

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
FAKULTET ZA FIZIKU

Viktorija Bolješić

Završni rad

Zvezdana arheologija

Rijeka, 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
FAKULTET ZA FIZIKU

Fizika, istraživački

Viktorija Bolješić

Zvezdana arheologija

Završni rad

Mentorica: prof. dr. sc. Rajka Jurdana-Šepić

Rijeka, 2022.

## *Sažetak*

Potruga za najstarijim zvijezdama započinje zajedno sa Velikom praskom; određivanje starosti zvijezda temelji se na proučavanju kemijskog sastava zvijezda. Prvi elementi u svemiru bili su vodik i helij te su se kasnije nukleosintezom u zvijezdama stvarali ostali, teži elementi. Jedan od kasnije sintetiziranih elemenata je i ugljik, koji je važan kao kemijski element osnove organskog života na Zemlji.

Prema vremenu nastanka i zastupljenosti kemijskih elemenata zvijezde se kategoriziraju u jednu od tri populacija, populaciju I čine zvijezde s najvećim udjelom metala, ujedno i najmlađe. Populaciju II čine zvijezde druge generacije, koje su siromašne metalima ali ih mogu sintetizirati. Populaciju III čine hipotetske zvijezde koje su nastale u najranijoj fazi zvjezdane evolucije, prije nego su postojali teži elementi. U populaciju III se danas mogu ubrajati samo crne rupe i neutronske zvijezde.

Razumijevanje postanka i razvoja zvijezda tijekom evolucije svemira i određivanje njihove starosti predmet je proučavanja tzv. zvjezdane arheologije.

## *Sadržaj*

1. Uvod .....	5
2. Razvoj svemira.....	6
2.1. Teorija Velikog praska.....	6
2.2. Prve 3 minute.....	6
3. Razvoj zvijezda.....	9
3.1. Osnovne metode astrofizike.....	9
3.2. HR dijagram.....	10
3.3. Evolucija zvijezda manje mase.....	12
3.4. Evolucija masivnih zvijezda.....	13
3.5. Zvezdane populacije.....	14
4. Zvezdana arheologija.....	15
4.1. Najstarije zvijezde.....	15
4.2. Nastanak galaksija.....	17
5. Zaključak.....	21
6. Literatura.....	22

# *1. Uvod*

Svi atomi u svemiru nastali su nuklearnom fuzijom u vrućim jezgrama zvijezda milijunima godina unazad. Prvi atomi koji su nastali bili su vodik i helij, u samim počecima Velikog praska, i gotovo je nemoguće zamisliti, ali činjenica je da su svi ostali teži elementi potekli od njih.

Arheologija je čin proučavanja drevnih materijalnih ostataka u svrhu boljeg shvaćanja i rekonstrukcije prošlih događaja, a kako je čovječanstvo stoljećima upiralo pogled prema nebu, pitajući se što se krije iza svjetlećih točkica koje ga prekrivaju, jedino preostaje, upotrebom ostataka koji su od nas udaljeni stotinama svjetlosnih godina, to i otkriti. U ovom završnom radu cilj je bio opisati problem najstarijih zvijezda i važnost njihovog istraživanja.

Zvezdana arheologija je naziv za izučavanje najstarijih zvijezda, odnosno dio astrofizike koji se bavi izučavanjem zvezdane evolucije na kozmološkoj skali, od postanka prvih zvijezda.

U prvim poglavljima rada govori se o nastanku svemira prema najraširenijoj teoriji Velikog praska, koji su se procesi događali u prve 3 minute te kako je započeo svemir kakav danas poznajemo. Opisan je nastanak prvih zvijezda, važnost spektroskopije i fotometrije kao metoda astrofizike i način na koji se kategoriziraju zvijezde prema udjelu metala u njima. Opisan je Hertzsprung – Russellov dijagram kao važan alat za razumijevanje i praćenje evolucije zvijezda te kategoriziranje zvijezda prema masi, temperaturi i luminozitetu. Postepeno se opisuje evolucija zvijezda ovisno o njihovoj masi.

U posljednjem poglavlju rada definira se zvezdana arheologija, načini proučavanja najstarijih zvijezda i koje karakteristike su presudne u njihovom pronalaženju. Govori se o najstarijim zvezdama, njihovom nastanku i gdje se nalaze te kakva je povezanost formiranja prvih galaksija i najstarijih zvijezda, koje su zapravo i bile kolijevka života cijelog svemira i koje već odavno ne postoje.

## ***2. Razvoj svemira***

### *2. 1. Teorija Velikog praska*

Veliki prasak je teorija o nastanku svemira prema kojoj je prije otprilike 13,8 milijardi godina, širenjem iz točke beskonačne gustoće i temperature, tzv. singularnosti, nastao svemir. Nastanak svemira podrazumijeva i početak vremena. Smatra se da je Veliki prasak nastao kvantnim fluktuacijama vakuuma, što je pojava neprestanog stvaranja i nestajanja mikroskopskih parova čestica i antičestica u vakuumu u skladu s Heisenbergovim načelom neodređenosti. Ova teorija najprihvaćenija je među znanstvenicima iako to nije jedina kozmološka teorija. Naime, teorija Velikog praska ne daje odgovore na sva pitanja u vezi nastanka svemira, tako niti o “trenutku nula”.

### *2.2. Prve 3 minute*

U prvim trenucima nakon Velikog praska gustoća i temperatura svemira bile su enormne. Prve promjene događale su se unutar djelića sekunde – najveći doseg znanosti o tome kako je svemir izgledao u svojim počecima seže već do trenutka kada je svemir bio star  $10^{-43}$  sekundi. Temperatura je tada iznosila  $10^{32}$  K i pretpostavlja se da se tada jedinstvena sila u svemiru – supergravitacija – razdvojila na gravitacijsku i ostale ujedinjene sile. U trenutku starosti svemira  $10^{-35}$  sekundi nastaje razdvajanje na jaku nuklearnu i elektroslabu silu. Tada je došlo do “zamrzavanja” jake nuklearne sile. Kada je svemir bio star  $10^{-10}$  sekundi, a temperatura iznosila  $10^{15}$  K, elektroslaba sila se razdvojila na elektromagnetsku i slabu nuklearnu silu.

