



ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი

პლანეტების წარმოშობა: ჩანასახების ფორმირება რეოლოგიურ დინებებში

ლუკა პონიატოვსკი

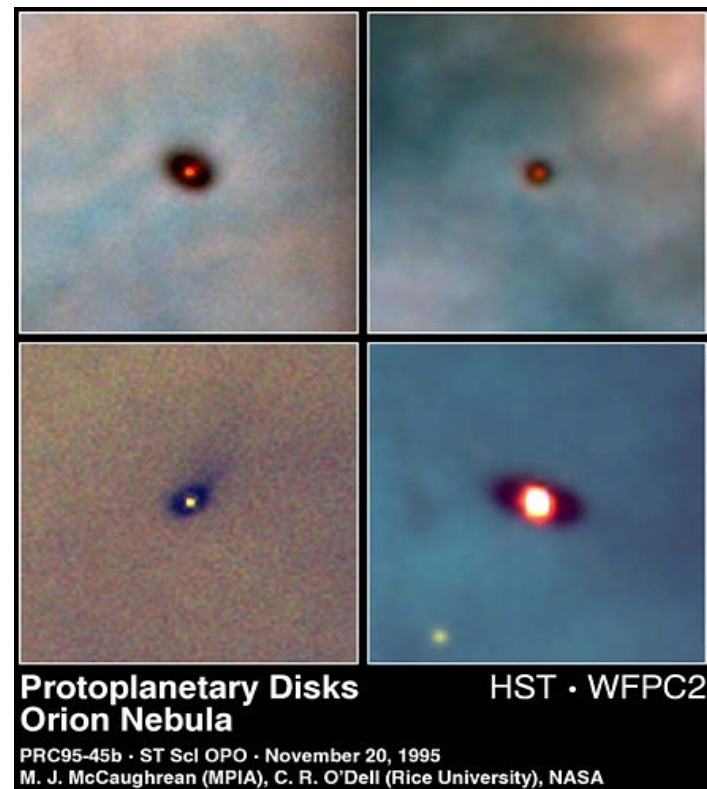
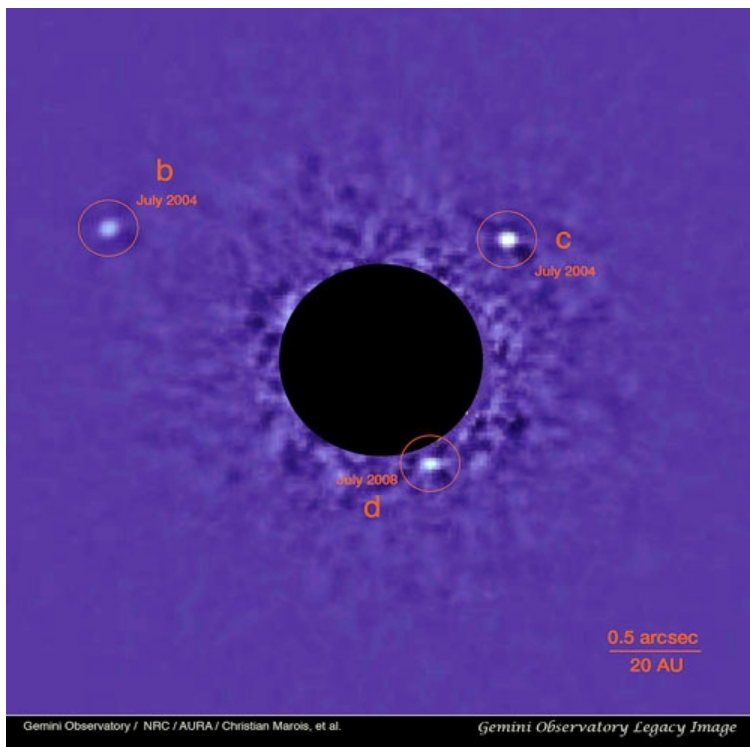
საბაკალავრო პროგრამა: ფიზიკა
ასტროფიზიკის კათედრა

ხელმძღვანელი: ალექსანდრე თევზაძე

(საბაკალავრო ნაშრომის დაცვა, 13.07.2015)

