

Az első exohold felfedezése szintén néhány éven belül várható (az ilyen holdak felfedezésének a lehetőségével *Simon Attila* foglalkozott a *Fizikai Szemle* 2012/7–8. számában).

Egy ennyire fiatal tudományágtól már a jelenlegi ismereteink is kimagasló eredmények, a tervezett kutatásokat látva pedig az exobolygókkal és idegen

naprendszerekkel kapcsolatos tudásunk további jelentős bővülésére és akár újabb vaskos meglepetésekre is számíthatunk.

Az exobolygók kutatásáról szemléletes összefoglalást ad a <https://exoplanets.nasa.gov>, az összes ismert exobolygót tartalmazó archívum a <http://exoplanet.eu> linken érhető el.

## INNOVÁCIÓ ÉS A 60 ÉVES BUDAPESTI KUTATÓREAKTOR

Rosta László,<sup>1</sup> Bajnok Katalin,<sup>1</sup> Baranyai Rózsa,<sup>2</sup> Belgya Tamás,<sup>2</sup> Bottyán László,<sup>2</sup> Fábíán Margit,<sup>1</sup> Füzi János,<sup>1</sup> Kis Zoltán,<sup>2</sup> Len Adél,<sup>2</sup> Szentmiklósi László<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Neutron Centrum, Wigner Fizikai Kutatóközpont

<sup>2</sup>Budapesti Neutron Centrum, Energiatudományi Kutatóközpont

Az MTA csillebérci kampuszán lévő Budapesti Kutatóreaktor idén ünnepelte 60 éves fennállását – először 1959. március 25-én kezdte meg működését. Ez egy kiemelkedő jelentőségű mérföldkő volt a magyar tudomány és technológia fejlődésében: a Budapesti Kutatóreaktor (BKR) folyamatosan megújuló és bővülő műszerparkja azóta is a legnagyobb, jelentős számú felhasználót kiszolgáló kutatási infrastruktúra hazánkban, sőt a közép-európai régióban is. A BKR megbízható üzemelésével meghatározó szerepet játszik az európai neutronkutatói közösség életében is, és az elkövetkező évtizedben ez még hangsúlyosabb lesz, hiszen egyre több európai ország dönt úgy, hogy hasonló típusú kutatóreaktorait bezárja. Jelenleg mintegy 200 hazai és – két éves átlagban – körül-

belül ugyanannyi külföldi kutató használja a neutronos módszereket, munkájukhoz a jövőben is a BKR által biztosított neutronok szolgáltatják a kísérleti háttérrel, amihez a reaktor élettartamának hosszabbítását tervezik.

Az 1959-ben indított új létesítmény akkor számos újdonságértékű, különféle fizikai jelenségek kutatásával kapcsolatos tevékenységet mozdított elő, különösen a neutronfizika, reaktorfizika, szilárdtestfizika, egészségügy, valamint a nukleáris kémia és sugárvédelem terén. Ezen kívül lehetővé tette Magyarország számára új nukleáris eszközök tervezését, előállítását, valamint az izotópgyártás beindítását. Az alapkutatások mellett az innováció és technológiatranszfer, valamint a kereskedelmi hasznosítás is mindig komoly hangsúlyt kapott a BKR-nél végzett tevékenységek során.

A reaktor jelenlegi formájában (10 MW teljesítmény, hidegforrás és neutronvezető rendszer, 16 felhasználói berendezés) a legutóbbi átfogó átalakítást (1986–92) követően 1993-ban kezdte meg működését egy 30 évre szóló üzemidő-engedéllyel. Ezzel egy időben alakult meg a Budapesti Neutron Centrum (BNC) [1], amely a neutronos mérőállomásokat üzemeltető laboratóriumok konzorciumaként működik azzal a céllal, hogy összehangolja a reaktor kutatási célú hasznosítását, ehhez biztosítsa a tudományos és műszeres háttérrel, így lehetővé téve a hozzáférést a mérőberendezésekhez a hazai és nemzetközi neutronfelhasználó közösség számára. Ugyancsak a BNC adja a keretet a kísérleti javaslatok befogadására és szakmai kiválóságának biztosítására a nemzetközi bizottság bírálati rendszerén keresztül. Így a neutronokkal történő kutatás vált a reaktor hasznosításának fő profiljává. A BNC tagja az európai neutronközpontok hálózatának és konzorciumi partner az EU keretprogramjainak számos projektjében is. Kulcsfontosságú tevékenység a jövőbeli tudományos szakértők képzése is. Magyar és külföldi egyetemekkel együttműködve hallgatókat fogad la-

Az írásban szereplő eredmények a Budapesti Kutatóreaktor több évtizedes sikeres innovációs tevékenységét tükrözik – ezért a munkáért nagyon sok korábban, illetve jelenleg is itt dolgozó kollégát illeti köszönet. Az alábbi fénykép a reaktor vezérlőjében készült 2018-ban és a reaktorüzemben, valamint a kísérleti állomásokat üzemeltető laboratóriumokban dolgozó mintegy 100 fős kollektíva akkor jelen lévő tagjait mutatja.

