एम.आर.आई. का विज्ञान

डॉ. भास बापट

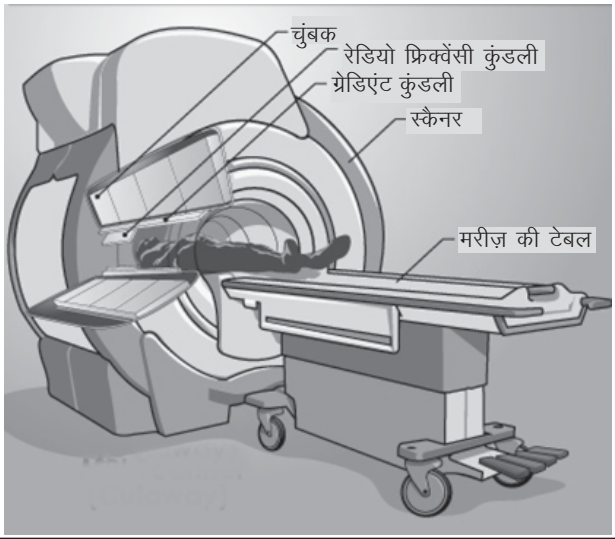
कभी-कभी कोई व्यक्ति बीमार होता है मगर रोग की पहचान नहीं हो पाती। ऐसी स्थिति में उसे एम.आर.आई. कराने की सलाह दी जाती है। एम.आर.आई. मतलब मैग्नेटिक रिज़ोनेन्स इमेजिंग। इस विधि की मदद से शरीर के आंतरिक अंगों की तस्वीर प्राप्त की जाती है। इस विधि का आधार है मैग्नेटिक रेज़ोनेन्स या चुंबकीय अनुनाद।

एम.आर.आई. करने के लिए व्यक्ति के शरीर के प्रभावित हिस्से या कभी-कभी तो पूरे शरीर को एक मशीन में बनी एक नलीनुमा गुहा में प्रविष्ट कराया जाता है। अजीब तरह की आवाज़ें सुनाई पड़ती हैं और कुछ समय बाद उस व्यक्ति को सही-सलामत बाहर निकाल लिया जाता है। कुछ देर बाद व्यक्ति के प्रभावित अंग की तस्वीरें प्राप्त हो जाती हैं। ये तस्वीरें या तो फोटोग्राफिक कागज़ पर मिलती हैं या कंप्यूटर के पर्दे पर।

सवाल है कि मशीन के अंदर होता क्या है? उपरोक्त तस्वीरें कैसे बनती हैं? क्या यह एक्सरे मशीन के समान कोई मशीन है? हम यहां इन्हीं सवालों पर चर्चा करेंगे।

यह तो आप जानते ही हैं कि परमाणु मूलतः दो भागों से बना होता है - केंद्रक और उसके पास चक्कर काटते इलेक्ट्रॉन। केंद्रक में प्रोटॉन और न्यूट्रॉन नामक कण पाए जाते हैं। ये दोनों ही कण अत्यंत दुर्बल चुंबकों के समान व्यवहार करते हैं। यदि थोड़ी तकनीकी भाषा का उपयोग करें, तो कहेंगे कि इन कणों में चुंबकीय आघूर्ण होता है। छड़ चुंबकों के साथ तो आप ज़रूर खेले होंगे। उस अनुभव से आप जानते ही हैं कि यदि ऐसे दो चुंबकों को पास-पास लाया जाए, तो वे एक-दूसरे पर कुछ बल लगाते हैं। यदि इनमें से एक चुंबक बड़ा हो और उसके आसपास कोई दुर्बल चुंबक रखा जाए, तो दुर्बल चुंबक घूमने को मजबूर हो जाता है। वह इस तरह घूमता है कि बड़े शक्तिशाली चुंबक के चुंबकीय क्षेत्र के साथ सीध में आ जाता है। यही स्थिति तब भी होगी है जब केंद्रक के कणों (यानी प्रोटॉन और न्यूट्रॉन) को शक्तिशाली चुंबकीय क्षेत्र में रखा जाएगा (ये कण बाहरी चुंबकीय क्षेत्र की दिशा में या उसके विपरीत दिशा की सीध में जम जाएंगे)।

