

შესავალი

შესწავლის ობიექტები

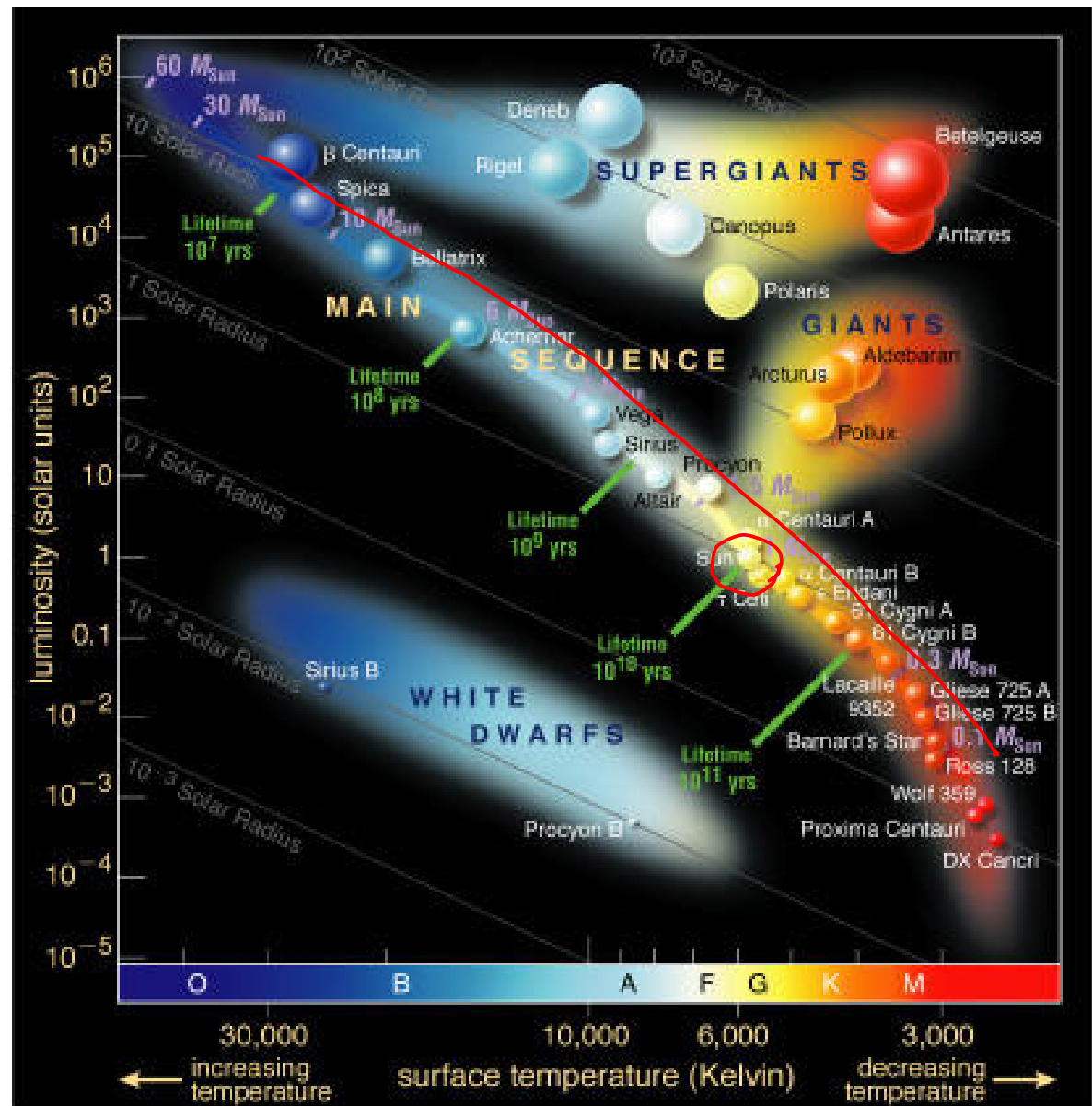
- ვარსკვლავების სტრუქტურა წონასწორობაში;
- მზის და ვარსკვლავების კონვექცია, ატმოსფეროს და კორონალური დინებები;
- ვარსკვლავური ოსცილაციები;
- ზეახალის აფეთქების დარტყმითი ტალღები;
- აკრეცია: აკრეციული დისკები;
- პროტოპლანეტური დისკები;
- ახალგაზრდა ვარსკვლავური ჭავლური დინებები (ჯეტები);
- გალაქტიკების დინამიკა;
- კოსმოლოგიური მასშტაბები;

ვარსკვლავების სტრუქტურა წონასწორობაში

მთავარი
თანმიმდევრობის
ვარსკვლავები

ჰერცშპრუნგ-რასელის
დიაგრამა

მაგალითი:
მზე

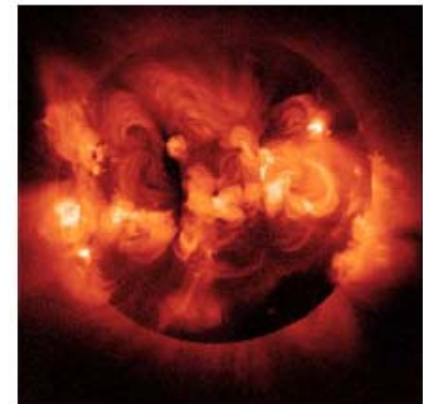
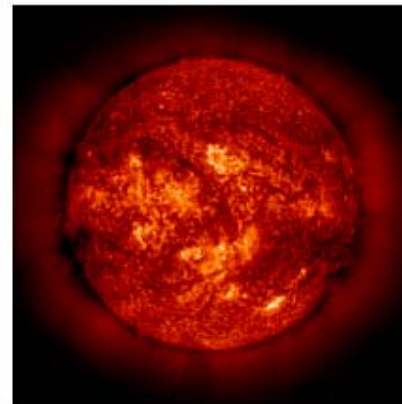
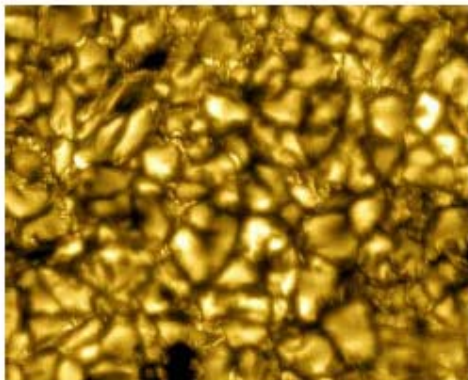
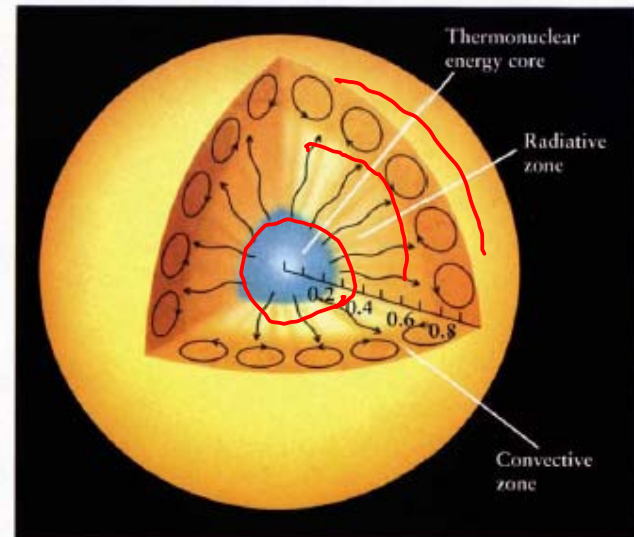


ვარსკვლავების სტრუქტურა წონასწორობაში

- კონვექციური ზონა;
- ატმოსფერო;

