

Uticaj migracija planeta na nastanak prstenolikih struktura u protoplanetarnom disku AS 209

Autori: Danilo Ristić, Treća beogradska gimnazija, 4. godina, Beograd

Jovan Dimitrijević, Tehnička škola "Nikola Tesla", 4. godina, Surdulica

Mentor: Vladimir Đošović, Katedra za astronomiju, Matematički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Apstrakt

Numerički je modelovana praznina (eng. *gap*) u protoplanetarnom disku AS 209 korišćenjem programskog paketa REBOUND, nastala kao posledica migracije planete. Orbitalni parametri planete, velika poluosa i ekscentricitet, kao i masa planete, varirani su u granicama od 90-120 AJ, 0-0.1 i 0.05-1 M_J , respektivno. Širina i pozicija praznina sa kojima su upoređeni rezultati simulacija, dobijeni su obradom CCD snimka datog protoplanetarnog diska sa ALMA opservatorije. Ukupno 5180 simulacija propagirano je na vremenskom intervalu od 200000 godina, što je vremenska skala migracije planete u ovom sistemu.

Pronađene su 34 odgovarajuće kombinacije velike poluose, mase i ekscentriciteta planete, koja bi migracijom mogla da formira praznine traženih karakteristika. Primećeno je da, sa ovako zadatim početnim uslovima, prazninu odgovarajuće širine formiraju samo planete mase iznad 0.4 M_J . Kako je od 34 dobijene praznine samo njih tri održalo odgovarajuće parametre do završetka migracije planete, pretpostavlja se da migracija planete u protoplanetarnom disku AS 209 još nije završena. Primećene su i određene pravilnosti u uticaju karakteristika planete na širinu i lokaciju dobijenih praznina u protoplanetarnom disku.

1. Uvod

Protoplanetarni disk predstavlja ostatak oblaka gasa i čestica prašine koji rotira oko novoformirane zvezde i iz kojeg se daljom dinamičkom evolucijom formiraju objekti poput planeta. Posmatranjima u protoplanetarnim diskovima primećena su izvesna opadanja intenziteta zračenja na određenim rastojanjima od zvezde. Ovu pojavu opadanja intenziteta u vidu prstenolike strukture nazivamo praznina (eng. *gap*). Pretpostavka je da ove praznine nastaju kao posledica migracije planeta u disku ka unutrašnjosti, usled aerodinamičkog otpora gasa, koje svojim kretanjem oko zvezde prikupljaju čestice prašine. Na ovaj način modelovan je i nastanak praznina u protoplanetarnom disku u ovom radu.

Tokom dvadesetog veka, otkriveno je postojanje vrućih Jupitera, planeta džinova, koje se nalaze blizu matičnih zvezda. Problem njihovog postojanja je taj što u okolini koja je blizu zvezde, ispod 1 AJ, nema dovoljno materijala za nastanak tolikih planeta (Wang i sar. 2017). Jedno od objašnjenja ovog problema je da su te planete na taj položaj došle migracijom (Morbidelli, 2016). Do migracije dolazi zbog gravitacione interakcije planete sa gasom koji se nalazi u protoplanetarnom disku. U sistemima sličnim Sunčevom, vrući Jupiteri su veoma retki, nalaze se samo u 1% takvih sistema (Dawson i Johnson 2018). Postoje dva modela koji predviđaju sadašnju konfiguraciju Sunčevog sistema. Grand tack model (Walsh et al. 2011) opisuje veoma ranu evoluciju Sunčevog sistema i objašnjava zašto Jupiter nije bliži Suncu. U ovom modelu planeta migrira ka zvezdi kao posledica interakcije sa gasom, što je takođe slučaj koji smo koristili za modelovanje nastanka praznina. Kasnija evolucija Sunčevog sistema je opisana Nice modelom (Tsiganis i sar. 2005, Nesvorný, 2011). Prema ovom modelu nakon disipacije gasa došlo je do migracije Saturna, Urana i Neptuna usled interakcije sa diskom planetezimala, na udaljenosti od 30 do 35 AJ od Sunca.

Protoplanetarni disk AS 209 nalazi se na udaljenosti od 121 pc od Sunca (Andrews i sar. 2009). Sastoji se od diska prečnika 278 AJ i centralne zvezde tipa K5, poluprečnika 2.3 R_{\odot} , luminoznosti 1.5 L_{\odot} i mase 0.9 M_{\odot} (ibid.). Starost diska iznosi oko 1 Myr, a inklinacija diska je 38 stepeni (ibid.). Dati protoplanetarni disk korišćen je za analizu u ovom radu, kako sadrži veliki broj jasno vidljivih praznina u disku. Nastanak praznina, kao posledicu migracije, u protoplanetarnom

disku AS 209, analizirali su i Davide Fedele i saradnici (Fedele i sar. 2018), korišćenjem hidrodinamičke simulacije, sa dobijenim vrednostima za položaj i širinu najveće praznine koje iznose, respektivno, 87 AJ i 32 AJ. Kao rezultat datog rada, dobijeno je poklapanje sa planetom mase $0.2 M_J$ na udaljenosti od 95 AJ.

Cilj projekta je ispitivanje uticaja orbitalnih parametara i mase planete na nastanak i izgled praznina u protoplanetarnom disku AS 209. Nastanak datih praznina ispitivan je kao posledica migracije planete u protoplanetarnom disku ka unutrašnjosti. Obradom *FITS* fajla postojećeg posmatranja protoplanetarnog diska AS 209, sa ALMA opservatorije, dobijene su širina i pozicija praznina u disku. Dati sistem je numerički simuliran sa implementiranim procesom migracije planete unutar diska, nakon čega su dobijeni rezultati širine i pozicija praznina poređeni sa rezultatima dobijenim obradom slike.

