

TUDOMÁNYOS ÉS KUTATÁSFEJLESZTÉSI ÁTTÖRÉSEK AZ EURÓPAI SPALLÁCIÓS NEUTRONFORRÁSNÁL

Horváth Ákos
elnök, Magyar ESS Bizottság
MTA Energiatudományi Kutatóközpont

Az elmúlt évtizedekben a neutronforrásokra alapozott kísérleti eszközöknek nagy szerepe volt az anyagtudomány fejlődésében. A mindennapi életben számos olyan használati tárgy vesz körül bennünket, amelyek kifejlesztéséhez az anyagi tulajdonságok részletes ismerete és így az anyagtudomány fejlett kísérleti technikáinak alkalmazása szükséges. Az anyagok szerkezetének részletes, atomi szintű megismerését segítik a különféle diffrakciós módszerek. A neutron- és röntgendiffrakciós vizsgálatok egymást kiegészítő eszközök: amíg a röntgensugárzás segítségével az elektronszerkezetet és az atomok térbeli elhelyezkedését tanulmányozhatjuk, a neutronokkal az atommagok térbeli elhelyezkedéséről és a mágneses tulajdonságokról szerezhetünk információt. A neutronok speciális tulajdonságait felhasználhatjuk mágneses vékonyrétegek vizsgálatára éppen úgy, mint a hegesztett szerkezetekben maradó mechanikai feszültségek felderítésére. Számos, a természet által inspirált napenergia-átalakító rendszer a szilárd hordozóra kötött katalizátorrétegek használatán alapul, amellyel hidrogén termelhető. A neutronok hidrogénérzékenységét kihasználva a fényerő-változtatás hatására létrejövő szerkezetváltozások jól tanulmányozhatók kisszögű neutronsórás-mérésekkel.

A neutron semlegességének egyik következménye, hogy mélyen be tud hatolni az anyagok belsejébe, és ezáltal a neutronsórás-kísérletek a mérnöki gyakorlatban használt próbatestek vizsgálatában is jól alkalmazhatók. A neutronsórás – azaz a mag- és mágneses szóródás – a kondenzált rendszerek szerkezetvizsgálatában vált nélkülözhetetlen módszerré, majd az anyagtudomány területén gyorsan ipari alkalmazásra talált [1]. A termikus neutronok hullámhossza (1. ábra) összemérhető a kondenzált rendszerekre jellemző atomi távolságokkal (0,05-2 nm) [2].

A neutronok felfedezését követően (Chadwick, 1932) gyors fejlődésnek indult a neutronkutatás, amelynek – társadalmi hatását tekintve – legnagyobb jelentőségű alkalmazása a maghasadáson alapuló

energiatermeléshez kapcsolódik. Az első láncreakciót a chicagói „atommáglyában” indították be 1942-ben, majd a reaktorfizikai fejlesztések eredményeként a második világháború után felépültek az első energiatermelő atomreaktorok. 1957-ben indult az első olyan reaktor Kanadában (NRU, Chalk River), amelynek egyik fő célja neutronnyalábok előállítására volt anyagtudományi kísérletek számára. A világ eddigi legsikeresebb neutronkutató intézete, a nagy fluxusú Institut Laue Langevin (ILL) reaktor Franciaországban, Grenoble-ban épült fel 1972-ben. Az ILL 60 MW termikus teljesítményen üzemel, és $1,5 \cdot 10^{15}$ n/cm²s neutronhozama a legnagyobb a reaktorok között. A folytonos neutronforrások egyik legfiatalabb képviselője a Münchenben működő FRM II reaktor, amely 2004-ben kezdte meg működését [URL2].

