

Uma introdução à interação eletrodinâmica entre Júpiter e os satélites Galileanos

An introduction to the electrodynamic interaction between Jupiter and the Galilean satellites

H.R.P. Jácome^{*1}, E. Echer¹, M.S. Marques²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geofísica, Natal, RN, Brasil.

Recebido em 07 de outubro de 2022. Revisado em 13 de janeiro de 2023. Aceito em 13 de fevereiro de 2023.

Dentre os planetas do Sistema Solar, Júpiter se destaca por seu tamanho, quantidade de satélites naturais, intenso campo magnético e colossal magnetosfera, atraindo por isso a atenção da humanidade desde a Antiguidade. Com a descoberta de emissões de rádio oriundas de Júpiter e do controle parcial dessas emissões por parte de satélites *Jovianos*, um novo cenário atraiu atenção ao planeta: a interação eletrodinâmica entre o campo magnético de Júpiter e os satélites Io, Europa, Ganimedes e Calisto, que propicia esse controle. Aqui, apresentamos brevemente o planeta Júpiter e sua magnetosfera, o que se sabe sobre a interação Júpiter-satélites, e algumas características dos satélites Galileanos.

Palavras-chaves: Júpiter, Satélites Galileanos, Emissões Aurorais de rádio.

Among the planets in the Solar System, Jupiter stands out because of its large dimensions, vast number of orbiting natural satellites, intense magnetic field and immense magnetosphere. For those reasons, Jupiter has drawn attention to itself since ancient times. Upon the discovery of radio emissions from Jupiter and of their partial control by Jovian satellites, a new scenario emerged: an electromagnetic interaction between the Jovian magnetic field and the satellites Io, Europa, Ganymede and Callisto, which enables that control. In this work, we briefly present Jupiter and its magnetosphere, what it is known about the Jupiter-satellite interaction, and some important characteristics of each one of the Galilean satellites.

Keywords: Jupiter, Galilean Satellites, Auroral Radio Emissions.

1. Introdução

Júpiter é o maior planeta do Sistema Solar, com um raio equatorial (R_J) mais de 11 vezes maior que o da Terra ($R_T \simeq 6371$ km), medindo aproximadamente 71492 km. Sua distância ao Sol é de $\sim 4,95$ unidades astronômicas¹ (UA) no periélio e de $\sim 5,46$ UA no afélio, com sua órbita em torno do Sol se localizando entre as órbitas de Marte e Saturno. Por sua enorme dimensão e relativa proximidade com a Terra (distanto em média aproximadamente 5,2 UA), Júpiter pode ser observado a olho nu da superfície terrestre. Por essa razão, ele é um dos planetas conhecidos pela humanidade desde a Antiguidade.² O seu nome se deriva da mitologia greco-romana, na qual Júpiter é o principal dos deuses, assim como o planeta é o maior dentre seus vizinhos.

Atualmente, Júpiter continua atraindo a atenção da humanidade pelos mistérios que ainda o envolvem, por exemplo quanto a sua dinâmica, densa, espessa e colorida

atmosfera (mostrada na Figura 1), e os diversos e únicos ambientes em cada um das dezenas de satélites naturais Jovianos. Além disso, outros fatores no ambiente que circunda o planeta, tais como o intenso campo magnético³ e alta concentração de plasma (gás ionizado), fazem de Júpiter um interessante laboratório natural para o estudo de física de plasmas. Há ainda o interesse no campo da astrobiologia ou exobiologia sobre a possível existência de vida em alguns dos satélites naturais Jovianos, especialmente Europa.

Assim como Mercúrio, Terra, Saturno, Netuno e Urano, Júpiter possui campo magnético intrínseco, gerado pelo mecanismo de dínamo magnético planetário [1, 2]. Baseado na teoria do dínamo, postula-se que o campo magnético é gerado e mantido pela rotação e convecção de fluido condutor no interior de corpos celestes. A ausência de campo magnético intrínseco nos planetas Marte e Vênus, portanto, sugere a inibição total ou parcial da convecção interna nesses planetas. Em Júpiter, a existência de um campo magnético próprio foi inferida a partir da detecção de ondas de rádio oriundas do planeta em comprimentos de onda na faixa decamétrica

* Endereço de correspondência: hadassajacome@gmail.com

¹ A unidade astronômica (UA) equivale à distância média entre a Terra e o Sol. $1 \text{ UA} \simeq 1,496 \times 10^8$ km.

² A Antiguidade abrange o período histórico que vai desde o surgimento da escrita, aproximadamente em 4000 a.C., e das primeiras civilizações até a queda do império Romano, em 476 d.C.

³ O momento de dipolo magnético de Júpiter (M_J) equivale a 20000 vezes o da Terra ($M_T = 8,0 \times 10^{22} \text{ J/T}$).

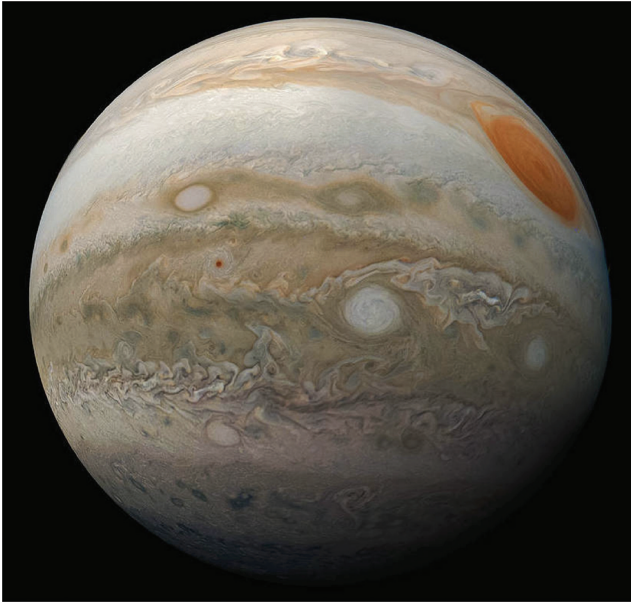


Figura 1: Imagem de Júpiter criada a partir de imagens do *JunoCam imager* obtidas em 12 de fevereiro de 2019. Imagem com cores aprimoradas mostrando o hemisfério Sul do planeta, latitudes de 40° a 74° . Fonte: JPL-NASA, <https://www.nasa.gov/image-feature/jpl/jupiter-marble>.

(DAM), com frequências variando entre poucos MHz até 40 MHz [3]. A partir da teoria da instabilidade maser ciclotrônica (CMI, do inglês *Cyclotron Maser Instability*) [4, 5], que é também associada à origem das emissões de rádio terrestres na faixa quilométrica (AKR ou TKR), tem-se que essas emissões são originadas a partir da amplificação de ondas eletromagnéticas do plasma através da ressonância com elétrons em movimento ciclotrônico em torno de linhas de campo magnético. Portanto, as frequências das emissões refletem diretamente a frequência ciclotrônica do elétron no local de origem das emissões e, conseqüentemente, a intensidade do campo magnético ao qual esse elétron está preso. Assim, as altas frequências das emissões DAM de Júpiter indicaram a presença do intenso campo magnético do planeta, aproximadamente 10 vezes mais intenso do que o da Terra, na superfície equatorial.

