

Turbulência no Helimak

(Universidade do Texas, Austin)

Trabalho de tese de Dennis Lozano Toufen

Sumário

1. Introdução
2. Texas Helimak
3. Caracterização do Plasma do Helimak
4. Propagação de ondas e turbulência
5. Transporte caótico

1. Introdução

- Turbulência da borda do plasma causa transporte de partículas nessa região.
- Transporte de partículas na borda depende do perfil do campo elétrico radial.
- Eletrodos modificam perfil radial do potencial elétrico.

3. Texas Helimak: visão geral

- Máquina localizada na University of Texas at Austin;
- Dados obtidos pela equipe do Prof. K. W. Gentle e analisados em colaboração;
- Grande parte do plasma apresenta características similares às da borda do plasma em tokamaks:

Parâmetros TCABR:*

Dens. central de elétrons: $n_e = 1 \text{ a } 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
Dens. do plasma no SOL : $n_e = 1,5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
Temp. média de elétrons : $T_{e_média} = 400 \text{ eV}$
Temp. dos elétrons na borda : $T_e = 10 \text{ a } 20 \text{ eV}$
Temp. dos elétrons no SOL : $T_{e_SOL} = 5 \text{ eV}$

Parâmetros Texas Helimak:**

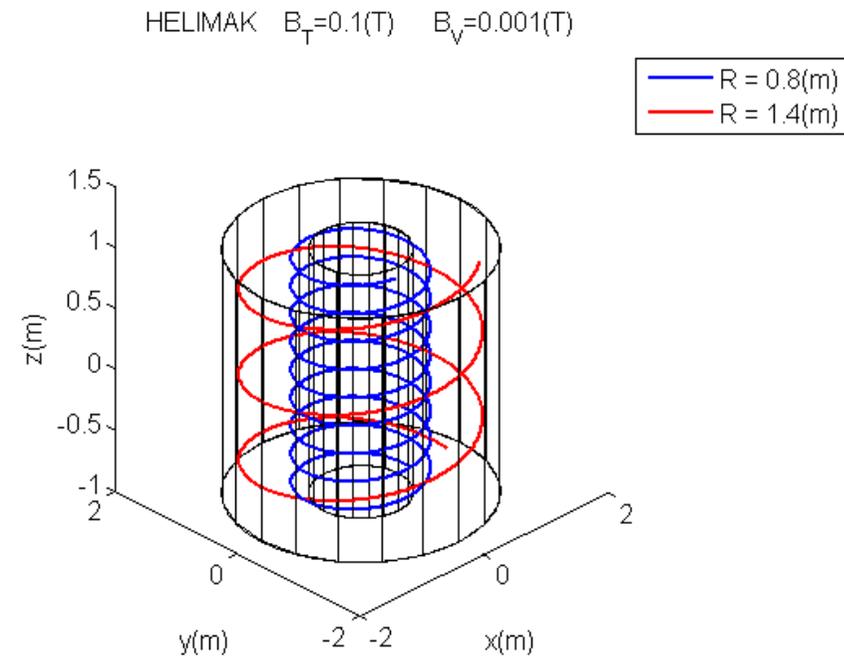
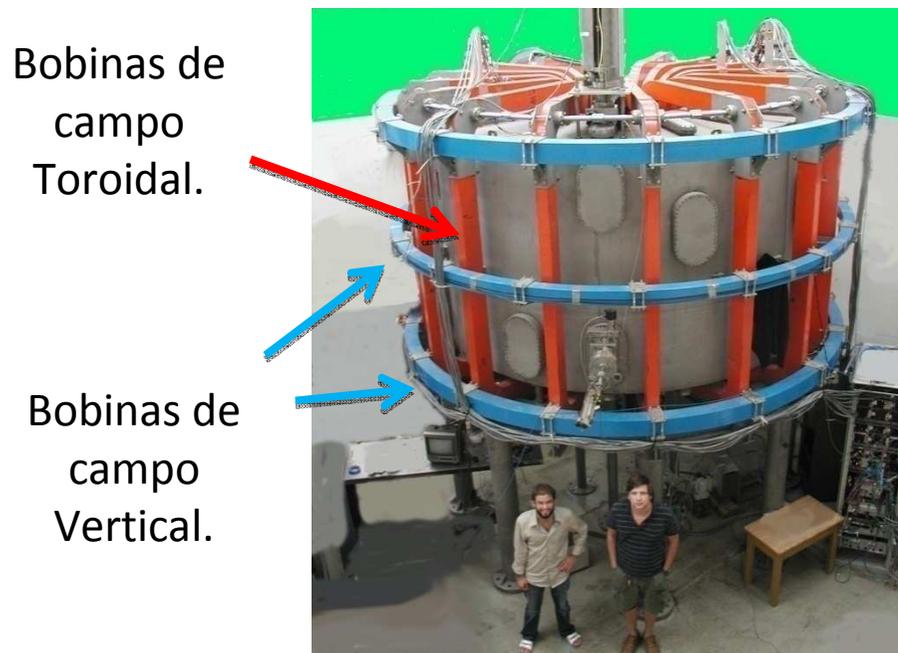
Dens. dos elétrons: $n \leq 10^{17} \text{ m}^{-3}$
Temp. típica de elétrons : $T_{e_média} = 10 \text{ eV}$

*Dos SANTOS LIMA, G. Z.; Tese de doutorado IFUSP 2009.

** GENTLE, K. W.; HUANG He; **Plas. Sc. Tec.** 10, 1, 2008.

Texas Helimak: campo magnético

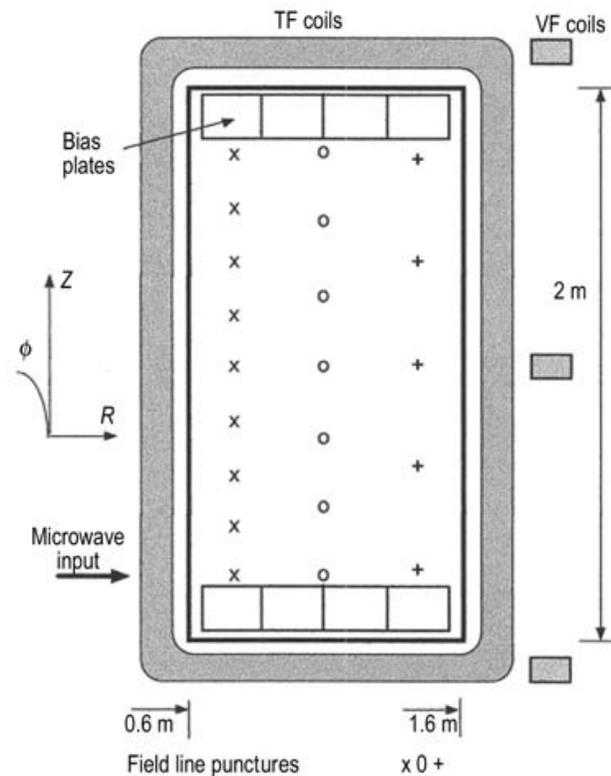
- A configuração das bobinas produz um campo toroidal principal somado a um campo vertical menos intenso, resultando em **linhas de campo helicoidais**.



GENTLE, K. W.; <http://www.ph.utexas.edu/~phy315>.

