

შესავალი

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

შესწავლის ობიექტები

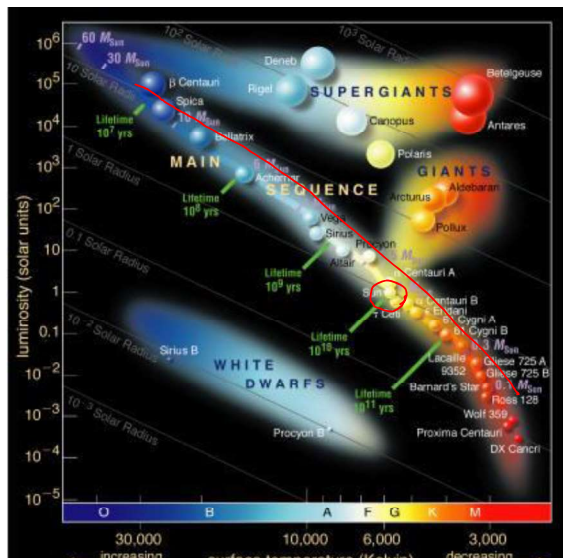
- თვითგრაფიტაცია და გრავ. კლასტერიზაცია;
- ვარსკვლავების სტრუქტურა წონასწორობაში;
- მზის და ვარსკვლავების კონვექცია, ატმოსფეროს და კორონალური დინებები;
- ვარსკვლავური ოსცილაციები;
- ზეახალის აფეთქების დარტყმითი ტალღები;
- აკრეცია: აკრეციული დისკები;
- პროტოპლანეტური დისკები;
- ახალგაზრდა ვარსკვლავური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

ვარსკვლავების სტრუქტურა წონასწორობაში

ძირითადი თანმიმდევრობის ვარსკვლავები

ჰერცშპრუნგ-რასელის დიაგრამა

მაგალითი: მზე

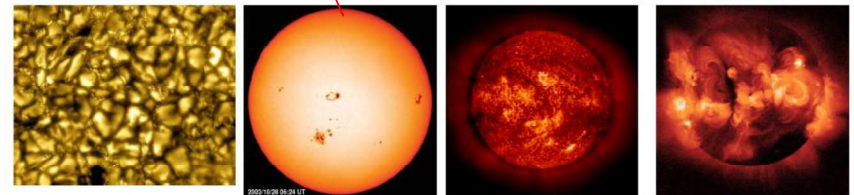
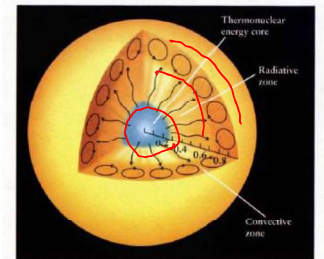


ვარსკვლავების სტრუქტურა წონასწორობაში

- კონვექციური ზონა;
- ატმოსფერო;

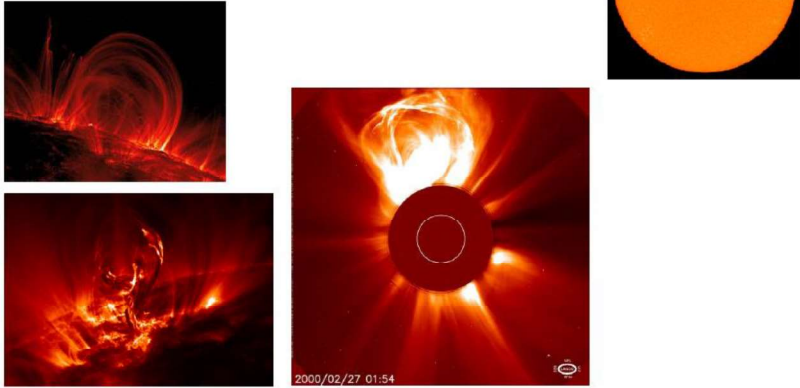
კონვექციური გრანულაცია; ფოტოსფერო; ქრომოსფერო; კორონა;

