

Prof. Dr. Sergio Pilling

Alunos: Fredson de Araujo Vasconcelos, Alexandre Bergantini de Souza, Will Robson M. Rocha, Victor Bonfim

AULA 12 - A Química de Atmosferas Planetares/Lunares

1. Introdução

A atmosfera de um planeta é uma camada de gases e material particulado (aerossóis) que o envolve. A composição da atmosfera dos planetas pode ser conhecida pela análise espectral da luz solar que eles refletem. Como essa luz solar refletida atravessou parte da atmosfera do planeta, e as moléculas do gás na atmosfera absorvem certos comprimentos de onda, o espectro apresenta certas linhas escuras que não aparecem no espectro solar. A identificação dessas linhas escuras permite identificar os gases que as produziram, assim como a pressão e temperatura da atmosfera. Os gases presentes na atmosfera de um planeta dependem dos constituintes químicos de que o planeta se formou, e da massa do planeta. Os planetas terrestres se formaram sem atmosferas extensas, e sua atmosfera atual não é primitiva, mas sim foi formada ao longo do tempo geológico a partir de gases escapados de seu interior. O impacto com cometas também contribui com alguns componentes dessa atmosfera secundária. Já os planetas massivos têm um tipo de atmosfera totalmente diferente, dominada pelos gases mais leves e mais comuns, especialmente hidrogênio e hélio. Evidentemente esses planetas foram capazes de reter o gás presente no sistema solar na época de sua formação (Oliveira e Saraiva 2013).

As atmosferas originais sofrem uma evolução com o decorrer do tempo, sendo que a variedade dos planetas se reflete em muitas atmosferas diferentes. Por exemplo, as atmosferas de Vênus e Marte são compostas primariamente de dióxido de carbono, com pequenas quantidades de nitrogênio, argônio e oxigênio, além de traços de outros gases. A composição atmosférica terrestre reflete as atividades dos seres vivos. As baixas temperaturas e a alta gravidade dos planetas gasosos permitem a eles reter gases com baixas massas moleculares. Portanto, estes contêm hidrogênio e hélio e subsequentes compostos, formados pelos dois. Titã e Tritão, satélites de Saturno e Netuno, respectivamente, apresentam composições atmosféricas não desprezíveis, primariamente constituídas de nitrogênio. Plutão também apresenta uma atmosfera semelhante, mas esta se congela quanto o planeta-anão se afasta do Sol ^[11]. Neste capítulo estudaremos a química que ocorre em atmosferas planetárias e de algumas luas do sistema solar.

2. Retenção de Atmosferas

A retenção de atmosferas é uma relação entre a energia cinética (ou temperatura) das moléculas do gás e a velocidade de escape do planeta (ou de sua massa).

Definimos a **velocidade de escape** como a velocidade mínima que deve ter um corpo para escapar da atração gravitacional da Terra, ou de qualquer outro corpo celeste. Na superfície de um corpo celeste de massa M e raio R , esta velocidade vale:

$$v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R}}$$

Na superfície da Terra a velocidade de escape é em torno de $11,2 \text{ km/s}$, como mostrado abaixo.

$$v_T = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M_T}{R_T}} = \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,97 \cdot 10^{24}}{6,37 \cdot 10^6} \approx 11200 \text{ m/s} = 11,2 \text{ km/s}$$

Podemos relacionar essa expressão com a temperatura na superfície do nosso planeta, utilizando a teoria cinética dos gases, que diz que a energia cinética E_c de uma molécula de massa m de um gás está relacionada com a sua velocidade v e a temperatura absoluta T da mesma, de acordo com a expressão abaixo (onde K é a constante de Boltzmann).

$$E_{\text{molécula}} = \frac{m \cdot v^2}{2} \approx \frac{3 \cdot K \cdot T}{2}$$

A partir desta relação segue-se uma *velocidade média* de uma molécula de gás a uma certa temperatura, dada pela expressão:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

A velocidade média das moléculas de um gás representa o valor de uma gama de velocidades que as diferentes moléculas podem ter. Se o gás é considerado como um gás ideal, as velocidades de todas as moléculas mostram um tipo de distribuição estatística "Maxwelliana", como mostrado no Gráfico 1.

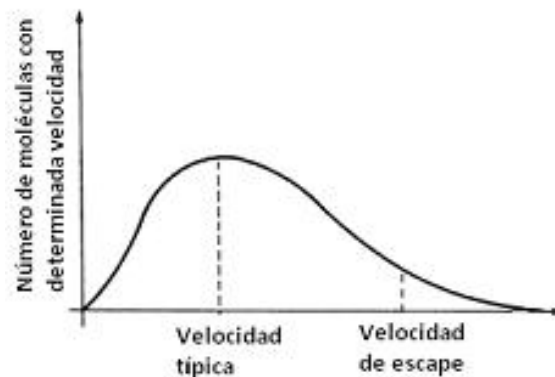


Figura 1. Velocidade das moléculas de um gás ideal.

Portanto, embora a velocidade de escape seja maior do que a velocidade média, geralmente sempre terá uma percentagem de moléculas com velocidades mais elevadas e que, portanto, escapam.

Cálculos mostram que, para um planeta reter certo gás por bilhões de anos, a velocidade média de suas moléculas deve ser menor do que 1/6 da velocidade de escape do planeta, ou seja:

$$\bar{v} \leq \frac{1}{6} v_{\text{escape}} = \frac{1}{6} \sqrt{2GM/r}$$

Dadas às expressões que calculam a velocidade de escape e a velocidade média, segue-se que, para manter longas moléculas de massa m , a temperatura da superfície do planeta tem que ser inferior a:

$$T < \frac{G \cdot M \cdot m}{54 \cdot R}$$

Portanto, a temperatura da superfície de um planeta ou um satélite é crucial para determinar tanto a formação e a evolução da sua possível atmosfera, como para explicar a composição química dela. A Figura 2 representa a velocidade dos gases a diferentes temperaturas e a velocidade de escape dos planetas e satélites. As linhas do gráfico marcam os valores da temperatura e da velocidade de escape acima dos quais o campo gravitacional do planeta ou satélite não pode reter alguns dos principais candidatos para componentes atmosféricos. Depois de colocar no mesmo gráfico os planetas e alguns dos principais satélites do sistema solar, se constata o tipo de atmosfera que possui cada um.

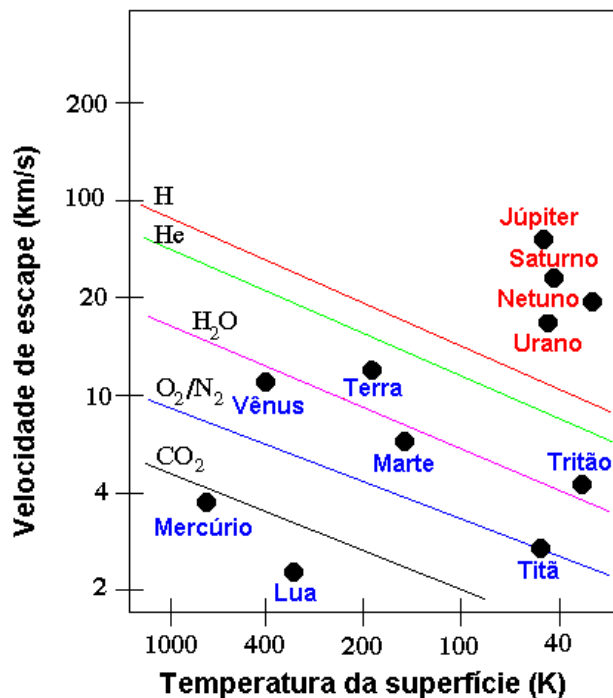


Figura 2. Velocidade dos gases a diferentes temperaturas e a velocidade de escape dos planetas e satélites.

Assim, vemos que as atmosferas dos planetas Jovianos (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno) são dominadas por elementos leves, principalmente H_2 e He , que são os gases mais abundantes no sistema solar. São, portanto, atmosferas primárias, que foram criadas quando o sistema solar foi formado. Em vez disso, as atmosferas de planetas terrestres (Vênus, Terra e Marte) são atmosferas secundárias dominadas por moléculas como o CO_2 , N_2 e O_2 ^[3]. Estes planetas, após a formação, também tinha uma atmosfera primária composta principalmente de H_2 e He . Mas, como o gráfico acima mostra, os dois gases são muito leves e gradualmente foram perdidos ao espaço.

Na Terra erupções vulcânicas injetaram na atmosfera primitiva substâncias como H_2O , CO_2 , SO_2 , N_2 e S_2 . Posteriormente, quando resfriado os gases vulcânicos, apenas uma pequena fração da água permaneceu em estado de vapor no ar.

3. Composição Química da Atmosfera Planetário/Lunares e outros Corpos do Sistema Solar.

3.1 Mercúrio

A atmosfera é reduzida a um fluxo modesto de gases leves, fornecidos pelo vento solar, entretanto possui uma tênue exosfera na superfície^[13], contendo hidrogênio, hélio, oxigênio, sódio, cálcio, potássio e outros. Essa exosfera não é estável, átomos são continuamente perdidos e repostos de várias fontes. O hidrogênio e o hélio provavelmente provêm do vento solar, difundido na magnetosfera mercuriana antes de escapar de volta para o espaço. O decaimento radioativo de elementos do interior da crosta é outra fonte de hélio, assim como de sódio e potássio. A sonda MESSENGER encontrou altas proporções de cálcio, hélio, hidróxidos, magnésio, oxigênio, potássio, silício e sódio na exosfera. O vapor de água presente provém de uma combinação de processos tais como cometas atingindo a superfície, pulverização catódica através do hidrogênio do vento solar e oxigênio das rochas, e sublimação de reservatórios de gelo na sombra permanente das crateras polares.

