

Nyolcvan éves a neutron

Rosta László

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

1121 Budapest, Konkoly Thege út 29-33.

A neutron, mint elemi részecskét James Chadwick fedezte fel 1932-ben - ez nemcsak a tudományban jelentett hatalmas előrelépést, hanem nagyban befolyásolta 20. század történelmét is, új utakat nyitott a nukleáris kutatásokban és az energiatermelésben. A neutronkutatásoknak számos önálló ágazata fejlődött ki a magfizikától a kondenzált anyagok kutatásán át a reaktor-fizikáig. Magyar tudósoknak a kezdetektől napjainkig meghatározó szerep jutott ezen a tudományterületen. A magyarországi neutronkutatás fő bázisa az MTA csillebérci kutatóreaktora, amely fontos szerepet tölt be a hazai nukleáris energetika támogatásában, az egészségügy radioizotóp ellátásában, valamint felfedező és alkalmazott kutatásokban elsősorban az anyagtudományok, biológia és kulturális örökség terén.

A neutron felfedezése

2012 nyarán a fizikus társadalmat, de általában a természettudományok iránt érdeklődő embereket a Higgs-bozonnak nevezett elemi részecske létezésének kísérleti igazolása hozta lázba. Az európai részecskefizikai kutatóközpont, a Genf melletti CERN üzemelteti a világ legnagyobb részecskegyorsítóját (LHC), ez lehetővé tette a Higgs-részecske felfedezését. Ez a megfigyelés nagy lépés az elemi részecskék tömegének a kialakulásáért felelős folyamat, ill. végső soron az Univerzum keletkezésének megértésében. De az idei év egy másik fontos részecskefizikai felfedezés kerek évfordulója miatt is különleges. 2012. június 1-én volt 80 éve, hogy a Royal Society közzé tette a Cambridge-i fizikus, James Chadwick tanulmányát [1], amelyben bebizonyította a neutronok létezését és ezért a felfedezésért 1935-ben Nobel-díjat kapott. Chadwick felfedezése a neutronkutatás gyors fejlődéséhez vezetett és ez a felfedezés történelmi áttörést jelentett a tudományban. Ha már neutron és kerek évforduló, akkor érdemes megemlíteni: éppen 40 éve annak, hogy Mezei Ferenc Budapesten felfedezte a neutron spin-echo elvét [2], mely újabb áttörést hozott a neutronkutatásokban és bátran mondhatjuk: ez az elmúlt fél évszázad legjelentősebb magyar kísérleti eredménye a természettudományos kutatásokban. És még egy „felezési idő”: éppen 20 esztendővel ezelőtt indult újra egy teljes körű modernizáció után az első hazai atomreaktor, mely ma a magyarországi, sőt közép-európai neutronkutatás fő bázisa [3].

A Chadwick által felfedezett semleges részecske neutron néven vált ismertté. Más töltött részecskékkal ellentétben (pl. a hélium atommagja, vagyis pozitív töltésű alfa-részecskék), amelyek visszaverődnek a nehéz atommagokról azok jelentős elektromos töltése miatt, a neutronoknak nem kell legyőzniük semmilyen elektromos gátat, ezért képesek áthatolni és/vagy széthasítani a legnehezebb elemek magját is. Így a neutron felfedezése nemcsak a tudományban jelentett hatalmas előrelépést, hanem nagyban befolyásolta az emberiség sorsának alakulását, a 20. század történelmét. Ez ugyanis

előkészítette az utat az atombomba, vagyis a nukleáris fegyverkezés, ill. az atomenergia békés célú felhasználása irányában. Chadwick felfedezése lehetővé tette, hogy az uránnál nehezebb elemeket állítsanak elő laboratóriumi körülmények között. A neutron felfedezése különösen nagy hatással volt a Nobel-díjas olasz fizikusra, Enrico Fermire, aki felfedezte a lassú neutronok által beindított magreakciókat, valamint az osztrák fizikus Lise Meitnert-re és a német kémikus Otto Hahnra, aki Nobel díjat kapott, akik felfedezték a maghasadást, ami végül is elindította az atombomba kifejlesztését. Magyar tudósok is igen hamar bekapcsolódtak a neutronok kutatásába. Wigner Jenő már 1933-ban cikket közölt a kisenergiás neutron-proton szórásról, ez és később Teller Ede cikke (1937) az orto és para-hidrogéneken való neutronszerzés elméletéről nagyban hozzájárult a magerők spin függésének kimutatásához. 1934-ben Szilárd Leó kidolgozta és szabadalmazta a neutronok által keltett maghasadás és láncreakció elvét. Hevesy György 1936-ben kidolgozta a neutronaktivációs analízis alapjait. A harmincas-negyvenes években Szilárd, Teller és Wigner alapvető szerepet játszott az atombomba, a hidrogénbomba, ill. az atomreaktorok létrehozásában - mindhárman az amerikai Manhattan program kiemelkedő személyiségei és egyben a kezdetektől fogva az atomenergia békés használatának legelkötelezettebb harcosai voltak. Pl. Szilárd és Teller számos ötlete is hozzájárult a programhoz, de a chicago-i reaktorprojekt vezetőjeként Wigner volt az igazi 'reaktorépítő' - csak reaktor témában 37 szabadalmat alkotott; például a ma üzemelő reaktorok 90%-a az általa kidolgozott víz-moderációs, vízhűtéses elven működik.

