

MAGFIZIKAI KÍSÉRLETEKKEL A NEUTRONGAZDAG ATOMMAGOK SZUPERNOVÁKBAN ZAJLÓ SZINTÉZISÉNEK NYOMÁBAN

NUCLEAR EXPERIMENTS FOR STUDYING THE SYNTHESIS OF NEUTRON-RICH NUCLEI IN SUPERNOVAE

Kiss Gábor Gyula

az MTA doktora, tudományos tanácsadó, Atommagkutató Intézet, Budapest
gkiss@atomki.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A Földünkön megtalálható stabil atommagok döntő része magreakciók révén jött létre a csillagfejlődés különböző szakaszaiban. Jelenlegi ismereteink szerint a vasnál nehezebb neutrongazdag atommagok sorozatos neutronbefogások révén keletkeznek neutroncsillagok összeolvadása során. Ugyanakkor a legújabb asztrofizikai szimulációk megmutatták, hogy a könnyű stroncium és ezüst között található neutrongazdag atommagok létrejöhetnek II-es típusú szupernóvák robbanása során is. Ezen elemkeletkezési folyamat modellezéséhez pontos magfizikai információkra van szükség. Ez a cikk a könnyű, neutrongazdag magokat létrehozó nukleoszintézis folyamatának vizsgálata céljából végzett méréseket és azok eredményeit mutatja be.

ABSTRACT

Most of the stable nuclei found on Earth were formed by nuclear reactions at different stages of stellar evolution. Current knowledge suggests that the neutron-rich nuclei, which are heavier than iron, are formed by a series of neutron captures during the fusion of neutron stars. However, recent astrophysical simulations have shown that neutron-rich nuclei between light strontium and silver can also be formed during the explosion of Type II supernovae. Accurate nuclear physics information is needed to model this nucleosynthesis scenario. This paper presents measurements and results from the study of the nucleosynthesis process that synthesizes these low-mass neutron-rich nuclei.

Kulcsszavak: nukleáris asztrofizika, robbanásos nukleoszintézis-folyamatok, hatáskeresztmetszet-mérés, asztrofizikai szimuláció

Keywords: nuclear astrophysics, explosive nucleosynthesis processes, cross-section measurement, astrophysical simulation

A VASNÁL NEHEZEBB ATOMMAGOK KELETKEZÉSE

A nukleáris asztrofizika a kémiai elemek és izotópjaik keletkezésében, illetve a csillagok energiatermelésében kulcsszerepet játszó magreakciók tanulmányozásával foglalkozik. Interdiszciplináris tudomány, amelynek célja a csillagászati észlelések értelmezése elméleti és kísérleti magfizikai adatokra támaszkodó asztrofizikai modellek segítségével.

A világegyetemet felépítő kémiai elemek döntő többsége a csillagfejlődés különböző szakaszaiban keletkezik (Iliadis, 2007). A csillagok életútja és a kémiai elemek szintézise szorosan összekapcsolódik, a nukleoszintézis során kulcsszerepet játszó magfizikai folyamatokat az égitestek tömege és összetétele határozza meg. Az egymást követő elemkeletkezési folyamatok a csillag tömegének függvényében akár több milliárd éven át tartanak. A könnyű elemek – például szén, nitrogén, oxigén stb. – energiatermelő magreakciók során jönnek létre a csillagok belsejében. Azonban ahogy egyre nehezebb atommagok keletkeznek, a felszabaduló energia – amely egyensúlyban tartja a csillagot a tömegvonzás ellenében – egyre kevesebb. Világunkban a legstabilabb atommag a 28 protonból és 34 neutronból álló ^{62}Ni . Ennél nehezebb atommagokat eredményező reakciók tehát nem termelik az energiát, hanem felhasználják. Továbbá az atommagok között fellépő Coulomb-taszítás a kölcsönható magok rendszámával nő, emiatt a magreakciók végbemenetelének valószínűsége meredeken csökken a növekvő rendszámmal.