2. Metod

2.1 Obrada slike protoplanetarnog diska AS 209

Da bi se odredile karakteristike praznina, potrebno je poznavati kako relativni položaj protoplanetarnog diska u odnosu na posmatrača utiče na oblik praznina. Očekuje se da je oblik praznine sličan orbiti planete. Gas u disku kreće se sub-keplerovski, po orbiti koja je na manjoj udaljenosti od zvezde od orbite koju bi to telo imalo da se kreće u vakuumu, pa formirane praznine teže kružnom obliku. Međutim, kako je protoplanetarni disk na nebeskoj sferi nagnut u odnosu na posmatrača, praznine prividno imaju elipsoidan oblik. Fitovanjem elipsi na konture protoplanetarnog diska bi se mogla odrediti širina kao udaljenost između susednih elipsi, a položaj kao udaljenost unutrašnje elipse od zvezde. Međutim, protoplanetarni disk u opštem slučaju nije orijentisan tako da se pravac normale na njegovu površinu poklapa sa pravcem vizure ka protoplanetarnom disku.

Za fazu obrade slike, korišćen je *FITS* fajl jednog posmatranja datog protoplanetarnog diska sa ALMA opservatorije. Dati fajl pretvoren je u binarni oblik, iz koga su izvučene pronađene konture u fajlu, korišćenjem softverskog paketa *Matplotlib*. Dalje je bilo potrebno opisati date konture elipsama i izvući elipse koje predstavljaju unutrašnje i spoljašnje granice praznina u protoplanetarnom disku. Za svaku tačku iz unutrašnje elipse svake praznine, nađena je najbliža udaljenost od spoljašnje elipse iste praznine. Dalje je na osnovu tih vrednosti napravljena raspodela vrednosti širine i položaja za svaku prazninu. Širine su dobijene kao data najbliža udaljenost tačke unutrašnje od spoljašnje elipse, a položaj kao sama udaljenost tačke od zvezde. Samim tim je napravljeni opseg vrednosti za položaj i širinu praznine. Za referente vrednosti širine i položaja praznine, u odnosu na koje će rezultati dobijeni simulacijama biti upoređivani, uzete su vrednosti maksimuma iz dobijenih raspodela. Dalje su izdvojeni parametri za dve najveće praznine (slika 3), s tim što je u daljoj analizi posmatrana samo ona veća.

2.2 Model protoplanetarnog diska AS 209

2.2.1 Model gasa u protoplanetarnom disku

Protoplanetarni disk AS 209 se sastoji od prašine i gasa koji rotiraju oko zvezde stare 1,6 miliona godina i mase $0.9 M_{\odot}$ (Andrews i sar. 2009). Gustina gasa zavisi od udaljenosti od zvezde i visine. Visina je definisana kao normalno rastojanje od središnje ravni. To je ravan koja protoplanetarni disk deli na dva simetrična dela i pritom je presek te ravni i protoplanetarnog diska prsten. Površinska gustina gasa Σ_g zavisi od rastojanja od zvezde R na sledeći način (ibid.):

$$\Sigma_g = \Sigma_{gc} \left(\frac{R}{R_c} \right)^{-\gamma} e^{-\left(\frac{R}{R_c} \right)^{2-\gamma}}, \quad (1)$$

gde su Σ_{gc} , R_c i γ konstante. Za AS 209 R_c , rastojanje od zvezde na kom površinska gustina prelazi sa stepene na eksponencijalnu zavisnost, iznosi 126 AJ, a γ 0.4 (ibid.). Konstanta normalizacije Σ_{gc} ima takvu vrednost da se integraljenjem izraza 2 nad celom površinom diska dobija ukupna masa gasa u disku. Iz integracije sledi da je konstanta Σ_{gc} data sledećim izrazom:

$$\Sigma_{gc} = (2 - \gamma) \frac{M_{gd}}{2\pi R_c^2},$$

gde je M_{gd} masa gasa u disku. Ukupna masa diska iznosi $0.028 M_\odot$, dok je masa gasa 100 puta veća od mase prašine (ibid.). Odatle se dobija da je $M_{gd} = 0.0277 M_\odot$, a $\Sigma_{gc} = 4.44 \cdot 10^{-7} \frac{M_\odot}{AU^2}$. Time je površinska gustina u potpunosti određena. Međutim, za simulaciju je potrebno znati kolika je zapreminska gustina gasa u bilo kom delu prostora. U ravnotežnom stanju, kada su gravitaciona sila i sila pritiska gasa izjednačene, može se doći do zavisnosti zapreminske gustine gasa ρ_g na rastojanju R , od visine z :

$$\rho_g = \rho_{g0} e^{\frac{-z^2}{2h^2}}, \quad (2)$$

gde je ρ_{g0} zapreminska gustina gasa na rastojanju R u središnjoj ravni, z je visina, a h je karakteristična visina (eng. scale height) na kojoj je gustina gasa $e^{\frac{1}{2}}$ puta manja od gustine gasa u središnjoj ravni za dato rastojanje R . Veličina h zavisi od udaljenosti kao:

$$h = h_c R \left(\frac{R}{R_c} \right)^\varphi.$$

Za AS 209 h_c iznosi 0.136, a φ 0.1 (Andrews i sar. 2009). Integraljenjem izraza 2 duž visine, od $-\infty$ do ∞ dobija se površinska gustina gasa na rastojanju R od zvezde. Odatle se ρ_{g0} može izraziti preko Σ_g :

$$\rho_{g0} = \frac{\Sigma_g}{\sqrt{2\pi h}}.$$

Za izračunavanje sile otpora, potrebna je brzina gasa u protoplanetarnom disku. Intenzitet te brzine v_g se zbog pritiska gasa razlikuje od keplerovske brzine (Daisaka, 2006) koju bi imalo telo koje se kreće u vakuumu $v_{kep} = \sqrt{\frac{\mu}{R}}$, gde je $\mu = GM_\oplus$ standardni gravitacioni parametar zvezde, a G je gravitaciona konstanta. Brzina v_g je data jednačinom:

$$v_g = v_{kep} \sqrt{1 - \frac{11}{4} \left(\frac{h}{R} \right)^2}$$

2.2.2 Model prašine u protoplanetarnom disku

Prašina u protoplanetarnom disku u ovom radu je predstavljena kao skup čvrstih tela jednake mase. Masa pojedinačne čestice prašine je zanemarljivo mala u poređenju sa najmanjom masom planete koja je korišćena u simulaciji. Iz tog razloga je gravitacioni uticaj čestica prašine na planetu zanemaren, a zanemareni su i međusobni gravitacioni uticaji čestica prašine, pošto su zanemarljivi u odnosu na uticaj zvezde i planete.