Texas Helimak: dimensões principais

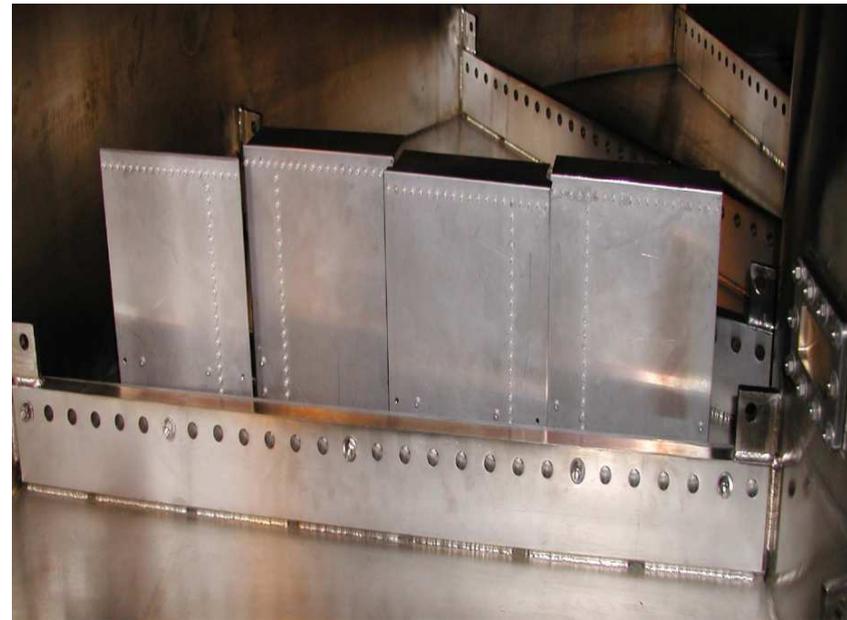
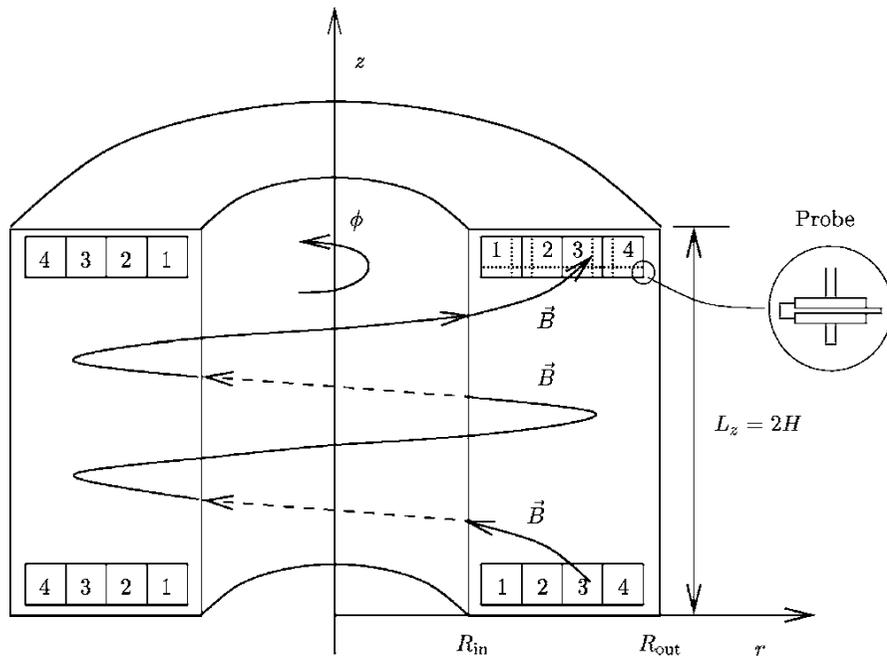
- As dimensões principais do Texas Helimak são: altura = 2m, raio menor = 0,6m e raio maior = 1,6m.
- Possui placas no topo e no fundo do vaso para imposição de potencial externo (bias).



GENTLE, K. W.; HUANG He; **Plas. Sc. Tec.** 10, 1, 2008.

Texas Helimak: diagnósticos

- O sistema de diagnóstico possui aprox. 700 sondas de Langmuir fixadas nas placas usadas para aplicar o bias.
- O sistema de aquisição possui dois ADCs: um rápido (100 kHz) com 16 canais e um lento (7kHz) com 64 canais.



PEREZ, J. C.; et. al.; **Phys. Plas.** 13, 032101, 2009.
GENTLE, K. W.; <http://www.ph.utexas.edu/~phy315>.

Texas Helimak: equilíbrio MHD

- Assumindo:

- Plasma uniforme nas direções vertical e toroidal. O equilíbrio depende somente da coordenada radial (r).

Equação de balanço de forças. 
$$\frac{d}{dr} \left(p + \frac{B_z^2}{2\mu_o} \right) + \frac{B_\phi}{\mu_o r} \frac{d}{dr} (rB_\phi) - \frac{\rho v_\phi^2}{r} = 0$$

- Perturbação do tipo: $\xi(r, \phi, z) = \xi(r) e^{(in\phi + ik_z z)}$

$$0 < \frac{2\mu_o \langle p \rangle}{B_z^2} < - \frac{1}{\frac{1}{p} \frac{dp}{dr} R_o} \quad \leftarrow \text{Critério de estabilidade.}$$

PEREZ, J. C.; et. al.; **Phys. Plas.** 13, 032101, 2009.

Texas Helimak: Ondas de deriva

- Assumindo:
 - Plasma como um sistema de dois fluidos:

Equação de movimento para dois fluidos. \rightarrow

$$\begin{cases} m_s n_s \frac{d}{dt} \mathbf{v}_s = -\nabla p_s + e_s n_s (\mathbf{E} + \mathbf{v}_s \times \mathbf{B}) + \mathbf{R}_s, & s = \{e, i\} \\ \text{sendo: } \mathbf{R}_e = m_e n_e \nu_e (\mathbf{v}_{i\parallel} - \mathbf{v}_{e\parallel}) \hat{\mathbf{b}} \end{cases}$$

Linearizando: $n(r, \varphi, z, t) = n_0(r) + \tilde{n}(r) e^{(-i\omega t - il\varphi + ik_z z)}$

Relações de dispersão:

Assumindo potencial uniforme e dissipação zero: \rightarrow

$$(1 + k_{\perp}^2 \rho_s^2) \tilde{\omega}^2 - (\omega_* - \omega_D) \tilde{\omega} - k_{\parallel}^2 c_s^2 = 0$$

Assumindo B e n uniforme: \rightarrow

$$(1 + k_{\perp}^2 \rho_s^2) \tilde{\omega} = \omega_* - \omega_D + i \frac{(\omega_* - \omega_D) \tilde{\omega}}{v_{\parallel}}$$

$\tilde{\omega} = \omega - \mathbf{k}_{\perp} \cdot \mathbf{v}_E^0$ \rightarrow Frequência com correção Doppler.

$\omega_D = \frac{2k_{\perp} T_e}{eBR_c}$ \rightarrow Frequência de deriva devida ao gradiente do campo e sua curvatura.

