

AZ ATOMENERGIA HASZNOSÍTÁSA ÉS A FIZIKA

Szatmáry Zoltán
BME Nukleáris Technikai Intézet

A tudomány és technika számos ágáról mondogatjuk, hogy többek között a fizikának is alkalmazási területe. Kevés terület van azonban, amely olyan mély és szerteágazó kapcsolatban lenne a fizikával, mint az atomenergia hasznosítása. Ha az alapvető jelenséget, a maghasadást más történelmi korban fedezték volna fel, az egész még hosszú ideig a fizikai laboratóriumok csöndjében fejlődött volna tovább, és csak lassan keresték volna meg a gyakorlati alkalmazásokat. A döntő felfedezésről szóló közlemény azonban 1939 elején jelent meg, így a II. világháború első éveiben rögtön keresni kezdték, és meg is találták az első kézenfekvő alkalmazást, az atomfegyvert. Annak is megvolt az oka, hogy a háború befejezését követően azonnal megvalósult a jelenség békés célú alkalmazása, az atomerőmű. Ennek okaival és következményeivel, gondoljaival és előnyeivel sokan sokat foglalkoztak már – többek között a *Fizikai Szemle* hasábjain is. Az alábbiakban az atomerőműveket nem ebből a szempontból tárgyaljuk, hanem inkább azt tekintjük át, milyen szerepet játszott a fizika ezen a fontos területen.

Az alaptudomány esetünkben nyilvánvalóan a *magfizika*. Kezdetben az atomenergia gyakorlati hasznosítását a magfizika egyik fejezetének tekintették. Az alkalmazás azonban visszahatott az alapokra, és a fizikának (részben a kémiának is) új ágait hozta létre: reaktorfizika, radiokémia stb., de hatására a fizika egyes, korábban is létező ágai új fejezetekkel gazdagodtak: sugárvédelem, áramlás- és hőtan, szilárdságtan, mérés technika stb. Közbevetőleg megjegyezzük, hogy a technikának van olyan ága, amely eredetileg a felsorolt tudományoknak köszönheti a létét: ez a számítástechnika. Közismert, hogy az első számítógépeket a kezdeti mag- és reaktorfizikai kutatások számára építették. Messze vezetne, ha a fizikának ezt az áldásos hatását is ki kívánánk fejteni, ezért megmaradunk az atomenergiánál.

A magfizika szerepe

Az atomenergetika a *maghasadás* felfedezésével indult 1939-ben. Ehhez kellett a neutron felfedezése 1932-ben, amihez viszont szükség volt a magreakciók és a radioaktivitás felfedezésére (1919, illetve 1896). *Szilárd Leó* ismerte fel és szabadalmaztatta a maghasadások láncreakcióját mint azt a módot, amelyen a maghasadásban felszabaduló energiát makroszkopikus léptékben fel lehet szabadítani.¹ Mai szemléletünk szerint a láncreakció egy új tudomány, a *reaktorfizika* tárgya, mint ahogy a reak-

torfizika részének tekintjük a neutronok lassulásának *Fermi* által kidolgozott elméletét is, hiszen enélkül nem érthetjük meg magát a láncreakciót sem. Ez természetesen nem lehet akadálya annak, hogy számos, magfizikáról szóló könyv röviden összefoglalja a láncreakció és a lassulás lényegét. Ugyanakkor a reaktorfizikusok a magfizikát olyan alaptudománynak tekintik, amely a reaktorok működésének a megértéséhez szükséges alapadatokat szolgáltatja. Emiatt a reaktorfizikával foglalkozó kézikönyvek többnyire szentelnek két-három bevezető fejezetet a magfizikának. A két tudományágnak ebben a szövevényes kapcsolatrendszerében úgy tehetünk rendet, ha köztük a magfizikai adatok szintjén képzeljük el az elválasztó síkot. Nézzük tehát, milyen adatokról van szó.

Mindenekelőtt szükség van a reaktort alkotó izotópok hatáskeresztmetszeteire, hiszen segítségükkel számítjuk ki a reaktorban lejátszódó magreakciók számát. A hatáskeresztmetszetekből nukleárisadat-könyvtárakat állítanak össze. A bennük szereplő izotópok száma meglehetősen nagy. Az urán izotópjain kívül a következők hatáskeresztmetszeteire van szükség: moderátoranyagok (könnyűvíz, nehézvíz, grafit, berillium), szerkezeti anyagok (vas, nikkel, cirkónium, nióbium, alumínium stb.), neutronabszorbensek (bór, kadmium, gadolínium, eurórium stb.), szennyezők (hafnium, nátrium, lítium, kobalt stb.), transzurán elemek (plutónium, neptúnium, amerícium, kúrium stb.), végül hasadási termékek. Csak az utóbbi csoportban több száz izotóp hatáskeresztmetszeteit kell ismerni. Fajtajukat tekintve minden izotópra ismerni kell az összes szóba jövő hatáskeresztmetszetet a magreakciót kiváltó neutron energiájának a függvényében: befogás, hasadás, rugalmas és rugalmatlan szórás, $(n,2n)$ stb.

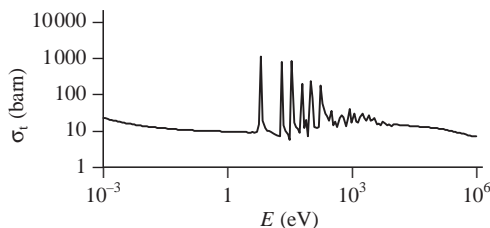
A magfizika egyik alkalmazott ága az úgynevezett *evaluált nukleárisadat-könyvtárak* összeállítása. A szükséges adatokat magfizikai laboratóriumok folyamatosan mérik, a tudományos sajtóban közölt adatokat pedig erre specializálódott központok értékelik, átlagolják, szórást és korrelációt becsülnek, egyszóval: *evaluálják*. A gyakorlat embereinek (elsősorban a reaktorfizikusoknak) óriási az adatigénye. Időről időre *request listek* (kívánságlisták) készülnek, hogy orientálják a magfizikusokat, mire van szükség. Ennek ellenére a könyvtárak mindig hiányosak. A hiányzó adatokat magmodelleken alapuló számítások alapján pótolják. Látjuk, hogy az evaluáció alapos ismereteket (és természetesen sok szorgalmat) igénylő tevékenység. Jelenleg három közhasznú nukleárisadat-könyvtár létezik: ENDF,² JEF,³ JENDL.⁴ Jóllehet hatalmas értéket

