टिप्पणियाँ

26

नाभिक और रेडियोधर्मिता

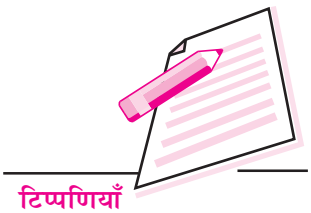
अब तक आपने यह जान लिया है कि परमाणु सभी पदार्थों के सूक्ष्मतम तत्व हैं जिनसे पदार्थों का निर्माण होता है। इसमें एक अति लघु **केन्द्रीय क्रोड** होता है, जिसे **नाभिक** कहते हैं तथा जिसके चारों ओर किसी खास निश्चित कक्षाओं में इलेक्ट्रॉन घूमते रहते हैं। यद्यपि नाभिक बहुत सूक्ष्म एवम् नन्हा सा होता है तथापि यह विस्मयकारक रूप से जटिल होता है। अत: इसे आप और अधिक गहराई तथा विस्तार से जानना चाहेंगे। इस नाभिक की भौतिकी के बारे में हमारी जानकारी की यात्रा की शुरूआत उन्नीसवीं शताब्दी के अंत में तब आरंभ हुई जब अचानक संयोग से रेडियोधर्मिता की खोज हुई। रेडियोधर्मिता एक प्राकृतिक किन्तु अद्भूत परिघटना है जिसमें परमाणु का नाभिक स्थाई होने तक विघटित होता रहता है। इस खोज ने एक अनोखा साधन वैज्ञानिकों को उपलब्ध करा दिया जिसके जरिए नाभिक की संरचना की खोज-बीन ज्यादा सटीक हो सकी। स्वाभाविक जिज्ञासा उठती रही कि इस नाभिक का आकार कितना बड़ा है? इसके अंदर क्या है? ऐसी कौन से बल हैं जो इसके संघटकों को बाँधे रहते हैं और क्यो बांधे रखते हैं?

वास्तव में जीगर एवं मार्सडन द्वारा (अल्फा) α-कणों को प्रयोग में लाया गया था ताकि उसके प्रकीर्णन से किसी तत्व के परमाणु के अंदर क्या है, उसे देखें। ये α-कण प्राकृतिक रूप से मिलने वाला रेडियोधर्मी तत्व ^{214}Bi से निकलते थे। इन अनुसंधानों ने शोधकार्यों के लिए नए रास्तों एवं प्रबल संभावनाओं को जन्म दिया। परिणामस्वरूप बहुत कम समय में एक नूतन एवं नायाब भौतिकी उभर कर आई जिसने विकास की दिशा एवं दशा बदल दी। इसी नई विधा को आप सविस्तार जानिएगा।

उद्देश्य

इस अध्याय को पढ़ने के पश्चात् आप

- *विभिन्न परमाणुओं के नाभिकों में विद्यमान न्यूट्रोनों एवं प्रोटोनों की संख्या बता सकेंगे;*
- *परमाणु नाभिक के साइज की गणना कर सकेंगे;*
- *नाभिक के अंदर न्यूक्लिआनों के बीच मौजूद बलों की प्रकृति को समझा सकेंगे;*



- *द्रव्यमान क्षति और बंधन ऊर्जा को समझा सकेंगे;*
- *प्रति न्यूक्लिऑन वक्र रेखा खींचकर उसके बंधन ऊर्जा को बताते हुए नाभिक परमाणु के स्थायित्व पर चर्चा कर सकेंगे;*
- *रेडियोधर्मिता की प्राकृतिक परिघटना पर चर्चा करते हुए तीनों प्रकार के रेडियो-विकिरणों की पहचान एवं प्रकृति को बता सकेंगे;*
- *रेडियोधर्मी नमूने में हो रही सक्रियता से रेडियो विकिरण की वृद्धि एवं क्षय (डिके) को समझा सकेंगे;*
- *किसी रेडियोधर्मिता वाले तत्व की अर्ध-आयु (हाफ-लाइफ) और उसके क्षयांक (डिके कांसटेन्ट) की गणना कर सकेंगे हैं और*
- *विभिन्न क्षेत्रों में रेडियोधर्मिता की उपयोगिता पर प्रकाश डाल सकेंगे।*

26.1 परमाण्विक नाभिक

परमाणु के अंदर नाभिक की खोज रदरफोर्ड ने 1911 में की थी। उसके तुरंत बाद भौतिकीविदों ने यह जानने का प्रयास तेज कर दिया कि आखिर नाभिक के अंदर क्या रहता है। सन् 1932 में जेम्स चेडविक ने न्यूट्रोन की खोज की। इस खोज ने तो वैज्ञानिक जगत में इस सत्य को पूर्णरूप से प्रतिष्ठित कर दिया कि नाभिक परमाणु प्रोटॉनों तथा न्यूट्रॉनों जैसे संघटकों से निर्मित होता है। इससे शोध की दिशा एवं गति में जबरदस्त प्रभाव पड़ा।

26.1.1 आवेश एवं द्रव्यमान

परमाण्विक नाभिक में दो प्रकार के कण होते हैं- प्रोटॉन तथा न्यूट्रॉन। प्रोटोन जहां धनावेशित होते हैं वहीं न्यूट्रॉन उदासीन होते हैं। इलेक्ट्रॉन, जो किसी अनुमत विशिष्ट कक्षाओं में रहकर नाभिक के चारों ओर परिक्रमा करते हैं, ऋणावेशित होते हैं। प्रोटॉन के धनावेश का मान ठीक इलेक्ट्रॉन के ऋणावेश के मान के बराबर होता है। जितनी संख्या में इलेक्ट्रोन होंगे ठीक उतनी ही संख्या में प्रोटॉन होंगे, इसीलिए परमाणु का स्थायित्व सदा बना रहता है। न्यूट्रॉन एवं प्रोटॉन संयुक्त रूप से न्यूक्लिऑन नाम से जाने जाते हैं। नाभिक में इन दोनों को मिलाकर जो संख्या बनती है वहीं न्यूक्लिऑन की संख्या कहलाएगी तथा इसे द्रव्यमान संख्या (मॉस नम्बर) कहते हैं। इसे A द्वारा दर्शाया जाता है। किसी परमाणु के नाभिक के अंदर प्रोटॉनों की संख्या (या फिर इलेक्ट्रॉनों की संख्या) उसकी परमाणु क्रमांक कहलाती है। इसे Z द्वारा दर्शाते हैं। नाभिक में मौजूद न्यूट्रॉन को $N = A - Z$. से दर्शाते है। प्राय: $N \geq Z$ होता है। A के बढ़ने के साथ अंतर $(N-Z)$ भी बढ़ता है। लीथियम के नाभिक में 3 प्रोटॉन तथा 4 न्यूट्रॉन होते हैं और उसका परमाणु क्रमांक $Z = 3$ तथा द्रव्यमान संख्या $A = 7$ होती है। न्यूट्रॉनों की तुलना में प्रोटॉनों का द्रव्यमान थोड़ा कम होता है। वैसे परमाणु का पूरा द्रव्यमान नाभिक पर ही केंद्रित होता है। नाभिक का द्रव्यमान प्रोटॉन (या फिर न्यूट्रॉन) के द्रव्यमान एवं A के गुणनफल के लगभग बराबर होता है। चूंकि प्रोटॉन का द्रव्यमान 1.67×10^{-27} kg होता है तथा A का मान अधिकांश नाभिकों के लिए 1और 240 के बीच होता है, इसलिए नाभिकों का द्रव्यमान 1.67×10^{-27}kg और 4.0×10^{-25}kg के बीच होता है। नाभिक का आवेश Ze के बराबर होता है जिसमें e किसी

भी इलेक्ट्रॉन पर आवेश का परिमाण होता है जो 1.6×10^{-19}C कूलाम के बराबर होता है। प्राकृतिक रूप में विद्यमान नाभिकों में Z का मान 1 और 92 के बीच होता है और कृत्रिम रूप से बनाए गए परायूरेनियम तत्वों (ट्रान्सयूरेनिक एलिमेन्टस) में Z की संख्या 93 से 105 के बीच होती है।

26.1.2 आकार (साइज)

परमाणु नाभिक की साइज को सामान्यत: उनकी त्रिज्याओं द्वारा दर्शाया जाता है। अधिकांश नाभिक लगभग वृत्ताकार साइज के होते हैं और इसलिए उनकी त्रिज्या R को निम्न सूत्र से दर्शाया जाता है

$$R = r_0 A^{1/3}$$

यहाँ पर r_0 नाभिकीय त्रिज्या की इकाई है जिसका सांख्यिकीय मान 1.2 फरमी है (फरमी लम्बाई की इकाई है और इसे प्रसिद्ध भौतिकीविद् एनरिको फरमी के सम्मान में यह नाम दिया गया है)। एक फरमी लगभग 10^{-15}m के बराबर होता है। हाइड्रोजन का परमाणु सबसे कम द्रव्यमान का होता है जिसका मान $1.2\,f$ के बराबर होता है क्योंकि हाइड्रोजन के लिए $A=1$ होता है। इसी प्रकार प्राकृतिक यूरेनियम का सबसे अधिक द्रव्यमान के परमाणु की त्रिज्या लगभग $7.5\,f$ होती है, क्योंकि यूरेनियम के लिए $A = 238$ होता है। यहां पर ध्यान दीजिए कि किसी भी वृत्ताकार नाभिक पिंड जिसकी त्रिज्या r है, उसका आयतन $4/3\pi R^3$ के बराबर होता है। अत: नाभिक का आयतन उसके द्रव्यमान संख्या A के समानुपाती होता है।

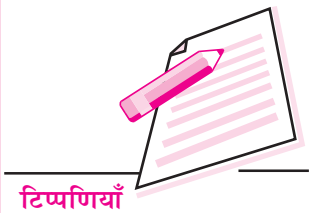
अब आप नाभिक के आयतन का अनुमान लगाइए कि परमाणु के आयतन के सापेक्ष वह कितना हो सकता है? यह जानते हुए कि नाभिक और परमाणु के साइजों में अंतर क्रमश: 10^{-15} m और 10^{-10}m के बीच होता है, अब यह सुनिश्चित कर सकते हैं कि परमाणु का आयतन नाभिक के आयतन से 10^{+15} गुना होता है। इसे इस प्रकार कल्पना कर समझें कि नाभिकीय आयतन तथा उसके सापेक्ष परमाणु के आयतन की तुलना ऐसी ही है, मानों एक बाल्टी पानी के आयतन की तुलना समूचे भाखड़ा बांध के पानी के आयतन से की जा रही हो।

