



# არამზიური პლანეტები: დაკვირვებები, თეორია და მომავალი

ალექსანდრე თევზაძე

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

# გეგმა

**არამზიური პლანეტების დაკვირვებები;**

არამზიური პლანეტების პოპულაცია;

პროტოპლანეტარული დისკები;

**პლანეტების წარმოშობის თეორია;**

Top-down;

Bottop-up;

გრიგალური მოდელი;

რეოლოგიური მოდელი;

**უკანასკნელი აღმოჩენები და მომავალი;**

სიცოცხლის ზონა;

ტელესკოპები: მომავალი ამოცანები;

# არამზიური პლანეტები

მზის ირგვლივ  
მბრუნავი პლანეტები:

სხვა ვარსკვლავების  
ირგვლივ მბრუნავი  
პლანეტები?

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



# არამზიური პლანეტების სტატისტიკა

(31.03.2017)

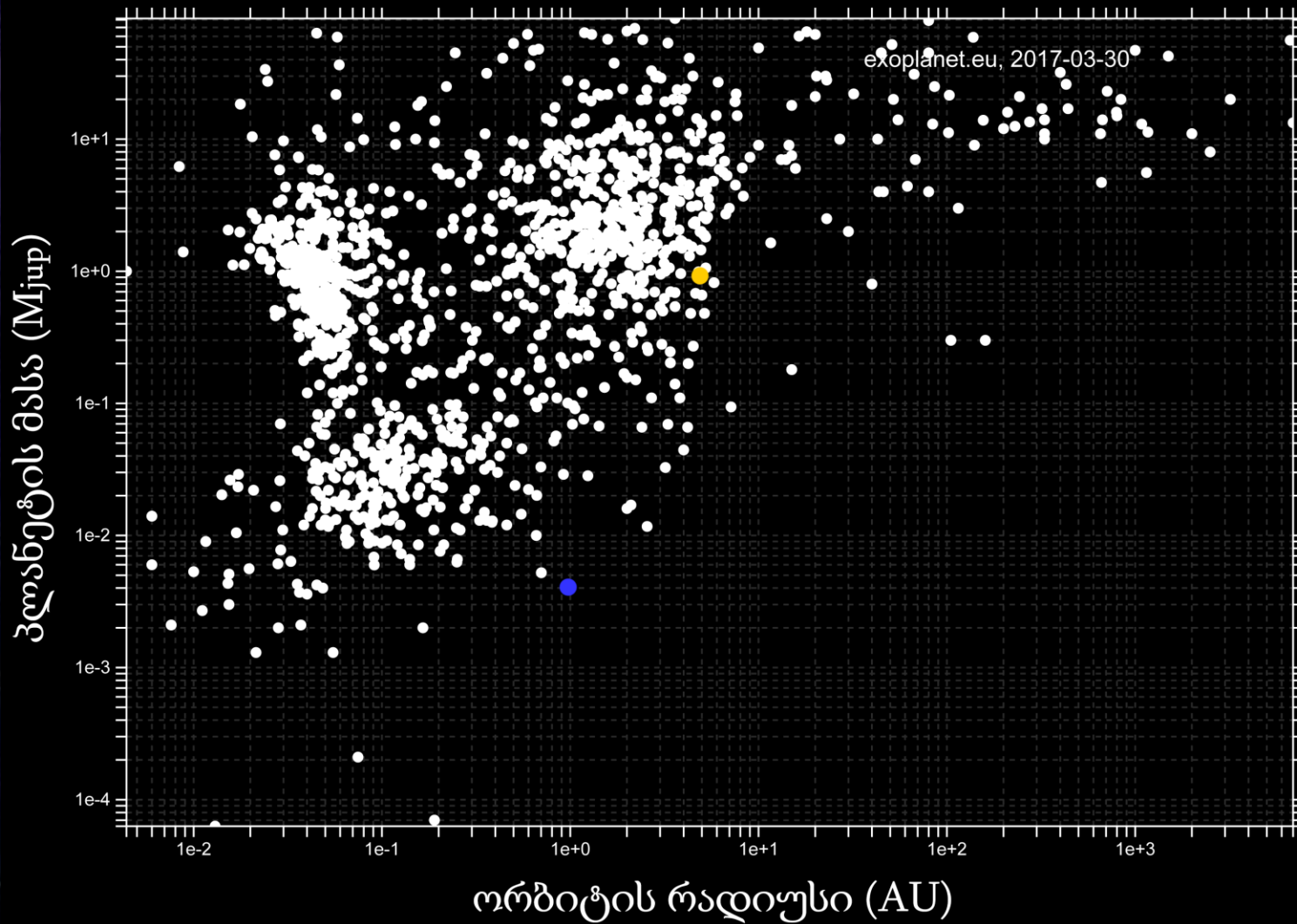
სულ (დადასტურებული): **3607**

Kepler-ის კანდიდატები: 4498

პირდაპირი გამოწასახი: **22**

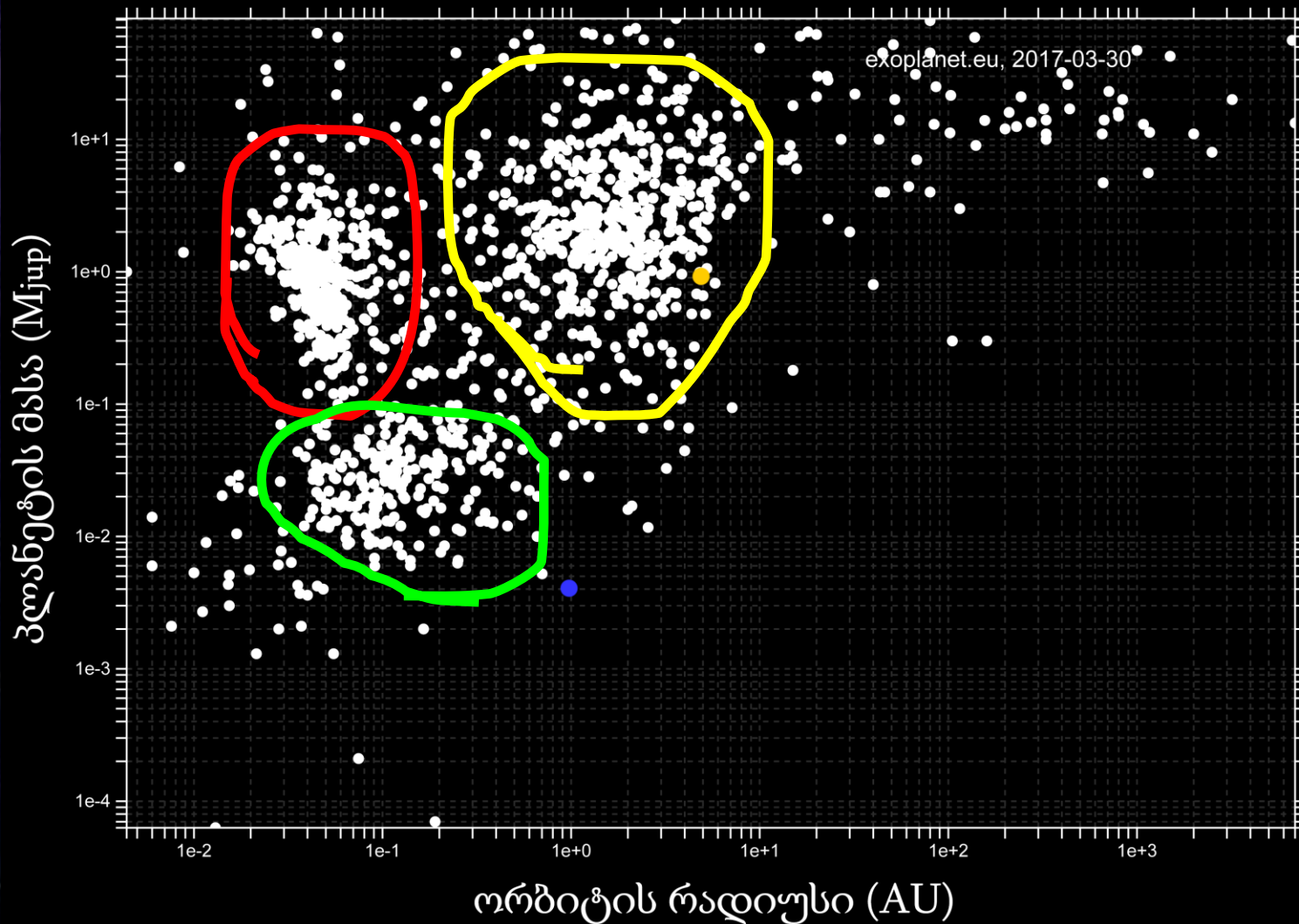
ვარსკვლავები რამოდენიმე  
პლანეტით: **603**

