

प्लाज़्मा फोकस संलयन - गैर-रेडियोधर्मी बहु-विकिरण स्रोत



डॉ. राम निरंजन

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

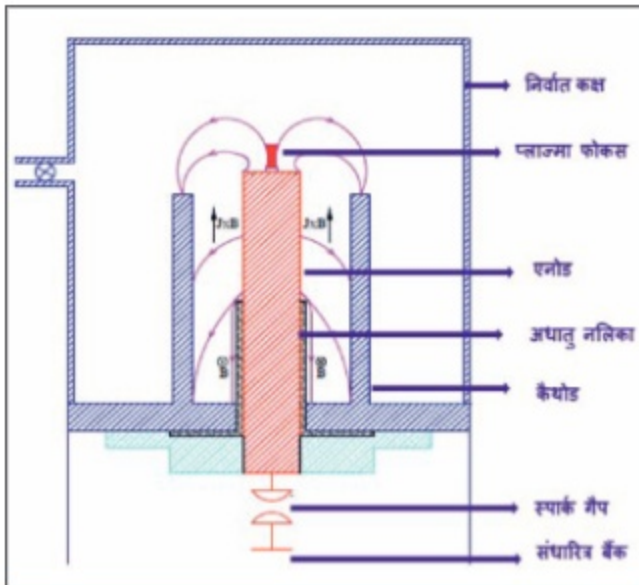
विकिरण का उपयोग नियमित रूप से मानवीय हित से संबंधित विविध अनुप्रयोगों में किया जाता है, जिसमें खाद्य उत्पादों का संरक्षण, स्वास्थ्य देखभाल संबंधित उत्पादों का विसंक्रमण, कैंसर के उपचार के लिए रेडियोथेरेपी, औद्योगिक नमूनों में खराबी के सकल आकलन के लिए अविनाशी परीक्षण, उच्च उपज देने वाली फसलों की किस्मों का विकास, इत्यादि शामिल हैं। इन अनुप्रयोगों में आमतौर पर इस्तेमाल किए जाने वाले विकिरण स्रोत रेडियोधर्मी सुवाहय (पोर्टेबल) स्रोत होते हैं जैसे कोबाल्ट (^{60}Co) और सीज़ियम (^{137}Cs), आदि गामा-किरण उत्सर्जक के रूप में तथा, न्यूट्रॉन उत्सर्जक के रूप में मुख्यतः अमेरिशियम-बेरिलियम ($^{241}\text{Am-BE}$), प्लूटोनियम-बेरिलियम (Pu-BE), केलिफोर्नियम (^{252}Cf), आदि। ये सारे स्रोत सतत विकिरण उत्सर्जित करते हैं इसलिए सामान्यतः इन विकिरण स्रोतों को सीलबंद रखा जाता है और अनुप्रयोग के समय इन्हें सावधानीपूर्वक उपयोग में लाया जाता है। इनके अलावा, प्रयोगशाला आधारित स्रोत जैसे प्रोटॉन और इलेक्ट्रॉन किरण के लिए त्वरक यंत्र और त्वरक यंत्र-आधारित न्यूट्रॉन और उच्च ऊर्जा एक्स-किरण (एक्स-रे) का उपयोग भी ऐसे उद्देश्यों के लिए किया जाता है। दूसरी ओर, सभी प्रकार के उपयुक्त विकिरण एक ही उपकरण का उपयोग करके उत्पन्न किए जाते हैं, जो कि प्लाज़्मा फोकस उपकरण के रूप में जाने जाते हैं। यह उपकरण चुंबकीय परिसीमन संलयन (मैग्नेटिक कन्फाइनमेंट फ्यूजन) और जड़त्वीय परिसीमन संलयन (इनर्शियल कन्फाइनमेंट फ्यूजन) के जैसे ही प्लाज़्मा फोकस संलयन पर आधारित हैं। यह उपकरण उच्च ऊर्जा एक्स-किरण, आपेक्षिकीय इलेक्ट्रॉन और उच्च ऊर्जा आयन

