नाभिकीय भौतिकी (Nuclear Physics)

15 CHAPTER

भूमिका (Introduction)

हम पढ़ चुके हैं कि प्रत्येक पदार्थ, परमाणुओं से मिलकर बना है। परमाणु का समस्त धनावेश तथा लगभग सम्पूर्ण द्रव्यमान, परमाणु के केन्द्र पर एक अत्यन्त सूक्ष्म स्थान में केन्द्रित रहता है। इस स्थान को **नाभिक** (nucleus) कहते हैं। **नाभिक का आकार 10^{-15} मी. की त्रिज्या की कोटि का होता है जबकि परमाणु का आकार 10^{-10} मी. त्रिज्या की कोटि का होता है।** अतः नाभिक की त्रिज्या, परमाणु की त्रिज्या से लगभग 10^5 गुना कम होती है तथा परमाणु का 99.9% से अधिक द्रव्यमान नाभिक में स्थित होता है। नाभिक की संरचना क्या है ? इस प्रश्न के उत्तर के लिए हम सर्वप्रथम नाभिक के कुछ मुख्य गुणों का वर्णन करेंगे।

15.1 नाभिकीय संरचना (Nuclear Structure)

अनेक प्रयोगों के आधार पर यह माना जाता है कि नाभिक में दो प्रकार के मूल कण होते हैं–(i) धनावेशित प्रोटॉन (ii) अनावेशित न्यूट्रॉन। दोनों ही कणों को सम्मिलित रूप में **न्यूक्लिऑन** कहते हैं।

प्रोटॉन पर आवेश इलेक्ट्रॉन के आवेश के बराबर परन्तु धनात्मक होता है, एवं इसका द्रव्यमान हाइड्रोजन परमाणु के बराबर होता है। प्रोटॉन को $_1p^1$ से प्रदर्शित करते हैं चूँकि हाइड्रोजन के नाभिक में केवल एक प्रोटॉन होता है इसलिए इसे $_1H^1$ से भी प्रदर्शित करते हैं। बायीं ओर का अंक कण के आवेश को व्यक्त करता है जबकि दायीं ओर वाला अंक कण की द्रव्यमान संख्या को व्यक्त करता है। किसी परमाणु के नाभिक में प्रोटॉन की संख्या उसकी परमाणु संख्या Z के बराबर होती है।

न्यूट्रॉन कण (जिसकी खोज के बारे में इसी अध्याय में आगें पढ़ेंगे) अनावेशित होते हैं। इनका द्रव्यमान प्रोटॉन के द्रव्यमान के लगभग बराबर होता है। न्यूट्रॉन को $_0n^1$ चिन्ह से प्रदर्शित करते हैं।

एक तत्व के लिए सभी नाभिकों में प्रोटॉनों की संख्या समान होती है अर्थात् एक तत्व का परमाणु क्रमांक Z निश्चित होता है (एक ही तत्व के विभिन्न नाभिकों में न्यूट्रॉनों की संख्या में अन्तर हो सकता है)।

नाभिक का कुल आवेश, उसमें उपस्थित समस्त प्रोटॉनों के आवेश के बराबर होता है तथा नाभिक का कुल द्रव्यमान, उसमें उपस्थित समस्त प्रोटॉनों व न्यूट्रॉनों के द्रव्यमान के योग के बराबर होता है।

एक नाभिकीय जाति (nuclear species) को न्यूक्लाइड (nuclide) कहते हैं और इसका प्रचलित प्रतीक $_ZX^A$ लिखा जाता है, जहाँ

X = तत्व का रासायनिक प्रतीक है,
Z = तत्व का परमाणु क्रमांक है,
A = न्यूक्लाइड की द्रव्यमान संख्या
= नाभिक में न्यूक्लिऑनों की कुल संख्या (Z + N)
यहाँ N = नाभिक में न्यूट्रॉनों की संख्या

उदाहरण–$_{17}Cl^{35}$, $_{92}U^{238}$ (इसे यूरेनियम-238 भी कहते हैं), आदि

टिप्पणी–(i) प्रोटॉन की खोज रदरफोर्ड ने 1919 में की थी। न्यूट्रॉन की खोज चैडविक ने 1932 में की थी। जब α-कणों की बौछार बेरीलियम पत्री पर की जाती है तब, न्यूट्रॉन उत्सर्जित होते हैं। यदि इन न्यूट्रॉनों को पेराफीन (paraffin) की पट्टिका (slab) से टक्कर करने दी जाये तब न्यूट्रॉन, टक्कर के बाद रुक जाते हैं और प्रोटॉन उत्सर्जित हो जाते हैं।

(ii) एक परमाणु का सम्पूर्ण धन आवेश नाभिक में होता है। Z परमाणु क्रमांक वाले नाभिक में कुल आवेश = Ze होता है, जहाँ $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C है।

(iii) एक परमाणु का लगभग सम्पूर्ण द्रव्यमान नाभिक में होता है।

(iv) यदि नाभिक में प्रोटॉनों तथा न्यूट्रॉनों की संख्या लगभग बराबर होती है तो नाभिक स्थायी होता है, परन्तु यदि नाभिक में न्यूट्रॉनों की संख्या, प्रोटॉनों की संख्या की तुलना में अधिक होती है तो नाभिक अस्थायी (या रेडियोएक्टिव) होता है।

15.1.1 कुछ महत्त्वपूर्ण परिभाषाएँ (Some Important Definitions)

समस्थानिक या सम प्रोटॉनिक (Isotopes or Isoprotons)–एक ही तत्व के वे परमाणु जिनके परमाणु क्रमांक (अर्थात् प्रोटॉनों की संख्या) समान हों लेकिन द्रव्यमान संख्या (अर्थात् न्यूक्लिऑनों की संख्या) भिन्न-भिन्न हों, समस्थानिक या समप्रोटॉनिक कहलाते हैं। चूँकि आवर्त सारणी में तत्वों का स्थान उनके परमाणु क्रमांक Z द्वारा निर्धारित होता है अतः किसी तत्व के सभी समस्थानिकों का स्थान (Z समान होने के कारण) समान रहता है, इसलिए इनका नाम समस्थानिक रखा गया। समस्थानिकों में न्यूट्रॉनों की संख्या भिन्न-भिन्न होती है, अतः इनके भौतिक गुण भिन्न-भिन्न होते हैं। एक ही तत्व के सभी समस्थानिकों में प्रोटॉनों की संख्या समान होने से इलेक्ट्रॉनों की संख्या भी समान होती है और इलेक्ट्रॉनिक विन्यास भी। जिसके कारण उनके रासायनिक गुण समान होते हैं। कुछ समस्थानिकों का विस्तृत वर्णन अग्र तालिका में दिया गया है।

समस्थानिक		परमाणु क्रमांक (Z)	द्रव्यमान क्रमांक (A)	नाभिक में		परमाणु इलेक्ट्रॉनों की संख्या (e)
				प्रोटॉन (*p*)	न्यूट्रॉन (n)	
हाइड्रोजन	$_1H^1$	1	1	1	0	1
	$_1H^2$	1	2	1	1	1
	$_1H^3$	1	3	1	2	1
लीथियम	$_3Li^6$	3	6	3	3	3
	$_3Li^7$	3	7	3	4	3
ऑक्सीजन	$_8O^{16}$	8	16	8	8	8
	$_8O^{17}$	8	17	8	9	8
	$_8O^{18}$	8	18	8	10	8
क्लोरीन	$_{17}Cl^{35}$	17	35	17	18	17
	$_{17}Cl^{37}$	17	37	17	20	17
यूरेनियम	$_{92}U^{235}$	92	235	92	143	92
	$_{92}U^{238}$	92	238	92	146	92

समस्थानिकों की विशेषताएँ–

(i) एक ही तत्व के सभी समस्थानिकों के परमाणु क्रमांक समान होते हैं अतः वे आवर्त सारणी में एक ही स्थान प्राप्त करते हैं।

(ii) एक ही तत्व के सभी समस्थानिकों की द्रव्यमान संख्याएँ भिन्न-भिन्न होती है।

(iii) एक ही तत्व के सभी समस्थानिकों के इलेक्ट्रॉनिक विन्यास अर्थात् इलेक्ट्रॉनों की संख्या समान होने से उनके रासायनिक गुण समान होते हैं।

(iv) एक ही तत्व के सभी समस्थानिकों में न्यूट्रॉनों की संख्या भिन्न होने से उनके भौतिक गुण भिन्न होते हैं।

(v) एक ही तत्व के समस्थानिकों में कुछ स्थायी हो सकते हैं और कुछ रेडियो एक्टिव हो सकते हैं। इसका कारण उनकी नाभिकीय संरचना का भिन्न-भिन्न होना है। उदाहरण के लिए $_6C^{12}$ व $_6C^{14}$ में $_6C^{12}$ स्थायी है लेकिन $_6C^{14}$ रेडियो एक्टिव है। इसी प्रकार सोडियम के समस्थानिकों में $_{11}Na^{23}$ स्थायी है जबकि $_{11}Na^{24}$ रेडियो एक्टिव है।

(vi) रासायनिक गुण समान होने के कारण एक ही तत्व के समस्थानिकों को रासायनिक प्रक्रिया द्वारा अलग नहीं किया जा सकता।

(vii) प्रायोगिक रूप से यह देखा गया है कि प्रत्येक तत्व अपने कई समस्थानिकों का मिश्रण होता है। इन समस्थानिकों का परमाणु द्रव्यमान तथा तत्व में इनकी प्रतिशत मात्रा, तत्व के अनुसार भिन्न-भिन्न होती है।

यदि किसी तत्व में प्राप्त भिन्न-भिन्न समस्थानिकों के परमाणु द्रव्यमान क्रमशः $m_1, m_2, m_3, \ldots, m_n$ हैं तथा तत्व में इनकी प्रतिशत मात्राएँ क्रमशः $x_1, x_2, x_3, \ldots x_n$ हैं तो

$$\text{तत्व का परमाणु द्रव्यमान} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \ldots + m_nx_n}{100}$$

समभारिक (Isobars)–वे नाभिक जिनमें न्यूक्लिऑनों की संख्या (अर्थात् द्रव्यमान क्रमांक) समान होती हैं, परन्तु प्रोटॉनों की संख्या (अर्थात् परमाणु क्रमांक) भिन्न-भिन्न होती है, समभारिक कहलाते हैं। परमाणु क्रमांक (Z) का भिन्न-भिन्न होना यह स्पष्ट करता है कि ये भिन्न-भिन्न तत्वों के समान भार वाले परमाणु होते हैं। अतः आवर्त सारणी में इनका स्थान भिन्न-भिन्न होता है। कुछ समभारिकों का विवरण निम्न तालिका में दिया गया है–

समभारिक	द्रव्यमान संख्या (A)	परमाणु संख्या (Z)	प्रोटॉन (*p*)	न्यूट्रॉन (*n*)	इलेक्ट्रॉनों की संख्या (*e*)
कार्बन $_6C^{14}$	14	6	6	8	6
नाइट्रोजन $_7N^{14}$	14	7	7	7	7
हाइड्रोजन $_1H^3$	3	1	1	2	1
हीलियम $_2He^3$	3	2	2	1	2
ऑक्सीजन $_8O^{17}$	17	8	8	9	8
फ्लोरीन $_9F^{17}$	17	9	9	8	9
ऑर्गन $_{18}Ar^{40}$	40	18	18	22	18
पोटेशियम $_{19}K^{40}$	40	19	19	21	19
कैल्सियम $_{20}Ca^{40}$	40	20	20	20	20

समभारिकों की विशेषताएँ–

(i) समभारिकों के परमाणु क्रमांक भिन्न-भिन्न होने के कारण आवर्त सारणी में इनके स्थान भिन्न होते हैं और उनके रासायनिक गुण भी भिन्न-भिन्न होते हैं।

(ii) समभारिकों में प्रोटॉनों एवं न्यूट्रॉनों की संख्याएँ भिन्न-भिन्न होती हैं लेकिन उनका योग समान होता है।

सम-न्यूट्रॉनिक (Isotones)–ऐसे नाभिक जिनमें केवल न्यूट्रॉनों की संख्या समान होती हैं, सम-न्यूट्रॉनिक कहलाते हैं। इनमें परमाणु क्रमांक (Z) व द्रव्यमान संख्या (A) दोनों भिन्न होते हैं लेकिन न्यूट्रॉनों की संख्या (A–Z) समान होती है।

उदाहरण के लिए–

(a) $_1H^3$ व $_2He^4$ दोनों में न्यूट्रॉनों की संख्या = 2

(b) $_3Li^7$ व $_4Be^8$ दोनों में न्यूट्रॉनों की संख्या = 4

(c) $_{11}Na^{23}$ व $_{12}Mg^{24}$ दोनों में न्यूट्रॉनों की संख्या = 12

(d) $_{80}Hg^{198}$ तथा $_{79}Au^{197}$ दोनों में न्यूट्रॉनों की संख्या = 118

प्रतीप या दर्पण नाभिक (Mirror Nuclei)

वे नाभिक जिनकी द्रव्यमान संख्या A समान हो तथा एक की प्रोटॉन संख्या (Z) दूसरे नाभिक की न्यूट्रॉन संख्या (A – Z) के बराबर तथा दूसरे की प्रोटॉन संख्या (Z) पहले की न्यूट्रॉन संख्या (A – Z) के बराबर होती है अर्थात् (इनके परमाणु क्रमांकों का अन्तर एक है) प्रतीप नाभिक या दर्पण नाभिक या प्रतिबिम्ब नाभिक कहलाते है।

उदाहरण : (a) $_1H^3$ तथा $_2He^3$ (b) $_3Li^7$ तथा $_4Be^7$

समअवयवी या आइसोमर्स (Isomers)– ऐसे नाभिक जिनमें प्रत्येक नाभिक का परमाणु क्रमांक Z तथा द्रव्यमान संख्या A दोनों समान हो परन्तु रेडियोएक्टिव गुण जैसे अर्द्ध आयु तथा नाभिकीय ऊर्जा अवस्थाएँ भिन्न हों आइसोमर्स कहलाते हैं। इन्हें समान रासायनिक प्रतीक द्वारा व्यक्त किया जाता है जिन पर तारांकित (*) करके इनकी मूल नाभिक से भिन्नता दर्शायी जाती है।

15.2 नाभिक का आमाप या साइज (Size of the Nucleus)

नाभिक से उच्च ऊर्जा के α-कणों, इलेक्ट्रॉनों, न्यूट्रॉनों का प्रकीर्णन करा कर, नाभिक की त्रिज्या का आंकलन किया जाता है। इस विधि में नाभिक से α–कण की निकटतम पहुँच की दूरी को लगभग नाभिक की त्रिज्या के बराबर माना जाता है, परन्तु इस प्रकार गणना करके नाभिक की त्रिज्या का यथार्थ मान प्राप्त नहीं हो पाता है, बल्कि यह मान, नाभिक की वास्तविक त्रिज्या से कुछ अधिक होता है। इलेक्ट्रॉन प्रकीर्णन से नाभिकीय आवेश वितरण के विषय में ज्ञान प्राप्त होता है जबकि न्यूट्रॉन प्रकीर्णन से नाभिकीय द्रव्यमान वितरण के विषय में जानकारी मिलती है।

अध्ययन से यह ज्ञात होता है कि अधिकांश नाभिकों के लिए नाभिक की त्रिज्या R द्रव्यमान संख्या A के (1/3) घात के समानुपाती होती है, अर्थात्

$$R \propto A^{1/3}$$

या

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

जहाँ उच्च ऊर्जा वाले इलेक्ट्रॉनों के प्रकीर्णन के प्रयोगों के आधार पर,

$$R_0 = (1.2 \pm 0.1) \times 10^{-15} \text{ metre} \approx 1.2 \text{ f m}$$

1 femtometre (fm) = 10^{-15} m, इसे फर्मी (fermi, F) भी कहते हैं (वैज्ञानिक Enrico Fermi के सम्मान में)।

15.2.1 नाभिकीय आयतन (Nuclear Volume)

एक R त्रिज्या के नाभिक का आयतन

$$V = \frac{4\pi R^3}{3} \quad \text{या} \quad V = \left(\frac{4\pi R_0^3}{3}\right) A$$

अतः नाभिक का आयतन, द्रव्यमान संख्या A के समानुपाती (अनुक्रमानुपाती) होता है, अर्थात् आयतन नाभिक में उपस्थित न्यूक्लिऑनों की संख्या के समानुपाती होता है,

$$V \propto A$$

महत्त्वपूर्ण तथ्य

1. तत्व स्वर्ण के 32 समस्थानिक होते हैं जिनकी द्रव्यमान संख्याओं का परास A = 173 से A = 204 तक होता है।

2. हाइड्रोजन के तीन समस्थानिक, प्रोटिनियम ($_1H^1$), ड्यूटीरियम ($_1H^2$) व ट्राइटियम ($_1H^3$) कहलाते हैं।

3. ट्राइटियम ($_1H^3$) नाभिक अस्थायी होने के कारण प्रकृति में नहीं पाया जाता है इसे कृत्रिम विधियों द्वारा प्रयोगशालाओं में निर्मित किया जाता है।

4. प्रोटिनियम, ड्यूटीरियम एवं ट्राइटियम के नाभिकों के द्रव्यमानों में अनुपात 1:2:3 होता है।

5. भारी नाभिकों का आकार हल्के नाभिकों की तुलना में बड़ा होता है।

6. नाभिक का घनत्व, द्रव्यमान संख्या पर निर्भर नहीं करता है। यह सभी नाभिकों के लिए समान होता है।

उदाहरण 1. $_{92}U^{235}$ के नाभिक में प्रोटॉनों, न्यूट्रॉनों व इलेक्ट्रॉनों की संख्या ज्ञात कीजिये।

हल–नाभिक में इलेक्ट्रॉन स्थित नहीं होते हैं अतः इलेक्ट्रॉनों की संख्या शून्य होगी।

प्रश्नानुसार परमाणु क्रमांक $Z = 92$

द्रव्यमान संख्या $A = 235$

$\therefore$ प्रोटॉनों की संख्या $Z = 92$

तथान्यूट्रॉनों की संख्या $N = A - Z = 235 - 92 = 143$

उदाहरण 2. $_6C^{14}$, $_7N^{13}$, $_7N^{14}$, व $_8O^{16}$ में समस्थानिकों, समन्यूट्रॉनिकों व समभारिकों के युग्म ज्ञात कीजिये।

हल–समस्थानिकों में परमाणु क्रमांक Z समान होता है,

अतः $_7N^{13}$ व $_7N^{14}$ समस्थानिक हैं।

समन्यूट्रॉनिकों में न्यूट्रॉन संख्या (A – Z) समान होती है,

अतः $_6C^{14}$ $(A - Z = 8)$ व $_8O^{16}$ $(A - Z = 8)$ समन्यूट्रॉनिक हैं।

समभारिकों में द्रव्यमान संख्या A समान होती है,

अतः $_6C^{14}$ व $_7N^{14}$ समभारिक हैं।

उदाहरण 3. $_{13}Al^{27}$ के नाभिक की त्रिज्या क्या होगी ?

पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.1

हल–
$$R = R_0 A^{1/3}$$
$$= 1.2 \times 10^{-15} \times (27)^{1/3}$$
$$= 3.6 \times 10^{-15} \text{ m} = 3.6 \text{ fm}$$

उदाहरण 4. हीलियम की द्रव्यमान संख्या 4 और सल्फर की द्रव्यमान संख्या 32 है। सल्फर के नाभिक की त्रिज्या, हीलियम के नाभिक की त्रिज्या के सापेक्ष कितने गुना बड़ी होगी ?

हल–
$$R = R_0 A^{1/3}$$

अतः
$$\frac{R_{sulfur}}{R_{helium}} = \frac{(32)^{1/3}}{(4)^{1/3}} = \left(\frac{32}{4}\right)^{1/3}$$
$$= (8)^{1/3} = 2$$

उदाहरण 5. $^{27}_{13}Al$ के दो नाभिकों के मध्य इनके विद्युत प्रतिकर्षण के कारण स्थितिज ऊर्जा ज्ञात करो जब ये एक दूसरे को सतह पर स्पर्श करते हैं। **पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.2**

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

$$U = \frac{Kq_1q_2}{d}$$

यहाँ प्रत्येक नाभिक में 13 प्रोटॉन है अतः

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

$$\therefore \quad U = \frac{9 \times 10^9 \times (3 \times 1.6 \times 10^{-19})^2}{7.2 \times 10^{-15}}$$

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

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

उदाहरण 6. द्रव्यमान संख्या A के किसी नाभिक के लिए नाभिकीय घनत्व का आंकिक मान परिकलित करें।

पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.3

हल– नाभिकीय पदार्थ का घनत्व,

$$\rho = \frac{\text{नाभिक का द्रव्यमान}}{\text{नाभिक का आयतन}}$$
$$= \frac{A}{\left(\frac{4\pi}{3} R_0^3 A\right)} \left(\frac{amu}{m^3}\right)$$
$$= \left(\frac{3}{4\pi R_0^3}\right) \times 1.66 \times 10^{-27} \left(\frac{kg}{m^3}\right)$$

$\therefore$ ρ, Z या A पर निर्भर नहीं करता। नाभिकीय का घनत्व सभी नाभिकों के लिए समान है। इसका मान निम्न हैं–

$$\rho = 2.4 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

इतने अधिक घनत्व वाला द्रव्य, न्यूट्रॉन स्टार (neutron star) में पाया जाता है।

विशेष–पानी का घनत्व $\rho_{water} = 1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$ होता है। अतः नाभिक का घनत्व पानी के घनत्व से लगभग 2400 खरब गुणा अधिक होता है।

15.3 परमाणु द्रव्यमान मात्रक (Atomic Mass unit : amu)

परमाणु के अत्यन्त सूक्ष्म होने से इसका द्रव्यमान किसी भी प्रत्यक्ष विधि द्वारा ज्ञात नहीं किया जा सकता है। हाइड्रोजन के एक परमाणु का द्रव्यमान 1.6735×10^{-27} किग्रा. तथा कार्बन के एक परमाणु का द्रव्यमान 1.992647 ×

10^{-26} किग्रा. है। किसी भी तत्व के एक परमाणु का निरपेक्ष द्रव्यमान बहुत कम होता है, अत: इसे किग्रा. मात्रक में व्यक्त करना सुविधाजनक नहीं होता है। सुविधा के लिए किसी हल्के तत्व के परमाणु को मानक मानकर अन्य तत्वों के परमाणु का द्रव्यमान व्यक्त किया जाता है। इसे आपेक्षिक परमाणु द्रव्यमान (relative atomic mass) कहते हैं।

सन् 1961 में अन्तर्राष्ट्रीय विज्ञान सम्मेलन में कार्बन के एक परमाणु का द्रव्यमान मानक (=12.0000 amu) माना गया। वर्तमान में इसी आधार पर अन्य तत्वों के परमाणु का द्रव्यमान व्यक्त किया जाता है। किसी तत्व का आपेक्षिक परमाणु द्रव्यमान वह संख्या है जो यह दर्शाती है कि उस तत्व का एक परमाणु, कार्बन-12 ($_6C^{12}$) के एक परमाणु के $\frac{1}{12}$ वें भाग से कितने गुना भारी है, अर्थात् किसी तत्व का आपेक्षिक परमाणु द्रव्यमान =

$$\frac{\text{तत्व के एक परमाणु का द्रव्यमान}}{\frac{1}{12} \times \text{कार्बन - 12 के एक परमाणु का द्रव्यमान}}$$

इस आधार पर हाइड्रोजन का आपेक्षिक परमाणु द्रव्यमान 1.008, ऑक्सीजन का आपेक्षिक परमाणु द्रव्यमान 15.999 प्राप्त होता है।

परमाण्वीय नाभिकों के द्रव्यमान का आंकलन, द्रव्यमान स्पैक्ट्रममापी (mass spectrometer) द्वारा नाभिकीय अभिक्रियाओं की ऊर्जाओं की सहायता से आवेश तथा द्रव्यमान के अनुपातों $\left(\frac{q}{m}\right)$ के प्रेक्षण द्वारा किया गया था।

सुविधा के लिए **कार्बन-12 के एक परमाणु के द्रव्यमान के बारहवें भाग को परमाणु द्रव्यमान मात्रक (atomic mass unit) कहते हैं।** इसे संकेत u द्वारा (या amu द्वारा) प्रदर्शित किया जाता है। अत:

$$1 \text{ amu} = \frac{1}{12} \times \text{कार्बन के एक परमाणु का द्रव्यमान}$$
$$= \frac{1}{12} \times 1.992647 \times 10^{-26} \text{ किग्रा.}$$
$$= 1.660539 \times 10^{-27} \text{ किग्रा.}$$
$$\approx 1.66 \times 10^{-27} \text{ किग्रा.}$$

इस प्रकार, परमाणु द्रव्यमान मात्रक (amu), द्रव्यमान का मात्रक है जहाँ

$$1 \text{ amu} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ किग्रा.}$$

परमाणु द्रव्यमान मात्रक में प्रोटॉन, न्यूट्रॉन तथा इलेक्ट्रॉन के द्रव्यमान निम्नलिखित हैं-

प्रोटॉन का द्रव्यमान $m_p = 1.00727$ amu
$= 1.67262 \times 10^{-27}$ किग्रा.

न्यूट्रॉन का द्रव्यमान $m_n = 1.00866$ amu
$= 1.6749 \times 10^{-27}$ किग्रा.

तथा इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान $m_e = 0.00055$ amu
$= 9.13296 \times 10^{-31}$ किग्रा.

सारणी

परमाणु द्रव्यमान मात्रक में कुछ कणों एवं परमाणुओं का द्रव्यमान

कण एवं परमाणु	amu में द्रव्यमान
हाइड्रोजन $_1H^1$	1.00794
हीलियम $_2He^4$	4.002604
बेरिलियम $_4Be^9$	9.0122
ऑक्सीजन $_8O^{16}$	15.9994
यूरेनियम $_{92}U^{238}$	238.0308
नाइट्रोजन $_7N^{14}$	14.0067
एल्युमिनियम $_{13}Al^{27}$	26.9815
आयरन $_{26}Fe^{56}$	55.847
जिंक $_{30}Zn^{64}$	65.38

द्रव्यमान-ऊर्जा (Mass-Energy)

आइन्सटीन ने अपने विशिष्ट सापेक्षिकता सिद्धान्त से यह सिद्ध किया कि, द्रव्यमान तथा ऊर्जा एक-दूसरे से भिन्न न होकर, एक दूसरे के तुल्य है अर्थात् ऊर्जा को द्रव्यमान में तथा द्रव्यमान को ऊर्जा में परिवर्तित किया जा सकता है। विशिष्ट सापेक्षिकता सिद्धान्त से पहले यह माना जाता था कि द्रव्यमान तथा ऊर्जा दो विभिन्न राशियाँ हैं। द्रव्यमान, पदार्थ का एक मौलिक गुण है जो उसमें निहित होता है, जबकि ऊर्जा, पदार्थ के कार्य करने की क्षमता है जो उसकी विशेष स्थिति अथवा गति के कारण होती है, न कि द्रव्यमान के कारण। इसके अलावा यह भी माना जाता था कि ब्रह्माण्ड में कुल द्रव्यमान तथा कुल ऊर्जा भिन्न-भिन्न संरक्षित रहते हैं।

आइन्सटीन के अनुसार प्रत्येक पदार्थ में ऊर्जा, उसके द्रव्यमान के कारण ही होती है। द्रव्यमान तथा ऊर्जा में निम्नलिखित सम्बन्ध होता है-

$$E = m c^2$$

जहाँ c प्रकाश की चाल (= 3×10^8 मी./से.) है।

उपरोक्त समीकरण को **आइन्सटीन का द्रव्यमान-ऊर्जा समीकरण** कहते हैं।

इस प्रकार स्पष्ट होता है कि m द्रव्यमान, $m c^2$ ऊर्जा के तुल्य है, अर्थात् m किग्रा. द्रव्यमान की क्षति होने पर $m c^2$ जूल ऊर्जा मुक्त होगी।

यदि 1 किग्रा. द्रव्यमान को ऊर्जा में परिवर्तित किया जाये तो प्राप्त ऊर्जा $E = 1 \times (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{16}$ जूल

इसी प्रकार, यदि पदार्थ को E जूल ऊर्जा दी जाती है तो उसके द्रव्यमान में m वृद्धि होगी, जहाँ $m = \frac{E}{c^2}$ परन्तु यह द्रव्यमान वृद्धि बहुत कम होगी क्योंकि c का मान बहुत अधिक है।

आइन्सटीन के द्रव्यमान-ऊर्जा सम्बन्ध की प्रायोगिक पुष्टि, न्यूक्लिआनों, नाभिकों, इलेक्ट्रॉनों तथा अन्य हाल ही में खोजे गये कणों के मध्य होने वाली नाभिकीय अभिक्रियाओं के अध्ययन में भी हो चुकी है। आइन्सटीन के अनुसार द्रव्यमान संरक्षण तथा ऊर्जा संरक्षण नियम भिन्न-भिन्न नहीं है, बल्कि ब्रह्माण्ड में द्रव्यमान तथा ऊर्जा का कुल परिमाण नियत रहता है अर्थात् (द्रव्यमान +

ऊर्जा) संरक्षित रहते हैं। यदि द्रव्यमान घटता है तो उसके तुल्य ऊर्जा उत्पन्न होती है (जैसे–युग्म उत्पादन में)

1 amu के तुल्य ऊर्जा–

$\because$ 1 amu = 1.6605×10^{-27} किग्रा.

आइन्सटीन के द्रव्यमान ऊर्जा समीकरण से

$$E = mc^2$$

यहाँ m = 1 amu = 1.6605×10^{-27} किग्रा.

$$\therefore \quad E = (1.6605 \times 10^{-27}) \times (2.9979 \times 10^8)^2$$

$$= 1.4924 \times 10^{-10} \text{ जूल}$$

परन्तु 1.602×10^{-19} जूल = 1 eV

$$\therefore \quad E = \frac{1.4924 \times 10^{-10}}{1.602 \times 10^{-19}} \text{eV} = 931.5 \times 10^6 \text{ eV}$$

= 931.5 MeV (मिलियन इलेक्ट्रॉन वोल्ट)

15.4 द्रव्यमान क्षति तथा नाभिकीय 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 है कि अमुक नाभिक में कितने प्रोटॉन एवं न्यूट्रॉन होते हैं। अतः गणना द्वारा हम किसी नाभिक का **सम्भावित द्रव्यमान** (expected mass) ज्ञात कर सकते हैं। द्रव्यमान स्पैक्ट्रोग्राफ (mass spectrograph) द्वारा किसी नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान भी ज्ञात किया जा सकता है। यह पाया जाता है कि **किसी नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान उसके अवयवों (constituents) अर्थात् न्यक्लिऑनों के संयुक्त द्रव्यमान (सम्भावित द्रव्यमान) से सदैव कम होता है। द्रव्यमान के इसी अन्तर को द्रव्यमान-क्षति कहते हैं।** इस प्रकार

द्रव्यमान क्षति = गणना द्वारा प्राप्त नाभिक का द्रव्यमान – नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान

या $\Delta M = \Sigma m - M$

यहाँ पर गणना द्वारा प्राप्त नाभिक के द्रव्यमान को संक्षेप में Σm से और नाभिक के वास्तविक द्रव्यमान को M से दिखाया गया है।

$\therefore \Delta M$ = [प्रोटॉनों का द्रव्यमान + न्यूट्रॉनों का द्रव्यमान] – नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान

या $\Delta M = [Zm_p + (A - Z)\, m_n] - M$

जहाँ Z परमाणु का परमाणु क्रमांक, A द्रव्यमान संख्या, m_p प्रोटॉन का द्रव्यमान, m_n न्यूट्रॉन का द्रव्यमान तथा M नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान है।

उदाहरण के लिए ऑक्सीजन नाभिक ($_8O^{16}$) का **वास्तविक द्रव्यमान** 15.99053 amu होता है। यदि एक प्रोटॉन का द्रव्यमान 1.00727 amu तथा एक न्यूट्रॉन का द्रव्यमान 1.00866 amu माना जाये तो द्रव्यमान क्षति

ΔM = (8 प्रोटॉनों का द्रव्यमान + 8 न्यूट्रॉनों का द्रव्यमान) – ऑक्सीजन नाभिक का द्रव्यमान

$= (8 \times 1.00727 + 8 \times 1.00866) - 15.99053$

$= (8.05816 + 8.06928) - 15.99053$

$= 16.12744 - 15.99053$

$= 0.13691\ amu$

किसी नाभिक की द्रव्यमान क्षति जितनी अधिक होती है, वह नाभिक उतना ही अधिक स्थायी होता है।

आइन्सटीन 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। 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। यह भी स्पष्ट है कि यदि बन्धन ऊर्जा के बराबर ऊर्जा यदि संगत नाभिक को दे दी जाये तो उसके समस्त न्यूक्लिऑन बन्धन मुक्त हो जायेंगे। इस प्रकार बन्धन ऊर्जा को हम इस प्रकार भी परिभाषित कर सकते हैं, **"किसी नाभिक की बन्धन ऊर्जा, ऊर्जा की वह मात्रा है जो नाभिक को दे देने पर उसके समस्त न्यूक्लिआनों को बन्धनमुक्त कर दे।"** अतः किसी नाभिक की बन्धन ऊर्जा

$$\Delta E = \Delta M.c^2$$

अथवा $\Delta E = [\{Zm_p + (A - Z)m_n\} - M] .c^2$

यदि किसी नाभिक की बन्धन ऊर्जा में न्यक्लिऑनों की संख्या का भाग दे दें तो हमें **नाभिक की बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन** प्राप्त होगी

$\therefore$ बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन $\overline{B} = \dfrac{\Delta E}{A}$

उदाहरण के लिए $_8O^{16}$ नाभिक की द्रव्यमान क्षति

ΔM = 0.13691 amu

$\therefore$ बन्धन ऊर्जा $\Delta E = 0.13691 \times 931.5$

= 127.53 MeV

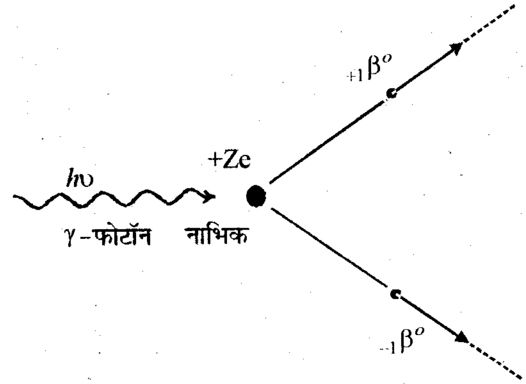
[$\because$ 1 amu = 931.5 MeV/c^2]

$\therefore$ $_8O^{16}$ नाभिक की कुल बन्धन ऊर्जा 127.53 MeV है तथा इसके नाभिक में 16 न्यूक्लिऑन होते हैं, अतः $_8O^{16}$ नाभिक की प्रति न्यूक्लिऑन

बन्धन ऊर्जा = $\dfrac{127.53}{16}$ = 7.968 MeV

महत्वपूर्ण तथ्य

(1) युग्म उत्पादन–जब कोई ऊर्जावान् गामा–किरण फोटॉन किसी भारी पदार्थ पर गिरता है तो वह पदार्थ के किसी नाभिक द्वारा अवशोषित कर लिया जाता है तथा परिणामस्वरूप एक इलेक्ट्रॉन, एक पॉजीट्रॉन उत्पन्न हो जाते है। इस प्रक्रिया को युग्म उत्पादन कहते हैं।



इसे निम्न समीकरण से प्रदर्शित कर सकते है–

$h\upsilon = {}_{+1}\beta^{0} + {}_{-1}\beta^{0}$

(γ-फोटॉन) (पॉजीट्रॉन) (इलेक्ट्रॉन)

इलेक्ट्रॉन व पॉजीट्रॉन की विराम–द्रव्यमान ऊर्जा

$E_0 = m_o c^2$

$= (9.1 \times 10^{-31} kg) \times (3 \times 10^8 m/s)^2$

$= 8.2 \times 10^{-14}$ जूल $= 0.51$ MeV

अतः युग्म उत्पादन होने के लिए आवश्यक है कि γ-फोटॉन की ऊर्जा कम से कम $2 \times 0.51 = 1.02$ MeV होनी चाहिए। यदि γ-फोटॉन की ऊर्जा इससे कम है तब यह पदार्थ पर गिरने पर प्रकाश विद्युत प्रभाव या कॉम्पटन प्रभाव प्रदर्शित करेगा।

(2) युग्म विनाश–युग्म उत्पादन के विपरीत युग्म विनाश प्रक्रिया भी संभव है। जब कभी एक पॉजीट्रॉन व इलेक्ट्रॉन एक–दूसरे के अत्यन्त समीप आते है तो वे परस्पर संयोग करके एक–दूसरे का विनाश कर देते है तथा उनके स्थान पर दो γ-फोटॉनों (ऊर्जा) की उत्पत्ति हो जाती है। इस प्रक्रिया को "युग्म विनाश" कहते है। इसे निम्न समीकरण से प्रदर्शित कर सकते है–

${}_{+1}\beta^{0} + {}_{-1}\beta^{0} = h\upsilon + h\upsilon$

(पॉजीट्रॉन) (इलेक्ट्रॉन) (γ-फोटॉन) (γ-फोटॉन)

उदाहरण 7. 1 g पदार्थ के समतुल्य ऊर्जा को परिकलित कीजिए।

हल : दिया है : $m = 1$ ग्राम $= 10^{-3}$ किग्रा

अतः $E = mc^2 = 10^{-3} \times 3 \times 10^8 \times 3 \times 10^8 = 9 \times 10^{13}$ जूल

उदाहरण 8. अग्रलिखित नाभिको के लिए बंधन ऊर्जाएँ ज्ञात कीजिए (i) ड्यूट्रॉन $\left({}^{2}_{1}H\right)$ तथा (ii) ${}^{120}_{50}Sn$ दिया है $m_p = 1.007u$, $m_n = 1.008u$ ड्यूट्रॉन नाभिक का द्रव्यमान $M_d = 2.013u$ तथा S_n नाभिक का द्रव्यमान $M_{Sn} = 119.902u$

$(1u = 931 MeV/c^2)$

पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.4

हल: नाभिकीय बंधन ऊर्जा के लिए सूत्र से

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

(i) ड्यूट्रॉन के लिए

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

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

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

$$= [2.015 - 2.013] \times 931.5 MeV$$

$$= 0.002 \times 931.5 = 1.863 \text{ MeV}$$

(ii) Sn नाभिक के लिए $Z = 50$, $A = 120$ $\therefore A - Z = 70$

$$\therefore \quad \Delta E = [50 \times 1.007 + 70 \times 1.008 - 119.902]c^2$$

$$= [50.35 + 70.56 - 119.902]uc^2$$

$$= [120.91 - 119.902] \times 931.5 MeV$$

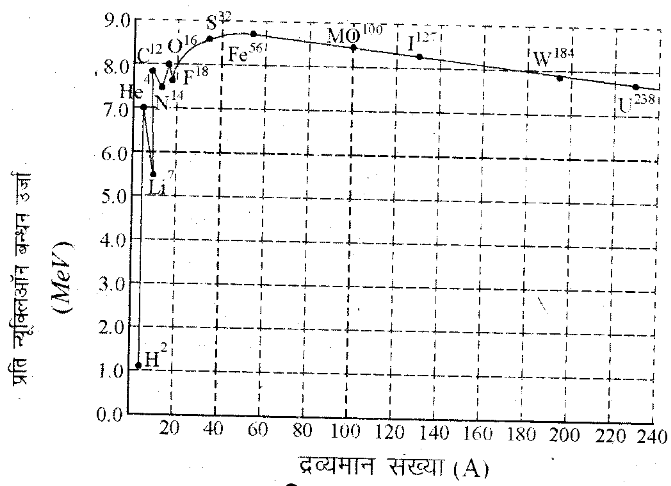
$$= 1.008 \times 931.5 MeV = 938.952 MeV$$

उपरोक्त उदाहरण से स्पष्ट है कि अपेक्षाकृत हल्के नाभिक ${}^{2}_{1}H$ की तुलना में मध्यवर्ती द्रव्यमान के नाभिक ${}^{120}_{50}Sn$ की बंधन ऊर्जा काफी अधिक है।

15.4.1 प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा (Binding energy per nucleon)

किसी नाभिक की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा जितनी अधिक होती है, नाभिक उतना ही अधिक स्थायी होता है। विभिन्न परमाणुओं के नाभिकों के लिए इसका मान भिन्न–भिन्न होता है। ड्यूट्रॉन की बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन 1.08 MeV और α-कण की बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन 7.03 MeV प्राप्त होती है। स्पष्ट है कि α-कण ड्यूट्रॉन की अपेक्षा अधिक स्थायी है।

नाभिकों के विखण्डन (fission) तथा संलयन (fusion) की क्रियाओं में भी बन्धन ऊर्जा का विशेष महत्त्व है जिसकी चर्चा बाद में करेंगे। यदि विभिन्न तत्वों के नाभिकों की बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन तथा उनकी द्रव्यमान संख्या के मध्य ग्राफ खींचा जाये तो प्राप्त वक्र **'बन्धन ऊर्जा वक्र'** कहलाता है। इसे चित्र में दिखाया गया है। इस वक्र के अध्ययन से निम्नांकित निष्कर्ष निकलते हैं–



चित्र 15.1

(1) प्रत्येक नाभिक की बन्धन-ऊर्जा धनात्मक होती है अतः नाभिक को विखण्डित करने के लिए ऊर्जा देनी होगी। यह नाभिकीय बल की आकर्षी प्रकृति को दर्शाता है जो कि प्रति न्यूक्लिऑन कुछ MeV बंधन उत्पन्न करने के लिए एक पर्याप्त बल है।

(2) द्रव्यमान संख्या बढ़ने पर बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन बढ़ती है और द्रव्यमान संख्या 56 (जो कि लोहे, Fe^{56} के संगत है) के लिए अधिकतम 8.75 MeV प्रति न्यूक्लिऑन, होकर फिर धीरे-धीरे घटने लगती है। इसका अर्थ यह हुआ कि द्रव्यमान संख्या 56 के संगत एवं उसके पड़ौसी तत्वों के नाभिक सबसे अधिक स्थायी है। इस प्रकार लोहा सबसे अधिक स्थायी तत्व हैं। इसी कारण भू-क्रोड (core) में सबसे अधिक

पिघला हुआ लोहा पाया जाता है।

(3) द्रव्यमान संख्या 56 से अधिक द्रव्यमान संख्या वाले तत्वों की बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन क्रमशः कम होती जाती है अतः नाभिकों का स्थायित्व क्रमशः कम होता जाता है (जैसे यूरेनियम, U^{238} **की बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन 7.6 MeV होती है।**)। दूसरे शब्दों में यह कहा जा सकता है कि तत्व जितना अधिक भारी होता है, वह उतना ही कम स्थायी होता है। इसीलिए सीसे से भारी सभी तत्व अस्थायी होते हैं और स्थायित्व को प्राप्त करने के लिए α एवं β कणों के रूप में अपने द्रव्यमान को कम करते रहते हैं। यही कारण प्राकृतिक रेडियोएक्टिवता का है।

(4) 56 से कम द्रव्यमान संख्या वाले नाभिकों के लिए भी बन्धन-ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन धीरे-धीरे घटती है तथा द्रव्यमान संख्या 20 से कम द्रव्यमान संख्या वाले नाभिकों के लिए बहुत तेजी से घटती है। उदाहरण के लिए भारी हाइड्रोजन (A = 2) के लिए यह केवल 1.1 MeV होती है। इससे यह निष्कर्ष निकलता है कि 20 से कम द्रव्यमान संख्या वाले नाभिक अपेक्षाकृत कम स्थायी हैं।

(5) द्रव्यमान संख्या 4, 12, 16 के संगत ग्राफ में शिखर बिन्दु प्राप्त होते हैं। अतः द्रव्यमान संख्या 4, 12, 16 वाले नाभिक He^4, C^{12}, O^{16} अपने निकटवर्ती नाभिकों की अपेक्षा अधिक स्थायी हैं।

(6) मध्यवर्ती द्रव्यमान संख्याओं $30 < A < 170$ के लिए बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन का मान लगभग नियत (8.0 MeV) रहता है अर्थात् परमाणु क्रमांक के साथ परिवर्तित नहीं होता है। ऐसा नाभिकीय बल के लघु परास बल होने के कारण होता है। यदि किसी बड़े नाभिक के भीतर स्थित किसी न्यूक्लिऑन पर विचार किया जाये तो यह न्यूक्लिऑन, नाभिकीय बल परास में आने वाले सभी न्यूक्लिऑनों से प्रभावित होगा। नाभिकों का यह गुण नाभिकीय बलों का संतृप्ति गुण कहलाता है। माना कि किसी नाभिक में नाभिकीय बल परास में अधिकतम न्यूक्लिऑन n है तब इसकी बंधन ऊर्जा n के समानुपाती होगी अर्थात्

बंधन ऊर्जा $\propto n$

या बंधन ऊर्जा = Kn

यहाँ K एक नियतांक है जिसकी विमा, ऊर्जा की विमा के तुल्य है।

अब यदि न्यूक्लिऑनों की संख्या में वृद्धि की जाती है तो नाभिक के भीतर न्यूक्लिऑनों की बंधन ऊर्जा अप्रभावित रहती है। इसका कारण यह है कि इस स्थिति में अधिकांश न्यूक्लिऑन, नाभिक के अन्दर रहते हैं तथा पृष्ठ की तुलना में बंधन ऊर्जा पर न्यूक्लिऑनों की वृद्धि का कुल प्रभाव नगण्य रहता है।

(7) बहुत भारी तथा बहुत हल्के ($A>170$ व $A<30$) नाभिकों की बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन का मान, मध्यवर्ती नाभिकों की तुलना में कम होता है। जिससे बहुत भारी नाभिक को यदि अपेक्षाकृत हल्के नाभिकों में विभक्त किया जाये तो प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा बढ़ जायेगी, जिससे नाभिकों का स्थायित्व बढ़ जायेगा तथा इस प्रक्रिया में अत्यधिक ऊर्जा मुक्त होगी। यह प्रक्रिया **नाभिकीय विखण्डन (nuclear fission)** कहलाती है। इस प्रकार यदि बहुत हल्के दो नाभिकों को मिलाकर अपेक्षाकृत भारी नाभिक में परिवर्तित किया जाता है तो भी बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन बढ़ती है, जिससे नाभिकों का स्थायित्व बढ़ जाता है तथा इस प्रक्रिया में भी अत्यधिक ऊर्जा मुक्त होती है। यह **प्रक्रिया नाभिकीय संलयन** (nuclear fusion) कहलाती है। यही सूर्य की ऊर्जा का स्रोत है।

