

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LIX. évfolyam

5. szám

2009. május

SPALLÁCIÓS ÉS FRAGMENTÁCIÓS ATOMMAG-REAKCIÓK

Fenyvesi András, Fényes Tibor
MTA ATOMKI, Debrecen

A spallációs és fragmentációs reakciók kiemelkedő jelentőségűek mind az atommagfizikai alap kutatásban, mind az alkalmazásokban. Az alap kutatásban azért, mert még több ezer atommag vár felfedezésre, és az új izotópok előállításának jelenleg leghatékonyabb módszere a nagyenergiájú nehéz ionokkal létrehozott fragmentáció [1]. A nehéz atommagok spallációja ugyanakkor kitűnő neutronhozamot biztosít széles energiatartományban, ami számos alkalmazásra nyújt lehetőséget az energetika, élettudományok, anyagvizsgálatok, szerkezetkutatások stb. területén.

A következőkben röviden összefoglaljuk a spallációs és fragmentációs reakciók legfőbb jellemzőit. Targyaljuk a reakciótermékek hozameloszlását, a spallációs neutronok sajátosságait (hozam, szögeloszlás, energiaspektrum) és áttekintést adunk néhány fontosabb spallációs neutronforrás jellemzőiről.

Több száz MeV-es könnyű részecskékkel (p , d , α stb.) bombázva atommagokat, jellegzetes reakció játszódik le, amit spallációnak nevezünk. A reakció első fázisában a bombázott atommagban ütközési kaszkád alakul ki, aminek eredményeként neutronok, protonok és (a mezonkeltés küszöbe felett) π -mezonok lépnek ki a magból, a maradék mag meg erősen gerjesztődik. A reakció következő fázisában a gerjesztett magból nukleonok párolognak el.

Kis valószínűséggel atommagok például (${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$) is kilépnek az atommagból. Ez utóbbi folyamatot fragmentációnak nevezzük. Növekvő bombázórészecske-energiánál a fragmentáció valószínűsége nő.

A reakciótermékek hozameloszlása

A rendelkezésre álló kísérleti adatok szisztematikus vizsgálata alapján Rudstam [2] megalkotott egy többparaméteres formulát, ami jó leírást ad a spallációs reakció hatáskeresztmetszetére széles bombázóener-

gia- és céltárgy-atommag tartományban. E szerint egy Z rendszámú és A tömegszámú reakciótermék $\sigma(Z, A)$ individuális hatáskeresztmetszete¹ a következőképpen függ a bombázó részecske E energiájától, valamint a céltárgymag A_t tömegszámától:

$$\sigma(Z, A) \approx F(A_t) f_2(E) \frac{P(E) \times \exp[-P(E) \times (A_t - A)]}{1 - \frac{0,3}{P(E) \times A_t}} \times \exp[-R(A) \times |Z - SA + TA|^n],$$

ahol az $F(A_t)$, $f_2(E)$, $P(E)$, $R(A)$ függvények közelítő alakját az 1. ábra mutatja. A $P(E)$ paraméter csak a bombázó részecske energiájától függ, nem függ a típusától, értéke p , n , d és α -részecskékre ugyanaz. Az állandók numerikus értékei a következők: $n = 1,5$, $S = 0,486$, $T = 0,00038$. A formula $PA_t \geq 1$ -re érvényes.

Példaképpen a 2. ábra bemutatja a ${}^{181}\text{Ta} + 660$ MeV-es proton spallációs reakció individuális hatáskeresztmetszetét – $\sigma(Z, A)$ – görbét a termékek rendszámának (Z) és tömegszámának (A) függvényében. Számos más céltárgy-atommagra is található numerikus adatok Rupp, Fényes [3] közleményében. A nagyenergiájú magreakciók részletesebb tárgyalását lásd például Feshbach összefoglaló munkájában [4], valamint [5]-ben.

A fragmentációs reakciót sematikusan a 3.a ábrán ábrázoltuk. A közbeeső tömegű fragmensek rendszám szerinti hozameloszlását¹ különböző reakciókra a 3.b ábra mutatja.

