टिप्पणियाँ

27

नाभिकीय विखंडन एवं संलयन

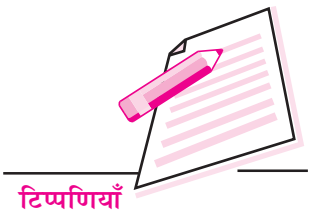
हम सभी यह जानते हैं कि सूर्य, सतत ऊर्जा प्रदान कर पृथ्वी पर जीवन संभव कर रहा है। सूर्य ऐसा पिछले कई करोड़ वर्षों से करता आ रहा है और आने वाले कई करोड़ वर्षों तक ऐसा करता रहेगा। सूर्य द्वारा विशाल मात्रा में उत्सर्जित इस ऊर्जा का स्रोत क्या है? यह प्रश्न सदैव मानव मस्तिष्क के लिए आकर्षण का केन्द्र बना रहा है। पर अब हमें विश्वस्तता से ज्ञात है कि सूर्य के क्रोड में ऊर्जा, हाइड्रोजन नाभिक के हीलियम नाभिक में, अत्याधिक तापमान पर संलयन के कारण उत्पन्न होती है। यह तथ्य अन्य तारों के लिए भी लागू होता है। किसी संलयन रियेक्टर में इसी तरह की परिस्थितियों के अनुकरण को, आने वाले वर्षों में हमारी ऊर्जा संबंधी सभी आवश्यकताओं के लिए ऊर्जा के परम स्रोत के रूप में देखा जा रहा है।

इसी तरह आपने, ऊर्जा में सुरक्षा एवं तारापुर, कोटा, कैगा, नरोरा, कल्पाकम एवं काकरपरा में स्थित हमारे नाभिकीय रियेक्टरों में विद्युत उत्पादन में नाभिकीय ऊर्जा की भूमिका के विषय में अवश्य पढ़ा होगा। इसी प्रकार आपने समाचार पत्र में पढ़ा होगा कि 6 अगस्त 1945 को जापान के एक बड़े शहर हिरोशिमा में परमाणु बम गिराया गया था जिससे लगभग पूरा शहर कुछ ही क्षणें में नष्ट हो गया एवं लाखों लोग मर गए। इस बम से उत्सर्जित ऊर्जा 20,000 टन टी.एन.टी. (ट्राई नाईट्रो टॉलूईन) के धमाके में उत्सर्जित ऊर्जा के बराबर थी एवं यह बम, मानव इतिहास में एकदम नया था। तब से और अधिक शक्तिशाली (परमाणु, हाइड्रोजन, न्यूट्रॉन) बम निर्मित हो चुके हैं जिनकी विध्वंसक शक्ति कई मेगा टन टी.एन.टी के बराबर है। ऐसा कहा जाता है कि विश्व की महाशक्तियों ने इस तरह से बमों का बड़ी संख्या में संचयन कर रखा है। उनके इस संचय की विध्वंस शक्ति इतनी अधिक है कि यह संपूर्ण पृथ्वी को कई बार नष्ट कर सकती है। ऊर्जा की इस विशाल मात्रा के लिए जो भौतिक प्रक्रिया उत्तरदायी है वह है नाभिकीय विखंडन। अब आप इन प्रक्रियाओं के विषय में जानेंगे।

उद्देश्य

इस पाठ को पढ़ने के पश्चात् आप:

- नाभिकीय अभिक्रियाओं में विभिन्न राशियों के संरक्षण नियमों को बता सकेंगे;



- नाभिकीय शृंखला-अभिक्रिया, नियंत्रित एवं अनियंत्रित विखंडन शृंखला-अभिक्रिया जैसे शब्दों को समझा सकेंगे;
- नाभिकीय रिएक्टर की कार्य-विधि का वर्णन कर सकेंगे; एवं
- तारों में ऊर्जा उत्पादन की क्रियाविधि को समझा सकेंगे।

27.1 रासायनिक एवं नाभिकीय

27.1.1 रासायनिक अभिक्रिया

हम जानते हैं कि सभी पदार्थ परमाणुओं से बने होते हैं। पाठ 26 में आपने पढ़ा कि किसी भी तत्व के रासायनिक गुणों का नियंत्रण, सबसे बाह्य कक्षा में उपस्थित इलेक्ट्रॉन करते हैं। अर्थात्, परमाणु अन्य परमाणु या अणु (परमाणु के समूह) से संयोग करते हैं एवं अपने संयोजक इलेक्ट्रॉन को पुन: व्यवस्थित करते हैं, जिसके साथ-साथ उनकी स्थैतिक ऊर्जा का ह्रास होता है।

अंत:क्रिया करने वाले परमाणु एवं अणु में, संयोजक इलेक्ट्रॉनों की पुन: व्यवस्था के कारण, ऊर्जा या अवशोषण के साथ नए यौगिक अणु के निर्माण को रासायनिक अभिक्रिया कहते हैं। इस प्रक्रिया में नाभिक (न्यूक्लियस) पूर्णत: अप्रभावित रहता है। इतना ही नहीं, आंतरिक कक्षाओं के इलेक्ट्रान भी अप्रभावित रहते हैं।

कार्बन अणु की ऑक्सीजन परमाणु से अंत:क्रिया के द्वारा कार्बन डाइ-ऑक्साइड का बनना रासायनिक अभिक्रिया का उदाहरण है:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 4.08\ eV \qquad (27.1)$$

इस रासायनिक अभिक्रिया में भाग लेने वाले प्रत्येक कार्बन परमाणु के लिए *4.08* eV ऊर्जा मुक्त होती है। इसे कार्बन डाईऑक्साइड की बंधन ऊर्जा कहते हैं। वे अभिक्रियाएं जिनमें ऊर्जा का उत्सर्जन होता है उन्हें ऊष्माक्षेपी अभिक्रियाएँ कहते हैं। वे रासायनिक अभिक्रियाएं जिन्हें प्रारंभ होने के लिए ऊर्जा की आवश्यकता होती है उन्हें ऊष्माशोषीय अभिक्रियाएँ कहते हैं। उदाहरण के लिए 4. 03eV ऊर्जा, यदि कार्बन डाईऑक्साइड परमाणु को उपयुक्त परिस्थिति में दी जाए तो वह अपने अव्यवी तत्वों में टूट जाएगा:

$$CO_2 + 4.08eV \rightarrow C + O_2 \qquad (27.2)$$

जैसे कि समीकरण 27.1 से स्पष्ट हे कि, 4.08 eV की ऊर्जा निकाय से निकल कर CO_2 गैस का निर्माण करती है। अत: CO_2 अणु का द्रव्यमान, C व O_2 के कुल द्रव्यमान से 4.08eV द्रव्यमान तुल्यांक कम होगा। द्रव्यमान के इस ह्रास Δm की गणना समीकरण $E = mc^2$ का उपयोग कर की जा सकती है।

$$\Delta m = \frac{4.08\times1.602\times10^{-19}}{9\times10^{16}} = 7.26\times10^{-36}\,kg \qquad (27.3)$$

द्रव्यमान में इतने कम/तुच्छ परिवर्तन का पता नहीं लगाया जा सकता है। अतः इसे नगण्य मान कर हम कहते हैं कि रासायनिक अभिक्रिया में द्रव्यमान संरक्षित रहता है, हालांकि द्रव्यमान में तुच्छ परिवर्तन अवश्य रहता है।

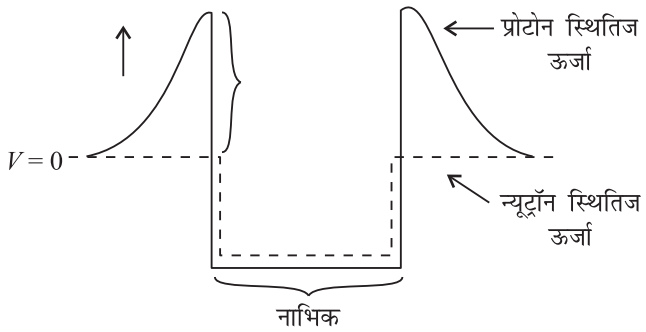
रासायनिक अभिक्रिया में ध्यान रखने योग्य महत्वपूर्ण बिंदू हैं:

- 10 eV की कोटि की ऊर्जा सम्मिलित है।
- द्रव्यमान में ह्रास 10^{-35} kg के क्रम का होता है जो अत्यन्त कम है। अतः हम कहते हैं कि द्रव्यमान संरक्षित रहता है।
- रासायनिक समीकरण के दाहिनी ओर उपस्थित प्रत्येक प्रकार के परमाणुओं की कुल संख्या, समीकरण के बाँईं ओर उपस्थित प्रत्येक प्रकार के परमाणुओं की कुल संख्या के सदैव बराबर होती है।

27.1.2 नाभिकीय अभिक्रियाएँ

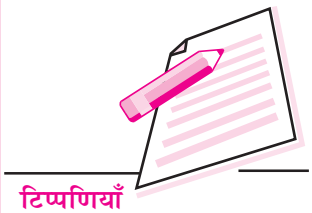
नाभिकीय अभिक्रियाओं में, अभिकारकों के नाभिक, न कि इलेक्ट्रॉन एक दूसरे से अंतःक्रिया करते हैं। परिणाम के रूप में वे नए तत्व का निर्माण करते हैं।

