

## **Aplicação do modelo teórico da interação Plasma – Campo Magnético na Geofísica Espacial**

LEONARDO DOS SANTOS FERREIRA<sup>1</sup>;

FERNANDO JAQUES RUIZ SIMÕES JUNIOR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pelotas – leonardofisicaufpel@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas – fernando.simoes@ufpel.edu.br

### **1. INTRODUÇÃO**

A imprevisibilidade da atividade solar representa uma potencial ameaça para a vida na Terra, em especial no que se refere a dependência da humanidade com a tecnologia, o que força a humanidade a investir cada vez mais tempo e dinheiro no estudo da relação Sol-Terra, o que, por sua vez, motivou o estudo do que se convencionou chamar de Clima Espacial (KANE, 2006, SIMÕES JUNIOR et al, 2011). O Clima Espacial pode ser compreendido como sendo o conjunto de fenômenos associados a interação dos corpos do Sistema Solar com o Sol, e, além dos efeitos relacionados a gravitação, os de natureza eletromagnética tem um peso importante na descrição do quadro geral do Clima Espacial.

A origem dessas interações eletromagnéticas está na composição do Sol. Basicamente, o Sol é uma esfera gigante de gás incandescente, e esse gás incandescente é conhecido como Plasma. O Plasma representa o quarto estado da matéria, e difere de um gás ordinário pelo fato de que é um sistema com elétrons livres e átomos carregados, com neutralidade global de carga, que apresenta comportamento coletivo devido as interações de longa distância (BITTENCOURT, 2004), enquanto um gás ordinário apresenta neutralidade microscópica e interações de curta distância. Graças a diferença de pressão entre o corpo solar e o meio interplanetário, um fluxo contínuo de Plasma surge, no sentido Sol – Meio Interplanetário; esse fenômeno é conhecido como Vento Solar (SCHERER et al, 2005) que consiste de um gás tênue, altamente condutor emitido continuamente a partir do Sol na direção radial. O Vento Solar pode ter velocidade da ordem de 300km/s em períodos de baixa atividade solar e até 1000km/s em períodos de máxima atividade. Ao se propagar pelo espaço, o Vento Solar interage com os planetas, e tem efeitos devastadores naqueles que não possuem magnetosfera. A magnetosfera dos planetas é um escudo natural contra a atividade solar e está associada ao campo magnético gerado pelo planeta, absorvendo e desviando parte do Vento Solar (KIVELSON et al, 1995), impedindo que as regiões mais externas atmosfera sejam significativamente afetadas por ele.

Em geral, plasmas podem ser descritos por uma função de distribuição de velocidades, e os momentos associados a ela, assim, o objeto deste estudo é investigar a evolução da função de distribuição de velocidades que descreve o plasmas do vento solar, e a interação das partículas do plasmas com ondas eletromagnéticas. Como parte inicial do trabalho de iniciação científica, estamos estudando os conceitos básicos de física dos plasmas e a interação entre as partículas eletricamente carregadas dos Plasmas com os campos magnéticos,

para que extrapolemos o modelo teórico de forma aplicada à relação Vento Solar – Magnetosfera Terrestre.

## 2. METODOLOGIA

Como o trabalho de Iniciação Científica está em fase inicial, nestes últimos três meses foi feita uma revisão teórica acerca das propriedades dos Plasmas, relacionadas a interação de partículas carregadas e campos eletromagnéticos, através de uma aproximação na qual os campos magnéticos são considerados constantes, associada a origem do processo de interação do vento solar com a magnetosfera terrestre. Embora relativamente simples, esse tipo de interação está associado a um conjunto de fenômenos que ocorrem no campo magnético da terra configurado na definição de Clima Espacial.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O termo "plasma" foi utilizado pela primeira vez referindo-se a região interna de um gás ionizado, livre de ligações interatômicas, macroscopicamente neutro, com um grande número de elétrons livres, que exhibe um comportamento coletivo (TONKS et al, 1929). A neutralidade macroscópica é verificada pela análise da mudança de fase de um gás ordinário para um plasma. Imaginemos um gás ordinário macroscopicamente neutro (soma das cargas internas igual a zero) sendo aquecido até que suas moléculas tenham uma energia cinética suficiente para, ao se chocarem, "arrancarem" elétrons umas das outras. Embora microscopicamente desequilibrados, a soma total de cargas do sistema continua sendo zero, já que a carga é conservada durante a troca de fases. A medida que os prótons e elétrons no interior do plasma colidem, eles podem gerar aglomerados de carga positiva ou negativa, que, por sua vez, quando em movimento, geram campos eletromagnéticos (BITTENCOURT, 2004). Esses aglomerados de carga e esses campos eletromagnéticos afetam o comportamento do plasma como um todo, mesmo à grandes distâncias, graças as forças de coulomb de longo alcance, o que promove um comportamento coletivo entre os átomos que constituem o plasma. O fato de um plasma ser microscopicamente desequilibrado, em questão de cargas elétricas, é fundamental para sua relação com os campos magnéticos.