Az eredmények számos hazai és nemzetközi projekthez is köthetők, amelyek a finanszírozáshoz jelentősen hozzájárultak, itt a jelenleg is futó SINE 2020 (EU H2020 Grant No. 654000), a V4-Korea RADCON (NKFIH NN17 127102), az NKFIH K17 124068 és a CAK (NVKP\_16-1-2016-0014), BrightnESS-2 (EU H2020 Grant No. 823867) projekteknek nyilvánítunk köszönetet.



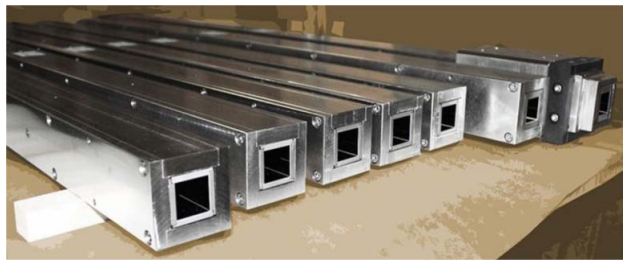
boratóriumi gyakorlatokra, hogy a diákok nukleáris alapú technikákat tanulhassanak. Fiatal kutatók képzésének, illetve új felhasználók figyelmének felkeltése céljából a BNC rendszeresen megszervezi a Közép-Európai Neutronszórás Iskolát (Central European Training School, CETS).

## Innováció

A neutronok – mint különleges tulajdonságokkal rendelkező részecskék – fizikai természetéből fakadóan a neutronkutatás interdiszciplináris jellegű. Ezért a Budapesti Kutatóreaktor – az eredetileg és alapvetően fizikai alapkutatásokra megépített nagyberendezés – egyre inkább nyitottá vált a más tudományágak felől érkező igényekre, valamint az ipari felhasználás, innovációs és technológiatranszfer lehetőségeire. A reaktor hatvan éves történetét áttekintve alább példákat mutatunk be a legjelentősebb eredményekből, amelyek jól szemléltetik az itt folyó szerteágazó innovációs tevékenységet. Radioizotópok előállítása, nukleáris műszerek fejlesztése és gyártása, neutronnyalábokkal végezhető anyagvizsgálatok, technológiafejlesztési, minőségellenőrzési alkalmazása, vagy besugárzással végezhető anyagmódosítás kereskedelmi célokra – mind a reaktor komplex és multidiszciplináris hasznosításának esetei.

## Izotópgyártás

A neutronnal besugárzott anyagok más elemekké vagy radioaktív izotóppokká alakulhatnak. Néhány ilyen radioaktív terméket a diagnosztikában és terápiában használnak fel. A radioizotópok előállítása a Budapesti Kutatóreaktorban már az 1960-as években elkezdődött. A fejlett technológiának hála az itt előállított termékek minősége felülmúlta az abban az időben a Szovjetunióból vagy az Egyesült Királyságból importáltakét. A hazai izotópgyártás és -forgalmazás fő képviselői az Izotóp Intézet Kft. és az Izinta Kft. Az elmúlt évtizedekben a következő izotópok előállítása és kereskedelme volt leginkább jellemző:  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{166}\text{Ho}$  és  $^{188}\text{W}$ . A felsoroltak közül például  $^{32}\text{P}$  radioterápiás eszközként, illetve biomolekuláris nyomjelzőként használható; az  $^{35}\text{S}$  egy alapvető radioizotóp, amely a ként tartalmazó aminosav-készítmények molekuláris jelölésére szolgál. Az  $^{90}\text{Y}$ -et is humántherápiás céllal hasznosítják, itt a béta-sugárzás kibocsátása a jellemző, ami mintegy 3,5 mm-es környezetben nyelődik el és tipikusan az ilyen méretű tumorsejtek elpusztításában hatékony. A humán diagnosztikában és terápiában egyre nagyobb szerepet kapnak a radiológiai eljárások, mivel a betegek nagy többsége inkább a besugárzásos kezeléseket, mint a sebészeti beavatkozásokat részesíti előnyben. A 90-es évekre a budapesti reaktorban előállított orvosi izotópok évente félmillió hazai pácienshez jutottak el, vagyis a magyarországi lakosság 5%-a profitált a hazai izotóptermeleésből.



1. ábra. A Mirrotron Kft. által szabadalmaztatott és forgalmazott „vasüveg szendvicsszerkezetű” neutronvezető, amelyben az üvegcső belső falát mintegy 1000 Ni és Ti rétegből álló szupertükrör borítja.

