

NEHÉZ ELEMÉK KELETKEZÉSE CSILLAGOKBAN

FORMATION OF HEAVY ELEMENTS IN STARS

Kiss Miklós

Berze Nagy János Gimnázium Gyöngyös/Debreceni Egyetem Fizika Doktori Iskola

ÖSSZEFOGLALÁS

A vason túli nehéz elemek keletkezésének kérdése fontos és érdekes probléma, ezért érdemes arra, hogy szóba kerüljön az iskolai oktatás keretében. Hagyományosan csak az elemek kialakulásának a kezdetét (fúzió), illetve a már valahogyan kialakult elemek átalakulásait (bomlások, hasadás) tárgyaljuk. Igazán szép kérdés, hogy hol, és hogyan jönnek létre a vasnál nehezebb elemek (építkezés). A témával kapcsolatban az elsődleges cél nem oktatási jellegű volt, de a folyamatok jól követhetők és jól szemléltethetők, és így az oktatásba jól beilleszthetők.

ABSTRACT

The origin of heavy elements beyond iron is an important and interesting problem; therefore, it is worth to discuss it in the classroom.

Traditionally we speak only about fusion and decays, but it also is an interesting question how the elements heavier than iron formed. The primary purpose of our investigation was not educational, but the processes can be followed and demonstrated easily and can be integrated into education.

KULCSSZAVAK/KEYWORDS

s-folyamat, neutronbefogás, *r*-mag
s-process, neutron capture, *r*-only nuclei

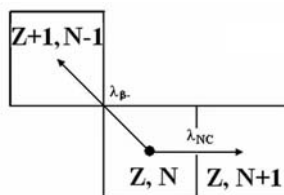
BEVEZETÉS

Magszintézis modellünk számításaiban eltértünk a hagyományos megközelítéstől [1,2], nem vettük figyelembe a szokásos korlátozásokat, hanem működtettük a modellt, a vas 56-os izotópjából (^{56}Fe) kiindulva, hagytuk a keletkező magokat megkötés nélkül átalakulni.

Az *s*-folyamatról való eddigi elképzelésünktől eltérően a fejlődés nem csak a béta stabilitás völgyében, hanem egy ahhoz illeszkedő sávban történik. A sáv szélességét két dolog határozza meg: a számolás időalapja és a neutronsűrűség.

A KLASSZIKUS MEGKÖZELÍTÉS

Érdekes az elem és az izotóp szavak helyett a mag szót használni. Két mennyiség egyértelműen jellemzi a magokat: a protonok száma (Z), és a neutronok száma (N). A folyamat két fő lépése a neutronbefogás és a bétabomlás. Neutronbefogásnál eggyel nő a neutronok száma. Ha a keletkező mag nem stabil és bétabomlással elbomlik, akkor a rendszám eggyel növekszik. A két folyamattal együtt egyet feljebb léphetünk az elemek létráján. A két lépés addig ismétlődik, amíg a fizikai körülmények engedik.



1. ábra. A klasszikus folyamat lépései

Adott mag mennyisége megváltozik e két folyamattal, a neutronbefogás növelheti is és csökkentheti is a mennyiséget. Mindegyik folyamatnak megvan az esélye, amit a körülmények határoznak meg, a neutronbefogást a neutron-sűrűség és a mag neutronbefogó képessége, a bomlást a felezési idő.

$$\begin{aligned} \frac{dN_A}{dt} &= N_n(t)N_{A-1}(t) \langle \sigma v \rangle_{A-1} - N_n(t)N_A(t) \langle \sigma v \rangle_A - \lambda_\beta N_A(t) \\ &= \lambda_{n_{A-1}} N_{A-1}(t) - \lambda_{n_A} N_A(t) - \lambda_\beta N_A(t), \quad \lambda_\beta = \frac{\ln 2}{T}, \quad \lambda_n = N_n \langle \sigma \rangle v_T \end{aligned} \quad (1)$$

Az összes magra (1) egy csatolt egyenletrendszer, amelyet minden magra egyszerre kell megoldani, ami számítógép nélkül csak egyszerűsítő feltevésekkel lehetséges.