# არამზიური პლანეტების პოპულაცია



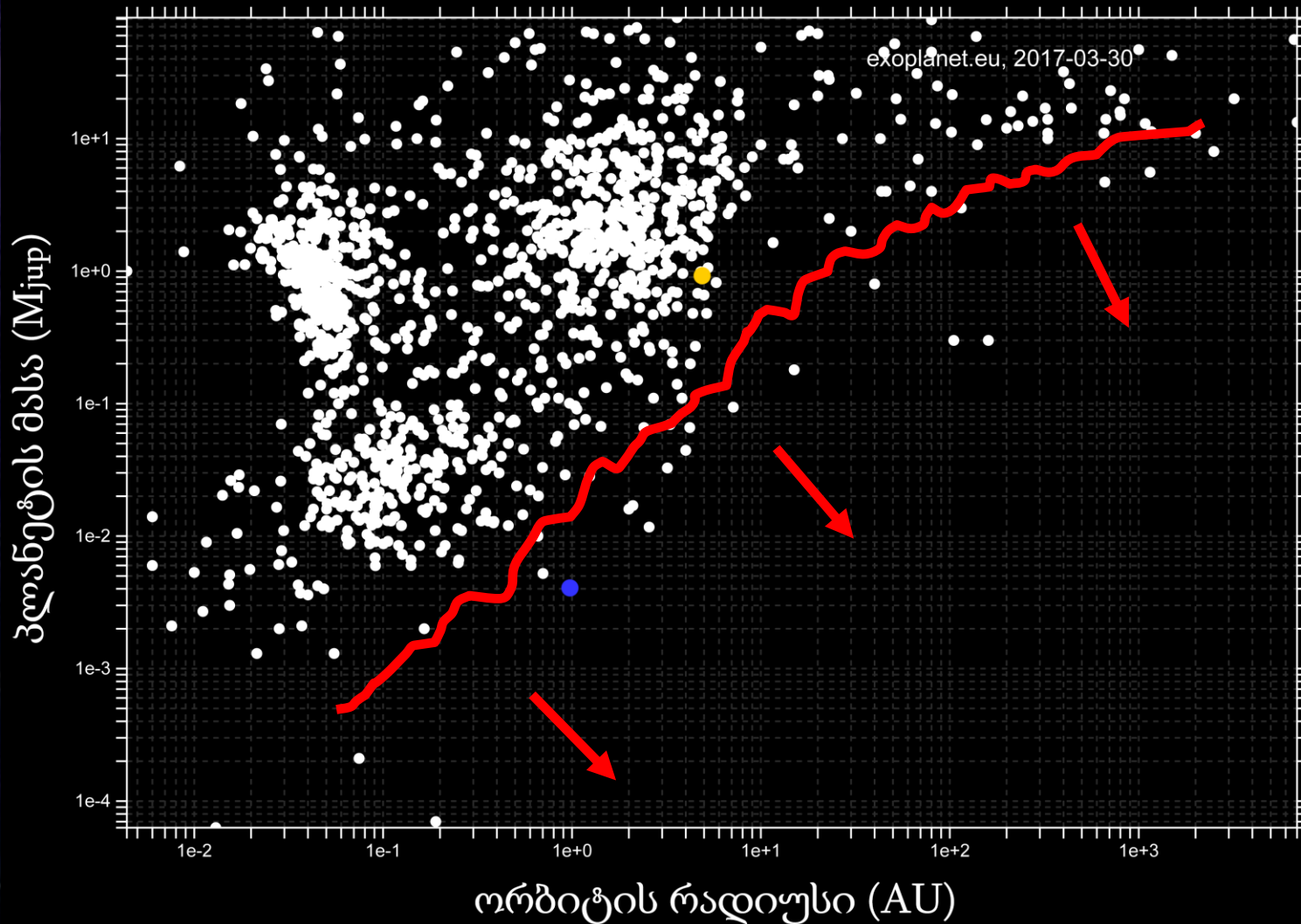
# არამზიური პლანეტების პოპულაცია

ცხელი იუპიტერები; გიგანტები; ზედედამიწები;

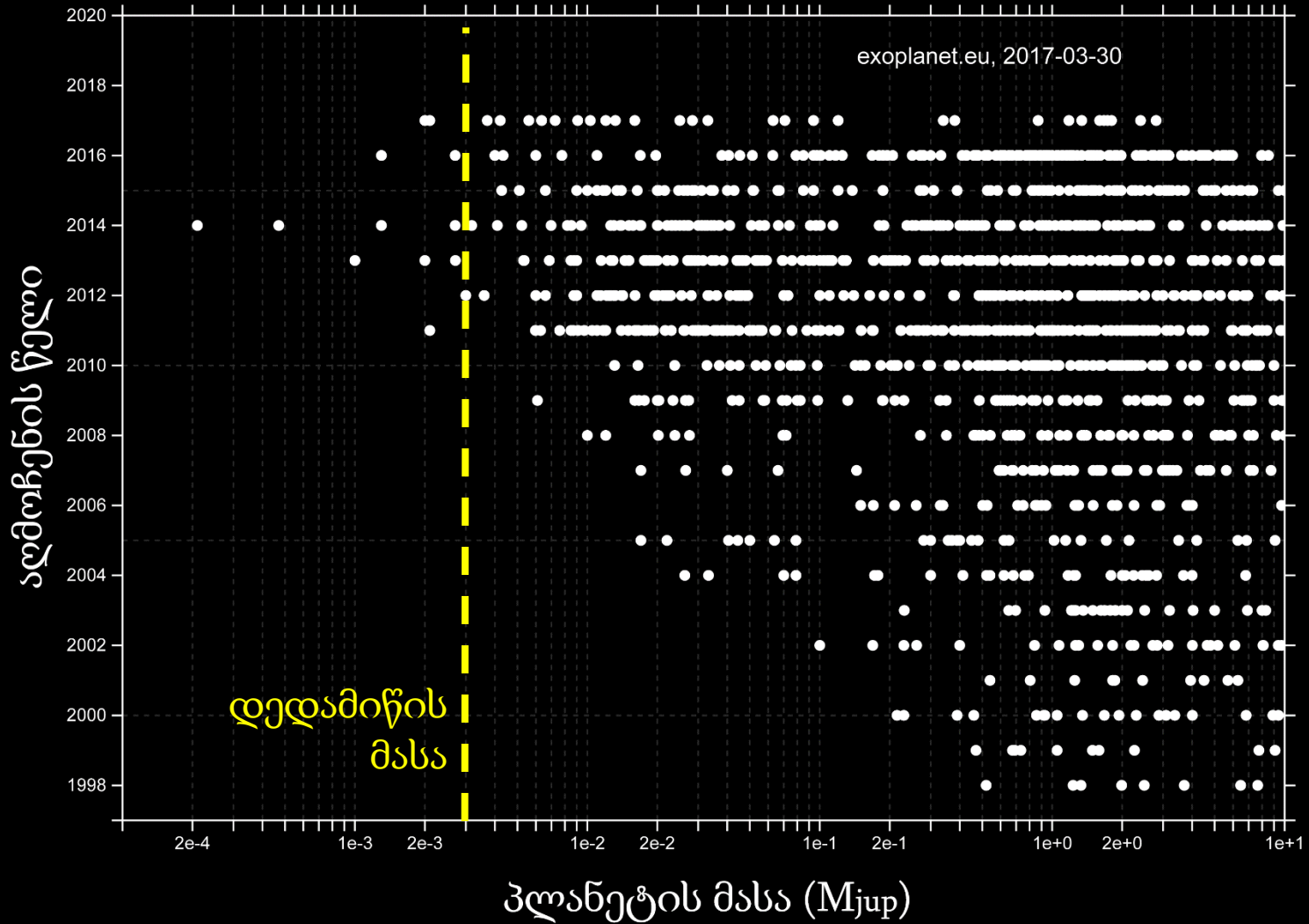


# არამზიური პლანეტების პოპულაცია

## მომავალი დაკვირვებები



# არამზიური პლანეტების პოპულაცია





# პროტოპლანეტარული დისკი

დისკები ახალგაზრდა ვარსკვლავების ირგვლივ:  
პლანეტების ფორმირების არეები



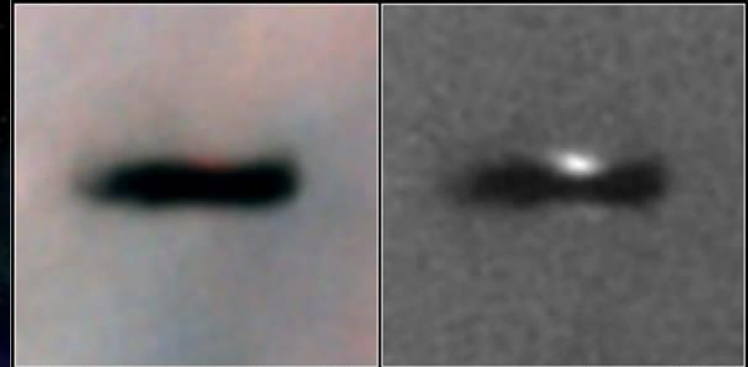
# პროტოპლანეტარული დისკები: დაკვირვებები

