

AZ ASZTROFIZIKAI R-FOLYAMAT VIZSGÁLATA RADIOAKTÍV NYALÁBOKKAL

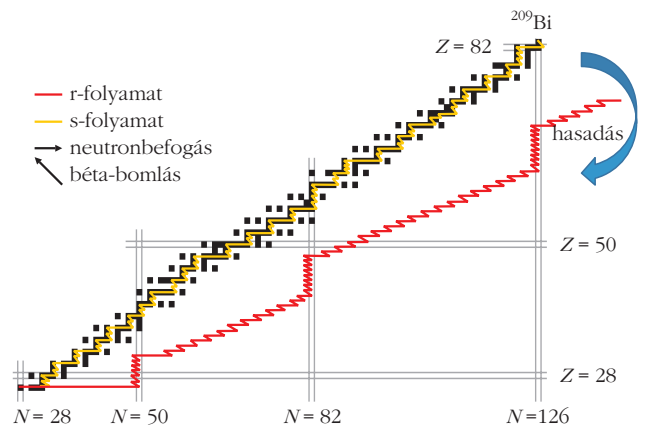
Kiss Gábor Gyula
RIKEN Nishina Center,
Radioactive Isotope Physics Laboratory

A nehéz kémiai elemek keletkezése az r-folyamatban

A Világegyetemet felépítő kémiai elemek és izotópjaik (a legkönnyebektől eltekintve) a csillagok belsejében a csillagfejlődés különböző szakaszaiban keletkeznek. A könnyű elemek jellemzően energiatermelő, töltött részecske-indukált fúziós folyamatokban jönnek létre. Tekintve, hogy az egy nukleonra jutó kötési energia a vascsoport elemeinél eléri a maximumát,¹ ezen elemeknél nehezebb magok energiatermelő folyamatokban nem jöhetnek létre. További korlát, hogy a kölcsönható töltött részecskék között fellépő Coulomb-taszítás a kölcsönható magok rendszámával nő, emiatt az alagúteffektus lejátszódásának, illetve – ennek következtében – a fúziós reakciók végbemene-
telének valószínűsége meredeken csökken [1].

A csillagfejlődés számos szakaszában azonban nagy számban keletkeznek neutronok, amelyek – Coulomb-taszítás hiányában – nehezebb magokon is könnyen befogódhatnak. A vascsoport elemeinél nehezebb atommagok döntő többsége² így neutronbefogás révén jön létre. Ezen neutronbefogásos folyamatok azonban nem termelik, hanem felemésztik az energiát, így nem meglepő, hogy a Naprendszer anyagának elenyésző része, hozzávetőleg minden 20 milliomodik atommag, tartozik ebbe a kategóriába.

A rendelkezésre álló neutronok számának függvényében klasszikusan két neutronbefogásos folyamatot különböztetünk meg, amelyeket az 1. ábra mutat be. Jelen írás célja, hogy az asztrofizikai r (rapid, azaz gyors) folyamat – amely a nukleosintézis jelenleg legkevésbé ismert folyamata – vizsgálata céljából, a RIKEN kutatóintézetben végzett kísérleteket bemutassa. Az elmúlt évtizedek intenzív elméleti és kísérleti munkája ellenére az r-folyamat asztrofizikai környezete igen pontatlanul ismert. Egyes modellek szerint a nagytömegű csillagok szupernóva-robbanása során, más model-



1. ábra. A vasnál nehezebb elemek izotópjainak keletkezése neutronbefogás révén. Az úgynevezett asztrofizikai s (slow, azaz lassú) folyamat a stabilitási völgyet követi [1]. Az r (rapid, azaz gyors) folyamat során egymást követő neutronbefogások révén a neutronellátási vonal közelében található extrém neutrongazdag magok jönnek létre. A fekete négyzetek a stabil atommagokat jelölik. Ezek közül azok, amelyeket nem érint a sárga vonal és a stabilitási völgy déli oldalán találhatóak, az úgynevezett tiszta r-magok. A völgy északi oldalán található olyan stabil magokat, amelyek neutronbefogás révén nem jöhetnek létre p-magoknak nevezük [2].

lek szerint neutroncsillagok egyesülésekor, esetleg a csillagok héliumgazdag rétegében neutrínóindukált reakciókban vagy gammakitörésekben mehet végbe az r-folyamat. Magfizikai megfontolások alapján azonban tudjuk, hogy az uráncsoport elemeinek létrejöttéhez legalább 10^{22} neutron/cm³ neutronsűrűség szükséges. Ezen óriási neutronfelesleg hatására sorozatos gyors (azaz a béta-bomlásnál gyorsabb) neutronbefogások révén extrém neutrongazdag, a neutronellátási vonal közelében található magok jönnek létre. Ilyen nagyszámú neutron csak valamilyen robbanásos folyamatban, magas hőmérsékleten – legalább 1 Gigakelvin, a Nap maghőmérsékletének több százszorosa –, rövid ideig állhat rendelkezésre!

