
Turbulencia: Füstoszloptól a H-módig

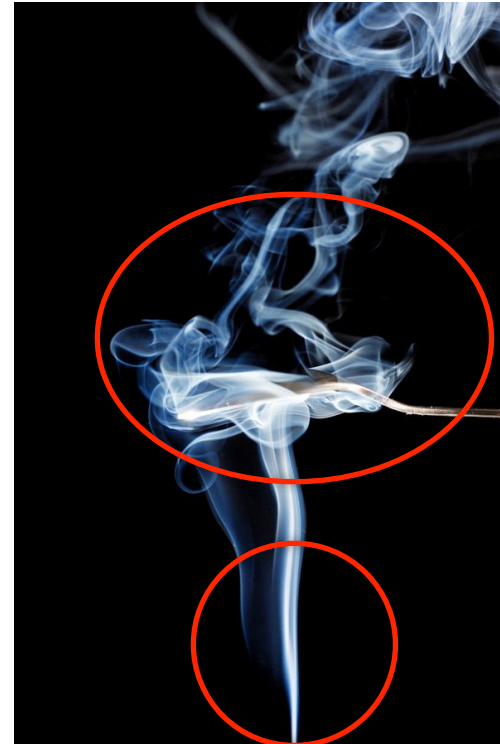
Bencze Attila
(Wigner FK RMI)

Mi a turbulencia?

Naiv megfogalmazás: egy állapot minőségileg turbulens: zavarok jelenléte, rendezetlen mozgások, gerjesztések.

“The motion of water where local velocities fluctuate and the direction of flow changes abruptly and frequently at any particular location, resulting in disruption of laminar flow.” (Webster online dictionary)

Mi a turbulencia?



turbulens
áramlás

lamináris
áramlás

Turbulencia a füstoszlopban

Mi a turbulencia?

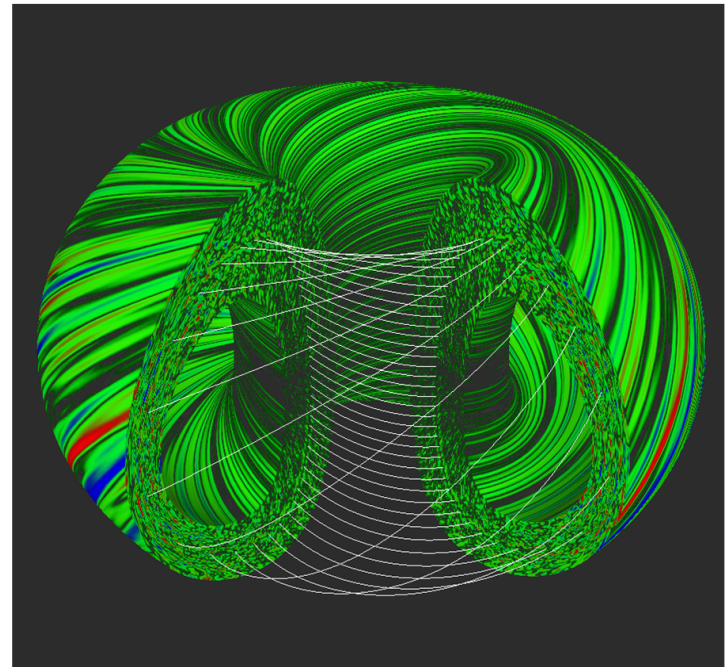
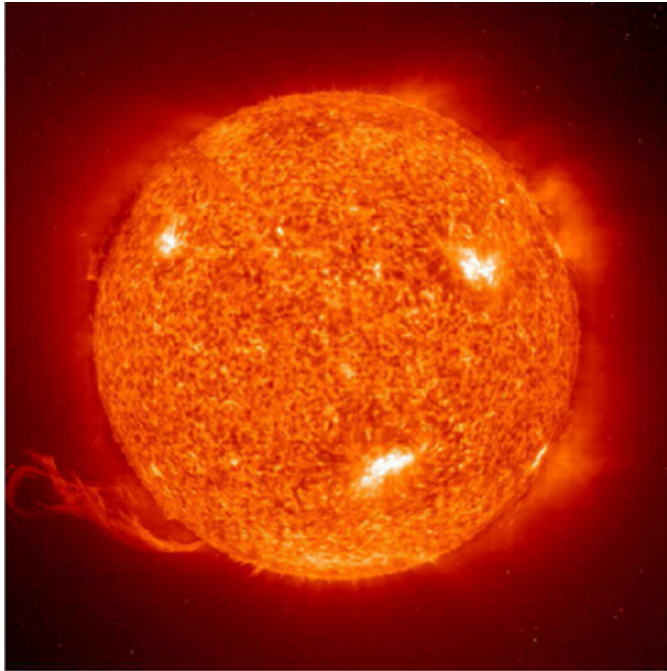


*Két nagyon
vékony
szappanhártya
közötti vékony
vízréteg*

~ 30 micron

Vékony szappan rétegek (lényegében 2D)

Mi a turbulencia?



Turbulencia fúziós plazmákban

Mi a turbulencia?

Turbulencia a nemlineáris fizikai rendszer azon állapota, melyre az jellemző, hogy az energia eloszlása a sok szabadsági fokra erősen eltér az egyensúlyi eloszlástól.

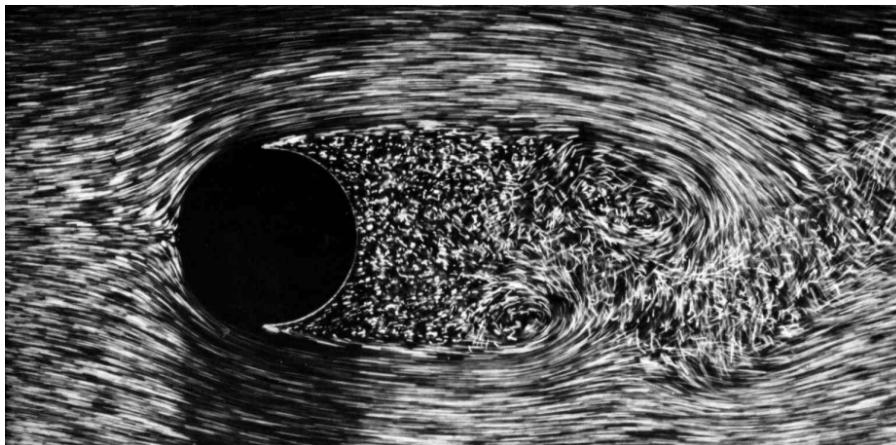
Térbeli és időbeli szabálytalanságok jellemzik (fluktuációk).

A turbulens állapot lehet kívülről fentartott vagy szabadon lebomló, egyensúlyi állapothoz tartó.

(G. Falkovich)

Jellemző tulajdonságok:

- nem a folyadék tulajdonsága, hanem az áramlásé
- a folyamatok “véletlen” jellege (statisztikus kezelés)
- sok térbeli és időbeli skála jellemzi
- gyors energia, impulzus és részecske keveredés (“mixing”)
- nemlineáris dinamika
- energiacsere a térbeli skálák között (kaskádfolyamat)



Folyadék turbulencia

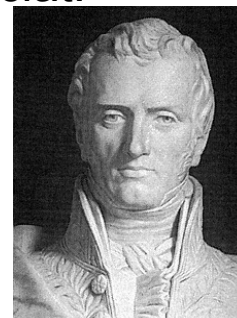
Navier-Stokes egyenlet elvben leírja a turbulenciát:

$$\partial_t \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{v}$$

Összenyomhatatlan feltétel:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

kinematikus viszkozitás



Claude-Louis Navier
1785-1836



Sir George Stokes
1819-1903

Ez az egyszerűnek tűnő egyenlet, teljesen determinisztikus, mégis teljesen benne van a turbulencia. **A kulcs a konvekciós tag!**

Osborne **Reynolds** megfigyelte, hogy az áramlás jellege egy bizonyos jól definálható paraméterkombinációtól függ.

$$Re = \frac{LU}{\nu}$$

Mi a fizikai jelentése?

$$\frac{\text{konv.}}{\text{dissz.}} = \frac{v \nabla v}{\nu \Delta v} \sim \frac{U^2/L}{\nu U/L^2} = \frac{LU}{\nu} = Re$$

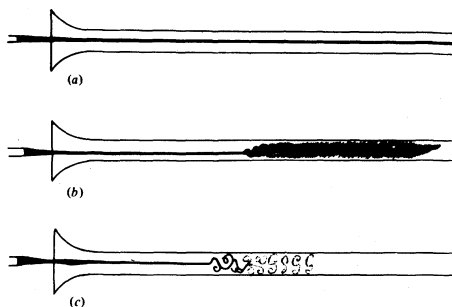


Fig. 9.2. Reynolds's drawings of the flow in his dye experiment.

