



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

IDENTIFICAÇÃO DE FRONTEIRAS DE PLASMA NA MAGNETOSFERA INDUZIDA DE MARTE

Gabriel Costa de Oliveira

Relatório final de Iniciação Científica
do programa PIBIC, orientado pelo Dr.
Ezequiel Echer e co-orientado pela
Dra. Adriane Marques

INPE
São José dos Campos

2022

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: O plasma do vento interestelar encontrando o vento solar.

Figura 2: Ilustração da magnetosfera de Marte com as principais regiões identificadas.

Figura 3: Exemplos de marcação de fronteiras de plasma utilizando o CCATI.

Figura 4: Dados de fronteiras na esquerda e a correção na direita.

Figura 5: Exemplos de marcação.

RESUMO

O vento solar é um fluxo de partículas ionizadas que deixam o sol com velocidades que costumam variar entre 300 a 800 km/s. Quando esse fluxo chega em Marte, ele interage com sua atmosfera condutora, formando uma magnetosfera induzida ao redor desse planeta. Existem diversas fronteiras nessa magnetosfera: frente de choque, fronteira de empilhamento magnético, ionopausa e fronteira de fotoelétrons. Um dos objetivos deste trabalho é identificar essas fronteiras utilizando dados dos sensores de plasma de elétrons e íons da sonda Mars Express. A marcação das fronteiras foi feita utilizando o software CCATI, em que era possível observar mudanças apresentadas nos espectros de energia de elétrons e íons devido às características do plasma em cada região e fronteira. Com as marcações, conseguimos atualizar o catálogo dessas fronteiras que antes do projeto estava disponível até 2016. Com esse projeto o catálogo foi atualizado até 2018.

Palavras-chave: Vento Solar. Magnetosferas Induzidas de Marte. Ondas de Plasma Comprimento de Correlação. Perda Atmosférica.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. DESENVOLVIMENTO	6
a) Revisão de literatura	6
b) Material e método	9
c) Resultados e discussão dos resultados	10
3. CONCLUSÃO	11
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	11

1. INTRODUÇÃO

O vento solar é um fluxo contínuo de partículas constituído, principalmente, de prótons e elétrons, que escapam da atração gravitacional do Sol. Essas partículas são energizadas por altas temperaturas na coroa, estas partículas deixam o sol em velocidades que variam de 300 a 800 km/s.[1] O termo magnetosfera foi designado por T. Gold em 1959, para descrever a região acima da ionosfera na qual o campo magnético da Terra controla o movimento das partículas carregadas. Qualitativamente, uma magnetosfera é o volume do espaço no qual o vento solar é excluído por um campo planetário. Esta definição não é muito precisa, pois o vento solar não é totalmente excluído da magnetosfera e também há fenômenos dinâmicos de mistura dos dois plasmas. Planetas não magnetizados também criam cavidades no vento solar com propriedades bem similares as de magnetosferas planetárias.[2] Quando o vento solar interage com o campos magnéticos e com as atmosferas ionizadas cria uma região ao redor do corpo planetário chamada magnetosfera. Magnetosfera pode ser considerada como uma região envoltória, constituindo a parte exterior da atmosfera de um astro, em que o campo magnético controla os processos eletrodinâmicos da atmosfera ionizada e de plasmas.

A magnetosfera pode ser de dois tipos: intrínseca e induzida. A intrínseca ocorre em planetas com campo magnético, a formação desse tipo de magnetosfera gera uma região ao redor do planeta onde o campo magnético distorcido controla o movimento das partículas. Além disso, a maioria dos planetas do sistema solar possuem magnetosferas intrínsecas. Por outro lado, a magnetosfera induzida ocorre em planetas não magnetizados onde o vento solar é defletido através das forças que são criadas pelas correntes elétricas, provenientes da ionosfera. Marte e Vênus são os únicos planetas do sistema solar com esse tipo de magnetosfera.[3]

O objetivo deste trabalho é identificar as fronteiras do plasma da Magnetosfera de Marte de 2017 até 2019, com o objetivo de atualizar os limites do catálogo. Existem diversas fronteiras nessa magnetosfera: frente de choque, fronteira de empilhamento magnético, ionopausa e fronteira de fotoelétrons.