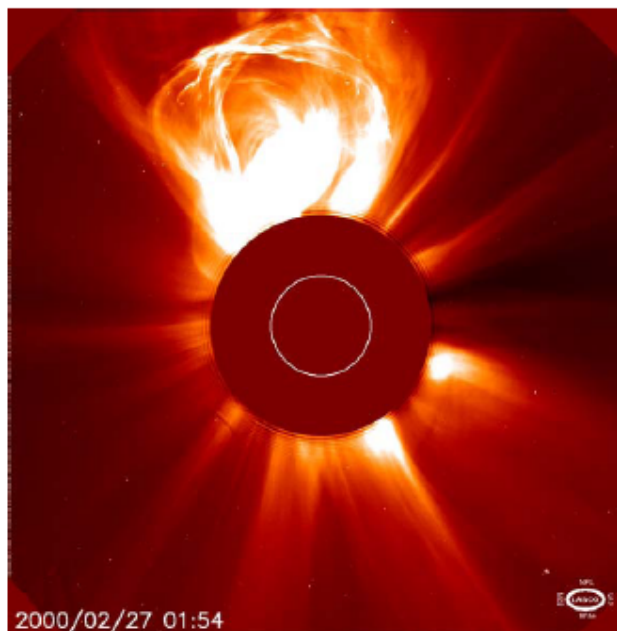
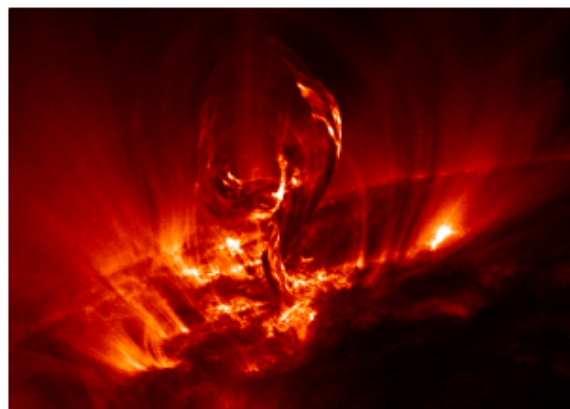
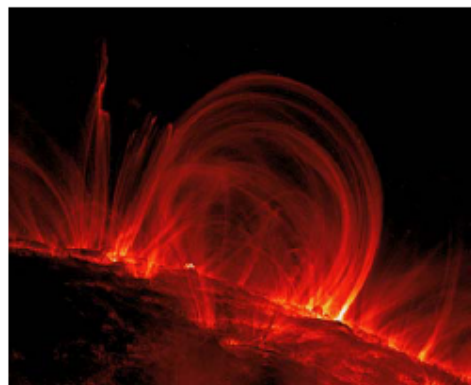
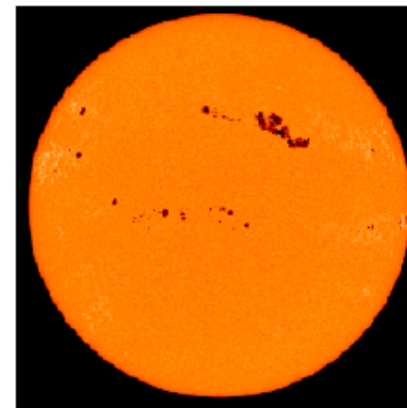
კონვექციური გრანულაცია;
ფოტოსფერო;
ქრომოსფერო;
კორონა;

ზეტა-ტუჩა
გეგმა



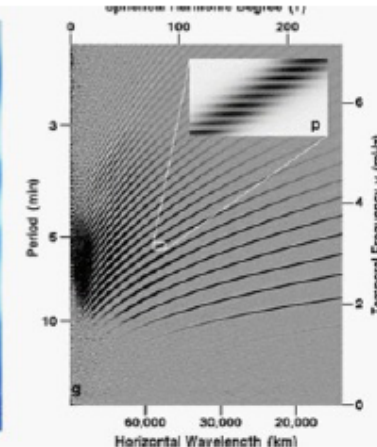
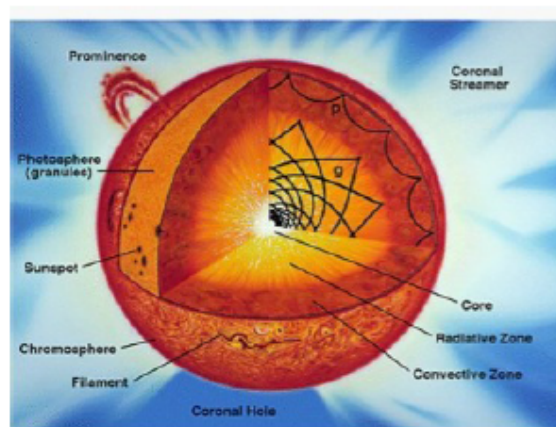
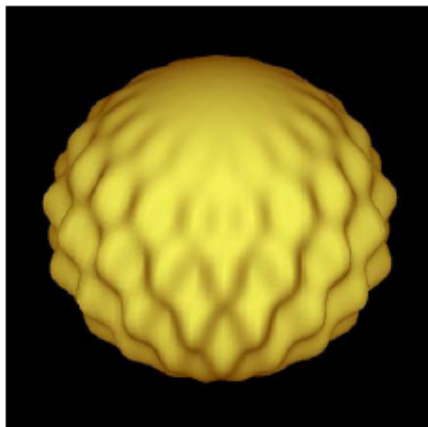
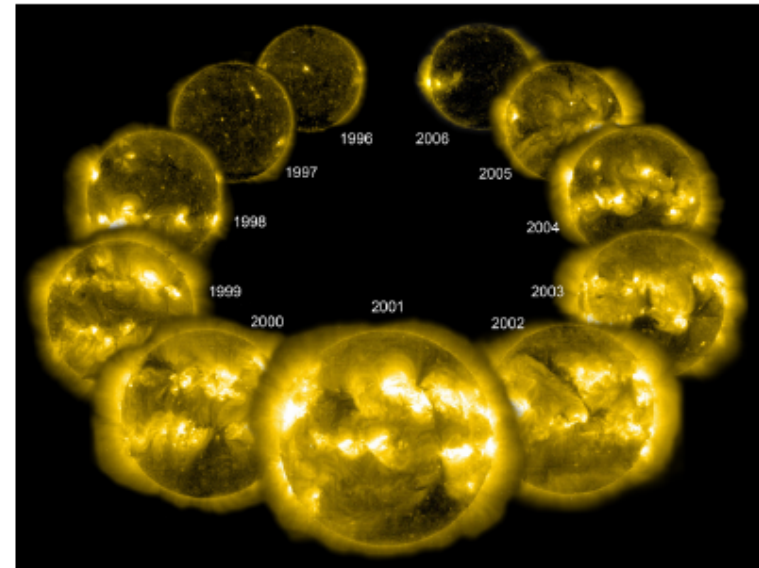
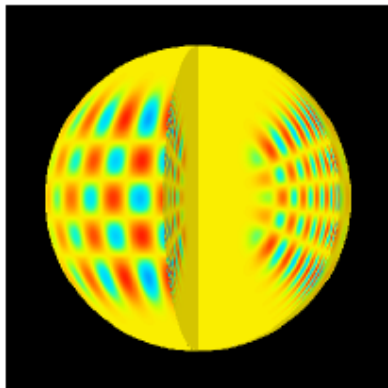
მზის და ვარსკვლავების კონვექცია, ატმოსფეროს და კორონალური დიებები

მზის ლაქები;
მაგნიტური თაღები და მარყუჟები;
მაგნიტური პრომინანსები და ფილამენტები;
კორონალური მასის ამორტყორცნები (CME);



