შესავალი

www.tevza.org/home/course/AF2016/

შესწავლის ობიექტები

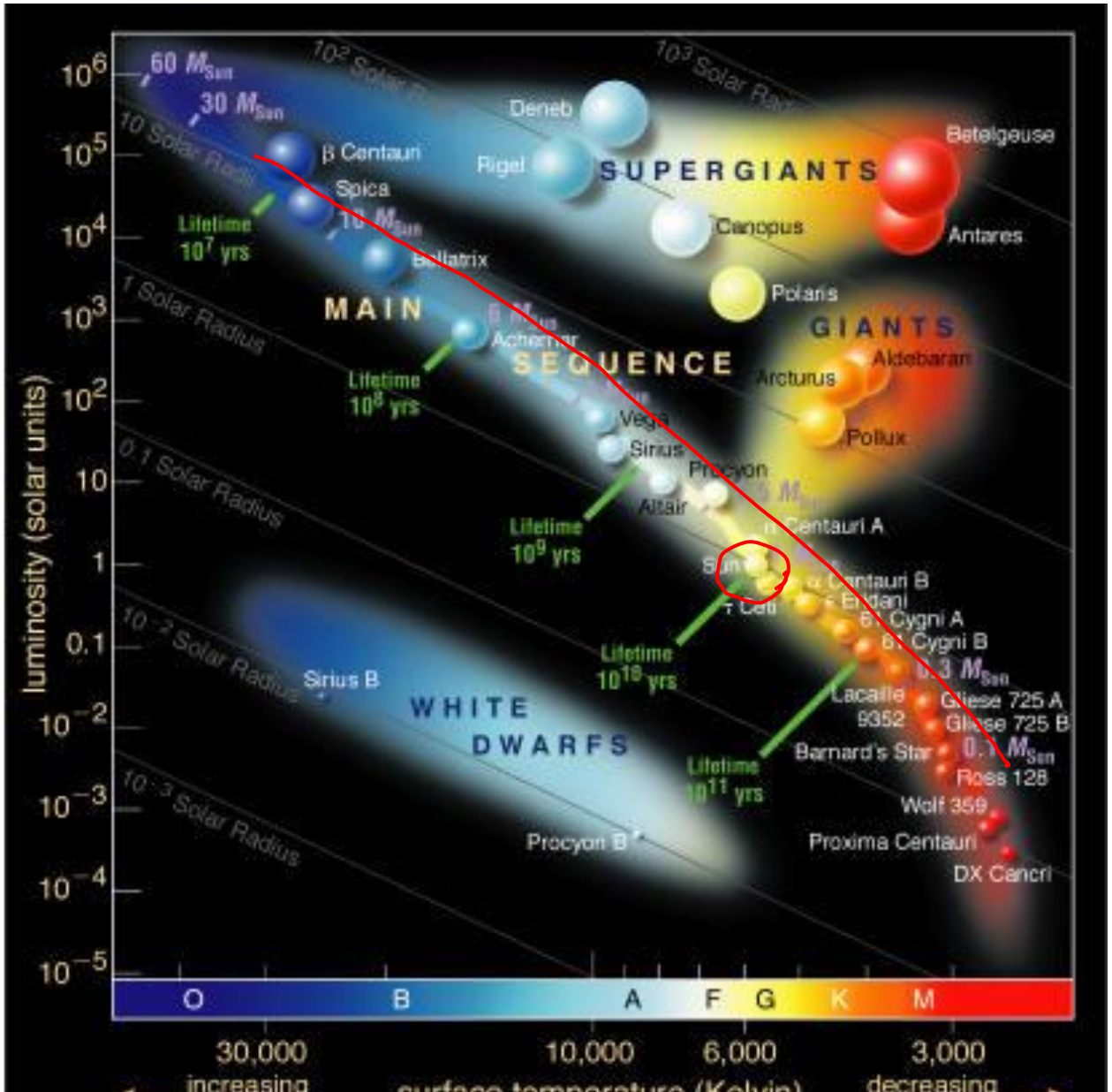
– თვითგრავიტაცია და გრავ. კლასტერიზაცია;
– ვარსკვლავების სტრუქტურა წონასწორობაში;
– მზის და ვარსკვლავების კონვექცია, ატმოსფეროს და კორონალური დინებები;
– ვარსკვლავური ოსცილაციები;
– ზეახალის აფეთქების დარტყმითი ტალღები;
– აკრეცია: აკრეციული დისკები;
– პროტოპლანეტური დისკები;
– ახალგაზრდა ვარსკვლავური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

ვარსკვლავების სტრუქტურა წონასწორობაში

ძირითადი
თანმიმდევრობის
ვარსკვლავები

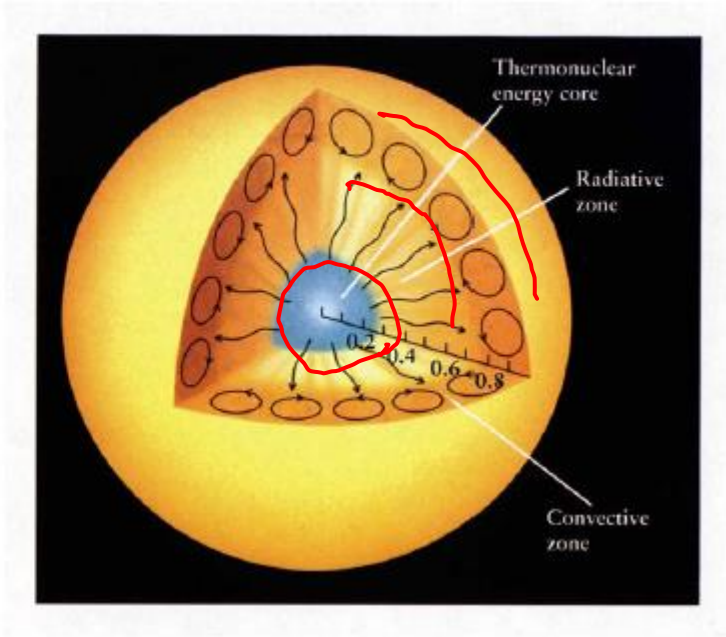
ჰერცშპრუნგ-რასელის
დიაგრამა

მაგალითი:
მზე

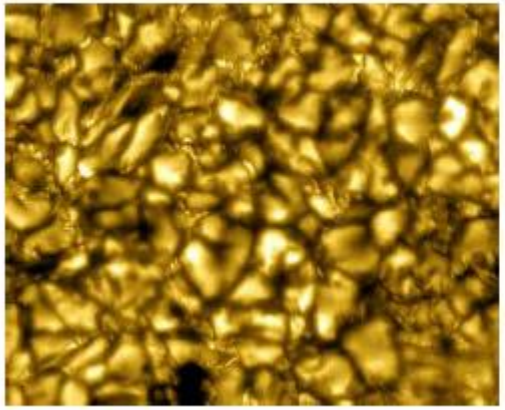


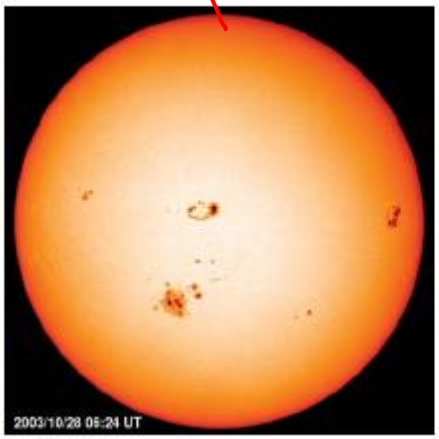
ვარსკვლავების სტრუქტურა წონასწორობაში

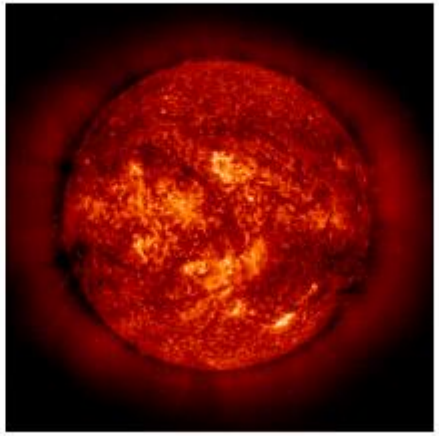
– კონვექციური ზონა;
– ატმოსფერო;

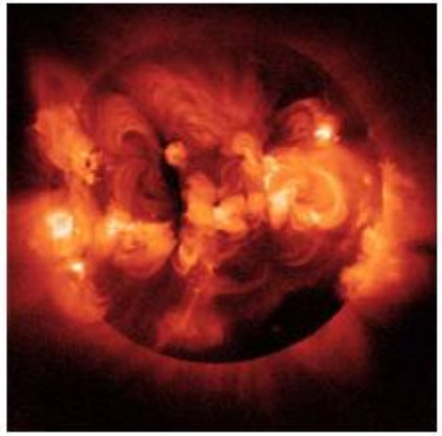


კონვექციური გრანულაცია;
ფოტოსფერო;
ქრომოსფერო;
კორონა;



