

პროტოპლანეტური დისკების დინამიკა: პლანეტების ფორმირების ადრეული ეტაპები

ალექსანდრე თევზაძე

*ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორია, ილიაუნი*

არამზიური პლანეტები

მზის ირგვლივ
მბრუნავი პლანეტები:

სხვა ვარსკვლავების
ირგვლივ მბრუნავი
პლანეტები?

არამზიური პლანეტა
“*extrasolar planet*”,
“*exoplanet*”



არამზიური პლანეტების სტატისტიკა

(07.04.2017)

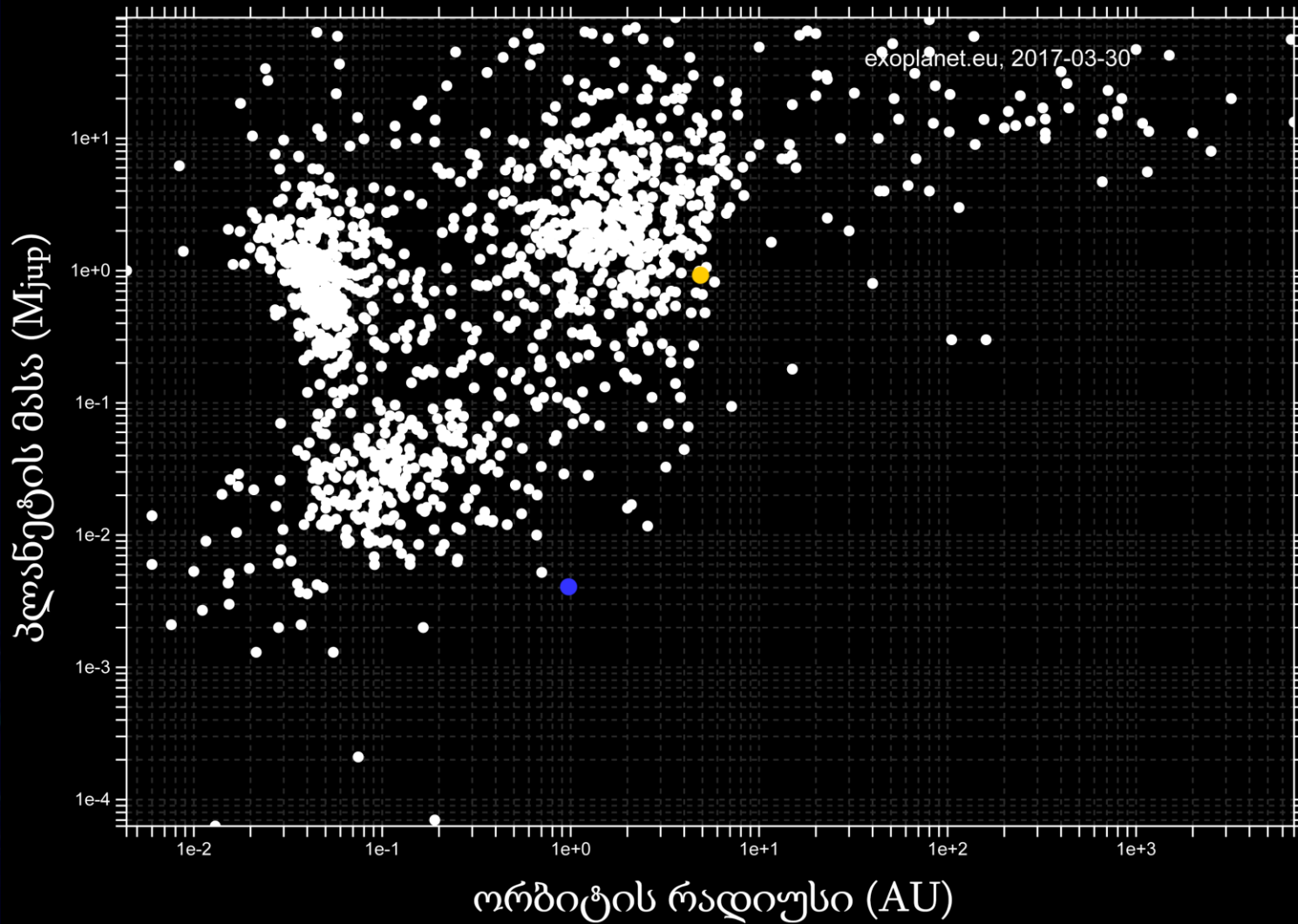
სულ (დადასტურებული): **3609**

Kepler-ის კანდიდატები: 4498

პირდაპირი გამოწასახი: **22**

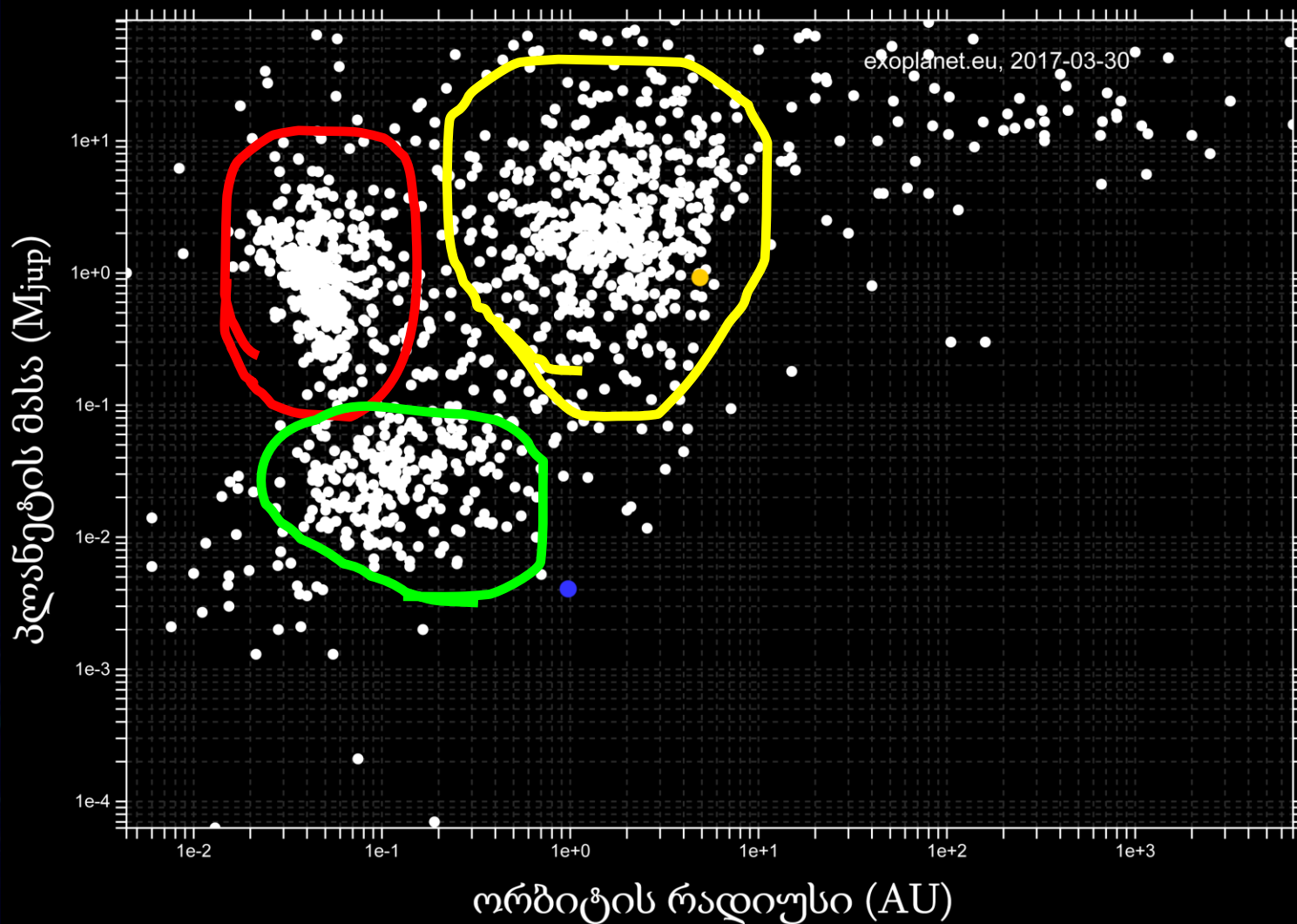
ვარსკვლავები რამოდენიმე
პლანეტით: **603**