პლანეტების ფორმირება

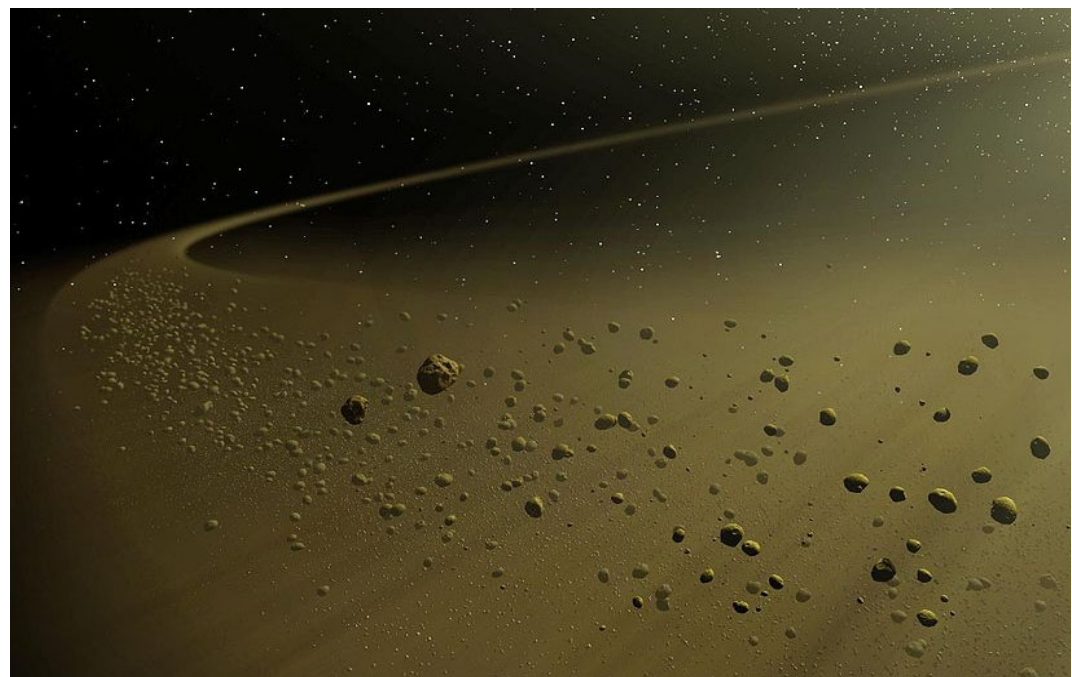
- დამზერილია ათასობით არამზიური პლანეტა
- დამზერილი პროტოპლანეტარული დისკები სადაც ფორმირდება პლანეტები
- აქტუალურია პლანეტების ფორმირების თეორიის შესწავლა



პროტოპლანეტური დისკები

- პლანეტის ფორმირების არეები (აირი + მტვერი)
- პრობლემა: პლანეტების ჩანასახების სწრაფი ფორმირება

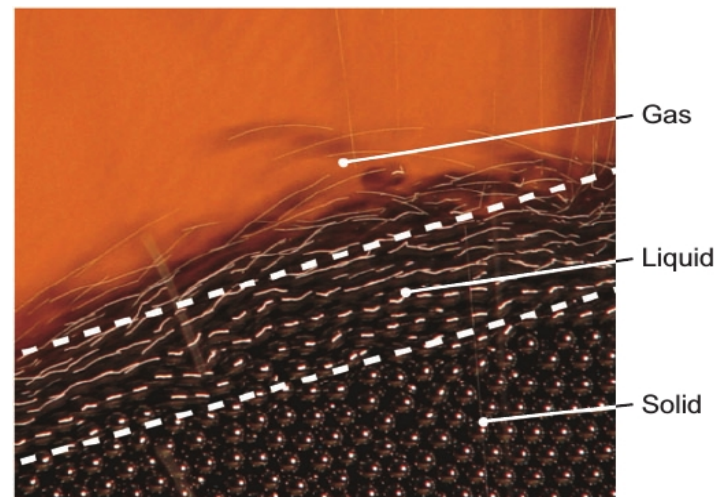
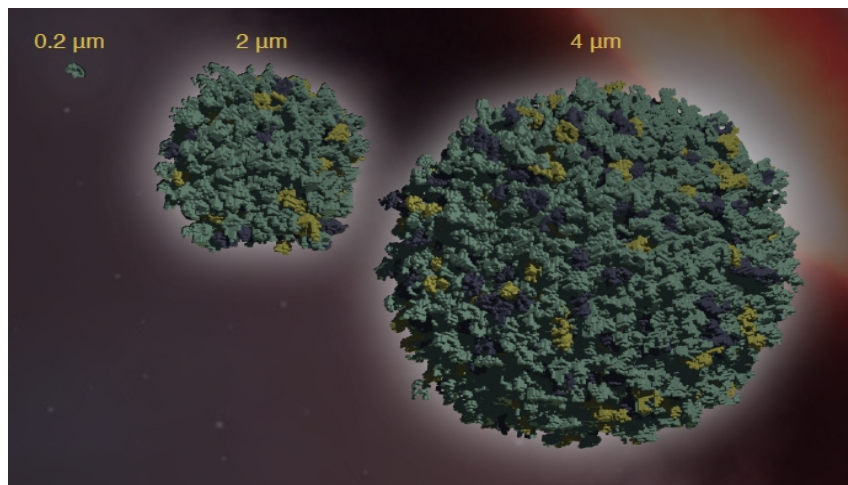
სწრაფი ჰიდრო პროცესები, მაგ. არამდგრადობა