ვარსკვლავური ოსცილაციები

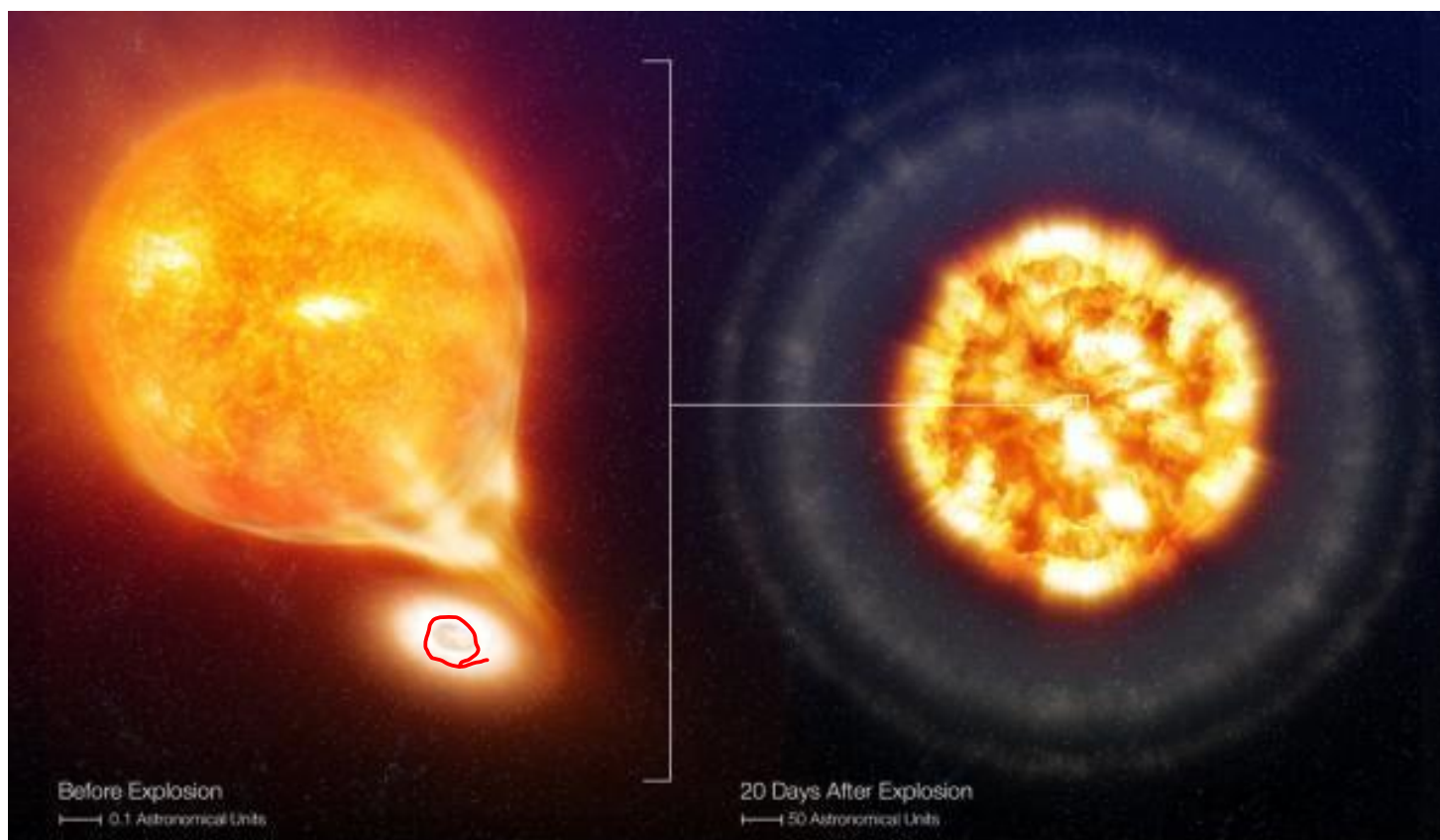
მზის 22 წლიანი ციკლი;
P-მოდები და ჰელიოსეისმოლოგია;



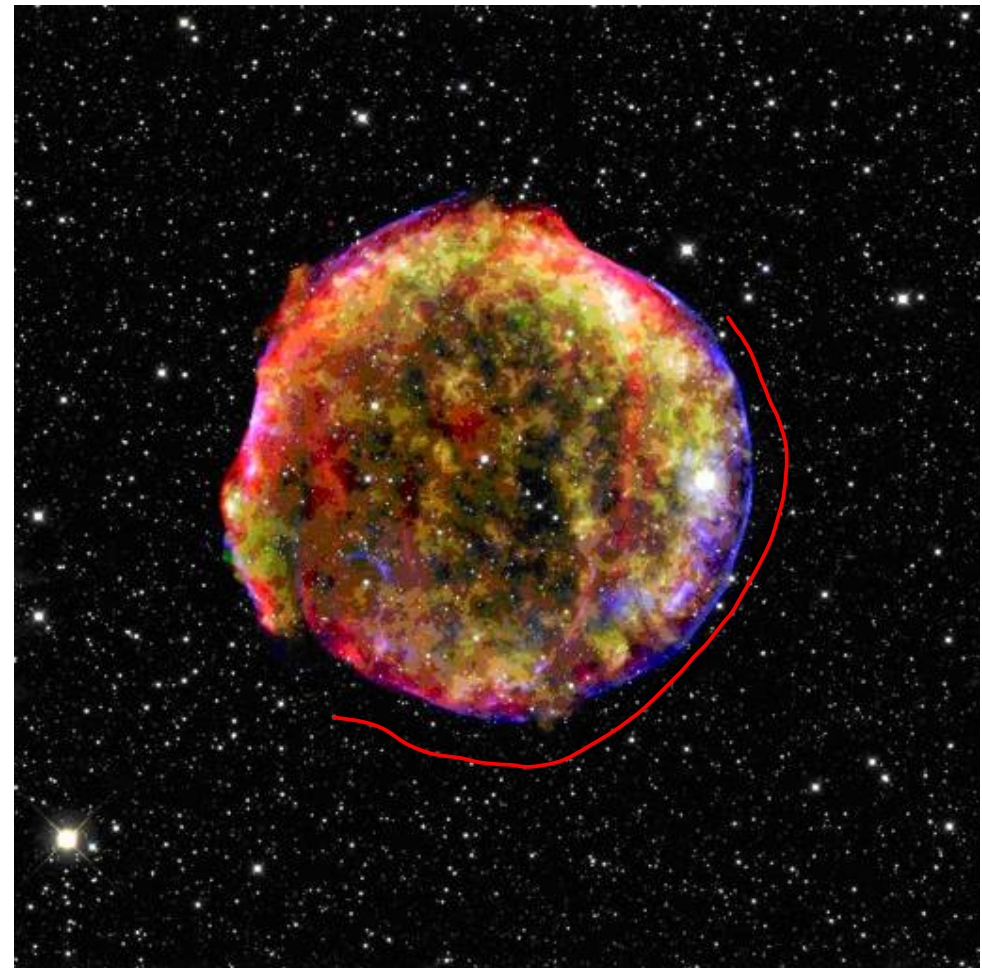
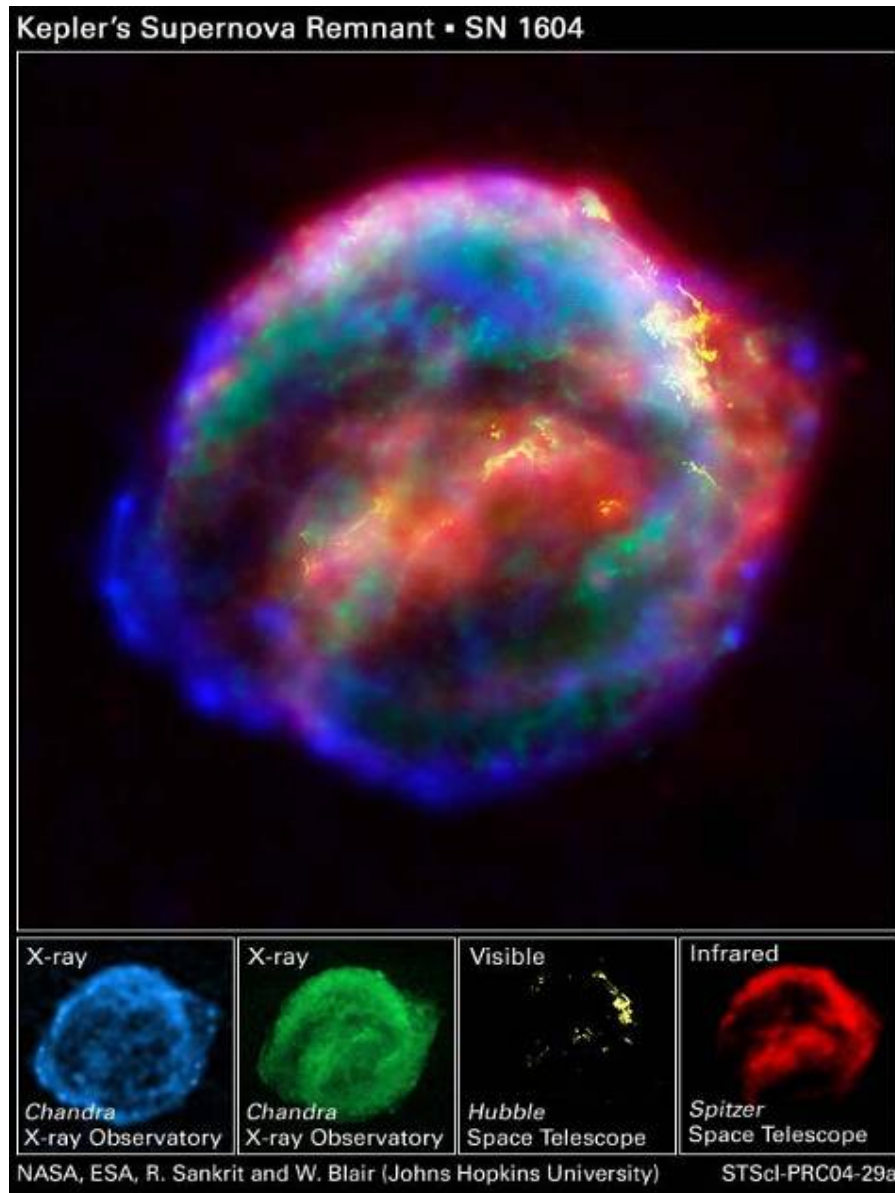
+ სეიზმები

