

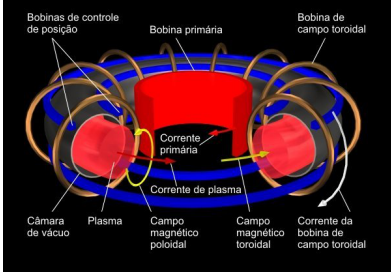
# Evolução de modos tipo *tearing* neoclássicos sob a ação da onda de cíclotron eletrônica em *tokamaks*

D. de O. Berto<sup>1</sup>, L. F. Ziebell<sup>1</sup>

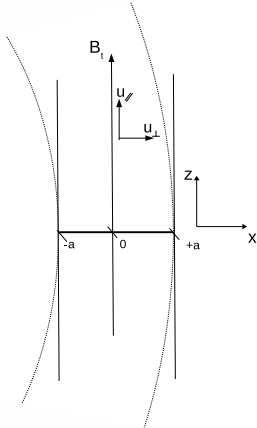
<sup>1</sup>Instituto de Física, UFRGS, Caixa Postal 15051, 91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: [daniel.oliveiraberto@gmail.com](mailto:daniel.oliveiraberto@gmail.com), [ziebell@if.ufrgs.br](mailto:ziebell@if.ufrgs.br)

## Introdução

- Um *Tokamak* consiste em uma armadilha magnética em forma de um toróide onde atuam um campo magnético toroidal gerado por bobinas externas e um poloidal gerado pela corrente que percorre o plasma.



- Entre as mais perigosas perturbações que existem em *Tokamaks* podemos destacar os chamados modos *tearing* neoclássicos (NTM), que são caracterizados pela formação de estruturas chamadas ilhas magnéticas.
- O uso de geração de corrente elétrica e aquecimento na região dessas estruturas através da injeção de ondas de cíclotron eletrônica (EC) é um possível método para controle desses modos.
- Foram usados um modelo simplificado para o *Tokamak*, em forma de Lâmina, e para o formato das ilhas, aliado a uso de um tratamento auto-consistente da interação das ondas com o plasma.



- Foi acrescentado ao modelo de forma auto-consistente a largura das ilhas magnéticas em função do tempo, no cálculo da função distribuição eletrônica.

## Notação e Definições

- $r$  posição radial no plano equatorial.
- $u$  momento normalizado pelo momento térmico dos elétrons  $(m_e T_{e0})^{1/2}$ .
- $\mu = \cos(\theta)$  onde  $\theta$  é o ângulo entre o momento da partícula e o campo magnético toroidal.
- $\tau$  é o tempo normalizado pelo tempo de colisão dos elétrons no centro da lâmina  $\tau_c = (\nu_{e0})^{-1}$
- $\vec{B} = B\hat{z}$  campo magnético toroidal
- $m_e$  a massa e  $e$  a carga do elétron  $Z$  é a carga efetiva dos íons
- $\Omega_e$  frequência de cíclotron eletrônica
- $a$  raio menor do toróide e  $R_0$  o raio maior.

## Interação onda-plasma

- Supomos que os íons formam um *background* estático de cargas positivas, uma vez que ondas de cíclotrons são ondas de alta frequência.
- Estudamos a evolução temporal da função distribuição de elétrons através de um formalismo quase-linear na presença de ondas de cíclotron, colisões, transporte através das linhas de campo toroidal e o efeito de um campo elétrico induzido na direção toroidal, assim modeladas por uma equação de Fokker-Planck:

$$\frac{\partial f}{\partial \tau} = \left(\frac{\partial f}{\partial \tau}\right)_{EC} + \left(\frac{\partial f}{\partial \tau}\right)_C + \left(\frac{\partial f}{\partial \tau}\right)_T + \left(\frac{\partial f}{\partial \tau}\right)_{E\parallel}$$

- $f = f(u, \mu, r, \tau)$  é a função de distribuição eletrônica.
- O primeiro termo relacionado as ondas de cíclotron:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \tau}\right)_{EC} = \frac{1}{u_{\perp}} \left( y \frac{\partial u_{\perp}}{\partial \tau} + \frac{u_{\perp}}{\sqrt{\mu e}} \frac{\partial u_{\parallel}}{\partial \tau} \right) \left[ u_{\perp} D_{cy} \left( \frac{\partial u_{\perp}}{\partial \tau} + \frac{u_{\perp}}{\sqrt{\mu e}} \frac{\partial u_{\parallel}}{\partial \tau} \right) f \right]$$