Posteriormente, Júpiter foi visitado por espaçonaves em diversos períodos de tempo, que, além de confirmarem a presença e intensidade do seu campo magnético, coletaram no espaço mais próximo a Júpiter dados de emissões de rádio, de plasma, e de gravimetria, além de obterem imagens com maior resolução do planeta e de seus satélites em diversos comprimentos de onda. Tais espaçonaves foram as *Pioneers 10* (com sobrevoo mais próximo a Júpiter ocorrendo em 04 de dezembro de 1973) e 11 (sobrevoo Júpiter em 3 de dezembro de 1974), as *Voyagers 1* (maior aproximação a Júpiter em 5 de maio de 1979) e 2 (sobrevoo mais próximo a Júpiter em 9 de julho de 1979), a *Galileo* (inserida na órbita Joviana em 7 de dezembro de 1995),

a *Ulysses* (sobrevoo Júpiter em 8 de fevereiro de 1992), a *Cassini* (com maior aproximação ao planeta ocorrendo em 30 de dezembro de 2000), a *New Horizons* (sobrevoo Júpiter em 28 de fevereiro de 2007), e, mais recentemente, a missão *Juno* (inserida na órbita Joviana em 4 de julho de 2016) [6, 7]. A Figura 1 mostra uma imagem com cores aprimoradas de Júpiter, obtida a partir de imagens coletadas pela *Juno* em 12 de fevereiro de 2019, mostrando o hemisfério Sul do planeta, quando a espaçonave distava de 26.900 km a 95.400 km do topo das nuvens do planeta.

A interação do campo magnético de Júpiter com o fluxo de plasma magnetizado liberado continuamente do Sol (vento solar) gera uma extensa magnetosfera planetária em torno de Júpiter, que se estende em seu lado diurno a distâncias de $45 R_J$ a $80 R_J$ do centro do planeta – enquanto que a magnetosfera terrestre em seu lado diurno se estende por cerca de $5 R_T$ a $10 R_T$ do centro da Terra. O vento solar é liberado continuamente devido ao gradiente de pressão entre a coroa solar e o meio interplanetário, e viaja a velocidades supersônicas ou supermagnetossônicas, de aproximadamente 400 km/s, encontrando os campos magnéticos ou ionosferas planetárias como obstáculos ao seu fluxo. As interações eletromagnéticas que ocorrem nesses encontros resultam na formação de “cavidades” no fluxo de plasma do vento solar em torno dos obstáculos, às quais dá-se o nome de magnetosferas. A superfície externa dessas cavidades é chamada de magnetopausa e marca a região de equilíbrio entre a pressão total (dinâmica e magnética) exercida pelo vento solar e a pressão magnética exercida pelo campo magnético do obstáculo planetário [1, 8–10]. No caso de Júpiter, além da pressão magnética, também há uma contribuição significativa da pressão de plasma interna no balanço com a pressão incidente do vento solar [11].

A magnetosfera Joviana é teoricamente dividida em três partes: interna ($<10 R_J$), média ($10 - 40 R_J$), e externa ($>40 R_J$), que se diferenciam principalmente pela distribuição, densidade e pelo transporte predominante do plasma magnetosférico [11]. Uma outra característica que distingue cada uma dessas regiões é a topologia das linhas de campo magnético, sendo, na magnetosfera interna, linhas de campo fechadas, quase dipolares; na magnetosfera média, linhas de campo de dipolo distorcidas pela rotação do planeta; e, na magnetosfera externa, predominantemente como linhas abertas devido ao fato de serem arrastadas pela interação com o vento solar. Uma representação da magnetosfera de Júpiter é apresentada na Figura 2. As regiões magnetosféricas indicadas na figura são comuns às magnetosferas planetárias intrínsecas do nosso Sistema Solar, exceto pelo torus de plasma de Io, e se diferenciam de uma magnetosfera a outra basicamente quanto às suas dimensões. Além disso, no caso de Júpiter, a presença de uma corrente elétrica azimutal (lâmina de corrente, na Figura 2) na região equatorial e a rápida rotação da magnetosfera distorcem

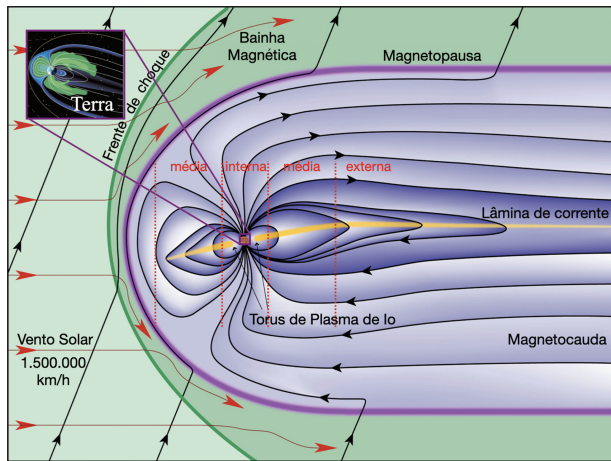


Figura 2: Representação da magnetosfera de Júpiter e comparação em tamanho com a magnetosfera terrestre. Fonte: Adaptada de <https://lasp.colorado.edu/home/mop/files/2012/04/EarthJup.jpg>. Créditos: Fran Bagenal e Steve Bartlett.

as linhas de campo magnético, fazendo com que o campo passe a apresentar linhas distendidas radialmente no equador magnético. Como consequência disto e de forças centrífugas, o plasma magnetosférico é confinado na região equatorial, formando o magnetodisco [12, 13], que é representado em seção transversal mais à frente neste artigo, na Figura 3.

A frente de choque, representada na Figura 2, é um choque estacionário formado à frente das magnetosferas planetárias em nosso Sistema Solar pelo fato de a velocidade do vento solar ser superior à velocidade magnetossônica do meio, a qual, por sua vez, é uma combinação da velocidade do som e da velocidade de Alfvén. A frente de choque marca a região em que a velocidade do vento solar diminui repentinamente devido à presença do obstáculo (planeta) ao seu fluxo [14]. Ademais, entre a frente de choque e a magnetopausa, tem-se a bainha magnética, também representada na Figura 2, onde o vento solar é desacelerado, defletido e aquecido [10, 15].

Já dentro dos limites da magnetosfera, a magnetocauda é a região da magnetosfera externa que é estendida no lado noturno a longas distâncias. A magnetocauda Joviana alcança distâncias superiores a $7000 R_J$ de Júpiter, chegando à órbita de Saturno [11].

Finalmente, na magnetosfera interna, o torus de plasma de Io, indicado na Figura 2, consiste do acúmulo de plasma ao longo da órbita do satélite Io, entre os raios de $5,2 R_J$ e $10 R_J$ de distância do centro de Júpiter. A alta concentração de plasma nessa região resulta da ionização e incorporação de parte da atmosfera de Io ao plasma magnetosférico na região [6, 11, 16].

Imersos nessa vasta magnetosfera, estão as dezenas de satélites naturais Jovianos⁴ conhecidos atualmente, dos quais, Io, Europa, Ganimedes e Calisto, os satélites

Galileanos, se destacam por seus tamanhos. Estes foram primeiramente observados por Galileo Galilei em 1610⁵, após a invenção do telescópio, e são as maiores luas de Júpiter, com raios médios que variam entre ligeiramente inferior ao raio da Lua terrestre ($R_L \simeq 1737$ km) a ligeiramente superior ao raio equatorial do planeta Mercúrio ($R_M \simeq 2439$ km). Os satélites Galileanos estão, ao longo de toda a sua órbita, completamente imersos na região média-interna da magnetosfera Joviana, dentro da distância radial de $27 R_J$ do centro do planeta.

Nessa região, o plasma magnetosférico está em cor-rotação com Júpiter. Ou seja, o plasma se propaga predominantemente na direção azimutal, seguindo o sentido e o período de rotação do planeta [11, 17]. Essa corrotação é enfraquecida a partir da distância radial de $20 R_J$, devido a forças centrífugas sobre o plasma. Entretanto, um sistema de correntes elétricas alinhadas ao campo magnético (correntes de Birkeland) é formado ligando esta região à ionosfera joviana, como que em uma tentativa de manutenção da corrotação do plasma pela ionosfera. Esse sistema de correntes, além de transmitir momento para o plasma magnetosférico, acelera elétrons na região auroral de Júpiter, gerando as emissões auroras na região da oval principal, mostradas mais à frente neste trabalho [11, 18–20]. As correntes de Birkeland são representadas na Figura 3.

