

*Динамичка еволуција планетских система I :
Настанак планета џинова и ера гасног диска*

Зоран Кнежевић

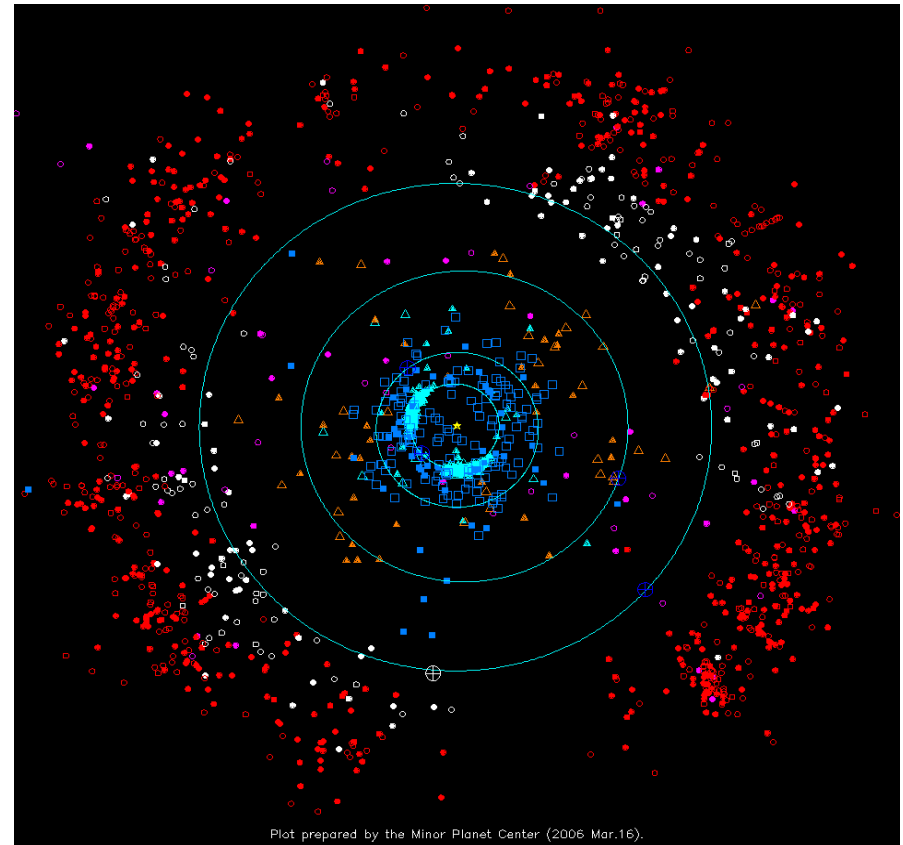
Астрономска опсерваторија & САНУ, Београд

Катедра за астрономију МФУБ, Београд 14.4.2015.

Планетски системи нису се формирали у својим садашњим конфигурацијама

Нетривијална динамичка еволуција

Миграција планета
Резонантни захват
Расејање планете планетом
Међусобни судари
Хиперболично избацавање



LETTERS

Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System

K. Tsiganis¹, R. Gomes^{1,2}, A. Morbidelli¹ & H. F. Levison^{1,3}

Planetary formation theories^{1,2} suggest that the giant planets formed on circular and coplanar orbits. The eccentricities of Jupiter, Saturn and Uranus, however, reach values of 6 per cent, 9 per cent and 8 per cent, respectively. In addition, the inclinations of the orbital planes of Saturn, Uranus and Neptune take maximum values of ~2 degrees with respect to the mean orbital plane

planetesimals. The planets then started to erode the disk, by either accreting or scattering away the planetesimals. The planets migrated because of the exchange of angular momentum with the disk particles during this process^{3,7}. Numerical simulations⁸ show that Jupiter was forced to move inward, while Saturn, Uranus and Neptune drifted outward. The orbital distribution of trans-