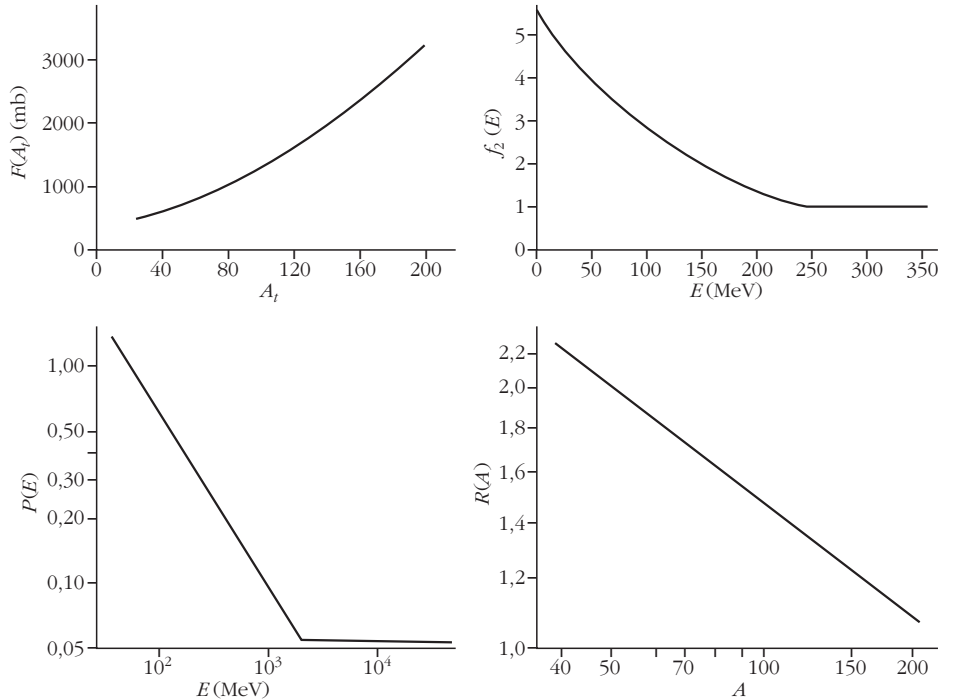
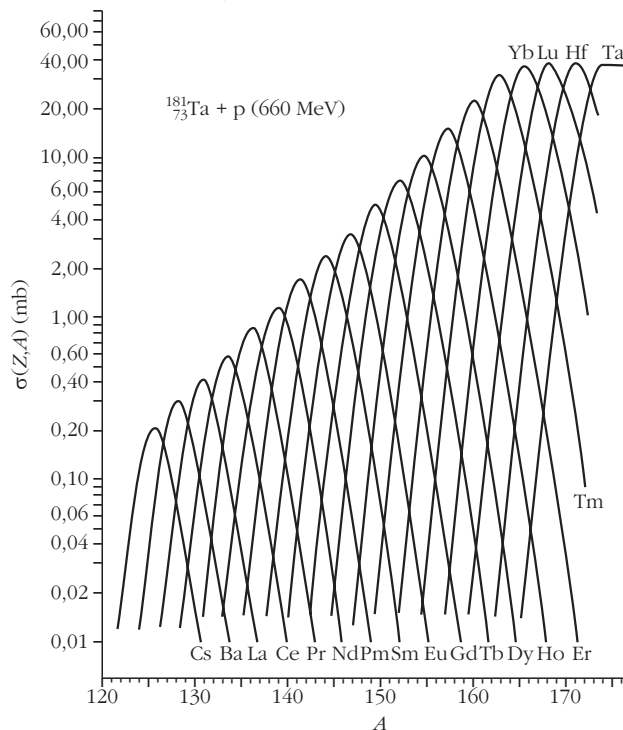
¹ A reakcióhozam (Y) definíció szerint: $Y \equiv \Delta N/N_0$, ahol N_0 a céltárgyra időegység alatt eső bombázó részecskék számát, a ΔN pedig a létrejött magreakciók számát jelöli. A hatáskeresztmetszet $\sigma \equiv \Delta N/(N_0 n_s)$, ahol n_s a felületegységre eső céltárgy-atommagok száma. A σ egysége a barn ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$).

A fragmensek tömegeloszlása a $10 \leq A \leq 40$ tartományban jól leírható az $Y \sim A^{-\tau}$ hatványfüggvénnyel, ahol Y a hozamot, A a fragmens tömegszámát jelöli. A τ kitevő a gerjesztési energia függvénye, értéke 2–3 között van, ha a termikus gerjesztési energia körülbelül 3–9 MeV/nukleon. A rendszám szerinti hozameloszlás (3.b ábra) is elég jól közelíthető a hatványfüggvénnyel.

A közbeeső fragmensek ($3 \leq A \leq 20$) töltéseloszlását a statisztikus modell jól leírja. A részleteket illetően lásd *Karnaukhov* közleményét [6].

