

A INFLUÊNCIA DE NEUTRINOS NA MAGNETO-HIDRODINÂMICA ESTELAR

Orientador: Pedro Cunha de Holanda, IFGW- UNICAMP

Aluna: Bianca Bulhões Martins, IFGW-UNICAMP

Agosto de 2024

Palavras Chave: Teoria MHD, Plasma, Neutrinos

1 Introdução

Estrelas são compostas por gases ionizados, isto é, no estado de plasma, que apresenta um comportamento fluido e elétrico [7]. O movimento do plasma significa o movimento de cargas, assim como o movimento de cargas, pela interação eletromagnética de longo alcance, implica no movimento do fluido, desse modo, ambos são interligados por movimentos coletivos. Em estrelas, esse efeito está vinculado ao transporte de energia por convecção e por radiação e à produção de vento estelar e de flares (aumentos de luminosidade) [5].

Em nível microscópico, assume-se que o tempo de colisão entre as partículas do fluido é muito menor que as demais grandezas do sistema (o plasma se comporta como um sistema de Maxwell-Boltzmann), tal que a união da Mecânica de Fluidos com a Eletrodinâmica componha a área da Magneto-Hidrodinâmica (MHD) [4]. Nesse sentido, as equações da MHD descrevem bem as ondas de plasma das estrelas, entretanto, não são suficientes para explicar o rápido resfriamento de anãs brancas e o atraso do helium flash de gigantes vermelhas. Mas interações entre o plasma e os neutrinos, partículas elementares, podem ser a solução- ou parte da solução.

O Modelo Padrão das Partículas Elementares afirma a existência de neutrinos sem massa e com carga e momento magnético intrínseco nulos [12], porém, já foi provado que os neutrinos são partículas massivas devido a oscilações de sabor induzida por diferenças de massa [6], ou seja, essas partículas estão além do Modelo Padrão. Nesse sentido, diversos modelos defendem que o neutrino possui uma mili carga e um momento de dipolo não nulos [2]. Nesses modelos, os neutrinos passam a interagir com os campos eletromagnéticos das estrelas e influenciam em sua dinâmica, principalmente por perdas de energia [11].

Uma interação não padrão fortemente debatida e inclusa em simulações computacionais é o processo plasma, que requer apenas que o campo eletromagnético do meio sofra de excitações em um neutrino e um anti-neutrino, os quais escapariam da estrela com energia. Por outro lado, podemos atribuir ao neutrino um momento magnético anômalo ou uma mili carga, o que aumenta ainda mais a taxa processo plasma e o resfriamento a ser causado no astro.

Portanto, o atual trabalho tem como objetivo introduzir a aluna ao estudo de plasmas astrofísicos e das equações da Magneto-Hidrodinâmica e de realizar o vínculo entre o balanço energético das estrelas e as possíveis propriedades eletromagnéticas dos neutrinos.

2 Metodologia

Com reuniões semanais para debates entre aluna e orientador, a pesquisa foi iniciada com as bases da MHD. Para tanto, havia as opções de abordagem da dedução das equações por meio da Física Estatística ou por comparação com princípios da Mecânica de Fluidos e da Eletrodinâmica, tal que se escolheu a segunda, pois a aluna poderia aproveitar conceitos já aprendidos em disciplinas do curso de Física. É importante ressaltar que foram utilizadas livros didáticos de introdução à MHD e à Astrofísica de Plasmas, já que a maioria dos livros encontrados não ressaltava a relação de plasmas e estrelas, a não ser com o Sol.

Então, pautando-se principalmente nas equações unificadas da MHD, estudou-se as propriedades desses fluidos. Em seguida, como a relação entre tipos de estrelas e fluidos não estava clara, estudou-se a evolução de estrelas de baixa massa, conforme explicado na proposta de pesquisa, principalmente com o livro [3].

Dessa forma, aprendeu-se a relação entre os fluidos, o fluxo de energia e os tipos de estrela, principalmente no que diz respeito a anãs brancas e gigantes vermelhas.

