

Maria Lugaro

**A vasnál nehezebb kémiai elemek és a
meteoritikus csillagpor eredete
aszimptotikus óriásági csillagoktól**

Az MTA doktora cím megszerzéséért
készített értekezés tézisei

Budapest, 2021

1. A kutatás előzményei

A Nap típusú és a Napnál akár tízszer nagyobb tömegű csillagok az aszimptotikus óriáságra (AGB) fejlődnek, amint a magjukban a hidrogént és a héliumot is elégették. Ezek az AGB csillagok több százszor nagyobb méretűek, mint azok az eredetileg fősorozati csillagok, amikből fejlődtek. Míg a felszíni hőmérsékletük kisebb, a belső rétegekben a hőmérséklet eléri a millió fokot, ami legalább tízszer akkora érték, mint az ezt megelőző evolúciós fázisokban. Ilyen körülmények között beindulnak azok a nukleáris reakciók, amelyek szabad neutronok keletkezéséhez vezetnek, különösen a ^{13}C és a ^{22}Ne magok α -részecske (He-atommag) befogása. Az AGB csillagokban lejátszódó, szabad neutronok által vezérelt lassú neutronbefogás-folyamata (s-folyamat, Burbidge és mtsai, 1957) felelős a vasnál nehezebb elemek – így az ólom és bizmut – Univerzumban megfigyelhető gyakoriságának közel feléért.

Míg az s-folyamat első modelljei egy nukleáris hálózat analitikus megoldásain alapultak (Clayton, 1968; Kaeppeler és mtsai, 1982), a hetvenes években az AGB csillagok első teljes modelljei lehetővé tették Icko Iben és munkatársai számára, hogy azonosítsák a szabad neutronok forrásait az AGB csillagokban, elsőként a ^{22}Ne -t, (Truran & Iben, 1977), majd a ^{13}C -t (Hollowell & Iben, 1988). Ezen neutronforrások aktiválódása szükséges ahhoz, hogy magyarázni lehessen a vasnál nehezebb elemeknek az ötvenes évek óta megfigyelt nagy mennyiségét az AGB csillagok atmoszférájában (Merrill, 1952; Burbidge és mtsai, 1957). Ahogy egyre több számítási teljesítmény állt rendelkezésre, a nyolcvanas években megszülettek az s-folyamat csillagfejlődési számításokon alapuló modelljei, többek között a Laurea¹ témavezetőm, Roberto Gallino (Busso és mtsai, 1988; Kaeppeler és mtsai, 1990) által vezetett torinói csoport által. A kilencvenes években ez a csoport alapozta meg az AGB csillagok s-folyamatának jelenleg elfogadott leírását (Gallino és mtsai, 1998; Arlandini és mtsai, 1999)² azon felfedezés alapján, hogy a ^{13}C neutronforrás radiatív viszonyok között ég (Straniero és mtsai, 1995), azaz nem a konvektív rétegekben, ahogyan azt korábban feltételezték. Publikációjuk óta ezt a leírást számos csoport kibővítette (pl. Goriely & Mowlavi, 2000; Cristallo és mtsai, 2009; Pignatari és mtsai, 2016), és több megfigyelési megkötéshez viszonyítva értékelte.

Az én feladatomban volt, hogy az AGB csillagok s-folyamatának ezen leírását összhangba hozzam a PhD-témavezetőm, John Lattanzio (Monash Egyetem, Ausztrália) által vezetett csoport csillagmodelljeivel. A PhD-munkám során három különböző csillagfejlődési kód bemenetét használtam fel, és azokat a Torino-utófeldolgozáson alapuló (post-processing) s-folyamat kóddal vizsgáltam az eredmények egymással, és megfigyelésekkel történő összehasonlítása céljából (Lugaro és mtsai, 2003). A PhD után kifejlesztettem egy másik utófeldolgozáson alapuló kód nukleáris hálózatát (alább, a 2. fejezetben ismertetett Monash dppns45 kód). A hálózatot kiterjesztettem 328 nuklid kezelésére, és előjelzéseket készítettem az s-folyamatból származó magok gyakoriságát illetően. Az új hálózat alkalmazása során a modell által adott előjelzések és a csillagok megfigyeléseivel, meteoritikus csillagporszemcsékkel és radioaktív magokkal történő összehasonlításra fókuszáltam.

A kilencvenes évek óta végeznek szisztematikus, kvantitatív összehasonlításokat az s-folyamat modellek és a sztelláris megfigyelések között (Lambert és mtsai, 1995; Busso és mtsai, 1995, 2001), legfőképpen a Napnak megfelelő fémtartalmú és ahhoz képest 0,1 fémesség közötti tartományba eső csillagokat felhasználva. A kétezres évek eleje óta rengeteg információ áll rendelkezésre a vasnál nehezebb elemek abundanciáját illetően az alacsonyabb – a Naphoz

1 A jelenlegi diplomamunka megfelelője.

2 A cikkek létrejöttében mesterszakos hallgatóként részt vettem, továbbá a cikkekre az mtmt.hu adatbázisa szerint 444, illetve 581 független hivatkozás történt.

képest akár 0,01, sőt 0,001 – fémességű csillagok esetén is, és számos csoport szentelte munkáját az adatok értelmezésének (pl. Van Eck és mtsai, 2001; Bisterzo és mtsai, 2012). Ezen csillagok némelyike sajátos, megmagyarázhatatlan, az s-folyamat és a gyors neutronbefogás (r-folyamat, amely robbanási körülmények között jelentkezik) közötti abundanciamintázatot mutat (Jonsell és mtsai, 2006; Lugaro és mtsai, 2009). Az értekezésben bemutatott munkák egy része ezen misztikus csillagok megértésére törekszik.

A meteoritikus csillagporszemcséket az 1980-as évek végén fedezték fel (pl. Bernatowicz és mtsai, 1987), és túlnyomó többségük AGB csillagokból származik. Az értekezésben bemutatott munka előtt csak néhány, főként a Torino-csoporttól származó cikk foglalkozott a csillagpor összetételének és az AGB modellből származó előrejelzések részletes, kvantitatív összehasonlításával (pl. Gallino és mtsai, 1990, 1997; Hoppe & Ott 1997)³. Az 1990-es évek végén két új, a csillagpor tanulmányozására szolgáló műszer kezdett működni: a rezonancia ionizációs tömegspektrométer (resonance ionisation mass spectrometer, RIMS) a Chicagói Egyetemen (USA, az Andrew Davis által vezetett csoportban) és a nanoméretű másodlagos ion-tömegspektrométer (Nanoscale secondary ion mass spectrometry, NanoSIMS) a Washington Egyetemen, St. Louisban (USA, Ernst Zinner vezette csoportban). E fejlesztések hatására kutatások sorát indítottam a doktori tanulmányaim alatt és után, amelyek az s-folyamattal kapcsolatos AGB modelleket hasonlítják össze a porszemcsék nagy pontossággal mért izotóp-összetételével.

Végezetül, az AGB csillagok által termelt, vasnál nagyobb rendszámú radioaktív magok témakörében végzett kutatásokat is a Torino-csoport kezdeményezte az 1990-es években⁴, a Caltech-nél dolgozó Gerry Wasserburg, az 1986-ban földtudományok terén Crafoord-díjat nyert kutató ösztönzésével és közreműködésével. Wasserburg érdeklődött azon radioaktív atommagok keletkezése iránt, amelyekre ő és munkatársai azt találták, hogy jelen voltak a korai Naprendszerben. Wasserburg és a Torino-csoport együttműködése idején a ¹⁸²Hf (felezési ideje 8,9 millió év) s-folyamatból származó mennyiségét elenyészőnek tartották. Ez vezette Wasserburgot és munkatársait (1996) arra, hogy rámutassanak a ¹⁸²Hf és ¹²⁹I (felezési ideje 15,7 millió év) abundanciája közti rejtélyes ellentmondására. Közel 20 évvel később ezt a problémát megoldottam (4(a). tézispont).

