अध्याय–15
नाभिकीय भौतिकी (Nuclear Physics)

सन् 1911 में रदरफोर्ड द्वारा α कण प्रकीर्णन प्रयोग के प्रेक्षणों के स्पष्टीकरण हेतु प्रतिपादित किया गया कि परमाणु का लगभग समस्त द्रव्यमान एवं सम्पूर्ण धनावेश इसके केन्द्र पर एक अतिसूक्ष्म क्षेत्र जिसे नाभिक कहते हैं में संकेन्द्रित होता है। इस प्रयोग तथा रदरफोर्ड नाभिकीय परमाणु मॉडल के बारे में आप पिछलेअध्याय में विस्तार से पढ़ चुके हैं। अब यह प्रश्न स्वाभाविक है कि जिस प्रकार परमाणु की अपनी एक आन्तरिक संरचना है क्या नाभिक की भी कोई आन्तरिक संरचना है? इस अध्याय में आगे हम इसी प्रश्न का उत्तर देने के प्रयास में नाभिकीय संगठन, नाभिक के आयाम, नाभिकीय स्थायित्व एवं नाभिकीय बलों इत्यादि के बारे में विवेचना करेंगे।

नाभिक की खोज से पहले से ही यह जानकारी थी कि भारी तत्व जैसे यूरेनियम, थोरियम, इत्यादि कुछ कणों जिन्हें α, β एवं γ विकिरण कहा जाता है का उत्सर्जन कर स्वतः विघटित होते हैं यह परिघटना जिसकी खोज 1896 में बैकेरल की थी रेडियो एक्टिवता कहलाती है। जैसाकि इस अध्याय में हम आगे देखेंगे रेडियो एक्टिवता एक नाभिकीय परिघटना (Nuclear phenomenon) है। रेडियोएक्टिव क्षय के नियमों एवं इसमें संबंधित परिभाषाओं की जानकारी प्राप्त करने के बाद हम नाभिकीय विखंडन, नाभिकीय भट्टी इत्यादि की विवेचना करेंगे जो वर्तमान में हमारी ऊर्जा आवश्यकताओं की पूर्ति में एक महत्वपूर्ण भूमिका निर्वहन करती है। इसके बाद हम नाभिकीय संलयन के बारे में जानकारी प्राप्त करेंगे जो कि सूर्य एवं तारों में ऊर्जा का जनक है तथा भविष्य में हमारे लिए एक स्वच्छ प्रदूषण मुक्त ऊर्जा का स्त्रोत बनने की संभावना रखता है।

15.1 नाभिकीय संरचना (Nuclear Structure)

सामान्य हाइड्रोजन के अपवाद को छोड़कर अन्य सभी तत्वों के नाभिक दो अवयवों जिन्हें प्रोटॉन एवं न्यूट्रॉन कहा जाता है से निर्मित होते हैं। सामान्य हाइड्रोजन के नाभिक में केवल एक प्रोटॉन होता है कोई न्यूट्रॉन नहीं। हाइड्रोजन के दो अन्य रूप (समस्थानिक) जिन्हें ड्यूटीरियम एवं ट्राइट्रीयम कहा जाता है में 1 प्रोटॉन के अतिरिक्त क्रमशः 1 व 2 न्यूट्रॉन होते हैं। प्रोट्रॉन पर इलेक्ट्रोन आवेश के बराबर धनात्मक आवेश होता है जबकि न्यूट्रॉन अनावेशित कण होता है। प्रोटॉन एवं न्यूट्रॉन के द्रव्यमान क्रमशः इस प्रकार है

$$m_n = 1.67626231 \times 10^{-27}\, kg$$

$$m_p = 1.6749286 \times 10^{-27}\, kg$$

(बाद में हम इन द्रव्यमानों को एक अन्य मात्रक(u) तथा तुल्य ऊर्जा मात्रकों के रूप में उल्लेखित करना सीखेंगें)। इलेक्ट्रॉन तो प्रकृति का एक मूल कण है परन्तु वस्तुतः न्यूट्रॉन एवं प्रोटॉन शुद्ध रूप में मूल कण नहीं है क्योंकि ये अन्य कणों जिन्हें क्वार्क (quarks) कहा जाता है से बने हैं, किन्तु इस अध्याय में हमारा उद्देश्य प्राथमिक रूप से नाभिक के उन गुणों का अध्ययन है जिनमें प्रोटॉन अथवा न्यूट्रॉन की आन्तरिक संरचना से कोई प्रत्यक्ष संबंध नहीं है अतः यहाँ हम क्वार्क के बारे में और चर्चा नहीं करेंगे।

किसी तत्व के नाभिक में उपस्थित प्रोटॉनों की संख्या (प्रोटॉन संख्या Proton number) को इसका परमाणु क्रमांक भी कहते हैं तथा इसे Z से प्रदर्शित करते हैं। यह संख्या उस तत्व के उदासीन परमाणु में उपस्थित इलेक्ट्रॉनों की संख्या के बराबर होती है। नाभिक में उपस्थित न्यूट्रॉनों की संख्या "न्यूट्रॉन संख्या" (Neurtron number) कहलाती है तथा इसे हम N से प्रदर्शित करते हैं। यदि आवेशों के अन्तर ($q = +e$ प्रोटॉन के लिए तथा $q = 0$ न्यूट्रॉन के लिए) को छोड़ दिया जाए तो प्रोटॉन एवं न्यूट्रॉन बहुत (अधिकतम) समान कण हैं इनके द्रव्यमान लगभग समान हैं तथा नाभिक के भीतर ये एक जैसे ही नाभिकीय बल अनुभव करते हैं इस कारण हम नाभिकीय न्यूट्रॉनों एंव प्रोटॉनों को एक साथ वर्गीकृत करते हुए इन्हें 'न्यूक्लिऑन' (Nucleon) कहते हैं। न्यूक्लिऑनों की कुल संख्या ($= Z + N$) को हम द्रव्यमान संख्या (Mass Number) कहते हैं तथा इसे हम A से प्रदर्शित करते हैं। Z तथा A (तथा इसके कारण N) की जानकारी होने पर हम किसी नाभिकीय प्रजाति विशेष अथवा न्यूक्लाइड (Nuclide) की पहचान कर सकते हैं। नाभिकीय प्रजाति के लिए परिपाटी के अनुसार प्रतीक $^A_Z X$ या $^A X_Z$ उपयोग में लिया जाता है जहाँ

X = तत्व का रासायनिक प्रतीक है

Z = तत्व का परमाणु क्रमांक है जो नाभिक में प्रोटॉनों की संख्या भी है

A = नाभिकीय प्रजाति की द्रव्यमान संख्या है जो नाभिक में कुल न्यूक्लिऑनों की संख्या भी है

इस प्रकार $^4_2 He$ हीलियम नाभिक को व्यक्त करता है जिसमें 2 प्रोटॉन तथा 4 न्यूक्लिऑन है अतः इसमें 2 न्यूट्रॉन है। इसी प्रकार $^{107}_{46}Ag$ रजत (चांदी) के नाभिक को बताता है जिसमें 46 प्रोटॉन तथा 107 न्यूक्लिऑन एवं इस कारण 61 न्यूट्रॉन है।

15.1.1 कुछ महत्वपूर्ण परिभाषाएँ (Some Important Defination)

समस्थानिक (Isotopes) $\therefore$ ये ऐसे परमाणु हैं जिनके नाभिकों में प्रोटॉनों की संख्या Z तो समान होती है किन्तु द्रव्यमान संख्या A भिन्न होती है। दूसरे शब्दों में किसी एक तत्व के समस्थानिको के नाभिकों में प्रोटॉनों की संख्या तो समान होती है किन्तु न्यूट्रॉनों की संख्या भिन्न होती है। उदाहरणार्थ $^{16}_8O$, $^{17}_8O$, $^{18}_8O$ ऑक्सीजन के तीन समस्थानिक हैं। क्योंकि

किसी भी तत्व के रासायनिक गुण इसमें इलेक्ट्रॉनों की संख्याZ द्वारा निर्धारित होते हैं अतः किसी तत्व के सभी समस्थानिक समान रासायनिक गुणधर्म प्रदर्शित करते हैं तथा आवर्त तालिका(periodic table) में समान स्थान पर होते हैं। इन्हें रासायनिक विश्लेषण द्वारा पृथक नहीं किया जा सकता है किन्तु इन्हें द्रव्यमान स्पैक्ट्रोग्राफ द्वारा अलग किया जा सकता है।

समभारिक (Isobars): ये ऐसे नाभिक हैं जिनमें द्रव्यमान संख्या अर्थात न्यूक्लिऑन संख्या A समान होती है किन्तु परमाणु संख्या (प्रोटॉन संख्या) Z तथा न्यूट्रान संख्या N भिन्न होती है। उदाहरणार्थ $^{14}_{6}C$ तथा $^{14}_{7}N$ समभारिक है इनमें A = 14 समान है पर Z तथा N भिन्न हैं। इनके परमाणु क्रमांक भिन्न होने से ये भिन्न रासायनिक तत्व हैं। इनके आवर्ततालिका में स्थान भी भिन्न हैं। इन्हें रासायनिक विधि से पृथक किया जा सकता है किन्तु द्रव्यमान स्पैक्ट्रोग्राफ द्वारा नहीं।

समन्यूट्रॉनिक (Isotones): ये भिन्न तत्वों के ऐसे नाभिक हैं जिनमें न्यूट्रॉनों की संख्या N समान किन्तु परमाणु क्रमांक Z व द्रव्यमान संख्या A भिन्न है उदाहरण के लिए $^{13}_{6}C$ व $^{14}_{7}N$ दोनों में N = 7 होने से ये समन्यूट्रॉनिक है। ये भिन्न तत्वों के नाभिक हैं इन्हें रासायनिक विधि अथवा द्रव्यमान स्पैक्ट्रोग्राफ दोनों से पृथक किया जा सकता है।

प्रतीप या दर्पण नाभिक (Mirror Nuclei): ये ऐसे नाभिक हैं जिनमें द्रव्यमान संख्याA समान है परन्तु प्रोटॉन एवं न्यूट्रॉन संख्या परस्पर परिवर्तित है अर्थात् एक में न्यूट्रॉनों की संख्या दूसरे में प्रोटॉनों की संख्या के बराबर है। उदाहरणः $^{7}_{4}Be(Z=4,\ N=3)$ तथा $^{7}_{3}Li(Z=3,\ N=4)$

समअवयवी या आइसोमर्स (Isomers): ये ऐसे नाभिक हैं जिनमें प्रत्येक का A व Z दोनों समान हैं किन्तु रेडियो एक्टिव गुण (यथा अर्द्ध आयु व नाभिकीय ऊर्जा अवस्थाएँ) भिन्न हैं। आइसोमर्स को समान रासायनिक प्रतीक द्वारा व्यक्त किया जाता है किन्तु उनपर * का चिन्ह लगाकर इनकी मूल नाभिक से भिन्नता दर्शाई जाती है।

15.2 नाभिक का आमाप (Nuclear Size)

पिछले अध्याय में हमने α कण प्रकीर्णन संबंधी प्रयोग के विश्लेषण में α कणों की नाभिकों के निकटतम पहुँचने की दूरी का परिकलन किया था। α कण संबंधी प्रयोगों में 5.5 MeV के α कणों के लिए रदरफोर्ड ने इस दूरी का मान स्वर्ण नाभिकों के लिए लगभग 4.0×10^{-14} m पाया। वस्तुतः α कण प्रकीर्णन प्रयोग में α कण नाभिक के धनावेश के कारण कूलॉम बल से प्रतिकर्षित होकर इस दूरी तक पहुँचकर पुनः अपने पूर्व पथ पर लौट जाता है। इससे रदरफोर्ड ने निष्कर्ष निकाला कि स्वर्ण नाभिक का वास्तविक आमाप 4.0×10^{-14} m से कम होना चाहिए। रदरफोर्ड ने ही रजत नाभिकों के लिए इस दूरी का आकलन 2.0×10^{-14} m प्राप्त किया। अतः स्पष्ट है कि नाभिक की यदि गोलाकार माना जाए तो इसकी त्रिज्या 10^{-14} m कोटि की होनी चाहिए।

नाभिक का आमाप ज्ञात करने के आधुनिक प्रयोगों में उच्च ऊर्जा के इलेक्ट्रॉनों अथवा न्यूट्रॉनों का उपयोग किया जाता है। इलेक्ट्रॉन प्रकीर्णन प्रयोगों में200 MeV से उच्च ऊर्जा के इलेक्ट्रॉन पुंज काम लिए जाते हैं ताकि इनकी दे ब्राग्ली तरंग दैर्ध्य इतनी कम हो जिससे यह नाभिकीय संरचना संवेदी अन्वेषी(Probe) की तरह काम कर सके। प्रभावी रूप में इस प्रकार के प्रर्कीणन प्रयोग प्रकीर्णित कणों का विवर्तन प्रतिरूप मापित करते हैं जिससे लक्ष्य (नाभिक) की आकृति प्राप्त की जाती है। यहाँ ध्यातव्य है कि इलेक्ट्रॉन प्रकीर्णन प्रयोग नाभिक में आवेश वितरण के बारे में सूचना देते हैं जबकि न्यूट्रॉन प्रकीर्णन प्रयोग से नाभिक में द्रव्य (द्रव्यमान) वितरण के बारे में जानकारी प्राप्त होती है। यद्यपि इन प्रयोगों से यह ज्ञात होता है कि नाभिक की कोई तीक्ष्णतः परिभाषित सतह नहीं हैं साथ ही अधिकांश नाभिक लगभग गोलाकार है किन्तु कुछ दीर्घवृत्तज (ellipsoidal) होती हैं। फिर भी यह सहमति है कि नाभिक के लिए एक औसत अथवा प्रभावी त्रिज्या(mean or effective radius) इस प्रकार परिभाषित की जा सकती है।

$$R = R_0 A^{1/3} \qquad \dots(15.1)$$

जहाँ A नाभिक की द्रव्यमान संख्या है तथा R_0 एक नियतांक है जिसका मान लगभग 1.2×10^{-15} m है।

नाभिक की त्रिज्या एवं नाभिकीय दूरियों के मापन के लिए एक सुविधाजनक मात्रक फैमटोमीटर(femtometre) है जिसे फर्मी (fermi) भी कहा जाता है। दोनों को संक्षिप्त रूप में fm से व्यक्त करते है। जहाँ

1 फर्मी = 1 फैमटोमीटर = 1 fm = 10^{-15} m अतः इस मात्रक में $R_0 = 1.2\ fm$

जैसा कि पिछले अध्याय में विवेचित किया जा चुका है परमाणु की त्रिज्या की तुलना में नाभिकीय त्रिज्या 10^4 के घटक से कम होती है।

15.2.1 नाभिकीय आयतन (Nuclear Volume)

यदि नाभिक को R त्रिज्या का गोलाकार माने तो इसका आयतन होगा

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

या
$$V = \frac{4}{3}\pi R_0^3 A \qquad \dots(15.2)$$

अतः नाभिक का आयतन इसकी द्रव्यमान संख्या A के समानुपाती होता है। प्रकारांतर से इसका अर्थ है कि नाभिकीय द्रव्य का घनत्व द्रव्यमान संख्या A पर निर्भर नहीं करता तथा सभी नाभिकों के लिए इसका मान समान होता है।

उदाहरण 15.1 $^{27}_{13}\text{Al}$ नाभिक की त्रिज्या ज्ञात करो।

हल: सूत्र $R = R_0 A^{1/3}$ में प्रश्नानुसार A = 27 तथा $R_0 = 1.2\ fm$ रखने पर

$$R = 1.2 \times (27)^{1/3}$$

$$= 3.6\ fm = 3.6 \times 10^{-15}\ m$$

उदाहरण 15.2 $^{27}_{13}\text{Al}$ के दो नाभिकों के मध्य इनके विद्युत प्रतिकर्षण के कारण स्थितिज ऊर्जा ज्ञात करो जब ये एक दूसरे को सतह पर स्पर्श करते हैं।

हल: उदाहरण 15.1 में प्राप्त उत्तर के अनुसार प्रत्येक $^{27}_{13}Al$ नाभिक का त्रिज्या $R = 3.6 \times 10^{-15}$ m होगी। जब ये एक दूसरे को स्पर्श करते हैं तो इनके केन्द्रों के मध्य दूरी $d = 2R = 7.2 \times 10^{-15}$ m होगी। अतः इस युग्म की स्थितिज ऊर्जा है।

$$U = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 d}$$

यहाँ प्रत्येक नाभिक में 13 प्रोटॉन है अतः

$$q_1 = q_2 = 13 \times 1.6 \times 10^{-19}\ C$$

$$\therefore \quad U = \frac{(9 \times 10^9\ Nm^2/C^2)(13 \times 1.6 \times 10^{-19}\ C)^2}{7.2 \times 10^{-15} m}$$

$$= 540.8 \times 10^{24} \times 10^{-38}\ \text{Nm}$$

$$= 540.8 \times 10^{-14}\ \text{J} = \frac{540.8 \times 10^{-14}}{1.6 \times 10^{-19}}\ \text{eV}$$

$$= 86.5\ \text{MeV}$$

उदाहरण 15.3 द्रव्यमान संख्या A के किसी नाभिक के लिए नाभिकीय घनत्व का आंकिक मान परिकलित करें।

हल: प्रोटॉन तथा न्यूट्रॉन के द्रव्यमान लगभग समान, माना m होते हैं अतः द्रव्यमान संख्या A के नाभिक का द्रव्यमान M = mA,

समीकरण 15.2 से नाभिक का आयतन $V = \frac{4}{3}\pi R_0^3 A$

$\therefore$ नाभिकीय द्रव्य का घनत्व $\rho = \frac{M}{V}$

$$= \frac{m}{4/3\pi R_0^3} = \frac{3}{4}\frac{m}{\pi R_0^3}$$

जोकि द्रव्यमान संख्या A पर अनाश्रित है तथा $R_0 = 1.2 \times 10^{-15}$ m लेने पर

$$\rho = \frac{3}{4 \times 3.14} \times \frac{1.67 \times 10^{-27}}{(1.2 \times 10^{-15}\ m)^3}$$

$$= 2.3 \times 10^{17}\ kg/m^3$$

उपर्युक्त उदाहरण से स्पष्ट है कि नाभिकीय द्रव्य घनत्व द्रव्यमान संख्या पर अनाश्रित है तथा $10^{17}\ \text{kg/m}^3$ की कोटि का है। यह प्रत्याशित ही है क्योंकि नाभिकीय द्रव्यमान अत्यंत सूक्ष्म क्षेत्र में सीमित रहता है। यदि नाभिकीय घनत्व की तुलना जल के घनत्व $(\rho_w = 10^3\ kg/m^3)$ से करे तो यह इससे 2.3×10^4 गुना अधिक हैं। इतने अधिक घनत्व का द्रव्यमान न्यूट्रॉन तारों(neutron stars) में पाया जाता हैं।

15.3 परमाणु द्रव्यमान मात्रक (Atomic Mass Unit)

परमाणवीय एवं नाभिकीय द्रव्यमान 10^{-25} kg से 10^{-27} kg की कोटि के होते हैं। व्यवहार में इतनी छोटी राशियों का उपयोग बहुत सुविधाजनक नहीं होने के कारण इन्हें एक अन्य छोटे मात्रक जिसे एकीकृत परमाणु द्रव्यमान मात्रक (unified atomic mass unit) कहते हैं में व्यक्त किया जाता है इसके लिए प्रतीक u प्रयुक्त किया जाता है (इस मात्रक के लिए पूर्व प्रचलित नाम परमाणु द्रव्यमान मात्रक व परमाणु द्रव्यमान इकाई एवं प्रतीक amu था।) इस मात्रक का चयन इस प्रकार किया जाता है ताकि $^{12}_{6}\text{C}$ परमाणु (ना कि नाभिक) का द्रव्यमान यर्थाथतः 12 u होता है।

अतः
$$1u = \frac{^{12}_{6}\text{C परमाणु का द्रव्यमान}}{12}$$

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

$$= 1.66054 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

ध्यातव्य है कि परमाणवीय द्रव्यमान उदासीन परमाणुओं के द्रव्यमान को व्यक्त करते हैं ना कि इसके नाभिक के द्रव्यमान को। अर्थात् किसी परमाणु के द्रव्यमान में सदैव इसके Z इलेक्ट्रानों का द्रव्यमान भी सम्मिलित होता है। परमाणु द्रव्यमान का यथार्थ मापन द्रव्यमान स्पैक्ट्रोग्राफ द्वारा किया जाता है। परमाणु द्रव्यमान मात्रक (u) में व्यक्त करने पर कई तत्वों के परमाणु द्रव्यमान, हाइड्रोजन परमाणु के द्रव्यमान के पूर्ण गुणज के निकट प्राप्त होते हैं परन्तु इसके कुछ अपवाद भी है यथा क्लोरीन का परमाणु द्रव्यमान 35.46 u है।

आंइसटाइन के प्रसिद्ध द्रव्यमान ऊर्जा समतुल्यता संबंध $E = mc^2$ का उपयोग कर 1u द्रव्यमान के समतुल्य ऊर्जा का मान ज्ञात किया जा सकता है जिसका परिकलन नीचे दिए गए अनुसार है।

$$m = 1u = 1.66050\times10^{-27}\ kg$$

$\therefore$ समतुल्य ऊर्जा $E = (1u)c^2$

$$E = (1.6605\times10^{-27})(2.9979\times10^{8})^2\ \mathrm{kg\,m^2/s^2}$$

$$= 1.4924\times10^{-10}\ \mathrm{J}$$

$$= \frac{1.4924\times10^{-10}}{1.602\times10^{-19}}\ \mathrm{eV}$$

$$E = 931.5\ MeV$$

इससे आशय है कि u को हम $931.5\ \mathrm{MeV}/c^2$ भी लिख सकते हैं तथा u में वर्णित किसी द्रव्यमान या द्रव्यमान अन्तर के समतुल्य ऊर्जा ज्ञात कर सकते हैं अथवा इसका विपरीत। सारणी 15.1 में भिन्न द्रव्यमान मात्रकों में प्रोटॉन, न्यूट्रॉन, इलेक्ट्रॉन तथा सामान्य हाइड्रोजन परमाणु के द्रव्यमानों का उल्लेख किया गया है।

सारणी 15.1 विभिन्न मात्रकों में प्रोटॉन, न्यूट्रॉन, इलेक्ट्रॉन तथा हाइड्रोजन परमाणु ($_1{}^1$H) के द्रव्यमान

कण	द्रव्यमान		
	kg	**u**	**MeV / c²**
प्रोटॉन	1.6726×10^{-27}	1.007276	938.28
न्यूट्रॉन	1.6750×10^{-27}	1.008665	939.29
इलेक्ट्रॉन	9.1095×10^{-31}	0.0005486	0.511
$^1_1$H परमाणु	1.6736×10^{-21}	1.007825	938.79

यद्यपि यर्थाथतः $1\ \mathrm{u} = 931.5\ \mathrm{MeV}$ है किन्तु गणना में सुविधा के लिए आगे हम $1\ \mathrm{u} = 931\ \mathrm{MeV}$ मानेंगे।

15.4 द्रव्यमान क्षति एवं नाभिकीय बंधन ऊर्जा (Mass Defect and Nuclear Binding Energy)

अपवाद स्वरूप सामान्य हाइड्रोजन नाभिक $(^1_1\mathrm{H})$ को छोड़ शेष सभी नाभिक न्यूट्रॉन एवं प्रोटॉनों से निर्मित होते हैं। अतः यह आशा स्वाभाविक ही है कि नाभिक का द्रव्यमान M इनके अवयवी न्यूक्लिऑनों के द्रव्यमानों के सकल योग $\sum m$ के बराबर होना चाहिए परन्तु नाभिक का प्रयोगों द्वारा प्राप्त द्रव्यमान M सदैव $\sum \mathrm{m}$ से कम पाया जाता है। द्रव्यमान में इस अन्तर को द्रव्यमान क्षति कहते हैं तथा इसे ΔM से व्यक्त करते हैं अर्थात्

$$\Delta M = \sum m - M$$

यदि द्रव्यमान संख्या A के नाभिक में Z प्रोटॉन तथा N न्यूट्रॉन हैं एवं प्रोटॉन तथा न्यूट्रॉन के द्रव्यमान क्रमशः m_p तथा m_n है तब

$$\sum M = Zm_p + Nm_n$$

तदानुसार

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M \qquad \ldots(15.3)$$

तथा चूंकि

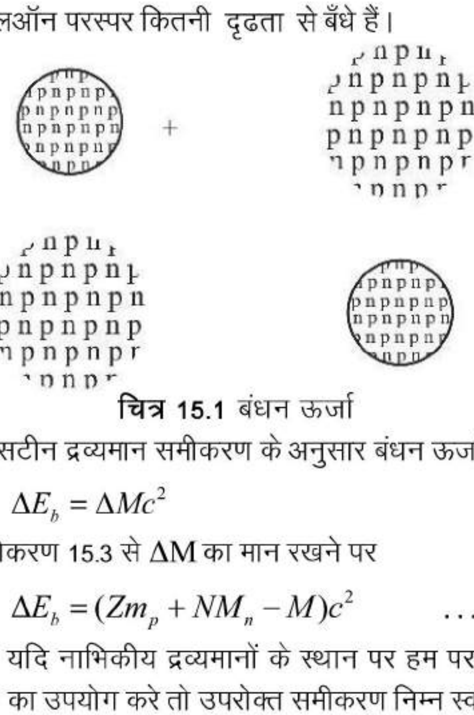
$$N = A - Z$$

$$\therefore \qquad \Delta M = Zm_p + (A - Z)m_n - m \qquad \ldots(15.4)$$

भी लिखा जा सकता है।

द्रव्यमान क्षति का सैद्धांतिक स्पष्टीकरण आईसटीन की द्रव्यमान ऊर्जा समीकरण में निहित है। इसके अनुसार द्रव्यमान क्षति ΔM के तुल्य ऊर्जा $\Delta E_b = \Delta Mc^2$ नाभिक की बंधन ऊर्जा होती है। नाभिक में न्यूक्लिऑन परस्पर बंधित होते हैं तथा नाभिक से इसके न्यूकिलऑनों को सुदूर (लंबी दूरियों) तक पृथक करने के लिए नाभिक को ऊर्जा दी जानी चाहिए (चित्र 15.1 अ)। ऐसा करने के लिए नाभिक को दी जाने वाली आवश्यक ऊर्जा नाभिक की बंधन ऊर्जा कहलाती है। इसी प्रकार यदि न्यूकिलऑन जो प्रारंभ में एक दूसरे से भली भांति पृथक हैं को एक दूसरे के निकट लाकर एक नाभिक की रचना की जाए तो इतनी ही ऊर्जा मुक्त होनी चाहिए (चित्र 15.1ब)

यद्यपि हम नाभिक को इस प्रकार तोड़ अथवा रचित नही कर सकते फिर भी नाभिक की बंधन ऊर्जा यह बताती है कि नाभिक में न्यूकिलऑन परस्पर कितनी दृढता से बँधे हैं।



