

**Prof. Dr. Sergio Pilling**

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

## AULA 16 – ASTROQUÍMICA DE EXOPLANETAS.

### 1. Introdução

Os últimos anos tem visto um aumento considerável no número de exoplanetas conhecidos e de métodos para caracterizar as suas propriedades atmosféricas (Bailey, 2014). A detecção e caracterização de planetas extrassolares é um dos campos mais emocionantes e de grande crescimento em astronomia. A descoberta dos primeiros exoplanetas foi anunciada em 1989, quando variações nas velocidades radiais das estrelas HD 114762 e Alrai ( $\gamma$  Cephei) foram explicadas como efeitos gravitacionais causados por corpos de massa sub-estelar, possivelmente gigantes gasosos de massas 11 MJ e 2-3 MJ, respectivamente. O primeiro planeta extrassolar descoberto ao redor de uma estrela da sequência principal (51 Pegasi) foi anunciado em 6 de Outubro de 1995 por Michel Mayor e Didier Queloz da Universidade de Genebra. Até 24 de Fevereiro de 2015, havia 1890 planets exoplanetas detectados (exoplanet.eu).

Para detecção de exoplanetas, usa-se algumas técnicas tais como: astrometria, medida de Velocidade Radial, fotometria, cronometria da chegada de pulsos, observação direta e micro-lentes gravitacionais. Devido não possuir luz própria, e seu tamanho característico, é pouco provável que se consiga detectar de modo direto um planeta fora do Sistema Solar.

Segundo Encrenaz (2003), dos dados obtidos com os exoplanetas descobertos, as seguintes características principais podem ser deduzidas: Hot Jupiters e Hot Neptunes são uma classe de exoplanetas cujas características são muito parecidas com os nossos respectivos gigantes gasosos, porém suas altas temperaturas e suas órbitas muito próximas às estrelas, além de períodos orbitais muito curtos. As condições de formação dessas classes de planetas ainda não estão bem definidas, mas as principais linhas de pesquisa acreditam que os planetas são formados longe da estrela e migram em sua direção.

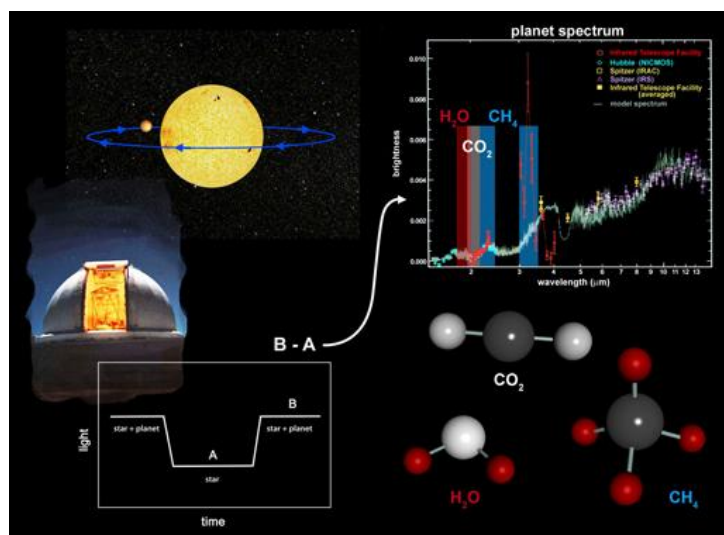
As atmosferas de exoplanetas são uma janela observável sobre as propriedades físicas e químicas desses objetos. Nos últimos dez anos, o estudo de ambientes exoplanetários tornou-se um dos campos mais emocionantes e de rápida progressão em astronomia. Para analisar as atmosferas de atmosferas exoplanetárias, os astrônomos da Universidade de Genebra, utilizar instrumentos de telescópios espaciais (Telescópio Espacial Hubble, Spitzer) bem como os instrumentos baseados em terra, como o HARPS, equipando telescópios do Observatório do Sul Europeu. Vários satélites como Kepler, Gaia, Darwin e Corot e telescópios terrestres como Keck, Gemini, Palomar e o telescópio japonês Subaru em Mauna Kea, no Havaí estão preparados para encontrar novos exoplanetas e estudar a composição química de seus ambientes. Os astrônomos conseguem determinar a composição das suas atmosferas ao observar quais os comprimentos de onda da luz que são transmitidos e quais os que são parcialmente absorvidos. Neste trabalho, estudaremos a astroquímica de atmosferas exoplanetárias.

