

नाभिकीय भौतिकी

पाठ्य पुस्तक के प्रश्न एवं उत्तर

बहुचयनात्मक प्रश्न

प्रश्न 1. नाभिक ${}_{30}^{64}\text{Zn}$ की त्रिज्या लगभग है (फर्मी में)

- (अ) 1.2
- (ब) 2.4
- (स) 4.8
- (द) 3.7

उत्तर: (स) 4.8

$${}_{30}^{64}\text{Zn}$$

$$\frac{4}{3}\pi R^3 \propto A$$

$$\begin{aligned} R &= R_0 A^{1/3} \\ R &= (1.2 \text{ fm}) (64)^{1/3} \\ R &= (1.2 \text{ fm}) (4^3)^{1/3} \\ R &= 4.8 \text{ fm} \end{aligned}$$

प्रश्न 2. यदि ${}^7_3\text{Li}$ 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

उत्तर: (द) 39.2 MeV

$$\begin{aligned} \Delta m &= [3 \times 1.007825 + 4 \times 1.008665] - 7.016005 \\ \Delta m &= [3.023475 + 4.03466] - 7.016005 \\ \Delta m &= [7.058135 \text{ u} - 7.016005 \text{ u}] \\ \Delta m &= 0.042134 \text{ u} \\ E_B &= \Delta mc^2 \end{aligned}$$

$$E_B = 0.04213 \times 931.5 \frac{\text{MeV}}{c^2} c^2$$

$$E_B = 39.24 \text{ MeV}$$

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

- (अ) 1.024×10^{20}
 (ब) 4.0×10^{21}
 (स) 6.4×10^{18}
 (द) 1.28×10^{19}

उत्तर: (ब) 4.0×10^{21}

$$N = \frac{N_0}{2^n} \quad n = 8$$

$$N = \frac{1.024 \times 10^{24}}{2^8}$$

$$N = \frac{1.024 \times 10^{24}}{256}$$

$$N = \frac{1024 \times 10^{21}}{256}$$

$$N = 4 \times 10^{21}$$

प्रश्न 4. लकड़ी के किसी पुरातन प्रतिदर्श में ^{14}C की सक्रियता 10 विघटन प्रति सेकंड प्रतिग्राम प्रतिदर्श पाई जाती है; जबकि लकड़ी 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।

उत्तर: (अ) 2850 वर्ष

सक्रियता

$$R_1 = 14.14$$

$$R_1 = \frac{1414}{100} \text{ विघटन/से. ग्राम}$$

$$R_2 = 10 \text{ विघटन/से. ग्राम}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{10}{1414}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1000}{1414}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{1.414}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{(2)^{1/2}} \quad \dots(i)$$

हम जानते हैं कि;

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{(2)^{t/T}} \quad \dots(ii)$$

(i) व (ii) की तुलना करने पर

$$\frac{t}{T} = \frac{1}{2}$$

$$t = \frac{T}{2} \Rightarrow \frac{5700}{2}$$

$$t = 2850 \text{ वर्ष}$$

प्रश्न 5. ${}_{92}^{238}\text{U}$ के अंततः स्थायी नाभिक ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ 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

उत्तर: (द) 8, 6

$$\alpha \text{ कणों की संख्या} = \frac{\text{द्रव्यमान संख्या में अन्तर}}{4}$$

$$\alpha \text{ कणों की संख्या} = \frac{238 - 206}{4}$$

$$= \frac{32}{4}$$

$$= 8$$

β कणों की संख्या = $2(\alpha \text{ कणों की संख्या}) - \text{परमाणु क्रमांक में अन्तर}$

$$= 2(8) - (92 - 82)$$

$$= 16 - 10$$

$$= 6$$

प्रश्न 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) 0.027u

(द) और अधिक सूचना चाहिए

उत्तर: (ब) 0.0024 u

$${}_1\text{H}^2 \text{ द्रव्यमान संख्या } A = 2$$

$$\text{ड्यूटीरियम की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा } \bar{E}_b = 1.115 \text{ MeV}$$

$$\text{बन्धन ऊर्जा } E_b = \bar{E}_b \times A$$

$$E_b = 1.115 \text{ MeV} \times 2$$

$$E_b = 2.230 \text{ MeV}$$

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

(अ) $F_n \gg F_e$

(ब) $F_e \gg F_n$

- (स) $F_n = F_e$
 (द) F_n, F_e से थोड़ा ही अधिक है।

उत्तर: (ब) $F_e \gg F_n$

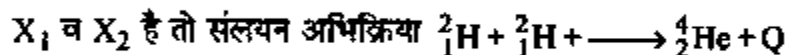
$$\text{द्रव्यमान ऊर्जा } \Delta m = \frac{2.230}{931}$$

$$\Delta m = \frac{2.230}{931}$$

$$\Delta m = 0.0024 \text{ u}$$

प्रश्न 8.

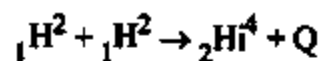
एक ड्यूट्रॉन तथा α कण की प्रतिन्यूक्लियॉन बंधन ऊर्जाएँ क्रमशः



में मुक्त ऊर्जा Q है—

- (अ) $4(X_1 + X_2)$
 (ब) $4(X_1 - X_2)$
 (स) $2(X_1 + X_2)$
 (द) $2(X_1 - X_2)$

उत्तर: (ब) $4(X_1 - X_2)$

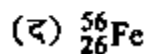
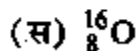
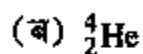
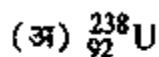


$$Q = 2x_1 + 2x_1 - 4x_2$$

$$Q = 4x_1 - 4x_2$$

$$Q = 4(x_1 - x_2)$$

प्रश्न 9. निम्नलिखित में से सर्वाधिक बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लियॉन को नाभिक है-



उत्तर: (द)

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

- (अ) 2kW
- (ब) 4kW
- (स) 1.6 kW
- (द) 3.2kW

उत्तर: (स) 1.6 kW

प्रश्नानुसार प्रति विखण्डन प्राप्त ऊर्जा = 250 MeV

$$= 250 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ जूल}$$

प्रति सेकण्ड विखण्डनों की संख्या = 10^{14}

$$\therefore \text{प्रति सेकण्ड प्राप्त ऊर्जा} = 250 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{14}$$

40% दक्षता है अतः निर्गम शक्ति

$$P = 250 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \times \frac{40}{100}$$

$$P = 1.6 \times 10^3 \text{ वाट} = 1.6 \text{ kW}$$

प्रश्न 11. β - क्षय में उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन की उत्पत्ति है-

- (अ) परमाणु की आन्तरिक कक्षाओं से
- (ब) नाभिक में विद्यमान मुक्त इलेक्ट्रॉनों से
- (स) नाभिक में न्यूट्रॉन के विघटन से
- (द) नाभिक से उत्सर्जित फोटॉन से

उत्तर: (स) नाभिक में न्यूट्रॉन के विघटन से

प्रश्न 12. एक माध्य-आयु में

- (अ) आधे सक्रिय नाभिक क्षयित होते हैं।
- (ब) आधे से अधिक सक्रिय नाभिक क्षयित होते हैं।
- (स) आधे से कम सक्रिय क्षयित होते हैं।
- (द) सभी नाभिक क्षयित होते हैं।

उत्तर: (ब) आधे से अधिक सक्रिय नाभिक क्षयित होते हैं।

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

- (अ) द्रव्यमान
- (ब) आयतन

- (स) बंधन ऊर्जा
(द) घनत्व

उत्तर: (द) घनत्व

प्रश्न 14. निम्नलिखित में से कौन सी विद्युत चुंबकीय तरंग है।

- (अ) α किरणें
(ब) β किरणें ।
(स) γ किरणें
(द) कैथोड किरणें

उत्तर: (स) γ किरणें

प्रश्न 15. $^{22}_{10}\text{Ne}$ 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 उत्तरमाला

उत्तर: (द) कार्बन उत्तरमाला

अति लघूत्तरात्मक प्रश्न

प्रश्न 1. $^{22}_{15}\text{X}$ नाभिक में प्रोटॉनों एवं न्यूट्रॉनों की संख्या है?

उत्तर: ${}_Z\text{X}^A$ से तुलना करने पर $Z = 15$ (प्रोटॉनों की संख्या)

$$A = 22$$

$$A - Z = 22 - 15$$

$$= 7 \text{ न्यूट्रॉनों की संख्या}$$

प्रश्न 2. $^{238}_{92}\text{U}$ द्रव्यमान के तुल्य ऊर्जा (MeV) में लिखो।

उत्तर: 931.5 MeV [अनुच्छेद 15.3 देखें]

0 15.3. परमाणु द्रव्यमान मात्रक (Atomic mass unit)

परमाणुओं, नाभिकों तथा मूल कणों (इलेक्ट्रॉन, प्रोटॉन, न्यूट्रॉन आदि) के द्रव्यमान इतने अल्प होते हैं कि उन्हें kg में व्यक्त करना असुविधाजनक है, अतः इनके द्रव्यमानों को व्यक्त करने के लिए छोटा मात्रक चुना गया जिसे 'परमाणु द्रव्यमान मात्रक' (संक्षेप में amu) कहते हैं। "एक परमाणु द्रव्यमान मात्रक ${}_6\text{C}^{12}$ के एक परमाणु के द्रव्यमान के बारहवें भाग के बराबर होता है।"

$$\therefore 1 \text{ amu} = \frac{1}{12} \times ({}_6\text{C}^{12} \text{ के एक परमाणु का द्रव्यमान})$$

amu को डॉल्टन भी कहते हैं, अतः

$$1 \text{ amu} = 1 \text{ डॉल्टन}$$

1 amu का आंकिक मान (Numerical Value of 1 amu) — (${}_6\text{C}^{12}$)
कार्बन के एक ग्राम-परमाणु का भार 12 ग्राम है तथा किसी भी तत्व के एक ग्राम परमाणु में परमाणुओं की संख्या एवोगैड्रो संख्या (N) के बराबर होती है, अतः

$${}_6\text{C}^{12} \text{ के एक परमाणु का द्रव्यमान} = \frac{12}{N} \text{ ग्राम}$$

\therefore परिभाषानुसार—

$$1 \text{ amu} = \frac{1}{12} \times ({}_6\text{C}^{12} \text{ के एक परमाणु का द्रव्यमान})$$

$$= \frac{1}{12} \times \frac{12}{N}$$

$$= \frac{1}{N} \text{ ग्राम}$$

$$= \frac{1}{6.02 \times 10^{23}} \text{ ग्राम}$$

$$= 1.660 \times 10^{-24} \text{ ग्राम}$$

$$= 1.660 \times 10^{-27} \text{ किग्रा.}$$

\therefore

$$\boxed{1 \text{ amu} = 1.660 \times 10^{-27} \text{ kg}}$$

1 amu के तुल्य ऊर्जा (Energy Equivalent to 1 amu) —
आइन्स्टीन के द्रव्यमान ऊर्जा समीकरण ($E = mc^2$) के अनुसार 1 amu के तुल्य ऊर्जा

$$E = (1.660 \times 10^{-27}) \times (3 \times 10^8)^2 \text{ J}$$

$$= 1.660 \times 9 \times 10^{-11} \text{ J}$$

$$= \frac{1.66 \times 9 \times 10^{-11}}{1.6 \times 10^{-19}} \text{ eV}$$

$$= 9.31 \times 10^8 \text{ eV}$$

$$= 931 \times 10^6 \text{ eV}$$

$$= 931 \text{ MeV}$$

\therefore

$$1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV}$$

अर्थात् 1 amu द्रव्यमान के तुल्य ऊर्जा 931 MeV है।

सारणी : विभिन्न मात्रकों में प्रोटॉन, न्यूट्रॉन इलेक्ट्रॉन तथा

हाइड्रोजन परमाणु (^1_1H) के द्रव्यमान

कण	द्रव्यमान		
	kg	4	MeV/c ²
प्रोटॉन	1.6726×10^{-27}	1.007276	938.28
न्यूट्रॉन	1.6726×10^{-27}	1.007276	938.28
इलेक्ट्रॉन	1.6726×10^{-27}	1.007276	938.28
^1_1H परमाणु	1.6726×10^{-27}	1.007276	938.28

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

उत्तर: समभारिक नाभिक में; क्योंकि β क्षय में एक न्यूक्लियॉन दूसरे न्यूक्लियॉन में रूपान्तरित होता है।

प्रश्न 4. α तथा β किरणों में से किसका स्पेक्ट्रम विविक्त होता है?

उत्तर: α -कण का।

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

उत्तर: नाभिकीय विखण्डन नियंत्रित श्रृंखला की अभिक्रिया पर आधारित है।

प्रश्न 6. परमाणु भट्टी में मंदक के रूप में काम आने वाले किसी एक पदार्थ का नाम लिखो?

उत्तर: ग्रेफाइट, भारी जल, जल।

प्रश्न 7. किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ की अर्द्ध-आयु तथा क्षयांक (λ) में सम्बन्ध लिखो?

उत्तर:

$$T = \frac{\log_e 2}{\lambda}$$

$$T = \frac{2.303 \log_{10} 2}{\lambda}$$

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

प्रश्न 8. सक्रियता की S.I इकाई क्या है?

उत्तर:

$$1 \text{ बेकुरल (Bq)} = \frac{1 \text{ विघटन}}{\text{सेकण्ड}}$$

प्रश्न 9. चार अर्द्ध-आयुओं के पश्चात् किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ की कितनी प्रतिशत मात्रा अवशेष रहेगी?

उत्तर:

$$\text{सक्रिय नाभिकों की संख्या } N = \frac{N_0}{2^n}$$

$$N = \frac{N_0}{2^4}$$

$$N = \frac{N_0}{16} \times 100$$

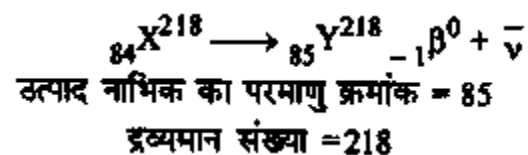
$$N = 6.25\%$$

प्रश्न 10. सूर्य में ऊर्जा उत्पादन करने के लिये कौन-सी नाभिकीय अभिक्रिया उत्तरदायी है?

उत्तर: तापीय नाभिकीय संलयन अभिक्रिया।

प्रश्न 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?

उत्तर:



प्रश्न 12. क्या γ क्षय के बाद नाभिक की द्रव्यमान संख्या में हानि होती है?

उत्तर: γ क्षय के पश्चात् नाभिक के परमाणु क्रमांक एवं द्रव्यमान संख्या अपरिवर्तित रहती है; परन्तु ऊर्जा की अवस्था में परिवर्तन होता है।

प्रश्न 13. लोहे अथवा सीसे के नाभिक में से किस से एक न्यूक्लियॉन बाहर निकालना अधिक आसान है?

उत्तर: सीसे से बाहर निकालना आसान है। क्योंकि सीसे की प्रति न्यूक्लियॉन बंधन ऊर्जा लोहे से कम है।

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

उत्तर: नाभिकीय विखण्डन में संवेग संरक्षित होगा।

$$E_K = \frac{p^2}{2m}$$

$$\therefore E_K \propto \frac{1}{m}$$

हल्के नाभिक की गतिज ऊर्जा अधिक होगी।

प्रश्न 15. यदि एक नाभिक के न्यूक्लियॉनों को एक-दूसरे से पृथक् कर दिया जाय तो कुल द्रव्यमान बढ़ता है। यह द्रव्यमान कहाँ से आता

उत्तर: यह द्रव्यमान नाभिक की बन्धन ऊर्जा से प्राप्त होता है।

लघुत्तरात्मक प्रश्न

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

उत्तर: क्योंकि अणुओं के बीच की दूरी A कोटि की होती है, जबकि नाभिकीय बल जिस दूरी पर कार्य करता है वह दूरी फर्मी कोटि की होती है।

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

उत्तर: α क्षय होने पर मातृ नाभिक से जो उत्पाद नाभिक प्राप्त होता है उसके परमाणु क्रमांक में 2 की कमी हो जाती है, जबकि हाइड्रोजन समस्थानिक के लिये सम्भव नहीं है।

प्रश्न 3. एकीकृत परमाणु द्रव्यमान मात्रक (u) को परिभाषित कीजिये।

उत्तर: परमाणु द्रव्यमान मात्रक (Atomic mass unit)

परमाणुओं, नाभिकों तथा मूल कणों (इलेक्ट्रॉन, प्रोटॉन, न्यूट्रॉन आदि) के द्रव्यमान इतने अल्प होते हैं कि उन्हें kg में व्यक्त करना असुविधाजनक है, अतः इनके द्रव्यमानों को व्यक्त करने के लिए छोटा मात्रक चुना गया जिसे 'परमाणु द्रव्यमान मात्रक' (संक्षेप में amu) कहते हैं। 'एक परमाणु द्रव्यमान मात्रक ${}_6C^{12}$ के

एक परमाणु के द्रव्यमान के बारहवें भाग के बराबर होता है।”

$$\therefore 1 \text{ amu} = \frac{1}{12} \times ({}_6\text{C}^{12} \text{ के एक परमाणु का द्रव्यमान})$$

amu को डॉल्टन भी कहते हैं, अतः

$$1 \text{ amu} = 1 \text{ डॉल्टन}$$

1 amu का आंकिक मान (Numerical Value of 1 amu)—(${}_6\text{C}^{12}$) कार्बन के एक ग्राम-परमाणु का भार 12 ग्राम है तथा किसी भी तत्व के एक ग्राम परमाणु में परमाणुओं की संख्या एवोगैड्रो संख्या (N) के बराबर होती है, अतः

$${}_6\text{C}^{12} \text{ के एक परमाणु का द्रव्यमान} = \frac{12}{N} \text{ ग्राम}$$

\therefore परिभाषानुसार—

$$1 \text{ amu} = \frac{1}{12} \times ({}_6\text{C}^{12} \text{ के एक परमाणु का द्रव्यमान})$$

$$= \frac{1}{12} \times \frac{12}{N}$$

$$= \frac{1}{N} \text{ ग्राम}$$

$$= \frac{1}{6.02 \times 10^{23}} \text{ ग्राम}$$

$$= 1.660 \times 10^{-24} \text{ ग्राम}$$

$$= 1.660 \times 10^{-27} \text{ किग्रा.}$$

$$\therefore \boxed{1 \text{ amu} = 1.660 \times 10^{-27} \text{ kg}}$$

1 amu के तुल्य ऊर्जा (Energy Equivalent to 1 amu)—
आइन्स्टीन के द्रव्यमान ऊर्जा समीकरण ($E = mc^2$) के अनुसार 1 amu के तुल्य ऊर्जा

$$E = (1.660 \times 10^{-27}) \times (3 \times 10^8)^2 \text{ J}$$

$$= 1.660 \times 9 \times 10^{-11} \text{ J}$$

$$= \frac{1.66 \times 9 \times 10^{-11}}{1.6 \times 10^{-19}} \text{ eV}$$

$$= 9.31 \times 10^8 \text{ eV}$$

$$= 931 \times 10^6 \text{ eV}$$

$$= 931 \text{ MeV}$$

$$\therefore 1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV}$$

अर्थात् 1 amu द्रव्यमान के तुल्य ऊर्जा 931 MeV है।

सारणी : विभिन्न भात्रकों में प्रोटॉन, न्यूट्रॉन इलेक्ट्रॉन तथा

हाइड्रोजन परमाणु (${}^1_1\text{H}$) के द्रव्यमान

कण	द्रव्यमान		
	kg	4	MeV/c ²
प्रोटॉन	1.6726×10^{-27}	1.007276	938.28
न्यूट्रॉन	1.6726×10^{-27}	1.007276	938.28
इलेक्ट्रॉन	1.6726×10^{-27}	1.007276	938.28
${}^1_1\text{H}$ परमाणु	1.6726×10^{-27}	1.007276	938.28

प्रश्न 4. नाभिकीय द्रव्यमान क्षति से तात्पर्य समझाइये।

उत्तर: यमन ति एवं नाविन्य बंधन ऊर्जा (Mass defect and Nuclear Binding energy)

हम पढ़ चुके हैं कि परमाणु का समस्त द्रव्यमान तथा धन आवेश नाभिक में केन्द्रित होता है और नाभिक प्रोटॉनों एवं न्यूट्रॉनों से मिलकर बना है। हम यह भी जानते हैं कि अमुक नाभिक में कितने प्रोटॉन एवं कितने न्यूट्रॉन होते हैं, अतः गणना द्वारा किसी नाभिक का सम्भावित द्रव्यमान (expected mass) ज्ञात किया जा सकता है। द्रव्यमान स्पेक्टोग्राफ (mass spectrograph) द्वारा किसी नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान (actual mass) भी ज्ञात किया जा सकता है। यह पाया जाता है कि किसी नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान उसके न्यूक्लिऑनों से गणना द्वारा प्राप्त सम्भावित द्रव्यमान से सदैव कम होता है, द्रव्यमान के इसी अन्तर को द्रव्यमान-क्षति (mass-defect) कहते हैं। इस प्रकार, द्रव्यमान क्षति = गणना द्वारा प्राप्त नाभिक का द्रव्यमान।

- नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान

या $\Delta m = m_c - m_a$
यहाँ पर गणना द्रव्यमान को संक्षेप में m_c व वास्तविक द्रव्यमान को m_a से व्यक्त किया गया है।

$$\therefore \Delta m = [\text{प्रोटॉनों का द्रव्यमान} \\ + \text{न्यूट्रॉनों का द्रव्यमान}] \\ - \text{नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान}$$

$$\text{या } \Delta m = [Z.m_p + (A - Z)m_n] - m \quad \dots(1)$$

जहाँ Z, परमाणु क्रमांक, A द्रव्यमान क्रमांक, m_p , प्रोटॉन का द्रव्यमान, m_n , न्यूट्रॉन का द्रव्यमान एवं m, नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान है।

आइन्स्टीन के अनुसार यह द्रव्यमान (Δm) ऊर्जा में बदल जाता है, इसी ऊर्जा को नाभिक को बन्धन ऊर्जा कहते हैं। यही ऊर्जा नाभिक के समस्त न्यूक्लिऑनों को नाभिक के रूप में बाँधे रहती है। Δm का अर्थ है कि जब प्रोटॉन तथा न्यूट्रॉन मिलकर नाभिक का निर्माण करते हैं तो Δm द्रव्यमान लुप्त हो जाता है तथा उसके तुल्य ऊर्जा $(\Delta m)c^2$ मुक्त हो जाती है। इस ऊर्जा के कारण ही प्रोटॉन व न्यूट्रॉन नाभिक से बाँधे रहते

हैं। स्पष्ट है कि नाभिक के प्रोटॉनों तथा न्यूट्रॉनों को तोड़ने के लिए इतनी ही बाह्य ऊर्जा की आवश्यकता होगी। इस प्रकार यह स्पष्ट हो जाता है कि जब 1 प्रोटॉन एवं न्यूट्रॉन मिलकर नाभिक बनाते हैं तो इस क्रिया में कुछ ऊर्जा निकलती है, जिसे 'नाभिक की बन्धन ऊर्जा' कहते हैं। इस तथ्य से यह भी स्पष्ट है कि यदि इतनी ही ऊर्जा (बन्धन ऊर्जा के बराबर) नाभिक को दे दी जाये तो उसके समस्त न्यूक्लिऑन बन्धनमुक्त हो जायेंगे। अतः बन्धन ऊर्जा की परिभाषा इस प्रकार भी कर सकते हैं, "किसी नाभिक की बन्धन ऊर्जा, ऊर्जा की वह मात्रा है जो नाभिक को दे देने पर उसके समस्त न्यूक्लिऑनों को बन्धन मुक्त कर दे।" अतः नाभिक की बन्धन ऊर्जा

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

$$= [Zm_p + (A - Z)m_n - m]c^2 \quad \dots(2)$$

यदि नाभिक की बन्धन ऊर्जा में न्यूक्लिऑनों की संख्या का भाग दे दें तो हमें नाभिक की 'बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन' (binding energy per nucleon) प्राप्त होती है। बन्धन ऊर्जा नाभिक के स्थायित्व को प्रदर्शित करती है।

$$\therefore \text{बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन} = \frac{\Delta E}{A} \quad \dots(3)$$

संकुलन गुणांक (Packing Fraction)—इसे द्रव्यमान क्षति प्रति न्यूक्लिऑनों के रूप में परिभाषित किया जाता है।

$$\text{संकुलन गुणांक (P)} = \frac{\text{द्रव्यमान क्षति}}{\text{परमाणु भार}} = \frac{\Delta m}{A}$$

उदाहरण α -कण की बन्धन ऊर्जा—

α -कण हीलियम (${}_2\text{He}^4$) का नाभिक होता है। इसमें 2 प्रोटॉन एवं 2 न्यूट्रॉन होते हैं। इसका वास्तविक द्रव्यमान 4.00389 amu होता है।