¹ A vetélkedők kedvelt kérdése, hogy ki szabadalmaztatta a láncreakciót, amire a helyes válasz Szilárd Leó. Helyenként arról is lehet olvasni, hogy az ötlet akkor született meg a fejében, amikor London egyik útkereszteződésében a zöld lámpára várt. Mikor a dologról Teller Edét személyesen megkérdeztem, Szilárd Leó szerzőségét nem vitatta, viszont a körülményeket kizártnak tartotta: „*Szilárd soba semmiféle piros lámpánál nem állt meg.*”

² Evaluated Nuclear Data File (evaluált nukleárisadat-könyvtár). Az Egyesült Államokban szerkesztett könyvtár „B” változata szolgál reaktorfizikai célokra. Az „A” változat az egyéb alkalmazások számára készült (például sugárvédelem).

³ Joint European File (közös európai könyvtár)

⁴ Japanese Evaluated Nuclear Data Library (japán evaluált nukleárisadat-könyvtár)



1. ábra. ^{238}U hatáskeresztmetszete a neutron energiájának a függvényében

képviselnek, ingyen hozzáférhető a felhasználók számára (kivéve természetesen a súlyos politikai embargó alá eső országokat). Az Olvasóban nyilván felmerül a kérdés, hogy miért nem egyetlen, mindenki által elfogadott adatkönyvtár van. A kérdésre még visszatérünk.

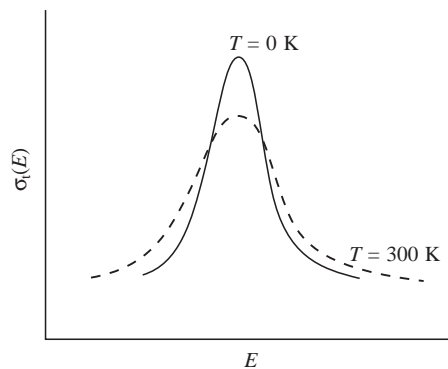
Amikor hatáskeresztmetszetekről beszéltünk, elnagyolva fogalmaztunk. Az izotópok nagy részére vonatkozóan elegendő a hatáskeresztmetszeteket a magreakciót kiváltó neutron E energiájának a függvényében kellően sűrű energiaértékekre megadni, mint az 1. ábra mutatja. Bizonyos energiákra azonban ez nem célszerű: ha az izotópnak vannak *rezonanciái*, mint például az ábrán mutatott ^{238}U esetében, akkor az ilyen görbe megadása kevés. Az egyes rezonanciákat a

$$\sigma_t(E) = \frac{\sigma_0}{\left(\frac{E - E_0}{\Gamma/2}\right)^2 + 1} + \sigma_p \quad (1)$$

Breit-Wigner-formulával lehet leírni, amelyben E_0 a rezonancia energiája, Γ a szélessége, σ_0 a hatáskeresztmetszet értéke $E = E_0$ esetén, végül σ_p a potenciális szórás hatáskeresztmetszete.⁵ Az elméleti magfizika, így az (1) képlet is a tömegközépponti rendszerben kifejezett neutronenergia függvényében adja meg a hatáskeresztmetszeteket. A reaktorfizikában viszont mindig a laboratóriumi rendszerben mért neutronenergiát használjuk. A kísérleti magfizika is ez utóbbi függvényében adja meg a hatáskeresztmetszeteket. Tekintve, hogy az atommag hőmozgást végez, a gyakorlatban egy *effektív hatáskeresztmetszetet* kell használnunk, amely az elméleti hatáskeresztmetszet átlaga:

$$\sigma_{\text{eff}}(v) = \frac{1}{v} \int v_r \sigma(v_r) P(\mathbf{V}) d\mathbf{V}, \quad (2)$$

ahol $v_r = |\mathbf{v} - \mathbf{V}|$ a neutron és az atommag relatív sebessége, \mathbf{v} és \mathbf{V} rendre a neutron és az atommag sebességvektora a laboratóriumi rendszerben, $P(\mathbf{V})$ az atommag sebességének valószínűségi sűrűségfüggvénye. Mivel az atommag hőmozgásának az energiája kT nagyságrendű, körülbelül ekkora a $P(\mathbf{V})$ eloszlás szélessége is. Érdekes megjegyezni, hogy a $T \rightarrow 0$ K határesetben $\sigma_{\text{eff}}(v) \rightarrow \sigma(v)$, vagyis az effektív hatáskeresztmetszet csak viszonylag magas hőmérsékleteken tér el az elméletitől. Két esetben kapunk lényeges eltérést: egyrészt termikus neutronenergiákra, vagyis amikor E és kT összemérhető, másrészt olyan gyorsan változó hatáskeresztmetszetek esetében, amelyekre egy $\Delta E \approx kT$ energiaintervallumban $\sigma(E)$ szá-



2. ábra. Doppler-effektus: az (1) képlet szerinti rezonanciagörbének ($T = 0$ K) a (2) képlet szerint szobahőmérsékleten ($T = 300$ K) megfelelő effektív hatáskeresztmetszet kiszélesedik.

mottevően megváltozik. Mivel a rezonanciák Γ szélessége és kT összemérhető, ilyenek az (1) képlet által adott rezonancia-hatáskeresztmetszetek. A 2. ábrán mutatunk egy példát: összehasonlítjuk a Breit-Wigner-képlettel számolt görbét ($T = 0$ K) és a szobahőmérséklethez tartozó effektív hatáskeresztmetszetet ($T = 300$ K). Látjuk, hogy az utóbbi szélesebb.⁶ Ezt a jelenséget nevezzük *Doppler-effektusnak*, amelynek a reaktorok biztonsága szempontjából alapvető jelentősége van. A hatáskeresztmetszet-könyvtárakra visszatérve ebből az következik, hogy azoknak nem a hatáskeresztmetszeteket, hanem a rezonanciák paramétereit (E_0 , Γ stb.) kell tartalmazniuk, mivel a felhasználók így tudják a legkönnyebben az effektív hatáskeresztmetszeteket a számukra érdekes T hőmérsékletekre kiszámolni.