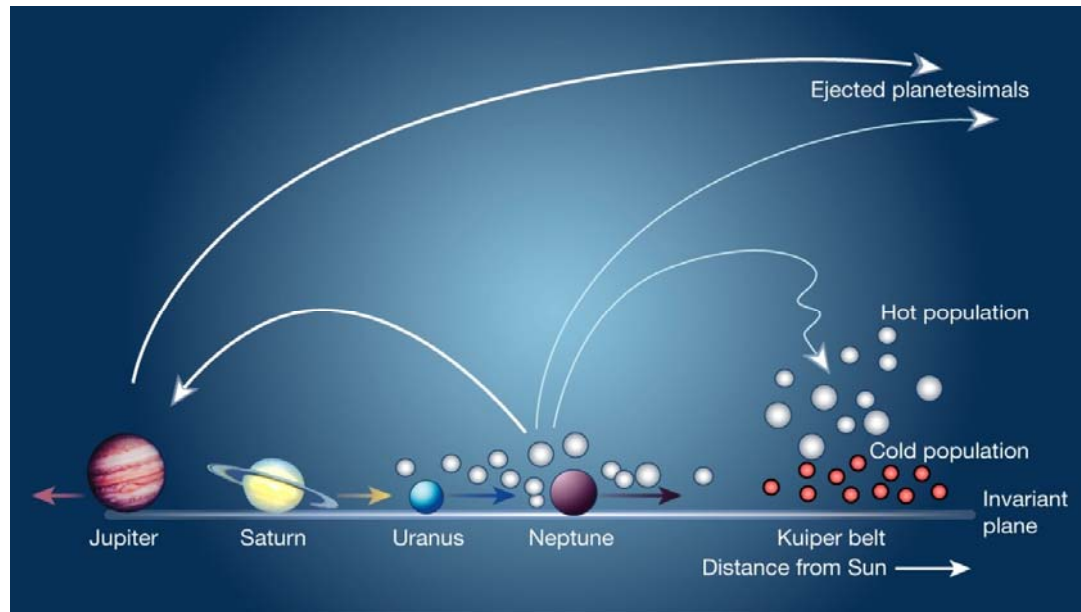
LETTERS

Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets

R. Gomes^{1,2}, H. F. Levison^{2,3}, K. Tsiganis² & A. Morbidelli²

LETTERS

Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System

A. Morbidelli¹, H. F. Levison^{1,2}, K. Tsiganis¹ & R. Gomes^{1,3}

(i) Рана еволуција џинова у гасном диску

$< 5 \cdot 10^4$ год

(ii) Еволуција џинова у интеракцији са диском планетезимала

$< 10^6$ год

(iii) Еволуција терестричких планета

$< 10^8$ год

(i) Настанак планета џинова

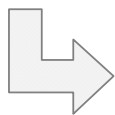
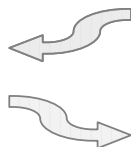
Механизам акреције језгра vs. Гравитационе нестабилности



Коагулација чврстих честица

Језгро $10 M_{\oplus}$

Гравитациони захват
масивних атмосфера
од водоника и хелијума



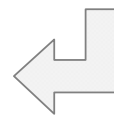
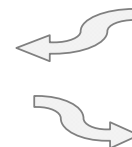
Близу
Велика већина



Хладни масивни прото-планетарни диск

Грудве гаса

Гравитациона контракција



Гасни џинови

Далеко
HR 8799, Fomalhaut

Механизам акреције језгра: про

Џинови у Сунчевом систему имају чврста језгра

Корелација металичности звезда и вероватноће да имају планете

Транзитирајуће планете имају чврста језгра чија релативна маса је корелисана са металичношћу звезда

Механизам акреције језгра: contra

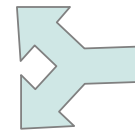
(i) Како формирати планетско језгро од $10M_{\oplus}$ за $< 5 \text{ Mr}$?

$V_{\text{rel}} < V_e$ —→ “runaway” раст

$$dM/dt \propto M^{1/3}$$

$V_{\text{rel}} \sim V_{\text{ev}}$ —→ “oligarchic” раст

$$dM_v/dt \propto 1/M_v^{1/3}$$



Гравитационо
фокусирање
планетезимала
(астероиди-комете)


Маса  изојације  ако је диск велик, иза “снежне линије”  супер-Земље

Језгро $1M_{\oplus}$ - расејање уместо акреције !?

