

FEJLŐDŐ PERSPEKTÍVÁK A NEUTRONNYALÁBOK SZÉLESKÖRŰ HASZNÁLATÁBAN

Mezei Ferenc
Mirrotron Kft. és Wigner FK.

Az elmúlt hét évtizedben a neutronnyalábok szórásának vizsgálata szerves része lett az anyagkutatás igen számos területének. A példák a mágnességtantól kezdve az élő szervezetek molekuláris szerkezetének és folyamatainak vizsgálatán keresztül az archeológiáig sok-sok tudományterületet fednek át. Az ehhez szükséges neutronnyalábok előállítása különböző elvi alapokon működő neutronforrások feladata, amelyek közös eleme, hogy a neutronokat az atommagok belsőjében elfoglalt kötött állapotból valamilyen magreakcióval kell kiszakítani. Ha ez a folyamat exoterm (maghasadás, fúzió) jelentős mennyiségű hő szabadul fel, amit el kell vezetni. Ha a folyamat endoterm (például energetikus protonokkal, gamma-sugárzással való besugárzás), akkor a beérkező sugárzás leadott energiáját kell elvezetni. Végülis technikai szempontból a neutronkibocsátás helyén megjelenő hőtermelés jellemzi a folyamat gyakorlati megvalósításának legfőbb körülményeit. Így például atomreaktor-neutronforrásokat a neutrontermelő maghasadás hőteljesítményével jellemzik, ami a KFKI telephelyen működő középfluxusú neutronforrásnak megfelelő kutató atomreaktor (BKR) esetében 10 MW. A gyorsított részecskenyalábokon alapuló neutronforrások esetében a gyorsított részecskenyaláb kinetikus energiája a hasonló jellemző, például a svédországi Lundban épülő Európai Spallációs Neutronforrás (ESS) protongyorsítójának tervezett nyalábteljesítménye 5 MW. Továbbá léteznek olyan neutronforrások, amelyekben radioaktivitás révén keletkeznek neutronok, és amelyeket így nem jellemez a hőteljesítmény, de ezek neutronintenzitása a következőkben ismertetendő alkalmazásokhoz túl alacsony.

A neutronforrásokban a neutron kibocsátó magreakció révén mindig jórészt nagyenergiájú neutronok születnek, szabadulnak ki a magokból. A születő neutronok spektrumának túlnyomó része 1 MeV-et meghaladó kinetikus energiájú gyors neutron. A forrásokat elég jól jellemzi a felszabadított és a neutron-

forrás aktív zónájából kibocsátott gyors neutronok másodpercenkénti száma. Ez az ESS esetében körülbelül $10^{18}/s$ lesz, míg a hazai BKR-nél körülbelül $3 \cdot 10^{17}/s$. E két utóbbi és a korábban említett teljesítményadatok jól illusztrálják, hogy a spallációs eljárás az atomreaktorokénál körülbelül egy nagyságrenddel kevesebb hőteljesítményt igényel ugyanannyi nasszens neutron előállításához, és így a legnagyobb neutronintenzitások előállítására a spalláció a legelőnyösebb magreakció. Mivel spalláció létrehozásához 200 MeV energiát jóval meghaladó protonokkal való besugárzás szükséges, a spallációs források létesítési költségei magasak, például az ESS esetében 1000 milliárd Ft. A BKR létrehozása – mai árakon – elérné a 300 milliárd Ft-ot.

Az elmúlt 10–20 évben olyan protongyorsítóra épülő neutronforrások jelentek meg (egy az USA-ban és több mint 10 Japánban), amelyben protongyorsítókat használnak – mint a spalláció esetén –, de a protonokat tipikusan csak 5–10 MeV-re gyorsítják, ami sokkal kisebb, mint például az ESS tervezett 2 GeV-es protonenergiája. Az ilyen kis energiájú gyorsítók elférnek egy osztályteremben, építési és üzemelési költségeik pedig mintegy 1%-át teszik ki a mai spallációs forrásokban használt 0,5–3 GeV energiájú gyorsítók költségeinek. Ezekben a protonok könnyű elem (lítium vagy berillium) atommagjaival ütközve vernek ki neutronokat, és másodpercenként körülbelül 10^{12} – 10^{13} gyors neutron tudnak előállítani. Az ilyen típusú berendezések „kompakt neutronforrás” vagy (az angol kifejezés „compact accelerator based neutron source” rövidítésével) CANS néven lettek ismertek.

