

# TERMONUKLEARNI IZVOR ENERGIJE I SINTEZA ELEMENATA NASTANAK ELEMENATA - TEORIJA NUKLEOSINTEZE

Osnova bilo kojeg elementa sastoji se od dvije temeljne gradbene jedinice : *protona i neutrona*. Omjer u kojem se te dvije jedinice - *nukleoni*- združuju u nuklearnom paketu, *jezgri*, definiraju različite kemijske elemente i njihove izotope. U stabilnim nuklidima malog atomskog broja omjer neutrona prema protonu ( $N/Z$ ) jednak je ili blizak jedinici i sistematski raste do 1,5 u smjeru težih stabilnih jezgri.

Kao što smo to već spomenuli u poglavlju o elementima, periodička tablica sastoji se od 92 stabilna elementa od kojih su 90 poznati na Zemlji, a jedan, tehnicijum, otkriven je u zvjezdanom spektru. Element koji nedostaje, prometijum, imenovan po grčkom mitološkom bogu Prometeju, dobiven je sintezom. Elementi atomskog broja većeg od 92, poznati i kao transuranijski elementi nastali su sintezom u procesu bombardiranja elementa s neutronima ili brzim česticama, protonima, deutronima i alfa česticama. To su članovi aktinidne serije od neptunija (atomski broj 93) preko lavrencija (atomski broj 103) do transaktinidnih elemenata atomskog broja većeg od 103. Element 106 otkriven je 1974., od kada se kontinuirano nastavlja rad na sintezi novih elemenata većeg atomskog broja. Tijekom 1981. i 1982. ekipa fizičara u Darmstadtu, Njemačka, predvođeni Peterom ARMBRUSTEROM, uspjeli su sintetizirati elemente atomskog broja 107 i 109. Ubrzo nakon toga ista je grupa proizvela nekoliko atoma elementa 108 u fuziji  $^{58}\text{Fe}$  i  $^{208}\text{Pb}$  koji po oslobađanju neutrona daju element 108 atomske mase 265, čime se broj umjetnih elemenata povećao na 17.

Uz nove elemente, sintetizirani su i umjetni izotopi gotovo svih čestih elemenata. Ukupni broj stabilnih nuklida cijeni se na oko 300, a radiogenih vrsta na oko 1.200 od čega su samo 55 prirodna radioaktivna izotopa.

**Na isti način na koji je čovjek sintetizirao brojne nuklide interakcijom protona i neutrona, može se objasniti i primordijalni nastanak elemenata sintezom ili građenjem počevši od temeljnih gradbenih jedinica. Bitni protoni i neutroni potrebni za sintezu kemijskih elemenata nastali su u jednoj intermedijalnoj fazi kada je svemir bio star samo nekoliko sekundi. U to vrijeme, temperatura od oko  $10^{10}$  K omogućila je udvajanje neutrina i reakciju neutrona i protona. Među stabilnim jezgrama nastalim u manje od 3 minute su deuterij, helij-3, helij-4 i litij-7, dok do nastanka težih elemenata nije moglo doći zbog odsutnosti stabilnih jezgri masenih brojeva 5 i 8. Kao posljedica toga, vodikova i helijeva jezgra (uz tragove litija-7) daleko su najizraženiji sastojci ukupne mase svemira u masenom omjeru od oko 3 prema 1. Preostali elementi, njih 90, imaju mjesto nastanka u određenim zvijezdama i energetske nivoima za vrijeme njihovog rođenja, života i smrti. Međutim, izvor energije na zvijezdama bio je dugo vrijeme znanstvena nepoznanica.**

*Znatiželjnik će se zapitati kako zvijezda kao Sunce može zračiti milijarde godina prilično ujednačenu količinu energije ( $4 \times 10^{26}$  Joula sek-1) bez iscrpljivanja izvora energije?* Da bi to približili našim spoznajama, pretpostavimo da je Sunce u cijelosti izgrađeno od nafte. Uz postojeću sjajnost, sva potencijalna energija iscrpila bi se u manje od 7.000 godina. Također, sva potencijalna gravitacijska energija ne bi trajala više od 30 milijuna godina. Rješenje ovog problema nametnulo se je razvojem nuklearne fizike, tj. realizacijom ideje da na zvijezdama postoji izvjesni *"kozmički reaktor"*. Takav reaktor ne bi samo proizvodio energiju, nego, u isto vrijeme, i cijeli spektar kemijskih elemenata u logičnom stepeničastom postupku.