किरण के साथ-साथ एकल-ऊर्जा (2.45 मेगा-इलेक्ट्रॉन वोल्ट) के तीव्र न्यूट्रॉन का एक विख्यात एवं विपुल बहु-विकिरण स्रोत है। इससे न्यूट्रॉन का उत्पादन तभी होता है जब इसे ड्यूटेरियम गैस (D_2) से भरकर संचालित किया जाता है। यह एक स्पंदित (पल्सड) विकिरण स्रोत है जो सिर्फ संचालित किए जाने पर ही विकिरण उत्पन्न करता है अन्यथा यह निष्क्रिय अथवा गैर-रेडियोधर्मी रहता है। इसलिए, इसे सीलबंद रखने की भी आवश्यकता नहीं होती है।

प्लाज़्मा फोकस उपकरण में प्लाज़्मा का उत्पादन गैस (दाब = कुछ मिलीबार) से भरे कक्ष में एक संधारित्र बैंक द्वारा उच्च विद्युत धारा ($\geq$ दस किलो-एम्पीयर या अधिक) को द्रुत गति से (कुछ माइक्रोसेकंड (μs) अवधि तक) प्रवाहित कराकर किया जाता है। उच्च विद्युत धारा घनत्व (J) और उसके चुंबकीय क्षेत्र (B) की परस्पर क्रिया से विद्युत चुम्बकीय बल (लॉरेंज बल: $J \times B$) उत्पन्न होता है, जो प्लाज़्मा को नाभिकीय संलयन अभिक्रिया के लिए अनिवार्य घनत्व और तापमान के एक सूक्ष्म बेलन के आकार में संपीड़ित कर देता है जिससे प्लाज़्मा गतिज दाब और चुंबकीय दाब के बीच एक संतुलन स्थापित होता है। चुंबकीय दाब और प्लाज़्मा गतिज दाब के बीच संतुलन की स्थिति को 'प्लाज़्मा फोकस' या 'प्लाज़्मा पिंच' कहा जाता है। प्लाज़्मा फोकस आमतौर पर केवल कुछ दसियों नैनो-सेकंड (ns) तक ही रहता है। प्लाज़्मा फोकस उपकरण के कार्य सिद्धांत का योजनावत चित्र-1 में दिखाया गया है।

प्लाज़्मा फोकस के दौरान, ऊष्मीय ब्रेम्सट्रालंग प्रक्रिया के द्वारा कम ऊर्जा वाली एक्स-किरणें (आमतौर पर लगभग 5 किलो इलेक्ट्रॉनवोल्ट (keV) या उससे कम) उत्पन्न होती हैं। यदि प्लाज़्मा फोकस उपकरण को ड्यूटेरियम गैस के

साथ संचालित किया जाए तो ड्यूटेरियम आयन के नाभिकीय संलयन अभिक्रिया के द्वारा 2.45 मेगा-इलेक्ट्रॉनवोल्ट (MeV) ऊर्जा के न्यूट्रॉन उत्पन्न होते हैं। ये न्यूट्रॉन समदैशिक होते हैं और इनकी तीव्रता प्रवाहित विद्युत धारा पर निर्भर करती है। तीव्र और उच्च विद्युत धारा से सदैव अधिक न्यूट्रॉन उत्सर्जित होते हैं। प्लाज्मा फोकस के दौरान, चुम्बक-द्रवगतिकी अस्थिरता (मैग्नेटो हाइड्रोडायनामिक इन्स्टेबिलिटी) तेजी से बढ़ती है, जिसके परिणामस्वरूप इसका विघटन हो जाता है। विघटन के दौरान, प्लाज्मा में उपस्थित इलेक्ट्रॉन और आयन, विकिरण एवं किरण की तीव्र और ऊर्जावान धाराएं विपरीत दिशाओं में त्वरित होते हैं। इलेक्ट्रॉन एनोड की ओर त्वरित होते हैं और आयन उसके विपरीत त्वरित होती है। ठोस एनोड से टकराने पर इलेक्ट्रॉन गैर-ऊष्मीय ब्रेम्सट्रालंग (नॉन-थर्मल ब्रेम्सट्रालंग) प्रक्रिया द्वारा उच्च ऊर्जा एक्स-किरण (सैकड़ों किलो इलेक्ट्रॉनवोल्ट) उत्पन्न करते हैं, साथ ही साथ, आयन परिप्रेक्ष्य प्लाज्मा/गैस से टकरा कर कणपुंज (बीम)-लक्ष्य नाभिकीय संलयन से न्यूट्रॉन उत्पन्न करते हैं। ये एक्स-किरण और न्यूट्रॉन विषमदैशिक प्रकृति के होते हैं और आयन कणपुंज (बीम) की दिशा में, अन्य दिशाओं की तुलना में ज्यादा ऊर्जा के अधिक न्यूट्रॉन उत्पन्न होते हैं। इसमें

