

# Razvoj ranog svemira

---

**Pecimotika, Mario**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:890084>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-26**

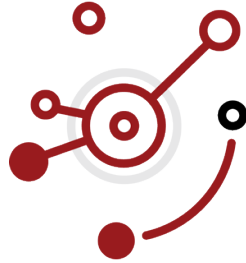


*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE J. J. STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**ODJEL ZA FIZIKU**



**MARIO PECIMOTIKA**

# **RAZVOJ RANOG SVEMIRA**

**Završni rad**

**Osijek, 2016.**

**SVEUČILIŠTE J. J. STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**ODJEL ZA FIZIKU**



**MARIO PECIMOTIKA**

# **RAZVOJ RANOG SVEMIRA**

**Završni rad**

predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku  
radi stjecanja zvanja prvostupnika fizike

**Osijek, 2016.**

Ovaj završni rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Branka Vukovića i dr. sc. Maje Varga Pajtler u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

# RAZVOJ RANOG SVEMIRA

Mario Pecimotika

Fizika ranog svemira nalazi se na granici astronomije i filozofije s obzirom da ne postoji potpuna teorija koja ujedinjuje sve fundamentalne sile prirode u trenutku stvaranja. Osim toga, ne postoji mogućnost povezivanja promatrane fizike ranog svemira s trenutnim fizikalnim teorijama (tj. nije moguće izgraditi drugi svemir).

Većinu događaja u evoluciji svemira nakon vremena Planckove epohe (oko  $10^{-43}$  sekundi nakon Velikog praska) današnja fizika može objasniti. Međutim, događaji prije tog trenutno su nedefinirani, a posebice ne razumijemo uzrok Velikog praska. U najboljem slučaju, možemo naše napore usredotočiti na ispitivanje i definiranje onoga što ne razumijemo u potpunosti.

(26 stranica, 8 slika)

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku**

**Ključne riječi:** galaksija / planet / svemir / Veliki prasak / zvijezda

**Mentor:** izv. prof. dr. sc. Branko Vuković

**Komentor:** dr. sc. Maja Varga Pajtler

**Ocjenjivači:** izv. prof. dr. sc. Branko Vuković

**Rad prihvaćen:** 15. rujna 2016.

# THE EVOLUTION OF THE EARLY UNIVERSE

**Mario Pecimotika**

Physics of the early Universe is at the boundary of astronomy and philosophy since there is no a complete theory that unifies all the fundamental forces at the begining. Furthermore, there is no way of joining observation of early Universe physics to current theories in physics (i.e. it's not possible to build another Universe)

Our physics can explain most of the evolution of the Universe after the Planck time (approximately  $10^{-43}$  seconds after the Big Bang). Though, events before this time are still undefined and, in particular, we do not understand the origin of the Big Ban. At best, we can focus our efforts on examining and defining what we do not fully understnd.

(26 pages, 8 figures)

**Thesis deposited in Department of Physics library**

**Keywords:** the Big Bang / galaxy / planet / star / universe

**Supervisor:** Branko Vuković, Ph.D., Associate Professor

**Co-Supervisor:** Maja Varga Pajtler, Ph.D., Senior Assistant

**Reviewers:** Branko Vuković, Ph.D., Associate Professor

**Thesis accepted:** September 15<sup>th</sup>, 2016

# Zahvale

*"Keep your dreams alive. Understand to achieve anything requires faith and belief in yourself, vision, hard work, determination, and dedication. Remember all things are possible for those who believe."* - Devers, G.

Zahvaljujem se svojim roditeljima bez kojih sve ovo ne bi bilo moguće, na njihovoj bezuvjetnoj ljubavi i podršci - majci, na požrtvovnosti i savjetima te ocu, na svim odricanjima i strpljenju.

Veliko hvala mojim mentorima, izv. prof. dr. sc. Branku Vukoviću i dr. sc. Maji Varga Pajtler na pruženom znanju, savjetima i danim prilikama da se iskažem i izrazim.

I naposljetku, hvala mojem šarmantnom bratu na strpljenu kada se nismo mogli družiti zbog učenja te mojoj izvanrednoj sestri na brizi kad bi bilo teško ...

# Sadržaj

Uvod	1
<b>1 KRONOLOŠKI RAZVOJ SVEMIRA</b>	<b>3</b>
1.1 Vrlo rani svemir . . . . .	3
1.1.1 Planckova epoha . . . . .	3
1.1.2 Epoha velikog ujedinjenja . . . . .	4
1.1.3 Epoha inflacije . . . . .	4
1.1.4 Elektroslabi epoha . . . . .	4
1.2 Rani svemir . . . . .	5
1.2.1 Slom elektroslabi simetrije i epoha kvarkova . . . . .	5
1.2.2 Epoha hadrona . . . . .	5
1.2.3 Epoha leptona . . . . .	6
1.2.4 Epoha fotona . . . . .	6
1.2.5 Nukleosinteza . . . . .	6
1.2.6 Dominacija materije . . . . .	6
1.2.7 Rekombinacija . . . . .	7
<b>2 POSTANAK GALAKSIJA</b>	<b>9</b>
<b>3 POSTANAK ZVIJEZDA</b>	<b>11</b>
3.1 Prva faza razvoja zvijezda . . . . .	11
3.2 Druga faza razvoja zvijezda . . . . .	15
3.3 Treća faza razvoja zvijezda . . . . .	18
<b>4 POSTANAK PLANETA</b>	<b>20</b>
4.1 Nebularna hipoteza . . . . .	20
4.2 Hipoteza zvjezdane katastrofe . . . . .	21
4.3 Obnova nebularne hipoteze . . . . .	22
4.4 Svrha teorije o nastanku sustava planeta . . . . .	22
<b>Zaključak</b>	<b>24</b>
<b>Bibliografija</b>	<b>25</b>
<b>Životopis</b>	<b>26</b>



# Uvod

Naše trenutno razumijevanje evolucije svemira temelji se na Freidmann - Robertson - Walker kozmološkom modelu (poznatiji kao Teorija velikog praska).<sup>[1]</sup> Ovaj, napose poznat i uspješan model postao je standard kozmologije. Prije otprilike četrnaest milijardi godina, na samom početku vremena, sve što znamo i o čemu pišemo - prostor, materija i energija bili su veličine glavice pribadače. Uobičajeno je, ali ne i pravilo, razvoj svemira podijeliti u tri veće faze.

U prvoj je fazi vrlo rani svemir bio toliko vruć da u početku nije bilo čestica, čak ni onih koje bi mogle postojati možda samo na trenutak. Prema znanstvenim teorijama, četiri osnovne sile bile su ujedinjene u jednu. Kako se svemir širio i hladio, gravitacija se odvojila od ostalih sila. Ubrzo zatim, razdvojile su se jedna od druge jaka nuklearna sila i elektroslaba sila. Taj događaj pratilo je ogromno oslobađanje uskladištene energije, što je dovelo do brzog povećanja veličine svemira za faktor  $10^{50}$ . Brzo širenje poznato kao razdoblje inflacije, raspršilo je te ujednačilo materiju i energiju, pri čemu su varijacije gustoće u različitim dijelovima svemira postajale sve manje i manje. Svemir je bio dovoljno vruć da fotoni spontano pretvore svoju energiju u parove čestica materije i antimaterije, koje su se odmah nakon nastajanja međusobno poništavale vraćajući se u energijski oblik fotona. Međutim, u jednom trenutku narušena je simetrija između materije i antimaterije, što je dovelo do neznatne razlike istih. Iako neznatna, ova asimetričnost imala je ključnu važnost za kasniji razvoj svemira: na svakih milijardu čestica antimaterije nastala je milijarda plus jedna čestica materije.

