

Artigos Gerais

Magnetosferas planetárias

(Planetary magnetospheres)

E. Echer¹

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

Recebido em 14/1/2009; Revisado em 17/7/2009; Aceito em 23/11/2009; Publicado em 17/1/2011

Este trabalho consiste em uma introdução às magnetosferas planetárias do Sistema Solar. Apresenta-se uma descrição geral da configuração das magnetosferas dos oito planetas do Sistema Solar e de sua formação pela interação de seu ambiente eletromagnético com o fluxo do vento solar. As magnetosferas planetárias são do tipo intrínseco (Mercúrio, Terra, Júpiter, Saturno, Urano, Netuno) quando o planeta possui um campo magnético intrínseco e a interação ocorre entre o vento solar e o campo planetário, com possíveis contribuições do plasma planetário; e induzida (Vênus e Marte) quando a interação ocorrer entre o fluxo do vento solar e a atmosfera superior/ionosfera do planeta. Um exemplo de medidas *in-situ* em uma magnetosfera também é apresentado com os dados de campo magnético da sonda Cassini em Saturno.

Palavras-chave: magnetosferas planetárias, vento solar, campo magnético planetário, sistema solar.

An introduction to the solar system planetary magnetospheres is presented. First the process of formation of the magnetosphere by the interaction of solar wind with an electromagnetic planetary obstacle is shown. Next, a general description of magnetosphere regions is presented. Finally, a short description of the solar system eight planetary magnetospheres is given. Planetary magnetospheres are of two types: intrinsic (Mercury, Earth, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune), when the planet has an active and intrinsic magnetic field and the interaction creating the magnetosphere occurs between the solar wind and the planetary field, with contributions of the planetary plasma; and induced (Venus and Mars), when the planet lacks an internal field, and it is the interaction between the solar wind and the planetary atmosphere/ionosphere that forms the magnetosphere. An example of *in-situ* observations at a planetary magnetosphere is presented with magnetic field data from the Cassini mission at Saturn.

Keywords: planetary magnetospheres, solar wind, planetary magnetic field, solar system.

1. Introdução

O espaço interplanetário é continuamente preenchido por um fluxo de gás altamente ionizado (plasma) supersônico e magnetizado, conhecido como vento solar. Este plasma magnetizado, composto principalmente de íons de hidrogênio (H^+) e elétrons, nada mais é do que a atmosfera externa do Sol – a coroa solar, a qual, devido às suas altas temperaturas, encontra-se em contínua expansão. Neste plasma, o livre caminho médio para colisões entre as partículas é tão grande (na órbita da Terra, é da ordem de 1 UA^2 ou seja, do tamanho da escala espacial do sistema) que choques mecânicos são extremamente raros e a transferência de momentum acontece principalmente por interações eletrodinâmicas/forças coulombianas de grande alcance [1-3].

Ao se expandir pelo sistema solar, o vento solar

encontra diversos obstáculos ao seu fluxo. Interações eletromagnéticas do plasma do vento solar com o campo magnético intrínseco e/ou com as atmosferas desses obstáculos criam uma “cavidade” assimétrica no fluxo do vento solar – uma magnetosfera. A natureza dessas magnetosferas irá depender da natureza do obstáculo e da intensidade do vento solar, a qual depende da distância heliocêntrica [4-6].

Nesse artigo pretende-se apresentar uma introdução às magnetosferas planetárias. Apresentar-se-á uma descrição geral de uma magnetosfera e aspectos específicos de cada uma das oito magnetosferas planetárias encontradas no Sistema Solar.

2. O que é uma magnetosfera?

O termo magnetosfera foi designado por T. Gold em 1959 [7] para descrever a região acima da ionosfera na

¹E-mail: eecher@dge.inpe.br.

² $1 \text{ UA} =$ distância média Terra-Sol de 1 Unidade Astronômica: $150 \times 10^6 \text{ km}$.

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.

Em sumário, pode-se definir uma magnetosfera por três conceitos básicos:

- Uma magnetosfera em seu sentido mais geral é a extensão da atmosfera superior de um planeta numa região espacial onde o campo magnético planetário domina (quando o planeta possui campo magnético intrínseco e atmosfera).
- A magnetosfera no sentido clássico é a região limitada pela magnetopausa e pela ionosfera (novamente quando há uma atmosfera e ionosfera significativa), ou pela magnetopausa e pela superfície do planeta, quando o mesmo não possui atmosfera.
- Em um sentido mais amplo e geral, uma magnetosfera é a região espacial de interação entre o vento solar e o corpo planetário.