सारे परमाणु केंद्रकों में से हाइड्रोजन का केंद्रक अनोखा है। इसके केंद्रक में सिर्फ एक प्रोटॉन होता है (और कुछ नहीं होता)। अर्थात हाइड्रोजन का केंद्रक एक नन्हा-सा चुंबक ही है। शेष तत्वों के केंद्रकों में एक से अधिक प्रोटॉन और न्यूट्रॉन होते हैं, और प्रत्येक का अपना-अपना चुंबकीय आघूर्ण होता है, इसलिए हाइड्रोजन के अलावा अन्य केंद्रकों का कुल चुंबकीय आघूर्ण थोड़ा पेचीदा होता है। कुछ केंद्रकों के संदर्भ में तो विभिन्न कणों के चुंबकीय आघूर्ण एक-दूसरे के विपरीत होते हैं। इस वजह से इन केंद्रकों का कुल चुंबकीय आघूर्ण शून्य हो जाता है। हाइड्रोजन के केंद्रक को जब किसी बाहरी चुंबकीय क्षेत्र में रखा जाता है, तो किसी भी साधारण चुंबक की तरह वह या तो बाहरी चुंबकीय क्षेत्र की दिशा में या उसके विपरीत जम जाता है।



जब किसी चुंबक को

चुंबकीय क्षेत्र में रखा जाता है तो उसमें स्थितिज ऊर्जा पैदा हो जाती है। इसका मतलब यह है कि यदि चुंबकीय क्षेत्र को बदला जाए, तो उसमें रखे चुंबक में कुछ गति होगी और उसकी ऊर्जा में परिवर्तन आएगा। परमाणु के कणों की बात करें, तो वहां ऊर्जा का परिवर्तन सतत नहीं होता - यह परिवर्तन ऊर्जा की एक बुनियादी इकाई के गुणज के बराबर ही हो सकता है। यानी परिवर्तन या तो एक इकाई के बराबर होगा या 2, 3 वगैरह इकाइयों के बराबर होगा; ढाई, पौनी इकाई के बराबर परिवर्तन नहीं होगा। तो यदि न्यूट्रॉन अथवा प्रोटॉन को किसी बाहरी चुंबकीय क्षेत्र में रखा जाएगा, तो चुंबकीय क्षेत्र की अनुपस्थिति में उस कण की स्थितिज ऊर्जा की तुलना में उसकी स्थितिज ऊर्जा एक निश्चित मात्रा में कम या ज़्यादा हो जाएगी।

जब प्रोटॉन के एक बड़े समूह को बाहरी चुंबकीय क्षेत्र में रखा जाता है, तो वे चुंबकीय स्थितिज ऊर्जा प्राप्त कर लेते हैं। बाद में जब वे ऊर्जा को उत्सर्जित करेंगे तो ठीक उतनी ही मात्रा निकलेगी जितनी प्राप्त हुई थी। प्रोटॉन के निम्न ऊर्जा स्तर और उच्च ऊर्जा स्तर के बीच जो अंतर होता है वह लगभग रेडियो तरंगों के बराबर होता है। अर्थात जब बाहरी चुंबकीय क्षेत्र चालू है और केंद्रकों को रेडियो तरंगों के संपर्क में लाया जाए, तो कुछ केंद्रक रेडियो तरंगों को अवशोषित कर लेंगे। परिणाम यह होगा कि ऐसे केंद्रकों के समूह में से गुज़रने वाली रेडियो तरंगों की ऊर्जा थोड़ी कम हो जाएगी। जब ऐसी रेडियो तरंगों की ऊर्जा और केंद्रक के ऊर्जा स्तरों में अंतर बराबर हो तो इस प्रक्रिया के परिणाम नाटकीय होते हैं। जब केंद्रकों की ऊर्जा स्तर में अंतर और रेडियो तरंगों की ऊर्जा आपस में मेल खाती है तो कहा जाता है कि इनमें रिज़ोनेन्स हो रहा है या अनुनाद हो रहा है। इस तरह से बाहरी चुंबकीय क्षेत्र में रखे गए केंद्रक का उपयुक्त रेडियो तरंगों के साथ अनुनाद न्यूक्लियर मैग्नेटिक रिज़ोनेन्स (एन.एम.आर.) कहलाता है। जब एक-सा बाहरी चुंबकीय क्षेत्र आरोपित किया जाए, तो हाइड्रोजन केंद्रक के द्वारा अवशोषित रेडियो तरंग की तरंग लंबाई और किसी अन्य केंद्रक के द्वारा अवशोषित रेडियो तरंग की तरंग लंबाई अलग-अलग होती है। यह भी देखा गया है कि अवशोषित रेडियो तरंग की लंबाई और आरोपित चुंबकीय क्षेत्र के बीच व्युत्क्रम अनुपात होता है। अर्थात जैसे-जैसे आप चुंबकीय क्षेत्र की शक्ति बढ़ाएंगे, केंद्रक कम से कम तरंग लंबाई वाली तरंगों को सोखेंगे। इन दोनों बातों का मैग्नेटिक रिज़ोनेन्स इमेजिंग की दृष्टि से बहुत महत्व है।

