



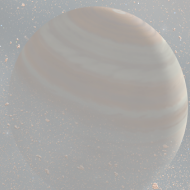
# Značaj planetezimala za dopremanje vode unutar sistema TRAPPIST-1

Vladimir Đošović

Matematički fakultet, Univerziteta u Beogradu

*vladimir\_djosovic@matf.bg.ac.rs*

03.11.2020.



# Sadržaj

- 1 Uvod
  - Protoplanetarni diskovi
  - Planetezimali
  - Nastanjiva zona
- 2 Dinamička evolucija planetarnih sistema
- 3 Trappist-1 sistem
- 4 Metodologija
- 5 Rezultati
  - Regioni potencijalnih impaktora
  - Alternativni regioni impaktora
  - Dopremanje vode na planete
- 6 Rezime

# Uvod

- 1989. prva ekstrasolarna planeta

(*Latham et al., 1989;*  
*Kane & Gelino, 2012*)

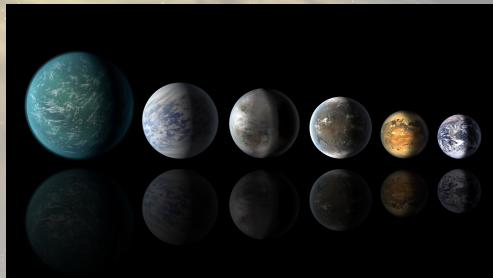
- 1995. prva potvrđena  
ekstrasolarna planeta

(*Mayor & Queloz, 1995*)

Dobitnici Nobelove nagrade za  
fiziku 2019. godine

- Do danas poznato preko 4300  
potvrđenih planeta u preko 3200  
planetarnih sistema

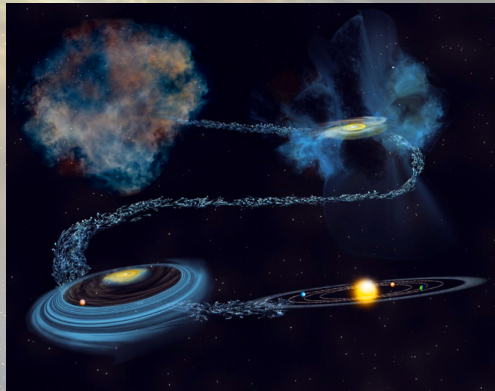
- preko 700 planetarna sistema sa  
više od jedne planete



# Uvod

## Protoplanetarni diskovi

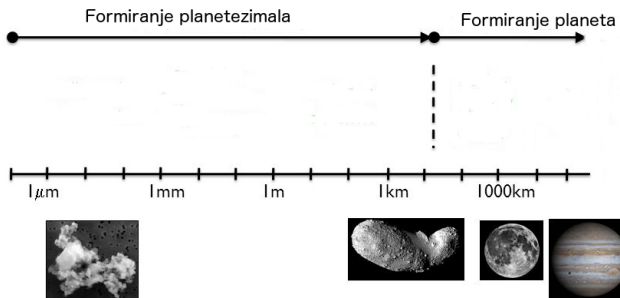
- Teorije sugerišu nastanak protozvezde iz oblaka gasa gravitacionim kolapsom
- Protoplanetarni disk se formira sažimanjem oblaka preostalog gasa
- Iz protoplanetarnog diska formiraju se planetezimali, koji kasnije delom ulaze u sastav planeta
- Asteroidi u Sunčevom sistemu su planetezimali?



