પ્રકરણ તેર

ન્યુક્લિયસ (NUCLEI)

13.1 પ્રસ્તાવના (INTRODUCTION)

અગાઉના પ્રકરણમાં આપણે શીખ્યા છીએ કે દરેક પરમાણુમાં ધન વિદ્યુતભાર અને દળ ઘનીષ્ટ રીતે પરમાણુના કેન્દ્ર પર સંકેન્દ્રિત થયેલાં છે અને તેનું ન્યુક્લિયસ (નાભિ) રચે છે. સમગ્રપણે ન્યુક્લિયસનાં પરિમાણ પરમાણુના પરિમાણ કરતાં ઘણાં નાનાં હોય છે. α-કણોના પ્રકીર્ણન (Scattering)ના પ્રયોગોએ દર્શાવ્યું કે ન્યુક્લિયસની ત્રિજ્યા પરમાણુની ત્રિજ્યા કરતાં 10^4 ગણી નાની છે. આનો અર્થ એ કે ન્યુક્લિયસનું કદ પરમાણુના કદના 10^{-12} ગણું છે. બીજા શબ્દોમાં પરમાણુ લગભગ ખાલી (Empty) છે. જો પરમાણુને એક વર્ગ-ખંડના માપ જેટલો વિવર્ધિત (Enlarged) કરીએ તો ન્યુક્લિયસ એક ટાંકણીની ટોચ (Pin Head) જેટલા માપનું હોય. આમ હોવા છતાં પણ ન્યુક્લિયસ પરમાણુનું લગભગ બધું (99.9 % કરતાં વધુ) દળ ધરાવે છે.

શું ન્યુક્લિયસને પરમાણુને હોય છે તેમ બંધારણ છે ? જો હોય તો ન્યુક્લિયસના ઘટકો કયા કયા છે ? તેઓ કેવી રીતે એક સાથે જકડાયેલાં છે ? આ પ્રકરણમાં આપણે આવા પ્રશ્નોના ઉત્તરો મેળવીશું. આપણે ન્યુક્લિયસના પરિમાણ, દળ અને સ્થાયીપણું (Stability) જેવાં વિવિધ ગુણધર્મો અને રેડિયો ઍક્ટિવિટી, વિખંડન અને સંલયન જેવી સંબંધિત ઘટનાઓની ચર્ચા કરીશું.

13.2 પરમાણુ દળો અને ન્યુક્લિયસનું બંધારણ (ATOMIC MASSES AND COMPOSITION OF NUCLEUS)

પરમાણુનું દળ કિલોગ્રામની સરખામણીએ ઘણું નાનું છે; દાખલા તરીકે, કાર્બન પરમાણુ ^{12}Cનું દળ 1.992647×10^{-26} kg છે. આવી નાની રાશિઓ માપવા માટે કિલોગ્રામ બહુ સગવડભર્યો એકમ નથી.

આથી, પરમાણુ દળોને દર્શાવવા માટે દળનો જુદો એકમ વપરાય છે. આ એકમ atomic mass unit (u) છે જેને કાર્બન (^{12}C) પરમાણુના દળના બારમા ભાગ (1/12) તરીકે વ્યાખ્યાયિત કરવામાં આવે છે. આ વ્યાખ્યા મુજબ

$$1\,u = \frac{\text{એક } ^{12}\text{C પરમાણુનું દળ}}{12}$$

$$= \frac{1.992647 \times 10^{-26}\,\text{kg}}{12}$$

$$= 1.660539 \times 10^{-27}\,\text{kg} \qquad (13.1)$$

જુદા જુદા તત્વોનાં પરમાણુદળોને atomic mass unit (u)માં દર્શાવતાં હાઈડ્રોજન પરમાણુના દળના પૂર્ણાંક ગુણકોની નજીકનાં હોવાનું જણાય છે. જો કે આ નિયમને ઘણા નોંધપાત્ર અપવાદો છે. દાખલા તરીકે, ક્લોરિનનું પરમાણુ દળ 35.46 u છે.

પરમાણુ દળોનું ચોક્સાઈભર્યું માપન માસ-સ્પેક્ટ્રોમીટર વડે થાય છે. પરમાણુ દળોનું માપન એક જ તત્વના વિવિધ પ્રકારના પરમાણુઓ કે જેઓ એકસમાન રાસાયણિક ગુણધર્મો ધરાવે પરંતુ દળમાં જુદા હોય તેમનું અસ્તિત્વ હોવાનું દર્શાવે છે. એક જ તત્વના પણ દળમાં જુદા હોય તેવા પરમાણુઓના પ્રકારને *સમસ્થાનિકો* (*Isotopes*) કહે છે. ગ્રીકમાં Isotope એટલે તે જ સ્થાન; એટલે કે તત્વોના આવર્ત કોષ્ટકમાં તેઓ એક જ સ્થાનમાં રહેલા છે.

લગભગ દરેક તત્વ ઘણાં સમસ્થાનિકોનું મિશ્રણ ધરાવતું હોવાનું જણાયું હતું. વિવિધ સમસ્થાનિકોનું સાપેક્ષ પ્રમાણ જુદાં જુદાં તત્વોમાં જુદું જુદું હોય છે. દાખલા તરીકે, ક્લોરિનને 34.98 u અને 36.98 u દળના બે સમસ્થાનિકો છે. તે હાઈડ્રોજનના દળના પૂર્ણાંક ગુણાંકની નજીક છે. આ સમસ્થાનિકોનું સાપેક્ષ પ્રમાણ અનુક્રમે 75.4 અને 24.6 ટકા છે. આમ ક્લોરિન પરમાણુનું સરેરાશ દળ આ બે સમસ્થાનિકોના દળોના ભારિત (Weighted) સરેરાશ પરથી મળે છે. આ મુજબ તે

$$= \frac{75.4 \times 34.98 + 24.6 \times 36.98}{100}$$

$$= 35.47\,u$$

મળે છે જે ક્લોરિનના પરમાણુ દળ સાથે સામ્ય ધરાવે છે. સૌથી હલકા તત્વ હાઈડ્રોજનને પણ 1.0078 u, 2.0141 u અને 3.0160 u દળના ત્રણ સમસ્થાનિકો છે. હાઈડ્રોજનના સૌથી હલકા પરમાણુ કે જેનું સાપેક્ષ પ્રમાણ 99.985 % છે તેના ન્યુક્લિયસને પ્રોટોન કહે છે. પ્રોટોનનું દળ

$$m_p = 1.00727\,u = 1.67262 \times 10^{-27}\,\text{kg છે.} \qquad (13.2)$$

આ મૂલ્ય હાઈડ્રોજન પરમાણુના દળ (= 1.00783 u) માંથી એક ઈલેક્ટ્રૉન દળ ($m_e = 0.00055\,u$)ને બાદ કરવાથી મળતા મૂલ્ય જેટલું છે. હાઈડ્રોજનના બીજા બે સમસ્થાનિકોને ડ્યુટેરિયમ અને ટ્રિટિયમ કહે છે. ટ્રિટિયમનાં ન્યુક્લિયસ અસ્થાયી હોવાથી કુદરતમાં મળતા નથી પણ પ્રયોગશાળાઓમાં કૃત્રિમ રીતે ઉત્પન્ન કરાય છે.

ન્યુક્લિયસમાંનો ધન વિદ્યુતભાર એ પ્રોટોનનો ધન વિદ્યુતભાર છે. પ્રોટોનને એક એકમનો મૂળભૂત વિદ્યુતભાર છે અને તે સ્થાયી છે. અગાઉ એવું માનવામાં આવતું કે ન્યુક્લિયસ ઈલેક્ટ્રૉન ધરાવતા હશે, પણ પછી ક્વૉન્ટમ સિદ્ધાંતો પર આધારિત દલીલો વડે તે નકારવામાં આવ્યું હતું. પરમાણુના બધા ઈલેક્ટ્રૉન ન્યુક્લિયસની બહાર છે. આપણે જાણીએ છીએ કે

પરમાણુના ન્યુક્લિયસની બહાર આવા ઈલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા, એ પરમાણુ ક્રમાંક Z છે. આમ, પરમાણુના ઈલેક્ટ્રૉનનો કુલ વિદ્યુતભાર ($-Ze$) છે અને પરમાણુ તટસ્થ હોવાથી ન્યુક્લિયસનો વિદ્યુતભાર ($+Ze$) છે. આથી પરમાણુના ન્યુક્લિયસમાં પ્રોટોનની સંખ્યા, બરાબર પરમાણુ ક્રમાંક Z જેટલી જ છે.

ન્યુટ્રોનની શોધ (Discovery of Neutron)

ડ્યુટેરિયમ અને ટ્રિટિયમનાં ન્યુક્લિયસ હાઈડ્રોજનના સમસ્થાનિકો (Isotopes) હોવાથી તે દરેક ફક્ત એક જ પ્રોટોન ધરાવતા હોય છે. પણ હાઈડ્રોજન, ડ્યુટેરિયમ અને ટ્રિટિયમનાં ન્યુક્લિયસોનાં દળો 1 : 2 : 3 ગુણોત્તરમાં છે. આથી ડ્યુટેરિયમ અને ટ્રિટિયમનાં ન્યુક્લિયસ, પ્રોટોન ઉપરાંત કંઈક તટસ્થ દ્રવ્યમાન ધરાવતાં હોવાં જોઈએ. આ સમસ્થાનિકો (Isotopes)નાં ન્યુક્લિયસમાં હાજર એવા આ તટસ્થ દ્રવ્યમાનનો જથ્થો, પ્રોટોનના દળના એકમમાં દર્શાવતાં અનુક્રમે લગભગ એક અને બે છે. આ હકીકત દર્શાવે છે કે પરમાણુનાં ન્યુક્લિયસ, પ્રોટોન ઉપરાંતનું, જે તટસ્થ દ્રવ્યમાન ધરાવે છે તે મૂળભૂત એકમના પૂર્ણાંક ગુણાંક જેટલું છે. આ અધિતર્ક 1932માં જેમ્સ ચૅડ્‌વિકે ચકાસ્યો હતો. તેણે જોયું કે, જ્યારે બેરિયમ ન્યુક્લિયસ પર α-કણનો મારો ચલાવવામાં આવે (α- કણો પ્રતાડિત કરવામાં આવે) ત્યારે તટસ્થ વિકિરણ ઉત્સર્જન પામે છે. (α-કણોએ હિલિયમ ન્યુક્લિયસ છે જે આગળ ઉપરના પરિચ્છેદમાં જોઈશું). એવું પણ અવલોકિત થયું કે આ તટસ્થ વિકિરણ, હિલિયમ, કાર્બન અને નાઈટ્રોજન જેવા હલકા ન્યુક્લિયસમાંથી પ્રોટોનને દૂર કરી શકે છે. તે સમયે તટસ્થ વિકિરણ તરીકે એકમાત્ર ફોટોન (વિદ્યુતચુંબકીય તરંગો) જાણીતાં હતાં. ઊર્જા સંરક્ષણ અને વેગમાન સંરક્ષણના સિદ્ધાંતો લાગુ પાડતાં એમ જણાયું હતું કે જો તટસ્થ વિકિરણ ફોટોનનું બનેલું હોય તો ફોટોનની ઊર્જા બેરિલિયમ ન્યુક્લિયસ પર α-કણોના મારાથી મળતી ઊર્જા કરતાં ખૂબ ઊંચી હોવી જોઈએ. ચૅડ્‌વિકે સંતોષકારક રીતે ઉકેલેલા આ કોયડાની ચાવી એ હતી કે તટસ્થ વિકિરણ, *ન્યુટ્રોન* તરીકે ઓળખાતા નવા પ્રકારના તટસ્થ કણોનું બનેલું ધારવામાં આવે. ઊર્જા અને વેગમાન સંરક્ષણ પરથી આ નવા કણ (ન્યુટ્રોન)નું દળ તે નક્કી કરી શક્યો અને તે 'પ્રોટોનના દળના લગભગ જેટલું જ દળ' હોવાનું જણાવ્યું.

અત્યારે ન્યુટ્રોનનું દળ વધુ ચોકસાઈપૂર્વક જાણી શકાયું છે. તે

$$m_n = 1.00866\,u = 1.6749 \times 10^{-27}\ \text{kg} \qquad (13.3)$$

છે. ન્યુટ્રોનની તેની શોધ માટે ચૅડ્‌વિકને ભૌતિકવિજ્ઞાનનું 1935નું નૉબેલ પ્રાઈઝ ઍનાયત થયું હતું.

મુક્ત પ્રોટોનથી વિપરિત, મુક્ત ન્યુટ્રોન અસ્થાયી છે. તે એક પ્રોટોન, એક ઈલેક્ટ્રૉન અને એક ઍન્ટિન્યુટ્રીનો (Antineutrino–એક અન્ય મૂળભૂત કણ) માં વિભંજન (ક્ષય) પામે છે અને તે 1000 *s*નો સરેરાશ જીવનકાળ ધરાવે છે. જો કે તે ન્યુક્લિયસની અંદર સ્થાયી છે.

હવે ન્યુક્લિયસનું બંધારણ નીચેનાં પદો અને પ્રતિકો (Symbols)નો ઉપયોગ કરી દર્શાવી શકાય છે.

Z - *પરમાણુ ક્રમાંક* = પ્રોટોનની સંખ્યા [13.4(a)]

N - *ન્યુટ્રોન ક્રમાંક* = ન્યુટ્રોનની સંખ્યા [13.4(b)]

A - *પરમાણુ દળાંક* = Z + N

= પ્રોટોન અને ન્યુટ્રોનની કુલ સંખ્યા [13.4(c)]

પ્રોટોન અને ન્યુટ્રોન માટે ન્યુક્લિયોન શબ્દ પણ વપરાય છે. આમ પરમાણુમાં ન્યુક્લિયોનની સંખ્યા એ તેનો દળાંક (પરમાણુ દળાંક) A છે.

ન્યુક્લિયસનાં પ્રકાર (જાત)ને ન્યુક્લાઈડ કહે છે, તેને ^A_ZX દ્વારા દર્શાવાય છે. જ્યાં, X તેના પ્રકારની રાસાયણિક સંજ્ઞા છે. ઉદાહરણ તરીકે, સોના (Gold)નું ન્યુક્લિયસ $^{197}_{79}Au$ દ્વારા દર્શાવાય છે. તે 197 ન્યુક્લિયોન ધરાવે છે જેમાં 79 પ્રોટોન છે અને બાકીના 118 ન્યુટ્રોન છે.

તત્ત્વના સમસ્થાનિકો (Isotopes)નું બંધારણ હવે સહેલાઈથી સમજાવી શકાય છે. આપેલ તત્વના સમસ્થાનિકોનાં ન્યુક્લિયસ સમાન સંખ્યાનાં પ્રોટોન ધરાવે છે, પરંતુ તેમની ન્યુટ્રોન સંખ્યામાં જુદા પડે છે. ડ્યુટેરિયમ ^2_1H કે જે હાઈડ્રોજનનો સમસ્થાનિક છે તે એક પ્રોટોન અને એક ન્યુટ્રોન ધરાવે છે. તેનો બીજો સમસ્થાનિક ટ્રિટિયમ ^3_1H, એક પ્રોટોન અને બે ન્યુટ્રોન ધરાવે છે. તત્વ સોનું (Gold) 32 સમસ્થાનિકો ધરાવે છે જેનાં દળાંક A = 173 થી A = 204 સુધીનાં છે. આપણે એ જણાવેલું જ છે કે તત્વોનાં રાસાયણિક ગુણધર્મો તેમના ઈલેક્ટ્રૉનિક બંધારણ પર આધારિત છે. સમસ્થાનિકના (Isotopic) પરમાણુઓને એકસમાન ઈલેક્ટ્રૉનિક બંધારણ હોવાથી તેમની રાસાયણિક વર્તણૂંક એકસમાન હોય છે અને તેઓને આવર્ત કોષ્ટકમાં એક જ સ્થાનમાં મૂકવામાં આવે છે.

એકસમાન દળાંક A ધરાવતા બધા ન્યુક્લાઈડ્ઝને સમદળીય (Isobar) કહે છે. ઉદાહરણ તરીકે, ^3_1H અને ^3_2He ન્યુક્લાઈડ્ઝ સમદળીય છે. એક સમાન ન્યુટ્રોન સંખ્યા N હોય પરંતુ પરમાણુ ક્રમાંક Z જુદા હોય તેવા ન્યુક્લાઈડ્ઝને *આઈસોટોન* (*Isotones*) કહે છે. દાખલા તરીકે $^{198}_{80}Hg$ અને $^{197}_{79}Au$ આઈસોટોન છે.

13.3 ન્યુક્લિયસનું પરિમાણ (SIZE OF THE NUCLEUS)

પ્રકરણ-12માં આપણે જોયું તે મુજબ, રધરફર્ડ એ પ્રણેતા હતો જેણે પરમાણુના ન્યુક્લિસની કલ્પના કરી અને તેનું અસ્તિત્વ સ્થાપિત કર્યું. રધરફર્ડના સૂચનથી ગેઈગર અને માર્સ્ડન નામના વિજ્ઞાનીઓએ પાતળા સોનાના વરખ વડે થતા α-કણોના પ્રકીર્ણનનો ઉત્કૃષ્ટ પ્રયોગ કર્યો. તેમના પ્રયોગોએ દર્શાવ્યું કે 5.5 MeVની ગતિઊર્જા ધરાવતા α-કણોનું, સોનાના ન્યુક્લિયસથી નજીકતમ અંતર (Distance of Closest Approach) લગભગ 4.0×10^{-14} m છે. સોનાના વરખ દ્વારા α-કણોનું પ્રકીર્ણન સમજવા માટે રધરફર્ડે એમ ધાર્યું કે કુલંબ અપાકર્ષણ બળ આ ઘટનામાં જવાબદાર છે. ધન વિદ્યુતભાર માત્ર ન્યુક્લિયસમાં જ હોવાથી, ન્યુક્લિયસનું વાસ્તવિક પરિમાણ 4.0×10^{-14} m કરતાં ઓછું હોવું જોઈએ.

જો આપણે 5.5 MeV કરતાં વધુ ઊર્જા ધરાવતા α-કણોનો ઉપયોગ કરીએ તો સોનાના ન્યુક્લિયસથી નજીકતમ અંતર હજી નાનું થશે અને કોઈ એક બિંદુએ પ્રકીર્ણન પર ટૂંકા (લઘુ) અંતરી ન્યુક્લિયર બળોની અસર થવા લાગશે અને તેથી રધરફર્ડની ગણતરીથી તે જુદું પડશે. રધરફર્ડની ગણતરીઓ, α-કણના ધન વિદ્યુતભાર અને સોનાના ન્યુક્લિયસ વચ્ચેના માત્ર કુલંબ અપાકર્ષણ બળ પર આધારિત હતી. જે અંતરેથી રધરફર્ડની ગણતરીઓથી આવું અલગ પડવાનું (વિચલન) જણાશે તે અંતર પરથી, ન્યુક્લિયસનું પરિમાણ જાણી શકાય છે. α-કણોને બદલે ઝડપી (Fast) ઈલેક્ટ્રૉનને પ્રક્ષિપ્ત કણ તરીકે લઈ, વિવિધ તત્વોના બનેલા લક્ષ્ય પર મારો ચલાવી પ્રકીર્ણનના પ્રયોગો કરતાં, વિવિધ તત્વોના ન્યુક્લિયસનાં પરિમાણ ચોક્સાઈપૂર્વક મપાયેલ છે.