### 2. ATMOSFERAS DE EXOPLANETAS

Dados observacionais para a caracterização de atmosferas de exoplanetas é, em grande parte, limitado a exoplanetas gigantes quentes, porque eles estão perto de sua estrela (Júpiteres quente) ou porque eles são

jovens e ainda em fase de esfriamento. Para estes planetas há boa evidência para a presença de absorções de CO e H<sub>2</sub>O no IR. Absorção de sódio é observada em um número de objetos. Medições de luz refletida mostram que alguns exoplanetas gigantes são muito escuros, indicando uma atmosfera com nuvens livres. No entanto, também há boas evidências de nuvens e neblina em alguns outros planetas. Algumas outras questões na composição e estrutura das atmosferas de exoplanetas gigantes, como a ocorrência de estruturas de temperatura invertidas, a presença ou ausência de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> e a ocorrência de alta relação C/O ainda são objeto de investigação e debate (Bailey, 2014).

Uma importante maneira de determinar a composição das atmosferas exoplanetárias acontece quando um exoplaneta passa em frente à sua estrela (trânsito planetário). Os astrônomos conseguem determinar a composição das suas atmosferas ao observar quais os comprimentos de onda da luz que são transmitidos e quais os que são parcialmente absorvidos. A Figura 1 ilustra bem essa técnica.



**Figura 1.** Técnica aplicada para um sistema de estrela, chamado HD 189733, para detectar as substâncias químicas na sua atmosfera a partir de um telescópio em terra. **Crédito da Ilustração:** NASA.

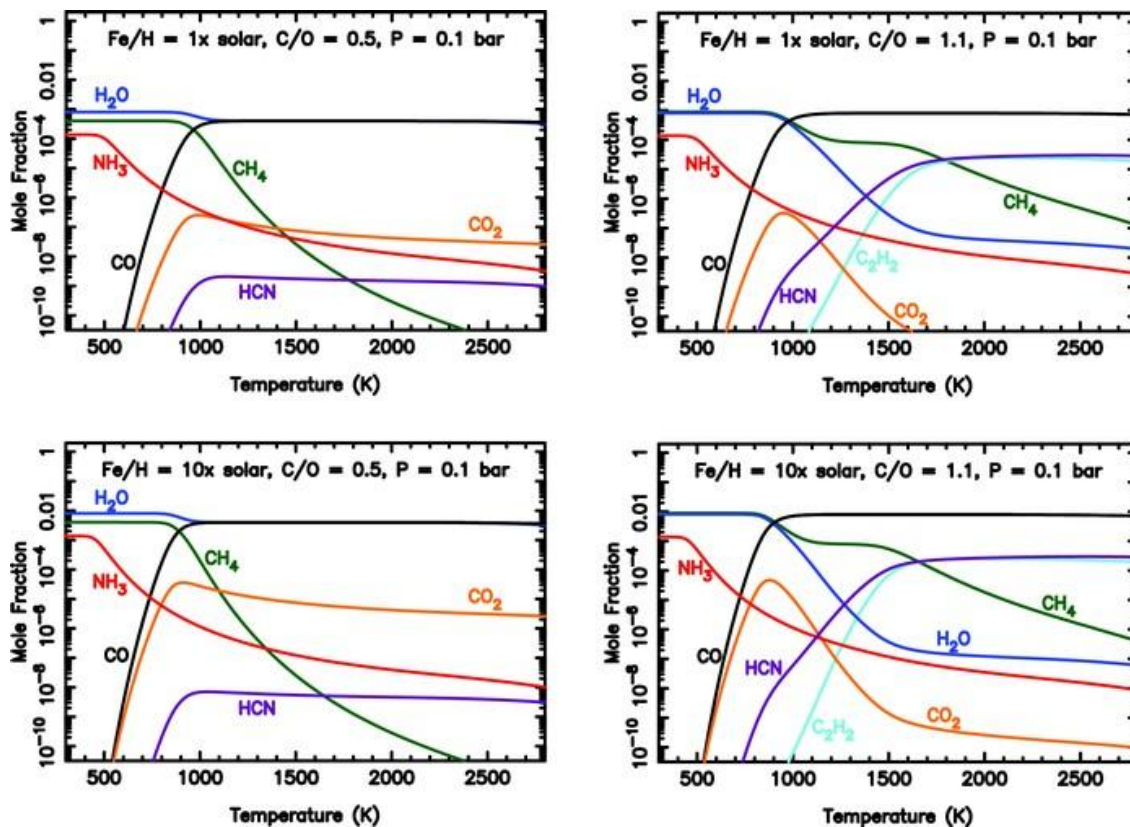
Essa técnica só tinha sido usada até então a partir de telescópios espaciais. Astrônomos dizem que esta técnica, quando usada com futuros telescópios espaciais, permitiria o estudo da atmosfera de planetas ainda menores, até mesmo como a Terra quando forem descobertos. Para detectar as substâncias químicas na atmosfera, os astrônomos medem a luz da estrela no sistema com o seu planeta. A luz total é medida e, em seguida, quando o planeta desaparece por trás da estrela, somente a luz da estrela é medida. Subtraindo o brilho observado, você recebe a luz apenas do planeta. A decomposição dessa luz em seus comprimentos de onda revela as "impressões digitais" dos produtos químicos<sup>[2]</sup>. Observações de trânsito e eclipse até à data têm sido utilizados para inferir a presença de moléculas de H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> nas troposferas e estratosferas de planetas extrassolares gigantes.

