3 = -1.51$ eV અને $E_3 - E_1 = 12.09$ eV અથવા હાઈડ્રોજન પરમાણુને તેની ધરા અવસ્થામાંથી બીજી ઉત્તેજિત અવસ્થા ($n = 3$) સુધી ઉત્તેજિત કરવા માટે, 12.09 eV ઊર્જાની જરૂર છે, વગેરે. આ ઉત્તેજિત અવસ્થાઓમાંથી ઈલેક્ટ્રૉન ઓછી ઊર્જાવાળી અવસ્થામાં પાછો પડે ત્યારે આ પ્રક્રિયામાં એક ફોટોનનું ઉત્સર્જન કરે છે. આમ, જેમ જેમ હાઈડ્રોજન પરમાણુની ઉત્તેજિતતા વધે છે (એટલે કે જેમ જેમ n વધે છે) તેમ તેમ ઉત્તેજિત પરમાણુમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનને મુક્ત કરવા માટે જરૂરી લઘુત્તમ ઊર્જા ઘટતી જાય છે.

સમીકરણ (12.19) પરથી હાઈડ્રોજન પરમાણુની સ્થાયી અવસ્થાઓની ઊર્જા સ્તર આકૃતિ*, બાજુમાંની આકૃતિ (12.8)માં દર્શાવેલ છે. મુખ્ય ક્વૉન્ટમ અંક n,



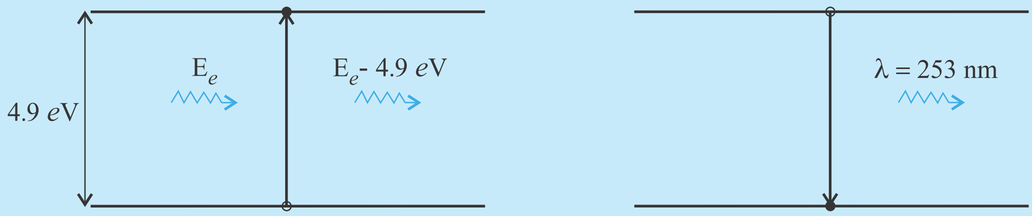
આકૃતિ 12.8 હાઈડ્રોજન પરમાણુ માટે ઊર્જા સ્તર આકૃતિ. ઓરડાના તાપમાને હાઈડ્રોજન પરમાણુમાં ઈલેક્ટ્રૉન તેનો મોટા ભાગનો સમય ધરા અવસ્થામાં પસાર કરે છે. હાઈડ્રોજન પરમાણુનું આયનીકરણ કરવા માટે ધરા અવસ્થામાંના ઈલેક્ટ્રૉનને 13.6 eV ઊર્જા પૂરી પાડવી પડે. [સમક્ષિતિજ રેખાઓ માન્ય (Allowed) ઊર્જા અવસ્થાઓની હાજરી દર્શાવે છે.]

* ઈલેક્ટ્રૉનને E = 0 eVથી ઉપરની કોઈ પણ કુલ ઊર્જા હોઈ શકે છે. આવી પરિસ્થિતિઓમાં ઈલેક્ટ્રૉન મુક્ત છે. આમ, આકૃતિ 12.8માં દર્શાવ્યા મુજબ ઊર્જા અવસ્થાઓનો એક સળંગ વિભાગ (Continuum) છે.

ઊર્જાના ચઢતા ક્રમમાં સ્થાયી અવસ્થાઓને દર્શાવે છે. આ આકૃતિમાં ઉચ્ચતમ ઊર્જા અવસ્થા, સમીકરણ (12.19)માં $n = \infty$ને અનુરૂપ છે અને તેની ઊર્જા 0 eV છે. પરમાણુની આટલી ઊર્જા જ્યારે ઈલેક્ટ્રૉન ન્યુક્લિયસથી સંપૂર્ણ દૂર ($r = \infty$) થઈને સ્થિર હોય ત્યારે હોય છે. જેમ n વધતો જાય તેમ ઉત્તેજિત અવસ્થાઓની ઊર્જાઓ કેવી વધુ ને વધુ નજીક આવે છે તે જુઓ.

ફ્રેન્ક-હર્ટ્ઝનો પ્રયોગ (FRANCK–HERTZ EXPERIMENT)

પરમાણુમાં અમુક નિશ્ચિત ઊર્જા સ્તરોના અસ્તિત્વની પ્રત્યક્ષ ચકાસણી 1914માં જેમ્સ ફ્રેન્ક અને ગુસ્તાવ હર્ટ્ઝ દ્વારા કરવામાં આવી હતી. તેમણે વિવિધ ગતિઊર્જા ધરાવતાં ઈલેક્ટ્રૉનને મરક્યુરિની બાષ્પ (Vapour)માંથી પસાર કરીને મળતા મરક્યુરિ બાષ્પના વર્ણપટનો અભ્યાસ કર્યો. ઈલેક્ટ્રૉન પર જુદી જુદી તીવ્રતા ધરાવતા વિદ્યુતક્ષેત્ર લાગુ પાડીને ઈલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા બદલવામાં આવી હતી. ઈલેક્ટ્રૉન મરક્યુરિના પરમાણુ સાથે અથડાઈને મરક્યુરિ પરમાણુઓને ઊર્જા પહોંચાડતા હતા. આવું ત્યારે જ થઈ શકે કે આપાત ઈલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા મરક્યુરિ પરમાણુના સ્તરમાં રહેલા ઈલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા અને તેની ઉપરના ખાલી સ્તરની ઊર્જાના તફાવત કરતાં, વધુ હોય (જુઓ આકૃતિ). દાખલા તરીકે, ઈલેક્ટ્રૉન વડે ભરાયેલા Hg પરમાણુના ઊર્જા સ્તર અને ઉપરના ખાલી સ્તર વચ્ચેનો તફાવત 4.9 eV છે. જો 4.9 eV જેટલી કે તે કરતાં વધુ ઊર્જા ધરાવતો કોઈ ઈલેક્ટ્રૉન મરક્યુરિ બાષ્પમાંથી પસાર થાય તો મરક્યુરિ પરમાણુમાંનો ઈલેક્ટ્રૉન આ આપાત ઈલેક્ટ્રૉનમાંથી ઊર્જાનું શોષણ કરી શકે અને ઉચ્ચ સ્તર સુધી ઉત્તેજિત થઈ શકે [આકૃતિ (a)]. આ રીતે આપાત થઈને અથડાતા ઈલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા આટલી માત્રામાં ઘટે છે.



(a) (b)

ત્યારપછી, આ ઉત્તેજિત ઈલેક્ટ્રૉન વિકિરણનું ઉત્સર્જન કરીને ધરા અવસ્થામાં પાછો પડે છે.

ઉત્સર્જિત વિકિરણની તરંગલંબાઈ

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6.625 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{4.9 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 253 \text{ nm છે.}$$

પ્રત્યક્ષ માપનમાં ફ્રેન્ક અને હર્ટ્ઝને જણાયું કે મરક્યુરિના ઉત્સર્જન વર્ણપટમાં આ તરંગલંબાઈને અનુરૂપ રેખા હાજર છે. પરમાણુમાં નિશ્ચિત ઊર્જાવાળા સ્તરો અંગે બોહ્રના મૂળભૂત વિચાર અને ફોટોનના ઉત્સર્જનની પ્રક્રિયાની આ પ્રાયોગિક ચકાસણી માટે ફ્રેન્ક અને હર્ટ્ઝને 1925માં નૉબેલ પ્રાઈઝ એનાયત થયું હતું.