A teljesség kedvéért érdemes megemlíteni, hogy a még sokkal olcsóbb, még kisebb energiájú gyorsítókra alapuló, akár hordozható, úgynevezett Elektronikus Neutron Generátorok (ENG) tipikusan 10^8 gyors neutron tudnak előállítani másodpercenként. Ilyeneket nagy számban használnak ipari és biztonsági feladatok megoldására (például robbanószerek, nukleáris anyagok illegális szállításának felderítésére). Ezek neutronfluxusa azonban nagyon távol van azon értéktől, amire az atomi méretű jelenségek vizsgálatához lenne szükség a kondenzált anyagokban.

A kompakt neutronforrások megjelenése időben egybeesett egy gazdasági probléma megjelenésével, a neutronnyalábokat előállító források első generációjának kiöregedésével és a mostanra igen drágává vált felújítás helyetti leállításával. E generáció legtöbb képviselője maghasadáson alapuló kutatóreaktor, amelyek több mint 50–60 évvel ezelőtt épültek (mint például a 60 éve üzemelő BKR). Az elmúlt 10–15 évben 8 ilyen jelentős kutatóreaktort állítottak le Európában. Ezzel a hazai BKR – az ESS jelentős részének

Készült a 30. Magyar Fizikus Vándorgyűlésen (Sopron, 2019. augusztus 21–24.) elhangzott előadás alapján.



Mezei Ferenc sikeres gimnáziumi sportja a KöMaL-feladatok megoldása volt. Az ELTE-n fizikusként végzett 1965-ben, majd a KFKI-ban dolgozott. 1972-ben a itt fedezte fel Neutron Spin Echo és 1976-ban a neutron szupertükrök elvét, amelyekért 1986-ban Europhysics Díjat kapott. Később a Laue-Langevin, a Hahn–Meitner és Los Alamos intézetekben dolgozott vezető kutatóként. Az épülő ESS európai neutronkutató központ tanácsadója és a neutronműszer-specialista Mirrotron Kft. vezetője.



A kompakt protongyorsító, öltönyben a szerző, Mezei Ferenc.

jó néhány év múlva esedékes üzembe helyezéséig – az ötödik legjelentősebb neutronforrássá lépett elő kontinensünkön. Emellett legalább 4 európai országban merült fel az az elképzelés, hogy kompakt neutronforrásokkal váltsák ki a leállított reaktorokat. Ez azt jelenti, hogy körülbelül 1000–10 000-szer kevesebb neutron előállító források állnak be a régi reaktorok helyett, igaz hogy az újjáépítési és üzemeltetési költségek kevesebb, mint 10%-át kitevő költségek mellett. Miért lenne ennek értelme?

A neutronforrásokban keletkezett gyors neutronokat – ha a neutronszorási kísérletekben akarjuk felhasználni – először több mint 1 milliószor kisebb energiákra kell lelassítani, hiszen hullámhosszuk ekkor lesz összemérhető a vizsgálandó anyagok atomjai közötti távolsággal. Ez szilárd testekben és folyadékokban tipikusan 0,2–0,5 nm. Ilyen hullámhosszú neutronok kinetikus energiája 50–300 K hőmérsékletű részecskék Boltzmann-energiájának felel meg, ezért hideg vagy termikus neutronoknak nevezik őket. A lelassítás (termalizálás) után pedig az ilyen lassú neutronokból álló nyalábokat a neutronokat mérő berendezésekhez (összefoglalva spektrométerekhez) kell eljuttatni, ahol a mintákon való szóródásukból (azaz sebességük irányának és nagyságának változásából) lehet következtetni arra, hogy a vizsgált anyagban miként vannak elrendezve és hogyan mozognak az atomok. Ehhez természetesen ismerni kell a neutronok kiindulási sebességét és irányát, amit monokromatizálás és

kollimációs eljárások révén érnek el. E három folyamat eredményeként a forrásban előállított száz millió – eredetileg folytonos energiaeloszlású, gyors – neutron közül kevesebb, mint egy jut el a minták helyére az egy forrás körül tipikusan üzemeltetett 20–40 spektrométer valamelyikén.

Az utóbbi évtizedekben kidolgozott, jobb hatásfokú kísérleti eljárások eredményeként ma a gyors neutronok közül, a kísérletek típusától függően 1000–100 000-szer többet lehet lelassítani és a mintákhoz elvezetni, mint amennyi akár csak 20 évvel ezelőtt eljutott a kutatóreaktorok köré épített spektrométerekbe. Ezen fejlesztések közül a két legfontosabb – folytonos üzemű reaktorok helyett – a tipikusan 0,5–2 ms időtartamú, a szakmában „hosszúnak” nevezett impulzusokban

előállítani a gyors neutronokat, másrészt az úgynevezett szupertükrök használata a lassú neutronnyaláb vezetéséhez – a forrástól a felhasználási pontig. Mindkét eljárás Budapesten született.