चित्र 15.1 बंधन ऊर्जा

अब आंइसटीन द्रव्यमान समीकरण के अनुसार बंधन ऊर्जा

$$\Delta E_b = \Delta Mc^2$$

अतः समीकरण 15.3 से ΔM का मान रखने पर

$$\Delta E_b = (Zm_p + NM_n - M)c^2 \qquad \ldots(15.5)$$

यदि नाभिकीय द्रव्यमानों के स्थान पर हम परमाणवीय द्रव्यमानों का उपयोग करे तो उपरोक्त समीकरण निम्न स्वरूप प्राप्त कर लेती है

$$\Delta E_b = \left(ZM_H + NM_n - {}^A_Z M\right)c^2 \qquad \ldots(15.5a)$$

जहाँ M_H सामान्य हाइड्रोजन $(^1_1\mathrm{H})$ परमाणु का तथा ${}^A_Z M$ प्रश्न में वांछित नाभिक के उदासीन परमाणु का द्रव्यमान है।

यहाँ यह देखा जा सकता है कि Z हाइड्रोजन परमाणुओं में Z इलेक्ट्रॉन हैं तथा परमाणु ${}^{A}_{Z}M$ में भी Z इलेक्ट्रॉनों का द्रव्यमान निहित है अतः इस प्रकार इलेक्ट्रॉनों के द्रव्यमान परस्पर निरस्त हो जाते हैं। (इस प्रकार के निरस्तीकरण β क्षय की प्रक्रिया में नहीं हो पाते) अतः नाभिकीय द्रव्यमान के स्थान पर प्रायः परमाणीय द्रव्यमान उपयोग में लिए जाते हैं। यद्यपि इलेक्ट्रॉनों की परमाणु में बंधन ऊर्जा के कारण समीकरण 15.6 से परिकलित नाभिकीय बंधन ऊर्जा में कुछ अन्तर आता है किन्तु परमाणवीय बंधन ऊर्जा eV की कोटि की होने तथा नाभिकीय बंधन ऊर्जा MeV की कोटि (जैसा हम आगे आंकिक उदाहरणों में देखेंगे) के होने के कारण यह त्रुटि नगण्य होती है।

उदाहरण 15.4 अग्रलिखित नाभिको के लिए बंधन ऊर्जाएँ ज्ञात कीजिए (i) ड्यूट्रॉन $\left({}^{2}_{1}\mathrm{H}\right)$ तथा (ii) ${}^{120}_{50}Sn$ दिया है $m_p = 1.007u$, $m_n = 1.008u$ डयूट्रॉन नाभिक का द्रव्यमान $M_d = 2.013u$ तथा S_n नाभिक का द्रव्यमान $M_{Sn} = 119.902u$ $(1u = 931\,MeV/c^2)$

हल: नाभिकीय बंधन ऊर्जा के लिए सूत्र से

$$\Delta E_b = \left[Zm_p + (A-Z)m_n - M\right]C^2$$

(i) ड्यूट्रॉन के लिए

$\because \quad Z = 1 \quad A = 2$

अतः $\quad \Delta E_b = \left[1m_p + 1m_n - M_d\right]c^2$

$$= [1.007 + 1.008 - 2.013]uc^2$$

$$= [2.015 - 2.013] \times 931\,MeV$$

$$= 0.002 \times 931 = 1.862\ \mathrm{MeV}$$

(ii) Sn नाभिक के लिए Z = 50; A = 120 अतः A − Z = 70

$$\therefore \quad \Delta E_b = [50 \times 1.007 + 70 \times 1.008 - 119.902] \times 931\mathrm{MeV}$$

$$= [50.35 + 70.56 - 119.902] \times 931\mathrm{MeV}$$

$$= [120.91 - 119.902] \times 931\mathrm{MeV}$$

$$= 1.008 \times 931\,MeV = 938.448\,MeV$$

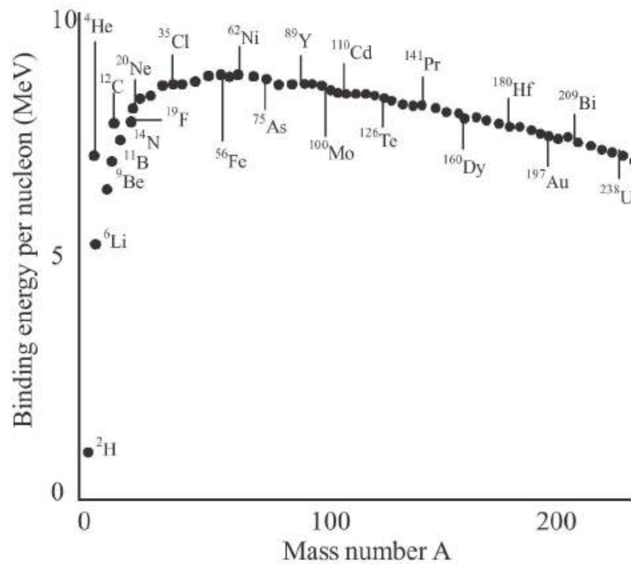
उपर्युक्त उदाहरण में यद्यपि हमने m_p, m_n तथा नाभिको के द्रव्यमान यर्थाथतः न लेकर सन्निकटतः लिए है तथा $1u = 931\,MeV$ माना है तथापि फिर भी स्पष्ट है कि नाभिकीय बंधन ऊर्जा का मान MeV कोटि का है जोकि परमाणवीय बंधन ऊर्जा जो eV कोटि की होती है से बहुत अधिक है। इसके अतिरिक्त अपेक्षाकृत हल्के नाभिक ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ की तुलना में मध्यवर्ती द्रव्यमान के नाभिक ${}^{120}_{50}S_n$ की बंधन ऊर्जा काफी अधिक है।

15.4.1 प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा (Binding Energy per Nucleon)

नाभिक की बंधन ऊर्जा ΔE_b में इसकी द्रव्यमान संख्या A से भाग देने पर प्राप्त राशि प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा कहलाती है। इसे ΔE_{bn} या $\overline{\Delta E_b}$ से व्यक्त कर सकते हैं। अर्थात्

$$\Delta E_{bn} = \frac{\Delta E_b}{A} \qquad \ldots(15.6)$$

यह एक महत्वपूर्ण अवधारणा है। किसी नाभिक के लिए जितना अधिक प्रति न्यूकिलऑन बंधन ऊर्जा का मान है उतना ही अधिक वह नाभिक स्थाई है। यदि विभिन्न तत्वों के नाभिकों की प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा तथा इसके संगत द्रव्यमान संख्या में ग्राफ खींचा जाए तो चित्र 15.2 में दर्शाए अनुसार वक्र प्राप्त होता है। इस वक्र के अध्ययन से निम्नांकित निष्कर्ष प्राप्त होते हैं।



चित्र 15.2

चित्र 15.2 कुछ प्रतिनिधिक नाभिकों के लिए प्रतिन्यूकिलऑन बंधन ऊर्जा का द्रव्यमान संख्या A के साथ परिवर्तन। नाभिक ^{62}Ni के लिए प्रति न्यूक्लिआन बंधन ऊर्जा का मान सर्वाधिक (लगभग 8.8 MeV) है जो समस्त ज्ञात स्थायी नाभिकों में सर्वाधिक है। यह भी ध्यान दीजिए कि नाभिक ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$, ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ अपने निकटवर्ती नाभिकों की तुलना में अधिक प्रतिन्यूकिलऑन बंधन ऊर्जा के कारण अधिक स्थायी है।

(i) ΔE_{bn} का मान पहले बढ़ता है फिर अधिकतम मान प्राप्त करता है तथा फिर धीमे धीमे घटता है। जिन नाभिकों के लिए न्यूकिलऑन संख्या A का मान 4 का गुणज होता है अर्थात् A = 4, 8, 12, 16 उनके लिए ΔE_{bn} का मान निकटवर्ती नाभिकों की तुलना में कहीं अधिक होता है अतः ये अपेक्षाकृत अधिक स्थायी होते हैं। (इससे पता चलता है

कि परमाणुओं में इलेक्ट्रॉनों की तरह नाभिक में भी न्यूक्लिऑन के लिए कोश संरचना होती है जिस प्रकार उदासीन गैसों जिनमें बाह्यतम कोश पूर्ण भरा होता है के परमाणु अपेक्षाकृत अधिक स्थायी होते हैं 4 के गुणक वाले नाभिक भी संगत नाभिकीय कोशों के पूर्णतः भरे होने के कारण अधिक स्थायी होते हैं। इसके बारे में अधिक जानकारी आप उच्च कक्षाओं में प्राप्त कर सकेंगे)

(ii) द्रव्यमान संख्या $A \sim 50$ से $A \sim 80$ के बीच के नाभिक सर्वाधिक स्थायी होते हैं इनके लिए औसत $\Delta E_{bn} \sim 8.7\,\text{MeV}$ प्रति न्यूकिलऑन होती है। $A < 50$ तथा $A > 80$ दोनो के लिए ΔE_{bn} घटती है। द्रव्यमान संख्या $A \sim 60$ के निकट बंधन ऊर्जा प्रति न्यूकिलऑन E_{bn} सर्वाधिक होती है अतः इसके संगत निकटवर्ती तत्व Fe, Ni, Co इत्यादि बहुत अधिक स्थायित्व रखते हैं ^{62}Ni के लिए बंधन ऊर्जा प्रति न्यूकिलऑन सर्वाधिक 8.8 MeV है यह प्रकृति में सबसे स्थायी नाभिक है। $^{60}_{26}Fe$ के लिए भी यह 8.8 MeV से तनिक ही कम होती है। यही कारण है कि भूक्रोड (Earth core) में सबसे अधिक पिघलता हुआ निकिल तथा लोहा पाया जाता है।

(iii) मध्यवर्ती द्रव्यमान संख्याओं $(30 < A < 170)$ के लिए E_{bn} का मान व्यवहारिक रूप से 8 MeV के लगभग नियत माना जा सकता है। इस परास में ΔE_{bn} की A पर बहुत अधिक आश्रित नहीं होना नाभिकीय बलों की लघुपरास तथा संतृप्तता के बारे में जानकारी देता है जिसे अगले अनुभाग में संक्षेप में समझाया जाएगा।

(iv) जैसा कि ऊपर उल्लेखित है मध्यवर्ती द्रव्यमान संख्या के नाभिक, उच्च द्रव्यमान संख्याओं के नाभिकों की तुलना में अधिक स्थायी हैं। अतः यदि कोई भारी नाभिक मध्यवर्ती द्रव्यमान के दो नाभिकों में टूटता है तो कुल बंधन ऊर्जा बढ़ेगी तथा विराम द्रव्यमान ऊर्जा घटेगी। अतः इस प्रक्रिया में ऊर्जा मुक्त होगी जो प्राप्त मध्यवर्ती नाभिकों की गतिज ऊर्जा अथवा अन्य किसी रूप में प्रकट होगी। यह नाभिकीय विखण्डन द्वारा ऊर्जा विमुक्त होने की संभावना अभिव्यक्त करता है जिसके बारे में हम इस अध्याय में आगे चर्चा करेंगे।

(v) इसी प्रकार कल्पना की जा सकती है कि दो हल्के नाभिक $(A \leq 10)$ संयुक्त होकर एक भारी नाभिक निर्मित सकते हैं। ऐसे हल्के नाभिक, परिणामित मध्यवर्ती नाभिक से अपेक्षाकृत कम प्रतिन्यूकिलऑन बंधन ऊर्जा रखते हैं अतः यहाँ भी कुल बंधन ऊर्जा बढ़ेगी तथा विराम द्रव्यमान ऊर्जा घटेगी। इस प्रकार यहाँ भी ऊर्जा मुक्त होगी। यह नाभिकीय संलयन की प्रक्रिया है जिसके बारे में हम आगे विवेचना करेंगे।

कुछ अन्य महत्वपूर्ण निष्कर्ष जो हम चित्र 15.2 के ग्राफ से सीधे नहीं देखे पाते, इस प्रकार हैं। सम A तथा सम Z रखने वाले नाभिक सामान्यतः स्थायी तथा बहुलता से उपलब्ध होते हैं। व्यापक रूप में विषम A व विषम Z के नाभिक अस्थाई होते हैं। अपवाद स्वरूप ^{2}H, ^{6}Li, ^{10}B, ^{14}N जो स्थायी हैं को छोड़ते हुए विषम Z तथा सम A वाले नाभिक अस्थाई होते हैं।

15.5 नाभिकीय बल (Nuclear Force)

दो प्रोटॉन (धनावेश) जो इतने निकट हैं जितना कि ये नाभिक में होते हैं एक दूसरे के बहुत अधिक स्थिर वैद्युतीय बल से प्रतिकर्षित करते हैं तब नाभिक को टूटने से कौन बचाता है? स्पष्टतः नाभिक के भीतर किसी प्रकार के प्रबल आकर्षण बल द्वारा नाभिक को बँधा रखा जाना चाहिए क्योंकि प्रकृति में उपलब्ध कई तत्वों के परमाणुओं के नाभिक स्थायी होते हैं। न्यूक्लिऑनो के अत्यल्प द्रव्यमानों तथा G के अल्पमान के कारण इनके मध्य गुरूत्वाकर्षण बल अन्तः नाभिकीय दूरियों के लिए भी इतने दुर्बल होते हैं कि वे विद्युत प्रतिकर्षण बल का प्रतिकार नहीं करते। वस्तुतः नाभिकीय भौतिकी की समस्याओं में गुरूत्वाकर्षण बल की पूर्णतया उपेक्षा की जाती है। अतः नाभिक में कोई अन्य प्रकार का बल कार्यकारी होना चाहिए जो न्यूक्लिऑनों का बाँध कर रख सके। यह बल ही नाभिकीय बल कहलाता है। नाभिकीय बल का कुल मिलाकर प्रभाव यह है कि यह नाभिकीय बल प्रोटॉनों के मध्य प्रतिकर्षी कूलॉम बलों से इतना अधिक प्रबल होता है कि नाभिक बँधा रहता है।

गुरूत्वाकर्षण अथवा विद्युत चुंबकीय बलों के लिए ज्ञात सूत्रों—न्यूटन नियम या कूलॉम नियम की तरह नाभिकीय बलों के लिए कोई सरल गणितीय सूत्र ज्ञात नहीं है। वस्तुतः आज भी नाभिकीय बल को पूर्णतः समझने के प्रयास जारी हैं। प्रयोगों के आधार पर नाभिकीय बलों के कुछ गुणात्मक अभिलक्षण नीचे दिए गए अनुसार हैं।

(i) नाभिकीय बल विद्युत आवेश पर अनाश्रित होते हैं, एक दिए पार्थक्य के लिए दो प्रोटॉनों, दो न्यूट्रॉनों अथवा एक न्यूट्रॉन व एक प्रोटॉन के मध्य लगने वाले बल लगभग समान परिमाण के होते हैं। [इलेक्ट्रॉन नाभिकीय बल से प्रभावित नहीं होते यही कारण है कि नाभिक की उच्च ऊर्जा के इलेक्ट्रॉनों से प्रकीर्णन के प्रयोग में इलेक्ट्रॉन केवल नाभिकीय आवेश के द्वारा ही प्रकीर्णित होते हैं तथा इस प्रकार के प्रकीर्णन प्रयोग से नाभिक में आवेश वितरण की जानकारी मिलती है। इसी प्रकार न्यूट्रॉन—नाभिक प्रकीर्णन प्रयोग में नाभिकीय आवेश की कोई भूमिका नहीं होती किन्तु नाभिकीय बल की होती है जिससे नाभिक में द्रव्यमान वितरण की जानकारी प्राप्त होती है]

(ii) नाभिकीय बलों की क्रिया परास बहुत ही अल्प, नाभिकीय आमाप (कुछ फैमटोमीटर) की कोटि की होती है किन्तु इस परास के भीतर नाभिकीय बल विद्युत बल से बहुत अधिक $(50 \sim 60$ गुना) होता है। नाभिकीय परास के बाहर नाभिकीय बल प्रभावी नहीं होता।

(iii) नाभिकीय बल केन्द्रीय प्रकृति के नहीं होते दो न्यूकिलऑनो के युग्म के लिए ये केवल इनके मध्य पार्थक्य पर ही निर्भर नहीं करते अपितु इनकी आपेक्षिक प्रचक्रण (spin) की दिशाओं पर भी निर्भर करते हैं।

(iv) नाभिकीय द्रव्य का घनत्व लगभग नियत होना तथा मध्यवर्ती द्रव्यमान परास में नाभिको की बंधन ऊर्जा का लगभग नियत होना यह दर्शाता है कि नाभिक में प्रत्येक न्यूक्लिऑन उपस्थित अन्य सभी न्यूक्लिऑनों से अन्तः क्रिया नहीं करता अपितु केवल अपने कुछ निकटतम न्यूकिलऑनों से ही अन्तः क्रिया करता है। (A द्रव्यमान संख्या के किसी नाभिक के एक न्यूकिलऑन पर विचार करें। यदि यह शेष सभी न्यूकिलऑनों से अन्तः क्रिया करता तो हमें ऐसी $A(A-1)/2$ अन्योन्य क्रियाएँ प्राप्त होती तब कुल बंधन ऊर्जा $A(A-1)$ के समानुपाती होती तथा इस तरह $A >> 1$ के लिए A^2 के समानुपाती होती। इसका आशय है कि अब प्रतिन्यूकिलऑन बंधन ऊर्जा A के समानुपाती होती अर्थात् लगभग नियत नहीं होती।) नाभिकीय बल का यह गुण ''नाभिकीय बल की संतृप्तता'' कहलाता है। यह विद्युत बल से भिन्न है नाभिक में प्रत्येक प्रोटॉन शेष सभी प्रोटॉनों से अन्तःक्रिया करता है (तथा अन्तः क्रियाओं की संख्या $\frac{Z(Z-1)}{2} \sim Z^2$ के समानुपाती होती है।)

(v) नाभिकीय बल सामान्यतः आकर्षी होते हैं किन्तु न्यूकिलऑनों के मध्य दूरी 1 fm की कोटि से कम होने पर इनके मध्य प्रतिकर्षण पाया जाता हैं। इसकी विस्तृत विवेचना अध्ययन के इस स्तर पर अपेक्षित नहीं है।

15.6 रेडियो सक्रियता (Radioactivity)

इस अध्याय के प्रारंभ में हमने 1896 में हेनरी बेकेरल द्वारा रेडियो एक्टिवता की खोज के उल्लेख में देखा था कि भारी तत्व यथा यूरेनियम, थोरियम इत्यादि कण या विकिरण का स्वतः उत्सर्जन करते हुए विघटित होते हैं। विघटन की इस प्रक्रिया के दौरान नवीन परमाणुओं (तत्वों) का निर्माण होता है जो स्वंय भी रेडियोएक्टिवता दर्शा सकते हैं तथा यह प्रक्रिया तब तक जारी रहती है जब तक कि किसी स्थायी तत्व का निर्माण नहीं हो जाता।

हेनरी बेकरेल द्वारा रेडियो एक्टिवता की खोज मात्र संयोगवश ही थी। उन्होंने पाया कि यूरेनियम लवण यूरेनियल पोटेशियम सल्फेट के क्रिस्टलों ने कुछ अदृश्य विकिरण उत्सर्जित किए जिन्होंने निकट रखी एक फोटोग्राफिक प्लेट जो प्रकाश रोधी आवरण से ढकी थी को भी काला कर दिया। प्रयोगों से बैकेरेल ने यह भी पाया कि ये विकिरण गैसों में आयनन की क्षमता भी रखते थे। इसके उपरान्त पौलेंड के वैज्ञानिक दम्पति मेरी क्यूरी तथा पिअरे क्यूरी ने वर्षो के अथक प्रयास के उपरान्त पिच ब्लैंड नामक अयस्क से दो नवीन तत्वों रेडियम एवं पोलोनियम की खोज की जो यूरेनियम से भी अधिक रेडियोएक्टिव थे। रदरफोर्ड ने प्रयोगों द्वारा यह प्रदर्शित किया कि रेडियो एक्टिव विकिरण तीन प्रकार के होते हैं जिन्हें उन्होंने अल्फा, बीटा तथा गामा किरणें कहा। बाद में किए गए प्रयोगों ने दर्शाया कि α (अल्फा) किरणें हीलियम नाभिकों के पुंज हैं, β (बीटा) किरणें इलेक्ट्रॉनों या पाजीट्रॉनों के पुंज तथा γ (गामा) किरणें उच्च ऊर्जा के फोटॉन हैं। प्रयोगों द्वारा यह भी सिद्ध हुआ कि रेडियोएक्टिवता, अस्थाई नाभिकों के क्षय या विघटन का ही परिणाम है। इस प्रकार रेडियो एक्टिवता एक नाभिकीय परिघटना है। रेडियो एक्टिवता के संबंध में कुछ महत्वपूर्ण तथ्य इस प्रकार है।

(i) रेडियोएक्टिवता पर बाह्य प्राचलों जैसे दाब, ताप अथवा रेडियोएक्टिव पदार्थ की प्रावस्था (ठोस, द्रव या गैस) का कोई प्रभाव नहीं होता। रेडियोएक्टिवता रासायनिक अभिक्रियाओं या रासायनिक संयोग से भी अप्रभावित रहती है (यथा यूरेनियम या इसका कोई यौगिक दोनों ही रेडियो एक्टिव होते हैं) चूंकि रासायनिक संयोग में परमाणु के बाह्य इलेक्ट्रॉनों का ही योगदान होता है अतः परमाणु के इलेक्ट्रॉनिक विन्यास का रेडियोएक्टिवता से कोई संबंध नहीं है। इसके साथ ही रेडियोएक्टिव विघटन में प्राप्त α कण, अत्यधिक ऊर्जा के β कण या उच्च ऊर्जा के γ किरण फोटॉनों का उत्सर्जन भी परमाणु के बाह्य भाग से संभव नहीं है। अतः रेडियो एक्टिवता विशुद्ध रूप से नाभिकीय परिघटना है।

(ii) किसी भी नाभिक के रेडियो एक्टिव क्षय में द्रव्यमान ऊर्जा, आवेश, रेखीय, संवेग, कोणीय संवेग जैसे संरक्षण नियमों के पालन के साथ न्यूकिलऑनों की संख्या का भी संरक्षण होना चाहिए।

(iii) सिद्धांततः कोई नाभिक X, α या β क्षय के लिए अस्थायी होगा यदि इसका द्रव्यमान इसके उत्पाद अवयवों के द्रव्यमानों के योग से अधिक हो।

(iv) रेडियोएक्टिव क्षय के प्रक्रम में प्रति परमाणु उत्सर्जित ऊर्जा कुछ MeV की कोटि की होती है जबकि रासायनिक क्रियाओं के लिए यह कुछ eV ही होती है।

15.6.1 रदरफोर्ड सोडी का रेडियोएक्टिव क्षय का नियम (Rutherford-Soddy Law of Radioactive Decay)

रेडियोएक्टिव क्षय एक यादृच्छिक प्रक्रिया है। यह एक सांख्यिकीय परिघटना है जो प्रायिकता के नियमों का पालन करती है। (वस्तुतः रेडियोएक्टिव क्षय ने ही सबसे पहले यह साक्ष्य दिया था कि उपपरमाणविक जगत (subatomic world) को नियंत्रित करने वाले नियम सांख्यिकीय होते हैं।) रेडियोएक्टिव पदार्थ के किसी प्रतिदर्श में उपस्थित परमाणुओं के विघटन के संदर्भ में प्रत्येक विघटन एक स्वतंत्र घटना है। यह बताने का कोई तरीका नहीं है कि प्रतिदर्श

में कोई दिया गया परमाणु अगले क्षण क्षय होने जा रहे परमाणुओं की अल्पसंख्या में सम्मिलित है अथवा नहीं। सभी के लिए प्रायिकता समान है। रेडियोएक्टिव विघटन के लिए नियम का प्रतिपादन रदरफोर्ड एवं सोडी द्वारा किया गया था। इस नियम के अनुसार किसी समय रेडियोएक्टि व नाभिकों की क्षय की दर $-dN/dt$ उस समय उपस्थित सक्रिय (अक्षयित) रेडियोएक्टिव नाभिकों की संख्या N के समानुपाती होती है अर्थात्

$$-\frac{dN}{dt} \propto N$$

या $$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \qquad \ldots(15.7)$$

ऋणात्मक चिन्ह इस बात का घोतक है कि क्षय प्रक्रिया में रेडियोएक्टिव नाभिकों की संख्या समय के साथ घटती जा रही है। λ एक स्थिरांक है जिसे क्षयांक या विघटन स्थिरांक या रेडियोएक्टिव स्थिरांक (decay constant or disintegration constant) कहते हैं। इसका मान रेडियोएक्टिव तत्व का अभिलाक्षणिक है तथा इसका SI मात्रक s^{-1} है। समीकरण 15.7 को समझने के लिए तर्क इस प्रकार है। मानले किसी क्षण t पर सक्रिय रेडियोएक्टिव नाभिकों की संख्या N है। इनमें से कितने नाभिक आगामी अल्प समयान्तराल dt में क्षयित होंगें? यह संख्या N तथा dt दोनों के समानुपाती होगी। प्रत्येक नाभिक के लिए समयाअन्तराल dt में क्षयित होने का अवसर (chance) है। अतः जितने अधिक नाभिक समय t पर उपस्थित होंगे उतनी ही अधिक संख्या आगामी dt समयअन्तराल में क्षयित होने जा रहे नाभिकों की होगी इसी प्रकार यदि dt में तनिक वृद्धि करें तो भी क्षय होने जा रहे नाभिकों की संख्या अधिक होगी क्योंकि अब प्रत्येक नाभिक के लिए क्षय होने के लिए अधिक अवसर होगा। अतः

$-dN \propto N dt$ या $dN = -\lambda N\, dt$

समीकरण 15.7 को पुनः व्यवस्थित करने पर

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

तब दोनों पक्षों का समाकलन करने पर

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ell n N - \ell n N_0 = -\lambda t$$

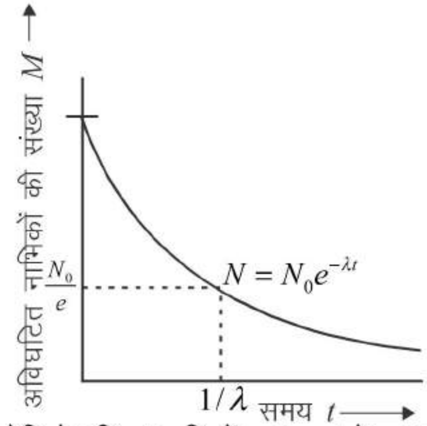
या $$\ell n \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

दोनों तरफ चार घातांकी (expenential) लेने पर

या $$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

या $$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad \ldots(15.8)$$

जहाँ N_0 समय $t = 0$ पर सक्रिय नाभिकों की संख्या है। समीकरण (15.8) से स्पष्ट है कि क्षयित होने जा रहे नाभिकों की संख्या समय के साथ चरघातांकी रूप से घटती है। इसे चित्र 15.3 में दर्शाया गया है।



चित्र 15.3 रेडियो एक्टिव नाभिकों का समय के साथ चरघातांकी रूप से क्षय

समय t में क्षयित हो चुके नाभिकों की संख्या है

$$N_0 - N = N_0 - N_0 e^{-\lambda t} = N_0\left(1 - e^{-\lambda t}\right) \ldots(15.9)$$

