

Nastanak i razvoj protoplanetarnih diskova i protoplaneta

Vidak, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka / Sveučilište u Rijeci**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:194:480557>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-22**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Physics - PHYRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
FAKULTET ZA FIZIKU

Sveučilišni preddiplomski studij Fizika

Ivan Vidak

NASTANAK I RAZVOJ PROTOPLANETARNIH
DISKOVA I PROTOPLANETA

Završni rad

Mentor: doc. dr. sc. Tomislav Jurkić

Rijeka, listopad 2024.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Nastanak protoplanetarnih diskova	2
2.1	Molekularni oblaci	2
2.2	Gravitacijski kolaps molekularnog oblaka	2
2.3	Zakon očuvanja kutne količine gibanja	4
2.4	Formiranje diska	4
3	Struktura protoplanetarnih diskova	7
3.1	Radijalna struktura diska	7
3.1.1	Unutarnji disk	7
3.1.2	Srednji disk	8
3.1.3	Vanjski disk	9
3.2	Vertikalna struktura diska	9
3.2.1	Ekvatorijalni sloj	10
3.2.2	Atmosferski sloj	11
3.2.3	Površinski sloj	11
3.3	Sastav diska	12
3.3.1	Plin	12
3.3.2	Prašina	12
4	Razvoj protoplanetarnih diskova	13
4.1	Klasifikacija mladih zvjezdanih objekata	13
4.2	Početak formiranja diska	14
4.3	Stabilizacija i razdvajanje materijala u disku	15
4.4	Nastanak i migracija protoplaneta	16
4.5	Raspršivanje diska i nastanak planetarnog sustava	16
5	Nastanak i razvoj protoplaneta	18
5.1	Koagulacija čestica prašine, nastanak i rast planetezimala	18
5.2	Nastanak i rast protoplaneta	19
5.3	Migracije protoplaneta	19
5.4	Daljnji razvoj	19

6 Zaključak	21
Literatura	22
Popis slika	24
Popis tablica	25

Sažetak

U ovom radu bavimo se nastankom i razvojem protoplanetarnih diskova te procesima koji dovode do formiranja protoplaneta i planetarnih sustava. Protoplanetarni diskovi su rotirajući diskovi plina i prašine koji se formiraju oko mladih zvijezda uslijed gravitacijskog kolapsa molekularnih oblaka. U njima, akrecijom materijala nastaju planetezimali, protoplaneti i konačno planeti. Opisujemo strukturu protoplanetarnih diskova, uključujući radijalnu i vertikalnu raspodjelu temperature i materijala, te razvoj diskova kroz faze do konačnog raspršenja plina i nastanka planetarnog sustava. Također, detaljnije su razmatrani mehanizmi migracije protoplaneta, koagulacija prašine i akrecija, te njihova uloga u nastanku različitih tipova planeta poput plinovitih divova i terestričkih planeta. Rad pruža pregled aktualnih teorijskih modela i opažanja, naglašavajući njihovu važnost u razumijevanju planetarnih sustava.

Ključne riječi: protoplaneti, protoplanetarni diskovi, planetezimali, planetarni sustavi, mladi zvjezdani objekti, molekularni oblaci

1 Uvod

Proučavanje procesa nastanka i razvoja protoplanetarnih diskova ključno je u razumijevanju planetarnih sustava poput našeg Sunčeva sustava. Njihovo istraživanje ne pomaže samo objasniti porijeklo planeta, već i uvjete koji su omogućili nastanak i razvoj života na planetima poput Zemlje.

Protoplanetarni diskovi nastaju iz molekularnih oblaka (engl. *molecular cloud*) koji se pod djelovanjem gravitacijske sile urušavaju formirajući protozvijezde i protoplanetarne diskove koji ih okružuju. Tijekom evolucije protoplanetarnih diskova dolazi do akrecije materijala. Postupno se formiraju planetezimali čijim daljnjim spajanjem nastaju protoplaneti. Protoplaneti akrecijom okolnog materijala dalje formiraju planete, čiste materijal diska iz svoje okoline orbite, sudarima migriraju, stvaraju prirodne satelite ili se spajaju u veće planete i tako oblikuju budući planetarni sustav.

Najprije ćemo se u prvom poglavlju osvrnuti na proces nastanka protoplanetarnih diskova, zatim u drugom poglavlju na njihovu strukturu. U trećem poglavlju opisati ćemo njihov razvoj, a u četvrtom poglavlju nastanak i razvoj protoplaneta.

2 Nastanak protoplanetarnih diskova

Protoplanetarni diskovi nastaju gravitacijskom kontrakcijom ili kolapsom molekularnog oblaka prema središtu. Molekularni oblaci sadrže nepravilnosti u gustoći zbog kojih se fragmentiraju na niz novih središta kolapsa. Dio materijala pada prema novim središtima formirajući protozvijezde, dok se drugi dio materijala preraspoređuje u prepoznatljive oblike rotirajućih diskova oko njih. Ti diskovi, koje nazivamo protoplanetarnim diskovima, predstavljaju početnu fazu razvoja novih planetarnih sustava.

2.1 Molekularni oblaci

Molekularni oblaci su gusti, hladni oblaci plina i prašine u međuzvjezdanom prostoru. Većinom su sastavljeni od molekula vodika (do $\sim 70\%$) i helija (oko 26%), dok teže elemente poput ugljika, kisika, dušika nalazimo samo u tragovima. Tipične temperature su od 10 do 20 K, što omogućava stabilnost molekula. Gustoća međuzvjezdanog medija u većem dijelu oblaka je od 10 do 30 cm^{-3} , a u najgušćim dijelovima i do 10^5 cm^{-3} . Najgušće dijelove oblaka nazivamo jezgrama molekularnog oblaka. Veličine molekularnih oblaka mogu biti nekoliko svjetlosnih godina, a mogu se protezati i do više stotina svjetlosnih godina kada govorimo o divovskim molekularnim oblacima (engl. *giant molecular clouds*, *GMC*). Najveći divovski molekularni oblaci mogu se protezati od 100 do 200 svjetlosnih godina i imati mase do nekoliko milijuna veće od mase Sunca. Kada u jednoj regiji svemira imamo više povezanih molekularnih oblaka govorimo o kompleksu molekularnih oblaka. Različiti dijelovi takvog kompleksa mogu se nalaziti u različitim stadijima nastanka zvijezda. Jedan primjer takvog kompleksa je maglica Orao (engl. *The Eagle Nebula*) na slici 2.1. [2, 3, 5, 7]

2.2 Gravitacijski kolaps molekularnog oblaka

Proces gravitacijskog kolapsa započinje poremećajem molekularnog oblaka događajima poput gravitacijskog utjecaja prolazeće zvijezde, eksplozije bliske supernove, sudarom dvaju različitih dijelova oblaka ili dvaju susjednih oblaka. Kada gravitacijska sila nadvlada unutarnji tlak započinje urušavanje oblaka prema jednom ili više središta



Slika 2.1: Kompleks molekularnih oblaka Orao (engl. *The Eagle Nebula*) [11]

koje nazivamo jezgrama oblaka (engl. *core*). Ova granica opisana je *Jeansovim kriterijem* [4] koji daje (kritičnu) *Jeansovu duljinu* λ_J :

$$\lambda_J = \sqrt{\frac{\pi c_s^2}{G\rho}} \quad (2.1)$$

i (kritičnu) *Jeansovu masu* M_J u sferi promjera λ_J :

$$M_J = \lambda_J^3 \rho = \frac{\pi c_s^2}{G^{3/2} \rho^{1/2}}, \quad (2.2)$$

pri čemu su: c_s brzina zvuka u tom dijelu oblaka, ρ njegova gustoća, a G gravitacijska konstanta. Kada u nekoj regiji oblaka masa prijeđe kritičnu vrijednost M_J , taj dio oblaka postaje nestabilan i započinje njegov gravitacijski kolaps. Tijekom kolapsa molekularnog oblaka povećava se njegova gustoća zbog čega se *Jeansova masa* smanjuje. Uslijed tome i manji dijelovi molekularnog oblaka mogu postići kritičnu masu i samostalno se urušavati. Tako može nastati više zvijezda iz istog molekularnog oblaka zbog čega promatramo zvjezdana jata (engl. *star clusters*). Jedan od najpoznatijih primjera zvjezdanog jata su Plejade (Messier 45) prikazane na slici 2.2.



