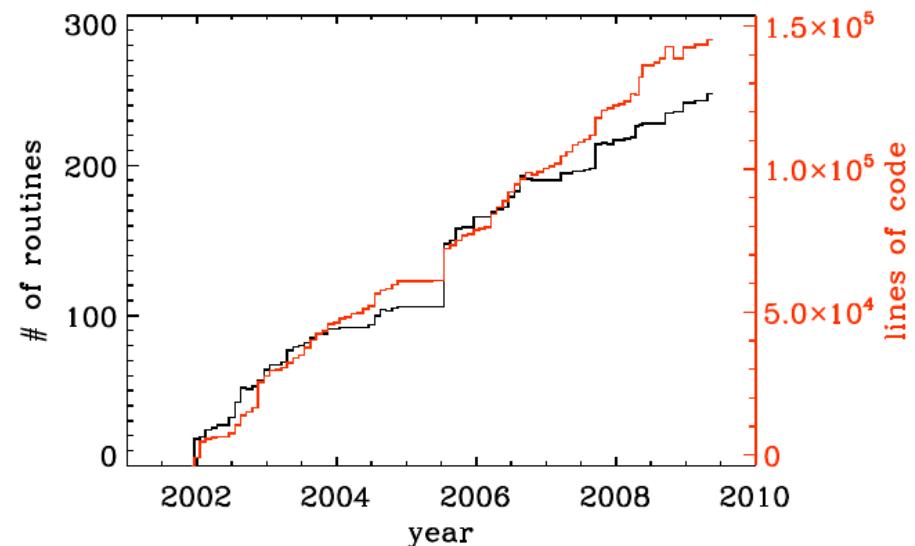


PENCIL Simulation

A high order MPI code



<https://github.com/pencil-code/pencil-code>

Wolfgang Dobler & Axel Branderburg

کارگاه شبیه‌سازی MHD ، ۱۴۰۴ ، IPM

To use PENCIL

- Linux or Unix
- F95 compiler , C compiler
- MPI
- Python for data visualisation

اگر این برنامه‌ها را دارید، کافیست برنامه را ذخیره و اجرا کنید. چیزی برای نصب وجود ندارد

Start PENCIL- I

- > cd pencil-home
- > ./sourceme.sh
- > cd to your sample directory
- > pc_setupsrс
- Check the primary simulation files
 - src/cparam.local
 - Src/Makefile.local
 - Start.in
 - Run.in
 - Print.in

Start PENCIL- II

- Check the primary simulation files

- src/cparam.local

- Src/Makefile.local

- Start.in

- Run.in

- Print.in

تعیین ابعاد شبیه‌سازی

تعیین تعداد هسته‌ها

ذره غبار می‌تواند اینجا تعریف شود

Start PENCIL- II

- Check the primary simulation files
 - src/cparam.local
 - Src/Makefile.local
 - Start.in
 - Run.in
 - Print.in

تعیین فیزیک شبیه‌سازی

دقت محاسبات عددی

فایل‌های کمکی

در پنسیل علاوه بر میدان

مغناطیسی اصلی، یک میدان زمینه

هم می توان داشت

Start PENCIL- II

- Check the primary simulation files

- src/cparam.local
- Src/Makefile.local
- Start.in
- Run.in
- Print.in

هر بار یکی از این دو تغییر کند، باید شبیه‌سازی دوباره کامپایل شود

Start PENCIL- II

- Check the primary simulation files

- src/cparam.local
- Src/Makefile.local
- Start.in
- Run.in
- Print.in

شرایط اولیه

برای هر اجرا کافیست یک بار انجام شود

Start PENCIL- II

- Check the primary simulation files
 - src/cparam.local
 - Src/Makefile.local
 - Start.in
 - Run.in
 - Print.in

شرایط اجرا
می‌توان شبیه‌سازی را تا جایی اجرا
کرد، پارامترها را تغییر داد و سپس
ادامه داد
فایل‌های خروجی به شکل باینری
ذخیره می‌شوند

Start PENCIL- II

- Check the primary simulation files
 - src/cparam.local
 - Src/Makefile.local
 - Start.in
 - Run.in
 - Print.in

انتخاب می‌کنیم چه چیزهایی در ترمینال نوشته شود. هر آنچه در ترمینال نوشته شود، به شکل اتوماتیک در یک فایل نیز ذخیره می‌گردد. به طور معمول گام زمانی، سرعت، عدد رینولدز، جرم ... پرینت می‌شود

Start PENCIL- III

- Compile the code
- > **pc_build**
- To clean: > **pc_build --cleanall**
- After checking all parameters:
- > **mkdir data**
- > **pc_run**

پوشه پارامترهای خروجی

```
--it----t-----dt-----urms----umax----rhom-----ssm-----dtc----dtu---dtnu---dtchi-
 0   0.34   6.792E-03   0.0060   0.0452   14.4708   -0.4478   0.978   0.013   0.207   0.346
 10  0.41   6.787E-03   0.0062   0.0440   14.4707   -0.4480   0.978   0.013   0.207   0.345
 20  0.48   6.781E-03   0.0064   0.0429   14.4705   -0.4481   0.977   0.012   0.207   0.345
 30  0.54   6.777E-03   0.0067   0.0408   14.4703   -0.4482   0.977   0.012   0.207   0.345
 40  0.61   6.776E-03   0.0069   0.0381   14.4702   -0.4482   0.977   0.011   0.207   0.346
```

cparam.local

```
integer, parameter :: ncpus=1,nprocy=1,nprocx=1,nprocz=ncpus/(nprocx*nprocy)
```

```
integer, parameter :: nxgrid=256,nygrid=nxgrid,nzgrid=1
```