## 2.1 A razão Carbono/Oxigênio em atmosferas de exoplanetas

Como vimos, o trânsito planetário e observações de eclipse podem fornecer uma visão sem precedentes sobre a composição atmosférica do planeta. Tais observações até à data têm fornecido algumas surpresas interessantes. Por exemplo, vários planetas extrassolares gigantes ricos em hidrogênio parecem apresentar uma baixa abundância de água na atmosfera em relação ao monóxido de carbono e/ou metano, e alguns parecem bastante ricos em carbono para os padrões solares<sup>[5]</sup>. A relação carbono-oxigênio (C/O) em um planeta fornece informações específicas sobre suas origens primordiais e evolução subsequente.

Moses e colegas de trabalho têm perseguido a ideia de que alguns dos exoplanetas descobertos até hoje tem a razão C/O maior do que o valor solar de ~ 0,55. Em particular, eles investigaram a influência da razão atmosférica C/O sobre a química, composição e espectros de planetas extrassolares gigantes.<sup>[5]</sup> Os resultados destes modelos indicam que a composição da atmosfera planetária pode mudar dramaticamente em função da relação C/O (ver Figura 2). Apesar do monóxido de carbono ser um dos principais

constituintes em Júpiteres quentes para todas as razões de C/O, moléculas como água e dióxido de carbono são muito mais abundantes quando  $C/O < 1$ , ao passo que o metano, acetileno e cianeto de hidrogênio pode tornar-se os principais constituintes para  $C/O > 1$ .



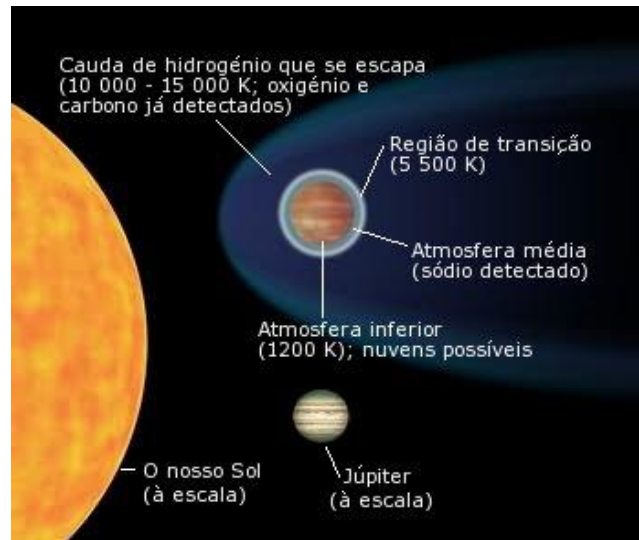
**Figura 2.** Abundâncias de equilíbrio termoquímico das principais moléculas espectralmente ativas em atmosferas de exoplanetas ricos em hidrogênio como uma função da temperatura em 0.1 bar, que é uma pressão típica dentro dos "fotosferas" infravermelhas dos Júpiteres quentes, para uma razão C/O (figuras à esquerda) versus uma larga razão C/O de 1.1 (figuras à direita), para metalicidades atmosféricas de 1x solar (figuras de topo) e 10 x solares (figuras de baixo). Figura de Moses et al. 2013, *Astrophys. J.*, 763, 25.

Observe a redução drástica na abundância de água em altas temperaturas em razões C/O altas em comparação com baixa razão C/O e o aumento da importância do CH<sub>4</sub>, HCN, e C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> a altas temperaturas para razões C/O altas em comparação com baixas razões C/O [5]. A partir deste estudo, eles enfatizam que a razão atmosférica C/O e metalicidade maior de exoplanetas fornecem pistas importantes sobre a formação e evolução de planetas gigantes dentro de nosso próprio sistema solar e, além disso, esperam que as futuras observações espectrais possam revelar exoplanetas gigantes ricos em carbono.