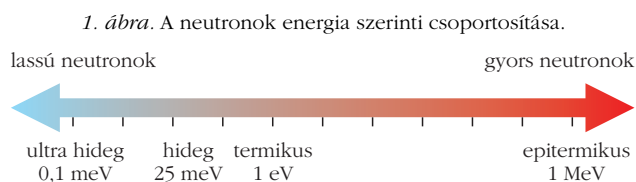
A magyarországi kísérleti neutronos kutatások a „csillebéri atomreaktornál” indultak be és mintegy hat évtizedes múltat tekintenek vissza [3]. A reaktorfelhasználó laboratóriumok (az Energiatudományi Központ és a Wigner Fizikai Kutatóközpont egységei) BNC néven (Budapest Neutron Centre, [URL1]) felhasználói konzorciumként egyesültek. A BNC európai nagyberendezésként a felhasználói neutronközpontok hálózatának elismert tagja [4]. A BNC nem dicsekedhet kimagasló technikai paraméterekkel, mégis az itt dolgozó kutatóknak meghatározó szerepük volt a neutronforrások következő generációjának kialakításában.

A reaktortechnikában a további intenzitásnövelés ára a termikus teljesítmény növelése volna, de ennek nyilvánvalóan megvannak a korlátai. Az egyetlen impulzusüzemű reaktor, amelyet neutronsórás-kísérletekhez építettek, a 60-as években üzembe helyezett dubnai IBR2 reaktor. Mozgatható reflektortárcsák periodikus mozgásával a reaktivitást és a neutronhozamot rövid időre nagymértékben megnövelik, és az 50 μ s hosszú impulzusok alatt $5 \cdot 10^{15}$ n/cm²s neutronhozamot állítanak elő. A reaktor átlagosan 2 MW teljesítményen üzemel, de a rövid impulzusok alatt a teljesítmény akár 850 MW is lehet.

A folyamatos és impulzusüzemű spallációs neutronforrások egy nagyságrenddel nagyobb neutronhozamot képesek biztosítani a fissionos reaktorokhoz



Horváth Ákos 1995-ben végzett az ELTE-n mérnök-fizikusként, PhD fokozatot 2003-ban szerzett. Kutatási területe a magas hőmérsékletű korrózió, atomreaktorok szerkezeti anyagainak sugárkárosodása, öregedése, a negyedik generációs atomreaktorok anyagtudományi, biztonsági kérdései. 2012-től az MTA Energiatudományi Kutatóközpont főigazgatója. 2012–2014 az Európai Neutronkutató Központ (ESS) Target Technical Advisory munkabizottsága tagja, 2015-től a Magyar ESS Bizottság elnöke.





2. ábra. Középen a neutronvezető, mintaállvány (részben takarásban) és balra a nyalábcsapda.

képe. A ma üzemelő spallációs forrásokban gyakran két lépcsőben gyorsítanak protonokat a végső 500-800 MeV energiára, majd a protonokat egy nagy tömegszámú céltárggyal (például volfrám, higany, urán) ütköztetik. Az első lépcsőben egy kisebb teljesítményű lineáris gyorsítót használnak, majd a nyalábot egy szinkrotronban tovább gyorsítják. Az ütközés eredményeként protononként 10-30 gyors neutron keletkezhet, amelyeket ugyanúgy le kell lassítani (termalizálni) az anyagszerkezeti vizsgálatok számára, mint a folytonos források esetében. A lassítás a moderáló közegben történik, ahol a gyors neutronokat könnyű atommagokat tartalmazó közegben sorozatos rugalmas ütközésekkel lelassítják.