Slika 2.2: Zvezdano jato Messier 45 poznatije kao Plejade (engl. *The Pleiades*) [13].

2.3 Zakon očuvanja kutne količine gibanja

Zakona očuvanja kutne količine gibanja glasi:

$$\vec{L} = I\vec{\omega} = \overrightarrow{konst.}, \quad (2.3)$$

pri čemu su: \vec{L} kutna količina gibanja, I moment inercije, $\vec{\omega}$ kutna brzina, a $\overrightarrow{konst.}$ konstantan vektor. Za točkastu masu m , na udaljenosti r od osi rotacije, moment inercije dan je izrazom:

$$I = mr^2. \quad (2.4)$$

Kako se oblak urušava, zbog gravitacijskog privlačenja, materijal se nakuplja prema središtu. Budući da je kutna količina gibanja očuvana, dolazi do sve brže rotacije materijala oko središta. Osim toga, povećanjem kutne brzine povećava se i centrifugalna sila [10]:

$$\vec{F}_{cf} = -m\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}). \quad (2.5)$$

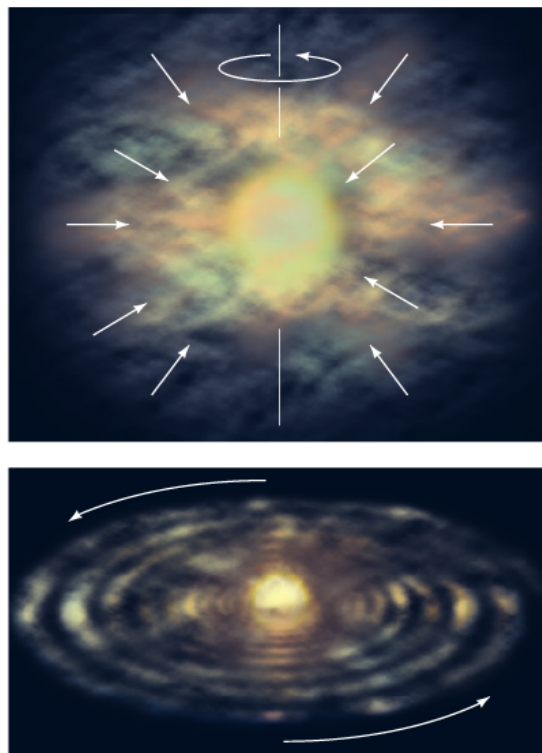
2.4 Formiranje diska

Centrifugalna sila djeluje okomito na smjer osi rotacije i opire se gravitacijskoj sili zbog čega sav materijal ne upada u središte. Pogledamo li поблиže jednadžbu 2.5 prepoznati ćemo u članu $\vec{\omega} \times \vec{r}$ tangencijalnu brzinu. Kako je tangencijalna brzina najveća u ekvatorijalnoj ravnini i centrifugalna sila je u toj ravnini najveća, dok na osi rotacije centrifugalne sile nema. Zbog toga, duž polova materijal upada u središte

oblaka dok se u ekvatorijalnoj ravnini opire kolapsu što dovodi do spljoštavanja oblaka i poprimanja oblika rotirajućeg diska. Vrijeme od početka gravitacijskog kolapsa do formiranja protozvijezde i diska reda je veličine 100 000 godina [5].

Takav disk rasprostire se do centrifugalnog radijusa koji ovisi o kutnoj brzini rotacije središta Ω i vremenu t [1]:

$$R(t) \propto \Omega^2 t^3. \quad (2.6)$$



Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

Slika 2.3: Grafički prikaz modela nastanka diska [12].

Vidimo da konačna veličina diska ovisi o karakteristikama jezgre i vremenu gravitacijskog kolapsa (engl. *infall time*) što je vrijeme potrebno da materija padne u središte diska. Kako se zbog gravitacije materijal nakuplja prema središtu, tlak se povećava zbog čega se plin zagrijava te nastaje kugla plina visoke temperature – protozvijezda. Akrecijom materijala prema protozvijezdi, materijal iz okolnog omotača i diska se čisti i disk postaje sve hladniji, manje mase i izraženijeg oblika. Kada se u središtu protozvijezde nakupi dovoljno plina on se, uslijed gravitacijskog kolapsa i oslobađanja gravitacijske potencijalne energije, zagrijava te se osigurava dovoljna temperatura i tlak za fuziju atoma i formira se zvijezda. Toplina oslobođena u fuziji

unutar središta zvijezda osigurava gradijent tlaka koji uravnotežuje gravitacijski kolaps zbog čega se zvijezde ne uruše. Valja napomenuti da centrifugalna sila nije jedini mehanizam opiranja gravitacijskom kolapsu. Turbulencije u oblaku i zračenja susjednih zvijezda i protozvijezda pomažu odupiranju dok u nekim dijelovima magnetska polja podupiru oblak i odgađaju ili potpuno zaustave gravitacijski kolaps. No, sama uloga magnetskih polja u gravitacijskom kolapsu molekularnog oblaka i formiranju diska nije potpuno razrađena. Neka promatranja ukazuju na to da magnetska polja većinom nisu dovoljno jaka da sama zaustave gravitacijski kolaps središta. [1, 3, 5]

3 Struktura protoplanetarnih diskova

Protoplanetarni diskovi protežu se od centrifugalnog radijusa prema van, obuhvaćajući nekoliko stotina astronomskih jedinica. U ovom poglavlju detaljno ćemo opisati glavne dijelove i fizikalne osobine koje definiraju strukturu tipičnog protoplanetarnog diska.