Usporedno sa silama nastajale su elementarne čestice koje su osnovne građevne jedinice atoma – protoni, neutroni i elektroni. Povijest svemira može se podijeliti na dva važna razdoblja – razdoblje zračenja i razdoblje materije. Rani svemir, koji pripada razdoblju zračenja dijeli se u nekoliko podrazdoblja:

Hadronsko podrazdoblje – ( $t = 10^{-8} \text{ s} - 10^{-4} \text{ s}$ ,  $T = 10^{14} \text{ K} - 10^{12} \text{ K}$ ), većinski dominiraju masivne čestice, protoni i antiprotoni, kvarkovi i antikvarkovi.

Leptonsko podrazdoblje – ( $t = 10^{-4} \text{ s} - 10 \text{ s}$ ,  $T \approx 10^{12} \text{ K}$ ), nastaju lakše čestice i antičestice, elektroni i pozitroni.

Podrazdoblje nukleosinteze – ( $t = 10 \text{ s} - 300 \text{ s}$ ,  $T = 10^{11} \text{ K} - 10^{10} \text{ K}$ ), formiranje neutrona iz protona i elektrona. Svemir se u ovom stadiju sastoji većinski od elektrona, neutrina, protona i neutrona te njihovih antičestica.

Teorija inflacije je model koji nadopunjuje teoriju Velikog praska. Prema inflacijskoj teoriji svemir se naglo počeo širiti kada se velika ujedinjena sila razdvojila na jaku nuklearnu i elektroslabu silu, kada je svemir bio star  $10^{-35}$  sekundi. Došlo je do “zamrzavanja” jake nuklearne sile, pri čemu je oslobođena velika količina energije, što je dovelo do iznenadnog širenja svemira, koje je trajalo do starosti svemira  $10^{-32}$  sekundi. Iako je trajalo vrlo kratko, svemir se u tom razdoblju povećao  $10^{50}$  puta.

Inflacijska teorija služi kao nadopuna teoriji Velikog praska, jer može objasniti neke nedostatke standardnog modela Velikog praska, kao što su nagla promjena zakrivljenosti svemira i očuvanje izotropnosti pozadinskog zračenja.

Kada se svemir ohladio na temperaturu od  $10^9 \text{ K}$  prvo su se formirale jezgre vodika, tj. protoni, kasnije i jezgre težeg vodika, deuterija, koje se sastoje od jednog protona i jednog neutrona. Iz jezgre deuterija formirale su se prve veće količine jezgara helija, koje se sastoje od dva protona i dva neutrona.

Sudarima novonastalih atoma helija došlo je do formiranja atoma novog elementa – litija, no u vrlo malim količinama. Svemir se nakon prvotne sinteze elemenata sastojao većinski od vodika, koji je činio 75% mase, 25% činio je helij te je litij postojao samo u tragovima, oko 0.000000002% ukupne mase svemira. Sve ovo se dogodilo unutar samo 3 minute nakon Velikog praska.

Sljedeća velika promjena dogodila se otprilike 380 000 godina kasnije, kada se svemir ohladio na temperaturu od 3 000 K. Slobodne jezgre su se dovoljno usporile da bi mogle uhvatiti slobodne elektrone, bez kojih se fotoni više nisu raspršivali. Materija i zračenje su se razdvojili, svemir je postao proziran po prvi put. Započelo je razdoblje materije.

Fotoni iz vremena ranog svemira još su uvijek oko nas, i nazivamo ih kozmičko pozadinsko zračenje. To su najstariji fotoni koje možemo opažati. Gustoća energije kozmičkog

pozadinskog zračenja se širenjem svemira smanjila i umjesto prvotnih 3000 K sada iznosi 2,7 K. Svemir je svojim neprestanim širenjem od Velikog praska do danas došao blizu temperature apsolutne nule.

Nekoliko stotina milijuna godina kasnije, kada je završio period spajanja slobodnih jezgara i elektrona, iz plinovitih oblaka počele su se stvarati prve zvijezde – sastavljene od jedinih tada postojećih elemenata, vodika, helija i litija. Te prve zvijezde formirale su se u prve galaksije, i u svojim vrućim jezgrama započele su sintezu ostalih, težih elemenata. Nakon 9 milijardi godina akumuliralo se dovoljno elemenata za nastanak Sunca i ostalih planeta Sunčevog sustava. [2]

Najstarije zvijezde su ključne za razumijevanje kemijske evolucije svemira.



### ***3. Razvoj zvijezda***

#### *3.1. Osnovne metode astrofizike*

Spektroskopija je znanstvena metoda koja uz pomoć spektra atoma ili molekula zaključuje o fizičkim parametrima uzorka ili područja u kojem se atomi i molekule nalaze; njihovim energijskim stanjima, pobuđenju, ionizaciji i promjenama nakon međudjelovanja s elektromagnetskim zračenjem.