არამზიური პლანეტების პოპულაცია



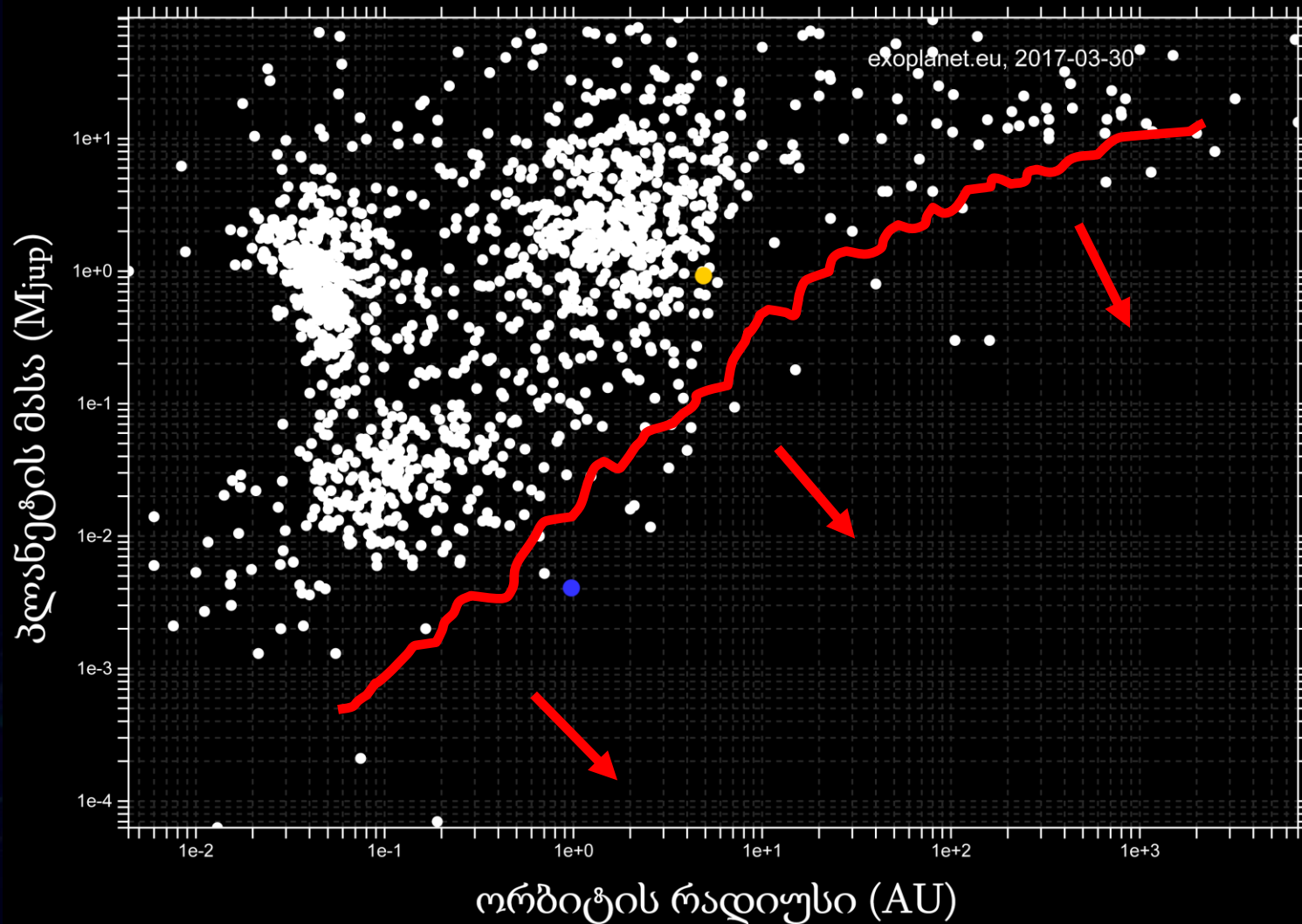
არამზიური პლანეტების პოპულაცია

ცხელი იუპიტერები; გიგანტები; ზედედამიწები;



არამზიური პლანეტების პოპულაცია

მომავალი დაკვირვებები



პროტოპლანეტარული დისკი

დისკები ახალგაზრდა ვარსკვლავების ირგვლივ:
პლანეტების ფორმირების არეები



პროტოპლანეტარული დისკები: დაკვირვებები

Hubble Space Telescope



**Protoplanetary Disks
Orion Nebula**

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



**Edge-On Protoplanetary Disk
Orion Nebula**

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

HST · WFPC2



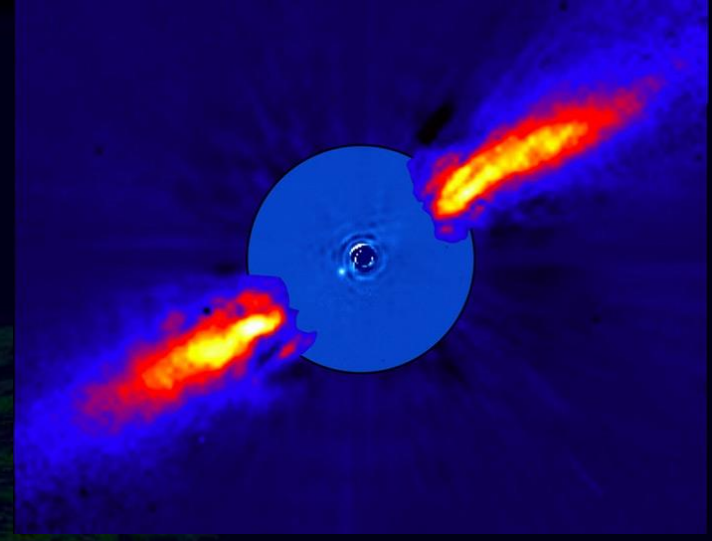
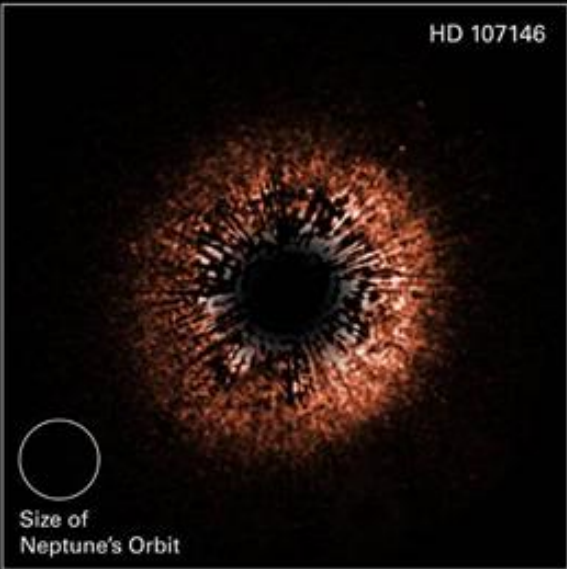
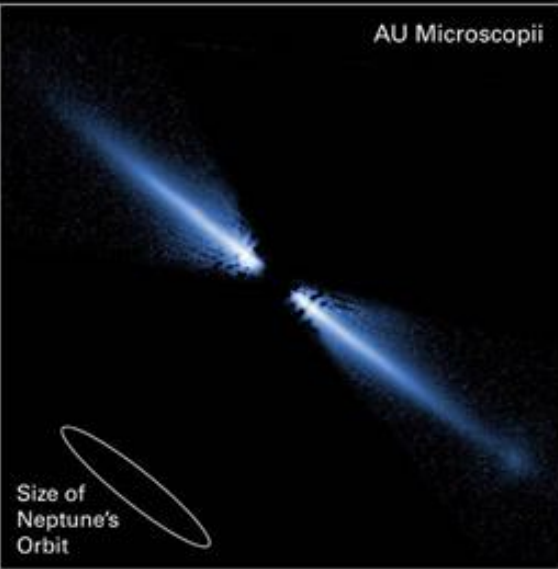
პროტოპლანეტური დისკი