ზეახალის აფეთქების დარტყმითი ტალღები

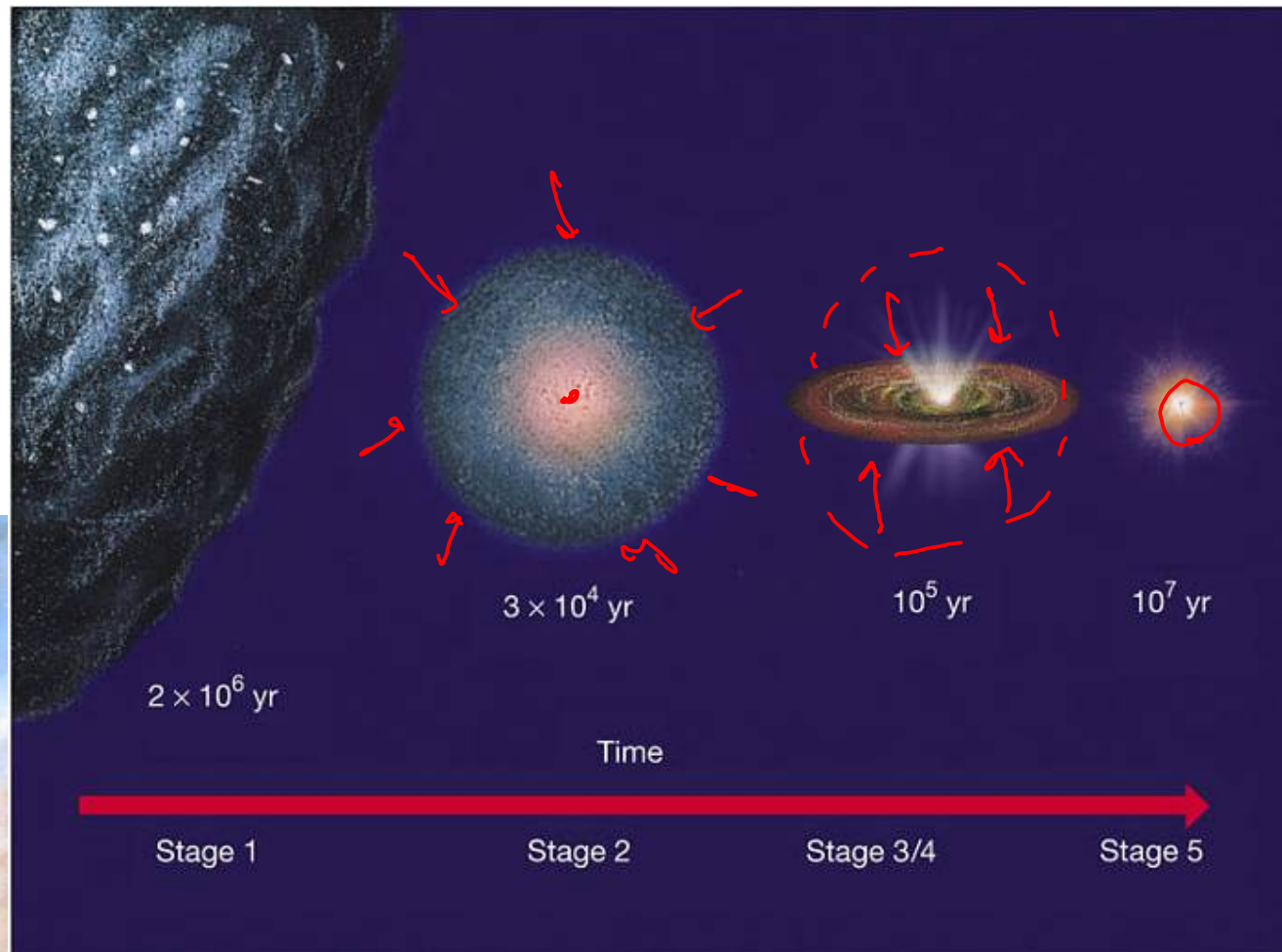
ძირითად თანმიმდევრობის ვარსკვლავის მდგრადი ფაზის დასასრული;
ზეახალის ტიპები
ზეახლები ორმაგ სისტემებში;
თეთრი ჯუჯა (Ia)
სტანდარტული სანთლები