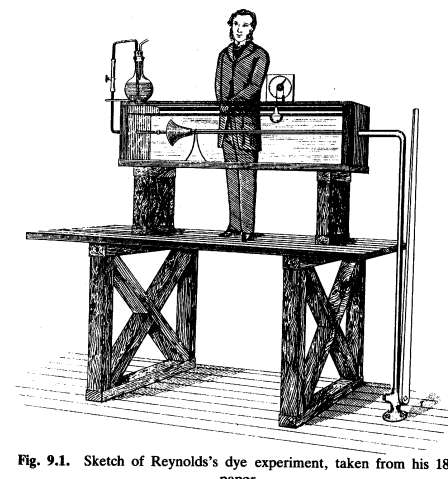
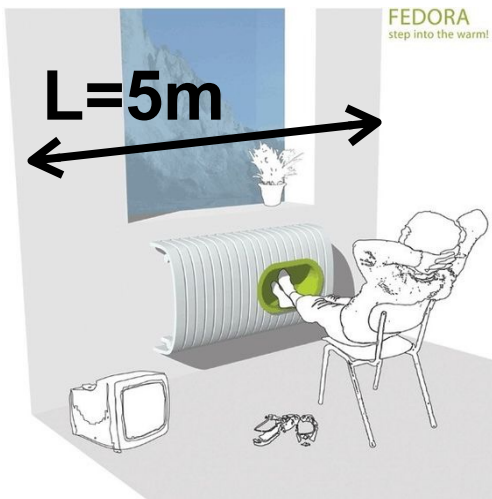


Fig. 9.1. Sketch of Reynolds's dye experiment, taken from his 1883 paper

Példa: molekuláris diffúzió vs. turbulens "diffúzió"



Tisztán molekuláris diffúziót tekintve:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_j}$$

terminus diffúziós együttható

$$\frac{\Delta T}{t_m} \sim \gamma \frac{\Delta T}{L^2} \Rightarrow t_m = \frac{L^2}{\gamma} = \frac{(500 \text{ cm})^2}{0.2 \text{ cm}^2/\text{s}} \sim 10^6 \text{ s} (100 \text{ h})$$

Turbulens konvekciót tekintve:

Reynolds-szám:

$$\frac{t_t}{t_m} \sim \frac{L}{u} \frac{\gamma}{L^2} = \frac{\gamma}{uL}$$

$$\frac{t_t}{t_m} \sim \frac{\nu}{uL} = \frac{1}{Re}$$

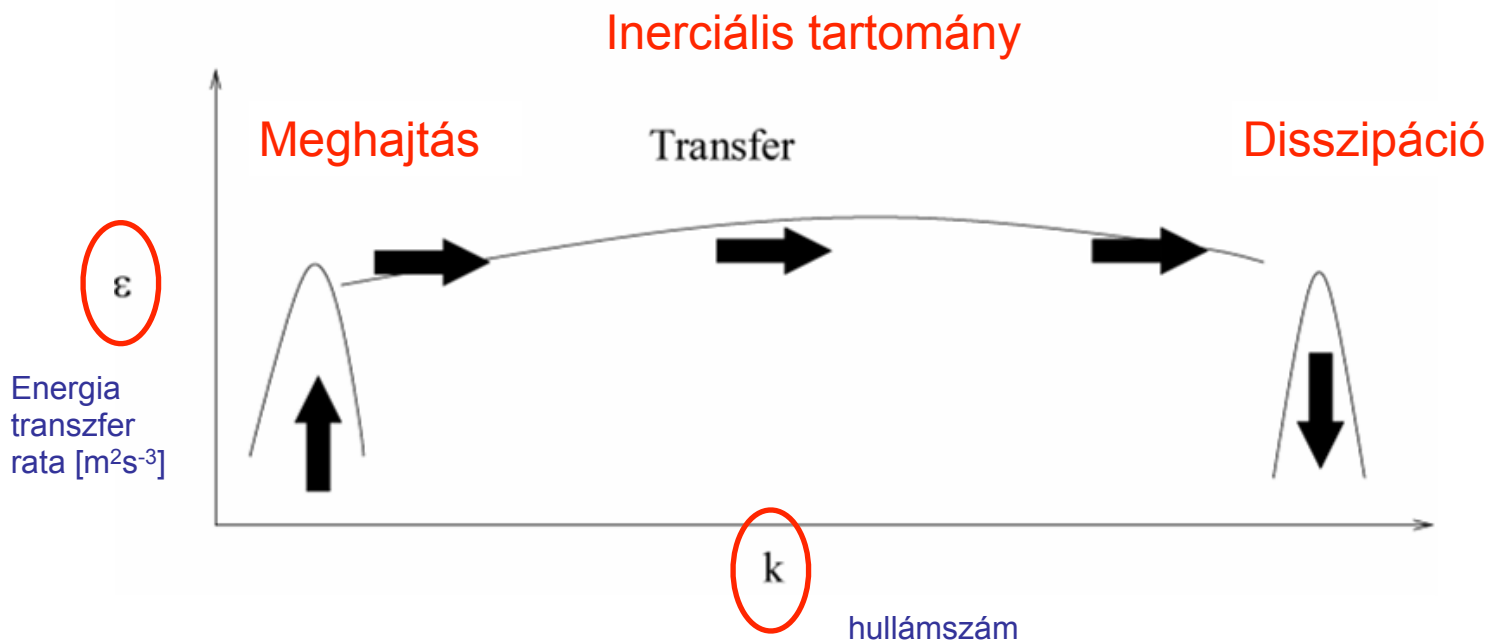
- Tfh: "L" a legeffektívebb hosszskála a transzport szempontjából
- "u" a turbulens sebességfluktuációk RMS értéke ~ 5 cm/s

$$t_t \sim \frac{L}{u} = \frac{500 \text{ cm}}{5 \text{ cm/s}} = 100 \text{ s} (2 \text{ min})$$

Levegőben a Prandtl-szám: $\nu/\gamma = 0.73 \Rightarrow \gamma \approx \nu$

Energia Kaszkád

Turbulens állapotban az energia áramlik a skálák között:





Kolmogorov elmélet

1941-es nevezetes munkájában dimenzió analízist használva megjósolta a spektrum alakját az **inerciális tartományban** (a disszipáció és a hajtás lokálisan elhanyagolható ebben a tartományban).

Univerzális viselkedés, független a dinamika részleteitől.

Energia transzfer ráta (ϵ) állandó és független **k-tól**.
(stacionér turbulencia)

3D izotróp turbulencia:

$$E_k = C \epsilon^{2/3} k^{-5/3}$$

Eltérések ettől az elmélettől megfigyelhetők:
hosszú távú korrelációk,
intermittens fluktuációk.

