

O MASER DE ELETRON-CICLOTRON COMO MECANISMO GERADOR DA EMIÇÃO SOLAR DO TIPO V

SANTOS, Michel Silva dos¹

GAELZER, Rudi¹.

¹Departamento de Física – Instituto de Física e Matemática – UFPel
Campus Universitário, s/nº – Caixa Postal 354 – CEP 96010-900.
michel.ufpel@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

Em ambientes espaciais, a matéria encontra-se majoritariamente na forma de plasma, sendo os processos físicos resultantes das propriedades desta forma de matéria. De particular importância são os fenômenos que ocorrem na cromosfera solar, onde são observados diversos processos distintos de emissão de ondas eletromagnéticas, denominados *Emissões Solares dos Tipos I – V*. Estes tipos de emissões distinguem-se por características como frequências típicas, direção de propagação, região de emissão e mecanismo gerador. As partículas energéticas resultantes destes processos irão compor parcela significativa do *Vento Solar* que é de vital importância para muitos processos físicos que ocorrem na terra e para o desenvolvimento tecnológico.

Todos os processos observados na cromosfera solar possuem em comum o fato da região-fonte apresentar inomogeneidades em diversos parâmetros físicos, tais como densidade, temperatura e campo magnético. Como consequência, um plasma inomogêneo é um sistema que está sempre fora do equilíbrio termodinâmico e, por isso, possui fontes de energia livre, capazes de gerar ondas e acelerar partículas.

Neste trabalho, serão realizadas considerações acerca da viabilidade do mecanismo do maser de elétron-cíclotron como método gerador da Emissão Solar do Tipo V. Fazendo-se uso da teoria magneto-iônica de plasmas, onde a relação de dispersão e as equações de traçados de raios serão numericamente resolvidas para o modo de propagação extraordinário lento (modo Z), propagando-se dentro de uma cavidade na cromosfera solar. Adicionalmente, o coeficiente de emissão das ondas no modo Z também será calculado. Como o modo Z é aprisionado dentro da cavidade, o critério de Ellis para conversão linear do modo Z para o modo ordinário (modo O) será verificado para cada posição do raio dentro da cavidade. Variando-se os valores de frequência e ângulo inicial de propagação das ondas, as trajetórias dos raios serão seguidas até que o critério de Ellis seja satisfeito em alguma posição dentro da cavidade. Nesta situação, parte da energia transportada pelo modo Z é linearmente convertida ao modo O, o qual pode se propagar ao meio interplanetário. Calculando adicionalmente o coeficiente de emissão das ondas, verifica-se para que condições o raio será amplificado. As equações do traçado de raios serão resolvidas numericamente fazendo-se uso do método de Runge-Kutta de quarta ordem. Tudo isto baseado

em um modelo de parâmetros físicos que visa reproduzir as condições existentes na cromosfera solar logo acima de uma região ativa.

2 METODOLOGIA

Na teoria magneto-iônica, a propagação de uma onda eletromagnética em um plasma magnetizado ocorre em dois modos distintos de propagação: o modo $L-O$, ou modo ordinário e o modo $R-X$, ou modo extraordinário, o qual, em função da frequência distingue-se em modo extraordinário lento (modo Z) e modo extraordinário rápido (modo X). As características da propagação são determinadas pela relação de dispersão. Para o modo $R-X$, esta fica:

$$D_{RX}(K, \psi, \omega, r, \theta) = 1 - \frac{k^2 c^2}{\omega^2} - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + \tau \Omega_e)} = 0 ; \quad s = \frac{\omega \Omega_e \sin^2(\psi)}{2|\omega_{pe} - \omega^2|} ;$$

$$\tau = \left(s + \sqrt{\cos^2 \psi + s^2} \right) s_{fe} ; \quad s_{fe} = \frac{\omega_{pe} - \omega^2}{|\omega_{pe} - \omega^2|} ;$$