A csillagfejlődés számos szakaszában azonban jelentős mennyiségben keletkeznek neutronok, amelyek – Coulomb-taszítás hiányában – könnyen befogódhatnak nehezebb atommagokon is. Mintegy hét évtizede tudjuk, hogy a vasnál nehezebb atommagok döntő többsége neutronok befogása révén keletkezik. A naprendszerünkben előforduló $Z > 28$ rendszámú atommagok 1. ábrán látható gyakoriságeloszlása alapján legalább két fő, a rendelkezésre álló neutronok száma alapján alapvetően különböző nukleoszintézis-folyamat létezését szükséges feltételezni. Ezek közül az egyik folyamat az asztrofizikai s- (*slow*, azaz lassú) folyamat, amelyet alacsony vagy közepes (10^6 – 10^{10} neutron/cm³) neutronsűrűség jellemez, és óriáscsillagokban játszódik le. Az s-folyamat a vas környékén található atommagok neutronbefogásával kezdődik. A befogások olyan lassan követik egymást, hogy amennyiben radioaktív atommag keletkezik, annak van ideje elbomlani, mielőtt a következő neutron befogódna. A folyamat így tehát évezredekken át is tarthat. A legnehezebb atommag, amely az s-folyamat során létrejöhet, a 83 protonból és 126 neutronból álló ^{209}Bi -mag, ugyanis az újabb neutron befogása révén létrejövő atommag bomlása alfa-részecske kibocsátásához vezet, ami csökkentve a rendszámot egy zárt hurokba kényszeríti a folyamatot. Ugyanakkor Földünkön urán ($Z = 92$) és tórium ($Z = 90$) is található. Hosszú évtizedeken keresztül válaszra váró kérdés volt, hogy ezen elemek milyen aszt-

rofizikai közegben jöhettek létre, és milyen magfizikai paraméterek jellemzik az ezeket létrehozó nukleoszintézis-folyamatot.

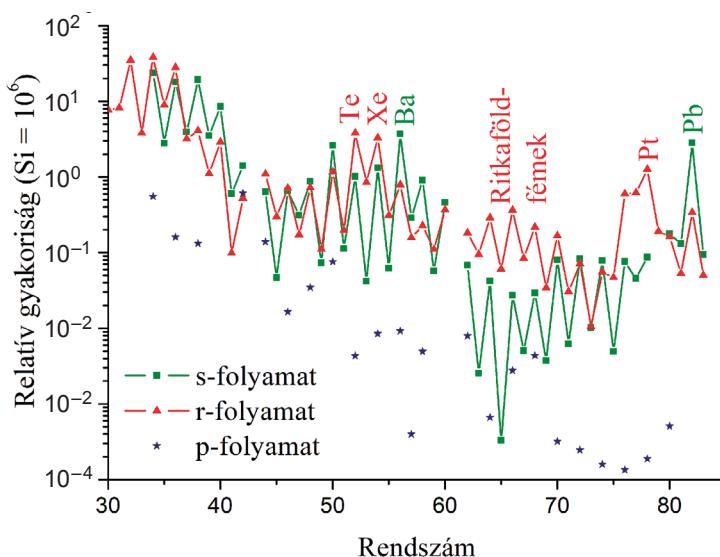
A 21. század első két évtizedében példátlan módon bővült a minket körülvevő világegyetemről rendelkezésre álló tudásunk. 2017. augusztus 17-én gravitációs, majd elektromágneses hullámok észlelésével bebizonyosodott, hogy összeolvadó neutroncsillagokban végbemehet a másik neutronbefogásos folyamat, amelyet asztrofizikai r-folyamatnak nevezünk (r mint rapid, azaz gyors). Ezt a folyamatot szélsőségesen magas (10^{26} neutron/cm³-t meghaladó) neutronsűrűség jellemzi, amelynek hatására a sorozatos neutronbefogások és béta-bomlások révén különböző, mindössze a másodperc töredékéig létező, nehéz (akár $Z = 100$ rendszámú), rendkívül neutrongazdag atommagok keletkeznek. A nagy neutronsűrűség legfeljebb csak néhány másodpercig áll rendelkezésre, ezt követően a létrejött radioaktív atommagok elbomlanak, létrehozva a bolygónkon is megtalálható, vasnál nehezebb, stabil atommagokat (Cowan et al., 2021).