यह अभिक्रिया नाभिकों का तत्वान्तरण (ट्रान्सम्यूटेशन) भी कहलाती है। पिछले पाठ से आप स्मरण कीजिए जिसमें कहा गया था कि नाभिकीय अभिक्रिया में M eV के तुल्य ऊर्जा का समागम होता है। हम जानते हैं कि परमाणु का सम्पूर्ण आवेश नाभिक में ही संकेन्द्रित होता है जिसका आकार (साइज) लगभग 10^{-15} m होता है। न्यूक्लियस चारो ओर से किसी खास अनुमत कक्षाओं में घूमते हुए इलेक्ट्रॉन द्वारा घिरा रहता है। इनसे प्रबल स्थिर वैद्युत विभव रोधिका (जिसे कूलॉम रोधिका भी कहते हैं) सृजित होती है। जैसा कि चित्र 27.1 में दर्शाया गया है।



चित्र 27.1 : नाभिक के समीप प्रोटोन और न्यूट्रॉन की स्थितिज ऊर्जाएं।

कूलॉम बेरियर का मान कार्बन नाभिक के लिए 3MeV तथा लेड नाभिक के लिए 20 M eV है। इसका तात्पर्य यह हुआ कि नाभिक की ओर लक्षित किसी आवेशित प्रक्षेपक को लक्ष्य नाभिक के कूलॉम रोधिका द्वारा उत्पन्न प्रबल विकर्षण का सामना करना होगा। यदि प्रक्षेपक की गतिज ऊर्जा रोधिका को भेदने के लिए पर्याप्त नहीं है तो वह वापस हो जाएगा और इस प्रकार किसी भी प्रकार की नाभिकीय अभिक्रिया नहीं होगी। कार्बन न्यूक्लियस में प्रोटॉन को



प्रवेश करके तत्वांतरण करने के लिए 3MeV ऊर्जा से अधिक ऊर्जा की आवश्यकता होती है। चूंकि नाभिकीय अभिक्रियाओं में बहुत अधिक ऊर्जा की आवश्यकता होती है, इसीलिए हम अपने दैनिक जीवन में सामान्य ताप और दबाव पर इन नाभिकीय अभिक्रियाओं का अवलोकन नहीं कर सकते।

नाभिकीय तत्वान्तरण या नाभिकीय अभिक्रिया की परिघटना की खोज लार्ड रदरफोर्ड ने सन् 1919 में की थी। उन्होंने नाइट्रोजन गैस पर पोलोनियम स्रोत से प्राप्त 7.7 MeV ऊर्जा के α–कणों की बमबारी कराई। रदरफोर्ड ने अवलोकित किया कि नाइट्रोजन का तत्वान्तरण ऑक्सीजन में हो गया। इस अभिक्रिया में उच्च ऊर्जा वाले प्रोटान की उत्पत्ति होती है:

$$^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{14}_{17}\mathrm{N} \rightarrow ^{17}_{8}\mathrm{O} + ^{1}_{1}\mathrm{H} \qquad (27.5)$$

आक्सीजन के नाभिक और प्रोटोन में 6.5 M eV की ऊर्जा समाहित रहती है। इससे स्पष्ट है कि इस अभिक्रिया के लिए किसी बाहरी स्रोत से 1.2 M eV ऊर्जा की आपूर्ति होनी चाहिए। जब बाहर से ऊर्जा ग्रहण की जा रही हो तो ऐसी अभिक्रिया ऊष्मा शोषी अभिक्रिया कहलाएगी। जब एल्युमिनियम पर 7.7 M eV ऊर्जा वाली अल्फा कणों की बमबारी की जाती है (इन कणों को पोलोनियम स्रोत से प्राप्त किया जाता है) तो जो नाभिकीय अभिक्रिया घटित होती है, उससे 10.7 M eV की ऊर्जा उत्पन्न होती है:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{30}_{14}\mathrm{Si} + ^{1}_{1}\mathrm{H} \qquad (27.6)$$

यहाँ पर हम देखते हैं कि निवेशित से अधिक ऊर्जा उत्पन्न और मुक्त हो रही है। इससे इस नाभिकीय अभिक्रिया को ऊष्माक्षेपी (एक्सोथर्मिक) कहते हैं। ध्यान दीजिए कि निवेशित ऊर्जा 7.7M eV थी और अभिक्रिया से 10.7M eV ऊर्जा मुक्त होकर निकल रही है अर्थात् प्रत्येक अभिक्रिया से 3 M eV ऊर्जा की प्राप्ति हो रही है। यह कार्बन परमाणु के दहन से मुक्त होने वाली ऊर्जा से 700, 000 गुना के बराबर है। **पर इस अभिक्रिया का प्रयोग ऊर्जा उत्पादन में नहीं किया जा सकता क्योंकि 1,25,000 आपतित अल्फा कणों में केवल एक कण ही उस अभिक्रिया को क्रियान्वित करने में सफल हो पाता है।** अत: इस अभिक्रिया द्वारा प्राप्त कुल ऊर्जा अभिक्रिया को सम्पन्न कराने में निवेशित ऊर्जा से बहुत ही कम हो जाती है। इस अभिक्रिया में निवेशित ऊर्जा का अपव्यय बहुत हो जाता है।

नाभिकीय अभिक्रिया प्रोटॉनों, ड्यूट्रॉनों, न्यूट्रॉनों के अलावा अन्य हल्के (नाभिकों) द्वारा भी शुरू हो सकती है। **इन सब में न्यूट्रॉन सर्वोत्तम प्रक्षेपक पाया गया है। इसका कारण है न्यूट्रॉनों का उदासीन होना जिसके कारण उन्हें कूलॉमी विकर्षण का सामना नहीं करना पड़ता।** इस प्रकार से समतापीय न्यूट्रॉन (अर्थात् जिनकी ऊर्जा 0.0253 eV हो) लक्ष्य नाभिक को भेदकर नाभिकीय अभिक्रिया को सम्पन्न कर सकता है।

प्रोटॉनों, ड्यूटॉनों तथा न्यूट्रॉनों द्वारा उत्पन्न की जाने वाली नाभिकीय अभिक्रियाओं के कुछ प्रारूपिक उदाहरण हैं–

$$^{6}_{3}\mathrm{Li} + ^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{3}_{2}\mathrm{He} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \qquad (27.7)$$

$$^{10}_{5}\mathrm{B} + ^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow 3\,^{4}_{2}\mathrm{He} \qquad (27.8)$$

$$^{10}_{5}B + n \rightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}He \qquad (27.9)$$

रासायनिक अभिक्रियाओं की तरह नाभिकीय अभिक्रियाएँ भी संरक्षण के नियमों का पालन करती हैं। इन नियमों का उल्लेख नीचे किया जा रहा है।

27.1.3 नाभिकीय अभिक्रियाओं के लिए संरक्षण नियम

- *अभिकारकों की द्रव्यमान-संख्याओं का योग सदैव उत्पादों (प्रोड्क्टस) की द्रव्यमान संख्याओं के योग* के बराबर होता है। समीकरण (27.7) में द्रव्यमान संख्या $7 = 3 + 4 = 6 + 1$ संरक्षित रहती है।
- अभिकारकों के परमाणु क्रमांकों का योग सदैव उत्पादों के परमाणु क्रमांकों के योग के बराबर होता है। समीकरण (27.7) में परमाणु क्रमांक $4 = 3 + 1 = 2 + 2$ संरक्षित रहता है।
- नाभिकीय अभिक्रिया ऊर्जा संरक्षण नियम का पालन करती है। हम जानते हैं कि द्रव्यमान भी संकेन्द्रित ऊर्जा ही होता है। अत: निवेश गतिज ऊर्जा तथा अभिकारकों के द्रव्यमान का योग निर्गत गतिज ऊर्जा तथा उत्पादों के द्रव्यमान के योग के बराबर होता है।
- नाभिकीय अभिक्रियाएं संवेग संरक्षण नियम का भी पालन करती हैं। परिणामस्वरूप, गतिज ऊर्जा का वितरण समान रूप से सभी उत्पाद नाभिकों में होता है।

पाठगत प्रश्न 27.1

1. सभी समीकरणों को पूरा कीजिए

   (a) $^{19}_{9}F + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{16}_{8}O + ?$

   (b) $^{27}_{13}Al + {}^{1}_{0}n \rightarrow ? + {}^{4}_{2}He$

   (c) $^{234}_{90}Th \rightarrow {}^{234}_{91}Pa + ?$

   (d) $^{63}_{29}Cu + {}^{2}_{1}D \rightarrow {}^{64}_{30}Zn + ?$

2. निम्नलिखित नाभिकीय अभिक्रियाओं में मुक्त हुई ऊर्जा का परिकलन करें

   $^{10}_{5}B + {}^{2}_{1}D \rightarrow 3{}^{4}_{2}He + Q$

   दिया हुआ है– $m(^{10}B) = 10.01294$ u; $m\left(^{2}_{1}D\right) = 2.014103$ u, और $m(^{4}_{2}He) = 4.002604$ और u.

