

ტურბულენტური და კოჰერენტული პროცესები ასტროფიზიკურ დისკებში

აღ. თევზაძე

ე. ხარაძის ეროვნული ასტროფიზიკური ობსერვატორია
ჭავჭავაძის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

გეგმა

- შესავალი

ასტროფიზიკური დისკები, წანაცვლებითი ნაკადები, მოკლე მიმოხილვა, წრფივი ეფექტები

- პროტოპლანეტური დისკები

მიმოხილვა, გრიგალური მოდელი, კოჰერენტული სტრუქტურების მდგრადობა

- აკრეციული დისკები

მიმოხილვა, ჰიდროდინამიკური ტურბულენტობა დიფერენციალურად მბრუნავ გარემოში

შესავალი

სამყაროში ფართოდ გავრცელებული ობიექტები
(აკრეციული, გალაქტიკური, პროტოპლანეტური დისკები)

ცენტრალური გრავიტაცია

კეპლერული ბრუნვა:

$$\Omega(r) \sim r^{-3/2}$$

დიფერენციალური ბრუნვა

დინამიკის განმსაზღვრელი ძირითადი ფაქტორი

შესავალი

წანაცვლებითი ნაკადები:

ნაკადის სიჩქარის არაერთგვაროვნება

არაორთოგონალური დინამიური ოპერატორები

საკუთარი ფუნქციების ინტერფერენცია

საკუთარი მნიშვნელობები კორექტულად ვერ
აღწერენ წრფივი მოდების დინამიკას

შესავალი

ინტერფერენციით გამოწვეული მოვლენები:
არაორთოგონალური ეფექტები

არამოდალური მიდგომა

- აპერიოდული შეშფოთებების ტრანზიენტული ზრდა;
- წრფივი მოდეის რეზონანსული და არარეზონანსული ურთიერთქმედება;

გრიგალების ალგებრული, არაექსპონენციალური ზრდა
წრფივი ტალღების გაძლიერება, კონვერსია,
ტრანსფორმაცია და არეკვლა

პროტოპლანეტური დისკები

ლაპლასის ჰიპოთეზა (1796) – პლანეტები იბადებიან პროტოპლანეტური ნისლოვანებებში

დაკვირვებები (Exoplanets):

1992 Wolszczan and Frail: PSR B1257+12

წელს: 61 პლანეტა

დადასტურებული პლანეტების რიცხვი: 307

პროტოპლანეტური დისკები

პლანეტების წარმოქმნის ძირითადი მექანიზმები:

1. გრავ. კლასტერიზაცია

კუმშვადი ტალღები, თვითგრავიტაცია,
დიდი მასის ობიექტები

2. გრიგალური მოდელი

გრიგალების დინამიკა, სამ ფაზოვანი მოდელი

პროტოპლანეტური დისკები

სტანდარტული პროცესი: კოაგულაცია
- ხანგრძლივი, რადიალური მიგრაცია;

გრიგალური მოდელი:

1. ანტიციკლონური გრიგალების ჩამოყალიბება
2. მტვრის კინემატიკური ჩაჭერა და პლანეტების ჩანასახების ჩამოყალიბება (planetesimals)
3. ნარჩენი ნივთიერების აკრეცია ჩანასახზე

პროტოპლანეტური დისკები

გრიგალების მდგრადობა კეპლერულ დისკებში

დიფერენციალური ბრუნვა

ძლიერი წანაცვლებითი ძალები

კოჰერენტული სტრუქტურების დეფორმაცია

არაწრფივი თვით-შენარჩუნების მექანიზმი

პროტოპლანეტური დისკები

პრობლემა:

2D: მდგრადი ანტიციკლონური გრიგალები

3D: ვერტიკალური სტრატეფიკაცია $g(z) \sim z$

$g(z)=g$ მდგრადია

$g(z)=0$ არამდგრადი

მტვრის მაქსიმალური სიმკვრივე: $z=0$

მდგრადი ანტიციკლონური გრიგალი: $z \neq 0$

პროტოპლანეტური დისკები

- Bodo, G., Tevzadze, A. G., Chagelishvili, G. D., Mignone, A., Rossi, P., and Ferrari, A. 2007, “*Stability and nonlinear adjustment of vortices in Keplerian flows*”, *Astron. Astrophys.* **475**, 51
- Tevzadze, A. G., Chagelishvili, G. D. and Lominadze, J. G., 2007, “*On vortex model of planet formation in Keplerian disks*”, *Bulletin of the Georgian Academy of Sciences*
- Bodo, G., Chagelishvili, G. D., Murante, G., Tevzadze, A., Rossi, P. and Ferrari, A. 2005, “*A Spiral Density Wave Generation by Vortices in Keplerian Flows*” *Astron. Astrophys.* **437**, 9

გრიგალური შემფოთებების დინამიკის შესწავლა კეპლერულ დისკებში: წრფივი და არაწრფივი რეჟიმები

პლანეტების წარმოქმნის გრიგალური მოდელის პირველი ფაზა

პროტოპლანეტური დისკები

რიცხვითი მოდელირება:

PLUTO (გოდუნოვის სქემა)