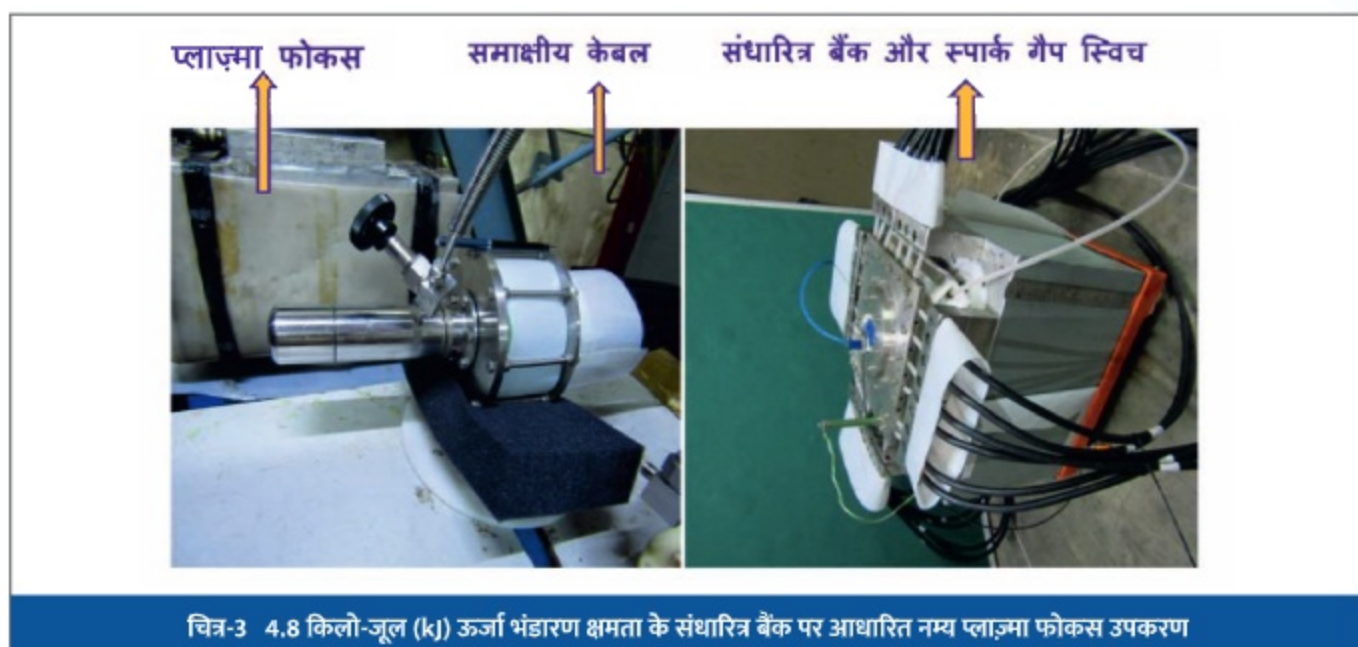


चित्र-1 प्लाज्मा फोकस उपकरण के कार्य सिद्धांत का योजनावत

कणपुंज (बीम)-लक्ष्य या गैर-तापनाभिकीय न्यूट्रॉन और तापनाभिकीय न्यूट्रॉन का अनुपात 90% से अधिक देखा गया है, जो कि अन्य मुख्य संलयन उपकरणों जैसे टोकामक (TOKAMAK) अर्थात् 'मैग्नेटिक कॉइल्स के साथ टोरॉयडल चैंबर' से अलग है। टोकामक में न्यूट्रॉन केवल तापनाभिकीय संलयन के माध्यम से उत्पन्न होते हैं। प्लाज्मा फोकस उपकरण में संधारित्र बैंक में भंडारित ऊर्जा को बढ़ा या घटा कर न्यूट्रॉन की उपज को आवश्यकता अनुसार अधिक या कम किया जा सकता है।