ზეახალის აფეთქების დარტყმითი ტალღები



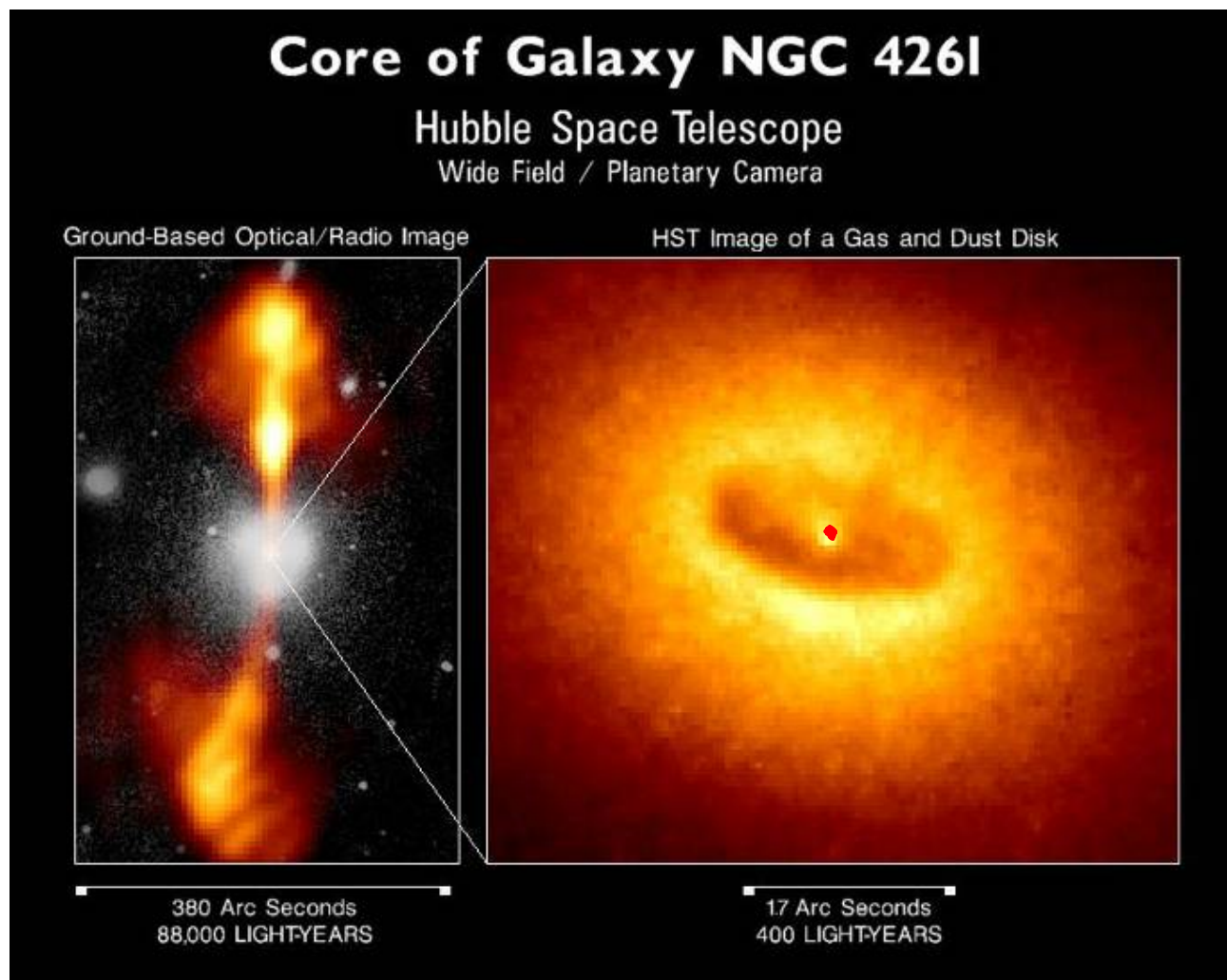
აკრეცია: აკრეციული დისკები



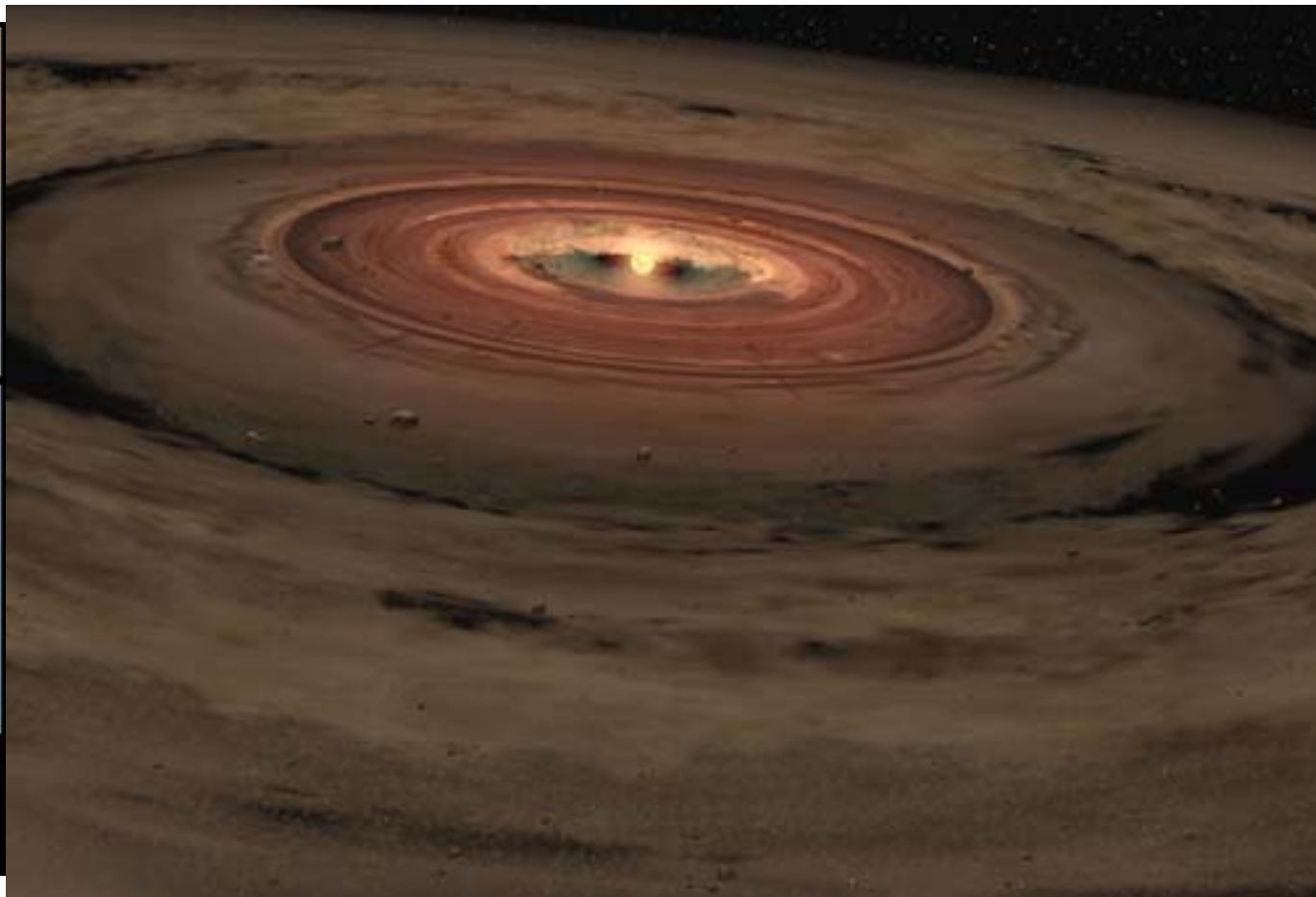
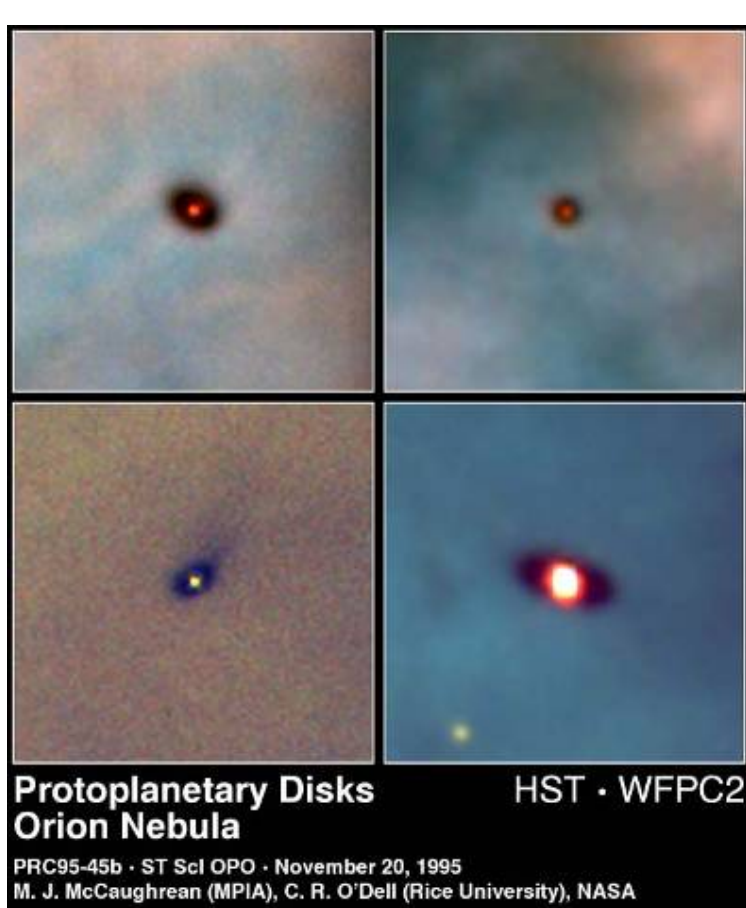
აკრეცია: აკრეციული დისკები

ენერგიის წყარო;

კვაზარები; აქტიური გალაქტიკის ბირთვები;

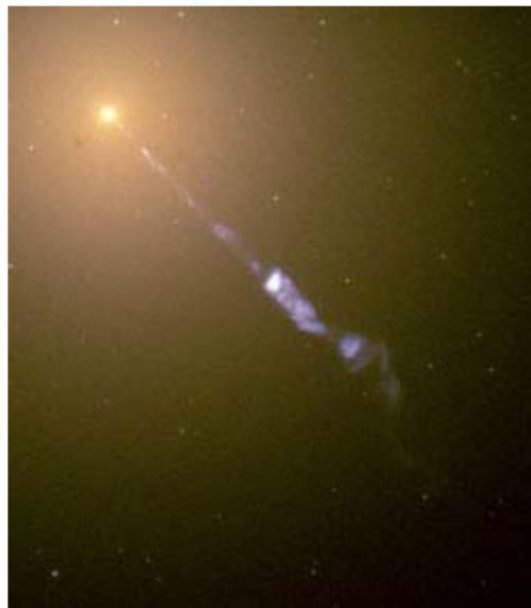


პროტოპლანეტური დისკები

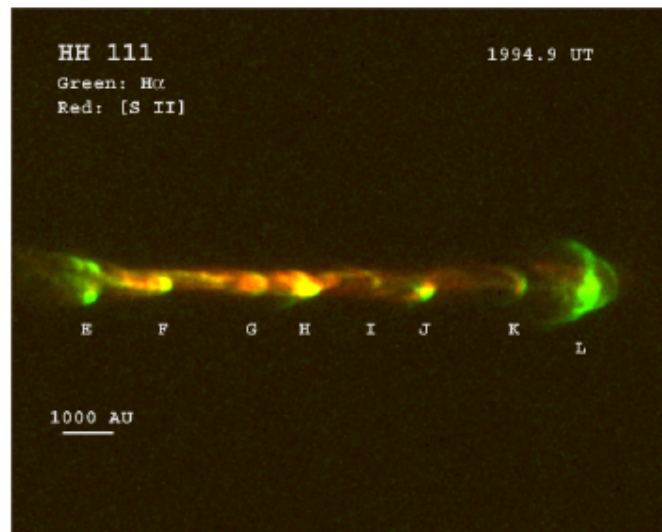


ახალგაზრდა ვარსკვლავური ჭავლური დინებები (ჯეტები)