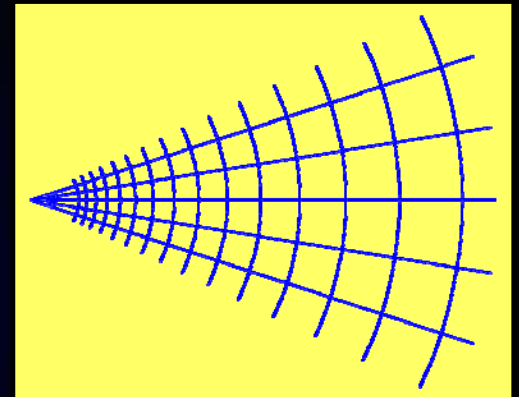
რადიალურად არაერთგვაროვანი ბადე

Momentum conserving, FARGO, ppm

MPI parallel

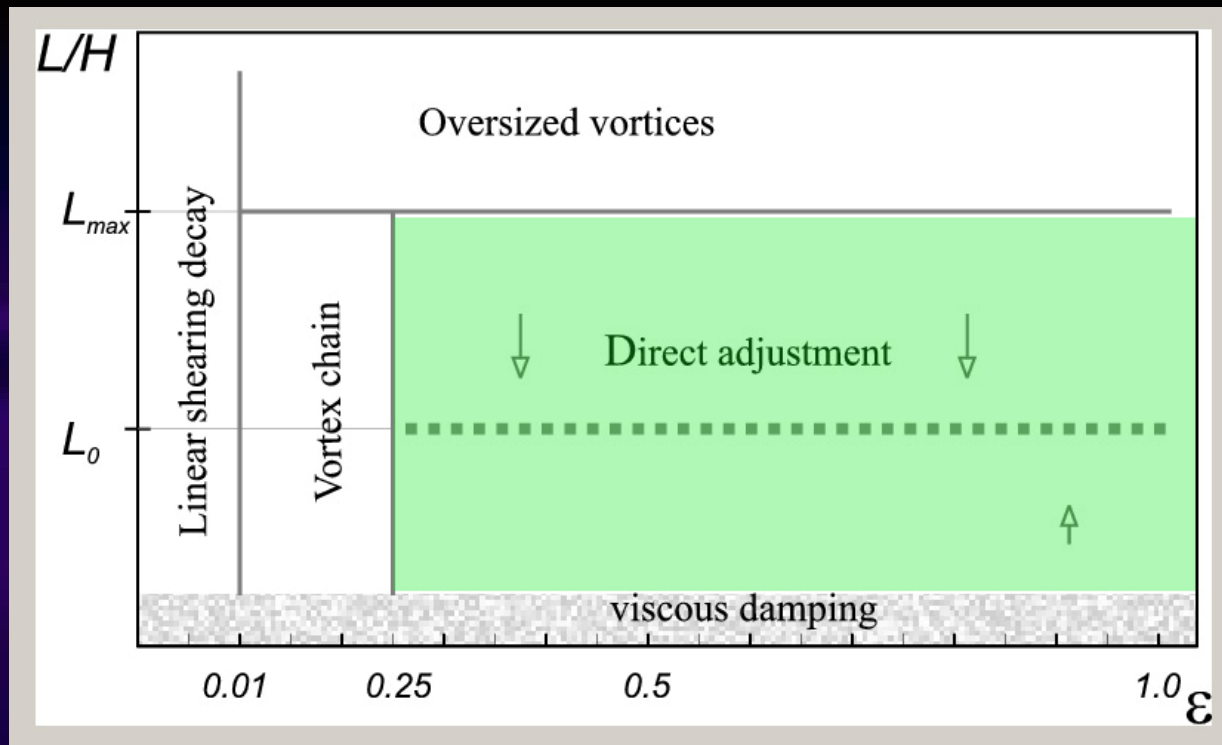
$R = (0.2-1.5)$

მაქსიმალური გარჩევა: 8000 x 1559



პროტოპლანეტური დისკები

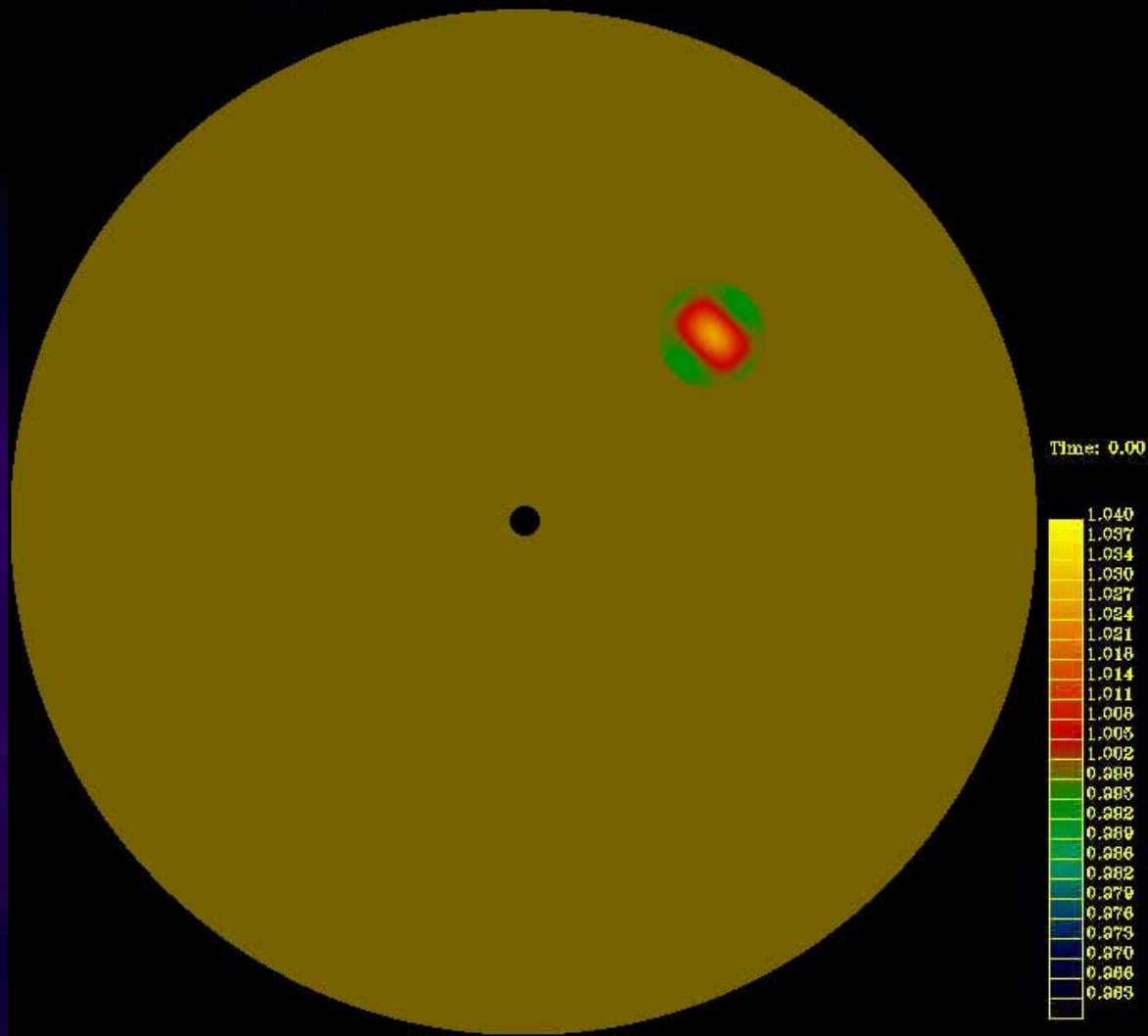
არაწრფივი წონასწორული კონფიგურაცია:
ატრაქტორი