એમ જણાયું છે કે દળાંક A ધરાવતા ન્યુક્લિયસની ત્રિજ્યા

$$R = R_0 A^{1/3} \tag{13.5}$$

વડે અપાય છે, જ્યાં, $R_0 = 1.2\times10^{-15}$m (= 1.2 *fm*; 1 *fm* = 10^{-15}m) આનો અર્થ એ કે ન્યુક્લિયસનું કદ કે જે R^3ને સમપ્રમાણમાં છે તે Aના સમપ્રમાણમાં છે. આમ, બધા ન્યુક્લિયસ માટે ન્યુક્લિયસની ઘનતા અચળ છે, જે A પર આધારિત નથી. જુદા જુદા ન્યુક્લિયસો અચળ ઘનતા ધરાવતા પ્રવાહીના બુંદ જેવાં છે. ન્યુક્લિયર દ્રવ્યની ઘનતા લગભગ 2.3×10^{17} kg m^{-3} છે. આ ઘનતા, સામાન્ય દ્રવ્યની ઘનતા દા. ત. પાણીની ઘનતા 10^3 kg m^{-3} કરતાં ઘણી મોટી છે. આ સમજાય તેવું છે, કારણ કે આપણે જોઈ ગયા કે પરમાણુ મહદ્ અંશે ખાલી (Empty) છે. પરમાણુઓના બનેલા સામાન્ય દ્રવ્યમાં પુષ્કળ પ્રમાણમાં ખાલી અવકાશ (Space) છે.

ઉદાહરણ 13.1

ઉદાહરણ 13.1 આયર્ન (લોખંડ)ના ન્યુક્લિયસ માટે દળ 55.85 u અને A = 56 આપેલ છે. તેના ન્યુક્લિયસની ઘનતા શોધો.

ઉકેલ $m_{Fe} = 55.85 u = 9.27 \times 10^{-26}$ kg

ત્રિજ્યા $R = R_0 A^{1/3}$

$= 1.2 \times 10^{-15} \times (56)^{1/3}$ m

ન્યુક્લિયસનું કદ $= \frac{4}{3} \pi R^3 = 4.05 \times 10^{-43} m^{-3}$

ન્યુક્લિયર ઘનતા $= \frac{\text{દળ}}{\text{કદ}} = 2.29 \times 10^{17}$ kg m^{-3}

ન્યુટ્રોન તારાઓ (ખગોળ ભૌતિકીય પદાર્થ)ની ઘનતા આ ઘનતા સાથે સરખામણી કરી શકાય તેવી છે. આ દર્શાવે છે કે, તેવા પદાર્થોમાં દ્રવ્ય એટલા બધા પ્રમાણમાં દબાવાયેલું (Compressed) - ખીચોખીચ - છે કે તેઓ મોટા ન્યુક્લિયસ સાથે સામ્યતા ધરાવે છે.

13.4 દળ-ઊર્જા અને ન્યુક્લિયર બંધન ઊર્જા (Mass-Energy and Nuclear Binding Energy)

13.4.1 આઈન્સ્ટાઈને તેના વિશિષ્ટ સાપેક્ષવાદ (Special Theory of Relativity)

પરથી દર્શાવ્યું કે દળ (દ્રવ્યમાન, mass)ને ઊર્જા (Energy)ના એક બીજા સ્વરૂપ તરીકે ગણવું જોઈએ. તેના વિશિષ્ટ સાપેક્ષવાદના આગમન પહેલાં એમ માનવામાં આવતું હતું કે પ્રક્રિયામાં દળ અને ઊર્જાનાં અલગ અલગ સંરક્ષણ થાય છે, પરંતુ આઈન્સ્ટાઈને દર્શાવ્યું કે દળ એ ઊર્જાનું બીજું સ્વરૂપ છે અને દળ-ઊર્જાનું રૂપાંતર ઊર્જાના અન્ય સ્વરૂપ જેવી કે ગતિઊર્જા વગેરેમાં થઈ શકે છે અને એથી ઊલટું અન્ય સ્વરૂપની ઊર્જાનું રૂપાંતર દળ-ઊર્જાના સ્વરૂપમાં થઈ શકે છે.

આઈન્સ્ટાઈને પ્રખ્યાત દળ-ઊર્જા સમતુલ્યતાનો સંબંધ

$$E = mc^2 \tag{13.6}$$

આપ્યો. અત્રે, દળ mને સમતુલ્ય ઊર્જા ઉપરના સમીકરણ દ્વારા સંબંધિત છે અને c પ્રકાશનો શૂન્યાવકાશમાં વેગ છે જે લગભગ 3×10^8 m s^{-1} બરાબર છે.

ઉદાહરણ 13.2

ઉદાહરણ 13.2 1 g દ્રવ્યને સમતુલ્ય ઊર્જાની ગણતરી કરો.

ઉકેલ

ઊર્જા $E = 10^{-3} \times (3 \times 10^8)^2$ J

$E = 10^{-3} \times 9 \times 10^{16}$ J $= 9 \times 10^{13}$ J

આમ, જો એક ગ્રામ દ્રવ્યનું ઊર્જામાં રૂપાંતર થાય તો વિપુલ પ્રમાણમાં ઊર્જા ઉત્પન્ન થાય છે.

આઈન્સ્ટાઈનના દળ-ઊર્જા સમીકરણની પ્રાયોગિક ચકાસણી, ન્યુક્લિયોન, ન્યુક્લિયસ, ઈલેક્ટ્રૉન અને હાલમાં શોધાયેલા અન્ય કણો વચ્ચેની ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયાઓમાં કરાયેલ છે. પ્રક્રિયામાં ઊર્જા સંરક્ષણનો નિયમ એમ જણાવે છે કે જો દળ સાથે સંબંધિત ઊર્જાનો સમાવેશ કરવામાં આવે તો પ્રારંભિક ઊર્જા અને અંતિમ ઊર્જા સમાન હોય છે. ન્યુક્લિયસનાં દળો અને ન્યુક્લિયસની એકબીજા સાથેની આંતરક્રિયા સમજવામાં આ વિભાવના મહત્વની છે. હવે પછીનાં કેટલાક પરિચ્છેદોમાં આ વિશે વિચારણા કરવામાં આવી છે.

13.4.2 ન્યુક્લિયર બંધન ઊર્જા (Nuclear Binding Energy)

પરિચ્છેદ 13.2માં આપણે જોયું કે ન્યુક્લિયસ ન્યુટ્રોન અને પ્રોટોનનો બનેલો છે. આથી, એવું અપેક્ષિત છે કે ન્યુક્લિયસનું દળ તેના પ્રોટોન અને ન્યુટ્રોનના વ્યક્તિગત દળોના કુલ દળ જેટલું જ હોય. પરંતુ ન્યુક્લિયસનું દળ M હંમેશા આ કુલ દળ કરતાં ઓછું જ હોય છે. ઉદાહરણ તરીકે, આપણે $^{16}_{8}O$ કે જેનું

ન્યુક્લિયસ 8 ન્યુટ્રોન અને 8 પ્રોટોનનું બનેલું છે, તેનો વિચાર કરીએ.

8 ન્યુટ્રોનનું દળ $= 8 \times 1.00866\, u$

8 પ્રોટોનનું દળ $= 8 \times 1.00727\, u$

8 ઈલેક્ટ્રૉનનું દળ $= 8 \times 0.00055\, u$

આથી, ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ ન્યુક્લિયસનું અપેક્ષિત દળ $= 8 \times 2.01593\, u = 16.12744\, u$

માસ-સ્પેક્ટ્રોસ્કોપીના પ્રયોગો પરથી ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ નું પરમાણુ દળ $15.99493\, u$ જણાય છે. આમાંથી 8 ઈલેક્ટ્રૉનનું દળ $(8 \times 0.00055\, u)$ બાદ કરતાં, ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ ન્યુક્લિયસના દળનું પ્રાયોગિક મૂલ્ય $15.99053\, u$ મળે છે.

આમ, આપણને જણાય છે કે ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ ન્યુક્લિયસનું દળ તેના ઘટકોના કુલ દળ કરતાં $0.13691\, u$ ઓછું છે. ન્યુક્લિયસના દળ અને તેના ઘટકોના કુલ દળ વચ્ચેનાં તફાવત ΔMને *દળ ક્ષતિ* (*Mass Defect*) કહે છે, અને તે

$$\Delta M = [Zm_p + (A - Z)m_n] - M \tag{13.7}$$

પરથી મળે છે.

દળ ક્ષતિનો અર્થ શું છે ? બરાબર આ બાબતમાં આઈન્સ્ટાઈનની દળ અને ઊર્જાની સમતુલ્યતા ભાગ ભજવે છે. ઑક્સિજન ન્યુક્લિયસનું દળ તેના ઘટકોના (8 પ્રોટોન અને 8 ન્યુટ્રોન અબંધિત અવસ્થામાંના) કુલ દળ કરતાં ઓછું હોવાથી ઑક્સિજન ન્યુક્લિયસની સમતુલ્ય ઊર્જા તેના ઘટકોની સમતુલ્ય ઊર્જાના સરવાળા કરતાં ઓછી છે. જો આપણે ઑક્સિજન ન્યુક્લિયસને તેના 8 પ્રોટોન અને 8 ન્યુટ્રોનમાં ખંડિત કરવો હોય તો આ $\Delta M\, c^2$ જેટલી વધારાની ઊર્જા આપવી પડે. આ જરૂરી ઊર્જા E_bનો દળ ક્ષતિ સાથેનો સંબંધ

$$E_b = \Delta M\, c^2 \text{ છે.} \tag{13.8}$$

ઉદાહરણ 13.3 એક atomic mass unit (u)ને સમતુલ્ય ઊર્જા પ્રથમ jouleમાં અને પછી MeVમાં શોધો. આ પરથી, ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ ની દળ ક્ષતિને MeV/c^2માં દર્શાવો.

ઉકેલ : $1\, u = 1.6605 \times 10^{-27}$ kg

તેને ઊર્જાના એકમોમાં રૂપાંતર કરવા માટે c^2 વડે ગુણીએ અને સમતુલ્ય ઊર્જા મેળવીએ.

સમતુલ્ય ઊર્જા $= 1.6605 \times 10^{-27} \times (2.9979 \times 10^8)^2\ \mathrm{kg\, m^2/s^2}$

$= 1.4924 \times 10^{-10}$ J

$$= \frac{1.4924 \times 10^{-10}}{1.602 \times 10^{-19}}\ eV$$

$= 0.9315 \times 10^9\ eV$

$= 931.5$ MeV

અથવા $1\, u = 931.5\ \mathrm{MeV}/c^2$

માટે $\Delta M = 0.13691\, u = 0.13691 \times 931.5\ \mathrm{MeV}/c^2$

$= 127.5\ \mathrm{MeV}/c^2$

આમ, ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ નું તેના ઘટકોમાં વિભાજન કરવા માટે જરૂરી ઊર્જા $127.5\ \mathrm{MeV}/c^2$ છે.

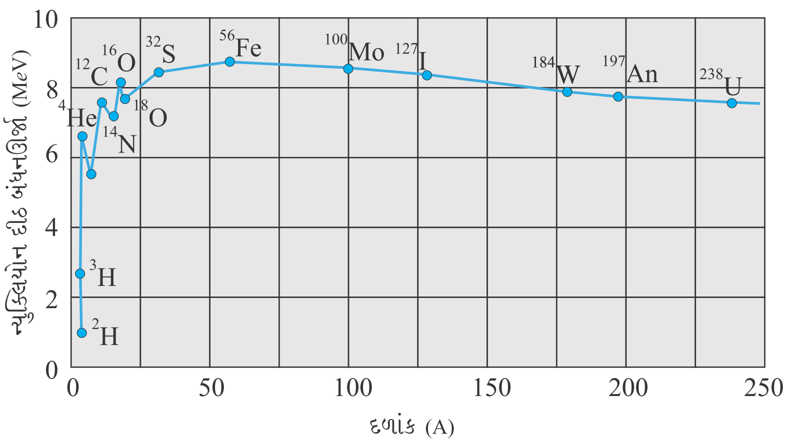
ઉદાહરણ 13.3

જો અમુક સંખ્યાના ન્યુટ્રોન અને પ્રોટોનને ભેગાં કરીને (જોડીને), અમુક વિદ્યુતભાર અને દળ ધરાવતા ન્યુક્લિયસની રચના કરવામાં આવે તો તે પ્રક્રિયામાં ઊર્જા E_b વિમુક્ત (Release) થશે.

E_b ઊર્જાને ન્યુક્લિયસની *બંધન ઊર્જા* કહે છે. જો આપણે ન્યુક્લિયસને તેના ન્યુક્લિયોનમાં વિભાજિત કરવો હોય તો આપણે કુલ E_b જેટલી ઊર્જા, તે કણોને પુરી પાડવી પડે. જો કે આ રીતે આપણે ન્યુક્લિયસને ચીરી શકતા નથી, તેમ છતાં ન્યુક્લિયર બંધન ઊર્જા, એ ન્યુક્લિયસ કેટલો સારો જકડાયેલો (પકડાયેલો) છે તેનું સુગમ ભર્યું માપન છે. ન્યુક્લિયસના ઘટકો વચ્ચેના બંધનનું વધુ ઉપયોગી માપન એ ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જા E_{bn} છે, જે ન્યુક્લિયસની બંધનઊર્જા E_b અને ન્યુક્લિયોન સંખ્યા A નો ગુણોત્તર છે.

$$E_{bn} = E_b / A \qquad (13.9)$$

આપણે ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધન ઊર્જાને; ન્યુક્લિયસને તેના વ્યક્તિગત ન્યુક્લિયોનમાં છુટા પાડવા માટે જરૂરી એવી *ન્યુક્લિયોન દીઠ સરેરાશ ઊર્જા* તરીકે ગણી શકીએ.



આકૃતિ 13.1 દળાંકના વિધેય તરીકે ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જા

આકૃતિ 13.1, મોટી સંખ્યાનાં ન્યુક્લિયસ માટે ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જા E_{bn} વિરુદ્ધ દળાંક A નો આલેખ છે. આ આલેખનાં નોંધપાત્ર મુખ્ય લક્ષણો આપણે આ મુજબ નોંધીએ :

(i) વચગાળાનાં (મધ્ય ગાળાનાં) દળાંક $(30 < A < 170)$ ધરાવતાં ન્યુક્લિયસો માટે ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જા E_{bn} લગભગ અચળ છે એટલે કે ન્યુક્લિયસોના પરમાણુ ક્રમાંક પર આધારિત નથી. આ વક્ર E_{bn}નું મહત્તમ મૂલ્ય 8.75 MeV/Nucleon દર્શાવે છે, જે $A = 56$ માટે મળે છે. $A = 238$ માટે E_{bn}નું મૂલ્ય 7.6 MeV/Nucleon છે.

(ii) હલકાં ન્યુક્લિયસ $(A < 30)$ અને ભારે ન્યુક્લિયસ $(A > 170)$ માટે E_{bn}નું મૂલ્ય નાનું છે.

આ બે અવલોકનો પરથી આપણે કેટલાક નિષ્કર્ષ તારવી શકીએ :

(i) બળ આકર્ષણ પ્રકારનું છે અને ન્યુક્લિયોન દીઠ કેટલાક MeVની બંધનઊર્જા ઉત્પન્ન કરવા માટે પુરતું પ્રબળ છે.

(ii) $30 < A < 170$ વિસ્તારમાં E_{bn} (ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જા)નું લગભગ અચળ મૂલ્ય હોવું એ, ન્યુક્લિયર બળ ટૂંકા અંતરી હોવાનું પરિણામ છે. પુરતા મોટા ન્યુક્લિયસના અંતરિયાળ વિસ્તારમાં રહેલા એક ન્યુક્લિયોનનો વિચાર કરો. તે તેના માત્ર કેટલાક પડોશીઓની અસરમાં હોય છે કે જેઓ તે ન્યુક્લિયોનથી ન્યુક્લિયર બળની અવધિના અંતરની અંદર રહેલા હોય. જો કોઈ એક ન્યુક્લિયોનથી બીજો કોઈ ન્યુક્લિયોન ન્યુક્લિયર બળની અવધિ કરતાં વધુ અંતરે રહેલો હોય તો તેની કોઈ અસર વિચારણા હેઠળના ન્યુક્લિયસ પર થતી નથી. જો કોઈ ન્યુક્લિયોનને ન્યુક્લિયર બળની અવધિની અંદરના અંતરમાં p પડોશીઓ હોય તો, તેની બંધનઊર્જા pને સમપ્રમાણમાં હોય છે. આ ન્યુક્લિયોનની બંધન ઊર્જા, ધારો કે pk છે. જ્યાં, k એવો અચળાંક છે જેને ઊર્જાનાં પરિમાણ છે. જો આપણે અન્ય ન્યુક્લિયોન ઉમેરીને A નું મૂલ્ય વધારીએ તો તેઓ, અંતરિયાળ ભાગમાંના ન્યુક્લિયોનની બંધનઊર્જા વધારતા નથી. મોટા ન્યુક્લિયસમાં મોટા ભાગના ન્યુક્લિયોન સપાટી

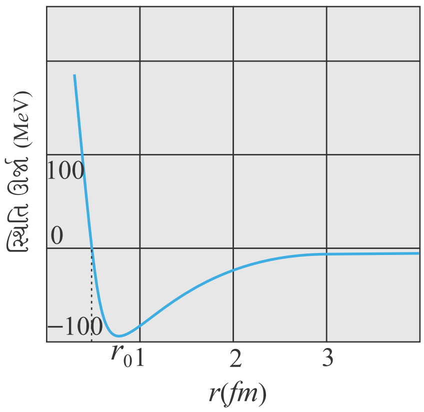
પર નહિ પણ અંદરના ભાગમાં રહેતા હોવાથી ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જામાંનો ફેરફાર નાનો હોય છે. ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જા અચળ હોય છે અને લગભગ *pk* બરાબર હોય છે. આપેલ ન્યુક્લિયોન માત્ર તેની નજીકનાં ન્યુક્લિયોનને જ અસર કરે છે-એ ગુણધર્મને ન્યુક્લિયર બળના સંતૃપ્તતાનો ગુણધર્મ (Saturation Property) પણ કહે છે.

(iii) ઘણા ભારે જેવા કે A = 240 હોય તેવા ન્યુક્લિયસની ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધન ઊર્જા (E_{bn})નું મૂલ્ય A = 120 હોય તેવા ન્યુક્લિયસ માટેના મૂલ્યની સરખામણીએ ઓછું છે. આમ જો A = 240નો ન્યુક્લિયસ ખંડિત થઈને બે A = 120ના ન્યુક્લિયસ બને તો; ન્યુક્લિયોન વધારે ઠાંસીને (ચુસ્તપણે, સખ્તાઈથી) બંધિત થાય છે. આ દર્શાવે છે કે આ ક્રિયામાં ઊર્જા વિમુક્ત (Release) થશે (એટલે કે ઊર્જા બહાર પડશે). આગળ ઉપર પરિચ્છેદ 13.7.1માં જેની ચર્ચા થવાની છે તે *વિખંડન* (*Fission*) દ્વારા ઊર્જા ઉત્પન્ન કરવામાં આ બાબતનું ખૂબ મહત્ત્વ છે.