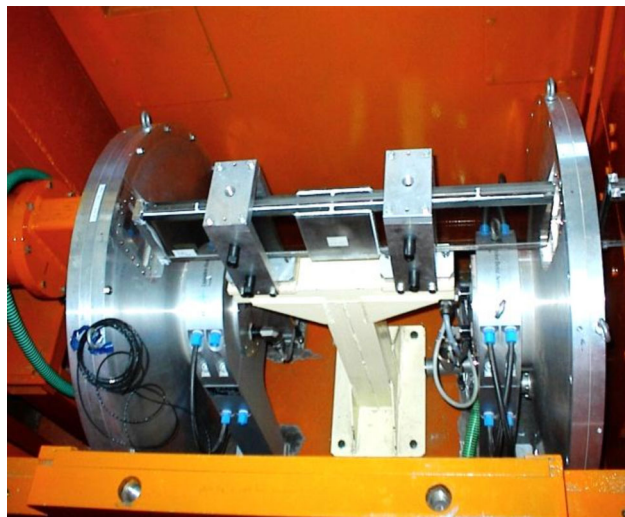
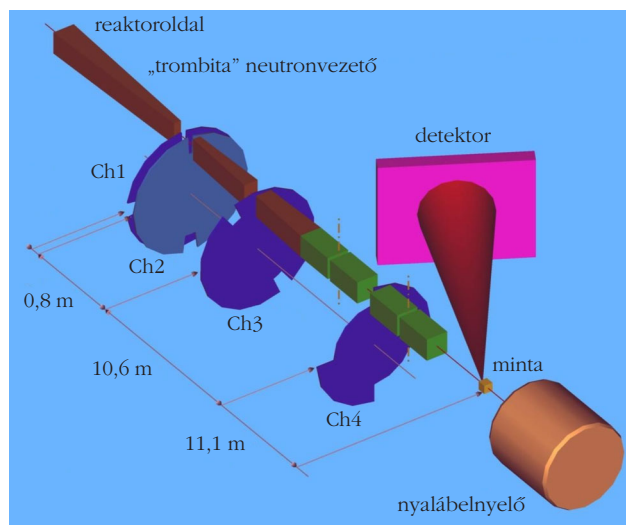
A nyalábot ezek után tovább formálják a neutronvezetőkben (2. ábra). A neutronvezetők belső felülete olyan kialakítású, amelynek segítségével a nagyobb hullámhosszú (tehát kis energiájú) neutronok a teljes visszaverődés elvén nagy távolságra is elvihetőek, miközben a kritikusnál kisebb hullámhosszúak kiszóródnak. Ráadásul a nyaláb a kritikus szög alacsony értéke – egy-két fok – következtében gyakorlatilag teljesen kollimált [5]. Ezen túlmenően a neutronvezetőknek enyhén görbülteknek kell lenniük, hogy azok speciálisan kialakított faláról hullámhossz-szelektíven visszavert neutronok jussanak a mintára és a detektorba, míg az egyenesen tovább haladó, háttérrel növelő rövid hullámhosszú neutronokat és a reaktorból származó direkt gamma-sugárzást a vezető kezdeti szakaszánál ki lehet szűrni.

Ha a neutronvezető felületére több, speciálisan megtervezett vastagságú nikkeltitán réteget párolnak fel, akkor több reflexiót is kapunk a különböző rétegekből, és így végső soron a teljes visszaverődés kritikus határszöge kiterjeszhető. A TiNi neutronvezető szupertükrök több száz elemű rétegszerkezetét úgy alakítják ki, hogy az arról visszaverődő neutronok határszöge a kívánt mértékű legyen [6]. Nagyobb határszög esetén a neutronvezető kisebb (de még így is

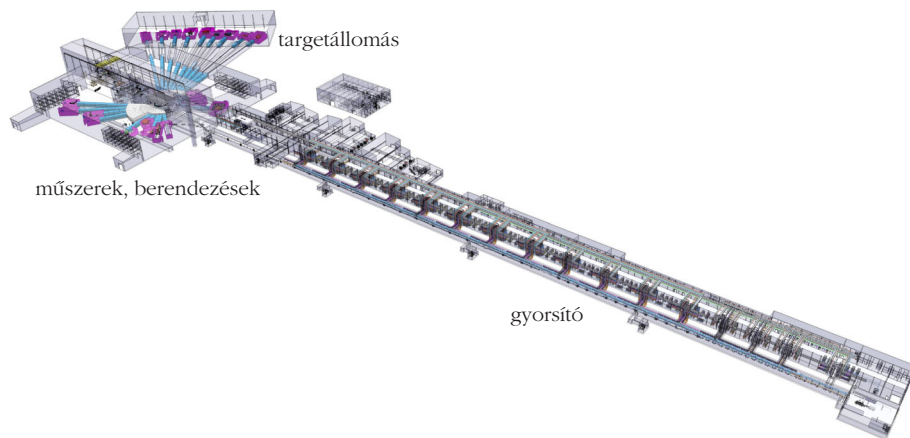
több száz méteres) sugárral görbíthető (ami a reaktortól való távolságot, azaz a szükséges épület méretét csökkenti) ugyanakkor a falon nagyobb mértékű és erősen hullámhossz-szelektív elnyelődést okoz, tovább javítva a mérés jel/zaj viszonyát.