U drugoj fazi razvoj svemira kako se kvark-gluonska plazma<sup>1</sup>, tj. svemir dalje hladio, elektroslaba sila rastočila se u elektromagnetsku silu i slabu nuklearnu silu čime

---

<sup>1</sup>Kvark-gluonska plazma (QGP) ili juha kvarkova je stanje tvari u kvantnoj kromodinamici, za koje se pretpostavlja da postoji na iznimno visokoj temperaturi, gustoći ili oboje. Pretpostavka je da se ovo stanje sastoji od asimptotski slobodnih kvarkova i gluona, koji su jedne od osnovnih građevnih čestica materije.

je bio upotpunjen današnji skup četiri zasebne sile prirode. Kako je energija i dalje opadala, iz raspoloživih fotona više se nisu mogli stvarati parovi čestica i antičestica. Svi preostali parovi čestica materije i antimaterije brzo su se međusobno poništili pa je u svemiru preostala samo po jedna čestica materije na svakih milijardu fotona. Da nije došlo do ove asimetričnosti između materije i antimaterije, šireći svemir zauvijek bi se sastojao samo od svjetlosti.

Treća faza razvoja svemira počela je nakon kratkog mračnog doba u svemiru u kojemu su postojale temeljne čestice i sile koje danas znamo i svjedočile nastanku stabilnih struktura u velikim razmjerima, kao što su prve zvijezde, galaksije, nakupine galaksija, superskupine i drugo. U unutrašnjosti tih zvijezda, s masom približno deset puta većom od Sunčeve, postojali su dovoljno visoki tlakovi i temperature da procesom nukleosinteze nastanu elementi teži od vodika, računajući tu i one od kojih su izgrađeni planeti i život na njima. Tu fazu stvaranja vidimo i danas.

Ovaj završni rad daje pregled kronološkog razvoja svemira i najranijih svemirskih struktura; detaljniji tretman ove teme dali su E. W. Kolb i M. S. Turner (1990.).

## Poglavlje 1

# KRONOLOŠKI RAZVOJ SVEMIRA

### 1.1 Vrlo rani svemir

Sve ideje koje se odnose na vrlo rani svemir su nagađanja i pretpostavke budući da još uvijek nismo u mogućnosti izvesti eksperiment kojim bismo dali uvid u ponašanje materije na razini energije koja je prevladavala tijekom tog razdoblja.<sup>[2]</sup> Neki od predloženih scenarija međusobno se razlikuju, dok se drugi poklapaju („Hartle-Hawking početno stanje”, „Kozmologija plinskih struna”, ...)

#### 1.1.1 Planckova epoha

Planckova epoha je razdoblje u tradicionalnoj (neinflacijskoj) kozmologiji, u kojem je temperatura bila toliko visoka da su četiri temeljne sile - elektromagnetska, gravitacijska, slaba nuklearna i jaka nuklearna, bile jedna sila. Razdoblje traje od Velikog praska do  $10^{-43}$  s nakon njega. Malo se zna o fizici na tim temperaturama; različite hipoteze predlažu različite scenarije. Tradicionalna kozmologija Velikog praska predviđa gravitacijsku jedinstvenost (singularitet) prije tog vremena. Gravitacijski singularitet je centralni dio crne rupe u kojem se svi atomi i sve čestice, koji se nađu u njemu, raščlanjuju i dijele, isčezavaju, ili prelaze u neki drugi oblik energije. Još uvijek se ne može dati postojano objašnjenje koje bi nam moglo reći što se točno od navedenog događa. Ipak, prema Einsteinovoj teoriji, uništenje energije nije moguće. Mogućnost uništenja energije osporila bi sve trenutne teorije o prostorvremenu. Ono

što se točno zna jest da u singularnosti ne postoji nijedna dimenzija: niti visina, niti širina, niti dužina, niti vrijeme. Postoji li neka nova, druga dimenzija, još uvijek se ne zna.<sup>[14]</sup>

### 1.1.2 Epoha velikog ujedinjenja

Kako se svemir širio i hladio, postigao je temperaturu od oko  $10^{27}$  K pri kojoj su se sile odvojile jedna od druge. Tijekom epohe velikog ujedinjenja, fizičke karakteristike poput mase i naboja bile su beznačajne. Krajem epohe temperatura je pala na razinu na kojoj je stvaranje X i Y bozona bilo moguće, a jedan dio istih se raspao. Moguće da je neki dio ovog procesa raspada slomio očuvanje broja bariona, što je dovelo do malog viška materije nad antimaterijom. Epoha velikog ujedinjenja započinje kad se gravitacija odvoji od ostalih prirodnih sila ( $10^{-43}$  s Velikog praska), a završava odvajanjem jake od elektroslabe sile ( $10^{-36}$  s nakon Velikog praska).

### 1.1.3 Epoha inflacije

Kozmička inflacija bila je era ubrzanog širenja svemira koju je (prema pretpostavkama) uzrokovalo polje nazvano inflaton<sup>1</sup>, svojstava sličnih Higgsovom polju i tamnoj energiji. Trajanje ove epohe nije poznato, ali se pretpostavlja da je počela  $10^{-32}$  s nakon Velikog praska. Dok je usporavanje širenja uzrokovalo promjene u homogenosti svemira (čineći ga kaotičnijim), ubrzavanje širenja učinilo je svemir homogenijim. Taj dovoljno dug period inflacije mogao bi objasniti visoki stupanj homogenosti koji danas promatramo u različitim razmjerima. Raspadom inflaton polja u uobičajene čestice (proces zvan podgrijavanje) završava epoha inflacije.

### 1.1.4 Elektroslaba epoha

Neki kozmolozi smještaju elektroslabu epohu na početak inflacijske epohe, oko  $10^{-36}$  s nakon Velikog praska. Drugi je smještaju na približno  $10^{-32}$  sekundi nakon Velikog praska, kada je potencijalna energija inflaton polja uzrokovala punjenje svemira gustom, toplom kvark-gluonskom plazmom. Interakcija čestica u ovoj fazi bila je dovoljno energična da bi stvorila veliki broj egzotičnih čestica, uključujući W i Z

---

<sup>1</sup>Inflaton je hipotetsko skalarno polje odgovorno za kozmičke inflacije u vrlo ranom svemiru.<sup>[13]</sup>

bozone i Higgsov bozon. Kako se svemir hladio i širio, interakcija među česticama bivala je sve manja te se u starosti svemira od  $10^{-12}$  s W i Z bozoni nisu više stvarali.

## 1.2 Rani svemir

### 1.2.1 Slom elektroslabe simetrije i epoha kvarkova

Kada je  $10^{-12}$  s nakon Velikog praska temperatura svemira pala ispod određene energijske razine, vjeruje se da je Higgsovo polje spontano steklo vakuum i razbilo elektroslabu simetriju. Postoje dvije posljedice toga: elektroslaba sila podijelila se na slabu i elektromagnetsku silu te preko Higgsovog mehanizma<sup>2</sup> sve elementarne čestice reagiraju s Higgsovim poljem i postaju masivnije. Na kraju ove epohe četiri temeljne sile zauzele su današnji oblik, a temeljne čestice dobile masu. S druge strane, tadašnja temperatura nije bila dovoljno niska da bi omogućila vezanje kvarkova i formaciju hadrona. Epoha je završila  $10^{-6}$  s nakon Velikog praska.

### 1.2.2 Epoha hadrona

Juha kvarkova od koje je bilo sastavljen svemir hladila se sve dok nije omogućila stvaranje hadrona, uključujući i bariona (kao protoni i neutroni). Jednu sekundu nakon Velikog praska neutrini su se odvojili i počeli slobodno putovati svemirom. Ta kozmička pozadina neutrina (za koju je malo vjerojatno da će biti opažena zbog vrlo male energije neutrina) analogna je kozmičkoj mikrovalnoj pozadini koja je bila emitirana mnogo kasnije. Kako god, postoje jaki, ali neizravni dokazi da kozmička pozadina neutrina postoji, bilo to u predviđanjima nukleosinteze Velikog praska za vrijeme koje nastaje izobilje helija ili anizotropije u kozmičkoj mikrovalnoj pozadini. Ova faza je trajala između  $10^{-6}$  s i 1 s nakon Velikog praska.