Devido à corrotação do plasma na região da magnetosfera média e interna com Júpiter, com velocidade angular superior à velocidade orbital dos satélites, os satélites Galileanos percebem o plasma com um movimento relativo e agem como obstáculos mecânicos e eletromagnéticos ao fluxo de plasma. Neste contexto,

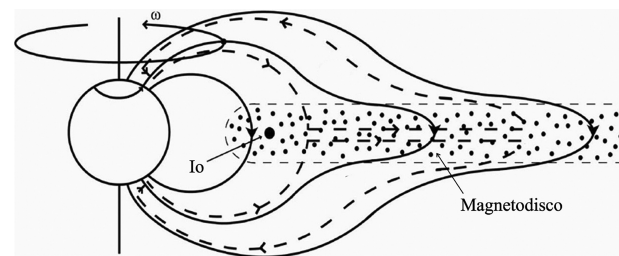


Figura 3: Seção transversal da magnetosfera de Júpiter com representação do sistema de correntes de Birkeland. As linhas contínuas à direita do planeta representam as linhas de campo magnético, que são distendidas para longe do planeta devido à rotação da magnetosfera e ao movimento radial do plasma. As linhas tracejadas representam o sistema de correntes de Birkeland, conectando a magnetosfera equatorial à ionosfera Joviana. A região pontilhada, o magnetodisco, é a região em que o plasma magnetosférico se concentra, em torno do equador magnético, a partir do torus de plasma de Io, se estendendo a maiores distâncias do planeta. Fonte: Adaptada de Cowley e Bunce (2001) [21].

⁵ A descoberta de corpos celestes orbitando Júpiter fez com que Galileo Galilei passasse a defender o modelo heliocêntrico, proposto por Nicolau Copérnico no século XVI.

⁴ <https://solarsystem.nasa.gov/moons/jupiter-moons/overview>

Tabela 1: Informações gerais dos satélites Galileanos e da região em que estão inseridos.

Satélite	Raio médio (km)	Semieixo maior (R_J)	B (nT)	v (km/s)	n_p (cm $^{-3}$)	M_A	β
Io	1821	6,0	1720	57	2500	0,31	0,32
Europa	1565	9,6	370	76	200	0,47	0,32
Ganimesdes	2634	15,3	64	139	5	0,73	2,4
Calisto	2403	26,9	4	192	0,15	2,8	64

B é a intensidade do campo magnético de Júpiter, em nT (1×10^{-9} T), na vizinhança de cada satélite Galileano; v é a velocidade azimutal do plasma magnetosférico em relação a cada satélite, em km/s; n_p é a densidade de plasma na região próxima a cada satélite, em cm $^{-3}$; M_A é o número de Mach de Alfvén, e β é o parâmetro beta de plasma nas regiões dos satélites. Dados obtidos de Saur (2021)[23].

correntes elétricas são geradas na vizinhança dos satélites, causando perturbações no plasma e no campo magnético Joviano. Tais perturbações se propagam pela magnetosfera ao longo das linhas de campo magnético de Júpiter através de ondas de Alfvén⁶ (sobre ondas de Alfvén, veja [22]). As ondas de Alfvén carregam as correntes elétricas até a atmosfera Joviana, chegando a induzir emissões aurorais em torno dos polos magnéticos de Júpiter. A geração dessas correntes e sua propagação ao longo das linhas de campo magnético conectadas aos satélites caracterizam a interação eletrodinâmica Júpiter-satélite.

O objetivo deste trabalho é apresentar de forma sucinta a interação eletrodinâmica entre Júpiter e os seus satélites Galileanos, assim como discutir brevemente sobre as emissões aurorais resultantes dela. Os satélites Galileanos também são apresentados com algumas de suas características e do meio em que estão imersos, as quais fazem com que a interação ocorra de forma única para cada um deles.

2. Os Satélites Galileanos

O satélite Galileano mais próximo a Júpiter é Io, seguido por Europa, Ganimesdes e Calisto. Cada um destes se encontra em uma localidade distinta na magnetosfera Joviana, em um ambiente com parâmetros de campo magnético e plasma únicos, como mostrado na Tabela 1. O campo magnético de Júpiter (B) e a densidade de plasma (n_p) são maiores na órbita de Io do que nas órbitas dos demais satélites Galileanos, sendo menores na órbita de Calisto. Por outro lado, a velocidade do fluxo de plasma em relação aos satélites aumenta à medida em que a distância radial a Júpiter aumenta, devido à manutenção da corotação do plasma com o planeta associada ao aumento da distância percorrida pelo plasma. Esses fatores definem os números de Mach⁷ (M) e o parâmetro beta de plasma⁸ (β), que caracterizam

o plasma local em aspectos que afetam a interação satélite-Júpiter, como será discutido na Seção 4 deste trabalho. O número de Mach de Alfvén e o beta de plasma na região de cada satélite Galileano são também apresentados na Tabela 1.

Todos os satélites Galileanos possuem ionosferas assimétricas⁹ formadas por ionização de impacto e fotoionização [24], e, portanto, são obstáculos sensíveis ao campo elétrico imposto ao satélite devido ao movimento relativo do plasma magnetosférico Joviano. Ademais, medidas de campo magnético na vizinhança dos satélites Galileanos apresentam perturbações no campo que podem estar associadas à presença de correntes elétricas resultantes da interação plasma-satélite, e à presença de campo magnético permanente ou induzido nos satélites [25].

A Figura 4 apresenta um esquema dos satélites Galileanos. No painel superior, mostra-se a distância relativa das órbitas dos satélites a Júpiter. Na parte inferior da figura, apresentam-se imagens dos discos satelitais a partir

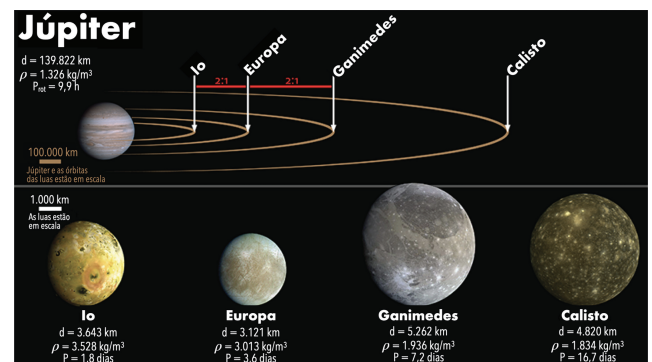


Figura 4: Localização e características gerais dos satélites Galileanos. Os satélites Galileanos apresentados em escala, com suas características gerais: diâmetro (d), densidade (ρ), e periodicidade (P) em dias. Os períodos orbitais de Io, Europa e Ganimesdes estão em ressonância (1:2:4), com o período orbital de Ganimesdes sendo equivalente a duas vezes o de Europa (2:1), que por sua vez equivale a duas vezes o de Io (2:1). Fonte: Adaptada de EOS, <https://eos.org/features/does-io-have-a-magma-ocean>.

⁶ Ondas de Alfvén são ondas transversais que se propagam em plasma condutor, paralelamente às linhas de campo magnético. Essas ondas são muito comuns no Sol, no meio interplanetário e em magnetosferas planetárias.

⁷ Os números de Mach comparam a velocidade relativa do plasma com a velocidade de Alfvén (número de Mach de Alfvén – M_A) e com a velocidade do som no meio (número de Mach sônico – M_S).

⁸ O parâmetro β relaciona a pressão térmica e a pressão magnética do plasma.

⁹ Ionosferas assimétricas ou com distribuição de densidade heterogênea devido aos fatos de a ionização ocorrer no lado diurno e na região frontal da interação com o plasma magnetosférico, e da atmosfera também ter distribuição heterogênea.

de observações da Voyager, e os principais parâmetros físicos. Os tamanhos dos satélites são apresentados em escala.

