

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

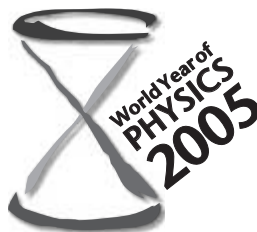
A Fizikai Szemle az Akadémia által 1862-ben elindított Matematikai és Természettudományi Értesítő és az 1891-ben Eötvös Loránd által alapított Matematikai és Physikai Lapok utóda és folytatása

LV. évfolyam

11. szám

2005. november

NEM ÉLHETÜNK



FIZIKA NÉLKÜL



## A NEUTRONFIZIKA MÁSODVIRÁGZÁSA

Csikai Gyula  
Debreceni Egyetem és  
MTA Atommagkutató Intézet

Az atomenergia gyakorlati méretű felszabadításának lehetősége mind szabályozott, mind robbanásszerű formában bő 60 évvel ezelőtt bizonyítást nyert. A neutronok által vezérelt láncreakcióban keletkező energia optimális kihozatalára és hasznosítására, valamint a nukleáris erőművek biztonságos üzemeltetésére világszerte széles körű alap- és alkalmazott kutatási programok, valamint technológiai fejlesztések indultak. A fizika fejlődése szempontjából a neutron felfedezése (1932) volt a döntő, de a fizikai kutatások támogatását a neutron-kölcsönhatások egyik melléktermékének, az atommaghasadás alkalmazásának köszönhetjük. Hazánkban az első kísérleti atomreaktort 1959. március 29-én az MTA KFKI-ban helyezték üzembe 2 MW teljesítménnyel, de az ilyen irányú alapkutatást és képzést Budapesten és Debrecenben az 50-es évek elejétől számíthatjuk. A többéves oktatási tapasztalaton alapuló egyetemi jegyzetek már 1956-tól megjelentek [1–3], míg radioaktív ( $\alpha, n$ ) neutronforrások (főleg a  $^{210}\text{PoBe}$ ) felhasználásával új és a korábnál pontosabb neutrondiffúziós paraméterek meghatározása történt [4–8]. Ezekben a kutatásokban a KFKI munkatársai közül *Ádám András*, *Bata Lajos*, *Kiss István*, *Kosály György* és *Pál Lénárd*, míg az ATOMKI Neutronfizikai Osztálya részéről, amely 1956-ban alakult, *Csikai Gyula*, *Daróczy Sándor* és *Dede Kálmán Miklós* vett részt. A KFKI kutatói másokkal szinte egy időben ismerték fel, hogy energiatermelő reaktorokban a nagyobb termikus hatásfok eléréséhez célszerű lenne a víznél jóval magasabb forráspontú (250–350 °C) szerves moderátorokat és

hűtőközegeket, például polifenil-folyadékokat használni. Pál Lénárd és munkatársai Dowtherm-A esetén a termikus neutronok diffúziós hosszát és hőmérsékleti koefficiensét széles tartományra határozták meg, amely adatok e közegek neutrondiffúziós paramétereinek alkalmazásakor ma is referenciának minősülnek [9]. Kiindulva a Pál és munkatársai által alkalmazott módszer geometriai korlátaiból, Debrecenben sikerült olyan eljárást kidolgozni [8], amely a diffúziós hossz méréséhez használt 500–600 liter mintát néhány literre csökkentette, és így a pontosság mind a statisztika, mind a konstans hőmérséklet miatt kedvezőbb volt. Pál Lénárd ekkor javasolta, hogy a két csoport működjön együtt a neutrongáz-fizikai kutatásokban, mondván, meglehet, hogy ez a téma nem vezet eredményre, mivel a szerves közegek sugárhatás-kémiai folyamatait nem ismerjük eléggé, de a neutrontereket jellemző fizikai paramétereket a különböző alkalmazások miatt komplex rendszerekre is meg kell határozni, és erre a Debrecenben kidolgozott módszer kedvezőnek látszik. Észrevétele és javaslata annyira beigazolódott, hogy ezek a kutatások a „másodvirágzás” idejére is áthúzódtak. Kezdeményezte továbbá a kísérleti atomreaktornál is közös vagy független kutatások végzését. Ennek első eredménye a nagy aktivitású fotoneutron-források készítése és magfizikai alkalmazása volt, amelyet 1961-től a KFKI több munkatársával közösen végeztünk [10, 11]. A fotoneutron-forrásokkal 1 MeV alatti tartományban mért neutronadatokat, főleg az izomer hatáskeresztmetszet-viszony energiafüggését máig is sokan idézik. Érdeemes megjegyezni, hogy ugyan a reaktornál az *organikus kísérleti burrok* csak 1963-ban került megépítésre, de ez így