Protoplanetarni disk je u simulaciji ispunjen česticama prašine u granicama radijalnog rastojanja od 50 do 150 AJ. U tom opsegu, protoplanetarni disk je izdelfjen na male prstenove širine $\Delta R = 1$ AJ. Smatra se da površinska gustina prašine ima isti oblik zavisnosti kao i površinska gustina gasa (Birnstiel i sar. 2010). U prstenu se aproksimativno nalazi masa Δm koja, na osnovu jednačine 1, zavisi od površinske gustine prašine i donje granice prstena R_d :

$$\Delta m = \Sigma_{pc} \left(\frac{R_d}{R_c} \right)^{-\gamma} e^{-\left(\frac{R_d}{R_c} \right)^{2-\gamma}} 2\pi R_d \Delta R. \quad (3)$$

Konstanta Σ_{pc} se može dobiti normalizacijom izraza za površinsku gustinu čestica prašine:

$$\Sigma_{pc} = (2 - \gamma) \frac{M_{pd}}{2\pi R_c^2} = (2 - \gamma) \frac{Nm_p}{2\pi R_c^2},$$

gde je M_{pd} masa prašine u disku, N broj čestica prašine, a m_p masa jedne čestice. Deljenjem obe strane jednačine (3) sa m_p , dobija se broj čestica prašine u prstenu:

$$\Delta n = \frac{(2 - \gamma)N}{2\pi R_c^2} \left(\frac{R_d}{R_c} \right)^{-\gamma} e^{-\left(\frac{R_d}{R_c} \right)^{2-\gamma}} 2\pi R_d \Delta R,$$

što se prostije može zapisati kao:

$$\Delta n = \Sigma'_{pc} \left(\frac{R_d}{R_c} \right)^{-\gamma+1} e^{-\left(\frac{R_d}{R_c} \right)^{2-\gamma}} \Delta R,$$

gde je:

$$\Sigma'_{pc} = \frac{(2 - \gamma)N}{R_c}.$$

Unutar prstena su velike poluose čestica prašine raspoređene uniformno od donje granice prstena do gornje granice prstena. Ekscentriciteti su uniformno raspoređeni u opsegu od 0 do 0.1. Inklinacije čestica prašine unutar prstena su raspoređene po normalnoj raspodeli, sa centrom raspodele u nuli. Standardna devijacija te raspodele je:

$$\sigma_i = c * \arcsin \left(\frac{h(R_d)}{a} \right),$$

gde je a velika poluosa čestica prašine, a h karakteristična normalna udaljenost čestice od nulte središnje ravni diska. Konstanta c iznosi 1.73747 i predstavlja vrednost pri kojoj na udaljenosti od 200 AJ od zvezde standardna devijacija inklinacije iznosi 15° (Batygin i Brown 2016). Argument perihela, longituda uzlaznog čvora i srednja anomalija raspoređeni su uniformno od 0 do 2π rad.

2.3 Sile koje deluju na planetu

Da bi se odredilo kretanje planete, potrebno je znati resultantnu silu koja deluje na nju. Kako je gravitacioni uticaj čestica prašine na planetu zanemaren, slučaj je pojednostavljen i sveden na rešavanje problema dva tela, planeta-zvezda, sa dodatim silama koje opisuju migraciju. Pošto se planeta kreće u sredini koja je ispunjena gasom, na nju deluje sila otpora. Sila otpora sredine je usmerena suprotno od smera relativne brzine planete u odnosu na gas v_{rel} , i po intenzitetu joj je jednaka (Armitage, 2010):

$$F_{os} = \frac{1}{2} C_d A \rho_g v_{rel}^2,$$

gde je C_d koeficijent koji zavisi od oblika tela koji se kreće kroz gas, i za sferno telo, kao što je planeta, ova konstanta iznosi 0.5; A je površina poprečnog preseka tela, normalnog na vektor brzine kojom se telo kreće u odnosu na gas.

Dinamičko trenje je reakcija gasa na kretanje planete kroz njega. U disku koji se može smatrati izotermalnim, važi da je sila koja deluje na planetu velike poluose a i mase M_p u cilindričnim koordinatama data sledećim jednačinama (Kominami i sar. 2005; Daisaka i sar. 2006; Ogihara i sar. 2007):

$$F_{gor} = \frac{M_p^2}{M_\odot} \left(\frac{v_k}{c_s}\right)^4 \left(\frac{\Sigma_g r_{cil}^2}{M_\odot}\right) \Omega_k (2A_r^c (v_\theta - r_{cil} \Omega_k) + A_r^s v_r)$$

$$F_{go\theta} = \frac{M_p^2}{M_\odot} \left(\frac{v_k}{c_s}\right)^4 \left(\frac{\Sigma_g r_{cil}^2}{M_\odot}\right) \Omega_k (2A_\theta^c (v_\theta - r_{cil} \Omega_k) + A_\theta^s v_r) - 2.17 \frac{M_p^2}{M_\odot} \left(\frac{v_k}{c_s}\right)^2 \left(\frac{\Sigma_g r_{cil}^2}{M_\odot}\right) \Omega_k v_k$$

$$F_{goz} = \frac{M_p^2}{M_\odot} \left(\frac{v_k}{c_s}\right)^4 \left(\frac{\Sigma_g r_{cil}^2}{M_\odot}\right) \Omega_k (A_z^c v_z + A_z^s \Omega_k),$$

gde su F_{gor} , $F_{go\theta}$ i F_{goz} , respektivno, radijalna komponenta, azimutalna komponenta i komponenta paralelna z osi sile gravitacionog otpora, r_{cil} projekcija vektora položaja na središnju ravan, i gde su:

$$A_r^c = 0.057, \quad A_\theta^c = -0.868, \quad A_z^c = -1.088$$

$$A_r^s = 0.176, \quad A_\theta^s = 0.325, \quad A_z^s = -0.871$$

$$v_k = \sqrt{\frac{\mu}{a}}, \quad \Omega_k = \sqrt{\frac{\mu}{r_{cil}^3}}$$

Brzine v_k predstavlja brzinu tela koje bi se kretalo po kružnoj orbiti u vakuumu kada bi rastojanje tela od centralne zvezde bilo a , a v_θ i v_r su, respektivno, azimutalna i radijalna komponenta brzine tela. Ugaona brzina Ω_k predstavlja ugaonu brzinu tela koje bi se kretalo po kružnoj orbiti u vakuumu oko centralne zvezde na udaljenosti r_{cil} , a brzina zvuka c_s je:

$$c_s = \Omega h, \quad \Omega = \sqrt{\frac{\mu}{R^3}}$$

gde je Ω ugaona brzina tela koje bi se kretalo po kružnoj orbiti u vakuumu oko centralne zvezde na udaljenosti R .