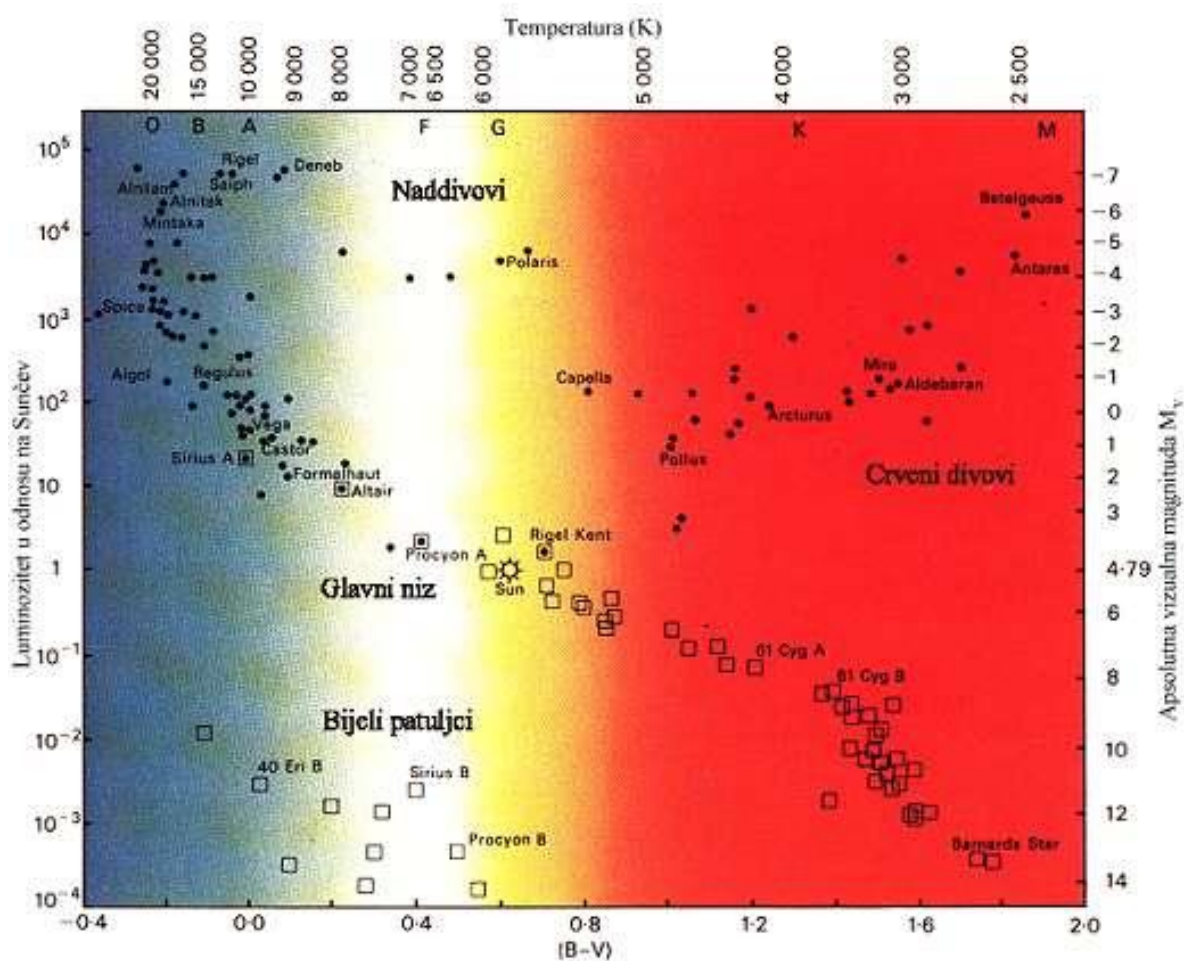
Razlikuju se tri oblika spektra ovisno o tipu interakcije: kontinuirani, linijski i vrpčasti. Zvijezde i zagrijane krutine emitiraju kontinuirani spektar, pobuđeni atomi u plinovitom stanju daju linijski spektar, ili atomski spektar zbog karakterističnosti spektra svakog kemijskog elementa. Vrpčasti spektri nastaju prolaskom dijela zračenja kroz uzorak pri čemu dolazi do apsorpcije, a pretežito ih zrače molekule. Apsorpcijski i emisijski spektri iste tvari su komplementarni.

Tamne ili tzv. apsorpcijske spektralne linije u Sunčevom spektru i spektrima drugih zvijezda nastaju zbog apsorpcije svjetlosti od atoma i molekule u Sunčevoj i zvjezdanim atmosferama. To otkriće je revolucionariziralo način na koji se utvrđuje kemijski sastav svemirskih objekata i po prvi puta povezalo fiziku, kemiju i astronomiju. Spektroskopijom je moguće odrediti koji se elementi nalaze u atmosferi dalekih zvijezda, odnosno kemijski sastav zvijezda, a izučavanjem intenziteta i profila spektralnih linija može se odrediti i količine odnosno zastupljenosti kemijskih elemenata i fizički parametri područja u kojima se spektralne linije formiraju kao što su temperatura, tlak, gustoća i sl.

Druga temeljna metoda izučavanja svjetlosti svemirskih objekata je fotometrija. To je grana optike koja se bavi mjerenjem svojstava svjetlosti; izvora svjetlosti, svjetlosnog toka koje daju izvori i osvjetljenja površina. Fotometrija se bavi samo vidljivim dijelom spektra, tj. dijelom elektromagnetskog zračenja koje je vidljivo ljudskom oku, od 380 nm do 780 nm. U astronomiji fotometrija se bavi mjerenjem fotometrijskih veličina nebeskih tijela, tako da se mjeri tok i intenziteti zračenja astronomskih objekata. [4]

### 3.2. HR dijagram

Hertzsprung – Russellov ili HR dijagram (nazvan prema prezimenima Henryja Norrisa Russella i Ejnarda Hertzsprunga) je način kategoriziranja zvijezda prema njihovom luminozitetu, veličini, efektivnoj temperaturi odnosno karakteristikama njihova spektra. Na HR dijagramu efektivna temperatura zvijezda nalazi se na apscisnoj osi, a luminozitet na ordinatnoj, najčešće izražen u jedinicama luminoziteta Sunca. Zvijezde manjeg luminoziteta nalaze se u donjem dijelu dijagrama, a one većeg u gornjem. Vruće zvijezde smještene su na lijevoj strani dijagrama, a hladne na desnoj.



Slika 1. Hertzsprung – Russellov dijagram [2]

Zvijezde su na HR dijagramu kategorizirane u grane ili nizove. Glavni niz nalazi se u sredini dijagrama i spušta se od gornjeg lijevog do donjeg desnog kuta. Niz divova odvaja se od glavnog niza prema hladnijem dijelu dijagrama.

Važnost HR dijagrama leži u tome što omogućuje smještanjem zvijezde u HR dijagram saznati njezine fizičke karakteristike i evolucijsku fazu. Zvijezde nastaju u oblacima plina i prašine gravitacijskim sažimanjem uslijed kojega se zagrijava njegova unutrašnjost (protozvijezda). Općenito, zvijezda dolazi na glavni niz nakon što u njezinoj jezgri započne proces nuklearne fuzije – tek tada postiže stabilnu temperaturu jezgre i luminozitet, postiže se ravnoteža tlaka zračenja i gravitacijskog tlaka i smatra se zvijezdom u užem smislu riječi. Određeni položaj na glavnom nizu koji zvijezda zauzima ovisi o njezinoj masi. U donjem desnom kutu nalaze se hladnije zvijezde manjih masa i manjih luminoziteta. Dijametralno suprotno u lijevom gornjem kutu HR dijagrama smještene su masivnije zvijezde vrlo visokih efektivnih temperatura i luminoziteta.