# Uvod

## Planetezimali

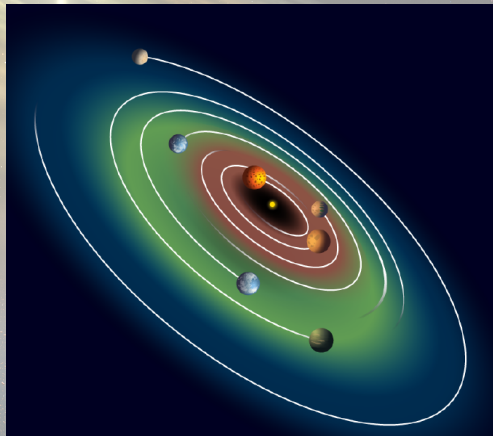
### *Od prašine do planete*



# Uvod

## Nastanjiva zona

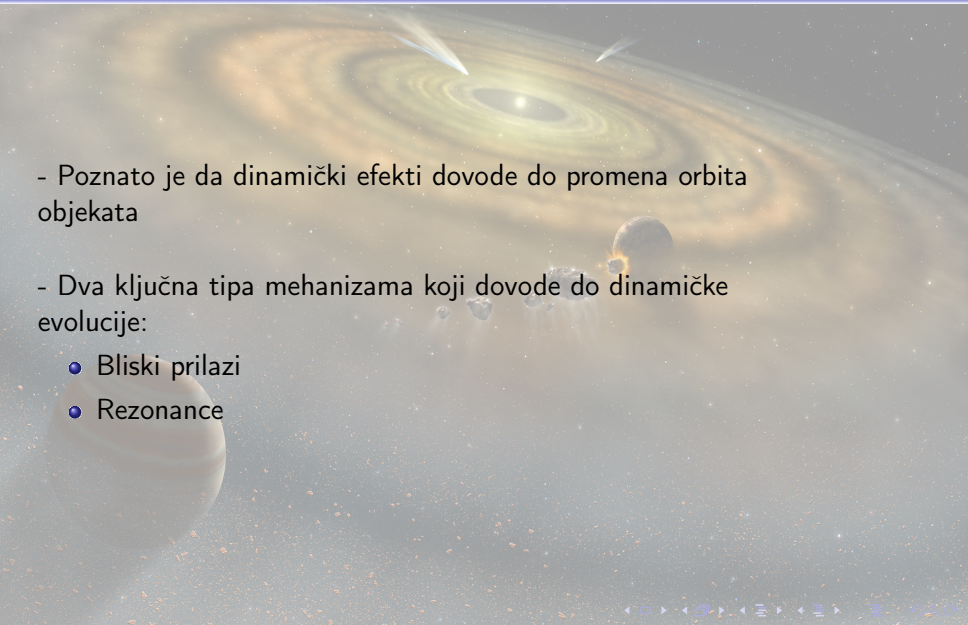
- Zašto brinemo uopšte o vodi?
- Nastanjiva zona – površinska temperatura iz intervala  $0-100^{\circ}\text{C}$  (*Gonzalez, 2005*)
- Planete u nastanjivim zonama obično su locirane unutar snežne linije
- Jedan od najpopularnijih modela dopremanja vode na Zemlju (*O'Brien et al., 2014*)



# Šta želimo postići?

- Iako u sistemu Trappist-1 nije detektovan, posmatrački podaci planetarnih sistema ukazuju na postojanje prstena planetezimala u okolini snežne linije
- Planetezimali formirani van snežne linije se smatraju veoma bitnim izvorom vode na unutrašnjim planetama
- Motivisani ovim činjenicama i radovima (*Bancelin et al., 2017; Kral et al., 2018; Dencs & Regály, 2019*), ispitivana je mogućnost dopremanja vode na planete planetezimalima u sistemu Trappist-1
- Numeričkim simulacijama dinamičke evolucije prstena planetezimala ispitivana je efikasnost i obim transporta vode

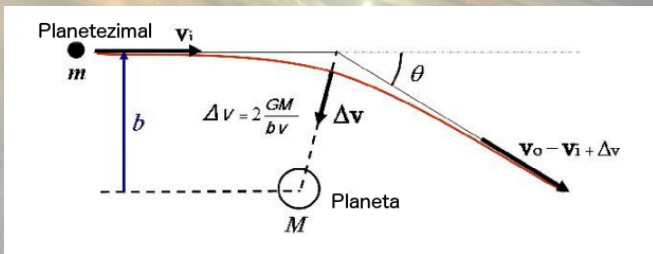
# Dinamička evolucija planetarnih sistema

- 
- Poznato je da dinamički efekti dovode do promena orbita objekata
  - Dva ključna tipa mehanizama koji dovode do dinamičke evolucije:
    - Bliski prilazi
    - Rezonance