2.1. Io

Io é o satélite mais denso e mais vulcanicamente ativo do Sistema Solar, com uma densidade de 3528 kg m^{-3} e apresentando mais de 400 vulcões distribuídos na superfície em regiões atualmente ativas ou inativas. A intensa atividade vulcânica no satélite é alimentada pelo efeito de maré devido à proximidade com Júpiter, e é mantida pela ressonância de Laplace¹⁰ entre Io, Ganimedes e Europa [26–28]. A ressonância conserva as excentricidades das órbitas e possibilita a redistribuição da energia rotacional e do momento angular entre esses satélites e Júpiter [29, 30]. Os períodos orbitais de Io, Europa e Ganimedes seguem a proporção 1:2:4, como indicado na Figura 4.

Devido a essa intensa e permanente atividade vulcânica, Io configura-se como a principal fonte de plasma interna à magnetosfera de Júpiter, lançando cerca de 1 T/s de plasma. Em consequência disso, o denso torus de plasma de Io é formado ao longo da órbita do satélite. Esse torus afeta diretamente a interação eletrodinâmica de Io e a propagação das ondas de Alfvén que dela resultam [11, 30].

Io também possui atmosfera e ionosfera densas. A atmosfera tem distribuição heterogênea, sendo mais densa sobre as latitudes mais baixas, e é formada pela sublimação de SO_2 congelado na superfície do satélite e pelo vulcanismo. A ionosfera, por sua vez, tem picos de densidade no lado diurno que se comparam às ionosferas de Marte e Vênus [30].

Ademais, diferentemente dos demais satélites Galileanos, Io não apresenta campo magnético intrínseco (como em Ganimedes) ou induzido (como em Europa, Calisto e também em Ganimedes, que tem um componente induzido), mas o campo magnético Joviano em sua vizinhança é perturbado com as intensas correntes elétricas geradas em sua interação eletrodinâmica com o plasma magnetosférico [11].

2.2. Europa

Os satélites Galileanos a partir de Europa apresentam-se com suas superfícies cobertas por gelo. Acredita-se que o interior de Europa seja bem diferenciado em um núcleo metálico envolvido por um manto rochoso; uma camada líquida de oceano salgado similar ao da Terra, com espessura de 100 km a 130 km; e uma camada externa de gelo com 5 km a 30 km de espessura [30].

Europa tem uma atmosfera tênue que permite a perda de partículas que são carregadas da superfície

do satélite por bombardeamento de íons oriundos da magnetosfera de Júpiter. Esse mecanismo se configura como a principal fonte das moléculas de H_2O , O_2 e H_2 presentes na atmosfera, que é composta principalmente de O_2 . A ionosfera do satélite, por sua vez, é igualmente tênue [30].

Observações de campo magnético pela sonda espacial Galileo na vizinhança de Europa indicam que o campo magnético do satélite é dominado por indução eletromagnética. Tal indução seria a resposta de uma camada global condutora na subsuperfície de Europa à variação do campo magnético Joviano no tempo, no plano de referência do satélite. Essa camada condutora é, muito provavelmente, a camada líquida de oceano com salinidade semelhante à dos oceanos terrestres, localizada próximo à superfície de Europa, entre o manto e a camada externa de gelo. O calor necessário para manter essa camada líquida é originado principalmente do efeito de maré sobre o satélite [31]. A provável presença desse oceano líquido e salgado no interior de Europa ainda tem apontado o satélite com um dos locais no Sistema Solar com maior potencial para abrigar vida fora da Terra, atraindo, por isso, atenção e investimentos em experimentos futuros. Um exemplo disso é a missão Europa Clipper¹¹ [32], da NASA, que está sendo desenvolvida com o objetivo de investigar se Europa realmente apresenta condições necessárias à vida.

Observações de campo magnético similares às de Europa foram também tomadas nas vizinhanças de Ganimedes e Calisto, e sugerem que estes satélites também possuem camadas globais líquidas de água salina em seu interior [24].

Mais recentemente, imagens obtidas pelo Espectrógrafo de Imagens STIS (*Space Telescope Imaging Spectrograph*) a bordo do Telescópio Espacial Hubble que mostram variações nas concentrações de Hidrogênio e Oxigênio na atmosfera de Europa fortaleceram a hipótese de presença de um oceano global em subsuperfície no satélite. As imagens apresentam aumentos persistentes do brilho das emissões associadas com os átomos de H e O em alguns pequenos períodos de observação, indicando a ocorrência inconstante de pluma de vapor de água em Europa [33]. Essa atividade certamente também contribui como fonte de partículas para a atmosfera do satélite, mas de forma menos efetiva, uma vez que as plumas aparentam ser raras [30].

2.3. Ganimedes

Ganimedes é o maior satélite no Sistema Solar e o único que possui campo magnético intrínseco conhecido. Esse campo é equivalente ao de um dipolo centrado e inclinado 176° com respeito ao eixo de rotação do satélite, com uma amplitude de $\sim 719 \text{ nT}$ na superfície equatorial. A origem desse campo magnético permanente de

¹⁰ Ressonância de Laplace é o termo dado, em homenagem ao cientista Pierre Simon Laplace, à ressonância orbital entre mais de dois corpos celestes cujos períodos orbitais são proporcionais, apresentando razão de 1:2:4 ou 1:3:9, por exemplo).

¹¹ <https://europa.nasa.gov>

dipolo é, muito provavelmente, relacionada à ação de dínamo no núcleo [25, 34].

O campo magnético de Ganimedes é suficientemente forte para equilibrar a pressão magnética exercida pelo campo magnético de Júpiter a uma distância de ~ 2 raios de Ganimedes (R_G) do centro do satélite, formando uma magnetosfera interna à de Júpiter [24, 25]. Assim como as regiões de interação entre os demais satélites Galileanos e o plasma Joviano (apresentadas na Seção 4 deste artigo), a magnetosfera de Ganimedes tem um formato cilíndrico, que se diferencia do formato comum das magnetosferas planetárias por causa do domínio da pressão magnética no ambiente. Sua extensão é de cerca de $8-10 R_G$ na direção do fluxo de plasma, e de $\sim 6R_G$ no plano normal a essa direção [25].

A magnetosfera de Ganimedes desvia o fluxo de plasma da magnetosfera de Júpiter, entretanto parte desse plasma pode ainda acessá-la através de reconexão magnética. Quando a reconexão ocorre, o plasma é transportado ao longo da magnetosfera até sua magnetocauda, onde nova reconexão pode acontecer, retornando parte do plasma em direção ao satélite e ejetando outra parte na direção do fluxo de plasma externo [25].

Na interação plasma-Ganimedes, o papel exercido pela ionosfera do satélite parece ser desprezível [35].

2.4. Calisto

Assim como Europa, Calisto não possui um momento magnético permanente, mas gera perturbações no campo magnético de Júpiter em sua vizinhança que são consistentes com a resposta de um oceano líquido subsuperficial à variação do campo Joviano no tempo, no plano de referência do satélite [31]. Entretanto, geologicamente, Calisto apresenta provavelmente seu interior apenas parcialmente diferenciado, e sua grande distância a Júpiter não permite a manutenção desse oceano em estado líquido pelo aquecimento por efeito de maré, como ocorre em Europa e Ganimedes [25, 35].

Quanto à ionosfera de Calisto, atualmente acredita-se que ela seja densa, embora heterogênea, com densidade superior à da ionosfera de Europa. Neste contexto, Hartkorn e Saur (2017) [35] reanalisaram os dados magnéticos obtidos em sobrevoos a Calisto feitos pela espaçonave Galileo, levando em consideração a contribuição da indução na ionosfera nas perturbações observadas, considerando também o conhecimento atual sobre a ionosfera do satélite. Os autores concluíram que as observações da Galileo certamente resultaram da combinação entre indução na ionosfera e indução em uma camada global no interior do satélite, com a indução ionosférica exercendo influência significativa. Entretanto, quanto à indução no interior do satélite, a questão se esta ocorre devido à presença de uma camada líquida condutora bem diferenciada ou de uma camada condutora composta de gelo e outros materiais (não bem diferenciada) permanece incerta.

