

**რადიალურად და ვერტიკალურად
სტრატეგიცირებული დიფერენციალურად
მბრუნავი ჰიდროდინამიკური
ასტროფიზიკური დისკების დინამიკა**

ა. თევზაძე

ბ. ჩაგელიშვილი

ე. უჩავა

რ. ჭანიშვილი

ჯ. ლომინაძე

ვ. ავსარქისოვი

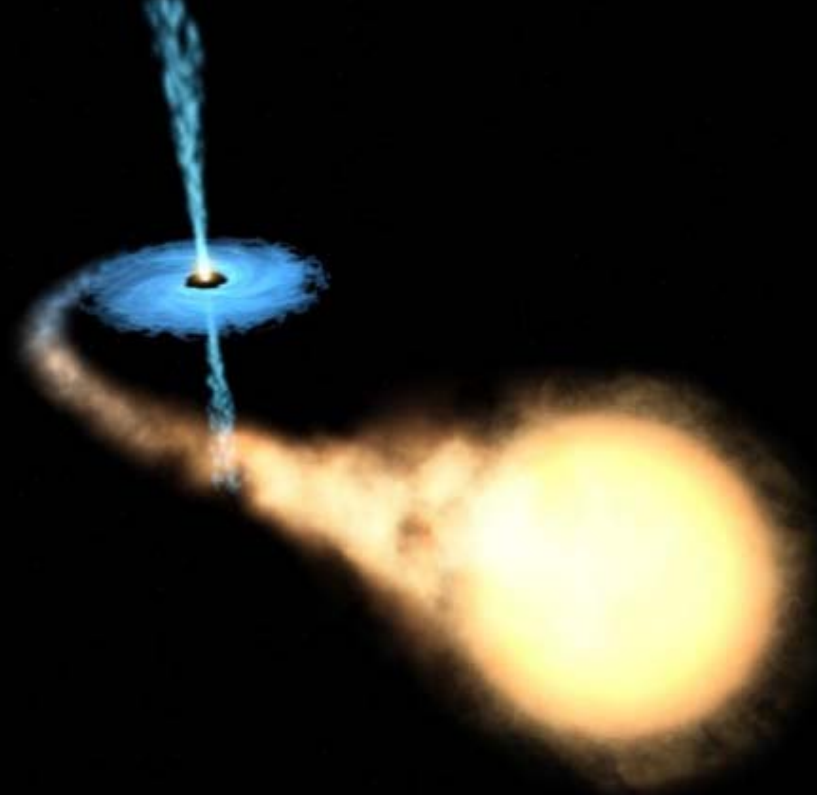
GNSF/ST08/4-420

- ასტროფიზიკური დისკების დინამიკა;
კეპლერული დისკები;
კვაზი–კეპლერული დისკები;
- პროტოპლანეტარული დისკები;
დაკვირვებები;
წრფივი თეორია;
რიცხვითი მოდელირება;
- კონვექცია აკრეციული დისკები;
წრფივი თეორია;
მომენტის გადატანა;

ასტროფიზიკური დისკები

აკრეციული დისკები ორმაგ სისტემებში

- აკრეცია კომპაქტურ ობიექტებზე
- პროტვარსკვლავური
- პროტოპლანეტარული



გრავიტაციული ენერჯია:

ზემპლავრი გამოსხივება;

კოჰერენტული სტრუქტურების ფორმირება:

პლანეტების ზრდა;

კეპლერული დინებები

წონასწორული
მდგომარეობა:

$$r\Omega^2(r) = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_0(r)}{\partial r} + \frac{\partial \Phi(r)}{\partial r}$$

კეპლერული დინებები

წონასწორული
მდგომარეობა:

$$r\Omega^2(r) = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_0(r)}{\partial r} + \frac{\partial \Phi(r)}{\partial r}$$

თერმოდინამიკური ძალები
გრავიტაციული ძალები

ბრუნვით დომინირებული დისკები

კეპლერული დიფერენციული ბრუნვა: $\Omega_K(r) \sim r^{-3/2}$

კვაზი-კეპლერული დინებები

წნევის რადიალური სტრუქტურული კავშირი

$$\Omega^2(\mathbf{r}) = \frac{1}{r\rho_0} \frac{\partial P_0(r)}{\partial r} + \Omega_K^2(\mathbf{r})$$

კეპლერული პროფილიდან გადახრა:

$$\Delta\Omega^2(\mathbf{r}) \equiv -\frac{1}{r\rho_0} \frac{\partial P_0(r)}{\partial r}$$

ქვე-კეპლერული დისკები:

$$\Omega^2(\mathbf{r}) = \Omega_K^2(\mathbf{r}) - \Delta\Omega^2(\mathbf{r}), \quad \Delta\Omega^2(\mathbf{r}) \ll \Omega_K^2(\mathbf{r})$$

სტრატეგიკული დისკები

რადიალური სტრატეგიკაცია:

ქვე-კეპლერული ბრუნვა;

პროტოვარსკვლავური და პროტოპლანეტარული
დისკები;

პლანეტების წარმოშობა;

ვერტიკალურად სტრატეგიკაცია:

კეპლერული ბრუნვა;

ოპტიკურად “სქელი” აკრეციული დისკები;

კონვექციური ტურბულენტობა;

ანომალური სიბლანტე;

