

AZ ATOMERŐMŰVEK MŰKÖDÉSÉRŐL EGYSZERŰEN, TÍPUSAIK ÉS JÖVŐJÜK – 1. RÉSZ

Király Márton – MTA Energiatudományi Kutatóközpont
Radnóti Katalin – ELTE TTK Fizikai Intézet

Az 1960-as évektől az atomerőművek jelentős szerephez jutottak a villamosenergia-termelésben. Az atomerőművek által termelt villamos energia – amely a világban termelt villamos energia 11%-át adja – jelenleg egymilliárd emberhez jut el. A világ több mint harminc országában található atomerőművek, főleg a fejlett gazdaságú (OECD) országokban. Ez összesen 447 atomerőművi blokkot jelent, 389 gigawatt erőművi kapacitással, amely az utolsó évtizedben nem változott jelentősen. Az 1970-es években épített erőművek élettartamának közelgő vége, az energia-ellátás biztonságának növekvő fontossága, valamint a globális klímaváltozás kockázata megújították a közgondolkodást, és újabb nukleáris beruházások indultak. Ugyanakkor az atomenergia megítélése gyorsan változik. A Fukusimában történt baleset hírére a közvélemény és néhány ország ismét elfordult az atomenergia felhasználásának lehetőségétől [1]. A hazánkban előállított villamos energia mintegy 50%-a származik atomenergiából, amelyről országunk az elkövetkező évtizedekben sem szándékozik lemondani. A Pakson épített erőművek üzemideje a végéhez közeledik, meghosszabbításuk folyamatban van, kiváltásukhoz a meglévő kapacitások bővítésére van szükség [2, 3].

Az atommaghasadás 1938-as felfedezése után a kor nagyhatalmai (Franciaország, Egyesült Királyság, Németország, Egyesült Államok, Szovjetunió) felismerték, hogy ez a fizikai folyamat lehetőséget adhat katonai célú alkalmazására. Ezzel párhuzamosan a tudó-

sok azon dolgoztak, hogy a maghasadás során felszabaduló energiát békés célokra is fel lehessen használni. Ezeket a törekvéseket siker koronázta, és az 1960-as évektől több atomerőmű-típust fejlesztettek ki, amelyek kereskedelmi forgalomba kerülhettek.

Jelenleg a legnagyobb kihívást a jövő lehetséges atomerőműveinek – az úgynevezett negyedik generációs elképzelések – megvalósítása, tenyésztő és gyorsreaktorok tervezése és megépítése jelenti. Ezek alapvetően átalakíthatják az atomenergiához fűződő viszonyunkat.

Írásunkat elsősorban fizikatanárok figyelmébe ajánljuk, hogy megfelelő ismereteket tudjanak közvetíteni tanítványaik felé a napi politikában ezzel kapcsolatban felmerülő kérdésekről, és tisztába kerüljenek az atomenergia jelenével és lehetséges jövőjével. A szöveg egyéni tanulói feldolgozásra is alkalmas lehet. Három részes írásunk első részében az atomenergia előállításának fizikai alapjairól és felfedezésük főbb lépéseiről adunk áttekintést. A történeti utalásokhoz eredeti írásokból vett részleteket is idéztünk, amelyek az interneten is megtalálhatók. Ezek elérhetőségét is közöljük, hogy a tanárok érdeklődő tanítványaik kezébe tudják adni az eredeti szöveget, amelyek jellemzően nem hosszúak, jelezvén, hogy egy korszakalkotó felfedezés leírása nem egy esetben milyen röviden, tömören is megfogalmazható. Ezek az idegen nyelvű, elsősorban angol, vagy a maghasadás felfedezése esetében német szövegek a diákok számára a fizika mellett a nyelvi gyakorlás szerepét is betölthetik. A második és a harmadik részben a jelenleg működő és a tervezés alatt álló atomerőmű-típusokról adunk rövid ismertetést.

A jelenleg energetikai céllal működő atomerőművek esetében a maghasadás és a szabályozott láncreakció azok az alapvető magfizikai folyamatok, amelyek energiatermelés (valójában energia-átalakítás) céljára felhasználhatók.

A maghasadás

A maghasadás felfedezése *Enrico Fermi* (1901–1954) kísérleteivel kezdődött. Rendkívül módszeresen járt el, amikor neutronokkal különféle anyagokat kezdett bombázni, végigmenve az egész periódusos rendszeren. Fermi első cikke kísérleteiről 1934. április 14-én jelent meg. Ebben 23 olyan elemről számolt be, amelyet sikerült felaktiválnia, és mindegyik aktivációs termék felezési idejét is meghatározta. Legfontosabb megállapítása az volt, hogy ezek a mesterséges radioaktív izotópok kivétel nélkül β^- sugárzók [4, 5].



Király Márton a BME-n végzett vegyészmérnök-ként. Munkahelye az MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratórium. Kutatási területe a fűtőelem-pálca-burkolatok mechanikai vizsgálata, amelyből a BME Nukleáris Technikai Intézetében készíti PhD dolgozatát. Publikációi az előbbi területen kívül kiterjednek a nukleáris energia történetére és a témával kapcsolatos ismeretterjesztésre.