# Dinamička evolucija planetarnih sistema

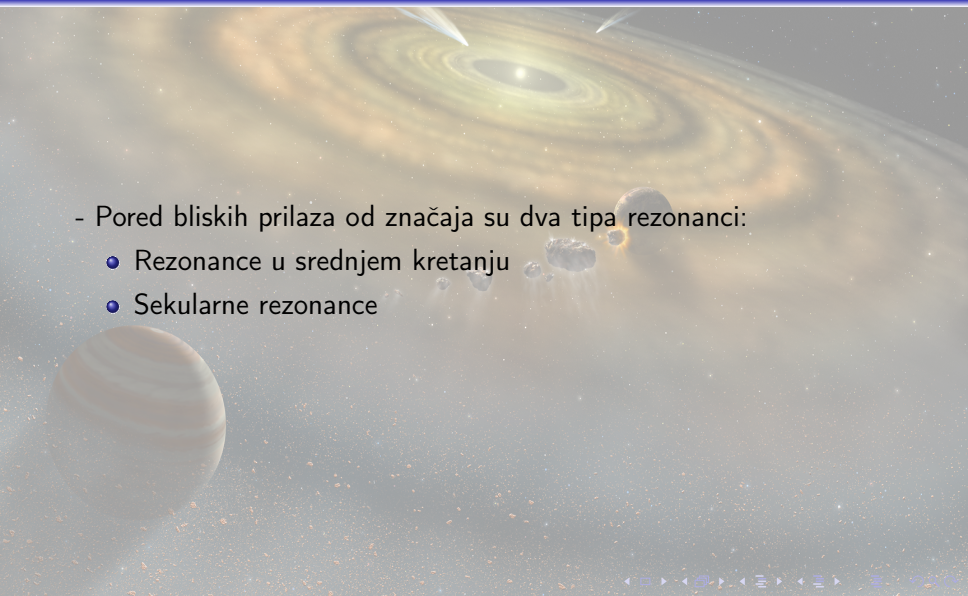
## Bliski prilazi



- Usled gravitacionog privlačenja planete dolazi do promene pravca kretanja planetezimala
- Nakon bliskih prilaza ne možemo tačno predvideti kretanje planetezimala – haotično kretanje

# Dinamička evolucija planetarnih sistema

## Rezonance

- 
- Pored bliskih prilaza od značaja su dva tipa rezonanci:
    - Rezonance u srednjem kretanju
    - Sekularne rezonance

# Dinamička evolucija planetarnih sistema

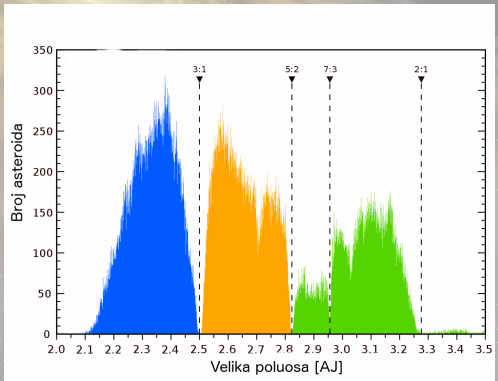
## Rezonance

- Srazmernosti u periodu revolucije asteroida i planete:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{k_1}{k_2}, \quad k_1 \cdot n_1 - k_2 \cdot n_2 \approx 0$$

- Rezonance povećavaju amplitudu oscilovanja orbitalnih parametara

- Primer asteroida u rezonanci 3:1 sa Jupiterom, koja uzrokuje velike amplitude u ekscentricitetu toliko da objekat ima bliski prilaz sa Marsom