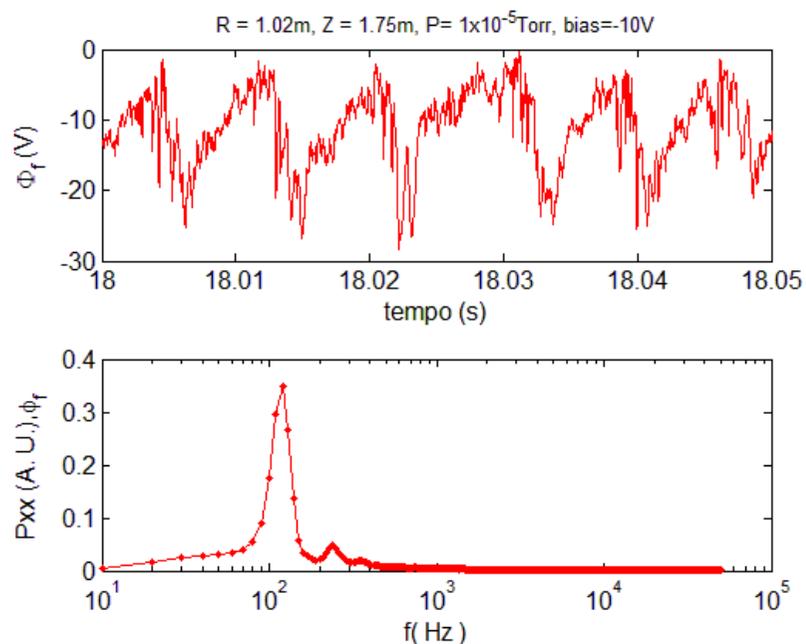
$\omega_* = \frac{k_{\perp} T_e}{eBL_n}$ \rightarrow Frequência de deriva diamagnética

PEREZ, J. C.; et. al.; **Phys. Plas.** 13, 032101, 2009.
 LUCKHARDT, S.; < <http://orion.ph.utexas.edu/~starpower/> >.

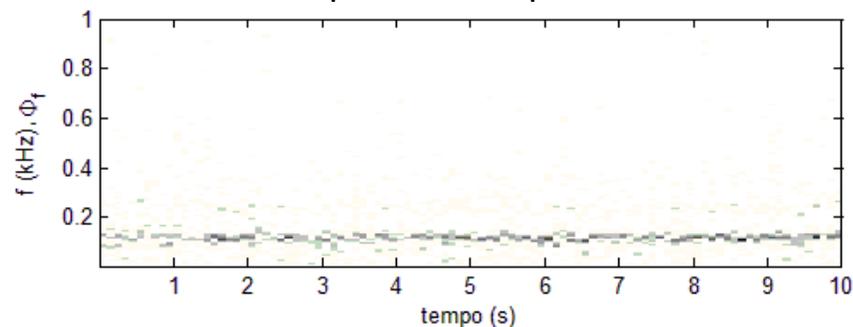
4. Métodos de análise, para uma sonda

- Análise Espectral:
 - Fornece informações sobre fenômenos de turbulência e ondas.
 - Para uma análise sensível também ao tempo, pode-se utilizar transformada de Fourier Janelada ou transformada *Wavelet*. Neste trabalho, até aqui, utilizou-se Fourier Janelada.

Espectro de potencia de uma série temporal: $P^j_{xx}(f) = X^j(f)X^{j*}(f)$



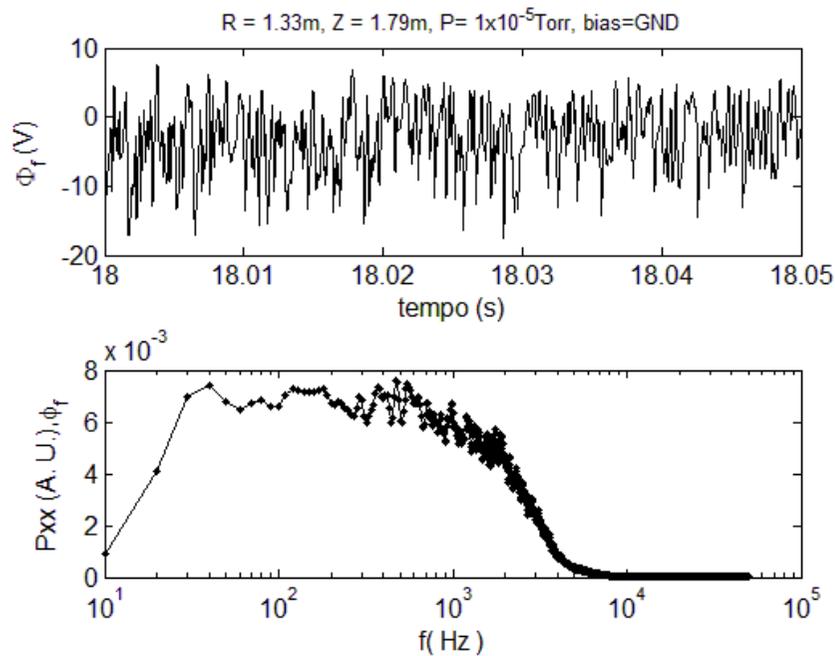
Espectrograma de potencia em função do tempo e da frequência:



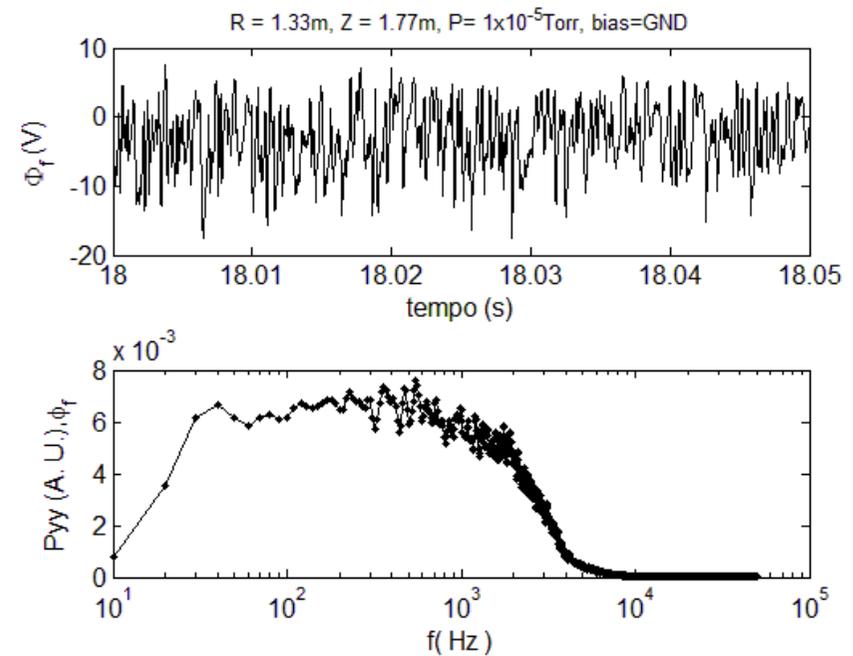
Métodos de análise, para duas sondas

- Mesma coordenada radial ($R=1,33$ m) e mesmo disparo (bias=Ground).
- Coordenada vertical (z) diferente:

Z=179 cm:



Z=177 cm:



Métodos de análise, para duas sondas

Espectro de cruzado de duas séries temporais:

$$C^{j}_{xy}(f) = X^j(f)Y^{j*}(f) \Rightarrow C^{j}_{xy}(f) = |C^{j}_{xy}(f)|e^{i\theta^j(f)}$$

Espectro do número de onda:

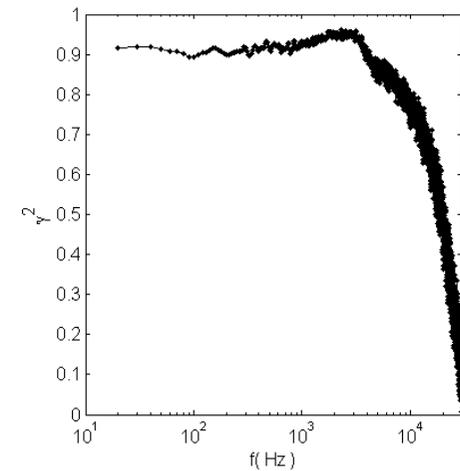
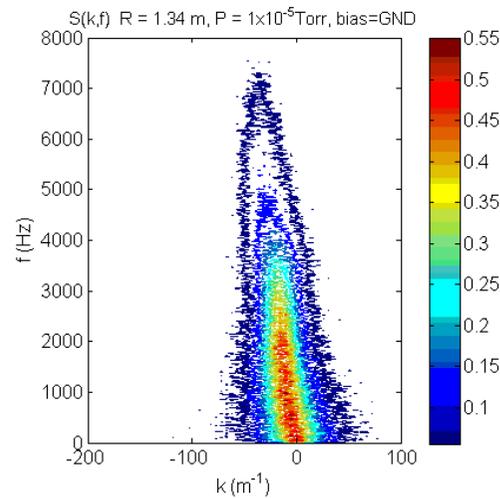
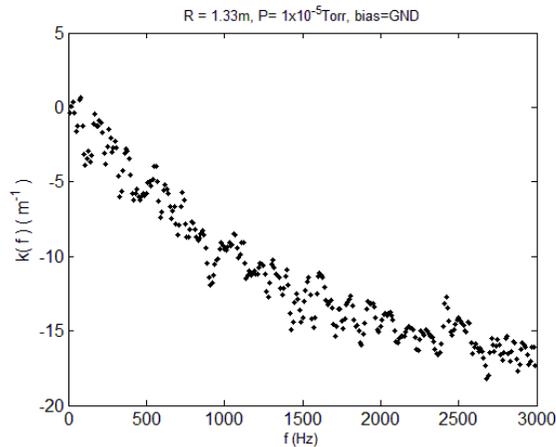
$$k^j(f) = \frac{\theta^j(f)}{\Delta d}$$

Espectro de potencia em função da frequência e do número de onda:

$$S_{xy}(k, f) = \sum_j \delta_{k,k^j} \delta_{f,f^j} |C^{j}_{xy}(f)|$$

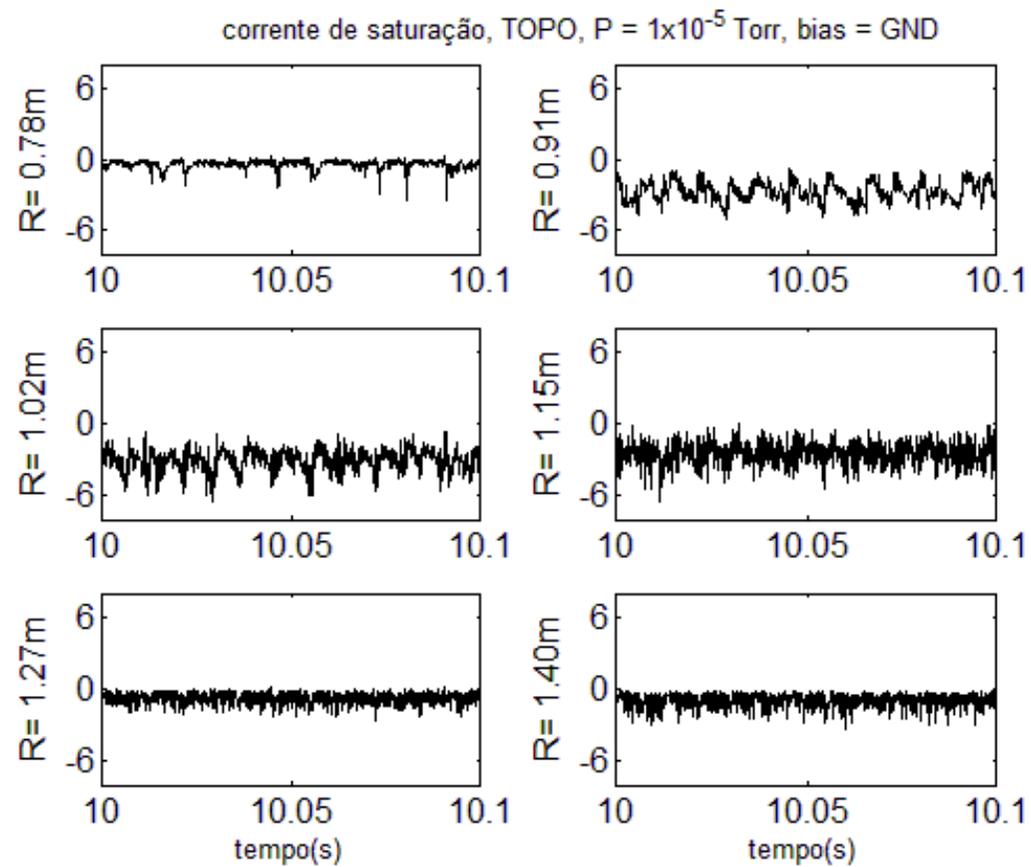
Espectro de coerência:

$$\gamma^2_{xy}(f) = \frac{|\langle C^{j}_{xy}(f) \rangle|^2}{\langle P^{j}_{xx}(f) \rangle \langle P^{j}_{yy}(f) \rangle}$$



Métodos de análise

- Análise Estatística das flutuações:



Nível de
Turbulência:
(p/ I sat.)