(iv) બે ખૂબ હલકાં ($A \leq 10$) ન્યુક્લિયસ ભેગાં મળીને એક ભારે ન્યુક્લિયસ બનાવે તેનો વિચાર કરો. આ રીતે સંલયનથી બનેલા ભારે ન્યુક્લિયસની ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધન ઊર્જા, હલકાં ન્યુક્લિયસના ન્યુક્લિયન દીઠ બંધનઊર્જા કરતાં વધુ છે. આનો અર્થ એ કે અંતિમ તંત્ર પ્રારંભિક તંત્ર કરતાં વધારે ચુસ્તપણે (ઠાંસીને) બંધિત થયેલ છે. આવી *સંલયન* ઘટનામાં પણ ઊર્જા વિમુક્ત થાય છે (એટલે કે ઊર્જા બહાર પડે છે) આગળ ઉપર પરિચ્છેદ 13.7.3માં ચર્ચા કરવાના છીએ તે સૂર્યની ઊર્જાનો આ સ્રોત છે.

13.5 ન્યુક્લિયર બળ (Nuclear Force)

પરમાણુનાં ઈલેક્ટ્રૉનની ગતિ નક્કી કરનારું બળ એ જાણીતું કુલંબ બળ છે. પરિચ્છેદ 13.4માં આપણે જોયું કે સરેરાશ દળ ધરાવતાં ન્યુક્લિયસ માટે ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જા લગભગ 8 MeV છે, જે પરમાણુઓમાં બંધનઊર્જા કરતાં ઘણી વધુ છે. આથી, ન્યુક્લિયસમાં ન્યુક્લિયોનોને જકડી (બાંધી) રાખનાર બળ, કોઈ તદ્દન જુદા પ્રકારનું પ્રબળ આકર્ષક બળ હોવું જોઈએ. તે (ધન વિદ્યુતભારિત) પ્રોટોન વચ્ચેના અપાકર્ષણની ઉપરવટ જઈને (પહોંચી વળીને), પ્રોટોન અને ન્યુટ્રોનને નાના ન્યુક્લિયર કદમાં જકડી રાખે તેટલું પુરતું પ્રબળ હોવું જોઈએ. આપણે એ જોઈ ગયા છીએ કે ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જાની અચળતા (Constancy), ટૂંકા અંતરી બળના પદમાં સમજી શકાય છે. આવા ન્યુક્લિયસને બંધિત રાખનાર આવા ન્યુક્લિયર બળનાં ઘણાં લક્ષણો નીચે ટૂંકમાં જણાવ્યાં છે. આ લક્ષણો 1930થી 1950 વચ્ચે થયેલા વિવિધ પ્રયોગો પરથી પ્રાપ્ત થયેલ છે.



આકૃતિ 13.2 ન્યુક્લિયોનની એક જોડીની સ્થિતિ ઊર્જા તેમની વચ્ચેના અંતરના વિધેય તરીકે. r_0 કરતાં વધુ અંતર માટે બળ આકર્ષક છે અને r_0 કરતાં ઓછા અંતર માટે બળ તીવ્ર અપાકર્ષક છે.

(i) વિદ્યુતભારો વચ્ચે લાગતાં કુલંબ બળ અને દળો વચ્ચે લાગતાં ગરુત્વ બળ કરતાં ન્યુક્લિયર બળ ઘણું પ્રબળ છે. ન્યુક્લિયસને બંધિત રાખનાર બળને, ન્યુક્લિયસની અંદર રહેલા પ્રોટોન-પ્રોટોન વચ્ચેના કુલંબ અપાકર્ષણ બળ પર, પ્રભુત્વ સ્થાપિત કરવું પડે. જ્યારે ન્યુક્લિયર બળ કુલંબ બળ કરતાં ઘણું પ્રબળ હોય ત્યારે જ આવું થાય. ગુરુત્વ બળ તો કુલંબ બળ કરતાં ઘણું નિર્બળ (Weak) બળ છે.

(ii) બે ન્યુક્લિયોન વચ્ચેનું ન્યુક્લિયર બળ તેમની વચ્ચેના કેટલાક ફેમ્ટોમીટર કરતાં વધુ અંતરે ઝડપથી ઘટીને શૂન્ય થાય છે. આને કારણે મધ્યમ કે મોટા કદના ન્યુક્લિયસમાં *બળોની સંતૃપ્તતા* (*Saturation of Forces*) થાય છે, જે ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જાના અચળત્વ (Constancy) માટેનું કારણ છે. આકૃતિ 13.2માં બે ન્યુક્લિયોન વચ્ચેની સ્થિતિ ઊર્જાનો અંતરના વિધેય તરીકે આલેખ આશરે દર્શાવેલ છે. લગભગ 0.8 *fm* જેટલા અંતર r_0 માટે સ્થિતિઊર્જા લઘુત્તમ છે. આનો અર્થ એ કે 0.8 *fm* કરતાં વધુ મોટા અંતરો માટે બળ આકર્ષણ પ્રકારનું અને 0.8 *fm* કરતાં ઓછા અંતરો માટે તે અપાકર્ષણ પ્રકારનું છે.

(iii) ન્યુટ્રોન-ન્યુટ્રોન વચ્ચેનું, પ્રોટોન-ન્યુટ્રોન વચ્ચેનું અને પ્રોટોન-પ્રોટોન વચ્ચેનું ન્યુક્લિયર બળ લગભગ સમાન છે. ન્યુક્લિયર બળ વિદ્યુતભાર પર આધારિત નથી.

કુલંબના નિયમ કે ન્યૂટનના ગુરુત્વાકર્ષણના નિયમથી વિપરિત (અલગ), ન્યુક્લિયર બળનું કોઈ સરળ ગાણિતીક સ્વરૂપ નથી.

13.6 રેડિયો ઍક્ટિવિટી (RADIO ACTIVITY)

એ. એચ. બેક્વેરલ નામના વિજ્ઞાનીએ રેડિયો ઍક્ટિવિટીની શોધ 1896માં આકસ્મિક જ કરી હતી. દૃશ્ય પ્રકાશને રાસાયણિક સંયોજનો પર આપાત કરીને પ્રસ્ફુરણ (Fluorescence) અને પશ્ચાત્ સ્ફુરણ (Phosphorescence)ના અભ્યાસ દરમ્યાન, બૅક્વેરેલને રસપ્રદ ઘટનાનું અવલોકન થયું. યુરેનિયમ-પોટેશિયમ સલ્ફેટના કેટલાક ટૂકડાઓ પર દૃશ્ય પ્રકાશ આપાત કર્યા બાદ, તેણે તેમને કાળા કાગળમાં વિંટાળીને તે પેકેટને એક, સિલ્વર (ચાંદી)ના ટૂકડા દ્વારા, ફોટોગ્રાફીક પ્લેટથી અલગ કરીને મૂક્યું. કેટલાક કલાક આ પ્રમાણે રાખીને ફોટો-પ્લેટને ડેવલપ કરવામાં આવી. આમ કરતાં ફોટો-પ્લેટ પર કાળાશ (Blackening) જણાઈ હતી. આ કાળાશ, સંયોજનમાંથી ઉત્સર્જન પામેલા કોઈક વિકિરણને લીધે હોવી જોઈએ કે જે કાળા કાગળ અને ચાંદી બંનેને ભેદી (Penetrate) શક્યું હોય.

ત્યાર બાદ થયેલા પ્રયોગોએ દર્શાવ્યું કે રેડિયો ઍક્ટિવિટી એ ન્યુક્લિયર ઘટના છે કે જેમાં કોઈ અસ્થાયી (Unstable) ન્યુક્લિયસ ક્ષય (Decay) પામે છે. આને *રેડિયો ઍક્ટિવ ક્ષય* કહે છે. કુદરતમાં ત્રણ પ્રકારનાં રેડિયો ઍક્ટિવ ક્ષય થતા જણાય છે.

(i) α-ક્ષય કે જેમાં હિલિયમ ન્યુક્લિયસ $^{4}_{2}He$ ઉત્સર્જન પામે છે.

(ii) β-ક્ષય કે જેમાં ઈલેક્ટ્રૉન અથવા પૉઝિટ્રોન (ઈલેક્ટ્રૉનના જેટલું જ દળ પરંતુ ઈલેક્ટ્રૉન જેટલો જ તેનાથી વિરુદ્ધ વિદ્યુતભાર ધરાવતો કણ) ઉત્સર્જન પામે છે.

(iii) γ-ક્ષય કે જેમાં ઉચ્ચ ઊર્જા (સેંકડો keV અથવા વધુ) ધરાવતા ફોટોન ઉત્સર્જિત થાય છે.

આગળ આવનારા પરિચ્છેદમાં આ દરેક ક્ષયનો વિચાર કરીશું.

13.6.1 રેડિયો ઍક્ટિવ ક્ષયનો નિયમ (Law of Radioactive Decay)

α, β કે γ ક્ષય પામતા કોઈ રેડિયો ઍક્ટિવ નમૂનામાં એમ જણાયું છે કે એકમ સમયમાં ક્ષય (વિભંજન) પામતા ન્યુક્લિયસની સંખ્યા તે સમયે તે નમૂનામાં રહેલા ન્યુક્લિયસની કુલ સંખ્યાના સમપ્રમાણમાં હોય છે. જો નમૂનામાં રહેલા ન્યુક્લિયસની સંખ્યા N હોય અને તેમાંથી ΔN ન્યુક્લિયસ Δt સમયમાં વિભંજન પામતા હોય તો

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$$

અથવા $\Delta N/\Delta t = \lambda N$ (13.10)

જ્યાં, λને રેડિયો ઍક્ટિવ *ક્ષય અચળાંક* અથવા *વિભંજન અચળાંક* કહે છે.

Δt સમયમાં, નમૂનામાં ન્યુક્લિયસની સંખ્યાનો ફેરફાર* $dN = -\Delta N$ છે.

આથી ($\Delta t \to 0$ લક્ષમાં) Nના ફેરફારનો દર,

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

* ΔN ક્ષય પામતા ન્યુક્લિયસની સંખ્યા છે અને તેથી હંમેશા ધન છે. dN એ Nમાં ફેરફાર છે, જેને ધન કે ઋણ ગમે તે ચિહ્ન હોઈ શકે. અહીં તે ઋણ છે, કારણ કે મૂળ N ન્યુક્લિયસમાંથી ΔN ક્ષય પામ્યા છે, જેથી $(N - \Delta N)$ન્યુક્લિયસ બચેલાં છે.

અથવા $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$

ઉપરના સમીકરણની બંને બાજુઓનું સંકલન કરતાં, આપણને

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{t_0}^{t} dt \qquad (13.11)$$

અથવા $\ln N - \ln N_0 = -\lambda(t - t_0)$ (13.12)

મળે છે. અહીં, N_0 એ કોઈક યાદચ્છિક t_0 સમયે નમૂનામાં રેડિયો ઍક્ટિવ ન્યુક્લિયસની સંખ્યા છે અને N તે પછીના કોઈક t સમયે રેડિયો ઍક્ટિવ ન્યુક્લિયસની સંખ્યા છે. $t_0 = 0$ મૂકીને ઉપરના સમીકરણની પુનઃગોઠવણી કરતાં,

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \qquad (13.13)$$

આ પરથી

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (13.14)$$

સમીકરણ મળે છે. એ નોંધો કે પ્રકાશના બલ્બ આવો કોઈ ચરઘાતાંકી (Exponential) નિયમ અનુસરતા નથી. જો આપણે 1000 બલ્બનું તેમના જીવન (કાળ) (તેઓ પીગલન પામે અથવા બળી જાય / પ્રકાશ આપવાનું બંધ કરે તે અગાઉના સમયગાળા) માટે પરિક્ષણ કરીએ તો, આપણને એવું અપેક્ષિત છે કે તેઓ લગભગ એકસમાન સમયે ક્ષય (Decay) પામશે (બળી જશે). પરંતુ રેડિયો ન્યુક્લાઈડ્ઝનો ક્ષય તદ્દન જુદો નિયમ; જે સમીકરણ (13.14) વડે રજૂ કરાય છે તે *રેડિયો ઍક્ટિવ ક્ષય*નો નિયમ અનુસરે છે.

કોઈ નમૂનાનો કુલ ક્ષય દર (વિભંજન દર, Decay Rate) R; એકમ સમયમાં વિભંજન પામતા ન્યુક્લિયસની સંખ્યા છે. ધારો કે dt સમયગાળામાં, મપાયેલાં વિભંજનની સંખ્યા ΔN છે. આ પરથી,

$$dN = -\Delta N$$

આ પરથી ધન રાશિ R(=વિભંજન દર)ને

$$R = -\frac{dN}{dt}$$

તરીકે વ્યાખ્યાયિત કરાય છે.

સમીકરણ (13.14)નું વિકલન કરતાં, આપણને

$$R = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

અથવા $R = R_0 e^{-\lambda t}$ (13.15)

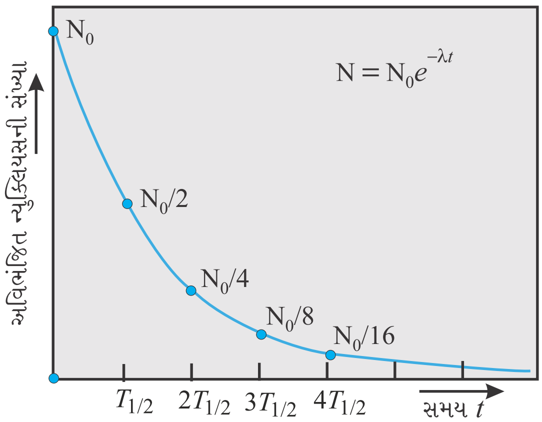
મળે છે. આ રેડિયો ઍક્ટિવ વિભંજનના નિયમને સમતુલ્ય સમીકરણ છે, કારણ કે તમે સમીકરણ (13.15)નું સંકલન કરશો તો પાછું સમીકરણ (13.14) જ મળી જશે. એ સ્પષ્ટ છે કે $R_0 = \lambda N_0$ એ $t = 0$ સમયે વિભંજન દર છે. કોઈ નિશ્ચિત t સમયે વિભંજન દર R અને તે જ સમયે અવિભંજિત (Undecayed) ન્યુક્લિયસની સંખ્યા N હોય તો તેમની વચ્ચેનો સંબંધ

$$R = \lambda N \qquad (13.16)$$

પરથી મળે છે. કોઈ નમૂનામાં રેડિયો ઍક્ટિવ ન્યુક્લિયસની સંખ્યા Nને બદલે, તે નમૂનાનો વિભંજન દર R એ વધુ પ્રત્યક્ષ રીતે માપી શકાય તેવી રાશિ છે અને તેને '*ઍક્ટિવિટી*' (*Activity*) એવું વિશિષ્ટ નામ અપાયું છે. રેડિયો ઍક્ટિવિટીના શોધક હેન્રી બેક્વેરેલની યાદમાં ઍક્ટિવિટીનો SI એકમ becquerel (B*q*) છે.

1 becquerel, દર સેકંડ દીઠ 1 વિભંજન અથવા ક્ષય બરાબર છે. વ્યાપક પ્રમાણમાં વપરાતો એક બીજો 'curie' નામનો એકમ પણ છે અને તેનો SI એકમ સાથેનો સંબંધ આ મુજબ છે :

1 curie = 1 C*i* = 3.7×10^{10} વિભંજન પ્રતિ સેકંડ = 3.7×10^{10} B*q*



આકૃતિ 13.3 રેડિયો ઍક્ટિવ ન્યુક્લિયસનો ચરઘાતાંકી ક્ષય. $T_{1/2}$ સમયગાળા પછી, આપેલ પ્રકારના ન્યુક્લિયસની સંખ્યા અડધી થાય છે.

જુદાં જુદાં રેડિયો ન્યુક્લાઈડ્ઝના ક્ષય દર (વિભંજન દર, Rate of Decay) ઘણા જુદાં જુદાં હોય છે. આ લક્ષણને વિશિષ્ટ રીતે રજુ કરવાનો સરળ ઉપાય *અર્ધ-આયુ* (*અર્ધ જીવનકાળ, Half life*)ના ખ્યાલ પરથી મળે છે. કોઈ રેડિયો ન્યુક્લાઈડનું અર્ધ-આયુ (જેને $T_{1/2}$ વડે દર્શાવાય છે) એ તેના નમૂનામાં પ્રારંભમાં રહેલા રેડિયો ન્યુક્લિયસની સંખ્યા N_0ને ઘટીને $N_0/2$ (એટલે કે અડધી) બનવા માટે લાગતો સમય છે. સમીકરણ (13.14)માં $N = N_0/2$ અને $t = T_{1/2}$ મૂકતાં

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$
$$= \frac{0.693}{\lambda} \qquad (13.17)$$

મળે છે. જો $T_{1/2}$ સમયમાં N_0 ઘટીને અડધા મૂલ્યનું બને તો, સમીકરણ (13.16) પરથી સ્પષ્ટ છે કે તેટલા જ સમયમાં R_0 પણ ઘટીને તેના અડધા મૂલ્યની બને.

એક બીજું સંબંધિત માપ એ *સરેરાશ જીવનકાળ* (*Average or Mean Life*) τ છે. આ પણ સમીકરણ (13.14) પરથી મેળવી શકાય છે. t અને $t + \Delta t$ વચ્ચેના સમયગાળામાં વિભંજન (ક્ષય) પામતા ન્યુક્લિયસની સંખ્યા $R(t)\Delta t\ (= \lambda N_0 e^{-\lambda t} \Delta t)$ છે. આમાંના દરેક ન્યુક્લિયસ t સમય સુધી તો જીવ્યા જ છે. આ બધા ન્યુક્લિયસનો કુલ જીવનકાળ $t\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$ છે. એ પણ સ્પષ્ટ છે જ કે કેટલાક ન્યુક્લિયસ ટૂંકા અને બીજા કેટલાક લાંબા સમય સુધી જીવ્યા હોય. આથી, સરેરાશ જીવનકાળ શોધવા માટે આપણે આ પદનો 0થી અનંત સુધીના બધા સમયો પરનો સરવાળો (અથવા સંકલન) મેળવવો જોઈએ અને તેને $t = 0$ સમયે કુલ ન્યુક્લિયસની સંખ્યા N_0 વડે ભાગવો જોઈએ. આમ

$$\tau = \frac{\lambda N_0 \int_0^\infty t e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \lambda \int_0^\infty t e^{-\lambda t} dt$$

આ સંકલન કરીને આપણે દર્શાવી શકીએ કે

$$\tau = 1/\lambda$$

આ પરિણામોનો સારાંશ આપણે નીચે મુજબ કરીએ :

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2 \qquad (13.18)$$

જે રેડિયો ઍક્ટિવ તત્વો (જેવા કે ટ્રિટિયમ, પ્લુટોનિયમ) ટૂંકો જીવનકાળ ધરાવે છે એટલે કે તેમના અર્ધ-આયુ બ્રહ્માંડ (વિશ્વ)ની ઉંમર (~15 Billion Years) કરતાં ઘણાં ઓછાં છે, તે બધા ઘણા સમય અગાઉ જ ક્ષય પામી ગયાં છે અને તેથી તેઓ કુદરતમાં મળી આવતાં નથી. જો કે પ્રયોગશાળામાં ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયાઓમાં તેઓને રચી શકાય છે.

મેરી સ્ક્લોડ્વસ્કા ક્યુરિ (1867-1934)

મેરી સ્ક્લોડ્વસ્કા ક્યુરિ (1867-1934) પોલેન્ડમાં જન્મ્યાં હતાં. તે ભૌતિકવિજ્ઞાની અને રસાયણવિજ્ઞાની બંને તરીકે ઓળખાય છે. 1896માં હેન્રી બેકવેરેલ દ્વારા થયેલી રેડિયો ઍક્ટિવિટીની શોધે મેરી અને તેના પતિ પીયરી ક્યુરિને તેમનાં સંશોધનો અને વિશ્લેષણમાં પ્રેરિત કર્યાં. જે પરથી રેડિયમ અને પોલોનિયમ તત્વોને અલગ મેળવી શકાયાં. બે નોબેલ ઈનામો પ્રાપ્ત કરનાર તે પ્રથમ વ્યક્તિ હતા – ભૌતિકવિજ્ઞાન માટે 1903માં અને રસાયણવિજ્ઞાન માટે 1911માં.