---

<sup>2</sup>Higgsov je mehanizam u fizici čestica glavni mehanizam koji objašnjava svojstva mase baždarnih bozona. U Standardnom modelu, pomoću Higgsovog mehanizma, trima se slabima bozonima povećava masa interakcijom s Higgsovim poljem koje prožima cijeli prostor. Normalni bozoni nemaju mase.

### 1.2.3 Epoha leptona

Većina hadrona i anti-hadrona poništili su jedni druge na kraju epohe hadrona ostavivši leptone i anti-leptone, koji su dominirali masom svemira. Približno 10 s nakon Velikog praska temperatura svemira pala je do točke na kojoj se novi lepton - anti-lepton parovi više nisu stvarali i većina leptona i anti-leptona bili su uništeni reakcijama anihilacije, zbog čega je ostao tek mali broj leptona. Faza je trajala između 1 s i 10 s nakon Velikog praska.

### 1.2.4 Epoha fotona

Nakon što se većina leptona i anti-leptona poništila, područjem svemira dominirali su fotoni. Ti fotoni još uvijek često međusobno reagiraju s nabijenim protonima, elektronima i (eventualno) jezgrama, što će se nastaviti i idućih 380 tisuća godina.

### 1.2.5 Nukleosinteza

Tijekom epohe fotona (koja je trajala između 3 min i 20 min nakon Velikog praska) temperatura svemira pala je do točke na kojoj je bilo omogućeno formiranje atomske jezgre. Protoni (vodikovi ioni) i neutroni počeli su tvoriti atomske jezgre u procesu nuklearne fuzije. Slobodni neutroni i protoni su formirali deuterij (deuterij se brzo stapa u  $^4\text{He}$ ). Nukleosinteza je trajala samo oko sedamnaest minuta jer su temperatura i gustoća svemira pali na temperaturu pri kojoj se nuklearna fuzija nije mogla nastaviti. Ipak, do tog trenutka svi neutroni već su bili uključeni u jezgre helija.

### 1.2.6 Dominacija materije

U razdoblju dominacije materije gustoća nerelativističke tvari (atomske jezgre) i relativističkog zračenja (fotoni) bila je jednaka. Prema  $\Lambda\text{CDM}^3$  teoriji, u toj fazi, hladna tamna tvar je dominirala uzrokujući povećanje sitnih nehomogenosti svemira koje su bile posljedica inflacijskog razdoblja, čineći guste regije guščima, a rjeđe regije razrjeđenijima. Međutim, zbog neuklapanja sadašnjih teorija o prirodi tamne tvari,

---

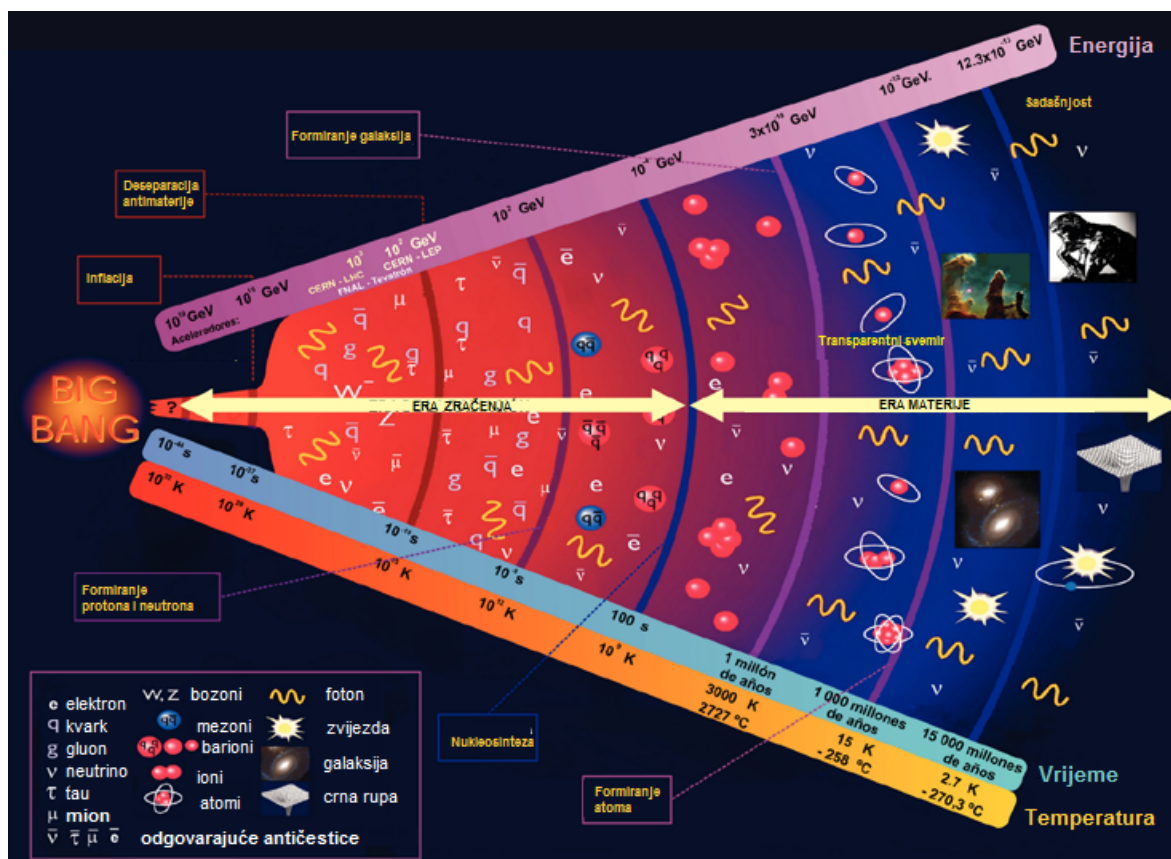
<sup>3</sup> $\Lambda\text{CDM}$  (Lambda hladna tamna materija) jest parametrizacija kozmološkog modela Velikog praska u kojem svemir sadrži kozmološku konstantu, označenu s lambda (grčki  $\Lambda$ ), povezanu s tamnom energijom i hladnom tamnom tvari.

još uvijek ne postoji znanje od podrijetla materije u ranom vremenu. Za ovu fazu pretpostavlja se da je trajala vrlo kratko kad je svemir bio star svega 70 000 godina.

### 1.2.7 Rekombinacija

Atomi vodika i helija počeli su se formirati kad je gustoća svemira pala. Oko 377 000 godina nakon Velikog praska, atomi vodika i helija bili su ionizirani, tj. nijedan elektron nije bio pridružen jezgri (koja je sadržavala pozitivno nabijene protone). Kako se svemir hladio, ioni su zarobljavali elektrone, formirajući električki neutralne atome. Taj proces, koji je trajao vrlo kratko, nazvan je rekombinacijom. Na kraju rekombinacije većina protona je bila povezana u neutralnim atomima. Dakle, srednji slobodni put fotona je postao efektivno beskonačan i fotoni su mogli slobodno putovati (Thomsonovo raspršenje) - svemir je postao po prvi puta transparentan za vidljivu svjetlost. Taj događaj obično se naziva razdvajanje. Fotoni koji su bili prisutni u trenutku razdvajanja isti su fotoni koje vidimo u kozmičkom mikrovalnom pozadinskom zračenju.