Sile dinamičkog trenja su znatno većeg intenziteta od sile otpora sredine. Pod dejstvom ovih sila velika poluosa planete će se tokom vremena smanjivati, odnosno planeta će migrirati ka zvezdi.

3. Parametri simulacije

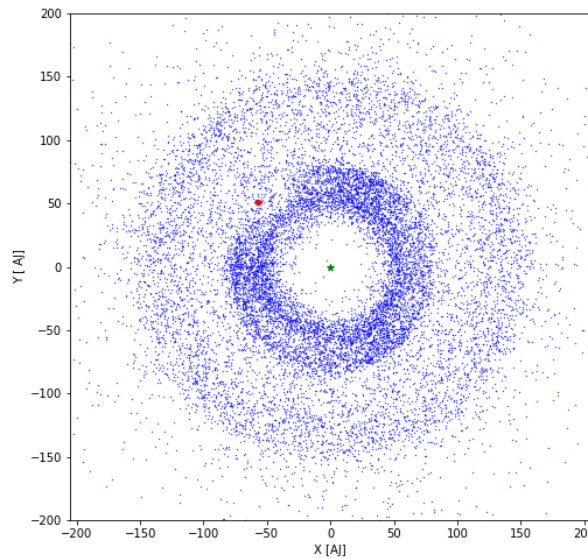
Da bi se ispitalo kako karakteristike planete utiču na prazninu, izvršene su numeričke simulacije protoplanetarnog diska AS 209. Za simulaciju diska korišćen je programski paket REBOUND (Rein i Tamayo 2015). Protoplanetarni disk je simuliran pomoću 20 000 bezmasenih čestica, koje gravitaciono ne utiču na kretanje planete, raspoređenih po površini celog diska prema jednačini (1). Posmatrane su samo one čestice koje su u početku bile u opsegu radijalnog rastojanja od 50 AJ do 150 AJ u disku, čime je dobijen disk sačinjen od 15913 bezmasenih čestica i dve masene čestice koje predstavljaju planetu i zvezdu. Bezmasene čestice su korišćene kao čestice prašine u disku, dok je efekat gasa simuliran kroz sile koje utiču na planetu u simulaciji. Varirani su orbitalni parametri planete: velika poluosa u granicama 90-120 AJ sa korakom 1 AJ, ekscentricitet u

granicama 0-0.1, sa korakom 0.01, i masa planete u granicama 0.05-1 M_J , sa korakom 0.05 M_J . Na taj način je dobijeno 6000 različitih kombinacija početnih parametara. Vrednosti velike poluose i ekscentriciteta su izabrane tako da planeta na početku bude konstantno u okolini posmatrane praznine. Pored toga, granične vrednosti mase su izabrane tako da se pokrije širok interval oko vrednosti dobijene u radu (Fedele i sar. 2017). Interval na koji je simulacija propagirana je dobijen preko formule (4) za vremensku skalu migracije (Armitage 2010):

$$t_m \cong 1.4 * 10^6 \left(\frac{M_p}{5M_\oplus} \right)^{-1} \left(\frac{a}{5AJ} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\Sigma}{20gcm^{-2}} \right)^{-1} \left(\frac{h}{0.05} \right)^2 yr, \quad (4)$$

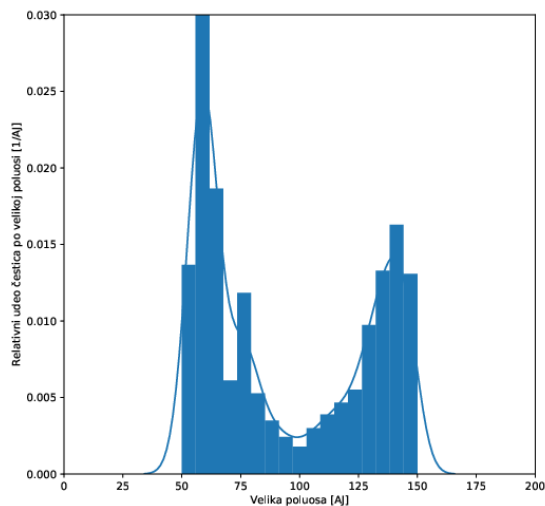
gde su M_p , M_\oplus , a , Σ , respektivno masa planete, masa zvezde, velika poluosa i površinska gustina diska, za udaljenost na kojoj se nalazi planeta, a h/r odnos karakteristične normalne udaljenosti od središnje ravni diska i radijalnog rastojanja. Na ovaj način je dobijena vrednost $t_m \cong 200\ 000$ godina.

Dobijeni su podaci za svakih 10 000 godina. Posmatrani su samo oni slučajevi gde je kombinacija velike poluose i ekscentriciteta orbite planetu na početku postavljala u opseg između 85 i 120 AJ. Ostali slučajevi nisu posmatrani, jer se za date početne uslove i za definisanu vremensku skalu ne dobija planeta koja formira traženu prazninu. Time je izvršeno 5180 simulacija. Kasnije su rezultati tih simulacija upoređeni sa osobinama praznine koja je uočena posmatranjima. Postojanje praznine u simulaciji može se uočiti vizuelno, korišćenjem prikaza simulacije u XY ravni, profila gustine i histograma velikih poluosa čestica u simulaciji. Izgled simulacije protoplanetarnog diska nakon 200 000 godina za planetu sa velikom poluosom od 108 AJ, ekscentricitetom 0.07 i sa masom od 0.5 M_J prikazan je na slici 1. Na toj slici, jasno je uočljiva struktura oblika prstena smanjene gustine čestica. Površinska gustina je jedna od veličina koja se može koristiti za određivanje parametara praznine. Pored nje, praznina se može uočiti i na osnovu raspodele velikih poluosa čestica. Na slici 2 prikazana je takva raspodela za planetu gore navedenih karakteristika, u simulaciji nakon 200 000 godina. Na slici se može primetiti postojanje praznine u vidu udubljenja na istim udaljenostima na kojima se primećuje prstenolika struktura na slici 1.