3. Evidências e Modelos da Interação Satélite-Júpiter

Emissões de rádio de origem planetária são conhecidas em diversos comprimentos de onda, originando-se em todos os planetas com campo magnético intrínseco no nosso Sistema Solar, como mostrado no diagrama da Figura 5. Neste diagrama, são apresentadas as densidades de fluxo das emissões de rádio planetárias conhecidas com origem no Sistema Solar, normalizadas para a distância de 1 UA das fontes e plotadas em função da frequência dessas emissões. Dos planetas do Sistema Solar que emitem ondas de rádio, Júpiter é o que emite o maior intervalo de comprimento de onda, variando da faixa quilométrica (KOM) até a faixa decamétrica. Nesta faixa, parte das emissões são induzidas pelos satélites Io [36, 37], Europa [38] e Ganimedes [39, 40], o que evidencia a existência da interação eletrodinâmica entre esses satélites e Júpiter. Quanto a Calisto, entretanto, ainda não foi detectado efeito significativo do satélite sobre as emissões de rádio Jovianas [39, 41].

A percepção dessa interação surgiu primeiramente nos anos 1960, a partir da observação da correlação entre a ocorrência de emissões decamétricas Jovianas e a fase orbital de Io [36]. Como evidências de controle das emissões de rádio Jovianas por parte dos demais satélites Galileanos não foram, a princípio, claramente observadas [36, 42–44], essa interação foi entendida como ocorrendo particularmente entre Io e Júpiter. Piddington e Drake (1968) [45] e Goldreich e Lynden-Bell (1969) [17] explicaram a interação Io-Júpiter pelo modelo de indutor unipolar, a partir do qual tem-se que Io é altamente condutor. Neste modelo, o satélite geraria uma força eletromotriz devido à variação do campo magnético

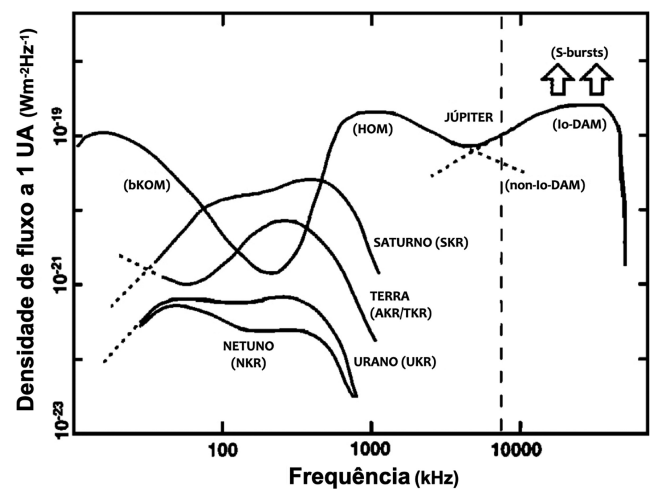


Figura 5: Densidade de fluxo das emissões planetárias aurais de rádio conhecidas no Sistema Solar. As densidades são apresentadas normalizadas para uma distância de 1 UA das fontes. KOM e KR se referem às emissões com comprimento de onda quilométrico; HOM, hectométrico; e DAM, decamétrico. Fonte: Adaptada de Zarka (1998) [47].

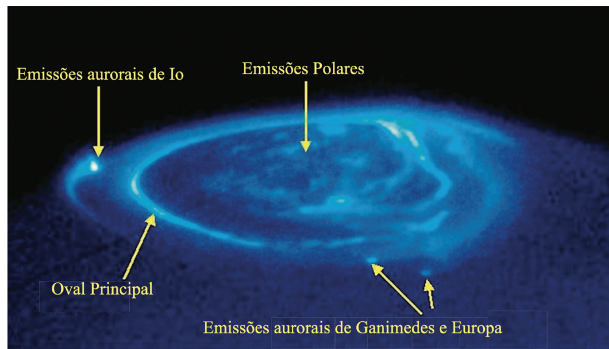


Figura 6: Emissões em UV nas bases das linhas de campo magnético de Júpiter conectadas com os satélites Io, Ganimedes e Europa na atmosfera do planeta. Imagem em UV obtida pelo STIS (*Space Telescope Imaging Spectrograph*) em 26 de novembro de 1996, mostrando não apenas as emissões aurorais em UV associadas a três dos satélites Galileanos, como também as emissões da oval principal e as polares no polo norte de Júpiter. Fonte: Adaptada de Clarke (2012) [49].

Joviano ao longo de seu diâmetro. Essa variação de campo se dá porque linhas de campo magnético distintas (com diferentes valores de \vec{B}) passam por Io. Tais linhas configuram o tubo de fluxo magnético do satélite. A força eletromotriz gerada é transmitida ao longo desse tubo de fluxo até a ionosfera joviana, onde dá origem a uma corrente elétrica que é propagada de volta em direção a Io e à ionosfera joviana no polo oposto através de ondas de Alfvén [17]. Assim, a corrente gerada dependeria da condutância da ionosfera de Júpiter [46].

Através de observações das regiões aurorais de Júpiter por sondas e telescópios espaciais, nos intervalos de frequência (ou de comprimento de onda) ultravioleta (UV), infravermelho (IR) e rádio, uma interação eletrodinâmica similar à de Io ocorrendo entre os demais satélites Galileanos e Júpiter passou a ser mais amplamente aceita e estudada. A Figura 6 apresenta uma imagem do polo norte de Júpiter, obtida em 26 de novembro de 1996 pelo STIS. Na imagem, são observadas emissões aurorais em UV ao centro da região polar (as emissões polares), outras emissões localizadas mais próximo às extremidades dessa região (as emissões da oval principal), e nas bases dos tubos de fluxo magnético dos satélites Io, Europa e Ganimedes (as emissões aurorais controladas por satélite) [48]. As emissões aurorais de satélite em UV são evidência da ocorrência de correntes alinhadas ao campo geradas pela interação satélite-plasma.

O uso de sondas espaciais também possibilitou o monitoramento mais contínuo das emissões Jovianas de rádio [50, 51] e a coleta de dados *in situ* do plasma local, os quais serviram para ampliar o conhecimento teórico sobre as interações, resultando na proposta de um novo modelo: o de “asas de Alfvén”, ou em inglês *Alfvén wing* [52, 53]. Neste novo modelo, a interação ocorre localmente, com correntes elétricas sendo geradas nas vizinhanças do satélite, e propagando-se à ionosfera de Júpiter. Dessa forma, neste modelo, as correntes

não dependem da condutância da ionosfera de Júpiter, mas da condutância de Alfvén¹² (Σ_A) do meio [46].

No modelo de indutor unipolar, uma condição necessária para que o circuito de correntes seja fechado é que a velocidade da onda de Alfvén seja suficientemente grande, a ponto de o tempo que a onda leva para se propagar ao longo da linha de campo entre o satélite e a ionosfera Joviana seja inferior ao tempo que o fluxo de plasma magnetosférico leva para percorrer o diâmetro do satélite. Assim, ao retornar ao satélite, a onda de Alfvén ainda o encontra, fechando o circuito de correntes [17, 46]. Essa condição é satisfeita na interação Io-Júpiter apenas quando Io está localizado próximo às bordas do torus de plasma. Portanto, esta interação é melhor descrita como sendo uma composição entre os modelos de indutor unipolar e de *Alfvén wing*. No caso dos demais satélites Galileanos, entretanto, essa condição não é satisfeita e a interação é melhor descrita pelo modelo de *Alfvén wing* [24].