Magyarországon az én Lendület 2014/17 ösztöndíjammal megkezdődött az AGB csillagok s-folyamatának vizsgálata, valamint alkalmazása a csillag- és meteoritmegfigyelésekre. Nincs tudomásom más magyar PhD vagy MTA értekezésről ebben a témakörben. Az egyetlen munka, amely neutronbefogással kapcsolatos modellel foglalkozik, Kiss Miklós 2012-es doktori értekezése a Debreceni Egyetemen, aki egy paraméteres modellt dolgozott ki a neutronbefogással történő nukleoszintézis leírására, és azt találta, hogy elegendően nagy neutronsűrűség mellett a bizmutnál nehezebb elemek képesek kialakulni.

2. Kutatási módszerek

Értekezésemben összehasonlítom az AGB-csillagokban zajló s-folyamat modelljeinek előrejelzéseit a csillagokra és meteoritokra vonatkozóan a szakirodalomban fellelhető adatokkal. A számításokat a dppns45 kóddal végeztem (Cannon fejlesztése 1993-ból, amelyet John Lattanzio kollaborációjával igazított az AGB csillagokhoz), amely a csillagokban előforduló elemek előfordulását számolja ki minden egyes lépésben, minden mélységben.

3 Az utolsó két cikk létrejöttében mesterszakos hallgatóként részt vettem.

4 Teljes egészében a diplomamunkám alatt zajlott.

A dppns45 több fő bemenő paramétert tartalmaz: ezek a számos fajta atommagból álló nukleáris hálózat és az azokat összekapcsoló nukleáris reakciók. Ezenkívül természetesen fontos a csillagok belső szerkezete (hőmérséklet, sűrűség, konvekciós sebességek és a keveredési hossz) minden időpontban és mélységben. Fejlesztettem, bővítettem és gondoztam a nukleáris hálózatot, míg a modelljeim csilagszerkezeti bemenetét munkatársaim alkották meg (főleg Amanda Karakas, de Richard Stancliffe, Simon Campbell és Carolyn Doherty is). Ilyen bemenő paramétereket használva a dppns45 kiszámítja a gyakoriságok változását a különböző elemekre, amely változást a nukleáris égés és a keveredés idéz elő. A dppns45 legnagyobb előnye a vele versengő kódokkal szemben, hogy az előfordulási gyakoriságokat kiszámító egyenletek egyszerre foglalják magukban mind a nukleáris égést, mind a keveredést, így azokat egyidejűleg oldja meg.

A dppns45 által alkalmazott időfüggő keveredési séma két anyagáramlást (föl és le) tartalmaz a konvekciós régiókban. Horizontális anyagáramlás szintén megengedett, így az egyes tömeghéjak végső összetétele a vertikális és a horizontális keveredéstől egyaránt függ. A sebesség, sűrűség és tömeg ismeretében minden egyes cellára kiszámíthatjuk a vertikális tömegáramot, míg a horizontális keveredést a függőleges áramlás gradiense határozza meg a diffúzió jelensége mellett.

Az atommagfajta N száma a nukleáris hálózatban meghatározza a futáshoz szükséges időt, amely nagyjából arányos az N^2 -tel, mivel a dppns45 implicit módszere egy $N \times N$ -es mátrixot old meg. Mindezek miatt két hálózatot használtam. A „könnyű” hálózat ($N=77$) használata akkor volt célszerű, amikor a vasnál könnyebb elemek előfordulása volt érdekes. A „nehéz” hálózat ($N=328$) pedig az s-folyamat útvonalán minden számítás szempontjából érdekes izotópot tartalmazott, egészen a polóniumig eljutva.

A dppns45 nukleáris hálózata Friedel Thielemann és Thomas Rauscher (Bázei Egyetem) által rendelkezésre bocsátott reaclib nevezetű csomagon alapul, amelyben a reakciósebességeket egy analitikus képlet adja meg, amelyből bármely hőmérsékleten kiszámítható a megfelelő érték. 2007-ben egy mesterhallgatóm, Mark Van Raai (Utrechti Egyetemen, Hollandia) egy új módszert hozott létre, amellyel a dppns45 képes egyedi, táblázatos reakciósebességek beolvasására, a reaclib illesztéseit felülírva. Ezen fejlesztésnek köszönhetően alaposabban tanulmányozhattam az egyes reakciósebességek hatását és azok bizonytalanságát az AGB csillagok nukleoszintézisében. Mivel a reaclib hálózata nem tartalmazza a β -bomlási és elektronbefogási reakciók hőmérséklet- és sűrűségfüggését, ezért 2014-ben elkezdtem néhány kiválasztott β -bomlási sebesség analitikus képleteit beépíteni a dppns45 kódba, az instabil atommagok különböző energiaszintjei alapján. A közelmúltban Andrés Yagüe López – csoportom posztdoktori munkatársa – egy pontosabb és rugalmasabb leírást fejlesztett ki a β -bomlási és elektronbefogási folyamatokra a dppns45 keretein belül, amely mind a hőmérséklet-, mind a sűrűségfüggést figyelembe veszi.

Hogy reprodukálhassuk az AGB csillagok esetében megfigyelt s-folyamatbeli anyagok magas előfordulási gyakoriságát (Busso és mtsai, 2001; Abia és mtsai, 2002) igen nagyszámú neutronra van szükség, amelyeket a ^{13}C neutronforrás szabadít föl. Ennek eléréséhez szokás a ^{13}C „zsebek” kialakulásának feltételezése az AGB csillagokban. Ezen értekezés által bemutatott munkában egy mesterséges és paraméterezett „parciális keveredési zónát” illesztettem a dppns45 kódba, ahol protonok és ^{12}C atomok egymással keverednek. A ^{12}C +proton reakció pedig ^{13}C zsebek keletkezését eredményezi.

Végül, a csillagok forgását e modellekben nem vettük számításba, mivel feltehetőleg nem játszik fontos szerepet az AGB csillagokban lejátszódó s-folyamat során. További részletekért

lásd, Cseh és mtsai. (2018) és den Hartogh és mtsai. (2019) szakkikket, amelyekben magam is szerzőtárs vagyok. E cikkek egymástól független megfigyelési megszorításokból vonják le ugyanezen következtetést, az első esetben spektroszkópiai, a másodikban báriumcsillagok asztroszeizmológiai mérései alapján.

3. Új tudományos eredmények

1. Az idős, fémszegény halócsillagokban és a poszt-AGB csillagokban megfigyelt elemgyakorisági mintázatot nem lehet megmagyarázni sem az AGB-csillagokban zajló lassú neutronbefogásos s-folyamattal, sem az s-folyamat és a gyors neutronbefogásos r-folyamat együttes hatásával. Ez bizonyítja, hogy létezik egy köztes neutronbefogásos i-folyamat, amelynek működése figyelhető meg ezekben a csillagokban.

Az s-folyamat végbemenetelének jeleit mutató csillagok közé tartoznak a szénben gazdag fémszegény (CEMP) és poszt-AGB csillagok.

(a) A CEMP csillagok (tipikus fémességük a Napénak 0,01-a) magas elemgyakoriság értékeket mutatnak a vasnál nehezebb elemekre. Ezek az elemek egy korábbi AGB fázisú társcsillagban termelődtek, és tömegátadással kerültek át a jelenleg megfigyelhető CEMP csillagokra. Azok a CEMP csillagok, amelyekben főként az s-folyamat által termelt elemek (pl. Ba) mutatnak magasabb elemgyakoriságot, az AGB modellek által jósolt elemgyakoriság-eloszlással összeegyeztethető mintázatot mutatnak. Azoknak a CEMP csillagoknak az elemgyakoriság-eloszlása, amelyek mind az s-, mind az r-folyamat által termelt elemekben (pl. Ba és Eu) is gazdagok, nem egyeztethető össze az AGB modellek által előre jelzettel, még úgy sem, ha az r-folyamat elemeiben való kezdeti feldúsulást is belefoglalják a modellekbe. A neutronbefogás s- és r-folyamatának semmilyen kombinációja nem tudja ezeket az összetételeket előállítani, így egy másfajta neutronbefogási folyamatra van szükség.

A tézisponthoz kapcsolódó tudományos publikáció: [1].