3.2 Vênus



Vênus é um mundo de intenso calor e atividade vulcânica. É semelhante à Terra em estrutura e tamanho e temperaturas quentes o suficiente para derreter chumbo. Vislumbres abaixo das nuvens revelam vulcões deformados e montanhas. Vênus gira lentamente na direção oposta da maioria dos planetas. A espessa atmosfera tóxica de Vênus é composta principalmente de dióxido de carbono (CO_2) e nitrogênio (N_2), com nuvens de ácido sulfúrico (H_2SO_4)^[13]. A tabela 1 mostra a composição química da atmosfera de Vênus^[5].

Tabela 1. Composição Atmosférica de Vênus

Maior	CO_2 (~96,5 %), N_2 (~3,5 %)
Menor (ppm)	SO_2 - 150; (Ar) - 70; (H_2O) - 20; (CO) - 17; (He) - 12; (Ne) - 7

A atmosfera rica em CO_2 , juntamente com as espessas nuvens de dióxido de enxofre, gera o mais forte efeito estufa do Sistema Solar, criando temperaturas na superfície acima de 460 °C. Isto torna a superfície venusiana mais quente do que a de Mercúrio, apesar de Vênus estar a uma distância do Sol quase duas vezes maior que a de Mercúrio e receber apenas 25% da irradiação solar que Mercúrio recebe. Acima da densa camada de CO_2 estão espessas nuvens consistindo principalmente de gotículas de dióxido de enxofre e ácido sulfúrico.^[9] Essas nuvens refletem de volta para o espaço cerca de 60% da luz do Sol que incide sobre elas e impedem a observação direta da superfície venusiana na luz visível. A capa permanente de nuvens implica que embora Vênus esteja mais próximo do Sol do que a Terra, sua superfície não é tão bem iluminada.

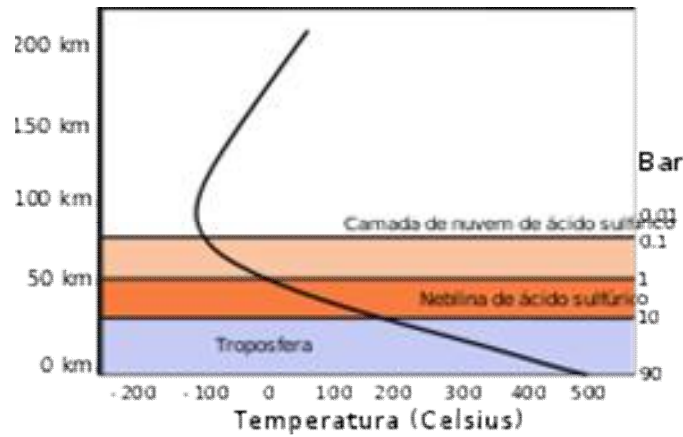


Figura 3. Perfil da Atmosfera de Vênus.

Em grandes altitudes na atmosfera, o forte fluxo de radiação ultravioleta que se aproxima a partir do Sol quebra as moléculas de dióxido de carbono (CO₂) presentes em grandes quantidades na atmosfera, liberando átomos de oxigênio. Esses átomos são então transportados pela chamada circulação atmosféricas subsolares e antissolares para o lado noturno [11]. Os átomos descem a partir da alta atmosfera para uma camada inferior, a chamada mesosfera, onde eles se recombinaem em O₂. Ao fazer isso, eles emitem luz em comprimentos de onda específicos, com a emissão mais forte no infravermelho. Esse fenômeno de luminescência é ilustrado na Figura 4.

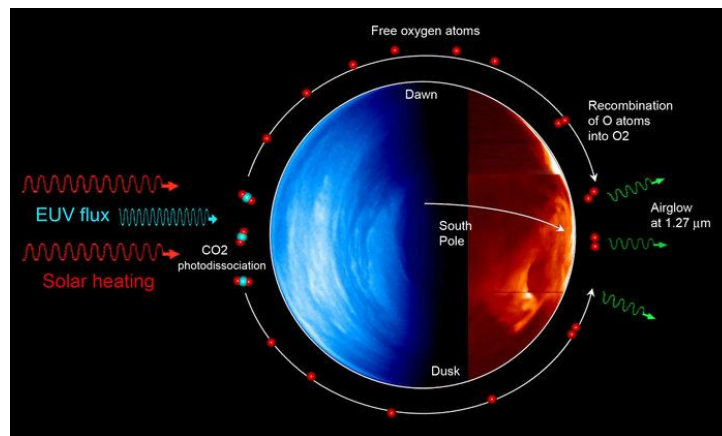
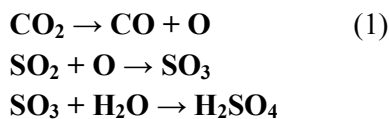


Figura 4. Diagrama esquemático mostrando a produção de luminescência em Vênus. **Crédito:** ESA.

Uma reação muito importante que acontece com essa atmosfera é interação de fótons de 169 nm com o dióxido de carbono na atmosfera superior. Essa reação fotoquímica produz o ácido sulfúrico como podemos ver no exemplo a seguir:



As chuvas de ácido sulfúrico nunca atingem o solo, pois são evaporadas pelo calor antes de atingi-lo num fenômeno conhecido como virga^[6]. Foi teorizado que atividades vulcânicas no início da história de Vênus liberaram enxofre na atmosfera e as altas temperaturas evitaram que o elemento ficasse preso em compostos sólidos na superfície como aconteceu na Terra.

3.3 Marte



A atmosfera marciana é rarefeita e bastante empoeirada, dando ao céu marciano uma cor amarelada quando vista da superfície; dados da Mars Exploration Rovers indicam que partículas suspensas possuem aproximadamente 1.5 micrômetros ^[6]. A atmosfera de Marte é formada principalmente de CO₂, contendo ainda outros compostos como pode ser visto na tabela abaixo.

Tabela 2. Composição da atmosfera de Marte.

Maior	(CO ₂) - 95.32%; (N ₂) - 2.7%; (Ar) - 1.6%; (O ₂) - 0.13%; (CO) - 0.08%
Menor (ppm)	(H ₂ O) - 210; (NO) - 100; (Ne) - 2.5; (HDO) - 0.85; (Kr) - 0.3; (Xe) - 0.08

As temperaturas da Estratosfera são baixas o suficiente para manter o CO₂ solidificado em névoas e nuvens. O principal componente da atmosfera de Marte é o dióxido de carbono (CO₂). Durante o inverno marciano os polos entram em um período de escuridão contínua, o que resfria a superfície de tal forma que 25% do CO₂ atmosférico condensa em dióxido de carbono sólido (gelo seco) formando uma capa de gelo nos polos. Quando os polos são expostos novamente à luz solar, durante o verão marciano, o CO₂ congelado sublima, voltando à atmosfera. Esse processo leva a uma grande variação da pressão e composição atmosférica ao redor dos polos marcianos.

Traços de metano, a um nível de algumas partes por bilhão, foram inicialmente descobertos por uma equipe do NASA Goddard Space Flight Center em 2003. Em março de 2004 a Mars Express Orbiter e observações do Canada-France-Hawaii Telescope também sugeriram a presença de metano na atmosfera marciana, com uma concentração de aproximadamente 10 ppb por volume. Foi comprovado recentemente que o metano poderia ser produzido por processos não-biológicos envolvendo água, dióxido de carbono, e o mineral olivina, que é comum em Marte. As condições necessárias para essa reação (e.x. temperatura e pressão) não existem na superfície, mas provavelmente existem na crosta. Para provar que esse processo estaria acontecendo, serpentina, um mineral produzido nesse processo deveria ser detectado. A Figura a seguir ilustra Possíveis fontes de metano em Marte.

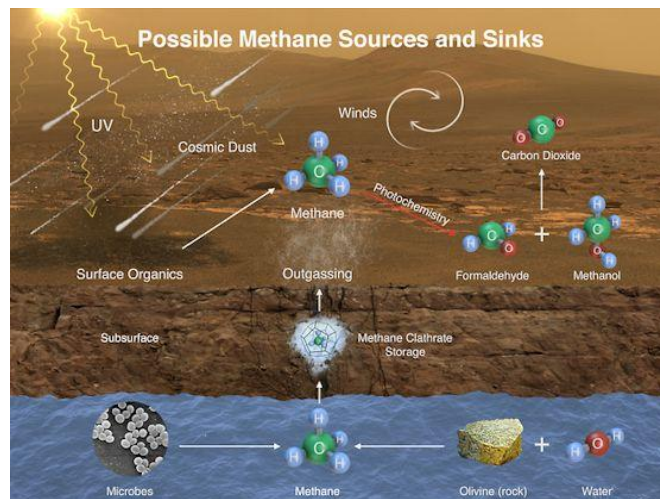


Figura 5. Possíveis fontes de metano em Marte. Crédito: NASA/JPL.

Em contraste com os resultados acima descritos, estudos realizados por Kevin Zahnle, cientista planetário da NASA Ames Research Center, e dois colegas concluíram que "não existe ainda nenhuma evidência convincente para metano em Marte". Eles argumentaram que as mais fortes observações relatadas do gás até à data têm sido tomadas em frequências onde a interferência de metano na atmosfera da Terra é particularmente difícil de remover, e são, portanto, não confiáveis.