Na sljedećoj stranici grafički je prikazan razvoj svemira od Velikog praska do danas (Slika 1.1).



Slika 1.1: Slika sažima gotovo 14 milijardi godina dugu povijest našeg svemira, a prikazuje glavne događaje koji su pratili razvoj svemira - od početka, kada su sva njegova svojstva bila gotovo identična pa sve do danas, kada poznajemo ogroman broj različitih kozmičkih struktura.<sup>[5]</sup>



## Poglavlje 2

# POSTANAK GALAKSIJA

Galaksija je velika skupina zvijezda koja broji od više milijuna do mnogo stotina milijarda članova. Na okupu se drži uzajamnim gravitacijskim silama, a obično sadrži značajne količine plina i prašine.



Slika 2.1: Mliječna staza je prečkasta spiralna galaksija u kojoj se nalazi između 200 i 400 milijardi zvijezda i velika količina međuzvezdane materije.<sup>[7]</sup>

Oko 280 milijuna godina poslije nastanka svemira započinje formiranje prvih galaksija. Većina teorijskih predviđanja pokazivala su da se galaksija formirala iz oblaka plina vrlo velikih dimenzija, promjera od nekoliko stotina tisuća svjetlosnih godina. U početku se taj plin polagano vrtio te se zgušnjavao, ali kako se zgušnjavao, brzina rotacije postupno se povećavala i uzrokovala spljošten oblak. Brzina rotacije povećala se u tom opsegu da buduće sažimanje nije moglo ići prema osi rotacije nego samo paralelno sa osi rotacije.

Promatramo li izgled današnjih galaksija, on će nam potvrditi gornje teorijsko

predviđanje: gledamo li neku galaksiju sa strane, vidjet ćemo centralno zadebljanje. To je mjesto galaksije gdje iščezava njezina pločasta struktura, a ta izbočina ima, u slučaju naše galaksije (Slika 2.1), debljinu od oko 10 000 svjetlosnih godina. Sunce se nalazi oko 30 000 svjetlosnih godina od centra galaksije i oko njega rotira brzinom od oko 230 km/s (period jednog okreta je dakle 220 milijuna godina). Gledamo li pak galaksiju srijeda, vidjet ćemo oblik ploče iz koje probijaju veliki spiralni krakovi pa nam izgleda kao da se galaksija savija u klupko.

Tijekom ovog prvog perioda, perioda zgušnjavanja i nastajanja galaksija, formirao se samo mali broj zvijezda. One su se počele masovno formirati kasnije, nakon što je velika masa plina stvorila opisani pločasti oblik galaksije.

Nakon milijarde godina starosti svemira, galaksije koje su prvobitno imale plosnati oblik počele su se dijelom pretvarati u eliptične galaksije. U razdoblju od 2 do 6 milijardi godina nastaju Mliječna staza i mnoge druge galaksije.

Dakle, nekoliko stotina milijuna godina nakon Velikog praska u svemiru su se formirali veliki filament materije koji su se zatim razdvojili u pojedinačne proto-galaksije – goleme oblake vodika i helija od kojih će poslije milijardu godina nastati galaksije. Budući da su sve galaksije nastale u isto vrijeme, današnje razlike među galaksijama morale su nastati njihovom naknadnom evolucijom. Važnu ulogu u daljnjem razvoju i određivanju izgleda galaksije imali su i sudari među galaksijama. Tako su od manjih galaksija nastajale veće, od spiralnih galaksija koje su se sudarale nastajale su eliptične.

## Poglavlje 3

# POSTANAK ZVIJEZDA

Zvijezdom nazivamo bilo koje masivno plinovito tijelo u svemiru. Zvijezde se vide kao svjetleće točkice (crvene, žute, bijele) na noćnom nebu, koje bljeskaju zbog efekta zemljine atmosfere i njihove udaljenosti od nas. Zvijezde u nastajanju nazivaju se protozvijezde. Nastanak protozvijezda i protosustava obično potiče supernova ili neki drugi siloviti svemirski događaj u blizini koji proizvede dovoljno energije da bi udarni valovi koji pritom nastanu komprimirali međuzvjezdanu prašinu u dovoljnoj mjeri da nastanu gravitacijske sile, koje potom privuku okolnu materiju u takav sustav te se on onda nastavi komprimirati i formirati u pravi planetarni sustav. Ovo nebesko tijelo je oblak, tj. nakupina međuzvjezdane prašine, koja u središtu ima gušći i veliki disk prašine koji se vrti oko protozvijezde. Cijela formacija je ustvari svojevrsna proto-planetarna maglica. Protozvijezda još nije postigla dovoljnu gustoću materije od koje je sastavljena da bi došlo do nuklearnih reakcija. Temperatura u središtu protozvijezda za vrijeme njihova sažimanja stalno raste. Kada dostigne golemu temperaturu od 10 milijuna K, započinju nuklearne reakcije.

### 3.1 Prva faza razvoja zvijezda

Nakon Velikog praska materija se, prema inerciji, počela širiti i hladiti. Međutim mjestimično se nasumice zgušnjavala. Hlađenje je dovelo do nasumičnih zgušnjavanja tvari. Pod utjecajem gravitacije takve su se gušće nakupine dalje zgušnjavale, formirajući sve veće oblike iz kojih su se rađala nebeska tijela. Zbog gravitacijskog sažimanja temperatura u središnjem dijelu nebeskog tijela je rasla te kad je dosegla  $10^7$  K, počela je nuklearna fuzija jezgara vodika u helij uz oslobađanje energije. Općenito, kod ter-

monuklearne fuzije, na jako visokim temperaturama, lakše jezgre spajaju se u teže uz oslobađanje energije. Ukupna masa čestica prije fuzije ( $m_1$ ) veća je od mase čestice koja je nastala fuzijom ( $m_2$ ). Zbog defekta mase:

$$\Delta m = m_1 - m_2, \quad (3.1)$$

oslobađa se energija u iznosu:

$$\Delta E = c^2 \cdot \Delta m, \quad (3.2)$$

gdje je  $c$  brzina svjetlosti ( $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ).

Taj proces možemo prikazati kao proton – proton niz ili p-p niz, odnosno reakciju nuklearne fuzije, kojom zvijezde pretvaraju vodik u helij. p-p niz može se pojaviti samo ako je temperatura (kinetička energija) protona dovoljno velika da prevlada Coulombovu barijeru, odnosno svlada elektrostatske sile između istih naboja protona. Prvi korak uključuje nuklearnu fuziju dvije jezgre vodika  ${}^1\text{H}$  (proton) u  ${}^2\text{H}$  (deuterij), čime se oslobađa pozitron i neutrino te se jedan proton mijenja u neutron:



Prvi se korak odvija izuzetno sporo zato što protoni trebaju proći efekt tuneliranja da bi savladali Coulombovu barijeru<sup>1</sup>. Pozitron se trenutno poništava s elektronom (čestica – antičestica) i višak mase u obliku energije nose dva fotona:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \quad (3.4)$$

Nakon toga, deuterij koji se dobio u prvom koraku, spaja se s drugim protonom (jezgra vodika) da bi se dobio lagani izotop  ${}^3\text{He}$ :