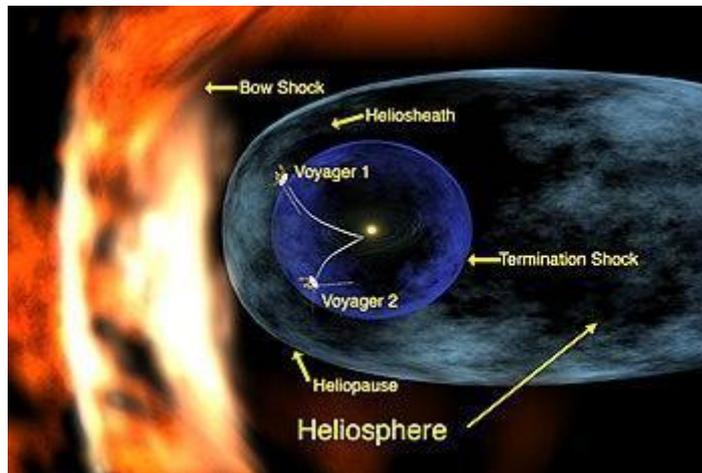
2. DESENVOLVIMENTO

Marte possui uma interação com o vento solar similar a de Vênus, conforme descrito na seção anterior. Assim como Vênus, Marte possui uma frente de choque. A exploração da interação de Marte com o vento solar/magnetosfera de Marte deve-se principalmente às sondas que cruzaram Marte: Mariner-4 (1964), Mars-2 e Mars-3 (1971-1972), Phobos-2 (1989) e as sondas orbitais Mars Global Surveyor (1996-2006) e Mars Express (desde 2003). [2]

a) Revisão de literatura

O vento solar é a emissão contínua de partículas carregadas provenientes da coroa solar. Essas partículas podem ser elétrons e prótons, além de subpartículas como os neutrinos. Próximo da Terra, a velocidade das partículas pode variar entre 400 e 800 km/s, com densidades próximas de 10 partículas por centímetro cúbico. Variações na coroa solar, devido à rotação do Sol e às suas atividades magnéticas, tornam o vento solar variável e instável, exercendo influência nos gases ao redor da estrela e planetas próximos a esta. Ilustração na figura 1. No espaço próximo à Terra, observa-se que o vento solar lento tem uma velocidade de 300 a 500 km/s, uma temperatura de ~ 105 K e uma composição que se aproxima da coroa.[4]

Figura 1: O plasma do vento interestelar encontrando o vento solar.

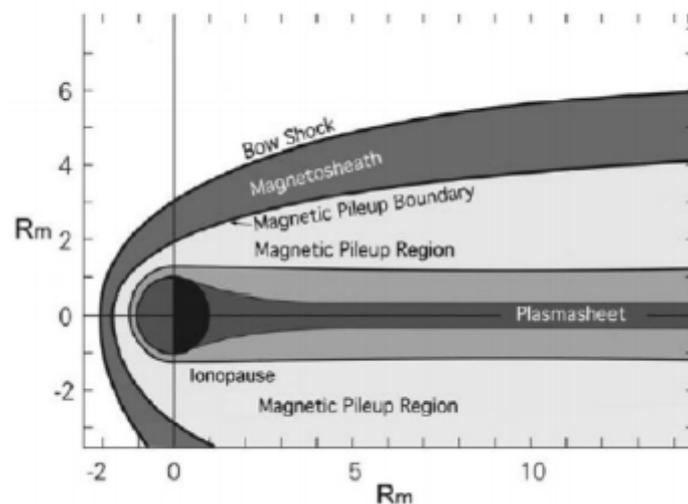


A natureza da interação entre um planeta não magnetizado e o vento solar supersônico é determinada pela condutividade elétrica do corpo. Se circuitos condutores existem através do interior ou da ionosfera do planeta, então correntes elétricas fluem através do planeta e no vento solar, onde elas criam forças que desaceleram e desviam o fluxo do