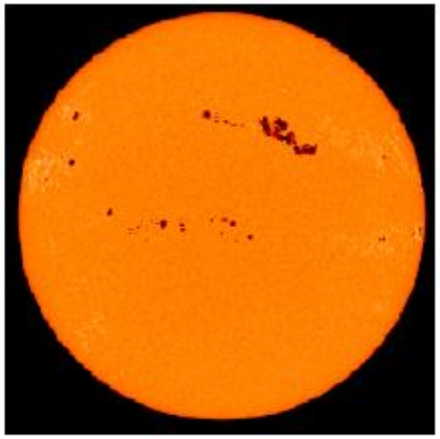


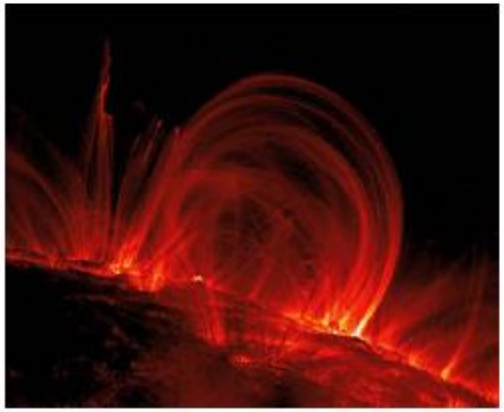


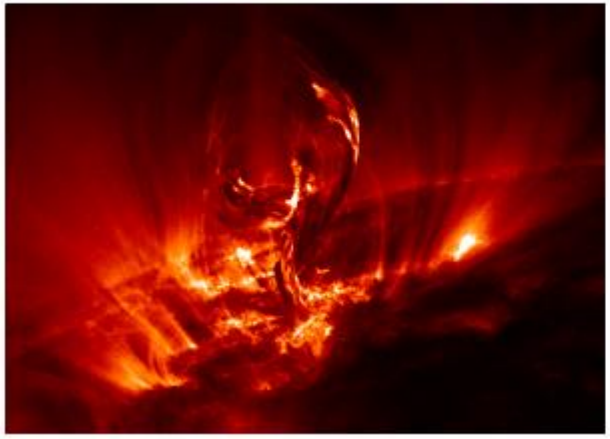


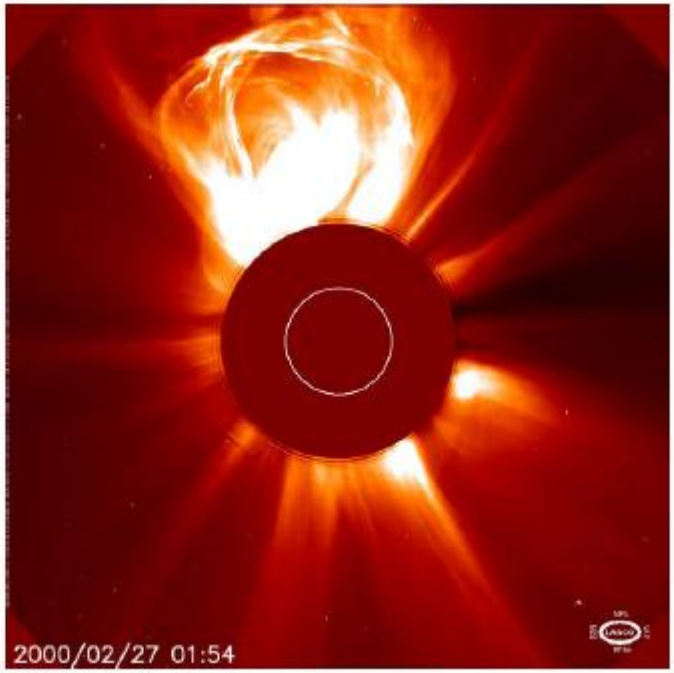
მზის და ვარსკვლავების კონვექცია, ატმოსფეროს და კორონალური დიებები

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



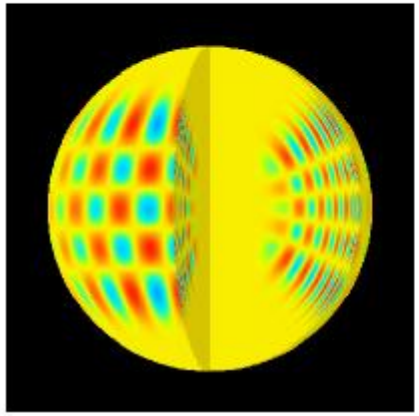


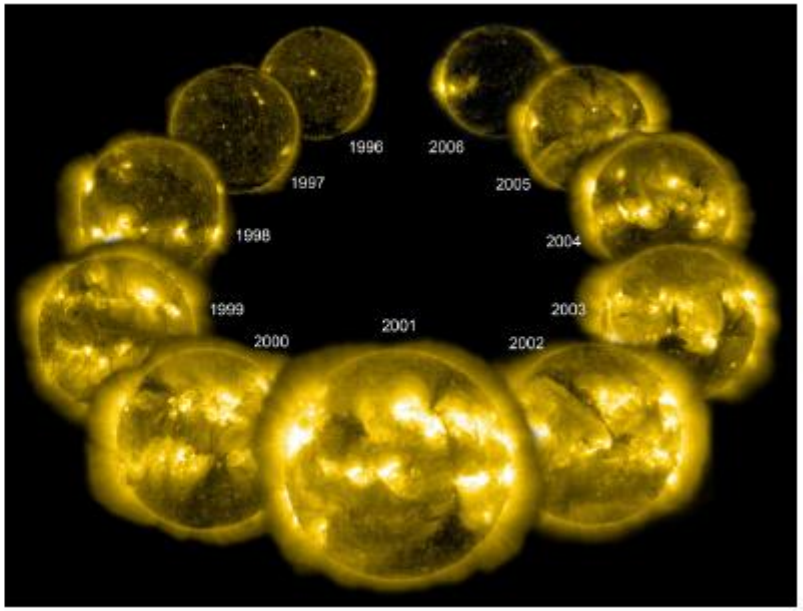


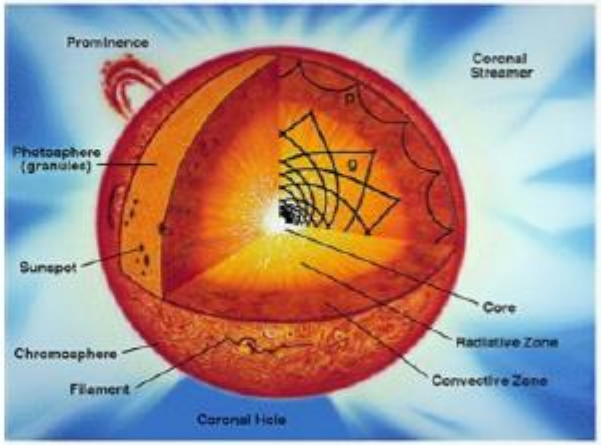


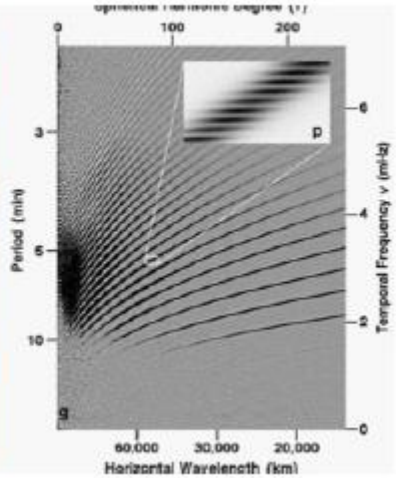
ვარსკვლავური ოსცილაციები

მზის 22 წლიანი ციკლი;
P–მოდები და ჰელიოსეისმოლოგია;