Az elmúlt években számos új tudományos eredmény látott napvilágot, amelyek az asztrofizikai r-folyamat pontosabb megértését segítik elő. A galaxisunk peremén található fémszegény csillagok összetételének vizsgálata arra a meglepő felfedezésre vezetett, hogy a báriumnál nehezebb magok ($Z > 56$) előfordulásait leíró függvény alakja gyakorlatilag megegyezik ugyanezen magok Naprendszerbeli előfordulását leíró függvénnyel. A 2. ábrán néhány ilyen csillagbeli – az abszorpciós vonalak tanulmányozásával

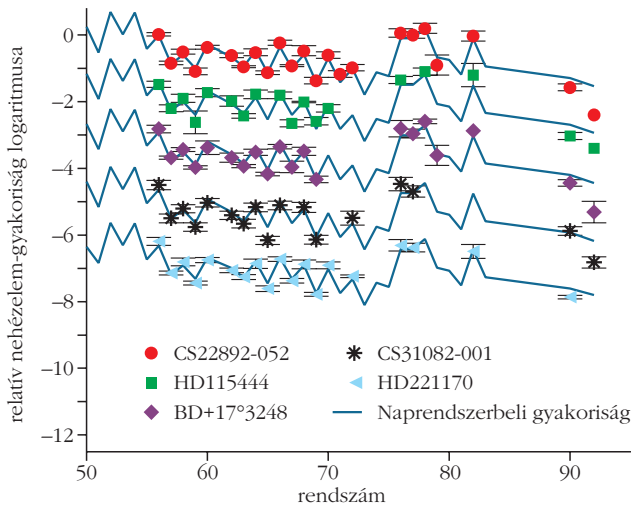
A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 27-én elhangzott planáris előadás alapján készült.



Kiss Gábor Gyula Junior Prima-díjas fizikus 2008-ban a Debreceni Egyetemen szerzett PhD-fokozatot, utána 2011-ig az olaszországi INFN-LNS kutatóintézetben az s-folyamat neutrontermelő reakcióit vizsgálta. Hazatérve az MTA ATOMKI-ban a nehéz, protongazdag magok keletkezésében szerepet játszó magreakciókat tanulmányozta. 2014-től a japán RIKEN Nishina Center vendégkutatója, kutatási témavezető, a késő neutron-, illetve protonkibocsátás jelenségének asztrofizikai szerepét vizsgálja.

¹ Az egy nukleonra eső kötési energia maximuma pontosan a ⁶²Ni izotópban van.

² Létezik azonban ~35 protongazdag, úgynevezett p-mag, amely nem jöhet létre neutronbefogással [2].

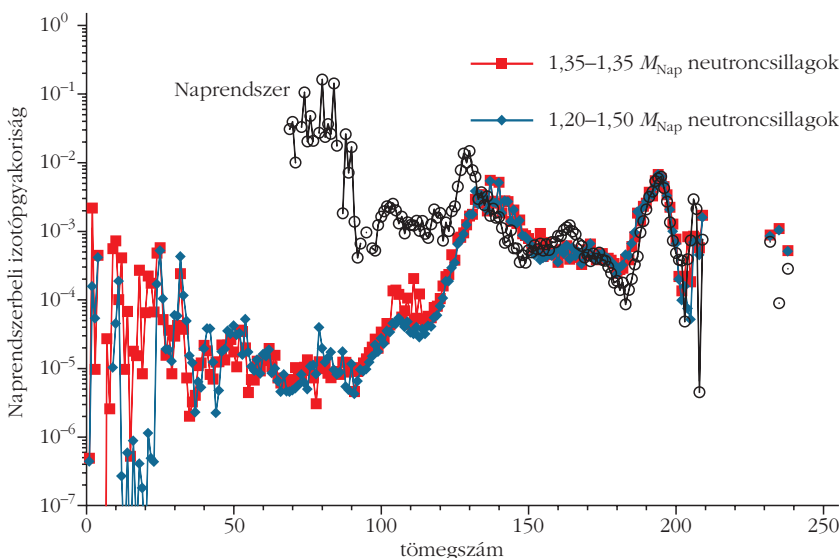


2. ábra. Galaxisunk peremén található csillagok (Cs22892-052, Cs3182-001, HD115444, Hd221170 és BD+17°3248) relatív nehéz elem ($Z > 56$) összetétele és – folytonos vonallal jelölve – a Naprendszerbeli nehézelem-gyakoriságok [3].

meghatározott – nehézelem-gyakoriság látható összehasonlítva a Naprendszert jellemző értékekkel [3]. Szintén forradalmi eredménynek tekinthető, hogy nagy vöröseltolódású – az Ősrobbanás után mindössze 2,5 milliárd évvel keletkezett – galaxisokban is nehéz elemek előfordulását sikerült kimutatni [4]. Ezen eredmények arra utalhatnak, hogy a csillagkeletkezés kozmológiai időskálán korán lejátszódhatott és az ekkor létrejött nagy tömegű csillagok szupernóva-robbanása során jöttek létre a galaxisunkban fellelhető r-magok.