პროტოპლანეტური დისკები

წრფივი დინამიკა

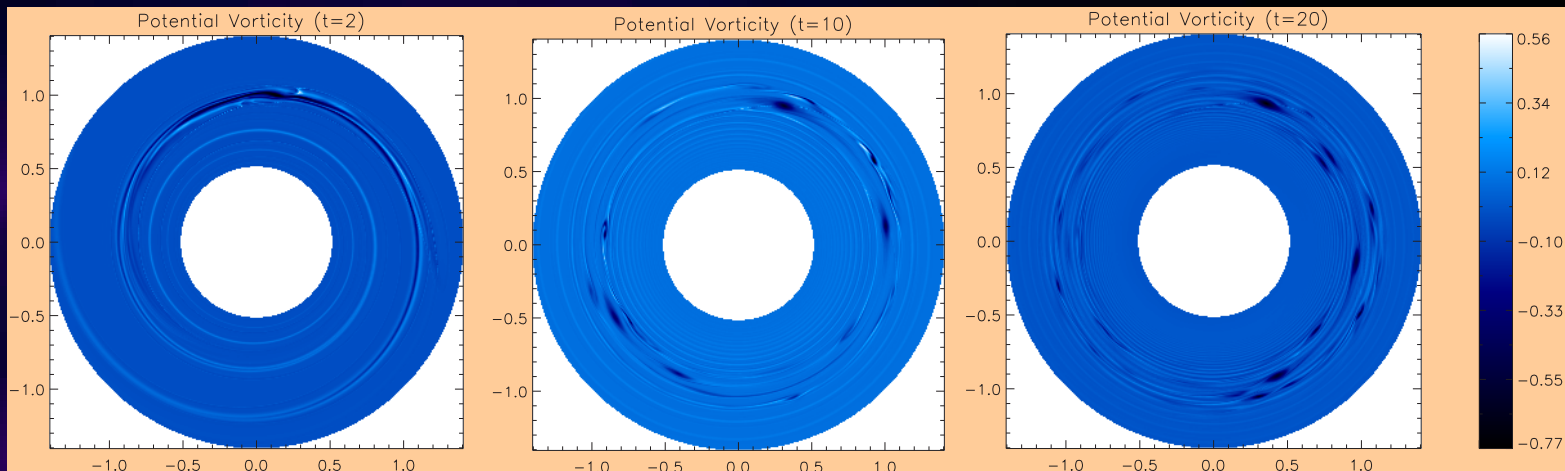
ρ



პროტოპლანეტური დისკები

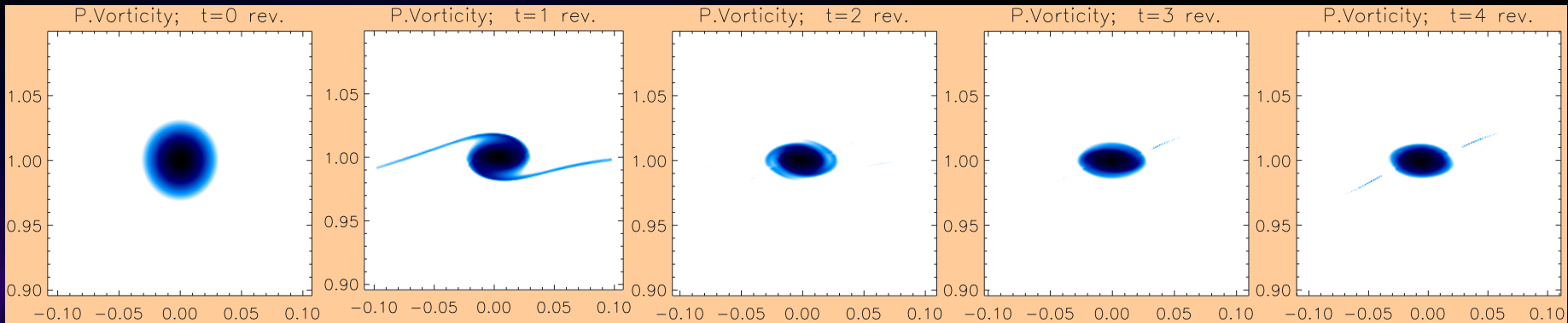
არაწრფივი რეჟიმები

მაქსიმალური რადიუსის გადაჭარბება



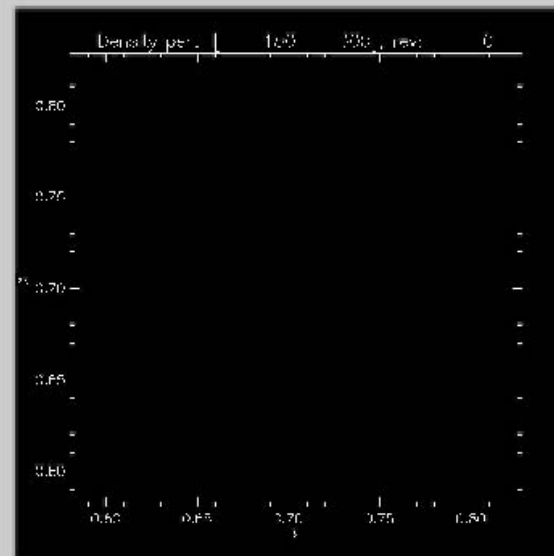
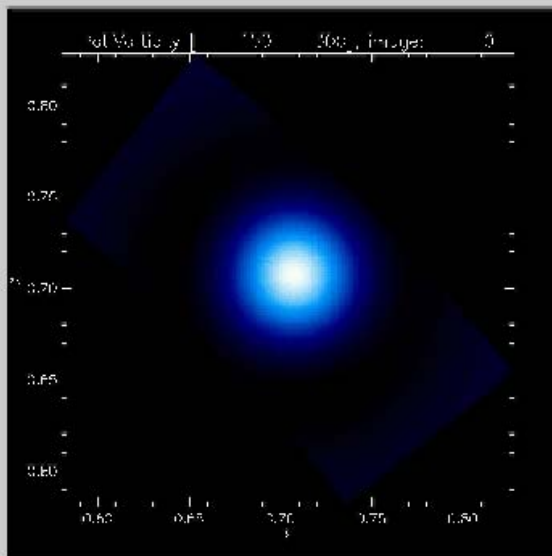
პროტოპლანეტური დისკები

არაწრფივი რეჟიმი: პირდაპირი გადასვლა
(direct adjustment)