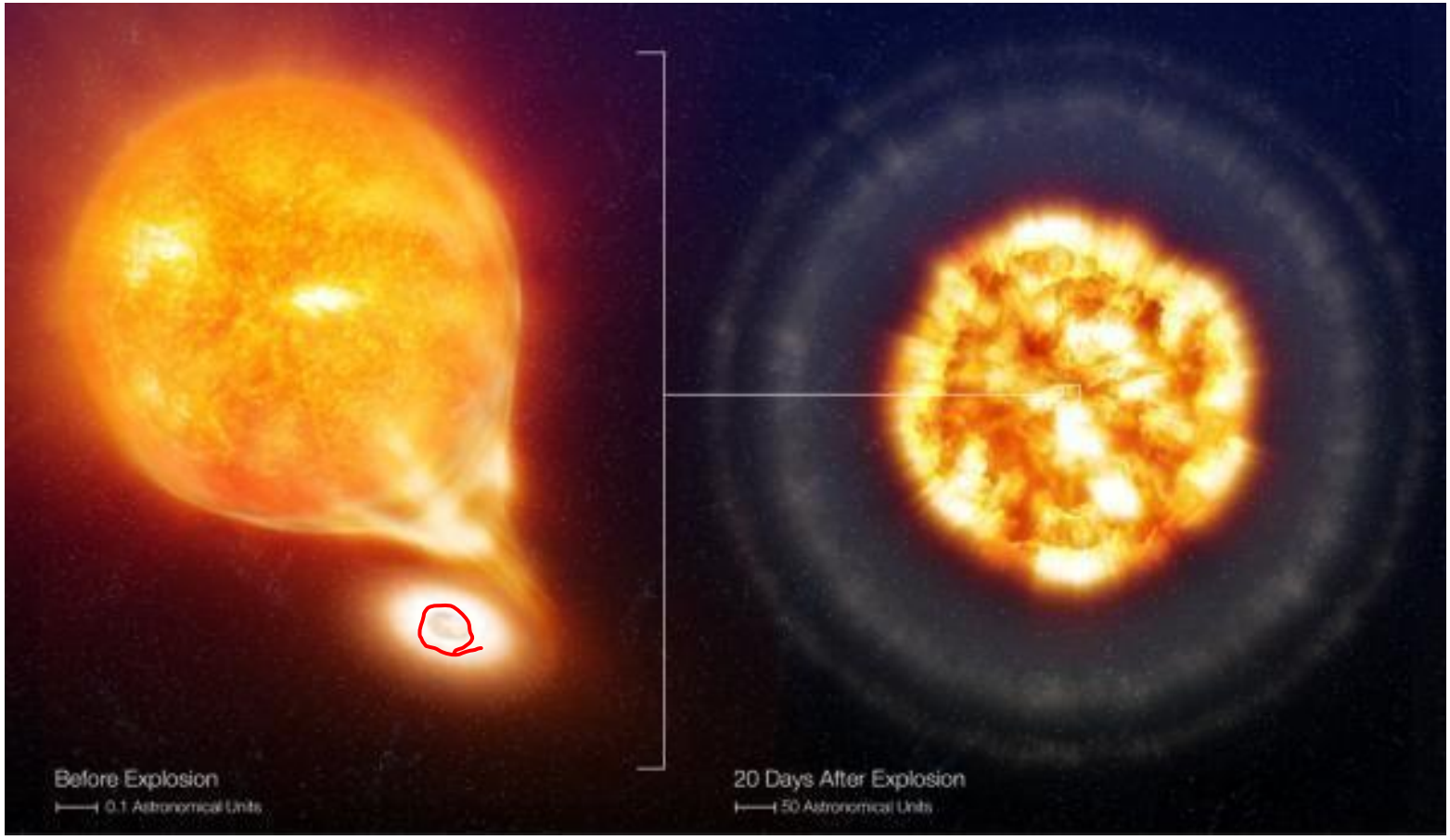




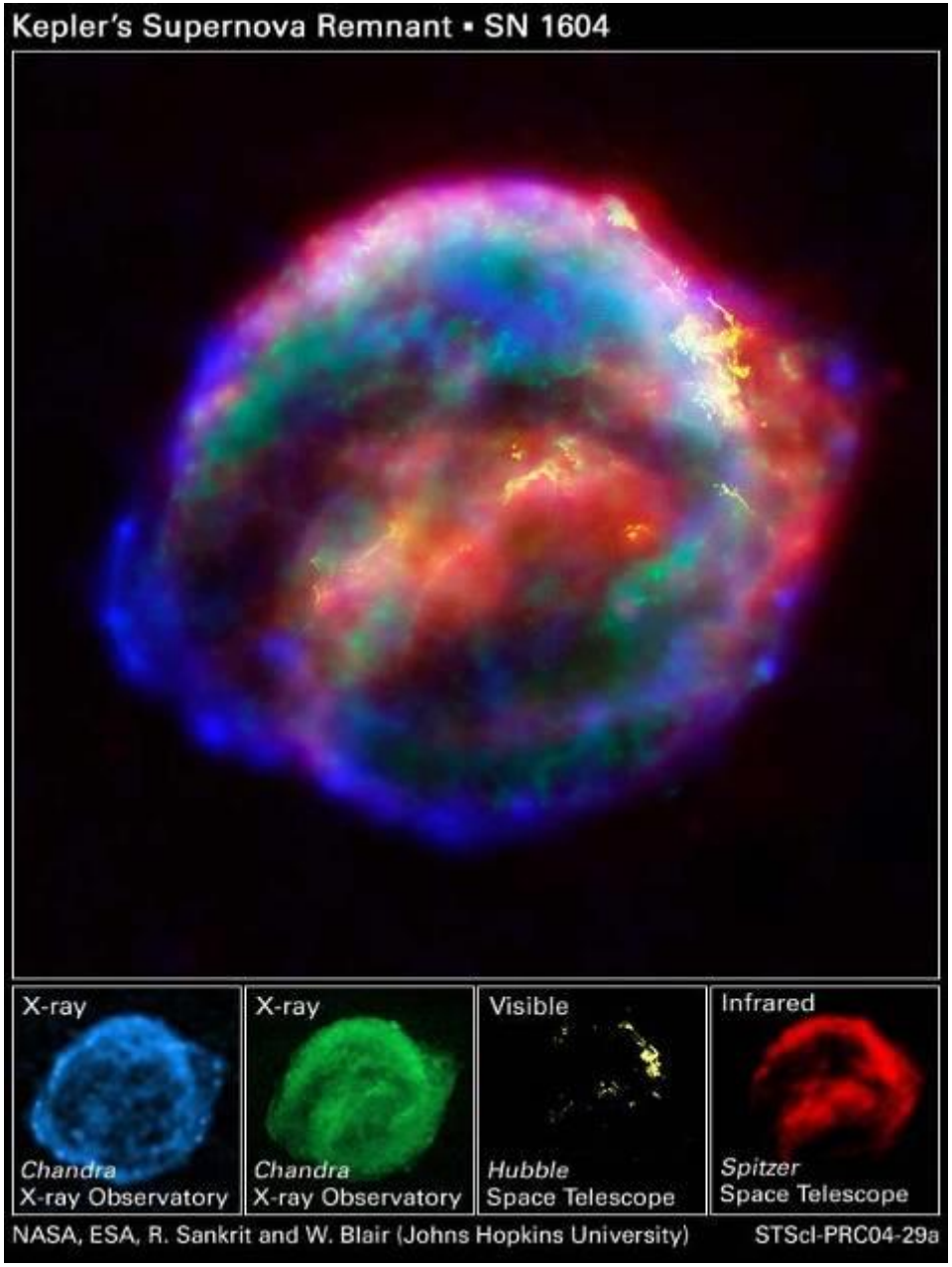
+ ცეფეიდები

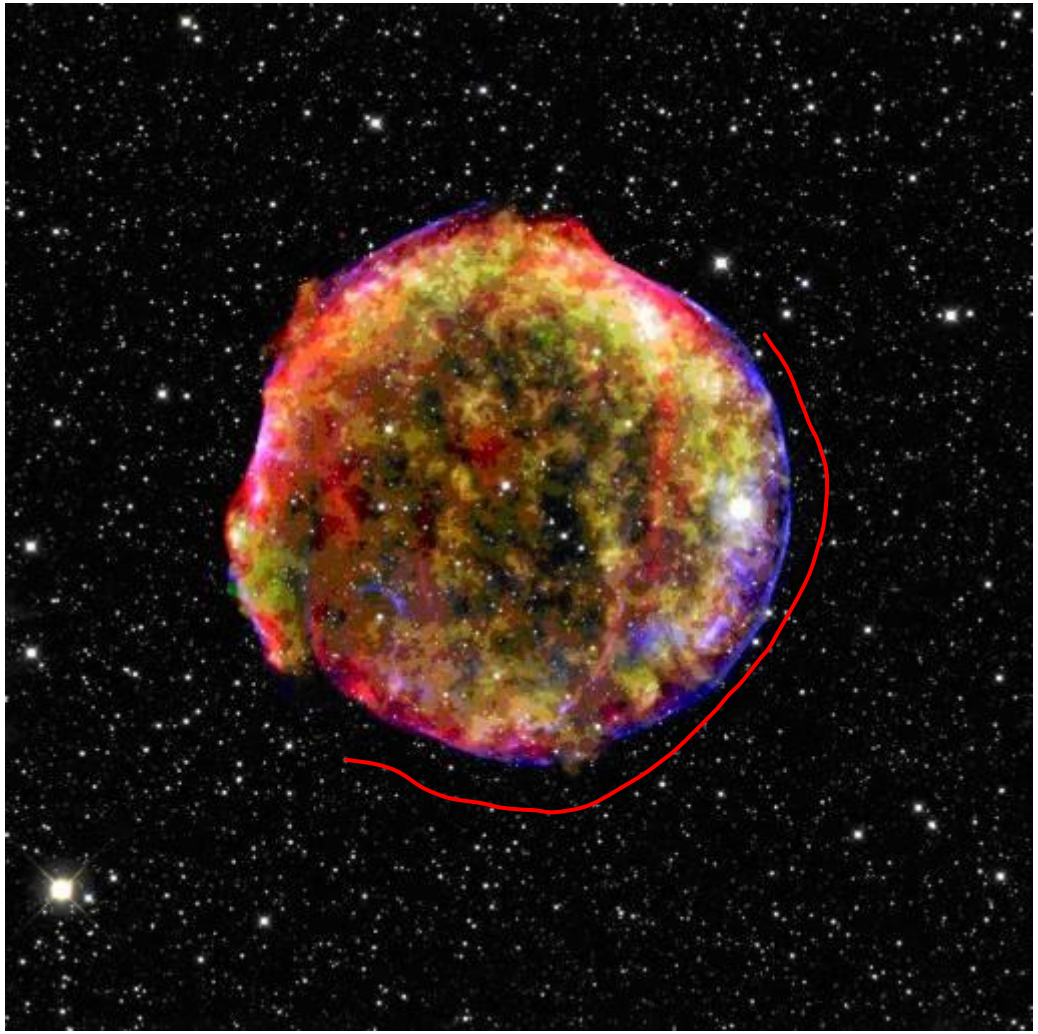
ზეახალის აფეთქების დარტყმითი ტალღები

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