Erősen neutrontöbbletes atommagok előállítására kitűnően alkalmasak a fragmentációs (és a bombázó részecske hasadási) reakciók. Ez jól látszik a 4.a és a 4.b ábrán, ahol a nátrium izotópokra vonatkozó hatáskeresztmetszet-, illetve hozamarányok vannak feltüntetve különböző nagyenergiájú reakciókra [7]. A fragmentációs reakciók kiemelt szerepét a stabilitási

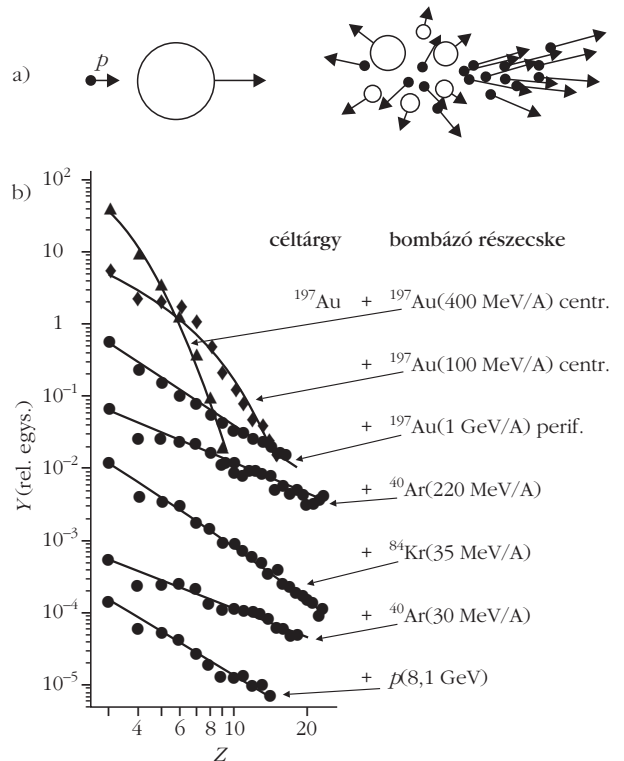
2. ábra. A $^{181}\text{Ta} + 660$ MeV-es proton spallációs reakció individuális hatáskeresztmetszet-görbéi a tömegszám (A) és rendszám (Z) függvényében. Az adatok a Rudstam-formula alapján lettek számolva. Rupp és Fényes [3] alapján.

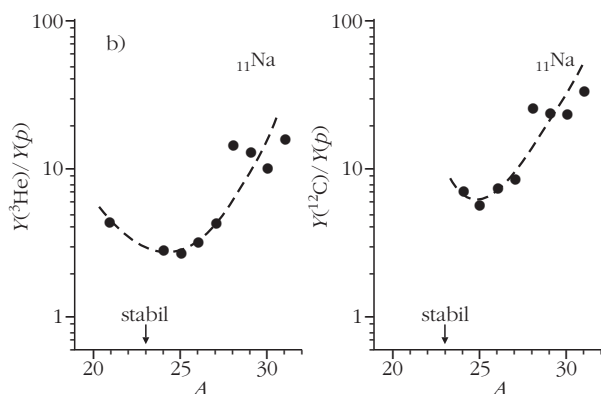
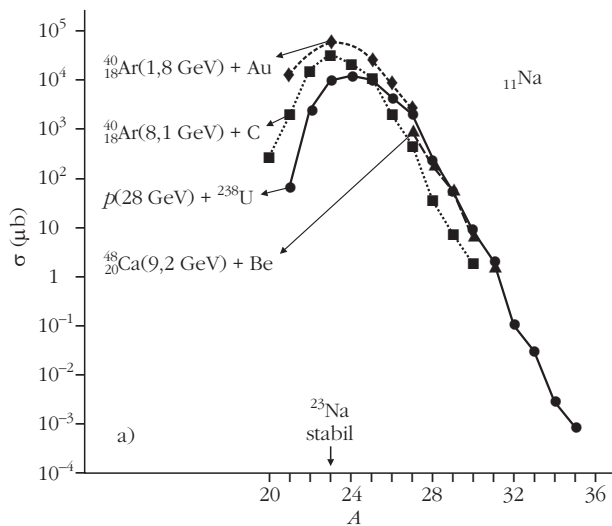


1. ábra. Az $F(A_i)$, $f_2(E)$, $P(E)$ és $R(A)$ paraméterek értékei a spallációs reakció hatáskeresztmetszetét leíró formulában. A a spallációs termék tömegszáma, a többi szimbólum jelentését lásd a szövegben. Rudstam [2] alapján.

sávtól távolieső atommagok előállításában egy korábbi közleményben részletesebben tárgyaltuk [1].

3. ábra. a) Nagyenergiájú proton ütközése nehéz atommaggal. A fragmentációs reakció vázlatos ábrázolása. b) A közbeeső fragmensek ($3 \leq Z \leq 20$) hozameloszlása (Y) a rendszám (Z) függvényében a $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$, $^{197}\text{Au} + ^{40}\text{Ar}$, $^{197}\text{Au} + ^{84}\text{Kr}$ és $^{197}\text{Au} + p$ fragmentációs reakciókra. Karnaukhov [6] alapján.