تعداد هسته، و تعداد هسته برای هر محور

ابعاد شبیهسازی

ابعاد فیزیکی بعدها تعیین می‌شوند

Makefile.local

```
HYDRO      = hydro
DENSITY    = density
ENTROPY    = noentropy
MAGNETIC   = magnetic
GRAVITY    = nogravity
FORCING    = forcing

MPICOMM    = nompicomm
GLOBAL     = noglobal
IO          = io_dist
FOURIER    =nofourier

REAL_PRECISION = double
```

میتوانید معادلات را
روشن کنید

استفاده از یک یا چند
هسته را مشخص کنید

خروجی روی یک یا چند
دیسک را مشخص کنید

!-*-f90-*- (for emacs)

! Initialisation parameters for dust particles moving in a random
! velocity field.

!&init_pars

cvsid='\$Id: start.in,v 1.2 2011-08-03 21:08:47 wlyra Exp \$',

lperi = T, T, T

ip=20, lwrite_ic=T, lwrite_aux=T

xyz0 = 0., 0., 0.

Lxyz = 1., 1., 1.

lshift_origin=T,T,T

/

&eos_init_pars

cs0=2.0412415

gamma=1.666666666666666666666666666667

/

&hydro_init_pars

inituu='gaussian-noise'

ampluu= 1.1

/

&density_init_pars

ldensity_nolog=T

/

&entropy_init_pars

/

&initial_condition_pars

lsmooth=0.025

Start.in

برای مختصات غیر دکارتی

&init_pars

coord_system='spherical_coords'

run.in

```
!  
&run_pars  
cvsid='$Id: run.in,v 1.2 2011-08-03 21:08:47 wlyra Exp $',  
nt=2000, it1=100, cdt=0.4, cdtv=0.4, isave=100, itorder=3  
dsnap=0.02, dvid=2.0, ip=20  
lpencil_check=F  
tmax=1.5  
! max_walltime=85500  
loutput_varn_at_exact_tsnap=T  
/  
&eos_run_pars  
/  
&hydro_run_pars  
/  
&density_run_pars  
idiff='hyper3-mesh'  
diffrho_hyper3_mesh=20.  
/  
&entropy_run_pars  
iheatcond='hyper3-mesh'  
chi_hyper3_mesh=20.  
/  
&viscosity_run_pars  
ivisc='hyper3-mesh'  
nu_hyper3_mesh=20.  
/  
&shock_run_pars  
/
```

شرایط مرزی

‘p’ periodic boundary condition

‘a’ antisymmetric condition w. r. t. the boundary, i. e. vanishing value

‘s’ symmetric condition w. r. t. the boundary, i. e. vanishing first derivative

‘a2’ antisymmetry w. r. t. the arbitrary value on the boundary, i. e. vanishing second derivative

‘c1’ special boundary condition for $\ln \rho$ and s : constant heat flux through the boundary

‘c2’ special boundary condition for s : constant temperature at the boundary — requires boundary condition a2 for $\ln \rho$

‘cT’ special boundary condition for s or $\ln T$: constant temperature at the boundary (for arbitrarily set $\ln \rho$)

‘ce’ special boundary condition for s : set temperature in ghost points to value on boundary (for arbitrarily set $\ln \rho$)

‘db’ low-order one-sided derivatives (“no boundary condition”) for density

‘she’ shearing-sheet boundary condition (default when the module *Shear* is used)

‘g’ force the value of the corresponding field on vertical boundaries (should be used in combination with the `force_lower_bound` and `force_upper_bound` flags set in the namelist *init_pars*)

‘hs’ special boundary condition for $\ln \rho$ and s which enforces hydrostatic equilibrium on vertical boundaries

Read the outputs in python

```
> ipython3
```

```
python > import pencil as pc
```

```
python > from matplotlib import pylab as plt  
python > var = pc.read.var(trimall=True)
```

```
python > plt.imshow(var.uu[0, 0, :, :].T, origin='lower')
```

Python - II

این عبارت را در مرتبه اول در فایل `~/.bashrc` قرار دهید

```
export PYTHONPATH=${PENCIL_HOME}/python
```

```
import pencil as pc
```

```
import numpy as np  
import pylab as plt  
import matplotlib
```

```
plt.ion()
```

`pc.math?`

جستجوی برنامه‌های کتابخانه
پنسیل

Python - III

برای خواندن آنچه در ترمینال پرینت شده است

```
ts = pc.read.ts()  
plt.plot(ts.t, ts.ekin)
```

برای خواندن فایل‌های باینری

```
var = pc.read.var()  
plt.imshow(var.uu[0, 32, :, :].T, origin='lower', extent=[-2, 2, -2, 2])
```