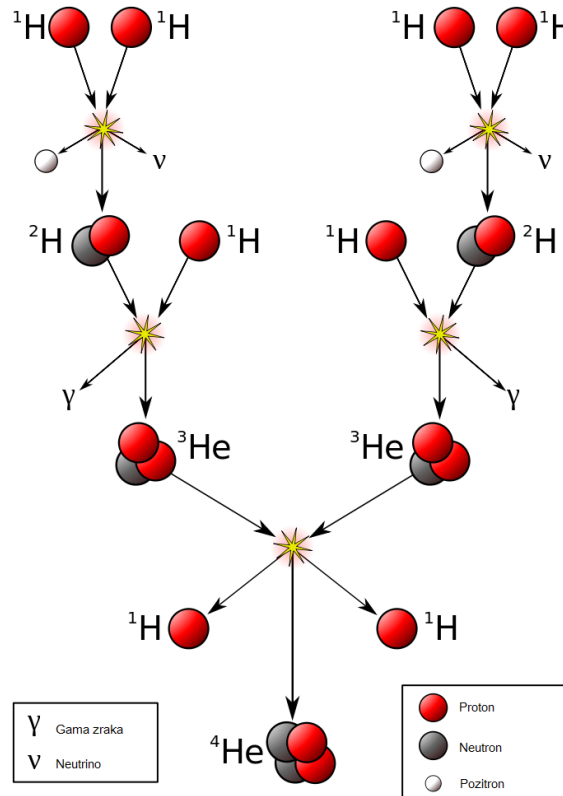


Nakon toga moguće su tri verzije puta kojim se dobiva  ${}^4\text{He}$ .<sup>[10]</sup> Kod prvog puta ili p-p I niza (Slika 4.1),  ${}^4\text{He}$  nastaje spajanjem dviju jezgara  ${}^3\text{He}$  (jednadžba (3.6)), kod drugog i trećeg puta ili p-p II niza (jednadžbe (3.7) do (3.9)) i p-p III niza

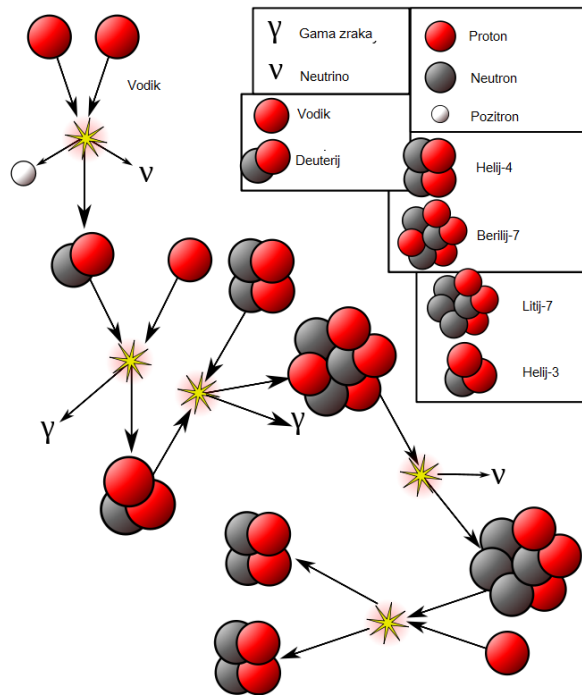
---

<sup>1</sup>Coulombova barijera, koja je nazvana prema Coulombovom zakonu, energijska je barijera zbog elektrostatskog međudjelovanja između dvije jezgre, koje one trebaju savladati, da bi se ostvarila nuklearna fuzija ili spajanje tih dviju jezgri.<sup>[3]</sup>

(jednadžbe (3.10) do (3.13)), spaja se jezgra  ${}^3\text{He}$  s već stvorenom jezgrom  ${}^4\text{He}$  da nastaje berilij (Slike 3.1 i 3.2). Postoji i četvrti, izuzetno rijedak put - p-p IV niz.

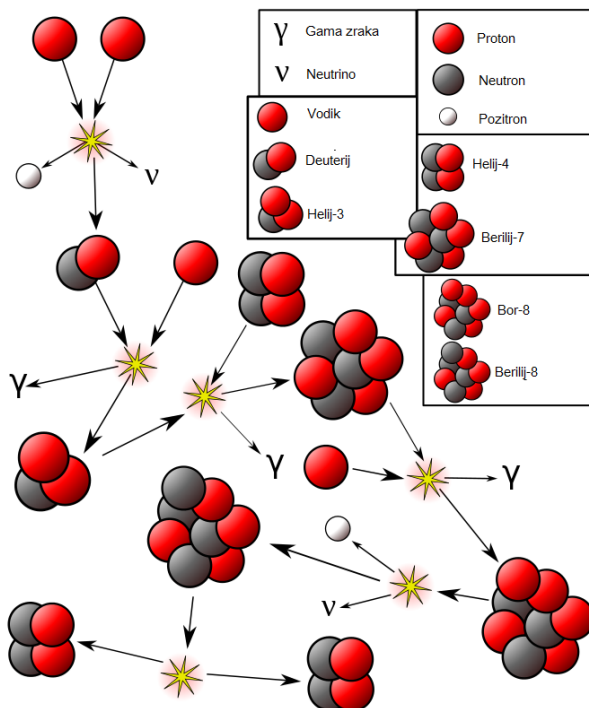


Slika 3.1: p-p I niz daje 26,7 MeV energije i prevladava na temperaturama između 10 i 14 milijuna kelvina. Ispod 10 000 000 K, p-p I niz stvara izuzetno malo energije.<sup>[9]</sup>



Slika 3.2: p-p II niz prevladava kod temperature od 14 000 000 do 23 000 000 K. 90 % neutrina se dobiva u reakciji (3.8) i nosi energiju 0,861 MeV, dok preostalih 10 % stvara 0,383 MeV. <sup>[9]</sup>





Slika 3.3: p-p III niz prevladava kod temperature iznad 23 000 000 K. Iako ovaj put nije znatno zastupljen (samo 0,11 %), stvara visokoenergijske neutrine, do 14,06 MeV.<sup>[9]</sup>

p-p IV niz je teorijski predviđen, ali nikad nije opažen zbog svoje rijetkosti. U toj reakciji  ${}^3\text{He}$  reagira direktno s protonom da bi se dobilo  ${}^4\text{He}$  i neutrino s još većom energijom, do 18,8 MeV.



## 3.2 Druga faza razvoja zvijezda

Budući da se u središnjem dijelu zvijezde iscrpi vodik pretvorivši se u helij, nastupa druga faza. U središnjem dijelu zvijezde više se ne stvara nuklearna energija pa se zvijezda dalje gravitacijski steže, pri čemu raste temperatura. Kad temperatura u središnjem dijelu zvijezde dovoljno poraste, počinje fuzija triju jezgara helija u jezgru ugljika, uz emisiju gama zračenja. Zatim nastaje fuzija ugljika i helija u kisik itd. Tada

se oko te središnje kugle, u kojoj se zbiva fuzija jezgara helija, nalazi vanjska ljuska u kojoj nije iscrpljen vodik pa u njemu i dalje teče fuzija vodika u helij.

Ova faza je niz ugljik – dušik – kisik ili CNO niz , također reakcija nuklearne fuzije kojom zvijezde pretvaraju vodik u helij. Za razliku od p-p niza, kod CNO niza potreban je katalizator. Teorija tvrdi da su to procesi koji prevladavaju kod zvijezda koji su veće barem za 30% od našeg Sunca. Razlika je u početnim temperaturama, tako za početak p-p niza treba temperatura od 4 000 000 K, dok za CNO niz početna temperatura treba biti oko 13 000 000 K. Kod CNO niza izlazna energija puno brže raste s povećanjem temperature i kod temperature 17 000 000 K taj proces prevladava u većim zvijezdama od Sunca. Sunce ima temperaturu u jezgri oko 15 700 000 K i samo 1,7 % helija se dobije CNO nizom.

Kod CNO niza, četiri protona (jezgre vodika) se spajaju koristeći izotope ugljika, dušika i kisika, stvaraju  $\alpha$ -čestice, dva pozitrona i dva neutrina (Slika 3.4). Pozitroni će odmah nestati reagirajući sa elektronima, oslobađajući energiju u obliku gama-čestica. Neutrini koji pobjegnu odmah odnose i dio energije. Izotopi ugljika, dušika i kisika služe kao katalizatori za veliki broj procesa.