პროტოპლანეტარული დისკები

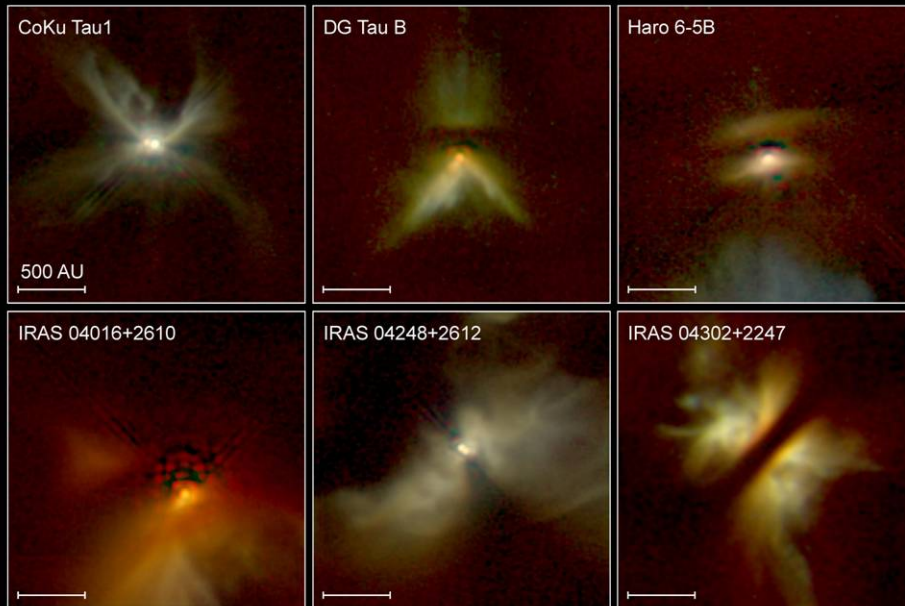
პლანეტების წარმოშობის არეები



Edge-On Protoplanetary Disk
Orion Nebula

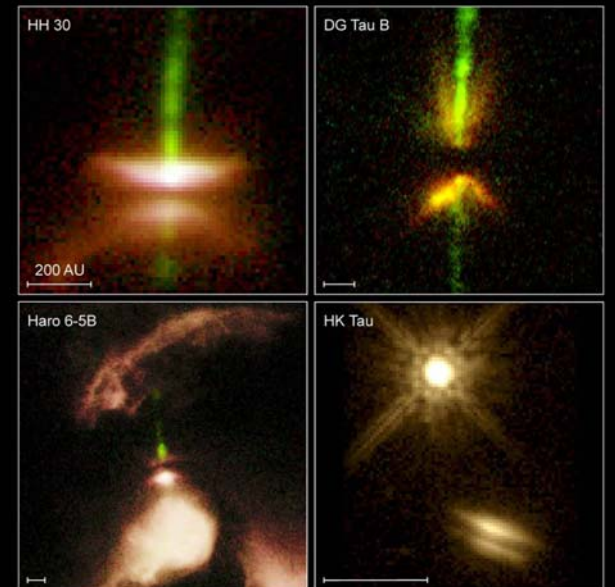
HST • WFPC2

PRC95-45c • ST ScI OPO • November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



Young Stellar Disks in Infrared
Hubble Space Telescope • NICMOS

PRC99-05a • STScI OPO • D. Padgett (IPAC/Caltech), W. Brandner (IPAC), K. Stapelfeldt (JPL) and NASA



Disks around Young Stars
Hubble Space Telescope • WFPC2

PRC99-05b • STScI OPO • C. Burrows and J. Krist (STScI), K. Stapelfeldt (JPL) and NASA

Exoplanets

მზის გარე სისტემების პლანეტები

აღმოჩენილია (10.02.2010): 429

უარყოფილი/საეჭვო: 69

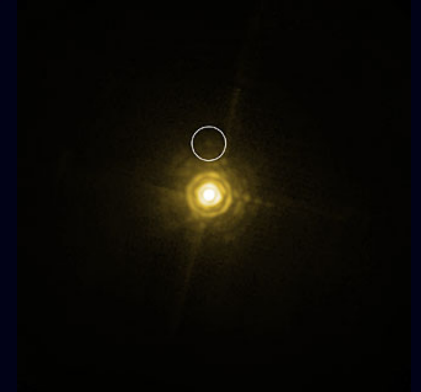
რადიალური სიჩქარეები,
ასტრომეტრია, ტრანზიტები: 399