अब आप नाभिकीय पदार्थ के घनत्व की परिमाण कोटि के बारे से भी जानना चाहेंगे। यदि हम सबसे हल्के नाभिक हाइड्रोजन पर विचार करें जिसका द्रव्यमान 1.673×10^{-27} kg तथा उसकी त्रिज्या 1.2×10^{-15} m, के बराबर है। उसकी आकृति को गोल मान कर उसके घनत्व का परिकलन निम्न सूत्रों द्वारा कर सकते हैं:

$$d_{\mathrm{H}} = \frac{M_{\mathrm{H}}}{\frac{4\pi}{3}R_{\mathrm{H}}^3} = \frac{1.673\times10^{-27}\,\mathrm{kg}}{\frac{4\pi}{3}\times\left(1.2\times10^{-15}\,\mathrm{m}\right)^3} = 2.3\times10^{17}\,\mathrm{kg\ m^{-3}}.$$

आक्सीजन के लिए $R_0 = 3 \times 10^{-15}$ m और $M_0 = 2.7 \times 10^{26}$ kg, इसलिए $d_0 = 2.39 \times 10^{17}$ kg m^{-3}

यानी हाइड्रोजन और आक्सीजन के नाभिकों का घनत्व एक ही परिमाण कोटि का होता है। हम जानते हैं कि पानी का घनत्व 10^3kg m^{-3} होता है। इसी प्रकार पारे (मरक्यूरी) का घनत्व 13.6×10^3 kg m^{-3} होता है। तब इस तुलनात्मक आंकड़ों से यह निष्कर्ष निकलता है कि



नाभिकीय पदार्थ कितनी विलक्षण परिमाण में सघनता लिए हुए रहता है। इसका एक अनुमान प्राप्त करने के लिए, यदि हम अपनी पृथ्वी को नाभिकीय सघनता से संकुलित द्रव्यमान (= 6×10^{24} kg) वाला एक पिंड मानें तो वह गोल आकृति का होगा जिसकी त्रिज्या 184 m मीटर ही होगी। इसी प्रकार यदि किसी नाभिक की त्रिज्या करीब 10 km हो तो उसका द्रव्यमान सूर्य के द्रव्यमान के बराबर होगा।

26.1.3 संकेतन (नोटेशन)

किसी परमाणु के नाभिक को उस तत्व के रासायनिक प्रतीक के रूप में प्रदर्शित करते हैं तथा उसकी द्रव्यमान संख्या A को उसके ऊपर अंकित करते हैं तथा उसके नीचे परमाणु क्रमांक Z को लिखा जाता है; ये दोनों रसायनिक प्रतीक के बाएँ तरफ ही अंकित होंगे। अर्थात यदि उस परमाणु के तत्व का प्रतीक मान लीजिए X है तो उसके नाभिक का संकेतन ${}^{A}_{Z}X$ होगा। उदाहरण के लिए, क्लोरीन के नाभिक को लें जिसमें प्रोटोनों की संख्या 17 तथा न्यूट्रानों की संख्या 18 है। उसे ${}^{35}_{17}Cl$ संकेतन द्वारा लिखेंगे। ध्यान दें कि 35 यहां पर Cl की द्रव्यमान संख्या है। विभिन्न तत्वों के परमाणुओं की समान द्रव्यमान संख्या हो सकती है यद्यपि उनके प्रोटोनों की संख्या भिन्न हो सकती है। ऐसे परमाणु जिनके A का मान तो समान हो परंतु Z के मान अलग-अलग हों उन्हें समभारिक (आइसोबार) कहते हैं। जैसे अरगान, जिसके A का मान 40 तथा Z का मान 18 है, वह कैल्शियम का समभारिक होगा जिसके A का मान 40 और Z का 20 होता है। ध्यान दें कि समभारिकों के रासायनिक गुण को उनके Z निर्धारित करते हैं जो अलग-अलग हैं, इसलिए इनके रासायनिक गुण तो भिन्न होंगे ही।

इसी प्रकार से एक ही तत्व के दो परमाणुओं में जिनके परमाणु क्रमांक Z समान हो किंतु उनके द्रव्यमान क्रमांक A अलग-अलग हों उन्हें समस्थानिक (आइसोटोप्स) कहते है। जैसे क्लोरीन के एक परमाणु जिसका $Z = 17$ और $A = 35$, है तथा दूसरा परमाणु जिसका Z=17 किंतु $A = 37$ है, दोनो एक ही तत्व क्लोरीन के समस्थानिक कहलाएंगे। चूंकि समस्थानिकों के Z का मान समान होते हैं, उनके रासायनिक गुण समान ही होने चाहिएं। ध्यान दें कि समस्थानिकों में न्यूट्रॉन की संख्या अलग-अलग होगी। परंतु यदि दो परमाणुओं में न्यूट्रॉनों की संख्या समान हो तो परमाणु समन्यूट्रॉनिक (आइसोटोन्स) कहलाते हैं। जैसे कि सोडियम जिसका $A = 23$ तथा $Z = 11$ है। मेगनीशियम के परमाणु, जिसका $A = 24$ तथा $Z = 12$ है का समन्यूट्रोनिक हैं क्योंकि दोनों के परमाणुओं के नाभिकों में न्यूट्रॉन की संख्या 12 है।

उदाहरण 26.1 : एक परमाणु ${}^{238}_{92}U$ के परमाणु में इसके इलेक्ट्रॉनों, प्रोटॉनों तथा न्यूट्रॉनों की संख्या की गणना कीजिए।

हल : ${}^{238}_{92}U$ संकेतन यूरेनियम तत्व का है जिसमें 92 प्रोटॉन तथा 238 न्यूक्लिओन हैं। अत: परमाणु क्रमांक $Z = 92$ = प्रोटोनों की संख्या, द्रव्यमान संख्या $A = 238$ = प्रोटॉनों और न्यूट्रोनों की संख्या = न्यूक्लिऑनों की संख्या इसलिए न्यूट्रानों की संख्या $= A - Z$

$= 238 - 92$

$= 146$

उदाहरण 26.2 : नीचे दिए गए समूह से समस्थानिक समभारिक तथा समन्यूट्रोनिक जोड़ियों का चुनाव कीजिए।

$^{12}_{6}C$, $^{27}_{13}Al$, $^{39}_{19}K$, $^{22}_{14}Si$, $^{76}_{32}Ge$, $^{40}_{20}Ca$, $^{76}_{34}Se$, $^{14}_{6}C$

हल : समस्थानिक – (समान Z मान) : $^{12}_{6}C$ और $^{14}_{6}C$

समन्यूट्रोनिक – [समान $A - Z$ मान] : $\left[^{27}_{13}Al \text{ और } ^{28}_{14}Si\right]$, $\left[^{39}_{19}K \text{ और } ^{40}_{20}Ca\right]$

आइसोबार (समभारिक) – (समान A का मान) : $^{76}_{32}Ge$ और $^{76}_{39}Se$

पाठगत प्रश्न 26.1

1. नीचे दिए गए विभिन्न परमाणुओं के संचय से समस्थानिक, समभारिक एवं समन्यूट्रोनिक समूह बनाइए

   $^{16}_{8}O$, $^{207}_{82}Pb$, $^{12}_{6}C$, $^{40}_{18}A$, $^{3}_{1}H$, $^{7}_{3}Li$, $^{76}_{32}Ge$, $^{76}_{34}Se$, $^{3}_{2}He$, $^{40}_{20}Ca$, $^{7}_{4}Be$, $^{2}_{1}H$,

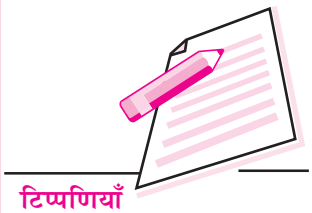
   $^{14}_{6}C$, $^{235}_{92}U$, $^{206}_{82}Pb$, $^{18}_{8}O$, $^{239}_{92}U$, $^{1}_{1}H$, $^{23}_{11}Na$, $^{27}_{13}Al$, $^{27}_{12}Mg$, $^{28}_{14}Si$, $^{37}_{17}Cl$, $^{35}_{17}Cl$

2. रिक्त स्थानों की पूर्ति कीजिए:
   (i) न्यूट्रोन प्रोटोन की अपेक्षा ..... होता है।
   (ii) किसी परमाणु में प्रोटोन एवं न्यूट्रान की संख्याओं का कुल योग उस परमाणु की ..... संख्या कहलाती है।
   (iii) प्रोटोन एवं न्यूट्रोनों सम्मिलित रूप से ..... कहलाते हैं।
   (iv) $^{27}_{13}Al$ संकेतन में न्यूट्रोन की संख्या = ... है।
   (v) $^{28}_{14}Si$ संकेतन में प्रोटोनों की संख्या = ... है।
   (vi) दो परमाणु भिन्न-भिन्न तत्वों के होंगे यदि उनके =..... क्रमांक भिन्न हैं।

3. द्रव्यमान संख्या, परमाणु क्रमांक, तथा न्यूट्रॉन संख्या, इनमें से कौन सा गुण ऐसा है जो एक ही तत्व के दो परमाणुओं में भिन्न नहीं हो सकता है?