A neutronkutatások területei

A neutronok kutatásának és alkalmazásának, vagyis tudományos, ipari, egészségügyi hasznosításának számos önálló ágazata alakult ki, amelyeket már egy 1971-es magyar nyelvű monográfia is jól felölel [4]. Az elmúlt 80 év során külön területként kifejlődött tevékenységeket itt röviden, szinte csak felsorolás szerűen ismertetjük.

A neutron, mint részecske

A neutronok tulajdonságainak kutatása a felfedezéstől a mai napig folytatódó izgalmas feladat. A neutronok töltésének és mágneses momentumának (illetve alaki tényezőjének) meghatározása hamar a neutronoknak az anyagokkal való kölcsönhatását leíró elméletek megalkotásához vezetett, ami aztán megalapozta a neutronok használatát az anyagi tulajdonságok vizsgálatában – ez ma a neutronkutatások legnagyobb területe. Ezen túl a neutronot arra is lehet használni, hogy az univerzumot mozgató alapvető erőkről többet megtudjunk. A neutronnak nincs töltése, és egy tökéletesen szimmetrikus erővel rendelkező univerzumban szintén nem lenne elektromos dipól-momentuma (EDM). Ugyanakkor azt is tudjuk, hogy a világegyetem jelenleg sokkal több anyagot tartalmaz, mint antianyagot, ami csak abban az esetben alakulhatott így, ha a szimmetria részlegesen megbomlott valamely ős-esemény során, közvetlenül a Big Bang-et követően. A kutatók nagyon alacsony energiájú neutronok segítségével a neutron EDM-jét próbálják egészen hihetetlen pontossággal meghatározni. Ennek függvényében esetleg alapjaiban újra kell gondolni egy sor jelenleg érvényben lévő elméletet, amelyek az elemi részecskék és erők születését írják le. Egy másik izgalmas fundamentális probléma a gravitáció természetével foglalkozó kutatások, azaz a nagy kihívás ezen a területen a kvantumelmélet összeegyeztetése Einstein gravitációelméletével. Ha nagyon lassan mozgó „ultrahideg” neutronok tükröződését vizsgálják egy rendkívül egyenes felületű tükrön, kimutatható, hogy adott lépésekben „pattognak”, ami azt bizonyítja, hogy gravitációs energiájuknak rögzített értékei vannak, azaz „kvantáltak”. Így vizsgálható a gravitáció, mely alapvető nyitott kérdések megválaszolásához ad lehetőséget az Univerzum mélyebb megismerésre.

Magfizika

A magfizika természetesen a neutronokkal kapcsolatos egyik alaptervekenység: az atommagok felépítésének felderítése, az elemek izotópjainak feltérképezése, a maghasadás és a mesterséges radioaktivitás jelenségeinek felfedezése vezetett a mai nukleáris kutatások és alkalmazások, a nukleáris energetika és más technikák kialakulásához. A mostani nagyintenzitású neutronforrások a magfizikai kutatások újabb virágkorát jelentik – a neutronokkal indukált magreakciók, rezonancia befogás és szóródás jelenségeinek tanulmányozása, a hasadási folyamatok és termékek vizsgálata számos új probléma megoldását segítik. Pl. az elem-transzmutáció kutatása vezethet a „nukleáris korszak” egyik legnagyobb problémájának megoldásához, a nagyaktivitású radioaktív hulladékok megsemmisítéséhez, ill. kezeléséhez.