ઉદાહરણ 13.4

ઉદાહરણ 13.4 α-ક્ષય પામતા $^{238}_{92}U$ નું અર્ધ-આયુ 4.5×10^9 years છે. $^{238}_{92}U$ ના 1 g નમૂનાની ઍક્ટિવિટી કેટલી હશે ?

ઉકેલ

$$T_{1/2} = 4.5 \times 10^9 \text{ y}$$
$$= 4.5 \times 10^9 \text{ y} \times 3.16 \times 10^7 \text{ s/y}$$

$= 1.42 \times 10^{17}$ s

કોઈ પણ સમસ્થાનિક (Isotope)ના 1 k molમાં એવોગેડ્રો સંખ્યાના પરમાણુઓ રહેલા હોય છે, તેથી 1 g $^{238}_{92}U$ માં રહેલાં ન્યુક્લિયસની સંખ્યા

$= \frac{1}{238} \times 10^{-3}$ k mol $\times 6.025 \times 10^{26}$ પરમાણુ/k mol

$= 25.3 \times 10^{20}$ પરમાણુ

વિભંજન દર (Decay Rate) R નીચે મુજબ મળે.

$$R = \lambda N$$

$$= \frac{0.693}{T_{1/2}} N = \frac{0.693 \times 25.3 \times 10^{20}}{1.42 \times 10^{17}} s^{-1}$$

$$= 1.23 \times 10^{4} s^{-1}$$

$$= 1.23 \times 10^{4} Bq$$

ઉદાહરણ 13.4

ઉદાહરણ 13.5 ટ્રિટિયમ 12.5 yના અર્ધ-આયુ સાથે બીટા-ક્ષય પામે છે. 25 y પછી શુદ્ધ ટ્રિટિયમના નમૂનાનો કેટલો અંશ (Fraction) અવિભંજિત રહેશે ?

ઉકેલ અર્ધ-આયુની વ્યાખ્યા મુજબ 12.5 y પછી મૂળ નમૂનાનો અડધો ભાગ અવિભંજિત રહેશે. તે પછીના બીજા 12.5 yમાં આ ન્યુક્લિયસની અડધી સંખ્યા વિભંજિત થશે. તેથી શુદ્ધ ટ્રિટિયમના મૂળ નમૂનાનો એક ચતુર્થાંશ અવિભંજિત રહેશે.

ઉદાહરણ 13.5

13.6.2 આલ્ફા ક્ષય (Alpha Decay)

આલ્ફા ક્ષયનું જાણીતું ઉદાહરણ એ એક હિલિયમ ન્યુક્લિયસના ઉત્સર્જન સાથે યુરેનિયમ $^{238}_{92}U$ નો ક્ષય થઈ થોરિયમ $^{234}_{90}Th$ બનવાની ઘટના છે.

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He \quad (\alpha\text{-ક્ષય}) \qquad (13.19)$$

α-ક્ષયમાં, ઉત્પન્ન થયેલાં ન્યુક્લિયસ (જનિત ન્યુક્લિયસ)નો દળાંક ક્ષય પામતા ન્યુક્લિયસ (જનક ન્યુક્લિયસ)ના દળાંક કરતાં ચાર જેટલો ઓછો હોય છે અને પરમાણુ ક્રમાંક બે જેટલો ઓછો હોય છે. વ્યાપકરૂપે, $^{A}_{Z}X$ જનક ન્યુક્લિયસના α-ક્ષયથી $^{A-4}_{Z-2}Y$ જનિત ન્યુક્લિયસ ઉત્પન્ન થાય છે.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He \qquad (13.20)$$

આઈન્સ્ટાઈનના દળ-ઊર્જા સમતુલ્યતાના સંબંધ (સમીકરણ 13.6) પરથી અને ઊર્જાના સંરક્ષણ પરથી એ સ્પષ્ટ છે કે આ સ્વતઃ (આપમેળે થતો) ક્ષય ત્યારે જ શક્ય બને કે જ્યારે ક્ષયથી નીપજતા પદાર્થોનું કુલ દળ, મૂળ ન્યુક્લિયસના દળ કરતાં ઓછું હોય. ન્યુક્લિયર દળો દર્શાવતા કોષ્ટકનો સંદર્ભ લઈને, આપણે ચકાસી શકીએ છીએ કે $^{234}_{90}Th$ અને $^{4}_{2}He$ નું કુલ દળ $^{238}_{92}U$ ના દળ કરતાં ખરેખર ઓછું જ છે.

વિભંજન ઊર્જા અથવા ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયાનું Q-મૂલ્ય એ પ્રારંભિક દળઊર્જા અને ક્ષય નીપજોની કુલ દળઊર્જાનો તફાવત છે. α-ક્ષય માટે

$$Q = (m_X - m_Y - m_{He})c^2 \qquad (13.21)$$

Q એ પ્રક્રિયામાં પ્રાપ્ત થતી કુલ (ચોખ્ખી) ગતિઊર્જા છે અથવા જો મૂળ ન્યુક્લિયસ X સ્થિર હોય તો તે નીપજોની ગતિઊર્જા છે. એ સ્પષ્ટ છે કે α-ક્ષય જેવી ઉષ્માક્ષેપક પ્રક્રિયાઓ માટે $Q > 0$ છે.

ઉદાહરણ 13.6 નીચેનાં પરમાણુદળો આપણને આપેલ છે :

$^{238}_{92}\text{U} = 238.05079\, u$ $\quad ^{4}_{2}\text{He} = 4.00260\, u$

$^{234}_{90}Th = 234.04363\, u$ $\quad ^{1}_{1}\text{H} = 1.00783\, u$

$^{237}_{91}Pa = 237.05121\, u$

અત્રે પ્રતિક Pa એ પ્રોટેક્ટિનિયમ (Z = 91) તત્વ માટે છે.

(a) $^{238}_{92}\text{U}$ ના આલ્ફા ક્ષય દરમ્યાન વિમુક્ત થતી ઉત્સર્જન પામતી ઊર્જા ગણો.

(b) $^{238}_{92}\text{U}$ સ્વતઃ (આપમેળે, સ્વયંભૂ રીતે) પ્રોટોનનું ઉત્સર્જન કરી શકે નહિ તેમ દર્શાવો.

ઉકેલ

(a) $^{238}_{92}\text{U}$ નો આલ્ફા ક્ષય સમીકરણ (13.20) દ્વારા રજૂ થાય છે. આ પ્રક્રિયામાં વિમુક્ત થતી ઊર્જા,

$Q = (m_{\text{U}} - m_{Th} - m_{\text{He}})c^2$ દ્વારા મળે.

પક્ષમાં આપેલા પરમાણુ દળોનાં મૂલ્યો અવેજ કરતાં આપણને Q નીચે મુજબ મળે.

$$Q = (238.05079 - 234.04363 - 4.00260)u \times c^2$$
$$= (0.00456\, u)c^2$$
$$= (0.00456\, u)\ (931.5\ \text{MeV}/u) = 4.25\ \text{MeV}$$

(b) જો $^{238}_{92}\text{U}$ સ્વતઃ એક પ્રોટોનનું ઉત્સર્જન કરે, તો ક્ષય પ્રક્રિયા નીચે મુજબ હોય.

$$^{238}_{92}\text{U} \rightarrow\ ^{237}_{91}Pa +\ ^{1}_{1}\text{H}$$

આ પ્રક્રિયા થવા માટેનું Q-મૂલ્ય નીચે મુજબ મળે.

$$Q = (m_{\text{U}} - m_{Pa} - m_{\text{H}})c^2$$
$$= (238.05079 - 237.05121 - 1.00783)\, u \times c^2$$
$$= (-0.00825\, u)c^2$$
$$= -(0.00825\, u)\ (931.5\ \text{MeV}/u) = -7.68\ \text{MeV}$$

આમ, આ પ્રક્રિયાનું Q-મૂલ્ય ઋણ છે તેથી તે સ્વતઃ (આપમેળે) થઈ શકે નહિ. આપણે $^{238}_{92}\text{U}$ ન્યુક્લિયસને 7.68 MeV જેટલી લઘુત્તમ ઊર્જા આપવી પડે અને તો જ તે એક પ્રોટોનનું ઉત્સર્જન કરી શકે.

ઉદાહરણ 13.6

13.6.3 બીટા ક્ષય (Beta Decay)

બીટા ક્ષયમાં, ન્યુક્લિયસ સ્વતઃ (આપમેળે) ઈલેક્ટ્રૉન (β^- ક્ષય)નું અથવા પૉઝિટ્રૉન (β^- ક્ષય)નું ઉત્સર્જન કરે છે. β^- ક્ષયનું એક સામાન્ય ઉદાહરણ

$$^{32}_{15}\text{P} \rightarrow\ ^{32}_{16}\text{S} + e^- + \bar{\nu} \qquad (13.22)$$

છે, અને β^+ ક્ષયનું ઉદાહરણ

$$^{22}_{11}Na \rightarrow\ ^{22}_{10}\text{Ne} + e^+ + \nu \qquad (13.23)$$

છે. વિભંજનોનું સંચાલન સમીકરણ (13.14) અને સમીકરણ (13.15) દ્વારા થાય છે, જેથી આપણે *કયું* ન્યુક્લિયસ ક્ષય પામશે તે કહી શકતા નથી પરંતુ આવા ક્ષયને અર્ધ-આયુ $T_{1/2}$ વડે લાક્ષણિક રીતે રજૂ કરાય છે. દાખલા તરીકે, ઉપર જણાવેલા વિભંજનો માટે $T_{1/2}$ અનુક્રમે 14.3 d અને 2.6 y છે. β^- ક્ષયમાં ઈલેક્ટ્રૉનના ઉત્સર્જનની સાથે જ ઍન્ટિન્યુટ્રીનો ($\bar{\nu}$) પણ ઉત્સર્જન પામે છે. તેના બદલે β^+ ક્ષયમાં ન્યુટ્રીનો ઉત્પન્ન થાય છે. ન્યુટ્રીનો એ ઈલેક્ટ્રૉનની સરખામણીએ ખૂબ નાના દળ (શૂન્ય પણ હોઈ શકે) ધરાવતા કણ છે. તેમની બીજા કણો સાથે માત્ર નિર્બળ (Weak) આંતરક્રિયા હોય છે. તેથી તેમની પરખ કરવી (Detect) ખૂબ મુશ્કેલ છે. તેઓ દ્રવ્યના વિપુલ જથ્થામાંથી (પૃથ્વીમાંથી પણ) કોઈ પણ આંતરક્રિયા કર્યા વગર આરપાર પસાર થઈ શકે છે.

β^- ક્ષય અને β^+ ક્ષય એ બંનેમાં દળાંક A અફર રહે છે. β^- ક્ષયમાં પરમાણુક્રમાંક Z માં 1નો વધારો થાય છે અને β^+ ક્ષયમાં પરમાણુક્રમાંક Zમાં 1નો ઘટાડો થાય છે. β^- ક્ષયમાં મૂળભૂત ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયા તો ન્યુટ્રોનનું પ્રોટોનમાં રૂપાંતર થવાની છે.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \qquad (13.24)$$

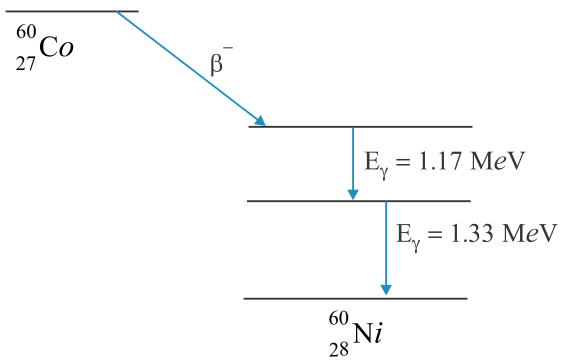
અને β^+ ક્ષયમાં તે પ્રોટોનનું ન્યુટ્રોનમાં રૂપાંતર થવાની છે.

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu \qquad (13.25)$$

એ બરાબર નોંધો કે મુક્ત (Free) ન્યુટ્રોન પ્રોટોનમાં ક્ષય પામે છે. પરંતુ પ્રોટોનનો ક્ષય પામીને ન્યુટ્રોન થવાની પ્રક્રિયા માત્ર ન્યુક્લિયસની અંદર જ શક્ય છે, કારણ કે પ્રોટોનનું દળ ન્યુટ્રોન કરતાં ઓછું છે.

13.6.4 ગેમા ક્ષય (Gamma Decay)

પરમાણુની જેમ, ન્યુક્લિયસને પણ જુદાં-જુદાં (અસતત) ઊર્જા સ્તરો-ધરા અવસ્થા અને ઉત્તેજિત અવસ્થાઓ-હોય છે. જો કે ઊર્જાનો માપક્રમ ઘણો જુદો હોય છે. પરમાણુ ઊર્જાના સ્તરોનો તફાવત *e*Vના ક્રમનો હોય છે, જ્યારે ન્યુક્લિયર ઊર્જા સ્તરોનો તફાવત MeVના ક્રમનો હોય છે. જ્યારે ઉત્તેજિત અવસ્થામાં રહેલું ન્યુક્લિયસ સ્વતઃ તેની ધરા અવસ્થા (અથવા બીજી નિમ્ન ઊર્જા અવસ્થા)માં ક્ષય પામે છે ત્યારે ન્યુક્લિયસના તે બે ઊર્જા સ્તરો વચ્ચેના તફાવત જેટલી ઊર્જાના ફોટોનનું ઉત્સર્જન થાય છે. આ ઘટનાને *ગેમા ક્ષય* કહેવાય છે. આ ઊર્જા (MeV), સખત (Hard) X-કિરણોના વિસ્તારથી પણ ટૂંકી તરંગલંબાઈ ધરાવતા વિકિરણને અનુરૂપ છે.



આકૃતિ 13.4 $^{60}_{27}Co$ ન્યુક્લિયસના β-ક્ષયથી નીપજેલ જનિત ન્યુક્લિયસ $^{60}_{28}Ni$ ની નિમ્નસ્તરો પર સંક્રાંતિથી ઉત્સર્જાતાં બે γ-કિરણો

લાક્ષણિક રીતે, જ્યારે α અથવા β ક્ષયના પરિણામે ઉપજેલ જનિત ન્યુક્લિયસ ઉત્તેજિત અવસ્થામાં હોય ત્યારે γ-કિરણ ઉત્સર્જિત થાય છે. આ નીપજ ન્યુક્લિયસ, ત્યારબાદ એક ફોટોનના ઉત્સર્જનથી અથવા એક કરતાં વધુ ફોટોનના ક્રમશઃ ઉત્સર્જનથી ધરા અવસ્થામાં પાછું આવે છે. આનું એક જાણીતું ઉદાહરણ એ $^{60}_{27}Co$ ના β^- ક્ષયથી નીપજેલ $^{60}_{28}Ni$ ન્યુક્લિયસની ધરા અવસ્થામાંની સંક્રાંતિ દરમિયાન ક્રમશઃ ઉત્સર્જાયેલાં 1.17 MeV અને 1.33 MeV ઊર્જા ધરાવતાં γ-કિરણો છે.

13.7 ન્યુક્લિયર ઊર્જા (NUCLEAR ENERGY)

આકૃતિ 13.1માં દર્શાવેલ ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જાના વક્રમાં A = 30 અને A = 170 વચ્ચે એક લાંબો સપાટ મધ્ય વિસ્તાર છે. આ વિસ્તારમાં ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધન ઊર્જા લગભગ અચળ (8.0 MeV) છે. આપણે અગાઉ નોંધ્યું છે તે પ્રમાણે A < 30ના હલકા ન્યુક્લિયસના વિસ્તાર માટે અને A > 170ના ભારે ન્યુક્લિયસના વિસ્તાર માટે ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જા 8.0 MeV કરતાં ઓછી છે. હવે, બંધનઊર્જા જેમ વધુ હોય તેમ ન્યુક્લિયસ જેવા બંધિત તંત્રનું કુલ દળ ઓછું હોય છે. પરિણામે, જો કુલ બંધનઊર્જા ઓછી હોય તેવા ન્યુક્લિયસ વધારે કુલ બંધનઊર્જા ધરાવતા ન્યુક્લિયસમાં રૂપાંતર પામે તો ઊર્જા મુક્ત થાય છે (એટલે કે ઊર્જાનું ઉત્સર્જન થાય છે). જ્યારે ભારે ન્યુક્લિયસનો બે અથવા વધુ વચગાળાનાં દળ ધરાવતાં ટુકડાઓમાં ક્ષય (*વિખંડન, Fission*) થાય છે અથવા હલકાં ન્યુક્લિયસનું *સંલયન* (*Fusion*) થઈ ભારે ન્યુક્લિયસ બને છે ત્યારે આવું જ થાય છે.

કોલસો અથવા પેટ્રોલિયમ જેવા ઊર્જાના પ્રચલિત સ્રોતમાં મૂળભૂત બાબત ઉષ્માક્ષેપક રાસાયણિક પ્રક્રિયાઓ છે. આમાં સંકળાયેલી ઊર્જા ઈલેક્ટ્રોન વૉલ્ટના ક્રમની હોય છે. બીજી તરફ, ન્યુક્લિયર

પ્રક્રિયામાં મુક્ત થતી (ઉત્સર્જન પામતી) ઊર્જા MeVના ક્રમની હોય છે. આથી સમાન જથ્થાનાં દળ માટે ન્યુક્લિયર સ્રોત, રાસાયણિક સ્રોત કરતાં મિલિયન (દસ લાખ, 10^6) ગણી ઊર્જા ઉત્પન્ન કરે છે. દાખલા તરીકે, 1 kg કોલસાના દહનથી 10^7 J ઊર્જા મળે છે જ્યારે 1 kg યુરેનિયમના વિખંડન (Fission)થી 10^{14} J ઊર્જા ઉત્પન્ન થાય છે.

13.7.1 વિખંડન (Fission)

જ્યારે આપણે નૈસર્ગિક (કુદરતી) રેડિયો ઍક્ટિવ વિભંજનોથી કંઈક આગળ જઈને ન્યુક્લિયસ પર પ્રોટોન, ન્યુટ્રોન, α-કણ વગેરે જેવાં અન્ય ન્યુક્લિયર કણોનો મારો ચલાવવાની પ્રક્રિયાઓનો અભ્યાસ કરીએ ત્યારે નવી સંભાવનાઓ ઊભી થાય છે.

સૌથી મહત્વની ન્યુટ્રોન પ્રેરિત ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયા એ વિખંડન છે. વિખંડનનું ઉદાહરણ એ યુરેનિયમના સમસ્થાનિક (Isotope) પર ન્યુટ્રોનનો મારો ચલાવતાં તેનું બે વચગાળાનાં દળ ધરાવતા ન્યુક્લિયર ટુકડાઓમાં વિભાજન થઈ જાય તે છે.

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3\,{}^{1}_{0}n \qquad (13.26)$$

આ જ પ્રક્રિયા વચગાળાનાં દળ ધરાવતા ટુકડાઓની અન્ય જોડ (Pair) પણ ઉત્પન્ન કરી શકે છે.

