გრანულარული დინებების მოდელირება სამგანზომილებიან კუმშვად ასტროფიზიკურ დისკებში

Numerical Simulation of granular flows in 3D compressible astrophysical disks

ლუკა პონიატოვსკი

სამაგისტრო პროგრამა "ფუნდამენტური ფიზიკა"
სპეციალიზაცია: ასტროფიზიკა

სამაგისტრო ნაშრომის დაცვა

ხელმძღვანელი:

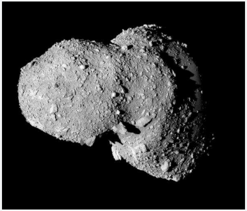
ასოც. პროფ.:

ალექსანდრე თევზაძე

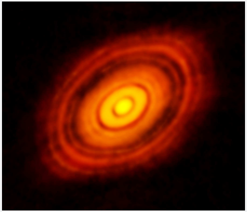
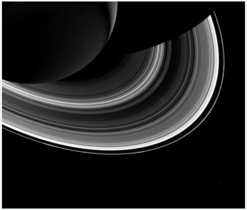
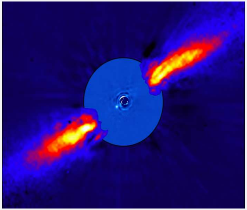
21 ივლ. 2017

გრანულარული დინება

- დინების მახასიათებელი ზომები: 1სმ $\sim$ 400AU
- განსხვავებული რეჟიმები:
  - კინეტიკური
  - სითხის
  - რბილი მატერია



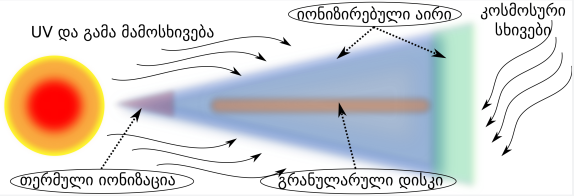
გრანულარული დინებები ასტროფიზიკაში

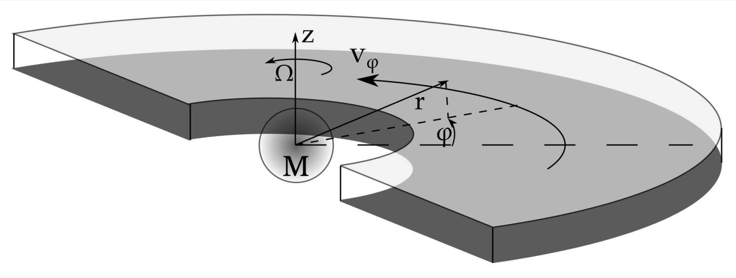
- არადრეკადი დაჯახებები, გრანულარული დისიპაცია
- ცენტრალური ობიექტის გრავიტაცია

$$\nu = \nu(P, \mathbf{V})$$

პროტოპლანეტური დისკი



$\Downarrow$



რეოლოგიური დინებები

რეოლოგია: სიბლანტის დამოკიდებულება ფიზიკურ სიდიდეებზე

ა) გრანულარული რეოლოგია

(Forterre & Pouliquen 2008 , Jop et. al. 2006).

$$\eta = \eta(P, \xi) \; , \qquad \xi = \sqrt{\frac{\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}}{2}}$$

ბ) ტურბულენტური სიბლანტე

$$\eta_{turb} = \rho \frac{\overline{u_i' u_j'}}{\varepsilon_{ij}} \; , \qquad \varepsilon_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}$$

სიბლანტით გამოწვეული არამდგრადობები

სიბლანტის მოდელი: $\nu(\sigma) \propto \sigma^{\beta}$

1. Viscous instability: $\beta < 0$

   (Lightman and Eardley 1974, Shakura and Sunyaev 1976)

2. Viscous Overstability : $\beta > 2$

   (Kato 1978, Blumenthal at. el. 1984)

სიბლანტის მოდელი: $\eta = \eta_0 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{g_P} \left(\frac{\xi}{\xi_0}\right)^{g_S}$

1. არამდგრადობის მოდიფიკაცია სიჩქარის წანაცვლებით
2. პერიოდული არამდგრადობის მოდიფიკაცია სიჩქარის წანაცვლებით

   (პონიატოვსკი 2015, საბაკალავრო ნაშრომი, 2D კუმშვადი)