A hatáskeresztmetszeteken kívül a könyvtáraknak tartalmazniuk kell egy sor egyéb adatot is. Közülük a legfontosabb a *hasadási termékek gyakorisága*, továbbá ezek és a transzurán elemek radioaktív *bomlási sémája*, valamint az emittált γ és β -részecskék energiaspektruma, illetve *átlagenergiája*. Ezeknek az adatoknak a felhasználása sokrétű. Mindenekelőtt szükségesek a reaktor működésének nyomon követéséhez, de alapvetők a radioaktív hulladékok kezelése szempontjából is. Speciális szerepet játszanak azok a hasadási termékek, amelyek bomlási sémája során neutron is keletkezik. Ezek termelik ugyanis a reaktorok szabályozását lehetővé tevő *késő neutronokat*. Esetükben nemcsak a bomlási séma adataira, hanem a keletkező neutronok energiaspektrumára is szükség van.

Befejezésül még egy speciális hatáskeresztmetszetről kell szólnunk: ez a *szórási magfüggvény*. Tekintsük a 3. ábrát: miután egy E energiájú neutron atommagon szóródik, E' energiával halad tovább. Sebességének irányvektora az ütközés előtt és után Ω , illetve Ω' . Annak a szórásnak a hatáskeresztmetszetét, amelyben a neutron szóródás utáni energiája az $(E', E' + dE')$ intervallumba, sebességének iránya az Ω' körüli $d\Omega'$ kúpszögbe esik, a következőképpen jelöljük:

$$\sigma_s(E \rightarrow E', \Omega \rightarrow \Omega') dE' d\Omega'.$$

⁵ A képletben szerepel még egy további tag is, de azt az egyszerűség kedvéért elhagytuk.

⁶ A 2. ábrán látható két görbe alatti terület megegyezik, ezért a szélesebb görbe maximuma kisebb.



3. ábra. Neutron szóródása atommagon

Ez a *rugalmas* szórási magfüggvény. Kivételes esetektől (például egykristályon való szóródástól) eltekintve nem külön-külön függ a két szögiránytól, hanem csak az általuk bezárt szögtől, pontosabban annak μ_0 koszinuszától (vö. 3. ábra):

$$\begin{aligned} \sigma_s(E \rightarrow E', \Omega \rightarrow \Omega') &= \sigma_s(E \rightarrow E', \Omega \Omega') = \\ &= \sigma_s(E \rightarrow E', \mu_0). \end{aligned} \quad (3)$$

Hasonló módon definiáljuk a *rugalmatlan* (inelasztikus) szóráshoz tartozó magfüggvényt, amely izotróp, vagyis független a szóródási szögtől⁷:

$$\sigma_{in}(E \rightarrow E', \Omega \Omega') = \frac{\sigma_{in}(E \rightarrow E')}{4\pi}.$$

A szórás izotrópiája egyáltalán nem érvényes a rugalmas szórásra: erre vonatkozóan a szórási szögtől való függés jelentős effektus. Leírását egyszerűsíti, hogy a magfüggvény csak látszólag függ három változótól. Egyszerű belátni, hogy az energia és az impulzus csak úgy maradhat meg az ütközés során, hogy E , E' és μ_0 között egyértelmű kapcsolat van. Mivel az ütközés előtti energia (E) adott, a magfüggvényt a szórási szög (μ_0) függvényének tekinthetjük, és a következő alakba írjuk át:

$$\sigma_s(E \rightarrow E', \mu_0) = \frac{1}{2\pi} \sigma_s(E) \chi(E, \mu_0).$$

A 2π -vel való osztás azt fejezi ki, hogy a 3. ábrán látható szóródás forgási szimmetriát mutat az eredeti neutronirány (Ω) körül. A $\chi(E, \mu_0)$ függvény μ_0 valószínűségi sűrűségfüggvénye. A Legendre-polinomok szerint haladó sorba szoktuk fejteni:

$$\sigma_s(E \rightarrow E', \mu_0) = \frac{1}{4\pi} \sigma_s(E) \sum_{\ell=0}^{\infty} \omega_{0,\ell}(E) P_{\ell}(\mu_0).$$

A hatáskeresztmetszet-könyvtárak a $\sigma_s(E)$ szórási hatáskeresztmetszetek mellett az $\omega_{0,\ell}(E)$ együtthatókat tartalmazják az E neutronenergia függvényében.⁸ Vannak izotópok, amelyekre vonatkozóan akár $\ell = 6$ -ig el kell menni a sorban (sőt néha még tovább is). Reaktorok leírásában az $\ell = 1$ -nél magasabb rendű tagok nem játszanak jelentős szerepet, de például biológiai védelmi falakon áthatoló neutronsugárzás esetében ezek a tagok a meghatározók.

⁷ Ez az állítás a tömegközépponti rendszerben vett szórási szögre igaz. A mag visszalökődése miatt a laboratóriumi rendszerben csak közelítőleg érvényes.

⁸ ω mellett a „0” index arra utal, hogy a sorfejtés a laboratóriumi rendszerben vett szórási szög szerint halad. A magfizikusok általában a tömegközépponti rendszerben vett szórási szöget részesítik előnyben. A kétfajta szórási szög szerinti eloszlások egymásba átszámolhatók.