$\therefore \alpha$ -कण के लिए

$$m_a = 4.00389 \text{ amu}$$

गणना द्वारा प्राप्त द्रव्यमान

$$m_c = [2m_p + 2m_n] = 2[m_p + m_n]$$

$$= 2[1.00813 + 1.00893] \text{ amu}$$

$$= 2[2.01706] = 4.03412 \text{ amu}$$

\therefore द्रव्यमान क्षति

$$\Delta m = m_c - m_a = (4.03412 - 4.00389) \text{ amu}$$

$$\text{या } \Delta m = 0.03023 \text{ amu}$$

$\therefore \alpha$ -कण की बन्धन ऊर्जा

$$\Delta E = 0.03023 \times 931 \text{ MeV}$$

$$\text{या } \Delta E = 28.14 \text{ MeV}$$

स्पष्ट है कि α -कण के बनने में 28.14 MeV ऊर्जा मुक्त होती है, अतः α -कण के न्यूक्लियॉनों को बन्धन मुक्त करने के लिए 28.14 MeV ऊर्जा की आवश्यकता होती है। α -कण के नाभिक में चार न्यूक्लियॉन होते हैं अतः α -कण की प्रति न्यूक्लियॉन बन्धन ऊर्जा

$$= \frac{\Delta E}{A} = \frac{28.14}{4}$$

$$= 7.03 \text{ MeV}$$

इसी प्रकार हम ड्यूट्रॉन की बन्धन ऊर्जा ज्ञात कर सकते हैं। परिणाम इस प्रकार होंगे-

$$\text{ड्यूट्रॉन की बन्धन ऊर्जा} = 2.17 \text{ MeV}$$

$$\text{और प्रति न्यूक्लियॉन बन्धन ऊर्जा} = 1.08 \text{ MeV}$$

इस प्रकार स्पष्ट है कि α -कण को विखण्डित करने में ड्यूट्रॉन की तुलना में बहुत अधिक ऊर्जा की आवश्यकता होती है। अतः α -कण, ड्यूट्रॉन की तुलना में अधिक स्थायी है।

प्रश्न 5. रेडियोएक्टिव को परिभाषित करो।

उत्तर: रेडियो सक्रियता (Radioactivity)

सन् 1896 ई. में फ्रांसीसी वैज्ञानिक हेनरी बेकुरल ने यह पाया कि यूरेनियम तथा इसके लवणों से कुछ अदृश्य किरणें स्वतः निकलती हैं। जो कि मोटे, काले कागज की कई पर्तों को पार कर सकती हैं साथ ही ये फोटोग्राफिक प्लेटों को भी प्रभावित करती हैं इन किरणों को रेडियोएक्टिव किरणें कहते हैं।

“किसी पदार्थ से स्वतः ही अदृश्य किरणें उत्सर्जित होते रहने की घटना रेडियोसक्रियता कहलाती है।” सन् 1898 में पोलैन्ड के दम्पति मैडम क्यूरी व पियरे क्यूरी ने ऐसे रेडियोएक्टिव तत्व की खोज की जो यूरेनियम की अपेक्षा लगभग दस लाख गुना रेडियो सक्रिय था उसका नाम ‘रेडियम’ है।

क्यूरी दम्पति को सन् 1903 में नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया। रेडियो एक्टिवता से सम्बन्धित तथ्य-

(i) रेडियो सक्रियता एक नाभिकीय प्रक्रम है। किसी भी भौतिक या रासायनिक प्रक्रम; जैसे-दाब, ताप या अन्य पदार्थों के संयोग का रेडियो सक्रियता पर कोई प्रभाव नहीं पड़ता है। कारण यह है कि रासायनिक परिवर्तनों के लिये ऊर्जाएँ इलेक्ट्रॉन वोल्ट के क्रम की होती हैं। जबकि नाभिकीय ऊर्जा MeV के क्रम की होती है।

(ii) नाभिक के रेडियोएक्टिव क्षय में आवेश, रेखीय व कोणीय संवेग एवं द्रव्यमान ऊर्जा संरक्षित होते हैं साथ ही साथ न्यूट्रॉनों व प्रोटॉनों की संख्या भी संरक्षित होगी।

(iii) यदि नाभिक से α या β क्षय के पश्चात् प्राप्त उत्पाद नाभिकों के द्रव्यमानों का योग मूल नाभिक के द्रव्यमान से कम होगा तो मूल नाभिक अस्थायी होगा।

प्रश्न 6. रदरफोर्ड सोडी नियम का उल्लेख करो।

उत्तर: रदरफोर्ड सोडी का रेडियोएक्टिव ऽय का नियम (Rutherford-Soddy Law of Radioactive decay)

सन् 1902 में रदरफोर्ड एवं सोडी ने अनेक रेडियोएक्टिव पदार्थों के स्वतः विघटन का प्रायोगिक अध्ययन किया और रेडियोएक्टिव क्षय के सम्बन्ध में निम्नांकित निष्कर्ष निकाले जो रदरफोर्ड एवं सोडी के नियमों के रूप में जाने गये। इनके अनुसार-

(i) रेडियोएक्टिवता एक नाभिकीय घटना है तथा रेडियोएक्टिव किरणों के उत्सर्जन की दर को भौतिक या रासायनिक कारण द्वारा नियन्त्रित नहीं किया जा सकता है अर्थात् न तो इसे बढ़ाया जा सकती है और न ही घटाया जा सकता है।

(ii) रेडियोएक्टिव पदार्थों के विघटन की प्रकृति सांख्यिकीय (statistical) है अर्थात् यह कहना कठिन है कि कौन-सा नाभिक कब विघटित होगी और विघटित होकर कौन-सा कण उत्सर्जित करेगा? किसी नमूने से निश्चित समय में उत्सर्जित कणों की संख्या निश्चित होती है। विघटन की प्रक्रिया में α , β , γ किरणों के उत्सर्जन के साथ एक तत्त्व दुसरे नये तत्त्व में बदलता रहता है जिसके रासायनिक एवं रेडियोएक्टिव गुण बिल्कुल नये होते हैं।

(iii) किसी भी क्षण रेडियोएक्टिव परमाणुओं के क्षय होने की दर उस क्षण उपस्थित परमाणुओं की संख्या के अनुक्रमानुपाती होती है।

माना किसी समय t पर उपस्थित परमाणुओं की संख्या N है तथा समय $t + \Delta t$ पर यह संख्या घट कर अपने मान की $N - \Delta N$ रह जाती है। तो परमाणुओं के क्षय होने की दर $-\frac{\Delta N}{\Delta t}$ होगी। अतः रदरफोर्ड व सोडी के नियमानुसार;

यदि Δt समय में ΔN नाभिक विघटित हो जाते हैं तो विघटन की दर

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N \text{ (उस समय मौजूद नाभिकों की संख्या)}$$

या में विघटन की दर)

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

$$\text{या} \quad \frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad \dots (1)$$

जहाँ λ एक नियतांक है, जिसे क्षय नियतांक (decay constant or disintegration constant) कहते हैं। समी. (1) में ऋणात्मक चिह्न यह प्रदर्शित करता है कि समय बढ़ने पर विघटन की दर घटती है। λ का मात्रक सेकण्ड^{-1} है। λ का मान एक दिये गये पदार्थ के लिए तो नियत रहता है परन्तु भिन्न-भिन्न पदार्थों के लिए भिन्न-भिन्न होता है।

समी. (1) को निम्न प्रकार भी लिख सकते हैं-

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad \dots(2)$$

इसका समाकलन करने पर

$$\log_e N = -\lambda t + C \quad \dots(3)$$

जहाँ C , समाकलन नियतांक है।

जब $t = 0$ तो $N = N_0$

$$\therefore \log_e N_0 = 0 + C \text{ या } C = \log_e N_0$$

\therefore समी. (3) से

$$\log_e N = -\lambda t + \log_e N_0$$

$$\text{या } \log_e N - \log_e N_0$$

$$= -\lambda t$$

$$\text{या } \log_e \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

प्रति लघुगणक (Anti-log) लेने पर--

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

या

$$\boxed{N = N_0 e^{-\lambda t}} \quad \dots(4)$$

समी. (4) से स्पष्ट है कि N का मान पहले तेजी से और बाद में धीरे-धीरे घटता है अर्थात् रेडियोएक्टिव पदार्थ का क्षय पहले तेजी से और फिर धीरे-धीरे होता है। इस नियम को चरघातांकी नियम (exponential law) कहते हैं। समी. (4) से यह भी स्पष्ट है कि रेडियोएक्टिव पदार्थ को पूर्णतः क्षयित (completely decay) होने में अनन्त समय लगेगा।

क्षय नियतांक (Decay Constant)

समी. (4) में $t = \frac{1}{\lambda}$ रखने पर

$$N = N_0 e^{-1} \text{ या } N = N_0 \left(\frac{1}{e} \right) \quad \dots(5)$$

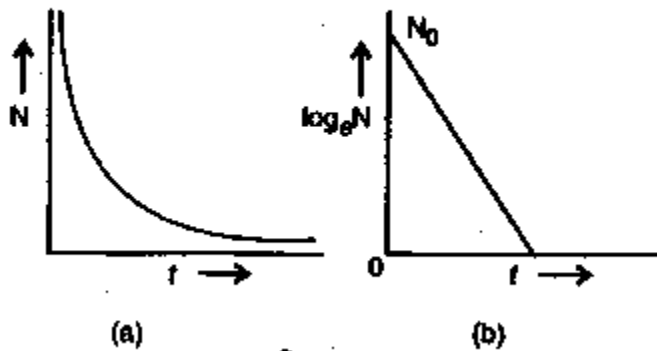
“अतः क्षय नियतांक उस समय का व्युत्क्रम है जिसमें अविघटित नाभिकों की संख्या अपने प्रारम्भिक मान की $(\frac{1}{e})$ गुनी रह जाती है।”

इस प्रकार समीकरण (4) के अनुसार N का मान पहले तेजी से और बाद में धीरे-धीरे घटता है अर्थात् रेडियोएक्टिव पदार्थ का क्षय पहले तेजी से और फिर धीरे-धीरे होता है। इस नियम को क्षय चरघातांकी नियम कहते हैं।

अविघटित नाभिकों की संख्या N तथा समय t के मध्य ग्राफ चित्र

15.3 (a) में प्रदर्शित है; जबकि $\log_e N$ तथा समय t के मध्य परिवर्तन चित्र

15.3 (b) में दिखाया गया है।



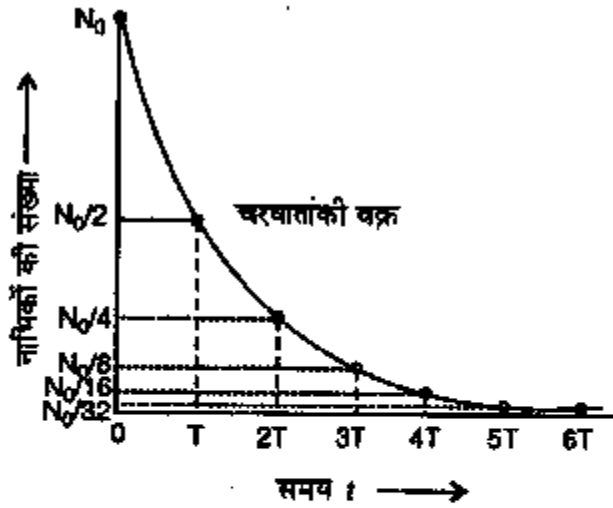
चित्र 15.3

प्रश्न 7. रेडियोएक्टिव तत्त्व की अर्द्ध-आयु व माध्य-आयु की परिभाषा दीजिए तथा इनमें सम्बन्ध लिखो।

उत्तर: अर्द्ध-आयु (Half life)

हम जानते हैं कि रेडियोएक्टिव तत्त्वों का सदैव विघटन होता रहता है और जैसे-जैसे समय बीतता जाता है, अविघटित नाभिकों की संख्या घटती जाती है। “वह समय जिसमें किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ के अविघटित नाभिकों की संख्या घटकर आधी रह जाती है, उस तत्त्व की अर्द्ध-आयु कहलाती है।” इसे T से व्यक्त करते हैं। एक तत्त्व के लिए इसका मान नियत एवं विभिन्न तत्त्वों के लिए भिन्न-भिन्न होता है। अर्द्ध-आयु का मान लिये गये पदार्थ की मात्रा पर निर्भर नहीं करता है। इसे भौतिक एवं रासायनिक प्रभावों द्वारा बदला नहीं जा

सकता है। कुछ तत्वों की अर्द्ध-आयु नीचे दी जा रही है-



चित्र 15.4

क्र. सं.	तत्व का नाम एवं संकेत	अर्द्ध-आयु
1.	यूरेनियम (${}_{92}\text{U}^{238}$)	4.5×10^9 वर्ष
2.	थोरियम (${}_{90}\text{Th}^{230}$)	8×10^4 वर्ष
3.	रेडियम (${}_{88}\text{Ra}^{226}$)	1620 वर्ष
4.	बिस्मथ (${}_{83}\text{Bi}^{218}$)	03 मिनट

यदि किसी रेडियोएक्टिव तत्व की अर्द्ध-आयु T है तो T समय पश्चात् वह अपनी प्रारम्भिक मात्रा का 50%, $2T$ समय बाद 25%, $3T$ समय बाद 12.5%, $4T$ समय बाद 6.25% शेष रह जायेगा। यदि पदार्थ के नाभिकों की संख्या को समय के साथ ग्राफ कर प्लॉट करें तो चित्र 15.4 की तरह चरघातांकी वक्र प्राप्त होगा।

माना प्रारम्भ में किसी पदार्थ के नाभिकों की संख्या N_0 है अर्थात् $t = 0$ पर $N = N_0$ तो एक अर्द्ध-आयु (अर्थात् $t = T$) के बाद शेष नाभिकों की संख्या

$$N_1 = \frac{N_0}{2}$$

या
$$N_1 = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^1$$

दो अर्द्ध-आयुओं के पश्चात् अर्थात् $t = 2T$ के बाद शेष नाभिक

$$\begin{aligned} N_2 &= \frac{N_1}{2} = N_1 \left(\frac{1}{2} \right) \\ &= N_0 \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{2} \right) \end{aligned}$$

या
$$N_2 = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^2$$

इसी प्रकार तीन अर्द्ध-आयुओं के बाद ($t = 3T$) शेष नाभिक

$$N_3 = \frac{N_2}{2} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{2}\right)$$

या
$$N_3 = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^3$$

इसी प्रकार n अर्द्ध-आयुओं के पश्चात् ($t = nT$) शेष नाभिक

$$N_n = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

या व्यापक रूप से n अर्द्ध-आयुओं के पश्चात् शेष नाभिकों की संख्या

$$\boxed{N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n} \quad \dots(1)$$

$$\because t = nT$$

$\therefore n = \frac{t}{T}$ की सहायता से n का मान ज्ञात कर सकते हैं।

○ अर्द्ध-आयु तथा क्षय नियतांक में सम्बन्ध—यदि प्रारम्भ में (अर्थात् $t = 0$) नाभिकों की संख्या N_0 हो तो t समय के बाद शेष नाभिकों की संख्या

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

जब $t = T$ तो $N = \frac{N_0}{2}$

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

या $\frac{1}{2} = e^{-\lambda T} = \frac{1}{e^{\lambda T}}$

या $2 = e^{\lambda T}$

दोनों ओर का लघुगणक लेने पर

$$\log_e 2 = \log_e e^{\lambda T} = \lambda T \log_e e = \lambda T$$

या $\lambda T = \log_e 2$

या
$$\boxed{T = \frac{\log_e 2}{\lambda}} \quad \dots(2)$$

इस समीकरण की सहायता से λ ज्ञात होने पर T का मान ज्ञात कर सकते हैं और T ज्ञात होने पर λ का मान ज्ञात कर सकते हैं।

$$\therefore \log_e 2 = 0.6932$$

$$\therefore \boxed{T = \frac{0.6932}{\lambda}} \quad \dots(3)$$

या $\boxed{\lambda = \frac{0.6932}{T}} \quad \dots(4)$

रेडियोएक्टिव पदार्थ की माध्य-आयु (Average Life of a Radioactive Substance)

जैसा कि हम पढ़ चुके हैं, रेडियोएक्टिव विघटन की प्रकृति सांख्यिकीय (statistical) होती है अर्थात् यह नहीं कहा जा सकता है कि कौन-सा नाभिक कब विघटित होगा और विघटित होकर किस प्रकार का कण उत्सर्जित करेगा। किसी भी नाभिक के विघटन का समय शून्य से अनन्त के मध्य कुछ भी हो सकता है। सभी नाभिकों की आयु के औसत को ही माध्य-आयु (Average life) कहते हैं। इसे τ से प्रकट करते हैं। गणितीय रूप से यह सिद्ध किया जा सकता है कि किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ की माध्य आयु क्षय नियतांक (λ) के व्युत्क्रम के बराबर होती है अर्थात्

$$\text{माध्य-आयु} = \frac{1}{\text{क्षय नियतांक}}$$

या $\tau = \frac{1}{\lambda}$

माध्य-आयु का व्यंजक (Expression for Mean or Average Life)

रदरफोर्ड एवं सोडी के नियम से;

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

केवल परिमाण लेने पर—

या $\left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N \quad \dots(1)$

अतः समय t व $(t + dt)$ के मध्य विघटित नाभिकों की संख्या

$$dN = \lambda N dt \quad \dots(2)$$

या $t = 0$ पर अविघटित नाभिकों की संख्या N_0 हो तो

$$\text{माध्य-आयु } \tau = \frac{\text{सभी नाभिकों की कुल आयु}}{\text{नाभिकों की कुल संख्या}}$$

$$= \frac{\Sigma t dN}{N_0}$$

समीकरण (2) से;

या $\tau = \frac{\Sigma t \lambda N dt}{N_0}$

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

या $\tau = \frac{\Sigma t \lambda (N_0 e^{-\lambda t}) dt}{N_0}$
 $= \Sigma t \lambda e^{-\lambda t} dt$

चूँकि नाभिक लगातार अनन्त काल तक विघटित होते रहते हैं। अतः Σ को $t=0$ से $t=\infty$ के निश्चित समाकलन के रूप में लिख सकते हैं।

$$\begin{aligned} \therefore \tau &= \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt \\ &= \lambda \left[\left(\frac{t e^{-\lambda t}}{-\lambda} \right)_0^{\infty} - \int_0^{\infty} 1 \left(\frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda} \right) dt \right] \\ &= \lambda \left[0 + \frac{1}{\lambda} \left(\frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda} \right)_0^{\infty} \right] \\ &= -\frac{1}{\lambda} [e^{-\lambda t}]_0^{\infty} \\ &= -\frac{1}{\lambda} [0 - 1] = \frac{1}{\lambda} \end{aligned}$$

या

$$\boxed{\tau = \frac{1}{\lambda}} \quad \dots(3)$$

$\therefore \lambda = \frac{0.693}{T} \therefore \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{0.693}$

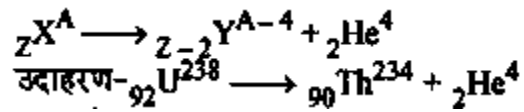
$\therefore \tau = \frac{T}{0.693} = 1.44 T$

या

$$\boxed{\tau = 1.44 T} \quad \dots(4)$$

प्रश्न 8. α क्षय किसे कहते हैं? α कणों का ऊर्जा स्पेक्ट्रम किस प्रकार का होता है?

उत्तर: α कण हीलियम का नाभिक होता है जो द्वि आयनित कण है।



स्पष्ट है, α -कण के उत्सर्जन से मूल नाभिक का परमाणु क्रमांक दो से तथा द्रव्यमान संख्या 4 से कम हो जाती है अर्थात् उत्पाद नाभिक को परमाणु क्रमांक 2 व द्रव्यमान संख्या 4 से घट जाती है इसे ही α क्षय कहते हैं।

α कणों की नाभिक से उत्सर्जन की व्याख्या चिरसम्मत सिद्धान्तों की अपेक्षा क्वाण्टम यांत्रिकी के आधार पर की जा सकती है। इसके अनुसार नाभिक α कण नाभिक में ही होता है तथा सुरंगन प्रभाव द्वारा यह नाभिक से बाहर आता है। α कणों की ऊर्जा का स्पेक्ट्रम विविक्त व रेखित होता है। विविक्त ऊर्जा स्पेक्ट्रम यह प्रदर्शित करता है कि नाभिक में भी परमाणु की भाँति विविक्त ऊर्जा स्तर उपस्थित है।

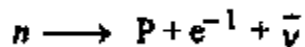
प्रश्न 9. β किरण स्पेक्ट्रम एक सतत ऊर्जा स्पेक्ट्रम हैसे क्या तात्पर्य है?

उत्तर: β -क्षय (β -decay)

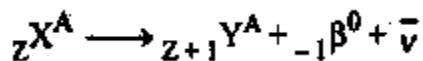
क्षय निम्न तीन प्रकार के होते हैं -

- (i) ऋणात्मक बीटा क्षय (β^-)
- (ii) धनात्मक बीटा क्षय (β^+)
- (iii) इलेक्ट्रॉन ग्रहण (electron capture or K capture)

(i) ऋणात्मक बीटा क्षय (β^-) जब किसी अस्थायी नाभिक में न्यूट्रॉन, प्रोटॉन में रूपान्तरित होता है तो साथ ही (β^-) व एण्टीन्यूट्रिनो ($\bar{\nu}$) प्राप्त होता है नाभिक से β^- व $\bar{\nu}$ उत्सर्जित होते हैं।

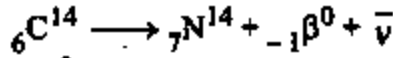


जब मातृ नाभिक से (β^-) उत्सर्जित होता है तो उत्पाद नाभिक के परमाणु क्रमांक में एक अंक की वृद्धि हो जाती है; जबकि द्रव्यमान संख्या अपरिवर्तित रहती है।



मातृ नाभिक उत्पाद नाभिक ऋणात्मक बीटा कण एण्टीन्यूट्रिनो

उदाहरण-



β क्षय में विघटन ऊर्जा— $\Delta m = m_x - (m_y + m_e)$... (i)

यहाँ m_x = मातृ नाभिक का द्रव्यमान

m_y = उत्पाद नाभिक का द्रव्यमान

m_e = इलेक्ट्रॉन या ऋणात्मक बीटा कण का द्रव्यमान

$\bar{\nu}$ को द्रव्यमान रहित लिया गया है।

समी. (i) में Zm_e को जोड़ते हैं एवं घटाते हैं।

$$\Delta m = [m_x - (m_y + m_e)] + Zm_e - Zm_e$$

$$\Delta m = (m_x + Zm_e) - \{m_y + m_e + Zm_e\}$$

$$\Delta m = (m_x + Zm_e) - \{m_y + (Z+1)m_e\}$$

$$\Delta m = M_x - M_y$$

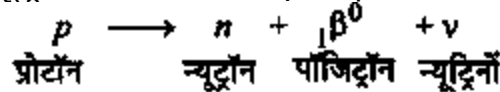
$$\text{विघटन ऊर्जा } Q = \Delta mc^2$$

$$Q = (M_x - M_y) c^2$$

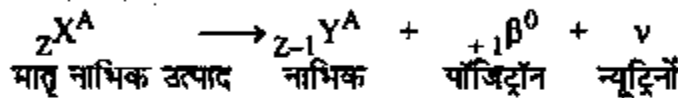
M_x = मातृ नाभिक का परमाण्वीय द्रव्यमान

M_y = उत्पाद नाभिक का परमाण्वीय द्रव्यमान

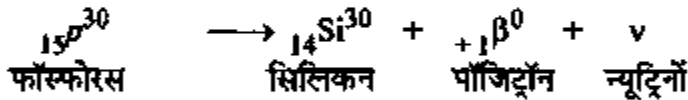
घनात्मक बीटा क्षय (β^+ क्षय)—जब किसी अस्थायी नाभिक में प्रोटॉन, न्यूट्रॉन में रूपान्तरित होता है तो साथ (β^+) पॉजिट्रॉन तथा (ν) न्यूट्रिनो प्राप्त होते हैं यही β^+ व ν नाभिक से उत्सर्जित होते हैं।



जब मातृ नाभिक से (β^+) उत्सर्जित होता है तो उत्पाद नाभिक के परमाणु क्रमांक में 1 अंक की कमी हो जाती है; जबकि द्रव्यमान संख्या अपरिवर्तित रहती है।