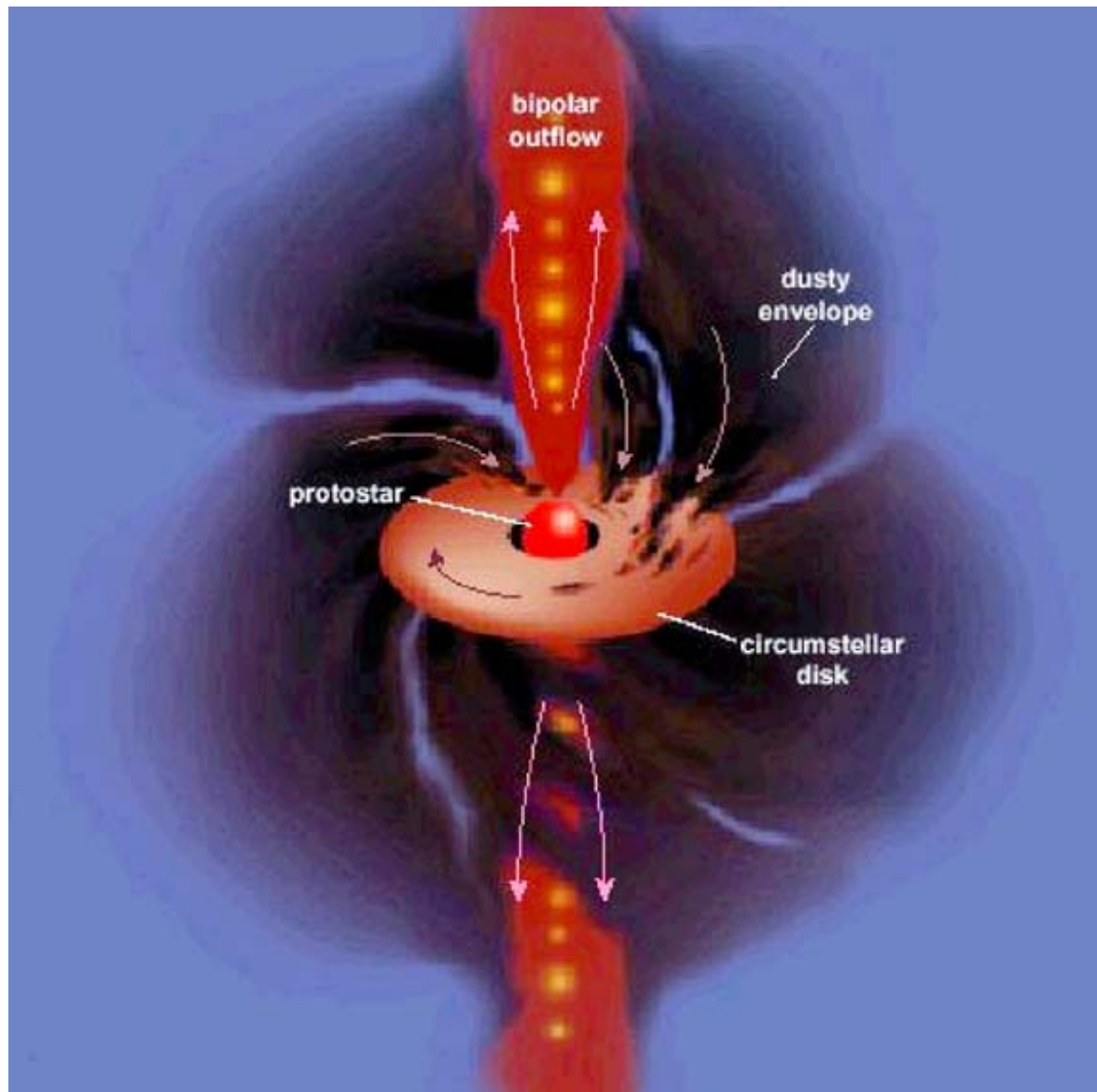
ექსტრაგალაქტიკური ჯეტები
ვარსკვლავური ჯეტები (პეზრიკ-ჰარო ობიექტები)



კოლიმაცია
„ნასკვები“



ახალგაზრდა ვარსკვლავური ჭავლური დინებები (ჯეტები)



გალაქტიკური დინებები



სპირალური სტრუქტურა

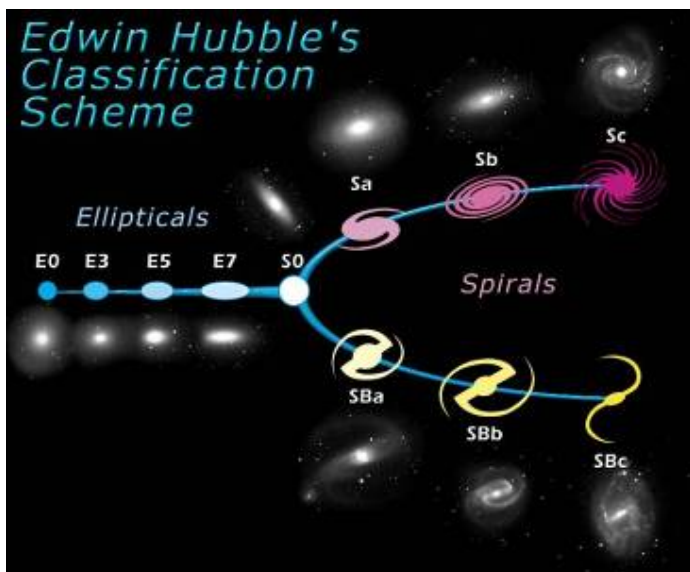
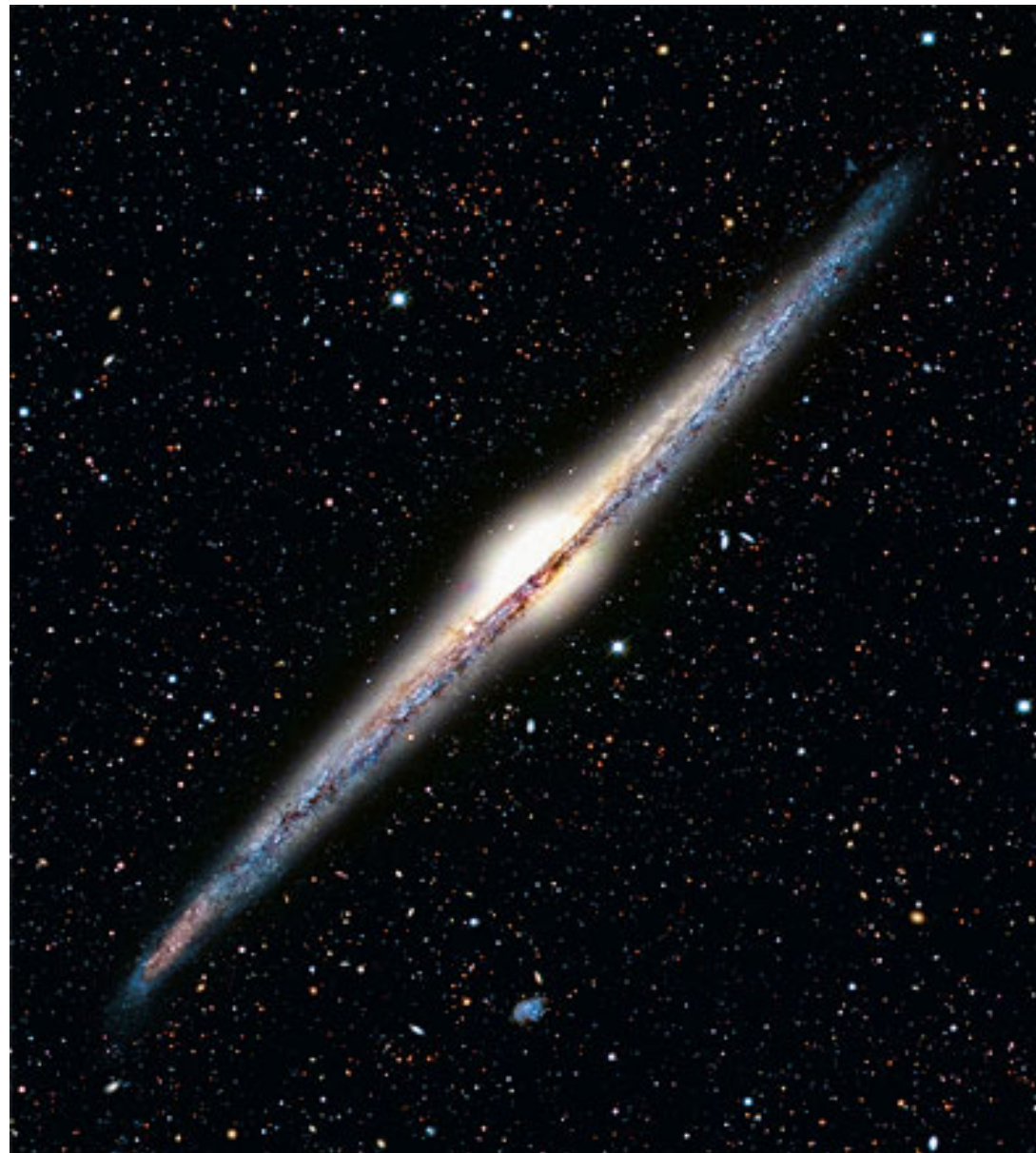
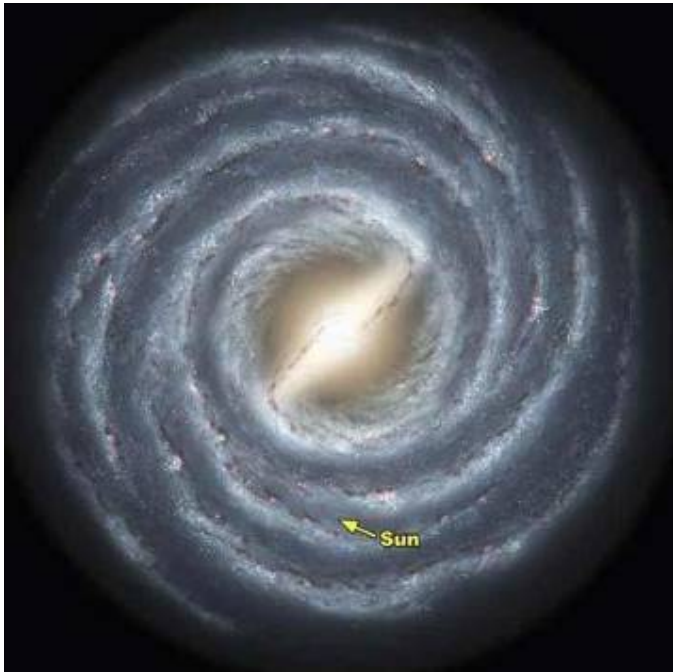
ცენტრალური მართკუთხედი (bar)

