अंक 1 | जुलाई-दिसंबर 2025

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र की हिंदी वैज्ञानिक पत्रिका

परमाणु विज्ञान

वैज्ञानिक सूचना संसाधन प्रभाग
भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र
S I R D
Scientific Information Resource Division
Bhabha Atomic Research Centre

प्रकाशकः
अध्यक्ष, वैज्ञानिक सूचना संसाधन प्रभाग,
भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र,
ट्रॉम्बे, मुंबई, 400 085, भारत

2026

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र की हिंदी वैज्ञानिक पत्रिका

परमाणु विज्ञान

अंक 1 | जुलाई-दिसंबर 2025

संपर्क सूत्र
श्री मनोज सिंह
मुख्य संपादक
परमाणु विज्ञान
वैज्ञानिक सूचना संसाधन प्रभाग
भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र
ट्रॉम्बे, मुंबई - 400 085 (महाराष्ट्र)
ई-मेल- parmanuvigyan@barc.gov.in; smanoj@barc.gov.in

परमाणु विज्ञान पत्रिका नाभिकीय विज्ञान, अभियांत्रिकी एवं प्रौद्योगिकी में हो रहे अनुसंधान एवं विकास तथा इसके व्यापक सामाजिक अनुप्रयोगों के संबंध में प्रामाणिक वैज्ञानिक जानकारी का हिंदी में प्रचार एवं प्रसार करने हेतु एक माध्यम है।

डॉ. अजित कुमार मोहान्ती
Dr. Aiit Kumar Mohanty

सत्यमेव जयते
भारत सरकार
Government of India

अध्यक्ष, परमाणु ऊर्जा आयोग
व
सचिव, परमाणु ऊर्जा विभाग
Chairman, Atomic Energy Commission
&
Secretary, Department of Atomic Energy

संदेश

यह हर्ष का विषय है कि भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई नाभिकीय विज्ञान एवं अभियांत्रिकी में हो रहे नित नये अनुसंधान और इसके सामाजिक अनुप्रयोगों के संबंध में प्रामाणिक जानकारी के व्यापक प्रचार एवं प्रसार के लिए "परमाणु विज्ञान" के नाम से हिंदी भाषा में एक वैज्ञानिक पत्रिका का प्रकाशन प्रारंभ कर रहा है।

भारत की समग्र ऊर्जा सुरक्षा में नाभिकीय विज्ञान एवं अभियांत्रिकी की विशेष भूमिका है। परमाणु ऊर्जा विभाग देश के नागरिकों को स्वच्छ, हरित एवं किफ़ायती बिजली उपलब्ध कराते हुए उनके जीवन स्तर को बेहतर बनाने और उनके समग्र विकास में अपना योगदान दे रहा है। विभाग "विकसित भारत" के लक्ष्य को पूर्ण करने हेतु प्रौद्योगिकियों को आकार देते हुए नाभिकीय ऊर्जा के मूल क्षेत्रों में सतत अनुसंधान एवं विकास के ज्ञान की सीमाओं को भी विस्तारित कर रहा है।

यह अर्ध-वार्षिक पत्रिका विभाग की विविध उपलब्धियों को बृहत स्तर पर भारतीय समाज के साथ साझा करने की दिशा में महत्वपूर्ण कदम है। इसका लक्ष्य आम-नागरिकों को सुगमता से विज्ञान के साथ जोड़ना है।

नि:संदेह, यह पत्रिका राष्ट्रीय स्तर पर न केवल परमाणु ऊर्जा विभाग का दर्पण बनकर उभरेगी बल्कि इसके जन-जागरूकता अभियान को भी आगे बढ़ाएगी। यह विभिन्न भाषाई क्षेत्रों के बीच तकनीकी जानकारी को साझा करने में सेतु का कार्य करेगी, जिससे समग्र एवं समावेशी विकास को बल मिल सकेगा। मैं आश्वस्त हूं कि भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई की यह पहल समाज और वैज्ञानिक समुदाय के बीच संवाद-सेतु को सुदृढ़ बनाएगी।

इस नवीन प्रयास हेतु मैं, 'परमाणु विज्ञान' पत्रिका से जुड़े सभी पदाधिकारियों को हार्दिक बधाई एवं शुभकामनाएं देता हूँ।

अजित कुमार मोहान्ती

(डॉ. अजित कुमार मोहान्ती)

राष्ट्र की सेवा में परमाणु
प ऊ वि DAE
ATOMS IN THE SERVICE OF THE NATION

अणुशक्तिभवन, छत्रपति शिवाजी महाराज मार्ग, मुंबई - 400 001, भारत • Anushakti Bhavan, Chhatrapati Shivaji Maharaj Marg, Mumbai - 400 001, India
दूरभाष/Phone:+(91) (22) 2202 2543 • फैक्स/Fax: +(91) (22) 2204 8476 / 2284 3888
ई-मेल/E-mail: chairman@dae.gov.in

विवेक भसीन
Vivek Bhasin

भारत सरकार
Government of India

निदेशक, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र
Director, Bhabha Atomic Research Centre
सदस्य, परमाणु ऊर्जा आयोग
Member, Atomic Energy Commission

मुख्य संरक्षक की कलम से...

मैं इस बात से अति प्रसन्न हूं कि भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई "परमाणु विज्ञान" के नाम से हिंदी में एक वैज्ञानिक पत्रिका का प्रकाशन प्रारंभ कर रहा है। इस पत्रिका का प्रमुख उद्देश्य परमाणु ऊर्जा विभाग की सार्वजनिक जनसंपर्क गतिविधियों का समर्थन करते हुए प्राथमिक जनसंपर्क प्लेटफॉर्म के रूप में उभरना है।

यह अर्ध-वार्षिक पत्रिका नाभिकीय रिएक्टर प्रौद्योगिकी, खाद्य प्रौद्योगिकी, नाभिकीय कृषि एवं जैव प्रौद्योगिकी, जल प्रौद्योगिकी, स्वास्थ्य सेवा (कैंसर प्रबंधन एवं रेडियोफार्मास्यूटिकल्स में प्रगति), नाभिकीय अपशिष्ट प्रबंधन, किरणपुंज प्रौद्योगिकी, स्वास्थ्य, संरक्षा एवं पर्यावरण, मेगा विज्ञान सहयोग, पदार्थ विकास, व्युत्पन्न प्रौद्योगिकियां, मानव संसाधन विकास एवं क्षमता निर्माण और अन्य प्रमुख क्षेत्रों को सम्मिलित करते हुए भापअ केंद्र एवं पऊवि की संघटक इकाइयों में बहु-विषयात्मक अनुसंधान एवं विकास में हो रही प्रगति पर प्रकाश डालेगी।

एक वैज्ञानिक संस्थान की वास्तविक शक्ति उसकी प्रयोगशालाओं में हो रहे अनुसंधान एवं विकास कार्यों को जन-सामान्य के साथ साझा करने में निहित है। "परमाणु विज्ञान" नामक यह पत्रिका हमारे इसी दृष्टिकोण को पूर्णता प्रदान करने में सहायक होगी।

हिंदी आम जनमानस की भाषा है। यह पत्रिका सरल, व्यवहार्य एवं सुबोध हिंदी में अपनी बात जनता तक पहुंचाने में निश्चित ही सफल होगी। इस पत्रिका के माध्यम से विज्ञान के विभिन्न क्षेत्रों में हो रहे अकल्पनीय परिवर्तनों के साथ-साथ विश्व को एक नई दिशा देने वाली प्रौद्योगिकीय संभावनाओं पर भी विचार साझा किए जाएंगे।

मुझे आशा है कि वैज्ञानिक एवं तकनीकी विषयों को सहज एवं सुव्यवस्थित ढंग से हिंदी में प्रस्तुत कर, यह पत्रिका जन-साधारण में विज्ञान के प्रति जिज्ञासा बढ़ाने और समाज के साथ अधिक निकटता स्थापित करने में सहायक होगी।

मैं संपादक मंडल को इस पहल के लिए बधाई देता हूं। साथ ही, ऐसी कामना करता हूं कि यह नई शुरूआत सफलता का उच्चतम प्रतिमान स्थापित करे।

विवेक भसीन

30.12.2025

(विवेक भसीन)

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, ट्रॉम्बे, मुंबई- 400 085, भारत • Bhabha Atomic Research Centre, Trombay, Mumbai 400 085, India
दूरभाष/Phone:+(91) (22) 2550 5300, 2551 1910 • फैक्स/Fax: +(91) (22) 2559 2107, 2550 5151
ई-मेल/E-mail: director@barc.gov.in

डॉ. ए. के. दुरेजा
Dr. A. K. Dureja

सत्यमेव जयते
भारत सरकार
Government of India

उत्कृष्ट वैज्ञानिक
सह निदेशक, ज्ञान प्रबंधन वर्ग (के.एम.जी)
अध्यक्ष, मानव संसाधन विकास प्रभाग
Outstanding Scientist
Associate Director, Knowledge Management Group (K.M.G.)
Head, Human Resource Development Division

अध्यक्ष की कलम से...

"परमाणु विज्ञान" का प्रथम अंक आपके समक्ष प्रस्तुत करते हुए मुझे अपार हर्ष की अनुभूति हो रही है। यह अंक हमारी पत्रिका के विशेष वैज्ञानिक एवं तकनीकी दृष्टिकोण को प्रतिबिंबित करता है जिसमें विज्ञान, प्रौद्योगिकी के अद्यतन एवं नवीन जानकारियों को प्रस्तुत किया गया है। वैज्ञानिकों द्वारा विज्ञान के क्षेत्र में किए जा रहे अनुसंधान नव-कीर्तिमान स्थापित करते हुए भारत को विकसित राष्ट्र बनाने का मार्ग प्रशस्त कर रहे हैं। पाठकों को, विज्ञान की विविध शाखाओं का महत्वपूर्ण ज्ञान उनकी अपनी भाषा हिंदी में उपलब्ध कराया जा रहा है।

इस अंक में प्रस्तुत लेख विज्ञान के विभिन्न विषय जैसे स्वास्थ्य देखभाल, स्वास्थ्य, संरक्षा एवं पर्यावरण, निदेशित अनुप्रयोगों के साथ अग्रणी क्षेत्रों में अनुसंधान, रसायन एवं जैव-विज्ञान, नाभिकीय पदार्थ सुरक्षा, जल प्रबंधन एवं जल सुरक्षा, खाद्य सुरक्षा, फसल सुधार एवं अन्य विकिरण प्रौद्योगिकियां, नाभिकीय ऊर्जा के सामान्य विषय, मेगा साइंस इत्यादि पर आधारित हैं। हमें विश्वास है कि यह अंक पाठकों की वैज्ञानिक सोच एवं कौशल को समृद्ध करेगा।

लेखकों/संपादक-दल का प्रयास है कि पत्रिका में सम्मिलित लेख केवल संकलन मात्र न होकर पाठकों को वैज्ञानिक अनुसंधान से जोड़ने और जिज्ञासा बढ़ाने में सफल हो सके। हमारा लक्ष्य गहनता एवं सरलता के बीच की दूरी को पाटते हुए एक साम्यावस्था स्थापित करने की है जिसमें पाठकों और विषय विशेषज्ञों के बीच समरूपता और समकक्षता लाई जा सके।

नाभिकीय अनुसंधान एवं प्रौद्योगिकीय विकास की महत्वपूर्ण उपलब्धियों की कहानियों को प्रस्तुत करके, हम विज्ञान को अधिक प्रासंगिक एवं अभिगम्य बनाना चाहते हैं। मैं, उन सभी महानुभावों के प्रति आभार व्यक्त करता हूं जिनके प्रयासों ने इस अंक को प्रेरणा के स्रोत के रूप में आकार दिया है। इस अंक के संपादन में संपादकीय/प्रकाशन समिति के विद्वान सदस्यों का योगदान प्रशंसनीय रहा है। विषय विशेषज्ञों और भाषाविदों के सहयोग के लिए मैं दिल से आभार व्यक्त करता हूं। भविष्य में भी लेखकों से इस पत्रिका की निरंतरता बनाए रखने हेतु इसी तरह के सहयोग की अपेक्षा रहेगी।

मुझे पूर्ण विश्वास है कि इस अंक में प्रस्तुत विषयवस्तु से पाठकगण अवश्य लाभान्वित होंगे।

आदर्श दुरेजा

(डॉ.ए.के. दुरेजा)

राष्ट्र की सेवा में परमाणु
भा प अ कें BARC
ATOMS IN THE SERVICE OF THE NATION

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, जी - 15, प्रशिक्षण विद्यालय परिसर, अणुशक्तिनगर, मुंबई - 400 094, भारत
Bhabha Atomic Research Centre, G - 15, Training School Complex, Anushaktinagar, Mumbai 400 094, India
दूरभाष / Tel.: +91-22-2559 7601 • मोबाईल / Mob.: +91-99690 60817, 87793 96092
ई-मेल / E-mail: akdureja@barc.gov.in / dureja@hbni.ac.in

मुख्य संपादक एवं संपादक की कलम से...

मनोज सिंह
अध्यक्ष, एसआईआरडी एवं
मुख्य संपादक, परमाणु विज्ञान

सैयद इरफ़ान अली
उप निदेशक (राजभाषा) एवं
संपादक, परमाणु विज्ञान

"परमाणु विज्ञान" को मूर्त रूप देकर इसके प्रथम अंक की प्रति आपके अवलोकन हेतु प्रस्तुत करते हुए हमें अपार हर्ष और प्रसन्नता हो रही है।

किसी भी पत्रिका का प्रथम अंक अपनी शैली एवं दृष्टिकोण को निर्धारित करता है। यह प्रकाशन हमें महत्वपूर्ण वैज्ञानिक कार्य और उनके पीछे की कहानियों को एक ऐसी भाषा एवं शैली में साझा करने का अवसर प्रदान करता है, जो आम जनमानस तक पहुंच बना सके। हमारा प्रयास है कि "परमाणु विज्ञान" पत्रिका के माध्यम से नाभिकीय विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी की प्रासंगिकता समाज के हर वर्ग तक रेखांकित हो।

इसका प्रत्येक अंक पाठकों को वैज्ञानिक खोज की दुनिया के निकट ले जाने की दिशा में एक कदम होगा। हमारा प्रयास यही रहेगा कि इस पत्रिका के माध्यम से विज्ञान के फलों का लाभ आम जनता तक पहुंचाए। हमारे इस प्रयास को सफल बनाने में आपका सहयोग प्रार्थनीय है।

इस पत्रिका के माध्यम से हम पर्यावरण, नाभिकीय विज्ञान एवं उससे जुड़ी प्रौद्योगिकियां, स्वास्थ के उच्च स्तरीय अनुसंधान को प्रोत्साहित करना चाहते हैं। हम लेखकों से आग्रह करते हैं कि वे अपने शोध एवं विचार हमारे साथ साझा करते रहें, ताकि ज्ञान एवं विज्ञान को आमजन तक पहुंचाकर एक समृद्ध वैज्ञानिक दृष्टिकोण वाले समाज का निर्माण किया जा सके। संपादकीय समिति ने इस पत्रिका को प्रत्येक दृष्टिकोण से संतुलित बनाए रखने के लिए सभी विषयों के लेखों का सम्मिलित करने का प्रयास किया है।

इस पत्रिका के आगामी अंकों में भी हम नवीनतम अनुसंधान एवं विकास, विचार आदि प्रकाशित करने के लिए प्रयत्नशील रहेंगे। इस पत्रिका के अंक दर अंक में निखार ले आने के लिए, सुधी पाठकों के अमूल्य सुझावों एवं सहयोग की प्रतीक्षा रहेगी।

(मनोज सिंह)

(सैयद इरफ़ान अली)

भारत में परमाणु ऊर्जा - वर्तमान परिदृश्य

बिजली का एक स्वच्छ, सुरक्षित, पर्यावरणीय अनुकूल एवं विश्वसनीय विकल्प

सैयद इरफ़ान अली

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

विकसित भारत' के संकल्प के साथ, तेज़ी से प्रगतिशील हमारे देश भारत में बिजली की मांग भी लगातार बढ़ रही है। इसे ध्यान में रखते हुए उपलब्ध संसाधनों के अनुरूप नाभिकीय विद्युत उत्पादन क्षमता को सुरक्षित, किफायती एवं क्रमिक ढंग से बढ़ाया जा रहा है। किसी भी देश का विकास उसकी ऊर्जा उत्पादन क्षमता पर काफी हद तक निर्भर करता है। भारत को तरक्की की राह पर तेज़ी से ले जाने के लिए भी हमें पर्यावरण को संरक्षित रखते हुए अपनी दीर्घकालिक ऊर्जा सुरक्षा पर ध्यान देना होगा। इस परिप्रेक्ष्य में, नाभिकीय ऊर्जा एक पर्यावरणीय अनुकूल, स्वच्छ, सुरक्षित एवं आर्थिक रूप से व्यवहार्य ऊर्जा स्रोत है।

किसी भी देश का विकास उसके नागरिकों की महत्वाकांक्षाओं एवं सपनों से भी जुड़ा होता है। देश की ऊर्जा उत्पादन क्षमता ऐसी शक्ति है जो इन सपनों को साकार करने में सहायक होती है। ऊर्जा न केवल औद्योगिक और वाणिज्यिक विकास के लिए अत्यावश्यक है बल्कि इससे नागरिकों की प्रकाश, परिवहन, शिक्षा, संचार, जलापूर्ति, कृषि, स्वास्थ्य-सेवाएं जैसी अनेक दैनिक आवश्यकताएं भी पूरी होती हैं। उच्चतर ऊर्जा उत्पादन आर्थिक विकास को गति प्रदान करने के साथ-साथ रोज़गार के अवसरों में बढ़ोत्तरी लाता है और लोगों की जीवन-शैली को बेहतर बनाता है।

वर्तमान में, देश के कुल विद्युत उत्पादन में जीवाश्मीय ईंधन स्रोतों की महत्वपूर्ण भूमिका है। परंतु, ये स्रोत धीरे-धीरे समाप्त हो रहे हैं और इनका अधिकाधिक उपयोग पर्यावरण प्रदूषण को भी बढ़ा रहा है। अक्षय (रिन्यूएबल) ऊर्जा स्रोत जैसे सौर ऊर्जा, पवन ऊर्जा, जल ऊर्जा (हाइड्रो पावर), आदि यद्यपि हमारी बिजली की बढ़ती मांग में महत्वपूर्ण योगदान दे रहे हैं, परंतु आंतरायिक (इंटरमिटेंट) प्रकृति के होने के कारण ये ग्रिड को सतत आपूर्ति नहीं कर सकते। नाभिकीय ऊर्जा चौबीसों घंटे (24X7) उपलब्ध रह सकने वाली सतत, स्वच्छ, विश्वसनीय एवं किफायती बिजली का एक प्रमाणित स्रोत है। बिजली उत्पादन के दौरान नाभिकीय ऊर्जा संयंत्रों से प्रदूषणकारी ग्रीनहाउस (हरित-गृह) गैसों अथवा अन्य हानिकारक प्रदूषकों का उत्सर्जन नगण्य होता है। इसके फलस्वरूप, यह वैश्विक तापमान में लगातार हो रही बढ़ोतरी से निपटने में भी सहायक है। यह प्रकृति के साथ पूर्ण सामंजस्य रखने वाला अथाह ऊर्जा का स्रोत है। स्वच्छ पर्यावरण युक्त भारत की दीर्घकालीन ऊर्जा आवश्यकताओं को पूरा करने के लिए, नाभिकीय ऊर्जा के उपरोक्त गुण इसे एक अति लाभप्रद एवं अपरिहार्य विकल्प बनाते हैं। भारत द्वारा वर्ष 2070 तक नेट ज़ीरो कार्बन उत्सर्जन का लक्ष्य निर्धारित किया गया है अर्थात, जितनी कार्बन डाइऑक्साइड (CO_2) गैस वातावरण में उत्सर्जित होगी, उतनी ही वातावरण से हटाई जाएगी। इस लक्ष्य की प्राप्ति में निश्चित रूप से परमाणु ऊर्जा का महत्वपूर्ण योगदान रहेगा।

वर्तमान में, देश के कुल छः (06) राज्यों के सात (07) प्रमुख स्थानों पर न्यूक्लियर पॉवर कार्पोरेशन ऑफ़ इंडिया लिमिटेड (एन पी सी आई एल) के कुल 24 परमाणु विद्युत संयंत्र (रिएक्टर) {राजस्थान परमाणु बिजलीघर इकाई-1 (RAPS-1), जो लम्बे समय से शटडाउन अवस्था में है, को छोड़कर} वाणिज्यिक प्रचालन कर रहे हैं। इन संयंत्रों से प्राप्त वर्तमान स्थापित परमाणु विद्युत क्षमता 8780 मेगावाट

देश में प्रचालनरत नाभिकीय रिएक्टर : एक नज़र

क्र. सं.	राज्य	स्थान	संयंत्र का नाम	इकाई	संयंत्र का प्रकार	विद्युत क्षमता (मेगावाट)
1	महाराष्ट्र	तारापुर	तारापुर परमाणु विद्युत केंद्र (टी ए पी एस; TAPS-1)	1	बी डब्ल्यू आर (BWR)*	160
2			तारापुर परमाणु विद्युत केंद्र (टी ए पी एस; TAPS-2)	2		160
3			तारापुर परमाणु विद्युत केंद्र (टी ए पी एस; TAPS-3)	3	पी एच डब्ल्यू आर (PHWR)#	540
4			तारापुर परमाणु विद्युत केंद्र (टी ए पी एस; TAPS-4)	4		540
5	राजस्थान	रावतभाटा	राजस्थान परमाणु विद्युत केंद्र (आर ए पी एस; RAPS-1)	1		0
6			राजस्थान परमाणु विद्युत केंद्र (आर ए पी एस; RAPS-2)	2		200
7			राजस्थान परमाणु विद्युत केंद्र (आर ए पी एस; RAPS-3)	3		220
8			राजस्थान परमाणु विद्युत केंद्र (आर ए पी एस; RAPS-4)	4		220
9			राजस्थान परमाणु विद्युत केंद्र (आर ए पी एस; RAPS-5)	5		220
10			राजस्थान परमाणु विद्युत केंद्र (आर ए पी एस; RAPS-6)	6		220
11			राजस्थान परमाणु विद्युत केंद्र (आर ए पी एस; RAPS-7)	7		700
12	उत्तर प्रदेश	नरौरा	नरौरा परमाणु विद्युत केंद्र (एन ए पी एस; NAPS-1)	1		220
13			नरौरा परमाणु विद्युत केंद्र (एन ए पी एस; NAPS-2)	2		220
14	गुजरात	काकरापार	काकरापार परमाणु विद्युत केंद्र (के ए पी एस; KAPS-1)	1	पी एच डब्ल्यू आर (PHWR)#	220
15			काकरापार परमाणु विद्युत केंद्र (के ए पी एस; KAPS-2)	2		220
16			काकरापार परमाणु विद्युत केंद्र (के ए पी एस; KAPS-3)	3		700
17			काकरापार परमाणु विद्युत केंद्र (के ए पी एस; KAPS-4)	4		700
18	कर्नाटक	कैगा	कैगा विद्युत उत्पादन केंद्र (के जी एस; KGS-1)	1		220
19			कैगा विद्युत उत्पादन केंद्र (के जी एस; KGS-2)	2		220
20			कैगा विद्युत उत्पादन केंद्र (के जी एस; KGS-3)	3		220
21			कैगा विद्युत उत्पादन केंद्र (के जी एस; KGS-4)	4		220
22	तमिलनाडु	कल्पाक्कम	मद्रास परमाणु विद्युत केंद्र (एम ए पी एस; MAPS-1)	1		220
23			मद्रास परमाणु विद्युत केंद्र (एम ए पी एस; MAPS-2)	2		220
24	तमिलनाडु	कुड़नकुलम	कुड़नकुलम नाभिकीय विद्युत केंद्र (के के एन पी एस; KKNPS-1)	1	वी वी ई आर (पी डब्ल्यू आर) (PWR)@	1000
25			कुड़नकुलम नाभिकीय विद्युत केंद्र (के के एन पी एस; KKNPS-2)	2		1000

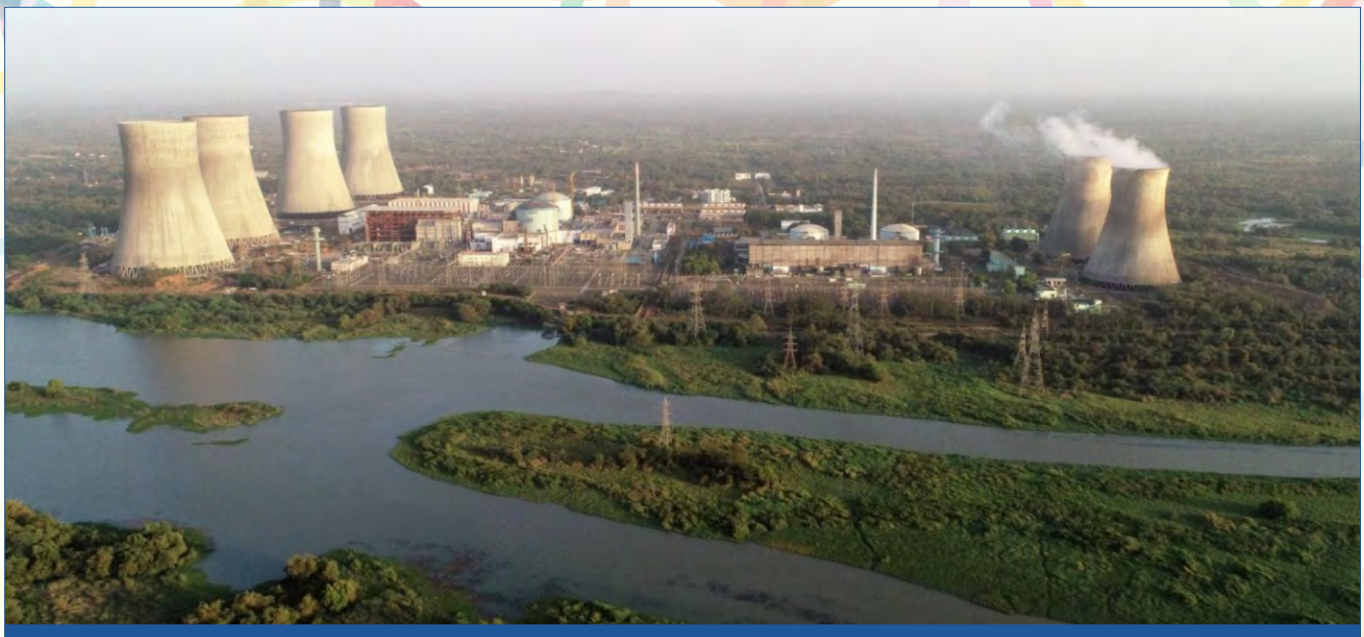
*बी डब्ल्यू आर (BWR) - क्वथन जल रिएक्टर; #पी एच डब्ल्यू आर (PHWR) - दाबित भारी पानी रिएक्टर;
@वी वी ई आर (VVER) - वोदो वोदायिनी एनर्जी रिएक्टर; @पी डब्ल्यू आर (PWR) - दाबित पानी रिएक्टर

(MWe) है। इन संयंत्रों में से, महाराष्ट्र (तारापुर) में 04, राजस्थान (रावतभाटा) में 06, उत्तर प्रदेश (नरौरा) में 02, गुजरात (काकरापार) में 04, कर्नाटक (कैगा) में 04 और तमिलनाडु (कुडनकुलम) में 04 संयंत्र प्रचालित हैं। न्यूक्लियर पॉवर कार्पोरेशन ऑफ़ इंडिया लिमिटेड (एन पी सी आई एल), भारत सरकार के परमाणु ऊर्जा विभाग के प्रशासनिक नियंत्रण के अधीन सार्वजनिक क्षेत्र का एक उपक्रम है, जो परमाणु संयंत्रों (रिएक्टरों) के अभिकल्पन (डिज़ाइन), निर्माण, कमीशनन (कमीशनिंग) एवं वाणिज्यिक प्रचालन के लिए उत्तरदायी है।

इस समय देश में जनित कुल विद्युत उत्पादन में, नाभिकीय ऊर्जा का लगभग 3 प्रतिशत योगदान है। इसमें क्रमिक रूप से वृद्धि किए जाने के अंतर्गत, वर्तमान में एनपीसीआईएल द्वारा 6100 मेगावाट विद्युत क्षमता के सात परमाणु विद्युत संयंत्रों का निर्माण किया जा रहा है। इनमें राजस्थान परमाणु विद्युत परियोजना (आर ए पी पी-8; 700 मेगावाट; पी एच डब्ल्यू आर), कुडनकुलम परमाणु विद्युत परियोजना (के के एन पी पी-3 एवं 4; 2x1000 मेगावाट; पी डब्ल्यू आर), कुडनकुलम परमाणु विद्युत परियोजना (के के एन पी पी-5 एवं 6; 2x1000 मेगावाट; पी डब्ल्यू आर) एवं गोरखपुर हरियाणा अणु विद्युत परियोजना (जी एच ए वी पी-1 एवं 2; 2x700 मेगावाट; पी एच डब्ल्यू आर) शामिल हैं। इसके अलावा, फ्लीट मोड में 700 मेगावाट प्रति इकाई विद्युत क्षमता के 10 पी एच डब्यू आर (दाबित भारी पानी रिएक्टर) संयंत्रों के लिए भी भारत सरकार ने प्रशासनिक अनुमोदन एवं वित्तीय स्वीकृति दे दी है तथा इनसे संबंधित विभिन्न प्रारंभिक गतिविधियां जैसे कि भूमि अर्जन व पुनर्वास एवं पुनर्स्थापन, पर्यावरणीय अनुमति, दीर्घकालिक सुपुर्दगी उपकरणों की खरीद, नियामक अनुमतियों के लिए अध्ययन, संयंत्र स्थल पर आधारभूत विकास कार्य, जनसंपर्क, मुख्य संयंत्र भवन निर्माण (सिविल कार्य) के लिए निविदा, इत्यादि विभिन्न चरणों में प्रक्रियाधीन हैं। इन सभी परियोजनाओं के क्रमवार पूर्ण होने पर वर्ष 2031-32 तक कुल परमाणु विद्युत स्थापित क्षमता 21980 मेगावाट (MW) तक पहुँचना प्रत्याशित है। महाराष्ट्र के जैतापुर एवं आंध्रप्रदेश के कोव्वाड़ा में भी अंतरराष्ट्रीय सहयोग पर आधारित अत्याधुनिक परमाणु विद्युत संयंत्र स्थापित करने के लिए इन स्थानों पर आधारभूत संरचनात्मक विकास, नियामक अनुमतियां, जनसंपर्क, इत्यादि एवं विभिन्न तकनीकी तथा वाणिज्यिक विचार विमर्श किए जा रहे हैं।

हाल ही (दिसंबर 2025) में, भारतीय संसद द्वारा परमाणु ऊर्जा क्षेत्र में एक नया विधेयक (भारत में बदलाव के लिए परमाणु ऊर्जा के सतत दोहन और विकास (शांति) विधेयक, 2025', अथवा 'दी सस्टेनेबल हरनेसिंग एंड एडवांसमेंट ऑफ़ न्यूक्लियर एनर्जी फॉर ट्रांसफॉर्मिंग इंडिया (SHANTI) विधेयक, 2025') पारित किया गया है। इस ऐतिहासिक क़ानून का मुख्य उद्देश्य देश के परमाणु ऊर्जा क्षेत्र में क्रांतिकारी बदलाव लाना है। यह क़ानून स्वतंत्र भारत के इतिहास में पहली बार निजी कंपनियों को परमाणु ऊर्जा संयंत्रों के निर्माण और प्रचालन में भागीदार बनने की अनुमति देता है। इसका लक्ष्य स्वच्छ ऊर्जा को बढ़ावा देना, नियमों को सुव्यवस्थित करना और लघु मॉड्यूलर रिएक्टरों (स्माल मॉड्यूलर रिएक्टर; SMR) के विकास, निर्माण, स्थापना एवं प्रचालन को सुगम बनाना है। इस क़ानून के द्वारा परमाणु ऊर्जा संयंत्रों की लाइसेंसिंग, जवाबदेही और सुरक्षा के लिए भी एक एकीकृत ढांचा तैयार किया गया है, जिसका उद्देश्य वर्ष 2047 तक परमाणु ऊर्जा क्षमता का प्रमुख रूप से विस्तार करना है।

निष्कर्ष - भारत में परमाणु बिजली उत्पादन क्षमता को सुरक्षित, किफायती एवं क्रमिक रूप से बढ़ाया जा रहा है। यह ऊर्जा विकल्प न केवल पर्यावरणीय अनुकूल है बल्कि सुरक्षित एवं आर्थिक रूप से व्यवहार्य भी है। भारत सरकार द्वारा वर्ष 2025 में शांति विधेयक के द्वारा परमाणु ऊर्जा के क्षेत्र में नया क़ानून बनाकर इसमें निजी क्षेत्र की अधिक भागीदारी हेतु द्वार खोल दिए हैं। यह अपेक्षित है कि जब देश स्वाधीनता के सौ वर्ष पूर्ण करेगा तब भारत के कुल ऊर्जा मिश्रण में परमाणु ऊर्जा की हिस्सेदारी काफी बढ़ जाएगी।



गुजरात स्थित काकरापार परमाणु ऊर्जा स्टेशन (केएपीएस) में चार परमाणु ऊर्जा इकाइयां
इकाई-1 एवं 2 (दाईं ओर) 220 मेगावाट विद्युत क्षमता (प्रति इकाई) के पी एच डब्ल्यू आर संयंत्र हैं।
इकाई-3 एवं 4 (बाईं ओर) 700 मेगावाट विद्युत क्षमता (प्रति इकाई) के पी एच डब्ल्यू आर संयंत्र हैं।

तमिलनाडु स्थित कुड़नकुलम परमाणु ऊर्जा संयंत्र की दो इकाइयां वर्तमान में वाणिज्यिक प्रचलन में हैं।

रूसी मूल की अत्याधुनिक परमाणु प्रौद्योगिकी से सुसज्जित इस संयंत्र की प्रत्येक इकाई 1000 मेगावाट विद्युत क्षमता भारी पानी रिएक्टर (पी डब्ल्यू आर; PWR) प्रौद्योगिकी पर आधारित हैं। कुड़नकुलम परमाणु ऊर्जा संयंत्र की दो इकाइयाँ (यूनिट-1 और 2) वाणिज्यिक प्रचालन में हैं। यूनिट-3 और 4 का निर्माण तेज़ी से चल रहा है और यूनिट-5 और 6 का निर्माण शुरू हो चुका है। यह संयंत्र प्रौद्योगिकी सहयोग के उन्नत क्षेत्रों में सशक्त भारत-रूस के बीच महत्वपूर्ण साझेदारी का प्रमाण है।

राजस्थान के रावतभाटा स्थित राजस्थान परमाणु विद्युत केंद्र (आरएपीएस)
इस केंद्र पर 6 संयंत्र (RAPS-2 से 7) प्रचालित हैं, एक संयंत्र (RAPS-1) विस्तारित शटडाउन में है एवं आठवीं इकाई (RAPS-8) की स्थापना का कार्य प्रगति पर है।

आभार

लेखक इस लेख की रचना में प्रत्यक्ष एवं परोक्ष रूप से सहयोग एवं मार्गदर्शन देने वाले सभी व्यक्तियों विशेषकर डॉ. धीरज जैन, वैज्ञानिक अधिकारी/जी, भापअ केंद्र और श्री कुमार अभिनव, वरिष्ठ अनुवाद अधिकारी, भापअ केंद्र के प्रति हार्दिक आभार प्रकट करते हैं। लेखक, प्रस्तुत जानकारी में प्रयुक्त पुस्तकों, लेखों और ऑनलाइन संसाधनों के लेखकों/संस्थाओं के प्रति भी आभार व्यक्त करते हैं।

लेखक का परिचय

सैयद इरफान अली

श्री सैयद इरफान अली, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के हिंदी अनुभाग में उप निदेशक (राजभाषा) के पद पर कार्यरत हैं।

डॉ. होमी जहांगीर भाभा : एक वैज्ञानिक युगद्रष्टा

बचपन से परमाणु वैज्ञानिक बनने तक की यात्रा

माधव एन.