Fascinatnim prikazom BURBIDGE i drugi su nam još 1957. približili nastanak i evoluciju kemijskih elemenata u sukcesiji nastanka prateći temperature od "umjerenih" nekoliko milijuna do nekoliko milijardi stupnjeva Kelvina

Ovdje ćemo ukratko prikazati pojednostavljenu teoriju nastanka znanu i kao **teoriju nukleosinteze**.

Središnja teorija astrofizike kaže da rođenje Svemira započinje gigantskom eksplozijom, nazvanom "Bing bang" ("Veliki prasak"), prije oko 13 - 18 milijardi godina. Veliki je prasak inicirao fuziju hipotetičkih temeljnih čestica, poznatih kao *kvarksi* (*kvarkovi*), koji stvaraju protone ( $^1\text{H}$ ) i neutrone omogućujući fuziju protona i neutrona i nastanak jednostavnih atomskih jezgri, tj. prije spomenutih  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ , i  $^7\text{Li}$ .

Nekoliko reakcijskih faza omogućuju sintezu helija-4. To je energetski jedan od najuspješnijih nuklearnih procesa u kojem se za vrijeme pretvorbe 1 kg vodika u helij oslobađa oko  $650 \times 10^6$  megawata/sek energije. U fuzijskim procesima se energija oslobađa na račun mase primjereno Einstenovoj jednadžbi ekvivalentnosti mase i energije. To je *p-p (proton-proton) proces*. Radi usporedbe, spomenimo da bi za oslobađanje tolike količine energije trebala tona uranija ("žutog kolača"), ili 20.000 tona ugljena.

Vrijeme u kojem zvijezda provede u fazi gdje se energija oslobađa samo fuzijom vodika i emitira u formi fotona, ovisi o njenoj masi. [to je veća masa zvijezde, veća je i brzina reakcije, ali čak i zvijezde srednje veličine trebaju nekoliko milijardi godina za potpuni završetak procesa. Važno je spomenuti da se nijedan drugi element, osim **helija**, ne stvara u toj fazi. A kada se iscrpi oko 10% izvora vodika, helij kao fuzijski produkt razrijedi nuklearno gorivo blokirajući nuklearni proces.

Nakon Velikog praska, svemir se širi uz istovremeno snažno opadanje temperature i tlaka do vrijednosti koje bi, eventualno, omogućile stvaranje težih elemenata fuzijom u međuzvjezdanom prostoru. Međutim, elementi s atomskim masama 5 i 8 su nestabilni, pa fuzije inače izrazito obilnih inicijalnih produkata Velikog praska ( $^1\text{H}$  i  $^4\text{He}$ ) ne mogu fuzijom proizvesti značajnije količine težih elemenata. Na taj način, sama teorija Velikog praska može objasniti nastanak elemenata samo do  $^7\text{Li}$ , dok nastanak težih elemenata mora "čekati" stvaranje novih zvijezda u svemiru - nekih milijardu godina kasnije.

Model sinteze težih elemenata, prema BURBIDGEU i dr. (1957), označava nekoliko putova koji se mogu javiti u unutrašnjosti zvijezde za vrijeme njene evolucije. Kako zvijezda stari, opada količina vodika u jezgri na račun fuzijom novonastalog helija. Opadanjem toplinske energije nuklearne fuzije, zvijezda se počinje urušavati prema unutra pod djelovanjem vlastite gravitacije. Porastom temperature i gustoće helij, "pepeo" iz vodikovog ciklusa počinje izgarati i zvijezda se širi. Ta se faza u razvoju zvijezda naziva *Crveni div* ("Red Giant"). Urušavanje jezgre podiže temperaturu do  $10^8$  K, što je dovoljno visoka temperatura da dvije  $^4\text{He}$  jezgre u jezgri zvijezde prevladaju svoje odbojne sile i združe se tvoreći **berilij-8 ( $^8\text{Be}$ )**.