## Nukleárisműszer-fejlesztés

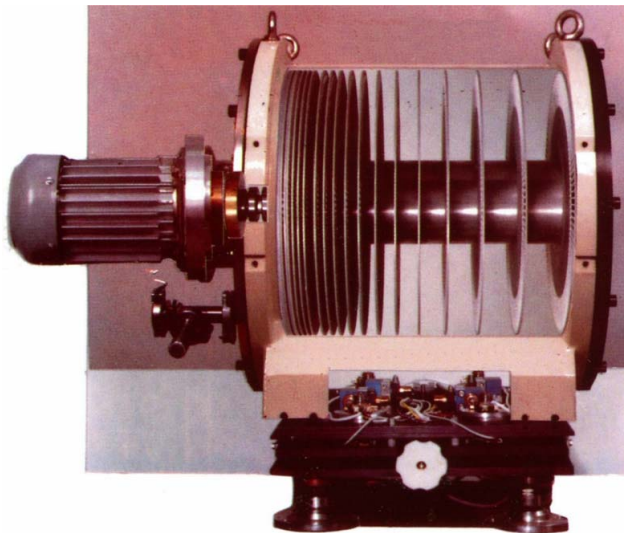
A neutronkutatás területén az egyik legnagyobb hatású felfedezés a szupertükrö-elv (supermirror, SM) és -eszközök felismerése, illetve megalkotása volt. Ez a korszakos innováció Mezei Ferenc nevéhez fűződik, 1974-ben a KFKI-ban készültek és a BKR-nél lettek bevizsgálva az első szupertükrök [2]. Az ipari méretű gyártást lehetővé tevő, csúcsmínőségű, vékonyréteg-technológia az 1990-es évek közepén vált elérhetővé. Azóta a neutronvezetőként és polarizáló optikai eszközként használt szupertükrök világszerte elterjedtek, a neutronkutató berendezések szerves részévé váltak (1. és 2. ábra). A Mirrotron Kft.-t spin-off vállalkozásként a Budapesti Kutatóreaktorhoz közeli fizikusok és mérnökök alapították szupertükrök előállításának céljából. Mára a szupertükrök piaca évi több millió eurós nagyságrendű, ebből a Mirrotron részesedése körülbelül 25%. Az alapvetően tudományos elgondolásból született elv, illetve kifejlesztett eszköz az innovatív technológiatranszfer révén ipari terméké, profittermelő tevékenységgé fejlődött. Ennek elismeréseképpen Mezei Ferenc és a Mirrotron Kft. 2019. március 28-án Innovációs Díj kitüntetésben részesült.

A műszerfejlesztés egy másik sikertörténete a mechanikus neutronsebesség-szelektorok fejlesztése, gyártásba vitele és üzleti forgalmazása. Ez a nagyfordulatú eszköz többféle spektrométerben kulcsfontosságú komponensként a neutronok monokromatizálására használatos. Az 1986-ban megépített prototípus, amely a soktárcsás eljárás alapul, mind a fizikai elvet, mind a mechanikai és vezérléstechnikai koncepcióját tekintve jelentős innovációt képviselt [3]. A szelektort (3. ábra) nemzetközi szabadalommal védtek le és az eszközt megalkotó fizikusokat és mérnököket 1987-ben Jánossy-díjjal jutalmazták.

1993 óta például ilyen szelektor van használat-



2. ábra. A Mirrotron Kft. által készített neutronvezető az Oxford melletti ISIS neutronkutató központban.



3. ábra. A soktárcsás neutronsebesség-szelektor felépítése.

ban a BKR kisszögű szórásvizsgáló (SANS) berendezésében, amely a legnépszerűbb kísérleti állomás – így a szelektor sok száz sikeres kísérlet megvalósításához járult hozzá. A szelektort – annak csúcstechnológiájú mechanikus rotorját és vezérlő elektronikáját – kereskedelmi terméké fejlesztették, mára több mint 40 hasonló berendezést gyártottak és installáltak szerte a világ neutronlaboratóriumaiiban (4. ábra).

Például a National Institute of Standards and Technology (Washington DC, USA) 3 szelektort vásárolt az Exxon olajcég által finanszírozott SANS berendezésekhez, amikor a 90-es években egy szigorúan titkosított projekt keretében SANS vizsgálatokat végeztek, hogy felkutassák az Egyesült Államok palaolaj-tartalékait és kifejlesszék a kinyerésükhöz szükséges technológiát. Ez a palaolaj-kutatás a neutronos technológiatranszfer egyik legnagyobb sikertörténete, amely

4. ábra. Soktárcsás neutronsebesség-szelektor a pekingi kutatóreaktor SANS berendezésénél.



nek a magyar szelektorok is részesei voltak. A Mirrotron Kft. jelenleg is gyárt és értékesít ilyen szelektorokat, miközben a BKR is minden értékesítés hasznélvezője, hiszen a neutronos bevizsgálás, ami bevétel a reaktornak, a minőségbiztosítás része.

### Neutronszórás autóiipari alkalmazása

Ismeretes, hogy a gépjármúiipar új technológiai alkalmazásainak legnagyobb része a versenyautók fejlesztéséből származik. Az alábbiakban egy rövid példát mutatunk be egy Forma-1-es autón elvégzett neutronvizsgálatra. A tanulmány oka az volt, hogy a versenyszabályok megváltoztatása miatt meg kellett növelni a motor élettartamát, ugyanis előírták, hogy a versenyautóknak motorcsere nélkül legalább két versenyciklust (például egy edzőfutam és a verseny) kell teljesíteniük. A motor élettartamát a rendkívüli igénybevételnek (17 000 rpm, 900 LE) kitett, minimális tömegűre munkált dugattyúk (5. ábra) határozták meg, amelyeknél – feltételezhetően – a felső peremen keletkezett repedések okozták a dugattyú rövid használat utáni megszorulását. A feladat tehát a repedések kialakulásának felderítése, a probléma kezelésére irányuló javaslat megtétele volt.