3.4 Júpiter



O planeta de maior massa em nosso sistema solar - com dezenas de luas e um campo magnético enorme - Júpiter forma um tipo de sistema solar em miniatura. Assemelha-se a uma estrela na composição, mas não tem acreção o suficiente para inflamar. Listras em volta das nuvens do planeta são pontuadas por tempestades maciças, como a Grande Mancha Vermelha que é uma tempestade complexa que se move no sentido anti-horário. Júpiter não pode suportar a vida como a conhecemos. No entanto, alguma das luas de Júpiter tem oceanos debaixo de suas crostas que podem suportar a vida. A atmosfera de Júpiter é composto principalmente de hidrogênio (H_2) e Hélio (He). A Tabela 3 mostra a composição da atmosfera do planeta gasoso ^[8].

Tabela 3. Composição Atmosférica de Júpiter

Maior	(H_2) - 89.8%; (He) - 10.2%
Menor (ppm)	(CH_4) - 3000; (NH_3) - 260; (HD) - 28; (C_2H_6) - 5.8; (H_2O) - 4
Aerossóis	gelo de amônia; gelo de água; Hidrossulfeto de amônia.

Júpiter é coberto por nuvens compostas por cristais de amônia e possivelmente hidrossulfeto de amônia. As nuvens estão localizadas na tropopausa, e estão organizadas em bandas de diferentes latitudes, conhecidas como regiões tropicais. Estas estão subdivididas em "faixas" de cor clara, e "cinturões" de cor escura. As zonas possuem comprimento, cor e intensidade variáveis com o passar do tempo, mas tem permanecido estáveis o suficiente para receberem termos de identidade da comunidade astronômica ^[11]. A Figura 6 mostra o Perfil da Atmosfera de Júpiter.

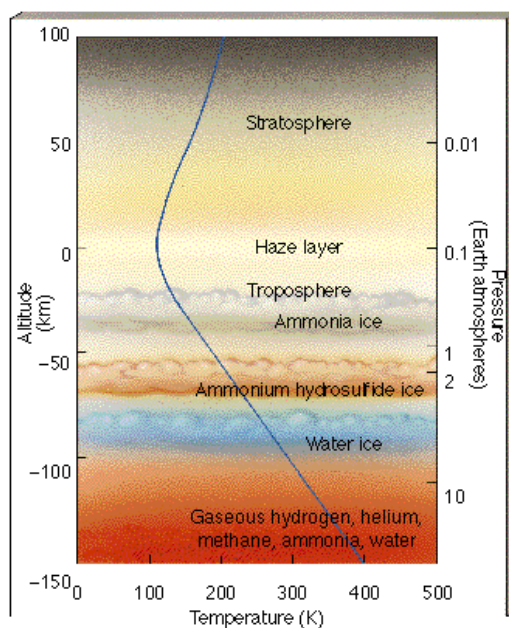


Figura 6. Perfil da Atmosfera de Júpiter.

As características mais evidentes em Júpiter são as bandas alternadas de nuvens brancas e coloridas, as zonas e cintos. Até o momento, ninguém sabe o que dá às nuvens as cores que eles têm, mas os cientistas têm teorias sobre por que as listras existem. Análise dos dados em muitos comprimentos de onda mostra que as regiões brancas tem maior espessura de nuvens do que as regiões mais avermelhadas. Isso pode significar que há formação ativa de nuvens nessas regiões, produzindo novas nuvens brancas. As nuvens nas faixas avermelhado-marrons são mais profundas, cobertas por uma poluição atmosférica de neblina espessa.

3.5 Saturno

Saturno orbita o Sol, uma estrela. Saturno é o sexto planeta a partir do sol a uma distância de aproximadamente 1,4 bilhão de km (886 milhões milhas) ou 9,5 UA. A atmosfera de Saturno tem um padrão de faixas escuras e claras, similares as de Júpiter embora a distinção entre ambas esteja muito menos nítida no caso de Saturno. Ele é um planeta gasoso gigante e não tem uma superfície sólida. A atmosfera é composta principalmente de hidrogênio (H_2) e hélio (He), contendo outros compostos. A Tebela 4 lista os principais gases que constituem a atmosfera de Saturno.

Tabela 4. Composição Atmosférica de Saturno.

Maior	(H_2) - 96.3%; (He) - 3.25%.
Menor (ppm)	(CH_4) - 4500; (NH_3) - 125; (HD) - 110; (C_2H_6) - 7.
Aerossóis	Gelo de amônia, gelo de água; hidrossulfeto de amônia.

As nuvens superiores de Saturno são formadas provavelmente por cristais de amônia. Uma névoa uniforme parece estender-se sobre todo o planeta, produzido por fenômenos fotoquímicos na atmosfera superior (cerca de 10 mbar). Em níveis mais profundos (perto de 10 bar de pressão) a água da atmosfera condensa-se provavelmente em uma camada da nuvem de água que não poderia ter sido observada. A Figura 7 ilustra a estrutura da atmosfera de Saturno.

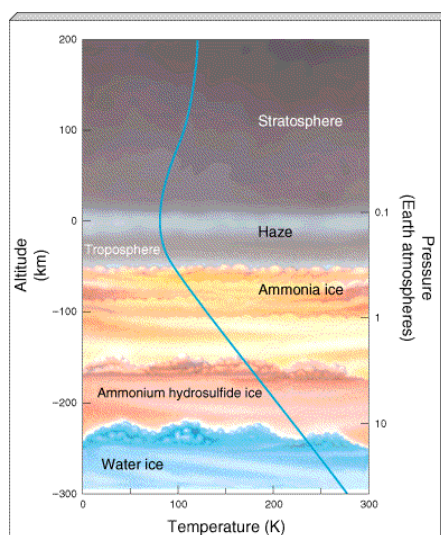
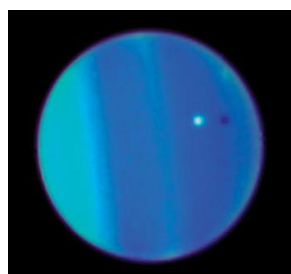


Figura 7. Estrutura da atmosfera de Saturno. Tal como acontece com Júpiter, há várias camadas de nuvens, mas a gravidade mais fraca de Saturno resulta em nuvens mais espessas e uma aparência mais uniforme.

Em muitos aspectos, a atmosfera de Saturno é bastante semelhante ao de Júpiter, exceto que a temperatura é um pouco menor devido à sua maior distância do Sol e porque suas nuvens são um pouco mais espessa. Saturno, como Júpiter, não tem uma superfície sólida, tomamos o topo da troposfera como nosso nível de referência, definindo-o como 0 km. A parte superior das nuvens visíveis fica a cerca de 50 km abaixo deste nível. Como em Júpiter, as nuvens são organizados em três camadas distintas, compostas (em ordem crescente de profundidade) de amoníaco, hidrossulfeto de amônia e gelo de água. Acima das nuvens existe uma camada de névoa formada pela ação da luz solar na atmosfera superior de Saturno.

Astrônomos observaram pela primeira vez metano no espectro de luz solar refletida de Saturno em 1930, quase ao mesmo tempo em que foi descoberto em Júpiter. No entanto, isso não pôde ser confirmado até 1960 quando observações mais sensíveis detectaram amônia. Na atmosfera fria superior de Saturno, mais amônia está na forma sólida ou líquida, com relativamente pouco dela presente como um gás para absorver a luz solar e criar linhas espectrais. Os astrônomos finalmente fizeram as primeiras determinações precisas do conteúdo de hidrogênio e hélio no final dos anos 1960^[11]. Estas medições terrestres foram posteriormente confirmadas com a chegada da nave espacial Pioneer e Voyager na década de 1970.

3.6 Urano



Urano é um gigante de gelo. A maioria (80 por cento ou mais) de massa do planeta é constituída por um fluido quente denso de materiais "gelados" - água (H₂O), metano (CH₄) e amônia (NH₃) - acima de um pequeno núcleo rochoso. Como Vênus, Urano tem uma rotação retrógrada (leste a oeste). Ao contrário dos outros planetas, Urano gira horizontalmente. Urano tem uma atmosfera que é composta principalmente de hidrogênio (H₂) e Hélio (He), com uma pequena quantidade de metano (CH₄). A Tabela 5 mostra a composição da atmosfera de Urano^[21].

Tabela 5. Composição da atmosfera de Urano

Maior	(H ₂) - 82.5%; (He) - 15.2%; (CH ₄) - 2.3%
Menor (ppm)	(HD) - 148
Aerossóis	Gelo de amônia, gelo de água, Hidrossulfeto de amônia, gelo de metano(?)

O metano tem uma proeminente banda de absorção no espectro visível e no infravermelho próximo, deixando a cor do planeta água-marinha ou ciano. As moléculas de metano correspondem a 2,3% da atmosfera por fração molar ao nível de pressão de 1,3 bar (130 kPa); isto representa aproximadamente 20 a 30 vezes a abundância de carbono encontrada no Sol. A abundância de compostos menos voláteis tais como amônia, água e sulfeto de hidrogênio no interior da atmosfera não é bem explicada. Estes compostos têm provavelmente valores maiores que os solares. Junto ao metano, são encontrados na estratosfera traços de vários hidrocarbonetos, os quais se acreditam serem produzidos a partir do metano pela fotólise induzida pela radiação ultravioleta solar. Os compostos incluem etano (C₂H₆), acetileno (C₂H₂), metilacetileno (CH₃C₂H) e diacetileno (C₂HC₂H). A espectroscopia também revelou traços de vapor de água, monóxido de carbono e dióxido de carbono na atmosfera superior, que só podem ter se originado de uma fonte externa, como poeira de cometas.