26.1.4 एकीकृत (यूनीफाइड) परमाणु द्रव्यमान

प्रयोग द्वारा यह तथ्य ज्ञात किया जा चुका है कि प्रोटोन का द्रव्यमान (m_p), इलेक्ट्रॉन के द्रव्यमान (m_e) का 1836 गुना होता है तथा न्यूट्रॉन का द्रव्यमान (m_n) इलेक्ट्रोन के द्रव्यमान का 1840 गुना (1840 m_e) होता है। चूँकि इलेक्ट्रॉन का द्रव्यमान न्यूक्लिओन के द्रव्यमान की तुलना में नगण्य होता है, अत: परमाणु का द्रव्यमान वास्तविक रूप से न्यूक्लिऑन का ही द्रव्यमान होता है। लेकिन न्यूट्रॉन प्रोटॉन की अपेक्षा कुछ भारी होता है, इसलिए आवश्यकता



महसूस होती है कि कोई एकीकृत मानक चुना जाए जो समस्त परमाणुओं (और प्रोटॉनों एवम् न्यूट्रॉनों) के द्रव्यमानों को भी व्यक्त कर सके। आजकल परमाणु द्रव्यमानों को कार्बन के समस्थानिक $^{12}_{6}C$ के वास्तविक द्रव्यमान के रूप में व्यक्त करते हैं। परमाणु द्रव्यमान की इकाई, जिसे u द्वारा दर्शाते हैं, कार्बन आइसोटोप $^{12}_{6}C$ के वास्तविक द्रव्यमान का (1/12) हिस्सा होता है। हमें ज्ञात है कि कार्बन परमाणु $^{12}_{6}C$ का द्रव्यमान 1.99267×10^{-26}kg है। अत:

1u = (1/12) × द्रव्यमान संख्या 12 के कार्बन परमाणु का द्रव्यमान

$$= (1/12) \times (1.99267 \times 10^{-26}\text{kg})$$

$$= 1.660565 \times 10^{-27}\text{kg}$$

$$= 1.66 \times 10^{-27}\text{ kg}$$

चूंकि प्रोटॉन का द्रव्यमान (m_p) 1.6723×10^{-27}kg, न्यूट्रॉन का द्रव्यमान (m_n) 1.6747×10^{-27}kg, है, इन दोनों को u के रूप में इस प्रकार व्यक्त कर सकते है:

$$m_p = \frac{1.6723\times10^{-27}}{1.6606\times10^{-27}}\text{ u} = 1.00727\text{ u}$$

और

$$m_n = \frac{1.6747\times10^{-27}}{1.6606\times10^{-27}}\text{ u} = 1.00865\text{ u}$$

क्या अब आप इलेक्ट्रॉन के द्रव्यमान 9.1×10^{-31}kg को u के रूप में व्यक्त कर सकते हैं? अब चूँकि हम नाभिकीय द्रव्यमानों को u के रूप में व्यक्त करेंगे, इसका ऊर्जा-तुल्यांक ज्ञात करना हमारे लिए काफी उपयोगी होगा। ऐसा करने के लिए हमें आइंसटाइन के द्रव्यमान-ऊर्जा तुल्य संबंध को प्रयोग में लाना होगा। इसे इस प्रकार व्यक्त किया जाता है:

ऊर्जा = द्रव्यमान × c^2

यहां पर c निर्वात में प्रकाश का वेग है। अत: हम लिख सकते हैं

$$1\text{u} = (1.66 \times 10^{-27}\text{kg})\,(2.9979\times10^{8}\text{m s}^{-1})^2$$

$$= 14.92\times10^{-11}\text{J}$$

$$= \frac{14.92\times10^{-11}}{1.60\times10^{-13}}\text{MeV}$$

$$= 931.3\text{MeV}$$

ध्यान दें कि जूल (J) नाभिकीय भौतिकी के लिए अति विशाल इकाई हो सकती है। अत: हमने u को Mev के रूप में व्यक्त किया है। 1MeV वह ऊर्जा है जिसे एक इलेक्ट्रॉन तब प्राप्त करता है जब उसे एक मिलियन वोल्ट के विभवान्तर पर त्वरित किया जाए। इसका मान 1.6×10^{-13}J जूल के बराबर है।

26.1.5 द्रव्यमान क्षति एवं बंधन ऊर्जा

यह पाया गया है कि किसी भी तत्व के परमाणु के नाभिक का द्रव्यमान नाभिक में उपस्थित न्यूक्लिऑनों के द्रव्यमानों के योग से हमेशा कम रहता है। इस क्षति या कमी को द्रव्यमान क्षति (मॉस डिफेक्ट) कहा जाता है। उदाहरण के लिए, हाइड्रोजन के समस्थानिक ड्यूटीरियम के नाभिक में एक प्रोटॉन और एक न्यूट्रॉन होता है। न्यूट्रॉन तथा प्रोटॉन के मापे गए द्रव्यमान क्रमशः 1.6723×10^{-27} kg तथा 1.6747×10^{-27} kg हैं। इन दोनों का संयुक्त द्रव्यमान 3.34709×10^{-27} kg हुआ। परंतु ड्यूटीरियम के नाभिक का द्रव्यमान 3.34313×10^{-27}kg है, जो प्रोटोन और न्यूट्रोन के संयुक्त द्रव्यमान से कम है। अतः हम कह सकते हैं कि ड्यूटीरियम के लिए द्रव्यमान क्षति 3.96242×10^{-30}kg है। आइए इस द्रव्यमान क्षति को Δm द्वारा दर्शाते हैं। किसी परमाणु ${}^{A}_{Z}X$ के लिए, गणितीय रूप से हम लिख सकते हैं न्यूक्लिओनों के द्रव्यमानों का योग $= Zm_p + (A–Z)m_n$

∴ द्रव्यमान गति
$$\Delta m = [Z.m_p + (A–Z)m_n] – M \qquad (26.1)$$

जहाँ M नाभिक का वास्तविक द्रव्यमान है।

द्रव्यमान क्षति का ऊर्जा तुल्यांक ज्ञात करने लिए फिर से द्रव्यमान एवं ऊर्जा संबंधी समीकरण का उपयोग करना पड़ेगा

$$BE = \Delta m\, c^2 \text{ J} \qquad (26.2)$$

ड्यूटीरियम परमाणु के लिए

$$BE = (3.96242\times10^{-30}\text{ kg}) \times (2.998 \times 10^{8}\text{m s}^{-1})^2$$
$$= 35.164 \times10^{-14}\text{kg m}^2\text{ s}^{-2} = 3.5164 \times10^{-13}\text{J}$$
$$= 2.223 \times 10^{6}\text{eV}$$

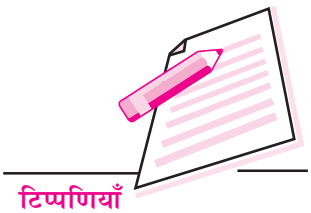
(चूँकि $1\text{eV} = 1.602\times10^{-19}\text{J}$)

इसका मतलब यह हुआ कि कम से कम 2.223MeV ऊर्जा देने पर ही ड्यूटीरियम नाभिक के संघटक कणों (प्रोटॉन और न्यूट्रॉन) को स्वतंत्र किया जा सकेगा। इस परिणामी को आप ऐसा भी कह सकते हैं कि द्रव्यमान क्षति एक ऐसी ऊर्जा के रूप प्रकट होता है जो न्यूक्लिऑनों को बांधे रहता है।

अतः बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिओन, $B= \Delta m\, c^2/A$

या
$$B = \frac{[Zm_p + (A-Z)m_n - M]\,c^2}{A} \qquad (26.3)$$

${}^{12}_{6}C$ के लिए, $Z = 6$ और $A = 12.$ होता है, इसलिए $(A–Z) = 12 – 6 = 6$ होगा यहाँ $M = 12$u $(1\text{u} = 931.3\text{MeV})$ है।



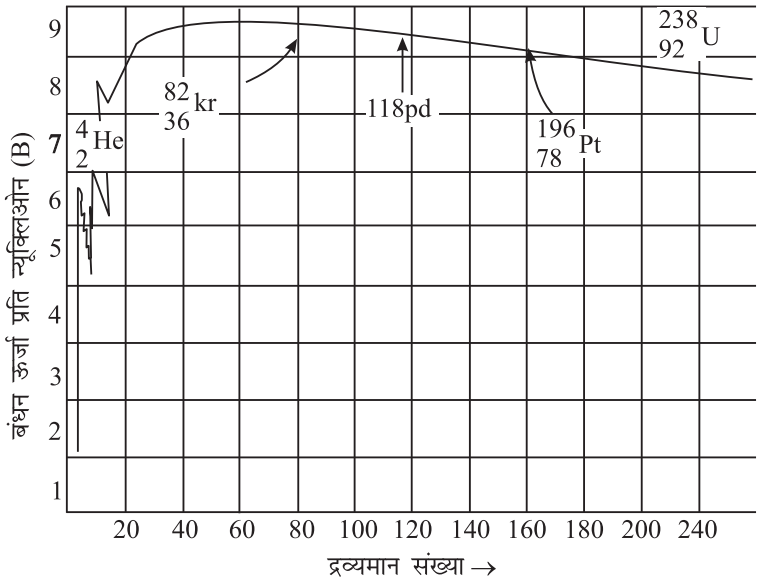
अत:

$$B = \frac{[6m_p + 6m_n - 12] \times 931.3}{12} \quad \text{MeV}$$

$$= 7.41 \text{MeV}$$

यहाँ हमने $m_p = 1.00727$ u और $m_n = 1.00865$ u लिया है। उपरोक्त परिकलन यह बताता है कि कार्बन के नाभिक के टूटने से करीब 90 MeV की ऊर्जा निकलती है, जिसका उपयोग विभिन्न उद्देश्यों के लिए किया जा सकता है। यह ऊर्जा $^{238}_{92}U$ जैसे भारी परमाणु के नाभिकीय विखंडन से प्राप्त की जाती है। इसके बारे में और अधिक विस्तार से अगले अध्याय में आप जानेंगे। यही परमाणु बम में भी ऊर्जा का स्रोत होता है।

B बंधन ऊर्जा का मान बढ़ते-बढ़ते लगभग 8.8 MeV हो जाता है जैसे-जैसे हम हीलियम (A = 4) से आयरन $(A = 56)$ की ओर बढ़ते हैं; इसके बाद इसका मान धीरे-धीरे घटना शुरु होता है और यूरेनियम के लिए यह घटकर 7.6 MeV हो जाता है। चित्र 26.2 में दर्शाया गया है कि बंधन ऊर्जा किस प्रकार से प्रति न्यूक्लिऑन द्रव्यमान के साथ बदलती है।