There are around 100 samples

1D

2D

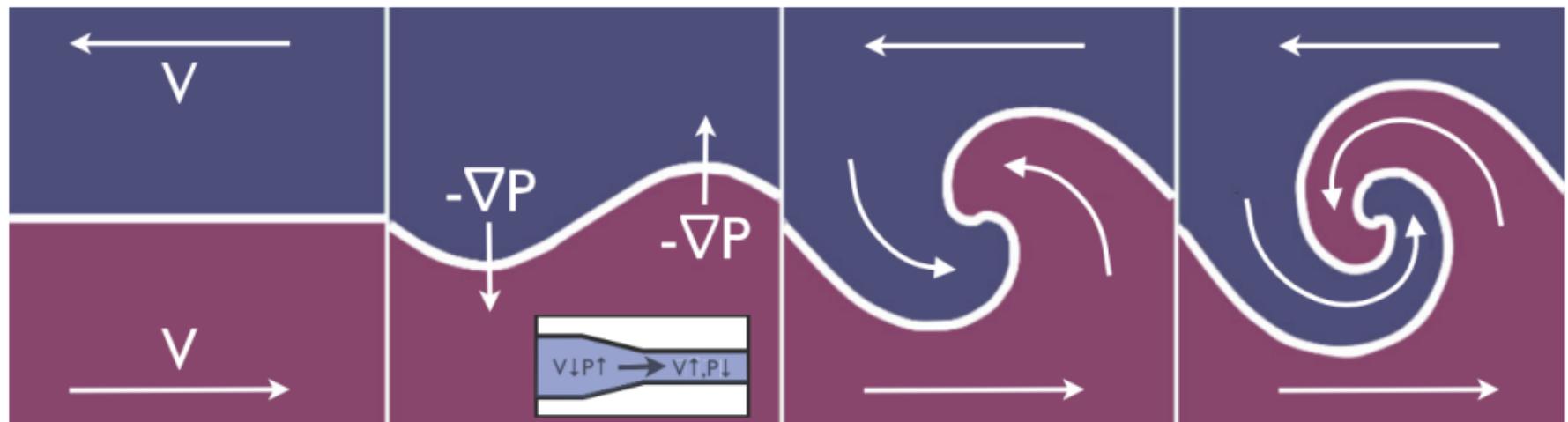
3D

Disk, ISM, Supernova, CosmicRay,

Turbulence, Dynamo, Solar Corona,

Ambipolar diffusion, Convection, Radiation

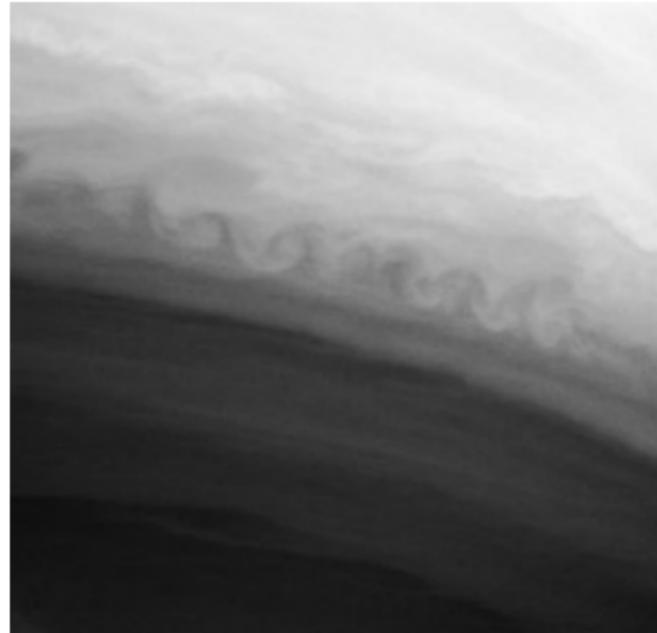
The Kelvin-Helmholtz instability



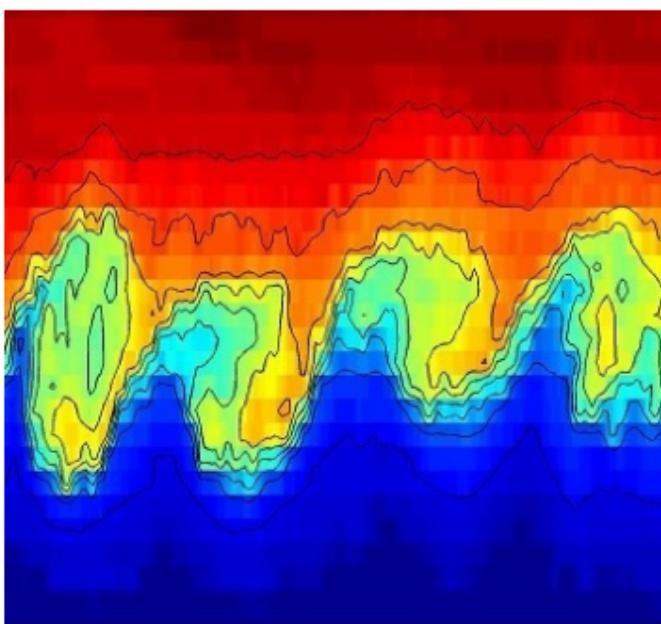
مثال‌ها



(a) Clouds above Breckenridge



(b) Saturn's Atmosphere



(c) Deep Ocean Currents on Earth

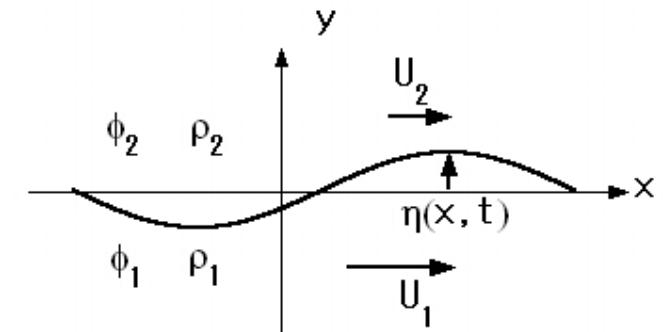


(d) Magnetic flux tubes on the Sun

$$\nabla^2 \phi_1 = 0 \quad \text{and} \quad \nabla^2 \phi_2 = 0$$

$$\begin{aligned}\nabla \phi_1 &= U_1 && \text{as } y \rightarrow \infty \\ \nabla \phi_2 &= U_2 && \text{as } y \rightarrow -\infty\end{aligned}$$