A lassú neutronok sebessége az 1000 m/s értékkel mérhető össze, ezért az impulzusüzemű forrástól 15–100 m távolságban elhelyezett spektrométerekhez – a sebességtől függő, könnyen regisztrálható – különböző időkésséssel jutnak el, azaz így a spektrométerig eltelt repülési idő alapján minden pillanatban tudjuk, hogy mekkora a bejövő neutronok sebessége. A folyamatosan működő forrás esetén a neutronsebességet csak úgy lehet beállítani, hogy a kiválasztott, nagyon szűk sebességtartományba eső neutronok kivé-

Az protongyorsítóhoz kapcsolt berilliumtartalmú neutronforrás, -moderátor és árnyékolás.

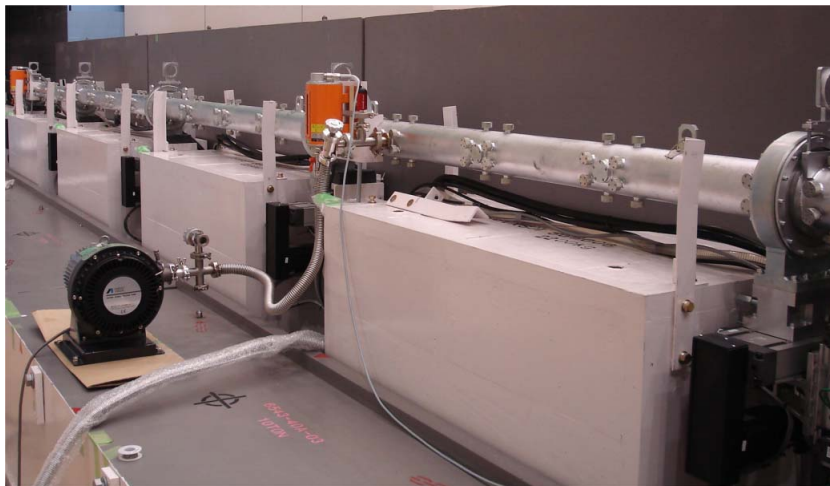


telével az összes többi kiszűrjük a nyalábból és megsemmisítjük. Így hosszú impulzusú üzemben körülbelül annyiszor több, ismert sebességű neutron érkezik a mintákra, mint a forrás impulzusai között eltelt periódusidő és az impulzushosszak aránya, feltéve hogy az impulzusok hossza elég nagy ahhoz, hogy a neutronsebesség ilyen módon való meghatározása – a szükségeshez képest – ne legyen túlságosan pontos. E módszerrel mintegy 20-szorosára lehet növelni a lassú neutronok kihasználása határfokát.

A lassúneutron-nyalábok spektrométerekhez való eljuttatása is olyan terület, ahol sokat fejlődött a technika. Hosszabb távolságokra – szabad repülés helyett – már évtizedek óta neutronvezető csövekben – amelyek tükörfelületű falai a kis szögben rájuk eső neutronokat visszaverik és így a transzportált nyalábban tartják – repülnek a neutronok. Az 1976-ban felfedezett szupertükrök nagyobb szögtartományban tudják visszaverni a neutronokat és ezért több neutront tudnak a neutronvezető csőben tartani, különösen, ha a vezetőcsövek alakja optikai megfontolások alapján optimalizált. A szupertükörrel bevont neutronvezetők körülbelül 20 év óta szisztematikusan veszik át a terepet. Velük újabb 10–20-szorosára javíthatjuk a neutrontranszport határfokát.

Az ESS-ben nemrég, sok más próbálkozás után, a gyors neutronokat lelassító moderátorok teljesítményét is sikerült növelni oly módon, hogy a moderátorok a termalizált neutronokat a kívánt irányokban – valamilyen prioritással – bocsássák ki. A gyakorlatban ez egy vízszintes, a műszercsarnok padlójával – amelyen elhelyezkednek a spektrométerek – párhuzamos síkot jelent. A neutronok a folyékony hidrogént vagy vizet tartalmazó palackokban található hidrogénatomokkal való ütközések és energia-csere útján lassulnak le. Ha csak egy ütközést veszünk figyelembe, akkor a lelassult neutron minden irányban nagyjából azonos valószínűséggel szóródik. Azonban a neutronok – mielőtt kijutnak a moderátor térfogatából – többször is ütköz(het)nek, és azt találtuk, hogy a moderátorpalack alakja valamelyest irányítja a kirepülő neutronok pályáját. Alacsony dimenziós alakokkal (sematikusan rúd vagy korong) lelassított hideg neutronok kibocsátásának intenzitása növekszik a moderátoredény hosszabb dimenziói irányában. Ezáltal 2–3-szor nagyobb nyalábfényességet lehet elérni – például a vízszintes síkban haladó nyaláboknál –, mint a korábban használt moderátorgeometriák mellett.