Neutronszórás

A röntgen- vagy más elektromágneses sugarakhoz hasonlóan a termikus neutronok a kristályrácon diffrakciót szenvednek, vagyis így a kristályok szerkezete tanulmányozható. A neutronok különleges tulajdonsága, hogy azokat az atommag szórja, így a szórás foka nem csak az elemtől, de az adott izotóptól is függ. Hasonló atomsúlyú elemek, vagy ugyanannak az elemnek a különböző izotópjai (például a hidrogén és a deutérium) igencsak különbözőképpen szórhatnak. Ennek révén lehetőség adódik arra, hogy egy izotópot másikra cseréljünk „intelligens”

kémiai vagy biotechnológiai reakciók segítségével, ezzel pedig bizonyos atomcsoportokat külön nézhetünk meg keverékekben vagy komplex anyagokban. A diffrakció a neutronkutatások legkiterjedtebb területe, ezen belül a biológiai anyagok vizsgálata ún. kisszögű szórással, valamint a protein kristallográfia ma az egyik leggyorsabban fejlődő kutatási ágazat.

Az aktuális tudományos problémák, különösen az anyagtudományok területén, gyors ütemben találnak technológiai és ipari alkalmazásra, így a műszaki tudományokban, gépészetben, új anyagok (mágneses-, optikai anyagok, polimerek, üvegek, szerves-szervetlen kompozitok) előállításában, nanotechnológiában, energiátárolás/átalakításban, biotechnológiában, kémiai technológiákban, sőt újabban a biológiai, geológiai és archeológiai kutatásokban is.

Érdekes néhány jellemző példát megemlíteni, amelyek jól mutatják, hogy milyen súlyú tudományos vagy műszaki problémákat sikerült megoldani neutronos vizsgálatokkal. Ilyenek: az energiagazdálkodás szempontjából kiemelt fontosságú szupravezetés (ellenállás nélküli elektromos áram) kutatásában alapvető kísérleti eredmények; a manapság használatos számítástechnikai és telekommunikációs eszközök mágneses komponensei anyagszerkezet/ anyagtechnológiai bázisának létrehozása; a mosó- és mosogatószerkezetek, szappanok ún. felületaktív anyagai által tökéletesített tisztító hatásmechanizmusának felderítése és ezáltal a gyártástechnológia javítása. Érdekes eseti tanulmány volt, amikor neutron diffrakciós kísérleti technikával sikerült megállapítani a német szuper-gyorsvonat néhány évvel ezelőtti, közel száz áldozatot követelő balesetének okát. Nevezetesen a kerék törését és a vonat kisiklását a kerekek konstrukciós hibájának következtében fellépő belső feszültség okozta (amelyet a legmodernebb tervezési számítások sem voltak képesek előrelátni, és a számítási eredmények kísérleti ellenőrzésére a baleset előtt nem került sor).

Mágneses szórás

A neutronoknak spinje, azaz mágneses momentuma van, amelynek segítségével nanoléptékben térképezhetjük fel és vizsgálhatjuk meg a mágneses anyagokat. A neutronszórás alkalmazási területeinek óriási választékából – a high-tech elemek minőségének ellenőrzésétől kezdve az energiátároló anyagok kifejlesztésén át az élettani kutatásokig – a mágneses szerkezetkutatás az egyik legnagyobb terület. Az intenzíven folyó jelenkori kutatások egyik témája a kvantum állapotok megértése az anyagokban, ehhez a legjelentősebb kísérleti eszköz pedig kétségtelenül a neutron szórás, mely számos, a mágnesesség terén elért eredményhez járult hozzá, ilyenek például a mágneses rend léte és típusai (pl. az antiferromágnesség felfedezése hozta a Nobel-díjat C. Shullnak, 1994). Ennek köszönhetőek a legerősebb állandó mágnesek, amelyeket elektromos motorokban és alacsony energiavesztésű csapágyaknál használnak.

A számítástechnikai eszközök számos funkciója mágneses jelenségeken alapszik, pl. a merevlemezek kiolvasása az ún. kolosszális mágneses ellenállás jelenség (Nobel-díj 2007) elvén működik – az effektus felfedezésétől a gyakorlati alkalmazásokig, sőt tömeggyártásig alig pár év telt el és a mágneses neutron diffrakció és reflektometria hatalmas szerepet játszott a technológiai fejlesztésben.

Neutronoptika

A neutronok, mint hullámok optikai jelenségei számos izgalmas kutatási problémát vetnek fel. A neutron interferometria mind a neutronok hullám-tulajdonságainak kutatásában, mind pedig anyagvizsgálati feladatok megoldásában sok érdekes eredményt produkált. A neutronok tükröződése alapvető szerephez jutott a neutronoknak a forrásokból (reaktorokból) való kivezetésében. A neutron spektrométerek építésében manapság nélkülözhetetlenek a neutronvezetők, neutronpolarizáló tükrök, különféle fókuszáló elemek.