Slika 1. Prikaz simulacije protoplanetarnog diska u XY ravni nakon 200 000 godina za planetu mase 0.5 M_J , početne velike poluose 108 AJ i ekscentriciteta 0.07. (plavom bojom su označene čestice prašine dok je crvenom bojom označena planeta)

Figure 1. Appearance of simulation of the protoplanetary disk in XY plane after 200 000 years for a planet of mass $0.5 M_J$, initial semi-major axis 108 AU and eccentricity 0.07. (blue colour represents dust particles and the red dot represents the planet)

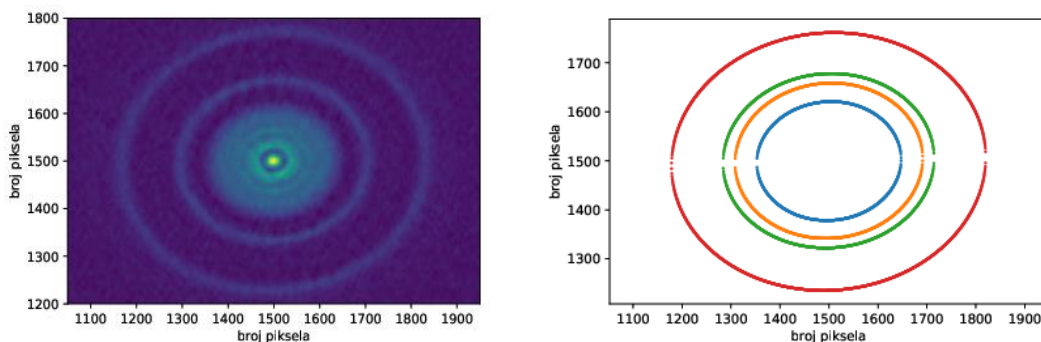


Slika 2. Prikaz histograma velikih poluosa čestica u simulaciji nakon 200 000 godina za planetu mase $0.5 M_J$, početne velike poluose 108 AJ i ekscentriciteta 0.07

Figure 2. Appearance of histogram of semi-major axes in a simulation after 200 000 years for a planet of mass $0.5 M_J$, initial semi-major axis 108 AU and eccentricity 0.07.

4. Rezultati i diskusija

Analiziran je snimak protoplanetarnog diska AS 209 sa ALMA opservatorije (Andrews i sar. 2009). Obradom FITS fajla dobijene su elipse koje predstavljaju granice praznina u protoplanetarnom disku (slika 3). Položaj i širina najveće praznine dobijene preko elipsi prikazane su u tabeli 1.



Slika 3. Protoplanetarni disk AS 209 (levo, svetloplave oblasti predstavljaju oblasti većeg intenziteta svetlosti) i elipse dobijene obradom FITS fajla (desno, gde elipse predstavljaju granice praznina u protoplanetarnom disku)

Figure 3. Protoplanetary disk AS 209 (left, with the light blue regions representing areas of more intense light) and ellipses obtained from FITS file processing (right, where the ellipses represent the outlines of the gaps in the protoplanetary disk)

Tabela 1: Dobijene vrednosti za lokaciju i širinu spoljašnje praznine u disku

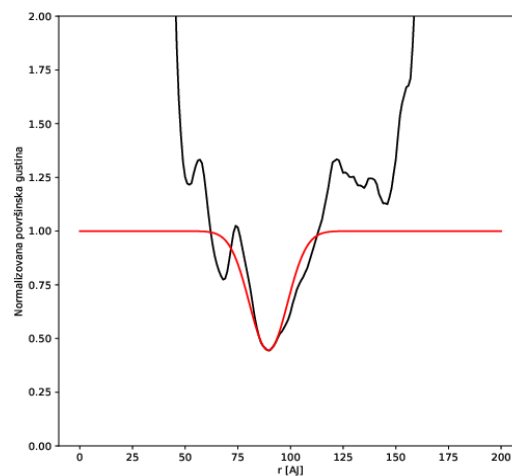
Table 1: Values obtained for the location and width of the outer gap in the disk

Širina praznine	$(33.5 \pm 0.5) \text{AJ}$
Položaj praznine	$(81.5 \pm 0.5) \text{AJ}$

