

RADIOAKTÍVION-NYALÁBOK AZ ATOMMAGFIZIKA ÉS A NUKLEÁRIS ASZTROFIZIKA SZOLGÁLATÁBAN

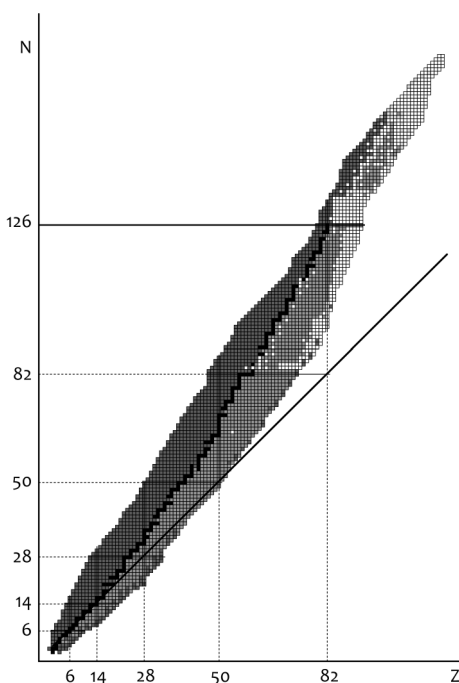
Elekes Zoltán

tudományos főmunkatárs,
MTA Atomki
elekes@atomki.mta.hu

Csupán száz éve annak, hogy *Frederick Soddy* felfedezte az izotópokat, azaz rájött arra, hogy egy adott elemnek különböző módosulatai lehetnek, attól függően, hogy a rendszámát meghatározó protonokhoz hány neutron csatlakozik az atommagban. Azóta nagy utat tettünk meg, hiszen napjainkra már három-ezernél is több izotópot helyeztünk el az atommagok térképén (1. ábra), és elméleti számolások azt mutatják, hogy még legalább további négyezer jelölt vár felfedezésre. Ebből a hétezerféle atommagból mindössze körülbelül háromszáz olyat találhatunk, melyek stabilak, így a természetben hosszú ideig léteznek. A többi izotóp radioaktív, vagyis magától elbomlik; élettartamuk a stabilitástól távol, azaz a térkép szélén a másodperc töredéke csak. Mégis, ezek az egzotikus atommagok igen fontos szerepet játszanak a Világegyetemben megfigyelhető elemgyakoriság kialakításában.

Mai tudásunk szerint a vasnál nehezebb elemek nem keletkezhetnek a csillagfejlődés során a csillag belsejében zajló fúziós magreakciókban, hanem azok valamilyen kataklizmaszerű esemény során jöhetnek létre. Ilyenek például a szupernóvák vagy a kettős

csillagok röntgenkitörései, amelyekben közös, hogy az atommagtérkép közepén húzódó, a stabil magok által alkotott sávtól igen távoli izotópok termelésével járnak. Természetesen



1. ábra • Az atommagok térképe, ahol N a neutronok, Z pedig a protonok számát (a kémiai elem rendszámát) jelöli

ezek az extrém neutron/proton aránnyal jellemezhető izotópok szinte azonnal elbomlanak, de tulajdonságaik meghatározzák az asztrofizikai folyamatok végén keletkező anyag elemösszetételét. Például az ún. *r-folyamat* során bekövetkező, egymást követő, sorozatos neutronbefogási reakciók addig folynak, amíg a stabilitás felé történő bomlás egyensúlyt nem képez velük. Ez akkor történhet meg, ha olyan egzotikus atommaghoz érünk, amely a környezetéhez képest stabilabb, például zárt a neutron- és/vagy a protonhéj szerkezete, amit a magfizikában mágiikusnak nevezünk. Arról, hogy ezek a mágiikus atommagok a térkép instabil tartományában pontosan hol helyezkednek el, még igen keveset tudunk.

De a radioaktív izotópok tulajdonságainak feltárása nemcsak az asztrofizikai objektumok működésének megértésében segíthet, hanem az atommagfizika alapvető kérdéseinek megválaszolásához is közelebb vihet, azaz ahhoz, hogy a nukleáris kölcsönhatás hogyan tartja össze a protonokat és a neutronokat az atommagban. Hiszen a különleges neutron- és protonszámok a kölcsönhatás olyan megjelenési formáját okozhatják, amely egészen egyedi, nem várt jelenségekben nyilvánulhat meg. Ilyen például a neutronglória, amikor az atommag törzsét alkotó, egymáshoz közel elhelyezkedő protonoktól és neutronoktól néhány neutron elszakad, és azoktól igen messze elkóborol; glóriaként róva pályáját az atommagtörzs körül.