Armitage “Astrophysics of planet formation” (2013)

გრანულარული დინება

- აირის და მტვრის (μm) ნარევი

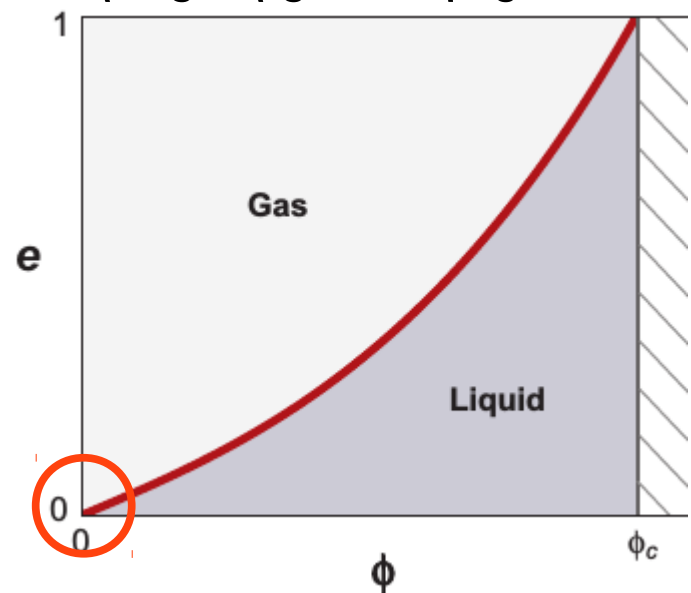
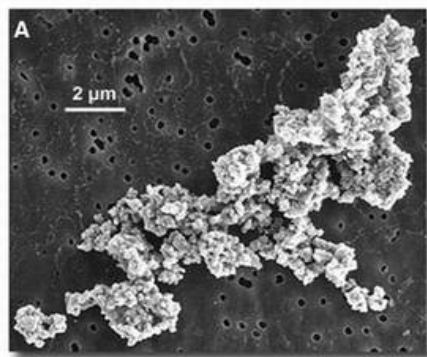


- გრანულარული დინება, რეოლოგიური დინების ლოკალური აღწერა

Forterre, Pouliquen ARFM 2008

- დრეკადობის პარამეტრი e :

$$e = \frac{U_a - U_b}{V_a - V_b}$$



მბრუნავი რეოლოგიური დინება

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + v_k \frac{\partial}{\partial x_k} \right\} v_i = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_k} \tau_{ik} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \mathbf{V} = 0 \quad \tau_{ik} = \eta \dot{\gamma}_{ik} \quad \dot{\gamma}_{ik} = \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i}$$

აბიმუტალური დინება: $\mathbf{V}_\phi = (0, r\Omega_0) \quad \Omega_0 \sim r^{-3/2}$

რეოლოგიური სიბლანტის
დაძაბულობის ტენზორი:

$$\tau_{r\phi} = \tau_{\phi r} = \eta r \frac{\partial \Omega_0}{\partial r}$$

$$\tau_{rr} = \tau_{\phi\phi} = 0$$

სტაციონარული მდგომარეობა

$$r : \quad \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \eta_0}{\partial r} \frac{\partial \Omega(r)}{\partial r} + \underline{\Omega(r)^2} = \frac{1}{\rho_0 r} \frac{\partial P_0}{\partial r} + \underline{\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r}}$$

$$\phi : \quad \frac{r}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} + \frac{\eta}{\rho_0} \left(r \frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + 3 \frac{\partial \Omega}{\partial r} \right) = 0$$