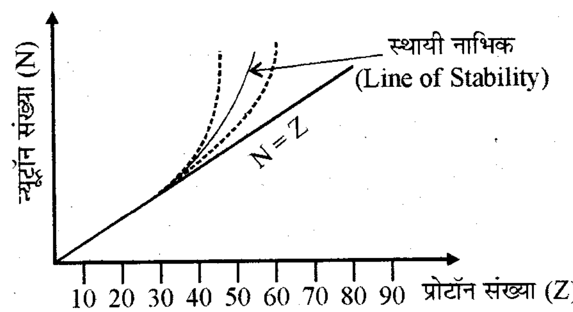
महत्वपूर्ण तथ्य

(1) नाभिक का स्थायित्व कई कारकों पर निर्भर करता है–

(i) न्यूट्रॉन–प्रोटॉन अनुपात ($\frac{N}{Z}$ अनुपात)–किसी परमाणु के समस्त रासायनिक गुण नाभिक में उपस्थित प्रोटॉनों की संख्या (Z) द्वारा निर्धारित होते हैं, परन्तु नाभिक का स्थायित्व दोनों न्यूट्रॉनों व प्रोटॉनों की संख्या पर निर्भर करता है।

हल्के नाभिक अधिक स्थायी होते हैं यदि इनमें न्यूट्रॉनों की संख्या तथा प्रोटॉनों की संख्या समान हो (N = Z) अर्थात् $\frac{N}{Z} = 1$

भारी नाभिक तभी स्थायी होते हैं यदि इनमें प्रोटॉनों की तुलना में न्यूट्रॉनों की संख्या अधिक हो। इस प्रकार भारी स्थायी नाभिकों में हल्के नाभिकों की तुलना में अधिक न्यूट्रॉन होते हैं (भारी नाभिकों में प्रोटॉनों की संख्या अधिक होने के कारण इनके बीच प्रतिकर्षी बल अधिक होता है। इसलिए भारी नाभिकों के स्थायी होने के लिए इनमें न्यूट्रॉनों की संख्या भी अधिक होनी चाहिए।)

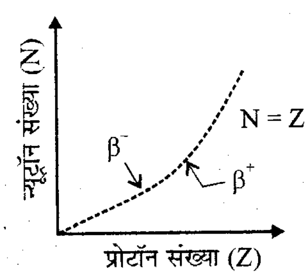


चित्र में स्थायी नाभिकों के लिए N व Z के बीच ग्राफ को दर्शाया गया है। Z के अधिक मान के लिए नाभिकीय बल नाभिक को बाँधे रहने में असमर्थ हो जाता है, क्योंकि प्रोटॉनों के बीच प्रतिकर्षण बल बढ़ जाता है। यदि प्रोटॉनों की संख्या न्यूट्रॉनों से अधिक हो तो विद्युत प्रतिकर्षण बल को नाभिकीय बल सन्तुलित नहीं कर पाता है। Bi के लिए (Z = 83, A = 209), न्यूट्रॉनों की संख्या $A - Z = 209 - 83 = 126$

वे नाभिक जिनके लिए $Z > 83$ है वे सभी अस्थायी है।

विशेष : नाभिक $_{83}Bi^{209}$ सबसे भारी स्थायी नाभिक है।

वे नाभिक जो स्थायित्व रेखा से ऊपर है, अर्थात् जिनमें न्यूट्रॉनों की संख्या अधिक है, β^- क्षय द्वारा विघटित होते है। ये नाभिक β^- क्षय द्वारा परमाणु क्रमांक Z को अधिक तथा न्यूट्रॉन संख्या N को कम करते है। β^- क्षय में N/Z अनुपात घटता है।



स्थायित्व रेखा से नीचे स्थित नाभिकों में प्रोटॉन की संख्या अधिक होती है। ये नाभिक β^+ क्षय द्वारा Z को कम तथा N को बढ़ाते है। β^+ क्षय में N/Z अनुपात बढ़ता है।

(ii) Z या N की सम या विषम संख्या द्वारा–नाभिकों का स्थायित्व इस आधार पर भी निर्धारित किया जा सकता है कि इसमें न्यूट्रॉन तथा प्रोटॉन की संख्या सम या विषम है। यह पाया गया है कि सम–सम नाभिक (सम Z तथा सम N) अधिक स्थायी होते है।

(60% स्थायी नाभिकों में प्रोटॉनों तथा न्यूट्रॉनों दोनों की संख्याऐं सम है।)

एक सम–विषम नाभिक (सम Z तथा विषम N) या

विषम–सम नाभिक (विषम Z तथा सम N)

अपेक्षाकृत कम स्थायी होते हैं।

केवल 5 विषम–विषम नाभिक स्थायी प्राप्त हुए है:–

${}_1H^2, {}_3Li^6, {}_5B^{10}, {}_7N^{14}$ तथा ${}_{75}Ta^{180}$

(2) संकुलन गुणांक (Paking fraction) : प्रतिन्यूक्लिऑन द्रव्यमान क्षति को संकुलन गुणांक कहते है।

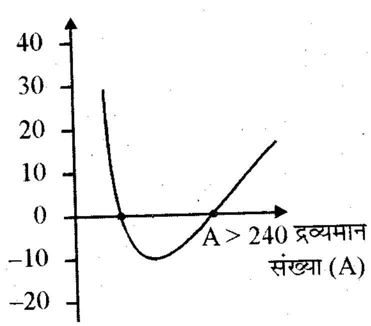
$$\text{संकुलन गुणांक } (f) = \frac{\Delta M}{A} = \frac{M - A}{A}$$

यहाँ M = नाभिक का द्रव्यमान

A = द्रव्यमान संख्या

(i) संकुलन गुणांक नाभिक के स्थायित्व की माप करता है। संकुलन गुणांक का मान जितना कम होगा, नाभिक उतना ही अधिक स्थायी होगा।

(ii) नाभिक A = 16 के लिए $f \to 0$



उदाहरण 9. कार्बन ${}_6C^{12}$ की बन्धन ऊंर्जा प्रति न्यूक्लिऑन ज्ञात करो।

m_p **= 1.007277 amu**

m_n **= 1.008665 amu**

${}_6C^{12}$ के नाभिक का द्रव्यमान = 12 amu

हल–${}_6C^{12}$ में 6 प्रोटॉन तथा 6 न्यूट्रॉन हैं, अत:

6 प्रोटॉनों का द्रव्यमान = 6 × 1.007277 = 6.034662 amu

6 न्यूट्रॉनों का द्रव्यमान = 6 × 1.008665 = 6.051990 amu

न्यूक्लिऑनों का द्रव्यमान = 12.0956532 amu

अत: द्रव्यमान क्षति = न्यूक्लिऑनों का द्रव्यमान – नाभिक का द्रव्यमान

$$\Delta M = 12.095652 - 12.00 = 0.095652 \text{ amu}$$

बंधन ऊर्जा $\Delta E = 0.095652 \times 931.5 = 89..099$ MeV

बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन $\bar{B} = \frac{89.099}{12} = 7.424\,\text{MeV}$

उदाहरण 10. एक परमाणु द्रव्यमान मात्रक के समतुल्य ऊर्जा का मान पहले जूल और फिर MeV में ज्ञात कीजिए। इसका उपयोग करके ${}^{16}_{8}O$ की द्रव्यमान क्षति MeV/c² में व्यक्त कीजिए।

हल– $\because m = 1$ amu $= 1.660539 \times 10^{-27}$ किग्रा

अत: इसके समतुल्य ऊर्जा $E = mc^2$

$$= 1.660539 \times 10^{-27} \times (2.9979 \times 10^8)^2$$

$$E = 14.9239 \times 10^{-11} \text{ जूल}$$

तथा $E = \frac{14.9239 \times 10^{-11}}{1.60 \times 10^{-19}}$ इलेक्ट्रॉन-वोल्ट

$= 9.315 \times 10^8$ इलेक्ट्रॉन-वोल्ट

या $E = 931.5$ MeV

अत: $1 \text{ amu} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$

पुन: ${}_8O^{16}$ की द्रव्यमान क्षति

$$\Delta M = (Zm_P + Nm_n) - M$$

$$\Delta M = (8 \times 1.00727 + 8 \times 1.00866) - 15.99053$$

$$\Delta M = (8.05816 + 8.06928) - 15.99053$$

$$\Delta M = 16.12744 - 15.99053 = 0.13691 \text{ amu}$$

अत: $\Delta M = 0.13691 \times 931.5 \text{ MeV}/c^2$

$$\Delta M = 127.5 \text{ MeV}/c^2$$

15.5 नाभिकीय बल (Nuclear Force)

"नाभिक के न्यूक्लिऑनों को परस्पर सम्बद्ध रखने वाले बल को नाभिकीय बल कहते हैं।"

जैसा कि हम पढ़ चुके हैं कि नाभिक का आकार 10^{-15} मीटर 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 विद्युत प्रतिकर्षण होना चाहिए कि नाभिक का स्थायी होना सम्भव नहीं हो लेकिन फिर भी नाभिक स्थायी है। इसका अर्थ यह हुआ कि गुरुत्वाकर्षण व विद्युत-बलों से भिन्न एक अन्य बल भी होता है जो न्यूक्लिऑनों को इतनी छोटी जगह में बाँधे रखता है। इसी बल को नाभिकीय बल कहते हैं।

यह अभी निश्चित रूप से 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 विद्युत बल की तुलना में बहुत अधिक होती है अन्यथा नाभिक स्थायी नहीं रहता। 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}) मीटर 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} मीटर की दूरी पर नाभिकीय बल विद्युत बल की तुलना में लगभग 100 गुना होता है।

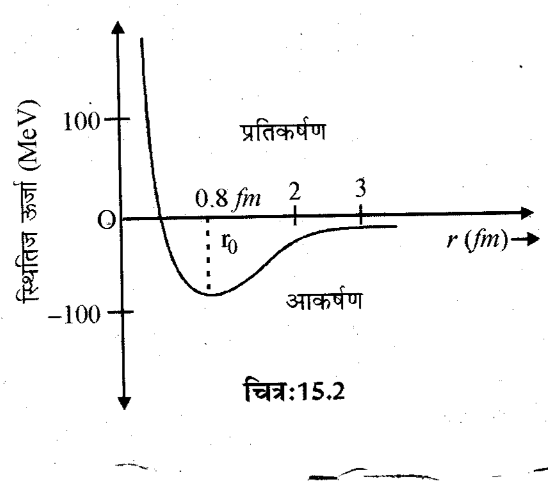
(iv) नाभिकीय बल की प्रकृति 0.5×10^{-15} मीटर की दूरी पर प्रतिकर्षणात्मक हो जाती है।

(v) नाभिकीय बल आवेश पर निर्भर नहीं होता है। अतः प्रोटॉन-न्यूट्रॉन अथवा प्रोटॉन-प्रोटॉन अथवा न्यूट्रॉन-न्यूट्रॉन के मध्य यह 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 बल न्यूक्लिऑनों की चक्रण की दिशा पर आश्रित होते हैं।

(vii) हल्के नाभिकों में नाभिकीय बल (आकर्षणात्मक) प्रोटॉनों के मध्य कार्यरत विद्युत प्रतिकर्षण बल से अत्यन्त प्रबल होता है, फलतः हल्के नाभिक स्थायी बने रहते हैं। जैसे–जैसे नाभिक भारी होता जाता है, नाभिक में प्रोटॉनों एव न्यूट्रॉनों दोनों की संख्या बढ़ने लगती हैं। चूँकि विद्युत 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। यदि न्यूक्लिऑनों के मध्य की दूरी कुछ फर्मी (fm) से बढ़ा दी जाती है तो न्यूक्लिऑनों के मध्य नाभिकीय बल तेजी से कम होकर शून्य हो जाता है। इस कारण बड़े नाभिकों में बलों की संतृप्तता की स्थिति आ जाती है तथा बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन लगभग नियत हो जाती है। भारी नाभिकों में न्यूक्लिऑनों के दूर-दूर होने के कारण विद्युत प्रतिकर्षण बल, कुल नाभिकीय बल की अपेक्षा अधिक 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 रेडियो एक्टिवता का गुण प्रदर्शित करते हैं।

निम्न चित्र में दो नाभिकों की स्थितिज ऊर्जा तथा उनके मध्य की दूरी में सम्बन्ध दर्शाने वाला एक आरेख दर्शाया गया है–



चित्र:15.2

लगभग 0.8 फर्मी (fm) की दूरी r_0 पर स्थितिज ऊर्जा का मान न्यूनतम होता है। इससे यह निष्कर्ष निकलता है कि $r < 0.8\ fm$ के लिए ये बल प्रतिकर्षी तथा $r > 0.8\ fm$ के लिए आकर्षी होते हैं। जब नाभिकों के बीच की दूरी $r = r_0$ होती है तो आकर्षण बल सर्वाधिक प्रबल होता है।

प्रकृति में पाये जाने वाले मूल बलों को तुलनात्मक दृष्टि से नीचे सारणी में दर्शाया गया है। प्रबल नाभिकीय बल एकांक मान कर अन्य बलों की तीव्रता प्रदर्शित की गयी है।

सारणी

बल का नाम	आपेक्षिक तीव्रता	परास
प्रबल नाभिकीय बल	1	10^{-15} मीटर (अल्प परास)
विद्युत चुम्बकीय बल	10^{-2}	अनन्त (दीर्घ परास)
गुरुत्वीय बल	10^{-40}	अनन्त (दीर्घ परास)
दुर्बल नाभिकीय बल	10^{-15}	10^{-15} मीटर (अल्प परास)

महत्वपूर्ण तथ्य

(1) नाभिकीय बल केन्द्रीय बल नहीं है।

(2) नाभिकीय बल विनिमय बल है–वैज्ञानिक युकावा के अनुसार : दो न्यूक्लिऑनों के मध्य कार्यरत नाभिकीय बल, न्यूक्लिऑनों के बीच π मेसॉन कणों के विनिमय के फलस्वरूप उत्पन्न होता है।

π-मेसॉन तीन प्रकार के होते हैं :

धनात्मक π-मेसॉन (π^+)

ऋणात्मक π-मेसॉन (π^-) या

उदासीन π-मेसॉन (π^0)

न्यूट्रॉन तथा प्रोटॉन के बीच, आवेशित मेसॉनों के विनिमय के फलस्वरूप, नाभिकीय बल उत्पन्न होता है।

$$p \rightarrow \pi^+ + n$$
$$n \rightarrow \pi^- + p$$

न्यूट्रॉन–न्यूट्रॉन तथा प्रोटॉन–प्रोटॉन के बीच नाभिकीय बल उदासीन (π^0) मेसॉनों के विनिमय के फलस्वरूप उत्पन्न होता है।

$$p \rightarrow \pi^0 + p^1$$
$$n \rightarrow \pi^0 + n^1$$

इस प्रकार π-मेसॉन कणों के विनिमय के परिणाम स्वरूप न्यूक्लिऑन परस्पर बँधे रहते हैं अर्थात् नाभिकीय बल उत्पन्न होता है।

अतिलघूत्तरात्मक प्रश्न

1. भारी नाभिक में प्रोटॉनों की अपेक्षा न्यूट्रॉनों की संख्या अधिक होती है, क्यों?
2. ^7Li तथा ^{56}Fe नाभिक की त्रिज्या का अनुपात कितना होगा?
3. यदि प्रोटॉन-प्रोटॉन, न्यूट्रॉन-न्यूट्रॉन तथा प्रोटॉन-न्यूट्रॉन के मध्य नाभिकीय बल क्रमशः f_{pp}, f_{nn} तथा f_{pn} है तो इन बलों के मध्य सम्बन्ध लिखिए।
4. यदि दो समस्थानिक तत्वों A तथा B की द्रव्यमान संख्याएँ क्रमशः 14 व 16 है। यदि तत्व A के परमाणु में 7 इलेक्ट्रॉन है तो तत्व B के परमाणु के नाभिक में कितने न्यूट्रॉन होंगे?
5. न्यूट्रिनों तथा एण्टिन्यूट्रिनों के लिए एक-एक ऐसे गुणों का उल्लेख

कीजिए जो (i) दोनों के लिए समान हो, (ii) जो एक दूसरे के विपरीत हो।
6. चार मूल कणों के नाम लिखिए।
7. किसी नाभिक के घनत्व ρ की द्रव्यमान संख्या A पर निर्भरता लिखिए।
8. नाभिकीय प्रक्रिया ${}_2^4He+{}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+2}^{A+3}Y+W$ में W कौन से कण को व्यक्त करता है?
9. एक नाभिक, पॉजिट्रॉन तथा γ विकिरण उत्सर्जित करता है। यदि प्रारंभिक नाभिक के परमाणु क्रमांक तथा द्रव्यमान संख्या क्रमशः Z व A है तो अन्तिम नाभिक के परमाणु क्रमांक व द्रव्यमान संख्या का मान लिखिए।
10. विघटन शृंखला ${}_{92}^{238}U \xrightarrow{\alpha} X \xrightarrow{\beta^-} {}_Z^AY$ में Z तथा A के क्रमशः मान लिखिए।
11. 931 MeV ऊर्जा के समतुल्य द्रव्यमान (किग्रा में) कितना होता है?
12. यदि ऑक्सीजन समस्थानिक ${}_8^{17}O$ का द्रव्यमान M_0, प्रोटॉन व न्यूट्रॉन का द्रव्यमान क्रमशः m_p तथा m_n है तो समस्थानिक की नाभिकीय बन्धन ऊर्जा कितनी होगी?
13. पैकिंग अंश से क्या तात्पर्य है?
14. नाभिक की प्रति न्यूक्लिऑन औसत बन्धन ऊर्जा कितनी होती है?
15. नाभिक में न्यूक्लिऑनों की संख्या (द्रव्यमान संख्या) बढ़ने पर प्रतिन्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा पर क्या प्रभाव पड़ता है?
16. यदि ड्यूटीरियम $\left({}_1^2H\right)$ तथा $\alpha-$ कण के लिए प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जाएँ क्रमशः X_1 व X_2 हों तो ${}_1^2H+{}_1^2H \rightarrow {}_2^4He+Q$ में मुक्त ऊर्जा Q का मान ज्ञात कीजिए।
17. हाइड्रोजन नाभिक की बन्धन ऊर्जा कितनी होती है?
18. नाभिक की त्रिज्या, परमाणु की त्रिज्या से कितनी कम होती है?
19. परमाणु द्रव्यमान मात्रक (amu) में प्रोटॉन, न्यूट्रॉन तथा इलेक्ट्रॉन के द्रव्यमान लिखिए।
20. न्यूक्लिऑन से क्या तात्पर्य है?
21. प्रोटॉन का संकेत लिखिए।
22. न्यूट्रॉन का संकेत लिखिए।
23. न्यूट्रॉन के उत्पादन की अभिक्रिया लिखिए।
24. न्यूट्रॉन का द्रव्यमान लिखिए।
25. नाभिक की त्रिज्या का सूत्र लिखिए।
26. आइन्सटीन का द्रव्यमान-ऊर्जा समीकरण लिखिए।
27. 1 amu के तुल्य ऊर्जा MeV में लिखिए।
28. किसी नाभिक की द्रव्यमान क्षति का नाभिक के स्थायित्व से क्या सम्बन्ध होता है?
29. बन्धन ऊर्जा वक्र से क्या तात्पर्य है?
30. सर्वाधिक बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन का मान लिखिए तथा यह किस तत्व के संगत होती है?
31. रेडियोएक्टिव नाभिक किस परमाणु क्रमांक से प्रारंभ होते हैं?

उत्तरमाला

1. क्योंकि भारी नाभिक अस्थायी (रेडियोएक्टिव) होते हैं।
2. 1:2 3. $f_{pp} = f_{nn} = f_{pn}$
4. 9
5. (i) दोनों आवेश रहित होते हैं।
(ii) दोनों के चक्रण विपरीत दिशाओं में होते हैं।
6. इलेक्ट्रॉन, प्रोटॉन, न्यूट्रॉन, न्यूट्रिनों।
7. $\rho =$ नियतांक 8. ${}_0^1n$ (न्यूट्रॉन)
9. (Z–1) तथा A 10. 91,234
11. 1.66×10^{-27} किग्रा 12. $(8m_p + 9m_n - M_0)\,c^2$
13. नाभिक के वास्तविक द्रव्यमान $m_{\text{नाभिक}}$ तथा द्रव्यमान संख्या A के अन्तर को नाभिक की द्रव्यमान अधिकता कहते हैं तथा द्रव्यमान अधिकता प्रति न्यूक्लिऑन को पैकिंग अंश कहते हैं।
14. 8MeV 15. पहले बढ़ती है, फिर घटती है।
16. $4(X_2 - X_1)$ 17. 13.6 eV
18. लगभग 10^5
19. प्रोटॉन का द्रव्यमान m_p = 1.00727 amu
न्यूट्रॉन का द्रव्यमान m_n = 1.00866 amu
इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान m_e = 0.00055 amu
20. प्रोटॉन व न्यूट्रॉन को सम्मिलित रूप से न्यूक्लिऑन कहते हैं।
21. ${}_1p^1$ या ${}_1H^1$ 22. ${}_0n^1$
23. ${}_4Be^9 + {}_2He^4 \rightarrow {}_6C^{12} + {}_0n^1$
24. 1.675×10^{-27} किग्रा. 25. $R = R_0A^{1/3}$
26. $E = mc^2$
27. 931.5 MeV (मिलियन इलेक्ट्रॉन वोल्ट)
28. किसी नाभिक की द्रव्यमान क्षति जितनी अधिक होती है, वह नाभिक उतना ही अधिक स्थायी होता है।
29. विभिन्न तत्त्वों के नाभिकों की बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन तथा उनकी द्रव्यमान संख्या के मध्य खींचा गया ग्राफ बन्धन ऊर्जा वक्र कहलाता है।
30. 8.75 MeV, Fe^{56} 31. Z > 83

15.6 रेडियो सक्रियता या रेडियोएक्टिवता (Radioactivity)

सन् 1896 ई. में फ्रांसीसी वैज्ञानिक बेकुरल जब विभिन्न अयस्कों के गुणों का अध्ययन कर रहे थे, तब उन्होंने संयोगवश यूरेनियम-पोटैशियम सल्फेट को काले कागज से लिपटी फोटोग्राफिक प्लेट पर रख दिया। जब इस प्लेट को उन्होंने विकसित (develop) किया तब पाया कि उस पर यूरेनियम अयस्क की छाप बन गई थी। उन्होंने इस प्रयोग को सूर्य के तीव्र तथा मन्द प्रकाश में तथा अन्धेरे में भी किया, परन्तु फोटोग्राफिक प्लेट पर एक ही प्रकार की छाप को पाया। इसके अतिरिक्त उन्होंने पाया कि यूरेनियम तथा इसके लवणों से कुछ अदृश्य किरणें स्वतः ही उत्सर्जित होती रहती है, जो अपारदर्शी पदार्थों में प्रवेश करने की क्षमता रखती है तथा फोटोग्राफिक प्लेट को प्रभावित कर देती है। इन किरणों को **'रेडियोएक्टिव किरणें' (radioactive rays)** अथवा **'बेकुरल किरणें' (Becquerel rays)** कहते हैं। किसी पदार्थ से स्वतः ही किरणें उत्सर्जित होते रहने की घटना को **'रेडियोएक्टिवता' (radioactivity)** कहते हैं तथा ऐसे पदार्थ को **'रेडियोएक्टिव पदार्थ'**

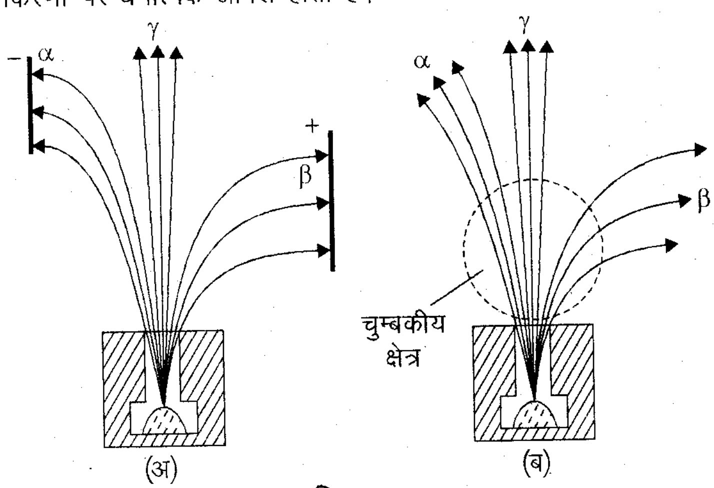
(radioactive substance) कहते हैं।

यूरेनियम में रेडियोएक्टिवता के गुण की खोज के पश्चात् यह ज्ञात हुआ कि यूरेनियम ही नहीं वरन् थोरियम, पोलोनियम, ऐक्टिनियम, नेप्चूनियम आदि अन्य तत्व भी रेडियोएक्टिव हैं। सन् 1898 में पियरे क्यूरी तथा उनकी पत्नी मेडम क्यूरी ने एक नये रेडियोएक्टिव तत्व का आविष्कार किया जिसे 'रेडियम' (radium) कहते हैं। इसमें यूरेनियम की अपेक्षा लगभग दस लाख गुनी अधिक रेडियोएक्टिवता होती है। उन्होंने लगभग 30 टन पिंच ब्लेण्डी (pith blende) से जो एक प्रकार का कोलतार है, बड़े कठोर परिश्रम से रासायनिक विधियों द्वारा भिन्न-भिन्न तत्वों को अलग करके केवल 2 मिलीग्राम रेडियम निकाला। इसके लिये क्यूरी दम्पत्ति को सन् 1903 में नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया।

रेडियोएक्टिव किरणों की प्रकृति (Nature of Radioactive Rays)

सन् 1902 में रदरफोर्ड (Rutherford) ने रेडियोएक्टिव किरणों का विश्लेषण किया। उन्होंने इन किरणों को विद्युत एवं चुम्बकीय क्षेत्रों से गुजारा। इसके लिए उन्होंने रेडियो-एक्टिव पदार्थ को सीसे की मोटी दीवारों वाले प्रकोष्ठ में रखा। प्रकोष्ठ में बने एक छिद्र से निकलने वाली रेडियो-एक्टिव किरणों को दो प्लेटों के मध्य लगे विद्युत क्षेत्र से गुजारा। ऐसा करने पर उन्होंने पाया कि रेडियोएक्टिव किरणें तीन भागों में बँट जाती हैं।

(i) एक भाग विद्युत क्षेत्र की ऋणात्मक प्लेट की ओर मुड़ जाता है। रेडियोएक्टिव किरणों के इस भाग को α-किरणें (α-rays) कहते हैं। विद्युत क्षेत्र की ऋणात्मक प्लेट की ओर मुड़ना यह सिद्ध करता है कि α-किरणों पर धनात्मक आवेश होता है।



चित्र 15.3

(ii) किरणों का दूसरा भाग विद्युत क्षेत्र की धनात्मक प्लेट की ओर विक्षेपित हो जाता है अतः इस भाग पर ऋणात्मक आवेश होता है। इन किरणों को β-किरणें (β-rays) कहते हैं।

(iii) रेडियो-एक्टिव किरणों का तीसरा भाग विद्युत क्षेत्र से प्रभावित नहीं होता है इस भाग को γ-किरणें (γ-rays) कहते हैं। इन किरणों पर कोई आवेश नहीं होता है।

इसी प्रकार जब इन किरणों को चुम्बकीय क्षेत्र से गुजारा गया तो उक्त निष्कर्ष की पुष्टि होती है कि चुम्बकीय क्षेत्र में रेडियोएक्टिव किरणें तीन भागों में बँट जाती हैं। विक्षेप की दिशाओं से उक्त आवेशों की पुष्टि होती है।

बाद में यह पता चला कि रदरफोर्ड ने जिन किरणों को α एवं β किरणों का नाम दिया था, वे वास्तव में किरणें नहीं बल्कि कणों से मिलकर बनी है। इसलिए इन्हें α-कण एवं β-कण कहना अधिक सार्थक प्रतीत होता है।

कोई भी रेडियो-एक्टिव पदार्थ α और β कणों में से किसी एक प्रकार के ही कणों को उत्सर्जित करता है तथा दोनों प्रकार के कणों का एक ही पदार्थ द्वारा निकालना असम्भव है। इसके अलावा γ-किरणें सभी रेडियो-एक्टिव पदार्थ से निकालते हैं। α तथा β कणों से निकलने के कुछ समय बाद γ-किरणों का उत्सर्जन होता है। ध्यान रखने योग्य बात है कि रेडियोएक्टिव कणों का निकलना मूलतः नाभिक का ही गुण है तथा नाभिक के परितः घूमने वाले इलेक्ट्रॉनों से इसका कोई सम्बन्ध नहीं है।

उक्त तथ्य के सम्बन्ध में एक प्रश्न यह उठता है कि जब एक रेडियो एक्टिव पदार्थ एक ही प्रकार के कणों का उत्सर्जन कर सकता है तो किसी रेडियो एक्टिव पदार्थ से उत्सर्जित किरणें विद्युत एवं चुम्बकीय क्षेत्रों में तीन भागों में क्यों बँट जाती है? इसका उत्तर यह है कि किसी भी रेडियो एक्टिव पदार्थ में केवल वही अकेला तत्व उपस्थित नहीं रहता है बल्कि सीसे (lead) तक सभी वे तत्व उपस्थित रहते हैं जो उसके टूटने से बनते रहते हैं। अब चूँकि भिन्न-भिन्न तत्व भिन्न-भिन्न प्रकार की किरणों का उत्सर्जन करते हैं अतः किसी रेडियो एक्टिव नमूने से उत्सर्जित किरणें तीन भागों में बँट जाती है यदि उन्हें विद्युत, चुम्बकीय क्षेत्र से गुजारा जाये। उदाहरण के लिए यदि किसी तत्व से α-कण उत्सर्जन होता है और यह 'नये' तत्व में बदल जाता है। यह नया तत्व आवश्यक नहीं कि α-उत्सर्जक ही हो, यह द्वि-उत्सर्जक भी हो सकता है। γ-किरणें दोनों प्रकार के कणों के साथ उत्सर्जित होती हैं। इस प्रकार रेडियो-एक्टिव पदार्थ से तीनों प्रकार की किरणें उत्सर्जित होती है।

α-कण हीलियम के नाभिक होते हैं अतः नाभिक में उपस्थित 2 प्रोटॉन एवं 2 न्यूट्रॉन मिलकर ($2\ {}_1H^1 + 2\ {}_0n^1 \rightarrow {}_2He^4$) α-कण बनाते हैं। नाभिक में जब एक न्यूट्रॉन, प्रोटॉन तथा इलेक्ट्रॉन में टूटता है तो β-कण का उत्सर्जन होता है। (${}_0n^1 \rightarrow {}_1H^1 + {}_1\beta^0$)।

15.6.1 रदरफोर्ड-सोड़ी का रेडियोएक्टिव क्षय का नियम (Rutherford-Soddy law of radioactive decay)

रेडियोएक्टिव घटना एक नाभिकीय प्रक्रम है। किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ के नाभिक में से α–कण अथवा β-कण उत्सर्जन होने से उसके नाभिक में न्यूट्रॉनों तथा प्रोटॉनों की संख्या परिवर्तित हो जाती है अर्थात् मूल रेडियोएक्टिव तत्व का नाभिक क्षय (decay) हो जाता है तथा किसी नये तत्व का नाभिक बन जाता है। यदि यह तत्व भी रेडियोऐक्टिव होता है तो यह नाभिक पुनः α-कण या β-कण उत्सर्जित करके किसी अन्य तत्व के नाभिक में क्षय हो जाता है। यह क्रिया तब तक चलती रहती है जब तक कि रेडियोएक्टिव क्षय से कोई स्थायी तत्व (सीसा Pb) का नाभिक नहीं प्राप्त हो जाता है।

किसी रेडियो एक्टिव पदार्थ से रेडियो एक्टिव किरणों के उत्सर्जन की दर को किसी भौतिक या रासायनिक क्रिया द्वारा नियंत्रित नहीं किया जा सकता है अर्थात् न तो इस उत्सर्जन दर को घटाया जा सकता है और न बढ़ाया जा सकता है।

रेडियो-एक्टिव पदार्थों के नाभिकों का विघटन स्वतः ही अनियमित रूप से होता रहता है। यह कहना कठिन है कि कौनसा नाभिक कब विघटित होगा और विघटित होने पर कौनसा रेडियो-एक्टिव कण उत्सर्जित करेगा। विघटन की प्रक्रिया में α, β, γ-किरणों के उत्सर्जन के साथ एक तत्व दूसरे नये तत्व में बदलता रहता है जिसके रासायनिक एवं रेडियो एक्टिव गुण बिल्कुल नये होते हैं।

15.12

रेडियोएक्टिव विघटन के लिए नियम का प्रतिपादन रदरफोर्ड तथा सोडी ने किया गया था। इस नियम के अनुसार **किसी भी क्षण रेडियो-एक्टिव परमाणुओं के क्षय होने की दर, उस क्षण उपस्थित कुल सक्रिय परमाणुओं की संख्या के अनुक्रमानुपाती होती है। इसे रेडियो-सक्रिय विघटन नियम या चरघातांकी क्षय नियम या रेडियोएक्टिव क्षयता का नियम भी कहते हैं।**

माना प्रारम्भ में $t = 0$ पर रेडियो-एक्टिव पदार्थ में सक्रिय परमाणुओं की संख्या N_0 है, t समय पश्चात् यह N रह जाती है और $(t + dt)$ समय पश्चात् यह घटकर $(N - dN)$ रह जाती है तो परमाणुओं के विघटन अर्थात् क्षय होने की दर $= -\frac{dN}{dt}$

अतः रदरफोर्ड व सोडी के अनुसार

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

या $$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \qquad .....(1)$$

जहाँ λ एक नियतांक है जिसे **क्षय नियतांक अथवा क्षयांक अथवा विघटन-नियतांक** (decay constant or disintegration constant) कहते हैं। इसका मात्रक सेकण्ड$^{-1}$ है। समीकरण (1) में ऋणात्मक चिन्ह यह प्रकट करता है कि समय के साथ सक्रिय परमाणुओं की संख्या घटती जा रही है। λ का मान एक दिये गये पदार्थ के लिए तो नियत रहता है परन्तु भिन्न-भिन्न पदार्थों के लिए भिन्न-भिन्न होता है।

समीकरण (1) को निम्न प्रकार भी लिख सकते हैं

$$\frac{dN}{N} = -\lambda.dt \qquad .....(2)$$

इसका समाकलन (integration) करने पर

$$\log_e N = -\lambda t + C \qquad .....(3)$$

जहाँ C, एक समाकलन नियतांक है।

जब $t = 0$ तो $N = N_0$

$$\log_e N_0 = 0 + C$$

या $$C = \log_e N_0$$

समीकरण (3) में C का मान रखने पर

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

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

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

प्रतिलघुगणक (anti-log) लेने पर

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

या $$\mathbf{N = N_0 e^{-\lambda t}} \qquad .....(4)$$

इस समीकरण (4) से स्पष्ट है कि N का मान समय के साथ पहले तेजी से और बाद में धीरे-धीरे घटता है अर्थात् रेडियो एक्टिव पदार्थ का क्षय पहले तेजी से और फिर धीरे-धीरे होता है। इस नियम को **चरघातांकी नियम** (exponential law) कहते हैं। सूत्र से स्पष्ट हो जाता है कि किसी रेडियो एक्टिव पदार्थ को पूर्णतः क्षयित (completely decay) होने में अनन्त समय लगेगा।

उपरोक्त समीकरण को द्रव्यमान के रूप में इस प्रकार लिखा जा सकता है– $\quad M = M_0 e^{-\lambda t}$

क्षय नियतांक (Decay Constant) या विघटन नियतांक या रेडियो सक्रिय नियतांक या रदरफोर्ड व सोडी नियतांक या प्रति सेकण्ड नाभिक के क्षय होने की प्रायिकता–

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

$$N = N_0.e^{-1}$$

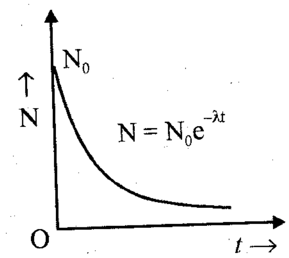
या $$N = N_0.\left(\frac{1}{e}\right)$$

अतः किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ का क्षय नियतांक उस समय का व्युत्क्रम है जिसमें सक्रिय रेडियोएक्टिव परमाणुओं अर्थात् अवघिटित नाभिकों की संख्या अपने प्रारम्भिक मान की $\left(\frac{1}{e}\right)$ गुनी रह जाती है।

यदि किसी तत्व में एक से अधिक प्रकार की रेडियो सक्रियता है तो परिणामी क्षयांक उनके क्षयांकों के योग के तुल्य होता है। उदाहरण के लिए यदि किसी तत्व में α व β सक्रियता साथ-साथ हो तो

$$\lambda = \lambda_\alpha + \lambda_\beta$$

λ का मान पदार्थ की प्रकृति पर निर्भर करता है इसका मान समय तथा किसी भौतिक व रासायनिक परिवर्तन से स्वतंत्र होता है।



चित्र 15.4

सक्रियता (Activity)

किसी रेडियोएक्टिव तत्व में एकांक समय में क्षयित होने वाले नाभिकों की संख्या को उस तत्व की क्षयता दर या सक्रियता कहते हैं।

अतः किसी क्षण रेडियोएक्टिव तत्व के विघटन की दर $\left(-\frac{dN}{dt}\right)$ उसकी उस समय सक्रियता होगी। सक्रियता को A या R द्वारा व्यक्त करते हैं।

अतः रदरफोर्ड सोडी के नियम से

$$\text{सक्रियता } R = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \qquad .....(1)$$

समी. (1) में N का मान ज्ञात करने के लिए तत्व की द्रव्यमान संख्या के बराबर ग्राम में द्रव्यमान लेने पर उसमें 6.02×10^{23} (आवोगाद्रो संख्या) परमाणु होते हैं। अतः यदि पदार्थ का द्रव्यमान m ग्राम तथा द्रव्यमान संख्या M हो तो सक्रिय परमाणुओं की संख्या

$$N = \frac{6.02 \times 10^{23} \times m}{M} \qquad .....(2)$$

समी. (1) में λ का मान अर्द्ध-आयु काल की सहायता से निम्न प्रकार ज्ञात किया जा सकता है–

$$\lambda = \frac{0.693}{T} \qquad .....(3)$$

समी. (1) से

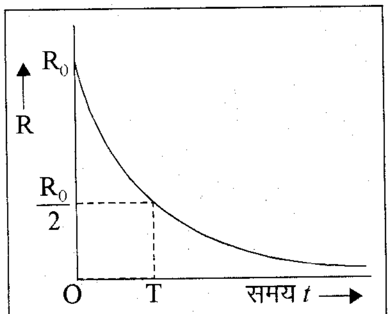
$$R = \lambda N$$

परन्तु $N = N_0 e^{-\lambda t}$

$\therefore$ $R = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$ .....(4)

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

जहाँ $R_0 = \lambda N_0$ प्रारंभिक सक्रियता है।



चित्र 15.5

उपरोक्त के अनुसार किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ की सक्रियता, उस नमूने में उपस्थित सक्रिय परमाणुओं की संख्या के समानुपाती होती है

अर्थात् $R \propto N$

समी. (1) से

सक्रियता समय पर निर्भर करती है तथा समय के साथ इसका चरघातांकी रूप से क्षय होता है। (चित्र से)

एक अर्द्धआयु काल (t = T) में सक्रियता आधी रह जाती है

$$R = \frac{R_0}{2} \quad \text{यदि} \quad t = T$$

सक्रियता का S. I. मात्रक **बेकुरल** (Bq) है। 1 बेकुरल = 1 विघटन/से. व्यवहार में सक्रियता का प्रचलित मात्रक **क्यूरी** (Ci) है। इसका मान

$$1 \text{ क्यूरी} = 3.7 \times 10^{10} \text{ विघटन प्रति सेकण्ड}$$
$$= 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

व्यवहार में अन्य छोटे मात्रकों जैसे मिलीक्यूरी, माइक्रो-क्यूरी को भी उपयोग करते हैं।

$\therefore$ 1 मिलीक्यूरी = 10^{-3} क्यूरी

या 1 मिलीक्यूरी = 3.7×10^7 विघटन/सेकण्ड

इसी प्रकार 1 माइक्रोक्यूरी = 3.7×10^4 विघटन/सेकण्ड

सक्रियता का एक अन्य मात्रक रदरफोर्ड (*rd*) भी है जिसका मान

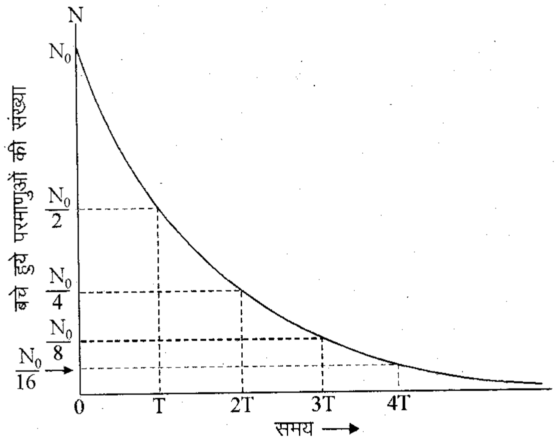
1 रदरफोर्ड = 10^6 विघटन/सेकण्ड

1 मिली. क्यूरी = 37 रदरफोर्ड

15.6.2 अर्द्धआयु (Half Life)

किसी रेडियो एक्टिव तत्व का सदैव विघटन होता रहता है अतः परमाणुओं का जैसे–जैसे विघटन होता रहता है, अविघटित परमाणुओं की संख्या घटती जाती है। **'वह समय जिसमें किसी रेडियो एक्टिव पदार्थ के अविघटित नाभिकों की संख्या घटकर आधी रह जाती है, उस तत्व की अर्द्ध आयु (Half-life) 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 लिए गये तत्व की मात्रा पर निर्भर नहीं करता है। इसे भौतिक एवं रासायनिक प्रभावों द्वारा नहीं बदला जा सकता है। यूरेनियम ($_{92}U^{238}$) के लिए इसका मान 4.5×10^9 वर्ष, थोरियम ($_{90}Th^{230}$) के लिए 8×10^4 वर्ष, रेडियम ($_{88}Ra^{226}$) के लिए 1620 वर्ष, तथा बिस्मथ ($_{83}Bi^{218}$) के लिए केवल 3 मिनट होती है।

यदि आज किसी रेडियो एक्टिव पदार्थ की कितनी भी मात्रा ली जाये, एक अर्द्ध-आयु के बाद वह प्रारम्भिक मान की ठीक आधी रह जायेगी। उदाहरण के लिए यदि हम आज 100 ग्राम रेडियम लें तो 1620 वर्ष बाद 50 ग्राम, 3240 वर्ष बाद 25 ग्राम, 4860 वर्ष बाद 12.5 ग्राम, 6480 वर्ष बाद, 6.25 ग्राम रह जायेगा। इस प्रकार पूरा रेडियम नष्ट होने में अनन्त समय लगेगा। उक्त आंकड़ों से स्पष्ट है कि यदि किसी रेडियो-एक्टिव तत्व की अर्द्ध-आयु T है तो T समय पश्चात् वह अपनी प्रारम्भिक मात्रा का 50%, 2T समय पश्चात् 25%, 4T समय पश्चात् 6.25% रह जायेगा। यदि हम समय तथा पदार्थ के नाभिकों की संख्या के बीच ग्राफ खींचे तो एक चरघातांकी वक्र (exponential curve) प्राप्त होगा (चित्र)।



चित्र 15.6 : चरघातांकी वक्र

माना कि किसी पदार्थ में प्रारम्भ में ($t = 0$ समय पर) N_0 परमाणु हैं और पदार्थ की अर्द्ध-आयु T है तो एक अर्द्ध-आयु के अन्त में (अर्थात् $t = T$) पदार्थ में शेष अविघटित परमाणुओं की संख्या

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

दो अर्द्ध-आयुओं के पश्चात् (अर्थात् $t = 2T$) शेष अविघटित परमाणु की संख्या

$$N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{N_0}{4} = N_0\left(\frac{1}{2}\right)^2$$

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

इसी प्रकार तीन अर्द्ध-आयुओं के पश्चात् (अर्थात् जब $t = 3T$) शेष परमाणुओं की संख्या अर्थात् अविघटित नाभिकों की संख्या

$$N_3 = \frac{N_2}{2} = \frac{N_0}{8} = N_0\left(\frac{1}{2}\right)^3$$

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

इसी प्रकार n-अर्द्ध आयुओं के पश्चात् (अर्थात् $t = nT$) शेष परमाणुओं की संख्या

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

इसी समीकरण को व्यापक रूप से लिखने के लिए यदि N_n को केवल N से व्यक्त किया जाये तो

$$N = N_0\left(\frac{1}{2}\right)^n \qquad .....(1)$$

n का मान $n = \frac{t}{T}$ सूत्र की सहायता से ज्ञात किया जा सकता है। स्पष्ट है कि n अर्द्धआयु काल पश्चात् विघटित होने वाले नाभिकों की संख्या $(N_0 - N)$ होगी।

$$N' = N_0 - N = N_0 - N_0\left(\frac{1}{2}\right)^n$$

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

$$N' = N_0\left(\frac{2^n - 1}{2^n}\right) \qquad .....(2)$$

अर्द्ध-आयु तथा क्षय-नियतांक में सम्बन्ध–यदि प्रारम्भ में ($t = 0$ समय पर) किसी रेडियो एक्टिव पदार्थ के परमाणुओं की संख्या N_0 है तो t समय पश्चात् शेष परमाणुओं की संख्या अर्थात् अविघटित नाभिकों की संख्या