A Földünkön megtalálható legtöbb, a vasnál nehezebb atommag mind az s-, mind az r-folyamat révén létrejöhet. Vannak azonban olyan atommagok is, amelyek különböző okok miatt csak az egyik folyamatban keletkezhetnek. Ezen atommagok szintézisének modellezése lehetővé teszi az elemkeletkezési folyamatok vizsgálatát. Napjainkban már ismeretekkel rendelkezünk a galaxisunk peremén található öreg, az ősrobbanás után mindössze néhány milliárd évvel keletkezett, fémszegény¹ csillagok összetételéről is. E csillagokat az teszi különlegessé, hogy – összehasonlítva összetételüket a Naprendszerével – bár vasat, nikkelt stb. alig-alig találunk bennük, mégis tartalmaznak nehéz elemeket, például báriumot, európiumot, aranyat stb. Mivel elhanyagolhatóan kevés vasat tartalmaznak, így nem valószínű, hogy a megfigyelt nehézelem-gyakoriság az s-folyamat során jött létre. Feltételeznünk kell tehát, hogy az észlelt nehéz atommagok dominánsan az asztrofizikai r-folyamat során keletkeztek, és így ezek a csillagok lehetőséget adnak az r-folyamat asztrofizikai modellezésére.

A nukleoszintézis-szimulációk egyrészt a csillagászati észlelések eredményeire, másrészt magfizikai adatokra támaszkodnak. Ugyanakkor az r-folyamat során létrejövő atommagok tulajdonságairól jellemzően nem, vagy csak rendkívül pontatlanul állnak rendelkezésre kísérleti információk, az elméleti modellek jóslatai pedig nemritkán nagyságrendet meghaladóan térnek el egymástól (Cowan et al., 2021). Ennek megfelelően a modern magfizikai kutatások egyik fókuszpontját az r-folyamat során létrejövő atommagok jellemzőinek és kölcsönhatásainak vizsgálá-

¹ A csillagok összetételének jellemzésére gyakran használjuk a következőképpen definiált vas/hidrogén arányszámot: $[Fe / H] = \log_{10}[N_{Fe} / N_H] - \log_{10}[N_{Fe} / N_H]_{Nap}$, ahol N_{Fe} , illetve N_H az adott csillag egységnyi térfogatra vonatkoztatott vas- és hidrogénatomjainak számát jelzi. A Napunkéval megegyező összetételű csillagok esetén ez a szám 0, az említett fémszegény csillagok esetén pedig $[Fe / H] \leq -3$. Tehát Napunkban a vas hidrogénre vonatkoztatott előfordulási gyakorisága legalább ezerszerese a fémszegény csillagokat jellemző értéknek.

lata képezi. Napjainkban szinte nincs is olyan magfizikai nagyberendezés vagy gyorsítóközpont, ahol a kutatási programban nem szerepel kiemelt témaként az r-folyamat ösvényén található atommagok tanulmányozása.



1. ábra. A vasnál nehezebb stabil atommagok előfordulási gyakorisága a Naprendszerben. A négyzetek és háromszögek a neutronbefogásos folyamatokban keletkező magokat jelölik. A nukleoszintézis-folyamatok lefolyását alapvetően meghatározza az atommagok szerkezete, bizonyos neutron- és protonszámok kiemelkedő stabilitást mutatnak, emiatt alakulnak ki gyakoriságcsúcsok például az s-folyamat esetén ólommagoknál vagy az r-folyamat során az arany–platina tartományban. A csillagok az ún. p-magokat jelölik, amelyek előfordulási gyakorisága – néhány kivételtől eltekintve – kb. két–három nagyságrenddel alacsonyabb az s- és r-magokat jellemző értéknél. Ezen atommagok jelenlegi tudásunk szerint fotobomlási reakciók során keletkeznek

NUKLEOSZINTÉZIS A SZUPERNOVÁK ROBBANÁSA SORÁN KILÖKÖTT ANYAGBAN

Egy-egy elemkeletkezési folyamat modellezése során asztrofizikai paraméterek (esetünkben például hőmérséklet, neutronsűrűség, időskála stb.) és magfizikai adatok (az atommagok tömegei, élettideje stb.) felhasználásával kiszámoljuk a folyamat eredményezte atommag-előfordulási gyakoriságokat. A modell megbízhatóságát a számolt és csillagászati megfigyelésekből ismert adatok egyezésének mértéke jellemzi. A nukleoszintézis szimulációihoz az r-folyamat atommagtérképen bejárt útvonalán található több ezer különböző rendszámú és neutronszerű atommag tulajdonságainak, valamint a köztük végbemenő reakciók paramétereinek ismerete szükséges.