Az eddigiekben a szórási magfüggvényeket a hőmozgás energiáját jóval meghaladó E neutronenergiákra vonatkoztattuk. Amikor az energia eV-nál kisebb, két újabb effektus lép fel: a kémiai kötés hatása és a szóró atommag hőmozgása. Kristályos anyag esetében a kristályrács is befolyásolja a szóródás lefolyását. Ebben az energiatartományban – megkülönböztetésül – *termalizációs* magfüggvényről szoktunk beszélni. Ha a szóró atom egy szabad gázatom, csak a hőmozgását szükséges figyelembe venni. Molekulában kötött atom esetében a neutron nem egymagában az atommaggal lép kölcsönhatásba, hanem az egész molekulával: gerjeszti annak rezgési és rotációs kvantumállapotait, kristályrácsok esetében pedig a fononokat. A termalizációs magfüggvény meghatározása tehát nemcsak a magfizika, hanem a szilárdtestfizika és a kvantumkémia eszközeit is igényli. Az 1960-as és 1970-es években önálló tudományággá fejlődött a termalizációs magfüggvény elméleti és kísérleti meghatározása. Tekintve, hogy a gyakorlatban csak néhány anyag van, amelyeket moderátorként használnak, és az ezeken való neutronszórást alaposan megvizsgálták, a termalizációs magfüggvény problémája egyelőre megoldottnak tekinthető. Messze vezetne a kérdés további elemzése, de megjegyezzük, hogy a jövőben épülő reaktorok számára a problémát két okból is újra elő kell majd venni: egyrészt új anyagok (például sóoldadék) alkalmazása várható, másrészt folyamatosan növelik az egységnyi hasadóanyagból kivett energiát, és emiatt növekedni fog a reaktorban felhalmozódó transzuránok (főleg a plutónium) mennyisége.⁹

A reaktorfizika szerepe

A magfizikai adatoknak az eddigiekben áttekintett könyvtárai elméleti és kísérleti magfizikusok százainak több évtizedes munkáját igényelték, és ez a munka még nem zárult le. Érdekes lenne egyszer megbecsülni, mennyi pénzt emésztettek fel azok a kutatások, amelyek a ma használt adatkönyvtárakat megalapozták. Valószínűleg dollármilliárdok jönnének ki. Itt logikusan felmerül a kérdés, hogy a magfizikusok viszont mennyi pénzt takarítanak meg a nukleáris energetikának. Erre még visszatérünk, de előbb áttekintjük, mire használják a magfizikai adatokat a reaktorfizikusok.

A reaktorfizika alapegyenlete a *transzportegyenlet*, amelynek régóta ismert a fizikai tartalma, hiszen az alapfogalom már a statisztikus fizika kezdetén megszületett. Erre való tekintettel sokan *Boltzmann-egyenletnek* is nevezik. Fizikai tartalma rendkívül egyszerű. Legyen $n(\mathbf{r}, E, \Omega, t)$ a neutronok sűrűsége a t időpillanatban a hely (\mathbf{r}), energia (E) és sebességirány (Ω) szerint. A transzportegyenlet a következőt fejezi ki:

$$\frac{\partial n(\mathbf{r}, E, \Omega, t)}{\partial t} = \text{neutrontermelés} - \text{neutronfogyás}. \quad (4)$$

⁹ Az elmúlt 40 év tapasztalata azt mutatta, hogy annál pontosabb termalizációs magfüggvényekre van szükség, minél nagyobb mennyiségben kerülnek a reaktorba neutronabszorbensek, amilyen például a plutónium is.

A jobb oldalon természetesen idő- és térfogategységre, továbbá egységnyi energjaintervallumra és kúpszögére vonatkozó reakciógyakoriságok állnak. Minden, a továbbiakban felírt mennyiség idő- és térfogategységre stb. fog vonatkozni, de az ezt kifejező körülményes jelzőket az egyszerűség kedvéért elhagyjuk. Nem kívánjuk az egyenletet teljes részletességgel felírni, csupán néhány tagot adunk meg illusztrációképpen. A neutronok két módon tűnhetnek el: kifolyás és magreakciók révén. Ezek száma:

$$\text{neutronfogyás} = \Omega v \nabla n(\mathbf{r}, E, \Omega, t) + \Sigma_i(\mathbf{r}, E) v n(\mathbf{r}, E, \Omega, t). \quad (5)$$

Itt v az E energiájú neutron sebessége, Σ_i pedig a teljes makroszkopikus hatáskeresztmetszet.¹⁰ 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 (5) jobb oldalának második tagja. Helyettük azonban a magreakció termelhet egy vagy több, más energiával és más irányban repülő neutronot. Ezek alkotják a (4) transzportegyenletben „neutrontermelés” kifejezéssel jelölt tag egy részét. Példák: maghasadás, rugalmas vagy rugalmatlan neutronszórás, $(n, 2n)$ reakció stb. Rajtuk kívül ebben a tagban vesszük még figyelembe a spontán hasadások vagy a korábbi hasadások termékei által termelt késő neutronokat és hasonlókat. A példa kedvéért felírjuk a rugalmas szóródásoknak megfelelő tagot:

$$\int_0^\infty dE' \int_{4\pi} d\Omega' \Sigma_s(E' \rightarrow E, \Omega\Omega') v' n(\mathbf{r}, E', \Omega', t), \quad (6)$$

ahol felhasználtuk a (3) alatt definiált rugalmas szórási magfüggvényt. Hasonló integrálokkal fejezhető ki a maghasadás, rugalmatlan szórás stb.

A neutronokra vonatkozó transzportegyenlet lényegesen egyszerűbb, mint például a töltött részecskékre vonatkozó hasonló egyenlet, mert nem kell figyelembe venni a neutronok közötti kölcsönhatást. Emiatt az egyenlet lineáris. A kvantummechanikán nevelkedett fizikusok számára viszont szokatlan, hogy a benne szereplő operátorok nem önadjungáltak. Ez különösebb matematikai nehézséget nem okoz, legfeljebb annyit, hogy a transzportegyenlet adjungáltját is meg kell oldani. Lényeges bonyodalom azonban, hogy az egyenletben szereplő hatáskeresztmetszetek és magfüggvények, valamint maga az egyenlet megoldása bizonyos energiákra és a reaktor bizonyos helyein E , illetve \mathbf{r} nagyon gyorsan változó függvénye. Ilyen jelenséget idéznek elő például a rezonanciák.