3.1 Radijalna struktura diska

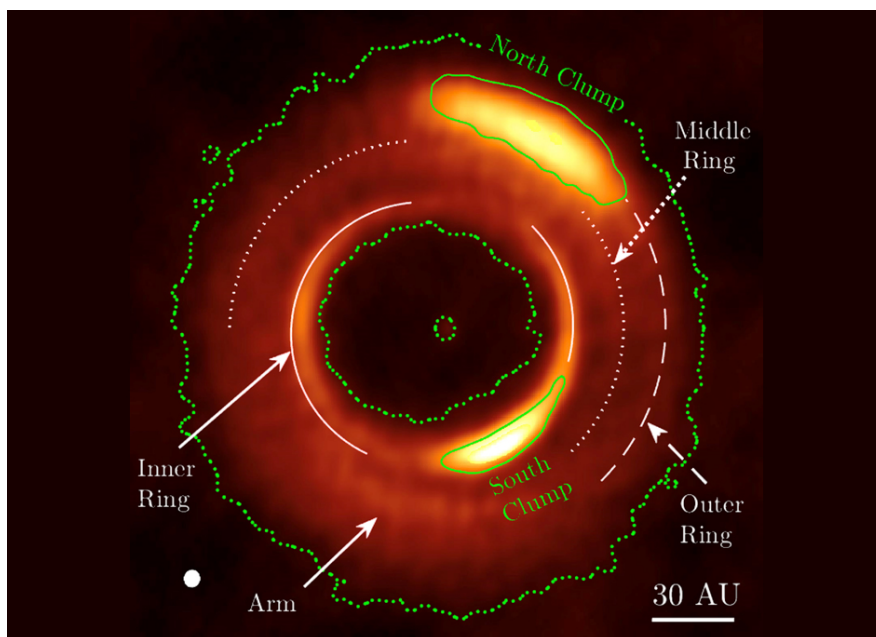
Radijalnu strukturu diska možemo podijeliti na tri dijela: unutarnji, srednji i vanjski disk. Jedan od ključnih čimbenika u razlikovanju tih slojeva je raspodjela temperature. Materijal u disku se u prvom redu zagrijava zbog zračenja zvijezde i gubitka gravitacijske potencijalne energije dok materijal pada u disk i kroz njega. Hlađenje materijala posljedica je ponovnog zračenja zvijezde najvećim dijelom zbog prašine. Za radijalnu raspodjelu temperature unutar diska $T(r)$ vrijedi [7]:

$$T(r) \propto r^{-p}, \quad (3.1)$$

pri čemu su: r udaljenost o zvijezde, a p konstanta koja ovisi o specifičnom sustavu. Na primjer, za diskove zanemarive vertikalne debljine (engl. *razor thin disks*) p iznosi $3/4$. Vidimo da temperatura opada udaljavanjem od zvijezde što u vanjskim, hladnijim dijelovima omogućava kondenzaciju leda koji igra ključnu ulogu u nastanku i razvoju planitezimala.

3.1.1 Unutarnji disk

U dijelovima najbližim zvijezdi temperatura u disku je najviša jer je direktno izložen zračenju zvijezde. Ova regija često se naziva i zonom sublimacije (engl. *sublimation zone*) jer su temperature dovoljno visoke da se čvrste tvari, poput leda, izravno prelaze iz čvrstog u plinovito stanje. Na ovoj udaljenosti od zvijezde međuzvjezdani materijal se većinom nalazi u obliku plina, a najviše je molekula poput spojeva silikata i metala zbog čega u kasnijem razvoju nastaju terestrički (stjenoviti) planeti. Zbog toga ovaj dio diska možemo nazvati zonom nastanka terestričkih planeta (engl. *terrestrial planet formation zone*).



Slika 3.1: Radijalna struktura diska oko zvijezde MWC 758 [15].
Inner Ring – unutarnji disk, Middle Ring – srednji disk, Outer Ring – vanjski disk.

3.1.2 Srednji disk

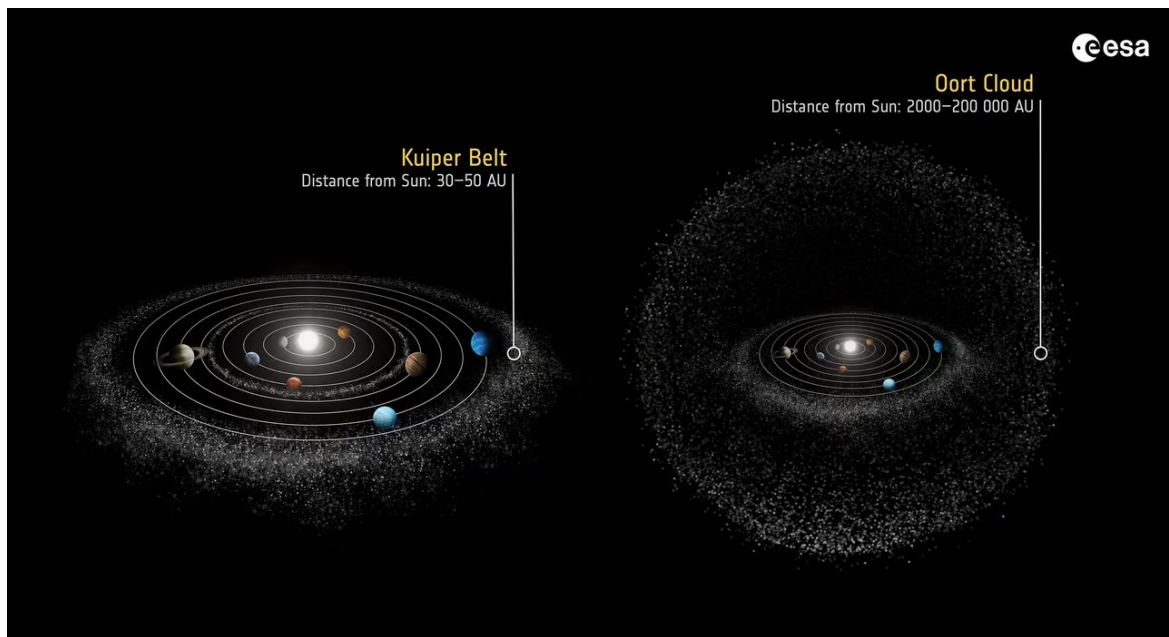
Udaljavanjem od zvijezde, temperatura i materijal postaju sve hladniji i gušći. Ovaj dio diska sadrži većinu njegove mase i u njoj dolazi do formiranja planetezimala, malih gradivnih blokova planeta. U ovom dijelu diska nalazi se snježna granica (engl. *snow line*). Snježna granica je udaljenost na kojoj temperatura postaje dovoljno niska (~ 170 K) da se voda kondenzira u led. Snježnu granicu možemo, kao i granicu sublimacije, procijeniti pomoću računa za luminozitet zvijezde [4]:

$$r_s = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{L_*}{\sigma T_s^4} \right)^{1/2}, \quad (3.2)$$

pri čemu su: r_s radijalna udaljenost snježne granice od zvijezde, T_s temperatura na snježnoj granici (~ 170 K za vodu), σ Stefan-Boltzmannova konstanta, a L_* luminozitet zvijezde. Isti račun može se koristiti za određivanje granica kondenzacije ili sublimacije drugih spojeva kada se uvrsti pripadajuća temperatura. Led je ključan za proces nastanka i rasta planetezimala pa tako dio diska od snježne granice, uključujući i vanjski disk, možemo nazivati zonom nastanka plinovitih i ledenih divova ili divovskih planeta (engl. *giant planet formation zone*).

3.1.3 Vanjski disk

Daljnijim udaljavanjem od zvijezde dijelovi diska postaju sve hladniji i rjeđi te sadrže veću količinu prašine i plina u ledu. Zbog manje gustoće međuzvjezdanog materijala proces nastanka planetezimala je najsporiji u ovom dijelu diska. U Sunčevu sustavu ovaj dio diska je Kuiperov pojas gdje nastaju patuljasti planeti poput Plutona.



Slika 3.2: Model Kuiperovog pojasa i Oortovog oblaka [18].