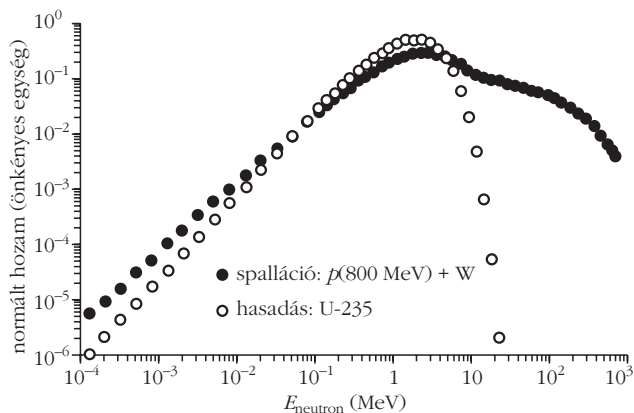
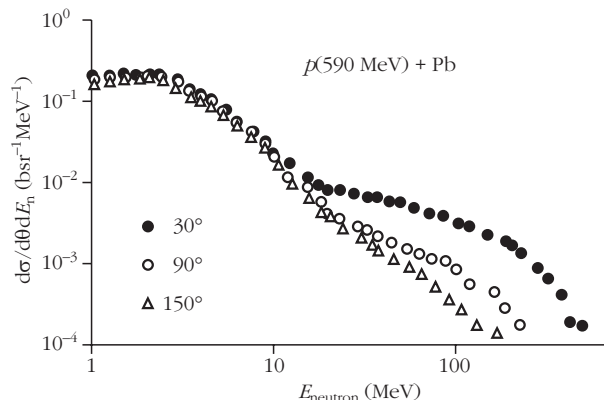


4. ábra. a) Na izotópokhoz vezető fragmentációs reakciók hatáskeresztmetszetei. b) A fragmentációs reakciók $Y(^3\text{He})/Y(p)$, illetve $Y(^{12}\text{C})/Y(p)$ hozamarányai nátrium izotópokra, ha urán céltárgyat 86 MeV/A energiájú ^3He , illetve ^{12}C nyalábokkal és 600 MeV-es protonokkal bombázunk. Bennett és mts. [7] alapján.

Spallációs neutronforrások

A spallációs, illetve fragmentációs reakciók alkalmasak intenzív neutronnyalábok előállítására is. Ezért fontos szerepet játszanak a gyorsítóval üzemeltetett

6. ábra. 590 MeV energiájú protonok által Pb céltárgyban kiváltott spallációs reakció $d\sigma/(d\theta dE_n)$ neutronkibocsátási differenciális hatáskeresztmetszete az E_n neutronenergia függvényében, a bombázónyáláb irányához viszonyított 30° , 90° és 150° szögeknél [8].



5. ábra. Egy spallációs, valamint egy hasadási neutronforrás által kibocsátott neutronok hozamának eloszlása (spektruma) a neutronenergia függvényében. Mindkét spektrum azt adja meg, hogy az összes neutronok hanyadrésze esik egy-egy energiatartományba.

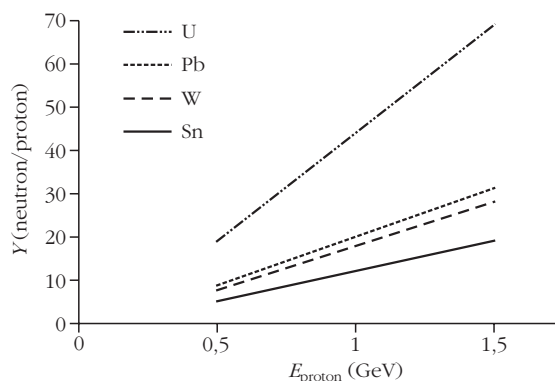
energiasokszorozóban, továbbá a szilárdtestfizikai célokra épített spallációs neutronforrásokban.

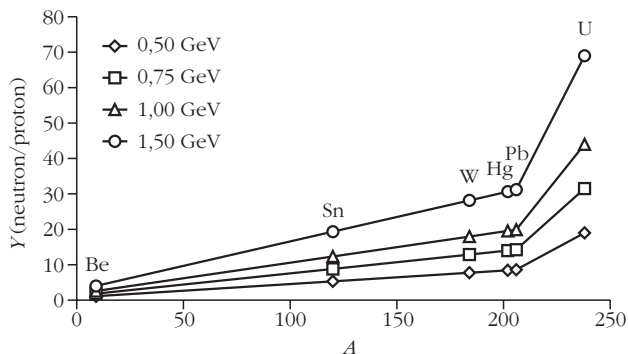
A spallációs reakcióban keletkező neutronok hozamát a neutronenergia függvényében az 5. ábra mutatja. Az ábrán az is látható, hogy a spallációs reakció jóval szélesebb energiatartományban szolgáltat neutronokat, mint a hasadási reakció.

