

Egzotikus atommagok béta-bomlásának kísérleti vizsgálata

Kovács Sándor

Debreceni Egyetem Tehetséggyorgozó Program

Témavezetők

Kiss Gábor Gyula

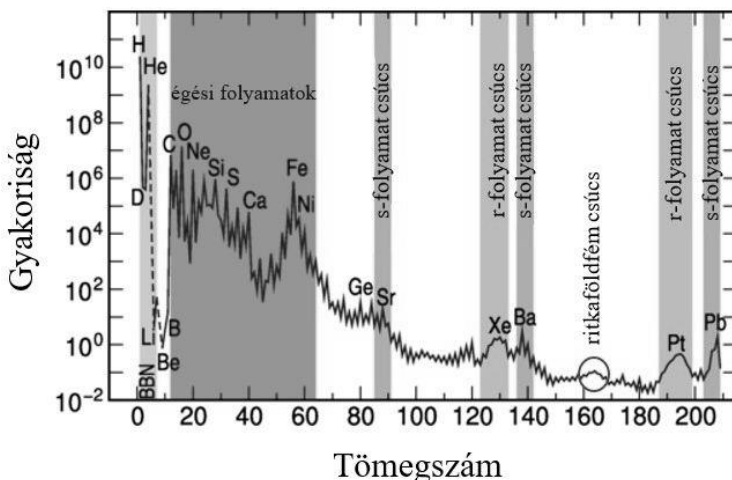
Vitéz-Sveiczter András

Bevezetés

A nukleáris asztrofizika a csillagászat és a magfizika együttes, egymásra épülő alkalmazása. Az 1. ábrán a Naprendszerünkben megtalálható stabil izotópok eloszlása látható, mely értelmezéséhez és magyarázatához nemcsak asztrofizikai hanem magfizikai ismeret is szükséges.

A különböző izotópokat csoportosíthatjuk az alapján, hogy milyen asztrofizikai folyamatban, milyen csillagászati objektumban keletkeznek. A legkönnyebb izotópok ^2H , $^3,^4\text{He}$ és ^7Li ¹ közvetlenül az Ősrobbanást követően keletkeztek. A nehezebb atommagok (egészen a vas-nikkel tartományban található izotópokig) csillagokban lejátszódó folyamatokban, protonok, illetve ^4He magok befogása révén jönnek létre [Iliadis, 2007].

¹ A vegyjelek előtt, felső indexben feltüntetett számok az úgynevezett tömegszámot, az adott atommag protonjainak és neutronjainak összegét jelöli.

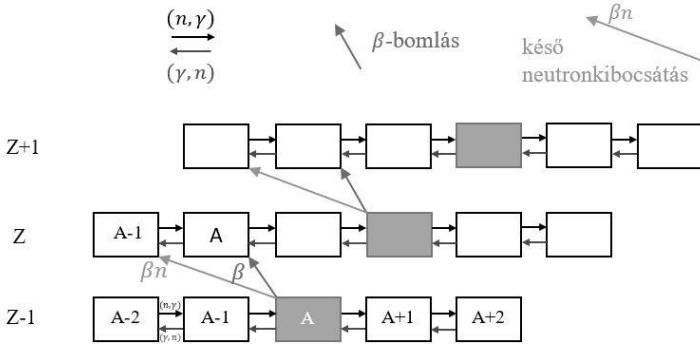


1. ábra. Az elemek és izotópok tömegszám szerinti eloszlása a Naprendszerben [Cowan, 2021, 015002].

Az asztrofizikai r folyamat

Az *r*-folyamat során keletkeznek jellemzően a vasnál nehezebb kémiai elemek legneutrongazdagabb izotópjai, illetve az urán és tórium magok [Iliadis, 2007 és Kiss, 2017, 7]. A folyamathoz nagy ($>10^{26}$ neutron/cm³) neutronsűrűség szükséges, mely például neutroncsillagok összeolvadásakor, illetve bizonyos típusú szupernóvák robbanása során áll fenn. Az elmúlt évtized talán egyik legfontosabb tudományos felfedezése volt, hogy neutroncsillagok összeolvadásakor gravitációs hullámok és optikai átmenetek együttes mérésével sikerült megfigyelni *r*-folyamatban képződő izotópokat [Abbott, 2017, 161101]. A Tejútrendszer peremén található halo csillagok nehézelem összetételének értelmezése egyetlen, ritka esemény segítségével

lehetséges. Ilyen esemény lehet egy speciális igen gyorsan forgó és erős mágneses térrel rendelkező ún. MHD (magneto-hydrodynamic) szupernóva magjának összeomlása. Az ekkor létrejövő extrém körülmények alkalmasak lehetnek az r -folyamat lejátszódására [Ji, 2016, 610].