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad .....(3)$$

यदि पदार्थ की अर्द्ध-आयु T है तो $t = T$ पर

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

∴ समीकरण (3) से

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

या $$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

या $$2 = \frac{1}{e^{-\lambda T}}$$

या $$2 = e^{\lambda T}$$

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

या $$\log_e 2 = \lambda T$$

या $$T = \frac{\log_e 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad .....(4)$$

या $$T \propto \frac{1}{\lambda}$$

अतः अर्द्ध आयु उसके क्षयांक के व्युत्क्रमानुपाती होती है।

इस समीकरण की सहायता से यदि किसी रेडियो एक्टिव पदार्थ का क्षय नियतांक ज्ञात हो तो उसकी अर्द्ध-आयु ज्ञात कर सकते हैं।

15.6.3 माध्य आयु (Mean Life)

रेडियो-एक्टिव विघटन की प्रक्रिया सांख्यिकीय (statistical) होती है अर्थात् यह नहीं कहा जा सकता है कि कौनसा नाभिक कब विघटित होगा और विघटित होकर किस प्रकार का कण उत्सर्जित करेगा। किसी भी नाभिक के विघटन का समय 0 (शून्य) और अनन्त के मध्य कुछ भी हो सकता है। सभी नाभिकों की आयुओं के औसत को ही **माध्य-आयु** (Average life) कहते हैं। इसे T_a से व्यक्त करते हैं।

किसी तत्व की माध्य आयु उसके सभी परमाणुओं की आयु के योग तथा परमाणुओं की कुल संख्या का अनुपात होती है अर्थात्

$$T_a = \frac{\text{सभी परमाणुओं की आयु का योग}}{\text{परमाणुओं की कुल संख्या}}$$

माना कि प्रारम्भ में ($t = 0$ समय पर) किसी रेडियोएक्टिव तत्व में N_0 परमाणु है तथा t समय पश्चात् परमाणुओं की संख्या N रह जाती है। यदि अत्यल्प समयांतराल dt में dN परमाणु विघटित हो जाते हैं तब सभी dN परमाणुओं की आयु का कुल योग $= t dN$

∵ यहाँ dt का मान बहुत छोटा अर्थात् $dt \to 0$ माना गया है जिससे dN परमाणु में से प्रत्येक परमाणु t समय तक सक्रिय रहा अर्थात् प्रत्येक परमाणु की आयु t थी।

प्रत्येक रेडियोएक्टिव तत्व की आयु शून्य से अनन्त तक हो सकती है अतः समस्त सक्रिय परमाणुओं की कुल आयु का योग

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

माध्य आयु $$T_a = \frac{\int_0^\infty t.dN}{N_0} \qquad .....(1)$$

$$\because \quad \frac{|dN|}{dt} = \lambda N$$

$$\therefore \quad |dN| = \lambda N dt$$

∴ समी. (1) से

$$T_a = \frac{\int_0^\infty \lambda N t\, dt}{N_0}$$

चरघातांकी नियम से

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

$$\therefore \quad T_a = \frac{\int_0^\infty \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda t} t\, dt}{N_0}$$

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

समाकलन करने पर

$$T_a = \lambda\left[\left\{t\frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda}\right\}_0^\infty - \left\{\int_0^\infty \frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda} dt\right\}\right]$$

$$= \lambda\left[0 + \frac{1}{\lambda}\int_0^\infty e^{-\lambda t} dt\right]$$

$$= \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt = \left[\frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda}\right]_0^\infty \qquad \because e^{-\infty} = 0, e^0 = 1$$

$$= 0 - \frac{1}{-\lambda} = \frac{1}{\lambda}$$

$$\therefore \quad T_a = \frac{1}{\lambda} \qquad .....(2)$$

अतः किसी भी रेडियोएक्टिव तत्व के परमाणुओं की माध्य आयु उनके क्षयांक के व्युत्क्रम के बराबर होती है।

अर्द्ध-आयु व औसत आयु में सम्बन्ध

∵ अर्द्ध-आयु

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

समीकरण (2) से $\frac{1}{\lambda}$ का मान उक्त समीकरण में रखने पर

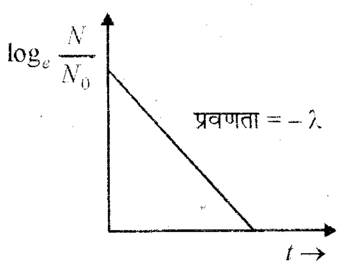
$$T = 0.693\, T_a \qquad .....(3)$$

महत्वपूर्ण तथ्य

(1) सूत्र $N = N_0 e^{-\lambda t}$

$\Rightarrow \dfrac{\log_e \frac{N}{N_0}}{t} = -\lambda$ ग्राफ में दिखायी गयी सरल रेखा की ढाल

अर्थात् विघटन वक्र के ढाल का व्युत्क्रम परिमाण में औसत आयु (T_a) के बराबर होता है।



(2) सूत्र $N = N_0 e^{-\lambda t}$ से

यदि $t = \frac{1}{\lambda} = T_a$ हो तो जहाँ e = 2.7813 एक गणितीय नियतांक है।

$N = N_0 e^{-1}$

$N = \frac{N_0}{e} = 0.37\, N_0$

$= N_0$ का 37%

अर्थात् वह समय जिसमें रेडियोसक्रिय परमाणुओं की संख्या घटकर अपने प्रारंभिक संख्या की $\frac{1}{e}$ या 0.37 गुना या 37% रह जाती है उस तत्व की माध्य (औसत) आयु कहलाती है।

या

वह समय जिसमें रेडियोसक्रिय परमाणुओं की संख्या $(N_0 - N)$ अपने प्रारंभिक मान की $\left(1 - \frac{1}{e}\right)$ या 0.63 गुना या 63% विघटित हो जाती है, माध्य आयु कहलाती है।

(3) $T = \frac{0.693}{\lambda}$

$\Rightarrow \frac{1}{\lambda} = T_a = \frac{T}{0.693}$

$= 1.44\ T$

अर्थात् माध्य आयु, अर्द्धआयु से लगभग 44% अधिक होती है।

$\therefore \quad T_a > T$

(4) किसी पदार्थ के एक ग्राम की सक्रियता को विशिष्ट सक्रियता कहते है। 1 ग्राम रेडियम 226 की विशिष्ट सक्रियता 1 क्यूरी कहलाती है।

(5) जैसे--जैसे अविघटित नाभिकों की संख्या समय के साथ घटती जाती है, रेडियोसक्रिय पदार्थों की सक्रियता भी घटती है।

(6) सक्रियता $\propto \dfrac{1}{\text{अर्द्धआयु}}$

उदाहरण 11. किसी नमूने की सक्रियता को नापने के लिए एक गणित्र का उपयोग किया गया। किसी समय पर यह 4750 विघटन प्रति मिनट बतलाता है। पाँच मिनट पश्चात् यह संख्या 2700 प्रति मिनट रह जाती है। क्षयाँक ज्ञात कीजिये।

हल–समय t पर विघटन की दर

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

समय $t = 0$ पर

$$\left(-\frac{dN_0}{dt}\right) = \lambda N_0$$

$$\therefore \quad \frac{\frac{dN}{dt}}{\frac{dN_0}{dt}} = \frac{N}{N_0} = \frac{2700}{4750} = e^{-5\lambda}$$

या $\quad e^{5\lambda} = \frac{4750}{2700} = 1.760$

या $\quad 5\lambda = \log_e 1.760 = 2.303 \log_{10} 1.760$

$= 2.303 \times 0.2455 = 0.5653$

$\therefore \quad \lambda = \frac{0.5653}{5}$

$= 0.1131$ प्रति मिनट

उदाहरण 12. किसी रेडियोएक्टिव प्रतिदर्श में 1000 परमाणु है जिनके लिए अर्द्ध आयु T है। तब कितने परमाणु T/2 समय पश्चात शेष रहेंगे?

पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.5

हल: दिया गया है: $t = \frac{T}{2}$

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

$$\because \quad N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

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

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

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

उदाहरण 13. एक रेडियो एक्टिव पदार्थ की सक्रिय मात्रा 15 घण्टों में कम होकर मूल मात्रा का (1/64) भाग रह जाती है। इसकी अर्धआयु क्या है ?

हल–दिया हुआ है,

t = 15 घण्टे, $N/N_0 = 1/64$, अतः उपयोगी सूत्र

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

मे मान रखने पर

$$\frac{1}{64} = \left(\frac{1}{2}\right)^{15/T}$$

या $$\left(\frac{1}{2}\right)^6 = \left(\frac{1}{2}\right)^{15/T}$$

अतः $$6 = \frac{15}{T}$$

या $$T = \frac{15}{6} = 2.5 \text{ घण्टा}$$

उदाहरण 14. किसी रेडियोएक्टिव प्रतिदर्श की सक्रियता 7.5 h में अपने प्रारंभिक मान का 1/32 रह जाती है। प्रतिदर्श के परमाणुओं की अर्द्ध आयु ज्ञात कीजिए।

पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.6

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

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

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

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

या $$5 = \frac{7.5}{T}$$

$\therefore$ $$T = \frac{7.5}{5} = 1.5 \text{ घण्टे}$$

उदाहरण 15. β–क्षय द्वारा, ट्राइटियम की अर्ध-आयु 12.5 वर्ष है। 25 वर्ष बाद शुद्ध ट्राइटियम के एक नमूने का कितना अंश अविघटित रहेगा ?

हल : दिया है : T = 12.5 वर्ष, t = 25 वर्ष

अतः अर्द्ध आयुकालों की संख्या $n = \frac{t}{T} = \frac{25}{12.5} = 2$

अतः अविघटित मात्रा $N = \frac{N_o}{2^n} = \frac{N_o}{2^2} = \frac{1}{4}N_o$

अतः 25 वर्ष बाद ट्राइटियम का $\frac{1}{4}$ भाग अविघटित रहेगा।

उदाहरण 16. ^{235}U के 10 kg प्रतिदर्श की सक्रियता क्या होगी यदि ^{235}U की अर्द्ध आयु 7.04×10^8 वर्ष है?

[1 वर्ष = 3.15×10^7 s लें तथा ^{235}U का परमाणु भार 252 g / mol मानें]

पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.7

हल: दिया गया है– T = 7.04×10^8 वर्ष, m = 10 किग्रा = 10^4 ग्राम

परमाणु भार M = 252 ग्राम/मोल

$\because$ M परमाणु भार के परमाणुओं से निर्मित m द्रव्यमान के प्रतिदर्श में परमाणुओं (नाभिकों) की संख्या

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

$$N = \frac{10 \times 10^3}{235} \times 6.02 \times 10^{23} = 2.56 \times 10^{25}$$

अतः सक्रियता $$R = \lambda N = \frac{0.693N}{T}$$

$$= \frac{0.693 \times 2.56 \times 10^{25}}{7.04 \times 10^8}$$

$$= 2.52 \times 10^{16} \text{ विघटन/वर्ष}$$

$$= \frac{2.52 \times 10^{16}}{3.15 \times 10^7} \text{ विघटन/सेकण्ड}$$

$$= 8.0 \times 10^8 \text{ Bq}$$

उदाहरण 17. एक रेडियोएक्टिव तत्व के N परमाणुओं द्वारा प्रति सेकण्ड n अल्फा कण उत्सर्जित होते हैं। तत्व की अर्ध आयु कितनी होगी ?

हल–तत्व की अर्ध आयु

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

जहाँ λ = क्षयांक है। परिभाषा से क्षयांक

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

यहाँ दिया गया है, $\left(\frac{-dN}{dt}\right) = n$ प्रति सेकण्ड, अतः

$$\lambda = \frac{n}{N} \text{ प्रति सेकण्ड}$$

$\therefore$ $$T = \frac{0.693}{\left(\frac{n}{N}\right)} = \frac{0.693N}{n} \text{ सेकण्ड}$$

उदाहरण 18. ^{214}Bi एक नामिक है जो दो क्षय चैनलों के द्वारा क्षयित हो सकता है इनमें से एक प्रक्रम में यह क्षयांक λ_1 के साथ α क्षय करता है जो इस प्रकार है

$$^{214}Bi \xrightarrow{\lambda_1} {}^{210}Tl + {}^4_2He$$

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

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

इन प्रक्रमों के संगत अर्द्ध आयु काल क्रमशः T_1 व T_2 हैं। तब ^{214}Bi के किसी प्रतिदर्श में कुछ परमाणु प्रथम प्रक्रम द्वारा तो कुछ द्वितीय प्रक्रम द्वारा क्षयित होते हैं। ऐसे प्रतिदर्श की प्रभावी अर्द्ध आयु के लिए सूत्र ज्ञात कीजिए। **पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.8**

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

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

इस प्रकार प्रभावी क्षयांक

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

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

अतः यदि प्रभावी अर्द्ध आयु T है तब

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

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

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

या $$T = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$$

उदाहरण 19. एक रेडियोएक्टिव स्रोत की गणना दर $t = 0$ सेकण्ड पर 1600 प्रति सेकण्ड और 8 सेकण्ड पर 100 प्रति सेकण्ड है। तब $t = 6$ सेकण्ड पर गणना दर क्या थी ? (प्रति सेकण्ड में)

हल–दिया हुआ है,

$R_0 = 1600$, जब $t = 8$ सेकण्ड तब $R = 100$, अतः यदि अर्ध आयु T हो तब,

$$\frac{R}{R_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad \text{जहाँ} \quad n = \frac{t}{T}$$

$$\frac{100}{1600} = \left(\frac{1}{2}\right)^{8/T}$$

या $$\left(\frac{1}{2}\right)^4 = \left(\frac{1}{2}\right)^{8/T}$$

या $$4 = \frac{8}{T},$$

$\therefore$ T = 2 सेकण्ड

अब मान लो $t = 6$ सेकण्ड पर, विघटन दर R′ है तब

$$\frac{R'}{R_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{6/2} = \frac{1}{8}$$

$$\therefore \quad R' = \frac{R_0}{8} = \frac{1600}{8}$$

$$= 200$$

उदाहरण 20. किसी रेडियोएक्टिव प्रक्रम में माना कोई नाभिक A क्षयांक λ_A के साथ किसी अन्य नाभिक B में बदल रहा है। नाभिक B स्वयं भी रेडियोएक्टिव है तथा क्षयांक λ_B के साथ एक अन्य नाभिक C में बदल रहा है। मान लीजिए किसी समय t पर A व B के नाभिकों की संख्या N_A तथा N_B है। वह प्रतिबंध ज्ञात कीजिए जब B के परमाणुओं की संख्या नियत हो जाती है।

पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.9

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

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

या $$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B$$

यह स्थिति रेडियोएक्टिव संतुलन कहलाती है।

उदाहरण 21. Sr^{90} के 1 g नमूने की सक्रियता की गणना करो यदि इसकी अर्ध आयु 28 वर्ष है।

हल–एक नमूने की सक्रियता निम्न होती है

$$R = \lambda N$$

यहाँ $$\lambda = \frac{0.693}{T} = \frac{0.693}{28 \times 3.15 \times 10^7}$$

और 1 ग्राम Sr^{90} में नाभिकों की संख्या $N = \dfrac{6.023 \times 10^{23} \times 1}{90}$

है अतः $$R = \frac{0.693}{28 \times 3.15 \times 10^7} \times \frac{6.023 \times 10^{23}}{90}$$

हल करने पर

$$R = 5.3 \times 10^{12} \text{ विघटन/सेकण्ड}$$

$$= \frac{5.3 \times 10^{12}}{3.7 \times 10^{10}} \text{ क्यूरी}$$

$$\approx 140 \text{ क्यूरी}$$

उदाहरण 22. ^{238}U, 4.47×10^8 **वर्ष की अर्द्धआयु के साथ** ^{206}Pb **में क्षयित होता है। चट्टान के एक प्रतिदर्श में** ^{238}U **का 1.19 mg तथा** ^{206}Pb **का 3.09 mg पाया जाता है। यह मानते हुए कि समस्त सीसा यूरेनियम से ही प्राप्त हुआ है, चट्टान की आयु का अनुमान लगाए।** **पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.10**

हल: माना कि N_{Pb} = समय t पर उत्पाद ^{206}Pb नाभिकों की संख्या

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

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

$m_U = U$ का प्रतिदर्श में द्रव्यमान

$M_{Pb} = pb$ का परमाणु भार

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

$$N_{Pb} = \frac{N_A}{M_{Pb}}\times m_{Pb},\ N_U = \frac{N_A}{M_U}\times m_U$$

$$\therefore\ \frac{N_{Pb}}{N_U} = \frac{m_{Pb}}{m_U}\frac{M_U}{M_{Pb}}$$

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

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

$$N_{Pb} + N_U = N_0$$

या $$3N_U + N_U = N_0$$

या $$N_U = \frac{N_0}{4}$$

अर्थात् समय t पर U के नाभिकों की संख्या इसके मूलमान (चट्टान के निर्माण के समय के मान) की 1/4 रह गई है जिसका तात्पर्य है कि चट्टान की आयु ^{238}U की अर्द्धआयु की दो गुना अर्थात्

$$2\times4.47\times10^8 \text{ वर्ष} = 8.94\times10^8 \text{ वर्ष}$$ है।

उदाहरण 23. रेडियम की अर्ध आयु 1600 वर्ष है, उसके क्षयांक तथा माध्य आयु का मान ज्ञात कीजिये।

हल– $\lambda = \frac{0.693}{T} = \frac{0.693}{1600}$

यहाँ T = 1600 वर्ष

माध्य आयु $= 4.33\times10^{-14}$ प्रतिवर्ष

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

$$\therefore\ T_a = \frac{1600}{0.693} = 2309 \text{ वर्ष}$$

उदाहरण 24. किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ जिसकी अर्द्धआयु 22 वर्ष है को क्षयित होकर 10% होने में कितना समय लगेगा? **पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.11**

हल: दिया गया है– $\frac{N}{N_0} = \frac{10}{100} = \frac{1}{10}$, T = 22 वर्ष

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

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

या $$(2)^{t/22} = 10$$

दोनों पक्षों का log लेने पर

$$\frac{t}{22}\log2 = \log10$$

$$\frac{t}{22}\times0.301 = 1$$

$$t = \frac{22}{0.301} = 73 \text{ वर्ष}$$

15.7 α, β तथा γ (किरणें) तथा उनके गुण [α, β and γ (rays) and their properties)

α-कणों के गुण (Properties of α-particles)

(1) एल्फा कणों पर धन आवेश होता है। एक एल्फा-कण पर 3.2×10^{-19} कूलॉम धन आवेश होता है जो कि प्रोटॉन पर आवेश का ठीक दुगुना है। α-कण का द्रव्यमान 6.645×10^{-27} किग्रा होता है जो कि हीलियम के नाभिक के द्रव्यमान के बराबर (अथवा प्रोटॉन के द्रव्यमान का चार गुना) है। जब हीलियम परमाणु से दो इलेक्ट्रॉन निकल जाते हैं तो शेष हीलियम नाभिक ही α-कण कहलाता है। अतः α-कण 'द्विः आयनित हीलियम परमाणु' (double ionised helium atom) है। इसे $_2He^4$ से प्रदर्शित करते हैं। इसमें दो प्रोटॉन व दो न्यूट्रॉन होते हैं।

(2) चूँकि α-कण धनावेशित हैं अतः ये विद्युत तथा चुम्बकीय क्षेत्रों में विक्षेपित हो जाते हैं। इनका विक्षेप β-कणों की अपेक्षा कम होता है जो यह बताता है कि α-कण, β-कण की अपेक्षा भारी है।

(3) α-कणों का वेग प्रकाश के वेग के 1/10 वें भाग से कुछ कम होता है। भिन्न-भिन्न तत्वों से उत्सर्जित α-कणों के वेग भिन्न-भिन्न होते हैं परन्तु एक ही तत्व से उत्सर्जित सभी α-कणों के समान होते हैं। इसी वेग भिन्नता के कारण विद्युत व चुम्बकीय क्षेत्रों में α-कणों में कुछ विक्षेपण (dispersion) हो जाता है।

(4) जब α-कण किसी गैस में से होकर गुजरते हैं तो उसका

आयनीकरण (ionisation) कर देते हैं। (अर्थात् गैस के अणुओं में से इलेक्ट्रॉन निकाल देते हैं।) α-कणों की आयनीकरण क्षमता β-कणों की अपेक्षा 100 गुनी तथा γ-किरणों की अपेक्षा 10,000 गुनी है।

(5) α-कणों की वेधन क्षमता (penetrating power) बहुत कम होती है। उदाहरणार्थ ये ऐल्युमिनियम की केवल 0.1 मिमी मोटी चादर द्वारा ही रोक लिये जाते हैं। इनकी वेधन क्षमता β-कणों की अपेक्षा 1/100 गुनी तथा γ-किरणों की अपेक्षा 1/10,000 गुनी है।

(6) α-कणों की वायु में परास (अर्थात् वह दूरी जहाँ तक ये वायु में चल सकते हैं) रेडियोएक्टिव पदार्थ पर निर्भर करती है तथा प्रत्येक पदार्थ के लिए इसका एक नियत मान होता है।

(7) α-कण अभ्रक अथवा सोने की पतली पन्नी में से गुजरने पर प्रकीर्णित (scattered) हो जाते हैं।

(8) α-कण फोटोग्राफिक प्लेट को हल्का-सा प्रभावित करते हैं।

(9) ये कण प्रतिदीप्तिशील पदार्थ जैसे—बेरियम-प्लेटिनोसाइनाइड तथा जिंक सल्फाइड पर पड़ने पर प्रतिदीप्ति उत्पन्न करते हैं। प्रत्येक α-कण बेरियम-प्लेटिनोसाइनाइड के पर्दे पर अलग-अलग चमक (scintillation) उत्पन्न करता है। इससे α-कणों को गिना जा सकता है।

(10) ये कण किसी लक्ष्य द्वारा रोकने पर ऊष्मीय प्रभाव दिखाते हैं।

(11) अत्यधिक वेग से निकलने के कारण जब α-कण किसी तत्व के परमाणु के नाभिक पर बमबारी करते हैं तो एक तत्व दूसरे तत्व में परिवर्तित हो सकता है। रदरफोर्ड ने नाइट्रोजन को ऑक्सीजन में इसी प्रकार बदला था।

(12) ये कण शरीर को झुलसा देते हैं, अतः अत्यन्त हानिकारक हैं।

β-कणों के गुण (Properties of β-particles)

(1) बीटा-कणों पर ऋण आवेश होता है। एक β-कण पर 1.6×10^{-19} कूलॉम ऋण आवेश होता है जो कि इलेक्ट्रॉन के आवेश के बराबर है। वास्तव में ये कण तीव्रगामी इलेक्ट्रॉन ही हैं। इनका विराम द्रव्यमान 9.1×10^{-31} किग्रा होता है।

(2) चूँकि β-कण ऋण आवेशित हैं, अतः ये विद्युत तथा चुम्बकीय क्षेत्रों में विक्षेपित हो जाते हैं। इनका विक्षेप, α-कणों की अपेक्षा बहुत अधिक होता है जो यह बताता है कि β-कण, α-कण की अपेक्षा बहुत हल्के हैं।

(3) इनका वेग प्रकाश के वेग का 0.01 से लेकर 0.98 गुना तक होता है। स्पष्ट है कि केवल वेग में ही β-कण कैथोड किरणों से भिन्न है। एक ही रेडियोएक्टिव पदार्थ से उत्सर्जित सभी β-कणों के वेग समान नहीं होते बल्कि उनमें काफी भिन्नता होती है। इसी वेग भिन्नता के कारण विद्युत व चुम्बकीय क्षेत्रों में β-कणों में काफी विक्षेपण हो जाता है।

(4) जब β-कण किसी गैस से गुजरते हैं तो उसका आयनीकरण कर देते हैं। इनकी आयनीकरण क्षमता α-कणों की अपेक्षा 1/100 गुनी तथा γ-किरणों की अपेक्षा 100 गुनी है।

(5) β-कणों की वेधन क्षमता α-कणों की अपेक्षा 100 गुनी तथा γ-किरणों की अपेक्षा 1/100 गुनी है। ये कण ऐल्युमिनियम की लगभग 1 सेमी मोटी चादर को पार कर जाते हैं।

(6) β-कणों की परास निश्चित नहीं होती (जबकि α-कणों की परास निश्चित होती है) क्योंकि एक ही रेडियोएक्टिव पदार्थ से उत्सर्जित β-कणों की गतिज ऊर्जा शून्य तथा एक निश्चित मान के बीच अविरत रूप से वितरित होती है।

(7) β-कण फोटोग्राफिक प्लेट को α-कणों की अपेक्षा अधिक प्रभावित करते हैं।

(8) ये कण प्रतिदीप्तिशील पदार्थ जैसे—बेरियम-प्लेटिनोसाइनाइड तथा जिंक-सल्फाइड पर पड़ने पर प्रतिदीप्ति उत्पन्न करते हैं।

(9) ये कण उच्च गलनांक वाली धातुओं पर डालने पर X-किरणें उत्पन्न करते हैं।

(10) चूँकि β-कणों का वेग प्रकाश के वेग की कोटि का होता है, अतः इनका द्रव्यमान इनके वेग के बढ़ने पर बढ़ता है। यदि β-कण का विराम द्रव्यमान m_0 तथा वेग v है तो आइन्स्टीन के आपेक्षिकता के सिद्धान्त के अनुसार β-कण का गति में द्रव्यमान

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

जहाँ c प्रकाश की चाल है। स्पष्ट है कि जैसे–जैसे v का मान बढ़ेगा m का मान भी बढ़ता जायेगा।

γ-किरणों के गुण (Properties of γ-rays)

(1) γ-किरणें, X-किरणों की भाँति विद्युत-चुम्बकीय तरंगें (अथवा फोटॉन) हैं। γ-फोटॉनों की ऊर्जा बहुत अधिक अर्थात् मिलियन इलेक्ट्रॉन-वोल्ट की कोटि की होती है, अतः इनकी तरंगदैर्ध्य बहुत छोटी अर्थात् 0.01 Å कोटि की होती है।

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

(3) ये किरणें आवेश रहित हैं अतः ये विद्युत तथा चुम्बकीय क्षेत्रों से प्रभावित नहीं होती।

(4) ये किरणें गैसों में आयनीकरण करती हैं परन्तु इनकी आयनीकरण क्षमता α-कणों की अपेक्षा 1/10,000 गुनी तथा β-कणों की अपेक्षा 1/100 गुनी है।

(5) γ-किरणों की वेधन क्षमता α-कणों की अपेक्षा 10,000 गुनी तथा β-कणों की अपेक्षा 100 गुनी है। ये किरणें अत्यधिक वेधन-क्षमता के कारण लोहे की 30 सेमी मोटी चादर को पार कर जाती है।

(6) ये किरणें प्रतिदीप्ति उत्पन्न करती है।

(7) ये किरणें फोटोग्राफिक प्लेट को β-कणों की अपेक्षा अधिक प्रभावित करती है।

(8) यद्यपि γ-किरणों तथा X-किरणों की प्रकृति में काफी समानता है परन्तु इनकी उत्पत्ति के स्रोत अलग-अलग हैं। γ-किरणों की उत्पत्ति नाभिक से होती है (अर्थात् यह नाभिकीय गुण है) जबकि X-किरणों की उत्पत्ति परमाणु के अन्दर की कक्षा वाले इलेक्ट्रॉन के एक कक्षा से दूसरी कक्षा में संक्रमण के कारण होती है (अर्थात् यह परमाण्वीय गुण है)।

(9) ये किरणें पदार्थों द्वारा अवशोषित होकर युग्म उत्पादन (pair production) की घटना को जन्म देती हैं। जब कोई गामा-किरण फोटॉन (जिसकी ऊर्जा 1.02 MeV से अधिक हो) पदार्थ के नाभिक से टकराता है तो इसकी सम्पूर्ण ऊर्जा अवशोषित हो जाती है तथा एक इलेक्ट्रॉन व एक पॉजीट्रॉन (धन आवेशित इलेक्ट्रॉन) की उत्पत्ति होती है।

$$h\upsilon \rightarrow e^- + e^+$$

(γ-फोटॉन) (इलेक्ट्रॉन) (पॉजीट्रॉन)

α-कण, β-कण तथा γ-किरणों की तुलना

गुण	α-कण	β-कण	γ-किरण
1. प्रकृति	धन आवेशित कण (हीलियम नाभिक)	ऋण आवेशित कण (तीव्रगामी इलेक्ट्रॉन)	विद्युत-चुम्बकीय तरंगें अथवा फोटोन
2. आवेश	$+3.2 \times 10^{-19}$ कूलॉम	-1.6×10^{-19} कूलॉम	आवेश रहित
3. विराम द्रव्यमान	6.6×10^{-27} किग्रा	9.1×10^{-31} किग्रा	शून्य
4. वेग	1.4×10^7 मी/से. से 2.2×10^7 मी./से. तक	3×10^6 मी./से. 2.9×10^8 मी./से. तक	3×10^8 मी./से.
5. ऊर्जा	कम	अधिक	सर्वाधिक
6. आयनीकरण क्षमता	सर्वाधिक (β-कण से 100 गुनी तथा γ-किरणों से 10,000 गुनी)	अधिक (γ-किरण से 100 गुनी)	सबसे कम (1)
7. वेधन क्षमता	सबसे कम (1) (कागज के एक पेज से रोका जा सकता है)	अधिक (α-कण से 100 गुनी)	सर्वाधिक (β-कण से 100 गुनी तथा α-कण से 10,000 गुनी) (लोहे या लैड चादर के 30 cm तक)
8. फोटोग्राफिक प्लेट पर प्रभाव	सबसे कम	अधिक	सबसे अधिक
9. विद्युत तथा चुम्बकीय क्षेत्र का प्रभाव	β-कण की अपेक्षा कम विक्षेपित तथा β-कण से विपरीत दिशा में विक्षेपित	α-कण की अपेक्षा अधिक विक्षेपित तथा α-कण की विपरीत दिशा में विक्षेपित	अप्रभावित रहती है।
10. ऊर्जा स्पैक्ट्रम	रेखीय तथा विविक्त	सतत्	रेखीय तथा विविक्त
11. द्रव्य से अन्योन्य क्रिया	ऊष्मा उत्पन्न करते हैं।	ऊष्मा उत्पन्न करते हैं।	प्रकाश–विद्युत प्रभाव कॉम्पटन प्रभाव, युग्म उत्पादन उत्पन्न करती है।

15.8 α, β तथा γ क्षय (α, β and γ decay)

15.8.1 α– क्षय (α– Decay)

जब किसी तत्व के परमाणुओं से α-कण उत्सर्जित होते हैं तब तत्व का परमाणु क्रमांक (atomic number) तथा द्रव्यमान संख्या (mass number) बदल जाता है। यह प्रक्रिया α-क्षय (α-decay) कहलाती है। इस स्थिति में परमाणु क्रमांक (Z) का मान 2 से तथा द्रव्यमान संख्या (A) का मान 4 से कम हो जाता है। इस प्रकार बना नया तत्व आवर्त सारणी में अपने मूल तत्व से 2 वर्ग बांये की स्थिति ग्रहण करता है।

व्यापक रूप में– ${}_{Z}X^{A} \rightarrow {}_{Z-2}Y^{A-4} + {}_{2}He^{4}$

यहाँ X को पितृ नाभिक (parent nucleus) तथा Y को पुत्री नाभिक (daughter nucleus) कहते हैं।

आइन्सटीन के द्रव्यमान-ऊर्जा सम्बन्ध तथा ऊर्जा संरक्षण नियम द्वारा यह स्पष्ट होता है कि इस स्थिति में स्वत: क्षय केवल क्षय उत्पादों का कुल द्रव्यमान, प्रारंभिक नाभिक के द्रव्यमान से कम होने के कारण संभव है। द्रव्यमानों में यह अन्तर उत्पादों की गतिज ऊर्जा के रूप में प्राप्त होता है। प्रारंभिक द्रव्यमान ऊर्जा तथा क्षय उत्पादों की कुल द्रव्यमान ऊर्जा का अन्तर इस प्रक्रिया का Q-मान अथवा **विघटन ऊर्जा** (Disintegration energy) कहलाता है अर्थात् α-क्षय में

$$Q = (m_x - m_y - m_\alpha)\, c^2$$

यदि प्रारंभिक नाभिक X स्थिर हो तो Q उत्पादों की गतिज ऊर्जा के रूप में होता है।

उदाहरण—जब ${}_{92}U^{238}$ के नाभिक से एक α-कण निकलता है तो ${}_{90}Th^{234}$ का नाभिक बनता है।

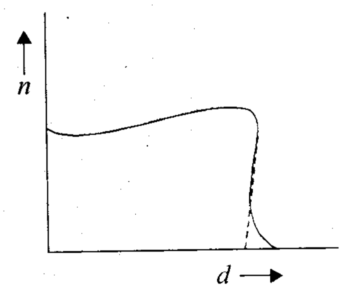
$$\underset{\text{(यूरेनियम)}}{{}_{92}U^{238}} \longrightarrow \underset{\text{(थोरियम)}}{{}_{90}Th^{234}} + \underset{(\alpha\text{-कण})}{{}_{2}He^{4}} + \underset{\text{(ऊर्जा)}}{Q}$$

इसी प्रकार जब रेडियम नाभिक से एक α-कण निकलता है तो रेडॉन बनता है।

$$\underset{\text{(रेडियम)}}{{}_{88}Ra^{226}} \longrightarrow \underset{\text{(रेडॉन)}}{{}_{86}Rn^{222}} + \underset{(\alpha\text{-कण})}{{}_{2}He^{4}} + \underset{\text{(ऊर्जा)}}{Q}$$

α-कणों की ऊर्जा का मान 4 MeV से 9 MeV के मध्य होता है जबकि वेग 1.42×10^7 मी./से. 2.05×10^7 मी./से. के मध्य होता है।

α-कणों की ऊर्जा का क्षय माध्यम (गैस) के आयनन के रूप में होता है। गैस को आयनित कर नष्ट होने से पहले α-कण जितनी दूरी तय करता है उसे उसकी परास (range) कहते हैं तथा इसे R द्वारा व्यक्त करते हैं। α-कणों की परास का मान, उनकी प्रारंभिक ऊर्जा जिससे वे उत्सर्जित हुए तथा गैस की प्रकृति पर निर्भर करती है। प्रति सेमी. पथ में उत्पन्न आयनों की संख्या n तथा संसूचक की स्त्रोत से दूरी d के मध्य खींचा गया आलेख निम्न प्रकार प्राप्त होता है–



चित्र 15.7

वह दूरी जहाँ पर आयनों की संख्या अचानक शून्य हो जाती है, कणों की परास होती है। α-कणों की परास R तथा वेग V के मध्य निम्न सम्बन्ध होता है–

$$V^3 = KR \qquad .....(1)$$

जहाँ K एक नियतांक है। यह सम्बन्ध गाइगर सम्बन्ध कहलाता है। K का मान सभी α-कणों के उत्सर्जन वाले तत्वों के लिए समान होता है तथा यह 1.03×10^{27} होता है जबकि V तथा R क्रमशः सेमी./से. तथा सेमी. में है।

$$\because \quad \text{ऊर्जा } E = \frac{1}{2} m V^2$$

$$\therefore \quad V = \left(\frac{2E}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \quad V^3 = \left(\frac{2E}{m}\right)^{\frac{3}{2}} = KR = 1.03 \times 10^{27} R$$

$$\Rightarrow \quad E^{3/2} = \left(\frac{m}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \times 1.03 \times 10^{27} R$$

$\Rightarrow \quad R \propto E^{3/2}$

$\Rightarrow \quad R = 0.318\, E^{3/2}$ .....(2)

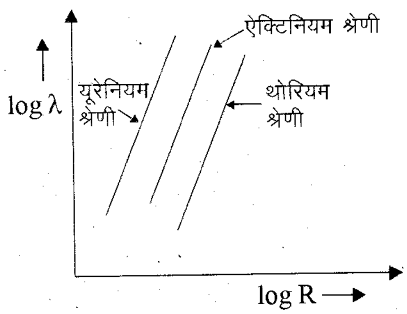
गाइगर तथा नटल (Geiger and Nuttal) ने प्रयोगों द्वारा सिद्ध किया कि रेडियोएक्टिव तत्व का क्षयांक λ जितना अधिक होगा, उत्सर्जित कणों का वेग V तथा परास R उतना ही अधिक होगा।

रेडियोएक्टिव तत्व के क्षयांक λ तथा परास R में निम्न सम्बन्ध होता है–

$$\log \lambda = A + B \log R \quad .....(3)$$

जहाँ A तथा B नियतांक है।

उपरोक्त सम्बन्ध गाइगर व नटल का नियम कहलाता है। इस सम्बन्ध का आलेख एक सरल रेखा प्राप्त होती है। निम्न चित्र में तीन प्राकृतिक रेडियोएक्टिव श्रेणियों के आलेख दर्शाये गये हैं–



चित्र 15.8

परास R, ऊर्जा E से सम्बन्धित होती है अतः गाइगर व नटल नियम को निम्न प्रकार भी व्यक्त किया जा सकता है–

$$\log \lambda = A + B \log E \quad .....(4)$$

प्रयोगों द्वारा यह पाया जाता है कि अधिकतम अर्द्ध-आयु का α-स्त्रोत न्यूनतम परास के α-कण उत्सर्जित करता है जबकि न्यूनतम अर्द्ध-आयु का α-स्त्रोत अधिकतम परास के α-कण उत्सर्जित करता है।

α-कणों का ऊर्जा स्पैक्ट्रम–सावधानीपूर्वक प्रयोगों द्वारा रोजेनब्लम (Rosenblum) ने यह सिद्ध किया कि रेडियोएक्टिव तत्व से उत्सर्जित सभी α-कणों की ऊर्जा समान नहीं होती है बल्कि यह विविक्त ऊर्जा समूहों (discrete energy groups) में उत्सर्जित होते हैं। ये विविक्त ऊर्जा समूह α-कणों के ऊर्जा स्पैक्ट्रम का निर्माण करते हैं। α-कणों की ऊर्जा सभी कणों की औसत ऊर्जा होती है।

सामान्यतः α-कणों के ऊर्जा स्पैक्ट्रम को निम्न तीन समूहों में विभक्त किया जा सकता है–

(i) एकल समूह स्पैक्ट्रम अर्थात् रैखिल– उदाहरण के लिए Rn, RaA तथा RaF का स्पैक्ट्रम।

(ii) लगभग समान ऊर्जा के दो या दो से अधिक ऊर्जा समूह के स्पैक्ट्रम– उदाहरण के लिए ThC, An, Pa आदि का स्पैक्ट्रम।

(iii) मुख्य समूह तथा बहुत अधिक ऊर्जा कणों के समूहों का स्पैक्ट्रम।

α-कणों के ऊर्जा स्पैक्ट्रम में सूक्ष्म संरचना (fine structure) पायी जाती है अर्थात् कण अनेक विविक्त परन्तु समीपवर्ती ऊर्जाओं से उत्सर्जित होते हैं। जब भी α-कणों का तत्व के नाभिक से उत्सर्जन होता है तब γ-किरणों का भी उत्सर्जन होता है। इसका कारण यह है कि α-कण के उत्सर्जन के पश्चात् नाभिक उत्तेजित अवस्था (excited state) में आ जाता है जिससे जब वह मूल अवस्था (ground state) में संक्रमण करता है तब उससे γ-किरणों का उत्सर्जन होता है जिसकी ऊर्जा उत्तेजित अवस्था तथा मूल अवस्था के ऊर्जा अन्तर के बराबर होती है।

गैमो (Gamow) ने यह सिद्ध किया कि α-कणों के नाभिक से उत्सर्जन की व्याख्या चिरसम्मत यांत्रिकी के आधार पर नहीं की जा सकती है। इसकी व्याख्या क्वाण्टम यांत्रिकी के आधार पर की जाती है। नाभिक के भीतर नाभिकीय आकर्षण बल प्रमुख होता है तथा इसकी सीमा के बाहर कूलॉम प्रतिकर्षण बल अन्योन्य क्रिया के लिए उत्तरदायी होता है। नाभिक की सीमा पर इन दोनों बलों के प्रभाव के कारण एक विभव रोधिका (potential barrier) उत्पन्न हो जाती है। यह विभव रोधिका सामान्यतः α-कणों के उत्सर्जन को रोकती है। यदि नाभिक की त्रिज्या 10^{-15} मीटर की कोटि की हो तो नाभिक के केन्द्र से इस दूरी पर विभव रोधिका ऊँचाई 26 MeV प्राप्त होती है। अतः चिरसम्मत यांत्रिकी के अनुसार α-कणों का इस विभव प्राचीर को पार करना संभव नहीं है। इस स्थिति में α-कणों की विभव रोधिका को पार करने की प्रायिकता (probability) निश्चित ही शून्य से अधिक होती है। इस घटना को सुरंग प्रभाव (Tunnel effect) या रोधिका प्रवेश (barrier penetration) कहते हैं।

15.8.2 β– क्षय (β–Decay)

जब भी किसी तत्व का β-कणों के उत्सर्जन से विघटन होता है अर्थात् **किसी नाभिक से एक इलेक्ट्रॉन अथवा एक पॉजिट्रॉन का स्वतः उत्सर्जन होता है तो एक नये रासायनिक तत्व की उत्पत्ति होती है।** तब इसे β-क्षय (β-decay) कहते हैं। β-विघटन से तत्व का परमाणु क्रमांक एक बढ़ या घट जाता है जबकि तत्व के परमाणु भार में अन्तर नहीं होता है। β-कणों पर आवेश इलेक्ट्रॉन के आवेश के मान के बराबर होता है। यह आवेश धनात्मक या ऋणात्मक हो सकता है। धनात्मक आवेश के β-कण को पॉजिट्रॉन (β^+) या (e^+) कहते हैं तथा ऋणात्मक आवेश के β कण को इलेक्ट्रॉन (β^-) या (e^-) कहते हैं। β-कणों का द्रव्यमान इलेक्ट्रॉन के बराबर होता है। **β^+ कण के उत्सर्जन के समय एक अन्य कण न्यूट्रिनों (ν) भी निकलता है जिसका विराम द्रव्यमान तथा आवेश दोनों शून्य होते हैं। जबकि β^- कण के उत्सर्जन के साथ एक अन्य कण एन्टिन्यूट्रिनों ($\bar{\nu}$) उत्सर्जित होता है जिसका भी विराम द्रव्यमान तथा आवेश दोनों शून्य होते हैं।**

उदाहरण–β^+ कण के लिए

$${}_{Z}X^{A} \longrightarrow {}_{Z-1}Y^{A} + \beta^+ \text{ या } ({}_{+1}e^0) + \nu \quad .....(1)$$

इस स्थिति में नवीन तत्व का परमाणु क्रमांक एक कम हो जाता है तथा द्रव्यमान संख्या समान रहती है अर्थात् तत्व समभारिक (isobar) होगा। परन्तु न्यूट्रॉन की संख्या एक बढ़ जाती है। नये तत्व का आवर्त सारणी में स्थान एक स्तम्भ पीछे खिसक जाता है।

β^- कण के लिए

$${}_{Z}X^{A} \longrightarrow {}_{Z+1}Y^{A} + \beta^- \text{ या } ({}_{-1}e^0) + \bar{\nu} \quad .....(2)$$

इस स्थिति में नवीन तत्व का परमाणु क्रमांक एक बढ़ जाता है तथा द्रव्यमान संख्या समान रहती है अर्थात् तत्व समभारिक होगा। परन्तु न्यूट्रॉन की संख्या पहले से एक कम हो जाती है। नये तत्व का आवर्त सारणी में स्थान एक स्तम्भ आगे खिसक जाता है।

उदाहरण : β^+ **क्षय के उदाहरण–**

(i) ${}_{11}Na^{22} \rightarrow {}_{10}Ne^{22} + {}_{+1}e^0 + \nu$
(β^+ कण) (न्यूट्रिनों)

(ii) ${}_{29}Cu^{64} \rightarrow {}_{28}Ni^{64} + {}_{+1}e^0 + \nu$
(β^+ कण) (न्यूट्रिनों)

β^- क्षय के उदाहरण–

(iii) ${}_{83}Bi^{210} \rightarrow {}_{84}Po^{210} + {}_{-1}e^0 + \bar{\nu}$
(β^- कण) (एन्टिन्यूट्रिनों)

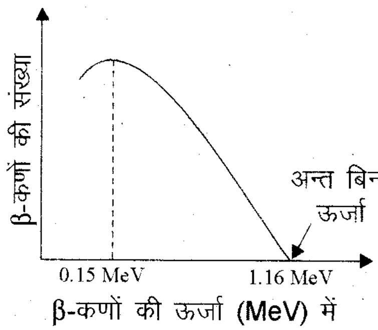
(iv) ${}_{15}P^{32} \rightarrow {}_{16}S^{32} + {}_{-1}e^{0} + \bar{\nu}$

(β^- कण) (एन्टिन्यूट्रिनों)

किसी तत्व से उत्सर्जित β-कणों के ऊर्जा स्पैक्ट्रम में निम्नलिखित विशेषताएँ पायी जाती हैं–

(i) β-कणों का ऊर्जा स्पैक्ट्रम सतत् (continuous) प्राप्त होता है अर्थात् एक अधिकतम मान के सभी संभव ऊर्जा के β-कण पाये जाते हैं।

(ii) रेडियोएक्टिव तत्व से उत्सर्जित β-कणों के स्पैक्ट्रम में ऊर्जा का एक विशिष्ट अधिकतम मान होता है जिसे अन्त बिन्दु ऊर्जा (end point energy) कहते हैं।



चित्र 15.9

(iii) एक विशिष्ट ऊर्जा के मान के लिए उत्सर्जित β-कणों की संख्या अधिकतम होती है। चित्र में RaE तत्व से उत्सर्जित β-कणों के ऊर्जा स्पैक्ट्रम को प्रदर्शित किया गया है।

15.8.3 न्यूट्रिनों परिकल्पना (Neutrino Hypothesis)