Na slici vidimo da su dijelovi Kuiperovog pojasa (engl. *Kuiper Belt*) udaljeni od Sunca otprilike 30 – 50 astronomskih jedinica (engl. *astronomical units, AU*), a dijelovi Oortovog oblaka (engl. *Oort Cloud*) od 2000 do 200 000 AU. Pretpostavlja se da je Oortov oblak sferna nakupina planetezimala sačinjenih većinom od leda na vanjskom dijelu Sunčeva sustava te da u njemu nastaju dugoperiodični kometi.

Dosada ga nismo direktno promatrali.

3.2 Vertikalna struktura diska

Početni molekularni oblak ne spljošti se sasvim u ekvatorijalnu ravninu već u novonastalom protoplanetarnom disku možemo razlikovati vertikalne slojeve. Ti slojevi razlikuju se po temperaturi i gustoći materijala, a općenito ih možemo podijeliti na tri istaknutija sloja: ekvatorijalni sloj, atmosferski sloj i površinski sloj. Materijal unutar diska raspoređen je prema hidrostatskoj razvnoteži tlaka unutar diska i gravitacije zvijezde [7]:

$$\frac{dP}{dz} = -\rho(z) \frac{GM_*}{(r^2 + z^2)} \frac{z}{(r^2 + z^2)^{1/2}}, \quad (3.3)$$

pri čemu su: P tlak plina, z visina u odnosu na ekvatorijalnu ravninu, $\rho(z)$ gustoća plina na visini z , G gravitacijska konstanta, r udaljenost od zvijezde, a M_* masa zvijezde. Vidimo da se tlak smanjuje udaljavanjem od ekvatorijalne ravnine. Disk je najgušći u ekvatorijalnoj ravnini, a plin i prašina se šire u atmosferu diska kako se udaljavamo od nje te gustoća diska pada. Kako bismo procijenili vertikalnu debljinu diska trebamo prvo procijeniti brzinu čestica i brzinu zvuka u disku. Brzinu čestica u disku možemo procijeniti računom za kružnu orbitu oko zvijezde:

$$v = \sqrt{\frac{GM_*}{r}}, \quad (3.4)$$

pri čemu su: G gravitacijska konstanta, M_* masa zvijezde, a r udaljenost od zvijezde. Dok je izraz za brzinu zvuka dan s [7]:

$$c_s = \sqrt{\frac{k_B T}{\mu m_H}}, \quad (3.5)$$

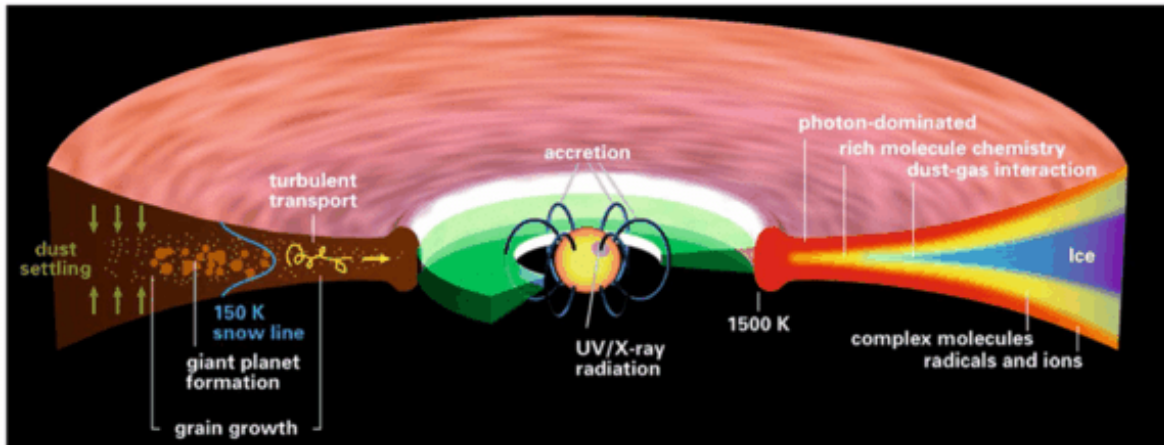
pri čemu su: k_B Boltzmannova konstanta, T temperatura, a μm_H prosječna masa jedne čestice. Tada (vertikalnu) debljinu diska H (engl. *scale height*) možemo procijeniti izrazom [4]:

$$H = \frac{c_s}{v} r. \quad (3.6)$$

Vidimo da je debljina diska manja što smo bliže zvijezdi (zbog veće brzine čestica), dok se udaljavanjem od zvijezde ona povećava kako disk poprima izbočen oblik. Ova se pojava na engleskom naziva *flaring effect*.

3.2.1 Ekvatorijalni sloj

Ovaj se sloj nalazi blizu ravnine diska, najgušći je i najhladniji. Kako zračenje, zbog gustoće materijala, slabije prodire kroz ovaj dio diska, on je hladniji. Jer je ovaj dio diska hladniji, led lakše opstaje te se lakše formiraju planetezimali. Stoga, ovaj sloj sadrži najveći dio mase diska i ovdje nastaju i rastu budući planeti i njihovi prirodni sateliti.



Slika 3.3: Skica fizičke i kemijske strukture protoplanetarnog diska oko zvijezde slične Suncu [17].

Dust settling – taloženje prašine, giant planet formation – formiranje divovskih planeta, snow line – snježna granica, grain growth – rast zrnaca (prašine), turbulent transport – turbulentni prijenos, accretion – akrecija, UV/X-ray radiation – UV/zračenje X-zrakama, photon-dominated – prevladavaju fotoni, rich molecule chemistry – bogato molekulama, dust-gas interaction – međudjelovanje plina i prašine, complex molecules – kompleksnije molekule, radicals and ions – radikali i ioni, ice – led.

3.2.2 Atmosferski sloj

Atmosferski sloj nalazi se neposredno iznad ekvatorijalnog sloja. Ovaj sloj manje je gustoće, ali više temperature od ekvatorijalnog sloja. Čestice prašine okružene su ledom. Apsorpcijom zračenja zvijezde plin i prašina se zagrijavaju te ponovno emitiraju zračenje proporcionalno svojoj temperaturi. U odnosu na površinu zvijezde temperatura diska je relativno niska zbog čega umjesto UV-zračenja ili zračenja u vidljivom spektru emitira zračenje većinom u infracrvenom području, što omogućava opažanje diska pomoću teleskopa poput *James Webba* ili *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)*.

3.2.3 Površinski sloj

Ovaj sloj sastoji se od rijetkog, difuznog plina izloženog izravnom zračenju mlade zvijezde. U njemu dolazi do fotoevaporacije. Fotoevaporacija je proces pri kojem zračenje zvijezde (većinom UV- i X-zrake) zagrijava plin u disku i tako ga postupno šalje prema vanjskom disku ili čak izbacuje iz diska.

3.3 Sastav diska

Sastav protoplanetarnog diska ovisi o sastavu molekularnog oblaka iz kojega je nastao. Kao i molekularni oblak, on se u početku sastoji uglavnom od plina, no upravo početno mala količina prašine u njemu igra glavnu ulogu u formiranju planeta. Površinska gustoća plina u disku ovisi, slično kao i temperatura, o udaljenosti od zvijezde na sljedeći način [7]:

$$\Sigma(r) \propto r^{-q}, \quad (3.7)$$

pri čemu su: Σ površinska gustoća plina, r udaljenost od zvijezde, a q vrijednost koja ovisi o konkretnom sustavu, ali tipično je između 1 i $\frac{3}{2}$. Vidimo da gustoća plina opada što se više udaljavamo od zvijezde. Prašina slijedi sličnu raspodjelu, no zbog gravitacijske i aerodinamičke sile većinom se raspoređuje u ravnini diska, dok se plin može raspršiti kroz cijeli vertikalni presjek.