## 2.2 Atmosferas de Alguns exoplanetas

### 2.2.1 Atmosfera do Exoplaneta HD 209458 b

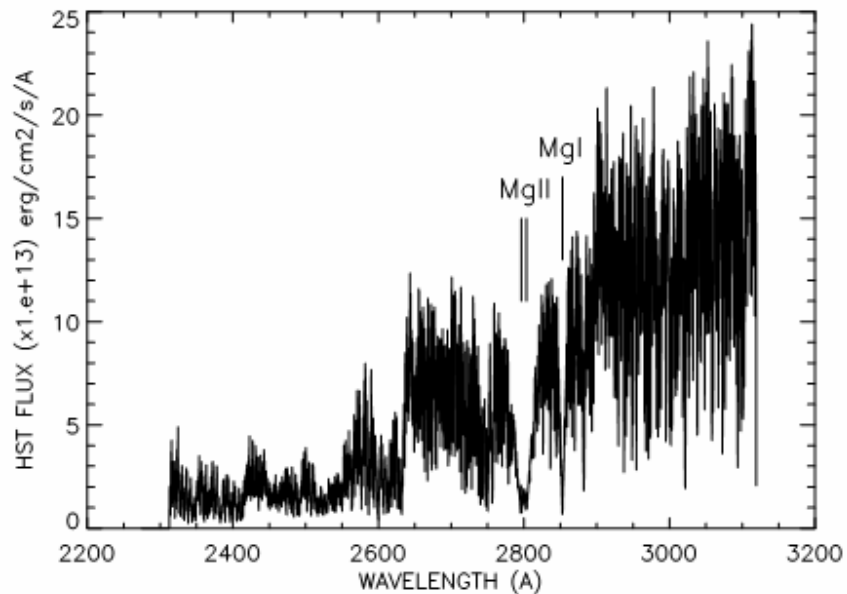
HD 209458 b é um planeta extrassolar que orbita uma estrela semelhante ao sol, denominada HD 209458 na constelação de Pegasus, a cerca de 150 anos-luz do sistema solar da Terra. A primeira tentativa de detecção de uma atmosfera de exoplaneta foi realizada através da detecção de sódio no trânsito desse Júpiter quente. Algumas outras espécies atômicas foram identificadas na evaporação da atmosfera superior do planeta, incluindo o hidrogênio, oxigênio e carbono (Vidal-Madjar et al., 2003). Observações complementares também foram exploradas na atmosfera de HD 209458 b, com as assinaturas de espécies moleculares detectadas usando espectrofotometria de trânsito ou espectro do lado diurno.



**Figura 3.** Ilustração da estrutura da atmosfera do exoplaneta HD 209458b. Crédito: NASA/ESA.

Observações em infravermelho próximo revelaram a presença de moléculas mais profundas na atmosfera deste exoplaneta com detecções de CO e H<sub>2</sub>O. As órbitas de Júpiteres quentes como esse estão tão perto de suas estrelas que eles são expostos a intensa radiação ultravioleta extrema (UVE) e a fortes ventos estelares, o que pode moldar suas atmosferas. As temperaturas elevadas provocam um rápido escape da atmosfera, o que implica que a termosfera superior é arrefecida principalmente por expansão adiabática.

Vidal-Madjar (et al. 2013) fez observações da atmosfera superior desse exoplaneta por meio de técnica de trânsito ultravioleta/óptico com observação H $\alpha$  da exosfera, revelando um escapamento da atmosférico desse Júpiter quente. Detalhes dessa observação pode ser visto em Vidal-Madjar et al. (2013). Os espectros desse experimento foram extraídos e um exemplo desta extração espectral é vista na Figura 4.

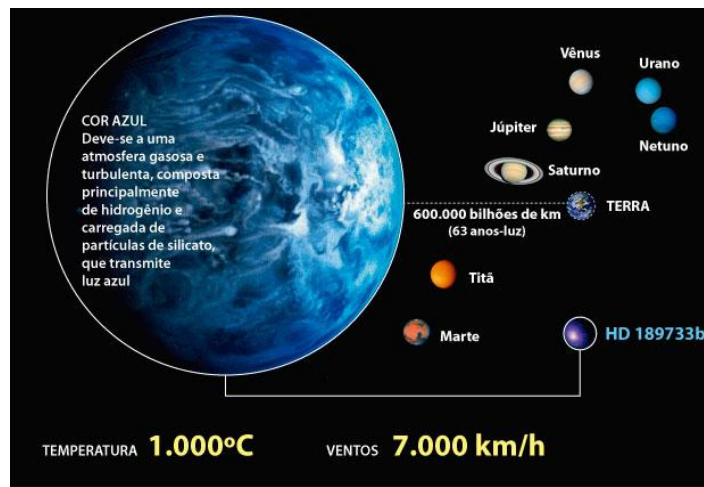


**Figura 4.** Espectro de HD 209458 em toda a faixa espectral observada. Muitas assinaturas espectrais são vistas no espectro estelar que inclui o Mg II duplicado próximo de 2.800 Å, suas emissões de núcleo devido a cromosfera estelar e a linha forte de Mg I próxima de 2850 Å.