ფიზიკური თვისებები

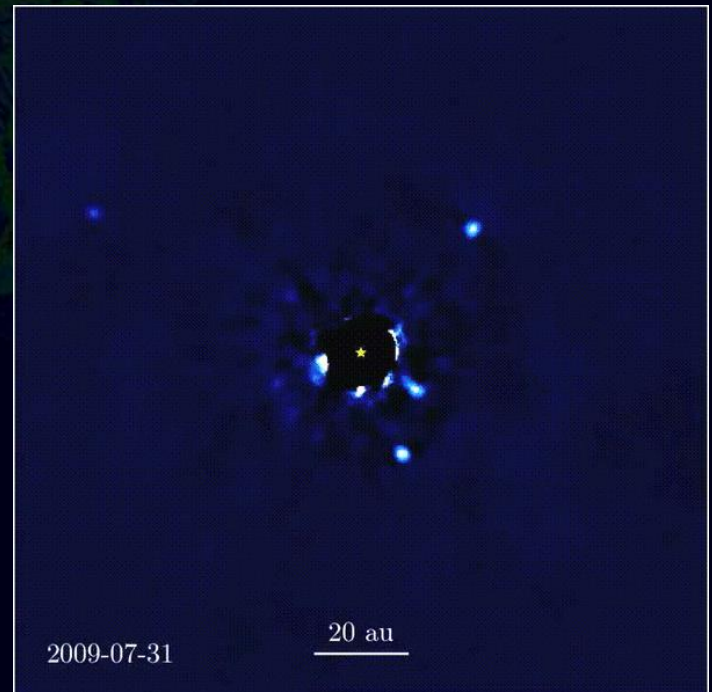
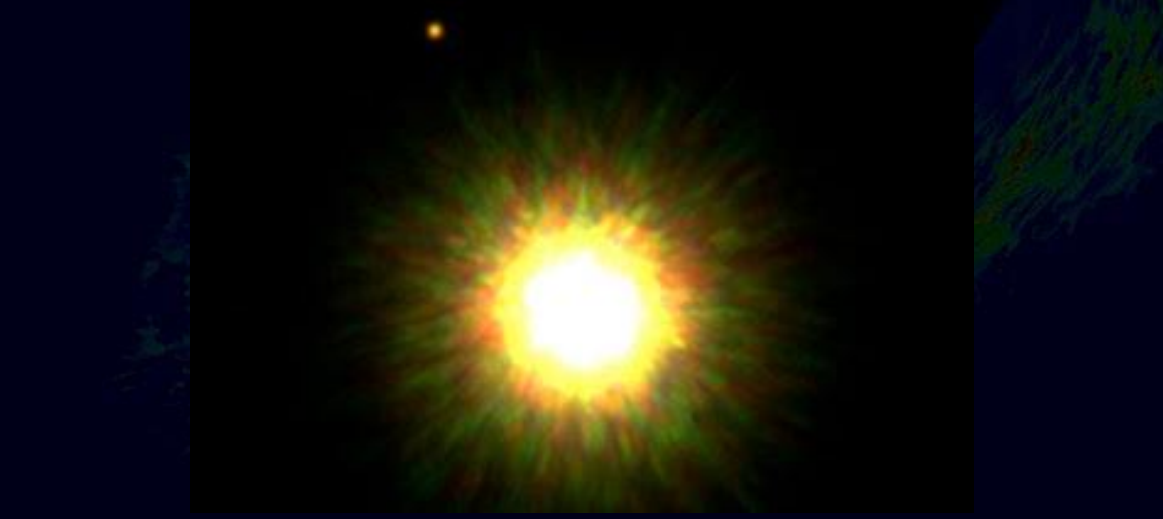
- ტემპერატურა: 10-150 K
- ბრუნვის სიჩქარე: ზეგერით
- მასშტაბი: 100-1000 AU
- დისკის მასა: 0.1-10% M_{star}
- მყარი ნაწილაკები: დისკის მასის 1%
- სიცოცხლის ხანგრძლივობა: 1-10 Myr



დაკვირვებები: დისკებიდან პლანეტებამდე



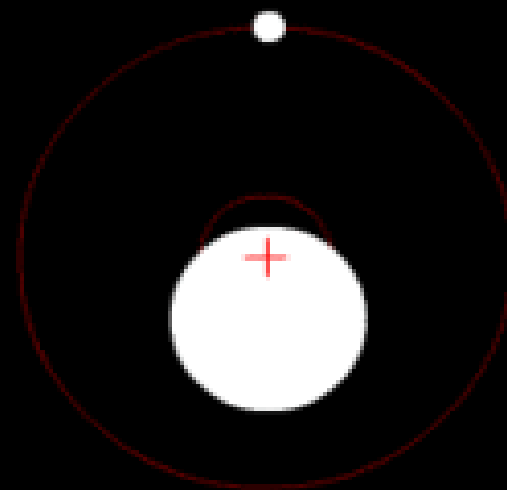
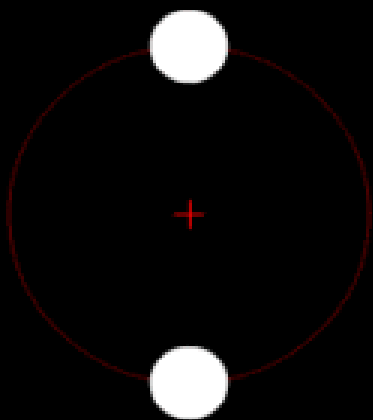
Circumstellar Debris Disks
Hubble Space Telescope • ACS HRC



რადიალური სიჩქარეები

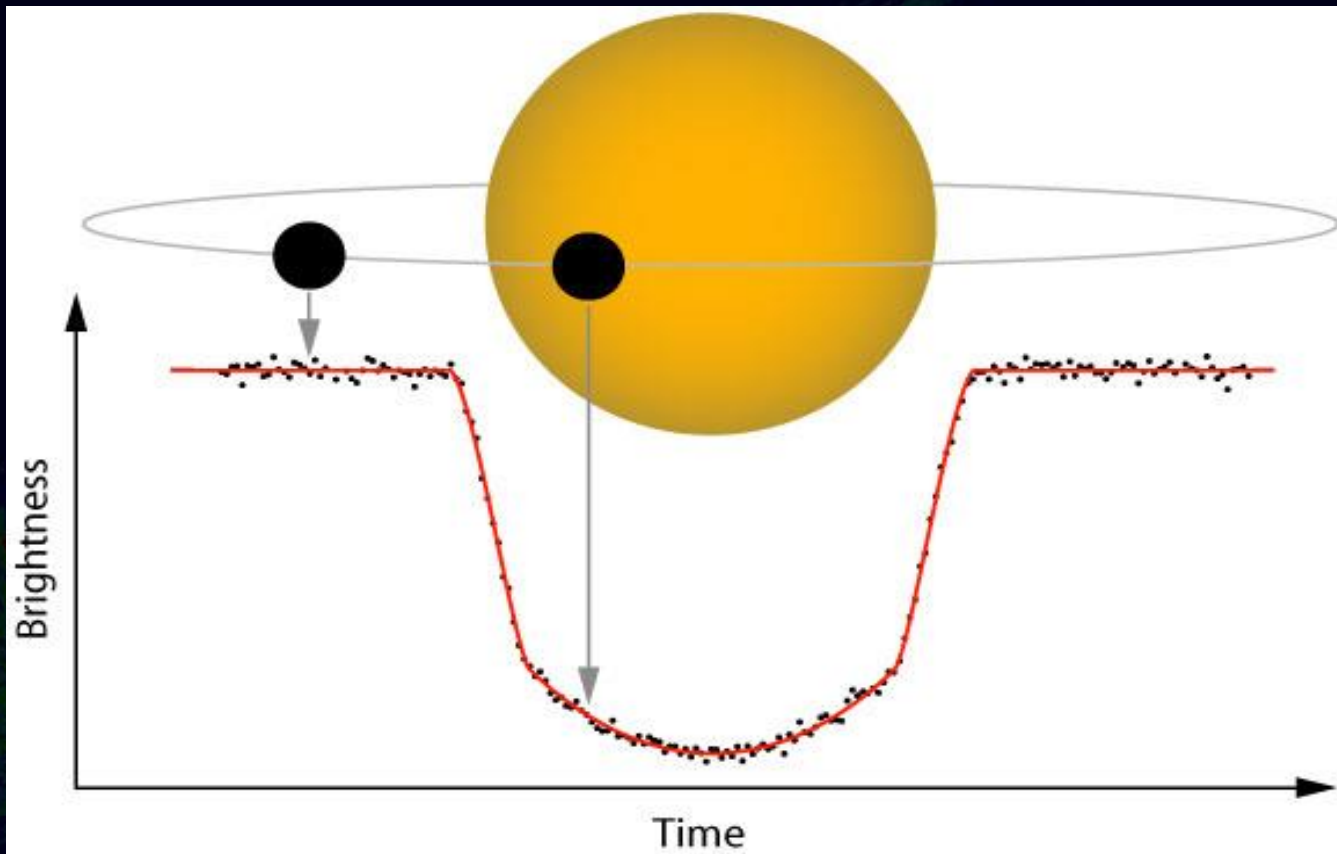
ციური სხეულები ბრუნავენ სისტემის სიმძიმის ცენტრის ირგვლივ.

შორეული დამკვირვებლისათვის მზე და დედამიწა ბრუნავენ მზის სისტემის ბარიცენტრის ირგვლივ.