Zvijezde najveći dio svog životnog vijeka, oko 90%, provedu na glavnom nizu. U tom stadiju zvijezda se vrlo malo mijenja fizički i fuzijom pretvara vodik u helij. Što je zvijezda manje mase živi dulje, jer masivnije zvijezde gore intenzivnije i brže sagorijevaju vodik u svojoj unutrašnjosti, time i kraće žive.

Nakon završene faze na glavnom nizu, zvijezda prelazi u niz crvenih divova i tamo provodi gotovo sav preostali životni vijek. Masa zvijezde i njezin životni vijek su obrnuto razmjerni, odnosno masivnije zvijezde žive kraće.

Završna faza života zvijezde i nastavak evolucije nakon niza crvenih divova ovisi isključivo o njezinoj masi. Nakon završene faze crvenog diva, zvijezda prelazi na horizontalni niz, gdje sagorijeva helij u ugljik. Otuda prelazi na asimptotsku granu divova, gdje će eventualno dovršiti proces nuklearne fuzije. Zvijezde manje mase postaju bijeli patuljci te prelaze u donji lijevi kut dijagrama.

Osim efektivne temperature, iz zvjezdanog spektra se može odrediti i njezina površinska gravitacija. Te dvije veličine su dovoljne da se zvijezdi odredi položaj na HR dijagramu, budući da je površinska gravitacija povezana s luminozitetom zvijezde preko njezine mase. [6]

### 3.3. Evolucija zvijezda manje mase

Zvijezdama manje mase smatraju se zvijezde masa  $M < 8 M_{\odot}$ . Jednom kad takva zvijezda dođe na glavni niz, tamo provede 90% svog životnog vijeka sintetizirajući vodik u helij, prvo u svojoj jezgri dok se sav vodik ne potroši te zatim u omotaču, odnosno ljusci materijala oko jezgre. Sada se inertna jezgra unutar ljuske počinje sažimati i zagrijavati, izbacujući višak energije u ljusku što uzrokuje pojačano sagorijevanje vodika. Slojevi iznad se naglo rašire i zatim ohlade. Zvijezda se vrlo brzo pomakne na donji kraj niza crvenih divova.

Proces se ponavlja na grani divova s inertnom helijevom jezgrom – zvijezda se polako sažima i zagrijava, dok se istovremeno vodikova ljuska sagorijevanjem širi. Polumjer zvijezde i njezin luminozitet se povećavaju uslijed tog procesa te se zvijezda hladi za nekoliko tisuća stupnjeva i smanjuje joj se površinska gravitacija.

Procesi fuzije vodika u helij u jezgrama zvijezda su proton-proton ili kraće p-p lanac i CNO ciklus. Proton-proton lanac se odvija u manje masivnim zvijezdama gdje su temperature jezgri manje od 20 milijuna kelvina, a CNO ciklus kod masivnijih zvijezda gdje su u jezgrama temperature veće od te vrijednosti.

Kada zvijezda dođe do vrha grane crvenih divova, njezina se jezgra sastoji pretežno od helija, gustoća i tlak u jezgri su veliki a kada dosegne temperaturu od 100 milijuna K steknu se uvjeti za fuziju helija, odnosno gorenje helijeve jezgre. Helij se fuzijom pretvara u ugljik i kisik. Kod manjih zvijezda dolazi do tzv. helijeva bljeska, kratke i eksplozivne fuzije helija koja zvijezdi daje dovoljno energije da promijeni položaj na HR dijagramu. Zvijezda sada ima novi izvor energije – sagorijevanje helija. Kako se gorući omotač vodika smanjuje tako opada i luminozitet zvijezde. Zvijezda se sažima i povećava joj se površinska temperatura – prelazi na horizontalni niz. Struktura zvijezde se ne razlikuje od one na glavnom nizu – jedina razlika je što zvijezda sada sagorijeva helij u ugljik i kisik u svojoj jezgri dok se vodik još uvijek fuzijom pretvara u helij u okolnoj ljusci.

Kada zvijezda sagori sav helij u jezgri događa se proces sličan onom na kraju sagorijevanja vodika – stvara se ljuska gorućeg helija oko jezgre koja sagorijeva helij u ugljik i kisik i zvijezda prelazi na početak tzv. asimptotske grane divova (AGB od *asymptotic giant branch*).

Kako helijeve ljuske postaju sve tanje tako postaju i nestabilnije te reagira vrlo brzo na i najmanju promjenu u temperaturi koju izaziva jezgra unutra. Plin expandira iznad i ispod helijeve ljuske, ona se nastavlja zagrijavati i postepeno širiti kako bi održala termičku ravnotežu – svako sljedeće širenje rezultira u sve većem hlađenju ljuske. Naizmjenično zagrijavanje i hlađenje dovode do termičkih pulseva koji se pojavljuju u prilično pravilnim intervalima u svim zvijezdama koje sagorijevaju helij i vodik.

U helijevoj ljusci fuzijom se pretvara helij najprije u ugljik i kisik, a kasnije ugljik i kisik u dušik. Tu dolazi do sinteze težih elemenata, dušika u fluor, kisik pa neon. U zvijezdama srednje mase dolazi i do fuzije neona u magnezij. Ovo je kraj razvoja za zvijezde male mase. Njihovi konačni izvori energije su helijev i vodikov omotač. Kako se oni sve više približavaju površini sa svakim novim toplinskim pulsom, tako su posljedice pulseva sve snažnije. Zvijezda svakim sljedećim pulsom izbacuje vanjske slojeve u svemir, sve dok naposljetku ne izbací sav preostali materijal, a na njezinom mjestu ostane samo mrtva jezgra kisika i ugljika – bijeli patuljak u stanju degeneriranog plina. Okružuje ga oblak plina i prašine - planetarna maglica. Zvijezda time ulazi u zadnji stadij svog života na nizu bijelih patuljaka. [3], [6]

### *3.4. Evolucija masivnih zvijezda*

Iako masivne zvijezde sadrže mnogo veće rezerve vodika, one također puno brže sagorijevaju vodik nego zvijezde manje mase, te je njihov životni vijek mnogo kraći.