2D turbulencia

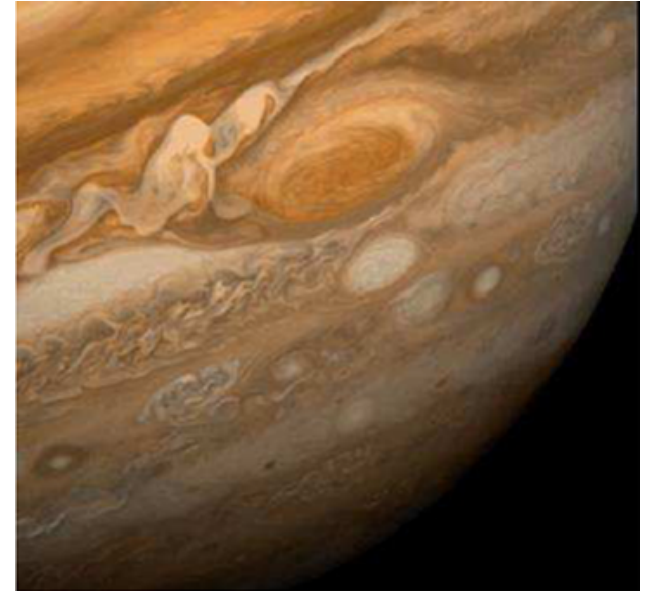
A sebesség egy 2D síkra korlátozódik

- geometriailag kvázi 2D-re korlátozott áramlások
- forgó rendszerek (Coriolis force $\sim$ Lorenz force)
- Plazma turbulencia mágneselesen összetartott fúziós berendezésekben (erős mágneses tér)

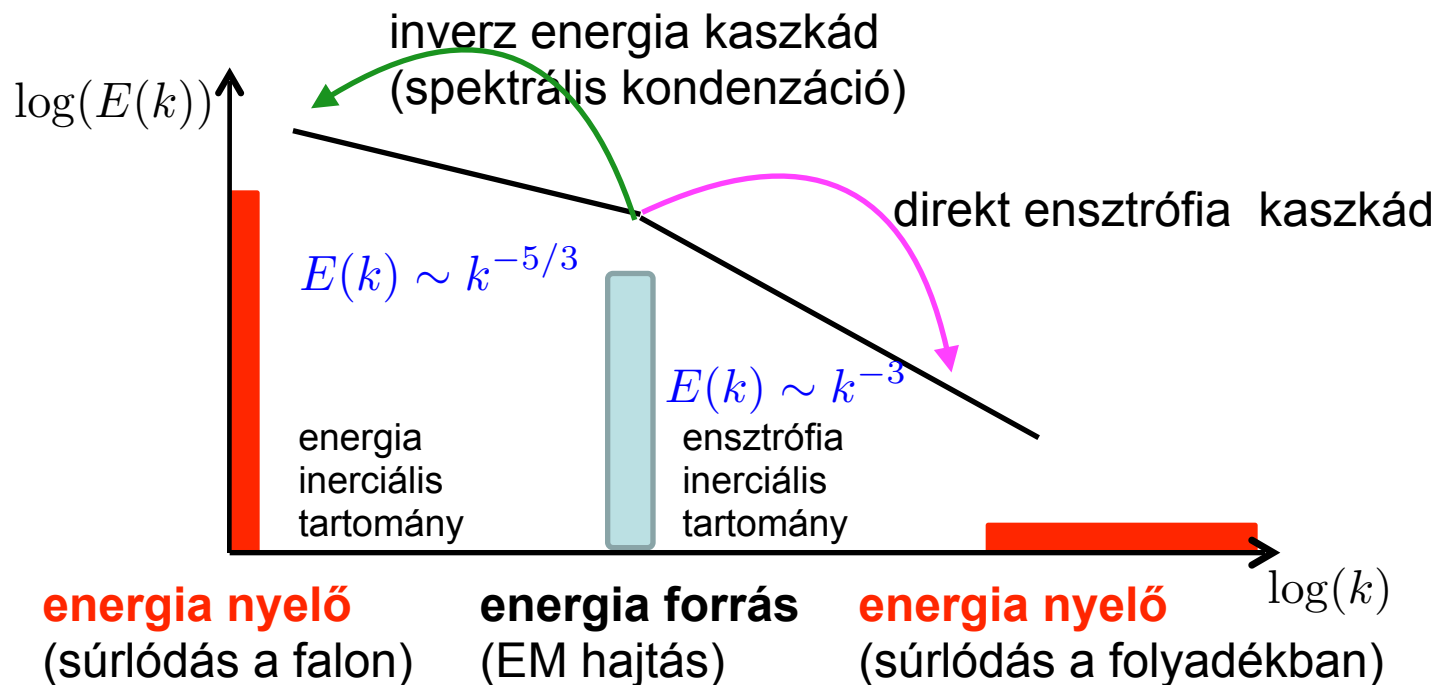
A 2D turbulencia jellemzői:

- két független megmaradó mennyiség:
 - energia: $E = \frac{1}{2} \langle v^2 \rangle$
 - ensztrófia: $\Omega = \frac{1}{2} \langle \omega^2 \rangle$
- két **inerciális tartomány** (az energia és az ensztrófia számára), különböző spektrummal
- duális kaszkád – inverz energia kaszkád és direkt ensztrófia kaszkád

Jupiter

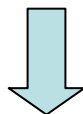


A Kolmogorov-Kraichnan-féle duális kaszkád

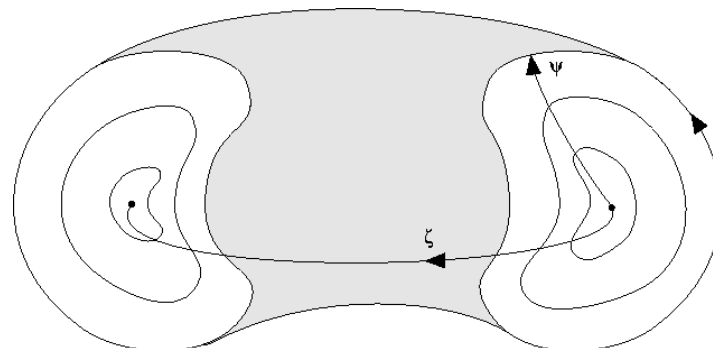


Miért érdekelt minket a plazma turbulencia?