3. ${}^{14}_{7}\mathrm{N}$ नाभिक पर α कणों की बमबारी करने से ${}^{17}_{8}\mathrm{O}$ उत्पन्न होता है। इस नाभिकीय अभिक्रिया का समीकरण लिखिए तथा मुक्त हुई ऊर्जा का परिकलन कीजिए

दिया है : $m\left({}^{14}_{7}\mathrm{N}\right) = 14.003014\,\mathrm{u}$; $m\left({}^{17}_{8}\mathrm{O}\right) = 16.999138\,\mathrm{u}$; $m\left({}^{4}_{2}\mathrm{He}\right) = 4.002604$ u; $m\left({}^{1}_{1}\mathrm{H}\right) = 1.007825$ u और α–कण की ऊर्जा = 7.7MeV.

27.2 नाभिकीय विखंडन

विखंडन के खोज की कहानी बड़ी रोचक है। सन् 1938 में एनरिको फर्मी, ऑटो हैन एवं अन्य वैज्ञानिकों ने परायूरेनियम तत्वों (जिनके परमाणु क्रमांक 92 से अधिक होते हैं), जो प्रकृति में नही पाए जाते, को उत्पन्न करने के लिए यूरेनियम के नाभिक पर कम गति वाले न्यूट्रॉनों की बमबारी कराई। जब आपतित न्यूट्रॉनों को यूरेनियम नाभिक ने प्रग्रहण कर लिया तब उसके नाभिक में न्यूट्रोन-प्रोट्रोन का अनुपात भी बढ़ गया। इस अनुपात को कम करने के प्रयास में यहाँ अपेक्षा की जा रही थी कि संभवत: यूरेनियम β–सक्रिय हो जाएगा। अर्थात् एक न्यूट्रॉन निश्चित रूप से ऐसा व्यवहार करेगा मानो कि वह प्रोटॉन में परिवर्तित हो गया हो। परिणामस्वरूप β-कण के साथ निम्न समीकरण के अनुसार कुछ ऊर्जा भी मुक्त होनी चाहिए:

$$ {}^{238}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{239}_{93}\mathrm{Np} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + \mathrm{Q} \qquad (27.10) $$

इस अभिक्रिया में 93 परमाणु क्रमांक वाले एक नए परायूरेनियम तत्व के निर्माण की अपेक्षा की जा रही थी। वास्तव में, फर्मी और उसके सहयोगी शोधकर्ताओं ने β–क्रियाशीलता अवलेकित की। जिसकी अर्ध-आयु का मान यूरेनियम के आसपास के भारी तत्वों के अर्ध-आयु के ज्ञात मानों से एकदम अलग था। इन प्रेक्षणों से फर्मी और उसके साथियों ने निष्कर्ष निकाला कि परायूरेनियम तत्व का उत्पादन हुआ था और इस तत्व की पहचान के लिए उन्होंने कुछ रासायनिक विश्लेषण किया किन्तु असफल रहे।

उसी वर्ष में ऑटो हैन एवं फ्रिज स्ट्रॉसमैन ने अनेक प्रयोग किए और इस तथ्य को स्थापित किया कि बेरियम एक मध्यवर्ती द्रव्यमान संख्या वाला तत्व ही इस अभिक्रिया में बनता है न कि परायुरेनिक तत्व और इस अभिक्रिया में लगभग 200 MeV ऊर्जा भी मुक्त होती है। यह अप्रत्याशित परिणाम कि धीमी गति से यूरेनियम नाभिक पर न्यूट्रॉन की बमबारी से बेरियम नामक तत्व उत्पन्न होता है, उस समय की नाभिकीय भौतिकी विज्ञान की जानकारी को अचम्भे में डाल दिया क्योंकि उस समय की यह बहुत बड़ी विरोधात्मक खोज थी। इस पूरे खोज की रिपोर्ट सुप्रतिष्ठित पत्रिका 'नेचर' में दिसम्बर 1938 में प्रकाशित हुई थी।

लिज़ मिटनर, एवं ओटोफ्रिश नाम के वैज्ञानिकों ने इस परिणामों को परमाणु नाभिक के द्रव बूंद मॉडल द्वारा (लिक्विड ड्राप मॉडल ऑफ न्यूक्लियस) समझाया। व्याख्या करते हुए इन वैज्ञानिकों ने इस अभिक्रिया को ''नाभिकीय विखंडन'' से नामजद किया। उन्होंने इस नाम की युक्ति जीव-विज्ञान में प्रयुक्त अभिक्रियात्मक शब्द ''कोशिका विखंडन' से प्रयुक्त किया था। कालान्तर में बोहर और व्हीलर ने नाभिकीय विखंडन में मुक्त होने वाली ऊर्जा का परिकलन किया और साथ ही साथ इस ''द्रव बूंद मॉडल'' के भौतिकीय आधार को स्थापित किया।

एनरिको फर्मी
(1901 – 1954)

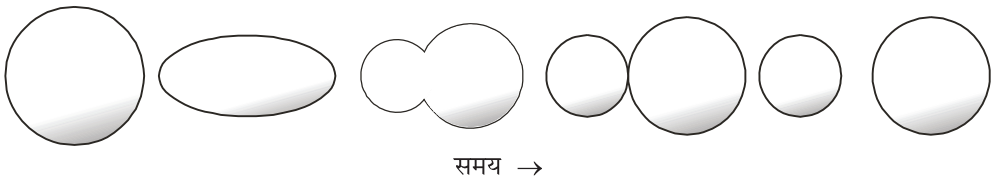
एनरिको फर्मी इटली देश में पैदा हुए भौतिकीविद् थे। नाभिकीय ऊर्जा का मानव कल्याण के लिए शान्तिपूर्ण अनुप्रयोगों के लिए आप ही उत्तरदायी थे। उन्होंने यह प्रदर्शित किया कि किसी भी तत्व को यदि न्यूट्रॉन की धारा से बमबारी कराएंगे तो उसमें रूपान्तरण (ट्रान्सफारमेशन) हो सकता है। स्वयं-पोषित एवं प्रचालित नाभिकीय विखंडन श्रृंखला अभिक्रिया को 1942 में उन्होंने साकार रुप दिया।

फर्मी जब केवल 25 वर्ष की उम्र के थे तब उन्होंने फर्मी-डिराक सांख्यिकी को सूत्रबद्ध किया था। यह सांख्यिकी अर्द्ध पूर्णांकीय स्पिन मान रखने वाले कणों (जिन्हें फर्मियॉन कहते हैं) के लिए लागू होती है। इनकी कम उम्र में ही मृत्यु हो गई। मृत्यु से कुछ वर्ष पूर्व तक वे ब्रह्माण्डीय विकिरण संबंधी सैद्धान्तिक अध्ययन में व्यस्त थे।

27.2.1 नाभिकीय विखंडन की प्रक्रिया

सन् 1939 में बोहर एवं व्हीलर ने नाभिकीय विखंडन के सिद्धांत का विकास नाभिकीय बलों की उन बलों के साथ अनुरुपता के प्रयोग द्वारा किया जो अणुओं को किसी द्रव में परस्पर बांधते हैं। उन्होंने पूर्वानुमान लगाया कि $^{238}_{92}U$ की तुलना में $^{235}_{92}U$ अधिक विखण्डनीय होता है। चित्र 27.2 का अवलोकन करें। यह तापीय न्यूट्रानों द्वारा $^{235}_{92}U$ के निम्न समीकरण द्वारा व्यक्त नाभिकीय विखंडन को दर्शाता है:

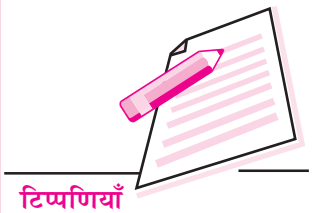
$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{141}_{36}Ba + ^{92}_{36}Kr + 3^{1}_{0}n + Q \qquad (27.11)$$



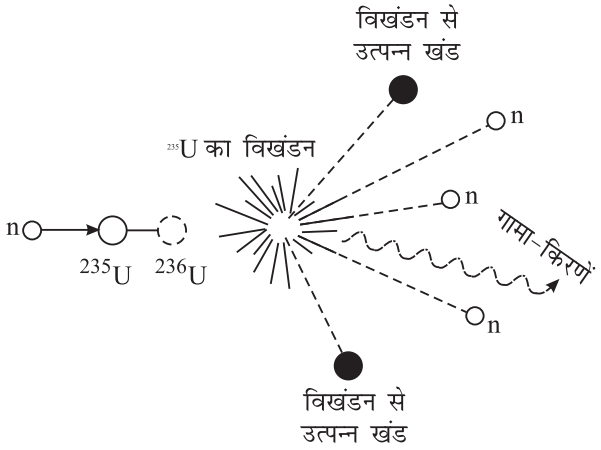
चित्र 27.2: द्रव-बूंद मॉडल के अनुसार किसी नाभिक का विखंडन

