

ATOMMAGOK A NUKLEONLESZAKADÁSI HATÁR KÖZELÉBEN

Fényes Tibor
MTA ATOMKI, Debrecen

Az atommagfizika számára kulcsfontosságú annak tisztázása, hogy a protonok és neutronok milyen kombinációi alkothatnak atommagot. Közeledve a nukleonleszakadási határokhoz, az atommagokban lényeges változások zajlanak le. Kialakulnak meglehetősen tiszta proton- vagy neutron-maganyagok, új egzotikus bomlásmódok lépnek fel (pl. két proton vagy két neutron kibocsátása), a magreakciókban a folytonos gerjesztett állapotok nagyobb szerephez jutnak. A gyengén kötött atommagoknak csak kevés vagy egyáltalán nincs részecskestabil gerjesztett állapota, már kis gerjesztés is a kontinuumba vezet. A stabilitási sávtól távol eső atommagok sajátosságainak, szerkezetének, bomlásának, reakcióinak felderítése fontos a nukleáris asztrófizika, az elemek kialakulása szempontjából is.

A nukleonleszakadási határok

Az 1. ábrán feltüntettük az atommagok térképét, ami a stabil, ismert radioaktív és várhatóan kötött állapotban lévő atommagokat mutatja a rendszám (Z) és neutronszám (N) függvényében. A könnyű, stabil

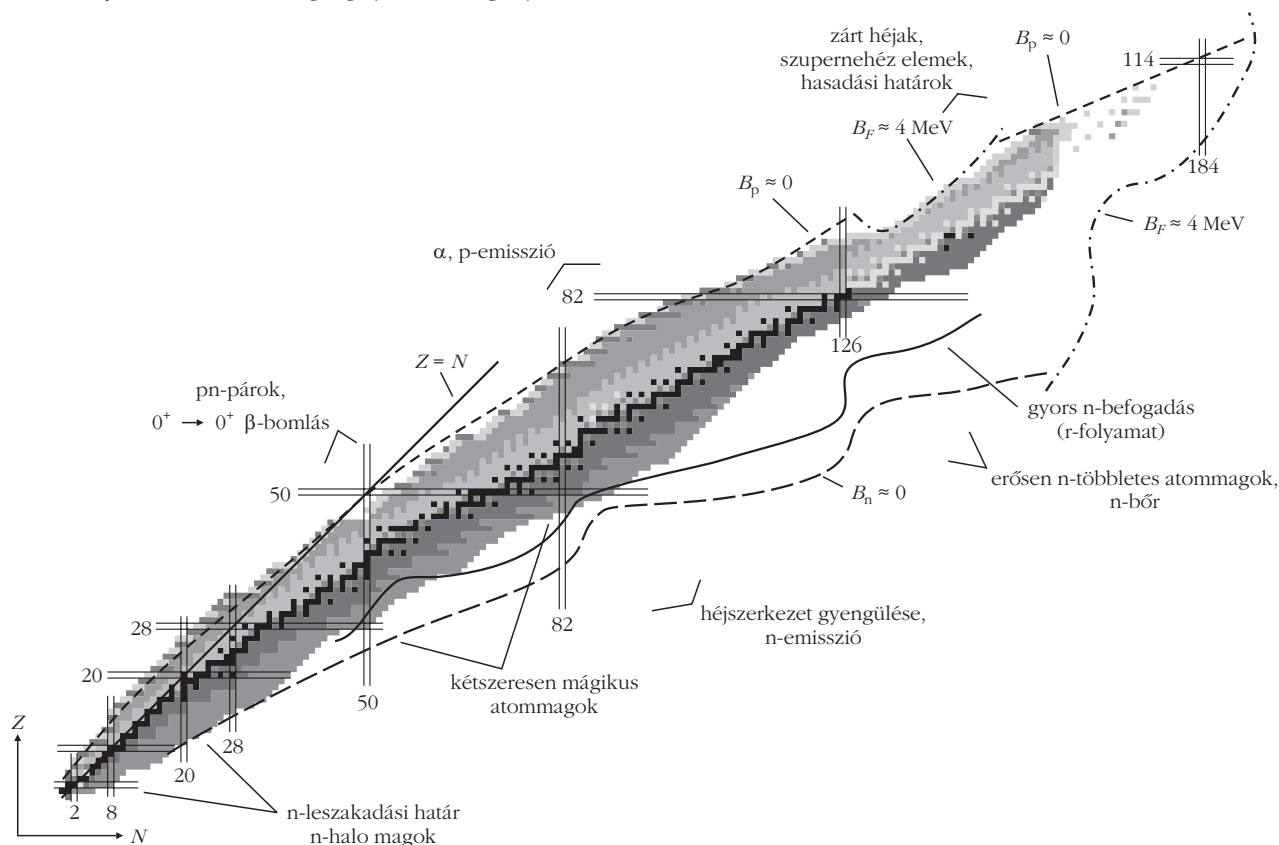
atommagokban körülbelül egyenlő számú proton, illetve neutron van, a nehezebbeknél a neutronszám túlsúlyba jut.

Az atommagtérkép ilyen alakulásában kiemelt szerepet játszik a protonok és neutronok közötti erős kölcsönhatás. Ennek közvetlen bizonyítékát adta nemrégiben a Jefferson Laboratórium (Virginia, USA) egy kísérlete. 4,627 GeV energiájú elektronokkal bombáztak ^{12}C céltárgyat, és az elektron rugalmatlan ütközésében kiütött részecskéket nagy felbontóképességű spektrométerekkel vizsgálták, koincidiációban a szóródott elektronokkal. Azt találták, hogy 80%-ban egyes nukleonok, 18%-ban pn-párok, és 1-1%-ban nn-, illetve pp-párok jelennek meg a kilépő reakciótermékek között. Ez azt jelenti, hogy a ^{12}C nukleonjainak 18%-a rövid hatótávolságú erős pn-kölcsönhatásban vesz részt [1].

Távolodván a stabilitási sávtól a proton, illetve a sáv másik oldalán a neutron szeparációs energiák csökkennek (kisebb ingadozásoktól eltekintve).

A nukleonleszakadási határokat úgy definiálhatjuk a Z - N síkban, hogy a szeparációs energiák (S_p , S_n) itt szelik át a zéró értéket.

1. ábra. Atommagok a rendszám (Z) és neutronszám (N) síkban. A stabil magokat fekete négyzetek jelölik. A lépcsőzetes vonalakkal határolt és besatírozott terület az ismert izotópok tartományát mutatja. A $B_p = S_p \approx 0$ és $B_n = S_n \approx 0$ görbék a proton-, illetve neutronleszakadási határok. B_f a hasadáshoz szükséges gerjesztési energiát jelöli.



A szeparációs energiák a két szomszédos atommag E_B kötési energiáiból számíthatók:

$$S_p = E_B(Z, N) - E_B(Z - 1, N),$$

$$S_n = E_B(Z, N) - E_B(Z, N - 1).$$

A szeparációs energia nem kötött rendszerekre definíció szerint negatív. A bomlásenergia a szeparációs energia abszolút értékével egyenlő $E_{bomlás} = |S_{p,n}|$.