سرعت



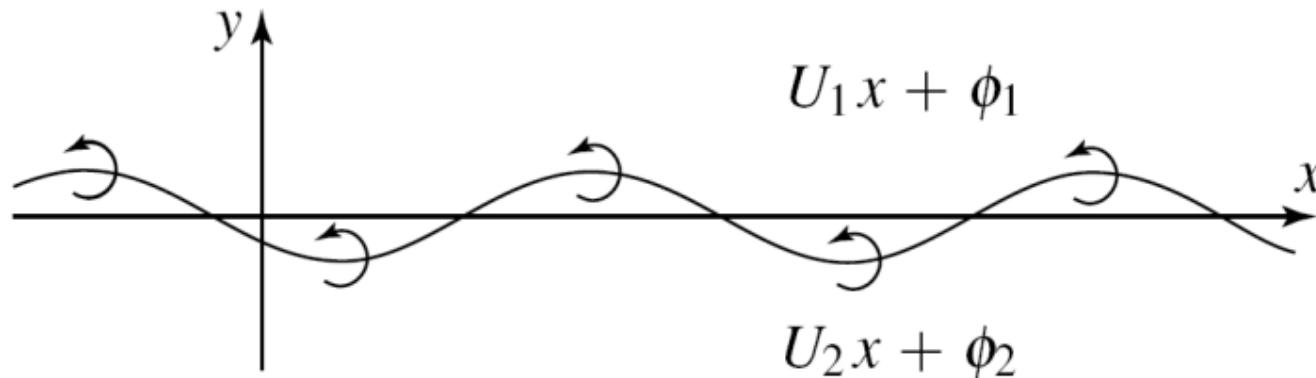
$$f(x, y, t) = y - \eta(x, t)$$

تغییر شکل سطح

$$\frac{Df}{Dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \bar{V}_{\text{int}} \cdot \nabla f = 0$$

حرکت مرز

اختلال اولیه



$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = v_\eta \quad \text{at} \quad y = \eta(x, t)$$

سرعت عمود در مرز

این یعنی مرز بالا و پایین می‌رود، با سرعتی برابر سرعت عمودی شاره

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (U_1 + u'_1) \frac{\partial \eta}{\partial x} = v'_1 \quad \text{at } y = \eta(x, t)$$

سرعت افقی

سرعت عمودی

برای ذره درست بالای مرز

$$v'_1 = \partial \phi_1 / \partial y$$

سرعت شاره اساسا در راستای افقی هست

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + (U_1 + u'_1) \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \text{at } y = \eta(x, t)$$

بالای مرز

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + (U_2 + u'_2) \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \text{at } y = \eta(x, t)$$

پایین مرز

معادله برنولی نقش شرایط مرزی را بازی می‌کند

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{(\nabla \phi_1)^2}{2} + gy = C_1$$
$$\frac{\partial \phi_2}{\partial t} + \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{(\nabla \phi_2)^2}{2} + gy = C_2$$

با توجه به پیوستگی فشار در مرز داریم

$$\rho_1 \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial t} + \frac{(\nabla \phi_1)^2}{2} - C_1 \right) = \rho_2 \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial t} + \frac{(\nabla \phi_2)^2}{2} - C_2 \right)$$

$$\rho_1 \left(\frac{1}{2} U_1^2 - C_1 \right) = \rho_2 \left(\frac{1}{2} U_2^2 - C_2 \right)$$

جمله پایا

جمله اختلالی

$$\phi_1 = U_1 x + \phi'_1$$

$$\phi_2 = U_2 x + \phi'_2$$

$$\nabla^2 \phi'_1 = 0 \quad \text{and} \quad \nabla^2 \phi'_2 = 0$$

$$\nabla \phi'_1 = 0 \quad \text{as} \quad y \rightarrow \infty$$

$$\nabla \phi'_2 = 0 \quad \text{as} \quad y \rightarrow -\infty$$

خطی سازی

$$\frac{\partial \phi'_1}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + U_1 \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \text{at} \quad y = 0$$

$$\frac{\partial \phi'_2}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + U_2 \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \text{at} \quad y = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (U_1 x + \phi'_1) + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{1}{2} [\nabla (U_1 x + \phi'_1)]^2 + g\eta = C_1$$

$$\frac{\partial \phi'_1}{\partial t} + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial}{\partial x} (U_1 x + \phi'_1) \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} (U_1 x + \phi'_1) \right)^2 \right] + g\eta = C_1$$

$$\frac{\partial \phi'_1}{\partial t} + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{1}{2} \left[\left(U_1 + \frac{\partial \phi'_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi'_1}{\partial y} \right)^2 \right] + g\eta = C_1$$