सजीवों, खासकर मनुष्यों के शरीर में काफी मात्रा में पानी होता है। पानी हाइड्रोजन और ऑक्सीजन का यौगिक (H_2O) है। दूसरे शब्दों में, मानव शरीर में बड़ी संख्या में हाइड्रोजन केंद्रक उपस्थित हैं। एन.एम.आर. की वजह से ये केंद्रक चुंबकीय क्षेत्र में रखे जाने पर खास लंबाई की रेडियो तरंगों को सोखेंगे। यह अवशोषण एक तरह से प्रोटॉन की उपस्थिति का द्योतक है - अर्थात यदि किसी स्थान विशेष पर खास लंबाई वाली रेडियो तरंगें सोखी जा रही हैं, तो वहां प्रोटॉन उपस्थित होना चाहिए। यही प्रोटॉन इमेजिंग का आधार है। मगर इसमें कई दिक्कतें हैं।

शरीर में तो हर जगह अनगिनत प्रोटॉन उपस्थित हैं; तो हम यह कैसे पता लगाएंगे कि शरीर का कौन-सा हिस्सा रेडियो तरंगों का अवशोषण कर रहा है। सारे प्रोटॉन तो एक जैसे ही होते हैं। लिहाज़ा, शरीर के सारे हिस्सों से आने वाला रेडियो तरंगों का विकिरण भी एक समान ही होगा। यानी हमारा मकसद पूरा होता नहीं लगता क्योंकि हमारे पास जो तस्वीर होगी वह तो पूरे शरीर के प्रोटॉन्स की होगी, किसी खास अंग या हिस्से की नहीं। रोग-निदान के लिहाज़ से तो यह तस्वीर बेकार ही है।

इसके अलावा, इस तरह की तस्वीर से हमें सामान्य ऊतक और असामान्य ऊतक के बीच कोई अंतर देखने को भी नहीं मिलेगा।

एक नैदानिक औज़ार के रूप में उपयोगी बनाने के लिए हमें एन.एम.आर. को और अधिक परिष्कृत करना होगा। उसके लिए हमें इसकी कुछ अन्य बारीकियों का फायदा उठाना पड़ेगा।

जैसे इसी बात को लें कि किसी चुंबकीय क्षेत्र में रखे सारे प्रोटॉन्स द्वारा अवशोषित रेडियो तरंग की लंबाई एक-सी होती है। यह बात एकदम सही तभी होती है जब ये सारे

प्रोटॉन्स मुक्त रूप में उपस्थित हों अर्थात इन प्रोटॉन्स के आसपास कोई पदार्थ न हो। यदि प्रोटॉन किसी अणु (जैसे पानी के अणु या प्रोटीन के अणु) का हिस्सा है तो इसके रिज़ोनेन्स की तरंग लंबाई किसी मुक्त प्रोटॉन से भिन्न होगी। इस गुण को तरंग लंबाई विचलन कहते हैं।

कोई प्रोटॉन जिस तरंग लंबाई की रेडियो तरंग का अवशोषण करता है, कुछ समय बाद उसी तरंग लंबाई को उत्सर्जित कर देता है। उत्तेजित होने के कुछ समय बाद रेडियो तरंग को उत्सर्जित करने की इस क्रिया को शिथिलीकरण या रिलेक्सेशन कहते हैं। रिलेक्सेशन की अवधि पर भी इस बात का असर पड़ता है कि प्रोटॉन किस परिवेश में है।

तरंग लंबाई विचलन और रिलेक्सेशन अवधि वे दो गुणधर्म है जो एनएमआर द्वारा इमेजिंग की तकनीक के विकास में निर्णायक रहे हैं।