3. Descrição geral da magnetosfera

Nessa sessão será utilizada a Terra como padrão para descrever globalmente uma magnetosfera. Isto se justifica, pois a Terra é a mais bem conhecida e estudada magnetosfera planetária. A Fig. 1 mostra um desenho esquemático apresentando as principais regiões da magnetosfera terrestre.

O vento solar ambiental ou normal³ viaja à velocidade de ~ 400 km/s como resultado da expansão supersônica da coroa solar. Decorrente do fato do plasma ser altamente condutor e da energia cinética ser maior que a energia magnética, o campo magnético do vento solar é “congelado” no plasma. Quando o vento solar encontra um obstáculo eletromagnético, ele não pode penetrar e é desacelerado, sendo também defletido ao redor deste. Como o vento solar se move mais rapidamente que a onda de pressão necessária para defletir, uma onda de choque se forma à frente das cavidades magnetosféricas. A região entre o choque e a magnetopausa é a magnetobainha (*magnetosheath*) onde o vento solar é desacelerado para velocidades

subsônicas, defletido e aquecido. É uma região de fluxo turbulento, instabilidades e ondas. As propriedades da frente de choque dependem fortemente do número de Mach (razão entre a velocidade do choque e a velocidade característica da onda magnetosônica no meio), da pressão do vento solar e do ângulo entre o campo interplanetário e o vetor normal ao choque [8, 9].

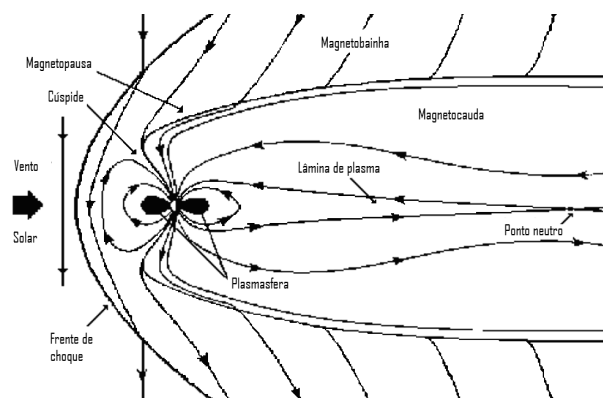


Figura 1 - Esquema geral da magnetosfera da Terra ilustrando as principais regiões (Oulu University, <http://www oulu.fi/~spaceweb/textbook/magnetosphere.html>).

A fronteira propriamente dita do vento solar com o ambiente de plasma planetário é a magnetopausa. Esta é bem variável, interpretada inicialmente como sendo uma descontinuidade⁴ tangencial (magnetopausa fechada) mantida pelo balanço de pressão entre o vento solar e do planeta (pressão do campo magnético + pressão de plasma). Quando há reconexão entre as linhas do campo interplanetário (IMF) e do campo planetário, a magnetopausa é uma fronteira aberta ou uma descontinuidade rotacional, permitindo a livre entrada de matéria e energia do vento solar para o interior da cavidade magnetosférica. A magnetopausa constitui uma camada limite entre o plasma planetário e o do vento solar, fluindo nela uma corrente elétrica (corrente de Chapman-Ferraro) que separa os campos nos lados opostos. O campo magnético planetário é comprimido no lado diurno e esticado no lado noturno.

As cúspides polares são regiões em ambos os pólos da magnetosfera onde a geometria das linhas de campo leva a uma configuração divergente que facilita a entrada de partículas do vento solar na magnetosfera. Em quase toda a superfície da magnetopausa, o campo magnético é tangente à magnetopausa, produzindo uma barreira natural à penetração de partículas do vento solar. Todavia, nas cúspides polares, o campo magnético é perpendicular a magnetopausa, permitindo uma entrada mais direta de partículas do vento solar na magne-

³Enquanto o vento solar normalmente tem velocidade de 400 km/s, remanescentes interplanetários de ejeções coronais de massa (ICMEs) podem ter velocidades entre 500-1000 km/s, e feixes rápidos de buracos coronais tipicamente têm velocidades entre 600-800 km/s.

⁴Descontinuidade: fronteira de transição abrupta em parâmetros macroscópicos (densidade, temperatura, campo magnético), que separa diferentes regiões do espaço. Descontinuidades em fluidos magneto-hidrodinâmicos podem ser do tipo tangencial, de contato, rotacional ou choques. As descontinuidades tangencial e rotacional correspondem à condições de magnetosfera fechada e aberta (ao fluxo de massa e energia do vento solar), respectivamente.

tosfera. O fluxo de plasma é bem turbulento na região das cúspides polares.