उत्सर्जित न्यूट्रॉन की ऊर्जा कुछ MeV कोटि की होती है तथा $Q \simeq 200MeV$

ध्यान दीजिए कि जैसे ही न्यूट्रॉन का नाभिक में अवशोषण (केप्चर) हुआ उसके 10^{-17} सेकंड में विखंडन की घटना हो जाती है तथा विखंडित न्यूट्रॉनों का उत्सर्जन घटना के 10^{-14} सेकंड पश्चात् प्रारंभ हो जाता है। इसके अलावा विखंडित टुकड़े भी असमान द्रव्यमान के होते हैं; एक टुकड़ा दूसरे की तुलना में 1.5 से 2 गुना तक भारी होता है। समीकरण (27.11) चालीस संभावित प्रकार के विखंडनों जिनके द्वारा $^{235}_{92}U$ यूरेनियम न्यूक्लियस का विखंडन हो सकता है, में से केवल एक को ही दर्शाता है। इसका आशय यह हुआ कि $^{235}_{92}U$ के विखंडन से मध्यवर्ती द्रव्यमानों वाले लगभग 80 भिन्न नाभिक उत्पन्न होते हैं। भारी विखंडित टुकड़े



125–150 के बीच के द्रव्यमान परास में होते हैं जिनका उच्चिष्ठ 140 के आसपास होता है जबकि हल्के विखांडित टुकड़े 80–100 के बीच के द्रव्यमान परास में होते हैं जिनका उच्चिष्ठ 95 के आसपास होता है। उत्सर्जित न्यूट्रॉनों की संख्या 2 या 3 होती है किन्तु औसतन न्यूट्रोन जो ^{235}U के विखण्डन में उत्सर्जित होते हैं वे 2.54 है।



चित्र 27.3 : नाभिकीय विखंडन

बोहर एव व्हीलर की मान्यता थी कि परमाणु नाभिक एक द्रव की बूंद की तरह समरूप गोलाई आकृति लिए (अपनी सबसे कम ऊर्जा की स्थिति में) सन्तुलन में बना रहता है। उनके अनुसार जब एक तापीय न्यूट्रॉन का न्यक्लियस द्वारा अवशोषण हो जाता है तो इस न्यूट्रॉन की बन्धन ऊर्जा, जो ^{235}U के लिए 6.8 Mev प्रति परमाणु द्रव्यमान इकाई मुक्त होती है। यह मुक्त हुई ऊर्जा न्यूक्लियस को उत्तेजित कर देती है जिससे उसकी आकृति (शेप) विकृत हो जाता है। जहाँ पृष्ठ-तनाव बल पुरानी आकृति को कायम रखने में प्रयासरत रहता है वहीं कूलॉम बल उसे विकृत करने में लगा रहता है। इस खींचा-तानी में नाभिक गोल आकृति तथा डम-बेल आकृतियों के बीच दोलायमान रहता है। इसे चित्र 27.2 में दिखाया गया है। जब दोलनों के बीच का आयाम (एम्पलीचूड) बढ़ जाता है तब कम परास (रेंज) वाला नाभिकीय आकर्षण बल डमबेल के सिरों के बीच घट जाता है। इन दोनों सिरों के बीच प्रतिकर्षण बल घटे हुए नाभिकीय आकर्षण बल से अधिक होते ही नाभिक के दोनों सिरे अलग-अलग विखंडित हो जाते हैं।

ऐसा पदार्थ जैसे $^{235}_{92}U$ यूरेनियम जिसका विखंडन तापीय न्यूट्रॉन द्वारा होता है, विखंडनीय पदार्थ कहलाता है। अन्य विखंडनीय पदार्थ के उदाहरण हैं $^{233}_{90}Th$ (थोरियम), $^{233}_{92}U$ और $^{239}_{93}Pu$ इत्यादि। आप पाएंगे कि इन सभी पदार्थों के नाभिक विषम द्रव्यमान संख्या वाले होते हैं और इनके परमाणु क्रमांक सम संख्या वाले होते हैं।

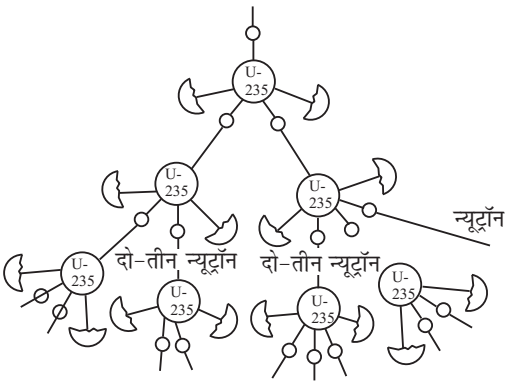
$^{235}_{92}U$ के विखंडन में मुक्त हुई ऊर्जा का परिकलन उसके नाभिक के विखंडन में द्रव्यमान क्षति (मास डिफेक्ट) को ज्ञात करके किया जा सकता है। इसे सारिणी 27.1 में दिया गया है:

सारिणी 27.1: नाभिकीय अभिक्रिया में उत्पन्न हुई ऊर्जा

अभिकारक	द्रव्यमान	उत्पाद	द्रव्यमान
^{235}U	235.0439u	$^{141}_{56}Ba$	140.9139u
^{1}n	1.008665 u	$^{92}_{36}Kr$	91.8973u
		$3\times Vn$	3.025995u
कुल द्रव्यमान	236.052565u	कुल द्रव्यमान	235.837195u
द्रव्यमान क्षति	0.21537u		
मुक्त हुई ऊर्जा	$0.21537\times931\sim200$ MeV		

27.2.2 नाभिकीय श्रृंखला अभिक्रिया

अब आप जान चुके हैं कि जब एक न्यूट्रॉन का $^{235}_{92}U$ नाभिक द्वारा प्रग्रहण होता है तो उसका विखंडन दो भागों में हो जाता है और 2 या 3 न्यूट्रॉन उत्पन्न होते हैं। इनमें विखंडन की प्रक्रियाको आगे बढ़ाने की क्षमता होती है। इसने विखंडन श्रृंखला अभिक्रिया को पोषित करने की एक रोमांचक संभावना प्रस्तुत की जिसमें प्रत्येक विखण्डन प्रक्रिया में एक न्यूट्रॉन प्रयुक्त होता है और इनके स्थान पर दो से अधिक न्यूट्रॉन आ जाते हैं। जब न्यूट्रॉनों की दर उनकी क्षति की दर के बराबर हो जाती है तो प्रक्रिया स्वत: पोषित एवं स्वत: स्फूर्त हो जाती है। ऐसी युक्ति जिसका निर्माण स्वत: स्फूर्त एवं नियन्त्रित श्रृंखला अभिक्रिया को पोषित करने के लिए किया जाता है, *नाभिक रियेक्टर* कहलाता है।



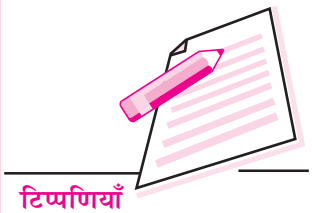
चित्र 27.4 : नाभिकीय श्रृंखला अभिक्रिया

नाभिक रिएक्टर उद्देश्यों के अनुसार वर्गीकृत होते हैं। नाभिक शक्ति रिएक्टर का उपयोग विद्युत उत्पादन के लिए होता है। एक शोध रिएक्टर का प्रयोग चिकित्सीय उद्देश्यों, अधिशोधन के लिए किए जाने वाले प्रयोगों या अनुप्रयुक्त शोध के लिए रेडियो समस्थानिकों के उत्पादन के लिए किया जाता है। भारत में भी इनका वर्गीकरण द्रुतगामी (फास्ट) और तापीय रिएक्टर के रूप में करते हैं जो इस बात पर आधारित है कि विखण्डन अभिक्रिया के लिए प्रयुक्त न्यूट्रॉन की ऊर्जा कितनी है। भारत में तापीय शक्ति रिएक्टर तारापुर, नरोरा, कोटा, कैगा आदि में स्थित हैं। तमिलनाडु के समुद्र तटीय कलापक्कम स्थान पर भारत एक द्रुत प्रजनक शोध रिएक्टर को विकसित कर रहा है।

आगे के खण्ड में आपको नाभिकीय रिएक्टर पर विशेष किन्तु संक्षिप्त जानकारी दी जाएगी।

27.3 नाभिकीय रिएक्टर

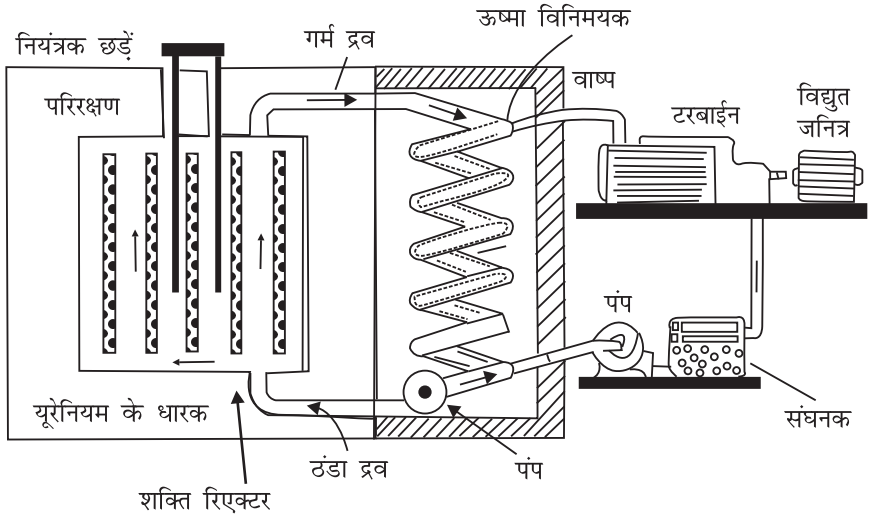
शिकागो विश्वविद्यालय (संयुक्त राष्ट्र अमेरिका) में फर्मी एवं उसके सहयोगियों द्वारा जब सर्वप्रथम नाभिकीय रिएक्टर का निर्माण किया गया तब से आज तक पूरे विश्व में ऊर्जा-आपूर्ति के प्रयास