vento solar incidente.[2] O vento solar desviado flui ao redor de uma região que é similar à uma magnetosfera intrínseca. Vênus e Marte não possuem um campo planetário. Ambos os planetas têm ionosferas que provêem os circuitos condutores necessários para defletir o vento solar. A barreira que separa o plasma planetário do plasma do vento solar é referida como ionopausa (por analogia à magnetopausa). Além da ionopausa, em direção ao vento solar, a interação do vento solar tem as características de uma magnetosfera planetária. A frente de choque aparece à frente do obstáculo, o vento solar é defletido em uma região de magnetobainha/ionobainha, o IMF é comprimido e empilhado ao redor do obstáculo na região da magnetobainha. [5]

Como foi mencionado anteriormente, existem 2 tipos de magnetosfera intrínseca e a induzida. Neste trabalho falaremos somente da induzida. As fronteiras criadas com a formação da magnetosfera induzida de Marte são: a frente de choque (do inglês, Bow Shock, BS), a fronteira de empilhamento magnético (do inglês, Magnetic Pile-up Boundary, MPB) e a fronteira fotoelétrica (ionopausa) (do inglês, PhotoElectron Boundary/ionopause, PEB). Uma ilustração da magnetosfera induzida de Marte com as principais regiões identificadas e apresentada na figura 2.

Figura 2: Ilustração da magnetosfera de Marte com as principais regiões identificadas.



Essas fronteiras são responsáveis pela separação dos ambientes de plasmas que existem nas proximidades de Marte. As principais características de cada fronteira e região de plasma são:

Frente de Choque: é formada devido a colisão do vento solar com um obstáculo planetário. Nessa região o vento solar é desacelerado, passando de uma velocidade supermagnetosônica para sub magnetosônica [6].

MPB: é identificada como uma fronteira onde ocorre uma rotação da direção do campo magnético e uma diminuição da turbulência de plasma.

Bainha magnética: Localizada entre a frente de choque e a MPB. Corresponde a uma região de alta densidade e temperatura elevada devido a compressão e aquecimento do vento solar.

PEB ou Ionopausa: Recebe esse nome devido a mesma ser caracterizada por fotoelétrons. Estes são produzidos por fótons da radiação ultravioleta e de raios-x moles de origem solar, que atingem regiões mais baixas da atmosfera marciana.

MPR: se encontra entre a MPB e a PEB. Esta é caracterizada como uma região com campo magnético forte e de alta organização, que é resultante do arrasto e acúmulo do campo magnético em torno da ionosfera de Marte. Nessa região a população de elétrons é uma mistura de elétrons do vento solar e fotoelétrons.