Onde K e ψ são, respectivamente, o módulo e o ângulo polar do vetor de onda em relação ao campo magnético solar, r e θ são, respectivamente o módulo e o ângulo polar do vetor posição do raio em relação ao centro da cavidade solar, c é a velocidade da luz no vácuo, ω frequência angular da onda, $\omega_{pe}^2 = 4\pi n_e e^2 / m_e$ a frequência angular de plasma ($n_e(r, \theta)$, e , m_e : densidade, carga e massa eletrônicas, respectivamente) e $\Omega_e = eB_0(r, \theta) / m_e c$ é a frequência angular de cíclotron. A propagação da onda é determinada pelas equações de traçado de raios:

$$\frac{\partial D_{RX}}{\partial \omega} \frac{dx}{dt} = -\sin \psi \frac{\partial D_{RX}}{\partial k} - \cos \psi \frac{1}{k} \frac{\partial D_{RX}}{\partial \psi} ; \quad \frac{\partial D_{RX}}{\partial \omega} \frac{dk}{dt} = \cos(\theta - \psi) \frac{\partial D_{RX}}{\partial r} - \sin(\theta - \psi) \frac{1}{r} \frac{\partial D_{RX}}{\partial \theta}$$

$$\frac{\partial D_{RX}}{\partial \omega} \frac{dz}{dt} = -\cos \psi \frac{\partial D_{RX}}{\partial k} + \sin(\theta - \psi) \frac{1}{k} \frac{\partial D_{RX}}{\partial \psi} ; \quad k \frac{\partial D_{RX}}{\partial \omega} \frac{d\psi}{dt} = \sin(\theta - \psi) \frac{\partial D_{RX}}{\partial r} + \cos(\theta - \psi) \frac{1}{r} \frac{\partial D_{RX}}{\partial \theta}$$

$$\frac{dI_\sigma}{dt} = S_\sigma(\omega, \theta) + 2\gamma_\sigma I_\sigma(\omega, \theta)$$

Sendo que a posição do raio é calculada em coordenadas cartesianas (x, z) , ao passo que o vetor de onda é determinado em coordenadas esféricas (k, ψ) . Os ângulos azimutais, tanto da posição do raio quanto do vetor de onda não se alteram com a propagação do raio. Com relação a amplificação do feixe, temos que a mesma é dada ao longo da propagação em função da taxa de amplificação em cada ponto γ_σ e da emissividade local S_σ que são dadas por:

$$\gamma_\sigma = -\frac{\sqrt{\pi} f_{pe}^2}{R_\sigma f} \sum_{s=0}^{s_{max}} \left[\theta (sf_{ce} - f) \int_{-1}^1 Q_s^\sigma(u_+, \mu) d\mu + \theta (f - sf_{ce}) \theta (1 - \mu_s^2) \int_{\mu_s}^1 d\mu \sum_{\pm} [Q_s^\sigma(u_\pm, \mu) + Q_s^\sigma(u_\pm, -\mu)] \right]$$

$$\frac{S_\sigma}{m_e c^2} = \frac{2\sqrt{\pi} f_{pe}^2}{R_\sigma f^2} \sum_{s=0}^{s_{max}} \left[\theta (sf_{ce} - f) \int_{-1}^1 \prod_S^\sigma(u_+, \mu) d\mu + \theta (f - sf_{ce}) \theta (1 - \mu_s^2) \int_{\mu_s}^1 d\mu \sum_{\pm} [Q_s^\sigma(u_\pm, \mu) + Q_s^\sigma(u_\pm, -\mu)] \right]$$

Os parâmetros aqui empregados são obtidos por um modelo de parâmetros físicos que modelam a formação de uma cavidade na região da cromosfera solar imediatamente acima de uma região ativa [8]. Já a expressão para a densidade eletrônica, a qual não será apresentada por restrições de espaço, prevê a formação de uma cavidade na região da cromosfera imediatamente acima da mancha solar.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir de um modelo de parâmetros físicos que visa reproduzir as condições existentes na cromosfera solar logo acima de uma região ativa, utilizou-se o mecanismo do *maser de elétron-cíclotron*, o qual é obtido a partir da teoria cinética de plasmas, para se calcular as taxas de emissão de radiação da região-fonte da Emissão Tipo V. Para tanto foi computada a taxa de emissão para diversos valores de frequência e ângulo do vetor de onda para uma onda eletromagnética se propagando no modo Z. Os valores de ângulo e vetor de onda de emissões do tipo V onde foram encontrados valores positivos para amplificação e onde se calculou que haveria conversão de modo Z para o modo O foram então cruzados, de modo que, fosse então refeitos os cálculos do traçado de raios, somente para ondas onde haveriam amplificação positiva e conversão de modo ao longo de sua propagação. Isso foi feito, pois se ao longo de sua trajetória a onda não sofrer conversão de modo concomitantemente com amplificação positiva essa será absorvida pelo plasma da cavidade e não será detectada por satélites.