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{133}_{51}Sb + {}^{99}_{41}Nb + 4\,{}^{1}_{0}n \qquad (13.27)$$

અથવા અન્ય ઉદાહરણ તરીકે,

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{140}_{54}Xe \rightarrow {}^{94}_{38}Sr + 2\,{}^{1}_{0}n \qquad (13.28)$$

આમાં નીપજતાં ટુકડાઓ રેડિયો ઍક્ટિવ ન્યુક્લિયસ છે, તેઓ ક્રમશઃ β-કણોનું ઉત્સર્જન કરીને સ્થાયી અંતિમ નીપજ બનાવે છે.

યુરેનિયમ જેવા ન્યુક્લિયસની વિખંડન પ્રક્રિયામાં વિમુક્ત થતી (ઉત્સર્જાતી) ઊર્જા, વિખંડન પામતા ન્યુક્લિયસ દીઠ 200 MeV છે. નીચે મુજબ આનો અંદાજ મેળવી શકાય.

ધારોકે આપણે A = 240 ધરાવતો ન્યુક્લિયસ લઈએ અને તે A = 120 ધરાવતા બે ટુકડાઓમાં વિભાજિત થાય, તો

A = 240 ન્યુક્લિયસ માટે E_{bn} = 7.6 MeV

A = 120નાં બે વિભાજિત ન્યુક્લિયસ માટે E_{bn} = 8.5 MeV

ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જામાં વધારો = 0.9 MeV

આથી, બંધનઊર્જામાં કુલ વધારો $240 \times 0.9 = 216$ MeV.

વિખંડન ઘટનામાં ઉદ્‌ભવતી આ વિભંજન ઊર્જા શરૂઆતમાં ટુકડાઓ અને ન્યુટ્રોનની ગતિઊર્જાના સ્વરૂપમાં હોય છે. સમય જતાં તે આસપાસના દ્રવ્યમાં રૂપાંતર પામીને ઉષ્મા રૂપે દેખા દે છે. વિદ્યુત ઉત્પન્ન કરનારા ન્યુક્લિયર રીએક્ટરોમાં સ્રોત તરીકે ન્યુક્લિયર વિખંડન છે. પરમાણુ બૉમ્બમાં વિમુક્ત થતી પ્રચંડ ઊર્જા અનિયંત્રિત ન્યુક્લિયર વિખંડન (Fission)માંથી આવે છે. હવે પછીના પરિચ્છેદમાં ન્યુક્લિયર રીએક્ટર કેવી રીતે કાર્ય કરે છે તેની ચર્ચા કરવાના છીએ.

13.7.2 ન્યુક્લિયર રીએક્ટર (Nuclear Reactor)

સમીકરણ (13.26)થી સમીકરણ (13.28)માં દર્શાવેલ વિખંડન પ્રક્રિયાઓમાં એક બહુ મહત્વની હકીકતની નોંધ લો. વિખંડન પ્રક્રિયામાં વધારાના ન્યુટ્રોન પણ મુક્ત થાય છે. દર એક યુરેનિયમ ન્યુક્લિયસના વિખંડન દીઠ સરેરાશ $2\frac{1}{2}$ ન્યુટ્રોન મુક્ત થાય છે. આ અપૂર્ણાંક હોવાનું કારણ એ છે કે કેટલાક વિખંડનમાં 2 ન્યુટ્રોન તો કેટલાંકમાં 3 ન્યુટ્રોન વગેરે ઉત્સર્જિત થાય છે. વધારાના ન્યુટ્રોન વિખંડન

ભારતનો પરમાણુ ઊર્જા કાર્યક્રમ (INDIA'S ATOMIC ENERGY PROGRAMME)

ભારતનો પરમાણુ ઊર્જા કાર્યક્રમ સ્વતંત્રતા સમયની આસપાસ હોમી જે. ભાભાના નેતૃત્વ હેઠળ શરૂ કરાયો હતો. પ્રારંભિક ઐતિહાસિક સિદ્ધિ તરીકે ભારતમાં પ્રથમ ન્યુક્લિયર રીએક્ટર (અપ્સરા નામ અપાયું હતું)નું આલેખન (Design) અને રચના હતી. જે 4 ઓગસ્ટ, 1956ના દિવસે કાર્યાન્વિત થયું હતું. તેમાં સમૃદ્ધ યુરેનિયમ બળતણ તરીકે અને પાણી મોડરેટર તરીકે વપરાયાં હતાં. આની પાછળ પાછળ બીજો નોંધપાત્ર સીમાસ્તંભ એ 1960માં CIRUS (Canada India Research U.S.) રીએક્ટરની રચનાનો હતો. આ 40 MWના રીએક્ટરમાં નૈસર્ગિક (કુદરતમાં મળે છે તે સ્વરૂપે) યુરેનિયમ બળતણ તરીકે અને ભારે પાણી મોડરેટર તરીકે વપરાયાં હતાં. અપ્સરા અને સાયરસ દ્વારા મૂળભૂત અને પ્રયોજિત ન્યુક્લિયર વિજ્ઞાનના સંશોધનના વિશાળ વિસ્તારોને પ્રોત્સાહન મળ્યું. પ્રથમ બે દશકના કાર્યક્રમનો મહત્વનો સીમાસ્તંભ એ ટ્રોમ્બે ખાતેના પ્લુટોનિયમ પ્લાન્ટના સ્વદેશી આલેખન (Design) અને રચનાનો હતો. તેનાથી ભારતમાં બળતણની પુનઃપ્રક્રિયા (રીએક્ટરમાં વપરાયેલા બળતણમાંથી વિખંડન કરી શકાય તેવા અને ફળદ્રુપ દ્રવ્યોને અલગ તારવવા)ની ટેક્નોલૉજીની શરૂઆત થઈ. ત્યારબાદ શરૂ કરાયેલા સંશોધન રીએક્ટરોમાં ZERLINA, PURNIMA (I, II અને III) DHRUVA અને KAMININો સમાવેશ થાય છે. KAMINI એ દેશનું સૌપ્રથમ મોટું રીએક્ટર છે જે U-233ને બળતણ તરીકે વાપરે છે. નામ જ સૂચવે છે કે સંશોધન રીએક્ટરનો મૂળ ઉદ્દેશ એ પાવર ઉત્પન્ન કરવાનો નથી પણ ન્યુક્લિયર વિજ્ઞાન અને ટેક્નોલૉજીના વિવિધ ક્ષેત્રોમાં સંશોધન માટેની સગવડ પુરી પાડવાનો છે. સંશોધન રીએક્ટરો વિવિધ રેડિયોએક્ટિવ સમસ્થાનિકો (Isotopes)ના ઉત્પાદન માટેનો એક સરસ સ્રોત છે. આ સમસ્થાનિકો ઉદ્યોગ, દવાઓ અને કૃષિ જેવા ક્ષેત્રોમાં ઉપયોગી છે.

ભારતના પરમાણુ ઊર્જા કાર્યક્રમના મુખ્ય ઉદ્દેશો દેશના સામાજિક અને આર્થિક વિકાસ માટે સલામત અને વિશ્વસનિય વિદ્યુત પાવર પુરો પાડવાનો અને ન્યુક્લિયર ટેક્નોલૉજીના દરેક પાસામાં સ્વનિર્ભર બનવાનો છે. પચાસના દાયકાની શરૂઆતથી ભારતમાં શરૂ થયેલી પરમાણુ ખનિજોની શોધખોળોએ દર્શાવ્યું કે ભારત પાસે યુરેનિયમનો મર્યાદિત જથ્થો છે પણ થોરિયમનો જથ્થો ઘણા સારા પ્રમાણમાં છે. આ મુજબ, આપણા દેશે ન્યુક્લિયર પાવર ઉત્પાદન માટે ત્રણ તબક્કાની વ્યુહરચના અપનાવી છે. પ્રથમ તબક્કામાં નૈસર્ગિક યુરેનિયમ બળતણ તરીકે અને ભારે પાણી (Heavy Water) મોડરેટર તરીકે વપરાય છે. રીઍક્ટરોમાંથી મળતા વપરાઈ ગયેલા બળતણની પુનઃપ્રક્રિયાથી મળતું પ્લુટોનિયમ-239 દ્વિતિય તબક્કા માટે Fast Breeder Reactorમાં બળતણ (Fuel) તરીકે વપરાય છે. તેમને આવું નામ એટલા માટે અપાયું છે કે તેઓ શૃંખલા પ્રક્રિયાને ચાલુ રાખવા માટે ઝડપી ન્યુટ્રોનનો ઉપયોગ કરે છે (અને તેથી કોઈ મોડરેટરની જરૂર પડતી નથી) અને પાવર ઉત્પાદન કરવા ઉપરાંત તેઓ જેટલું વાપરે તેના કરતાં વધારે વધુ વિખંડનિય (પ્લુટોનિયમ) ઉત્પન્ન કરે છે. તૃતીય તબક્કો લાંબા ગાળે સૌથી મહત્વનો છે તેમાં Fast Breeder Reactorની મદદથી થોરિયમ-232માંથી યુરેનિયમ-233 ઉત્પન્ન કરીને તેમના પર આધારિત પાવર રીએક્ટરો બનાવવાના છે.

હાલમાં ભારત આ કાર્યક્રમના બીજા તબક્કામાં સારી રીતે કાર્ય કરે છે અને ત્રીજા તબક્કા-થોરિયમના ઉપયોગના તબક્કામાં પણ નોંધપાત્ર પ્રગતિ થયેલ છે. ખનિજ શોધખોળો અને ખાણો કરવી, બળતણની રચના, ભારે પાણીનું ઉત્પાદન, રીઍક્ટરનાં આલેખન (Design), નિર્માણ અને સંચાલન, બળતણની પુનઃપ્રક્રિયા વગેરે જેવી જટિલ ટેક્નોલૉજીમાં આપણા દેશે નિપુણતા મેળવી છે. દેશમાં વિવિધ સ્થળોએ બનાવેલા Pressurised Heavy Water Reactors (PHWRs) આ કાર્યક્રમના પ્રથમ તબક્કાની પૂર્ણતા દર્શાવે છે. ભારે પાણીના ઉત્પાદનમાં ભારત હવે સ્વનિર્ભર હોવાથી પણ આગળ વધેલું છે. Radiological Protection (વિકિરણ સામે રક્ષણ) અંગેના કડક પ્રમાણોને વળગી રહેવામાં અને રીઍક્ટરોના આલેખન (Design) અને સંચાલનમાં વિસ્તૃત સલામતી પગલાંઓ ભારતના પરમાણુ ઊર્જા કાર્યક્રમના ગુણવત્તાની અધિકૃત છાપ સમાન છે.

પ્રક્રિયાને હજી આગળ ધપાવીને હજી વધારે ન્યુટ્રોન ઉત્પન્ન કરે છે. એનરિકો ફર્મિએ સૂચવ્યા મુજબ આને કારણે શ્રૃંખલા પ્રક્રિયા (Chain Reaction) શક્ય બને છે. જો આવી શ્રૃંખલા પ્રક્રિયાને યોગ્ય રીતે નિયંત્રિત કરવામાં આવે તો આપણને સ્થાયી દરથી ઊર્જા મળે. ન્યુક્લિયર રીએક્ટરમાં આવું જ થાય છે. જો શ્રૃંખલા પ્રક્રિયા અનિયંત્રિત હોય તો ન્યુક્લિયર બૉમ્બની જેમ ધડાકાભેર ઊર્જા બહાર પડે છે.

જોકે, અત્રે દર્શાવેલી શ્રૃંખલા પ્રક્રિયાને સતત ચાલુ રાખવામાં એક અડચણ છે. પ્રયોગથી એમ જણાયું છે કે $^{235}_{92}$Uનું વિખંડન ઉપજાવવામાં ધીમા ન્યુટ્રોન (Slow Neutrons, Thermal Neutrons) ઝડપી (Fast) ન્યુટ્રોન કરતાં વધુ અસરકારક છે. ઉપરાંત, વિખંડનમાં મુક્ત થયેલા ઝડપી ન્યુટ્રોન બીજી વિખંડન પ્રક્રિયા ઉપજાવવાને બદલે ભાગી છુટે એમ પણ બને.

$^{235}_{92}$U ના વિખંડનથી ઉદ્‌ભવેલા ન્યુટ્રોનની સરેરાશ ઊર્જા 2 MeV છે. આ ન્યુટ્રોનને જો ધીમા પાડવામાં ન આવે તો યુરેનિયમ ન્યુક્લિયસ સાથે પ્રક્રિયા કર્યા વિના રીઍક્ટરમાંથી ભાગી છૂટશે, સિવાય કે શ્રૃંખલા પ્રક્રિયાને ચાલુ રાખવા વિખંડનિય દ્રવ્યનો ખૂબ વધારે જથ્થો વાપરવામાં આવે. ઝડપી ન્યુટ્રોનને હલકાં ન્યુક્લિયસ સાથેના સ્થિતિસ્થાપક પ્રકીર્ણન (Scattering)થી ધીમા પાડવાની જરૂર છે. હકીકતમાં ચૅડ્‌વિકના પ્રયોગોએ દર્શાવ્યું કે હાઈડ્રોજન સાથેના સ્થિતિસ્થાપક સંઘાતમાં ન્યુટ્રોન લગભગ સ્થિર થાય છે અને પ્રોટોન ઊર્જા લઈ જાય છે. આ પરિસ્થિતિ એક લખોટી બીજી તેના જેવી જ પણ સ્થિર લખોટીને સન્મુખ અથડાય તેના જેવી જ છે.

આથી, રીઍક્ટર્સમાં *મોડરેટર* તરીકે ઓળખાતાં હલકાં ન્યુક્લિયસ વિખંડનિય ન્યુક્લિયસની સાથે જ, ઝડપી ન્યુટ્રોનને ધીમા પાડવા માટે રાખેલા હોય છે. સામાન્ય રીતે વપરાતાં મોડરેટર પાણી, ભારે પાણી (D_2O) અને ગ્રેફાઈટ છે. મુંબઈમાં ભાભા ઍટમિક રિચર્સ સેન્ટર ખાતેના અપ્સરા રીઍક્ટરમાં મોડરેટર તરીકે પાણી વપરાય છે. પાવર ઉત્પાદન માટે વપરાતા અન્ય ભારતીય રીઍક્ટર્સ મોડરેટર તરીકે ભારે પાણી વાપરે છે.

મોડરેટરના ઉપયોગને લીધે એ શકય છે કે કોઈ એક પેઢી (Generation)ના ન્યુટ્રોન વડે ઉપજાવેલાં વિખંડનની સંખ્યા અને તેની અગાઉની પેઢી (Generation)માં ઉપજેલાં વિખંડનની સંખ્યાનો ગુણોત્તર K, એક કરતાં મોટો હોય. આ ગુણોત્તરને *ગુણક અંક* (*Multiplication Factor*) કહે છે અને તે રીઍક્ટરમાં ન્યુટ્રોનના વૃદ્ધિ દરનું માપ છે. K = 1 માટે રીઍક્ટર *ક્રિટિકલ-Critical* થયાનું કહેવાય છે અને સ્થાયી પાવર ઉત્પન્ન કરવા માટે આપણે તે જ ઈચ્છિએ છીએ. જો K એક કરતાં વધી જાય તો પ્રક્રિયાનો દર અને રીઍક્ટરનો પાવર ચરઘાતાંકી રીતે (Exponentially) વધી જાય છે. ગુણક અંક Kને ઘટાડીને એકની ખૂબ નજીક લાવવામાં ન આવે તો રીઍક્ટર સુપર ક્રિટિકલ-(Super Critical) બની જાય અને ધડાકો (વિસ્ફોટ) પણ થઈ શકે. 1986માં યુક્રેનમાં ચેર્નોબીલ રીઍક્ટરમાં થયેલ ધડાકો એ દુ:ખદ યાદ અપાવે છે કે ન્યુક્લિયર રીઍક્ટરમાં અકસ્માતો આફત બની શકે છે.

પ્રક્રિયાનો દર નિયંત્રિત કરવા માટે ન્યુટ્રોનનું શોષણ કરે તેવા કેડ્‌મિયમ જેવા દ્રવ્યના બનેલા નિયંત્રક-સળિયાઓ વપરાય છે. નિયંત્રક-સળિયાઓ ઉપરાંત રીઍક્ટરમાં *સલામતી સળિયાઓ* - (*Safety Rods*) પણ હોય છે જેઓને જ્યારે જરૂર પડે ત્યારે રીઍક્ટરમાં દાખલ કરીને Kનું મૂલ્ય ઝડપથી એક કરતાં ઓછું કરી શકાય.

કુદરતી રીતે મળતા યુરેનિયમમાં વધુ પ્રમાણમાં રહેલો સમસ્થાનિક (Isotope) $^{238}_{92}$U વિખંડનીય (વિખંડન થઈ શકે તેવો) નથી. જ્યારે તે એક ન્યુટ્રોનને પ્રાપ્ત કરે છે ત્યારે તે નીચેની પ્રક્રિયાઓ મારફત અત્યંત રેડિયોઍક્ટિવ એવું પ્લુટોનિયમ ઉત્પન્ન કરે છે.

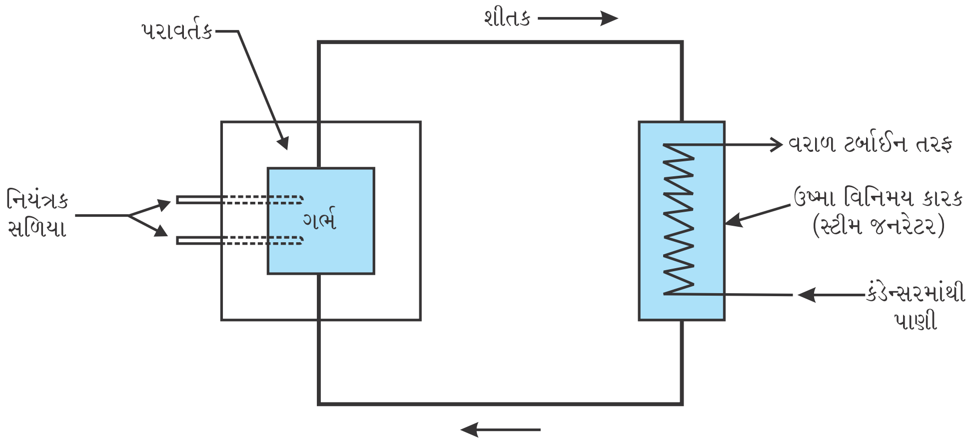
$$^{238}_{92}\text{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{239}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{239}_{93}\text{N}_p + e^- + \bar{\nu}$$

$$^{239}_{93}\text{N}p \rightarrow {}^{239}_{94}\text{P}u + e^- + \bar{\nu} \qquad (13.29)$$

પ્લુટોનિયમ ધીમા ન્યુટ્રોનથી વિખંડિત થાય છે.

ઉષ્મીય (Thermal) ન્યુટ્રોન વિખંડન પર આધારિત ન્યુક્લિયર રીઍક્ટરની રેખાકૃતિ આકૃતિ 13.5માં દર્શાવી છે. રીઍક્ટરનો *ગર્ભ-અંદરનો મધ્યભાગ* - એ ન્યુક્લિયર વિખંડનનું સ્થાન છે તે યોગ્ય સ્વરૂપમાં રચીને રાખેલા બળતણ (Fuel) તત્વો ધરાવે છે. બળતણ તરીકે સમૃદ્ધ (Enriched) યુરેનિયમ (એટલે કે કુદરતી રીતે મળતા યુરેનિયમમાં હોય તે કરતાં તેનામાં $^{235}_{92}$U નું પ્રમાણ વધારે હોય) હોઈ શકે છે.