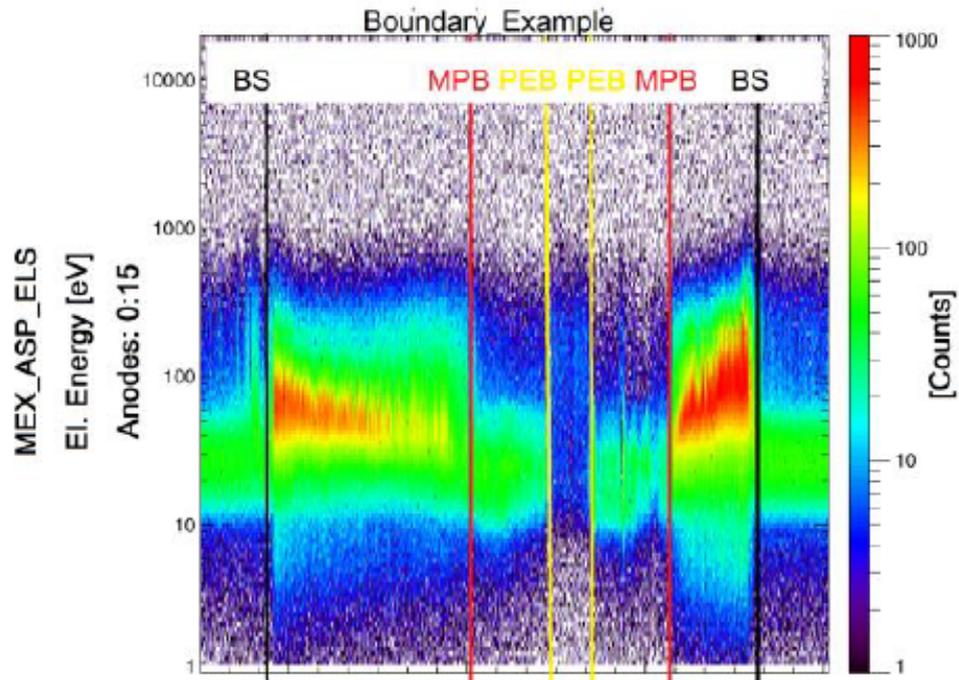
Magnetocauda: é formada com o arraste das linhas de campo magnético em torno do planeta, que deslizam sobre os pólos e se estendem na direção anti-solar.

b) Material e método

O software utilizado para fazer as marcações foi o CCATI. A marcação das fronteiras é realizada de acordo com a passagem do espaço nave Mars Express (MEX) por cada uma delas, à medida que a MEX adentra na magnetosfera Marciana (Inbound), assim como, a medida que a espaçonave sai do ambiente de plasma do planeta (outbound). Dessa forma, as fronteiras 1, 2 e 3 correspondem a frente de choque, MPB e PEB (inbound), respectivamente. Já as fronteiras 4, 5 e 6 correspondem às fronteiras PEB, MPB e frente de choque (outbound), respectivamente.

Esse software plota algumas imagens em que era possível observar mudanças apresentadas nos espectros de energia de elétrons e íons devido às características do plasma em cada região e fronteira. Com essas imagens, era possível fazer as marcações de cada fronteira manualmente e enviado para correção. São geradas 3 imagens durante o dia, fazendo com que um mês tenha cerca de 90 marcações. Pode-se observar na figura 3, exemplos de marcação de fronteiras.

Figura 3: Exemplos de marcação de fronteiras de plasma utilizando o CCATI.



Após as marcações, o CCATI gerava um arquivo com os dados das fronteiras marcadas. Após isso, era enviado para o orientador tanto os dados como as imagens. Após certo momento era enviado a correção feita pelo orientador e se necessário a remarcação das fronteiras como podemos ver na figura 4.