A proton szeparációs energiája a tömegekből is származtatható,

$$S_p = M(Z - 1, N) + M_H - M(Z, N),$$

ahol M_H a hidrogén atom tömege. Ez azt jelenti, hogy a proton- (vagy neutron-) leszakadási határ megállapításához négy mag tömegét is ismernünk kell.

Megjegyezzük, hogy a nukleonleszakadási határ fenti definíciója és a tényleges nukleonemisszió kapcsolata nem egyszerű. Ugyanis a protonemissziót késlelteti a fellépő Coulomb-, illetve centrifugális gát, és ez utóbbi a neutronkibocsátásnál is felléphet. Ezért a leszakadási határt egyesek úgy definiálják, hogy ennél az utolsó nukleon nem kötött (a legkönnyebb vagy legnehezebb izotópra), és az atommag az erős kölcsönhatásra jellemző 10^{-22} s nagyságrendben bomlik. Ezt tekinthetjük jellemző nukleáris időnek. Az új atommagtáblázatok tartalmazznak olyan nem kötött atommagokat, amelyek élettartama $\sim 10^{-22}$ s nagyságrendben van (2. ábra). Ez egyúttal szolgálhat az atommag definíciójához: ha az atommag élettartama hosszabb, mint $\sim 10^{-22}$ s, a nukleon-együttes atommagnak tekinthető. Ma már számos olyan atommag ismert, amelyik alapállapotban nem kötött, de magreakciókban (pl. a ${}^7\text{Li}({}^3\text{H}, {}^3\text{He}){}^7\text{He}$ reakcióval) gerjesztett állapotait előállították. A hidrogénnél és héliumnál 4-4, a lítiumnál 3 ilyen atommagról tudunk.

Nukleonleszakadási határok. Az 1. ábrán láthatjuk, hogy a protonleszakadási határt a legnehezebb atommagoktól eltekintve már majdnem mindenütt elérték, sőt a határon túl is ismerünk atommagokat $\leq \mu\text{s}$ nagyságrendű felezési időekkel. Más a helyzet a neutrontöbbletes magoknál, itt csak $Z \sim 20$ -ig (kalcium) sikerült előállítani a határon lévő atommagokat, egyébként messze vagyunk tőle. A nukleonleszakadási határra vonatkozó előrejelzések meglehe-

2. ábra. A legkönnyebb atommagok a rendszám (Z) – neutronszám (N) síkban [3] alapján.

		Li 4 5,0 MeV 91·10 ⁻²⁴ s	Li 5 1,23 MeV 370·10 ⁻²⁴ s	Li 6 7,59	Li 7 92,41	Li 8 840,3 ms	Li 9 178,5 ms	Li 10 230 keV 2·10 ⁻²¹ s	Li 11 8,5 ms
3		p	p		β^- β^- β^-	β^- β^-	β^- β^-	n	β^- β^- β^- β^- β^-
2	He 3 0,000134	He 4 99,999866	He 5 648 keV 700·10 ⁻²¹ s	He 6 806,7 ms	He 7 159 keV 2,9·10 ⁻²¹ s	He 8 119 ms	He 9 65 keV 7·10 ⁻²¹ s	He 10 0,17 MeV 2,7·10 ⁻²¹ s	
1	H 1 99,9885	H 2 0,0115	H 3 12,323 a	H 4 3,28 MeV 139·10 ⁻²¹ s	H 5 1,9 MeV? 240·10 ⁻²¹ s	H 6 1,6 MeV 290·10 ⁻²¹ s	H 7 20 MeV 23·10 ⁻²¹ s		
		n 1 10,25 m							
			2	3	4	5	6	7	8 N

tösen bizonytalanok, akár 15 neutron is lehet az eltérés a különböző számítások között [2]. Jelenleg ~ 300 stabil (élettartam $> 10^9$ év), továbbá ~ 2700 radioaktív atommag ismeretes és még ~ 4000 atommag vár felfedezésre.

Reakciók, a termékek szeparálása és azonosítása

Reakciók

A nukleonleszakadási határ közelében lévő atommagok előállítására az elmúlt évek során számos reakciót használtak.

A nagyenergiájú részecskékkel létrehozott *spallációs reakciók* igen bő választékát adják a neutronhiányos izotópoknak, de felhasználhatók neutrontöbbletes izotópok előállítására is. Kombinálva on-line tömegszeparálással számos új izotóp előállítását tették lehetővé. Mindazonáltal ma már az extrém neutronhiányos vagy -többletes magok előállítására a fúziós-párolgási, vagy bombázó részecske fragmentációs reakciók alkalmasabbak.

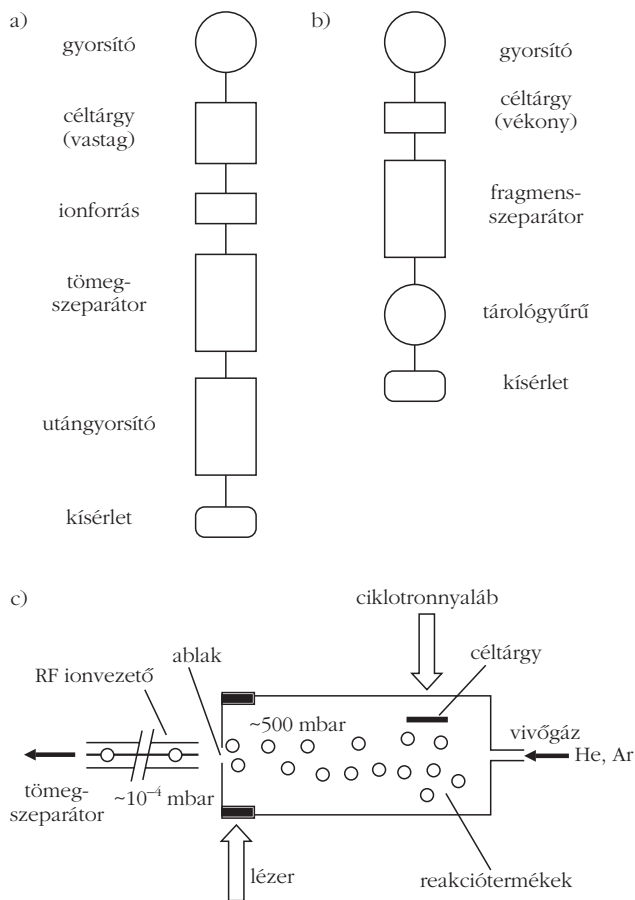
A nehéz ionokkal létrehozott összeolvadási-párolgási reakciók nagyon sikeresnek bizonyultak a neutronhiányos izotópok előállítására. Jelenleg ez a leggyakoribb módszer a protonleszakadási határon (vagy azon túl) lévő atommagok előállítására $Z = 50$ rendszám felett. Kiválóan alkalmasak transzurán elemek szintézisére is, megfelelő stabil céltárgy – bombázó részecske kombinációban.

Néhány nukleonátadással járó reakciók tipikusan 5–10 MeV/nukleon, míg fragmentációs reakciók > 35 MeV/nukleon energiáknál jönnek létre. *Mélyen rugalmatlan (neutronátadó) reakciókat* sikeresen alkalmaztak neutrontöbbletes atommagok előállítására a $6 \leq Z \leq 17$ tartományban. A módszer azon alapszik, hogy ha viszonylag könnyű bombázó ionok (pl. ${}^{22}\text{Ne}$, ${}^{40}\text{Ar}$) kölcsönhatásba lépnek nehéz (és így neutronokban gazdag) céltárgymagokkal, nagy valószínűséggel ragadnak magukhoz neutronokat.