3.3.1 Plin

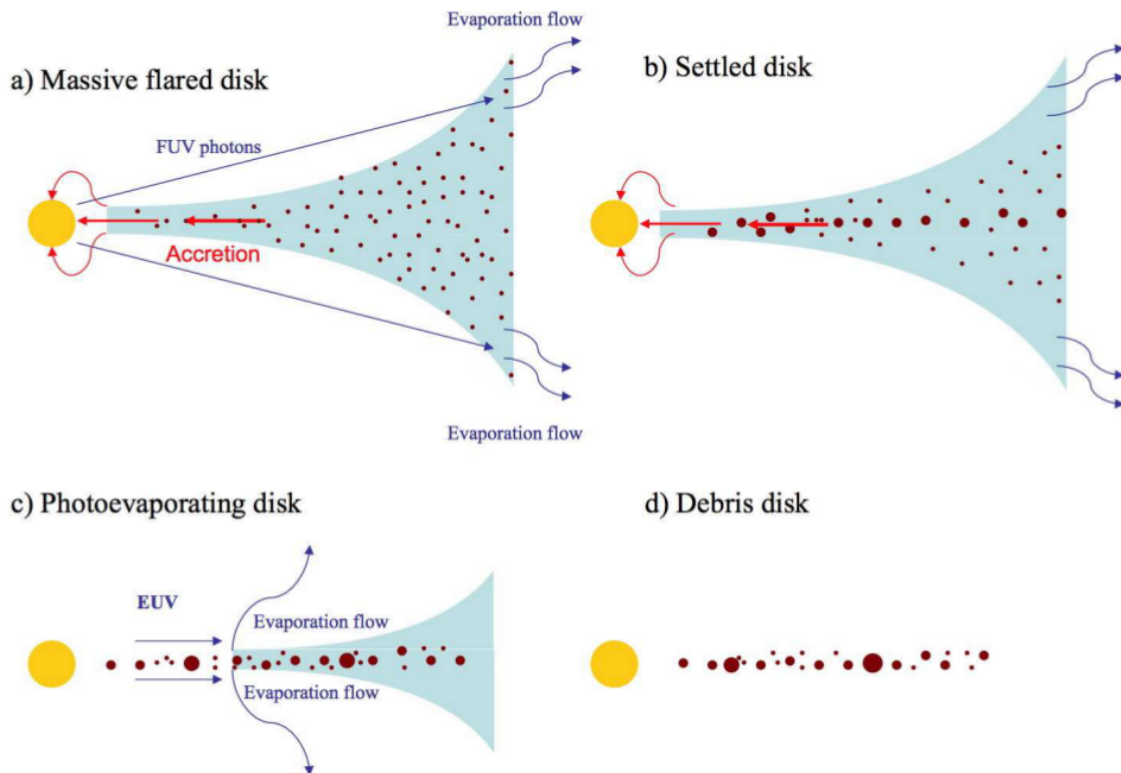
Protoplanetarni disk sastoji se uglavnom od plina ($\sim 99\%$). U početku plin se nalazi uglavnom u molekularnom obliku. Zbog zračenja središnje zvijezde on se ionizira. Tijekom razvoja protoplanetarnog diska fotoevaporacijom, akrecijom na zvijezdu ili protoplanete i planete plin se postupno gubi iz diska.

3.3.2 Prašina

Iako prašina čini samo $\sim 1\%$ mase diska, ima značajnu ulogu u formiranju planetezimala i planeta. Čestice prašine, koje su u početku reda veličine mikrometra, tijekom vremena se nakupljaju i formiraju veća kruta tijela putem sudara i koagulacije. [1, 3, 4, 7]

4 Razvoj protoplanetarnih diskova

Od svog formiranja kolapsom molekularnog oblaka, tijekom milijuna godina, protoplanetarni diskovi prolaze kroz značajne promjene u svojoj strukturi i dinamici postupno se transformirajući u sustav planeta, asteroida i drugih manjih nebeskih objekata. U ovom poglavlju govoriti ćemo o fazama razvoja protoplanetarnih diskova i mehanizmima koji ih provode.



Slika 4.1: Skica razvoja protoplanetarnog diska [1].

Massive flared disk – masivni zakrivljeni disk, Settled disk – ustaljeni disk, Photoevaporating disk – fotoisparavajući disk, Debris disk – disk ostataka.

4.1 Klasifikacija mladih zvjezdanih objekata

Pojam neodvojiv od evolucije diskova jest klasifikacija mladih zvjezdanih objekata (engl. *Young Stellar Objects*, YSO). Mladi zvjezdani objekti su zvijezde u ranim fazama razvoja koje još nisu dovršile proces gravitacijskog kolapsa pa i dalje akrecijom preuzimaju materijal iz okolnog protoplanetarnog diska. Razlikujemo ih po njihovim spektralnim energijskim raspodjelama (SED), a najčešće koristimo spektralni indeks α koji opisuje ovisnost toka zračenja o valnoj duljini na logaritamskoj skali u infracrve-

nom području [1]:

$$\alpha_{IR} = \frac{d \log \lambda F_\lambda}{d \log \lambda} = \frac{d \log \nu F_\nu}{d \log \nu}, \quad (4.1)$$

pri čemu su: λ valjna duljina, F_λ tok zračenja na valnoj duljini λ , ν frekvencija zračenja, a F_ν tok zračenja na frekvenciji ν . Mlade solarne objekte dijelimo na sljedeće klase: 0, I, FS (prijelazni oblik između klase I i II), II i III.

Klasa	Spektralni indeks	Odnosi masa	Opažачke karakteristike
0	-	$M_{omotač} > M_{zvijezda} > M_{disk}$	nema optičkog ni blisko infracrvenog zračenja
I	$\alpha_{IR} > 0.3$	$M_{zvijezda} > M_{omotač} \sim M_{disk}$	većinom optički zaklonjeno
FS	$-0.3 < \alpha_{IR} < 0.3$		prijelaz između I i II klase
II	$-1.6 < \alpha_{IR} < -0.3$	$M_{disk}/M_{zvijezda} \sim 1\%$, $M_{omotač} \sim 0\%$	akrecijski disk; snažno H α i UV zračenje
III	$\alpha_{IR} < -1.6$	$M_{disk}/M_{zvijezda} \ll 1\%$, $M_{omotač} \sim 0\%$	pasivni disk; jako slaba ili nema akrecije

Tablica 4.1: Klasifikacija mladih zvjezdanih objekata [1].