Ove vrednosti su upoređene sa parametrima praznine iz svake simulacije. Za određivanje osobina praznine dobijene simulacijom, korišćen je normalizovani profil gustine. Normalizovani profil gustine je količnik profila gustine i profila gustine u početnom trenutku. Ova veličina je za svaku simulaciju analizirana na svakih 10 000 godina i pronađen je njen minimum. U slučajevima kad je minimum manji od 0.5 (Malik, 2015) fitovan je gausijan na profil gustine (slika 4). Širina je određena kao FWHM (širina na polovini vrednosti maksimuma) tog gausijana, a položaj kao vrednost radijalne udaljenosti za koju se dostiže minimum umanjen za HWHM gausijana. Na slikama 5, 6, 7 i 8 je, za različite početne uslove, prikazano kako položaj i širina praznine, po završetku simulacije, zavise od početne velike poluose planete i početnog ekscentriciteta planete. Na osnovu slika 5 i 7 može se primetiti da sa povećanjem zadate početne vrednosti velike poluose povećava i dobijena vredost za položaj praznine, što nam govori o jasnoj zavisnosti između položaja praznine i početne velike poluose planete. Nasuprot tome, ne primećuje se zavisnost početnog ekscentriciteta planete i položaja praznine. Na slikama 6 i 8 ne primećuje se zavisnost dobijene vrednosti širine praznine od početnih vrednosti velike poluose i ekscentriciteta planete. U tabeli 2 su prikazani početni uslovi koji omogućuju formiranje praznine čiji se parametri poklapaju sa parametrima iz tabele 1, i trenutak u simulaciji u kom su se parametri poklopili. Može se uočiti da za vremenski period od 200 000 godina planete koja stvaraju odgovarajuću prazninu imaju masu veću ili jednaku $0.45 M_J$. Takođe, analizom datih podataka može se primetiti da se sa povećanjem mase planete, smanjuje prosečna vrednost početne poluose za koju planeta proizvodi prazninu traženih karakteristika. Dati rezultati nam govore o jasnoj zavisnosti mase planete na parametre praznine koju ona proizvodi. Dobijeno rešenje možemo uporediti sa rezultatima rada Davidea Fedele i saradnika (Fedele et al. 2018), u kojem se prati sličan postupak simuliranja sistema AS 209 sa implementacijom migracione sile na planetu. Navedeni rad je kao rezultat naveo da bi date praznine u razmatranom disku mogla da napravi planeta mase $0.2 M_J$, što prema rezultatima našeg rada ne bi bilo moguće, pošto ni u jednom slučaju planeta mase ispod $0.45 M_J$ nije proizvela odgovarajuću prazninu. Pomenute razlike mogu biti posledica korišćenja različitih tipova simulacija, gde je u referentnom radu korišćena hidrodinamička simulacija, dok je u našem radu korišćena N-body simulacija sa dodatom migracionom silom. Takođe, na razliku u rezultatima između pomenutog rada i našeg, mogle su imati uticaj i različite dobijene vrednosti dobijene za položaj i širinu posmatrane praznine iz posmatranja. Navedeni rad za položaj praznine navodi udaljenost od 95 AJ od zvezde, što je značajno više nego što je dobijeno našom analizom, mada vrednosti položaja praznine u disku AS 209 dosta variraju u različitim izvorima (Van der Marel et al. 2019). Nasuprot prethodno pomenutom referentnom radu, Van der Marelova i saradnici pretpostavljaju da praznine širine nalik na posmatranu prazninu diska AS 209 prave planete masa približnih masi Jupitera, što se slaže sa rezultatima našeg rada (Van der Marel et al. 2018).

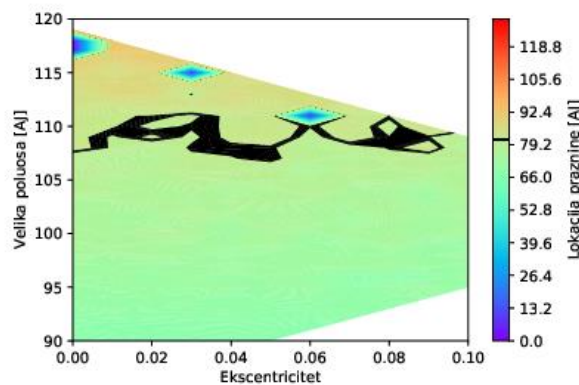
Takođe je primećena veza između početne velike poluose planete i trenutka u kojem nastaje praznina odgovarajućih karakteristika. Naime, ukoliko se uporede vremenski trenuci nastanka praznina u simulacijama manjih početnih velikih poluosa (90-100 AJ), i simulacijama većih početnih poluosa, (105-120 AJ), primećuje se da pri manjim poluosama praznina odgovarajućih karakteristika nastaje ranije. Data veza je i očekivana, pošto planeti sa manjom početnom poluosom treba manje vremena da migracijom dostigne traženu udaljenost praznine.

Primećeno je da su, od 34 dobijene, samo tri praznine u simulaciji održale odgovarajuće vrednosti za položaj i širinu praznine do završetka simulacije. Navedeni rezultat nas dovodi do zaključka da ovakve praznine mogu da predstavljaju prolazne strukture u evoluciji protoplanetarnog diska. Moramo uzeti u obzir da trajanje migracije planete u stvarnosti može varirati u dužini, i razlikovati se od procene vremenske skale dobijene jednačinom (4), i da migraciona sila u simulaciji utiče na planetu tokom celog trajanja simulacije. Iz tih razloga, ukoliko bi trajanje migracije bilo kraće od procene skale, prolaznost bi mogla biti posledica nastavka migracije u simulaciji. Zbog toga je moguće da bi se za manju procenjenju skalu migracije dobilo više praznina koje nisu prolazne.



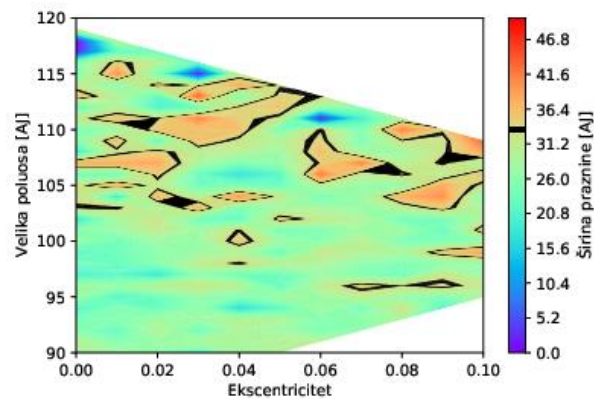
Slika 4. Primer fitovanog gausijana na normalizovani profil gustine diska u simulaciji

Figure 4. An example of Gaussian fitted to normalised profile of density of a disk in a simulation



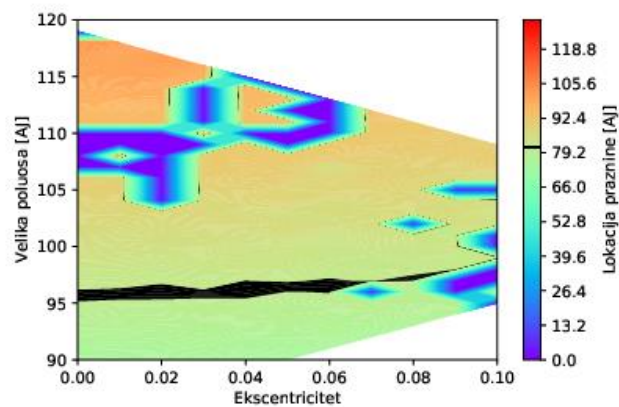
Slika 5. Zavisnost lokacije praznine od ekscentriciteta i velike poluose planete na početku simulacije nakon 200 000 godina za planetu mase $0.5 M_J$ (crnim linijama označeni su položaji koji se poklapaju sa onim dobijenim obradom slike)