Bombázó részecske fragmentációs reakciók létrehozható például úgy, hogy ≥ 35 MeV/nukleon energiájú nehéz ionokkal (pl. erősen neutrontöbbletes ${}^{48}\text{Ca}$ ionokkal) bombáznak könnyű (pl. ${}^9\text{Be}$) atommagokat. Így nagyon erősen neutrontöbbletes izotópok állíthatók elő. A vizsgálni kívánt atommagok azonosíthatók röptükben a céltárgy mögé tett mágneses szeparátorral. Jelenleg a nehéz bombázó részecske fragmentációs (vagy hasadásos) reakciói szolgáltatják az egyik leghatékonyabb módszert mind a neutrontöbbletes, mind a neutronhiányos új atommagok előállítására.

Nagyenergiájú nehéz részecskékkel (pl. ${}^{238}\text{U}$ -nal) bombázva céltárgyakat létrehozható a *bombázó részecskék hasadása*. A módszer különösen hatékony neutrontöbbletes atommagok előállítására a $20 \leq Z \leq 47$ tartományban.

Reakciók radioaktív nyalábokkal. Magreakciókban előállított, szeparált és utángyorsított másodla-



3. ábra. Radioaktív ionnyalábok szeparálási technikái. Az ISOL (a), röntében való (b) és IGISOL (c) szeparálási módszerek működési elvei.

gos nyalábok is felhasználhatók egzotikus izotópok előállítására és vizsgálatára. Jelenleg azonban a radioaktív nyalábok intenzitása nem elegendő ahhoz, hogy ezekkel részleteiben tanulmányozni lehessen a nukleonleszakadási határok közelében lévő atommagok sajátosságait (a legkönnyebb elemek kivételével). Precíziós tömegmérést különböző csapdáknál akár néhány atommagon is lehet végezni. A bomlás-sajátosságok, első gerjesztési szintek, transzfer reakciók vizsgálatához azonban már 2–3, a nivósémák, rezonanciák vizsgálatához ~5 nagyságrenddel erősebb radioaktív nyalábbintenzitások szükségesek. Ezért a következő generációs berendezéseknél az egyik legfontosabb célkitűzés a radioaktív nyalábbintenzitások növelése.

A reakciótermékek szeparálása, azonosítása

A stabilitási sávtól távol eső atommagok vizsgálata szempontjából nemcsak az előállító magreakció, hanem a szeparálási és azonosítási módszer is lényeges. Ez utóbbiaknak két főbb típusa alakult ki, nevezetesen az *izotóp szeparálása egyidejűleg a céltárgy bombázásával (on-line, ISOL)*, valamint a *röntében való szeparálás (in flight, IF)*. Hídat alkot a kétféle típus között az IGISOL (*ion guide isotope separator on-line*) módszer.

A 3. ábrán feltüntettük a háromféle szeparálás működési elvét.

Az *ISOL-módszernél* a felgyorsított stabil részecskével vastag céltárgyban létrehozzák a vizsgálni kívánt izotópokat. A céltárgyból magas hőmérsékleten való hevítéssel elpárologtatják a reakciótermékeket, majd ionforrásban ionizálják és tömegszeparátorral szétválasztják. A szeparált izotópokat – kívánság szerint – utángyorsíthatják magreakció-vizsgálatok céljaira. A céltárgyanyag (vegyület) megfelelő megválasztásával bizonyos elemekre szelektív kiválasztás is elérhető, ha ezek könnyebben párolognak el. Továbbá megvan a lehetőség, hogy lézernyalábbal szelektíven ionizáljanak. A módszer előnye, hogy a nagy bombázó nyalábbintenzitás és vastag céltárgy miatt jó hozammal, kiváló minőségű radioaktív ionnyalábok állíthatók elő. Hátránya, hogy a vastag céltárgyból való elpárologás viszonylag hosszú időt vesz igénybe (≥ 1 ms), így csak a hosszabb felezési idejű izotópokra alkalmazható. Nehezen elpárologtatható anyagok (Ta, W stb.) vizsgálata is nehézséggé ütközik.

A *röntében való szeparálás módszernél* vékony céltárgyat alkalmaznak, amelyből a magreakció termékei kirepülnek. Ezeket fragmenszeperátorral rendszerint és tömegszám szerint szétválasztják. A mag-spektroszkópiai (vagy reakció-) vizsgálatok elvégezhetők tárológyűrű közbeiktatásával vagy anélkül is. Relativisztikus energiáig felgyorsított elsődleges nehézionnyalábok nagy hatásokkal lökik ki a reakciótermékeket a vékony céltárgyból. A módszer gyors, tiszta és kémiai független szeparálást tesz lehetővé. Segítségével ~ μ s (vagy némileg kisebb) felezési idejű izotópok is vizsgálhatók.

Az *IGISOL technikában* a bombázó nyalábbal vékony céltárgyból kilökik a reakciótermékeket, majd hélium gázban lefékeznek. Körülbelül 100 mbar vivőgáznyomás mellett elérhető, hogy a reakciótermékek fokozatosan +1 e töltésű állapotba kerüljenek. Az ionokat megfelelő ionoptikai rendszerrel kivonják a kamrából, majd felgyorsítják és on-line tömegszeparátorral szétválasztják. A vivőgázt nagy szívósebességű szivattyúkkal több lépcsőben távolítják el a rendszerből. A módszer alkalmas rövid felezési idejű izotópok ($T_{1/2} \geq 0,1$ ms) vizsgálatára, és nehezen párologó anyagokra (pl. Nb, Mo, Tc, Ru, Rh) is hatékony.

Nagyobb vivőgáznyomás (~500 mbar) mellett elérhető, hogy a reakciótermékek semlegesítődjének. Ekkor lézernyalábbal szelektív ionizáció hozható létre (3.c ábra).

A céltárgyból kilökött reakciótermékeket *gáztöltésű szeparátorban* is el lehet választani egymástól. Ezekkel nagy transzmisszió és mérsékelt tömegfeloldás érhető el. Különösen alacsony hozamokkal előálló radioaktív atommagok (pl. a szupernehéz elemek) vizsgálatára alkalmas.

A Michigan Állami Egyetem Nemzeti Szupravezető Ciklotron Laboratóriumában (MSU, NSCL, East Lansing) kifejlesztés alatt áll egy rendszer, ami a *röntében szeparált nagyenergiájú ionnyalábot megállítja (start-stop)*, például egy hélium gázzal töltött cső-

ben vagy más módon. A megállított ionok aztán egy keskeny elektronnyalábos csapdában (EBIS, elektronnyaláb-ionforrás [14]) erősen ionizálhatók, majd szupravezető lineáris gyorsítóval ~ 3 MeV/A energiára utángyorsíthatók. Így remélhetőleg igen jó minőségű nyalábot lehet nyerni, többek között nehezen elpárolgó elemekre.