चित्र 26.2 : प्रति न्यूक्लिओन बंधन ऊर्जा का द्रव्यमान संख्या के साथ परिवर्तन

उपरोक्त चित्र में ध्यान दें, कि बंधन ऊर्जा की वक्र रेखा $^{4}_{2}He$, $^{12}_{6}C$, $^{16}_{8}O$ and $^{20}_{9}Ne$ परमाणुओं के लिए तीखा शीर्ष (शार्प पीक) दर्शाती है। जहाँ B का मान कम दिखता है वे यह दर्शाते हैं कि हल्के नाभिक जिनका द्रव्यमान A < 20 (बीस से कम) है कम स्थाई होते हैं। उदाहरण के लिए, भारी हाइड्रोजन ($^{2}_{1}He$) के लिए बंधन ऊर्जा का मान1.1 MeV प्रति न्यूक्लिऑन होता है। $^{4}_{2}He$, $^{12}_{6}C$, $^{16}_{8}O$ (सम-सम नाभिक अर्थात् ऐसे नाभिक जिनमें प्रोटोनों की संख्या तथा न्यूट्रोनों की संख्या भी सम हो) पर आने वाले गौण शिखर (सब्सीडरी पीक्स) यह दर्शाते हैं कि ऐसे नाभिक अपने ठीक समीपस्थ नाभिकों की अपेक्षा अधिक स्थाई होते हैं। प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा की वक्र रेखा नाभिकीय विखंडन एवं नाभिकीय संलयन की परिघटनाओं को समझाने में बहुत ही उपयोगी है।

उदाहरण 26.3 : बोरोन ($^{10}_{5}B$) परमाणु का द्रव्यमान 10.811 u है। इसके द्रव्यमान का परिकलन किलोग्राम में कीजिए।

हल : चूंकि $u = 1.660565 \times 10^{-27}$kg,

$$10.811u = 10.811 \times 1.660565 \times 10^{-27}\text{kg}$$

$$= 17.952368 \times 10^{-27}\text{kg}$$

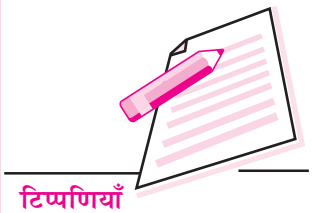
पाठागत प्रश्न 26.2

1. $^{7}_{3}Li$ के परमाणु का द्रव्यमान 6.01513 u है। द्रव्यमान क्षति तथा प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा का परिकलन कीजिए। $m_p = 1.00727$ u.; $m_n = 1.00865$ u और 1 u = 931 MeV लें।

2. $^{8}_{4}Be$ परमाणु की त्रिज्या का परिकलन कीजिए।
[$R = r_0 A^{1/3}$; $r_0 = 1.2 \times 10^{-15}$m लें।]

26.2 न्यूक्लिऑन किस प्रकार एक दूसरे से जुड़े रहते हैं: नाभिकीय बल

जैसे ही भौतिकीविदों ने नाभिक के न्यूट्रॉन-प्रोटॉन की परिकल्पना को स्वीकार किया, एक महत्वपूर्ण प्रश्न उभर कर आया- नाभिक के अंदर न्यूक्लिऑन किस प्रकार एक दूसरे से जुड़े रहते हैं? दूसरे शब्दों में कहें तो जो बल न्यूक्लिऑनों को परस्पर बांधे रखता है उस बल की प्रकृति क्या है? चूंकि गुरुत्वाकर्षण तथा विद्युत-चुम्बकीय बलों की पारस्परिक अन्योन्यक्रियाएं बहुत से प्रेक्षित तथ्यों पर प्रकाश डालते हैं, इसलिए आप की भी चाहत इन्हीं में से किसी बल को चुनने की होगी। चूंकि नाभिक का साइज इतना सूक्ष्म होता है जिसके अंदर प्रोटॉन और न्यूट्रॉन इतनी सघनता से संकुलित होते हैं। इनके बीच लगने वाले बल प्रबल, लघु परिसर के तथा आकर्षी होने चाहिए। ऐसा बल स्थिर वैद्युत (इलेक्ट्रोस्टैटिक) जाति का नहीं हो सकता क्योंकि प्रोटॉनों के बीच ऐसा बल प्रतिकर्षी होता है और यदि केवल ये ही कार्यरत होते, न्यूक्लिओन नाभिक से निकल कर बाहर चले गए होते, जो हमारे अनुभव के विरुद्ध है। इसके अलावा एक और तथ्य यह है कि न्यूक्लिऑनों के बीच कार्यरत बल ही विशाल बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिओन (करीब 8 MeV) के लिए उत्तरदायी होता है। अब दूसरा विकल्प गुरुत्वाकर्षण बल का है। निस्संदेह, यह बल न्यूक्लिऑनों की प्रत्येक जोड़ी के बीच आकर्षण बल के रूप में कार्य करता है। लेकिन यह बल इतना क्षीण है कि न्यूक्लिओनों के बीच लगने वाले शक्तिशाली आकर्षण बलों को समझा पाने में सक्षम नहीं है। यदि न्यूक्लिओन-न्यूक्लिओन के बीच कार्यरत बल को 1 मान लें तो गुरुत्वाकर्षण बल का मान 10^{-39} के करीब होगा।



इन सबसे हम यह निष्कर्ष निकाल सकते हैं कि न्यूक्लिओनों के बीच का आकर्षण बल एक नए किस्म का ही है। इसकी किसी भी ऐसे बल, जो चिरसम्मत भौतिकी के क्षेत्र में अब तक ज्ञात है, से तुलना नहीं हो सकती। ऐसे नए आकर्षण बल को *नाभिकीयबल* कहते हैं।

26.2.1 नाभिकीय बल के विशिष्ट गुणधर्म

आप याद कीजिए कि गुरुत्वाकर्षण बल तथा स्थिर विद्युत (इलेक्ट्रोस्टेटिक) दोनों व्युत्क्रम वर्ग नियम का पालन करते हैं। लेकिन न्यूक्लिऑन अति सघनता से संकुलित होते हैं तथा नाभिकीय बल, जो न्यूक्लिओनों को परस्पर बांधे रखता है, पड़ोसी न्यूक्लिओनों के बीच मौजूद होना चाहिए। अत: नाभिकीय बल एक लघु परास बल होना चाहिए जो अति लघु दूरियों ($\sim 10^{-15}$m) तक ही कार्यकारी होता है। इन नाभिकीय बलों को निम्नलिखित कणों के बीच लगने वाले आकर्षी बल को समझा पाने में सक्षम होना चाहिए:

– प्रोटोनों एवं न्यूट्रॉनों के बीच

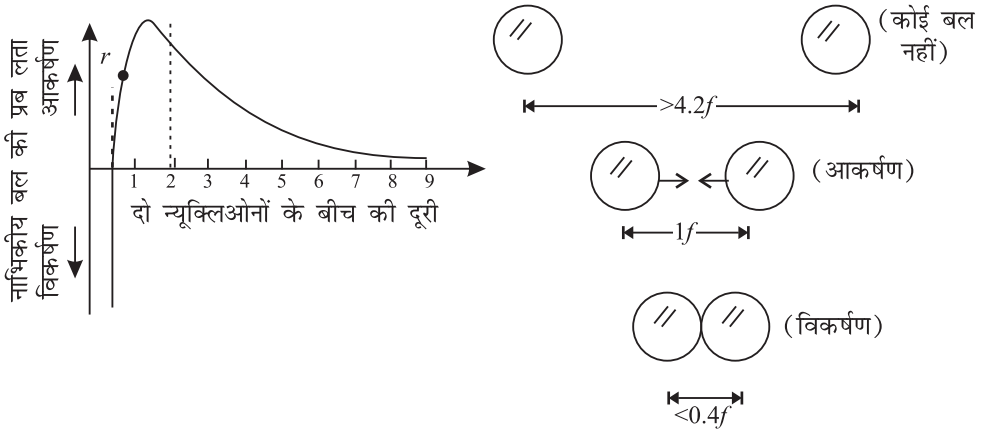
– दो प्रोटोनों के बीच; तथा

– दो न्यूट्रोनों के बीच

चूंकि प्रति न्यूक्लिऑन बंधन ऊर्जा B समान है चाहे नाभिक के अन्दर न्यूट्रॉनों और प्रोट्रॉनों का सम्मिश्रण कुछ भी क्यों न हो, उनके बीच के बल को समतुल्य लेने का हमारे पास पूरा औचित्य है। अत: नाभिकीय बल किसी प्रकार से आवेश द्वारा प्रभावित नहीं रहता, अर्थात यह आवेश अनाश्रित होता है।

नाभिकीय बल संतृप्तता के गुणधर्म का भी प्रदर्शन करता है। इसका तात्पर्य यह है कि न्यूक्लिओन केवल सीमित आकर्षण का ही प्रदर्शन करते हैं। अर्थात् नाभिक में मौजूद हर न्यूक्लिओन केवल अपने पड़ोसी यानी निकटस्थ न्यूक्लिओनों के साथ अन्योन्यक्रिया कर सकता है न कि नाभिक में विद्यमान सभी न्यूक्लिओनों के साथ।

यदि नाभिकीय बल केवल आकर्षी प्रकृति का ही होता तो न्यूक्लिऑन इसके प्रभाव से परस्पर संलीन हो जाते। लेकिम हम सब इस तथ्य से अवगत हैं कि न्यूक्लिऑनों के बीच की औसत दूरी स्थिर रहती है जिसके कारण नाभिकीय आयतन कुल न्यूक्लिओनों की संख्या के समानुपाती होता है। इसकी संभावित व्याख्या यह है कि नाभिकीय बल उसी सीमा तक आकर्षण बल के रूप में कार्यरत रहता है जब तक कि न्यूक्लिऑनों के बीच की दूरी किसी क्रांतिक मान पर बनी रहती है। यह दूरी जैसे ही कम होना शुरु होती है नाभिकीय बल में सहसा बहुत परिवर्तन आता है; आकर्षण विकर्षण में बदल जाता है (ध्यान रहे कि यह विकर्षण सामान्य स्थिर वैद्युत विकर्षण वाला बल नहीं है)। नाभिकीय बलों की इन गुणात्मक विशिष्टताओं को चित्र 26.3 में प्रदर्शित किया गया है।