β-कणों के ऊर्जा स्पैक्ट्रम की सतत् प्राप्ति से यह निष्कर्ष निकलता है कि रेडियोएक्टिव तत्वों के नाभिकों से भिन्न-भिन्न ऊर्जा के मान के β कण उत्सर्जित होते हैं। इस कारण β कण के उत्सर्जन के पश्चात् नाभिक की विराम द्रव्यमान ऊर्जा में अन्तर प्राप्त होना चाहिए परन्तु वास्तव में β-कणों के उत्सर्जन में नाभिक की ऊर्जा में अन्तर प्रेक्षित नहीं होता है। इसी प्रकार β-क्षय की प्रक्रिया में कोणीय संवेग संरक्षण नियम के पालन सम्बन्धी एक और जटिलता उत्पन्न होती है। β-क्षय में β-कण के नाभिक से उत्सर्जन की व्याख्या को नाभिक के भीतर न्यूट्रॉन तथा प्रोटॉन के रूपान्तरण द्वारा समझाया जा सकता है।

${}_0n^1 \longrightarrow {}_1p^1 + \beta^- ({}_{-1}e^0)$ [न्यूट्रॉन का प्रोटॉन में रूपान्तरण]

${}_1p^1 \longrightarrow {}_0n^1 + \beta^+ ({}_{+1}e^0)$ [प्रोटॉन का न्यूट्रॉन में रूपान्तरण]

प्रोट्रॉन का द्रव्यमान, न्यूट्रॉन के द्रव्यमान से कम होता है। अत: प्रोटॉन का न्यूट्रॉन में रूपान्तरण केवल नाभिक के भीतर ही संभव है जबकि न्यूट्रॉन का प्रोटॉन में रूपान्तरण मुक्त अवस्था में भी संभव है।

इस प्रक्रिया में न्यूट्रॉन, प्रोटॉन तथा इलेक्ट्रॉन (पॉजिट्रॉन) का चक्रण कोणीय संवेग $\pm\frac{1}{2}\left(\frac{h}{2\pi}\right)$ होता है। जिससे β-क्षय से पहले कोणीय संवेग $\frac{1}{2}\left(\frac{h}{2\pi}\right)$ होगा तथा β-क्षय के पश्चात् कुल कोणीय संवेग

$$\left[\frac{1}{2}\left(\frac{h}{2\pi}\right) \pm \frac{1}{2}\left(\frac{h}{2\pi}\right)\right] = 0$$

या। $\frac{h}{2\pi}$ होगा। इस प्रकार इस प्रक्रिया में कोणीय संवेग संरक्षण नियम का पालन नहीं होता है।

सन् 1929 में पॉउली ने एक परिकल्पना प्रस्तुत की जिसके अनुसार β^- क्षय में इलेक्ट्रॉन के साथ एक अन्य कण भी उत्सर्जित होता है जिसे पॉउली ने न्यूट्रिनों नाम दिया। अब β^- क्षय में इलेक्ट्रॉन के साथ उत्सर्जित कण को एन्टिन्यूट्रिनों (antineutrino) कहते हैं तथा β^+ क्षय में पॉजिट्रॉन के साथ उत्सर्जित कण को न्यूट्रिनों कहते हैं।

$${}_0n^1 \longrightarrow {}_1p^1 + \beta^- ({}_{-1}e^0) + \bar{\nu}$$

$${}_1p^1 \longrightarrow {}_0n^1 + \beta^+ ({}_{+1}e^0) + \nu$$

(पॉजिट्रॉन की खोज सन् 1932 में एन्डरसन ने की थी)

न्यूट्रिनों तथा एन्टिन्यूट्रिनों दोनों के विराम द्रव्यमान शून्य होते हैं तथा कोणीय संवेग $\frac{1}{2}\left(\frac{h}{2\pi}\right)$ होता है। न्यूट्रिनों तथा एन्टिन्यूट्रिनों पर आवेश शून्य होता है। दोनों में अन्तर यह है कि न्यूट्रिनों के चक्रण की दिशा उसके संवेग की दिशा के विपरीत होती है जबकि एन्टिन्यूट्रिनों के चक्रण की दिशा उसके संवेग की दिशा के समान्तर होती है।

न्यूट्रिनों परिकल्पना द्वारा β-क्षय में ऊर्जा संरक्षण तथा कोणीय संवेग संरक्षण की पालना होती है।

γ-किरणें विद्युत चुम्बकीय तरंगें होती हैं। इनका विराम द्रव्यमान तथा आवेश शून्य होता है। एक नाभिक के लिए भी परमाणु की भांति ऊर्जा स्तर परिभाषित किए जाते हैं। उच्च ऊर्जा स्तर से कोई नाभिक जब निम्न ऊर्जा स्तर पर संक्रमण करता है तब ऊर्जा स्तरों की ऊर्जाओं का अन्तर एक γ-किरण फोटॉन के रूप में उत्सर्जित हो जाता है। γ-किरणों की आवृत्ति बहुत अधिक होती है। γ-क्षय से प्राप्त किरणों की ऊर्जा का स्पैक्ट्रम विविक्त (discrete) होता है। जिससे यह निष्कर्ष निकलता है कि नाभिक में उसी प्रकार के ऊर्जा स्तर पाये जाते हैं जैसे कि नाभिक के बाहर परमाणु में उपस्थित होते हैं।

जब γ-किरणें किसी पदार्थ पर आपतित होती है तब वे पदार्थ द्वारा अवशोषित होती है। माना कि x मोटाई की एक पट्टिका पर I_0 तीव्रता की γ-किरणें आपतित हो रही है तब पट्टिका के पार γ-किरणों की तीव्रता होगी–

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

यहाँ μ अवशोषण गुणांक (absorption coefficient) कहलाता है।

जब γ-किरणों की तीव्रता आधी रह जाये तब पट्टिका की मोटाई, अर्ध मोटाई (half thickness) कहलाती है। इसका मान निम्न होता है–

$$x_{1/2} = \frac{0.693}{\mu}$$

एक नाभिक में, परमाणु के समान विभिन्न ऊर्जा स्तर होते हैं–उच्चतर ऊर्जा स्तर तथा निम्नतर ऊर्जा स्तर। परमाणु में ऊर्जा स्तरों की ऊर्जा eV तथा KeV की कोटि की होती है जबकि नाभिकीय ऊर्जा स्तरों की ऊर्जा MeV की कोटि की होती है। जब कोई नाभिक उच्चतर ऊर्जा स्तर से निम्नतर ऊर्जा स्तर में संक्रमित होता है,तब ऊर्जा स्तरों की ऊर्जाओं का अन्तर, एक γ-किरण फोटॉन के रूप में उत्सर्जित हो जाता है। यही गामा क्षय कहलाता है। यह ऊर्जा कठोर X- किरणों के परिसर से कम तरंगदैर्ध्य अर्थात् उच्च ऊर्जा वाले विकिरणों से सम्बन्धित होती है। γ-किरण उत्सर्जन होने से नाभिक के परमाणु क्रमांक Z तथा द्रव्यमान संख्या A में कोई परिवर्तन नहीं होता है। वास्तव में, रेडियोएक्टिव विघटन में α-कण या β-कण उत्सर्जन होने पर प्राप्त नाभिक उत्तेजित अवस्था में होता है, अत: यह नाभिक α-कण या β-कण के साथ–साथ γ-किरण उत्सर्जित करके उत्तेजित अवस्था से मूल अवस्था में वापस आ जाता है।

$${}_Z X^{A^*} \rightarrow {}_Z X^A + \gamma \quad (h\upsilon \text{ ऊर्जा का फोटॉन})$$

यहाँ पर तारक (*) यह प्रदर्शित करता है कि नाभिक उत्तेजित अवस्था में है।

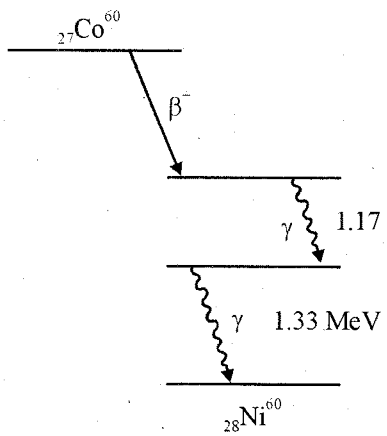
उदाहरण–

$${}_{88}Ra^{226} \rightarrow {}_{86}Rn^{222*} + {}_2He^4$$

तथा $_{86}Rn^{222*} \rightarrow _{86}Rn^{222} + \gamma$ – किरण

एक अन्य उदाहरण में $_{27}Co^{60}$ के नाभिक से β^- क्षय द्वारा $_{28}Ni^{60}$ नाभिक की प्राप्ति में 1.17 MeV तथा 1.33 MeV ऊर्जाओं की गामा किरणों का क्रमवार उत्सर्जन होता है। इसी प्रकार $_{12}Mg^{27}$ के नाभिक से भी β^- क्षय द्वारा $_{13}Al^{27}$ नाभिक की प्राप्ति में 1.015 MeV तथा 0.834 MeV ऊर्जाओं की गामा किरणों का क्रमवार उत्सर्जन होता है।

निम्न चित्र में $_{27}Co^{60}$ के नाभिक से β^- क्षय द्वारा γ-किरणों के उत्सर्जन को दर्शाने वाला ऊर्जा स्तर आरेख प्रदर्शित किया गया है–



चित्र:15.10

जब γ-किरणें किसी द्रव्य से अन्योन्य क्रिया करती है तब विभिन्न अवस्थाओं में निम्न तीन मुख्य प्रभाव उत्पन्न होते हैं–

(i) प्रकाश विद्युत प्रभाव (Photoelectric effect) – जब कोई ऊर्जित γ-किरण फोटॉन परमाणु के इलेक्ट्रॉन से टकराता है तब उसे अपनी सम्पूर्ण ऊर्जा स्थानान्तरित कर देता है। जिससे इलेक्ट्रॉन, परमाणु से निष्कासित हो जाता है। इस निष्कासित इलेक्ट्रॉन की ऊर्जा, γ-किरण ऊर्जा तथा परमाणुओं में इलेक्ट्रॉन की बंधन ऊर्जा के अन्तर के बराबर होती है।

(ii) कॉम्पटन प्रभाव (Compton effect) – जब γ-किरण फोटॉन किसी शिथिलतः बद्ध इलेक्ट्रॉन से टकराता है तब यह अपनी ऊर्जा का कुछ भाग इस इलेक्ट्रॉन को दे देता है जिससे इलेक्ट्रॉन तथा फोटॉन किसी कोण पर प्रकीर्णित हो जाते हैं। यह घटना कॉम्पटन प्रभाव कहलाती है। इस प्रक्रिया में प्रकीर्णित फोटॉन की ऊर्जा आपतित फोटॉन की ऊर्जा से कम होती है।

(iii) युग्म उत्पादन (Pair production) – जब कोई ऊर्जित γ-किरण फोटॉन किसी भारी पदार्थ पर आपतित होता है तब वह पदार्थ के किसी नाभिक द्वारा अवशोषित कर लिया जाता है तथा उसकी ऊर्जा से एक इलेक्ट्रॉन व एक पॉजिट्रॉन की उत्पत्ति होती है। इस प्रक्रिया को युग्म उत्पादन कहते हैं तथा इसे निम्न समीकरण द्वारा प्रदर्शित कर सकते हैं–

$$h\nu \longrightarrow {}_{-1}e^0 + {}_{+1}e^0$$

(γ-फोटॉन) (इलेक्ट्रॉन) (पॉजिट्रॉन)

युग्म उत्पादन के लिए यह आवश्यक है कि γ-फोटॉन की ऊर्जा कम से कम 1.02 MeV होनी चाहिए। यदि γ-फोटॉन की ऊर्जा इससे कम है तब यह पदार्थ पर आपतित होने पर प्रकाश विद्युत प्रभाव अथवा कॉम्पटन प्रभाव प्रेक्षित होता है।

प्राकृतिक तथा कृत्रिम रेडियोएक्टिवता (Natural and Artificial Radioactivity)

प्राकृतिक रेडियो एक्टिवता

प्रकृति में कुछ पदार्थ ऐसे होते हैं जिनमे नाभिक धीरे-धीरे विघटित होते रहते हैं। इसे प्राकृतिक रेडियो एक्टिवता कहते हैं। सामान्यतया Z = 82 से अधिक परमाणु संख्या वाले नाभिकों में रेडियोएक्टिवता का गुण पाया जाता हैं। रेडियोऐक्टिव पदार्थ के नाभिक सक्रिय होते हैं। परन्तु सभी नाभिकों का विघटन एक साथ नहीं होता है। रेडियोएक्टिवता के कारण नाभिक में से α-कण, β-कण या γ-विकिरण उत्सर्जित होते हैं। उदाहरणार्थ, यूरेनियम विघटित होकर थोरियम बनाता है तथा α-कण उत्सर्जित होते हैं–

$$_{92}U^{238} \longrightarrow {}_{90}Th^{234} + {}_2He^4 (\alpha\text{-कण}) \quad .....(3)$$

इसी तरह थोरियम से β-कण उत्सर्जित होता है एवं प्रोटेक्टिनियम बनता है

$$_{90}Th^{234} \longrightarrow {}_{91}Pa^{234} + {}_{-1}e^0 (\beta\text{-कण}) + \bar{\nu} \quad .....(4)$$

विघटन की यह प्रक्रिया उस समय तक चलती है, जब तक कि कोई स्थायी तत्व प्राप्त नहीं हो जाता है। उदाहरण के लिये यूरेनियम का परमाणु क्षय होते होते अन्त में सीसे ($_{82}Pb^{206}$) के परमाणु में बदल जाता है। यही सबसे भारी स्थायी तत्व हे। सभी रेडियो एक्टिव तत्व α, β कणों व 'γ' किरणें उत्सर्जित कर अन्ततः सीसे में ही बदलते हैं।

रेडियो एक्टिव क्षय वास्तव में एक ऐसी नाभिकी प्रक्रिया है जिसमें नाभिक का स्वतः विघटन होता है। इस प्रक्रिया की गति को किसी भौतिक अथवा रासायनिक विधि से परिवर्तित नहीं किया जा सकता है। इस विघटन की क्रिया में यह निश्चित नहीं होता है कि कौनसा नाभिक पहले विघटित होगा। परन्तु एक निश्चित समय में विघटन होने वाले नाभिकों की संख्या नियत रहती है।

कृत्रिम या प्रेरित रेडियोएक्टिवता (Aritificial or Induced Radioactivity)

एल्युमिनियम पर जब α-कणों की बौछार की जाती है तो न्यूट्रॉन कणों के साथ-साथ पॉजीट्रॉन कण भी निकलते हुए पाये जाते है (पॉजीट्रॉन कण इलेक्ट्रॉन जैसे हैं, किन्तु धन आवेश वाले कण होते हैं,) परन्तु α स्रोत हटा लेने के बाद न्यूट्रॉन कणों का निकलना तो बन्द हो जाता है लेकिन पॉजीट्रॉन का उत्सर्जन होता रहता है। यह उत्सर्जन समय बीतने के साथ घटता जाता है। अर्थात् α कणों के संघात के कारण कोई ऐसा नाभिक बनता है जो रेडियोएक्टिव होता है एवं जिससे पॉजीट्रॉन का उत्सर्जन होता है। इस प्रकार स्थायी नाभिक में रेडियोएक्टिवता प्रेरित की जा सकती है। उपर्युक्त नाभिकीय प्रक्रिया को निम्नलिखित समीकरण द्वारा दर्शाया जा सकता है–

$$_{13}Al^{27} + {}_2He^4 (\alpha\text{-कण}) \rightarrow {}_{15}P^{30} + {}_0n^1 \quad .....(5)$$

प्रकृति में पाया जाने वाला फॉस्फोरस स्थायी होता है परन्तु फॉस्फोरस का समस्थानिक $_{15}P^{30}$ रेडियोएक्टिव होता है, जो स्वतः विघटित होकर पॉजीट्रॉन उत्सर्जित कर सिलिकन में परिवर्तित हो जाता है।

$$_{15}P^{30} \longrightarrow {}_{14}Si^{30} + {}_{+1}e^0 + \nu \quad .....(6)$$

(इस अभिक्रिया द्वारा पॉजीट्रॉन की खोज हुई)

इसी प्रकार सोडियम पर त्वरित न्यूट्रॉन की बौछार से रेडियोएक्टिव सोडियम बनता है जो β-कण उत्सर्जित करते हुए मैग्नीशियम में बदल जाता है।

$$_{11}Na^{23} + {}_0n^1 \longrightarrow {}_{11}Na^{24} \quad .....(7)$$

$$_{11}Na^{24} \longrightarrow {}_{12}Mg^{24} + {}_{-1}e^0 + \nu \quad .....(8)$$

इस प्रकार स्थायी नाभिक में रेडियो एक्टिवता प्रेरित करने की प्रक्रिया को कृत्रिम रेडियो एक्टिवता कहते हैं। कृत्रिम रेडियोएक्टिवता, नाभिकीय अभिक्रिया के बाद प्राप्त उत्पाद नाभिक में पायी जाती है।

प्राकृतिक तथा कृत्रिम उत्तरोत्तर रूपान्तरणों (Successive transformations) की चार मुख्य श्रेणियाँ निम्न प्रकार हैं–

श्रेणी	मूल तत्व	अंत्य तत्व
(i) यूरेनियम श्रेणी	$_{92}U^{238}$	$_{82}Pb^{206}$
(ii) ऐक्टिनियम श्रेणी	$_{92}U^{235}$	$_{82}Pb^{207}$
(iii) थोरियम श्रेणी	$_{90}Th^{232}$	$_{82}Pb^{208}$
(iv) नेप्च्यूनियम श्रेणी	$_{94}Pu^{241}$	$_{81}Tl^{206}$

यहाँ प्रथम तीन श्रेणियाँ प्राकृतिक रूप से प्राप्त होती हैं जबकि चतुर्थ श्रेणी कृत्रिम रूप से प्राप्त होती है।

महत्वपूर्ण तथ्य

नाभिकीय अभिक्रिया (Nuclear reaction)

जब किसी लक्ष्य नाभिक X पर कोई कण a प्रक्षेपित किया जाता है तब एक अस्थायी नाभिक C बनता है जिसे संलयज नाभिक (Compound nucleus) कहते है तथा यह अस्थायी नाभिक अन्य नाभिक Y में रूपान्तरित होता है तथा साथ में एक कण b इस अभिक्रिया से प्राप्त होता है। इस सम्पूर्ण अभिक्रिया को नाभिकीय अभिक्रिया (nuclear reactions) कहते है। नाभिकीय अभिक्रिया को निम्न प्रकार से लिखा जाता है–

$X_{(\text{पितृ नाभिक})} + a_{(\text{आपतित कण})} \rightarrow C_{(\text{नाभिक})} \rightarrow Y_{(\text{पुत्री नाभिक})} + b_{(\text{उत्पन्न कण})} + Q_{(\text{ऊर्जा})}$

यहाँ X एवं a क्रियाकारक तथा Y एवं b उत्पाद कहलाते है।

उपरोक्त अभिक्रिया को सांकेतिक रूप में निम्न प्रकार लिखा जाता है– X (a,b) Y

अर्थात् लक्ष्य नाभिक (आपतित कण, उत्सर्जित कण) रूपान्तरित नाभिक

उदाहरण–

$$_7N^{14} + {}_2He^4 \rightarrow {}_9F^{18*} \rightarrow {}_8O^{17} + {}_1H^1$$

सांकेतिक रूप में $\quad {}_7N^{14}\ (\alpha,p)\ {}_8O^{17}$

नाभिकीय अभिक्रियाओं में कुछ संरक्षण नियमों का पालन होता है। ये संरक्षण नियम निम्न प्रकार है–

(1) आवेश का संरक्षण (Conservation of charge)–नाभिकीय अभिक्रिया से पहले तथा उसके बाद में नाभिकों के कुल परमाणु क्रमांक का मान समान रहता है।

(2) न्यूक्लिऑनों का संरक्षण (Conservation of nucleons)–नाभिकीय अभिक्रिया से पहले तथा उसके बाद में कुल द्रव्यमान संख्या समान रहती है।

(3) रेखीय संवेग का संरक्षण (Conservation of linear momentum)–अन्योन्य क्रिया में प्रयुक्त कणों के कुल रेखीय संवेग का मान उत्पाद कणों के कुल रेखीय संवेग के मान के समान होता है।

(4) कोणीय संवेग का संरक्षण (Conservation of angular momentum)–अन्योन्य क्रिया में प्रयुक्त कणों के कुल कोणीय संवेग का मान उत्पाद कणों के कुल कोणीय संवेग के मान के समान होता है।

(5) द्रव्यमान ऊर्जा का संरक्षण (Conservation of mass energy)–किसी भी नाभिकीय अभिक्रिया में ऊर्जा संरक्षित रहती है। नाभिकीय अभिक्रियामें कुछ द्रव्यमान में क्षति होती है जो द्रव्यमान ऊर्जा सम्बन्ध $E = mc^2$ के अनुसार ऊर्जा के रूप में परिवर्तित होती है।

उदाहरण 25. हमें निम्नलिखित परमाणु द्रव्यमान दिए गए हैं :

$^{238}_{92}U = 238.05079$ u $\qquad ^4_2He = 4.00260$ u

$^{234}_{90}Th = 234.04363$ $\qquad ^1_1H = 1.00783$ u

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

यहाँ प्रतीक *Pa* तत्व प्रोटऐक्टिनियम (Z = 91) तत्व के लिए है।

(a) $^{238}_{92}U$ के α–क्षय में उत्सर्जित ऊर्जा परिकलित कीजिए।

(b) दर्शाइए कि $^{238}_{92}U$ स्वतः प्रोटॉन उत्सर्जन नहीं कर सकता।

हल : दिया है : परमाणु द्रव्यमान

$^{238}_{92}U = 238.05079$ amu, $^4_2He = 4.00260$ amu

$^{234}_{90}Th = 234.04363$ amu, $^1_1H = 1.00783$ amu

तथा $^{237}_{91}Pa = 237.05121$ amu

(a) $^{238}_{92}U$ से α–क्षय निम्न समीकरण के अनुसार होता है

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^4_2He$$

अतः द्रव्यमान क्षति $\Delta M = [M_U - (M_{Th} + M_{He})]$

$= [238.05079 - (234.04363 + 4.00260]$

$\Delta M = [238.05079 - 238.04623]$

$= 0.00456$ amu

अतः उत्सर्जित ऊर्जा $Q = \Delta M \times 931.5$ MeV

$= 0.00456 \times 931.5$ MeV

या $Q = 4.25$ MeV

(b) माना $^{238}_{92}U$, स्वतः प्रोटॉन का उत्सर्जन करता है तब संभावित समीकरण निम्नानुसार होगी–

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{237}_{91}Pa + {}^1_1H$$

अतः द्रव्यमान क्षति $\Delta M = [M_U - (M_{Pa} + M_H)]$

$= [238.05079 - (237.05121 + 1.00783)]$

$\Delta M = [238.05079 - 238.05904]$

$= -0.00825$ amu

द्रव्यमान क्षति ऋणात्मक है अतः यह प्रक्रिया स्वतः संभव नहीं है। इस प्रक्रिया को सम्पन्न कराने के लिए $^{238}_{92}U$ नाभिक को $E = 0.00825 \times 931.5 = 7.68$ MeV ऊर्जा प्रदान करनी होगी।

उदाहरण 26. रेडियोएक्टिव नाभिक $^{228}_{90}Th$ के उत्तरोतर क्षय के उपरान्त अन्ततः $^{213}_{83}Bi$ में परिवर्तन के प्रक्रम में उत्सर्जित α व β कणों की संख्या ज्ञात कीजिए। **पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.12**

हल- दी गई नाभिकीय अभिक्रिया

$${}^{228}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{212}_{83}\text{Bi}$$

परमाणु क्रमांक में नेट कमी = 90 – 83 = 7

द्रव्यमान संख्या में नेट कमी = 228 – 212 = 16

∵ एक α– कण (${}^{4}_{2}$He नाभिक) के उत्सर्जन में परमाणु क्रमांक में 2 की कमी तथा द्रव्यमान संख्या में 4 की कमी होती है। अत: उत्सर्जित कुल α– कणों की संख्या 4 होनी चाहिए जिससे द्रव्यमान संख्या में नेट कमी 16 की होगी अब परमाणु क्रमांक में नेट कमी 7 होने के लिए 8 की कमी तो α– कण से ही हो रही है इसके लिए एक β-कण भी उत्सर्जित होना चाहिए।

इस प्रकार दी गई नाभिकीय अभिक्रिया में 4α कण तथा 1β^- कण उत्सर्जित होंगे।

उदाहरण 27.(a) ${}^{226}_{88}$Ra एवं (b) ${}^{220}_{86}$Rn नाभिकों के α-क्षय में उत्सर्जित α-कणों का Q-मान एवं गतिज ऊर्जा ज्ञात कीजिए। दिया है :

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

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

हल : (a) दिया है : $m_{(Ra)} = 226.02540$ amu

$m_{(Rn^{222})} = 222.01750$ amu

तथा $m_{(He^4)} = 4.002603$ amu

∵ ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ का α – क्षय निम्नानुसार व्यक्त किया जा सकता है–

$${}_{88}\text{Ra}^{226} \rightarrow {}_{86}\text{Rn}^{222} + {}_{2}\text{He}^{4} + Q$$

अत: Q = ΔM × 931.5 MeV

$= [m_{(Ra^{226})} - \{m_{(Rn^{222})} + m_{(He^4)}\}] \times 931.5\text{MeV}$

= [(226.02540) – (222.01750 + 4.002603)] × 931.5 MeV

Q = [226.02540 – 226.020103] × 931.5 = 0.005297 × 931.5

Q = 4.934 MeV

तथा α-कण की गतिज ऊर्जा

$$E_K = \frac{M_{Rn}}{M_{Rn} + M_\alpha} \times Q = \frac{222}{(222+4)} \times 4.934$$

$$E_K = \frac{222}{226} \times 4.934 = 4.846 \text{ MeV}$$

(b) दिया है : $m_{(Rn^{220})} = 220.01137$ amu

$m_{(po^{216})} = 216.00189$ amu

तथा $m_{(He^4)} = 4.002603$ amu

∵ ${}_{86}\text{Rn}^{220}$ का α–क्षय निम्नानुसार व्यक्त किया जा सकता है–

$${}_{86}\text{Rn}^{220} \rightarrow {}_{84}\text{Po}^{216} + {}_{2}\text{He}^{4} + Q$$

अत: Q = ΔM × 931.5 MeV

$Q = [m_{(Rn^{220})} - (M_{(Po^{216})} + m_{(He^4)})] \times 931.5$ MeV

Q = [(220.01137) – (216.00189 + 4.002603)] × 931.5

Q = [220.01137 – 220.004493] × 931.5 = 0.006877 × 931.5

Q = 6.406 MeV

तथा α - कण की गतिज ऊर्जा

$$E_K = \frac{M_{Po}}{M_{Po} + M_\alpha} \times Q = \frac{216}{(216+4)} \times 6.406 = 6.29 \text{ MeV}$$

उदाहरण 28. ${}^{238}_{97}$U नाभिक, 4.5×10^9 वर्ष की अर्द्ध आयु के साथ α क्षय करता है। क्षय की समीकरण लिखिए तथा निम्नलिखित आंकड़ो की सहायता से उत्सर्जित α कणों की गतिज ऊर्जा का अनुमान लगाइए। **पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.13**

$$M({}^{238}_{92}\text{U}) = 238.0507\text{u}$$

$$M({}^{4}_{2}\text{He}) = 4.0026\text{u}$$

$$M({}^{234}_{90}\text{Th}) = 234.0435\text{u}$$

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

हल: ${}^{238}_{92}$U का α– क्षय निम्नानुसार व्यक्त किया जा सकता है–

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

इस अभिक्रिया के लिए विखंडन ऊर्जा इस प्रकार से है

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

विभिन्न राशियों के मान रखने पर

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

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

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

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

∴ $$p_\alpha = p_{Th}$$

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

जहाँ A मूल नाभिक की द्रव्यमान संख्या है।

या $$K_{Th} = \frac{4}{A-4}K_\alpha$$

∵ $$K_\alpha + K_{Th} = Q$$

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

या $$K_\alpha = \frac{A-4}{A}Q$$

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

उदाहरण 29. रेडियोन्यूक्लाइड ^{11}C का क्षय निम्नलिखित समीकरण के अनुसार होता है–

$^{11}_{6}C \rightarrow ^{11}_{5}B + e^{+} + \nu :\ T_{1/2} = 20.3$ min

उत्सर्जित पॉजिट्रॉन की अधिकतम ऊर्जा 0.960 MeV है। द्रव्यमानों के निम्नलिखित मान दिए गए हैं

$m(^{11}_{6}C) = 11.011434$ u **तथा** $m(^{11}_{5}B) = 11.009305$ u

Q–मान की गणना कीजिए एवं उत्सर्जित पॉजिट्रॉन की अधिकतम ऊर्जा के मान से इसकी तुलना कीजिए।

हल : दिया है : क्षय समीकरण $_6C^{11} \rightarrow _5B^{11} + _{+1}e^0 + \nu$

(अर्द्ध आयु $T_{1/2}$ = 20.3 मिनट)

पॉजीट्रॉन की अधिकतम गतिज ऊर्जा $(E_K)_{max}$ = 0.960 MeV

तथा $m_{(C^{11})}$ = 11.011434 amu, $m_{(B^{11})}$ = 11.009305 amu

यहाँ दिए गए द्रव्यमान परमाण्वीय है, अत: इनके नाभिकीय द्रव्यमान प्रयुक्त करने के लिए इनके इलेक्ट्रॉनों का द्रव्यमान घटाना होगा अत:

$Q = \Delta M \times 931.5$ MeV

$Q = [(m_{C^{11}} - 6m_e) - \{(m_{B^{11}} - 5m_e) + m_e\}] \times 931.5$ MeV

$Q = [m_{C^{11}} - m_{B^{11}} - 2m_e] \times 931.5$ MeV

$Q = [11.011434 - 11.009305 - 2 \times 0.000548] \times 931.5$ MeV

$Q = [11.011434 - 11.010401] \times 931.5 = 0.001033 \times 931.5$ MeV

$Q = 0.962$ MeV

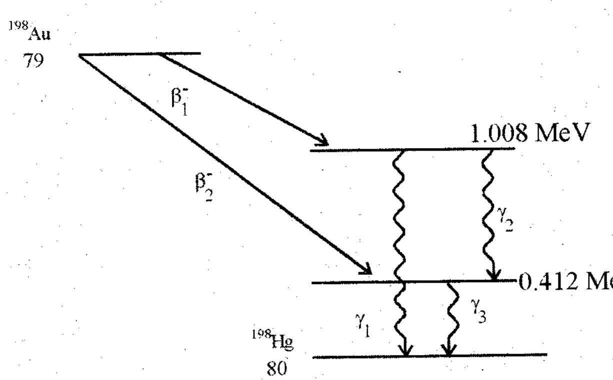
यह ऊर्जा प्रत्येक उत्पाद की गतिज ऊर्जा के रूप में होगी अर्थात्

$Q = E_{K_B} + E_{K_{e^+}} + E_{K_\nu}$

परंतु $_5B^{11}$, पॉजीट्रॉन की तुलना में अत्यधिक भारी है अत: पॉजीट्रॉन की तुलना में B की गतिज ऊर्जा नगण्य अर्थात् $E_{K_B} \simeq 0$ होगी। यदि न्यूट्रिनों की गतिज ऊर्जा न्यूनतम अर्थात् शून्य हो तो पॉजीट्रॉन की ऊर्जा अधिकतम होगी जो कि Q के समान ही होगी।

अर्थात् $\left(E_{K_{e^+}}\right)_{max} = Q = 0.962$ MeV

उदाहरण 30. सलंग्न चित्र में प्रदर्शित क्षय योजना में β कणों की अधिकतम गतिज ऊर्जा तथा γ क्षय में विकिरण आवृत्तियाँ ज्ञात कीजिए। दिया है



चित्र 15.11

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

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

$1u = 931\,\text{MeV}/c^2$ मानें

पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.14

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

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

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

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

प्रश्नानुसार β_1^- से प्रदर्शित β कणों के उत्सर्जन में पुत्री नाभिक अपनी द्वितीय उत्तेजित अवस्था में बन रहा है जो मूल ऊर्जा स्तर से 1.008 MeV उच्च है अत: ऐसे β कणों को उपलब्ध अधिकतम गतिज ऊर्जा होगी

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

इसी प्रकार β_2^- से प्रदर्शित β कणों के लिए पुत्री नाभिक प्रथम उत्तेजित अवस्था में बन रहा है जो कि मूल अवस्था से 0.412 MeV उच्च है अत: ऐसे कणों को उपलब्ध अधिकतम गतिज ऊर्जा होगी

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

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

आवृत्ति $\upsilon(\gamma_1) = \frac{1.008 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}\,J}{6.63 \times 10^{-34}\,J \cdot s} = 2.62 \times 10^{20}$ Hz

आवृत्ति $\upsilon(\gamma_2) = \frac{(1.008 - 0.412) \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 1.63 \times 10^{20}$ Hz

आवृत्ति $\upsilon(\gamma_3) = \frac{0.412 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 0.99 \times 10^{20}$ Hz

उदाहरण 31. $^{23}_{10}Ne$ का नाभिक, β^- उत्सर्जन के साथ क्षयित होता है। इस β-क्षय के लिए समीकरण लिखिए और उत्सर्जित इलेक्ट्रॉनों की अधिकतम गतिज ऊर्जा ज्ञात कीजिए।

$m(^{23}_{10}Ne) = 22.094466$ u .

; $m(^{23}_{11}Na) = 22.089770$ u,

हल : दिया है :

$m_{(Ne^{23})} = 22.094466$ amu

$m_{Na^{23}} = 22.089770$ amu

β^- क्षय समीकरण

$_{10}Ne^{23} \rightarrow _{11}Na^{23} + _{-1}\beta^0 + \bar{\nu}$

दिए गए द्रव्यमान परमाण्वीय द्रव्यमान है, इनके नाभिकीय द्रव्यमान प्रयुक्त करने के लिए इनके इलेक्ट्रॉनों का द्रव्यमान घटाना होगा अत:

$Q = \Delta M \times 931.5$

$= [(m_{Ne^{23}} - 10m_e) - \{(m_{Na^{23}} - 11m_e) + m_e\}] \times 931.5$ MeV

$Q = [m_{Ne^{23}} - m_{Na^{23}}] \times 931.5$

$= (22.094466 - 22.089770) \times 931.5$ MeV

$Q = 0.004696 \times 931.5 = 4.37$ MeV

$\because$ $_{11}Na^{23}$, इलेक्ट्रॉन की तुलना में अत्यधिक भारी है तथा इलेक्ट्रॉन की अधिकतम गतिज ऊर्जा के लिए प्रति न्यूट्रिनों की ऊर्जा शून्य होगी अत: इलेक्ट्रॉन की अधिकतम गतिज ऊर्जा Q के समान अर्थात् 4.37 MeV होगी।

उदाहरण 32. β^+ **क्षय** $^{25}Al \rightarrow {}^{25}Mg + e^+ + \upsilon$ **के लिए Q मान ज्ञात कीजिए। दिया है** $M(^{25}Al) = 24.990u$

$$M(^{25}Mg) = 24.9858u$$

पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.15

हल: β^+ क्षय में Q मान के लिए

$$Q = [M(^{25}Al) - M(^{25}Mg) - 2m_e]c^2$$

जहाँ m_e इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान है

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

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

$$= [0.0046] \times 931MeV - 1.022MeV$$

$$= 4.2849 - 1.022 = 3.26MeV$$

उदाहरण 33.माना कि हम $^{56}_{26}Fe$ **नाभिक के दो समान अवयवों** $^{28}_{13}Al$ **में विखंडन पर विचार करें। क्या ऊर्जा की दृष्टि से यह विखंडन संभव है ? इस प्रक्रम का Q-मान ज्ञात करके अपना तर्क प्रस्तुत करें।**

दिया है : $m(^{56}_{26}Fe) = 55.93494$ u **एवं** $m(^{28}_{13}Al) = 27.98191$ u

हल : दिया है : $m_{(_{26}Fe^{56})} = 55.93494$ amu,

$m_{(_{13}Al^{28})} = 27.98191$ amu

तथा $_{26}Fe^{56}$ का $_{13}Al^{28}$ में विखण्डन निम्नानुसार व्यक्त किया जा सकता है—

$_{26}Fe^{56} \rightarrow _{13}Al^{28} + _{13}Al^{28}$

अत: $Q = [m_{(Fe^{56})} - 2m_{(Al^{28})}] \times 931.5$ MeV

$Q = [55.93494 - (2 \times 27.98191)] \times 931.5$ MeV

$Q = [55.93494 - 55.96382] \times 931.5$

$= -0.02888 \times 931.5$ MeV

$Q = -26.9$ MeV

स्पष्टत: $_{26}Fe^{56}$ के दो समान अवयव $_{13}Al^{28}$ में विखण्डन ने लिए बाह्य रूप से 26.9 MeV ऊर्जा देनी होगी। अत: $_{26}Fe^{56}$ का इस प्रकार विखण्डन संभव नहीं है।

15.9 नाभिकीय ऊर्जा (Nuclear energy)

नाभिकीय अभिक्रिया में प्रांरभिक स्थिर द्रव्यमान अन्तिम स्थिर द्रव्यमान के तुल्य नहीं होता है। स्थिर द्रव्यमान के मध्य यह अन्तर नाभिकीय अभिक्रिया की ऊर्जा के बराबर होता है। अभिक्रिया ऊर्जा Q को निम्न प्रकार परिभाषित किया जाता है–

$$Q = [m_x + m_a]c^2 - [m_y + m_b]c^2$$

यदि Q धनात्मक है तो अभिक्रिया को ऊष्माक्षेपी (exothermic) कहते है जबकि यदि Q ऋणात्मक है तो अभिक्रिया को ऊष्माशोषी कहते है।

उदाहरण– $_9F^{19}(p, \alpha)\,_8O^{16}$ के लिए Q = + 8.13 MeV

$_1H^1 + _1H^3 \rightarrow 2\,_1H^2$ के लिए Q = –4.03 MeV

कुछ महत्वपूर्ण सामान्य नाभिकीय अभिक्रियाऐं :

(i) (p, n) अभिक्रिया $\rightarrow _1H^1 + _5B^{11} \rightarrow _6C^{12} \rightarrow _6C^{11} + _0n^1$

(ii) (p, α) अभिक्रिया $\rightarrow _1H^1 + _3Li^7 \rightarrow _4Be^8 \rightarrow _2He^4 + _2He^4$

(iii) (p, γ) अभिक्रिया $\rightarrow _1H^1 + _6C^{12} \rightarrow _7N^{13} \rightarrow _7N^{13} + \gamma$

(iv) (n, p) अभिक्रिया $\rightarrow _0n^1 + _7N^{14} \rightarrow _7N^{15} \rightarrow _6C^{14} + _1H^1$

(v) (γ, n) अभिक्रिया $\rightarrow \gamma + _1H^2 \rightarrow _1H^1 + _0n^1$

नाभिकीय अभिक्रियायें मुख्यत: दो प्रकार की होती है–

(i) नाभिकीय विखण्डन (Nuclear fission)

(ii) नाभिकीय संलयन (Nuclear fusion)

उदाहरण 34. किसी नाभिकीय अभिक्रिया A + b → C + d का Q-मान निम्नलिखित समीकरण द्वारा परिभाषित होता है,

$Q = [m_A + m_b - m_c - m_d]c^2$

जहाँ दिए गए द्रव्यमान, नाभिकीय विराम द्रव्यमान (rest mass) हैं। दिए गए आँकड़ों के आधार पर बताइए कि निम्नलिखित अभिक्रियाएँ ऊष्माक्षेपी हैं या ऊष्माशोषी।

(i) $^1_1H + ^3_1H \rightarrow ^2_1H + ^2_1H$

(ii) $^{12}_6C + ^{12}_6C \rightarrow ^{20}_{10}Ne + ^4_2He$

15.28

दिए गए परमाणु द्रव्यमान इस प्रकार हैं :

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

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

$m({}_6^{12}C) = 12.000000$ u

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

हल : (i) दिया है : समीकरण ${}_1H^1 + {}_1H^3 \rightarrow {}_1H^2 + {}_1H^2$

के लिए $m_{({}_1H^2)} = 2.014102$ amu,

$m_{({}_1H^3)} = 3.016049$ amu

तथा $m_{({}_1H^1)} = 1.007825$ amu

अतः $Q = [m_{({}_1H^1)} + m_{({}_1H^3)} - 2m_{({}_1H^2)}]\, c^2$ जूल

$Q = [m_{({}_1H^1)} + m_{({}_1H^3)} - 2m_{({}_1H^2)}] \times 931.5$ MeV

$Q = [1.007825 + 3.016049 - 2 \times 2.014102] \times 931.5$

$= -0.00433 \times 931.5$ MeV

$Q = -4.033$ MeV

यहाँ Q ऋणात्मक है अतः यह अभिक्रिया ऊष्माशोषी है।

(ii) दिया है : समीकरण

${}_6C^{12} + {}_6C^{12} \rightarrow {}_{10}Ne^{20} + {}_2He^4$ के लिए

$m_{({}_6C^{12})} = 12.000000$ amu,

$m_{({}_{10}Ne^{20})} = 19.992439$ amu

तथा $m_{{}_2He^4} = 4.002603$ amu

अतः $Q = [2m_{({}_6C^{12})} - m_{({}_{10}Ne^{20})} - m_{({}_2He^4)}]\, c^2$ जूल

$= [(2 \times 12) - 19.992439 - 4.002603] \times 931.5$ MeV

$= 0.004958 \times 931.5$ MeV $= 4.62$ MeV

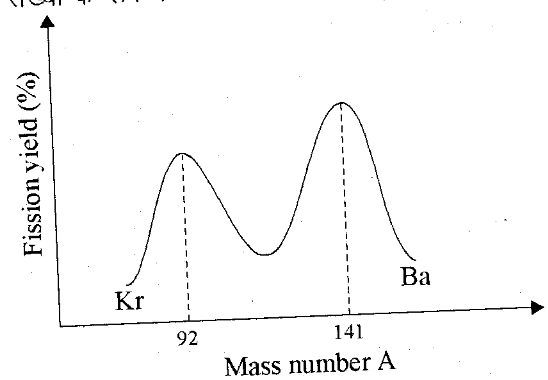
यहाँ Q, धनात्मक है, अतः यह अभिक्रिया ऊष्माक्षेपी है।

15.10 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 ओटो हॉन (Otto hahn) एवं स्ट्रांसमान (Strassmann) ने की। उन्होंने यूरेनियम (Z = 92) के नाभिक पर जब न्यूट्रॉनों की बमबारी की तो पाया कि यूरेनियम का नाभिक दो लगभग बराबर हल्के नाभिकों, बेरियम (Z = 56) एवं क्रिप्टन (Z = 36) में टूट जाता है और एक विखण्डन में 3 न्यूट्रॉनों के साथ अपार ऊर्जा मुक्त होती है। परमाणु भट्टी व परमाणु बम का आधार नाभिकीय विखण्डन ही है। नाभिकीय भट्टियों में नाभिकीय विखण्डन ऊर्जा से विद्युत उत्पादन होता है जबकि परमाणु बम में मुक्त होने वाली अपार ऊर्जा अनियंत्रित नाभिकीय विखण्डन से ही उत्पन्न 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 द्रव्यमान का योग प्रयुक्त नाभिक के द्रव्यमान से कुछ कम होता है अर्थात् इस प्रक्रिया में कुछ द्रव्यमान लुप्त हो जाता है जो आइन्सटीन के द्रव्यमान-ऊर्जा सम्बन्ध ($\Delta E = \Delta m.c^2$) के अनुसार ऊर्जा में बदल जाता है। इसी ऊर्जा को **नाभिकीय ऊर्जा** (nuclear energy) कहते हैं।

नाभिकीय विखण्डन में प्राप्त नाभिकों की द्रव्यमान संख्या ठीक बराबर नहीं होती है। यदि विभिन्न नाभिकों की आपेक्षिक उत्पादन को द्रव्यमान संख्या के रूप में व्यक्त करें तब चित्रानुसार वक्र प्राप्त होता है–



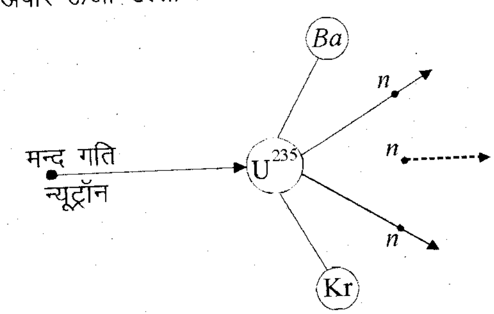
चित्र 15.12

उत्पादन की सर्वाधिक प्रायिकता द्रव्यमान संख्या A = 92 तथा A = 141 वाले खण्डों के लिए होती है। पूर्णतया समान द्रव्यमान संख्या के खण्डों के उत्पादन की प्रायिकता अल्प होती है।

प्राकृतिक यूरेनियम में दो आइसोटोप ${}_{92}U^{235}$ व ${}_{92}U^{238}$ पाये जाते हैं। इस प्राकृतिक यूरेनियम 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 भी सम्भव है। इस प्रकार स्पष्ट है कि यूरेनियम 235 ही विखण्डन के लिए अधिक उपयोगी है। परमाणु बम में यूरेनियम 235 प्रयोग किया जाता है।

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 यह आइसोटोप अस्थायी होता है अतः यह तुरन्त ही दो नाभिकों में टूट जाता है तथा तीन नये न्यूट्रॉन व अपार ऊर्जा उत्सर्जित करता है।



चित्र 15.13

प्रक्रिया निम्न समीकरण द्वारा व्यक्त की जा सकती है–

$_{92}U^{235} + {}_0n^1 \rightarrow ({}_{92}U^{236}) \rightarrow {}_{56}Ba^{141} + {}_{36}Kr^{92} + 3\,{}_0n^1 +$ ऊर्जा
(यूरेनियम) (न्यूट्रॉन) (बेरियम) (क्रिप्टन) (न्यूट्रॉन)

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।

विखण्डन में द्रव्यमान क्षति एवं उत्पन्न ऊर्जा

(i) विखण्डन से पूर्व द्रव्यमान

$_{92}U^{235}$ परमाणु का द्रव्यमान = 235.0439 amu
$_0n^1$ का द्रव्यमान = 1.0087 amu
∴ विखण्डन से पूर्व कुल द्रव्यमान = 236.0526 amu

(ii) विखण्डन के बाद द्रव्यमान

$_{56}Ba^{141}$ परमाणु का द्रव्यमान = 140.9139 amu
$_{36}Kr^{92}$ परमाणु का द्रव्यमान = 91.8973 amu
3 न्यूट्रॉनों का द्रव्यमान = 3.0261 amu
∴ विखण्डन के बाद कुल द्रव्यमान = 235.8373 amu
∴ द्रव्यमान में कमी = 0.2153 amu

यह द्रव्यमान में कमी ऊर्जा में परिवर्तित हो जाती है। चूँकि 1 amu, 931 MeV ऊर्जा के तुल्य होता है। अतः $_{92}U^{235}$ के एक परमाणु के विखण्डन से प्राप्त ऊर्जा

$$= 0.2153 \times 931$$
$$= 200 \text{ MeV (लगभग)}$$

इस प्रकार U^{235} के एक नाभिक के विखण्डन में लगभग 200 MeV ऊर्जा उत्पन्न होती है। इस ऊर्जा का अधिकांश भाग विखण्डन में प्राप्त खण्डों (fragments) की गतिज ऊर्जा के रूप में प्राप्त होता है तथा 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 में मुक्त ऊर्जा–

U^{235} के एक ग्राम-परमाणु (235 ग्राम) में परमाणुओं की संख्या 6×10^{23} (आवोगाद्रो संख्या) होती है। अतः

1 ग्राम यूरेनियम में परमाणुओं की संख्या = $\frac{6\times10^{23}}{235}$

चूँकि एक यूरेनियम परमाणु के विखण्डन में मुक्त ऊर्जा लगभग 200 MeV होती है।

अतः 1 ग्राम यूरेनियम के विखण्डन से मुक्त ऊर्जा

$$= \frac{6\times10^{23}}{235} \times 200\,\text{MeV}$$
$$\approx 5 \times 10^{23}\ \text{MeV}$$

इस प्रकार हम देखते हैं कि 1 ग्राम यूरेनियम का विखण्डन होने पर 5×10^{23} MeV ऊर्जा उत्पन्न होती है जो 20 टन T.NT. (Tri-nitro-toluene) में विस्फोट करने से उत्पन्न होती है। इस ऊर्जा से लगभग $2 \cdot 10^5$ किग्रा. पानी का ताप 0°C से 100°C तक बढ़ाया जा सकता है। इस ऊर्जा से 2×10^4 किलोवाट घण्टा विद्युत ऊर्जा उत्पन्न की जा सकती है।

महत्वपूर्ण तथ्य

$_{92}U^{235}$ विखण्डन की कुछ अन्य अभिक्रियाएँ इस प्रकार है–

$$_{92}U^{235} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{92}U^{236} \rightarrow {}_{56}Ba^{144} + {}_{36}Kr^{90} + 2\,{}_0n^1$$
$$\rightarrow {}_{54}Xe^{140} + {}_{38}Sr^{94} + 2\,{}_0n^1$$
$$\rightarrow {}_{56}Ba^{144} + {}_{36}Kr^{89} + 3\,{}_0n^1$$
$$\rightarrow {}_{57}La^{148} + {}_{35}Br^{85} + 3\,{}_0n^1$$
$$\rightarrow {}_{51}Sb^{133} + {}_{41}Nb^{99} + 4\,{}_0n^1$$
$$\rightarrow {}_{60}Nd^{130} + {}_{32}Ge^{81} + 5\,{}_0n^1$$
→ अन्य अभिक्रियाएँ

उदाहरण 35. $^{239}_{94}Pu$ के विखंडन गुण बहुत कुछ $^{235}_{92}U$ से मिलते-जुलते हैं। प्रति विखंडन विमुक्त औसत ऊर्जा 180 MeV है। यदि 1 kg शुद्ध $^{239}_{94}Pu$ के सभी परमाणु विखंडित हों तो कितनी MeV ऊर्जा विमुक्त होगी ?