Az egzotikus égítetek robbanását leíró modellek is jelentős fejlődésen mentek át az elmúlt években. Ezen modellek célja, a robbanás fizikai leírásán túl, a csillagközi térbe kijutó anyag izotóp- és mennyiségeloszlásának leírása. Érdekes ellentmondás a csillagászati észlelésekkel, hogy a nagy tömegű csillagok robbanását leíró modellek a Naprendszerbelitől nagyon eltérő

3. ábra. Két különböző tömegű neutroncsillag-kettős összeolvadásakor kilöködő anyag eloszlása a Naprendszerbeli eloszlással összehasonlítva [5].



kilöködöttanyag-eloszlást jósnak. Ezzel szemben a másik „népszerű” r-folyamat helyszín jelölt – a kettős neutroncsillagok egyesülésekor végbemenő robbanás során lejátszódó r-folyamat – esetén, legalábbis az ónnál nehezebb magokra, a Naprendszerbeli izotópeloszláshoz nagyon hasonló függvényt eredményeznek a szimulációk.

Ezt illusztrálандó, a 3. ábrán két különböző tömegű neutroncsillag-páros összeolvadásakor kilöködő anyag eloszlása látható a Naprendszerbeli anyageloszlással összehasonlítva [5].

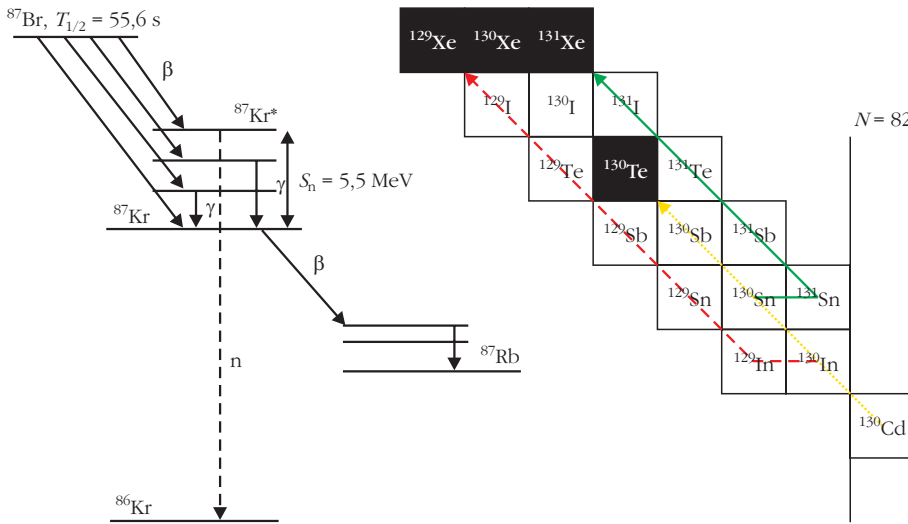
Az ellentmondás feloldásához a kulcs a magfizikai adatok – tömegek és a béta-bomlásokat jellemző mennyiségek, úgymint felezési idők és késleltetett neutronkibocsátási valószínűségek – pontos mérése vezethet [3]. Napjainkban a radioaktívnyaláb-gyárakban lehetővé vált/válik az r-folyamatösvényen található magok vizsgálata. Ebben a cikkben azokat a méréseket szeretném bemutatni, amelyeket az ezen a kutatási területen vezető szerepet játszó – Japánban, a Tokió melletti Wakóban található – RIKEN Nishina gyorsítóközpontban végeztünk az r-folyamat során végbemenő béta-bomlások jobb megértése céljából.

Béta-bomlások a stabilitási völgytől távol

A neutronbefogások révén létrejövő nehéz izotópok (adott izotópláncok menti) relatív gyakoriságát a neutronbefogások Q -értékei,³ illetve az ezzel ellentétes hatást kifejtő, az asztrofizikai közeg hőmérsékletétől függő fotobomlások határozzák meg. A stabilitási völgyhöz közelebb a Q -értékek magasak, a neutronbefogásokat a magas hőmérséklet miatt előforduló fotobomlások nem képesek egyensúlyban tartani. A neutronelhullatási vonal felé haladva azonban a neutronbefogások Q -értékei csökkennek, termikus egyensúly jön létre az (n,γ) és (γ,n) reakciók között, amely adott izotóplánc mentén egy maximummal rendelkező gyakoriságeloszlást

eredményez. Mivel egy páros neutronszámú mag kisebb valószínűséggel fog be további neutront, ezért a (hőmérséklettől és a rendelkezésre álló neutronok számától függő) maximum szinte mindig páros neutronszámú magnál van. Ezen magok az úgynevezett „várakozási pontok”, ahol az r-folyamat béta-bomlás révén eggyel nagyobb rendszámú magokat kezdhet felépíteni. Ezt követően a neutron-sűrűség és a hőmérséklet függvényében a következő izotóplánc mentén is beáll a fentebb vázolt egyensúly.

³ A Q -érték a reakció energiamelegéről ad információt, a pozitív Q -értékű (exoterm) reakciók energiát termelnek, a negatív Q -értékű (endoterm) reakciók végbemeneteléhez pedig energiára van szükség.