A transzportegyenlet – típusát tekintve – integro-differenciálegyenlet, hiszen egyesek fordulnak elő benne integrál- és differenciáloperátorok. Az utóbbiak helyettesíthetők integráloperátorokkal, tehát az egyenletnek van egy tisztán integrális alakja, de a fordított állítás nem igaz:

a transzportegyenletnek nincs tisztán differenciális alakja. Ennek oka abban rejlik, hogy a neutronszórásból és a maghasadásból kilépő neutronok energiája ugrásszerűen eltér a szóródó, illetve a hasadást kiváltó neutron energiájától, és ezt csak a (6)-hoz hasonló szerkezetű integráloperátorokkal lehet leírni. Amikor a szóró atommag tömege tart a végtelenhez, az energiaugrás zérushoz tart, így az integráloperátor jól közelíthető differenciáloperátorral. Ez azonban csak elvi lehetőség, mivel a reaktorban mindig vannak nagy szórási hatáskeresztmetszetű könnyű atommagok (például a víz hidrogénje).

A reaktorfizika alapfeladata a transzportegyenlet megoldása. Mivel a hatáskeresztmetszetek kísérletileg meghatározott, tehát csak numerikusan ismert függvények, a transzportegyenlet megoldására is csak numerikus módszerek jönnek szóba.¹¹ A korszerű számítógépek tulajdonképpen már lehetővé tennék a transzportegyenletnek minden lényeges matematikai közelítés nélkül való numerikus megoldását. Egy kis jóindulattal kijelenthetjük, hogy ilyen program létezik is: ez az MCNP nevű Monte Carlo program, amely számítógépen szimulálja a neutronoknak a reaktor belsejében való véletlenszerű mozgását. Ha elegendően sok neutron mozgását, eltűnését, keletkezését követjük nyomon, bármilyen kívánt pontossággal előállíthatjuk az egyenlet megoldását. (Legfeljebb hónapokig kell futtatni a programot.) A reaktorfizika számos feladatát megoldhatjuk ezen a módon – különösen akkor, ha nem szeretünk sokat gondolkodni. A gyakorlatban azonban nem nélkülözhetjük azokat a megoldási módszereket, amelyek a transzportegyenlet *közelítő megoldására* törekednek. Vannak ugyanis problémák, amelyek csak nagyon körülményesen vagy egyáltalán nem kezelhetők Monte Carlo szimulációval.

A reaktorfizika első évtizedeiben (az 1950–1970-es években) a számítógépek teljesítménye messze elmaradt attól, hogy a transzportegyenletet eredeti alakjában tudjuk megoldani. Emiatt a neutronoknak a keletkezéstől az eltűnésig terjedő élettörténetét szakaszokra bontottuk, és mindegyikre külön (közelítő) elméletet és számítógépi programot hoztunk létre. Így születtek meg a reaktorfizika egyes fejezetei: *neutronlassulás, termalizáció, diffúzióelmélet, szabályozórudak elmélete*. Ezekről külön tárgyaltuk az időfüggő jelenségeket (*reaktorkinetika*), valamint a *kiégést*, vagyis az urán fogyását és a transzuránok, meg a hasadási termékek felhalmozódását. Mindegyik részfeladatra külön számítógépi programok születtek, és a konkrét feladatokat ezek sorozatban való futtatásával oldottuk meg. Ahogy a számítógépek kapacitása nőtt, a programok sorozatban való használatát automatizáltuk, de a programrendszer alapelve hosszú ideig alig változott.

A részfeladatokra való bontás a *reaktorfizikai alaptételek* nevezett megfigyelésen alapult: a transzportegyenlet megoldása homogén reaktorban és időtől független esetben a hely- és a többi változó szerint szeparálható:

$$n(\mathbf{r}, E, \Omega) = n(\mathbf{r}) \psi(E, \Omega). \quad (7)$$

¹⁰ A transzportelmélet makroszkopikus hatáskeresztmetszetekkel dolgozik, amelyek a mikroszkopikus hatáskeresztmetszetek és a térfogategységben található atommagok számának a szorzatai.

¹¹ Analitikus megoldása csak kivételesen egyszerű, idealizált esetekben ismert.

Kritikus állapotban levő reaktorokban kísérletileg részletesen igazolták, hogy ez homogén tartományokon belül, határfelületektől elegendően távol érvényes. A $\Psi(E, \Omega)$ energiaspektrum meghatározására szolgál a lassulásmélet és a termalizáció. Mivel a (7) összefüggés a határfelületektől távol, aszimptotikusan érvényes, ezek az elméletek az *aszimptotikus* jelzőt viselik. Kiküszöbölik a helyváltozót (\mathbf{r}) és a neutronirányt (Ω), így az energiaspektrumot az egyedül maradt E változó finom beosztású értékeire ki tudjuk számítani. Ehhez szükség van a hatáskeresztmetszetek energiatartományok részletes ismeretére. Az $n(\mathbf{r}, E, \Omega)$ neutronirányú sűrűségnek a helyváltozótól való függését viszont az E változónak csak meglehetősen durva beosztása mellett tudjuk meghatározni: a (0–20 MeV) intervallumot legfeljebb négy (esetleg hat) részre oszthatjuk fel. Egy ilyen részintervallumba eső neutronok összességét *neutroncsoportnak* nevezzük. Rájuk vonatkozóan átlagoljuk a hatáskeresztmetszeteket:

$$\Sigma_k = \frac{\int_{E_k}^{E_{k-1}} \Sigma(E) \int_{4\pi} \Psi(E, \Omega) d\Omega dE}{\int_{E_k}^{E_{k-1}} \int_{4\pi} \Psi(E, \Omega) d\Omega dE}, \quad (8)$$

amelyeket *csoportállandóknak* nevezünk ($k = 1, 2, 3, 4$). A Σ jelölés tetszőleges fajta hatáskeresztmetszetet jelenthet (abszorpció, hasadás stb.). A

$$\Phi_k = \int_{E_k}^{E_{k-1}} \int_{4\pi} v n(\mathbf{r}, E, \Omega) d\Omega dE$$

csoportfluxusokra vonatkozóan a transzportegyenlethez – bizonyos elhanyagolások árán – le lehet vezetni a *diffúzióegyenletet*, amelyet (elvileg) tetszőlegesen bonyolult geometriájú reaktorra numerikusan meg lehet oldani. A megoldás ismeretében kiszámíthatjuk a reaktorban lejátszódó valamennyi reakció gyakoriságát, tehát nyomon követhető a transzuránok és a hasadási termékek felhalmozódása.¹²