მიკროლინზირება: 10

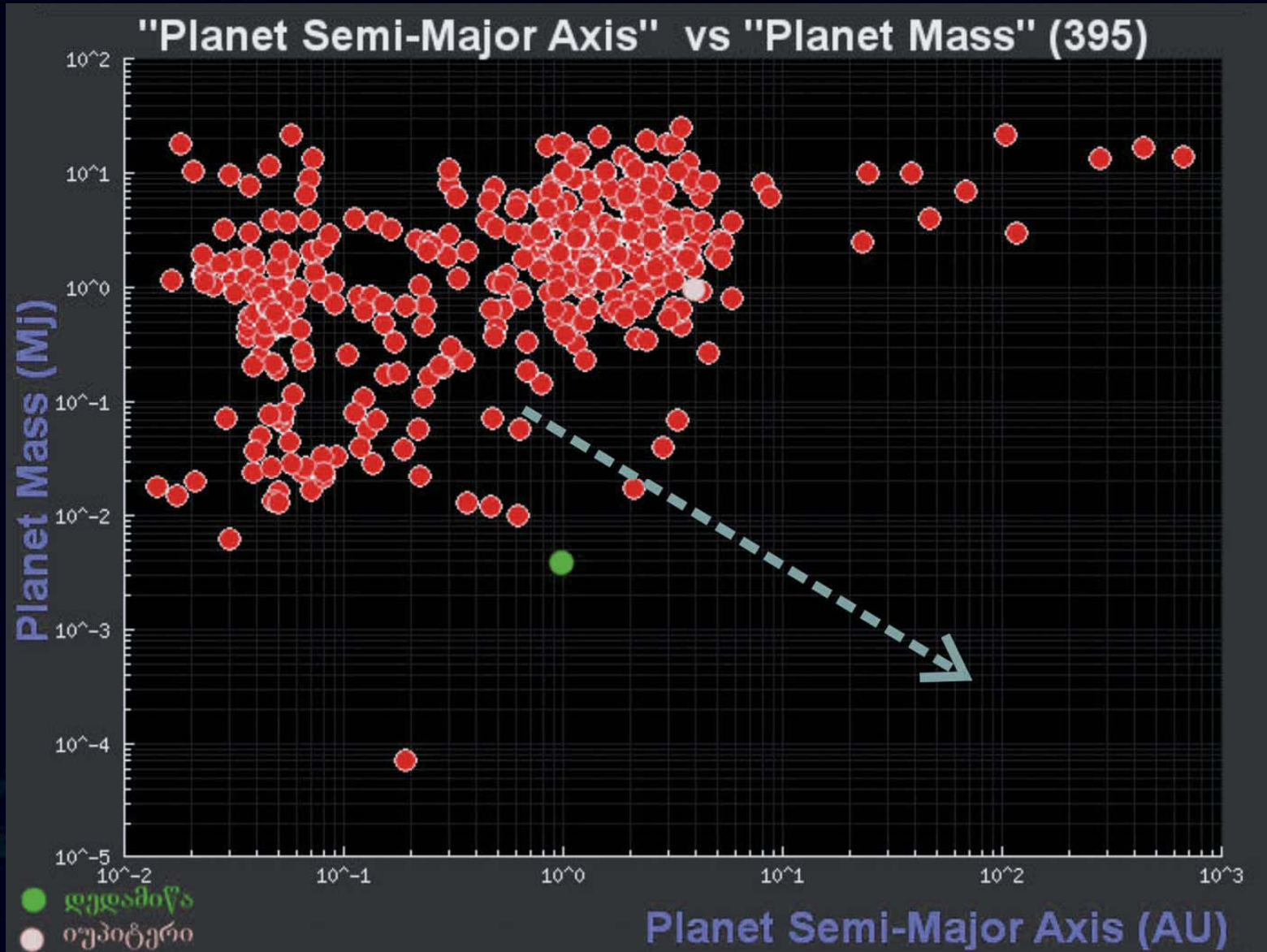
პირდაპირი გამონახვა: 11

პლანეტის ატმოსფეროს სპექტრი: 13.01.2010

ESO 1002b, HR8799



Exoplanets



პროტოპლანეტარული დისკები

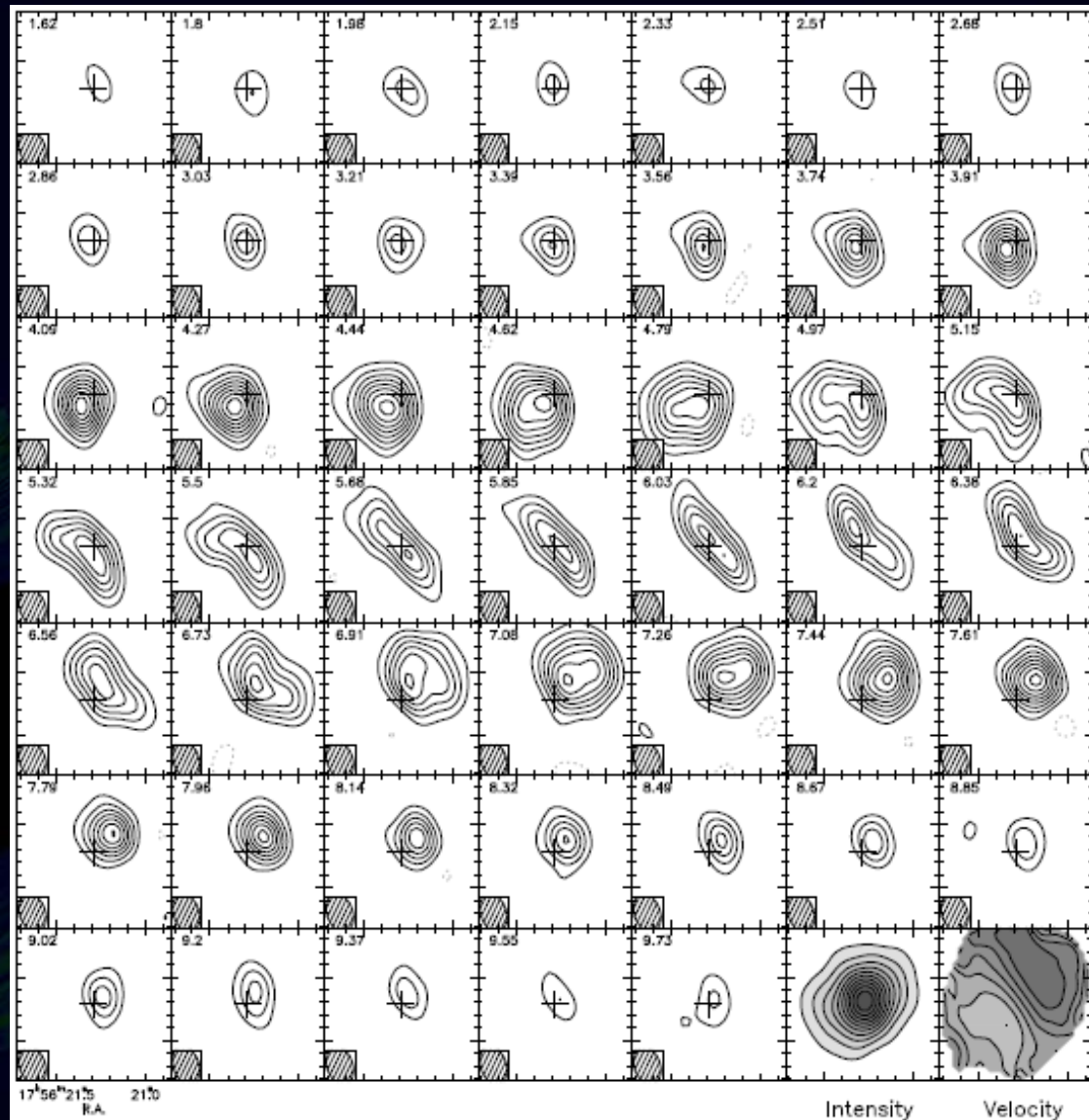
Isella et al. 2007

$^{12}\text{CO } J=3-2$

ქვე-მილიმეტრული
დაკვირვებები

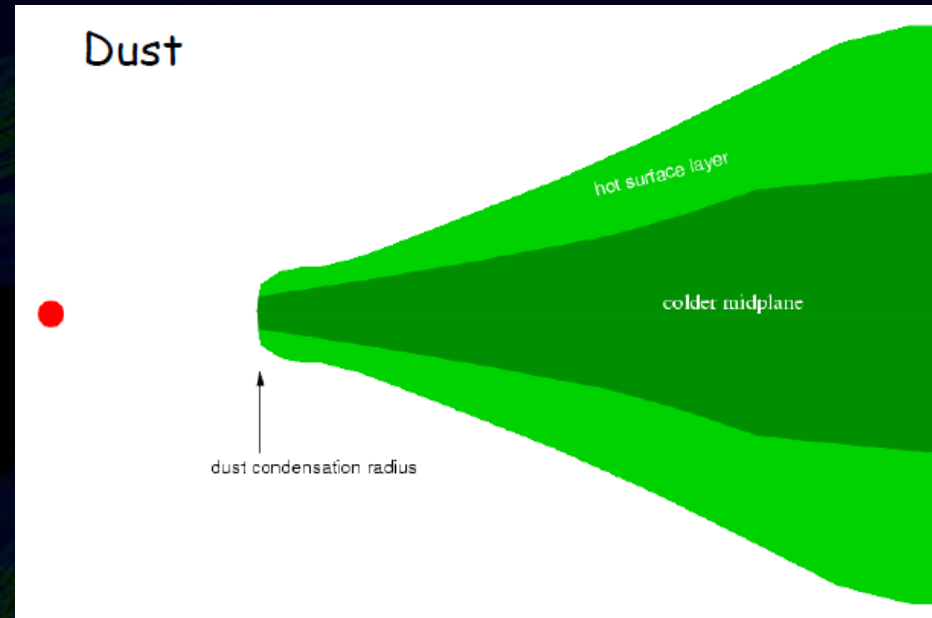
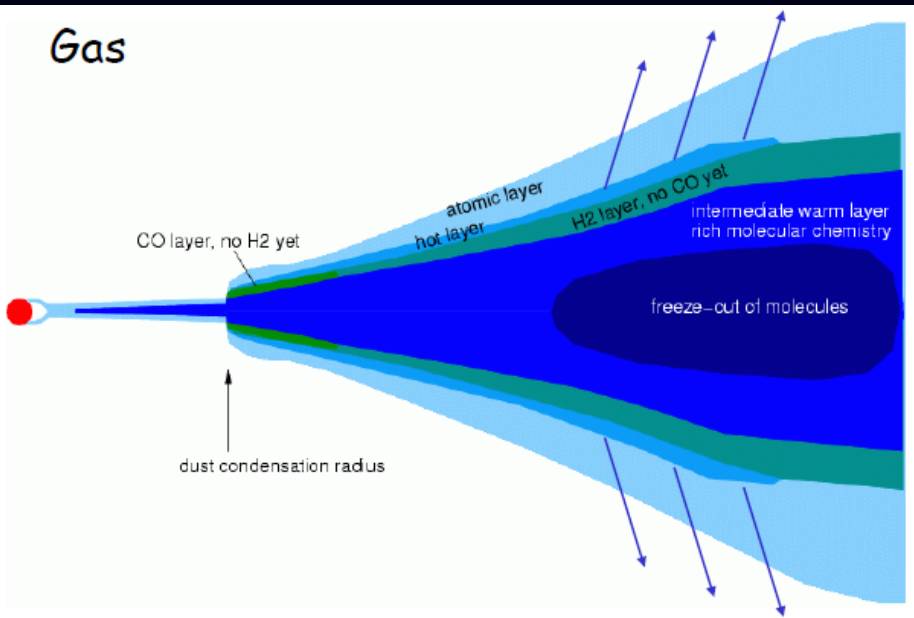
რადიალური
სტრუქტურა;