$$\frac{\sigma}{\langle x(t) \rangle}$$

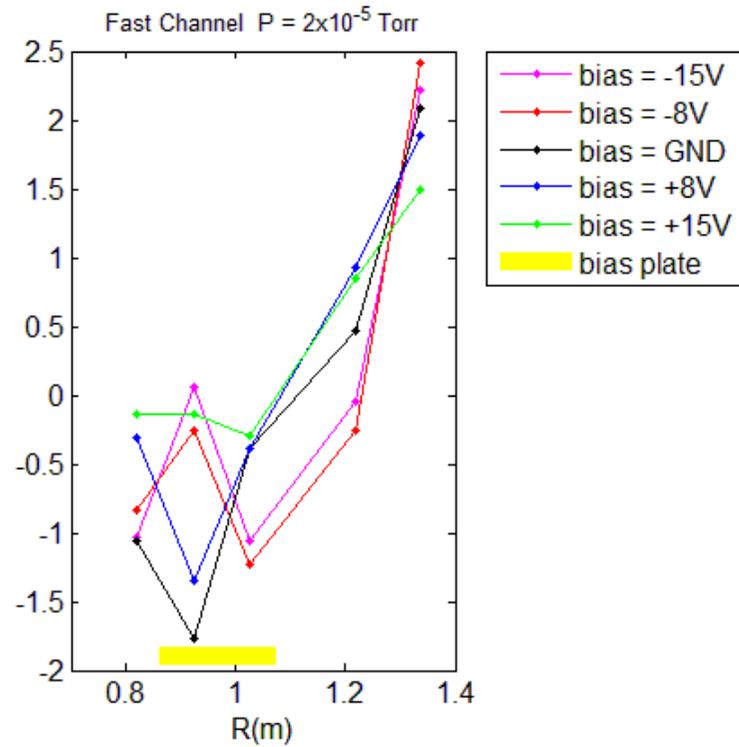
Métodos de análise

- Transporte turbulento:
 - O transporte devido a turbulência é dado pela expressão:

$$\Gamma_r = \langle \tilde{n}(t) \tilde{v}_r(t) \rangle$$

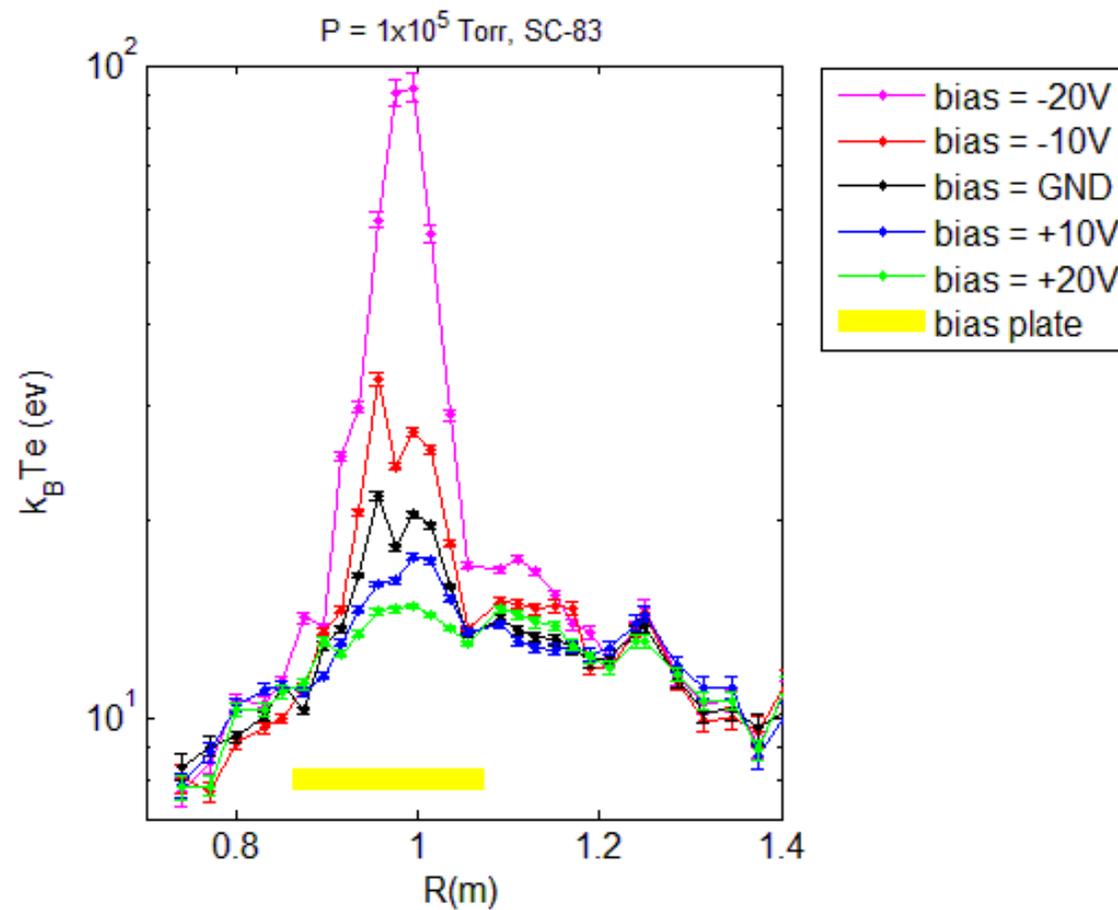
$$\mathbf{v}_{ExB} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \quad \longrightarrow \quad \Gamma_r \propto - \left\langle \tilde{n} \tilde{E}_z \right\rangle_t$$

$$E_z \cong - \frac{\langle \Delta \phi_p \rangle}{\Delta z} \quad \longrightarrow \quad E_z \cong - \frac{\langle \Delta \phi_f \rangle}{\Delta z}$$



Métodos de Análise

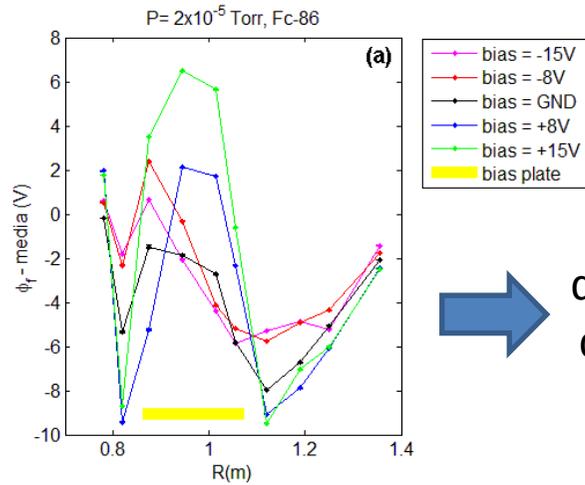
- Medidas de temperatura:
 - Um das formas de estimar a temperatura dos elétrons no plasma e medindo a curva tensão x corrente na sonda:



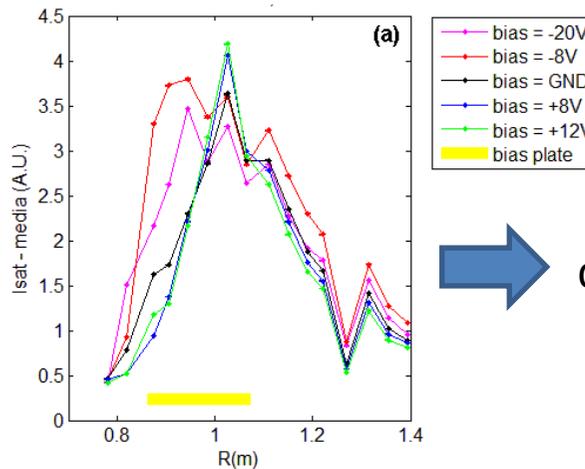
5. Caracterização do Plasma do Helimak

- Dados para plasma com **Pressão Alta** (2×10^{-5} Torr):

Perfis de ϕ_f e I_{sat} :