उदाहरण—



β^+ क्षय में विघटन ऊर्जा—

परमाण्वीय द्रव्यमान के रूप में द्रव्यमान क्षति

$$\Delta m = [M_x - Zm_e] - [\{M_y - (Z-1)m_e\} + m_e]$$

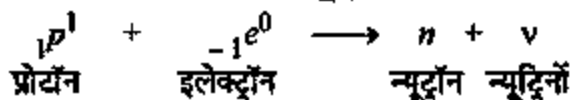
$$\Delta m = [M_x - M_y - 2m_e]$$

विघटन ऊर्जा $Q = \Delta mc^2$

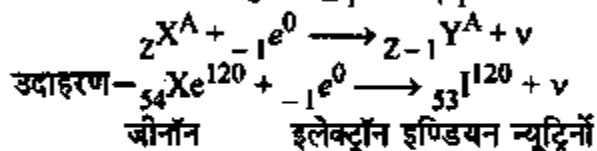
$$Q = [M_x - M_y - 2m_e] c^2$$

इलेक्ट्रॉन प्रग्रहण—ऐसे नाभिक जिनमें ऊर्जा संरक्षण के आधार पर

β^+ क्षय तो संभव नहीं है; अतः प्रोटॉन कक्षीय इलेक्ट्रॉन सामान्यतया K कक्ष के इलेक्ट्रॉन का प्रग्रहण कर लेता है तथा इनसे संयुक्त होकर न्यूट्रॉन में रूपान्तरित हो जाता है। यहाँ न्यूट्रिनो भी प्राप्त होता है।



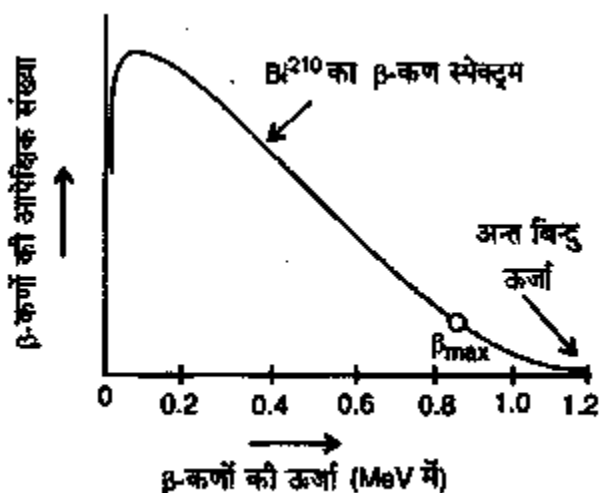
इस प्रक्रिया में मातृ नाभिक इलेक्ट्रॉन प्रग्रहण के द्वारा उत्पाद नाभिक में रूपान्तरित हो जाता है परन्तु यहाँ ${}_{-1}^0e^0$ या ${}_{+1}^0e^0$ का उत्सर्जन नहीं होता है।



M_x = मूल नाभिक का परमाणवीय द्रव्यमान

M_y = उत्पाद नाभिक का परमाणवीय द्रव्यमान

* विघटन ऊर्जा Q का मान है $= Q = [M_x - M_y] c^2$



चित्र 15.9

β -कण की आपेक्षिक संख्या एवं उनकी ऊर्जा के मध्य (Bi^{210}) के लिए ग्राफ चित्र 15.9 में प्रदर्शित है। यह ग्राफ दर्शाता है कि

- अधिकतर β -कणों की ऊर्जा कम होती है,
- केवल कुछ इलेक्ट्रॉनों की ऊर्जा अधिकतम होती है जो अन्त बिन्दु ऊर्जा (end point energy) कहलाती है और
- ऊर्जा स्पेक्ट्रम सतत है जो यह दर्शाता है कि उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों की ऊर्जा 0 (शून्य) से $(Q_\beta)_{\max}$ तक सम्भव है।

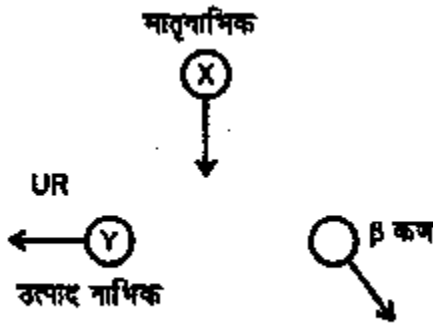
प्रश्न 10. न्यूट्रिनो परिकल्पना β क्षय की प्रक्रिया में कौन-से संरक्षण नियम की व्याख्या में सहायक है?

उत्तर: न्यूट्रिनो परिकल्पना (Neutrino Hypothesis)

प्रारम्भ में β क्षय में यह माना जाता था कि मूल नाभिक, उत्पाद नाभिक व β^- या β^+ में रूपान्तरित होता है। परन्तु इस अवधारणा में ऊर्जा, रेखिक संवेग तथा कोणीय संवेग संरक्षण लागू नहीं होता है।

(i) **ऊर्जा संरक्षण** – β क्षय में, उत्सर्जित β कणों की ऊर्जा मातृ व उत्पाद नाभिकों की ऊर्जाओं के अन्तर के बराबर नहीं पाई गई; स्पष्ट है β क्षय में ऊर्जा संरक्षण का नियम विचलित होता है।

(ii) **रेखिक संवेग संरक्षण-**



चित्र 15.10

चित्र 15.10 से ज्ञात होता है कि β क्षय के दौरान उत्पाद नाभिक एवं β कण परस्पर विपरीत गति नहीं करते जबकि इनकी विपरीत गति रेखिक संवेग संरक्षण के लिये आवश्यक है। स्पष्ट है रेखिक संवेग संरक्षण का नियम भी विचलित हो गया।

(iii) **कोणीय संवेग संरक्षण**

β -क्षय में कोणीय संवेग या चक्रण के संरक्षण नियम का भी विचलन होता है। β -कण अर्थात् इलेक्ट्रॉन का चक्रण $1/2$ होता है। जब यह नाभिक द्वारा उत्सर्जित होता है तो नाभिक का चक्रण भी $1/2$ परिवर्तित होना आवश्यक है, परन्तु β -कण उत्सर्जित करते नाभिक का चक्रण कभी भी $1/2$ से परिवर्तित होना नहीं पाया गया। नाभिक का चक्रण अपरिवर्तित या पूर्णतः परिवर्तित होता है। इसलिए कोणीय संवेग संरक्षण का नियम β -क्षय द्वारा विचलित होता है।

ऊर्जा, रेखिक व कोणीय संवेग संरक्षण के नियमों के विचलन के प्रश्न का समाधान पॉली (Pauli) ने सन् 1930 में किया। उनके अनुसार जब मातृ नाभिक से β कण उत्सर्जित होता है तो उसके साथ एक अन्य कण न्यूट्रिनो (ν) या एण्टिन्यूट्रिनो ($\bar{\nu}$) भी उत्सर्जित होता है। न्यूट्रिनो या एन्टीन्यूट्रिनो द्रव्य से नगण्य अन्योन्य क्रियाएँ करते हैं अतः इनका संसूचन बहुत मुश्किल था। 1956 में रेन्स तथा कोवान (Reiense and Cowan) ने इन कणों का संसूचन करने में सफलता प्राप्त की। न्यूट्रिनो में निम्न गुण होते हैं-

1. यह उदासीन कण होता है।
2. इसका विराम द्रव्यमान शून्य होता है।
3. इसका कोणीय संवेग अन्य न्यूक्लिऑन के समान $\pm \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2\pi} \right)$ होता है।
4. यह फोटॉन के समान ऊर्जा वाला कण होता है।
5. फोटॉन के समान ही इनमें रैखिक संवेग होता है।

उपरोक्त समीकरणों में ऊर्जा, रैखिक एवं कोणीय संवेग संरक्षण लागू है।

(i) इस प्रकार β क्षय में जब β^+ या β^- व ν या $\bar{\nu}$ निकलते हैं तो दोनों ही ऊर्जाओं का योग अन्त बिन्दु ऊर्जा के बराबर होता है। इस प्रकार β कण व न्यूट्रिनो की कुल ऊर्जा नियत है जो ऊर्जा संरक्षण के नियम का पालन हो जाता है। या मातृ नाभिक व उत्पाद नाभिकों की ऊर्जाओं का अन्तर β कण व न्यूट्रिनो (एण्टिन्यूट्रिनो) की ऊर्जाओं के योग के समान होता है।

(ii) β क्षय में न्यूट्रिनो या एण्टिन्यूट्रिनो के उत्सर्जन की दिशा β क्षय में रैखिक संवेग संरक्षण को स्थापित करता है।

(iii) जैसा कि यह ज्ञात होता है कि न्यूट्रिनो का कोणीय संवेग $\pm \frac{h}{2\pi}$ है तो β क्षय में कोणीय संवेग संरक्षण भी लागू हो जाता है।

प्रश्न 11. नाभिकीय बल के कोई दो गुण लिखो?

उत्तर: नाभिकीय बल (Nuclear force)

हम पढ़ चुके हैं कि नाभिक का आकार 10^{-15} m की कोटि का होता है और इसी नाभिक में धनावेशित प्रोटॉन एवं उदासीन न्यूट्रॉन उपस्थित रहते हैं। इतनी अल्प दूरी पर प्रोटॉनों के मध्य इतना अधिक वैद्युत प्रतिकर्षण-बल होना चाहिए कि नाभिक का स्थायी होना सम्भव न हो, लेकिन फिर भी नाभिक स्थायी है। इसका अर्थ यह हुआ कि गुरुत्वाकर्षण व वैद्युत बलों से भिन्न एक अन्य बल भी होता है जो न्यूक्लिऑनों को इतनी छेटी जगह में बाँधे रहता है, इसी बल को 'नाभिकीय बल' कहते हैं।

यह अभी तक ज्ञात नहीं हो सका है कि दूरी बदलने पर नाभिकीय बल किस नियम के अनुसार बदलता है, परन्तु इतना निश्चित है कि दूरी बदलने पर नाभिकीय बल के परिवर्तन की दर गुरुत्वीय बल एवं वैद्युत बल की तुलना में बहुत अधिक होती है अन्यथा नाभिक स्थायी नहीं रहता। गुरुत्वीय बल, कूलॉम बल एवं नाभिकीय बलों की आपेक्षिक शक्ति (strength) में निम्न अनुपात होता है-

$$F_g : F_e : F_n = 1 : 10^{36} : 10^{38}$$

नाभिकीय बल के सम्बन्ध में निम्नांकित तथ्य ज्ञात किये गये हैं-

- (i) नाभिकीय बल की प्रकृति आकर्षणात्मक होती है।
- (ii) नाभिकीय बल लघु परास बल (short range force) होता है।

न्यूक्लिऑनों के मध्य (1×10^{-14}) से अधिक दूरी होने पर यह बल नगण्य हो जाता है। इससे कम दूरी पर ही यह बल प्रभावी रहता है, इसीलिए इसे लघु परास बल कहते हैं।

(iii) नाभिकीय बल अत्यन्त तीव्र (very strong) होता है। 2×10^{-15} m की दूरी पर नाभिकीय बल वैद्युत बल की तुलना में लगभग 100 गुना होता है।

(iv) नाभिकीय बल की प्रकृति 0.5×10^{-15} m की दूरी पर प्रतिकर्षणात्मक हो जाती है।

(v) नाभिकीय बल आवेश पर निर्भर नहीं होता है, अतः यह बल प्रोटॉन-न्यूट्रॉन अथवा प्रोटॉन-प्रोटॉन अथवा न्यूट्रॉन-न्यूट्रॉन युग्मों के मध्य समान रूप से लगता है। नाभिकीय बल की इसी प्रकृति के कारण नाभिक के स्थायी होने के प्रश्न का समाधान हो जाता है।

(vi) नाभिकीय द्रव्य का घनत्व लगभग नियत होना तथा मध्यवर्ती द्रव्यमान परास में नाभिकों की बंधन ऊर्जा का लगभग नियत होना यह दर्शाता है कि नाभिक में प्रत्येक न्यूक्लिऑन उपस्थित अन्य सभी न्यूक्लिऑनों से अन्तःक्रिया नहीं करता अपितु केवल अपने कुछ निकटतम न्यूक्लिऑनों से ही अन्तःक्रिया करता है। नाभिकीय बल का यह गुण “नाभिकीय बल की संतृप्तता” कहलाता है। यह विद्युत बल से भिन्न है नाभिक में प्रत्येक प्रोटोन शेष सभी प्रोटॉनों से अन्तः क्रिया करता है तथा अन्तः क्रियाओं की संख्या $\frac{Z(Z-1)}{2} \sim Z^2$ के समानुपाती होती है।

हल्के नाभिकों में नाभिकीय बल (आकर्षणात्मक), प्रोटॉनों के मध्य लगने वाले वैद्युत प्रतिकर्षण बल से अत्यन्त प्रबल होता है, फलस्वरूप हल्के नाभिक स्थायी बने रहते हैं। जैसे-जैसे नाभिक भारी होता जाता है, नाभिक में प्रोटॉनों एवं न्यूट्रॉनों दोनों की संख्या बढ़ने लगती है। चूंकि वैद्युत प्रतिकर्षण बल प्रोटॉनों के प्रत्येक युग्म (pair) के मध्य कार्य करता है तथा यह न्यूक्लिऑनों के बीच की दूरी के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती होता है जबकि नाभिकीय बल दूरी बढ़ने पर और तेजी से घटता है, फलस्वरूप भारी नाभिकों में न्यूक्लिऑनों के दूर-दूर होने के कारण वैद्युत प्रतिकर्षण, कुल नाभिकीय बल की अपेक्षा तेजी से बढ़ता है। इससे नाभिक का स्थायित्व घटने लगता है। यही कारण है कि परमाणु क्रमांक $Z > 83$ वाले सभी नाभिक अस्थायी होते हैं और रेडियोएक्टिवता का गुण प्रदर्शित करते हैं। यह नाभिकीय बल की संतृप्तता को व्यक्त करता है।

प्रश्न 12. बन्धन ऊर्जा प्रतिन्यूक्लिऑन से क्या आशय है? यह नाभिक के स्थायित्व से किस प्रकार सम्बन्धित है?

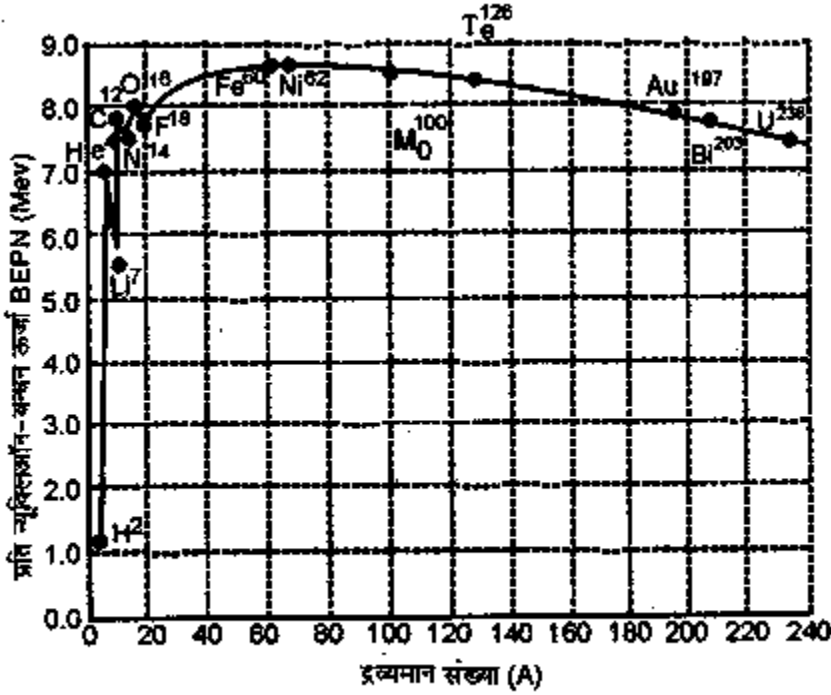
उत्तर: प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा (Binding energy per Nucleon) – नाभिक की बन्धन ऊर्जा ΔE_b में इसकी द्रव्यमान संख्या A से भाग देने पर जो राशि प्राप्त होती है उसे प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा कहा जाता है। इसे $\frac{\Delta E_b}{A}$ से व्यक्त करते हैं।

$$\boxed{\frac{\Delta E_b}{A} = \frac{\Delta E_b}{A}}$$

$$\frac{\Delta E_b}{A} : \text{बन्धन ऊर्जा}$$

$$A : \text{द्रव्यमान संख्या}$$

किसी नाभिक की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा जितनी अधिक होती है। नाभिक उतना ही अधिक स्थायी होता है। यदि विभिन्न तत्वों के नाभिकों की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा तथा उनकी द्रव्यमान संख्या के मध्य ग्राफ खींचा जाय तो प्राप्त वक्र प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा वक्र कहलाता है।



चित्र 15.2

वक्र के अध्ययन से निम्न निष्कर्ष प्राप्त होते हैं-

(i) वक्र से स्पष्ट है कि प्रारम्भ में प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा बढ़ती है फिर अधिकतम मान पर पहुँचकर द्रव्यमान संख्या के बढ़ने के साथ-साथ धीरे-धीरे घटती है।

(ii) प्रत्येक नाभिक की बन्धन ऊर्जा धनात्मक होती है; अतः नाभिक को विखण्डित करने के लिये ऊर्जा देनी होगी।

(iii) द्रव्यमान संख्या बढ़ने पर प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा बढ़ती है। और द्रव्यमान संख्या 62 (${}_{28}\text{Ni}^{62}$) निकल के लिये अधिकतम, लगभग 8.8 MeV प्रति न्यूक्लिऑन होकर फिर धीरे-धीरे घटने लगती है। इसका अर्थ यह है कि द्रव्यमान संख्या 62 के संगत एवं उसके पड़ोसी तत्वों के नाभिक सबसे अधिक स्थायी हैं। ${}_{26}\text{Fe}^{56}$ के लिये भी यह लगभग 8.8 MeV प्रति न्यूक्लिऑन होती है लेकिन ${}_{28}\text{Ni}^{62}$ से थोड़ी कम होती है। इस प्रकार निकल सबसे अधिक स्थायी तत्व है। इसी कारण भू-क्रोड में सबसे अधिक पिघला हुआ निकल तथा लोहा पाया जाता है।

(iv) द्रव्यमान संख्या 62 से अधिक द्रव्यमान संख्या वाले तत्वों की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन-ऊर्जा तत्वों की द्रव्यमान संख्या के बढ़ने पर क्रमशः कम होती जाती है। इसीलिये सीसे (Pb) से भारी सभी तत्व अस्थायी

होते हैं। इसी कारण स्थायित्व को प्राप्त करने के लिये α एवं β कणों के उत्सर्जन के रूप में अपने द्रव्यमान को कम करते रहते हैं। प्राकृतिक रेडियोएक्टिव का यही कारण है।

(v) द्रव्यमान संख्या 4, 12, 16 वाले नाभिकों की प्रतिन्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा ($\overline{\Delta E_b}$) का मान इनके निकटवर्ती नाभिकों की तुलना में अधिक होता है। अतः ये निकटवर्ती नाभिकों की तुलना में अपेक्षाकृत अधिक स्थायी होते हैं। इसी कारण ग्राफ में इन नाभिकों को शिखर बिन्दुओं द्वारा व्यक्त किया गया है। कारण-परमाणुओं की भाँति नाभिक में न्यूक्लिऑनों के लिये कोश संरचना है। 4 के गुणक वाले नाभिकों में नाभिकीय कोश पूर्णतः भरे होते हैं; अतः ये निकटवर्ती नाभिकों की तुलना में अधिक स्थायी होते हैं।

(vi) मध्यवर्ती द्रव्यमान संख्या ($30 < A < 170$) वाले नाभिक की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा ($\overline{\Delta E_b}$) का मान लगभग 8 MeV के निकट होता है जो इन नाभिकों के स्थायित्व को व्यक्त करता है।

(vii) वक्र से स्पष्ट है कि यदि हम किसी बहुत भारी नाभिक (जैसे-यूरेनियम) को किसी विधि द्वारा मध्यवर्ती द्रव्यमान संख्या वाले नाभिकों में तोड़ लें तो प्राप्त नाभिकों की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा बढ़ जायेगी। अतः इस प्रक्रिया में बहुत अधिक मात्रा में ऊर्जा मुक्त होगी। यह नाभिकीय विखण्डन कहलाता है।

(viii) वक्र से यह भी स्पष्ट है कि दो या अधिक बहुत हल्के नाभिकों (जैसे भारी हाइड्रोजन ${}^1_1\text{H}^2$ के नाभिक) को अपेक्षाकृत भारी नाभिकों जैसे ${}^4_2\text{He}$ में संयुक्त कर लें तो प्राप्त नाभिक की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा ($\overline{\Delta E_b}$) बढ़ जायेगी, इस प्रक्रिया में भी अत्यधिक ऊर्जा मुक्त होगी इसे नाभिकीय संलयन कहते हैं।

मुख्य बिन्दु—(i) नाभिक का स्थायित्व $\propto \frac{\Delta E}{A}$

(ii) $A = 62$ (Ni^{62}) पर $\overline{\Delta E_b} = 8.8 \text{ MeV}$ हो जाता है जो अधिकतम है।

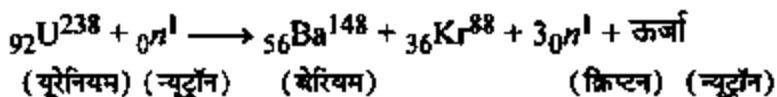
(iii) $A \sim 60$; जैसे Ni, Fe, Co के संगत $\overline{\Delta E_b} \approx 8.8 \text{ MeV}$ है अतः ये स्थायी तत्त्व हैं।

(iv) $A = 150$ पर 8.4 MeV प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा घटकर $A = 240$ पर $\overline{\Delta E_b} = 7.6 \text{ MeV}$ हो जाता है।

प्रश्न 13. नाभिकीय विखण्डन को परिभाषित करो?

