

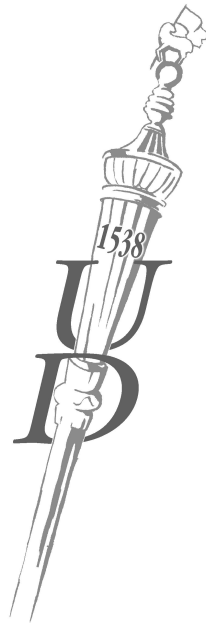
Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei
PhD Dissertation Theses

A vasnál nehezebb elemek keletkezése csillagokban

Formation of Heavy Elements in Stars

Kiss Miklós

Témavezető/Supervisor: Dr. Trócsányi Zoltán



DEBRECENI EGYETEM
Fizikai Tudományok Doktori Iskola
Debrecen, 2012

Bevezetés

A nehéz (vasnál nehezebb) elemek atommagjainak keletkezéséért felelős folyamatokat ma is úgy tekintik, ahogy azt Burbidge, Burbidge, Fowler és Hoyle (B²FH) 1957-ban leírta. Hatvan év alatt a modell jóslatait annyira sikerült pontosítani, hogy a Naprendszerben előforduló elemgyakoriságokat százalékos pontossággal le tudjuk írni. E pontos mennyiségi leírás alapján az irodalomban megkérdőjelezhetetlen igazságnak tekintik, hogy a neutronbefogással megvalósuló magszintézis két legfontosabb folyamata az alacsony neutronsűrűségű környezetben (jellemzően a hélium, illetve szén-oxigén égető vörös óriás csillagokban,) megvalósuló lassú s-folyamat és a magas neutronsűrűségű környezetben (jellemzően szupernóva robbanásokban) megvalósuló gyors r-folyamat. A felosztás azon alapszik, hogy egy nem stabil mag vagy elbomlik, vagy előbb befog egy újabb neutron. Egyedi magokat tekintve lassú folyamat esetén tíz évenként várható egy neutron befogása, ezért az évesnél nagyobb felezési idejű magok időközben majdnem biztosan elbomlanak. A lassú folyamat fizikai képe szerint az elemek keletkezése a stabilitási völgy mélyén az ún. s-úton halad a könnyebb magoktól a nehezebbek felé.

A klasszikus megközelítés nyilvánvalóan finomításra szorul olyan atommagok esetén, ahol a neutronbefogási idő és a bomlási idő azonos nagyságrendű. Az ilyen esetekre vezették be az elágazások figyelembevételét az s-folyamatnál (Käpeller, Beer, Wisshak 1989). A legfrissebb irodalmi összefoglalások is ebben a képben írják le az s-folyamatot (Lugaro 2005, Karakas 2010). A két folyamat fontos észlelési bizonyítékának számítanak az s-, illetve r-magok. A klasszikus kép szerint s-magok csak s-folyamatokban, r-magok csak r-folyamatokban keletkezhetnek.

Klasszikusan az s-folyamatban az atommagok a stabilitás völgye mentén keletkeznek, ezért az elfogadott kép szerint, a magszintézis biztosan véget ér a bizmutnál a polónium gyors alfa bomlása miatt (Clayton 1967).

A modell helyességének megítéléséhez ma is a Naprendszerbeli elemgyakoriságok reprodukálását tartják szinte az egyetlen kritériumnak. Ugyanakkor abban már árnyalt a kép, hogy a tapasztalt gyakoriságok az atom-magszintézis különböző helyszínein lezajló

folyamatok együttes eredményeként jönnek létre. A két folyamat közötti köztes neutronsűrűségű magszintézis feltételezése szükségesnek tűnik. Erre utalnak a korai meteoritokban megfigyelhető izotóp anomáliák is (Lugaro 2005). A köztes folyamatok magvalósulásának színhelyét az AGB csillagokban találhatjuk meg.

Célkitűzéseim

Dolgozatomban célul tűztem ki egy egységes statisztikus modell felírását a vason túli elemek kialakulásának szimulációja céljából. Eredetileg didaktikai céllal készítettem a modellt, hogy a középiskolások számára érthetővé, és érzékletessé tegyem a magfizikai folyamatok szerepét a nehéz elemek kialakulása során. Az irodalomban található modellek tanulmányozása alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a klasszikus képet árnyalni célszerű, mert bár a stabil elemek Naprendszerben észlelhető gyakoriságait néhány százalékos pontossággal megjósolja, azonban a természetben lezajló folyamatoknak nyilvánvalóan nem feleltethető meg. Ennek következménye, hogy bár egyszerű jelenségekről van szó, a klasszikus leírás köztudatba szemléletes módon nem közvetíthető.