चित्र 26.3 : (a) नाभिकीय बलों का दूरी के साथ प्रारूपिक परिवर्तन, तथा (b) दो न्यूक्लिऑनों के बीच की दूरी का न्यूक्लिऑनों के बीच कार्यरत बल पर प्रभाव

26.3 रेडियोधर्मिता

हमारी पृथ्वी की आयु कितनी है? भूगर्भविज्ञानी खुदाई द्वारा प्राप्त शैलों तथा जीवाश्मों की आयु का निर्धारण किस प्रकार करते हैं? कैंसर कोशिकाओं की रेडियो-चिकित्सा क्या है? इन सभी रोचक एवं उपयोगी प्रश्नों के उत्तर रेडियोधार्मिता, जो एक प्राकृतिक परिघटना है जिसमें परमाणु विकिरणों के उत्सर्जन द्वारा स्थायित्व प्राप्त करते हैं, के अध्ययन में अंतर्निहित हैं। यद्यपि इस रेडियोधार्मिता की खोज आकस्मिक रूप से हुई थी तथापि इस खोज ने भौतिकी में अनेक नई संभावनाओं के द्वारा खोल दिए। उद्योगों, कृषि तथा चिकित्सा क्षेत्र में इसके व्यापक अनुप्रयोग हैं। आइए, इसके बारे में जानकारी हासिल करें।

26.3.1 रेडियोधर्मिता की खोज

रेडियाधर्मिता की खोज की कहानी बड़ी रोचक है। सन् 1896 में फ्रांसीसी भौतिकीविद ए.एच. बैक्यूरल प्रतिदीप्ति की परिघटना (जिसमें कुछ पदार्थ दृश्य प्रकाश का उत्सर्जन करते हैं जब उन पर पराबैंगनी विकिरण आकर गिरती है) पर कार्य कर रहे थे। अपनी मेज की एक दराज में विभिन्न प्रकार के खनिजों के नमूनें भी रखे हुए थे। इन्हीं के साथ फोटोग्राफिक प्लेटों के कई बंद डब्बे भी रखे गए थे। किन्हीं कारणों से दराज में रखी हुई सभी ज्यों की त्यों रखी रहीं। एक दिन बैक्यूरल ने किसी वस्तु का फोटोग्राफ लेने के लिए डिब्बे में बंद रखी फोटोग्राफिक प्लेटों को दराज से निकाला। जब प्लेटों को डेवलप किया तो उन्हें यह जानकर निराशा हुई कि प्लेटें बुरी तरह से धुंधली थीं मानो पूर्व में वे प्रकाश के संपर्क में आई हों। उन्होंने बंद डिब्बों में रखी सभी फोटोग्राफिक प्लेटों का प्रयोग किया और पाया कि सभी प्लेटें धुधंली थीं। कारण उनकी समझ में नहीं आ रहा था क्योंकि सभी प्लेटों को सावधानीपूर्वक काले कागजों में लपेटकर सील बंद डिब्बों में सुरक्षित रखा गया था। उन्होंने पाया कि उनके दराज में रखे यूरेनियम ने ही (फोटोग्राफिक प्लेटों को) नुकसान पहुंचाया होगा। उन्होंने यह

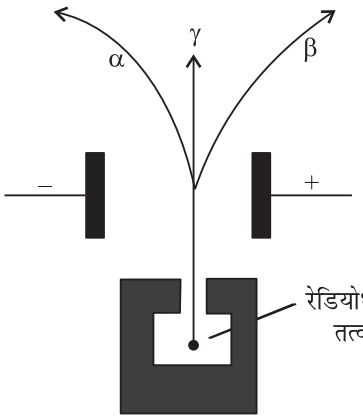
निष्कर्ष निकाला कि यूरेनियम लवण से नए प्रकार का विकिरण उत्पन्न होता है। इस विकिरण को *बैक्यूरल किरणें* कहा गया तथा विकिरण के उत्सर्जन की परिघटना को *रेडियोधर्मिता* नाम दिया गया। इस परिघटना का प्रदर्शन करने वाले तत्वों को *रेडियाधर्मी तत्वों* का नाम दिया गया।

इस खोज के तुरंत पश्चात् मेडम मारी क्यूरी ने व्यापक अध्ययन पर आधारित अपने पति पियरे क्यूरी के साथ मिलकर यूरेनियम अयस्क से बड़ी कठिन और जटिल प्रक्रिया द्वारा, जिसे रासायनिक पृथक्करण (केमिकल फ्रेक्शनिंग) कहते हैं, एक नए तत्व को वियोजित किया। यह नया तत्व यूरेनियम से करोड़ों गुना अधिक क्षमता से रहस्यमयी किरणों को उत्सर्जित कर सकता है। इस नए तत्व का नाम उन्होंने रेडियम रखा। मेडम क्यूरी द्वारा एक और नए रेडियोधर्मी तत्व की खोज की गई जिसका नाम उन्होंने अपने देश पोलेन्ड के सम्मान में पोलोनियम रखा।

26.3.2 विकिरणों की प्रकृति

सन् 1899 में जो एक ब्रिटिश भौतिकीविद लॉर्ड रदरफोर्ड ने रेडियोधर्मी तत्वों द्वारा उत्सर्जित बैक्यूरल किरणों का विश्लेषण किया। उन्होंने दो भिन्न घटकों की उपस्थिति को स्थापित किया: α-कण एवं β-किरणें। तीसरे घटक γ-किरणों का पता पी. विलार्ड ने लगाया।

हम अवगत हैं कि सभी परमाणुओं के नाभिक में धनावेशित प्रोटॉन होते हैं जो स्थिर वैद्युत प्रतिकर्षण के फलस्वरूप एक दूसरे को अत्यधिक प्रबलता से प्रतिकर्षित करते हैं। इस प्रत्याकर्षण पर काबू पाने के लिए नाभिक में न्यूट्रॉन की उपस्थिति गोंद (ग्लू) का काम करती है। परंतु भारी नाभिकों में यह स्थिर वैद्युत प्रतिकर्षण इतना प्रबल होता है कि न्यूट्रॉन की संख्या बढ़ाने से भी नाभिक स्थाई नहीं रह पाता। स्थायित्व प्राप्त करने के लिए ऐसे नाभिक स्वत: विघटित होकर α और β कणों के साथ γ-किरणों का भी उत्सर्जन करने लगते हैं जैसा कि चित्र 26.4 में दर्शाया गया है। इस प्रकार हम यह कह सकते हैं कि प्राकृतिक रेडियोधर्मिता में α व β–कणों और γ-किरणों का उत्सर्जन होता है। उत्सर्जित विकिरणों को रेडियोधर्मी विकिरण रहते हैं तथा (α, β और γ-किरणों के उत्सर्जन के साथ) परमाणु नाभिकों के विघटन (टूटने) की प्रक्रिया को रेडियाधर्मी क्षय करते हैं। कभी-कभी, यह प्रक्रिया स्थाई नाभिकों पर हल्के कणों (जैसे न्यूट्रोन और प्रोटोन) की बमबारी द्वारा भी प्रेरित की जा सकती है। इसे *कृत्रिम रेडियोधर्मिता* कहते हैं। इस परिघटना के विशिष्ट गुण यह है कि यह स्वत: होती है और α अथवा β उत्सर्जनों की स्थिति में नए तत्व से संबंधित नया नाभिक बनता है। अर्थात्, एक तत्व दूसरे तत्व में परिवर्तित हो जाता है। इस प्रकार यह नाभिकीय विघटन की परिघटना है और नए नाभिकों के बनने की संभावना की ओर संकेत करती है। आइए, पहले α, β और γ-विकिरणों के विलक्षण गुणो के विषय में अध्ययन करें।



चित्र 26.4 : α, β γ किरणों का उत्सर्जन

(i) α-**कण**

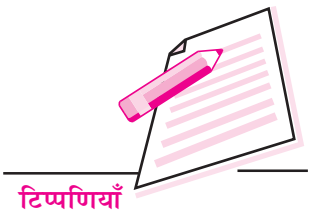
ये कण हीलियम परमाणु (^4_2He) के नाभिक होते हैं और इस नाभिक में दो प्रोटॉनो तथा दो न्यूट्रॉन होते हैं। α कणों के संबंध में विस्तृत अध्ययन उनके निम्नलिखित गुणों को प्रकाश में लाया:

- आवेशित कण होने के कारण ये विद्युत एवम् चुम्बकीय क्षेत्रों में विक्षेपित हो जाते हैं।
- ये कण बेरियम प्लेटिनोसाइनाइड तथा जिंक सल्फाइड जैसे पदार्थों पर प्रतिदीप्ति उत्पन्न करते हैं, फोटोग्राफिक प्लेट को प्रभावित करते हैं, कुछ तत्वों में रेडियाधार्मिता उत्पन्न कर सकते हैं और नाभिकीय अभिक्रिया उत्पन्न करते हैं।
- इन कणों में अत्यधिक आयनकारी क्षमता होती है। मात्र एक α–कण किसी गैस से पारगमन करने की प्रक्रिया में अवशोषित होने के पूर्व हजारों गैस परमाणुओं को आयनीकृत कर सकता है।
- ठोस पदार्थों में पारगमन करने की इन कणों की वेधन क्षमता कम होती है और धातुओं की पतली पन्नियों द्वारा ये परगमन कर प्रकीर्णित होते हैं। एल्युमिनियम की मात्र 0.02 mm मोटी चादर द्वारा रोक लिए जाते हैं।
- किसी रेडियोधर्मी तत्व से उत्सर्जित कणों की ऊर्जा उसे उत्सर्जित करने वाले नाभिक का अभिलक्षण होती है। यह उनके वेग में $1.4 \times 10^7 \text{ m s}^{-1}$ से $2.05 \times 10^7 \text{ m s}^{-1}$ के परिवर्तन के संगत होता है।

(ii) β-**कण**

β-कण धनावेशित तथा ऋणावेशित भी हो सकते हैं। नाभिक के अंदर एक न्यूट्रोन के प्रोटोन में बदलने और इसकी विपरीत प्रक्रिया के फलस्वरूप ही ये अस्तित्व में आते हैं। β-कणों के विषय में और अधिक अध्ययन करने के उपरांत निम्नलिखित गुणों की जानकारी प्राप्त हुई है:

- आवेशित होने के कारण ये कण विद्युत तथा चुम्बकीय क्षेत्रों में विक्षेपित हो जाते हैं।
- ये कण प्रतिदीप्ति उत्पन्न करने वाली पदार्थो जैसे जिंक सल्फाइड और बेरियम प्लेटिनोसाइनाइड पर डाले जाने पर प्रतिदीप्ति उत्पन्न करते हैं, और ये फोटोग्राफिक प्लेटों को भी प्रभावित करते हैं।
- इन कणों में गैसों के परमाणुओं के अयनीकरण की क्षमता होती है परंतु यह क्षमता α-कणों की क्षमता से कम होती है।
- ऋणावेशित β-कण एल्युमिनियम की कुछ मिलीमीटर तक मोटी चादर से पारगमन कर सकते हैं। इनकी वेधन क्षमता α-कणों से 100 गुना अधिक होती है।



- इनकी औसत ऊजाएँ 2 MeV और 3MeV के बीच होती हैं। इन कणों का द्रव्यमान कम होने के कारण इनके वेगों का परास बहुत अधिक होता है जो कि 0.33c से 0.998 c के बीच होता है, जहाँ c प्रकाश के वेग है।

(iii) **γ-कण**

γ-किरणें उच्च आवृत्ति की विद्युत-चुम्बकीय तरंगे हैं, और इसलिए अति ऊर्जात्मक होती है। इनमें निम्नलिखित अभिलक्षणिक गुण पाए जाते हैं:

- ये विद्युत अथवा चुम्बकीय क्षेत्रों द्वारा विक्षेपित नहीं होती हैं। ये निर्वात में प्रकाश के वेग से चलती हैं।
- इनकी वेधन-क्षमता α तथा β–कणों से अधिक होती है; गामा-किरणें लौह धातु तथा लेड की कई सेन्टीमीटर मोटी चादरों को भेद सकती हैं।
- इनमें अयनीकरण क्षमता होती है जो α एवं β-कणों की अपेक्षा कम होती है।
- ये किरणें पदार्थों में प्रतिदीप्ति उत्पन्न कर सकती हैं तथा फोटोग्राफिक प्लेट को भी प्रभावित कर सकती हैं।
- ये किरणें जिन धातु-पृष्ठों पर गिरती हैं उनसे इलेक्ट्रॉन बाहर निकाल देती हैं एवं पृष्ठ को गर्म कर देती है। कठोर गामा किरणें (अर्थात् उच्च ऊर्जा वाली गामा किरणों) का प्रयोग दुर्दम अर्थात् कैंसरकारी कोशिकाओं की रेडियो-चिकित्सा में किया जाता है।

मारी क्यूरी
(1867–1934)

मारी क्यूरी ने रेडियोधर्मिता के क्षेत्र में किए गए अपने अध्ययनों के लिए वर्ष 1903 के भौतिकी नोबेल पुरस्कार को ए. हेनरी बैक्यूरल तथा अपने पति पियरे क्यूरी के साथ संयुक्त रूप से प्राप्त किया। विश्व की वह एकमात्र महिला थीं। जिन्हें दो बार नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया था। उन्हें दूसरा नोबल पुरस्कार 1911 में रसायन विज्ञान के क्षेत्र में दिया गया था। कालान्तर में उनकी पुत्री जोलिओट को भी रसायन विज्ञान के क्षेत्र में नोबेल पुरस्कार प्रदान किया गया जो उनकी कृत्रिम रेडियोधर्मिता की खोज के लिए था।

26.3.3 रेडियोधर्मी क्षय

किसी भी रेडियोधर्मी क्षय प्रक्रिया में स्वत: प्रवर्तित (स्पान्टेनियस) उत्सर्जन सें या तो α-कण अथवा एकल β-कण उत्सर्जित होता है। किसी रेडियोधर्मी नाभिक (जिसे *जनक नाभिक* कहते हैं) से α-कण का उत्सर्जन होता है तो यह एक नए नाभिक (जिसे *संतति नाभिक* कहते हैं) में बदल जाता है। इसके परिणामस्वरूप, परमाणु क्रमांक में दो इकाई और द्रव्यमान संख्या में चार इकाई की कमी हो जाती है। इसी प्रकार जनक नाभिक से β–कण के उत्सर्जन से संतति नाभिक प्राप्त होता है और इस प्रक्रिया में परमाणु क्रमांक एक इकाई बढ़ जाता है (यदि

यह β-उत्सर्जन है) परन्तु द्रव्यमान संख्या में कोई परिवर्तन नहीं होता। किरणों के उत्सर्जन से जनक नाभिक का न तो परमाणु क्रमांक और न ही द्रव्यमान का संख्या में कोई परिवर्तन होता है। इसलिए किसी नए नाभिक का सृजन नहीं होता।

ध्यान दीजिए कि किसी भी नाभिकीय विघटन में आवेश संख्या (Z) और द्रव्यमान संख्या (A) सदैव संरक्षित रहते हैं। इस प्रकार रेडियोधर्मी नाभिक, जो X द्वारा प्रदर्शित होता है, के लिए नाभिकीय रूपान्तरणों को निम्न प्रकार लिखा जा सकता है-

$${}^{A}_{Z}X \xrightarrow{\alpha-\text{क्षय}} {}^{4}_{2}He + {}^{A-4}_{Z-2}Y$$

(α-कण)

$${}^{A}_{Z}X \xrightarrow{\beta-\text{क्षय}} {}^{0}_{-1}e + {}^{A}_{Z-1}Y$$

(β-कण)

$$({}^{A}_{Z}X)^{*} \xrightarrow{\gamma-\text{क्षय}} {}^{A}_{Z}X + \gamma$$

तत्व के संकेत के ऊपर लगा तारा-चिह्न यह दर्शाता है कि वह उत्तेजित अवस्था में।

26.3.4 रेडियोधर्मी क्षय के नियम

हम जानते हैं कि यदि हमारे पास किसी खास मात्रा में रेडियोधर्मी समस्थानिक पदार्थ है तो विघटनों के कारण उसकी मात्रा समय के साथ धीरे-धीरे कम होती जाएगी। इसे दर्शाने वाला नियम बहुत सरल है। रेडियोधर्मी विघटन की दर बाहरी कारकों जैसे ताप, दबाव आदि पर निर्भर नहीं करती है तथा यह केवल संभाव्यता के नियम पर निर्भर करती है। यह नियम बताता है कि प्रति सेकंड विघटित होने वाले रेडियोधर्मी परमाणुओं की संख्या विघटन के क्षण उपस्थित कुल रेडियाधर्मी परमाणुओं की संख्या के समानुपाती होता है। इसे रेडियोधर्मी क्षय का नियम कहते हैं।

मान लीजिए कि $t = 0$ समय पर रेडियोधर्मी परमाणु की प्रारंभिक संख्या N_o है तथा किसी समय t पर उपस्थित रेडियोधर्मी परमाणुओं की संख्या $N(t)$ है। यदि dN अल्प समय dt में क्षय होने वाले उन परमाणुओं की संख्या को दर्शाता है, तो समय $(t+dt)$ पर परमाणुओं की संख्या $(N - dN)$ होगी। अत: क्षय की दर:

$$\frac{dN(t)}{dt} \propto N,$$

अथवा

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \qquad (26.4)$$

जहां λ क्षय नियतांक है जो क्षय होने वाले रेडियोधर्मी पदार्थ का अभिलक्षण होता है। ऋणात्मक चिन्ह यह बताता है कि समय के साथ नाभिकों की संख्याओं में कमी आती है। इस संबंध को इस प्रकार लिख सकते हैं:

$$\lambda = -\frac{1}{N(t)}\frac{dN(t)}{dt} \qquad (26.5)$$

हम समी. (26.4) को निम्न प्रकार से लिख सकते हैं :

$$\frac{dN(t)}{N(t)} = -\lambda\, dt$$

समाकलित करने पर,

$N(t) = -\lambda t + k.$

$t = 0$ पर $N(t) = N_0$

अत: $k = ln\, N_0$

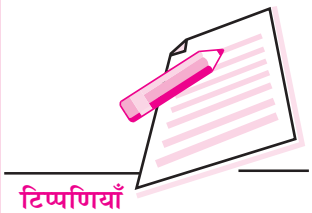
अथवा

$\ln N(t) - \ln N_0 = -\lambda t$

$$\text{or } \ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right) = -\lambda t$$

एंटीलॉग लेने पर हमें वांछित संबंध प्राप्त होता है :

$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$



इस प्रकार, क्षय नियतांक (λ) को विघटन की तात्कालिक दर तथा उस क्षण उपस्थित रेडियोधर्मी परमाणुओं की संख्या के अनुपात के रूप में परिभाषित किया जा सकता है।

क्षय-नियम को कभी-कभी चर-घातांकी रूप में भी व्यक्त करते हैं- और इसे चर घातांकी *क्षय नियम* भी कहते हैं। चर-घातांकी रूप को प्राप्त करने के लिए हम समीकरण (26.4) को समय के सापेक्ष समाकलित करते हैं:

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) \qquad (26.6)$$

इस नियम से सबसे महत्वपूर्ण निष्कर्ष यह निकलता है कि N तभी शून्य होगा जब $t = \infty$ होगा। इस प्रकार कोई भी रेडियोधर्मी जनक तत्व बहुत लम्बी अवधि में भी पूर्णतः लुप्त नहीं हो सकता। रेडियोधर्मी क्षय नियम बताता है कि यदि भिन्न रेडियोधर्मी तत्वों की प्रारंभिक संख्या एक ही अर्थात् N_0 है तो भी बाद के किसी क्षण $N(t)$ के मान भिन्न-भिन्न होंगे। ऐसा इसलिए होगा क्योंकि उनके क्षय नियतांक (λ) भिन्न-भिन्न होंगे। इसलिए वे विघटन की भिन्न-भिन्न दरें दर्शाएंगे। इसका परिकलन उनकी अर्ध-आयु ($T_{1/2}$) तथा औसत आयु (T_a) से किया जाता है।

