

TERRELLA

PULICI, Angelo Rober¹

MELO, Michael de²

RESUMO

Este artigo apresenta uma experiência de física de plasma por meio de um dispositivo denominado Terrella, que emite um vento de partículas em uma esfera magnetizada inserida numa câmara à vácuo produzindo auroras polares artificiais. A Terrella provou ser uma ferramenta eficaz não só para fins acadêmicos, mas também para divulgação científica.

Palavras-chave: Terrella. Aurora. Plasma. Magnetismo.

ABSTRACT

This paper presents a plasma physics experiment using a device denominated Terrella, which emits a particle wind in a magnetized sphere inserted into a vacuum chamber producing artificial polar auroras. Terrella has proven to be an effective tool not only for academic purposes, but also for scientific dissemination.

Keywords: Terrella. Aurora. Plasma. Magnetism.

INTRODUÇÃO

Em 1600 o físico inglês William Gilbert investigou o magnetismo da Terra. Ele conclui que a Terra era magnética e este era o motivo pelo qual

¹Bacharel em Física pela Universidade Mackenzie, Especialista em Astrofísica pelo IAG da USP, Mestre em Biofísica pela UNESP. Docente da UNIFEV, Votuporanga, São Paulo, Brasil.
angelopulici@fev.edu.br

²Bacharel em Física pela USP, Especialista em Administração de Empresas pela FCMSCSP, Mestre em Engenharia Civil pela UNESP e Doutorando em Física da Matéria Condensada pela UNESP. Docente da UNIFEV, Votuporanga, São Paulo, Brasil.

as bússolas apontavam para o norte; anteriormente, dizia-se que isto se devia à estrela polar ou às grandes ilhas magnéticas no polo norte que atraíam as bússolas (GILBERT,1991).

Em 1733, no primeiro tratado sobre luzes polares, Jean-Jacques Dortous de Mairan descreve de forma intuitiva e visionária a ligação entre as auroras terrestres e o Sol, demonstrando a partir de um grande número de observações que a atmosfera solar às vezes atinge a órbita terrestre (DORTOUS DE MAIRAN,1733). Alguns anos depois, em 1747, o astrônomo sueco Anders Celsius e seu assistente Olof Hiorter descobriram que o campo magnético é um ingrediente essencial da física das auroras boreais.

Durante o século XIX, os geofísicos estabeleceram que as luzes polares ocorrem preferencialmente em torno dos polos magnéticos. Trabalhos paralelos no eletromagnetismo também resultaram na postulação da existência de partículas carregadas, os elétrons, descobertos por Thomson em 1901. Estas partículas carregadas eram na época chamadas de raios catódicos. No final do século XIX, o físico norueguês Kristian Olaf Birkeland teve a ideia original de disparar raios catódicos sobre uma esfera magnetizada suspensa numa câmara de vácuo. Ele imaginou o cátodo representando o Sol com os raios catódicos simulando a atmosfera solar emitindo o vento solar, e a esfera magnetizada suspensa representando a Terra. Ele construiu cerca de quatorze diferentes versões de sua experiência durante o curso de sua vida. Esta experiência é chamada Terrella. Ao reverter as polaridades de seu experimento, Birkeland foi também o primeiro a visualizar as correntes do anel. Os cinturões de radiação associadas a estas correntes foram descobertos mais tarde em 1958 durante os primeiros voos espaciais norte-americanos por James Van Allen, resultado que lhe valeu o prêmio Crafoord em 1989.

Com o advento da era espacial (EGELAND e BURKE, 2005), entendia-se que as auroras são produzidas principalmente por elétrons acelerados por meio de potenciais elétricos resultantes dos fluxos de convecção do plasma na magnetosfera. Estes fluxos são, em última instância, causados pelo plasma do vento solar fluindo para além da Terra, que combina energia no limite da magnetosfera da Terra via reconexão magnética (STERN 1996, KIVELSON e

RUSSEL 1995, LILENSTEN e BORNAREL, 2006). Nenhum destes processos físicos foi incorporado na experiência original de Birkeland.

Nos experimentos de Birkeland o "vácuo" tinha uma pressão de cerca de 10 Pa, a tensão era maior do que 300 V para uma corrente na ordem de 0,1 a 1,0 mA e a intensidade do campo magnético foi de aproximadamente 0,5 T distante 0,5 cm da superfície dos ímãs. Estas condições, embora facilmente alcançáveis hoje, colocaram desafios muito maiores na virada do século XX.

1. AS AURORAS

As auroras são um fenômeno intrigante que pode ser visto nas regiões polares, nas quais a camada fina da atmosfera superior brilha e tremeluz durante a noite. Também são conhecidas como luzes do norte (aurora boreal) ou do sul (aurora austral).