Az eddig felsorolt 3 módszerrel az eredetileg létrejött gyors neutronok közül 400–1200-szor több termalizált neutront lehet felhasználni. A spektrométerek fejlesztésének további újításaival, többek között a nagyobb szögtartományt lefedő detektorok alkalmazásával – esetektől függően – újabb 3–100-szoros fak-



Egy, a Mirrotron Kft. által gyártott neutronvezető cső.

torral lehet növelni a spektrométerekben megfigyelt lassú neutronok számát. A teljes kihasználási határfok-növekedés, a kísérletek típusától és részleteitől függően, körülbelül 1000-szeres és 100 000-szeres között van. E módszereket, természetesen, rendszeresen alkalmazzák az újonnan épülő vagy felújított legnagyobb teljesítményű neutronforrásokban is. Ez a haladás minőségi oldala a nagyobb kísérleti érzékenységek felé, amelyekkel eddig nem megfigyelhető új jelenségek kerülhetnek napvilágra.

A megtermelt gyors neutronok nagyobb határfokkal való felhasználása más irányban is komolyan gyümölcsöztethető, ugyancsak új perspektívákat nyit: a neutronkutató centrumok sokkal kevesebb gyors neutron előállítására árán tudják azt az érzékenységet és mérési kapacitást elérni, mint 20 évvel ezelőtt. Emiatt a neutronnyalábok használata sokkal hozzáférhetőbbé válik mind a helyigényt, mind a biztonsági kívánalmakat, mind a költségeket illetően. Ez különösen az ipari alkalmazások szempontjából fontos, ahol az alacsonyabb költségek és könnyebb hozzáférhetőség döntő szerepet játszhatnak.

Egy konkrét példa a szerkezeti anyagok belsejében kialakult feszültségek vizsgálata. A neutronsugarak még vasban is akár 20 cm mélyen behatolnak és lehetővé teszik, hogy egy alkatrész egész térfogatában körülbelül 0,5 mm térbeli felbontással, mintegy 0,01% pontossággal meghatározzuk a kristályrács rácsállandóit. A feszültséget a rácsállandó eltérése – a nominális, egyensúlyi értékétől, ami akár 0,1% is lehet – mutatja. A módszert sok neutronforrás mellett használták és használják különféle ipari problémák megoldására. Többek között ide tartozik hegesztések körül keletkező feszültségek detektálása, feszültségcsökkentő hőkezelési eljárások vizsgálata, vasúti sínek elhasználódásának kutatása, motortengelyek terveinek ellenőrzése, használat során felhalmozódó húzófeszültségek és az ezektől származó törésveszély vizsgálata, különös tekintettel a járművekre. Egy nem is oly régi példa a német ICE gyorsvasút kerekének eltörése miatti, sok áldozatot



A Mirrotron Kft. martonvásári telephelyének alapkövetétele, 2018. június 8.

A fent leírtak a teljesítmény/költség arány viszonylatában egyértelműen generációváltást jelentenek ott, ahol jól definiált sebességű és kollimált neutronnyalábokat használunk, azaz például a neutronos anyagvizsgálatban.

A besugárzás jellegű anyagtranszformálás a neutronforrások egy másik felhasználása. Ilyen például neutronaktivációs analízis, vagy a klíma- és környezetvédelem szempontjából messze legkedvezőbb és nélkülözhetetlen atomerőművi energiatermelés fel nem használható hulladékának transzmutációs feldolgozása. Ezekben az alkalmazásokban elektromos energia segítségével sok

követő baleset okainak vizsgálata (Eschede, 1998). Csak a baleset után került sor az eltörött keréktípus már használt darabjaiban kialakult feszültségek vizsgálatára. A neutronos mérések az elfogadott elméletekkel össze nem egyeztethető húzófeszültségeket tártak fel a kerék azon helyén, ahol nagy sebességnél bekövetkezett a balesetet okozó törés.