(b) A Nagy-Magellán-felhőben észlelt poszt-AGB csillagok (fémességük kb. 0,1-e a Napénak és tömegük kb. $1,3 M_{\odot}$) kiemelkedően magas elemgyakoriságot mutatnak a vasnál nehezebb elemek esetében, bár az elemgyakoriság-mintázatuk nem magyarázható meg a korábbi AGB fázis alatt zajló s-folyamattal. Különösképpen az ólom gyakorisága sokkal alacsonyabb a megjósoltnál, míg a ritkaföldfémeké magasabb. Ezt lehetetlen előállítani az s-folyamattal, és egy, az s- és az r-folyamattól különböző neutronbefogási folyamat bekövetkezésére utal.

A tézisponthoz kapcsolódó tudományos publikáció: [2].

2. Azok a csillagporból származó szilícium-karbid (SiC) szemcsék, amelyek az s-folyamat jeleit hordozzák, kb. 2 és $4 M_{\odot}$ közötti kezdeti tömegű, a Naphoz hasonló és a Napnál fémszegényekben kb. kétszer gazdagabb, szénben gazdag AGB csillagokban keletkeztek. A szemcsék mérete az AGB szülőcsillag fémességével együtt növekszik, kb. a mikrométernél kisebbtől az annál nagyobbig.

A meteoritokból nyert csillagpor szemcsék főleg AGB csillagokból származnak, és a nagyon precíz laboratóriumi elemzésük szerint a csillagokból eredő izotóp-összetétel jeleit mutatják.

(a) A nukleoszintézis s-folyamatának a SiC szemcsék nagy részében megtalált jelei azt mutatják, hogy a szemcséket szülő AGB csillag kezdeti tömege $2-4 M_{\odot}$ között volt, fémességük a Nap fémessége és nagyjából annak kétszerese közé esett.

A tézisponthoz kapcsolódó tudományos publikációk: [3], [4], [5].

(b) A szemcsék adatait Ba-csillagok (kb. a Napénk megfelelő fémességű AGB csillagok társcsillagai) spektroszkópiai észleléseivel összehasonlítva azt látjuk, hogy a SiC szemcsék mérete a szülő csillag fémességével együtt növekszik. Ez azt vetíti előre, hogy inkább a Napnál fémekben gazdagabb AGB csillagokban keletkeznek a nagyobb méretű szemcsék, mint a Napnak megfelelő fémességű AGB csillagokban.

A tézisponthoz kapcsolódó tudományos publikáció: [6].

(c) Az AGB csillagokból származó SiC szemcsék fő eleme, a szilícium eloszlását használva levezethető a szülő AGB csillag kor-fémesség relációja. Ez azt mutatja, hogy a részecskének olyan csillagokból kell származniuk, amelyek fémgyakorisága átlagosan nagyobb a Nap környezetében megfigyeltnél.

A tézisponthoz kapcsolódó tudományos publikációk: [7], [8].

3. A csillagorból származó oxid- és szilíciumszemcsék erős ^{18}O hiányt mutatnak, amelyek II. csoportba tartozó szemcsékként is ismertek. E szemcsék olyan, kb. $4 M_{\odot}$ feletti tömegű AGB csillagokból erednek, amelyekben protonbefogás történik a konvektív burok alján.

A csillagorból származó oxid- és szilíciumszemcsék főképp O-ben gazdag AGB csillagokból származnak, de eddig a II. típusú szemcsék eredete bizonytalan volt. Az előrejelzések és a megfigyelések alapján az O-ban gazdag por nagy része nagy tömegű AGB csillagokban keletkezik, azonban nem figyeltek meg ilyen csillagokból származtatható szemcséket a meteoritokból származó csillagporok között. A LUNA laboratóriumban (Olaszországban, kb. egy km-rel a felszín alatt a Gran Sasso Nemzeti Laboratóriumban) végzett mérések alapján a $^{17}\text{O}(p,\alpha)^{14}\text{N}$ reakció új hatás keresztmetszete 2-2,5-szerese a korábbi becsléseknek (Bruno et al., 2016). A nagy tömegű AGB csillagok nukleoszintézisének azon modelljeiben, amelyekben a burok alján zajlik a CNO ciklus, az új hatás keresztmetszet értéket használva megilleszthető a II. típusú szemcsék $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ aránya a ^{18}O előrejelzett hiányával együtt.

A tézisponthoz kapcsolódó tudományos publikációk: [9], [10].

4. A fiatal Naprendszerben az s- és r-folyamat során keletkezett radioaktív elemek eredete elválik egymástól, és független nyomjelzőként szolgál a Naprendszer anyagához hozzájáruló utolsó r-folyamat (egy neutroncsillag összeolvadása vagy egy ritka szupernóva) és s-folyamat (egy AGB csillag) forrására. A p-folyamatból eredő nehéz radioaktív atommagok elemgyakorisága Ia típusú szupernóvák és kollapszár szupernóvák által is keletkezhet.

A vasnál nehezebb radioaktív magok, amelyek ma már nem léteznek, jelen voltak a Nap születésekor, amire meteoritok elemzéséből következtettek. Felhasználva ezeket az elemgyakoriságokat, megmérhetjük a Naprendszer történetéhez köthető időskálákat.

(a) A ^{129}I (felezési idő = 15,7 millió év) és ^{182}Hf (felezési idő = 8,90 millió év) eredete a korai Naprendszerben elkülönül. Az előbbi csak az r-folyamat során keletkezik, míg az utóbbi AGB csillagokban az s-folyamat során is. A ^{182}Hf s-folyamatból származását a ^{181}Hf β -bomlásának hőmérsékletfüggéséről készült adatok újraelemzése adta. A ^{181}Hf az az instabil izotóp, amely megelőzi a ^{182}Hf -et az s-folyamat neutronbefogásos útján. Korábban azt hitték, hogy a ^{181}Hf sokkal gyorsabban bomlik az s-folyamat hőmérsékletén (200-300 MK), mint földi hőmérsékleteken egy 68 keV-es gerjesztett atomi energiaállapot következtében. Azonban ennek az energiaállapotnak a létezése a ^{181}Hf esetében jelenleg kísérletileg nem bizonyított, ami

azt jelenti, hogy még a csillag forró környezetében is a földiéhez áll közel a ^{181}Hf bomlási aránya. Ez előnyben részesíti a $^{181}\text{Hf}(n,\gamma)^{182}\text{Hf}$ reakciót és a ^{182}Hf keletkezését az AGB csillagokban. Ebből adódóan a ^{129}I és a ^{182}Hf eredete különböző. A Naprendszer anyagához hozzájáruló utolsó r-folyamat és s-folyamat események nagyjából 100 és 30 millió évvel a Nap kialakulása előtt történtek.

A tézisponthoz kapcsolódó tudományos publikáció: [11].

(b) Ha a p-folyamatból származó radioaktív ^{92}Nb és ^{146}Sm magok csak Ia típusú szupernóvákban keletkeznek, akkor ellentmondás van a Naprendszer történetét leíró, ^{92}Nb -ből és ^{53}Mn -ből kapott időskálák között, mivel az utóbbi szintén Ia típusú szupernóvákban keletkezik. Ez arra utal, hogy a ^{92}Nb kollapszár szupernóvákban is kell, hogy keletkezzen.

A tézisponthoz kapcsolódó tudományos publikáció: [12].

4. Az eredmények hasznosítása

Az 1. tézispontot a későbbiekben alátámasztották Hampel et al. (2016, 2019) i-folyamatra vonatkozó modelljei, amely közleményekben szerzőtárs voltam. E munkák megmutatták, hogy a parametrikus i-folyamat modellek összeegyeztethetők a CEMP-s/r csillagok (amelyeket átneveztünk CEMP-i csillagoknak) és poszt-AGB csillagok elemgyakoriságaival. Az i-folyamat modellek és ezek vasnál nehezebb elemek kémiai fejlődésére gyakorolt hatása egyaránt aktívan kutatott témák. Például az i-folyamat befolyásolhatja a fiatal halmazokban található csillagok (Baratella et al., 2021) és a nemrég felfedezett foszforgazdag csillagok összetételét is (Masseron et al., 2020a,b). Együttműködésünk (Garcia-Hernandez, Masseron, Lugaro, Hampel, Pignatari), amely ezen új P-gazdag csillagokon dolgozik, nemrég 23,5 óra távcsőidőt nyert el az ESO (SC107) UVES-VLT műszerrel, hogy tovább vizsgálhassa az i-folyamat lehetséges nyomait ezen csillagok esetében.