 წნევის გრადიენტი / რეოლუგიური სიბლანტე

 გრავიტაცია / დიფერენციალური ბრუნვა

ამონახსნები:

$$\rho_0 = \bar{\rho} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\beta_\Sigma} \quad \beta_\Sigma = 2/\gamma$$

$$P_0(r) = \bar{P} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\beta_p} \quad \beta_\eta = 1/2$$

$$\eta(r) = \bar{\eta} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\beta_\eta} \quad \beta_p = 2$$

რადიალური დინების მდგრადობა

- სტაციონარული დინება + ნორმირებული წრფივი შეშფოთება

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_0 + \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\delta_\Sigma} \rho' \\ P &= P_0(r) + \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\delta_p} P' \\ \mathbf{V} &= \mathbf{V}_0 + \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\delta_v} \mathbf{V}' \\ \eta &= \eta_0 + \eta'\end{aligned}\quad (\eta' \approx 0)$$

- ვუგულებელვყოთ სითბურ ტალღებს (იზენტროპულობის პირობა):

$$\beta_s = \beta_p - \beta_\Sigma/\gamma = 0$$

- რადიალური ნორმირების შერჩევა :

$$\begin{aligned}1 + \delta_v - \beta_p/\gamma &= 0 \\ \delta_p - \beta_p/\gamma &= 0\end{aligned}$$

Tevzadze, Chagelishvili, Bodo, Rossi MNRAS 2009

დისპერსია

ლოკალურ მიახლოებაში:

$$i\omega(\omega^2 - \omega_0^2) + i\omega\nu^2 D_2 + \omega^2 \nu D_1 = 0 \quad (2)$$

$$\omega_0^2 = c_s^2 k^2 + 4B^2 \quad \text{კუმშვადი სპირალური ტალღის სიხშირე.}$$

$$\omega(k_x, k_y) = \Omega(k_x, k_y) + i\sigma(k_x, k_y) \quad \Omega, \sigma \neq \text{const}$$