Radnóti Katalin az ELTE-n végzett kémiafizika szakos tanárként. A budapesti Kölcsey Ferenc Gimnáziumban nyolc éven keresztül tanított. Jelenleg az ELTE Fizikai Intézetében főiskolai tanár. Kutatási területe a fizika és a természettudományok tanításának módszertana. Publikációs tevékenysége is e témához kapcsolódik, tanári segédletek, tanulmányok, könyvek, könyvfejezetek. A *Nukleon*, a Magyar Nukleáris Társaság internetes folyóirata főszerkesztője.

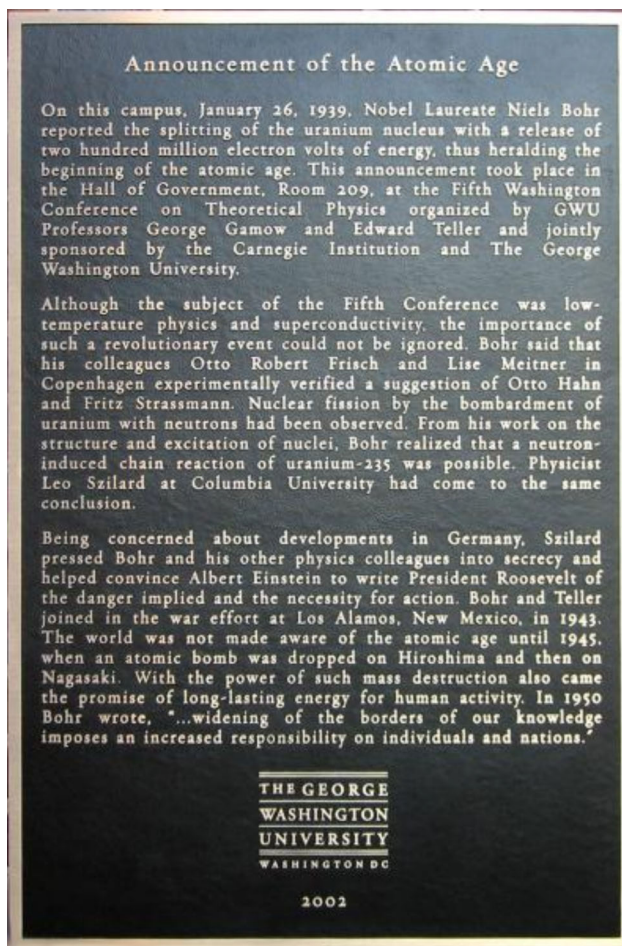
A maghasadás gondolata először 1934-ben jelent meg. *Ida Noddack-Tacke* német vegyész (1896–1978, a rénum elem felfedezője) Fermi kísérleteire reflektálva 1934-ben írt cikkében felvetett egy másik magátalakulási lehetőséget: „... feltételezhető, hogy ha neutronokat használunk magátalakítás céljára, valami teljesen új típusú magreakció megy végbe, (...) elképzelhető, hogy az atommag több nagy töredékre hasad szét, amelyek természetesen ismert elemek izotópjai lennének, de egyáltalán nem a besugárzott elem szomszédságában” [6]. Akkor ezt – mint abszurd feltevést – elvetették.

1938-ban *Irène Joliot-Curie* (1897–1956) laboratóriumából érkeztek olyan hírek, hogy az urán neutronnal történő besugárzásakor nem csak magasabb, hanem alacsonyabb rendszámú elemek is keletkeznek. A kapott elemeknél lantánra és aktíniumra gyanakodtak. (A lantán a báriumhasadvány bomlásterméke.) Fermihez hasonlóan tehát a Joliot-Curie házaspár is létrehozott mesterséges maghasadást, de a jelenségre – a kísérleti evidencia ellenére – teljesen más magyarázatot adtak. Szerintük aktínium keletkezik, azonban a radioaktivitás a lantánra utalt, amely a kísérlet előtt nem volt a mintában. Így Joliot-Curie-ék egy hasadványt fedeztek fel, de szinte szándékosan félreértelmezték a kísérletek eredményeit, számukra annyira hihetetlenek voltak a helyes következtetések. Átmenetileg volt olyan munkahipotézisük, hogy az uránmag elhasad, de később eltávolodtak ettől a gondolattól, és visszatértek a transzurán modellhez.