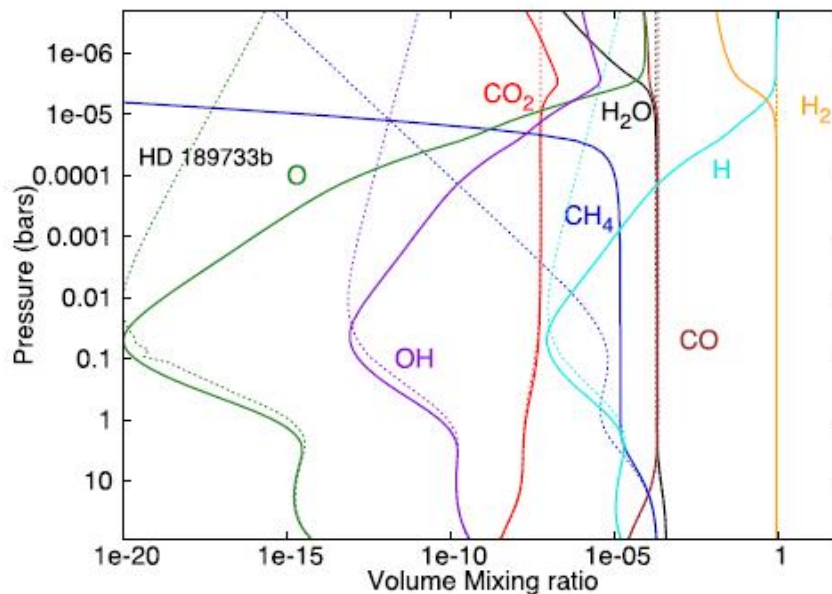
## 2.2.2 Atmosfera do Exoplaneta HD 189733b

HD 189733b é um planeta extrassolar gigante com a existência de vapor de água em sua atmosfera. Esse exoplaneta tem uma cor azul forte devido à dispersão de luz azul por partículas de silicato em sua atmosfera.



**Figura 5.** Imagem ilustrativa do Exoplaneta HD 189733b com algumas de suas características.

Miguel e Kaltenegeger (2014) calcularam um modelo que liga os dados astrofísicos observáveis (distância orbital e temperatura estelar eficaz) com a composição atmosférica esperada para atmosferas de exoplanetas gigantes quentes, entre eles o HD 189733b. O modelo leva o efeito da fotoquímica induzida por radiação estelar, considerando equilíbrio e desequilíbrio químico, bem como a difusão vertical e difusão molecular. O modelo atmosférico térmico e fotoquímico apresentada nesse artigo pode ser aplicado para observações planetárias atuais e futuras para sugerir que espécies atmosféricas observáveis são esperadas para atmosferas de exoplanetas dominadas por H. As proporções de mistura no modelo utilizados por esses autores para o HD 189733b são vistas na Figura 6, com CO, H<sub>2</sub>O, e H sendo os principais gases no seu ambiente.

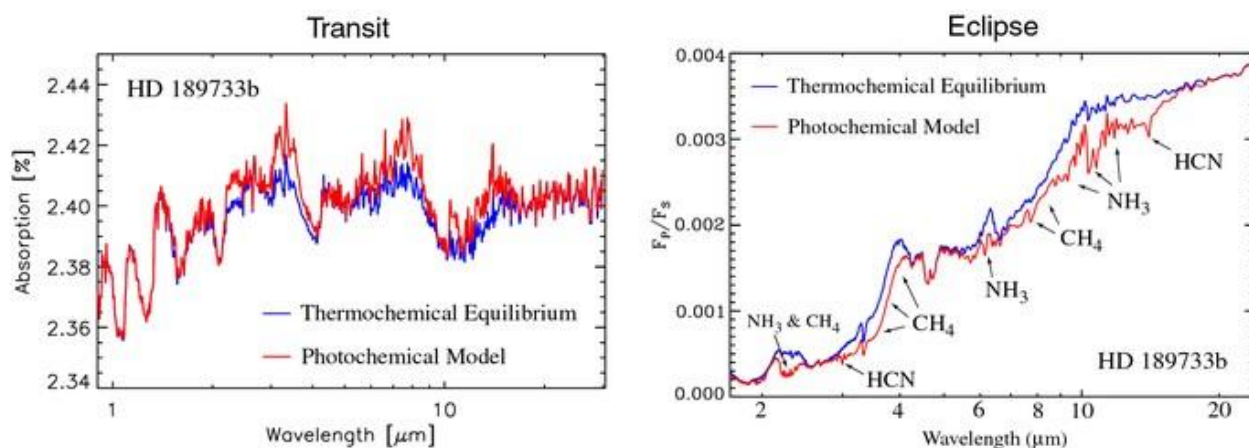


**Figura 6.** Razão de mistura vs. pressão para o HD 189733b realizado por Miguel e Kaltenegeger (2014). As linhas sólidas mostram os resultados quando o desequilíbrio químico devido à mistura vertical e fotoquímica é incluído, enquanto as linhas pontilhadas mostram as proporções de mistura em equilíbrio.