Érdekes módon az r-folyamat azon szimulációi, amelyek viszonylagosan jól leírják a báriumnál nehezebb elemek megfigyelt gyakoriságát, több mint egy nagyságrenddel kevesebb könnyű, azaz a stroncium és ezüst között található neutrongazdag atommag keletkezését jósolják, mint amennyi a természetben megtalálható. Ez a tény arra utal, hogy ezen atommagok egy (domináns) része nem a klasszikus r-folyamat során, hanem valamilyen más nukleoszintézis-folyamatban keletkezik (Cowan et al., 2021). Jelen írás tárgyát a könnyű, $Z < 48$ rendszámú neutrongazdag magok szintézisének tanulmányozása céljából végzett vizsgálatok és azok eredményei képezik.

A II-es típusú, azaz magösszeomlásos szupernóvák elméleti tanulmányozása azt mutatja, hogy a stroncium és ezüst között található neutrongazdag atommagok jöhetnek létre a robbanás hatására kilökött anyagban. A Napunk tömegének legalább nyolcszorosát tartalmazó kezdeti tömegű csillagok szerkezete a hagyományra emlékeztet. Kívülről befelé haladva egyre összetettebb, egyre nehezebb atommagokat létrehozó elemkeletkezési folyamatok mennek végbe az egyes rétegekben. Amikor a nukleoszintézis-folyamatok már nem tudnak megfelelő mennyiségű energiát termelni, a csillag magja összeomlik, az összeomlást pedig egy robbanás követi. A robbanás során lelökött – jellemzően protonokból és neutronokból álló, de a vasnál nehezebb atommagokat is tartalmazó – anyag távolodva a születő neutroncsillag felszínétől fokozatosan lehül. Amikor a közeg hőmérséklete öt gigakelvin (azaz a Napunk belsejét jellemző hőmérséklet mintegy háromszázszorosa) alá csökken, lehetővé válik nehezebb atommagok kialakulása is magreakciók révén. A protonok és neutronok alfa-részecskéket alkotnak, amelyek a kilökött anyagban előforduló, vasnál nehezebb atommagokon végbemenő alfarészecske-indukált reakciók révén felépíthetik a stroncium és ezüst között található neutrongazdag atommagokat. Ezt az elemkeletkezési scénáriót gyenge r- vagy alfa-folyamatnak nevezzük (Arcones–Montes, 2011).

A gyenge r-folyamat modellezését hálózatszámításokkal végezzük, amelynek során több mint ezer különböző proton- és neutronsámú atommag tulajdonságait és a lehetséges magreakciók adatait vesszük figyelembe. Az érintett atommagok döntő többsége – szemben a „klasszikus” r-folyamattal – a stabil atommagok környezetében található, így a tulajdonságaik (például a tömegük vagy az életidejük) a szükséges pontossággal már napjainkban is ismertek. Az alfarészecske-indukált reakciók hatáskeresztmetszeteit – azaz a reakció végbemenetelének valószínűségét – elméleti magfizikai modellek segítségével határozhatjuk meg. Ezeknek az elméleti számításoknak számos magfizikai paraméterük van, ezek egy része a keletkező mag tulajdonságait, más része a különböző reakciók hatáskeresztmetszeteit írja le. Mindezen bemenő adatokra különböző paraméterezések állnak rendelkezésre a szakirodalomban. Ugyanakkor az asztrofizikai közeg hőmérsékletének megfelelő kölcsönhatási energiák esetén a különböző elméleti modellekkel számolt alfarészecske-indukált hatáskeresztmetszetek több mint egy nagyságrend-

del térnek el. Emiatt a reakcióhálózat-számítás igen jelentős magfizikai eredetű bizonytalansággal terhelt, ami megghiúsítja a pontos nukleoszintézis-szimulációk elvégzését. E bizonytalanság csökkentése céljából méréssorozatot indítottunk az Atommagkutató Intézetben. Az első kísérlet során a $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ -reakció hatáskeresztmetszetét vizsgáltuk az asztrofizikai szempontból releváns energiatarományban (Kiss et al., 2021). Ezt a mérést két további kísérlet követte, számos vizsgálat előkészítése pedig folyamatban van.