में बहुत बड़ी संख्या में नाभिकीय रिएक्टरों का निर्माण हो चुका है। कुछ देशों में तो लगभग 70% बिजली का उत्पादन न्यूक्लियर रिएक्टरों द्वारा होता है, भारत में नाभिकीय शक्ति का प्रयोग मात्र 3% ही है परंतु प्रयास किए जा रहे हैं कि इसका योगदान और बढ़ाया जा सके। ठीक-ठीक आंकड़ों में व्यक्त किया जाये तो हम भारत में 20,000 MW विद्युत-शक्ति नाभिकीय रिएक्टरों द्वारा उत्पन्न करते हैं।

नाभिकीय रिएक्टरों की विशाल जटिल संरचना होती है तथा इसके डिज़ाइन में काफी सावधानी और सतर्कता की जरूरत होती है। सैद्धान्तिक रूप से न्यूक्लियर रिएक्टर और विद्युत (पावर) संयंत्र में समरूपता होती है। नाभिक विखण्डन से उत्पन्न तापीय ऊर्जा को किसी शीतलक जैसे कि जल को ईंधन से प्रवाहित करके अधिक दाब और ताप पर वाष्प में बदला जाता है। (तापीय विद्युत संयंत्र में भी कोयले को ईंधन के रूप में जलाकर वाष्प उत्पन्न की जाती है जिससे विद्युत पैदा करने वाले टरबाइन संचालित होते हैं। चूंकि एक बार की विखण्डन की अभिक्रिया में जो ऊर्जा उत्पन्न होती है वह कोयले को जलाने से उत्पन्न ऊर्जा से 7×10^5 गुना अधिक होती है। नाभिकीय ऊर्जा के प्रयोग द्वारा ग्रीन हाउस गैसों के उत्सर्जन में अभूतपूर्व कमी लाई जा सकती है। यद्यपि नाभिक ऊर्जा शक्ति के संयंत्र के संचालन एवं निर्माण में राजनैतिक एवं सामाजिक परिप्रेक्ष्य में कुछ जटिल समस्याओं को, जिनका वैश्विक स्तर पर भी प्रभाव पड़ता है, सुलझाना या सामंजस्य स्थापित करना अनिवार्य होता है, इन्हीं सब समस्याओं के परिप्रेक्ष्य में हमारी राष्ट्रीय नीति ऊर्जा विकल्पों में नाभिकीय ऊर्जा का क्या स्थान होगा, इस पर अन्तिम निर्णय करेगी।

विद्युत शक्ति उत्पादन में न्यूक्लियर रिएक्टर से प्राप्त ऊर्जा को वाष्प बनाने में प्रयुक्त करते हैं। इस भाप को जनरेटर का टरबाइन चलाने में प्रयोग करते हैं। परन्तु शोधकार्य के लिए प्रयुक्त न्यूक्लियर रिएक्टर में बनी ऊष्मा को समीपस्थ नदी अथवा समुद्र के जल में छोड़ा जाता है। मुम्बई स्थित भाभा एटॉमिक रिसर्च सेन्टर तथा कलपक्कम स्थित इन्दिरा गाँधी रिसर्च सेन्टर, दोनों स्थानों में क्रमशः अरब सागर एवं बंगाल की खाड़ी में ऊष्मा को छोड़ दिया जाता है।



चित्र 27.5 : नाभिकीय रिएक्टर का व्यवस्थात्मक आरेख

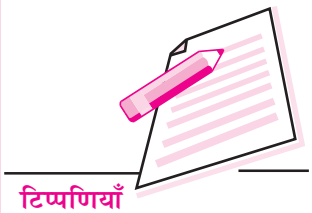
किसी रिएक्टर के सामान्य लक्षणों को चित्र 27.5 में दर्शाया गया है। सभी नाभिकीय रिएक्टरों में निम्नलिखित घटक होते हैं:

- **रिएक्टर :** यह वह आन्तरिक भाग है जहाँ नाभिकीय विखण्डन की अभिक्रिया सम्पन्न होती रहती है। इससे ऊर्जा मुक्त होती है। इसके अन्दर ईंधन छड़ें ग्रेफाइट के बने मन्दक में जड़ी रहता हैं तथा नियंत्रक छड़ें होती हैं। इन नियंत्रक छड़ों द्वारा श्रृंखला अभिक्रिया को एक निर्धारित स्तर पर कायम रखा जाता है। नियंत्रक छड़ों में केडमियम या बोरॉन का प्रयोग किया जाता है।
- शीतलक को विखंडन से प्राप्त ऊर्जा को अवशोषित करने के लिए संचारित किया जाता है। सामान्यत:, भारी जल या सामान्य जल का प्रयोग शीतलक के रुप में किया जाता है
- **एक रिफ्लेक्टर (परावर्तक)** होता है जो क्रोड के बगल में रखा रहता है। इसका मुख्य उद्देश्य क्रोड से न्यूट्रॉनों का रिसाव रोकना होता है।
- **प्रेशर-वेहसल:** यह एक विशेष प्रकार का पात्र होता है जिसके अन्दर रिएक्टर की संपूर्ण असेम्बली रखी जाती है। कुछ इंच मोटी परत वाली स्टेनलेस स्टील का प्रयोग इस प्रेशर वेहसल में होता है।
- **परिरक्षक (शील्ड):** रिएक्टर क्रोड से निकलने वाली रेडियोधर्मी विकिरणों से वैज्ञानिकों एवं सहयोगियों को सुरक्षा कवच के रूप में एक मोटी कंक्रीट की दीवार रिएक्टर की पूरी संरचना (असेम्बली) के चारो ओर बनाई जाती है ओर उसे सीसे (लेड) की पर्त से आच्छादित कर दिया जाता है।
- रिएक्टर भवन: सम्पूर्ण नाभिकीय रिएक्टर को अपनी संरचनात्मक (एसेम्बली यूनिट के साथ एक ऐसे भवन में स्थापित किया जाता है जो पूर्णत: वायुरुद्ध (एयर टाइट) हो तथा वहाँ दबाव सामान्य वातावरणीय दाब से कम रखा जाता है ताकि पूरी तरह एयर टाइट रहे।

ऊष्मा, जो रिएक्टर क्रोड भवन में विखण्डन अभिक्रिया से उत्पन्न होती है, उसे बाहर निकालने के लिए किसी शीतलक (कूलेंट) की आवश्यकता होती है जिसे चित्र में दर्शाए अनुसार संचारित किया जाता है। तप्त कूलेन्ट को एक तापीय विनिमयक (हीट एक्सचेंज) से संचारित किया जाता है जहाँ तप्त शीतलक अपना ताप ठंडे जल को प्रदान करता है और इससे पानी की वाष्प बनती है। इस वाष्प का प्रयोग टरबाइन-जनरेटर को संचालित करने के लिए किया जाता है। टरबाइन को चलाने के पश्चात भाप पुन: संघनक (कन्डेन्सर) में आती है और पुन: जल में परिवर्तित हो जाती है। यह जल पुन: ऊष्मा विनिमायक में चला जाता है।

पाठगत प्रश्न 27.2

1. ${}^{238}_{92}U$ यूरेनियम का नाभिक एक न्यूट्रोन को अवशोषित करने के पश्चात् β-सक्रिय क्यों हो जाता है?
2. निम्नलिखित में से कौन-सा नाभिक विखण्डनीय है- ${}^{238}_{92}U$, ${}^{141}Ba$, ${}^{239}Pu$, और ${}^{12}_{6}C$
3. जब ${}^{235}_{92}U$ के विखण्डन में कितनी ऊर्जा मुक्त होती है?