# Dinamička evolucija planetarnih sistema

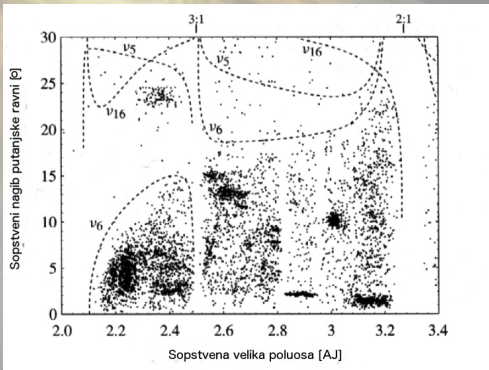
## Rezonance

- Sekularne rezonance -  
srazmernosti u periodu  
precesije orbite asteroida i  
planete:

$$j_1 \cdot g_1 + j_2 \cdot g_2 + k_1 \cdot s_1 + k_2 \cdot s_2 \approx 0$$

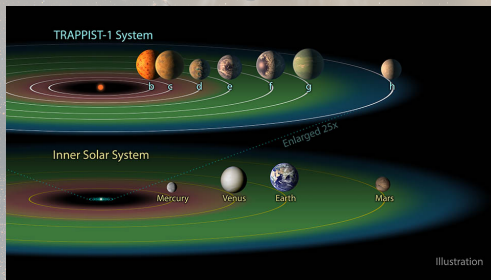
- U Sunčevom sistemu neke od  
najjačih sekularnih rezonanci sa  
Jupiterom i Saturnom,  $\nu_5$ ,  $\nu_6$  i  
 $\nu_{16}$ , ograničavaju GAP

$$\nu_5 = g_a - g_J, \nu_6 = g_a - g_S, \nu_{16} = s_S - s_J$$



# Trappist-1 sistem

- Veliku pažnju naučne javnosti privuklo je otkriće sistema Trappist-1 (*Gillon et al., 2017*)
- Sedam Zemljolikih planeta orbitiraju oko ultra hladnog crvenog patuljka
- Tri od sedam planeta ovog sistema se nalaze u nastanjivoj zoni (*Papaloizou, Szuszkiewicz, & Terquem, 2018*)



# Trappist-1 sistem

- Procenjena starost sistema je na 7.6 Ggod
- Planete u Trappist-1 sistemu se nalaze u tzv. rezonantnom lancu, sve susedne planete su međusobno u rezonanci  $8/5, 5/3, 3/2, 3/2, 4/3$ , i  $3/2$
- Pretpostavlja se da planeta Trappist-1d, f, g i h imaju okean vode na svojim površinama (*Grimm et al., 2018*)
- Zbog udaljenosti od matične zvezde, na nekim planetama ti okeani su verovatno zamrznuti
- Na planeti Trappist-1b detektovano je postojanje atmosfere, koja na toj planeti pravi jako veliki uticaj efekta staklene bašte

# Metodologija


- Na osnovu posmatračkih podataka u planetarnim sistemima, prsteni planetezimala se očekuju u okolini snežne linije (*Martin & Livio, 2012*)

$$r_{\text{ice}} = 2.7 \left( 0.23 \left( \frac{M_*}{M_{\odot}} \right)^{2.3} \right)^{1/2}$$

- Od značaja su nam samo planetezimali koji u svom sastavu sadrže vodu
- Korišćenjem *Mercury* programskog paketa, numerički je simulirana dinamička evolucija sedam planeta Trappist-1 sistema i 20000 test objekata u prstenu planetezimala
- Unutrašnja granica prstena se nalazi na snežnoj liniji, dok je širina uzeta vrednost od 0.07 AJ do 0.2 AJ

# Metodologija

Dva modela Grimm et al. (2018) i Wang et al. (2017)