მზის ბუნება



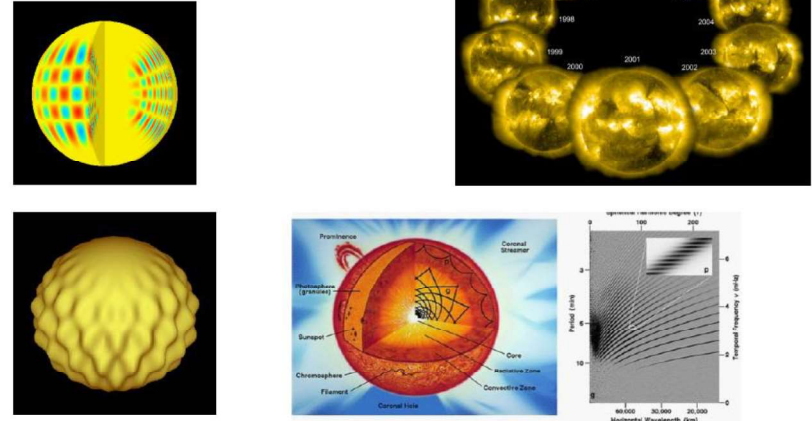
მზის და ვარსკვლავების კონვექცია, ატმოსფეროს და კორონალური დიებები

მზის ლაქები;
მაგნიტური თაღები და მარყუქები;
მაგნიტური პრომინანსები და ფილამენტები;
კორონალური მასის ამორტყორცვები (CME);



ვარსკვლავური ოსცილაციები

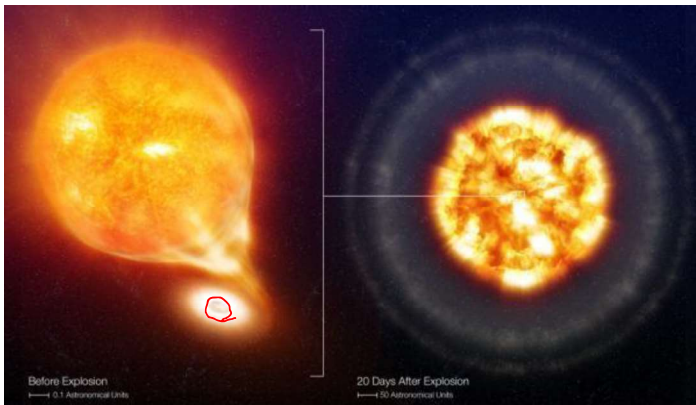
მზის 22 წლიანი ციკლი;
P-მოდები და ჰელიოსისმოლოგია;



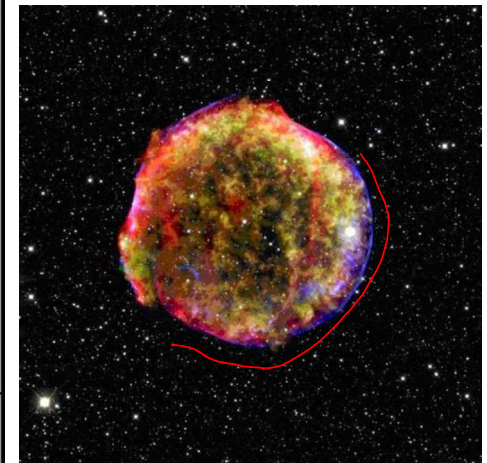
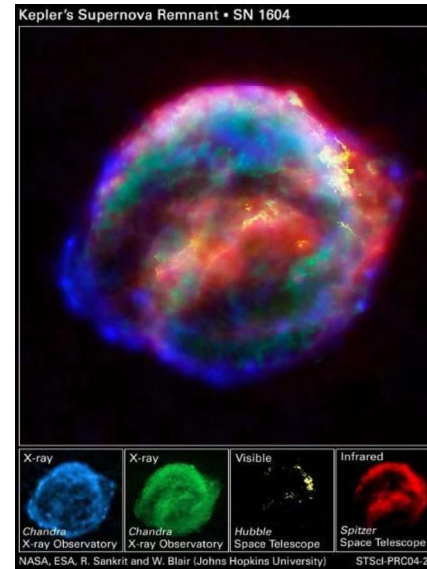
± ცეფეიდები