A T felezési idejű nem stabil mag átlagos élettartama

$$\tau_\beta = \frac{1}{\lambda_\beta} = \frac{T}{\ln 2} = \frac{T}{0,6932} = 1,4427 T \quad (2)$$

A felezési idő statisztikai jelentésű fogalom, csak magok sokaságáról tehetünk biztos kijelentéseket. Az egyes magoknak van egy átlagos élettartamuk, de ennél jóval rövidebb, vagy hosszabb ideig is létezhetnek. Ugyanakkor két neutronbefogás között is eltelik valamennyi idő, ami a körülményektől függ. Két neutronbefogás között átlagosan

$$\tau_n \sim \frac{1}{\lambda_n} = \frac{1}{N_n \langle \sigma \rangle v_T} \quad (3)$$

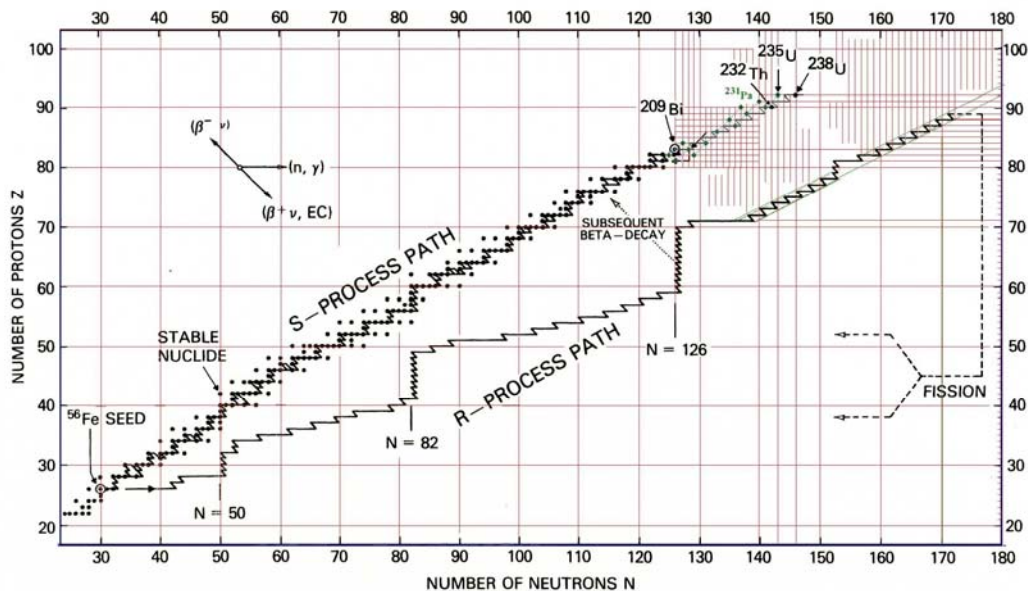
időtartam telik el, ahol $\langle \sigma \rangle$ a sebességre átlagolt neutronbefogási hatáskeresztmetszet. Lehetséges, hogy a neutron befogása után a mag egy újabb neutron befogása előtt bomlik el. Ha ez többnyire így van, lassú vagy *s*-folyamatról beszélünk. Ha a bomlást újabb neutronbefogás előzi meg, akkor a folyamat gyors vagy *r*-folyamat.

1. táblázat. A folyamatok összehasonlítása

| | s-folyamat | r-folyamat |
|---------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Időviszonyok | $\tau_n \ll \tau_\beta$ | $\tau_n \gg \tau_\beta$ |
| Neutronbefogási idő | $\tau_n \approx 10 \text{ év}$ | $\tau_n \approx 10^{-3} \text{ s}$ |
| Neutronsűrűség | $N_n = 10^8 \text{ cm}^{-3}$ | $N_n = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ |

Érdeemes a *Z-N* síkon áttekinteni a folyamatokat. A lassú folyamat a stabil magok közelében halad – a béta stabilitás völgyében (a *Z-N* síkon a stabil magok tartománya), a

gyors pedig a völgytől jobbra, a neutronús magok mentén. A távolodás csak a kis befogási hatáskeresztmetszetű magokon akad el a telített neutronhjú magoknál, az úgynevezett mágikus számoknál: 50, 82, 126. A lassú folyamat a bizmutnál ($^{209}_{83}\text{Bi}$) véget ér. Az urán pedig csak gyors folyamatban keletkezik.