Гас, нееластични судари – празнине
Радијални дрифт планетезимала – резонанце

Шљунак!!

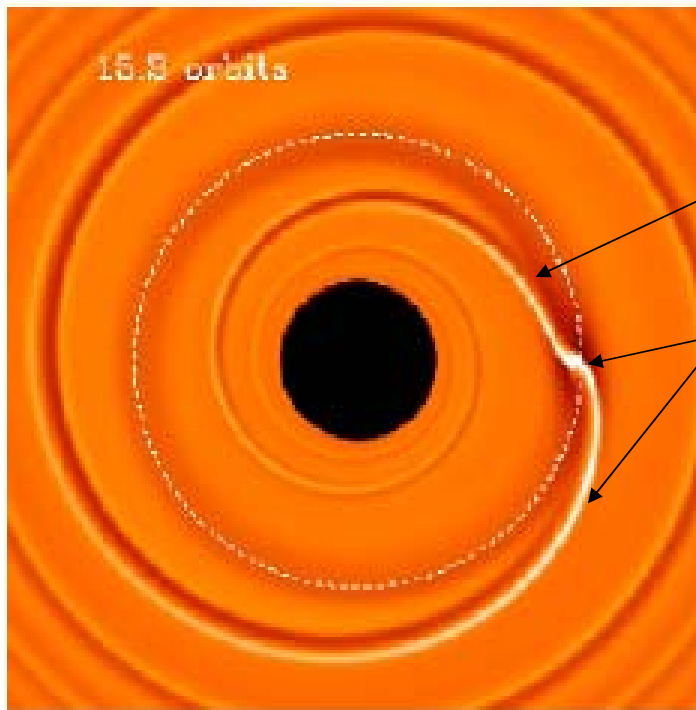
Механизам акреције језгра: contra

- (ii) Миграција типа I  турбуленција, градијент површинске густине
- (iii) Однос маса језгара спољашњих и унутрашњих планета у Сунчевом систему - очекивано $2x$, посматрано 10^2

“sweet spots” (вертекси)

Миграција типа I

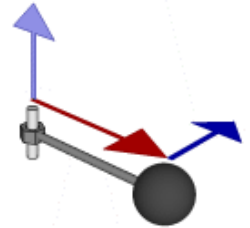
Радијално кретање планетских језгара масе Марса до неколико Земљиних услед гравитационе интеракције са гасном компонентом протопланетарног диска



Спирални
талас
густине

Планетско
језгро

$$\tau = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$$
$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$$



Унутрашњи део диска:
позитиван орбитални моменат

Спољашњи део диска
негативан орбитални моменат

Миграција типа I

У дисковима са степеном променом густине укупно негативан – миграција према унутра брзином:

$$da/dt \propto M_p \Sigma_g (a/H)^2$$

M_{\square} , 1АЈ, 200.000 година – пад на звезду!