Hozamok

Az előzőekben láttuk, hogy a stabilitási sávtól távol eső neutrontöbbletes, illetve -hiányos atommagok előállítására az egyik leghatékonyabb mechanizmus a nagyenergiájú bombázó részecskék fragmentációja, illetve hasadása. Nagyenergiájú nehéz atommaggal (pl. uránnal) bombázva alacsony rendszámú céltárgyat (pl. berilliumot) a reakciótermékek főleg a bombázó részecskék irányába repülnek, így röptükben jó hatásokkal szeparálhatók. Ez nagy előny a nehézion-neutronátadó (pl. ^{22}Ne (174 MeV) + ^{232}Th) reakciókhoz képest, ahol a reakciótermékek zömmel kúpszögben repülnek ki a bombázó nyaláb irányához képest.

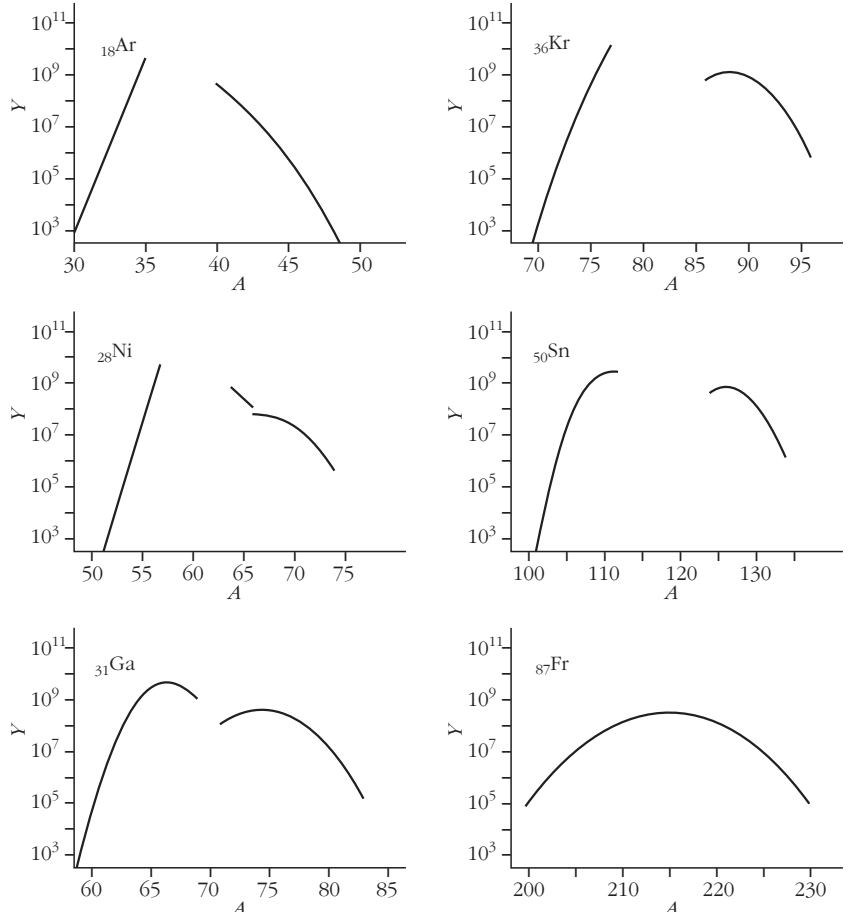
Az $\text{U}(1 \text{ GeV}/A) + \text{Be}$ reakció hozamai különböző elemek izotópjaira a 4. ábrán láthatók.

Egy adott radioaktív izotóp hozama (Y) az első szeparátor (analizáló mágnes) után a következő képpel írható le:

$$Y = \sigma \Phi N \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3,$$

ahol σ az illető magreakció hatáskeresztmetszete, Φ az elsődleges bombázó részecske árama, N az effektív céltárgyvastagság, ϵ_1 a kiszabadulási és átviteli hatékonyság, ϵ_2 az ionizációs hatékonyság, ϵ_3 a tömegszeparálás hatékonysága. Az említett $\text{U}(1 \text{ GeV}/A) + \text{Be}$ és hasonló reakcióknál a σ hatáskeresztmetszet, az effektív céltárgyvastagság (a nagy bombázó energia miatt), továbbá az ϵ_1 és ϵ_2 hatékonyságok igen kedvezőek lehetnek. Ha az energia $> 400\text{--}800$ MeV/nukleon, az elektronok majdnem teljesen lefosztódnak az ionokról az anyagon való áthaladásuk során, mivel a sebességük hasonló vagy éppen nagyobb mint a keringő elektronoké (lásd később a 7. ábrát). Így csupasz (vagy majdnem csupasz) atommagok nyerhetők. A töltéseloszlás az energia függvénye, és jól leírható különböző fekező anyagokra és anyagvastagságokra.

Egy adott (egzotikus) izotóp maximális hozammal való előállítása szempontjából mérlegelni kell a bombázó részecske – céltárgy kombinációt, a céltárgy vastagságát és a bombázó részecske energiáját.



4. ábra. A $^{92}\text{U}(1 \text{ GeV}/A) + ^9\text{Be}$ reakció hozamai (Y) az adott elem tömegszámának (A) függvényében. A bombázó részecskék intenzitása $2 \times 10^{12}/\text{s}$, a Be-céltárgy vastagsága $4 \text{ g}/\text{cm}^2$ volt a fragmentációs, illetve $2 \text{ g}/\text{cm}^2$ a hasadási reakcióknál. Az adatokat röptében való szeparálási módszerrel nyerték. A stabil izotópok tartománya ki lett zárva. [4] alapján.

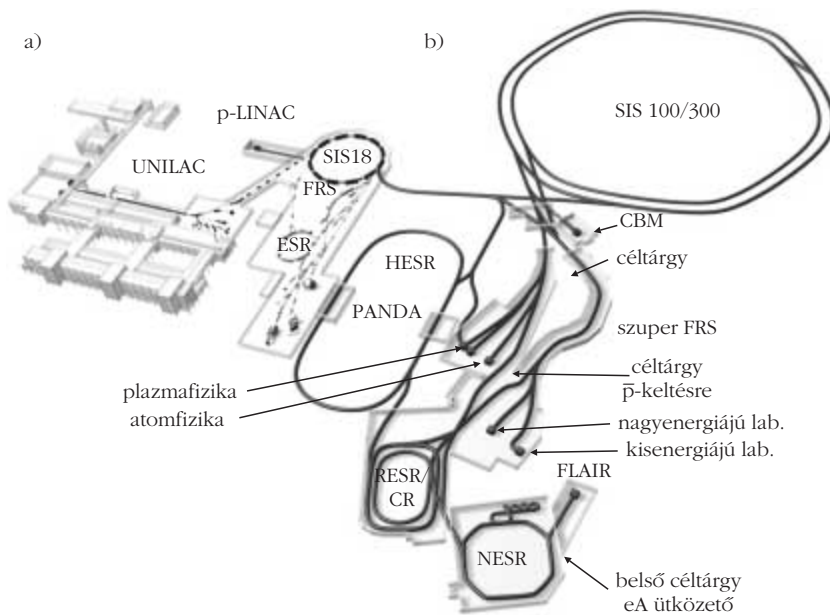
A GSI FAIR és más programok

A nukleonleszakadási határ közelében levő atommagokat több nagyszabású programban is vizsgálják. Különösen jelentős a darmstadti (Németország) GSI FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) – német részről jóváhagyott – program, amelyben nagyarányú fejlesztés folyik.