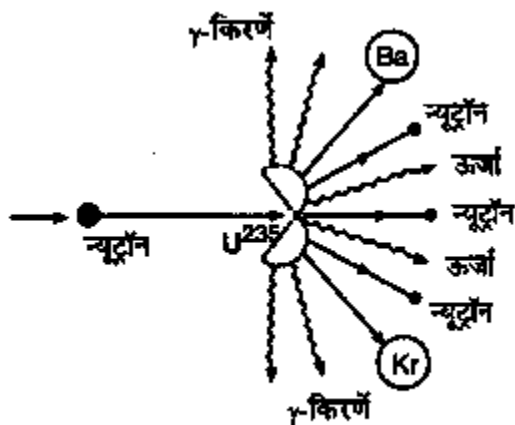
उत्तर: नाभिकीय विखण्डन (Nuclear Fission)

“किसी भारी नाभिक के दो या दो से अधिक हल्के नाभिकों में टूटने की प्रक्रिया को ‘नाभिकीय विखण्डन’ कहते हैं।” इस घटना की खोज सन् 1939 में जर्मन के दो वैज्ञानिकों ओटोहान (Otto Hann) एवं स्ट्रास्मान (Stassmann) ने की थी। उन्होंने यूरेनियम - 238 के नाभिक पर जब तीव्रगामी (लगभग 10^6 eV ऊर्जा वाले) न्यूट्रॉनों की बमबारी की तो पाया कि ${}_{92}\text{U}^{238}$ का नाभिक दो लगभग बराबर हल्के नाभिकों बेरियम (${}_{56}\text{Ba}^{148}$) एवं क्रिप्टन (${}_{36}\text{Kr}^{88}$) में टूट जाता है और एक विखण्डन में 3 न्यूट्रॉनों के साथ अपार ऊर्जा मुक्त होती है। प्रक्रिया निम्न समीकरण से व्यक्त होती है-



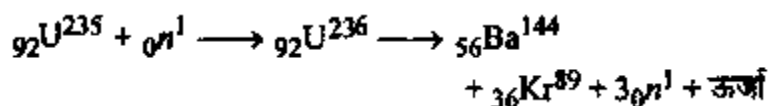
नाभिकीय विखण्डन की इस घटना में अत्यधिक परिमाण में ऊर्जा भी उत्पन्न होती है। इसका कारण यह है कि इस प्रक्रिया में प्राप्त नाभिकों के द्रव्यमानों का योग प्रयुक्त नाभिक के द्रव्यमान से कुछ कम होता है अर्थात् इस प्रक्रिया में कुछ द्रव्यमान लुप्त हो जाते हैं जो आइन्स्टीन के द्रव्यमान-ऊर्जा सम्बन्ध ($\Delta E = \Delta mc^2$) के अनुसार ऊर्जा में बदल जाता है। इसी ऊर्जा को 'नाभिकीय ऊर्जा' (nuclear energy) कहते हैं।

प्राकृतिक यूरेनियम में दो आइसोटोप ${}_{92}\text{U}^{235}$ व ${}_{92}\text{U}^{238}$ पाये जाते हैं। इनका अनुपात 1 : 145 होता है। इस प्राकृतिक यूरेनियम में 99.3% यूरेनियम-238 तथा केवल 0.7% यूरेनियम-235 होता है। यूरेनियम के ये दोनों आइसोटोप विखण्डनीय हैं। प्रयोगों द्वारा यह पता चलता है कि यूरेनियम-238 का विखण्डन केवल तीव्रगामी न्यूट्रॉनों (10^6 eV ऊर्जा वाले) द्वारा ही सम्भव है; जबकि यूरेनियम-235 का विखण्डन मन्दगामी न्यूट्रॉनों (1 eV से भी कम ऊर्जा वाले) से जैसे ऊष्मीय न्यूट्रॉनों (0.03 eV ऊर्जा) से भी सम्भव है। इस प्रकार स्पष्ट है कि यूरेनियम-235 विखण्डन के लिए अधिक उपयोगी है। परमाणु बम में यूरेनियम-235 प्रयोग में लाया जाता है।

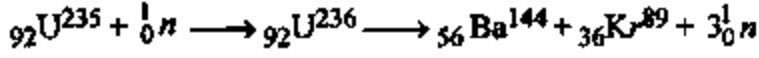
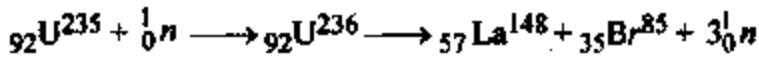
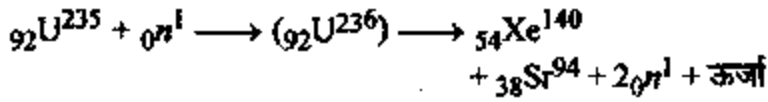


चित्र 15.13

यूरेनियम-235 का विखण्डन-जब मन्दगामी न्यूट्रॉन यूरेनियम-235 के नाभिक से टकराता है तो वह उसमें अवशोषित हो जाता है तथा यूरेनियम का अन्य आइसोटोप यूरेनियम-236 अस्थायी रूप से बनता है। चूँकि ${}_{92}\text{U}^{236}$ अस्थायी है अतः यह तुरन्त ही दो नाभिकों में टूट जाता है। तथा तीन नये न्यूट्रॉन व अपार ऊर्जा उत्सर्जित करता है। प्रक्रिया निम्न समीकरण द्वारा व्यक्त की जाती है-



यह आवश्यक नहीं है कि यूरेनियम-235 के विखण्डन में सदैव बेरियम एवं क्रिप्टन के ही नाभिक प्राप्त हों, बल्कि इसमें 20 से भी अधिक भिन्न-भिन्न तत्वों के 100 से भी अधिक आइसोटोप प्राप्त होते हैं। जिनकी द्रव्यमान संख्या 75 से 160 तक होती है। उदाहरण के लिए-अन्य अभिक्रिया निम्न प्रकार है-



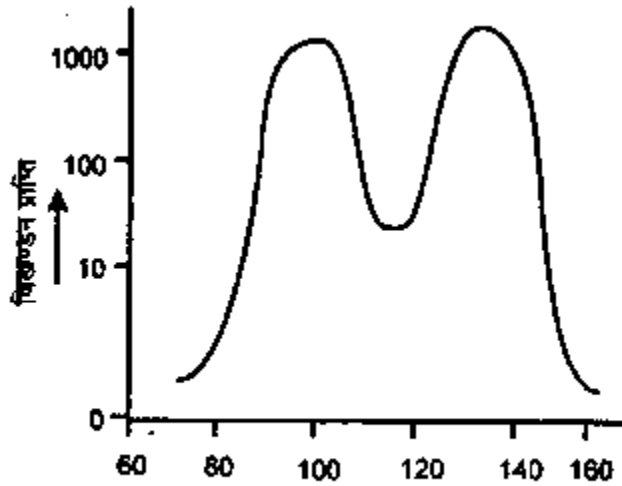
यूरेनियम के प्रत्येक विखण्डन में लगभग 200 MeV ऊर्जा प्राप्त होती है। इस ऊर्जा का अधिकांश भाग विखण्डन से प्राप्त खण्डों की गतिज ऊर्जा के रूप में प्राप्त होता है। शेष भाग उत्सर्जित न्यूट्रॉनों की गतिज ऊर्जा, γ -किरणों तथा ऊष्मा व प्रकाश विकिरणों के रूप में प्राप्त होता है।

1 ग्राम यूरेनियम के विखण्डन से मुक्त ऊर्जा- यूरेनियम-235 के एक ग्राम परमाणु (235 g) में परमाणुओं की संख्या एवोगैड्रो संख्या (6×10^{23}) के बराबर होती है। अतः

1 ग्राम यूरेनियम में परमाणुओं की संख्या $= \frac{6 \times 10^{23}}{235}$
 एक यूरेनियम परमाणु विखण्डन में लगभग 200 MeV ऊर्जा मुक्त होती है। अतः 1 g यूरेनियम के विखण्डन से

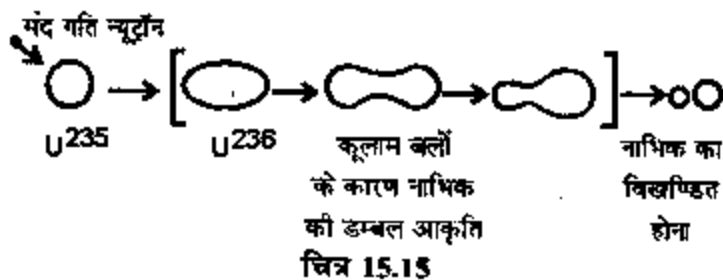
$$\begin{aligned} \text{मुक्त ऊर्जा} &= \frac{6 \times 10^{23}}{235} \times 200 \text{ MeV} \\ &= 5 \times 10^{23} \text{ MeV} \end{aligned}$$

इस प्रकार हम देखते हैं कि 1 ग्राम यूरेनियम के विखण्डन होने पर 5×10^{23} MeV ऊर्जा उत्पन्न होती है जो 20 टन T.N.T. (Trinitrotoluene) में विस्फोट करने से उत्पन्न होती है। इस ऊर्जा से 2×10^4 किलोवाट घण्टा (kWh) विद्युत ऊर्जा उत्पन्न हो सकती है।



चित्र 15.14—विखण्डन प्राप्ति (fission yield) वक्र

द्रव बूँद मॉडल द्वारा नाभिकीय विखण्डन की व्याख्या
(Explanation of Nuclear Fission by Liquid drop Model) —
 बोर् तथा व्हीलर द्वारा प्रतिपादित नाभिकीय द्रव बूँद मॉडल द्वारा नाभिकीय विखण्डन को समझाया जा सकता है।



जब मन्द गति का न्यूट्रॉन U^{235} में प्रवेश करता है तो न्यूट्रॉन की अतिरिक्त ऊर्जा के कारण नाभिक में उपस्थित न्यूक्लिऑन की स्थितिज ऊर्जा, आन्तरिक उत्तेजन ऊर्जा में रूपान्तरित हो जाती है। इस प्रक्रिया में उत्तेजन ऊर्जा 6.5 MeV होती है। परिणामस्वरूप नाभिक कम्पन करने लगता है तथा नाभिक विकृत होकर डम्बल आकृति धारण कर लेता है। अनुकूल परिस्थितियों में डम्बल के इन दो भागों के मध्य तीव्र प्रतिकर्षण प्रभाव के कारण नाभिक दो भागों में विखण्डित हो जाता है।

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

उत्तर: नाभिकीय विखण्डन में उत्पन्न सभी न्यूट्रॉन विखण्डन में भाग नहीं लेते हैं। यहाँ न्यूट्रॉनों के उत्पत्ति की दर पिण्ड के आयतन ($\frac{4}{3}\pi r^3$) पर निर्भर होती है; जबकि पृष्ठ से क्षरण की दर पृष्ठीय क्षेत्रफल ($4\pi r^2$) पर निर्भर करती है। इस प्रकार

$$\frac{\text{न्यूट्रॉनों की क्षरण दर}}{\text{न्यूट्रॉनों की उत्पत्ति दर}} = \frac{4\pi r^2}{4\pi r^3}$$

स्पष्ट है पिण्ड का आकार छोटा होने पर क्षरण दर उत्पत्ति दर के सापेक्ष अधिक होगी, जबकि पिण्ड का आकार अधिक होगा तो क्षरण दर की अपेक्षा उत्पत्ति दर अधिक होगी व श्रृंखला अभिक्रिया की सम्भावना अधिक होगी।

उपरोक्त व्याख्या से स्पष्ट है भारी नाभिक (यूरेनियम) का वह न्यूनतम द्रव्यमान (आकार) जिसमें नाभिकीय विखण्डन श्रृंखला अभिक्रिया सम्भव होती है उसे क्रान्ति द्रव्यमान कहते हैं।

प्रश्न 15. भारी जल नाभिकीय भट्टी में उपयुक्त मंदक है क्यों?

उत्तर: जब समान द्रव्यमान के दो कणों के बीच प्रत्यास्थ टक्कर होती है तो उनके वेग आपस में बदल जाते हैं अतः जब तीव्र वेग वाला न्यूट्रॉन समान द्रव्यमान वाले हाइड्रोजनी पदार्थ जैसे- भारी जल से टकराता है तो टक्कर के पश्चात् न्यूट्रॉन के वेग में अधिकतम रूस होता है।

निबन्धात्मक प्रश्न

प्रश्न 1. नाभिक की संरचना का वर्णन करते हुए नाभिकीय बलों की विवेचना करो।

उत्तर: नाभिकीय संरचना (Nuclear structure)

जेम्स चैडविक द्वारा सन् 1932 में न्यूट्रॉन की खोज किये जाने के। बाद वैज्ञानिक हाइजेन बर्ग ने बताया कि नाभिक प्रोटॉनों एवं न्यूट्रॉनों से मिलकर बना होता है।

(i) नाभिक में उपस्थित प्रोटॉनों की संख्या परमाणु क्रमांक (Z) कहलाती है।

(ii) नाभिक में उपस्थित प्रोटॉनों तथा न्यूट्रॉनों की संख्या का योग द्रव्यमान संख्या (A) कहलाता है।

(iii) प्रोटॉन पर इलेक्ट्रॉनिक आवेश के बराबर धनात्मक आवेश होता है; जबकि न्यूट्रॉन निरावेशित कण होता है।

(iv) नाभिक में उपस्थित न्यूट्रॉनों एवं प्रोटॉन के द्रव्यमान लगभग समान हैं। (न्यूट्रॉन का द्रव्यमान प्रोटॉन से 0.5% अधिक) होता है।

(v) इलेक्ट्रॉन तो प्रकृति का मूल कण है परन्तु न्यूट्रॉन एवं प्रोटॉन शुद्ध रूप में मूल कण नहीं हैं क्योंकि ये अन्य कणों से बने हैं जिन्हें क्वार्क (Quarks) कहते हैं।

(vi) परमाणु क्रमांक Z तथा द्रव्यमान संख्या A का ज्ञान नाभिकीय प्रजाति विशेष अथवा न्यूक्लाइड (Nuclide) के प्रतीक द्वारा किया जा सकता है। नाभिकीय प्रजाति विशेष के लिए परिपाटी के अनुसार प्रतीक ${}_Z^AX$ या ${}_Z^AX_Z$ या ${}_Z^AX^A$ का उपयोग में लिया जाता है।



X- तत्व का रासायनिक प्रतीक

Z- तत्व का परमाणु क्रमांक या नाभिक में प्रोटॉनों की संख्या

A- नाभिक की द्रव्यमान संख्या

$N = A - Z$ -नाभिक में न्यूट्रॉनों की संख्या

(vii) नाभिक में उपस्थित न्यूट्रॉन व प्रोटॉन एक जैसे ही नाभिकीय बल अनुभव करते हैं इस कारण इन्हें संयुक्त रूप से 'न्यूक्लिऑन' कहा जाता है।

नाभिकीय बल (Nuclear force)

हम पढ़ चुके हैं कि नाभिक का आकार 10^{-15} m की कोटि का होता है और इसी नाभिक में धनावेशित प्रोटॉन एवं उदासीन न्यूट्रॉन उपस्थित रहते हैं। इतनी अल्प दूरी पर प्रोटॉनों के मध्य इतना अधिक वैद्युत

प्रतिकर्षण-बल होना चाहिए कि नाभिक का स्थायी होना सम्भव न हो, लेकिन फिर भी नाभिक स्थायी है। इसका अर्थ यह हुआ कि गुरुत्वाकर्षण व वैद्युत बलों से भिन्न एक अन्य बल भी होता है जो न्यूक्लिऑनों को इतनी छेटी जगह में बाँधे रहता है, इसी बल को 'नाभिकीय बल' कहते हैं।

यह अभी तक ज्ञात नहीं हो सका है कि दूरी बदलने पर नाभिकीय बल किस नियम के अनुसार बदलता है, परन्तु इतना निश्चित है कि दूरी बदलने पर नाभिकीय बल के परिवर्तन की दर गुरुत्वीय बल एवं वैद्युत बल की तुलना में बहुत अधिक होती है अन्यथा नाभिक स्थायी नहीं रहता। गुरुत्वीय बल, कूलॉम बल एवं नाभिकीय बलों की आपेक्षिक शक्ति (strength) में निम्न अनुपात होता है-

$$F_g : F_e : F_n = 1 : 10^{36} : 10^{38}$$

नाभिकीय बल के सम्बन्ध में निम्नांकित तथ्य ज्ञात किये गये हैं-

(i) नाभिकीय बल की प्रकृति आकर्षणात्मक होती है।

(ii) नाभिकीय बल लघु परास बल (short range force) होता है।

न्यूक्लिऑनों के मध्य (1×10^{-14}) से अधिक दूरी होने पर यह बल नगण्य हो जाता है। इससे कम दूरी पर ही यह बल प्रभावी रहता है, इसीलिए इसे लघु परास बल कहते हैं।

(iii) नाभिकीय बल अत्यन्त तीव्र (very strong) होता है। 2×10^{-15} m की दूरी पर नाभिकीय बल वैद्युत बल की तुलना में लगभग 100 गुना होता है।

(iv) नाभिकीय बल की प्रकृति 0.5×10^{-15} m की दूरी पर प्रतिकर्षणात्मक हो जाती है।

(v) नाभिकीय बल आवेश पर निर्भर नहीं होता है, अतः यह बल प्रोटॉन-न्यूट्रॉन अथवा प्रोटॉन-प्रोटॉन अथवा न्यूट्रॉन-न्यूट्रॉन युग्मों के मध्य समान रूप से लगता है। नाभिकीय बल की इसी प्रकृति के कारण नाभिक के स्थायी होने के प्रश्न का समाधान हो जाता है।

(vi) नाभिकीय द्रव्य का घनत्व लगभग नियत होना तथा मध्यवर्ती द्रव्यमान परास में नाभिकों की बंधन ऊर्जा का लगभग नियत होना यह दर्शाता है कि नाभिक में प्रत्येक न्यूक्लिऑन उपस्थित अन्य सभी न्यूक्लिऑनों से अन्तःक्रिया नहीं करता अपितु केवल अपने कुछ निकटतम न्यूक्लिऑनों से ही अन्तःक्रिया करता है। नाभिकीय बल का यह गुण "नाभिकीय बल की संतृप्तता" कहलाता है। यह विद्युत बल से भिन्न है नाभिक में प्रत्येक प्रोटोन शेष सभी प्रोटॉनों से अन्तः क्रिया करता है तथा अन्तः क्रियाओं की संख्या $\frac{Z(Z-1)}{2} \sim Z^2$ के समानुपाती होती है।

हल्के नाभिकों में नाभिकीय बल (आकर्षणात्मक), प्रोटॉनों के मध्य लगने वाले वैद्युत प्रतिकर्षण बल से अत्यन्त प्रबल होता है, फलस्वरूप हल्के नाभिक स्थायी बने रहते हैं। जैसे-जैसे नाभिक भारी होता जाता है, नाभिक में प्रोटॉनों एवं न्यूट्रॉनों दोनों की संख्या बढ़ने लगती है। चूंकि वैद्युत प्रतिकर्षण बल प्रोटॉनों के प्रत्येक युग्म (pair) के मध्य कार्य करता है तथा यह न्यूक्लिऑनों के बीच की दूरी के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती होता है जबकि नाभिकीय बल दूरी बढ़ने पर और तेजी से घटता है, फलस्वरूप भारी नाभिकों में

न्यूक्लिऑनों के दूर-दूर होने के कारण वैद्युत प्रतिकर्षण, कुल नाभिकीय बल की अपेक्षा तेजी से बढ़ता है। इससे नाभिक का स्थायित्व घटने लगता है। यही कारण है कि परमाणु क्रमांक $Z > 83$ वाले सभी नाभिक अस्थायी होते हैं और रेडियोएक्टिवता का गुण प्रदर्शित करते हैं। यह नाभिकीय बल की संतृप्तता को व्यक्त करता है।

प्रश्न 2. द्रव्यमान क्षति तथा बन्धन ऊर्जा को समझाइये प्रतिन्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा व द्रव्यमान संख्या के आलेख से प्राप्त मुख्य निष्कर्षों को समझाइये।

उत्तर: द्रव्यमान क्षति एवं जाणिय बंधन ऊर्जा (Mass defect and Nuclear Binding energy)

हम पढ़ चुके हैं कि परमाणु का समस्त द्रव्यमान तथा धन आवेश नाभिक में केन्द्रित होता है और नाभिक प्रोटॉनों एवं न्यूट्रॉनों से मिलकर बना है। हमें यह भी जानते हैं कि अमुक नाभिक में कितने प्रोटॉन एवं कितने न्यूट्रॉन होते हैं, अतः गणना द्वारा किसी नाभिक का सम्भावित द्रव्यमान (expected mass) ज्ञात किया जा सकता है।

द्रव्यमान स्पेक्ट्रोग्राफ (mass spectrograph) द्वारा किसी नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान (actual mass) भी ज्ञात किया जा सकता है। यह पाया जाता है कि किसी नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान उसके न्यूक्लिऑनों से गणना द्वारा प्राप्त सम्भावित द्रव्यमान से सदैव कम होता है, द्रव्यमान के इसी अन्तर को द्रव्यमान-क्षति (mass-defect) कहते हैं। इस प्रकार, द्रव्यमान क्षति = गणना द्वारा प्राप्त नाभिक का द्रव्यमान – नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान या

$$\begin{aligned} & \text{— नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान} \\ \text{या} \quad & \Delta m = m_c - m_a \\ & \text{यहाँ पर गणना द्रव्यमान को संक्षेप में } m_c \text{ व वास्तविक द्रव्यमान को } m_a \text{ से व्यक्त किया गया है।} \\ \therefore & \Delta m = [\text{प्रोटॉनों का द्रव्यमान} \\ & \quad + \text{न्यूट्रॉनों का द्रव्यमान}] \\ & \quad - \text{नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान} \\ \text{या} \quad & \Delta m = [Z.m_p + (A - Z)m_n] - m \quad \dots(1) \end{aligned}$$

जहाँ Z , परमाणु क्रमांक, A द्रव्यमान क्रमांक, m_p , प्रोटॉन का द्रव्यमान, m_n , न्यूट्रॉन का द्रव्यमान एवं m , नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान है।

आइन्स्टीन के अनुसार यह द्रव्यमान (Δm) ऊर्जा में बदल जाता है, इसी ऊर्जा को नाभिक की बन्धन ऊर्जा कहते हैं। यही ऊर्जा नाभिक के समस्त न्यूक्लिऑनों को नाभिक के रूप में बाँधे रहती है। Δm का अर्थ है कि जब प्रोटॉन तथा न्यूट्रॉन मिलकर नाभिक का निर्माण करते हैं तो Δm द्रव्यमान लुप्त हो जाता है तथा उसके तुल्य ऊर्जा $(\Delta m)c^2$ मुक्त हो जाती है। इस ऊर्जा के कारण ही प्रोटॉन व न्यूट्रॉन नाभिक से बाँधे रहते हैं।

स्पष्ट है कि नाभिक के प्रोटॉनों तथा न्यूट्रॉनों को तोड़ने के लिए इतनी ही बाह्य ऊर्जा की आवश्यकता होगी। इस प्रकार यह स्पष्ट हो जाता है कि जब प्रोटॉन एवं न्यूट्रॉन मिलकर नाभिक बनाते हैं तो इस क्रिया में कुछ ऊर्जा निकलती है, जिसे 'नाभिक की बन्धन ऊर्जा' कहते हैं। इस तथ्य से यह भी स्पष्ट है कि यदि इतनी ही ऊर्जा (बन्धन ऊर्जा के बराबर) नाभिक को दे दी जाये तो उसके समस्त न्यूक्लिऑन बन्धनमुक्त हो जायेंगे। अतः बन्धन ऊर्जा की परिभाषा इस प्रकार भी कर सकते हैं, "किसी नाभिक की बन्धन ऊर्जा, ऊर्जा की वह मात्रा है जो नाभिक को दे देने पर उसके समस्त न्यूक्लिऑनों को बन्धन मुक्त कर दे।" अतः नाभिक की बन्धन ऊर्जा

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

$$= [Zm_p + (A - Z)m_n - m]c^2 \quad \dots(2)$$

यदि नाभिक की बन्धन ऊर्जा में न्यूक्लिऑनों की संख्या का भाग दे दें तो हमें नाभिक की 'बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन' (binding energy per nucleon) प्राप्त होती है। बन्धन ऊर्जा नाभिक के स्थायित्व को प्रदर्शित करती है।

$$\therefore \text{बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन} = \frac{\Delta E}{A} \quad \dots(3)$$

संकुलन गुणांक (Packing Fraction)—इसे द्रव्यमान क्षति प्रति न्यूक्लिऑनों के रूप में परिभाषित किया जाता है।

$$\text{संकुलन गुणांक (P)} = \frac{\text{द्रव्यमान क्षति}}{\text{परमाणु भार}} = \frac{\Delta m}{A}$$

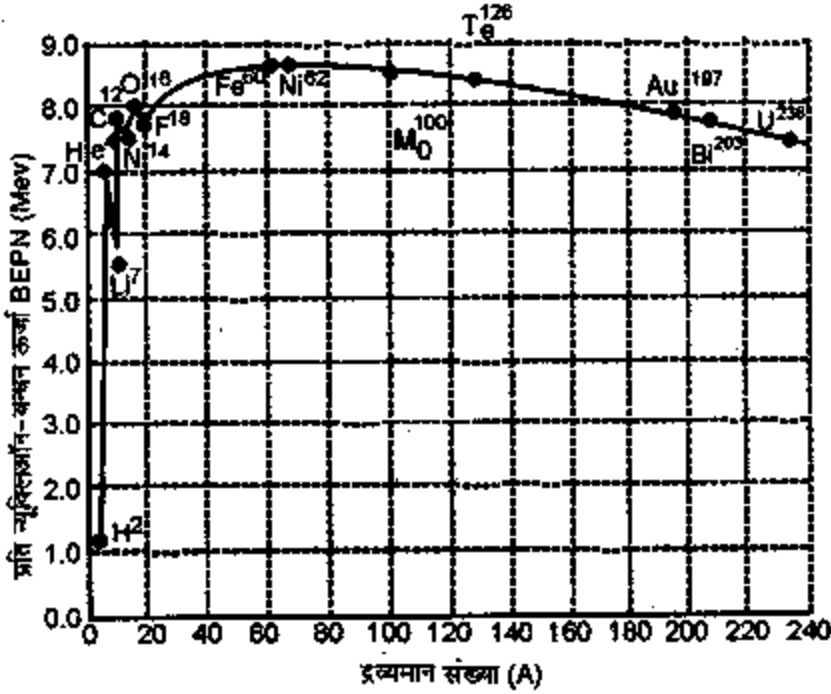
प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा (Binding energy per Nucleon) –

नाभिक की बन्धन ऊर्जा ΔE_b में इसकी द्रव्यमान संख्या A से भाग देने पर जो राशि प्राप्त होती है उसे प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा कहा जाता है। इसे $\frac{\Delta E_b}{A}$ से व्यक्त करते हैं।

$$\frac{\Delta E_b}{A} = \frac{\Delta E_b}{A}$$

$\frac{\Delta E_b}{A}$: बन्धन ऊर्जा
 A : द्रव्यमान संख्या

किसी नाभिक की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा जितनी अधिक होती है। नाभिक उतना ही अधिक स्थायी होता है। यदि विभिन्न तत्वों के नाभिकों की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा तथा उनकी द्रव्यमान संख्या के मध्य ग्राफ खींचा जाय तो प्राप्त वक्र प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा वक्र कहलाता है।



चित्र 15.2

वक्र के अध्ययन से निम्न निष्कर्ष प्राप्त होते हैं-

(i) वक्र से स्पष्ट है कि प्रारम्भ में प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा बढ़ती है फिर अधिकतम मान पर पहुँचकर द्रव्यमान संख्या के बढ़ने के साथ-साथ धीरे-धीरे घटती है।