Magkémia

A neutronokkal keltett magreakciók tanulmányozása vezetett a forráatomkémia kialakulásához (Szilárd Leó, Nature, 1934), többek között a szerves anyagok mesterséges radioaktív elemekkel való jelöléséhez. Az n-gamma reakciók megfigyelése révén fejlődött ki az aktivációs analitika (Hevesy György, kémiai Nobel-díj: 1943), ennek külön ága a prompt-gamma aktivációs analízis, amely ma az egyik legérzékenyebb elem-analízis módszernek számít – rendkívül széles alkalmazási területekkel a gyógyszergyártástól az archeológiáig.

Reaktorfizika

A neutronok különféle alkalmazásai közül is a legszélesebb körű és társadalmi hatását tekintve a legnagyobb jelentőségű a neutronok szerepének kutatása és hasznosítása a maghasadás okozta láncreakció folyamatában. Az atommagokban rejlő hatalmas energia felszabadítása a fizikusok és mérnökök generációinak jelentett, sőt jelent ma is izgalmas tudományos és technológiai kihívást. A neutron felfedezésétől számított első 10 év alatt a nukleáris korszak nagyjai, köztük számos magyar tudós és persze kutatók százai a láncreakció elméleti és kísérleti megvalósításának felderítésével foglalkoztak. Pl. Wigner Jenő az USA-ban az ún. „Plutónium projekt” Elméleti Fizikai Csoportját vezette és egy 1946-os cikkében kijelentette, hogy a láncreakció, ill. egy reaktorzóna egyik legfontosabb paramétere az ún. *neutron reprodukciós tényező* kiszámítása olyan egyszerű, hogy „akárki, akinek valamennyire is megfelelő hozzáértése van, könnyűszerrel ugyanerre a következtetésre jutott volna”. Ez a kijelentés persze azután állta meg a helyét, amikor már az első reaktoros kísérletek igazolták a számítások helyességét. Ezek az első láncreakció kísérletek a második világháború alatt zajlottak, így óriási titoktartás övezte sokáig a kutatásokat. Egy tudománytörténész bemutatta, hogy a *neutron reprodukciós tényező* kiszámítását egymástól függetlenül egy-két éven belül hat kutatócsoport is elvégezte az USA-ban, Franciaországban, Németországban és a Szovjetunióban – természetesen ugyanarra az eredményre jutva. Az első reaktoros láncreakciót a Chicago-i „atommagyában” indították be 1942-ben.

A reaktorfejlesztések a háború után nagy léptekkel haladtak a vezető nukleáris nagyhatalmaknál, számos ún. zéró-reaktor építettek kutatási célokra. Az ötvenes években fejlesztették ki San Diego-ban a TRIGA reaktorokat, amelyek „még egy ifjú fizikushallgató kezében is biztonságosak” (Teller Ede szavai, aki a fejlesztést vezette) és a mai napig több mint 60 ilyen reaktort helyeztek üzembe. Az energiatermelő reaktorok különböző változatai az 1950-es évek közepén jelentek meg, pl. a Kurcsatov vezetésével tervezett első vízhűtéses grafit-

moderált reaktor 1954-ben lett kritikus (Obninszk), vagy az első angliai reaktor (Calder Hall) 1956-ban kezdett elektromos energiát termelni. A neutronokat nyalábok kutatására eredetileg a fegyverkezési, ill. energetikai célú atomreaktorokból nyerték, mint mellékterméket. 1958-ban épült fel Kanadában (Chalk River) az első olyan atomreaktor, amelynek a fő célja neutronnyalábok előállítása, illetve az anyagkutatás volt. A világ eddigi legsikeresebb neutronkutató intézete a Grenoble-i nagyfluxusú reaktor, mely Institut-Laue-Langevin (ILL) néven 1972 óta üzemel nemzetközi központként, ennek 2005 óta Magyarország is tagja. Az ILL már tízszer nagyobb neutronfluxust produkált, mint az első, kanadai központ.