Iako helij, po jedinici mase, generira svega 10% energije nastale u fuziji vodika, ipak ta reakcija daje "pepeo" u gorivom ciklusu koji je značajna karika u sintezi elemenata. Nastali  $^8\text{Be}$  je nestabilan s vremenom poluraspada od samo  $10^{-16}$  sek, ali i to je dovoljno vrijeme da se u iznimno zgusnutom stanju materije zvjezdane jezgre događaju procesi spajanja  $\alpha$ -čestica (tj. jezgri helija). To je  $3\alpha$  proces jer on praktički zahtijeva simultanu koliziju tri  $^4\text{He}$  jezgre. Tim se procesom premošćuje jaz atomskih masa od 5 do 8 i omogućuje sinteza složenijih elemenata.



Iako je glavni produkt izgaranja helija ugljik, sličnim procesima 4 helijske jezgre daju kisik (8 protona i 8 neutrona); **pet helijskih jezgri daje neon; šest helijskih jezgri daje magnezij; i slično dalje nastaju silicij, sumpor i argon.** Ovdje spomenuti elementi su ujedno i među najzastupljenijim elementima u svemiru.

Uz prisutnost katalizirajućeg ugljika, postaje operativan sljedeći, tzv, ***CNO trostruki ciklus (Bethe - Weizsäcker-ov ciklus)***, ali pri nižim temperaturama ( $2 \times 10^7$  K) davajući niz jezgri :  **$^{13}\text{N}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ , i  $^{15}\text{N}$ .** Ovaj niz je razlogom ujednačenog sadržaja kisika i dušika u svemiru.

Pri temperaturi od oko  $10^9$  K, gorenje dvije  $^{12}\text{C}$  jezgre daju : 1) proton i natrij-23, 2) gama kvant i magnezij-24, ili 3) helij-4 i neon.

Različite fuzijske reakcije u zvijezdama različite veličine odgovorne su za sintezu elemenata do željeza. Te reakcije oslobađaju energiju i proizvode vrlo stabilne jezgre.

**Željezo-56 je najstabilniji element i zadnji koji može nastati u reakcijama fuzije kojima se oslobađa energija.** To je i razlog obilnosti željeza u svemiru. *A koji je vremenski okvir reakcija do ove točke?* Zvijezda mase 25 puta veće od Sunca će iscrpiti raspoloživi vodik u svojoj jezgri za nekoliko milijuna godina, sagoriti helij u narednih pola milijuna godina, i - kako se jezgra nastavlja sažimati, a temperatura rasti - goriti će ugljik 600 godina, kisik šest mjeseci, i silicij jedan dan.

