

ESTUDO DOS MODOS FUNDAMENTAIS DE ONDAS EM PLASMAS FRIOS

LAÍNE BENGO SOARES ROSALES¹; FERNANDO SIMÕES JUNIOR²

¹Universidade Federal de Pelotas – bsrlaine@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – fernando.simoese@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Plasma é o gás ionizado mais comum no universo, compondo 99% da matéria visível (PECSELI, 2020). Representado na forma natural pelo Sol, as estrelas e parte significativa do meio interestelar, na forma artificial principalmente, no estudo de fusão termonuclear controlada (GURNETT; BHATTACHARJEE, 2005).

A análise teórica de um plasma se baseia nas equações de transporte (FITZPATRICK, 2015). No entanto, o conjunto dessas equações não é suficiente para criar um sistema fechado cuja solução seja única. Para superar essa restrição, são utilizadas aproximações denominadas aproximação de plasma frio, morno ou quente. Neste estudo, será utilizada a aproximação de plasma frio. Neste modelo, as equações de conservação de massa e *momentum* são levadas em conta, e a diádica de pressão cinética é vista como nula. Isso significa que os movimentos térmicos das partículas e a força resultante do divergente da diádica de pressão cinética são ignorados. Ademais, também são ignoradas as colisões entre partículas. Ainda se presume que a temperatura do plasma seja nula, portanto, a função de distribuição de velocidades é representada por uma função Delta de Dirac, centrada na velocidade macroscópica do fluxo (BITTENCOURT, 2010). Em relação aos campos, o modelo leva em conta um ambiente com um campo magnético, onde o vetor de onda, para fins de estudo, pode ser separado em componentes paralela ou perpendicular a este campo. Tal separação permite o estudo dos modos de propagação mais frequentemente vistos nesse modelo, sendo eles: modo Ondas de Langmuir; modo ordinário e modo extraordinário, resultantes da propagação perpendicular do vetor de onda em relação ao campo magnético ambiente; modo circularmente polarizado à esquerda e à direita, resultantes da propagação paralela do vetor de onda em relação ao campo magnético ambiente e; modo Whistler. No que diz respeito à frequência, presume-se que a frequência de oscilação dos íons positivos seja consideravelmente inferior à dos elétrons, o que define a chamada aproximação de alta frequência.

O estudo se restringe a ondas de baixa frequência, cuja estrutura costuma ser sinusoidal (CHEN, 2016). A análise se baseará na teoria das perturbações lineares, presumindo que as alterações nos parâmetros do plasma são mínimas em relação aos parâmetros não perturbados. A teoria magneto-iônica requer algumas aproximações adicionais: assume-se que o plasma é homogêneo e infinito; o campo magnético utilizado é constante e uniforme; e apenas o movimento dos elétrons será considerado (BITTENCOURT, 2010). A teoria de Appleton-Hartree (BITTENCOURT, 2010) se refere à teoria de alta frequência e ondas planas de pequena amplitude que se propagam em uma direção aleatória em relação ao campo magnético. As equações utilizadas serão as equações de Maxwell,

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (4)$$

onde ρ é a densidade de cargas, ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo, \mathbf{E} é o campo elétrico, \mathbf{B} é o campo magnético, \mathbf{J} é a densidade de corrente elétrica e μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo. Essas equações serão associadas à equação de continuidade e à equação de Langevin, dadas respectivamente por

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\vec{u}) = 0, \quad (5)$$

$$m \frac{D\vec{u}}{Dt} = q(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) - m\nu\vec{u}. \quad (6)$$

Cuja densidade do número de elétrons $n(\mathbf{r},t)$ e a velocidade de deriva dos elétrons $\mathbf{u}(\mathbf{r},t)$ são as duas variáveis termodinâmicas envolvidas. Ainda D/Dt é a derivada total, que nesse caso é necessária uma vez que as quantidades variam no tempo e no espaço simultaneamente.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho de iniciação científica que está associado ao trabalho de conclusão de curso a ser realizado no semestre 2024/2, serão utilizadas as metodologias do uso de aproximações físicas que estão no escopo da teoria de plasmas frio, bem como o processo de linearização das equações de Maxwell e movimento para obter detalhadamente as relações de dispersão dos modos de propagação. Essas equações serão resolvidas para diferentes configurações do vetor de onda em relação ao campo magnético ambiente aplicado, com o objetivo de obter as expressões analíticas dos modos fundamentais de ondas em plasmas. A partir das equações das relações de dispersão, será realizada a análise gráfica dos modos de propagação, destacando pontos de corte, ressonância e discussões dos fenômenos físicos e o comportamento do plasma que pode ser obtido com o estudo desse tipo de gráfico. A implementação gráfica das equações a serem obtidas será feita através da linguagem de programação *Python*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos estudos de propagação de ondas eletromagnéticas em plasmas frios, uma consideração fundamental é a interação entre as ondas e os elétrons do plasma. Quando um campo magnético está presente, os elétrons seguem trajetórias helicoidais, o que altera a forma como as ondas são polarizadas (BITTENCOURT, 2010). Dependendo das condições do plasma e da orientação do campo magnético, pode-se observar polarização linear, circular ou elíptica.