अतः समय t में क्षयित नाभिकों का भिन्नांश (fraction) है

$$\frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - e^{-\lambda t}$$

क्षयांक (decay constant): समीकरण (15.7) से

$$\lambda = \frac{\left|(dN/dt)\right|}{N}$$

अतः क्षयांक प्रतिपरमाणु रेडियोएक्टिव क्षय की दर है।

साथ ही $$\lambda = \left(-\frac{dN}{N}\right)\frac{1}{dt}$$

अतः क्षयांक प्रतिएकांक समय में क्षय की प्रायिकता भी है

इसके अतिरिक्त यदि समीकरण 15.8 में यदि हम $t = 1/\lambda$ लें

तब $$N = N_0 e^{-1} = \frac{N_0}{e} = 0.368\, N_0$$

प्राप्त होता है। अतः क्षयांक उस समय के व्युत्क्रम के बराबर है जिसमें सक्रिय परमाणुओं की संख्या घटकर इनकी प्रारंभिक संख्या की 1/e हो जाती है अर्थात् लगभग 36.8% नाभिक शेष रहते हैं या लगभग 63.2% नाभिक क्षयित हो जाते हैं। इसकी गणना चित्र 15.3 के ग्राफ से की जा सकती है।

सक्रियता (Activity): कई बार हम प्रतिदर्श में उपस्थित सक्रिय नाभिकों की संख्या N ज्ञात करने के बजाये प्रतिएकांक समय में क्षयित नाभिकों की संख्या ज्ञात करने के इच्छुक होते हैं, (क्योंकि यह N की तुलना में अधिक प्रायोगिक मापन योग्य राशि

होती है।) इसे प्रतिदर्श की सक्रियता कहा जाता है। यह रेडियोएक्टिव नाभिकों के क्षय की दर भी कहलाती है तथा परिभाषा से धनात्मक मानी जाती है इसे R से व्यक्त किया जाता है।

$$\text{सक्रियता } R = \left|\frac{dN}{dt}\right| \qquad \ldots(15.10)$$

समीकरण 15.7 से $\left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda N$

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

$$= R_0 e^{-\lambda t} \qquad \ldots(15.11)$$

जहाँ $R_0 = \lambda N_0 \qquad \ldots(15.12)$

प्रतिदर्श की प्रारंभिक सक्रियता है। सक्रियता का SI मात्रक बैकेरल (प्रतीक Bq) है तथा

$1\ \text{Bq} = 1$ क्षय / सेंकड

सक्रियता का पारंपरिक मात्रक क्यूरी (C_i) है। 1 क्यूरी 1 ग्राम रेडियम ^{226}Ra की सक्रियता है जिसका मान है

$1C_i = 3.7\times10^{10}$ क्षय / सेंकड

$= 3.7\times10^{10}\ \text{Bq}$

समीकरण (15.11) का ग्राफीय चित्रण भी चित्र 15.3 की तरह ही होगा केवल Y अक्ष पर N के स्थान पर R लिया जाएगा।

15.6.2 अर्द्ध आयु (Half Life)

किसी रेडियोएक्टिव तत्व के प्रतिदर्श में उपस्थित सक्रिय नाभिकों की संख्या जितने समय में अपने प्रारंभिक मान की आधी हो जाए उस समय को उस रेडियोएक्टिव तत्व की अर्द्ध आयु कहते हैं। यदि अर्द्धआयु काल को T से व्यक्त करें तो समीकरण 15.8 में समय $t = T$ के लिए $N = N_0/2$ प्राप्त होना चाहिए अर्थात्

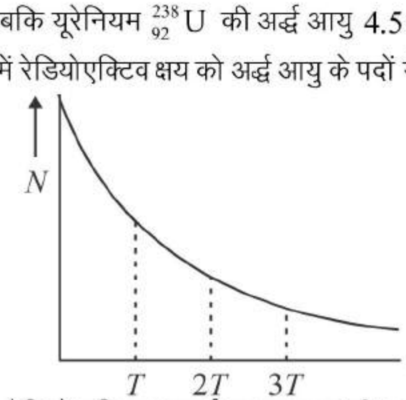
$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}$$

या $e^{\lambda T} = 2$

या $\lambda T = \ell n 2$

$$\therefore \quad T = \frac{\ell n 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad \ldots(15.13)$$

अतः किसी रेडियो एक्टिव की अर्द्ध आयु उसके क्षयांक के व्युत्क्रमानुपाती है। किसी दिए गए रेडियोएक्टिव पदार्थ के लिए यह नियतांक है। इस पर बाह्य प्राचलों यथा दाब, ताप इत्यादि का कोई प्रभाव नहीं होता है। चूंकि सक्रियता R भी λ क्षयांक के साथ चरघातांकी रूप से घटती है अतः एक अर्द्धआयुकाल में सक्रियता भी अपने प्रारंभिक मान की आधी रह जाती है। विभिन्न तत्वों के लिए अर्द्ध आयु में वृहत अन्तर होता है। अर्द्ध आयु काल की परास सेकण्ड के दस लाख वें भाग से लेकर करोड़ों वर्ष तक होती है। उदाहरण के लिए पोलोनियम के एक समस्थानिक $^{214}_{84}P_0$ की आयु मात्र 10^{-15} s होती है जबकि यूरेनियम $^{238}_{92}U$ की अर्द्ध आयु 4.5×10^{9} वर्ष है। चित्र 15.4 में रेडियोएक्टिव क्षय को अर्द्ध आयु के पदों में दर्शाया गया है।



चित्र 15.4 रेडियो एक्टिव पदार्थ का चरघातांकी क्षय, प्रत्येक अर्द्ध आयु काल के पश्चात उपस्थित सक्रिय नाभिकों की संख्या (अथवा सक्रियता) अपने पूर्ववर्ती अर्द्धआयु काल के समय उपस्थित सक्रिय नाभिकों की संख्या (सक्रियता) की आधी रह जाती है।

समीकरण (15.13) का उपयोग करने पर समीकरण (15.8) पुनः निम्न प्रकार से लिखी जा सकती है

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-(\ell n 2)t/T}$$

$$= \frac{N_0}{\left[e^{\ell n 2}\right]^{t/T}} = \frac{N_0}{2^{t/T}} \qquad \left[\because\ e^{\ell n 2} = 2\right]$$

$$\text{या} \quad \frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} \qquad \ldots(15.14)$$

तथा इसी प्रकार

$$\frac{R}{R_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} \qquad \ldots(15.15)$$

उपर्युक्त समीकरणें T तथा λ की गणना में बहुत उपयोगी होती है जैसा कि आगे आंकिक उदाहरणों में देखा जा सकेगा।

15.6.3 माध्य आयु (Mean Life)

रेडियोएक्टिव क्षय के नियम के अनुसार रेडियोएक्टिव प्रतिदर्श के सक्रिय परमाणुओं की संख्या समय के साथ चरघातांकी रूप से घटती जाती है परन्तु पूर्ण प्रतिदर्श का विघटन अनंत समय में ही संभव है अर्थात् सक्रिय परमाणुओं की आयु की परास शून्य से अनंत तक हो सकती है। किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ की माध्य आयु इसके समस्त परमाणुओं की आयु के योग तथा इनसे परमाणुओं की कुल संख्या का अनुपात होता है। इसे τ से व्यक्त करते हैं तब

$$\tau = \frac{\text{समस्त परमाणुओं की आयु का योग}}{\text{परमाणुओं की कुल संख्या}} \ldots(15.16)$$

मान लीजिए कि प्रारंभ $(t = 0)$ किसी रेडियोएक्टिव तत्व के प्रतिदर्श में N_0 परमाणु हैं तथा t समय पश्चात् परमाणुओं की संख्या N रह

जाती है। अब अति सूक्ष्म समय अन्तराल dt में dN परमाणुओं का विघटन होता है। क्योंकि dt अतिसूक्ष्म है अतः यह माना जा सकता है कि इन सभी dN परमाणुओं की आयु t ही है तब इन सभी dN परमाणुओं की कुल आयु tdN होगी। यह स्पष्ट है कि प्रतिदर्श में कुछ परमाणुओं का आयुकाल बहुत अल्प तथा कुछ का बहुत अधिक होता है अतः सभी N_0 परमाणुओं की आयु का योग होगा

$$= \int_0^\infty t\,dN$$

समीकरण 15.7 से

$$= \int_0^\infty t\,dN = \int_0^\infty \lambda\,Nt\,dt = \int_0^\infty \lambda\,N_0 e^{-\lambda t} \cdot t\,dt$$

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

$$= \lambda \int_0^\infty t\,e^{-\lambda t} dt$$

उपर्युक्त समाकलन को हल करने पर प्राप्त परिणाम है

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \qquad \dots(15.17)$$

अतः किसी रेडियोएक्टिव तत्व के परमाणुओं की औसत आयु उसके क्षयांक के व्युत्क्रमानुपाती होती है। हम पूर्व में ही देख चुके हैं कि समय $t = 1/\lambda$ पर रेडियोएक्टिव नाभिकों की संख्या प्रारंभिक मान की $1/e$ रह जाती है अतः माध्य आयुकाल को उपर्युक्तानुसार भी परिभाषित किया जा सकता है।

समीकरण 15.13 तथा 15.17 से यह देखा जा सकता है कि

$$T = \frac{\ell n2}{\lambda} = \tau \ell n2 = 0.693\tau \qquad \dots(15.18)$$

उपर्युक्त व्युत्पन्न समस्त समीकरणें सांख्यिकीय प्रकृति की हैं। ये प्रत्येक व्यष्टिगत नाभिक के यथार्थ व्यवहार की भविष्यवाणी नहीं करती। एक अर्द्ध आयु काल में सक्रिय परमाणुओं में से आधे क्षयित होंगे पर इनमें से कौनसा इस अर्धआयु काल में विघटित होगा यह कभी भी नहीं बतलाया जा सकता। रेडियोएक्टिव क्षय की समीकरणें केवल तभी भली भांति कार्य करेगी जब N का मान पर्याप्त बड़ा हो।

उदाहरण 15.5 किसी रेडियोएक्टिव प्रतिदर्श में 1000 परमाणु है जिनके लिए अर्द्ध आयु T है। तब कितने परमाणु T/2 समय पश्चात शेष रहेंगे।

हल: सूत्र $\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T}$

उपयोग में लें। यहाँ $t = T/2$ दिया है अतः $\frac{t}{T} = \frac{1}{2}$

$$\therefore \quad \frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{1/2} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

या $$N = \frac{1}{\sqrt{2}} N_0 = (0.707) \times 1000 = 707 \text{ परमाणु}$$

उदाहरण 15.6 किसी रेडियोएक्टिव प्रतिदर्श की सक्रियता 7.5 h में अपने प्रारंभिक मान का 1/32 रह जाती है। प्रतिदर्श के परमाणुओं की अर्द्ध आयु ज्ञात करें।

हल: दिया है $\frac{R}{R_0} = \frac{1}{32}, t = 7.5h$

अतः सूत्र $\frac{R}{R_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T}$

में मान रखने पर

$$\frac{1}{32} = \left(\frac{1}{2}\right)^{7.5/T}$$

या $$\left(\frac{1}{2}\right)^5 = \left(\frac{1}{2}\right)^{7.5/\mathrm{T}}$$

या $$5 = \frac{7.5}{\mathrm{T}}$$

$$\therefore \quad \mathrm{T} = \frac{7.5}{5} = 1.5\,\mathrm{h}$$

उदाहरण 15.7 ^{235}U के 10 kg प्रतिदर्श की सक्रियता क्या होगी यदि ^{235}U की अर्द्ध आयु 7.04×10^8 वर्ष है?
[1 वर्ष $= 3.15 \times 10^7$ s लें तथा ^{235}U का परमाणु भार 252 g/mol मानें]

हल: M परमाणु भार के परमाणुओं से निर्मित m द्रव्यमान के प्रतिदर्श में परमाणुओं (नाभिको) की संख्या होगी

$$N = \frac{m}{M} N_A \text{ जहाँ } N_A \text{ आवोग्रादा संख्या है}$$

संगत मान रखने पर

$$\mathrm{N} = \frac{10 \times 10^3}{235}\left[6.02 \times 10^{23}\right] = 2.56 \times 10^{25}$$

अतः सक्रियता $R = \lambda N = \frac{(\ell n2)N}{T}$

$$= \frac{0.693 \times \left(2.56 \times 10^{25}\right)}{7.04 \times 10^8 \text{ year}}$$

$= 2.52\times10^{16}$ विघटन / वर्ष

$= \dfrac{2.52\times10^{16}}{3.15\times10^{7}}$ विघटन / s

$= 8.0\times10^{8}$ Bq

उदाहरण 15.8 ^{214}Bi एक नाभिक है जो दो क्षय चैनलों के द्वारा क्षयित हो सकता है इनमें से एक प्रक्रम में यह क्षयांक λ_1 के साथ α क्षय करता है जो इस प्रकार है

$$^{214}Bi \xrightarrow{\lambda_1} {}^{210}T\ell + {}^{4}_{2}He$$

अथवा यह क्षयांक λ_2 के साथ β^- क्षय करता है जो इस प्रकार है

$$^{214}Bi \xrightarrow{\lambda_2} {}^{214}Po + {}^{0}_{-1}e$$

इन प्रक्रमों के संगत अर्द्ध आयु काल क्रमशः T_1 व T_2 हैं। तब ^{214}Bi के किसी प्रतिदर्श में कुछ परमाणु प्रथम प्रक्रम द्वारा तो कुछ द्वितीय प्रक्रम द्वारा क्षयित होते हैं। ऐसे प्रतिदर्श की प्रभावी अर्द्ध आयु के लिए सूत्र ज्ञात करें।

हल: प्रश्नानुसार प्रथम प्रक्रम के लिए क्षयांक λ_1 व द्वितीय प्रक्रम के लिए क्षयांक λ_2 हैं। यह प्रायिकता कि कोई सक्रिय नाभिक dt समय में प्रथम प्रक्रम द्वारा क्षयित हो, $\lambda_1 dt$ होगी। इसी प्रकार इतने ही समय dt में नाभिक के द्वितीय प्रक्रम द्वारा क्षयित होने की प्रायिकता $\lambda_2 dt$ होगी। अतः यह प्रायिकता कि नाभिक प्रथम या द्वितीय किसी भी प्रक्रम के द्वारा क्षयित हो $\lambda_1 dt + \lambda_2 dt$ होगी। यदि प्रभावी क्षयांक λ हो यह प्रायिकता λdt भी होगी

अतः $\lambda dt = \lambda_1 dt + \lambda_2 dt$

इस प्रकार प्रभावी क्षयांक

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 \qquad \ldots (i)$$

तथा चूंकि $\lambda_1 = \dfrac{0.693}{T_1},\ \lambda_2 = \dfrac{0.693}{T_2}$

अतः यदि प्रभावी अर्द्ध आयु T है तब

$$\lambda = \frac{0.693}{T_2}$$

समीकरण (i) में, λ_1, λ_2 व λ के मान रखने पर

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}$$

या $$T = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$$

उदाहरण 15.9 किसी रेडियोएक्टिव प्रक्रम में माना कोई नाभिक A क्षयांक λ_A के साथ किसी अन्य नाभिक B में बदल रहा है। नाभिक B स्वयं भी रेडियोएक्टिव है तथा क्षयांक λ_B के साथ एक अन्य नाभिक C में बदल रहा है। मान लीजिए किसी समय t पर A व B के नाभिकों की संख्या N_A तथा N_B है। वह प्रतिबंध ज्ञात कीजिए जब B के परमाणुओं की संख्या नियत हो जाती है।

हल: किसी अल्प समय अन्तराल t से $t+dt$ के मध्य मूल नाभिक A के क्षय होने वाले नाभिकों की संख्या $\lambda_A N_A dt$ होगी। यह इस अन्तराल में उत्पन्न होने वाले संतति (daughter) नाभिकों B की उत्पत्ति की संख्या भी होगी। B से C में क्षय के कारण इसी समय अन्तराल में B के क्षयित नाभिकों की संख्या $\lambda_B N_B dt$ होगी नाभिक B के नाभिकों की संख्या नियत होगी यदि इनकी उत्पत्ति की दर इनके क्षय की दर के बराबर हों, अर्थात्

$$\lambda_A N_A dt = \lambda_B N_B dt$$

या $$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B$$

उदाहरण 15.10 ^{238}U, 4.47×10^{8} y की अर्द्धआयु के साथ ^{206}Pb में क्षयित होता है। चट्टान के एक प्रतिदर्श में ^{238}U का 1.19 mg तथा ^{206}Pb का 3.09 mg पाया जाता है। यह मानते हुए कि समस्त सीसा यूरेनियम से ही प्राप्त हुआ है, चट्टान की आयु का अनुमान लगाए।

हल: मान ले यहाँ N_F = समय t पर उत्पाद ^{206}Pb नाभिकों की संख्या

तथा N_I = समय t पर ^{238}U नाभिकों की संख्या है

$m_{Pb} = Pb$ का प्रतिदर्श में द्रव्यमान

$m_U = U$ का प्रतिदर्श में द्रव्यमान

$M_{Pb} = pb$ का परमाणु भार

$M_u = U$ का परमाणु भार है तथा N_A = आवोगाद्रो संख्या है तब

$$N_F = \frac{m_{pb}}{M_{Pb}} N_A,\ N_I = \frac{m_U}{M_U} N_A$$

$$\therefore \quad \frac{N_F}{N_I} = \frac{m_{Pb}}{m_U}\frac{M_u}{M_{Pb}}$$

$$= \frac{3.09(mg)}{1.19(mg)}\frac{238 g/mol}{206 g\, mol} = 3$$

यदि ^{238}U के प्रारंभिक नाभिकों की संख्या N_0 है तो

$$N_F + N_I = N_0$$

या $3N_I + N_I = N_0$

या $N_I = \dfrac{N_0}{4}$

अर्थात् समय t पर U के नाभिकों की संख्या इसके मूलमान (चट्टान के निर्माण के समय के मान) की 1/4 रह गई है जिसका आशय है कि चट्टान की आयु ^{238}U की अर्द्धआयु की दो गुना अर्थात् $2\times4.47\times10^8 = 8.94\times10^8\,y$ है।

उदाहरण 15.11 किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ जिसकी अर्द्धआयु 22 वर्ष है को क्षयित होकर 10% होने में कितना समय लगेगा?

हल: सूत्र $\dfrac{N}{N_0} = \left(\dfrac{1}{2}\right)^{t/T}$

से $\dfrac{10}{100} = \left(\dfrac{1}{2}\right)^{t/22}$ या $\dfrac{1}{10} = \left(\dfrac{1}{2}\right)^{t/22}$

या $(2)^{t/22} = 10$

दोनों पक्षों का log लेने पर

$$\frac{t}{22}\log 2 = \log 10$$

$$\frac{t}{22}\times 0.301 = 1$$

$$t = \frac{22}{0.301} = 73y$$

15.7 α, β, एवं γ (किरणें) एवं उनके गुण (α, β and γ Particles (rays) and their Properties)

रेडियो एक्टिव प्रक्रम में उत्सर्जित α, β एवं γ किरणों को सम्मिलित रूप में नाभिकीय विकिरण भी कहा जाता है। इस अनुभाग में हम इन विकिरणों के मुख्य गुणों का विवेचन करेंगे।

15.7.1 α कणों के गुण (Properties of α Particles)

α कणों के प्रमुख गुण निम्नलिखित हैं

(i) α कण धनावेशित कण हैं। वस्तुतः यह द्विआयनित हीलियम परमाणु अर्थात् हीलियम के नाभिक (^4_2He) हैं जिनका द्रव्यमान प्रोटॉन के द्रव्यमान का चार गुना तथा आवेश प्रोटॉन (इलेक्ट्रॉनिक आवेश) के आवेश का दो गुना होता है।

(ii) आवेशित होने के कारण इनका विद्युत एवं चुंबकीय क्षेत्र दोनों से विक्षेप होता है। इनका द्रव्यमान अधिक होने के कारण किसी दिए गए विद्युत या चुंबकीय क्षेत्र से इनका विक्षेप β कणों की तुलना में कम होता है।

(iii) इन कणों का वेग $1.4\times10^7 \sim 1.7\times10^7\ m/s$ परास में होता है अर्थात् $v_\alpha \sim 0.05c$ (जहाँ c प्रकाश की निर्वात में चाल है) होता है।

(iv) α कण गैसों में से गुजरने पर उनके परमाणुओं से टकराकर इलेक्ट्रॉन बाहर निकाल देते हैं जिससे गैसों का आयनीकरण हो जाता है। इनकी आयनन क्षमता, β कणों की अपेक्षा 100 गुनी तथा γ किरणों की अपेक्षा 1000 गुनी होती है। इसका कारण α कणों का अपेक्षाकृत अधिक आवेश तथा अपेक्षाकृत कम वेग होता है।

(v) सामान्य ताप एवं दाब पर α कणों द्वारा वायु में तय की गई दूरी को α कण की परास (range) कहते हैं अर्थात् वह दूरी जहाँ तक चलने पर α कण की आयनन क्षमता समाप्त हो जाती है α कण की परास कहलाती है। वायु में परास 2.7 cm से 8.6 cm तक होती है। गाइगर एवं नटाल के नियम के अनुसार α क्षय के लिये क्षयांक λ तथा α कण की ऊर्जा E में संबंध इस प्रकार है

$$\ell n\ \lambda = A_1 + B_1 \ell n\ E \qquad \ldots(15.19)$$

अतः $\ell n\ \lambda$ व $\ell n\ E$ में ग्राफ सरल रेखा होना चाहिए। अब चूंकि प्रयोगों के अनुसार α कणों की परास $R_\alpha \propto E^{3/2}$ या $R_\alpha \propto v^3$ अतः इन परिणामों के उपयोग से संबंध $\ell n\ \lambda = A + B \ell n\ R$ प्राप्त किया जा सकता है। अतः $\ell n\ \lambda$ व $\ell n\ R$ में ग्राफ सरल रेखा होता है। B का मान सभी रेडियोएक्टिव श्रेणियों (जिनका अध्याय में आगे उल्लेख किया गया है) के लिए समान होता है।

(vi) α कणों की भेदन क्षमता β तथा γ किरणों की अपेक्षा बहुत कम होती है। ये किसी कार्डशीट या एल्यूमिनियम की 0.1 mm मोटी चादर द्वारा ही रोक लिए जा सकते हैं। इसका कारण इनका अपेक्षाकृत भारी होना तथा इनकी आयनन क्षमता का अधिक होना है जिसके कारण किसी पदार्थ में से गुजरने पर β कणों अथवा γ किरणों की तुलना में इनकी ऊर्जा तेजी से घटती है। पदार्थ द्वारा रोके जाने पर α कण ऊष्मीय प्रभाव उत्पन्न करते हैं।

(vii) ये फोटोग्राफिक प्लेट पर हल्का प्रभाव डालते हैं। ये जिंक सल्फाइड (ZnS) तथा बेरियम प्लेटिनो सायनाइड जैसे पदार्थों पर पड़ने के बाद प्रतिदीप्ति उत्पन्न करते हैं।

(viii) α उत्सर्जन के पश्चात नाभिक का परमाणु क्रमांक Z, 2 से तथा द्रव्यमान संख्या 4 से घटती है एवं नाभिक के आकार में कमी आती है।

(ix) α कणों का ऊर्जा स्पैक्ट्रम विविक्त रेखिल होता है जो नाभिक में विविक्त ऊर्जा स्तरों का द्योतक है।

15.7.2 β किरणों के गुण (Properties of β Particles)

β किरणे दो प्रकार की होती हैं। ऋणात्मक β क्षय में प्राप्त β कण वस्तुतः नाभिक से उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन होते हैं। (इन कणों के उत्सर्जन में समय नाभिक के न्यूट्रॉन प्रोटॉन में बदलते हैं)। कतिपय प्रकरणों में जिन्हें धनात्मक β क्षय कहा जाता है प्राप्त β कण धनात्मक होते हैं जो पॉजीट्रॉन(positron) कहलाते हैं। सामान्यतः β क्षय से आशय ऋण β क्षय से ही होता है β कणों के प्रमुख गुण निम्नलिखित हैं

(i) ऋण β किरणों पर आवेश $= -e = -1.6\times10^{-19}$ C (इलेक्ट्रानिक आवेश) है वस्तुतः ये इलेक्ट्रॉन ही है जिनका उद्गम स्त्रोत नाभिक है। धन β किरणों अर्थात् पाजीट्रॉन कणों पर आवेश +e होता है। पॉजीट्रॉन इलेक्ट्रॉन का प्रतिकण है।

(ii) आवेशित होने के कारण ये विद्युत क्षेत्र एवं चुंबकीय क्षेत्र दोनों से विक्षेपित होती हैं इनका विक्षेप α कणों की तुलना में बहुत अधिक होता है। β^- कणों के विक्षेप की दिशा α कणों के विक्षेप की दिशा के विपरीत होती है जबकि β^+ कणों के लिए यह α कणों के विक्षेप की दिशा में ही होती है।

(iii) β कणों का वेग प्रकाश के वेग के 1% से लेकर 99% तक होता है। इसके अतिरिक्त एक ही स्त्रोत से उत्सर्जित β कणों के वेगों तथा इस कारण गतिज ऊर्जाओं में बहुत भिन्नता होती है।

(iv) एक ही रेडियोएक्टिव पदार्थ से उत्सर्जित β कणों में गतिज ऊर्जा शून्य से लेकर एक अधिकतम मान के मध्य संतत रूप से वितरित होती है। अतः β किरणों का ऊर्जा स्पैक्ट्रम संतत होता है। इसका कारण β कणों की परास निश्चित नहीं होती है किन्तु α कणों की तुलना में काफी अधिक सेन्टी मीटर के कुछ दशकों तक होती है।

(v) β किरणें भी आयनीकरण करती हैं किन्तु इनकी आयनीकरण की क्षमता α कणों की आयनीकरण क्षमता का लगभग 1/100 वां भाग होती है। पर γ किरणों की तुलना में 100 गुना अधिक होती है।

(vi) इनकी भेदन क्षमता α किरणों की तुलना में लगभग 100 गुना अधिक किन्तु γ किरणों की तुलना में 1/100 वाँ भाग होती है। β किरणें 1 cm मोटाई की एल्यूमिनियम शीट का भी भेदन कर जाती हैं।

(vii) ये भी फोटोग्राफिक प्लेट को प्रभावित करती हैं। इनके द्वारा जिंक सल्फाइड, बेरियम प्लेटिनोसाइनाइड, विलेमाइट तथा कैल्शियम टंग्सटेट इत्यादि में प्रतिदीप्ति उत्पन्न होती है।

(viii) β क्षय में परमाणु संख्या Z में इकाई से परिवर्तन होता है जबकि द्रव्यमान संख्या A अप्रभावित रहती है। नाभिक के आकार में कोई परिवर्तन नहीं होता।

15.9.3 γ किरणों के गुण (Properties of γ Rays)