Ebben az időben *Otto Hahn* és *Lise Meitner* a Berlin-Dahlemben lévő Kaiser Wilhelm Institut für Chemie-ben (Vilmos Császár Kémiai Intézet) dolgozott. 1935-ben csatlakozott hozzájuk *Fritz Strassmann*. Ők hárman határozták el, hogy nagy körültekintéssel és alapos előkészítéssel megismétlik a római (Fermi) és a párizsi csoportok (Joliot-Curie) munkáját, hogy transzuránokat állítsanak elő, és felderítsék ezen anyagok tulajdonságait. Írásuk *Urán neutronnal való besugárzásakor keletkező alkáliföldfémek létezéséről* címmel 1939. január 6-án jelent meg a *Die Naturwissenschaften* című folyóiratban, de cikkükben még nem használták a hasadás kifejezést. A dolgozat meglehetősen hosszan mutatja be a kémiai analízis módszereit, amely az egyes termékek radioaktivitásán alapul, a befejező részben pedig kijelentik: „...mint vegyészek, a röviden bemutatott kísérletek alapján, új nevekkkel kell ellátnunk a fenti ábrán bemutatott sémát, ugyanis a Ra, Ac, Th helyett Ba, La, Ce írandó ... még nem tudjuk pontosan értelmezni eredményeinket” [7].

A január 28-i cikkükben már teljes bizonyossággal leszögezik a hasadási termékek létét. Kísérleteikben az urán egy másik hasadványát, a kripton (a bárium kiegészítő hasadványa a kripton, a rendszámokat tekintve $56 + 36 = 92$), illetve annak a bomlástermékeit, a rubídiumot, a stronciumot és az itriumot vizsgálták.

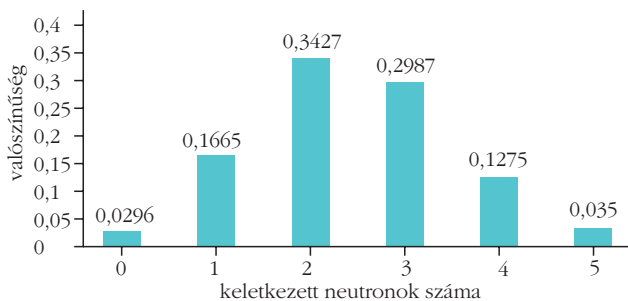
Az akkor már Svédországban élő *Lise Meitner* folyamatosan értesült a berlini laboratórium munkájáról. Hahn a készülő dolgozatuk kéziratát is elküldte



1. ábra. Emléktábla a George Washington Egyetem 209-es számú előadóterme előtt.

neki. Meitner és unokaöccse *Otto Robert Frisch* a cseppmodell, egy félempirikus atommagmodell felhasználásával megmutatták, hogy a maghasadás ténylegesen végbemehet, sőt körülbelül 200 MeV energia szabadulhat fel. Ők vezették be a maghasadás fogalmát is [8, 9].

A hasadványok minden esetben *radioaktívak* voltak. Ennek oka az, hogy a hasadás során keletkező magokban a proton-neutron arány nem nagyon változik meg. A periódusos rendszer elején található elemek atommagjaiban, a könnyű atommagokban közel azonos a protonok és a neutronok száma, míg az egyre nagyobb rendszámú, az atommagjukban több protonot tartalmazó atommagok esetében egyre nő a neutronok aránya. Az oxigén legstabilabb izotópjában 8 proton és 8 neutron található, a 26-os rendszámú vas leggyakoribb izotópjának tömegszáma 56, a magban 30 neutron van, arányuk 53,5%, míg a 92-es rendszámú urán legstabilabb 238-as tömegszámú izotópjában már 146 neutron van, ami a nukleonok 61%-a. A könnyebb elemekben a neutronok aránya alacsonyabb, mint az uránban, ezért amikor uránból maghasadással könnyebb elemek keletkeznek, akkor a neutronok feleslegben lesznek. Ez a felesleg egyrészt kibocsátódik, másrészt pedig radioaktív bomlások révén közeledik az egyensúlyi állapot felé. A hasadás



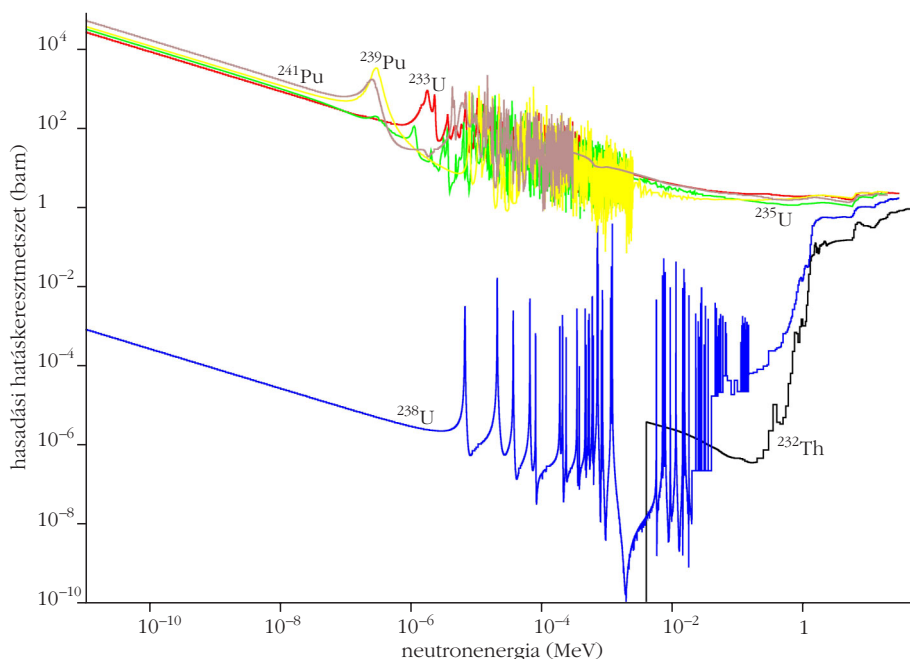
2. ábra. A hasadási neutronok számának eloszlása [10].