A 2. tézispont azon tény magyarázatának részeként szolgál, hogy a Föld miért dúsultabb az s-folyamat elemeiben, mint a Naptól távolabb keletkezett égitestek. A legnagyobb SiC szemcsék, amiket a nagy fémességű AGB csillagokról származónak találtam, a legjobb jelöltek az s-folyamattal történt nukleoszintézis nyomainak megőrzésére a protoplanetáris korongban (Ek et al., 2020). Ez azért lehet, mert ilyen fémességen a Naprendszerben többségben előforduló első csúcsban lévő s-elemek termelése a második csúcsban található s-elemekhez képest nagyobb mennyiségű, és utóbbiak nem is figyelhetőek meg nagy mennyiségben a Naprendszerben.

A 3. tézispont alapján én és szerzőtársaim fontolóra vesszük a nukleáris reakciósebesség további hatásait az oxidszemcsék összetételére, azzal a feltevésével, hogy egy töredékük nagy tömegű AGB csillagokból származik. Például a ^{26}Al neutronbefogási sebességét a közelmúltban a CERN n TOF kísérletében mérték, és ennek a $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ arányra kifejtett hatását értékeljük, a modellek eredményét a szemcsékkel összevetve.

Végül a 4. tézispont alapján benyújtottam egy sikeres ERC-CoG-2016 javaslatot, amely bizonyítja a radioaktív atommagok felhasználásának szükségességét a Nap születésének megértésében. Az ERC-csapat legújabb eredményei között Côté et al. (2021) kimutatták, hogy mivel két r-folyamatbeli mag, a ^{129}I és ^{247}Cm azonos felezési idejű, a meteoritokban előforduló elemgyakoriságuk közvetlenül hordozza a képződési folyamatuk nyomait: valószínűleg neutroncsillag-összeolvadások körüli korongból erednek. Brinkman et al. (2019) pedig kimutatták, hogy a kettős rendszerek kölcsönhatása növeli a nagy tömegű csillagok szele által kibocsátott ^{26}Al mennyiségét. Jelenleg vizsgáljuk a radioaktív magok galaxisban történő szállításának problémáját is.

5. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos publikációim

- [1] 1(a). tézispont. M. Lugaro, A. I. Karakas, R. J. Stancliffe, C. Rijs (2012). “The s-process in Asymptotic Giant Branch Stars of Low Metallicity and the Composition of Carbon-enhanced Metal-poor Stars”. *ApJ*, 747: id.2.
- [2] 1(b). tézispont. M. Lugaro, S. W. Campbell, H. Van Winckel, K. De Smedt, A. I. Karakas, F. Käppeler (2015). “Post-AGB stars in the Magellanic Clouds and neutron- capture processes in AGB stars”. *A&A*, 583: A77.
- [3] 2(a). tézispont. M. Lugaro, A. M. Davis, R. Gallino, M. J. Pellin, O. Straniero, F. Käppeler (2003). “Isotopic Compositions of Strontium, Zirconium, Molybdenum, and Barium in Single Presolar SiC Grains and Asymptotic Giant Branch Stars”. *ApJ*, 593: 486–508.
- [4] 2(a). tézispont. M. Lugaro, G. Tagliente, A. I. Karakas, P. M. Milazzo, F. Käppeler, A. M. Davis, M. R. Savina (2014). “The impact of updated Zr neutron-capture cross sections and new asymptotic giant branch models on our understanding of the s process and the origin of stardust”. *ApJ*, 780: id.95.
- [5] 2(a). tézispont. M. Lugaro, A. I. Karakas, M. Pető, E. Plachy (2018). “Do meteoritic silicon carbide grains originate from asymptotic giant branch stars of super-solar metallicity?” *Geochim. Cosmochim. Acta*, 221: 6–20.
- [6] 2(b). tézispont. M. Lugaro, B. Cseh, B. Világos, A. I. Karakas, P. Ventura, F. Dell’Agli, R. Trappitsch, M. Hampel, V. D’Orazi, C. B. Pereira, G. Tagliente, G. M. Szabó, M. Pignatari, U. Battino, A. Tattersall, M. Ek, M. Schönbächler, J. Hron, L. R. Nittler (2020). “Origin of Large Meteoritic SiC Stardust Grains in Metal-rich AGB Stars”. *ApJ*, 898: id.96.
- [7] 2(c). tézispont. M. Lugaro, E. Zinner, R. Gallino, S. Amari (1999). “Si Isotopic Ratios in Mainstream Presolar SiC Grains Revisited”. *ApJ*, 527: 369–394.
- [8] 2(c). tézispont. K. M. Lewis*, M. Lugaro*, B. K. Gibson, K. Pilkington (2013). “Decoding the message from meteoritic stardust silicon carbide grains”. *ApJL*, 768: id.L19. *Az első két szerző hozzájárulása a cikkhez azonos mértékű volt.
- [9] 3. tézispont. M. Lugaro, A. I. Karakas, L. R. Nittler, C. M. O. Alexander, P. Hoppe, C. Iliadis, J. C. Lattanzio (2007). “On the asymptotic giant branch star origin of peculiar spinel grain OC2”. *A&A*, 461: 657–664.
- [10] 3. tézispont. M. Lugaro, A. I. Karakas, C. G. Bruno, M. Aliotta, L. R. Nittler, D. Bemmerer, A. Best, A. Boeltzig, C. Broggini, A. Caciolli, F. Cavanna, G. F. Ciani, P. Corvisiero, T. Davinson, R. Depalo, A. di Leva, Z. Elekes, F. Ferraro, A. Formicola, Z. Fülöp, G. Gervino, A. Guglielmetti, C. Gustavino, G. Gyürky, G. Imbriani, M. Junker, R. Menegazzo, V. Mossa, F. R. Pantaleo, D. Piatti, P. Prati, D. A. Scott, O. Straniero, F. Strieder, T. Szücs, M. P. Takács, D. Trezzi (2017). “Origin of meteoritic stardust unveiled by a revised proton-capture rate of ^{17}O ”. *Nature Astronomy*, 1: id.0027.
- [11] 4(a). tézispont. M. Lugaro, A. Heger, D. Osrin, S. Goriely, K. Zuber, A. I. Karakas, B. K. Gibson, C. L. Doherty, J. C. Lattanzio, U. Ott (2014). “Stellar origin of the ^{182}Hf cosmochronometer and the presolar history of solar system matter”. *Science*, 345: 650–653.
- [12] 4(b). tézispont. M. Lugaro, M. Pignatari, U. Ott, K. Zuber, C. Travaglio, G. Gyürky, Z. Fülöp (2016). “Origin of the p-process radionuclides ^{92}Nb and ^{146}Sm in the early solar system and inferences on the birth of the Sun”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113: 907–912.

Köszönetnyilvánítás A téziszüzet magyarra fordításában való közreműködésükért köszönetemet fejezem ki Világos Blankának, Soós Benjáminnak, Cseh Borbálának, Szányi Baláznak és Szabados Lászlónak.