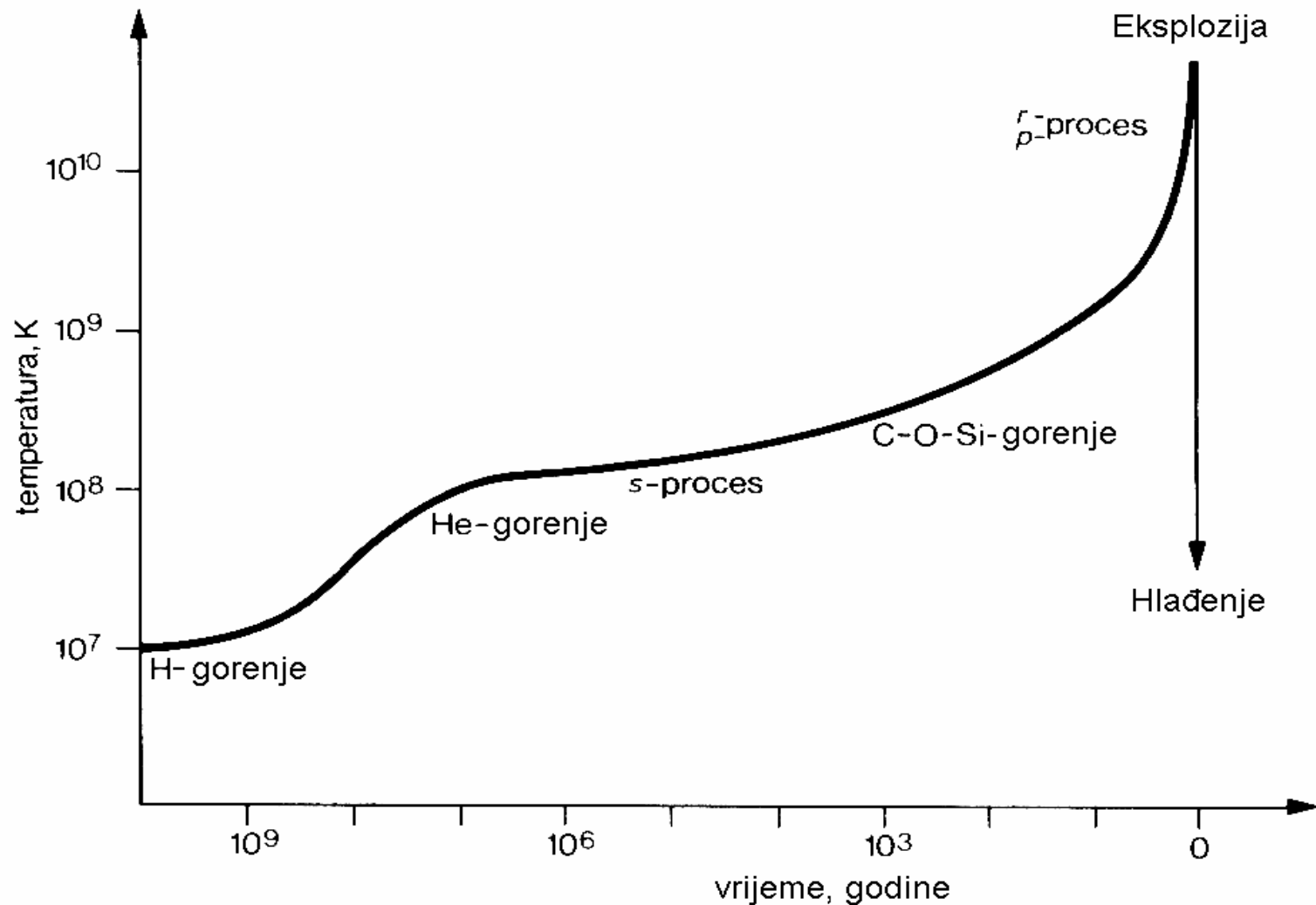
Stvaranjem elemenata težih od željeza reakcije međutim postaju endotermne (tj. zahtijevaju energiju) i fuzijom oslobođena toplina nije dovoljna da kompenzira gravitacijsko sažimanje koje se nastavlja i zvijezda postaje vrlo nestabilna. To rezultira u katastrofičnom urušavanju i eksploziji zvijezde, koje mi prepoznajemo kao *supernova*. Emisija energije te eksplozije *supernove* je, u tom kratkom vremenu, istog intenziteta kao 100 milijardi sporo evoluirajućih zvijezda. Pri tome, kako stabilne tako i nestabilne jezgre elemenata nastalih u bivšoj zvijezdi rasprše se u okolnom svemirskom prostoru. Miješajući se s međuzvjezdanim česticama plina i prašine stvaraju nebularni oblak u kojem, gravitacijskim sažimanjem, nanovo otpočinje proces stvaranja nove zvijezde. Velike se zvijezde vrlo naglo razvijaju tako da su u stanju potrošiti svoje nuklearno gorivo u roku od svega nekoliko desetaka milijuna godina. Smatra se, stoga, da je u dosadašnjem stadiju razvoja naše galaktike moglo postojati više generacija velikih zvijezda u kojima su stvarani teški elementi.