A spallációs reakció során a magból kilépő nagyenergiájú neutronok szög szerinti eloszlása jelentős anizotrópiát mutat a laboratóriumi rendszerben. Kis neutronenergiákon az anizotrópia jóval kevésbé szembetűnő. Erre utal 6. ábra, amely 590 MeV energiájú protonok által bombázott Pb céltárgy esetén adja meg a $d\sigma/(d\theta dE_n)$ neutronkibocsátási differenciális hatáskeresztmetszetet az E_n neutronenergia függvényében különböző szögeknél [8].

A 7. ábra azt mutatja be, hogy az egy proton által keltett spallációs neutronok száma (Y) hogyan függ a bombázó proton energiájától (E_{proton}) különböző céltárgyanyagok esetén. A 8. ábra az egy protonra eső neutronhozamot (Y) ábrázolja a céltárgy tömegszámának (A) függvényében különböző bombázóenergiáknál (E_{proton}). Fraser és munkatársai [9] az egy proton által keltett spallációs neutronok számára, vagyis

7. ábra. Az egy proton által keltett spallációs neutronok hozama a bombázó proton energiájának függvényében különböző tömegszámok esetén. A protonokkal bombázott hengeres céltárgyak átmérője 10,2 cm, hosszúsága 61 cm volt. Fraser és Bartholomew [12] alapján.





8. ábra. Az egy proton által keltett spallációs neutronok hozama a céltárgymag tömegszámának függvényében különböző bombázó-energiáknál. A protonokkal bombázott hengeres céltárgyak átmérője 10,2 cm, hosszúsága 61 cm volt. Fraser és Bartholomew [12] alapján.

a neutronhozamra vonatkozóan a következő összefüggéseket állapították meg:

$$Y(E, A) = \begin{cases} 0,1 (E - 0,12) (A + 20) & \text{hasadóanyagok} \\ & \text{kivételével} \\ 50 (E - 0,12) & {}^{238}\text{U} \text{ esetén,} \end{cases}$$

ahol E GeV-ben értendő. A vizsgálatokat az 500 MeV $< E < 1,5$ GeV tartományban végezték 10,2 cm átmérőjű és 61 cm hosszúságú hengeres céltárgyakat használva. Amikor az átmérőt 10,2 cm-ről 20,3 cm-re növelték változatlan hossz mellett, mintegy 20%-kal megnőtt a neutronhozam.

A céltárgy optimális átmérője elvileg csak a bombázóenergia által meghatározott internukleáris kaskád hossz- és sugárirányú kiterjedésétől, a neutronelnyelődéstől és a neutronkiszökéstől függ. A gyakorlatban azonban figyelembe kell venni a céltárgyban disszipáló hő elvezetésével járó mechanikai, hidraulikai és más technikai korlátokat is.

magreakció	neutronhozam	hőleadás a céltárgyban (MeV/neutron)
$T(d, n)$ ($E_d = 0,2$ MeV)	$8 \times 10^{-5} n/d$	~2500
$W(e, n)$ ($E_e = 35$ MeV)	$1,7 \times 10^{-2} n/e$	~2000
${}^9\text{Be}(d, n)$ ($E_d = 15$ MeV)	$1,2 \times 10^{-2} n/d$	~1200
${}^{235}\text{U}(n, f)$ maghasadás	~1 n/hasadás*	~200
(T, d) fúzió	~1 n/fúzió	~3
Pb spalláció ($E_p = 1$ GeV)	20 n/p**	~23
${}^{238}\text{U}$ spalláció ($E_p = 1$ GeV)	40 n/p**	~50

* Hasadásonként átlagban 2,4 neutron keletkezik, de ebből ~1,4 neutron a láncreakció fenntartásához és a különböző veszteségek (elnyelődés, kiszökés stb.) pótlásához szükséges.

** 10,2 cm átmérőjű és 61 cm hosszúságú hengeres céltárgy esetén.

Az 1. táblázat áttekintést ad arra vonatkozóan, hogy a különböző magreakciókkal milyen neutronhozamok érhetőek el. A táblázat jól mutatja, hogy a spallációs neutronforrások hozama kiemelkedően nagy, miközben az 1 neutron keltése során disszipálódó hő kicsi. Emiatt a neutronintenzitás növelésének lehetősége terén jelentős tartalékok vannak más típusú neutronforrásokkal szemben. Az intenzitásnövelésnek természetesen vannak korlátai. A céltárgy hűtésének fentebb említett problémáján kívül számításba kell venni a céltárgy és környezete sugárkárosodását, a sugárvédelmi szempontokat, valamint a technikai megoldások és az üzemeltetés gazdaságossági szempontjait is.