हल : दिया है : $_{94}Pu^{239}$ के विखण्डन से प्रति विखण्डन उत्सर्जित ऊर्जा = 180 MeV

तथा 1 kg, $_{94}Pu^{239}$ में नाभिकों की संख्या

$$= \frac{6.023\times10^{23}}{239}\times10^3$$

अतः कुल विमुक्त ऊर्जा

$$Q = \frac{6.023\times10^{26}}{239}\times180$$
$$= 4.536 \times 10^{26}\ \text{MeV}$$

उदाहरण 36. नाभिकीय विखण्डन की प्रक्रिया में ^{235}U नाभिक एक न्यूट्रॉन का अवशोषण करता है जिसके परिणाम स्वरूप ^{236}U नाभिक निर्मित होता है। इस प्रक्रिया में ^{236}U नाभिक को प्राप्त आन्तरिक ऊर्जा की गणना कीजिए।

पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.16

दिया है: $M(^{235}U) = 235.0439\,u$

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

तथा $M(^1n) = 1.0086\,u$

$1u = 931\,MeV$ मानें

हल: दिए गए प्रक्रम के संगत नाभिकीय अभिक्रिया है

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

अभिक्रिया से पूर्व नाभिकों का द्रव्यमान

$$M_i = M(^{235}U) + M(^1n)$$
$$= 235.0439 + 1.0086 = 236.0525\,u$$

अभिक्रिया के पश्चात् का द्रव्यमान $M_f = 236.0455\,u$

$\because$ $M_i > M_f$ अतः द्रव्यमान क्षति हो रही है जिसका तात्पर्य यह है कि विराम द्रव्यमान ऊर्जा नाभिक में आन्तरिक ऊर्जा के रूप में परिवर्तित हो रही है जिसका मान

$$E = (263.0525 - 236.0455)\,931.5$$
$$= 6.52\ \text{MeV}$$

उदाहरण 37. विखण्डन अभिक्रिया

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

में मुक्त ऊर्जा का मान ज्ञात कीजिए।

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

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

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

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

पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.17

हल: दी गई अभिक्रिया के लिए Q का मान

$$Q = \left[M\left(^{235}_{92}U\right) + M\left(^{1}_{0}n\right) - M\left(^{140}_{54}Xe\right) - M\left(^{94}_{30}Sr\right) - 3M\left(^{1}_{0}n\right)\right] \times 931.5\ \text{MeV}$$

$$= [235.0439 + 1.00867 - 139.9054 - 93.9063 - 3(1.00867)] \times 931.5\ \text{MeV}$$

$$= (0.22353) \times 931.5 \approx 208\ \text{MeV}$$

उदाहरण 38. किसी 1000 MW विखंडन रिएक्टर के आधे ईंधन का 5.00 वर्ष में व्यय हो जाता है। प्रारंभ में इसमें कितना $^{235}_{92}U$ था? मान लीजिए कि रिएक्टर 80% समय कार्यरत रहता है, इसकी संपूर्ण ऊर्जा $^{235}_{92}U$ के विखंडन से ही उत्पन्न हुई है; तथा $^{235}_{92}U$ न्यूक्लाइड केवल विखंडन प्रक्रिया में ही व्यय होता है।

हल : **दिया है :** रिएक्टर की शक्ति P = 1000 मेगावॉट = 1000×10^6 वॉट तथा रिएक्टर, 80% समय कार्यरत रहता है।

अतः 5 वर्ष में रिएक्टर द्वारा उत्पन्न कुल ऊर्जा

$$Q = Pt = 1000 \times 10^6 \times 5 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 \times \frac{80}{100}$$

$$Q = 1.26 \times 10^{17}\ \text{जूल} \qquad \ldots(1)$$

$\because$ U^{235} के प्रति विखण्डन से उत्पन्न ऊर्जा

$$= 200\ \text{MeV} = 200 \times 1.6 \times 10^{-13}\ \text{जूल}$$

तथा m ग्राम U से उत्पन्न उर्जा

$$= \frac{6.023 \times 10^{23}}{235} \times m \times 200 \times 1.6 \times 10^{-13} \ldots(2)$$

प्रश्नानुसार, रिएक्टर से उत्पन्न ऊर्जा, केवल U^{235} के विखण्डन से है अतः

$$\frac{6.023 \times 200 \times 1.6 \times 10^{10}}{235} m = 1.26 \times 10^{17}$$

अतः U^{235} की विखण्डित मात्रा

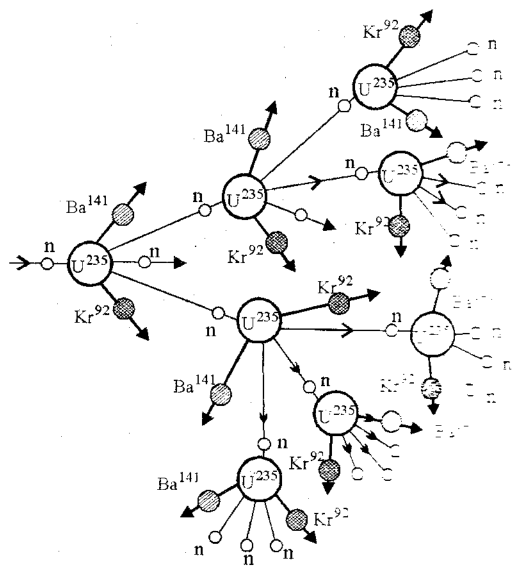
$$m = \frac{1.26 \times 10^{17} \times 235}{6.023 \times 200 \times 1.6 \times 10^{10}} = 1.54 \times 10^6\ \text{ग्राम}$$

$$m = 1540\ \text{किग्रा.}$$

अतः U^{235} की प्रारंभिक मात्रा = 2 × 1540 = 3080 किग्रा.

15.11 नियंत्रित तथा अनियंत्रित शृंखला अभिक्रिया (Controlled and Uncontrolled chain reaction)

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



चित्र 15.14

अनुकूल परिस्थितियों में नये न्यूट्रॉन अन्य तीन यूरेनियम नाभिकों को भी इसी प्रकार विखण्डित करते हैं। यूरेनियम के इन तीन नाभिकों के विखण्डन से 9 नये न्यूट्रॉन तथा अत्यधिक ऊर्जा उत्सर्जित होती है। अनुकूल परिस्थितियों में ये नये न्यूट्रॉन अन्य यूरेनियम नाभिकों को विखण्डित करते हैं। इस प्रकार नाभिकों के विखण्डन की एक शृंखला (chian) बन जाती है (चित्र) जो एक बार प्रारम्भ होने पर स्वतः ही तेजी से जारी रहती है जब तक कि समस्त यूरेनियम के नाभिक विखण्डित नहीं हो जाते। इस प्रक्रिया को नाभिकीय शृंखला अभिक्रिया कहते हैं। इस प्रकार नाभिकीय विखण्डन से उत्पन्न हुई ऊर्जा उत्तरोत्तर बढ़ती जाती है चूँकि यूरेनियम के एक नाभिक के विखण्डन से लगभग 200 MeV ऊर्जा उत्पन्न होती है और शृंखला अभिक्रिया के कारण विखण्डित होने वाले नाभिकों

की संख्या तेजी से बढ़ती है, अतः शृंखला अभिक्रिया के फलस्वरूप उत्पन्न ऊर्जा बहुत कम समय में एक भयानक रूप धारण कर लेती है।

शृंखला अभिक्रिया को कई कारक बन्द कर देते हैं। उनमें निम्नलिखित प्रमुख हैं–

(1) तंत्र से न्यूट्रॉन का निकल जाना।

(2) तंत्र में उपस्थित अविखण्डीय पदार्थ द्वारा न्यूट्रॉनों का शोषण।

(3) U^{238} द्वारा न्यूट्रॉनों का शोषण।

नाभिकीय विखण्डन में यह आवश्यक नहीं है कि अभिक्रिया से प्राप्त सभी न्यूट्रॉन शृंखला अभिक्रिया को निरन्तर आगे बढ़ायें। विखण्डन में प्राप्त न्यूट्रॉनों में से कुछ न्यूट्रॉन, अविखण्डीय पदार्थ द्वारा अवशोषित हो जाते हैं तथा कुछ विखण्डनीय पदार्थ के नाभिक से संघट्ट के पूर्व ही तन्त्र की ज्यामिति से बाहर निकल जाते हैं।

अतः शृंखला अभिक्रिया को बनाये रखने के लिये आवश्यक शर्त है कि विखण्डन से प्राप्त प्रत्येक नाभिक के न्यूट्रॉनों में से औसत कम से कम एक न्यूट्रॉन ऐसा हो जो नई नाभिक को तोड़ने में भाग ले। इस शर्त को तंत्र के **न्यूट्रॉन गुणन गुणांक या पुनरूत्पादन गुणांक (Neutron Multiplication Factor or Reproduction Factor) K** से परिभाषित करते हैं।

किसी स्तर पर निकले न्यूट्रॉनों के द्वारा विखण्डनों की संख्या तथा उसके पिछले स्तर पर निकले न्यूट्रॉनों के द्वारा विखण्डनों की संख्या का अनुपात गुणन कारक या न्यूट्रॉन गुणन गुणांक (K) कहलाता है।

$$K = \frac{\text{विखण्डन की पीढ़ी के प्रारम्भ में न्यूट्रॉनों की संख्या}}{\text{इस पीढ़ी से एक कम पीढ़ी के प्रारम्भ में उपस्थित न्यूट्रॉनों की संख्या}}$$

यदि $K > 1$ हो तब प्रत्येक पीढ़ी के प्रारंभ में न्यूट्रॉनों की संख्या इसके पूर्ववर्ती पीढ़ी से अधिक होगी। इसका अर्थ यह है कि पीढ़ी दर पीढ़ी विखण्डनो की संख्या बढ़ती जायेगी और ऊर्जा का उत्पादन भी बढ़ता जायेगा।

यदि $K < 1$ हो तब प्रत्येक पीढ़ी के प्रारंभ में न्यूट्रॉनों की संख्या इसक पूर्ववर्ती पीढ़ी से कम होगी। इसका अर्थ यह है कि पीढ़ी दर पीढ़ी विखण्डनों की संख्या घटती जायेगी और ऊर्जा का उत्पादन भी घटता जायेगा।

यदि $K = 1$ हो तब प्रत्येक पीढ़ी के प्रारंभ में न्यूट्रॉनों की संख्या उसके पूर्ववर्ती पीढ़ी के बराबर होगी। इसका अर्थ है कि पीढ़ी दर पीढ़ी विखण्डनों की संख्या नियत बनी रहेगी और ऊर्जा का उत्पादन नियत दर से होता रहेगा।

शृंखला अभिक्रिया में पलायन होने वाले न्यूट्रॉनों की संख्या तंत्र के सतह के क्षेत्रफल पर निर्भर करती है तथा विघटन से प्राप्त न्यूट्रॉन यूरेनियम के आयतन पर निर्भर करते हैं अर्थात् पृष्ठ से न्यूट्रॉनों के क्षरण की दर पृष्ठ के क्षेत्रफल पर निर्भर करती है जबकि न्यूट्रॉनों की उत्पत्ति दर यूरेनियम पिण्ड में उपस्थित नाभिकों की संख्या अर्थात् पिण्ड के आयतन पर निर्भर करती है।

यदि r त्रिज्या के एक गोलाकार पिण्ड की कल्पना करें तब उत्पत्ति दर r^3 के तथा क्षरण की दर r^2 के समानुपाती होगी। इस प्रकार क्षरण दर का उत्पत्ति दर के सापेक्ष अनुपात (1/r) के समानुपाती होगा।

पिण्ड का आकार छोटा होने पर क्षरण दर का मान उत्पत्ति दर से अधिक होने के कारण शृंखला अभिक्रिया की संभावना कम होगी। पिण्ड का आकार बड़ा होने पर क्षरण दर का मान, उत्पत्ति दर से कम होगा तथा शृंखला अभिक्रिया की संभावना अधिक होगी।

अतः शृंखला अभिक्रिया को बनाये रखने के लिये विखण्डनीय पदार्थ के आवश्यक न्यूनतम द्रव्यमान को क्रांतिक द्रव्यमान (critical mass) कहते हैं। जब $K = 1$ होता है तब विखण्डनीय पदार्थ की मात्रा को क्रान्तिक मात्रा कहते हैं। जब $K > 1$ होता है तब पदार्थ की मात्रा को अतिक्रान्तिक (super critical) मात्रा कहते हैं। जब $K < 1$ होता है तब पदार्थ की मात्रा को अक्रान्तिक मात्रा कहते हैं। इस स्थिति में शृंखला अभिक्रिया जारी नहीं रहती है। इस प्रकार शृंखला अभिक्रिया हेतु पदार्थ की मात्रा क्रान्तिक द्रव्यमान से अधिक होनी चाहिए। शृंखला अभिक्रिया दो प्रकार की होती है–

(1) नियंत्रित शृंखला अभिक्रिया

(2) अनियंत्रित शृंखला अभिक्रिया

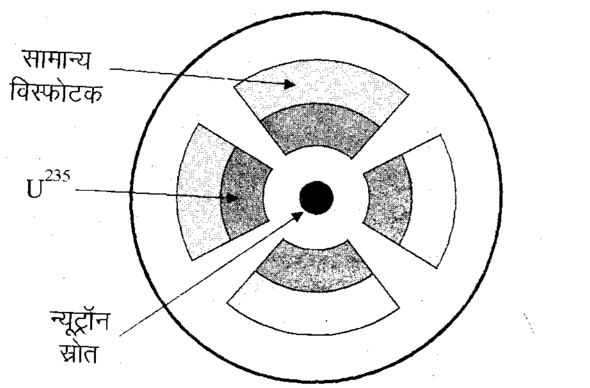
यदि विखण्डन की अभिक्रिया इस प्रकार नियंत्रित की जाये कि उसमें न तो वृद्धि हो न ही कमी, अर्थात् अभिक्रिया ऐसे स्तर पर स्थायी रहे जिससे अभिक्रिया में मुक्त ऊर्जा सदैव विस्फोट की सीमा से कम रहे तो नियंत्रित शृंखला अभिक्रिया कहते हैं।

इसके लिये यह आवश्यक है कि प्रति सेकण्ड निकलने वाले तथा प्रति सेकण्ड U^{235} में अवशोषित होने वाले न्यूट्रॉन की संख्या बराबर रहे। नियंत्रित शृंखला अभिक्रिया में जो ऊर्जा प्राप्त होती है, उसका उपयोग रचनात्मक कार्यों में किया जाता है। नियंत्रित विखण्डन शृंखला ही परमाणु भट्टी का मूल सिद्धान्त है।

अनियंत्रित शृंखला अभिक्रिया में प्रत्येक विखण्डन से प्राप्त न्यूट्रॉनों में से औसत 1 से अधिक न्यूट्रॉन विखण्डन की क्रिया में भाग लेते है यहाँ $K > 1$ होता है। इससे नाभिकों के विखण्डन की दर तेजी से बढ़ती है तथा कुछ ही क्षणों में अत्यधिक अपार ऊर्जा मिलती है, तथा प्रचण्ड विस्फोट का कार्य करती है। परमाणु बम में यही अभिक्रिया होती हे।

परमाणु बम में समृद्ध यूरेनियम-235 या प्लूटोनियम-239 नाभिकीय ईंधन (nuclear fuel) के दो या दो से अधिक पिण्ड लिये जाते हैं। प्रत्येक पिण्ड का द्रव्यमान क्रांतिक द्रव्यमान से कम लिया जाता है।

परमाणु बम में अपक्रांतिक द्रव्यमान के ईंधन पिण्ड एक बहुत ही मजबूत धातु के आवरण के अन्दर पृथक् रूप से निश्चित दूरी पर रखे जाते हैं (देखें अनुमानित व्यवस्था चित्र)। इन पिण्डों के मध्य में एक न्यूट्रॉन स्रोत रखा जाता है। इन पिण्डों के साथ सामान्य विस्फोटक पदार्थ भी संलग्न होता है।



चित्र 15.15

जब सामान्य विस्फोटक पदार्थ में विस्फोट कराया जाता है तब नाभिकीय ईंधन के पिण्ड अन्तः दिशा में गति कर प्रबल रूप से जुड़ जाते हैं जिसमें इनका द्रव्यमान तथा साईज क्रांतिक स्थिति के द्रव्यमान तथा साईज से अधिक हो जाती है। तब न्यूट्रॉन स्रोत से प्राप्त न्यूट्रॉनों द्वारा प्रारम्भ की गई शृंखला अभिक्रिया अनियंत्रित हो जाती है। इस बम का आवरण इतना मजबूत लिया जाता है कि जब तक विखण्डन प्रक्रिया अधिकतम पहुँच नहीं जाये तब तक आवरण फटता नहीं है। विस्फोट पर परमाणु बम से अनियंत्रित ऊर्जा बहुत अधिक मात्रा में निकलती है।

द्वितीय महायुद्ध के अन्त में (1945 में) अमरीका द्वारा पहली बार जापान के दो शहरों, हिरोशिमा और नागासाकी पर परमाणु बम गिराये

गये थे, जिसकी विनाशलीला सर्वविदित है। प्रथम बार भारत ने 18 मई 1974 को राजस्थान के पोकरन नामक स्थान पर प्लूटोनियम 239 ईंधन से बना भूमिगत परमाणु विस्फोट किया था। प्लूटोनियम पिण्डों को प्रबल रूप से जोड़ने के लिए अन्तः स्फोट (implosion) विधि का उपयोग किया गया था। यह विस्फोट 10-13 किलो टन TNT के तुल्य था। 11 मई और 13 मई 1998 को भारत ने कुल 5 और परमाणु विस्फोट के परीक्षण किये थे।

15.12 नाभिकीय भट्टी (Nuclear reactor)

वह समायोजन जिसमें रेडियो-एक्टिव पदार्थ के नियंत्रित विखण्डन से अपार ऊर्जा उत्पन्न की जाये, नाभिकीय रिएक्टर कहलाता है। नियंत्रित शृंखला अभिक्रिया चलाने के लिये निम्न बातों का होना आवश्यक है–

(i) इसमें इस प्रकार के यूरेनियम का उपयोग करना चाहिये, जिसमें U^{235} की मात्रा प्रकृति में पाये जाने वाली मात्रा से अधिक हो, इस प्रकार के यूरेनियम को **समृद्ध यूरेनियम** कहते हैं।

(ii) शृंखला अभिक्रिया चालू रहे इसके लिये यूरेनियम की मात्रा कम से कम क्रान्तिक द्रव्यमान के बराबर होनी चाहिये।

(iii) न्यूट्रॉन की गति को कम करने के लिये मंदक का प्रयोग करना चाहिये, अन्यथा तीव्रगामी न्यूट्रॉनों का U^{238} द्वारा अवशोषण होने से अभिक्रिया ही बन्द हो जायेगी।

आकार व रचना की दृष्टि से परमाणु भट्टियाँ कई प्रकार की होती है। प्रत्येक भट्टी में सिद्धान्त रूप से निम्न भाग होते हैं–

(1) विखण्डनीय पदार्थ अर्थात् ईंधन (Fission material or fuel)– इसके लिये निम्न में से किसी एक पदार्थ का उपयोग करते हैं–

(i) प्राकृतिक यूरेनियम (ii) समृद्ध U^{235}

(iii) Pu^{239} (iv) U^{233}

(2) मंदक (Moderator) – विखण्डन से प्राप्त न्यूट्रॉनों की गति बहुत तेज होती हैं जिन्हें U^{238} अवशोषित करता है। इन तेज न्यूट्रॉनों की गति उनके अवशोषण से पूर्व ही कम कर देते हैं।

इस कार्य के लिये प्रयुक्त होने वाले पदार्थ को मंदक कहते हैं। मंदक पदार्थ निम्न में से कोई भी हो सकता है–

(i) भारी पानी D_2O (ii) ग्रेफाइट

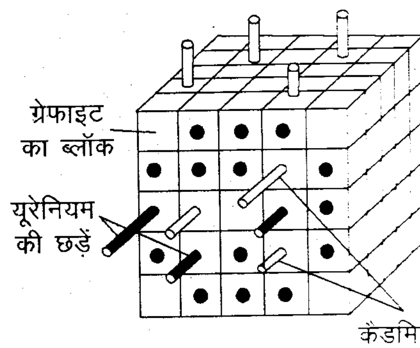
(iii) बेरिलियम ऑक्साइड

(3) नियंत्रक छड़ें (Control rods) – विखण्डन की दर पर नियंत्रण रखने के लिये, कैडमियम की छड़ प्रयुक्त की जाती है। कैडमियम न्यूट्रॉन की उत्तम अवशोषक है, जब ये छड़े रिएक्टर के अन्दर होती है तो काफी संख्या में न्यूट्रॉन का अवशोषण कर लेती है जिससे विखण्डन क्रिया बन्द हो जाती है। जब इन्हें धीरे-धीरे बाहर निकालते हैं तो क्रिया पुनः शुरू होने लगती है। इनकी स्थिति में परिवर्तन से शृंखला अभिक्रिया की दर को नियंत्रित कर सकते हैं। **नियंत्रक छड़ों के अलावा नाभिकीय भट्टियों में अतिरिक्त रक्षक छड़ों का भी उपयोग किया जाता है। आवश्यकता पड़ने पर इन छड़ों को भट्टी में प्रवेश कराकर K का मान शीघ्रता से एक से कम किया जा सकता है।**

(4) शीतलक (Coolant) – जो ऊर्जा भट्टी के अन्दर उत्पन्न होती है उसकी बाहर निकालने के लिये शीतलक का उपयोग किया जाता है। इस कार्य हेतु सामान्यतः भारी पानी, सामान्य पानी, हवा, द्रव अवस्था में रहने वाली धातुओं का उपयोग किया जाता है। नाभिकीय भट्टी को सैद्धान्तिक चित्र में दिखाया गया है।

(5) परिरक्षक (Shielding material) – नाभिकीय भट्टी मे उत्पन्न होने वाली अत्यन्त घातक γ-किरणों के शोषण के लिये नाभिकीय भट्टी के चारों ओर कंकरीट और इस्पात की कम से कम 1.5 मीटर मोटी दीवारें बनायी जाती है।

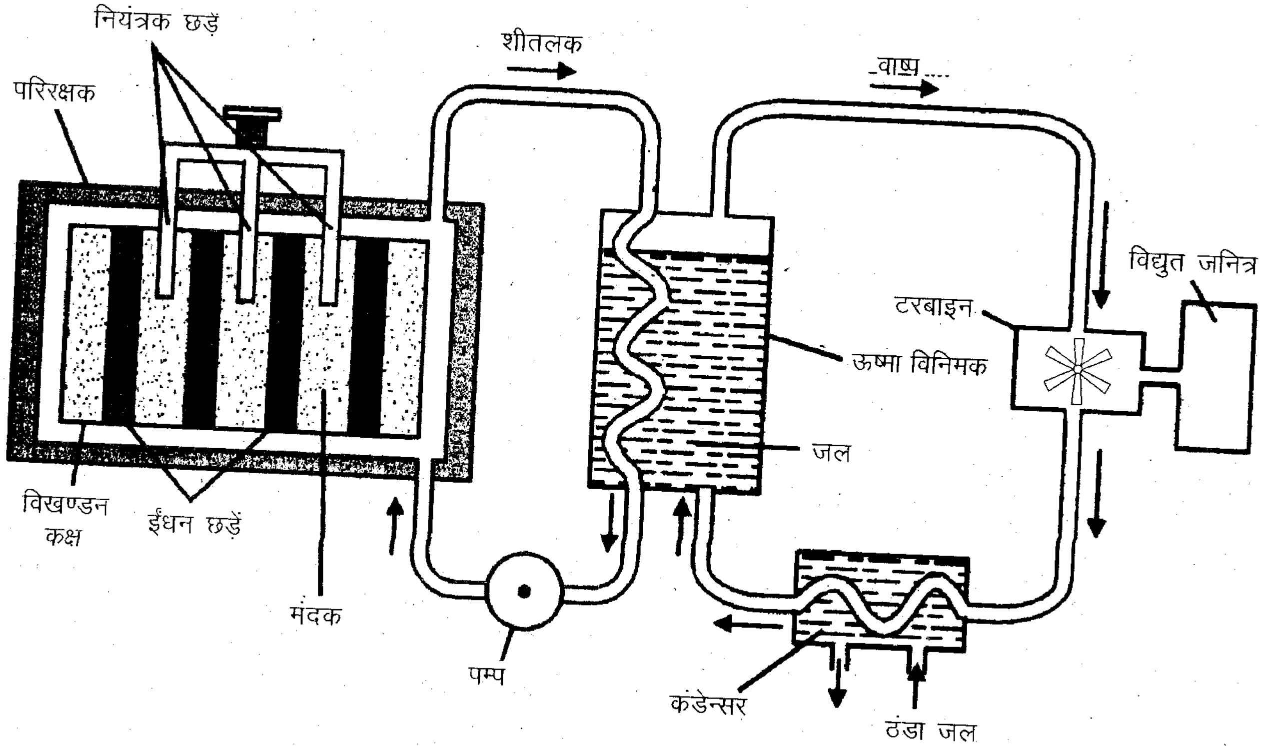
बनावट–सबसे पहली नाभिकीय भट्टी सन् 1942 में फर्मी के निर्देशन में शिकागो युनिवर्सिटी में बनी थी जिसमें U^{235} ईंधन के रूप में प्रयुक्त किया गया था। इसका सरल रूप चित्र में दिखाया गया है। इसमें ग्रेफाइट की ईंटों से बनाया गया एक ब्लॉक हैं जिसमें निश्चित स्थानों पर साधारण यूरेनियम की छड़ें धँसी हुई है। यूरेनियम को ऑक्सीकरण से बचाने के लिये यूरेनियम की छड़ों पर एल्यु-मिनियम के खोल चढ़ा देते हैं। ब्लॉक में बने खाँचों में कैडमियम की छड़े रखी होती है जोकि 'नियंत्रक छड़ें' हैं। इन्हें आवश्यकतानुसार भीतर अथवा बाहर खिसकाया जा सकता है। इस प्रकार ग्रेफाइट 'मन्दक' (moderator) का कार्य करता है तथा कैडमियम नियंत्रक (controller) का कार्य करता है। परमाणु भट्टी को सात फुट मोटे कंकरीट के कवच से घेरा जाता है जिससे कि हानिकारक विकिरण कार्यकर्त्ता के पास तक न पहुँच सकें।



चित्र 15.16

कार्य-विधि–नाभिकीय भट्टी को चलाने के लिए किसी बाह्य स्रोत की आवश्यकता होती है। नाभिकीय भट्टी में सदैव कुछ न्यूट्रॉन उपस्थित रहते है। अतः जब नाभिकीय भट्टी को चलाना होता है तो कैडमियम की छड़ों को बाहर खींचे लेते हैं। तब नाभिकीय भट्टी में उपस्थित न्यूट्रॉन, U^{235} के नाभिकों का विखण्डन करने लगते हैं विखण्डन के फलस्वरूप अन्य तीव्रगामी न्यूट्रॉन उत्पन्न होते हैं। ये न्यूट्रॉन बारम्बार मन्दक (ग्रेफाइट) से टकराते हैं। चूँकि मन्दक हल्की धातु का होता है, अतः न्यूट्रॉन उसकी पकड़ में नहीं आ सकते पर उससे टकराकर पार निकलने पर उनकी गति मन्द पड़ जाती है। तब ये भी U^{235} के नाभिकों का विखण्डन करने लगते हैं। इस प्रकार विखण्डन की शृंखला अभिक्रिया प्रारम्भ हो जाती है। न्यूट्रॉनों की इस बढ़ती हुई संख्या पर कैडमियम छड़ों को भीतर खिसकाकर नियंत्रण किया जाता है। ये छड़ें कुछ न्यूट्रॉनों को अवशोषित कर लेती है। इस प्रकार विखण्डनों की दर को कम करके उत्पन्न ऊर्जा पर नियंत्रण रखा जाता है ताकि विस्फोट न होने पाये। नाभिकीय भट्टी में शृंखला-अभिक्रिया चलाने के लिए इसका आकार एक क्रान्तिक साइज़ से बड़ा होना चाहिये।

निम्न चित्र में नाभिकीय भट्टी से विद्युत उत्पादन का एक सरल चित्र दर्शाया गया है–



चित्र 15.17

नाभिकीय भट्टी के उपयोग–

(i) इसके द्वारा विद्युत उत्पादन किया जाता है।

(ii) इसके द्वारा कई तत्वों के रेडियो आइसोटोप बनाये जाते हैं, जिसका उपयोग चिकित्सा, कृषि, जीव विज्ञान तथा वैज्ञानिक खोजों में किया जाता है।

(iii) इसी से प्लूटोनियम Pu^{239} का उत्पादन किया जाता है जो परमाणु बम बनाने में काम में आता है।

महत्त्वपूर्ण तथ्य

1. नाभिकीय रिएक्टर द्वारा प्लूटोनियम ($_{94}Pu^{239}$) का उत्पादन– रिएक्टर में जो न्यूट्रॉन, यूरेनियम 235 के विखण्डन की शृंखला अभिक्रिया को बनाये रखने में भाग नहीं लेते हैं, वे यूरेनियम 238 द्वारा अवशोषित होकर एक भारी आइसोटोप $_{92}U^{239}$ बनाते हैं जो अत्यन्त अस्थायी (अर्द्धआयुकाल 23 मिनट) होता है। यह आइसोटोप एक β^- कण उत्सर्जित करके नैप्चूनियम 239 ($_{93}Np^{239}$) में बदल जाता है। नैप्चूनियम ($_{93}Np^{239}$) भी रेडियोएक्टिव है। जिसकी अर्द्ध आयु 23 दिन हैं। यह पुन: एक β^- कण उत्सर्जित करके प्लूटोनियम ($_{94}Pu^{239}$) नाभिक में बदल जाता है। इनकी क्रियाएँ निम्न प्रकार हैं–

$$_{92}U^{238} + _0n^1 \rightarrow _{92}U^{239} + \gamma \text{ (ऊर्जा)}$$

$$_{92}U^{239} \rightarrow _{93}Np^{239} + _{-1}e^0 + \bar{\nu}$$

तथा $_{93}Np^{239} \rightarrow _{94}Pu^{239} + _{-1}e^0 + \bar{\nu}$

2. वे रिएक्टर जिनमें $_{92}U^{235}$ का ईंधन के रूप में उपयोग होता है, तापीय रिएक्टर (thermal reactors) कहलाते हैं तथा वे रिएक्टर जिनमें $_{92}U^{238}$ से $_{94}Pu^{239}$ प्राप्त करके ईंधन के रूप में उपयोग होता है, ब्रीडर रिएक्टर (breeder reactors) कहलाते हैं।

उदाहरण 39. ^{235}U **के एक नाभिक के विखण्डन से लगभग 200 MeV ऊर्जा प्राप्त होती है।** ^{235}U **ईंधन पर आधारित किसी नाभिकीय भट्टी में कितने** ^{235}U **नाभिक प्रति सेकेंड विघटित होते है यदि भट्टी 1000 kW शक्ति उत्पन्न कर रही है?**

पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.19

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

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

अतः प्रति सेकंड विखण्डनों की संख्या

$$= \frac{6.25 \times 10^{24}}{200 \times 10^6} = 3.12 \times 10^{16}$$

उदाहरण 40. मान लीजिए कि भारत का लक्ष्य 2020 तक 200,000 MW विद्युत शक्ति जनन का है। इसका 10% नाभिकीय शक्ति संयंत्रों से प्राप्त होना है। माना कि रिएक्टर की औसत उपयोग दक्षता (ऊष्मा को विद्युत में परिवर्तित करने की क्षमता) 25% है। 2020 के अंत तक हमारे देश को प्रति वर्ष कितने विखंडनीय यूरेनियम की

आवश्यकता होगी। ^{235}U प्रति विखंडन उत्सर्जित ऊर्जा 200 MeV है।

हल : दिया है : प्रति U^{235} विखण्डन से उत्सर्जित ऊर्जा = 200 MeV

सन् 2020 तक नाभिकीय संयंत्र से प्राप्त शक्ति

$$P = 200,000 \times 10^6 \times \frac{10}{100}$$

$$P = 2 \times 10^{10} \text{ वॉट}$$

तथा 1 वर्ष में प्राप्त कुल विद्युत ऊर्जा Q = Pt

$$(\because t = 1\text{वर्ष} = 3.154 \times 10^7 \text{ सेकण्ड})$$

$$Q = 2 \times 10^{10} \times 3.154 \times 10^7 \text{ जूल}$$

$$Q = 6.308 \times 10^{17} \text{ जूल} \quad ...(1)$$

माना U^{235} की m ग्राम मात्रा से उत्सर्जित ऊर्जा का यह 25% है तब

$$Q = \frac{6.023 \times 10^{23}}{235} \times m \times \frac{25}{100} \times 200 \text{ MeV}$$

$$\text{या } Q = \frac{6.023 \times 25 \times 2}{235} m \times 1.6 \times 10^{+10} \text{ जूल} \quad ...(2)$$

(1) व (2) से

$$\frac{6.023 \times 50 \times 1.6 \times 10^{+10}}{235} m = 6.308 \times 10^{17}$$

$$\text{या } m = \frac{6.308 \times 235 \times 10^{17}}{6.023 \times 50 \times 1.6 \times 10^{+10}} \text{ ग्राम}$$

$m = 3.076 \times 10^7$ ग्राम = 3.076×10^4 किग्रा.

15.13 नाभिकीय संलयन (Nuclear fusion)

हल्के तत्वों के नाभिकों को मिलाकर उनसे भारी तत्वों का निर्माण किया जाये तो इस अभिक्रिया को **संलयन** कहते हैं। **संलयन से प्राप्त नाभिक का द्रव्यमान, संलयन करने वाले मूल नाभिकों के द्रव्यमानों के योग से कम होता है। अतः** संलयन के फलस्वरूप द्रव्यमान की क्षति होती है एवं द्रव्यमान में यह क्षति ऊर्जा में बदल जाती है जिसकी गणना $E = mc^2$ सूत्र से की जा सकती है।

जब हल्के तत्वों के नाभिकों को परस्पर समीप लाया जाता है तब वे धनावेशित होने के कारण परस्पर प्रतिकर्षण बल का अनुभव करते हैं। इस प्रतिकर्षण बल को पार करने के लिए हल्के तत्वों में अत्यधिक गतिज ऊर्जा होनी चाहिए। अत्यधिक गतिज ऊर्जा के लिए उच्च ताप की आवश्यकता होती है। इतने उच्च ताप पर ही नाभिकों में अपनी ऊष्मीय गति के कारण इतनी अधिक ऊर्जा आ पाती है कि परस्पर समीप आने पर, इनके मध्य लगने वाले प्रतिकर्षण बल को पार कर सकने में ये समर्थ हो पाते हैं तथा एक-दूसरे में संलीन हो जाते हैं। इस प्रकार इस क्रिया को प्रारंभ होने के लिये यह आवश्यक है कि ताप 10^6K से 10^8K तक हो एवं दाब भी अत्यधिक हो। अतः इस प्रकार की प्रक्रिया को **ताप नाभिकीय संलयन** भी कहते हैं।

अत्यधिक उच्च ताप व दाब पर चार हाइड्रोजन के नाभिक (प्रोटॉन) मिलकर हीलियम का नाभिक बनाते हैं (इसे प्रोटॉन-प्रोटॉन अभिक्रिया कहते हैं)। यह अभिक्रिया निम्नलिखित समीकरण द्वारा दर्शायी जाती है

$$4\,{}_1H^1 \rightarrow {}_2He^4 + 2\,{}_{+1}e^o + 2\nu + 24.7 \text{ MeV} \quad .....(1)$$

इस संलयन की अभिक्रिया में 24.7 MeV ऊर्जा प्राप्त होती है।

संलयन अभिक्रिया में ऊर्जा की गणना–

4 हाइड्रोजन नाभिक का द्रव्यमान = (1.00727) × 4 amu

हीलियम नाभिक का द्रव्यमान = 4.00146 amu

पॉजीट्रॉन का द्रव्यमान = 0.00055 amu

अतः द्रव्यमान की क्षति = 4 × 1.00727 – 4.00146 – 2 × 0.00055
= 0.02652 amu

∴ निर्मित ऊर्जा = 0.02652 × 931 MeV
= 24.7 MeV

लेकिन संलयन क्रिया में मुक्त दो पॉजिट्रॉन, वायुमण्डल में उपस्थित दो इलेक्ट्रॉनों से विनाशित (annihilate) होकर लगभग 2 MeV ऊर्जा मुक्त करते हैं। इस प्रकार संलयन क्रिया में कुल मुक्त ऊर्जा = 24.7 + 2 = 26.7 MeV

संलयन को नियंत्रित अवस्थाओं में संचारित करने के मार्ग में कई व्यावहारिक कठिनाईयाँ हैं जिनको अभी तक दूर नहीं किया जा सका है।

विखण्डन एवं संलयन दोनों में द्रव्यमान की क्षति होती है जो ऊर्जा में बदल जाती है। परन्तु प्रति ग्राम ऊर्जा की गणना से यह ज्ञात होता है कि संलयन में विखण्डन की तुलना में काफी अधिक ऊर्जा प्राप्त होती है।

एक अनुमान के अनुसार सूर्य करोड़ों वर्षों से प्रति सेकण्ड 3.8×10^{26} जूल ऊर्जा प्रकाश व ऊर्जा के रूप में उत्सर्जित कर रहा है। इतनी अधिक मात्रा में ऊर्जा का उत्पादन पदार्थों के दहन अथवा रासायनिक अभिक्रियाओं द्वारा सम्भव नहीं है। उदाहरणार्थ, यदि सूर्य किसी बाह्य पदार्थ (जैसे कार्बन) का बना होता तो इस पदार्थ के पूर्ण दहन से भी इतनी बड़ी दर पर ऊर्जा केवल कुछ हजार वर्षों तक ही मिल पाती। सूर्य की इस असीमित ऊर्जा के स्रोत के सम्बन्ध में वैज्ञानिकों ने विभिन्न मत दिये हैं

हेल्महोल्ट्ज के अनुसार, सूर्य लगातार सिकुड़ रहा है जिससे उसकी गुरुत्वीय ऊर्जा लगातार घटती जा रही है तथा ऊष्मीय ऊर्जा में बदलती जा रही है। परन्तु गणना से पता चलता है कि सूर्य के संकुचन से उत्पन्न ऊर्जा, सूर्य के वास्तव में उत्सर्जित ऊर्जा के 1% से भी कम होती है। अतः गुरुत्वीय संकुचन सूर्य की ऊर्जा का स्रोत नहीं हो सकता।

सूर्य में यूरेनियम जैसे भारी तत्वों की मात्रा बहुत कम हैं अतः इन तत्वों के नाभिकों का रेडियोएक्टिव विघटन अथवा विखण्डन भी सूर्य की ऊर्जा का स्रोत नहीं हो सकता क्योंकि इन तत्वों के नाभिकों के विखण्डन से इतनी बड़ी दर से ऊर्जा इतने लम्बे समय तक उत्सर्जित नहीं हो सकती।

आधुनिक मतानुसार, सूर्य की अपार ऊर्जा का स्रोत हल्के नाभिकों का संलयन है। सूर्य का लगभग 90% भाग हाइड्रोजन तथा हीलियम से बना है तथा शेष 10% भाग में अन्य तत्व हैं जिनमें से अधिकांश हल्के तत्व हैं। सूर्य के भीतरी भाग का ताप लगभग 20 लाख (2×10^7) K हैं। इतने ऊँचे ताप पर सूर्य में उपस्थित सभी तत्वों के परमाणुओं से इलेक्ट्रॉन अलग हो जाते हैं जिससे हाइड्रोजन, हीलियम आदि तत्वों के परमाणु प्लाज्मा (Plasma) अवस्था में आ जाते हैं (पदार्थ की वह अवस्था जिसमें पदार्थ के धनात्मक आयन (नाभिक) तथा इलेक्ट्रॉन अत्यधिक संख्या में उपस्थित हों पदार्थ की 'प्लाज्मा अवस्था' कहलाती है) अर्थात्

ये तत्व नाभिकीय अवस्था में होते हैं। अत्यधिक ताप के कारण जब चार प्रोटॉन (हाइड्रोजन नाभिक) संलयित होकर एक एल्फा-कण (हीलियम नाभिक) का निर्माण करते हैं तो इस अभिक्रिया में अत्यधिक ऊर्जा उत्पन्न होती है। संलयन से उत्पन्न ऊर्जा ही सूर्य की ऊर्जा का स्रोत है।

उदाहरण 41. D-T अभिक्रिया (ड्यूटीरियम-ट्रीटियम संलयन), $^2_1H + ^3_1H \rightarrow ^4_2He + n$ पर विचार कीजिए।

(a) नीचे दिए गए आँकड़ों के आधार पर प्रक्रिया में विमुक्त ऊर्जा का मान MeV में ज्ञात कीजिए।

$m(^2_1H) = 2.014102$ u

$m(^3_1H) = 3.016049$ u

(b) ड्यूटीरियम एवं ट्राइटियम दोनों की त्रिज्या लगभग 1.5 fm मान लीजिए। इस अभिक्रिया में, दोनों नाभिकों के मध्य कूलॉम प्रतिकर्षण से पार पाने के लिए कितनी गतिज ऊर्जा की आवश्यकता है ? अभिक्रिया प्रारंभ करने के लिए गैसों (D तथा T गैसें) को किस ताप तक ऊष्मित किया जाना चाहिए ?

(संकेत : किसी संलयन क्रिया के लिए आवश्यक गतिज ऊर्जा = संलयन क्रिया में संलग्न कणों की औसत तापीय गतिज ऊर्जा = 2 (3kT/2); k : बोल्ट्जमान नियतांक तथा T = परम ताप)

हल : (a) दिया है : $m_{(_1H^2)} = 2.014102$ amu,

$m_{(_1H^3)} = 3.016049$ amu

अत: संलयन प्रक्रिया $_1H^2 + _1H^3 \rightarrow _2He^4 + _0n^1$ के लिए

$Q = [m_{(_1H^2)} + m_{(_1H^3)} - m_{(_2He^4)} - m_n] \times 931.5$ MeV

$= [2.014102 + 3.016049 - 4.002603 - 1.008665] \times 931.5$ MeV

$= 0.018883 \times 931.5 = 17.59$ MeV

(b) $\because$ त्रिज्या $r = 1.5$ फर्मी $= 1.5 \times 10^{-15}$ मी.