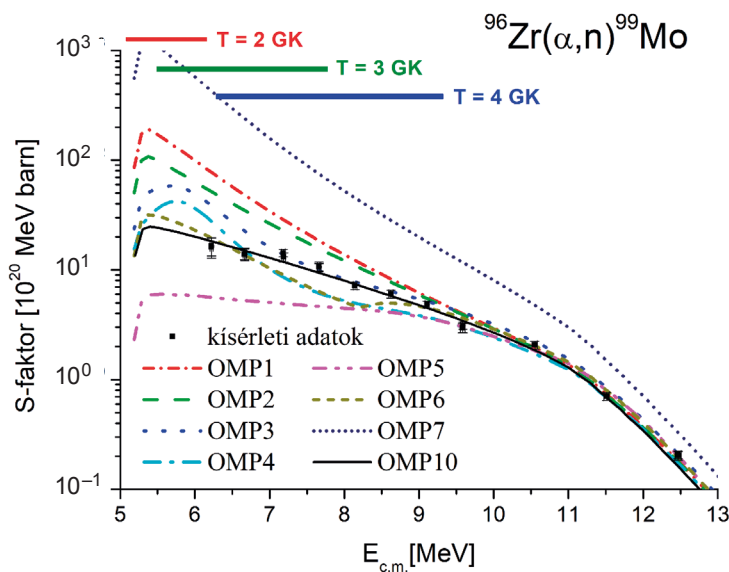
HATÁSKERESZTMETSZET-MÉRÉSEK ÉS NUKLEOSZINTÉZIS-SZIMULÁCIÓK

A hatáskeresztmetszet-méréseket a Magyarországon magfizikai célra épített legnagyobb kutatási berendezéssel, az Atommagkutató Intézet ciklotron típusú részecskegyorsítójával végeztük. A $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{89}\text{Sr}$ -magreakció-méréseink eredményeként meghatározott asztrofizikai S-faktorát² fekete pontokkal jelölöm a 2. ábrán, amelyen a folytonos vonalak a különböző elméleti modellekkel számolt jóslatokat jelölik. Az asztrofizikai közeg hőmérsékletének megfelelő energiatarományt a bal felső sarokban vízszintes sávokkal jelzem. A kísérlet eredményeként a korábban nagyságrendet meghaladó eltérés helyett 25–30% pontossággal váltak ismertté az elemkeletkezési folyamat szimulációjához a magfizikai adatok. Az Atommagkutató Intézetben mért kísérleti adatokra támaszkodva kidolgoztunk egy elméleti modellt (amelynek jóslatait a 2. ábrán fekete folytonos vonallal jelölöm), amely széles tömegszám-tartományban egy kettes faktoron belül, azaz korábbi számításoknál lényegesen pontosabban határozza meg a hatáskeresztmetszet-adatokat (Mohr et al., 2020). Az elméleti modellünk megbízhatóságát a stabil atommagok tartományában az elmúlt néhány év során már független mérések is igazolták.

A pontos kísérleti hatáskeresztmetszetek és az azokra támaszkodó elméleti magreakció-modell birtokában megvizsgáltuk a gyenge r-folyamat során végbemenő elemkeletkezést. A szimulációhoz szükséges asztrofizikai paraméterek értékeit nem ismerjük pontosan, ezért az egyes mennyiségek paramétertartományát részekre osztottuk, és a szimulációkat az asztrofizikai bemenő adatok értékeinek számos lehetséges kombinációjával végeztük el. Adott asztrofizikai *input* adatokkal elvégzett szimulációk – rögzített magfizikai adatok esetén – kirajzolják a nukleoszintézis folyamat ösvényét az atommagtérképen, ezért trajektóriának

² A $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ reakció esetén a legkisebb és legnagyobb mért hatáskeresztmetszet eltérése meghaladja az öt nagyságrendet. A hatáskeresztmetszet erős energiafüggése miatt asztrofizikai számításokban a következőképpen meghatározott asztrofizikai S-faktort szokás használni: $S(E) \equiv \sigma(E)E / \exp(-2\pi\eta)$, ahol $\sigma(E)$ az adott E energián meghatározott hatáskeresztmetszet, η pedig a Sommerfeld-paraméter (Iliadis, 2007).