Masivne zvijezde također provode 90% svog životnog vijeka na glavnom nizu, gdje sagorijevaju vodik u helij. Vremenom se stvara vodikov omotač oko jezgre koja počinje sagorijevati helij i zvijezda se pomiče po HR dijagramu i smješta na niz crvenih divova.

Na asimptotskoj grani divova započinje gorenje helija. Masivne zvijezde stvaraju ugljikovu jezgru koja doseže temperature od milijardu kelvina.

Vrlo visoka temperatura i gustoća u jezgri dovode do stvaranja velike količine neutrina. Budući da neutriini ne interagiraju sa materijom, napuštaju zvijezdu brzinom svjetlosti bez utjecaja na gravitacijski tlak. Energija utrošena nuklearnom fuzijom za stvaranje neutrina gubi se odmah, te zvijezda postaje nestabilna. Jezgra se sve više zagrijava i sažima, čime se stvara više neutrina i nuklearno gorenje u zvijezdi se ubrzava.

To se nastavlja kroz sve stadije nuklearnog gorenja u jezgri, sve do gorenja silicija, svaki sljedeći stupanj gorenja traje sve kraće i kraće pa se primjerice trajanje gorenja silicija procjenjuje na svega 10 dana. Zvijezda zrači enormne količine energije u obliku neutrina. Silicij se fuzijom pretvara u željezo, a zvjezdana jezgra se sastoji od željeza i nikla. Fuzija u jezgri prestaje. Zvijezda se nastavlja pomicati po asimptotskoj grani divova, gdje različiti slojevi unutar zvijezde nastavljaju nuklearnu fuziju.

Kod vrlo masivnih zvijezda nestabilnosti u krajnjim fazama evolucije dovode do eksplozivnih procesa, neke zvijezde eksplodiraju kao supernove i ovisno o masi, postaju neutronske zvijezde ili crne rupe. [3], [6]

### *3.5. Zvjezdane populacije*

Metalicitet  $Z$  opisuje udio kemijskih elemenata u zvijezdama isključujući vodik i helij. Pojam "metali" u astrofizici koristi se u smislu „ostali elementi osim vodika i helija“, a neovisno o uobičajenoj definiciji metala u periodnom sustavu elemenata.

Zvjezdane populacije opisuju podjelu zvijezda u Mliječnoj stazi. Zvijezde se prema metalicitetu i prostornom rasporedu u galaksiji dijele u 3 skupine: populacija I, populacija II i populacija III. Svaka populacijska skupina ima opadajući metalicitet i rastuću dob, dakle prve zvijezde najnižeg metaliciteta pripadaju populaciji III, a mlađe zvijezde bogate metalima populaciji I. Sunce je zvijezda populacije I, bogata metalima. Najstarije zvijezde najsiromašnije su metalima, što je jedan od kriterija kako ih pronaći i definirati.

Populacija I je veća grupa kojoj pripadaju mlađe zvijezde bogate metalima koje su uglavnom ravnomjerno raspoređene po galaktičkom disku. Govorimo i o tzv. populaciji diska gdje se nalaze planetarne maglice, ostaci supernova i rijetka međuzvjezdana tvar. Starije zvijezde siromašnije metalima pripadaju populaciji II, a dominantne su u galaktičkom halou. Populaciju III sačinjavaju masivne iščezle zvijezde prve generacije koje su nastale kada u svemiru još nije bilo metala i koje su se sastojale samo od vodika, helija i litija u tragovima. Te su zvijezde započele nukleosintezu težih elemenata u svojim jezgrama, i stvorile svemir kakav znamo danas. [6]

## ***4. Zvezdana arheologija***

Zvezdana arheologija je naziv za istraživanja drevnih zvijezda, bavi se proučavanjem njihovog kemijskog sastava i utvrđivanja kemijskog sastava ranog svemira i njegove kemijske evolucije. Ta saznanja pomažu utvrditi kako se između ostalog stvorila i razvila naša galaksija Mliječna staza, ali i ostale zvijezde i galaksije u svemiru.

Opažajući moćnim teleskopima vrlo daleke galaksije i plinovite oblake vidimo zapravo svemir u ranijim razdobljima njegova razvoja. Naime, vrlo daleki objekti su kao mlade galaksije emitirale svjetlost kojoj je trebalo određeno vrijeme da stigne do Zemlje, po nekoliko milijardi godina, te tako imamo mogućnost direktnog uvida u prošlost. Ovaj pristup je vrlo populariziran teleskopom Hubble, koji od 1990. godine iz svemira šalje spektakularne slike dalekih galaksija i svemirskih objekata.

Proučavanje svjetlosti dalekih galaksija dovelo je do spoznaje da postoje zvijezde koje su nastale 700 milijuna godina nakon Velikog praska. No, za razliku od zvezdane arheologije ovakav pristup nam daje samo ograničene informacije o kemijskom sastavu promatranih zvijezda te posljedično o sastavu njihovih unutrašnjosti i koji se elementi sintetiziraju u njihovim jezgrama.