2. ábra. Az r -folyamat menetének vázlata [Kovács, 2021, 5].

A bemutatott asztrofizikai környezetekben, melyeket néhány GK^2 hőmérséklet jellemez, sorozatos neutronbefogás révén extrém neutrongazdag magok jönnek létre. Mint a 2. ábrán látható, adott izotópláncban dinamikus egyensúly alakul ki a neutronbefogások és a nagy hőmérséklet miatt jellemző fotobomlások között. Ezen folyamatok eredményeként az egyik (jellemzően páros neutronszámú) magnak a gyakorisága jelentősen nagyobb lesz, mint a szomszédos izotópoké. Hogy melyik lesz ezen úgynevezett *várakozási mag* az a környezettől (neutronsűrűség, hőmérséklet) és a magokra jellemző neutron szeparációs

² $\text{GK} = 10^9$ K hőmérséklet. Összehasonlításképpen, a Nap magjában a hőmérséklet körülbelül 15×10^6 K azaz mintegy két nagyságrenddel kisebb, mint ezen extrém környezetek hőmérséklete.

energiától (S_n) függ. A 2. ábrán a sötét téglalappal jelöltem a várakozási pontokat, melyek esetén β -bomlás révén épülnek fel az egyre nagyobb rendszámú atommagok. A $Z+1$ -vel jelölt izotóplánc esetén szintén kialakul az egyensúly melyet ismét β -bomlás követ.

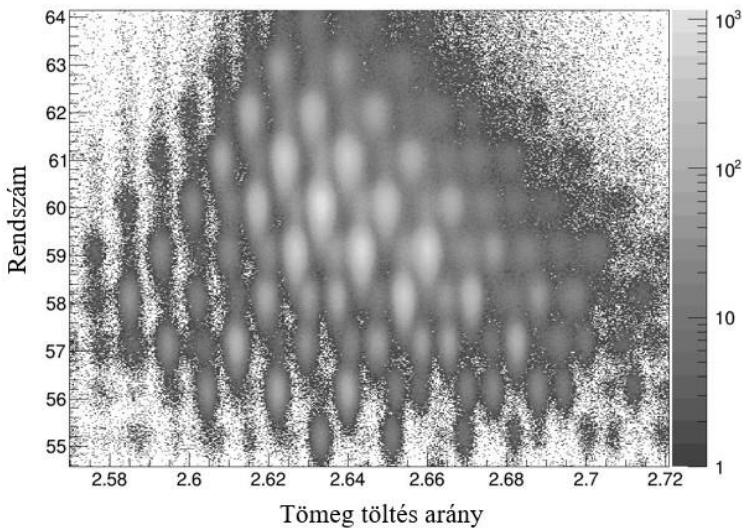
Azonban az r -folyamatban keletkező igen rövid életidejű jellemzően extrém neutrongazdag magok esetén előfordulhat, hogy a β -bomlás a leánymag neutronszeperációs energia feletti nivóra vezet, ezért azt (akár többszörös) neutronkibocsátás követheti. Ezt a folyamatot, melyet a P_n értékkel (azaz a neutronkibocsátás valószínűségével) jellemezhetünk, a 2. ábrán βn -vel jelöltem.

A Ritkaföldfém r -gyakoriság csúcs

Az 1. ábrán az $A \sim 130$ és $A \sim 195$ tömegszámoknál megfigyelhető gyakoriságcsúcsok kialakulásának magfizikai okai vannak: azok a zárt neutronhéjak miatti lokális stabilitásmaximum miatt jönnek létre. Azonban – jelenlegi ismereteink szerint – az $A \sim 160$ tömegszám környékén található kisebb úgynevezett ritkaföldfém gyakoriságcsúcs az r -folyamat egy későbbi szakaszában jön létre amikor a neutronsűrűség már számos nagyságrenddel alacsonyabb, kialakulását a stabilitási völgytől távoli neutrongazdag magok tulajdonságai (felezési idő, S_n) határozzák meg [Mumpower, 2012, 045801]. Kutatási munkám célja ezen, másodpercnél lényegesen rövidebb életidejű magok tulajdonságainak vizsgálata. Ezen egzotikus atommagok tulajdonságainak pontos ismeretében lehetőség fog nyílni az r -folyamat kevésbé ismert asztrofizikai környezeteinek termodinamikai tulajdonságainak pontosabb megismerésére.