4. ábra. A ^{87}Br -mag bomlássémája és a késleltetett neutronok szerepe az r-folyamat késői szakaszában. A ^{87}Br -mag béta-bomlása a ^{87}Kr -mag alap- és gerjesztett állapotaira vezet. A gerjesztett állapotok gamma-sugárzás kibocsátásával kerülnek az alapállapotba, majd újabb béta-bomlás következik be. Amennyiben azonban a ^{87}Br -mag béta-bomlása a ^{87}Kr -mag S_n neutronszerparációs energiájánál, azaz $S_n \sim 5,5$ MeV-nél magasabb gerjesztett állapotokra vezet, előfordulhat, hogy a ^{87}Br -mag béta-bomlását neutronkibocsátás követi. A jobb oldalon látható ábra a béta-késleltetett neutronok szerepét ábrázolja a ^{130}Cd „waiting point” mag stabilitási völgy felé vezető lehetséges bomlásain keresztül. Ezen mag sorozatos béta-bomlások révén ^{130}Te -maggá alakul (középső, pontozott nyíl). Amennyiben azonban bomlását neutronkibocsátás követi (az esetek körülbelül 3,5%-ban), a sorozatos béta-bomlások ^{129}Xe -magra vezetnek (bal oldali, szaggatott nyíl). A korábban kibocsátott béta-késleltetett neutronok be is fogódhatnak, példánkban így (is) keletkezhet a stabil ^{131}Xe -mag (jobb oldali, folytonos nyíl).

A sorozatos neutronbefogásokat a zárt neutronhéjjal rendelkező magok szintén megakasztják, mint az az 1. ábrán is látható. Ennek magyarázata a héjmodellben rejlik: a mágikus neutronszámra vezető neutronbefogások Q -értékei sokkal magasabbak, mint a további neutronbefogásoké. Ilyen izotópokat elérve a béta-bomlás esélye megnő, ennek következtében pedig az r-folyamat eltávolodik a neutronelhullatási vonaltól. A stabilitási völgyhöz közeledve azonban a béta-bomlások felezési ideje egyre hosszabb, így az r-folyamat egy adott ponton „leküzd” a zárt neutronhéjak jelentette akadályt, és tovább folytatja az egyre nehezebb magok felépítését. Modellszámítások szerint az r-folyamat körülbelül az $A \sim 260$ -as tartományig építheti fel az elemeket. Ezt a tömegtartományt elérve a létrejött magok újabb neutron befogva hasadnak, a hasadványok pedig visszakerülnek az r-folyamat áramába és újabb, egyre neutrongazdagabb magok felépítésében vesznek részt. A neutronfluxus megszűntével az r-folyamat során létrejött magok sorozatos béta-bomlással kerülnek vissza a stabilitás völgyébe és építik fel az adott kémiai elem neutronban leggazdagabb stabil izotópjait.

Mivel a neutronbefogások a zárt neutronhéjjal rendelkező magok környezetében lelassulnak, így ezen magok gyakorisága megnő. Ez a magyarázata az $A \sim 80$, $A \sim 130$ és $A \sim 195$ tömegszámoknál található izotópok magasabb előfordulásának. Fontos megjegyezni, hogy a neutronfluxus megszűntét megelőző, termikus egyensúlyllyal jellemezhető – páros neutronszámú magok által dominált – izotópgyakoriságok azonban jelentősen eltérnek a Naprendszerbeli tiszta r-magok előfordulásától [1, 5]

Ennek magyarázata, hogy a stabilitási völgytől távolabbra kalandozva a béta-bomlás érdekesebb formái is megfigyelhetők. Amennyiben a béta-bomlás a leányelemben a részecske (például neutron) szeparációs energia felett elhelyezkedő gerjesztett állapotokra vezet, a bomlást részecskekibocsátás követheti. Ezen – béta-késleltetett részecskekibocsátásnak nevezett – jelenség energetikai jellemzőit a 4. ábra mutatja a neutrongazdag ^{87}Br -mag béta-bomlásának példáján keresztül. A $T_{1/2} = 55,6$ s felezési idejű ^{87}Br -mag béta-bomlása a ^{87}Kr -mag alap-, illetve gerjesztett állapotaira vezet. A gerjesztett állapotok többsége gamma-sugárzás kibocsátásával a ^{87}Kr -mag alapállapotába bomlik, majd az újabb béta-bomlás a – stabilnak tekinthető – ^{87}Rb -magra vezet. Azon-

ban van egy másik lehetséges bomlási folyamat is! Amennyiben a ^{87}Br -mag béta-bomlása a ^{87}Kr -magban a neutronszerparációs energia ($S_n \approx 5,5$ MeV) feletti gerjesztett állapotokra vezet, előfordulhat (az esetek nagyjából 2,5%-ban), hogy nem gamma-sugárzás kibocsátása, hanem neutronemisszió követi a ^{87}Br -mag béta-bomlását. Ezt a jelenséget, amelyet a 4. ábrán szaggatott vonal jelöl, nevezük késleltetett neutronkibocsátásnak. A stabilitási völgytől távolodva a késleltetett neutronkibocsátás valószínűsége növekszik. Ennek magyarázata, hogy a béta-bomlás Q -értéke folyamatosan nő, illetve a részecskeszerparációs energiák egyre alacsonyabbak, így annak valószínűsége is egyre magasabb, hogy a bomlás a leányelem magas, a részecskeszerparációs energia feletti, gerjesztett állapotaira vezet. Fontos megjegyezni, hogy az r-folyamat során olyan extrém neutrongazdag magok is létrejönnek, hogy a béta-bomlásukat követően két, illetve három neutronkibocsátásra is sor kerülhet!