A [Figura 1](#) mostra as linhas de contorno de um gráfico de superfície das taxas de emissão para um raio emitido a uma altitude de $1,2R_{solar}$ no modo Z para diversos valores de frequência e ângulo do vetor de onda. As diferentes taxas de amplificação são demonstradas com diferentes cores respectivas aos seus valores. Já a [Figura 2](#) mostra os pontos de emissão de ondas, em função da frequência e ângulo de lançamento, onde haverá conversão de modo Z para o modo O com dois valores para o critério da janela de Ellis, que determina a conversão mínima de energia para ser caracterizada a conversão de modo.

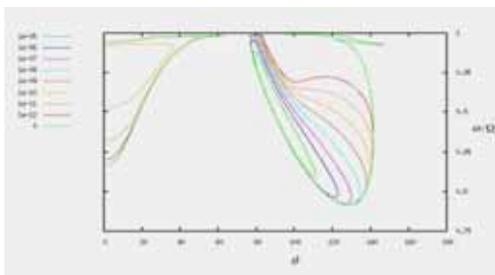


Figura 1. Valores das taxas de amplificação em função do ângulo e frequência do vetor de onda em uma altitude de $1,2R_{solar}$.

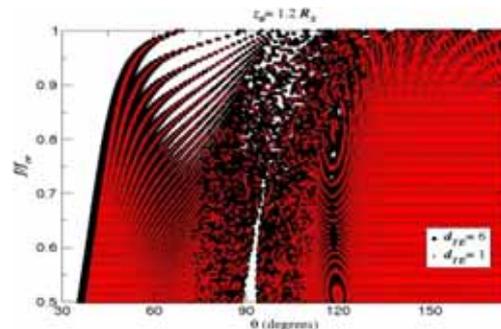


Figura 2. Valores de ângulo e frequência do vetor de onda em uma altitude de $1,2R_{solar}$ para dois valores de condição da Janela de Ellis onde há conversão do Modo Z para o Modo O.

As equações do traçado de raios foram resolvidas numericamente fazendo-se uso do método de Runge-Kutta de quarta ordem [9]. Os parâmetros físicos adotados são característicos das regiões ativas na fotosfera solar: $R_{solar} = 7 \times 10^{15} \text{ Km}$ e $b = 3,16 \times 10^4 \text{ Km}$. Para cada ponto avançado ao longo da trajetória do raio, a relação de dispersão $D_{RX}(K, \psi, \omega, r, \theta) = 0$ foi novamente resolvida e seu resultado comparado com a solução numérica das equações de traçado de raios. Caso ocorresse uma discrepância muito grande entre dois valores, o passo temporal era reduzido e o conjunto de equações era novamente resolvido, repetindo-se o teste. Desta maneira, evita-se o acúmulo de erros de arredondamento nas soluções numéricas das equações diferenciais. A [Figura 3](#) mostra a trajetória dos raios desde sua emissão até sua conversão de modo, já a [Figura 4](#) mostra a taxa de amplificação que estas emissões sofreram durante o seu percurso em função do tempo. Maiores detalhes a respeito do critério de

conversão da janela de Ellis serão omitidos por falta de espaço.

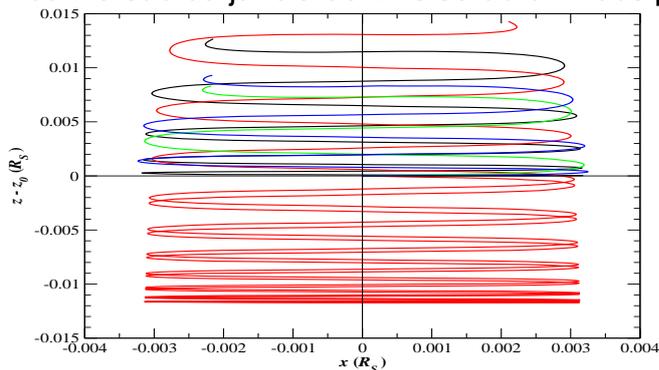


Figura 3. Trajetória dos raios desde seu lançamento até sua conversão, quando o critério da janela de Ellis é satisfeito.