კეპლერული
ბრუნვიდან
გადახრები;



პროტოპლანეტარული დისკები

სტრუქტურა: გაზი + მყარი ნაწილაკები



Dullemond, Hollenbach, Kamp and D'Allesio, 2009

ინფრაწითელი ინტერფერომეტრია

პლანეტების ფორმირების მოდელები

პლანეტის დაბადება

1. (Top Down) ზემოდან ქვევით;

თვითგრავიტაცია და ღრუბლის შეკუმშვა; (Laplace)

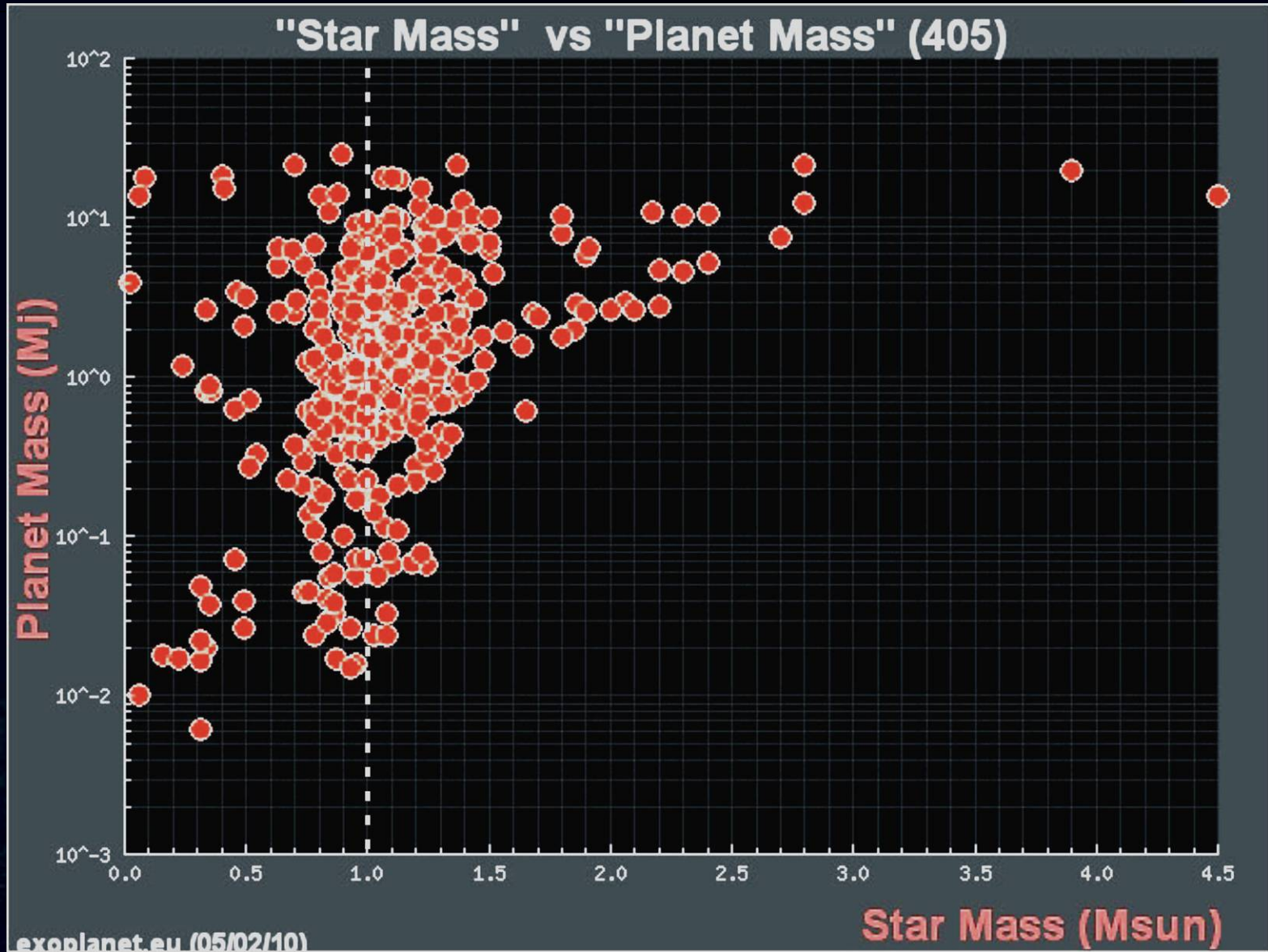
გრავიტაციული ფრაგმენტაცია

2. (Bottom Up) ქვემოდან ზევით;

პლანეტის ჩანასახის დაბადება და ზრდა; (Safronov)