Modellem felírása után természetes kérdés volt, hogy vajon képes-e az elemgyakoriságok hasonló pontosságú leírására, mint az irodalmi klasszikus s- és r-folyamat. A didaktikai célkitűzés így átalakult tudományos célkitűzéssé: a nehéz elemek keletkezésének egységes modellezése, a modellhez szükséges bemenő adatok minél teljesebb összegyűjtése, a modell jóslatainak a Naprendszerben észlelhető elemek gyakoriságával történő összevetése. Célul tűztem ki továbbá a modell által sugallt fizikai kép leírását, valamint a modellből az elemek keletkezéséről levonható esetleges új, a tudományos köztudatban nem szereplő következtetések feltárását. A klasszikus megközelítés ugyanis nem veszi figyelembe azt a jelenséget, ami miatt 3α folyamattal szén keletkezik a csillagokban. A csillagokban lezajló energiatermelő folyamatokban a nagyon rövid felezési idejű berillium folyamatos keletkezik, és elbomlik, és folyamatosan jelen van, amíg a folyamatok fenntartanak egy

dinamikus egyensúlyi koncentrációt.. Ugyanez a helyzet a nem stabil nehéz magokkal: a folyamatos keletkezés miatt mindaddig jelen vannak, amíg tart a neutron expozíció.

Eredményeim

Új tudományos eredményeim az alábbi tézispontokban foglalom össze.

1. Nehéz (vasnál nehezebb) atommagok neutronbefogásos egyesített modelljét írtam le a magok átalakulását jellemző összes mennyiség – a felezési idő, bomlási mód, elágazási arány és neutronbefogási hatáskeresztmetszet – figyelembevételével. Az átalakulási folyamatokat leíró csatolt differenciálegyenlet-rendszert olyan közelítő numerikus eljárással oldottam meg számítógép segítségével, amely lehetővé teszi az egyes atommagok megjelenésének és felszaporodásának szemléltetését.
2. A 30 keV-es neutronbefogási hatáskeresztmetszetek tanulmányozása alapján egyszerű tapasztalati képletekkel megfogalmazható észrevételeket tettem a legnagyobb hatáskeresztmetszetek helyére a Z-N síkon, valamint a helytől függő legnagyobb értékekre is. A képletek felhasználásával becslést tudtam adni a modellszámításaimhoz szükséges, az irodalomban nem megtalálható hatáskeresztmetszetek értékére.
3. Megmutattam, hogy modellemmel megkaphatók a Naprendszerbeli mérésekkel tapasztalt r-mag/s-mag arányok $n_n \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ neutronsűrűség mellett.
4. Megállapítottam, hogy az atommagszintézis sávosan történik a stabilitási völgy mentén. A sáv szélessége a neutronfluxustól és a kiinduló vas mennyiségétől függ, a sáv szélességétől függően pedig olyan atommagok is keletkezhetnek a klasszikus s-folyamatra jellemző viszonylag alacsony neutronsűrűség esetén, amelyek keletkezését a klasszikus s-folyamat nem teszi lehetővé. Például $n_n = 2,715 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ neutronsűrűség esetén keletkezhet ${}^{70}_{30}\text{Zn}$, ${}^{76}_{32}\text{Ge}$ és ${}^{82}_{34}\text{Se}$ atommag, amelyek a klasszikus leírás szerint csak nagy neutronsűrűség esetén bekövetkező r-folyamatban

keletkezhetnek. Elegendő kiindulási mag esetén pedig s-magoknak tartott atommagok is keletkezhetnek r-folyamatokban. Az s-magok száma jelentősen lecsökken. Biztosan s-mag csak a ${}^{176}_{72}\text{Hf}_{104}$ és ${}^{192}_{78}\text{Pt}_{114}$.