Az instabil atommagok közül a hosszú élettartamúakat úgy lehet kísérleti vizsgálatoknak alávetni, hogy belőlük céltárgyakat készítünk, amit stabil ionnyalábokkal bombázunk a vizsgálandó tulajdonság szempontjából érdekes magreakciót létrehozva. Azonban a rövid élettartamú izotópokat csak úgy

tudjuk tanulmányozni, ha a folyamatot megfordítjuk, azaz radioaktívion-nyalábot hozunk létre, és ezt ütköztetjük stabil céltárgygal, amelynek során lezajlik a kérdéses magreakció.

Radioaktívion-nyalábot kétféleképpen hozhatunk létre: (1) az ún. közvetlen izotópszeparációval (Isotope Separation On-Line – ISOL) vagy (2) röptében történő izotópszeparációs (*In-Flight*–IF) technikával, amelyek kitűnően kiegészítik egymást.

Történetileg először az ISOL-módszer alakult ki. Ennek lényege az, hogy első lépésben elektronokkal, neutronokkal, könnyű- (jellemzően hidrogén-) vagy nehézionokkal bombázunk egy céltárgyat, amelyben radioaktív izotópokat hozunk létre. Ezek vagy nagyon lelassulnak a céltárgyban magában, vagy pedig valamilyen más, a céltárgy után elhelyezett anyagban (gyűjtőközeg) lassítjuk le őket. A gyűjtőközeget a radioaktív anyag egy része igen kicsi energiával képes elhagyni, amit egy ionforrásba vezetünk, ahol az atomokról általában egy elektront lefosztunk, azaz ionizáljuk azokat. Az így keletkező, már töltött részecskéket elég jól szét tudjuk választani egy mágneses szeparátor segítségével. A megtisztított, vizsgálandó radioaktív ionokat pedig már vagy közvetlenül be lehet vezetni egy utólagos gyorsítóberendezésbe, ahol a többi elektrontól is megszabadítjuk őket, vagy pedig a gyorsítás előtt egy töltésállapot-sokszorozóban hajtjuk végre a teljes lefosztást. Sajnos meglehetősen hosszú idő szükséges ahhoz, hogy a radioaktív izotópok létrehozásától eljussunk addig, hogy a radioaktívionnyaláb az adott kísérlet rendelkezésére álljon. Ez azt jelenti, hogy ez a módszer jellemzően csak olyan instabil atommagoknál használható, amelyek élettartama a másodperc századrésznél (10 ms) hosszabb.

Ennek a problémának a kiküszöbölésére az IF-technikát használhatjuk, amelyet először a 1980-as évek második felében alkalmaztak. A módszer során nagy energiára felgyorsított, stabil, teljesen lefosztott ionokból álló nyalábot bocsátunk egy céltárgyra, ahol az eredeti nyalábbal nagyjából megegyező energiájú radioaktív ionok keletkeznek. Ennek a soknemű elegynek az egyedeit röptében különítjük el egymástól egy izotópszeparátor segítségével. Az élettartam szempontjából tanulmányozható izotópok tára sokkal szélesebb, amit a rendszeren történő átfutás ideje (jellemzően <1 ms) korlátoz csak.

A radioaktív ionok elkülönítésére szolgáló eljárás tárgyalása előtt azokat a leggyakrabban használt fizikai folyamatokat mutatom be, amelyek során létrejönnek ezek az egzotikus atommagok, mivel ezek alapvetően határozzák meg a kialakítható nyaláb tulajdonságait.