Nuclear power plants in India
http://www.npcil.nic.in/plantsInoperation.asp



આકૃતિ 13.5 ઉષ્મીય ન્યુટ્રૉન વિખંડન પર આધારિત ન્યુક્લિયર રીએક્ટરની રેખાકૃતિ

આ ગર્ભમાં ન્યુટ્રોનને ધીમા પાડવા માટે મોડરેટર હોય છે. ગર્ભની આસપાસ લીકેજ (Leakage) ઘટાડવા માટે *પરાવર્તક* હોય છે. વિખંડનમાં મુક્ત થતી (બહાર પડતી) ઊર્જા (ઉષ્મા) યોગ્ય *શીતક* (*Coolant*) દ્વારા દૂર કરાય છે. આ બધાને ધારણ કરતું પાત્ર વિખંડનની રેડિયો ઍક્ટિવ નીપજોને લીક થતું રોકે છે. આ સમગ્ર તંત્ર-સમૂહ (Assembly) નુકશાનકારક વિકિરણ બહાર ન આવે તે રીતે રક્ષિત કરી દેવામાં આવે છે. ન્યુટ્રોનનું પુષ્કળ શોષણ કરી શકે તેવા સળિયાઓ (દા.ત., કેડ્મિયમના બનેલા)ની મદદથી રીએક્ટરને બંધ કરી શકાય છે. શીતક ઉષ્માને કાર્યકારી તરલમાં પહોંચાડે છે અને તે વરાળ ઉત્પન્ન કરે છે. વરાળ ટર્બાઈનને ચલાવે છે અને વિદ્યુત ઉત્પન્ન કરે છે.

કોઈ પણ પાવર રીએક્ટરની જેમ જ ન્યુક્લિયર રીઍક્ટર ખાસ્સી માત્રામાં બિનઉપયોગી પદાર્થો (કચરો) ઉત્પન્ન કરે છે. પરંતુ ન્યુક્લિયર કચરો રેડિયો ઍક્ટિવ અને જોખમી (Hazardous) હોવાથી તેના નિકાલ માટે વિશેષ કાળજીની જરૂર છે. રીઍક્ટરના સંચાલન અને ખર્ચાયેલા બળતણને સંભાળવા અને પુનઃપ્રક્રિયા કરવામાં વિસ્તૃત સલામતી પગલાંઓ જરૂરી છે. આ સલામતી પગલાંઓ, ભારતના પરમાણુ ઊર્જા કાર્યક્રમનું વિશિષ્ટ લક્ષણ છે. રેડિયો ઍક્ટિવ કચરાનું રૂપાંતર ઓછા ઍક્ટિવ અને અલ્પજીવી દ્રવ્યમાં કરવાની શક્યતાના અભ્યાસની યોગ્ય યોજના વિકસાવવામાં આવી રહી છે.

13.7.3 ન્યુક્લિયર સંલયન-તારાઓમાં ઊર્જાની ઉત્પત્તિ (Nuclear Fusion - Energy Production in Stars)

આકૃતિ 13.1માં બંધનઊર્જા વક્ર પરથી આપણે જોઈ ગયા તે મુજબ, જ્યારે બે હલકાં ન્યુક્લિયસ સંલગ્ન (Fuse) થઈ એક ભારે (એટલે કે મોટું) ન્યુક્લિયસ બનાવે છે ત્યારે ઊર્જા વિમુક્ત થાય છે કારણ કે મોટું ન્યુક્લિયસ વધારે સખતાઈથી (Tightly) બંધિત હોય છે. ઊર્જામુક્ત કરતી આવી કેટલીક ન્યુક્લિયર સંલયન પ્રક્રિયાઓનાં ઉદાહરણ નીચે મુજબ છે :

$$ {}_1^1\mathrm{H} + {}_1^1\mathrm{H} \rightarrow {}_1^2\mathrm{H} + e^+ + \nu + 0.42\,\mathrm{MeV} \qquad [13.29(a)] $$

$$ {}_1^2\mathrm{H} + {}_1^2\mathrm{H} \rightarrow {}_2^3He + n + 3.27\,\mathrm{MeV} \qquad [13.29(b)] $$

$$ {}_1^2\mathrm{H} + {}_1^2\mathrm{H} \rightarrow {}_1^3\mathrm{H} + {}_1^1\mathrm{H} + 4.03\,\mathrm{MeV} \qquad [13.29(c)] $$

A simplified online simulation of a nuclear reactor
http://www.kernenergie.net/datf/en/interactive/reactor.php

PHYSICS

પ્રથમ પ્રક્રિયામાં, બે પ્રોટોન સંયોજાઈને એક ડ્યુટેરોન અને એક પૉઝિટ્રોન બનાવે છે અને 0.42 MeV ઊર્જા વિમુક્ત થાય છે. [13.29(b)]માંની પ્રક્રિયામાં, બે ડ્યુટેરોન સંયોજાઈને હિલિયમનો હલકો ન્યુક્લિયસ બનાવે છે [13.29(c)]માંની પ્રક્રિયામાં બે ડ્યુટેરોન સંયોજાઈને એક ટ્રિટોન અને એક પ્રોટોન બનાવે છે. સંલયન થવા માટે બે ન્યુક્લિયસ એકબીજાની એટલાં નજીક આવવાં જોઈએ કે આકર્ષક એવાં ટૂંકા અંતરી ન્યુક્લિયર બળો તેમના પર અસર કરી શકે. જોકે તેઓ બંને ધન વિદ્યુતભારિત હોવાથી તેઓ કુલંબ અપાકર્ષણ અનુભવે છે. આથી, તેઓની ઊર્જા કુલંબ અપાકર્ષણરૂપી દિવાલને ઓળંગી શકે તેટલી પુરતી હોવી જોઈએ. આ અપાકર્ષણરૂપી દિવાલની ઊંચાઈ આંતરક્રિયા કરતા તે બે ન્યુક્લિયસના વિદ્યુતભાર અને ત્રિજ્યાઓ પર આધારિત છે. દા.ત., એવું દર્શાવી શકાય છે કે બે પ્રોટોન માટે આવી અપાકર્ષણરૂપી દિવાલની ઊંચાઈ ~ 400 *ke*V જેટલી છે અને વધુ વિદ્યુતભાર ધરાવતા ન્યુક્લિયસ માટે વધારે ઊંચી હોય છે. આવી કુલંબ અપાકર્ષણરૂપી દિવાલની ઊંચાઈને ઓળંગી જવા માટે પ્રોટોન વાયુમાં રહેલાં બે પ્રોટોનને જરૂરી (સરેરાશ) ઊર્જા હોવા માટે લગભગ કેટલું તાપમાન હોય તેનો અંદાજ આપણે મેળવી શકીએ છીએ.

$(3/2)\ kT = K$ (ગ.ઉ.), 400 keV, તે પરથી $T \sim 3 \times 10^9$ K

જ્યારે કુલંબ અપાકર્ષણરૂપી દિવાલને ઓળંગી જવા માટે તાપમાન વધારીને પુરતી ઊર્જા પુરી પાડીને કણોનું સંલયન કરાવવામાં આવે, તે પ્રક્રિયાને *તાપ ન્યુક્લિયર સંલયન* (*Thermo Nuclear Fusion*) કહે છે.

તાપ ન્યુક્લિયર સંલયન એ તારાઓના અંતરિયાળ ભાગમાં ઉદ્‌ભવતી ઊર્જાનો સ્રોત છે. સૂર્યના અંતરિયાળ ભાગનું તાપમાન 1.5×10^7K છે, જે સરેરાશ ઊર્જા ધરાવતા કણોના સંલયન માટે અંદાજિત તાપમાન કરતાં ખાસ્સું ઓછું છે. સ્પષ્ટપણે, સૂર્યમાં સંલયન માટે પ્રોટોનની ઊર્જા સરેરાશ ઊર્જા કરતાં ઘણી વધારે હોવી જરૂરી છે.

સૂર્યમાં થતી સંલયન પ્રક્રિયા એ ઘણા તબક્કાઓમાં થતી પ્રક્રિયા છે કે જેમાં હાઈડ્રોજન દહન પામીને હિલિયમ બનાવે છે. આમ સૂર્યમાં બળતણ તરીકે તેના ગર્ભભાગમાં રહેલો હાઈડ્રોજન છે. આ સંલયન પ્રક્રિયા જેના દ્વારા થાય છે તે *પ્રોટોન-પ્રોટોન* (p, p) *ચક્ર* નીચેની પ્રક્રિયાઓના સમૂહ દ્વારા રજૂ કરાય છે :

$${}^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + e^+ + \nu + 0.42\,\text{MeV} \qquad \text{(i)}$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma + 1.02\,\text{MeV} \qquad \text{(ii)}$$

$${}^2_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^3_2He + \gamma + 5.49\,\text{MeV} \qquad \text{(iii)}$$

$${}^3_2He + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + {}^1_1H + {}^1_1H + 12.86\,\text{MeV} \qquad \text{(iv)} \qquad (13.30)$$

ચોથી પ્રક્રિયા થવા માટે પહેલી ત્રણ પ્રક્રિયાઓ બે વાર થવી જોઈએ અને આ કિસ્સામાં બે હલકાં હિલિયમ ન્યુક્લિયસ જોડાઈને સામાન્ય હિલિયમ ન્યુક્લિયસ બનાવે છે. જો આપણે 2(i) + 2(ii) + 2(iii) + (iv) સંયોજન વિચારીએ તો કુલ અસર આ પ્રમાણે થશે :

$$4\,{}^1_1H + 2e^- \rightarrow {}^4_2He + 2\nu + 6\gamma + 26.7\,\text{MeV}$$

અથવા $(4\,{}^1_1H + 4e^-) \rightarrow ({}^4_2He + 2e^-) + 2\nu + 6\gamma + 26.7\,\text{MeV}$ (13.31)

આમ, ચાર હાઈડ્રોજન પરમાણુઓ સંયોજિત થઈને ${}^4_2He$ પરમાણુ બનાવે છે અને તેમાં 26.7 MeV ઊર્જા વિમુક્ત થાય છે (એટલે કે બહાર પડે છે).

તારાના અંતરિયાળ ભાગમાં સંલયનથી માત્ર હિલિયમ જ બને છે એવું નથી. ગર્ભભાગનો હાઈડ્રોજન હિલિયમ બનાવવામાં વપરાઈ જાય (ખલાસ થતો જાય) ત્યારે ગર્ભભાગ ઠંડો પડવા લાગે છે. તારો તેના પોતાના ગુરુત્વની અસર હેઠળ સંકોચાવા લાગે છે, જેના લીધે ગર્ભભાગનું તાપમાન વધવા

લાગે છે. જો આ તાપમાન વધીને લગભગ 10^8 K જેટલું બને તો ફરીથી સંલયન થાય છે પરંતુ હવે હિલિયમનાં ન્યુક્લિયસનું કાર્બનમાં સંલયન થાય છે. આ પ્રકારની પ્રક્રિયા સંલયન દ્વારા મોટાને મોટા દળાંક ધરાવતાં તત્વો ઉત્પન્ન કરે છે પણ આકૃતિ 13.1માંના બંધનઊર્જા વક્રની ટોચ નજીકના દળાંક કરતાં વધારે દળાંકવાળાં તત્વો આ રીતે બની શકતાં નથી.

સૂર્યની ઉંમર લગભગ 5×10^9 y છે અને એવો અંદાજ કરવામાં આવેલ છે કે સૂર્યમાં પુરતો હાઈડ્રોજન છે કે જેથી તે હજી બીજા 5 બિલિયન વર્ષ સુધી પ્રકાશી શકશે. ત્યારબાદ હાઈડ્રોજનનું દહન બંધ થઈ જશે અને સૂર્ય ઠંડો પડવાનો શરૂ થશે અને ગુરુત્વની અસર હેઠળ સંકોચાવા લાગશે અને તેનાથી ગર્ભભાગનું તાપમાન વધશે. સૂર્યનું બાહ્ય આવરણ વિસ્તરવા લાગશે અને તે જેને *રેડ જાયન્ટ* (*Red Giant*) કહીએ છીએ તેમાં ફેરવાશે.

ન્યુક્લિયર સર્વનાશ (Nuclear Holocaust)

યુરેનિયમના એક વિખંડનથી લગભગ 0.9×235 Mev (≈ 200 MeV) ઊર્જા વિમુક્ત થાય છે. લગભગ 50 kg ^{235}Uનું દરેક ન્યુક્લિયસ વિખંડન પામે તો લગભગ 4×10^{15} J ઊર્જા વિમુક્ત થાય. આ ઊર્જા લગભગ 20,000 ટન TNTને સમતુલ્ય છે, તે પ્રચંડ વિસ્ફોટ માટે પુરતી છે. વિપુલ ન્યુક્લિયર ઊર્જાના અનિયંત્રિત ઉત્સર્જનને પરમાણુ વિસ્ફોટ (Atomic Explosion) કહે છે. સૌ પ્રથમવાર ઑગસ્ટ 6, 1945ના દિવસે યુદ્ધમાં પરમાણુ હથિયારનો ઉપયોગ થયો હતો. જાપાનના હિરોશિમા પર US દ્વારા પરમાણુ બૉંબ ઝીંકાયો હતો. આ વિસ્ફોટ 20,000 TNTને સમતુલ્ય હતો. તત્ક્ષણ રેડિયોઍક્ટિવ નીપજોએ 3,43,000 રહેવાસી ધરાવતા શહેરના 10 $(km)^2$ વિસ્તારનો સર્વનાશ કર્યો હતો. આમાં 66,000 મૃત્યુ પામ્યા હતા અને 69,000 ઘવાયા હતા, શહેરનું 67 % બાંધકામ નાશ પામ્યું હતું.

સંલયન પ્રક્રિયાઓ માટેની ઊંચા તાપમાનની પરિસ્થિતિ વિખંડન બૉમ્બના વિસ્ફોટથી ઉત્પન્ન કરી શકાય છે. 10 મેગાટન TNTની વિસ્ફોટક શક્તિને સમતુલ્ય પ્રચંડ વિસ્ફોટોનું 1954માં પરીક્ષણ થયું હતું. હાઈડ્રોજનના સમસ્થાનિકો ડ્યુટેરિયમ અને ટ્રિટિયમના સંલયનને સાંકળતા આવા બૉમ્બને હાઈડ્રોજન બૉમ્બ કહે છે. એવો અંદાજ કરવામાં આવ્યો છે કે આપણા ગ્રહ પરના જીવનના બધા સ્વરૂપોને અનેક વખત નાશ કરી શકે તેવો ન્યુક્લિયર શસ્ત્રાગાર હાલમાં મોજૂદ છે જે બટન દબાવતાં જ સર્વનાશ કરે. આવો ન્યુક્લિયર સર્વનાશ આપણા ગ્રહ પર અત્યારે અસ્તિત્વ ધરાવતા જીવનનો તો નાશ કરશે જ પણ તેની રેડિયોઍક્ટિવ નીપજો આ ગ્રહને હંમેશ માટે જીવન માટે અયોગ્ય બનાવશે. સૈદ્ધાંતિક ગણતરીઓ એવી આગાહી કરે છે કે રેડિયોઍક્ટિવ કચરો પૃથ્વીના વાતાવરણમાં વાદળની પેઠે લટકતો રહેશે અને સૂર્યનાં કિરણોનું શોષણ કરી લઈ પૃથ્વી પર '*ન્યુક્લિયર શિયાળો*' (*Nuclear Winter*) ઉત્પન્ન કરશે.

13.7.4 નિયંત્રિત તાપ ન્યુક્લિયર સંલયન (Controlled Thermonuclear Fusion)

તારામાં કુદરતી રીતે થતી તાપ ન્યુક્લિયર સંલયનની પ્રક્રિયાની તાપ ન્યુક્લિય સંલયન રચનામાં નકલ કરવામાં આવે છે. નિયંત્રિત સંલયન રીએક્ટરોમાં ન્યુક્લિયર બળતણને 10^8 K જેવા ઊંચા તાપમાન સુધી ગરમ કરી સ્થાયી પાવર ઉત્પન્ન કરવાનો ઉદ્દેશ હોય છે. આવા ઊંચા તાપમાને બળતણ ધન આયનો અને ઈલેક્ટ્રૉનના મિશ્રણ (પ્લાઝમા) રૂપમાં હોય છે. આટલું ઊંચું તાપમાન કોઈ પાત્ર સહન કરી શકે તેમ ન હોવાથી આ પ્લાઝમાને બંધિત કરવું (કેદ કરવું) એ મોટો પડકાર છે. ભારત સહિત વિશ્વભરમાં ઘણા દેશો આ અંગેની ટેકનીક વિકસાવી રહ્યાં છે. જો સફળ થાય તો, સંલયન રીએક્ટરો માનવજાતને લગભગ અમર્યાદ પાવર પુરો પાડી શકશે.

ઉદાહરણ 13.7 નીચેના પ્રશ્નોના જવાબ આપો :

(a) ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયાઓ (પરિચ્છેદ 13.7માં દર્શાવેલી છે તેવી)નાં સમીકરણો જે અર્થમાં રાસાયણિક સમીકરણ (દા.ત., $2H_2 + O_2 = 2H_2O$) સમતોલ છે, તે અર્થમાં 'સમતોલ' છે ? જો આમ ન હોય, તો કયા અર્થમાં તેઓ બંને બાજુ સમતોલ છે ?

(b) જો પ્રોટોન સંખ્યા અને ન્યુટ્રોન સંખ્યા દરેક ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયામાં સંરક્ષિત રહેતી હોય તો ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયામાં દળનું રૂપાંતર ઊર્જામાં (અથવા ઉલટું) કેવી રીતે થાય છે ?

(c) એક સામાન્ય છાપ એવી છે કે દળ અને ઊર્જાનું એકબીજામાં રૂપાંતર માત્ર ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયામાં જ થાય છે અને રાસાયણિક પ્રક્રિયામાં કદાપિ નહિ. આ તદ્દન ખોટું છે. સમજાવો.

ઉકેલ

(a) રાસાયણિક સમીકરણ એ અર્થમાં સમતોલ છે કે દરેક તત્વના પરમાણુઓની સંખ્યા સમીકરણની બંને બાજુએ સમાન હોય છે. રાસાયણિક પ્રક્રિયા માત્ર પરમાણુઓના મૂળ સંયોજનોને બદલે છે. ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયામાં તત્વોનું રૂપાંતર થતું હોઈ શકે. આમ, ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયામાં દરેક તત્વના પરમાણુઓની સંખ્યા સંરક્ષિત થવી જ જોઈએ એવું જરૂરી નથી. આમ છતાં ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયામાં પ્રોટોનની સંખ્યા અને ન્યુટ્રોનની સંખ્યા અલગ અલગથી સંરક્ષિત થાય છે. (હકીકતમાં, આ પણ ઊંચી ઊર્જાના વિસ્તારમાં તદ્દન સાચું નથી. જેનું સંપૂર્ણપણે સંરક્ષણ થાય છે તે 'કુલ વિદ્યુતભાર' અને કુલ 'બેરિયોન સંખ્યા' છે. અહીં આપણે આને આગળ નહિ ધપાવીએ. ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયાઓ (દા.ત., સમીકરણ 13.26)માં પ્રોટોન સંખ્યા અને ન્યુટ્રોન સંખ્યા સમીકરણની બંને બાજુએ સમાન હોય છે.