Planet Model	<sup>b</sup>		<sup>c</sup>		<sup>d</sup>		<sup>e</sup>		<sup>f</sup>		<sup>g</sup>		<sup>h</sup>	
	W	G	W	G	W	G	W	G	W	G	W	G	W	G
Mass ( $M_{\oplus}$ )	0.790	1.017	1.630	1.156	0.330	0.297	0.240	0.772	0.360	0.934	0.566	1.148	0.086	0.331
Planetary radius ( $R_{\oplus}$ )	1.086	1.121	1.056	1.095	0.772	0.784	0.918	0.910	1.045	1.046	1.127	1.148	0.715	0.773
Semimajor axis (AU)	0.011 11	0.011 55	0.015 22	0.015 82	0.021 45	0.022 28	0.028 18	0.029 28	0.037 10	0.038 53	0.045 10	0.046 88	0.059 60	0.061 93
Eccentricity	0.019	0.006	0.014	0.007	0.003	0.008	0.007	0.005	0.011	0.010	0.003	0.002	0.086	0.006
Inclination ( $^{\circ}$ )	89.393	90.000	89.626	90.000	89.866	90.000	89.754	90.000	89.694	90.000	89.707	90.000	89.814	90.000
Longitude of ascending node ( $^{\circ}$ )	307.0	0.0	201.5	0.0	338.7	0.0	322.2	0.0	199.2	0.0	190.4	0.0	269.9	0.0
Longitude of pericentre ( $^{\circ}$ )	0.0	336.9	40.0	282.5	80.0	-8.7	110.0	108.4	160.0	368.8	195.0	191.3	230.0	338.9
Mean anomaly ( $^{\circ}$ )	344.0	203.1	232.9	69.9	371.0	173.9	185.5	347.9	4.5	113.6	185.9	265.1	93.2	269.7



# Metodologija

Dva modela Grimm et al. (2018) i Wang et al. (2017)

Planet Model	b		c		d		e		f		g		h	
	W	G	W	G	W	G	W	G	W	G	W	G	W	G
Mass ( $M_{\oplus}$ )	0.790	1.017	1.630	1.156	0.330	0.297	0.240	0.772	0.360	0.934	0.566	1.148	0.086	0.331
Planetary radius ( $R_{\oplus}$ )	1.086	1.121	1.056	1.095	0.772	0.784	0.918	0.910	1.045	1.046	1.127	1.148	0.715	0.772
Semimajor axis (AU)	0.011 11	0.011 55	0.015 22	0.015 82	0.021 45	0.022 28	0.028 18	0.029 28	0.037 10	0.038 53	0.045 10	0.046 88	0.059 60	0.061 93
Eccentricity	0.019	0.006	0.014	0.007	0.003	0.008	0.007	0.005	0.011	0.010	0.003	0.002	0.086	0.006
Inclination ( $^{\circ}$ )	89.393	90.000	89.626	90.000	89.866	90.000	89.754	90.000	89.694	90.000	89.707	90.000	89.814	90.000
Longitude of ascending node ( $^{\circ}$ )	307.0	0.0	201.5	0.0	338.7	0.0	322.2	0.0	199.2	0.0	190.4	0.0	269.9	0.0
Longitude of pericentre ( $^{\circ}$ )	0.0	336.9	40.0	282.5	80.0	-8.7	110.0	108.4	160.0	368.8	195.0	191.3	230.0	338.9
Mean anomaly ( $^{\circ}$ )	344.0	203.1	232.9	69.9	371.0	173.9	185.5	347.9	4.5	113.6	185.9	265.1	93.2	269.7

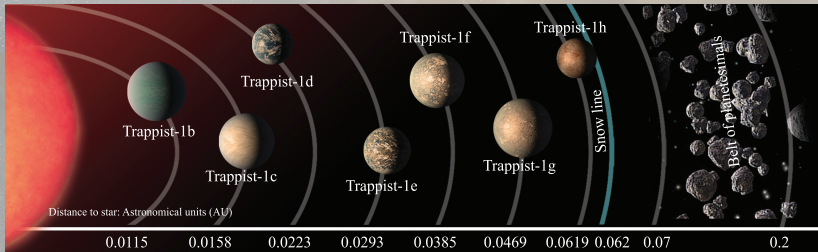
# Metodologija

- Planetezimali su raspoređeni u prostoru orbitalnih parametara uniformno,

$$0.07 \leq a \leq 0.2,$$

$$0.0 \leq e \leq 0.2$$

- Osim u slučaju nagiba putanjske ravni gde je uzeta Gausova raspodela, u odnosu na ravan diska sa standardnom devijacijom  $\sigma = 1^\circ$