წრფივი მდგრადობის 3D ანალიზი

$g_P = 0$ გამოირიცხება ცნობილი არამდგრადობები

- წრფივი მდგრადობის ანალიზი (უკუმშვადი)

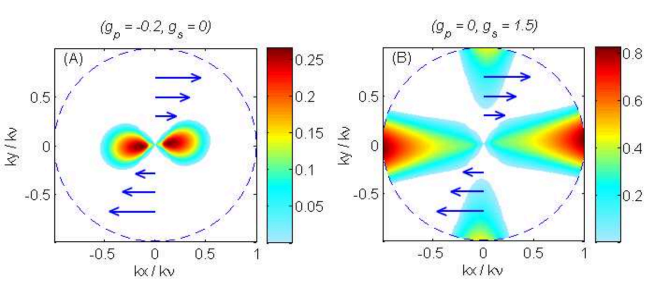
$$\omega = \pm(\bar{\kappa}^2 - W^2)^{1/2} + i(W - \nu k^2) \ . \qquad (1)$$

$\bar{\kappa}$ - ეპიციკლური სიხშირის რეოლოგიური შესწორება

$$W \equiv \sigma_A + \sigma_P + \sigma_S$$

უკუმშვადი სპექტრი

ზრდის ინკრიმენტი: $\mathcal{I}m(\omega)$



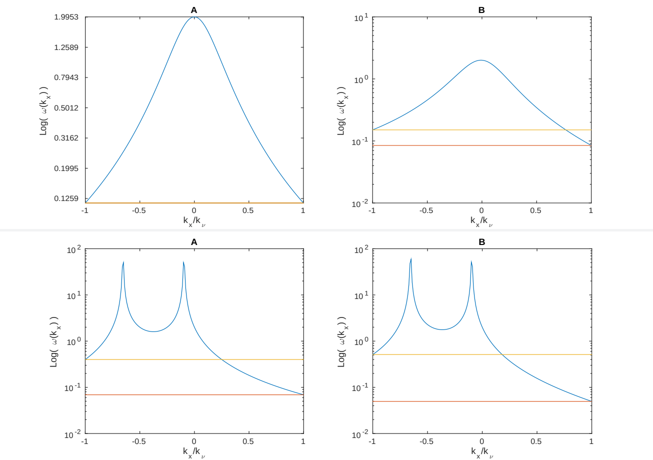
- G_P დიდმასშტაბოვნი სტრუქრურები; G_S ლოკალური სტრუქტურები
- ციკლონურ - ანტიციკლონური ასიმეტრია

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left[\ln\left(\mathrm{curl}(\mathbf{u})_z\right)\right] = qG_S\Omega_0\frac{(k_x(t)^2 - k_y^2)^2}{k(t)^2} - \nu k(t)^2 \qquad (2)$$

სპირალური ტალღა

ეპიციკლური სიხშირის დისპერსია $\kappa = \kappa(\mathbf{k})$

$$\bar{\kappa}^2 \equiv (-4\mathrm{B}\Omega - 4\mathrm{A}^2 G_S k_x k_y) \frac{k_z^2}{k^2 - 4\mathrm{A} G_P k_x k_y} \qquad (3)$$



პირდაპირი რიცხვითი მოდელირება

- კუმშვადი ასტროფიზიკური დინებების მოდელირების DNS კოდი PLUTO
- მოდულური, HD/RHD, MHD/RMHD, Shock Capturing
- ბადეზე დაფუძვნებული რიმან/გოდუნოვის ამომხსნელი
- Cartesian , Cylindrical , Polar, Spherical, თანამბრუნავი სისტემის და წანაცვლები სიბრტყის რიცხვითი მოდული

```
EXPAND (dVxi = D_DX_I(Vx);, dVyi = D_DX_I(Vy);, dVzi = D_DX_I(Vz);)
#if DIMENSIONS >= 2
 EXPAND (dVxj = D_DY_I(Vx);, dVyj = D_DY_I(Vy);, dVzj = D_DY_I(Vz);)
 #if DIMENSIONS == 3
  dVxk = D_DZ_I(Vx); dVyk = D_DZ_I(Vy); dVzk = D_DZ_I(Vz);
 #endif
#endif
```

plutocode.ph.unito.it

რეოლოგიური მოდული - PLUTO Rheo

შექმნილი რეოლოგიური მოდული

$$\frac{\mathrm{D}V_k}{\mathrm{D}t} + \nabla_i J_{ik} = S_k$$

წყაროს წევრი:

$$S_k \propto \frac{\partial}{\partial x_i}\nu(P,\xi)\varepsilon_{ik}\ , \quad \varepsilon_{ik} = \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_i}{\partial x_k}\right)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{\varepsilon_{ik}\varepsilon_{ik}}{2}}$$