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

जन्म और पारिवारिक पृष्ठभूमि होमी जहांगीर भाभा का जन्म 30 अक्टूबर, 1909 को तत्कालीन बॉम्बे (वर्तमान में मुंबई) में जहांगीर हॉर्मुसजी भाभा (पिता) और मेहरबाई भाभा (माता) के घर हुआ था। उनका परिवार कुलीन पारसी समुदाय का हिस्सा था। शिक्षा, संस्कृति और लोक सेवा की परंपरा में विश्वास रखता था। मुंबई के 'मालाबार हिल' इलाके में स्थित होमी भाभा के घर जिसका नाम 'मेहरानगीर' था, का नाम उनकी माता (मेहरबाई) एवं पिता (जहांगीर) के नाम पर रखा गया। इस विशाल भवन में पुस्तकालय, उद्यान, आदि के साथ अनेक सुविधाएं थीं, जिनका होमी भाभा की जीवन शैली पर विशेष प्रभाव पड़ा। उनके छोटे भाई जमशेद जहांगीर भाभा के संस्मरण के अनुसार परिवार के सभी सदस्यों में अत्यंत प्रेमभाव था और जमशेद अपने बड़े भाई होमी की छोटी-बड़ी सभी जरूरतों का ध्यान रखते थे। दया और करुणा की प्रतिमूर्ति माता मेहरबाई जीवनपर्यन्त होमी के लिए केंद्रीय शक्ति बनी रहीं। भाभा परिवार के अन्य प्रतिष्ठित पारसी परिवारों, जिनमें टाटा परिवार, पेटिट परिवार, पांडे परिवार एवं वाचा परिवार शामिल थे, इनके साथ गहरे संबंध थे।

प्रारंभिक शिक्षा और अभिरुचियाँ

तत्कालीन बॉम्बे के प्रसिद्ध कैथेड्रल एंड जॉन कॉनन स्कूल से सात वर्ष की आयु में होमी ने अपनी औपचारिक शिक्षा की शुरूआत की। अपने आपको शैक्षणिक रूप से प्रतिष्ठित करने के साथ-साथ, होमी ने अंग्रेज़ी में निबंध लेखन एवं गणित में उत्कृष्ट प्रदर्शन किया, लैटिन और फ्रेंच भाषा सीखना जारी रखा, तथा कला (चित्रकला) के प्रति भी गहरी अभिरुचि दर्शाई। पश्चिमी शास्त्रीय संगीत के साथ दोनों भाइयों (होमी और जमशेद) का ही गहरा और उल्लेखनीय लगाव था। बचपन से ही बीथोवेन, मोजार्ट और वैगनर जैसे महानतम संगीतकारों की कृतियों के प्रति उनकी गहरी रुचि थी। बाल्यकाल में ही उन्होंने वायलिन बजाना भी सीख लिया था। कला के प्रति होमी की विशेष अभिरुचि थी एवं चित्रकला की शिक्षा उन्होंने प्रसिद्ध चित्रकार जहांगीर अर्देशिर लालकाका, जो जे.जे. स्कूल ऑफ आर्ट से जुड़े थे, से प्राप्त की।

विज्ञान के प्रति आकर्षण

अल्पायु से ही होमी को विज्ञान के प्रति विशिष्ट लगाव था। अनेक विषयों पर तीव्र पकड़ वाले उत्सुक पाठक के रूप में बालक होमी काफी समय अपने गृह-पुस्तकालय और सर दोराबजी टाटा के निजी पुस्तकालय में बिताते थे। अनेक छोटे-छोटे घटकों से विभिन्न प्रकार के कार्यशील यांत्रिक मॉडल बनाने वाले अपने खिलौनों (मेक्कानो सेट) के उपयोग से उन्होंने आनंदमय रूप से यांत्रिकी का प्राम्भिक अनुभव प्राप्त किया। पंद्रह वर्ष की आयु से पहले, स्कूल की पढ़ाई के दौरान ही, उन्होंने आइंस्टीन के 'सापेक्षता के सिद्धांत' को अच्छी तरह से समझ लिया था, जो किशोरावस्था में उनकी एक अभूतपूर्व उपलब्धि थी। मोहनदास करमचंद गांधी (महात्मा गांधी), पंडित जवाहरलाल नेहरू सहित भारतीय राजनीति एवं उद्योग की प्रमुख हस्तियों से उनका परिचय पारिवारिक संपर्क के माध्यम से, विशेषतया उनके चाचा सर दोराबजी टाटा एवं चाची मेहरबाई टाटा के घर पर हुआ।

कैम्ब्रिज में प्रवेश - इंजीनियरिंग, भौतिकी और कला में उपलब्धियां

मात्र पंद्रह वर्ष की आयु में होमी ने इंग्लैंड के कैम्ब्रिज विश्वविद्यालय में प्रवेश के लिए आवश्यक परीक्षा विशिष्टता के साथ उत्तीर्ण कर ली थी जहां जाने के लिए निम्नतम आयु अठारह वर्ष थी। अतः, स्कूली शिक्षा के तुरंत बाद एवं केम्ब्रिज जाने से पहले उन्होंने बॉम्बे के एलफिंस्टन कॉलेज (1925-26) एवं रॉयल इंस्टीट्यूट ऑफ साइंस (1926-27) में क्रमशः कला (प्रथम वर्ष) एवं विज्ञान स्नातक (प्रथम वर्ष) के अध्ययन हेतु समय बिताया। इस दौरान उन्हें प्रसिद्ध अमेरिकी कण भौतिकज्ञ, आर्थर होली कॉम्पटन (जिन्होंने 1927 का भौतिकी में नोबेल पुरस्कार जीता) के कॉम्प्टन प्रभाव एवं ब्रह्मांडीय किरणों (कॉस्मिक-रे) पर दिए गए व्याख्यान को सुनने का अवसर भी मिला। इस घटना ने होमी भाभा के वैज्ञानिक दृष्टिकोण को विशेष आकार दिया।

वर्ष 1927 में, होमी भाभा कैम्ब्रिज पहुंचे और टाटा उद्योग समूह में योगदान की अपने पिता की इच्छा के अनुरूप उन्होंने यांत्रिक अभियांत्रिकी (मैकेनिकल इंजीनियरिंग) में ऑनर्स डिग्री (ट्राइपोस) हेतु गोनविल एंड कैयस कॉलेज में दाखिला लिया, यद्यपि वे जान चुके थे कि उनका जुनून भौतिकी एवं कला में था। कैम्ब्रिज में भाभा विज्ञान, संगीत और कला के विशिष्ट एवं उत्कृष्ट वातावरण से परिचित हुए। कैम्ब्रिज के अपने समय में उन्होंने चित्रकारी, संगीत, रंगमंच डिज़ाइन, नौकायन रेस (कॉक्सस्वेन अर्थात नेतृत्त्व करने वाले नाविक के रूप में), इत्यादि में भाग लिया। वास्तव में, कैम्ब्रिज ने भाभा को कला के क्षेत्र में एक ऐसा विशेष अवसर दिया, जिससे उन्हें दुनिया के महान संग्रहालयों को देखने, संगीत कार्यक्रमों में भाग लेने, और संगीत की अनेक विधाओं का आनंद लेने का मौका मिला जो उन्हें बहुत पसंद था।

हालांकि उन्होंने इंजीनियरिंग में उत्कृष्टता प्राप्त की, लेकिन इस विषय ने उन्हें आकर्षित नहीं किया। परिवार के साथ विचार विमर्श और उद्देश्य की विशिष्ट दृढ़ता के साथ, अकादमिक उत्कृष्टता प्राप्त करने का वादा करने के साथ उन्होंने अपने पिता से भौतिकी में अध्ययन हेतु अनुमति प्राप्त की। तदोपरांत, उन्होंने यांत्रिकी (मैकेनिकल साइंसेज़) और गणित, दोनों में ही ऑनर्स डिग्री (ट्राइपोस) प्रथम श्रेणी से प्राप्त की, जिससे आगामी शोध कार्य (डॉक्टरेट) हेतु मार्ग प्रशस्त हुआ।

कैवेंडिश प्रयोगशाला - प्रारंभिक अनुसंधान एवं यादगार वर्ष

कैम्ब्रिज विश्वविद्यालय की कैवेंडिश प्रयोगशाला, जिसका नेतृत्व उस समय प्रख्यात भौतिकज्ञ एवं रसायनज्ञ अर्नेस्ट रदरफोर्ड कर रहे थे, में डॉक्टरेट शोधकार्य हेतु बिताये वर्ष होमी भाभा के वैज्ञानिक जीवन का स्वर्णिम काल माने जाते हैं। कैवेंडिश प्रयोगशाला क्वांटम भौतिकी का तत्कालीन प्रमुख केंद्र था। यहां होमी भाभा ने दिग्गज वैज्ञानिकों जैसे की पॉल एड्रिएन मौरिस डिराक (क्वांटम यांत्रिकी के वास्तुकार), नील्स बोहर (जिन्होंने परमाणु संरचना और क्वांटम सिद्धांत समझाने में मूलभूत योगदान दिया), और वोल्फगैंग पाउली (क्वांटम यांत्रिकी के अग्रणी वैज्ञानिक) के साथ विचार-विमर्श किया तथा क्वांटम यांत्रिकी तथा ब्रह्मांडीय किरणों (कॉस्मिक-रे) पर हो रहे अनुसंधान से जुड़ गए। होमी भाभा की कुछ उल्लेखनीय प्रारंभिक वैज्ञानिक उपलब्धियाँ निम्न हैं।

- भाभा प्रकीर्णन (भाभा स्कैटरिंग) का सिद्धांत: वह प्रक्रिया जिसमें इलेक्ट्रॉन (इलेक्ट्रॉनों) द्वारा पॉज़िट्रॉन (पॉज़िट्रॉनों) का प्रकीर्णन होता है। इस प्रक्रिया की खोज होमी भाभा ने ही की थी जिसके कारण इसे भाभा प्रकीर्णन (भाभा स्कैटरिंग) नाम दिया गया है।
- ब्रह्मांडीय किरणों की वर्षा (कॉस्मिक-रे शॉवर्स) के सोपानीपात (कैस्केड) सिद्धांत का उपयोग करते हुए, वायुमंडल में द्वितीयक कण-वर्षा (सेकेंडरी पार्टिकल-शॉवर्स) का सटीक वर्णन (यह कार्य उन्होंने प्रसिद्ध भौतिकज्ञ वॉल्टर हेटलर के सहयोग से किया)
- ब्रह्मांडीय विकिरण (कॉस्मिक रेडिएशन) में म्यूऑन

कणों (जिन्हें भारी इलेक्ट्रॉन भी कहा जाता है) के अस्तित्व की भविष्यवाणी करने से पूर्व उसकी प्रयोगात्मक खोज।

इस अवधि के दौरान, भाभा ने दोस्तों और परिवार के साथ सक्रिय पत्राचार भी जारी रखा, जो दर्शन, कला और उनके करियर की दिशा को दर्शाता है। यूरोप में रहने के शुरूआती इरादों के बावजूद, द्वितीय विश्व युद्ध के बढ़ते खतरे ने उन्हें अपने भविष्य पर पुनर्विचार करने के लिए प्रेरित किया।

भारत में वापसी

वर्ष 1939 की गर्मियों में, भाभा छुट्टियों पर भारत लौटे। परन्तु, सितम्बर 1939 में 'द्वितीय विश्व युद्ध' प्रारम्भ होने से वे कैम्ब्रिज वापस नहीं जा पाए। इन परिस्थितियों में उन्होंने बैंगलोर स्थित भारतीय विज्ञान संस्थान (इंडियन इंस्टीट्यूट ऑफ साइंस) में, जिसके तत्कालीन निदेशक नोबेल पुरस्कार विजेता सर सी.वी. रमन थे, टाटा ट्रस्ट द्वारा उन्हें दिए गए विशेष शोध अनुदान से, ब्रह्मांडीय किरण (कॉस्मिक-रे) अनुसंधान इकाई में रीडर का पदभार संभाला एवं यहां अपना शोध प्रारम्भ किया। इस दौरान ही, भारत में वैज्ञानिक अनुसंधान के लिए विश्व स्तरीय संस्थानों की स्थापना के उनके आजीवन मिशन की शुरूआत हुई।

संक्षेप में, डॉ. होमी जहांगीर भाभा के जीवन का बचपन से लेकर कैम्ब्रिज से भारत वापसी तक का प्रारंभिक काल एक विशेषाधिकार प्राप्त और सांस्कृतिक रूप से समृद्ध परिवार में पालन-पोषण, गहन उत्तम शिक्षा, भौतिकी में उत्कृष्ट उपलब्धियां और विज्ञान तथा कला के क्षेत्र में गहरी प्रतिबद्धता एवं अभिरुचि के रूप में देखा जा सकता है। वर्ष 1939 में भारत में उनकी वापसी को, मौलिक भौतिकी में वैश्विक-स्तर पर एक उभरते हुए सितारे से आधुनिक भारतीय विज्ञान के वास्तुकार के रूप में परिवर्तन के रूप में चिह्नित किया जा सकता है।

नोबेल पुरस्कार विजेता और प्रसिद्ध परमाणु वैज्ञानिक सर जॉन कॉकरॉफ्ट ने डॉ. होमी जहांगीर भाभा के लिए कहा - "मानव प्रगति हमेशा उत्कृष्ट क्षमता और रचनात्मकता वाले कुछ व्यक्तियों की उपलब्धियों पर निर्भर करती है। होमी भाभा उनमें से एक थे।"

डॉ. होमी जहांगीर भाभा के प्रेरणामय जीवन पर आधारित यह सारांश परिचय, उनके बचपन की दिलचस्प झांकी के कुछ आयामों, मौलिक भौतिकी पर उनके द्वारा किए गए अनुसंधान की कुछ प्रारंभिक उपलब्धियों को समाहित

होमी जहांगीर भाभा (किशोरावस्था में; दाएं) और उनके छोटे भाई जमशेद भाभा (बाएं)

युवा होमी जहांगीर भाभा

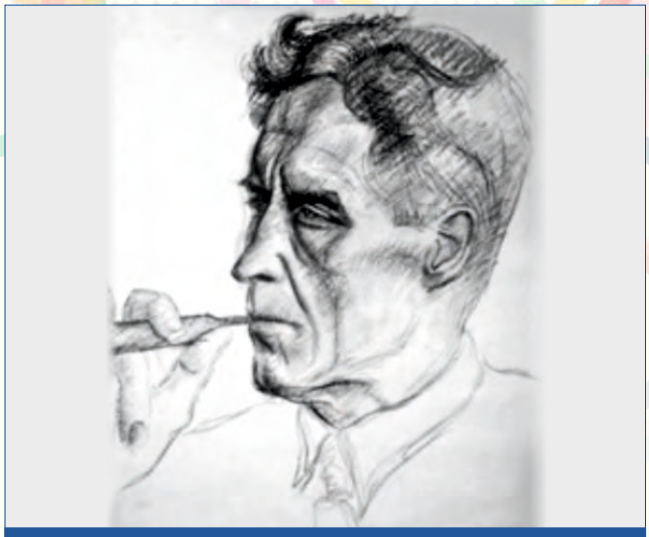
कैम्ब्रिज विश्वविद्यालय में "डव सोनो। बेली सोमेंटी" को चित्रित करते हुए होमी जहांगीर भाभ

करता है। उनकी भारत-वापसी जो कालांतर में देश के लिए अभूतपूर्व साबित हुई, का उल्लेख भी किया गया है। अगले अंक में, भारतीय विज्ञान एवं अनुसंधान के क्षेत्र में उनके अभूतपूर्व योगदान का सार प्रस्तुत किया जाएगा, जिसमें उत्कृष्ट वैज्ञानिक संस्थानों की स्थापना में उनकी दूरदृष्टिता, महत्वपूर्ण भूमिका एवं कुछ रोचक घटनाओं पर प्रकाश डाला जाएगा, जिन्होंने अंततः वर्ष 1954 में परमाणु ऊर्जा विभाग की स्थापना का मार्ग प्रशस्त किया।

नोट: लेख में दर्शाए सभी चित्र टाटा मूलभूत अनुसंधान संस्थान (TIFR) के संग्रह से लिए गए हैं।

17 वर्ष की आयु में युवा होमी जहांगीर भाभा का स्व-चित्र

होमी जहांगीर भाभा द्वारा डिज़ाइन किया गया रंगमंच (स्टेज सेट)



कला प्रेमी डॉ. होमी जहांगीर भाभा द्वारा बनाया गया स्वयं का रेखाचित्र

आभार

लेखक, इस लेख की सरंचना में प्रत्यक्ष एवं परोक्ष रूप से सहयोग एवं मार्गदर्शन देने वाले सभी व्यक्तियों विशेषकर श्री मनोज सिंह, अध्यक्ष, वैज्ञानिक सूचना संसाधन प्रभाग, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के प्रति हार्दिक आभार प्रकट करते हैं।

लेखक का परिचय

माधव एन.

श्री माधव एन., भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के वैज्ञानिक सूचना संसाधन प्रभाग (SIRD) में तकनीकी अधिकारी-डी के पद पर कार्यरत हैं।

प्लाज़्मा - कैंसर के विरुद्ध आशा की एक नई किरण

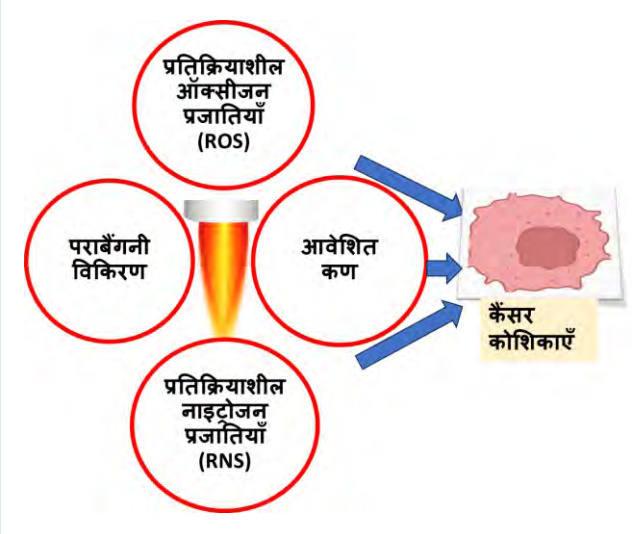
वंदना चतुर्वेदी मिश्रा

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

आशा की किरण, अंधेरों में उजाला लाए,
जब विज्ञान का दीपक, जीवन को फिर से सजाए
राह कठिन हो, रात घनी, डर का साया छाए,
ज्ञान की लौ हर दिल में, नई सुबह बन जाए।

विश्व स्वास्थ्य संगठन (WHO) की वर्ष 2022 की रिपोर्ट के अनुसार, दुनिया भर में कैंसर के लगभग 2 करोड़ नए मामले दर्ज किए गए जिनमें से लगभग एक करोड़ लोग इस बीमारी के कारण अपनी जान गंवा बैठे। कैंसर केवल एक चिकित्सा समस्या नहीं, बल्कि एक सामाजिक, आर्थिक और भावनात्मक चुनौती भी है। कैंसर के उपचार में तीन पारंपरिक तरीके सबसे अधिक इस्तेमाल होते हैं—

(1) **शल्य-क्रिया (सर्जरी) :** सर्जरी में ट्यूमर को शरीर से काटकर निकाल दिया जाता है, लेकिन यह तभी कारगर होती है जब कैंसर एक जगह सीमित हो और ऑपरेशन संभव हो; इसमें खून बहना, संक्रमण और ट्यूमर के दोबारा उभरने का खतरा रहता है।



(2) **कीमोथेरेपी :** कीमोथेरेपी में तेज़ी से बढ़ने वाली कैंसर कोशिकाओं को खत्म करने के लिए दवाएँ दी जाती हैं, परंतु ये स्वस्थ कोशिकाओं को भी नुकसान पहुँचा देती हैं, जिससे बाल झड़ना, उल्टी, थकान, प्रतिरक्षा में कमी और लंबे समय में अंगों को नुकसान जैसे दुष्प्रभाव हो सकते हैं, साथ ही समय के साथ दवाओं का असर भी कम हो सकता है।

(3) **विकिरण-चिकित्सा :** विकिरण-चिकित्सा में उच्च-ऊर्जा किरणों से कैंसर कोशिकाओं को नष्ट किया जाता है, लेकिन इसमें आसपास के स्वस्थ ऊतकों को भी नुकसान पहुँच सकता है, जिससे त्वचा में जलन, थकान, ऊतक का सख़्त होना और कभी-कभी भविष्य में दूसरा कैंसर होने का खतरा होता है; साथ ही इसके लिए महंगे और विशेष उपकरणों की ज़रूरत होती है।

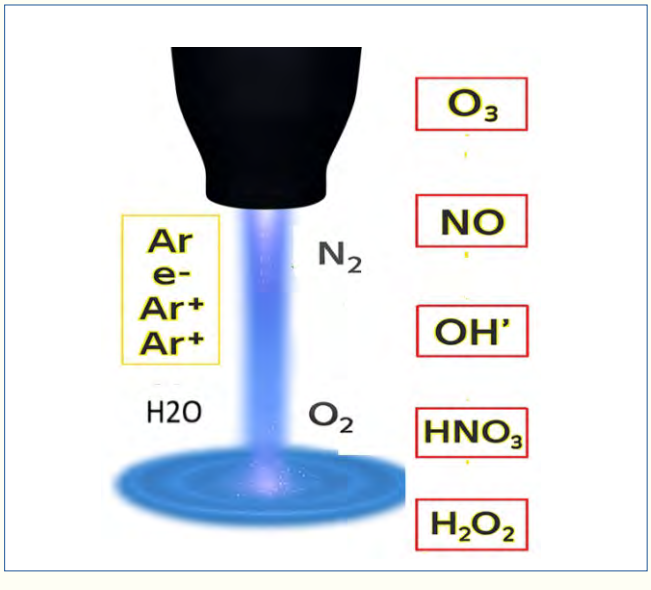
प्लाज़्मा क्या है?

प्लाज़्मा, जिसे अक्सर पदार्थ की चौथी अवस्था कहा जाता है, एक ऐसी अवस्था है जिसमें गैस के अणु और परमाणु आयनित (ionized) होकर मुक्त इलेक्ट्रॉन और आयन में बदल जाते हैं। यह अवस्था प्राकृतिक रूप से सूर्य, बिजली (lightning) और ऑरोरा में पाई जाती है, लेकिन वैज्ञानिकों ने इसे कृत्रिम रूप से भी उत्पन्न करना सीख लिया है।

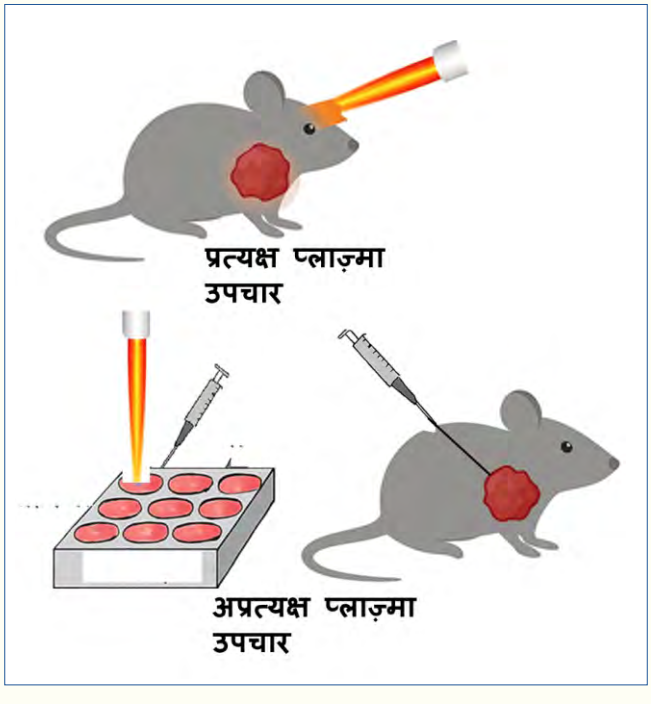
इसके दो मुख्य प्रकार हैं:

1. उच्च तापमान वाला प्लाज़्मा — सूरज में पाया जाता है।
2. निम्न तापमान या गैर-तापीय (नॉन-थर्मल) प्लाज़्मा — जिसे कमरे के तापमान पर भी उत्पन्न किया जा सकता है।

तापीय प्लाज़्मा में सभी कण—इलेक्ट्रॉन, आयन और तटस्थ गैस अणु—लगभग समान रूप से बहुत उच्च तापमान पर होते हैं, जिसके कारण यह अत्यधिक ऊर्जा-युक्त होता है और धातु काटने, वेल्डिंग तथा अन्य औद्योगिक प्रक्रियाओं में उपयोगी है, लेकिन जीवित ऊतकों के लिए हानिकारक है। दूसरी ओर, गैर-तापीय प्लाज़्मा में केवल इलेक्ट्रॉनों का तापमान बहुत अधिक होता है, जबकि भारी कण अपेक्षाकृत ठंडे रहते हैं, जिससे इसका औसत तापमान कम रहता है और यह जैविक ऊतकों को क्षति पहुँचाए बिना प्रभावी रूप से काम कर सकता है। यही कारण है कि गैर-तापीय प्लाज़्मा, जिसे शीत (कोल्ड) वायुमंडलीय प्लाज़्मा भी कहा जाता है, चिकित्सा अनुप्रयोगों जैसे घाव भरना, संक्रमण नियंत्रण और कैंसर उपचार में अधिक उपयुक्त और सुरक्षित माना जाता है। गैर-तापीय प्लाज़्मा विज्ञान का एक ऐसा चमत्कार जो कम तापमान पर काम करते हुए, बिना स्वस्थ ऊतकों को नुकसान पहुँचाए, कैंसर कोशिकाओं को नष्ट करने की क्षमता रखता है। गैर-तापीय प्लाज़्मा में मौजूद उत्तेजित प्रजातियाँ (Excited Species), पराबैंगनी विकिरण (UV), रिएक्टिव ऑक्सीजन प्रजातियाँ (ROS), रिएक्टिव नाइट्रोजन प्रजातियाँ (RNS) और आवेशित कण (Charged Species) सभी जैव-अणुओं पर प्रभाव डाल सकते हैं। इनकी संयुक्त क्रिया कोशिकाओं की संरचना और कार्य को प्रभावित करके विभिन्न चिकित्सीय लाभ प्रदान करती है। यह प्लाज़्मा घाव भरने, त्वचा पुनर्जनन, रक्त के थक्के जमाने (Blood Coagulation), संक्रमण नियंत्रण (Disinfection) और यहाँ तक कि कैंसर उपचार में भी प्रभावी रूप से उपयोग किया जा सकता है, क्योंकि यह सूक्ष्मजीवों को नष्ट करने, ऊतक की मरम्मत को बढ़ावा देने और असामान्य कोशिकाओं को लक्षित करने में सक्षम है।



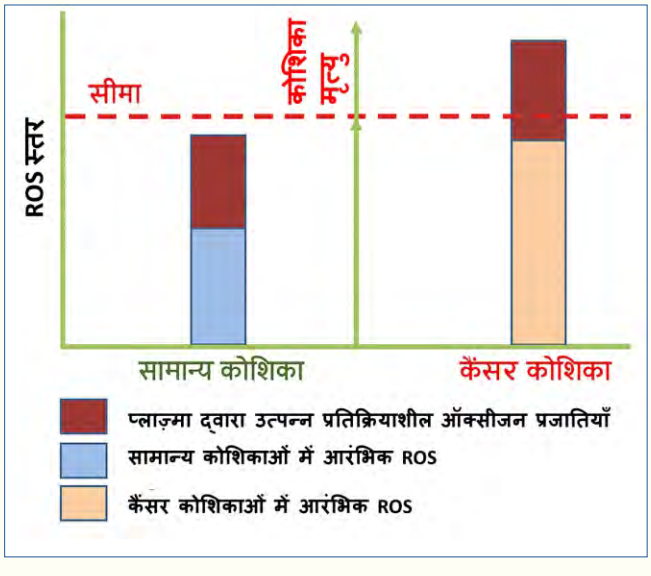
गैर-तापीय (नॉन-थर्मल) प्लाज़्मा का कैंसर उपचार में महत्व : गैर-तापीय प्लाज़्मा का चिकित्सा क्षेत्र में विशेष महत्व है, क्योंकि यह कम तापमान पर कार्य करता है और सामान्य ऊतकों के लिए सुरक्षित रहता है। यह प्लाज़्मा विभिन्न रिएक्टिव ऑक्सीजन प्रजातियों (ROS) और रिएक्टिव नाइट्रोजन प्रजातियों (RNS) का उत्पादन करता है, जो कैंसर कोशिकाओं की संरचना और कार्य को नुकसान पहुँचाकर उन्हें नष्ट करने में सक्षम होते हैं। इसका सबसे बड़ा लाभ यह है कि यह एक गैर-आक्रामक तरीका है, जिसमें



बिना चीरा लगाए उपचार संभव है, जिससे मरीज़ को कम दर्द और तेज़ रिकवरी मिलती है। साथ ही, इसमें चयनात्मकता होती है—यह स्वस्थ कोशिकाओं को सुरक्षित रखते हुए केवल कैंसर कोशिकाओं पर ही हमला करता है, जिससे दुष्प्रभाव न्यूनतम रहते हैं और उपचार अधिक प्रभावी बनता है।

कैंसर कोशिकाओं का चयनात्मक विनाश

गैर- तापीय (नॉन-थर्मल) प्लाज़्मा की चयनात्मकता (Selective Killing) मुख्य रूप से कैंसर कोशिकाओं और सामान्य कोशिकाओं की संरचना व जैव-रसायनिक अंतर पर आधारित होती है। कैंसर कोशिकाओं की झिल्ली (Membrane) अधिक अस्थिर और नकारात्मक चार्ज वाली होती है, जिससे प्लाज़्मा से उत्पन्न रिएक्टिव ऑक्सीजन और नाइट्रोजन प्रजातियाँ (ROS/RNS) आसानी से उनमें प्रवेश कर सकती हैं। तेज़ी से विभाजित होने के कारण इन कोशिकाओं का मेटाबॉलिज्म पहले से ही उच्च ROS स्तर बनाए रखता है, और जब प्लाज़्मा से अतिरिक्त ROS बनते हैं तो यह जल्दी उस न्यूनतम आवश्यक स्तर (Threshold) तक पहुँच जाता है, जिसके बाद कोशिका मृत्यु (Cell Death) हो जाती है। दूसरी ओर, सामान्य कोशिकाओं में ऑक्सिडेंट और एंटीऑक्सिडेंट के बीच संतुलन बनाए रखने की क्षमता होती है, साथ ही उनका



DNA मरम्मत तंत्र मज़बूत होता है, जिससे वे ROS द्वारा हुई क्षति की मरम्मत कर पाती हैं और जीवित रहती हैं। इस प्रकार, कैंसर कोशिकाएँ जल्दी क्षतिग्रस्त होकर नष्ट हो जाती हैं जबकि स्वस्थ कोशिकाएँ सुरक्षित रहती हैं।

अन्य चिकित्सा उपयोग

गैर-तापीय प्लाज़्मा अपने कम तापमान और उच्च जैव-क्रियाशीलता के कारण दंत-चिकित्सा, त्वचा-रोग, घाव-उपचार और निष्क्रियकरण जैसे कई क्षेत्रों में प्रभावी रूप से काम करता है। इसमें उत्पन्न रिएक्टिव ऑक्सीजन और नाइट्रोजन प्रजातियाँ (ROS/RNS), पराबैंगनी विकिरण (UV) और आवेशित कण सीधे बैक्टीरिया, वायरस और फंगस की कोशिका झिल्ली और DNA को नुकसान पहुँचाकर उन्हें निष्क्रिय कर देते हैं। दंत-चिकित्सा में यह दाँतों और मसूड़ों की सतह पर मौजूद रोगजनक सूक्ष्मजीवों को नष्ट करता है और मसूड़ों की चिकित्सा में सहायता करता है। त्वचा-रोगों में यह संक्रमण, एक्ज़िमा और फंगल रोग के कारकों को खत्म करता है तथा सूजन कम करता है। घाव-उपचार में यह संक्रमण हटाकर ऊतक पुनर्जीवन को प्रोत्साहित करता है और रक्त प्रवाह में सुधार करता है। निष्क्रियकरण में यह उपकरणों और सतहों पर मौजूद बैक्टीरिया को बिना गर्मी से नुकसान पहुँचाए नष्ट कर देता है, जिससे संवेदनशील चिकित्सा उपकरण भी सुरक्षित रहते हैं।

गैर-तापीय (नॉन-थर्मल) प्लाज़्मा चिकित्सा की चुनौतियाँ और सीमाएँ

गैर-तापीय प्लाज़्मा चिकित्सा के कई लाभ होने के बावजूद इसकी कुछ सीमाएँ भी हैं। यह सभी प्रकार के कैंसर पर समान रूप से प्रभावी नहीं होता, क्योंकि विभिन्न कैंसर कोशिकाओं की संरचना और प्रतिक्रिया में अंतर होता है। इसके लिए उपयोग होने वाले उपकरण महंगे और तकनीकी रूप से जटिल होते हैं, जिन्हें संचालित करने के लिए विशेष प्रशिक्षण की आवश्यकता पड़ती है। साथ ही, इसकी दीर्घकालिक सुरक्षा और संभावित दुष्प्रभावों को पूरी तरह

समझने के लिए अभी और व्यापक वैज्ञानिक अध्ययन आवश्यक हैं, ताकि इसे बड़े पैमाने पर सुरक्षित और मानक उपचार के रूप में अपनाया जा सके।

भविष्य की संभावनाएँ

आने वाले वर्षों में गैर- तापीय प्लाज़्मा उपचार कैंसर चिकित्सा का एक प्रमुख हिस्सा बन सकता है। यदि इसके लिए पोर्टेबल और किफायती उपकरण विकसित कर लिए जाएँ, तो यह तकनीक दूरस्थ और ग्रामीण क्षेत्रों तक आसानी से पहुँच सकेगी। साथ ही, इसे पारंपरिक उपचार विधियों के साथ संयोजन (कंबिनेशन थैरेपी) में उपयोग करके उपचार की प्रभावशीलता बढ़ाई जा सकती है और मरीज़ों को अधिक सुरक्षित, कम दुष्प्रभाव वाला विकल्प प्रदान किया जा सकता है।

गैर-तापीय प्लाज़्मा की किरण,
आशा का नया सवेरा लाए,
जहाँ कैंसर हार मान जाए और जीवन मुस्कुराए !