Több fázisban 2015-ig a következő szinkrotronokat és tárológyűrűket – a megfelelő nyalábenergiákkal – kívánják üzembe helyezni (5. ábra):¹

- SIS 100 szinkrotron: 2,7 GeV/A U^{28+} -ra; 29 GeV protonokra
- SIS 300 szinkrotron: 34 GeV/A U^{92+} -ra
- CR gyűjtőgyűrű: 740 MeV/A, $A/q = 2,7$; 3 GeV antiprotonokra
- NESR új kísérleti tárológyűrű: 740 MeV/A U^{92+} -ra, $A/q = 2,7$; 3 GeV antiprotonokra
- HERS nagyenergiájú tárológyűrű: 0,8–14,5 GeV antiprotonokra
- Elsődleges nyalábok a következő területekre:
 - Radioaktív nyalábok: 0,4–1,5 GeV/A ionok minden elemre uránig

¹ Részletesebben lásd: *Nucl. Phys. News* vol. 16, No. 1 (2006)



5. ábra. a) A GSI működő nehézion-gyorsító komplexumának vázlatos képe. UNILAC: lineáris nehézion-gyorsító (2–14 MeV/A), SIS18: nehézion-szinkrotron (1–2 GeV/A), ESR: kísérleti tárológyűrű ($\leq 0,8$ GeV/A H-tól U-ig), FRS: fragmenszeparátor (lásd részletesebben a 6.a ábrán), p-LINAC: újonnan telepítendő nagyáramú proton lineáris gyorsító.

b) A tervezett FAIR gyorsítókomplexum. SIS 100 és SIS 300: szupravezető szinkrotronok, CR: gyűjtő gyűrű, RESR: tárológyűrű, NESR: új kísérleti tárológyűrű és átmetsző elektron ütköztető (eA), HESR: nagyenergiájú antiproton tárológyűrű, rajta a PANDA detektor, Super-FRS: szupravezető, röptében szeparáló berendezés radioaktív nyalábokra, FLAIR: alacsony energiájú antiproton és ion fizikai vizsgálatok. [5] alapján.

– Kvantumszindinamika antiprotonokkal: $\leq 14,5$ GeV

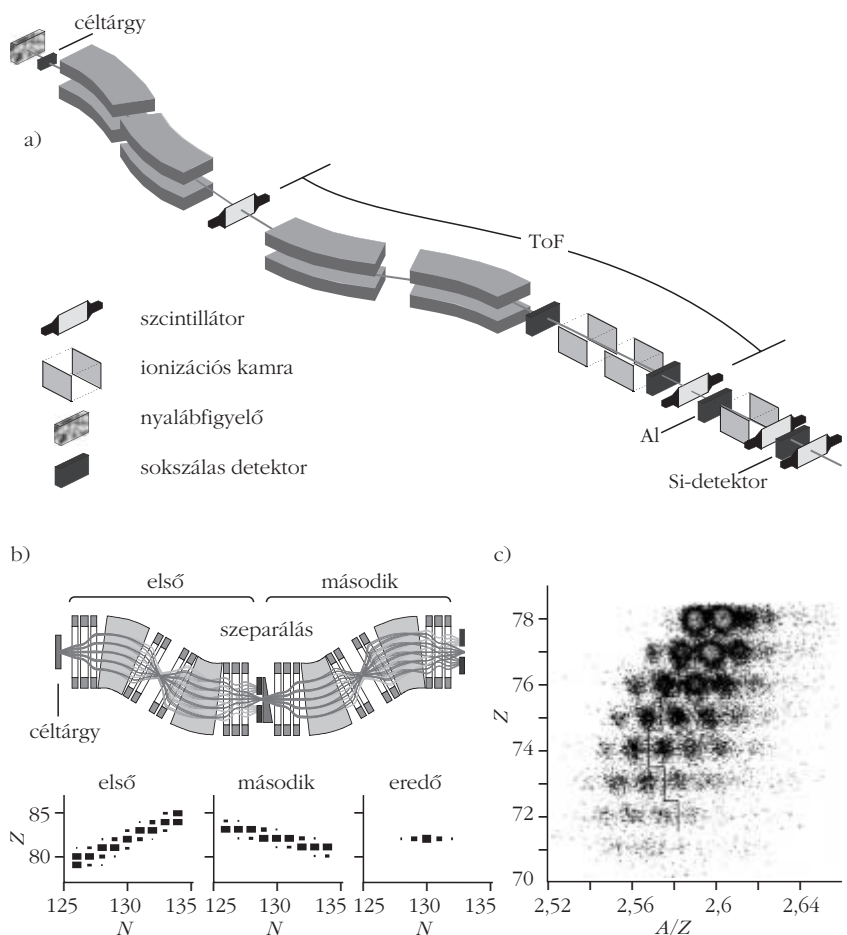
– A radioaktív ionok csúcsintenzitása: 5×10^{11} ion/pulzus U-ionokra, tárológyűrűs kísérletekre. Átlagintenzitás $3 \times 10^{11}/s$ rögzített céltárgyas kísérletekre. Tárológyűrűbe való bevitelnél a pulzus ~ 60 ns-os.

Az FRS jelű fragmenszeparátor (6.a ábra) lehetővé teszi a céltárgyból kirepülő reakciótermékek röptében való szeparálását. Mágneses eltérítő rendszerrel méri a részecske mágneses merevségét ($Br = mv/q$), továbbá repülési idejéből a sebességét, így meghatározható az m/q hányados. (Itt B a mágneses indukciót, r az eltérítési sugarat, m a részecske tömegét, q az ion töltését, v a sebességét jelenti.) 1 GeV/A energiájú bombázó ólomnyaláb esetén a fragmens

6. ábra. a) Fragmenszeparátor (FRS) a GSI-ben; a szeparált ionok implantálása Si-detektorokba. Az azonosításon kívül meghatározhatók a felezési idők is.

b) A fragmenszeparátor ionoptikája és a szeparálás elve. [6] alapján.

c) Beütések a fragmenszeparátor detektorrendszerén. A rendszám (Z) és tömegszám/rendszám (A/Z) arány összefüggése. Adott rendszámkapuban megjeleníthetők a különböző izotópokhoz tartozó jelek.



lényegében a héjelektronjaitól lefosztva lép ki a céltárgyból (lásd később a 7. ábrát). Méri a specifikus energiaveszteséget (dE/dx) is ionizációs kamrákkal (vagy Si-detektorokkal). A nehéz töltött részecskék specifikus energiavesztesége töltésük négyzetétől függ; így meghatározható a részecske rendszáma.