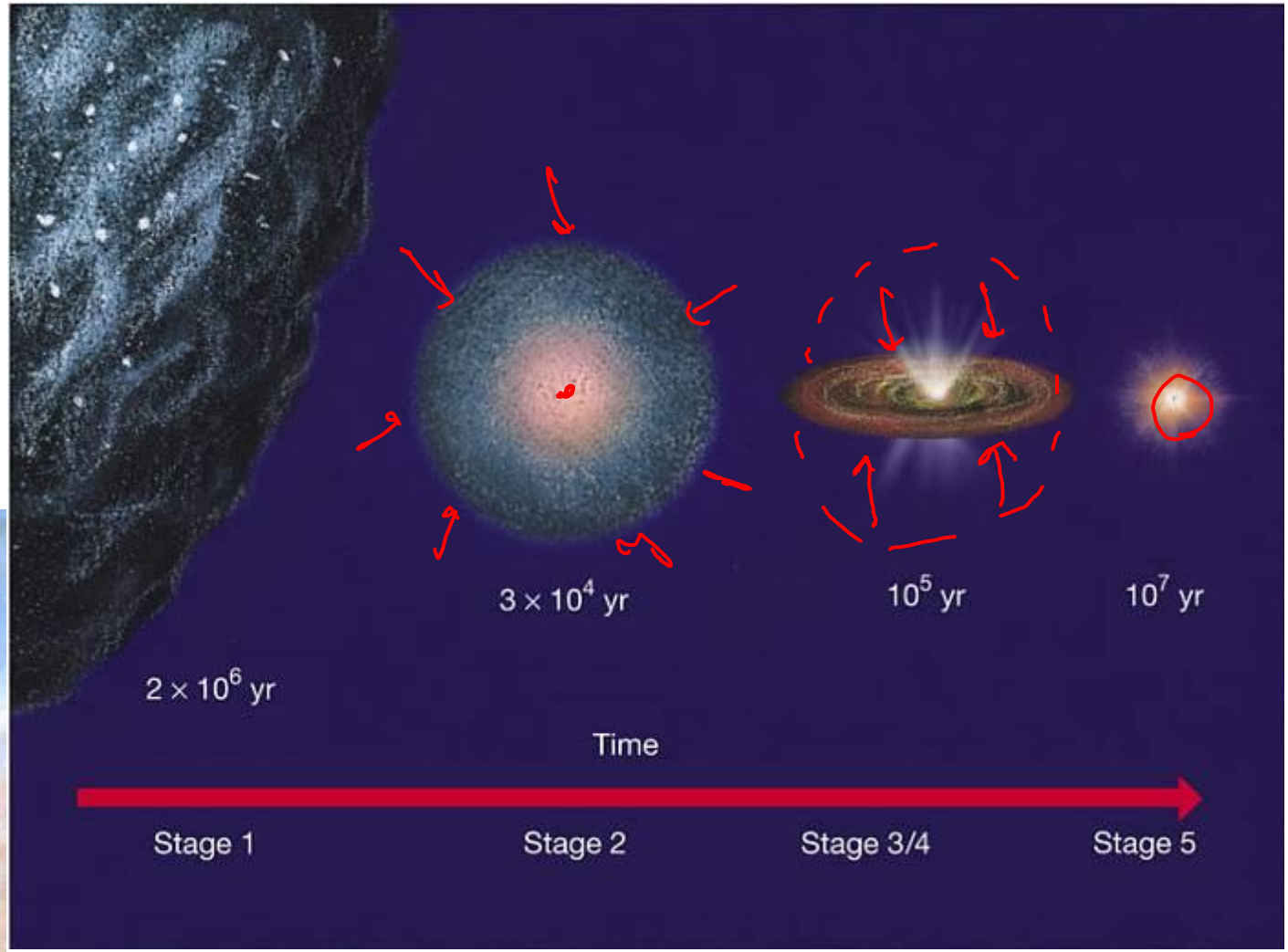


ზეახალის აფეთქების დარტყმითი ტალღები



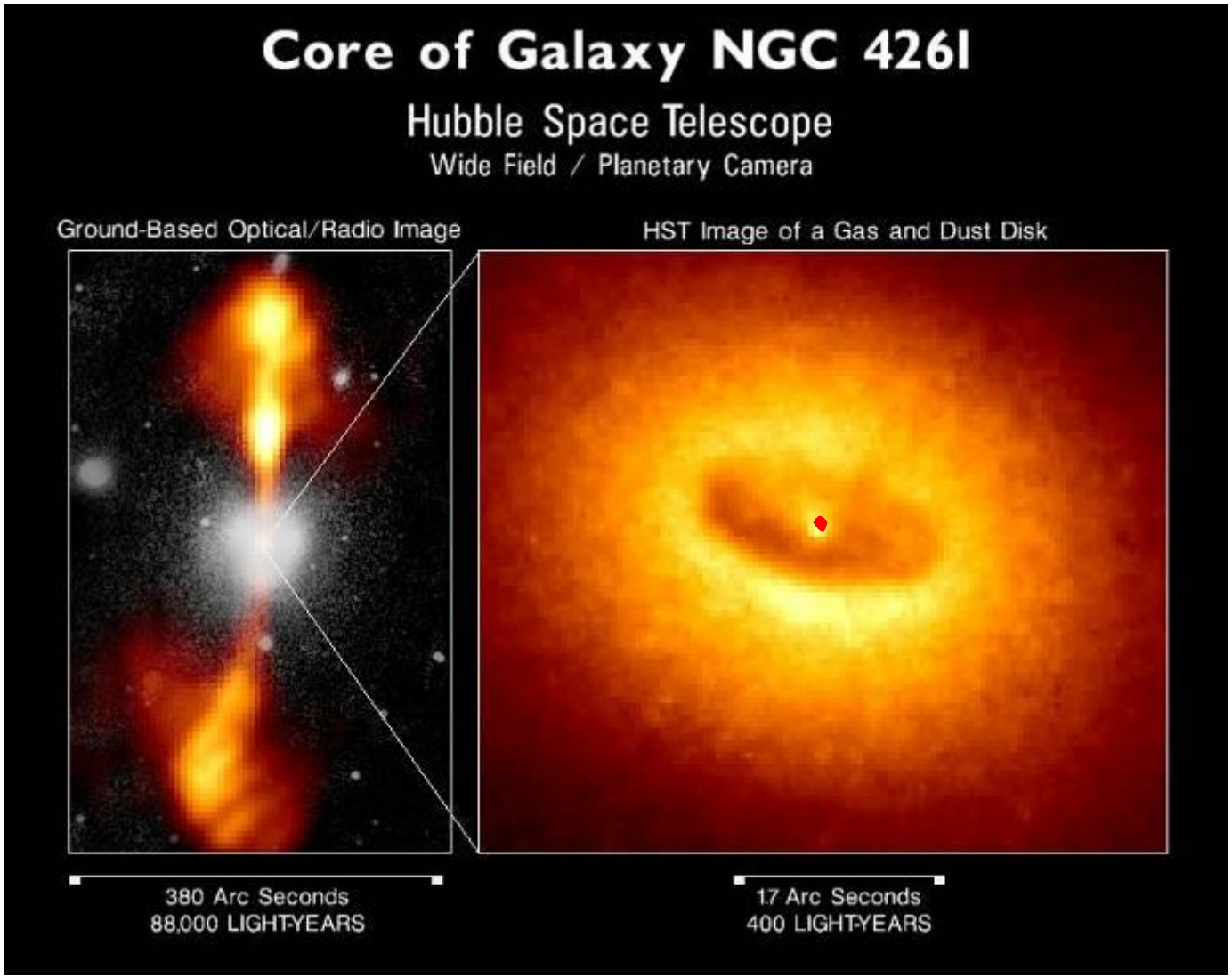


აკრეცია: აკრეციული დისკები

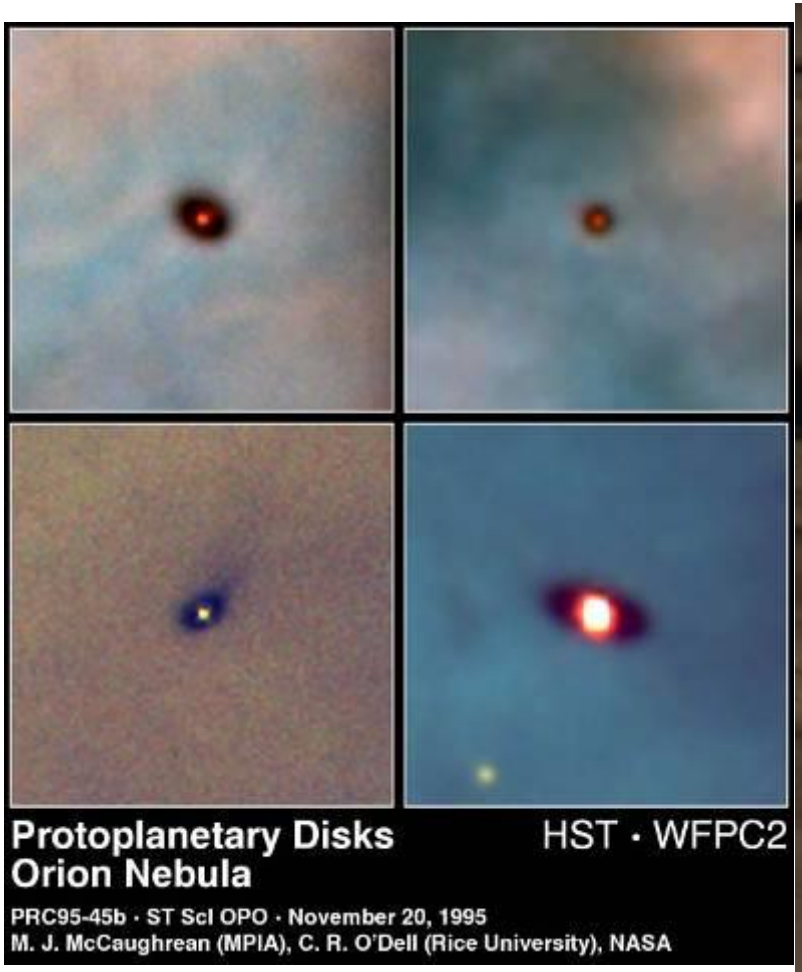


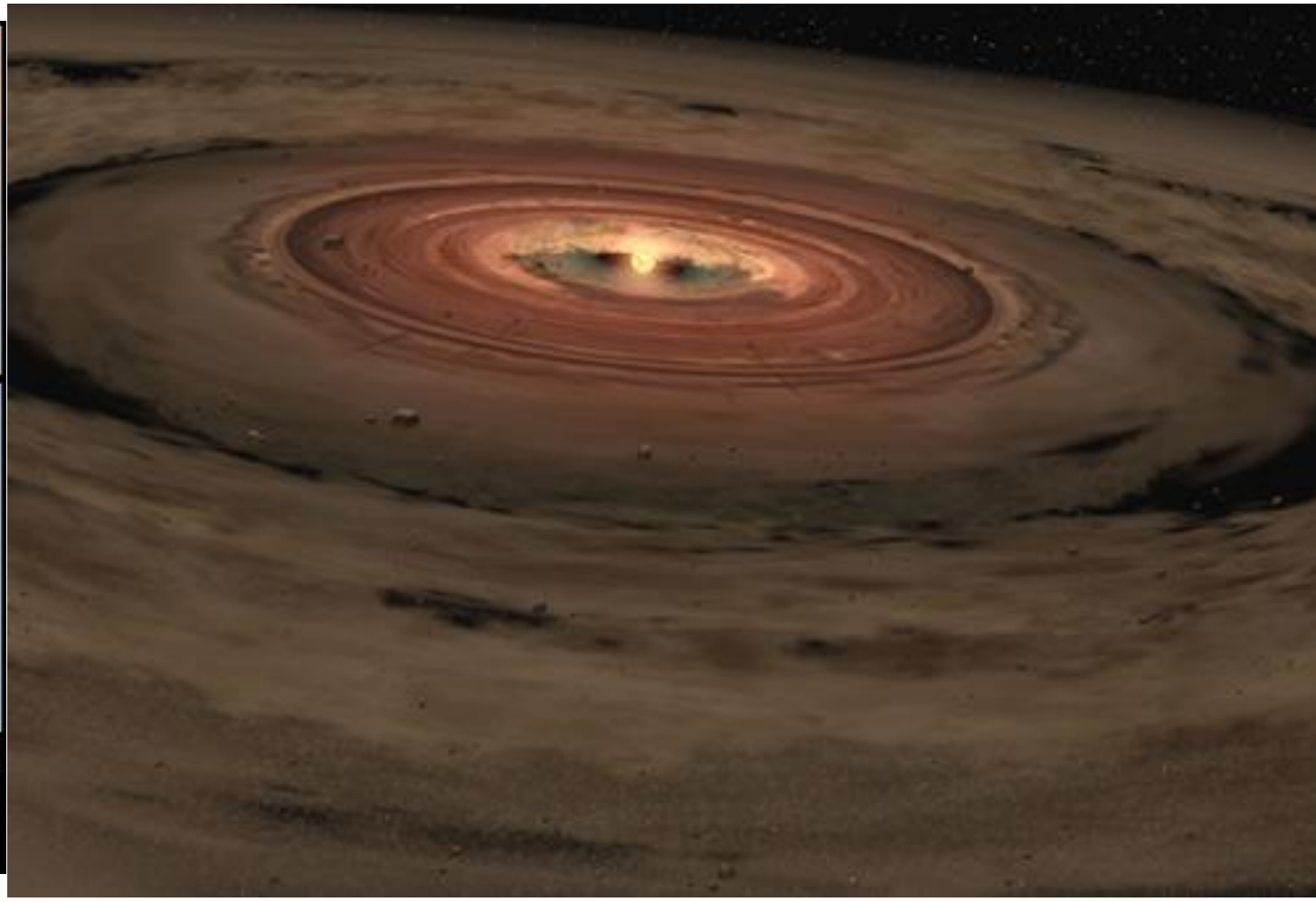