A troposfera é a parte mais baixa e densa da atmosfera, sendo caracterizada pela diminuição da temperatura à medida que aumenta a altitude. A temperatura cai de aproximadamente 320 K na base da

troposfera nominal, a -300 km, até 53 K a 50 km. Acredita-se que troposfera possui uma complexa estrutura de nuvens; lança-se a hipótese da existência de nuvens de água abaixo da faixa de pressão de 50 a 100 bar (5 a 10 MPa), nuvens de hidrossulfeto de amônia na faixa de 20 a 40 bar (2 a 4 MPa), nuvens de amônia ou sulfeto de hidrogênio entre 3 e 10 bar (0,3 a 1 MPa) e finalmente finas nuvens de metano detectadas diretamente a 1 a 2 bar (0,1 a 0,2 MPa). A Figura 8 mostra o perfil de Temperatura na troposfera e na estratosfera inferior de Urano.

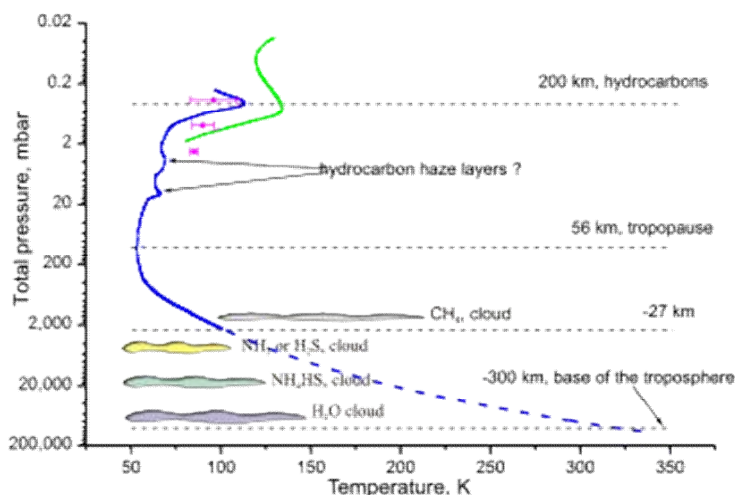
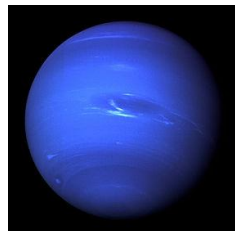


Figura 8. Perfil de temperatura da troposfera e estratosfera inferior. Nuvens e camadas de névoa também são indicadas.

A camada do meio da atmosfera uraniana é a estratosfera, onde a temperatura no geral aumenta com a altitude, indo de 53 K na tropopausa para entre 800 e 850 K na base da termosfera. O calor da estratosfera é causado pela absorção da radiação UV e IR solar pelo metano e outros hidrocarbonetos, que são formados nesta parte da atmosfera como resultado da fotólise do metano. O calor também é conduzido a partir da termosfera quente. Os hidrocarbonetos ocupam uma camada relativamente estreita em altitudes entre 100 e 300 km, correspondentes a uma faixa de pressão de 10 a 0,1 mbar (1000 a 10 kPa) e temperaturas entre 75 e 170 K.

Os hidrocarbonetos mais abundantes são CH_4 , C_2H_2 e C_2H_6 com uma razão de mistura de aproximadamente 10^{-7} em relação ao hidrogênio. A razão de mistura do monóxido de carbono é similar nestas altitudes. A razão de mistura de hidrocarbonetos mais pesados e dióxido de carbono é três ordens de magnitude inferior. A taxa de abundância de água é de aproximadamente 7×10^{-9} . Etano e acetileno tendem a condensar na parte inferior da estratosfera e tropopausa (abaixo do nível de 10 mBar) formando as camadas de névoa, que podem em parte ser responsáveis pela aparência uniforme de Urano^[22]. A concentração de hidrocarbonetos na estratosfera uraniana acima da névoa é significativamente menor que na estratosfera de outros planetas gigantes.

3.7 Netuno



Netuno pertence à classe dos gigantes gelados, pois possui uma grande massa de compostos voláteis que são encontrados sob a forma de gelo nas regiões longínquas do Sistema Solar. Embora esteja no grupo dos gigantes gasosos, Netuno, assim como Urano, é bem mais denso e menos massivo que Júpiter e Saturno. Contudo, seu tamanho ainda é bastante superior às dimensões dos planetas telúricos. A atmosfera de Netuno é muito semelhante à de Urano. Ela é composta

principalmente de hidrogênio (H₂), Hélio (He) e metano (CH₄). A Tabela 6 mostra a composição da atmosfera de Urano.

Tabela 6. Composição da atmosfera de Netuno.

Maior	(H ₂) - 80.0%;(He) - 19.0%; (CH ₄) 1.5%.
Menor (ppm)	(HD) - 192; (C ₂ H ₆) - 1.5
Aerossóis	Gelo de amônia, gelo de água, Hidrossulfeto de amônia, gelo de metano (?)

Contrastando com a coloração azul do planeta, surgem nuvens de cristais de metano de coloração branca, análogas aos cirros formados por cristais de água na Terra. Modelos teóricos da atmosfera de Netuno preveem a localização de outras camadas de nuvens nas camadas internas da atmosfera do planeta, abaixo das camadas observadas pela Voyager 2. Devem ser formadas por sulfeto de hidrogênio e amônia entre 2 e 5 bar e cristais de água e hidrossulfeto de amônio entre 20 e 50 bar ^[2]. Somente duas camadas de nuvem foram observadas diretamente, sendo a superior formada por metano e a inferior uma camada espessa e opaca, tratando-se possivelmente do topo da camada de nuvens de sulfeto de hidrogênio.

A pequena quantidade de metano nas camadas altas da atmosfera é, em parte, responsável pela coloração azul do planeta. Nessas camadas, a radiação vinda do sol interage com metano que absorve a luz vermelha e reflete a azul. A Figura a seguir ilustra esse fenômeno.

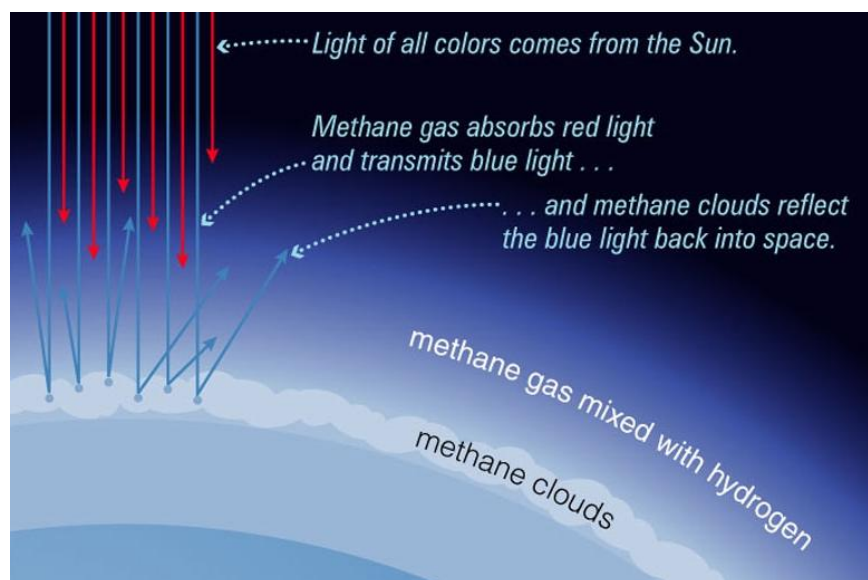


Figura 9. Diagrama esquemático mostrando a reação do metano nas altas camadas da atmosfera de Netuno com a luz do sol, produzindo coloração azul a esse planeta.

3.8 Perfil da atmosfera dos Planetas Gasosos

Sabemos que os diversos planetas gigantes do nosso sistema solar foram estudados em detalhe. É útil fazer uma breve revisão de suas propriedades (Bailey, 2014).

Todos os planetas gigantes têm atmosferas compostas de hidrogênio e hélio e são enriquecidos em elementos pesados com respeito à composição solar. No caso de Júpiter, medições com a sonda Galileo mostram C, N, S, Ar, Kr, Xe enriquecido por fatores de 2 a 4 relativamente a abundâncias solares (Owen et al, 1999;. Wong et al., 2004). Carbono é enriquecido em relação ao seu valor solar por 7 vezes em Saturno (Flasar et al., 2005) e por 30-40 vezes em Urano e Netuno (Lodders & Fegley 1994).

As atmosferas de planeta gigante tiveram medições de suas estruturas de temperatura a partir de medições de ocultações de rádio, e da sonda, no caso de Júpiter (ver na Figure 10) ^[1].