Spallációs neutronforrások

A 20. század végétől a szabad neutronok, ill. neutronnyalábok előállítására az ún. spallációs források építése került előtérbe. Egy spallációs forrás olyan részecskegyorsítóra épülő nagyberendezés-komplexum, amely intenzív neutronnyalábokat állít elő elsősorban anyagszerkezet kutatási feladatokra rendkívül széles multidiszciplináris tudományos és műszaki-fejlesztési hasznosítással vagy magfizikai típusú anyagmódsítási kísérletek céljaira. A forrás bázisa egy nagyteljesítményű lineáris protongyorsító, ehhez csatlakozhat egy szinkrotron tárológyűrű. A linac-ból direkt vagy a szinkrotronból kilépve a nagyenergiás (fénysebesség közeli) protonok egy target-állomást táplálnak. A targetben a protonok egy nehézfém (pl. volfrám, higany, tantál) céltárgynak ütköznek, amelynek atommagjait „felaprítják” (az angol spallation szót erre a folyamatra találták ki); miközben kisebb rendszámú elemek keletkeznek (Fe, Ni, stb.), nagyszámú igen gyors neutron szabadul fel. Ezeket a neutronokat lelassítva nyalábbá lehet formálni, és a target-állomástól kivezetett sugárnyalábok neutronforrásként szolgálnak az anyagvizsgálati kísérleti berendezésekben (neutron spektrométerekben). Az 1980-as években egy-egy spallációs forrás épült japánban (KEK) és az Egyesült Államokban (Argonne), ill. ekkor állt üzembe az Oxford melletti ISIS is, amely a mai napig a világ vezető spallációs neutronközpontja. Az OECD kutatási minisztereinek fóruma 1999-ben a világ három régiójában felépítendő egy-egy új megawatt kategóriájú spallációs neutronforrás központról határozott és ennek megvalósításaképpen az amerikai forrás (SNS) 2007-ben, ill. a japán kutatóközpont (J-PARC) 2009-ben került üzembe állításra. Az európai projekt, az ESS is indításra kész: a lényegi koncepciójában magyar kutatási eredményekre alapozó tervezet – a Mezei Ferenc által javasolt hosszú-impulzusú forrás [5] – minden tekintetben a világ legjobb neutronkutató központja lesz a várható 2019-es indulással a svédországi Lundban. A spalláció egy másik típusú alkalmazása, ha a targetben keletkező neutronokat nem lassítják le, hanem a gyorsneutronok mag-átalakítási kísérletekre vagy nehézionnyalábok előállítására szolgálnak. Ilyen projekt az EURISOL, amely szintén a 2020-as években épülhet meg. Az újgenerációs neutronforrások, mint az ESS vagy EURISOL lehetőségei 10, sőt 100-szorosan is meghaladják a jelenleg elterjedt kutatási célú atomreaktorok lehetőségeit úgy, hogy közben nem keletkezik hasadóképes radioaktív hulladék, vagyis környezetvédelmi, ill. társadalmi elfogadtatás szempontból kedvező technológiára épülnek. Fontos megemlíteni, hogy a „nukleáris korszak” egyik legfontosabb mérföldköve az ENSZ égisze alatt 1955-ben Genfben aláírt egyezmény „Az atomenergia békés célú

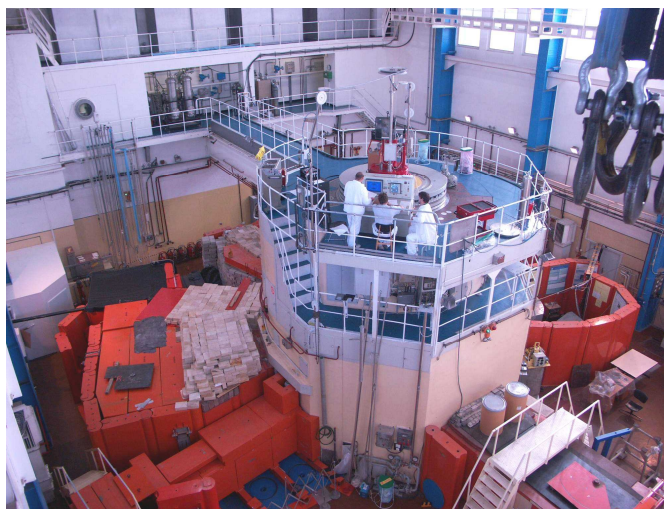
felhasználásáról". Ez az egyik legfőbb biztosítéka annak, hogy Hiroshima és Nagaszaki óta nukleáris fegyverek nem kerültek bevetésre az emberiség ellen.