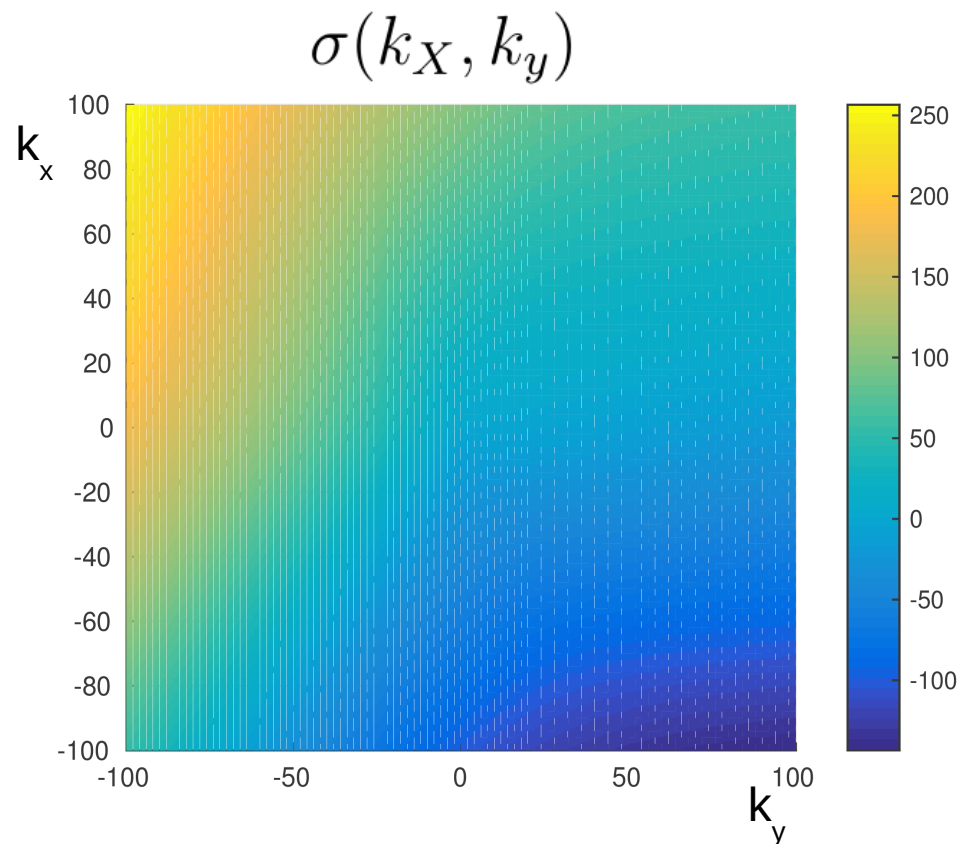
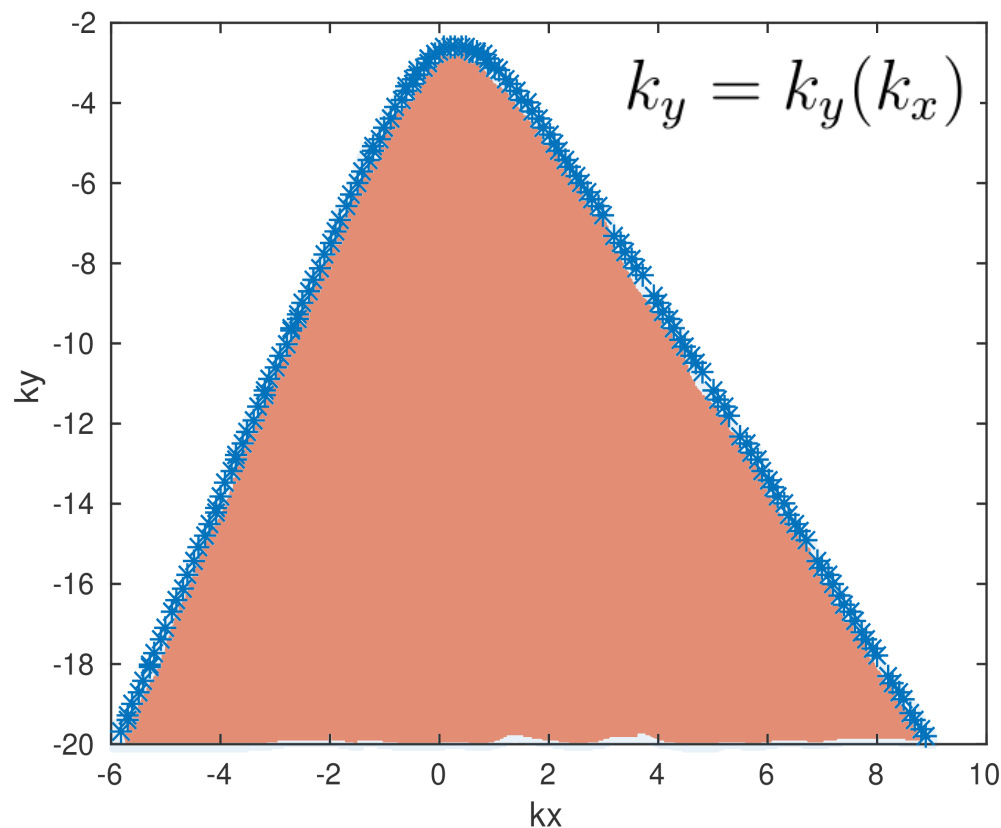
$$\sigma = K_0^2 \left[\frac{8\Omega_0^2}{\omega_0^2} k_x^2 + \frac{2\Omega_0}{\beta_\eta \omega_0} (k_y - k_x) \right] \quad (3)$$

კუმშვადი სპირალური გრანულარული არამდგრადობა: $\sigma > 0$

არამდგრადობა

არამდგრადობის პირობა მიიღება :

$$k_y < -\frac{\Omega_0}{\beta_\eta \omega_0} k_x^2 \quad (4)$$



შედეგები

- ფორმულირებულია მბრუნავი დინებს მოდელი გარნულარული რეოლოგიური სიბლანტით
- ნაჩვენებია $2D$ რადიალურად არაერთგვაროვანი წონასწორული მდგომარეობა
- ნაპოვნია კუმშვადი სპირალური რეოლეგიური არამდგრადობა
 - არამდგრადობა ასიმეტრიული ხასიათისაა $k_\phi < 0$
 - დისკის ბრუნვის საწინააღმდეგოდ დახვეული სპირალური შეშფოთებების არამდგრადობა (*Trailing Mode*)
- არამდგრადობამ შეიძლება გამოიწვიოს მტვრის აგლომერაცია და პლანეტის ჩანასახის სწრაფი ზრდა
- *Poniatowski, Tevzadze, “Local rheological instability of radially stratified compressible Keplerian flows” MNRAS (in preparation)*

პლანეტების ფორმირება

გ მ ა დ ლ ო ბ თ