5. Rámutattam, hogy az AGB csillagok TP állapotában bekövetkező neutronbefogási folyamatok révén a folyamatokat jellemző $10^{10} \leq n_n \leq 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ neutronsűrűségeen is keletkezhetnek a bizmutnál nehezebb elemek, és ellentétben a klasszikus képpel, az atommagok keletkezése egészen a fermiumig haladhat. Ez jó összhangban van a tellúr izotópok gyakoriságával. Ez utóbbit jól tudom reprodukálni a modellem alapján kapott s-, r- és m-folyamatok szuperpozíciójával. Ezzel megmutattam, hogy a közepes neutronsűrűségeen lezajló folyamatok (AGB magszintézis) szerepe nagyon jelentős a végső izotópeloszlások kialakulásában. Meghatároztam az átlépési függvényt, amely megadja, hogy adott mennyiségű kiinduló vasmag esetén mekkora neutronsűrűség esetén következik be a neutronbefogásos magszintézis folyamatnál a bizmuton való átlépés.

Introduction

Processes that are used to describe formation of nuclei of elements heavier than iron were defined by Burbidge, Burbidge, Fowler and Hoyle (B²FH) in 1957. In sixty years the model was refined such that element abundances in the Solar System are reproduced with less than a percent error. Such accurate quantitative description lead to the general and unquestioned acceptance of two main processes that describe neutron capture nucleosynthesis in the literature: the s-process (slow process) in low neutron density environments such as helium and carbon-oxygen burning asymptotic giant branch stars and the r-process (rapid process) in high neutron density environments, typically supernovae explosions. This separation relies on the fact that an unstable nucleus can either decay or first capture another neutron. Assuming individual nuclei and s-process a neutron capture is expected every ten years. Nuclei having a half-life less than a year almost certainly decay. Formation of elements occurs along a path (s-path) in the nuclear valley of stability, from the light towards the heavy elements.

Obviously, the classical approach needs refinement if the neutron capture time and decay time are of the same order. The notion of branching was introduced for such cases in the s-process (Käpeller, Beer, Wisshak 1989) and even the latest literature relies on this view (Lugaro 2005, Karakas 2010). The r- and s-nuclei are important observation evidences of the two processes. According to the classical model, s-nuclei can only form in s-processes and r-nuclei can only form in r-processes.

In the classical model nucleosynthesis by the s-process occurs in a band along the valley of beta stability and it is generally accepted that the s-process nucleosynthesis terminates at bismuth by the fast alpha decay of polonium (Clayton 1967).

Currently, verification of a model almost completely relies on one criterion: the abundances of elements in the Solar System should be correctly reproduced. However, observed abundances include the

aggregate effects of multiple processes that take place during nucleosynthesis. It seems reasonable to assume the existence of an intermediate neutron density nucleosynthesis to bridge the gap between the s- and r-processes. Anomalous isotopic ratios observed in early meteorites substantiate such assumptions (Lugaro 2005). Intermediate processes take place in AGB stars.

Objectives

My primary goal was to create a unified statistical model to simulate the formation of elements heavier than iron. Originally, my intent was to create a didactical model to demonstrate and make easier for high school students to comprehend the role of nuclear processes in the formation of heavy elements. Studying the classical models in the literature, I came to a conclusion that the classical view is rather coarse and needs refining. Although classical models can predict the abundances of stable elements in the Solar System with good, few percent accuracy, obviously they cannot be directly associated to processes observed in nature. As a result, even though the concepts are simple, the classical description, represented by the s- and r-paths, is misleading and hard to comprehend for non-experts.

After encoding my model, the natural question arose: Is it able to describe element-abundances as accurately as the classical s- and r-processes in the literature? What was originally a didactical goal became scientific: to create a unified model of formation of heavy elements, to collect all the necessary and concise input data and to compare predictions of abundances to those observed in the Solar System. My objectives became to explore the physical picture suggested by the model and to formulate possible novel conclusions, if any, about element formation that is not yet present in the literature. The classical approach does not take into account a phenomenon through which carbon is created in stars via the triple-alpha (3α) process. In stellar nuclear fusion reactions beryllium is produced but also decays due to its short half-life and is continuously present until a dynamical equilibrium concentration is maintained by the relevant processes. The same is true for unstable heavy nuclei: these are

continuously produced and remain present while neutron exposition lasts.

Achievements

My novel scientific achievements are listed below.