ზეახალის აფეთქების დარტყმითი ტალღები

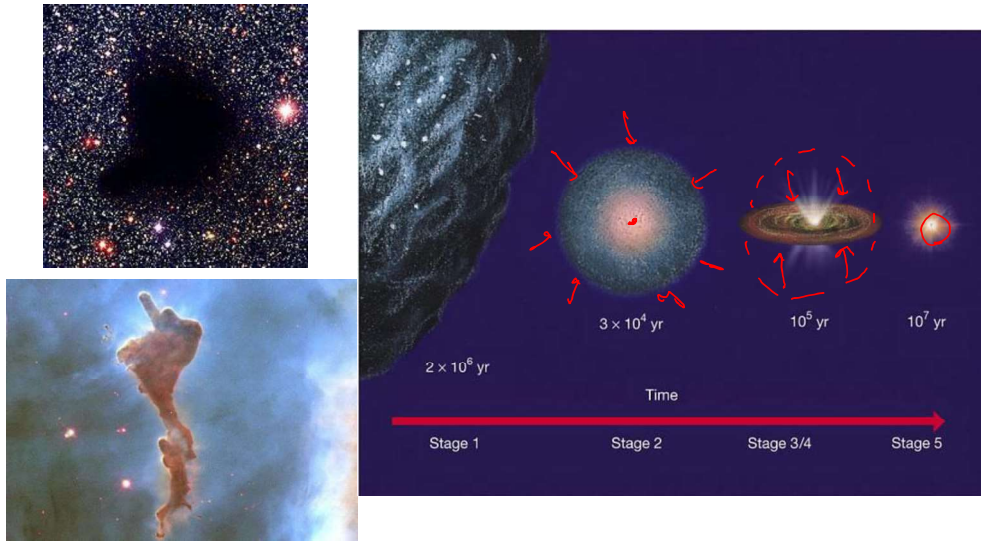
ძირითად თანმიმდროშის ვარსკვლავის მდგრადი ფაზის დასასრული;
ზეახალის ტიპები
ზეახლები ორმაგ სისტემებში;
თეთრი ჯუჯა (Ia)
სტანდარტული სანთლები



ზეახალის აფეთქების დარტყმითი ტალღები

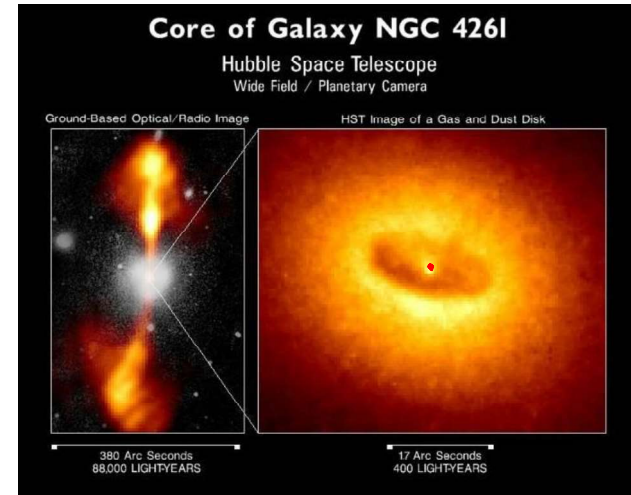


აკრეცია: აკრეციული დისკები



აკრეცია: აკრეციული დისკები

ენერჯის წყარო;
კვაზარები; აქტიური გალაქტიკის ბირთვები;



პროტოპლანეტური დისკები

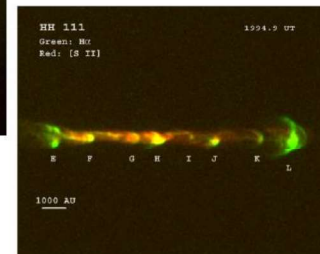


ახალგაზრდა ვარსკვლავური ჯგუფური დინამიკები (ჯეტები)

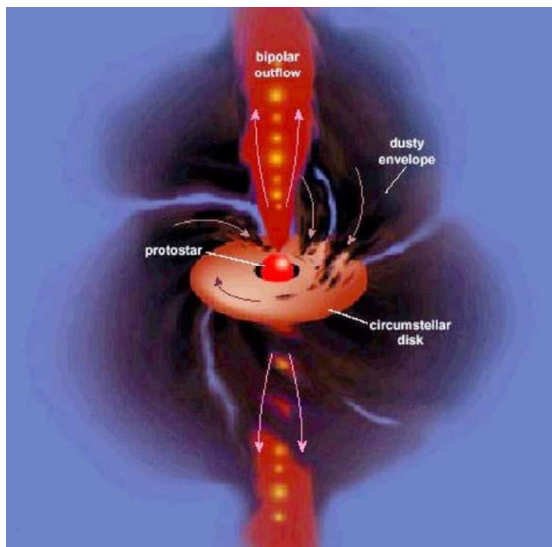
ექსტრაგალაქტიკური ჯეტები
ვარსკვლავური ჯეტები (ჰერბიკ-ჰარო ობიექტები)