Hivatkozott irodalom

- Abia, C., Domínguez, I., Gallino, R., et al. 2002, *ApJ*, 579, 817
 Arlandini, C., Käppeler, F., Wisshak, K., et al. 1999, *ApJ*, 525, 886
 Baratella, M., D’Orazi, V., Sheminova, V., et al. 2021, arXiv e-prints, arXiv:2107.12381
 Bernatowicz, T., Fraundorf, G., Ming, T., et al. 1987, *Nature*, 330, 728
 Bisterzo, S., Gallino, R., Straniero, O., Cristallo, S., & Käppeler, F. 2012, *MNRAS*, 422, 849
 Brinkman, H. E., Doherty, C. L., Pols, O. R., et al. 2019, *ApJ*, 884, 38
 Bruno, C. G., Scott, D. A., Aliotta, M., et al. 2016, *Phys. Rev. Lett.*, 117, 142502
 Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., & Hoyle, F. 1957, *Rev. Mod. Phys.*, 29, 547
 Busso, M., Gallino, R., Lambert, D. L., Travaglio, C., & Smith, V. V. 2001, *ApJ*, 557, 802
 Busso, M., Lambert, D. L., Beglio, L., et al. 1995, *ApJ*, 446, 775
 Busso, M., Picchio, G., Gallino, R., & Chieffi, A. 1988, *ApJ*, 326, 196
 Cannon, R. C. 1993, *MNRAS*, 263, 817
 Clayton, D. D. 1968, *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis* (New York: McGraw-Hill)
 Côté, B., Eichler, M., Yagüe López, A., et al. 2021, *Science*, 371, 945
 Cristallo, S., Straniero, O., Gallino, R., et al. 2009, *ApJ*, 696, 797
 Cseh, B., Lugaro, M., D’Orazi, V., et al. 2018, *A&A*, 620, A146
 den Hartogh, J. W., Hirschi, R., Lugaro, M., et al. 2019, *A&A*, 629, A123
 Ek, M., Hunt, A. C., Lugaro, M., & Schönbachler, M. 2020, *Nature Astronomy*, 4, 273
 Gallino, R., Arlandini, C., Busso, M., et al. 1998, *ApJ*, 497, 388
 Gallino, R., Busso, M., & Lugaro, M. 1997, in *American Institute of Physics Conference Series*, Vol. 402, American Institute of Physics Conference Series, ed. E. K. Zinner & T. J. Bernatowicz, 115–153
 Gallino, R., Busso, M., Picchio, G., & Raiteri, C. M. 1990, *Nature*, 348, 298
 Goriely, S., & Mowlavi, N. 2000, *A&A*, 362, 599
 Hampel, M., Karakas, A. I., Stancliffe, R. J., Meyer, B. S., & Lugaro, M. 2019, *ApJ*, 887, 11
 Hampel, M., Stancliffe, R. J., Lugaro, M., & Meyer, B. S. 2016, *ApJ*, 831, 171
 Hollowell, D., & Iben, Jr., I. 1988, *ApJL*, 333, L25
 Hoppe, P., & Ott, U. 1997, in *American Institute of Physics Conference Series*, Vol. 402, American Institute of Physics Conference Series, ed. T. J. Bernatowicz & E. Zinner, 27–58
 Jonsell, K., Barklem, P. S., Gustafsson, B., et al. 2006, *A&A*, 451, 651
 Käppeler, F., Beer, H., Wisshak, K., et al. 1982, *ApJ*, 257, 821
 Käppeler, F., Gallino, R., Busso, M., Picchio, G., & Raiteri, C. M. 1990, *ApJ*, 354, 630
 Lambert, D. L., Smith, V. V., Busso, M., Gallino, R., & Straniero, O. 1995, *ApJ*, 450, 302
 Lugaro, M., Campbell, S. W., & de Mink, S. E. 2009, *Publ. Astron. Soc. Austr.*, 26, 322
 Lugaro, M., Herwig, F., Lattanzio, J. C., Gallino, R., & Straniero, O. 2003, *ApJ*, 586, 1305
 Masseron, T., García-Hernández, D. A., Santoveña, R., et al. 2020a, *Nature Communications*, 11, 3759
 Masseron, T., García-Hernández, D. A., Zamora, O., & Manchado, A. 2020b, *ApJL*, 904, L1
 Merrill, S. P. W. 1952, *ApJ*, 116, 21
 Pignatari, M., Herwig, F., Hirschi, R., et al. 2016, *ApJ Suppl. Ser.*, 225, 24
 Straniero, O., Gallino, R., Busso, M., et al. 1995, *ApJL*, 440, L85
 Truran, J. W., & Iben, Jr., I. 1977, *ApJ*, 216, 797
 Van Eck, S., Goriely, S., Jorissen, A., & Plez, B. 2001, *Nature*, 412, 793
 Wasserburg, G. J., Busso, M., & Gallino, R. 1996, *ApJ*, 466, L109

Maria Lugaro

Origin of the chemical elements heavier than iron
and of meteoritic stardust
from asymptotic giant branch stars

Dissertation submitted for the title of
Doctor of the Hungarian Academy of Sciences

Budapest, 2021

1 Antecedents of the research

Stars like the Sun, and up to roughly 10 times more massive, will evolve onto the asymptotic giant branch (AGB) once both hydrogen and helium are burnt in their core. These AGB stars are hundreds of time larger than the original main-sequence stars from which they evolved, and while they have lower surface temperatures, their deep layers reach temperatures of million degrees, at least ten times higher than during the previous phases of their evolution. Under these conditions, the nuclear reactions that produce free neutrons are activated, specifically due to the capture of α particles (the atomic nuclei of helium) by nuclei of ^{13}C and ^{22}Ne . The captures of such free neutrons drives the *slow* neutron-capture process (the *s* process, Burbidge et al., 1957) in AGB stars, producing roughly half of the abundances of the elements heavier than iron, up to lead and bismuth, in the Universe.

While the first models of the *s* process were based on analytical solutions of a nuclear network (Clayton, 1968; Kaeppeler et al., 1982), in the 1970s the first full models of the evolution of AGB stars allowed Icko Iben and collaborators to identify the sources of free neutrons in AGB stars, first ^{22}Ne (Truran & Iben, 1977) and then ^{13}C (Hollowell & Iben, 1988). The activation of these neutron sources in AGB stars is required to explain the high abundances of the elements heavier than iron observed in their atmospheres since the 1950s (Merrill, 1952; Burbidge et al., 1957). As more computational power became available, *s*-process models based on full calculations of stellar evolution were produced in the 1980s, including those of the group in Torino (Italy) led by Roberto Gallino (Busso et al., 1988; Kaeppeler et al., 1990), my *Laurea*¹ supervisor. In the 1990s, this group established the currently accepted description of the *s* process in AGB stars (Gallino et al., 1998; Arlandini et al., 1999)², based on the discovery that the ^{13}C neutron source burns in radiative conditions (Straniero et al., 1995), i.e., in stellar layers that are not mixed, instead of in convective regions, as previously assumed. Since its establishment, this description has been expanded considerably by several groups (e.g., Goriely & Mowlavi, 2000; Cristallo et al., 2009; Pignatari et al., 2016) and evaluated in relation to many observational constraints.

In particular, I was responsible for applying this AGB *s*-process description in the context of the stellar models calculated by the Monash University's group (Australia), led by my PhD supervisor John Lattanzio. During my PhD, I used inputs from three different stellar evolutionary codes and implemented them into the Torino post-processing *s*-process code to compare their results to each other and to observations (Lugaro et al., 2003). After my PhD, I developed the nuclear network of another post-processing code (the Monash `dppns45` code described in Section 2 below). I extended it to handle 328 nuclear species and produce predictions for the abundances of *s*-process nuclei. Using this new network, I subsequently focused on comparing

¹A current Master's thesis equivalent.

²These papers include my participation as a Master's student and have respectively collected 444 and 581 independent citations, according to the mtmt.hu database.

model predictions to stellar observations, meteoritic stardust grains, and radioactive nuclei.

Systematic, quantitative comparisons between *s*-process models and stellar observations have been presented since the 1990s (Lambert et al., 1995; Busso et al., 1995, 2001), mostly for stars of metallicity from solar to approximately 1/10 of solar. Since the start of the 2000s, a wealth of information on the abundances of the elements heavier than iron became available also for stars of much lower metallicity, down to 1/100 and even 1/1000 of solar, and several groups dedicated their work to their interpretation (e.g., Van Eck et al., 2001; Bisterzo et al., 2012). Some of these stars present peculiar, unexplained abundance patterns (Jonsell et al., 2006; Lugaro et al., 2009), in between the *s* process and the *rapid* neutron-capture process (the *r* process, which occurs in explosive stellar environments). Some of the work presented in this thesis attempts to understand these mysterious stars.