Vjerojatno oko 90% izvorne zvjezdane mase biva raspršeno u okolni svemirski prostor. Teži elementi od željeza očito nastaju uzastopnim hvatanjem neutrona od jezgri Fe duboko u jezgri stabilnih zvijezda ili za vrijeme eksplozije *supernove*. **Ti se procesi označavaju kao *s* i *r* procesi ( *s* označava *sporu*, a *r* se odnosi na *brzu* reakciju).** U toj se fazi mogu sintetizirati i teški elementi poput, primjerice, neptunija, pa i transuranijski elementi. Naime, eksplozija *supernove* je tako snažna da se raspadaju i mnoge jezgre težih elemenata. Kako su teži elementi ujedno i bogatiji neutronima od lakših, na taj se način oslobađaju i brojni neutroni. Za vrijeme same eksplozije već prije sintetizirane jezgre olova i bizmuta vrlo brzo hvataju slobodne neutrone tvoreći sve teže elemente, sve do torija i uranija. Proces je tako brz (*r-proces*) da se nestabilni elementi između bizmuta i torija (polonij, astatin, radij, francij, radon i aktinij) ne stignu raspasti, u tom relativno kratkom vremenu. Drugi nestabilni elementi, uključujući tehnicijum, prometijum i transuranijske elemente, također nastaju za vrijeme eksplozije supernove.

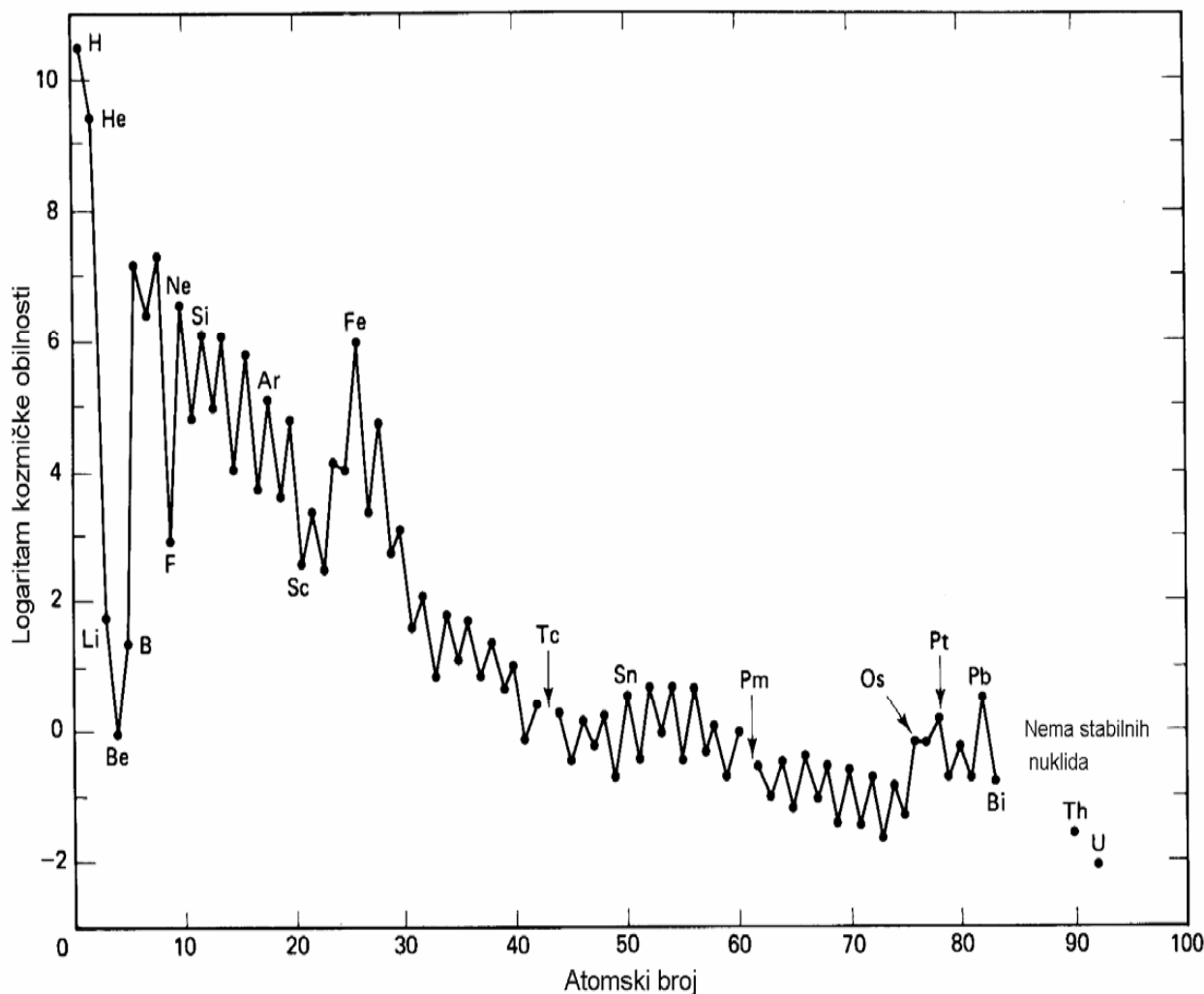
*Postoje li materijalni dokazi za samu eksploziju supernove i za vrijeme kada se je ta eksplozija eventualno dogodila?* Osim današnjih opažanja događanja na drugim galaktikama, važni su i podatci o nekim radioaktivnim elementima u meteoritima. Meteoriti daju odgovor na pitanje što je bilo izvor iz kojeg su te čestice i plin potekli. Naime, oni sadrže konačni raspadni produkt neptunijevog radioaktivnog niza,  $^{209}\text{Bi}$ . Vrijeme poluraspada neptunija, najduže živućeg člana neptunijeva raspadnog niza kraće je za gotovo četiri reda veličine od starosti svemira. Neptunija u prirodi tj. na Zemlji također nema. Znači da je materijal od kojeg su meteoriti građeni formiran nakon sinteze neptunija. Da bi se u prirodi mogao sintetizirati neptunij, potrebni su visokoenergetski uvjeti kakvi vladaju u zvijezdama u fazi kolapsa, što odgovara eksploziji supernove.