गामा किरणों के मुख्य गुण निम्नलिखित हैं

(i) गामा किरणें अति उच्च आवृत्ति या अति लघुतरंग दैर्ध्यों की विद्युत चुंबकीय तरंगे या फोटॉन पुंज हैं। इनकी तरंग दैर्ध्य 10^{-4} Å से 1 Å परास में है। ये अनावेशित होती है तथा γ किरण फोटॉनो का विराम द्रव्यमान शून्य होता है।

(ii) अनावेशित होने के कारण ये विद्युत व चुम्बकीय क्षेत्रों द्वारा विक्षेपित नहीं होती।

(iii) इनका वेग प्रकाश के वेग के बराबर होता है।

(iv) इनके द्वारा गैसों का बहुत ही क्षीण आयनीकरण होता है। क्योंकि ये अनावेशित है तथा बहुत अधिक वेग से चलती हैं।

(v) इनकी परास बहुत अधिक वायु में कई सौ मीटर तक होती है।

(vi) इनकी भेदन क्षमता α व β किरणों की अपेक्षा बहुत होती हैं। ये 30 cm मोटी लोहे की प्लेट को भी पार कर सकती है। यदि I_0 तीव्रता की γ किरणें किसी पदार्थ में प्रवेश करती है तो पदार्थ के भीतर x गहराई पर γ किरणों की तीव्रता $I = I_0 e^{-\mu x}$ द्वारा दी जहाँ पदार्थ का अवशोषण गुणांक है। पदार्थ की प्रकृति के साथ–साथ γ किरण की तरंग दैर्ध्य $(\mu \propto \lambda^3)$ भी निर्भर करता है।

(vii) ये फोटोग्राफिक प्लेट को प्रभावित करती हैं तथा जिंक सल्फाइड, बोरियम प्लेटो सायइनाइड इत्यादि में प्रतिदीप्ति उत्पन्न करती हैं।

(viii) X किरणों की तरह γ किरणों का भी क्रिस्टलों द्वारा विवर्तन होता है। परन्तु इनके उद्गम स्त्रोत भिन्न–भिन्न हैं। X किरणों की उत्पत्ति परमाणवीय गुण है जो परमाणु के ऊर्जा स्तरों में इलेक्ट्रॉन के संक्रमण के कारण है जबकि γ किरणें नाभिक के किसी उत्तेजित अवस्था स्तर से निम्न ऊर्जा स्तर या मूल ऊर्जा स्तर में संक्रमण के कारण हैं। अतः इनका उत्सर्जन नाभिकीय गुण है।

(ix) γ किरणों की द्रव्य में अन्योन्य क्रिया के कारण इनकी ऊर्जा के अनुरूप प्रकाश विद्युत प्रभाव, काम्पटन प्रभाव तथा युग्म उत्पादन की घटनाएँ होती हैं।

इनके अतिरिक्त उपर्युक्त सभी प्रकार के नाभिकीय विकिरण पदार्थ में अवशोषिण होने पर ऊष्मीय प्रभाव भी उत्पन्न करते हैं। इनका मानव शरीर पर प्रतिकूल प्रभाव पड़ता है जिसमें शरीर का झुलसना, लंबे समय तक विकिरण के प्रभाव में रहने पर कैंसर इत्यादि रोग होना प्रमुख हैं।

15.8 α, β एवं γ क्षय (α, β and γ Decay)

अब तक 1000 से अधिक न्यूक्लाइड ज्ञात हैं परन्तु इनमें से अधिकांश अस्थायी हैं। कोई अस्थायी नाभिक किसी प्रकार का कण उत्सर्जन कर अपना संघटन परिवर्तित करता है जबकि स्थायी नाभिक अपना संघटन बनाए रखता है। दो मुख्य प्रक्रम जिनके द्वारा

नाभिक क्षयित होता है एल्फा क्षय तथा बीटा क्षय है। एल्फा क्षय या बीटा क्षय के उपरान्त कई बार उत्पाद नाभिक अपनी उत्तेजित अवस्था में बनता है तथा मूल अवस्था में आने के प्रक्रम में गामा किरणें उत्सर्जित करता है। उपर्युक्त सभी प्रकार के क्षय प्रक्रमों में सभी ज्ञात संरक्षण नियमों यथा द्रव्यमान ऊर्जा संरक्षण, संवेग एवं कोणीय संवेग संरक्षण, आवेश संरक्षण इत्यादि का पालन होना चाहिए तथा न्यूक्लिऑन संख्या भी संरक्षित रहनी चाहिए। इसके अतिरिक्त यह भी आवश्यक है कि क्षयित होने जा रहे नाभिक का द्रव्यमान क्षय उत्पादों के द्रव्यमानों के योग में अधिक से इस अनुभाग में हम एल्फा क्षय, बीटा क्षय तथा गामा क्षय का अध्ययन करेंगे।

15.8.1 α क्षय (α Decay)

हम जानते है कि α कण वस्तुतः हीलियम नाभिक ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ है। अतः किसी नाभिक से α कण उत्सर्जन की प्रक्रिया में उत्पादित विघटन नाभिक की द्रव्यमान संख्या क्षय होने वाले मूल नाभिक की तुलना में 4 से कम तथा परमाणु क्रमांक 2 से कम होती है। चूंकि परमाणु क्रमांक परिवर्तित हो रहा है अतः उत्पाद नाभिक का रासायनिक प्रतीक मूल नाभिक से भिन्न होगा। क्षय होने जा रहे नाभिक को पितृ (parent) नाभिक तथा क्षय उत्पाद नाभिक को पुत्री (daughter) नाभिक भी कहा जाता है। अतः किसी नाभिक ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ के α क्षय को प्रतीकात्मक रूप से निम्नानुसार प्रदर्शित किया जा सकता है

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \qquad \ldots(15.20)$$

उपर्युक्त समीकरण में स्पष्टतः न्यूकिलऑन संख्या का संरक्षण एवं आवेश संरक्षण हो रहा है। एल्फा क्षय के लिए एक उदाहरण है।

$$ {}^{238}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \qquad \ldots 15.21$$

α क्षय उन सभी नाभिको में होता है जिनके लिए द्रव्यमान संख्या $A > 210$ है। हम समझ सकते हैं कि भारी नाभिको में प्रोटॉनों के मध्य कूलाम प्रतिकर्षण बल के कारण ये अस्थायी होते हैं। अल्फा कण उत्सर्जन से नाभिक की द्रव्यमान संख्या में तथा आकार में कमी आती है तथा नाभिक स्थायित्व की ओर अग्रसर होता है। जैसा कि आवश्यक है, क्षय के प्रक्रम में क्षय उत्पादों की कुल द्रव्यमान–ऊर्जा मूल नाभिकी द्रव्यमान की द्रव्यमान–ऊर्जा से कम होनी चाहिए। प्रारंभिक द्रव्यमान ऊर्जा तथा क्षय उत्पादों की कुल द्रव्यमान ऊर्जा के अन्तर को प्रक्रम की विघटन ऊर्जा अथवा Q मान कहते हैं। यदि पितृ नाभिक का द्रव्यमान M_x, पुत्री नाभिक का द्रव्यमान M_y तथा α कण का द्रव्यमान M_α से व्यक्त हो तो

$$Q = \left(M_x - M_y - M_\alpha\right)c^2 \qquad \ldots(15.22)$$

विघटन ऊर्जा Q निकाय की बंधन ऊर्जा में कमी को निरूपित करती है तथा पुत्री नाभिक एवं α कण की गतिज ऊर्जा के रूप में प्रकट होती है। ऊर्जा संरक्षण के साथ संवेग संरक्षण नियम का भी पालन होना चाहिए। यदि पितृ नाभिक विराम अवस्था में है तो संवेग संरक्षण से, क्षय के उपरान्त पुत्री नाभिक को तथा α कण को बराबर व विपरीत संवेग से गतिमान होना होगा। परन्तु $M_y >> M_\alpha$ होने से α कण की चाल पुत्री नाभिक Y की चाल से बहुत अधिक होगी तथा इस कारण उपलब्ध गतिज ऊर्जा का अधिकांश भाग α कण से संबद्ध होगा। संवेग संरक्षण तथा ऊर्जा संरक्षण नियम से यह दर्शाना सरल है कि उत्सर्जित α कण की गतिज ऊर्जा K_α का मूल नाभिक की द्रव्यमान संख्या तथा Q मान से संबंध है

$$K_\alpha = \frac{A-4}{A}Q \qquad \ldots(15.23)$$

चूंकि $A > 210$ है अतः K_α, Q से तनिक ही कम होगी।

समीकरणों (15.22) तथा (15.23) के अनुसार α कण एक विविक्त ऊर्जा K_α के साथ उत्सर्जित होने चाहिए। व्यवहार में हम पाते हैं कि α कणों का उत्सर्जन विविक्त ऊर्जाओं के समूह के रूप में होता है जिसमें अधिकतम ऊर्जा समीकरण 15.22 से दी जाती है। ऐसा इस कारण से है कि परमाणु की तरह नाभिक की ऊर्जा भी क्वांटीकृत होती है। समीकरण 15.22 में हमने माना था कि क्षय के बाद पुत्री नाभिक अपनी मूल अवस्था में है। यदि उत्पत्ति के क्षण पुत्री नाभिक उत्तेजित अवस्था में है तो क्षय के लिए कम ऊर्जा उपलब्ध है तथा α कण अधिकतम ऊर्जा से कम ऊर्जा की बजाय उत्सर्जित होगा। यह तथ्य कि α कणों के लिए ऊर्जाओं का विविक्त समूह है नाभिक में ऊर्जा के क्वांटीकरण का सीधा साक्ष्य है।

यह प्रश्न उठना स्वाभाविक है कि कोई भारी नाभिक α कण का उत्सर्जन कर क्षयित होता है तथा प्रोटॉन या न्यूट्रान का उत्सर्जन करके नहीं। ऐसा इस कारण नहीं होता क्योंकि n अथवा p के उत्सर्जन के बाद उत्पादों $Y+n$ या $Y+p$ के द्रव्यमानों का योग मूल नाभिक के द्रव्यमान से अधिक हो जाता है। इस परिस्थिति में $Q<0$ होगी अर्थात् प्रक्रिया स्वतः नहीं हो सकती। वस्तुतः ${}^{2}_{4}\mathrm{He}$ नाभिक की उच्च प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा ($\sim 7.1\,\mathrm{MeV}$) उत्पादों $\mathrm{Y}+\alpha$ के द्रव्यमानों को इतना घटा देती है कि α क्षय संभव हो जाता है।

जैसा कि ऊपर वर्णित किया गया है α क्षय में नाभिक की द्रव्यमान संख्या 4 से कम हो जाती है। कई बार पुत्री नाभिक भी स्वयं रेडियोएक्टिव होता है तथा α तथा β क्षय कर क्षयित होता है। यदि मूल नाभिक की द्रव्यमान संख्या $4n$ (n एक पूर्णांक है) तो पुत्री नाभिक तथा आगामी क्षय श्रृंखला में आने वाले सभी अन्य नाभिकों की द्रव्यमान संख्या भी किसी पूर्णांक की 4 गुना होगी। इसी प्रकार यदि मूल नाभिक की द्रव्यमान संख्या $4n+1$ है तो क्षय श्रृंखला में सभी नाभिकाके की द्रव्यमान संख्या भी $4n+1$ से दी जाएगी जहां प्रत्येक क्षय के लिए n इकाई से घटेगा। इस प्रकार हम देखते है कि α क्षय के लिए चार श्रृंखलाएँ संभव हैं जो इस पर निर्भर करती हैं कि A, 4n, 4n+1, 4n + 2 तथा 4n+3 में से किस के बराबर है।

इनमें से तीन श्रृंखलाएँ प्रकृति में उपलब्ध हैं तथा 4n+1 वाली श्रृंखला प्रकृति में नहीं पाई जाती है क्योंकि इसका सर्वाधिक आयुकाल वाला तत्व (स्थायी अन्तिम उत्पाद 209 Bi को छोड़ते हुए) ^{237}Np है जिसकी अर्द्ध आयु 2×10^6 y है जो पृथ्वी की आयु से बहुत कम है अतः यह श्रृंखला लुप्त हो चुकी है। इन श्रेणियों के नाम, मूल नाभिक एवं अन्तिम उत्पाद नीचे सारणी 15.2 में उल्लेखित हैं

सारणी 15.2 विभिन्न रेडियोएक्टिव श्रेणियाँ

द्रव्यमान संख्या	श्रेणी	पितृ नाभिक	अन्तिम स्थायी उत्पाद
4n	थोरियम	$^{232}_{90}$Th	$^{208}_{82}$Pb
4n+1	नेप्ट्यूनियम	$^{237}_{93}$Np	$^{209}_{83}$Bi
4n+2	यूरेनियम	$^{238}_{82}$U	$^{206}_{82}$Pb
4n+3	एक्टीनियम	$^{235}_{82}$U	$^{207}_{82}$Pb

विभिन्न α उत्सर्जक नाभिको के लिए अर्द्धआयु के मान भिन्न होते हैं। उदाहरण के लिए ^{238}U नाभिक के लिए अर्द्धआयु 4.47×10^9 y है जबकि ^{232}U के लिए यह मात्र 550 s है। अब यह प्रश्न उठना स्वाभाविक है कि यद्यपि प्रत्येक α क्षय में ऊर्जा मुक्त होती है तो ^{238}U के लिए α क्षय में बहुत अधिक समय लगना तथा ^{238}U में बहुत कम समय लगना, ऐसा क्यों हो रहा है। न्यूटोनियन यांत्रिकी इन प्रश्नों का उत्तर नहीं देती यहाँ तक कि न्यूटोनियन यांत्रिकी के अनुसार α क्षय प्रक्रम होना संभव नहीं है। इन प्रश्नों का उत्तर क्वांटम यांत्रिकी में निहित है जिसकी विस्तृत विवेचना यहाँ संभव नहीं है। जानकारी की दृष्टि से यहाँ हम α क्षय के लिए गैमो (Gammow) द्वारा प्रतिपादित α क्षय सिद्धांत को अति सरल शब्दों में संक्षेप में समझाने का प्रयत्न करेंगे।

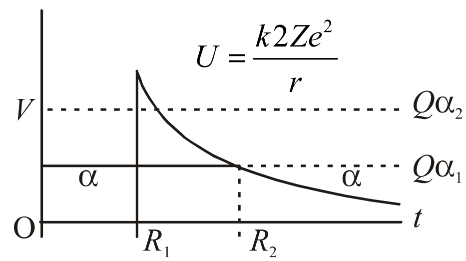
इस सिद्धांत के अनुसार α कण को नाभिक से उत्सर्जन से पूर्व नाभिक में अस्तित्व में माना जाता है। चित्र 15.5 में α कण तथा अवशेष नाभिक के लिए स्थितिज ऊर्जा फलन को इनके पार्थक्य r के फलन के रूप में दर्शाया गया है। यह ऊर्जा

(i) नाभिक के भीतर आकर्षी नाभिकीय बलों से संबद्ध ऊर्जा $(r < R_1)$ तथा

(ii) क्षय के पश्चात नाभिक के बाहर नाभिक व α कण के मध्य कूलाम प्रतिकर्षण बल से संबद्ध स्थितिज ऊर्जा $(r > R_1)$ का संयोजन है। चित्र से स्पष्ट है कि नाभिक की सीमा पर एक विभवरोधिका (potential barrier) उपस्थित है। Q_α से चिन्हित रेखा α क्षय प्रक्रम की विघटन ऊर्जा जो α कण की गतिज ऊर्जा के लगभग बराबर है को दर्शाती है। चित्र से स्पष्ट है कि क्षेत्र $R_1 < r < R_2$ में α कण की कुल ऊर्जा E इसकी स्थितिज ऊर्जा U से कम है अर्थात् गतिज ऊर्जा ऋणात्मक है जोकि असंभव है। अर्थात् न्यूटोनियन यांत्रिकी के अनुसार α क्षय नहीं हो सकता।

α क्षय को समझाने के लिए यदि कण के साथ संबद्ध द्रव्य तरंग पर विचार करें तो क्वांटम यांत्रिकी के अनुसार इस तरंग के लिए विभव प्राचीर को पार करने के लिए परिमित प्रायिकता होती है। इसे सुरंगन प्रभाव (Tunnel effect) कहा जाता है। इसका आशय है कि α क्षय संभव है। यह प्रायिकता विभव प्राचीर की विमाओं की ऊँचाई एवं चौड़ाई का संवेदी फलन होती है। जिन α क्षय प्रक्रमों के लिए Q_α कम तथा प्रभावी रोधिका ऊँचाई अधिक है उनमें यह प्रायिकता बहुत कम होती है। ^{238}U जैसे नाभिकों में ऐसा ही होता है। गणनाओं से पता चलता है कि यदि α कण को बार–बार रोधिका पर टकराता हुआ माना जाए तो रोधिका पार करने से पूर्व इसे 10^{38} बार रोधिका पर टकराना होता है।

अतः ऐसे नाभिक के लिए α उत्सर्जन में अधिक समय लिया जाएगा तथा क्षय के लिए अर्द्ध आयु अधिक होगी।



चित्र 15.5 नाभिक से α क्षय के लिए स्थितिज ऊर्जा फलन। छायाकित भाग कूलाम विभवरोधिका को दर्शाता है जो क्षय प्रक्रम का विरोध करती है।

अब हम ऐसे α क्षय पर विचार करते हैं जिसकी विघटन ऊर्जा $Q'_\alpha (> Q_\alpha)$ है। चित्र से स्पष्ट है कि ऐसे α कण के लिए विभव रोधिका की ऊँचाई अपेक्षाकृत कम है साथ ही रोधिका की चौड़ाई भी कम है। अब चूंकि रोधिका पार करने की प्रायिकता ऊंचाई तथा चौड़ाई मे कमी के साथ तेजी से बढ़ती है ऐसे α कणों का उत्सर्जन शीघ्र होगा अर्थात् ऐसे नाभिकों की अर्द्धआयु अपेक्षाकृत कम होगी।

15.8.2 β क्षय (β decay)

जब कोई नाभिक एक इलेक्ट्रॉन अथवा एक पाजीट्रॉन उत्सर्जित कर क्षयित होता है तो क्षय प्रक्रिया β क्षय कहलाती है। ऋण β (β^-) क्षय में नाभिक से एक इलेक्ट्रॉन तथा एक एन्टीन्यूट्रीनो का उत्सर्जन होता है तथा पुत्री नाभिक की परमाणु संख्या Z, इकाई से बढ़ जाती है किन्तु द्रव्यमान संख्या अपरिवर्तित रहती है। प्रतीकात्मक रूप में β^- क्षय निम्न समीकरण से निरूपित किया जाता है।

$$^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + \bar{v} \qquad \ldots(15.24)$$

इसका एक उदाहरण इस प्रकार है

$$^{234}_{90}\text{Th} \longrightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + {}^{o}_{-1}e + \bar{v}$$

यहाँ देखा जा सकता है कि आवेश एवं न्यूक्लिऑन संख्या दोनों का संरक्षण हो रहा है। एन्टीन्यूट्रीनो $\bar{v}$ एक उदासीन कण है जिसका विराम द्रव्यमान अत्यल्प है। यह द्रव्य से इतनी क्षीण अन्योन्य क्रिया करता है कि इसका संसूचन कर पाना बहुत कठिन है। प्रक्रिया से पहले कुल आवेश +90 e है तथा प्रक्रिया के बाद भी आवेश = 91 e + (–e) + 0 = 90 e. चूंकि इलेक्ट्रॉन तथा न्यूट्रीनो दोनों ही न्यूक्लिऑन नहीं है अतः प्रक्रिया के पूर्व एवं पश्चात न्यूक्लिऑनों की संख्या 234 ही है।

यह आश्चर्यजनक लग सकता है कि नाभिक इलेक्ट्रॉन (पाजीट्रॉन) एवं न्यूट्रीनों को उत्सर्जित करता है क्योंकि हम जानते है कि नाभिक में केवल न्यूट्रॉन एवं प्रोटॉन ही होते हैं। परन्तु पूर्ववर्ती अध्याय में हमने देखा है कि परमाणु फोटॉन उत्सर्जित करते हैं जबकि हम कभी यह नहीं कहते हैं कि परमाणुओं में फोटॉन होते हैं हम यह कहते है कि फोटॉन उत्सर्जन की प्रक्रिया के दौरान निर्मित होते हैं। ऐसा ही β क्षय के अर्न्तगत इलेक्ट्रॉन (पाजीट्रॉन) तथा एन्टीन्यूट्रीनो (न्यूट्रीनो) के लिए होता है।इनका निर्माण उत्सर्जन प्रक्रम के समय ही होता है। ऋण β क्षय में नाभिक में एक न्यूट्रॉन अपने आप को निम्नलिखित समीकरण के अनुसार एक प्रोटॉन में रूपान्तिरित करता है।

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{v} \qquad \ldots(15.25)$$

यह प्रक्रिया विशिष्ट प्रकार के दुर्बल नाभिकीय बलों (जो व्यापक रूप में क्षीण अन्योन्य क्रियाओं(Weak interactions) के नाम से जाने जाते हैं) के अन्तर्गत संपन्न होती है। यहाँ देखा जा सकता है कि न्यूक्लिऑन संख्या इसलिए नहीं बदल रही है क्योंकि एक संघटक न्यूक्लिऑन दूसरे प्रकार के संघटक न्यूकिलाऑन में बदल रहा है। [जैसा कि हम आगे देखेंगे ऐसा ही पाजीट्रान(β^+) क्षय में होगा]

β^- क्षय में विघटन ऊर्जा इस प्रकार ज्ञात की जा सकती है। मान ले X तथा Y के नाभिकीय द्रव्यमान m_x व m_y हैं तथा इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान m_e है तब द्रव्यमान क्षति

$$\Delta m = m_x - \left[m_y + m_e\right] \qquad \ldots(15.26)$$

जहाँ एन्टीन्यूट्रीनो को द्रव्यमानहीन माना गया है। यदि उपर्युक्त समीकरण के दक्षिण पक्ष में हम Zm_e जोंड़े एवँ घटाएँ तो

$$\Delta m = \left(m_x + Zm_e\right) - \left[m_y + \left(Z+1\right)m_e\right]$$

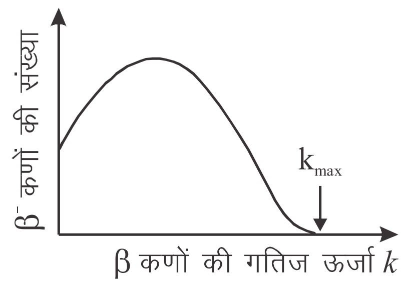
या $$\Delta m = \left(M_x\right) - \left(M_y\right) \qquad \ldots(15.27)$$

प्राप्त होगा जहाँ M_x तथा M_y क्रमशः X व Y के परमाणवीय द्रव्यमान हैं। तब विघटन ऊर्जा

$$Q = \Delta mc^2 = \left(M_x - M_y\right)c^2 \qquad \ldots(15.28)$$

से परिकलित की जा सकती है। यहाँ भी हमने क्षय से पूर्व तथा पश्चात् परमाणविक इलेक्ट्रॉनों की बंधन ऊर्जा के कारण होने वाले अल्प अन्तर की उपेक्षा की है।

विघटन ऊर्जा Q क्षय उत्पादों की गतिज ऊर्जा के रूप में होती है। अवशेष नाभिक का द्रव्यमान इलेक्ट्रॉन तथा एक्टीन्यूट्रीनो की तुलना में बहुत अधिक होने के कारण यह माना जा सकता है कि ऊर्जा Q में इलेक्ट्रॉन एवं एन्टीन्यूट्रीनो की ही सहभागिता होगी। इस प्रकार उत्तर्सजित β^- कणो की ऊर्जा शून्य से लेकर एक अधिकतम मान Q के बीच कुछ भी हो सकती है जो इस बात पर निर्भर करेगा कि एन्टीन्यूट्रीनो द्वारा इस ऊर्जा के कितने भाग में सहभागिता की जा रही है (यथा यदि इलेक्ट्रॉन की गतिज ऊर्जा शून्य है तो एन्टीन्यूट्रीनो की Q होगी अथवा इसके विपरीत) अतः β^- क्षय में उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों का ऊर्जा स्पैक्ट्रम शून्य तथा Q मान के मध्य संतत होता है (चित्र 15.6)। ध्यातव्य है कि α कणों के लिए ऊर्जा स्पैक्ट्रम विविक्त होता है।



चित्र 15.6 β कणों का ऊर्जा स्पैक्ट्रम

धन β क्षय में नाभिक से एक पॉजीट्रॉन तथा एक न्यूट्रीनो उत्सर्जित होता है। इसप्रकार के क्षय का प्रतीकात्मक निरूपण इस प्रकार है

$${}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{1}e^+ + v \qquad \ldots(15.29)$$

तथा इसके लिए एक उदाहरण इस प्रकार है

$${}^{12}_{11}Na \longrightarrow {}^{12}_{10}Ne + {}^{0}_{1}e^+ + v$$

यहाँ द्रव्यमान संख्या A अपरिवर्तित रहती है जबकि परमाणु संख्या Z एक से कम हो जाती है। एन्टीन्यूट्रीनो की तरह न्यूट्रीनो v भी आवेशहीन तथा लगभग द्रव्यमानहीन है। उत्सर्जित पॉजीट्रॉन तथा न्यूट्रीनों का भी नाभिक में पहले से अस्तित्व नहीं होता बल्कि क्षय के समय नाभिक में एक प्रोटॉन, एक न्यूट्रॉन एक पाजीट्रॉन तथा एक न्यूट्रीनो में बदलता है

$$p \longrightarrow n + e^+ + v \qquad \ldots(15.30)$$

β^+ क्षय में भी β^- क्षय की तरह न्यूक्लिऑन संख्या एवं आवेश का संरक्षण होता है। β^+ क्षय के लिए विघटन ऊर्जा

$$Q = \left(M_x - M_y - 2m_e\right)c^2 \qquad \ldots(15.31)$$

से दी जाती है। यहाँ भी मुक्त पॉजीट्रॉनों की गतिज ऊर्जा शून्य से लेकर Q मान तक संतत रूप से बदलती है।

कतिपय नाभिको में एक अन्य प्रकार का बीटा क्षय प्रेक्षित होता है जिसे **इलेक्ट्रॉन प्रगहण (electron capture)** कहते है। ऐसे कुछ न्यूकिलाइड है जिनमें ऊर्जा संरक्षण की दृष्टि से β^+ क्षय संभव नहीं है किन्तु इनमें परमाणु के किसी कक्षीय इलेक्ट्रॉन (सामान्यतः K कक्ष का इलेक्ट्रान) का नाभिक द्वारा प्रगहण किया जाकर प्रोटॉन इससे संयुक्त होकर एक न्यूट्रॉन बनाता है जो नाभिक में ही रहता है तथा एक न्यूट्रीनों उत्सर्जित होता है। इस प्रकार के क्षय के लिए प्रतीकात्मक रूप से समीकरण निम्नलिखित है।

$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{o}_{-1}e \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + \nu \qquad \ldots(15.32) $$

इस प्रकार के प्रक्रम का एक उदाहरण है

$$ {}^{64}_{29}Cu + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{64}_{28}Ni + \nu $$