1. I formulated a unified model to describe neutron capture nucleosynthesis of heavy (heavier than iron) elements, incorporating all properties necessary to characterize nuclei transformations (half-life, decay mode, branching ratio, neutron capture cross sections). The coupled differential equations describing the transformation processes were solved with a numerical approximation procedure that also helps visualizing the appearance and accretion of nuclei on a computer screen.
2. I proposed locations and values of the highest capture cross sections on the Z-N plane by studying published neutron capture cross sections at 30keV. I estimated necessary neutron capture cross sections values not available in the literature based on the proposed phenomenological formulae.
3. I demonstrated that the unified model is able to reproduce the observed r- and s-nuclei ratios in the Solar System at neutron density of $n_n \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.
4. I established that nucleosynthesis occurs in a band along the valley of stability. The width of the band depends on the neutron flux and amount of iron at the beginning of the process. Depending on the width of the band, such nuclei can appear at the relatively low neutron density typical in classical s-process that are excluded from the classical s-process. For instance, at neutron density of $n_n = 2,715 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$, ${}^{70}_{30}\text{Zn}$, ${}^{76}_{32}\text{Ge}$ and ${}^{82}_{34}\text{Se}$ nuclei appear, that could only form in an r-process, which only occurs at high neutron densities based on the classical model. Given sufficient amount of initial iron, nuclei that are known s-only can also form in r-processes. The number of s-only nuclei is significantly reduced. The only certainly s-nuclei are ${}^{176}_{72}\text{Hf}_{104}$ and

${}^{192}_{78}\text{Pt}_{114}$.

5. I pointed out that contrary to the classical view, elements heavier than bismuth, all the way to fermium can form during neutron capture processes at neutron densities in the range $10^{10} \leq n_n \leq 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, typical in the TP phase of AGB stars. This is in good agreement with observed abundances of tellurium isotopes, which I can reproduce with my model as a superposition of s-, r- and m-processes. I demonstrated that processes occurring at intermediate neutron densities (AGB nucleosynthesis) play a significant role in final isotope distributions. I defined a threshold function that provides the neutron density for a given amount of initial iron nuclei at which neutron capture nucleosynthesis does not terminate at bismuth.

Az értekezés témakörében megjelent közleményeim (Publications related to the dissertation)

Referált közlemények (Peer reviewed publications)

1. Kiss Miklós, Trócsányi Zoltán, *Nehéz elemek keletkezése csillagokban*, FIZIKATANÍTÁS TARTALMASAN és ÉRDEKESEN Magyarul tanító tanítók nemzetközi konferenciája, 397-402, Budapest, ELTE, (2009). ISBN: 978-963-284-150-2
2. Miklós Kiss and Zoltán Trócsányi, *A unified model for nucleosynthesis of heavy elements in stars*, 2010 J. Phys.: Conf. Ser. 202 012024, impakt faktor: 0.0
doi: 10.1088/1742-6596/202/1/012024.
3. Kiss Miklós, *A vasnál nehezebb elemek keletkezése csillagokban*, Fizikai Szemle 2011. március 78.o.,
<http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz1103/kissm1103.html>.

Preprintek (Preprints)

1. Miklós Kiss and Zoltán Trócsányi, *Phenomenological description of neutron capture cross sections at 30 keV*, arXiv:1104.0209v1 [nucl-ex].

Előadások, poszterek (Presentations and posters)

1. Zoltán Trócsányi and Miklós Kiss: *A unified model for nucleosynthesis of heavy elements in star*, NPAIV Frascati June 10, 2009. (előadás)
2. Kiss Miklós, Trócsányi Zoltán, *Nehéz elemek keletkezése csillagokban formation of heavy elements in stars*, FIZIKATANÍTÁS TARTALMASAN és ÉRDEKESEN Magyar nyelvű nemzetközi szeminárium magyarul tanító fizikatanárok számára, Budapest, ELTE 2009. aug. 27-29. (előadás)
3. Miklós Kiss, *Phenomenological description of neutron capture cross sections at 30 keV*, NPA5 Eilat, April 6, 2011. (poszter)

Egyéb megjelent közleményeim (Other publications)

1. Kiss Miklós, *Készítsünk napórát*, Fizikai Szemle 2006. április 132.o., <http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0604/FizSzem-200604.pdf>