**Radi se o brzom gravitacijskom kolapsu zvijezde, koja je gotovo potrošila svoje nuklearno gorivo, a što rezultira oslobađanjem gravitacijske energije u ekstremno snažnoj eksploziji same zvijezde. Materijal potreban za formiranje Sunčevog sustava je dakle dio ostatka materijala koji je preostao nakon kolapsa zvijezde. Kada se je ta eksplozija supernove dogodila neznamo sasvim pouzdano. Sistematika stabilnih jezgara ukazuje na to kako je teško vjerovati da je prvobitna zastupljenost uranijevog izotopa  $^{235}\text{U}$  bila veća od zastupljenosti  $^{238}\text{U}$ . Ako je prvobitna zastupljenost oba uranijeva izotopa bila jednaka, na temelju omjera njihovih današnjih zastupljenosti (isti su kako u materijalima sa Zemlje tako i u lunarnom materijalu i meteoritima) i vremena poluraspada može se zaključiti da se je eksplozija supernove zbila pred oko 5,9 milijardi godina. To bi značilo da je proces gravitacijskog sažimanja u nebuli, a koji je rezultirao rađanjem našeg Sunca, trajao oko 1,3 do 1,4 milijarde godina.**

# Vremenska i temperaturna skala različitih procesa sinteze elemenata



# Kozmička zastupljenost elemenata u odnosu prema $10^6$ atoma silicija



Taj (ovdje značajno pojednostavljen) model objašnjava brojna opažanja o zastupljenosti kemijskih elemenata u svemiru. Prvo, zastupljenost elemenata opada logaritamski s porastom mase od vodika i helija, izvornih gradbenih jedinica svemira.