A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség adatbázisa [6] szerint jelenleg 241 késleltetett, egy neutron kibocsátásával bomló magot ismerünk. További 18, illetve 4 (^{11}Li , ^{14}Be , ^{17}B és ^{31}Na) atommag esetén a béta-bomlás a leánymag olyan magasan gerjesztett állapotára vezet, hogy kettő, illetve három késleltetett neutron kibocsátása is megtörténhet. A késleltetett neutronkibocsátást a P_n -értékekkel jellemezzük, ez a szám azt mutatja meg, hogy a béta-bomlások hány százalékát követi legalább egy neutron kibocsátása. Továbbá, a P_{1n} -érték az egy neutron kibocsátásának, a P_{2n} -érték a két neutron kibocsátásának stb. valószínűségét mutatja meg (tehát $P_n = P_{1n} + P_{2n} + \dots$, illetve $P_{0n} = 100\% - P_n$). A ^{86}Ga -mag béta-késleltetett neutronkibocsátását

például a következő P_n -értékek jellemzik: $P_{1n} \approx 20\%$, $P_{2n} \approx 60\%$, illetve $P_{0n} \approx 20\%$, tehát a bomlások mindösszesen egyötödét nem követi neutronkibocsátás. Fontos különbséget tenni aközött, hogy egy mag esetén kísérletileg igazolt a késleltetett neutronkibocsátás és aközött, hogy megmértük a megfelelő P_n -értékeket: a 241 béta-késleltetett egy neutron kibocsátó mag közül kevesebb, mint a fele esetén ismerjük a kibocsátási valószínűséget. A 18 ismert késleltetett két neutron kibocsátó mag közül csak három (^{17}B , ^{31}Na , ^{86}Ga), illetve a 4 kísérletileg igazolt késleltetett három neutron kibocsátó mag közül csak egyetlen (^{17}B) mag esetében ismertek a P_{2n} , illetve P_{3n} -értékek [6].

A r-folyamat késői szakaszában, az $(n, \gamma) - (\gamma, n)$ egyensúly megszűntét követően a béta-késleltetett neutronkibocsátás – és más magok általi neutronbefogás – újabb béta-bomlás, neutronkibocsátás, ... folyamat többször lejátszódik, ezáltal kisimul a termikus egyensúlyt jellemző páros neutronsámú magok dominálta izotóp-előfordulás. Ez a folyamat – amelyet a 4. ábra jobb oldalán, a ^{130}Cd -mag bomlásán keresztül szemléltetnek – vezet a Naprendszerben megfigyelhető sima függvénnyel leírható izotópgyakoriságokhoz.

A különböző r-folyamatmodellek jelenleg nagyon széles asztrofizikai bemenő paraméter (hőmérséklet, szabad neutronok száma, időskála stb.) tartományt és bizonytalan magfizikai inputadatokat (úgy mint tömegek, béta-bomlási paraméterek) használnak. Az extrém neutrongazdag magok béta-bomlásainak jobb megértése – azaz például a felezési idők és béta-késleltetett neutronkibocsátási valószínűségek mérése – az r-folyamat pontosabb modellezését teszik lehetővé, megszorítva az asztrofizikai bemenő paramétereket is [3].

A béta-bomlások vizsgálata radioaktív nyalábokkal

A modern radioaktív nyalábokat előállító gyorsítók fejlődésével napjainkra lehetővé vált – például az ez irányú kutatásban világvezető RIKEN Nishina gyorsítóközpontban – számos, az r-folyamatban keletkező extrém neutrongazdag mag megfelelő intenzitású előállítása. A RIKEN-ben az AVF-ciklotron és RILAC-injektorok⁴ által szolgáltatott ionnyaláb további gyorsítását egymást követő ciklotron-típusú részecskegyorsítók végzik.⁵ A végső gyorsítási fokozat a jelenleg működő legnagyobb teljesítményű, $K = 2600$ MeV szupravezető SRC-ciklotron, amely az urán 238-as izotópját 345 MeV/nukleon energiára, a fénysebesség közel 70%-ára képes gyorsítani. Az így felgyorsított nehéz ionok az elsődleges céltárggyal (általában be-

rillium vagy ólom) ütközve „széttöredeznek”, változatos tömegű, illetve neutron-proton arányú, radioaktív fragmentumok jönnek létre.

Az így létrehozott radioaktív nyaláb „tisztítását” a BigRIPS-szeparátor végzi, azaz a létrehozott izotópok sokaságából a szupravezető elektromágnesek és részek pontos beállításával kiválaszthatjuk a kísérleteinkhez szükséges magokat. Kísérleteinket – a beállításoktól függően – általában 5-25 magból álló, úgynevezett „kocktálnyalábbal” végezzük. A kocktálnyaláb használata előnyös számunkra, hiszen így egy kísérletben – költséghatékony módon – számos felezési időt, nívósémát, illetve P_n -értéket tudunk meghatározni. A magok azonosítását energiaveszteség – repülési idő technikával kivitelezük. A nagy energiával rendelkező ionnyaláb plasztikszcintillátorokon, illetve ionizációs kamrákon áthaladva csak minimális energiát veszít (és kicsit szóródik), ami mérésünket így nem zavarja, azonban a részecskék azonosításához feldolgozható minőségű jel keletkezik. A nyalábot alkotó részecskék repülési ideje és energiavesztesége különbözőképpen függ tömegüktől, töltésüktől és sebességüktől, tehát ha ezen mennyiségeket egymás függvényében ábrázoljuk a különböző magok megfelelően elkülönülnek egymástól.