Előnyei ellenére az impulzusüzem alkalmazásának elsődleges célja nem a hasznosított neutronokra jutó hőveszteség minimalizálása, hanem az, hogy optimális felbontást biztosítson a repülési idő méréseit felhasználó neutronszórás-vizsgálatokhoz, azaz minél rövidebb idejű csomagokat állítson elő. Amennyiben a neutronok előállítására folytonos forrást használunk (reaktorban), akkor a repülési idő mérésekhez (és a megfelelő hullámhossztartományba eső neutronok kiválasztásához) nyalábcsapdatot kell alkalmazni.

3. ábra. Fent: a repülési idő spektrométerhez tervezett nyalábcsapdat a Budapesti Kutatóreaktorban. A tárcsák (Ch1–Ch4) anyaga szénszálalás epoxigyanta, amelynek felületét neutronelnyelő GdO_2 réteggel vonták be. Az első két tárcsa (Ch1, Ch2) polikromatikus impulzusokat vág ki a folytonos neutronnyalábból. A második két tárcsával (Ch3, Ch4) a megfelelő hullámhossztartományokat tudják kiválasztani, illetve megszüntetik az egymást követő impulzusok közötti átfedéseket [8]. Lent: a Budapesti Kutatóreaktorban működő nyalábcsapdató fényképe. Balra a Ch1+Ch2 dupla csopper, jobbra a Ch3, köztük egy neutronvezető szakasz.



A forrás intenzitásának további növelése céljából Mezei Ferenc 1995-ben egy olyan egylépcsős koncepciót javasolt [7], amelyben a lineáris gyorsítóban előállított protonokat közvetlenül a cél-tárgyra engedjük. Az így előállított, a korábbihoz képest lényegesen hosszabb idejű impulzusban keletkező neutronok közül, a moderátorban történt lassítás után, nyalábszaggatóval választjuk ki a megfelelő hullámhossztartományban lévőket. A hosszú impulzus néven ismert koncepciót később beépítették a svédországi Lundban felépülő



4. ábra. Az Európai Spallációs Forrás (ESS) Svédországban, Lundban fog felépülni. A berendezés nyalábteljesítménye 5 MW; a protonokat 2,5 GeV-re gyorsítják a 600 m hosszú lineáris gyorsítóban. A forgó céltárgy anyaga volfrám, héliumhűtéssel. A berendezés tervezett beruházási költsége 1,84 milliárd euró (2013. évi adat).

ESS (European Spallation Source – Európai Spallációs Neutronforrás) terveibe. A hosszúimpulzus-koncepció egyik következménye, hogy a kétlépcsős gyorsítás második elemére, a szinkrotronra nincs szükség, ami költségcsökkentéssel jár. További előny, hogy a forgó céltárgy felmelegedése könnyebben kezelhető.

Ugyanakkor egy megfelelően kialakított többletárcsás mechanikus nyalábszaggatót kell alkalmazni a megfelelő hullámforma kialakításához, amit Mezei és kollégái megterveztek és a Budapest Kutatóreaktorban ki is próbáltak (3. ábra) [8, 9].

A neutronok lassítását szolgáló moderátor geometriai optimalizálása révén az utóbbi években további intenzitásnövekedést sikerült elérni. A neutronok haladási irányával párhuzamos irányban megnyújtott alakú (kvázi 2D vagy „lapos”) moderátor és az azt körülvevő közeg a lelassított neutronokat a csatornák irányába „tereli”, ezáltal csökkentve a kiszóródott neutronok által okozott veszteséget [10]. A kísérletileg is igazolt 2-3-szoros intenzitásnövekedés nemcsak az ESS-ben, hanem – a moderátorok cseréjével – más berendezésekben is elérhető lesz.

A hosszú impulzus elvének alkalmazásával járó költségcsökkentés árán az ESS számára egy nagyobb teljesítményű lineáris gyorsítót terveztek. A 2,9 ms hosszú impulzusok 14 Hz ismétlési frekvenciával követik egymást és a protonokat 2,5 GeV-re gyorsítják majd. Az ESS átlagos nyalábteljesítménye 5 MW lesz. A forgó céltárgy anyaga volfrám (egy acélhenger belsőjében), amelyet héliummal fognak hűteni.