Meteoritic stardust grains were discovered in the late 1980s (e.g., Bernatowicz et al., 1987) and the vast majority of them originate from AGB stars. Before the work presented in this thesis, only a few papers, mostly from the Torino group, addressed the detailed, quantitative comparison between stardust composition and AGB model predictions (e.g. Gallino et al., 1990, 1997; Hoppe & Ott, 1997)³. In the late 1990s, two new instruments dedicated to the study of stardust became operational: the resonance ionisation mass spectrometer (RIMS) instrument at the University of Chicago (USA, in the group led by Andrew Davis), and the Nanoscale secondary ion mass spectrometry (NanoSIMS) at Washington University in St Louis (USA, in the group led by Ernst Zinner). Due to these developments, during and after my PhD, I initiated a line of research comparing *s*-process AGB models to high-precision isotopic compositions measured in stardust grains.

Finally, research into the topic of production of radioactive nuclei heavier than iron in AGB stars was also initiated by the Torino group in the 1990s⁴, under the incentive of, and in collaboration with, Gerry Wasserburg from Caltech (USA), a winner of the Crafoord Prize in Geosciences in 1986. Gerry Wasserburg was interested in the production of the radioactive nuclei that he and his colleagues found to be present in the early Solar System. At the time of Wasserburg's collaboration with the Torino group, the production of ¹⁸²Hf (with a half live of 8.9 Myr) by the *s*-process in AGB stars was found to be insignificant. This led Wasserburg et al. (1996) to point out a puzzling inconsistency between the abundances of ¹⁸²Hf and ¹²⁹I (with a half live of 15.7 Myr). I resolved this problem almost 20 years later (thesis point 4a).

Investigations on the *s* process in AGB stars, and its application to stellar and meteoritic observations, started in Hungary with my Lendület 2014/17 grant. I am not aware of any other PhD or MTA dissertations in Hungary on the same topic. The only other work on the topic of neutron-capture models is the PhD thesis of Kiss Miklós at the University of Debrecen in 2012, who developed a parametric model to describe neutron-capture nucleosynthesis and found that, for neutron densities high enough, the elements heavier than bismuth can be produced.

³The last two papers include my participation as a Master's student.

⁴It was developing fully during the time of my Master's thesis.

2 Methods

In the thesis I compare AGB *s*-process model predictions to observational stellar and meteoritic data taken from the literature. I carried out the calculations using the `dppns45` code (developed by Cannon, 1993, and adapted to AGB stars in collaboration with John Lattanzio), which calculates stellar abundances at each time step and at all depths inside a star.

The main inputs for the `dppns45` code are: the nuclear network, made up of a number of species and the nuclear reactions that connect them; and the information on the stellar structure (temperature, density, convective velocities, and mixing length) at each time step and depth in mass. I have developed, extended, and maintained the nuclear network, while the stellar structure inputs for my models were calculated by collaborators (mainly Amanda Karakas, but also Richard Stancliffe, Simon Campbell, and Carolyn Doherty). Given such input, the `dppns45` code calculates the changes in the abundances of the nuclear species due to nuclear burning and mixing. A principal advantage of `dppns45` over competing codes is that the equations that represent the abundance changes include both nuclear burning and mixing, which are therefore solved simultaneously.

The time-dependent mixing scheme employed by `dppns45` includes two (up and down) streams of material moving within convective regions. Horizontal diffusion between streams is also allowed so that the final composition of each mass shell depends on both vertical and horizontal mixing. Knowing the velocity, density, and mass, we can solve for the vertical mass flux through each cell, while the horizontal mixing is controlled by the gradient in the vertical flow plus a fraction from diffusion.

The number of species N in the nuclear network determines the time of computation, which is roughly proportional to N^2 , since the implicit method of `dppns45` solves an $N \times N$ matrix. Therefore, I have been using both a “light” network of $N=77$ nuclear species, when the focus is on deriving the abundances of the elements lighter than iron; and a “heavy” network of $N=328$, including all the computationally relevant isotopes on the *s*-process path, up to Po.

The nuclear reaction network of `dppns45` is based on the `reaclib` package provided by Friedel Thielemann and Thomas Rauscher (University of Basel), where all the reaction rates are expressed by an analytic formula from which the rate can be calculated at any given temperature. In 2007, my Master’s student Mark van Raai (at the University of Utrecht, NL) added a routine to the `dppns45` code that allows us to include specific reaction rates as tabulated values instead of a `reaclib` fit. Thanks to this improvement I was able to study more accurately the effect of many reaction rates and their uncertainties on AGB nucleosynthesis. As the `reaclib` libraries do not include the temperature nor the density dependence for β -decay rates and electron captures, in 2014 I started to include analytical formulas for some selected β -decay rates within the `dppns45` code, based on the inclusion of the excited nuclear energy levels of the unstable nuclei. Currently, Andrés Yägüe López, a post-doctoral fellow in my group, has been implementing a more accurate and flexible description of β -decay and electron-capture rates in the `dppns45` code, including both temperature and density dependence.

To match the observations that AGB stars are enriched in the *s*-process elements (Busso

et al., 2001; Abia et al., 2002), a large number of neutrons are needed to be released by the ^{13}C neutron source. To achieve this, a ^{13}C “pocket” is commonly assumed to form in AGB models. In the work presented in this thesis, I inserted an artificial, parametrised “partial mixing zone” in the `dppns45` calculations, where protons and ^{12}C are mixed together. The ^{12}C +proton reaction then results in the production of the ^{13}C pocket.

Finally, stellar rotation is not included in the models presented in this thesis as it should not play a major role on the AGB *s*-process abundances. For more details, I refer to co-authored papers by Cseh et al. (2018) and den Hartogh et al. (2019), who drew this conclusion from independent observational constraints related to spectroscopic observations of Ba stars and asteroseismology, respectively.

3 New scientific results

1. **The abundance signatures observed in old, metal-poor halo stars, and in post-AGB stars, cannot be explained by the *slow* neutron-capture (*s*) process in AGB stars, nor by a combination of the *s* process and the *rapid* neutron-capture (*r*) processes. This provides evidence that an *intermediate* neutron-capture (*i*) process exists, and its operation can be seen in these stars.**

Among the stellar objects showing the signature of *s*-process nucleosynthesis are carbon-enhanced metal-poor (CEMP) and post-AGB stars.

- (a) CEMP stars (with metallicities typically around 1/100 of solar) show high abundances of the elements heavier than iron, which were produced by a former AGB companion and transferred via binary interaction onto the stars now seen as CEMPs. CEMP stars showing excesses in the elements mostly produced by the *s* process (e.g., Ba) have abundance distributions compatible with those predicted by models of AGB stars. CEMP stars showing excesses in elements produced by both the *s* and the *r* processes (e.g., Ba and Eu, respectively) have, instead, abundance distributions incompatible with those predicted by models of AGB stars, even if an initial enhancement of *r*-process elements is included in the models. No combination of the *s* and *r* neutron-capture processes can match their composition, and a different neutron-capture process must be invoked.

Scientific publication related to the thesis point: [1].

- (b) Post-AGB stars observed in the Large and Small Magellanic Clouds (with metallicities approximately 1/10 of solar and masses approximately $1.3 M_{\odot}$) display extremely high abundances of the elements heavier than iron, however, their abundance patterns cannot be explained by the operation of the *s* process during the former AGB phase. In particular, the Pb abundance is much lower than predicted, while the abundances of the rare-earth elements are higher. This is impossible to produce with the *s* process

and points to the operation in nature of a neutron-capture process different from the s and r processes.

Scientific publication related to the thesis point: [2].

2. **The stardust silicon carbide (SiC) grains that carry the signature of the s process formed in C-rich AGB stars of initial masses between roughly 2 and 4 M_{\odot} and metallicity from solar up to roughly twice solar. The grain sizes increase, roughly from smaller to larger than a micrometer, with increasing the metallicity of the AGB parent star.**

Stardust grains recovered from meteorites originated mostly in AGB stars and their high-precision laboratory analysis shows that they carry the signature of the isotopic compositions of their stellar origin.