तथा नाभिकों का कूलॉम अवरोध = नाभिकों को सटाकर रखने पर उनकी प्रतिकर्षी स्थितिज ऊर्जा

अत: $U = \dfrac{Kq_{_1H^2}q_{_1H^3}}{R}$

$\because$ $q_{_1H^2} = 1.6 \times 10^{-19}$ कूलॉम

$q_{_1H^3} = 1.6 \times 10^{-19}$ कूलॉम

तथा $R = 2r = 3 \times 10^{-15}$ मी.

अत: $U = \dfrac{9\times10^9 \times 1.6\times10^{-19} \times 1.6\times10^{-19}}{3\times10^{-15}}$

या $U = 7.68 \times 10^{-14}$ जूल

अत: कूलॉम अवरोध को पार करने के लिए आवश्यक न्यूनतम गतिज ऊर्जा 7.68×10^{-14} जूल होगी।

पुन: $\because$ K.E. = 3kT

अत: आवश्यक ताप $T = \dfrac{K.E.}{3k}$

जहाँ $k = 1.381 \times 10^{-23}$ जूल/केल्विन

$$T = \frac{7.68\times10^{-14}}{3\times1.381\times10^{-23}} = 1.85\times10^9 \text{ केल्विन}$$

उदाहरण 42. ड्यूटीरियम नाभिक ^2_1H पर आवेश +e है तथा इसकी मापित त्रिज्या लगभग 2fm है। ऐसे दो ड्यूटीरियम नाभिक एक दूसरे की ओर समान ऊर्जा K से दागे गए है। K का मान कितना होना चाहिए कि जब दोनों नाभिक सदृस्पर्श (just touch) की अवस्था में हो तो वे पारस्परिक कूलाम प्रतिकर्षण के कारण विराम में आ जाते है? इस गतिज ऊर्जा के संगत ताप की की गणना भी कीजिए।

पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.20

हल: $\because$ त्रिज्या $r = 2$ फर्मी $= 2 \times 10^{-15}$ मी.

तथा नाभिकों का कूलॉम अवरोध = नाभिकों को सटाकर रखने पर उनकी प्रतिकर्षी स्थितिज उर्जा

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

$\because$ $q_1 = e,\ q_2 = e,\ R = 2r$

या $U = \dfrac{1}{4\pi\epsilon_0}\dfrac{e^2}{4R}$

$$= \frac{9\times10^9\times(1.6\times10^{-19})^2}{2\times2\times10^{-15}}$$

$= 5.76\times10^{-14}$ जूल

अत: कूलॉम अवरोध को पार करने के लिए आवश्यक न्यूनतम गतिज उर्जा 5.76×10^{-14} जूल होगी।

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

गतिज ऊर्जा = 3KT

$\Rightarrow$ $T = \dfrac{\text{गतिज उर्जा}}{3K}$

$$= \frac{5.76\times10^{-14}}{3\times1.381\times10^{-23}} = 1.39\times10^9 \text{ केल्विन}$$

उदाहरण 43. 2.0 kg ड्यूटीरियम के संलयन से एक 100 वॉट का विद्युत लैंप कितनी देर प्रकाशित रखा जा सकता है ? संलयन अभिक्रिया निम्नवत ली जा सकती है :

$^2_1H + ^2_1H \rightarrow ^3_2He + n + 3.27$MeV

हल : दिया है—बल्ब की शक्ति P = 100 वॉट, ड्यूटीरियम की मात्रा $m = 2$ किग्रा. तथा संलयन अभिक्रिया

$_1H^2 +_1 H^2 \rightarrow_2 He^3 +_0 n^1 + 3.2 \text{ MeV}$

अर्थात् 2 ड्यूटीरियम नाभिक के संलयन से उत्सर्जित ऊर्जा

$= 3.2 \text{ MeV}$

$\because$ 2 किग्रा. ड्यूटीरियम में नाभिकों की संख्या

$$= \frac{6.023 \times 10^{23}}{2} \times 2 \times 10^3 = 6.023 \times 10^{26}$$

अत: 2 किग्रा. ड्यूटीरियम में संलयनों की संख्या

$$= \frac{6.023 \times 10^{26}}{2}$$

तथा उत्सर्जित कुल ऊर्जा $Q = \frac{6.023 \times 10^{26}}{2} \times 3.2$

या $Q = 9.637 \times 10^{26}$ MeV $= 9.637 \times 10^{26} \times 1.6 \times 10^{-13}$ जूल

तथा $Q = Pt$ से

समय $t = \frac{Q}{P} = \frac{9.637 \times 1.6 \times 10^{13}}{100}$ सेकण्ड

या $t = \frac{15.4 \times 10^{13}}{100 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365}$ वर्ष

$= 4.9 \times 10^4$ वर्ष

उदाहरण 44. 3 ड्यूटीरियम नाभिकों के संलयन से लगभग 21.6 MeV ऊर्जा प्राप्त होती है। 1 kg ड्यूटीरियम के संलयन से प्राप्त ऊर्जा की गणना कीजिए। **पाठ्यपुस्तक उदाहरण 15.21**

हल: 1 किग्रा ड्यूटीरियम में परमाणुओं की संख्या

$$= \frac{6.02 \times 10^{23}}{2} \times 10^3 = 3.01 \times 10^{26}$$

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

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

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

$= 3.01 \times 10^{26} \times 7.2 \text{ MeV}$

$= 21.67 \times 10^{26} \text{ MeV}$

$= 21.67 \times 10^{27} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

$= 34.67 \times 10^{13} \text{ J}$

15.13.1 सूर्य तथा तारों में तापनाभिकीय संलयन (Thermonuclear fusion in Sun and stars)

सूर्य लगभग प्रति सेकण्ड 3.8×10^{26} जूल ऊष्मा विकिरित करता है। समीकरण $\Delta E = (\Delta m)c^2$ के अनुसार, प्रति सेकण्ड इतनी ऊर्जा देने के लिए सूर्य का द्रव्यमान प्रति सेकण्ड लगभग 4.1×10^9 किग्रा कम हो जाता है। इस प्रकार सूर्य तीव्र गति से नष्ट हो रहा है। सूर्य का कुल द्रव्यमान 2×10^{30} किग्रा है, अत: नष्ट होने वाला द्रव्यमान इसकी तुलना में बहुत कम है। उपरोक्त आँकड़ों से सूर्य के जीवन की गणना की जा सकती है। ऐसा अनुमान है कि सूर्य पृथ्वी अभी अगले एक हजार करोड़ वर्षों तक (10^{11} वर्षों तक) इसी दर से ऊर्जा उत्सर्जित करता रहेगा।

एक अन्य मत के अनुसार जैसे–जैसे सूर्य ठण्डा होता है इसके भीतर दाब में कमी आती है इस कारण यह अपने भीतर प्रबल गुरुत्वीय बलों के प्रभाव में संकुचित होगा। जिसके कारण गुरुत्वीय स्थितिज ऊर्जा आन्तरिक ऊर्जा में बदलेगी परन्तु इस आधार पर की गई गणनाओं से भी सूर्य को लगभग 10^8 वर्षों तक ही ऊर्जा विकिरण करने में सक्षम होना था। सूर्य की क्रोड में द्रव्यमान के अनुपात के हिसाब से लगभग 35% हाइड्रोजन एवं 64% हीलियम एवं 1% अन्य तत्वों की उपस्थिति है। भारी तत्वों की नगण्य मात्रा में उपस्थिति के कारण नाभिकीय विखंडन भी सूर्य ऊर्जा का स्त्रोत नहीं हो सकता।

सन् 1939 में अमेरिकन वैज्ञानिक बैथे (Bethe) ने प्रस्तावित किया कि सूर्य एवं अन्य तारों में ऊर्जा का जनन तापनाभिकीय अभिक्रियाओं के कारण है जिनमें हाइड्रोजन नाभिक हीलियम नाभिक में संलयित होते है।

हाइड्रोजन नाभिकों का हीलियम नाभिक में संलयन निम्न दो प्रकार से हो सकता है–

(i) कार्बन-नाइट्रोजन चक्र (C-N Cycle)–अमेरिकन वैज्ञानिक बैथे (Bethe) के मतानुसार, सूर्य एवं तारों के अन्दर चार हाइड्रोजन नाभिकों का एक हीलियम नाभिक में संलयन सीधे न होकर, कई ताप नाभिकीय अभिक्रियाओं के एक चक्र के द्वारा होता है। ये ताप-नाभिकीय अभिक्रियाएँ बड़ी तेजी के साथ होती रहती है। इन अभिक्रियाओं में कार्बन एक उत्प्रेरक (Catalyst) की भाँति प्रयुक्त होता है। अभिक्रियाएँ निम्न प्रकार होती हैं–

$_1H^1 + {_6C^{12}} \rightarrow {_7N^{13}} + \gamma +$ ऊर्जा

$_7N^{13} \rightarrow {_6C^{13}} + {_{+1}\beta^0} + \nu$ (न्यूट्रिनो)

$_1H^1 + {_6C^{13}} \rightarrow {_7N^{14}} + \gamma +$ ऊर्जा

$_1H^1 + {_7N^{14}} \rightarrow {_8O^{15}} + \gamma +$ ऊर्जा

$_8O^{15} \rightarrow {_7N^{15}} + {_{-1}\beta^0} + \nu$

$_1H^1 + {_7N^{15}} \rightarrow {_6C^{12}} + {_2He^4}$

उपरोक्त सभी अभिक्रियाओं को मिलाकर रखने पर

$_1H^1 + {_1H^1} + {_1H^1} + {_1H^1} + \longrightarrow {_2He^4} + {_{-1}\beta^0} + 2\nu + \gamma +$ ऊर्जा

इस प्रकार एक C-N चक्र में चार हाइड्रोजन के नाभिक संलयित होकर एक हीलियम के नाभिक की रचना करते हैं तथा 2 पॉजीट्रॉन ($_{1+}\beta^0$) व 24.7 MeV ऊर्जा मुक्त होती है। ये पॉजीट्रॉन दो इलेक्ट्रॉनों से मिलकर विनाशित (annihilate) हो जाते हैं तथा 2 MeV ऊर्जा मुक्त करते हैं। इस प्रकार एक C-N चक्र में कुल 26.7 MeV ऊर्जा मुक्त करते हैं। यह ऊर्जा सूर्य का ताप स्थिर बनाये रखने में सहायक होती है। चूँकि सूर्य के द्रव्य के 1 ग्राम में लगभग 2×10^{23} प्रोटॉन होते हैं अत: सूर्य के 1 ग्राम द्रव्य से अपार ऊर्जा ($\approx 13.35 \times 10^{23}$ MeV) उत्पन्न होती है।

इसके अतिरिक्त नाभिकीय संलयन में प्राप्त β-किरणें सूर्य से छनित (Filter) होती हुई पराबैंगनी, दृश्य प्रकाश तथा अवरक्त किरणों के रूप में लगातार सूर्य से विकिरित होती रहती है।

(ii) प्रोटॉन-प्रोटॉन चक्र (H-H Cycle)–वर्तमान अनुसंधानों के अनुसार बैथे का सिद्धान्त केवल उच्च ताप वाले तारों के लिए अधिक सत्य होता है। सूर्य के लिए, जो उन तारों की अपेक्षा कम ताप पर है, कार्बन-नाइट्रोजन चक्र की अपेक्षा एक अन्य चक्र की अधिक सम्भावना होती है जिसे 'प्रोटॉन-प्रोटॉन चक्र' कहते हैं। इस चक्र में भी कई ताप नाभिकीय अभिक्रियाओं के द्वारा चार हाइड्रोजन के नाभिक संलयित होकर एक हीलियम के नाभिक की रचना करते हैं। अभिक्रियाएँ निम्न प्रकार होती है–

$${}_1H^1 + {}_1H^1 \rightarrow {}_1H^2 + {}_{+1}\beta^0 + \nu \text{ (न्यूट्रिनों)} + 0.42 \text{ MeV}$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma + 1.02 \text{ MeV} \quad ...(i)$$

$${}_1H^2 + {}_1H^1 \rightarrow {}_2He^3 + \gamma + 5.49 \text{ MeV} \quad ...(ii)$$

$${}_2He^3 + {}_2He^3 \rightarrow {}_2He^4 + {}_1H^1 + {}_1H^1 + 12.86 \text{ MeV} \quad ...(iii)$$

(i) व (ii) समीकरणों को 2 से गुणा करके, समी. (iii) में जोड़ने पर

$${}_1H^1 + {}_1H^1 + {}_1H^1 + {}_1H^1 + \longrightarrow {}_2He^4 + 2{}_{+1}\beta^0 + 2\nu + 6\gamma + 26.7 \text{ MeV}$$

स्पष्ट है कि इस चक्र का भी नैट परिणाम ठीक वही है जो C-N चक्र हैं। इस चक्र में उत्पन्न ऊर्जा सूर्य के ताप को स्थिर बनाये रखने में सहायक होती है तथा γ-किरणों का विकिरण पराबैंगनी, दृश्य प्रकाश तथा अवरक्त किरणों के रूप में होता है।

महत्वपूर्ण तथ्य

1. नाभिकीय बम–यह अनियंत्रित नाभिकीय अभिक्रिया पर आधारित होता है–

परमाणु बम	हाइड्रोजन बम
(1) नाभिकीय विखण्डन पर आधारित होता है, इसमें U^{235} का विखण्डन होता है।	नाभिकीय संलयन पर आधारित होता है, इसमें ड्यूट्रॉन तथा ट्रिटियम के मिश्रण का उपयोग होता है।
(2) इसमें क्रान्तिक आकार महत्वपूर्ण होता है।	क्रान्तिक आकार की कोई सीमा नहीं है।
(3) सामान्य ताप व दाब पर विस्फोट संभव है।	उच्च ताप व दाब की आवश्यकता होती है।
(4) हाइड्रोजन बम की तुलना में कम परिमाण में ऊर्जा उत्पन्न होती है।	परमाणु बम की तुलना में अधिक ऊर्जा उत्पन्न होती है। अतः परमाणु बम की तुलना में अधिक खतरनाक होता है।

2. नियंत्रित ताप नाभिकीय संलयन

(Controlled thermonuclear fusion)

नियंत्रित ताप नाभिकीय संलयन शक्ति स्रोतों को बनाना बहुत कठिन है। नाभिकीय संलयन रिएक्टर भावी ऊर्जा स्रोत माने जाते हैं। किसी नियंत्रित ताप संलयन रिएक्टर (परमाणु भट्टी) का उद्देश्य नाभिकीय ईंधन को 10^8K ताप के परास में गर्म कर स्थायी जनन करना होता है। नियंत्रित ताप नाभिकीय संलयन रिएक्टर की मुख्य आवश्यकताएँ निम्नानुसार हैं–

(1) अधिक कण घनत्व–इसमें काम में आने वाले कणों का घनत्व अत्यधिक होना चाहिए ताकि उनमें टक्करों की संख्या की दर अधिक हो सके। परन्तु उच्च ताप पर ${}_1H^2$ पूर्णतः आयनित अवस्था के रूप में होता है जिसे प्लाज्मा (plasma) कहते हैं।

(2) प्लाज्मा का अधिक ताप–इसके लिए प्लाज्मा का ताप अधिक होना चाहिए। उच्च ताप पर ही नाभिक कूलॉम बल के प्रतिकर्षण के विरोध को पार करके ही संलयन कर सकेंगे।

(3) उक्त उच्च ताप पर गर्म प्लाज्मा को किसी पात्र में इस प्रकार बनाये रखना कि यह पात्र की दीवारों के सम्पर्क में न आये तथा पात्र में अधिक समय तक बनाये रखना एक अत्यन्त जटिल समस्या है। इसके लिए वैज्ञानिक विभिन्न विधियाँ खोज रहे हैं। इन समस्याओं का समाधान मिलने पर ही संलयन पर नियंत्रण हो सकेगा।

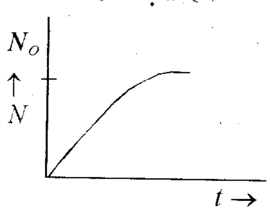
अतिलघूत्तरात्मक प्रश्न

1. रेडियम का क्षय नियतांक λ है। उचित प्रक्रिया द्वारा इसका यौगिक रेडियम ब्रोमाइड प्राप्त किया जाता है। रेडियम ब्रोमाइड का क्षय नियतांक क्या होगा?
2. एक रेडियो सक्रिय तत्व A का विघटन स्थायी तत्व B में होता है प्रारंभ में A का नया नमूना उपलब्ध है। इस नमूने में B तत्व के नाभिकों की संख्या का समय के साथ परिवर्तन प्रदर्शित करने का ग्राफ खींचिए।
3. समीकरण ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^{A}Y + {}_{-1}^{0}e + \bar{\nu}$ किस प्रकार की अभिक्रिया को व्यक्त करता है?
4. सन् 1945 में नागासाकी (जापान) पर गिराये गये बम में प्रयुक्त विखण्डनीय पदार्थ का नाम लिखिए।
5. ऊष्मीय न्यूट्रॉन की औसत गतिज ऊर्जा का मान कितना होता है?
6. U 235 के प्रत्येक विखण्डन में उत्पन्न तात्कालिक न्यूट्रॉनों की औसत संख्या कितनी होती है?
7. सबसे सरलता से विखण्डनीय यूरेनियम आइसोटोप की द्रव्यमान संख्या लिखिए।
8. एक नाभिकीय संलयन क्रिया है: ${}_1^2H + {}_1^2H \rightarrow {}_2^3He + {}_0^1n + Q$

   यदि ड्यूटीरियम $\left({}_1^2H\right)$ के दो मोल संलयित हों तो अभिक्रिया में प्राप्त कुल ऊर्जा कितनी होगी?
9. नाभिकीय अभिक्रिया ${}_Z^AX \rightarrow {}_{z+1}^{A}Y \rightarrow {}_{Z-1}^{A-4}Y' \rightarrow {}_{Z-1}^{A-4}R$ में उत्सर्जित कण तथा विकिरण लिखिए।
10. यदि ${}^{238}U$ एक न्यूट्रॉन के साथ क्रिया कर दो बार β^- क्षय करता है तब कौन सा नाभिक प्राप्त होगा?
11. नाभिकीय विखण्डन में लगभग कितने प्रतिशत द्रव्यमान ऊर्जा में बदलता है?
12. परमाणु भट्टी में बोरॉन (Boron) छड़ों का क्या उपयोग होता है?
13. रेडियोएक्टिव तत्वों के उदाहरण लिखिए।

15. क्षय नियतांक का मात्रक लिखिए।
16. अर्द्ध आयु से क्या तात्पर्य है?
17. क्षय नियतांक को परिभाषित कीजिए।
18. यदि किसी पदार्थ में प्रारंभ में परमाणुओं की संख्या N_0 है तब n विघटन पश्चात् शेष परमाणुओं की संख्या तथा विघटित होने वाले परमाणुओं की संख्या बताइए।
19. अर्द्ध-आयु तथा क्षय नियतांक में सम्बन्ध सूत्र लिखिए।
20. रेडियोएक्टिव पदार्थ की माध्य आयु को परिभाषित कीजिए।
21. अर्द्ध आयु तथा माध्य आयु में सम्बन्ध सूत्र लिखिए।
22. सक्रियता का SI मात्रक लिखिए।
23. ऐल्फा-क्षय की सामान्य अभिक्रिया लिखिए।
24. β^+ कण के लिए सामान्य अभिक्रिया लिखिए।
25. β^- कण के लिए सामान्य अभिक्रिया लिखिए।
26. γ क्षय के लिए सामान्य अभिक्रिया लिखिए।
27. नाभिकीय अभिक्रियाओं में किन संरक्षण नियमों का पालन होता है?
28. $_{92}U^{235}$ के एक परमाणु के विखण्डन से लगभग कितनी ऊर्जा मुक्त होती है?
29. यूरेनियम 235 के विखण्डन की अभिक्रिया लिखिए।
30. न्यूट्रॉन गुणन गुणांक से क्या तात्पर्य है?
31. परमाणु भट्टी के प्रमुख भागों का नाम लिखिए।
32. ताप नाभिकीय संलयन के लिए ताप कितना होना चाहिए?
33. संलयन अभिक्रिया का उदाहरण लिखिए।
34. हाइड्रोजन नाभिकों के हीलियम नाभिक में संलयन के चक्रों का नाम लिखिए।
35. सूर्य से विकिरित ऊष्मा की मात्रा लिखिए।

उत्तरमाला

1. λ, क्योंकि किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ की सक्रियता पर रासायनिक क्रिया का कोई प्रभाव नहीं पड़ता है।
2. 

तत्व A का विघटन चरघातांकी नियम के अनुसार होता है, अत: तत्व B के नाभिकों की संख्या भी चरघातांकी नियम के अनुसार बढ़ेगी।
3. $\beta-$ क्षय
4. प्लूटोनियम
5. लगभग 0.03eV
6. 2.5
7. 235
8. $\because$ ^2_1H के दो नाभिकों के संलयन में मुक्त ऊर्जा = Q
$\therefore$ ^2_1H के दो मोल ($= 2 \times 6.02 \times 10^{23}$ नाभिकों) के संलयन में मुक्त ऊर्जा $= Q \times 6.02 \times 10^{23}$ होगी।
9. क्रमश: β, α, γ
10. ^{239}Pu
11. 0.1%
12. न्यूट्रॉनों का अवशोषण करने में।
13. यूरेनियम, थोरियम, पोलोनियम, ऐक्टिनियम, नेप्चूनियम आदि।
14. $N = N_0 e^{-\lambda t}$
15. सेकण्ड$^{-1}$
16. वह समय जिसमें किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ के अविघटित नाभिकों की संख्या घटकर प्रारंभिक मान की आधी रह जाती है, उस तत्व की अर्द्धआयु कहलाती है।
17. किसी रेडियोऐक्टिव पदार्थ का क्षय नियतांक उस समय का व्युत्क्रम होता है जिसमें सक्रिय रेडियोएक्टिव परमाणुओं की संख्या अपने प्रारंभिक मान की $\frac{1}{e}$ गुनी रह जाती है।
18. शेष परमाणुओं की संख्या $= N_0\left(\frac{1}{2}\right)^n$

विघटित होने वाले परमाणुओं की संख्या $= N_0\left(\frac{2^n - 1}{2^n}\right)$
19. $T = \frac{0.693}{\lambda}$
20. $T_a = \frac{\text{सभी परमाणुओं की आयु का योग}}{\text{परमाणुओं की कुल संख्या}}$
21. अर्द्ध आयु $T = 0.693\, T_a$
22. बेकुरल (Bq)
23. $_ZX^A \rightarrow {}_{Z-2}Y^{A-4} + {}_2He^4 + Q$ (ऊर्जा)
24. $_ZX^A \rightarrow {}_{Z-1}Y^A + \beta^+ + \nu$
25. $_ZX^A \rightarrow {}_{Z+1}Y^A + \beta^- + \bar{\nu}$
26. $_ZX^{A*} \rightarrow {}_ZX^A + \gamma$ ($h\upsilon$ ऊर्जा का फोटॉन)
27. आवेश संरक्षण, न्यूक्लिऑनों का संरक्षण, रेखीय संवेग संरक्षण, कोणीय संवेग संरक्षण तथा द्रव्यमान ऊर्जा संरक्षण
28. 200MeV
29. $_{92}U^{235} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{92}U^{236} \rightarrow {}_{56}Ba^{141} + {}_{36}Kr^{92} + 3{}_0n^1 +$ ऊर्जा
30. न्यूट्रॉन गुणन गुणांक

$K = \frac{\text{विखण्डन की पीढ़ी के प्रारम्भ में न्यूट्रॉनों की संख्या}}{\text{इस पीढ़ी से एक कम पीढ़ी के प्रारम्भ में उपस्थित न्यूट्रॉनों की संख्या}}$
31. (1) विखण्डनीय पदार्थ (2) मंदक (3) नियंत्रक छड़ें (4) शीतलक (5) परिरक्षक।
32. 10^6 K से 10^8 K
33. $4\,{}_1H^1 \rightarrow {}_2He^4 + 2\,{}_{+1}e^0 + 2\nu + 24.7$ MeV
34. (1) कार्बन-नाइट्रोजन चक्र (2) प्रोटॉन-प्रोटॉन चक्र।
35. सूर्य लगभग प्रति सेकण्ड 3.8×10^{26} जूल ऊष्मा विकिरित करता है।

विविध उदाहरण

Basic Level

उदाहरण 45. यदि हम 4 न्यूट्रॉन तथा 3 प्रोटॉन से लिथियम का एक नाभिक $_3Li^7$ बनाये तो कितने MeV ऊर्जा मुक्त होगी ? $_3Li^7$ के नाभिक का द्रव्यमान = 7.01653 amu एक प्रोटॉन का द्रव्यमान = 1.00759 amu एक न्यूट्रॉन का द्रव्यमान 1.00898 amu।

हल–3 प्रोटॉन का द्रव्यमान $= 3 \times 1.00759$
$= 3.02277$ amu

4 न्यूट्रॉन का द्रव्यमान $= 4 \times 1.00898$
$= 4.03592$ amu

इन न्यूक्लिऑनों का कुल द्रव्यमान $= 3.02277 + 4.03592$
$= 7.05869$ amu

$_3Li^7$ की नाभिक का द्रव्यमान $= 7.01653$ amu

द्रव्यमान क्षति ΔM = न्यूक्लिऑन का द्रव्यमान – नाभिक का द्रव्यमान

$= 7.05869 - 7.01653$

द्रव्यमान ऊर्जा समीकरण के अनुसार $1 \text{ amu} = 931.5 \text{ MeV/C}^2$

अतः $\Delta E = 0.04261 \times 931.5$ MeV
$= 39.27$ MeV

उदाहरण 46. $_8O^{16}$ का परमाणु-द्रव्यमान 16.0000 amu है। इसकी प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन-ऊर्जा ज्ञात कीजिये। इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान = 0.00055 amu, प्रोटॉन का द्रव्यमान 1.007593 amu तथा न्यूट्रॉन का द्रव्यमान = 1.008982 amu तथा 1 amu = 931.5 MeV/C^2।

हल–ऑक्सीजन के नाभिक में 8 प्रोटॉन व 8 न्यूट्रॉन होते हैं तथा नाभिक के बाहर 8 इलेक्ट्रॉन कक्षाओं में घूमते हैं।

8 प्रोटॉनों का द्रव्यमान $= 8 \times 1.007593$
$= 8.060744$ amu

8 न्यूट्रॉनों का द्रव्यमान $= 8 \times 1.008982$
$= 8.071856$ amu

इनका योग $= 16.132600$ amu

यह न्यूक्लिऑनों के द्रव्यमानों का योग है। अब

ऑक्सीजन परमाणु ($_8O^{16}$) का द्रव्यमान $= 16.0000$ amu

8 इलेक्ट्रॉनों का द्रव्यमान $= 8 \times 0.00055 = 0.0044$ amu

इनका अन्तर $= 15.9956$ amu

यह ऑक्सीजन के नाभिक का द्रव्यमान है।

$\therefore$ द्रव्यमान-क्षति, ΔM =

यूक्लिऑनों का द्रव्यमान – नाभिक का द्रव्यमान
$= 16.1326 \text{ amu} - 15.9956$ amu
$= 0.1370$ amu

परन्तु 1 amu द्रव्यमान के तुल्य ऊर्जा 931.5 MeV है

$\therefore$ 0.1370 amu के तुल्य ऊर्जा $= 0.1370 \times 931.5$
$= 127.6155$ MeV

ऑक्सीजन के नाभिक में 8 प्रोटॉन तथा 8 न्यूट्रॉन होते हैं। अतः

प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन-ऊर्जा $= \frac{127.6155}{16} = 7.97$ MeV

उदाहरण 47. यदि एक नाभिकीय संलयन प्रक्रिया में द्रव्यमान-क्षति 0.3 प्रतिशत हो तो 1 किग्रा द्रव्यमान की संलयन प्रक्रिया में कितनी ऊर्जा मुक्त होगी?

हल–आइन्सटीन की द्रव्यमान-ऊर्जा समीकरण के अनुसार, उत्पन्न ऊर्जा

$$\Delta E = (\Delta M)c^2$$

यहाँ द्रव्यमान-क्षति,

$$\Delta M = \frac{0.3}{100} \times 1 \text{ किग्रा}$$
$$= 0.003 \text{ किग्रा।}$$
$$\therefore \quad \Delta E = 0.003 \times (3.0 \times 10^8)^2$$
$$= 2.7 \times 10^{14} \text{ जूल।}$$

उदाहरण 48. एक ताप-नाभिकीय अभिक्रिया में 1.000×10^{-3} किग्रा हाइड्रोजन, 0.993×10^{-3} किग्रा हीलियम में परिवर्तित होती है। मुक्त ऊर्जा की गणना जूल तथा किलोवॉट-घण्टा में कीजिये।

हल– $\Delta E = (\Delta M)c^2$

यहाँ द्रव्यमान-क्षति, $\Delta M = (1.000 - 0.993) \times 10^{-3} = 0.007 \times 10^{-3}$ किग्रा तथा प्रकाश की चाल $c = 3.0 \times 10^8$ मीटर/सेकण्ड।

$$\therefore \quad \Delta E = (0.007 \times 10^{-3}) \times (3.0 \times 10^8)^2$$
$$= 6.3 \times 10^{11} \text{ जूल}$$
$$= \frac{6.3 \times 10^{11}}{3600} \text{ वॉट-घण्टा}$$
$$= 1.75 \times 10^8 \text{ वॉट-घण्टा}$$
$$= 1.75 \times 10^5 \text{ किलोवॉट-घण्टा (kWh)।}$$

उदाहरण 49. निम्न संलयन अभिक्रिया में मुक्त ऊर्जा के मान की गणना कीजिए–

$$_1H^2 + {_1H^3} \longrightarrow {_2He^4} + {_0n^1} + E$$

$_1H^2$ का द्रव्यमान = 2.0141 amu
$_1H^3$ का द्रव्यमान = 3.0160 amu
$_2He^4$ का द्रव्यमान = 4.0026 amu
$_0n^1$ का द्रव्यमान = 1.0087 amu

हल–दी गयी अभिक्रिया में अभिक्रिया से पहले कणों का कुल द्रव्यमान

$= 2.0414 + 3.0160 = 5.0301$ amu

अभिक्रिया के पश्चात् कणों का द्रव्यमान

$= 4.0026 + 1.0087 = 5.0113$ amu

द्रव्यमान क्षति $\Delta M = 5.0301 - 5.0113$
$= 0.0188$ amu

$\therefore$ मुक्त ऊर्जा $= 0.0188 \times 931.5$
$= 17.51$ MeV

उदाहरण 50. रेडियम की अर्द्धआयु 1600 वर्ष है, तो इसके क्षयांक व माध्य आयु का मान ज्ञात कीजिए।

हल–दिया गया है–

$$T = 1600 \text{ वर्ष}$$
$$\text{क्षयांक } \lambda = \frac{0.693}{T}$$
$$= \frac{0.693}{1600}$$
$$= 4.33 \times 10^{-4} \text{ प्रतिवर्ष}$$
$$\text{माध्य आयु} \quad T_a = \frac{1}{\lambda}$$
$$= \frac{1}{4.33 \times 10^{-4}} = 2309 \text{ वर्ष}$$

उदाहरण 51. रेडान की अर्द्ध-आयु 3.8 दिन है। 9.6 मिलीग्राम रेडान 19 दिनों बाद कितनी रह जायेगी ?

हल–अर्द्ध-आयु की परिभाषा के अनुसार, यदि किसी रेडियोएक्टिव तत्व की प्रारम्भिक मात्रा N_0 है, तब n अर्द्ध-आयु के पश्चात् बचे (अविघटित) तत्व की मात्रा

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

रेडान की प्रारम्भिक मात्रा $N_0 = 9.6$ मिलीग्राम है तथा $T = 3.8$ दिन, $t = 19$ दिन

$\because \quad t = nT$

अतः $\quad n = \frac{t}{T}$

$= \frac{19}{3.8} = 5$

अतः 5 अर्द्ध-आयुओं के पश्चात् शेष मात्रा

$$N = 9.6 \times \left(\frac{1}{2}\right)^5$$

$= 0.3$ मिलीग्राम।

उदाहरण 52. एक रेडियो एक्टिव तत्व के 75% भाग का 24 वर्ष में विघटन हो जाता है। तत्व की अर्ध आयु की गणना कीजिये।

हल–माना की N_0 तत्व की प्रारम्भिक मात्रा है। तब T अर्ध धातुओं के पश्चात् बचे पदार्थ की मात्रा

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

अवशेष मात्रा = प्रारम्भिक मात्रा – विघटित मात्रा

$$= N_0 - \frac{75}{100}N_0 = \frac{N_0}{4}$$

$\therefore \quad \frac{N_0}{4} = N_0\left(\frac{1}{2}\right)^n$

$\frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^n$

या $\quad \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^n$

या $\quad n = 2,$

अतः $\quad t = nT$ से

जहाँ $\quad t = 24$ वर्ष

$2T = 24$

$\therefore \quad T = 12$ वर्ष

उदाहरण 53. रेडियम के एक आइसोटोप की अर्धआयु 1600 वर्ष है। इसका 1/64 वाँ भाग कितने वर्ष शेष रहेगा ?

हल–माना कि t समय बाद 1/64 वाँ भाग शेष रहता है। यदि यह समय अर्ध आयु के बराबर हो, तो $t = n$T होगी।

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

या $\quad \frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^n$ मान रखने पर

$\frac{1}{64} = \left(\frac{1}{2}\right)^n$

या $\quad \left(\frac{1}{2}\right)^6 = \left(\frac{1}{2}\right)^n$

$\therefore \quad n = 6$

या $\quad t = nT = 6 \times 16$

$= 9600$ वर्ष

9600 वर्ष बाद नमूने का $\frac{1}{64}$ वाँ भाग शेष रहेगा।

उदाहरण 54. $_{38}Sr^{90}$ के एक ग्राम प्रतिदर्श की सक्रियता ज्ञात करो। इसके β-विघटन की अर्ध आयु 28 वर्ष है।

हल–90 ग्राम Sr^{90} में परमाणुओं की संख्या

$$N = 6.02 \times 10^{23}$$

$\therefore$ 1 ग्राम Sr^{90} में परमाणुओं की संख्या $N = \frac{6.02 \times 10^{23}}{90}$

अब $\quad \lambda = \frac{0.693}{T} = \frac{0.693}{28}$

$\therefore$ सक्रियता $\quad R = \lambda N$

$$= \frac{0.693}{28} \times \frac{6.02 \times 10^{23}}{90}$$

$= 1.655 \times 10^{20}$ विघटन/वर्ष

उदाहरण 55. किसी प्रयोग में रेडियोधर्मी तत्व के दिए गए नमूने की सक्रियता 6400 विघटन/मिनट पायी गयी। 6 दिन बाद जब यह प्रयोग दोहराया गया तो सक्रियता 400 विघटन/मिनट हो गयी। दिए गए तत्व की अर्द्धआयु ज्ञात कीजिए।

हल–दिया गया है–

प्रारंभिक सक्रियता $R_0 = \lambda N_0 = 6400$ विघटन/मिनट

$t = 6$ दिन पश्चात् सक्रियता

$R = \lambda N = 400$ विघटन/मिनट

$\therefore \quad \frac{R}{R_0} = \frac{\lambda N}{\lambda N_0} = \frac{400}{6400} = \frac{1}{16} = \frac{1}{2^4}$

इस प्रकार एक अर्द्धआयु में सक्रियता प्रारंभिक सक्रियता का $\frac{1}{2}$ भाग रह जाती है। 4 अर्द्धआयु में यह $\frac{1}{2^4}$ रह जायेगी

अतः $\quad$ 4 अर्द्धआयु = 6 दिन

अर्द्धआयु $= \frac{6}{4} = 1.5$ दिन

उदाहरण 56. एक रेडियोऐक्टिव पदार्थ की मात्रा 10 वर्ष में घटकर 25% रह जाती है। उसकी अर्ध-आयु एवं क्षयांक की गणना कीजिए।

हल– माना n अर्द्ध-आयुओं के पश्चात् सक्रियता प्रारंभिक मान का 25% अर्थात् $\frac{25}{100} = \frac{1}{4}$ भाग रह जाती है।

अतः सूत्र $\quad R = R_0\left(\frac{1}{2}\right)^n$

$\frac{R_0}{4} = R_0\left(\frac{1}{2}\right)^n$

$\left(\frac{1}{2}\right)^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad \therefore n = 2$

यदि अर्द्ध आयुकाल T वर्ष है तो $2T = 10$

$\therefore \quad T = \frac{10}{2}$

$= 5$ वर्ष

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

$= \frac{0.693}{5}$

$= 0.1386$ प्रतिवर्ष

उदाहरण 57. एक रेडियोएक्टिव प्रतिदर्श की सक्रियता 3200 वर्ष में अपने प्रारम्भिक मान की 1/4 हो जाती है। प्रतिदर्श की माध्य आयु की गणना कीजिए।

उत्तर– $\quad R = \frac{R_0}{4} = \frac{R_0}{2^2}$

इस समीकरण का निम्न समीकरण से तुलना करने पर

$$R = R_0\left(\frac{1}{2}\right)^n = \frac{R_0}{2^n}$$

$n = 2$

$t = nT$

$$T = \frac{t}{n} = \frac{3200}{2} = 1600 \text{ वर्ष}$$

उदाहरण 58. $_6C^{12}$ कार्बन नाभिक की बन्धन ऊर्जा MeV में ज्ञात कीजिए।

हल– $_6C^{12}$ में 6 प्रोटॉन तथा 6 न्यूट्रॉन है अतः

6 प्रोटॉनों का द्रव्यमान $= 6 \times m_p = 6 \times 1.007825$
$= 6.04695$ amu

6 न्यूट्रॉनों का द्रव्यमान $= 6 \times m_n = 6 \times 1.008665$ amu
$= 6.05199$ amu

न्यूक्लिऑनों का द्रव्यमान $= 6.04695 + 6.05199$
$= 12.09894$ amu

$_6C^{12}$ के नाभिक का द्रव्यमान = 12 amu

अतः द्रव्यमान क्षति = न्यूक्लिऑनों का द्रव्यमान – नाभिक का द्रव्यमान

$= 12.09894 - 12$
$= 0.09894$ amu

$\therefore$ बंधन ऊर्जा $= 0.09894 \times 931.5$ MeV
$= 92.16$ MeV

उदाहरण 59. दो नाभिकों की त्रिज्याओं का अनुपात 1 : 2 इनकी द्रव्यमान संख्याओं का अनुपात लिखिए।

उत्तर– $\because \quad R = R_0A^{1/3}$

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

दिया गया है–

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

$$\Rightarrow \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^{1/3} = \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{1}{8}$$

$\therefore \quad A_1 : A_2 = 1 : 8$

उदाहरण 60. एक रेडियोएक्टिव प्रतिदर्श की अर्ध आयु 1386 वर्ष है। अपनी प्रारंभिक मात्रा का 90% विघटित होने में यह कितना समय लेगा?

उत्तर– जब 90% भाग विघटित हो जायेगा तब अविघटित शेष भाग

$$= 10\% = \frac{10}{100} = \frac{1}{10}$$

माना कि यह विघटन n अर्द्धआयु कालों में हुआ है

$$\therefore \left(\frac{1}{2}\right)^n = \frac{1}{10}$$

$\Rightarrow \quad 2^n = 10$

दोनों तरफ लघुगणक लेने पर

$\Rightarrow \quad n\log_{10} 2 = \log_{10}10$

$$\Rightarrow \quad n = \frac{\log_{10} 10}{\log_{10} 2} = \frac{1}{0.3010}$$

$\therefore$ विघटन में लगा समय

$t = nT$

$$= \frac{1}{0.3010} \times 1386$$

$= 4604.65$ वर्ष

उदाहरण 61. एक नाभिक दो नाभिकों में टूटता है जिनके वेगों का अनुपात 2:1 है। इनके नाभिकीय आकारों का अनुपात ज्ञात कीजिए।

हल– $\because$ नाभिकीय विखण्डन की प्रक्रिया में संवेग संरक्षित रहता है।

$\therefore \quad m_1v_1 = m_2v_2$

$$\Rightarrow \quad \frac{m_1}{m_2} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{2}$$

$\because \quad R = R_0A^{1/3}$

$$\therefore \quad \frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^{1/3} = \left(\frac{1}{2}\right)^{1/3} = 1 : 2^{1/3}$$

उदाहरण 62. निम्न नाभिकीय अभिक्रिया में A क्या दर्शाता है?

$$_2He^4 + {}_ZX^A \rightarrow {}_{Z+2}Y^{A+3} + A$$

हल– $\because \; _2He^4 + {}_ZX^A \rightarrow {}_{Z+2}Y^{A+3} + A$

आवेश तथा द्रव्यमान संख्या के संरक्षण नियम से–

$4 + A = A + 3 + x$

$\Rightarrow \quad x = 1$

$2 + Z = Z + 2 + y$

$\Rightarrow \quad y = 0$

$\therefore \quad {}_yA^x = {}_0A^1$

यह एक न्यूट्रॉन है।

उदाहरण 63. दो रेडियोएक्टिव पदार्थ x_1 तथा x_2 के क्षय नियतांक क्रमशः 5λ तथा λ है। यदि प्रारंभ में उनके नाभिकों की संख्या समान हैं तो कितने समय पश्चात् x_1 तथा x_2 के नाभिकों की संख्या का अनुपात $\frac{1}{e}$ होगा?

हल– $\because \quad N = N_0e^{-\lambda t}$

$$\Rightarrow \quad \frac{N_1}{N_2} = \frac{e^{-\lambda_1 t}}{e^{-\lambda_2 t}} = e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}$$

$$\because \quad \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{e}$$

$$\therefore \quad \frac{1}{e} = e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}$$

$\Rightarrow \quad e = e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t}$

$\Rightarrow \quad (\lambda_1 - \lambda_2)t = 1$

$$\Rightarrow \quad t = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} = \frac{1}{5\lambda - \lambda} = \frac{1}{4\lambda}$$

उदाहरण 64. लोहे के नाभिक का द्रव्यमान 55.85u एवं A = 56 है, इसका नाभिकीय घनत्व ज्ञात कीजिए।

हल— दिया है : $m_{Fe} = 55.85$ amu

तथा द्रव्यमान संख्या $A = 56$

$\because \quad 1 \text{ amu} = 1.660539 \times 10^{-27}$ किग्रा.

अतः: $m_{Fe} = 55.85 \times 1.660539 \times 10^{-27}$
$= 9.27 \times 10^{-26}$ किग्रा

तथा नाभिक का आयतन $V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi(R_0 A^{\frac{1}{3}})^3$

$$V = \frac{4}{3}\pi R_0^3 A$$

$$= \frac{4}{3} \times 3.14 \times (1.2 \times 10^{-15})^3 \times 56$$

$$= 4.051 \times 10^{-43} \text{ मीटर}^3$$

अतः नाभिकीय घनत्व $= \frac{m}{V} = \frac{9.27 \times 10^{-26}}{4.051 \times 10^{-43}}$

$$= 2.29 \times 10^{17}$$

उदाहरण 65. निम्नलिखित प्रश्नों के उत्तर दीजिए :

(a) क्या नाभिकीय अभिक्रियाओं के समीकरण (जैसा कि पुस्तक में दिए हैं) रासायनिक समीकरण (उदाहरण के लिए $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$) के रूप में संतुलित हैं ? यदि नहीं तो किस रूप में दोनों ओर समीकरण संतुलित होंगे।

(b) यदि प्रोटॉनों और न्यूट्रॉनों की संख्या, प्रत्येक नाभिकीय अभिक्रिया में संरक्षित रहती है, किसी नाभिकीय अभिक्रिया में किस प्रकार द्रव्यमान, ऊर्जा में (या इसका उलटा) बदलता है ?

(c) सामान्य विचार है कि केवल नाभिकीय क्रिया में ही द्रव्यमान-ऊर्जा एक दूसरे में बदले जा सकते हैं जबकि रासायनिक क्रिया में यह कभी नहीं होता है। यह कहना असत्य है। समझाइए।

उत्तर–(a) किसी रासायनिक अभिक्रिया में अवयवी परमाणुओं के मूल संयोजन में परिवर्तन मात्र होता है। अतः रासायनिक अभिक्रिया के संतुलन के लिए दोनों ओर सभी तत्वों के परमाणुओं की संख्या समान होती है। जबकि नाभिकीय अभिक्रिया में तत्वांतरण भी हो सकता है अतः तत्व के परमाणुओं की संख्या दोनों ओर समान होना आवश्यक नहीं है, नाभिकीय अभिक्रिया में प्रोटॉनों तथा न्यूट्रॉनों की संख्याएँ पृथक रूप से संरक्षित रहती हैं।

(b) चूँकि प्रत्येक नाभिक के निर्माण में, प्रयुक्त प्रोटॉनों तथा न्यूट्रॉनों का विराम द्रव्यमान समान रहता है परन्तु इनके संघटन में प्रयुक्त नाभिकीय बंधन ऊर्जा, नाभिक के कुल द्रव्यमान में क्षति के फलस्वरूप होती है। इसी प्रकार किसी नाभिकीय अभिक्रिया में बायीं ओर के नाभिकों की कुल बंधन ऊर्जा, दायीं ओर के नाभिकों की कुल बंधन ऊर्जा के समान नहीं होती तथा दोनों ओर की बंधन ऊर्जाओं का यह अन्तर ही उत्सर्जित या अवशोषित ऊर्जा के रूप में प्रकट होता है। चूँकि बंधन ऊर्जा द्रव्यमान में योगदान देती है अतः दोनों ओर के कुल द्रव्यमानों का अन्तर ऊर्जा के रूप में परिवर्तित होता है या ऊर्जा कुल द्रव्यमानों के अन्तर के रूप में परिवर्तित होती है।

(b) किसी रासायनिक अभिक्रिया में उत्सर्जित अथवा अवशोषित ऊर्जा, अभिक्रिया के दोनों ओर के परमाणुओं एवं अणुओं की बंधन ऊर्जाओं को व्यक्त करती है तथा यह रासायनिक बंधन ऊर्जा भी परमाणुओं एवं अणुओं के द्रव्यमान क्षति को ही व्यक्त करती है यद्यपि द्रव्यमान का यह अंतर नाभिकीय अभिक्रियाओं की तुलना में कई लाख गुना कम होता है परन्तु यह कहना सत्य नहीं है कि द्रव्यमान-ऊर्जा अंतः रूपान्तरण नाभिकीय अभिक्रियाओं में ही होता है, रासायनिक अभिक्रियाओं में नहीं।

Advance Level

उदाहरण 66. $_8O^{16}$ नाभिक की त्रिज्या यदि 3.2 फर्मी है तो $_{82}Pb^{205}$ नाभिक की त्रिज्या क्या होगी ?