Como etapa inicial do trabalho foram desenvolvidas graficamente as equações da polarização para as componentes do campo elétrico de uma onda eletromagnética plana cujas componentes \mathbf{E}_x e \mathbf{E}_y são representadas por:

$$E_x = E_x^0 \cos(\omega t + \phi) \quad (7)$$

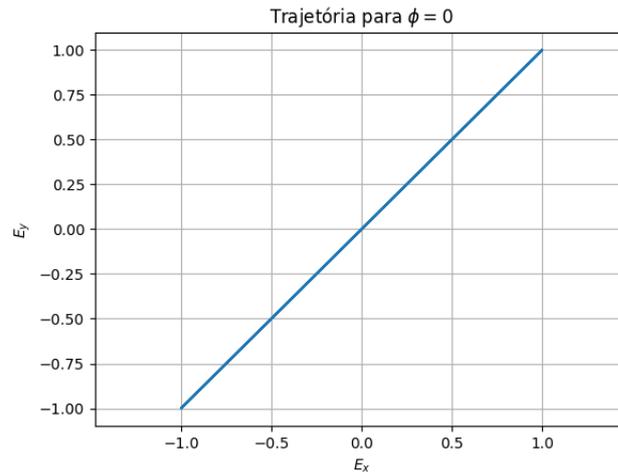
$$E_y = E_y^0 \cos(\omega t + \phi) \quad (8)$$

onde ϕ é a diferença de fase ($\phi = \alpha_2 - \alpha_1$), com de $z=0$, ou seja, fixando z temos um vetor campo elétrico uma magnitude constante E^0 . As figuras a seguir

apresentam a polarização das ondas para ângulos de fase 0, $\pi/4$ e $\pi/2$, respectivamente.

Na Figura 1 é apresentada a polarização da onda eletromagnética plana supondo que as componentes E_x e E_y estão em fase, isto é, $\phi = 0$.

Figura 1: Diferença de fase $\phi = 0$.



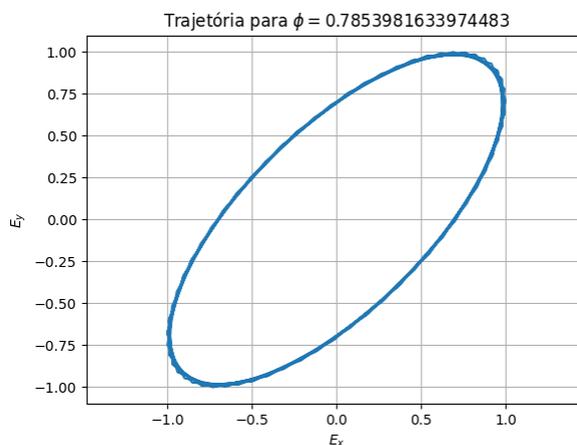
Fonte: A autora.

A partir das Equações (7) e (8) podemos obter uma equação generalizada que descreve o comportamento das ondas do ponto de vista da polarização, elevando ao quadrado e somando as Equações (7) e (8) obtemos:

$$\left(\frac{E_x}{E_x^0}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_y^0}\right)^2 = \cos^2(\omega t + \alpha_1) + \cos^2(\omega t + \alpha_2). \quad (9)$$

Que é uma equação da elipse mostrando que, de forma geral, as componentes do campo elétrico de uma onda plana terão polarização elíptica em função do tempo, esse resultado é apresentado na Figura (2).

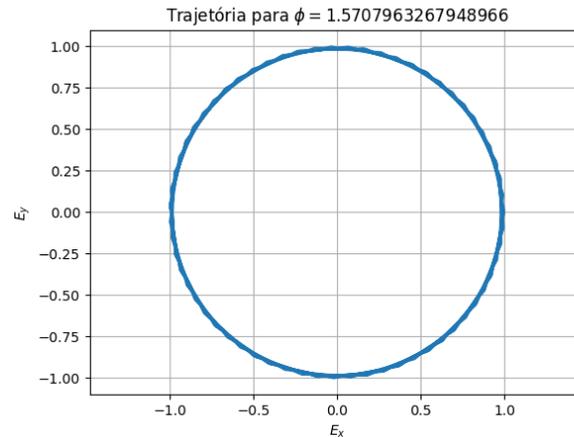
Figura 2: Diferença de fase $\phi = \pi/4$.



Fonte: A autora.

Na Figura 3 é apresentada a polarização da onda eletromagnética plana supondo que as componentes E_x e E_y estão com uma diferença de fase, $\phi = \pi/2$.

Figura 3: Diferença de fase $\phi = \pi/2$.



Fonte: A autora.

Essas variações de polarização estão diretamente relacionadas ao comportamento das ondas no plasma e sua interação com as partículas carregadas.

4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho a autora está estudando o processo de linearização das equações que descrevem o comportamento de um plasma utilizando a aproximação de plasmas frio. Após obter as relações de dispersão para diferentes modos de propagação serão realizados os gráficos das relações de dispersão identificando as regiões de corte, ressonância e reflexão para os diferentes modos. Esse processo é importante uma vez que define diferentes processos físicos internos ao plasma. Para isso será utilizada a linguagem *Python*. Até o momento foram estudados os tipos de polarização de uma onda eletromagnética a depender do ângulo de fase. Esse resultado mostra que para um plano fixo, ($z=0$), o campo elétrico, em geral, apresenta polarização elíptica em função do tempo. A autora, na condição de bolsista, agradece o **Programa de Educação Tutorial – PET**.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BITTENCOURT, José Augusto. **Fundamentals of Plasma Physics**. 3. ed. New York: Springer, 2010. 679 p.
- CHEN, Francis Fulbright. **Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion**. 3. ed. Cham: Springer, 2016. 490 p.
- FITZPATRICK, Richard. **Plasma Physics: An introduction**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. 275 p.
- GURNETT, Donald A.; BHATTACHARJEE, A. **Introduction to Plasma Physics: With space and laboratory applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 445 p.
- PECSELI, Hans L. **Waves and Oscillations in Plasmas**: Second edition. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2020. 537 p.