4. A Interação Eletrodinâmica

A interação eletrodinâmica entre o plasma magnetosférico Joviano e os satélites Galileanos se assemelha à interação entre os planetas e o vento solar que resulta na formação das magnetosferas planetárias no Sistema Solar. Em ambos os casos, o planeta ou satélite age como um obstáculo ao fluxo de plasma, gerando uma “cavidade” em torno do obstáculo, cujas propriedades dependem de parâmetros do plasma descritos pelos números de Mach, o beta de plasma e a condutância de Alfvén; e características do obstáculo, tais como presença de campo magnético e sua condutividade efetiva [1, 6, 23, 54]. Diferentemente dos planetas no nosso Sistema Solar, que são varridos pelo vento solar supermagnetossônico, os satélites Galileanos são varridos pelo plasma magnetosférico de Júpiter, com uma velocidade relativa (\vec{v}) sub-Alfvénica ou sub-magnetossônica ($M_A = v/v_A < 1$, em que v_A é a velocidade de Alfvén no meio) [54]. Como resultado disso, não há formação da frente de choque anterior à região de interação dos satélites com o plasma.

A condutividade elétrica efetiva dos satélites é definida a partir da condutividade de sua ionosfera (condutividades Pedersen e Hall¹³) e pela taxa de captura de plasma (plasma *pickup*), que se refere à formação de íons e elétrons ao redor do satélite a partir da ionização de partículas atmosféricas neutras. Tais íons e elétrons, inicialmente em repouso em relação ao satélite, juntamente com a ionosfera condutora, são sensíveis ao

¹² A condutância de Alfvén indica a capacidade do plasma de conduzir correntes de Alfvén. Ela é definida como $\Sigma_A = (\frac{\rho}{\mu_0 B^2})^{1/2}$, onde ρ é a densidade de plasma; μ_0 , a constante magnética; e B , o campo magnético local.

¹³ As condutividades Pedersen e Hall são componentes da condutividade ionosférica. Pedersen (ou componente transversal) é a componente perpendicular ao campo magnético e paralela ao campo elétrico; e Hall, a componente perpendicular tanto ao campo magnético quanto ao campo elétrico.

campo elétrico que é imposto sobre o satélite devido ao movimento relativo do plasma com as linhas de campo magnético (\vec{B}) que são arrastadas (“*frozen-in*”) por ele:

$$\vec{E} = -\vec{v} \times \vec{B}. \quad (1)$$

Esse campo \vec{E} gera correntes elétricas que são limitadas principalmente pela condutividade de Pedersen e pela condutância de Alfvén do meio, e perturbam o fluxo local de plasma por meio de forças $\vec{J} \times \vec{B}$, fazendo-o desviar do satélite e desacelerar em relação ao mesmo [6, 23, 55].

Essas correntes se propagam por uma superfície que separa o fluxo de plasma do obstáculo, delimitando a “cavidade” formada. No caso dos planetas, a cavidade se assemelha ao formato de uma bala, como mostrado na Figura 2, pois $\beta > 1$ nessa região (interação dominada pela pressão térmica do plasma). Já no caso dos satélites Galileanos, o formato das cavidades é cilíndrico devido a $\beta \ll 1$ (interação dominada pelo campo magnético) [56]. Na interação plasma-satélite, as correntes elétricas geradas formam um circuito de ondas de Alfvén que se propagam paralelamente às linhas de campo magnético em direção a Júpiter, carregando consigo as correntes elétricas. Essas ondas bordejam a região cilíndrica que se estende ao norte e ao sul do satélite, comumente chamada de *Alfvén wing* [52], e propagam as perturbações de fluxo de plasma e campo magnético geradas pela interação local com uma velocidade equivalente a:

$$\vec{v}_A^\pm = \vec{v} \pm \frac{\vec{B}}{(\mu_0 \rho)^{1/2}}, \quad (2)$$

em que ρ é a densidade do plasma, e os sinais de mais e menos indicam o sentido de propagação da onda, que, no caso de Júpiter, é em direção ao hemisfério Sul do planeta e em direção ao hemisfério Norte do planeta, respectivamente [52]. A estrutura da *Alfvén wing* é ilustrada na Figura 7 em dois cortes: no plano de referência do satélite (à esquerda), e no plano de referência do plasma (à direita). No plano de referência do satélite, a inclinação da *Alfvén wing* em relação às linhas de campo magnético não perturbadas é determinada por [52]:

$$\theta_A = \tan^{-1} M_A. \quad (3)$$

A projeção das correntes elétricas geradas pela interação plasma-satélite na ionosfera Joviana é a aurora nas bases dos tubos de fluxo dos satélites, conhecida como aurora controlada por satélite [18]. As emissões aurorais controladas por satélites resultam da geração de feixes de elétrons acelerados, que se precipitam parcialmente na atmosfera de Júpiter, causando aquecimento local e geração de emissões em UV e IR devido a colisões com partículas neutras na atmosfera, de maneira semelhante às auroras polares na Terra [24, 55, 57, 58]. A outra parte dos elétrons, que não é precipitada na atmosfera, mas refletida, pode transferir energia a ondas no plasma por ressonância, causando a amplificação dessas ondas através da instabilidade maser ciclotrônica [18, 59].

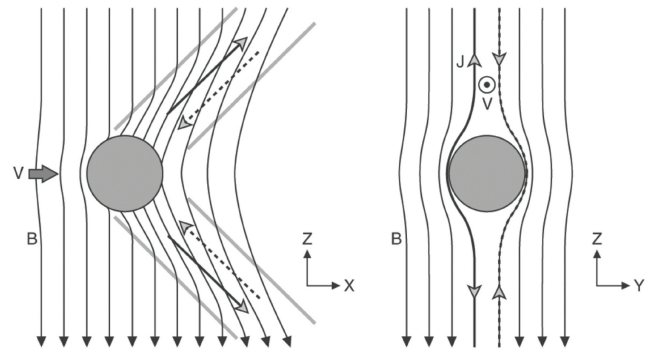


Figura 7: *Alfvén wing*. Representação da *Alfvén wing* no plano de referência do satélite (à esquerda) e do plasma (à direita). \mathbf{V} é o vetor da velocidade relativa entre o fluxo de plasma e o satélite e \mathbf{B} , o campo magnético arrastado pelo plasma. No caso dos satélites Galileanos, o eixo y aponta para Júpiter. As linhas de campo magnético são defletidas pelas correntes geradas no satélite devido ao campo $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}$. Fonte: Kivelson et al. (2019) [61].

5. Visualização das Emissões de Rádio

Pela teoria da instabilidade maser ciclotrônica [4, 5], tem-se que a amplificação das ondas se dá ao longo das linhas do campo magnético, com a direção de emissão formando um ângulo θ com \vec{B} . Considerando-se simetria em torno da linha de campo magnético, tem-se, então, que as emissões se originam em cones ocios de emissão centrados nas linhas de campo magnético. Segundo Hess et al. (2008) [60], o ângulo de meia-abertura (θ) desses cones de emissão pode ser definido a partir da frequência com que a radiação é emitida pelo cone, com θ inversamente proporcional à frequência emitida. Devido à anisotropia das emissões, uma emissão só pode ser detectada quando seu observador está localizado na direção de propagação da onda, em outras palavras, quando está em frente às “paredes” do cone de emissão. Na Figura 8, são representados o cone de emissão centrado em uma das linhas de campo magnético de um planeta, o seu ângulo de abertura em relação à linha de campo, e a direção de propagação da emissão detectada por uma sonda espacial.