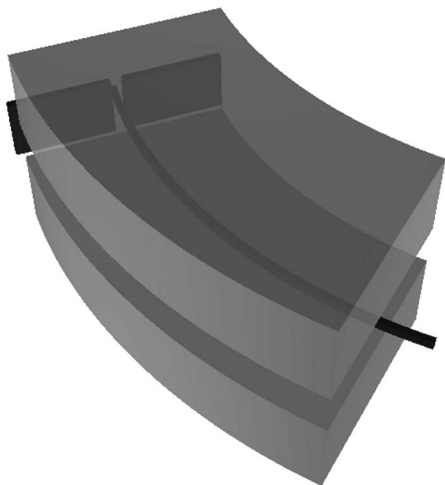
Az ún. *fúziós-párolgási* reakciók során két atommag egyesülése után keletkező izotóp néhány nukleont bocsát ki (elpárologtat), aminek az eredményeként egy instabil mag keletkezik. Amennyiben a reakció egyik résztvevője egy könnyű részecske, akkor a stabilitási sávhoz közeli izotópokat tudunk termelni, de két nehéz atommag fúziójával már egészen különleges izotópokat is létre tudunk hozni a stabilitási sáv neutronhiányos oldalán. Az ilyen típusú reakciókban jellemzően tízes nagyságrendben keletkeznek a radioaktív izotópok fajtái.

Spallációs reakció során a lövedékion eltávolít (leforgácsol) néhány nukleont a céltárgyat alkotó atommagból, így hozva létre radioaktív izotópot. Elsősorban neutronhiányos atommagok előállítására használják, amelyek energiája viszonylag alacsony (néhány MeV/nukleon), de akár ezer különféle izotóp is keletkezhet ilyen típusú reakció során.

A spallációs reakcióhoz igen hasonlatos a *fragmentáció*, amikor a lövedék darabokra töri a céltárgyat alkotó atommagot. Fordított irányban még inkább használatos a módszer, amikor a nehéz lövedék törik darabokra a céltárgyba történő belövés során. A létrejövő radioaktív ionok igen változatosak, itt is ezres nagyságrendről beszélhetünk, és az ionok energiája a lövedék energiájának körülbelül kilencven százaléká. Ezzel a módszerrel gyakorlatilag a lövedék tömegszáma alatti bármilyen izotóp előállítható természetesen az atommagtérképen tőle való távolsággal egyre kisebb intenzitással.

A fragmentáció remek kiegészítője az atommaghasadáson alapul, ilyenkor uránt vagy tóriumot készítenek hasadásra oly módon, hogy azokat céltárgyként használjuk, vagy belőlük álló ionnyalábot hozunk létre. Ilyenkor néhány száz fajta radioaktív izotóp állhat elő, amelyek energiája a bombázó nyalábéhoz közeli lesz.

A fenti eljárásokkal termelt radioaktív atommagok elkülönítésének kulcsfontosságú eleme a *mágneses elterítésen* alapul. Egyszerű eloszlású mágneses mezőbe helyezett töltött részecske körpályára áll, amelynek a sugarát (ρ) a tér erőssége (B), illetve a részecske lendülete (P) és töltése (Q) egyértelműen meghatározza. Ennek alapján minden egyes radioaktív ionhoz hozzárendelhető egy mennyiség, amit mágneses rigiditásnak (merevség) nevezünk, és $B\rho$ -val jelölünk. Értéke pedig a részecske lendületének és töltésének aránya; azt fejezi ki, hogy a nagyobb lendületű ionok merevbbek, azaz kevésbé térülnek el egy adott erősségű mágneses térben. Ennek megfelelően egy izotópszeparátor kulcseleme a dipólmágnes (2. ábra), amely tulajdonképpen két hengersetől áll, közöttük egyenes eloszlású mágneses térrel. Amennyiben