გრიგალური მოდელი

პლანეტების ფორმირების მოდელები



გრიგალური მოდელი

(Core-accretion) ბირთვზე აკრეციის მოდელი

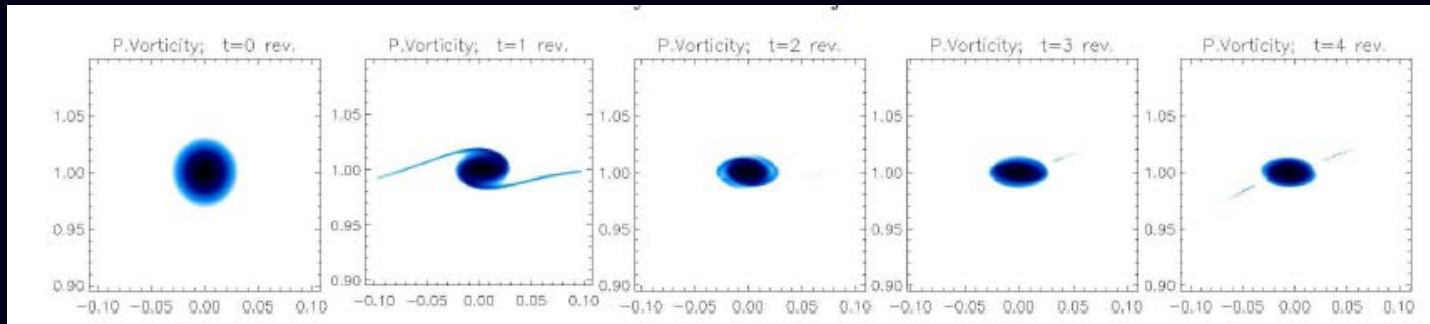
1. მდგრადი გრიგალების არსებობა;
2. პლანეტარული ჩანასახების ფორმირება;
3. მატერიის კონდენსირება ჩანასახებზე;

პრობლემები:

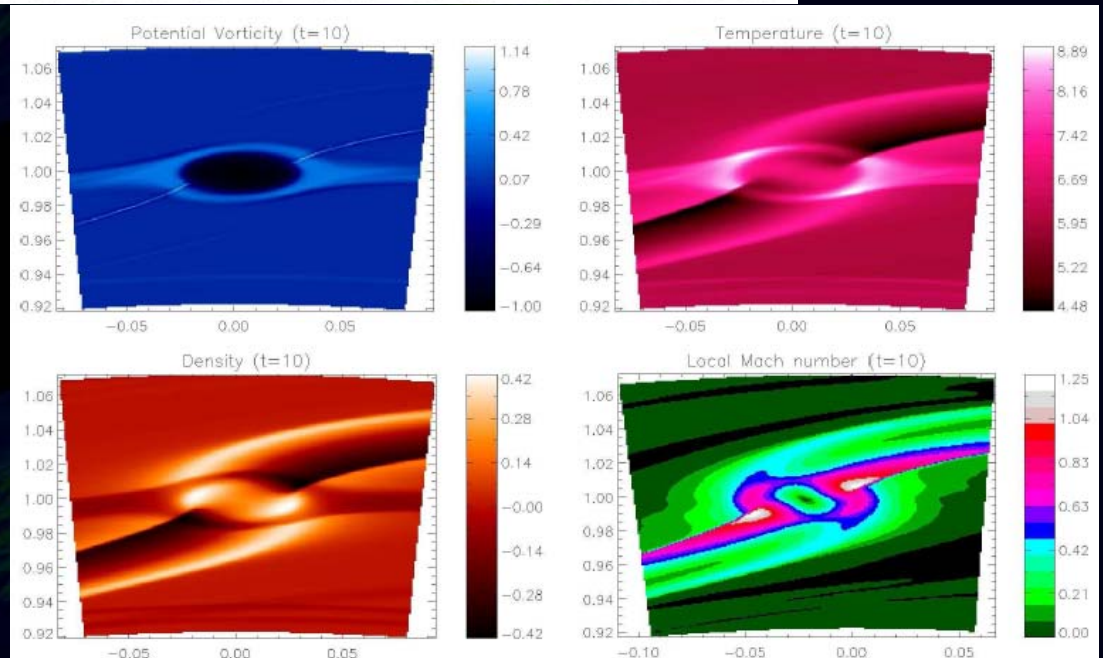
- 1) დიფ. ბრუნვა და ჰიდროდინ. არამდგრადობები;
- 2) პლანეტის ჩანასახი + გაზი; მიგრაციის თეორია;
- 3) პლანეტების ემბრიონები და ნამსხვრები;
რეზონანსები და გაფანტვები

გრიგალების მდგრადობა

რიცხვითი მოდელირება: გლობალური, კუმშვადი, 2D, (Bodo et al. 2007)