Az elmondottakból következik, hogy a neutronlassulás és -termalizáció aszimptotikus elmélete szolgál a diffúzióegyenletben felhasznált csoportállandók számítására. Itt rögtön látszik egy ellentmondás: a diffúzióegyenlet éppen arra szolgál, hogy az aszimptotikus elmélettől való eltéréseket leírjuk, viszont benne az aszimptotikus elmélettel számolt csoportállandókat használunk fel. Ennek ellenére már az 1970-es években meglepően pontos eredményeket szolgáltató programrendszerek voltak használatban. Természetesen a reaktorfizikusok igyekeztek ettől az ellentmondástól megszabadulni, amint egyre nagyobb számítógépek álltak rendelkezésre. Például a Magyarországon kifejlesztett programrendszer a határfelületek közelében tértől füg-

gő csoportállandókkal dolgozik. A megnyugtató megoldás persze az lenne, hogy a diffúzióegyenletet sok energiacsoporttal oldanánk meg, hiszen ekkor a lassulást és a termalizációt ugyanaz a program írná le, amely a diffúzióegyenletet is megoldja. Ilyen hatalmas program még nem létezik, bár a modern számítógépek már azon a határon vannak, hogy ezt lehetővé tegyék. Nem lehet kétséges, hogy egy ilyen „szuperprogram” legkésőbb egy évtizeden belül meg fog születni. Az is bizonyos azonban, hogy csak lassan fog tudni a jelenlegi programrendszerek helyébe lépni. Ennek oka a gyakorlati alkalmazások természetében rejlik. E cikk befejezéséül ezt vizsgáljuk meg közelebbről, és ebből az is ki fog derülni, merre kell a mag- és reaktorfizikának továbbfejlődnie – legalábbis e sorok írója szerint.

A továbblépés problémái

Egy reaktorfizikai számítás pontossága három dolog pontosságától függ:

- a transzportegyenlet megoldására használt *program*,
- a számításban felhasznált *magfizikai adatok*,
- *technológiai adatok*.

Az első két dologról már volt szó, de a technológiai adatokról még nem. A számítás bemenő adatai a reaktor anyagi összetételére és geometriai szerkezetére vonatkozó adatok. A nukleáris üzemanyag dúsítása, sűrűsége, a fűtőelempláncák méretei, egymástól való távolságuk, a vízben oldott bórsav koncentrációja és sok hasonló dolog gyári, illetve üzemviteli adat. Mindennek a pontosságára a reaktorfizikusnak nincs befolyása.¹³ Hasonlóan nincs befolyása a magfizikai adatok pontosságára sem. A magfizikusok szolidárisabbak, mint az üzemanyaggyárok: ha szükséges, az adatokat időnként újra megméri, és így egyre pontosabb adatkönyvtárak jelennek meg. A reaktorfizikában természetes törekvés, hogy a programok számítási hibája lényegesen kisebb legyen, mint a másik két bizonytalanságnak a hatása. A számítási hiba ugyanis *szisztematikus*, viszont a magfizikai és a technológiai adatok bizonytalansága *statisztikus* természetű. Mindkét fajta hatást számszerűsíteni kell, különben a számítások a gyakorlatban használhatatlan eredményeket adnak. Ezt a kérdést közelebbről is megvizsgáljuk.

Tekintve, hogy az atomerőművek tervezése és üzemvitelének számításokon alapul, a biztonság mindent megelőző követelményéből következik, hogy mind a számításra felhasznált eszközöket (programokat és adatkönyvtárakat), mind magukat az egyes számításokat ellenőrizni kell. Ez azt jelenti, hogy csak *validált* eszközök használata jöhet szóba. A „validálás” az utóbbi időben divatba jött szó. Mivel értelmét sokan félreértik, érdemes pontosan megmondani, mit értünk validáláson: *a használt eszközök megfelelő voltának hatósági érvényű igazolása*. A validálásnak természetesen része az eredmények pontosságá-

¹² Ezeknek az izotópoknak a megjelenése megváltoztatja a makroszkopikus hatáskeresztmetszeteket, tehát visszahat a transzportegyenletre, amely ettől kis mértékben nemlineárisá válik. Helyhiány miatt további részleteit nem tárgyaljuk.

¹³ Legfeljebb zúgolódhat, hogy – például – miért nem kisebbek a fűtőelemgyár tűrései.

nak a becslése is. Az erőmű üzemeltetőjének nincs joga más eszközt használni, mint amelyet a biztonságot felügyelő hatóság validáltnak ismer el.¹⁴ A dolgnak van egy másik oldala is: a hatóságnak nincs joga a használt eszközöket vitatni, legfeljebb azok helyes használatát ellenőrizheti. Miután a validált eszközökkel egy művelet megterveztek (például az üzemanyag átrakását és a reaktor újraindítását), még mindig marad egy hibaforrás: a reaktor nem felel meg annak, amit a tervezéskor feltételeztek. Ennek kiszűrésére szolgálnak az *üzemviteli mérések*. Egy sor számolt mennyiséget a működő atomerőműben megmérnek, és ha a mért és számított mennyiségek eltérése a számítási pontosságon kívül esik, a művelet nem folytatható tovább. Hangsúlyozzuk: a számított és a mért adatok összevetésének nem a számítási modell ellenőrzése a célja, hanem itt már magát a reaktort ellenőrzik, megfelel-e annak, amit a tervezők feltételeztek. Például elvileg előfordulhat, hogy két fűtőelemköteget összecserélnek. Az ilyen természetű hibát az üzemi mérések ki tudják mutatni, ha a tervezésben validált eszközöket használtak.