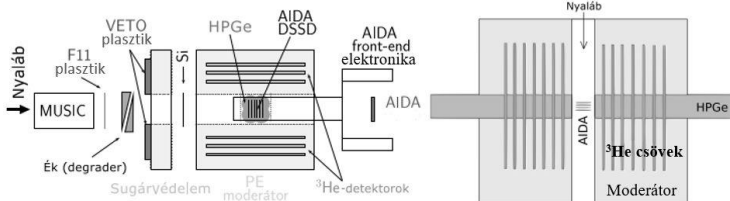
A Kísérlet részletei

Az extrém (azaz az adott elem Földünkön megtalálható leg-neutrongazdagabb izotópjához képest akár 10-15 neutronfeleggel rendelkező) atommagokat a Japánban található RIKEN Nishina Centerben az Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF) gyorsítóinak segítségével állították elő úgynevezett *in-flight fission* eljárással. Az egymást követő gyorsítófokozatok révén az elsődleges ^{238}U nyaláb körülbelül a fénysebesség 70%-ra gyorsítható. Ezt a nehéz, nagyenergiás ionnyalábot berillium céltárgyra bocsátva az atommagok összetöredeznek változatos proton/neutron arányú fragmentumokat létrehozva, melyek közül a mintegy 100 m hosszú BigRIPS szeparátor segítségével válogathatják ki a kísérleteinkhez szükséges izotópokat. A kísérlet során a szeparátor több szakaszán is folytonosan méréseket szükséges végezni melyek révén minden egyes gyorsított mag azonosítható, meghatározható tömeg töltés arányuk és rendszámuk. A kapott adatok révén elkészíthető a 3. ábrán látható Particle Identification Diagram (PID) melyen minden egyes pont egy atommagnak felel meg. Ezen adathalmazból én a $Z = 61$ rendszámú Pm magok magfizikai tulajdonságainak meghatározását végeztem el.



3. ábra. Particle Identification Diagram (PID) amelyen a mért hozam van ábrázolva A/Q és Z függvényében [Kovács, 2021, 11].

A BigRIPS szeparátor segítségével azonosított atommagokat az AIDA detektorrendszert alkotó szegmentált – azaz függőleges és vízszintes irányokban érzékelőszálakkal ellátott – szilikon detektorban lefékezve vizsgálhatjuk a magok β -bomlását. A kísérlet során az AIDA detektort polietilén moderátorba ágyazott ^3He gázzal töltött neutronszámlálókkal, illetve (gamma fotonok detektálására szolgáló) nagytisztaságú germánium detektorokkal vették körül. A kísérleti elrendezés sematikus rajza a 4. ábrán látható.



4. ábra. A β -bomlás paramétereinek vizsgálatához felépített kísérleti elrendezés sematikus rajza [Delgado, 2019, 133].

Adatkiértékelés: a Pm magok felezési idejének meghatározása

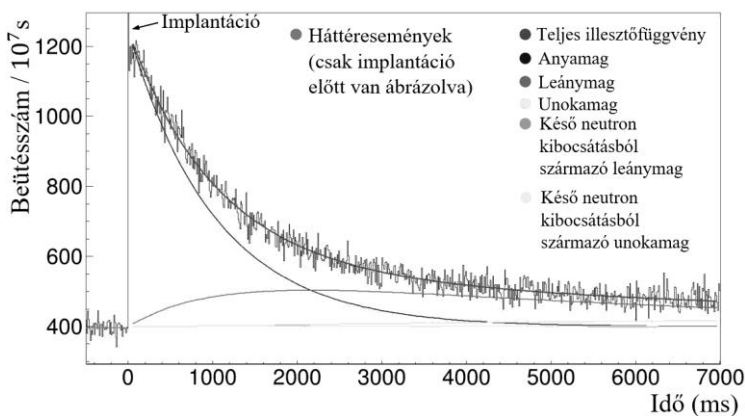
A kísérlet során tanulmányozott magok esetén az anyamag bomlását követően a leány és unokamagok is viszonylag rövid felezési idővel rendelkező β -bomló magok. Ezért a bomlási sor tagjaitól származó β -részecskéket egymást követően detektáljuk, nincs módunk annak megállapítására, hogy a bomlási sor mely tagjától származnak. Ilyen esetekben a bomlási sor i -edik elemének darabszámát a Bateman-formula [Bateman, 1910, 423] segítségével határozhatjuk meg:

$$N_i(t) = \sum_{j=1}^i \frac{N_{10} \prod_{k=1}^{i-1} \lambda_k}{\prod_{k=1}^i (\lambda_k - \lambda_j)} e^{-\lambda_j t}.$$

A fenti egyenlet révén meghatározhatjuk a teljes aktivitást:

$$A_{teljes} = \sum_{i=1}^n \lambda_i N_i(t).$$

Ezen teljes aktivitás arányos az 5. ábrán látható, úgynevezett implantáció-béta hisztogramot illesztő függvénnyel. Tehát mérési eredmények illesztésével – bomlási sor későbbi tagjainak bomlását jellemző magfizikai paraméterek ismeretében – meghatározható az anyag felezési ideje. Az ezen eljárással meghatározott felezési idők – amennyiben megfelelő hozammal keletkezett az adott atommag – a β -bomlást követően kibocsátott γ -sugárzás germánium detektorral mért hozamának vizsgálatával ellenőrizhetők [Kovács, 2021].