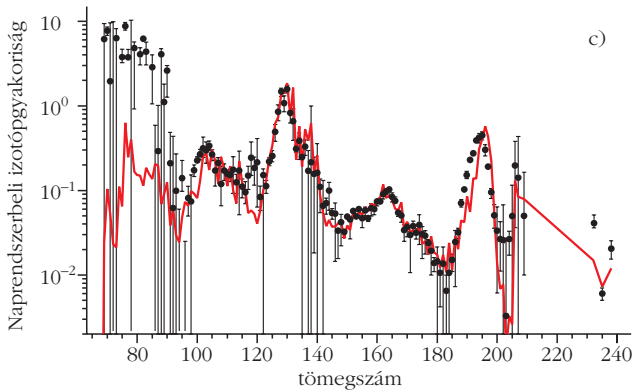
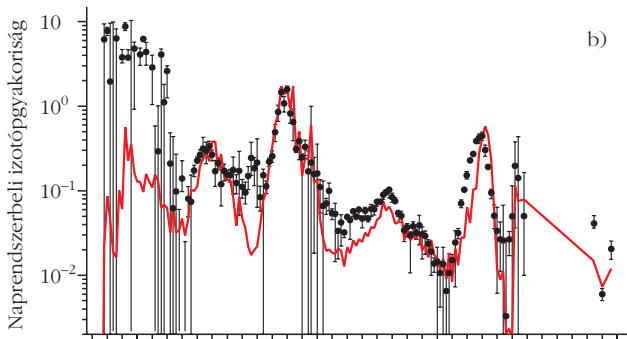
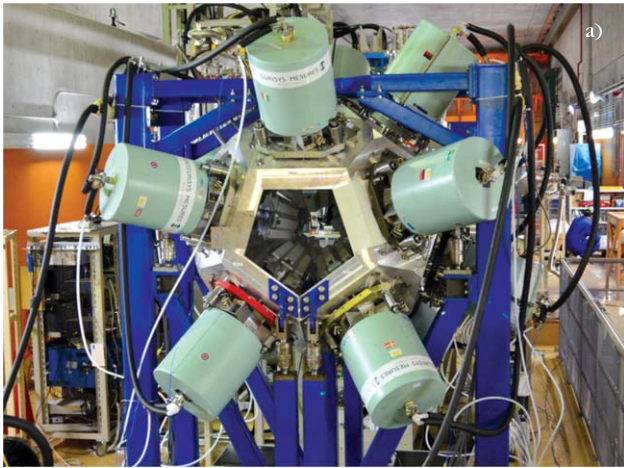
Kísérleteink során koincidenzában mérjük a kocktálnyalábot alkotó magok béta-bomlásakor kibocsátott elektronokat, neutronokat és gamma-legerjesztődést. A kísérleti elrendezés két részből áll: a kocktálnyalábot szegmentált szilíciumdetektorokból álló rendszerbe „lőjük”, ahol megáll a nyaláb és bekövetkezik a bomlás, amely során a kibocsátott gamma-részecskéket, illetve neutronokat egy másik detektorrendszerrel mérjük. A kísérlet által lefedett tömegtartománytól függően 3-8 darab 1 mm vastag szilíciumdetektort használtunk. A különböző magok energiavesztesége a detektor anyagában, rendszámuk függvényében más és más, így a legnehezebb magok az elülső, míg a könnyebb magok a hátulsó szilíciumdetektorokban állnak meg. Például, míg a 2014 őszén végrehajtott, ritkaföldfém-elemek keletkezésének és megszerkeztetének megértését célzó kísérlet során 3 réteg szilíciumdetektor elég volt a nehéz neodímium- – erbiummagok megállítására, addig a 2016 tavaszán kivitelezett (tömegméréssel egybekötött) neutrongazdag cink- – kryptonmag tartományban 7 detektorra volt szükség. A radioaktív magok teljes lefékeződését béta-bomlás követi. Míg az implantációs események során GeV nagyságú energia kerül leadásra, a bomlást nagyságrendekkel kisebb, maximum néhány MeV energiájú elektronok kibocsátása követi, így a különböző eseményeknek megfelelő jelek megkülönböztethetők.

Az EURICA-együtműködés keretében⁶ mintegy 140 izotópra határoztunk meg elsőként felezési idő-értéke-

⁴ Variálható frekvenciájú lineáris nehézion-gyorsító.