तथा प्रक्रिया के लिए Q मान है

$$ Q = \left(M_x - M_y\right)c^2 \qquad \ldots(15.33) $$

जब नाभिक द्वारा परमाणवीय इलेक्ट्रॉन ग्रहण किया जाता है तब इसके संगत कक्षा में रिक्तता उत्पन्न हो जाती है जिसे भरने के लिए इससे उच्च ऊर्जा स्तर के इलेक्ट्रॉन इस कक्षा में संक्रमण करते हैं जिसके परिणाम स्वरूप X किरणें उत्पन्न होती है।

β क्षय से हमें ज्ञात होता है कि न्यूट्रॉन व प्रोटॉन मूल कण नहीं हैं। साथ ही यह भी ध्यान देने योग्य है कि प्रक्रम $n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu}$ नाभिक के बाहर व भीतर दोनों स्थितियों में संभव है। अर्थात् एक विलगित न्यूट्रॉन एक प्रोटॉन में क्षयित हो सकता है किन्तु प्रक्रम $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ नाभिक के बाहर संभव नहीं है चूंकि न्यूट्रॉन का द्रव्यमान प्रोटॉन के द्रव्यमान से अधिक है अतः विलगित प्रोटॉन का न्यूट्रॉन में क्षय संभव नहीं है। नाभिक के भीतर इस प्रकार के प्रक्रम में क्योंकि नाभिकों की बंधन ऊर्जाओं की भी भूमिका है ऐसा प्रक्रम संभव है।

15.8.3 न्यूट्रीनो परिकल्पना (Neutrino Hypothesis)

सन् 1930 से पहले β क्षय को समझाने के लिए यह अवधारणा थी कि क्षय के प्रक्रम में मूल नाभिक, अवशेष नाभिक तथा इलेक्ट्रॉन (या पाजीनीट्रॉन) में ही बदलता है अर्थात् β क्षय प्रक्रम इस प्रकार माना गया

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{o}_{-1}e \qquad \ldots(15.34) $$

अथवा
$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{o}_{+1}e \qquad \ldots(15.34a) $$

परन्तु इस अवधारणा के आधार पर नाभिक से इलेक्ट्रॉन का उत्सर्जन समझाना तो संभव था किन्तु β क्षय के अन्य प्रायोगिक प्रेक्षणों को समझाना वैज्ञानिकों के लिए टेढ़ी खीर थी। यदि उपर्युक्त प्रक्रमों को सही मान लिया जाए तो मुख्य समस्या β कणों के संतत ऊर्जा स्पैक्ट्रम को समझाना था। उपर्युक्त प्रक्रम में क्योंकि क्षय के बाद केवल दो ही उत्पाद संभव है तथा उत्पाद नाभिक Y का द्रव्यमान, इलेक्ट्रान (अथवा पाजीट्रॉन) के बहुत अधिक होने के कारण उत्सर्जित ऊर्जा Q लगभग पूर्णतः β कणों को ही प्राप्त होनी थी दूसरे शब्दों में β कणों की ऊर्जा अद्वितीय होनी चाहिए थी जो कि प्रायोगिक प्रेक्षणों के ठीक विपरीत है। ऐसा प्रतीत हो रहा था मानों कि β क्षय में ऊर्जा संरक्षण सिद्धांत का पालन नहीं हो रहा है। ऐसी ही समस्या संवेग संरक्षण को लेकर थी। यदि क्षय उत्पाद केवल दो ही है तथा प्रारंभ में नाभिक X विराम में है तो संवेग संरक्षण के अनुसार नाभिक Y तथा इलेक्ट्रॉन को बराबर परिमाण के संवेग से विपरीत दिशाओं में गमन करना चाहिए परन्तु प्रायोगिक प्रेक्षणों में उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन प्रतिक्षिप्त नाभिक Y से विभिन्न कोणों पर उत्सर्जित होते हुए पाए गए। इसी प्रकार की समस्याएँ कोणीय संवेग के संरक्षण को लेकर भी हुई। एक बार तो वैज्ञानिक जगत में इस समस्या के समाधान को लेकर यह मत सा बनने लगा कि β क्षय का प्रक्रम एक अपवाद है जिसमें ऊर्जा संवेग एवं कोणीय संवेग इत्यादि नियमों का पालन नहीं होता।

सन 1930 में वैज्ञानिक पॉउली (Pauli) ने इस समस्या का हल ढूंढने के लिए परिकल्पना प्रस्तुत की कि ऊर्जा, संवेग एवं कोणीय संवेग इत्यादि नियमों का पालन करने के लिए आवश्यक है कि प्रक्रम में एक अन्य कण का उत्सर्जन भी होना चाहिए। बाद में फर्मी ने इस कण का नाम न्यूट्रीनो (अंग्रेजी भाषा मेंneutrino, little neutral one को इंगित करता है) रखा क्योंकि आवेश संरक्षण के लिए इसे उदासीन तथा द्रव्यमान–ऊर्जा संरक्षण के लिए इसे लगभग शून्य विराम द्रव्यमान का होना चाहिए। हम देख चुके है कि किस प्रकार न्यूट्रीनों की उपस्थिति β कण के संतत ऊर्जा स्पैक्ट्रम को समझाती है। विराम द्रव्यमान शून्य होने के उपरान्त भी ऊर्जा के कारण न्यूट्रीनों में संवेग होता है अतः संवेंग संरक्षण सिद्धांत को भी समझाया जा सकता है। न्यूट्रीनों एंव इलेक्ट्रानों के सदिश संवेगों का योग प्रतिक्षिप्त नाभिक के संवेग के परिमाण के बराबर तथा इसके विपरीत दिशा में होता है। इसी प्रकार न्यूट्रीनो के लिए प्रचकण ½ $\hbar$ माना जाकर कोणीय संवेग संरक्षण की अनुपालना भी सुनिश्चित की गई जिसका विस्तृत अध्ययन क्षेत्र की सीमाओं के कारण हम नहीं कर पा रहे हैं एन्टीन्यूट्रीनो, न्यूट्रीनो का प्रतिकण है जो एक गुण जिसे कुण्डलता (helicity) कहा जाता है को छोड़ अन्य सभी बातों में न्यूट्रीनो के समान है। न्यूट्रीनो या एन्ट्रीन्यूट्रीनो द्रव्य से नगण्य अन्योन्य क्रियाएँ करते हैं अतः इनका संसूचन बहुत मुश्किल था। अंततः सन् 1956 में रेन्स तथा कोवान (Reiens and Cowan) ने इन कणों की संसूचन करने में सफलता प्राप्त की।

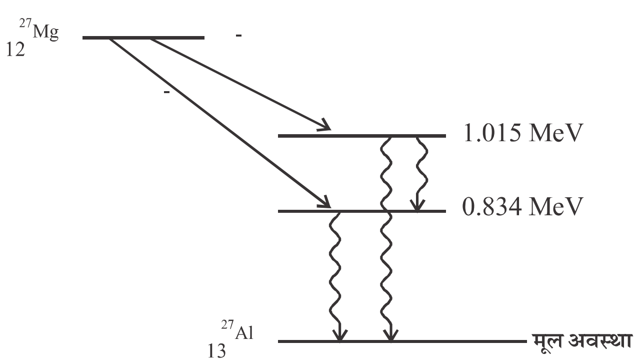
इस प्रकार पॉउली की परिकल्पना ने न केवल संरक्षण सिद्धांतों की पुष्टि की वरन यह भी दर्शाया कि किस प्रकार संरक्षण सिद्धांत नवीन कणों की खोज में सहायक होते हैं।

15.8.4 γ क्षय (γ Decay)

एक नाभिक का उन अवस्थाओं में भी अस्तित्व हो सकता है जिनमें इसकी ऊर्जा इसकी मूल अवस्था से अधिक है। यह उसी प्रकार से है जैसा कि परमाणुओं में होता है पर यहाँ अन्तर यह है कि परमाणवीय ऊर्जा स्तर eV या keV में होते हैं जबकि नाभिकीय ऊर्जा स्तर MeV परास में होते हैं। किसी उत्तेजित नाभिक को इसके प्रतीक के ऊपर * का चिन्ह लगाकर व्यक्त करते है। उत्तेजित नाभिक के किसी निम्न ऊर्जा स्तर अथवा मूल ऊर्जा स्तर में संक्रमण करने पर प्रारंभिक एवं अन्तिम ऊर्जा स्तरों की ऊर्जाओं के अन्तर के बराबर ऊर्जा के फोटॉन उत्सर्जित होते हैं। इन्हें γ किरण फोटॉन करते हैं। γ किरण फोटॉनों की ऊर्जा कईMeV कोटि की होती है। सामान्यतः α या β क्षय के उपरान्त के प्राप्त पुत्री नाभिक उत्तेजित अवस्था में बनते हैं। अतः α या β क्षय के बाद γ क्षय होता है। प्रतीकात्मक रूप से γ क्षय को निम्नानुसार लिखा जाता है।

$$ {}_Z^AX^* \longrightarrow {}_Z^AX + \gamma \qquad \ldots(15.35)$$

γ क्षय में द्रव्यमान संख्या A व परमाणु संख्या Z नहीं बदलती है अतः एक तत्व का दूसरे में रूपांतरण नहीं होता। γ क्षय में सभी ज्ञात संरक्षण नियमों का पालन होता है एवं γ किरणों का ऊर्जा स्पैक्ट्रम विविक्त होता है। चित्र 15.7 में ${}_{12}^{27}Mg$ नाभिक का क्रमागत β उत्सर्जनों एवं γ उत्सर्जनों के द्वारा ${}_{13}^{27}\mathrm{Al}$ में क्षय दर्शाया गया है।



चित्र 15.7 ${}_{12}^{27}\mathrm{Mg}$ का β^- उत्सर्जन के बाद γ क्षय करते हुए ${}_{13}^{27}\mathrm{Al}$ में विघटन

उदाहरण 15.12 रेडियोएक्टिव नाभिक ${}_{90}^{228}\mathrm{Th}$ के उत्तरोतर क्षय के उपरान्त अन्ततः ${}_{83}^{213}\mathrm{Bi}$ में परिवर्तन के प्रक्रम में उत्सर्जित α व β कणों की संख्या ज्ञात कीजिए।

हल: दिए प्रक्रम

$$ {}_{90}^{228}\mathrm{Th} \longrightarrow {}_{83}^{212}\mathrm{Bi} $$

के लिए द्रव्यमान संख्या व परमाणु संख्या में नेट कमी क्रमशः है

$$\Delta A = 228 - 212 = 16$$

तथा $\quad \Delta Z = 90 - 83 = 7$

चूंकि β क्षय में द्रव्यमान संख्या अपरिवर्तित रहती है अतः ΔA में परिवर्तन α उत्सर्जन के संगत होना चाहिए। चूंकि एक α क्षय में द्रव्यमान संख्या 4 से घटती है अतः उत्सर्जित α कणों की संख्या $16/4 = 4$ होनी चाहिए। परन्तु 4α कणों के उत्सर्जन से Z में अपेक्षित कमी $= 4 \times 2 = 8$ अतः Z का अन्तिम मान 82 होना चाहिए परन्तु प्रश्नानुसार Z का अन्तिम मान 83 है। यह तब ही संभव है जब केवल एक β^- कण भी उत्सर्जित होता है जिसके कारण Z, 82 के स्थान पर $82 + 1 = 83$ प्राप्त होगा। इस प्रकार प्रक्रम में 4α तथा $1\beta^-$ कण उत्सर्जित होंगे।

उदाहरण 15.13 ${}_{97}^{238}\mathrm{U}$ नाभिक, 4.5×10^9 वर्ष की अर्द्ध आयु के साथ α क्षय करता है। क्षय की समीकरण लिखिए तथा निम्नलिखित आंकड़ो की सहायता से उत्सर्जित α कणों की गतिज ऊर्जा का अनुमान लगाइए।

$$\mathrm{M}\left({}_{92}^{238}\mathrm{U}\right) = 238.0507\,\mathrm{u}$$

$$\mathrm{M}\left({}_{2}^{4}\mathrm{He}\right) = 4.0026\,\mathrm{u}$$

$$\mathrm{M}\left({}_{90}^{234}\mathrm{Th}\right) = 234.0435\,\mathrm{u}$$

गणितीय सुविधा के लिए $\mathrm{u} = 931\,\mathrm{MeV}/c^2$ मानें तथा नाभिक को प्रारंभ में स्थिर मानें

हल: वांछित क्षय समीकरण है

$$ {}_{92}^{238}\mathrm{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\mathrm{Th} + {}_{2}^{4}\mathrm{He} $$

इस अभिक्रिया के लिए विखंडन ऊर्जा इस प्रकार से है

$$Q = \left[\mathrm{M}\left({}_{92}^{238}\mathrm{U}\right) - \mathrm{M}\left({}_{90}^{234}\mathrm{Th}\right) + \mathrm{M}\left({}_{2}^{4}\mathrm{He}\right)\right]c^2$$

विभिन्न राशियों के मान रखने पर

$$Q = [238.0507 - 234.0435 - 4.0026] = c^2$$

$$= [0.0046] \times 931 = 4.28\,\mathrm{MeV}$$

यह मानते हुए कि प्रारंभ में ${}_{92}^{238}\mathrm{U}$ नाभिक विराम में था, संवेग संरक्षण नियम से

$$0 = \mathbf{p} \;\; + \mathbf{p}_{\mathbf{Th}}$$

$\therefore \quad p_\alpha = p_{Th}$

$$\therefore \quad \frac{K_\alpha}{K_{Th}} = \frac{p_\alpha^2/2m_\alpha}{p_{Th}^2/2m_{Th}} = \frac{m_{Th}}{m_\alpha} = \frac{A-4}{4}$$

(जहाँ A मूल नाभिक की द्रव्यमान संख्या है)

या $\quad K_{Th} = \dfrac{4}{A-4} K_\alpha$

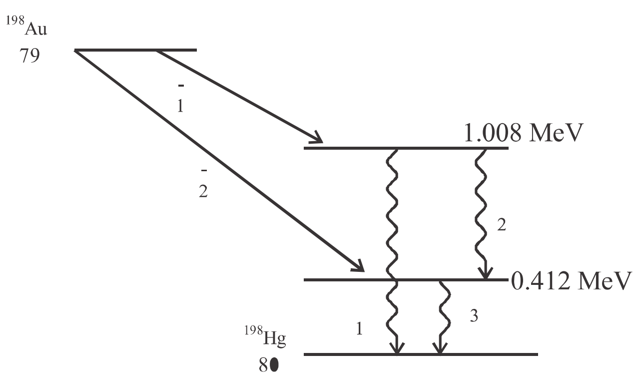
किन्तु $K_\alpha + K_{Th} = Q$

$$K_\alpha + \frac{4K_\alpha}{A-4} = Q$$

या $K_\alpha = \frac{A-4}{A} Q$

$$= \frac{238-4}{238} \times 4.28 = 4.20\,\text{MeV}$$

उदाहरण 15.14 सलंग्न चित्र में प्रदर्शित क्षय योजना में β कणों की अधिकतम गतिज ऊर्जा तथा γ क्षय में विकिरण आवृतियाँ ज्ञात करो। दिया है



$$M\left({}^{198}_{79}Au\right) = 197.9682\,u,$$

$$M\left({}^{198}_{80}Hg\right) = 197.9667\,u$$

$$1u = 931\,\text{MeV}/c^2 \text{ मानें}$$

हल: β^- क्षय में यदि पुत्री नाभिक अपनी मूल अवस्था में बनता है तो β^- कणों को उपलब्ध अधिकतम गतिज ऊर्जा Q मान के बराबर होती है जो इस प्रकार दी जाती है

$$Q = \left[M\left({}^{198}_{79}Au\right) - M\left({}^{198}_{80}Hg\right)\right]c^2$$

$$= [197.9682u - 197.9667u]c^2 \times 931\,\text{MeV}/c^2$$

$$= 1.396\,\text{MeV}$$

परन्तु प्रश्न में β_1^- से इंगित β कणों के उत्सर्जन में पुत्री नाभिक अपनी द्वितीय उत्तेजित अवस्था में बन रहा है जो मूल ऊर्जा स्तर से 1.008 MeV उच्च है अतः ऐसे β कणों को उपलबध अधिकतम गतिज ऊर्जा होगी

$$k(\beta_1) = 1.396 - 1.008 = 0.288\,\text{MeV}$$

इसी प्रकार β_2^- से इंगित β कणों के लिए पुत्री नाभिक प्रथम उत्तेजित अवस्था में बन रहा है जो कि मूल अवस्था से0.412 MeV उच्च है अतः ऐसे कणों को उपलब्ध अधिकतम गतिज ऊर्जा होगी

$$k(\beta_2) = 1.396 - 0.412 = 0.984\,\text{MeV}$$

चित्र में प्रदर्शित विभिन्न संक्रमणों के लिए आवृतियाँ $\nu = \frac{\Delta E}{h}$ से ज्ञात की जा सकती है जो इस प्रकार है

$$\nu(\gamma_1) = \frac{1.008\times10^6 \times 1.6\times10^{-19}\,J}{6.63\times10^{-34}\,J\cdot s} = 2.62\times10^{20}\,\text{Hz}$$

$$\nu(\gamma_2) = \frac{(1.008-0.412)\times10^6\times1.6\times10^{-19}}{6.63\times10^{-34}} = 1.63\times10^{20}\,\text{Hz}$$

$$\nu(\gamma_3) = \frac{0.412\times10^6\times1.6\times10^{-19}}{6.63\times10^{-34}} = 0.99\times10^{20}\,\text{Hz}$$

उदाहरण 15.15 β^+ क्षय ${}^{25}A\ell \rightarrow {}^{25}Mg + e^+ + \nu$ के लिए Q मान ज्ञात करें। दिया है $M\left({}^{25}A\ell\right) = 24.990u$ $M\left({}^{25}Mg\right) = 24.9858u$

हल: β^+ क्षय में Q मान के लिए

$$Q = \left[M\left({}^{25}A\ell\right) - M\left({}^{25}Mg\right) - 2m_e\right]c^2$$

जहाँ m_e इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान है

$$\therefore\ Q = [24.9904u - 24.9858u]c^2 - 2[0.511\,MeV]$$

(उपरोक्त व्यंजक के अंतिम दर में इलेक्ट्रॉन के द्रव्यमान के तुल्य ऊर्जा का प्रयोग किया गया है)

$$= [0.0046]\times931\,MeV - 1.022\,MeV$$

$$= 4.282 - 1.022 = 3.26\,MeV$$

15.9 नाभिकीय ऊर्जा (Nuclear Energy)

ऊर्जा के विभिन्न रूपों से आप सुपरिचित हैं। आइंसटीन द्रव्यमान ऊर्जा समीकरण के ज्ञान के बाद आप यह भी जानते हे कि द्रव्य अपने आप में ऊर्जा का भंडार हैं। परन्तु हमारे दैनिक जीवन में कार्य आने वाली ऊर्जा कुछ विशिष्ट रूपों में ही वांछित होती है। उदाहरण के लिए भोजन पकाने, पानी गर्म करने के लिए ऊष्मा ऊर्जा चाहिए जबकि पंखे, कूलर, विद्युत बल्ब इत्यादि युक्तियों के लिए हमें विद्युत ऊर्जा चाहिए। कोयला, प्राकृतिक गैस, ऑक्सीजन सबमें आन्तरिक ऊर्जा है किन्तु इनसे सीधे ही ऊष्मा प्राप्त नहीं की जा सकती। इसके लिए इनका दहन आवश्यक है जिसमें वस्तुतः रासायनिक अभिक्रियाएं उपस्थित है। रासायनिक अभिक्रियाओं में

वस्तुतः हम दहनशील पदार्थों के परमाणुओं की बाह्य इलेक्ट्रानों की व्यवस्थाएं परिवर्तित कर अधिक स्थायी संयोजनों का निर्माण करते है। इसी प्रकार किसी नाभिकीय निकाय से भी हम विभिन्न नाभिकीय अभिक्रियाओं द्वारा ऊर्जा प्राप्त कर सकते हैं। बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन संबंधी अध्ययन में हम देख चुके है कि मध्यवर्ती द्रव्यमान के नाभिका की प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा अधिक होने के कारण ये अपेक्षाकृत अधिक स्थायी होते है तथा स्थायित्व प्राप्त करने के लिए भारी नाभिक मध्यवर्ती नाभिकों में विखंडित होकर ऊर्जा विमुक्त कर सकते हे या हल्के नाभिक संलयन की प्रक्रिया द्वारा स्थायित्व प्राप्त कर ऊर्जा विमुक्त कर सकते है इन दोनों ही प्रक्रमों में हम न्यूक्लिऑनों को पुनः व्यवस्थित कर अधिक स्थायी संयोजन प्राप्त करते है।हम यह भी जानते है कि रासायनिक प्रक्रमों में इलेक्ट्रानों से संबद्ध ऊर्जा कुछ eV से KeV कोटि मान रखती है जबकि नाभिकीय प्रक्रमों में न्युक्लिऑनों से संबंध ऊर्जा कुछ MeV कोटि मान की होती है। यद्यपित पारंपरिक ईंधन के दहन या नाभिकीय ईंधन यूरेनियम के विखंडन दोनों में ही ईंधन की विराम द्रव्यमान ऊर्जा में कमी ही विमुक्त ऊर्जा के रूप में प्रकट होती है पर नाभिकीय विखंडन में विराम द्रव्यमान का एक बडा अंश ऊर्जा के अन्य रूप में प्रकट होता है जो पारंपरिक इंधन कोयला, गैस इत्यादि की तुलना में बहुत अधिक (कई लाख गुना) होता है। उदाहरण के रूप में सिद्धांततः 1 kg कोयले के दहन से प्राप्त ऊर्जा से 100 W का एक बल्ब 8 घंटो तक प्रकाशित किया जा सकता है जबकि 1 kg ^{235}U के विखंडन से यही बल्ब लगभग 3×10^4 y तक प्रकाशित किया जा सकता है। अब आपको नाभिकीय ऊर्जा का महत्व समझ आ गया होगा।

विखण्डन के अतिरिक्त नाभिकीय संयलन भी नाभिकीय ऊर्जा का स्त्रोत है जिसका अध्ययन हम इस अध्याय के अंत में करेंगे। यहां यह भी ध्यान देने योग्य है कि वर्तमान में लोकप्रिय वैकिल्पक ऊर्जा स्त्रोतो में से एक सौर ऊर्जा के मूल में भी नाभिकीय ऊर्जा ही है।

15.10 नाभिकीय विखंडन (Nuclear Fission)

सन् 1932 में न्यूट्रॉन की खोज के कुछ वर्ष उपरान्त फर्मी ने विभिन्न तत्वों पर न्यूट्रॉनों की बम वर्षा करने पर कुछ नवीन रेडियोएक्टिव तत्वों की उत्पति होना पाया। फर्मी के अनुसार न्यूट्रॉन उदासीन होने के कारण नाभिक की सतह पर पहुंचने पर किसी कूलाम प्रतिकर्षण बल का अनुभव नहीं करते अतः मंदगामी न्यूट्रॉन भी भारी नाभिको में प्रवेश कर इनके न्यूकिलऑनों से अन्तःक्रिया कर सकते है। तापीय न्यूट्रॉन (Thermal Neutrons) ऐसे न्यूट्रॉन है जो कक्ष ताप पर द्रव्य के साथ तापीय साम्य में होते है।300 K ताप पर ऐसे न्यूट्रॉनों की गतिज ऊर्जा होती है।

$$K_{av} = \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2}\left(8.62\times10^{-5} eV/K\right)\left(300\,K\right)$$
$$= 0.04\,eV$$

ऐसे न्यूट्रान नाभिकीय अभिक्रियाओं के लिए प्रभावी एवं सुविधाजनक होते है।

1939 में जर्मन वैज्ञानिको ऑटोहान (Otto Holen) एवं फिट्ज स्ट्रासमैन (Fritz strassman) ने यूरेनियम पर तापीय न्यूट्रॉनों की बौछार के बाद पाया कि प्रक्रिया में उत्पादित कई नवीन रेडियो एक्टिव तत्वों में से एक तत्व ऐसा था जिसके रासायनिक गुण बेरियम के समान थे। बाद में यह पुष्ट हुआ कि वस्तुतः यह कोई नवीन तत्व नहीं था बल्कि वस्तुतः बेरियम (Z = 56) था। ऑटोहॉन तथा स्ट्रासमैन के लिए यह समझना कठिन था कि यूरेनियम(Z = 92) पर न्यूट्रॉनों की बमवर्षा से मध्यवर्ती द्रव्यमान का नाभिक बेरियम (Z=56) किस प्रकार उत्पन्न होता है?