მდგრადი
ანტიციკლონური
გრიგალი
 $a = f(Cs)$
 $q=5$

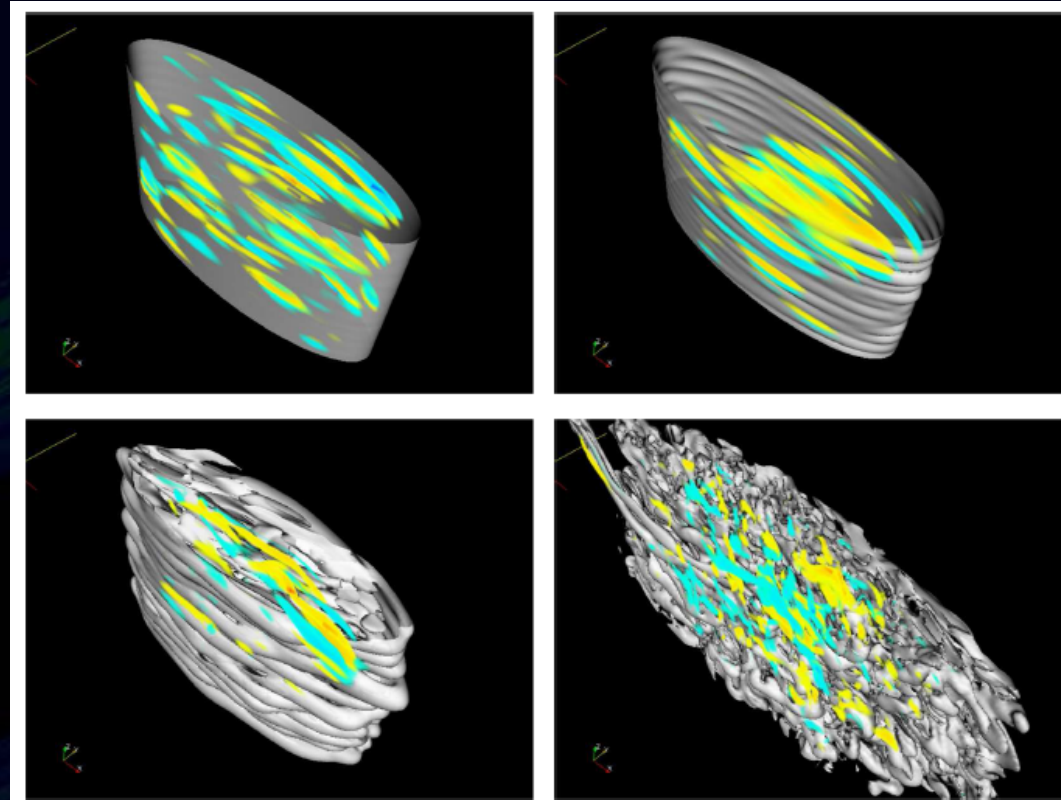


გრიგალების მდგრადობა

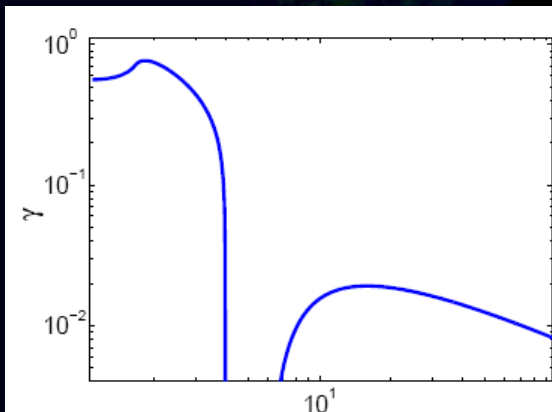
3D დინამიკა

ელიფსური
არამდგრადობა
(Lesur & Papaloizou, 2009)

არამდგრადობის
ინკრიმენტი



ზღრის მინიმუმი: $q=5$



გრიგალების აღძვრა

გრიგალი – არაწრფივი ინვარიანტი
(potential vorticity) პოტენციური ცირკულაცია;

$$\mathbf{W} = \text{rot}(\mathbf{V})/\rho$$

პოტენციური ცირკულაციის გაჩენის მექანიზმები:

- როსბის ტალღის არამდგრადობა;
- ბაროკლინური ძალები;
- დარტყმითი ტალღები;

ბაროკლინური დისკები

ბაროკლინური ძალები;

$$(\nabla P \times \nabla \rho) \neq 0$$

წრფივი თეორია:

ენტროპიის რადიალური სტრუქტურა

$$(\nabla P_0 \times \nabla \rho_0) = 0$$

$$(\nabla P_1 \times \nabla \rho_1) \neq 0$$

დისკის რადიალური სტრუქტურა:

$$\bar{\Sigma}(r) = \Sigma_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\beta_S}, \quad \bar{P}(r) = P_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\beta_P}, \quad \beta_S \equiv \beta_P - \gamma \beta_\Sigma.$$

ბაროკლინური დისკები

წრფივი მოდეები:

$$\bar{\omega}_p^2 = c_s^2 k^2 + 4\Omega_0^2,$$

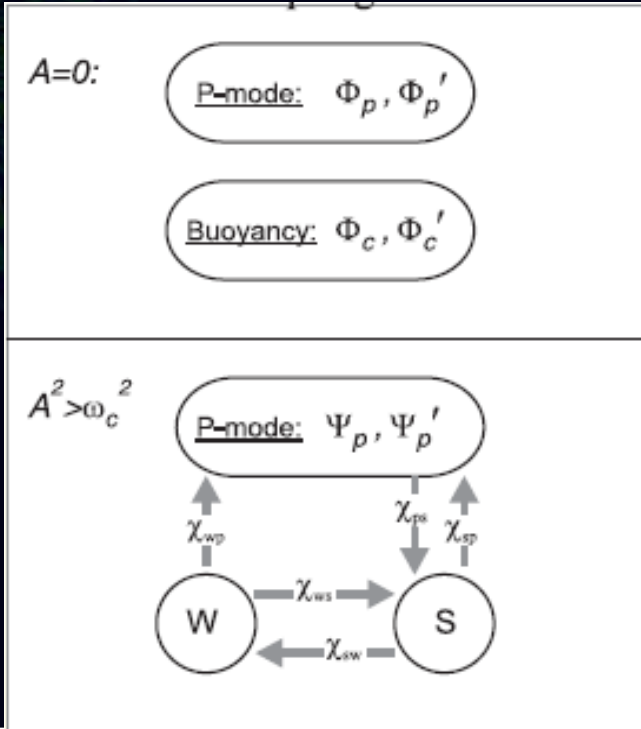
$$\bar{\omega}_c^2 = -\frac{c_s^4 \eta k_y^2}{c_s^2 k^2 + 4\Omega_0^2}.$$

$$\eta = \frac{\beta_P \beta_S}{\gamma^2 r_0^2}.$$

მახასიათებელი
დროითი
მასშტაბები:

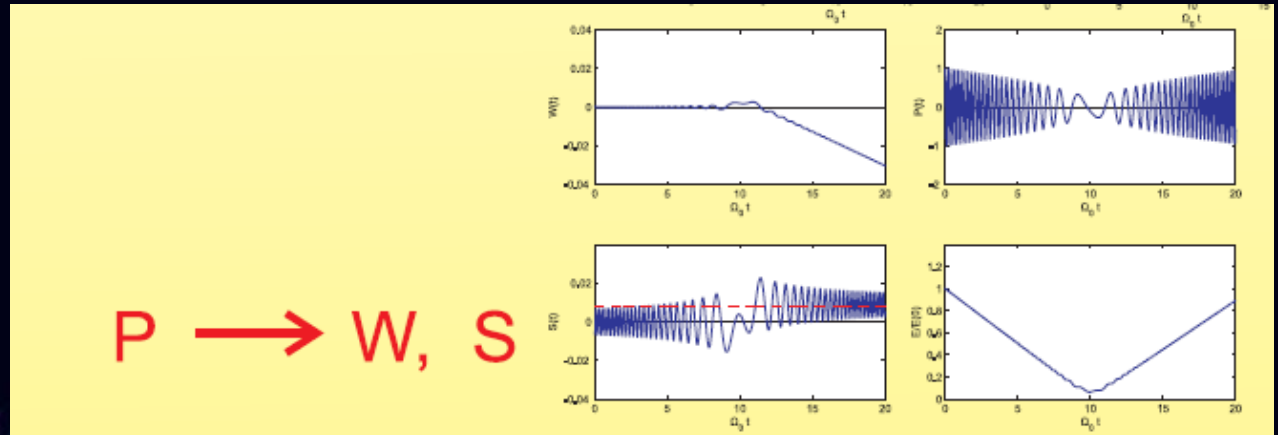
$$\bar{\omega}_c^2 \ll A^2 \ll \bar{\omega}_p^2$$

3-მოდოვანი ფორმალიზმი:



ბაროკლინური დისკები

მოდების წრფივი ბმა:



კუმშვადი შეშფოთებები \rightarrow გრიგალები

ეფექტურობა:

დიფ. ბრუნვა + რადიალური სტრუქტურული სტრუქტურული

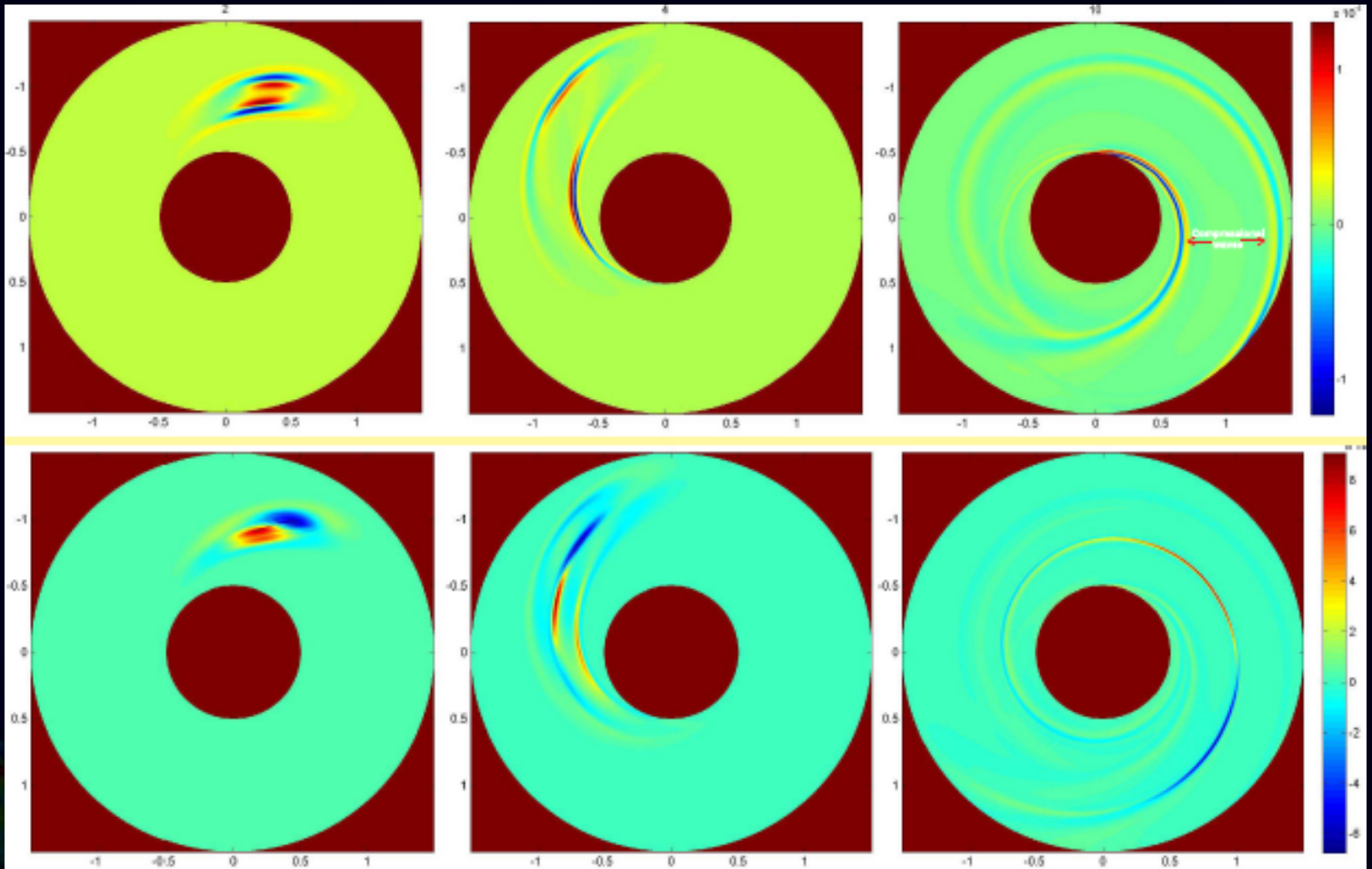
რიცხვითი მოდელირება

კოდი: **PLUTO** (`plutocode.to.astro.it`)
ამომხსნელი: **Riemann/Godunov, HD, FARGO, (ppm)**
ბადე: **Polar, [2048x326], [4096x652]**

წონასწორული დინება:
რადიალურად სტრატეფიცირებული დისკი

შეშფოთებები: წნევა, სიმკვრივე;
პოტენციური ცირკულაცია, ენთროპია = 0.

რიცხვითი მოდელირება



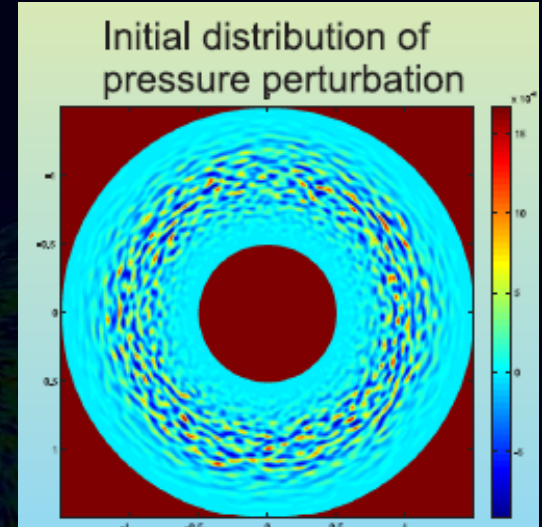
ენტროპიის აჩენა: (+/-)

გრიგალების გაჩენა: არაეფექტური

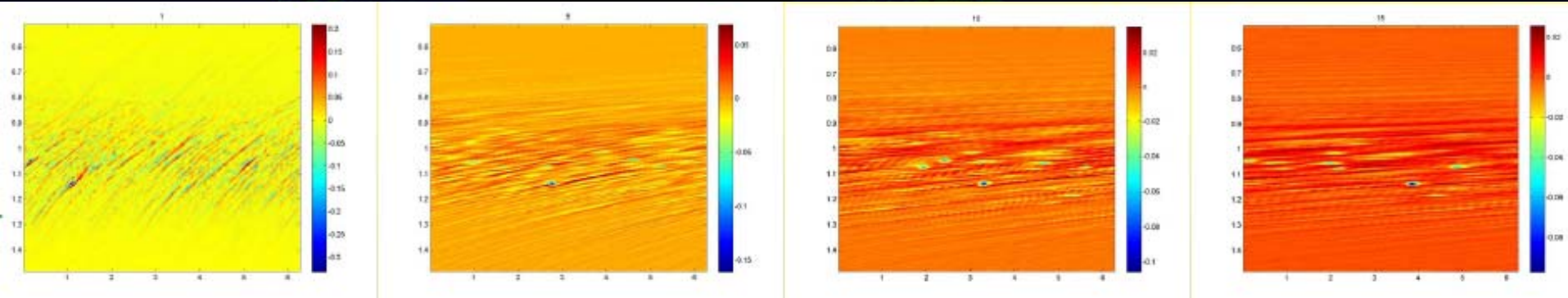
რიცხვითი მოდელირება

გრიგალების გაჩენა დარტყმითი ტალღებით

კეპლერული დისკი;
შემთხვევითი კუმშვადი
შეშფოთებები;