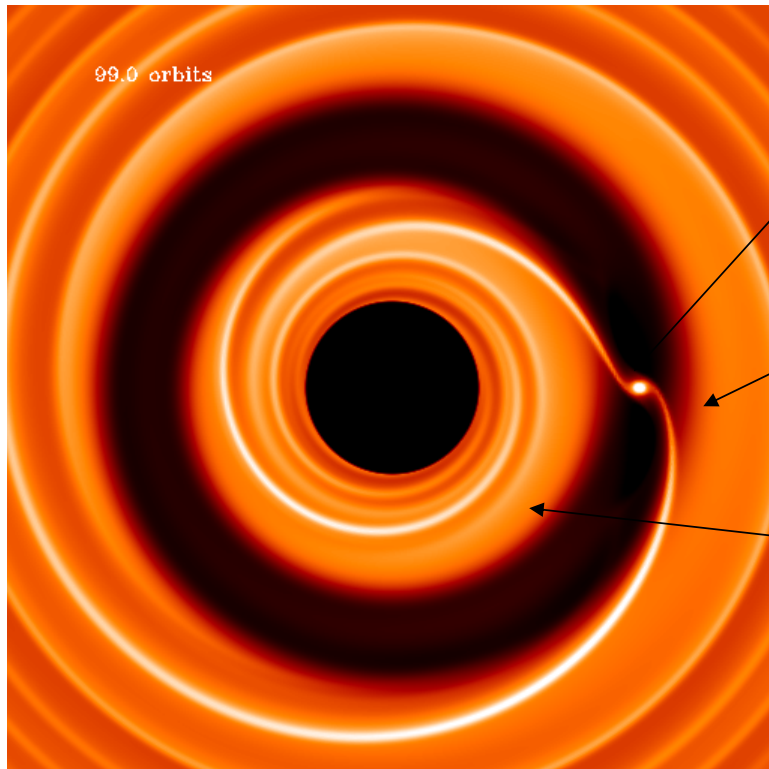
Турбуленција – случајно кретање

Велики позитиван градијент површинске густине на спољним рубовима централних празнина

Миграција према ван у густим унутрашњим деловима диска

Миграција типа II

џиновске планете формиране - отварање празнина



Планета остаје у
средини празнине,
акреција престаје

Позитивни обртни моменат –
спољашњи део гура према ван

Негативни обртни моменат –
унутрашњи део гура према унутра

Врели Јупитери



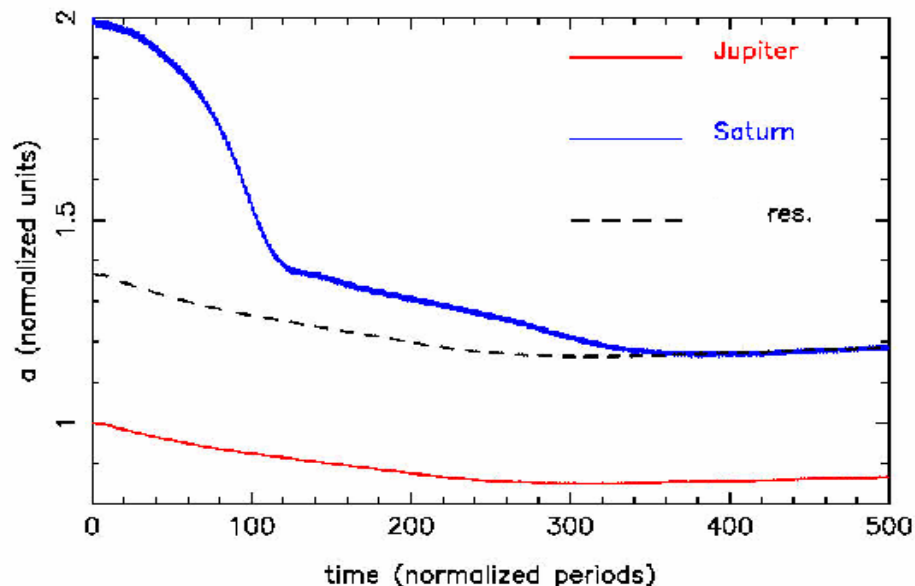
Масиван диск – акреција се наставља гурајући планету према унутра

Недовољно масиван диск – планета не мигрира, унутрашњи диск нестаје

Да, али Сунчев систем ...?

Пар Јупитер – Сатурн са специфичним односом маса

Акреционе историје различите: Сатурн мањи, бржа миграција, резонанца 2/3



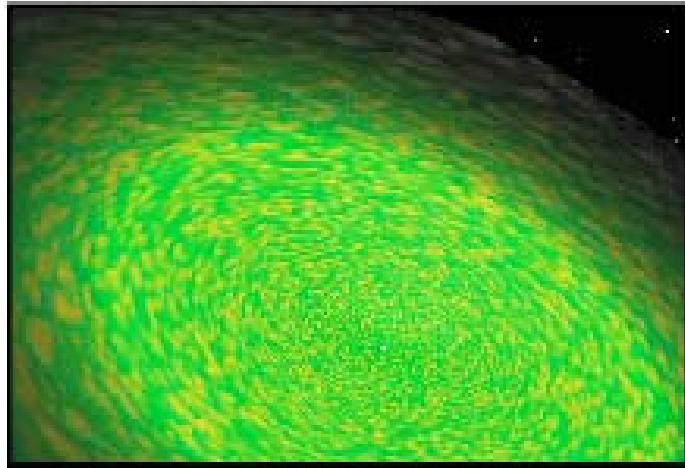
Диск са споро опадајућом дебљином: миграција се зауставља