- Az energia és részecske transzport **anomális!**

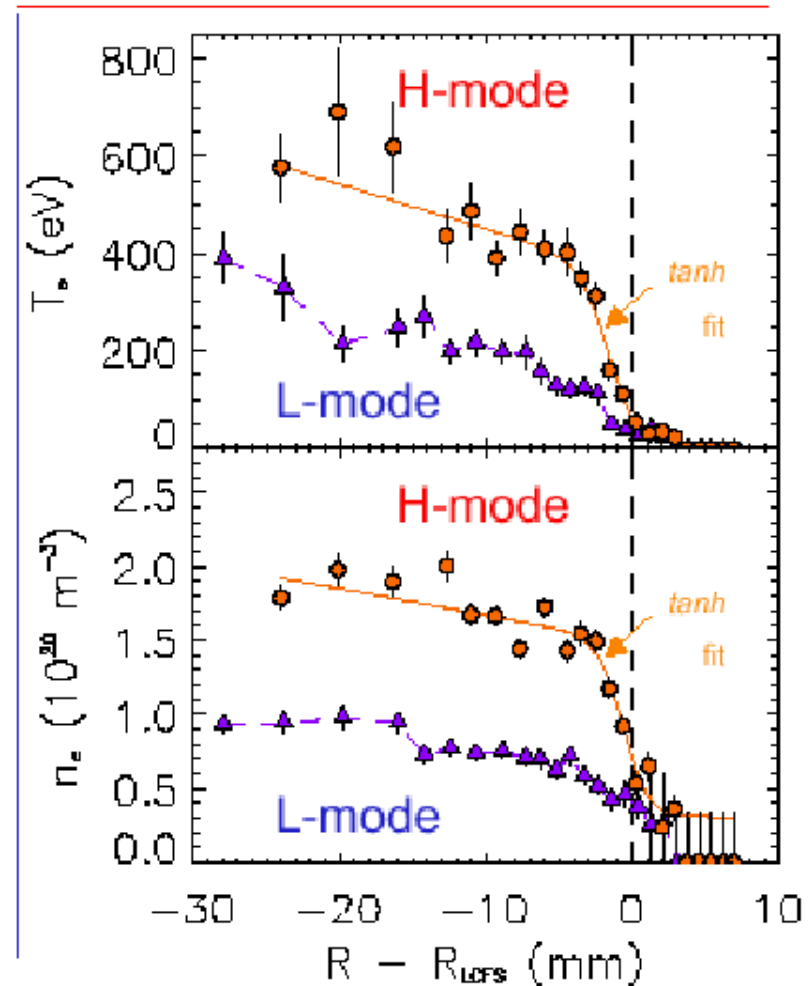
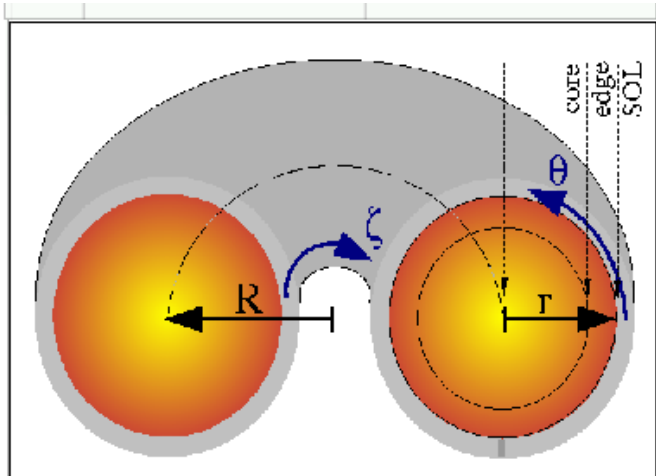


Hatással van a plazma összetartásra



- Az L-H átmenet megértése kulcsfontosságú

- spontán átmenet a plazma állapotába
- meredek gradiensek épülnek fel
- kis fluktuációs amplitúdók



Hogyan vizsgáljuk kísérletileg a plazma turbulenciát?

- mérjük a különböző fizikai mennyiségek (sűrűség, elektrosztatikus potenciál, hőmérséklet) tér- és időbeli fluktuációinak tulajdonságait.

Diagnosztikák:

- Szondák (Langmuir, Mirnov)
- BES
- Gas Puff Imaging (GPI)
- Reflektometria
- HIBP, ABP

...

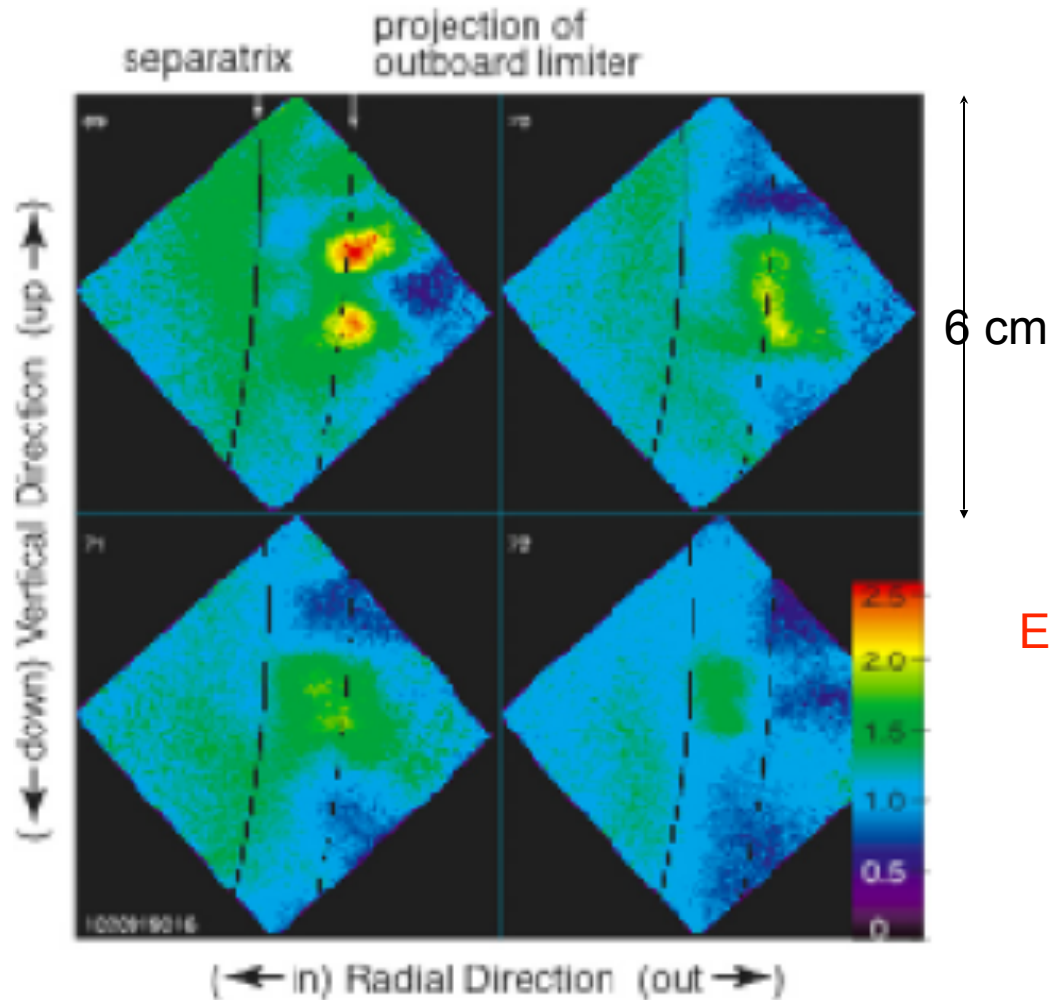
Adatfeldolgozás:

- Amplitúdó eloszlások, momentumok
- Autokorrelációs és keresztkorrelációs függvények
- Spektrális módszerek

...

2D turbulens
struktúrák az Alcator
C-Mod tokamakban
(MIT).