აკრეცია: აკრეციული დისკები

ენერგიის წყარო;
კვაზარები; აქტიური გალაქტიკის ბირთვები;



პროტოპლანეტური დისკები

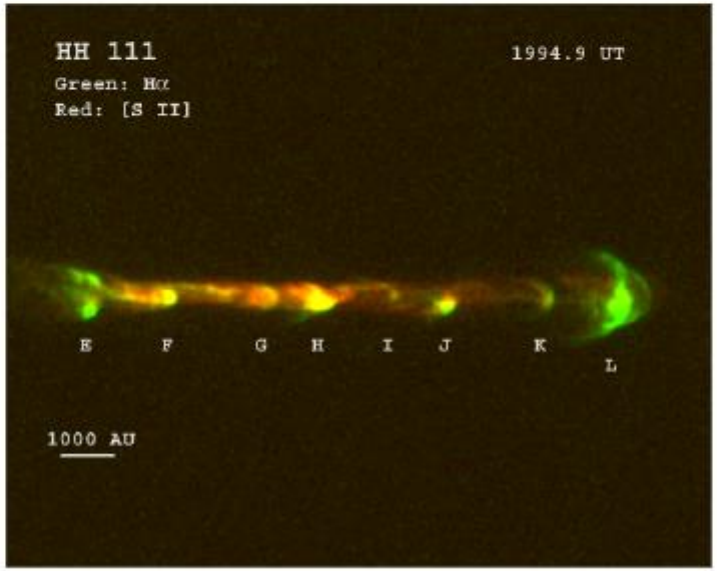




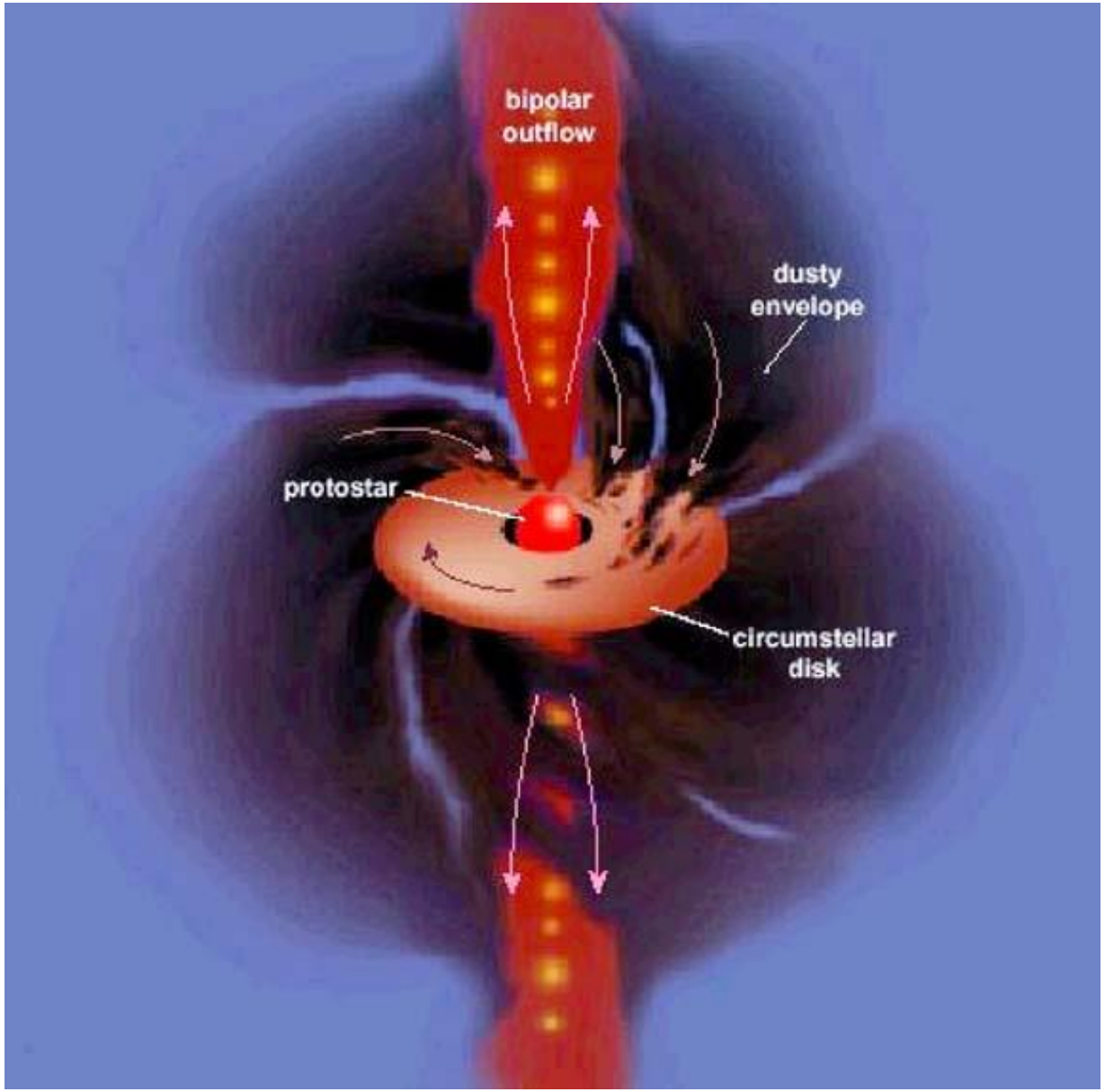
ახალგაზრდა ვარსკვლავური ჭავლური დინებები (ჯეტები)