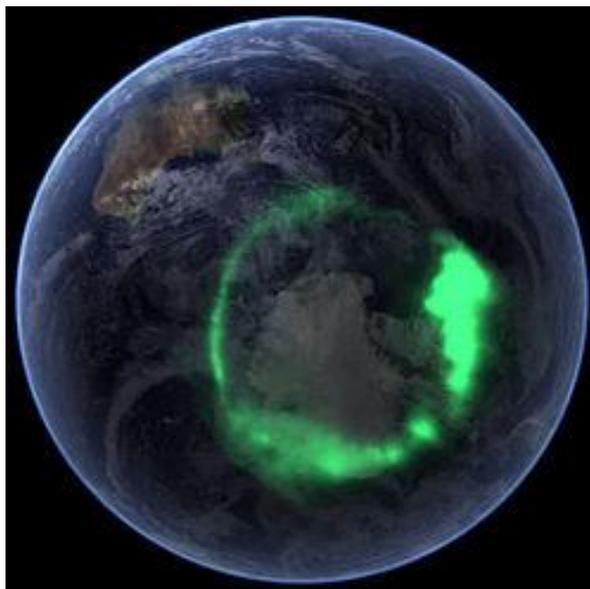


Figura 1: aurora austral captada pelo satélite IMAGE (© NASA)

Talvez de forma inesperada, a causa última das auroras não reside na atmosfera terrestre, mas no Sol. O Sol libera a sua energia para o espaço de duas formas: como radiação, da qual vemos todos os dias a parte visível; e como vento solar, que é invisível, mas que origina as auroras quando interage

com as camadas superiores da atmosfera. O vento solar é constituído por partículas carregadas, elétrons e íons, sendo estes sobretudo cátions, hidrogênio (prótons), e tem propriedades variadas. A sua velocidade pode ir de algumas dezenas até alguns milhares de quilômetros por segundo, e a sua densidade vai de alguns (tipicamente cinco) elétrons e prótons por centímetro cúbico à distância a que a Terra se encontra do Sol.

Sendo eletricamente carregado, o vento solar é sensível aos campos magnéticos. Uma das consequências disto é que uma larga proporção das partículas do vento solar que passam pelo nosso planeta são captadas pelo campo magnético da Terra e eventualmente dirigidas a um dos seus polos magnéticos; estas partículas capturadas formam aquilo que se chama de cinturão de Van Allen.

Para todos os efeitos, o cinturão de Van Allen situa-se bem acima da superfície da Terra (cerca de 45.000 km na região do equador). Nos polos, contudo, penetra na atmosfera: as suas partículas carregadas colidem com a atmosfera a uma altitude de 80 a 500 km, onde o ar é rarefeito (com uma pressão de menos de alguns décimos de pascal). Durante as colisões, os átomos da atmosfera ficam ionizados (quando um ou mais elétrons são ejetados) ou excitados (quando a colisão aumenta o nível energético de um elétron, sem, no entanto, provocar a sua ejeção) e, portanto, instáveis.

Para regressar ao seu estado normal, os átomos deverão participar de reações químicas ou liberar a energia que acabaram de absorver sob a forma de luz. Quando este processo emite luz visível, denomina-se aurora. Vistas do espaço, as auroras boreal e austral formam um anel conhecido como a oval da aurora, que demarca a região onde o cinturão de Van Allen intercepta a atmosfera terrestre.

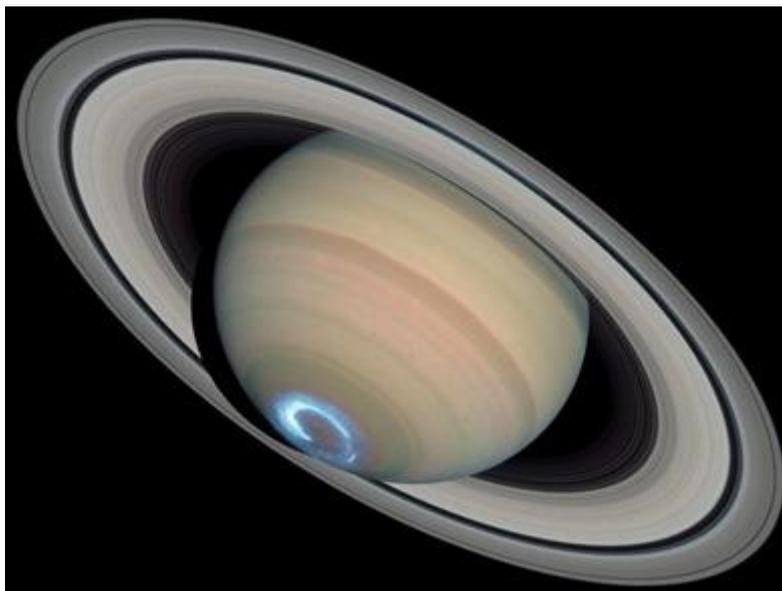


Figura 2: aurora no polo sul de Saturno vista pela sonda Cassini (© NASA)