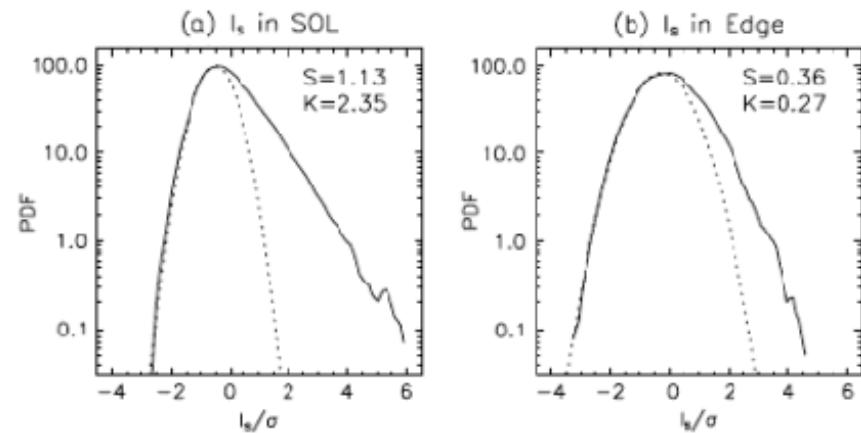
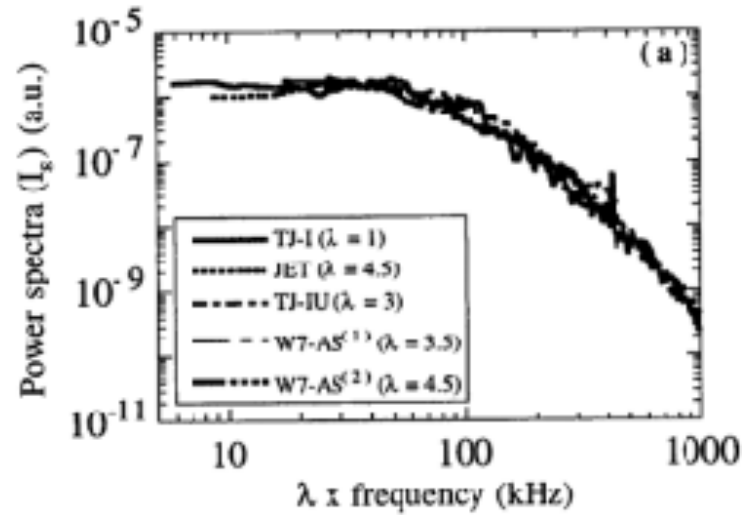
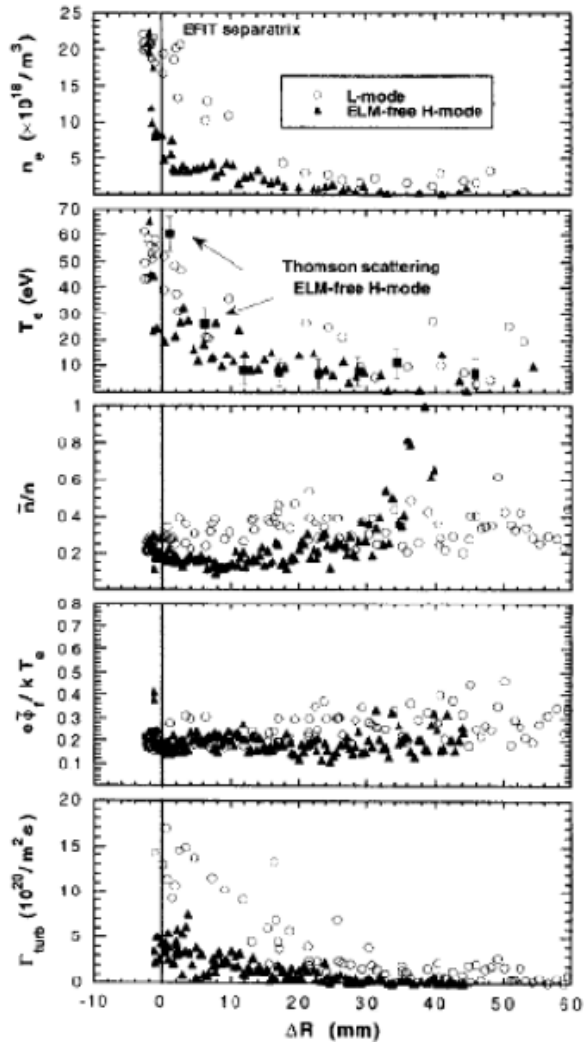
Gas Puff Imaging



Exp. Idő = 2 μ s

$\Delta T = 16$ ms.

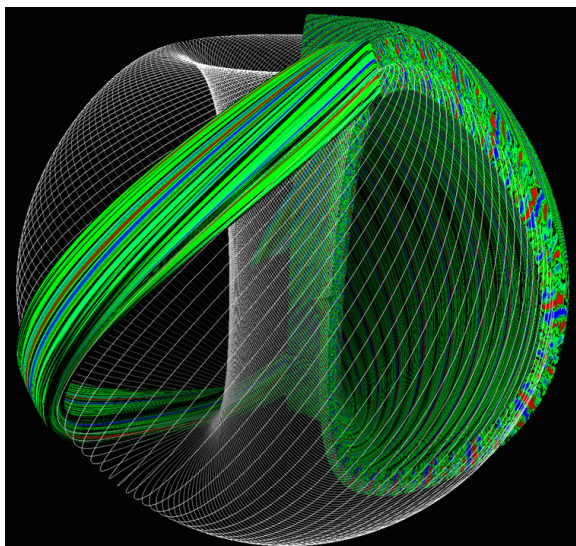
SJ Zweben et. al. PPCF, 2007



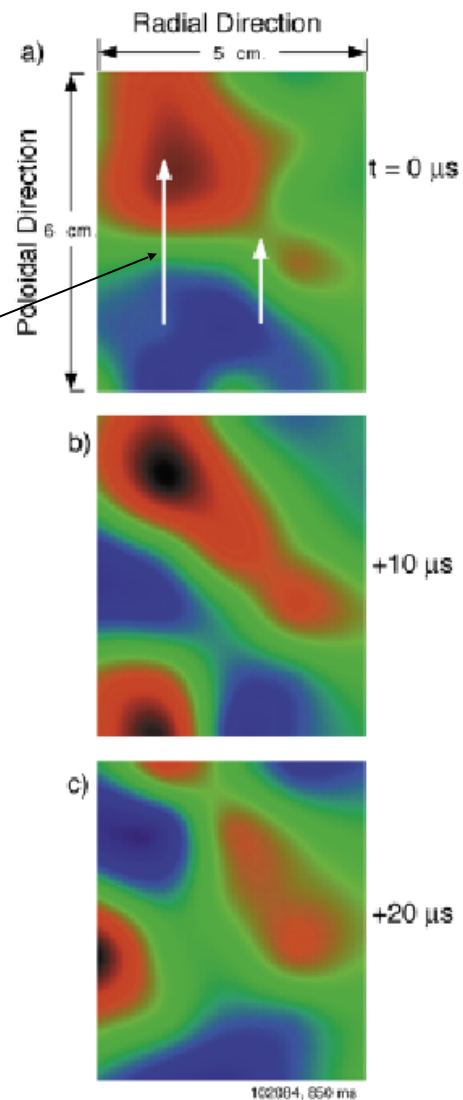
BES (Nyalábemissziós spektroszkópia) a DIII-D tokamakon

2D sűrűség fluktuációk

Szimulációk!

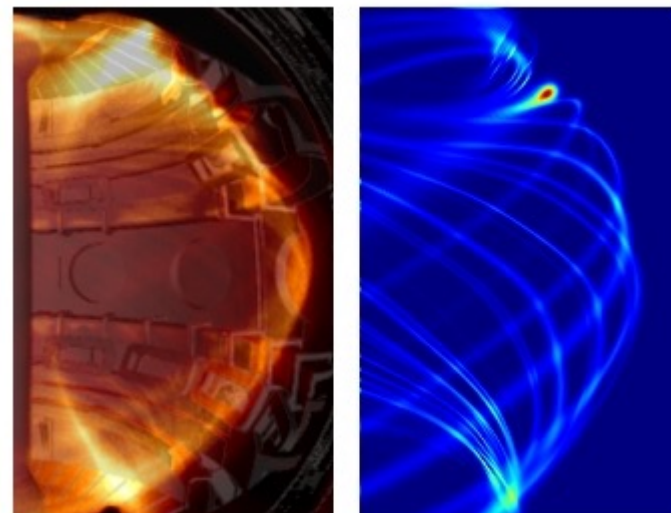


Lokális átlagos áramlás
iránya (kvalitatív)



Eddigi kísérletek összefoglalása:

- szélessávú sűrűségfluktuációk (10 kHz – 1 MHz); a korrelációs idők néhány mikroszekundum nagyságúak.
- $\delta n/n \sim 5 - 100\%$; $\delta n/n \sim (0.3 - 0.5) \delta T/T$
- a mágneses fluktuációk relatíve kicsik: $\delta B_r/B_t \sim 10^{-5}$
- toroidálisan elnyúlt 'filamentum'-szerű struktúrák
- a radiális-poloidális síkon lokalizáltak: 0.1 – 10 cm