(ii) प्रत्येक नाभिक की बन्धन ऊर्जा धनात्मक होती है; अतः नाभिक को विखण्डित करने के लिये ऊर्जा देनी होगी।

(iii) द्रव्यमान संख्या बढ़ने पर प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा बढ़ती है। और द्रव्यमान संख्या 62 (${}_{28}\text{Ni}^{62}$) निकल के लिये अधिकतम, लगभग 8.8 MeV प्रति न्यूक्लिऑन होकर फिर धीरे-धीरे घटने लगती है। इसका अर्थ यह है कि द्रव्यमान संख्या 62 के संगत एवं उसके पड़ोसी तत्वों के नाभिक सबसे अधिक स्थायी हैं। ${}_{26}\text{Fe}^{56}$ के लिये भी यह लगभग 8.8 MeV प्रति न्यूक्लिऑन होती है लेकिन ${}_{28}\text{Ni}^{62}$ से थोड़ी कम होती है। इस प्रकार निकल सबसे अधिक स्थायी तत्व है। इसी कारण भू-क्रोड में सबसे अधिक पिघला हुआ निकल तथा लोहा पाया जाता है।

(iv) द्रव्यमान संख्या 62 से अधिक द्रव्यमान संख्या वाले तत्वों की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन-ऊर्जा तत्वों की द्रव्यमान संख्या के बढ़ने पर क्रमशः कम होती जाती है। इसीलिये सीसे (Pb) से भारी सभी तत्व अस्थायी होते हैं। इसी कारण स्थायित्व को प्राप्त करने के लिये α एवं β कणों के उत्सर्जन के रूप में अपने द्रव्यमान को कम करते रहते हैं। प्राकृतिक रेडियोएक्टिव का यही कारण है।

(v) द्रव्यमान संख्या 4, 12, 16 वाले नाभिकों की प्रतिन्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा ($\overline{\Delta E_b}$) का मान इनके निकटवर्ती नाभिकों की तुलना में अधिक होता है। अतः ये निकटवर्ती नाभिकों की तुलना में अपेक्षाकृत

अधिक स्थायी होते हैं। इसी कारण ग्राफ में इन नाभिकों को शिखर बिन्दुओं द्वारा व्यक्त किया गया है। कारण-परमाणुओं की भाँति नाभिक में न्यूक्लिऑनों के लिये कोश संरचना है। 4 के गुणक वाले नाभिकों में नाभिकीय कोश पूर्णतः भरे होते हैं; अतः ये निकटवर्ती नाभिकों की तुलना में अधिक स्थायी होते हैं।

(vi) मध्यवर्ती द्रव्यमान संख्या ($30 < A < 170$) वाले नाभिक की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा ($\overline{\Delta E_b}$) का मान लगभग 8 MeV के निकट होता है जो इन नाभिकों के स्थायित्व को व्यक्त करता है।

(vii) वक्र से स्पष्ट है कि यदि हम किसी बहुत भारी नाभिक (जैसे-यूरेनियम) को किसी विधि द्वारा मध्यवर्ती द्रव्यमान संख्या वाले नाभिकों में तोड़ लें तो प्राप्त नाभिकों की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा बढ़ जायेगी। अतः इस प्रक्रिया में बहुत अधिक मात्रा में ऊर्जा मुक्त होगी। यह नाभिकीय विखण्डन कहलाता है।

(viii) वक्र से यह भी स्पष्ट है कि दो या अधिक बहुत हल्के नाभिकों (जैसे भारी हाइड्रोजन ${}_1\text{H}^2$ के नाभिक) को अपेक्षाकृत भारी नाभिकों जैसे ${}_2\text{He}^4$ में संयुक्त कर लें तो प्राप्त नाभिक की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा ($\overline{\Delta E_b}$) बढ़ जायेगी, इस प्रक्रिया में भी अत्यधिक ऊर्जा मुक्त होगी इसे नाभिकीय संलयन कहते हैं।

मुख्य बिन्दु—(i) नाभिक का स्थायित्व $\propto \frac{\Delta E}{A}$

(ii) $A = 62$ (Ni^{62}) पर $\overline{\Delta E_b} = 8.8 \text{ MeV}$ हो जाता है जो अधिकतम है।

(iii) $A \sim 60$; जैसे Ni, Fe, Co के संगत $\overline{\Delta E_b} \approx 8.8 \text{ MeV}$ है अतः ये स्थायी तत्त्व हैं।

(iv) $A = 150$ पर 8.4 MeV प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा घटकर $A = 240$ पर $\overline{\Delta E_b} = 7.6 \text{ MeV}$ हो जाता है।

प्रश्न 3. रेडियोएक्टिव क्षय के नियम लिखो। चरघातांकी क्षय के नियम का उपयोग करते हुए तत्त्व की अर्द्ध-आयु व माध्य-आयु के सूत्र ज्ञात करो।

उत्तर: रेडियो सक्रियता (Radioactivity)

सन् 1896 ई. में फ्रांसीसी वैज्ञानिक हेनरी बेकुरल ने यह पाया कि यूरेनियम तथा इसके लवणों से कुछ अदृश्य किरणें स्वतः निकलती हैं। जो कि मोटे, काले कागज की कई पर्यो को पार कर सकती हैं साथ ही ये फोटोग्राफिक प्लेटों को भी प्रभावित करती हैं इन किरणों को रेडियोएक्टिव किरणें कहते हैं।

“किसी पदार्थ से स्वतः ही अदृश्य किरणें उत्सर्जित होते रहने की घटना रेडियोसक्रियता कहलाती है।” सन् 1898 में पौलेन्ड के दम्पति मैडम क्यूरी व पियरे क्यूरी ने ऐसे रेडियोएक्टिव तत्त्व की खोज की जो यूरेनियम की अपेक्षा लगभग दस लाख गुना रेडियो सक्रिय था उसका नाम ‘रेडियम’ है। क्यूरी दम्पति को सन् 1903 में नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया।

रेडियो एक्टिवता से सम्बन्धित तथ्य-

(i) रेडियो सक्रियता एक नाभिकीय प्रक्रम है। किसी भी भौतिक या रासायनिक प्रक्रम; जैसे-दाब, ताप या अन्य पदार्थों के संयोग का रेडियो सक्रियता पर कोई प्रभाव नहीं पड़ता है। कारण यह है कि रासायनिक परिवर्तनों के लिये ऊर्जाएँ इलेक्ट्रॉन वोल्ट के क्रम की होती हैं। जबकि नाभिकीय ऊर्जा MeV के क्रम की होती है।

(ii) नाभिक के रेडियोएक्टिव क्षय में आवेश, रेखीय व कोणीय संवेग एवं द्रव्यमान ऊर्जा संरक्षित होते हैं साथ ही साथ न्यूट्रॉनों व प्रोटॉनों की संख्या भी संरक्षित होगी।

(iii) यदि नाभिक से α या β क्षय के पश्चात् प्राप्त उत्पाद नाभिकों के द्रव्यमानों का योग मूल नाभिक के द्रव्यमान से कम होगा तो मूल नाभिक अस्थायी होगा।

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

सन् 1902 में रदरफोर्ड एवं सोडी ने अनेक रेडियोएक्टिव पदार्थों के स्वतः विघटन का प्रायोगिक अध्ययन किया और रेडियोएक्टिव क्षय के सम्बन्ध में निम्नांकित निष्कर्ष निकाले जो रदरफोर्ड एवं सोडी के नियमों के रूप में जाने गये। इनके अनुसार-

(i) रेडियोएक्टिवता एक नाभिकीय घटना है तथा रेडियोएक्टिव किरणों के उत्सर्जन की दर को भौतिक या रासायनिक कारण द्वारा नियन्त्रित नहीं किया जा सकता है अर्थात् न तो इसे बढ़ाया जा सकती है और न ही घटाया जा सकता है।

(ii) रेडियोएक्टिव पदार्थों के विघटन की प्रकृति सांख्यिकीय (statistical) है अर्थात् यह कहना कठिन है कि कौन-सा नाभिक कब विघटित होगा और विघटित होकर कौन-सा कण उत्सर्जित करेगा? किसी नमूने से निश्चित समय में उत्सर्जित कणों की संख्या निश्चित होती है। विघटन की प्रक्रिया में α , β , γ , किरणों के उत्सर्जन के साथ एक तत्त्व दूसरे नये तत्त्व में बदलता रहता है जिसके रासायनिक एवं रेडियोएक्टिव गुण बिल्कुल नये होते हैं।

(iii) किसी भी क्षण रेडियोएक्टिव परमाणुओं के क्षय होने की दर उस क्षण उपस्थित परमाणुओं की संख्या के अनुक्रमानुपाती होती है।

माना किसी समय t पर उपस्थित परमाणुओं की संख्या N है तथा समय $t + \Delta t$ पर यह संख्या घट कर अपने मान की $N - \Delta N$ रह जाती है। तो परमाणुओं के क्षय होने की दर $-\frac{\Delta N}{\Delta t}$ होगी।

अतः रदरफोर्ड व सोडी के नियमानुसार:

यदि Δt समय में ΔN नाभिक विघटित हो आते हैं तो विघटन की दर

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N \text{ (उस समय मौजूद नाभिकों की संख्या या में विघटन की दर)}$$

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

$$\text{या } \frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad \dots(1)$$

जहाँ λ एक नियतांक है, जिसे क्षय नियतांक (decay constant or disintegration constant) कहते हैं। समी. (1) में ऋणात्मक चिह्न यह प्रदर्शित करता है कि समय बढ़ने पर विघटन की दर घटती है। λ का मात्रक सेकण्ड⁻¹ है। λ का मान एक दिये गये पदार्थ के लिए तो नियत रहता है परन्तु भिन्न-भिन्न पदार्थों के लिए भिन्न-भिन्न होता है।

समी. (1) को निम्न प्रकार भी लिख सकते हैं—

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad \dots(2)$$

इसका समाकलन करने पर

$$\log_e N = -\lambda t + C \quad \dots(3)$$

जहाँ C , समाकलन नियतांक है।

जब $t = 0$ तो $N = N_0$

$$\therefore \log_e N_0 = 0 + C \text{ या } C = \log_e N_0$$

\therefore समी. (3) से

$$\log_e N = -\lambda t + \log_e N_0$$

$$\text{या } \log_e N - \log_e N_0 = -\lambda t$$

$$\text{या } \log_e \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

प्रति लघुगणक (Anti-log) लेने पर—

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

$$\text{या } \boxed{N = N_0 e^{-\lambda t}} \quad \dots(4)$$

समी. (4) से स्पष्ट है कि N का मान पहले तेजी से और बाद में धीरे-धीरे घटता है अर्थात् रेडियोएक्टिव पदार्थ का क्षय पहले तेजी से और फिर धीरे-धीरे होता है। इस नियम को चरघातांकी नियम (exponential law) कहते हैं। समी. (4) से यह भी स्पष्ट है कि रेडियोएक्टिव पदार्थ को पूर्णतः क्षयित (completely decay) होने में अनन्त समय लगेगा।

क्षय नियतांक (Decay Constant)

समी. (4) में $t = \frac{1}{\lambda}$ रखने पर

$$N = N_0 e^{-1} \text{ या } N = N_0 \left(\frac{1}{e} \right) \quad \dots(5)$$

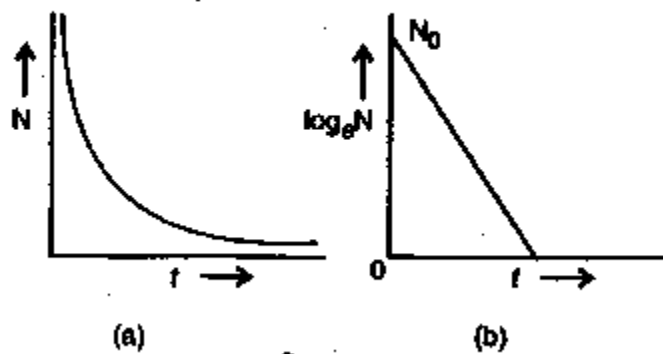
“अतः क्षय नियतांक उस समय का व्युत्क्रम है जिसमें अविघटित नाभिकों की संख्या अपने प्रारम्भिक मान की $\left(\frac{1}{e} \right)$ गुनी रह जाती है।”

इस प्रकार समीकरण (4) के अनुसार N का मान पहले तेजी से और बाद में धीरे-धीरे घटता है अर्थात् रेडियोएक्टिव पदार्थ का क्षय पहले तेजी से और फिर धीरे-धीरे होता है। इस नियम को क्षय चरघातांकी नियम कहते हैं।

अविघटित नाभिकों की संख्या N तथा समय t के मध्य ग्राफ चित्र

15.3 (a) में प्रदर्शित है; जबकि $\log_e N$ तथा समय t के मध्य परिवर्तन चित्र

15.3 (b) में दिखाया गया है।

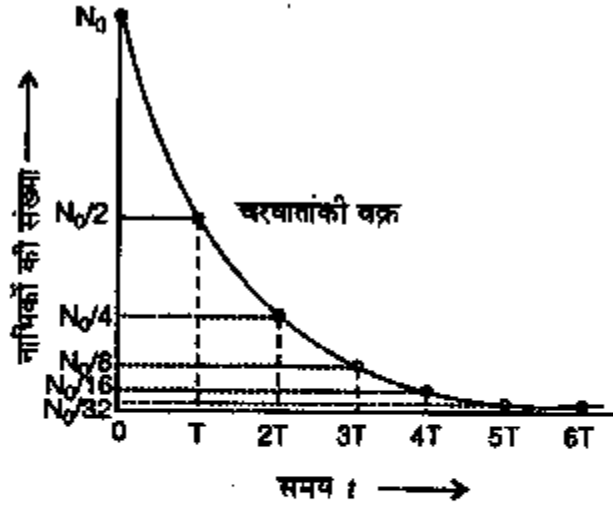


चित्र 15.3

अर्द्ध-आयु (Half life)

हम जानते हैं कि रेडियोएक्टिव तत्वों का सदैव विघटन होता रहता है और जैसे-जैसे समय बीतता जाता है, अविघटित नाभिकों की संख्या घटती जाती है। “वह समय जिसमें किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ के अविघटित नाभिकों की संख्या घटकर आधी रह जाती है, उस तत्व की अर्द्ध-आयु कहलाती है।” इसे T से व्यक्त करते हैं। एक तत्व के लिए इसका मान नियत एवं विभिन्न तत्वों के लिए भिन्न-भिन्न होता है। अर्द्ध-आयु का मान लिये गये पदार्थ की मात्रा पर निर्भर नहीं करता है। इसे भौतिक एवं रासायनिक प्रभावों द्वारा

बदला नहीं जा सकता है। कुछ तत्वों की अर्द्ध-आयु नीचे दी जा रही है-



चित्र 15.4

क्र. सं.	तत्व का नाम एवं संकेत	अर्द्ध-आयु
1.	यूरेनियम (${}_{92}\text{U}^{238}$)	4.5×10^9 वर्ष
2.	थोरियम (${}_{90}\text{Th}^{230}$)	8×10^4 वर्ष
3.	रेडियम (${}_{88}\text{Ra}^{226}$)	1620 वर्ष
4.	बिस्मथ (${}_{83}\text{Bi}^{218}$)	03 मिनट

यदि किसी रेडियोएक्टिव तत्व की अर्द्ध-आयु T है तो T समय पश्चात् वह अपनी प्रारम्भिक मात्रा का 50%, $2T$ समय बाद 25%, $3T$ समय बाद 12.5%, $4T$ समय बाद 6.25% शेष रह जायेगा। यदि पदार्थ के नाभिकों की संख्या को समय के साथ ग्राफ कर प्लॉट करें तो चित्र 15.4 की तरह चरघातांकी वक्र प्राप्त होगा। माना प्रारम्भ में किसी पदार्थ के नाभिकों की संख्या N_0 है अर्थात् $t = 0$ पर $N = N_0$ तो एक अर्द्ध-आयु (अर्थात् $t = T$) के बाद शेष नाभिकों की संख्या

$$N_1 = \frac{N_0}{2}$$

या
$$N_1 = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^1$$

दो अर्द्ध-आयुओं के पश्चात् अर्थात् $t = 2T$ के बाद शेष नाभिक

$$\begin{aligned} N_2 &= \frac{N_1}{2} = N_1 \left(\frac{1}{2} \right) \\ &= N_0 \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{2} \right) \end{aligned}$$

या
$$N_2 = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^2$$

इसी प्रकार तीन अर्द्ध-आयुओं के बाद ($t = 3T$) शेष नाभिक

$$N_3 = \frac{N_2}{2} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{2}\right)$$

या
$$N_3 = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^3$$

इसी प्रकार n अर्द्ध-आयुओं के पश्चात् ($t = nT$) शेष नाभिक

$$N_n = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

या व्यापक रूप से n अर्द्ध-आयुओं के पश्चात् शेष नाभिकों की संख्या

$$\boxed{N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n} \quad \dots(1)$$

$\therefore t = nT$

$\therefore n = \frac{t}{T}$ की सहायता से n का मान ज्ञात कर सकते हैं।

○ अर्द्ध-आयु तथा क्षय नियतांक में सम्बन्ध—यदि प्रारम्भ में (अर्थात् $t = 0$) नाभिकों की संख्या N_0 हो तो t समय के बाद शेष नाभिकों की संख्या

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

जब $t = T$ तो $N = \frac{N_0}{2}$

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

या $\frac{1}{2} = e^{-\lambda T} = \frac{1}{e^{\lambda T}}$

या $2 = e^{\lambda T}$

दोनों ओर का लघुगणक लेने पर

$$\log_e 2 = \log_e e^{\lambda T} = \lambda T \log_e e = \lambda T$$

या $\lambda T = \log_e 2$

या
$$\boxed{T = \frac{\log_e 2}{\lambda}} \quad \dots(2)$$

इस समीकरण की सहायता से λ ज्ञात होने पर T का मान ज्ञात कर सकते हैं और T ज्ञात होने पर λ का मान ज्ञात कर सकते हैं।

$$\therefore \log_e 2 = 0.6932$$

$$\therefore \boxed{T = \frac{0.6932}{\lambda}} \quad \dots(3)$$

या $\boxed{\lambda = \frac{0.6932}{T}} \quad \dots(4)$

रेडियोएक्टिव पदार्थ की माध्य-आयु (Average Life of a Radioactive Substance)

जैसा कि हम पढ़ चुके हैं, रेडियोएक्टिव विघटन की प्रकृति सांख्यिकीय (statistical) होती है अर्थात् यह नहीं कहा जा सकता है कि कौन-सा नाभिक कब विघटित होगा और विघटित होकर किस प्रकार का कण उत्सर्जित करेगा। किसी भी नाभिक के विघटन का समय शून्य से अनन्त के मध्य कुछ भी हो सकता है। सभी नाभिकों की आयु के औसत को ही माध्य-आयु (Average life) कहते हैं। इसे 1 से प्रकट करते हैं। गणितीय रूप से यह सिद्ध किया जा सकता है कि किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ की माध्य आयु क्षय नियतांक (λ) के व्युत्क्रम के बराबर होती है अर्थात्

$$\text{माध्य-आयु} = \frac{1}{\text{क्षय नियतांक}}$$

या $\tau = \frac{1}{\lambda}$

माध्य-आयु का व्यंजक (Expression for Mean or Average Life)

रदरफोर्ड एवं सोडी के नियम से;

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

केवल परिमाण लेने पर—

या $\left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N \quad \dots(1)$

अतः समय t व $(t + dt)$ के मध्य विघटित नाभिकों की संख्या

$$dN = \lambda N dt \quad \dots(2)$$

या $t = 0$ पर अविघटित नाभिकों की संख्या N_0 हो तो

$$\begin{aligned} \text{माध्य-आयु } \tau &= \frac{\text{सभी नाभिकों की कुल आयु}}{\text{नाभिकों की कुल संख्या}} \\ &= \frac{\sum t dN}{N_0} \end{aligned}$$

समीकरण (2) से;

या
$$\tau = \frac{\sum \lambda N dt}{N_0}$$

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

या
$$\tau = \frac{\sum \lambda (N_0 e^{-\lambda t}) dt}{N_0}$$

$$= \sum \lambda e^{-\lambda t} dt$$

चूँकि नाभिक लगातार अनन्त काल तक विघटित होते रहते हैं। अतः Σ को $t = 0$ से $t = \infty$ के निश्चित समाकलन के रूप में लिख सकते हैं।

$$\begin{aligned} \therefore \tau &= \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt \\ &= \lambda \left[\left(\frac{t e^{-\lambda t}}{-\lambda} \right)_0^{\infty} - \int_0^{\infty} 1 \left(\frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda} \right) dt \right] \\ &= \lambda \left[0 + \frac{1}{\lambda} \left(\frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda} \right)_0^{\infty} \right] \\ &= -\frac{1}{\lambda} [e^{-\lambda t}]_0^{\infty} \\ &= -\frac{1}{\lambda} [0 - 1] = \frac{1}{\lambda} \end{aligned}$$

या
$$\boxed{\tau = \frac{1}{\lambda}} \quad \dots(3)$$

$$\therefore \lambda = \frac{0.693}{T} \therefore \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{0.693}$$

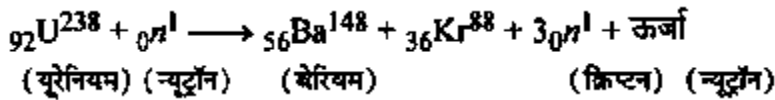
$$\therefore \tau = \frac{T}{0.693} = 1.44 T$$

या
$$\boxed{\tau = 1.44 T} \quad \dots(4)$$

प्रश्न 4. नाभिकीय विखण्डन से क्या तात्पर्य है? विखण्डन की क्रिया स्वयं श्रृंखलाबद्ध क्यों नहीं होती है? समझाइये कि श्रृंखलाबद्ध अभिक्रिया प्राप्त करने के लिये क्या करना होता है?