जिस अंग अथवा वस्तु (जिसे सामान्य रूप से नमूना कहते हैं) की आंतरिक संरचना का पता करना है, उसे एक चुंबकीय क्षेत्र में रखा जाता है। ऐसा करने पर केंद्रकों के चुंबकीय आघूर्ण चुंबकीय क्षेत्र की सीध में जम जाते हैं। इसके बाद एक पूरक क्षेत्र आरोपित किया जाता है। इसे ग्रेडिएन्ट क्षेत्र कहते हैं, और इसकी तीव्रता नमूने की मोटाई के साथ घटती या बढ़ती है। इसका असर यह होता है कि नमूने की अलग-अलग गहराई पर स्थिति केंद्रकों का चुंबकीय आघूर्ण अलग-अलग हो जाता है और नमूने के एक छोर से दूसरे छोर तक लगातार बदलता रहता है।

अब चूंकि विभिन्न केंद्रकों की स्थितिज ऊर्जा अलग-अलग है, इसलिए वे अलग-अलग तरंग लंबाइयों पर अनुनादित होंगे। यदि एक निश्चित तरंग लंबाई वाली रेडियो तरंगें नमूने पर डाली जाएं, तो इन्हें वही केंद्रक सोखेंगे जिनके ऊर्जा स्तर इसी रेंज में हों। अर्थात प्रत्येक तरंग लंबाई वाली तरंगों को नमूने के किसी खास हिस्से या किसी खास गहराई की परत पर उपस्थित केंद्रक ही सोखेंगे।

इसका मतलब यह हुआ कि चुंबकीय क्षेत्र के एक विशिष्ट ग्रेडिएन्ट और रेडियो तरंगों की एक विशिष्ट तरंग लंबाई का उपयोग करके हम यह सुनिश्चित कर सकते हैं कि नमूने की किसी एक खास परत से अवशोषण सिग्नल मिलें। जैविक नमूनों के संदर्भ में तो सक्रिय माध्यम पानी है और हम उसी परत के केंद्रकों का अनुनाद देखते हैं। जिन क्षेत्रों में कोई अवशोषण नहीं होता, वे तस्वीर में प्रायः काले दिखेंगे और जिन बिंदुओं पर खूब अवशोषण होगा वे काफी चमकीले दिखेंगे।

चाहें तो नमूने को सरका-सरका कर या रेडियो तरंगों की दिशा को बदल-बदल कर हम किसी भी परत को पूरा कवर कर सकते हैं। ऐसा करने पर हमें किसी नमूने के विभिन्न क्षेत्रों का एक तीव्रता मानचित्र प्राप्त हो जाएगा। अलग-अलग परतों में उपस्थित केंद्रकों की तस्वीरें प्राप्त करने के लिए अलग-अलग रेडियो तरंगों का इस्तेमाल किया जाता है। कई तरंग लंबाइयों वाली रेडियो तरंगों का उपयोग करके हम किसी नमूने की पूरी गहराई की तमाम परतों की तस्वीर प्राप्त कर सकते हैं। चाहें तो तरंग लंबाई को स्थिर रखकर चुंबकीय क्षेत्र का ग्रेडिएन्ट बदलकर भी अलग-अलग परतों की तस्वीर मिल सकती है मगर वह थोड़ा ज़्यादा कठिन काम है।

रिज़ोनेन्स करते केंद्रकों के परिवेश के बारे में जानकारी प्राप्त करने और विभिन्न परिवेशों के बीच भेद करने (जो सामान्य व असामान्य स्थिति का परिचायक होगा) के लिए ज़रूरी होगा कि हम एन.एम.आर. में रिलेक्सेशन के गुणधर्म का अध्ययन करें।

काफी विस्तृत अध्ययनों और नियंत्रित अवलोकनों की बदौलत अब यह संभव हो गया है कि रिलेक्सेशन अवधि के आधार पर विभिन्न परिवेशों के बीच अंतर किया जा सके। रिलेक्सेशन दो किस्म के होते हैं। इनमें रिलेक्सेशन अवधि चंद मिलीसेकंड से लेकर कुछ सेकंड तक की होती है।

अर्थात, एमआरआई तस्वीर की गहराई के प्रति संवेदनशीलता, अलग-अलग हिस्सों में विभेद (कॉन्ट्रास्ट) और रिज़ॉल्यूशन की गुणवत्ता को चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता के ग्रेडिएन्ट, तथा रेडियो तरंग की अवधि व तीव्रता की मदद से नियंत्रित किया जा सकता है। यदि रिलेक्सेशन अवधि में अंतरों को बढ़ाकर बेहतर कॉन्ट्रास्ट हासिल करना है, तो शरीर के उस हिस्से में कुछ भारी तत्वों के यौगिक