Na magnetosfera interna, onde o campo magnético é quase-dipolar, o movimento das partículas carregadas é caracterizado por 3 quantidades, cada qual conservando um invariante adiabático do movimento: giro-ressonância, movimento oscilante ao longo de uma linha de campo (*bounce*) e deriva. A variação espacial de campo magnético faz com que íons positivos derivem para oeste no plano equatorial, gerando uma corrente anelar, a qual é bem intensificada durante tempestades magnéticas [2, 3].

O plasma magnetosférico apresenta movimentos predominantes de corotação (mais internamente) e convecção (mais externamente). O movimento de corotação é impactado à ionosfera por colisões com a atmosfera neutra e transmitido ao restante da magnetosfera por um campo elétrico. O movimento de convecção resulta da presença de um campo elétrico na direção amanhecer-entardecer (*dawn-dusk*) através da magnetosfera/magnetocauda, o qual causa um movimento líquido de plasma da cauda magnética para o lado diurno. A fronteira entre as regiões dominadas por corotação e convecção se localiza ao longo das linhas de campo cruzando o equador em 4-5 R_T (raios terrestres) – a plasmapausa. A região interna da plasmapausa é a plasmasfera, preenchida com plasma denso e frio (de baixa energia) de origem ionosférica.

Os cinturões de radiação de Van Allen preenchem uma região em forma de toróide ao redor dos planetas contendo partículas energéticas aprisionadas. Esses cinturões consistem de elétrons e íons energéticos aprisionados que se movem ao longo das linhas de campo e oscilam entre os dois hemisférios.

O vento solar “estica” ou distorce o campo magnético na direção anti-solar, constituindo a magnetocauda. Na magnetosfera interna, a configuração de campo é a de um dipolo distorcido, mas uma transição rápida segue-se e em torno de 15 R_T as linhas de campo são radiais; a magnetopausa se torna então quase cilíndrica, separada em dois lóbulos (N e S) pela lâmina de plasma. No caso da Terra, no lóbulo norte o campo é direcionado para a Terra/Sol e no lóbulo sul para a direção anti-solar. A lâmina de plasma é uma espessa camada de plasma quente (plasma de alta energia), contendo a lâmina neutra (lâmina de corrente) onde ocorre uma rápida reversão na direção do campo magnético.

O momento magnético (M_T , campo superficial equatorial \times cubo do raio planetário) da Terra é $7.91 \times 10^{15} \text{ T.m}^3$. Os principais fatores que afetam o tamanho e a dinâmica de uma magnetosfera são: pressão dinâmica do vento solar, componentes B_y e B_z (no sistema de coordenadas centrado no eixo magnético do planeta e na linha radial Sol-planeta) do campo magnético interplanetário, campo magnético do planeta, rotação planetária, fontes de plasma e densidade

de plasma interno do planeta, condutividade magnetosférica/ionosférica, escala da magnetosfera em relação ao tamanho do planeta.

4. Tipos de magnetosferas

Há diversos tipos de magnetosferas no sistema solar, tais como a própria heliosfera (cavidade no espaço interestelar onde o vento solar predomina), magnetosferas de planetas e luas não magnetizados porém com atmosfera (Vênus, Marte, Titã), luas não magnetizadas sem atmosferas (Lua terrestre), sistemas resultantes da interação do vento solar com asteróides/cometas e objetos da família de Plutão e magnetosferas de planetas magnetizados [5]. Neste artigo se descrevera a interação do vento solar com planetas magnetizados (Mercúrio, Terra, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno) e não magnetizados (Vênus e Marte).

4.1. Magnetosferas intrínsecas

Em uma magnetosfera “verdadeira” (intrínseca) o tamanho da escala espacial é determinado pela distância de equilíbrio (L_{mp}) ao longo da linha planeta-Sol, na qual a soma da pressão do campo magnético planetário e da pressão exercida pelo plasma confinado na magnetosfera balança a pressão do vento solar. A L_{mp} varia com a intensidade do campo planetário, a pressão de plasma magnetosférico e a distancia heliocêntrica/pressão do vento solar. Numa magnetosfera, o campo magnético difere significativamente do que seria se o planeta estivesse em um vácuo (dipolo perfeito). O campo é distorcido por correntes fluindo na magnetopausa e no plasma aprisionado dentro da magnetosfera. A existência de um campo magnético global em um planeta com intensidade suficiente para defletir o vento solar leva a características únicas do ambiente planetário. A formação de uma magnetosfera gera uma região no espaço ao redor de um planeta na qual o plasma do vento solar é excluído e dentro da qual um campo planetário distorcido controla o movimento das partículas carregadas. Externamente à esta cavidade se encontra a onda de choque no fluxo supersônico do vento solar e uma magnetocauda se desenvolve na direção anti-solar. Mais detalhes foram discutidos na sessão 3 e Fig. 1.