4.2 Početak formiranja diska

Klasa 0 mladih zvjezdanih objekata podrazumijeva najraniju fazu formiranja zvijezda i ujedno je prva faza evolucije protoplanetarnih diskova. Traje otprilike 150 tisuća godina [3]. Glavno obilježje je gravitacijski kolaps molekularnog oblaka. Tijekom kolapsa materijal iz oblaka nakuplja se u središtu i formira protozvijezdu. Istovremeno, zbog zakona očuvanja kutne količine gibanja, oko protozvijezde nastaje spljošteni rotirajući disk koji predstavlja najraniji stadij protoplanetarnog diska. U ovoj fazi razvoja omotač je najizraženiji i zaklanja zračenje unutrašnjih dijelova zbog čega nema detekcije. Postupnim raspadanjem omotača, što akrecijom plina i prašine na zvijezdu, a što na disk, prepreka zračenju će polako nestajati i tako ćemo detektirati sve jače zračenje i razlikovati razvojnu fazu mladog zvjezdanog objekta. U ovoj fazi disk je nestabilan i turbulentan zbog prenosa kutne količine gibanja i utjecaja magnetiskog polja. Vrijeme kolapsa središta molekularnog oblaka i formiranja protozvijezde možemo procijeniti pomoću računa za slobodni pad [6]:

$$t = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}, \quad (4.2)$$

pri čemu su: G gravitacijska konstanta, a ρ gustoća molekularnog oblaka.

4.3 Stabilizacija i razdvajanje materijala u disku

Nakon gravitacijskog kolapsa i formiranja protozvijezde prelazimo iz klase 0 u klasu I mladih zvjezdanih objekata. Ova faza traje od otprilike petsto tisuća godina [3]. Disk postaje sve stabilniji, a materijal iz okolnog omotača postupno nestaje akrecijom na disk odnosno protozvijezdu. U ovoj fazi počinje raslojavanje diska, stoga možemo razlikovati unutarnje i vanjske dijelove diska. Sudarima i spajanjem prašine unutar diska formiraju se planetezimali, kruta tijela koja međusobnim spajanjem rastu i gravitacijski privlače materijal oko sebe stvarajući protoplanete. Brzinu akrecije materijala u disku možemo opisati izrazom [4]:

$$\dot{M} = 3\pi\nu\Sigma, \quad (4.3)$$

pri čemu su: \dot{M} stopa akrecije mase, ν viskoznost diska, a Σ površinska gustoća diska. Viskozni prijenos (engl. *viscous transport*) je proces prijenosa materijala unutar diska zbog trenja između različitih slojeva u disku. Kako plin i prašina padaju prema središtu, u dijelovima bližim središtu, zbog viskoznosti u disku gube kutnu količinu gibanja i tako lakše padaju na zvijezdu. Kutna količina gibanja prenosi se na vanjske dijelove diska, a trenje između slojeva plina stvara turbulentne zone u disku. U tim zonama čestice se lakše zbližavaju, sudaraju i spajaju, stvarajući veća tijela poput planetezimala, koji se kasnije sakupljaju u protoplanete. Viskoznost ν možemo procijeniti pomoću α -disk modela [4]:

$$\nu = \alpha c_s H, \quad (4.4)$$

pri čemu su: α bezdimenzijski parametar koji daje informaciju o efikasnosti prijenosa kutne količine gibanja i manji je ili jednak 1, c_s brzina zvuka (3.5), a H debljina diska (3.6). Vidimo da je viskoznost proporcionalna brzini zvuka i debljini diska. Klasa FS mladih zvjezdanih objekata ima jasnije formiran disk od klase I i ime je dobila po svojoj ravnoj spektralnoj energijskoj raspodjeli (engl. *flat spectrum*) koja se proteže od infracrvenih do radiofrekvencija.

4.4 Nastanak i migracija protoplaneta

Protozvijezda ulazi u klasu II mladih zvjezdanih objekata. Ova faza traje otprilike dva milijuna godina [3]. Protoplanetarni disk postaje sve manji, a proces stvaranja protoplaneta postaje sve istaknutiji. Većina plina je sada u protozvijezdi ili raspršena zračenjem zvijezde. Planetezimali se sudaraju i gravitacijski privlače što dovodi do spajanja u protoplanete. Protoplaneti imaju dovoljno veliku masu da počinju utjecati na dinamiku diska prikupljajući materijal oko sebe i stvarajući praznine u disku. Kako bi neki planetezimal ili protoplanet sakupio okolni materijal, njegova gravitacijska sila mora nadvladati gravitacijsku silu zvijezde unutar određenog područja. To područje naziva se *Hillova sfera* i određeno je radijusom [7]:

$$r_H = a \left(\frac{M_p}{3M_*} \right)^{1/3} \quad (4.5)$$

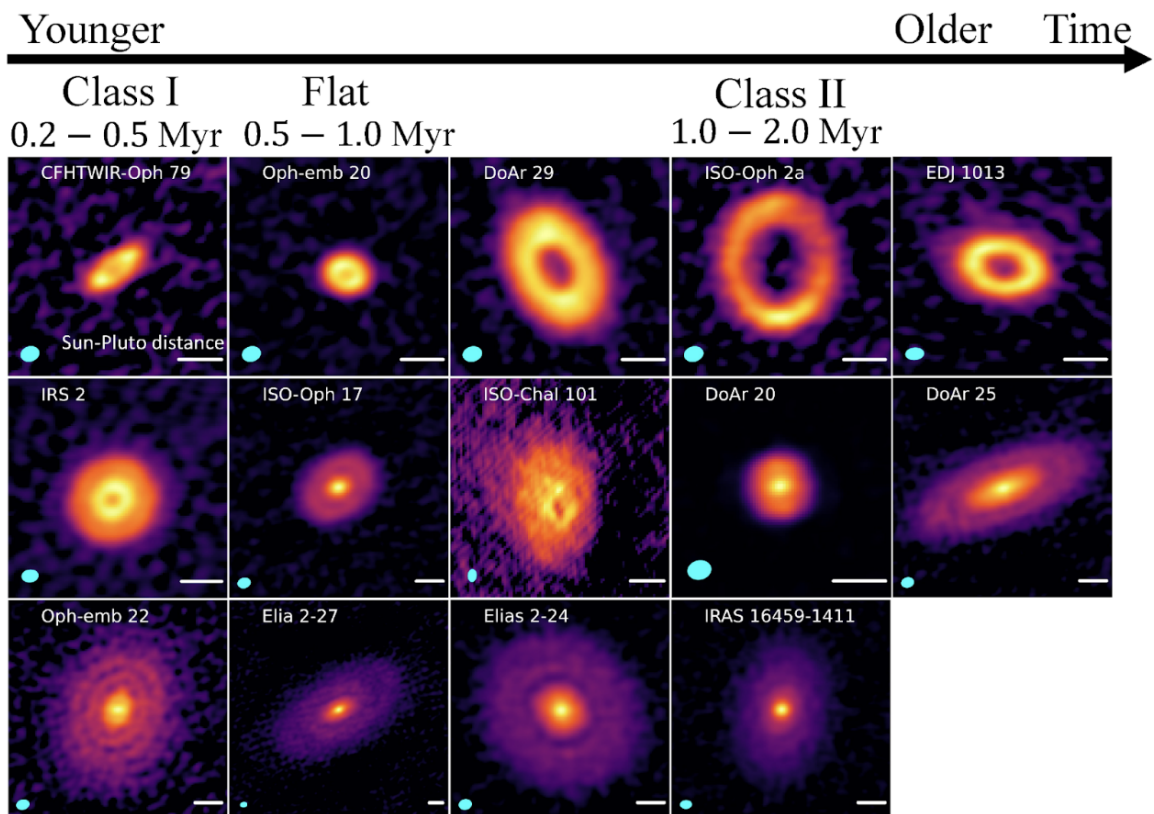
pri čemu su: r_H radijus Hillove sfere, a velika poluos orbite planetezimala/protoplaneta, M_p njegova masa, a M_* masa zvijezde. Međudjelovanje protoplaneta s okolnim plinom i prašinom može rezultirati migracijama protoplaneta (vidi poglavlje 5.3). Primjer su plinoviti divovi koji privlače plin koji ih okružuje i migriraju prema zvijezdi ostavljajući praznine u disku. Zračenje zvijezde uzrokuje fotoevaporaciju. U vanjskim dijelovima diska plin je dovoljno rijedak pa ga zračenje može lakše zagrijati, zbog čega je fotoevaporacija tamo izraženija i ograničava ili zaustavlja nastanak novih plinovitih divova. Brzinu koju plin treba postići da ga se izbacilo iz diska možemo procijeniti pomoću druge kozmičke brzine v_{II} :

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM_*}{r}}, \quad (4.6)$$

pri čemu su: G gravitacijska konstanta, M_* masa zvijezde, a r udaljenost od zvijezde. Ako zračenje zvijezde zagrije plin iznad energije potrebne za postizanje druge kozmičke brzine, plin biva izbačen iz diska.