12.5 હાઈડ્રોજન પરમાણુના રેખીય વર્ણપટ (THE LINE SPECTRA OF THE HYDROGEN ATOM)

બોહ્ર મૉડેલની ત્રીજી સ્વીકૃતિ મુજબ, જ્યારે પરમાણુ n_i ક્વૉન્ટમ અંકની ઉચ્ચ ઊર્જા અવસ્થામાંથી, n_f ($n_f < n_i$) ક્વૉન્ટમ અંકની નિમ્ન ઊર્જા અવસ્થામાં સંક્રાંતિ કરે છે ત્યારે તેના ઊર્જા તફાવત જેટલી ઊર્જાનો ફોટોન ઉત્સર્જિત થાય છે, જેની આવૃત્તિ ν_{if} નીચેના સૂત્ર પરથી મળે છે.

$$h\nu_{if} = E_{n_i} - E_{n_f} \tag{12.20}$$

E_{n_i} અને E_{n_f} માટે સમીકરણ (12.16) પરથી આપણને

$$h\nu_{if} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \tag{12.21}$$

$$\text{અથવા } \nu_{if} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \tag{12.22}$$

મળે છે. સમીકરણ (12.21) હાઈડ્રોજન પરમાણુના વર્ણપટ માટે રીડબર્ગનું સૂત્ર છે. આ સૂત્રમાં જો આપણે $n_f = 2$ અને $n_i = 3, 4, 5$ ... લઈએ તો તેનું સ્વરૂપ બામર શ્રેણી માટેના સમીકરણ (12.10) જેવું બને છે. રીડબર્ગના અચળાંક Rની ઓળખ

$$R = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} \tag{12.23}$$

તરીકે કરી શકાય છે.

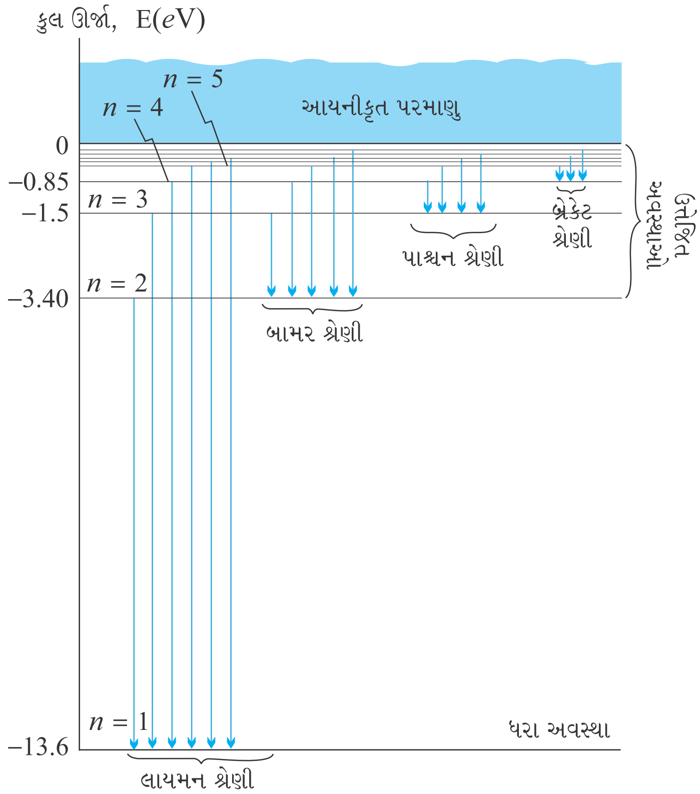
જો આપણે સમીકરણ (12.23)માં જુદા જુદા અચળાંકોનાં મૂલ્યો દાખલ કરીએ તો,

$R = 1.03 \times 10^7\ m^{-1}$

મળે છે. આ મૂલ્ય બામરના આનુભવિક સૂત્ર પરથી મળતા મૂલ્ય ($1.097 \times 10^7\ m^{-1}$)ની ખૂબ જ નજીક છે. રીડબર્ગના અચળાંકના સૈદ્ધાંતિક અને પ્રાયોગિક મૂલ્યોની આ સમાનતાએ બોહ્‌ર મૉડેલને પ્રત્યક્ષ અને નોંધપાત્ર સમર્થન પુરૂં પાડ્યું.

n_f અને n_i બંને પૂર્ણાંકો હોવાથી સમીકરણ (12.22) દર્શાવે છે કે વિવિધ પરમાણુ અવસ્થાઓ વચ્ચેની સંક્રાંતિઓમાં વિવિધ નિશ્ચિત આવૃત્તિઓના પ્રકાશનું ઉત્સર્જન થાય છે. હાઈડ્રોજન વર્ણપટ માટે બામરનું સૂત્ર $n_f = 2$ અને $n_i = 3, 4, 5$ વગેરેને અનુરૂપ છે. બોહ્‌ર મૉડેલના પરિણામોએ હાઈડ્રોજન પરમાણુ માટે બીજા પણ શ્રેણી વર્ણપટો હોવાનું સૂચન કર્યું. જેઓ $n_f = 1$ અને $n_i = 2, 3$ વગેરે, $n_f = 3$ અને $n_i = 4, 5$ વગેરેને અનુરૂપ શ્રેણીઓ અને તે જ પ્રમાણે આગળ બીજી શ્રેણીઓ માટે હોય. આવી શ્રેણીઓ સ્પેક્ટ્રોસ્કોપીક અભ્યાસોમાં જોવા મળી હતી અને તેઓ લાયમન, બામર, પાશ્ચન, બ્રેકેટ અને ફંડ શ્રેણીઓ તરીકે ઓળખાય છે. આ શ્રેણીઓને અનુરૂપ ઈલેક્ટ્રૉનની સંક્રાંતિઓ આકૃતિ 12.9માં દર્શાવી છે.

પરમાણુ વર્ણપટોમાં જુદી-જુદી રંગીન પ્રકાશિત રેખાઓ ત્યારે ઉત્પન્ન થાય છે કે જ્યારે ઈલેક્ટ્રૉન ઉચ્ચ ઊર્જા અવસ્થામાંથી નિમ્ન ઊર્જા અવસ્થામાં કૂદી પડીને ફોટોનનું ઉત્સર્જન કરે છે. આ વર્ણપટ-રેખાઓને ઉત્સર્જન રેખાઓ કહે છે. પરંતુ આ જ ઈલેક્ટ્રૉનને નિમ્ન ઊર્જા અવસ્થાથી ઉચ્ચ ઊર્જા અવસ્થામાં સંક્રાંતિ કરવા માટે જરૂરી ઊર્જા જેટલી જ ઊર્જા ધરાવતા ફોટોનને જો પરમાણુ શોષે તો એ ક્રિયાને શોષણ કહે છે. આમ, જો સતત મૂલ્યો ધરાવતી આવૃત્તિઓનાં



આકૃતિ 12.9 ઊર્જા સ્તરો વચ્ચેની સંક્રાંતિથી રેખીય વર્ણપટો ઉદ્‌ભવે છે.