प्लाज्मा फोकस उपकरण

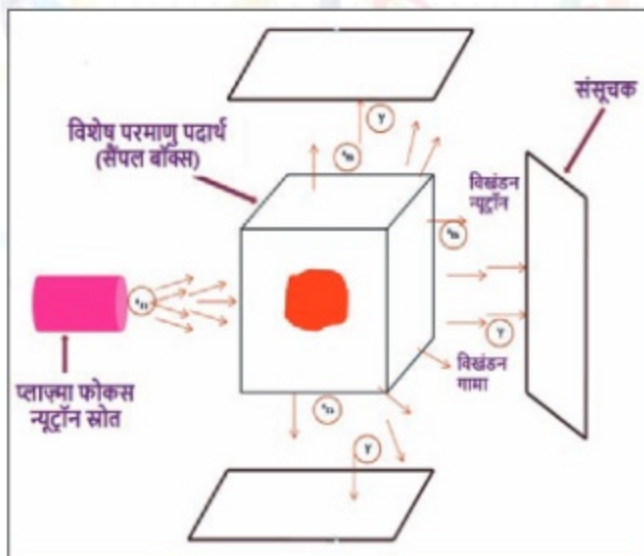
प्लाज्मा फोकस अन्य संलयन उपकरणों की तुलना में एक सरल संलयन उपकरण है। इसमें समाक्षीय (कोएक्सियल) बेलनाकार धातु इलेक्ट्रोडों की एक जोड़ी होती है। केंद्रीय इलेक्ट्रोड एनोड और बाहरी इलेक्ट्रोड कैथोड की तरह काम करता है। केंद्रीय इलेक्ट्रोड के तल पर एक अधातु नलिका (सिरेमिक पदार्थ जैसे कि क्वार्ट्ज ट्यूब से बनी) रखी जाती है जो एनोड और कैथोड के बीच विद्युतीय अलगाव (इलेक्ट्रिकल आइसोलेशन) प्रदान करती है। साथ ही साथ, यह प्रबल और सुघड़ प्लाज्मा फोकस गठन में महत्वपूर्ण भूमिका निभाती है। एनोड, कैथोड और अधातु नलिका समेत पूरी व्यवस्था (असेंबली) को एक निर्वात कक्ष के अंदर रखा जाता है जिसे हम 'प्लाज्मा फोकस इकाई' कहते हैं। प्लाज्मा फोकस इकाई, स्पार्क गैप स्विच और संधारित्र एक साथ मिलकर प्लाज्मा फोकस उपकरण का निर्माण करते हैं। संधारित्र का उपयोग या तो एकल या बैंक के रूप में किया जाता है जिसमें कई संधारित्र समानांतर जुड़े होते हैं। स्पार्क गैप स्विच का उपयोग करके, संधारित्र बैंक में संग्रहित ऊर्जा प्लाज्मा फोकस इकाई में निर्वहित की जाती है और प्लाज्मा फोकस संलयन की प्रक्रिया पूरी होती है। प्लाज्मा फोकस इकाई या तो संधारित्र बैंक पर सीधे जुड़ी होती है या इसे समाक्षीय केबलों के माध्यम से जोड़ा जाता है। संधारित्र बैंक से सीधे जोड़ने पर प्लाज्मा फोकस उपकरण सुवाह्य और सुगठित हो जाते हैं जबकि समाक्षीय केबल से जोड़ने



पर इसे किसी भी दिशा में रखने की स्वतंत्रता मिलती है। चित्र-2 में दिखाई गई प्लाज़्मा फोकस इकाई, संधारित्र (ऊर्जा भंडारण क्षमता 3.1 किलो-जूल (kJ)) से सीधे जुड़ी हुई है। चित्र-3 में, एक अन्य प्लाज़्मा फोकस इकाई दिखाई गई है, जो संधारित्र बैंक (ऊर्जा भंडारण क्षमता 4.8 किलो-जूल (kJ)) से कई समाक्षीय केबलों द्वारा (प्रत्येक की लंबाई 20 मीटर) जुड़ी हुई है।

प्लाज़्मा फोकस उपकरण के अनुप्रयोग

प्लाज़्मा फोकस उपकरण से उत्सर्जित विकिरण का उपयोग अनुप्रयुक्त अनुसंधान से लेकर पदार्थ विज्ञान तक बहुविषयक क्षेत्रों में किया जाता है। विभिन्न प्लाज़्मा फोकस उपकरणों का उपयोग बड़ी नाभिकीय संलयन मशीनों जैसे कि फ्रांस में बन रही ईटर (ITER) अर्थात् 'इंटरनेशनल