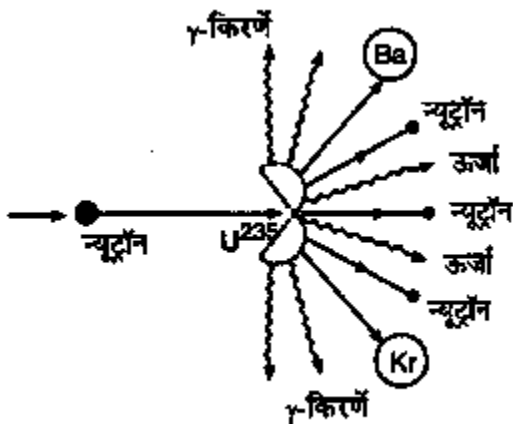
उत्तर: नाभिकीय विखण्डन (Nuclear Fission)

“किसी भारी नाभिक के दो या दो से अधिक हल्के नाभिकों में टूटने की प्रक्रिया को ‘नाभिकीय विखण्डन’ कहते हैं।” इस घटना की खोज सन् 1939 में जर्मन के दो वैज्ञानिकों ओटोहान (Otto Hann) एवं स्ट्रास्मान (Stassmann) ने की थी। उन्होंने यूरेनियम – 238 के नाभिक पर जब तीव्रगामी (लगभग 10^6 eV ऊर्जा वाले) न्यूट्रॉनों की बमबारी की तो पाया कि ${}_{92}\text{U}^{238}$ का नाभिक दो लगभग बराबर हल्के नाभिकों बेरियम (${}_{56}\text{Ba}^{148}$) एवं क्रिप्टन (${}_{36}\text{Kr}^{88}$) में टूट जाता है और एक विखण्डन में 3 न्यूट्रॉनों के साथ अपार ऊर्जा मुक्त होती है। प्रक्रिया निम्न समीकरण से व्यक्त होती है-



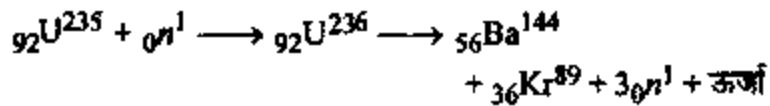
नाभिकीय विखण्डन की इस घटना में अत्यधिक परिमाण में ऊर्जा भी उत्पन्न होती है। इसका कारण यह है कि इस प्रक्रिया में प्राप्त नाभिकों के द्रव्यमानों का योग प्रयुक्त नाभिक के द्रव्यमान से कुछ कम होता है अर्थात् इस प्रक्रिया में कुछ द्रव्यमान लुप्त हो जाते हैं जो आइन्स्टीन के द्रव्यमान- ऊर्जा सम्बन्ध ($\Delta E = \Delta mc^2$) के अनुसार ऊर्जा में बदल जाता है। इसी ऊर्जा को ‘नाभिकीय ऊर्जा’ (nuclear energy) कहते हैं।

प्राकृतिक यूरेनियम में दो आइसोटोप ${}_{92}\text{U}^{235}$ व ${}_{92}\text{U}^{238}$ पाये जाते हैं। इनका अनुपात 1 : 145 होता है। इस प्राकृतिक यूरेनियम में 99.3% यूरेनियम-238 तथा केवल 0.7% यूरेनियम-235 होता है। यूरेनियम के ये दोनों आइसोटोप विखण्डनीय हैं। प्रयोगों द्वारा यह पता चलता है कि यूरेनियम-238 का विखण्डन केवल तीव्रगामी न्यूट्रॉनों (10^6 eV ऊर्जा वाले) द्वारा ही सम्भव है; जबकि यूरेनियम-235 का विखण्डन मन्दगामी न्यूट्रॉनों (1 eV से भी कम ऊर्जा वाले) से जैसे ऊष्मीय न्यूट्रॉनों (0.03 eV ऊर्जा) से भी सम्भव है। इस प्रकार स्पष्ट है कि यूरेनियम-235 विखण्डन के लिए अधिक उपयोगी है। परमाणु बम में यूरेनियम-235 प्रयोग में लाया जाता है।

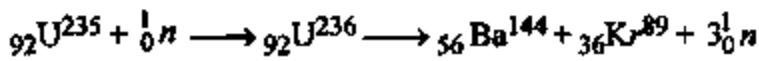
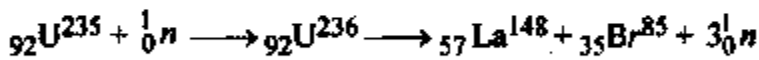
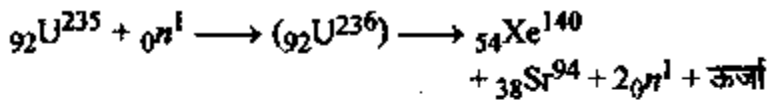


चित्र 15.13

यूरेनियम-235 का विखण्डन-जब मन्दगामी न्यूट्रॉन यूरेनियम-235 के नाभिक से टकराता है तो वह उसमें अवशोषित हो जाता है तथा यूरेनियम का अन्य आइसोटोप यूरेनियम-236 अस्थायी रूप से बनता है। चूँकि ${}_{92}\text{U}^{236}$ अस्थायी है अतः यह तुरन्त ही दो नाभिकों में टूट जाता है। तथा तीन नये न्यूट्रॉन व अपार ऊर्जा उत्सर्जित करता है। प्रक्रिया निम्न समीकरण द्वारा व्यक्त की जाती है-



यह आवश्यक नहीं है कि यूरेनियम-235 के विखण्डन में सदैव बेरियम एवं क्रिप्टन के ही नाभिक प्राप्त हों, बल्कि इसमें 20 से भी अधिक भिन्न-भिन्न तत्त्वों के 100 से भी अधिक आइसोटोप प्राप्त होते हैं। जिनकी द्रव्यमान संख्या 75 से 160 तक होती है। उदाहरण के लिए-अन्य अभिक्रिया निम्न प्रकार है-



यूरेनियम के प्रत्येक विखण्डन में लगभग 200 MeV ऊर्जा प्राप्त होती है। इस ऊर्जा का अधिकांश भाग विखण्डन से प्राप्त खण्डों की गतिज ऊर्जा के रूप में प्राप्त होता है। शेष भाग उत्सर्जित न्यूट्रॉनों की गतिज ऊर्जा, γ -किरणों तथा ऊष्मा व प्रकाश विकिरणों के रूप में प्राप्त होता है।

1 ग्राम यूरेनियम के विखण्डन से मुक्त ऊर्जा- यूरेनियम-235 के एक ग्राम परमाणु (235 g) में परमाणुओं की संख्या एवोगैड्रो संख्या (6×10^{23}) के बराबर होती है। अतः

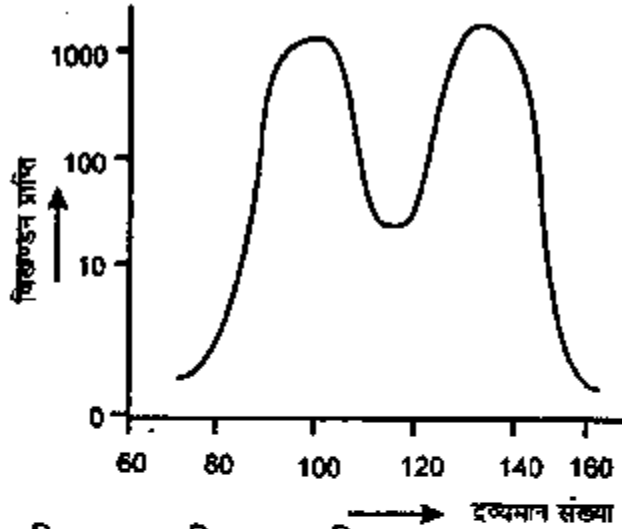
$$1 \text{ ग्राम यूरेनियम में परमाणुओं की संख्या} = \frac{6 \times 10^{23}}{235}$$

एक यूरेनियम परमाणु विखण्डन में लगभग 200 MeV ऊर्जा मुक्त होती है। अतः 1 g यूरेनियम के विखण्डन से

$$\begin{aligned} \text{मुक्त ऊर्जा} &= \frac{6 \times 10^{23}}{235} \times 200 \text{ MeV} \\ &= 5 \times 10^{23} \text{ MeV} \end{aligned}$$

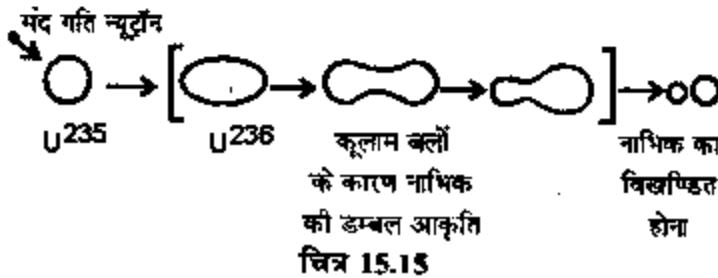
इस प्रकार हम देखते हैं कि 1 ग्राम यूरेनियम के विखण्डन होने पर 5×10^{23} MeV ऊर्जा उत्पन्न होती है जो 20 टन T.N.T. (Trinitrotoluene) में विस्फोट करने से उत्पन्न होती है। इस ऊर्जा से 2×10^4

किलोवॉट घण्टा (kWh) विद्युत ऊर्जा उत्पन्न हो सकती है।



चित्र 15.14—विखण्डन प्राप्ति (fission yield) वक्र

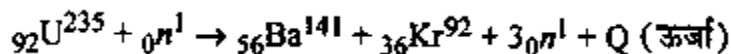
द्रव बूँद मॉडल द्वारा नाभिकीय विखण्डन की व्याख्या
(Explanation of Nuclear Fission by Liquid drop Model)—
 बोरे तथा व्हीलर द्वारा प्रतिपादित नाभिकीय द्रव बूँद मॉडल द्वारा नाभिकीय विखण्डन को समझाया जा सकता है।



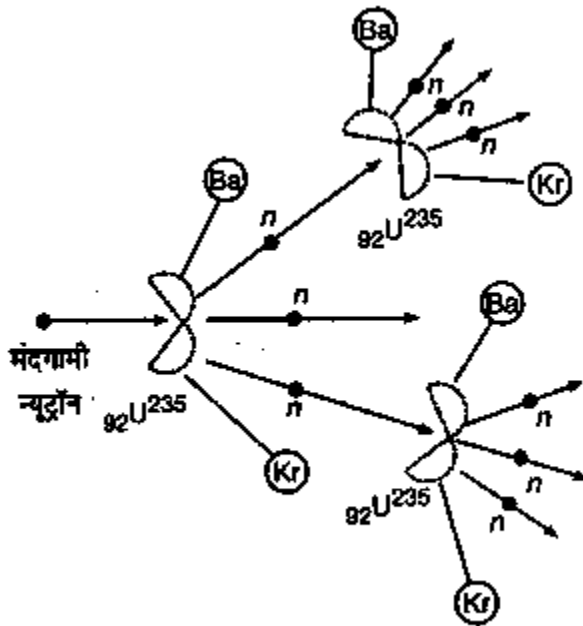
जब मन्द गति का न्यूट्रॉन U^{235} में प्रवेश करता है तो न्यूट्रॉन की अतिरिक्त ऊर्जा के कारण नाभिक में उपस्थित न्यूक्लियोन की स्थितिज ऊर्जा, आन्तरिक उत्तेजन ऊर्जा में रूपान्तरित हो जाती है। इस प्रक्रिया में उत्तेजन ऊर्जा 6.5 MeV होती है। परिणामस्वरूप नाभिक कम्पन करने लगता है तथा नाभिक विकृत होकर डम्बल आकृति धारण कर लेता है। अनुकूल परिस्थितियों में डम्बल के इन दो भागों के मध्य तीव्र प्रतिकर्षण प्रभाव के कारण नाभिक दो भागों में विखण्डित हो जाता है।

नियंत्रित एवं अनियंत्रित श्रृंखला अभिक्रिया नाभिकीय विखण्डन में श्रृंखला-अभिक्रिया (Chain Reaction in Nuclear Fission)

जब ${}_{92}U^{235}$ के नाभिकों पर मन्दगामी न्यूट्रॉनों की बमबारी की जाती है तो प्रत्येक यूरेनियम नाभिक लगभग दो बराबर खण्डों में टूट जाता है। विखण्डन की इस अभिक्रिया में तीन नये न्यूट्रॉन तथा अत्यधिक ऊर्जा उत्सर्जित होती है, अभिक्रिया निम्न प्रकार होती है-



अनुकूल परिस्थितियों में ये नये न्यूट्रॉन अन्य तीन यूरेनियम नाभिकों को भी इसी प्रकार विखण्डित करते हैं। इसी प्रकार तीन अभिक्रियाओं में उत्पन्न 9 न्यूट्रॉनों द्वारा विखण्डन की श्रृंखला आगे बढ़ायी जाती है। इस प्रकार नाभिकों के विखण्डन की एक श्रृंखला (chain) बन जाती है जिसे चित्र 15.16 में दिखाया गया है जो एक बार प्रारम्भ होने पर स्वतः तेजी से जारी रहती है जब तक कि समस्त यूरेनियम के नाभिक विखण्डित नहीं हो जाते हैं। इस प्रकार नाभिकीय विखण्डन से उत्पन्न हुई ऊर्जा उत्तरोत्तर बढ़ती जाती है। चूंकि यूरेनियम के एक नाभिक के विखण्डन से लगभग 200 MeV ऊर्जा उत्पन्न होती है। अतः श्रृंखला अभिक्रिया के फलस्वरूप उत्पन्न ऊर्जा बहुत कम समय में एक भयानक रूप धारण कर लेती है। श्रृंखला अभिक्रिया अग्र दो प्रकार की होती है—



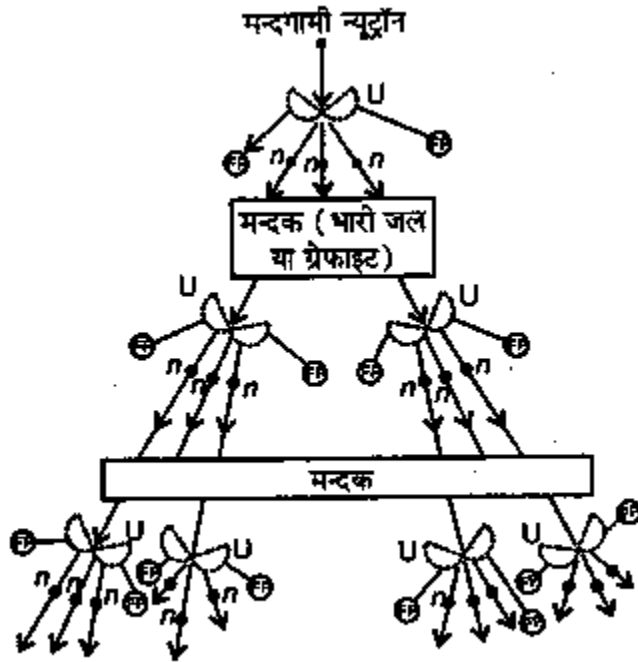
चित्र 15.16

- (i) अनियन्तित श्रृंखला अभिक्रिया
- (ii) नियन्तित श्रृंखला अभिक्रिया।

(i) अनियन्तित श्रृंखला अभिक्रिया (Uncontrolled Chain Reaction) – इस अभिक्रिया में प्रत्येक विखण्डन से प्राप्त नये न्यूट्रॉन, जो संख्या में दो या दो से अधिक होते हैं, नये नाभिकों का विखण्डन करते हैं, फलस्वरूप विखण्डनों की संख्या बहुत तेजी से बढ़ती है। इस प्रकार यह अभिक्रिया अत्यन्त तीव्र गति से होती है तथा अत्यन्त सूक्ष्म समय में ही समस्त पदार्थ का विखण्डन हो जाता है। इस अभिक्रिया में उत्पन्न अपार ऊर्जा भयानक विस्फोट का रूप ले लेती है। परमाणु बम इसी अभिक्रिया पर आधारित है।

(ii) नियन्तित श्रृंखला अभिक्रिया (Controlled Chain Reaction) – इस अभिक्रिया में कृत्रिम उपायों द्वारा (मन्दक एवं नियन्त्रक पदार्थों की सहायता से) इस प्रकार का प्रबन्ध किया जाता है कि प्रत्येक विखण्डन से प्राप्त न्यूट्रॉनों में से केवल एक ही न्यूट्रॉन आगे विखण्डन कर पाये, फलस्वरूप विखण्डनों की दर नियत रहती है। इस प्रकार यह अभिक्रिया धीरे-धीरे होती है। इस अभिक्रिया से प्राप्त ऊर्जा का उपयोग

रचनात्मक कार्यों में किया जा सकता है। नाभिकीय रिएक्टर में इसी अभिक्रिया का उपयोग किया जाता है।



चित्र 15.17

श्रृंखला अभिक्रिया के वास्तविक प्रचालन में मुख्यतः दो कठिनाइयाँ सामने आती हैं-

(i) प्राकृतिक यूरेनियम में अधिकांश (99.3%) U^{238} होता है और मात्र 0.7% U^{235} होता है। U^{238} केवल तीव्रगामी (1 MeV से अधिक ऊर्जा वाले) न्यूट्रॉनों द्वारा ही विखण्डित होता है तथा मन्दगामी (1 MeV से कम ऊर्जा वाले) न्यूट्रॉनों को अवशोषित कर लेता है, अतः U^{235} के विखण्डन से जो नये न्यूट्रॉन उत्सर्जित होते हैं वे U^{238} द्वारा अवशोषित कर लिए जाते हैं, फलस्वरूप श्रृंखला अभिक्रिया आगे नहीं चल पाती। इस कठिनाई को दूर करने के दो उपाय हैं -

(a) प्राकृतिक यूरेनियम में से U^{235} को विसरण विधि द्वारा अलग कर लिया जाता है। आइसोटोप U^{235} का विखण्डन तीव्रगामी एवं मन्दगामी दोनों प्रकार के न्यूट्रॉनों से सम्भव होता है, अतः श्रृंखला अभिक्रिया आगे चलती रहती है।

(b) मन्दकों (moderators) द्वारा न्यूट्रॉनों को इतना मन्दगामी कर लिया जाता है कि उनकी ऊर्जा केवल 0.03 eV के लगभग रह जाती है। इस दशा में न्यूट्रॉन U^{238} द्वारा अवशोषित नहीं हो पाते हैं, परन्तु U^{235} को विखण्डित कर सकते हैं। इस प्रकार मन्दकों को प्रयोग करके प्राकृतिक यूरेनियम में भी श्रृंखला आगे चलती रहती है (चित्र 15.17) प्रायः ग्रेफाइट तथा भारी जल को मन्दक के रूप में प्रयोग किया जाता है।

(ii) U^{235} नाभिक के विखण्डन से प्राप्त तीव्रगामी न्यूट्रॉन पदार्थ में लगभग 10 cm दूरी तय कर लेने पर ही मन्दगामी होते हैं तथा अन्य यूरेनियम नाभिकों का विखण्डन कर सकते हैं। अतः यदि विखण्डित होने वाले पदार्थ का आकार छोटा है तो अधिकांश न्यूट्रॉन विखण्डन को आगे बढ़ाने से पहले ही पदार्थ से बाहर निकल जायेंगे और श्रृंखला अभिक्रिया रुक जायेगी। अतः श्रृंखला अभिक्रिया आगे जारी रहने के लिए विखण्डनीय पदार्थ का आकार एक विशेष आकार (क्रान्तिक आकार) से बड़ा होना चाहिए।

प्रश्न 5. नाभिकीय भट्टी को सरल रेखाचित्र बनाते हुए इसकी प्रक्रिया स्पष्ट कीजिये।

उत्तर:

नाभिकीय रिएक्टर अथवा परमाणु भट्टी (Nuclear Reactor or Atomic Furnace)

निर्यान्तत श्रृंखला अभिक्रिया पर आधारित यह एक ऐसा उपकरण है। जिसकी सहायता से नाभिकीय ऊर्जा का उपयोग शान्तिमय एवं रचनात्मक कार्यों के लिए किया जा सकता है। इसके निम्नलिखित प्रमुख भाग होते हैं-

(i) **ईंधन (Fuel)**- नाभिकीय रिएक्टर में यूरेनियम- 235 (${}_{92}\text{U}^{235}$) अथवा प्लूटोनियम-239 (${}_{94}\text{Pu}^{239}$) को ईंधन के रूप में प्रयोग किया जाता है। यह रिएक्टर का प्रमुख भाग है जिसे सक्रिय भाग (active core) भी कहते हैं। विभिन्न प्रकार के रिएक्टरों में ईंधन का विखण्डन विभिन्न प्रकार से कराया जाता है; जैसे ऊष्मीय रिएक्टर में तापीय न्यूट्रॉनों द्वारा, माध्यमिक रिएक्टर में अल्पतापीय (epithermal) न्यूट्रॉनों द्वारा, तीव्रगामी रिएक्टर में तीव्रगामी न्यूट्रॉनों द्वारा।

(ii) **मन्दक (Moderator)** - ${}_{92}\text{U}^{235}$ के विखण्डन के लिए मन्दगामी (1 eV ऊर्जा वाले) न्यूट्रॉनों की आवश्यकता होती है और इन मन्दगामी न्यूट्रॉनों का U^{238} द्वारा अवशोषण भी नहीं होता है, जबकि तीव्रगामी न्यूट्रॉन (1 MeV से कम ऊर्जा वाले) U^{238} का विखण्डन तो कर नहीं पाते बल्कि उनका अवशोषण हो जाता है। इस प्रकार श्रृंखला अभिक्रिया को जारी रखने के लिए न्यूट्रॉनों की ऊर्जा कम करना अत्यन्त आवश्यक है। इसके लिए तीव्रगामी न्यूट्रॉनों को मन्दक पदार्थ से गुजारकर उन्हें मन्दगामी न्यूट्रॉनों में बदल लिया जाता है। इस कार्य के लिए ऐसे पदार्थ का प्रयोग किया जाता है जो न्यूट्रॉनों को अवशोषित तो न करे लेकिन उनके वेग को घटा दे। साधारण जल, भारी जल, ग्रेफाइट तथा बेरीलियम। आदि हल्के परमाणुओं वाले पदार्थ इसके लिए उपयोगी हैं। मन्दक के रूप में भारी जल सर्वोत्तम है, लेकिन इसमें न्यूट्रॉनों का अवशोषण भी अधिक होता है, अतः भारी जल के उपयोग से विखण्डन के प्राप्त न्यूट्रॉनों की संख्या घट जाती है। इसकी पूर्ति के लिए भारी जल युक्त रिएक्टरों में ईंधन के रूप में समृद्ध यूरेनियम का उपयोग किया जाता है ताकि विखण्डन तीव्र गति से होता रहे और अधिक संख्या में न्यूट्रॉन पैदा होते द्रवित हीलियम तथा बेरीलियम अधिक मात्रा में सुविधा से नहीं मिलते हैं और इनका मूल्य भी अधिक है, अतः भारी जल एवं ग्रेफाइट ही अधिकांशतः मन्दक के रूप में प्रयोग किये जाते हैं।

(iii) **नियन्त्रक (Controller)** - नाभिकीय विखण्डन की दर न्यूट्रॉनों की संख्या पर निर्भर करती है, अतः विखण्डन की दर को नियन्त्रित करने के लिए न्यूट्रॉनों की संख्या पर नियन्त्रण किया जाता है। कैडमियम न्यूट्रॉनों को अवशोषित कर लेता है, अतः विखण्डन की दर को नियन्त्रित करने के लिए कैडमियम की छड़ें प्रयोग की जाती हैं। ये छड़ें विखण्डन की क्रिया में उत्सर्जित न्यूट्रॉनों में से कुछ न्यूट्रॉनों का अवशोषण कर लेती हैं। इन छड़ों को रिएक्टर की दीवार में बने बेलनाकार खाँचों में रखा जाता है तथा आवश्यकतानुसार इन्हें अन्दर या बाहर खिसकाकर विखण्डन की दर को कम या अधिक किया जा सकता है।

(iv) **शीतलक (Coolant)** - विखण्डन के फलस्वरूप अत्यधिक मात्रा में ऊष्मा उत्पन्न होती है जिसे शीतलक द्वारा दूर किया जाता है। इसके लिए वायु, ठण्डा जल अथवा CO_2 को रिएक्टर के अन्दर पाइपों द्वारा प्रवाहित किया जाता है। इस ऊष्मा से जलवाष्प बनाकर उससे टरबाइन द्वारा विद्युत ऊर्जा प्राप्त कर लेते हैं और विद्युत ऊर्जा का उपयोग मन वांछित तरीके से करते हैं।

शीतलक पदार्थ द्रव या गैस ही हो सकता है। इसमें निम्नलिखित गुण होने चाहिए

(a) इसकी विशिष्ट ऊष्मा अधिक होनी चाहिए ताकि यह बिना अधिक ताप वृद्धि के अधिकाधिक ऊष्मा का अवशोषण कर सके।

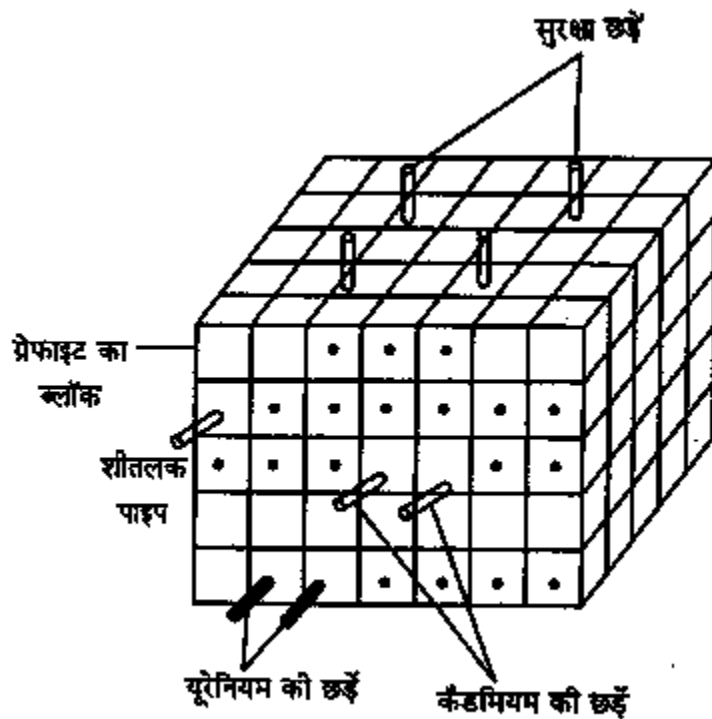
(b) शीतलक पदार्थ न्यूट्रॉनों का अवशोषण न करें।

(c) शीतलक पदार्थ द्वारा न्यूट्रॉनों का मंदन भी यथासम्भव नहीं होना चाहिए क्योंकि इस कार्य के लिए मन्दक का प्रयोग किया जाता है।

(d) शीतलक पदार्थ रिएक्टर तथा संलग्न सहायक उपकरणों के लिए संक्षारक नहीं होना चाहिए।

(v) **परिरक्षक (Shield)**- रिएक्टर में अनेक तीव्र विकिरण भी निकलते हैं जो इसके पास काम करने वालों के लिए हानिकारक होते हैं, अतः इन घातक विकिरणों से कर्मचारियों की सुरक्षा के लिए रिएक्टर को कंकरीट की मोटी दीवारों के अन्दर बन्द कर दिया जाता है।