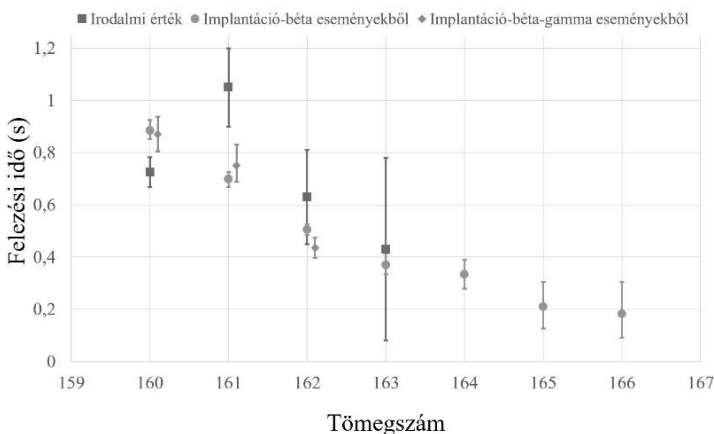


4. ábra. Implantáció-béta hisztogram illesztése Bateman formula segítségével [Kovács, 2021, 16].

Eredmények, kitekintés

A kísérlet során vizsgált magtartományban csak nagyon kevés korábbi mérési adat áll rendelkezésre. Egyrészt ezen adatoknál lényegesen kisebb bizonytalansággal sikerült felezési idő értékeket meghatároznom. Másrészt három prométium izotópra elsőként sikerült felezési időt meghatározni. Azon esetekben

ahol mindkét fent említett eljárással tudtam vizsgálni a magok tulajdonságait, az eredményül kapott felezési idő értékek igen jó egyezésben vannak. Kísérleti eredményeimet korábbi mérési eredményekkel is összehasonlítottam, ez látható a 6. ábrán. Az elkövetkező időszakban a Pm izotópok leány (Sm) és unokamagjaira (Eu) is elvégzem a fent bemutatott kiértékelést. Szintén vizsgálni kívánom a β -bomlást követően kibocsátott neutronok számát. Eredményeimet nemzetközi konferencián tervezem bemutatni, illetve tudományos közleményben megjelentetnem.



5. ábra. Az analízis során $i\beta$ és $i\beta\gamma$ események alapján meghatározott és korábbi mérések [Wu, 2017, 072701] eredményei.

Irodalomjegyzék

[Abbott, 2017, 161101] B. P. Abbott és tsai. (2017): GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. Physical Review Letters **119**, 161101.

- [Bateman, 1910, 423] K. Bateman (1910): Solution of a system of differential equations occurring in the theory of radioactive transformations. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **15**, 423–427.
- [Cowan, 2021, 015002] John J. Cowan és tsai. (2021): Origin of the heaviest elements: The rapid neutron-capture process. *Rev. Mod. Phys.* **93**, 015002
- [Delgado, 2019, 133] A. Tolosa-Delgado és tsai. (2019): Commissioning of the BRIKEN detector for the measurement of very exotic beta-delayed neutron emitters. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **925**, 133–147.
- [Iliadis, 2007] Christian Iliadis (2007): *Nuclear Physics of Stars*, Wiley
- [Ji, 2016, 610] Alexander P. Ji és tsai (2016): R-process enrichment from a single event in an ancient dwarf galaxy. *Nature* **531**, 610–613.
- [Kiss, 2017, 7] G. G. Kiss (2017): Az asztrofizikai *r*-folyamat vizsgálata radioaktív nyalábokkal. *Fizikai Szemle* **1**, 7.
- [Kovács, 2021] Kovács Sándor (2021): Extrém neutrongazdag ritkaföldfém magok béta-bomlásának vizsgálata, Debreceni Egyetem elektronikus Archívum
<https://hdl.handle.net/2437/307629>
- [Mumpower, 2012, 045801] Matthew R. Mumpower - G. C. McLaughlin - Rebecca Surman (2012): Formation of the rare-earth peak: Gaining insight into late-timer-process dynamics. *Physical Review C* **85**, 045801
- [Wu, 2017, 072701] J. Wu és tsai. (2017): $94\beta^-$ -Decay Half-Lives of Neutron-Rich Cs55 to Ho67: Experimental Feedback and Evaluation of the *r*-Process Rare-Earth Peak Formation. *Physical Review Letters* **118**, 072701