## Hubble Space Telescope



**Protoplanetary Disks  
Orion Nebula**

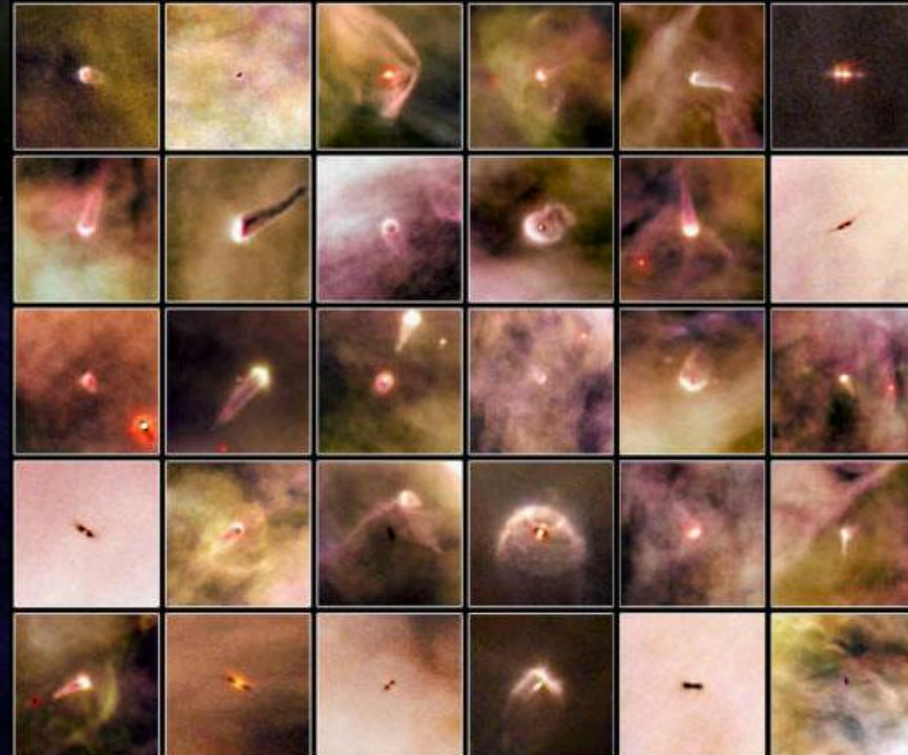
PRC95-45b · ST ScI OPO · November 20, 1995  
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



**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

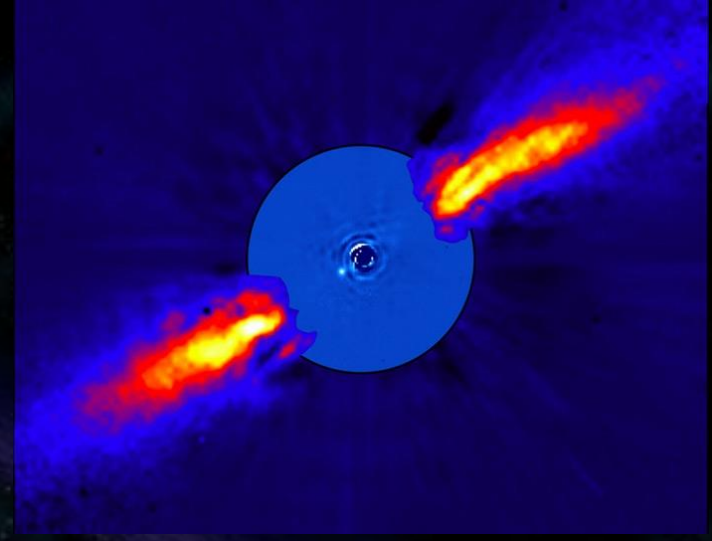
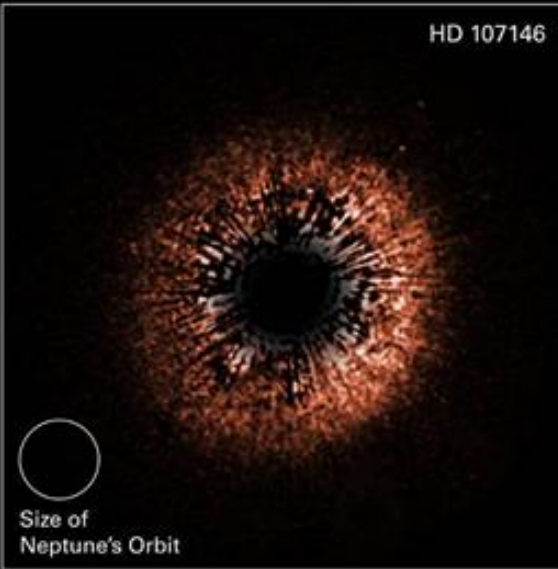
- ტემპერატურა: 10-150 K
- ბრუნვის სიჩქარე: ზებგერით
- მასშტაბი: 100-1000 AU
- დისკის მასა: 0.1-10%  $M_{\text{star}}$
- მყარი ნაწილაკები: დისკის მასის 1%
- სიცოცხლის ხანგრძლივობა: 1-10 Myr



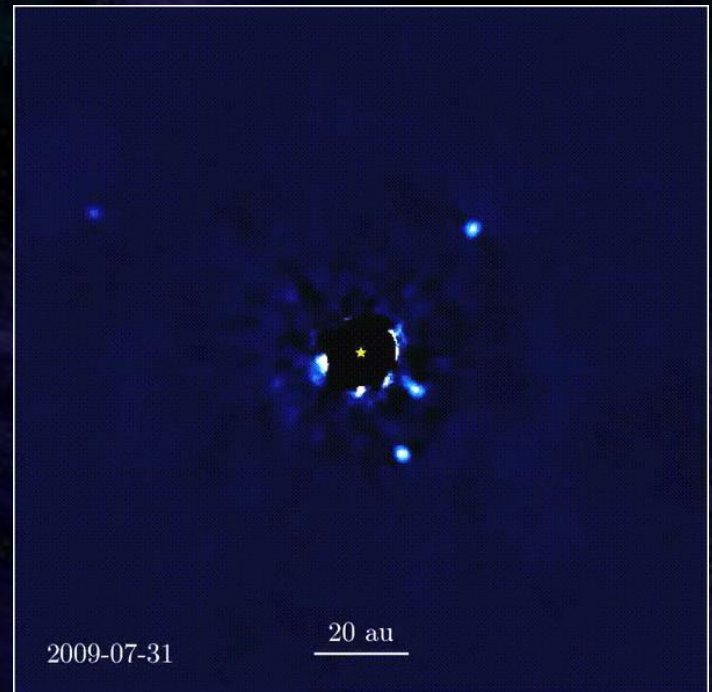
# დაკვირვებები: დისკებიდან პლანეტებამდე

AU Microscopii

HD 107146



**Circumstellar Debris Disks**  
Hubble Space Telescope • ACS HRC



# 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  
ნისლოეულის 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“

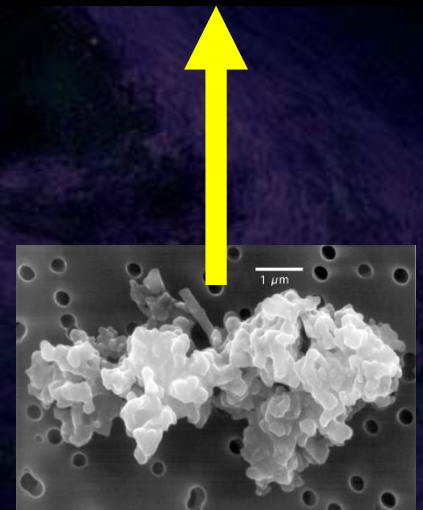
**Safronov (1969)**

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



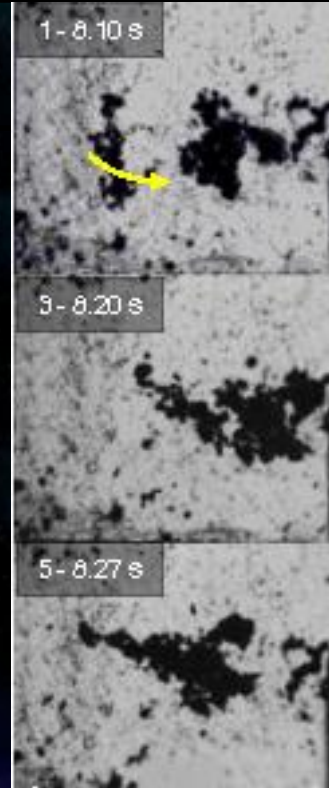
# ჩანასახების ფორმირება

მყარი ნაწილაკები დისკში:

„მტვერი“ (sub-micro meter particles)

ჩანასახის ზრდა მტვერის კოაგულაციით:

დაჯახებები: კოაგულაცია/ფრაგმენტაცია;



მიკრო მეტრი → მეტრი

სწრაფი კოაგულაცია;

მეტრი → კოლიმეტრი?