تا مرتبه اول

$$\boxed{\frac{\partial \phi'_1}{\partial t} + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{1}{2} \left(U_1^2 + 2U_1 \frac{\partial \phi'_1}{\partial x} \right) + g\eta = C_1}$$

$$-p_1 = \rho_1 \left(\frac{\partial \phi'_1}{\partial t} + \frac{1}{2} U_1^2 + U_1 \frac{\partial \phi'_1}{\partial x} + g\eta - C_1 \right)$$

$$-p_2 = \rho_2 \left(\frac{\partial \phi'_2}{\partial t} + \frac{1}{2} U_2^2 + U_2 \frac{\partial \phi'_2}{\partial x} + g\eta - C_2 \right)$$

p1=p2 at the border

$$\rho_1 \left(\frac{\partial \phi'_1}{\partial t} + U_1 \frac{\partial \phi'_1}{\partial x} + g\eta \right) = \rho_2 \left(\frac{\partial \phi'_2}{\partial t} + U_2 \frac{\partial \phi'_2}{\partial x} + g\eta \right) \quad \text{at } y = 0$$

جواب نوعی

$$\eta = \hat{\eta} e^{ik(x-ct)}$$

$$\phi'_1 = \hat{\phi}_1(y) e^{ik(x-ct)}$$

$$\phi'_2 = \hat{\phi}_2(y) e^{ik(x-ct)}$$

$\nabla^2 \phi'_1 = 0$ gives

$$\nabla^2 (\hat{\phi}_1 e^{ik(x-ct)}) = 0$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (\hat{\phi}_1 e^{ik(x-ct)}) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\hat{\phi}_1 e^{ik(x-ct)}) = 0$$

$$\hat{\phi}_1 \frac{\partial^2}{\partial x^2} (e^{ik(x-ct)}) + e^{ik(x-ct)} \frac{\partial^2 \hat{\phi}_1}{\partial y^2} = 0$$

می خواهیم فرم توابع
پتانسل سرعت را پیدا
کنیم

$$-k^2 \hat{\phi}_1 e^{ik(x-ct)} + e^{ik(x-ct)} \frac{\partial^2 \hat{\phi}_1}{\partial y^2} = 0$$

$$e^{ik(x-ct)} \left[\frac{\partial^2 \hat{\phi}_1}{\partial y^2} - k^2 \hat{\phi}_1 \right] = 0$$

$$\frac{d^2 \hat{\phi}_1}{dy^2} = k^2 \hat{\phi}_1$$

$$\hat{\phi}_1 = A e^{-ky} + C e^{ky}$$

$$\hat{\phi}_2 = D e^{-ky} + B e^{ky}$$

$$\hat{\phi}_1 = A e^{-ky}$$

$$\hat{\phi}_2 = B e^{ky}$$

با توجه به شرایط مرزی

$$\phi'_1 = A e^{-ky} e^{ik(x-ct)}$$

$$\phi'_2 = B e^{ky} e^{ik(x-ct)}$$

با قرار دادن این عبارت‌ها در شرایط مرزی

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(A e^{-ky} e^{ik(x-ct)} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\hat{\eta} e^{ik(x-ct)} \right) + U_1 \frac{\partial}{\partial x} \left(\hat{\eta} e^{ik(x-ct)} \right)$$
$$-kA e^{-ky} e^{ik(x-ct)} = -ikc \hat{\eta} e^{ik(x-ct)} + ikU_1 \hat{\eta} e^{ik(x-ct)}$$
$$A e^{-ky} = -i \hat{\eta} (U_1 - c)$$

$$A = -i(U_1 - c) \hat{\eta}$$

$$B = i(U_2 - c) \hat{\eta}$$

جاگذاری در معادله برنولی

$$\rho_1 \left(\frac{\partial \phi'_1}{\partial t} + U_1 \frac{\partial \phi'_1}{\partial x} + g\eta \right) = \rho_2 \left(\frac{\partial \phi'_2}{\partial t} + U_2 \frac{\partial \phi'_2}{\partial x} + g\eta \right)$$

$$\rho_1 e^{ik(x-ct)} \left(-ikcA e^{-ky} + ikU_1 A e^{-ky} + g\hat{\eta} \right) = \rho_2 e^{ik(x-ct)} \left(-ikcB e^{ky} + ikU_2 B e^{ky} + g\hat{\eta} \right)$$

At $y = 0$,

$$\rho_1 [ik\cancel{A}(U_1 - c) + g\hat{\eta}] = \rho_2 [ik\cancel{B}(U_2 - c) + g\hat{\eta}]$$

$$\boxed{\rho_1 \left[k (U_1 - c)^2 \hat{\eta} + g\hat{\eta} \right] = \rho_2 \left[-k (U_2 - c)^2 \hat{\eta} + g\hat{\eta} \right]}$$

$$\rho_1 k (U_1 - c)^2 + \rho_2 k (U_2 - c)^2 = g (\rho_2 - \rho_1)$$

این رابطه پاشندگی را می‌دهد. برای سرعت موج مختلط حل می‌کنیم

$$c = c_r + i c_i = \frac{\rho_1 U_1 + \rho_2 U_2}{\rho_1 + \rho_2} \pm \left[\frac{g \rho_2 - \rho_1}{k \rho_1 + \rho_2} - \rho_1 \rho_2 \left(\frac{U_1 - U_2}{\rho_1 + \rho_2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{g \rho_2 - \rho_1}{k \rho_1 + \rho_2} \geq \rho_1 \rho_2 \left(\frac{U_1 - U_2}{\rho_1 + \rho_2} \right)^2$$