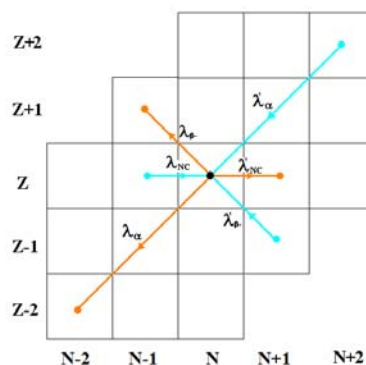


2. ábra. A béta stabilitás völgye [2].

AZ ÚJ MEGKÖZELÍTÉS

Modellünkben csak a magfolyamatokat vizsgáltuk, a csillagok fizikáját nem vettük figyelembe, Az új megközelítés csillagmodellben is alkalmazható, azonban oktatási célra túl lassú programot eredményezne. Állandónak feltételezzük a neutronfluxust és homogénnek a környezetet. A klasszikus folyamattól eltérően nem feltételezünk semmit a magfolyamatok sebességviszonyairól, hanem az összes lehetséges folyamatot egyszerre figyelembe véve numerikusan határozzuk meg melyik magból mennyi és mivé alakul át az egyes lépésekben.

Tekintsünk minden olyan átalakulást, amely egy adott mag mennyiségét megváltoztatja: bétabomlással érkezni is lehet egy magba, de az alfabomlás is növelheti és csökkentheti a magok számát.



3. ábra. A legfontosabb folyamatok

További folyamatok: elektronbefogás, pozitív bétabomlás, alfabomlás, protonkibocsátás, kettős bétabomlás (negatív), kettős bétabomlás (pozitív), spontán hasadás. Valamint ezek

együtt, elágazásokkal, összesen 19 folyamat. Ezek az átalakulások bizonyos magoknál jelentősek is lehetnek. Léteznek hármas elágazások, de a harmadik ág aránya jelentéktelen.

A teljes egyenlet kezdete (csak n-befogást, valamint α - és β -bomlásokat figyelembe véve):

$$\begin{aligned} \frac{dN_{Z,N}}{dt} = & N_n(t)N_{Z,N-1}(t) \langle \sigma \nu \rangle_{Z,N-1} + \lambda_{\beta} N_{Z-1,N+1}(t) + \lambda_{\alpha} N_{Z+2,N+2}(t) \\ & - N_n(t)N_{Z,N}(t) \langle \sigma \nu \rangle_{Z,N} - \lambda_{\beta} N_{Z,N}(t) - \lambda_{\alpha} N_{Z,N}(t), \end{aligned} \quad (4)$$

Ha pontosabb eredményt szeretnénk, akkor az egyenlet jobb oldalán figyelembe vehetjük a többi folyamat járulékát is. Az egyenletrendszer megoldása számítógéppel lehetséges. Válasszunk egy időtartamot (t), amelyet a továbbiakban „időalapnak” nevezünk. Induljunk ki csak vasból és használjunk két egymást követő lépést. Nézzük, ez alatt milyen és hány átalakulás következik be. Minden magnál számoljuk mennyiségének változását.

1. lépés a neutronbefogás: meghagyva a maradék magokat a helyükön, az átalakult magokat hozzáadjuk a megfelelő helyhez (készletezés).

$$N_{befog} \approx N_0 \cdot \lambda_n t, \quad N_{megmaradó} \approx N_0 \cdot (1 - \lambda_n t). \quad (5)$$

2. lépés a magok bomlása: Most a magokat a rájuk jellemző bomlásnak megfelelően készletezzük, megint minden magnál a rá jellemző adatoknak megfelelően számolunk. Tekintjük az időalapot. Ezen időtartammal számolunk. Először áttöltjük az átalakult magokat, megőrizve azokat, amelyek megmaradtak, aztán a célhelyre mindegyiket hozzáadjuk. Ezeket a lépéseket a mag felezési ideje és a bomlási arány alapján meg tudjuk tenni. Mivel számítógéppel dolgozunk, át kell gondolnunk, hogy a felezési időnek megfelelően hogyan járunk el. A használt három eset: Ha a felezési idő közepes:

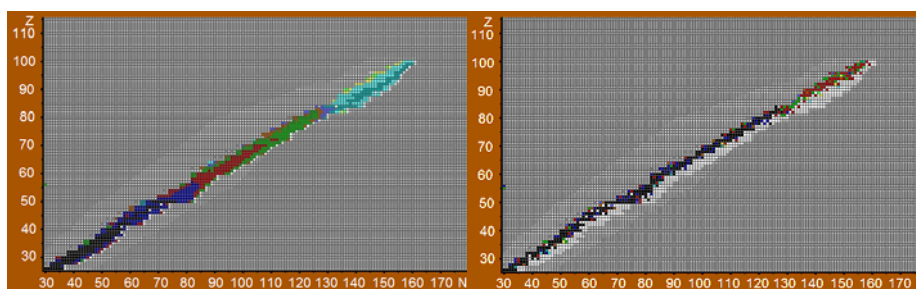
$$N_{megmaradó} = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad N_{átalakuló} = N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda t}). \quad (6)$$

Ha 99 százalékosan számolunk (megmaradás, ill. elbomlás): pl. egy másodperc lépésközt alkalmazva: a $0,15 \text{ s} < T < 69 \text{ s}$ tartományban kell exponenciálisan számolni. Ha $T > 69 \text{ s}$, akkor $\lambda t \ll 1$, és az exponenciális függvény lineáris közelítését használjuk,

$$N_{megmaradó} \approx N_0 \cdot (1 - \lambda t), \quad N_{átalakuló} = N_0 \cdot \lambda t. \quad (7)$$

Ha pedig $T < 0,15 \text{ s}$, akkor $\lambda t \gg 1$, és feltesszük, hogy minden részecske elbomlik.

Ahhoz, hogy a számolást ténylegesen elvégezhessek, szükség van az egyes magokat jellemző neutronbefogási és bomlási adatokra. A programunkban figyelembe vett 2096 magra mintegy 10500 adatot használunk [3]. Néhány további paraméter értékének rögzítésével (időalap, neutronsűrűség) indulhat a számolás. Az eredményeket grafikus felülettel nagyon látványosan jeleníthetjük meg. Követhetjük az épülést, és az azt követő bomlást is.

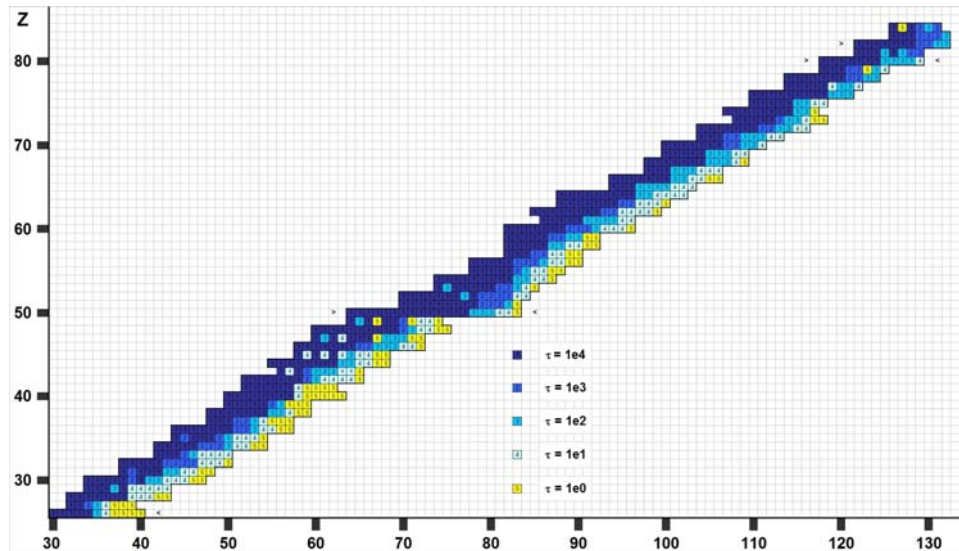


4. ábra. Pillanatfelvételek. A magok gyakoriságának logaritmusát színskálával érzékeltetjük.