során átlagosan 2,4 darab neutron szabadul fel, de a hasadványokban még így is bőven marad neutronfelesleg. Ezért ezek a magok mind β -bomlással fogják helyreállítani a megfelelő proton-neutron arányt, amelyet γ -sugárzás követ.

A nukleáris láncreakció

A neutronokkal működő láncreakció ötlete Szilárd Leótól (1898–1964) származik. 1933-ban elsőként ő vetette fel, hogy ha találnának egy olyan izotópot, amelynek atommagjából egy neutron befogásának hatására egynél több neutron keletkezne, akkor ezt a folyamatot nukleáris láncreakció előidézésére lehetne használni. A láncreakció kifejezést Szilárd egyes kémiai folyamatokra alkalmazott szakkifejezésből kölcsönözte. 1934. március 12-én szabadalmat jelentett be a neutronokkal kiváltott láncreakcióra. A szabadalmi leírásban a neutronokat megduplálni képes elem lehetőségeként Szilárd a berilliumot, a brómot és az uránt javasolta. A Brit Admirális a szabadalmat 440023 szám alatt megadta, és Szilárd kérésére titkosí-

3. ábra. Egyes izotópok hasadási hatáskeresztmetszetének változása a neutron energiájának függvényében. Forrás: <https://universe-review.ca/114-03-crosection.png>



totta. Ezután Szilárd szabadalmához több kiegészítést, illetve pontosítást nyújtott be. Megemlítette, hogy az önfenntartó láncreakció csak egy kritikus tömeg felett lehetséges, ugyanis az adott térfogatban keletkező neutronok számának felül kell múlnia a felületen át kiszökő neutronok számát, ami csak egy minimális méret felett lehetséges. 1938 szeptemberében Szilárd az USA-ba költözött.

A dán Niels Bohr (1885–1962) Otto Frisch révén (aki nála dolgozott Koppenhágában) folyamatosan értesült Hahn és Meitner maghasadással kapcsolatos kísérleteiről és eredményeiről. Bohr 1939. január 16-án érkezett New Yorkba. Utazása célja az volt, hogy részt vegyen egy elméleti fizikai konferencián Washingtonban, amelynek témája az alacsony hőmérsékletek fizikája volt. A konferenciát George Gamow (1904–1968) és Teller Ede (1908–2003) szervezte január 26. és 28. között. A washingtoni konferencia előzetes programját az elnöklő Gamow megváltoztatta, és Bohrnak adta meg a szót, ezzel a maghasadás került az érdeklődés középpontjába. Az előadás emlékére a George Washington Egyetem 209-es számú előadótermében emléktáblát állítottak (1. ábra).

A konferencia befejezésének napján több laboratórium hozzálátott a maghasadás megerősítéséhez, és azt is sikerült kimutatniuk, hogy közben neutronok – amelyeket Szilárd Leó korábban megjósolt – szabadulnak fel. Egy hasadásban a keletkező neutronok száma 0 és 5 között változhat, átlagosan 2,4 szabadul föl. A keletkező neutronok számának valószínűségi eloszlásfüggvénye 235 tömegszámú uránizotóp esetében a 2. ábrán látható [10].

Bohr és Wheeler megállapították, hogy a természetes uránban a kis mennyiségben (0,71%-ban) előforduló 235 tömegszámú izotóp sokkal nagyobb valószínűséggel hasad, mint a 238 tömegszámú (99,28%-ot kitevő) izotóp. A 238-as tömegszámú izotóp leginkább nagy energiájú neutronok hatására hasad, viszont a 235-ös tömegszámú kis energiájúak hatására is, ezért jó nukleáris üzemanyag (3. ábra).