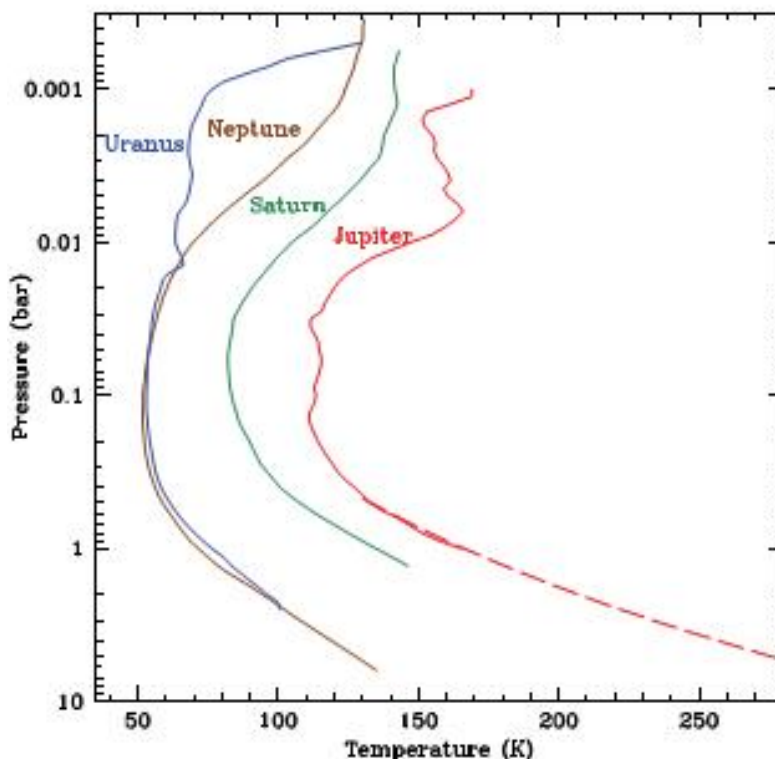


Figura 10. Perfis de Temperature de atmosferas de planetas gigantes do Sistema Solar a partir das medições de ocultação rádio da Voyager (Lindal1992) e da sonda Galileo para Júpiter (linha tracejada - Seiff et al.1998).

Os espectros de IR próximo dos planetas gigantes são mostrados na Figura 9. Todos são dominados por bandas de absorção devido ao metano (CH_4), centrado em torno de 1.15, 1.4, 1.7 e 2.3 μm , e são brilhantes nas regiões de janela entre estas absorções. A este respeito, os espectros se assemelham aos da T dwarfs e o T9 dwarf UGPS 0722-0 é mostrado na Figura 9 para comparação.

Júpiter mostra também devido à absorção de NH_3 em torno 1.55 μm . Todos os planetas também mostram absorção de colisão induzida devido a pares $\text{H}_2 - \text{H}_2$, que a baixas temperaturas mostram-se como uma característica larga em torno de 2.12 μm . ^[1] Outras espécies presentes na atmosfera em níveis residuais e detectadas em espectros de comprimento de onda mais longo incluem PH_3 e AsH_3 em Júpiter e Saturno (Fletcher et al.2011), e hidrocarbonetos, tais como C_2H_2 e C_2H_6 na estratosfera (Hesman et al 2009;. Greathouse et al.2011).

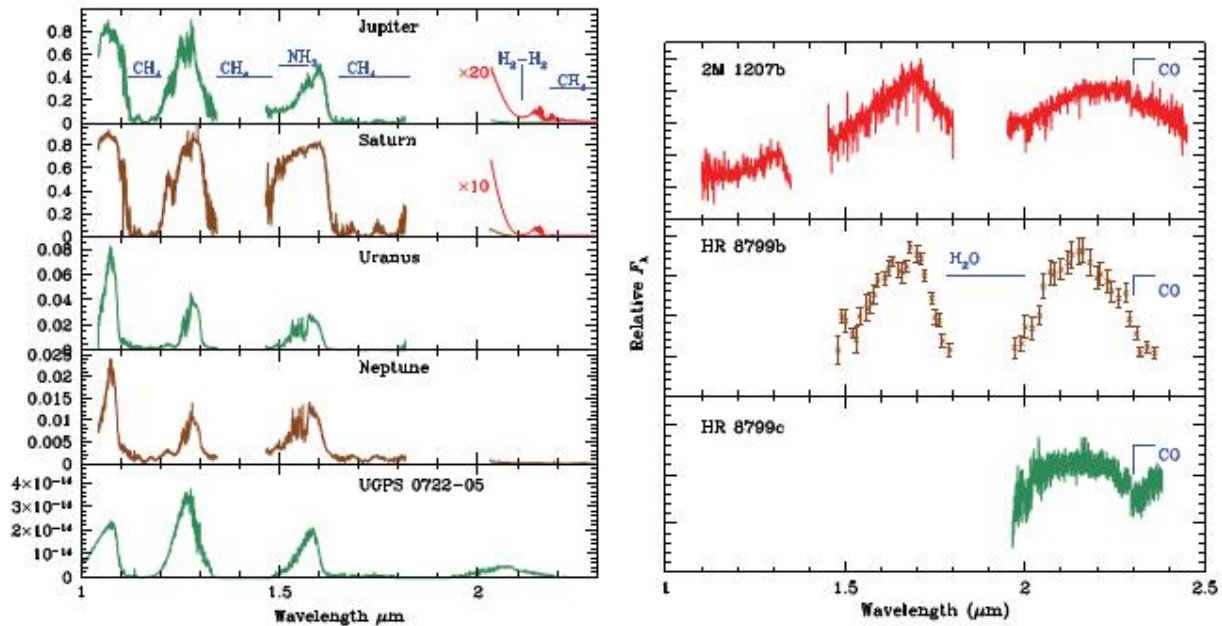


Figura 11. Direita: Espectro de luz refletida no IR próximo dos planetas gigantes do sistema solar: Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. (marcada como fator de radiância I/F). Os dados são da IRIS2 no Telescópio Anglo-Australiano. As curvas vermelhas mostram os espectros de K-banda fraca de Júpiter e Saturno ampliados por fatores de 10 e 20. O espectro da T9 dwarf UGPS 0722-05 é mostrado para comparação com os dados dos Bochanski et al. (2011). Esquerda: Espectro dos planetas de imagem direta (ou objetos de massa planetária) 2M 1207b, HR 8799b e HR 8799c. A banda do CO em 2.3μm é evidente em todos os três objetos, bem como a absorção de H₂O em ~1.9 e ~1.4μm. Fonte: Bailey, 2014.

3.8 Terra



A atmosfera terrestre é composta principalmente de nitrogênio, oxigênio e argônio. Os gases restantes são muitas vezes referidos como gases traços¹, entre os quais estão incluídos os gases do efeito estufa. Vários poluentes industriais também podem estar presentes, tais como o cloro (elementar ou em compostos), compostos de flúor, mercúrio elementar e compostos de enxofre, tais como dióxido de enxofre (SO₂, que pode causar a chuva ácida). A tabela a seguir mostra a composição da atmosfera da Terra.

Tabela 6. Composição da atmosfera da Terra.

Maior	(N ₂) 78.08%; (O ₂) 20.95%
Menor (ppm)	(Ar) - 9340; (CO ₂) - 400; (Ne) - 18.18; (He) - 5.24; CH ₄ - 1.7; (Kr) - 1.14; (H ₂) - 0.55.

Por conveniência de estudo, a atmosfera é usualmente subdividida em camadas concêntricas, de acordo com o perfil vertical médio de temperatura. A Figura 8 mostra a estrutura vertical da atmosfera terrestre. A troposfera é a camada inferior, onde a temperatura decresce com a altitude até atingir cerca de -60°C. Varia entre 8 km (polos) até 15 km (equador) e contém 80% em massa dos gases atmosféricos. A camada seguinte, a estratosfera, se estende até ~50 km. Ela contém a camada de ozônio. Inicialmente, por uns 20 km, a temperatura permanece quase constante e depois cresce até o topo da estratosfera, devendo-se este aumento à interação química e térmica entre a radiação solar e os gases aí existentes. Conforme mencionamos, o ozônio absorve radiação ultravioleta do sol. Conseqüentemente, a estratosfera é aquecida.

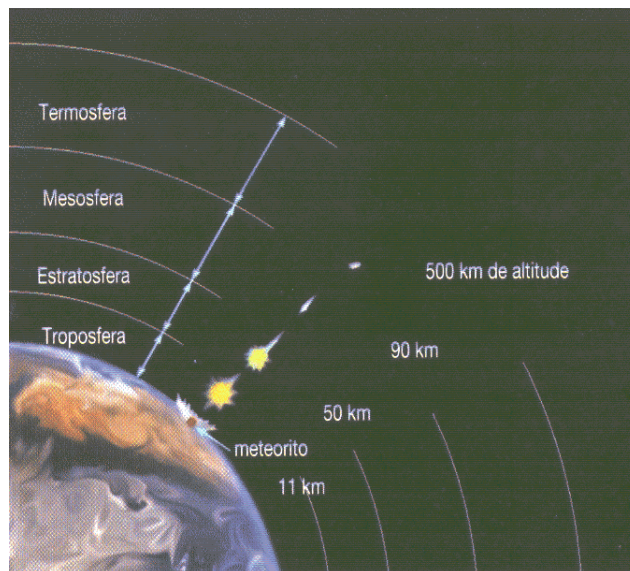


Figura 12. Estrutura vertical da atmosfera da Terra. http://profs.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Atmosfera/Composio_Atmosfera.html.

Na mesosfera a temperatura novamente decresce com a altura, até a mesopausa, que está em torno de 80 km, atingindo os -100°C , pois a absorção de radiação solar é muito fraca. Acima da mesopausa, e sem limite superior definido, está a termosfera, onde a temperatura é inicialmente isotérmica e depois cresce rapidamente com a altitude, podendo atingir-se os 2000°C , devido à absorção das radiações de energia superior a $9,9 \times 10^{-19}$ J por átomos de oxigênio e nitrogênio, verificando-se, novamente, a conjugação dos efeitos térmico e químico das radiações.