Figure 5. Dependence of the location of gap after 200 000 years of eccentricity and semi-major axis at the beginning of a simulation of a planet of mass $0.5 M_J$ (with the black lines representing the location that corresponds with the values acquired through the analysis of the .FITS file)



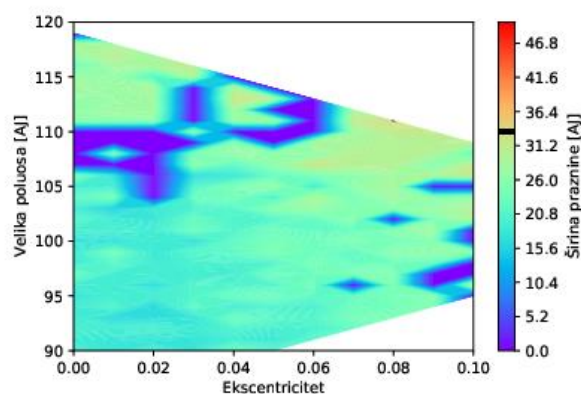
Slika 6. Zavisnost širine praznine od ekscentriciteta i velike poluose planete na početku simulacije nakon 200 000 godina za planetu mase $0.5 M_J$ (crnim linijama označene su širine koje se poklapaju sa širinom dobijenom obradom slike)

Figure 6. Dependence of the width of gap after 200 000 years of eccentricity and semi-major axis at the beginning of a simulation of a planet of mass $0.5 M_J$ (with the black lines representing the width that corresponds with the values acquired through the analysis of the .FITS file)



Slika 7. Zavisnost položaja praznine od ekscentriciteta i velike poluose planete na početku simulacije nakon 200 000 godina za planetu mase $0.3 M_J$ (crnim linijama označeni su položaji koji se poklapaju sa onim dobijenim obradom slike)

Figure 7. Dependence of the location of gap after 200 000 years of eccentricity and semi-major axis at the beginning of a simulation of a planet of mass $0.3 M_J$ (with the black lines representing the location that corresponds with the values acquired through the analysis of the .FITS file)



Slika 8. Zavisnost širine praznine od ekscentriciteta i velike poluose planete na početku simulacije nakon 200 000 godina za planetu mase $0.3 M_J$ (crnim linijama označene su širine koje se poklapaju sa širinom dobijenom obradom slike)

Figure 8. Dependence of the width of gap after 200 000 years of eccentricity and semi-major axis at the beginning of a simulation of a planet of mass $0.3 M_J$ (with the black lines representing the width that corresponds with the values acquired through the analysis of the .FITS file)

Tabela 2. Parametri simulacija koji proizvode odgovarajuću prazninu u vremenskom trenutku od početka simulacije, prikazanom u prvoj koloni

Table 2: Parameters of simulation which produce required gap in moment of time since the beginning of the simulation in the first column

Vreme (god)	Masa (MJ)	Velika poluosa (AJ)	Ekscentricitet	Položaj praznine (AJ)	Širina praznine (AJ)
70000	0.55	95	0.06	81.50	33.01
80000	0.8	97	0.09	81.70	33.20
	1	102	0.03	81.14	33.02
90000	1	102	0.06	81.86	33.48
	0.7	99	0.09	81.67	33.67
100000	0.95	104	0.03	81.56	33.60
	0.9	106	0.08	81.80	33.46
110000	0.9	108	0.08	81.31	33.60
120000	0.7	104	0.08	81.27	33.86
	0.75	104	0.02	81.56	33.13
	0.8	108	0.04	81.37	33.72
130000	0.6	103	0.06	81.03	33.19
	0.65	105	0.05	81.98	33.54
	0.85	112	0.02	81.56	33.25
	0.95	114	0.01	81.15	33.38
140000	0.55	104	0.08	81.66	33.04
	0.6	104	0.05	81.67	33.28
	0.65	106	0.01	81.37	33.66
	0.65	107	0	81.44	33.76
	0.7	109	0.01	81.64	33.50
	0.8	108	0.02	81.09	33.05
150000	0.55	104	0.01	81.08	33.11
	0.6	107	0.06	81.56	33.89

	0.6	108	0.01	81.98	33.72
170000	0.6	112	0.06	81.06	33.02
	0.7	110	0.09	81.49	33.79
180000	0.5	107	0	81.68	33.83
	0.5	107	0.02	81.26	33.22
	0.5	108	0.07	81.68	33.61
	0.55	108	0.04	81.55	33.16
190000	0.45	105	0.05	81.09	33.77
200000	0.5	110	0.02	81.15	33.69
	0.5	111	0.06	81.79	33.46
	0.55	111	0.06	81.63	33.19

5. Zaključak

Cilj ovog projekta bio je ispitivanje uticaja mase i početnih orbitalnih parametara planete - ekscentriciteta i velike poluose, na nastanak praznina u protoplanetarnom disku. Poređenjem rezultata simulacije sa parametrima praznine dobijenim iz posmatranja, pronađena su 34 odgovarajuća seta parametara planete koja bi mogla migracijom da proizvede posmatranu prazninu u protoplanetarnom disku AS 209. Rezultati pokazuju jasnu zavisnost mase planete na dobijene parametre nastale praznine, pa tako i da planete mase manje od $0.45 M_J$ ne mogu da proizvedu prazninu koja bi odgovarala praznini iz posmatranja. Navedeno zapažanje poklapa se sa pretpostavkom da ovakve praznine prave planete masa približnih Jupiteru (Van der Marel, 2018), ali se ne poklapa sa rezultatima rada Davidea Fedele i saradnika (Fedele i sar., 2018), u kojem se kao rezultat dobija najbolje poklapanje sa planetom mase $0.2 M_J$, što prema rezultatima našeg rada nije moguće. Navedena odstupanja mogu biti posledica različitih tipova simulacija, budući da je u referentnom radu korišćena hidrodinamička simulacija, a kod nas je uticaj gasa modelovan u vidu dodatnih sila koje deluju na planetu. Pomenuta odstupanja mogu biti i posledica različitih početnih vrednosti za položaj i širinu praznine čiji je nastanak simuliran. Takođe je uočeno da položaj praznine ne zavisi od početnog ekscentriciteta, već samo od početne velike poluose. Dati rezultat je i očekivan pošto su korišćene vrednosti ekscentriciteta planetarne orbite bile male, a pod uticajem dinamičkog trenja na planetu taj ekscentricitet se dodatno smanjuje sa vremenom. S druge strane, širina praznine ne zavisi ni od početne velike poluose ni od početnog ekscentriciteta. Dati rezultati pokazuju da je širina praznine više svojstvo planete, odnosno njene mase, nego početnih orbitalnih parametara planete. Pored analize zavisnosti datih parametara na dobijenu prazninu, na osnovu dobijenih rezultata, primećeno je i da su, za korišćenu vremensku skalu migracije, od 34 dobijenih praznina odgovarajućih parametara, samo tri praznine održale odgovarajuće parametre do završetka migracije. Navedeni rezultati ukazuju na to da je ispitivanu prazninu u protoplanetarnom disku AS 209 izazvala planeta mase iznad $0.4 M_J$, čija faza migracije verovatno još nije završena, i da je po završetku možemo očekivati na nešto manjim velikim poluosama od početne.