ફોટોનને અત્યંત ઓછી ઘનતાના વાયુમાંથી પસાર કરી, તેમનું સ્પેક્ટ્રોમીટર વડે વિશ્લેષણ કરવામાં આવે તો એક સળંગ વર્ણપટમાં અપ્રકાશિત એવી શોષણ રેખાઓ જોવા મળે છે. અપ્રકાશિત રેખાઓ, વાયુના પરમાણુ વડે શોષાયેલી આવૃત્તિઓનું સૂચન કરે છે.

બોહ્‌રના મૉડેલ વડે અપાયેલી હાઈડ્રોજન પરમાણુના વર્ણપટની સમજૂતી એક ઉત્કૃષ્ટ સિદ્ધિ હતી, જેનાથી આધુનિક ક્વૉન્ટમ સિદ્ધાંત તરફના વિકાસને પ્રોત્સાહન મળ્યું. 1922માં, બોહ્‌રને ભૌતિકવિજ્ઞાનનું નોબેલ પ્રાઈઝ એનાયત થયું હતું.

ઉદાહરણ 12.6

ઉદાહરણ 12.6 રીડબર્ગના સૂત્રનો ઉપયોગ કરી, હાઈડ્રોજન વર્ણપટની લાયમન શ્રેણીની પ્રથમ ચાર વર્ણપટ રેખાઓની તરંગલંબાઈઓની ગણતરી કરો.

ઉકેલ રીડબર્ગનું સૂત્ર નીચે મુજબ છે,

$$hc/\lambda_{if} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

લાયમન શ્રેણીની પ્રથમ ચાર રેખાઓની તરંગલંબાઈઓ n_i = 2, 3, 4, 5 થી n_f = 1 સંક્રાંતિઓને અનુરૂપ છે.

$$\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} = 13.6\ eV = 21.76 \times 10^{-19}\ J$$

આથી,

$$\lambda_{i1} = \frac{hc}{21.76 \times 10^{-19}\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)}\ m$$

$$= \frac{6.625 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 \times n_i^2}{21.76 \times 10^{-19} \times (n_i^2 - 1)}\ m = \frac{0.9134\ n_i^2}{(n_i^2 - 1)} \times 10^{-7}\ m$$

$$= 913.4\, n_i^2/(n_i^2 - 1)\ \text{Å}$$

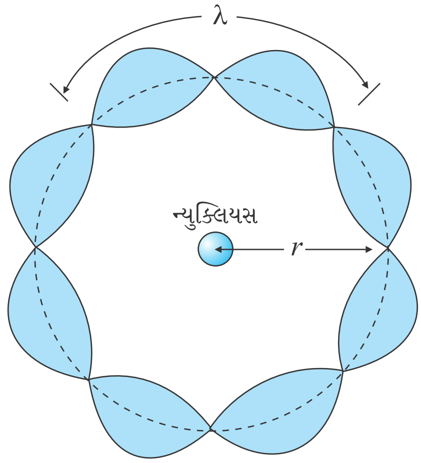
n_i = 2, 3, 4, 5 અવેજ કરતાં આપણને λ_{21} = 1218 Å, λ_{31} = 1028 Å, λ_{41} = 974.3 Å અને λ_{51} = 951.4 Å મળે છે.

12.6 બોહ્‌રની ક્વૉન્ટમીકરણની બીજી સ્વીકૃતિની ડિ બ્રોગ્લીની સમજૂતી (De Broglie's Explanation of Bohr's Second Postulate of Quantisation)

બોહ્‌રે તેના પરમાણુના મૉડેલમાં રજૂ કરેલી સ્વીકૃતિઓમાં સૌથી વધુ કોયડારૂપ તેની બીજી સ્વીકૃતિ છે. તે જણાવે છે કે ન્યુક્લિયસની આસપાસ કક્ષીય ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉનનું કોણીય વેગમાન ક્વૉન્ટમીકૃત (Quantised) છે. (એટલે કે, $L_n = nh/2\pi$; n = 1, 2, 3 ...). કોણીય વેગમાનને $h/2\pi$ના પૂર્ણાંક ગુણાંક ધરાવતાં મૂલ્યો જ શા માટે હોવાં જોઈએ ? બોહ્‌રે તેનું મૉડેલ રજૂ કર્યું તેના દસ વર્ષ બાદ, 1923માં ફ્રેંચ ભૌતિકવિજ્ઞાની લૂઈ ડિ બ્રોગ્લી (Louis de Broglie) એ આ કોયડાનો ઉકેલ જણાવ્યો.

પ્રકરણ-11માં આપણે શીખ્યા છીએ કે ડિ બ્રોગ્લીના અધિતર્ક મુજબ, ઈલેક્ટ્રૉન જેવાં દ્રવ્ય કણોને પણ તરંગ પ્રકૃતિ (તરંગ સ્વભાવ) હોય છે. પછીથી 1927માં, સી. જે. ડેવિસન અને એલ. એચ. ગર્મર

દ્વારા ઈલેક્ટ્રૉનની તરંગ પ્રકૃતિની પ્રાયોગિક ચકાસણી થઈ હતી. લૂઈ ડિ બ્રોગ્લીએ એવી દલીલ કરી કે બોહ્‌રના સૂચવ્યા મુજબ વર્તુળાકાર કક્ષામાંના ઈલેક્ટ્રૉનને દ્રવ્ય તરંગ (Particle Wave) તરીકે જોવું જોઈએ. દોરી પર પ્રસરતા તરંગોની જેમ, દ્રવ્ય તરંગો પણ અનુનાદ સ્થિતિઓમાં સ્થિત તરંગો ઉપજાવે છે. ધોરણ XIના ભૌતિકવિજ્ઞાનના પાઠ્યપુસ્તકના પ્રકરણ-15 પરથી, આપણે જાણીએ છીએ કે, જ્યારે દોરીને ખેંચીને છોડી દેવામાં આવે (આંચકો આપવામાં આવે–Plucked) ત્યારે મોટી સંખ્યામાં તરંગલંબાઈઓ ઉત્તેજિત થાય છે. આમ છતાં, જે તરંગો માટે છેડાઓ પર નિષ્પંદ બિંદુઓ (Nodes) હોય અને સ્થિત તરંગો રચતા હોય તેવા જ તરંગો ટકી રહે છે. આનો અર્થ એ કે દોરીમાં સ્થિત તરંગો ત્યારે રચાય છે કે જ્યારે તરંગે દોરી પર જતાં અને પાછા આવતાં કાપેલું કુલ અંતર, એક તરંગલંબાઈ, બે તરંગલંબાઈ અથવા તરંગલંબાઈના કોઈ પણ પૂર્ણાંક ગણું હોય. બીજી તરંગલંબાઈઓ ધરાવતાં તરંગો પરાવર્તન થતાં તેમની પોતાની સાથે વ્યતિકરણ અનુભવે છે અને તેમના કંપવિસ્તાર ઝડપી ઘટીને શૂન્ય થાય છે. r_n ત્રિજ્યાની n-મી વર્તુળાકાર કક્ષામાં ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉન માટે, કુલ અંતર કક્ષાના પરિઘ $2\pi r_n$ જેટલું છે.