*Pál Lénárd*nak ajánlva, 80-ik születésnapjára.

is a második volt a világon. A reaktor létesítését megelőzően a kísérleti kutatások mellett kiemelkedő elméleti eredmények is születtek. Ezek egyike a hasadási neutronszám ingadozását leíró elmélet, a *Pál-Bell-egyenlet*, amelyet már 1958-ban publikáltak, de igazolása csak a 60-as évek közepén sikerült, a KFKI *ZR-3 kritikus rendszer* üzembe helyezése után [12]. Az eredmény fontosságát bizonyítja, hogy ez a „másodvirágzás” feladatai között is kiemelten szerepel.

*Szalay Sándor* kezdeményezésére Debrecenben az 50-es évek elején elkezdődött a Van de Graaff gyorsító és a neutrongenerátor építése. Az alacsonyfeszültségű (300 kV) neutrongenerátort 1958-ban az ATOMKI-ban helyeztük üzembe [13], amellyel a neutronfizikai kutatások technikai háttere jelentősen bővült. A  $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$  és a  $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$  reakciókban (D+D, D+T) keletkező 3, illetve 14 MeV energiájú neutronokkal nagyszámú hatáskeresztmetszet meghatározása történt különböző atommagfolyamatokra, ami jól csatlakozott a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) nukleáris kutatási és képzési programjához. A tanszéki Van de Graaff gyorsító fejlesztéséhez kapcsolódóan 1956-tól több eredmény került publikálásra, majd 1963-ban [14] az első magfizikai dolgozat, amely az integrális neutronhozam energiafüggésének meghatározására vonatkozott a  $^9\text{Be}(d,n)$  reakcióban. Ez a reakció a „másodvirágzás” egyik fontos szereplője. Ezekkel a kutatásokkal párhuzamosan a KFKI munkatársai 1957-től a neutrongenerátorok egész sorát fejlesztették ki [15], így például az NG-200 (1957), NA-1 (1964), NA-2 (1967) típusokat, és elkészült egy impulzusüzemű D+T-forrás is [16]. Itt kell megemlíteni, hogy a KFKI-ban 1960 októberében üzembe helyezték az első hazai tervezésű és építésű atomreaktort, a *ZR-1 kritikus rendszert*, amelyet a különböző célú ZR-modellek sok éven át sikeresen követtek. Ezek a nemzetközi együttműködésben folyó kutatások a Paksi Atomerőmű tudományos és technikai hátterét is biztosították, amelynek első blokkja 1983-ban kezdte meg az energiatermelést.

Debrecenben a neutronfizikai kutatások 1967-től a DE TTK Kísérleti Fizikai Tanszékén folynak, jelentős NAÜ-támogatással (technikai segélyek, kutatási szerződések, külföldi szakértői megbízatások, külföldi szakemberek csoportos és egyéni képzése, tanfolyamok vagy ösztöndíjak keretében, meghívás NAÜ-programok kidolgozására, felkérés szakmai jelentések készítésére és értékelésére, speciális eszközök tervezése és kivitelezése a fejlődő országok számára stb.). A NAÜ szakértői megbízatásai fontos részét képezte a KFKI által kifejlesztett kisméretű, mobil NA-1, NA-2 neutrongenerátorokra alapozott nukleáris kutatási és képzési programok meghonosítása a fejlődő országokban. Közben a kutatási lehetőségek Debrecenben is jelentősen bővültek, így például a tanszéki két saját fejlesztésű (az egyik nagyáramú) 180 kV-os és egy, a NAÜ által adott impulzusüzemű generátorral, egy  $2 \times 10^9$  n/s hozamú  $^{252}\text{Cf}$ -forrással.