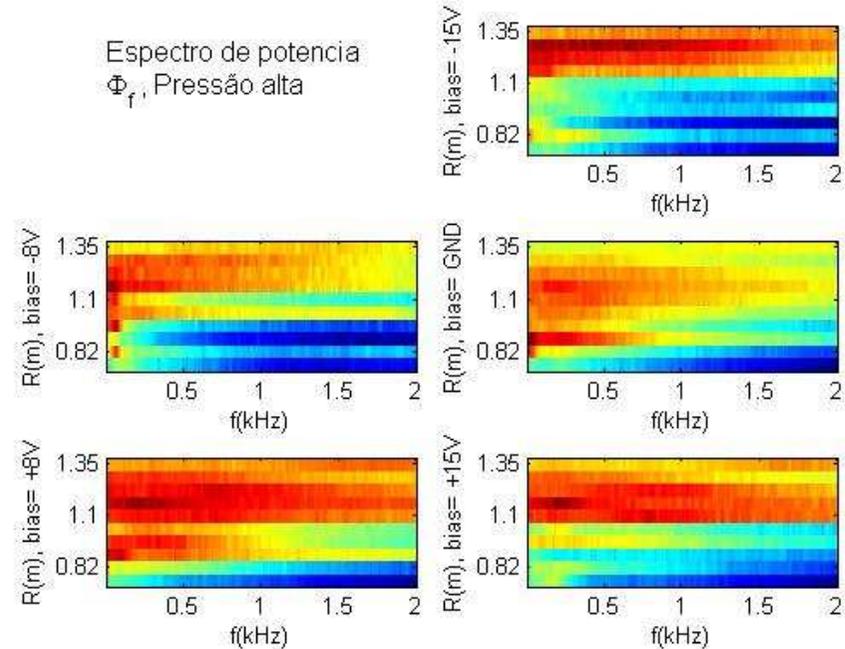


Forte dependência do bias e do raio.



Pouco dependente do bias.

Espectros de Potência para ϕ_f :

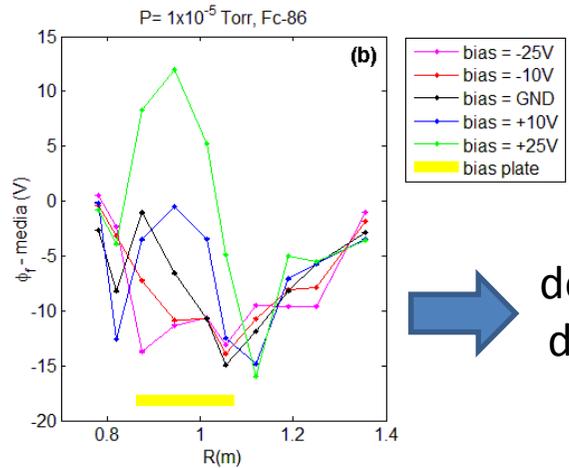


- Pouco dependente do bias.
- Diferença clara entre raios internos (B alto) e externos (B baixo).
- Domínio de modos de banda larga.

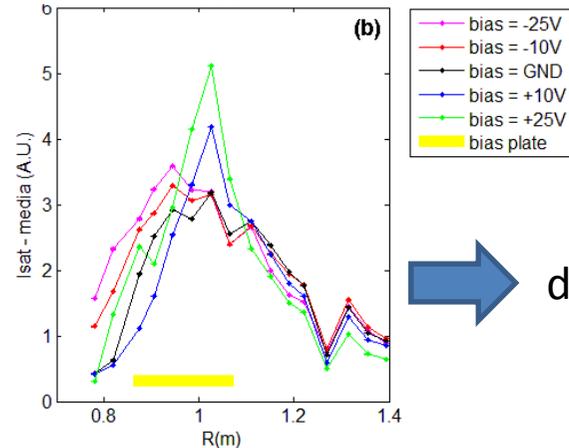
Caracterização do Plasma do Helimak

- Dados para plasma com **Pressão Baixa** (2×10^{-5} Torr):

Perfis de ϕ_f e I_{sat} :

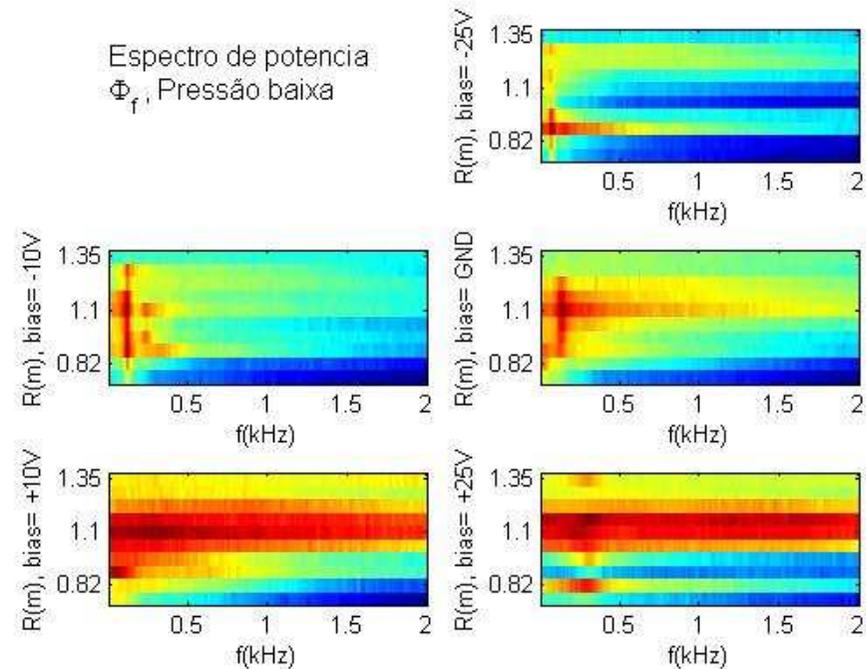


Forte dependência do bias e do raio.



Pouco dependente do bias.

Espectros de Potência para ϕ_f :

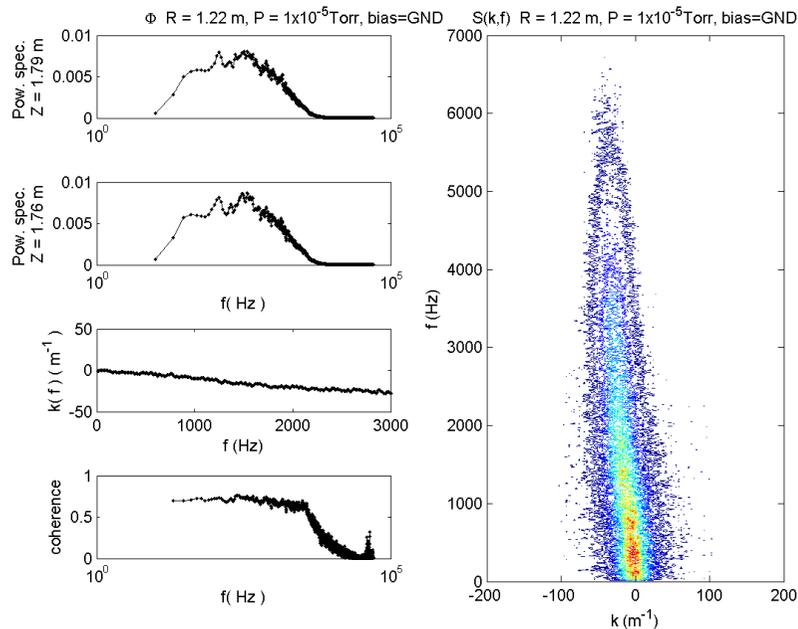


- Dependente do bias.
- Modos de baixa frequência e banda estreita fora das bordas do vaso e para bias negativo e GND.
- Modos de banda larga fora das bordas do vaso e para bias positiva.