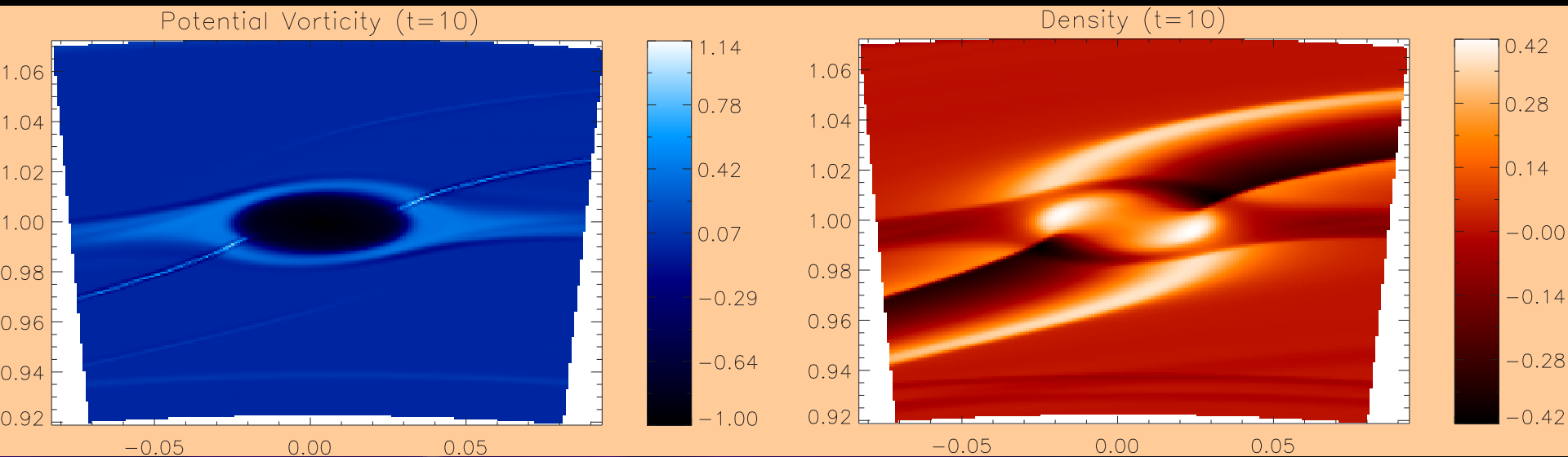
პროტოპლანეტური დისკები

არაწრფივი რეჟიმი



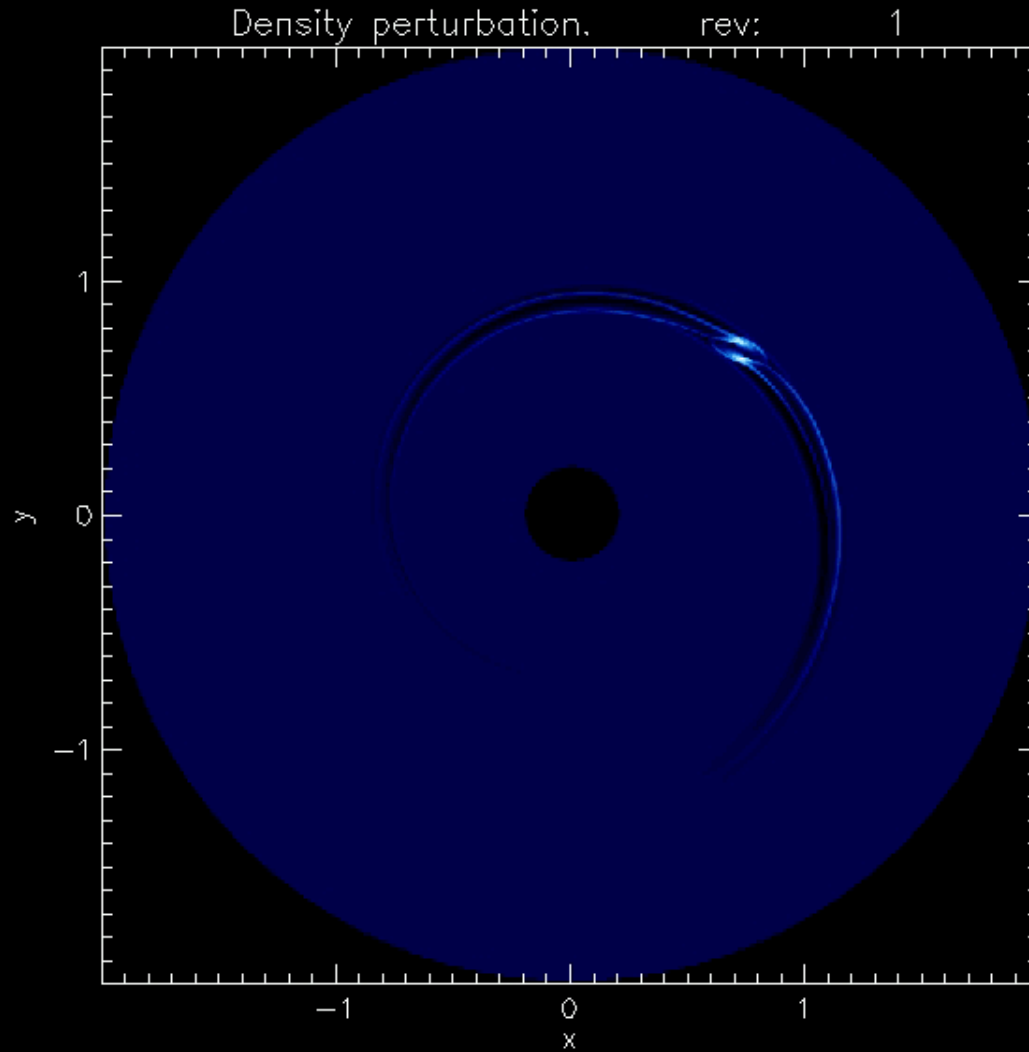
პროტოპლანეტური დისკები