4.2. Magnetosferas induzidas

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.

O vento solar desviado flui ao redor de uma região que é similar à uma magnetosfera planetária.

Nem Vênus nem Marte possuem um campo planetário na atualidade. Ambos os planetas têm ionosferas que provêm 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).

A estrutura magnética circundando Marte e Vênus tem características bem similares às aquelas encontradas em uma magnetosfera verdadeira circundando um planeta magnetizado. Isso ocorre, pois a interação causa o campo magnético do vento solar a se “empilhar” ao redor do planeta. O campo empilhado se expande para longe do Sol, formando uma magnetocauda induzida. A simetria da configuração magnética dentro da magnetocauda é governada pela orientação do IMF no vento solar incidente, a qual varia com o tempo. Numa magnetosfera induzida como a de Vênus, o vento solar interage diretamente com a ionosfera planetária. Campos e plasmas observados são geralmente de origem do vento solar ou ionosférica. Não há cinturões de radiação ou uma magnetocauda intrínseca. A fronteira do obstáculo com o vento solar é definida pela superfície da ionopausa, onde há equilíbrio entre a pressão dinâmica do vento solar no lado externo e a pressão térmica de íons/elétrons ionosféricos no lado interno.

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.

A magnetocauda induzida é a extensão da magnetobainha, com os campos IMF empilhados sendo arrastados no rasto dos obstáculos ionosféricos. O efeito empilhamento do campo na magnetocauda induzida é aumentado além daquele da magnetobainha devido à entrada de massa (*mass loading*) dos tubos de fluxo in-

terplanetários que passam perto da ionopausa e formam a magnetocauda.

5. Magnetosferas dos planetas

Apresenta-se uma breve descrição das magnetosferas de cada um dos oito planetas do sistema solar. A Tabela 1 apresenta um sumário das principais propriedades de cada planeta e de sua magnetosfera.

5.1. Mercúrio

Mercúrio possui um momento magnético relativamente pequeno, $M_M \sim 0.63 \times 10^{-3} M_T$. Observações sugerem que a magnetosfera de Mercúrio é muito pequena para manter uma população de plasma aprisionado ao redor do planeta, mas aceleração impulsiva de partículas carregadas pode ocorrer na magnetocauda estendida de Mercúrio. Ele é o menor planeta e de rotação mais lenta do sistema solar a ter um dínamo magnético ativo. A alta densidade média (5.4 cm^{-3}) observada indica que uma parte significativa do planeta é ocupada pelo núcleo. O momento de dipolo é direcionado no mesmo sentido do terrestre, com inclinação de $\sim 14^\circ$ em relação ao eixo de rotação. O fraco momento de dipolo de Mercúrio mais a alta pressão dinâmica do vento solar resultam em uma magnetosfera muito pequena. A cavidade magnética deflete o vento solar a uma distância de apenas $1.5 R_p$ (raio planetário, ver Tabela 1) acima do centro do planeta. Mercúrio não tem uma ionosfera/atmosfera dinamicamente significativa. No entanto, as observações mostram que a magnetosfera é bem dinâmica, com variações no fluxo de partículas energéticas de alguns minutos, sendo observada a possível ocorrência de sub-tempestades.

Mercúrio foi explorado pela 1ª vez com as duas trajetórias de cruzamento da sonda Mariner-10 em 1973 e 1975. Recentemente, em 2008, a sonda Messenger realizou duas trajetórias de cruzamento e outra esta prevista em 2009, antes da fase orbital iniciando em 2011.

Tabela 1 - Principais características dos planetas e de suas magnetosferas.