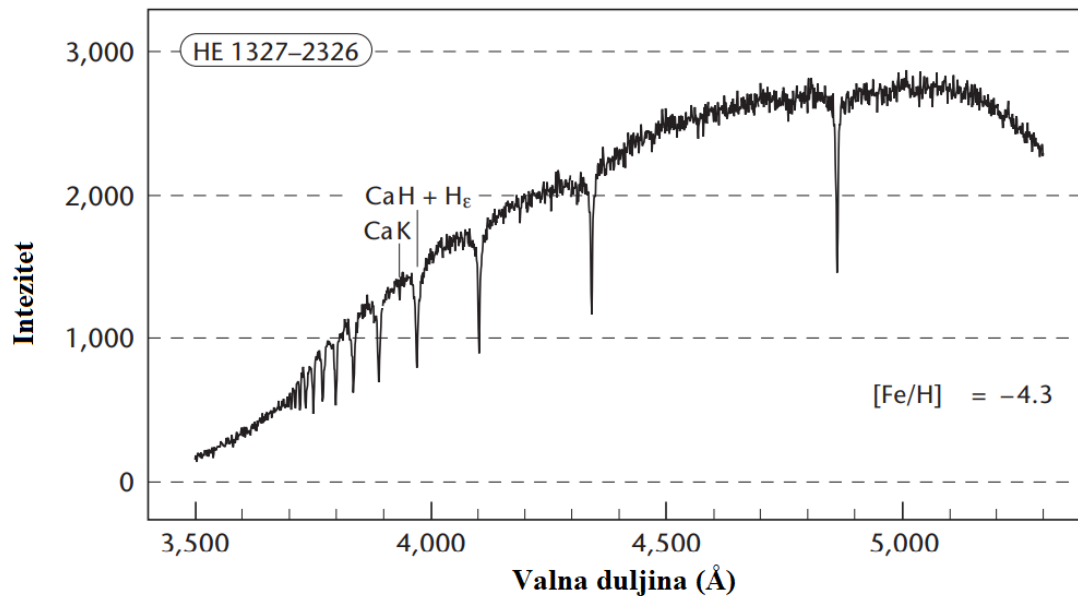
Temeljna metoda zvezdane arheologije i izučavanja kemijskog sastava drevnih zvijezda je spektroskopija. [3]

### ***4.1. Najstarije zvijezde***

Kemijski razvoj ranog svemira možemo promatrati samo kroz kemijski trag koji su najranije zvijezde ostavile nakon svoje smrti – taj materijal se danas nalazi u zvezdama populacije II, proučavanjem njihovog sastava možemo zaključiti kakvi su bili uvjeti na početku stvaranja svemira.

Iz prvotnog oblaka plina formirale su se prve zvijezde siromašne metalima, te su se tijekom generacija i generacija zvijezda formirali metali u njima koji su se širili svemirom nakon

njihovih eksplozija potpomognuti zvjezdanim vjetrovima. Starenjem svemira metalicitet zvijezda se povećavao.



**Slika 2.** Spektar zvijezde HE 1327-2326 iznimno malog metaliciteta, snimljen 2,3 metarskim teleskopom. Vrlo slaba Fraunhoferova K linija kalcija vidi se između vodikovih linija na valnoj duljini od oko 390 nm.

Prve zvijezde zasjale su tek nekoliko stotina milijuna godina nakon Velikog praska i živjele kratko te u nekoliko milijuna godina nestale u velikim eksplozijama vrlo brzo nakon formiranja. To ih čini gotovo nemogućima za opažanje danas, čak niti upotrebom svemirskih teleskopa. Razumijevanje nastanka prvih zvijezda pokušava se danas simulirati uz pomoć računalnih modela i simulacija.

Nemoguće je odrediti starost zasebne zvijezde, već se uglavnom određuje starost određene skupine zvijezda, tzv. zvjezdanog jata. Pretpostavlja se da su sve zvijezde jednog jata nastale u isto vrijeme i od istog materijala, u istom oblaku međuzvjezdanog plina i prašine te da se razlikuju samo po masi. Jedna zvijezda ne daje pouzdane informacije o svojoj starosti jer 90% života provede na glavnom nizu HR dijagrama ne mijenjajući svoju temperaturu niti luminozitet, zbog čega može biti vrlo mlada ili vrlo stara. U zvjezdanom jatu nalazi se mnogo zvijezda iste starosti, ali različitih masa te je dovoljno pronaći najmasivniju zvijezdu koja još nije postala nestabilna. Određivanjem njezine mase i luminoziteta može se utvrditi koliko je



vodika imala u trenutku nastajanja i koliko brzo izgara taj vodik. Zna se da je zvijezda na putu da postane nestabilna i uđe u zadnji stadij svoje evolucije, zbog čega je gotovo iscrpila svoj izvor vodika. Iz omjera količine vodika kojim zvijezda raspolaže i brzine kojom izgara vodik određuje se njezina starost. Budući da su sve zvijezde jata jednako stare, starost jedne zvijezde određuje i starost ostalih. [5]

Najstarija pronađena zvijezda, prozvana i Metuzalemskom zvijezdom, za koju se smatra da je nastala nedugo nakon Velikog praska je HD 140283, čija se starost procjenjuje na  $14,46 \pm 0,31$  milijarde godina, za poredbu, procjena starosti svemira iznosi  $13,77 \pm 0,06$  milijardi godina. Metuzalemska zvijezda je zvijezda populacije II u našem zvjezdanom susjedstvu, čiji je kemijski sastav dobro određen visokorezolucijskom spektroskopijom. [1]

Prve zvijezde nastale su oko 300 milijuna godina nakon Velikog praska od vodika, helija i vrlo malih količina litija. Stvaranjem iz ogromnih oblaka plina i prašine prve zvijezde bile su masivne, vrlo velikih luminoziteta i visokih temperatura. Svaka zvijezda je na kraju eksplodirala u supernovu, ostavljajući za sobom crnu rupu, no ovisno o njihovoj masi određeni dio materijala bio je izbačen u svemir. Završetak života iznimno masivnih zvijezda masa između 140 i  $260 M_{\odot}$  događa se u izuzetno izdašnom energijskom procesu te najviše doprinosi kemijskom obogaćivanju svemira težim elementima.