წონასწორული კონფიგურაციის სტრუქტურა



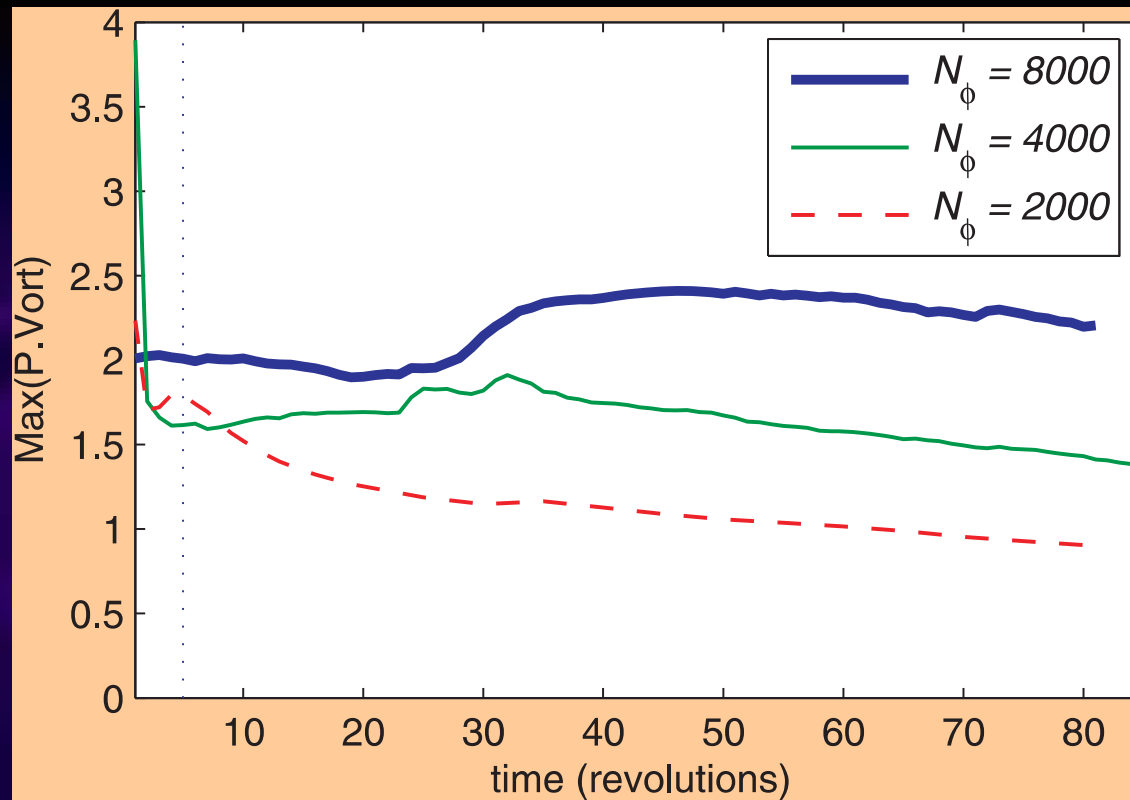
- გაორებული სიმკვრივის ბირთვი
- დარტყმითი ტალღები