Hazai neutronkutatások

A Budapesti Kutatóreaktor (BKR)

A magyarországi kísérleti neutronkutatás közel hatvan évre tekint vissza [6]. Magreakciókat először a Simonyi Károly által Sopronban felállított, majd 1955-ben a budapesti KFKI-ba telepített Van de Graaff generátorral keltettek. A tényleges neutronos kísérletek a „csillebérci atomreaktornál” indultak be. A reaktor megépítéséről 1957-ben született döntés és alig két évvel később, 1959 márciusában lett kritikus a VVR típusú, szovjet tervezésű és kivitelezésű reaktor (a Szentpétervár melletti Gatchinában ma is üzemel a VVR prototípus/„anya” reaktor, bár hamarosan a helyébe lép a világ legnagyobb kutatóreaktora, a PIK, amelynek fizikai indítása 2011-ben volt). 1986 és 1992 között – ezúttal hazai tervezés és kivitelezés alapján – lezajlott egy teljeskörű felújítás és modernizáció. 2004-ben a BKR működési engedélyét újabb 10 évre meghosszabbították. Az eszközfejlesztési program folytatódik, a kísérleti állomások köre jelenleg is bővül, megújul. A reaktorfelhasználó laboratóriumok (az Energiatudományi Kutatóközpont és a Wigner Fizikai Kutatóközpont egységei) BNC néven (Budapest Neutron Centre, www.bnc.hu) felhasználói konzorciumként egyesültek: a BNC kísérleti szolgáltatásokkal nyitva áll a hazai és nemzetközi kutatói közösségek számára; elismert tagja az európai felhasználói neutronközpontok hálózatának.

A BKR egy könnyűvízzel moderált és hűtött tank típusú reaktor, mely 10 MW teljesítményen üzemel. A zónát körülvevő moderátorból 10 vízszintes csatorna vezeti ki a neutronnyalábokat. A zónában és a moderátorban lévő függőleges csatornák szolgálnak besugárzásra, pl. radioizotópok előállításra, sugárkárosodási vizsgálatok végzésére. Összesen 15 mérőállomást üzemeltetünk, amelyek a nemzetközi kutatói közösség rendelkezésére állnak. Az 1. ábra a reaktort és a körülötte lévő kísérleti állomásokat mutatja. Az elmúlt 50 évben keletkezett kiegészítő fűtőelemeket 2009-ben Oroszországba szállítottuk, a jelenlegi friss fűtőelem készlet kb. 2016-ig elegendő, a reaktor 2023-ig tervezett üzemeléséhez hamarosan új fűtőelemek beszerzése esedékes.



1. ábra: A 10 MW-os budapesti kutatóreaktor – kísérleti csarnok

Reaktorhasználat

A Budapesti Kutatóreaktor az alap- és alkalmazott kutatások számára nagyteljesítményű neutronforrásként szolgál [7], gyakorlati felhasználásai közül pedig a számos ipari terület mellett a legfontosabb a radioizotópokon alapuló orvosi diagnosztika, továbbá a kulturális örökségvédelem. A reaktorhasználat kiemelt területei a következők:

– A BKR gyakorlatban hasznosuló legfontosabb "alkalmazása" természetesen az, hogy az MTA Energiatudományi Kutatóközpontjában (EK) az évtizedek folyamán létrejött az a szaktudás és biztonsági kultúra, amely lehetővé teszi, hogy az EK mind a Paksi Atomerőmű tudományos bázisintézményeként, mind pedig az Országos Atomenergia Hivatal műszaki szakértő intézményeként sikeresen vehessen részt a hazai atomenergetika legkülönbözőbb problémáinak megoldásában. A BKR egyben tudományos és fejlesztési eszközként is szolgál, amely az energiakutatások más területein is kiemelkedő szerepet játszik, elsősorban az energiatakarékosság és energiatermelés területén (pl. új anyagok kifejlesztése energiatermelés és -tárolás céljára, anyagkutatás és fejlesztés végzése fúziós energia vagy új generációs reaktorok támogatására, további energiatakarékos technológiák, szupravezetők fejlesztése).

– A kutatóreaktor olyan komplex sugárforrás, amelyet anyagelemzéshez, nanotechnológiai, műszaki, egészségügyi stb. vizsgálatok elvégzéséhez használnak. A legismertebb tevékenység az egészségügyben és az iparban használható radioaktív izotópok előállítása. E tevékenység, amelynek főszereplője az Izotóp Intézet Kft. (a reaktornál csak az izotópgyártásban használatos anyagok besugárzása folyik a függőleges besugárzó csatornák használatával) jelentős, bár volumene elmarad a korábbi nagy reményektől, de a radioaktív izotópgyártás még így is kiemelt társadalmi fontosságú feladat. Az Izotóp Intézet Kft. hazánkban mintegy 60 kórházat lát el az általa előállított izotópokkal – ez a népesség közel 5%-át érintő orvos-diagnosztikai beavatkozást és különböző terápiás kezelést jelent. A reaktorban lévő pneumatikus csőposta a besugárzást segítő létesítmény, amely nagyon rövid élettartamú izotópokat szolgáltat neutron aktivációs analízishez, környezetkémiai, geokémiai, biológiai és orvosi kutatásokhoz. BAGIRA a neve annak a gázhűtésű besugárzási huroknak, amely a reaktorzónában atomreaktorok zónatartály anyagainak, fúziós berendezések komponenseinek sugárállósági élettartam vizsgálatára szolgál. Ehhez csatlakozik egy anyagvizsgálati eszközökkel felszerelt forrókamra is.