Диск са брзо опадајућом дебљином: миграција према ван – далеке екстрасоларне планете

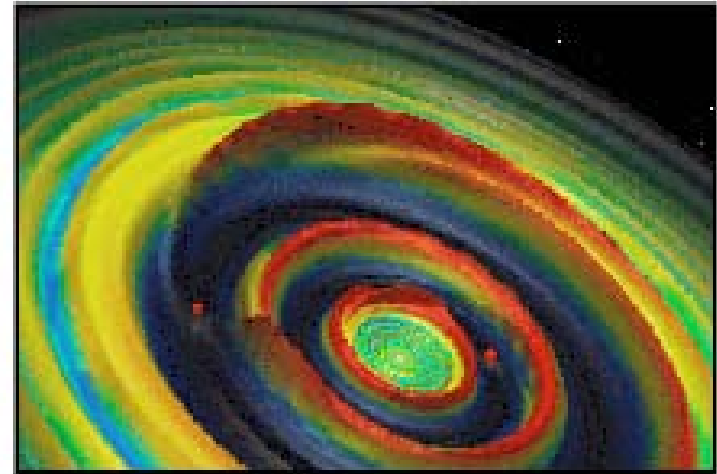
OGLE-06-109L vs.
HD12661, HD13498, HIP14810 ¹²

Резонантна конфигурација

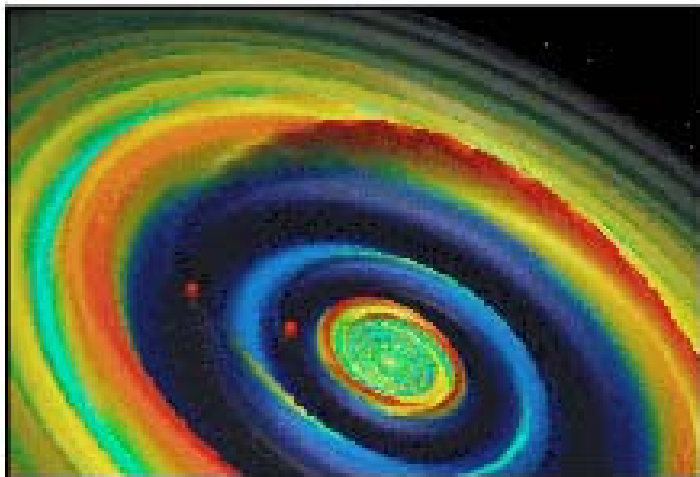
Диск у почетном стању



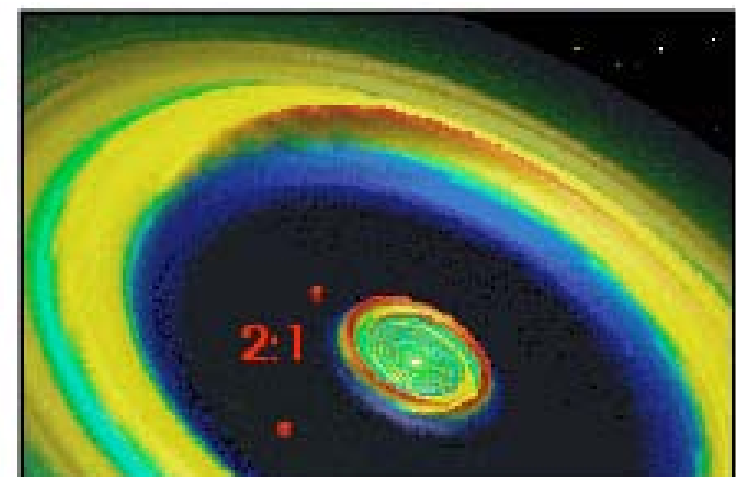
Настанак празнина



Дисипација гасног прстена



Резонантна конфигурација



Хеуристичко објашњење J-C случаја:

- две блиске планете еволуирају у заједничкој празнини
- унутрашња планета, ближа је унутрашњем него спољашњем рубу празнине, осећа позитивни обртни моменат и тежи према ван
- спољашња планета, насупрот томе, тежи према унутра
- крећући се једна према другој, долазе у резонанцу, релативно растојање се “закључава”
- правац заједничке миграције зависи од тога који обртни моменат је већи
- моменат је пропорционалан површинској густини диска у близини сваке од планета и квадрату њене масе
- планете “потроше” део гаса из унутрашњег диска, површинска густина спољашњег је зато већа
- непходан услов да се избегне миграција према унутра је да **маса унутрашње планете мора да буде већа.**

Посматрачка потврда: резонантни парови екстрасоларних планета у близини централне звезде немају J-C однос маса.

Зашто је Сатурн остао мањи ?

Гасни диск се брзо смањивао за време J-C резонантне фазе

Атмосфера Јупитера 3-4 богатија елементима тежим од хелијума него Сунце – диск тада већ имао 3-4 пута мање водоника и хелијума

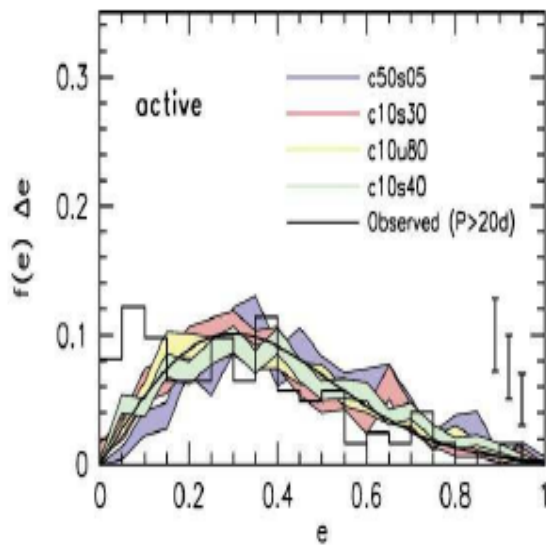
Сателити џиновских планета формирану у циркумпланетарним дисковима сиромашним гасом

Уран и Нептун “закасниле” да формирају масивне атмосфере

Јупитер → Сатурн → Уран и Нептун

Екстрасоларне планете имају неочекивано велике ексцентричности ~ 0.4 !?

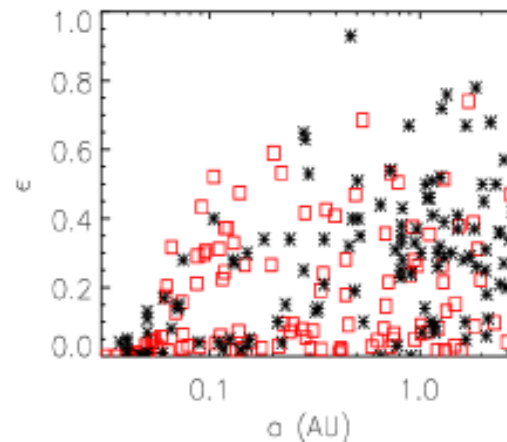
У почетку мале ексцентричности – кружне струјне линије у диску
Интеракције планета – диск не могу да објасне велике ексцентричности



Расејање

Расејање + миграција

Џиновске планете у почетку на нестабилним, квази-циркуларним орбитама, еволуирају кроз блиске прилазе до динамичке релаксације: избацавања или судара неких од њих.



Зашто настаје и када настаје нестабилност ?

Пораст масе vs. Смањење растојања (миграција)

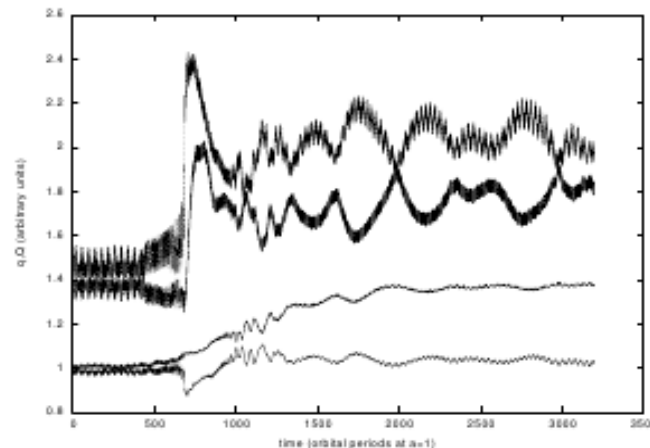
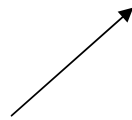