A kísérletekben kisszögű neutronszórással tanulmányoztuk a széleskörűen használt  $AlSi_2CuNiMg$  ötvözetből készült valódi dugattyúkban előforduló fém-

5. ábra. A Ferrari Forma-1 versenyautó és motorjának dugattyúja.



szerkezeti kiválások mikrostrukturális kialakulását. A vizsgálatot a világbajnok Ferrari csapat 3000 cm<sup>3</sup>-es, hathengeres motorjainak új és használt dugattyúkoronáin végeztük. A SANS görbéket mindkét dugattyú 5-5 különböző pontján (a lehetséges repedési gócpontokon), 10 mm átmérőjű nyalábbal mértük meg. Az új minta központi részein izotróp szórás volt megfigyelhető, a dugattyú oldalsó részein azonban a szórás anizotróppá vált, jelezve a gyártás által előidézett textúra jelenlétét. Továbbá, az Al-Mg-Si ötvözetek olyan mechanikai jellemzőkkel bírnak, amelyek igen érzékenyek a hőkezelésekre. A működési hőmérséklet általában nagyon közel van az előregedési hőmérsékletéhez és a korona egyes részein meg is haladja azt. Az öregedés gyakorlatilag azt jelenti, hogy a többkomponensű ötvözetben egyes alkotóelemek elkülönülnek („kiválnak”) ezáltal gyengítve az eredetileg homogén ötvözet megfelelő mechanikai tulajdonságait. Tipikusan a réz szerepel precipitációs gócképzőként az anyagokban [4].

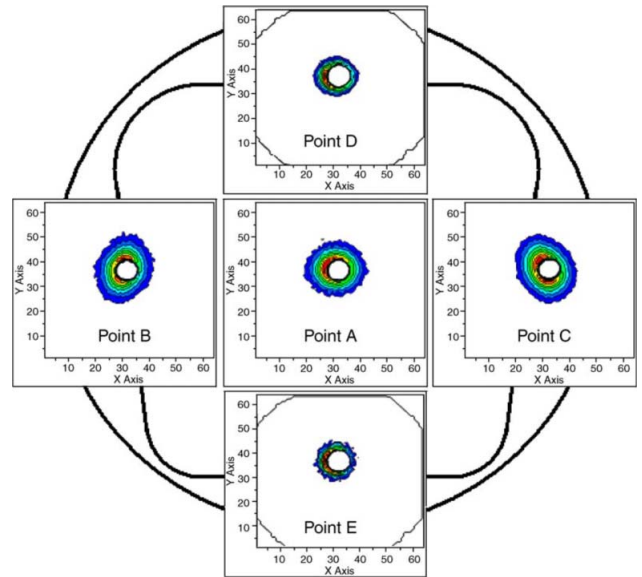
Összehasonlítottuk a mechanikai tulajdonságok öregítési kezeléssel előidézett változásait a kiválások szerkezetében bekövetkezett változásokkal és megállapítottuk, hogy 4–20 nanométeres kiterjedésű, Cuban feldúsult precipitátumok keletkeznek (6. ábra). Kimutatható volt, hogy a használat korai stádiumban keletkezett kiválások képezik a mikrorepedések gócait és ezek terjedése a kiválás méretétől függően változik; leggyorsabban a 10 nm körüli kiválások/repedések terjednek. Javasoltuk a dugattyúk gyártás-közi hőkezelését, ami a kiválások homogenizálásához vezethet, így a mikrorepedések terjedése is lelassul. Végeredményben a SANS eredmények elősegítették a gyártási technológia optimalizálását, és hozzájárultak a motor élettartamának jelentős növeléséhez, sőt a teljesítmény csekély növelését is lehetővé tették, ami viszont döntően hozzájárult a Ferrari csapat akkori kiemelkedő győzelmi sorozatához.

### Csapágyak kenési problémájának feltárása

Egy elhasznált és egy új kétsoros golyóscsapágy összehasonlító vizsgálatában [5] a neutronok segítségével feltárhattuk nemcsak a konkrét hibát, a repedéseket és töréseket, hanem az okát is (*root cause analysis*, RCA).

Neutrontomográfia módszerével ugyanis (a röntgentomográfiával ellentétben) a fémes részek mellett a szerves anyagok is láthatóvá tehetők. Ezzel a csapágy megbontása nélkül lehetett kimutatni, hogy a tapasztalt kopás és törés kenési elégtelenségre vezethető vissza. Figyeljük meg a 7. ábra jobb alsó paneljén, hogy az alsó tárgyból a fehéren látszó kenőanyag szinte teljesen hiányzik, és számos repedést fedezhetünk fel.

Amennyiben a mintadarabot szétszedés után további vizsgálatnak (például neutrodiffrakció) vetjük alá, az első lépésben végzett neutrontomográfia egyértelműen rögzíti a tárgy geometriáját és a későbbiekben segíti a szerkezeti információ értelmezését, kontextusba helyezését.