⁵ RRC ($K = 540$ MeV ring ciklotron), fRC ($K = 570$ MeV rögzített frekvenciájú ciklotron), IRC ($K = 980$ MeV, közbenső ciklotron) végül SRC ($K = 2600$ MeV szupravezető ciklotron). A ciklotrontípusú gyorsítók teljesítményének jellemzésére a K -értéket használjuk, összehasonlításképpen a hazai magfizikai kutatások számára rendelkezésre álló legnagyobb teljesítményű – az ATOMKI-ban található – MGC-20 ciklotron típusú gyorsítójának K -értéke 20 MeV.

⁶ Jelen cikkben – helyhiány miatt – csak az új felezési idők szerepéről írok azonban fontos megjegyezni, hogy az együtműködés keretében a stabilitási völgytől távol fekvő magok szerkezetét (deformáció, héj- és alhéjlezáródás, izomer állapotok, izospin-szimmetria stb.) és egzotikus bomlási formákat (például 2 proton kibocsátás) is tanulmányoztunk.



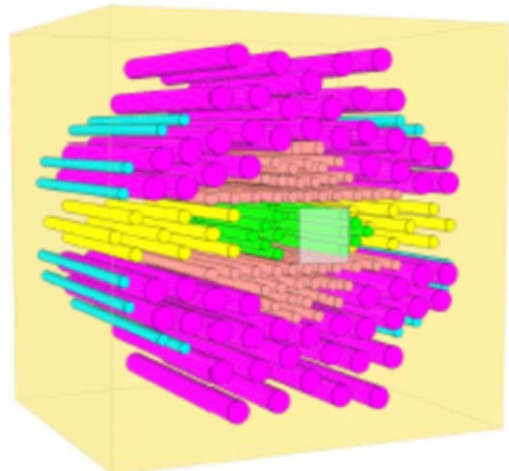
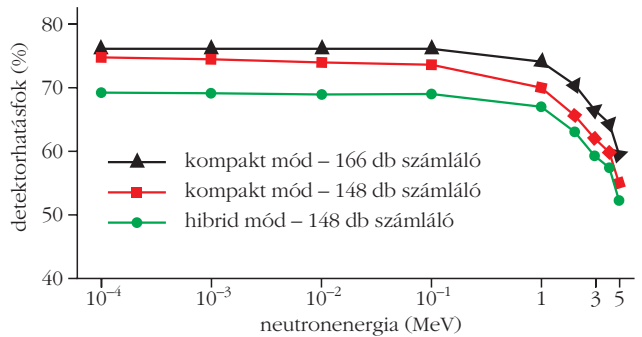
5. ábra. Az EURICA gamma-detektorrendszer fényképe, illetve az EURICA együttműködés keretében meghatározott új felezési idők hatása az r-folyamatszimulációkra. Az alsó, b) és c) ábrákon a Naprendszerbeli r-maggyakoriságok (fekete pontok) és az r-folyamatszimulációk (folytonos vonal) összehasonlítása látható: az első, b) esetben az irodalmi felezési idők, a második, c) esetben a RIKEN-ben 2012-től az EURICA-együttműködés keretében meghatározott új felezési idők figyelembevételével végeztük az r-folyamat modellezését [7].

ket (és körülbelül ugyanennyi esetben jelentősen pontosítottuk az irodalmi adatokat). Az együttműködés neve az *Euroball-RIKEN Cluster Array* angol kifejezésből ered: a szilíciumdetektorokat körülvevő 84 darab, nagy tisztaságú germániumdetektort 12 darab, egyenként 7 detektort tartalmazó „fürtbe” rendeztük. Az 5. ábra tetején az EURICA-detektorrendszer fényképe látható. A szilíciumdetektorokban megálló radioaktív magok béta-bomlását és az ezt követő gamma-legerjesztődéseket koincidenzában mérve, a mag felezési ideje nagy pontossággal meghatározható. Az

új felezési időkkel elvégzett r-folyamatszámítások sokkal jobban egyeznek a Naprendszerbeli r-izotóp-gyakoriságokkal, mint azt az 5.c ábra mutatja [7].

A bomlást követő neutronok mérését a BRIKEN-detektorrendszerrel végezzük. A detektorrendszer ^3He -gázt tartalmazó számlálócsövekből áll. A neutronok és a ^3He -gáz kölcsönhatása során trícium és proton keletkezik 765 keV kinetikus energiával. A proporcionális számlálókat egy megközelítőleg 1 m^3 térfogatú, nagy sűrűségű polietilénből készült moderátorba ágyaztuk,

6. ábra. A késleltetett neutronkibocsátási valószínűségek mérésére használt kísérleti elrendezés hatásfokának szimulációja (föül), a berendezés fényképe (középen), illetve a különböző intézetekből származó számlálócsövek elhelyezkedése a polietilén moderátorban (alul).