A fentiekben vázolt kutatási és fejlesztési időszakot tekintem a hazai neutronfizika első virágzásának, amelyben a kísérleti reaktor a csatlakozó mérőberendezésekkel a reaktorfizikai kutatásokon túl, a magfizika, a szilárdtestfizika, a nukleáris analitika, az izotóptechnika, a radio-

gráfia terén meghatározó szerepet játszott. Ezeket az eredményeket foglalja össze az Akadémiai Kiadó gondozásában 1971-ben megjelent, 25 szerző által írt *Neutronfizika* című könyv, amelynek előszavában Pál Lénárd egyebek mellett a következőket írja: „... a neutronfizikai vizsgálati módszereknek a molekuláris biológiában éppen úgy szerepük lehet, mint a magfizikában és a szilárdtestfizikában, ... de a csillagászatban is, ... láthatjuk, hogy intenzíven fejlődő tudományágról van szó...”

A 60-as évek végén megjelenő olajválság felgyorsította az atomerőművek fejlesztését, beleértve a fúziós kutatásokat is, amelyeket különösen a NAÜ támogatott. Ezekben a programokban a budapesti és a debreceni kutatók éveken át érdemlegesen vettek részt kutatási szerződésekkel és megbízásokkal. A 80-as évek közepe a neutronfizika „másodvirágzását” eredményezte, egyrészt a Paksi Atomerőmű üzembe helyezésével, másrészt Debrecenben az MGC-20 ciklotron telepítésével. Ez utóbbi a  $^2\text{H}(d,n)$  és a  $^9\text{Be}(d,n)$  reakciókra alapozott, változtatható energiájú neutronforrások üzemeltetésével jelentősen új alap- és alkalmazott kutatási témák művelését eredményezte. A ciklotron Debrecenbe történő telepítését az előkészítés és a döntés szintjén Pál Lénárd segítette elő, egyensúlyt teremtve ezzel a KFKI és az ATOMKI között a nagyberendezések elhelyezését illetően, ami egyben jelentősen hozzájárult a vidék kutatási infrastruktúrájának fejlesztéséhez is.

Az éppen 20 éve kifogástalanul üzemelő ciklotron a neutronfizika hazai és nemzetközi együttműködésekben történő művelésében döntő fordulatot jelentett. Sikeres, hosszú távú kapcsolatok jöttek létre a világ sok intézetével (főleg Európában, az USA-ban, Japánban) és nemzetközi szervezetekkel (úgy mint IAEA, CERN, JINR, INDC, EC-JRC IRRM, JSPS). A neutronforrásokat új detektálási és spektroszkópiai technikával kiegészítve érdemlegesen vehettünk és vehetünk részt az alábbi elvi és gyakorlati jelentőségű témák művelésében is:

1) A tiltott (pl. kábítószerek) és veszélyes anyagok (tapszóaknák, robbanószerkezetek, nukleáris anyagok) észlelése [17]. Ismételten felmerült a neutrondiffúziós és -reflexiós paraméterek ismeretének igénye a szállító konténerre és a komplex talajkörnyezetre [18, 19], továbbá a prompt hasadási neutronok multiplicitáseloszlási függvényének pontosítása a fontosabb aktinidákra az energia függvényében [20].

2) Kiterjedt, komplex közegek neutronaktivációs és prompt sugárzásos analízise, főleg a fosszilis energiahordozók esetén a H-, C-, N-, O-, S-, Cl-, Fe-, Ca-, Si-, valamint környezeti mintákban az As-, Cd-, Hg-, Pb-koncentráció meghatározása [21]. Az aktivációs analízist az utóbbi években kidolgozott neutronspektroszkópiai módszerek jól egészítik ki [22].