गैर-तापीय प्लाज़्मा कैंसर उपचार में एक क्रांतिकारी बदलाव लाने की क्षमता रखता है — यह केवल रोगग्रस्त कोशिकाओं को नष्ट नहीं करता, बल्कि जीवन की उम्मीद को भी संजीवनी देता है। कम दुष्प्रभाव, उच्च चयनात्मकता और व्यापक उपयोग क्षमता के साथ, यह तकनीक आने वाले समय में मानवता की सबसे बड़ी चिकित्सा उपलब्धियों में गिनी जा सकती है। यदि भविष्य के शोध इसके लाभों को और प्रमाणित करते हैं, तो संभव है कि एक दिन कैंसर का भय केवल इतिहास के पन्नों में सिमटकर रह जाए।

लेखक का परिचय

वन्दना चतुर्वेदी मिश्रा

डॉ. वंदना चतुर्वेदी मिश्रा, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के लेसर एवं प्लाज़्मा प्रौद्योगिकी प्रभाग (L&PTD) में वैज्ञानिक अधिकारी-ई के पद पर कार्यरत हैं।

झाबुआ (मध्य प्रदेश) के जवाहर नवोदय विद्यालय में आयोजित जन-संपर्क अभियान 'परमाणु ज्योति' के दौरान उत्साहित छात्र-छात्राएँ

मेस टेलीस्कोप : ब्रह्मांड की खोज में आत्मनिर्भर कदम

संदीप गोदियाल

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

ब्रह्मांड अनगिनत रहस्यों से परिपूर्ण है और प्राचीन काल से ही यह मानव जिज्ञासा का प्रमुख केंद्र रहा है। यद्यपि वैज्ञानिकों ने इसके स्वरूप, संरचना और विकास को समझने हेतु निरंतर प्रयास किए हैं, फिर भी अब तक हम केवल इसके लगभग 5% हिस्से को ही जान पाए हैं। शेष 95% भाग, जिसे 'डार्क मैटर' और 'डार्क एनर्जी' के रूप में जाना जाता है, हमारे लिए अज्ञात है।

जिस प्रकार मानव शरीर और पेड़- पौधे अत्यंत सूक्ष्म कोशिकाओं से मिलकर बने होते हैं, उसी प्रकार यह ब्रह्मांड भी असंख्य तारों, ग्रहों और आकाशगंगाओं से मिलकर बना है। जैसे शरीर के विभिन्न अंगों के कार्य-व्यवहार को समझने के लिए कोशिकाओं का अध्ययन आवश्यक होता है, वैसे ही ब्रह्मांड की उत्पत्ति, विकास और संभावित भविष्य को समझने के लिए इसके सूक्ष्म घटकों और ब्रह्मांडीय किरणों का गहन अध्ययन अनिवार्य है।

ब्रह्मांड अपने रहस्यों को हम तक तरंगों और कणों के रूप में संकेतों के माध्यम से पहुंचाता है। ये संकेत मुख्य रूप से विद्युत-चुंबकीय तरंगों (जैसे रेडियो, दृश्य प्रकाश, एक्स-रे, गामा-किरणें), गुरुत्वीय तरंगों और सूक्ष्म कणों (जैसे प्रोटॉन, इलेक्ट्रॉन, न्यूट्रिनो आदि) के रूप में होते हैं। इन संकेतों के अध्ययन और विश्लेषण से ही वैज्ञानिक ब्रह्मांड की गहराइयों में झांकने में सक्षम हो पाते हैं।

विद्युत चुंबकीय तरंगें — जिनमें रेडियो तरंगों से लेकर गामा-किरणों तक का पूरा स्पेक्ट्रम शामिल है — ब्रह्मांड को समझने का प्रमुख साधन है। इनमें गामा-किरणें सर्वाधिक ऊर्जा वाली होती हैं, जिनकी ऊर्जा सीमा बिलियन इलेक्ट्रॉन वोल्ट से लेकर ट्रिलियन इलेक्ट्रॉन वोल्ट तक होती है। इनकी आवेश-रहित (न्यूट्रल) प्रकृति इन्हें आकाशगंगाओं के चुंबकीय क्षेत्रों से अप्रभावित रखती है, जिससे ये अपने स्रोत से सीधी और बिना विक्षेपित हुए हम तक पहुंचती हैं और अपने मूल स्रोत के बारे में सटीक जानकारी देती हैं।

गामा-किरणें ब्रह्मांड में होने वाली अत्यधिक ऊर्जावान और विलक्षण घटनाओं द्वारा उत्पन्न होती हैं - जैसे सुपरनोवा विस्फोट, ब्लैक होल के चारों ओर पदार्थ का संचयन, तेज़ी से घूर्णन करते हुए न्यूट्रॉन तारे और गामा-किरण विस्फोट इत्यादि। इन्हीं घटनाओं को समझने के लिए गामा-किरणों का अध्ययन किया जाता है। परंतु, पृथ्वी का वायुमंडल गामा-किरणों को सतह तक नहीं पहुंचने देता, जिससे उनका प्रत्यक्ष अध्ययन संभव नहीं हो पाता है।

इस चुनौती का समाधान 1936 में डॉ. होमी जहांगीर भाभा और वॉल्टर हिटलर द्वारा प्रतिपादित 'कॉस्मिक-रे एयर-शॉवर' सिद्धांत से मिला। उन्होंने बताया कि जब उच्च-ऊर्जा विकिरण वायुमंडल में प्रवेश करता है, तो वह द्वितीयक कणों और प्रकाश के झरने उत्पन्न करता है। इन झरनों के अध्ययन से हम प्राथमिक गामा-किरणों और कॉस्मिक किरणों के स्रोतों के बारे में जानकारी प्राप्त कर सकते हैं।

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र (बीएआरसी) के वैज्ञानिकों द्वारा लद्दाख स्थित हानले में वायुमंडलीय इमेजिंग चेरेनकोव प्रयोग पर आधारित मेस (MACE: Major Atmospheric Cherenkov Experiment) टेलीस्कोप की परिकल्पना की गई, जिसे अत्यधिक ऊँचाई पर स्थापित एक आधुनिक गामा-किरण टेलीस्कोप के रूप में विकसित किया गया है, ताकि गामा-किरण खगोलिकी के क्षेत्र में और अधिक संवेदनशील तथा सटीक प्रेक्षण संभव हो सके। मेस स्वदेशी तकनीक पर आधारित एक अत्याधुनिक, पृथ्वी-स्थित गामा-

रे टेलीस्कोप है, जिसका औपचारिक उद्घाटन डॉ. ए. के. मोहांती, अध्यक्ष, परमाणु ऊर्जा आयोग एवं सचिव, परमाणु ऊर्जा विभाग, भारत सरकार के द्वारा 4 अक्टूबर 2024 को किया गया।

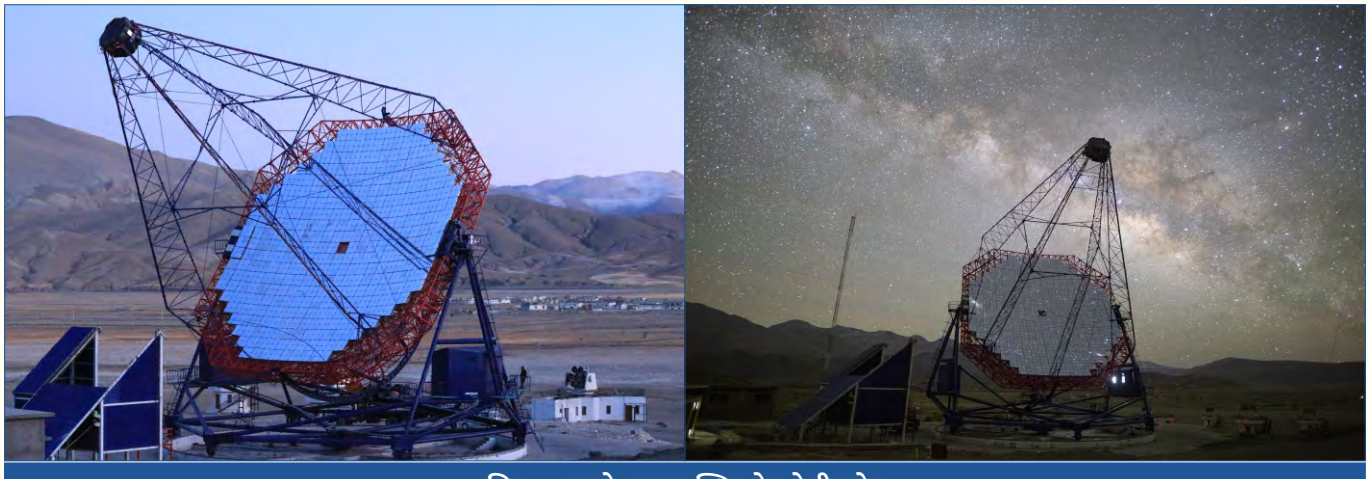
मेस का निर्माण, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र के वैज्ञानिकों और अभियंताओं के संयुक्त प्रयास का परिणाम है। यह प्रोजेक्ट न केवल भारत की वैज्ञानिक क्षमता और तकनीकी कार्यकुशलता का प्रतीक है, बल्कि 'आत्मनिर्भर भारत' की दिशा में एक गौरवपूर्ण उपलब्धि और एक महत्त्वपूर्ण मील का पत्थर भी है। मेस न केवल एशिया का सबसे बड़ा, बल्कि विश्व का सबसे ऊँचाई पर स्थित इमेजिंग चेरेनकोव टेलीस्कोप भी है।

तथ्यों की दृष्टि में मेस :

मेस टेलीस्कोप को 20 बिलियन इलेक्ट्रॉन वोल्ट से अधिक ऊर्जा वाली गामा-किरणों का अध्ययन करने और विश्व की अन्य एकल टेलीस्कोपों की तुलना में बेहतर संवेदनशीलता प्राप्त करने के उद्देश्य से विकसित किया गया है। इसके 21 मीटर व्यास और 25 मीटर फोकस दूरी वाले विशाल परावर्तक में कुल 1424 दर्पण लगाए गए हैं। इन पर सिलिकॉन डाइऑक्साइड की परत चढ़ाई गई है ताकि हानले की कठोर जलवायु में भी इनकी गुणवत्ता और स्थायित्व बना रहे। इस परावर्तक द्वारा एकत्रित चेरेनकोव प्रकाश को फोकस तल पर स्थित इमेजिंग कैमरा संसूचित करता है तथा इन प्रकाशीय संकेतों को अनुरूप इलेक्ट्रॉनिक संकेतों में बदल देता है। यह कैमरा अत्यंत तीव्र एवं संवेदनशील प्रकाश सेंसरों से मिलकर बना है, जो कि अत्यंत मंद प्रकाश को भी संसूचित कर सकता है तथा 0.125° का पिक्सल विभेदन प्रदान करता है । कैमरे के पीछे स्थापित उच्च गति वाली इलेक्ट्रॉनिक्स प्रणाली इन संकेतों का तुरंत प्रक्रमण करती है। इस पूरी इलेक्ट्रॉनिक्स प्रणाली और टेलीस्कोप के संचालन को स्थल पर स्थापित 240 किलोवाट क्षमता वाले सौर ऊर्जा संयंत्र से ऊर्जा प्रदान की जाती है। लगभग 180 टन वज़न वाला यह विशालकाय टेलीस्कोप अपने शक्तिशाली ड्राइव सिस्टम की सहायता से अधिकतम 3° प्रति सेकंड की गति से घूमने में सक्षम है, जिससे यह गामा-किरण विस्फोट जैसी तीव्र और क्षणिक खगोलीय घटनाओं का बेहद सटीक और प्रभावी अध्ययन कर सकता है। इसका ड्राइव सिस्टम न केवल तेज़ और सटीक है, बल्कि 30 कि.मी. प्रति घंटे तक की हवा की गति में भी 1 आर्क-मिनट से बेहतर ट्रैकिंग सुनिश्चित करता है।

हानले : खगोलीय अनुसंधान की एक तेज़ी से उभरती प्रयोगशाला

उत्तर भारत के ट्रांस-हिमालयी क्षेत्र में स्थित हानले एक शीत



चित्र 1 : हानले, लद्दाख स्थित मेस टेलीस्कोप

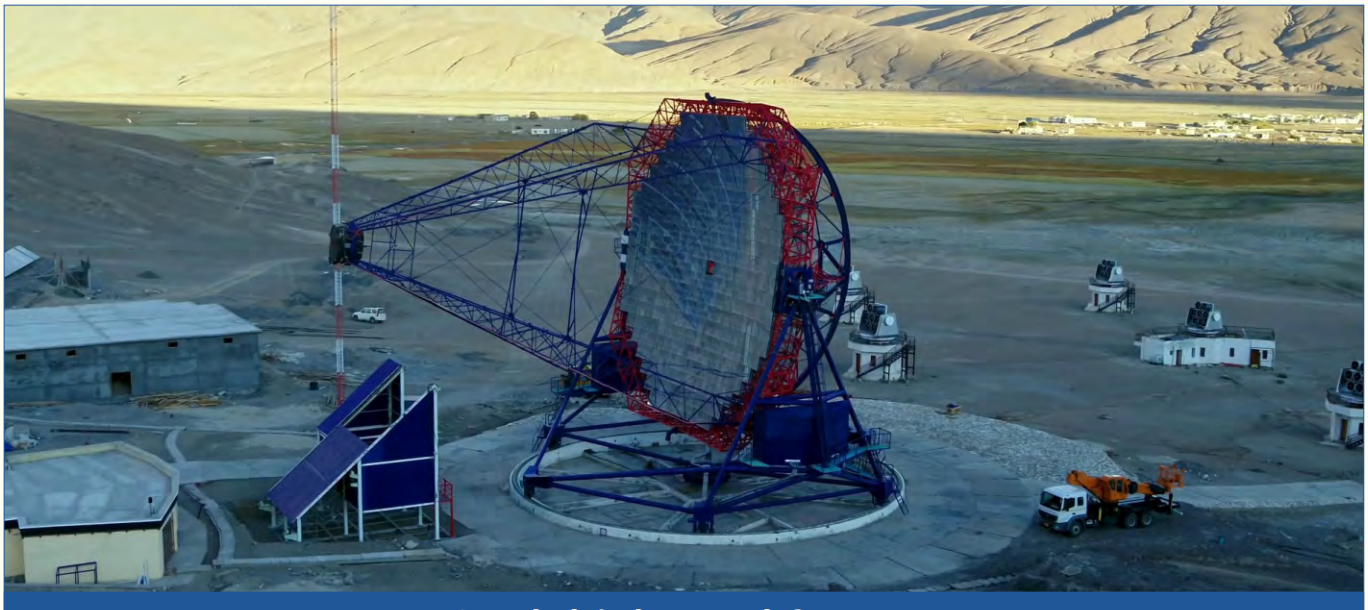
मरुस्थली इलाका है, जिसकी ऊंचाई समुद्र तल से लगभग 4.3 किलोमीटर है। यह क्षेत्र लेह से लगभग 300 कि.मी. की दूरी पर स्थित है और आम-जनजीवन से लगभग कटा हुआ है । इस स्थान का चयन वैज्ञानिक दृष्टि से किया गया है, क्योंकि यहाँ का वातावरण शुष्क, प्रदूषण-मुक्त, एवं स्थिर जलवायु वाला है । जनसंख्या कम होने के कारण यहां पर कृत्रिम प्रकाश- प्रदूषण भी कम है, जो कि खगोलीय अनुसंधान के लिए एक आदर्श स्थल माना जाता है । यहाँ वर्ष भर ज़्यादातर रातें साफ एवं बादलरहित रहती हैं, जिससे गामा-किरण टेलीस्कोपों को लंबे समय तक आकाश का अध्ययन करने का अवसर मिलता है तथा उच्च-ऊर्जा वाली खगोलीय घटनाओं को बेहतर ढंग से समझने में मदद मिलती है।

हानले, चांगथांग वन्यजीव अभयारण्य का हिस्सा है और 01 दिसंबर, 2022 को लद्दाख प्रशासन ने इसे देश का पहला 'डार्क स्काई रिज़र्व ' घोषित किया। इसका उद्देश्य न केवल खगोल-पर्यटन को बढ़ावा देना है, बल्कि स्थानीय ग्रामीणों को अंधेरे आकाश के वैज्ञानिक महत्व के प्रति जागरूक करना भी है। अपनी अनोखी भौगोलिक और प्राकृतिक विशेषताओं के कारण हानले अब कई राष्ट्रीय और अंतरराष्ट्रीय वैज्ञानिक संस्थानों के लिए एक पसंदीदा शोध स्थल के रूप में उभर रहा है।

मेस : ब्रह्मांड से भारत का संवाद

अक्टूबर, 2020 में लद्दाख के हानले में मेस टेलीस्कोप की सफल स्थापना के साथ भारत ने उच्च- ऊर्जा गामा-किरण खगोलिकी के क्षेत्र में एक महत्वपूर्ण कदम बढ़ाया है। अप्रैल, 2021 में इस टेलीस्कोप ने अपनी प्रायोगिक क्षमताओं का प्रदर्शन करते हुए खगोल भौतिकी के मानक स्रोत 'क्रैब नेबुला' से उत्सर्जित उच्च-ऊर्जा गामा फोटॉनों का सफलतापूर्वक पता लगाया। यह उपलब्धि न केवल तकनीकी दृष्टि से उल्लेखनीय थी, बल्कि इससे भारत की गामा-किरण अन्वेषण यात्रा को एक नई दिशा और वैश्विक पहचान प्राप्त हुई।

इसके बाद, दिसंबर, 2022 से जनवरी, 2023 के बीच, मेस टेलीस्कोप ने रेडियो गैलेक्सी NGC1275 में हुई दो पृथक फ्लेयरिंग घटनाओं का सफलतापूर्वक अवलोकन किया। यह अवलोकन न केवल वैज्ञानिक दृष्टि से महत्त्वपूर्ण था, बल्कि इसके परिणाम एक प्रतिष्ठित अंतरराष्ट्रीय शोध पत्रिका में प्रकाशित भी हुए, जो मेस की विश्वसनीयता और



चित्र 2 : मेस टेलीस्कोप स्थल-हानले की स्थलाकृति

वैज्ञानिक योगदान का प्रमाण है।

इस शोध यात्रा को आगे बढ़ाते हुए, 26 जनवरी, 2025 को मेस ने लगभग 8 अरब प्रकाश वर्ष दूर स्थित एक अत्यंत सुदूर आकाशगंगा - OP313 से प्राप्त गामा-किरण संकेतों का सफलतापूर्वक पता लगाकर एक और ऐतिहासिक उपलब्धि अपने नाम की । यह खोज भारत के लिए एक बड़ी वैज्ञानिक उपलब्धि मानी गई। इसके अतिरिक्त, मेस टेलीस्कोप डार्क मैटर जैसे रहस्यमय और विरल खगोलीय स्रोतों के अध्ययन हेतु भी निरंतर सक्रिय है।

आज मेस न केवल भारत की वैज्ञानिक उत्कृष्टता का प्रतीक बन चुका है, बल्कि यह ब्रह्मांडीय रहस्यों को उजागर करने की दिशा में एक महत्वपूर्ण प्रयास भी है। इन उल्लेखनीय उपलब्धियों से प्रेरित होकर, भविष्य में 'स्टीरियो- मेस सिस्टम' की परिकल्पना को मूर्त रूप देने की योजना बनाई जा रही है। इस योजना के अंतर्गत मेस जैसे दो और टेलीस्कोप स्थापित किए जाएंगे, जिससे अति उच्च ऊर्जा वाले गामा-किरण स्रोतों का अधिक संवेदनशील, सटीक और विस्तृत अध्ययन संभव हो सकेगा।

मेस आज भारत की एक अग्रणी खगोल- भौतिकी प्रयोगशाला के रूप में स्थापित हो चुका है, जो कि केवल एक वैज्ञानिक उपकरण ही नहीं है, बल्कि यह ब्रह्मांड की अदृश्य किरणों द्वारा ब्रह्मांड से संवाद का एक सशक्त माध्यम भी है।

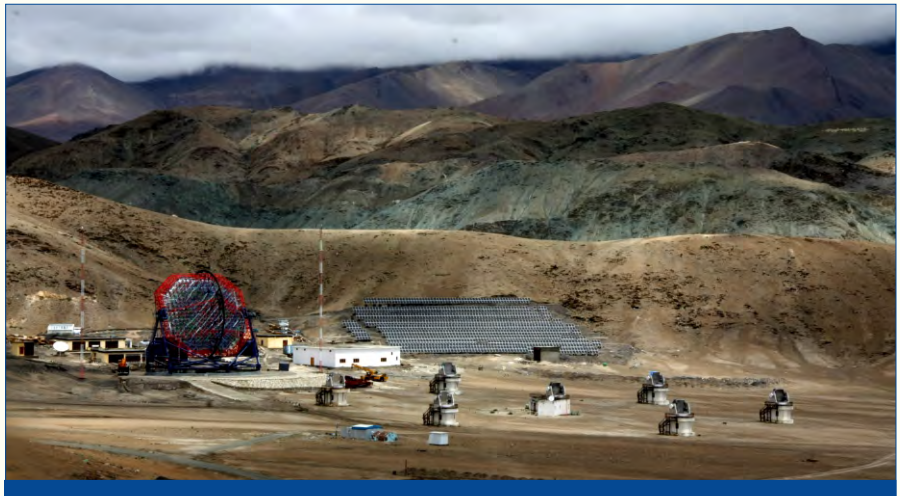
अभिस्वीकृति:

लेखक अपने प्रभागीय सहयोगियों श्री प्रद्युम्न पांडेय, श्री अतुल पठानिया और श्री स्टेंजिन नोरला के प्रति हार्दिक आभार व्यक्त करता है, जिनसे की गई सारगर्भित चर्चा एवं सुझावों द्वारा इस लेख के प्रारूप में महत्वपूर्ण योगदान प्राप्त हुआ।

लेखक का परिचय

संदीप गोदियाल

श्री संदीप गोदियाल, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के खगोल भौतिकी विज्ञान प्रभाग (ApSD) में वैज्ञानिक सहायक - ई के पद पर कार्यरत हैं।



हानले, लद्दाख स्थित मेस टेलीस्कोप एवं संबद्ध सुविधाओं का विहंगम दृश्य

फ्लोरोसेंस से पैथोलॉजी तक : पॉइंट ऑफ़ केअर की राह

प्रभात कुमार सिंह एवं नितिन ओ. कावडे

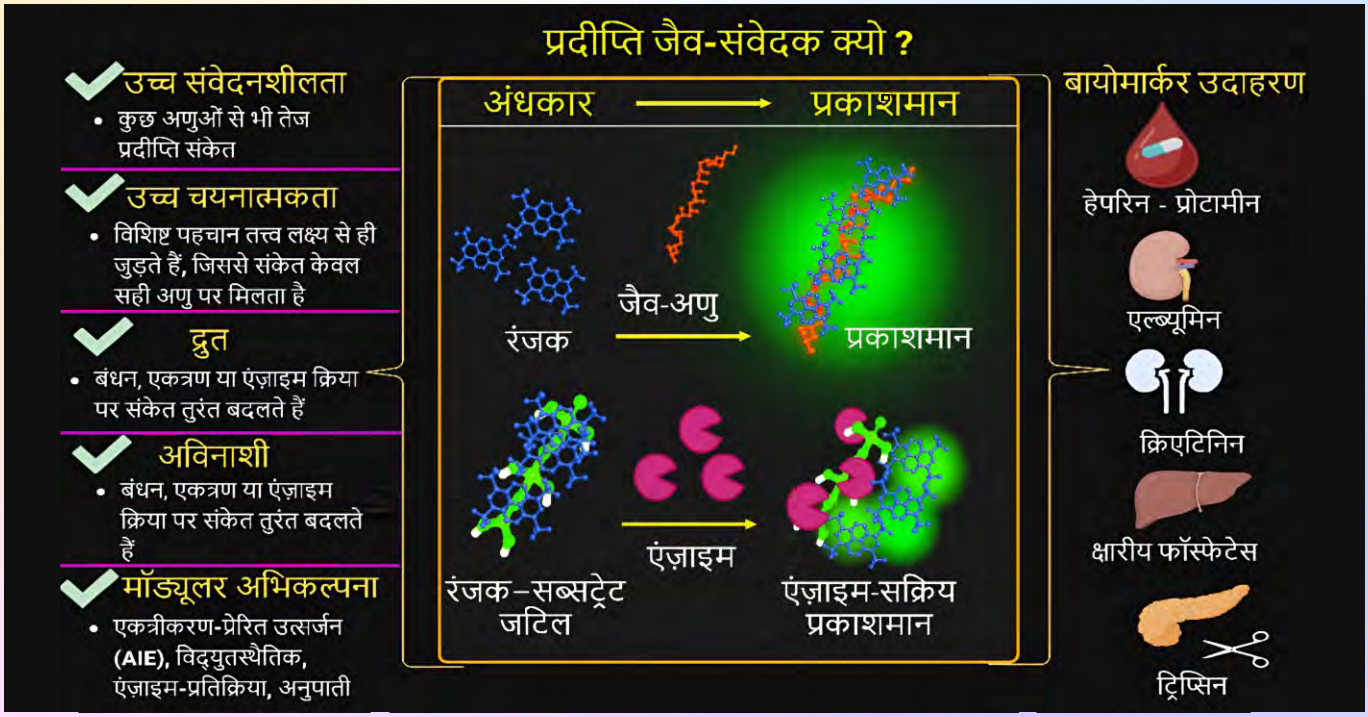
भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

प्रतिदीप्ति (फ्लोरेसेंस) एक प्रकाश-आधारित प्रभाव है जो पदार्थ को क्षणिक रूप से "चमकने में सक्षम बनाता है। इसके द्वारा कई प्रकार के जटिल जैव-माध्यमों जैसे कि रक्त-सीरम, प्लाज़्मा और मूत्र में उपस्थित अवयवों के संवेदनशील मापन किये जा सकते हैं। इस लेख में, हमारे द्वारा विकसित उदाहरणों के माध्यम से प्रतिदीप्ति-आधारित संवेदन (सेंसिंग) तकनीकों को सरल रूप में प्रस्तुत किया गया है। स्वास्थ्य-सेवा क्षेत्र में पॉइंट-ऑफ़-केयर अनुप्रयोगों के लिए कागज़ की पट्टियों (पेपर-स्ट्रिप एवं पोर्टेबल पाठ्य-उपकरणों (रीडर्स/डिस्प्ले) के रूप में इन तकनीकों के अनुप्रयोगों की संभावनाओं को भी दर्शाया गया है।

फ्लोरेसेंस क्यों, और अभी क्यों?

उत्तम स्वास्थ्य सेवाओं के लिए चिकित्सीय परीक्षणों का (i) सटीक होना, (ii) रक्त एवं मूत्र जैसे जैविक नमूनों पर सीधे काम करना, और (iii) सरल तथा विश्वसनीय तकनीक /उपकरणों पर आधारित होना अत्यावश्यक है। प्रतिदीप्ति (फ्लोरेसेंस)-आधारित संवेदन (सेंसिंग) इन तीनों मानकों पर खरा उतरता है। इसके द्वारा विश्लेष्य पदार्थ की अत्यल्प मात्रा को कुछ ही मिनटों में सरल एवं पोर्टेबल प्रकाशीय उपकरणों की सहायता से पहचाना / मापा जा सकता है।

जिस प्रकार अँधेरे में हल्का सा प्रकाश भी स्पष्ट दिखाई देता है, उसी प्रकार प्रतिदीप्ति (फ्लोरेसेंस) फोटोनों की संख्या की सटीक गिनती कर पाना इस तकनीक की संवेदनशीलता को निर्धारित करता है। अधिक संवेदनशीलता से सूक्ष्म परिवर्तनों का पता लगाना सरल हो जाता है। प्रतिदीप्ति (फ्लोरेसेंस) संकेत के तात्कालिक (रियल-टाइम) मापन द्वारा सम्बंधित प्रक्रिया (जैसे कि रसायनिक अभिक्रिया) की गति का आकलन किया जा सकता है जिससे एंज़ाइमों की सक्रियता



/अवरोधन की दर पर भी नज़र रखी जा सकती है। गहरे-लाल (डीप-रेड) या निकट-अवरक्त (नियर-इंफ्रारेड) प्रतिदीप्ति (प्रकाश) के उपयोग से, जो अपारदर्शी (रंगीन अथवा धुंधले) नमूनों (सैम्पल्स) से अधिक प्रभावी ढंग से गुजरती है और प्राकृतिक पृष्ठभूमि प्रतिदीप्ति संकेत (बैकग्राउंड फ्लोरेसेंस सिग्नल) से कम-से-कम हस्तक्षेप करती है, इस तकनीक की चयनात्मकता बढ़ायी जा सकती है।

"डार्क-टू-ब्राइट" सिग्नल पर आधारित सेंसिंग डिज़ाइन

इस डिज़ाइन का आधार एक सरल "डार्क-टू-ब्राइट"संकेत है। प्रारम्भ में सैंपल (नमूना) मंद प्रकाश (डार्क) देता है, और लक्षित विश्लेष्य अणुओं की उपस्थिति में तीव्रता से चमक उठता (ब्राइट) है। इससे संकेत (सिग्नल) की अस्थिरता (ड्रिफ्ट) कम होती है और परिणाम आसानी से रिकॉर्ड किये जा सकते हैं। सेंसिंग दो अलग-अलग प्रकार से की जा सकती है: (1) ऐसे रंजक (डाई) अणु जो केवल एकत्रित होकर अथवा रासायनिक बंध बनाने पर ही प्रतिदीप्ति (प्रकाश) उत्पन्न करते हैं, जिसे एग्रीगेशन-इंड्यूज्ड एमिशन (AIE) कहा जाता है। (2) एंज़ाइमों के उपयोग से रंजक (डाई) अणु सक्रियित होकर एक प्रतिदीप्ति उत्पाद बनाते हैं, जिससे उत्सर्जित प्रकाश के मापन द्वारा संवेदन (सेंसिंग) किया जाता है। इसे "एंजाइम-सक्रियित प्रोब" कहा जाता है। दोनों ही प्रक्रियाएं जैविक घटनाओं को स्पष्ट प्रकाशीय संकेत में परिवर्तित करते हैं।

वास्तविक परिस्थितियों में प्रदर्शन

सामान्यतया जैव-संवेदकों (बायो-सेंसर्स) का परीक्षण शुद्ध माध्यमों जैसे लवण-जल (सेलाइन) में किया जाता है, जिससे प्राप्त परिणाम वास्तविक जैविक-नमूनों (बायो-सैम्पल्स) की तुलना में काफी अच्छे प्रतीत हो सकते हैं। इस प्रकार के परीक्षण वास्तविक परिस्थितियों को वर्णित नहीं करते। इस अनिश्चितता से बचने के लिए, भाभा परमाणु अनुसन्धान केंद्र में हम सीरम, प्लाज़्मा या कृत्रिम मूत्र में किये गए परीक्षणों से ही संवेदकों के प्रदर्शन का सत्यापन करते हैं, और स्व-मानक विधियों, जैसे एक ही सैंपल में दो रंगों की तुलना, को शामिल करते हैं ताकि नमूने के रंग या प्रकाशीय पथ की लंबाई में होने वाले अंतर का प्रभाव कम किया जा सके। इसके अलावा सभी परीक्षणों में व्यवहारिक हार्डवेयर (उपकरण) का उपयोग किया जाता है। अनुसंधान कार्य में मानक प्रयोगशाला फ्लोरोमीटर, प्रोटोटाइप के विकास एवं परीक्षण हेतु सामान्य क्यूवेट्स अथवा कागज़ (फ़िल्टर पेपर) से निर्मित पट्टियों (स्ट्रिप्स) का उपयोग किया जाता है।

प्रस्तुत लेख में हेपरिन, एल्ब्यूमिन, क्रिएटिनिन, क्षारीय (अल्कलाइन) फॉस्फेटेज़ एवं ट्रिप्सिन, इन पांच पदार्थों के प्रतिदीप्ति (फ्लोरेसेंस) - आधारित सेंसिंग परिणामों को दर्शाते हुए स्पष्ट किया गया है कि किस प्रकार इस तकनीक को रोज़मर्रा के जैविक-नमूनों (बायो-सैम्पल्स) की जांच एवं पॉइंट-ऑफ़-केयर अनुप्रयोगों के लिए उपयोग में लाया जा सकता है।

प्रथम अध्ययन (केस-1) :- हेपरिन का संवेदन (प्रोटामाइन द्वारा सुरक्षित निरसन)

हृदय एवं फेफड़े की बाईपास शल्यचिकित्सा, डायलिसिस तथा हृदय संबंधी कई प्रक्रियाओं में रक्त के थक्कों के बनने से बचाव के लिए हेपरिन, जो एक प्रतिस्कंदक (एंटीकोएग्युलेन्ट) है, का उपयोग किया जाता है। उपयोग के बाद सही समय पर प्रोटामाइन नामक औषधि, जो एक प्रोटीन है, के द्वारा हेपरिन को "निष्क्रिय"करना आवश्यक है। हेपरिन की कम मात्रा से रक्त का थक्का (थ्रॉम्बस) बनने का जोखिम बढ़ जाता है, जबकि अधिक मात्रा में इसकी उपस्थिति सामान्य रक्त जमाव प्रक्रिया को बाधित कर सकती है। वर्तमान में उपयोग में लाये जाने वाले परीक्षण (टेस्ट) प्रायः अधिक समय लेते हैं और नमूनों (सैम्पल्स) की प्रकृति (के प्रकार) से भी आसानी से प्रभावित हो जाते हैं। इन कठिनाईओं/कमियों को दूर करने के लिए, तात्कालिक एवं मरीज़ के निकट (शैय्या-निकट / बेड-साइड) किये जा सकने वाली त्वरित परीक्षण विधियां अत्यंत उपयोगी हैं।

इस दिशा में हमनें एक विशेष रंजक (डाई) विकसित किया है जो हेपरिन के संपर्क में आते ही तीव्र प्रतिदीप्ति (प्रकाश) उत्सर्जित करता है। धनावेशित रंजक और ऋणावेशित हेपरिन अणुओं के बीच प्रबल आकर्षण के कारण यह प्रतिदीप्ति उत्पन्न होती है, जो बिना तनुकृत (डाइल्यूटेड) किए मानव सीरम में भी प्रभावी है। रंजक-हेपरिन से बना संकुल (कॉम्प्लेक्स) ही हेपरिन के शरीर से निरसन को ट्रैक करने में सक्षम बनाता है। जब प्रोटामाइन मिलाया जाता है तो यह रंजक- हेपरिन संकुल को तोड़ देता है और प्रतिदीप्ति (प्रकाश) संकेत तुरंत घट जाता है। इससे यह स्पष्ट हो जाता है कि दी गई खुराक पर्याप्त है या नहीं।

प्रतिदीप्ति का यह संकेत (सिग्नल) कुछ सेकंड से मिनटों के भीतर बदलता है और साधारण से उपकरणों जैसे कि क्यूवेट या छोटे चैनल में भी आसानी से पढ़ा जा सकता है। प्रतिदीप्ति-आधारित इस विधि से हेपेरिन–प्रोटामाइन का त्वरित, मरीज़ के निकट (शैय्या-निकट / बेड-साइड) परीक्षण संभव हो पाता है, जो चिकित्सकीय प्रक्रियाओं को अधिक सुरक्षित बनाते हुए शीघ्र निर्णय में सहायक है।

द्वितीय अध्ययन (केस 2) :- एल्ब्यूमिन (रक्त परीक्षण और मूत्र जाँच)

एल्ब्यूमिन, मानव शेयर में यकृत (लिवर) में बनने वाला और रक्त-प्लाज़्मा में सबसे ज्यादा पाया जाने वाला प्रोटीन है। रक्त में एल्ब्यूमिन का स्तर यकृत की कार्यक्षमता और पोषण-स्तर को दर्शाता है, जबकि मूत्र में एल्ब्यूमिन की उपस्थिति, जिसे एल्ब्यूमिन-से-क्रिएटिनिन अनुपात (ACR) कहा जाता है, दीर्घकालिक वृक्क रोड (क्रॉनिक किडनी डिजीज; CKD) की पहचान और अवस्था निर्धारण के लिए एक प्रमुख सूचक है।

एल्ब्यूमिन के त्वरित परिक्षण के लिए हमनें एक रंजक (डाई) अणु विकसित किया है जो एल्ब्यूमिन अणु के साथ "सक्रिय"होकर गहरे लाल रंग (डीप रेड) की सैकड़ों गुना अधिक प्रतिदीप्ति (प्रकाश) उत्पन्न करता है। यह प्रतिदीप्ति प्राकृतिक पृष्ठभूमि प्रकाश (बैकग्राउंड फ्लोरेसेंस) से अतिभिन्न होती है। इस लेबल-फ्री परीक्षण से मानव मूत्र में एल्ब्यूमिन की जांच त्वरित एवं प्रभावी ढंग से की जा सकती है। प्रयुक्त रंजक (डाई) से प्राप्त प्रतिदीप्ति उत्सर्जन (फ्लोरेसेंस ग्लो) का रंग, नमूने को उत्तेजित करने के लिए उपयोग किये गए आपतित प्रकाश के रंग से काफी हटकर लालरंग के क्षेत्र में होता है। अतः मूत्र के अपारदर्शी (धुंधले) नमूनों से प्राप्त परिणाम भी विश्वसनीय होते हैं। यह विधि केवल मिश्रण और माप पर आधारित है तथा इसके लिए केवल साधारण क्यूवेट्स या पोर्टेबल प्रकाशीय उपकरण ही आवश्यक हैं।

तृतीय अध्ययन (केस 3) :- कृत्रिम मूत्र में क्रिएटिनिन का संवेदन

क्रिएटिनिन, जो मानव शरीर में प्रोटीन के पाचन से बना एक अपशिष्ट है, सामान्यतया गुर्दों द्वारा रक्त से फिल्टरित होकर मूत्र के माध्यम से शरीर से निष्कासित होता है। रक्त में क्रिएटिनिन की मात्रा, गुर्दों की कार्यक्षमता (eGFR) का अनुमान लगाने के लिए की जाती है। मूत्र में एल्ब्यूमिन के साथ मिलकर एल्ब्यूमिन- से- क्रिएटिनिन का अनुपात (एल्ब्यूमिन टू क्रिएटिनिन रेश्यो; ACR), दीर्घकालिक वृक्क रोड (क्रॉनिक किडनी डिजीज; CKD) की पहचान और निगरानी हेतु प्रमुख आधार है। दोनों ही परीक्षण विश्व स्वास्थ्य संगठन द्वारा दी गयी मानव शरीर के बाहर (पात्रे; इन-विट्रो) की जाने वाली आवश्यक नैदानिक जांचों में शामिल हैं। वर्ष 2024 के KDIGO, जो गुर्दे से सम्बंधित बीमारियों के लिए साक्ष्यों के आधार पर चिकित्सकीय दिशानिर्देश तैयार करने वाला एक वैश्विक गैर-लाभकारी संगठन है, के अनुसार भी, पॉइंट-ऑफ़-केयर क्रिएटिनिन परीक्षण सीमित लैब सुविधाओं वाले समुदायों में गुर्दे के रोग सम्बंधित मामलों की पहचान बढ़ाने में महत्वपूर्ण है।