Planeta	Tipo magnetosfera	Órbita (UA)	Diâmetro equatorial (R_T)	Período de rotação	$M_p (M_T)$	Inclinação dipolo	$L_{mp} (R_p)$
Mercúrio	Intrínseca	0.39	0.39	58d	0.001	14°	1.4
Vênus	Induzida	0.72	0.95	-243d	<0.0001	-	> 1.0
Terra	Intrínseca	1.0	1.00	1d	1	11°	11
Marte	Induzida	1.52	0.53	24.6h	< 0.001	-	1.2
Júpiter	Intrínseca	5.2	11.21	9.92h	20000	-10°	45-80
Saturno	Intrínseca	9.5	9.41	10.66h	580	$<-1^\circ$	20
Urano	Intrínseca	19.2	3.98	17.24h	49	-59°	27
Netuno	Intrínseca	30.1	3.81	16.1h	27	-47°	26

$R_T = 6378 \text{ km}$. $1 M_T = 7.91 \times 10^{15} \text{ T.m}^3$. $R_p =$ raio do planeta. $L_{mp} =$ posição sub-solar da magnetopausa.

5.2. Vênus

Planeta gêmeo da Terra pela proximidade orbital e tamanho, Vênus no entanto apresenta grandes diferenças na pressão e composição atmosféricas em relação a Terra. Sua rotação é muito lenta e no sentido oposto ao restante dos planetas. Além disso, Vênus não possui um campo magnético intrínseco na atualidade. O momento magnético de Vênus é estimado como $M_V < 10^{-5} M_T$. A temperatura da crosta é superior a temperatura de Curie⁵ e, portanto não há magnetismo crustal. Enquanto a formação de um núcleo sólido no interior da Terra mantém o seu dínamo operando até o presente por causa da agitação do núcleo derretido, Vênus parece não ter os requisitos físico-químicos internos necessários para a formação de um núcleo sólido, ou ter cessado esses processos.

O vento solar interage diretamente com a ionosfera de Vênus, produzindo uma frente de choque e um longo rasto planetário. Há uma magnetocauda induzida na região noturna, no rasto do vento solar e a sua ionosfera e a atmosfera superior é constantemente exposta ao vento solar. No rasto de Vênus, não há uma magnetocauda do tipo Terra, mas uma estrutura relacionada ao IMF. A fronteira da magnetopausa/ionopausa se localiza entre 1-1.5 R_p do centro de Vênus.

O planeta Vênus foi explorado por várias missões espaciais. Do ponto de vista de física da magnetosfera, destacam-se as sondas que realizaram cruzamento pelo planeta: Mariner-2 (1962) e sondas Venera-1, 3, 4, 5, 6 (entre 1966 e 1969), Venera-9 e Venera-10 (1975), Mariner-10 (1974), Galileo (1990) e Cassini (1998-1999). Duas sondas orbitaram o planeta Pioneer Venus Orbiter (1978-1994) e Venus Express (desde 2006).

5.3. Terra

A magnetosfera da Terra teve sua configuração geral descrita na sessão 3 (e Fig. 1). No lado diurno, a magnetopausa se encontra em torno de 10 R_p , e a frente de choque da Terra se localiza entre 12-14 R_p , mas a posição de ambas depende da pressão do vento solar. No lado noturno a magnetosfera é distendida em uma longa magnetocauda, até $\sim 1000 R_p$, com diâmetro de $\sim 40 R_p$. O plasma magnetosférico terrestre consiste basicamente de elétrons e H^+ . Para a Terra as fontes principais de plasma são a ionosfera e o vento solar. O plasma dentro da magnetosfera não é uniformemente distribuído, mas é agrupado em diferentes regiões com diferentes densidades e temperaturas. O momento magnético é de $7.91 \times 10^{15} \text{ T.m}^3$.

O magnetismo terrestre é conhecido há séculos. W. Gilbert (cerca de 1600) já descreveu a Terra como um grande imã/magneto. O campo geomagnético é gerado por correntes elétricas fluindo bem dentro da Terra

sólida. Em primeira aproximação pode ser representado como um dipolo em forma de barra no centro da Terra. Como um campo de dipolo, ele se estende além da superfície planetária, através da atmosfera neutra e rumo a ionosfera, onde há efeitos consideráveis. O campo magnético afeta o movimento das partículas ionizadas e então modifica as correntes ionosféricas e o movimento do plasma.

Fenômenos de interesse ocorrem durante episódios de aumento na dinâmica magnetosférica – tempestades, subtempestades geomagnéticas, auroras e precipitação de partículas, os quais têm grande importância na variabilidade do Clima Espacial [3]. Mais de uma centena de missões vêm explorando a magnetosfera da Terra desde o início da era espacial. Entre as mais recentes, podemos destacar as missões Geotail (desde 1995), Cluster (desde 2001) e Polar (desde 1996).