(b) આપણે જાણીએ છીએ કે ન્યુક્લિયસની બંધનઊર્જા ન્યુક્લિયસના દળમાં ઋણ ફાળો (દળ ક્ષતિ) આપે છે. હવે, પ્રોટોન સંખ્યાનું અને ન્યુટ્રોન સંખ્યાનું ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયામાં સંરક્ષણ થતું હોવાથી, ન્યુટ્રોનનું કુલ સ્થિર દળ અને પ્રોટોનનું કુલ સ્થિર દળ પ્રક્રિયાની બંને બાજુએ સમાન હોય છે. પરંતુ ડાબી બાજુએ બધા ન્યુક્લિયસની કુલ બંધનઊર્જા જમણી બાજુના બધા ન્યુક્લિયસની કુલ બંધનઊર્જાને બરાબર જ હોય તે જરૂરી નથી. આ બંધનઊર્જાઓમાંનો તફાવત ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયામાં વિમુક્ત થતી કે શોષાતી ઊર્જારૂપે દેખા દે છે. બંધનઊર્જા દળમાં ફાળો આપતી હોવાથી આપણે એમ કહીએ છીએ કે બંને બાજુના ન્યુક્લિયસના કુલ દળનો તફાવત ઊર્જામાં રૂપાંતર પામે છે અથવા તેથી ઉલટું થાય છે. આ અર્થમાં ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયા દળ-ઊર્જાના આંતરરૂપાંતરણ (એકબીજામાં રૂપાંતરણ)નું ઉદાહરણ છે.

(c) દળ અને ઊર્જાના આંતર-રૂપાંતરણની દૃષ્ટિએ, *સિદ્ધાંતમાં* તો રાસાયણિક પ્રક્રિયા ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયા જેવી છે. રાસાયણિક પ્રક્રિયામાં વિમુક્ત થયેલી કે શોષાયેલી ઊર્જા પ્રક્રિયાની બે બાજુઓ પરના પરમાણુઓ અને અણુઓની રાસાયણિક (ન્યુક્લિયર નહિ) બંધનઊર્જાના તફાવત સાથે સંબંધિત છે. બહુ સાચું કહીએ તો રાસાયણિક બંધનઊર્જા પણ પરમાણુ કે અણુના કુલ દળમાં ઋણ ફાળો (દળક્ષતિ) આપે છે તેથી આપણે એમ પણ કહી શકીએ કે રાસાયણિક પ્રક્રિયાની બે બાજુના પરમાણુઓ કે અણુઓના કુલ દળમાંનો તફાવત ઊર્જામાં રૂપાંતર (અથવા એથી ઉલટું) પામે છે. જો કે, રાસાયણિક પ્રક્રિયામાંની દળક્ષતિઓ ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયામાંની દળક્ષતિઓની દસ લાખ ગણી નાની હોય છે. દળ-ઊર્જા આંતર-રૂપાંતરણ રાસાયણિક પ્રક્રિયામાં થતું નથી તેવી સામાન્ય છાપ (જે *ખોટી* છે)નું આ કારણ છે.

ઉદાહરણ 13.7

સારાંશ

1. પરમાણુને ન્યુક્લિયસ હોય છે. ન્યુક્લિયસ ધન વિદ્યુતભારિત છે. ન્યુક્લિયસની ત્રિજ્યા પરમાણુની ત્રિજ્યા કરતાં 10^4 ગણી નાની છે. પરમાણુનું 99.9 % કરતાંય વધુ દળ ન્યુક્લિયસમાં કેન્દ્રિત થયેલું છે.
2. પરમાણુ માપક્રમ પર દળને atomic mass unit (u)માં માપવામાં આવે છે. વ્યાખ્યા મુજબ, 1 atomic mass unit એ ^{12}C પરમાણુના દળનો બારમો ભાગ (1/12 ગણો) છે, $1\,u = 1.660563 \times 10^{-27}$ kg
3. ન્યુક્લિયસ ન્યુટ્રોન તરીકે ઓળખાતા તટસ્થ કણ ધરાવે છે. તેનું દળ પ્રોટોનના દળ જેટલું લગભગ છે.
4. પરમાણુ ક્રમાંક Z એ તત્વના પરમાણુના ન્યુક્લિયસમાં રહેલા પ્રોટોનની સંખ્યા છે. દળાંક A એ પરમાણુના ન્યુક્લિયસમાં રહેલા પ્રોટોન અને ન્યુટ્રોનની કુલ સંખ્યા છે, $A = Z + N$; અહીં N ન્યુક્લિયસમાં રહેલા ન્યુટ્રોનની સંખ્યા દર્શાવે છે.

   ન્યુક્લિયસનો પ્રકાર અથવા ન્યુક્લાઈડ ^A_ZX તરીકે દર્શાવાય છે. જ્યાં, X એ તત્વની રાસાયણિક સંજ્ઞા (પ્રતિક) છે. એકસમાન પરમાણુ ક્રમાંક Z ધરાવતા પણ જુદી જુદી ન્યુટ્રોન સંખ્યા N ધરાવતા ન્યુક્લાઈડ્ઝને *સમસ્થાનિકો* (*Isotopes*) કહે છે. સમાન A ધરાવતા ન્યુક્લાઈડ્ઝને સમદળીય કહે છે અને સમાન N ધરાવતા ન્યુક્લાઈડ્ઝને *આઈસોટોન્સ* (*Isotones*) કહે છે.

   મોટાભાગના તત્વો બે કે વધુ સમસ્થાનિકો (Isotopes)ના મિશ્રણ રૂપે રહેલા છે. તત્વનું પરમાણુદળ તેના સમસ્થાનિકોના દળોના ભારિત (Weighted) સરેરાશ જેટલું હોય છે. આવું ભારિત સરેરાશ સમસ્થાનિકોના સાપેક્ષ પ્રમાણથી નક્કી થાય છે.
5. ન્યુક્લિયસને ગોળાકાર સ્વરૂપે વિચારી શકાય અને તેને ત્રિજ્યાનો નિર્દેશ કરી શકાય. ઈલેક્ટ્રૉનના પ્રકીર્ણનના પ્રયોગો પરથી ન્યુક્લિયસની ત્રિજ્યા નક્કી કરી શકાય છે. એમ જણાય છે કે ન્યુક્લિયસની ત્રિજ્યા $R = R_0A^{1/3}$

   સૂત્રને અનુસરે છે. જ્યાં, R_0 = અચળાંક = 1.2 *fm*. આનો અર્થ એ છે કે ન્યુક્લિયસની ઘનતા A પર આધારિત નથી. તે 10^{17} kg/m^{3}ના ક્રમની છે.
6. ન્યુટ્રોન અને પ્રોટોન ન્યુક્લિયસમાં ટૂંકા અંતરી (Short-Range) પ્રબળ ન્યુક્લિયર બળ દ્વારા બંધિત છે. ન્યુક્લિયર બળ ન્યુટ્રોન અને પ્રોટોન વચ્ચે ભેદ રાખતું નથી.
7. ન્યુક્લિયસનું દળ M, તેના ઘટકોના કુલ દળ Σm, કરતાં હંમેશા ઓછું જ હોય છે. ન્યુક્લિયસના દળ અને તેના ઘટકોના કુલ દળ વચ્ચેના તફાવતને *દળ ક્ષતિ* (*Mass Defect*) કહે છે. $\Delta M = [Z m_p + (A - Z)m_n] - M$

   આઈન્સ્ટાઈનના દળઊર્જા સંબંધનો ઉપયોગ કરી, આપણે આ દળ તફાવતને ઊર્જામાં આ મુજબ દર્શાવીએ છીએ. $\Delta E_b = \Delta M c^2$

   ઊર્જા ΔE_b, ન્યુક્લિયસની *બંધનઊર્જા* દર્શાવે છે. 30થી 170 સુધીના દળાંકના વિસ્તારમાં, ન્યુક્લિયોન દીઠ બંધનઊર્જા લગભગ અચળ છે, લગભગ 8 MeV/Nucleon.
8. ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયાઓમાં સંકળાયેલી ઊર્જાઓ રાસાયણિક પ્રક્રિયાઓ કરતાં લગભગ દસ લાખ ગણી હોય છે.
9. ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયાનું Q-મૂલ્ય Q = અંતિમ ગતિઊર્જા – પ્રારંભિક ગતિઊર્જા છે.

   દળ-ઊર્જાની સમતુલ્યતાને લીધે આ Q-મૂલ્યને

   Q = (પ્રારંભિક દળોનો સરવાળો – અંતિમ દળોનો સરવાળો)c^2 તરીકે પણ લખી શકાય છે.
10. રેડિયો ઍક્ટિવિટી એ આપેલ ન્યુક્લાઈડ્ઝની α અથવા β અથવા γ-કિરણો ઉત્સર્જિત કરીને રૂપાંતર પામવાની ઘટના છે. α-કિરણો હિલિયમનાં ન્યુક્લિયસ છે. β-કિરણો ઈલેક્ટ્રૉન છે. γ-કિરણો X-કિરણો કરતાં ટૂંકી તરંગલંબાઈ ધરાવતાં વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણ છે.

11. રેડિયો ઍક્ટિવ ક્ષયનો નિયમ : $N(t) = N(0)\, e^{-\lambda t}$
જ્યાં, λ ક્ષય નિયતાંક અથવા રેડિયો ઍક્ટિવ નિયતાંક છે. રેડિયો ન્યુક્લાઈડનું અર્ધ-આયુ $T_{1/2}$ એ Nને તેના પ્રારંભિક મૂલ્યનું અડધું થવા માટે લાગતો સમયગાળો છે. સરેરાશ જીવનકાળ τ એ Nને તેના પ્રારંભિક મૂલ્યના e^{-1} ગણું બનવા માટે લાગતો સમયગાળો છે.
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$$
12. જ્યારે ઓછી સખ્તાઈથી બંધિત ન્યુક્લિયસ, વધુ સખ્તાઈથી બંધિત ન્યુક્લિયસમાં રૂપાંતર પામે ત્યારે ઊર્જા વિમુક્ત થાય છે (બહાર પડે છે, ઉત્સર્જિત થાય છે). વિખંડનમાં ${}^{235}_{92}U$ જેવું ભારે ન્યુક્લિયસ બે નાના ટુકડાઓમાં વિભાજિત થઈ જાય છે.
દા.ત., $${}^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{133}_{51}Sb + {}^{99}_{41}Nb + 4\,{}^{1}_{0}n$$
13. વિખંડનમાં વપરાતા હોય તે કરતાં વધુ ન્યુટ્રોન ઉત્પન્ન થાય છે એ હકીકત શૃંખલા પ્રક્રિયાની શક્યતા દર્શાવે છે કે જેમાં ઉત્પન્ન થયેલો દરેક ન્યુટ્રોન હજી આગળ બીજું વિખંડન ઉપજાવે છે. ન્યુક્લિયર બૉમ્બ વિસ્ફોટમાં શૃંખલા પ્રક્રિયા અનિયંત્રિત અને ત્વરિત હોય છે. ન્યુક્લિયર રીઍક્ટરમાં તે નિયંત્રિત અને સ્થાયી હોય છે. રીઍક્ટરમાં ન્યુટ્રોન ગુણક અંકનું મૂલ્ય 1 જેટલું જાળવી રાખવામાં આવે છે.
14. સંલયનમાં હલકાં ન્યુક્લિયસ જોડાઈને મોટું (ભારે) ન્યુક્લિયસ બનાવે છે. હાઈડ્રોજનનાં ન્યુક્લિયસનું હિલિયમનાં ન્યુક્લિયસમાં સંલયન એ આપણા સૂર્ય સહિત બધા તારાઓમાં ઊર્જાનું ઉદ્‌ગમ છે.

ભૌતિક રાશિ	પ્રતિક	પરિમાણ	એકમો	નોંધ
atomic mass unit (એટમીક માસ યુનિટ)		[M]	u	પરમાણુ અથવા ન્યુક્લિયર દળોને દર્શાવવા માટેનો એકમ. એક atomic mass unit એ ${}^{12}C$ પરમાણુના દળનો બારમો ભાગ (1/12 ગણું) છે.
વિભંજન અથવા ક્ષય નિયતાંક	λ	$[T^{-1}]$	s^{-1}	
અર્ધ-આયુ	$T_{1/2}$	[T]	s	રેડિયો ઍક્ટિવ નમૂનામાં હાજર ન્યુક્લિયસની પ્રારંભિક સંખ્યાના અડધાને ક્ષય પામતા લાગતો સમય.
સરેરાશ જીવનકાળ	τ	[T]	s	ન્યુક્લિયસની સંખ્યા ઘટીને પ્રારંભિક સંખ્યાના e^{-1} ગણી થવા માટે લાગતો સમય.
રેડિયો ઍક્ટિવ નમૂનાની ઍક્ટિવિટી	R	$[T^{-1}]$	Bq	રેડિયો ઍક્ટિવ સ્રોતની ઍક્ટિવિટીનું માપ

ગહન વિચારણાના મુદ્દાઓ

1. ન્યુક્લિયર દ્રવ્યની ઘનતા ન્યુક્લિયસના પરિમાણ પર આધારિત નથી. પરમાણુની દળ ઘનતા આ નિયમનું પાલન કરતી નથી.
2. ઈલેક્ટ્રૉનના પ્રકીર્ણનના પ્રયોગો પરથી નક્કી કરેલ ન્યુક્લિયસની ત્રિજ્યા, α-કણના પ્રકીર્ણન પરથી નક્કી કરેલ ત્રિજ્યા કરતાં સહેજ જુદી છે. આનું કારણ એ છે કે ઈલેક્ટ્રૉન

પ્રકીર્ણન ન્યુક્લિયસના વિદ્યુતભાર વિતરણની અનુભૂતિ (Sense) કરે છે જ્યારે α-કણ અને તેના જેવા કણ ન્યુક્લિયર દ્રવ્યની અનુભૂતિ (Sense) કરે છે.

3. આલ્બર્ટ આઈન્સ્ટાઈને દળ અને ઊર્જાની સમતુલ્યતા, $E = mc^2$ દર્શાવી. હવે આપણે દળ સંરક્ષણ અને ઊર્જા સંરક્ષણના અલગ નિયમોની વાત ન કરી શકીએ પરંતુ આપણે દળ-ઊર્જાના સંરક્ષણના સંગઠિત નિયમની વાત કરવી જોઈએ. કુદરતમાં આ સિદ્ધાંત લાગુ પડતો હોવાનો સૌથી ખાતરીદાયક પુરાવો ન્યુક્લિયર ભૌતિકવિજ્ઞાનમાંથી મળે છે. તે ન્યુક્લિયર ઊર્જાની આપણી સમજનું હાર્દ છે અને પાવરના ઉદ્‌ગમ તરીકે તેને ઉપયોગમાં લેવામાં મુખ્ય છે. આ સિદ્ધાંતનો ઉપયોગ કરીને ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયા (ક્ષય અથવા અન્ય)ના Q મૂલ્યને પ્રારંભિક અને અંતિમ દળોના પદમાં દર્શાવી શકાય છે.
4. (ન્યુક્લિયોન દીઠ) બંધનઊર્જાના વક્રનો પ્રકાર દર્શાવે છે કે જેમાં બે હલકાં ન્યુક્લિયસ જોડાય અથવા ભારે ન્યુક્લિયસ વિખંડન પામીને વચગાળાનાં દળ ધરાવતા ન્યુક્લિયસ બનાવે તેવી ઉષ્માક્ષેપક ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયાઓ શક્ય છે.
5. સંલયન માટે, હલકાં ન્યુક્લિયસની પ્રારંભિક ઊર્જા કુલંબ સ્થિતિમાનને (અપાકર્ષણરૂપી દિવાલને) ઓળંગી જવા માટે પુરતી હોવી જોઈએ. આ કારણથી સંલયન માટે ઘણું ઊંચું તાપમાન જરૂરી છે.
6. જો કે (ન્યુક્લિયોન દીઠ) બંધનઊર્જા વક્ર સુંવાળો (Smooth) છે અને ધીમા ફેરફાર દર્શાવે છે, તેમ છતાં તે ^4He, ^{16}O વગેરે ન્યુક્લાઈડ્ઝ આગળ શિખરો (Peaks) દર્શાવે છે. આને ન્યુક્લિયસમાં પરમાણુની જેમ કવચ-બંધારણ (Shell Structure) હોવાના પુરાવારૂપે જોવામાં આવે છે.
7. ઈલેક્ટ્રૉન અને પૉઝીટ્રોન એ કણ-પ્રતિકણની જોડ (Pair) છે. તેમનાં દળ સમાન છે. તેમનાં વિદ્યુતભાર સમાન મૂલ્યના અને વિરુદ્ધ પ્રકારના છે (એમ જણાયું છે કે જ્યારે ઈલેક્ટ્રૉન અને પૉઝિટ્રોન ભેગાં મળે ત્યારે તેઓ એકબીજાનો પૂર્ણનાશ કરે છે અને ગેમા કિરણ ફોટોનના રૂપમાં ઊર્જા આપે છે.).
8. β-ક્ષય (ઈલેક્ટ્રૉન ઉત્સર્જન)માં ઈલેક્ટ્રૉનની સાથે સાથે ઉત્સર્જિત કણ એન્ટિ-ન્યુટ્રિનો ($\bar{\nu}$) છે. બીજી તરફ, β^+-ક્ષય (પૉઝિટ્રોન ઉત્સર્જન)માં પૉઝિટ્રોનની સાથે ઉત્સર્જન પામતો કણ ન્યુટ્રિનો (ν) છે. ન્યુટ્રિનો અને એન્ટિન્યુટ્રિનો એ કણ-પ્રતિકણની જોડ છે. દરેક કણ માટેનો કોઈક પ્રતિકણ હોય છે. પ્રોટોનનો પ્રતિકણ એન્ટિપ્રોટોન કેવો હશે ?
9 મુક્ત ન્યુટ્રોન અસ્થાયી છે ($n \rightarrow p + \bar{e} + \bar{\nu}$). પરંતુ આવો પ્રોટોનનો ક્ષય શક્ય નથી, કારણ કે પ્રોટોન ન્યુટ્રોન કરતાં સ્હેજ હલકો છે.
10. સમાન્ય રીતે ગેમા ઉત્સર્જન આલ્ફા કે બીટા ઉત્સર્જન પછી થતું હોય છે. ઉત્તેજિત અવસ્થામાં રહેલું ન્યુક્લિયસ એક ગેમા કિરણ ફોટોનનું ઉત્સર્જન કરીને નિમ્નસ્તરમાં સંક્રાંતિ કરે છે. આલ્ફા કે બીટા ઉત્સર્જનથી જનિત ન્યુક્લિયસ ઉત્તેજિત અવસ્થામાં હોઈ શકે છે. આ જ ન્યુક્લિયસમાંથી ક્રમશઃ ગેમા કિરણોનું ઉત્સર્જન (^{60}Niના કિસ્સાની જેમ, આકૃતિ 13.4), પરમાણુની જેમ ન્યુક્લિયસને પણ અલગ-અલગ ઊર્જા સ્તરો હોવાનો સ્પષ્ટ પુરાવો છે.
11. રેડિયો ઍક્ટિવિટી એ ન્યુક્લિયસના અસ્થાયીપણાની સૂચક છે. હલકાં ન્યુક્લિયસના સ્થાયીપણા માટે ન્યુટ્રોન અને પ્રોટોનનો ગુણોત્તર 1 : 1 હોવો જરૂરી છે. આ ગુણોત્તર ભારે ન્યુક્લિયસ માટે વધીને 3 : 2 થાય છે. (પ્રોટોન - પ્રોટોન વચ્ચેના અપાકર્ષણને પહોંચી વળવા માટે વધારે ન્યુટ્રોનની જરૂર છે.) આ સ્થાયીત્વ ગુણોત્તરથી દૂર હોય તેવાં ન્યુક્લિયસ એટલે કે આ રીતે જરૂરી હોય તે કરતાં વધુ ન્યુટ્રોન કે પ્રોટોન ધરાવતાં ન્યુક્લિયસ અસ્થાયી છે. હકીકતમાં જાણીતાં સમસ્થાનિકો (બધા તત્વોનાં)ના માત્ર 10 % જ સ્થાયી છે. બીજાઓને (અસ્થાયી) પ્રયોગશાળામાં α, p, d, n કે બીજા કણોનો યોગ્ય ન્યુક્લાઈડ્ઝ પર મારો ચલાવીને બનાવાયાં છે અથવા વિશ્વમાં દ્રવ્યના ખગોળીય અવલોકનોમાં ઓળખાયાં છે.