A 2. táblázat a spallációs céltárgyként használt néhány anyag jellemzőit mutatja. A táblázatból kitűnik, hogy az ólom és a bizmut, valamint ezek eutektikus (LBE) ötvözeete igen kedvező a neutronabszorpció

céltárgy anyaga	tömegszám (A)	neutronelnyelési hatáskeresztmetszet (barn)	hővezetési állandó ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)*	olvadáspont (K)
Ta	181	21	54	3270
W	184	19,2	180	3380
Hg	201	375	8,3	234
Pb	207	0,17	35 (16 – 623 K esetén)	600
Bi	209	0,034	8,5 (11,3 – 573 K esetén)	544
Pb-Bi eutektikus ötvözet		0,094**	9,3 (423 K esetén)	398
Th	232	7,4	41	1968
${}^{\text{nat}}\text{U}$	238	7,59	25	1406
${}^{238}\text{U}$	238	2,7	25	1406

* 273 K esetén, ha nincs más megadva.

** Effektív hatáskeresztmetszet.

Néhány spallációs neutronforrás technikai jellemzői

berendezés	céltárgy anyaga	bombázó nyaláb teljesítménye (kW)	céltárgy mértékadó hőterhelése	hűtőközeg a primer körben	moderátorok
NTOF (CERN, Genf, Svájc) H ⁺ ($E = 20$ GeV, $I = 7 \times 10^{12}$ proton/impulzus) $t = 6$ ns, $\nu = 0,06\text{--}0,42$ Hz	Pb	1,4 – 10 (22,4 kJ/impulzus)	10 kW	H ₂ O	H ₂ O (300 K)
SINQ (PSI, Villigen, Svájc) H ⁻ ($E = 570$ MeV, $I = 1,3$ mA) folyamatos üzemmód	Pb	750	750 kW	D ₂ O	D ₂ O (300 K) D ₂ -folyadék (25 K)
MEGAPIE (PSI, Villigen, Svájc) H ⁻ ($E = 570$ MeV, $I = 1,3$ mA) folyamatos üzemmód	LBE	1000	1000 kW	LBE	
ISIS (RAL, Didcot, Egyesült Királyság) H ⁻ ($E = 800$ MeV, $I = 200$ μ A) $t = 100$ ns, $\nu = 50$ Hz	W	160	90 kW	H ₂ O	H ₂ O (316 K) CH ₄ -folyadék (100 K) H ₂ -folyadék (20 K)
Mark-2 (Lujan Center, LANSCE, LANL, Los Alamos, NM, USA) H ⁻ \rightarrow H ⁺ ($E = 800$ MeV, $I = 135$ μ A) $t = 125$ ns, $\nu = 20$ Hz	W	108	108 kW	H ₂ O	H ₂ O (283 K) H ₂ -folyadék (20 K) szilárd D ₂ (5 K)
SNS (ORNL, Oak Ridge, TN, USA) H ⁻ ($E = 1$ GeV, $I = 1,4$ mA) $t = 695$ ns, $\nu = 60$ Hz	Hg	1400	24 kJ/impulzus	Hg	H ₂ O (300 K) H ₂ -folyadék (20 K)
JSNS (J-PARC, Tokaimura, Ibaraki, Japán) H ⁻ ($E = 3$ GeV, $I = 333$ μ A) $t = 1$ μ s, $\nu = 25$ Hz	Hg	1000	40 kJ/impulzus	Hg	H ₂ O (300 K) H ₂ (20 K, 1,5 MPa, 100% para állapot)
ESS (helyszínről 2009-ben várható döntés**) H ⁺ ($E = 1$ GeV, $I = 150$ mA) $t = 2$ ms, $\nu = 16$ 2/3 Hz	Hg*	5000	300 kJ/impulzus	Hg	H ₂ O (300 K) H ₂ -folyadék (20 K)

Jelmagyarázat: E : nyalábenergia, I : nyalábáram, t : a nyaláb makroimpulzusainak hossza, ν : a makroimpulzusok ismétlődési frekvenciája.

* LBE és W céltárgyakra is készülnek elemzések.

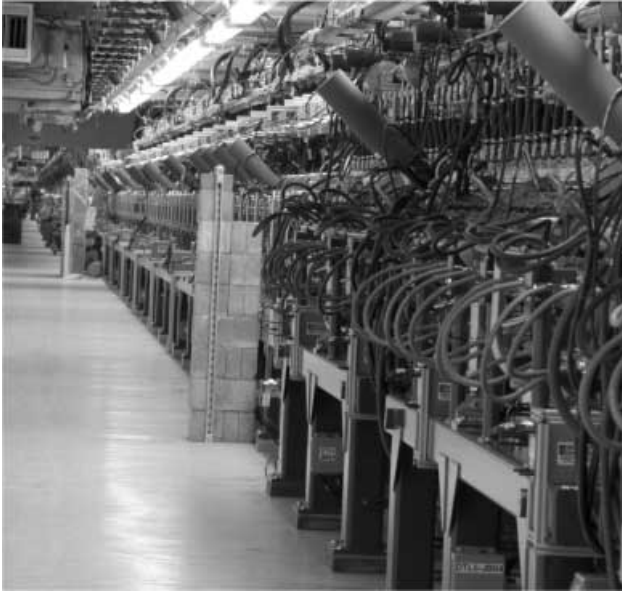
** Jelöltek: Debrecen, Magyarország; Bilbao, Spanyolország; Lund, Svédország (legvalószínűbb helyszín).