ბრუნვის საწინააღმდეგოდ
დახვეული სპირალები



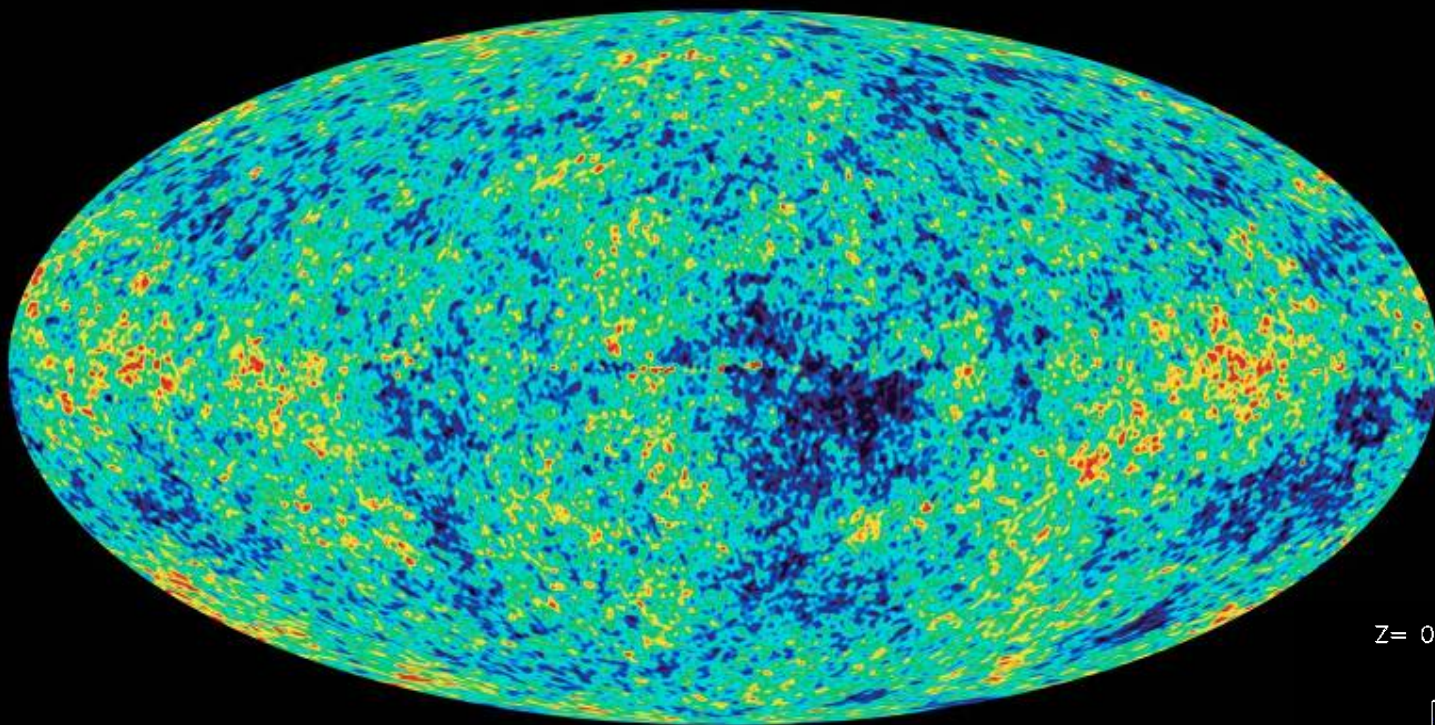
ირმის ნახტომი რეკონსტრუქცია

გალაქტიკური დინებები

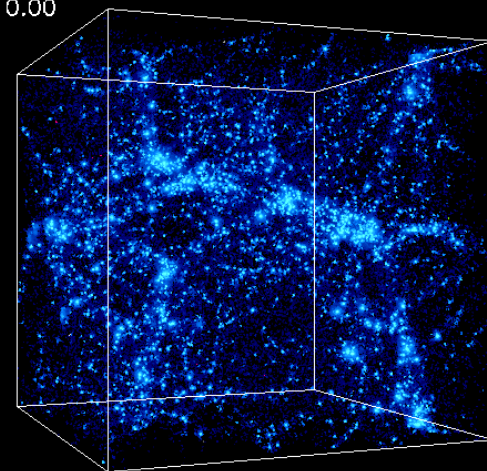


კოსმოლოგიური მასშტაბები

გალაქტიკების
კლასტერები



$z = 0.00$



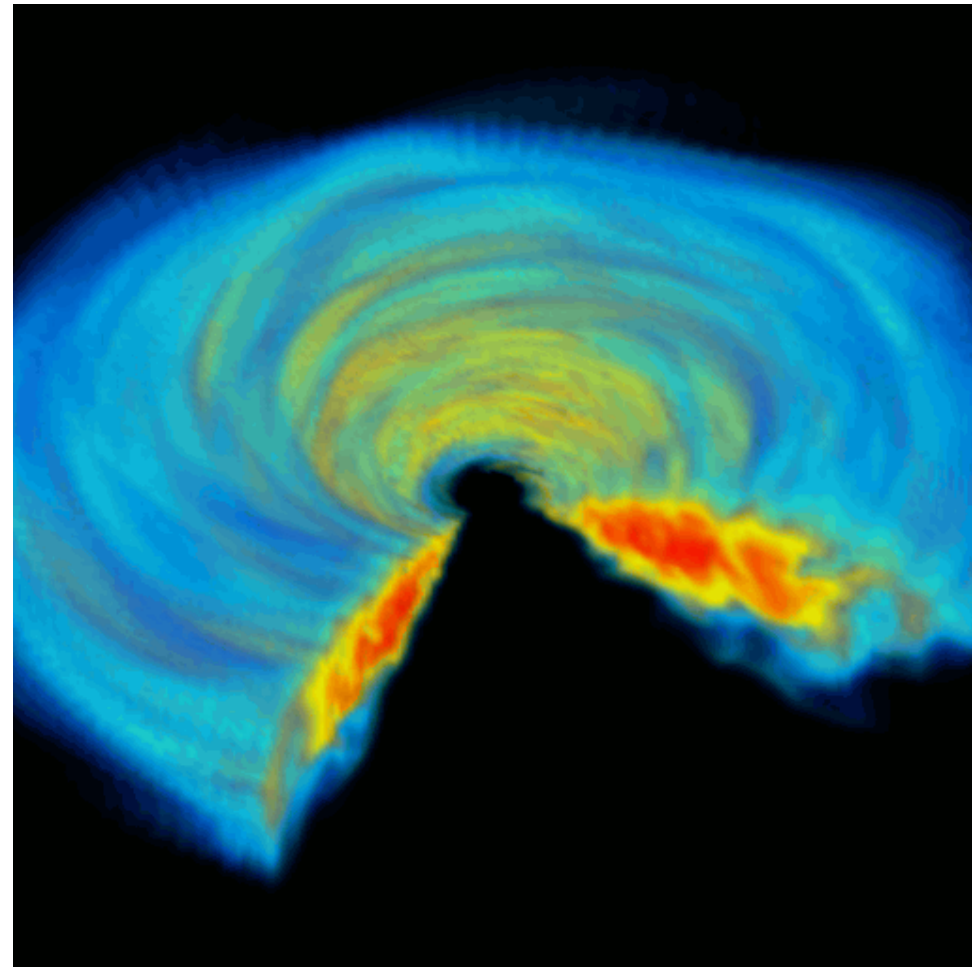
ტურბულენტობა

ქაოსი



Leonardo's imagery of falling water (1508-09)