(vi) **सुरक्षा छड़ें (Safety Rods)**- वैसे तो नाभिकीय विखण्डन की श्रृंखला अभिक्रिया को नियन्त्रित करने के लिए रिएक्टर में नियन्त्रक छड़ें लगी होती हैं, लेकिन इनके अलावा कुछ सुरक्षा छड़ें भी लगा दी जाती हैं। जो आपातकाल के समय स्वतः रिएक्टर में प्रवेश करके श्रृंखला अभिक्रिया को नियन्त्रित कर देती हैं।
रचना (Construction)-नाभिकीय रिएक्टर का सैद्धान्तिक आरेख चित्र 15.18 में प्रदर्शित है। इसमें ग्रेफाइट की ईंटों से बनाया गया एक आयताकार ब्लॉक होता है जो चारों ओर से कंकरीट की मोटी दीवारों से घिरा होता है। ग्रेफाइट की ईंटों में लम्बे बेलनाकार खाँचे बने होते हैं।



चित्र 15.18

इन खाँचों में रिक्त स्थानों में यूरेनियम-235 की छड़ें लगी रहती हैं। इन छड़ों को ऑक्सीकरण से बचाने के लिए इन्हें एल्यूमीनियम के खोल में बन्द कर देते हैं। समुचित स्थानों पर नियन्त्रक के रूप में कैडमियम की छड़े ब्लॉक में बने खाँचों में लगी रहती हैं जिन्हें इच्छानुसार अन्दर या बाहर की ओर खिसकाया जा सकता है। ग्रेफाइट के ब्लॉक में होकर पाइप लाइन बिछी रहती है जिसमें ठण्डा जल प्रवाहित करके शीतलन किया जाता है। ब्लॉक में कुछ अन्य छड़े भी सुरक्षा छड़ों के रूप में लगी रहती हैं।

कार्यविधि (Working)- जब रिएक्टर बन्द होता है तो कैडमियम की छड़े ब्लॉक में पूर्णतः अन्दर होती हैं। जब रिएक्टर चलाना होता है तो कैडमियम की छड़ों को बाहर खींच लिया जाता है जिससे रिएक्टर में पहले से ही विद्यमान न्यूट्रॉन विखण्डन क्रिया आरम्भ कर देते हैं। क्रिया को बढ़ाने अथवा घटाने के लिए कैडमियम की छड़ों को आवश्यकतानुसार बाहर या अन्दर की ओर खिसकाना पड़ता है। रिएक्टर में उपस्थित न्यूट्रॉन U^{235} के नाभिकों का विखण्डन करने लगते हैं।

विखण्डन के फलस्वरूप तीव्रगामी न्यूट्रॉन उत्पन्न होते हैं, ये तीव्रगामी न्यूट्रॉन बार-बार मन्दक से टकराते हैं जिससे इनकी गति मन्द पड़ जाती है। तब ये भी U^{235} नाभिकों का विखण्डन करने लगते हैं। इस प्रकार विखण्डन की श्रृंखला अभिक्रिया प्रारम्भ हो जाती है। जब रिएक्टर बन्द करना होता है तो कैडमियम की छड़ों को पूर्णतः ब्लॉक में अन्दर की ओर खिसका देते हैं।

यहाँ एक बात ध्यान में रखने की है और वह यह है कि अभिक्रिया को चलाने के लिए यूरेनियम की छड़ों का आकार क्रान्तिक आकार से बड़ा होना चाहिए।

उपयोग (Uses)-

- नाभिकीय रिएक्टर का उपयोग विद्युत उत्पादन के लिए किया जाता है।
- इनका उपयोग रेडियोएक्टिव आइसोटोप उत्पन्न करने के लिए किया जाता है जिनका प्रयोग चिकित्सा विज्ञान, कृषि एवं उद्योगों में किया जाता है। कोबाल्ट, आयोडीन, गन्धक, फास्फोरस आदि के रेडियो-आइसोटोप अनेक रोगों के उपचार में काम आते हैं।
- यह नाभिकीय अनुसंधान के लिए उच्च तीव्रता के न्यूट्रॉन पूँज उत्पन्न करने के काम आते हैं।

प्रश्न 6. β क्षय को समझाइये। β क्षय में न्यूट्रिनो परिकल्पना की विवेचना कीजिये।

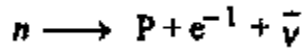
उत्तर:

β -क्षय (β -decay)

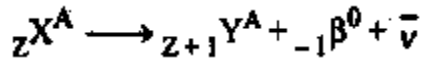
क्षय निम्न तीन प्रकार के होते हैं -

- (i) ऋणात्मक बीटा क्षय (β^-)
- (ii) धनात्मक बीटा क्षय (β^+)
- (iii) इलेक्ट्रॉन प्रग्रहण (electron capture or K capture)

(i) ऋणात्मक बीटा क्षय (β^-) जब किसी अस्थायी नाभिक में न्यूट्रॉन, प्रोटॉन में रूपान्तरित होता है तो साथ ही (β^-) व एण्टीन्यूट्रिनो ($\bar{\nu}$) प्राप्त होता है नाभिक से β^- व $\bar{\nu}$ उत्सर्जित होते हैं।

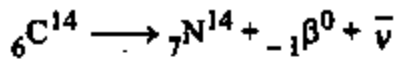


जब मातृ नाभिक से (β^-) उत्सर्जित होता है तो उत्पाद नाभिक के परमाणु क्रमांक में एक अंक की वृद्धि हो जाती है; जबकि द्रव्यमान संख्या अपरिवर्तित रहती है।



मातृ नाभिक उत्पाद नाभिक ऋणात्मक बीटा कण एण्टीन्यूट्रिनो

उदाहरण-



β क्षय में विघटन ऊर्जा— $\Delta m = m_x - (m_y + m_e)$... (i)

यहाँ m_x = मातृ नाभिक का द्रव्यमान

m_y = उत्पाद नाभिक का द्रव्यमान

m_e = इलेक्ट्रॉन या ऋणात्मक बीटा कण का द्रव्यमान

$\bar{\nu}$ को द्रव्यमान रहित लिया गया है।

समी. (i) में Zm_e को जोड़ते हैं एवं घटाते हैं।

$$\Delta m = [m_x - (m_y + m_e)] + Zm_e - Zm_e$$

$$\Delta m = (m_x + Zm_e) - \{m_y + m_e + Zm_e\}$$

$$\Delta m = (m_x + Zm_e) - \{m_y + (Z+1)m_e\}$$

$$\Delta m = M_x - M_y$$

$$\text{विघटन ऊर्जा } Q = \Delta mc^2$$

$$Q = (M_x - M_y) C^2$$

M_x = मातृ नाभिक का परमाण्वीय द्रव्यमान

M_y = उत्पाद नाभिक का परमाण्वीय द्रव्यमान

धनात्मक बीटा क्षय (β^+ क्षय)-जब किसी अस्थायी नाभिक में प्रोटॉन, न्यूट्रॉन में रूपान्तरित होता है तो साथ (β^+) पॉजिट्रॉन तथा (ν) न्यूट्रिनो प्राप्त होते हैं यही β^+ व ν नाभिक से उत्सर्जित होते हैं।

समी. (i) में Zm_e को जोड़ते हैं एवं घटाते हैं।

$$\Delta m = [m_x - (m_y + m_e)] + Zm_e - Zm_e$$

$$\Delta m = (m_x + Zm_e) - \{m_y + m_e + Zm_e\}$$

$$\Delta m = (m_x + Zm_e) - \{m_y + (Z+1)m_e\}$$

$$\Delta m = M_x - M_y$$

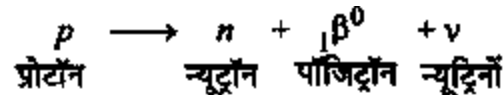
$$\text{विघटन ऊर्जा } Q = \Delta mc^2$$

$$Q = (M_x - M_y) c^2$$

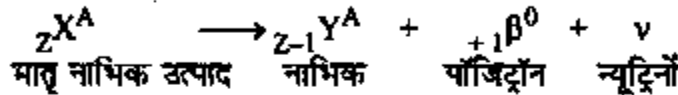
M_x = मातृ नाभिक का परमाण्वीय द्रव्यमान

M_y = उत्पाद नाभिक का परमाण्वीय द्रव्यमान

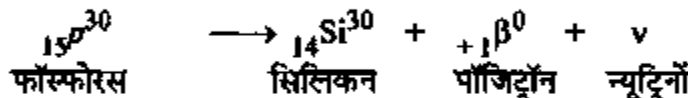
घनात्मक छोटा क्षय (β^+ क्षय)—जब किसी अस्थायी नाभिक में प्रोटॉन, न्यूट्रॉन में रूपान्तरित होता है तो साथ (β^+) पॉजिट्रॉन तथा (ν) न्यूट्रिनो प्राप्त होते हैं यही β^+ व γ नाभिक से उत्सर्जित होते हैं।



जब मातृ नाभिक से (β^+) उत्सर्जित होता है तो उत्पाद नाभिक के परमाणु क्रमांक में 1 अंक की कमी हो जाती है; जबकि द्रव्यमान संख्या अपरिवर्तित रहती है।



उदाहरण—



β^+ क्षय में विघटन ऊर्जा—

परमाण्वीय द्रव्यमान के रूप में द्रव्यमान क्षति

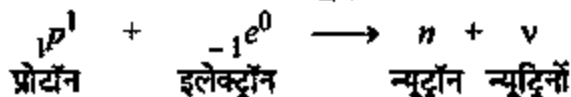
$$\Delta m = [M_x - Zm_e] - \{[M_y - (Z-1)m_e] + m_e\}$$

$$\Delta m = [M_x - M_y - 2m_e]$$

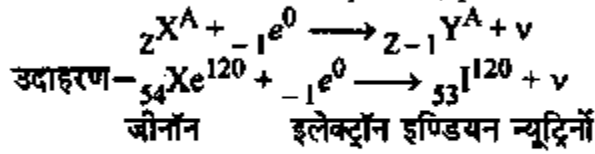
$$\text{विघटन ऊर्जा } Q = \Delta mc^2$$

$$Q = [M_x - M_y - 2m_e] c^2$$

इलेक्ट्रॉन प्रग्रहण—ऐसे नाभिक जिनमें ऊर्जा संरक्षण के आधार पर β^+ क्षय तो संभव नहीं है; अतः प्रोटॉन कक्षीय इलेक्ट्रॉन सामान्यतया K कक्ष के इलेक्ट्रॉन का प्रग्रहण कर लेता है तथा इनसे संयुक्त होकर न्यूट्रॉन में रूपान्तरित हो जाता है। यहाँ न्यूट्रिनो भी प्राप्त होता है।



इस प्रक्रिया में मातृ नाभिक इलेक्ट्रॉन प्रग्रहण के द्वारा उत्पाद नाभिक में रूपान्तरित हो जाता है परन्तु यहाँ ${}_{-1}e^0$ या ${}_{+1}e^0$ का उत्सर्जन नहीं होता है।

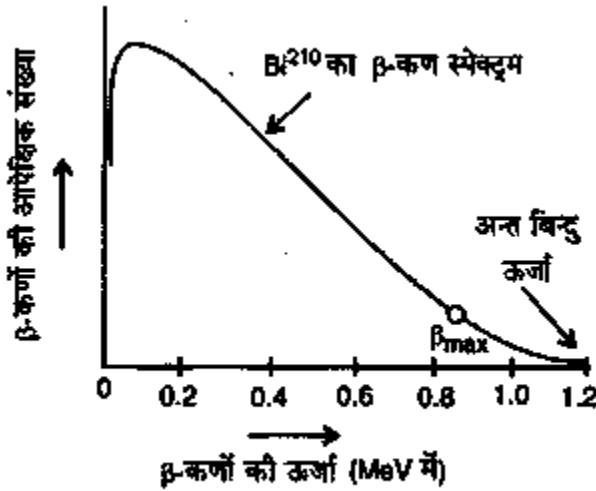


M_x = मूल नाभिक का परमाणवीय द्रव्यमान

M_y = उत्पाद नाभिक का परमाणवीय द्रव्यमान

* विघटन ऊर्जा Q का मान है $= Q = [M_x - M_y] c^2$

इलेक्ट्रॉन प्रग्रहण-ऐसे नाभिक जिनमें ऊर्जा संरक्षण के आधार पर β^+ क्षय तो संभव नहीं है; अतः प्रोटॉन कक्षीय इलेक्ट्रॉन सामान्यतया K कक्ष के इलेक्ट्रॉन को प्रग्रहण कर लेता है तथा इनसे संयुक्त होकर न्यूट्रॉन में रूपान्तरित हो जाता है। यहाँ न्यूट्रिनो भी प्राप्त होता है।



चित्र 15.9

β -कण की आपेक्षिक संख्या एवं उनकी ऊर्जा के मध्य (Bi^{210}) के लिए ग्राफ चित्र 15.9 में प्रदर्शित है।

यह ग्राफ दर्शाता है कि

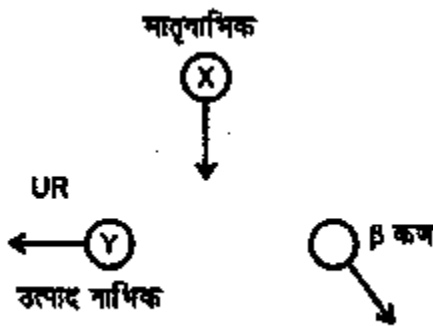
- अधिकतर β -कणों की ऊर्जा कम होती है,
- केवल कुछ इलेक्ट्रॉनों की ऊर्जा अधिकतम होती है जो अन्त बिन्दु ऊर्जा (end point energy) कहलाती है और
- ऊर्जा स्पेक्ट्रम सतत है जो यह दर्शाता है कि उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों की ऊर्जा 0 (शून्य) से $(0_\beta)_{\max}$ तक सम्भव है।

न्यूट्रिनो परिकल्पना (Neutrino Hypothesis)

प्रारम्भ में β क्षय में यह माना जाता था कि मूल नाभिक, उत्पाद नाभिक व β^- या β^+ में रूपान्तरित होता है। परन्तु इस अवधारणा में ऊर्जा, रैखिक संवेग तथा कोणीय संवेग संरक्षण लागू नहीं होता है।

(i) **ऊर्जा संरक्षण** – β क्षय में, उत्सर्जित β कणों की ऊर्जा मातृ व उत्पाद नाभिकों की ऊर्जाओं के अन्तर के बराबर नहीं पाई गई; स्पष्ट है β क्षय में ऊर्जा संरक्षण का नियम विचलित होता है।

(ii) **रैखिक संवेग संरक्षण-**



चित्र 15.10

चित्र 15.10 से ज्ञात होता है कि β क्षय के दौरान उत्पाद नाभिक एवं β कण परस्पर विपरीत गति नहीं करते जबकि इनकी विपरीत गति रैखिक संवेग संरक्षण के लिये आवश्यक है। स्पष्ट है रैखिक संवेग संरक्षण का नियम भी विचलित हो गया।

(iii) **कोणीय संवेग संरक्षण**

β -क्षय में कोणीय संवेग या चक्रण के संरक्षण नियम का भी विचलन होता है। β -कण अर्थात् इलेक्ट्रॉन का चक्रण $1/2$ होता है। जब यह नाभिक द्वारा उत्सर्जित होता है तो नाभिक का चक्रण भी $1/2$ परिवर्तित होना आवश्यक है, परन्तु β -कण उत्सर्जित करते नाभिक का चक्रण कभी भी $1/2$ से परिवर्तित होना नहीं पाया गया। नाभिक का चक्रण अपरिवर्तित या पूर्णतः परिवर्तित होता है। इसलिए कोणीय संवेग संरक्षण का नियम β -क्षय द्वारा विचलित होता है।

ऊर्जा, रैखिक व कोणीय संवेग संरक्षण के नियमों के विचलन के प्रश्न का समाधान पॉली (Pauli) ने सन् 1930 में किया। उनके अनुसार जब मातृ नाभिक से β कण उत्सर्जित होता है तो उसके साथ एक अन्य कण न्यूट्रिनो (ν) या एन्टिन्यूट्रिनो ($\bar{\nu}$) भी उत्सर्जित होता है। न्यूट्रिनो या एन्टिन्यूट्रिनो द्रव्य से नगण्य अन्योन्य क्रियाएँ करते हैं अतः इनका संसूचन बहुत मुश्किल था। 1956 में रेन्स तथा कोवान (Reines and Cowan) ने इन कणों का संसूचन करने में सफलता प्राप्त की।

न्यूट्रिनो में निम्न गुण होते हैं-

- यह उदासीन कण होता है।
- इसका विराम द्रव्यमान शून्य होता है।
- इसका कोणीय संवेग अन्य न्यूक्लिऑन के समान $\pm \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2\pi} \right)$ होता है।

- यह फोटॉन के समान ऊर्जा वाला कण होता है।
- फोटॉन के समान ही इनमें रैखिक संवेग होता है।

उपरोक्त समीकरणों में ऊर्जा, रैखिक एवं कोणीय संवेग संरक्षण लागू है।

(i) इस प्रकार β क्षय में जब β^+ या β^- व ν या $\bar{\nu}$ निकलते हैं तो दोनों ही ऊर्जाओं का योग अन्त बिन्दु ऊर्जा के बराबर होता है। इस प्रकार β कण व न्यूट्रिनो की कुल ऊर्जा नियत है जो ऊर्जा संरक्षण के नियम का पालन हो जाता है। या मातृ नाभिक व उत्पाद नाभिकों की ऊर्जाओं का अन्तर β कण व न्यूट्रिनो (एण्टिन्यूट्रिनो) की ऊर्जाओं के योग के समान होता है।

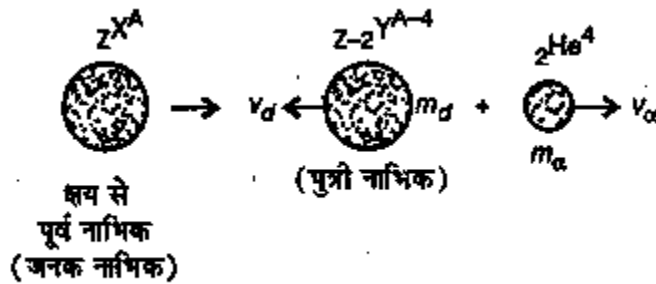
(ii) β क्षय में न्यूट्रिनो या एण्टिन्यूट्रिनो के उत्सर्जन की दिशा β क्षय में रैखिक संवेग संरक्षण को स्थापित करता है।

(iii) जैसा कि यह ज्ञात होता है कि न्यूट्रिनो का कोणीय संवेग $\pm \frac{h}{2\pi}$ है तो β क्षय में कोणीय संवेग संरक्षण भी लागू हो जाता है।

प्रश्न 7. रेडियोएक्टिव नाभिक से α क्षय की व्याख्या कीजिये। समझाइये कि क्षय से प्राप्त कणों को ऊर्जा स्पेक्ट्रम विविक्त ऊर्जाओं का समूह होता है।

उत्तर: α -क्षय (α -decay)

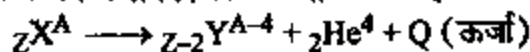
जो नाभिक α -कण का उत्सर्जन करता है उसे जनक नाभिक कहते हैं। जब कोई भारी नाभिक (जनक) α -कण



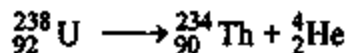
चित्र 15.6

उत्सर्जित करता है तो जनक नाभिक की आन्तरिक ऊर्जा बहुत अधिक होती है तथा यह अस्थायी होता है। अतिरिक्त ऊर्जा के उत्सर्जन के लिए, जनक नाभिक एक α -कण उत्सर्जित करता है तथा निर्मित नाभिक पुत्री नाभिक (daughter nucleus) कहलाता है। इस पुत्री नाभिक के द्रव्यमान एवं वेग को क्रमशः m_d एवं ν_d से व्यक्त करते हैं। पुत्री नाभिक एवं α -कण के रेखीय संवेग संरक्षण के लिए (चित्र 15.6) परस्पर विपरीत दिशाओं में प्रक्षेपित होते हैं।

α -क्षय की अभिक्रिया निम्न प्रकार लिखी जा सकती है—



इस समीकरण में न्यूक्लियॉन संख्या का संरक्षण एवं आवेश संरक्षण हो रहा है। एल्फा क्षय के लिए एक उदाहरण है।



अब रेखीय संवेग संरक्षण के सिद्धान्त से—

$$\vec{p}_d + \vec{p}_\alpha = 0$$

$$\text{या } m_d \vec{v}_d + m_\alpha \vec{v}_\alpha = 0$$

$$\text{या } \vec{v}_d = \frac{-m_\alpha \vec{v}_\alpha}{m_d} \quad \dots(1)$$

केवल परिमाण के लिए

$$v_d = \frac{m_\alpha v_\alpha}{m_d}$$

अब ऊर्जा संरक्षण के सिद्धान्त से

$$E_d + E_\alpha = Q$$

$$\text{या } \frac{1}{2} m_d v_d^2 + \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 = Q \quad \dots(2)$$

समी. (1) से v_d का आंकिक मान समी. (2) में रखने पर

$$\frac{1}{2} m_d \left(\frac{m_\alpha v_\alpha}{m_d} \right)^2 + \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 = Q$$

$$\text{या } \frac{1}{2} m_d \frac{m_\alpha^2 v_\alpha^2}{m_d^2} + \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 = Q$$

$$\text{या } \frac{1}{2} \frac{m_\alpha^2 v_\alpha^2}{m_d} + \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 = Q$$

$$\text{या } \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 \left[\frac{m_\alpha}{m_d} + 1 \right] = Q$$

$$\text{या } E_\alpha \left(\frac{m_\alpha}{m_d} + 1 \right) = Q$$

जहाँ $E_\alpha = \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 = \alpha\text{-कण की गतिज ऊर्जा}$

$\therefore m_\alpha = 4 \text{ amu}$ और $m_d = (A - 4) \text{ amu}$

$$\therefore E_\alpha \left(\frac{4}{A-4} + 1 \right) = Q$$

या $E_{\alpha} \left(\frac{A}{A-4} \right) = Q$

या $E_{\alpha} = \left(\frac{A-4}{A} \right) Q \quad \dots(3)$

चूँकि पुत्री नाभिक, α -कण की तुलना में बहुत भारी होता है, अतः लगभग पूरी विघटन ऊर्जा (Q), α -कण की गतिज ऊर्जा के रूप में प्रकट होती है।

उदाहरण के लिए (${}_{94}\text{Po}^{210}$) नाभिक से α -क्षय के समय α -कण की गतिज ऊर्जा 5.3 MeV होती है तो समी. (3) से

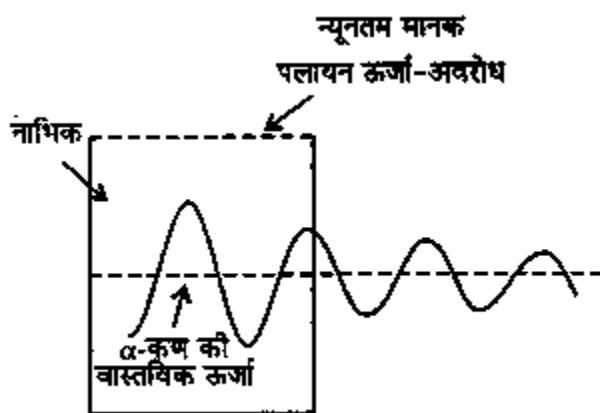
$$Q = E_{\alpha} \times \frac{A}{A-4}$$

$$= 5.3 \text{ MeV} \times \frac{210}{(210-4)}$$

$$= 5.3 \times \frac{210}{206} \text{ MeV}$$

$$= 5.4 \text{ MeV}$$

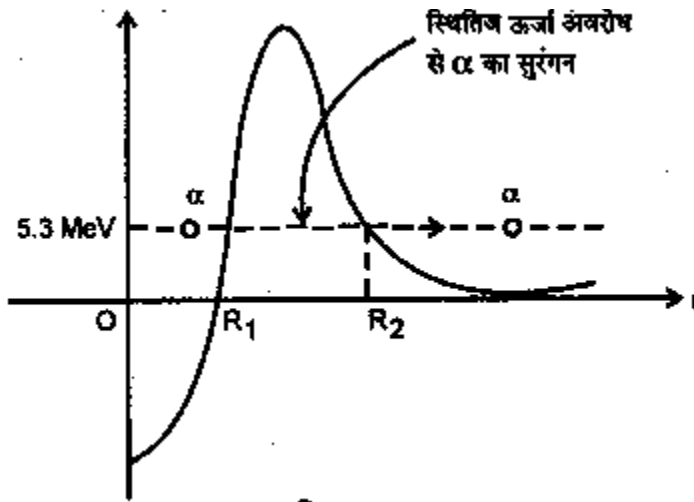
इस प्रकार स्पष्ट है कि विघटन ऊर्जा लगभग पूर्णतः α -कण की गतिज ऊर्जा के रूप में प्रकट होती है। यदि नाभिक का विभव प्राचीर (potential barrier) α -कण की गतिज ऊर्जा की कोटि का हो तो α -कण का पलायन हो सकता है। यह देखा गया है कि नाभिक के विभव प्राचीर का मान लगभग 26 MeV होता है।