આકૃતિ 12.10 વર્તુળાકાર કક્ષા પર સ્થિત તરંગ દર્શાવેલ છે. જ્યાં, ચાર ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈઓ કક્ષાના પરિઘમાં બંધબેસતી છે.

આમ, $2\pi r_n = n\lambda, \qquad n = 1, 2, 3, ...$ (12.24)

આકૃતિ 12.10, $n = 4$ માટેની વર્તુળાકાર કક્ષા પરનું સ્થિત દ્રવ્ય તરંગ દર્શાવે છે, એટલે કે $2\pi r_n = 4\lambda$. જ્યાં, λ એ n-મી કક્ષામાં ભ્રમણ કરતાં ઈલેક્ટ્રૉનની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ છે. પ્રકરણ-11 પરથી આપણને $\lambda = h/p$ મળે છે. જ્યાં, p એ ઈલેક્ટ્રૉનના વેગમાનનું મૂલ્ય છે. જો ઈલેક્ટ્રૉનની ઝડપ પ્રકાશની ઝડપ કરતાં ઘણી ઓછી હોય તો વેગમાન mv_n છે. આમ, $\lambda = h/mv_n$. સમીકરણ (12.24) પરથી આપણને $2\pi r_n = nh/mv_n$ અથવા $mv_n r_n = nh/2\pi$ મળે છે.

આ જ ઈલેક્ટ્રૉનના કોણીય વેગમાન માટે બોહ્‌રે સૂચવેલ ક્વૉન્ટમ શરત [સમીકરણ (12.13)] છે. પરિચ્છેદ 12.5માં આપણે જોયું છે કે હાઈડ્રોજન પરમાણુમાં નિશ્ચિત કક્ષાઓ અને ઊર્જા સ્તરોની સમજૂતીમાં આ સમીકરણ પાયારૂપ છે. આમ, ડિ બ્રોગ્લી અધિતર્કે, કક્ષામાં ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉનના કોણીય વેગમાનના ક્વૉન્ટમીકરણ માટેની બોહ્‌રની બીજી સ્વીકૃતિની સમજૂતી આપી. ક્વૉન્ટમીકૃત ઈલેક્ટ્રૉન કક્ષાઓ અને ઊર્જા અવસ્થાઓ ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ સ્વરૂપના કારણે છે અને માત્ર અનુનાદિત સ્થિત તરંગો ટકી શકે છે.

ગતિપથ અંગેનું પ્રચલિત ચિત્ર (સૂર્યની આસપાસ ગ્રહની જેમ ન્યુક્લિયસની આસપાસ કક્ષામાં ભ્રમણ કરતો ઈલેક્ટ્રૉન) ધરાવતું બોહ્‌રનું મૉડેલ હાઈડ્રોજન જેવા પરમાણુઓના* મોટાભાગનાં લક્ષણો ખાસ કરીને ઉત્સર્જિત અથવા પસંદગીયુક્ત શોષણ કરેલ વિકિરણની આવૃત્તિઓની સાચી આગાહી કરે છે. આમ છતાં આ મૉડેલની ઘણી મર્યાદાઓ છે.

કેટલીક આ મુજબ છે :

(i) બોહ્‌ર મૉડેલ હાઈડ્રોજન જેવાં પરમાણુઓને લાગુ પડે છે. તેને ફક્ત બે ઈલેક્ટ્રૉન ધરાવતા હિલિયમ જેવા પરમાણુઓ સુધી પણ લાગુ પાડી શકાતું નથી. હાઈડ્રોજન જેવાં પરમાણુઓ માટેનાં બોહ્‌રના મૉડેલની પદ્ધતિએ જ એક કરતાં વધુ ઈલેક્ટ્રૉનવાળા પરમાણુઓના વિશ્લેષણનો પ્રયાસ કરવામાં આવ્યો હતો પરંતુ તેને કોઈ સફળતા મળી ન હતી. દરેક ઈલેક્ટ્રૉન ધન વિદ્યુતભારિત ન્યુક્લિયસની સાથે જ નહિ પણ બીજા બધા ઈલેક્ટ્રૉન સાથે પણ

* હાઈડ્રોજન જેવા પરમાણુઓ કંઈક ધન વિદ્યુતભાર $+Ze$ ધરાવતા ન્યુક્લિયસ અને એક ઈલેક્ટ્રૉનના બનેલા છે, જ્યાં Z પ્રોટોનની સંખ્યા છે. તેના ઉદાહરણો તરીકે હાઈડ્રોજન પરમાણુ, સીંગલી આયોનાઈઝ્‌ડ હિલિયમ અને ડબલી આયોનાઈઝ્‌ડ લિથિયમ વગેરે છે. આ પરમાણુમાં વધારે જટિલ એવી ઈલેક્ટ્રૉન-ઈલેક્ટ્રૉન આંતરક્રિયા અસ્તિત્વ ધરાવતી નથી.

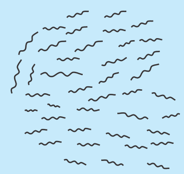
આંતરક્રિયા કરે છે તે હકીકતમાં જ મુશ્કેલી રહેલી છે. બોહ્ર મૉડેલની રચનામાં ધન વિદ્યુતભારિત ન્યુક્લિયસ અને ઈલેક્ટ્રૉન વચ્ચેનું વિદ્યુતબળ સંકળાયેલું છે. તે બહુ ઈલેક્ટ્રૉન પરમાણુઓમાં અનિવાર્યપણે દેખાતા ઈલેક્ટ્રૉન-ઈલેક્ટ્રૉન વચ્ચેના વિદ્યુતબળોનો સમાવેશ કરતું નથી.

(ii) બોહ્ર મૉડેલ, હાઈડ્રોજન પરમાણુઓ વડે ઉત્સર્જિત પ્રકાશની આવૃત્તિઓનું સાચી રીતે પુર્વાનુમાન કરે છે, તેમ છતાં આ મૉડેલ વર્ણપટમાં આવૃત્તિઓની સાપેક્ષ તીવ્રતાઓ સમજાવી શકતું નથી. હાઈડ્રોજનના ઉત્સર્જન વર્ણપટમાં, કેટલીક દશ્ય આવૃત્તિઓની તીવ્રતા ઓછી છે અને બીજીની તીવ્રતા વધુ છે. શા માટે ? પ્રાયોગિક અવલોકનો દર્શાવે છે કે કેટલીક સંક્રાંતિઓ અન્ય કરતાં વધારે માનીતી (Favoured) છે. બોહ્રનું મૉડેલ તીવ્રતાના ફેરફારો સમજાવવા માટે અશક્ત છે.

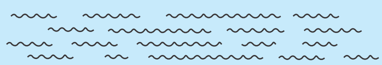
બોહ્રનું મૉડેલ પરમાણુનું મનોહર ચિત્ર રજૂ કરે છે અને તેને જટિલ પરમાણુઓ માટે લાગુ પાડી શકાતું નથી. જટિલ પરમાણુઓ માટે ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્ર પર આધારિત મૂળભૂત રીતે અલગ પડતા નવા વાદનો ઉપયોગ કરવો પડે છે.