5.4. Marte

Marte possui uma interação com o vento solar similar a de Vênus, conforme descrito nas sessões anteriores. Não se detectou um campo magnético dipolar no limite de $M_M < 10^{-4} M_T$. Embora as observações demonstrem que Marte não possui um campo magnético intrínseco, também se notou que partes da crosta planetária são magnetizadas e que reversões de polaridade do campo de dipolo devem ter ocorrido quando o dínamo planetário ainda era ativo. Além da interação com a atmosfera, também essas regiões de magnetização crustal local podem interagir com o vento solar.

Assim como Vênus, Marte possui uma frente de choque. Campos magnéticos no rasto de Marte são determinados pela orientação do campo magnético interplanetário (IMF). A ionopausa localiza-se a cerca de 1.2 R_p .

A exploração da interação de Marte com o vento solar/magnetosfera de Marte deve-se principalmente as 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).

5.5. Júpiter

Júpiter possui a maior magnetosfera planetária do sistema solar, a qual poderia facilmente englobar o Sol e a coroa visível. Também possui o maior momento magnético dos planetas, $M_J \sim 20000 M_T$. O eixo de dipolo tem inclinação de 10° com o eixo orbital e sentido oposto ao da Terra. É um poderoso emissor de ondas de radio, sendo observado nessa faixa de frequência desde 1955 [10]. Sua magnetosfera gigante é uma excelente armadilha e acelerador de partículas energéticas.

⁵Um material perde as suas propriedades magnéticas acima de uma temperatura específica, a temperatura de Curie, pois o calor provoca um desarranjo na disposição das suas partículas. Esta temperatura é constante para cada substância.

A energia para o plasma é derivada predominantemente de fontes internas à magnetosfera. O tamanho gigante da magnetosfera deve-se a forte intensidade do campo magnético planetário, a baixa densidade do vento solar na órbita de Júpiter, a rápida rotação do planeta e a fonte de plasma em Io. A mais provável fonte do campo magnético de Júpiter é um dínamo hidromagnético associado com movimentos de fluido nas partes eletricamente condutoras do interior do planeta.

A lua Io possui forte atividade vulcânica, causada pelo aquecimento do satélite devido a deformação causada por forças de maré. A atmosfera vulcanicamente derivada de Io é perdida por espalhamento para a magnetosfera. As partículas aprisionadas nos cinturões de radiação colidem com as partículas atmosféricas e as arrancam da esfera gravitacional de influência de Io, as colocando em órbita de Júpiter. As partículas atmosféricas são então ionizadas por troca de carga, ionização por impacto e fotoionização, sendo movidas para movimento em corotação com o planeta pelo campo elétrico associado com o plasma magnetizado em rotação. As velocidades associadas com esse processo combinadas com a alta taxa de perda de massa de Io são suficientes para distorcer o campo magnético de Júpiter em um disco – o magnetodisco. As forças centrífugas associadas com este magnetodisco distendem a magnetosfera em todas as direções e aumentam o raio diurno da magnetosfera até $100 R_J$. Júpiter ainda possui uma super-extensa magnetocauda com observações indicando sua extensão até a órbita de Saturno.

A magnetosfera de Júpiter foi explorada primeiramente por trajetórias de cruzamento com as sondas Pioneer-10 (1973), Pioneer-11 (1974), Voyager-1 (1979), Voyager-2 (1980), Ulysses (1992), pela sonda orbital Galileo (1995-2003) e recentemente pelos cruzamentos das sonda Cassini (2000) e New Horizons (2007). A magnetosfera ainda é estudada por meio de emissões aurorais (visível e UV) com o telescópio espacial Hubble, raios X (telescópio Chandra) e emissões de rádio por rádio-telescópios de superfície.

5.6. Saturno

É o 2º maior planeta do Sistema Solar, girando tão rápido quanto Júpiter e com composição similar ao do planeta maior. O campo magnético de Saturno é, no entanto intrinsecamente mais fraco que o de Júpiter. O momento de dipolo é de $M_S \sim 580 M_T$, $1/5$ do valor de Júpiter. O campo magnético apresenta uma estrutura bem simples, quase axi-simétrica, com separação de $\sim 1^\circ$ em relação ao eixo de rotação e sentido oposto à da Terra.