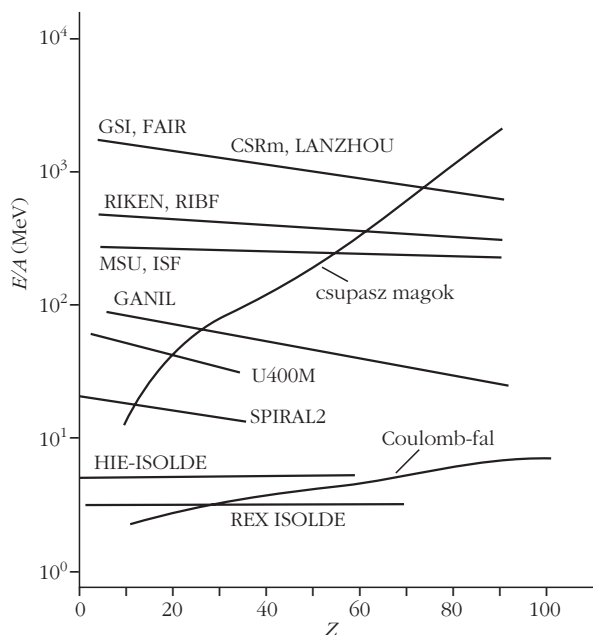
A mágneses spektrométer két részből áll, amelyek között egy megfelelően formázott Be-éket alkalmaznak. A két szelektáló rendszer együttesen egyértelmű, a fragmensek sebességétől független rendszám–tömegszám meghatározást tesz lehetővé. A rendszer térben is elkülöníti a reakciótermékeket (6.c ábra), így lehetővé válik bomlásuk vizsgálata is. Az ionoptikai és detektorrendszerben minden részecske nyomát végigkövetik.

A Si-detektorok előtti Al-fólia a fragmensek fékezésére szolgál, hogy a detektorba implantálódjanak. Az Al-fólia utáni ionizációs kamra a fóliában létrehozott másodlagos reakciótermékeket szűri ki.

A fragmenseket kétoldalas Si-sávdetektorrendszerbe implantálják és mérik az implantálás és a β -szecske megjelenése közötti időkorrrelációt. A Si-detektorrendszer előtt és után alkalmazott szcintillációs detektorokkal tiltó jelet adnak a zavaró háttérbeütésekre. A több generációs anya–leány bomlások végigkövetése egyúttal az azonosításukat is elősegíti. A rendszerrel nagyszámú új, erősen neutrontöbbletes izotópot sikerült azonosítani. Meghatározták a β -bomlási felezési idejüket is.

A megszerkezeti, asztrofizikai és magreakció vizsgálatok céljaira a FAIR szupravezető fragmensszeparátor után három nyalábcsatornát hoznak létre, ezekre telepítik a nagy- és kisenergiájú laboratóriumokat és az RESR, illetve NESR tárológyűrűket (5.b ábra). A NUSTAR (Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions) együttműködés berendezései rendkívül sokoldalú és precíziós vizsgálatokat tesznek lehetővé.

A 7. ábrán feltüntettük, hogy milyen energiák érhetőek el a radioaktív (másodlagos) ionnyalábokra egyes nagyobb programokban.



7. ábra. A radioaktív (másodlagos) nyalábok közelítőleges energia-tartománya (E/A) a rendszám (Z) függvényében néhány nagyobb létező és tervezett egzotikus nyaláb berendezésben. A Coulomb-fal magassága, valamint az az energia is fel van tüntetve, amelynél már 90%-ban csupasz atommagok lépnek ki a céltárgyból. [4] alapján, korszerűsítve.

A jelölések magyarázata: GSI, FAIR: Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Németország. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Lanzhou, Kína. CSR: Cooler Storage Ring. RIKEN, RIBF: RIKEN Radioactive Ion Beam Facility, Saitama, Tokyo mellett, Japán. MSU, ISF: Michigan State Univ., tervezett Isotope Science Facility, East Lansing, USA. GANIL: Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, Caen, Franciaország. U400M: Egyesített Atommagkutató Intézet, Dubna, Oroszország. $K = 630$ nehézion ciklotron. SPIRAL2: épülő nagyáramú szupravezető lineáris gyorsító a GANIL-ban. HIE-ISOLDE: High Intensity and Energy, ISOLDE-program, CERN, Genf, Svájc. REX-ISOLDE: az ISOLDE tömegszeparátor után lineáris gyorsítóval tovább gyorsítja az ionokat.

$N = Z$ atommagok, pn -párok kialakulása. Az $N = Z$ atommagok nagyon erősen kötöttek. Az utolsó proton és utolsó neutron közötti kölcsönhatási energia kísérleti értéke $N = Z$ -nél kiugróan nagy (néhány MeV-es) adott elem különböző izotópjaira. Ez az izospin $T = 0$ pn -kölcsönhatás fontosságára utal. Amint a rendszám növekszik, a Coulomb-taszítás a protonok között nő. Fontos lenne tudni, hogy a $T = 0$ kölcsönhatás erőssége hogyan változik az $N = Z$ vonal mentén, amint közeledünk a legnehezebb ismert kötött $N = Z$ maghoz, a $^{100}\text{Sn}_{50}$ -hez.

A jelenlegi gyorsítókkal előállíthatók erősen neutronhiányos atommagok a protonleszakadási határon, sőt még azon túl is. A $Z = N$ és szomszédos atommagok vizsgálata $A = 100$ -ig információt ad az izospin szerepéről, a tükrömagokról, a szupermegengedett β -bomlásról, proton-neutron párkorrelációkról, egzotikus magalakokról (szuper-, hiper-, oktupól-deformált állapotokról, háromtengelyű deformációról stb.). Tanulmányozható, hogy az izoskalár ($T = 0$) párkölcsönhatás hogyan járul hozzá kollektív állapotok kialakulásához. Radioaktív nyalábok felhasználása e területen is hozhat lényegesen újat, például a hozamok növelésével, magreakciók vizsgálatával inverz

Néhány új eredmény

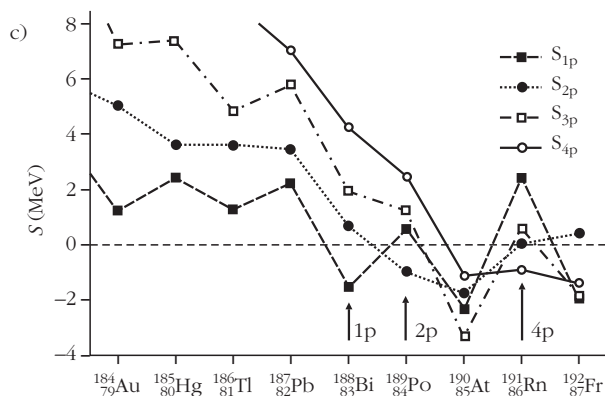
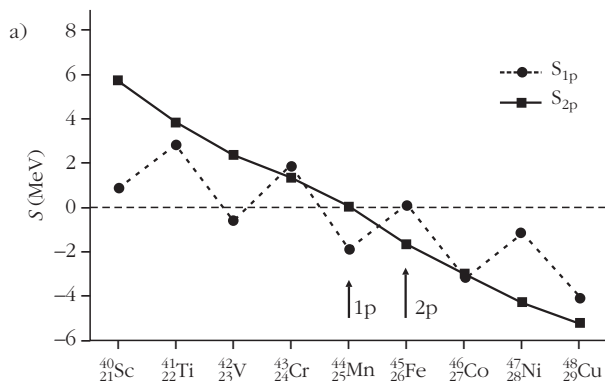
Az atommagok szerkezete

Az atommagok héjszerkezetének változása. A stabilitási sávtól távolosó atommagok vizsgálata lehetőséget ad igen hosszú izotópláncok vizsgálatára. A hosszú láncokban nyomon követhető a magszerkezet változása, a nivók eltolódása, a kollektivitás kialakulása.