Pri prijelazu iz p-p niza u CNO niz, zvijezda se uvelike širi. To će se za nekoliko milijardi godina dogoditi sa Suncem. Ono će pritom proširiti svoj volumen do nezamislivih veličina.

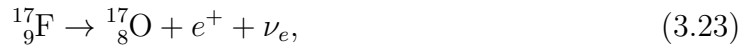
CNO I ciklus (jednadžbe (3.15) do (3.20)) je daleko najvažniji među svim ciklusima jer uključuje molekule s manjim Coulombovim barijerama, nego bilo koji drugi ciklus, zbog čega je njegov nastanak vjerojatniji.<sup>[11]</sup>



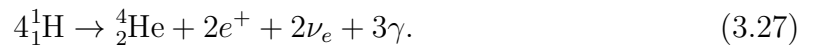


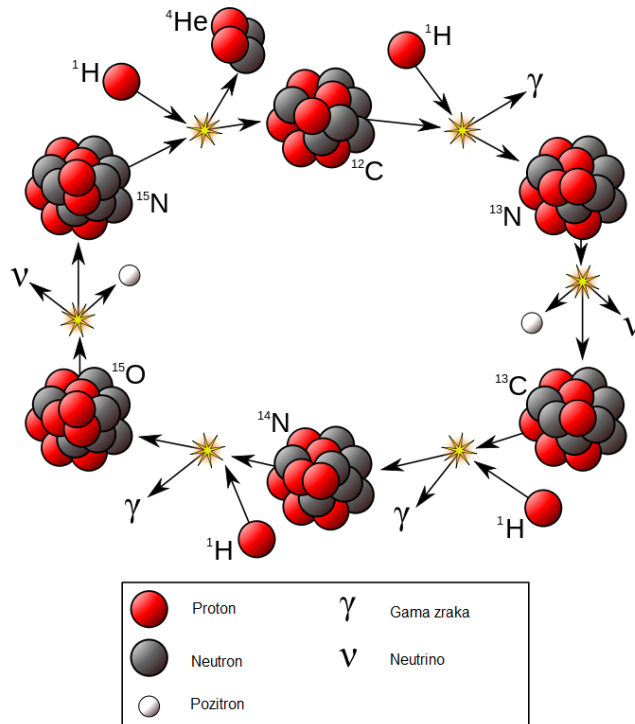


CNO II (jednadžbe (3.21) do (3.26)) niz je malo vjerojatan niz reakcija koji se događa u Sunčevoj jezgri (samo oko 0,04 % ukupnog vremena trajanja reakcije) i konačna reakcija ne stvara  ${}^{12}\text{C}$  i  $\alpha$ -čestice, već se stvara  ${}^{15}\text{O}$  i foton<sup>[12]</sup>:



Kao što su ugljik, dušik i kisik uključeni u glavni put, tako postoji i fluor koji nije sastavni element zvijezda, ali služi kao katalizator. Treba primijetiti da svi ciklusi daju isti rezultat, unatoč tome što se u CNO II nizu osim ugljika, dušika i kisika, koriste i drugi kemijski elementi kao katalizatori:





Slika 3.4: Kod CNO niza, četiri protona (jezgre vodika) se spajaju, koristeći izotope ugljika, dušika i kisika, stvaraju  $\alpha$ -čestice, dva pozitrona i dva neutrina.<sup>[8]</sup>

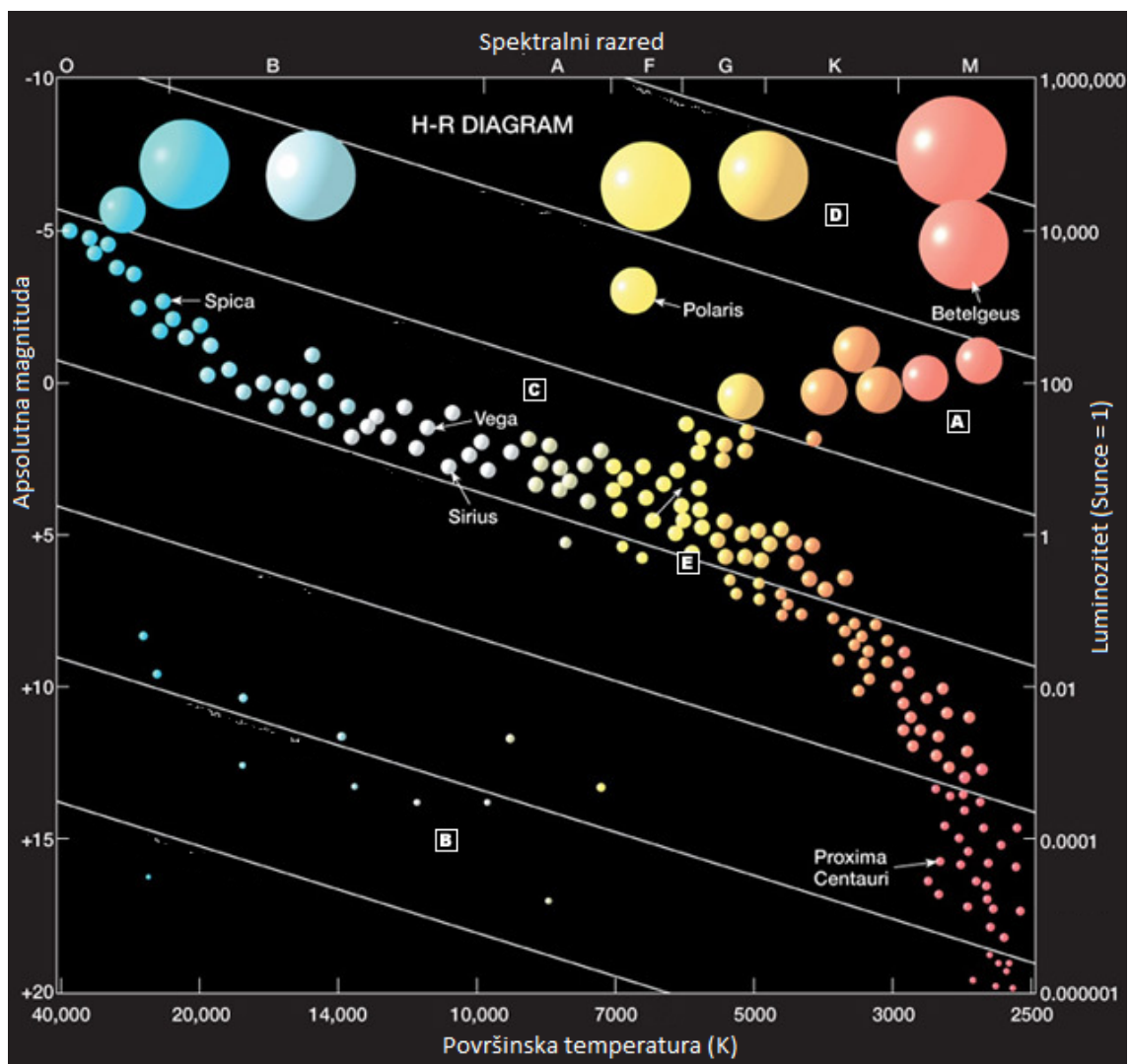
### 3.3 Treća faza razvoja zvijezda

Kada se u središnjem dijelu zvijezde potroši sav ugljik, središnji se dio ponovno gravitacijski steže i temperatura raste. Kada temperatura dovoljno poraste, nastupa treća faza. Daljnjom fuzijom u središnjem dijelu nastaju magnezij, silicij i teži elementi. Oko središnje kugle nalazi se prva ljuska u kojoj daljnom fuzijom helija nastaje ugljik, pa sljedeća ljuska u kojoj fuzijom vodika nastaje helij. U idućim fazama nastaje fuzija sve težih i težih jezgara, sve dok u središnjem dijelu zvijezde ne nastane željezo.