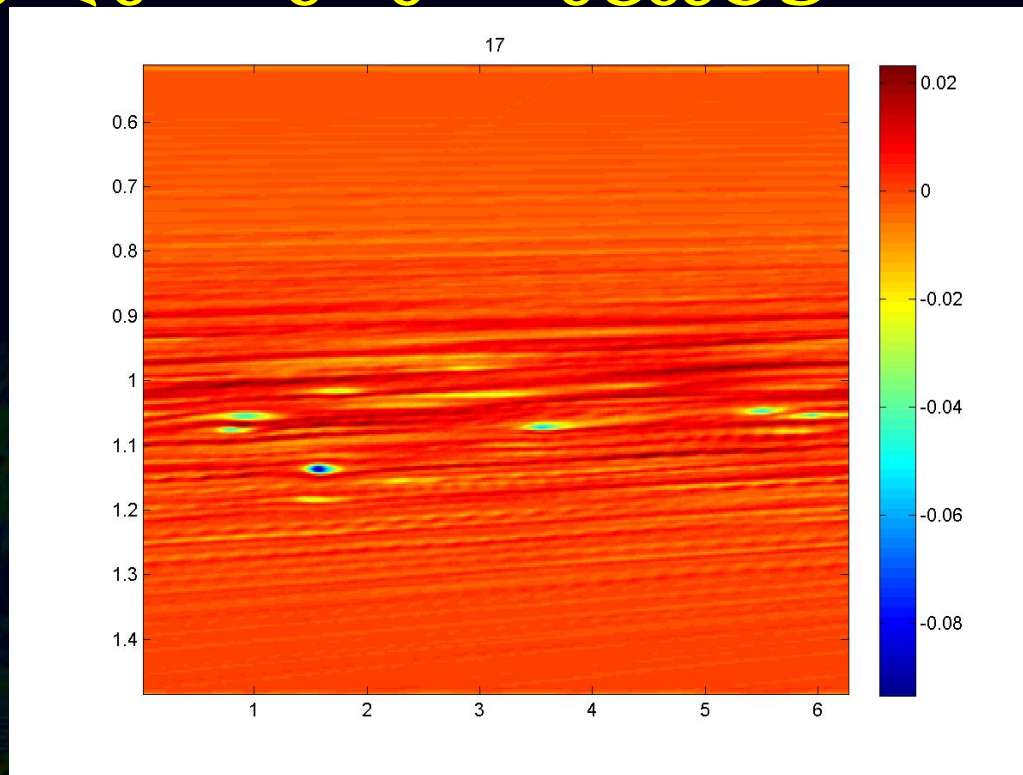
კოჰერენტული გრიგალების გენერაცია



რიცხვითი მოდელირება

დარტყმითი ტალღები რადიალურად
სტრატეფიცირებულ დისკებში:

გრიგალების გაჩენის ეფექტურობის ზრდა



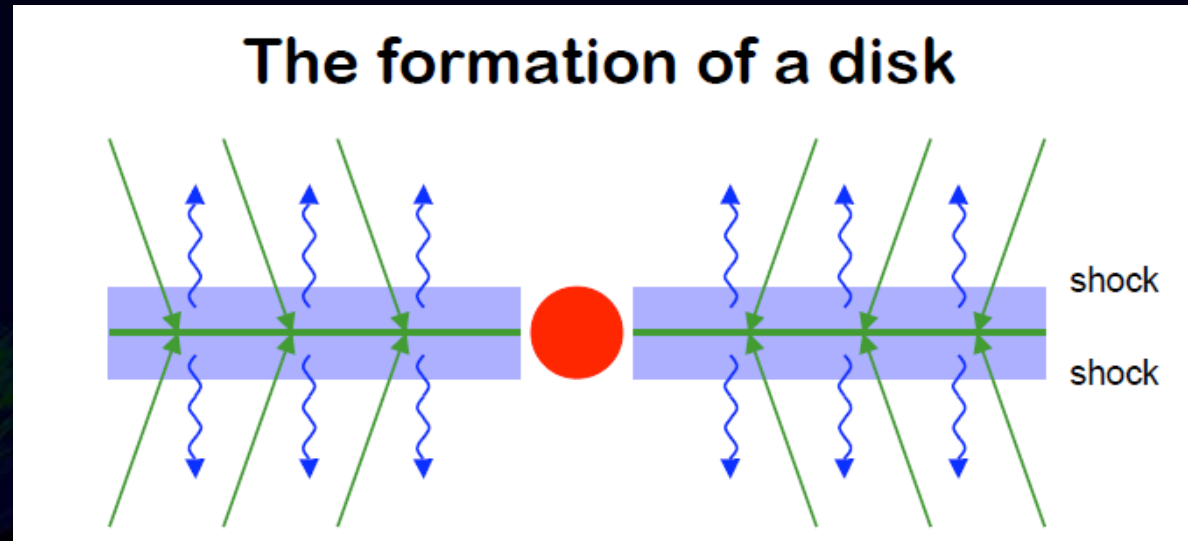
გენერაციის დრო ~ ბრუნვის პერიოდი

გრიგალების გენერაცია

პროტოპლანეტარული დისკის ფორმირება

Dullemond (2009)

საწყისი გაცხელება



+ კუმშვადი შეშფოთებები;

+ დარტყმითი ტალღები;

გრიგალების გენერაცია დისკის დაბადების პროცესში

შედეგები

რადიალურად სტრატეგიცირებული კუმშვადი პროტოპლანეტარული დისკების პირდაპირი რიცხვითი ოდელირება

– გრიგალების არძვრის ორი კონკურირებადი მექანიზმი

1. წრფივი მოდების გარდაქმნა

2. არაწრფივი დარტმითი ტალღების დინამიკა

არაწრფივ ამპლიტუდებზე დომინირებენ დარტმითი ტალღები

შედეგები

რეალურ ასტროფიზიკურ სიტუაციებში საწყისი კუმშვადი შეშფოთებების ენერგია კვებავს ანტიციკლონურ გრიგალებს

გრიგალების წარმოშობა და პლანეტარული ჩანასახების ფორმირება უწვევტ კავშირშია დისკის ჩამოყალიბებისას მიმდინარე პროცესებთან

შედეგები

არაიზოთერმული კეპლერული დისკების
ლოკალური წრფივი თეორია

კვაზილოკალური მიახლოება და შეშფოთებების
ვერტიკალური გადანორმვა

ბრუნვითი მომენტის გარეთ გადატანისა და მასის
აკრეციის შესაძლებლობა

კონვექციური აკრეციის კრიტერიუმი დისკის
ვერტიკალურ სტრუქტურაზე



გმადლობთ ყურადღებისათვის