Figura 4: Dados de fronteiras na esquerda e a correção na direita.

```

# CCATi boundary location file: time bndnum yvalue zvalue
2017-10-02/00:01:00 1 18.2440 18.0000
2017-10-02/01:19:01 2 31.1610 13.0000
2017-10-02/00:00:38 3 15.8000 6584.00
2017-10-02/00:16:38 4 17.9000 2646.00
2017-10-02/20:11:30 1 42.3121 60.0000
2017-10-02/20:39:26 2 53.2236 173.0000
2017-10-02/20:41:09 +-20:44 3 13.7000 64.0000
2017-10-02/21:13:09 +-20:58 4 15.8000 2191.00
2017-10-02/21:17:09 5 45.6749 124.0000
2017-10-02/21:31:33 6 45.6749 17.0000
2017-10-03/11:15:59 41 21.2592 14.0000
2017-10-03/11:43:59 + 11:28 5 2 22.9488 3.00000
2017-10-03/11:09:29 + 11:43 6 4 18.2440 16.0000
2017-10-04/00:40:00 + 00:09 12 21.2592 20.0000
2017-10-04/00:26:30 + 00:24 23 21.8000 527.000
2017-10-04/00:55:18 (N marcar) 4 13.7000 1562.00
2017-10-04/08:19:58 51 42.3121 243.000
2017-10-04/08:35:59 6 2 42.3121 47.0000
2017-10-04/09:17:03 ?????? 5 8.49158 14.0000
2017-10-04/10:12:14 ?????? 6 9.89498 185.000
2017-10-04/14:17:01 1 36.3110 6.00000
2017-10-04/14:38:31 14:28 2 18.2440 43.0000
2017-10-04/14:29:12 14:38 3 13.7000 202.000
2017-10-04/15:01:12 14:49 4 13.7000 108.000
2017-10-04/15:04:31 5 28.8668 106.000
2017-10-04/15:33:31 6 33.6376 55.0000
2017-10-04/20:13:01 1 22.9488 37.0000
2017-10-04/20:13:01 1 22.9488 37.0000
2017-10-04/20:21+- 2 22.9488 37.0000
2017-10-05/12:21:00 1 5 28.8668 51.0000
2017-10-05/12:35:28 2 5 31.1610 89.0000
2017-10-05/13:15:03 5 13.4359 32.0000
2017-10-05/14:14:32 6 11.5303 243.000
2017-10-06/16:35:28 2 53.2236 304.000
2017-10-06/17:16:45 5 36.3110 3000.00
2017-10-07/13:22:28 1 105.931 49.0000
2017-10-07/13:41:29 13:38 2 105.931 36.0000
2017-10-07/14:15:59 5 31.1610 97.0000

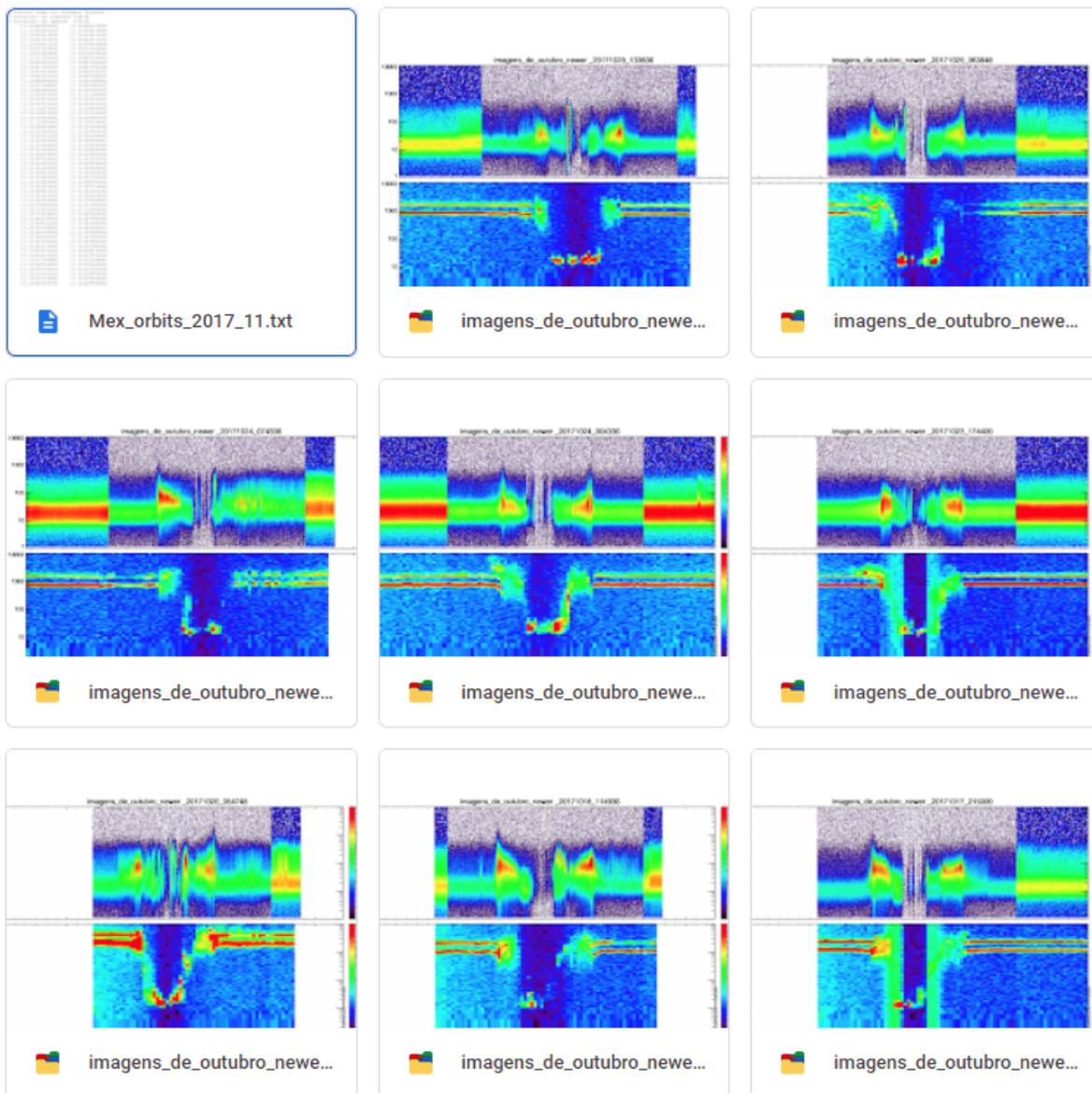
```