चित्र 15.7

प्राचीन यान्त्रिकी के अनुसार α -कण, जिसकी ऊर्जा लगभग 5.4 MeV होती है, विभव प्राचीर (26 MeV) को पार नहीं कर पाता है। परन्तु रेडियोएक्टिव नाभिक द्वारा उत्सर्जित किसी भी α -कण की ऊर्जा इतनी नहीं होती है, इसलिये ये नाभिक से पलायन नहीं कर सकते हैं। α -कण के नाभिक से पलायन की समस्या को गेमोव कोल्डोन (Gamow Congdon) एवं गर्नेय (Gurmey) द्वारा 1928 में क्वाण्टम यान्त्रिकी का प्रयोग करते हुए हल किया गया।

इस सिद्धान्त के अनुसार कण नाभिक से उत्सर्जन से पूर्व नाभिक में ही मौजूद होता है।



चित्र 15.8

जब α कण नाभिक में होता है तो उस पर नाभिकीय आकर्षण बल कार्य करता है ($r < R_1$) पर

(ii) जब α कण नाभिक से बाहर आता है तो नाभिक व α कणों के मध्य कूलॉम प्रतिकर्षण बल कार्य करता है ($r < R_2$)। α क्षय में विघटन ऊर्जा लगभग α कण की गतिज ऊर्जा के बराबर है। चित्र 15.8 से स्पष्ट है कि $R_1 < r < R_2$ में α कण की कुल ऊर्जा (E), इसकी स्थितिज ऊर्जा U से कम है।

$E_K = E - U$ के अनुसार; यदि $E < U$ गतिज ऊर्जा E_K ऋणात्मक है जो कि असम्भव है। न्यूटन की यांत्रिकी से प्रतीत होता है α क्षय संभव नहीं है।

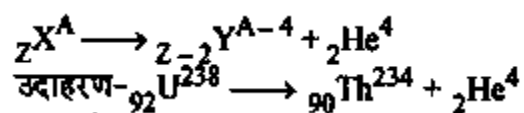
यदि गतिशील α कण के साथ द्रव्य तरंग सम्बद्ध मान लें तो क्वाण्टम यांत्रिकी के अनुसार इस तरंग के लिये नाभिक की विभव प्राचीर को पार करने की परिमित प्रायिकता होगी। इसे सुरंगन प्रभाव (Tunnel Effect) कहते हैं।

रेडियोएक्टिव श्रेणियाँ-जब किसी रेडियोएक्टिव नाभिक से α कण उत्सर्जित होता है तो उत्पाद नाभिक की द्रव्यमान संख्या में 4 अंक की कमी हो जाती है। ऐसा सम्भव है कि α क्षय से प्राप्त पुत्री नाभिक स्वयं भी रेडियो सक्रिय हो तथा α या β का क्षय करती हो। यदि मूल नाभिक की द्रव्यमान संख्या $4n$ है जहाँ n पूर्णांक है तो उत्पाद या पुत्री नाभिक तथा आगामी क्षय श्रृंखला में आने वाले अन्य सभी अस्थायी नाभिकों एवं अन्तिम स्थायी नाभिक की द्रव्यमान संख्या भी किसी पूर्णांक की 4 गुना होगी। यदि मूल नाभिक की द्रव्यमान संख्या $4n + 1$ है तो इसकी क्षय श्रृंखला में आने वाले सभी नाभिकों की द्रव्यमान संख्या $4n + 1$ होगी। इस प्रकार α क्षय के लिये चार श्रृंखलाएँ सम्भव हैं जो निम्न सारणी में व्यक्त हैं।

द्रव्यमान संख्या	श्रेणी	मूल नाभिक	अन्तिम स्थायी उत्पाद
$4n$	थोरियम	${}_{90}\text{Th}^{234}$	${}_{82}\text{Pb}^{208}$
$4n+1$	नेप्टूनियम	${}_{93}\text{Np}^{237}$	${}_{83}\text{Bi}^{209}$
$4n+2$	यूरेनियम	${}_{82}\text{U}^{238}$	${}_{82}\text{Pb}^{206}$
$4n+3$	एक्टिनियम	${}_{82}\text{U}^{235}$	${}_{82}\text{Pb}^{207}$

नोट— $4n+1$ द्रव्यमान संख्या वाली नेप्टूनियम श्रेणी लुप्त हो चुकी है क्योंकि इस श्रेणी का सर्वाधिक आयु काल वाला तत्व (Bi^{209} को छोड़कर) ${}_{93}\text{Np}^{237}$ है जिसकी अर्द्ध-आयु 2×10^6 वर्ष है जो पृथ्वी की आयु से बहुत कम है।

α कण हीलियम का नाभिक होता है जो द्वि आयनित कण है।



स्पष्ट है, α -कण के उत्सर्जन से मूल नाभिक का परमाणु क्रमांक दो से तथा द्रव्यमान संख्या 4 से कम हो जाती है अर्थात् उत्पाद नाभिक को परमाणु क्रमांक 2 व द्रव्यमान संख्या 4 से घट जाती है इसे ही α क्षय कहते हैं।

α कणों की नाभिक से उत्सर्जन की व्याख्या चिरसम्मत सिद्धान्तों की अपेक्षा क्वाण्टम यांत्रिकी के आधार पर की जा सकती है। इसके अनुसार नाभिक α कण नाभिक में ही होता है तथा सुरंगन प्रभाव द्वारा यह नाभिक से बाहर आता है। α कणों की ऊर्जा का स्पेक्ट्रम विविक्त व रेखित होता है। विविक्त ऊर्जा स्पेक्ट्रम यह प्रदर्शित करता है कि नाभिक में भी परमाणु की भाँति विविक्त ऊर्जा स्तर उपस्थित है।

प्रश्न 8. संलयन में प्रोटॉन-प्रोटॉन चक्र किस प्रकार सम्पन्न होता है। ये ताप नाभिकीय अभिक्रियायें प्रयोगशाला में सम्पन्न नहीं हो सकती

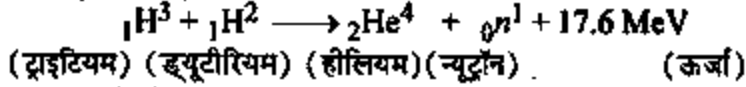
उत्तर:

नाशिकीय संलयन (Nuclear Fusion)

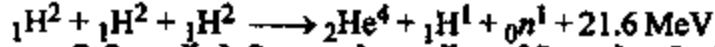
“वह प्रक्रिया, जिसमें दो हल्के नाभिक परस्पर संयुक्त होकर एक भारी नाभिक की रचना करते हैं, नाभिकीय संलयन कहलाती है।” इस प्रक्रिया में प्राप्त भारी नाभिक का द्रव्यमान, संयोग करने वाले दोनों नाभिकों के द्रव्यमान के योग से कम होता है। द्रव्यमान की यह क्षति आइन्स्टीन के द्रव्यमान ऊर्जा सम्बन्ध ($\Delta E = \Delta mc^2$) के अनुसार ऊर्जा में रूपान्तरित हो जाती है।

उदाहरण के लिए; भारी हाइड्रोजन अर्थात् ड्यूटीरियम के दो नाभिक संयोग करते हैं तो ट्राइटियम प्राप्त होता है।

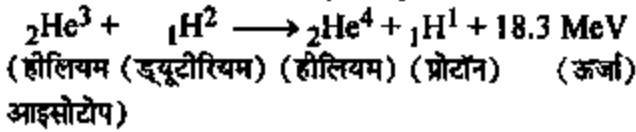
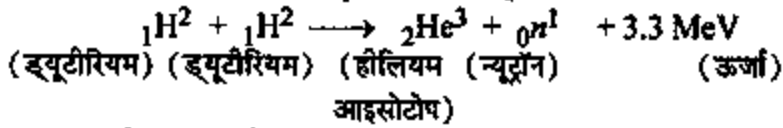
${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^2 \longrightarrow {}_1\text{H}^3 + {}_1\text{H}^1 + 4.0 \text{ MeV}$
 (ड्यूटीरियम) (ड्यूटीरियम) (ट्राइटियम) (प्रोटॉन) (ऊर्जा)
 ट्राइटियम का नाभिक पुनः ड्यूटीरियम नाभिक से संयोग करके
 α -कण अर्थात् हीलियम का नाभिक बनाते हैं—



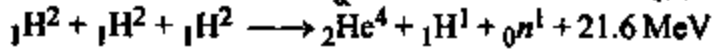
इस प्रकार दोनों अभिक्रियाओं को मिलाने पर अन्तिम अभिक्रिया निम्न प्रकार प्राप्त होगी—



उपयुक्त अभिक्रियाओं के विकल्प के रूप में ड्यूटीरियम के नाभिकों के संलयन की निम्न अभिक्रियाएँ भी सम्भव हैं—



इन दोनों के परिणामी के रूप में पूर्व की भाँति निम्न प्रक्रिया होगी—



इस प्रकार परिणामी प्रतिक्रियाएँ दोनों स्थितियों में समान हैं। इन दोनों में ड्यूटीरियम के तीन नाभिक संलयित होकर हीलियम के नाभिक की संरचना करते हैं तथा 21.6 MeV ऊर्जा उत्पन्न होती है जो न्यूट्रॉन एवं प्रोटॉन की गतिज ऊर्जा के रूप में प्राप्त होती है। यद्यपि ऐसा प्रतीत होता है कि नाभिकीय संलयन से प्राप्त ऊर्जा (21.6 MeV), U^{235} के एक नाभिक के विखण्डन से प्राप्त ऊर्जा (200 MeV) से बहुत कम है, परन्तु वास्तव में ऐसी बात नहीं है। समान द्रव्यमान के हल्के नाभिकों के संलयन से प्राप्त ऊर्जा, भारी नाभिक के विखण्डन से प्राप्त ऊर्जा से कहीं अधिक होती है क्योंकि हल्के पदार्थ के एकांक द्रव्यमान में परमाणुओं की संख्या भारी पदार्थ के एकांक द्रव्यमान में परमाणुओं की संख्या से बहुत अधिक होती

है। उदाहरण के लिए 1 ग्राम ड्यूटीरियम में नाभिकों की संख्या = $\frac{6.02 \times 10^{23}}{2}$

= 3.01×10^{23} जबकि 1 ग्राम यूरेनियम-235 में नाभिकों की संख्या = $\frac{6.02 \times 10^{23}}{235}$

= 2.56×10^{21} , अतः 1 ग्राम ड्यूटीरियम से प्राप्त ऊर्जा = $\frac{3.01 \times 10^{23}}{3} \times 21.6$

= $21.7 \times 10^{23} \text{ MeV}$ (क्योंकि 3 ड्यूटीरियम नाभिकों के संलयन से 21.6 MeV ऊर्जा मुक्त होती है)। इसी प्रकार 1 ग्राम यूरेनियम के विखण्डन से प्राप्त ऊर्जा = $200 \times 2.56 \times 10^{21} = 5.12 \times 10^{23} \text{ MeV}$ ।

नाभिकीय संलयन एक कठिन प्रक्रिया है तथा यह साधारण ताप व दाब पर सम्भव नहीं है। इसका कारण यह है कि संलयित होने वाले नाभिक धनावेशित होते हैं, अतः जब वे एक-दूसरे के निकट आते हैं तो उनके मध्य प्रबल वैद्युत प्रतिकर्षण बल कार्य करने लगता है। इस प्रतिकर्षण बल के विरुद्ध संलयित होने के लिए नाभिकों की गतिज ऊर्जा बहुत अधिक (10^5 eV) होनी चाहिए। इसके लिए अति उच्च ताप (10^8 K) तथा अति उच्च दाब की आवश्यकता होती है। इतना अधिक ताप सूर्य पर ही सम्भव है। पृथ्वी पर इतना अधिक ताप नाभिकीय विखण्डन के द्वारा ही उत्पन्न किया जा सकता है। अतः पृथ्वी पर नाभिकीय संलयन नाभिकीय विखण्डन के बाद ही सम्भव है। इसी आधार पर 'संलयन बम' अथवा 'हाइड्रोजन बम' बनाया गया है। चूंकि संलयन अति उच्च ताप पर होता है अतः इसे 'ताप नाभिकीय अभिक्रिया' (thermo nuclear reaction) भी कहते हैं।

आंकिक प्रश्न

प्रश्न 1. न्यूक्लियॉन संख्या 16 के एक नाभिक की त्रिज्या $3 \times 10^{-15} \text{ m}$ है। उस नाभिक जिसकी न्यूक्लियॉन संख्या 128 है की त्रिज्या क्या होगी?

हल :

दिया है—

$$A_1 = 16$$

$$A_2 = 128$$

$$R_1 = 3 \times 10^{-15} \text{ मी.}$$

$$R = R_0(A)^{1/3}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{1/3}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \left(\frac{128}{16} \right)^{1/3}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = (8)^{1/3}$$

$$R_2 = 2R_1$$

$$R_2 = 2 \times 3 \times 10^{-15} \text{ मी.}$$

$$R_2 = 6 \times 10^{-15} \text{ मी.}$$

प्रश्न 2. ${}_{26}\text{Fe}^{56}$ नाभिक के लिये बन्धन ऊर्जा ज्ञात करो (दिया है) ${}_{26}\text{Fe}^{56}$ का द्रव्यमान = 55.9349 u ,

ट्रॉन का द्रव्यमान = 1.00867 u

प्रोटॉन का द्रव्यमान = 1.00783 u तथा $1 \text{ u} = 931 \text{ MeV}/c^2$

हल :

$$\begin{aligned}\text{द्रव्यमान क्षति } \Delta m &= [(30 m_n + 26 m_p) - M({}_{26}\text{Fe}^{56})] \\ \Delta m &= (30 \times 1.00867 + 26 \times 1.00783) u - 55.9349 u \\ \Delta m &= (30 \times 2601 + 26 \cdot 20358) u - 55.9349 u \\ \Delta m &= 56.46368 - 55.9349 u \\ \Delta m &= 0.52878 u \\ E_B &= 0.52878 \times 931 \text{ MeV} \\ E_B &= 492.29 \text{ MeV}\end{aligned}$$

प्रश्न 3. एक रेडियोएक्टिव समस्थानिक X की अर्द्ध-आयु $3x$ है। प्रारम्भ में इस समस्थानिक के किसी प्रतिदर्श में 8000 परमाणु हैं। गणना करो - (i) इसका क्षय नियतांक (ii) समय जिस पर इस प्रतिदर्श में 1000 परमाणु सक्रिय रहेंगे?

हल :

$$\begin{aligned}T_{1/2} &= 3x \\ N_0 &= 8000\end{aligned}$$

(i) हम जानते हैं कि,

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{0.693}{T_{1/2}} \\ \lambda &= \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{3} \\ \lambda &= 0.231 \text{ s}^{-1}\end{aligned}$$

(ii)

$$\begin{aligned}N &= \frac{N_0}{2^{t/T_{1/2}}} \\ 1000 &= \frac{8000}{2^{t/T_{1/2}}}\end{aligned}$$

$$\frac{1}{8} = \frac{1}{2^{t/T_{1/2}}}$$

$$\frac{1}{2^3} = \frac{1}{2^{t/T_{1/2}}}$$

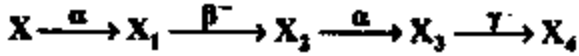
$$\frac{t}{T_{1/2}} = 3$$

$$t = 3T_{1/2}$$

$$t = 3 \times 3$$

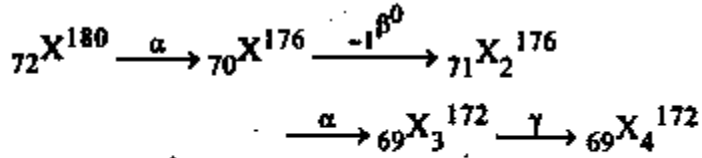
$$t = 9s$$

प्रश्न 4. एक रेडियोएक्टिव नाभिक इस प्रकार क्षयित होता है।



यदि x की द्रव्यमान संख्या 180 व परमाणु संख्या 72 है तो नाभिक X_4 की द्रव्यमान संख्या तथा परमाणु संख्या ज्ञात करो।

उत्तर:



X_4 का परमाणु क्रमांक = 69

द्रव्यमान संख्या = 172

प्रश्न 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 प्रति सेकण्ड विखण्डित ले रहे नाभिकों की संख्या ज्ञात करो।

हल :

$$\text{प्रति सेकण्ड उत्पन्न ऊर्जा} = 1000 \times 10^3 \text{ J}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{10^6}{1.6 \times 10^{-19}} \text{ eV} \\ &= 6.25 \times 10^{24} \text{ eV} \end{aligned}$$

$$\text{प्रति सेकण्ड विखण्डनों की संख्या} = \frac{6.25 \times 10^{24} \text{ eV}}{200 \text{ MeV}}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{6.25 \times 10^{24} \text{ eV}}{200 \times 10^6 \text{ eV}} \\ &= 3.125 \times 10^{16} \end{aligned}$$

प्रश्न 6. संलयन अभिक्रिया ${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^2 \rightarrow {}_2\text{He}^3 + {}_0\text{n}^1$ में ड्यूट्रॉन हीलियम तथा न्यूट्रॉन के द्रव्यमान क्रमशः 2.015 u, 3.017 u तथा 1.0094 u हैं। यदि 1 kg ड्यूटीरियम का पूर्ण संलयन होना है तो मुक्त ऊर्जा ज्ञात करो। [$1\text{u} = 931 \text{ MeV}/c^2$]

उत्तर: ड्यूटीरियम के 1 मोल (0.002 kg) में 6.02×10^{23} परमाणु

$$\text{होते हैं। अतः 1 kg इयूटीरियम में परमाणुओं की संख्या} = \frac{6.02 \times 10^{23}}{0.002} \\ = 3.01 \times 10^{26}$$

उपरोक्त सभी में इयूटीरियम के संलयन से प्राप्त ऊर्जा के लिये

$$\Delta m = [2 \times 2.015 u - (3.017 + 1.009) u]$$

$$\Delta m = [4.030 u - 4.026 u]$$

$$\Delta m = 0.004$$

$$E_B = \Delta mc^2$$

$$E_B = 0.004 \times 931 \frac{\text{MeV}}{c^2} c^2$$

$$E_B = 3.7294 \text{ MeV}$$

दो इयूटीरियम की संलयन ऊर्जा = 3.724 MeV

$$1 \text{ इयूटीरियम की संलयन ऊर्जा} = \frac{3.724}{2} \text{ MeV} \\ = 1.862 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ kg इयूटीरियम की संलयन ऊर्जा} = (1.862 \times 3.01 \times 10^{26}) \text{ MeV} \\ = 5.6 \times 10^{26} \text{ MeV} \\ = 5.6 \times 10^{26} \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$= 8.96 \times 10^{13} \\ = 9 \times 10^{13} \text{ J}$$

प्रश्न 7.

अभिक्रिया ${}_{92}\text{U}^{235} + {}_0n^1 \longrightarrow {}_{54}\text{Xe}^{140} + {}_{38}\text{Sr}^{94} + 2{}_0n^1 + Q$ के लिये Q का मान ज्ञात कीजिये। दिया है;

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

$${}_{54}\text{Xe}^{140} \text{ का द्रव्यमान} = 139.9054 \text{ u}$$

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

$${}_0n^1 \text{ का द्रव्यमान} = 1.00867 \text{ u}$$

हल :

द्रव्यमान क्षति

$$\Delta m = [M({}_{92}\text{U}^{235}) + M({}_0n^1) - M$$

$$({}_{54}\text{Xe}^{140}) - M({}_{38}\text{Sr}^{94}) - M(2{}_0n^1)]$$

$$\Delta m = [(235.0435 + 1.00867) - (139.9054 + 93.9063 \\ + 2 \times 1.00867)]$$

$$\Delta m = [(238.05217) - (235.82904)]u$$

$$\Delta m = 0.22313u$$

$$Q = \Delta mc^2$$

$$Q = 0.22313 \times 931 \frac{\text{MeV}}{c^2} c^2 \quad [\because 1u = 931 \frac{\text{MeV}}{c^2}]$$

$$Q = 207.73 \text{ MeV}$$

प्रश्न 8. एक मिली क्यूरी सक्रियता के लिये Th^{227} की मात्रा ज्ञात कीजिये इसकी अर्द्ध-आयु 19 वर्ष है।

हल :

$$\begin{aligned} 1 \text{ मिली क्यूरी} &= 10^{-3} \text{ क्यूरी} \\ &= 10^{-3} \times 3.7 \times 10^{10} \text{ विघटन/से.} \end{aligned}$$

$$\text{थोरियम की सक्रियता } R = 3.7 \times 10^7 \text{ विघटन/से.}$$

$$R = \lambda N$$

$$R = \frac{0.693}{T_{1/2}} N$$

$$N = \frac{R T_{1/2}}{0.693}$$

$$N = \frac{3.7 \times 10^7 \times T_{1/2}}{0.693}$$

$$T_{1/2} = 19 \text{ वर्ष}$$

$$T_{1/2} = 19 \times 365 \times 24 \times 3600 \text{ s}$$

$$N = \frac{3.7 \times 10^7 \times 19 \times 365 \times 24 \times 3600}{0.693}$$

$$N = 31991.06 \times 10^{12}$$

यदि परमाणुओं की संख्या N_A है तो थोरियम की मात्रा = 227 g है

यदि परमाणुओं की संख्या 1 है तो थोरियम की मात्रा = $\frac{227}{N_A}$ g

यदि परमाणुओं की संख्या N है तो थोरियम की मात्रा

$$= \frac{227}{N_A} \times N$$

$$\text{थोरियम की मात्रा} = \frac{227}{6.02 \times 10^{23}} \times 3199.06 \times 10^{12}$$

$$= 12.06 \times 10^{-6} \text{ g}$$

प्रश्न 9.

किसी प्रयोग में रेडियोएक्टिव तत्व के दिये गये प्रतिदर्श की

सक्रियता 6400 $\frac{\text{विघटन}}{\text{मिनट}}$ पाई गई। 6 दिन यह प्रयोग दोहराये जाने पर

सक्रियता $\frac{\text{विघटन}}{\text{मिनट}}$ हो गई। दिये गये तत्व की अर्द्ध-अवधि ज्ञात करो।

हल :

हम जानते हैं कि,

$$\text{सक्रियता } R = \lambda N$$

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

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

$$R = R_0 e^{-\lambda t}$$

$$\frac{R}{R_0} = e^{-\lambda t} \quad \dots(i)$$

रदरफोर्ड सोडी नियम से, $N = N_0 e^{-\lambda t}$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad \dots(ii)$$

सम्बन्ध (i) से,

$$\frac{R}{R_0} = \frac{N}{N_0} \quad \text{जहाँ} \quad N = \frac{N_0}{2^n}$$

$$\frac{R}{R_0} = \frac{1}{2^{n/T_{1/2}}} \quad N = \frac{N_0}{2^{n/T_{1/2}}}$$

$$\frac{1}{16} = \frac{1}{2^{6/T_{1/2}}} \quad \frac{N}{N_0} = \frac{N_0}{2^{6/T_{1/2}}}$$

$$\frac{1}{2^4} = \frac{1}{2^{6/T_{1/2}}}$$

दिया है;

$$\frac{R}{R_0} = \frac{400}{6400}$$

$$\frac{R}{R_0} = \frac{1}{16}$$

$$t = 6 \text{ दिन}$$

घातों की तुलना करने पर

$$\frac{6}{T_{1/2}} = 4$$

$$T_{1/2} = \frac{6}{4}$$

$$T_{1/2} = 1.5 \text{ दिन}$$

प्रश्न 10. ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ 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?

हल :



$$Z = 88$$

$$A = 226$$

$$E_{\alpha} = 4.662 \text{ MeV}$$

$$E_{\alpha} = \frac{A-4}{A} Q$$

$$Q = \left(\frac{A}{A-4} \right) E_{\alpha}$$

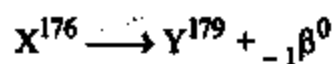
$$Q = \left(\frac{226}{226-4} \right) 4.662 \text{ MeV}$$

$$Q = \frac{226}{222} \times 4.662 \text{ MeV}$$

$$Q = 4.746 \text{ MeV}$$

प्रश्न 11. नाभिक X^{176} , β क्षय कर नाभिक Y^{176} 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 करो।

हल:



$$\text{द्रव्यमान क्षति } \Delta m = [175.942694 - 175.941426]u$$

$$\Delta m = 0.001268u$$

$$\beta \text{ कण की अधिकतम गतिज ऊर्जा} = \Delta mc^2 \text{ } 1u = 931 \frac{\text{MeV}}{C^2}$$

$$= 0.001268 \times 931 \frac{\text{MeV}}{C^2} C^2$$

$$= 1.18 \text{ MeV}$$