Drift hullámok (DW):

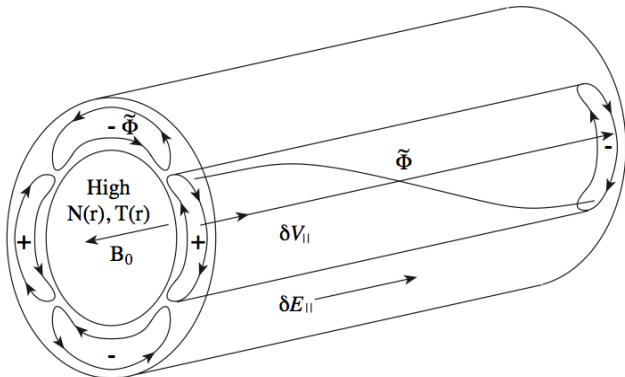
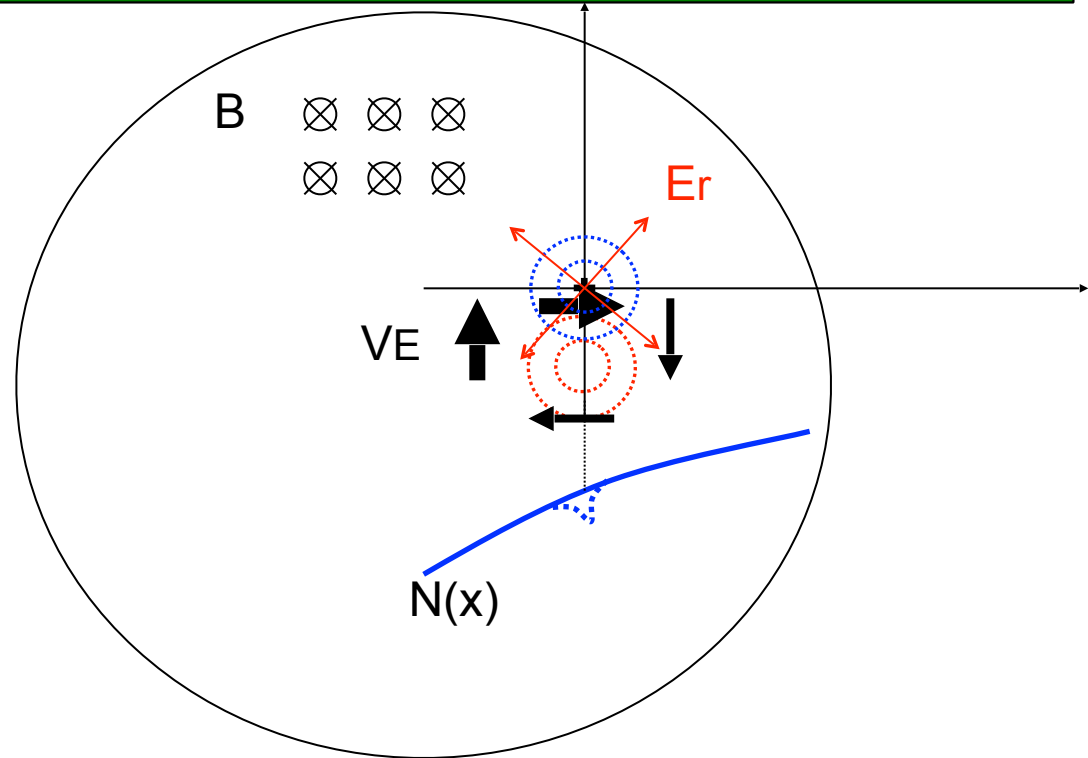
Két-folyadék modell

Kis frekvenciák: $\omega_{dw} \ll \omega_{ci}$

Adiabatikus elektronok $\frac{\tilde{n}_e}{n_0} \approx \frac{e\tilde{\phi}}{k_B T_e}$

Lin. Diszperziós reláció

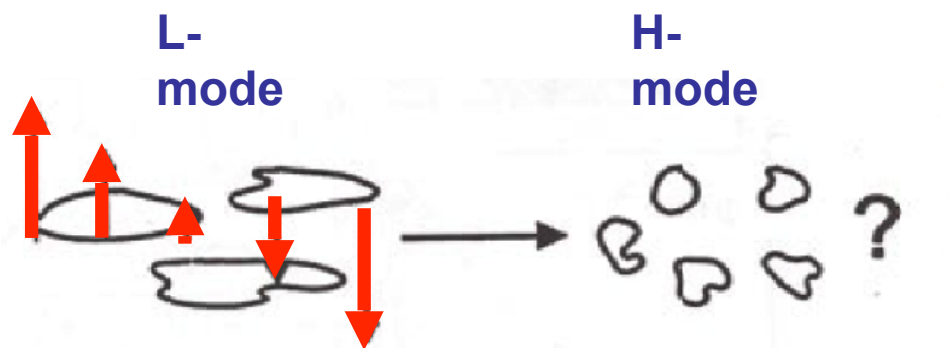
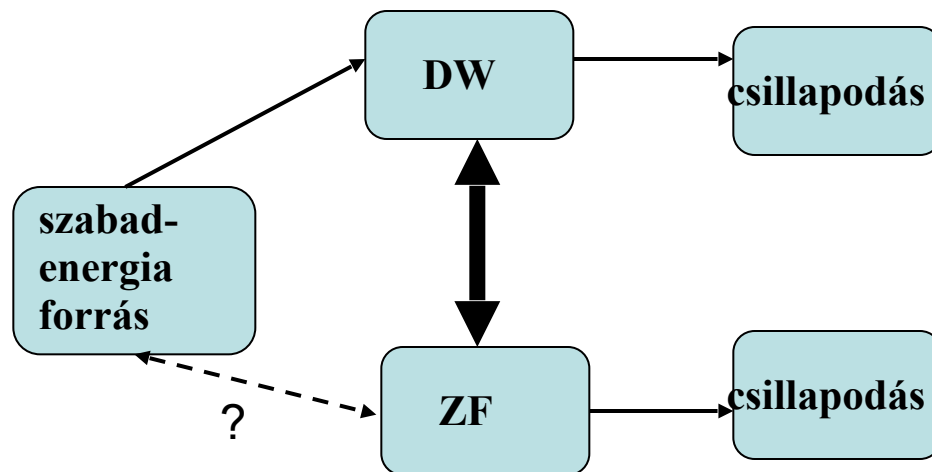
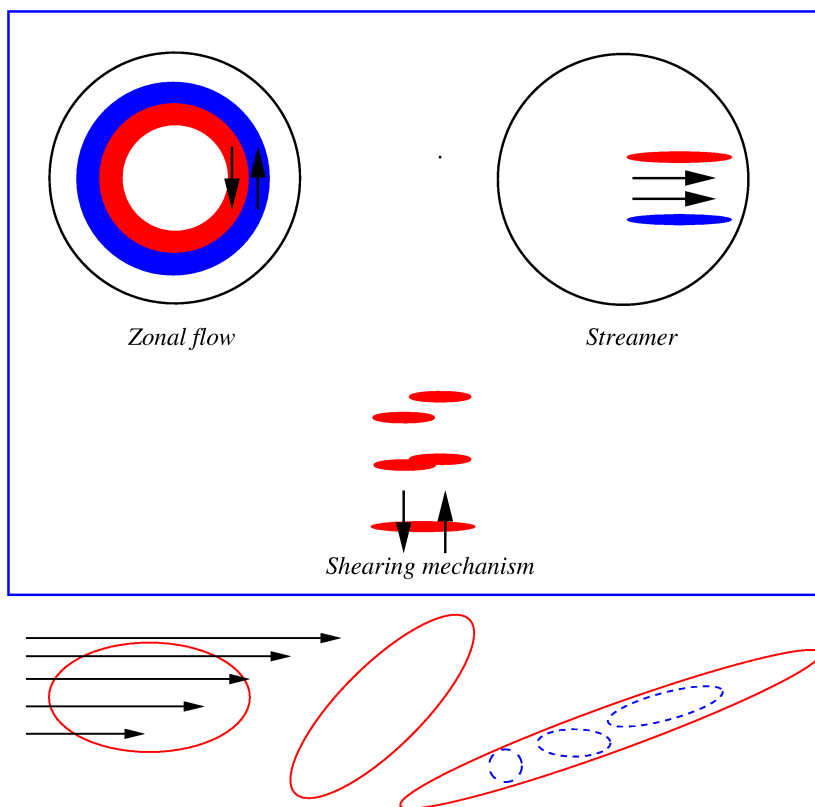
$$\frac{\omega_{dw}}{k_y} = v_{*e} \equiv \left| \frac{\mathbf{B} \times \nabla p}{en_e B^2} \right|$$