- onde o coeficiente de difusão EC é  $D_{cy}$ :

$$D_{cy} = \frac{4\pi P_0}{c^2 S n_e \Lambda \omega} \frac{h\Gamma(n_{\parallel})}{\gamma |u_{\parallel}|}$$

- $y = j|\Omega_e|/\omega$ ,  $\omega = 2\pi f_{\omega}$ ,  $f_{\omega}$  frequência da onda,  $B_0$  é a magnitude local do campo magnético e  $n_{\parallel}$  é a componente paralela do índice de refração.  $\Gamma$  é uma distribuição Gaussiana de números de onda.

- Aproximação do termo de colisões no limite de altas velocidades:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \tau}\right)_C = \frac{Z^2 + 1}{u^3 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin\theta \frac{\partial f}{\partial \theta}) + \frac{2}{u^2} \frac{\partial}{\partial u} \left( \frac{1}{u} \frac{\partial u f}{\partial u} + f \right)$$

- Termo de transporte também tem a forma de eq. de difusão,

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \tau}\right)_T = \frac{\partial}{\partial x} (D_m \frac{\partial f}{\partial x}) \quad ; \quad D_m = \frac{2\pi q R_0 c}{\nu_{e0}} \left( \frac{|u_{\parallel}|}{\gamma \mu e_0} \right)^2$$

- O termo do campo elétrico induzido

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \tau}\right)_{E\parallel} = \frac{E_{\parallel}}{E_{e0}} \left( \mu \frac{\partial f}{\partial u} + \frac{1 - \mu^2}{u} \frac{\partial f}{\partial \mu} \right)$$

## Perfis do plasma

- Os perfis de densidade do plasma ( $n_e$ ), temperatura ( $T_e$ ), fator de segurança ( $q$ ) e campo magnético ( $B_0$ ), são mantidos constantes e dados por

$$\begin{aligned} n_e(x) &= (n_{e0} - n_{ea})(1 - x^2/a^2) + n_{ea} \\ T_e(x) &= (T_{e0} - T_{ea})(1 - x^2/a^2) + T_{ea} \\ q_e(x) &= (q_0 - q_a)(1 - x^2/a^2) + q_a \\ B_0(x) &= B_0(0)(1 + x/R_0)^{-1} \end{aligned}$$

- Na presença de ilhas, essas quantidades são modificadas nessas regiões a fim de obedecer uma condição de simetria,

$$Q(x_{res} \pm \delta x) = [Q_{eq}(x_{res} + \delta x) + Q_{eq}(x_{res} - \delta x)]/2$$

- onde o subíndice *res* indica a posição da superfície de ressonância, i.e. onde o fator de segurança é  $q = m/n$  no equilíbrio.  $\delta x$  é a distância da superfície ressonante e  $Q_{eq}$  se refere ao valor de equilíbrio.
- Com a variação na largura das ilhas, os perfis mudam na região das ilhas.

## Evolução temporal da largura das ilhas

- Faz-se o uso da equação de Rutherford para a largura das ilhas  $w$ ,

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\kappa_r}{\sigma \mu_0} (\Delta' + \Delta'_\beta + \Delta'_{CD})$$

- onde,  $\Delta'$  é o termo estabilizador clássico,  $\Delta'_\beta$  termo neoclássico e  $\Delta'_{CD}$  descreve o efeito da corrente gerada pelas ondas EC.
- A última atualização do projeto possui a inclusão do termo neoclássico

$$\Delta'_\beta = -9,2(\xi)^{1/2} \frac{\mu_0 R^2 q}{\sigma_p^2 q'}$$

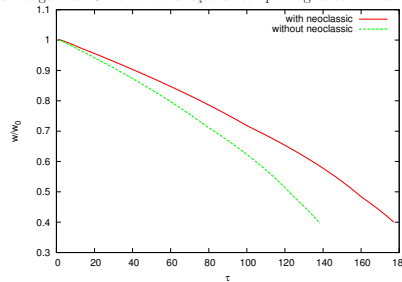
$$\left[ q' = \frac{\partial q}{\partial r} \right]_{res}, \quad \left[ p' = \frac{\partial p}{\partial r} \right]_{res}, \quad \left[ \phi'_p = \frac{\partial \phi'_p}{\partial r} \right]_{res}$$

$$R = (R_0 + x_{res}), \quad \xi = x_{res}/R.$$

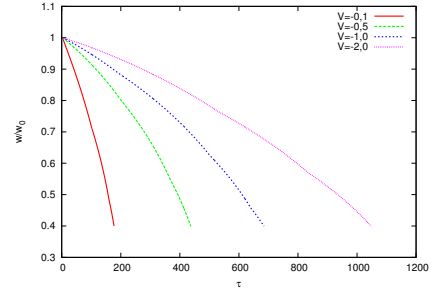
- onde  $q$  é o fator de segurança,  $p$  a pressão, e  $\phi$  o fluxo poloidal, todos eles calculados na superfície de ressonância.