3.8.1 Ionosfera

A ionosfera da terra é a região que se estende de 60 km a 2000 km de altitude, onde a radiação solar produz um plasma parcialmente ionizado principalmente de H^+ and He^+ acima de 1000 km, O^+ de 300-500 quilômetros e íons moleculares (NO^+ , O_2^+ , N_2^+) abaixo de 200 km. A maior densidade de íons ocorre próximo a 300 km. A concentração de íons é pequena abaixo de 80 km porque nestas regiões muito da radiação de ondas curtas necessária para ionização já foi esgotada^[24]. Acima de ~400 km a concentração é pequena por causa da extremamente pequena densidade do ar, possibilitando a produção de poucos íons. A ionosfera tem pequeno impacto sobre o tempo, mas tem grande influência sobre a transmissão de ondas de rádio na banda AM. Durante o dia as ondas de rádio tendem a ser absorvidas nas duas camadas mais baixas, especialmente na camada D. A camada F reflete as ondas de rádio durante o dia e a noite. Contudo, mesmo que as ondas consigam atravessar as camadas D e E e ser refletidas na camada F, elas serão absorvidas no seu caminho de volta para a Terra. À noite, contudo, a camada absorvedora D desaparece e as ondas podem atingir a camada F mais facilmente e ser refletidas para a superfície da Terra.

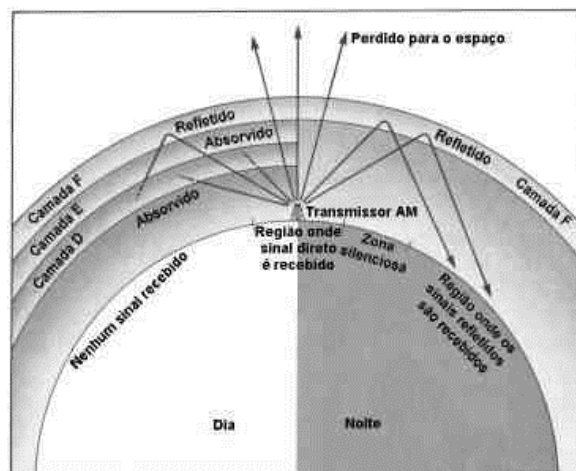


Figura 13. Influência da Ionosfera sobre a transmissão de ondas de rádio. Fonte: <http://fisica.ufpr.br>.

Partículas energizadas (prótons e elétrons) que viajam ao longo do campo magnético da Terra e vêm colidindo com a atmosfera, perto do polo norte e sul, colidem com os constituintes atmosféricos de nitrogênio e oxigênio. O nitrogênio molecular e oxigênio atômico absorvem parte da energia da colisão e depois libera sob a forma de luz. As cores e a intensidade da luz formam as chamadas auroras, como pode ser visto na Figura 8.2. As zonas de maior ocorrência das auroras situam-se em torno de 20-30° ao redor dos polos geomagnéticos (76°N, 102°W; 68°S, 145°E).

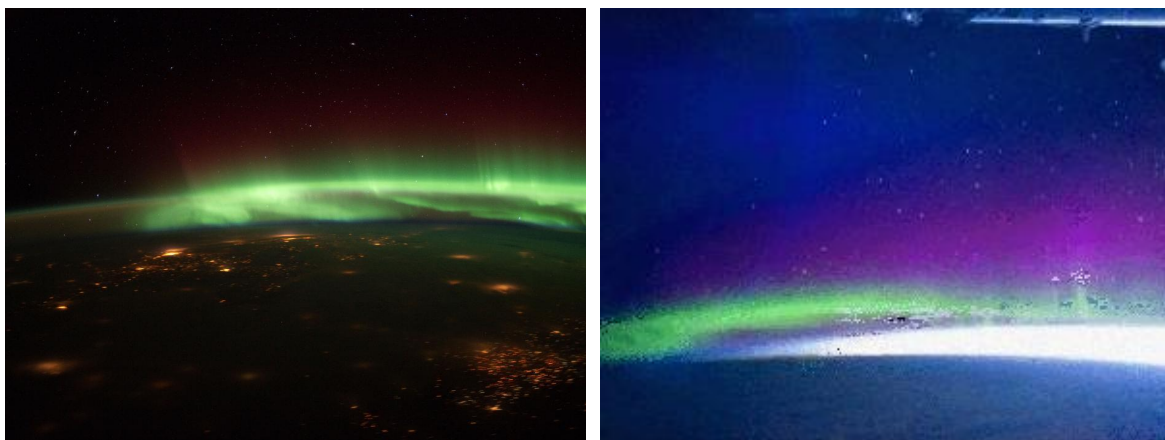
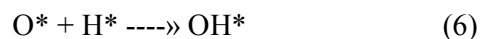
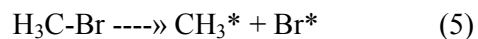
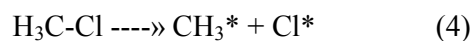
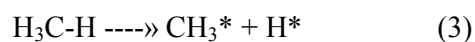


Figura 14. Fotografia de uma aurora boreal tirada a partir da Estação Espacial Internacional. Crédito: NASA.

3.8.2 Reações Fotoquímicas

O efeito químico da radiação solar manifesta-se na quebra de ligações químicas nas moléculas e na ionização de átomos ou moléculas. As reações químicas desencadeadas pela ação da radiação solar designam-se por reações fotoquímicas ou fotólises. As reações fotoquímicas que levam à ruptura de ligações são dissociações de moléculas, e que ocorrem na parte superior da troposfera e na estratosfera, das quais resultam os radicais livres, como o OH*, O*, Cl* ou o Br*,^[25] podem ser esquematizadas a seguir





Cada molécula para se dissociar, necessita de um valor mínimo de energia, designada por energia de dissociação. Por exemplo, a energia de dissociação da molécula de HCl é 4,5 eV, isto é, para quebrar a ligação covalente entre o átomo H e o átomo Cl é necessário que a radiação que nela incida tenha a energia de 4,5 eV (radiação UV).



Se a radiação incidente possuir energia superior a 4,5 eV, o excesso de energia reverte como energia cinética das partículas formadas e esse aumento de energia cinética traduz-se num aumento de temperatura dessas partículas. Se a radiação incidente possuir energia inferior a 4,5 eV, a radiação não é absorvida e nada acontece. ^[25] Na tabela seguinte indicam-se alguns valores de energias de dissociação.

Tabela 7. Energias de dissociação de algumas espécies químicas moleculares

Molécula	Dissociação	Energia de Dissociação (eV)
N ₂	N ₂ ----}\rangle N^* + N^*	10
O ₂	O ₂ ----}\rangle O^* + O^*	5,18
HCl	HCl ----}\rangle H^* + Cl^*	4,5
ClO	ClO ----}\rangle Cl^* + O^*	2,1
BrO	BrO ----}\rangle Br^* + O^*	2,4

Se houver uma ionização, a energia da radiação solar absorvida pelas partículas é utilizada para a remoção de um elétron, ficando cada partícula com carga +1. Se esta radiação tiver energia igual ou superior à energia mínima de remoção, a radiação solar consegue retirar um elétron à partícula, ionizando-a. Essa energia mínima de remoção designa-se por **energia de 1ª ionização (E₁)** e na tabela seguinte temos alguns exemplos.

Tabela 8. Energias de 1ª ionização de algumas espécies químicas.

Partícula	Energia de 1ª ionização (eV)
N ₂	15,6
O ₂	11,8
N*	14,3
O*	13,7

As radiações absorvidas na parte superior da troposfera e na estratosfera são radiações UV de energia compreendida entre $6,6 \times 10^{-19}$ J e $9,9 \times 10^{-19}$ J. Os gases que absorvem estas radiações são, principalmente, o oxigênio (O₂) e o ozônio (O₃). Podem também absorver estas radiações os CFCs, os

compostos de bromo, os óxidos de azoto, etc. Estas radiações absorvidas possuem energia suficiente para dissociar as moléculas dos gases aí existentes, mas não para as ionizar. [25] Formam-se assim, preferencialmente, radicais livres.

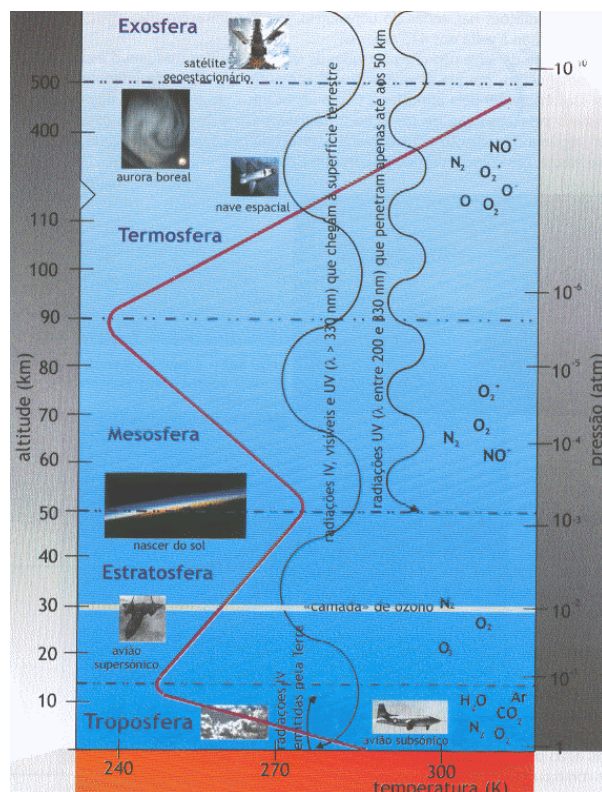


Figura 15. Representação esquemática das camadas da atmosfera, com a respectiva indicação da variação da pressão e da temperatura em função da altitude. **Fonte:** http://profs.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Atmosfera/Composio_Atmosfera.html.