લેસર પ્રકાશ (LASER LIGHT)

ભીડવાળા બજાર અથવા રેલ્વે સ્ટેશનનો વિચાર કરો જેનાં એક દરવાજેથી દાખલ થઈને લોકો બધી દિશામાં જતા હોય. તેમનાં પગલાં અસ્તવ્યસ્ત હોય છે અને તેમની વચ્ચે કોઈ કળા સંબંધ હોતો નથી. બીજી તરફ, મોટી સંખ્યાના સૈનિકો નિયંત્રિક કૂચમાં હોય, તેનો વિચાર કરો. તેમનાં પગલાં (કદમો) વચ્ચે ખૂબ સારો સંબંધ છે. અહીંની આકૃતિ જુઓ.



(a) બલ્બમાંથી આવતો પ્રકાશ



(b) લેસર પ્રકાશ

આ તફાવત, મીણબત્તી કે બલ્બ જેવા સામાન્ય ઉદ્‌ગમ દ્વારા ઉત્સર્જિત પ્રકાશ અને લેસર વડે ઉત્સર્જિત પ્રકાશ વચ્ચેના તફાવત જેવો છે. LASER એ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiationનું ટૂંકું સ્વરૂપ છે. 1960માં તેની શરૂઆતથી વિકાસ થતાં તે વિજ્ઞાન અને ટેક્નોલૉજીના દરેક ક્ષેત્રમાં દાખલ થયેલ છે. ભૌતિકવિજ્ઞાન, રસાયણવિજ્ઞાન, જીવવિજ્ઞાન, ઔષધવિજ્ઞાન, શસ્ત્રક્રિયા (Surgery), ઈજનેરી વગેરેમાં તેના ઉપયોગો જણાયા છે. 0.5 mW પાવર જેવા ઓછા પાવરના લેસર પેન્સિલ લેસર્સ કહેવાય છે અને તેઓ દર્શક (Pointer) તરીકે વપરાય છે. જુદા-જુદા પાવરના લેસર પણ હોય છે, જેમાંથી કેટલાક આંખની અથવા હોજરી (Stomach)માંની ગ્રંથિની નાજુક શસ્ત્રક્રિયા માટે યોગ્ય છે. અંતમાં, કેટલાક લેસર સ્ટીલને કાપી શકે કે કાયમી જોડાણ (Welding) કરી શકે તેવા હોય છે.

ઉદ્‌ગમમાંથી પ્રકાશ તરંગોના પેકેટ (Packets) સ્વરૂપે ઉત્સર્જિત થાય છે. સામાન્ય ઉદ્‌ગમમાંથી આવતો પ્રકાશ ઘણી તરંગલંબાઈઓનું મિશ્રણ ધરાવે છે. વળી જુદા જુદા તરંગો વચ્ચે કોઈ કળા-સંબંધ પણ હોતો નથી. તેથી આવો પ્રકાશ, કોઈ છિદ્રમાંથી પસાર કરવામાં આવે તો પણ, ઝડપથી ફેલાઈ જાય છે અને કિરણાવલિનું પરિમાણ અંતર સાથે ઝડપથી વધતું જાય છે. લેસર પ્રકાશની બાબતમાં, દરેક પેકેટની તરંગલંબાઈ લગભગ સમાન હોય છે. વળી, તરંગોના પેકેટની સરેરાશ લંબાઈ ઘણી વધારે હોય છે. આનો અર્થ એ છે કે લાંબા સમયગાળા સુધી ઘણો સારો કળા-સંબંધ હોય છે. આના પરિણામે લેસર કિરણાવલિનું ફેલાઈ જવું ઘણું ઘટી જાય છે.

જો ઉદ્‌ગમમાં N પરમાણુઓ હોય અને દરેક I તીવ્રતાનો પ્રકાશ ઉત્સર્જિત કરતા હોય તો સામાન્ય ઉદ્‌ગમ વડે ઉત્પન્ન થતી તીવ્રતા NIના સમપ્રમાણમાં હોય છે, જ્યારે લેસર ઉદ્‌ગમમાં તે N^2Iને સમપ્રમાણમાં છે. N ખૂબ જ મોટી સંખ્યા છે તેમ વિચારતાં આપણે જોઈ શકીએ છીએ કે સામાન્ય ઉદ્‌ગમમાંથી આવતા પ્રકાશ કરતાં લેસરમાંથી આવતો પ્રકાશ ખૂબ તીવ્ર હોય છે.

જ્યારે એપોલો મિશન (Apollo Mission)ના અવકાશયાત્રીઓ ચંદ્ર પર પહોંચ્યા ત્યારે તેમણે પૃથ્વી તરફ રહે તે રીતે એક અરિસો તેની સપાટી પર મૂક્યો. પછી પૃથ્વી પરના વિજ્ઞાનીઓએ તીવ્ર લેસર કિરણ તેના પર મોકલ્યું જે અરિસા વડે પરાવર્તિત થઈને પૃથ્વી પર પાછું મેળવવામાં આવ્યું હતું. પરાવર્તિત લેસર કિરણનું પરિમાણ (Size) અને યાત્રાનો જવા-આવવાનો કુલ સમય માપવામાં આવ્યો હતો. આ પરથી (*a*) લેસર કિરણના અત્યંત ઓછા ફેલાવાનું અને (*b*) પૃથ્વીથી ચંદ્રના અંતરનું ચોક્સાઈથી માપન થયું હતું.

સારાંશ

1. પરમાણુ, સમગ્રપણે વિદ્યુતની દૃષ્ટિએ તટસ્થ છે અને તેથી સમાન માત્રામાં/જથ્થામાં ધન અને ઋણ વિદ્યુતભારો ધરાવે છે.
2. *થોમસનના મૉડેલમાં,* પરમાણુ એ ધન વિદ્યુતભારોનું ગોળાકાર વાદળ છે અને તેમાં ઈલેક્ટ્રૉન જડાયેલા (Embedded) છે.
3. *રધરફર્ડના મૉડેલમાં* પરમાણુનું લગભગ બધું દળ અને બધો જ ધન વિદ્યુતભાર સૂક્ષ્મ ન્યુક્લિયસમાં (જે પરમાણુના પરિમાણના દસ હજારમાં ભાગનું પરિમાણ ધરાવે છે તેમાં) કેન્દ્રિત થયેલ છે અને ઈલેક્ટ્રૉન તેની આસપાસ ભ્રમણ કરે છે.
4. રધરફર્ડ ન્યુક્લિયર મૉડેલને પરમાણુનું બંધારણ સમજાવવામાં બે મુખ્ય મુશ્કેલીઓ પડે છે. (a) તે એવું પૂર્વાનુમાન કરે છે કે પરમાણુઓ અસ્થાયી છે કારણકે ન્યુક્લિયસની ફરતે ભ્રમણ કરતા પ્રવેગિત ન્યુક્લિયસ સર્પિલ ગતિ કરીને ન્યુક્લિયસમાં પડી જવા જોઈએ. આ બાબત દ્રવ્યના સ્થાયીપણાનો વિરોધ કરે છે. (b) વિવિધ તત્વોના પરમાણુઓના લાક્ષણિક રેખીય વર્ણપટોને તે સમજાવી શકતું નથી.
5. મોટા ભાગના તત્વના પરમાણુઓ સ્થાયી છે અને લાક્ષણિક વર્ણપટનું ઉત્સર્જન કરે છે. વર્ણપટ અલગ અલગ સમાંતર રેખાઓના સમૂહનો બનેલો છે અને તેને રેખીય વર્ણપટ કહે છે. તે પરમાણુના બંધારણ અંગેની ઉપયોગી માહિતી ધરાવે છે.
6. પરમાણ્વિક હાઈડ્રોજન રેખીય વર્ણપટનું ઉત્સર્જન કરે છે જે વિવિધ શ્રેણીઓનો બનેલો છે. શ્રેણીમાં કોઈ પણ રેખાની આવૃત્તિ બે પદોના તફાવત તરીકે રજૂ કરી શકાય છે :