- (a) The signature of s -process nucleosynthesis found in the vast majority of the SiC grains indicates that their parent AGB stars were of initial masses between roughly 2 and 4 M_{\odot} and metallicity from solar up to roughly twice solar.

Scientific publications related to the thesis point: [3], [4], [5].

- (b) Comparison of the grain data to spectroscopic observations of Ba stars, the binary companions of AGB stars at roughly solar metallicity, shows that the size of the SiC grains increases with the metallicity of the parent star. Therefore, AGB stars of metallicity higher than solar are predicted to produce larger grains more favourably than AGB stars of metallicity around solar.

Scientific publication related to the thesis point: [6].

- (c) Using the distribution of the main element silicon in the SiC grains from AGB stars, the age-metallicity relationship of the AGB parent stars can be derived, which shows that the grains must have originated in stars with, on average, higher metallicities than observed in the solar neighbourhood.

Scientific publications related to the thesis point: [7], [8].

3. **Stardust oxide and silicate grains showing strong depletion in ^{18}O , known as Group II grains, originated from AGB stars with initial masses above roughly 4 M_{\odot} , where proton captures occur at the base of the convective envelope.**

Stardust oxide and silicate grains mostly originate from O-rich AGB stars, but the origin of Group II grains has so far been elusive. Massive AGB stars are predicted and observed to produce vast amounts of O-rich dust, however, no dust grains had been found in the meteoritic stardust inventory that could be interpreted as originating from them. A new rate of the $^{17}\text{O}(p,\alpha)^{14}\text{N}$ reaction measured by the LUNA laboratory (located roughly a kilometre underground at the Gran Sasso National Laboratories in Italy) was reported to be 2 to 2.5 times higher than the previous estimates (Bruno et al., 2016). Using this new rate, models of nucleosynthesis in massive AGB stars that experience the CNO cycle at the

base of their envelope are able to match the $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of the Group II grains, together with the predicted depletion of ^{18}O .

Scientific publications related to the thesis point: [9], [10].

4. **The origin of the abundances of radioactive nuclei made by the r - and s -processes in the early Solar System is decoupled, and provides us with independent clocks for the last r -process (a neutron star merger or a rare supernova) and s -process (an AGB star) source that contributed matter to the Solar System. The abundances of the heavy radioactive nuclei of p -process origin should be produced by both Type Ia and core-collapse supernovae.**

Radioactive nuclei heavier than iron, now extinct, were present at the time when the Sun formed, as inferred from meteoritic analysis. Using their abundances we can measure timescales relating to the history of the Solar System.

- (a) The origin of ^{129}I (half life = 15.7 Myr) and ^{182}Hf (half life = 8.90 Myr) in the early Solar System is decoupled. The former is made only by the r process, while the latter is also made by the s process in AGB stars. The s -process origin for ^{182}Hf was revealed by the re-analysis of the temperature dependence of the β -decay of ^{181}Hf , the unstable isotope that precedes ^{182}Hf on the s -process path of neutron captures. Previously, it was believed that ^{181}Hf decays much faster at s -process temperatures (200-300 MK) than at terrestrial temperatures, due to an excited nuclear energy level at 68 keV. However, the existence of this energy level in ^{181}Hf was not confirmed by recent experiments, which means that also in hot stellar environments the decay rate of ^{181}Hf is close to the terrestrial rate. This favours the $^{181}\text{Hf}(n,\gamma)^{182}\text{Hf}$ reaction and the production of ^{182}Hf in AGB stars. Therefore, ^{129}I and ^{182}Hf have two different origins. The last r -process and s -process events to contribute to the Solar System matter occurred roughly 100 Myr and 30 Myr before the formation of the Sun, respectively. Scientific publications related to the thesis point: [11].

- (b) If the p -process radioactive nuclei ^{92}Nb and ^{146}Sm only originated in Type Ia supernovae, there is a discrepancy between timescales relating to the history of the Solar System obtained using ^{92}Nb and those obtained using ^{53}Mn , another main product of Type Ia supernovae. This indicates that ^{92}Nb should also be produced in core-collapse supernovae.

Scientific publications related to the thesis point: [12].

4 Utilization of results

Thesis point 1. was subsequently verified with the i -process models of Hampel et al. (2016, 2019), whose papers I co-authored. These works demonstrated that parametric i -process models can provide a match to the abundances of CEMP- s/r stars (which we renamed CEMP- i stars)

and post-AGB stars. The *i*-process models and their impact on the chemical evolution of the elements heavier than iron are a current popular topic of investigation. For example, the *i* process may also affect the composition of stars in young clusters (Baratella et al., 2021), and of the recently discovered phosphorus(P)-rich stars (Masseron et al., 2020a,b). Our collaboration (Garcia-Hernandez, Masseron, Lugaro, Hampel, Pignatari) working on these new P-rich stars has recently been awarded 23.5 hours of highly competitive ESO (SC107) telescope time (on UVES-VLT) to further investigate the possible *i*-process signatures of these stars.

Thesis point 2. was subsequently considered as part of the explanation of why the Earth is observed to be more *s*-process enriched than bodies that formed farther away from the Sun. The largest SiC grains, which I identified to have originated in AGB stars of high metallicity, are the best candidates to have carried *s*-process nucleosynthetic signatures in the proto-planetary disk (Ek et al., 2020). This is because at such metallicity the production of the first peak *s*-process elements, which are observed to be variable in the Solar System, is favoured with respect to that of the second peak *s*-process elements, which are instead not observed to be variable in the Solar System.

On the basis of thesis point 3., I and my coauthors are considering further effects of nuclear reactions rates on the composition of oxide grains under the idea that a fraction of them originated from massive AGB stars. For example, the neutron-capture rates of ^{26}Al have been recently measured at the n_TOF facility at CERN and we are evaluating their impact on the $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ratios in the models, as compared to the grains.

Finally, I used thesis point 4. to prepare a successful ERC-CoG-2016 proposal, as proof of concept for the use of radioactive nuclei in understanding the birth of the Sun. Among the most recent results of the ERC project team, Côté et al. (2021) have demonstrated that since the *r*-process nuclei ^{129}I and ^{247}Cm have the same half life, their abundances in meteorites carry the direct signature of their production process, most likely in the disk around neutron star mergers; and Brinkman et al. (2019) showed that binary interaction increases the amount of ^{26}Al ejected by massive star winds. We are currently also investigating the problem of transport of radioactive nuclei in the Galaxy.

5 Scientific publications related to the thesis points

- [1] **Thesis point 1a.** M. Lugaro, A. I. Karakas, R. J. Stancliffe, and C. Rijs (2012). “The *s*-process in Asymptotic Giant Branch Stars of Low Metallicity and the Composition of Carbon-enhanced Metal-poor Stars”. *ApJ*, 747: id.2. **Link**
- [2] **Thesis point 1b.** M. Lugaro, S. W. Campbell, H. Van Winckel, K. De Smedt, A. I. Karakas, and F. Käppeler (2015). “Post-AGB stars in the Magellanic Clouds and neutron-capture processes in AGB stars”. *A&A*, 583: A77. **Link**
- [3] **Thesis point 2a.** M. Lugaro, A. M. Davis, R. Gallino, M. J. Pellin, O. Straniero, and F. Käppeler (2003). “Isotopic Compositions of Strontium, Zirconium, Molybdenum, and

Barium in Single Presolar SiC Grains and Asymptotic Giant Branch Stars”. *ApJ*, 593: 486–508. **Link**