चित्र-4 प्लाज्मा फोकस न्यूट्रॉन स्रोत का उपयोग करके विशेष परमाणु पदार्थ के अविनाशी और सक्रिय जांच प्रणाली का योजनावत

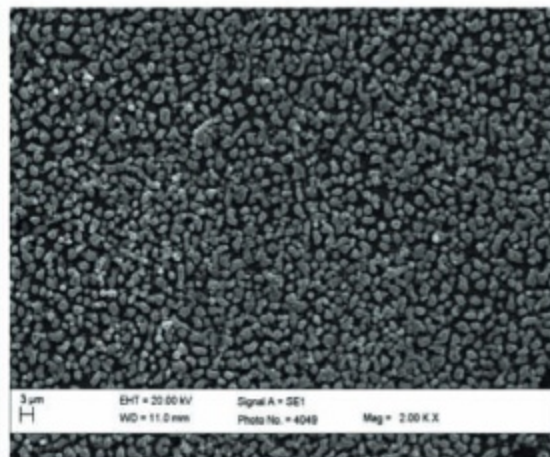
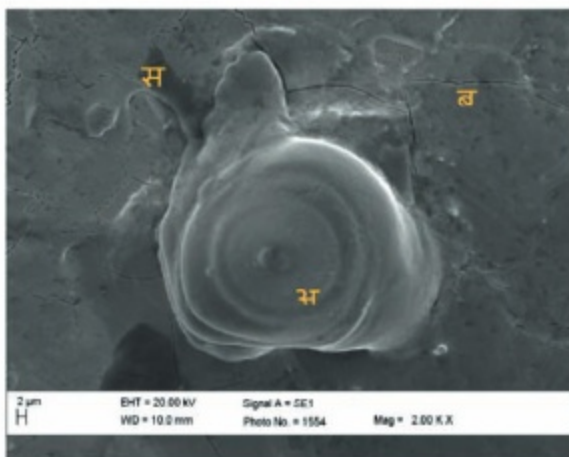
थर्मोन्यूक्लियर एक्सपेरिमेंटल रिएक्टर' में अंतर्निहित वैज्ञानिक अध्ययन जैसे उच्च घनत्व, उच्च तापमान प्लाज्मा का गठन, चुम्बक-द्रवगतिकी अस्थिरता की वजह से प्लाज्मा परिसीमन में व्यवधान, संलयन विकिरण का विभिन्न घटक पदार्थों पर प्रभाव, विभिन्न घटकों के लिए संभावित पदार्थों के व्यवहार का प्रयोगात्मक अनुकरण, विभिन्न नए नैदानिकी परीक्षण, इत्यादि के लिए बड़े पैमाने पर किया जाता है। इसके साथ ही, प्लाज्मा फोकस उपकरण का उपयोग विशेष परमाणु पदार्थों जैसे यूरेनियम (U) के अविनाशी (नॉन-डेस्ट्रक्टिव) और सक्रिय जांच के लिए किया जाता है। चित्र-4 में प्लाज्मा फोकस उपकरण का उपयोग करके विशेष परमाणु पदार्थों की अविनाशी और सक्रिय जांच प्रणाली का योजनावत दिखाया गया है। इसमें प्लाज्मा फोकस उपकरण से उत्सर्जित न्यूट्रॉन का उपयोग करके विशेष परमाणु पदार्थ में नाभिकीय विखंडन कराया

जाता है। तत्पश्चात, नाभिकीय विखंडन उत्पादों जैसे त्वरित न्यूट्रॉन, त्वरित गामा-किरणों, विलंबित न्यूट्रॉन (डिलेड न्यूट्रॉन), विलंबित गामा आदि की गणना उपयुक्त संसूचकों (डिटेक्टर) द्वारा की जाती है जो कि निहित विशेष परमाणु पदार्थ के समानुपाती होती है। प्लाज्मा फोकस उपकरण में नगण्य परिप्रेक्ष्य विकिरण होने की वजह से इसमें सर्वाधिक संकेत (सिग्नल) और परिप्रेक्ष्य का अनुपात अंतर्निहित होता है। इस कारण से विशेष परमाणु पदार्थ की अतिसूक्ष्म मात्रा भी तुरंत ही आसानी से ज्ञात की जा सकती है।