इस उलझन का हल भौतिक शास्त्रियों लीज मेटनर(Lise Meittner) तथा ऑटो फ्रिश (Otto - Frisch) ने प्रस्तुत किया। उन्होंने दर्शाया कि यूरेनियम नाभिक तापीय न्यूट्रॉन का अतशोषण कर ऊर्जा मुक्त करने के साथ मध्यवर्ती द्रव्यमान के दो नाभिको में टूट सकता है जिसमें से एक बेरियम भी हो सकता है। इस प्रक्रम का उन्होंने नाभिकीय विखंडन नाम दिया। नाभिकीय विखंडन में उत्पाद नाभिको तथा ऊर्जा मुक्त होने के अतिरिक्त न्यूट्रॉन भी मुक्त होते है। यहां पर ध्यान देने योग्य है कि उत्पाद नाभिक अद्वितीय (unique) नहीं होते जैसाकि ^{235}U के लिये कुछ विखंडन अभिक्रियाओं जिन्हें नीचे दर्शाया गया है से स्पष्ट होता है

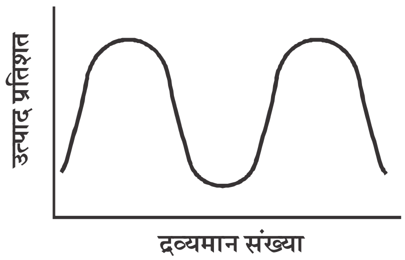
$$^{235}_{92}\text{U} + {}^{1}_{0}\text{n} \longrightarrow {}^{236}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{144}_{56}\text{Ba} + {}^{90}_{36}\text{Kr} + 2\,{}^{1}_{0}\text{n}$$
$$\rightarrow {}^{140}_{54}\text{Xe} + {}^{94}_{38}\text{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}\text{n}$$
$$\rightarrow {}^{148}_{57}\text{La} + {}^{85}_{35}\text{Br} + 3\,{}^{1}_{0}\text{n}$$
$$\rightarrow {}^{144}_{56}\text{Ba} + {}^{89}_{36}\text{Kr} + 3\,{}^{1}_{0}\text{n}$$

→ इसी प्रकार कई अन्य

मध्यवर्ती द्रव्यमानों के दो विखंडनीय उत्पादों की द्रव्यमान संख्याएं असमान होते है। सामान्यतः यें स्वयं भी रेडियोएक्टिव होते हैं। ऐसे उत्पाद सामान्यतः β^- क्षयो की एक श्रृंखला करते हैं जब तक कि स्थायी उत्पाद प्राप्त नहीं हो जाए। एक विशिष्ट उदाहरण इस प्रकार है

$$^{140}_{54}\text{Xe} \xrightarrow{\beta^-} {}^{140}_{55}\text{Ca} \xrightarrow{\beta^-} {}^{140}_{56}\text{Ba} \xrightarrow{\beta^-} {}^{140}_{57}\text{La} \xrightarrow{\beta} {}^{140}_{58}\text{Ce}$$

औसत रूप से विखंडन में ~2.5 न्यूट्रॉन प्राप्त होते हैं जिन्हें तीवग्रसी न्यूट्रॉन कहा जाता है इनकी ऊर्जा ~2 MeV प्रत्येक होता है। इन न्यूट्रॉनों द्वारा $^{235}_{92}$U का आगे और विखडन संभव नहीं है जब तक कि इन्हें मंदित नहीं कर दिया जाए। चित्र 15.8 में ^{235}U के विखण्डन से प्राप्त विभिन्न विखंडन उत्पाद नाभिको के प्रतिशत उत्पादित तथा द्रव्यमान संख्या के मध्य ग्राफ दर्शाया गया है।100 से ऊपर विभिन्न न्यूक्लाइड जो 20 से अधिक भिन्न तत्वों को प्रदर्शित करते हैं दर्शाए गए है। अधिकांश विखण्डन उत्पादों के लिये द्रव्यमान संख्या 90 से 100 तथा 135 से 145 तक होती है। सर्वाधिक प्रायिकता द्रव्यमान संख्या A = 95 तथा A = 140 के लिए है। लगभग समान द्रव्यमानों के विखंडन उत्पादों की प्रायिकता अल्प है।



चित्र 15.8 विभिन्न विखण्डन उत्पादो के उत्पाद प्रतिशत का द्रव्यमान संख्या के साथ ग्राफ

नाभिकीय विखंडन के लिए मुक्त ऊर्जा Q रासायनिक प्रक्रमों में मुक्त ऊर्जा से अत्यधिक होती है। इसका अनुमानित आकलन करने के लिए हम प्रतिन्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा वक्र की सहायता लेते है। इस वक्र से हम देख सकते हैं कि भारी नाभिकों के लिए प्रति न्यूकिल्ऑन बंधन ऊर्जा E_{bn} लगभग 7.6 MeV होती है जबकि मध्यवर्ती द्रव्यमान नाभिको के लिए यह लगभग 8.5 MeV होती है। मान लीजिए कि A= 240 द्रव्यमान संख्या का एक नाभिक A= 120 द्रव्यमान संख्या के दो नाभिको में टूट रहा है। तब

A = 240 नाभिक के लिए कुल बंधन ऊर्जा $\Delta E_{bi} = \Delta E_{bni} A$

$$\Delta E_{bi} = (7.6) \times 240 \text{ MeV}$$

तथा $2(A = 120)$ नाभिको की कुल बंधन ऊर्जा

$$\Delta E_{bf} = 2(\Delta E_{bnf}) A/2 = 2(8.5) \times 120$$

$$= (8.5) \times 240 \text{ MeV}$$

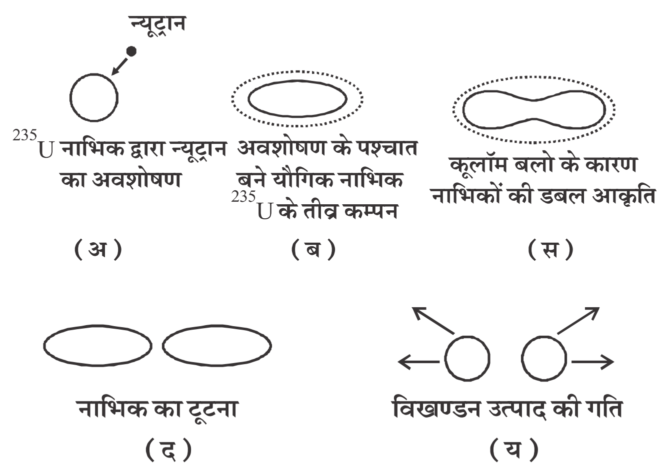
अतः प्रक्रिया में विमुक्त ऊर्जा $Q = \Delta E_{bf} - \Delta E_{bi}$

$$= (8.5 - 7.6) \times 240 = 216 \text{ MeV}$$

इस प्रकार विखंडन ऊर्जा $Q \sim 200$ MeV कोटिमान की होती है। (आगे दिए गए आंकिक उदाहरणों में हम और परिष्कृत रूप से इस राशि व अन्य संबंधित राशियों की गणना करेंगे) इस ऊर्जा का अधिकांश भाग विखंडन में प्राप्त नाभिकों की गतिज ऊर्जा के रूप में शेष भाग न्यूट्रॉनों की गतिज ऊर्जा एवं आगामी क्षय उत्पादों की ऊर्जा के रूप में होता है।

नाभिकीय विखण्डन को बोर तथा व्हीलर (Bohr and Wheeler) द्वारा प्रतिपादित नाभिकीय द्रव बूंद माडल(liquid drop model) की सहायता से समझाया जा सकता है। यहां हम इस मॉडल का अतिसरलीकृत रूप में संक्षेप में अध्ययन करेंगें।

द्रव बूंद प्रतिरूप में नाभिक को गोलाकार आवेशित द्रव बूंद की भांति माना जाता है जो आन्तरिक आकर्षण बलो तथा कूलाम प्रतिकर्षण बलो के सन्तुलन के कारण साम्य में होती है। चित्र 15.9 में ^{235}U नाभिक के लिए विखण्डन प्रक्रम का दर्शाता है। जब ^{235}U जैसा भारी नाभिक एक मंद न्यूट्रान अवशोषित करता है तो इसकी नाभिकीय न्यूक्लिऑनो से संबंद्ध स्थितिज ऊर्जा नाभिक की आन्तरिक उत्तेजन ऊर्जा में बदल जाती है। इस प्रक्रिया में उत्तेजन Åt kZy xHkx 6.5 MeV होती है (देखे उदाहरण 15.16) तथा इस अतिरिक्त उत्तेजन ऊर्जा के कारण नाभिक भीषण कम्पन करने लगता है (चित्र 15.9)। इस प्रकार के कंपनों के कारण नाभिक में एक छोटी ग्रीवा उत्पन्न हो जाती है तथा यह डबंल (Dumble) जैसी आकृति में आ जाती है। यदि परिस्थितियाँ अनुकूल हो तो इन दो भागों के मध्य प्रतिकर्षण के कारण नाभिक दो भागों में टूट जाता है अन्यथा नाभिक γ किरणे उत्सर्जित कर पुनः पूर्व रूप में आ जाता है। बोर और व्हीलर द्वारा क्वांटम यांत्रिकी के आधार पर की गई गणनाओं के अनुसार ^{235}U में नाभिक को टूटने के लिए आवश्यक ऊर्जा जिसे क्रांतिक ऊर्जा कहा जाता है लगभग 5.3 MeV है जो नाभिक की उत्तेजन ऊर्जा से कम है अतः नाभिक का विखंडन संभव हो जाता है।



चित्र 15.9 द्रव–बूंद मॉडल के अनुसार नाभिकीय विखण्डन प्रक्रम

यदि किसी नाभिक की मंद न्यूट्रॉनों के अवशोषण से प्राप्त उत्तेजन ऊर्जा संगत क्रांतिक ऊर्जा से कम हो तो उनका ऐसे न्यूट्रॉनों द्वारा विखडंन संभव नहीं है। उदाहरण के लिए ^{239}U के लिए तो यह संभव है किन्तु ^{238}U तथा ^{244}Am के लिए यह संभव नहीं है। यद्यपि इन नाभिकों का तीव्रगामी न्यूट्रॉनों के द्वारा विखण्डन संभव है।

उदाहरण 15.16 नाभिकीय विखण्डन की प्रक्रिया में ^{235}U नाभिक एक न्यूट्रॉन का अवशोषण करता है जिसके परिणाम स्वरूप ^{236}U नाभिक निर्मित होता है। इस प्रक्रिया में ^{236}U नाभिक को प्राप्त आन्तरिक ऊर्जा की गणना करो

दिया है: $M(^{235}U) = 235.0439\,u$

$$M(^{236}U) = 236.0455\,u$$

तथा $M(^{1}n) = 1.0086\,u$

$1u = 931$ MeV मानें

हलः दिए गए प्रक्रम के संगत नाभिकीय अभिक्रिया है

$$^{235}U + {}^{1}n \longrightarrow {}^{236}U$$

अभिक्रिया से पूर्व अभिकर्मको का द्रव्यमान

$$M_i = M\left({}^{235}U\right) + M\left({}^{1}n\right)$$

$$= 235.0439 + 1.0086 = 236.0525\,u$$

अभिक्रिया के बाद उत्पाद का द्रव्यमान $M_f = 236.0455\,u$

स्पष्टतः $M_i > M_f$ अतः द्रव्यमान क्षति हो रही है जिसका आशय है कि विराम द्रव्यमान ऊर्जा नाभिक में आन्तरिक ऊर्जा के रूप में बदल रही है जिसका मान है

$$E = \left(\Delta Mc^2\right) = \{236.0525 - 236.0455\}uc^2$$

$$= \{.0070\} \times 931\,MeV = 6.51\,MeV$$

उदाहरण 15.17 विखण्डन अभिक्रिया

$${}^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{140}_{54}Xe + {}^{94}_{38}Sr + 2{}^{1}_{0}n$$

में मुक्त ऊर्जा का मान ज्ञात करो।

दिया है $M\left({}^{235}_{92}U\right) = 235.0439\,u$

$$M\left({}^{1}_{0}n\right) = 1.00867\,u$$

$$M\left({}^{140}_{54}Xe\right) = 139.9054\,u$$

$$M\left({}^{94}_{38}Sr\right) = 93.9063\,u$$

हलः उपरोक्त अभिक्रिया के लिए Q का मान है

$$Q = \left[M\left({}^{235}_{92}U\right) + M\left({}^{1}_{0}n\right) - M\left({}^{140}_{54}Xe\right) - M\left({}^{94}_{30}Sr\right) - 3M\left({}^{1}_{0}n\right)uc^2\right.$$

$$= [235.0439 + 1.00867 - 139.9054 - 93.9063 - 3(1.00867) \times 931\,MeV$$

$$= [0.22353] \times 931 \approx 208\,MeV$$

उदाहरण 15.18 यह मानते हुए कि प्रतिविखण्डन 200 MeV ऊर्जा उत्पन्न होती है 1 kg ${}^{235}U$ के विखण्डन से प्राप्त ऊर्जा की गणना करो।

हलः यूरेनियम परमाणु भार 235 के 1 मोल (0.235 kg) में परमाणुओं (नाभिकों) की संख्या आवोग्रेद्रों संख्या $N_A = 6.023 \times 10^{23}$ के बराबर होती है।

अतः 1 kg ${}^{235}U$ में नाभिकों की संख्या $= \dfrac{6.02 \times 10^{23}}{0.235}$

∴ 1 kg यूरेनियम के विखण्डन से प्राप्त ऊर्जा

$$= \frac{6.02 \times 10^{23}}{0.235} \times 208\,MeV$$

$$5.12 \times 10^{26}\,MeV$$

$$= 5.12 \times 10^{26} \times 10^{6} \times 1.9 \times 10^{-19}\,J$$

$$= 8.19 \times 10^{13}\,J$$

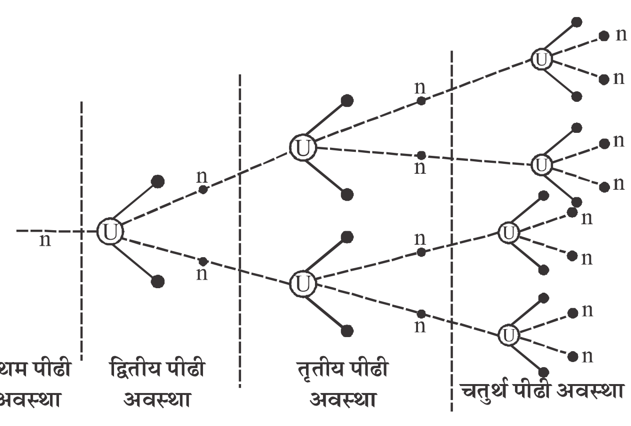
$$= \frac{8.19 \times 10^{13}}{60 \times 60 \times 100}\,kWh$$

$$= 2.27 \times 10^{7}\,kWh$$

(यह ऊर्जा कई हजार टन TNT के विस्फोट से प्राप्त ऊर्जा के तुल्य है)

15.11 नियंत्रित एवं अनियंत्रित श्रृंखला अभिक्रियाएं (Controlled and Uncontrolled Chain Reactions)

${}^{235}U$ जैसे भारी नाभिक के विखण्डन में हमने देखा है कि प्रतिनाभिक विखण्डन में हमे औसतन2.5 न्यूट्रान प्राप्त होते है इसका आशय है कि यदि 100 यूरेनियम नाभिको का विखण्डन हो रहाहै तो लगभग 250 न्यूट्रॉन और प्राप्त होते है। ऐसे न्यूट्रॉन द्वितीयक न्यूट्रॉन कहलाते है तथा ये तीवग्रामी होते है। यदि इन न्यूट्रॉनों को मंदित कर तापीय न्यूट्रॉनों की ऊर्जा तक ले जाया जाए तो अनुकूल परिस्थितियों में ये न्यूट्रॉन विखंडनीय पदार्थ में उपस्थित अन्य ${}^{235}U$ नाभिकों का विखंडन कर सकते हैं इससे प्राप्त न्यूट्रॉनों की संख्या और बढ जाती है जो और अधिक नाभिको का विघटन करती है। इस प्रकार नाभिकीय विखण्डनों की एक श्रृंखला बनती है जिसे श्रृंखला अभिक्रिया कहते है। इस प्रकार की अभिक्रिया को चित्र 15.10 में दर्शाया गया है। इसमें केवल 2 न्यूट्रॉनों को ही श्रृंखला अभिक्रिया को आगे बढाने के लिए बताया गया है।



चित्र 15.10 श्रृंखला अभिक्रिया का एक प्रतीकात्मक चित्र यहां विखण्डन उत्पाद नाभिको को तथा *n* न्यूटॉन को दर्शाते है।

श्रृंखला अभिक्रिया स्वसंपोषी हो इसके लिए आवश्यक है कि ${}^{235}U$ के विखंडन से प्राप्त न्यूट्रॉनों में से कम से एक (औसत रूप में) का किसी अन्य ${}^{235}U$ नाभिक द्वारा प्रगहण होकर इसका विखण्डन हो। इस प्रतिबंध को प्राय एक प्राचलKसे व्यक्त करते है जिसे न्यूट्रॉन गुणन

गुणांक या पुनरूत्पादन गुणांक (neutron multipication factor or reproduction factor) कहते हैं तथा यह प्रत्येक विखण्डन से प्राप्त न्यूट्रॉनों की औसत संख्या को व्यक्त करता है जो आगामी विखण्डन करते हैं। K को निम्नानुसार भी परिभाषित करते हैं

$$K = \frac{\text{विखण्डन की किसी जनन या पीढ़ी में उपस्थित न्यूट्रॉनों की संख्या}}{\text{इस पीढ़ी से ठीक पूर्वोत्तर पीढ़ी में उपस्थित न्यूट्रॉनों की संख्या}} \quad ...(15.36)$$

K का अधिकतम मान 2.5 हो सकता है किन्तु सामान्यतः यह इससे कम होता है क्योंकि (i) कुछ न्यूट्रॉनों का विखण्डनीय पदार्थ से क्षरण हो सकता है (ii) कुछ न्यूट्रॉन विखण्डनीय पदार्थ में उपस्थित नाभिकों द्वारा अवशोषित हो सकते हैं। यदि K का मान 1 से कम है तो स्पष्ट है कि स्वपोषी श्रृंखला अभिक्रिया संभव नहीं है क्योंकि आगामी प्रत्येक विघटन के बाद न्यूट्रॉनों की संख्या में उत्तरोत्तर कमी होगी तथा कुछ जननों के बाद श्रृंखला अभिक्रिया समाप्त हो जाएगी।

यदि $K > 1$ है तो अभिक्रिया की दर तेजी से बढेगी उदाहरण के लिए $K = 1.5$ है तथा किसी जनन में 100 न्यूट्रॉन प्राप्त है तो अगले जनन में 150 न्यूट्रॉन प्राप्त होंगे। इस प्रकार प्रत्येक जनन में न्यूट्रॉनों की संख्या वृद्धि होती जाएगी ऐसी स्थिति में अभिक्रिया अनियंत्रित कहलाती है तथा बहुत तीव्रता से प्रगति करती है तथा कुछ ही क्षणों में इतनी ऊर्जा ऊष्मा के रूप में प्रकट होती है जो अंततः विस्फोट को जन्म देती है। परमाणु बम में ऐसी ही अनियंत्रित श्रृंखला अभिक्रिया वांछित होती है।

यदि $K = 1$ है तब अभिक्रिया स्वपोषी होगी। उदाहरण के लिए यदि किसी जनन में 100 न्यूट्रॉन प्राप्त है तो अगले जनन में भी 100 न्यूट्रॉन ही प्राप्त होंगे एक बार प्रारंभ होने के बाद संपोषी श्रृंखला अभिक्रिया समान दर पर चलती रहेगी इस प्रकार की अभिक्रिया नियंत्रित श्रृंखला अभिक्रिया कहलाती है तथा परमाणु भट्टियों में $K \quad 1$ रखा जाता है।

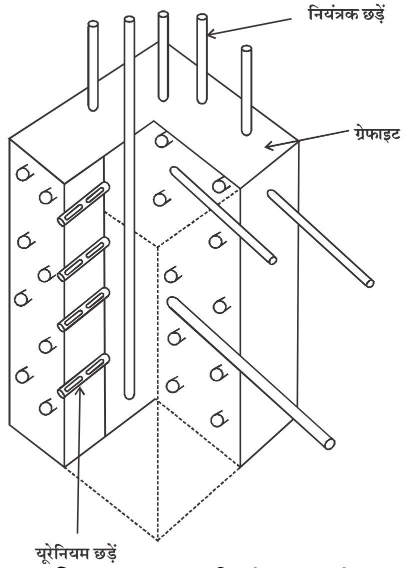
प्राकृतिक यूरेनियम में दो समस्थानिक ^{235}U तथा ^{238}U प्रतिशत बाहुल्य क्रमशः 99.3% तथा 0.7% में होते हैं। ^{238}U का मंद गामी न्यूट्रॉनों द्वारा विखण्डन नहीं हो सकता तथा यह ऐसे न्यूट्रॉनों को अवशोषित कर ^{239}U नाभिक निर्मित करता है जो विखण्डन के स्थान पर अन्य क्षयों द्वारा विघटित होते हैं। ^{235}U का मंदगामी न्यूट्रॉनों द्वारा विखण्डन होता है किन्तु प्राकृतिक यूरेनियम में इसकी मात्रा कम होने के कारण विघटन प्रायिकता कम होती है। अतः विखण्डन अभिक्रिया की प्रायिकता बढाने के लिए कृत्रिम उपायों द्वारा ^{235}U की प्रतिशत मात्रा बढ़ाकर 3% तक की जाती है। इस तरह प्राप्त यूरेनियम समृद्ध यूरेनियम कहलाता हैं। इसके उपरान्त भी ^{235}U से स्वपोषी श्रृंखला अभिक्रिया प्राप्त करने में निम्न गंभीर समस्याएं उपस्थित होती है जिनका निराकरण करना आवश्यक होता है

1. **न्यूट्रॉन क्षरण समस्याः** विखण्डन से प्राप्त कुछ न्यूट्रॉन विखण्डनीय पदार्थ से पलायन कर जाते हैं तथा श्रृंखला अभिक्रिया के लिए उपलब्ध नहीं हो पाते इसी प्रकार कुछ न्यूट्रॉन विखंडनीय पदार्थ में अवशोषित हो जाते हैं तथा कुछ न्यूट्रॉन परिरक्षित करने वाले कवच द्वारा अवशोषित हो जाते है। यदि क्षरण होने वाले न्यूट्रॉनों की संख्या बहुत अधिक है तो श्रृंखला अभिक्रिया जारी नहीं रहेगी।
पदार्थ से न्यूट्रॉनों का क्षरण एक पृष्ठीय प्रभाव है जो पदार्थ की विमाओं के वर्ग के समानुपाती होता है उदाहरण के लिए यदि पदार्थ गोलाकार है तो क्षरण, पृष्ठीय क्षेत्रफल $= 4\pi r^2$ के समानुपाती होगा। न्यूट्रॉन का उत्पादन एक आयतन प्रभाव है जो पदार्थ की विमाओं के घन समानुपाती होता है (गोलाकर पदार्थ के लिए आयतन $= 4/3\pi r^3$)। न्यूट्रॉनों का क्षरण करने के लिए विखण्डनीय पदार्थ का आकार इतना बडा रखना चाहिए ताकि सतह क्षेत्रफल का आयतन से अनुपात कम हो जाए (गोलाकार पदार्थ के लिए $= 3/r$)। इस प्रकार श्रृंखला अभिक्रिया जीवित रखने के लिए विखण्डनीय पदार्थ यूरेनियम पिंड का एक न्यूनतम साइज या न्यूनतम द्रव्यमान होना आवश्यक है। इस द्रव्यमान को क्रांतिक द्रव्यमान कहा जाता है।
2. **न्यूट्रॉन ऊर्जा समस्याः** विखण्डन में उत्पन्न न्यूट्रॉन लगभग 2 MeV की गतिज ऊर्जा के होते है जबकि विखण्डन मंदगामी न्यूट्रॉनों से होता है। अतः तीव्रग्रामी न्यूट्रॉनों का वेग कम किया कर जाकर उनको तापीय ऊर्जा 0.04 eV तक लाना आवश्यक है। ऐसा मंदको (moderators) का उपयोग करके किया जाता है। मंदक पदार्थ में निम्नलिखित गुण होने चाहिए (अ) इनके परमाणुओं का द्रव्यमान कम होना चाहिए ताकि न्यूट्रॉनों से टक्करों में न्यूट्रॉनो की गतिज ऊर्जा की अधिक हानि हो (अ) ये न्यूट्रॉन के अवशोषक नहीं होने चाहिए। पानी, भारी पानी$(D = 0)$ तथा ग्रेफाइट सामान्यतः उपयोग मंदक पदार्थ है।
3. **न्यूट्रॉन प्रग्रहण समस्याः** नाभिकीय ईंधन में उपस्थित ^{238}U के नाभिक $1-100$ eV ऊर्जा के न्यूट्रॉनों के उत्तम अवशोषक होते हैं। 2 MeV ऊर्जा के तीव्रग्रामी न्यूट्रॉनों के 0.04 eV तक मंदित होने की प्रक्रिया में इनकी ऊर्जा इस परास में भी हो सकती है अतः इनकी ^{238}U नाभिको से अवशोषण की भी काफी संभावना होती हैं। इस समस्या का निराकरण करने के लिए नाभिकीय इंधन जो प्रायः यूरेनियम छड़ो के रूप में होता है तथा मंदको को उपयुक्त दूरी पर इस प्रकार व्यवस्थित किया जाता है कि अधिकांश न्यूट्रॉन मंदन के बाद ही छड़ो के संपर्क में आते है।

नियंत्रित नाभिकीय विखंडन श्रृंखला का उपयोग नाभिकीय भट्टी के प्रचालन में किया जाता है जो नाभिकीय ऊर्जा का उपयोग कर विद्युत उत्पादन करती है।

15.12 नाभिकीय भट्टी (Nuclear Reactor)

नाभिकीय भट्टी के द्वारा नाभिकीय विखण्डन से प्राप्त ऊर्जा को विद्युत ऊर्जा में परिवर्तित कर शक्ति जनन किया जाता है। जैसा कि हम पूर्व में उल्लेख कर चुके हैं नाभिकीय भट्टी में नियंत्रित श्रृंखला अभिक्रिया काम ली जाती है। यहां हम तापीय न्यूट्रॉनों के द्वारा ^{235}U के विखण्डन पर आधारित नाभिकीय भट्टी का संक्षिप्त विवेचन करेंगे। इस प्रकार की भट्टी एवं उसके साथ संबंद्ध अन्य उपकरणों का एक सरलीकृत आरेख चित्र 15.11 में दर्शाया गया हैं भट्टी की सक्रिय क्रोड में ईंधन के रूप में काम लिए जा रहे यूरेनियम को बेलनाकार छड़ों के रूप में नियमित प्रतिरूप में व्यवस्थित किया जाता हैं। क्रोड का आयतन मंदक पदार्थों जैसे जल, भारी जल (D_2O) अथवा ग्रेफाइट से भरा होता है।



चित्र 15.11 नाभिकीय भट्टी

जब किसी यूरेनियम छड में विखण्डन होता है तो उत्पन्न तीव्र न्यूट्रॉनों में से अधिकांश छड से बाहर निकल कर मंदक पदार्थ में प्रवेश करते हैं जहाँ इनकी टक्कर मंदक के परमाणुओं से होती है। कुछ टक्करों के बाद न्यूट्रॉनों की ऊर्जा 2 MeV से घटकर तापीय ऊर्जा परास में आ जाती है। छड़ों के मध्य दूरी इस प्रकार समायोजित की हुई होती है कि किसी एक छड से निर्गत न्यूट्रान किसी अन्य छड में प्रवेश करने से पहले तापीय ऊर्जा परास में आजाए। इस प्रकार 1-100 eV परास के न्यूट्रॉनों के किसी छड में उपस्थित ^{238}U नाभिको द्वारा अवशोषण की संभावना बहुत कम हो जाती हैं। क्रोड की ज्यामिती इस प्रकार की होती है कि न्यूट्रॉनों का क्षरण इस सीमा तक ही हो ताकि प्रति विखंडन में प्राप्त औसतन 2.5 न्यूट्रॉनों में से 1 न्यूट्रॉन अगले विखंडन के लिए उपलब्ध हो। इस स्थिति में पुनरूद्वोत्पदान गुणक $K = 1$ प्राप्त होता है तथा श्रृंखला अभिक्रिया स्थायी दर पर चलती है। यदि किसी कारणवंश न्यूट्रॉन के सरण की दर घट जाए तो $K > 1$ की स्थिति उत्पन्न होती है तथा भट्टी में विस्फोट की संभावना होती है इस के निराकरण के लिए नियंत्रक छडो जो कैडमियम से निर्मित होती है का उपयोग किया जाता है जो भट्टी में मंदक पदार्थों के बीच कुछ गहराई तक उपस्थित रहती है। कैडमिम न्यूट्रॉनो का अच्छा अवशोषक होता है। वस्तुतः प्रारंभ में $K > 1$ रखा जाता है तथा फिर शीघ्रता से कैडमियम छडो को उपयुक्त गहराई पर लाकर $K = 1$ स्थिति प्राप्त की जाती है। आवश्यकता होने पर कैडियम छडो को पूरी गहराई तक अन्दर डालकर $K < 1$ स्थिति प्राप्त की जा सकती है तथा भट्टी का प्रचालन बंद हो जाता है। ऐसा भट्टी के रखरखाव की दृष्टि से अथवा सुरक्षा कारणों से किया जाता है।

