

--

TYPY MIGRACE

podle toho, CO migraci zpusobuje:

1. migrace v plynnem disku

podle mechanismu interakce planety s plynem:

Typ I - bez mezery v disku (lehke planety zemskeho typu),
Lindbladovy rezonance => spiralni vlny => moment sil pusobici na planetu meni její L,
vnejsi rezonance jsou blize k planete nez vnitřni => planeta migruje dovnitr

$$da/dt_I = -(2.7 - 1.1 x) (M/M_*) (\Sigma_{gas} a^2 / M_*) (1/b^2) v_{kepl}$$

$\Sigma_{gas} \sim a^x$... plosna hustota
 $b = H_{gas}/a$, H_{gas} ... tlouska disku

Typ II - vytvorena prstencova MEZERA v disku (obri planety),
moment sil pusobici na disk musi prekonat gradient tlaku a viskozni sily
dovnitř, ale pomalejsi nez I

$$da/dt_{II} = -3 \nu / (2 a)$$

ν ... viskozita disku

Typ III - castecna mezera (Saturn), exponencialni rust, dovnitr nebo ven

stochasticka - turbulence, nahodna chuze

2. migrace v disku planetesimal (simple)

podle hmotnosti $M(t)$ planetesimal, ktere mohou interagovat s planetou:

a. tlumena (damped): $M(t)$ exponencialne klesa <- to je prirodzeny dusledek $dM/dt \sim -M$

b. podporovana (sustained) prekotna (runaway): $M(t)$ exponencialne roste diky "nabirani"
planetesimal pri da/dt planety samotne

c. podporovana nucena (forced): je-li pro prisun planetesimal nutna
pritomnost dalsi planety

3. chaoticka migrace - nestabilita planetarniho systemu, velke excentricity, nastavaji blizka priblizeni planet

--

1 osamocena planeta: migruje obvykle dovnitr

pokud planeta rozptyli planetesimalu VEN, planeta musi migrovat DOVNITR,
kdezto planetesimally rozptylene dovnitr se furt vraceji, dokud nejsou rozptylene ven!

4 planety: Jupiter migruje dovnitr, ale S, U & N migruji VEN

planetesimally rozptylene Jupiterem leti ven, jako predtim,
ALE planetesimally od Saturnu rozptylene dovnitr jsou ODEBIRANE Jupiterem,
takze Saturn migruje naopak VEN

--

Jak planety migrovaly v plynném disku?

- Jupiter a Saturn v plynném disku prodělali migraci typu II směrem dovnitř
ALE zachycení planet ve 3:2 rezonanci => společná migrace VEN!
Morbidelli a Crida (2007)

teorie též vysvětluje vznik malého Marsu, neboť migrující Jupiter \uv{navštívil} terestrickou zónu a vymetl embrya z okolí dráhy Marsu
Walsh et al. (2010)

- i další velké planety byly zachycené ve vzájemných rezonancích, nejspíše
Saturn--Uran 3:2
Uran--Neptun 4:3
Morbidelli et al. (2007)

--

Jak planety migrovaly v planetesimálním disku?

takto těsná konfigurace planet by sama o sobě byla velmi nestabilní,
ale přežila stovky miliónů let díky tlumení diskem zbývajících planetesimál

instabilita planetárního systému nastává až později, díky pomalé migraci
způsobené diskem planetesimál, když Jupiter a Saturn OPUSTÍ rezonanci 3:2
a projdou rezonancí 5:3 (nikoli 2:1)
Morbidelli et al. (2007)

Jupiter a Saturn se beztak musí k rezonanci 2:1 přibližovat rychle,
protože jinak by zvýšená excentricita Marsu kvůli rezonanci $g_4 = g_5$
destabilizovala všechny terestrické planety!

- průchod Jupiteru a Saturnu rezonancí 2:1
-> chaotické zachycení Trojanů (Morbidelli et al. 2005)
-> pozdní velké bombardování (Gomes et al. 2005)

--

Jaké jsou důkazy, že nastávala BLÍZKÁ PŘIBLÍŽENÍ planet?

- obří planety mají relativně VELIKÉ excentricity a sklony drah
a zároveň velké amplitudy sekulárních oscilací s frekvencemi g_5 a g_6
(příslušejících Jupiteru a Saturnu)

průchody rezonancemi středního pohybu mezi planetami přitom mohou zvýšit
pouze excentricity, nikoli sklony, a pouze jednu amplitudu, nikoli obě

pro excitaci módů jsou třeba blízká přiblížení mezi Saturnem a Uranem (nebo Neptunem)

Morbidelli aj. (2010)

- terestrické planety mají MALÉ amplitudy módů g_1 a g_2

rezonance $g_1 = g_5$ a $g_2 = g_5$, které nastávají při migraci Jupiteru,
by však způsobily nerealistické zvýšení amplitud

Jupiter proto musel migrovat velmi rychle, aby byly tyto rezonance přeskočeny
=> přiblížení Uranu (nebo Neptunu) k Jupiteru

Brasser aj. (2010)

- planetky hlavního pásu na velkých sklonech (nad ν_6 rezonancí) jsou vzácné

pomalá migrace Jupiteru a Saturnu poháněná planetesimálami ($s \tau_{\text{mig}} \gtrsim 3 \tau_{\text{Myr}}$)

a s tím související přechod sekulární rezonance ν_{16} přes hlavní pás by vytvořil početnou populaci planetek nad ν_6 , což se nepozoruje

velmi rychlá migrace ($\tau_{\text{mig}} \lesssim 0.3 \text{ Myr}$) však může vzniknout při blízkých přiblíženích planet tak, že se Neptun (nebo Uran) se nejprve přiblíží k Saturnu, který jej rozptýlí dovnitř, čímž se Saturn pohne ven. Neptun je následně rozptýlen Jupiterem ven, což způsobí pohyb Jupiteru dovnitř, čili nastane velmi rychlé vzdálení Jupiteru od Saturnu

Morbidelli aj. (2010)

--

- dynamické tření působící na planety od planetesimál -> tlumení e , I na dnešní hodnotu

OBR časová osa?

POZN. o možnosti zachycení Oortova oblaku od cizí hvězdy, která byla členem této hvězdokupy jako Slunce?
-> neboť efektivita vypuzování z vnitřní sluneční soustavy je malá
Levison et al. (2010)

--

doplňit reference:

Chambers (2009)
Brasser aj. (2010)
Morbidelli aj. (2010)
Morbidelli aj. (2010)
Morbidelli a Crida (2007)
Morbidelli et al. (2007)
Walsh et al. (2010)
Levison et al. (2010)

--