ექსტრაგალაქტიკური ჯეტები
ვარსკვლავური ჯეტები (ჰებრიჰ–ჰარო ობიექტები)

კოლიმაცია
„ნასკვები“



ახალგაზრდა ვარსკვლავური ჭავლური დინებები (ჯეტები)

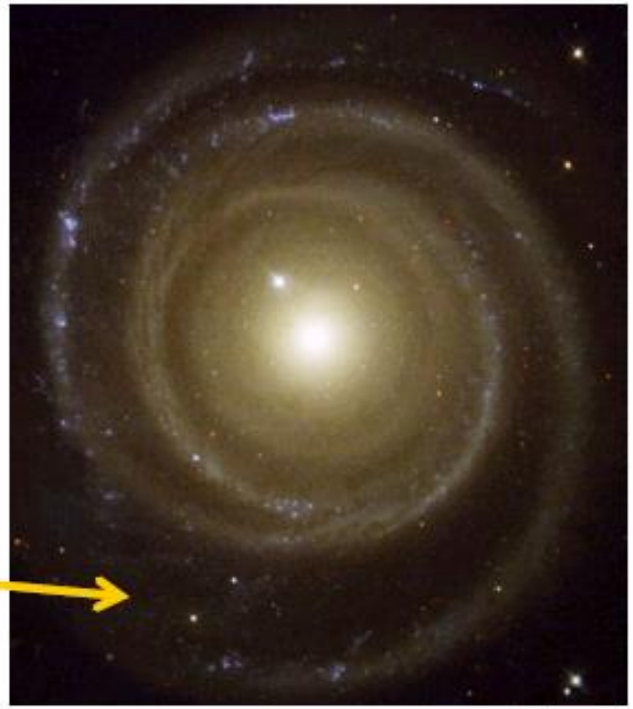


გალაქტიკური დინებები

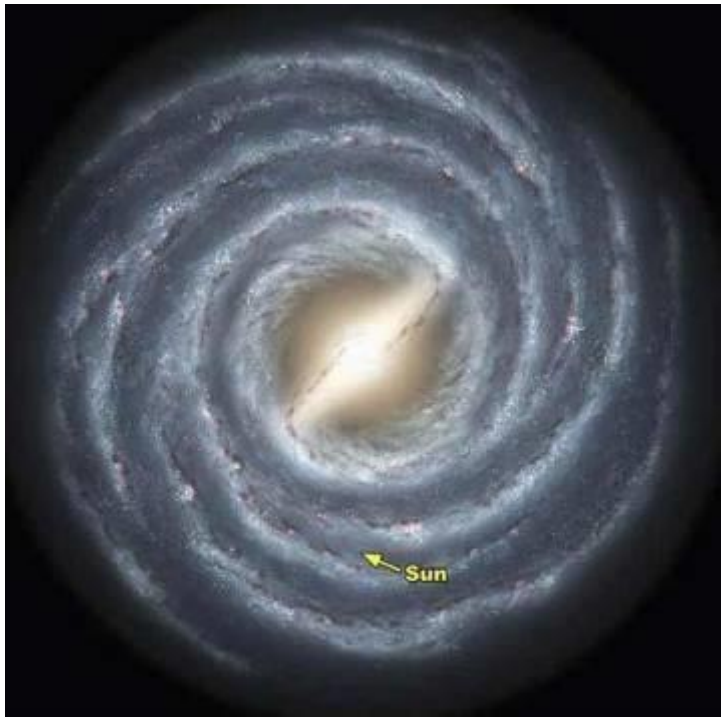
სპირალური სტრუქტურა

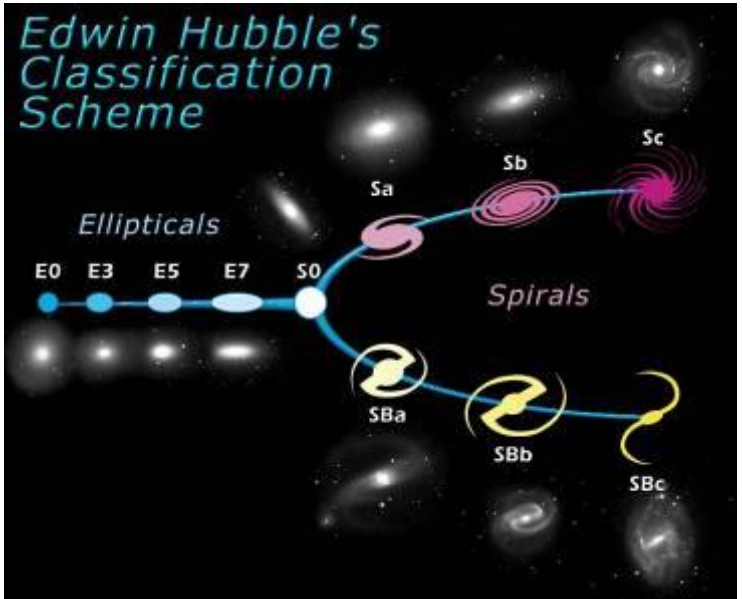
ცენტრალური მართკუთხედი (bar)

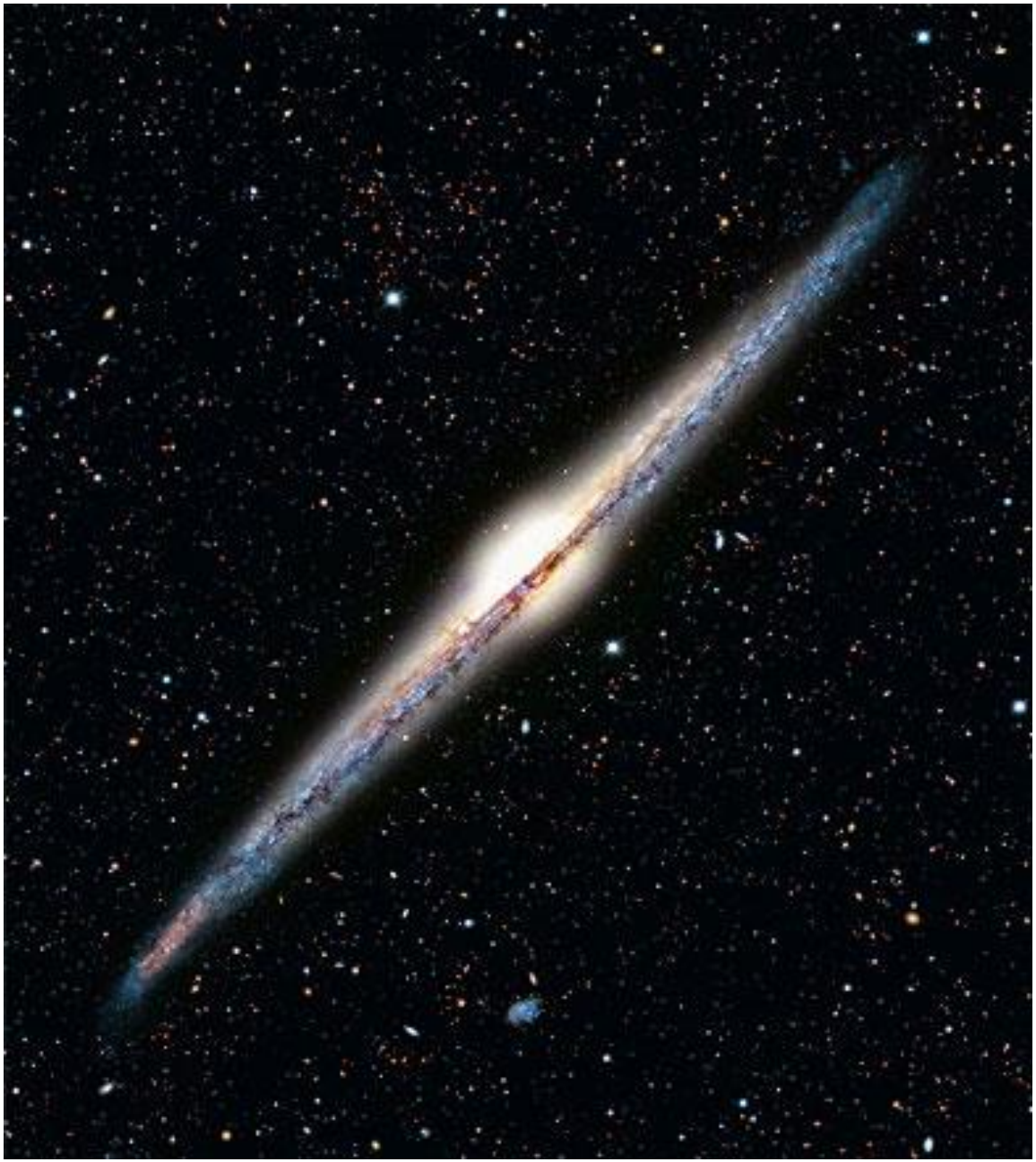
ბრუნვის საწინააღმდეგოდ
დახვეული სპირალები