27.3 नाभिकीय संलयन

अब आप जानते हैं कि यूरेनियम के नाभिक को हलके नाभिकों में पृथक किया जा सकता है और ऐसा करने में भारी मात्रा में ऊर्जा मुक्त होती है। अब आप पूछ सकते हैं: यदि हम हल्के नाभिकों को मिला दें तो क्या ऊर्जा उत्पन्न होगी? इस प्रश्न के उत्तर को ढूंढ़ने के लिए आइए हम प्रति न्यूक्लिआन बंधन ऊर्जा (BE/A) वक्र (चित्र 26.2) का अवलोकन करें। आप पाएंगे कि जैसे-जैसे हम हाइड्रोजन से हीलियम तत्व की ओर बढ़ेंगे प्रति न्यूक्लिओन बंधन ऊर्जा में भी वृद्धि होती जाएगी। इसका मतलब यह हुआ कि हाइड्रोजन की अपेक्षा हीलियम अधिक स्थिर है। अब निम्नलिखित समीकरण पर ध्यान दें–

$$^{2}_{1}D + ^{2}_{1}D \rightarrow ^{4}_{2}He + Q$$

आप बड़ी आसानी से अभिकारकों एवम् उत्पादों के बंधन ऊर्जा का अवकलन कर सकते हैं:

अभिकारकों की कुल बंधन ऊर्जा $BE_1 = 2 \times 2.22 = 4.44 MeV$

उत्पादों की कुल बंधन ऊर्जा $BE_2 = 28.295 \text{ MeV}$

$$Q = (BE_2 - BE_1) \simeq 24 MeV$$

ध्यान दें कि इस अभिक्रिया में प्रति न्यूक्लिओन मुक्त ऊर्जा $24/4 = 6 MeV$ है, जो नाभिकीय विखण्डन अभिक्रिया से उत्पन्न ऊर्जा $(200/238 = 0.83 \text{ MeV})$ का लगभग 7 गुना है।

वह प्रक्रिया जिसमें दो हल्के नाभिक परस्पर मिलकर अर्थात् संलयित होकर एक भारी नाभिक का निर्माण करते हैं, नाभिकीय संलयन कहलाती है।

नाभिकीय संलयन प्रक्रिया अपने आपको अधिक उपयुक्त संभावित ऊर्जा विकल्प के रूप में प्रस्तुत करती है। यह बात अलग है कि नाभिकीय संलयन की अभिक्रिया को कार्यान्वित करना नाभिकीय विखण्डन की अभिक्रिया के मुकाबले ज्यादा कठिन है। इसका प्रमुख कारण दोनों ड्यूट्रॉनों का धनावेशित होना है। इसलिए संलयन प्रक्रिया में पास आकर मिलने की जगह वे प्रत्याकर्षित हो जाते हैं। प्रत्याकर्षण इतना प्रबल होता है कि अभिक्रिया होना साधारणतया असंभव सा लगता है।

इस अभिक्रिया को संभव बनाने के लिए ड्यूट्रॉनों को लगभग 10 मिलियन केल्विन ताप तक तापित किया जाता है जिसके कारण उसकी गतिज ऊर्जा इतनी अधिक बढ़ जाती है कि ड्यूट्रॉन के नाभिक उस प्रत्याकर्षण बल को लांघकर हीलियम के नाभिक में संलयित हो जाते हैं। परन्तु इतने अधिक-ताप को निरंतर बनाए रखना तथा अभिकारकों को साथ रखने की समस्या आज तक बनी हुई है। अब वह समय दूर नहीं रहा जब इस ऊर्जा स्रोत के दोहन के लिए नियंत्रित ताप नाभिकीय अभिक्रिया को संपन्न करना संभव हो पाएगा।

ड्यूटारियम (भारी हाइड्रोजन) के लगभग अक्षय भण्डार समुद्र में विद्यमान हैं। यदि एक बार इस स्रोत का दोहन शुरू कर दें तो ऊर्जा की समस्या का स्थायी समाधान मिल जाएगा। इससे हम कम लागत में बिजली की असीमित आपूर्ति प्राप्त कर सकेंगे और वह भी बिना किसी प्रदूषण की समस्या के। ऐसा इसलिए है क्योंकि एक ग्राम ड्यूटीरियम 100,000 kwh की ऊर्जा देता है।

27.3.1 सूर्य और तारों में ऊर्जा

हमारे सूर्य के समान तारों का द्रव्यमान बहुत अधिक होता है। वे पिछले अरबों वर्षों से लगातार असीमित ऊर्जा का उत्सर्जन करते आ रहे हैं।

इतनी विशाल ऊर्जा पारंपरिक ईंधन जैसे कि कोयले के जलाने से कभी भी प्राप्त नहीं की जा सकती। नाभिकीय विखण्डन की अभिक्रिया भी इतनी ऊर्जा उत्पन्न नहीं कर सकती क्योंकि सूर्य में भारी तत्व अधिक मात्रा में नहीं पाए जाते। सूर्य में प्रमुख रूप से हाइड्रोजन और हीलियम गैस होती हैं। तब आप यह जानना चाहेंगे कि सूर्य में ऊर्जा का कौन सा स्रोत है? यह प्रश्न मानव मस्तिष्क में सदियों से उठता रहा है। बपचन में आपने भी निम्न शिशु गीत को याद करते समय आकाश को निहारा होगा: ट्विन्कल ट्विन्कल लिटिल स्टार, हाऊ आई वन्डर व्हाट यू आर।

आप जानते होंगे कि अपने विशाल द्रव्यमान के कारण सूर्य बहुत शक्तिशाली गुरुत्वाकर्षण क्षेत्र उत्पन्न करता है। यह प्रबल क्षेत्र सूर्य के घटक गैसों को बहुत अधिक दबाव से सम्पीड़ित करता है। परिणामस्वरूप, सूर्य के केन्द्र में ताप करोड़ों केल्विन तक जा पहुँचता है। अनुमान लगाया जाता है कि सूर्य के केन्द्र में विद्यमान ताप लगभग दो करोड़ (20 मिलियन) केल्विन के बराबर होता है। इतने उच्च दबाव एवम् ताप पर गैस के अणु बड़ी उच्च चाल से गतिमान होकर आपस में टकराते हैं जिससे ताप-नाभिकीय अभिक्रिया प्रारंभ हो जाती है और विशाल मात्रा में ऊर्जा मुक्त होती है।

बेथे ने यह प्रस्तावित किया कि हाइड्रोजन नाभिकों का हीलियम में संलयन ही तारों में ऊर्जा के उत्पादन के लिए उत्तरदायी होता है:

$$4\,{}_{1}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}_{2}^{4}\mathrm{He} + 2\,{}_{+1}^{0}\mathrm{e} + \mathrm{Q}$$

अर्थात् संपूर्ण संलयन की अभिक्रिया में चार हाइड्रोजन के नाभिक हीलियम के नाभिक में संलयित हो जाते हैं, साथ ही दो पॉजिट्रॉनों (इलेक्ट्रॉन जैसे सूक्ष्म कण जिनका द्रव्यमान इलेक्ट्रॉन के बराबर किन्तु आवेश धनात्मक होता है) के मुक्त होने के साथ 26.8 MeV की ऊर्जा भी मुक्त होती है। एक ताप-नाभिकीय अभिक्रिया में विपुल परिणाम में मुक्त होने वाली ऊर्जा ही तारों में ऊर्जा स्रोत का कार्य करती है। अनुमान के अनुसार सूर्य में विद्यमान हाइड्रोजन अभी इतनी मात्रा में उपलब्ध है कि वह सूर्य को 8 अरब वर्षों तक प्रकाशमान रख सकती है।

पाठगत प्रश्न 27.3

1. ${}_{92}^{235}\mathrm{U}^{5}$ यूरेनियम के एक नाभिक के विखण्डन से 200 MeV ऊर्जा मुक्त होती है और 4 प्रोटोनों के संलयन (फ्यूज़न) से 26.8 MeV ऊर्जा निकलती है। इन दोनों में से कौन-सी अभिक्रिया में प्रति इकाई द्रव्यमान (पर यूनिट मास) अधिक ऊर्जा निकलती है?
2. निम्नलिखित अभिक्रियाओं पर विचार कीजिए।

   (*a*) ${}_{1}^{1}\mathrm{H} + {}_{3}^{7}\mathrm{Li} \rightarrow {}_{2}^{4}\mathrm{He} + Q$.

(b) ${}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{1}_{1}H + 4MeV.$

प्रथम अभिक्रिया में Q का मान और द्वितीय अभिक्रिया में ट्रीशियम का द्रव्यमान ज्ञात कीजिए।

दिया हुआ है कि $m\left({}^{2}_{1}H\right) = 2.014103u, m\left({}^{4}_{2}H\right) = 4.002604u, m\left({}^{1}_{1}H\right) = 1.007825u$ और

$m\left({}^{7}_{3}Li\right) = 7.015982u.$

27.4 नाभिकीय ऊर्जा

हमारी सभी आर्थिक गतिविधियों के लिए हमें ऊर्जा की आवश्यकता होती है। प्रति-व्यक्ति खपत की जाने वाली ऊर्जा की मात्रा किसी भी देश की प्रगति की परिचायक है। 2007 की यूनेस्को रिपोर्ट में दिए गए एक अनुमान के अनुसार हम हमारी धरती माता द्वारा पैदा किए जाने वाले भोजन, पानी और ऊर्जा से 40% अधिक मात्रा में उपभोग कर रहे हैं। वस्तुत: मानव समाज लगातार ऊर्जा की सुरक्षात्मक एवं विश्वसनीय उपलब्धता के बारे से कोशिशें करता रहा है और इसीलिए नए-नए ऊर्जा स्रोतों की खोज करता रहा है। अत्यधिक खपत एवं ऊर्जा के प्रयोग से हमारे पारंपरिक ऊर्जा स्रोत घटते रहे हैं और हो सकता है आनेवाले 100 वर्षों में पूर्णत: समाप्त हो जाएं। नाभिकीय ऊर्जा शायद आगामी भविष्य की जरूरतों को पूरा कर सकने का एक महत्वपूर्ण विकल्प सिद्ध होगा जिसे हम शान्तिपूर्ण अनुप्रयोगों में लगा सकते हैं। आइए इस पर चर्चा करें।