A magnetosfera de Saturno não possui um mecanismo interno para energizar plasma como a lua Io de Júpiter. As partículas aprisionadas nos cinturões de radiação, terminam na sua borda interna nos anéis, os quais são absorvedores de partículas. As partículas

energéticas dos cinturões também são absorvidas em colisões com as luas. As principais fontes de plasma são a ionosfera de Saturno, o vento solar, e a atmosfera e a superfície gelada das luas. A magnetopausa se encontra em $\sim 20 R_p$ e a frente de choque em torno de $30 R_p$.

A magnetosfera de Saturno foi explorada primeiramente por trajetórias de cruzamento com a sonda Pioneer-11 em 1979, posteriormente pelas sondas Voyager-1 (1980) e Voyager-2 (1981). A missão Cassini está explorando como sonda orbital o sistema de Saturno desde 2004. A magnetosfera ainda é estudada por meio de emissões aurorais com o telescópio espacial Hubble.

5.7. Urano

O eixo de rotação de Urano encontra-se quase no plano de sua órbita, 97° , mas o eixo magnético não está proximalmente alinhado ao eixo de rotação, estando inclinado por 59° em relação ao eixo de rotação. Isso implica que o vento solar flui perpendicularmente ao eixo magnético. A magnetopausa se encontra em torno de $25 R_p$ e a frente de choque à $33 R_p$. O momento magnético é de $M_U \sim 50 M_T$, com grande contribuição do momento de quadrupolo, comparável ao termo de dipolo. A magnetosfera parece em geral ser similar à da Terra, porém menos ativa em termos de atividade de ondas e fluxo de partículas energéticas.

Urano foi explorado *in-situ* apenas pelo cruzamento da sonda Voyager-2 em 1986.

5.8. Netuno

O eixo de rotação de Netuno é particularmente perpendicular a direção do vento solar, o que propicia que o eixo polar magnetosférico ou cúspide polar encontre-se alternadamente alinhado com o fluxo ou perpendicular ao fluxo do vento solar. O eixo dipolar magnético tem uma inclinação de 47° com o eixo de rotação e o momento magnético de Netuno equivale a $27 M_T$. O momento de quadrupolo é bem grande, com maior contribuição ao campo superficial deste termo do que em qualquer outro planeta. A magnetopausa se encontra em torno de $\sim 26 R_p$ e a frente de choque em $\sim 34 R_p$. A magnetosfera é a mais quiescente do sistema solar, com níveis de ondas e fluxos de partículas energéticas sendo bem baixos. A configuração magnetosférica é bastante similar à da Terra.

Netuno foi explorado *in-situ* apenas pelo cruzamento da sonda Voyager-2 em 1989.

6. Exemplo de dados de um cruzamento pela magnetosfera de Saturno

A Fig. 2 apresenta os dados da magnitude do campo magnético observados pela sonda *Cassini* na trajetória de entrada em Saturno [11, 12]. O eixo y é o campo

magnético (B) em nT, com resolução de 1 minuto e eixo y é o tempo, entre 25 de junho a 10 de julho de 2004. As diversas regiões da magnetosfera estão indicadas pelas abreviações apresentadas na figura.

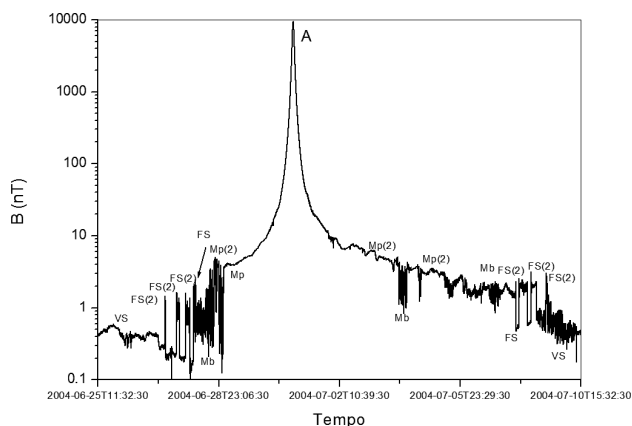


Figura 2 - Dados da magnitude do campo magnético medidos pela sonda Cassini durante a trajetória de entrada em Saturno. A resolução de 1 minuto e o intervalo de tempo é entre 25/6/2004 e 10/7/2004. As abreviações significam: VS: vento solar; FS: cruzamento da frente de choque; FS(2) cruzamento duplo da frente de choque; Mb: magnetobainha; Mp: cruzamento da magnetopausa; Mp(2): cruzamento duplo da magnetopausa; A: aproximação mais próxima da Cassini por Saturno.