Na mesosfera superior e na termosfera, as radiações absorvidas possuem energia superior a $9,9 \times 10^{19}$ J, o que já vai provocar ionização. Se compararmos os valores das Tabelas 1e 2, concluiremos que as energias de ionização são superiores às de dissociação, o que implica que os processos de ionização ocorram aqui.

3.9 Atmosfera de Europa

Observações recentes feitas pelo Telescópio Espacial Hubble revelam que Europa, uma das Luas de Júpiter, tem uma atmosfera tênue (1 micropascal de pressão atmosférica à superfície) composta de oxigênio. Ao contrário do oxigênio da atmosfera terrestre, o oxigênio em Europa não deve ter origem biológica. É provavelmente gerado pela luz do sol e partículas carregadas que atingem a superfície gelada produzindo vapor de água que subsequentemente se divide em hidrogênio e oxigênio. O hidrogênio escapa à gravidade de Europa por causa da sua massa atômica muito pequena, deixando para trás o oxigênio. A atmosfera tênue de Europa, que, ao contrário de Titan, Io, ou Callisto, é apenas provocado por colisão. Visto que a atmosfera é resultado dessas colisões, é muitas vezes referida como uma exosfera.

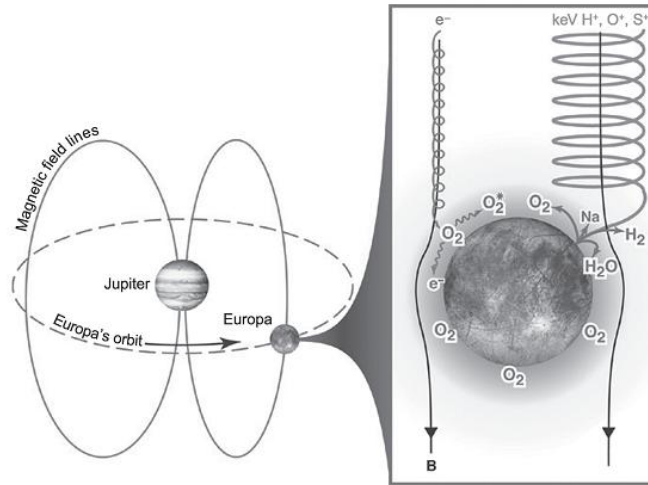


Figura 16. Campo magnético intrínseco de Europa, e colisões de íons (NASA).

Neutros que escapam da gravidade da Europa na sua maioria permanecem gravitacionalmente ligadas a Júpiter em uma nuvem em forma toroidal. Uma vez que a perda de H₂ acompanha a formação de O₂ e de ejeção de gelo (Johnson e Quickenden, 1997) e escapa mais prontamente do que as espécies mais pesadas, H₂ é a principal espécie no toro neutro de Europa [5]. Há cerca de três vezes mais moléculas e átomos neste toro que no toro neutro de Io (Smyth e Marconi, 2006).

3.10 Atmosfera de Encéladus

Encéladus, uma das luas de Saturno, tem uma atmosfera rarefeita. A fonte da atmosfera pode ser vulcanismo, gêiseres, ou gases que se libertam da superfície ou o interior como pode ser visto na Figura 15. Este material foi recolhido e analisado in situ por instrumentos da Cassini, especialmente o Ion and Neutral Mass Spectrometer (INMS) e a Ultraviolet Imaging Spectrograph (UVIS), e a composição da pluma foi determinado para consistir de ~ 90% de H₂O, ~ 5% de CO₂, ~0.9% de CH₄, ~0.8% de NH₃, além de pequenas quantidades de outras espécies, que incluem CH₃OH, N₂, ⁴⁰Ar, C_nH_n e C_nH_nO (Spencer et al 2006; Spencer et al., 2009).

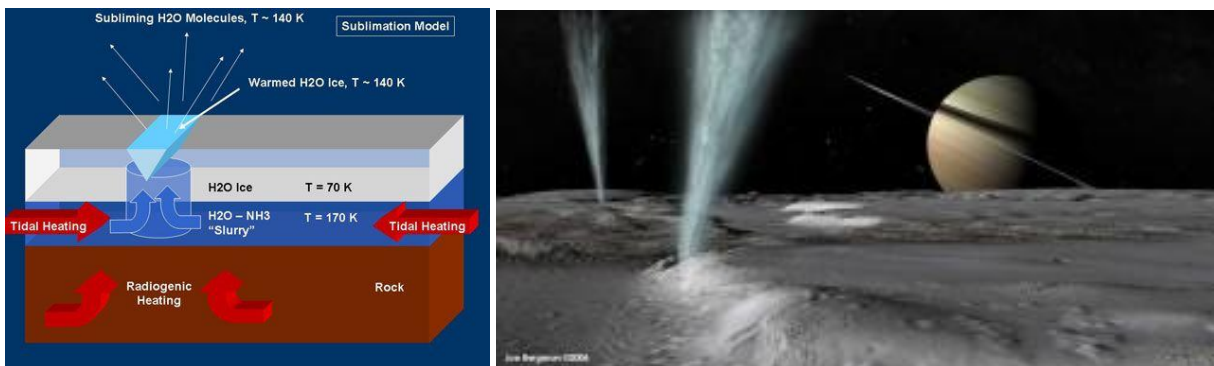


Figura 17. Modelo geológico para as plumas de Enceladus (NASA). Imagem artística de cryovolcanismo de Enceladus.

As moléculas acima da superfície de Encélado são submetidas a todos os tipos de radiações ionizante, incluindo os elétrons do vento solar e da magnetosfera de Saturno, que é fortemente ligada com a região polar norte de Enceladus. Esta é a região mais fria da superfície de Enceladus, com temperaturas de até 33 K (Spencer et al., 2006). O bombardeio da pluma de Encéladus por elétrons energéticos pode provocar

alterações nas moléculas, destruindo e produzindo espécies, levando assim, um aumento da complexidade química no ambiente (Bergantini et al. 2014).

3.11 Tritão

Tritão é a maior lua de Netuno. Esse satélite tem uma atmosfera extremamente fina, composta por N_2 (99,9%) com pequenas quantidades de CH_4 (0,01%). Partículas de gelo de nitrogênio podem formar nuvens finas poucos quilômetros acima da superfície. A pressão atmosférica em Tritão é de cerca de 15 microbars, 0.000015 vezes a pressão à superfície do mar, na Terra. Tritão está cheio de fendas enormes. As imagens da Voyager 2 mostram erupções tipo gêiser ativos que espalham nitrogênio gasoso e partículas escuras de poeira por vários quilômetros na atmosfera.

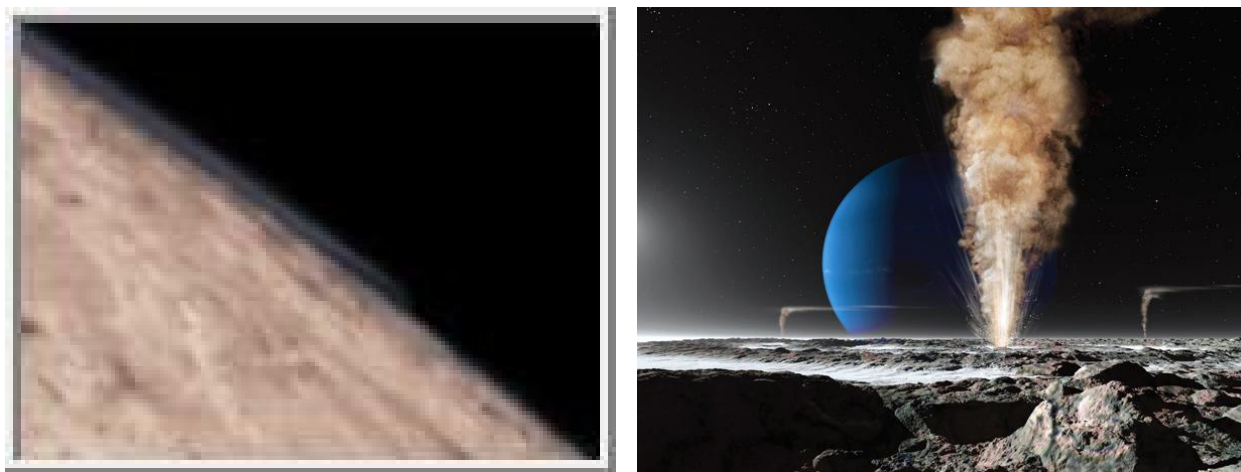


Figura 18. (esquerda) Imagem mostrando uma fina camada de nuvens ao longo do limbo da lua - Fonte: NASA. (direita) Imagem artística mostrando a atividade vulcânica expelindo N_2 líquido e gêiseres - Fonte: <http://astropt.org/blog/wp-content/uploads/2012/08/06-triton-geyser.jpg>.

3.12 Titã

Titã, a maior lua de Saturno, tem uma atmosfera quimicamente rica, resultado do processamento química provocado pela radiação vinda do sol e de partículas altamente energéticas da magnetosfera de Saturno. Fontes exógenas e endógenas de energia iniciam reações químicas (fotólise, radiólise) na atmosfera, produzindo hidrocarbonetos gasosos e nitrilas que através de vários processos de polimerização¹⁰ produzem partículas de aerossóis sólidos que crescem por uma variedade de mecanismos e caem na superfície (Cable et al. 2012). O diagrama esquemático da Figura 12 ilustra o processamento químico na atmosfera da maior lua de Saturno.