इस दिशा में हमनें सरल स्वपोषी-परपोषी (होस्ट–गेस्ट) युग्म पर आधारित थायोफ्लैविन-T (ThT) रंजक (डाई) और सल्फरीकृत बीटा- साइक्लोडेक्सट्रिन (सल्फेटेड β - साइक्लोडेक्सट्रिन) युक्त द्वि- वर्णीय आनुपातिक सेंसर विकसित किया है। एल्युमिनियम आयनों की उपस्थिति में

यह युग्म अलग हो जाता है, जिसका स्पेक्ट्रम रिकॉर्ड किया जाता है। क्रिएटिनिन इस युग्म को फिर से जोड़ देता है, जिसके परिणामस्वरूप दो तरंग दैर्ध्यों के बीच प्रतिदीप्ति (प्रकाश) का संतुलन विपरीत दिशाओं में बदल जाता है। इस प्रतिदीप्ति अनुपात के मापन का फ़ायदा यह है कि नमूने (सैंपल) के रंग या प्रकाशीय पथ लम्बाई (ऑप्टिकल लेंथ) से होने वाले अंतर निरस्त हो जाते हैं एवं सामान्य नमूनों में भी विश्वसनीय परिणाम मिलते हैं।

यह विधि, रोगी के वास्तविक नमूनों के सटीक विकल्प के रूप में प्रयुक्त प्रयोगशाला में निर्मित कृत्रिम मूत्र में भी प्रभावी है। प्रतिदीप्ति अनुपात में परिवर्तन को एल ई डी (LED), फोटो डायोड या स्पेक्ट्रोमीटर, आदि संहत प्रकाशीय उपकरणों (कॉम्पैक्ट ऑप्टिकल इक्विपमेंट) द्वारा आसानी से मापा जा सकता है, जिससे रोगियों की शीघ्र जांच और अनुवर्तन (फॉलो-अप) के लिए सरल एवं पोर्टेबल सुविधा विकसित की जा सकती है।

चतुर्थ अध्ययन (केस 4):- अल्कलाइन फॉस्फेटेज़ (ALP) सक्रियता और उसके अवरोधक

एल्कलाइन फॉस्फेटेस (ALP) एक नियमित रक्त परीक्षण है जो एल्कलाइन फॉस्फेटेस नामक एंजाइम की मात्रा को मापता है तथा चिकित्सकों को यकृत तथा पित्त-नलिकाओं की सेहत और अस्थि-अपचय (बोन टर्नओवर) का आकलन करने में मदद करता है। इसका बढ़ा हुआ स्तर यकृत (लिवर) या हड्डियों में समस्या का संकेत दे सकता है, जबकि कम लेवल पोषण की कमी या दूसरी समस्याओं का संकेत देते हैं। अत्यधिक ALP स्तर के साथ बढ़ा हुआ बिलीरुबिन प्रायः यकृत में पित्त प्रवाह की समस्या की ओर संकेत करता है। रक्त में लिए जाने वाले एंज़ाइम परीक्षण, जिसे गामा ग्लूटेमाएल ट्रांस्फ़ेरेस (GGT) कहा जाता है, के साथ यह पुष्टि की जा सकती है की अधिक ALP का स्रोत वास्तव में यकृत (लिवर) है या नहीं। रोज़मर्रा में किये जाने वाले जांच एवं निदान के लिए, ALP-सक्रियता की शीघ्र जांच चिकित्सीय निर्णयों में मददगार हो सकती है।

इसके लिए हमनें एक "लाइट-अप"(टर्न-ऑन) डिज़ाइन विकसित की है, जिसमें एक रंजक-प्रोटीन (डाई–प्रोटीन) युग्म प्रबल प्रतिदीप्ति (चमक) देता है और फॉस्फेट-युक्त योजक इस प्रतिदीप्ति (चमक) को बंद कर देता है। ALP एंज़ाइम, योजक के फॉस्फेट समूहों को तोड़कर पुनः प्रतिदीप्ति उत्पन्न करता है। पुनः उत्पन्न होने वाली प्रतिदीपि तीव्रता जितनी अधिक होगी, नमूने (सैंपल) में ALP सक्रियता भी उतनी ही अधिक होगी। यह "लाइट-अप"(टर्न-ऑन) संकेत मानव रक्त-सीरम में सीधे कार्य करता है और इसके लिए साधारण प्रकाशीय उपकरणों की आवश्यकता होती है।

यह अभिक्रिया कुछ सेकंड से मिनटों में ही पूर्ण हो जाती है और इसे क्यूवेट या कागज़ की पट्टियों (पेपर स्ट्रिप्स) पर भी पढ़ा जा सकता है। यह विधि उन औषधियों की शीघ्रजांच (स्क्रीनिंग) के लिए भी उपयोगी है जो ALP को अवरुद्ध करती हैं, विशेषकर तब जब पुष्टि हेतु प्रयोगशाला परीक्षण तुरंत उपलब्ध न हों।

पांचवां अध्ययन (केस 5):- ट्रिप्सिन (प्रोटीज़ सक्रियता और अवरोधन)

ट्रिप्सिन की जांच की दो विशेष आवश्यकताएं होती हैं: (i) सिस्टिक फाइब्रोसिस नामक बीमारी के लिए नवजात शिशुओं की स्क्रीनिंग, जहाँ एड़ी से लिए गए रक्त में उच्च प्रतिरक्षा- क्रियाशील ट्रिप्सिनोजेन (इम्यूनो रिएक्टिव ट्रिप्सिनोजेन; IRT), विश्वभर में प्रथम-चरण के परीक्षण के रूप में प्रयुक्त होता है, और (ii) अग्न्याशय संबंधी रोग, जहाँ ट्रिप्सिन (ट्रिप्सिनोजेन) की असामयिक सक्रियता अग्नाशयशोथ (पैनक्रियाटाइटिस) अनुसंधान में प्रमुख कारक और मापन संकेत है।

ट्रिप्सिन के संवेदन के लिए हमनें एक सरल "ब्राइट-टू-डिम" विधि (प्रोब) विकसित की है। एक विशेष ऋणावेशित रंजक (डाई), क्षारीय प्रोटीन 'प्रोटामाइन' से जुड़कर एक तीव्र प्रतिदीप्तिमान संकुल (फ्लोरेसेंट कॉम्प्लेक्स) बनाता है। सक्रिय ट्रिप्सिन प्रोटामाइन को काट देता है और यह संकुल

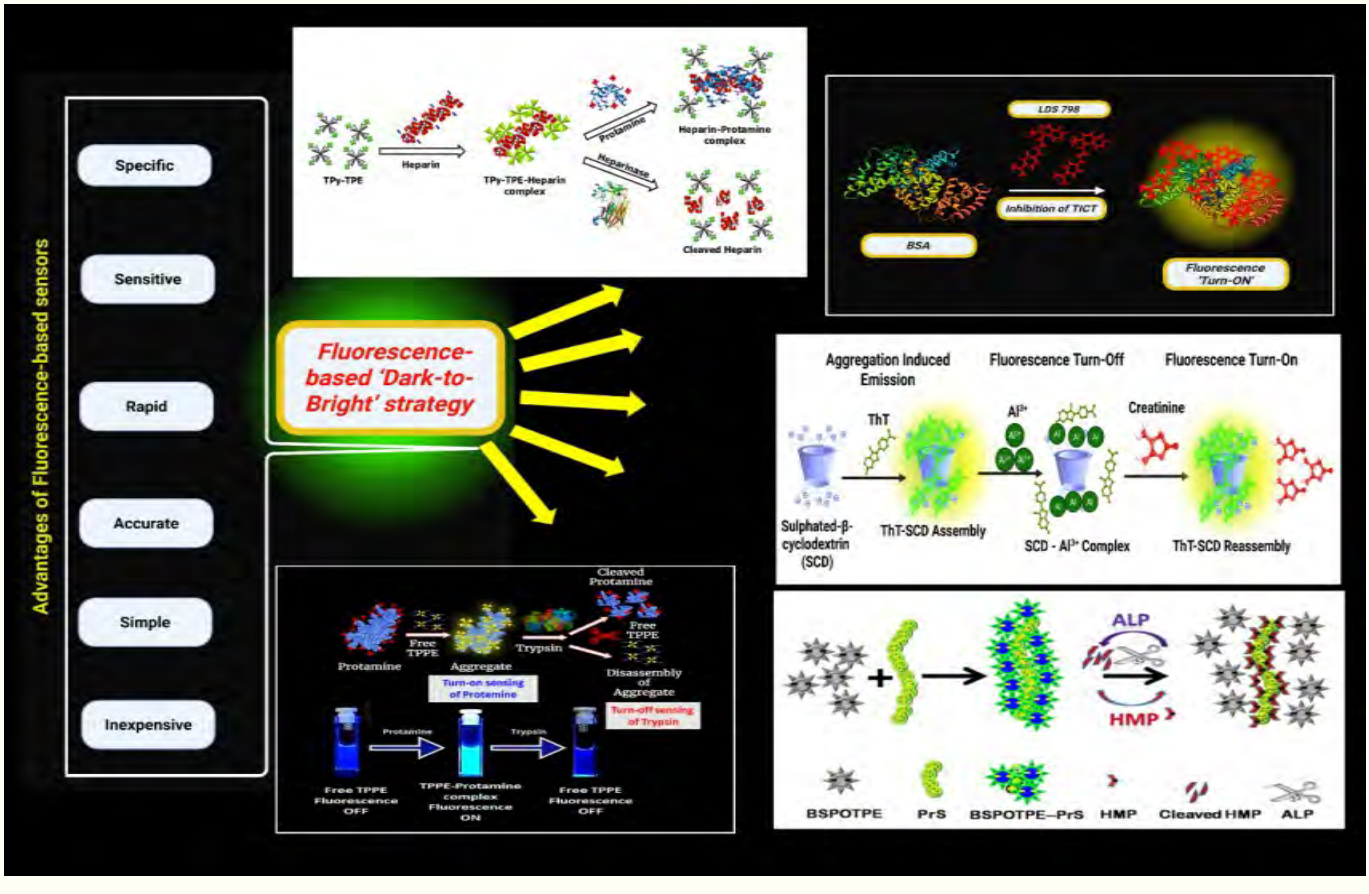
(कॉम्प्लेक्स) टूट जाता है जिससे लगभग 470 नैनोमीटर (nm) पर उत्सर्जित प्रकाश (प्रतिदीप्ति) एंज़ाइम सक्रियता के अनुपात में घट जाता है। यही सिद्धांत तनुकृत मूत्र में भी कार्य करता है, जिससे रोज़मर्रा के नमूनों से भी विश्वसनीय परिणाम प्राप्त होते हैं।

यह एक मिश्रण और मापन (मिक्स एंड मेज़र) प्रकार का परीक्षण है जो सामान्य क्यूवेट में किया जा सकता है। लगभग 15 मिनट में इसके परिणाम आ जाते हैं। इस विधि द्वारा बिना किसी अतिरिक्त सेटअप परिवर्तन के, त्वरित सक्रियता जाँच एवं संभावित ट्रिप्सिन अवरोधकों की स्क्रीनिंग की जा सकती है।

महत्त्वपूर्ण टिप्पणियाँ:

इस लेख में प्रस्तुत विधियों का परीक्षण केवल शुद्ध लवण-जल (सेलाइन) में ही नहीं बल्कि सीरम, प्लाज़्मा और कृत्रिम मूत्र जैसे वास्तविक नमूनों (सैम्पल्स) में भी किया गया है। ये सभी सैम्पल्स अक्सर अपारदर्शी (धुंधले) या रंगीन हो सकते हैं। उदाहरण के लिए, एल्ब्यूमिन परीक्षण में गहरे लाल / निकट-अवरक्त प्रतिदीप्ति (प्रकाश) का उपयोग किया जाता है, और क्रिएटिनिन परीक्षण में द्वि-वर्णीय (द्वि-रंग) अनुपात मापा जाता है। दोनों तरीकों में वास्तविक नमूनों (सैम्पल्स) से प्राप्त संकेत को रव-युक्त (नॉइज़) नमूनों से भली-भांति अलग किया जा सकता है।

प्रस्तुत विधियों में यथासंभव रूप से प्रतिदीप्ति के एक संकेत (तीव्रता) की बजाय दो संकेतों के अनुपात को मापा जाता है ताकि नमूने (सैंपल) की मात्रा, प्रकाशीय पथ की लंबाई, या प्रकाश स्रोत की तीव्रता में होने वाले अंतर निरस्त हो जाते हैं। इस प्रकार परिणामों की स्वतः ही अंतर्निर्मित जाँच हो जाती है। यह विशेष रूप से छोटे और पोर्टेबल रीडर्स के लिए अत्यंत उपयोगी है।



धनावेशित प्रोटीन और ऋणावेशित रंजक (डाई) के बीच का जो आकर्षण हेपरिन का पता लगाता है, वही हमें इसके प्रतिविष (प्रोटामाइन) के मापन तथा हेपरिन को विघटित करने वाले एंज़ाइम के संकेत का पता लगाने में भी मददगार है। इस तरह एक ही प्रकार के रसायनिक क्रिया से विभिन्न प्रकार के कई संबंधित परीक्षण किये जा सकते हैं।

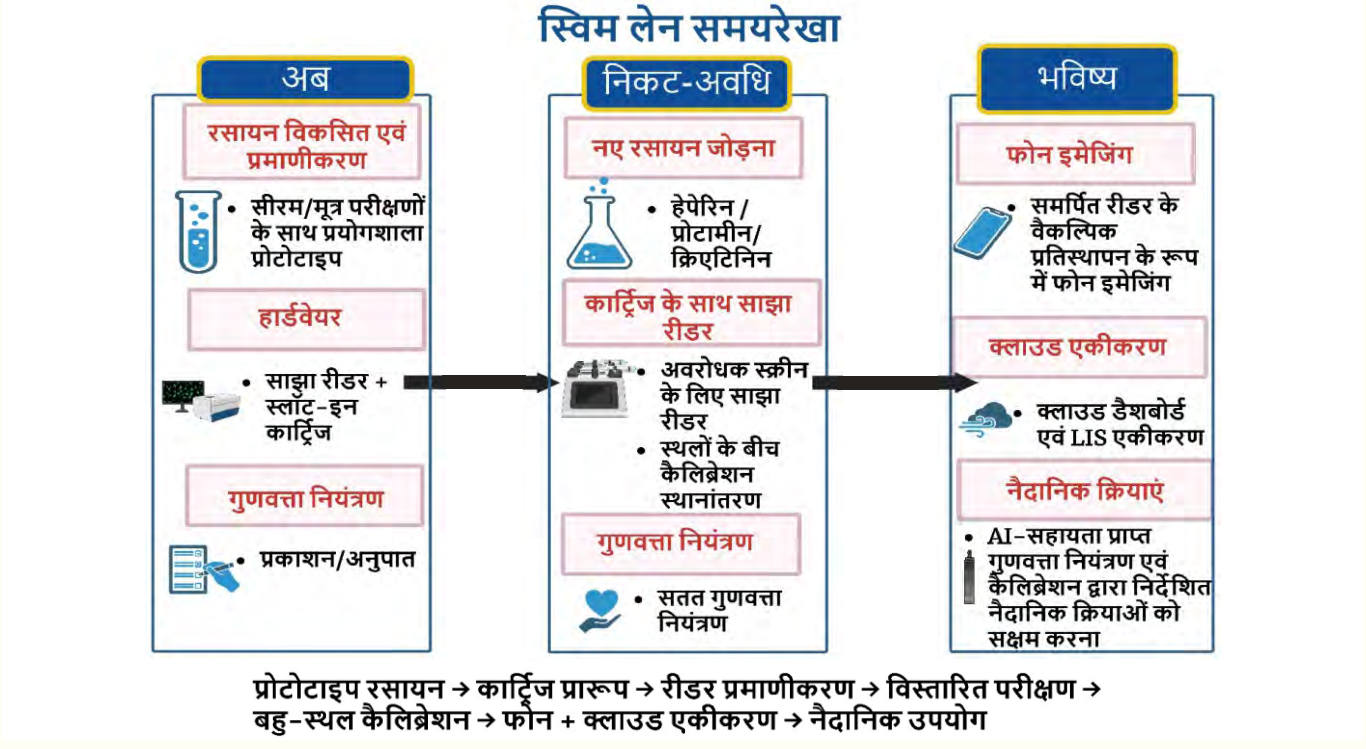
अनुसंधान से पॉइंट-ऑफ़-केयर तक: भावी संभावनाएं

प्रतिदीप्ति-आधारित ये सभी रसायनिक संवेदन (सेंसिंग) विधियाँ वास्तविक परीक्षण परिस्थितियों को ध्यान में रखकर ही विकसित की गई हैं। अब इन्हें ऐसे पैकेज के रूप में विकसित किया जाना है जिनका रोगी के निकट सरलता से उपयोग किया जा सके। इसके लिए प्राप्त परिणामों के सत्यापन हेतु अन्य चिकित्सीय सुविधाएं होना भी आवश्यक है।

कागज़ की पट्टियां (पेपर स्ट्रिप्स): एक बार ही उपयोग में आने वाली छेददार पेपर स्ट्रिप्स, जो संवेदन (सेंसिंग) में प्रयुक्त रसायन को सोख सकें और एल्ब्यूमिन, ट्रिप्सिन तथा ALP के लिए स्पष्ट रूप से "डार्क-टू-ब्राइट" संकेत दे सकें, का उपयोग किया जा सकता है। प्राप्त संकेतों को पढ़ने के लिए पोर्टेबल रीडर एवं प्रक्रिया के पूर्ण सत्यापन के बाद मोबाइल कैमरे (स्मार्टफोन) का उपयोग भी किया जा सकता है।

पोर्टेबल रीडर: एल ई डी (LED) लाइट युक्त पोर्टेबल रीडर या संहत युक्तियाँ (कॉम्पैक्ट डिवाइस) जो सेंसर से परावर्तित प्रकाश (प्रतिदीप्ति) का सटीक मापन कर हेपरिन↔प्रोटामाइन चक्र, एल्ब्यूमिन तथा क्रिएटिनिन के मात्रात्मक निर्धारण हेतु सही-सही आंकिक (संख्यात्मक) परिणाम देते हों।

स्मार्टफ़ोन उपयोग: विकसित संवेदकों से प्राप्त परिणामों को मानक प्रयोगशाला उपकरणों से सत्यापित करने के बाद, स्मार्टफ़ोन कैमरे को प्रतिबिम्बन (इमेजिंग) के लिए उपयोग में लाया जा सकता है। इसके साथ उपयुक्त स्मार्टफोन ऐप (App) के द्वारा परीक्षण का समय, ऑपरेटर की जानकारी एवं नमूने (सैंपल) का विवरण, इत्यादि रिकॉर्ड भी सटीक रूप से सुरक्षित एवं सुनिश्चित किये जा सकते हैं।



गुणवत्ता जांच हेतु कृत्रिम बुद्धिमत्ता (आर्टिफिशियल इंटेलिजेंस; AI): स्मार्टफोन अथवा निकाय (डिवाइस) पर उपलब्ध सरल एवं सामान्य AI एल्गोरिथ्म की सहायता से अनुपयुक्त प्रतिदीप्ति प्रीतिबिम्बों (छवियों) को पहचाना जा सकता है। अलग-अलग फ़ोनों पर प्राप्त प्रतिदीप्ति (प्रकाश) संकेतों के बीच के अंतर को सुधारा जा सकता है एवं नमूनों (सैम्पल्स) के विभिन्न बैचों से प्राप्त परिणामों को स्थायीकृत किया जा सकता है। AI के प्रयोग से, संवेदनशील डेटा को डिवाइस से बाहर भेजे बिना ही, मापन/निर्धारण की संवेदनशीलता और पुनरुत्पादकता को बेहतर बनाया जा सकता है।

एक पाठ्य-उपकरण (रीडर)-अनेक परीक्षण: विकसित संवेदकों के उपयोग के लिए एक ही पाठ्य-उपकरण (रीडर) का उपयोग किया जा सकता है, जिसमें समान प्रकाशीय और इलेक्ट्रॉनिक घटकों का इस्तेमाल करके विभिन्न रासायनिक क्रियाओं (एल्ब्यूमिन/ क्रिएटिनिन; हेपेरिन/ प्रोटामाइन; ALP; ट्रिप्सिन) के संवेदन हेतु लिए अलग-अलग कार्ट्रिज उपयोग में लिए जा सकें।

निष्कर्ष

प्रतिदीप्ति (फ्लोरोसेंट) संवेदन द्वारा वास्तविक जैव-नमूनों में होने वाले सूक्ष्म जैव-रसायनिक परिवर्तनों को, न्यूनतम उपकरणों की आवश्यकता के साथ, स्पष्ट और विश्वसनीय प्रतिदीप्ति (प्रकाश) संकेतों में शीघ्रता से रूपांतरित किया जा सकता है। इस तकनीक के रक्त-सीरम, प्लाज़्मा और मूत्र जैसे जैव-नमूनों में किये गए परीक्षण एवं मान्यीकरण द्वारा एवं सामान्य पाठ्य - उपकरणों (सरल रीडरों) तथा कागज़ की पट्टियों (पेपर-स्ट्रिप्स) के विकास से इस अनुसंधान को आसानी से सीधे पॉइंट-ऑफ़-केयर उपयोग तक ले जाया जा सकता है। जहां रोगी दिखाने आएं, वहां पर ही सामान्य नैदानिक आवश्यकताओं के लिए द्रुत, किफ़ायती एवं विश्वसनीय समाधान प्रदान करने की दिशा में किया जा रहा यह अनुसंधान एवं विकास, बेहतर स्वास्थ्य हेतु लक्षित है।

आभार

इस अनुसंधान कार्य को संभव करने के लिए लेखक भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र (BARC) और परमाणु ऊर्जा विभाग (DAE) से प्राप्त सतत समर्थन के लिए कृतज्ञतापूर्वक आभार व्यक्त करते हैं। यहां संक्षेपित कार्य के शोधकर्ताओं एवं सह-लेखकों का भी हार्दिक धन्यवाद ज्ञापित करते हैं।

लेखकगण का परिचय

प्रभात के. सिंह

डॉ. प्रभात के. सिंह, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के विकिरण एवं प्रकाश रसायनिकी प्रभाग (RPCD) में वैज्ञानिक अधिकारी-जी के पद पर कार्यरत हैं।

नितिन ओ. कावडे

श्री नितिन ओ. कावडे, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के विकिरण एवं प्रकाश रसायनिकी प्रभाग (RPCD) में वैज्ञानिक अधिकारी-एच के पद पर कार्यरत हैं।

यूरेनियम की यात्रा - मिट्टी से भट्टी तक

विवेकानंद झा

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

चुटकी भर यूरेनियम ऊर्जा आवश्यकताओं की पूर्ति हेतु परमाणु ऊर्जा एक श्रेष्ठ विकल्प है। जहाँ तक ऊर्जा उत्पादकता का प्रश्न है, यूरेनियम किसी भी अन्य ऊर्जा स्रोत की तुलना में अधिक ऊर्जा प्रदान करने में सक्षम है। ऊर्जा उत्पादन की दृष्टि से, नाभिकीय ईंधन के रूप में प्रयुक्त 1 ग्राम यूरेनियम धातु (^{235}U) लगभग 2500 किलोग्राम कोयले, लगभग 2560 लीटर पेट्रोलियम और लगभग 2200 घन मीटर प्राकृतिक गैस के समतुल्य है। नाभिकीय ऊर्जा न केवल ऊर्जा आवश्यकताओं की पूर्ति और ग्रीनहाउस गैसों के उत्सर्जन को कम करने में सहायक है, अपितु अन्य क्षेत्रों एवं अनुप्रयोगों में भी महत्वपूर्ण भूमिका निभा सकती है, जैसे कि स्वास्थ्य सेवाएँ, कृषि, प्रदूषण नियंत्रण, जल-प्रबंधन, अपशिष्ट पुनर्चक्रण, इत्यादि।

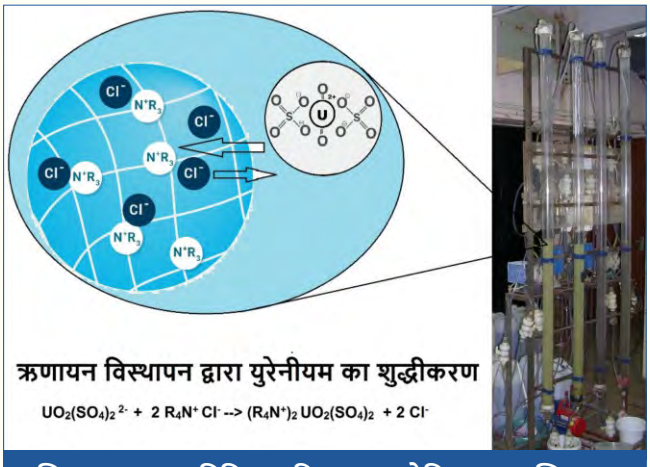
चित्र 1 - चुटकी भर यूरेनियम में निहित ऊर्जा हज़ारों किलोग्राम कोयले से प्राप्त ऊर्जा के समतुल्य है।

यूरेनियम उत्पादन प्रक्रिया - मूलतः भिन्न-भिन्न प्रकार के चट्टानों में निक्षेपित (डिपोज़िटेड) यूरेनियम, प्रकृति से निकाले जाने वाले यूरेनियम का मूल स्रोत है। यूरेनियम खनन का मूल प्रक्रिया अन्य धातुई अयस्कों की खनन प्रक्रिया के समरूप ही है। सामान्यतः खनन योग्य अयस्क को रेडियोधर्मिता (रेडियोसक्रियता) मापन द्वारा चिह्नित किया जाता है। अयस्क खंड का आकार, खदान में अयस्क खंड की अवस्थिति (लोकेशन), अभिविन्यास (ओरिएंटेशन), उपस्थित यूरेनियम एवं अन्य धातुओं की गुणवत्ता, स्थानीय परिस्थिति, इत्यादि महत्त्वपूर्ण मापदंड उपयुक्त खनन तकनीक के निर्धारण में सहायक होते हैं। वास्तविक प्रक्रिया अयस्क की भूगर्भीय स्थिति द्वारा निर्धारित की जाती है। यह मुख्यतः सतही (ओपन-पिट) या भूमिगत (अंडरग्राउंड) खनन हो सकता है। अयस्क में यूरेनियम की मात्रा (सांद्रता) कम होने की स्थिति में सतही खनन आर्थिक दृष्टि से अधिक लाभप्रद होता है। खनन द्वारा प्राप्त अयस्क को उपयुक्त तकनीक जैसे कि कंवेयर बेल्ट, इत्यादि द्वारा प्रसंस्करण इकाई तक पहुँचाया जाता है। अयस्क को यांत्रिक प्रक्रियाओं जिसमें क्रशिंग, ग्राइंडिंग, स्क्रीनिंग, इत्यादि शामिल हैं, द्वारा लघु आकार में रूपांतरित किया जाता है।

क्रशिंग एवं ग्राइंडिंग, इत्यादि प्रक्रियाओं द्वारा बड़े आकार

चित्र 2 - भूमिगत प्रक्रिया पर आधारित यूरेनियम खनन

के अयस्क पत्थरों / टुकड़ों को चूर्ण में परिवर्तित करने का उद्देश्य यही है कि अगले चरण अर्थात रसायनिक निक्षालन (लीचिंग) अभिक्रिया के लिए चूर्ण का पृष्ठीय क्षेत्र बढ़ जाए ताकि अयस्क (ठोस-अवस्था) में निहित यूरेनियम जलीय माध्यम में पूर्ण रूप से स्थानांतरित हो सके। खनन की अन्य प्रक्रियाओं में स्वस्थाने-निक्षालन (इन-सीटू लीचिंग), पुंज-निक्षालन (हीप-लीचिंग), अन्य धातुओं जैसे सोना, ताम्बा, इत्यादि के अतिरिक्त उत्पाद के रूप में यूरेनियम की प्राप्ति शामिल है। अयस्क की प्रकृति के हिसाब से निक्षालन (लीचिंग) प्रक्रिया अम्लीय (एसिडिक) या क्षारीय (ऐल्कलाइन) हो सकती है। प्रक्रिया के अगले चरणों में निस्यंदन (फिल्ट्रेशन), शुद्धिकरण, अवक्षेपण (प्रेसिपीटेशन), इत्यादि शामिल होते हैं। प्राप्त यूरेनियम का शुद्धिकरण आयन विनिमय (आयन एक्सचेंज) प्रक्रिया द्वारा किया जाता है।



चित्र 3 - ऋणायन विनिमय प्रक्रिया द्वारा यूरेनियम का शुद्धिकरण

इस प्रकार प्राप्त सांद्रित (कंसन्ट्रेटेड) यूरेनियम उत्पाद को विशेष रसायनिक यौगिक जैसे कि मैग्नीशियम डाईयुरेनेट, सोडियम डाईयुरेनेट, अमोनियम डाईयुरेनेट, यूरेनियम परऑक्साइड, आदि, जिन्हें सामान्यतः **'येलो केक'** कहा जाता है, के रूप में प्राप्त किया जाता है।

नाभिकीय ईंधन बनाने के लिए, 'येलो केक' उत्पाद को ईंधन संविचरन सुविधाओं, जैसे कि तेलंगाना राज्य के हैदराबाद स्थित नाभिकीय ईंधन सम्मिश्र (न्यूक्लियर फ्यूल कॉम्प्लेक्स), में सबसे पहले यूरेनियम ऑक्साइड के रूप में परिवर्तित किया जाता है। तत्पश्चात, चूर्ण धातुकी (पाउडर मेटलर्जी) प्रक्रिया से उसकी सघन गुटिकाएं (पेलेट) बनायी जाती हैं। मिट्टी से निकला यूरेनियम, इन ईंधन गुटिकाओं (फ्यूल पेलेट) के रूप में अब परमाणु भट्टी में विखंडन (फिशन) के द्वारा नाभिकीय ऊर्जा प्रदान करता है।

खदान से ईंधन तक यूरेनियम की यात्रा में कार्मिक संरक्षा - परमाणु ऊर्जा का उपयोग ऊर्जा उत्पादन से लेकर राष्ट्रीय सुरक्षा के लिए भी आवश्यक है। इस क्षेत्र में कार्यरत कर्मियों की स्वास्थ्य संरक्षा भी अत्यावश्यक है जिसका पूरा ध्यान रखा जाता है। मिट्टी (अयस्क) से भट्टी (परमाणु संयंत्र) तक की यूरेनियम की इस लंबी और जटिल यात्रा में हज़ारों मज़दूर, तकनीशियन, वैज्ञानिक, इंजिनियर (अभियंता), आदि कार्यरत रहते हैं। खदान से प्रारम्भ करके, ईंधन के उपयोग और तत्पश्चात ईंधन पुनर्संस्करण (फ्यूल रीप्रोसेसिंग) तक यूरेनियम की पूरी यात्रा में स्वास्थ्य भौतिकविदों (हेल्थ फ़िजिसिस्ट) की अति-महत्वपूर्ण और अनूठी भूमिका होती है। वे पर्यावरण और कार्यस्थल दोनों में ही विकिरण स्तरों की सतत निगरानी सुनिश्चित करते हैं और साथ ही साथ यूरेनियम एवं अन्य रेडियोधर्मी (रेडियोसक्रिय) पदार्थों के प्रहस्तन (हैंडलिंग) में लगे सभी कर्मियों एवं उपकरणों की समय-समय पर जांच / सर्वेक्षण करके सुरक्षित संचालन सुनिश्चित करते हैं। विभिन्न प्रकार के विकिरण संवेदकों (सेंसर्स) एवं संसूचकों (डिटेक्टर्स) की इस कार्य में महत्त्वपूर्ण भूमिका है।

चित्र 4 - 'येलो केक' के रूप में प्राप्त यूरेनियम उत्पाद

चित्र 5 - पर्यावरणीय विकिरण संसूचक

यूरेनियम और उसकी यात्रा के बारे में और अधिक जानकारी के लिए, पाठक मुंबई के 'नेहरू विज्ञान केंद्र' में प्रदर्शित 'परमाणु ऊर्जा हॉल (हॉल ऑफ न्यूक्लियर पावर)' अवश्य देखें।

लेखक का परिचय

विवेकानंद झा

डॉ. विवेकानंद झा, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के स्वास्थ्य भौतिकी प्रभाग (HPD) में वैज्ञानिक अधिकारी-एफ के पद पर कार्यरत हैं।

चित्र 6 - 'नेहरू विज्ञान केंद्र, मुंबई' का 'परमाणु ऊर्जा हॉल (हॉल ऑफ न्यूक्लियर पावर)'

विकिरण : असीम संभावनाओं के खुलते द्वार

डरें नहीं, समझें विज्ञान और करें विश्वास

विनय जैन और दीपक शर्मा

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

लोक व्यवहार में, " विकिरण" शब्द सुनते ही अधिकांश लोगों के मन में डर का भाव उत्पन्न हो जाता है, परंतु वास्तविकता इससे कोसों दूर है। विकिरण उतना ही स्वाभाविक है जितना कि सूरज की रोशनी या हवा। यह कोई नई या कृत्रिम चीज़ नहीं है जिसे हाल ही में मानव ने बनाया हो। यह ब्रह्मांड की उत्पत्ति से ही मौजूद है, और पृथ्वी पर जीवन ने इसके बीच ही अपना विकास किया है। सूरज की रोशनी, धरती की चट्टानों में मौजूद रेडियोधर्मी (रेडियोसक्रिय) तत्व और हमारे शरीर में मौजूद पोटेशियम-40 जैसे तत्व इस बात का प्रमाण हैं कि विकिरण हमारे जीवन का एक स्वाभाविक हिस्सा है।

दुनिया भर में लोग औसतन 2.4 मिलीसीवर्ट (mSv) प्रति वर्ष प्राकृतिक विकिरण के संपर्क में आते हैं। यह विकिरण मुख्यतः चार स्रोतों से आता है:

क्रम	विकिरण के प्रकार	विकिरण स्रोत
1.	कॉस्मिक किरणें	अंतरिक्ष से आने वाली किरणें
2.	स्थलीय विकिरण	पृथ्वी की चट्टानों में मौजूद यूरेनियम और थोरियम से
3.	आंतरिक विकिरण	हमारे शरीर में मौजूद पोटैशियम-40 जैसे रेडियोन्यूक्लाइड्स से
4.	रेडॉन गैस	जो जमीन से निकलती है और घरों में प्रवेश करती है

प्राकृतिक विकिरण के ये स्रोत पृष्ठभूमि विकिरण कहलाते हैं। दुनिया के कुछ हिस्सों में, यह पृष्ठभूमि विकिरण सामान्य से कई गुना अधिक है। ऐसे क्षेत्रों को **उच्च स्तर वाले प्राकृतिक विकिरण क्षेत्र** कहा जाता है। प्रमुख **उच्च स्तर वाले प्राकृतिक विकिरण** क्षेत्रों में शामिल हैं:

- रामसर, ईरान – कुछ जगहों पर 10 mSv से 260 mSv/वर्ष तक
- यांगजियांग, चीन – 3–5 mSv/वर्ष
- गुआरापारी, ब्राज़ील – 1–20 mSv/वर्ष
- केरल, भारत के कुछ तटवर्ती क्षेत्र– विशेष रूप से चवारा और नींदकारा, जहाँ विकिरण स्तर 70 mSv/वर्ष तक पहुँचते हैं

तो फिर सवाल उठता है - क्या इन इलाकों में रहने वाले लोग ज्यादा बीमार पड़ते हैं? क्या उनके बच्चों में आनुवंशिक विकार होते हैं? वैज्ञानिक उत्तर है: " नहीं " ।

विकिरण को लेकर आम भय और उसे चुनौती देती वैज्ञानिक सच्चाइयाँ

लोगों में विकिरण का डर इतिहास की घटनाओं से उपजा है जैसे हिरोशिमा और नागासाकी पर परमाणु बम विस्फोट, चेरनोबिल (1986) और फुकुशिमा (2011) जैसी घटनाएँ। लेकिन क्या ये घटनाएँ हमारे रोज़मर्रा की कम मात्रा वाली विकिरण से मेल खाती हैं?