Ha hosszabb időt várunk, néhány elem el is tűnik, azok, amelyeknek nincs stabil izotópja, pl. a technécium. (A 43. elem az s-folyamat észlelési bizonyítéka. Itt most nem kell százezer

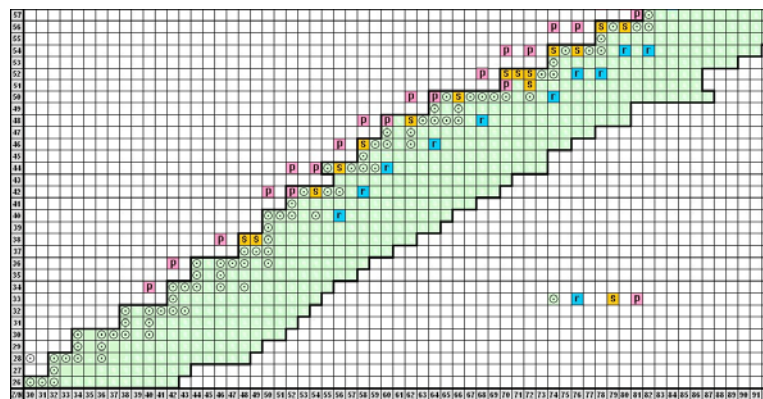
éveket várunk.) Az oktatásbeli alkalmazási lehetőség nem ér véget itt, hiszen paraméterek (pl. a neutronssűrűség) változtatásával a magok keletkezésének körülményeit is változtathatjuk. Ugyanakkor a folyamatokat célzottan is vizsgálhatjuk, elemezhetjük. Ezeket itt nem soroltjuk fel, csak néhány tapasztalatról írunk.

1. 1090 mag keletkezik! (Sőt, szupernóva szimulációban, amikor igen nagy a neutronssűrűség, 1. táblázat még több!)



5. ábra. A fejlődés sávja az időalap függvényében

2. A program időalapja jelentős hatással van a futásra. A fejlődés mindig sávos. A sáv szélességét a számítás időalapja befolyásolja. Fontos, hogy ez nem fizikai, hanem technikai paraméter. Az eredmények az 5. ábrán láthatók. A futások összesen ugyanannyi fizikai ideig tartottak. Látható, hogy ha nagy időalappal számolunk, keskeny sávban, szinte a béta stabilitás völgyében halad a folyamat. Ha rövid időalapot választunk, a sáv kiszélesedik. Az ábrát nézve elgondolkodhatunk: Mi is az s-folyamat?



6. ábra. A völgy nagy neutronfluxus esetén szélesebb

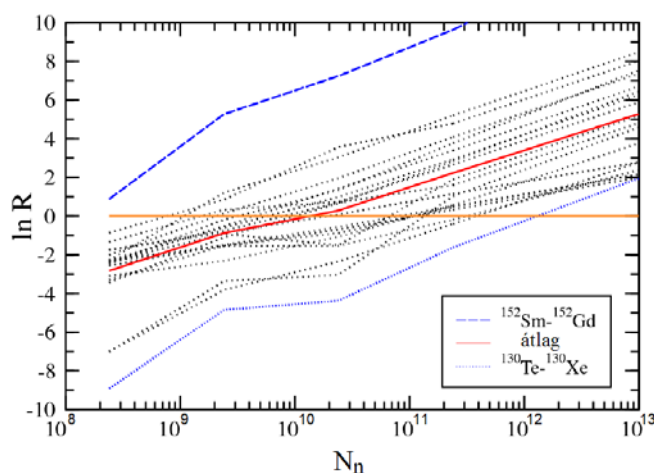
3. A neutronssűrűség, és így a neutronfluxus már fizikai paraméter. A nagy fluxus hatására a sáv kiszélesedik (képszerűen: „az erős neutronszél messze elfűjja a magokat a völgyből a nagy neutronszámú magok felé”). A 6. ábrán más is látható. Bejelöltük, a stabil magokat, kiemelve keletkezésük módját: *s*-mag, *r*-mag, *p*-mag. Pl. az *s*-mag onnan kapta a nevét, hogy csak *s*-folyamatban keletkezik, mert egy stabil mag leányékolja az *r*-folyamatban való keletkezés előtt. Az *r*- és *p*-magok pedig az elfogadott nézetek szerint csak gyors neutronbefogási, illetve protonbefogási folyamatban keletkeznek. (Az utóbbit modellünk nem

veszi figyelembe.) Az s - és az r -magok többnyire párba állíthatók pl.: $^{132}\text{Te}-^{132}\text{Xe}$, $^{152}\text{Sm}-^{152}\text{Gd}$, $^{192}\text{Os}-^{192}\text{Pt}$.