As auroras não se restringem apenas ao nosso planeta, é possível observar auroras em outros planetas do Sistema Solar, em particular Júpiter e Saturno, e também em Marte, além de anomalias magnéticas (KEILING, JACKMAN e DELAMEREIX, 2015).

2. O EXPERIMENTO TERRELLA

A Terrella é um dispositivo que consiste em uma câmara à vácuo, onde uma esfera de alumínio com uma barra de ímã permanente embutida imita a Terra e seu campo magnético. Um sistema de eletrodos é ajustado a uma grande diferença de potencial para gerar um fluxo de elétrons que ioniza o ar residual em torno da esfera. Isso resulta em auroras polares incandescentes, cuja geometria é dependente da orientação e distância da barra imantada, de modo que várias configurações podem ser experimentadas (MESSEROTTI, BACCOMI, IUGOVAZ e LILENSTEN, 2008).

Nesta experiência, similar à de Birkeland, é possível simular as auroras e o cinturão de Van Allen. O equipamento deve ser montado de forma a que o eletrodo suspenso do topo da câmara de vácuo seja o cátodo, representando o

Sol e gerando um fluxo de elétrons. A esfera magnetizada é o ânodo, representando a Terra, e o seu eixo magnético deve ser perpendicular ao fluxo de elétrons.

Os elétrons (vento solar) são atraídos e envolvem a esfera. Os elétrons colidem com os átomos do gás, uma vez que na câmara não existe um vácuo perfeito, isso pode ser verificado na forma de um brilho à volta da esfera. Os elétrons movem-se então em direção aos polos da esfera, contornando-a de forma a seguirem as linhas do campo magnético; nota-se este efeito como um anel à volta de cada polo.

De que forma esta simulação se relaciona com a realidade? O brilho generalizado à volta da esfera magnética representa o cinturão de Van Allen, que na realidade é apenas visível nos polos, onde intercepta a atmosfera terrestre. Nesta simulação, uma vez que existem pequenas quantidades de gás em toda a câmara, é possível visualizar todo o campo magnético da esfera (“Terra”).



Figura 3: auroras polares obtidas pela Terrella (© Universidade de Paris)

Os anéis brilhantes à volta de cada polo no experimento representam as ovas aurorais. Tal como na realidade, são provocadas por um elevado número de elétrons atingindo os átomos do gás, sendo que as linhas do campo magnético se encontram mais próximas nos polos.

As cores da experiência, contudo, diferem das que são mais vulgarmente observadas nas luzes do norte e do sul. As cores mais brilhantes nas auroras terrestres (verde e vermelho) são provocadas pelo átomo de oxigênio, que está apenas presente nas camadas superiores da atmosfera. As cores da experiência (púrpura, vermelho, rosa e branco) são encontradas apenas nas auroras que ocorrem a baixas altitudes, onde abundam o oxigênio e o nitrogênio moleculares. Essas cores são visíveis apenas algumas vezes em cada década, quando o vento solar entra na atmosfera com velocidades particularmente elevadas.

3. CARACTERÍSTICAS DO GÁS E DOS ELÉTRONS

Usando a lei de gás ideal para uma temperatura constante T de 300 K, podemos facilmente deduzir a densidade dentro da câmara:

$$\frac{N}{V} = \frac{p}{k.T}, \quad (1)$$

onde N é o número de partículas, V é o volume, p é a pressão, T é a temperatura, e k é a constante de Boltzmann.

A densidade do gás resultante é da ordem de $2 \times 10^{21} m^{-3}$.

Os elétrons disparados pelo cátodo têm uma alta energia. A equação de energia cinética fornece uma velocidade máxima de $1,88 \times 10^7 m/s$, isto é, 6% da velocidade da luz ($\cong 3 \times 10^8 m/s$), o que os torna não relativísticos.