27.4.1 शान्तिपूर्ण अनुप्रयोग

नाभिकीय ऊर्जा का सर्वश्रेष्ठ अनुप्रयोग विद्युत-शक्ति के उत्पादन में होता है। नाभिकीय शक्ति संयंत्र के अनेकों लाभों में से प्रमुख लाभ यह है कि इस संयंत्र में किसी भी तापीय-विद्युत उत्पादक संयंत्र में लगने वाले पारंपरिक ईंधन जैसे किसी इंधन की आवश्यकता नहीं होती है। दूसरा लाभ यह है कि अन्य संयंत्रों में जहाँ पारंपरिक ईंधन जैसे गैस या कोयले का प्रयोग होता है जिससे उत्पन्न धुआं एवं राख पर्यावरण को बहुत अधिक प्रदूषित करते हैं, इन नाभिकीय ऊर्जा संयंत्रों में न धुआँ और न राख उत्पन्न होता है। अत: बिजली शक्ति उत्पादन पूर्णत: प्रदूषण रहित होता है। जो ईंधन परमाणु भट्टी (रिएक्टर) में प्रयुक्त होता है उसे एक बार भट्टी में डाल दिया जाए तो लगातार छ: महीनों तक ऊर्जा उत्पादन होती रहती है। इसी विशेषता के कारण नाभिकीय ऊर्जा संयंत्रों का अनुप्रयोग बड़े-बड़े समुद्री जहाजों एवं पनडुब्बियों को विद्युत शक्ति प्रदान कने के लिए होता है।

परमाणु भट्टी (रिएक्टर) में प्रयोग के बाद बचा ईंधन काफी रेडियोधर्मी हो जाता है क्योंकि इसमें बहुत मात्रा में रेडियोआइसोटोप्स मौजूद होते हैं। भारत में अवशिष्ट ईंधन के पुन: प्रयोग के लिए शोधन की तकनीक विकसित हो चुकी है। इस शोधन की तकनीक से प्रयुक्त ईंध न के अवशेष से अनेक रेडियो आइसोटोप्स निकाल लिए जाते हैं जिनका अनुप्रयोग विभिन्न क्षेत्रों जैसे कृषि, औषधि, उद्योग एवं शोधकार्य (रिसर्च) में होता है। रेडियो एक्टिव कचरा को उचित और सुरक्षित तरीके से निष्कासित किया जाता है। इन रेडियाधर्मी टुकड़ों से विकिरण के प्रसार को इधर-उधर खुली जगह या जल में जाने से रोकने के लिए इन्हें भारी मोटी परत

वाली स्टील केस में बन्द करके या तो नमक की गहरी खदानों में या जमीन की काफी गहराई में गाड़ दिया जाता है। परमाणु ऊर्जा के हानिकारक या कहें विध्वंसकारक क्षमता एवं प्रभाव ने तीव्र प्रतिरोध एवं विवाद खड़े किए। इसका नमूना 6 अगस्त 1945 में देखने को मिल चुका है। परमाणु बम को जापान देश के हिरोशिमा में गिराने से बहुत कम समय में हजारों-लाखों लोगों की मृत्यु हो गई। इसके कुछ वर्षों पश्चात इससे भी अधिक विनाशकारी हाइड्रोजन एवं नाइट्रोजन बम तैयार कर लिए गए जो इस समूचे पृथ्वी को अनेक बार विनष्ट करने की क्षमता रखते हैं।

भारत में नाभिकीय शक्ति

भारत को स्वतंत्रता मिलने के कुछ ही वर्षों बाद डा. होमी जहाँगीर भाभा (एच.जे. भाभा) ने सर्वप्रथम नाभिकीय ऊर्जा को सार्वजनिक उपयोग में लाने की संभावना की पहचान एवं पहल की। उन्होंने देश की परमाणु शक्ति की आवश्यकताओं की आपूर्ति को ध्यान में रखते हुए, एक त्रिचरणीय विकास की योजना रूपरेखा तैयार की। ये तीन चरण हैं:

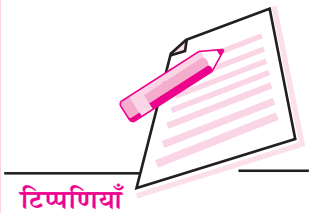
- बिजली को उत्पादित करने के लिए प्राकृतिक यूरेनियम का ईंधन के रूप में उपयोग करके दाबित भारी जलरिएक्टरों का निर्माण जिनसे प्लूटोनियम एक उप उत्पाद के रूप में प्राप्त होता है।
- प्लूटोनियम के दहन से तीव्र प्रजनक रिएक्टर स्थापित करना और इस तरह थोरियम से U-233 प्राप्त करना
- उपरोक्त द्वितीय चरण में और विकास लाते हुए अधिक से अधिक विखण्डनीय पदार्थों का ब्रीडर रिएक्टर में उत्पादन।

भारत में नाभिक शक्ति का उत्पादन वाणिज्यिक रूप में, 14 छोटे रिएक्टरों तथा 1 मध्य आकार के रिएक्टर द्वारा किया जा रहा है। इसके अलावा 8 रिएक्टर अभी निर्माण की प्रक्रिया में हैं तथा और भी रिएक्टरों के निर्माण की योजना चल रही है। अब तक जो नाभिकीय ऊर्जा विकसित हुई है उससे 2×10^{10}kWh की बिजली मिल रही है जो कुल उपलब्ध क्षमता का मात्र 3% ही है।

सरकारी नीति के अनुसार 2020 तक 20GWe की नाभिकीय क्षमता प्राप्त करना है और 2050 तक नाभिकीय ऊर्जा के योगदान को 3% से बढ़ाकर 25% तक लाने की योजना है।

पाठगत प्रश्न 27.4

1. भारत में किस प्रकार के रिएक्टर विद्युत उत्पादन के लिए प्रयोग में लाए जा रहे हैं?
2. एक परमाणु बम में $^{235}_{92}U$ का कितनी मात्रा में विखण्डन होता है जिससे 20,000 टन TNT के समतुल्य ऊर्जा का विस्फोट हो? (दिया गया है कि 1 g TNT लगभग 1000 कैलोरी ऊष्मा देता है।



27.4.2 नाभिकीय विकिरण के खतरे एवं सुरक्षा-उपाय

सजीव एवं निर्जीव पदार्थ, जो हमारे चारों ओर के परिवेश में व्याप्त हैं, उनसे ही हमारे पर्यावरण का निर्माण होता है। हमारे इस पर्यावरण में पेड़-पौधे, जीव-जन्तुओं, जलीय जीव तथा मानव जीवन के बीच एक नाजुक संतुलन करोड़ों वर्षों से बना हुआ है। अब इस संतुलन के बिगड़ने का खतरा उत्पन्न हो गया है। बहुत से कारणों के बीच सबसे बड़ा खतरा बढ़ता हुआ प्रदूषण है। पर्यावरण में विद्यमान प्रदूषण के कारकों में सबसे खतरनाक कारक जिसका दीर्घकालीन दुष्प्रभाव जैविक जगत में हो सकता है वह है नाभिकीय विकिरण। प्रकृति में विद्यमान रेडियोधर्मी खनिजों से उत्सर्जित विकिरण तथा अन्तरिक्ष से आपतित विकिरण तो हमारे पर्यावरण में बहुत पहले से ही व्याप्त हैं। किन्तु इनकी मात्रा में मानव निर्मित स्रोतों से उत्तरोत्तर वृद्धि हो रही है। वर्तमान में नाभिकीय विकिरणों के प्रधान मानव-निर्मित स्रोत हैं :

नाभिकीय परीक्षण, नाभिकीय शोधकार्य के उद्देश्यों के लिए स्थापित किए जा रहे विभिन्न प्रकार की नाभिकीय संरचनाएं, नाभिकीय रिएक्टर, एवं रेडियो समस्थानिकों का बीमारियों के इलाज में व्यापक पैमाने पर प्रयोग।

नाभिकीय विकिरण जीवित कोशिकाओं की जटिल संरचनाओं को आयनीकृत कर उनका विनाश कर देता है। इनसे कैंसरकारी वृद्धि हो सकती है, वंध्यापन आ सकता है खतरनाक त्वचा दाह उत्पन्न हो सकते हैं तथा बीमारियों के प्रति शरीर की प्रतिरोधकता घट सकती है। विकिरण आनुवंशिक प्रक्रिया को, विशेष रुप से अजन्में शिशुओं में, छिन्न-भिन्न कर देता है और अपना दुष्प्रभाव आने वाली पांच पीढ़ियों तक छोड़ जाता है। प्रत्यक्ष दुष्प्रभाव के अलावा नाभिकीय विकिरण का परोक्ष प्रभाव हमारे पेड़-पौधों एवं जलीय प्राणियों पर भी पड़ता है। यह विकिरण वनस्पति, मछलियों एवं जीव-जंतुओं को नष्ट करता है।