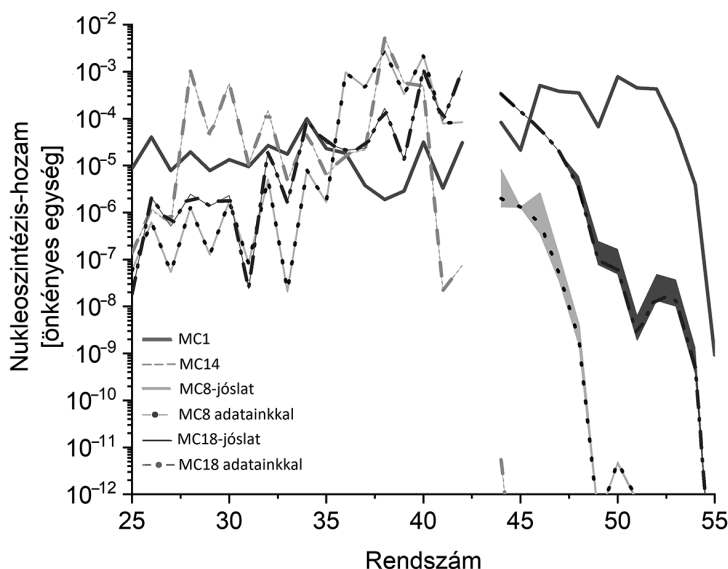
nevezzük azokat. A különböző asztrofizikai paraméterek kombinációja, azaz különböző trajektóriák esetén a folyamat ösvénye lényegesen eltérő, ezért más és más magreakciók lehetnek fontosak, és a nukleoszintézis-szimulációk igen eltérő elemgyakoriságot eredményeznek. A 3. ábrán 36 elvégzett nukleoszintézis-számítás közül négy különböző trajektóriát használó szimuláció eredményét mutatom be. Például amennyiben a gyenge r-folyamat asztrofizikai környezetét az MC1-nek vagy az MC14-nek nevezett inputok írják le, akkor a folyamat során az Atommagkutató Intézetben vizsgált $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ -reakció nem játszik szerepet. Előbbi esetben ugyanis a közeg nagyon neutrongazdag, a folyamat ösvénye a stabil atommagoktól viszonylag messze fut, és még az ón ($Z = 50$) és cézium ($Z = 55$) között található magok is létrejönnek. Ezzel szemben az MC14-paraméterezés egy viszonylag neutronszegény közeget feltételez, amelyben számottevő mennyiségben csak igen könnyű r-magok ($Z \leq 41$) keletkeznek.



2. ábra. A $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Sr}$ magreakció kísérletileg meghatározott asztrofizikai S-faktora (fekete pontokkal jelölve). A különböző stílusú vonalak, amelyek a sávokkal jelölt releváns energiatartományban több mint egy nagyságrendben eltérnek, a különböző paraméterezésekkel elvégzett elméleti számítások eredményeit mutatják (Kiss et al., 2021)

Ugyanakkor az MC8- és MC18-trajektóriák esetén a nukleoszintézis-hozamokat érzékenyen befolyásolja az általunk vizsgált magreakció hatáskeresztmetszete. E két trajektória esetén a $42 < Z < 55$ tartományban a széles sávok a rendszám függvényében jelzik az elemkeletkezési folyamatban létrejövő hozamokat azok magfizikai eredetű bizonytalanságával. A vékony pontozott vonal és a pontvonal