Језгра расејана али
цин на кружној путањи



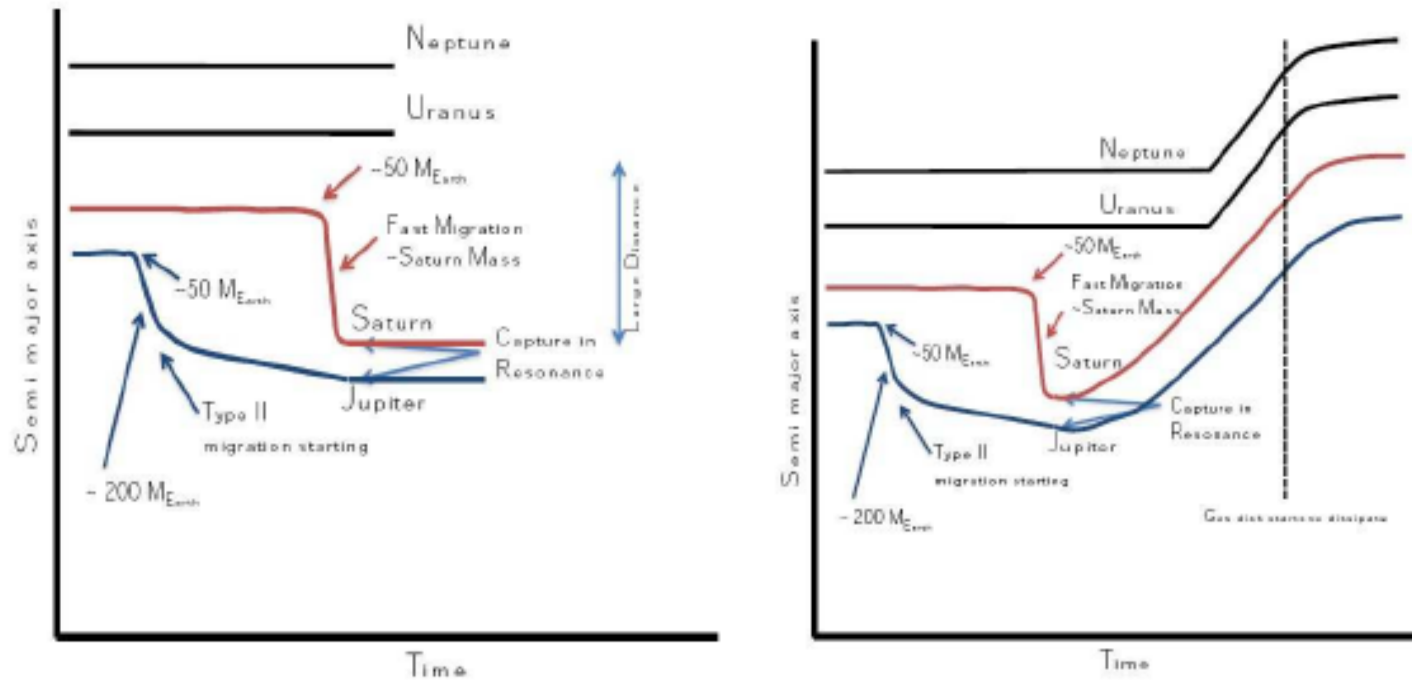
Резонантна конфигурација –
пораст ексцентричности

Нестабилност у
гасном диску –
ексцентричност се
пригушује



Нема корелације између велике полуосе и ексцентричности путања екстрасоларних планета – планете прво мигрирају у близину централних звезда, а затим, након нестанка гаса, постају нестабилне.

Могући сценарио за Сунчев систем



Планете на крају еволуције у резонанци 4 тела
Компактна орбитална конфигурација
Мале ексцентричности

Стабилност могућа до 1 милијарде година
Нестабилност због диска планетезимала

ХВАЛА!