პროტოპლანეტური დისკები



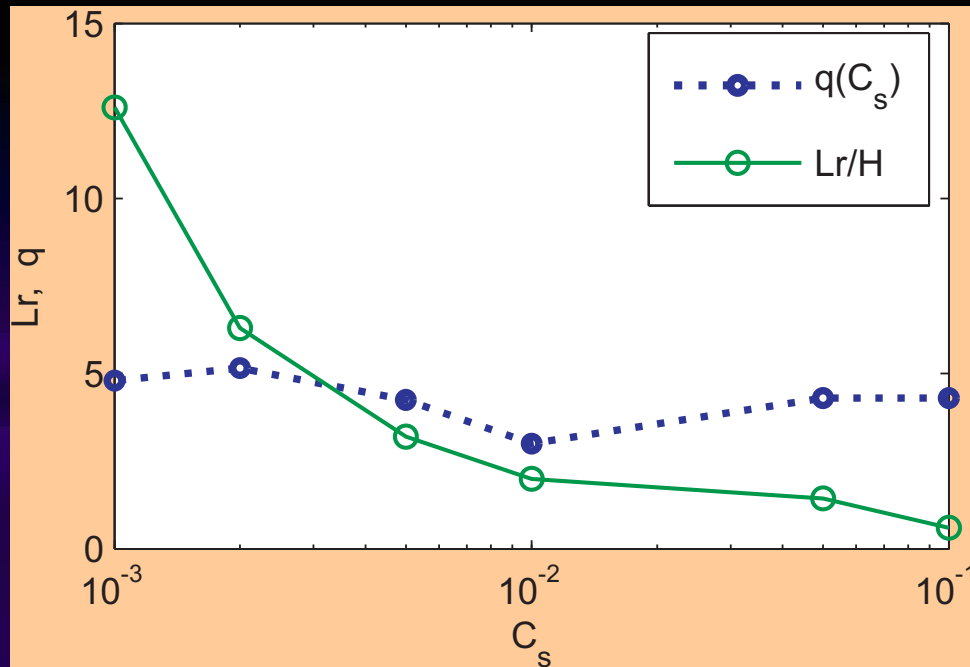
პროტოპლანეტური დისკები

კოჰერენტული სტრუქტურის მდგრადობა



პროტოპლანეტური დისკები

ანტიციკლონის ზომები



პროტოპლანეტური დისკები

არაწონასწორული გრიგალური შეშფოთებები გადადიან
წონასწორულ სტრუქტურებში (direct nonlinear adjustment)

ანტიციკლონური გრიგალის წონასწორული
კონფიგურაცია დამოკიდებულია დისკის პარამეტრებზე

წონასწორული გრიგალის ზომა შეიძლება აღემატებოდეს
დისკის სისქეს და იყოს მდგრადი (2D)

კუმშვადი ანტიციკლონური გრიგალებს შეუძლიათ
მნიშვნელოვნად დააჩქარონ პლანეტების ჩანასახების
წარმოქმნა (პირველი ფაზა)

აკრეციული დისკები

მაღალენერგეტიკული ასტროფიზიკური დისკები
კომპაქტური ობიექტების გარშემო

AGN, Quasars, Protostellar disks

გამოსხივება: აკრეცირებული ნივთიერების
უძრაობის მასის 10%

აკრეციული დისკები

აკრეციის მექანიზმი

კუთხური მომენტის გადატანა გარეთ;
მასის გადატანა ცენტრისაკენ (აკრეცია);

კინემატიკური სიბლანტე?

$$Re > 10^{10}$$

ანომალური სიბლანტე

ტურბულენტური აკრეცია, α -მოდელი

აკრეციული დისკები

ტურბულენტობა

Rayleigh criterion: $\frac{\partial(R^2\Omega)}{\partial R} > 0,$

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

მაგნიტური ველი:

მაგნიტო ბრუნვითი არამდგრადობა (MRI)

MRI turbulence

აკრეციული დისკები

ჰიდროდინამიკური ტურბულენტობა

იონიზაციის დაბალი ხარისხი;

ჰიდროდინამიკური აკრეციული დისკების პრობლემა
მომენტის კოჰერენტული გადატანა?

Tevzadze, A. G., Chagelishvili, G. D., Zahn, J.-P., Chanishvili, R. G. and Lominadze, J. G., 2003, “*On hydrodynamic shear turbulence in Keplerian disks: transient growth of small-scale 3D vortex mode perturbations*”, *Astron. Astrophys.* **407**, 779-786.

Chagelishvili, G. D., Zahn, J.-P., Tevzadze, A. G. and Lominadze, J. G., 2003, “*On hydrodynamic shear turbulence in Keplerian disks: Via transient growth to bypass transition*”, *Astron. Astrophys.* **402**, 401-407.