**Procijenjeni prosječni sadržaj elemenata u našem Suncu upućuje na dominantni udio vodika (92,3% broja atoma, odnosno 74,3% ukupne mase) i helija (7,5% broja atoma i 24,0% mase). Na sve ostale elemente, među kojima su najzastupljeniji kisik, ugljik i dušik, otpada manje od 2% mase odnosno 0,2% ukupnog broja atoma (tablica 5-8). [toviše, kako svemir stari, sve će više vodika prijeći u teže elemente za vrijeme evolucije zvijezde. Spomenuli smo da masivne zvijezde žive relativno kratko, jer njihovo nuklearno gorivo brzo izgara. One mogu trajati samo  $10^7$  -  $10^8$  godina, u usporedbi s  $10^{10}$  godina "običnih" zvijezda kao što je naše Sunce. Kako je svemir nastao prije oko 15 milijardi godina, mnoge su masivne zvijezde nastale i nestale, uglavnom u katastrofičnim ekspozijama.**

**Eksplodije supernova imaju dvije važne posljedice. *Prvo, novi elementi i izotopi nastali u zvjezdanim jezgrama i za vrijeme same eksplozije raspršuju se u jednom ekspanirajućem oblaku plinova i prašine miješajući se sa međuzvjezdanom materijom (koja je uglavnom vodik i helij). Nove zvijezde koje počinju svoj život iz te smjese započinju ga relativno obogaćene težim elementima, čak uključujući i torij i uranij.***

**Kako se procesi nastanka masivnih zvijezda, sinteze težih elemenata u njihovoj unutrašnjosti, i eksplozije supernove nastavljaju (a naravno traju i danas), Svemir kao cjelina postaje progresivno sve bogatiji teškim elementima. Recentno nastale zvijezde imaju 100 do 1.000 puta više željeza i drugih teških elemenata od starih zvijezda. Astrofizičari prepoznaju naše Sunce kao mlađu zvijezdu druge generacije, nastalu iz ostataka prijašnje supernove, pa u skladu s time ona sadrži i više željeza i težih elemenata negoli neka zvijezda prve generacije u kojoj bi dominirao inicijalni proces izgaranja vodika.**

***Drugo važno svojstvo eksplozije supernove je to da ona može potaći formiranje novih zvijezda šaljući udarne valove kroz susjedne plinovite oblake.***

Vratimo se mi na karakteristike slike kozmičke zastupljenosti elemenata. **Druga vidljiva značajka te slike je relativna obilnost lakih elemenata parnog atomskog broja i to zbog toga jer je prvi korak nastanka elemenata ispod litija fuzija jezgri s parnim atomskim brojem (primjerice,  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ). Laki elementi s neparnim atomskim brojem nastaju fisijom teških jezgri parnog atomskog broja. Osim toga, jezgre s parnim brojem nukleona su stabilnije pa je i to razlog veće obilnosti jezgri s parnim atomskim brojem.**

I na kraju, **niska kozmička zastupljenost Li, Be, i B rezultat je činjenice da inicijalna reakcija fuzije preskače jezgre s atomskim masama od 5 do 8, stvarajući odmah  $^{12}\text{C}$ , kao što smo prethodno pokazali.** A najveći dio Li, Be, i B nastao je potpunim raspršenjem (razgradnjom) jezgre (fizikalnom reakcijom znanom kao spalacija) - fisijom težih elemenata pri sudaru s kozmičkim zrakama u međuzvezdanom prostoru. Taj je proces (*l-proces*) istovremen s *r-procesom* stvaranja teških jezgri.

Kemijski sastav svemira (bez uzimanja u proračun materije neutronskih zvijezda i crnih rupa) može se predstaviti ako se kao osnova uzme **1 milijun atoma. Tada je od toga 924.400 atoma vodika, 74.000 helija, 830 kisika, 470 ugljika, 84 dušika, 82 neona, 35 magnezija, 33 silicija, 32 željeza, 18 sumpora, 8 argona, 3 aluminija, 3 kalcija, i preostalih 2 atoma svih ostalih elemenata.**

Zaključno se može reći da, kad bi nekom kemičaru dali kozmičku tvar na analizu on bi, analizirajući je, zaključio da se ta univerzalna tvar sastoji od vodika i helija s nečistoćama praktički svih ostalih elemenata.