4. A programmal a neutronsűrűséget változtatva vizsgálhatjuk, mennyi lesz az r/s arány, azaz az r -magok és az s -magok mennyiségének aránya. Ezt összehasonlíthatjuk a Naprendszerbeli aránnyal:

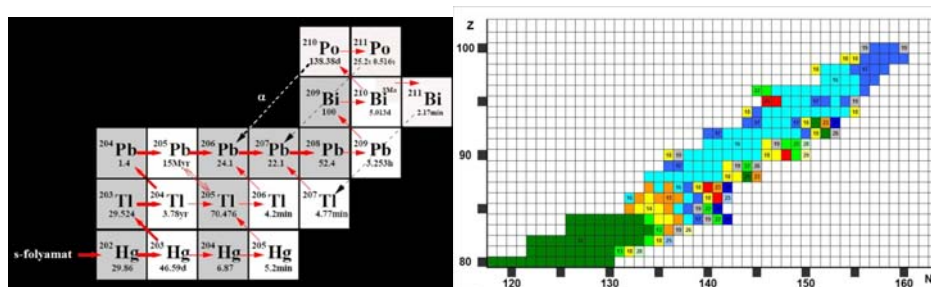
$$R = \left(\frac{N_r}{N_s} \right)_{\text{modell}} : \left(\frac{N_r}{N_s} \right)_{\text{Naprendszer}} \quad (8)$$

A 7. ábrán az R hányados logaritmusát ábrázoltuk a neutronsűrűség függvényében. Látható, hogy $N_n = 10^{10 \pm 1} \text{cm}^{-3}$ sűrűséggel a modell jóslata leírja a megfigyelt értékeket.



7. ábra. Az R arány logaritmus a neutronsűrűség függvényében.

5. A klasszikus s -folyamat a polónium gyors alfabomlása miatt véget ér a bizmutnál. Ahogy a polónium keletkezik, úgy rögtön el is bomlik. Megpróbálhatjuk növelni a neutronsűrűséget. Ha $N_n \geq 10^{10} \text{cm}^{-3}$, akkor a széles sáv miatt elkerülhető a polónium csapdája. A fejlődésnek ebben az esetben csak a fermium spontán hasadása vet véget.



8. ábra. A bizmut körüli klasszikus kép és a modell egy lehetősége

A vörös óriás csillagok között az ún. AGB csillagokban időnként van ilyen körülmény [4]. A mag főleg szénből és oxigénből áll, ezt veszi körül a hélium réteg, azt pedig kívülről a konvektív zóna. A hélium réteg alján hélium-égés, a konvektív zóna alján hidrogén-égés történik felváltva. Ezt a lehetőséget kétféle neutronfluxus felváltva történő alkalmazásával modellezhetjük.

OKTATÁSI LEHETŐSÉGEK

A vázolt folyamatok fizikai alapjai középiskolai keretek között feldolgozhatók. A radioaktivitás tanulmányozás után a szükséges fogalmak rendelkezésre állnak. A differenciálegyenletet persze nem kell közölnünk, az alapvető folyamatokról enélkül is átfogó képet adhatunk. A probléma felvetése közben ismertetjük az 1. és 3. ábrát, és a számolás alapját jelentő (5–7) képleteknek megfelelő fizikai képet. Ezek után a program grafikus felülettel történő futtatása, vagy az ebből készült animáció segítségével élményszerűvé tehetjük a magok keletkezését (4. ábra).

IRODALOMJEGYZÉK

1. F. Käpeller, H. Beer and K. Wisshak: Rep. Prog. Phys. 52. 945-1013. 1989.
2. Rolfs C. E., Rodney W. S. Cauldrons in the Cosmos, The Univ. of Chicago Press, 1988
3. J. K. Tuli, Nuclear Wallet Cards, Brookhaven National Laboratory, 2005
4. M. Lugaro, A. I. Karakas, S. Bisterzo: PoS (NIC X) 034, NIC X Mackinac Island, Michigan, USA 27 July – 1 August, 2008

SZERZŐ

Kiss Miklós tanár, Berze Nagy János Gimnázium, kiss-m@chello.hu