ნელი (>100მლნ წ.);

**1 მეტრიანი ბარიერი**

# მასის ზრდის ბარიერები

- **1 მ ბარიერი**  
(პლანეტის ჩანასახის ზრდის ტემპი)
- **1 კმ ბარიერი**  
(ფრაგმენტაცია)
- **ოლიგარქიული ზრდის ბარიერი**  
(იზოლაციის მასა)
- **მიგრაციის ბარიერი**  
(მიგრაციის ტიპები: I, II)
- **ემბრიონის ზრდის ბარიერი**  
(კოროტაციის, ლინდბლადის რეზონანსები)

# გრიგალური მოდელი

დიფერენციალური ბრუნვა: სტრუქტურის ფორმირება?

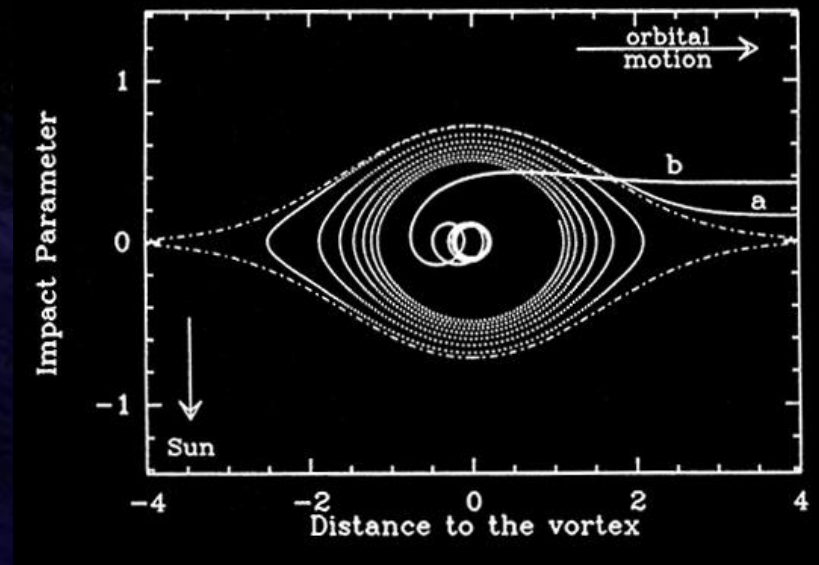
ძლიერი გრიგალი:

პლანეტების ჩანასახების ფორმირების ცენტრები  
(Barge Sommeria 1995)

ანტიციკლონური გრიგალი:

- მდგრადობა;
- მტვრის ჩაჭერა;

+ რიცხვითი მოდელირებები



# გრიგალური მოდელი

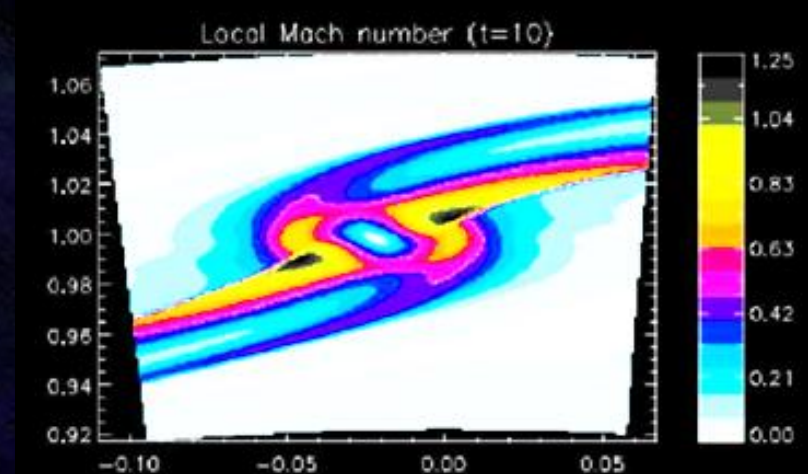
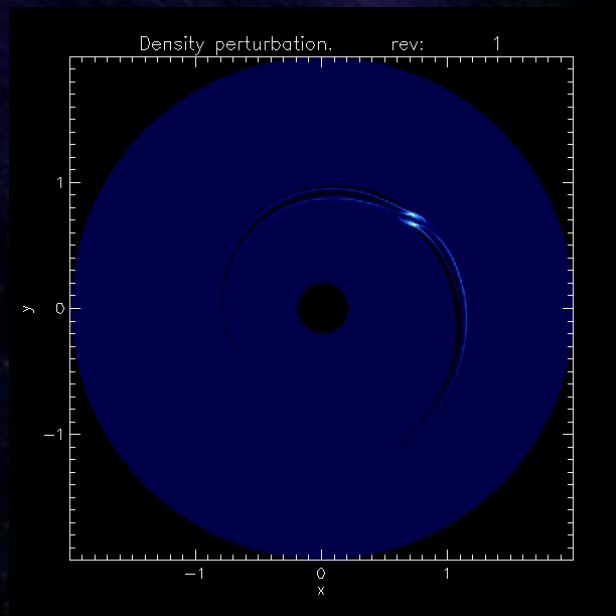
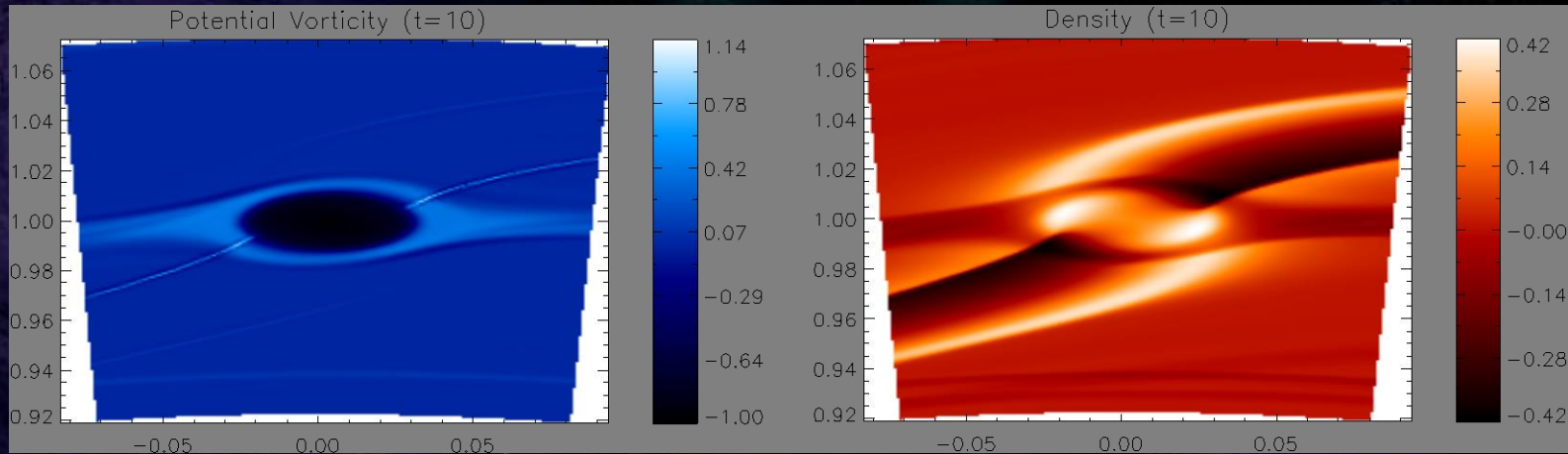
## წონასწორული ანტიციკლონური გრიგალი

1. არაწონასწორული გრიგალის წონასწორულ კონფიგურაციაში გადასვლა: „არაწრფივი ატრაქტორი“
2. სპირალური ტალღების გაჩენა;
3. არაწრფივი სპირალური დარტყმითი ტალღების ფორმირება;
4. არაიზოთერმული ეფექტების შესწავლა (ბაროკლინობა);

- Tevzadze, Chagelishvili, Bodo, Rossi, MNRAS (2010)
- Tevzadze, Chagelishvili, Zahn, Astron. Astrophys. (2008)
- Bodo, Tevzadze, Chagelishvili, Mignone, Rossi, Ferrari, Astron. Astrophys. (2007)
- Bodo, Chagelishvili, Murante, Tevzadze, Rossi, Ferrari, Astron. Astrophys. (2005)