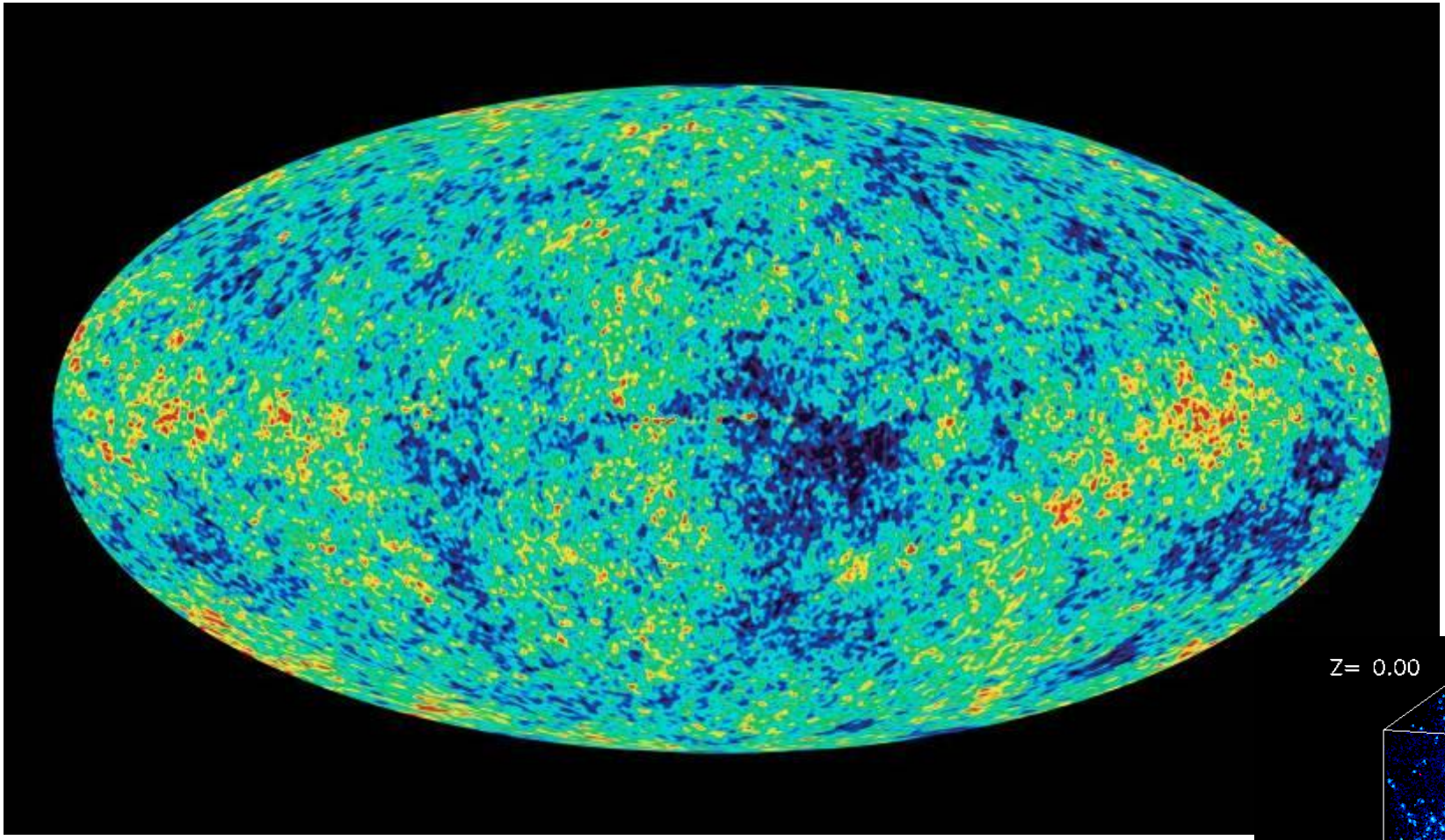
გალაქტიკური დინებები



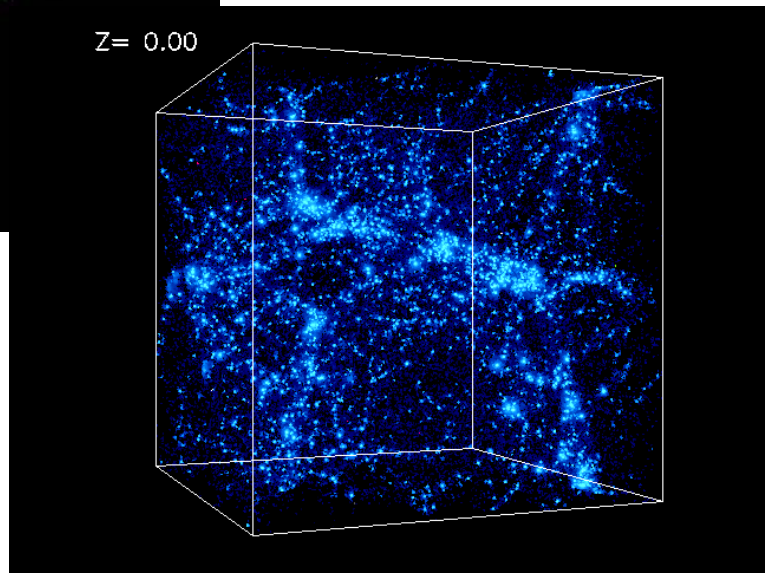




კოსმოლოგიური მასშტაბები

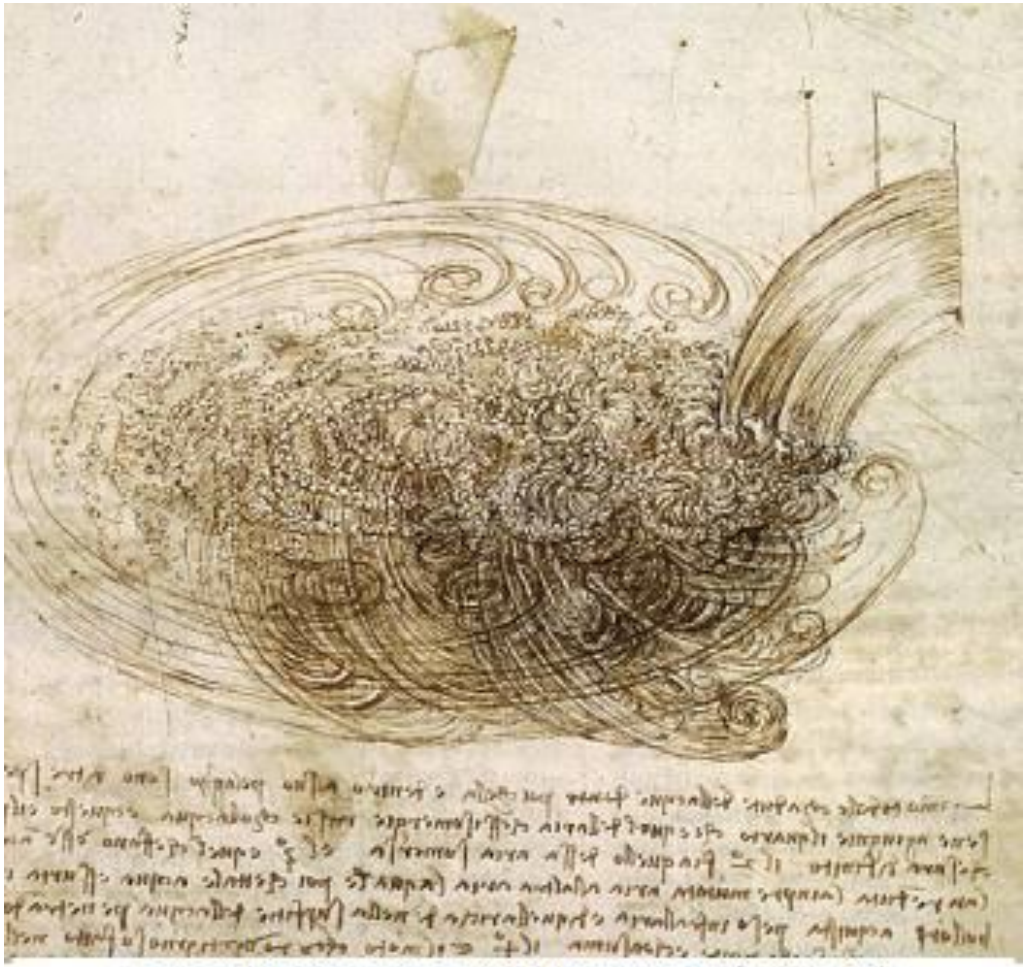


გალაქტიკების
კლასტერები

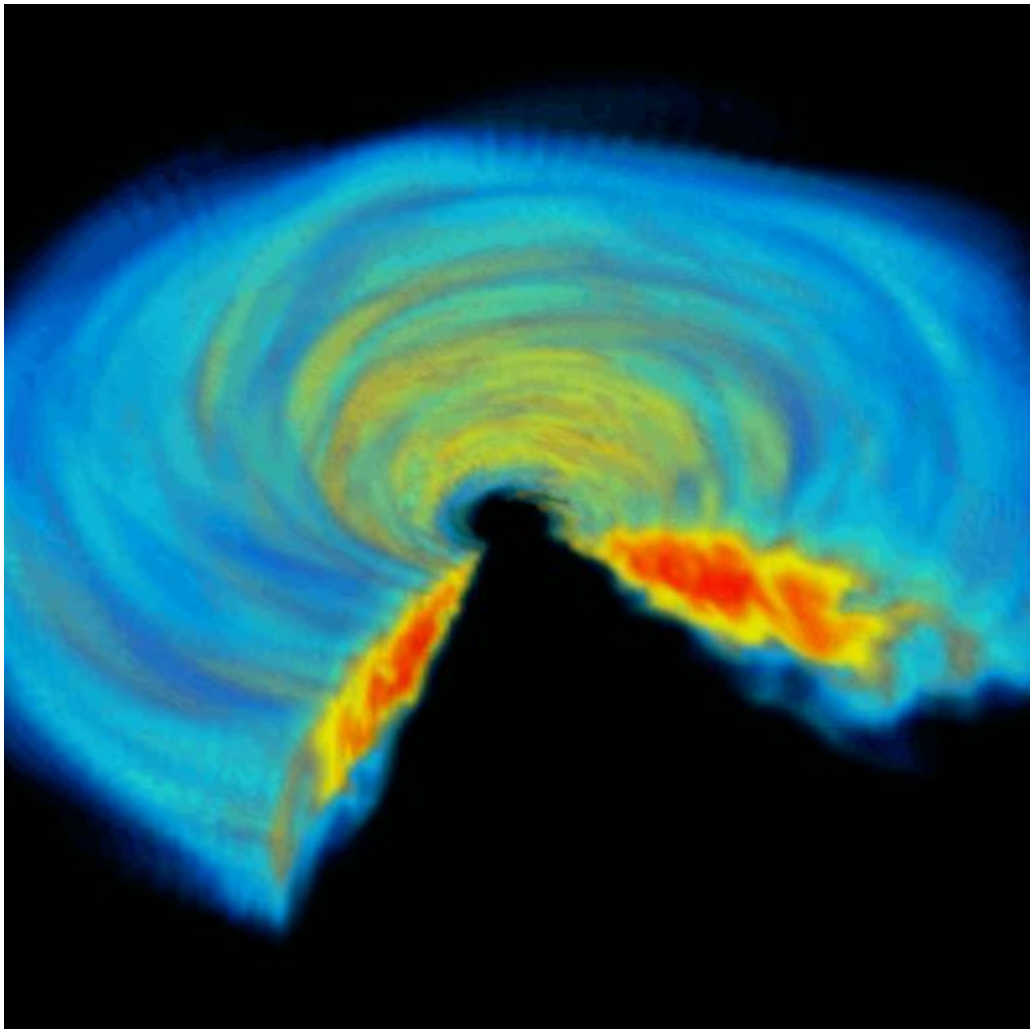


ტურბულენტობა

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;

უწვეტი გარემოს ფიზიკა

უწყვეტობის განტოლება - მასის შენახვა:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0. \qquad \int_V \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho \mathbf{u}) \right\} \mathrm{d}V = 0.$$

იმპულსის შენახვა - მოძრაობის განტოლება:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = f_i + \frac{\partial}{\partial x_j}[T_{ij}].$$

გრავიტაცია:

$$f_i = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}, \qquad \nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho,$$

მაგნიტური ველი:

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

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

მდგომარეობის განტოლება

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

$$dp = \underbrace{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s}_{c_s^2} d\rho + \underbrace{\left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_\rho}_{\beta/c_v} ds$$

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

მიახლოებები

უკუმშვადი მიახლოება;
ადიაბატური კუმშვადობა;
ბაროტროპული მიახლოება;
MHD;

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

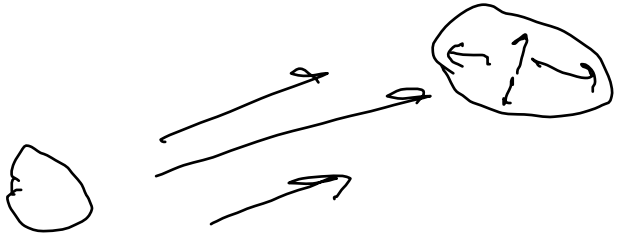
$$\mathrm{div}(\vec{v}) = 0$$

$$p' = c_s^2 \rho'$$

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

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

ეილეის და ლაგრანჟის სისტემები



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

$$m\vec{a} = \vec{F} \quad \Big\| \quad \rho\vec{a} = \vec{f}$$

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

არამდგრდობების ფიზიკა

განტოლების ამონახსნები

წრფივ შეშფოთებათა ანალიზი;
წრფივი მოდები
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

კნუდსენის რიცხვი: $\mathrm{Kn} = \lambda / L$

„უწვეტი გარემო“

მახის რიცხვი: $\mathrm{Ma} = U / c_s$