$$k \leq \frac{g}{\rho_1 \rho_2} \frac{\rho_2^2 - \rho_1^2}{(U_1 - U_2)^2}$$

شرط آنکه جواب حقیقی باشد

شرط آنکه جواب موهومی باشد

$$k > \frac{g}{\rho_1 \rho_2} \frac{\rho_2^2 - \rho_1^2}{(U_1 - U_2)^2}$$

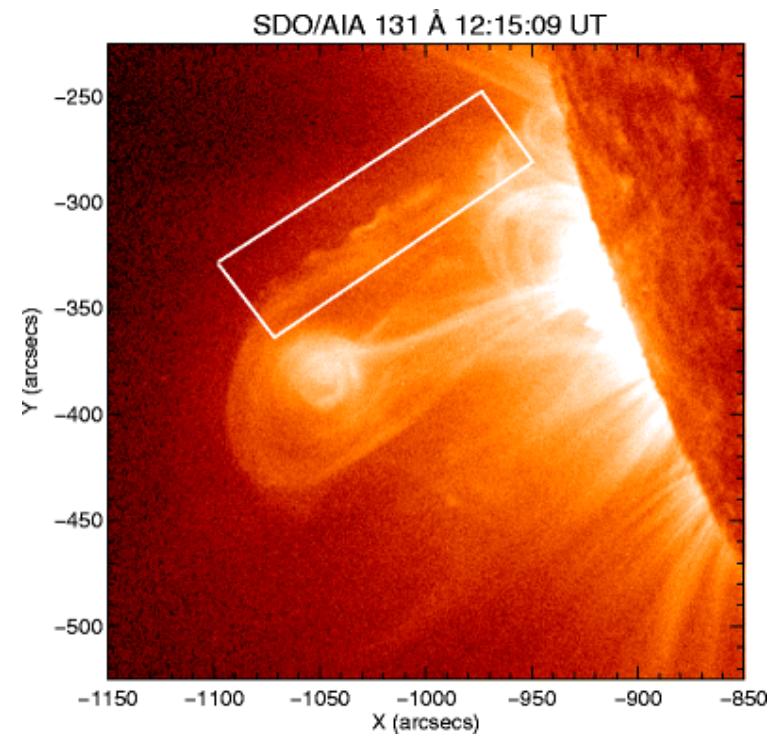
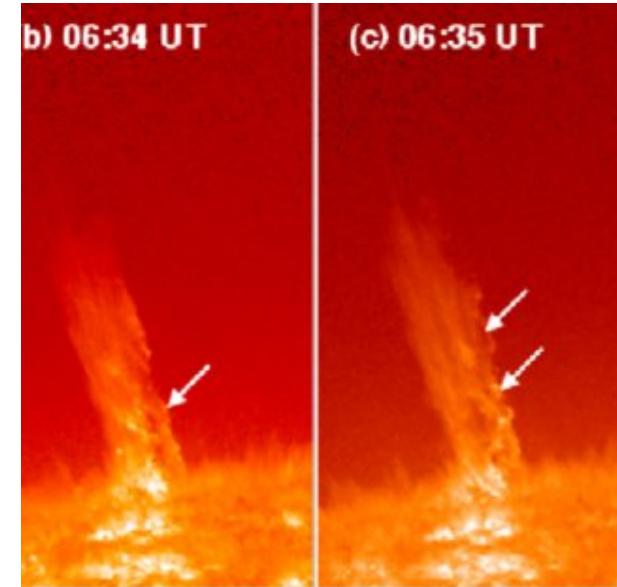
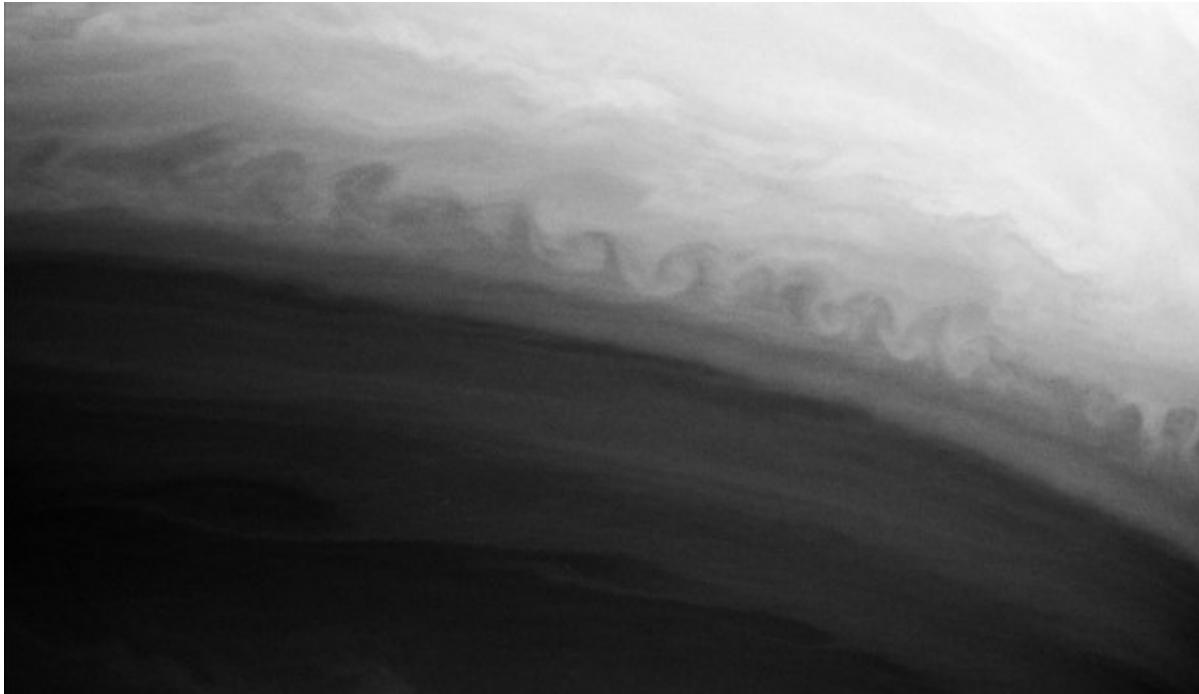
حالت خاص: چگالی همگن