# Metodologija

- Od 20000 objekata iz prvog seta simulacija, identifikovano je 1726 (1709) onih koji su imali bliske prilaze sa planetama ili su imali perihelsko rastojanje manje od 0.07 AJ
- Za tih 1726 (1709) objekata rađena je simulacija sa hibridnim integratorom, koji ima adaptivni korak i preciznije praćenje objekata prilikom bliskih prilaza
- Sve analize su radjene skaliranjem test objekata na stvaran broj planetezimala u prstenu

# Metodologija

-Kako bismo obračunali količinu transportovane vode na planete, neophodno je poznavati ne samo broj udara, već i veličinu objekata

- Masa protoplanetarnog diska  $M_{\text{disk}} = 1\%M_*$ , odnos mase prašine i gasa  $f = 0.01$  (Armitage, 2010)

- Iz profila opadanja površinske gustine u protoplanetarnom disku, određena je masa prstena planetezimala (Weidenschilling, 1977)

$$\Sigma \sim r^{-1.5}$$

# Metodologija

- Određena je raspodela planetezimala po veličinama, čime je dobijen i njihov ukupan broj u prstenu

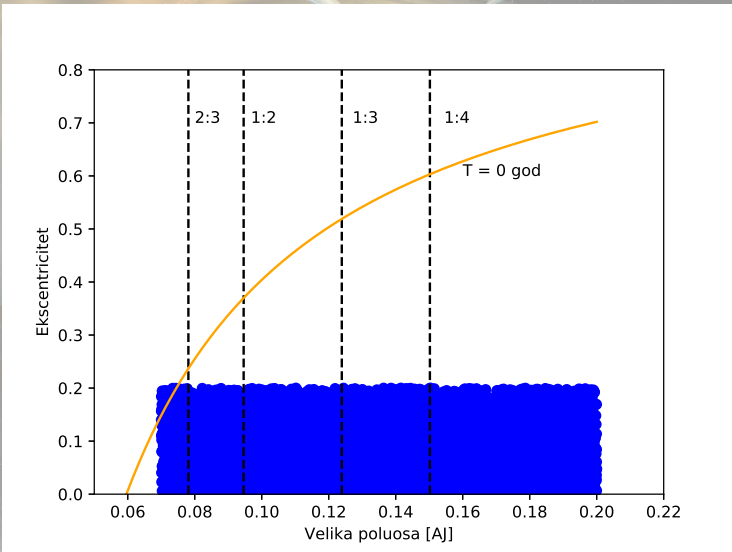
$$N(> D) = N_t D^{-\alpha},$$

- Za objekte manje od 100 km  $\alpha = 1.43$ , za veće  $\alpha = 2.5$  (*Tsirvoulis et al., 2018*)
- Ukupan broj objekata je numerički računat iz formule:

$$M_p = \frac{1}{6} \rho \pi \left[ \sum_{N=N_t \cdot 100^{-1.43}}^{N_t} \left( \frac{N_t}{N} \right)^{\frac{3}{1.43}} + \sum_{N=1}^{N_t \cdot 100^{-1.43}} \left( \frac{N_t \cdot 100^{\frac{2.5}{-1.43}}}{N} \right)^{\frac{3}{2.5}} \right]$$