સ્વાધ્યાય

તમને સ્વાધ્યાયના ઉકેલમાં નીચેની વિગતો ઉપયોગી થશે :

$e = 1.6\times10^{-19}$ C N $= 6.023 \times 10^{23}$ mole દીઠ

$1/(4\pi\varepsilon_0) = 9\times10^{9}$ N m^2/C^2 $k = 1.381 \times 10^{-23}$ J K^{-1}

1 MeV $= 1.6\times10^{-13}$ J 1 u = 931.5 MeV/c^2

1 year $= 3.154\times10^{7}$ s

$m_H = 1.007825\,u$ $m_n = 1.008665\,u$

$m(^4_2He) = 4.002603\,u$ $m_e = 0.000548\,u$

13.1 (a) લિથિયમના બે સ્થાયી સમસ્થાનિકો ^6_3Li અને ^7_3Li નું પ્રમાણ (જથ્થો) અનુક્રમે 7.5 % અને 92.5 % છે. તેમના દળો અનુક્રમે 6.01512 u અને 7.01600 u છે. લિથિયમનું પરમાણુ દળ શોધો.

(b) બોરોનને બે સ્થાયી સમસ્થાનિકો $^{10}_5B$ અને $^{11}_5B$ છે. તેમનાં દળ અનુક્રમે 10.01294 u અને 11.00931 u છે અને બોરોનનું પરમાણુદળ 10.811 u છે. $^{10}_5B$ અને $^{11}_5B$ નું સાપેક્ષ પ્રમાણ શોધો.

13.2 નિયોનના ત્રણ સ્થાયી સમસ્થાનિકો $^{20}_{10}Ne$, $^{21}_{10}Ne$ અને $^{22}_{10}Ne$ નું સાપેક્ષ પ્રમાણ 90.51 %, 0.27 % અને 9.22 % છે. આ ત્રણ સમસ્થાનિકોના પરમાણુ દળો અનુક્રમે 19.99 u, 20.99 u અને 21.99 u છે. નિયોનનું સરેરાશ પરમાણુદળ શોધો.

13.3 નાઈટ્રોજન ન્યુક્લિયસ ($^{14}_7N$)ની બંધનઊર્જા (MeVમાં) શોધો. $m(^{14}_7N) = 14.00307\,u$ આપેલ છે.

13.4 નીચેની વિગતો પરથી $^{56}_{26}Fe$ અને $^{209}_{83}Bi$ ન્યુક્લિયસની બંધનઊર્જા MeV એકમમાં શોધો.

$m(^{56}_{26}Fe) = 55.934939\,u$, $m(^{209}_{83}Bi) = 208.980388\,u$

13.5 એક આપેલ સિક્કાનું દળ 3.0 g છે. બધા ન્યુટ્રોન અને પ્રોટોનને એકબીજાથી અલગ કરવા માટે જરૂરી ન્યુક્લિયર ઊર્જાની ગણતરી કરો. સરળતા ખાતર સિક્કો સંપૂર્ણપણે $^{63}_{29}Cu$ પરમાણુઓ (62.92960 u દળના) નો બનેલો ગણો.

13.6 નીચેના માટે ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયા સમીકરણો લખો.

(i) $^{226}_{88}Ra$ નો α-ક્ષય (ii) $^{242}_{94}Pu$ નો α-ક્ષય

(iii) $^{32}_{15}P$ નો β^--ક્ષય (iv) $^{210}_{83}Bi$ નો β^--ક્ષય

(v) $^{11}_6C$ નો β^+-ક્ષય (vi) $^{97}_{43}Tc$ નો β^+ ક્ષય

(vii) $^{120}_{54}Xe$ નું ઈલેક્ટ્રૉન કેપ્ચર

13.7 એક રેડિયો ઍક્ટિવ સમસ્થાનિકનું અર્ધ-આયુ T years છે. તેની ઍક્ટિવિટી મૂળ ઍક્ટિવિટીના (a) 3.125 % (b) 1 % થવા માટે કેટલો સમય લાગશે ?

13.8 કાર્બન-ધરાવતા સજીવ દ્રવ્યની સામાન્ય ઍક્ટિવિટી કાર્બનના દર ગ્રામ દીઠ દર મિનિટે 15 વિભંજન જણાય છે. આ ઍક્ટિવિટી સ્થાયી કાર્બન સમસ્થાનિક $^{12}_6C$ ની સાથે થોડા પ્રમાણમાં હાજર રહેલા રેડિયો ઍક્ટિવ $^{14}_6C$ને લીધે છે. જ્યારે સજીવ મૃત્યુ પામે છે ત્યારે તેની

વાતાવરણ (જે ઉપર્યુક્ત સંતુલન ઍક્ટિવિટી જાળવી રાખે છે) સાથેની આંતરક્રિયા બંધ થાય છે અને તેની ઍક્ટિવિટી ઘટવાની શરૂ થાય છે. ${}^{14}_{6}C$ ના જાણીતા અર્ધ-આયુ (5730 years) અને ઍક્ટિવિટીના માપેલા મૂલ્ય પરથી તે નમૂનાની ઉંમરનો લગભગ અંદાજ લગાવી શકાય છે. પુરાતત્વવિદ્યામાં વપરાતા ${}^{14}_{6}C$ ડેટીંગનો આ સિદ્ધાંત છે. ધારો કે મોહેન-જો-દરોનો એક નમૂનો કાર્બનના દર ગ્રામ દીઠ દર મિનિટે 9 વિભંજનની ઍક્ટિવિટી દર્શાવે છે. સિંધુ-ખીણની સંસ્કૃતિની લગભગ ઉંમરનો અંદાજ કરો.

13.9 8.0 mCi તીવ્રતાનો રેડિયો ઍક્ટિવ સ્રોત મેળવવા માટે ${}^{60}_{27}Co$ નો જરૂરી જથ્થો શોધો. ${}^{60}_{27}Co$ નું અર્ધ-આયુ 5.3 years છે.

13.10 ${}^{90}_{38}Sr$ નું અર્ધઆયુ 28 years છે. આ સમસ્થાનિકના 15 mgનો વિભંજન દર કેટલો હશે ?

13.11 ગોલ્ડના સમસ્થાનિક ${}^{197}_{79}Au$અને સિલ્વરના સમસ્થાન ${}^{107}_{47}Ag$નાં ન્યુક્લિયસની ત્રિજ્યાઓનો આશરે ગુણોત્તર શોધો.

13.12 (a) ${}^{226}_{88}Ra$ અને (*b*) ${}^{220}_{86}Rn$ ના α-ક્ષયમાં Q-મૂલ્ય અને ઉત્સર્જિત α-કણની ગતિઊર્જા શોધો.

$m({}^{226}_{88}Ra) = 226.02540\,u$ $\quad$ $m({}^{222}_{86}Rn) = 222.01750\,u$

$m({}^{220}_{86}Rn) = 220.01137\,u$ $\quad$ $m({}^{216}_{84}Po) = 216.00189\,u$ આપેલ છે.

13.13 રેડિયો ન્યુક્લાઈડ ${}^{11}C$ નું વિભંજન

${}^{11}_{6}C \rightarrow {}^{11}_{5}B + e^{+} + \nu;\ T_{1/2} = 20.3$ min, મુજબ થાય છે.

ઉત્સર્જિત પૉઝિટ્રોનની મહત્તમ ગતિઊર્જા 0.960 MeV છે. દળનાં મૂલ્યો આપેલ છે :

$m({}^{11}_{6}C) = 11.011434\,u$ અને $m({}^{11}_{5}B) = 11.009305\,u$.

Q-મૂલ્યની ગણતરી કરો અને તેને ઉત્સર્જિત પૉઝિટ્રોનની મહત્તમ ઊર્જા સાથે સરખામણી કરો.

13.14 ${}^{23}_{10}Ne$ ન્યુક્લિયસ β^{-}-ઉત્સર્જન દ્વારા ક્ષય પામે છે. β-ક્ષયનું સમીકરણ લખો અને ઉત્સર્જન પામેલા ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા શોધો.

$m({}^{23}_{10}Ne) = 22.994466\,u$

$m({}^{23}_{11}Na) = 22.989770\,u$ આપેલ છે.

13.15 ન્યુક્લિયર પ્રક્રિયા $A + b \rightarrow C + d$ નું Q-મૂલ્ય $Q = [m_A + m_b - m_C - m_d]c^2$ વડે વ્યાખ્યાયિત થાય છે. જ્યાં દળો અનુરૂપ ન્યુક્લિયસનાં છે. આપેલ વિગતો પરથી નીચેની પ્રક્રિયાઓનું Q-મૂલ્ય શોધો અને જણાવો કે પ્રક્રિયાઓ ઉષ્માક્ષેપક છે કે ઉષ્માશોષક છે.

(i) ${}^{1}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H$

(ii) ${}^{12}_{6}C + {}^{12}_{6}C \rightarrow {}^{20}_{10}Ne + {}^{4}_{2}He$

પરમાણુદળો આ મુજબ આપેલ છે :

$m({}^{2}_{1}H) = 2.014102\,u$

$m({}^{3}_{1}\mathrm{H}) = 3.016049\,u$

$m({}^{12}_{6}\mathrm{C}) = 12.000000\,u$

$m({}^{20}_{10}\mathrm{Ne}) = 19.992439\,u$

13.16 ધારોકે આપણે ${}^{56}_{26}Fe$ ન્યુક્લિયસનું વિખંડન બે સમાન ટુકડાઓ ${}^{28}_{13}Al$ માં કરવાનું વિચારીએ. આવું વિખંડન ઊર્જાની દૃષ્ટિએ શક્ય છે ? પ્રક્રિયાનું Q મૂલ્ય શોધીને સમજાવો. $m({}^{56}_{26}\mathrm{Fe}) = 55.93494\,u$ અને $m({}^{28}_{13}\mathrm{A}l) = 27.98191\,u$ આપેલ છે.

13.17 ${}^{239}_{94}Pu$ ના વિખંડન ગુણધર્મો ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ ના જેવાં છે. વિખંડનદીઠ વિમુક્ત થતી ઊર્જા 180 MeV છે. જો શુદ્ધ ${}^{239}_{94}Pu$ ના 1 kg માંના બધા પરમાણુઓ વિખંડન પામે તો કેટલી ઊર્જા MeVમાં વિમુક્ત થશે ?

13.18 એક 1000 MWનું વિખંડન (Fission) રીએક્ટર તેના બળતણનો અડધો ભાગ 5 yમાં વાપરે છે. પ્રારંભમાં તે કેટલું ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ ધરાવતો હશે ? એવું ધારોકે રીએક્ટર 80 % સમય માટે કાર્યાન્વિત રહે છે, બધી ઊર્જા ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ ના વિખંડનથી ઉત્પન્ન થાય છે અને આ ન્યુક્લાઈડ માત્ર વિખંડન પ્રક્રિયામાં જ વપરાયું છે.

13.19 ડ્યુટેરિયમના 2.0 kgના વિખંડનથી 100 Wનો વિદ્યુત લૅમ્પ કેટલો સમય સુધી પ્રકાશતો રાખી શકાય ? વિખંડન પ્રક્રિયા નીચે મુજબ થાય છે એમ ગણો.

$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}He + n + 3.27\,\mathrm{MeV}$$

13.20 બે ડ્યુટેરોનના સન્મુખ (Head-on) સંઘાત માટે સ્થિતિમાન બેરિયરની ઊંચાઈ ગણો. (સૂચના : સ્થિતિમાન બેરિયરની ઊંચાઈ બે ડ્યુટેરોન એકબીજાને સ્હેજ સ્પર્શે ત્યારે તેમની વચ્ચેના કુલંબ અપાકર્ષણ દ્વારા અપાય છે. તેમને 2.0 *fm*ની ત્રિજ્યાના સખત ગોળા ગણી શકાય છે તેમ ધારો.)

13.21 $\mathrm{R} = \mathrm{R_0 A^{1/3}}$ સંબંધ, જ્યાં $\mathrm{R_0}$ એ અચળાંક અને A એ ન્યુક્લિયસનો દળાંક છે, પરથી દર્શાવો કે ન્યુક્લિયર દ્રવ્યની ઘનતા લગભગ અચળ હોય છે (એટલે કે A પર આધારિત નથી).

13.22 ન્યુક્લિયસમાંથી β^+ (પૉઝિટ્રોન)ના ઉત્સર્જન માટે બીજી એક સ્પર્ધા કરનારી પ્રક્રિયા ઈલેક્ટ્રૉન કેપ્ચર (અંદરની કક્ષા દા.ત., K કવચમાંથી ઈલેક્ટ્રૉન ન્યુક્લિયસ દ્વારા પકડાઈ જાય છે અને એક ન્યુટ્રિનો ઉત્સર્જિત થાય છે)ની પ્રક્રિયા છે.

$$e^- + {}^{A}_{Z}\mathrm{Y} \rightarrow {}_{Z-1}^{\ \ A}\mathrm{Y} + \nu$$

દર્શાવો કે જો β^+ ઉત્સર્જન ઊર્જાની દૃષ્ટિએ મંજુર હોય તો ઈલેક્ટ્રૉન કેપ્ચર મંજુર હોવું જ જોઈએ પરંતુ તેથી ઊલટું સંભવ નથી (એટલે કે ઈલેક્ટ્રૉન કેપ્ચર ઊર્જાની દૃષ્ટિએ મંજુર હોય તો β^+ઉત્સર્જન મંજૂર હોવું જ જોઈએ એમ નથી).

વધારાના સ્વાધ્યાય

13.23 આવર્ત કોષ્ટકમાં મૅગ્નેશિયમનું સરેરાશ દળ 24.372 u આપેલ છે. સરેરાશ મૂલ્ય, પૃથ્વી પરના તેના સમસ્થાનિકોના સાપેક્ષ કુદરતી પ્રમાણ પર આધારિત છે. ત્રણ સમસ્થાનિકો (Istopes) અને તેમનાં દળ $^{24}_{12}\text{Mg}$ (23.98504 u), $^{25}_{12}\text{Mg}$ (24.98584 u) અને $^{26}_{12}\text{Mg}$ (25.98259 u) છે. $^{24}_{12}\text{Mg}$ નું કુદરતમાં દળનું પ્રમાણ 78.99 % છે. બીજા બે સમસ્થાનિકોના પ્રમાણ નક્કી કરો.

13.24 ન્યુક્લિયસમાંથી ન્યુટ્રોનને દૂર કરવા માટે જરૂરી ઊર્જાને ન્યુટ્રોન વિયોગ (Separation) ઊર્જા તરીકે વ્યાખ્યાયિત કરવામાં આવે છે. નીચેની વિગતો પરથી $^{41}_{20}Ca$ અને $^{27}_{13}Al$ નાં ન્યુક્લિયસ માટે ન્યુટ્રોન વિયોગ ઊર્જાનાં મૂલ્યો શોધો.

$$m(^{40}_{20}Ca) = 39.962591\,u$$

$$m(^{41}_{20}Ca) = 40.962278\,u$$

$$m(^{26}_{13}Al) = 25.986895\,u$$

$$m(^{27}_{13}Al) = 26.981541\,u$$

13.25 એક સ્રોત ફોસ્ફરસના બે રેડિયો ન્યુક્લાઈડ્ઝ $^{32}_{15}\text{P}(T_{1/2} = 14.3\ d)$ અને $^{33}_{15}\text{P}\ (T_{1/2} = 25.3\ d)$ ધરાવે છે. પ્રારંભમાં 10 % ક્ષય $^{33}_{15}\text{P}$ માંથી આવે છે. આ 90 % બને તે માટે કેટલો સમય લાગશે ?

13.26 કેટલાંક સંજોગોમાં ન્યુક્લિયસ α-કણ કરતાં વધુ દળના કણના ઉત્સર્જનથી ક્ષય પામે છે. નીચેની ક્ષય પ્રક્રિયા વિચારો :

$$^{223}_{88}Ra \rightarrow \ ^{209}_{82}Pb + \ ^{14}_{6}C$$

$$^{223}_{88}Ra \rightarrow \ ^{219}_{86}Rn + \ ^{4}_{2}He$$

આ ક્ષય માટે Q-મૂલ્યો ગણો અને આ બંને ઊર્જાની દષ્ટિએ મંજૂર છે તેમ નક્કી કરો.

13.27 ઝડપી ન્યુટ્રોન વડે થતા $^{238}_{92}\text{U}$ ના વિખંડનનો વિચાર કરો. એક વિખંડન ઘટનામાં કોઈ ન્યુટ્રોન ઉત્સર્જિત થતો નથી અને β-ક્ષય પામ્યા બાદ પ્રાથમિક ટુકડાઓ $^{140}_{58}Ce$ અને $^{99}_{44}Ru$ છે. આ વિખંડન પ્રક્રિયા માટે Q-મૂલ્ય ગણો. પરમાણુના અને કણના જરૂરી દળો આ મુજબ છે :

$$m(^{238}_{92}\text{U}) = 238.05079\,u$$

$$m(^{140}_{58}Ce) = 139.90543\,u$$

$$m(^{99}_{44}Ru) = 98.90594\,u$$

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

$${}_{1}^{2}\text{H} + {}_{1}^{3}\text{H} \rightarrow {}_{2}^{4}He + n$$

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

$m({}_{1}^{2}\text{H}) = 2.014102\,u$

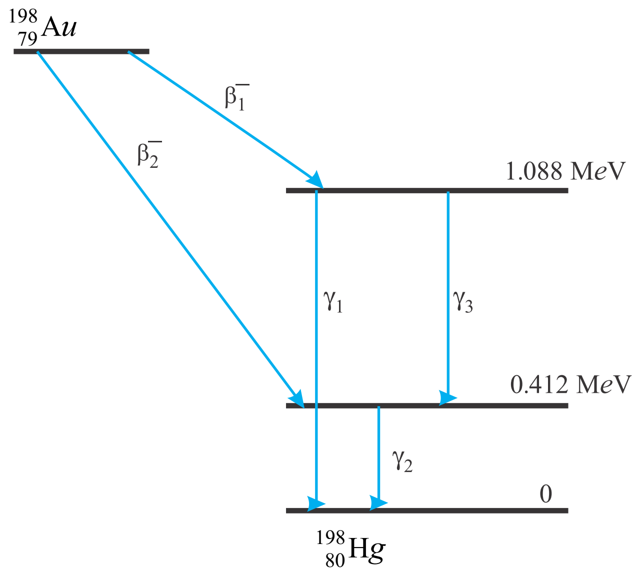
$m({}_{1}^{3}\text{H}) = 3.016049\,u$

(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.

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

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



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.