हल–द्रव्यमान संख्या A के नाभिक की त्रिज्या

$$R \propto A^{1/3}$$

$$\frac{(R)_{205}}{(R)_{16}} = \left(\frac{205}{16}\right)^{1/3}$$

या $(R)_{205} = \left(\frac{205}{16}\right)^{1/3} \times 3.2$ फर्मी

$$\log (R)_{205} = \frac{1}{3}\log\frac{205}{16} + \log 3.2$$

$$= \frac{1}{3} \times 1.1075 + 0.5051$$

$$= 0.3692 + 0.5051 = 0.8743$$

$\therefore$ $(R)_{(205)} = 7.487 \approx 7.50$ फर्मी

उदाहरण 67. यूरेनियम की विखण्डन अभिक्रिया में प्रति विखण्डन लगभग 200×10^6 eV ऊर्जा मुक्त होती है। यदि कोई रिएक्टर 6 मेगावाट शक्ति प्रदान करता है तो शक्ति के इस स्तर के लिए कितने विघटन प्रति सेकण्ड आवश्यक होंगे ?

हल–प्रति सेकण्ड N विखण्डन सम्पन्न होने पर उत्पादित शक्ति होगी–

$$P = N \times 200 \times 10^6 \text{ eV/ सेकण्ड}$$

$$= N \times 200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ जूल/से.}$$

$$= N \times 3.2 \times 10^{-17} \text{ मेगावॉट}$$

परन्तु दिया गया है–

$$P = 6 \text{ मेगावॉट}$$

$$\therefore N \times 3.2 \times 10^{-17} = 6$$

$$N = \frac{6}{3.2 \times 10^{-17}}$$

$$= \frac{6 \times 10^8}{32}$$

$$= 1.875 \times 10^{17} \text{ विखण्डन/से.}$$

उदाहरण 68. यदि यूरेनियम की विखण्डन अभिक्रिया में प्रति विखण्डन 200×10^6 eV ऊर्जा मुक्त होती है तो एक मिलीग्राम U^{235} के विखण्डन से कितने कैलोरी ऊष्मा प्राप्त होगी ?

हल–235 ग्राम U^{235} में परमाणुओं की संख्या

$$= \text{आवोगाद्रो संख्या} = 6.02 \times 10^{23}$$

$\therefore$ 1 ग्राम यूरेनियम में परमाणुओं की संख्या

$$= \frac{6.02 \times 10^{23}}{235}$$

1 मिलीग्राम यूरेनियम में परमाणुओं की संख्या

$$= \frac{6.02 \times 10^{23}}{235} \times 10^{-3}$$

प्रति विखण्डन मुक्त ऊर्जा = 200 MeV = 200×10^6 eV

$$= 200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ जूल}$$

$$= 200 \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ जूल}$$

$$= \frac{200 \times 1.6 \times 10^{-13}}{4.2} \text{ कैलोरी}$$

अतः 1 मिलीग्राम यूरेनियम के विखण्डन से प्राप्त ऊष्मा

$$= \frac{200 \times 1.6 \times 10^{-13}}{4.2} \times \frac{6.02 \times 10^{20}}{235}$$

$$= \frac{1926.4}{987} \times 10^7$$

$= 1.952 \times 10^7$ कैलोरी

उदाहरण 69. रेडियम की अर्द्धआयु 1620 वर्ष है। शुद्ध रेडियम के 1 ग्राम नमूने में 2.7×10^{21} परमाणु हैं। इनमें से वर्षों में कितने रेडियम परमाणु विघटित हो जायेगें ?

हल–यदि किसी रेडियोएक्टिव तत्व की प्रारम्भिक मात्रा N_0 है, तब n अर्द्ध आयुओं के पश्चात् बचे तत्व की मात्रा

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

रेडियम की अर्द्ध आयु 1620 वर्ष है। अतः 810 वर्षों में अर्द्ध-आयुओं की संख्या

$$n = \frac{810}{1620} = \frac{1}{2}$$

प्रारम्भ में परमाणुओं की संख्या $N_0 = 2.7 \times 10^{21}$

अतः आधी $\left(\frac{1}{2}\right)$ अर्द्ध आयु के पश्चात् अविघटित परमाणुओं की संख्या

$$N = 2.7 \times 10^{21} \times \left(\frac{1}{2}\right)^{1/2}$$

$$= \frac{2.7 \times 10^{21}}{\sqrt{2}} = 1.9 \times 10^{21}$$

$\therefore$ विघटित रेडियम परमाणु $= 2.7 \times 10^{21} - 1.9 \times 10^{21}$

$= 0.8 \times 10^{21}$

उदाहरण 70. एक रेडियोएक्टिव पदार्थ के नमूने में 10^6 रेडियोएक्टिव नाभिक है। इसकी अर्द्ध आयु 20 सेकण्ड है। 10 सेकण्ड के पश्चात् कितने नाभिक रह जायेंगे ?

हल–यदि किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ के नमूने में प्रारम्भ में N_0 नाभिक हैं, तब n अर्द्ध आयुओं के पश्चात् बचे नाभिकों की संख्या

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

रेडियोएक्टिव पदार्थ की अर्द्ध आयु 20 सेकण्ड है। अतः 10 सेकण्ड में अर्द्ध आयुओं की संख्या

$$n = \left(\frac{10}{20}\right) = \frac{1}{2}$$

यहाँ प्रारम्भ में नाभिकों की संख्या $N_0 = 10^6$

अतः $\frac{1}{2}$ (आधी) अर्द्ध-आयु के पश्चात् बचे नाभिकों की संख्या

$$N = 10^6 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{2}} = 10^6 \sqrt{\frac{1}{2}}$$

$$= \frac{10^6}{\sqrt{2}} = \frac{10^6}{1.41} = \frac{10}{1.41} \times 10^5$$

$= 7 \times 10^5$ (लगभग)

उदाहरण 71. थोरियम-X की अर्द्ध-आयु 3.64 दिन है। कितने दिनों के बाद पदार्थ के द्रव्यमान का 0.1 भाग अक्षय रहेगा ?

हल–क्षय नियतांक $\lambda = \frac{0.6931}{T} = \frac{0.6931}{3.64} = 0.1904$ प्रतिदिन

यदि प्रारम्भ में ($t = 0$ समय पर) किसी रेडियोएक्टिव पदार्थ के परमाणुओं की संख्या N_0 है तथा t समय पश्चात् बचे हुये परमाणुओं की संख्या N हैं, तब

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

यहाँ $\frac{N}{N_0} = 0.1 = 10^{-1}$

$\therefore$ $10^{-1} = e^{-\lambda t}$

अथवा $e^{\lambda t} = 10$

अथवा $\lambda t = \log_e 10 = 2.3026 \times \log_{10} 10 = 2.3026 \times 1$

$\therefore$ $t = \frac{2.3026 \times 1}{\lambda} = \frac{2.3026 \times 1}{0.1904}$

$= 12.1$ दिन।

उदाहरण 72. Ra D की अर्द्धआयु 22 वर्ष है। कितने समय में Ra D के किसी प्रतिदर्श का 90% विघटित हो जायेगा ?

हल–जब 90% भाग विघटित हो जायेगा तब अविघटित शेष भाग

$$= 10\% = \frac{10}{100} = \frac{1}{10}$$

माना कि यह विघटन n अर्द्धआयु कालों में हुआ है

$\therefore$ $\left(\frac{1}{2}\right)^n = \frac{1}{10}$

$\Rightarrow$ $2^n = 10$

दोनों तरफ लघुगणक लेने पर

$$n \log_{10} 2 = \log_{10} 10$$

$$n = \frac{\log_{10} 10}{\log_{10} 2} = \frac{1}{0.3010}$$

$\therefore$ विघटन में लगा समय

$$t = nT$$

$$= \frac{1}{0.3010} \times 22$$

$= 73.09$ वर्ष

उदाहरण 73. एक रेडियोएक्टिव नमूने की सक्रियता का मान नौ वर्षों में घटकर प्रारम्भिक मान R_0 का एक-तिहाई रह गया है। अब से नौ वर्ष और व्यतीत होने पर इसकी सक्रियता के मान की गणना कीजिये।

हल–रदरफोर्ड-सोडी नियम से

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

$t = 9$ वर्षों में, $R = R_0/3$

$\therefore$ $e^{-9\lambda} = \frac{1}{3}$

माना अगले 9 वर्षों में सक्रियता R′ रह जाती है तब

$$R' = R_0 e^{-18\lambda}\ R_0 (e^{-9\lambda})^2 = R_0 \left(\frac{1}{3}\right)^2 = R_0/9$$

उदाहरण 74. एक मिली क्यूरी सक्रियता के लिए Th^{227} की मात्रा ज्ञात कीजिए। उसकी अर्द्धआयु 1.9 वर्ष है।

हल–दिया गया है–

R = 1 मिली क्यूरी

$= 3.7 \times 10^7$ विघटन/से.

T = 1.9 वर्ष

$= 1.9 \times 365 \times 24 \times 3600$ प्रति सेकण्ड

$\because$ सक्रियता $R = \lambda N$

तथा यदि Th^{227} की आपेक्षिक मात्रा m ग्राम है तब इसमें सक्रिय परमाणुओं की संख्या

$$N = \frac{6.02 \times 10^{23} \times m}{227}$$

$\therefore$ $R = \lambda N$ से

$$3.7 \times 10^7 = \frac{0.693}{T} N$$

$$\Rightarrow 3.7 \times 10^7 = \frac{0.693}{1.9 \times 365 \times 24 \times 3600} \times \frac{6.02 \times 10^{23} \times m}{227}$$

$$\Rightarrow m = \frac{3.7 \times 10^7 \times 1.9 \times 365 \times 24 \times 3600 \times 227}{0.693 \times 6.02 \times 10^{23}}$$

$= 1.206 \times 10^{-6}$ ग्राम

$= 1.206$ माइक्रोग्राम

उदाहरण 75. एक रेडियोधर्मी पदार्थ (अर्द्ध-आयु = 10 दिन) की कुछ मात्रा एक बन्द कमरे के अन्दर फैला दी गई है, परिणामस्वरूप विकिरण का स्तर कमरे की सामान्य अध्यावास (normal occupacy) के लिए स्वीकृत स्तर से 50 गुना हो जाता है। कितने दिनों के बाद कमरा उपयोग के लिये सुरक्षित होगा ?

हल–माना स्वीकृत स्तर तक पहुँचने में t समय लगता है। इसका अर्थ है कि t समय पश्चात् सक्रियता वर्तमान मान की 1/50 तक गिर जायेगी। इस प्रकार यदि वर्तमान सक्रियता R_0 है तथा t समय पश्चात् R है, तब

$$\frac{R}{R_0} = \frac{1}{50}$$

अथवा $$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{50}$$

जहाँ N व N_0 संगत रेडियोएक्टिव परमाणुओं की संख्यायें हैं ($R = N\lambda$, $R_0 = N_0\lambda$, जहाँ λ क्षय-नियतांक है)।

अब $N = N_0 e^{-\lambda t}$

अथवा $\lambda t = \log_e \frac{N}{N_0} = \log_e 50$

अथवा $t = \left(\frac{(\log_e 50)}{\lambda}\right)$

परन्तु $\lambda = \frac{(\log_e 2)}{T}$ जहाँ T अर्द्ध-आयु है।

$$\therefore \quad t = T\frac{\log_e 50}{\log_e 2} = T\frac{\log_{10} 50}{\log_{10} 2}$$

$$= (10 \text{ दिन}) \times \frac{1.6990}{0.3010} = 56.45 \text{ दिन}$$

उदाहरण 76. $_{84}P^{210}$ की अर्द्ध-आयु 140 दिन है। प्रति सप्ताह सक्रियता में प्रतिशत कमी ज्ञात कीजिए।

हल–रदरफोर्ड-सोडी सूत्र से, $\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$

अब यदि प्रारम्भिक सक्रियता तथा t समय पर सक्रियता क्रमशः R_0 तथा R हो, तो $R_0 = \lambda N_0$ एवं $R = \lambda N$

अतः $$\frac{N}{N_0} = \frac{R}{R_0} = e^{-\lambda t} = \frac{1}{e^{\lambda t}}$$

$$\therefore \quad \frac{R}{R_0} = e^{\lambda t}$$

लघुगणक लेने पर

$$\log_e\left(\frac{R}{R_0}\right) = \lambda t$$

$$\log_{10}\left(\frac{R}{R_0}\right) = \frac{\lambda t}{2.303} \quad \left[\because \lambda = \frac{0.693}{T}\right]$$

$= \frac{0.693}{T} \times \frac{t}{2.303}$ [यहाँ $t = 7$ दिन, $T = 140$ दिन]

$$= \frac{0.693}{140} \times \frac{7}{2.303} = 0.015$$

अतिलघुगणक लेने पर

$$\frac{R}{R_0} = \text{Anti log } 0.015 = 1.035$$

या $$\frac{R}{R_0} = \frac{1}{1.035} = 0.699$$

$\therefore$ प्रति सप्ताह सक्रियता में प्रतिशत कमी

$$= \frac{R_0 - R}{R_0} \times 100 = \left(1 - \frac{R}{R_0}\right) \times 100$$

$= (1 - 0.966) \times 100 = 3.4\%$

अतिलघूत्तरात्मक प्रश्न

प्रश्न 1. नाभिक के अस्तित्व की खोज किसने व कैसे की ?

प्रश्न 2. न्यूट्रॉन की खोज किसने की ?

प्रश्न 3. नाभिक का आकार लगभग किस कोटि का होता है ?

प्रश्न 4. 'फर्मी' का क्या तात्पर्य है ?

प्रश्न 5. नाभिकीय द्रव्य का घनत्व किस कोटि का होता है ?

प्रश्न 6. $_{11}Na^{23}$ के नाभिक की संरचना बतलाइये।

प्रश्न 7. α-कण क्या होते हैं ?

प्रश्न 8. रेडियोएक्टिव क्षयता का सूत्र लिखिये।

प्रश्न 9. क्षयांक क्या निरूपित करता है ?

प्रश्न 10. β^- कण और β^+ कण में क्या अन्तर है ?

प्रश्न 11. एक रेडियोएक्टिव पदार्थ अपने माध्य आयु के बराबर समय तक विघटित होता है तो पदार्थ का कितना भाग शेष रहेगा ?

प्रश्न 12. अर्ध-आयु T और माध्य आयु T_a में सम्बन्ध लिखिये।

प्रश्न 13. एक तत्व के रेडियोधर्मी समस्थानिक और स्थाई समस्थानिक के रासायनिक गुणों में क्या अन्तर होगा ?

प्रश्न 14. क्या रेडियोएक्टिव विघटन की प्रक्रिया को किसी बाह्य साधन द्वारा त्वरित किया जा सकता है ?

प्रश्न 15. कार्बन डेटिंग में कार्बन का कौन से समस्थानिक के विघटन का अध्ययन किया जाता है ?

प्रश्न 16. 1 amu के तुल्य ऊर्जा का मान क्या होगा ?

प्रश्न 17. द्रव्यमान क्षति क्या होगी है ?

प्रश्न 18. नाभिकीय बन्धन ऊर्जा क्या होती है ?

प्रश्न 19. किस तत्व के नाभिक में प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा अधिकतम होती है ?

प्रश्न 20. कौन सा पदार्थ न्यूट्रॉन का अच्छा मंदक होता है ?

प्रश्न 21. नाभिकीय ऊर्जा का शांतिपूर्ण उपयोग कहाँ किया जाता है ?

प्रश्न 22. परमाणु भट्टी में कौनसा पदार्थ ईंधन के रूप में प्रयुक्त होता है ?

प्रश्न 23. परमाणु भट्टी तथा परमाणु बम में मौलिक अन्तर क्या होता है ?

प्रश्न 24. सूर्य से ऊर्जा हमें कैसे प्राप्त होती है ?

उत्तरमाला

उत्तर 1. रदरफोर्ड ने α-कणों के स्वर्ण पत्र से प्रकीर्णन द्वारा।

उत्तर 2. जेम्स चैडविक

उत्तर 3. 10^{-15} मी.

उत्तर 4. फर्मी दूरी का एक मात्रक है, 1 फर्मी = 10^{-15} मी.

उत्तर 5. $\sim 10^{17}$ किग्रा./मी.^{3}

उत्तर 6. $_{11}Na^{23}$ के नाभिक में परमाणु क्रमांक 11 है अतः इसमें 11 प्रोटॉन होंगे तथा द्रव्यमान संख्या और परमाणु क्रमांक के अन्तर के तुल्य अर्थात् (23 – 11) = 12 न्यूट्रॉन होंगे।

उत्तर 7. द्विआयनित हीलियम परमाणु ($_2He^4$)

उत्तर 8. $N = N_0 e^{-\lambda t}$ जहाँ N_0 प्रारम्भिक ($t = 0$ पर) सक्रिय परमाणु की संख्या है N समय t पर सक्रिय परमाणुओं की संख्या है व λ क्षयांक है।

उत्तर 9. क्षयांक λ प्रति सक्रिय परमाणु प्रति सेकण्ड विघटन की प्रायिकता निरूपित करता है।

उत्तर 10. β^- कण तीव्रगामी इलेक्ट्रॉन होते हैं जबकि β^+ पॉजीट्रॉन। पॉजीट्रॉन, इलेक्ट्रॉन का प्रतिकण (antiparticle) हैं। इलेक्ट्रॉन पर ऋण आवेश व पॉजीट्रॉन पर समान परिमाण का धन आवेश होता है उनका द्रव्यमान समान होता है।

उत्तर 11. $(1/e)$ भाग = 36.78%

उत्तर 12. $T = 0.693\, T_a$

उत्तर 13. कोई नहीं क्योंकि रासायनिक गुण परमाणु के इलेक्ट्रॉनों पर निर्भर है जबकि समस्थानिकों में नाभिक के न्यूट्रॉनों की संख्या भिन्न होती है।

उत्तर 14. नहीं।

उत्तर 15. C^{14} का, C^{14} रेडियोएक्टिव है व इसकी अर्ध-आयु 5700 वर्ष है।

उत्तर 16. सूत्र $E = mc^2$ के अनुसार 931.5 MeV

उत्तर 17. नाभिक के न्यूक्लिऑनों के द्रव्यमानों के योग तथा नाभिक के वास्तविक द्रव्यमान के अन्तर के मान को द्रव्यमान क्षति कहते हैं।

उत्तर 18. नाभिक की द्रव्यमान क्षति के तुल्य ऊर्जा जो नाभिक के न्यूक्लिऑनों को एक दूसरे के साथ बांधने में मुक्त होती है।

उत्तर 19. $_{26}Fe^{56}$

उत्तर 20. भारी जल D_2O

उत्तर 21. परमाणु भट्टी में

उत्तर 22. यूरेनियम 235 या प्लूटोनियम 239

उत्तर 23. परमाणु भट्टी में नियंत्रित नाभिकीय शृंखला अभिक्रिया होती है जबकि परमाणु बम अनियंत्रित नाभिकीय शृंखला होती है।

उत्तर 24. सूर्य से ऊर्जा हमें नाभिकीय संलयन अभिक्रिया के द्वारा प्राप्त होती है।

पाठ्यपुस्तक के प्रश्न-उत्तर

वस्तुनिष्ठ प्रश्न

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

(अ) 1.2 (ब) 2.4
(स) 4.8 (द) 3.7

2. यदि ^7_3Li समस्थानिक का द्रव्यमान 7.016005 u तथा H परमाणु व न्यूट्रॉन के द्रव्यमान क्रमशः 1.007825 u व 1.008665 u है Li नाभिक की बंधन ऊर्जा है

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

3. यदि किसी समय किसी रेडियोएक्टिव प्रतिदर्श में 1.024×10^{20} सक्रिय परमाणु है तो आठ अर्द्धआयुकाल के बाद शेष सक्रिय परमाणुओं की संख्या है

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

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

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

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

(अ) 8, 8 (ब) 6, 6
(स) 6, 8 (द) 8, 6

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

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

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

(अ) $F_n >> F_e$

(ब) $F_e >> F_n$

(स) $F_n = F_e$

(द) F_n, F_e से थोडा ही अधिक है

8. एक ड्यूट्रॉन तथा α कण की प्रतिन्यूकिलऑन बंधन ऊर्जाएं क्रमशः x_1 व x_2 है तो संलयन अभिक्रिया

$^2_1H + ^2_1H + \rightarrow ^4_2He + Q$ में मुक्त ऊर्जा Q है

(अ) $4(x_1 + x_2)$ (ब) $4(x_1 - x_2)$

(स) $2(x_1 + x_2)$ (द) $2(x_2 - x_1)$

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

(अ) $^{238}_{92}U$ (ब) ^4_2He

(स) $^{16}_8O$ (द) $^{56}_{26}Fe$

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

(अ) 2 kW (ब) 4 kW

(स) 1.6 kW (द) 3.2 kW

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

(अ) परमाणु की आन्तरिक कक्षाओं से

(ब) नाभिक में विद्यमान मुक्त इलेक्ट्रॉनों से

(स) नाभिक में न्यूट्रान के विघटन से

(द) नाभिक से उत्सर्जित फोटॉन से

12. एक माध्य आयु में

(अ) आधे सक्रिय नाभिक क्षयित होते है

(ब) आधे से अधिक सक्रिय नाभिक क्षयित होते है

(स) आधे से कम सक्रिय क्षयित होते है

(द) सभी नाभिक क्षयित होते है

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

(अ) द्रव्यमान (ब) आयतन

(स) बंधन ऊर्जा (द) घनत्व

14. निम्नलिखित में से कौनसी विद्युत चुंबकीय तरंग है

(अ) α किरणे (ब) β किरणे

(स) γ किरणे (द) कैथोड किरणे

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

(अ) ऑक्सीजन (ब) बोरान

(स) सिलिकॉन (द) कार्बन

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

1. (स) $R = R_0A^{1/3}$ fm.

या $R = 1.2\ (64)^{1/3}$

($\because R_0 = 1.2$ fm तथा यहाँ $A = 64$)

या $R = 1.2 \times 4$ fm.

या $R = 4.8$ fm

2. (द) $E_B = [Z \times m_p + (A - Z)m_n - m_{nuc}] \times 931 MeV$

या $E_B = [3 \times 1.007825 + (7-3) \times 1.008665 - 7.016005] \times 931 MeV$

या $E_B = [3.023475 + 4.034660 - 7.016005] \times 931 MeV$

या $E_B = (7.058135 - 7.016005) \times 931$ MeV

या $E_B = 0.042130 \times 931$ MeV $= 39.22$ MeV

3. (ब) $N_0 = 1.024 \times 10^{20}$ $t = 8T$

शेष सक्रिय परमाणुओं की संख्या

$$N = N_0 \times 2^{-t/T}$$

$$= N_0 \times \frac{1}{2^{t/T}} = N_0 \times \frac{1}{2^{\frac{8T}{T}}}$$

या $$= 1.024 \times 10^{20} \times \frac{1}{256} = 4 \times 10^{17}$$

4. (अ) $A_0 = 14.14$ विघटन प्रति सेकेण्ड प्रति ग्राम

$A = 10.00$ विघटन प्रति सेकेण्ड प्रति ग्राम

$T = 5700$ वर्ष

$\because$ $$A = A_0e^{-\lambda t} \text{ या } e\lambda^t = \frac{A_0}{A}$$

$$\lambda.t = \log_e \frac{A_0}{A}$$

या $$\frac{\log_e 2}{T}.t = \log_e \frac{A_0}{A}$$

या $$\log_{10} 2 \times \frac{t}{T} = \log_{10} \times \frac{A_0}{A}$$

$\therefore$ $$t = \frac{T \times \log_{10}\left(\frac{A_0}{A}\right)}{\log_{10} 2}$$

$$= \frac{5700 \times \log_{10} \frac{14.14}{10}}{\log_{10} 2}$$

$$t = \frac{5700 \times \log_{10} \sqrt{2}}{\log_{10} 2}$$

$$= \frac{5700 \times \frac{1}{2} \log_{10} 2}{\log_{10} 2}$$

t = 2850 वर्ष

5. (द) $^{238}_{92}U \xrightarrow{\alpha} ^{234}_{90}Th \xrightarrow{\beta} ^{234}_{91}Pa \xrightarrow{\beta} ^{234}_{92}U \xrightarrow{\alpha}$

$^{230}_{90}Th \xrightarrow{\alpha} ^{226}_{88}Ra \xrightarrow{\alpha} ^{222}_{86}Rn \xrightarrow{\alpha} ^{218}_{84}P_0 \xrightarrow{\alpha}$

$^{214}_{82}Pb \xrightarrow{\beta} ^{214}_{83}Bi \xrightarrow{\beta} ^{214}_{84}P_0 \xrightarrow{\alpha} ^{210}_{82}Pb \xrightarrow{\beta} ^{210}_{83}Bi$

$\xrightarrow{\beta} ^{210}_{84}P_0 \xrightarrow{\alpha} ^{206}_{82}Pb$

कुल उत्सर्जित α कण 8 एवं β कण 6

6. (ब) प्रति न्यूक्लिओन बंधन ऊर्जा = 1.115 MeV

ड्यूटीरियम नाभिक में कुल न्यूक्लिओन = 2

$\therefore$ नाभिक की कुल बंधन ऊर्जा = 2 × 1.115 MeV

या $E_b = 2.230$ MeV

$\therefore$ द्रव्यमान क्षति $\Delta m = \left(\frac{E_b}{931}\right)u$

$$\Delta m = \frac{2.230}{931}u = 0.002395\ u$$

या $\Delta m = 0.0024\ u$

7. (ब) नाभिकीय बल की परास अत्यल्प 10^{-4} Å की कोटि में होती है, प्रश्नानुसार प्रोटॉनों के मध्य दूरी 10Å है, अतः नाभिकीय बल F_n नगण्य होगा, जबकि उनके मध्य स्थिर वैद्युत बल (कूलॉम बल) F_e अत्यधिक होगा। $\therefore F_e >> F_n$

8. (ब) ड्यूट्रोन की प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा x_1

α कण (^4_2He) की प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा x_2

संलयन अभिक्रिया

$^2_1H + ^2_1H \longrightarrow ^4_2He + Q$ (में Q मुक्त ऊर्जा)

$\therefore 2x_1 + 2x_1 \longrightarrow 4x_2 + Q$

$4x_1 - 4x_2 \longrightarrow Q$

$Q = 4(x_1 - x_2)$

9. (द) द्रव्यमान संख्या A = 30 से A = 170 तक के तत्वों की बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिओन नियत तथा मान में अधिकतम (लगभग 8.75 MeV) होती है। अतः चारों विकल्पों में यह केवल $^{56}_{26}Fe$ के लिए सर्वाधिक होगी।

10. (स) नाभिकीय भट्टी में विलयन दर

$$\frac{dN}{dt} = 10^{14} \text{ विघटन / सेकण्ड}$$

प्रति विखण्डन प्राप्त ऊर्जा = 250 MeV

$\therefore$ भट्टी का शक्ति निवेश

$P_i = 10^{14} \times 250$ MeV

या $P_i = 10^{14} \times 250 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}$

या $P_i = 4000$ W = 4 KW

दक्षता = 40%

$\therefore \frac{P_0}{P_i} = \frac{40}{100}$

$\Rightarrow P_0 = \frac{40}{100} \times P_i$

या $P_0 = \frac{40}{100} \times 4 = 1.6$ KW

11. (स) $^1_0n \longrightarrow ^1_1H + \beta^-(^0_{-1}e) + \bar{\nu}$ (न्यूट्रॉन, प्रोटॉन, बीटाकण, एन्टी न्यूट्रिनो)

12. (ब) 63% सक्रिय नाभिक क्षयित होते हैं, जो संख्या आधे से अधिक है।

13. (द) द्रव्यमान $\propto$ आयतन

$\therefore \frac{\text{द्रव्यमान}}{\text{आयतन}}$ = नियतांक

घनत्व = नियतांक

घनत्व परिवर्तित नहीं होता।

14. (स)

15. (द) $^{22}_{10}Ne \longrightarrow ^{22-8}_{10-4}X + 2 \times ^4_2He$

$\longrightarrow ^{14}_{6}X = ^{14}_{6}C$, कार्बन

अतिलघुत्तरात्मक प्रश्न

1 $^{32}_{15}X$ नाभिक में प्रोटॉनो एवं न्यूट्रॉनों की संख्या क्या है?

उत्तर– प्रोटॉनों की संख्या Z = 15

न्यूट्रॉनों की संख्या N = A – Z = 32 – 15 = 17

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

उत्तर– 931 MeV

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

उत्तर– कोई नाभिक β क्षय के उपरांत अपने समभारिक में बदलता है।

$$^{A}_{Z}X \longrightarrow \beta^{-}\left(^{0}_{-1}e\right) + ^{A}_{Z+1}Y$$

नाभिक X व Y समभारिक होंगे।

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

उत्तर– α विकिरणों का स्पेक्ट्रम विविक्त होता है।

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

उत्तर– विखण्डन की नियंत्रित शृंखला पर परमाणु भट्टी आधारित है।

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

उत्तर– ग्रेफाइट या भारी जल या बेरीलियम ऑक्साइड।

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

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

या
$$T = \frac{0.693}{\lambda}$$

जहाँ T और λ क्रमशः अर्द्धआयु व क्षयांक है।

8 **सक्रियता की SI इकाई क्या है?**

उत्तर– 1 बेकरेल (Bq) = 1 विघटन / सेकण्ड

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

उत्तर– जब $t = 4T$

तब
$$N = \frac{N_0}{2^4} = \frac{N_0}{16}$$

$$\therefore \quad \frac{N}{N_0} = \frac{1}{16}$$

$$\% \frac{N}{N_0} = \frac{1}{16} \times 100 = 6.25\%$$

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

उत्तर– ताप नाभिकीय संलयन

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– प्रश्नानुसार यदि वह तत्व X हो, तो

$$^{218}_{84}X \longrightarrow \beta^{-}(^{0}_{-1}e) + ^{218}_{85}Y + \bar{\nu}$$

अतः β^- कण उत्सर्जित करने में हुए विघटन से प्राप्त तत्व की द्रव्यमान संख्या 218 व परमाणु संख्या 85 होगी।

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

उत्तर– नहीं, γ क्षय के बाद नाभिक की द्रव्यमान संख्या में कोई हानि नहीं होती है, यह अपरिवर्तित रहती है।

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

उत्तर– सीसे के नाभिक से एक न्यूक्लिऑन बाहर निकालना अधिक आसान है, क्योंकि इसकी बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन लोहे की तुलना में काफी कम होती है।

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

उत्तर– हल्के नाभिक में अधिक गतिज ऊर्जा होगी। क्योंकि दोनों का विपरीत दिशा में संवेग समान होगा और तब

$$m \times E = \text{नियतांक}$$

अर्थात्
$$E \propto \frac{1}{m}$$

m का मान कम होने पर ऊर्जा E अधिक होगी।

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

उत्तर– नाभिक के न्यूक्लिऑनों को एक दूसरे से पृथक कर देने से कुल द्रव्यमान में वृद्धि का स्रोत नाभिक की बंधन ऊर्जा होती है।

लघुत्तरात्मक प्रश्न

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

उत्तर– हाइड्रोजन के अणु में दोनों प्रोटॉनों के मध्य दूरी नाभिकीय बल के प्रभावी होने की परास की तुलना में काफी अधिक होती है और इस दूरी पर नाभिकीय बल सदैव उपेक्षणीय हो जाता है। साथ ही 10^{-14} मीटर से अधिक दूरियों पर नाभिकीय विमाओं के सदर्भ में अंतःक्रियाएँ विद्युत चुम्बकीय हो जाती है।

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

उत्तर– हाइड्रोजन के समस्थानिक ट्राइटियम $\left(^{3}_{1}H\right)$ के दो नाभिक पहले संलयित होकर, फिर दो न्यूट्रॉनों का उत्सर्जन करते हुए α-क्षय कर विघटित हो सकते है, जिसमें क्रिया के साथ Q ऊर्जा मुक्त होती है।

$$^{3}_{1}H + ^{3}_{1}H \longrightarrow ^{4}_{2}He + 2\,^{1}_{0}n + Q$$

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

उत्तर– कार्बन परमाणु के द्रव्यमान के $\frac{1}{12}$ भाग का मान एकीकृत परमाणु द्रव्यमान मात्रक कहलाता है। इस मात्रक में परमाणु तथा नाभिक के द्रव्यमान को मापा जाता है, इसे amu या केवल u से व्यक्त करते हैं।

$$1u = 1.6605 \times 10^{-27} \text{ किग्रा}$$

4 नाभिकीय द्रव्यमान क्षति से तात्पर्य समझाइए।

उत्तर– किसी तत्व के नाभिक का द्रव्यमान, उस नाभिक में उपस्थित न्यूक्लिऑनों (प्रोटॉन व न्यूट्रॉन) के द्रव्यमानों के योग से सदैव कम होता है। नाभिक के द्रव्यमान में यह कमी द्रव्यमान क्षति कहलाती है।

द्रव्यमान क्षति $\Delta m = (Z \times m_p + N \times m_n) - m_{nuc}$

यहाँ Z = प्रोटॉनों की संख्या, N = न्यूट्रॉनों की संख्या, m_p = एक प्रोटॉन का द्रव्यमान, m_n = एक न्यूट्रॉन का द्रव्यमान तथा m_{nuc} = नाभिक का द्रव्यमान है।

5 रेडियोएक्टिवता को परिभाषित कीजिए।

उत्तर– भारी तत्वों के स्वत: विघटन द्वारा विकिरणों के निरन्तर उत्सर्जन की प्रक्रिया रेडियो एक्टिवता कहलाती है। इस प्रक्रिया को दर्शाने वाले तत्व रेडियोएक्टिव तत्व कहलाते है।

6 रदरफोर्ड-सोडी नियम का उल्लेख कीजिए।

उत्तर– रदरफोर्ड–सोडी ने रेडियोएक्टिव विघटन संबंधी निम्न तथ्यों के आधार पर रेडियोएक्टिव क्षयता का नियम प्रस्तुत किया।

(i) रेडियो एक्टिवता समस्त परमाणु का गुण न होकर केवल नाभिक का गुण होता है तथा स्वत: सम्पन्न होने वाली घटना है।

(ii) यह घटना भौतिक प्रभाव ताप, दाब, आर्द्रता आदि से प्रभावित नहीं होती।

(iii) यह घटना यादृच्छिक होती है।

(iv) यह घटना प्रायिकता के सिद्धांत का पालन करती है।

''किसी समय सक्रिय नाभिकों के विघटन की दर उस समय उपस्थित कुल सक्रिय नाभिकों की संख्या के अनुक्रमानुपाती होती है।''

इसे रेडियो एक्टिव विघटन का नियम या रदरफोर्ड–सोडी का नियम या चारघाताङ्की क्षय का नियम कहते हैं।

अर्थात् विघटन की दर $\left(-\frac{dN}{dt}\right) \propto N$

इसमें (–) चिह्न यह दर्शाता है, कि विघटन से रेडियोएक्टिव नाभिकों की संख्या घटती है।

$$\therefore \quad \frac{dN}{dt} = -\lambda.N \quad \quad ...(1)$$

यहाँ स्थिरांक λ, तत्व का क्षयांक कहलाता है। इसका मान भिन्न–भिन्न तत्वों के लिए उनकी प्रकृति के अनुसार भिन्न–भिन्न होता है।

समी. (1) से
$$\lambda = \frac{\left(-\frac{dN}{dt}\right)}{N} \quad \quad ...(2)$$

अत: किसी तत्व का क्षयांक, किसी क्षण उसके विघटन की दर और उस क्षण उसमें उपस्थित सक्रिय नाभिकों की संख्या का अनुपात होता है।

समी. (2) से समाकलन द्वारा निम्न सूत्र प्राप्त होता है।

$$N = N_0 e^{-\lambda.t} \quad \quad ...(2)$$

जहाँ N_0 = विघटन प्रारम्भ होने से पूर्व सक्रिय नाभिकों की संख्या, तथा N = t समय पश्चात् शेष बचे सक्रिय नाभिकों की संख्या है।

समी– (3) रदरफोर्ड के नियम का चरघाताङ्की रूप है, इसलिए यह नियम चरघाताङ्की क्षयता का नियम भी जाना जाता है।

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

उत्तर– **अर्द्धआयु–**जितने समय में किसी रेडियोएक्टिव तत्व के परमाणुओं की संख्या अपनी प्रारम्भिक संख्या से आधी रह जाती है, उस समय को उस तत्व की अर्द्धआयु T कहते हैं।

माध्य आयु–किसी रेडियो एक्टिव तत्व की माध्य आयु उसके सभी सक्रिय परमाणुओं की आयु का योग और सक्रिय परमाणुओं की कुल संख्या का अनुपात होती है। इसे T_a से व्यक्त करते हैं।

$$\therefore T_a = \frac{\textit{सभी सक्रिय परमाणुओं की आयु का योग}\ (S)}{\textit{सक्रिय परमाणुओं की कुल संख्या}\ (N_0)}$$

अर्द्धआयु एवं माध्य आयु में संबंध–

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

या
$$T_a = 1.443\ T$$

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

उत्तर– α-कण के उत्सर्जन से किसी तत्व का विघटन होना α-क्षय कहलाता है। जब किसी नाभिक से α-कण का उत्सर्जन होता है, तो उत्पाद नाभिक का परमाणु क्रमांक, पैतृक नाभिक के परमाणु क्रमांक से दो कम हो जाता है तथा उत्पाद नाभिक की द्रव्यमान संख्या पैतृक नाभिक की द्रव्यमान संख्या से चार कम हो जाती है। यदि पैतृक नाभिक एवं उत्पाद नाभिक को क्रमश: X एवं Y से व्यक्त करें, तो

$$\underset{\text{(पैतृक नाभिक)}}{{}^{A}_{Z}X} \longrightarrow \underset{\text{(उत्पाद नाभिक)}}{{}^{A-4}_{Z-2}Y} + \underset{(\alpha-\text{कण})}{{}^{4}_{2}He}$$

उदाहरण के लिए–

$$\underset{\text{(यूरेनियम)}}{{}^{238}_{92}U} \longrightarrow \underset{\text{(थोरियम)}}{{}^{234}_{90}Th} + \underset{(\alpha-\text{कण})}{{}^{4}_{2}He}$$

α-कणों का ऊर्जा स्पेक्ट्रम : रोजेनब्लम के अनुसार रेडियोएक्टिव तत्व से उत्सर्जित सभी α-कणों की ऊर्जा समान नहीं होती है, बल्कि

यह विविक्त ऊर्जा समूहों में उत्सर्जित होती है। ये विविक्त ऊर्जा समूह α कणों के ऊर्जा स्पेक्ट्रम का निर्माण करते हैं। अत: स्पेक्ट्रम विविक्त प्रकार का होता है।

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

उत्तर– β-किरण स्पेक्ट्रम सतत् होता है अर्थात् एक अधिकतम मान तक के सभी संभव ऊर्जा के β-कणों का नाभिक से उत्सर्जन होता है। प्रत्येक रेडियोएक्टिव तत्व से उत्सर्जित β-कणों के स्पेक्ट्रम में ऊर्जा के लाक्षणिक अधिकतम मान को अन्त:बिन्दु ऊर्जा कहते हैं।

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

उत्तर– न्यूट्रीनों परिकल्पना β क्षय की प्रक्रिया में निम्न संरक्षण नियमों की व्याख्या में सहायक होती है।

(i) ऊर्जा संरक्षण नियम।

(ii) कोणीय चक्रण संवेग संरक्षण नियम।

11 नाभिकीय बलो के कोई दो गुण लिखिए।

उत्तर– (i) नाभिकीय बल आकर्षण बल होता है, जो न्यूक्लिओनों को बाँधे रखता है।

(ii) नाभिकीय बल आवेश अनाश्रित होते हैं।

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

उत्तर– बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन नाभिक की कुल बंधन ऊर्जा तथा उस नाभिक में उपस्थित कुल न्यूक्लिओनों की संख्या का अनुपात होती है।

अर्थात् बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन

$$\bar{E}_b = \frac{\text{नाभिक की कुल बंधन ऊर्जा}}{\text{न्यूक्लिऑनों की कुल संख्या}}$$

या $$\bar{E}_b = \frac{E_b}{A} \qquad \text{जहाँ } A = Z + N$$

जिन नाभिकों की बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन का मान अधिक होता है, वे अधिक स्थायित्व रखते हैं। $A = 50$ से $A = 100$ तक $\bar{E}_b$ का मान लगभग नियत रहता है तथा यह मान अधिकतम मान (8.7 MeV) के निकट होता है। अत: इस द्रव्यमान संख्या की परास में नाभिक सर्वाधिक स्थायित्व रखते हैं।

13 नाभिकीय विखण्डन को परिभाषित कीजिए।

उत्तर– नाभिकीय विखण्डन वह प्रक्रिया है, जिसमें एक भारी नाभिक दो तुलनात्मक (लगभग बराबर) द्रव्यमानों के नाभिकों में टूट जाता है तथा अपार मात्रा में ऊर्जा मुक्त होती है।

उदाहरण के लिए, $^{235}_{92}U$ का विखण्डन निम्न प्रकार दर्शाया जाता है।

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{236}_{92}U \longrightarrow ^{141}_{56}Ba + ^{92}_{36}Kr + 3^{1}_{0}n + \text{ऊर्जा}$$

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

उत्तर– नाभिकीय श्रृंखला अभिक्रिया हेतु प्रयुक्त विखण्डनीय पदार्थ के द्रव्यमान का वह सीमान्त मान जिससे अधिक द्रव्यमान होने पर ही विखण्डन संभव होता है, क्रांतिक द्रव्यमान (Critical Mass) कहलाता है। द्रव्यमान इससे कम होने पर न्यूट्रॉन विखण्डन से पूर्व ही पदार्थ से बाहर पलायन कर जाते हैं।

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

उत्तर– विखण्डन से प्राप्त न्यूट्रॉनों को ^{238}U द्वारा अवशोषण से बचाने के लिए उनकी गति धीमी करनी पड़ती है। इस कार्य हेतु प्रयुक्त होने वाले पदार्थ (भारी जल, ग्रेफाइट, बेरीलियम ऑक्साइड) मंदक कहलाते हैं। इन सबमें भारी जल सबसे उपयुक्त है, क्योंकि

(i) भारी जल अन्य मंदकों की तुलना में प्रयोग करना सस्ता पड़ता है।

(ii) भारी जल अन्य मंदकों की तुलना में समुद्र एवं जल स्रोतों से सुगमता से उपलब्ध होता है।

(iii) नाभिकीय भट्टी की संरचना में अन्य मंदकों की भाँति अलग से कोई ब्लॉक नहीं बनाना पड़ता है, केवल एक पूल जैसी संरचना करनी होती है।

(iv) भारी जल से न्यूट्रॉनों की गति का मंदन शीघ्रता से होता है।

निबंधात्मक प्रश्न

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

उत्तर– अनुच्छेद 15.1 तथा 15.5 पर देखें।

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

उत्तर– अनुच्छेद 15.4 तथा 15.4.1 पर देखें।

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

उत्तर– अनुच्छेद 15.6.1, 15.6.2 तथा 15.6.3 पर देखें।

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

उत्तर– अनुच्छेद 15.10 तथा 15.11 पर देखें।

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

उत्तर– अनुच्छेद 15.12 पर देखें।

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

उत्तर– अनुच्छेद 15.8.2 तथा 15.8.3 पर देखें।

7 रेडियो एक्टिव नाभिक से α क्षय की व्याख्या कीजिए। समझाइए कि क्षय से प्राप्त α कणों का ऊर्जा स्पैक्ट्रम

विविक्त ऊर्जाओं का समूह होता है।

उत्तर- अनुच्छेद 15.8.1 पर देखें।

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

उत्तर- अनुच्छेद 15.13.1 पर देखें।

आंकिक प्रश्न

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

उत्तर-

न्यूक्लिऑन संख्या (A)	नाभिक की त्रिज्या (R)
16	3×10^{-15} m.
128	?

$\because \quad R = R_0 R^{1/3}$

उपरोक्त सूत्र से

$$3 \times 10^{-15} = R_0(16)^{1/3} \quad ...(1)$$

तथा

$$R = R_0(128)^{1/3} \quad ...(2)$$

$$\therefore \quad \frac{R}{3\times10^{-15}} = \left(\frac{128}{16}\right)^{1/3} = (8)^{1/3}$$

या

$$\frac{R}{3\times10^{-15}} = 2$$

या

$$R = 2 \times 3 \times 10^{-15} \text{ m.}$$
$$= 6 \times 10^{-15} \text{ m}$$

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

उत्तर- $^{56}_{26}$Fe का द्रव्यमान $m_{nuc} = 55.9349$ u

न्यूट्रॉन का द्रव्यमान $m_n = 1.00867$ u

प्रेटॉन का द्रव्यमान $m_p = 1.00783$ u

तथा
$$1 \text{ u} = 931 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

प्रोटॉनों की संख्या Z = 26 तथा न्यूट्रॉनों की संख्या N = 56 – 26

या N = 30

$\therefore$ द्रव्यमान क्षति $\Delta m = Z \times m_p + N \times m_n - m_{nuc}$

या $\Delta m = 26 \times 1.00783 + 30 \times 1.00867 - 55.9349$

या $\Delta m = 26.20358 + 30.26010 - 55.9349$

या $\Delta m = 56.46368 - 55.9349$

या $\Delta m = 0.52878$ u

$\therefore$ नाभिक के लिए बंधन ऊर्जा $E_b = \Delta mc^2$

$$E_b = 0.52878\ C^2 \times 931 \text{ MeV/C}^2$$
$$E_b = 492.29 \text{ MeV}$$

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

उत्तर- अर्द्धआयु T = 3s

प्रतिदर्श में परमाणुओं की प्रारम्भिक संख्या $N_0 = 8000$

t समय पश्चात् प्रतिदर्श में परमाणुओं की संख्या N = 1000

(i) क्षयांक $\lambda = \dfrac{\log_e 2}{T} = \dfrac{0.693}{3} = 0.231\ s^{-1}$

(ii) चरघाताङ्की क्षय नियम से.