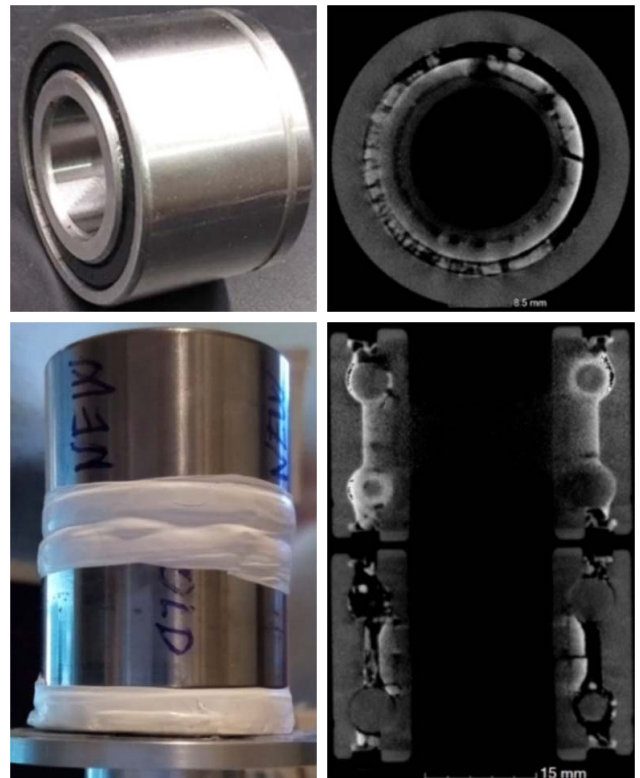


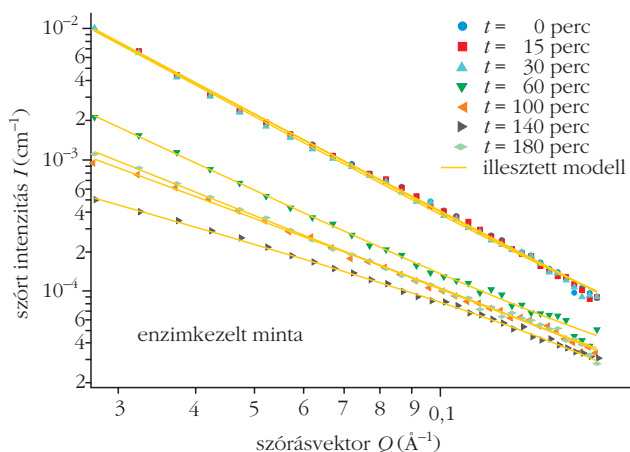
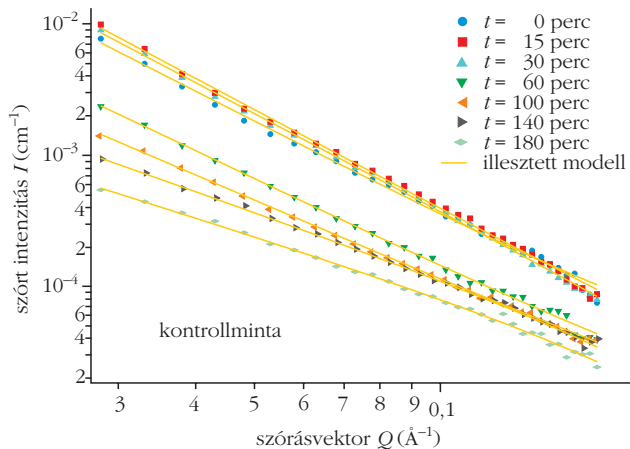
6. ábra. A dugattyú felülnézeti képe 2D SANS intenzitáseloszlás-spektrumokkal.

### Élelmiszerminőség-javítás

Neutronyaláb-kísérletekkel joghurtokban vizsgáltuk a fehérjemicellákra gyakorolt enzimhatást. A mikrobiális transzglutamináz enzimet (mTG) az élelmiszeripar azon területein használhatják állománymódosítóként, ahol a mátrixban valamilyen fehérje található – ilyenek például a tej- vagy a húsipari ter-

7. ábra. Egy új és egy elhasznált kétsoros golyóscsapágy neutrontomogramja. A jobb alsó panelen észrevehető, hogy az alsó mintából a fehéren látszó kenőanyag szinte teljesen hiányzik.