## Solução numérica

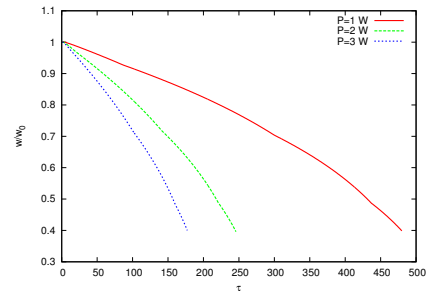
- Usamos uma grade de 151x71x81 pontos no espaço  $(u_{\parallel}, u_{\perp}, x)$ .
- Parâmetros do *tokamak* ASDEX Upgrade,  $R_0 = 165$  cm,  $a = 50$  cm
- Ilhas Magnéticas: Largura inicial  $w_0 = 5$  cm com largura mínima  $(w_{min} = 0, 4u_0)$ . Modos de razão  $m/n = 2/1$  centradas em  $x = 22, 4$  cm
- Voltagem aplicada no plasma entre  $V = -0,1$  e  $-2$  V. Temperatura  $T_{e0} = 3$  keV e  $T_{ea} = 0,03$  keV. Densidade:  $n_{e0} = 5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$  e  $n_{ea} = 5 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ . Campo magnético no centro  $B_0(0) = 2,72$  T.
- Ondas EC:  $f = 140$  Ghz, potência entre  $P = 1$  e  $3$  MW, injetadas com um ângulo de  $23^\circ$  relativo à direção do campo magnético toroidal



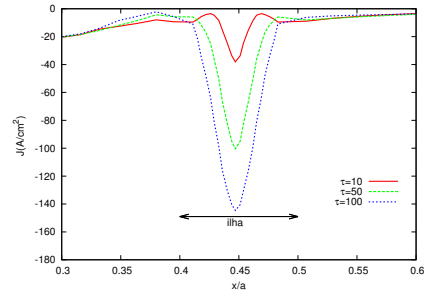
Evolução temporal da largura das ilhas para  $V = -0,1$  V,  $P_{EC} = 3$  W, comparando o efeito do termo neoclássico.



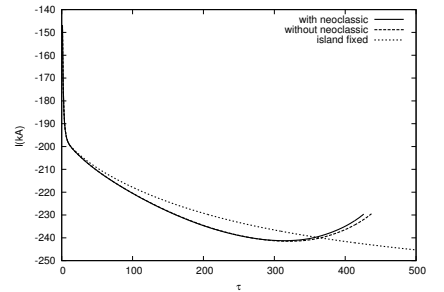
Efeito da variação da tensão aplicada no plasma na evolução temporal da largura das ilhas magnéticas para  $V$  entre  $-0,1$  e  $-2,0$  V e ondas de cíclotron  $P_{EC} = 3$  W.



Efeito da variação da potência das ondas de cíclotron injetadas na evolução temporal da largura das ilhas magnéticas para  $P_{EC}$  entre 1 e 3 W e  $V = -0,1$  V.



Densidade de corrente no *tokamak* para  $V = -0,1$  V,  $P_{EC} = 3$  W.



Corrente total no *tokamak* para  $V = -0,5$  V,  $P_{EC} = 3$  W.

## Conclusões finais

- O termo neoclássico se mostra como um retardador da diminuição da largura das ilhas pelas ondas EC
- Apesar disso o método se mostra eficiente na criação de corrente na região da ilha e assim para o possível controle dos NTM.
- O aumento da potência das ondas aumenta seu efeito, porém valores altos de voltagem aplicada no plasma, retardam o processo.
- Percebeu-se um acréscimo na corrente associado à variação da largura até um máximo. Entretanto, devido ao limite mínimo estabelecido para a largura da ilha, não foi possível acompanhar a evolução da corrente para tempos muito prolongados, após o máximo de corrente.