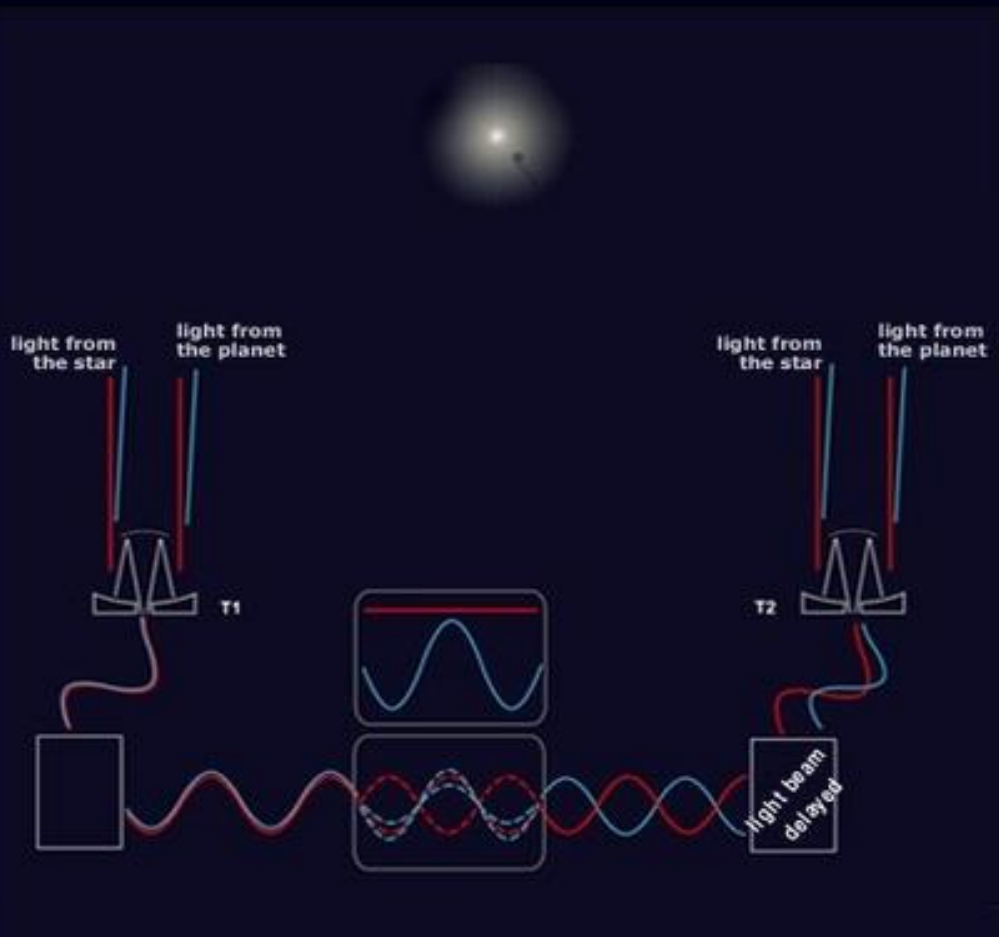
არამზიური პლანეტის ტრანზიტი

ვარსკვლავის ნათობის მრუდი



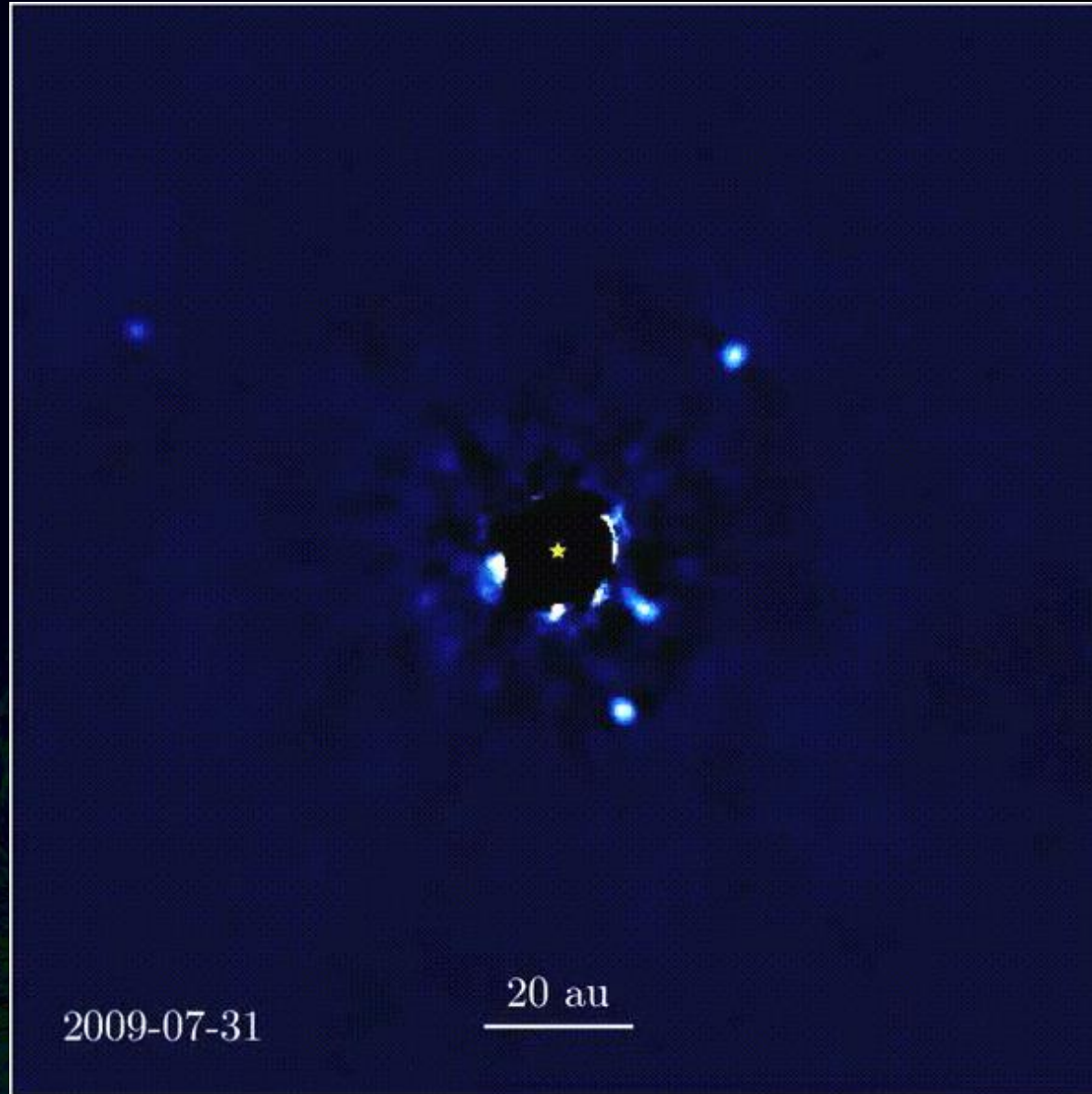
ინტერფერომეტრია

Keck telescope Hawaii



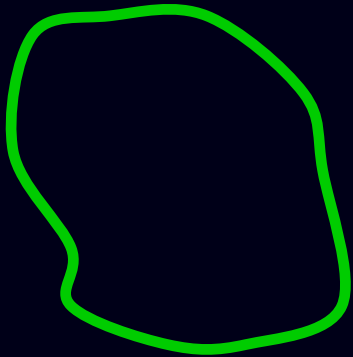
ვარსკვლავის
ნათების
გაბათილება:
პლანეტები

არამზიური პლანეტები: დაკვირვებები



პლანეტების ფორმირების თეორიები

TOP



DOWN

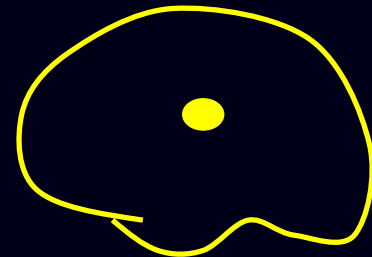
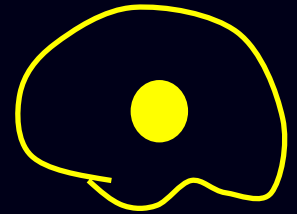
1. Top-Down (*Laplace*)

გრავიტაციული
ფრაგმენტაცია

2. Bottom-Up (*Safronov*)

ბირთვზე აკრეცია

UP



BOTTOM

პლანეტების ფორმირება: **Top-Down**

*„ვარსკვლავები და პლანეტები წარმოიქმნებიან
ნისლეულის საკუთარი სიმძიმის ველში დალოქვით,
ვარსკვლავის ირგვლივ დისკში ბრუნვისას“*

Kant (1755), Laplace (1796)

მზე: 99.86% M; 3% J;

პლანეტები: 0.14% M; 97% J;

გრავიტაციული არამდგრადობა (ჯინსის მექანიზმი)

Kuiper (1951)

არასაკმარისი მასა (გიგანტი პლანეტები?)

პლანეტების ფორმირება: **Bottom-Up**

„პლანეტების ფორმირება ხდება პროტოპლანეტარულ დისკებში პლანეტების ჩანასახის გაჩენით და ზრდით“

Safronov (1969)

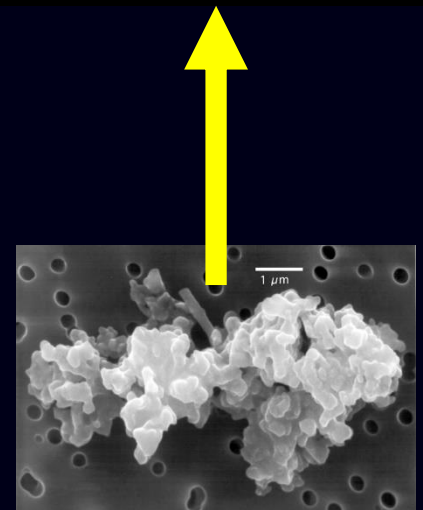
საწყისი მდგომარეობა: 10^{-15} kg

საბოლოო მდგომარეობა: 10^{25} kg

საწყის და საბოლოო მასებს შორის ფარდობა: $10^{40} - 10^{50}$

სხვადასხვა ფიზიკა

სხვადასხვა მასშტაბებზე



ბირთვზე აკრეციის მოდელი

Core-accretion model

1. პლანეტების ჩანასახების ფორმირება

შედეგი: ჩანასახი (planetesimal, 1km)

2. ნარჩენი აირის ჩანასახზე აკრეცია

პლანეტის “ემბრიონი” (embryo, protoplanet)

3. ოლიგარქიული ზრდა

პლანეტის საბოლოო ფორმა

ფიზიკური ეტაპები

აირი + „მტვერი“ (1%)

HD

აირი + „მტვერი“ + „ნამტვრევები“ HD + drag force;

მყარი ნაწილაკების დაჯახებები = ტურბულენტობა?