Caracterização do Plasma do Helimak

- Caracterização de ondas na direção z;
- Casos para as mesmas coordenadas z (1,76m e 1,79m) e bias=GND.

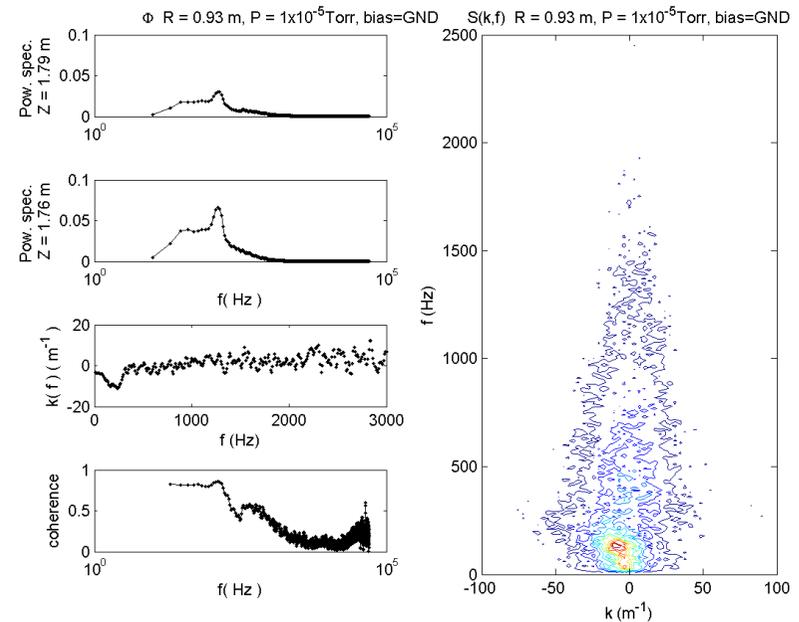
➔ Pacote de ondas (R=1,22m):



Onda já discutida na literatura*, com velocidade de fase comparável com a velocidade de deriva diamagnética dos elétrons.

$$V_{ph} = 650 \text{ m/s} \quad \longleftrightarrow \quad V_{de} = 300 \text{ m/s}$$

➔ Ondas de baixa frequência (R=0,93m):



Presentes principalmente nos dados de pressão baixa.

$$V_{ph} = 160 \text{ m/s} \quad p / f < 250 \text{ Hz}$$

*GENTLE, K. W.; HUANG He; **Plas. Sc. Tec.** 10, 1, 2008.

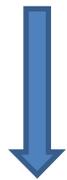
6. Interpretação Teórica

Transporte Caótico

- Utilizando um modelo de transporte caótico* pode-se interpretar a dependência do transporte de partículas com o perfil do campo elétrico radial.

Hamiltoniana de duas ondas:

$$H(x, y, t) = \phi_0(x) - u_1 x + A_1 \text{sen}(k_{x1} x) \cos(k_{y1} y) + A_2 \text{sen}(k_{x2} x) \cos[k_{y2} (y - ut)]$$



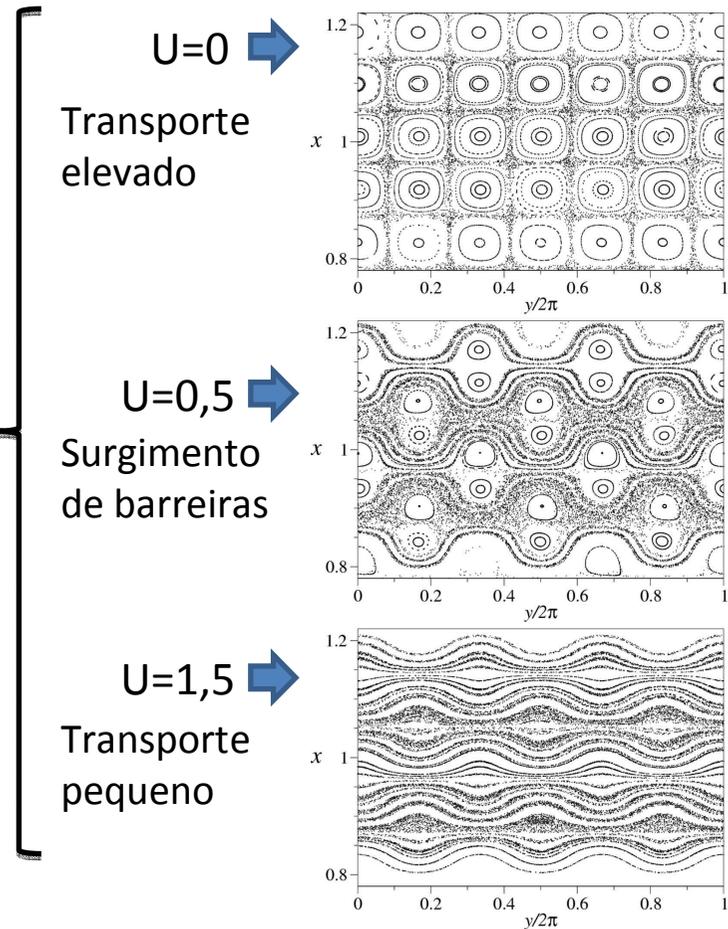
Se a segunda onda for desprezada o modelo possui apenas um parâmetro adimensional relevante:

Parâmetro de confinamento:

$$U(x) = \frac{B_0}{A_1 k_{x1}} [v_E(x) - u_1]$$

- A_1 → a amplitude da onda
- k_{x1} → o número de onda na direção radial
- v_E → a velocidade de deriva eletrostática
- u_1 → a velocidade de fase da onda principal

Simulações para sistema com duas ondas: forte relação do parâmetro U com o transporte de partículas.



*MARCUS, F. A.; et. al.; **Phys. Plasmas** 15, 112304, 2008.

Propagação de Ondas e Turbulência

Instabilidade Modulacional

- A proposta é a utilização de um modelo de 4 ondas acopladas*, sendo uma delas admitida como Zonal Flow, para interpretar os diferentes casos de propagação (ou não) de ondas na direção z:

Ondas com modulação:

$$\tilde{A} = A(t)e^{ik_x x + ik_y y - i\omega_0 t} \quad \leftarrow A_0: \text{Onda Principal}$$

$$\tilde{B} = B(t)e^{iqx - i\omega t}, \text{ para: } \omega \ll \omega_0 \quad \leftarrow B: \text{Zonal Flow}$$

$$\tilde{a}_{\pm} = a_{\pm}(t)e^{i(k_x \pm q)x + ik_y y - i\omega_{\pm} t} \quad \leftarrow a_+ \text{ e } a_-: \text{ondas de banda lateral}$$

*LASHMORE-DAVES, C. N.; et. al.; **Phys. Plasmas** 13, 122304, 2005.