amelyre a nagyenergiás neutronok lassítása miatt van szükség. A rendszer rugalmas kialakítású, a mérési terv függvényében két elrendezést használhatunk. A 148 darab számlálóból és két darab „clower” típusú HPGe detektorból álló elrendezés béta-neutron-gamma koincidenciamérésekre ad lehetőséget. Ezt az elrendezést ~70%-os neutronszámlálási hatásfok és 1% gamma-detektálási hatásfok ($E_\gamma = 1,33$ MeV esetén) jellemzi. Amennyiben a germániumdetektorokat nem kívánjuk használni, újabb számlálócsövek behelyezésére nyílik lehetőség, amelynek eredményeképp ~76% neutrondetektálási hatásfok érhető el. Így elmondhatjuk, hogy az amerikai Oak Ridge Nemzeti Laboratórium, a németországi GSI, az orosz JINR (Egyesített Atommagkutató Intézet), a spanyolországi UPC (Katalán Tudományegyetem) és a japán RIKEN kutatóintézet együttműködésében felépített BRIKEN-rendszer a késleltetett neutronok detektálására valaha épített legnagyobb hatásfokú rendszer. A számlálócsövek elhelyezésének megtervezésekor nemcsak a legnagyobb hatásfok elérésére törekedtünk, hanem konstans közeli hatásfok-energia függvény elérése is célunk volt. Ennek oka, hogy a jelenlegi berendezéssel „csak” számláljuk a neutronokat, energiájukat nem mérjük. Mivel a stabilitási völgytől távoli magokról van szó, a késleltetett neutronok energiájáról nem rendelkezünk részletes kísérleti információval. Héjmodellszámítások alapján (amelyeket a stabilitási völgyhöz közelebb található, késleltetett neutront kibocsátó magok, például: $^{87,88}\text{Br}$, ^{137}I -magok segítségével ellenőriztünk) azonban tudjuk, hogy ezen neut-

ronok energiája általában 1 MeV-nél alacsonyabb. Detektorunk hatásfokfüggvénye 2,9%-on (166 számlálócsöves elrendezés), illetve 3,6%-on (148 számlálócső és két germániumdetektor) állandó a 0–1 MeV tartományban, ezért a P_n -értékek meghatározásának – a neutronenergia-mérés hiányából származó – szisztematikus hibája kisebb, mint 4%, szemben a korábbi hasonló detektorok 10%-ot meghaladó bizonytalanságával. A 6. ábrán a BRIKEN-detektor hatásfok-energia függvénye, az utolsó számlálócső behelyezéséről készített fényképem, illetve a számlálócsövek elhelyezkedését ábrázoló sematikus rajz láthatók.

A 2016 őszi és 2017 tavaszi félévek során öt, a RIKEN Program Tanácsadó Testület által jóváhagyott mérési kampányban neutrongazdag ^{28}Fe - és ^{65}Tb -izotópok között ~160 új mag esetében fogjuk az egy, két, illetve három késleltetett neutronkibocsátás valószínűségeit meghatározni, ezzel mintegy megduplázva a rendelkezésre álló adatbázis méretét. Az új kísérleti eredmények várhatóan az r-folyamat modelljei pontosságát fogják lehetővé tenni, illetve segítenek a jövőben a GSI-ben végrehajtandó mérések tervezésében.

Irodalom

1. C. Iliadis: *Nuclear Physics of Stars*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2007).
2. Gy. Gyürky, *Fizikai Szemle* 60 (2010) 37.
3. J. J. Cowan, *Nature* 440 (2006) 27.
4. J. Prochaska, *Nature* 423 (2003) 57.
5. S. Goriely és mts., *Astrophysical Journal Letter* 738 (2011) L21.
6. Nemzetközi Atomenergia Ügynökség, INDC (NDS)-0599 összefoglaló, <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds-0599>
7. G. Lorusso és mts. *Physical Review Letters* 114 (2015) 1925201.

SZIGETELŐ ANYAGOK IONNYALÁBOS ANALÍZISE

Szilágyi Edit, Kótai Endre

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Részecske- és Magfizikai Intézet

Dielektrikumokat az anyagtudomány számos területén használnak, mint például űrtechnikában (hőszigetelő bevonatok), optoelektronikában, napelemeknél vagy polimerek széleskörű alkalmazásainál. Az ionsugaras mérőműszerekkel, nevezetesen a visszaszórás-

sos spektrometriával (BS), a rugalmasan meglökött magok detektálásával (ERD), a magreakciós analízissel (NRA) a dielektrikumok vizsgálata során – mint minden más anyag esetén is – elsősorban a mintákat alkotó anyagok, szennyezők mélységeloszlása határozható meg. Az ionsugaras nukleáris analitikai (IBA, Ion Beam Analysis) mérőműszerek lényege, hogy néhány keV-től néhány MeV-ig terjedő energiájú

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 26-án elhangzott előadás alapján készült.



Szilágyi Edit, az MTA doktora, az MTA Wigner FK Nukleáris Anyagtudományi Osztály és az ionnyaláb-fizika kutatócsoport vezetője. Nevéhez fűződik az ionnyalábos analitikai mérőműszerek energia- és mélység-felbontóképességének kísérleti és elméleti meghatározása, valamint e módszerek spektrometria-számításába beépítette az energiaelmosódás hatását is. A módszerfejlesztéseken túl az ionbesugárzás felületmódosító hatásai, vékony- és multirétegek, valamint nanosztruktúrák vizsgálatával is foglalkozik.



Kótai Endre, a fizikai tudomány kandidátusa, az MTA Wigner FK külső munkatársa. Főbb kutatási területe az ionnyaláb-analitika, ionimplantáció fizikai folyamatainak tanulmányozása. Nevéhez fűződik a több külföldi laboratóriumban is használt RBX szimulációs program kifejlesztése.