A fent leírt neutronfelhasználási határfok-növekedés révén ilyen típusú vizsgálatok olyan kis méretű, kompakt neutronforrások mellett is lehetségessé válnak, amelyek építése a korábbiak töredékébe, körülbelül 2 milliárd Ft-ba kerülnek, üzemeltetésük költségei évi 100 millió Ft alatt maradnak, és akár egy vállalatnál, egyetemen vagy ipari parkban is elhelyezhetők.

Európában az első ilyen ipari és alkalmazott kutatási célokra szánt kompakt neutronforrás a Mirrotron Kft. új, erre a célra felépített martonvásári telephelyén – a strukturális alapok regionális iparfejlesztési támogatásával – jelenleg készül és 2021-ben kezdi el működését. A fent említett kihasználási határfokot növelő modern módszerek kompakt neutronforrásoknál még körülbelül egy 4-szeres szorzóval kedvezőbb eredményt adnak, mert a kis hőfelszabadulás miatt a moderátorok közelebb kerülhetnek az aktív zónához (ami itt gyorsított nyalábot felfogó target), mint például egy reaktorban. E prototípus megvalósítása lehetővé fogja tenni hozzá hasonló, körülbelül $3 \cdot 10^{12}$ neutron/s intenzitású neutronforrás sorozatgyártását és értékesítését is. Ezen túlmenően segíteni tudja nagyobb, a körülbelül 5 kW teljesítményű helyett 50–100 kW-os kompakt források kifejlesztését. Ezek a neutronszerű alkalmazások területén már meg tudják haladni a középfluxusú reaktorok teljesítményét, és az elkövetkező évtizedekben fel tudják váltani az öregedő kutatóreaktorokat. Minden, eredetileg kutatóintézetben kifejlesztett és használt eszköz előbb-utóbb hatékonyabban, kevesebb költséggel és rövidebb idő alatt állítható elő ipari körülmények között, ha létezik felvevő piac. A kompakt neutronforrások előállítása nagyon közel áll ahhoz, hogy ebbe fázisba érkezzen.

gyors neutront kell előállítani, azaz a teljesítményt az adott áramfogyasztásból nyert neutronok mennyisége jellemzi. Itt, mint korábban láttuk, a spalláció a legjobb ismert eljárás, ahol körülbelül 30–40 MeV gyorsított protonnyaláb-energia kell egy gyors neutron előállításához. Ha figyelembe vesszük, hogy még a leghatékonyabb gyorsítók is a hálózathoz vett elektromos energia csupán 40–45%-át alakítják protonenergiává, akkor $80\text{--}90 \text{ MeV} = (1,3\text{--}1,45) \cdot 10^{-11}$ joule elektromos energiába kerül egy gyors neutron előállítása. Az utóbbi években rohamosan fejlődtek és egyre gazdaságosabbá váltak a rövid, nagyintenzitású lézerpulzusok keltette neutronokon alapuló források. E területen a jövő fogja megmutatni, hogy hosszú távon melyik a leg gazdaságosabb eljárás. A spallációs neutronforrás használatáról már tudjuk, hogy lehetővé teszi az atomhulladék fennmaradó, hosszú ideig radioaktív komponenseinek transzmutálását kedvezően tárolható izotóppokká, vagy akár a bőven található tórium transzmutálását hasadóképes fűtőanyagká. Mindezt olyan energiabefektetéssel, amely csak csekély részét teszi ki a kapcsolódó nukleáris elektromosenergia-termelésnek.

A bőséges atomenergia kérdése annál is inkább aktuális, mert óriási, sokak szerint elengedhetetlen mértékben járulna hozzá a klímaprobléma mielőbbi megoldásához. Évtizedek óta ismert és kidolgozott technika a szintetikus benzin, kerozin stb. gyártása vízből és a levegőből kinyert szén-dioxidból – atomreaktor segítségével. Ezzel klímaneutralisan működhetnének a konvencionális autók és repülőgépek. Az így előállított benzin önköltsége ma 1 euro/liter. Természetesen ehhez még hozzájönnek szállítási és forgalomba hozási költségek, de ezek nagyfogyasztók – mint repülőterek – esetében nem lennének jelentősek. A környezeti következmények tényleges költségeit is beszámítva a kőolajalapú üzemanyag sem olcsóbb, viszont nagyon káros és fenntarthatatlan. A világgazdaságot vezető országok politikája óriási baklövést követett el, amikor a fosszilis energiaforrások rövidlátó rablógazdaságát pár évtizeddel ezelőtt nem váltotta fel a nukleáris energiatermelés széles körű kiépítésével.