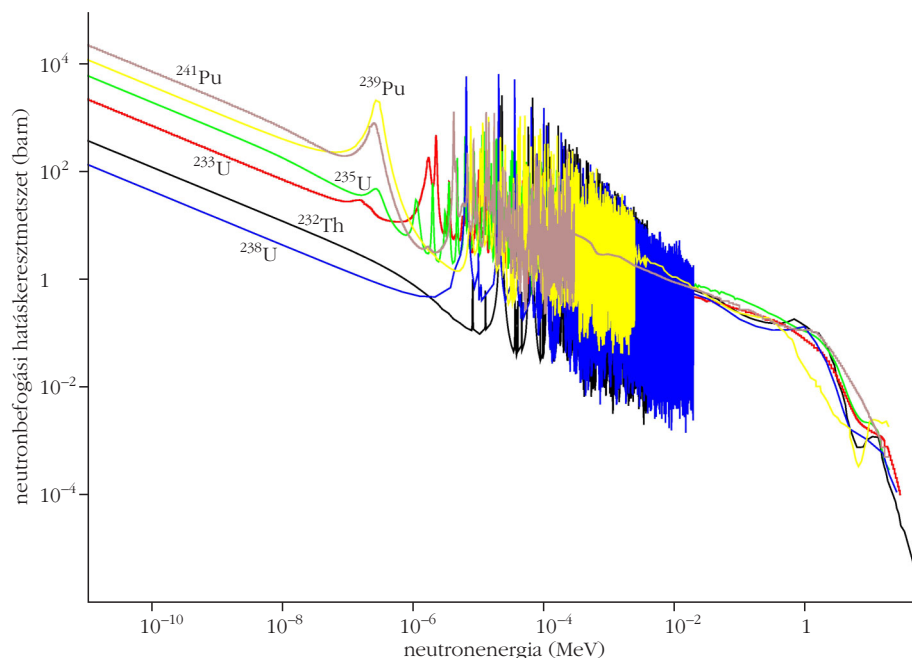
A reaktorfizikában a σ hatáskeresztmetszet segítségével fejezik ki annak valószínűségét, hogy az egyes atommagok különböző magreakciókban (neutron- vagy protonbefogás, hasadás, rugalmas vagy rugalmatlan szóródás stb.) vegyenek részt. Ha az atommagot a klasszikus mechanika fogalmai szerint képzelnénk el, akkor σ -t tekinthetnénk az atommag keresztmetszetének, az atommagot körülvevő magerőternek. A valóságban azonban az atommag valós

méretének semmi köze ezen értékhez(!), mivel bonyolult kvantummechanikai effektusok is fellépnek, amelyek eldöntik, hogy valóban bekövetkezik-e az adott reakció. Mindezeket figyelembe véve adódik a σ hatáskeresztmetszet, amelyet ténylegesen számítással és empirikusan határoznak meg. Egy felület dimenziójú mennyiségről van szó, amely például a neutronfluxus (egy adott felületen időegységenként áthaladó neutronok száma) leárnnyékolásának feleltethető meg. Mivel az atommagok sugara 10^{-12} cm (10^{-14} m) nagyságrendű, a hatáskeresztmetszet egysége a barn, ami 10^{-24} cm². A szokásos felületegységek helyett az SI rendszer a magfizikában és a reaktorfizikában – kivételesen – megengedi ezt a már régóta használatos egységet. A hatáskeresztmetszetek additívak, a különböző típusú magreakciók együttes hatáskeresztmetszete a rész-hatáskeresztmetszetek összege. Például, a neutronabszorpciós hatáskeresztmetszet a befogási és a hasadási hatáskeresztmetszet összege. Az egyes hatáskeresztmetszetek függenek továbbá a résztvevő partnerek (például mozgási) energiájától is.

A hatáskeresztmetszet-energia függvények esetében megfigyelhető keskeny csúcsokat rezonanciáknak nevezük, itt a hatáskeresztmetszet nagyon szűk energiatartományon belül nagyon nagy értékre ugrik fel. Ennek oka az, hogy az ilyen energiájú neutronok az összetett mag valamelyik energiaállapotát gerjesztik, ezért könnyen elnyelődnek [11]. Az atommag esetében mind a protonok, mind pedig a neutronok csak meghatározott energiaszinteken lehetnek, hasonlóan az elektronburok elektronjaihoz. Elektronoknál ennek eredménye az atomok vonalas színképe, jelen esetben pedig a neutronbefogási rezonanciák.

Nézzünk meg néhány ilyen függvényt! Az atommagoknak van egy olyan tulajdonságuk, hogy a közepes (néhány keV) energiájú neutronokat befogják (4. ábra). Ez a jelenség a 238-as urán esetén az egyik legnagyobb mértékű.

Földünkön egyetlen olyan a természetben előforduló izotóp található, amely lassú neutron hatására könnyen képes elhasadni és új neutronokat termelni, ez a 235-ös tömegszámú uránizotóp. Emellett az atomreaktorokban három olyan izotóp állítható elő neutronbefogással, amelyek hasonló céllal felhasználhatók, a plutónium 239-es és 241-es izotópja az urán 238-as (túlsúlyban lévő) izotópjából, valamint az urán 233-as tömegszámú izotópja, amely a thórium 232-es izotópjából keletkezik. Ezekről a későbbiekben lesz szó.



4. ábra. Egyes izotópok neutronbefogási hatáskeresztmetszetének változása a neutron energiájának függvényében. A középső tartományban látszanak a rezonanciák. Forrás: http://www.nuclear-power.net/wp-content/uploads/2014/11/capture_cross_section.jpg

Az első önfenntartó nukleáris lánreakciót megvalósító reaktort 1942 végére építették meg Chicagóban, természetes uránt (0,71% ²³⁵U) és grafitot (mint neutronlassító közeget, amelyről később lesz szó) használva. Az atomreaktorokban a lánreakció szabályozott formában megy végbe, ezért energiatermelésre használható.