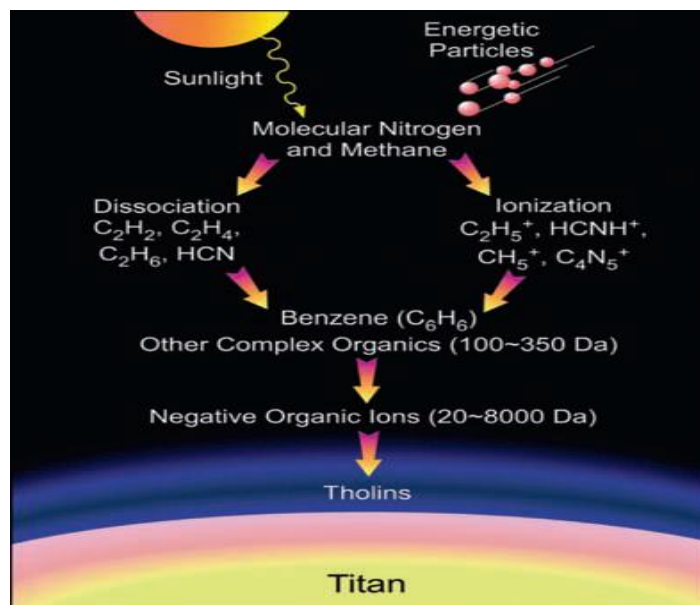


Figura 19. Diagrama esquemático do processamento químico da atmosfera de Titã (Waite et al. 2007).

De acordo com dados recentes da Cassini Composite Infrared Spectrometer (CIRS) e outras observações, a atmosfera de Titã é composta de N_2 , CH_4 , H_2 , CO , com traços de etano, acetileno, propano, etileno, cianeto de hidrogênio, cianoacetileno, dióxido de carbono e vapor de água. A Tabela 9 mostra composição da Atmosfera de Titã.

Tabela 9. Composição da Atmosfera de Titã.

gas ^a	fraction (%)
N_2	94–98
CH_4	1.8–6.0
H_2	0.1–0.2
CO	0.005
^{40}Ar	0.005

^aTrace components: C_2H_6 , C_2H_2 , C_3H_8 , C_2H_4 , ^{36}Ar , HCN , CH_3CN , CO_2 , CH_3C_2H , C_4H_2 , HC_3N , C_6H_6 and H_2O vapor.

A fim de obter uma melhor compreensão da química de Titã, muitas tentativas foram feitas para replicar os componentes atmosféricos de Titã em laboratórios na Terra. Todas essas técnicas usam algum tipo de descarga ou fonte de radiação para imitar uma ou várias das fontes de energia capazes de gerar radicais livres e outras espécies ativas na atmosfera de Titã. A Figura 6 ilustra as diversas fontes exógenas capazes de afetar a atmosfera dessa lua de Saturno.

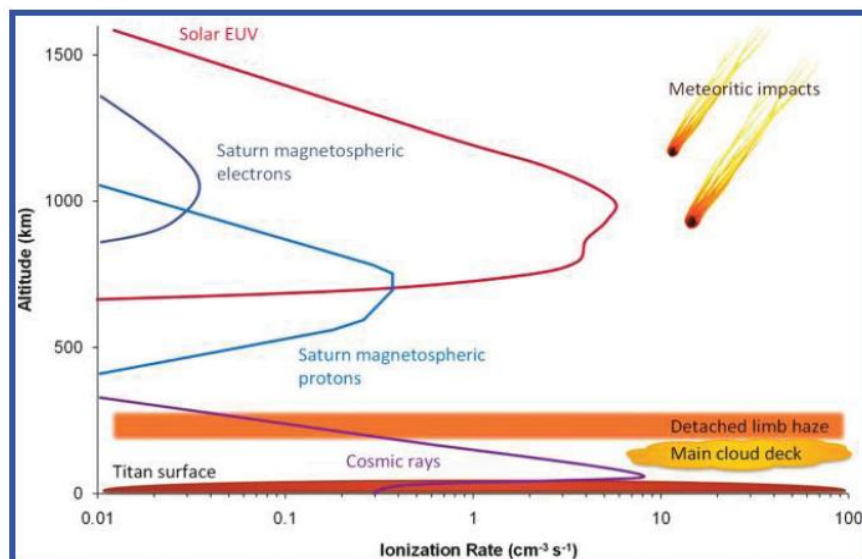


Figura 20 Fontes de energia exógenas capazes de afetar a química da atmosfera de Titã. Fluxos de fótons em condições médias globais. Fonte: Cable et al.2012.

Por exemplo, uma descarga de plasma induzido por laser replica o calor libertado durante um período de impacto de meteoritos, enquanto que a irradiação UV simula a radiação solar da atmosfera superior (Figura 12.2). Esta última (radiação UV) produz íons e radicais por fotoionização e fotodissociação (ou fotólise), respectivamente, que ainda reage para formar produtos finais estáveis. A extensão e o tipo da fotoquímica é altamente dependente do comprimento de onda. Por exemplo, o metano pode ser efetivamente fotolizado na faixa de UV extremo ($\lambda < 140$ nm), ao passo que a fotólise de nitrogênio requer comprimentos de ondas muito mais curtos ($\lambda < 80$ nm) como pode ser visto na tabela a seguir^[3].

Tabela 12.2. Tabela 3. Fotodissociação (d) e fotoionização (i) Energias para os componentes principais da atmosfera de Titã.

molecule	type	photochemical process	threshold energy		wavelength (λ) range (nm)	ref
			kJ/mol	eV		
nitrogen	d	$N_2 + h\nu \rightarrow N^+ + N + e^-$	2345	24.3	<51	100
	d	$N_2 + h\nu \rightarrow N_2^+ + e^-$	1505	15.6	<80	100
	i	$N_2 + h\nu \rightarrow 2N\bullet$	942	9.76	<80	55
methane	d	$CH_4 + h\nu \rightarrow CH_2^+ + H_2 + e^-$	1465	15.2	<82	100
	d	$CH_4 + h\nu \rightarrow CH_3^+ + H + e^-$	1380	14.3	<87	100
	d	$CH_4 + h\nu \rightarrow CH_4^+ + e^-$	1216	12.6	<99.1	241
	i	$CH_4 + h\nu \rightarrow CH_3\bullet + H\bullet$	439	4.55	<155	55, 99

^aNote that in some cases the minimum wavelength required for photochemistry to be observed is different from the threshold energy. For example, the bond dissociation energy of N_2 is 942 kJ/mol, which corresponds to a wavelength of 127 nm, but photodissociation does not occur until $\lambda < 80$ nm.

Referências

[1] BURGESS, Eric. *By Jupiter: Odysseys to a Giant*. New York: Columbia University Press, 1982.

[2] Cruikshank, D. P. (ed.). *Neptune and Triton* (em Inglês). [S.l.]: Arizona University Press, 1995. 1249 p. ISBN 0-8165-1525-5.

[3] [22] Cable, Morgan L. et al. (2012). Chem. Rev.2012, 112, 1882–1909

[4] Domingue, Deborah L. *et al.*. (agosto 2009). "Mercury's Atmosphere: A Surface-Bounded Exosphere". *Space Science Reviews* **131** (1–4): 161–186.DOI:10.1007/s11214-007-9260-9.

[5] Johnson Composition and Detection of Europa's Sputter-induced Atmosphere R. E. Johnson

[6] Lemmon et al., "Atmospheric Imaging Results from the Mars Exploration Rovers: Spirit and Opportunity"

[7] Oliveira, Kepler., Saraiva, M. de Fátima. *Astronomia e Astrofísica*, Livraria da Física (2013).

[8] Spencer, J. R., Barr, A. C., Esposito, L. W., et al. 2009, Enceladus: An Active Cryovolcanic Satellite (Dougherty, M. K. and Esposito, L. W. and Krimigis, S. M.), 683.

[9] Spencer, J. R., Pearl, J. C., Segura, M., et al. 2006, *Science*, 311, 1401

[10] Titan from Cassini Huygens; Brown, R. H., Lebreton, J.-P., Waite, J. H., Eds.; Springer: New York, 2009.

[11] [1] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Atmosfera>

[12] http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Campo_gravitatorio/Campo_gravitatorio15.htm

[13] <http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Venus>

[14] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/venusfact.html>

[15] http://pt.wikipedia.org/wiki/Atmosfera_de_V%C3%AAnus

[16] <http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Jupiter>

[17] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/jupiterfact.html>

[18] http://pt.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9nus_%28planeta%29

[19] http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2007/11/Oxygen_airglow_production_schematic

[20] <http://lifeng.lamost.org/courses/astrotoday/CHAISSON/NAV/FRAMESET/FRAME12/IDX12-02.HTM>

[21] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/uranusfact.html>

[22] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Urano_\(planeta\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/Urano_(planeta))

[23] http://pt.wikipedia.org/wiki/Atmosfera_de_Marte

[24] <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap1/cap1-2.html>

[25] http://profs.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Atmosfera/Composio_Atmosfera.html

[26] <http://www.sci-news.com/space/science-nasa-chemistry-titans-atmosphere-01989.html>

[27] <http://www.sci-news.com/space/science-nasas-cassini-interaction-titan-supersonic-solar-wind-02448.html>