A magnetosfera de Saturno estava em um estado dinamicamente ativo durante o período, o que se pode constatar pelos cruzamentos múltiplos da frente de choque e magnetopausa. A sonda Cassini encontrava-se no vento solar nos dias 25 e 26 de junho. A partir do dia 27 de junho, 7 cruzamentos da frente de choque foram observados. O cruzamento da frente de choque é notado por um aumento abrupto na magnitude do campo. Três pares de cruzamentos de entrada e saída na magnetobainha (Mb) são observados nos dias 27 e 28 de junho de 2004. O cruzamento final ocorreu às 05:40 UT do dia 28 de junho, à $\sim 40.5 R_p$. Posteriormente a Cassini encontrou a região da magnetobainha, caracterizada por flutuações magnéticas turbulentas e três cruzamentos múltiplos da magnetopausa, no dia 28-29 de junho. Após o último cruzamento da magnetopausa, a Cassini atingiu a aproximação mais próxima com Saturno às 02:40 UT de 1 de julho de 2004 ($\sim 3 R_p$). A trajetória de Saída da Cassini na magnetosfera de Saturno também apresentou um quadro dinamicamente complexo, com cruzamentos múltiplos da magnetopausa entre os dias 3 e 5 de julho e da frente de choque entre os dias 6 e 8 de julho.

Dados de campo magnético e outros instrumentos de varias sondas que passaram pelas magnetosferas podem ser obtidos do site Planetary Data System (<http://pds.jpl.nasa.gov/>).

7. Conclusões

Nesse artigo apresentou-se uma introdução às magnetosferas planetárias do Sistema Solar. Descreveu-

se a formação da cavidade magnetosférica via interação com o vento solar e suas características gerais. Apresentaram-se os dois tipos de magnetosferas planetárias - induzida e intrínseca. Também apresentou-se uma breve descrição de cada uma das oito magnetosferas planetárias. Por fim, apresentou-se um exemplo de observações *in-situ* de uma magnetosfera planetária, com dados de campo magnético da sonda Cassini em Saturno.

O estudo comparativo das magnetosferas planetárias é extremamente importante para o entendimento dos processos físicos da interação vento solar-planetas e da física de plasmas espaciais. Cada uma das magnetosferas do Sistema Solar é única, pois tanto as propriedades do vento solar são diferentes em cada órbita planetária como as propriedades internas (campo magnético, atmosfera, plasma) variam bastante. Atualmente transita-se da fase exploratório-descoberta para a fase de entendimento dos processos físicos em magnetosferas e o estudo desse conjunto variado de sistemas magnetosféricos é fundamental para o avanço do conhecimento humano na física espacial. Esse conhecimento pode ser aplicado aos planetas extra-solares, os quais irão propiciar no futuro uma diversidade maior de magnetosferas para estudo comparativo.

Referências

- [1] E.N. Parker, *The Astrophysical Journal* **128**, 664 (1959).
- [2] G. Parks, *Physics of Space Plasmas: An Introduction* (Westview Press, Boulder, 2004).
- [3] E. Echer, W.D. Gonzalez, F.L. Guarnieri, A. Dal Lago and L.E.A. Vieira, *Advances in Space Research* **35**, 855 (2005).
- [4] D.P. Stern and N.F. Ness, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **20**, 139 (1982).
- [5] M.G. Kivelson and F. Bagenal, *Enc. Solar System* (Academic Press, San Diego, 1999), p. 477-497.
- [6] C.T. Russell, *Planetary and Space Science* **49**, 1005 (2001).
- [7] T. Gold, *J. Geophys. Res.* **64**, 1665 (1959).
- [8] E. Echer M.V. Alves e W.D. Gonzalez, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **28**, 51 (2006).
- [9] E. Echer, *Advances in Space Research*, in press (2009).
- [10] E. Echer, W. Zarka, L. Gonzalez and A. Denis, *Astronomy and Astrophysics* submetido (2009).
- [11] M.K. Dougherty, N. Achilleos, N. Andre, C.S. Arridge, A. Balogh, C. Bertucci, M.E. Burton, S.W.H. Cowley, G. Erdos, G. Giampieri, K.-H. Glassmeier, K.K. Khurana, J. Leisner, F.M. Neubauer, C.T. Russell, E.J. Smith, D.J. Southwood and B.T. Tsurutani, *Science* **307**, 1266 (2005).
- [12] E. Echer, in *Proceedings of the 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Rio de Janeiro, 2007, p. 1-5