Nagađa se da su postojale i zvijezde mase veće od  $260 M_{\odot}$ , koje najvjerojatnije nisu eksplodirale kao supernove, već su se urušile u crne rupe. Takve zvijezde nisu doprinijele obogaćivanju svemira težim elementima. [3]

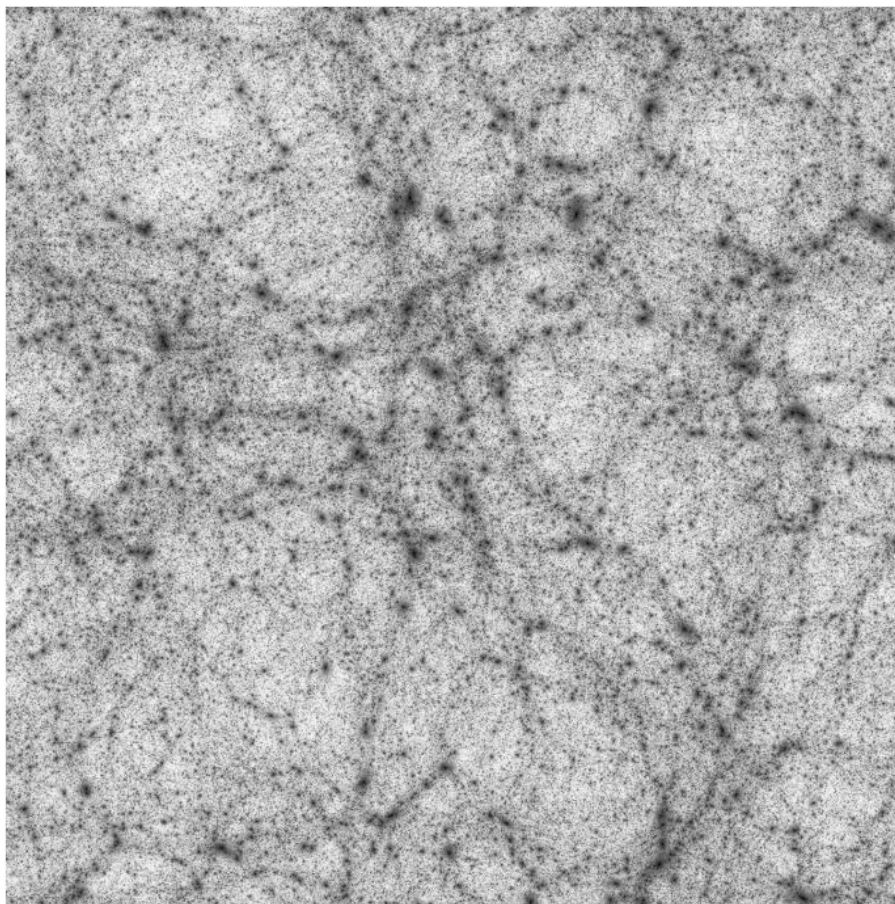
## *4.2. Nastanak galaksija*

Razumijevanje nastanka i razvoja prvih zvijezda povezano je s razumijevanjem formiranja i evolucije galaksija te se uz pomoć podataka prikupljenih iz opažanja i teorijskih izračuna te kompjuterskih simulacija odgovara na pitanja nastanka tih svemirskih struktura.

Danas se procjenjuje da se svemir sastoji 23% od tamne tvari i 72% tamne energije. Galaksije, zvijezde, plin i ostala svijetla tvar čine samo njegovih 5%. Porijeklo i priroda tamne tvari i energije još je uvijek nepoznanica i predmet intenzivnih istraživanja, a jedan od načina izučavanja tih fenomena je istraživanje njihovih gravitacijskih učinaka. Tamna tvar zbog svoje

velike mase djeluje velikom gravitacijskom silom, koju je moguće promatrati i mjeriti, iako samu tvar nije moguće vidjeti. Smatra se da se galaksije većinski sastoje od tamne tvari. Kod teorija o razvoju galaksija uvodi se pojam hipotetskog tamnog haloa, područja galaksije ispunjenog tamnom tvari velike gustoće. Budući da se sastoji od tamne tvari halo nije moguće izravno opažati, već se njegovo postojanje pokazuje učinkom na kretanje zvijezda i plina u galaksijama. Pretpostavlja se da se galaksije i njihovi haloi nalaze u središtu tamnog haloa, odnosno da su Mliječna staza i druge galaksije okružene halom tamne tvari.

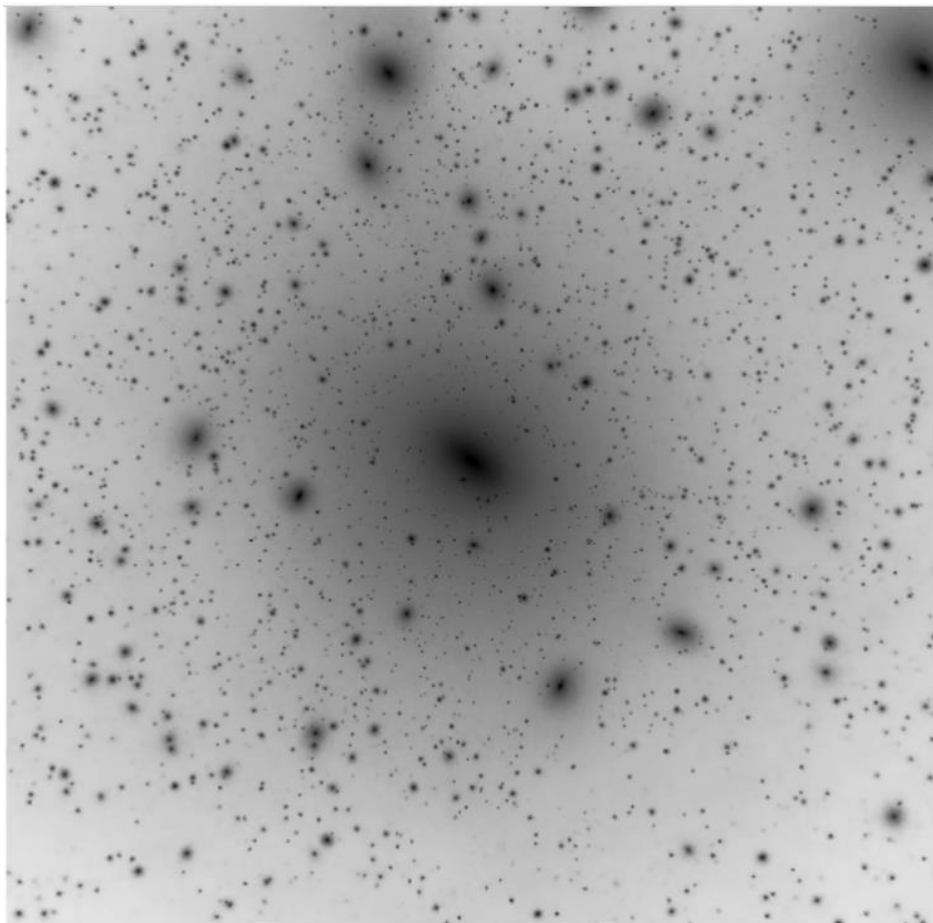
Kozmološke simulacije ukazuju na mogućnost da su se prvi halo tamne tvari formirali ubrzo nakon Velikog praska. Nedugo zatim spojili su se u veći tamni halo, stvarajući pritom i prve galaksije. S vremenom su se ostali manji halo spajali i rasli, te tako formirali i veće galaksije, kao što je Mliječna staza. Gravitacijska sila Mliječne staze uzrokovala je uvlačenje mnogih patuljastih galaksija u svoj halo. Opažачke potvrde u prilog ovih hipoteza nalaze se fotometrijskim i spektroskopskim mjerenjima. Poznato je da galaksije rastu i šire se obuhvaćajući manje galaksije, a procesi se zbivaju zbog utjecaja gravitacijske sile.