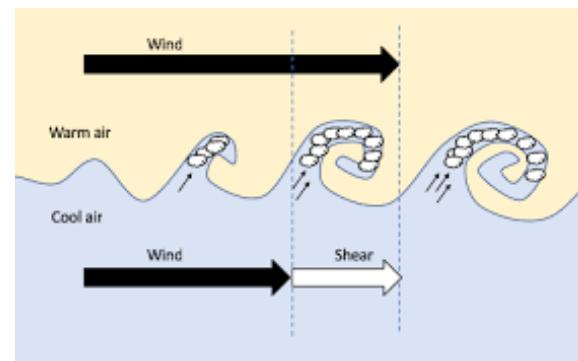
$$c = c_r + ic_i = \rho^2 \frac{U_1 + U_2}{2\rho^2} \pm \left[-\rho^2 \frac{(U_1 - U_2)^2}{4\rho^2} \right]^{1/2}$$

$$c = c_r + ic_i = \frac{1}{2} (U_1 + U_2) \pm i \frac{1}{2} |U_1 - U_2|$$



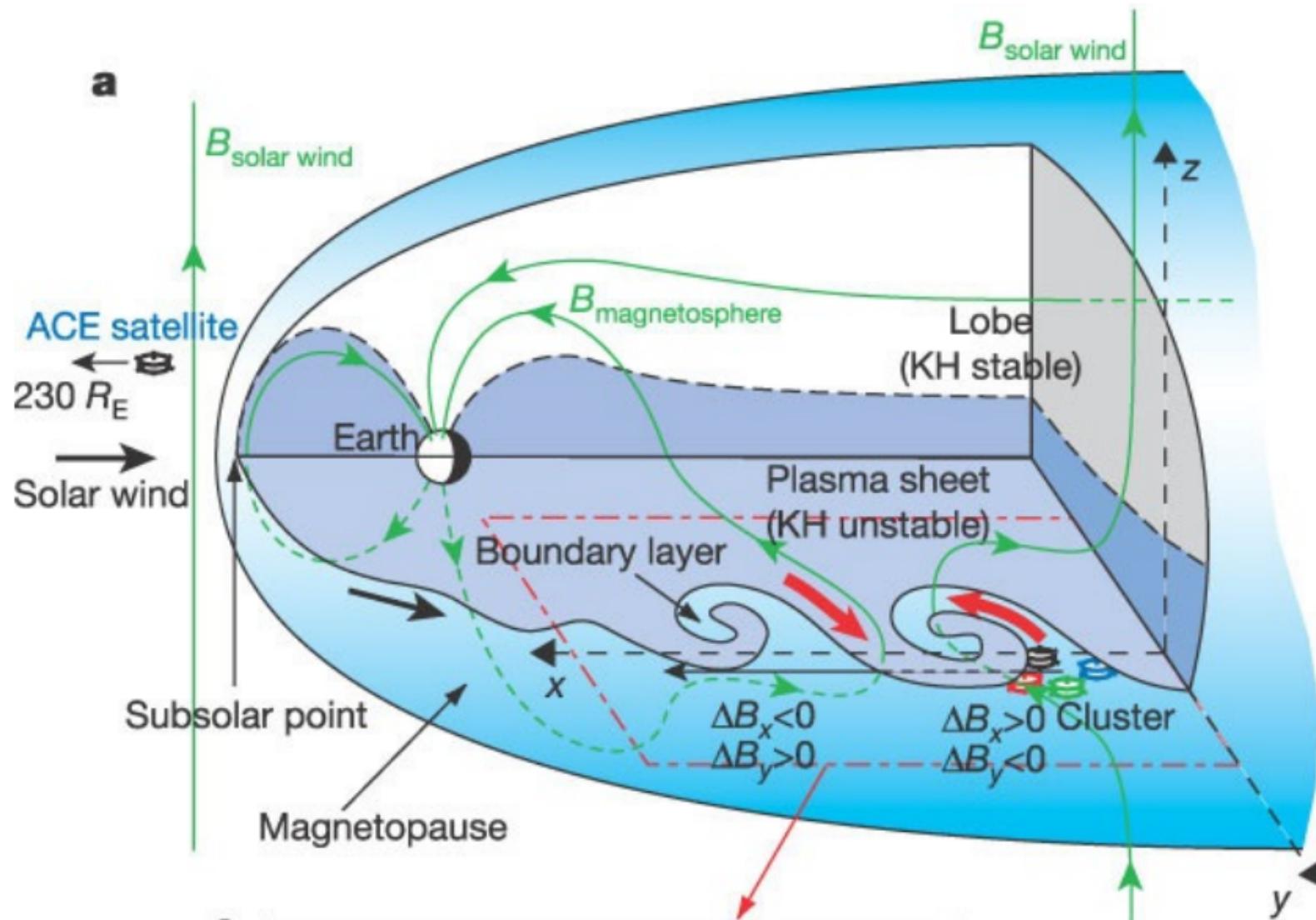
Chandrasekhar, S., Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability, Dover Publications, New York (1981).