नाभिकीय विकिरण द्वारा क्षति, शरीर के खुले हुए अंगों के साथ-साथ विकिरण की ऊर्जा तीव्रता एवं प्रकृति पर भी निर्भर करती है। मानव शरीर के विभिन्न अंगों की विकिरण के गति अलग-अलग संवेदनशीलता होती है। α-कण अपनी उच्च आयनन शक्ति के कारण बहुत क्षतिकारक होते हैं। विभिन्न प्रकार के विकिरणों की क्षतिकारक क्षमता की तुलना उनकी आपेक्षिक जैव प्रभावशीलता (रिलेटिव बायलॉजिकल इफेक्टिवनेस) से की जाती है जिसे आर बी ई गुणक कहते हैं। विभिन्न कणों/किरणों के लिए इन गुणाकों के मान सारणी 27.3 में दिए गए हैं।

प्राकृतिक पदार्थों से उत्पन्न विकिरणों पर तो कोई नियंत्रण नहीं हो सकता। किन्तु वे सभी प्रयास तो किए ही जा सकते हैं जिनसे मानव-निर्मित रेडिएशन के स्रोतोंसे विकिरण को कम किया जा सके। इनमें से कुछ निम्नवत प्रयास हो सकते हैं:

- नाभिकीय विस्फोटों को टालना
- रेडियो आइसोटोप्स के उत्पादन में कमी लाना
- कारखानों के कचरों में जिनमें रेडियोधर्मी न्युक्लिआइडों के सूक्ष्म अंश हों, उनका निष्पादन अत्यन्त सावधानी से करना।

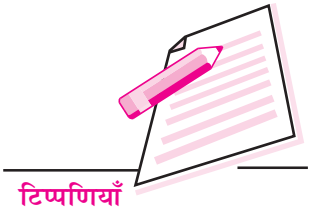
सारणी 27.2 : कुछ हल्के नाभिकों की प्रति न्युक्लियॉन बंधन ऊर्जा (BE/A)

न्युक्लियॉन	*BE/A*(MeV में)
^{2}D	1.11
^{3}T	2.827
^{3}He	2.573
^{4}He	7.074
^{6}Li	5.332
^{7}Li	6.541

- नाभिकीय चिकित्सा की दवाएं, और रेडिएशन द्वारा उपचार तभी करना चाहिए जब और कोई विकल्प ही नहीं बचा हो और इसकी मात्रा भी उचित विचार-विमर्श के बाद ही सुनिश्चित करना चाहिये।

आपने क्या सीखा

- रासायनिक अभिक्रिया में संयोजी इलेक्ट्रोन भाग लेते हैं और इस अभिक्रिया में सम्मिलित ऊर्जा 10 eV कोटि की होती है।
- नाभिकीय अभिक्रिया में नाभिकीय कणों द्वारा अन्योन्यक्रिया (इन्टरएक्शन) से नए तत्व का निर्माण होता है।
- नाभिकीय अभिक्रिया में सम्मिलित ऊर्जा MeV कोटि की होती है।
- नाभिकीय अभिक्रिया में परमाणु संख्या, द्रव्यमान संख्या और आवेश संरक्षित रहते हैं।
- जब किसी भारी नाभिक (जैसे यूरेनियम) पर धीमी गति के न्यूट्रॉनों द्वारा बमबारी कराई जाती है तो यह भारी नाभिक 2 भागों में विभक्त हो जाता है तथा 2-3 न्यूट्रोन मुक्त होते हैं और इसके साथ-साथ 200MeV शक्ति की ऊर्जा भी मुक्त होती है। इस अभिक्रिया को नाभिकीय विखण्डन कहते हैं।
- ऐसे पदार्थ जो विखण्डन की प्रक्रिया में विखण्डित होते हैं, इन्हें विखण्डनीय पदार्थ कहते हैं। ^{233}Th, ^{233}U, ^{235}U, और ^{239}Pu इसके उदाहरण हैं।
- श्रृंखला अभिक्रिया तब ही हो पाती है जब एक से अधिक उत्सर्जित न्यूट्रॉन विखण्डन की अभिक्रिया में प्राथमिक विखण्डन को अभिप्रेरित करता हुआ श्रृंखला की अभिक्रिया को स्वरूप देता है।
- न्यूक्लियर रिएक्टर एक ऐसी युक्ति है जिसके द्वारा नियंत्रित श्रृंखला अभिक्रिया स्वत: स्फूर्ति के साथ चलता रहे।
- नाभिकीय संलयन में दो हल्के नाभिक आपस में घुलमिल कर एक हो जाते हैं।
- नाभिकीय संलयन को उत्पन्न करने के लिए अभिकारक नाभिकों को 20 मिलियन (2 करोड़) केल्विन ताप पर तपाया जाता है। इस ताप से नाभिकीय कणों में पर्याप्त गतिज ऊर्जा आ जाती है और ये कूलॉम बेरियर को आसानी से पार कर लेते हैं।
- तारों में ऊर्जा उत्पादन नाभिकीय संलयन अभिक्रिया द्वारा होता है।
- हाइड्रोजन की जितनी मात्रा की खपत सूर्य में होती है वह लगभग 400×10^6 टन प्रति सेकन्ड के बराबर होती है।
- रेडियो आइसोटोप्स के विभिन्न अनुप्रयोग कृषि, औषधि एवं उद्योग के क्षेत्रों में होते हैं।



पाठान्त प्रश्न

1. नाभिकीय अभिक्रिया किस प्रकार से रासायनिक अभिक्रिया से भिन्नता रखती है?
2. विखण्डन रिएक्टर में मंदक (माडरेटर) और अवशोषक (एब्सोर्बर) के क्या उपयोग हैं?
3. बन्धन ऊर्जा प्रति न्यूक्लिओन तथा द्रव्यमान संख्या ग्राफ के आधार पर नाभिकीय संलयन की अभिक्रिया को समझाइये।
4. नाभिकीय अभिक्रिया क्या है? इस नाभिकीय अभिक्रिया के अन्तर्गत संरक्षण नियमों का अनुपालन होता है उसे स्पष्ट कीजिए। नाभिकीय अभिक्रियाओं के तीन उदाहरण दीजिए।
5. नाभिकीय विखण्डन क्या है? उदाहरण सहित अपने उत्तर पर प्रकाश डालें।
6. कितनी मात्रा (किलोग्राम) में ^{235}U की आवश्यकता होगी जो 100 मेगावाट की शक्ति लगातार 30 दिनों तक उत्पन्न कर सके।
7. भारी हाइड्रोजन में निम्नलिखित संलयन की अभिक्रिया होती है–

   $^{2}_{1}D + {}^{2}_{1}D \rightarrow {}^{4}_{2}He + 24\ MeV$

   उपरोक्त समीकरण में दर्शाए गए ऊर्जा के उत्पादन के लिए कितनी मात्रा में भारी हाइड्रोजन की आवश्यकता होगी–इसका परिकलन कीजिए।
8. नाभिकीय संलयन क्या है? अपने उत्तर को स्पष्ट करने के लिए नाभिकीय संलयन का एक समीकरण लिखें।
9. सूर्य में ऊर्जा का कौन सा स्रोत है? यह ऊर्जा किस प्रकार उत्पन्न होती है? उदाहरण के द्वारा इस पर प्रकाश डालें।
10. परमाणु रिएक्टर की संरचना का वर्णन कीजिए।
11. निम्नलिखित समीकरण जिस संलयन अभिक्रिया को दर्शा रहा है, उसमें मुक्त होने वाली ऊर्जा का परिकलन करें–

    $3\,({}^{4}_{2}He) \rightarrow {}^{12}_{6}C$

    दिया है–एक α-कण का द्रव्यमान = 4.00263u.

पाठगत प्रश्नों के उत्तर

27.1

1. a. $^{19}_{9}F + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{16}_{8}O + {}^{4}_{2}He$; b. $^{27}_{13}AI + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{24}_{11}Na + {}^{4}_{2}He$;

c. $^{234}_{90}Th \rightarrow {}^{234}_{90}Pa + {}^{0}_{-1}e$; d. $^{63}_{29}Cu + {}^{2}_{1}D \rightarrow {}^{64}_{30}Zn + {}^{1}_{0}n$

2. 17.9MeV

3. $^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H + 6.5MeV$.

27.2

1. *n/p* के अनुपात में वृद्धि उसके स्वभाविक अनुपात से होने के कारण उसका स्थायित्व घट जाता है। अत: इस अनुपात को घटाने के लिए, क्योंकि तभी स्थायित्व प्राप्त हो सकता है, यह β-कण को उत्सर्जित करता है।

2. 239Pu

3. 200 MeV.

27.3

1. (1) विखंडन में उत्सर्जित होने वाली ऊर्जा 0.84 MeV/u जबकि संलयन में यह 6.7 MeV/u है। इस प्रकार प्रति इकाई द्रव्यमान के लिए उत्सर्जित ऊर्जा संलयन में अधिक है।

2. (*a*) 17.3 MeV, (b) 2.69 MeV.

27.4

1. दाबित भारी जल रिएक्टर 2. लगभग 1 kg

पाठांत प्रश्नों के उत्तर

6. 30.6 kg 7. 146.6 g 11. 7.35 MeV