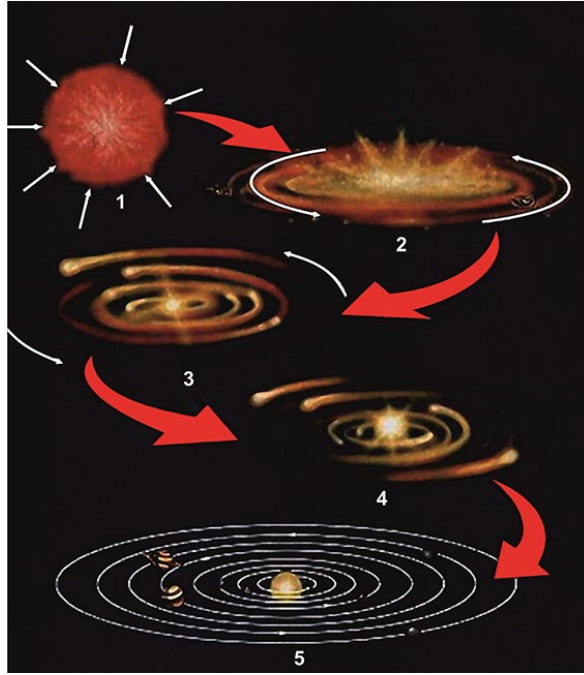
4.5 Raspršivanje diska i nastanak planetarnog sustava

Posljednja faza razvoja protoplanetarnih diskova podrazumijeva klasu III mladih zvjezdanih objekata. Većina plina i prašine iz diska je nestala te se preostali disk sastoji uglavnom od asteroida, kometa i protoplaneta dok plina gotovo nema. Većina plina



Slika 4.2: Snimka mladih zvjezdanih objekata iz ALMA CAMPOS istraživanja [14]. Slijeva nadesno: klase I, FS i II poredane po starosti.

raspršena je zbog fotoevaporacije unutar diska i sakupljanja na zvijezdi ili novonastalim planetima [3]. Nakon raspršenja plina disk postaje takozvani disk ostataka (engl. *debris disk*) koji sadrži čestice prašine i krhotine iz sudara protoplaneta. Ovakvi diskovi mogu trajati milijardama godina, a nama najbliži primjer je Kuiperov pojas u Sunčevu sustavu. U ovoj fazi iz protoplaneta nastaju planeti, a preostala prašina, ako nije izbačena u međudjelovanju sa protoplanetima, uglavnom ostaje u obliku manjih tijela poput asteroida i kometa. Na kraju je važno napomenuti da većina teorija o nastanku i razvoju planeta pretpostavlja da je početak nastanka tijekom klase II, međutim vremenska skala u kojoj se oblikuju planeti je kraća od očekivanog trajanja razvoja klase 0 i klase I, stoga je nastanak planeta ranije od faze III itekako moguć. [5, 7]



Slika 4.3: Model nastanka planetarnog sustava [16].

5 Nastanak i razvoj protoplaneta

5.1 Koagulacija čestica prašine, nastanak i rast planetezimala

U početku, mikrometerska zrnca prašine u disku sudaraju se i lijepe elektrostatskim privlačenjem i van der Waalsovima silama. Tijekom vremena ta zrnca rastu i sakupljaju se u sve veće nakupine i počinju značajno gravitacijski privlačiti materijal oko sebe. Kada dosegnu promjer otprilike jednog metra, zbog trenja s plinom gube energiju, tj. gube orbitalnu brzinu i počinju spiralno padati prema zvijezdi. Ova pojava naziva se *metrička barijera*. Čestice koje tako padaju prema zvijezdi nemaju dovoljno vremena za rast, no zbog turbulencija okolnog plina, vrtložnih pojava u disku (npr. magnetorotacijska nestabilnost) i interakcije s drugim nakupinama prašine dio tih nakupina opire se padu prema zvijezdi. To omogućava formiranje planetezimala, tijela veličine nekoliko kilometara. Kada planetezimali dosegnu kritičnu veličinu njihovo gravitacijsko privlačenje počinje dominirati nad elektrostatskim i van der Waalsovima privlačenjem. Tada planetezimal raste najviše akrecijom, tj. gravitacijskim sakupljanjem okolnog materijala. Stopu akrecije planetezimala \dot{M} možemo procijeniti *Bondi-Hoyleovom* akrecijom [8]:

$$\dot{M} = 2\pi \frac{G^2 M^2 \rho_\infty}{(c_\infty^2 + V^2)^{3/2}}, \quad (5.1)$$

pri čemu su: G gravitacijska konstanta, M masa planetezimala, ρ_∞ gustoća neperturbiranog plina oko planetezimala, c_∞ brzina zvuka u tom (neperturbiranom) plinu, a V brzina planetezimala. Vidimo da brzina akrecije raste kvadratno s masom planetezimala, stoga tijekom rasta planetezimali sve brže i brže nakupljaju materijal oko sebe.

5.2 *Nastanak i rast protoplaneta*

Planetesimali koji dosegnu veličine ~ 10 km počinju gravitacijski dominirati svojim okruženjem i tako rastu brže od manjih tijela u disku. Ovakve planetezimale nazivamo *oligarsi* jer akiraju sav plin i prašinu oko sebe, a sam proces nazivamo *oligarhička akrecija*. Njihovim sudarima i spajanjima nastaju sve veća tijela koja se dalje oblikuju u protoplanete. Kada protoplaneti postanu dovoljno masivni njihova gravitacijska privlačnost postaje sve jača i nakupljaju materijal iz veće udaljenosti eksponencionalno brže od manjih objekta u disku te im masa raste u relativno kratkom vremenu.