विघटन के मात्रक

क्षय नियतांक की माप का मात्रक प्रति सेकेंड है। किसी क्षण पर किसी रेडियोधर्मी पदार्थ की सक्रियता उस क्षण, उसके विघटन दर से मापी जाती है। इसका *SI* मात्रक बैक्यूरल कहलाता है:

1 बेक्युरल = 1 विघटन प्रति सेकंड

क्षय नियतांक का एक अन्य मात्रक क्यूरी है।

1 क्यूरी $= 3.7 \times 10^{10}$ विघटन प्रति सेकंड

एक और मात्रक रदरफोर्ड (rd) है:

1 रदरफोर्ड $= 10^6$ विघटन प्रति सेकेंड

26.3.5 अर्ध-आयु ($T_{1/2}$)

किसी रेडियोधर्मी तत्व की अर्ध-आयु वह समय-अंतराल है जिसमें उसके जनक रेडियोधर्मी परमाणुओं की संख्या अपनी प्रारंभिक संख्या की आधी रह जाती है।

परिभाषा के अनुसार, समय $t = T_{1/2}$, पर $N = N_{0/2}$ समीकरण (26.2) के प्रयोग द्वारा हम लिख सकते हैं:

$N_0/2 = N_0 \exp(-\lambda T_{1/2})$

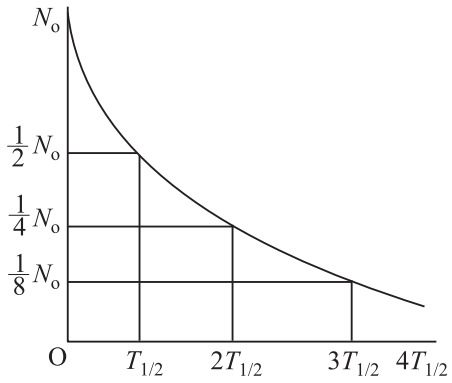
अथवा $\lambda T_{1/2} = \log_e 2$

अथवा $$T_{1/2} = \frac{\log_e 2}{\lambda}$$

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

$$= \frac{2.303 \times 0.3010}{\lambda}$$

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



चित्र 26.5 रेडियोधर्मी क्षय वक्र

इस प्रकार किसी रडियोधर्मी पदार्थ की अर्ध-आयु उसके क्षय-नियतांक की व्युत्क्रमानुपाती होती है

और रेडियोधर्मी नाभिक का यह एक अभिलक्षणिक गुण है। ${}^{14}_{6}C$ (रेडियोधर्मी कार्बन) की अर्धआयु 5730 वर्ष है। इसका अर्थ यह हुआ कि ${}^{14}_{6}C$ की 1 g मात्रा को 0.50 g तक घटने में 5730 वर्ष लगेंगे। अगले 5730 वर्षों अर्थात् 11460 वर्षों की कुल अवधि में यह संख्या घटकर $\frac{0.5}{2} = 0.025\,g$ रह जाएगी। रेडियोधर्मी नमूना किस प्रकार विघटित होता है इसे चित्र 26.5 में दिखाया गया है।

उदाहरण 26.4 : मोहनजोदड़ो की खुदाई से प्राप्त एक प्राणी का जीवाश्म कार्बन के एक ग्राम का 9 क्षय प्रतिमिनट की सक्रियता बताता है। इसके आधार पर ज्ञात कीजिए की सिन्धु घाटी सभ्यता कितनी पुरानी है। दिया है कि कार्बन ^{14}C की सक्रियता जीवित प्राणि-प्रतिदर्श के लिए 15 क्षय प्रति मिनट प्रति ग्राम कार्बन है तथा कार्बन (^{14}C) की अर्ध आयु 5730 वर्ष है।

हल : कार्बन ^{14}C, कार्बन का रेडियोधर्मी समस्थानिक है। जीवित प्राणियों में इसका प्रतिशत नियत रहता है। परन्तु मृत्यु होने पर रेडियोधर्मी क्षय के कारण ^{14}C का प्रतिशत घटने लगता है। रेडियोधर्मी क्षय के नियम के अनुसार इसे हम इस प्रकार लिख सकते हैं

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$$

ताकि $$N/N_0 = \exp(-\lambda t)$$

अथवा $$9/15 = \exp(-\lambda t)$$

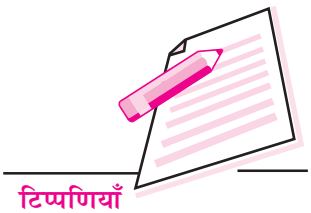
अथवा $$\log_e (9/15) = -\lambda t$$

अथवा $$\log e \left(\frac{15}{9}\right) = \lambda t$$

जिससे $$t = 1/\lambda\,[\log_e (15/9)]$$

यहाँ $T_{1/2} = 0.693/\lambda = 5730$ वर्ष। इसलिए

$$t = 2.303 \times (5730/0.693)\,[\log_{10} 15 - \log_{10} 9]$$



अत: $t = 4224.47$ वर्ष

इस प्रकार कार्बन-14 का नमूना 4224.47 वर्ष पहले अस्तित्व में था। अत: सिंधु घाटी सभ्यता का अनुमानित अस्तित्व 4225 वर्ष पूर्व था।

पाठगत प्रश्न 26.3

1. आप किस प्रकार से समझाएंगे कि रेडियोधर्मिता एक नाभिकीय विघटन की परिघटना है?
2. α, β और γ - विकिरणों की आयनीकरण क्षमता एवं वेधन क्षमता की तुलना कीजिए।
3. निम्नलिखित क्षय-समीकरणों में आवेश तथा द्रव्यमान संख्या के संरक्षण नियमों का प्रयोग करते हुए a और b के मानों को ज्ञात करें:

   (i) ${}^{A}_{Z}X = {}^{4}_{2}He + {}^{b}_{a}Y + \gamma$

   (ii) ${}^{4}_{Z}X = {}^{0}_{-1}e + {}^{b}_{a}Y + \gamma$

4. एक रेडियोधर्मी पदार्थ की अर्ध-आयु पांच वर्ष है। कितने समय में इस पदार्थ की 10 g की मात्रा घटकर 2.5g रह जाएगी?

रेडियोधर्मिता के अनुप्रयोग

रेडियोधर्मिता के हमारे दैनिक जीवन में अनेक अनुप्रयोग हैं, जिनमें से कुछ को नीचे बताया जा रहा है

(i) ***चिकित्सा में:*** कैंसर के इलाज (रेडियो-चिकित्सा) में कोबोल्ट के रेडियोधर्मी स्रोत, जिससे X- किरणें उत्सर्जित होती है, का प्रयोग कैंसरकारी कोशिकाओं को नष्ट करने में होता है। एकल रेडियोधर्मी परमाणु के क्षय को एक धारक दीवार के बाहर बहुत दूर पर रखे एक उपकरण द्वारा दर्ज किया जा सकता है। ऐसे उच्च संवेदनशीलता के गुण का उपयोग ट्रेसर टेकनीक कहलाता है तथा इसका उपयोग चिकित्सा क्षेत्र में शरीर के अंदर किसी भाग में व्रण (अल्सर) की पहचान और किस जगह में स्थित है, इसका पता लगाने में किया जाता है। कुछ हानिरहित तत्व, जैसे सोडियम के समस्थानिक $\left({}^{24}_{11}Na\right)$ के कुछ रेडियोधर्मी परमाणुओं को रोगी के शरीर में इन्जेक्शन द्वारा पहुंचाया जाता है। इनकी गति को दर्ज किया जा सकता है। शरीर का प्रभावित भाग रेडियोधर्मी परमाणुओं को अवशोषित कर लेता है जिससे उनकी गति अवरूद्ध हो जाती है। इससे रोगग्रस्त भाग की चिकित्सक अच्छी तरह पहचान कर पाते हैं।

(ii) ***कृषि क्षेत्र में:*** जीवों पर नियंत्रित गामा किरणें डालकर हम फसलों, फलों और सब्जियों की गुणवत्ता और उपज में सुधार ला सकते हैं। भंडारण से पहले उन पर विकिरणों का प्रयोग कर उन्हें क्षति से बचाया जा सकता है।

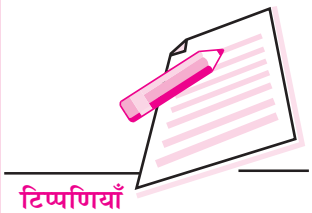
(iii) ***भूगर्भ विज्ञान में :*** सबसे महत्वपूर्ण उपयोग पुराने जीवाश्मों (फासिल्स) के आयु निर्धारण में होता है। पदार्थों में उपलब्ध जीवित कार्बन की सामान्य सक्रियता लगभग 15 क्षय प्रति मिनट प्रति ग्राम कार्बन पाई जाती है। यह सक्रियता वातावरण में उपलब्ध साधरण कार्बन (C –12) के साथ रेडियोधर्मी कार्बन (C–14) की कुछ मात्रा पाए जाने के कारण होती है। पेड़-पौधे इस समस्थानिक (^{14}C) को वातावरण से प्राप्त करते हैं और यह उन प्राणियों में पहुँचता है जिनका भोजन ही पेड़-पौधे होता है। इस प्रकार समस्त जीव जन्तुओं में उपलब्ध कार्बन का लगभग 10^8 अंश में से एक भाग रेडियोधर्मी कार्बन का होता है। सभी जीवित प्राणियों (जंतु एवं पौधे) की मृतावस्था में उनका वातावरण के साथ संबंध समाप्त हो जाता है क्योंकि वातावरण से कार्बन (14) का अवशोषण नहीं हो पाता है। अत: साम्यावस्था समाप्त हो जाती है और सक्रियता घटने लगती है। इस प्रकार किसी भी नमूने की अनुमानित आयु निर्धारित की जाती है। इसी इसे कार्बन-काल निर्धारण कहते हैं और इसी सिद्धांत के आधार पर पुरातत्व वेत्ता किसी जीवाश्म की आयु निर्धारित करते हैं।