# Rezultati

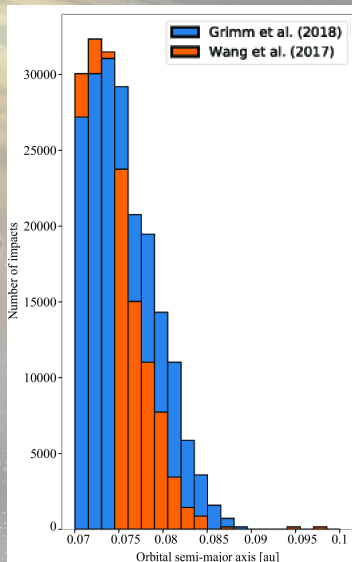
## Regioni potencijalnih impaktora



# Rezultati

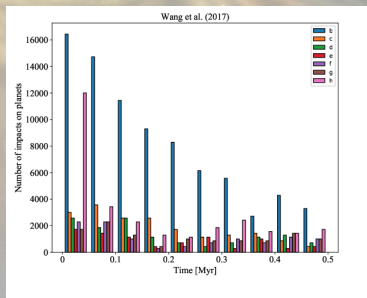
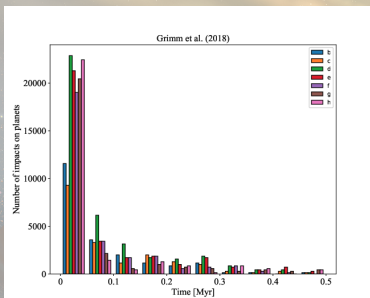
## Regioni potencijalnih impaktora

- Svi objekti koji su okarakterisani kao potencijalni impaktori, dolaze iz uskog pojasa unutrašnjeg dela našeg prstena
- Uzrokovani rezonancom 2:3 (na 0.0812 AJ) i bliskim prilazima sa najudaljenijom planetom Trappist-1h



# Rezultati

## Regioni potencijalnih impaktora





# Rezultati

## Regioni potencijalnih impaktora

- Analizirane su brzine opadanja broja bliskih prilaza planetezimala sa planetama
- Određivanjem poluživota zaključeno je rapidno pražnjenje regiona potencijalnih impaktora, u oba modela na vremenskoj skali manjoj od 1 Mgod

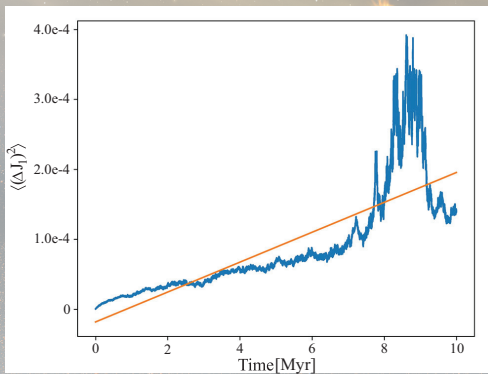
$$N(t) = N_0 \cdot e^{\frac{-\ln 2}{\tau} t}$$

Planet	Dynamical half-life (kyr)	
	Grimm et al. (2018)	Wang et al. (2017)
Trappist-1b	207	378
Trappist-1c	191	425
Trappist-1d	183	447
Trappist-1e	166	462
Trappist-1f	161	458
Trappist-1g	151	853
Trappist-1h	146	143

# Rezultati

## Alternativni regioni impaktora

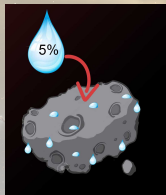
- Neke od najjačih rezonanci su razmatrane u ovom radu, i dobijeno je da bi na skalama od 1 Ggod one imale efekta. U modelu Wang situacija je drastično drugačija.
- Porast ekscentriciteta usled mehanizma rezonanci 1:2 značajan u kontekstu formiranja novog regiona potencijalnih impaktora



# Rezultati

## Dopremanje vode na planete

- Analiziran je transport vode na planete putem planetezimala
- Uzeta je vrednost od 5% za procenat zapremine planetezimala koji čini voda (*Dvorak et al., 2012*)



- Bliski prilaz objekta sa planetom na manjem rastojanju od njenog poluprečnika smatran je udarom
- Prilikom udara, planetezimal bi svoju zapreminu vode preneo planeti

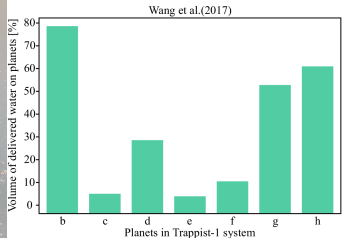
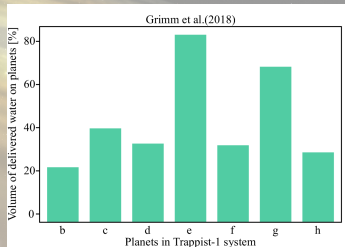
# Rezultati