3) A kifolyási és a lokális neutronspektrumok mérésére kidolgozott módszerek (protonmeglökés [23], aktivációs küszöbdetektor [24]) a hasadási és fúziós reaktorok továbbfejlesztéséhez, illetve tervezéséhez szükséges differenciális és integrális neutronadatok meghatározásán túl, több tudományterületet és társadalmi jelentőségű fejlesztéseket egyaránt szolgálnak. Így például a hidrogénkoncentrációt és mélységi eloszlását egyaránt igényli

a nanotechnika, a fűtőanyagcella és más, hidrogénre alapozott energiaforrás fejlesztése.

4) A spallációs neutronforrások és a szubkritikus reaktorok kombinációja reményt ad a radioaktív izotópok olyan átalakítására, amely az energiatermelés mellett a hulladékok tárolási gondjait is jelentősen enyhítheti [25]. Ezen bonyolult rendszerekben kialakuló neutronspektrumok, valamint differenciális és integrális reakciósebességek modellezésére jó lehetőséget kínál a  ${}^9\text{Be}(d,n)$  reakcióban keletkező neutronok különböző kölcsönhatásainak vizsgálata. Az ATOMKI ciklotronjának felhasználásával első lépésként a Pb–Bi eutektikus elegyre alapozott spallációs céltárgy tervezéséhez kiterjedt (140 kg) Bi-minitára a kifolyási neutronspektrum meghatározása történt [26], ami lehetővé tette az ENDF/B-VI és más adatbázisra alapozott MCNP-4C számítások alkalmazhatóságának ellenőrzését.

5) A most jelentkező globális energiaválság előtérbe helyezi az alternatív energiaforrások kutatását, és ebben a termonukleáris reaktorok szerepét nem lehet mellőzni. Ennek köszönhető az ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) programról 2005 júniusában történt pozitív döntés.

A fenti vizsgálatokat hazai és nemzetközi szinten jól egészítik ki a Budapesti Kutató Reaktorra, valamint a BME Tanreaktorára alapozott sokrétű neutronfizikai kutatások.

## Irodalom

1. SIMONYI K.: *A reaktorfizika és reaktortechnika alapjai* – Bp. 1956.
2. LÉVAY A.: *Atomerművek* – Bp. 1956.
3. CSIKAI GY.: *Neutronfizika* – Bp. 1959.
4. ÁDÁM, G. KOSÁLY – KFKI Reports 6/1 (1958)
5. L. PÁL, L. BATA, I. KISS – Acta Phys. Hung. 10 (1959) 173
6. CSIKAI GY., DARÓCZY S. – Magy. Fiz. Foly. 7 (1959) 507
7. CSIKAI GY., DEDE K. – Magy. Fiz. Foly. 8 (1960) 1
8. J. CSIKAI, A. DARÓCZY, K. DEDE – J. Nucl. Energy 15 (1961) 204
9. K.H. BECKURTS, K. WIRTZ: *Neutron Physics* – Springer-Verlag, 1964, 370.
10. CSIKAI GY., SCHADEK J. – ATOMKI Közl. 3 (1961) 59
11. J. BACSÓ, J. CSIKAI, B. KARDON, D. KISS – Nucl. Phys. 67 (1965) 443
12. JÉKI L.: *KFKI* – Budapest, Arteria Studio, 2001.
13. BEREZ I., BORNEMISZA-PAUSPERTL P., NAGY J. – Magy. Fiz. Foly. 6 (1958) 431
14. E. KOLTAY – Acta Phys. Hung. 16 (1963) 93
15. KLOPPER E. – Informatika 7 (2004) 5
16. A. ÁDÁM, L. BOD, Z. SZABÓ, I. SZEGHŐ – Acta Phys. Hung. 12 (1960) 107
17. CSIKAI GY. – Fizikai Szemle 52/5 (2002) 146
18. J. CSIKAI, Cs.M. BUCZKÓ – Appl. Radiat. Isotopes 50 (1999) 487
19. J. CSIKAI, E. HUSSEIN, U. ROSENGARD – Appl. Radiat. Isotopes 61 (2004) 1
20. D.W. MUIR, M. HERMAN: *Long term needs for nuclear data development, INDC(NDS)-423* – IAEA, Vienna, 2001.
21. CSIKAI GY. – Fizikai Szemle 51/5–6 (2001) 169
22. J. CSIKAI, I. EL-AGIB – Nucl. Instrum. Methods A 432 (1999) 410
23. B. KIRÁLY, L. OLÁH, J. CSIKAI – Rad. Phys. Chem. 61 (2001) 781
24. I. SPAHN, S.M. QAIM, S. SUDÁR, J. CSIKAI – NEMEA, Report EUR 21100EN (2004) 122
25. *Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles* – NEA, OECD 2002, France.
26. A. FENYVESI, L. OLÁH, J. JORDANOVA, J. CSIKAI (közlésre előkészítve).