Consideremos um plasma se propagando no espaço livre de influências eletromagnéticas. Agora, se em algum lugar desse espaço o plasma entra em contato com um campo magnético sabemos que a interação carga – Campo Magnético é dada pela 2ª lei de Newton:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

onde  $\mathbf{v}$  é a velocidade de partícula e  $\mathbf{B}$  o campo magnético local.

Podemos escrever o *momentum* linear da partícula como sendo  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ . Nesse tratamento, é mais conveniente escrevermos a velocidade da partícula em uma componente paralela ao campo magnético  $v_{\parallel}$  e outra perpendicular  $v_{\perp}$ . Desse modo, a Equação (1) pode ser dividida em:

$$\frac{dv_{\parallel}}{dt} = \frac{q}{m} (\mathbf{v}_{\parallel} \times \mathbf{B}); \quad (1.1)$$

$$\frac{dv_{\perp}}{dt} = \frac{q}{m} (\mathbf{v}_{\perp} \times \mathbf{B}). \quad (1.2)$$

Sabendo que o produto vetorial entre dois vetores paralelos é zero, na Equação (1.1), a variação da velocidade paralela ao campo é zero. Essa relação matemática implica fisicamente no fato de que a linha de campo redireciona a partícula carregada, com uma velocidade paralela constante e uma velocidade perpendicular acelerada. A soma dessas implicações origina o movimento de helicoidal das cargas em torno das linhas de campo magnético, que por sua vez, resulta no que se conhece por aprisionamento de partículas carregadas por linhas de campo magnético. Basicamente, as linhas de campo servem como verdadeiros caminhos de carga elétrica, direcionando o fluxo de cargas no sentido da linha de campo, quando a carga for positiva, e no sentido contrário, quando negativa (Para mais esclarecimentos, veja (BITTENCOURT, 2003)). Essa aproximação de um campo magnético constante funciona muito bem para descrevermos parte da interação do Vento Solar com a Magnetosfera terrestre, já que o campo elétrico na região onde ela acontece é praticamente inexistente e as alterações no campo magnético podem ser descartadas. Sendo assim, a aplicação da teoria na descrição do fenômeno é direta.