इंजेक्ट किए जा सकते हैं।

व्यापक अनुसंधान व ट्रायल्स की मदद से आज हम शरीर के विभिन्न हिस्सों के ऊतकों के एनएमआर गुणधर्मों के बीच के अंतरों को पहचानते हैं और एक अच्छा तकनीशियन एमआरआई तस्वीर को देखकर तंदुरुस्त व रोगी ऊतक के बीच भेद कर सकता है।

एमआरआई के व्यावहारिक व भरोसेमंद इस्तेमाल के लिए ज़रूरी होता है कि हमारे पास शक्तिशाली रेडियो तरंगों का एक स्रोत हो, जिसकी तरंग लंबाई को बहुत थोड़ा-थोड़ा बदला जा सके। इसे फाइन ट्यूनिंग कहते हैं। इसके अलावा हमें एक रिसीवर की ज़रूरत होगी जो विभिन्न तरंग लंबाइयों के बीच बारीक भेद कर सके और प्रत्येक तरंग लंबाई पर तीव्रता में छोटे से छोटे अंतर को भी पकड़ सके।

वैसे इमेजिंग की दृष्टि से बड़ी चुनौती तो यह है कि एक शक्तिशाली चुंबकीय क्षेत्र होना चाहिए, जिसकी तीव्रता एक बड़े क्षेत्र में एकरूप बनी रहे। कम से कम मानव शरीर के बराबर क्षेत्र में तो इसे एक जैसी रहना चाहिए। यह चुनौती वाकई बहुत कठिन है। यदि आप इसकी मुश्किल समझना चाहें तो इस बात पर गौर कीजिए कि हमें कितनी शक्ति का चुंबकीय क्षेत्र चाहिए। आम तौर पर काम आने वाले चुंबक (जैसे सायकिल के डायनेमो, टीवी या सीडी प्लेयर के स्पीकरों में लगा चुंबक, फ्रिज पर चिपकाया जाने वाला चुंबक) करीब 0.1 टेस्ला शक्ति के होते हैं जबकि पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र की शक्ति 1 टेस्ला का करीब 1 करोड़वां भाग है। और ये मान चुंबक के नज़दीक के क्षेत्र के लिए ही हैं। चुंबक से थोड़ा दूर जाएंगे तो चुंबकीय क्षेत्र की शक्ति तेज़ी से कम होती है। करीब 25 से.मी. दूर तो किसी चुंबक की शक्ति नगण्य हो जाती है।

दूसरी समस्या यह है कि किसी स्थायी चुंबक के क्षेत्र को आसानी से बदला या नियंत्रित नहीं किया जा सकता है। इसलिए अंगों की इमेजिंग के लिए स्थायी चुंबक उपयोगी नहीं होता। इसलिए विद्युत-चुंबकों का इस्तेमाल किया जाता है। विद्युत-चुंबक दरअसल कई छल्लों से बनी एक कुंडली होती है जिसमें विद्युत धारा बहती है। प्रत्येक वृत्ताकार छल्ला अपनी अक्ष के समांतर चुंबकीय क्षेत्र पैदा करता है। यदि दो हूबहू एक जैसी कुंडलियों को एक-दूसरे के समांतर इस तरह रखा जाए कि उनके बीच की दूरी उनके अर्धव्यास के बराबर हो तो उनके बीच चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता एकरूप रहती है और कुंडलियों में विद्युत धारा को बदलकर चुंबकीय क्षेत्र की तीव्रता को नियंत्रित किया जा सकता है। तांबे की कुंडलियों से बनी ऐसी व्यवस्था 1 टेस्ला से कम शक्ति का क्षेत्र पैदा करती हैं। मगर एमआरआई के लिए इससे ज़्यादा शक्तिशाली चुंबकीय क्षेत्र की ज़रूरत होती है। इनमें तांबे की कुंडली का उपयोग नहीं किया जा सकता क्योंकि बहुत अधिक धारा बहे तो तांबा गर्म होकर पिघल जाता है।

अतिचालकता (सुपरकंडक्टिविटी) की खोज ने अतिशक्तिशाली विद्युत-चुंबकों के निर्माण का मार्ग प्रशस्त किया और एनएमआर को इमेजिंग का एक व्यावहारिक औज़ार बनाने में मदद की।