भट्टी में नाभिकीय विखण्डन से प्राप्त अत्याधिक ऊर्जा के कारण उत्पन्न ऊष्मा को हटाने के लिए क्रोड के क्षेत्र में उच्चदाब पर जल या पिघला सोडियम आदि प्रवाहित करते हैं जो शीतलक का कार्य करते है। शीतलको द्वारा भट्टी से ली गई ऊष्मा को जल से भाप उत्पन्न करने में काम लिया जाता है यह भाप टरबाईन चलाकर विद्युत ऊर्जा उत्पादन में काम आती है।

भट्टी के चारो ओर क्रंकीट की मोटी दीवारे बनाई जाती है ताकि भट्टी में विखण्डन उत्पादों के रेडियो एक्टिव विघटन से निकले घातक विकिरण आसपास के वातावरण में प्रवेश नहीं कर सके। इस प्रकार नाभिकीय शक्ति उत्पादन केन्द्र में काम करने वाले व्यक्तियाँ तथा समीपवर्ती इलाको के निवासियों एवं जीवधारियों की सुरक्षा होती है।

शक्ति उत्पादन के अतिरिक्त नाभिकीय भट्टियों का उपयोग विभिन्न प्रकार के उपयोग रेडियोएक्टिव समस्थानिको के उत्पादन, शोधकार्य के लिए न्यूट्रॉन पुंज प्राप्त करने इत्यादि में भी होता है। यद्यपि नाभिकीय भट्टी विद्युत ऊर्जा उत्पादन में बहुत योगदान करती है किन्तु इनसे प्राप्त जहरीले। रेडियोएक्टिव अपशिष्टों का निराकरण बहुत बडी समस्या है जिनके लिऐ विशेष अन्तराष्ट्रीय नियमों का पालन करना अतिआवश्यक होता है। साथ ही इनका प्रचालन बहुत ही कड़ी व्यवस्था के अन्तर्गत होता है। सुरक्षा प्रवंधन में जरा सी लापरवाही भी वर्षों तक घातक हो सकती है जैसाकि 1986 में रूस (वर्तमान में यूक्रेन) के चेरनोबिल नाभिकीय संयत्र में हुआ था जिसके दृष्परिणाम आज तक स्थानीय एवं निकटवर्ती यूरोपीय देशो के निवासियों के प्रभावित कर रहे है। भारतीय परमाणु ऊर्जा कार्यक्रम सुरक्षा की दृष्टि से अर्न्तराष्ट्रीय मानको के अनुरूप है।

उदाहरण 15.19 ^{235}U के एक नाभिक के विखण्डन से लगभग 200 MeV ऊर्जा प्राप्त होती है। ^{235}U ईंधन पर आधारित किसी नाभिकीय भट्टी में कितने ^{235}U नाभिक प्रति सेकेंड विघटित होते है यदि भट्टी 1000 kW शक्ति उत्पन्न कर रही है।

हलः प्रश्नानुसार प्रति सेंकड उत्पन्न ऊर्जा $= 1000 \times 10^3$ J

$$= \frac{10^6}{1.6\times10^{-19}} \text{eV} = 6.25\times10^{24} \text{eV}$$

अतः प्रति सेकंड विखण्डनों की संख्या

$$= \frac{6.25\times10^{24}}{200\times10^6} = 3.12\times10^{16}$$

15.13 नाभिकीय संलयन (Nuclear Fusion)

जब दो हल्के नाभिक परस्पर मिलकर अपेक्षाकृत अधिक द्रव्यमान संख्या के नाभिक का निर्माण करते हैं तथा ऊर्जा मुक्त होती है तो इस प्रक्रिया को नाभिकीय संलयन कहते हैं। संलयन से प्राप्त नाभिक का द्रव्यमान संलयित हो रहे नाभिको के द्रव्यमानों के योग से कम होता है। इस प्रकार से नाभिक के द्रव्यमान में होने वाली क्षति ही द्रव्यमान ऊर्जा समीकरण के अनुरूप ऊर्जा के रूप में परिवर्तित होती है। इस तथ्य को हमने पूर्व में बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन संबंधित अनुभाग में भी स्पष्ट किया है।

नाभिकीय संलयन एक जटिल प्रक्रिया है। संलयन के लिए आवश्यक है कि संलयन करने वाले नाभिक इतने पास लाए जाए ताकि ये एक दूसरे के नाभिकीय बलों की परास में हो, यह एक कठिन कार्य है। जब नाभिक निकट लाए जाते है तो उनके मध्य कार्यकारी कूलॉम प्रतिकर्षण बल बहुत प्रबल होता है इस कूलाम अवरोध से पार करने के लिए नाभिकों की गतिज ऊर्जा बहुत अधिक 0.1 MeV से 1 MeV परास में होनी चाहिए। (देखे उदाहरण 15.16) इतनी ऊर्जाएं कण त्वरित्रों से प्राप्त की जा सकती हैं किन्तु त्वरित्रों में एक नाभिक के दूसरे नाभिक से प्रकीर्णन की संभावना संलयन से अधिक होती है साथ ही एक नाभिक से दूसरे नाभिक पर संघात करने के लिए त्वरित्रों में निवेशी ऊर्जा संलयन से प्राप्त ऊर्जा की तुलना में अधिक होती है। इस कारण कण त्वरित्रों द्वारा स्थूल द्रव्य में संलयन प्रक्रिया से ऊर्जा प्राप्ति व्यवहारिक नहीं है। संलयन से ऊर्जा प्राप्त करने के लिए गैस रूप में द्रव्य कणों को इतने उच्च ताप तक गर्म किया जाना चाहिए ताकि यादृच्छिक टक्करों के कारण नाभिक इतने निकट आ सकें ताकि संलयन हो। इस ताप की कोटि 10^9 K की होती है तथा इस प्रकार की संलयन अभिक्रियाएं तापनाभिकीय संलयन (thermonuclear fusion) कहलाती है।

संलयन अभिक्रिया के उदाहरण के रूप में ड्यूटीरियम नाभिको के संलयन को लिया जा सकता है जो नीचे दर्शायी गयी है

$$^2_1H + ^2_1H \longrightarrow ^3_1H + ^1_1H + 4.0\,MeV$$

उपरोक्त अभिक्रिया में प्राप्त ट्राइटियम $\left(^3_1H\right)$ नाभिक पुनः ड्यूटीरियम नाभिक से संयलन कर हीलियम नाभिक बनाता है।

$$^3_1H + ^2_1H \rightarrow ^2_4He + ^1_0n + 17.6\,MeV$$

उपरोक्त दोनों समीकरणों को संयुक्त करने पर प्राप्त अभिक्रिया है

$$3\left(^2_1H\right) \rightarrow ^4_2He + ^1_1H + ^1_0n + 21.6\,MeV$$

इस प्रकार ड्यूटीरियम के तीन नाभिक संलयित होकर ^4_2He नाभिक का निर्माण करते है तथा 21.6 MeV ऊर्जा मुक्त होती है। यद्यपि उपरोक्त संलयन से प्राप्त 21.6 MeV ऊर्जा यूरेनियम के एक नाभिक के विखण्डन से प्राप्त ऊर्जा 200 MeV की तुलना में बहुत कम है किन्तु यदि प्रतिकिलोग्राम ड्यूटीरियम से प्राप्त संलयन ऊर्जा की तुलना प्रतिकिलोग्राम यूरेनियम से प्राप्त विखडन ऊर्जा से करें तो यह बहुत अधिक होती है (देखे उदाहरण 15.17)। इसके अतिरिक्त संलयन से प्राप्त उत्पाद रेडियोएक्टिव नहीं होते जबकि विखंडन से उत्पाद रेडियोएक्टिव होते है अतः तुलनात्मक रूप से संलयन ऊर्जा का एक स्वस्छ स्त्रोत है।

उदाहरण 15.20 ड्यूटीरियम नाभिक ^2_1H पर आवेश +e है तथा इसकी मापित त्रिज्या लगभग 2fm है। ऐसे दो ड्यूटीरियम नाभिक एक दूसरे की ओर समान ऊर्जा K से दागे गए है। K का मान कितना होना चाहिए कि जब दोनों नाभिक सदृस्पर्श (just touch) की अवस्था में हो तो वे पारस्परिक कूलाम प्रतिकर्षण के कारण विराम में आ जाते है। इस गतिज ऊर्जा के संगत ताप की की गणना भी करो।

हलः क्योंकि सदृस्पर्श की स्थिति में दोनों नाभिक क्षणिक रूप से विराम में आ जाते हैं इनकी कुल गतिज ऊर्जा K इनके मध्य कार्यकारी कूलाम प्रतिकर्षण बल से संबद्ध स्थितिज ऊर्जा में बदल जाती है। यदि हम इन्हें बिन्दु आवेशों की तरह माने जो कि 2R दूरी से पृथक है (R प्रत्येक नाभिक की त्रिज्या है) तब ऊर्जा संरक्षण नियम से

$$2K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_1q_2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{2R}$$

या $$2K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{4R}$$

$$= \frac{\left(9\times10^9\,N.m/C^2\right)\left(1.6\times10^{-19}C\right)^2}{4\left(2\times10^{-15}\,m\right)}$$

$$= 2.7\times10^{-14}\,J \quad 170\,keV$$

यदि ड्यूटीरियम नाभिक की गतिज ऊर्जा के संगत ताप T है तो

$$K_{av} = \frac{3}{2}kT$$

या $$T = \frac{2}{3}\frac{K_{av}}{k}$$

$$= \frac{2}{3}\frac{170\times10^3 eV}{\left(8.62\times10^{-5}eV/K\right)}$$

$$= 1.31\times10^9\,K$$

उदाहरण 15.21 3 ड्यूटीरियम नाभिकों के संलयन से लगभग 21.6 MeV ऊर्जा प्राप्त होती है। 1 kg ड्यूटीरियम के संलयन से प्राप्त ऊर्जा की गणना करो।

हल: ड्यूटीरियम के 1 मोल $(0.002\,kg)$ में 6.02×10^{23} (आवेगाद्रो संख्या) परमाणु होते है अतः1 kg ड्यूटीरियम में परमाणुओं की संख्या

$$=\frac{6.02\times10^{23}}{0.002}=3.01\times10^{26}$$

प्रश्नानुसार 3 ड्यूटीरियम नाभिकों के संलयन से प्राप्त ऊर्जा 21.6 MeV है अतः 1 ड्यूटीरियम नाभिक के संगत ऊर्जा

$$=\frac{21.6}{3}=7.2\,MeV$$

$\therefore$ 1 kg ड्यूटीरियम के संलयन से प्राप्त ऊर्जा

$$=3.01\times10^{26}\times7.2\,MeV$$

$$=21.67\times10^{26}\,MeV$$

$$=21.67\times10^{27}\times1.6\times10^{-19}\,J$$

$$=34.67\times10^{13}\,J$$

उदाहरण 15.14 में हमने देखा है कि 1 kg यूरेनियम के विखडन से प्राप्त ऊर्जा $8.19\times10^{13}\,J$ है अतः इस संलयन से प्राप्त ऊर्जा यूरेनियम के विखडन से प्राप्त ऊर्जा से लगभग 4 गुना अधिक है।

उपरोक्त उदाहरणों में हमने संलयन के लिए आवश्यक ताप एवं संलयन से मुक्त ऊर्जा का आंकलन किया है। इतने उच्च ताप पर द्रव्य के परमाणुओं से इलेक्ट्रॉन मुक्त हो जाते है तथा द्रव्य नाभिकीय ऑयन एवं इलेक्ट्रॉनों के रूप में होता है। पदार्थ की इस विशेष अवस्था को प्लाज्मा (Plasma) कहते है। जैसा कि हम अगले उपअनुभाग में देखेंगे सूर्य एवं अन्य तारों में उत्पन्न ऊर्जा का स्त्रोत संलयन के कारण है। पृथ्वी पर ताप नाभिकीय अभिक्रियाओं का आरंभ 1952 से हुआ जब पहले संलयन (हाइड्रोजन) बम का विस्फोट किया गया। इस प्रकार की ताप नाभिकीय अभिक्रिया के लिए आवश्यक उच्च ताप को प्राप्त करने के लिए पहले एक परमाणु बम का विस्फोट किया गया था। हाइड्रोजन बम के रूप में प्राप्त नाभिकीय संलयन ऊर्जा अनियंत्रित संलयन अभिक्रिया का परिणाम है तथा केवल विनाशकारी है।

पृथ्वी पर महासागरीय जल में ड्यूटीरियम का अथाह भंडार होने से यदि संपोषी एवं नियंत्रित संलयन अभिक्रियाओं पर आधारित युक्ति निर्मित की जा सके तो पृथ्वी की ऊर्जा समस्या का बहुत हद तक निराकरण करना संभव है परन्तु इस प्रकार की युक्ति जिसे संलयन भट्टी (fusion reactiot) कहा जा सकता है के निर्माण में कई व्यवहारिक कठिनाईयां है। सबसे पहली कठिनाई तो प्रयोगशालाओं में संलयन के लिए आवश्यक ताप प्राप्त करता है। इसके लिए वर्तमान में शक्तिशाली स्पंद लेजर(pulsed laser) का प्रयोग किया जाकर $10^8\,K$ तक के ताप प्राप्त किए जा चुके है परन्तु सबसे प्रमुख कठिनाई संरोधन (confinment) की है। संलयन अभिक्रियाऐं अधिक संख्या में हो इसके लिए आवश्यक है कि प्लाज्मा को लंबे समय तक उच्च ताप तथा उच्च कण घनत्व पर बनाए रखा जाए। प्लाज्मा के इतने उच्च ताप पर होने से यह तो स्पष्ट है कि किसी ठोस पदार्थ के पात्र द्वारा इस प्रकार का संशोधन संभव नहीं है अतः नियंत्रित संलयन के लिए यह एक बडी चुनौती है। वर्तमान में वैज्ञानिक दो विधियों जिन्हें चुंबकीय संरोधन (magnetic confinment) एवं जडत्वीय संरोधन(inertial confinment) कहा जाता है पर काम कर रहे है। चुंबकीय परिरोधन पर आधारित एक युक्ति जिसे टोकामैक (tokomek) कहा जाता है द्वारा लगभग 1 सेंकड के लिए 10 MW संलयन शक्ति प्राप्त की जा चुकी है। परन्तु वाणिज्यक दृष्टि से लंबे समय तक संलयन से शक्ति प्राप्त करने के प्रयास अभी शैशावास्था मे ही हैं वैज्ञानिक जगत में आशा है कि 21वीं शताब्दी के मध्य तक वाणिग्यिक रूप से उपयोगी नाभिकीय संलयन भट्टी का निर्माण संभव हो सकेगा।

15.13.1 सूर्य एवं तारो में तापनाभिकीय संलयन (Thermonuclear Fusion in Sun and Stars)

सूर्य लगभग 4.5×10^8 वर्षों से $3.9\times10^{26}\,W$ की दर से ऊर्जा विकिरित कर रहा है। सन् 1930 से पहले यह माना जाता था कि सूर्य जिसका द्रव्यमान लगभग $2.0\times10^{30}\,kg$ है में कार्बन एवं ऑक्सीजन के दहन (रासायनिक अभिक्रिया) के कारण ऊर्जा उत्पन्न होती है परन्तु जिस दर पर सूर्य ऊर्जा विकिरण करता है उस दर के आधार पर सूर्य को कुछ हजार वर्ष के बाद उत्सर्जन बंद कर देना चाहिए था। एक अन्य मत के अनुसार जैसे–जैसे सूर्य ठण्डा होता है इसके भीतर दाब में कमी आती है इस कारण यह अपने भीतर प्रबल गुरुत्वीय बलों के प्रभाव में संकुचित होगा। जिसके कारण गुरुत्वीय स्थितिज ऊर्जा आन्तरिक ऊर्जा में बदलेगी परन्तु इस आधार पर की गई गणनाओं से भी सूर्य को लगभग10^8 वर्षों तक ही ऊर्जा विकिरण करने में सक्षम होना था। सूर्य की क्रोड में द्रव्यमान के अनुपात के हिसाब से लगभग 35% हाइड्रोजन एवं 64% हीलियम एवं 1% अन्य तत्वों की उपस्थिति है। भारी तत्वों की नगण्य मात्रा में उपस्थिति के कारण नाभिकीय विखंडन भी सूर्य ऊर्जा का स्त्रोत नहीं हो सकता।

सन् 1939 में अमेरिकन वैज्ञानिक बैथे(Bethe) ने प्रस्तावित किया कि सूर्य एवं अन्य तारों में ऊर्जा का जनन तापनाभिकीय अभिक्रियाओं के कारण है जिनमें हाइड्रोजन नाभिक हीलियम नाभिक में संलयित होते है। इस प्रकार के प्रक्रम जिसे प्रोटॉन प्रोटॉन चक्र (proton proton cycle) कहा जाता है को निम्नलिखित अभिक्रियाओं के समुच्चय द्वारा व्यक्त किया जा सकता है

$$^{1}_{1}H+{}^{1}_{1}H\rightarrow{}^{2}_{1}H+e^{+}+\gamma+0.42\,MeV \qquad \ldots(i)$$

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

$$^{2}_{1}H+{}^{1}_{1}H\rightarrow{}^{3}_{2}He+\gamma+5.49\,MeV \qquad \ldots(iii)$$

$$^{3}_{2}He+{}^{3}_{2}He\rightarrow{}^{4}_{2}He+{}^{1}_{1}H+{}^{1}_{1}H+12.86\,MeV \ldots(iv)$$

चौथी अभिक्रिया होने के लिए आवश्यक है कि प्रथम तीन अभिक्रियाएं के दो बार हों ताकि चौथी अभिक्रिया के लिए आवश्यक दो $_2^3He$ नाभिक प्राप्त हो सकें। अतः पहली तीन अभिक्रियाओं को दो बार तथा चौथी अभिक्रिया को 1 बार मानते हुए विचार करें तो सकल प्रभाव है।

$$4\left({}_1^1H\right) + 2e^- \rightarrow {}_2^4He + 2\nu + 6\gamma + 26.7\,MeV$$

यदि उपरोक्त समीकरण में दोनों पक्षों में दो इलेक्ट्रॉनों का योग करे तो प्राप्त समीकरण

$$4\left({}_1^1H + e^-\right) \rightarrow \left({}_2^4He + 2e^-\right) + 2\nu + 6\gamma + 26.7\,MeV \quad \ldots(15.36)$$

ध्यान दें अब कोष्ठको में उपस्थित राशियाँ क्रमशः हाइड्रोजन व हीलियम परमाणुओं को व्यक्त कर रही है। उपरोक्त समीकरण में मुक्त ऊर्जा 26.7 MeV है। इसे द्रव्यमान क्षति के रूप में सत्यापित किया जा सकता है।

$$Q = \left(m_i - m_f\right)c^2 = \left[4M_{{}_1^1H} - M_{{}_2^4He}\right]c^2$$

यहाँ $M\left({}_1^1H\right)$ तथा $M\left({}_2^4He\right)$ क्रमशः हाइड्रोजन तथा हीलियम के परमाणु द्रव्यमान है जिनके मान क्रमशः 1.007825 u तथा 4.002603u है

$$\therefore \quad Q = \left[4\left(1.007825\right)u - 4.002603u\right] \times \left[931.5\,MeV/u\right]$$

$$= 26.7\,MeV$$

γ किरण फोटॉनों के द्रव्यमानहीन होने तथा न्यूट्रीनों के नगण्य द्रव्यमान के कारण इन्हें Q की गणना में सम्मिलित नहीं किया गया है।

सूर्य के आन्तरिक भाग का ताप लगभग 1.5×10^7 K आंकलित किया गया है। जबकि कुछ देर पूर्व हमने पढ़ा था कि ताप नाभिकीय अभिक्रियाएं लगभग 10^9K ताप पर होती है तब सूर्य में ऐसा क्यों हो रहा है? इस उलझन का समाधान यह है कि यद्यपि हम संलयन के लिए आवश्यक नाभिकों की गतिज ऊर्जा का आकलन के सूत्र 3/2 kT से करते है वस्तुतः यह ऊर्जा नाभिकों की औसत गतिज ऊर्जा है। इस ऊर्जा से कही अधिक ऊर्जा के नाभिक भी सूर्य में विद्यमान है तथा सूर्य के विशाल द्रव्यमान के कारण इस प्रकार के नाभिको की संख्या भी पर्याप्त है ताकि सूर्य में संलयन प्रक्रिया जारी रह सकती है।

वर्तमान आंकलन के अनुसार सूर्य में अगले 5×10^9 वर्षों के लिए संलयन हेतु पर्याप्त हाइड्रोजन उपलब्ध है। इसके पश्चात सूर्य की क्रोड में मुख्यतः हीलियम ही होगी। गुरुत्व के कारण सूर्य की क्रोड संकुचित होने लगेगी तथा इसका ताप बढेगा। इसके कारण सूर्य का बाहरी आवरण बहुत अधिक प्रसरित होगा संभवतः इतना कि यह पृथ्वी की कक्षा को घेर ले। ऐसी स्थिति में खगौलविज्ञान की भाषा में कहे तो सूर्य एक लाल दानव (Red giant) बन जाएगा।

महत्वपूर्ण बिन्दु (Important Points)

1. नाभिक, प्रोटॉन (धनावेश +e) तथा न्यूट्रॉन (उदासीन) से बने होते है जिन्हें सम्मिलित रूप से न्यूक्लिऑन कहा जाता है। किसी नाभिकीय प्रजाति को $^{A}_{Z}X$ से व्यक्त किया जाता है जहां X नाभिक से संबंधित तत्व का रासायनिक प्रतीक है, A द्रव्यमान संख्या (न्यूकिलऑन संख्या) तथा Z प्रोटॉन संख्या (परमाणु संख्या) कहलाती है। न्यूट्रॉन संख्या $N = A - Z$ होती है। सामान्य हाइड्रोजन नाभिक में केवल प्रोटॉन ही होता है।

2. नाभिक लगभग गोलाकार माने जाते है जिनकी त्रिज्या इस प्रकार दी जाती है

$$R = R_0 A^{1/3} \text{ जहाँ } R_0 = 1.2\,\text{fm}$$

इस प्रकार नाभिकीय आयतन $V = \frac{4}{3}\pi R_0^3 A$ अर्थात् $V \propto A.$

प्रकारांतर से इसका आशय है कि नाभिकीय द्रव्य का घनत्व इसकी द्रव्यमान संख्या पर निर्भर नहीं करता। इसका मान $2.3\times10^{17}\,kg/m^3$ कोटि का होता है जो लगभग सभी नाभिको के लिए समान है।

3. नाभिकीय द्रव्यमान एकीकृत परमाणु द्रव्यमान मात्रक (u) में मापे जाते है

$$1u = \frac{\text{एक } ^{12}C \text{ परमाणु का द्रव्यमान}}{12} = 1.66054\times10^{-27}\,kg$$

तथा $1u = 931.5\,MeV/c^2$

4. नाभिक का द्रव्यमान M इसके संघटक न्यूक्लिऑनों के कुल द्रव्यमान $\sum m$ के कम होता है द्रव्यमान क्षति $\Delta M = \sum m - M$ से दी जाती है। इसके तुल्य ऊर्जा नाभिक की बंधन ऊर्जा ΔE_b कहलाती है अर्थात् $\Delta E_b = \Delta Mc^2$

Z प्रोटॉनों तथा N न्यूट्रॉनों से युक्त नाभिक के लिए बंधन ऊर्जा इस प्रकार दी जाती है

$$\Delta E_b = \left[Zm_p + Nm_n - M\right]c^2$$

जहाँ m_p व m_n क्रमशः प्रोटॉन व न्यूट्रॉन के द्रव्यमान है तथा M नाभिक का द्रव्यमान है यदि नाभिकीय द्रव्यमान के स्थान पर परमाणविक द्रव्यमान काम लिए जाए तो

$$\Delta E_b = \left[ZM_H + Nm_n - {}^{A}_{Z}M\right]c^2$$

से दी जाती है जहाँ M_H हाइड्रोजन परमाणु का तथा $^{A}_{Z}M$ नाभिक के संगत परमाणु का द्रव्यमान है। बंधन ऊर्जा नाभिक के स्थायित्व का मापक है। यदि हम नाभिक को इसके संघटक न्यूक्लिऑनों में पृथक करने में सक्षम होते है तो हमे नाभिक को बंधन ऊर्जा के बराबर ऊर्जा देनी होती।

5. किसी नाभिक की प्रति न्यूकिलऑन बंधन ऊर्जा ΔE_{bn} इसकी बंधन ऊर्जा E_b में इसकी न्यूकिलऑन संख्या ΔA से भाग देने पर प्राप्त राशि है।

$$\Delta E_{bn} = \Delta E_b / A$$

E_{bn} का अधिक मान नाभिक के अपेक्षाकृत अधिक स्थायित्व का सूचक है। ΔE_{bn} तथा A के मध्य खींचा गया वक्र प्रदर्शित करता है कि मध्यवर्ती द्रव्यमानों के नाभिक हल्के अथवा भारी द्रव्यमानों के नाभिको की अपेक्षा अधिक स्थायी हैं। यह वक्र भारी नाभिक के मध्यवर्ती नाभिको में विखण्डन तथा हल्के नाभिको के संयलन से ऊर्जा विमुक्त होना भी दर्शाता है।

6. नाभिकीय बल बहुत ही प्रबल आकर्षण बल है जो नाभिको में न्यूक्लिऑनो को बांध कर रखता है। यह बहुत ही लघु परास (नाभिकीय आमाप कुछ fm) का होताह" पर इस परास में यह प्रोटॉनों के मध्य स्थिर विद्युत प्रतिकर्षण बल से $50 \sim 60$ गुना प्रबल होता है।

नाभिकीय बल आवेश पर अनाश्रित होते है। अर्थात् किसी दिए गए पार्थक्य के लिए $n-p, n-n$ था $p-n$ के मध्य आकर्षण बल लगभग समान परिमाण के होते है। नाभिकीय बल केन्द्रीय बल नहीं होते है तथा इनमें संतृप्तता का गुण होताह"।

न्यूक्लिऑनों के मध्य दूरी 1 fm या कम होने पर नाभिकीय बल प्रतिकर्षी हो जाते है।

7. भारी तत्वों यथा यूरेनियम, थोरियम, रेडियम इत्यादि के नाभिक $\alpha, \beta,$ या γ कणों का उत्सर्जन कर स्वतः क्षयित होते है इस प्रक्रम को रेडियोएक्टिवता कहा जाता है। यह एक नाभिकीय परिघटना है जो सामान्य भौतिक प्रक्रमों जैसे उष्मा, दाब, अवस्था परिवर्तन तथा रासायनिक क्रियाओं से अप्रभावित रहती है।

8. α कण वस्तुत, हीलियम के नाभिक (^4_2He) हैं एवं धनावेशित हैं। β किरणें इलैक्ट्रॉनों (ऋणावेशित) अथवा पाजीट्रॉनों (धनावेशित) का पुंज होती है। γ किरणे (उदासीन) बहुत उच्च ऊर्जा के फोटॉन है जिनकी तरंग दैर्ध्य X किरणों से भी कम होती है।