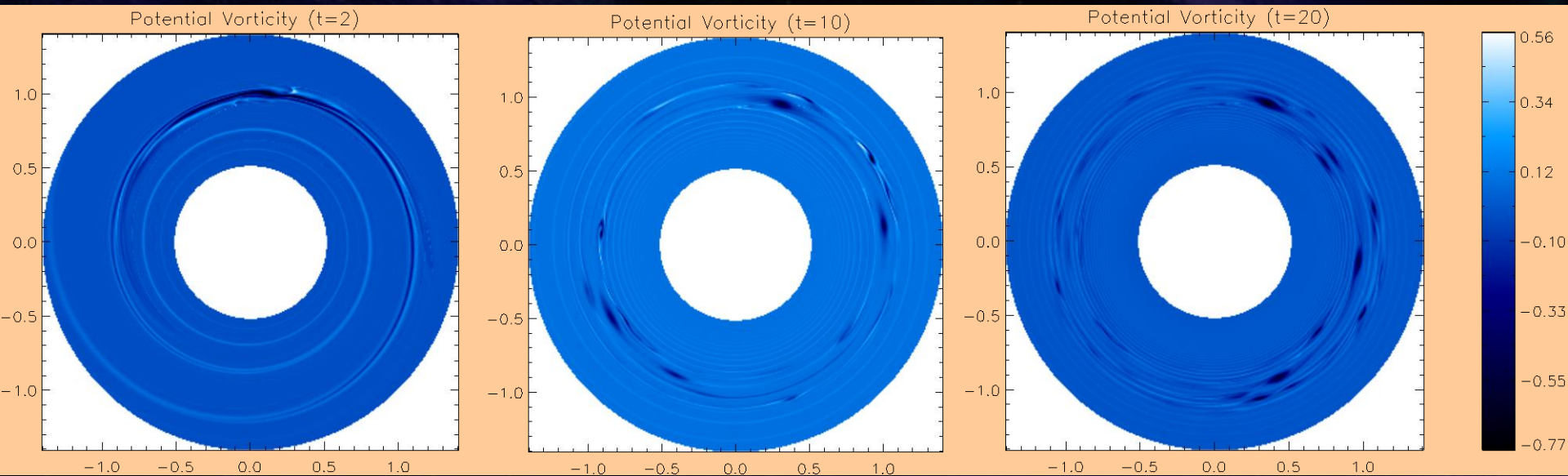
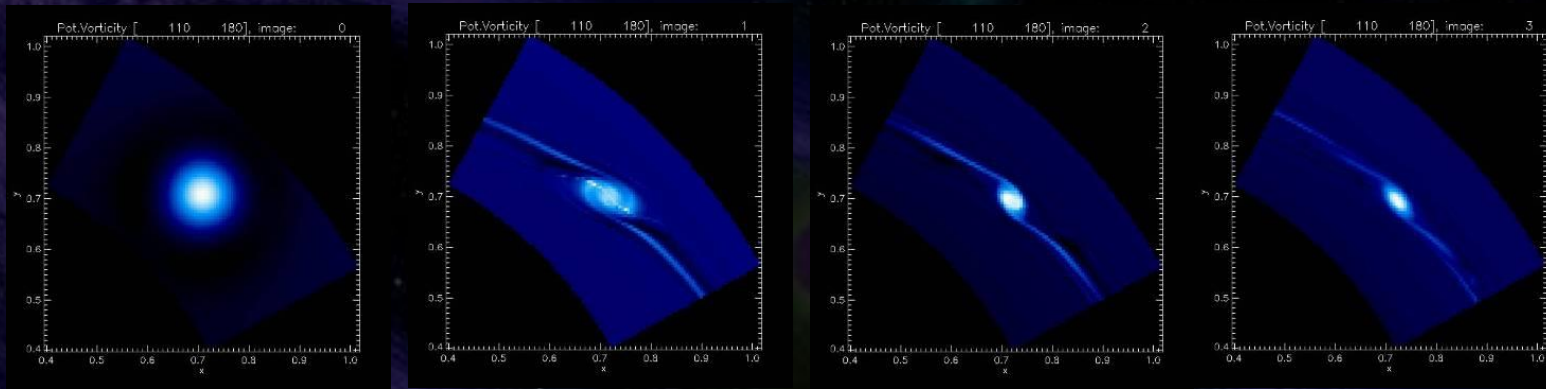
# გრიგალების დინამიკის მოდელირება

## მდგრადი ანტიციკლონური გრიგალი



# გრიგალური მოდელი

## ანტიციკლონი: არაწრფივი ატრაქტორი

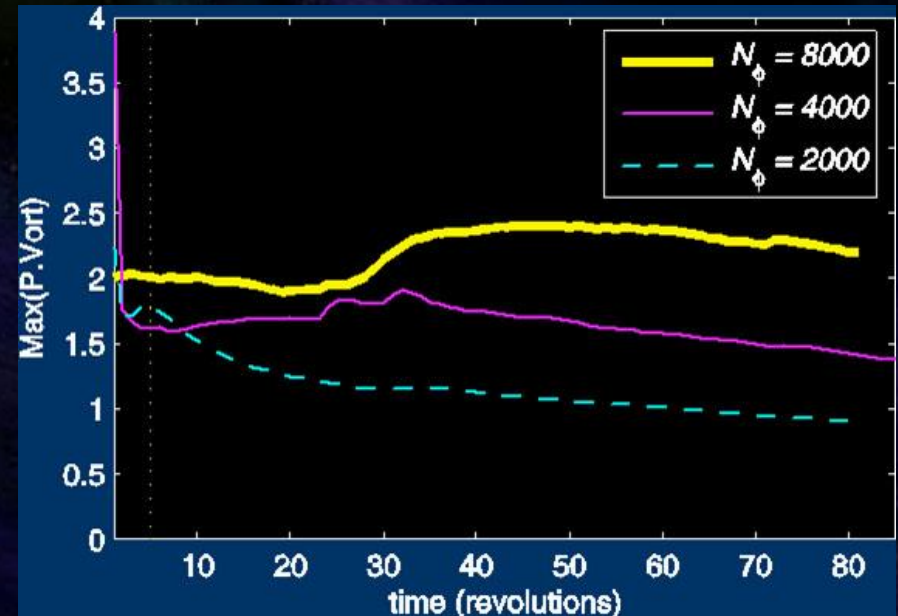
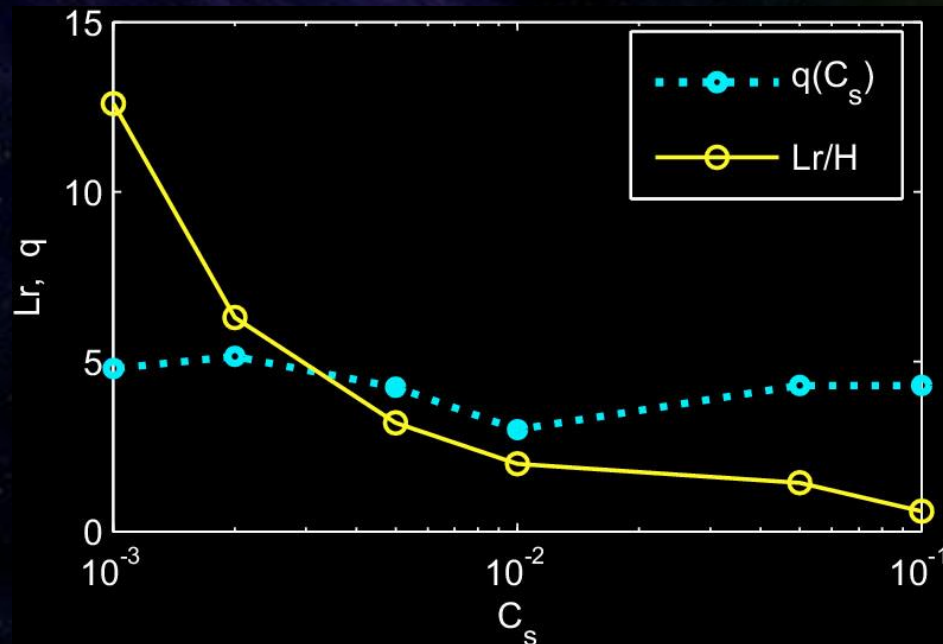


# წონასწორული გრიგალი

## scaling laws

არაწრფივი თვით-შენარჩუნების მექანიზმი  
- გრიგალის გეომეტრია დამოკიდებულია  $T$ -ზე;

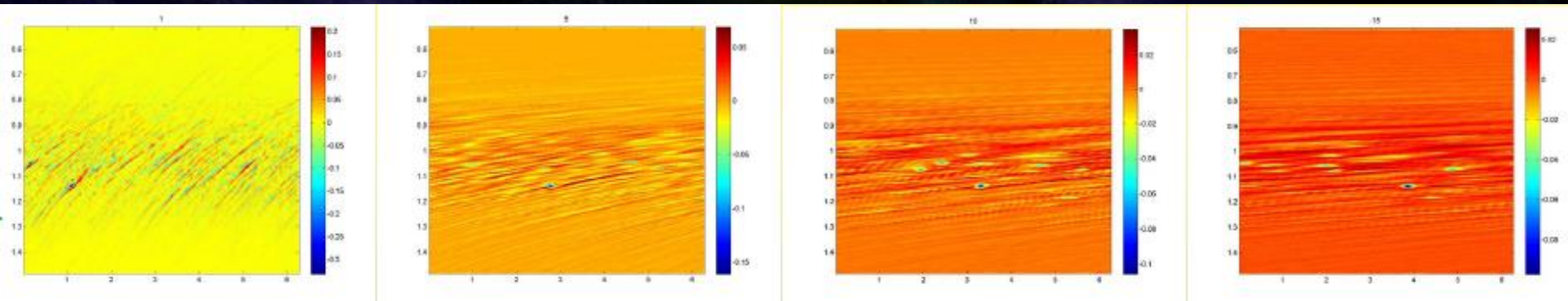
$$l_r = f(C_s) \quad q=5$$



# ბაროკლინური დისკები

დარტყმითი ტალღები რადიალურად  
სტრატოფიცირებულ დისკებში:

გრიგალების გაჩენის ეფექტურობის ზრდა



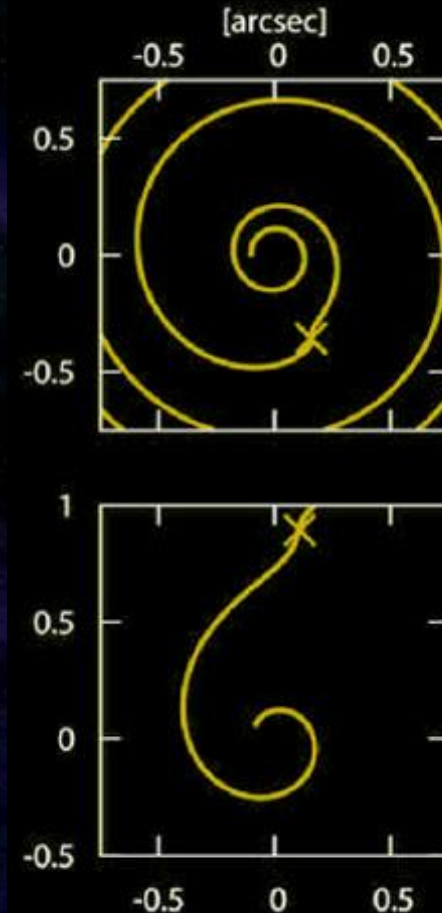
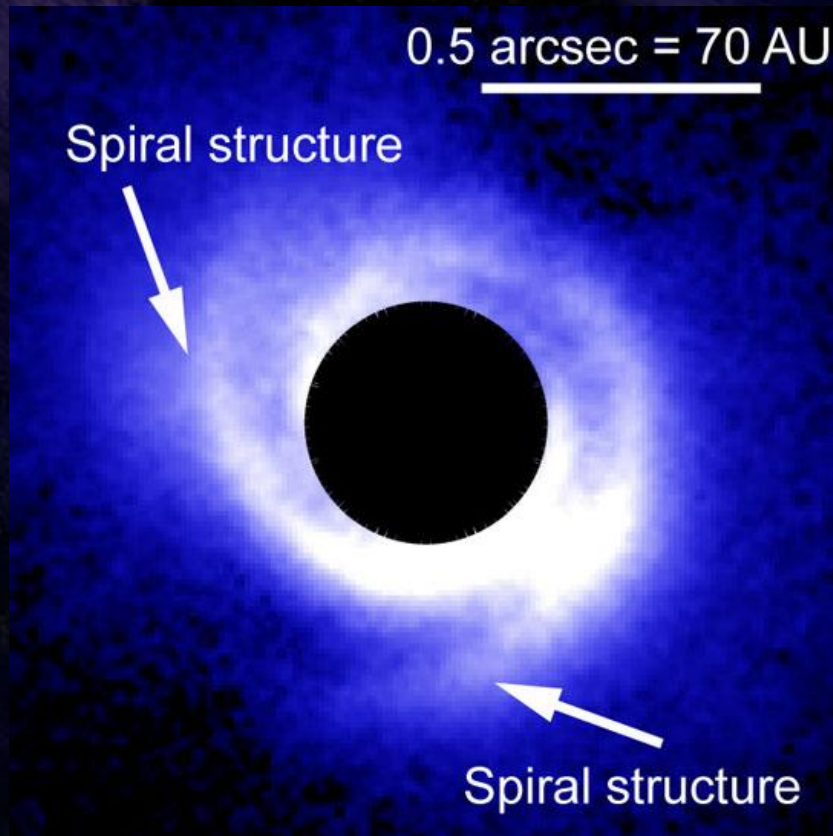
გენერაციის დრო ~ ბრუნვის პერიოდი



# სპირალების დაკვირვება

## გრიგალების არაპირდაპირი დაკვირვება?

### DISCOVERY OF SMALL-SCALE SPIRAL STRUCTURES IN THE DISK OF SAO 206462



# გრანულარული დინება

ფორმირების ეტაპები:

→ აირის და მტვრის დინება;

→ მყარი ნაწილაკების დინება;

მყარი ნაწილაკების დაჯახებები:  
„გრანულარული სითხე“

→ ნამსხვრევების დისკი;



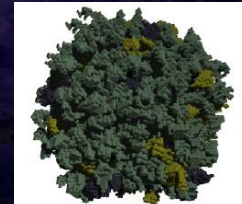
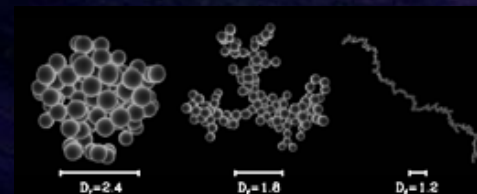
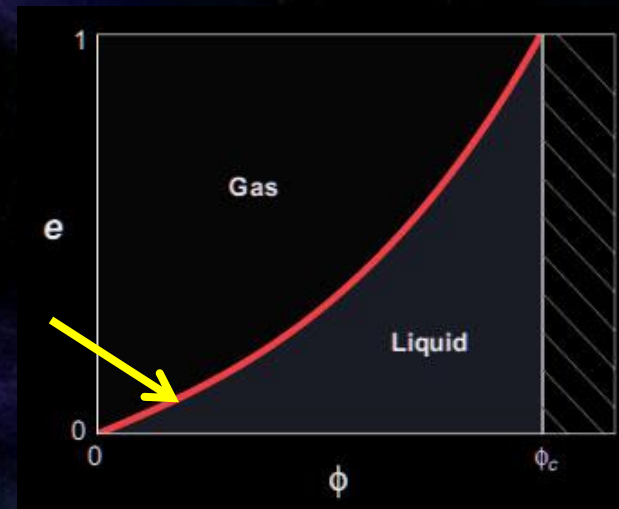
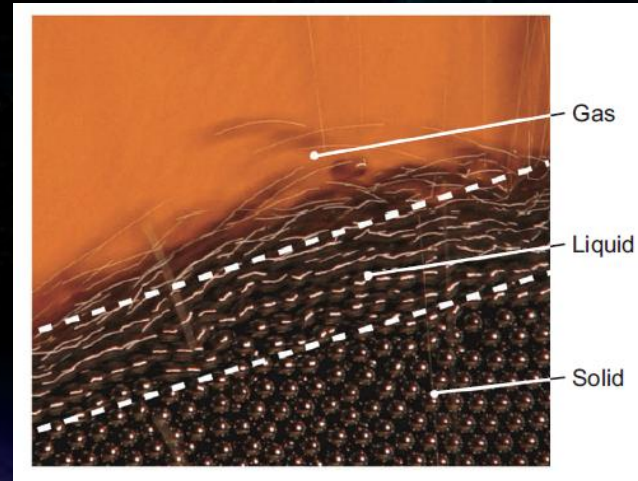
# რეოლოგიური მოდელი

ლოკალური მდგომარეობის  
განტოლება

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

- Pressure rheology
- Shear rheology

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



# გრანულარული დინება

## გრანულარული „სითხის“ დინება

ნაწილაკების დაჯახებები: რეოლოგიურ სიბლანტე

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

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

წრფივი მდგრადობის ანალიზი:

*ანალიზის ტიპის არამდგრადობა*

### Visco-rotational shear instability

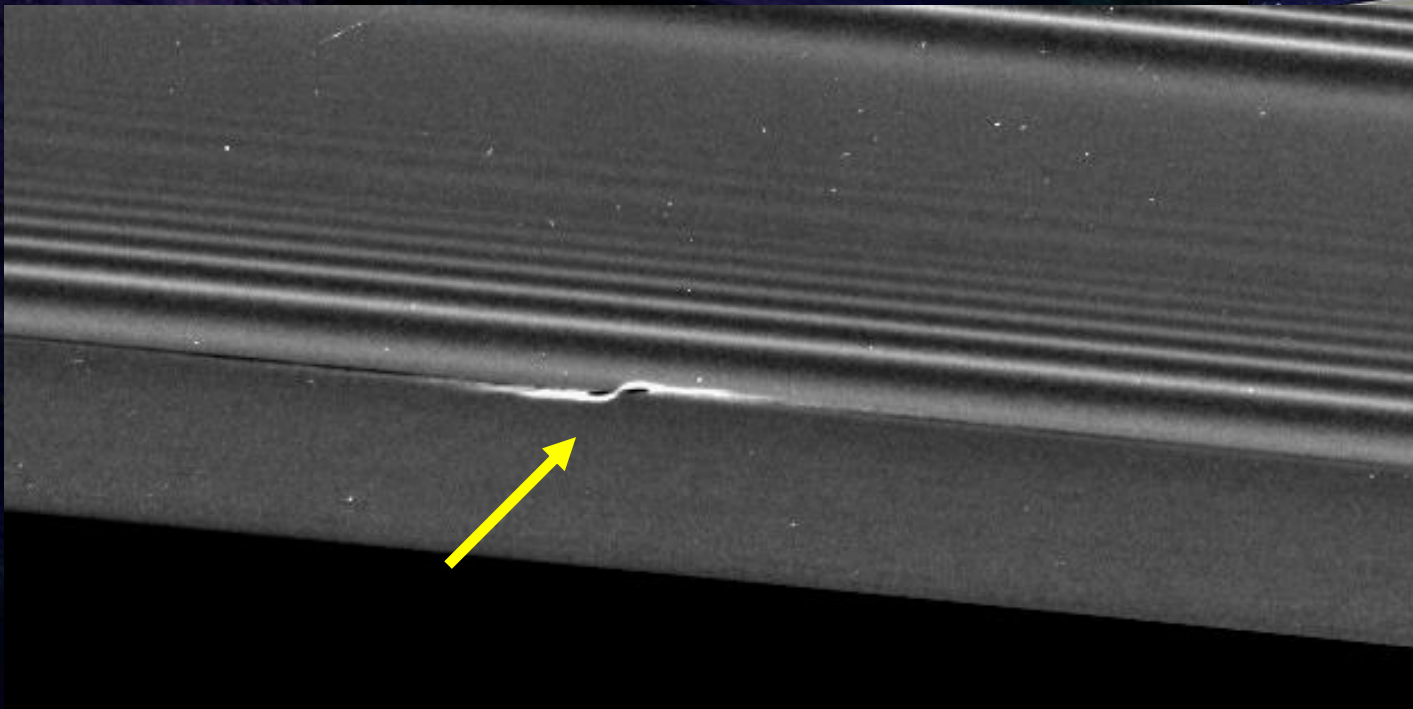
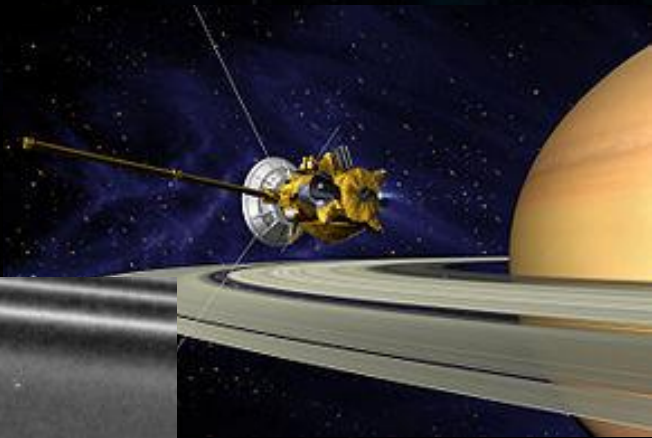
1. დიფერენციალური ბრუნვა;
2. გრანულარული სიბლანტე;

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

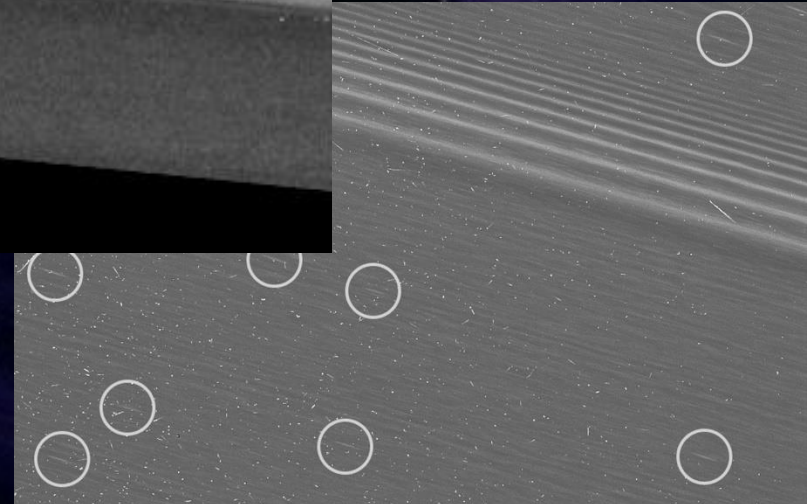
- Poniatowski & Tevzadze, PRL (submitted)

# Cassini (2016)

სატურნის რგოლებთან მიახლოება  
Flyby - Dec.2016



“moonlet”



# პირველი ...

2004 – პლანეტარული მასის ობიექტი (პლანემო)

2005 - სუპერდედამიწა

2008 - პლანეტარული სისტემის პირდაპირი გამოსახულება

2009 - პლანეტა 4-ჯერად სისტემაში



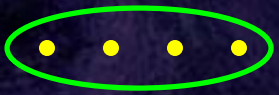
2009 - რეტროგადული პლანეტა

2010 - არამზიური პლანეტა სიცოცხლის ზონაში;

2011 - ორი პლანეტა ორჯერად სისტემაში;



2012 - საერთო პლანეტა 4-ჯერად სისტემაში;



2016 - პლანეტა 3-ჯერად სისტემაში (Proxima)

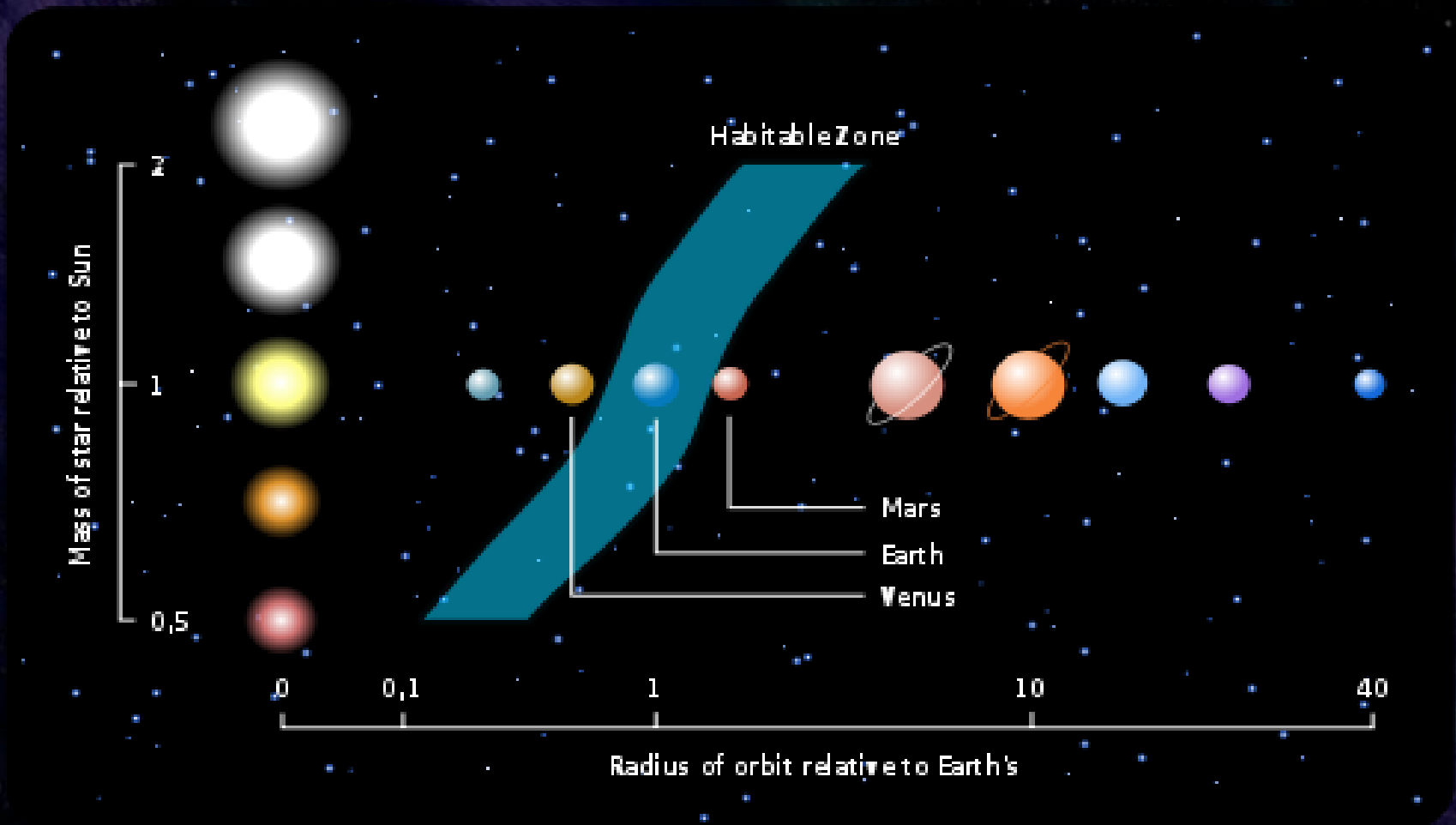


2017 – TRAPPIST – 7 კლდოვანი პლანეტა;