Egy programrendszer és adatkönyvtár validálása költséges és bonyolult feladat. Először a *számítási hibát* kell ellenőrizni: a validálandó programok eredményeit nagy pontosságú, úgynevezett *precíziós programok* eredményeivel vetik össze. Ha mindkét számításban azonos magfizikai adatokat használtak fel, az eltérések felvilágosítást adnak a számítási hibáról. Ez az oka annak, hogy a gyakorlati célokra szolgáló programoknál lényegesen pontosabb reaktorfizikai programokra is szükség van. Tulajdonképpen erre a célra jöttek létre a Monte Carlo módszeren alapuló programok. Sokan ma is úgy gondolják, hogy a precíziós programokat minden feladatra fel lehet használni. Ez két okból sincs így: egyrészt a számítási idő nagyon hosszú, másrészt a precíziós programok csak idealizált, a gyakorlat igényeitől messze eső problémákra használhatók. Talán az egyetlen kivétel a már említett MCNP, amelynek kitűnő, professzionális szerzői a gyakorlati felhasználás igényeit is képesek voltak figyelembe venni.

A validálás másik fázisa a *reaktorfizikai kísérletek* eredményeivel való összevetés. Erre a célra az elmúlt évtizedekben kisebb-nagyobb kísérleti programokat hajtottak végre, amelyek célja az elképzelt reaktortípusok reaktorfizikai modellezése volt. Tulajdonképpen minden, ma alkalmazott erőműtípushoz tartozott egy modellkísérlet. Mivel a méréseket olyan kis teljesítményen végezték el, hogy elhanyagolható legyen az üzemanyag felaktiválódása, ezeket a berendezéseket *kritikus rendszereknek* vagy *zérusteljesítményű reaktoroknak* nevezzük. A mérések célja olyan kísérleti adatok létrehozása, amelyek alkalmasak az adott típushoz használt számító programok és adatkönyvtárak validálására. A dolog lényegéből következik, hogy a kritikus rendszerek általában nagy gonddal megépített berendezések, hiszen csak így lehet biztosítani, hogy a rajtuk kapott mérési eredmények bi-

zonytalanságát a lehető legkevésbé befolyásolják a kritikus rendszer technológiai bizonytalanságai. A validálás azt igényli, hogy a méréseket ne csak azon a fűtőelemrácson végezzék el, amely az adott típusú atomerőműben meg fog valósulni, hanem attól eltérőkn is. Így lehet a számítási modell érvényességi határait megbízhatóan kijelölni. Emiatt e modellkísérletek némelyike meglehetősen nagyszabású és költséges volt.

A kritikus rendszereken kapott mérési eredményeket összevetjük azok számított értékeivel. Az üzemviteli mérésekkel szemben most a feladat a számítási modell ellenőrzése. Ha ismert a számítás hibája, az elemzés ki tudja mutatni a magfizikai adatok pontatlanságainak a hatását is. A gyakorlatban a rendelkezésre álló adatkönyvtárak közül így tudjuk azt az egyet kiválasztani, amellyel az adott reaktortípusra a legpontosabb eredményeket lehet kapni. Ha a mért és számított eredmények eltérése a kívánt határokon belül marad, a modell validáltnak tekinthető – a vizsgált mennyiségek számítására.¹⁵

Ezen a ponton tudunk a korábban feltett kérdésre válaszolni. A validálás során feltárult bizonytalanságok miatt az atomerőművek teljesítménye nem érheti el a biztonságos felső határt. A tényleges teljesítmény úgy adódik, hogy a biztonságos felső határt elosztják egy biztonsági tényezővel, amely a következő négy dolog bizonytalanságát fejezi ki: 1) reaktorfizikai számítások és magfizikai adatok; 2) a biztonságos felső határ ismerete; 3) technológiai adatok; 4) üzemviteli mérések. Amikor a paksi atomerőmű 1982-ben elindult, ez a tényező 1,5 volt, amelyen belül az 1) szerinti bizonytalanságot egy 1,10 értékű tényezővel vették figyelembe. Azóta a paksi reaktorok 7–8%-kal nagyobb teljesítményen járnak, amit az tett lehetővé, hogy a hazai kutatások a fentiek közül az 1), 2) és 4) hibaforrás hatását csökkentették. Nagyon durva becsléssel ez évi 20–30 milliárd forint értékű többlet villamos energiát jelent, amiből a magfizikai adatok pontosságának a javulása körülbelül 2–3 milliárd forintot hozott. Aki ismeri, mibe kerültek a hazai atomenergia-kutatások, könnyen beláthatja, hogy ezek költségei egy-két év alatt megtérültek Pakson.¹⁶ Ha pedig azt kérdezzük, hogy a magfizikusok erőfeszítései világszinten mit hoztak, a megtakarítás évente körülbelül egy milliárd dollárra becsülhető.

Egy évtizeden belül várhatóan új típusú atomerőművek fognak épülni, amelyekhez – a korábbiakhoz hasonlóan – szükség lesz validált számítási programokra és adatkönyvtárakra. Az elmúlt ötven évben több száz kritikus rendszeren folytak mérések, amelyek validálásra alkalmas mérési adatokat szolgáltatottak. Ezek a kísérleti programok többnyire a vezető országok nemzeti laboratóriumaiban történtek, tehát az általuk felemésztett hatalmas költségeket a *kormányok* fedezték. Ha a jövőben ilyen kísérleteket végeznek, azokat elsősorban a *magántőkének* kell majd finanszíroznia, ugyanis az új

¹⁴ Belső használatra természetesen azzal dolgozik, amit jónak lát, de a hatóságnál előterjesztett elemzések csak validált eszközökkel készülhetnek.

¹⁵ Amit itt a validálásról leírtunk, egy idealizált követelmény csupán, ritkán valósul meg ebben a formában.