– A BKR legkiterjedtebb hasznosítása a neutronnyalábkutatás. Ennek a tevékenységnek az eredményeképpen jelentős számú fontos kísérleti eredmény született (beleértve PhD-, és szerződéses alapú munkákat is). Például 2011-ben mintegy 200 kísérletet végeztek el a kutatóreaktor használó intézetek (azaz a BNC) munkatársai. Számos kísérlet külföldi kutatóintézetekből, egyetemekről, ipari-, vagy más kutatólaboratóriumokból érkezett felhasználó együttműködésével valósult meg. A BNC intézetei több EU Keretprogramban megvalósuló projektben szerepelnek partnerként. Érdemes megemlíteni, hogy komoly elismerés volt a BNC számára 2009-ben, az EU 6. Keretprogramja által támogatott NMI3 projektzáró ülésén, hogy a program egésze alatt megvalósult közel 1000 kísérletből négy európai szakértő 32 kiemelkedő jelentőséggel bíró kísérletet emelt ki, és ezek közül 11 kísérletet a Budapesti Neutronközpontban

végeztek el. Ez is jól mutatja, hogy a térség fejlődő régióiból érkező felhasználók sok izgalmas ötletet hoznak magukkal a BNC-be.

– A nukleáris kutatások területén megvalósuló egyetemi oktatás, csakúgy, mint a posztgraduális és szakmai képzés mindig hangsúlyos feladat volt a BNC-ben. Az első nemzetközi neutronszórás iskola 1999-ben került megrendezésre Budapesten, egy időben a 2. Európai Neutronszórás Konferenciával, amely alkalmat teremtett több száz neutronkutatónak, hogy ellátogasson a BKR-ba. Később aztán ebből fejlődött rendszeres regionális eseménnyé a Közép-Európai Neutronszórás Iskola (CETS). 2012 májusában már hatodik alkalommal került megrendezésre Budapesten a CETS. Ezek az iskolák a neutronkutatásba engednek mélyebb betekintést, különös hangsúlyt fektetve a kutatóreaktor berendezésit bemutató gyakorlati képzésre. Fejlődő országokból érkező kutatók számára rendszeresen kerülnek megrendezésre 4-6 hetes tanfolyamok, amelyek során szintén kiemelten jut szerephez a berendezés használat.

Regionális szerepkör és perspektívák

A Budapesti Kutatóreaktor jelenlegi formájában még 10 évig szolgálhatja a hazai és nemzetközi kutatói közösséget. Ebben az időszakban jelentős bővítés, még több mérőállomás kiépítése nem várható. Viszont fontos fejlesztési szempont a jelenlegi berendezés állomány folyamatos megújítása, a spektrométerek lehető legmagasabb szintű kiépítése és működtetése. Ismeretes, hogy a magas nemzetközi színvonalú kísérleti lehetőségekre átlag kétszer annyi igény van a tudományos/ipari felhasználás részéről, mint amekkora kapacitás rendelkezésre áll. Ezért elsőrendű cél a BKR lehetőségeinek maximális kihasználása, azaz ennek a berendezésnek a hazai és nemzetközi versenyképessége, ill. pályázati potenciáljának erősítése. Ez is elősegítheti a BKR közép-európai regionális szerepének kiteljesítését, az e térségben dolgozó mintegy 800 potenciális neutronkutató felhasználói igényeinek kielégítését, ezzel is erősítve a hazai nukleáris ágazat pozícióit. Jelenleg kétféle trend figyelhető meg a világban. Az egyre összetettebb és költségesebb kutatási, innovációs és kísérleti fejlesztési feladatok ellátásában fokozott szerep jut a csak nagy-berendezéseknél, kutatási infrastruktúráknál (KI) elvégezhető tevékenységeknek. Egy-egy KI projekt általában csak a nagy és gazdag országok (USA, Oroszország, Japán) nemzeti nagyberendezéseként valósul meg, vagy mivel meg meghaladja egy ország műszaki-gazdasági erejét, több ország összefogásával nemzetközi intézményként épül meg. Az Európai Unió ezt felismerve létrehozta a kutatási infrastruktúrák stratégiai fórumát (ESFRI), amely jelenleg mintegy 40 európai KI megvalósítását koordinálja. A nukleáris kutatások szempontjából e téren az a tendencia rajzolódik ki, hogy a jövőben a sokirányú hasznosítású reaktorokat speciális célú, azaz dedikált feladatokra tervezett