Quando o Vento Solar se choca com a Magnetosfera Terrestre, o que define se a partícula será absorvida ou defletida é o ângulo entre o vetor velocidade e o vetor campo magnético (chamado de “pitch angle” ou ângulo de lançamento) e o *momentum* linear associado a ela. Quanto mais próximo da perpendicularidade o ângulo de lançamento e quanto maior for o momentum linear, mais chances a partícula tem de adentrar a magnetosfera, e são essas partículas que nos interessam, já que as que são defletidas para longe da Terra não contribuem de forma efetiva para fenômenos na magnetosfera terrestre. Lembrando do modelo teórico, quando a partícula que penetra o campo magnético é direcionada pelas linhas de campo e rotaciona entorno dela (o raio dessa rotação é chamado de raio de *cyclotron*). Seguindo essa lógica, as partículas são direcionadas para os polos do planeta, e agora terão de vencer o que se chama de espelho magnético (BITTENCOURT, 2003). Quando possuem um momentum magnético suficiente para tal, a partícula entra na alta ionosfera, dando origem ao fenômeno de precipitação auroral. Quando elas se chocam com os átomos da atmosfera, elas os excitam, fazendo com que atinjam níveis energéticos maiores, e que saiam do estado de equilíbrio; para que voltem ao equilíbrio, os átomos excitados emitem fótons, que dão origem as auroras polares (KIVELSON et al, 1995). Dentre os fenômenos relacionados à Interação Sol-Terra, certamente as auroras são os mais conhecidos e de maior facilidade na visualização; nas regiões polares, basta olhar para o céu a noite. Porém existem fenômenos invisíveis a olho nu, que impactam muito na vida na terra. As partículas que não vencem o espelho magnético tem sua direção de translação invertida, e são direcionadas de volta pela linha de campo; já que elas não venceram uma vez, provavelmente elas não vencerão o espelho magnético no outro polo do planeta, o que fará com que elas fiquem aprisionadas entre os polos. Enquanto rotacionam, as partículas são lançadas de uma linha para outra, e de linha em linha acabam orbitando a Terra. Esse fluxo de cargas ao redor da Terra tem o nome de Corrente de Anel, e tem implicações pertinentes na tecnologia. Se essa corrente aumentar de intensidade, devido a uma atividade solar mais intensa, ela pode promover deformações significativas no campo magnético local, fazendo com que a bússola de um navegador, por exemplo, passe a apontar para qualquer outro lugar, ao invés do norte. A descoberta desse

tipo de interação mostra o quão importante é a evolução da localização por satélite, já que a bússola não é totalmente confiável.

A medida em que são descobertos novos fenômenos decorrentes da Interação Sol-Terra, é conveniente que se criem métodos para que possamos observar os impactos promovidos por eles na Magnetosfera. Esses são os Índices de Atividade Geomagnética. Existem índices para fenômenos específicos, como o AE e o DST. O AE é baseado na medição quantitativa da atividade magnética global, na região auroral, medindo o desvio, em um certo instante de tempo, do campo magnético horizontal nessas, em comparação ao valores médios. Já o DST mede a variação da atividade magnética graças a Corrente de Anel. Por outro lado, existem índices gerais, como o KP, que mede a variação do campo magnético global, em relação a valores médios, causados por irregularidades na atividade solar.

#### 4. CONCLUSÕES

Com a realização deste estudo, foi possível tomar conhecimento inicial a respeito da teoria de física de plasmas no clima espacial e a percepção dos fenômenos como manifestação da natureza, mostrando a validade da aplicação do modelo teórico para descrição da interação entre plasmas e campos magnéticos na área do clima espacial. Foi possível compreender parte do fenômeno das auroras polares, utilizando ferramentas simplificadas de matemática, condizente com o período inicial do curso de física, assim como a fenomenologia da Interação Sol-Terra e do Clima Espacial como um todo. Os próximos passos da pesquisa estarão associados ao formalismo numérico de um código de simulação, utilizando o método PIC (particle in cell) aplicado à plasmas espaciais. O código utilizado será o KEMPO 1 (OMURA et al, 1993).

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KANE, R. P. **The idea of Space Weather - A historical perspective. Advances in Space Research**, v. 37, p. 1261–1264, Jan. 2006.

Simões Junior, F. J. R., Alves M. V. E. Costa Junior. O vento solar e a atividade geomagnética. **Revista Brasileira do Ensino de Física**. São Paulo, v 33, n 4, 2011.

BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of Plasma Physics**. São José dos Campos, SP: Springer, 2004.

SCHERER, B. H. K.; FICHTNER, H.; MALL, U. **Space Weather - The Physics Behind a Slogan**. Alemanha: Springer, 2005.

KIVELSON, M. G.; RUSSEL, C.T. **Introduction to Space Physics**. Los Angeles: Cambridge University Press, 1995.

OMURA, Y.; MATSUMOTO, H. KEMPO1: Technical Guide to One-Dimensional Electromagnetic Particle Code. In: MATSUMOTO, H.; OMURA, Y. (Ed.). **Computer Space Plasma Physics: Simulation Techniques and Software**. [S.l.]: Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), 1993.