5.3 *Migracije protoplaneta*

Interakcija s okolnim plinom može dovesti do promjene u orbitama protoplaneta. Dvije glavne vrste migracija su migracija I i migracija II tipa. Kada manji protoplaneti izgube više kutne količine gibanja, zbog viskoznosti u disku, nego je sakupe lokalnom gravitacijskom interakcijom, kreću se prema središtu diska i tada govorimo o migraciji I tipa. S druge strane, veći protoplaneti stvaraju prazninu unutar diska koja ograničava migraciju drugih protoplaneta, ali oni i dalje sami mogu migrirati s okolnim diskom prema unutrašnjosti. [7]

5.4 *Daljnji razvoj*

Kada protoplaneti postanu dovoljno masivni započinje razdvajanje materijala unutar njih i protoplaneti počinju poprimati slojevitou strukturu. Zbog unutrašnjeg zagrijavanja i razlike u gustoći, teži elementi padaju prema središtu formirajući jezgru, dok lakši elementi ostaju bliže površini i formiraju plašt. Unutarnje zagrijavanje uzrokovano je akrecijskim zagrijavanjem i radioaktivnim raspadima kratkoživućih izotopa. Akrecijsko zagrijavanje jest stvaranje topline unutar protoplaneta uslijed oslobađanja

gravitacijske potencijalne energije tijekom akrecije materijala i možemo ga procijeniti gravitacijskom potencijalnom energijom E_{gp} [9]:

$$E_{gp} = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}, \quad (5.2)$$

pri čemu su: G gravitacijska konstanta, M masa, a R radijus protoplaneta. Kada protoplaneti prikupe većinu materijala oko svoje orbite, veće promjene događaju se gravitacijskom interakcijom između njih. Međusobnim sudarima protoplaneti se mogu izbaciti iz novonastajućeg planetarnog sustava, mijenjati raspored ili stvoriti prirodne satelite i druge manje objekte. Na primjer, neki smatraju da je Mjesec nastao sudarom Zemlje i manjeg protoplaneta. Masivni protoplaneti privuku veliku količinu plina formirajući plinovite divove (npr. Jupiter i Saturn), dok su manji protoplaneti bliži zvijezdi bogatiji tvrdim materijalima poput željeza i silicija te formiraju stjenovite (terestričke) planete (Merkur, Venera, Zemlja, Mars). Osim sudara mogu formirati i stabilne orbitalne odnose sa zvijezdom ili međusobno. Te odnose nazivamo rezonancijama i one sprečavaju sudare u planetarnim sustavima.

6 Zaključak

Istraživanje nastanka i razvoja protoplanetarnih diskova i protoplaneta ključno je za razumijevanje planetarnih i zvjezdanih sustava koje promatramo danas. Niz procesa koje smo opisivali u prethodnim poglavljima obuhvaćaju tijela i događaju se na udaljenostima u velikom rasponu redova veličina. U ovom radu iznijeli smo trenutno razumijevanje tih procesa, ali sama teorija ima još niz neodgovorenih pitanja poput pitanja rasporeda kutne količine gibanja u Sunčevu sustavu, trenutnog položaja Jupitera i Saturna, postojanja Kuiperovog pojasa, prisutstva vode na Zemlji i mnogih drugih. Odgovori na ova pitanja te nastavak istraživanja ovih procesa ključni su za bolje razumijevanje zvjezdanih i planetarnih sustava te mogućnosti postojanja planeta s uvjetima pogodnim za život izvan Sunčeva sustava.

Literatura

- [1] Williams, Jonathan P., and Lucas A. Cieza. "Protoplanetary Disks and Their Evolution." *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 49, no. 1 (September 22, 2011): 67–117.
- [2] Wilson, Thomas L., and Kenneth J. Johnston, eds. *The Structure and Content of Molecular Clouds 25 Years of Molecular Radioastronomy: Proceedings of a Conference Held at Schloss Ringberg, Tegernsee, Germany 14–16 April 1993*. Vol. 439. Lecture Notes in Physics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1994.
- [3] Beuther, Henrik, Ralf S. Klessen, Cornelis P. Dullemond, and Th Henning, eds. *Protostars and Planets VI*. The University of Arizona Space Science Series. Tucson: Houston: The University of Arizona Press; Lunar and Planetary Institute, 2014.
- [4] Hartmann, Lee. *Accretion Processes in Star Formation*. 2nd ed. Cambridge University Press, 2009.
- [5] Carroll, Bradley W., and Dale A. Ostlie. *An Introduction to Modern Astrophysics*: 2nd ed. Cambridge University Press, 2017.
- [6] Dyson, J. E., and David A. Williams. *The Physics of the Interstellar Medium*. Third edition. Boca Raton: CRC Press, 2020.
- [7] Armitage, Philip J. *Astrophysics of Planet Formation*. 2nd ed. Cambridge University Press, 2020.
- [8] Bondi, H. "On Spherically Symmetrical Accretion." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 112, no. 2 (April 1, 1952): 195–204.
- [9] Chandrasekhar, Subrahmanyan. *An Introduction to the Study of Stellar Structure*. Unabr. and corr. Republ. of orig. publ. 1939 by Univ. of Chicago Pr. Dover Books on Astronomy. New York: Dover Publ, 1970.
- [10] "Centrifugalna Sila - Hrvatska Enciklopedija." [https://enciklopedija.hr/clanak/centrifugalna-sila#:~:text=centrifugalna%20sila%20\(centri%2D%20%2B%20%2D,odrediti%20kao%20vektorski%20umno%C5%BEak%20kutne](https://enciklopedija.hr/clanak/centrifugalna-sila#:~:text=centrifugalna%20sila%20(centri%2D%20%2B%20%2D,odrediti%20kao%20vektorski%20umno%C5%BEak%20kutne). (4.11.2024.)

- [11] “Molecular Cloud — COSMOS.” <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/m/Molecular+Cloud>. (18.09.2024.)
- [12] “Disk Formation.” https://lweb.cfa.harvard.edu/COMPLETE/learn/disk_formation/diskformation.html. (18.09.2024.)
- [13] “The Pleiades: Facts about the ‘Seven Sisters’ Star Cluster.” Space.com, October 8, 2019. <https://www.space.com/pleiades.html>. (20.9.2024.)
- [14] National Radio Astronomy Observatory. “Early Evolution of Planetary Disk Structures Seen for the First Time.” <https://public.nrao.edu/news/early-evolution-of-planetary-disk-structures-seen-for-the-first-time/>. (21.9.2024.)
- [15] Cowing, Keith. “Structures In A Young Protoplanetary Disk Suggest Planet Formation.” *SpaceRef* (blog), June 20, 2018. <https://spaceref.com/science-and-exploration/structures-in-a-young-protoplanetary-disk-suggest-planet-formation/>. (21.9.2024.)
- [16] Marov, Mikhail. “The Formation and Evolution of the Solar System.” In *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*, 2018.
- [17] Rab, Christian, Carla Baldovin-Saavedra, Odysseas Dionatos, Eduard Vorobyov, and Manuel Güdel. “The Gas Disk: Evolution and Chemistry.” *Space Science Reviews* 205, no. 1–4 (December 2016): 3–40.
- [18] Krishna, Swapna. “The Kuiper Belt and the Oort Cloud: What to Know.” Ad Astra. <https://www.adastraspaces.com/p/kuiper-belt-oort-cloud>. (22.9.2024.)

Popis slika

2.1	Kompleks molekularnih oblaka Orao (engl. <i>The Eagle Nebula</i>)	3
2.2	Zvezdano jato Messier 45 poznatije kao Plejade (engl. <i>The Pleiades</i>)	4
2.3	Grafički prikaz modela nastanka diska	5
3.1	Radijalna struktura diska oko zvijezde MWC 758	8
3.2	Model Kuiperovog pojasa i Oortovog oblaka	9
3.3	Skica fizičke i kemijske strukture protoplanetarnog diska oko zvijezde slične Suncu	11
4.1	Skica razvoja protoplanetarnog diska	13
4.2	Snimka mladih zvezdanih objekata iz ALMA CAMPOS istraživanja	17
4.3	Model nastanka planetarnog sustava	18

Popis tablica

4.1	Klasifikacija mladih zvjezdanih objekata	14
-----	--	----