Az atomreaktorokban a lánreakciót egy állandó szinten kell tartani és szabályozni kell a stabil működéshez, valamint azt is meg kell oldani, hogy szükség esetén a lánreakció azonnal leállítható legyen. Egy hasadás során több neutron keletkezik, a lánreakció fenntartásához viszont csak 1-re van szükség, ezért a felesleget – amely a rendszerből kiszökő neutronok után is marad – el kell tüntetni. A felesleges neutronok elnyelésével lehet csökkenteni a hasadások számát, és így szabályozni a lánreakciót. A fogyó és keletkező neutronok arányát jellemző számot sokszorozási tényezőnek nevezzük. Minden reaktorban vannak neutronelnyelő anyagok, ezek egyike a szabályozó rúd, illetve rudak. Az aktív zónába belógó rudak helyzetének változtatásával módosítják a zónában lévő neutronelnyelő anyagok mennyiségét. Amikor a szabályozó rudat betolják a reaktorba, akkor a sokszorozási tényezőt csökkentik, amikor pedig kihúzzák, akkor a sokszorozási tényezőt növelik. Így lehet beindítani vagy leállítani a reaktort, illetve változtatni teljesítményét. A maghasadás rendkívül gyors folyamat, 10^{-8} másodperc alatt végbemegy, ha csak így keletkeznének neutronok, akkor a lánreakciót nem lehetne szabályozni. A pontos szabályozását a késő neutronok teszik lehetővé, amelyek nem közvetlenül a maghasadásból, hanem később, az egyes hasadási termékek (hasadványok) bomlása során keletkeznek.

Ha a reaktorban a szabályozott láncreakció állandó teljesítményen megy végbe, akkor a reaktor *kritikus* állapotban van. Itt emelnénk ki a szaknyelv és a köznyelv közötti jelentős különbséget. A köznyelvben a „kritikus” szó valami veszélyes helyzetet jelöl: „a beteg állapota kritikusra fordult”, vagy „a földrengés után kritikus helyzet alakult ki az olasz városban”. Ugyanakkor a szakmai nyelv által használt „kritikus állapotnak” semmi köze a veszélyhez: amikor a reaktor „kritikus” állapotban van, akkor szép nyugodtan, egyenletes teljesítménnyel üzemel. A reaktor folyamatos energiatermelés közben végig kritikus állapotban van. Normál üzemállapotban is lehet időlegesen a sokszorozási tényező nagyobb, mint 1. Arra azonban ügyelni kell, hogy a késő neutronok nélkül (csak a prompt neutronokkal) sohase legyen 1-nél nagyobb a sokszorozási tényező, azaz a reaktor sohase legyen „prompt-kritikus”. Ha a sokszorozási tényező 1 alá kerül, akkor csökken a teljesítmény, végül leáll a láncreakció, ha pedig a késő neutronok nélkül is 1 fölé emelkedik, a reaktor teljesítménye ugrásszerűen megnő, ezt nevezik megszaladásnak.

A Hirosimára 1945-ben ledobott atombomba szinte tiszta 235-ös tömegszámú uránizotópot tartalmazott, míg a Nagaszakira ledobott bomba elkészítésénél a plutónium 239-es izotópját használták. Az atombombában a láncreakciót a hasadás során keletkező prompt gyors neutronok tartják fenn. A láncreakció ezen formája nem szabályozható, vagyis robbanáshoz vezet!

A reaktorokban a teljesítmény szabályozása a szabályozórudak mellett úgy is történhet, hogy a hűtővízbe neutronelnyelésre képes anyagot kevernek. Például a bór 10-es tömegszámú izotópja kiváló neutronelnyelő, de vannak mások is, mint például a kadmium, vagy a legújabban alkalmazott gadolínium, a diszprózium és az erbium. Vízhűtéses reaktorokban (Paks-on is) gyakran bizonyos mennyiségű bórt oldott állapotban, bórsav formájában is bevisznek a hűtővízbe. Ennek koncentrációját változtatva ellensúlyozni lehet a sokszorozási tényező változásait, és így lehetséges a reaktor folyamatosan kritikus állapotban tartani a hasadóanyag fogyása mellett is. Stationer kritikus állapotban az egy hasadásból származó neutronok átlagosan/pontosan egy új hasadást hoznak létre, a sokszorozási tényező értéke 1, az időegység alatti hasadások száma és ezzel a termelt energia mennyisége is állandó.