O cone de emissão centrado na linha de campo magnético rotaciona junto com o campo magnético de Júpiter, fazendo com que a frequência detectada por um observador varie no tempo. Como consequência disso, as emissões são observadas formando arcos nos espectros dinâmicos. Um espectro dinâmico é uma representação em projeção bidimensional de uma variável (a intensidade de emissões), dependente de duas variáveis: o tempo e a frequência. Os arcos formados no espectro dinâmico durante a observação das emissões tendem a apresentar padrões únicos para cada componente das emissões. Na Figura 9, são mostrados espectros dinâmicos com emissões detectadas pelas Antenas Decamétricas de Nançay (NDA, do inglês *Nançay Decameter Array*) em 07 de agosto de 1999. A intensidade é dada

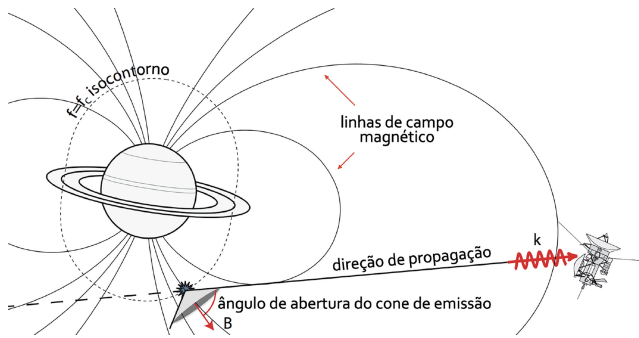


Figura 8: Representação do cone de emissão da Instabilidade Maser Ciclotrônica e da detecção de uma emissão por um observador. O isocontorno indicado na imagem indica a região em volta do planeta em que seria possível haver cones de emissão semelhantes ao representado. Fonte: Adaptada de LESIA – Observatoire de Paris, <https://maser.lesia.obspm.fr/task-2-modeling-tools/expres/exoplanetary-and-planetary-radio.html?lang=en>.

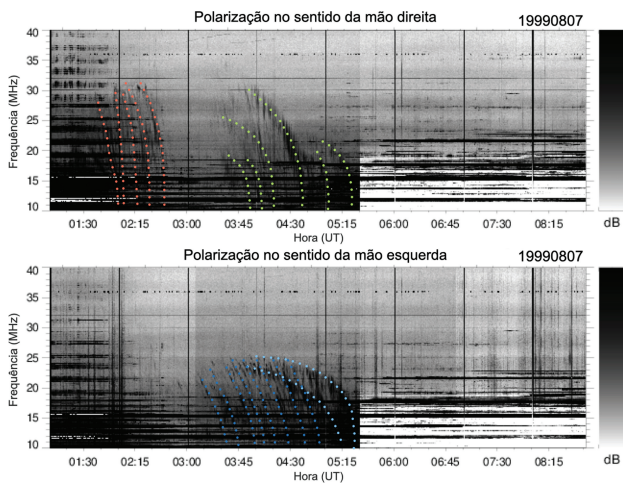


Figura 9: Espectros dinâmicos ($t \times f$) obtidos através da observação de Júpiter pelo conjunto de Antenas Decamétricas de Nançay (NDA) no dia 07 de agosto de 1999. Três emissões classificadas no catálogo digital das antenas do *Nançay Decameter Array* como sendo induzidas por Io. As emissões formam arcos no diagrama devido ao movimento de rotação dos cones de emissão com o campo magnético de Júpiter.

em decibel (dB) acima da intensidade de fundo; a frequência, em MHz; e o tempo, em horas e minutos. Todas as emissões aqui apresentadas foram classificadas no catálogo digital das NDA [37] como sendo induzidas por Io.

O hemisfério de origem das emissões é determinado a partir do sentido de polarização circular dominante da emissão, uma vez que a instabilidade maser ciclotrônica depende da direção do campo magnético. Considerando-se o campo magnético Joviano, as emissões originadas no hemisfério Norte são as com polarização no sentido

da mão direita, enquanto que as emissões originadas no hemisfério Sul são as com polarização no sentido da mão esquerda. Assim, na Figura 9, o espectro dinâmico superior mostra duas emissões originadas no hemisfério Norte de Júpiter, e o espectro dinâmico inferior mostra uma única emissão originada no hemisfério Sul de Júpiter.

6. Conclusão

Neste artigo, foram brevemente apresentados o planeta Júpiter, sua magnetosfera e seus principais satélites naturais – Io, Europa, Ganimedes e Calisto, os satélites Galileanos. Uma introdução à interação eletrodinâmica entre esses satélites e o campo magnético Joviano também foi apresentada, como também às emissões aurorais de Júpiter que resultam dessa interação.

As grandiosas dimensões do sistema Joviano e sua relativa proximidade com a Terra estabelecem um interessante laboratório natural para estudos de plasma. Embora esse sistema já venha há muitas décadas sendo estudado, muitas questões permanecem em aberto, tais como sobre as condições de manutenção de possível vida em Europa, o interior de Calisto, e a densidade e energia do plasma na vizinhança de Europa, Ganimedes e Calisto, as quais afetam diretamente a interação eletrodinâmica entre estes satélites e o campo magnético Joviano, e, conseqüentemente, as emissões resultantes dessas interações.

Por essas razões, muitos experimentos espaciais direcionados a Júpiter e ao seu sistema ainda têm sido desenvolvidos nos últimos anos, tais como a missão Juno, cuja espaçonave tem orbitado Júpiter desde 2016 com o objetivo de prover dados que possibilitem inferências sobre a origem não apenas de Júpiter, mas dos planetas gasosos em nosso Sistema Solar, o interior de Júpiter, seu campo magnético e magnetosfera, e sua atmosfera; e as missões futuras JUICE¹⁴ (*JU*pter *IC*y moons *EX*plorer), da ESA, e Europa Clipper, da NASA, que buscam entender melhor o interior dos satélites Europa, Ganimedes e Calisto e sua habitabilidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem às agências de fomento CAPES e CNPq pelo apoio financeiro. Este trabalho foi parcialmente apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2019/03533-6. E. Echer agradece às agências pelas bolsas de pesquisa: CNPq (PQ-301883/2019-0) e FAPESP (2018/21657-1). Os autores também agradecem ao Ministério Brasileiro de Ciência, Tecnologia e Inovação e à Agência Espacial Brasileira.