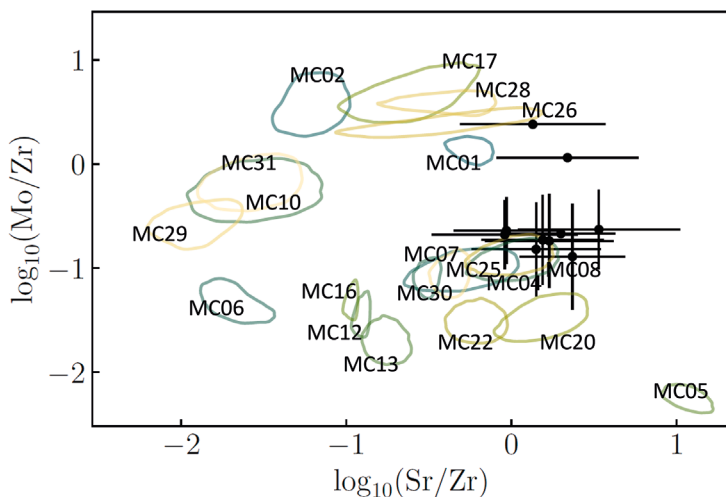
pedig egy olyan hálózatszámítás eredményét és bizonytalanságát jelzi, amely mindenben egyezik az előbbi számításokkal, kivéve a $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ -reakciót, amelynek jellemzésére az elméleti modellek helyett a kísérleti eredményeinket használjuk. Kijelenthető tehát, hogy már egy reakció hatáskeresztmetszetének pontos meghatározása is jelentősen csökkentheti a gyenge r-folyamat hálózatszámításának részeredményeinél a magfizikai eredetű bizonytalanságot.



3. ábra. Gyenge r-folyamat reakcióhálózat-számítás eredménye négy különböző trajektória (MC1, MC8, MC14 és MC18) esetén. A hálózatszámítást kétszer végeztük el. Első alkalommal minden reakció esetén a hatáskeresztmetszeteket elméleti modellekkel határoztuk meg. Ezt követően az MC8-, valamint MC18-trajektóriák esetén megismételtük a hálózatszámítást: a $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ -reakció esetén a hatáskeresztmetszet kísérleti eredményeit, a többi reakció esetén pedig az elméleti modellek szolgáltatja eredményeket használva. Az MC8- és MC18-trajektóriák esetén az első számítások bizonytalanságát a széles sávok jelzik. A $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ -reakció kísérleti adatait használó szimulációk bizonytalanságát pedig pontozott vonallal és pontvonallal jelzett vékony csíkok ábrázolják (Kiss et al., 2021)

Galaxisunk, a Tejútrendszer peremén található számos öreg, fémszegény csillag esetében ismerjük a különböző könnyű elemek egymáshoz viszonyított gyakoriságát. Feltételezve, hogy elméleti magreakció-modellünk alkalmazhatósága kiterjeszthető a stabil magokhoz képest néhány további neutron tartalmazó radioaktív atommagok tartományára is, akkor a relatív könnyűelem-gyakoriságok kiszámításával vizsgálhatjuk az asztrofizikai modellt. A 4. ábrán egy ilyen számítás eredményeit mutatom be. Minden egyes pont egy-egy, a galaxisunk peremén található öreg, fémszegény csillag esetén jelöli a csillagászati megfigyelé-

seken alapuló stroncium–cirkónium arány függvényében a molibdén–cirkónium arányt. A zárt görbék mind egy-egy olyan nukleoszintézis-számítás eredményeit jelzik (bizonytalansággal együtt), amelyek az Atommagkutató Intézetben mért kísérleti adatokra, valamint az itt kifejlesztett elméleti reakciómodellre támaszkodnak. Hatáskeresztmetszet-méréseink előtt – a hálózatszámítások magfizikai eredetű bizonytalansága miatt – az elemkeletkezési folyamat ilyen tanulmányozására nem volt lehetőség.



4. ábra. Öreg, fémsegény csillagok relatív elemgyakoriságai (fekete pont) és ugyanezen atommagarányok különböző trajektóriákkal elvégzett nukleoszintézis-számítások esetén (MC-jelöléssel). Az elemkeletkezési folyamat szimulációja kísérleti adatainkra, valamint elméleti modellünkre támaszkodik (Psaltis et al., 2021)

Bár látható, hogy vannak olyan asztrofizikai paraméterkészletek, amelyekkel elvégzett számítások jobban egyeznek a csillagászati észlelések eredményeivel, mégis egy-egy ilyen szimuláció talán legfontosabb üzenete az, hogy meghatározza a kísérleti fizikusok számára a vizsgálandó magfizikai adatok körét. Ennek megfelelően alább azon folyamatban lévő munkákat mutatom be dióhéjban, amelyek célja a magfizikai bemenő adatok még megbízhatóbb meghatározása.