चेरनोबिल, फुकुशिमा और परमाणु बम पीड़ितों से सीखा गया पाठ

चेरनोबिल और फुकुशिमा: डर की समीक्षा

चेरनोबिल (1986) और फुकुशिमा (2011) की परमाणु दुर्घटनाएं गंभीर ज़रूर थीं, लेकिन इनके बारे में आम धारणा

अक्सर अतिरंजित (अतिश्योक्ति) होती है। चेरनोबिल दुर्घटना में अधिकांश मौतें विस्फोट और आग से हुई थीं, न कि विकिरण से। दीर्घकालिक बीमारियों की घटनाएं भी अपेक्षाकृत कम रहीं। केवल कुछ बच्चों में थायरॉइड कैंसर की वृद्धि देखी गई, जिनका संपर्क उच्च मात्रा में आयोडीन-131 से हुआ था, लेकिन अन्य प्रकार के कैंसर या ल्यूकेमिया (रक्त कैंसर) में कोई उल्लेखनीय वृद्धि नहीं हुई। बच्चों में कोई आनुवंशिक दोष भी नहीं पाया गया। शोध पत्रिका Science (2021) में प्रकाशित लेख (Yeager et al.) के अध्ययन ने यह दर्शाया कि चेरनोबिल सफाइकर्मियों की संतान में कोई नया आनुवंशिक उत्परिवर्तन नहीं देखा गया। दूसरी ओर, फुकुशिमा दुर्घटना में किसी की भी मृत्यु विकिरण से नहीं हुई। विश्व स्वास्थ्य संगठन (WHO) और संयुक्त राष्ट्र परमाणु विकिरण के प्रभावों पर वैज्ञानिक समिति (UNSCEAR) जैसी अंतरराष्ट्रीय संस्थाओं की रिपोर्टों के अनुसार, वहाँ की अधिकांश जनसंख्या को इतनी कम विकिरण खुराक मिली कि उससे कोई दीर्घकालिक स्वास्थ्य प्रभाव नहीं पाया गया। ये तथ्य स्पष्ट करते हैं कि ऐसी घटनाओं से भयभीत होने के बजाय वैज्ञानिक समझ अपनाने की आवश्यकता है।

परमाणु बम पीड़ितों का अध्ययन: सबसे बड़ा दीर्घकालिक साक्ष्य

इसी तरह, जापान के हिरोशिमा और नागासाकी में परमाणु बमबारी के बाद 1,20,000 से अधिक जीवित बचे लोगों पर विकिरण प्रभाव अनुसंधान प्रतिष्ठान (Radiation Effects Research Foundation – RERF) द्वारा 70 वर्षों तक किए गए अध्ययन (Life Span Study) से यह सामने आया कि कम खुराक वाली विकिरण से कैंसर जैसी बीमारियों का खतरा नहीं बढ़ता। इसके अतिरिक्त, पीड़ितों की संतानों में कोई विरासत में मिले आनुवंशिक परिवर्तन नहीं पाए गए। ये निष्कर्ष इस बात को बल देते हैं कि सामान्य जीवन में मिलने वाली कम खुराक वाली विकिरण (Low Dose Radiation – LDIR) न केवल सुरक्षित है, बल्कि इसे लेकर फैली आशंकाएं भी वैज्ञानिक तथ्यों पर आधारित नहीं हैं। ये अध्ययन आज भी वैज्ञानिकों के लिए Low Dose Radiation (LDIR) को समझने का आधार हैं।

भारत का अनोखा उदाहरण – केरल के उच्च स्तर वाले प्राकृतिक विकिरण क्षेत्र (HLNRA)

भारत में विकिरण का अध्ययन वैश्विक स्तर पर एक उदाहरण बन चुका है। केरल के कोल्लम ज़िले में चवारा-नींदकारा क्षेत्र में उच्च स्तर वाले प्राकृतिक विकिरण क्षेत्र (HLNRA) स्थित है। यहां की रेत में थोरियम समृद्ध मोनाज़ाइट होती है। इन क्षेत्रों में रहने वाले लोग लगातार दीर्घकालिक उच्च प्राकृतिक पृष्ठभूमि विकिरण के संपर्क में रहते हैं, जिसकी खुराक लगभग 1 mGy से 70 mGy प्रति वर्ष तक होती है। इसी कारण इसे प्रकृति की अपनी प्रयोगशाला (Nature's own laboratory) माना जाता है।

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के निम्न स्तरीय विकिरण अनुसंधान अनुभाग ने पिछले चार दशकों से केरल के उच्च प्राकृतिक विकिरण क्षेत्रों में विस्तृत अध्ययन किया है।

अध्ययनों के अनुसार:

- कुछ क्षेत्रों में प्राकृतिक पृष्ठभूमिक (Background) विकिरण स्तर 70 mGy/वर्ष तक है, जो कि विश्व औसत (~2.4 mSv/वर्ष) से कई गुना अधिक है।
- यहां किए गए अध्ययन में 2 लाख से अधिक नवजात शिशुओं और 4 लाख माता-पिता को शामिल किया गया। इसमें पाया गया कि जन्म दोष या आनुवंशिक विकार नहीं बढ़े – जन्मजात विकृतियाँ, मृत जन्म और लिंग अनुपात जैसे कारकों में कोई अंतर नहीं मिला।
- इन क्षेत्रों की जनसंख्या में किसी भी प्रकार की कैंसर वृद्धि की दर नहीं देखी गई है। बीते कई दशकों में एक लाख से अधिक लोगों पर किए गए अध्ययन में उच्च स्तर वाले प्राकृतिक विकिरण और सामान्य क्षेत्रों के बीच कैंसर के मामलों में कोई उल्लेखनीय अंतर नहीं पाया गया।

- कोई अतिरिक्त आनुवंशिक क्षति नहीं – कोशिकीय स्तर पर माइक्रोन्यूक्लियस और क्रोमोसोमल परिवर्तन जैसे परीक्षणों में कोई नकारात्मक प्रभाव नहीं मिला।
- परिणाम बताते हैं कि DNA क्षति, कैंसर दरें, या जन्म दोष की दरें सामान्य से अधिक नहीं हैं - बल्कि कुछ मामलों में DNA रिपेयर क्षमता बेहतर पाई गई है।

अध्ययनों से स्पष्ट है कि चाहे विकिरण तीव्र (Acute) रूप में मिले या दीर्घकालिक (Chronic) रूप में, कम खुराक पर यह मानव स्वास्थ्य के लिए हानिकारक नहीं है। केरल, ईरान के रामसर और चीन के यांगजियांग जैसे उच्च प्राकृतिक विकिरण क्षेत्रों में रहने वाली जनसंख्या पूरी तरह स्वस्थ पाई गई है, जहाँ उनके जीवनकाल, प्रजनन क्षमता या आनुवंशिक स्वास्थ्य पर कोई नकारात्मक प्रभाव नहीं देखा गया। वहीं, परमाणु ऊर्जा संयंत्रों के आसपास रहने वाले लोगों को मिलने वाली विकिरण खुराक इन क्षेत्रों की तुलना में लगभग 1000 गुना कम होती है। इसलिए परमाणु ऊर्जा और उससे जुड़े विकिरण को लेकर डरने की कोई आवश्यकता नहीं है।.

हमारे जीवन में विकिरण तकनीकों की उपयोगिता

विकिरण तकनीकें आज हमारे जीवन का ऐसा हिस्सा बन चुकी हैं, जो चुपचाप हमारे स्वास्थ्य और सुविधाओं को बेहतर बना रही हैं। चिकित्सा क्षेत्र में विकिरण का उपयोग एक्स-रे, सीटी स्कैन, कैंसर की रेडियोथेरेपी जैसी जांचों और इलाजों में होता है, जिससे गंभीर बीमारियों का समय पर पता लगाकर जीवन बचाया जा सकता है। आज लाखों कैंसर रोगियों को रेडियोथेरेपी से नया जीवन मिल रहा है। खाद्य संरक्षण में विकिरण का प्रयोग करके अनाज, मसाले और फल-सब्जियों को कीटाणु मुक्त और अधिक समय तक सुरक्षित रखा जाता है, जिससे खाने की बर्बादी कम होती है। कृषि में इसका उपयोग बीजों को बेहतर बनाने, फसलों की उन्नत किस्में बनाने और कीट नियंत्रण के लिए किया जाता है। उद्योगों में भी विकिरण तकनीक से पाइपलाइन और मशीनों की गुणवत्ता जांची जाती है, जिससे निर्माण की विश्वसनीयता बढ़ती है।

जनमानस में बदलाव की आवश्यकता

अब समय आ गया है कि हम विकिरण को केवल डर और खतरे की नजर से देखना बंद करें। आज की वैज्ञानिक समझ इस बात को स्पष्ट करती है कि कम स्तर की विकिरण खुराकों के हानिकारक प्रभावों के कोई ठोस प्रमाण नहीं हैं। अंतरराष्ट्रीय वैज्ञानिक संस्थाएं जैसे UNSCEAR भी इस निष्कर्ष की पुष्टि कर चुकी है। वास्तव में, अब यह धारणा उभर रही है कि सीमित मात्रा में विकिरण शरीर की प्रतिरक्षा प्रणाली को सक्रिय कर सकती है और डीएनए मरम्मत जैसे जैविक तंत्रों को बेहतर बनाने में सहायक हो सकती है।

भारत के केरल तटवर्ती क्षेत्रों और दुनिया के अन्य हिस्सों जैसे ईरान, ब्राज़ील और चीन में लाखों लोग दशकों से प्राकृतिक रूप से अधिक विकिरण वाले वातावरण में रह रहे हैं - बिना किसी उल्लेखनीय स्वास्थ्य प्रभाव के। वैज्ञानिकों द्वारा इन क्षेत्रों में किए गए दीर्घकालिक अध्ययन यह दर्शाते हैं कि विकिरण को लेकर आम धारणा में जो भय व्याप्त है, वह वैज्ञानिक तथ्यों की तुलना में कहीं अधिक भावनात्मक और काल्पनिक है।

समाज में विकिरण को लेकर फैले डर और भ्रांतियों को दूर करना अब अनिवार्य हो गया है। हमें यह समझने की आवश्यकता है कि विज्ञान और तकनीकी ने विकिरण को एक बहुमूल्य संसाधन में बदल दिया है - वह अब केवल खतरा नहीं बल्कि अनेक संभावनाओं का द्वार है। स्वास्थ्य देखभाल में कैंसर की पहचान और इलाज से लेकर कृषि में फसल की गुणवत्ता सुधारने, खाद्य संरक्षण में शुद्धता बनाए रखने, और ऊर्जा उत्पादन में हरित ऊर्जा समाधान तक - विकिरण तकनीक ने हर क्षेत्र में क्रांति ला दी है।

जनता को अब पुराने डर और गलत धारणाओं से बाहर निकलने की आवश्यकता है। केवल आशंकाओं के आधार पर किसी तकनीक को खारिज कर देना तर्कसंगत नहीं है, विशेष रूप से तब जब वही तकनीक भविष्य में भारत की ऊर्जा आत्मनिर्भरता, खाद्य सुरक्षा और आधुनिक चिकित्सा की रीढ़ बनने जा रही है। आज आवश्यकता है वैज्ञानिक दृष्टिकोण अपनाने की, सही जानकारी फैलाने की, और

समाज में यह सोच विकसित करने की कि हर तकनीक का मूल्यांकन तथ्यों और शोध के आधार पर होना चाहिए - डर और अंधविश्वास के आधार पर नहीं। विकिरण को समझने और अपनाने का यही सही समय है - एक नए दृष्टिकोण के साथ, जो भय नहीं बल्कि समझ, विज्ञान और संभावनाओं पर आधारित हो। आज जरूरत है कि हम जनता के बीच सही जानकारी पहुंचाएं और नीति-निर्माण में वैज्ञानिक प्रमाणों को महत्व दें।

भविष्य की संभावनाएँ

अगर हम विकिरण तकनीकों को समझदारी से अपनाएं, तो भविष्य में यह न केवल स्वास्थ्य सेवाओं में क्रांति लाएंगी बल्कि जल शुद्धिकरण, स्मार्ट कृषि, ऊर्जा उत्पादन और पर्यावरणीय सुधारों में भी अहम भूमिका निभाएंगी। आने वाले वर्षों में विकिरण तकनीकों का इस्तेमाल कैंसर जैसी बीमारियों के ज्यादा प्रभावी इलाज, पर्यावरण प्रदूषण को कम करने और यहां तक कि अंतरिक्ष अन्वेषण जैसे क्षेत्रों में भी बढ़ेगा। रेडियोआइसोटोप्स का उपयोग नए तरह की व्यक्तिगत चिकित्सा (personalized therapy) में किया जा रहा है जो कैंसर के इलाज को और भी प्रभावी बना सकता है। आज जब भारत "नेट ज़ीरो कार्बन उत्सर्जन" का लक्ष्य लेकर चल रहा है, तो परमाणु ऊर्जा जैसी स्वच्छ और हरित ऊर्जा के लिए विकिरण तकनीकें बेहद जरूरी हैं। इसलिए अब हमें विकिरण से डरने की बजाय, इसकी उपयोगिता को समझते हुए इसे विकास और बेहतर जीवन के लिए अपनाना चाहिए।

जनता को संदेश: डरें नहीं, विज्ञान और परमाणु ऊर्जा से जुड़ें

विकिरण अब भय का विषय नहीं, बल्कि संभावनाओं का द्वार है। आज यह तकनीक केवल स्वास्थ्य, कृषि और उद्योग को ही नहीं, बल्कि सुरक्षित और स्वच्छ ऊर्जा के सबसे बड़े स्रोत – नाभिकीय ऊर्जा (न्यूक्लियर पावर) – का आधार भी है। यह ऊर्जा न केवल देश की ऊर्जा आत्मनिर्भरता सुनिश्चित करती है,बल्कि पर्यावरण संरक्षण और कार्बन उत्सर्जन में कमी के लिए भी अत्यंत महत्वपूर्ण है। अब समय आ गया है कि हम विकिरण और परमाणु ऊर्जा को डर की दृष्टि से नहीं, बल्कि एक मित्र और सहयोगी के रूप में देखें—जो विज्ञान की रोशनी से हमारे जीवन में उजाला और हमारे भविष्य में स्थिरता ला रहा है।

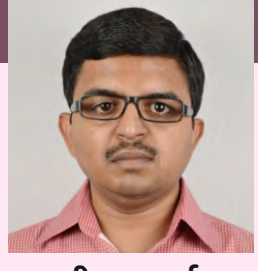
आभार

लेखकगण, इस लेख की सरंचना में प्रत्यक्ष एवं परोक्ष रूप से सहयोग एवं मार्गदर्शन देने वाले सभी व्यक्तियों विशेषकर डॉ. संतोष कुमार संदुर, अध्यक्ष, विकिरण जैविकी एवं स्वास्थ्य विज्ञान प्रभाग, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के प्रति हार्दिक आभार प्रकट करते हैं। प्रस्तुत जानकारी में प्रयुक्त पुस्तकों, लेखों और ऑनलाइन संसाधनों के लेखकों का भी हम आभार व्यक्त करते हैं।

लेखकगण का परिचय

विनय जैन

डॉ. विनय जैन, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के विकिरण जैविकी एवं स्वास्थ्य विज्ञान प्रभाग (RB&HSD) में वैज्ञानिक अधिकारी-एफ के पद पर कार्यरत हैं।



दीपक शर्मा

डॉ. दीपक शर्मा, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के विकिरण जैविकी एवं स्वास्थ्य विज्ञान प्रभाग (RB&HSD) में वैज्ञानिक अधिकारी-एच के पद पर कार्यरत हैं।

EXAFS - पदार्थों की दुनिया को समझने का अनोखा अंदाज़

अशोक कुमार यादव

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

क्या आपने कभी सोचा है कि जो पदार्थ हम आँखों से देखते हैं, उनके मूल घटक जैसे कि अणु, परमाणु, आयन, इत्यादि कैसे व्यवस्थित रहते हैं? वैज्ञानिक कैसे किसी पदार्थ की संरचना को देखते हैं? आंखों से या सामान्य सूक्ष्मदर्शी से तो परमाणु दिखाई नहीं देते। फिर कैसे हमें उनका ज्ञान होता है? इसका जवाब है एक विशेष तकनीक, एक्स-रे (एक्स-किरण) ! हाँ, बिल्कुल वैसे ही जैसे हम चिकित्सा हेतु अपने शरीर के अंगों का एक्स-रे करवाते हैं। उसी प्रकार पदार्थों को भी अणु/परमाणु स्तर पर एक्स-रे की सहायता से देखा जा सकता है, बशर्ते कि प्रयुक्त एक्स-रे की तरंगदैर्ध्य परमाणुओं के बीच की दूरी के समतुल्य होनी चाहिए।

जिस तकनीक द्वारा किसी क्रिस्टल जालक को देखा जाता है, ठीक वैसे ही जैसे मानव शरीर के कंकाल को देखा जाता है, तथा जिसमें परमाणुओं की त्रिविमीय स्थिति दीर्घ-परास क्रम (लांग रेंज आर्डर) में ज्ञात की जाती है, उसे एक्स-रे विवर्तन (एक्स-रे डिफ्रैक्शन) तकनीक कहते हैं। यह तकनीक संपूर्ण क्रिस्टल में परमाणुओं की व्यवस्थित संरचना को समझने में सहायक होती है। परन्तु कभी-कभी केवल संपूर्ण क्रिस्टल की जानकारी ही पर्याप्त नहीं होती, बल्कि किसी विशेष परमाणु के आस-पास के वातावरण की जानकारी भी आवश्यक होती है। इसी आवश्यकता को पूरा करने वाली तकनीक का नाम है EXAFS ('एक्सटेंडेड एक्स-रे अब्सॉर्प्शन फाइन स्ट्रक्चर' अथवा 'Extended X-ray Absorption Fine Structure') जिसे 'विस्तारित एक्स-रे अवशोषण सूक्ष्म संरचना' तकनीक भी कहा जाता है।

जहाँ एक्स-रे विवर्तन संपूर्ण क्रिस्टल की दीर्घ-परास संरचना बताती है, वहीं EXAFS द्वारा किसी विशेष परमाणु के चारों ओर के स्थानीय परिवेश का अध्ययन किया जाता है। यह तकनीक वैज्ञानिकों को यह समझने में सहायता करती है कि पदार्थ में किसी परमाणु के निकटतम कौन-कौन से परमाणु हैं, वे कितनी दूरी पर स्थित हैं, तथा उनकी व्यवस्था कितनी नियमित या अनियमित है।

जब हम किसी पदार्थ पर एक्स-रे डालते हैं, तो वह एक्स-रे उस पदार्थ के भीतर प्रवेश कर परमाणुओं से अन्योन्य क्रिया करती है। यदि आपतित एक्स-रे की ऊर्जा परमाणुओं के आंतरिक कक्षक में उपस्थित इलेक्ट्रॉन की बंधन ऊर्जा से अधिक हो, तो वह उस इलेक्ट्रॉन को परमाणु से बाहर निकाल सकती है। उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन, एक तरंग के समान व्यवहार करता है। यह इलेक्ट्रॉन-तरंग जांचित परमाणु के आसपास उपस्थित परमाणुओं से परावर्तित होती है। उत्सर्जित इलेक्ट्रॉन-तरंग और परावर्तित इलेक्ट्रॉन-तरंग के मध्य होने वाले व्यतिकरण के परिणामस्वरूप एक्स-रे अवशोषण सूचकांक में विशेष प्रकार के दोलन (ऑसिलेशन) उत्पन्न होते हैं, जिन्हें EXAFS कहा जाता है। इन्हीं दोलनों के विश्लेषण से वैज्ञानिक किसी परमाणु के चारों ओर उपस्थित परमाणुओं के प्रकार, संख्या, दूरी तथा नियमितता का अध्ययन करते हैं।

EXAFS हेतु प्रयुक्त उपकरण एवं इससे प्राप्त जानकारियां

EXAFS प्रयोगों के लिए अत्यधिक तीव्र, सतत एवं नियंत्रित एक्स-रे विकिरण की आवश्यकता होती है। ये आवश्यकताएं प्रयोगशालाओं में उपयोग आने वाले परंपरागत एक्स-रे स्रोतों से पूरी नहीं की जा सकती, क्योंकि

चित्र - 1 (अ) इंडस सिंक्रोट्रॉन त्वरक परिसर, (ब) इंडस त्वरक मशीन का एक दृश्य, (स) प्रायोगिक हॉल, (द) विभिन्न वैज्ञानिक अनुप्रयोगों में प्रयुक्त कणपुंज रेखाओं (बीमलाइनों) का योजनावत दृश्य (चित्र सौजन्य: राजा रामन्ना प्रगत प्रौद्योगिकी केंद्र, इंदौर)

उनसे उत्सर्जित एक्स-रे विशिष्ट तरंगदैर्घ्य की और अपेक्षाकृत कम तीव्रता की होती हैं। अतः EXAFS मापन के लिए वैज्ञानिक सिंक्रोट्रॉन विकिरण स्रोत का उपयोग करते हैं। सिंक्रोट्रॉन एक विशाल वैज्ञानिक त्वरक (एक्सिलिरेटर) है, जिसमें इलेक्ट्रॉनों को लगभग प्रकाश की गति के निकट तक त्वरित किया जाता है और उन्हें वृत्ताकार पथ में उच्च तीव्रता वाले चुम्बकीय क्षेत्र द्वारा पथ से विचलित किया जाता है। त्वरित या विचलित होते इलेक्ट्रॉन अत्यंत तीव्र विद्युतचुम्बकीय विकिरण (जैसे कि एक्स-रे) उत्सर्जित करते हैं। इंडस-2, भारत की एक ऐसी सिंक्रोट्रॉन सुविधा है जो परमाणु ऊर्जा विभाग के संस्थान, राजा रामन्ना प्रगत प्रौद्योगिकी केंद्र, इंदौर (चित्र-1) में स्थित है।

विशेष रूप से अभिकल्पित की गई बीमलाइनों, जिनमें सिंक्रोट्रॉन विकिरण की ऊर्जा को सतत परिवर्तन करने की क्षमता होती है, के उपयोग से EXAFS मापन किए जा सकते हैं। इंडस में EXAFS प्रयोगों के लिए समर्पित दो बीमलाइनें, बीएल-08 और बीएल-09, उपलब्ध हैं।

EXAFS मापन की प्रक्रिया कई क्रमबद्ध चरणों में संपन्न होती है। सबसे पहले अध्ययन हेतु विशिष्ट तत्व का चयन

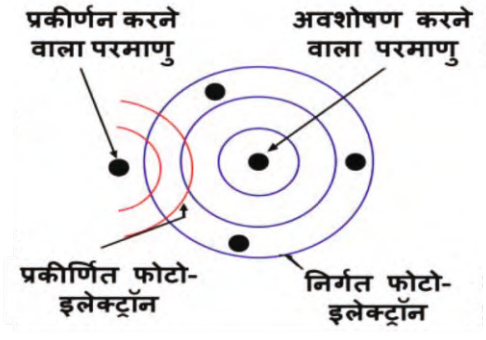
चित्र-2 इंडस-2 सिंक्रोट्रॉन स्रोत पर स्थित दो EXAFS बीमलाइनें

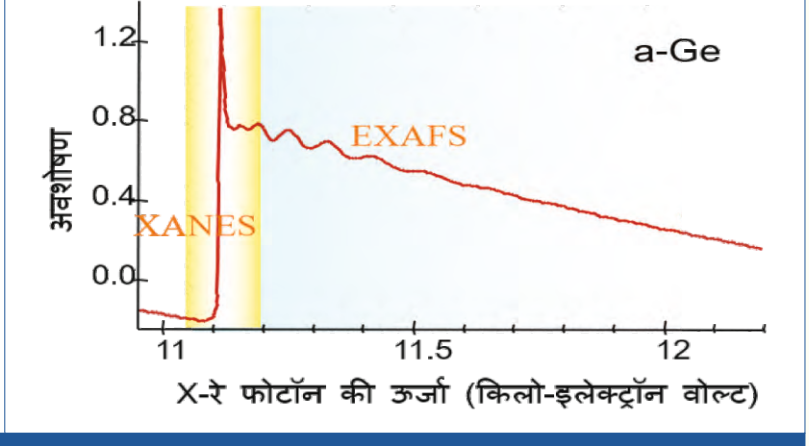
किया जाता है, क्योंकि EXAFS संकेत सीधे उस तत्व की अवशोषण-धार (अब्सॉर्प्शन-एड्ज) से संबंधित होता है। इसके पश्चात पदार्थ के नमूने (सैंपल) पर उपयुक्त ऊर्जा की एक्स-रे किरणें प्रविष्ट कराई जाती हैं, जिससे आंतरिक कक्षक से इलेक्ट्रॉनों का उत्सर्जन होता है। इस प्रक्रिया के दौरान प्राप्त एक्स-रे अवशोषण तीव्रता को बदलती एक्स-रे ऊर्जा के साथ रिकॉर्ड किया जाता है। प्राप्त आंकड़ों (डेटा) में उपस्थित सूक्ष्म दोलनों (ऑसिलेशन) का अवलोकन कर पदार्थ की संरचना का प्रारंभिक अनुमान लगाया जाता है। अंततः इन दोलनों का विस्तृत कंप्यूटरीकृत विश्लेषण करके निकटतम परमाणुओं के प्रकार, उनकी संख्या, जांचित परमाणु से बंध-दूरी तथा पदार्थ की स्थानीय संरचनात्मक व्यवस्थितता के बारे में सटीक जानकारी प्राप्त की जाती है।

EXAFS से ठीक पहले जो हिस्सा आता है, उसे XANES (एक्स-रे अब्सॉर्प्शन नियर एड्ज स्ट्रक्चर' या 'X-ray Absorption Near Edge Structure') कहा जाता है, जो तत्व की ऑक्सीकरण अवस्था के बारे में जानकारी देता है। विशेष EXAFS तकनीकों में, समय के साथ हो रहे परिवर्तनों का अध्ययन करने के लिए समय-समाधानित (टाइम-रिसॉल्वड) EXAFS का उपयोग प्रचलन में है। EXAFS डेटा में पाए जाने वाले दोलनों को कंप्यूटर प्रोग्राम की मदद से वास्तविक परमाण्विक दूरियों में रूपांतरित किया जाता है, जिसके लिए 'फूरियर रूपांतरण (फूरियर ट्रासंफॉर्मशन) जैसी गणितीय विधियों का उपयोग किया जाता है।

EXAFS के अनुप्रयोग

EXAFS तकनीक का उपयोग वैज्ञानिक और औद्योगिक क्षेत्रों में व्यापक रूप से किया जाता है। रसायनिक उत्प्रेरकों के सक्रिय स्थलों और उनकी संरचना को परमाण्वीय-स्तर पर समझने में इससे मदद मिलती है, जिससे अधिक दक्षता युक्त उत्प्रेरकों का विकास किया जा सकता है। पर्यावरण विज्ञान में इस तकनीक का प्रयोग पानी, मिट्टी और वायु में उपस्थित धात्विक प्रदूषकों के रसायनिक रूप और वितरण





चित्र-3 (बाएँ) EXAFS का सरल वर्णन, (दाएँ) माप से प्राप्त सामान्य वर्णक्रम (स्पेक्ट्रम)

को समझने के लिए किया जाता है। ऊर्जा भंडारण प्रणालियों, जैसे लिथियम-आयन बैटरियों और अति-संधारणीय संधारित्रों (सुपर कैपेसिटर्स) के लिए, यह तकनीक इलेक्ट्रोड के रूप में प्रयुक्त पदार्थों के आवेशन-निस्सरण (चार्ज–डिस्चार्ज) चक्र के दौरान संरचनात्मक परिवर्तनों के अध्ययन में उपयोगी है। जैविक प्रणालियों में, EXAFS धातु आयनों के स्थानीय परिवेश और उनकी जैव-रसायनिक भूमिका को उजागर करता है। इसके अलावा, यह तकनीक नए पदार्थों के विकास, नैनो-पदार्थों के अध्ययन, और उच्च तापमान अथवा उच्च दाब पर पदार्थों के संरचनात्मक अध्ययन हेतु भी प्रयुक्त होती है।

चित्र - 4 EXAFS तकनीक के बहुआयामी उपयोग

EXAFS - चुनौतियां, सीमाएं एवं भविष्य की संभावनाएं

EXAFS तकनीक के लिए सिंक्रोट्रॉन सुविधा की आवश्यकता होती है, जो हर जगह उपलब्ध नहीं है। सटीक मापन के लिए पदार्थ के नमूने में संबंधित तत्व की पर्याप्त मात्रा होना भी आवश्यक है। इसके अलावा, प्राप्त आंकड़ों (डेटा) के विश्लेषण के लिए विशेषज्ञता भी आवश्यक है। भविष्य में EXAFS तकनीक में कई उन्नत बदलाव देखने को मिलेंगे। कृत्रिम बुद्धिमत्ता के उपयोग से EXAFS डेटा का विश्लेषण और व्याख्या अधिक सटीक और शीघ्र हो पाएगी, जिससे शोधकर्ताओं को बेहतर परिणाम प्राप्त होंगे। साथ ही, अत्यंत त्वरित एक्स-रे सिंक्रोट्रॉन लेसर जैसी नई तकनीकों के संयोजन से EXAFS तकनीक वास्तविक काल (रियल टाइम) में जटिल प्रक्रियाओं को समझने में सक्षम होगी। इसके अलावा, अन्य विश्लेषण तकनीकों के साथ EXAFS के संयोजन से बहुआयामी और व्यापक अनुसंधान संभव होगा, जो नई वैज्ञानिक खोजों को प्रोत्साहित करेगा।

अंततः संक्षेप में यह कहना उचित होगा कि EXAFS एक ऐसी अद्भुत तकनीक है जिससे हम परमाणुओं की दुनिया में झांक सकते हैं। यह तकनीक वैज्ञानिकों की आंख बन गई है, जो किसी पदार्थ को बिना तोड़े/बिगाड़े, उसकी आंतरिक संरचना देखने में मदद करती है।

आभार

लेखक, इस लेख की रचना के दौरान प्राप्त मार्गदर्शन के लिए अध्यक्ष, परमाणु एवं आण्विक भौतिकी प्रभाग, भापअ केंद्र, मुंबई के प्रति आभार व्यक्त करते हैं।

लेखक का परिचय

अशोक कुमार यादव

डॉ. अशोक कुमार यादव, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के परमाणु एवं आण्विक भौतिकी प्रभाग (A&MPD) में वैज्ञानिक अधिकारी-ई के पद पर कार्यरत हैं।

विकिरण प्रौद्योगिकी एवं खाद्य सुरक्षा

सुधांशु सक्सेना एवं सत्येंद्र गौतम

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

खाद्य पदार्थों में हमें विविध प्रकार के क्षय देखने को मिलते हैं, जौ प्रत्यक्ष अथवा परोक्ष रूप से प्राकृतिक संसाधनों का भी क्षय है। जैसे फल-सब्जियों का सड़ जाना, अंकुरित होकर खाने योग्य ना रहना, अनाज, मसालों में कीड़े लग जाना, तैयार खाद्य पदार्थों (रेडी टू ईट फूड) का कम समय में खराब हो जाना, मौसमी फलों का वर्ष भर (या लम्बे समय तक) उपलब्ध ना होना, इत्यादि। बढ़ती जनसंख्या के पोषण हेतु खाद्य सुरक्षा नितांत आवश्यक है और आधुनिक काल में पर्यावरण को ध्यान में रखते हुए खाद्य सुरक्षा हेतु हमें ऐसी प्रौद्योगिकी को अपनाना है जिसका पर्यावरण एवं हमारे स्वास्थ्य, दोनों पर कोई दुष्प्रभाव न हो। विकिरण प्रौद्योगिकी एक ऐसी ही प्रभावी प्रक्रिया है जिससे खाद्य सुरक्षा और संरक्षण, दोनों को सुनिश्चित किया जा सकता है। दुनिया के 70 से भी अधिक देश वर्तमान में खाद्य सुरक्षा और संरक्षण के लिए विकिरण प्रौद्योगिकी का उपयोग कर रहे हैं। विकिरण स्रोत के रूप में रेडियोसमस्थानिकों (रेडियोआइसोटोप) जैसे कि कोबाल्ट-60 (^{60}Co) और सीज़ियम-137 (^{137}Cs) का उपयोग किया जाता है । इसके इलावा, इलेक्ट्रॉन किरणपुंज (इलेक्ट्रॉन बीम) तथा और एक्स-किरणों (एक्स-रे) जैसे मशीन-युक्त विकिरण स्रोत भी उपयोग में लाए जाते हैं। विकिरण प्रौद्योगिकी के बहुआयामी उपयोग हैं और इसके प्रचार एवं प्रसार और विस्तार से खाद्य सुरक्षा, संरक्षण और खाद्य-संबंधित अंतरराष्ट्रीय व्यपार में अनेक लाभ प्राप्त किए जा सकते हैं।

भारत में खाद्य विकिरण की पृष्ठभूमि

भारत में विकिरण प्रौद्योगिकी का आरंभ डॉ. होमी जहांगीर भाभा के द्वारा किया गया था। खाद्य पदार्थों पर आयनकारी विकिरण के प्रयोग वर्ष 1967 में भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई में प्रारंभ हुए। खाद्य पदार्थों का विकिरण राष्ट्रीय (भारतीय खाद्य सुरक्षा और मानक प्राधिकरण) एवं अंतरराष्ट्रीय संस्थानों (संयुक्त राष्ट्र खाद्य एवं कृषि संगठन) द्वारा अनुमोदित है, जिसके फलस्वरूप आज विश्वभर में 70 से भी अधिक देशों में इसे उपयोग में लाया जा रहा है। इस समय, भारत में 30 व्यावसायिक खाद्य विकिरण केंद्र हैं और आगामी वर्षों में इनकी संख्या में निश्चित बढ़ोतरी देखने को मिलेगी।

खाद्य विकिरण - पूर्ण सुरक्षित एवं अनुमत

प्रत्येक खाद्य पदार्थ के लिए विकिरण की मात्रा (डोज़) सुनिश्चित होती है, जिसकी इकाई ग्रे (Gy) होती है (1 ग्रे = 1 जूल ऊर्जा जो एक किलोग्राम पदार्थ द्वारा अवशोषित होती है)। उदाहरण के लिए, आलू और प्याज़ में अंकुरण की रोकथाम के लिए 60 से 70 ग्रे डोज प्रभावी है। खाद्य पदार्थों के विकिरण के दौरान विकिरण स्रोत खाद्य पदार्थ के सीधे संपर्क में नहीं आता है। अपितु, स्रोत से निकलने वाली विकिरण ही खाद्य पदार्थ पर पड़ती है। खाद्य विकिरण में केवल अनुमोदित स्रोत ही उपयोग में लाए जाते हैं। इनसे जो विकिरण निकलती है उनकी ऊर्जा से खाद्य पदार्थों में किसी भी प्रकार का दुष्प्रभाव नहीं होता। खाद्य विकिरण प्रसंस्करण प्रशिक्षित संचालक के द्वारा एक पूर्ण-नियंत्रित केंद्र में किया जाता है। अंतरराष्ट्रीय मानक के अनुसार विकिरण प्रसंस्करित खाद्य पदार्थ के पैकेट पर एक रेडुरा चिह्न (चित्र–1) अवश्य लगा होना चाहिए।

खाद्य विकिरण संयत्र की संपूर्ण सुरक्षा अनेक मापदंडों पर आधारित एवं सुनिश्चित होती है, जिसे संक्षिप्त रूप से