   લાયમન શ્રેણી : $\nu = Rc\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right)$; $n = 2, 3, 4 ...$

   બામર શ્રેણી : $\nu = Rc\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$; $n = 3, 4, 5 ...$

   પાશ્ચન શ્રેણી : $\nu = Rc\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right)$; $n = 4, 5, 6 ...$

   બ્રેકેટ શ્રેણી : $\nu = Rc\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right)$; $n = 5, 6, 7 ...$

   ફંડ શ્રેણી : $\nu = Rc\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right)$; $n = 6, 7, 8 ...$

7. પરમાણુ વડે ઉત્સર્જિત રેખીય વર્ણપટ તેમજ પરમાણુઓના સ્થાયીપણાને સમજાવવા માટે નીલ્સ બોહ્રે, હાઈડ્રોજન જેવા (એક ઈલેક્ટ્રૉન ધરાવતા) પરમાણુઓ માટે એક મૉડેલ સૂચવ્યું. તેણે ત્રણ સ્વીકૃતિઓ અપનાવી અને ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રનો પાયો નાંખ્યો :
   (a) હાઈડ્રોજન પરમાણુમાં ઈલેક્ટ્રૉન અમુક નિશ્ચિત સ્થાયી કક્ષાઓ (જેમને સ્થિર (Stationary) કક્ષાઓ કહે છે)માં વિકિરણ ઊર્જાના ઉત્સર્જન વિના ભ્રમણ કરે છે.
   (b) સ્થાયી કક્ષાઓ એ છે કે જેમાં કોણીય વેગમાન $h/2\pi$ના પૂર્ણાંક ગણું છે (બોહ્રની ક્વૉન્ટમીકરણની શરત). એટલે કે $L = nh/2\pi$ જ્યાં n એ પૂર્ણાંક છે જેને મુખ્ય ક્વૉન્ટમ અંક કહે છે.
   (c) ત્રીજી સ્વીકૃતિ જણાવે છે કે ઈલેક્ટ્રૉન તેની કોઈ એક નિશ્ચિત, વિકિરણનું ઉત્સર્જન ન કરતી હોય તેવી, કક્ષામાંથી બીજી ઓછી ઊર્જા ધરાવતી કક્ષામાં સંક્રાંતિ કરી શકે છે. જ્યારે તે આમ કરે, ત્યારે એક ફોટોન ઉત્સર્જિત થાય છે જેની ઊર્જા, પ્રારંભિક અને અંતિમ અવસ્થાઓની, ઊર્જાના તફાવત જેટલી હોય છે. આ પરથી ઉત્સર્જિત ફોટોનની આવૃત્તિ

   $h\nu = E_i - E_f$

   દ્વારા મળે છે. પરમાણુ જે આવૃત્તિનું ઉત્સર્જન કરે છે તે જ આવૃત્તિના વિકિરણનું શોષણ કરે છે અને તે કિસ્સામાં ઈલેક્ટ્રૉન nના ઊંચા મૂલ્યની કક્ષામાં સંક્રાંતિ કરે છે.

   $E_i + h\nu = E_f$

8. કોણીય વેગમાનના ક્વૉન્ટમીકરણની શરતના પરિણામે ઈલેક્ટ્રૉન ન્યુક્લિયસની ફરતે ફક્ત અમુક નિશ્ચિત ત્રિજ્યાઓની કક્ષામાં જ ભ્રમણ કરે છે. હાઈડ્રોજન પરમાણુ માટે આ ત્રિજ્યાઓ $r_n = \left(\frac{n^2}{m}\right)\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2\left(\frac{4\pi\varepsilon_0}{e^2}\right)$ વડે અપાય છે.
કુલ ઊર્જાનું પણ ક્વૉન્ટમીકરણ થયેલ છે.
$$E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2}$$
$$= -13.6\ eV/n^2$$
$n = 1$ અવસ્થાને ધરા અવસ્થા કહે છે. હાઈડ્રોજન પરમાણુમાં ધરા અવસ્થાની ઊર્જા $-13.6\ eV$ છે. nનાં ઊંચા મૂલ્યો ($n > 1$) ઉત્તેજિત અવસ્થાઓને અનુરૂપ છે. પરમાણુઓ, બીજા પરમાણુઓ કે ઈલેક્ટ્રૉન સાથેની અથડામણોથી અથવા યોગ્ય આવૃત્તિના ફોટોનના શોષણથી આ ઊંચી અવસ્થાઓ સુધી ઉત્તેજિત થાય છે.
9. તરંગ-કણની દ્વૈત પ્રકૃતિનો ઉપયોગ કરી ઈલેક્ટ્રૉનને h/mv જેટલી તરંગલંબાઈ છે એવા ડિ બ્રોગ્લીના અધિતર્ક વડે બોહ્‌રની ક્વૉન્ટમીકૃત કક્ષાઓની સમજૂતી આપી શકાઈ હતી. કક્ષાઓ, વર્તુળાકાર સ્થિત તરંગોને અનુરૂપ છે, જેમાં કક્ષાનો પરિઘ તરંગલંબાઈના પૂર્ણાંક જેટલો હોય છે.
10. બોહ્‌રનું મૉડેલ માત્ર હાઈડ્રોજન જેવા (એક ઈલેક્ટ્રૉન ધરાવતા) પરમાણુઓને જ લાગુ પડે છે. તે હિલિયમ જેવા બે ઈલેક્ટ્રૉન ધરાવતા પરમાણુઓને પણ લાગુ પાડી શકાતું નથી. આ મૉડેલ, હાઈડ્રોજન જેવા પરમાણુઓ વડે ઉત્સર્જિત આવૃત્તિઓની સાપેક્ષ તીવ્રતાઓને પણ સમજાવી શકતું નથી.