Kada jezgra dostigne masu 60 masa Sunca, više se ne odvija fuzija jer je jezgra energetske nepovoljna za daljnju fuziju. Tada se život zvijezde približava njezinom kraju. Pritom se neke zvijezde skupljaju do tolike mjere da doslovce postanu željezni žar koji se hladi. Međutim, ako je zvijezda dovoljno masivna, ona će se iznenada raširiti i za vrlo kratko vrijeme će proizvesti više energije nego što će naše Sunce proizvesti za vrijeme cijelog svog života. Tu vrlo jaku, blistavu reakciju nazivamo supernovom.

Pritom može doći do fuzije u kemijske elemente teže od željeza. Elementi kao što su zlato, srebro i olovo koji su pronađeni na Zemlji ostaci su eksplozija supernova. Izvori željeza, kojeg ima svuda na Zemlji, nastali su direktno iz reakcije supernova i iz mrtvih zvijezda koje su u prošlosti udarale u Zemlju.

Evoluciju zvijezde vješto nam prikazuje Hertzsprung-Russellov dijagram (Slika 3.5). Otkriće dijagram dovelo je do velikog napretka u razumijevanju evolucije zvijezda, a služi za definiranje različitih tipova zvijezda i teorijsko predviđanje evolucije zvijezda pomoću računala i promatranja istih.



Slika 3.5: Hertzsprung-Russellov dijagram (poznat pod kraticama HRD ili HR dijagram) je dijagram koji pokazuje odnose između apsolutnog sjaja, boje i temperature zvijezda.<sup>[6]</sup>

## Poglavlje 4

# POSTANAK PLANETA

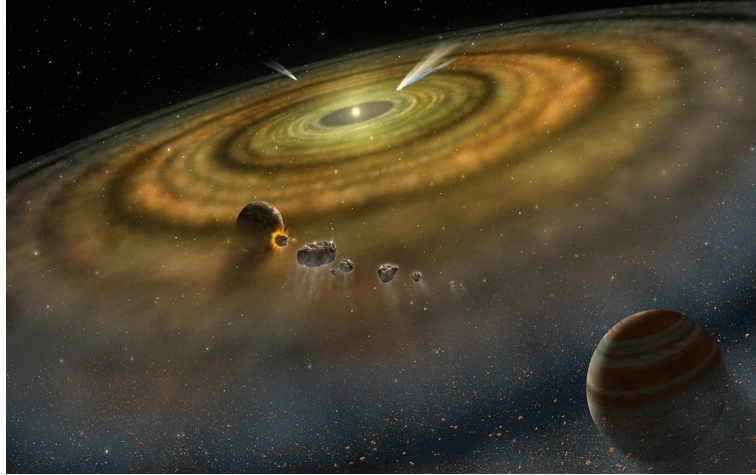
Planet je veće tijelo koje kruži oko neke zvijezde, a samo nije zvijezda. Do početka 1990.-ih bilo je poznato devet planeta, svi u Sunčevom sustavu. Danas se u Sunčevom sustavu broji osam planeta, dok je Pluton svrstan u kategoriju planetoida. Dakle, Sunčevu sustavu pripada osam planeta, sedamdesetak planetskih satelita, dvjesto kratkoperiodičkih kometa, više desetaka tisuća asteroida, milijarda dugoperiodičkih kometa, trilijuni meteoroida tj. čestica prašine koja lebdi u planetskom području. Posljednjih godina utvrđeno je postojanje više desetaka ekstrasolarnih planetarnih sustava. Njihovo postojanje još uvijek čeka svoje objašnjenje, međutim, lako je zaključiti kako je nastanak planeta sasvim uobičajen događaj.

### 4.1 Nebularna hipoteza

Prvu znanstvenu hipotezu o postanku planeta dali su u drugoj polovici 18. stoljeća E. Kanta i P. Laplace. Nazvana je nebularnom hipotezom jer za izvor planetske tvari pretpostavlja nebulu (maglicu) - golemi, lebdeći oblak raspršene tvari u prostoru. Najveća odlika ove teorije jest što je nastanak Sunca kao zvijezde povezala s nastankom planeta, unatoč mnogim drugim manjkavostima. Upravo to suvremena znanost prihvaća kao ispravno.

Nebularnu hipotezu možemo ovako pojednostaviti: međuzvjezdani oblak se vrti, steže i poprima oblik diska ili ploče, takozvanog protoplanetarnog diska (Slika 4.1). Pri stezanju vrtnja se ubrzava. Najprije nastaje Sunce u središtu oblaka. Zbog sve brže vrtnje, vanjski dijelovi maglice više ne tlače na unutarne pa se od središta odvajaju niz prstenova, a svaki se prsten pak steže u vlastito središnje zgušnjavanje te tako

nastaje planet. Kako bi opravdala postojanje satelita, nebularna hipoteza zahtjeva da se i planetsko zgušnj enje razdvoji na prstenove od koji moraju nastaju sateliti. Upravo izgled Saturna i njegovih prstenova potvrđuje nebularnu hipotezu.



Slika 4.1: Protoplanetarni disk – Međuzvjezdani oblak prašine oblika diska ili ploče.<sup>[4]</sup>

Ipak, nebularna hipoteza nije mogla rastumačiti zašto se Sunce vrti mnogo sporije, no što bi trebalo. Ono bi se pak trebalo vrtjeti vrlo brzo, a planeti sporo obilaziti oko njega. Objašnjenje nastanka planetâ također nije uvjerljivo. Ostaje neodgovoreno i pitanje zašto i sateliti ne dobivaju vlastite satelite i tako u više stupnjeva.

## 4.2 Hipoteza zvjezdane katastrofe

Početak dvadesetog stoljeća nastaje hipoteza zvjezdane katastrofe. T. Chamberlin i F. Moulton obrađivali su ideju o sudaru Sunca s drugom zvijezdom, što je zatim preuzeo J. Jeans, s čijim se imenom ova hipoteza najčešće povezuje. Hipoteza zvjezdane katastrofe nalaže da su se Sunce i neka druga zvijezda međusobno okrznuli, pri čemu je zbog međusobne privlačne sile iz Sunca izvučen dio (plinoviti pramen) tvari koji se ohladio, a potom kondenzirao u mnogobrojna mala čvrsta tijela, takozvane planetezimali. Planetezimali su tijela veličine sitnijih stijena do tijela velikih poput današnjih asteroida. Njihovim srastanjem tijela rastu do veličine planetâ, čime se ujedno iscrpljuje oblak tvari iz koje nastaju.

Ova hipoteza uvodi razmatranje planetezimali kao hladne opeke od kojih nastaju čvrsta tijela, odnosno planeti. Međutim, teorija zvjezdane katastrofe imala

je više nedostataka, a najveći u polazištu - takvi su sudari, zbog nama nezamislivih dimenzija svemira, malo vjerojatni. Jasno je pri ovakvom razmišljanju da bi kroz deset milijardi godina u jednoj galaksiji nastao tek jedan planetarni sustav.