6. Propagação de ondas e turbulência

Sistema de equações:

$$\frac{dA_0}{dt} = -\Omega_0 \frac{[1 + (k_+^2 - q^2)\hat{\rho}^2]}{(1 + k_0^2\hat{\rho}^2)} a_+ B^* + \Omega_0 \frac{[1 + (k_-^2 - q^2)\hat{\rho}^2]}{(1 + k_0^2\hat{\rho}^2)} a_- B$$

← A_0 : Onda Principal

$$\frac{dB}{dt} = \Omega_0 \frac{(k_+^2 - k_0^2)}{q^2} a_+ A_0^* - \Omega_0 \frac{(k_-^2 - k_0^2)}{q^2} a_-^* A_0$$

← B: Zonal Flow

$$\frac{da_+}{dt} + i\delta_+ a_+ = \Omega_0 \frac{[1 + (k_0^2 - q^2)\hat{\rho}^2]}{(1 + k_+^2\hat{\rho}^2)} A_0 B$$

← a_+ e a_- : ondas de banda lateral

$$\frac{da_-}{dt} + i\delta_- a_- = -\Omega_0 \frac{[1 + (k_0^2 - q^2)\hat{\rho}^2]}{(1 + k_-^2\hat{\rho}^2)} A_0 B^*$$

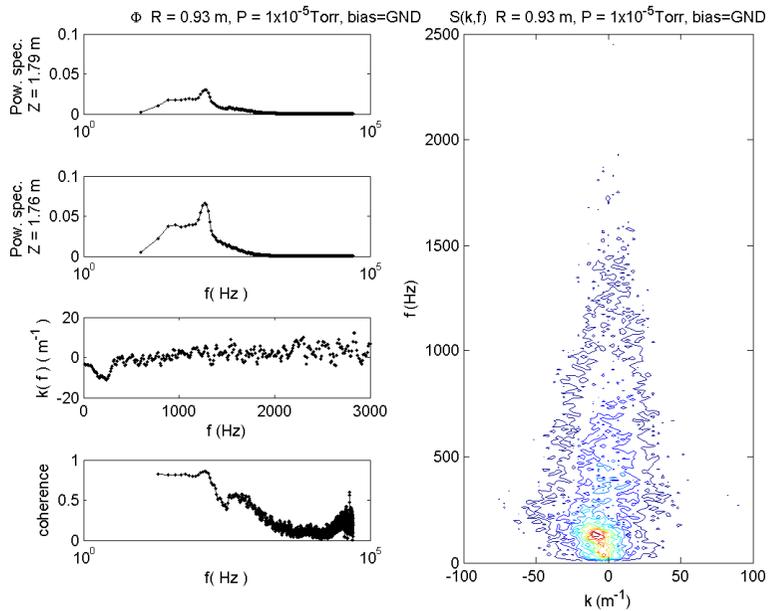
←

*LASHMORE-DAVES, C. N.; et. al.; **Phys. Plasmas** 13, 122304, 2005.

Propagação de Ondas e Turbulência

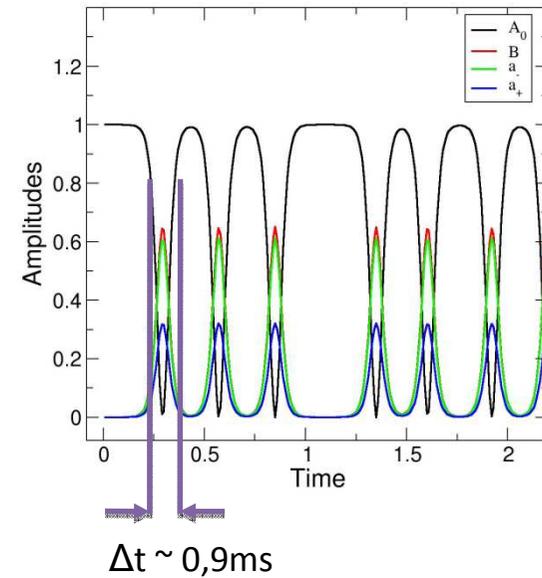
- Alguns resultados preliminares:*

1º Caso: modo de banda estreita e frequência Baixa.



$$V_{ph} = 160\text{m/s} \Rightarrow \Delta t = 0,2\text{ms}$$

Para as condições deste caso, o modelo **prevê** propagação das ondas

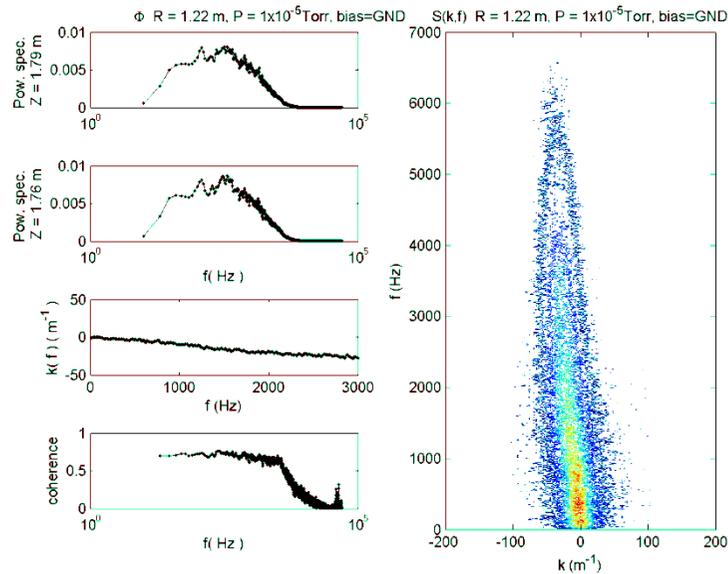


*Obtidos em colaboração com: Dr. José Danilo Szezech

Propagação de Ondas e Turbulência

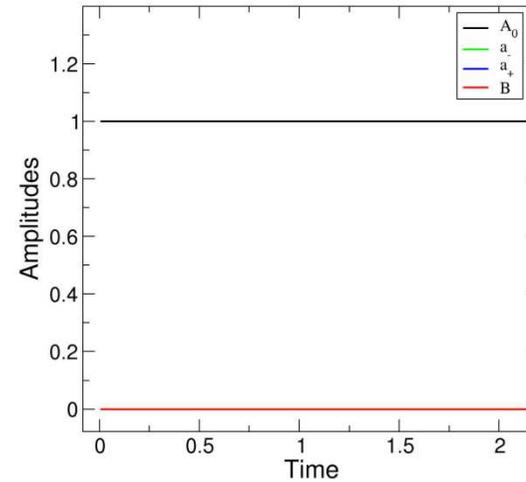
- Alguns resultados preliminares:*

2º Caso: modo de banda larga e frequência Baixa.



$$V_{ph} = 650\text{m/s} \Rightarrow \Delta t = 0,05\text{ms}$$

Para as condições deste caso, o modelo **não** prevê propagação das



*Obtidos em colaboração com: Dr. José Danilo Szezech

Texas Helimak: Ondas de deriva

Números de onda,
em módulo:

$$k_{\perp} = \frac{lB_z}{rB} + \frac{k_z B_{\varphi}}{B}$$
$$k_{\parallel} = \frac{k_z B_z}{B} - \frac{lB_{\varphi}}{rB}$$