nagyberendezések váltják fel. Pl. az ESS a neutronnyaláb-kutatások újgenerációs bázisa lesz, a Jules Horowitz reaktor Franciaországban pedig a nukleáris reaktorfejlesztéseknek ad majd otthont. Ezek az új berendezések 10-15 év múlva lépnek a kutatás szolgálatába, addig a mostani központok, pl. a BKR/BNC fontos feladata az átmenet biztosítása, az ottani fejlesztések elősegítése és a felkészülés az új berendezések használatára. Magyarország versenyképessége, a magyar tudomány és innováció további fejlődése szempontjából kulcsfontosságú néhány jól kiválasztott európai kutatási infrastruktúrafejlesztési projekthez való csatlakozás, ilyenek elsősorban a nukleáris nagyberendezések, mivel a BKR révén az ezekhez való csatlakozás biztosítható a leghatékonyabb és legkifizetődőbb módon, pl. a részvétel költségeinek természetbeni beszállításával történő teljesítésével. A másik trend az, hogy a fejlődő világ országai (pl. Argentína, Brazília, India, Kína, Jordánia, Vietnám) a nukleáris energetika és kutatások robbanásszerű fejlesztése tapasztalható. Kutatóreaktorok új generációjának építése indult be, és az ezzel kapcsolatos kutatások fellendítése, ill. a neutronnyaláb kísérletek társadalmi hasznosságára való összpontosítás a következő egy-két évtized fontos feladata. A feltörekvő országok a következő 50-100 évben a társadalom energiaellátását nem tudják elképzelni nukleáris energia nélkül, ennek pedig egyértelmű velejárója a kutatások, a nukleáris kultúra és biztonság fejlesztése. A hazai nukleáris tradícióknak és potenciálnak köszönhetően az ipari szereplők kedvező helyzetben vannak az új kutatóreaktor építések üzleti hasznosításában az ottani fejlesztések, műszerberuházások beszállítóiként.

Végezetül fontos kitérni arra, hogy Magyarország rendületlenül elkötelezett a nukleáris energia fejlesztése és a kapacitások bővítése mellett. Az ország energiaforrás lehetőségei tekintetében az elkövetkező, mondjuk, újabb **80 évre** nem kínálkozik az atomenergia kiváltására alkalmas és megfizethető alternatíva. A Paksi Atomerőmű bővítésére hozott kormányrendelet (1194/2012, VI.18) tehát célszerűen a hazai nukleáris kutatások és technológia felfejlesztését is előírnyozza. Az elmúlt négy évtized tapasztalata egyértelműen mutatja, hogy a nukleáris energiatermelés felépítése, a reaktorok megbízható, gazdaságos és biztonságos üzemeltetése nem elképzelhető alkalmas kutatási, oktatási háttér, azaz egy korszerű és hatékony kutatóreaktor működtetése nélkül. Ezért a következő évek fontos feladata nemcsak a paksi bővítésre való felkészülés, hanem a BKR 2023 utáni kiváltásának megtervezése és előkészítése, ami lehet akár a BKR-nek egy újabb átfogó rekonstrukciója és modernizálása a jelenlegi telephely megtartásával, akár egy új nemzeti vagy regionális szerepkörű, zöldmezős kutatóreaktor/neutronforrás megépítése.

Irodalomjegyzék

- [1] Chadwick J, *The existence of a neutron*, Proc.Roy.Soc. 136, 692 (1932) and Chadwick J, *Possible existence of a neutron*, Nature 129, 312 (1932)
- [2] F. Mezei, *Neutron Spin Echo: A new concept in polarized thermal neutron scattering*, Z. Phys. 255 (1972) 146-160.
- [3] Rosta L, Cser L, *A kutatóreaktor tudományos program tervezete a rekonstrukció után*, Fizikai Szemle 44, 170 (1991)
- [4] *Neutronfizika*, Szerkesztő: Kiss D, Quittner P, Akadémiai Kiadó Budapest, 1971
- [5] Mezei F, *Long Pulse Concept of Spallation Sources*, Acta Physica Hungarica, Wigner Memorial Volume 1, 209 (1995)
- [6] Csikai Gy, *A neutronfizika másodvirágzása*, Fizikai Szemle 2005/11. 369.o.
- [7] Rosta L, Baranyai R, *Budapest Research Reactor – 20 years of international user operation*, Neutron News, 22, 31 (2011)