9. रेडियोएक्टिव क्षय नियम : रेडियोएक्टिव क्षय एक यादृच्छिक प्रक्रिया है जो एक सांख्यिकी परिघटना है। रदरफोर्ड–सोडी के क्षय नियम के अनुसार किसी क्षण पर रेडियोएक्टिव नाभिको के क्षय की दर उस समय उपस्थित अक्षयित नाभिको की संख्या के समानुपाती होती है। अर्थात् $--\dfrac{dN}{dt} = \lambda N$ समानुपाती स्थिरांक λ क्षयांक कहलाता है। तदानुसार किसी समय t पर अविघटित नाभिकों की संख्या इसप्रकार दी जाती है।

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

जहाँ N_0 समय $t = 0$ पर उपस्थित मूल नाभिकों की संख्या है। अतः रेडियोएक्टिव पदार्थ में क्षयित होने जा रहे नाभिकों की संख्या समय के साथ चर घातांकी रूप से घटती है।

10. क्षयांक $\lambda = \dfrac{dN/dt}{N}$ प्रति परमाणु रेडियोएक्टिव क्षय की दर है अथवा प्रति एकांक समय में क्षय की प्रायिकता है। समय $t = 1/\lambda$ पर रेडियोएक्टिव नाभिको की संख्या प्रांरभिक संख्या N_0 की $1/e$ रह जाती है।

11. सक्रियता (R): यह प्रति एकांक समय में क्षयित परमाणुओं की संख्या है

$$R = \left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda N \text{ तथा } R = R_0 e^{-\lambda t}, \; R_0 = \lambda N_0$$

R_0 प्रारंभिक सक्रियता है। सक्रियता भी समय के साथ चर घातांकी रूप से घटती है इसका SI मात्रक बैक्रेल (Bq) है तथा 1 Bq = 1 क्षय / सेकंड। इसके लिए एक अन्य प्रचलित मात्रक क्यूरी (Ci) भी है जो 1 g रेडियम की सक्रियता के मान के बराबर है।

$$1Ci = 3.7\times10^{10} \text{ क्षय / सेंकड } = 3.7\times10^{10}\ Bq$$

12. अर्द्धआयुः किसी रेडियेएक्टिव प्रतिदर्श में जितने समयान्तराल के अंत में रेडियोएक्टिव नाभिकों की संख्या N (अथवा सक्रियता R) प्रांरभिक संख्या N_0 (प्रारंभिक सक्रियता) की आधी रह जाती है उस समयान्तराल को प्रतिदर्ा के पदार्थ की अर्द्ध आयु T कहते है।

$$T = \frac{\ell n2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

अर्द्ध आयु के पदों में समय t पर उपस्थित नाभिकों की संख्या है

$$N = \frac{N_0}{(2)^{t/T}}$$

13. औसत आयुः यह वह समय (τ) है जिसमें किसी रेडियोएक्टिव प्रतिदर्श में सक्रिय नाभिकों की संख्या N तथा सक्रियता R दोनो घटकर अपने प्रारंभिक मान का $1/e\,(\sim 37\%)$ रह जाते है।

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ell n2}$$

14. α क्षय में भारी नाभिक (पितनाभिक) X एक α कण का उत्सर्जन कर पुत्री नाभिक Y में बदलता है।

$$^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He$$

पुत्री नाभिक की द्रव्यमान संख्या मूल नाभिक से 4 कम तथा परमाणु संख्या मूल नाभिक से 2 कम होती है। प्रक्रम की विघटन ऊर्जा

$$Q = \left(M_x - M_y - M_\alpha\right)c^2$$

से दी जाती है। इसका अधिकांश भाग α कण की गतिज ऊर्जा के रूप में ही होता है।α कणों का ऊर्जा स्पैक्ट्रम विविक्त ऊर्जाओं का समूह होता है जो नाभिक की ऊर्जा के क्वांटीकृत होने की द्योतक है।

15. β^- क्षय में पितृ नाभिक X एक इलेक्ट्रॉन तथा एक एन्टीन्यूट्रीनो $\left(\bar{\nu}\right)$ का उत्सर्जन कर पुत्री नाभिक Y में बदलता है।

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + \nu$$

इस प्रकार के क्षय में पुत्री नाभिक की द्रव्यमान संख्या पितृ नाभिक के समान ही रहती है पर परमाणु क्रमांक 1 सेबढ़ता है। वस्तुतः β^- क्षय में नाभिक के भीतर एक न्यूट्रॉन एक प्रोटॉन, एक इलेक्ट्रॉन व एक एन्टी न्यूट्रीनो में बदलता है

$${}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e^- + \nu$$

प्रोटॉन नाभिक में ही रहता है जबकि इलेक्ट्रान व एन्टी न्यूट्रीनो का उत्सर्जन होता है। β^- क्षय के लिए विघटन ऊर्जा

$$Q = \left(M_x - M_y\right)c^2$$

से दी जाती है। इलेक्ट्रॉन तथा न्यूट्रीनो परिवर्तित अनुपातों में Q में सहभागिता करते है।

16. β^+ क्षय में पितृनाभिक X, एक पाजीट्रॉन $\left(e^+\right)$ तथा एक न्यूट्रीनो $\left(\nu\right)$ उत्सर्जित कर पुत्री नाभिक Y में बदलता है।

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

पुत्री नाभिक की द्रव्यमान संख्या पितृ नाभिक के समान होती है किन्तु परमाणु संख्या 1 से घटती है। वस्तुतःइस प्रक्रम में नाभिक में एक प्रोटॉन, एक न्यूट्रॉन एक पॉजीट्रान तथा एक न्यूट्रीनो में बदलता है

$${}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

यह अभिक्रिया नाभिक के बाहर संभव नहीं है। β^+ क्षय की विघटन ऊर्जा

$$Q = \left(M_x - M_y - 2m_e\right)c^2$$

द्वारा दी जाती है। इसमें भी इलेक्ट्रॉनों की गतिज ऊर्जा व न्यूट्रीनों की गतिज ऊर्जा की सहभागिता होती है।

17. कतिपय नाभिकों में β^+ क्षय के स्थान पर इलेक्ट्रान प्रगहण प्रक्रम होता है जिसमें नाभिक परमाणु की किसी आन्तरिक कक्ष के इलेक्ट्रॉन का प्रगहण करता है जो नाभिक में प्रोटॉन से संयुक्त होकर एक न्यूट्रॉन बनाता है।

$${}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + \nu$$

18. β क्षय (β^+ व β^- दोनों के लिए) ऊर्जा स्पैक्ट्रम संतत होता है जो शून्य से अधिकतम मान $K_{max} = Q$ तक की परास में होता है। इसका कारण Q मान में इलेक्ट्रॉन (पॉजीट्रान) तथा एन्टीन्यूट्रीनो (न्यूट्रीनों) की ऊर्जा में सहभागिता के कारण है।

19. न्यूट्रीनों व एन्टीन्यूट्रीनों दोनो ही लगभग नगण्य द्रव्यमान के उदासीन कण है जो द्रव्य से नगण्य अन्योन्य क्रिया करते है। न्यूट्रीनों की परिकल्पना पॉली द्वारा β क्षय के संतत ऊर्जा स्पैक्ट्रम की व्याख्या करने तथा संवेग एवं कोणीय संवेग के संरक्षण की वैधता बनाए रखने के लिए की गई थी।

20. γ क्षयः सामान्यतः α या β क्षय के उपरान्त पुत्री नाभिक मूल अवस्था में न बन कर किसी उत्तेजित ऊर्जा अवस्था में बनता है। इसके किसी निचले ऊर्जा स्तर या मूल अवस्था में लौटने के प्रक्रम में अन्तिम एंव प्रारंभिक ऊर्जा स्तरों के अन्तर केऊर्जा मान के फोटॉन उत्सर्जित होते है जो γ फोटॉन कहलाते है।

$${}^{A}_{X}Z^* \rightarrow {}^{A}_{X}Z + \gamma$$

γ क्षय में नाभिक की द्रव्यमान संख्या तथा परमाणु संख्या दोनों अपरिवर्तित रहती हैं इनका ऊर्जा स्पैक्ट्रम विविक्त होता है।

21. नाभिकीय विखण्डन में एक भारी नाभिक अपेक्षाकृत हल्के दो मध्यवर्ती द्रव्यमानों के नाभिकों में टूटता है तथा ऊर्जा मुक्त होती हैं ${}^{235}U$ में विखण्डन एक तापीय न्यूट्रॉन के अवशोषण द्वारा प्रेरित किया जा सकता हैं विखण्डन में मुक्त ऊर्जा है

Q = (अन्तिम बंधन ऊर्जा ΔE_{bf}) – (प्रारंभिक बंधन ऊर्जा ΔE_{bi})

एक यूरेनियम नाभिक के विखण्डन से औसतन 200 MeV ऊर्जा मुक्त होती है नाभिकीय विखडन के दौरान मुक्त न्यूट्रॉनों की ऊर्जा को कम कर तापीय ऊर्जा तक ले आया जाए तो ये और ^{235}U नाभिको का विखण्डन कर सकते है यह श्रृंखला अभिक्रिया को जन्म देता है। श्रृंखला अभिक्रिया नियंत्रित या अनियंत्रित हो सकती है। श्रृंखला अभिक्रिया नियंत्रित कहलाती है यदि विखण्डन में प्राप्त न्यूट्रॉनों में से एक ही न्यूट्रॉन अगले विखण्डन हेतु उपलब्ध हो। नियंत्रित श्रृंखला अभिक्रिया का उपयोग नभिकीय भट्टी में ऊर्जा उत्पादन के लिए किया जाता है। अनियंत्रित श्रृंखला अभिक्रिया विध्वसंकारी होती है जो परमाणु बम में काम ली जाती है।

22. नाभिकीय भट्टी एक युक्ति है जिसमें एक स्वसंपोषी नियंत्रित श्रृंखला अभिक्रिया द्वारा ऊर्जा उत्पन्न की जाती है। सामान्यतः इसमें संवर्धित यूरेनियम 235 का इंधन के रूप में उपयोग होता है। विखण्डन में प्राप्त तीव्रगामी न्यूट्रॉनों को तापीय ऊर्जा तक लाने के लिए इनकी मंदक पदार्थों जैसे जल भारी जल या ग्रेफाइट से टक्करे होती है। न्यूट्रॉन अवशोषक पदार्थ जैसे कैडमियम की छडो द्वारा अभिक्रिया को नियंत्रित किया जाता है। भट्टी में ऊर्जा के रूप में उत्पन्न उष्मा को शीतलक पदार्थों यथा जल, पिघला सोडियम इत्यादि के द्वारा हटाया जाता है। भट्टी से उत्सर्जित हानिकार के नाभिकीय विकिरणों को रोकने के लिए इसे 7 से 8 फीट मोटी कंक्रीट का दीवारों द्वारा परिरक्षित किया जाता है।

24. नाभिकीय संलयन के प्रक्रम में दो नाभिक संयुक्त होकर अपेक्षाकृत अधिक द्रव्यमान संख्या के नाभिक में बदलते तथा ऊर्जा मुक्त करते है। संलयन प्रक्रिया के लिए बहुत उच्च ताप $\sim 10^9$ K की आवश्यकता होती है। सूर्य एवं अन्य तारों में ऊर्जा जनन तापनाभिकीय संलयन के कारण ही होता है। वर्तमान में ऊर्जा उत्पादन के लिए संलयन भट्टी के निर्माण के लिए प्रयास जारी है।

अभ्यासार्थ प्रश्न

बहुचयनात्मक प्रश्न

1. नाभिक $^{64}_{30}Zn$ की त्रिज्या लगभग है (fm में)

(अ) 1.2 (ब) 2.4
(स) 4.8 (द) 3.7

2. यदि $^{7}_{3}Li$ समस्थानिक का द्रव्यमान 7.016005 u तथा H परमाणु व न्यूट्रॉन के द्रव्यमान क्रमशः 1.007825 u व 1.008665 u है Li नाभिक की बंधन ऊर्जा है

(अ) 5.6 MeV (ब) 8.8 MeV
(स) 0.42 MeV (द) 39.2 MeV

3. यदि किसी समय किसी रेडियोएक्टिव प्रतिदर्श में 1.024×10^{24} सक्रिय परमाणु है तो आठ अर्द्धआयुकाल के बाद शेष सक्रिय परमाणुओं की संख्या है

(अ) 1.024×10^{20} (ब) 4.0×10^{17}
(स) 6.4×10^{18} (द) 1.28×10^{19}

4. लकड़ी के किसी पुरातन प्रतिदर्श में ^{14}C की सक्रियता 10 विघटन प्रति सेंकड प्रतिग्राम प्रतिदर्श पाई जाती है जबकि लकडी के ताजे प्रतिदर्श में सक्रियता 14.14 विघटन प्रति सेकंड प्रतिग्राम पाई जाती है। यदि ^{14}C की अर्द्ध आयु 5700 वर्ष है तब प्रतिदर्श की आयु लगभग है

(अ) 2850 वर्ष (ब) 4030 वर्ष
(स) 5700 वर्ष (द) 8060 वर्ष

5. $^{238}_{92}U$ के अंततः स्थायी नाभिक $^{206}_{82}Pb$ में क्षयित होने के प्रक्रम में उत्सर्जित α तथा β कणों की संख्या क्रमशः है

(अ) 8, 8 (ब) 6, 6
(स) 6, 8 (द) 8, 6

6. ड्यूटीरियम नाभिक के लिए प्रतिन्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा 1.115 MeV है। तब इस नाभिक के लिए द्रव्यमान क्षति है लगभग

(अ) 2.23 u (ब) 0.0024 u
(स) 0.027 u (द) और अधिक सूचना चाहिए

7. दो प्रोटॉन परस्पर 10 Å की दूरी पर रखे है। इनके मध्य नाभिकीय बल F_n तथा स्थिर वैद्युत बल F_e है अतः

(अ) $F_n >> F_e$
(ब) $F_e >> F_n$
(स) $F_n = F_e$
(द) F_n, F_e से थोडा ही अधिक है

8. एक ड्यूट्रॉन तथा α कण की प्रतिन्यूकिलऑन बंधन ऊर्जाएं क्रमशः x_1 व x_2 है तो संलयन अभिक्रिया $^2_1H + ^2_1H + \rightarrow ^4_2He + Q$ में मुक्त ऊर्जा Q है

(अ) $4(x_1 + x_2)$ (ब) $4(x_1 + x_1)$
(स) $2(x_1 + x_2)$ (द) $2(x_2 - x_1)$

9. निम्नलिखित में से सर्वाधिक बंधन ऊर्जा प्रतिन्यूकिलऑन का नाभिक है

(अ) ${}^{238}_{92}U$ (ब) ${}^{4}_{2}He$

(स) ${}^{16}_{8}O$ (द) ${}^{56}_{26}Fe$

10. 40% दक्षता वाली एक नाभिकीय भट्टी में 10^{14} विघटन/सेंकड हो रहे है। यदि प्रति विखण्डन प्राप्त ऊर्जा 250 MeV है तो भट्टी का शक्ति निर्गम है

(अ) 2 kW (ब) 4 kW

(स) 81.6 kW (द) 3.2 kW

11. β^- क्षय में उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन की उत्पति है

(अ) परमाणु की आन्तरिक कक्षाओं से

(ब) नाभिक में विद्यमान मुक्त इलेक्ट्रॉनों से

(स) नाभिक में न्यूट्रान के विघटन से

(द) नाभिक से उत्सर्जित फोटॉन से

12. एक माध्य आयु में

(अ) आधे सक्रिय नाभिक क्षयित होते है

(ब) आधे से अधिक सक्रिय नाभिक क्षयित होते है

(स) आधे से कम सक्रिय क्षयित होते है

(द) सभी नाभिक क्षयित होते है

13. द्रव्यमान संख्या में वृद्धि होने पर नाभिक से संबंधित कौन सी राशि परिवर्तित नहीं होती

(अ) द्रव्यमान (ब) आयतन

(स) बंधन ऊर्जा (द) घनत्व

14. निम्नलिखित में से कौनसी विद्युत चुंबकीय तरंग है

(अ) α किरणे (ब) β किरणे

(स) γ किरणे (द) कैथोड किरणे

15. ${}^{22}Ne$ नाभिक ऊर्जा अवशोषित करने के बाद दो α कणों एवं एक अज्ञात नाभिक में क्षय हो जाता है। अज्ञात नाभिक है

(अ) ऑक्सीजन (ब) बोरान

(स) सिलिकॉन (द) कार्बन

अतिलघूत्तरात्मक प्रश्न

1 ${}^{22}_{15}X$ नाभिक में प्रोटॉनो एवं न्यूट्रॉनों की संख्या क्या है?

2 1u द्रव्यमान के तुल्य ऊर्जा (MeV) में लिखिए।

3 कोई नाभिक β क्षय के उपरान्त अपने समस्थानिक या समभारिक किसमें बदलता है?

4 α तथा β किरणों में से किसका स्पैक्ट्रम विविक्त होता है?

5 विखण्डन की कौन सी श्रृंखला पर परमाणु भट्टी आधारित है?

6 परमाणु भट्टी में मंदक के रूप में काम आने वाले किसी एक पदार्थ का नाम लिखिए।

7 किसी रेडियो एक्टिव पदार्थ की अर्द्धआयु T तथा क्षमांक λ में संबंध लिखिए।

8 सक्रियता की SI इकाई क्या है?

9 चार अर्द्ध आयुओं के पश्चात किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ की कितनी प्रतिशत मात्रा अवशेष रहेंगी?

10 सूर्य में ऊर्जा उत्पादन करने के लिए कौनसी नाभिकीय अभिक्रिया उत्तरदायी है?

11 एक रेडियोएक्टिव तत्व जिसकी द्रव्यमान संख्या 218 व परमाणु संख्या 84 है β^- कण उत्सर्जित करता है। विघटन के बाद तत्व की द्रव्यमान संख्या एवं परमाणु संख्या क्या होगी?

12 क्या γ क्षय के बाद नाभिक की द्रव्यमान संख्या में हानि होता है?

13 लोहे अथवा सीसे के नाभिक में से किस से एक न्यूक्लिऑन बाहर निकालना अधिक आसान है

14 किसी नाभिकीय विखण्डन में नाभिक मध्यवर्ती द्रव्यमानों के असमान द्रव्यमान के दो नाभिको में टूटता है। दोनों में से किसमें (हल्के या भारी में) अधिक गतिज ऊर्जा होगी।

15 यदि एक नाभिक के न्यूक्लिऑनो को एक दूसरे से पृथक कर दिया जाए तो कुल द्रव्यमान बढता है। यह द्रव्यमान कहां से आता है।

लघूत्तरात्मक प्रश्न

1 हाइड्रोजन के अणु में दो प्रोटॉन तथा दो इलेक्ट्रॉन है। हाइड्रोजन अणु के व्यवहार की विवेचना में इन प्रोटॉनों के मध्य के नाभिकीय बल की सदैव उपेक्षा की जाती है। क्यों?

2 एक विद्यार्थी यह दावा करता है कि हाइड्रोजन का एक भारी रूप (समस्थानिक) एल्फा क्षय कर विघटित होता है। आप क्या प्रतिक्रिया देंगें?

3 एकीकृत परमाणु द्रव्यमान मात्रक (u) को परिभाषित कीजिए।

4 नाभिकीय द्रव्यमान क्षति से तात्पर्य समझाइए।

5 रेडियोएक्टिवता को परिभाषित कीजिए।

6 रदरफोर्ड–सोडी नियम का उल्लेख कीजिए।

7 रेडियोएक्टिव तत्व की अर्द्धआयु व माध्य आयु की परिभाषा दीजिए तथा इनमें संबंध लिखिए।

8 α क्षय किसे कहते है? α कणों का ऊर्जा स्पैक्ट्रम किस प्रकार का होता है?

9 β किरण स्पैक्ट्रम एक संतत ऊर्जा स्पैक्ट्रम है, से क्या तात्पर्य है?

10 न्यूट्रीनो परिकल्पना β क्षय की प्रक्रिया में कौन से संरक्षण नियमों की व्याख्या में सहायक होता है

11 नाभिकीय बलो के कोई दो गुण लिखिए।

12 बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन से क्या आशय है। यह नाभिक के स्थायित्व से किस प्रकार संबंधित है।

13 नाभिकीय विखण्डन को परिभाषित कीजिए।

14 नाभिकीय श्रृंखला अभिक्रिया में क्रान्तिक द्रव्यमान से क्या आशय है?

15 नाभिकीय भट्टी में भारी जल एक उपयुक्त मंदक है, क्यों?

निबन्धात्मक प्रश्न

1 नाभिक की संरचना का वर्णन करते हुए नाभिकीय बलों की विवेचना कीजिए।

2 द्रव्यमान क्षति तथा बंधन ऊर्जा को समझाईए। प्रतिन्यूक्ऑिन बंधन ऊर्जा व द्रव्यमान संख्या के आलेख से प्राप्त मुख्य निष्कर्षो को समझाइए।

3 रेडियोएक्टिव क्षय के नियम लिखिए। चरघातांकी क्षय के नियम का उपयोग करते हुए तत्व की अर्द्ध आयु व माध्य आयु के सूत्र ज्ञात कीजिए।

4 नाभिकीय विखण्डन से क्या तात्पर्य है? विखण्डन की क्रिया स्वयं श्रृंखलाबद्ध क्यों नहीं होती है? समझाईए कि श्रृंखलाबद्ध अभिक्रिया प्राप्त करने के लिए क्या करना होता है।

5 नाभिकीय भट्टी का सरल रेखा चित्र बनाते हुए इसकी प्रक्रिया स्पष्ट कीजिए।

6 β क्षय को समझाइए। β क्षय में न्यूट्रीनो परिकल्पना की विवेचना कीजिए।

7 रेडियो एक्टिव नाभिक से α क्षय की व्याख्या कीजिए। समझाइए कि क्षय से प्राप्त α कणों का ऊर्जा स्पैक्ट्रम विविक्त ऊर्जाओं का समूह होता है।

8 संलयन में प्रोटॉन–प्रोटॉन चक्र किस प्रकार संपन्न होता है ये ताप नाभिकीय अभिक्रियाएं प्रयोगशाला में क्यों संपन्न नहीं हो सकती?

उत्तरमाला (बहुचयानात्मक प्रश्न)

1. (स)	2. (द)	3. (ब)	4. (अ)	5. (द)	6. (ब)
7. (ब)	8. (ब)	9. (द)	10. (स)	11. (स)	12. (ब)
13. (द)	14. (स)	15. (द)			

अतिलघुत्तरात्मक प्रश्न

1. 15, 17

2. 931.5 MeV

3 समभारिक

4 α कण

5 नियंत्रित

6 ग्रेफाइट / भारी जल / जल

7 $$T = \frac{\ell n2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

8 1 Bq = 1 विघटन / सेंकड

9 6.25%

10 ताप नाभिकीय संलयन

11 218, 85

12 नहीं

13 सीसे के नाभिक से

14 हल्के नाभिक में

15 नाभिक की बंधन ऊर्जा से

आंकिक प्रश्न

1 न्यूक्लिऑन संख्या 16 के एक नाभिक की त्रिज्या 3×10^{-15} m है। उस नाभिक जिसकी न्यूकिलऑन संख्या 128 है की त्रिज्या क्या होगी।

(उत्तर: 6×10^{-15} m)

2 $^{56}_{26}Fe$ नाभिक के लिए बंधन ऊर्जा ज्ञात करो (दिया है $^{56}_{26}Fe$ का द्रव्यमान $= 55.9349\,u$, न्यूट्रॉने का द्रव्यमान $= 1.00867u$ प्रोटॉन का द्रव्यमान $= 1.00783u$ तथा $1u = 931\,\text{MeV/c}^2$

(उत्तर: 492 MeV)

3 एक रेडियोएक्टिव समस्थानिक X की अर्द्धआयु 3s है। प्रारंभ में इस समस्थानिक के किसी प्रतिदर्श में 8000 परमाणु है। गणना कीजिए (i) इसका क्षय नियतांक (ii) समय t जिस पर इस प्रतिदर्श में 1000 परमाणु सक्रिय रहेंगें।

¼mÙkj %0.231 s^{-1}, 9 s)

4 एक रेडियोएक्टिव नाभिक इस प्रकार क्षयित होता है

$$X \xrightarrow{\alpha} X_1 \xrightarrow{\beta^-} X_2 \xrightarrow{\alpha} X_3 \xrightarrow{\gamma} X_4$$

यदि X की द्रव्यमान संख्या 180 व परमाणु संख्या 72 है तो नाभिक X_4 की द्रव्यमान संख्या तथा परमाणु संख्या ज्ञात कीजिए।

(उत्तर: 172, 69)

5 एक यूरेनियम 235 नाभिक के विखण्डन से लगभग 200 MeV ऊर्जा प्राप्त होती है। यूरेनियम 235 को ईंधन के रूप में काम ले रही एक नाभिकीय भट्टी 1000 kW शक्ति उत्पन्न करती है तो इनमें प्रतिसेकण्ड विखंडित हो रहे नाभिको की संख्या ज्ञात करो।

(उत्तर: 3.12×10^{16})

6 संलयन अभिक्रिया $^2_1H + ^2_1H \rightarrow ^3_2He + ^1_0n$ में ड्यूट्रॉन

हीलियम तथा न्यूट्रॉन के द्रव्यमान क्रमशः 2.015 u, 0.017 u तथा 1.009 u है। यदि 1 kg ड्यूट्रीयन का पूर्ण संलयन होना है तो मुक्त ऊर्जा ज्ञात कीजिए [1u = 9.31 MeV/c^2 लें]

(उत्तरः 5.6×10^{26} MeV = 9.0×10^{13} J)

7 अभिक्रिया $^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{140}_{54}Xe + ^{94}_{38}Sr + 2\,^{1}_{0}n + Q$ के लिए Q मान ज्ञात कीजिए। दिया है

$^{235}_{92}U$ का द्रव्यमान = 235.0435 u

$^{14}_{54}Xe$ का द्रव्यमान = 139.9054 u

$^{94}_{38}Sr$ का द्रव्यमान = 93.9063 u

$^{1}_{0}n$ का द्रव्यमान = 1.00867 u

(उत्तरः 207.73 MeV)

8 एक मिली क्यूरी सक्रियता के लिए ^{227}Th की मात्रा ज्ञात कीजिए इसकी अर्द्ध आयु 19 वर्ष है

(उत्तरः 1.206×10^{-6} g)

9 किसी प्रयोग में रेडियोएक्टिव तत्व के दिए गए प्रतिदर्श की सक्रियता 6400 विघटन प्रति मिनट पाई गई। 6 दिन यह प्रयोग दोहराए जाने पर सक्रियता 400 विघटन प्रतिमिनट हो गई। दिए गए तत्व की अर्द्धआयु ज्ञात कीजिए।

(उत्तरः 1.5 दिन)

10 $^{226}_{88}Re$ के एक नाभिक से एक α कण उत्सर्जित होता है। यदि α कण की ऊर्जा 4.662 MeV है तो इस क्षय में कुल मुक्त ऊर्जा कितनी है

(उत्तरः 4.746 MeV)

11 नाभिक $^{176}X, \beta$ क्षय कर नाभिक ^{176}Y में क्षयित होता है यदि X तथा Y के परमाणवीय द्रव्यमान क्रमशः 175.942694 u तथा 175.941426 u है तो उत्सर्जित β कण की अधिकतम ऊर्जा ज्ञात कीजिए।

(उत्तरः 1.182 MeV)