აკრეციული დისკები

ჰიდროდინამიკური ტურბულენტობა
სპექტრალურად მდგრად ნაკადებში

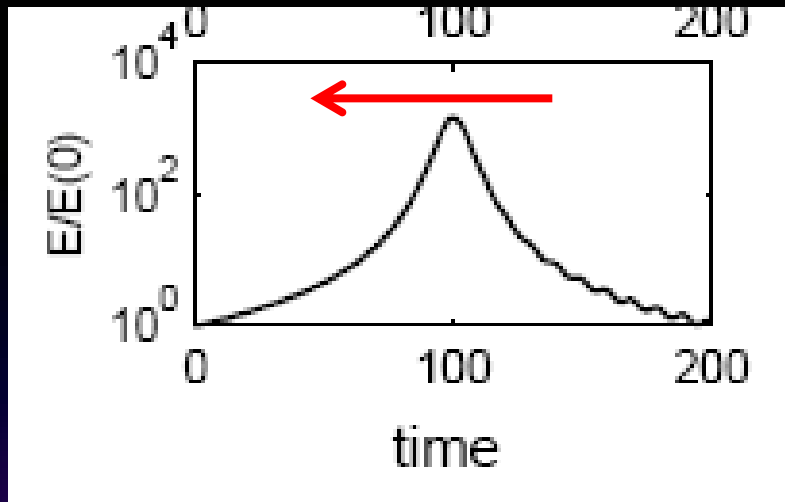
ბრტყელი პარალელური წანაცვლებითი ნაკადები

Bypass concept

ტურბულენტობა ექსპონენციალურად ზრდადი
მოდეზის გარეშე

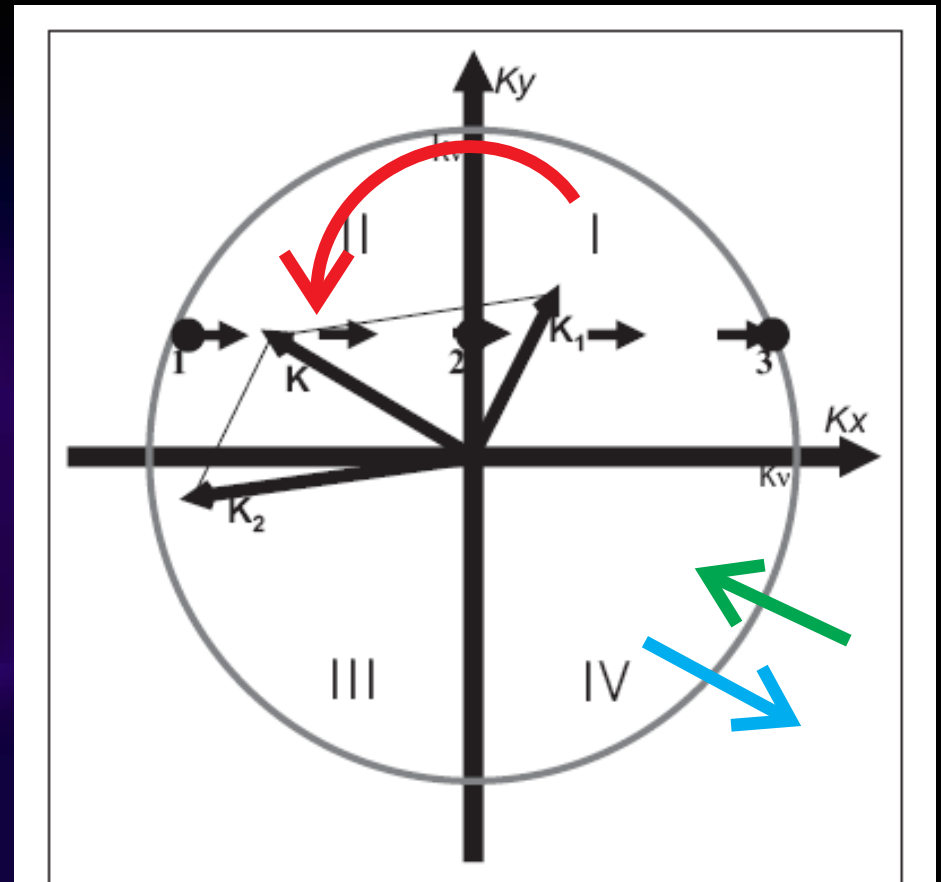
აკრეციული დისკები

წრფივი ტრანზიენტული ზრდა



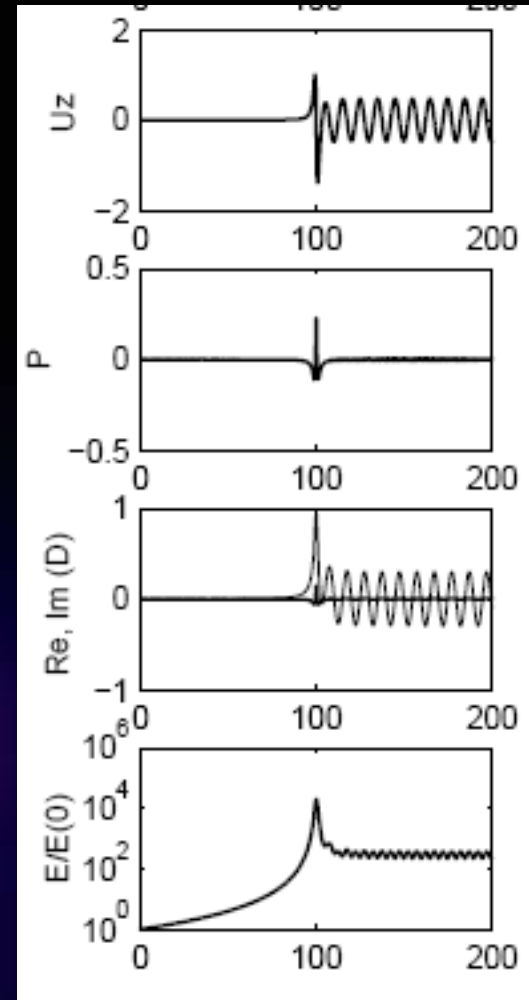
არაწრფივი სპექტრალური
გადანაწილება

transverse cascade



აკრეციული დისკები

- კოროლისის ძალის
დესტრუქციული ქმედება
- + ტალღის გენერაცია



აკრეციული დისკები

ენერგეტიკული შედარება

პარალელური და მბრუნავი წანაცვლებითი ნაკადები

(რეინოლდსის რიცხვის 4 რივით გაზრდა)