Segundo esses autores, temperatura e fluxo de UV afetam espécies químicas na atmosfera desse exoplaneta. Eles concluíram que efeitos são devidos à temperatura e às características estelares, mostrando as espécies mais afetadas em cada caso.

O Exoplaneta HD 189733b foi também estudado por um modelo de equilíbrio termoquímico e modelos que incluem cinética fotoquímica/termoquímicos e transportes de Moses e colegas de trabalho para investigar quantitativamente como o desequilíbrio químico afeta a composição e propriedades espectrais observáveis de planetas extrassolares<sup>[6]</sup>. Moses e colaboradores acham que fotoquímica e extinção induzida pelo transporte pode alterar significativamente os perfis verticais dos constituintes atmosféricos sobre exoplanetas em trânsito. Em primeiro lugar, a composição da atmosfera pode ser prevista através da suposição de equilíbrio termoquímico, que só depende da composição elementar em grandes quantidades e a temperatura e a pressão em qualquer ponto dentro da atmosfera. Esta suposição funciona melhor para ambientes muito quentes, a temperaturas superiores a  $\sim 2.000$  K. Para as atmosferas frias irradiadas por fontes externas, como a sua estrela hospedeira, processo de desequilíbrio químico como fotoquímica e extinção induzida pelo transporte pode desempenhar um papel importante em influenciar as propriedades atmosféricas.

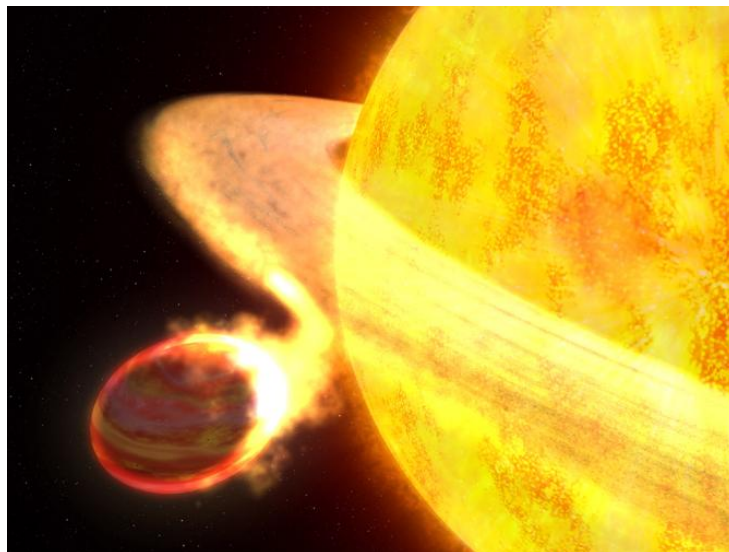
Espécies com ligações moleculares fortes ou que são eficientemente reciclados, como  $H_2O$ ,  $CO$  e  $N_2$ , são menos afetadas por fotoquímica do que espécies com ligações fracas, como  $CH_4$  e  $NH_3$ . Desequilíbrio químico também leva a um aumento de espécies atômicas  $O$ ,  $C$ , e  $N$ , alguns hidrocarbonetos insaturados, como o acetileno ( $C_2H_2$ ) e algumas nitrilas como  $HCN$ .<sup>[6]</sup> Os efeitos de um desequilíbrio químico em espectros sintéticos a partir de planeta "quente" (modelo a partir do HD 189733b) são mostrados na Figura 7.



**Figura 7.** O efeito de desequilíbrio químico em espectros sintéticos do trânsito primário (esquerda) e eclipse secundário (direita) de HD 189733b. As curvas azuis representam os resultados do modelo de equilíbrio termoquímico, enquanto que as curvas vermelhas são resultados de modelos que incluem cinética fotoquímico/termoquímico e transportes. Moléculas de desequilíbrio responsáveis por bandas de absorção no espectro de emissão são rotuladas especificamente. Crédito: Moses et al. (2011). Fonte:

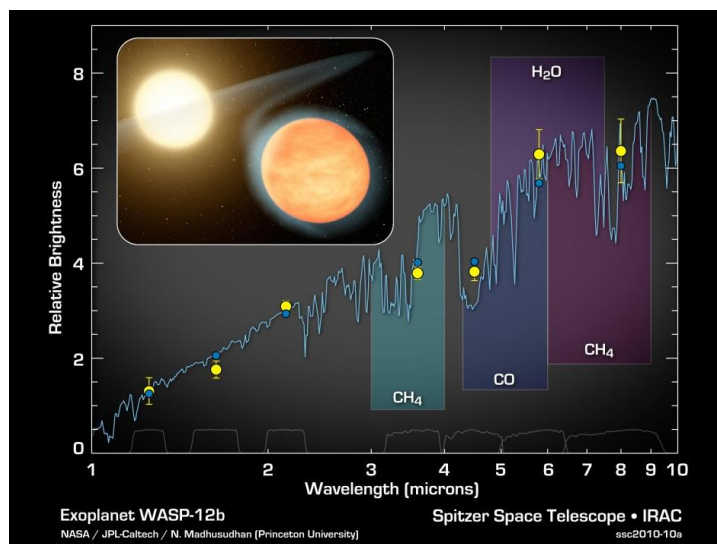
### 2.2.3 Atmosfera do Exoplaneta WASP-12b

WASP-12b é um planeta extrassolar que orbita a estrela WASP-12. WASP-12b está tão perto de WASP-12 que as forças de maré da estrela estão distorcendo-o em uma forma oval e puxando sua atmosfera a uma taxa de cerca de  $10^{-7} M_J$  (cerca de 189 quatrilhões de toneladas) por ano<sup>[4]</sup>. Devido a proximidade de sua estrela, a temperatura é de cerca de 2 500 K, sendo assim um dos planetas extrassolares mais quentes.



**Figura 8.** Conceito artístico do exoplaneta WASP-12b. Crédito: NASA / ESA / G. Bacon.

Sugere-se que esse exoplaneta poderia abrigar grafite, diamante, ou até mesmo uma forma mais exótica de carbono debaixo de suas camadas gasosas. Dados do Telescópio Espacial Spitzer da NASA indica a presença de moléculas tais como CO, CH<sub>4</sub>, traços de H<sub>2</sub>O. Madhusudhan et al. (2011) relatou que observações do telescópio espacial Spitzer mostram fortes características de absorção de CH<sub>4</sub> na faixa de 3,6 um e CO em 4,5 um, ao passo que as características mais fracas foram observadas faixa de 5,8 um, onde absorve H<sub>2</sub>O.

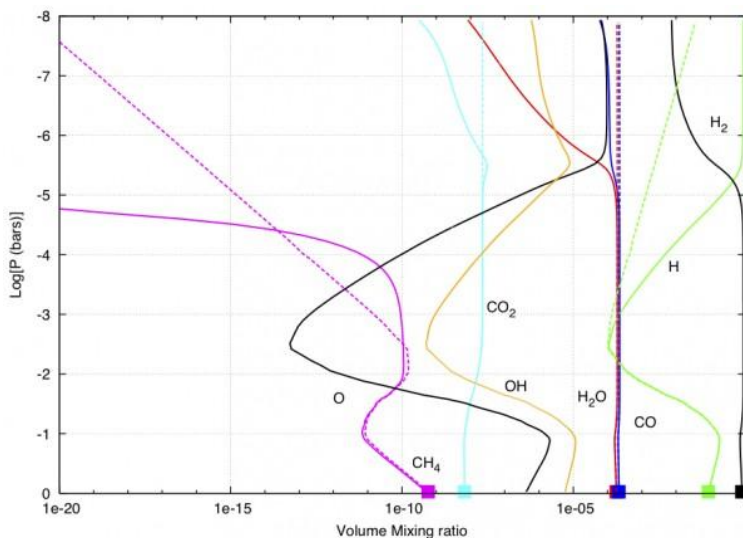


**Figura 9.** Este lote de dados do Telescópio Espacial Spitzer da NASA indica a presença de moléculas no planeta WASP-12b. Crédito de imagem: NASA

Isso sugere que o CH<sub>4</sub> e CO são dominantes e que H<sub>2</sub>O é menos abundante na atmosfera de WASP-12b. Assumindo equilíbrio químico e energia solar  $[C]/[O] = 0,54$ , H<sub>2</sub>O e CO deveriam ser as espécies dominante e CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> menos abundante. Portanto, uma razão solar  $[C]/[O]$  está descartada. Concluem que, para explicar a abundância observada de CH<sub>4</sub> e CO, WASP-12b deve ter  $[C]/[O] \geq 1$ , o que implica que ele é um planeta rico em carbono.