# NEUTRONZAJ REAKTOROKBAN

Szatmáry Zoltán  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

## A transzportegyenlet

A reaktorokban megvalósuló hasadási láncreakció leírására általában a *transzportegyenletet* használjuk. Az egyenlet a neutronfluxusra vonatkozik, amelyet a következőképpen definiálunk:  $\Phi = vn$ . Itt  $v$  az  $E$  energiájú neutron sebessége,  $n$  pedig a neutronsűrűség a fázistérben, vagyis  $n(\mathbf{r}, E, \Omega, t) dV dE d\Omega$  megadja azoknak a neutronoknak a számát a  $t$  időpontban, amelyek az  $\mathbf{r}$  pont körüli  $dV$  térfogatelemben található, energiájuk az  $(E, E+dE)$  intervallumba, sebességük iránya pedig az  $\Omega$  egységvektor körüli  $d\Omega$  térszögbe esik. A  $dV dE d\Omega$  mennyiséget a továbbiakban fázistérfogat-elemnek fogjuk nevezni. A transzportegyenlet fizikai tartalma rendkívül egyszerű, hiszen a neutronsűrűségre vonatkozó mérlegegyenlet:

$$\frac{\partial n(\mathbf{r}, E, \Omega, t)}{\partial t} = \text{neutrontermelés} - \text{neutronfogyás.} \quad (1)$$

A jobb oldalon természetesen időegységre, továbbá egységnyi fázistérfogat-elemre vonatkozó mennyiségek állnak. A neutronok két módon tűnhetnek el: kifolyás és magreakciók révén. Ezek száma:

*Pál Lénárdnak ajánlva, 80-ik születésnapjára.*

$$\begin{aligned} \text{neutronfogyás} = & \Omega v \text{grad } n(\mathbf{r}, E, \Omega, t) + \\ & + \Sigma_t(\mathbf{r}, E) v n(\mathbf{r}, E, \Omega, t). \end{aligned} \quad (2)$$

Itt  $\Sigma_t$  a teljes makroszkopikus hatáskeresztmetszet. Az első tag jelenti a kifolyást: a térfogategységből időegység alatt kidiffundáló és az oda bediffundáló neutronok számának a különbsége. A második tag pedig az összes magreakciók számát adja meg. Úgy tekintjük, hogy minden neutron eltűnik, amely magreakciót vált ki. Ezt fejezi ki (2) jobb oldalának második tagja. Helyettük azonban a magreakciók termelhetnek egy vagy több, más energiával és más irányban repülő neutronot. Ezek alkotják az (1) transzportegyenletben „neutrontermelés” kifejezéssel jelölt tag egy részét. Példák: maghasadás, rugalmas vagy rugalmatlan neutronszórás,  $(n, 2n)$  reakció stb. A másik részt a spontán hasadások vagy a korábbi hasadások termékei által termelt késő neutronok, illetve a neutronfluxustól független, úgynevezett külső neutronforrások alkotják. A példa kedvéért felírjuk a szóródásoknak megfelelő tagot:

$$\int_0^{\infty} dE' \int_{4\pi} d\Omega' \Sigma_s(E' \rightarrow E, \Omega\Omega') v' n(\mathbf{r}, E', \Omega', t). \quad (3)$$