საწყისი პირობები

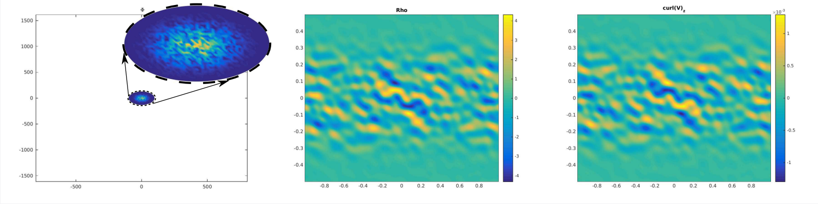
I k სივრცეში ლოკალიზებული გაუსური ხმაური

II ლოკალიზებული განაწილება L_x ღერძის მიმართ $\mathbb{M}(r)$

III პერიოდულობა L_y ღერძის საზღვრებზე

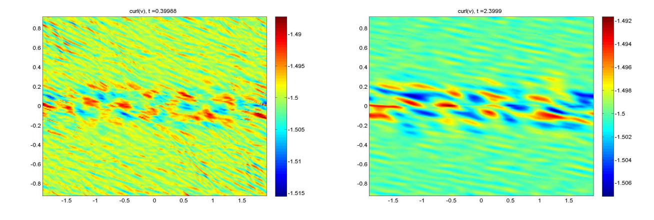
$$\Phi(k) = \varepsilon \exp\left\{-\left(\frac{k}{k_0}\right)^2\right\}\mathcal{R}\,, \quad \Psi(r) = \mathbb{M}(r)\iint \mathrm{d}k_x \mathrm{d}k_y \mathrm{e}^{i\mathbf{kr}}\Phi(k)$$

$$V'_x = \frac{\partial\Psi}{\partial y}\,, \quad V'_y = -\frac{\partial\Psi}{\partial x}\,, \quad V_{y0} = -q\Omega x.$$

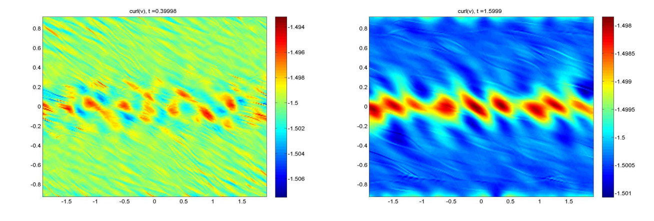


რიცხვითი თვლები (256x512x32)

ფიდუციური მოდელი



წანაცვლებითი რეოლოგია



- მდგრადი ფიდუციური მოდელი;
- არამდგრადობის არაწრფივი გაჯერება;
- ხანგრძლივი ანტიციკლონების ჩამოყალიბება;

შედეგები

1. ბლანტი-ბრუნვითი არამდგრადობა

   (ახალი ტიპის 3D დიფერენციალურად მბრუნავი სითხის ლოკალური არამდგრადობა)

   - მდგრადობის კრიტერიუმი
   - Poniatowski & Tevzadze, "Viscorotational shear instability of Keplerian granular flows Phys. Rev. E **96**, 010901 (2017)
   - ეპიციკლური სიხშირის რეოლოგიური შესწორება (მზადებაში)

2. PLUTO კოდის ახალი მოდული

   - რეოლოგიური სიბლანტის მოდული

3. არაწრფივი მოდელირება

   - რამდგრადობის არაწრფივი გაჯერება დიდ ამპლიტუდებზე
   - კვაზისტაციუნარული თვითშენარჩუნებადი ანტიციკლონური გრიგალები
   - ციკლონურ - ანტიციკლონირუ ასიმეტრია (მზადებაში)

გმადლობთ ყურადღებისთვის