“მტვერი“ + “debris”

N particle;

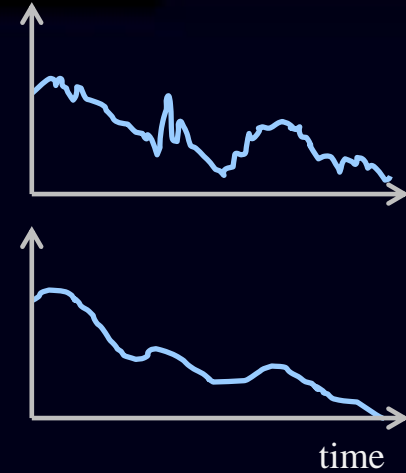
Planetoids/asteroids

gravitating N particles;

ტურბულენტური დინება

პულსაციები „ბლანტ დინებაში“:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right) u_i = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$



რეინოლდსის გასაშუალოება:

$$u_i = U_i + u'_i, \quad \overline{u'_i} = 0, \quad \overline{u'_i u'_j} \neq 0, \quad \dots$$

1. რეგულარული დინების მასშტაბი: L
2. ტურბულენტური პულსაციების მასშტაბი: l_{turb}
3. მიკროსკოპული (ბლანტი) მასშტაბი: l_v

ტურბულენტური დინება

რეგულარული დინება:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right) U_i = \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}$$

$$T_{ij} = \begin{pmatrix} \mathcal{P}_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \mathcal{P}_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \mathcal{P}_z \end{pmatrix}$$

„ტურბ. წნევა“:

$$\mathcal{P}_x = -P + \overline{\rho u'_x u'_x}$$

„ტურბ. დისიპაცია“:

$$\tau_{ij} = \nu \rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \overline{R_{ij}}$$

რეინოლდსის დაძაბულობის ტენზორი:

$$R_{ij} \equiv \overline{\rho u'_i u'_j}$$

ტურბულენტობის “ჩაკეცვა” (closure)

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + U_i \frac{\partial}{\partial x_i} \right) R_{jk} = R_{jk}^s + R_{jk}^{\text{diss}} + R_{jk}^{\text{psr}} + R_{jk}^{\text{diff}}$$

წყარო:

$$R_{jk}^s = \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right)$$

დისიპაცია:

$$R_{jk}^{\text{diss}} = 2\nu\rho \overline{\frac{\partial u'_k}{\partial x_i} \frac{\partial u'_j}{\partial x_i}}$$

წნევის კორელაცია:

$$R_{jk}^{\text{psr}} = -p' \overline{\left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u'_k}{\partial x_j} \right)}$$

დიფუზია:

$$R_{jk}^{\text{diff}} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial}{\partial x_i} R_{jk} + \overline{p'(\delta_{ij} u'_k + \delta_{ik} u'_j)} + \overline{\rho u'_i u'_j u'_k} \right)$$

BBGKY იერარქია?

ტურბულენტური სიბლანტე

დეფორმაციის ტენზორი (strain rate): $\dot{\gamma}_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}$

ეფექტური სიბლანტე: $\tau_{ij} \equiv \nu_{\text{turb}} \rho \dot{\gamma}_{ij}$

$$\nu_{\text{turb}} \dot{\gamma}_{ij} = \nu \dot{\gamma}_{ij} + \frac{R_{ij}}{\rho}$$

$$\left\langle \frac{\nu \rho \dot{\gamma}_{ij}}{R_{ij}} \right\rangle \propto \frac{\nu}{UL} = \frac{1}{\text{Re}}$$

რეინოლდსის რიცხვი ასტროფიზ. დისკებში: $\text{Re} \gg 10^{10}$

$$\nu_{\text{turb}} = \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^{-1} \overline{u'_i u'_j}$$

α -მოდელი

აკრეცია კომპაქტურ ობიექტებზე:
Shakura & Sunyaev (1973)

$$\nu_{\text{turb}} = \alpha P$$

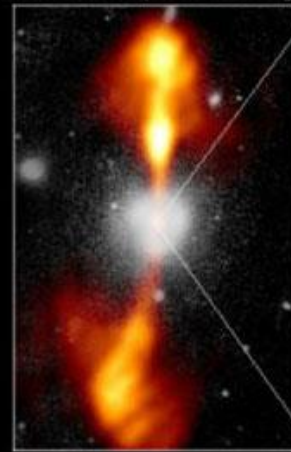
აკრეციის სიჩქარე: $L \sim \dot{M} \sim \tau_{ij} \sim \alpha$

დაკვირვებადი სიდიდეები:
 $\alpha \sim 0.001-0.02$



Core of Galaxy NGC 4261

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS

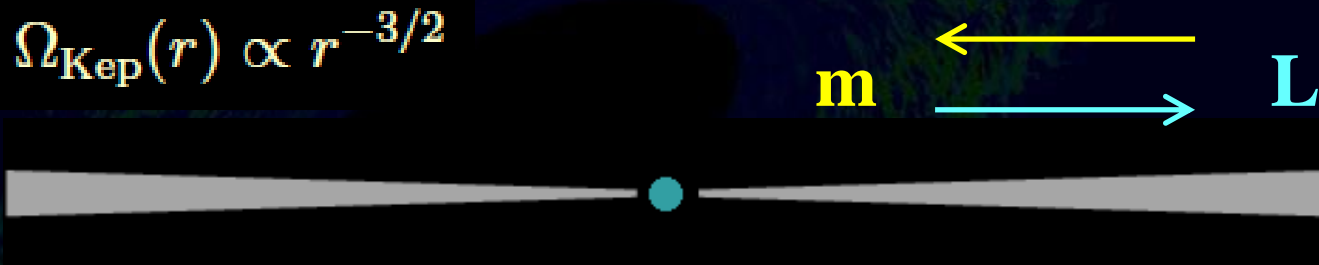
α -მოდელი

იზოტროპული ტურბულენტობა:
(K41 თეორია)

$$\overline{v'_x v'_x} = \overline{v'_y v'_y} = \overline{v'_z v'_z}$$

ასტროფიზიკური დისკი:

$$\tau_{r,\varphi} = \rho \overline{v'_r v'_\varphi}$$



α მოდელი + “თხელი დისკი”:

$$\nu_{\text{eff}} = \alpha C_s H$$

გლობალური არამდგრადობები

ზედაპირული სიმკვრივე: σ

$$\nu(\sigma) \propto \sigma^\beta$$

წრფივი მდგრადობის ანალიზი:

1. არამდგრადობა: $\beta < 0$

(*Lightman and Eardley 1974, Shakura and Sunyaev 1976*)

2. პერიოდული არამდგრადობა: $\beta > 2$

(*Kato 1978, Blumenthal et al. 1984*)

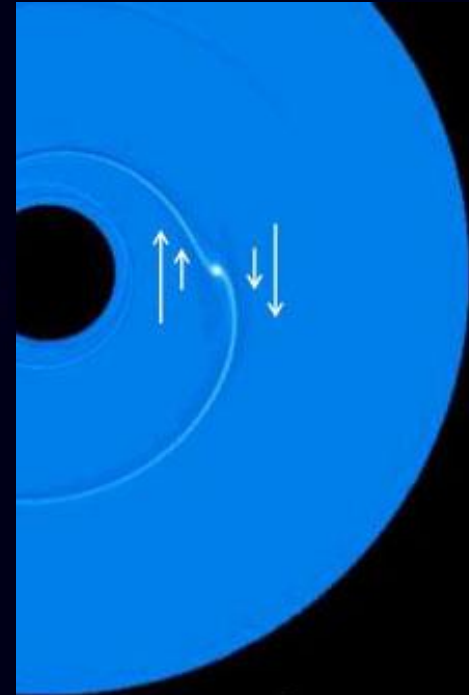
ზრდის ინკრიმენტი $\sim k \sim 1/\lambda$

დიდმასშტაბოვანი არამდგრადობა;