¹⁴ <https://sci.esa.int/web/juice/>

Referências

- [1] E. Echer, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **32**, 2301 (2010).
- [2] M.G. Kivelson e F. Bagenal, em: *Encyclopedia of the Solar System*, editado por T. Spohn, D. Breuer e T.V. Johnson (Elsevier, Amsterdã, 2014).
- [3] B.F. Burke e K.L. Franklin, *Journal of Geophysical Research* **60**, 213 (1955).
- [4] C.S. Wu e L.C. Lee, *The Astrophysical Journal* **230**, 621 (1979).
- [5] G.A. Dulk, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **23**, 169 (1985).
- [6] N. Krupp, K.K. Khurana, L. Iess, V. Lainey, T.A. Cassidy, M. Burger, C. Sotin e F. Neubauer, *Space science reviews* **153**, 11 (2010).
- [7] F. Bagenal, T.E. Dowling e W.B. McKinnon, em: *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, editado por F. Bagenal, T.E. Dowling e W.B. McKinnon (Cambridge University Press, Cambridge, 2004).
- [8] Y. Kamide e A. C.L. Chian, em: *Handbook of the solar-terrestrial environment*, editado por Y. Kamide e A.C.L. Chian (Springer, Berlim, 2007).
- [9] R.A. Wolf, em: *Introduction to space physics*, editado por M.G. Kivelson e C.T. Russell (Cambridge University Press, Cambridge, 1995).
- [10] J.K. Hargreaves, *The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace – the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere* (Cambridge University Press, Cambridge, 1992).
- [11] K.K. Khurana, M.G. Kivelson, V.M. Vasyliunas, N. Krupp, J. Woch, A. Lagg, B.H. Mauk e W.S. Kurth, em: *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, editado por W.B. McKinnon, T.E. Dowling e F. Bagenal (Cambridge University Press, Cambridge, 2004).
- [12] J.E.P. Connerney, S. Timmins, M. Herceg, e J.L. Joergensen, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **125**, e2020JA028138 (2020).
- [13] C.K. Goertz, *Space Science Reviews* **23**, 319 (1979).
- [14] E. Echer, M.V. Alves e W.D. Gonzalez, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **28**, 51 (2006).
- [15] E.A. Lucek, D. Constantinescu, M.L. Goldstein, J. Pickett, J.L. Pinçon, F. Sahraoui, R.A. Treumann e S.N. Walker, em: *Outer Magnetospheric Boundaries: Cluster Results*, editorado por G. Paschmann, S.J. Schwartz, C.P. Escoubet e S. Haaland (Springer, Berlim, 2005).
- [16] N. Thomas, F. Bagenal, T.W. Hill, e J.K. Wilson, em: *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, editado por W.B. McKinnon, T.E. Dowling e F. Bagenal (Cambridge University Press, Cambridge, 2004).
- [17] P. Goldreich e D. Lynden-Bell, *The Astrophysical Journal* **156**, 59 (1969).
- [18] J.T. Clarke, D. Grodent, S.W.H. Cowley, E.J. Bunce, P. Zarka, J.E.P. Connerney e T. Satoh, em: *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, editado por W.B. McKinnon, T.E. Dowling e F. Bagenal (Cambridge University Press, Cambridge, 2004).
- [19] V.M. Vasyliunas, em: *Physics of the Jovian magnetosphere*, editado por A.J. Dessler (Cambridge University Press, Cambridge, 1983).
- [20] T.W. Hill, *Journal of Geophysical Research* **84**, 6554 (1979).
- [21] S.W.H. Cowley e E.J. Bunce, *Planetary and Space Science* **49**, 1067 (2001).
- [22] E. Costa Jr., F.R. Cardoso, F.J.R. Simões Jr. e M.V. Alves, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **33**, 2302 (2011).
- [23] J. Saur, em: *Magnetospheres in the Solar System*, editado por R. Maggiolo, N. André, H. Hasegawa, T.D. Welling, Y. Zhang e L.J. Paxton (American Geophysical Union, Washington, DC, 2021).
- [24] M.G. Kivelson, F. Bagenal, W.S. Kurth, F.M. Neubauer, C. Paranicas e J. Saur, em: *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, editado por W. B. McKinnon, T.E. Dowling e F. Bagenal (Cambridge University Press, Cambridge, 2004).
- [25] X. Jia, M.G. Kivelson, K.K. Khurana e R.J. Walker, *Space Science Reviews* **152**, 271 (2010).
- [26] A.S. McEwen, *Journal of Geophysical Research: Planets* **106**, 32959, (2001).
- [27] W.B. Moore, G. Schubert, J.D. Anderson e J.R. Spencer, em: *Io after Galileo*, editado por R.M.C. Lopes e J.R. Spencer (Springer, New York, 2007).
- [28] D.A. Williams e R.R. Howell, em: *Io after Galileo*, editado por R.M.C. Lopes e J.R. Spencer (Springer, New York, 2007).
- [29] M. Blanc, Y. Alibert, N. André, S. Atreya, R. Beebe, W. Benz, S.J. Bolton, A. Coradini, A. Coustenis, V. Dehant et al., *Experimental Astronomy* **23**, 849 (2009).
- [30] F. Bagenal e V. Dols, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **125**, e2019JA027485 (2020).
- [31] C. Zimmer, K.K. Khurana e M.G. Kivelson, *Icarus* **147**, 329 (2000).
- [32] S.M. Howell, e R.T. Pappalardo, *Nature Communications* **11**, 1311, (2020).
- [33] L. Roth, J. Saur, K.D. Retherford, D.F. Strobel, P.D. Feldman, M.A. McGrath e F. Nimmo, *Science* **343**, 171 (2014).
- [34] M.G. Kivelson, K.K. Khurana e M. Volwerk, *Icarus* **157**, 507 (2002).
- [35] O. Hartkorn e J. Saur, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **122**, 11 (2017).
- [36] E. K. Bigg, *Nature* **203**, 1008 (1964).
- [37] M.S. Marques, P. Zarka, E. Echer, V.B. Ryabov, M.V. Alves, L. Denis e A. Coffre, *Astronomy & Astrophysics* **604**, A17 (2017).
- [38] H.R.P. Jácome, M.S. Marques, P. Zarka, E. Echer, L. Lamy e C.K. Louis, *Astronomy & Astrophysics* **665**, A67 (2022).
- [39] P. Zarka, M.S. Marques, C.K. Louis, V.B. Ryabov, L. Lamy, E. Echer e B. Cecconi, em: *Planetary radio emissions VIII*, editado por G. Fischer, G. Mann, M. Pachenko e P. Zarka (Austrian Academy of Sciences Pres, Vienna, 2017).
- [40] P. Zarka, M.S. Marques, C.K. Louis, V.B. Ryabov, L. Lamy, E. Echer e B. Cecconi, *Astronomy & Astrophysics* **618**, A84 (2018).
- [41] J.D. Menietti, D.A. Gurnett e I. Christopher, *Geophysical Research Letters* **28**, 3047 (2001).
- [42] G.R. Lebo, A.G. Smith e T.D. Carr, *Science* **148**, 1724 (1965).
- [43] G.A. Dulk, *The Astrophysical Journal* **148**, 239 (1967).

- [44] R.G. Wilson, J.W. Warwick, G.A. Dulk e W.F. Libby, *Nature* **220**, 1218 (1968).
- [45] J.H. Piddington e J.F. Drake, *Nature* **217**, 935 (1968).
- [46] T.W. Hill, A.J. Dessler e C.K. Goertz, em: *Physics of the Jovian magnetosphere*, editado por A.J. Dessler (Cambridge University Press, Cambridge, 1983).
- [47] P. Zarka, *Journal of Geophysical Research: Planets* **103**, 20159 (1998).
- [48] J.T. Clarke, G. Ballester, J. Trauger, J. Ajello, W. Pryor, K. Tobiska, J.E.P. Connerney, G.R. Gladstone, J.H. Waite Jr., L. Ben Jaffel et al., *Journal of Geophysical Research: Planets* **103**, 20217 (1998).
- [49] J.T. Clarke, em: *Auroral Phenomenology and Magnetospheric Processes: Earth and Other Planets, Volume 197*, editado por A. Keiling, E. Donovan, F. Bagenal e T. Karlsson (American Geophysical Union, Washington, DC, 2012).
- [50] J.D. Menietti, D.A. Gurnett, W.S. Kurth e J.B. Groene, *Geophysical Research Letters* **25**, 4281, (1998).
- [51] C.A. Higgins, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **112**, (2007).
- [52] F.M. Neubauer, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **85**, 1171 (1980).
- [53] C.K. Goertz, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **85**, 2949 (1980).
- [54] M.G. Kivelson, *Advances in Space Research* **33**, 2061 (2004).
- [55] S.L.G. Hess e P.A. Delamere, em: *Auroral Phenomenology and Magnetospheric Processes: Earth And Other Planets, Volume 197*, editado por A. Keiling, E. Donovan, F. Bagenal e T. Karlsson (American Geophysical Union, Washington, DC, 2012).
- [56] F.M. Neubauer, *Journal of Geophysical Research: Planets* **103**, 19843 (1998).
- [57] F.J. Crary e F. Bagenal, *Geophysical Research Letters* **24**, 2135 (1997).
- [58] F.J. Crary, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **102**, 37 (1997).
- [59] P. Zarka, T. Farges, B.P. Ryabov, M. Abada-Simon e L. Denis, *Geophysical Research Letters* **23**, 125, (1996).
- [60] S. Hess, B. Cecconi e P. Zarka, *Geophysical Research Letters* **35**, L13107 (2008).
- [61] M.G. Kivelson, K.K. Khurana, M. Volwerk, em: *Europa*, editado por R.T. Pappalardo, W.B. McKinnon e K. Khurana (University of Arizona Press, Tucson, 2009).