Az ESS európai nagyberendezésként, a tagországok közös beruházásaként a következő évtizedben valósulhat meg (4. ábra). Az ESS 1,84 milliárd euró (2013-as adat) tervezett beruházási költségének felét Svédország, Norvégia és Dánia vállalták. A beruházási költségek másik felét 14 tagország fizeti. A majdani működési költségekből (évi körülbelül 140 millió euró) a skandináv országok viszont csak 15%-ot vállaltak, a többi ország hozzájárulása pedig a használatlalt lesz arányos. Magyarország az elsők között csatlakozott a konzorciumhoz 2014-ben. Mivel a tagdij 70%-át

természetbeni hozzájárulás (*inkind*) formájában is lehet teljesíteni, ez a hazai kutatás-fejlesztéssel foglalkozó intézetek és a műszergyártás területén tevékenykedő vállalkozások számára is további lehetőségeket tartogat.

A Magyar Kormány 2014–2025 között évi 1,6 millió euró tagdíj befizetését vállalta, amelynek 70%-át Magyarországon elköltendő természetbeni hozzájárulás formájában teljesíti. A beszállítás szakmai koordinálását a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal intézi az NKFI Hivatal elnöke által felállított Magyar ESS Bizottságon (MEB) keresztül. A MEB tagjai között vannak a neutronos kutatással foglalkozó három releváns akadémiai kutatóintézet – MTA Atommagkutató Intézet, MTA Energiatudományi Kutatóközpont és MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont – képviselői, valamint az ipar/vállalkozói szféra, a Budapesti Neutronkutató Centrum képviselői és az ESS Irányító Tanács magyar delegáltjai.

Az anyagtudományi kutatások számára építendő ESS a neutronforrások következő generációját képviseli olyan jelentős technikai újdonságokkal, amelyek az intenzitás nagyságrendi növekedésével járnak – a korábbiakhoz hasonló költség mellett. A berendezés koncepciójának kidolgozásában fontos szerepe volt a hazai kutatóknak (elsősorban Mezei Ferencnek és kollégáinak) és a Budapesti Kutatóreaktornak is. A beruházás során fizetendő magyar tagdíj jelentős természetbeni beszállítási aránya kutatás-fejlesztési és gazdaságélénkítő hatással is jár. Mindemellett a most épülő ESS jelentős hatással lesz a magyar neutronos kutatások jövőképeire is.

Irodalom

1. Rosta László: A neutronkutatások nyolcvan éve és mai társadalmi haszna, *Magyar Tudomány* (2013/4) 488–497.
2. Cser László: *Kondenzált közegek vizsgálata neutronszórással*. Budapest, Typotex, 2010.
3. Csikái Gyula: A neutronfizika másodvirágása. *Fizikai Szemle* 65/11 (2005) 369.
4. Rosta László, Baranyai Rózsa: Budapest Research Reactor – 20 Years of International User Operation. *Neutron News* 22 (2011) 31–36.

5. Molnár Gábor: Elemanalitika hideg neutronokkal, *Fizikai Szemle* 50/11 (2000) 382.
6. Mezei Ferenc: Novel polarized neutron devices: Supermirror and spin component amplifier. *Communications on Physics* 1 (1976) 81.
7. Mezei Ferenc: The Concept of Long Pulse Neutron Sources. *Acta Physica Hungarica, Heavy Ion Physics* (1995) 209–226.
8. Sánta Zsombor: Nagyfelbontású repülési idő diffraktométer a Budapesti Neutron Kutatóközpontban. *Archeometriai Műhely* 2 (2006) 22–26.
9. Russina M., Káli György, Sánta Zsombor, Mezei Ferenc: First experimental implementation of pulse shaping for neutron diffraction on pulsed sources. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Sect. A*, 654 (2011) 383–389.
10. Mezei Ferenc, et al.: Low dimensional neutron moderators for enhanced source brightness. *Journal of Neutron Research* 17 (2014) 101–105.

Honlapok:

URL1: Budapest Neutron Centre – www.bnc.hu

URL2: Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) – www.frm2.tum.de