ગહન વિચારણાના મુદ્દાઓ

1. થોમસન અને રધરફર્ડ બંનેનાં મૉડેલ એક અસ્થાયી તંત્ર રચે છે. થોમસનનું મૉડેલ સ્થિત વિદ્યુતની દૃષ્ટિએ અસ્થાયી છે, જ્યારે રધરફર્ડનું મૉડેલ કક્ષામાં ભ્રમણ કરતા ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણના ઉત્સર્જનને કારણે અસ્થાયી છે.
2. બોહ્‌રે કોણીય વેગમાનનું ક્વૉન્ટમીકરણ કર્યું (બીજી સ્વીકૃતિ) અને બીજી કોઈક રાશિનું કેમ ન કર્યું ? એ નોંધો કે hને કોણીય વેગમાનનાં પરિમાણ છે, અને વર્તુળાકાર કક્ષાઓ માટે કોણીય વેગમાન એ બહુ સુસંગત રાશિ છે. આથી બીજી સ્વીકૃતિ તદ્દન સ્વાભાવિક છે.
3. હાઈડ્રોજન પરમાણુના બોહ્‌ર મૉડેલમાં કક્ષાનું ચિત્ર અનિશ્ચિતતાના સિદ્ધાંત (Uncertainty Principle) સાથે સુસંગત ન હતો. તેને સ્થાને અર્વાચિન ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રનો સ્વીકાર થયો કે જેમાં બોહ્‌રની કક્ષાઓ એવા વિસ્તારો છે કે જ્યાં ઈલેક્ટ્રૉનને શોધવાની સંભાવના (Probability) વધુ છે.
4. સૂર્યમંડળની પરિસ્થિતિમાં ગ્રહ-ગ્રહ વચ્ચેનાં ગુરુત્વ બળો, સૂર્યના દરેક ગ્રહ પરના બળ કરતાં ઘણા નાનાં છે (કારણ કે સૂર્યનું દળ કોઈ પણ ગ્રહના દળ કરતાં ઘણું વધારે છે.) આથી વિપરિત ઈલેક્ટ્રૉન-ઈલેક્ટ્રૉન વચ્ચેનું વિદ્યુતબળ, ઈલેક્ટ્રૉન-ન્યુક્લિયસ વિદ્યુતબળ સાથે સરખાવી શકાય તેવા માનનું હોય છે, કારણ કે વિદ્યુતભારો અને અંતરો માનના એકસરખા ક્રમનાં છે. આ કારણથી ગ્રહ - જેવા ઈલેક્ટ્રૉન સાથેનું બોહ્‌ર મૉડેલ બહુ-ઈલેક્ટ્રૉન પરમાણુઓને લાગુ પાડી શકાતું નથી.
5. બોહ્‌રે, જેમાં ઈલેક્ટ્રૉન વિકિરણ ઉત્સર્જિત કરતા નથી એવી વિશિષ્ટ કક્ષાઓની સ્વીકૃતિ અપનાવીને ક્વૉન્ટમ સિદ્ધાંતનો પાયો નાંખ્યો. બોહ્‌રનું મૉડેલ માત્ર એક ક્વૉન્ટમ અંક n નો સમાવેશ કરે છે. ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્ર તરીકે ઓળખાતો નવો સિદ્ધાંત બોહ્‌રની સ્વીકૃતિનું

સમર્થન કરે છે. આમ છતાં, ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રમાં (જે વધુ વ્યાપકપણે સ્વીકારાયું છે, તેમાં), આપેલ ઊર્જા સ્તર માત્ર એક જ ક્વૉન્ટમ અવસ્થાને અનુરૂપ નહિ હોય. દાખલા તરીકે, કોઈ અવસ્થા ચાર ક્વૉન્ટમ અંકો (n, l, m અને s) દ્વારા લાક્ષણિક બને છે, પરંતુ (હાઈડ્રોજન પરમાણુની જેમ) શુદ્ધ કુલંબ સ્થિતિમાન માટે ઊર્જા ફક્ત n પર આધાર રાખે છે.

6. બોહ્‌રના મૉડેલમાં, સામાન્ય પ્રચલિત અપેક્ષા કરતાં વિરૂદ્ધ, ઈલેક્ટ્રૉનની તેની કક્ષામાંના ભ્રમણની આવૃત્તિને વર્ણપટની રેખાની આવૃત્તિ સાથે કોઈ સંબંધ નથી. રેખાની આવૃત્તિ બે કક્ષીય ઊર્જાઓના તફાવત ભાગ્યા h જેટલી છે. આમ છતાં, મોટા ક્વૉન્ટમ અંકો વચ્ચેની સંક્રાંતિઓ (n થી $n-1$, n ઘણો મોટો) માટે તેઓ બંને અપેક્ષા મુજબ એક જ બની જાય છે.

7. બોહ્‌રનું કેટલાક પ્રચલિત અને કેટલાક અર્વાચિન ભૌતિકવિજ્ઞાનના ખ્યાલો પર આધારિત અર્ધ-પ્રચલિત (Semi Classical) મૉડેલ, સાદામાં સાદા હાઈડ્રોજન જેવા પરમાણુઓનું સાચું ચિત્ર રજૂ કરતું નથી. સાચું ચિત્ર ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રની બાબત છે જે બોહ્‌ર મૉડેલ કરતાં ઘણી મૂળભૂત રીતે જુદું પડે છે. પણ તો પછી જો બોહ્‌ર મૉડેલ તદ્દન સાચું ન હોય તો આપણે તેની ચિંતા શા માટે કરીએ છીએ ? આ બધું છતાં બોહ્‌ર મૉડેલને ઉપયોગી બનાવતાં કારણો આ છે :
   (i) મૉડેલ માત્ર ત્રણ સ્વીકૃતિઓ પર આધારિત છે પણ હાઈડ્રોજન વર્ણપટનાં લગભગ બધાં સામાન્ય લક્ષણોને સમજાવે છે.
   (ii) મૉડેલમાં આપણે પ્રચલિત ભૌતિકવિજ્ઞાનમાં શીખ્યા હોઈએ તેવા ઘણા ખ્યાલોને સમાવેલા છે.
   (iii) એક સૈદ્ધાંતિક ભૌતિકવિજ્ઞાનીએ, કોઈકવાર કોયડાના ઉકેલના અભિગમમાંની કેટલીક મુશ્કેલીઓ, કેવી રીતે શબ્દશઃ અવગણવી જોઈએ કે જેથી બીજા કેટલાંક પૂર્વાનુમાન કરવાની આશા રાખી શકાય, તે આ મૉડેલ દર્શાવે છે. જો મૉડેલ કે સિદ્ધાંતનાં આ પૂર્વાનુમાન પ્રયોગ સાથે સંમત થાય તો, સિદ્ધાંતવાદીએ જે મુશ્કેલીઓને અવગણી હતી તેને તાર્કિક રીતે સમજાવવાની આશા ગમે તેમ કરીને રાખવી જ જોઈએ.