A könnyű atommagok erősen neutrontöbbletes izotópjainál új héjlezárodásokat találtak $N = 6, 16$ és 32 neutronszámoknál. Míg például a stabilitási sávban fekvő $^{30}_{14}\text{Si}_{16}$ nivórendszerében az energiérés csak nagy gerjesztési energiánál jelentkezik, addig az erősen neutrontöbbletes $^{24}_{8}\text{O}_{16}$ -nál már alacsony energián megjelenik. Új héjlezárodásra utal $N = 32$ -nél az $^{52}_{20}\text{Ca}_{32}$ 2^+ nivójának kiugróan nagy volta. A 16 -os nukleonszám kitüntetett volta a $^{36}_{16}\text{S}_{20}$ és $^{36}_{20}\text{Ca}_{16}$ tükrömagoknál egyaránt jelentkezik. Lásd részletesebben Dombrádi [7] és Elekés [8] közleményeiben.

A stabilitási sávtól távolabb fellépő héjátrendeződének több oka is lehet. Például csökken a spinpálya kölcsönhatás erőssége, diffúz a nukleonsűrűség a lazán kötött nukleonoknál, a tenzorerők fontosságra tesznek szert. Az atommagok kollektív sajátosságait egyrészt az egyrészcsekés energiák közti különbségek, másrészt a valencianukleonok közti, úgynevezett maradék kölcsönhatás erősségei szabják meg. A korszerű héjmodellszámítások a tenzorkölcsönhatást is figyelembe veszik a maradék kölcsönhatásnál, ez a héjlezárodásokra lényeges hatást gyakorolhat.

Különösen hosszú izotóplánc ismeretes az ólomnál, ahol a páros-páros neutronhiányos izotópok nivószisztematikája a gömbszerű, belapult és megnyúlt magalakokra jellemző nivórendszerek érdekes együttlétét mutatja. Kis változás a neutronszámában nagy változást okozhat a magalakban.



8. ábra. a) Egyproton- (S_{1p}) és kétproton- (S_{2p}) szeparációs energiák az $N = 19$ izotón atommagokra. [2] alapján.

b) A ^{45}Fe kétproton-bomlása; optikai időprojekciós kamra felvételt. A ^{45}Fe balról lép be a gázkamrába, ott lelassul, majd ellentétes irányokban két protonot bocsát ki. [12] alapján.

c) Egy-, két-, három- és négyproton szeparációs energiák $N = 105$ izotónokra. [2] alapján.

kinematikában (mozgó egzotikus atommag, nyugvó könnyű mag, pl. proton).

Nukleonglóriás atommagok, neutronbőr. Távolság a stabilitási sávától a legkülső nukleon(ok) kötésienergiája kicsi, ami a nukleon (nukleonpár) térbeli kiterjedésének jelentős növekedésével járhat. Az extrém nagy kiterjedésű, kis sűrűségű nukleoneloszlást nukleonudvarnak (halo, glória) nevezzük. A mag többi nukleonja továbbra is egy szokásos, nagy sűrűségű tözset alkot.

Ma már a nukleonhalók léte jól megalapozott. A $Z = 2-10$ rendszám tartományban számos neutronglóriás (pl. ^6He , ^{11}Li , ^{19}C), illetve protonglóriás (pl. ^8B) atommag ismeretes. Ezek mérete összemérhető a jóval nehezebb ^{48}Ca méretével.

A halomagok külső részén a sűrűség nagyságrendekkel kisebb lehet, mint a jellemző maganyagsűrűség. Ez egy új típusú maganyagot jelent, ami a normál atommag és szabad nukleonok között van. Ebben a nukleonok közötti kölcsönhatások a megszokottól különbözőek lehetnek, például a folytonos, kötetlen állapotok közelsége miatt. A halomagok szerkezetéről és reakcióiról részletes összefoglaló található a [9] alapvető munkában.

Mind az elméleti számítások, mind a kísérleti tények arra mutatnak, hogy az erősen neutrontöbbletes atommagokban neutronbőr épül ki a magtörzs felett. A neutronbőrben az anyag alacsony sűrűségű. Itt – önkonzisztens számítások alapján – erősebb neutron-neutron páreffektus várható, ugyanakkor számos jel mutatja, hogy a spin-pálya kölcsönhatás erőssége csökken. Mindez a nívók átrendeződéséhez, a nagyobb héjakba való csoportosulásukhoz vezethet. Egyes szerzők szerint a gyengén kötött neutrongazdag anyagban a közéletér jelentősége kicsi, ami még azt is megkérdőjelezheti, hogy a nukleonok egy részecskepályán mozognak. A bőrök fellépte szükségszerűen felveti a diszkrét (kötött) és folytonos (szóródási) állapotok közti kapcsolatot, így a mag szerkezeti és reakcióvizsgálatok egybeolvasását. A neutronbőrrel kapcsolatban lásd például *Krasznahorkay* [10] munkáját.

Egzotikus bomlásmódok

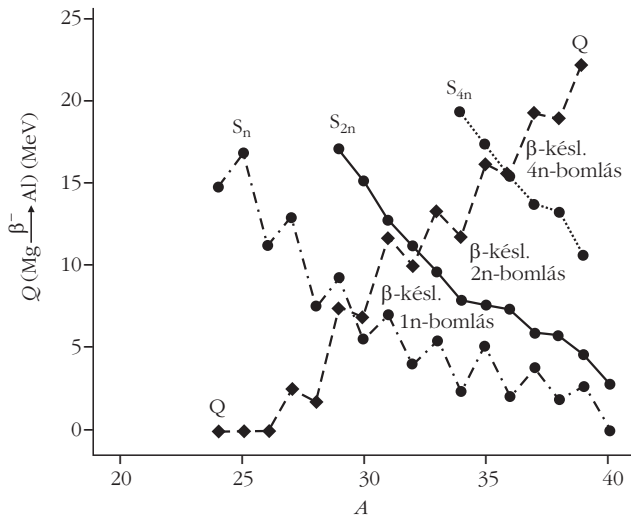
A stabilitási sáv közelében a β -bomlás, illetve a nehéz atommagoknál az α -bomlás az uralkodó bomlásmód. Távolság a stabilitási sávától új bomlásmódok is megjelennek.

Protonban gazdag oldalon β -késleltetett p-, illetve α -bomlás lép fel, amikor a részecskekibocsátás a β -bomlás után előállt leánymag gerjesztett állapotából történik. Ezek közül a β -késleltetett protonbomlás a gyakoribb, már több mint 120 eset ismeretes. β -késleltetett kétproton-bomlást is megfigyeltek több mint 8 esetben.

Protonbomlás alapállapotból, vagy hosszabb élettartamú izomer állapotokból is lehetséges. *Delion* és munkatársai [11] összefoglaló munkájában 41 ilyen bomlásról tesznek említést a $Z > 50$ tartományban, de a $Z < 50$ atommagok között is vannak p-kibocsátók (pl. ^{53}Co , ^{69}Br).