რეინოლდსის რიცხვი: $\mathrm{Re} = U L / \nu$

$$\mathrm{Kn} = \frac{\mathrm{Ma}}{\mathrm{Re}} \sqrt{\frac{\gamma\pi}{2}}.$$

პრანდტლის რიცხვი:

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

რეილის რიცხვი:

$$\mathrm{Ra}_x = \frac{g\beta}{\nu\alpha}(T_s - T_\infty)x^3 = \mathrm{Gr}_x \mathrm{Pr}$$

სიბლანტე:

$$\mu = \frac{1}{2}\rho\bar{c}\lambda.$$

ბოლცმანის განაწილება:

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8k_BT}{\pi m}}$$

მოლეკულის საშუალო სიჩქარე:

$$\lambda = \frac{\mu}{\rho}\sqrt{\frac{\pi m}{2k_BT}}$$

თავისუფალი განარბენი:

$$\frac{\lambda}{L} = \frac{\mu}{\rho L}\sqrt{\frac{\pi m}{2k_BT}}$$

კნუდსენის რიცხვი:

$$c_s = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{\gamma k_BT}{m}}$$

ბგერის სიჩქარე:

$$\frac{\mathrm{Ma}}{\mathrm{Re}} = \frac{U_\infty/c_s}{\rho U_\infty L/\mu} = \frac{\mu}{\rho L c_s} = \frac{\mu}{\rho L\sqrt{\frac{\gamma k_BT}{m}}} = \frac{\mu}{\rho L}\sqrt{\frac{m}{\gamma k_BT}}$$

$$\mathrm{Kn} = \frac{\mathrm{Ma}}{\mathrm{Re}}\sqrt{\frac{\gamma\pi}{2}}.$$

მაგნიტური რეინოლდსის რიცხვი:

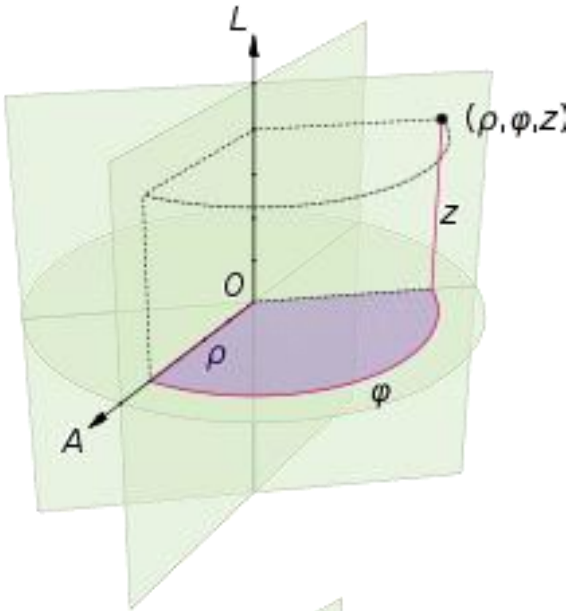
$$\mathrm{R_m} = \frac{UL}{\eta} \sim \frac{\text{induction}}{\text{diffusion}}$$

მაგნიტური პრანდლის რიცხვი:

$$\mathrm{Pr_m} = \frac{\mathrm{Re_m}}{\mathrm{Re}} = \frac{\nu}{\eta} = \frac{\text{viscous diffusion rate}}{\text{magnetic diffusion rate}}$$

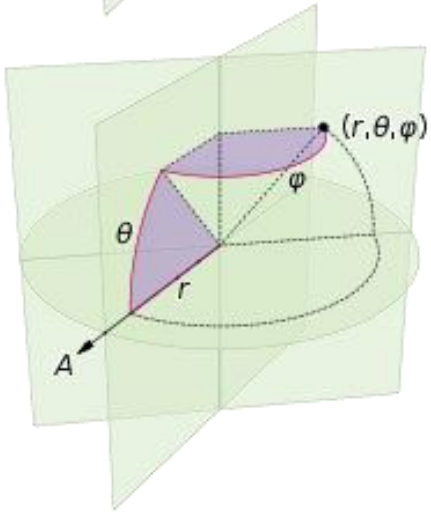
მრუდწირული კოორდინატთა სისტემები

პოლარული: (r, φ)



ცილინდრული: (r, φ, z)

სფერული: (r, φ, θ)



ცილინდრული კორდინატთა სისტემა

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

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

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

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

სფერულ კორდინატთა სისტემა

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

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

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

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

ამოცანები

Pringle, King - 1.9.1, 1.9.2, 1.9.3