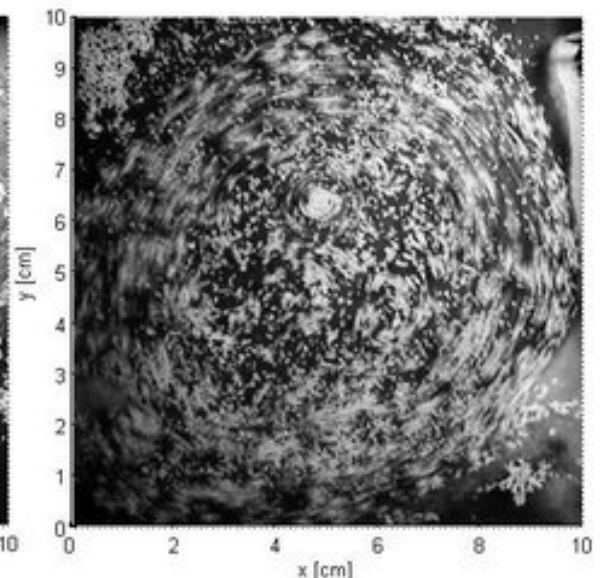
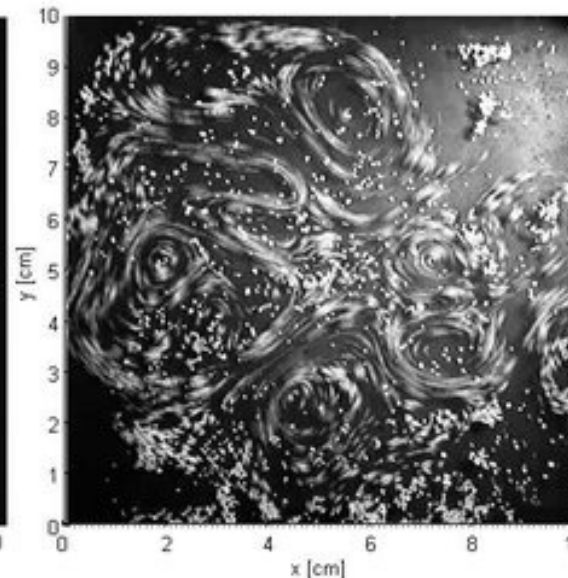
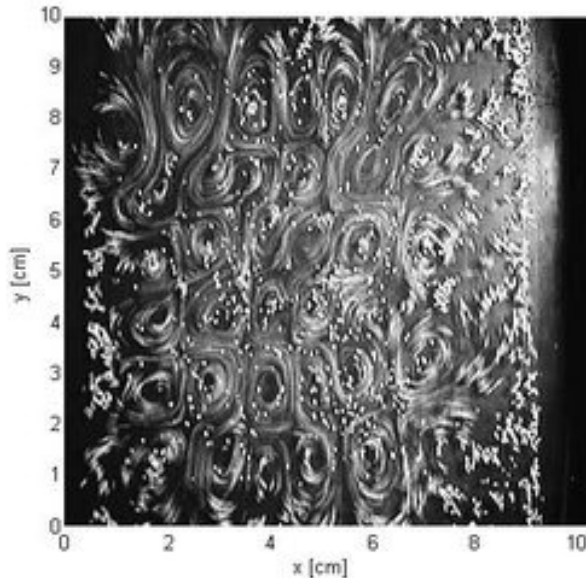
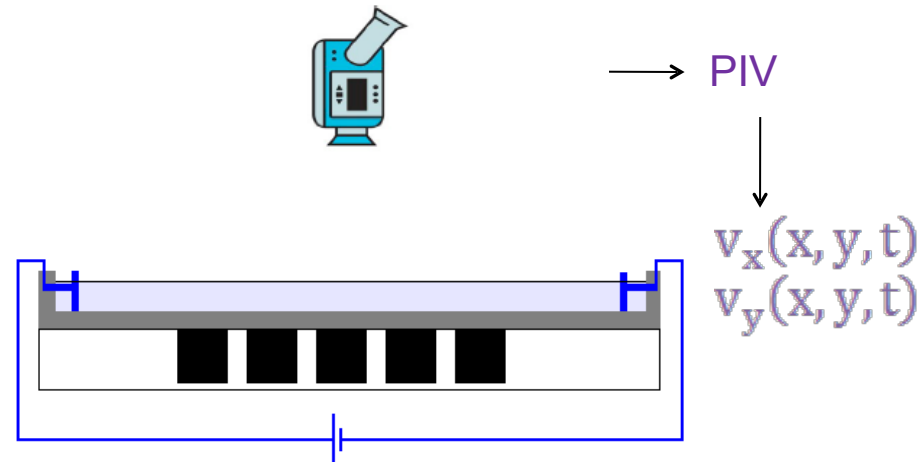
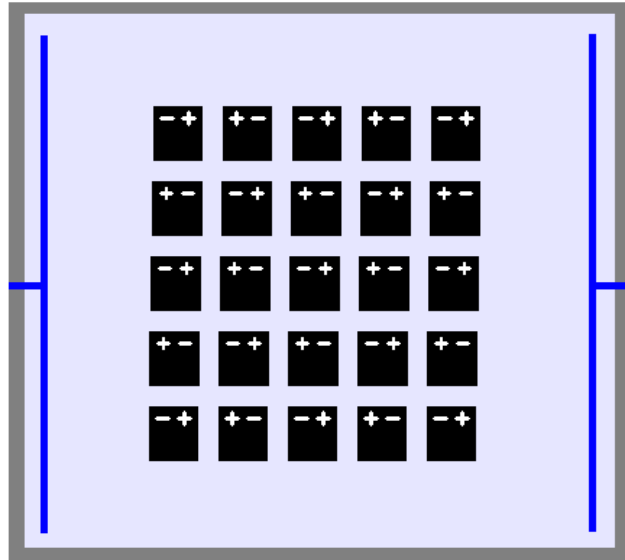
DW-instabilitás $\longrightarrow$ DW-turbulencia