კოლიმაცია
„ნასკვები“



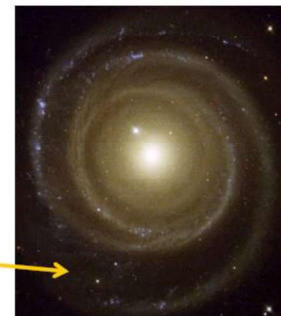
ახალგაზრდა ვარსკვლავური ჯგუფური დინებები (ჯეტები)



გალაქტიკური დინებები



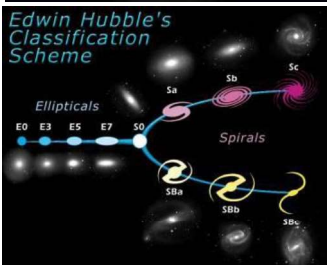
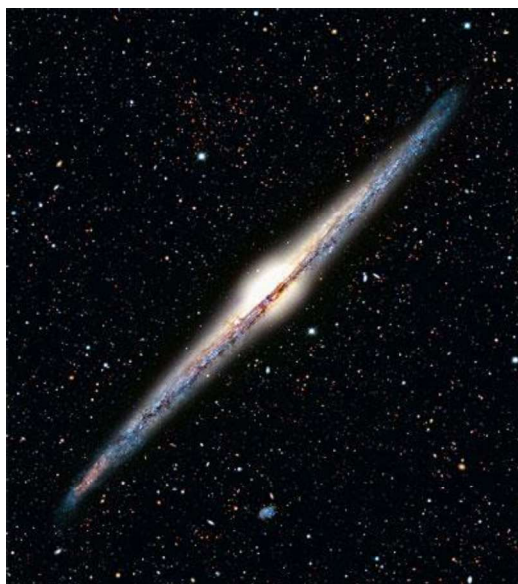
სპირალური სტრუქტურა
ცენტრალური მართკუთხედი (bar)



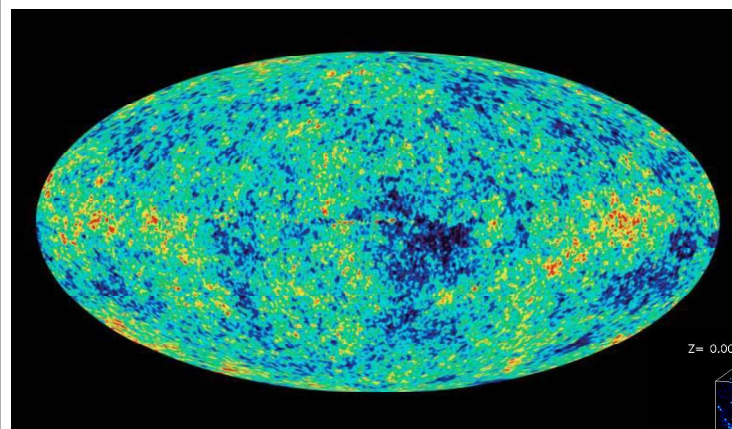
ბრუნვის საწინააღმდეგოდ
დახვეული სპირალები