चित्र – 1 विकिरण प्रसंस्करण दर्शाने वाला रेडुरा चिह्न

चित्र – 2 में दिखाया गया है।

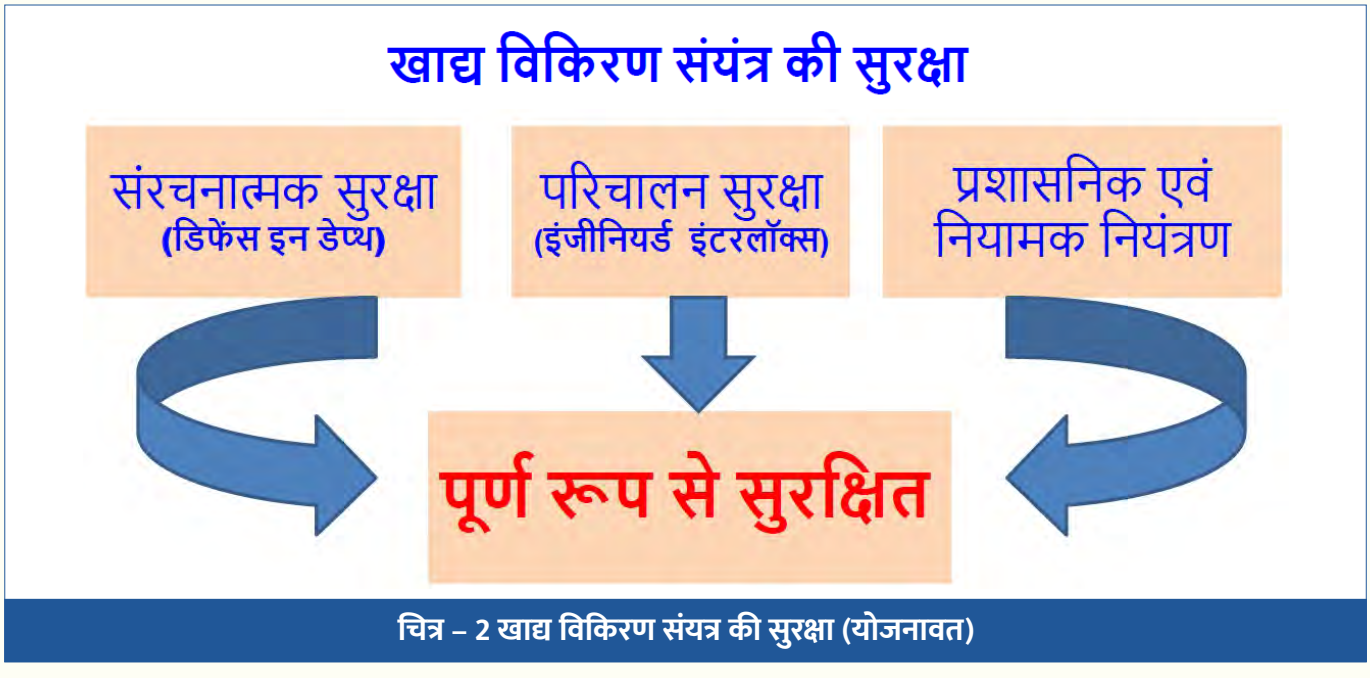
खाद्य पदार्थों के विकिरण प्रसंस्करण की विशेषताएं

विकिरण प्रसंस्करण (रेडिएशन प्रोसेसिंग) एक पर्यावरणीय अनुकूल एवं अविनाशी प्रक्रिया है। अत्यधिक भेदनक्षमता और प्रभाविता के कारण, बड़े पैमाने पर अनेक प्रकार के खाद्य पदार्थों का कुशलता से प्रसंस्करण किया जा सकता है।

- विकिरण प्रसंस्करण अतापीय प्रक्रिया है जिसमें खाद्य पदार्थ के तापमान में ऐसी वृद्धि नहीं होती जिससे ऊष्मा-संवेदी घटकों का क्षय हो। इस प्रकार खाद्य पदार्थ की गुणवत्ता पर कोई दुष्प्रभाव नहीं पड़ता है।
- रसायनिक प्रक्रिया के विपरीत, विकिरण प्रसंस्करण में किसी भी रसायन का उपयोग नहीं होता है जिसके फलस्वरूप, खाद्य पदार्थ में कोई विशिष्ट रसायनिक अपघटक का निर्माण नहीं होता है।
- यह प्रक्रिया मानव स्वास्थ्य एवं पर्यावरण को खतरे में डालने वाले रसायनिक धूमकों का प्रभावी विकल्प है। रसायनिक धूमन (केमिकल फ्यूमिगेशन) के विपरीत विकिरण प्रसंस्करण पहले से ही पैक किए गए (प्री-पैकेज्ड) खाद्य पदार्थों में की जा सकती है और इसलिए विकिरण के बाद संदूषण (कंटामिनेशन) का कोई खतरा नहीं होता है।
- इस प्रक्रिया से कोई विषाक्त अवशेष उत्पन्न नहीं होते हैं।
- अनुशंसित डोज़ पर यह खाद्य पदार्थ के संवेदी गुणों, बनावट और पोषक मूल्यों को बनाए रखता है।

विकिरण प्रसंस्करण के लाभ

खाद्य पदार्थों का विकिरण प्रसंस्करण कई प्रकार के



चित्र – 2 खाद्य विकिरण संयत्र की सुरक्षा (योजनावत)

चित्र – 3 : आलू एवं प्याज़ में विकिरण प्रसंस्करण द्वारा अंकुरण अवरोध

वांछनीय लाभों के लिए बहुत ही प्रभावी, क्रियाशील एवं पर्याप्त है। इसके कुछ विशिष्ट लाभ निम्नलिखित हैं :-

बल्ब, तना, जड़ कंद और प्रकंद में अंकुरण अवरोध - उदाहरण आलू, अदरक एवं प्याज़

चित्र-3 से स्पष्ट है कि विकिरण प्रसंस्करण द्वारा विभिन्न खाद्य पदार्थों में अंकुरण को विलम्बित / अवरोधित करके उनकी उपयोग युक्त अवधि (शेल्फ लाइफ) को बढ़ाया जा सकता है और खाद्य पदार्थों के नाश/क्षय को कम किया जा सकता है।

कीट विसंक्रमण तथा सूक्ष्मजीव न्यूनीकरण

कई अनाज, दालों, मसालों, इत्यादि में विकिरण प्रसंस्करण द्वारा कीट विसंक्रमण एवं सूक्ष्मजीवों की संख्या में कमी लाई जा सकती है एवं खाद्य क्षय को कम किया जा सकता है (चित्र-4)।

इसी क्रम में बहुत से अन्य खाद्य पदार्थों का भी विकिरण प्रसंस्करण किया जाता है, जिनमें मछली, जलीय-कृषि, समुद्री भोजन (सी-फ़ूड) एवं उनके ताज़ा एवं फ्रोज़न उत्पाद, केकड़े, झींगा, लॉबस्टर जैसे परुषकवची (क्रस्टेशियन) जीवों में रोगजनक उन्मूलन, भण्डारण विस्तार तथा मानव परजीवियों का नियंत्रण, इत्यादि शामिल हैं। पारम्परिक/जातीय भोजन (एथनिक फ़ूड), सैन्य राशन, अंतरिक्ष में उपयोग आने वाला भोजन (स्पेस फ़ूड), खाने के लिए तैयार (रेडी टू ईट) एवं पकाने के लिए तैयार (रेडी टू कुक) भोजन, न्यूनतम प्रसंस्कृत खाद्य पदार्थों, इत्यादि का विकिरण प्रसंस्करण मुख्यतः सम्पर्करोध/संगरोध (क्वारंटाइन) तथा सूक्ष्मजीवों की संख्या में कमी लाने के लिए किया जाता है।

विकिरणित भोजन की संपूर्णता, पोषण संबंधी पर्याप्तता और सुरक्षा

खाद्य पदार्थ के विकिरण प्रसंस्करण के उपरांत उसमें किसी भी प्रक्रार की रेडियोधर्मिता (रेडियोसक्रियता) उत्पन्न नहीं होती है तथा प्रसंस्कृत खाद्य सामग्री की गुणवत्ता में कमी नहीं आती है। उसके मौलिक पोषक तत्व जैसे प्रोटीन, कार्बोहाइड्रेट, वसा (फैट्स), खनिजों (मिनरल्स), इत्यादि पर किसी भी प्रकार का दुष्प्रभाव नहीं पड़ता है। अतः उनका सेवन स्वास्थ्य के लिए पूर्णतया सुरक्षित है। खाद्य पदार्थों को विकिरणित करने से उनमें उपलब्ध विटामिनों का अनुपात उच्च तापमान पर अथवा जमने वाले तापमान पर प्रसंस्कृत किए गए खाद्य पदार्थों के विटामिनों के अनुपात के तुलनीय

चित्र – 4 : अनाज मसालों, इत्यादि में विकिरण प्रसंस्करण द्वारा कीट विसंक्रमण एवं सूक्ष्मजीव नियंत्रण

ही होता है। भारत सहित 70 से अधिक देशों ने 100 से भी अधिक खाद्य पदार्थों के विकिरण प्रसंस्करण को मंजूरी दी है। दुनिया के विभिन्न हिस्सों में पादप- स्वच्छता (फाइटोसैनिटरी) अनुप्रयोगों के लिए खाद्य पदार्थों के विकिरण प्रसंस्करण का अभ्यास किया गया है।

अंतरराष्ट्रीय व्यापार में खाद्य विकिरण प्रसंस्करण की उपयोगिता

अंतरराष्ट्रीय व्यापार में आमों की विकिरण प्रक्रिया अनुमोदित है। संयुक्त राज्य अमेरिका (USA) को आम भेजने के लिए, सम्पर्करोधन/संगरोधन के अनुपालन के क्रियान्वयन हेतु, 400 ग्रे (Gy) विकिरण डोज़ देना अनिवार्य है। संयुक्त राज्य अमेरिका के कृषि विभाग (यूएसडीए) और भारत के मध्य हुए समझौते के फलस्वरूप भारतीय आमों को विकिरण प्रक्रिया के बाद ही संयुक्त राज्य अमेरिका को निर्यात किया जाता है। वर्ष 2007 से यह क्रम चल रहा है और वर्ष 2025 में लगभग 3000 टन भारतीय आमों का निर्यात संयुक्त राज्य अमेरिका को किया गया है जो विकिरण प्रक्रिया का एक विशिष्ट योगदान है। इससे भारतीय आम को उचित मूल्य और वैश्विक पहचान मिलती है।

अनाजों का रसायन मुक्त संरक्षण

अनाज का संरक्षण खाद्य सुरक्षा में अत्यंत महत्वपूर्ण है। अनाज के संग्रहण में प्रायः रसायनिक प्रक्रिया का उपयोग किया जाता है और वह भी अनेकों बार। उपयोग में लाए जाने वाले कई रसायन जैसे एल्युमीनियम फॉस्फाइड, मेलाथियान, डेल्टामैथ्रिन, इत्यादि पर्यावरण और मानव-स्वास्थ्य पर होने वाले दुष्प्रभावों के कारण बहुत से देशों द्वारा प्रतिबंधित कर दिए गए हैं। विकिरण प्रक्रिया एक ऐसा तरीका है जिसमें किसी भी प्रकार के रसायन का उपयोग नहीं किया जाता है और पूर्ण पैकेजिंग के उपरान्त अनाज को विकिरण देकर लम्बे समय तक संरक्षित किया जा सकता है।

हमारे देश में अनाज का उत्पादन बहुत ही अधिक मात्रा में होता है। इनके संरक्षण के लिए देशव्यापी विकिरण केंद्रों की आवश्यकता है। निर्धारित अवधि में विकिरण केंद्रों की सीमित क्षमता एक प्रकार का अवरोध है। इसलिए, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई द्वारा संरचनात्मक सुधार युक्त ऐसे विकिरण संयंत्रों का विकास किया जा रहा है, जिनके उपयोग द्वारा अधिक मात्रा में भी अनाज का संरक्षण किया जा सकता है। देश के कई राज्य अनाज के रसायन मुक्त संरक्षण

के लिए भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के संपर्क में हैं।

खाद्य विकिरण में नवीन पहल

भारत सरकार के खाद्य प्रसंस्करण उद्योग मंत्रालय द्वारा बहु-उत्पाद खाद्य विकिरण इकाइयों की स्थापना के लिए आवेदन आमंत्रित किए गए हैं। इन इकाइयों की स्थापना के लिए देश भर के संभावित उद्यमियों से "प्रधान मंत्री किसान संपदा योजना" की एकीकृत शीत श्रृंखला, मूल्यवर्धन एवं परिरक्षण अवसरंचना योजना (इंटीग्रेटेड कोल्ड चेन एंड वैल्यू एडिशन इंफ्रास्ट्रक्चर स्कीम) के अंतर्गत, 'रुचि की अभिव्यक्ति' (एक्सप्रेशन और इंटरेस्ट) के माध्यम से प्रस्ताव आमंत्रित किए गए हैं। केंद्रीय मंत्रिमंडल ने "प्रधान मंत्री किसान संपदा योजना" के लिए अतिरिक्त परिव्यय को स्वीकृति दी है। इसमें बजट घोषणा के अनुरूप इस योजना के अंतर्गत 50 बहु-उत्पाद खाद्य विकिरण इकाइयों की स्थापना की मंजूरी दी गई है। इन इकाइयों के क्रियान्वयन से विकिरणित खाद्य का प्रति वर्ष 20 से 30 लाख मीट्रिक टन तक कुल संरक्षण क्षमता सृजित होने की उम्मीद है।

खाद्य विकिरण एक बहुत ही प्रभावी और रसायन मुक्त भौतिक प्रक्रिया है। वर्षों के शोध के फलस्वरूप यह सुनिश्चित हो गया है कि खाद्य विकिरण के द्वारा खाद्य संरक्षण की खाद्य सुरक्षा और अंतरराष्ट्रीय व्यापार में अग्रणी भूमिका है। आने वाले वर्षों में भारत में अनेक खाद्य विकिरण संयत्र स्थापित होंगे जो हमारे देश के लिए बहुत अहम भूमिका निभाएंगे। ऐसे विकिरण संयंत्र जिन्हें कम लागत पर लगाया जा सके, पर अनुसंधान एवं विकास कार्य आवश्यक है जिसके परिणामस्वरूप निजी कंपनियां भी खाद्य विकिरण संयंत्र को स्थापित कर सकें और देश की समृद्धि में योगदान दे सकें। साथ में यह भी आवश्यक है कि ऐसे खाद्य एवं संबंधित पदार्थ जिनकी विकिरण द्वारा सुरक्षा एवं संरक्षण की मानक प्रचालन प्रक्रिया अपूर्ण है, को पूर्ण विकसित करने की दिशा में और तेज़ी से शोध कार्य किया जाए। शिक्षण संस्थानों के पाठ्यक्रम में खाद्य विकिरण विषय को शामिल किया जाना चाहिए और जन-जागरूकता अभियान पर भी ज़ोर दिया जाना चाहिए ताकि खाद्य विकिरण को व्यापक बनाया जा सके। सभी के सहयोग, जागरूकता, सहभागिता, समन्वय और विश्वास के फलस्वरूप खाद्य विकिरण को नए शिखर पर ले जाया जा सकता है।

तालिका - 1 खाद्य वस्तुओं के विकिरण प्रसंस्करण का वर्ग आधारित अनुमोदन (अनुसूची I)

वर्ग	खाद्य उत्पाद	वर्गीकृत उद्देश्य	डोज़ सीमा (kGy)	
			न्यूनतम	अधिकतम
1	बल्ब, तना, जड़ कंद और प्रकंद	अंकुरण अवरोध	0.02	0.2
2	ताज़े फल / सब्जियां (वर्ग 1 के अलावा)	पकने की प्रक्रिया को मंद करना	0.2	1.0
		कीट विसंक्रमण	0.2	1.0
		भंडारण विस्तार	1.0	2.5
		सम्पर्करोध/संगरोध (क्वारंटाइन)	0.1	1.0
3	अनाज और उनके पिसे हुए उत्पाद, दालें और उनके पिसे हुए उत्पाद, मेवे, तिलहन, सूखे मेवे और उनके उत्पाद	कीट विसंक्रमण	0.25	1.0
		सूक्ष्मजीवों की संख्या में कमी	1.5	5.0
4	मछली, जलीय कृषि, समुद्री भोजन और उनके ताज़ा एवं फ्रोजन उत्पाद और क्रस्टेशियन	रोगजनक उन्मूलन	1.0	7.0
		भंडारण विस्तार	1.0	3.0
		परजीवियों का नियंत्रण	0.3	2.0

वर्ग	खाद्य उत्पाद	वर्गीकृत उद्देश्य	डोज़ सीमा (kGy)	
			न्यूनतम	अधिकतम
5	पोल्ट्री (ताज़ा और फ्रोजन) और अंडे सहित मांस और मांस उत्पाद	रोगजनक उन्मूलन	1.0	7.0
		भंडारण विस्तार	1.0	3.0
		परजीवियों का नियंत्रण	0.3	2.0
6	सूखी सब्जियाँ, मसाले, सूखी जड़ी-बूटियाँ और उनके उत्पाद, चाय, कॉफी, कोको, पौधों के उत्पाद	सूक्ष्मजीवों का उन्मूलन	6.0	14.0
		कीट विसंक्रमण	0.3	1.0
7	पशु मूल के सूखे खाद्य पदार्थ और उनके उत्पाद	कीट विसंक्रमण	0.3	1.0
		फफूंद पर नियंत्रण	1.0	3.0
		रोगजनक सूक्ष्मजीवों का उन्मूलन	2.0	7.0
8	जातीय भोजन, सैन्य राशन, अंतरिक्ष खाद्य पदार्थ, खाने के लिए तैयार, पकाने के लिए तैयार/न्यूनतम प्रसंस्कृत खाद्य पदार्थ	संपर्करोध/संगरोध (क्वारंटाइन)	0.25	1
		सूक्ष्मजीवों की संख्या में कमी	2	10

तालिका - 2 संबद्ध उत्पादों के विकिरण प्रसंस्करण की स्वीकृति (अनुसूची II)

क्रमांक	संबद्ध उत्पाद	प्रयोजन	डोज़ सीमा (kGy)	
			न्यूनतम	अधिकतम
1	पशु खाद्य पदार्थ और चारा	कीट विसंक्रमण सूक्ष्मजीवों का उन्मूलन	0.25 5.0	1.0 10.0
2	आयुर्वेदिक जड़ी-बूटियाँ, उनके उत्पाद तथा दवाइयाँ	कीट विसंक्रमण सूक्ष्मजीवों का उन्मूलन जीवाणुनाशन	0.25 5.0 10	1.0 10.0 25
3	खाद्य / संबद्ध उत्पादों के लिए पैकेजिंग सामग्री	सूक्ष्मजीवों का उन्मूलन जीवाणुनाशन	5.0 10.0	10.0 25
4	खाद्य योजक	कीट विसंक्रमण सूक्ष्मजीवों का उन्मूलन जीवाणुनाशन	0.25 5.0 10	1.0 10.0 25
5	स्वास्थ्य खाद्य पदार्थ, आहार पूरक और न्यूट्रास्यूटिकल्स	कीट विसंक्रमण सूक्ष्मजीवों का उन्मूलन जीवाणुनाशन	 5.0 10	1.0 10.0 25
6	शरीर की देखभाल और सफाई उत्पाद	सूक्ष्मजीवों का उन्मूलन जीवाणुनाशन	 10	10.0 25
7	फूल	संपर्करोध/संगरोध (क्वारंटाइन) भंडारण विस्तार	0.25 0.25	1.0 1.0

चित्र – 5 खाद्य प्रौद्योगिकी विभाग, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई में स्थापित देश का पहला खाद्य विकिरण संयंत्र (स्थापना वर्ष - 1967)

आभार

लेखकगण, इस लेख की सरंचना में प्रत्यक्ष एवं परोक्ष रूप से सहयोग एवं मार्गदर्शन देने वाले सभी व्यक्तियों विशेषकर डॉ. संजीव कुमार, वैज्ञानिक अधिकारी/जी और डॉ. सचिन हजारे, वैज्ञानिक अधिकारी/जी; खाद्य प्रौद्योगिकी प्रभाग, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के प्रति हार्दिक आभार प्रकट करते हैं। प्रस्तुत जानकारी में प्रयुक्त पुस्तकों, लेखों और ऑनलाइन संसाधनों के लेखकों का भी हम आभार व्यक्त करते हैं।

लेखकगण का परिचय

सुधांशु सक्सेना

डॉ. सुधांशु सक्सेना, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के खाद्य प्रौद्योगिकी प्रभाग (FTD) में वैज्ञानिक अधिकारी-जी के पद पर कार्यरत हैं।

सत्येंद्र गौतम

डॉ. सत्येंद्र गौतम, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के खाद्य प्रौद्योगिकी प्रभाग (FTD) में उत्कृष्ट वैज्ञानिक के रूप में कार्यरत हैं।

विकिरण प्रौद्योगिकी के सामाजिक अनुप्रयोग

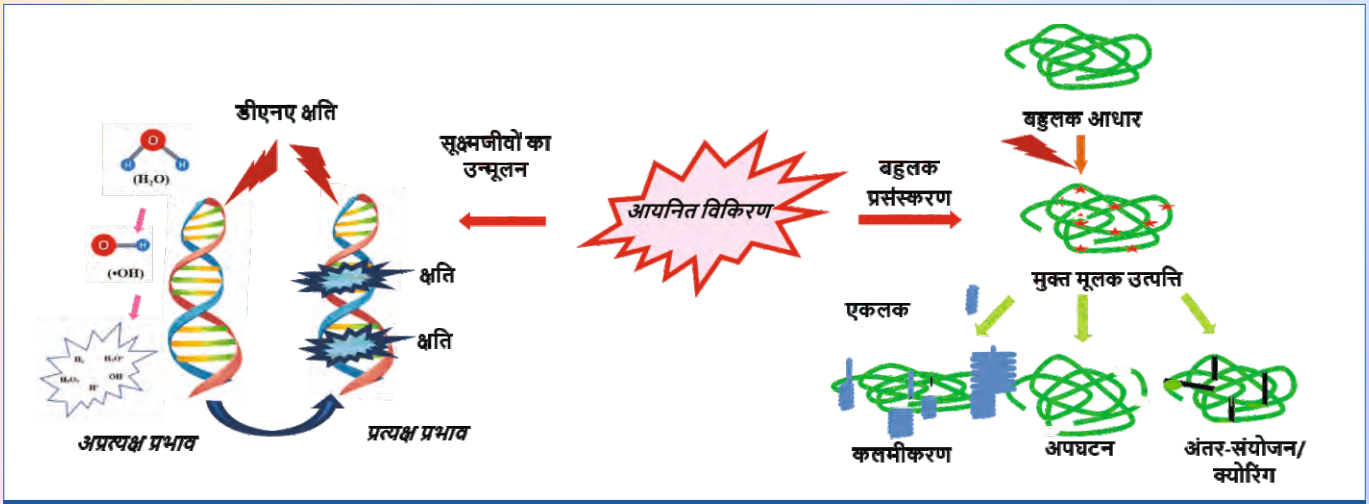
नरेंद्र कुमार गोयल और नीलांजल मिश्रा

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

नाभिकीय प्रौद्योगिकी और उसमें भी विशेष रूप से विकिरण प्रौद्योगिकियों के सामाजिक अनुप्रयोग, सभी के आकर्षण एवं विचार-विमर्श के विषय रहे हैं। जन-सामान्य के कल्याण की बात हो तो यह आकर्षण और भी बढ़ जाता है। विकिरण के उपयोगों को लेकर जो भ्रांतियाँ जन-मानस में फ़ैली हुई हैं, वे पूर्ण रूप से तथ्यहीन हैं एवं अनावश्यक डर और शंका उत्पन्न करती हैं। परमाणु ऊर्जा के क्षेत्र में कार्यरत वैज्ञानिकों एवं विद्वानों ने दशकों के अपने अथक प्रयासों द्वारा इन भ्रांतियों को दूर करने में उल्लेखनीय सफलता पाई है। इन प्रयासों द्वारा जन-सामान्य को विकिरण प्रौद्योगिकियों के अनुप्रयोगों में पालन किए जाने वाले सभी सुरक्षा मानकों के बारे में अवगत कराने का निरंतर प्रयास किया गया है। साथ ही यह भी स्पष्ट किया गया है कि ये प्रौद्योगिकियां आर्थिक लाभ के साथ-साथ समाज के समग्र विकास हेतु बहु-उपयोगी हैं। नाभिकीय एवं विकिरण प्रौद्योगिकियों ने विभिन्न क्षेत्रों जैसे कि ऊर्जा, स्वास्थ्य सेवाएं, कृषि, उद्योग, पर्यावरण संरक्षण, इत्यादि में अपनी उपादेयता प्रदर्शित की है। प्रस्तुत लेख पिछले तीन दशकों में, विशेषतः पर्यावरण, स्वास्थ्य सेवाओं और उद्योग के क्षेत्रों में विकिरण प्रौद्योगिकियों के प्रभावशाली उपयोगों पर प्रकाश डालता है।

क्या है विकिरण प्रौद्योगिकी?

उच्च ऊर्जा आयनकारी (आयोनाइज़िंग) विकिरणों (इलेक्ट्रॉन, गामा एवं एक्स-किरणों, इत्यादि) को विभिन्न पदार्थों जैसे कि बहुलकों (पॉलिमर्स) पर नियंत्रित, स्वच्छ एवं प्रभावी तरीके से उपयोग करके, इन पदार्थों के गुणधर्मों को संशोधित करने अथवा / एवं उनमें वांछित गुणों / लक्षणों को उत्पन्न करने की प्रक्रिया को सामान्य रूप से विकिरण प्रौद्योगिकी कहा जाता है। ऊष्मीय अथवा रसायनिक उपचारों के विपरीत, आयनकारी विकिरणें किसी भी पदार्थ में अपेक्षाकृत समान रूप से अधिक गहराई तक पहुंचती हैं। परिणामतः, विविध प्रकार की विकिरण-जन्य प्रक्रियाओं के द्वारा पदार्थों में परमाण्विक / आण्विक स्तर पर लाभकारी संरचनात्मक परिवर्तन लाए जा सकते हैं, जिन्हें प्रतीकात्मक



चित्र 1. पदार्थों पर आयनकारी विकिरणों के कुछ प्रभाव एवं प्रक्रियाएं (प्रतीकात्मक विवरण)

रूप से चित्र-1 में दिखाया गया है।

विकिरण प्रक्रियाओं के सुरक्षित क्रियान्वयन द्वारा, विभिन्न सामाजिक लाभों के लिए उन्नत तकनीकों का विकास किया गया है। चिकित्सा उपकरणों / संसाधनों का सम्पूर्ण रोगाणुनाशन (स्टरलाईज़ेशन), मलजल (सीवेज) का कीटाणुशोधन, सुरक्षित एवं टिकाऊ खाद्य पैकेजिंग विचरन, जल-शुद्धिकरण हेतु प्रयुक्त अधिशोषक (एडसोर्बेन्ट) एवं निस्यंदक (फिल्टर), इत्यादि इनके कुछ प्रमुख उदाहरण हैं।

विकिरण प्रौद्योगिकियों के पर्यावरणीय अनुप्रयोग

औद्योगिक क्रांति की शुरूआत से ही वैश्विक स्तर पर जहां एक ओर बहुआयामी विकास के द्वारा जन-सामान्य के जीवन में व्यापक लाभकारी प्रभाव हुए और करोड़ों लोगों को गरीबी और भूख से राहत मिली, वहां साथ ही साथ, पर्यावरण पर इसका गहरा एवं विपरीत प्रभाव भी पड़ा। अंधाधुंध शहरीकरण, जीवाश्म ईंधनों के अत्यधिक दोहन और जनसंख्या विस्फोट, इन सभी कारकों ने पर्यावरण प्रदूषण में भारी योगदान दिया है। वायु, जल और मिट्टी जैसे मूलभूत संसाधन भयावह रूप से प्रदूषित हो रहे हैं। ऐसे में यह अत्यावश्यक है कि पर्यावरण प्रदूषण नियंत्रण हेतु हरित एवं संधारणीय (सस्टेनेबल) तकनीकों को अपनाया जाए जिनसे प्रदूषण नियंत्रण के साथ-साथ प्राकृतिक संसाधनों को पुनर्जीवित भी किया जा सके। इस दिशा में, पर्यावरण संरक्षण हेतु एक रक्षक की भूमिका निभाते हुए, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र द्वारा जल एवं भूमि संसाधनों को सुरक्षित रखने के लिए विकिरण-आधारित नवीन तकनीकों का विकास किया है।

अपशिष्ट जल प्रशोधन (वस्त्र / कपड़ा उद्योग) हेतु विकिरण प्रौद्योगिकी

कपड़ा उद्योग, विशेषतः कपास और सेल्युलोस-आधारित (विस्कोस) उद्योगों के विभिन्न प्रसंस्करण (प्रोसेसिंग) चरणों जैसे रंगाई, छपाई, धुलाई और परिष्करण (फिनिशिंग), इत्यादि प्रक्रियाओं में जल का अत्यधिक मात्रा में उपयोग किया जाता है। इन चरणों में बड़ी मात्रा में कृत्रिम रंगों / रसायनों से युक्त अपशिष्ट जल उत्पन्न होता है, जो पर्यावरण के लिए अत्यंत हानिकारक है। इस प्रकार के अपशिष्ट जल को कम से कम लागत में, हरित एवं सतत रूप में प्रशोधित किया जाना अत्यावश्यक है, ताकि प्रशोधित जल का पुनःउपयोग किया जा सके। अपशिष्ट जल प्रशोधन, जल खपत की दैनिक मात्रा में कमी लाने के साथ-साथ, मौजूदा जल-संसाधनों के संरक्षण में भी सहायक है। भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र द्वारा विकिरण प्रौद्योगिकी के उपयोग से अपशिष्ट जल में से रंजक (डाई) अणुओं को अधिशोषित करने के लिए बहुलक (पॉलिमर्स)-आधारित विशेष फिल्टर विकसित किए गए हैं। इस स्वदेशी तकनीक को बड़े पैमाने पर अपनाया और कार्यान्वित भी किया गया है। इस प्रौद्योगिकी में विकिरण उपचार द्वारा सूत (कपास) पर आधारित अधिशोषक फिल्टर कार्ट्रिज विकसित किए गए हैं, जो वस्त्र उद्योग से जनित अपशिष्ट जल में उपस्थित आयनिक रंजकों (रंगों) को हटाने में सक्षम हैं। इन फिल्टर कार्ट्रिज में काम में लाया गया सूत (कपास) सेल्यूलोज़-आधारित जैव-अपघटनीय (बायोडिग्रेडेबल) पदार्थ है जिसके फ़िल्टर कार्ट्रिज के उपयोग काल समाप्त होने के बाद अंततः निष्पादन में किसी प्रकार की कठिनाई नहीं होगी। यह फ़िल्टर प्रौद्योगिकी की अपेक्षा अतिलाभदायक है।

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र द्वारा विकसित यह स्वदेशी तकनीक सूती एवं विस्कोस-आधारित वस्त्र उद्योग के लिए अत्यंत उपयोगी एवं पर्यावरणीय रूप से अनुकूल है। औद्योगिक परिस्थितियों में किए गए व्यापक परीक्षणों के बाद, जोधपुर (राजस्थान) में स्थित एक वस्त्र उद्योग इकाई में इस प्रौद्योगिकी पर आधारित 75 किलो लीटर प्रति दिन (KLD) क्षमता वाला एक परीक्षण प्रशोधन संयंत्र स्थापित किया गया है (चित्र 2)। यह संयंत्र इस प्रौद्योगिकी में रुचि रखने वाले उद्योगों एवं विभिन्न नियामक निकायों जैसे कि प्रदूषण नियंत्रण बोर्ड के समक्ष प्रदर्शन इकाई के रूप में और देश के अन्य भागों में इस प्रौद्योगिकी के प्रचार-प्रसार हेतु कार्यरत है। रंगीन अपशिष्ट जल को पुनः उपयोगी औद्योगिक

चित्र 2. वस्त्र उद्योग जनित अपशिष्ट जल प्रशोधन हेतु विकिरण प्रौद्योगिकी का अनुप्रयोग

जल में परिवर्तित करने से (1) उद्योग हेतु ताज़े जल (मीठे जल) की खपत में उल्लेखनीय कमी आती है, (2) सामान्य (केंद्रीय) अपशिष्ट उपचार संयंत्रों (CETPs) पर कम दबाव पड़ता है, (3) भूजल के दोहन में कमी आती है, एवं (4) बहुमूल्य जल संसाधनों पर अतिरिक्त बोझ डाले बिना भी सतत औद्योगिक विकास को बढ़ावा मिलता है।

मलपंक (सीवेज स्लज) प्रशोधन के लिए विकिरण प्रौद्योगिकी

घरेलू मलजल को सीवेज उपचार संयंत्र (एसटीपी) से गुज़ारने के बाद शेष बचे अर्ध-ठोस मलबे को मलपंक (आपंक अथवा सीवेज स्लज) कहा जाता है। भारत में प्रतिवर्ष लगभग 19 लाख मीट्रिक टन सूखा मलपंक उत्पन्न होता है। कार्बन-बाहुल्य यह मलपंक पेड़-पौधों के लिए पोषक तत्वों का अच्छा स्रोत है, मगर अपने यथारूप में यह विविध प्रकार के जीवाणुओं (बैक्टीरिया) एवं रोगजन्य सूक्ष्मजीवों से संदूषित होता है। बिना किसी नियंत्रण, परीक्षण या उपचार से पहले इसके कृषिभूमि में उपयोग से यह विभिन्न रोगों के प्रसार और भूजल-प्रदूषण का कारण बन सकता है।

मलपंक को उच्च ऊर्जा गामा विकिरणों से किरणित कराने पर इसमें उपस्थित हानिकारक सूक्ष्मजीवों एवं जीवाणुओं को सफलतापूर्वक नष्ट किया जा सकता है। इस प्रक्रिया को विकिरण आपंक-स्वच्छन (रेडिएशन स्लज हाइजीनाइजेशन) कहा जाता है। जीवाणुओं/ रोगाणुओं को नष्ट करने के अतिरिक्त, गामा किरणन द्वारा आपंक में मौजूद कार्बनिक प्रदूषकों जैसे कि पॉलीएरोमैटिक हाइड्रोकार्बन का निम्नन (डीग्रेडेशन) भी किया जा सकता है। इस प्रकार, यह तकनीक आपंक को कृषि उपयोग हेतु सुरक्षित बनाने का एक प्रभावी उपाय है। भारत में इस तकनीक का पहला प्रदर्शन संयंत्र वर्ष 1992 में वड़ोदरा (गुजरात) में स्थापित किया गया, जहां लगभग 4 से 5 % ठोस पदार्थ युक्त तरल आपंक का स्वच्छन (हाइजीनाइजेशन) एवं प्रशोधन किया जाता है। विकिरण प्रशोधित आपंक गंधहीन होता है। यह कार्बन एवं पेड़-पौधों हेतु आवश्यक पोषक तत्वों से युक्त होने के कारण फसल की पैदावार बढ़ाने में उपयोगी है।

वड़ोदरा स्थित संयंत्र के बाद, स्थानीय नगर निगमों के सहयोग से वर्ष 2019 एवं 2022 में क्रमशः अहमदाबाद (गुजरात) और इंदौर (मध्य प्रदेश) में 75-80 % ठोस पदार्थ युक्त सूखे आपंक को प्रशोधित करने वाले उच्च दक्षता के दो नए संयंत्र स्थापित किए गए हैं (चित्र 3)। वर्तमान में ये संयंत्र सफलतापूर्वक संचालित हैं। विकिरण-आधारित यह स्वच्छ तकनीक, भारत सरकार की स्मार्ट वेस्ट मैनेजमेंट और सतत कृषि पद्धतियों को विकसित करने की दिशा में किए जा रहे प्रयासों के लिए एक प्रोत्साहनीय विकल्प हैं।

चित्र 3. मलजल आपंक के कीटाणुनाशक प्रशोधन में विकिरण प्रौद्योगिकी का उपयोग

स्वास्थ्य सेवाओं में विकिरण प्रौद्योगिकी के अनुप्रयोग

घावों के उपचार हेतु विकिरण-प्रसंस्कृत पट्टी (ड्रेसिंग):

जलने से होने वाले घाव एक गंभीर स्वास्थ्य समस्या हैं। दुनिया भर में प्रतिवर्ष लगभग एक करोड़ से भी अधिक लोग जलने का शिकार होते हैं, जिन्हें सही एवं सुगम चिकित्सकीय देखभाल की आवश्यकता होती है। इस प्रकार के घावों के उपचार के लिए लंबे समय से पारंपरिक पट्टियों (ड्रेसिंग) का उपयोग किया जाता रहा है, जो कई प्रकार की कमियों जैसे कि पट्टी का घाव से चिपकना, घाव-प्रभावित क्षेत्र का सूख जाना और, सूक्ष्मजीवी संक्रमण के जोखिम, इत्यादि से युक्त हैं। इन कमियों को दूर करने के लिए, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र द्वारा विकिरण-तिर्यकबद्ध (रेडिएशन-क्रॉसलिंक्ड) बहुलक, जिसे हाइड्रोजेल कहा जाता है पर आधारित एक विशेष घाव-उपचार पट्टी (ड्रेसिंग) विकसित की है। इसका उपयोग जलने की गंभीर चोटों के साथ-साथ मधुमेह-जनित घावों, बिस्तर के घावों (बेड-सोर्स), और पशुओं के काटने से मिली चोटों के उपचार में भी किया जा सकता है। विकिरण प्रौद्योगिकी के द्वारा इन उत्पादों का निर्माण एवं कीटाणुशोधन (निर्जर्मीकरण/स्टरलाईज़ेशन) एक साथ ही किया जाता है (चित्र 4)।