szempontjából. Ezen anyagok szilárd és olvadék céltárgy használatát egyaránt lehetővé teszik. Az LBE ötvözet céltárgyként és/vagy hűtőközeggként való használata kedvező több, már jelenleg is létező, valamint a még fejlesztés szakaszában levő nukleáris technológia esetén is (gyorsreaktorok, spallációs céltárgyak hosszú felezési idejű radioaktív hulladékok transzmutációjához, radioizotópok termelése stb.). A bizmutból azonban polónium izotópok is keletkezhetnek, ezért rendkívül biztonságos és igen költséges technológiák alkalmazására van szükség. Az Európai Unióban nemzetközi együttműködésben fejlesztették ki, és 2006 óta a Paul Scherrer Intézetben (Villigen, Svájc) üzemeltetik az olvadt LBE ötvözetet tartalmazó MEGAPIE spallációs céltárgyat. Az 1 MW hőteljesítmény elviselésére tervezett rendszerrel tanulmányozni lehet az LBE ötvözet használatával járó technológiai megoldásokat.

Ciklotronok, szinkrotronok és lineáris gyorsítók mellett egyaránt épültek spallációs neutronforrások. A gyorsítók mellett szerzett tapasztalatok alapján az adódott, hogy a H⁺- és H⁻-ionok gyorsítására kifejlesztett nagyáramú lineáris gyorsítók mellett érhető el a legnagyobb neutronintenzitások legkisebb költségek mellett.

Néhány spallációs neutronforrás technikai jellemzőit a 3. táblázat mutatja.

A bombázórészecskék gyorsítása több lépésben történik más-más típusú gyorsítókkal. A részecskék a gyorsítók belsejében igen nagy frekvenciájú elektromágneses mezőktől nyerik az energiájukat. Az egyes fokozatok típusától függően a gyorsítófeszültség frekvenciája a MHz–GHz tartományba esik. A céltárgyat valójában a legelső gyorsító fokozat frekvenciájának megfelelő részecskecsomagok (mikropulzusok) sorozatával bombázzák. A legtöbb spallációs neutronforrást azonban nem folyamatos üzemmódban használják. Sokkal nagyobb neutronintenzitások érhetőek el, ha egy rövid t időtartamban sokszorosára növelik a bombázórészecskék áramát, majd annyi ideig szüneteltetik a besugárzást, ami elegendő a céltárgyban disszipált nyalábenergia elvezetésére. Csak azt követően érkezik a következő mikropulzus-sorozat (makroimpulzus, röviden impulzus) a céltárgyra. A rövid impulzusú spallációs neutronforrások esetén $t \approx 1\text{--}2$ μ s, míg a hosszú impulzusú források esetén $t \approx 1\text{--}2$ ms. A besugárzási periódusok ν ismétlődési frekvenciájának tipikusan az elektromos hálózat frekven-



9. ábra. Az Oak Ridge-ben működő SNS (Spallation Neutron Source) mintegy 300 méter hosszú lineáris gyorsítója, mely az eredendően 2,5 MeV energiájú H^- -ionokat 1 GeV energiára gyorsítja.

ciáját vagy annak felét-harmadát választják. Az impulzus üzemmód különösen szigorú követelményeket támaszt a céltárggyal, a gyorsítórendszerrel és az elektromos energiaellátó hálózattal szemben. A besugárzási impulzus t ideje alatt a pillanatnyi nyalábteljesítmény a rövid impulzusú források esetén elérheti a több tíz GW nagyságrendet is, míg a hosszú impulzusú források esetén néhány MW nagyságrendű.

Az anyagszerkezeti kutatások céljára szolgáló rövid impulzusú spallációs neutronforrások esetén a szükséges μ s-os impulzusok elérése érdekében két módszert alkalmaztak eddig. Az egyik módszerben az utolsó fokozatként szolgáló lineáris gyorsítóból (linac, 9. ábra) kilépő protonok egy tárológyűrűbe kerülnek, ahol már nem nő tovább az energiájuk, hanem csak a protoncsomagok összenyomása történik meg. Ezt a technikai megoldást alkalmazzák az Oak Ridge-ben található SNS-nél (Spallation Neutron Source) is, ahol a tárológyűrűből kivont 1 GeV-es protoncsomagokkal bombázzák a spallációs céltárgyat (Hg). Más módszert alkalmaznak a Tokaimurában található J-PARC (Japanese Proton Accelerator Research Complex) mellett működő JSNS (Japanese Spallation Neutron Source) spallációs neutronforrás esetén. Ott egy lineáris gyorsító által táplált nagyfrekvenciájú szinkrotronban 3 GeV energiát érnek el a protonok, miközben megtörténik a protoncsomagok összenyomása is. A JSNS higany céltárgyát bombázzó 3 GeV energiájú protonokat a szinkrotronból vonják ki. (Megemlítendő, hogy ez a 3 GeV-es szinkrotron táplálja a J-PARC harmadik fokozatát, az 50 GeV-es szinkrotront is, amelyet nagyenergiájú fizikai kísérletek céljára használnak.)