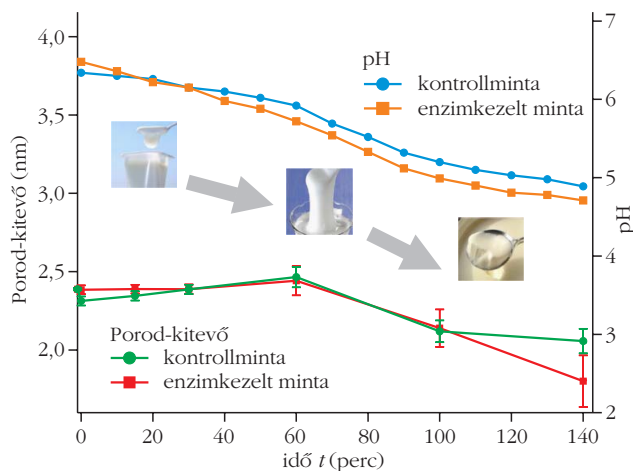


8. ábra. A joghurt erjedésének folyamatából vett, kontroll- és enzimezett minták kisszögű szórásgörbéi. A folyamatos vonal az illesztett modellgörbét (a Porod-függvényt) jelenti.

mékek. Az enzim a fehérjékben lévő glutamin és lizin aminosavak között hoz létre keresztkötéseket és így polimerizált fehérjemolekulák keletkeznek. Ennek következtében a kialakuló fehérjeháló vissza tudja tartani a vizet, savófehérjéket, valamint a zsírcseppecskéket. A mikrobiális transzzglutamináz enzim egyik legjobb szubsztrátja a tejfehérjék 80%-át alkotó kazeinfehérje.

Az enzim hatására a kazeinmicellák aggregálódnak és olyan komplex kazeinmátrix jön létre, amely joghurtok esetén nagyobb gélzilárdságot és kevesebb savóeresztést eredményez, a sajtgyártásban pedig a savófehérjék beépítésével növeli a kihozatalt és emeli a sajt tápértékét. Kutatásaink a fermentáció kazein-

10. ábra. MirroBor márkanevű rugalmas neutronvédő anyag.



9. ábra. A transzzglutamináz enzim hatása a joghurt erjedési folyamatára, a térhálós szerkezet az enzimezett mintában hamarabb kialakul, ami a Porod-kitevő változásában látható.

micellára gyakorolt változásának nyomon követése, az enzim hozzáadásával és anélkül; amelyhez a kisszögű neutronszerzés vizsgálat különleges lehetőséget adott. A méréseket a BKR Yellow Submarine berendezésén végeztük, 43 °C hőmérsékleten, amely optimális hőmérséklet a joghurtkulturákhoz. Az enzimadagolt minták esetében a megfelelő mérési pontok előtt 70 °C-on inaktívtuk az enzimet, így egészen a folyamat végéig követni tudtuk a mikrobiális transzzglutamináz enzim adott időpillanatokbeli hatását a tejsavas erjesztésre.

A 8. ábrán az erjedés folyamatából vett, kontroll- és enzimezett minták szórásgörbéi láthatók. A mért értékek illesztéséből megkaptuk az úgynevezett Porod-kitevőt, amely az enzim hatására történő szerkezetváltozást jellemzi. A kisebb kitevő kompaktabb szerkezetre utal, az 1 és 2 közötti kitevő pedig a térhálós szerkezet jellemzője.

A 9. ábrán látható, hogy az enzimezett minta esetében a térhálós szerkezet hamarabb kialakul, mint a kontrollminta esetében, bár a pH-mérések alapján a joghurtok hasonló ütemben savanyodtak. A joghurt alvadási folyamata során fellépő térszerkezeti változások neutronszerzés megértése úttörő eredményt jelenthet az élelmiszertudomány területén, és egyúttal választ kaphatunk arra is, hogy a folyamat során az mTG enzim miként módosítja a kialakuló gél szerkezetet [6].

### Új sugárvédelmi anyag fejlesztése

2012-ben egy új, neutronsugárzás elleni védelmet nyújtó anyagot fedeztünk fel. Egy nagyon hatékony, bór-tartalmú rugalmas műanyag neutronvédő anyagot fejlesztettünk ki (10. ábra), amely végső soron jobbnak bizonyult, mint bármely más, hasonló anyag a piacon.

A technológiatranszfernek hála a Mirrotron Kft. ezt is kereskedelmi termékévé fejlesztette (MirroBor márkanev alatt le is védette), amely mostanra a világpiacon a legkeresettebb lett a hasonló termékek közül [7].



11. ábra. Különböző ékszerészeti formára csiszolt kék topáz kristályok a besugárzás után.

### Kereskedelmi célú besugárzás

A gyorsneutron-besugárzás különleges alkalmazási területe az ékszerminőségű drágakövek előállítására. Ez a tevékenység ugyan nem a legrelevánsabb a tudomány számára, mégis ez a reaktor egyik legjövedelmezőbb kereskedelmi tevékenysége, amely 2002 óta folyamatosan zajlik.

A neutronbesugárzás defekteket okoz a topáz kristályszerkezetében, amelyek színpontként jelennek meg (11. ábra). Ezáltal a színtelen, csiszolt kövek kék színűvé változnak, így 100-szorosára növelik az ékszer értékét. Ezt a színezési eljárást a BKR-ben fejlesztették ki, és az elmúlt 15 évben több 10 tonna topázkristályt sugároztak be, ezzel biztosítva jelentős bevételt a reaktornak.