გლობალური არამდგრადობები

$\beta > 2$

$\beta < 0$



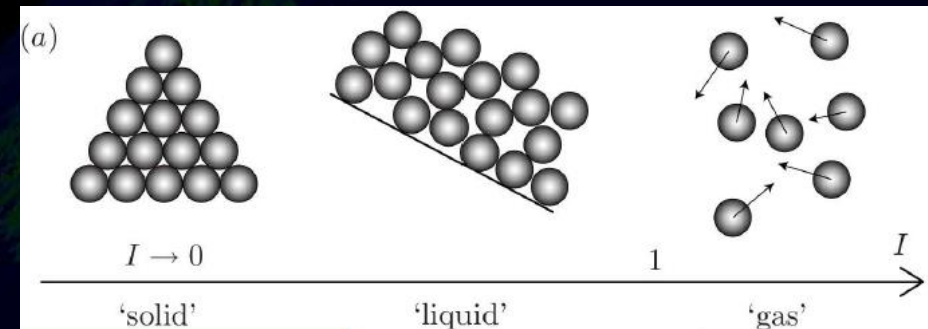
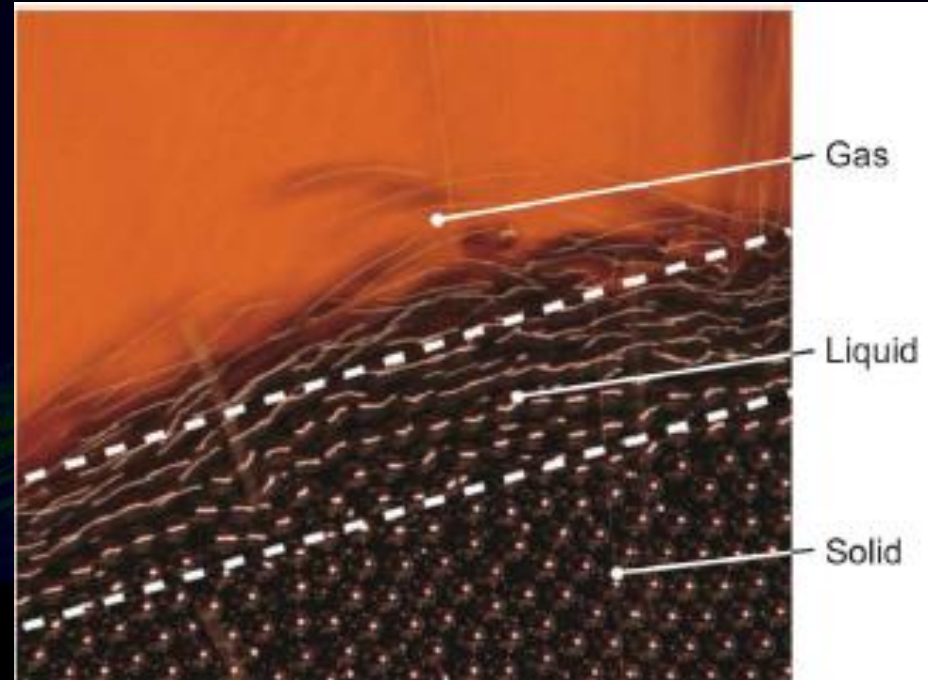
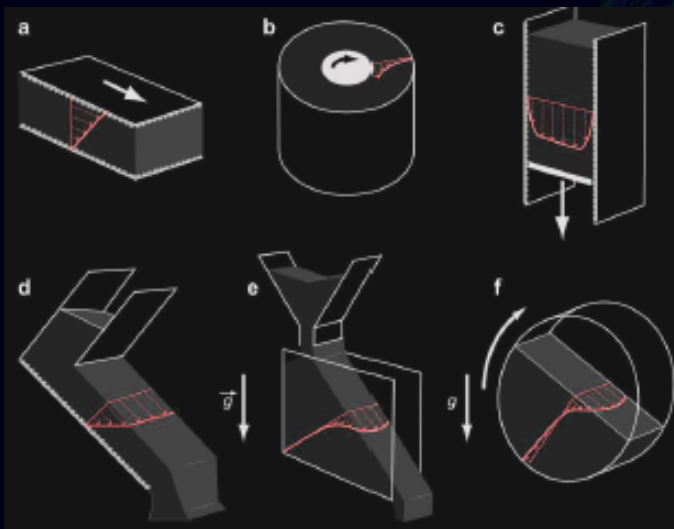
არამდგრადობა: სპირალური სიმკვრივის ტალღის ზრდა;
გამოსხივების ეფექტები?

რიცხვითი მოდელირება: არაწრფივი გაჯერება;

გრანულარული დინება

რეჟიმები:

- კინეტიკური;
- სითხე;
- „რბილი“ მატერია;



Forterre & Pouliquen 2008

Jop et al. 2006

გრანულარული დინება

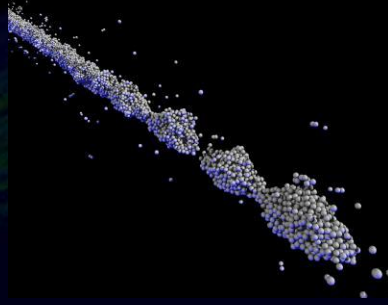
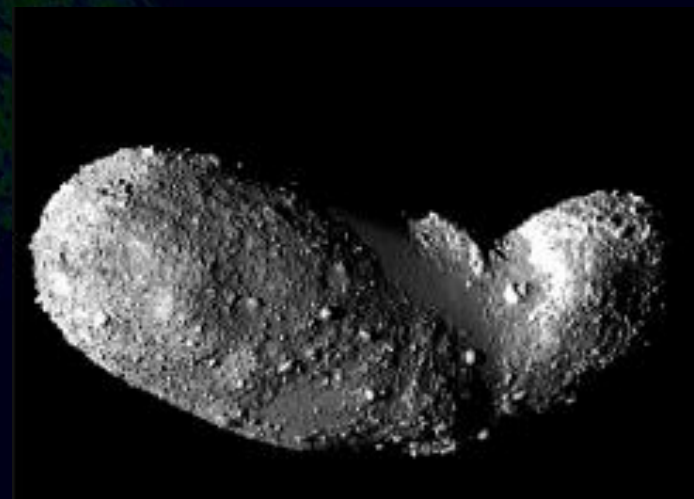
ფორმირების ეტაპები:

→ აირის და მტვრის დინება;

→ მყარი ნაწილაკების დინება;

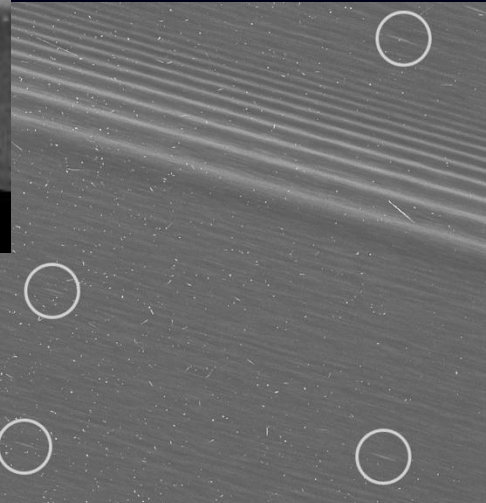
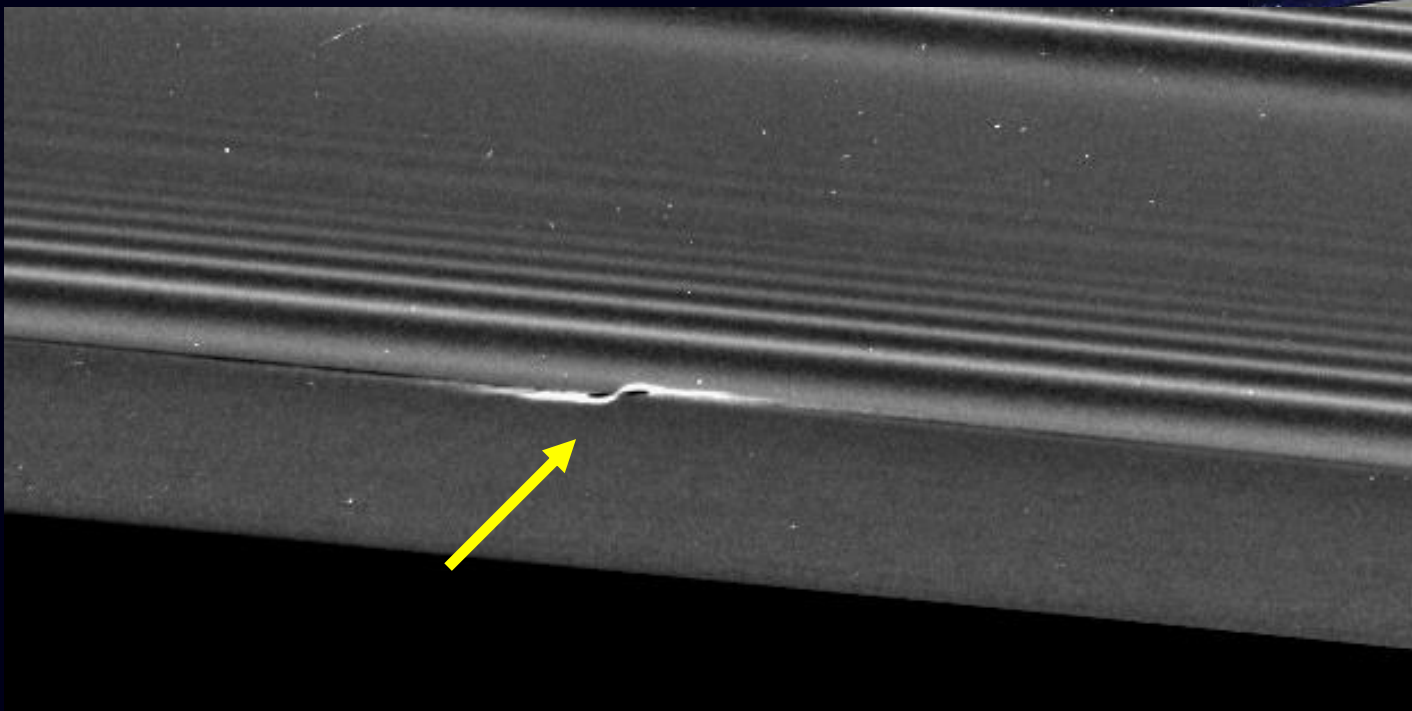
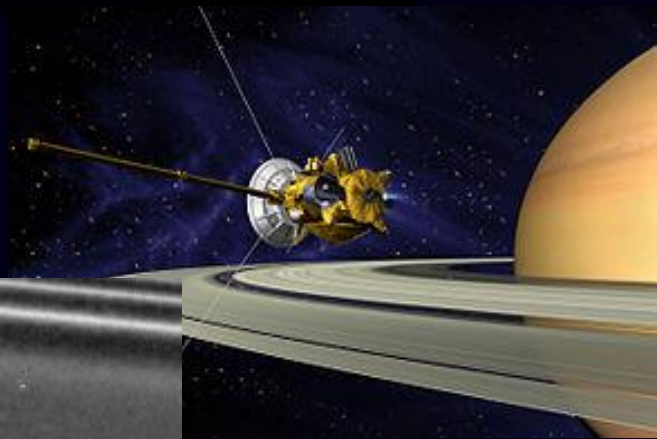
მყარი ნაწილაკების დაჯახებები:
„გრანულარული სითხე“