સ્વાધ્યાય

12.1 દરેક વિધાનને અંતે આપેલ શબ્દ/શબ્દ સમૂહોમાંથી સાચો વિકલ્પ પસંદ કરો :

(a) થોમસનના મૉડેલમાં પરમાણુનું પરિમાણ, રધરફર્ડના મૉડેલમાં પરમાણુના પરિમાણ .... છે. (કરતાં ઘણું મોટું / થી જુદું નથી / કરતાં ઘણું નાનું)

(b) .... ની ધરા અવસ્થામાં ઈલેક્ટ્રૉન સ્થાયી સંતુલનમાં છે જ્યારે .... માં ઈલેક્ટ્રૉન હંમેશાં ચોખ્ખું (Net) બળ અનુભવે છે. (થોમસન મૉડેલ / રધરફર્ડ મૉડેલ)

(c) .... પર આધારિત પ્રચલિત પરમાણુનું ભાગ્ય જ પડી ભાંગવાનું છે. (થોમસન મૉડેલ / રધરફર્ડ મૉડેલ)

(d) .... માં પરમાણુ લગભગ સતત દળ વિતરણ ધરાવે છે પરંતુ .... માં પરમાણુ ખૂબ જ અસતત દળ વિતરણ ધરાવે છે. (થોમસન મૉડેલ / રધરફર્ડ મૉડેલ)

(e) .... માં પરમાણુનો ધન વિદ્યુતભારિત વિભાગ લગભગ બધું દળ ધરાવે છે. (રધરફર્ડ મૉડેલ / બંને મૉડેલ)

12.2 ધારો કે તમને આલ્ફા-કણ પ્રકિર્ણનનો પ્રયોગ સુવર્ણના વરખને સ્થાને ઘન (Solid) હાઈડ્રોજન વાપરીને કરવાની તક આપવામાં આવે છે. (હાઈડ્રોજન 14 K થી નીચા તાપમાને ઘન હોય છે) તમે કેવાં પરિણામોની અપેક્ષા રાખશો ?

12.3 વર્ણપટ રેખાઓની પાશ્ચન શ્રેણીમાં ટૂંકામાં ટૂંકી કઈ તરંગલંબાઈ હાજર છે ?

12.4 એક પરમાણુમાં 2.3 eV તફાવત બે ઊર્જા સ્તરોને જુદા પાડે છે. જ્યારે પરમાણુ ઉચ્ચ સ્તરથી નિમ્નસ્તર પર સંક્રાંતિ કરે ત્યારે ઉત્સર્જિત વિકિરણની આવૃત્તિ કેટલી હશે ?

12.5 હાઈડ્રોજન પરમાણુની ધરા અવસ્થાની ઊર્જા -13.6 eV છે. આ અવસ્થામાં ઈલેક્ટ્રૉનની ગતિઊર્જા અને સ્થિતિઊર્જા કેટલી હશે ?

12.6 પ્રારંભમાં ધરા સ્થિતિમાં રહેલો હાઈડ્રોજન પરમાણુ એક ફોટોનનું શોષણ કરે છે, જે તેને $n = 4$ સ્તર સુધી ઉત્તેજિત કરે છે. આ ફોટોનની આવૃત્તિ અને તરંગલંબાઈ શોધો.

12.7 (a) બોહ્‌ર મૉડેલનો ઉપયોગ કરીને $n = 1$, 2 અને 3 સ્તરોમાં હાઈડ્રોજન પરમાણુમાંના ઈલેક્ટ્રૉનની ઝડપની ગણતરી કરો. (b) આ દરેક સ્તર માટે કક્ષીય આવર્તકાળ શોધો.

12.8 હાઈડ્રોજન પરમાણુની સૌથી અંદરની ઈલેક્ટ્રૉન કક્ષાની ત્રિજ્યા 5.3×10^{-11} m છે. $n = 2$ અને $n = 3$ કક્ષાઓની ત્રિજ્યાઓ કેટલી હશે ?

12.9 ઓરડાના તાપમાને 12.5 eVની ઈલેક્ટ્રૉન કિરણાવલિ વાયુરૂપ હાઈડ્રોજન પર મારો ચલાવવા માટે વપરાય છે. તરંગલંબાઈઓની કઈ શ્રેણી(ઓ) ઉત્સર્જિત થશે ?

12.10 બોહ્‌ર મૉડેલ અનુસાર, સૂર્યની આસપાસ 3×10^4 m/sની ઝડપથી 1.5×10^{11} mની ત્રિજ્યા ધરાવતી કક્ષામાંના પૃથ્વીના ભ્રમણને રજૂ કરતો ક્વૉન્ટમ અંક શોધો.
(પૃથ્વીનું દળ $= 6.0 \times 10^{24}$ kg)

વધારાના સ્વાધ્યાય

12.11 નીચેના પ્રશ્નોના જવાબ આપો જે તમને થોમસન મૉડેલ અને રધરફર્ડ મૉડેલ વચ્ચેનો તફાવત સમજવામાં સારી મદદ કરશે.

(a) પાતળા સુવર્ણ વરખ વડે થતા α-કણોના વિચલન (આવર્તન)ના સરેરાશ કોણ અંગે થોમસન મૉડેલનું પૂર્વાનુમાન રધરફર્ડ મૉડેલના પૂર્વાનુમાન કરતાં, ઘણું ઓછું, લગભગ તેટલું જ કે ઘણું વધારે છે ?

(b) પશ્ચાદ્‌વર્તી (પાછળ તરફનું, Backward) પ્રકીર્ણન (એટલે કે 90° કરતાં મોટા કોણે α-કણોનું પ્રકીર્ણન)ની સંભાવના અંગે થોમસન મૉડેલનું પૂર્વાનુમાન રુધરફર્ડ મૉડેલના પૂર્વાનુમાન કરતાં ઘણું ઓછું, લગભગ તેટલું જ કે ઘણું વધારે છે ?

(c) પ્રયોગથી એવું જણાય છે કે બીજા પરિબળો અચળ રાખતાં, ઓછી જાડાઈ t માટે, મધ્યમ (Moderate) કોણે પ્રકીર્ણન પામતા α-કણોની સંખ્યા, t ના સમપ્રમાણમાં છે. t પરની આ સપ્રમાણતા શું સૂચવે છે ?

(d) પાતળા વરખ દ્વારા α-કણોના પ્રકીર્ણનના સરેરાશ કોણની ગણતરીમાં એક કરતાં વધુ (Multiple) પ્રકીર્ણન થવાનું અવગણવું કયા મૉડેલમાં સંપૂર્ણપણે ખોટું છે ?

12.12 હાઈડ્રોજન પરમાણુમાં ઈલેક્ટ્રૉન અને પ્રોટોન વચ્ચેનું ગુરુત્વાકર્ષણ, કુલંબ આકર્ષણ કરતાં 10^{-40} ગણું નાનું છે. આ હકીકતને જોવાની એક વૈકલ્પિક રીત, ઈલેક્ટ્રૉન અને પ્રોટોન ગુરુત્વાકર્ષણથી બંધિત હોત તો હાઈડ્રોજન પરમાણુની પ્રથમ બોહ્‌ર કક્ષાની ત્રિજ્યાનો અંદાજ મેળવવાની છે. તમને તેનો ઉત્તર રસપ્રદ લાગશે.

12.13 હાઈડ્રોજન પરમાણુ સ્તર nથી $(n - 1)$ સ્તર પર સંક્રાંતિ કરે ત્યારે ઉત્સર્જિત વિકિરણની આવૃત્તિ માટેનું સૂત્ર મેળવો. n ના મોટા મૂલ્ય માટે, દર્શાવો કે આ આવૃત્તિ, કક્ષામાં ઈલેક્ટ્રૉનના ભ્રમણની પ્રચલિત આવૃત્તિ બરાબર છે.