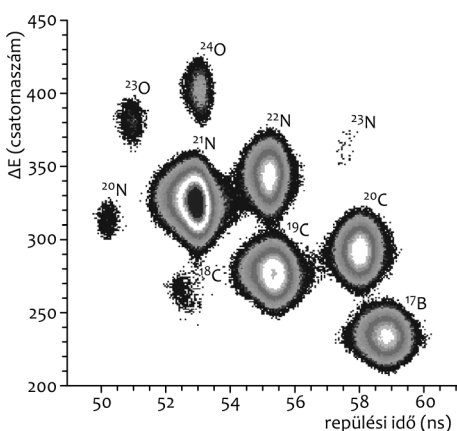


2. ábra • Dipólmágnes, a kilépőoldalon elhelyezett rés és a rajta áthaladó ion

ezt a mezőt úgy állítjuk be, hogy az erőssége a kiválasztandó izotóp rigiditásával egybevág, akkor a mágnes kilépő oldalán elhelyezett résen csak a kívánt részecskék haladnak át, a többi ion felfut a mágnes oldalára vagy a részopákra. Ez természetesen nem elegendő az ionnyaláb egyneművé tételére, hisz keletkezhetnek azonos rigiditású, de más fajtájú ionok is. Ezért a mágnes után egy újabb fázisban még elhelyezhetünk valamilyen, az ionnyaláb energiája szempontjából vékony anyagot, amelyen áthaladva az ionok rigiditása megváltozik, de nem akárhogyan, hanem az ion rendszámától függően. Ha ezután még egy dipólmágnesbe vezetjük a részecskéket, és annak a terét úgy állítjuk be, hogy a kiválasztandó ion új rigiditásának feleljen meg, az ionnyaláb tisztasága rendkívül sokat javul, akár egyneművé is válhat. A valóságban az a probléma, hogy a radioaktív ionok elég széles lendületeloszlással keletkeznek, ezért az izotópszeparátor résein általában többfajta részecske is átjut, ezért azokra koktélnyalábként is szoktak hivatkozni. Ez nem kifejezetten

hátrány, hisz így módon annyi kísérletet tudunk végrehajtani, ahányfajta iont tartalmaz a nyaláb. Persze ez azt jelenti, hogy ha biztosan akarunk lenni abban, hogy milyen magreakció játszódik le a céltárgyunkban, minden egyes iont azonosítani kell, meg kell címkézni.

A címkézést úgy végezzük, hogy különböző detektorokon (észlelőberendezés) vezetjük keresztül a nyalábot, amelyek mérik a részecskék sebességét, töltését, energiaveszteségét és két pont közötti repülési idejét. A 3. ábrán ilyen kétdimenziós azonosítási diagramot láthatunk, ahol az egyes radioaktív ionok elkülönülő foltokként jelennek meg. Általában ehhez hasonló koktélnyalábot vezetünk a céltárgyra, amelynek anyaga az előidézni kívánt magreakciótól függ. A radioaktívionnyalábok intenzitása rendkívül kicsi, mivel az előállítás valószínűsége is az, ezért a magreakciót elhagyó sugárzás (töltött részecskék, neutronok, nehézionok, γ -fotonok) nagy határfokú észlelése alapvető fontosságú. Így az instabil nyalábokat használó kísérletek során meglehetősen összetett rendszerek hasz-



3. ábra • Koktélnyaláb azonosítása az energiaveszteség és a repülési idő alapján

nálatosak, amelyek bonyolultsága megközelelti a részecskefizikai kísérletekét.

Ahhoz, hogy az egzotikus összetevőkből álló ionnyalábot megfelelően nagy energiára gyorsítsuk, robusztus gyorsítóberendezések szükségesek, amelyek csak néhány helyen találhatóak meg a világban. Napjainkra eljutottunk oda, hogy az idáig használt infrastruktúra kezdi elérni a határait. Ezért minden olyan országban, ahol van radioaktívion-gyorsító, annak bővítését, illetve újak építését határozták el. Japánban már néhány éve működik ezen gyorsítóberendezések legújabb generációja, az RIBF (Radioactive Ion Beam Factory), amely a legnagyobb szupravezető ciklotront tartalmazza a világon (4. ábra), de Európában is megkezdődött az építkezés, és remélhetően néhány éven belül rendelkezésre áll majd a FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) Németországban.

Az MTA Atomki kutatói mindkét intézettel gyümölcsöző együttműködést folytattak idáig, és jelenleg is részt veszünk az új eszközök fejlesztésében. Ezek a berendezések új távlatokat nyitnak számunkra mind az atommagfizika, mind pedig a nukleáris asztrofizika területén, hiszen a jelenlegi nyalábintenzitások akár ezerszeresét is el lehet majd érni. Valóban egy új korszak kezdetén vagyunk, ami nagy valószínűséggel úttörő felfedezéseket fog hozni, hiszen az atommagtér-



4. ábra • A RIBF-gyorsítóberendezés szupravezető ciklotronja

kép olyan tartományaihoz férhetünk hozzá, amelyek eddig rejtve voltak előttünk. Kapcsolataink továbbfejlesztése révén Magyarország is részese lehet ennek az izgalmas utazásnak az atommagtérkép ismeretlen tájaira.

A kutatást a TÁMOP 4.2.4.A/2-II-I-2012-0001 számú *Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program* c. kiemelt projekt személyi támogatásával végeztük. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Kulcsszavak: *radioaktív ion, szupravezető ciklotron, izotópszeparátor, atommagfizika, nukleáris asztrofizika*