**Slika 3.** Fragment iz kozmološke simulacije tamne materije te evolucije galaksija i struktura. Tamnije nakupine prikazuju mjesta veće gustoće tamne tvari koje sadrže mnoge galaksije i galaktička jata. [3]

U evoluciji galaksija zanimljivo je pitanje porijekla zvijezda populacije II. Smatra se da su u njihovu nastanku imale veliku ulogu patuljaste galaksije. Za primjer se obično navodi Mliječna staza – najstarije zvijezde naše galaksije morale su se formirati prije njene formacije, negdje tijekom najranijih faza razvoja galaksije. Računalne simulacije ukazuju na mogućnost da su se galaktički halo formirali puno prije od galaktičkog diska. Moguće je da su patuljaste galaksije bile prvi građevni blokovi galaktičkih haloa, uvučene u središte galaksije jakim gravitacijskim privlačenjem novonastale galaksije. Te galaksije već su sadržavale zvijezde siromašne metalima, koje su onda u procesu spajanja ostale zarobljene unutar haloa. Vremenom je sve više patuljastih galaksija bivalo uvučeno gravitacijskim privlačenjem Mliječne staze, no nisu bile dovoljno masivne da dođu do njezina središta, već su ostajale na rubovima galaksije polako se krećući prema središtu, gdje se većina i danas nalazi. Nasuprot tome, galaktički halo se sastoji od dijelova ranih patuljastih galaksija rastrganih gravitacijom. (Slike 3 i 4)

Ova hipoteza navodi na zaključak da su najstarije zvijezde siromašne metalima nastale u patuljastim galaksijama, istim onima koje su u vrijeme nastajanja većih galaksija formirale njihove haloe. Promatranjem postojećih dalekih patuljastih galaksija otkriveno je da sadrže stare zvijezde siromašne metalima, dakle niskog metaliciteta i kemijskim su sastavom slične zvijezdama galaktičkog haloa. Iako se radi o znanstvenoj hipotezi velika je vjerojatnost da su zvijezde najsiromašnije metalima iz najranijih stadija svemira kakve se nalaze u halou naše galaksije nastale upravo u patuljastim galaksijama i datiraju iz tog razdoblja. [3], [6]



**Slika 4.** Fragment iz kozmološke simulacije tamne materije koji prikazuje područje dimenzija 4 milijuna svjetlosnih godina. U sadašnjem trenutku razvoja svemira ogromni halo tamne tvari okružuju galaksije poput naše. Manji halo, za koje se pretpostavlja da su patuljaste galaksije kruže oko središnje galaksije i njezina haloa tamne tvari.

## **5. Zaključak**

Razumijevanje nastanka svemira i svih struktura u njemu temelji se na razumijevanju i proučavanju nastanka prvih zvijezda. Najstarije zvijezde u svojim su jezgrama započele nukleosintezu kemijskih elemenata težih od vodika, te uslijed eksplozija supernovi sav materijal izbacivale u okolinu, obogaćujući tako svemir novim, težim elementima. Zvezdana arheologija bavi se upravo otkrivanjem tih najstarijih zvijezda, te uz pomoć njih rekonstruiranjem uvjeta u kakvima je nastao svemir.

Mnoga znanstvena otkrića potvrđuju hipotezu da su prve zvijezde nastale u davnim patuljastim galaksijama, koje su uslijed djelovanja gravitacijskog privlačenja postepeno stvorile veće galaksije, prvo njihov galaktički halo u središtu, zatim akrecijom materijala i okolni disk.

Nagađa se postojanje tamnog haloa, u koji su uronjene cijele galaksije, sa tamnim diskom koji ih okružuje.

## 6. Literatura

- [1] Bond, H. E.; Nelan, E. P.; Vandenberg D. A.; Schaefer, G. H.; Harmer D. "HD 140283: A Star in the Solar Neighborhood that Formed Shortly After the Big Bang". *The Astrophysical Journal Letters*. **765** (1): L12. 2013 ([arXiv:1302.3180](https://arxiv.org/abs/1302.3180). [Bibcode:2013ApJ...765L..12B](https://ui.adsabs.org/abs/2013ApJ...765L..12B). [doi:10.1088/2041-8205/765/1/L12](https://doi.org/10.1088/2041-8205/765/1/L12). [S2CID 119247629](https://ui.adsabs.org/abs/2013ApJ...765L..12B))
- [2] E-škola astronomije: [H-R dijagram i temeljne osobitosti zvijezda « E-škola astronomije | Zvezdarnica Zagreb](#)
- [Teorija Velikog praska i fizikalni uvjeti tijekom razvoja svemira « E-škola astronomije | Zvezdarnica Zagreb](#)
- [3] Frebel, A. *Searching for the Oldest Stars*, 1st ed. Princeton, New Jersey : Princeton University Press, 2015.
- [4] Hrvatska enciklopedija: [spektroskopija | Hrvatska enciklopedija](https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=57380)  
<https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=57380>
- [5] Naftilan, S. A.; Stetson, P. B. (2006-07-13). "[How do scientists determine the ages of stars? Is the technique really accurate enough to use it to verify the age of the universe?](#)". Scientific American. Retrieved 2007-05-11.
- [6] Vujnović, Vladis, *Astronomija 2*, Školska knjiga d.d., Zagreb, 1990.