A temperatura proporcionada pelo elétron é deduzida da equação da energia:

$$E = k.T, \quad (2)$$

sendo o seu valor igual a $1,17 \times 10^7 K$. Esta temperatura é o máximo alcançável e só é válida para elétrons que não colidem durante sua viagem no meio. Os elétrons resultantes da ionização de impacto entre os elétrons e o gás neutro não têm uma distribuição de Maxwell. No entanto, eles são ejetados com uma grande energia (DENDY, 1995, BALESCU, 1988).

4. A GERAÇÃO DA CORRENTE DO ANEL

Considerando inicialmente um campo magnético constante. A força de Lorentz é expressa por:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}, \quad (3)$$

onde F é a força magnética, q é a carga elétrica, v é a velocidade e B é o campo magnético.

Projetando nos eixos (x , y , z), os elétrons estão sujeitos a uma frequência de cíclotron dada por:

$$\omega = \frac{|q| \cdot B}{m}, \quad (4)$$

onde ω é a frequência angular e m é a massa do elétron ($9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$).

E o raio r (chamado raio de Larmor) é dado por:

$$r = \frac{v_t}{|\omega|} = \frac{m \cdot v_t}{|q| \cdot B} \quad (5)$$

Para calcular os valores destes parâmetros, basta considerar a relação do campo dipolar B/r^3 constante. No experimento com a intensidade do campo magnético de 0,5 T medido a 0,5 cm da superfície dos ímãs caracteriza um raio de Larmor de 0,21 mm e uma frequência de cíclotron de $8,8 \times 10^{10} \text{ Hz}$.

Então, a presença de um campo magnético gera uma rotação. Mas um segundo efeito está em ação, devido ao gradiente do campo magnético. Enquanto se aproximam do ímã, os elétrons atravessam um meio no qual o gradiente do campo magnético aumenta. A teoria clássica é limitada a um desenvolvimento de primeira ordem. Neste caso, ao negligenciar no momento os efeitos das colisões, a equação de forças é descrita por:

$$\vec{F} = q \cdot \left(-\frac{r \cdot v_t}{2} \nabla B + \vec{v} \times \vec{B} \right) \quad (6)$$

Supondo estacionária, esta soma é igual a zero. Isso implica que os elétrons estão sujeitos a uma velocidade igual:

$$\vec{v} = -\frac{r \cdot v_t}{2} \frac{\vec{B} \times \nabla B}{B^2} \quad (7)$$

A velocidade dos elétrons é tanto perpendicular ao campo magnético como ao gradiente do campo, fazendo uma rotação em torno do ímã, origem da corrente do anel.

CONCLUSÃO

O experimento Terrella possibilita: pesquisar a interação do plasma fracamente magnetizado com um campo magnético forte, analisar o transporte e o aquecimento gerado pelas ondas de choque, verificar a cintilação do plasma e seu aprisionamento em um único campo magnético, e simular as auroras polares.

Este experimento pode ser realizado com materiais de baixo custo para aplicação na área educacional. A grande dificuldade advém da fabricação das esferas, que devem ter uma boa qualidade superficial, pois qualquer irregularidade pode desviar o campo elétrico.

Uma pesquisa interessante aplicando a Terrella é estudar o efeito da sublimação em cometas simulando a interação do plasma com as moléculas que constituem sua coma, nuvem de poeira e gás que circunda o núcleo deste astro cósmico.

REFERÊNCIAS

BALESCU, R. **Transport Processes in Plasmas**. v. 1, Amsterdam: North-Holland, 1988.

DENDY, R.O. **Plasma Physics. An Introductory Course**, Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

DORTOUS DE MAIRAN, J.J. **Traité Physique et Historique de l'Aurore Boréale**, Paris: De l'Imprimerie Royale, p. 281, 1733.

EGELAND, A., BURKE, W.J. **Kristian Birkeland, the First Space Scientist**, Springer, New York: Springer, 2005.

GILBERT, W. **De Magnete**, reprodução da tradução de Mottelay, São Paulo: Dover Books, 1991.

KEILING, A., JACKMAN, C., DELAMEREIX P., **Magnetotails in the Solar System**, Wiley, 2015.

KIVELSON, M.G., RUSSELL, C.T. **Introduction to Space Physics**, New York: Cambridge University Press, p. 568, 1995.

LILENSTEN, J., BORNAREL, J. **Space Weather, Environment and Societies**, Dordrecht: Springer, p. 242, 2006.

MESSEROTTI, M., BACCOMI, R., IUGOVAZ, D., LILENSTEN, J. A Terrella device for simulating aurora-like phenomena in a box, **Earth, Moon and Planet**, New York City: Springer, v. 104, p. 55-58, 2008.

STERN, D.P. **A brief history of magnetospheric physics during the space age**, *Reviews of Geophysics* 34, 1, p. 1-32, 1996.