A láncreakció fenntartása azt jelenti, hogy minden hasadásra jusson még egy hasadás. Egy hasadás során keletkező neutronok közül egynek újabb hasadást kell kiváltania, vagyis nem nyelődhet el a szerkezeti anyagokban, a szabályozó rudakban, a hűtőközegben, a neutronlassító közegben, vagy magában az üzemanyagban, illetve nem szökhet ki a rendszerből. Az urán 235-ös tömegszámú, neutronok hatására hasadó izotópja csak 0,71%-a természetes uránnak, a többi a 238-as tömegszámú uránizotóp teszi ki, amely neutronok hatására gyakorlatilag nem hasad. A természetes uránérchen azért nem jön létre láncreakció, mert a kis mennyiségű ²³⁵U hasadása során kelet-

kező gyorsneutronok a nagy tömegben lévő ²³⁸U-ban a kis hatáskeresztmetszet miatt kevés hasadást okoznak, a lelassult neutronokat pedig a 238-as izotóp hasadás nélkül befogja, amely megállítja a folyamatot. Ezek miatt nem könnyű hasadási láncreakciót létrehozni, keményen meg kell küzdeni, hogy a sokszorozási tényező elérje az egyet.

A hasadási láncreakció elérésére és fenntartására a reaktorokban két lehetőség kínálkozik:

1. A hasadás során keletkező gyors neutronokat lelassítják, ezáltal több százszorosára nő a hasadási reakció esélye (hatáskeresztmetszete). Ehhez neutronlassító anyagokat, úgynevezett moderátorokat alkalmaznak. Ezen anyagok atommagjaival ütközve a neutron lelassul, a környezet hőmérsékletére jellemző energiája lesz ($0,025 \text{ eV} = 4 \cdot 10^{-21} \text{ J}$), más néven termalizálódik. Az ilyen elven működő reaktorokat termikus reaktornak nevezik. A moderátor azonban nemcsak lassítja a neutronokat, de sajnos el is nyel belőle valamennyit, a neutronelnyelés mértékétől függően az urán 235-ös izotópját a kezdeti 0,71%-ról 2-5%-ra kell dúsítani, hogy fenntartható legyen a láncreakció. Az urán 238-as izotópjának a 4. ábrán látható neutronelnyelési rezonanciáinak elkerülésére inhomogén reaktort kell építeni, vagyis a moderátort és az üzemanyagot nem összekeverve, hanem váltakozva kell elhelyezni. Így az üzemanyagból kilépő neutron a moderátorban megfelelően lelassul, majd mire újra üzemanyaggal találkozik, addigra termalizálódik, és nagy valószínűséggel elkerüli a rezonanciabefogást. Erről cikkünk második részében lesz szó.

2. A másik lehetőség, hogy nem lassítják a neutronokat, hanem az előbbihez képest sokkal nagyobb mértékben dúsítják az uránt a 235-ös izotópban és nagyobb mennyiséget halmoznak föl a reaktorban, hogy kompenzálják a kis hatáskeresztmetszetet. A ²³⁸U neutronelnyelése ebben az esetben kifejezetten kívánatos is, mivel abból plutónium keletkezik, vagyis a reaktor működése közben új hasadóanyagot termel. Ezt a folyamatot nevezik tenyésztésnek és a moderálatlan neutronokkal működő reaktorokat gyorsreaktornak hívják. Ezekről cikkünk harmadik részében lesz szó.

Írásunkban röviden áttekintettük a nukleáris reaktorok működésének alapelveit, illetve a maghasadás felfedezését. A következő részben a termikus reaktorok főbb típusait ismertetjük.

Irodalom

1. Aszódi Attila, Boros Ildikó: Az atomenergia jövője Fukushima után. *Nukleon* V/2 (2012) 105; http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_5_2_105_Aszodi.pdf
2. Hózer Zoltán, Pázmándi Tamás: Új blokkok a paksi atomerőműben. *Nukleon* VII/1 (2014) 152; http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_7_1_152_Hozer.pdf
3. Hózer Zoltán: Az új paksi reaktorok üzemanyaga. *Fizikai Szemle* 65/12 (2015) 417–420; <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1512/HozerZ.pdf>
4. E. Fermi: Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92. *Nature* 133 (16 June 1934) 898–899; absztrakt: <http://www.nature.com/nature/journal/v133/n3372/pdf/133898a0.pdf>
5. L. Fermi: *Atom a családban*. Gondolat Kiadó, Budapest, 1966.

6. I. Noddack: On Element 93. *Zeitschrift für Angewandte Chemie* 47 (September, 1934) 653; angolul: <http://www.chemteam.info/Chem-History/Noddack-1934.html>
7. O. Hahn, F. Strassmann: Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle. *Die Naturwissenschaften* 27 (Januar 1939) 11–15; [http://www.chemteam.info/Chem-History/Hahn-fission-1939a/Hahn-fission-1939a.html](http://www.chemteam.info/Chem-History/Hahn-fission-1939a-German/Hahn-1939a-fission-German.pdf)
8. L. Meitner, O. R. Frisch: Disintegration of Uranium by Neutrons: A New Type of Nuclear Reaction. *Nature* 143 (Februar 11, 1939)

- 239–240; http://www.atomicarchive.com/Docs/Begin/Nature_Meitner.shtml
9. Horváth András, Radnóti Katalin: A Becquerel-sugaraktól a chikago-i reaktorig II. *Nukleon* V/3 (2012) 116; http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_5_3_116_HorvathA.pdf
10. Horváth András, Radnóti Katalin: A Becquerel-sugaraktól a chikago-i reaktorig III. *Nukleon* V/4 (2012) 125; http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_5_5_125_Horvath.pdf
11. Sükösd Csaba: *Kísérleti magfizika*. (2014); http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop412A/2011-0064_16_kiserleti_magfizika/index.html

IN MEMORIAM...