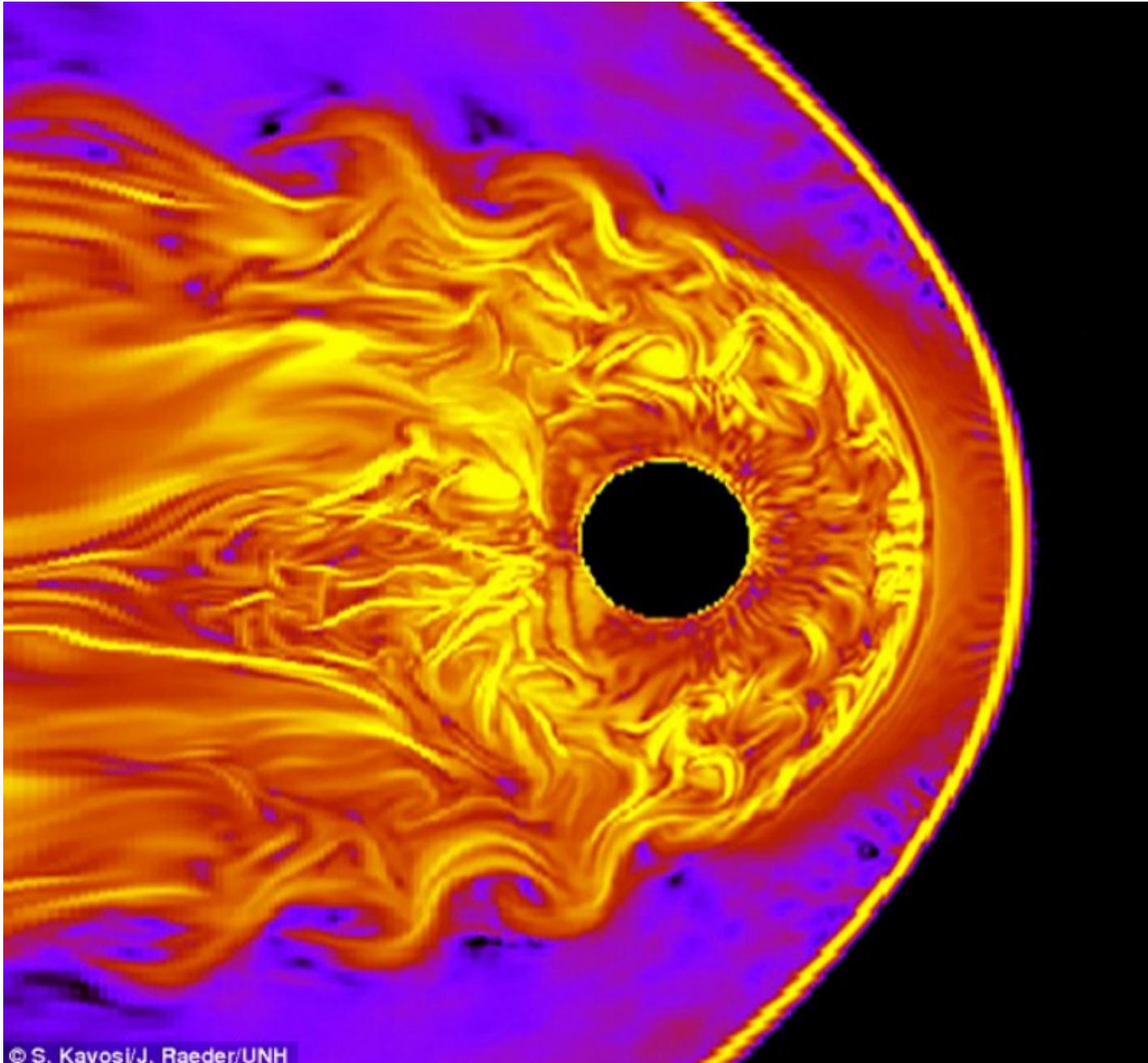


ناپایداری کلوین-هلمھولتز مغناطیسی

$$\omega = \frac{\mathbf{k} \cdot (\rho_1 \mathbf{V}_1 + \rho_2 \mathbf{V}_2)}{\rho_1 + \rho_2} \pm i \sqrt{\rho_1 \rho_2 \left([\mathbf{k} \cdot (\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2)]^2 - \frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_1)^2 + (\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_2)^2}{4\pi\rho_{12}} \right)}$$



شبیه‌سازی مغناطکره زمین



© S. Kavosi/J. Raeder/UNH