### Az innovációs tevékenység társadalmi hatása

#### Költséghatékonyság

Ahogy alább láthatjuk majd, a reaktorban rejlő lehetőségek kihasználása – a tudományos eredmények mellett – gazdaságilag is jövedelmezőnek bizonyult. Egyfelől a reaktor besugárzásos és neutronnyaláb-technológiák általi alkalmazása biztosít különféle termékeket és szolgáltatásokat a társadalom, ipar, egészségügy, kereskedelem és oktatás szektorainak, aminek jelentős és közvetlen gazdasági hatása van. Másrészt a nukleáris/neutron kutatási szektor tudományos módszereinek és eszközeinek fejlődése indirekt gazdasági hatással is jár. A tényleges gazdasági hozam számszerű megítélése bonyolult kérdés, viszont megállapítható, hogy az izotópgyártás, csakúgy, mint a nukleáris-energia-szektor technikai és biztonsági támogatása százmilliárd forint nagyságrendű hozzájárulást jelentenek az ökoszisztémához. A műszeripari hozadékok viszont meglehetősen pontossággal meg lehet becsülni: például a reaktor neutronfizikai eszköztárának piaci értéke – a 16 mérőállomás + a hidegforrás – mintegy 20 millió euro áron került telepítésre, beleértve a

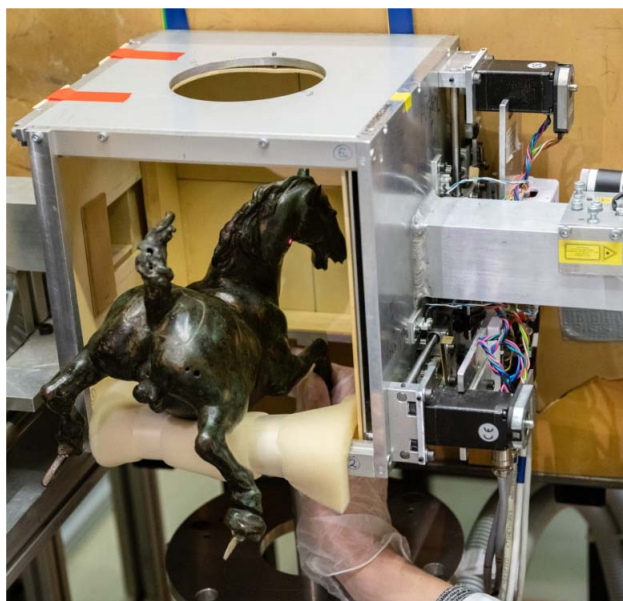
munka- és eszköz költségeket, míg a piaci értékük körülbelül 42 millió euro lenne. A technológiatranszfer révén a spin-off kis- és középvállalkozások neutronberendezés-eladásai az elmúlt 20 évben 45 millió euro exportárbevételt hoztak (összehasonlításként: a reaktor jelenlegi éves működése 2,4 millió eurónyi költséget tesz ki).

### Kulturális örökség

Az egyik legérdekesebb társadalmi hatás a nemzeti kulturális örökséghez kapcsolódik: *Leonardo da Vinci* bronz lovasszobrának neutronos vizsgálata. A kis bronzfigura a Magyar Szépművészeti Múzeum 19. század előtti szoborgyűjteményének részét képezi. Sok rövid életű próbálkozással ellentétben, amelyek során szobrokat próbáltak Leonardónak tulajdonítani, a budapesti ló és lovasa (lásd a címlapon) alkotójának személye körül élénk eszmecsere bontakozott ki a művészettörténészek körében az elmúlt száz évben. Annak megfajtása céljából, hogy a szobor létrejöttére csak inspirációként hatottak-e Leonardó ötletei vagy a szobor a mester saját kezének munkája is lehet, 2017–18-ban átfogó neutronalapú vizsgálatokat végeztek a kis bronzszobron a Budapesti Neutron Centrumban (12. ábra). A 3-dimenziós neutrontomográfia kiváló minőségű, tizedmilliméter felbontású képeket (13. ábra) eredményezett a szobor belsejéről [8]. További képek a hátsó borítón találhatók.

A neutrontranszmissziós kísérletek az öntési anyag maradványait is megjelenítették, amelyek a tárgy belsejében maradtak a viaszveszejtési eljárás után. Ezen maradványok elemi összetételét prompt-gamma-spektroszkópiával határozták meg, míg a neutrodiffrakció bebizonyította, hogy a lovat és lovasát ugyanabból a bronzanyagból öntötték, csupán

12. ábra. A Szépművészeti Múzeum 2018 októberi újraindításának legfőbb látványosságát, az esetleg Leonardo-alkotta szobrot prompt-gamma aktivációs analitikai vizsgálatra készítik elő.





13. ábra. A szobor belsejének neutrontomográfiai leképezése.

az eljárás volt különböző. Ezek a komplex vizsgálatok sem szolgáltak minden kétséget kizáró bizonyítékok arra, hogy ez maga a mester keze munkája, de a begyűjtött új argumentumok mindinkább ezt látszanak alátámasztani.

2018 októberében három évig tartó, átfogó felújítási munkálatok után a Szépművészeti Múzeum újra megnyitotta kapuit és a fő látványossággá a „Leonardo-szobor” időszakos kiállítása vált [9], amelynek keretében megtekinthetők voltak a windsori Royal Collectionból érkezett, a szobrokhoz készült tanulmányrajzai is. A neutronvizsgálatokat bemutató film<sup>1</sup> is szerves része volt a kiállításnak, amelyet 65 000 magyar és külföldi múzeumlátogató tekintett meg.