इसी तरह से प्लाज्मा फोकस से उत्सर्जित एक्स-किरण का उपयोग पदार्थों की उच्च गुणवत्ता वाली रेडियोग्राफी करने में भी किया जाता है। उदाहरण के लिए, चित्र-5 में प्लाज्मा फोकस एक्स-किरण द्वारा लिया गया कंप्यूटर रैम का रेडियोग्राफ दिखाया गया है। इसके अलावा, प्लाज्मा फोकस से उत्सर्जित ऊर्जावान और तीव्र आयन किरण का उपयोग विभिन्न पदार्थों (विशेषतः 'ईटर' संलयन रिएक्टर में प्लाज्मा का प्रत्यक्ष सामना करने वाले घटक पदार्थों) के नमूने की सतह को किरणित करने के बाद हुई क्षति का अध्ययन करने के लिए किया जाता है। चित्र-6 (बाएँ) से स्पष्ट है कि उच्च उर्जा, उच्च तीव्रता की आयन किरण से किरणित नमूने की सतह में बहुत तरह की क्षति उत्पन्न होती है जैसे कि (अ) फफोले, (ब) अतिसूक्ष्म दरारें, (स) सतह का पिघलना और अपक्षरण, इत्यादि। इस प्रकार के अध्ययन से संलयन रिएक्टर के वास्तविक संचालन के दौरान घटक पदार्थों के प्रदर्शन का पूर्वानुमान लगाने में मदद मिलेगी। साथ ही साथ, प्लाज्मा फोकस उपकरण द्वारा विभिन्न पदार्थों की पतली फिल्म का निक्षेपण भी किया जाता है। चित्र-6 (दाएँ) में, प्लाज्मा फोकस उपकरण को एसिटिलीन



चित्र-5 प्लाज्मा फोकस एक्स-किरण का उपयोग करके कंप्यूटर रैम की रेडियोग्राफी



चित्र-6 प्लाज़्मा फोकस आयन से किरणित नमूने की सतह का स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोग्राफ़ (बाएँ) और प्लाज़्मा फोकस का उपयोग करके बनाई गई हीरा-नुमा कार्बन फिल्म का स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोग्राफ़ (दाएँ)

गैस के साथ संचालित करके सिलिकॉन की सतह के ऊपर निक्षेपित हीरा-नुमा कार्बन की पतली फिल्म का सूक्ष्म-आरेख (माइक्रोग्राफ़) दिखाया गया है। इस तरह इस उपकरण का उपयोग किसी भी पदार्थ की पतली फिल्म का किसी भी सतह पर निक्षेपण करने में भी किया जा सकता है।

उपरोक्त विवरण से यह स्पष्ट है कि, प्लाज़्मा फोकस उपकरण बहु-विकिरण और प्लाज़्मा का एक सरल और विपुल स्रोत है, जिसका उपयोग नाभिकीय संलयन का अनुभव प्राप्त करने के लिए किया जा सकता है, तथा उन कारकों का पता लगाने के लिए किया जा सकता है, जो दूसरे बड़े संलयन उपकरणों में स्व-संचालित नाभिकीय संलयन प्रक्रिया को संभावित रूप से प्रभावित कर सकते हैं। साथ ही साथ, यह विश्वविद्यालयों/ शिक्षण संस्थानों में स्नातक स्तर पर नाभिकीय संलयन और अन्य बहुविषयक क्षेत्रों के प्रशिक्षण एवं अनुभव प्राप्त करने के लिए एक उत्कृष्ट और कम लागत वाला स्रोत भी साबित हो सकता है।



आभार

लेखक, इस लेख की संरचना के विभिन्न चरणों में प्रत्यक्ष एवं परोक्ष रूप से सहयोग एवं मार्गदर्शन देने वाले सभी व्यक्तियों विशेषकर डॉ. के. डी. जोशी, अध्यक्ष, अनुप्रयुक्त भौतिकी प्रभाग से प्राप्त सतत समर्थन के लिए कृतज्ञतापूर्वक आभार व्यक्त करते हैं।

लेखक का परिचय



डॉ. राम निरंजन

डॉ. राम निरंजन, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र वर्तमान में, मुंबई के अनुप्रयुक्त भौतिकी प्रभाग में वैज्ञानिक अधिकारी-एफ के पद पर कार्यरत हैं।