### 4.3 Obnova nebularne hipoteze

Važnu ulogu u oživljavanju nebularne hipoteze imao je O. Schmidt koji je smatrao da je tvar od koje su nastali planeti bila u izravnom dodiru sa Suncem pri njegovu prolazu kroz galaksije. Tim povratom na nebularnu hipotezu omogućen je današnji razvoj planetske kozmogonije. Na Schmidtova se istraživanja šezdesetih godina dvadesetog stoljeća nadovezao V. Safronov koji je proučavao ideju u nastanak planeta iz prasunčeve maglice veoma malene mase, najviše jednu desetinu Sunčeve. Srastanjem planetezimala u tako maloj maglici, i to u roku od deset milijuna godina, nastaju Zemlji slični planeti, dok Jupiterova stjenovita jezgra nastaje tek za sto milijuna godina. To je moguće jer je prasunčeva maglica dovoljno gusta pa je sudarnje stijena intenzivno, a kako se oko Sunca gibaju na vrlo sličan način, pri susretima srastaju. Jupiter i ostali planeti iz te skupine pretežno su plinoviti pa su se njihove stjenovite jezgre u narednim godinama obložile dubokim plinovitim atmosferama. Međutim, prema Safronovu, vrijeme formiranja planetâ treba biti sve duže i duže što je on udaljeniji pa stoga dolazi do problema koji postavljaju Uran i Neptun. Proračunato vrijeme njihova rasta duže je od vremena postojanja Sunca. Prema teoriji, oni ne postoje!

### 4.4 Svrha teorije o nastanku sustava planeta

Teorija o nastanku planetarnog sustava prvo mora objasniti dinamičko stanje sustava. Drugo, mora odgovoriti zašto se svi planeti gibaju u istom smjeru i gotovo u jednoj ravnini, a ne mnogo drugačije gibaju se i mnogobrojni asteroidi. Treće, treba rastumačiti zašto postoje dvije fizički različite skupine planeta. Jedno su čvrsti kuglasti planeti: Merkur, Venera i Mars, koji su istih osobina kao Zemlja. Drugo su divovski planeti izgrađeni od plinova: Jupiter, Saturn, Uran i Neptun. Zatim treba rastumačiti zašto postoje sateliti, a i oni se međusobno razlikuju oblikom i veličinom.

Izravnu potvrdu nebularne teorije daju opažanja mladih zvijezda. Sve se one nalaze okružene ostatkom raspršene međuzvjezdane tvari i omotane u diskove od

prašine. Pojediniosti se mogu uočiti samo kod nama bližih zvijezda i pomoću najvećih teleskopa. Iz mladih zvijezda struji jak zvjezdani vjetar i njihova je svjetlost veoma promjenjiva. Bliže dijelove maglice Sunce je moralo jako zagrijati i plin djelomice ionizirati, dok je kroz ionizirani plin prolazilo Sunčevo magnetsko polje koje je povezano s gibanjem ioniziranog plina.

Prilikom vrtnje, Sunce svojim magnetskim poljem gura plin, plinoviti se sastojak maglice stoga ubrzava i udaljava, dok se samo Sunce usporava. Plin sa sobom povlači i planetezimale te tako dolazi do razlike u dinamici Sunca i planeta. Sunčevo zračenje najjače je u njegovoj blizini. Zbog toga je ovdje malo plina i preostaju čvrsta zrnca i čvrsta tijela od kojih nastaju planeti Zemljine skupine, bogati teškim elementima. Podalje od Sunca, tamo gdje zračenje kroz maglicu jedva prodire, vladaju niske temperature i plin se okuplja oko već stvorenih stjenovitih planetskih jezgara. Tako nastaju divovski plinoviti planeti Jupiterove skupine. Kako je plin u svemiru sastavljen pretežno od vodika i helija, tako su i divovski planeti sastavljeni pretežno od ova dva najlakša elementa te stoga imaju male gustoće. Saturn ima gustoću manju od vode.

Sva su tijela nastala srastanjem planetezimala, a kroz maglicu su se gibala samostalno ili u grupama. Dok je maglica još dovoljno gusta, pojedina manja tijela postaju sateliti većih tijela. Posljedice stvaranja planeta izravno se vide na nebeskim tijelima. Mjesec, Merkur, veliki i mali sateliti Jupitera ili nekog drugog planeta puni su kratera koji nastaju upravo udarom. Starost udara (kratera) na Mjesecu je procijenjena na više od tri i pol milijardi godina. Zaključak prethodne rečenice vrlo je jednostavan - to mora značiti da je u prvoj milijardi godina svog postojanja, naš planetarni sustav „očišćen“ od većine sitnih tijela te su ona preostala uglavnom u prostoru između Marsa i Jupitera<sup>1</sup>, kao asteroidi.

---

<sup>1</sup>Asteroidni pojas ili glavni planetoidni pojas je područje Sunčeva sustava između Marsove i Jupiterove putanje u kojem se gibaju patuljasti planet Cerera ili Ceres, oko 750 000 planetoida (asteroida) s promjerom većim od 1 kilometar (na primjer Junona, Vesta, Higijeja) i milijuni manjih.

# Zaključak

Kad pričamo o svemiru, većinom se fokusiramo na naš planet – Zemlju. Da je Zemlja nastala bliže Suncu, oceani bi isparili. Da je stvorena na većoj udaljenosti od Sunca, oceani bi se zaledili. U oba slučaja život se ne bi razvio u obliku kakav trenutno poznajemo. Za vrlo kratko vrijeme, ono što smo doznali o supernovama tipa Ia i kozmičkom pozadinskom zračenju promijenilo je status tamne energije iz nategnute misli, kojom se Einstein jednom poigrao, u temeljnu kozmičku činjenicu. Budućnost, naprotiv, izgleda jednolična: za stotinu milijardi godina, kada većina zvijezda u potpunosti izgori, sve osim nama najbližih galaksija nestat će izvan našeg obzora vidljivosti. Do tada će se Mliječna staza već stopiti s najbližim susjedima, stvorivši divovsku galaksiju usred ničega, a jedino što ćemo moći vidjeti na nebu su zvijezde - mrtve i žive. Bit će to vrlo oskudan svemir. Usudio bih se reći i surov, jer bez galaksija ne bismo mogli pratiti širenje prostora što bi dovelo do pogrešnog zaključka koji je jednom predložio i sâm Einstein - pomislili bismo da je svemir statičan.



# Bibliografija

- [1] Kolb, E., Turner, M., *The Early Universe*, Sarat Book House, Indija, 1990.
- [2] University of Oregon, Department of Physics, Schombert, J., *Cosmology*.  
Dostupno na: (<http://abyss.uoregon.edu/~js/cosmo>) (13. veljače 2016.)
- [3] Chadwick, J. *The existence of a neutron*, Nature, 1932 692–708.
- [4] <http://goo.gl/1Hc7D5> (30. travnja 2015.)
- [5] <http://goo.gl/zdR0Za> (30. travnja 2016.)
- [6] <http://goo.gl/kxaRAo> (4. svibnja 2015.)
- [7] <http://goo.gl/1jY16x> (30. travnja 2016.)
- [8] <https://goo.gl/0e2onV> (3. svibnja 2015.)
- [9] <https://goo.gl/T4yKMv> (3. svibnja 2015.)
- [10] <http://burro.cwru.edu/academics/Astr221/StarPhys/ppchain.html> (25. travnja 2015.)
- [11] <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/c/cno+cycle> (3. svibnja 2016.)
- [12] <http://faculty.tamuc.edu/cbertulani/ast/lectures/Lec10.pdf> (19. svibnja 2016.)
- [13] <http://www.physics.princeton.edu/~steinh/0411036.pdf> (19. svibnja 2016.)
- [14] <http://goo.gl/2V1ouo> (19. svibnja 2016.)

# Životopis

Mario Pecimotika rođen je 28. veljače 1995. u Virovitici, a živi u Pitomači gdje je završio osnovnu školu. Nakon završene srednje škole upisao je Preddiplomski studij fizike kojeg izvodi Odjel za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, gdje studira i danas. U slobodno vrijeme piše poeziju i prozu, svira klavir i čita knjige. Područja fizike koja ga najviše interesiraju su čestična i nuklearna astrofizika.

*„Što sam ako se usporedim sa svemirom?“*

— Van Beethoven, L.