→ ნამსხვრევების დისკი;



Cassini (2016)

სატურნის რგოლებთან მიახლოება
Flyby - Dec.2016



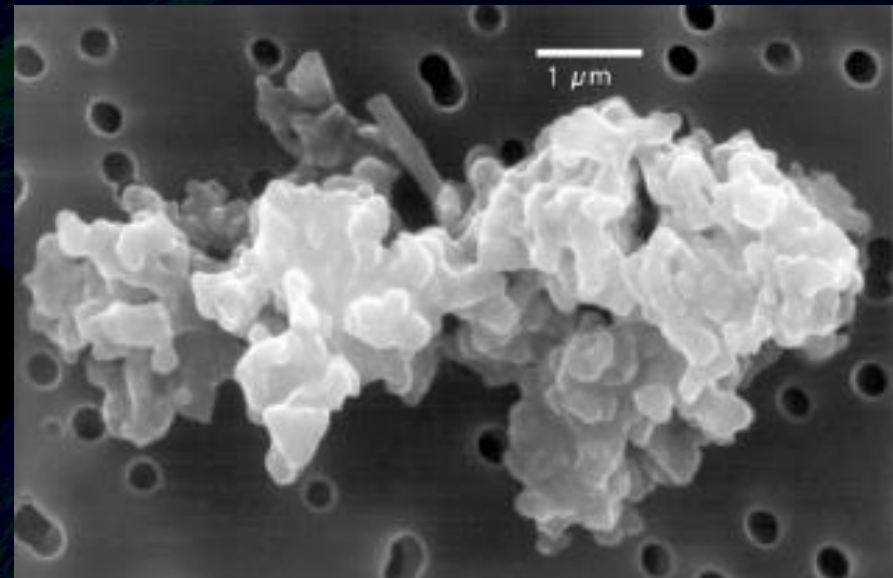
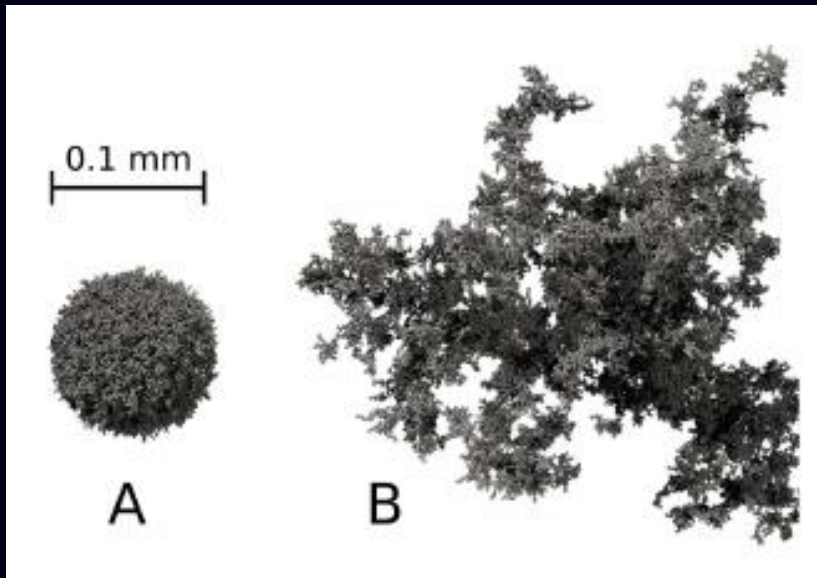
„moonlet“

გრანულარული დინება

პროტოპლანეტარული „მტვერი“

რიცხვითი მოდელი

ექსპერიმენტი



ფოროვანი ნაწილაკები; არადრეკადი დაჯახებები;

გრანულარული დინება

ϕ - შევსების პარამეტრი;

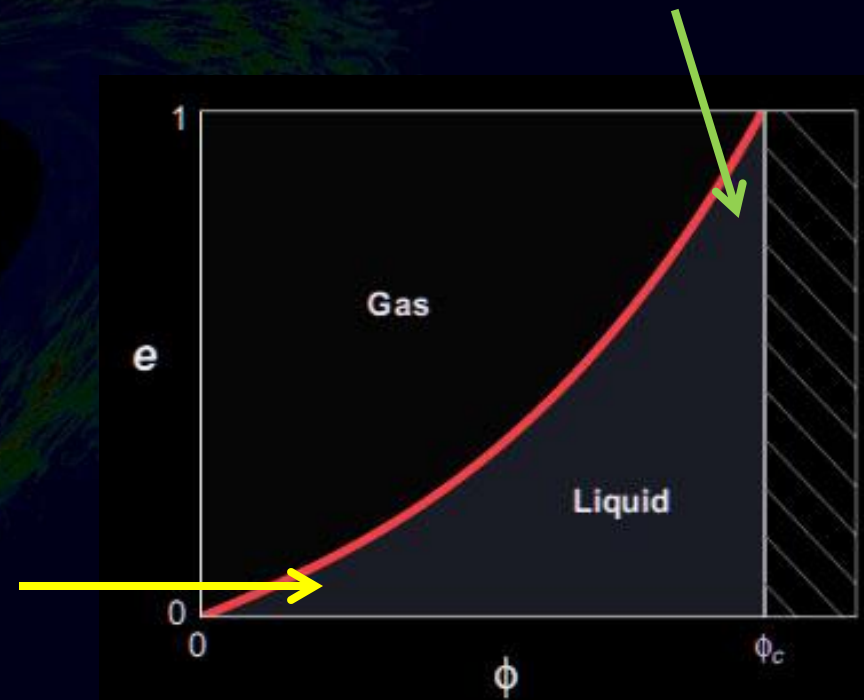
e - რესტიტუციის პარამეტრი;

$$e = \frac{v_2}{v_1}$$

$$\phi = \frac{V[Grains]}{V[Total]}$$

ლაბორატორიული
გრანულარული დინება

ასტროფიზიკური
გრანულარული დინება



გრანულარული დინება

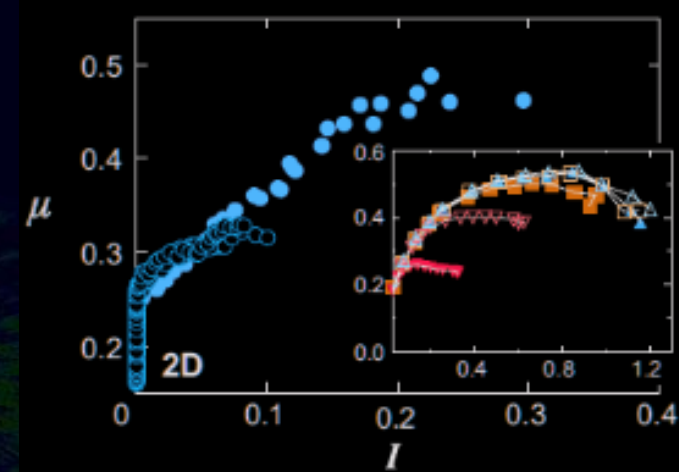
რეგულარული გრანულარული დინება (ARFM, 2008):

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + \tau_{ij},$$

$$\eta = \frac{\mu(I)P}{|\dot{\gamma}|},$$

$$\tau_{ij} = \eta\dot{\gamma}_{ij},$$

$$I = \frac{\dot{\gamma}d}{\sqrt{P/\rho_p}}.$$



$$\mu(I) = \mu_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{I_0/I + 1} \quad \text{and} \quad \Phi = \Phi_{max} + (\Phi_{min} - \Phi_{max})I.$$

ტურბულენტური გრანულარული დინება:

$$\eta = \eta(P, \xi), \quad \xi = \sqrt{\frac{1}{2}\dot{\gamma}_{ik}\dot{\gamma}_{ik}}.$$

გრანულარული „სითხის“ დინება

ლოკალური ტურბულენტობის „ჩაკეტვა“:

ანომალური ტურბულენტური რეოლოგიური
სიბლანტე

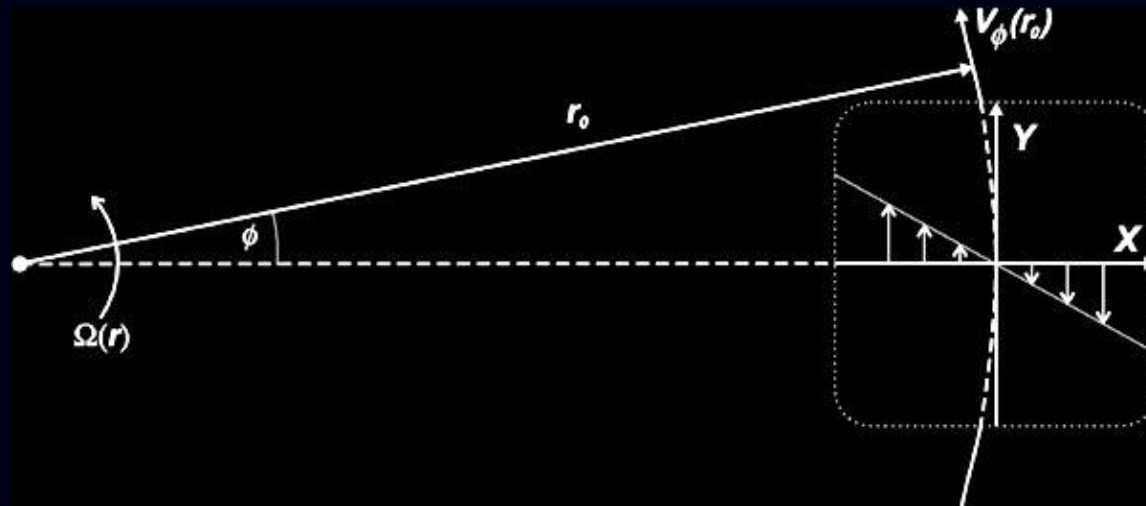
$$\rho \left\{ \frac{\partial}{\partial t} + V_k \frac{\partial}{\partial x_k} \right\} V_i = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k}$$

$$\tau_{ik} = \eta \dot{\gamma}_{ik}, \quad \dot{\gamma}_{ik} = \partial V_k / \partial x_i + \partial V_i / \partial x_k$$

$$\eta \gg \eta_{gas,turb}, \eta_v$$

გრანულარული კეპლერული დინება

ლოკალური ანალიზი: „წანაცვლების სიბრტყე“



- წნევის ტურბ. რეოლოგიის პარამეტრი;
- წანაცვლების ტურბ. რეოლოგიის პარამეტრი;

$$G_P \equiv \left(\frac{\partial \eta}{\partial P} \right)_{\xi}, \quad G_S \equiv \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \eta}{\partial \xi} \right)_P$$

გრანულარული დინება

ლოკალური წრფივი მდგრადობის ანალიზი:

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

დისპერსიის ანალიზური ამონახსნები

$$W = \sigma_A + \sigma_P + \sigma_S ,$$

$$\sigma_A = \frac{Ak_x k_y}{k^2 - 4AG_P k_x k_y} , \quad \text{transient growth}$$

$$\sigma_P = 2AG_P \frac{(\Omega k_x^2 + Bk_y^2)}{k^2 - 4AG_P k_x k_y} , \quad \text{pressure effect}$$

$$\sigma_S = -AG_S \frac{(k_x^2 - k_y^2)^2 + k_{\perp}^2 k_z^2}{k^2 - 4AG_P k_x k_y} , \quad \text{shear (strain) effect}$$

გრანულარული „სითხის“ დინება

ახალი ტიპის არამდგრადობა

Visco-rotational shear instability

$$\left(\frac{\partial \ln \eta}{\partial \ln \xi} \right)_P > 2$$

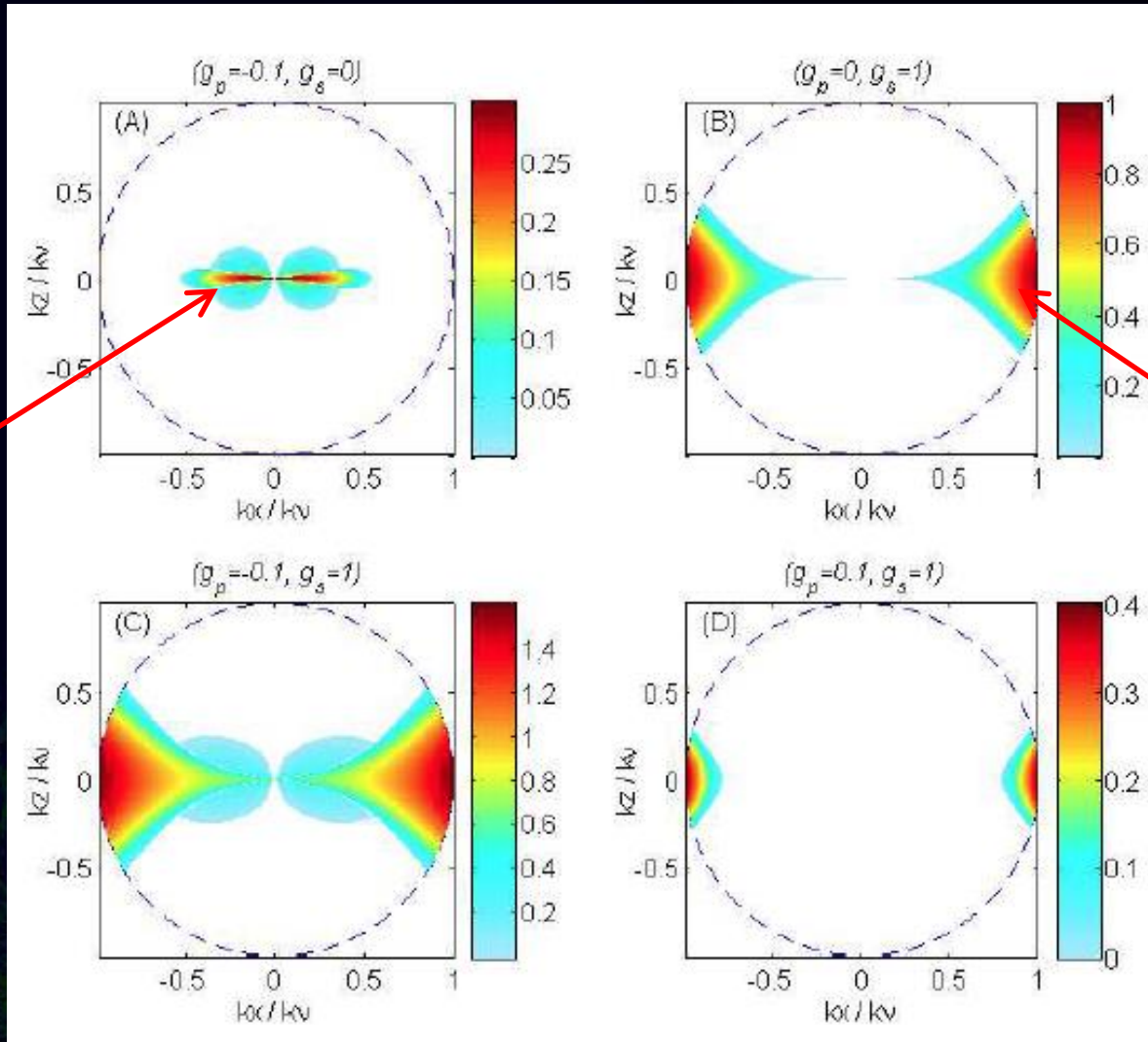
1. დიფერენციალური ბრუნვა;
2. რეოლოგიური სიბლანტე;

(Poniatowski & Tevzadze, PRL, submitted)

თხელი აზიმუტალური სტრუქტურების
არამდგრადობა (ლოენტური)



არამდგრადობები



Pressure
overstability

Visco-
rotational

რეოლოგიური ჩაკეტვის მოდელი

- ეპიცენტრული სიხშირის (სპირალური ტალღის) რეოლოგიური შესწორება;
- სიბლანტის ბრუნვითი წანაცვლების არამდგრადობა;
- წნევის რეოლოგიით მოდიფიკაცია;

არამდგრადობის შედეგი:

- სტრუქტურების ფორმირება?
- არაწრფივი სატურაცია?
- დელოკალიზაცია?

დაკვირვებები

2004 – პლანეტარული მასის ობიექტი (პლანემო)

2005 - სუპერდედამიწა

2008 - პლანეტარული სისტემის პირდაპირი გამოსახულება

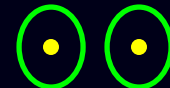
2009 - პლანეტა 4-ჯერად სისტემაში



2009 - რეტროგადული პლანეტა

2010 - არამზიური პლანეტა სიცოცხლის ზონაში;

2011 - ორი პლანეტა ორჯერად სისტემაში;



2012 - საერთო პლანეტა 4-ჯერად სისტემაში;



2016 - პლანეტა 3-ჯერად სისტემაში (Proxima)



2017 – TRAPPIST – 7 კლდოვანი პლანეტა;





გმადლობთ ყურადღებისათვის