HATÁSKERESZTMETSZET-MÉRÉSEK ITTHON ÉS A NAGYVILÁGBAN

A fizikában érvényes szólás szerint egy mérés nem mérés. Ahhoz, hogy minél pontosabban tudjuk modellezni a gyenge r-folyamat során végbemenő elemkeletkezést, mindenképpen szükség van további kísérleti adatokra. Nekünk, kísérleti fizikusoknak minél több alfarészecske-indukált magreakció hatáskeresztmet-

szetét kell megmérnünk a releváns energiatartományban, lehetőleg különböző mérési eljárásokat használva. Ellenőriznünk kell az elméleti modellek megbízhatóságát radioaktív atommagokon végbemenő reakciók esetén, és – amennyiben szükséges – meg kell határoznunk a hatáskeresztmetszetek számításához a modellek bemenő paramétereit. Mindezen vizsgálatokhoz új kísérleti technikák kifejlesztésére van szükség.

Az Atommagkutató Intézetben kripton és rubídium atommagokon végbemenő alfarészecske-indukált magreakciók vizsgálata van folyamatban. E mérésekhez a céltárgyak a Wigner Fizikai Kutatóközpontban készülnek. Nem csak Magyarországon folynak azonban ilyen kísérletek. Például az Egyesült Államokban East Lansingban és Chicago mellett található egy-egy olyan részecskegyorsító berendezés, amellyel különböző technikákkal, de rövid életidejű atommagokból adott energiájú ionnyaláb készíthető, és így a radioaktív magokon végbemenő alfa-részecske-indukált magreakciók is tanulmányozhatókká váltak. Vizsgáljuk annak a lehetőségét is, hogy Európában a CERN-ISOLDE-laboratóriumban alfa-részecskék rugalmas szórását vizsgálva radioaktív atommagok esetén az elméleti modellek bemenő paramétereit tanulmányozzuk. Reményeink szerint mindezen mérések segítségével a következő néhány évtized során jelentősen pontosabbá válik a tudományos képünk ezen elemkeletkezési folyamatról és az asztrofizikai környezetéről.

IRODALOM

- Arcones, Almudena – Montes, Fernando (2011): Production of Light-Element Primary Process Nuclei in Neutrino-Driven Winds. *The Astrophysical Journal*, 731, ID5. DOI: 10.1088/0004-637X/731/1/5, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/731/1/5>
- Cowan, John J. – Sneden, Christopher – Lawler, James E. (2021): Origin of the Heaviest Elements: The Rapid Neutron-Capture Process. *Reviews of Modern Physics*, 93, 015002. DOI: 10.1103/RevModPhys.93.015002
- Iliadis, Christian (2007): *Nuclear Physics of Stars*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- Kiss Gábor Gyula – Szegedi Tibor Norbert – Mohr Péter et al. (2021): Low-Energy Measurement of the $^{96}\text{Zr}(\alpha, n)^{99}\text{Mo}$ Reaction Cross Section and Its Impact on Weak r -Process Nucleosynthesis. *The Astrophysical Journal*, 908, ID202. DOI: 10.3847/1538-4357/abd2bc, <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/abd2bc>
- Mohr Péter – Fülöp Zolt – Gyürky György et al. (2020): Successful Prediction of Total α -Induced Reaction Cross Sections at Astrophysically Relevant Sub-Coulomb Energies Using a Novel Approach. *Physical Review Letters*, 124, 252701. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.252701
- Psaltis, Athanasios – Arcones, Almudena – Montes, Fernando et al. (2022): Constraining Nucleosynthesis in Neutrino-Driven Winds: Observations, Simulations, and Nuclear Physics. *The Astrophysical Journal*, 935, ID27. DOI: 10.3847/1538-4357/ac7da7, <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac7da7/pdf>