Az anyagszerkezeti vizsgálatok céljára használt spallációs neutronforrásokat különböző neutronlassító (moderátor) és reflektáló közegek kombinációjával veszik körül. Legkívül a sugárvédelmi árnyékolás van, amely a forrás spektrumától és intenzitásától függően

akár több méter vastagságot is elérhet. A forrás és a besugárzóhelyek között csatornákat, neutronvezetőket alakítanak ki. Ezekben jutnak el neutronok a detektorhoz vagy a vizsgálandó mintához. A forrás közvetlen közelében elhelyezett, megfelelően kialakított moderátorokból szóródnak a csatornába a kívánt energiatarományba lelassult neutronok. Termikus neutronok ($E_n \approx 0,025$ eV) előállítására céljából rendszerint szobahőmérsékletű vizet vagy nehézvizet (D_2O) szokás használni. Hideg neutronok (300 neV $< E_n < 250$ meV) előállításához 20–25 K hőmérsékletű gáz vagy folyadék halmazállapotú hidrogént, deutériumot vagy metánt használnak. Az úgynevezett ultrahideg neutronokat ($E_n < 300$ neV) 5 K hőmérsékletű fagyott D_2 darabkákból álló moderátorban való termalizálás és szuperfolyékony 4He atomjaival való ütköztetés segítségével állítják elő. A termikus és hideg neutronok gyakorlati alkalmazásainak száma igen nagy. Az ultrahideg neutronok főleg alapvető részecskefizikai állandók meghatározásához szükségesek.

Akár a 10^{-6} – 10^9 eV energiatarományban is elő lehet állítani neutronokat spallációs források mellett. A 15 nagyságrendet lefedő energiataromány és az elérhető neutronintenzitások számos új alapkutató és alkalmazást tesznek lehetővé ugyanazon laboratóriumban. A spallációs neutronforrások létesítése iránti igények ezért világszerte növekednek, amit jól mutat az is, hogy nemrég helyezték üzembe Oak Ridge-ben az SNS-t és Tokaimurában a JSNS-t. Több, korábban meghatározó szerepet játszó forrás továbbfejlesztésén is dolgoznak jelenleg. A remények szerint néhány éven belül az Európai Unió területén is elkezdődhet az ESS (European Spallation Source) [10] építése, amely a jelenlegi elképzelések szerint a Mezei Ferenc alapötletét megvalósító hosszúimpulzusú spallációs neutronforrás lehet [11].

Irodalom

1. Fényes T.: Atommagok a nukleonleszakadási határ közelében. *Fizikai Szemle* 58 (2008) 323.
2. Rudstam G., *Zeitschrift für Naturforschung* 21a (1966) 1027.
3. Rupp E., Fényes T., *Szooobszenyija OJIAI* (Dubna) 6-4998 (1970).
4. Feshbach H.: *Theoretical nuclear physics. Nuclear reactions*. Wiley, New York, 1992.
5. *GEANT4 Physics Reference Manual*. CERN, Geneva, Switzerland, December 9, 2005. (<http://geant4.web.cern.ch/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/PhysicsReferenceManual.html>)
6. Karnaukhov V. A., *Particles and nuclei (ECHAYA)* 37(2006).
7. Bennette R. et al.: Radioactive nuclear beam facilities. *NuPECC Report 2000* CERN – ISOLDE, Geneva, Switzerland.
8. Cierjacks S. et al., ICANS V, *Proc. 5th Meeting of Intern. Collaboration on Advanced Neutron Sources*, KFA-Jülich, 1981.
9. Fraser J. S. et al., *Physics in Canada* 21/2 (1965) 17.
10. ESS Council, *The ESS Project, Volume III – Update, Technical Report Status December 2003*. ISSN 1433-559X, December 2003.
11. Mezei F., Tindemans P., Bongardt K.: *Current ESS proposal, The 5 MW LP ESS; best price-performance, an EU FP7 Preparatory Phase Project, 2009*. (<http://ess-neutrons.eu/index.php/current-proposal>)
12. Fraser J. S., Bartholomew G. A.: Spallation Neutron Sources. In Cierjacks S. (editor): *Neutron Sources for Basic Physics and Applications*. – an OECD/NEA Report, A Nuclear Energy Agency Nuclear Data Committee (OECD) Series, Volume 2, Pergamon Press, Oxford – New York – Toronto – Sydney – Paris – Frankfurt, 1983.