अतिचालक तार (जो नियोबियम-टाइटेनियम मिश्र धातुओं से बने होते हैं) विद्युत धारा के मार्ग में कोई प्रतिरोध पैदा नहीं करते। इसलिए ये गर्म भी नहीं होते और ऊर्जा की खपत भी बहुत कम होती है। अलबत्ता, इन्हें अत्यंत कम तापमान पर रखना पड़ता है - 4 केल्विन (ऋण 269 डिग्री सेल्सियस)।

इतना कम तापमान हासिल करने के लिए कुंडली को तरल हीलियम में डुबोकर रखा जाता है और पूरे उपकरण को एक विशाल थर्मस फ्लास्क में बंद कर दिया जाता है। कुंडली में दसियों हज़ार घेरे होते हैं। इस मुख्य कुंडली के अलावा कई छोटी-छोटी पूरक कुंडलियां भी होती हैं जो अलग-अलग दिशाओं में पूरक चुंबकीय क्षेत्र पैदा करती हैं। यह चुंबक उपकरण ही लगभग एक बड़ी मेज़ के बराबर होता है। यही एमआरआई यंत्र का सबसे प्रमुख व बड़ा हिस्सा है।

चुंबक के अलावा एमआरआई यंत्र में रेडियो रिसीवर व ट्रांसमीटर होते हैं जिन्हें विभिन्न दिशाओं व स्थितियों में लाया जा सकता है ताकि पूरे नमूने को स्कैन किया जा सके। यह ज़रूरी होता है कि स्कैनिंग की स्थिति, ट्रांसमीटर की तरंग लंबाई का ट्यूनिंग और उत्सर्जित रेडियो तरंगों

को पकड़ना, ये सारे काम एक साथ लयबद्ध ढंग से होने चाहिए, इसलिए बेहतर व अनिवार्य होता है कि इस पूरे संचालन कार्य को कंप्यूटर के भरोसे छोड़ दिया जाए। नमूने की विभिन्न गहराई की परतों से प्राप्त तस्वीरों को एक कंप्यूटर में संग्रहित किया जाता है।

जहां एक्सरे का उपयोग मुख्य रूप से हड्डियों की तस्वीर खींचने के लिए किया जाता है, वहीं एमआरआई मुख्यतः मुलायम ऊतकों व आंतरिक अंगों के लिए अधिक उपयुक्त है। इसके अलावा, एमआरआई से हमें एक ही अंग या शरीर के एक ही हिस्से की अलग-अलग गहराई की परतों की कई तस्वीरें मिलती हैं। इससे उस अंग का लगभग एक 3-डी चित्र मिल जाता है।

एमआरआई तस्वीरें रेडियो तरंगों की मदद से बनाई जाती हैं, जिनकी तरंग लंबाई मीटर की रेंज में होती है। ये तरंगें शरीर को किसी तरह का नुकसान नहीं पहुंचातीं। दूसरी ओर, एक्सरे अत्यंत ऊर्जावान होता है और ऊतकों को नुकसान पहुंचा सकता है।

एमआरआई एक निहायत लचीली तकनीक है और इसका उपयोग हड्डियों समेत विभिन्न शारीरिक अंगों में असामान्यता के अध्ययन में किया जा सकता है। यह सही है कि एमआरआई एक महंगी तकनीक है मगर अत्यंत समर्थ तकनीक है। अब तक इसके कोई साइड प्रभाव भी सामने नहीं आए हैं।

एमआरआई तकनीक के विकास में कई लोगों ने योगदान दिया है। 1970 व 80 के दशक में कई भौतिक शास्त्रियों, गणितज्ञों और रसायन शास्त्रियों के अलावा इंजीनियर्स के परिश्रम के दम पर यह तकनीक उपलब्ध हुई है। इसके विकास में न सिर्फ परमाणु केंद्रक की हमारी समझ बल्कि पदार्थ विज्ञान, अति-चालकता और इलेक्ट्रॉनिक्स के क्षेत्र में हुए अनुसंधानों की भी अहम भूमिका रही है। वैसे पौल लॉटरबर, सर पीटर मैन्सेल्ड और रैमंड डेमेडियन का योगदान विशेष रूप से उल्लेखनीय माना जाता है। इनमें से प्रथम दो (लॉटरबर और मैन्सेल्ड) को 2003 में चिकित्सा विज्ञान का नोबेल पुरस्कार दिया गया था। ***(स्रोत फीचर्स)***