- [4] **Thesis point 2a.** M. Lugaro, G. Tagliente, A. I. Karakas, P. M. Milazzo, F. Käppeler, A. M. Davis, and M. R. Savina (2014). “The impact of updated Zr neutron-capture cross sections and new asymptotic giant branch models on our understanding of the s process and the origin of stardust”. *ApJ*, 780: id.95. **Link**
- [5] **Thesis point 2a.** M. Lugaro, A. I. Karakas, M. Pető, and E. Plachy (2018). “Do meteoritic silicon carbide grains originate from asymptotic giant branch stars of super-solar metallicity?” *Geochim. Cosmochim. Acta*, 221: 6–20. **Link**
- [6] **Thesis point 2b.** M. Lugaro, B. Cseh, B. Világos, A. I. Karakas, P. Ventura, F. Dell’Agli, R. Trappitsch, M. Hampel, V. D’Orazi, C. B. Pereira, G. Tagliente, G. M. Szabó, M. Pignatari, U. Battino, A. Tattersall, M. Ek, M. Schönabächler, J. Hron, and L. R. Nittler (2020). “Origin of Large Meteoritic SiC Stardust Grains in Metal-rich AGB Stars”. *ApJ*, 898: id.96. **Link**
- [7] **Thesis point 2c.** M. Lugaro, E. Zinner, R. Gallino, and S. Amari (1999). “Si Isotopic Ratios in Mainstream Presolar SiC Grains Revisited”. *ApJ*, 527: 369–394. **Link**
- [8] **Thesis point 2c.** K. M. Lewis*, M. Lugaro*, B. K. Gibson, and K. Pilkington (2013). “Decoding the message from meteoritic stardust silicon carbide grains”. *ApJL*, 768: id.L19. *The first two authors have equally contributed to this paper. **Link**
- [9] **Thesis point 3.** M. Lugaro, A. I. Karakas, L. R. Nittler, C. M. O. Alexander, P. Hoppe, C. Iliadis, and J. C. Lattanzio (2007). “On the asymptotic giant branch star origin of peculiar spinel grain OC2”. *A&A*, 461: 657–664. **Link**
- [10] **Thesis point 3.** M. Lugaro, A. I. Karakas, C. G. Bruno, M. Aliotta, L. R. Nittler, D. Bemmerer, A. Best, A. Boeltzig, C. Brogгинi, A. Caciolli, F. Cavanna, G. F. Ciani, P. Corvisiero, T. Davinson, R. Depalo, A. di Leva, Z. Elekes, F. Ferraro, A. Formicola, Z. Fülöp, G. Gervino, A. Guglielmetti, C. Gustavino, G. Gyürky, G. Imbriani, M. Junker, R. Menegazzo, V. Mossa, F. R. Pantaleo, D. Piatti, P. Prati, D. A. Scott, O. Straniero, F. Strieder, T. Sziucs, M. P. Takács, and D. Trezzi (2017). “Origin of meteoritic stardust unveiled by a revised proton-capture rate of ^{17}O ”. *Nature Astronomy*, 1: id.0027. **Link**
- [11] **Thesis point 4a.** M. Lugaro, A. Heger, D. Osrin, S. Goriely, K. Zuber, A. I. Karakas, B. K. Gibson, C. L. Doherty, J. C. Lattanzio, and U. Ott (2014). “Stellar origin of the ^{182}Hf cosmochronometer and the presolar history of solar system matter”. *Science*, 345: 650–653. **Link**
- [12] **Thesis point 4b.** M. Lugaro, M. Pignatari, U. Ott, K. Zuber, C. Travaglio, G. Gyürky, and Z. Fülöp (2016). “Origin of the p-process radionuclides ^{92}Nb and ^{146}Sm in the early

solar system and inferences on the birth of the Sun”. *Proceedings of the National Academy of Science*, 113: 907–912. [Link](#)

References

- Abia, C., Domínguez, I., Gallino, R., et al. 2002, *ApJ*, 579, 817
- Arlandini, C., Käppeler, F., Wisshak, K., et al. 1999, *ApJ*, 525, 886
- Baratella, M., D’Orazi, V., Sheminova, V., et al. 2021, arXiv e-prints, arXiv:2107.12381
- Bernatowicz, T., Fraundorf, G., Ming, T., et al. 1987, *Nature*, 330, 728
- Bisterzo, S., Gallino, R., Straniero, O., Cristallo, S., & Käppeler, F. 2012, *MNRAS*, 422, 849
- Brinkman, H. E., Doherty, C. L., Pols, O. R., et al. 2019, *ApJ*, 884, 38
- Bruno, C. G., Scott, D. A., Aliotta, M., et al. 2016, *Phys. Rev. Lett.*, 117, 142502
- Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., & Hoyle, F. 1957, *Rev. Mod. Phys.*, 29, 547
- Busso, M., Gallino, R., Lambert, D. L., Travaglio, C., & Smith, V. V. 2001, *ApJ*, 557, 802
- Busso, M., Lambert, D. L., Beglio, L., et al. 1995, *ApJ*, 446, 775
- Busso, M., Picchio, G., Gallino, R., & Chieffi, A. 1988, *ApJ*, 326, 196
- Cannon, R. C. 1993, *MNRAS*, 263, 817
- Clayton, D. D. 1968, *Principles of stellar evolution and nucleosynthesis* (New York: McGraw-Hill)
- Côté, B., Eichler, M., Yagüe López, A., et al. 2021, *Science*, 371, 945
- Cristallo, S., Straniero, O., Gallino, R., et al. 2009, *ApJ*, 696, 797
- Cseh, B., Lugaro, M., D’Orazi, V., et al. 2018, *A&A*, 620, A146
- den Hartogh, J. W., Hirschi, R., Lugaro, M., et al. 2019, *A&A*, 629, A123
- Ek, M., Hunt, A. C., Lugaro, M., & Schönbachler, M. 2020, *Nature Astronomy*, 4, 273
- Gallino, R., Arlandini, C., Busso, M., et al. 1998, *ApJ*, 497, 388
- Gallino, R., Busso, M., & Lugaro, M. 1997, in *American Institute of Physics Conference Series*, Vol. 402, American Institute of Physics Conference Series, ed. E. K. Zinner & T. J. Bernatowicz, 115–153
- Gallino, R., Busso, M., Picchio, G., & Raiteri, C. M. 1990, *Nature*, 348, 298
- Goriely, S., & Mowlavi, N. 2000, *A&A*, 362, 599
- Hampel, M., Karakas, A. I., Stancliffe, R. J., Meyer, B. S., & Lugaro, M. 2019, *ApJ*, 887, 11
- Hampel, M., Stancliffe, R. J., Lugaro, M., & Meyer, B. S. 2016, *ApJ*, 831, 171
- Hollowell, D., & Iben, Jr., I. 1988, *ApJL*, 333, L25
- Hoppe, P., & Ott, U. 1997, in *American Institute of Physics Conference Series*, Vol. 402, American Institute of Physics Conference Series, ed. T. J. Bernatowicz & E. Zinner, 27–58
- Jonsell, K., Barklem, P. S., Gustafsson, B., et al. 2006, *A&A*, 451, 651
- Kaeppler, F., Beer, H., Wisshak, K., et al. 1982, *ApJ*, 257, 821
- Kaeppler, F., Gallino, R., Busso, M., Picchio, G., & Raiteri, C. M. 1990, *ApJ*, 354, 630
- Lambert, D. L., Smith, V. V., Busso, M., Gallino, R., & Straniero, O. 1995, *ApJ*, 450, 302
- Lugaro, M., Campbell, S. W., & de Mink, S. E. 2009, *Publ. Astron. Soc. Austr.*, 26, 322
- Lugaro, M., Herwig, F., Lattanzio, J. C., Gallino, R., & Straniero, O. 2003, *ApJ*, 586, 1305
- Masseron, T., García-Hernández, D. A., Santoveña, R., et al. 2020a, *Nature Communications*, 11, 3759
- Masseron, T., García-Hernández, D. A., Zamora, O., & Manchado, A. 2020b, *ApJL*, 904, L1
- Merrill, S. P. W. 1952, *ApJ*, 116, 21
- Pignatari, M., Herwig, F., Hirschi, R., et al. 2016, *ApJ Suppl. Ser.*, 225, 24
- Straniero, O., Gallino, R., Busso, M., et al. 1995, *ApJL*, 440, L85
- Truran, J. W., & Iben, Jr., I. 1977, *ApJ*, 216, 797
- Van Eck, S., Goriely, S., Jorissen, A., & Plez, B. 2001, *Nature*, 412, 793
- Wasserburg, G. J., Busso, M., & Gallino, R. 1996, *ApJ*, 466, L109