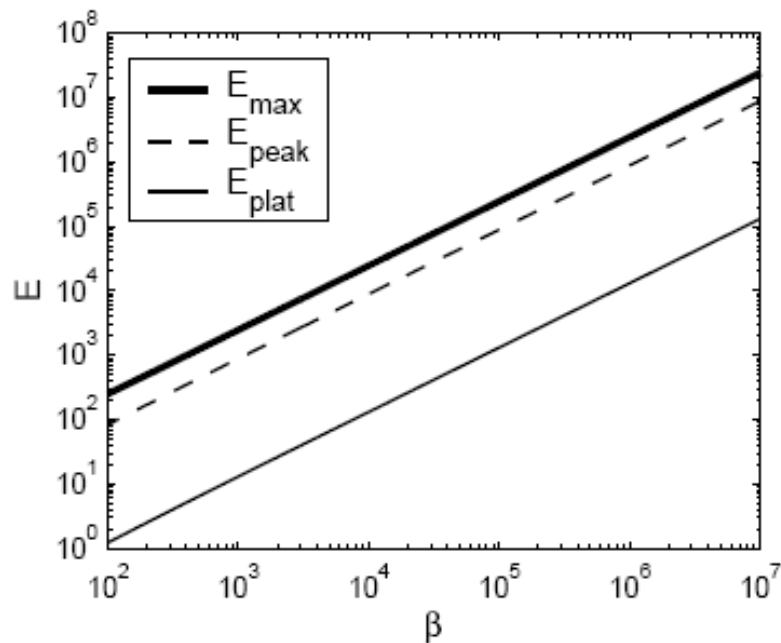


Fig. 4. Maximum normalized energy E_{max} in the plane case, peak energy E_{peak} and plateau energy E_{plat} in the disk case, vs. $\beta \equiv (k_x(0)/k_y)^2$, for the same $E(0)$ and $k_z = k_y$.

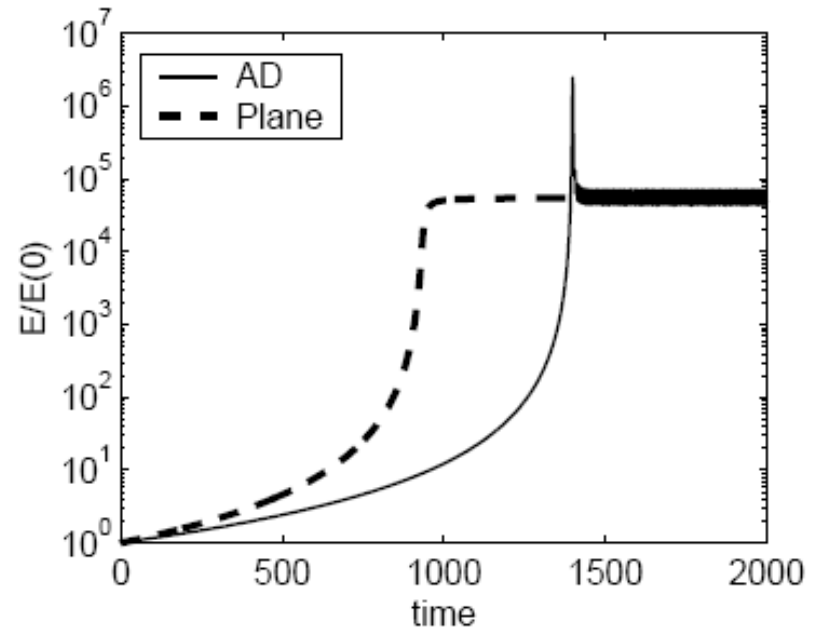


Fig. 5. $E(t)/E(0)$ vs. t for the Keplerian disk and plane cases, for $k_z = k_y$ and for values of β at which $E_{\text{max}}/E(0) = E_{\text{plat}}/E(0) = 5 \times 10^4$ ($\beta_{\text{plane}} = 2.25 \times 10^3$ and $\beta_{\text{AD}} = 4.41 \times 10^6$).

აკრეციული დისკები

3D ტურბულენტობისთვის აუცილებელი პირობები

გრიგალური მოდის არსებობა

ვერტიკალური სტრატეფიკაცია

სიჩქარის პროფილის არაერთგვაროვნება

დიფერენციალური ბრუნვა

გრავიტო-სპირალური ტალღის არსებობა

კუმშვა, მოდების მბის სწორი აღწერა

აკრეციული დისკები

ჰიდროდინამიკური ტურბულენტობის მოდელი
კეპლერული დისკებისათვის

- ენერჯის წყაროა წრფივი ტრანზიენტული ზრდა
- არაწრფივი პროცესები უზრუნველყოფენ უკუკავშირს
- ზუსტი არაწრფივი მოდელირების საჭიროება
($Re \gg 1$)
- არაწრფივი ურთიერთქმედებების დეტალური
გათვლა

მაღლობთ ყურადღებისათვის