¹⁶ A hazai kutatások a nemzetközi erőfeszítéseken alapulnak, tehát nem mindent mi találtunk ki, amit Pakson alkalmaztunk, de azért elég sok mindent kitaláltunk!

reaktorokat már magánvállalatok fogják tervezni és építeni. Eszerint aligha valószínű, hogy sor fog kerülni a korábbiakhoz hasonló számú és léptékű kísérletekre. Valószínűleg csak kivételesen lesz ilyesmire szükség. A korábbi kísérleti programok ugyanis olyan nagy mennyiségű kísérleti adatot produkáltak, hogy az esetek többségében az új típusok validálási igényeit is ki tudják elégíteni. Ez persze csak akkor lesz így, ha ezek a mérési eredmények kellő részletességgel dokumentálva rendelkezésre fognak állni. Sajnos nem ez a helyzet. Az elmúlt ötven év a katonai szembenállás és titkolódzás korszaka volt, amikor az ilyen természetű adatokat nem hozták nyilvánosságra. Az 1990-es években indult egy nemzetközi összefogás abból a célból, hogy a korábbi kísérleteket értékeljük, és a kellően jól dokumentált, valamint kielégítő pontossággal elvégzett kísérletek eredményeit a jövőben várható felhasználásuk érdekében megőrizzük. Öröndetes, hogy itt már nyoma sincs a korábbi titkolódzásnak. A tapasztalat azt mutatta, hogy a kísérleteknek egy jelentős részéről dokumentációs vagy minőségi kifogások miatt le kell mondani. Körülbelül 250 kísérleti program ütötte meg a kívánt szintet, és folyamatban van eredményeik értékelése. A programok zöme az Egyesült Államokban, Franciaországban, Japánban, Nagy-Britanniában, Oroszországban és Magyarországon történt. Mi magyarok az 1972 és 1990 között a KFKI-ban működő ZR-6 kritikus rendszeren nemzetközi keretek között végrehajtott kísérleti programra való tekintettel kaptunk meghívást ebbe a munkába. Talán nem érdektelen a magyar olvasó számára, hogy a többiekkel összehasonlítva kiderült, hogy ez a mérési program a többi országok programjai közül mind az eredmények minőségét, mind a megvizsgált reaktorkonfigurációk számát tekintve kiemelkedő.

Egyéb feladatok

Az eddigiekben áttekintettük az atomerőművek által igényelt mag- és reaktorfizikai feladatokat. Ezek természetesen csak a feladatok egy részét jelentik. Befejezésül még kettőt említünk meg, amelyek mindegyikéről egy-egy hasonló cikket lehetne írni.

- A reaktor kielégítő hűtése a reaktorbiztonság legkritikusabb feltétele. Amikor egy reaktort megterveznek, először a hűtést optimalizálják, és csak ezt követheti a reaktorfizikai tervezés. Az itt felhasznált alaptudomány az áramlás- és hőtan speciális ága, a termohidraulika. Az atomerőmű teljesítményének fent említett biztonságos felső korlátját elsősorban termohidraulikai elemzéssel lehet meghatározni. A reaktorfizikához hasonlóan szükség van egy validált termohidraulikai számítógépi programrendszerre is, amellyel igazolni lehet, hogy a reaktor mind normálüzemben, mind baleseti körülmények között eleget tesz a biztonsági követelményeknek. E programok validálásához szintén modellkísérleteket kellett végezni. Ezek bonyolultsága és költségei felülmúlták a reaktorfizikai kísérletekét. A termohidraulika jelentős részben már a műszaki tudományok területére esik. Mindenesetre a reaktorfizikai és a termohidraulikai számítási modell csak kompromisszumok árán választható szét egymástól, hiszen bizonyos problémák tárgyalásához (például egyes balesetek elemzéséhez) csatolt reaktorfizikai-termohidraulikai programra van szükség.

- A reaktor üzemének a biztonságát egyértelműen minősíti a reaktorban dolgozó személyzetet és a környező lakosságot érő sugárzás dózisa. Az ezzel foglalkozó sugárvédelem tudománya a fizika és a biológia határterületére esik. Sajnos – helyhiány miatt – az itt felmerülő problémák áttekintésétől is le kellett mondanunk.

FIZIKA ÉS A MINDENNAPI ÉLET

Jéki László
KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest

Mit köszönhetünk a fizikának a mindennapokban? A tömör és nem is nagyon túlzó válasz az lehetne, hogy életünk alapvetően más lenne, ha nem használhatnánk a fizikai felismerésekre alapozott eszközöket, módszereket. A részletes érdemi válasz, a fizikatörténet egészének áttekintése viszont köteteket töltene meg. Marad a közbenső megoldás, csak a XX. század fizikai felfedezéseinek hatásaiból mutatunk be példákat, a teljességre törekvés nélkül. Választásunk mellett szól, hogy a XX. századot joggal szokták a fizika századának nevezni. Csak itt emlékeztünk rá, a példánknál már nem térünk ki arra, hogy milyen szerepet játszottak más tudományok, a műszaki fejlesztés abban, míg egy fizikai törvényre alapozva új eszköz született, terjedt el. Természetes, hogy az eszközzé formálásban döntő volt a mérnöki tudományok szerepe, és esetenként az eredmény elválaszthatatlan a matematika, a kémia és más tudományok közrehatásától. Egyetemista korunkban azzal bosszantattuk a kémia szakos hallgató-

nőket, hogy nem az övük az elemek periódusos rendszere, mert atomfizika nélkül nem érhető meg a felépítése. Az ilyen vitákat itt elkerüljük, amelyek különben „gyerekesnek” tekinthetők.

Új eszközök és eljárások úgy is születtek, hogy a műszaki csúcsteljesítménynek a fizikai kísérletek voltak a „megrendelői”, ez is a XX. század újdonsága volt. Elegendő itt a részecskefizikai kutatásokat szolgáló gyorsítók és detektorok kapcsán felmerülő igényekre (mágneses tér, vákuum, adatgyűjtés és feldolgozás stb.) vagy az űrkutatás különleges követelményeire emlékeztetni. A NASA amerikai űrügynökség közel 30 éve minden évben kiadványt jelentet meg a legújabbban „földre hozott” kutatás-fejlesztési eredményekről. Néhány példa a 2002-es kötetből: szívátültetéskor használható pumpa, csontritkulást mérő műszer, levegő- és víztisztító berendezések, új számítógépes eljárások és szoftverek, megnövelt hatásfokú napelemek, környezetbarát légyirtó szer.