No entanto, não havia ainda relação clara com os neutrinos, portanto, consultou-se artigos mais recentes. Neles, teve-se a confirmação dos mecanismos de perda de energia pelas anãs brancas e gigantes vermelhas, possibilitada principalmente pelos neutrinos. Então, analisou-se mais artigos sobre os neutrinos, em especial sobre a NMHD. Porém, a aluna começou a se questionar sobre o fundamento do neutrino conseguir ter propriedades elétricas. Por isso, foram analisadas as possibilidades de ter carga elétrica ou magnética segundo os modelos de Dirac ou de Majorana. Em seguida, aprofundou-se na emissão de energia pelas estrelas e no processo plasma. Contudo, a estudante perdeu o vínculo com a universidade e a pesquisa foi encerrada.

3 Desenvolvimento e discussão

3.1 Equações de Maxwell na Eletrodinâmica e na MHD Ideal

Sejam \vec{E} o campo elétrico, \vec{B} o campo magnético, \vec{J} a densidade de corrente, \vec{u} a velocidade da onda, \vec{F} a força de Lorentz, ρ_e a densidade de elétrons, μ a permeabilidade, t o tempo. As equações de Maxwell na Eletrodinâmica são [8]:

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

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

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

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

Também há as equações auxiliares:

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho_e}{\partial t} \quad (5)$$

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (6)$$

No entanto, no presente trabalho utilizaremos a MHD ideal, isto é, as suposições de que a resistividade do meio é muito baixa, há conservação local da carga e podemos desprezar as correntes de deslocamento em relação à densidade de corrente. Logo, as equações 1 a 3 se mantêm, mas as demais são modificadas:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (8)$$

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (9)$$

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (10)$$

3.2 Equações de Fluidos

Para um fluido com um campo de velocidades \vec{u} , densidade ρ , pressão superficial p , n viscosidade cinemática, temos a seguinte equação de Navier Stokes [4]:

$$\frac{D\vec{u}}{dt} = -\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right) + n\nabla^2\vec{u} \quad (11)$$

Já pela vorticidade do fluido e pela Lei de Biot-Savart [4], tal que ω é definido como a vorticidade:

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u} \rightarrow \frac{D\vec{\omega}}{dt} = (\vec{\omega} \cdot \nabla)\vec{u} + n\nabla^2\vec{\omega} \quad (12)$$

3.3 Os princípios da MHD

As equações acima podem ser combinadas de forma a resultar na equação de indução 13, na equação 14 pela segunda lei de Newton e na equação de vorticidade 15:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{u} \times \vec{B}) + \lambda \nabla^2 \vec{B}, \lambda = (\mu\sigma)^{-1} \quad (13)$$

$$\frac{D\vec{u}}{dt} = -\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right) + n\nabla^2\vec{u} + \frac{(\vec{J} \times \vec{B})}{\rho} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{u} \times \vec{\omega}) + n\nabla^2\vec{\omega} + \nabla \times \frac{(\vec{J} \times \vec{B})}{\rho} \quad (15)$$

Usualmente, os resultados da MHD dependem de alguns parâmetros, como o número magnético de Reynolds, R_m , a velocidade de Alfvén, v_a e o tempo magnético de amortecimento, τ . Normalmente, meios astrofísicos na MHD ideal são representados por grandes números magnéticos de Reynolds, ou seja, por meios com baixa resistividade, porque tratam de escalas de comprimento muito grandes, quando se torna válida a aproximação adotada pela MHD ideal, $\lambda \rightarrow 0$. Então as equações acima podem ser combinadas, tal que precisam satisfazer $n \rightarrow 0$. Logo:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{u} \times \vec{B}) \quad (16)$$

Dessa maneira, é estabelecido o Teorema de Alfvén, que afirma o que os elementos do fluido em determinadas linhas do campo magnético em um instante inicial continuarão naquela linha por todo o tempo (congelamento de linhas de campo no fluido) e que o fluxo magnético de um loop do fluido é constante, $\frac{d\Phi_B}{dt} = 0$. Como consequência, a topologia magnética do astro precisa ser mantida.

3.4 Plasma e Neutrinos

3.4.1 Processo Plasma

Se considerarmos neutrinos dentro do Modelo Padrão, mas interações não padrão, simulações mostram que, a densidades não nucleares, neutrinos são emitidos, principalmente, por meio das reações nucleares de processo plasma, aniquilações, produção de pares e bremsstrahlung, tal que o processo plasma é dominante em anãs brancas e núcleos degenerados de gigantes vermelhas de baixa massa [10].

$$\gamma \rightarrow \bar{\nu} + \nu \quad (17)$$

No processo plasma, conforme a expressão acima, um plasmon decai em um neutrino e em um anti-neutrino, ou seja, ocorre uma deexcitação do campo eletromagnético e um acoplamento ao campo de neutrinos.