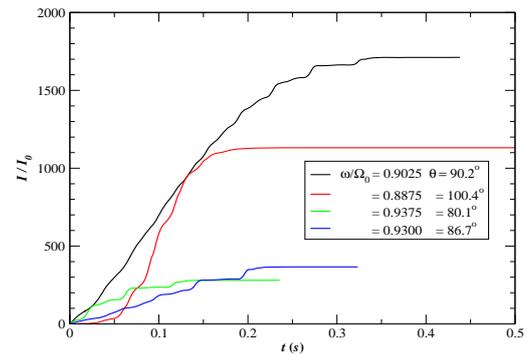


Figura 4. Taxa de Amplificação dos raios ao longo de sua trajetória.

4 CONCLUSÕES

Com o cálculo da trajetória dos raios podemos concluir que o maser de elétron-cíclotron é um mecanismo de geração viável para explicar a detecção de ondas do Tipo V. Notamos com os cálculos realizados, que para um grande número de frequências (f) e ângulos do número de onda (θ), de raios emitidos, sofrem amplificação positiva $\gamma_\sigma > 0$ e tem conversão do modo Z para o modo O segundo o critério da janela de Ellis. Muitos dos raios emitidos no modo Z do centro da cavidade sofrem amplificação de 2 a 3 ordens de grandeza e após sofrem conversão de modo. Esses resultados corroboram com a hipótese de o maser de elétron-cíclotron ser o mecanismo gerador das emissões solares do Tipo V.

5 REFERÊNCIAS

- [1] BERNSTEIN, I. B. Geometric optics in space- and time-varying plasmas. *The Physics of Fluids*, v. 18, n. 3, pp. 320 – 324, 1975.
- [2] BERNSTEIN, I. B., FRIEDLAND, L. Geometric optics in space and time varying plasmas. In: *Handbook of Plasma Physics*, Rosenbluth, M. N., Sagdeev, R. Z. (Eds.), volume 1: *Basic Plasma Physics I*, capítulo 2.5, pp. 367 – 418. Amsterdam : North Holland, 1983.
- [3] ROBINSON, R. D. A study of Type V solar radio bursts. *Solar Physics*, v. 55, n. 2, pp. 459 – 472, 1977.
- [4] DULK, G. A., SUZUKI, S., GARY, D. E. The position and polarization of Type V solar bursts. *Astronomy and Astrophysics*, v. 88, n. 1-2, pp. 218 – 229, 1980.
- [5] RAOULT, A., VLAHOS, L., MANGENEY, A. An injection model for type III/V bursts in solar flares. *Astronomy & Astrophysics*, v. 233, n. 3, pp. 229-234, 1990.
- [6] WINGLEE, R. M., DULK, G. A. The electron-cyclotron maser instability as the source of solar Type V continuum. *The Astrophysical Journal*. v. 310, n. 1, part 1, pp. 432 – 443, 1986.
- [7] SMITH, M. S. Numerical Solution of the “Ellis Window” Problem. *Nature-Physical Science*, v. 243, n. 124, pp. 29, 1973.
- [8] YOON, P. H., WU, C. S., WANG, C. B. Generation of type III solar radio bursts in the low corona by direct amplification. II. Further numerical study. *The Astrophysical Journal*, v. 576, n. 1, pp. 552-560, 2002.
- [9] PRESS, W. H., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, B. P. *Numerical Recipes in FORTRAN*. New York : Cambridge Press, 1992, Second Edition, 999 pp.
- [10] YOON, P. H., WEATHERWAX, A. T., ROSENBERG, T. J., LABELLE, J., SHEPHERD, S. G. Propagation of medium frequency (1-4 MHz) auroral radio waves to the ground via the Z-mode radio window. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, n. A12, pp. 29267-29275, 1998.