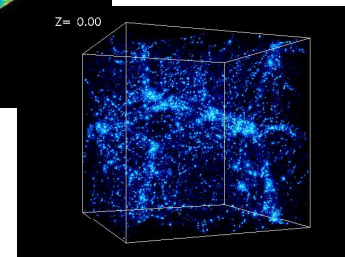
გალაქტიკური დინებები



კოსმოლოგიური მასშტაბები

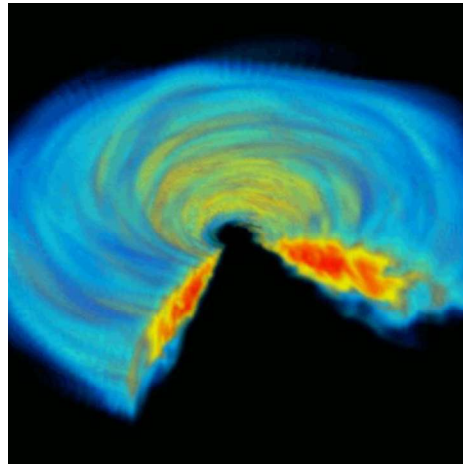
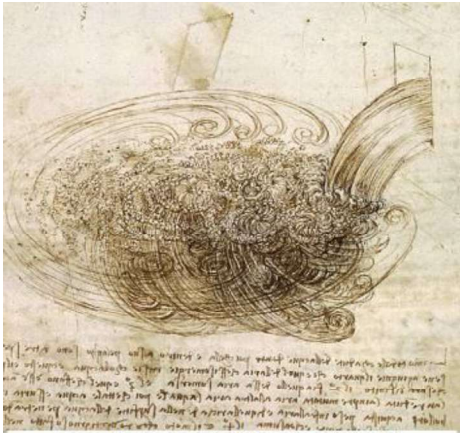


გალაქტიკების
კლასტერები



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;
- ენერჯის წყარო;

უწყვეტი გარემოს ფიზიკა

უწყვეტობის განტოლება - მასის შენახვა:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0, \quad \int_V \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) \right\} dV = 0.$$

იმპულსის შენახვა - მოძრაობის განტოლება:

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

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

გრავიტაცია:

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

მაგნიტური ველი:

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

მდგომარეობის განტოლება

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

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

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

მიახლოებები

უკუმშვადი მიახლოება;
 ადიაბატური კუმშვადობა;
 ბაროტროპული მიახლოება;
 MHD;

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

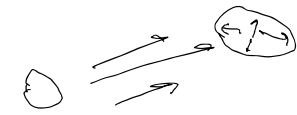
$$\text{div}(\vec{v}) = 0$$

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

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

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

ვილეს და ლაგრანჟის სისტემები



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

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

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

არამდგრადობის ფიზიკა

განტოლების ამონახსნები

წრფივ შემფოთებათა ანალიზი;
 წრფივი მოდელები
 მდრადობა და არამდგრადობა
 ზრდის ინკრემენტი

დინამიკური არამდგრადობები

ჰიდროდინამიკური არამდგრადობები

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

მაგნიტური არამდგრადობები

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

უგანზომილებო რიცხვები

კნულსენის რიცხვი:
„უწვეტი გარემო“

$$Kn = \lambda / L$$

მახის რიცხვი:

$$Ma = U / c_s$$

რეინოლდსის რიცხვი:

$$Re = U L / \nu$$

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

პრანდტლის რიცხვი:

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

რეილის რიცხვი:

$$Ra_x = \frac{g\beta}{\nu\alpha} (T_s - T_\infty) x^3 = Gr_x Pr$$

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

ბოლცმანის განაწილება:

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

მოლეკულის საშუალო სიჩქარე:

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

თავისუფალი განარბენი:

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

კნულსენის რიცხვი:

$$c_s = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} = \sqrt{\frac{\gamma k_B T}{m}}$$

ზგერის სიჩქარე:

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

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

მაგნიტური რეინოლდსის რიცხვი:

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

მაგნიტური პრანდტლის რიცხვი:

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

მრუდწირული კოორდინატა სისტემები

პოლარული:

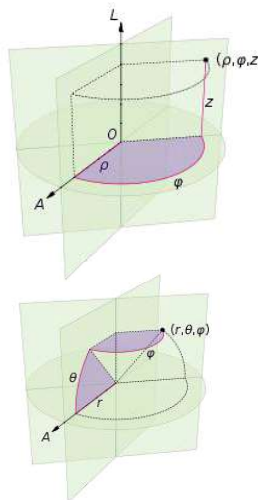
$$(r, \varphi)$$

ცილინდრული:

$$(r, \varphi, z)$$

სფერული:

$$(r, \varphi, \theta)$$



ცილინდრული კოორდინატა სისტემა

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

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

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

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

სფერულ კოორდინატთა სისტემა

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

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

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

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

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

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

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

ამოცანები

Pringle, King - 1.9.1, 1.9.2, 1.9.3