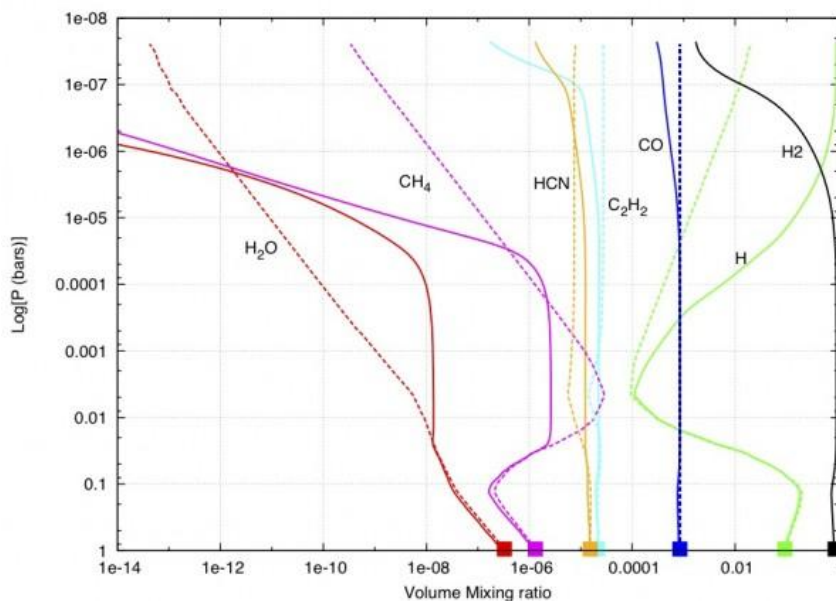
Kopparapu et al. (2011) utilizou um modelo 1D para estudar como a abundância de moléculas que contêm oxigênio e carbono são afetados pela fotoquímica e desequilíbrio químico. Os autores consideram tanto a razão C/O uma vez solar quanto a duas vezes solar.

Para uma razão solar C/O, oxigênio mais disponível está contido em água e monóxido de carbono. Ambas as espécies permanecem em valores de equilíbrio até abaixo de 10-15 bar de pressão, onde a água é fotolizada. Este processo conduz as partidas de equilíbrio químico. Fotólise da água produz moléculas OH, que ajuda na produção de dióxido de carbono, diminuindo a abundância de água em relação ao CO e CO<sub>2</sub> na atmosfera superior. A Figura 10 mostra o volume de razão de mistura como uma função da pressão para um razão C/O uma vez solar.



**Figura 10.** Volume de razão de mistura como uma função da pressão para um razão solar C/O.

Para uma razão C/O duas vezes solar, toda a atmosfera está esgotada em água e reforçada em metano e monóxido de carbono, o que confirma as hipóteses extraídas das observações. A transição entre o domínio da água e CO para o metano e CO acontece muito abruptamente na razão  $[C] / [O] = 1$ . Baixa abundância de água significa que a produção OH é insignificante e as reações que produzem C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> e HCN se tornam mais importantes, tanto em regiões de equilíbrio e fotoquímicas. C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> é mais abundante do que água ou metano e assim é fotolizada mais rapidamente do que estas moléculas. Também tem uma maior profundidade óptica e uma característica que se sobrepõe com a banda de metano em 7-8 micrometros, e por isso tem que ser considerada em observações.



**Figura 11.** Volume de razão de mistura como uma função da pressão para uma razão C/O duas vezes solar.



Em geral, este estudo confirmou que uma razão C/O alta é necessária para explicar o espectro observado de WASP-12 b medido por Madhusudhan et al. (2011). Eles também concluíram que fotoquímica é importante para considerar pressões abaixo de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  bar, embora se possa penetrar para pressões mais elevadas, se o coeficiente de difusão de vento for maior.

## Referências

Bailey, J., Publications of the Astronomical Society of Australia(PASA), Vol. 31, e043, 36 pages (2014)

Encrenaz, T. - **Planetary Atmospheres: From Solar System Planets to Exoplanets**, - Lectures in Astrobiology, Volume II Exoplanets, disponível em <http://exoplanet.eu/pictures.html>

Kopparapu, R., et al. 2011.

Madhusudhan, N. et al. 2011, Nature, 469, 64.

Madhusudhan, N. et al. 2011b, arXiv:1109.3183.

Miguel, Y., Astrophys. J. 780,166, 2014.

Moses et al., Astrophys. J., 737, 15.

Vidal-Madjar, A., et al., A&A 560, A54, 2013.

### Site Consultados

[1 ] <http://exoplanet.eu/>

[2] <http://www.nasa.gov/topics/universe/features/exoplanet20100203-b.html>

[4] <http://pt.wikipedia.org/wiki/WASP-12b>

[5] <http://ceps.space-science.org/atmospheric-c-o-ratio.html>

[6] <http://ceps.space-science.org/disequilibrium-chemistry.html>

[7] <http://exoplanets.ch/research/exoplanet-atmospheres/>

[8]<http://www.nasa.gov/press/2014/september/nasa-telescopes-find-clear-skies-and-water-vapor-on-exoplanet/>