Zahvalnost. Autori se zahvaljuju mentoru, Vladimiru Đošoviću, koji je svojim predlozima pomogao u realizaciji ovog rada. Takođe, zahvaljuje se Debori Pavela na korisnim komentarima.

6. Literatura

1. Andrews S. M., Wilner D. J., Hughes A. M., Qi C., Dullemond C. P. 2009. Protoplanetary disk structures in Ophiuchus. *The Astrophysical Journal*, 700 (2): 1502.
2. Armitage P. J. 2010. *Astrophysics of planet formation*. Cambridge University Press.
3. Batygin K., Brown M. 2016. EVIDENCE FOR A DISTANT GIANT PLANET IN THE SOLAR SYSTEM. *The Astronomical Journal*, 151 (2): 22.
4. Birnstiel T., Dullemond C. and Brauer F. 2010. Gas- and dust evolution in protoplanetary disks. *Astronomy and Astrophysics*, 513: A79.
5. Daisaka J. K., Tanaka H., Ida S. 2006. Orbital evolution and accretion of protoplanets tidally interacting with a gas disk: II. Solid surface density evolution with type-I migration. *Icarus*, 185 (2): 492.
6. Dawson R., Johnson J. 2018. Origins of Hot Jupiters. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56 (1): 175.
7. Fedele D., Tazzari M., Booth R., Testi L., Clarke C. J., et al. 2018. ALMA continuum observations of the protoplanetary disk AS 209-Evidence of multiple gaps opened by a single planet. *Astronomy & Astrophysics*, 610: A24.
8. Kominami J., Tanaka H., Ida S. 2005. Orbital evolution and accretion of protoplanets tidally interacting with a gas disk: I. Effects of interaction with planetesimals and other protoplanets. *Icarus*, 178 (2): 540.
9. Malik M., Meru F., Mayer L., Meyer, M. 2015. On the gap-opening criterion of migrating planets in protoplanetary disks. *The Astrophysical Journal*, 802 (1): 56.
10. Morbidelli A., Raymond S. N. 2016. Challenges in planet formation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121 (10): 1980.
11. Nesvorný D. 2011. Young solar system's fifth giant planet?. *The Astrophysical Journal Letters*, 742 (2): L22.
12. Ogihara M., Ida S., Morbidelli A. 2007. Accretion of terrestrial planets from oligarchs in a turbulent disk. *Icarus*, 188 (2): 522.
13. Rein H., Tamayo D. 2015. WHFAST: a fast and unbiased implementation of a symplectic Wisdom–Holman integrator for long-term gravitational simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452 (1): 376.
14. Tsiganis K., Gomes R., Morbidelli A., Levison H. F. 2005. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature*, 435: 459.
15. Van der Marel N., Williams J. P. and Bruderer S. 2018. Rings and gaps in protoplanetary disks: planets or snowlines?. *The Astrophysical Journal Letters*, 867 (1): L14.
16. Van der Marel N., Dong R., di Francesco J., Williams J. P. and Tobin J. 2019. Protoplanetary disk rings and gaps across ages and luminosities. *The Astrophysical Journal*, 872 (1): 112.
17. Walsh K., Morbidelli A., Raymond S., O'Brien D., Mandell A. 2011. A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration. *Nature*, 475: 206.

18. Wang Y., Zhou J., Liu H-G., Meng Z. 2017. Forming Different Planetary Architectures. I. The Formation Efficiency of Hot Jupiters from High-eccentricity Mechanisms. *The Astrophysical Journal*, 848 (1): 20.

Gap formation in the protoplanetary disk AS 209: role of planetary migration

Protoplanetary disk is a remnant of a cloud of gas and dust particles that rotates around a newly formed star and from which objects such as planets will be formed. Observing the protoplanetary discs, decreases of the intensity at certain radial distances from the star have been noticed. These decreases manifest as ring-shaped structures called gaps. Assuming that such structures usually occur as a result of a planetary migration, this scenario was used to examine the formation of gaps in the protoplanetary disk AS 209. Adding the force that describes the migration of the planet in our model and using the REBOUND integrator, the mentioned disk made up of about 30,000 particles was simulated. The width and position of the gaps to which we compared the results of the simulations were obtained from an ALMA image of that protoplanetary disk.

Orbital parameters, namely the semi-major axis and the eccentricity, and also the mass of the migrating planet were varied in a range of 90 – 120 AU, 0 – 0.1 and 0.05 – 1 M_J respectively. A total of 6000 simulations were propagated over a time interval of 200,000 years, obtained to be the upper limit of the migration timescale for the planet's physical and orbital characteristics considered. A total of 34 combinations of the orbital parameters and mass of the planet that could reproduce the formation of the observed gap were found. The corresponding gap was only formed by planets with mass above 0.4 M_J . Since only three of the gaps maintained the required characteristics until the end of the planetary migration, results suggest that the migration of the planet in this protoplanetary disk might not yet be finished. Regularities in the influence of the planet characteristics on the width and location of the gap were also found.