Mind a β -késleltetett, mind az alap- vagy izomerállapotból történő protonbomlás igen értékes mag szerkezeti információt szolgáltat a protonleszakadási határ közelében lévő atommagokra. Például spektroszkópiai faktorokat (amelyek a kezdeti és a végállapot konfigurációitól függenek) közvetlenül le lehet vezetni a p-bomlási vizsgálatokból. A protonbomlásnál nem kell számolni részecskekialakulási valószínűséget (az α -bomlásnál kell).

Két proton kibocsátása is várható páros Z -jú atommagokból, főleg ha egy proton kibocsátása energetikailag tiltott. A szeparációs energiák ismeretében ilyen eset állhat elő például a ^{45}Fe -nél (8.a ábra). Két proton kibocsátását valóban észlelték, sőt optikai időprojek-



9. ábra. A $^{12}\text{Mg} \xrightarrow{\beta^-} ^{13}\text{Al}$ bomlás Q értékei a tömegszám (A) függvényében. Az ábrán fel vannak tüntetve az Al-izotópok S_n , S_{2n} , S_{4n} szeparációs energiái is. Széles tömegszámtartományokban várható β -késléttett n , $2n$, $4n$ kibocsátás. [13] alapján.

ciós kamrában mind a ^{45}Fe , mind a kilépő két proton nyomát sikerült regisztrálni (8.b ábra). A kísérlet egyúttal azt is mutatja, hogy 3-test bomlás történt, az analízis a kötött diproton-emissziót kizárja. Két proton kibocsátását találták ^{48}Ni és ^{54}Zn esetében is. A protonleszakadási határon kívül lévő könnyű atommagoknál is észlelték két proton kibocsátását, nevezetesen a ^6Be és ^{12}O gerjesztett állapotaiból. Mindkét esetben a bomlás 3-test felhasadással történt $\sim 10^{-21}$ s felezési idővel. A nem kötött állapotú atommag tömegét és gerjesztési energiáját a bomlástermékek energiájából és kirepülési szögeiből lehet meghatározni.

β -késléttett deuteronemissziót is megfigyeltek. Például a $^6_2\text{He}_4 \xrightarrow{\beta^-} ^6_3\text{Li}_3$ bomlás során a ^6Li gerjesztett állapotából kis valószínűséggel kilép deuteron.

A neutrongazdag oldalon egy neutron kibocsátásának csak nagy impulzusnyomaték-változás esetén lehet lényeges felezési ideje. A leszakadási határ közelében, nehéz magoknál várható elég nagy impulzusnyomaték, ezek viszont még nem érhetőek el kísérletileg.

A β -késléttett neutronkibocsátás ugyanakkor gyakori jelenség. A γ -sugár és neutron repülési idő spektroszkópia kombinációjából részletes információ nyerhető a β -bomlás leánymagjának nívószerkezetére. A vizsgálatok fontosak a nukleáris asztrofizika r-folyamatának megértéséhez is.

A 9. ábra a $^{12}\text{Mg} \xrightarrow{\beta^-} ^{13}\text{Al}$ bomlás Q bomlásenergia értékét mutatja az A tömegszám függvényében, valamint az Al-izotópok S_n , S_{2n} , S_{4n} szeparációs energiáit. Látható, hogy széles tömegszámtartományokban várható β -késléttett n , $2n$, sőt $4n$ kibocsátása.

Két proton kibocsátásához hasonlóan várható két neutron emissziója is erősen neutrontöbbletes magokból (pl. ^{26}O -ból). Ezek vizsgálata hasznos információ szolgáltatna a nn-párkölcsonhatásra, a két valencia-neutron hullámfüggvényeire stb. Ilyen bomlást egyelőre nem észlelték, de az új generációs gyorsítókkal remény van előállításukra.

Asztrofizikai vonatkozások

A nukleonleszakadási határ közelében lévő atommagok sajátosságainak ismerete fontos az asztrofizikai gyors protonbefogási (rp-folyamat) és a gyors neutronbefogási (r-folyamat) megértése szempontjából (lásd részletesebben [14]-ben).

Az rp-folyamat alapvető szerepet játszik a csillagrobbanásban (pl. a röntgensugár-felvillanásokban) és a protonleszakadási vonalat nagyon szorosan követi. A folyamatban főleg a sugárzásos p-befogás (p,γ) és a β -bomlás játszik szerepet.

Az r-folyamat gyors neutronbefogást jelent, ami addig tart, amíg az (n,γ) folyamat olyan erősen neutrontöbbletes maghoz vezet, ahol az (n,γ) és (γ,n) folyamatok egyensúlyba kerülnek (1. ábra). Ez a folyamat felelős (a lassú neutronbefogás mellett) a vason túli elemek szintéziséért.

Az új programok (GSI FAIR, RIKEN-RIBF stb.) lehetővé teszik mind az rp-, mind az r-folyamatban résztvevő atommagok részletes tanulmányozását.



A szupernehéz elemeket egy következő közleményben fogjuk tárgyalni.

Összefoglalás

A korszerű (meglévő, ill. épülő) gyorsító, szeparáló és mérőberendezések lehetővé teszik a protonleszakadási határon (sőt még azon túl) lévő atommagok előállítását és részletes vizsgálatát.

A neutronleszakadási határ elérése eddig csak körülbelül $Z = 20$ -ig (kalcium) sikerült, de az új programok segítségével igen nagyszámú új neutrontöbbletes izotóp felfedezése és precíziós vizsgálata várható.

A nukleonleszakadási határok közelében lévő atommagok vizsgálatából a mag szerkezet, bomlás, reakciók és magerők számos eddig rejtett sajátosságára derült fény és további felismerések várhatók.

A kutatások fontosak a nukleáris asztrofizika szempontjából is.

Irodalom

1. R. Subedi és mts., *Science* 320 (2008) 1476.
2. M. Thoennessen, *Rep. Progr. Phys.* 64 (2004) 107.
3. J. Magill, I.G. Pfenning, I.J. Galy, *Karlsruher Nuklidkarte 2006*. Karlsruhe, 2006.
4. R. Bennett és mts., *The NuPECC working group on radiative nuclear beam facilities*. ESF, Strasbourg, 2000.
5. H.H. Gutbrod (szerk.): *FAIR baseline technical report GSI*. Darmstadt, 2006.
6. W. Henning, *Nucl. Phys. News* 1/1 (1990) 13.
7. Dombrádi Zs., *Fiz. Szemle* 57/7 (2007) 221.
8. Elekes Z., *Fiz. Szemle* 58/3 (2008) 98.
9. V. Suzuki, R.G. Lovas, K. Yabana, K. Varga: *Structure and reactions of light exotic nuclei*. Taylor and Francis, London, 2003.
10. A. Krasznahorkay, *Acta Phys. Polon.* B36/4 (2005) 1095.
11. D.S. Delion, R.J. Liotta, R. Wyss, *Phys. Rep.* 424 (2006) 113.
12. K. Miernik és mts., *Phys. Rev. Lett.* 99 (2007) 192501.
13. C.K. Gelbke (szerk.), *Michigan State Univ. MSUSCL-1345 report*, 2006.
14. Fényes T. (szerk.): *Atommagfizika*. Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen, 2005.