यह हाइड्रोजेल पट्टी (ड्रेसिंग), जैव-विघटनीय एवं गैर-विषाक्त बहुलक (जैसे कि पॉलीविनाइल अल्कोहॉल) और बहुशर्करा (पॉलीसैकेराइड, जैसे कि एगर) के मिश्रण को किरणित करके तैयार की जाती है। इन पारदर्शी बहुलक पट्टियों में अधिकांशतः (लगभग 90%) पानी होता है, जिससे यह घाव/चोट से चिपके बिना उसे सुगम रूप से ठंडा बनाए रखती है। संक्रमण के इलाज और शीघ्र घाव भरने के लिए, इन पट्टियों में जल में विलयशील औषधियां भी मिलाई जा सकती हैं। सफल चिकित्सकीय परीक्षणों के बाद यह प्रौद्योगिकी कई स्वास्थ्य सेवा कंपनियों को हस्तांतरित की गयी है।

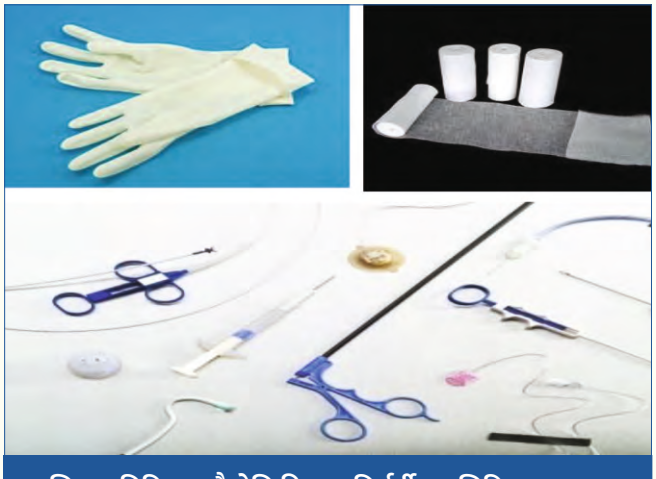
विकिरण प्रौद्योगिकी द्वारा चिकित्सा उत्पादों का निर्जर्मीकरण (स्टरलाईज़ेशन)

किसी पदार्थ को सभी हानिकारक सूक्ष्मजीवों से पूरी तरह मुक्त कर देना ही निर्जर्मीकरण (स्टरलाईज़ेशन) कहलाता है। चिकित्सा उत्पादों जैसे कि सर्जिकल दस्ताने, सूइयाँ, टांके, कैथेटर, प्रत्यारोपणों (इम्प्लांट्स), इत्यादि के लिए यह प्रक्रिया अत्यावश्यक है, क्योंकि इन उत्पादों में सूक्ष्मजीवों की थोड़ी-सी भी उपस्थिति शरीर में संक्रमण फैला सकती है और यहां तक की गंभीर मामलों में रोगी की मृत्यु का कारण भी बन सकती है। पारंपरिक तरीकों जैसे कि ऊष्मा-उपचार, एथिलीन ऑक्साइड से रसायनिक उपचार, इत्यादि से किए जा रहे निर्जर्मीकरण (स्टरलाईज़ेशन) में जो कमियां पायी गई हैं, उनमें असमान विसंक्रमण, शेष रह गई एथिलीन ऑक्साइड (जो कैंसर और उत्परिवर्तन उत्पन्न करने वाला

चित्र 4. विकिरण-प्रसंस्कृत हाइड्रोजेल-आधारित कीटाणुरहित घाव पट्टी (ड्रेसिंग)

संभावित कारक है) की विषाक्तता, निर्जर्मीकृत उत्पादों के पैकिंग के दौरान पुनःसंदूषण का खतरा, इत्यादि शामिल हैं। इन सभी कमियों को दूर करने के लिए, उच्च ऊर्जा विकिरणों (गामा किरणें, इलेक्ट्रॉन बीम) के उपयोग द्वारा प्रगत निर्जर्मीकरण तकनीक विकसित की गई है (चित्र 5)। विकिरण प्रौद्योगिकी द्वारा किये गए निर्जर्मीकरण के कई लाभ हैं जिनमें उच्च विश्वसनीयता, द्रुत प्रक्रिया, उत्पाद की अंतिम पैकेजिंग के पश्चात स्पर्शरहित निर्जर्मीकरण (ताकि पुनर्संदूषण की संभावना ना रहे) , निर्जमीकृत उत्पादों में विषैले रसायन अवशेषों की अनुपस्थिति, इत्यादि शामिल हैं।

भारत का प्रथम गामा विकिरण आधारित चिकित्सा उत्पादों



चित्र 5. विकिरण प्रौद्योगिकी द्वारा निर्जर्मीकृत चिकित्सा उत्पाद

का विसंक्रमण संयंत्र (आइसोमेड; ISOMED) भाभा परमाणु अनुसन्धान केंद्र द्वारा मुंबई में स्थापित किया गया जिसका प्रचालन वर्ष 1974 में प्रारंभ हुआ। कई दशकों के सफल प्रचालन के पश्चात इसे उन्नयित करके 22 अप्रैल, 2025 को ISOMED-2.0 के रूप में पुनः प्रचालित किया गया। चिकित्सा उत्पादों के निर्जर्मीकरण और स्वास्थ्य सेवा उद्योग को व्यापक सेवाएं प्रदान करने की दिशा में परमाणु ऊर्जा विभाग द्वारा देश में अनेकों व्यावसायिक विकिरण संयंत्रों की स्थापना को भी बढ़ावा दिया गया है।

विकिरण तकनीक के औद्योगिक अनुप्रयोग

विभिन्न उद्योगों में भी विकिरण तकनीकों की व्यापक उपादेयता है। उदाहरण के लिए, उच्च-ऊर्जा इलेक्ट्रॉन किरणपुंज त्वरक (इलेक्ट्रॉन बीम एक्सिलिरेटर) के उपयोग से विभिन्न पदार्थों जैसे कि रत्नों (जेमस्टोन्स), औद्योगिक बहुलकों (पॉलिमर्स), अर्धचालक (सेमीकंडक्टर) एवं प्रसंस्कृत खाद्य पदार्थों के गुणधर्मों में उन्नयन किया जाता है। इन त्वरकों से उत्पन्न उच्च-उर्जित इलेक्ट्रॉनों की उक्त पदार्थों से परस्परक्रिया के फलस्वरूप उनके गुणधर्मों में ऐसे कई लाभकारी परिवर्तन होते हैं, जिन्हें अन्य सामान्य / पारंपरिक प्रक्रियाओं से प्राप्त करना कठिन या अव्यवहार्य होता है (चित्र 6)। वर्ष 1982 में भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई में पहला व्यावसायिक इलेक्ट्रॉन किरणपुंज त्वरक (ILU-6) स्थापित किया गया । विभिन्न औद्योगिक अनुप्रयोगों के लिए आवश्यक प्रक्रियाओं और उत्पादों के अनुसंधान एवं विकास

कार्य में इस त्वरक का व्यापक रूप से उपयोग किया जा रहा है। रंगीन रत्नों का उत्पादन, तिर्यकबंधन (क्रॉसलिंकिंग) द्वारा उच्च गुणवत्ता युक्त बहुलक-आधारित तारों एवं केबलों का उत्पादन, टायरों, ओ-रिंग गैस्केटों, ऊष्मा-संकुचनीय (हीट-श्रिंकेबल) बहुलकों का निर्माण एवं भंडारण-अवधि (शेल्फ लाइफ) वृद्धि हेतु खाद्य पदार्थों का विकिरण प्रसंस्करण, आदि इनके उदाहरण हैं। उक्त सभी अनुप्रयोगों द्वारा वैश्विक बाज़ार में प्रतिस्पर्धनीय गुणवत्ता वाले उत्पादों का निर्माण संभव / सुगम हुआ है जो भारत की "मेक इन इंडिया" पहल को सशक्त बनाने में अग्रणी भूमिका निभा रहा है।

चित्र 6. औद्योगिक उत्पादों के विकास में विकिरण तकनीक (इलेक्ट्रॉन बीम) का उपयोग

आभार

लेखकगण, इस लेख की रचना में सहयोग एवं मार्गदर्शन के लिए डॉ. वीरेंद्र कुमार, अध्यक्ष, विकिरण प्रौद्योगिकी विकास प्रभाग, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के प्रति आभार प्रकट करते हैं।

लेखकगण का परिचय

नरेंद्र कुमार गोयल

डॉ. नरेंद्र कुमार गोयल, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के विकिरण प्रौद्योगिकी विकास प्रभाग (RTDD) में वैज्ञानिक अधिकारी-जी के पद पर कार्यरत हैं।

नीलांजल मिश्रा

डॉ. नीलांजल मिश्रा, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के विकिरण प्रौद्योगिकी विकास प्रभाग (RTDD) में वैज्ञानिक अधिकारी-एफ के पद पर कार्यरत हैं।

नाभिकीय संलयन : भविष्य की स्वच्छ ऊर्जा

मन्नू मान

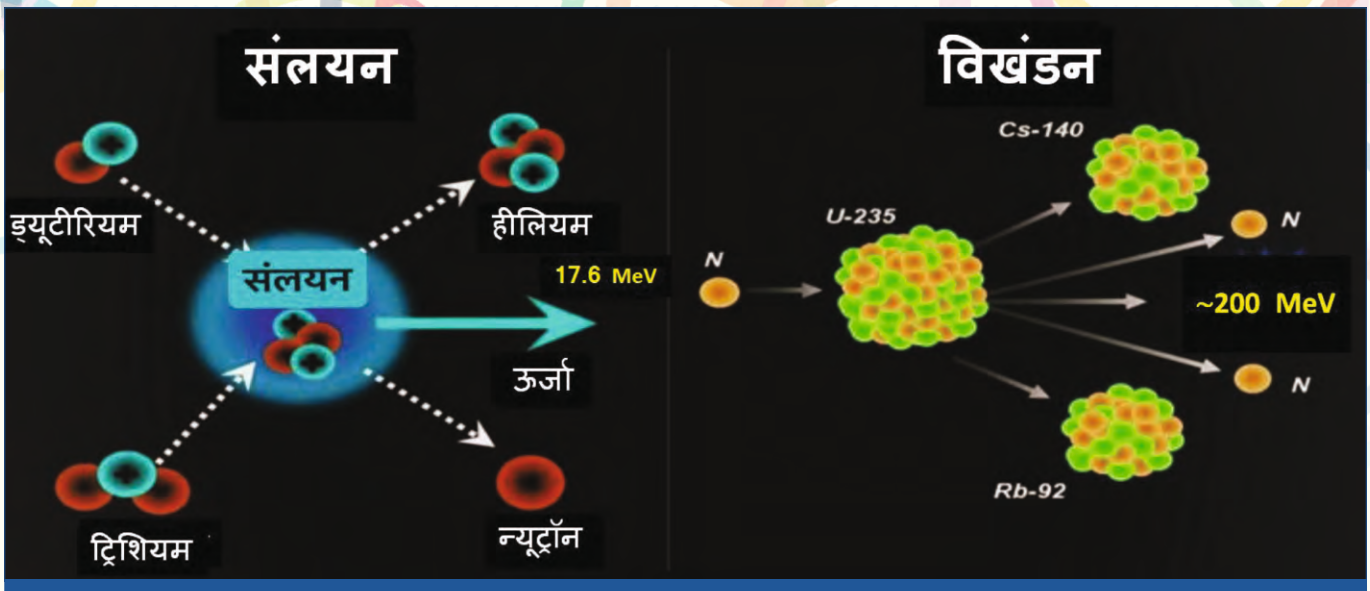
भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

मानव सभ्यता की प्रगति और ऊर्जा की खपत का अटूट संबंध रहा है। औद्योगिक प्रगति में लकड़ी, कोयले और हाइड्रोकार्बन गैस जैसे कार्बन-आधारित ईंधनों का अत्यधिक उपयोग हुआ है। हालांकि, जलवायु परिवर्तन, पर्यावरणीय क्षरण और सीमित संसाधनों के अभाव में मानवता को इसकी भारी कीमत भी चुकानी पड़ी है। आज, इक्कीसवीं सदी में ऊर्जा की अप्रत्याशित बढ़ती मांगों को पूरा करने के लिए स्वच्छ, टिकाऊ और शक्तिशाली स्रोतों की तत्काल आवश्यकता ने हमें परमाणु के हृदय में छिपी अपार शक्ति की ओर देखने के लिए प्रेरित किया है। परमाणु ऊर्जा दो मुख्य प्रक्रियाओं द्वारा प्राप्त की जा सकती है। नाभिकीय विखंडन (न्यूक्लियर फिशन) और नाभिकीय संलयन (न्यूक्लियर फ्यूज़न)। ये दोनों अभिक्रियाएं, रसायनिक अभिक्रियाओं की तुलना में लाखों गुना अधिक ऊर्जा उत्पन्न करती है। नाभिकीय विखंडन एक ऐसी अभिक्रिया है जिसमें भारी परमाणु नाभिक, जैसे यूरेनियम-235 या प्लूटोनियम-239, बमबारित मुक्त न्यूट्रॉन का अवशोषण करके दो छोटे नाभिकों में विभाजित हो जाता है। इस प्रक्रिया में, दो से तीन अतिरिक्त न्यूट्रॉन भी निकलते हैं, जो अन्य यूरेनियम (अथवा प्लूटोनियम) परमाणुओं को विभाजित करते हैं, जिससे विखंडन की श्रृंखला अभिक्रिया (फिशन चेन रिएक्शन) चलती रहती है। प्रत्येक विखंडन में लगभग 200 मिलियन इलेक्ट्रॉन वोल्ट (MeV) ऊर्जा निकलती है। पिछले आठ दशकों से भी अधिक के अनुसंधान एवं विकास के फलस्वरूप नाभिकीय विखंडन वाणिज्यिक रूप से एक परिपक्व और सिद्ध तकनीक बन चुकी है, जो कार्बन-न्यून बिजली/ का एक महत्वपूर्ण स्रोत है। विश्वभर में, वर्तमान में प्रचालित 416 परमाणु बिजली संयंत्रों द्वारा कुल बिजली का लगभग 10 प्रतिशत उत्पादन हो रहा है। लेकिन इस प्रौद्योगिकी की कुछ अंतर्निहित चुनौतियाँ भी हैं, जैसे कि दीर्घकालिक रेडियोधर्मी (रेडियोसक्रिय) अपशिष्ट का सुरक्षित प्रबंधन, हथियारों के लिए नाभिकीय पदार्थ के प्रसार का जोखिम, इत्यादि। इन्हीं चुनौतियों ने वैज्ञानिकों को एक बेहतर, स्वच्छ और सुरक्षित विकल्प की तलाश करने के लिए प्रेरित किया है: जो है नाभिकीय संलयन।

नाभिकीय संलयन क्या है?

यह नाभिकीय विखंडन की ठीक विपरीत प्रक्रिया है। भारी परमाणु के दो (या अधिक) हल्के परमाणुओं में विभाजित (विखंडन) होने के बजाय, यह दो हल्के परमाणु नाभिकों के मिलने से (संलयन) एक भारी नाभिक बनाने की प्रक्रिया है। इसी मौलिक प्रक्रिया से हमारे सूर्य और ब्रह्मांड के अरबों तारों को शक्ति मिलती है, जिससे वे अरबों वर्षों से प्रकाश और ऊष्मा (गर्मी) उत्सर्जित कर रहे हैं। वैज्ञानिकों का लक्ष्य इसी प्रक्रिया (नाभिकीय संलयन) को पृथ्वी पर नियंत्रित रूप से दोहराना है।

ब्रह्मांडीय तारों के कोर (गर्भ) में अत्यधिक गुरुत्वाकर्षण और दाब के कारण, हाइड्रोजन के नाभिक (प्रोटॉन) आपस में मिलकर हीलियम बनाते हैं। हालांकि, पृथ्वी पर तारों जैसा गुरुत्वाकर्षण दाब बनाना असंभव है, वैज्ञानिकों ने एक ऐसी संलयन अभिक्रिया की पहचान की है जिसमें हाइड्रोजन के दो भारी समस्थानिकों (आइसोटोप्स) - ड्यूटीरियम (D) और ट्रिशियम (T) को अत्यधिक उच्च तापमान पर एक साथ लाया जाता है। इससे वे आपस में संलयित (फ्यूज) होकर हीलियम-4 (He-4) नाभिक (जिसे अल्फा कण / विकिरण भी कहा जाता है) और एक उच्च-ऊर्जा न्यूट्रॉन बनाते हैं। इस



चित्र 1 : नाभिकीय संलयन और नाभिकीय विखंडन की प्रक्रिया

प्रक्रिया में भारी मात्रा में (17.6 मिलियन-इलेक्ट्रॉन-वोल्ट (MeV) प्रति संलयन) ऊर्जा निकलती है। नाभिकीय संलयन पदार्थ की एक विशेष अवस्था में होता है जिसे 'प्लाज़्मा' कहा जाता है। किसी गैस को अत्यधिक उच्च तापमान पर गर्म करने पर उसके परमाणुओं से इलेक्ट्रॉन अलग हो जाते हैं। इससे धनावेशित आयनों और मुक्त इलेक्ट्रॉन युक्त आयनित (आयनाइज़्ड) गैस बनती है, जिसे संयुक्त रूप से प्लाज़्मा कहते हैं। चूंकि प्लाज़्मा में आवेशित कण होते हैं, इसलिए इसे शक्तिशाली चुंबकीय क्षेत्रों द्वारा नियंत्रित और परिसीमित किया जा सकता है, जो संलयन को साधने की महत्त्वपूर्ण कुंजी है। चित्र 1 में नाभिकीय संलयन और नाभिकीय विखंडन की विपरीत प्रक्रिया को योजनावत रूप में दिखाया गया है।

संलयन को साधने की तकनीकें

सूर्य के कोर (गर्भ) की परिस्थितियों को पृथ्वी पर एक मानव-निर्मित मशीन के अंदर बनाना और बनाए रखना, यह इक्कीसवीं सदी की सबसे बड़ी अभियांत्रिकी (इंजीनियरिंग) चुनौतियों में से एक है। धनावेशित ड्यूटेरियम और ट्रिशियम नाभिकों के बीच प्राकृतिक रूप से स्थिरवैद्युत (इलेक्ट्रोस्टैटिक) प्रतिकर्षण होता है। उन्हें संलयित (फ्यूज) करने के लिए, निम्नलिखित तीन महत्वपूर्ण शर्तों को एक साथ पूरा करना और बनाए रखना आवश्यक है।

1. अत्यधिक तापमान: प्लाज़्मा को 10 करोड़ से 15 करोड़ डिग्री सेल्सियस से अधिक तापमान तक गर्म किया जाना चाहिए। यह तापमान सूर्य के कोर के तापमान से भी लगभग दस गुना अधिक है। ऐसा तापमान नाभिकों को इतनी अधिक गतिज ऊर्जा प्रदान करता है कि वे अपने पारस्परिक प्रतिकर्षण को दूर कर सकें और टकराकर संलयित (फ्यूज़) हो सकें।

2. पर्याप्त घनत्व (डेंसिटी): प्लाज़्मा को पर्याप्त रूप से घना होना चाहिए ताकि ईंधन आयनों (जैसे कि ड्यूटेरियम और ट्रिशियम) के बीच टकराव की संभावना बढ़ सके और एक सार्थक दर पर संलयन अभिक्रियाएं हो सकें।

3. पर्याप्त परिसीमन (कन्फ़ाइनमेंट) समय: गर्म एवं घने प्लाज़्मा को पर्याप्त समय तक परिसीमित (कन्फ़ाइंड) रखना आवश्यक है ताकि प्लाज़्मा के ठंडे होने या क्षय होने से पहले ही संलयन अभिक्रियाओं के लिए पर्याप्त समय मिल सके और जिसके परिणामस्वरूप एक शुद्ध ऊर्जा लाभ प्राप्त हो सके।

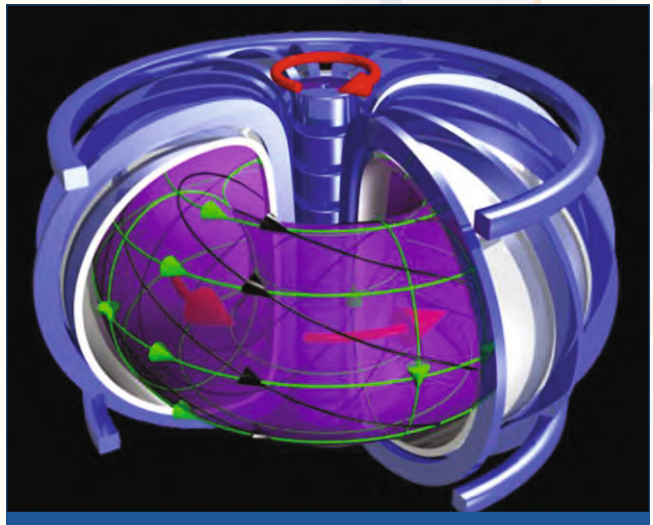
उक्त तीन शर्तों का संयुक्त प्रभाव (गुणनफल) इस प्रकार होना चाहिए ताकि एक स्वपोषी (सेल्फ-सस्टेनिंग), ऊर्जा-उत्पादक संलयन अभिक्रिया प्राप्त की जा सके। पृथ्वी पर इन असाधारण परिस्थितियों को प्राप्त करना और उन्हें बनाए रखना संलयन अनुसंधान की सबसे बड़ी चुनौती है। पर्याप्त परिसीमन (कन्फ़ाइनमेंट) को प्राप्त करने के लिए, वैज्ञानिक मुख्य रूप से निम्न दो दृष्टिकोणों पर काम कर रहे हैं: (1) चुंबकीय परिसीमन संलयन (मैग्नेटिक कन्फ़ाइनमेंट फ्यूज़न; MCF) और (2) जड़त्वीय परिसीमन संलयन (इनर्शियल कन्फ़ाइनमेंट फ्यूज़न; ICF)।

1. चुंबकीय परिसीमन संलयन (मैग्नेटिक कन्फ़ाइनमेंट फ्यूज़न; MCF)

इसका मूल सिद्धांत 15 करोड़ डिग्री सेल्सियस से अधिक गर्म प्लाज़्मा को शक्तिशाली चुंबकीय क्षेत्रों द्वारा एक प्रकार से 'चुंबकीय बोतल' में सीमित (परिसीमित) करना है। चूंकि प्लाज़्मा आवेशित कणों (आयनों और इलेक्ट्रॉनों) से बना होता है, इसलिए यह चुंबकीय क्षेत्र रेखाओं का अनुसरण करता है। ये चुंबकीय क्षेत्र प्लाज़्मा को रिएक्टर की भौतिक दीवारों को छूने से रोकते हैं, जिससे न ही प्लाज़्मा ठंडा होता है और न ही रिएक्टर की दीवारें अत्यधिक ऊष्मा-प्रभाव से पिघलती हैं। इस प्रकार के संलयन के पुनः दो मुख्य डिज़ाइन हैं, जिन्हें टोकामक और स्टेलरेटर कहते हैं।

I) टोकामक (Tokamak)

'टोकामक' एक रूसी संक्षिप्त नाम है जिसका अर्थ "चुंबकीय कुंडली (कॉइल्स) के साथ टॉरॉयडल चैंबर" है। यह संलयन अनुसंधान में अब तक सबसे विकसित और व्यापक रूप से इस्तेमाल किया जाने वाला उपकरण है। यह डोनट के आकार का (टॉरॉयडल) एक निर्वात कक्ष (वैक्यूम चैंबर) होता है जिसके चारों ओर शक्तिशाली चुंबक लगे होते हैं। टोकामक डिज़ाइन अपेक्षाकृत सरल है और यह उत्कृष्ट प्लाज़्मा परिसीमन (कन्फ़ाइनमेंट) प्राप्त कर सकता है। यह उच्च तापमान और घनत्व तक पहुंचने में बहुत सफल रहा है। हालांकि टोकामक की सबसे बड़ी कमज़ोरी प्लाज़्मा करंट पर इसकी निर्भरता है। यह करंट प्लाज़्मा में अस्थिरता / व्यवधान पैदा कर सकता है जिससे रिएक्टर को नुकसान हो सकता है। इसके अलावा, टोकामक के निरंतर प्रचालन के लिए उन्नत और ऊर्जा-गहन तकनीकों की आवश्यकता होती है। चित्र 2 में टोकामक का एक त्रिविमीय (3D) योजनावत (स्कीमेटिक) चित्र दिखाया गया है।



चित्र 2: डोनट के आकार का एक टॉरॉयडल निर्वात कक्ष (वैक्यूम चैंबर) "टोकामक" का त्रिविमीय (3D) योजनावत (स्कीमेटिक) चित्र

ii) स्टेलरेटर (Stellarator)

'स्टेलरेटर' एक लैटिन भाषा का शब्द है जिसका अर्थ है 'तारा'। चुंबकीय परिसीमन (कन्फ़ाइनमेंट) के लिए यह एक विकल्प है। यह भी एक टॉरॉयडल उपकरण है, जो प्लाज़्मा को परिसीमित (कन्फ़ाइन) करने के लिए पूरी तरह से बाहरी चुंबकों पर निर्भर करता है। इसमें प्लाज़्मा के भीतर कोई बड़ा करंट प्रेरित करने की आवश्यकता नहीं होती है। आवश्यक रूप से मुड़े हुए चुंबकीय क्षेत्र को प्राप्त करने के लिए, स्टेलरेटर अत्यंत जटिल, मुड़े हुए और गैर-समतलीय (नॉन-प्लेनर) आकार के चुंबकीय कुंडलियों (कॉइल्स) का उपयोग करता है। प्लाज़्मा करंट की अनुपस्थिति स्टेलरेटर को, स्थिर-अवस्था (स्टेडी-स्टेट) या निरंतर प्रचालन के लिए सक्षम बनाती है, जो व्यावसायिक बिजली संयंत्र के लिए एक बहुत ही वांछनीय विशेषता है। हालांकि इसके लिए जटिल आकार के चुम्बकीय कुंडलियों (मेग्नेटिक कॉइल्स) को

मिलीमीटर-स्तर की सटीकता के साथ बनाना एक बड़ी अभियांत्रिकी (इंजीनियरिंग) चुनौती है। इसके अलावा, इसके भीतर प्लाज़्मा संचार (परिवहन) का भौतिक विज्ञान टोकामक की तुलना में अधिक जटिल है और अब तक के अनुसंधान अनुभव में इसने टोकामक की तुलना में कम परिसीमन (कन्फ़ाइनमेंट) प्रदर्शित किया है।

MCF डिज़ाइन पर वैश्विक स्तर पर सर्वाधिक अनुसंधान एवं विकास किया गया है। इस डिज़ाइन पर आधारित कुछ प्रमुख एवं सफल प्रयोग निम्नानुसार हैं:

1. यूनाइटेड किंगडम (UK) का JET (जॉइंट यूरोपियन टॉरस) जिसने 6 9 मेगाजूल ऊर्जा उत्पादन करके लगभग पांच सेकंड तक संलयन अभिक्रिया को बनाए रखा।

2. जर्मनी का वेंडेलस्टीन 7-X, जिसने आधुनिक स्टेलरेटरों में हाल में हुई प्रगति और उन्नत कंप्यूटिंग से दीर्घकालिक स्थिरता का प्रदर्शन किया।

3. चीन के टोकामक EAST (एक्सपेरिमेंटल एडवांस्ड सुपरकंडक्टिंग टोकामक) ने लगभग 1066 सेकंड तक सतत संलयन का एक विश्व रिकॉर्ड बनाया, जो स्थायी नाभिकीय संलयन की दिशा में एक महत्वपूर्ण कदम है।

2. जड़त्वीय परिसीमन संलयन (इनर्शियल कन्फ़ाइनमेंट फ्यूज़न; ICF)

ICF नाभिकीय संलयन के लिए एक पूर्णतया अलग दृष्टिकोण है। इसका लक्ष्य नाभिकों को इतनी तेज़ी से संलयित (फ्यूज़) करना है कि उनके पास अपने निहित जड़त्व (इनर्शिया) के कारण अलग दिशा में जाने का समय ही न रहे। इस तकनीक में, ड्यूटीरियम-ट्रिशियम ईंधन से भरी एक छोटी सी गुटिका (गोली / पेलेट) को सभी दिशाओं से एक साथ अत्यंत शक्तिशाली लेसर या कणपुंज से बमबारित किया जाता है। इस प्रकार, प्राप्त अत्यधिक ऊर्जा से गुटिका की बाहरी परत तुरंत वाष्पीकृत हो जाती है और जिसके फलस्वरूप एक शक्तिशाली अंतर्मुखी प्रघात तरंग (शॉक वेव) उत्पन्न होती है। यह तरंग गुटिका के भीतर (केंद्र में) ईंधन को संकुचित और इतना गर्म करती है कि जिससे गुटिका के भीतर का घनत्व और तापमान नाभिकीय संलयन हेतु आवश्यक परिस्थितियों तक पहुंच जाता है। इस प्रकार, एक लघु तापनाभिकीय (थर्मोन्यूक्लियर) विस्फोट में ऊर्जा निकलती है। जड़त्वीय परिसीमन संलयन प्रयोग का सबसे प्रसिद्ध उदाहरण संयुक्त राज्य अमेरिका (USA) के लॉरेंस लिवरमोर नेशनल लेबोरेटरी (LLNL) में स्थित नेशनल इग्निशन फ़ैसिलिटी (NIF) का वर्ष 2022 में किया गया वैज्ञानिक प्रज्वलन (साइंटिफिक इग्निशन) रहा है। व्यावसायिक रूप के बिजली उत्पादन संयंत्र के लिए इस प्रक्रिया को प्रति सेकंड कई बार दोहराना आवश्यक है, जो एक बहुत बड़ी अभियांत्रिकी (इंजीनियरिंग) चुनौती है।

विखंडन बनाम संलयन - एक तुलनात्मक अध्ययन

यह समझने के लिए कि दुनिया भर के वैज्ञानिक और सरकारें संलयन ऊर्जा में इतना अधिक निवेश क्यों कर रही हैं, विखंडन और संलयन के बीच एक सीधी, बिंदु-दर-बिंदु तुलना आवश्यक है। यह तुलना स्पष्ट करती है कि संलयन को क्यों "परम ऊर्जा स्रोत" माना जाता है। विखंडन और संलयन दोनों ही परमाणु के नाभिक में संग्रहीत बंधन ऊर्जा (बाइंडिंग एनर्जी) का उपयोग करते हैं। लेकिन यह उपयोग विपरीत तरीकों से होता है। विखंडन में भारी तत्वों को तोड़कर ऊर्जा प्राप्त की जाती है, जबकि संलयन में हल्के तत्वों को जोड़कर। दोनों ही प्रक्रियाएं द्रव्यमान को ऊर्जा में परिवर्तित करती हैं, लेकिन उनके ईंधन, उप-उत्पाद, सुरक्षा प्रोफाइल और तकनीकी परिपक्वता में ज़मीन-आसमान का अंतर है। तालिका-1 में विखंडन और संलयन की विस्तृत तुलना दिखाई गई है।

उक्त तुलना से स्पष्ट है कि यदि संलयन की तकनीकी चुनौतियों पर काबू पा लिया जाए, तो यह मानवता के लिए एक सुरक्षित, स्वच्छ और लगभग अंतहीन ऊर्जा स्रोत बन सकता है।

तालिका 1: विखंडन बनाम संलयन - एक विस्तृत तुलना

विशेषता	नाभिकीय विखंडन (न्यूक्लियर फिशन)	नाभिकीय संलयन (न्यूक्लियर फ्यूज़न)
प्रक्रिया	भारी नाभिक (जैसे यूरेनियम) का हल्के नाभिकों में टूटना	हल्के नाभिकों (जैसे हाइड्रोजन) का एक भारी नाभिक में जुड़ना
ईंधन	यूरेनियम-235, प्लूटोनियम-239 (सीमित संसाधन)	ड्यूटीरियम (समुद्री जल से आसानी से और किफायती रूप से निकाला जा सकता है), ट्रिशियम (नाभिकीय रिएक्टर के अंदर लिथियम से उत्पन्न किया जा सकता है) (वस्तुतः असीमित ईंधन)
ऊर्जा उत्पादन	उच्च	विखंडन से 3-4 गुना अधिक
उप-उत्पाद	न्यून ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन दीर्घकालिक रेडियोधर्मी (रेडियोसक्रिय) नाभिकीय अपशिष्ट	हीलियम (एक अक्रिय गैस), रिएक्टर संरचना में अल्पकालिक न्यूट्रॉन से सक्रियता- जो कम समय में सुरक्षित स्तर तक क्षय हो जाती है। न्यूनतम ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन
सुरक्षा	नाभिकीय श्रृंखला अभिक्रिया के अनियंत्रित होने का जोखिम (सख्त नियंत्रण की आवश्यकता)	स्वाभाविक रूप से सुरक्षित; अभिक्रिया परिस्थितियां भंग होने पर प्लाज़्मा स्वतः बंद हो जाता है। नाभिकीय गलन (न्यूक्लियर मेल्टडाउन) का कोई खतरा नहीं
प्रौद्योगिकी परिपक्वता	परिपक्व, दशकों से वाणिज्यिक प्रचालन	प्रायोगिक चरण में; बहुत अधिक अनुसंधान एवं विकास की आवश्यकता

इंटरनेशनल थर्मोन्यूक्लियर एक्सपेरिमेंटल रिएक्टर (ITER) - एक वैश्विक महापरियोजना

इंटरनेशनल थर्मोन्यूक्लियर एक्सपेरिमेंटल रिएक्टर (ITER) नाभिकीय संलयन से ऊर्जा उत्पादन के लिए मानव इतिहास की सबसे महत्वाकांक्षी और जटिल वैश्विक महापरियोजनाओं में से एक है। यह दक्षिणी फ्रांस के कैडाराचे (कैडाराशे) में है। ITER का उद्देश्य नाभिकीय संलयन को बड़े पैमाने पर एक कार्बन-मुक्त ऊर्जा स्रोत के रूप में वैज्ञानिक और तकनीकी रूप से प्रदर्शित करना है। ITER का विशिष्ट लक्ष्य, 500 मेगावाट (MW) संलयन शक्ति का उत्पादन करना, लंबे समय तक संलयन स्पन्द (पल्स) को बनाए रखना और एक संलयन बिजली संयंत्र के लिए आवश्यक प्रौद्योगिकियों का प्रदर्शन और परीक्षण करना है। साथ ही, अन्य प्रगत प्रौद्योगिकियां जैसे कि अतिचालक चुंबक, प्रणालियों का रोबोट द्वारा दूरस्थ रखरखाव और ट्रिशियम ब्रीडिंग, इत्यादि का परीक्षण एवं प्रदर्शन भी सम्मिलित है। ITER एक प्रायोगिक उपकरण है और इसे ग्रिड के लिए बिजली उत्पादन करने के लिए डिज़ाइन नहीं किया गया है। यह परियोजना सात स्थायी सदस्यों, जिनमें यूरोपीय संघ (मेज़बान के रूप में), भारत,

जापान, दक्षिण कोरिया, रूस, संयुक्त राज्य अमेरिका एवं चीन शामिल हैं, के एक अद्वितीय वैश्विक सहयोग से चल रही है। प्रत्येक सदस्य केवल परियोजना की निर्माण लागत में मौद्रिक योगदान के लिए ही नहीं बल्कि विभिन्न घटकों, प्रणालियों या भवनों के डिज़ाइन, निर्माण और वितरण के लिए भी जिम्मेदार है।

ITER में भारत का योगदान

भारत औपचारिक रूप से वर्ष 2005 में ITER परियोजना में शामिल हुआ। ITER-India, गुजरात के गांधीनगर स्थित 'प्लाज़्मा अनुसंधान संस्थान' (इंस्टीट्यूट ऑफ़ प्लाज़्मा रिसर्च, IPR) की विशेष परियोजना है और IPR ही ITER के लिए भारत के सभी योगदानों एवं भूमिकाओं को समन्वयित करने के लिए जिम्मेदार संस्था (एजेंसी) है । ITER में भारत की भूमिका केवल एक भागीदार की नहीं है, बल्कि भारत इसमें सबसे महत्वपूर्ण और तकनीकी रूप से चुनौतीपूर्ण घटकों के निर्माण एवं सुपुर्दगी के लिए भी जिम्मेदार है। निम्नतापस्थापी (क्रायोस्टेट) जैसी जटिल प्रणालियों की एंड-टू-एंड डिलीवरी की जिम्मेदारी लेकर, भारतीय कंपनियों ने बड़े पैमाने पर सटीक निर्माण, निम्नतापविज्ञान (क्रायोजेनिक्स) और निर्वात (वैक्यूम) प्रौद्योगिकी जैसे जटिल क्षेत्रों में विश्व स्तरीय विशेषज्ञता विकसित की है। इस प्रयास में लगभग 200 से अधिक भारतीय वैज्ञानिक और अभियंता (इंजीनियर) शामिल हैं। साथ ही, लार्सन एंड टुब्रो (एल एंड टी), आइनॉक्स इंडिया (Inox India) और टाटा कंसल्टिंग इंजीनियर्स (T C E) जैसे प्रमुख औद्योगिक भागीदार भी शामिल हैं। भारत का योगदान ITER की सफलता के लिए अभिन्न है और यह वैश्विक मंच पर देश की वैज्ञानिक और औद्योगिक शक्ति प्रदर्शन का एक शक्तिशाली अंग है।