# სიცოცხლის ზონა

სიცოცხლე: თხევადი წყალი:

ტემპერატურა ზედაპირზე: 0–100 გრად.С

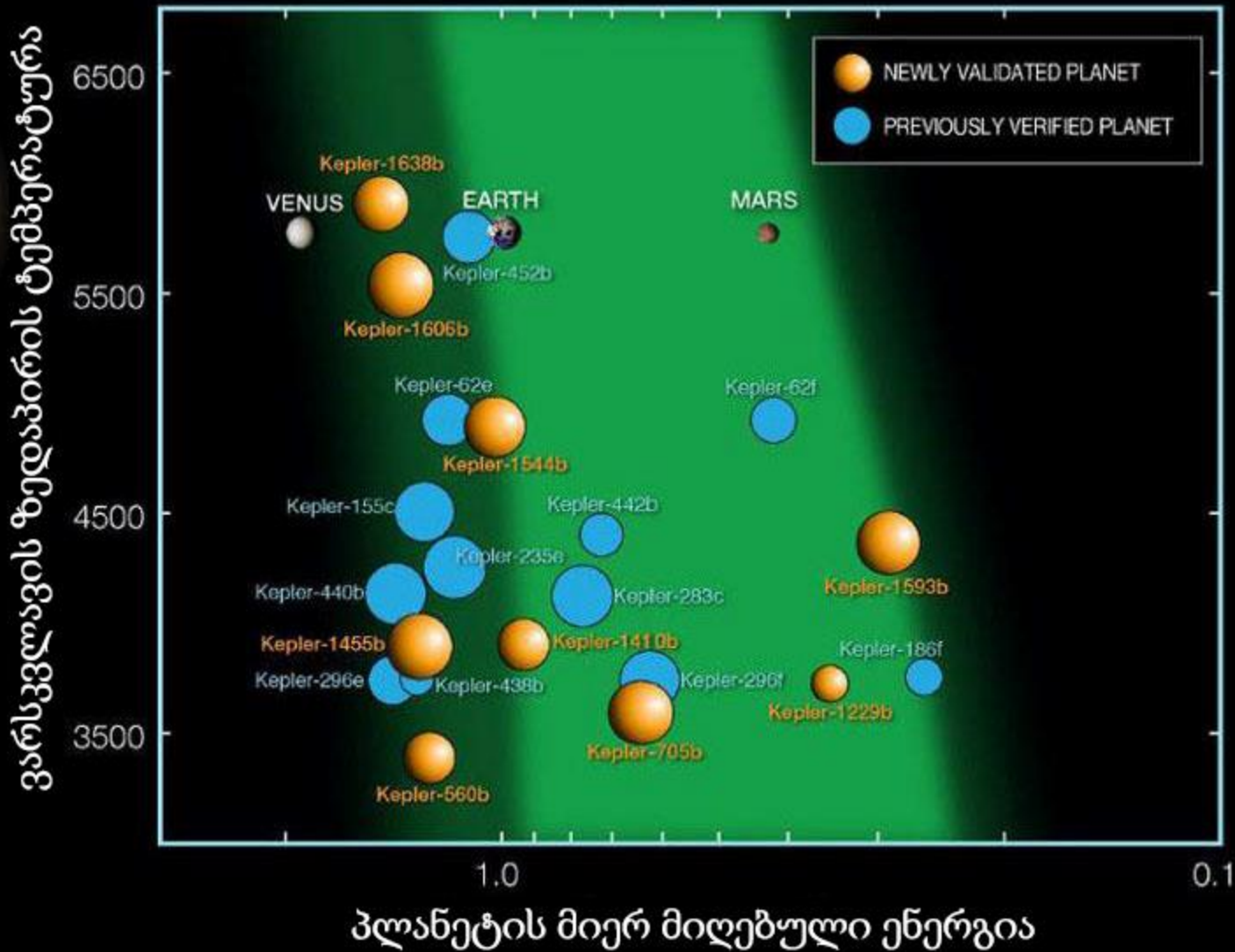


# არამზიური პლანეტები სიცოცხლის ზონაში (25)

სახელი	მასა ( $M_{\oplus}$ )	რადიუსი ( $R_{\oplus}$ )	ტემპერატურა (K)	პერიოდი (დღე)	Dმანძლი მზიდან (სწ.)
<a href="#">Kepler-438b</a>	4.0 – 1.3 – 0.6	1.1	276	35.2	473
<a href="#">Kepler-296e</a>	12.5 – 3.3 – 1.4	1.5	337.0±17.5	34.1	737
<a href="#">Kepler-62e</a>	18.7 – 4.5 – 1.9	1.6	270±15	122.4	1200
<a href="#">Gliese 832 c</a>	≥ 5.4	1.2 – 1.7 – 2.2	253; 233–280	35.7	16
<a href="#">K2-3d</a>	11.1	1.5	300	44.6	137
<a href="#">Kepler-1544b</a>	31.7 - 6.6 - 2.6	1.8	248	168.8	1138
<a href="#">Kepler-283c</a>	35.3 – 7.0 – 2.8	1.8	248	92.7	1741
<a href="#">Tau Ceti e*</a>	≥ 4.3	1.1 – 1.6 – 2.0	282	168.1	12
<a href="#">Gliese 180 c</a>	≥ 6.4	1.3 – 1.8 – 2.3	239	24.3	38
<a href="#">Kepler-440b</a>	41.2 – 7.7 – 3.1	1.9	273	101.1	851
<a href="#">Gliese 180 b</a>	≥ 8.3	1.3 – 1.9 – 2.4	268	17.4	38
<a href="#">HD 40307 g</a>	≥ 7.1	1.3 – 1.8 – 2.3	227	197.8	42
<a href="#">Gliese 163 c</a>	≥ 7.3	1.3 – 1.8 – 2.3	230; 277	25.6	49
<a href="#">K2-18 b</a>	? – 16.5 – 6.0	2.2	272±15	32.9	111
<a href="#">Kepler-61b</a>	? – 13.8 – 5.2	2.2	258, 273±13	59.9	1063
<a href="#">Kepler-443b</a>	? – 19.5 – 7.0	2.3	247	177.7	2540
<a href="#">Kepler-22b</a>	? – 20.4 – 7.2	2.04; 2.4	262	289.9	619



# არამზიური პლანეტები: დაკვირვებები



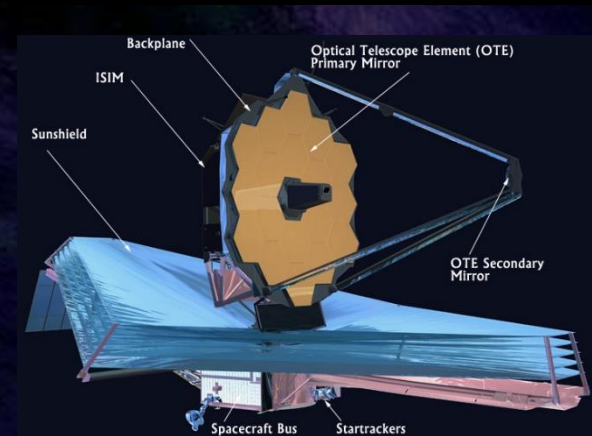
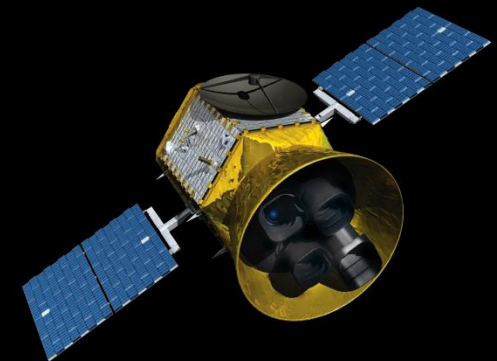
# მომავალი დაკვირვებები

არსებული:

- Hubble Space Telescope;
- Kepler (2009); K2 (2015);

დაგეგმილი:

- **TESS**  
(Transiting Exoplanet Survey Satellite)  
(2018/March)
- **James Webb telescope**  
(2018+)



# მომავალი

- არამზიური პლანეტების ატმოსფეროს სპექტრი;
- მზის სისტემის უნიკალობა (?)
- დედამიწის ტიპის არამზიური პლანეტები და პლანეტები სიცოცხლის ზონაში;
- არამზიური პლანეტების მაგნიტური ველის აღმოჩენა (მაგნიტოსფერო);

# გმადლობთ ყურადღებისათვის