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

या
$$e^{\lambda t} = \frac{N_0}{N}$$

या
$$\lambda . t = \log_e\left(\frac{N_0}{N}\right)$$

या
$$t = \frac{1}{\lambda}\log_e\left(\frac{N_0}{N}\right)$$

या
$$t = \frac{1}{\lambda}\log_e\frac{8000}{1000} = \frac{1}{\lambda}\log_e 2^3$$

या
$$t = 3\times\frac{\log_e 2}{\lambda} = 3 \times T$$

या
$$t = 3 \times 3 = 9s$$

4 **एक रेडियोएक्टिव नाभिक इस प्रकार क्षयित होता है $X \xrightarrow{\alpha} X_1 \xrightarrow{\beta^-} X_2 \xrightarrow{\alpha} X_3 \xrightarrow{\gamma} X_4$ यदि X की द्रव्यमान संख्या 180 व परमाणु संख्या 72 है तो नाभिक X_4 की द्रव्यमान संख्या तथा परमाणु संख्या ज्ञात कीजिए।**

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

प्रश्नानुसार X की द्रव्यमान संख्या A= 180

X की परमाणु संख्या Z = 72

$$\therefore\ ^{180}_{72}X \xrightarrow{\alpha} {}^{176}_{70}X_1$$

$$^{176}_{70}X \xrightarrow{\beta} {}^{176}_{71}X_2$$

$$^{176}_{71}X_2 \xrightarrow{\alpha} {}^{172}_{69}X_3$$

$$^{172}_{69}X_3 \xrightarrow{\gamma} {}^{172}_{69}X_4$$

$\therefore$ X_4 की द्रव्यमान संख्या = 172

तथा X_4 की परमाणु संख्या = 69

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

उत्तर– नाभिकीय भट्टी द्वारा उत्पन्न शक्ति 1000 kW = 10^6 W

$\therefore$ नाभिकीय भट्टी से प्रतिसेकण्ड उत्पन्न ऊर्जा E = 10^6 J

पुन: यूरेनियम 235 के नाभिक के विखण्डन से प्राप्त ऊर्जा (E_n) = 200 MeV

या $E_n = 200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}$ J

या $E_n = 3.2 \times 10^{-11}$ J

अत: ऊर्जा E के उत्पादन में प्रति सेकेण्ड विखण्डित हो रहे नाभिकों की संख्या

$$= \frac{E}{E_n} \quad \frac{10^6}{3.2\times10^{-11}}$$

$$= 3.12 \times 10^{16}$$

6 **संलयन अभिक्रिया ${}^2_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_2He + {}^1_0n$ में ड्यूट्रॉन हीलियम तथा न्यूट्रॉन के द्रव्यमान क्रमश: 2.015 u, 3.017 u तथा 1.009 u है। यदि 1 kg ड्यूट्रीयन का पूर्ण संलयन होना है तो मुक्त ऊर्जा ज्ञात कीजिए [1u = 931 MeV/c² लें]**

उत्तर– ड्यूट्रॉन का द्रव्यमान $m_D = 2.015$ u

हीलियम का द्रव्यमान $m_{He} = 3.017$ u

न्यूट्रॉन का द्रव्यमान $m_n = 1.009$ u

ड्यूट्रीयन की मात्रा = 1 kg

1 u = 931 MeV / C^2

संलयन अभिक्रिया समीकरण

${}^2_1H + {}^2_1H \longrightarrow {}^3_2He + {}^1_0n + Q$ (मुक्त ऊर्जा)

2 ड्यूट्रॉन नाभिकों के संलयन में द्रव्यमान क्षति

$\Delta m = 2 \times m_D - (m_{He} + m_n)$

या $\Delta m = 2 \times 2.015 - (3.017 + 1.009)$

$= 4.030 - 4.026$

या $\Delta m = 0.004$ u

अत: 1 ड्यूट्रॉन नाभिक के लिए द्रव्यमान क्षति

$$= \frac{1}{2}\times0.004 = 0.002 \text{ u}$$

1 kg ड्यूट्रीयन में नाभिकों की संख्या

$$= \frac{6.023\times10^{23}}{2}\times1000$$

$N = 3.0125 \times 10^{26}$

$\therefore$ कुल द्रव्यमान क्षति = $3.0125 \times 10^{26} \times 0.002$ u

$= 6.023 \times 10^{23}$ u

$\therefore$ मुक्त ऊर्जा Q = द्रव्यमान क्षति × 931 MeV/c² × c²

$= 6.023 \times 10^{23} \times 931$ MeV

या $Q = 5607.4 \times 10^{23}$ MeV

या $Q = 5.6074 \times 10^{26}$ MeV

$\simeq 5.6 \times 10^{26}$ MeV

या $Q = 5.6 \times 10^{26} \times 1.6 \times 10^{-13}$ J

या $Q = 8.96 \times 10^{13}$ J $\simeq 9 \times 10^{13}$ J

7 **अभिक्रिया ${}^{235}_{92}U + {}^1_0n \rightarrow {}^{140}_{54}Xe + {}^{94}_{38}Sr + 2\,{}^1_0n + Q$ के लिए Q मान ज्ञात कीजिए। दिया है**

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

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

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

${}^1_0n$ का द्रव्यमान = 1.00867 u

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

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

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

${}^1_0n$ का द्रव्यमयान $m_n = 1.00867$ u

विखण्डन अभिक्रिया का समीकरण,

${}^{235}_{92}U + {}^1_0n \longrightarrow {}^{140}_{54}Xe + {}^{94}_{38}Sr + 2{}^1_0n + Q$

अभिक्रिया में द्रव्यमान क्षति,

$\Delta = (m_U + m_n) - (m_{Xe} + m_{Sr} + 2 \times m_n)$

या $\Delta m = m_U - (m_{Xe} + m_{Sr} + m_n)$

या $\Delta m = 235.0435 - (139.9054 + 93.9063 + 1.00867)$

या $\Delta m = 235.0435 - 234.82037 = 0.22313$ u

$\therefore$ अभिक्रिया में मुक्त ऊर्जा

$Q = \Delta m \times C^2$

$= 0.22313 \text{ u} \times C^2$

$= 0.22313 \times 931 \text{ MeV} / c^2 \times c^2$

$= 207.73$ MeV

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

उत्तर– ${}^{227}Th$ की अर्द्धआयु T = 19 वर्ष

$= 19 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60$ सेकेण्ड

$= 5.99 \times 10^8$ सेकण्ड

रेडियो सक्रियता $\left(-\frac{dN}{dt}\right)$ = 1 मिली क्यूरी = 10^{-3} क्यूरी

या $-\frac{dN}{dt} = 10^{-3} \times 3.7 \times 10^{10}$ विघटन / सेकेण्ड

या $-\frac{dN}{dt} = 3.7 \times 10^7$ विघटन / सेकेण्ड

सूत्र– $\left(-\frac{dN}{dt}\right) = \lambda N$ प्रयोग करने पर,

$$N = \frac{1}{\lambda}\left(-\frac{dN}{dt}\right) = \frac{T}{0.693}\left(-\frac{dN}{dt}\right)$$

या
$$N = \frac{5.99\times10^8}{0.693}\times3.7\times10^7$$

$$N = 3.198 \times 10^{16} \simeq 3.2\times10^{16}$$

पुनः: ^{227}Th के 6.023×10^{23} परमाणुओं की मात्रा 227 ग्राम

∴ Th के 3.2×10^{165} परमाणुओं की मात्रा

$$= \frac{227\times3.2\times10^{16}}{6.023\times10^{23}} \text{ ग्राम}$$

$$= 1.206\times10^{-5} \text{ ग्राम}$$

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

उत्तर– प्रतिदर्श की प्रारम्भिक सक्रियता $\left(-\frac{dN}{dt}\right)_1 = \lambda N_0 = 6400$ विघटन प्रति मिनट

t = 6 दिन बाद सक्रियता $\left(-\frac{dN}{dt}\right)_2 = \lambda.N = 400$ विघटन प्रति मिनट

भाग देने पर,

$$\therefore \quad \frac{N_0}{N} = \frac{6400}{400} = 16$$

चरघाताङ्की क्षय नियम से,

$$e^{\lambda t} = \frac{N_0}{N} = 16$$

$$\therefore \quad \lambda t = \log_e 16 = \log_e 2^4$$

$$\lambda t = 4\log_e 2$$

$$t = \frac{4\log_e 2}{\lambda} \qquad \left\{\because T = \frac{\log_e 2}{\lambda}\right\}$$

या
$$t = 4T$$

$$\therefore \quad T = \frac{t}{4} = \frac{6}{4} = 1.5 \text{ दिन}$$

10 $^{226}_{88}Ra$ 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

उत्तर– $^{226}_{88}Ra$ के नाभिक से एक α-कण उत्सर्जन का अभिक्रिया समीकरण

$$^{226}_{88}Ra \longrightarrow {}^{222}_{86}Rn + \underset{(\alpha-\text{कण})}{^{4}_{2}He} + \underset{\text{मुक्त ऊर्जा}}{Q}$$

α कण की ऊर्जा = 4.662 MeV

कुल मुक्त ऊर्जा Q = ?

$$\alpha \text{ कण की ऊर्जा} = \left(\frac{A-4}{A}\right)\times Q = 4.662 \text{ MeV}$$

यहाँ A = 222

$$\therefore \quad \left(\frac{222-4}{222}\right)\times Q = 4.662 \text{ MeV}$$

$$\frac{218}{222}\times Q = 4.662 \text{ MeV}$$

$$\therefore \quad Q = 4.662\times\frac{222}{218}$$

$$= 4.747 \text{ MeV}$$

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

उत्तर– प्रश्नानुसार β क्षय का अभिक्रिया समीकरण

$$^{176}X \longrightarrow {}^{176}Y + \beta + Q$$

किन्तु β कण की अधिकतम ऊर्जा Q = 0 होने पर ही प्राप्त होगी।

∴ द्रव्यमान क्षति $\Delta m = (m_x - m_y)$

या $\Delta m = (175.942694 - 175.941426)u$

या $\Delta m = 0.001268$ u

∴ β कण की अधिकतम ऊर्जा $= \Delta m \times c^2$

$$= (0.001268 \text{ u})\times c^2$$

$$= 0.001268\times931\frac{MeV}{c^2}c^2$$

$$= 1.181 \text{ MeV}$$

महत्त्वपूर्ण वस्तुनिष्ठ प्रश्न

1. किसी नाभिक में प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा दर्शाती है–
   (अ) उसके स्थायित्व को (ब) उसके आकार को
   (स) उसके द्रव्यमान को (द) उपर्युक्त में कोई नहीं
2. द्रव्यमान संख्या 40 से 120 तक नाभिक की प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा होती है–
   (अ) 1.2 MeV (ब) 2.4 MeV
   (स) 6.8 MeV (द) 8.5 MeV
3. किस नाभिक के लिये प्रति न्यूक्लिऑन बन्धन ऊर्जा का मान सर्वाधिक होगा–
   (अ) $_{26}Fe^{56}$ (ब) $_{8}O^{16}$
   (स) $_{2}He^{4}$ (द) $_{92}U^{238}$
4. स्वपोषी शृंखला अभिक्रिया के लिये न्यूट्रॉन गुणन गुणांक (K) का मान होगा–
   (अ) एक के बराबर (ब) एक से अधिक
   (स) एक से कम (द) 0.5
5. न्यूट्रॉनों की क्षरण दर का उनकी उत्पत्ति दर के सापेक्ष अनुपात का

मान अनुक्रमानुपाती होता है–

(अ) $\frac{1}{r^2}$ के (ब) $\frac{1}{r}$ के

(स) $\frac{1}{r^3}$ के (द) r के

6. किसी रेडियोएक्टिव तत्व से उत्सर्जित β-कण होते हैं–
(अ) विद्युत चुम्बकीय विकिरण
(ब) नाभिक के प्रति परिक्रमा करते हुये इलेक्ट्रॉन
(स) नाभिक से उत्सर्जित आवेशित कण
(द) अनावेशित कण
7. β-विघटन में कोणीय संवेग व ऊर्जा संरक्षण की व्याख्या के लिये β-कणों के साथ उत्सर्जित होने वाला अन्य कण होगा–
(अ) न्यूट्रॉन (ब) न्यूट्रिनो (स) प्रोटॉन (द) α-कण
8. नाभिकीय अभिक्रिया–
$${}_{Z}X^{A} \rightarrow {}_{Z+1}Y^{A} \rightarrow {}_{Z-1}R^{A-4} \rightarrow {}_{Z-1}R^{A-4}$$
में उत्सर्जित कण (या विकिरण) होंगे–
(अ) α, β, γ (ब) β, γ, α (स) γ, α, β (द) β, α, γ
9. रेडियोएक्टिव विघटन में–
(अ) α, β व γ-कण एक साथ उत्सर्जित होते हैं।
(ब) α व β कण साथ उत्सर्जित होते हैं।
(स) पहले α, फिर β व अन्त में γ-कण उत्सर्जित होते हैं।
(द) पहले α, तत्पश्चात् γ या पहले β तत्पश्चात् γ उत्सर्जित होते हैं।
10. β-विघटन की नाभिकीय क्रिया द्वारा कोणीय संवेग में परिवर्तन होना चाहिये–
(अ) $\frac{1}{2}\left(\frac{h}{2\pi}\right)$ (ब) $\frac{3}{2}\left(\frac{h}{2\pi}\right)$
(स) शून्य या $\frac{h}{2\pi}$ (द) $\frac{1}{2}\left(\frac{h}{2\pi}\right)$ या $\frac{3}{2}\left(\frac{h}{2\pi}\right)$
11. नाभिकीय बलों की अन्योन्य क्रिया निम्न कणों के विनिमय के कारण होती है–
(अ) फोटॉन (ब) ग्रेवीटॉन (स) π-मैसॉन (द) क्वार्क्स

हल एवं संकेत

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

लघुत्तरात्मक प्रश्न

प्रश्न 1. प्रकृति में पाये जाने वाले सभी तत्व प्राकृतिक रूप से रेडियो-एक्टिव क्यों नहीं होते ? यह गुण केवल भारी तत्वों तक ही क्या सीमित हैं ?

उत्तर–वे तत्व जिनका परमाणु क्रमांक 83 से अधिक होता है, भारी तत्व कहलाते हैं। इन तत्वों के नाभिक में कण (न्यूट्रॉन एवं प्रोटॉन) परस्पर इतनी दृढ़ता से बद्ध नहीं रहते जितने हल्के तत्वों में रहते हैं। अतः भारी तत्व कोई स्थायी रूप प्राप्त करने के लिए कुछ कणों का उत्सर्जन करते रहते हैं।

प्रश्न 2. रेडियो-एक्टिव क्षय की प्रक्रिया में सभी तत्व अन्त में सीसे (Pb) में ही क्यों बदल जाते हैं ?

उत्तर–सीसे के तुलना में सभी तत्व रेडियो-एक्टिव हैं। इसका कारण यह है कि भारी तत्वों के नाभिक में नाभिकीय आकर्षण बलों के साथ प्रोटॉनों के बीच विद्युत-प्रतिकर्षण बल भी प्रभावी होते हैं जो नाभिक के स्थायित्व को घटा देते हैं। अतः भारी तत्व के नाभिक रेडियो-एक्टिव क्षय के फलस्वरूप अधिकाधिक हल्के तत्वों में बदलते रहते हैं। जब ये सीसे में बदल जाते हैं तो रेडियो-एक्टिव क्षय की प्रक्रिया बन्द हो जाती है क्योंकि सीसे का नाभिक स्थायी है।

प्रश्न 3. β-कण तापायनिक उत्सर्जिन अथवा प्रकाश विद्युत प्रभाव से प्राप्त इलेक्ट्रॉनों से किस प्रकार भिन्न होते हैं ?

उत्तर–अन्तर इनकी ऊर्जाओं का होता है। β-कण चूँकि नाभिक से निकलते हैं अतः इनका वेग प्रकाश वेग के 1% से 90% के बीच होता है, जबकि दूसरी विधियों में इलेक्ट्रॉन बाहरी कक्षा से निकलते हैं, अतः इनका वेग अपेक्षाकृत बहुत ही कम होता है।

प्रश्न 4. गामा किरण की वेधन-क्षमता तथा आयनीकरण क्षमता की तुलना एल्फा व बीटा कणों से कीजिए।

उत्तर–गामा किरण की वेधन-क्षमता β-कण से 100 गुनी तथा α-कण से 10,000 गुनी है। गामा किरण की आयनीकरण क्षमता β-कण से 1/100 गुनी तथा α-कण से 1/10,000 गुनी है।

प्रश्न 5. क्या कारण है कि α-कणों की अपेक्षा β-कणों की आयनीकरण क्षमता कम परन्तु वेधन क्षमता अधिक होती हैं ?

उत्तर–α-कणों की अपेक्षा β-कण बहुत तीव्रगति से उत्सर्जित होते हैं। जिससे β-कण α-कणों की अपेक्षा माध्यम के परमाणुओं के सम्पर्क में बहुत कम समय तक रहते हैं। अतः β-कणों से परमाणुओं के आयनीकरण की सम्भावना α-कणों की अपेक्षा कम होती है। परन्तु इस कारण β-कणों की ऊर्जा का क्षय अपेक्षाकृत धीरे-धीरे होता है, अतः उनकी वेधन क्षमता अधिक होती है।

प्रश्न 6. क्या कारण है कि विद्युत क्षेत्र में गतिमान α-कण का विक्षेप β-कण के विक्षेप की विपरीत दिशा में होता है ?

उत्तर–क्योंकि α-कण धनावेशित तथा β-कण ऋणावेशित हैं।

प्रश्न 7. क्या कारण है कि चुम्बकीय क्षेत्र के लम्बवत् गतिमान α तथा β-कणों का मार्ग वृत्ताकार हो जाता है ?

उत्तर–चुम्बकीय क्षेत्र में क्षेत्र की दिशा के लम्बवत् गतिमान आवेशिम कण पर लगने वाला चुम्बकीय बल (लॉरेन्ज बल) गति की दिशा तथा क्षेत्र की दिशा दोनों के लम्बवत् होता है जिससे बल द्वारा किया गया कार्य शून्य होता है अर्थात् कण की गतिज ऊर्जा तथ चाल नियत रहती है परन्तु त्वरण क कारण वेग बदलता रहता है। ऐसा मार्ग जिसमें चाल नियत रहे परन्तु वेग बदले, वृत्ताकार होता है। वृत्ताकार मार्ग में गति के लिए आवश्यक अभिकेन्द्र बल, लॉरेन्ज, बल प्रदान करता है।

प्रश्न 8. क्या कारण है कि चुम्बकीय क्षेत्र में β-कण के मार्ग की वक्रता α-कण के मार्ग की वक्रता से अधिक होती है ?

उत्तर–वृत्ताकार मार्ग की त्रिज्या $r = mv/qB$, चूँकि, β-कण, α-कण की अपेक्षा हल्के होते हैं अतः β-कण के मार्ग की वक्रता त्रिज्या, α-कण के मार्ग की वक्रता त्रिज्या से कम होती है अर्थात् β-कण से मार्ग की वक्रता, α-कण के मार्ग की वक्रता से अधिक होती है।

प्रश्न 9. तापायनिक उत्सर्जन अथवा प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन से

प्राप्त इलेक्ट्रॉनों तथा β-कणों में क्या भिन्नता है ?

उत्तर–तापायनिक अथवा प्रकाश-विद्युत उत्सर्जन में इलेक्ट्रॉन परमाणु के नाभिक के बाहरी भाग से बहुत कम गतिज ऊर्जा से उत्सर्जित होते हैं जबकि β-कण परमाणु के नाभिक से बहुत अधिक गतिज ऊर्जा से उत्सर्जित होते हैं।

प्रश्न 10. क्या कारण है कि β-कणों का द्रव्यमान अन्य स्रोतों से प्राप्त इलेक्ट्रॉनों के द्रव्यमान से अधिक होता है जबकि β-कण भी इलेक्ट्रॉन ही हैं ?

उत्तर–β-कण तीव्रगामी इलेक्ट्रॉन हैं तथा इनका वेग 0.99 c तक होता है। अतः आइन्सटीन की आपेक्षिकता के सिद्धान्त के अनुसार, इनका द्रव्यमान विराम द्रव्यमान (m_0) की तुलना में काफी अधिक होता है। अन्य स्रोतों से प्राप्त इलेक्ट्रॉनों का वेग, प्रकाश के वेग c की तुलना में काफी कम होता है अतः उनका द्रव्यमान M_0 ही रहता है।

प्रश्न 11. चुम्बकीय क्षेत्र में β-कण के मार्ग की वक्रता α-कण के मार्ग की वक्रता से अधिक होती है क्यों ?

उत्तर– $$r' = \frac{mv}{eB}$$

$$\text{वक्रता} = \frac{1}{r} = \frac{eB}{mv}$$

$$m_\alpha > m_\beta$$

अतः β-कण की वक्रता α-कण से ज्यादा होती है।

प्रश्न 12. विद्युत क्षेत्र एवं चुम्बकीय क्षेत्र में β-कण का विक्षेप α-कण के विक्षेप की विपरीत दिशा में होता है। क्यों ?

उत्तर–चूँकि α-कण व β-कणों पर विपरीत आवेश है अतः विक्षेप की दिशा विपरीत होती है।

प्रश्न 13. क्या β-कणों का द्रव्यमान नियम है ?

उत्तर–नहीं क्योंकि β-कण का वेग प्रकाश के वेग से तुलनीय है। अतः उसका द्रव्यमान $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$ के अनुसार बदलता है। वेग बढ़ने पर m बढ़ता है।

प्रश्न 14. किसी रेडियो-एक्टिव नाभिक का परमाणु क्रमांक Z है। उसमें से एक β^-–कण निकल जाने पर बचे नाभिक का परमाणु क्रमांक कितना हो जायेगा ?

उत्तर–Z + 1

प्रश्न 15. किसी रेडियो-एक्टिव नाभिक का परमाणु क्रमांक Z है। उसमें से एक α-कण के निकल जाने से बचे नाभिक का परमाणु क्रमांक कितना हो जायेगा ?

उत्तर–Z – 2

प्रश्न 16. यदि रेडियो.एक्टिवता नाभिकीय प्रक्रिया है तो इलेक्ट्रॉन कहाँ से निकलते हैं, क्योंकि नाभिक में तो इलेक्ट्रॉन होते नहीं।

उत्तर–रेडियो-एक्टिव नाभिक में उपस्थित न्यूट्रॉन अस्थायी होता है इलेक्ट्रॉन के उत्सर्जन में यह न्यूट्रॉन निम्न समीकरण के अनुसार विघटित होकर प्रोटॉन में बदल जाता है।

प्रश्न 17. निम्न समीकरणों को पूरा कीजिए-

(i) ${}_7N^{14} + {}_0n^1 \rightarrow {}_6C^{14} + ...$

(ii) ${}_1H^1 \rightarrow {}_0n^1 + ... + \nu$ (न्यूट्रिनों)

(iii) ${}_7N^{14} + {}_2He^4 \rightarrow {}_1H^1 + ...$

(iv) ${}_1H^3 \rightarrow {}_2He^3 + ... + ...$

(v) ${}_5B^{11} + {}_1H^1 \rightarrow {}_4Be^8 + ...$

(vi) ${}_{90}Th^{234} \rightarrow {}_{91}Pa^{234} + ... + ...$

(vii) ${}_4Be^9 + ... \rightarrow {}_6C^{12} + {}_0n^1$

(viii) ${}_{88}Ba^{226} \rightarrow {}_{86}Rn^{222} + ...$

(ix) ${}_{90}Th^{232} \rightarrow {}_{88}Ra^{228} + ...$

(x) ${}_{82}Pb^{210} \rightarrow {}_{83}Bi^{210} + ...$

(xi) ${}_{15}P^{30} \rightarrow {}_{14}Si^{30} + ...$

(xii) ${}_{42}Mo^{94} + {}_1H^2 \rightarrow {}_{43}Te^{95} + ...$

उत्तर–(i) ${}_1H^1$, (ii) ${}_{+1}\beta^0$, (iii) ${}_8O^{17}$, (iv) ${}_{-1}\beta^0 + \bar{\nu}$, (v) ${}_2He^4$, (vi) ${}_{-1}\beta^0 + \bar{\nu}$, (vii) ${}_2He^4$, (viii) ${}_2He^4$, (ix) ${}_2He^4$, (x) ${}_{-1}\beta^0 + \bar{\nu}$, (xi) ${}_{+1}\beta^0 + \nu$, (xii) ${}_0n^1$

प्रश्न 18. हीलियम नाभिक की बन्धन ऊर्जा 7 MeV/न्यूक्लिऑन है। जबकि भारी नाभिक की 1 MeV/न्यूक्लिऑन है। इनमें से कौन स्थायी है ?

उत्तर–हीलियम नाभिक।

प्रश्न 19. यदि प्रकाश की चाल 10^8 मी/सेकण्ड होती तो किसी नाभिक की बन्धन ऊर्जा पर क्या प्रभाव पड़ता ?

उत्तर–$\frac{1}{9}$ गुनी रह जाती।

प्रश्न 20. निम्न सम्भावित प्रक्रियाओं के नाम बताइये-

(i) जब एक मन्द न्यूट्रॉन ${}_{92}U^{238}$ नाभिक के निकट आता है।

(ii) एक भारी नाभिक स्वतः ही α या β कण उत्सर्जित करता है।

उत्तर–(i) नाभिकीय विखण्डन, (ii) रेडियोएक्टिव विघटन।

प्रश्न 21. एक तारे का ताप 3×10^8 K है, क्या वहाँ नाभिकीय संलयन की प्रक्रिया हो सकत है ? यदि हाँ तो कार्बन-नाइट्रोजन चक्र तथा प्रोटॉन-प्रोटॉन चक्र में से किसकी सम्भावना अधिक है ?

उत्तर–हाँ, कार्बन-नाइट्रोजन चक्र की।

प्रश्न 22. सूर्य का द्रव्यमान प्रति सेकण्ड क्यों घट रहा है और कितना ?

उत्तर–नाभिकीय संलयन में द्रव्यमान क्षति के कारण, 9×10^9 किग्रा/सेकण्ड।

आंकिक प्रश्न

1. (a) **लीथियम के दो स्थायी समस्थानिकों ^6_3Li एवं ^7_3Li की बहुलता का प्रतिशत क्रमशः 7.5 एवं 92.5 हैं। इन समस्थानिकों के द्रव्यमान क्रमशः 6.01512 u एवं 7.01600 u हैं। लीथियम का परमाणु द्रव्यमान ज्ञात कीजिए।**

(b) **बोरॉन के दो स्थायी समस्थानिक $^{10}_5B$ एवं $^{11}_5B$ है। उनके द्रव्यमान क्रमशः 10.01294 u एवं 11.00931 u एवं बोरॉन का परमाणु भार 10.811 u है। $^{10}_5B$ एवं $^{11}_5B$ की बहुलता ज्ञात कीजिए।**

हल : (a) दिया है :

$_3Li^6$ का द्रव्यमान = 6.01512 amu तथा बहुलता प्रतिशत = 7.5%

$_3Li^7$ का द्रव्यमान = 7.01600 amu तथा बहुलता प्रतिशत = 92.5%

अतः लीथियम का परमाणु द्रव्यमान

$$= \frac{(7.5\times6.01512)+(92.5\times7.01600)}{100}$$

$$= \frac{45.1134+648.98}{100} = \frac{694.0934}{100}$$

= 6.941 amu

(b) दिया है :

$_5B^{10}$ का द्रव्यमान = 10.01294 amu

तथा $_5B^{11}$ का द्रव्यमान = 11.00931 amu

बोरॉन का परमाणु भार = 10.811 amu

माना $_5B^{10}$ का बहुलता प्रतिशत x% है तथा $_5B^{11}$ का बहुलता प्रतिशत $(100-x)$% है।

तब परमाणु भार $10.811 = \dfrac{10.01294x+11.0093(100-x)}{100}$

$1081.1 = 1100.93 - 11.0093x + 10.01294\,x$

$0.99636\,x = 1100.93 - 1081.1 = 19.83$

अतः $x = \dfrac{19.83}{0.99636}$ = 19.90% ($_5B^{10}$ का बहुलता प्रतिशत)

तथा $_5B^{11}$ का बहुलता प्रतिशत = 100 − 19.90 = 80.1%

2. **नाइट्रोजन नाभिक $\left(^{14}_7N\right)$ की बंधन-ऊर्जा MeV में ज्ञात कीजिए $m_N = 14.00307$ u**

हल : दिया है :

m_N = 14.00307 amu

तथा $_7N^{14}$ में Z = 7, N = 14 − 7 = 7

अतः द्रव्यमान क्षति $\Delta M = [Zm_p + Nm_n] - m_N$

$\Delta M = (7 \times 1.007825 + 7\times1.008665) - 14.00307$

$\Delta M = (7.054775 + 7.060655) - 14.00307 = 14.11543 - 14.00307$

$\Delta M = 0.11236$ amu

अतः बंधन ऊर्जा $\Delta E = \Delta M \times 931.5$ MeV = 0.11236×931.5 MeV

ΔE = 104.7 MeV

3. **निम्नलिखित आँकड़ों के आधार पर $^{56}_{26}Fe$ एवं $^{209}_{83}Bi$ नाभिकों की बंधन-ऊर्जा MeV में ज्ञात कीजिए।**

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

हल : दिया है : $_{26}Fe^{56}$ का द्रव्यमान M = 55.934939 amu

$_{26}Fe^{56}$ में Z = 26 तथा N = A − Z = 30

अतः द्रव्यमान क्षति $\Delta M = [Zm_p + Nm_n] - M$

$\Delta M = [(26 \times 1.007825) + (30 \times 1.008665)] - 55.934939$

$\Delta M = [26.20345 + 30.25995] - 55.934939 = 56.4634 - 55.934939$

$\Delta M = 0.528461$ amu

अतः बंधन ऊर्जा $\Delta E = \Delta M \times 931.5$ MeV

$= 0.528461 \times 931.5$

ΔE = 492.3 MeV

प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा

$$\bar{B} = \frac{\Delta E}{A} = \frac{492.3}{56} = 8.79 \text{ MeV}$$

(ii) दिया है :

$_{83}Bi^{209}$ का द्रव्यमान M = 208.980388 amu

तथा $_{83}Bi^{209}$ में Z = 83 तथा N = A − Z = 209 − 83 = 126

अतः द्रव्यमान क्षति $\Delta M = [Zm_p + Nm_n] - M$

$\Delta M = [(83 \times 1.007825) + (126 \times 1.008665)] - 208.980388$

$= [83.649475 + 127.09179] - 208.980388$

$= 210.741265 - 208.980388$

$\Delta M = 1.760877$ amu

अतः बंधन ऊर्जा $\Delta E = \Delta M \times 931.5$ MeV

$= 1.760877 \times 931.5 = 1640.26$ MeV

प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा

$$\bar{B} = \frac{\Delta E}{A} = \frac{1640.26}{209} = 7.84 \text{ MeV}$$

4. **एक दिए गए सिक्के का द्रव्यमान 3.0 g है। उस ऊर्जा की गणना कीजिए जो इस सिक्के के सभी न्यूट्रॉनों एवं प्रोटॉनों को एक-दूसरे से अलग करने के लिए आवश्यक हो। सरलता के लिए मान लीजिए कि सिक्का पूर्णतः $^{63}_{29}Cu$ परमाणुओं का बना है। ($^{63}_{29}Cu$ का द्रव्यमान = 62.92960 u)।**

हल : दिया है : सिक्के का द्रव्यमान m = 3 ग्राम

अतः सिक्के में तांबे के परमाणुओं की संख्या

$$N = \frac{m}{M}\times6.023\times10^{23} = \frac{3}{63}\times6.023\times10^{23}$$

$N = 2.87 \times 10^{22}$ परमाणु

पुनः $_{29}Cu^{63}$ का द्रव्यमान = 62.92960 amu,

Z = 29 तथा न्यूट्रॉन संख्या n = 63 − 29 = 34

अतः द्रव्यमान क्षति $\Delta M = [(29 \times 1.007825) + (34 \times 1.008665)] - 62.92960$

$\Delta M = [29.226925 + 34.29461] - 62.92960$

$\Delta M = 63.521535 - 62.92960 = 0.591935$ amu

प्रति परमाणु बंधन ऊर्जा $\Delta E = \Delta M \times 931.5 = 0.591935 \times 931.5$
$= 551.39$ MeV

अत: सभी परमाणुओं की कुल बंधन ऊर्जा

$= 551.39 \times N = 551.39 \times 2.87 \times 10^{22}$ MeV
$= 1582.49 \times 10^{22}$ MeV $= 1582.49 \times 10^{28}$ eV
$= 1582.49 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19}$ जूल
$= 2.532 \times 10^{12}$ जूल

5. निम्नलिखित के लिए नाभिकीय समीकरण लिखिए :

(i) $^{226}_{88}Ra$ **का α-क्षय** **(ii)** $^{242}_{94}Pu$ **का α-क्षय**

(iii) $^{32}_{15}P$ **का** β^-**-क्षय** **(iv)** $^{210}_{83}Bi$ **का** β^-**-क्षय**

(v) $^{11}_{6}C$ **का** β^+**-क्षय** **(v)** $^{97}_{43}Tc$ **का** β^+**-क्षय**

(vii) $^{120}_{54}Xe$ **का इलेक्ट्रॉन अभिग्रहण**

हल : (i) $_{88}Ra^{226} \rightarrow _{86}Rn^{222} + _2He^4$

(ii) $_{94}Pu^{242} \rightarrow _{92}U^{238} + _2He^4$

(iii) $_{15}P^{32} \rightarrow _{16}S^{32} + _{-1}\beta^0 + \bar{\nu}$

(iv) $_{83}Bi^{210} \rightarrow _{84}Po^{210} + _{-1}\beta^0 + \bar{\nu}$

(v) $_6C^{11} \rightarrow _5B^{11} + _{+1}\beta^0 + \nu$

(vi) $_{43}Tc^{97} \rightarrow _{42}Mo^{97} + _{+1}\beta^0 + \nu$

(vii) $_{54}Xe^{120} + _{-1}e^0 \rightarrow _{53}I^{120} + \nu$

6. 8.0 mCi सक्रियता का रेडियोऐक्टिव स्रोत प्राप्त करने के लिए $^{60}_{27}Co$ **की कितनी मात्रा की आवश्यकता होगी ?** $^{60}_{27}Co$ **की अर्धायु 5.3 वर्ष है।**

हल : दिया है : आवश्यक सक्रियता R = 8 मिली क्यूरी $= 8 \times 3.7 \times 10^7$ विघटन/से.

तथा T = 5.3 वर्ष $= 5.3 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 1.67 \times 10^8$ से.

$$\text{अत: } \lambda = \frac{0.693}{T} = \frac{0.693}{1.67 \times 10^8}$$
$= 4.15 \times 10^{-9}$ प्रति से.

अत: $R = \lambda N$ से

$_{27}Co^{60}$ के आवश्यक परमाणुओं की संख्या $N = \dfrac{R}{\lambda}$

अत: $_{27}Co^{60}$ की आवश्यकता मात्रा $m = \dfrac{M}{N_A} \times N$

(जहाँ M = परमाणुभार 60, $N_A = 6.023 \times 10^{23}$)

$$\text{अत: } m = \frac{60}{6.023 \times 10^{23}} \times \frac{R}{\lambda} = \frac{60}{6.023 \times 10^{23}} \times \frac{8 \times 3.7 \times 10^7}{4.15 \times 10^{-9}}$$
$m = 7.1 \times 10^{-6}$ ग्राम

7. $^{90}_{38}Sr$ **की अर्धायु 28 वर्ष है। इस समस्थानिक के 15 mg की विघटन दर क्या है ?**

हल : दिया है : T = 28 वर्ष, m = 15 मिलीग्राम $= 15 \times 10^{-3}$ ग्राम

पदार्थ $= _{38}Sr^{90}$

अत: विघटन दर (या सक्रियता) $R = \lambda N$

$$= \frac{0.693}{T} \cdot \frac{m}{M} \times N_A$$

$$R = \frac{0.693}{28 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60} \cdot \frac{15 \times 10^{-3}}{90} \times 6.023 \times 10^{23}$$

$R = 7.87 \times 10^{10}$ विघटन/से. $= 7.87 \times 10^{10}$ बेकुरल

$$\text{या } R = \frac{7.87 \times 10^{10}}{3.7 \times 10^{10}} \text{ क्यूरी} = 2.13 \text{ क्यूरी}$$

8. दो ड्यूट्रॉनों के आमने-सामने की टक्कर के लिए कूलॉम अवरोध की ऊँचाई ज्ञात कीजिए। (संकेत-कूलॉम अवरोध की ऊँचाई का मान इन ड्यूट्रॉन के बीच लगने वाले उस कूलॉम प्रतिकर्षण बल के बराबर होता है जो एक-दूसरे को संपर्क में रखे जाने पर उनके बीच आरोपित होता है। यह मान सकते हैं कि ड्यूट्रॉन 2.0 fm प्रभावी त्रिज्या वाले दृढ़ गोले हैं।)

हल : दिया है : ड्यूट्रॉन की प्रभावी त्रिज्या r = 2 फर्मी
$= 2 \times 10^{-15}$ मी.

तथा एक ड्यूट्रॉन का आवेश $q = 1.6 \times 10^{-19}$ कूलॉम

दो ड्यूट्रॉन को परस्पर सम्पर्क में रखने पर इनके मध्य प्रभावी दूरी R = $2r = 4 \times 10^{-15}$ मी.

अत: कूलॉम अवरोध

$$U = \frac{Kq^2}{R} = \frac{9 \times 10^9 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.6 \times 10^{-19}}{4 \times 10^{-15}} \text{ जूल}$$

$$U = 5.76 \times 10^{-14} \text{ जूल} = \frac{5.76 \times 10^{-14}}{1.6 \times 10^{-19}} \text{ eV}$$
$= 3.6 \times 10^5$ eV

या U = 360 किलो इलेक्ट्रॉन - वोल्ट

9. किसी नाभिक से β^+ **(पॉजिट्रॉन) उत्सर्जन की एक अन्य प्रतियोगी प्रक्रिया है जिसे इलेक्ट्रॉन परिग्रहण (Capture) कहते हैं (इसमें परमाणु की आंतरिक कक्षा, जैसे कि K-कक्षा, से नाभिक एक इलेक्ट्रॉन परिगृहीत कर लेता है और एक न्यूट्रिनो,** ν **उत्सर्जित करता है)।**

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

दर्शाइए कि यदि β^+ **उत्सर्जन ऊर्जा विचार से अनुमत है तो इलेक्ट्रॉन परिग्रहण भी आवश्यक रूप से अनुमत है, परंतु इसका विलोम अनुमत नहीं है।**

हल : माना β^+ (पॉजीट्रॉन) उत्सर्जन की निम्न दो प्रक्रियाएँ संभव हैं–

(i) $_ZX^A \rightarrow _{Z-1}Y^A + _{+1}\beta^0 + \nu + Q_1$ ...(1)

तथा (ii) $_ZX^A + _{-1}e^0 \rightarrow _{Z-1}Y^A + \nu + Q_2$ ...(2)

(इलेक्ट्रॉन परिग्रहण)

प्रक्रिया (1) में उत्सर्जित ऊर्जा (परमाण्वीय द्रव्यमानों को नाभिकीय द्रव्यमान में परिवर्तित करके)

$Q_1 = [(m_{(X^A)} - Zm_e) - \{m_{(Y^A)} - (Z-1)\,m_e + m_e\}]\,c^2$ जूल

$Q_1 = [m_{(X^A)} - m_{(Y^A)} - 2m_e]\,c^2$ जूल

तथा प्रक्रिया (2) में उत्सर्जित ऊर्जा (परमाण्वीय द्रव्यमानों को नाभिकीय

द्रव्यमान में परिवर्तित करके)

$Q_2 = [(m_{(XA)} - Zm_e) + m_e - \{m_{(YA)} - (Z-1)\, m_e\}]\, c^2$ जूल

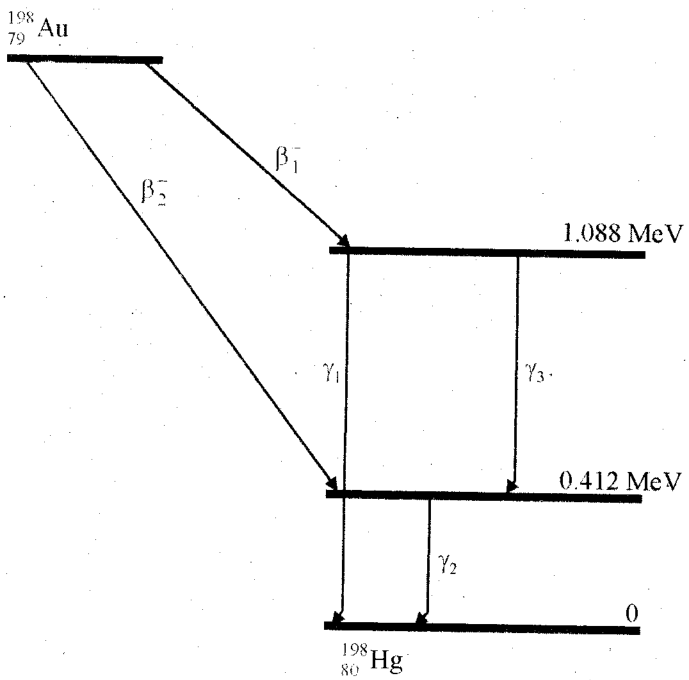
$Q_2 = [m_{(XA)} - m_{(YA)}]\, c^2$ जूल

स्पष्टत: यदि $Q_1 > 0$ है तो Q_2 भी धनात्मक होगा परंतु यदि Q_2 धनात्मक है तो Q_1 का धनात्मक होना आवश्यक नहीं है अर्थात् यदि प्रक्रिया Q_1 अनुमत है तो Q_2 भी अनुमत होगी परंतु इसका विलोम सत्य नहीं है।

10. नीचे दी गई क्षय-योजना में, γ-क्षयों की विकिरण आवृत्तियाँ एवं β-कणों की अधिकतम गतिज ऊर्जाएँ ज्ञात कीजिए। दिया है :

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

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



चित्र 15.18

हल : दिया है : $m_{(Au^{198})} = 197.968233$ amu,

$m_{(Hg^{198})} = 197.966760$ amu

चित्र से स्पष्ट है कि

γ_1 की ऊर्जा $E_1 = 1.088 - 0 = 1.088$ MeV $= 1.088 \times 1.6 \times 10^{-13}$ जूल

तथा γ_1 की आवृत्ति $\upsilon_1 = \dfrac{E_1}{h} = \dfrac{1.088 \times 1.6 \times 10^{-13}}{6.62 \times 10^{-34}}$

$= 2.63 \times 10^{20}$ हर्ट्ज

इसी प्रकार

γ_2 की आवृत्ति $\upsilon_2 = \dfrac{E_2}{h} = \dfrac{0.412 \times 1.6 \times 10^{-13}}{6.62 \times 10^{-34}}$

$= 9.96 \times 10^{19}$ हर्ट्ज

γ_3 की आवृत्ति

$$\upsilon_3 = \frac{E_3}{h} = \frac{(1.088 - 0.412) \times 1.6 \times 10^{-13}}{6.62 \times 10^{-34}}$$

$= 1.63 \times 10^{20}$ हर्ट्ज

पुन: β_1 कणों की अधिकतम गतिज ऊर्जा

$K.E_{max} = [m_{(Au^{198})} - m_{(Hg^{198})}] \times 931.5 - 1.088$ MeV

$= [197.968233 - 197.966760] \times 931.5 - 1.088$ MeV

$= 0.001473 \times 931.5 - 1.088 = 1.372 - 1.088$ MeV

$= 0.284$ MeV

इसी प्रकार β_2 कणों की अधिकतम गतिज ऊर्जा

$K.E_{max} = [m_{Au^{198}} - m_{Hg^{198}}] \times 931.5 - 0.412$ MeV

$= 1.372 - 0.412 = 0.96$ MeV

11. सूर्य के अभ्यंतर में (a) 1 kg हाइड्रोजन के संलयन के समय विमुक्त ऊर्जा का परिकलन कीजिए। (b) विखंडन रिएक्टर में 1.0 kg ^{235}U के विखंडन में विमुक्त ऊर्जा का परिकलन कीजिए। (a) तथा (b) प्रश्नों में विभक्त ऊर्जाओं की तुलना कीजिए।

हल : (a) चूँकि हाइड्रोजन के चार नाभिक संलयन करके 26 MeV ऊर्जा विमुक्त करते हैं तथा 1 kg हाइड्रोजन में नाभिकों की संख्या $= \dfrac{6.023 \times 10^{23}}{1} \times 10^3 = 6.023 \times 10^{26}$

अत: कुल विमुक्त ऊर्जा = नाभिकों की संख्या × प्रति नाभिक विमुक्त ऊर्जा

$$Q_1 = 6.023 \times 10^{26} \times \frac{26}{4} = 39.15 \times 10^{26} \text{ MeV}$$

(b) एक U^{235} के विखण्डन में विमुक्त ऊर्जा = 200 MeV

तथा 1 kg, U^{235} में नाभिकों की संख्या

$$= \frac{6.023 \times 10^{23}}{235} \times 10^3 = \frac{6.023 \times 10^{26}}{235}$$

अत: कुल विमुक्त ऊर्जा

$$Q_2 = \frac{6.023 \times 10^{26}}{235} \times 200 = 5.1 \times 10^{26} \text{ MeV}$$

(c) $\dfrac{Q_1}{Q_2} = \dfrac{39.15 \times 10^{26}}{5.1 \times 10^{26}} = 7.67 \simeq 8$

$\Rightarrow Q_1 \simeq 8\, Q_2$

अर्थात् 1 kg, हाइड्रोजन के संलयन में विभुक्त ऊर्जा, 1 kg, U^{235} के विखण्डन में विमुक्त ऊर्जा से लगभग 8 गुना अधिक है।