इसी तकनीक का उपयोग भूगर्भीय नमूनों में प्राप्त यूरेनियम अयस्क में उपलब्ध ^{238}U तथा ^{206}Pb की सापेक्षिक मात्राओं को मापकर पृथ्वी की आयु आकलित करने के लिए किया जाता है। मान लीजिए की पृथ्वी की उत्पत्ति के समय प्रारंभिक समय के नमूनों में केवल यूरेनियम ही था और लेड नहीं था। किंतु जैसे-जैसे समय बीतता गया यूरेनियम क्षय के द्वारा लेड में परिवर्तित होता गया। अत: किसी नमूने में उपस्थित लेड की मात्रा उसकी आयु बता सकती है। इस तकनीक के प्रयोग द्वारा पृथ्वी की वर्तमान आयु लगभग 4 अरब वर्ष आंकी गई है।

(iv) ***उद्योगों में :*** भारी मशीनरी के अंदरूनी भागों में छूटी हुई कमियों या अपूर्णताओं को पहचानने के लिए गामा किरणों का प्रयोग किया जाता है। उदाहरण के लिए, यदि अंदरुनी भाग में वायु का बुलबुला रह गया है तो वहाँ पर γ-किरणों का वेधन अधिक होगा।

आपने क्या सीखा

- परमाणु के नाभिक में धनावेशित प्रोटॉन तथा निरावेशित न्यूट्रॉन होते हैं।
- किसी तत्व के परमाणु के नाभिक में उपस्थित प्रोटोनों की संख्या उस तत्व का परमाणु क्रमांक है।
- किसी परमाणु के नाभिक में प्रोटोनों तथा न्यूट्रानों की संख्या का योग उसकी द्रव्यमान संख्या कहलाती है।
- वे परमाणु जिनके परमाणु क्रमांक तो समान होते हैं परंतु उनके द्रव्यमान संख्या भिन्न होते हैं, समस्थानिक कहलाते हैं।



- वे परमाणु जिनकी द्रव्यमान संख्या समान होती है परन्तु उनका परमाणु क्रमांक भिन्न होता है, समभारिक कहलाते हैं।
- वे परमाणु जिनके नाभिको में न्यूट्रॉनों की संख्या समान हो समन्यूट्रॉनिक कहलाते हैं।
- प्रत्येक परमाणु के नाभिक के अंदर स्थित न्युक्लिऑन आपस में तीव्र नाभिकीय आकर्षण बलों से बंधे होते हैं। ये बल लघु परिसर वाले होते हैं और आवेश पर निर्भर नहीं करते हैं।
- नाभिक के न्यूक्लिऑनों का कुल द्रव्यमान, परमाणु के द्रव्यमान से अधिक होता है। द्रव्यमानों के इस अंतर को द्रव्यमान क्षति कहते हैं। बंधन ऊर्जा का यह अनुमापक है।
- नाभिक का साइज (आयतन) उसके न्यूक्लिओनों के कुल द्रव्यमानों पर निर्भर होता है।
- किसी नाभिक से α-कण अथवा β-कण के स्वत: प्रवर्तित उत्सर्जन के बाद अनुगामी γ-विकिरणों का उत्सर्जन रेडियोधर्मिता कहलाता है।
- α-कणों की पहचान हीलियम के नाभिकों के रूप में तथा β-कणों की पहचान द्रुतगामी इलेक्ट्रोनों के रूप में की गई है। γ किरणें छोटी तरंग दैर्ध्य वाली विद्युत-चुम्बकीय तरंगे होती हैं।
- रेडियोधर्मिता क्षय के नियमानुसार, रेडियोधर्मी परमाणुओं के प्रति सेकंड क्षय होने की संख्या विघटन के समय उपस्थित परमाणुओं के संख्या की अनुक्रमानुपाती होती है।
- किसी रेडियाधर्मी पदार्थ की अर्ध-आयु समय का वह अंतराल है जिसमें रेडियोधर्मी परमाणुओं की संख्या अपनी प्रारंभिक संख्या की आधी रह जाती है।
- रेडियोधर्मिता क्षय का चर-घातांकी नियम $N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$ है।

पाठांत प्रश्न

1. रेडियोधर्मिता का नमूना कब विघटित होता है?
2. समस्थानिकों और समभारिकों के बीच अंतर स्पष्ट कीजिए।
3. बंधन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिऑन तथा द्रव्यमान संख्या के बीच खींचे गए ग्राफ के अभिलक्षण स्पष्ट कीजिए।
4. नाभिकीय बल की क्या प्रकृति होती है? उनके कुछ विशेषताओं को लिखिए।
5. स्पष्ट कीजिए कि किसी रेडियोधर्मी पदार्थ का क्षय नियतांक उसके अर्ध आयु से किस प्रकार का संबंध रखता है।
6. निम्नलिखित शब्दों की परिभाषा लिखिए-

   (i) परमाणु क्रमांक; (ii) द्रव्यमान संख्या; (iii) द्रव्यमान क्षति

   (iv) न्यूक्लिओनों की बंधन ऊर्जा; (v) अर्ध-आयु; (vi) औसत आयु

   (vii) क्षय-नियतांक

7. रेडियोधर्मी क्षय के नियम को स्पष्ट कीजिए।

8. ''कार्बन-काल निर्धारण' क्या होता है? इसकी महत्ता की व्याख्या कीजिए।

9. निम्नलिखित परमाणुओं में न्यूट्रोनों, प्रोटोनों तथा इलेक्ट्रोनों की संख्या ज्ञात करें।

   (i) $^{23}_{11}Na$; (ii) $^{2}_{1}H$; (iii) $^{238}_{92}U$; (iv) $^{35}_{17}Cl$;

10. निम्नलिखित नाभिकों के लिए द्रव्यमान क्षति और बंधन ऊर्जा का परिकलन कीजिए-

    (i) $^{4}_{2}He$; (ii) $^{7}_{3}Li$; (iii) $^{14}_{7}N$;

    दिया हुआ है, 1 u = 1.660566×10^{-27}kg = 931 MeV, प्रोटॉन का द्रव्यमान = 1.007276 u, न्यूट्रॉन का द्रव्यमान = 1.008665 u, $^{4}_{2}He$ परमाणु का द्रव्यमान = 4.00260 u, $^{7}_{3}Li$ परमाणु का द्रव्यमान = 7.01601 u, $^{14}_{7}N$ परमाणु का द्रव्यमान = 14.00307 u.

11. यूरेनियम के दो मुख्य समस्थानिकों की वर्तमान प्रचुरता को प्रयोग में लाते हुए तथा यह कल्पना करते हुए कि प्रचुरता अनुपात 1 से अधिक कभी नहीं रहा, भूपर्पटी (क्रस्ट) की अधिकतम संभावित आयु का प्राक्कलन कीजिए। दिया हुआ है कि ^{238}U और ^{235}U के मध्य का वर्तमान अनुपात 137.8 : 1 है; ^{238}U की अर्ध-आयु = 4.5×10^{9} वर्ष; और ^{235}U की अर्ध-आयु = 7.13×10^{8} वर्ष।

12. किसी रेडियोधर्मी नमूने की सक्रियता 1 घंटे 20 मिनट में उसकी प्रारंभिक मान की $\left(\frac{1}{16}\right)$ रह जाती है। उस नमूने की अर्ध-आयु ज्ञात कीजिए।

पाठगत प्रश्नों के उत्तर

26.1

1.

समस्थानिक	समभारिक	समन्यूट्रॉनिक
$^{12}_{6}C$ और $^{14}_{6}C$	$^{76}_{32}Ge$ और $^{76}_{34}Se$	$^{2}_{1}H$ और $^{3}_{2}He$
$^{1}_{1}H$, $^{2}_{1}H$ और $^{3}_{1}H$	$^{40}_{18}A$ और $^{40}_{20}Ca$	$^{14}_{6}C$ और $^{18}_{8}O$
$^{16}_{8}O$ और $^{18}_{8}O$	$^{76}_{32}Ge$ और $^{76}_{34}Se$	$^{23}_{11}Na$ और $^{24}_{12}Mg$
$^{35}_{17}Cl$ और $^{37}_{17}Cl$	$^{3}_{1}H$ और $^{3}_{2}He$	$^{27}_{13}Al$ और $^{28}_{14}Si$
$^{206}_{82}Pb$ और $^{207}_{82}Pb$	$^{7}_{3}Li$ और $^{7}_{4}Be$	$^{27}_{13}Al$ और $^{28}_{14}Si$
$^{238}_{92}U$ और $^{239}_{92}U$		

2. (i) भारी; (ii) द्रव्यमान; (iii) न्यूक्लिऑन; (iv) 14; (v) 14 (vi) परमाणु

3. परमाणु संख्या.

26.2

1. $\Delta m = 1.041358$ u; 969.5 MeV.

2. 2.4×10^{-15}m.

26.3

1. नाभिकीय विघटन में सामान्यत: α या β कणों का उत्सर्जन होता है जिसके परिणामस्वरूप जनक तत्व के परमाणु क्रमांक और द्रव्यमान संख्या में परिवर्तन उत्पन्न होते हैं। α और β कणों के उत्सर्जन से भारी नाभिक अपने द्रव्यमान में कमी कर लेता है। परिणामस्वरूप, थोड़े हल्के द्रव्यमान वाला नाभिक उत्पन्न होता है। इसलिए, यह एक नाभिकीय विघटन की परिघटना है।

2. अयनीकरण क्षमता क्रम–

   $\alpha > \beta > \gamma$

   वेधन क्षमता क्रम–

   $\alpha < \beta < \gamma$

3. i) $a = Z - 2$ और $b = A - 4$

   ii) $a = Z + 1$ और $b = A$.

4. दो अर्ध-आयु का समय लगेगा। एक अर्ध-आयु 10 ग्राम से पांच ग्राम तक घटने में और दूसरी पांच ग्राम से 2.5 ग्राम तक घटने में, अर्थात 10 वर्ष।

पाठांत प्रश्नों के उत्तर

9. (i) 12, 11, 11 (ii) 1, 1, 1 (iii) 146, 92, 921 (iv) 18, 17, 17

10. (i) 0.034, 28 MeV (ii) 0.044, 37.86 MeV (iii) 0.10854, 101 MeV

11. 6×10^9 वर्ष

12. 20 मिनट