भारत में संलयन अनुसंधान: प्लाज़्मा अनुसंधान संस्थान (इंस्टीट्यूट ऑफ़ प्लाज़्मा रिसर्च, IPR)

जब विश्व नाभिकीय संलयन की शक्ति को प्रौद्योगिकी के रूप में विकसित करने के लिए मिलकर काम कर रहा है, तब भारत भी इस प्रयास में केवल एक भागीदार के रूप में ही नहीं, बल्कि एक महत्वपूर्ण और सक्षम राष्ट्र के रूप में खड़ा है। भारत की यह क्षमता दशकों से देश में चल रहे अनुसंधान एवं विकास का परिणाम है, जिसका नेतृत्व गांधीनगर, गुजरात में स्थित प्लाज़्मा अनुसंधान संस्थान (इंस्टीट्यूट ऑफ़ प्लाज़्मा रिसर्च, IPR) कर रहा है। IPR भारत के परमाणु ऊर्जा विभाग (DAE) के तहत एक स्वायत्त संस्थान है। वर्ष 1986 में स्थापित यह संस्थान, प्लाज़्मा विज्ञान एवं तापनाभिकीय संलयन (थर्मोन्यूक्लियर फ्यूज़न) में मौलिक और अनुप्रयुक्त अनुसंधान के लिए देश के प्रमुख संस्थान के रूप में कार्यरत है। IPR ने अब तक स्वदेशी रूप से विभिन्न टोकामक डिज़ाइन और निर्मित किए हैं। वर्ष 1989 में प्रचालित किया गया 'आदित्य टोकामक', भारत का पहला स्वदेशी रूप से डिज़ाइन एवं निर्मित किया गया टोकामक है। यह एक मध्यम आकार की मशीन है। वर्ष 2016 में इसके उन्नयित स्वरुप 'आदित्य-U' (ADITYA-U) द्वारा लगभग 200 kA प्लाज़्मा करंट और 350 मिलीसेकंड की प्रचालन अवधि हासिल की गई है, जो भारत को अगली पीढ़ी के टोकामक विकास के पायदान पर लाती है। SST-1 (स्टेडी स्टेट सुपरकंडक्टिंग टोकामक-1) एक उन्नत, मध्यम आकार का स्थिर-अवस्था अतिचालक टोकामक है जिसका प्राथमिक उद्देश्य भविष्य के संलयन-आधारित बिजली उत्पादन संयंत्रों हेतु स्थिर-अवस्था (स्टेडी-स्टेट) प्रचालन, दीर्घ प्रचालन अवधि हासिल करना और अतिचालक (सुपरकंडक्टिंग) चुंबकों का अध्ययन करना है। आदित्य (ADITYA) के द्वारा जहां टोकामक संचालन हेतु बुनियादी कौशल प्राप्त किया गया, उन्नयित स्वरूप 'आदित्य-U' (ADITYA-U) से प्लाज़्मा को आकार देने की शुरूआत हुई। SST-1 ने अतिचालक चुंबकों और स्थिर-अवस्था प्रचलन जैसी चुनौतियों को लक्षित किया। IPR, निश्चित रूप से वैश्विक ITER परियोजना में भारत की सफल भागीदारी का प्रत्यक्ष उदाहरण है।

नाभिकीय संलयन - एक स्वच्छ ऊर्जा भविष्य की ओर

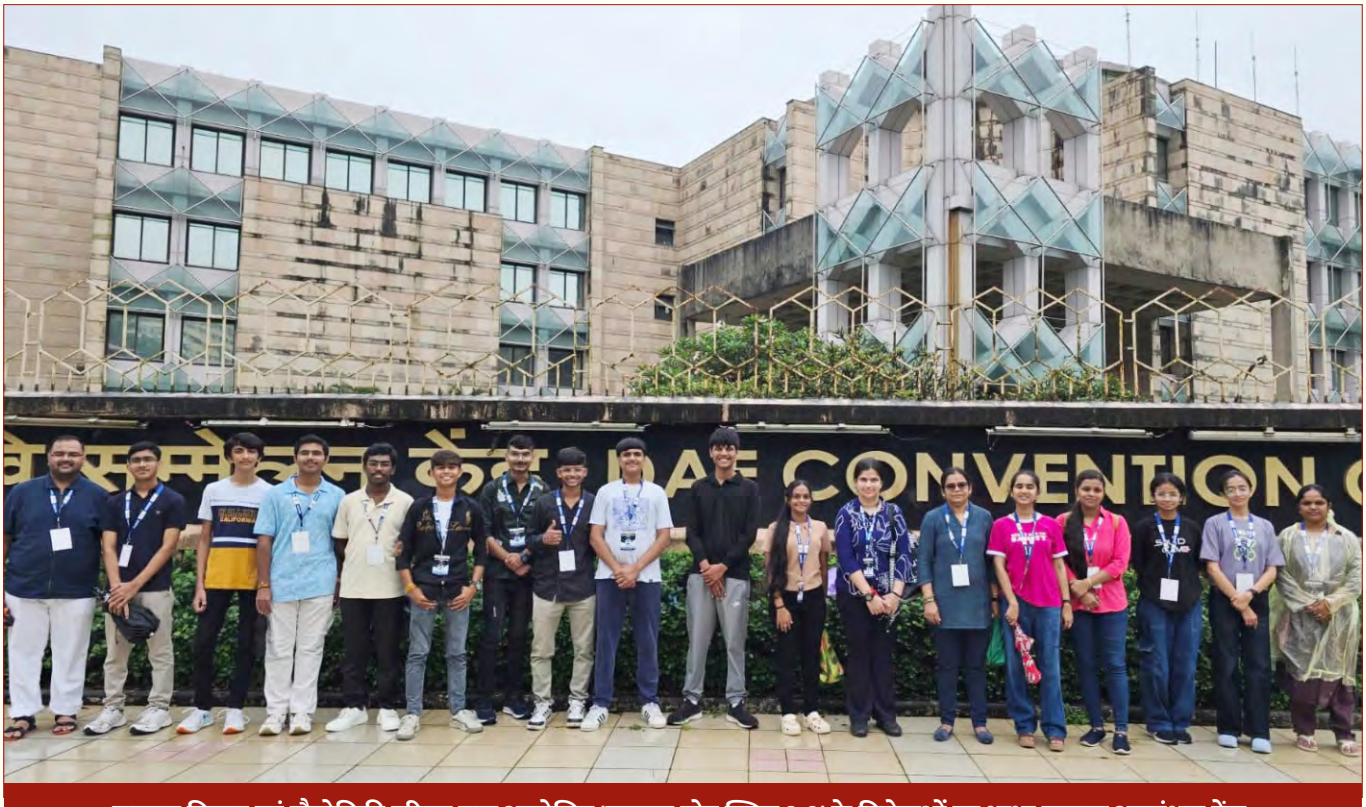
नाभिकीय संलयन अपार ऊर्जा का स्रोत है। एक ऐसा स्रोत जो वस्तुतः असीमित ईंधन (समुद्री जल से ड्यूटीरियम और

लिथियम से ट्रिशियम) का उपयोग करता है; जो कोई ग्रीनहाउस गैस या वायु प्रदूषक उत्सर्जित नहीं करता; जो कोई दीर्घकालिक रेडियोधर्मी (रेडियोसक्रिय) अपशिष्ट उत्पन्न नहीं करता; और जो स्वाभाविक रूप से सुरक्षित है, जिसमें नाभिकीय गलन (न्यूक्लियर मेल्टडाउन) का कोई खतरा भी नहीं है। यह मानवता की ऊर्जा और पर्यावरणीय दुविधाओं का एक स्थायी समाधान प्रदान करने में सक्षम है। परंतु, इस तकनीक को व्यावसायिक वास्तविकता में बदलने की राह निःसंदेह लंबी और जटिल चुनौतियों से भरी है। ये चुनौतियां भौतिकी, पदार्थ विज्ञान, अभियांत्रिकी (इंजीनियरिंग) और अर्थशास्त्र के क्षेत्रों में फैली हुई हैं। पिछले एक दशक में इन क्षेत्रों में हुई प्रगति ने इस क्षेत्र में एक नए उत्साह और आशा का संचार किया है।

लेखक का परिचय

मन्नू मान

श्रीमती मन्नू मान, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के स्वास्थ्य भौतिकी प्रभाग (HPD) में वैज्ञानिक अधिकारी-डी के पद पर कार्यरत हैं।



गुजरात विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी परिषद द्वारा आयोजित 'गुजरात स्टेम क्विज़ 3.0' के विजेताओं का भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, ट्रॉम्बे, मुंबई का दौरा

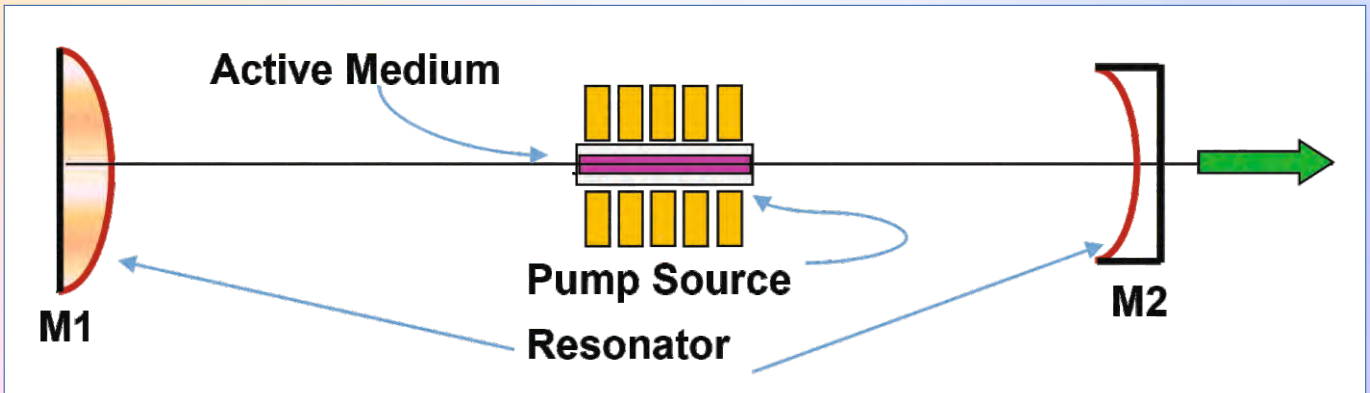
लेसर प्रौद्योगिकी : प्रगति का नया आयाम

परमजीत राणा और विनोद सिंह रावत

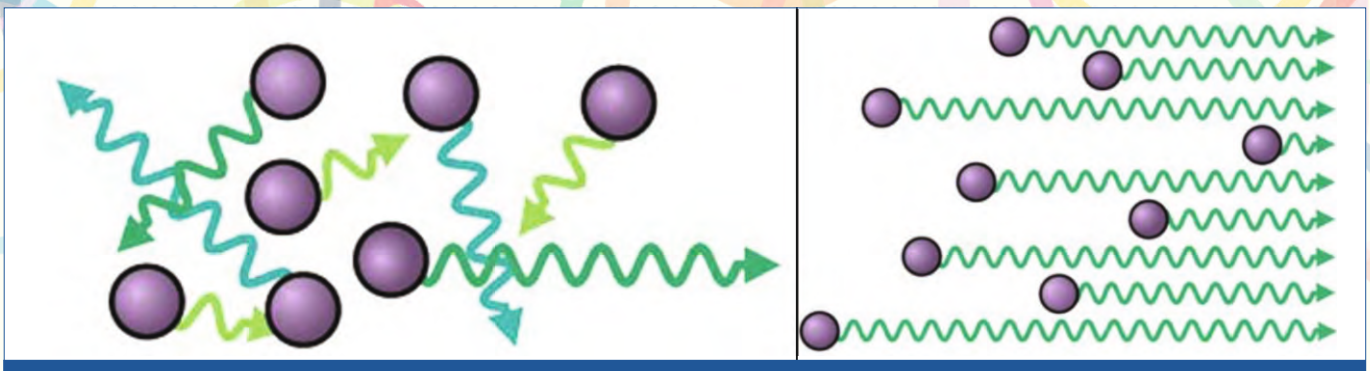
भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

प्रकाश केवल प्रकृति की विविधता और सुन्दरता का दर्शन करने में ही नहीं बल्कि उसे समझने और विश्लेषण करने में भी अहम भूमिका निभाता है। प्रकाश विद्युतचुम्बकीय ऊर्जा है जिसे अलग-अलग वर्गों में विभाजित किया गया है। इसके अनेक प्रकारों में से, एक अति-विशिष्ट प्रकार है, लेसर (LASER)। विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी को उन्नति की ऊंचाइयों पर पहुंचाने में लेसर का योगदान अहम है। लेसर का उपयोग हमारे दैनिक कार्यों में इस्तेमाल होने वाले बार-कोड स्कैनर, सीडी/ डीवीडी (CD/DVD) प्लेयर, पॉइंटर, इत्यादि में हो रहा है। रक्षा-क्षेत्र में इस्तेमाल होने वाले हथियारों से लेकर क्वांटम कम्प्यूटिंग तक, ब्रह्मांडीय गुरुत्वाकर्षण तरंगों के अध्ययन संबंधित वेधशाला (लिगो; LIGO) से लेकर संलयन (फ्यूज़न) तक, एवं लेसर-प्रेरित परमाणु परिवर्तन जैसी उन्नत वैज्ञानिक तकनीकों तक लेसर अपना प्रभाव स्थापित कर चुकी है। प्रस्तुत लेख में, लेसर उपकरणों की विशेषताओं और कुछ अनुप्रयोगों के बारे में संक्षिप्त जानकारी दी गई है।

लेसर का कार्य सिद्धांत - लेसर (LASER) का पूरा नाम 'लाइट एम्पलीफिकेशन बाइ स्टिम्युलेटेड एमिशन ऑफ रेडिएशन' (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) है जिसका हिंदी रूपांतरण 'विकिरण के उद्दीपित उत्सर्जन द्वारा प्रकाश का प्रवर्धन' है। यह एक ऐसी तकनीक है, जिससे प्रकाश की अति-तीव्र, संकरी और सीधी किरण उत्पन्न होती है। यह सामान्य प्रकाश से काफी अलग होती है। किसी लेसर से प्राप्त सभी प्रकाश तरंगों की दिशा, आवृति और कला (Phase) समान होती है। इसका मूल सिद्धान्त यह है कि जब किसी परमाणु को ऊर्जा दी जाती है तो उसके इलेक्ट्रॉन उत्तेजित होकर, उच्च ऊर्जास्तर पर चले जाते हैं। ये इलेक्ट्रॉन प्रकाश कण (फोटॉन) उत्सर्जित करते हुए पुनः निम्न ऊर्जास्तर पर आते हैं। इस प्रक्रिया में, फोटॉन जब किसी उत्तेजित परमाणु से टकराता है तो उद्दीपित उत्सर्जन (स्टिम्युलेटेड एमिशन) के कारण उसी दिशा और कला में एक अन्य फोटॉन उत्पन्न हो जाता है। यह प्रक्रिया जब उत्तेजित परमाणुओं के किसी पदार्थ में बार-बार दोहराई जाती है, तो एक ही तरह के फोटॉनों (प्रकाश कणों) का प्रवर्धन होता है। इसके परिणामस्वरूप, एक शक्तिशाली, केंद्रित, संबद्ध (कोहरेंट) लेसर प्रकाश-पुंज (लाइट-बीम) प्राप्त होता है।



चित्र-1 लेसर का मूल ढांचा (योजनावत)



चित्र - 2 असंबद्ध (नॉन-कोहरेंट) एवं संबद्ध (कोहरेंट) फोटॉन

लेसर के तीन मुख्य घटक होते हैं - सक्रिय/लब्धि माध्यम (active/gain medium), पंप स्रोत (pump source) और प्रकाशीय अनुनादक (optical resonator) । ये मिलकर उद्दीपित उत्सर्जन द्वारा संबद्ध (कोहरेंट) प्रकाश उत्पन्न करते हैं।

लेसर के गुण - लेसर प्रकाश में केवल एक ही तरंगदैर्घ्य (वेवलेंथ) होती है जो इसे एकवर्णीयता (मोनोक्रोमैटिसिटी) प्रदान करती है। लेसर किरणें बहुत कम फैलती हैं, इसलिए बहुत दूर तक सीधी जा सकती है जिसे दैशिकता (डाइरेक्शनालिटी; directionality) कहा जाता है। कला-संबद्धता (phase-coherence) लेसर का सबसे महत्वपूर्ण गुण है जो इसे अन्य सभी प्रकार के प्रकाश स्रोतों से विशिष्ट बनाता है और इसकी उपयोगिता को असाधारण रूप से बढ़ा देता है।

लेसर किरणपुंज की समस्त ऊर्जा को बहुत ही छोटे क्षेत्र में केंद्रित किया जा सकता है, जिसके कारण इसकी तीव्रता को बहुत अधिक मात्रा में बढ़ाया जा सकता है।

लेसर के सामान्य प्रकार - सक्रिय (लब्धि) माध्यम की अवस्था के आधार पर लेसर को चार प्रकारों में बांटा गया है - (1) ठोस-अवस्था (सॉलिड-स्टेट) लेसर जैसे कि Nd:YAG, (2) गैसीय अवस्था लेसर जैसे कि हीलियम-निऑन (He-Ne), (3) अर्धचालक (सेमी-कंडक्टर) लेसर जैसे कि गैलियम आर्सेनाइड (Ga-As), तथा (4) तरल अवस्था लेसर जैसे कि रंजक (डाइ; dye) लेसर । तरंग निरन्तरता के आधार पर लेसर दो प्रकार की होती है - सतत तरंग (कन्टिन्यूअस वेव) और स्पंदित (पल्स्ड) । स्पंदित लेसरों को उनके स्पंद अन्तराल (पल्स ड्यूरेशन) के आधार पर नैनो (10^{-9}), पिको (10^{-12}), फेम्टो (10^{-15}), एट्टो (10^{-18}) सेकंड लेसर के तौर पर जाना जाता है। तरंगदैर्घ्य (वेवलेंथ) की निश्चितता अथवा परिवर्तनीयता के आधार पर लेसर दो प्रकार की - एकवर्णीय (मोनोक्रोमेटिक) एवं समस्वरणीय (ट्यूनेबल) होती है। डाइ लेसर, सॉलिड-स्टेट ट्यूनेबल लेसर (टाइटेनियम-सफायर; Ti-Sapphire), सेमी-कंडक्टर लेसर और प्रकाश प्राचलिक दोलित्र (आप्टिकल पैरामेट्रिक ऑसिलेटर; optical parametric oscillator), इत्यादि समस्वरणीय (ट्यूनेबल) लेसरों के कुछ सामान्य प्रकार हैं।

लेसर के महत्वपूर्ण अनुप्रयोग - ट्यूनेबल लेसर की तरंगदैर्घ्य को सटीक रूप से नियंत्रित किया जा सकता है, जो विभिन्न क्षेत्रों में उनके अनुप्रयोगों के लिए उत्तरदायी है। इसमें दूरसंचार, स्पेक्ट्रमदर्शी, मेडिकल इमेजिंग एवं संवेदन (सेंसिंग) तथा अनेक प्रकार के अनुसंधान एवं विकास शामिल हैं। चिकित्सा के क्षेत्र में लेसर का उपयोग विविध प्रकार की शल्य-चिकित्सा एवं अन्य-उपचारों के लिए किया जाता है, जिनमें आंखों की शल्य-चिकित्सा (सर्जरी), दंत-चिकित्सा, त्वचा-देखभाल एवं कैंसर-उपचार महत्त्वपूर्ण हैं।

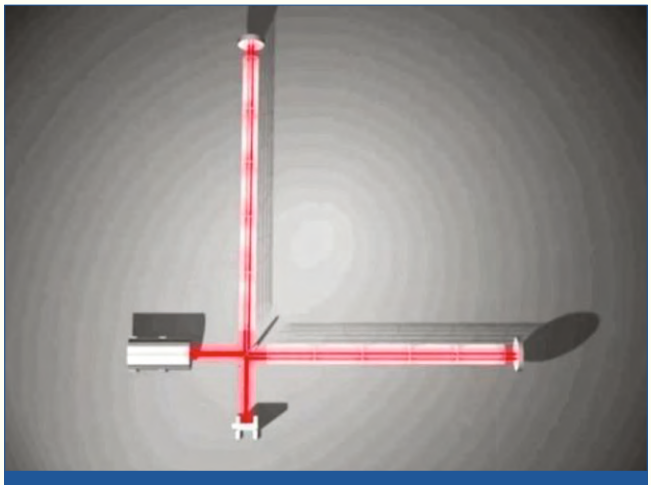
उद्योगों में भी लेसर का उपयोग सटीक और कुशल प्रक्रियाओं के क्रियान्वयन में किया जाता है। लेसर किरणों की ऊर्जा को अति-सूक्ष्मबिंदु पर केंद्रित कर पाने की क्षमता

के कारण, धातुओं, गैर-धातुओं की वेल्डिंग, कटिंग, ड्रिलिंग, मार्किंग, इत्यादि बड़ी आसानी से की जा सकती है। सुपरमार्केट में उत्पादों के बारकोड स्कैनर, लेसर पॉइंटर, पर्यटक स्थलों पर लेसर लाईट शो, इत्यादि अनुप्रयोग सामान्य जन-जीवन में लेसर की उपयोगिता को दर्शाते हैं।

कुछ प्रमुख, प्रभावशाली एवं प्रगतिशील लेसर प्रौद्योगिकियों के वैश्विक उपयोग, जो विज्ञान और तकनीकी विकास में क्रांतिकारी बदलाव ला रहे हैं, की चर्चा भी आवश्यक है। लेसर किरणों में निहित अथाह ऊर्जा को केंद्रित करके चरम शक्ति घनत्व (peak power density) प्राप्त किया जा सकता है जिसका उपयोग नाभिकीय संलयन (न्यूक्लियर फ्यूज़न) में किया जाता है। लेसर फ्यूज़न को जड़त्वीय परिसीमन संलयन (इनर्शियल कन्फ़ाइनमेंट फ्यूज़न; inertial confinement fusion (ICF)) भी कहा जाता है। इसका लक्ष्य नाभिकीय ऊर्जा को एक स्वच्छ, सुरक्षित और लगभग असीमित स्रोत बनाना है। इस प्रक्रिया में ड्यूटिरियम (2D) और ट्रिशियम (3T) युक्त गुटिका (पेलेट) पर अति-ऊर्जित किरणों को आपतित किया जाता है, जिससे गुटिका (पेलेट) की बाहरी परत वाष्पीकृत हो जाती है और इसके अंदर का भाग सूर्य के समान उच्च दाब एवं तापमान अवस्था का सामना कर पाता है।

इन परिस्थितियों में ड्यूटीरियम एवं ट्रिशियम के नाभिक संलयित हो जाते हैं और भारी मात्रा में ऊर्जा मुक्त होती है जिसका विभिन्न प्रकार से उपयोग किया जा सकता है। वर्ष 2022 में, संयुक्त राज्य अमेरिका की राष्ट्रीय इग्निशन सुविधा (NIF) में पहली बार लेसर संलयन (लेसर फ्यूज़न) संभव हो पाया, जिसे इस क्षेत्र में बड़ी सफलता माना जाता है।

लेसर तरंगों के संबद्ध (कोहरेंट) होने के कारण, व्यतिकरण (इंटरफेरेंस) पर आधारित अनुप्रयोगो में भी इसका उपयोग किया जाता है। लेसर इंटरफेरोमीटर गुरुत्वीय-तरंग वेधशाला (लेसर इंटरफेरोमीटर ग्रेविटेशनल-वेव ऑब्जर्वेटरी, जिसे LIGO भी कहा जाता है) इसका एक महत्त्वपूर्ण उदाहरण है, जिसके द्वारा ब्रह्मांड में मौजूद गुरुत्वाकर्षण तरंगों का पता लगाया जा सकता है। इसमें एक संवेदनशील लेसर इंटरफेरोमीटर का उपयोग करके अंतरिक्ष समय (स्पेस टाइम) में होने वाले सूक्ष्म परिवर्तनों को मापा जाता है। जब एक गुरुत्वाकर्षण तरंग पृथ्वी से होकर गुज़रती है तो वह स्पेस को थोड़ा खींचती और सिकोड़ती है जिससे वेधशाला (ऑब्जर्वेटरी) में लगे उपकरणों में बहुत ही मामूली बदलाव होते हैं, जिन्हें संसूचक (डिटेक्टर) माप लेते हैं। इस वेधशाला (ऑब्जर्वेटरी) में माइकलसन व्यतिकरणमापी (माइकलसन इंटरफेरोमीटर) को 4 किलोमीटर लंबी दो भुजाओं में स्थापित किया गया है। जब अति-संबद्ध लेसर किरणें इन भुजाओं के अन्त में स्थित दर्पणों से टकरा कर पुनः एक बिन्दु पर मिलती हैं तो एक इंटरफेरेंस पैटर्न का निर्माण होता है। गुरुत्वाकर्षण तरंग की मौजूदगी इस पैटर्न में हुए बदलाव के कारण ही डिटेक्ट की जा सकती है।



चित्र-3 लेसर इंटरफेरोमीटर गुरुत्वीय तरंग वेधशाला

[https://www.ligo-india.in/outreach/ detecting-gravitational-waves/]

क्वांटम कम्प्यूटिंग के क्षेत्र में भी समस्वरणीय (ट्यूनेबल) लेसर का उपयोग क्वांटम बिट्स अर्थात क्युबिट्स (Qubits) को नियंत्रित और परिवर्तित करने के लिए किया जाता है। ट्यूनेबल लेसर के उपयोग से आयन पाश (आयन ट्रैप) और परमाणु पाश (एटम ट्रैप) जैसी परिस्थितियां उत्पन्न करके क्युबिट्स का निर्माण एवं नियंत्रण किया जाता है।

ट्यूनेबल लेसर का अनुप्रयोग समस्थानिकों के संवर्धन में भी किया जाता है। समस्थानिकीय समृद्ध पदार्थों को नाभिकीय रिएक्टर में तत्वान्तरित (परिवर्तित) करके, प्राप्त उत्पादों का कैंसर के निदान और उपचार में इस्तेमाल किया जा रहा है, जिससे सामाजिक कल्याण में भी योगदान मिल रहा है।

आधुनिक लेसर किरणों की शीर्ष शक्ति (पीक पावर) पेटावाट (10^{15} वाट) तक और स्पन्द अंतराल (पल्स ड्यूरेशन) एट्टोसेकंड (10^{-18} सेकंड) तक पहुँच चुकी है। लेसर-आधारित तकनीकें विज्ञान के विभिन्न क्षेत्रों में नए आयाम स्थापित करते हुए क्रांतिकारी बदलाव ला रही है।

लेसर के अनुप्रयोग निरंतर बढ़ रहे हैं। परमाणु ऊर्जा विभाग की विभिन्न इकाइयों जैसे भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई और राजा रमन्ना प्रगत प्रौधोगिकी केंद्र, इंदौर में लेसर के विकास एवं उन्नत अनुप्रयोगों पर तीव्र गति से कार्य हो रहा है। इन संस्थानों में कार्यरत वैज्ञानिक उन्नत लेसर के विकास और इनके अनुप्रयोगों के माध्यम से वैश्विक स्तर पर देश के विकास और जन-कल्याण हेतु निरंतर प्रयासरत हैं।

आभार

लेखकद्वय, इस लेख की संरचना में प्रत्यक्ष एवं परोक्ष रूप से सहयोग एवं मार्गदर्शन देने वाले सभी व्यक्तियों विशेषकर श्री मार्टिन मास्करेन्हस, निदेशक, किरणपुंज विकास वर्ग, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के प्रति हार्दिक आभार प्रकट करते हैं।

लेखकगण का परिचय

परमजीत राणा

डॉ. परमजीत राणा, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के प्रगत ट्यूनेबल लेसर अनुप्रयोग प्रभाग (ATLAD) में वैज्ञानिक अधिकारी-जी के पद पर कार्यरत हैं।

विनोद सिंह रावत

डॉ. विनोद सिंह रावत, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के प्रगत ट्यूनेबल लेसर अनुप्रयोग प्रभाग (ATLAD) में वैज्ञानिक अधिकारी-एच के पद पर कार्यरत हैं।

"मेरी सफलता इस बात पर निर्भर नहीं करेगी कि कोई मेरे बारे में क्या सोचता है..."

- डॉ. होमी जहांगीर भाभा

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र की हिंदी वैज्ञानिक पत्रिका

परमाणु विज्ञान

अंक 1 | जुलाई-दिसंबर 2025

'परमाणु विज्ञान' पत्रिका में प्रकाशित लेखों में अभिव्यक्त विचारों, सूचनाओं, जानकारियों, आदि से भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई या इस अंक के संपादन/प्रकाशन समिति का सहमत होना आवश्यक नहीं है। यह पत्रिका नाभिकीय विज्ञान एवं अभियांत्रिकी में हो रहे अनुसंधान एवं इसके व्यापक सामाजिक अनुप्रयोगों के संबंध में प्रामाणिक वैज्ञानिक जानकारी का हिंदी में प्रचार एवं प्रसार करने हेतु अर्ध-वार्षिक रूप से प्रकाशित की जाती है।

इस अंक में...

भारत में परमाणु ऊर्जा : वर्तमान परिदृश्य 1

डॉ. होमी जहांगीर भाभा : एक वैज्ञानिक युगद्रष्टा 6

प्लाज़्मा : कैंसर के विरुद्ध आशा की एक नई किरण 10

मेस टेलिस्कोप : ब्रह्मांड की खोज में आत्मनिर्भर कदम 14

फ्लोरेसेंस से पैथोलॉजी तक : पॉइंट ऑफ़ केअर की राह 18

यूरेनियम की यात्रा : मिट्टी से भट्टी तक 25

विकिरण : असीम संभावनाओं के खुलते द्वार 28

EXAFS - पदार्थों की दुनिया को समझने का अनोखा अंदाज़ 32

विकिरण प्रौद्योगिकी एवं खाद्य सुरक्षा 36

विकिरण प्रौद्योगिकी के सामाजिक अनुप्रयोग 43

नाभिकीय संलयन : भविष्य की स्वच्छ ऊर्जा 49

लेसर प्रौद्योगिकी : वैज्ञानिक उन्नति का नया आयाम 56

संपादन मंडल

मुख्य संरक्षक
श्री विवेक भसीन, निदेशक, भापअ केंद्र

सह-संरक्षक
श्री के. जयकुमार, नियंत्रक, भापअ केंद्र

प्रकाशन/संपादकीय समिति

अध्यक्ष
डॉ. ए. के. दुरेजा
सह निदेशक, ज्ञान प्रबंधन वर्ग एवं अध्यक्ष, मानव संसाधन विकास प्रभाग, भापअ केंद्र

मुख्य संपादक
श्री मनोज सिंह
अध्यक्ष, वैज्ञानिक सूचना संसाधन प्रभाग, भापअ केंद्र

संपादक
श्री सैयद इरफ़ान अली
उप निदेशक (राजभाषा), हिंदी अनुभाग, भापअ केंद्र

सह-संपादक
डॉ धीरज जैन
वैज्ञानिक अधिकारी-जी, विकिरण एवं प्रकाश रसायनिकी प्रभाग, भापअ केंद्र

सदस्यगण
डॉ (श्रीमती) चेल्लम श्रीविद्या
वैज्ञानिक अधिकारी-एच, आयुर्विज्ञान प्रभाग, भापअ केंद्र
डॉ. अमित कुमार
वैज्ञानिक अधिकारी-जी, विकिरण जैविकी एवं स्वास्थ्य विज्ञान प्रभाग, भापअ केंद्र
श्री हेमंत कुमार स्वेन
वैज्ञानिक अधिकारी-एफ, सुदूर प्रहस्तन एवं रोबोटिक्स प्रभाग, भापअ केंद्र
डॉ. के. के. सिंह
वैज्ञानिक अधिकारी-एफ, खगोल भौतिकी विज्ञान प्रभाग, भापअ केंद्र
श्री तत्सत द्विवेदी
वैज्ञानिक अधिकारी-ई, लेज़र एवं प्लाज्मा प्रौद्योगिकी प्रभाग, भापअ केंद्र
सुश्री शुचिता बहादुर
वैज्ञानिक अधिकारी-ई, विकिरण संरक्षा प्रणाली प्रभाग, भापअ केंद्र
श्री निखिलेश नव विज्ञान
वैज्ञानिक अधिकारी-ई, पदार्थ संसाधन एवं संक्षारण अभियांत्रिकी प्रभाग, भापअ केंद्र
डॉ. गौतम विश्वकर्मा
वैज्ञानिक अधिकारी-ई, नाभिकीय कृषि एवं जैव-प्रौद्योगिकी प्रभाग, भापअ केंद्र
श्री माधव एन.
तकनीकी अधिकारी-डी, वैज्ञानिक सूचना संसाधन प्रभाग, भापअ केंद्र

मुखपृष्ठ की संकल्पना

'परमाणु विज्ञान' पत्रिका के मुखपृष्ठ और अंतिम पृष्ठ की संकल्पना वर्ण मनोविज्ञान और विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी के ज्यामितीय दृश्य संतुलन का मिश्रण है। भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के निदेशक श्री विवेक भसीन ने इस पत्रिका का नाम 'परमाणु विज्ञान' रखने और इसे कैलीग्राफिक फॉन्ट में प्रभावशाली, सुलेख और स्पष्ट पठनीय शैली में प्रस्तुत करने की परिकल्पना की । वे स्वयं, इस पत्रिका के मुख्य संरक्षक भी हैं।

इस पत्रिका के फॉन्ट का रंग, हेक्सकोड 4DB2EDFF, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र ट्रॉम्बे स्थित अप्सरा-यू रिसर्च रिएक्टर में चेरेनकोव विकिरण की रोशनी की छवि से प्राप्त रंग पट्टिकाओं से उत्पन्न रंगों में से एक है। पत्रिका के प्रथम पृष्ठ से अंतिम पृष्ठ तक सजाए गए ज्यामितीय रंगीन आकार परमाणु विज्ञान और प्रौद्योगिकी अनुसंधान एवं विकास के विभिन्न मुख्य क्षेत्रों को इंगित करते हैं, जिनमें रिसर्च रिएक्टर साइरस (CIRUS) की गुंबदनुमा संरचना भी शामिल है। मुखपृष्ठ और अंतिम पृष्ठ में बिंदुओं का समूह शोध रिएक्टर के ईंधन बंडलों के शीर्ष क्रॉस-सेक्शनल सदृश्य हैं।

इस पत्रिका के पृष्ठों के डिज़ाइन की परिकल्पना श्री मनोज सिंह, प्रभागाध्यक्ष, वैज्ञानिक सूचना संसाधन प्रभाग (वै. सू. सं. प्र.) द्वारा की गई है। इसकी ग्राफिक अभिकल्पना को श्री बी. एस. चौहान, वै. सू. सं. प्र., ने आकार प्रदान किया और श्री एस. के. सिंह, वै. सू. सं. प्र. ने इसकी आर्ट प्रिंटिंग में योगदान दिया। श्री हेमंत कुमार स्वैन, डीआरएचआर द्वारा इस पत्रिका हेतु एक अनुपम दृश्य विशिष्टता की परिकल्पना की गई, जिसे वै. सू. सं. प्र. में और अधिक परिमार्जित कर मनोरम बनाया गया ।

श्री कुमार अभिनव, वरिष्ठ अनुवाद अधिकारी ने लेखों को जन-सामान्य की सरल हिंदी भाषा में पठनीय बनाने में सक्रिय योगदान दिया है ।

संपर्क सूत्र
श्री मनोज सिंह
मुख्य संपादक
परमाणु विज्ञान
वैज्ञानिक सूचना संसाधन प्रभाग
भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र
ट्रॉम्बे, मुंबई - 400 085 (महाराष्ट्र)
ई-मेल- parmanuvigyan@barc.gov.in; smanoj@barc.gov.in