Ha nem tisztán adiabatikusak az elektronok

Zonális áramlások fizikai alapjai



Nyírt $E \times B$ áramlás



$h = 3 \text{ mm}$

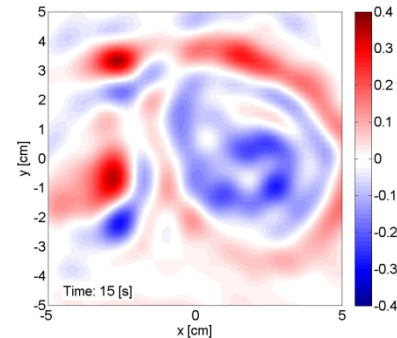
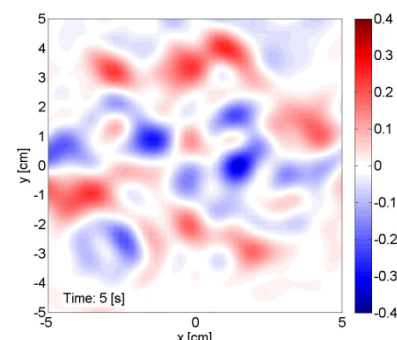
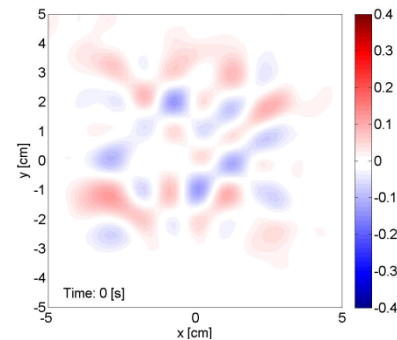
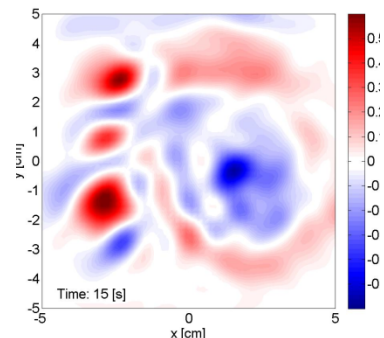
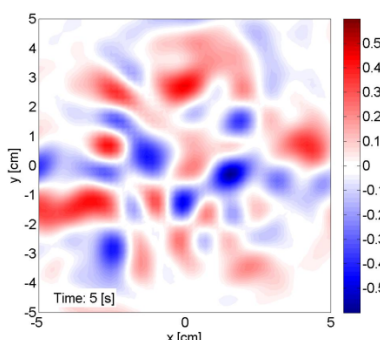
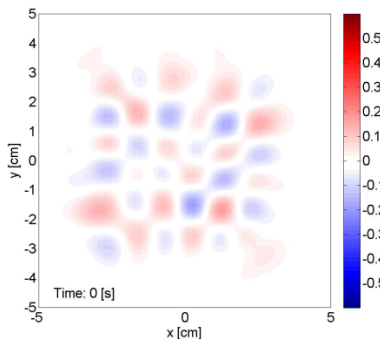
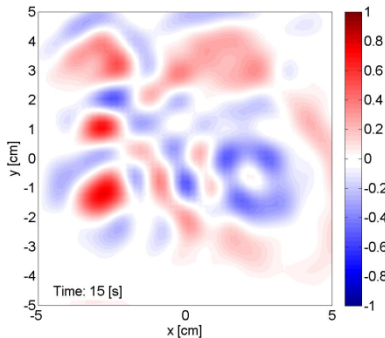
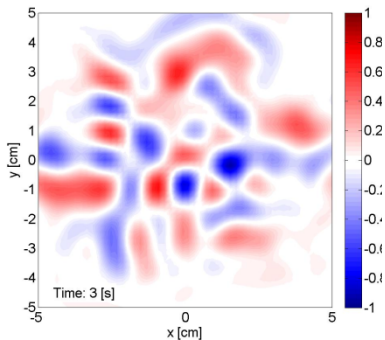
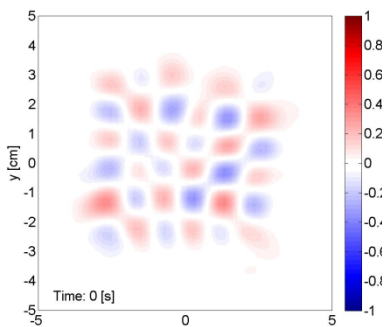
$h = 5 \text{ mm}$

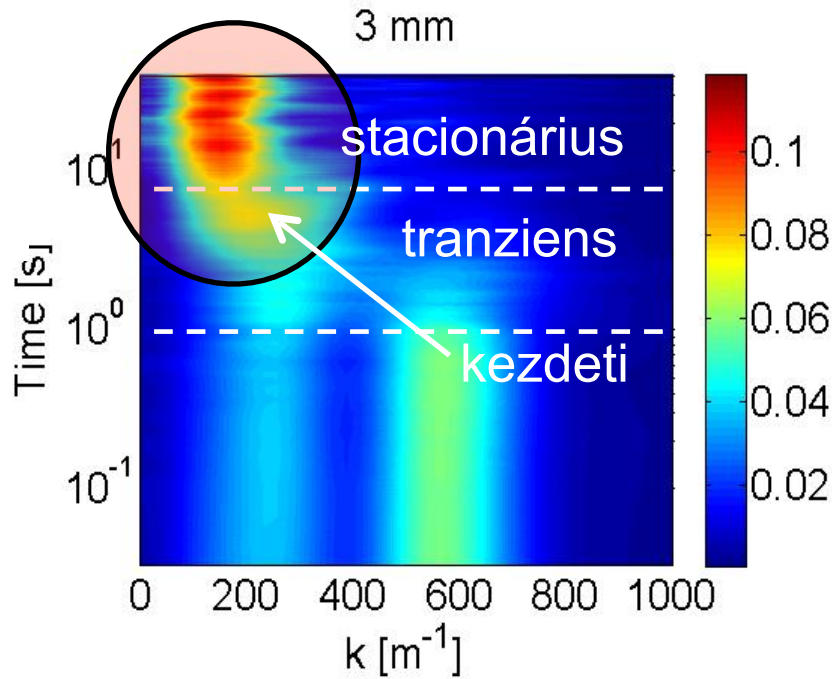
$h = 6 \text{ mm}$

Kezdeti
állapotok

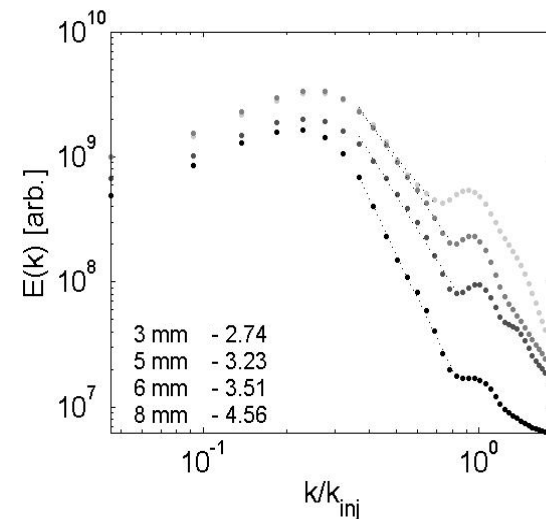
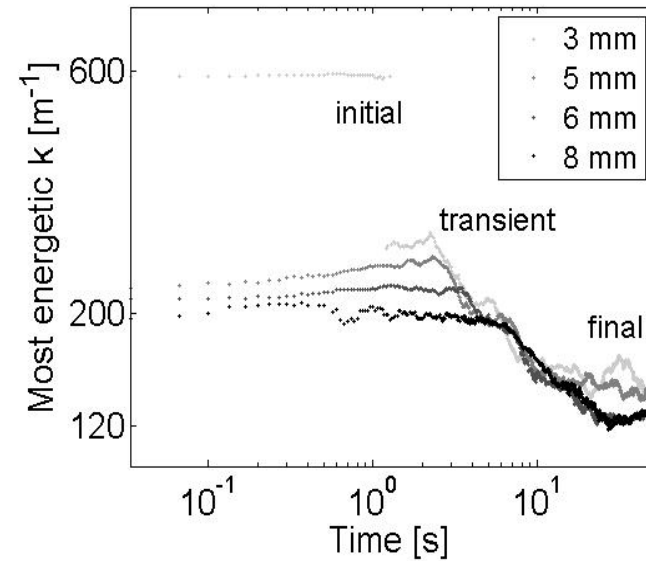
Tranziens
állapotok

Stacionárius
állapotok





Spektrum átlaga a stacionárius állapotban





KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!