CENTENÁRIUMI MEGEMLÉKEZÉSEK 2016 – 3. RÉSZ

Nobel-díjas szovjet-országi fizikusok

Radnai Gyula
ELTE Fizikai Intézet

Tíz szovjet-országi fizikus kapott fizikai Nobel-díjat olyan kutatásokért, amelyeket még a Szovjetunióban végeztek. 1958-ban *Cserenkov* (1904–1990), *Frank* (1908–1990) és *Tamm* (1895–1971) megosztott Nobel-díjat kaptak a Cserenkov-effektus felfedezéséért és helyes magyarázatáért. 1962-ben *Landau* (1908–1968) a kondenzált állapotokra vonatkozó úttörő elméletéért egyedül kapta meg a díjat. 1964-ben *Prohorov* (1916–2002) és *Bászov* (1922–2001) a kvantumelektronika területén végzett munkásságukért kaptak Nobel-díjat, megosztva *Townes* amerikai fizikussal. 1978-ban *Kapica* (1894–1984) az alacsony hőmérsékletű fizikája terén elért eredményeiért kapta meg a Nobel-díj egyik felét, a díj másik felét kapta *Penzias* és *Wilson* amerikai asztrofizikus. 2000-ben *Alfjorov* (1930–) megosztva *Kroemer* német fizikussal a félvezető heterostrukturák kifejlesztéséért kapta a díj egyik felét, a másik felét kapta *Kilby* amerikai fizikus. Végül 2003-ban *Ginzburg* (1916–2009) és *Abrikosov* (1928–), *Leggett* (1938–) angol-amerikai fizikussal megosztva lettek Nobel-díjasok, a szupravezetés és a szuperfolyékonyság területén végzett úttörő munkásságukért. A fenti tíz szovjet-országi fizikus közül ketten születtek 1916-ban, tehát száz évvel ezelőtt, rájuk emlékezünk a következőkben.



Radnai Gyula ny. egyetemi docens, a fizikai tudományok kandidátusa, matematika-fizika tanári szakon végzett 1962-ben. Az ELTE Kísérleti Fizika tanszékén kapcsolódott be a tanárképzésbe, a fizika hazai kultúrtörténetének kutatásába pedig *Simonyi Károly* ösztönzésére fogott a '70-es években. *Physics in Budapest* című – *Kunfalvi Rezsővel* közös – könyve, valamint a *Fizikai Szemlében* és a *Természet Világában* megjelent számos, ma már az interneten is elérhető publikációja hitelesíti ezt a tevékenységét.

A kvantumelektronika atyja a Szovjetunióban: Alekszandr Mihajlovics Prohorov (1916–2002)

Már az is furcsa, hogy Ausztráliában született. Szülei – néhány más orosz családdal együtt – egészen Ausztráliáig menekültek a cári rendőrség és titkosrendőrség zaklatásai elől. Amikor 1912-ben Brisbane-be értek, még csak egy kislányuk volt. Amikor innen sok száz kilométerre északra, a mai Pearamontól nem messze lévő kis településen Szása fiúk 1916-ban megszületett, addigra Szásának már nem egy, hanem három nővére volt. Ezt a vidéket, a főként bevándorolt oroszok lakta kolónia környezetét, az orosz családok „kis Szibériának” nevezték el, hatalmas lakatlan erdősegei miatt. A honvágy hajtotta vissza Prohorovékát Oroszországba – akkor már a Szovjetunióba – 1923-ban, remélve a boldogabb életet. (Az iskola falán, amelyben a kisfiú elkezdte tanulmányait Ausztráliában, ma már márványtábla őrzi a későbbi Nobel-díjas tudós emlékét.)

1934-ben iratkozott be a Leningrádi Egyetem fizika szakára, ahol kvantummechanikából és relativitáselméletből *V. A. Fok* (1898–1974) professzor előadásait hallgatta. Diplomájának 1939-es megszerzése után Moszkvában kezdte meg doktori tanulmányait a Lebegyev Intézetben, *N. D. Papalekszi*¹ (1880–1947) professzor laboratóriumában. Ebben a laborban főleg nagyfrekvenciás elektromos rezgéseltető berendezések fejlesztésével foglalkoztak, nem is nehéz kitalálni, hogy milyen célból.

¹ Ő az a Papalekszi, akinek irányításával készült az a kétkötetes *Fizika* könyv, benne a tragikus sorsú *G. Sz. Gorelik* (1906–1956) által írt jó színvonalú termodinamikával, amelynek magyar fordítása az alapszintű kísérleti fizika történeti szemléletű tárgyalásának egyetemi tankönyve lett 1951-ben Magyarországon.