[Source: <http://www.visi.com/~reuteler/leonardo.html>]



ტურბულენტობა

განვითარებული ტურბულენტობა: ქაოსი

– სტატისტიკური აღწერა:
კოლმოგოროვის თეორია

– ფენომენოლოგიური აღწერა:
ანომალური სიბლანტე (ალფა მოდელი)

ტურბულენტობაზე გადასვლა:

- არამდგრადობები;
- ენერგიის წყარო;

უწყვეტი გარემოს ფიზიკა

„უწყვეტი გარემო“

Knudsen Number

კოლექტიური მოვლენები

$$\frac{\ell}{L} \ll 0.1$$

უწყვეტი გარემოს ფიზიკა

ძირითადი განტოლებები:

მასის უწყვეტობის განტოლება;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0,$$

იმპულსის შენახვა; (მოძრაობის განტოლება)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} + \frac{\partial m_{ij}}{\partial x_j}.$$

$$m_{ij} = B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B_k B_k.$$

ენერგიის შენახვა; (თერმოდინამიკური მდგომარეობის განტოლება)

$$\rho T \frac{DS}{Dt} = -\operatorname{div} \mathbf{h} + \epsilon.$$

$$\mathbf{h} = -\lambda \nabla T,$$

მასის მუდმივობა

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0$$

იმპულსის მუდმივობა

$$\rho \left\{ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right\} = -\nabla P + \nabla \Phi$$

$$\Phi = G \frac{M}{r^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} m_{ij} = B_i B_j - \delta_{ij} B_k B_k$$

მდგომარეობის განტოლება

$$p = p(\rho, S)$$

$$\underline{dp} = \underbrace{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_S}_{\text{I}} d\rho + \underbrace{\left(\frac{\partial p}{\partial S} \right)_\rho}_{\text{II}} dS$$

I
 II

c_s^2
 β/c_v

$$dp = c_s^2 d\rho$$

მიახლოებები

უკუმშვადი მიახლოება;
ადიაბატური კუმშვადობა;
ბაროტროპული მიახლოება;
MHD;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0$$

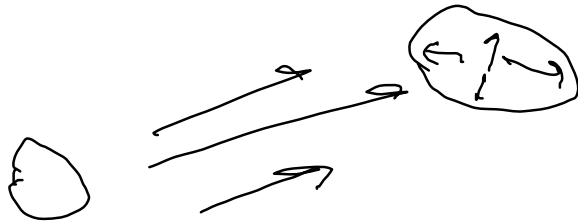
$$\operatorname{div}(\vec{v}) = 0$$

$$p = c_s^2 \rho$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \rho = 0$$

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \right\} \rho = 0$$

ეილერის და ლაგრანჟის სისტემები



$$\frac{d}{dt} \rightarrow \left\{ \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \right\} \equiv \frac{D}{Dt}$$

$$m \vec{a} = \vec{F} \quad \text{or} \quad \rho \vec{a} = \vec{f}$$

$$\rho \frac{D \vec{v}}{Dt} = \sum_i \vec{f}_i \quad \left| \quad \rho \left\{ \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \right\} \vec{v} = -\nabla p + \sum_i \vec{f}_i \right.$$

კონვექციური წარმოებული

არამდგრადობების ფიზიკა

განტოლების ამონახსნები

წრფივ შეშფოთებათა ანალიზი;

წრფივი მოდელები

მდრადობა და არამდგრადობა

ზრდის ინკრიმენტი

დინამიკური არამდგრადობები

ჰიდროდინამიკური არამდგრადობები

- თერმული (ტემპერატურის გრადიენტები, კონვექცია);
- ბრუნვითი (ცენტრიფუგული ძალები);
- გრავიტაციული ჯინსის (კუმშვადობა, თვითგრავიტაცია);
- კელვინ–ჰელმჰოლცის (სიჩქარის წანაცვლება);

მაგნიტური არამდგრადობები

- პარკერი (მაგნიტური ტივტივადობა)
- მაგნიტობრუნვითი (დიფერენციალური ბრუნვა და მაგნიტური ველი)

უგანზომილებო რიცხვები

რეინოლდსის რიცხვი:

$$Re = U L / \nu$$

პრანდტლის რიცხვი:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\text{viscous diffusion rate}}{\text{thermal diffusion rate}} = \frac{c_p \mu}{k}$$

რეილის რიცხვი:

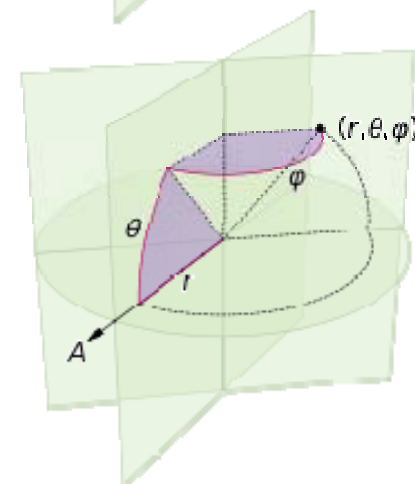
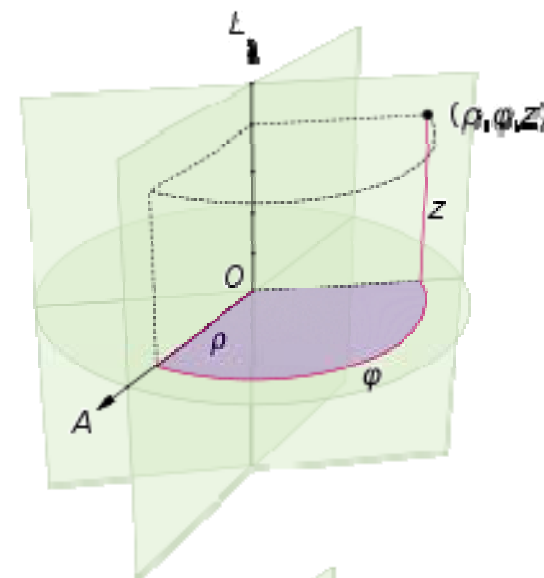
$$Ra = \frac{g \alpha \Delta T d^3}{\nu \kappa},$$

მრუდწირული კოორდინატთა სისტემები

პოლარული: (r, φ)

ცილინდრული: (r, φ, z)

სფერული: (r, φ, θ)



ცილინდრული კოორდინატთა სისტემა

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0.$$

$$r: \quad \rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\phi}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\phi^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} \right] + \rho g_r$$

$$\phi: \quad \rho \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\phi}{\partial r} + \frac{u_\phi}{r} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} + u_z \frac{\partial u_\phi}{\partial z} + \frac{u_r u_\phi}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial z^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} - \frac{u_\phi}{r^2} \right] + \rho g_\phi$$

$$z: \quad \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\phi}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \phi} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z.$$

სფერულ კოორდინატთა სისტემა

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u_r) + \frac{1}{r \sin(\theta)} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} + \frac{1}{r \sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin(\theta) u_\theta) = 0.$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\phi}{r \sin(\theta)} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\phi^2 + u_\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r +$$

$$\mu \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin(\theta)^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \phi^2} + \frac{1}{r^2 \sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) - 2 \frac{u_r + \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_\theta \cot(\theta)}{r^2} - \frac{2}{r^2 \sin(\theta)} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} \right]$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\phi}{\partial r} - \frac{u_\phi}{r \sin(\theta)} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\phi}{\partial \theta} + \frac{u_r u_\phi + u_\theta u_\phi \cot(\theta)}{r} \right) = -\frac{1}{r \sin(\theta)} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \rho g_\phi +$$

$$\mu \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial u_\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin(\theta)^2} \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial \phi^2} + \frac{1}{r^2 \sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial u_\phi}{\partial \theta} \right) + \frac{2 \sin(\theta) \frac{\partial u_r}{\partial \phi} + 2 \cos(\theta) \frac{\partial u_\theta}{\partial \phi} - u_\phi}{r^2 \sin(\theta)^2} \right]$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\phi}{r \sin(\theta)} \frac{\partial u_\theta}{\partial \phi} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r u_\theta - u_\phi^2 \cot(\theta)}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho g_\theta +$$

$$\mu \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin(\theta)^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \phi^2} + \frac{1}{r^2 \sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta + 2 \cos(\theta) \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi}}{r^2 \sin(\theta)^2} \right].$$