## Dopremanje vode na planete

- Najveći broj udara sa planetom Trappist-1e i 1g u modelu Grimm odnosno planetom Trappist-1b, 1g i 1h u modelu Wang. Količina dopremljene vode je zavisna od modela koji se koristi

- Sličnu analizu radili (*Kral et al., 2018*) i (*Dencs & Regály, 2019*), sa različitim početnim uslovima, ali neki od glavnih zaključaka su u saglasnosti

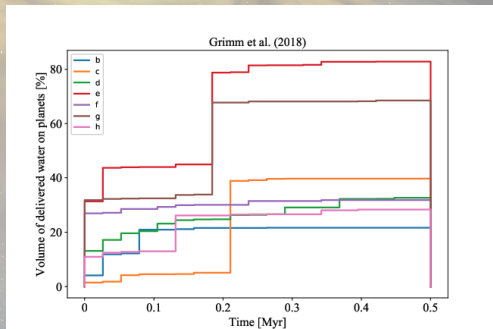
- Kombinacija mehanizama rezonanci i bliskih prilaza veoma bitna u ovom sistemu



# Rezultati

## Dopremanje vode na planete

- Planete sa efikasnim transportom vode su Trappist-1e i Trappist-1g u modelu Grimm
- Obe locirane u nastanjivoj zoni. Planeta 1e analizom plimskih efekata i klime potencijalno najnastanjivija planeta unutar TRAPPIST-1 (*Lincowski et al.(2018)*)
- U sistemu Trappist-1 moguće dopremanje značajne količine vode iz prstena planetezimala



# Rezultati

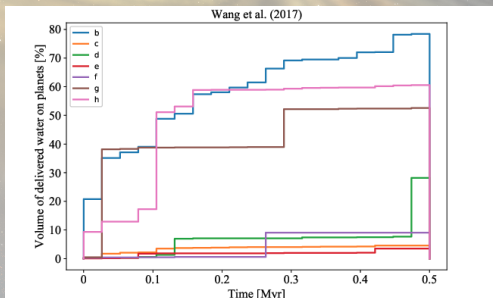
## Dopremanje vode na planete

- Dopremanje vode dogodilo se u ranoj fazi evolucije sistema, vrlo brzo nakon dolaska planeta na njihove današnje putanje

- U oba modela jedina planeta koja je primila veću količinu vode je planeta Trappist-1g -

*Grimm et al., 2018* bave se prirodom planeta u Trappist-1 sistemu

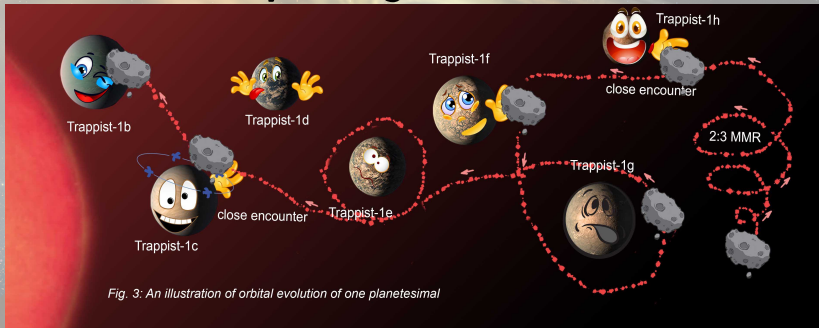
- 5 planeta ima neki vid vode na sebi, bilo u vidu atmosferskog gasa, tečne vode ili leda



# Rezime

- Pitanje porekla vode na planetama koje se nalaze u nastanjivim zonama
- Posmatranja pokazuju da se prsten planetezimala očekuje u okolini snežne linije
- Iz takvog prstena planetezimala dopremanje vode moguće je u ranim fazama zbog rapidnog pražnjenja
- Negravitacioni efekti zanemarivi u sistemu, mehanizam rezonanci zanemariv
- Efikasan transport vode moguć na planetu Trappist-1g
- Na Trappist-1g moguća voda u tečnom agregatnom stanju
- Trappist-1 sistem bezbedan od katastrofičnih udara u planete

# Hvala na pažnji!





# Rezultati

## Dopremanje vode na planete