3.4.2 Neutrino não padrão

Existem diferentes abordagens para um neutrino com propriedades eletromagnéticas não padrão [2]. Uma série de artigos defende a existência de um momento magnético anômalo para o neutrino. Com a adição de um momento dipolar magnético no neutrino, é possível que os neutrinos interajam diretamente com os fótons e, assim, a taxa de reações por processo plasma aumente [1], Análises em aglomerados globulares indicam que ele aumentaria a taxa de acoplamento com o plasma, aumentando também a taxa de processo plasma, o que melhora as perdas de energia por neutrinos [10].

Por outro lado, uma nova área de pesquisa, a Magneto-Hidrodinâmica de Neutrinos, mistura as equações de onda dessas partículas com as equações da MHD e defende que, em um meio ionizado, o neutrino não padrão poderia ganhar uma carga efetiva e interagir elétrica e magneticamente com o meio [9]. No entanto, esse fenômeno teria consequências sobre a propagação das ondas de plasma da estrela, que seriam amortecidas e ganhariam instabilidades. Também, em um plasma com condutividade infinita, o Teorema de Alfvén não teria mais validade, e ocorreria a difusão das linhas de campo magnético [9].

4 Considerações Finais

As equações encontradas para a MHD se pautam nas considerações de uma distribuição de Maxwell-Boltzmann e de que o fluido está em um meio astrofísico, intrínseco às suposições de que a resistividade do meio é muito baixa, há conservação local de carga e podemos desprezar as correntes de deslocamento. Dessa forma, chegamos no teorema de Álfven e descobrimos o congelamento das linhas de campo magnético. O próximo passo necessário é descobrir por dados do resfriamento das anãs brancas e de gigantes vermelhas quanta energia é liberada e quanta energia esperava-se que fosse liberada e calcular se seria razoável esperar isso do processo plasma, colocando o momento magnético anômalo como uma segunda hipótese- haja vista que poderia invalidar o teorema de Álfven.

Referências

- [1] BERTOLAMI, M. M. M. Limits on the neutrino magnetic dipole moment from the luminosity function of hot white dwarfs. *Astronomy & Astrophysics* 562 (2014), A123.
- [2] BROGGINI, C., GIUNTI, C., AND STUDENIKIN, A. Electromagnetic properties of neutrinos. *Advances in High Energy Physics* 2012 (2012).
- [3] CARROLL, B. W., AND OSTLIE, D. A. *An introduction to modern astrophysics*. Cambridge University Press, 2017.
- [4] DAVIDSON, P. A. *Introduction to magnetohydrodynamics*, vol. 55. Cambridge university press, 2016.
- [5] FILHO, K., AND SARAIVA, M. *Astronomia e Astrofísica*, vol. 3. Livraria da Física, 2014.
- [6] GIUNTI, C., AND KIM, C. W. *Fundamentals of neutrino physics and astrophysics*. Oxford university press, 2007.
- [7] GOOSSENS, M. *An introduction to plasma astrophysics and magnetohydrodynamics*, vol. 294. Springer Science & Business Media, 2003.
- [8] GRIFFITHS, D. J. *Introduction to electrodynamics*. Cambridge University Press, 2023.
- [9] HAAS, F., PASCOAL, K. A., AND MENDONÇA, J. T. Neutrino magnetohydrodynamics. *Physics of Plasmas* 23, 1 (2016).
- [10] HAFT, M., RAFFELT, G., AND WEISS, A. Standard and non-standard plasma neutrino emission revisited. *arXiv preprint astro-ph/9309014* (1993).
- [11] RAFFELT, G. G. Neutrinos and stars. In *Neutrinos in Particle Physics, Astrophysics and Cosmology*. CRC Press, 2008, pp. 185–194.
- [12] VALDIVIESSO, GUSTAVO DO A, G. M. M. Compreendendo a oscilação dos neutrinos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*.