### Oktatás, a nukleáris kultúra fenntartása

A nemzeti és közép-európai régió felhasználói közösség (körülbelül 500 szakember) tevékenységének népszerűsítése érdekében, illetve új felhasználók neutronos berendezésekhez való hozzáféréseinek támogatása céljából, a BNC immár 1992 óta rendszeresen nemzetközi konferenciákat, iskolákat, szakmai tréningeket szervez. A BNC jelenleg az úgynevezett bevezető jellegű neutroniskolák európai koordinátora, és így képzéseket szervez karrierjük elején lévő kutatóknak, nemcsak a CETS neutronszórás iskola keretében, hanem egyéb tudásközpontokban is Európán-szerre.

A BKR/BNC szívügyének tekinti a tudósok következő generációinak képzését. Magyar egyetemekkel (BME, ELTE, Pannon Egyetem, Pécsi Egyetem stb.) együttműködve a BNC hallgatókat fogad, akik nukleáris tudományok és technológiák tematikájú la-

<sup>1</sup> A Szépművészeti Múzeumtól kapott engedély alapján a *Fizikai Szemle* olvasói a <http://fizikaiszemle.hu/extra/leonardo> helyen megnézhetik a filmet.

boratóriumi gyakorlaton vehetnek részt. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökséggel együttműködve a BNC ilyen témájú tanfolyamokat tart külföldi és hazai hallgatóknak. A reaktor kapui nyitva állnak a nagyközönség előtt is. A BNC szakértői tematikus előadásokat tartanak szerte az országban minden év november 3-a körül, a magyar tudomány napjának részeként, amelyet a Magyar Tudományos Akadémia szervez.

### Jövőbeli tendenciák

A nukleáris kutatási infrastruktúra és különösen az európai neutronközpontok száma drasztikus változáson fog keresztül menni a következő évtizedben. Előszörban az extrém nagy berendezések fogják kielégíteni az egész kontinens neutronkutatási szükségleteit (például a Svédországban két milliárd eurós beruházással épülő csúcserendezés, az ESS – European Spallation Source), illetve a besugárzott anyagok tulajdonságainak vizsgálatát (Jules Horowitz Reactor, Cadarache, Franciaország) és a radioizotópok előállítását (High Flux Reactor, Petten, Hollandia). A BKR azon közepes méretű létesítmények egyike, amely a következő évtizedben valószínűleg tovább fog működni – a működési engedély 10 éves meghosszabbításának előkészítése folyamatban van. A reaktor tevékenységei döntő fontosságúak ebben az átmeneti időszakban, tehát a BKR szándékában áll továbbra is magas szintű szolgáltatásokat biztosítani a hazai és régióbeli felhasználók számára, akik így felkészülhetnek a vezető európai központok jövőbeli használatára. Továbbá, a reaktorfelhasználó közösség számára szintén fontos szempont, hogy a fokozódó tevékenység mellett, kielégítve az igényeket, a BKR biztosítsa a folyamatosságot és megalapozza egy nélkülözhetetlen, következő generációs hazai kísérleti bázis létesítését.

### Irodalom

1. Budapesti Neutron Centrum, [www.bnc.hu](http://www.bnc.hu)
2. Mezei, F.: Novel polarized neutron devices: Supermirror and spin component amplifier *Comm. Phys.* 1 (1976) 81–85.
3. Rosta, L.: Neutron Physical Properties of a Multidisc Velocity Selector. *Physica B* 156–157 (1989) 615–621.
4. Rogante, M., Lebedev, V. T., Nicolaie, F., Rétfalvi, R., Rosta, L.: SANS study of the precipitates microstructural evolution in Al 4032 car engine pistons. *Physica B* 358 (2005) 224–231.
5. Rogante, M., Rosta, L.: BNC Experimental proposal No. 687 (2017) és Kis Z., Szentmiklósi L.: BNC vizsgálati jelentés (2018).
6. Len A., Füzi J., Darnay L., Harmat P., Koncz K., Rosta L.: Nanostruktúra-vizsgálat kisszögű neutronszórással. *Fizikai Szemle*, 64/1 (2014) 9–13.
7. <http://mirrotron.com/en/products/radiation-shielding>
8. Szócs, M.: Megmértetve, avagy lehet-e a lovas Leonardo alkotása: A Szépművészeti Múzeum kisbronz Washingtonban. *Artmagazin* 4 (2009), 74–79. és Kis, Z., Bakonyi, E.: Neutron Tomography of the Budapest Horse and Rider. In Kárpáti, Z. (ed.): *Leonardo da Vinci & the Budapest Horse and Rider*. Budapest, Museum of Fine Arts (2018) ISBN: 978-615-5304-82-8, 191–201.
9. A szobor és a kiállítás honlapja: <http://leonardo.szepmuveszeti.hu/hu> és a megjelent írás a tomográfiai vizsgálatokról: <http://leonardo.szepmuveszeti.hu/hu/research/technical>