c) Resultados e discussão dos resultados

Foram marcadas diversas fronteiras na magnetosfera induzida de Marte, completando os anos de 2017 e 2018. A partir disso foi possível atualizar o catálogo de fronteiras de Marte.

Figura 5: Exemplos de marcação.

Arquivos



Como podemos ver na figura 5, no primeiro arquivo estão listados os dados referentes às marcações das imagens. Fazendo isso a cada mês, conseguimos completar 2017 e 2018.

3. CONCLUSÃO

Torna-se evidente, portanto, que o projeto foi um sucesso. Os dados de fronteira de plasma na magnetosfera de Marte estão atualizados até 2018 e isso contribuirá para diversos estudos relacionados a Marte. Além disso, foram estudados diversos artigos científicos sobre o assunto, contribuindo para o desenvolvimento do aluno. Para um possível próximo projeto, seria interessante o estudo da posição das fronteiras em função do ciclo solar e ano marciano, separadas em função da hora local/ângulo solar zenital.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - SILVA, Adriana Valio Roque da. Nossa estrela: o Sol - 1ed. - São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006
- [2] - T. Gold, J. Geophys. Res. 64, 1665 (1959).
- [3] - E. Echer, Magnetosferas planetárias, Revista Brasileira de Ensino de Física (2010).
- [4] - McComas, D. J.; Elliott, H. A.; Schwadron, N. A.; Gosling, J. T.; Skoug, R. M.; Goldstein, B. E. (15 de maio de 2003). «The three-dimensional solar wind around solar maximum». *Geophysical Research Letters* (em inglês). 30 (10). 1517 páginas.
- [5] - E. Echer M.V. Alves e W.D. Gonzalez, Revista Brasileira de Ensino de Física 28, 51 (2006).
- [6] - C. Mazelle, D. Winterhalter, K. Sauer, J. Trotignon, M. Acuna, K. Baumgartel, C. Bertucci, D. Brain, S. Brecht, M. Delva, E. Dubinin, 165 M. Oieroset, J. Slavin, Bow shock and upstream phenomena at mars, Space