

Prof. Dr. Sergio Pilling

**Alunos: Alexandre Bergantini de Souza
Evelyn Cristine de Freitas Marques Martins
Fredson de Araujo Vasconcelos**

Aula 9 - Exoplanetas. Métodos de detecção.

1. Introdução

Um exoplaneta é um planeta que orbita uma estrela (exceto o sol), um remanescente estelar, ou uma anã marrom. Até 24 de Abril de 2015 havia mais de 1915 exoplanetas detectados em 1210 sistemas planetários, incluindo 481 múltiplos sistemas planetários¹³.

Segundo a União Astronômica Internacional, planeta é um corpo que orbita uma estrela, e é grande o suficiente para possuir uma gravidade que supere as forças do corpo rígido, assumindo uma forma em equilíbrio hidrostático, ou seja, a massa tem que ser “grande suficiente” para possuir uma gravidade que deixe a forma do objeto arredondado, além de serem corpos celestes que limpam os arredores de sua órbita. Neste sentido, exoplanetas são planetas que estão fora do sistema solar¹⁵.

A descoberta dos primeiros exoplanetas foi anunciada em 1989, quando variações nas velocidades radiais das estrelas HD 114762 e Alrai (γ Cephei) foram explicadas como efeitos gravitacionais causados por corpos de massa sub-estelar, possivelmente gigantes gasosos de massas 11 MJ e 2-3 MJ, respectivamente¹³. Contudo, os dados não eram robustos o bastante para confirmar a presença de um planeta. A confirmação veio alguns anos depois, quando técnicas aperfeiçoadas confirmaram que Alrai era realmente um exoplaneta.

O primeiro planeta extra-solar descoberto ao redor de uma estrela da seqüência principal (51 Pegasi) foi anunciado em 6 de Outubro de 1995 por Michel Mayor e Didier Queloz da Universidade de Genebra. O primeiro sistema a ter mais de um planeta detectado foi o ν Andromedae. A maioria dos planetas detectados possuem órbitas muito elípticas e são de grande massa, geralmente superior à de Júpiter¹⁴.

Dessa forma, a busca por exoplanetas tornou-se o campo da Astrofísica que mais cresceu¹⁵, uma vez que caracterizar estes objetos permitem avanços no entendimento de como ocorreu o processo de formação e evolução do sistema planetário.

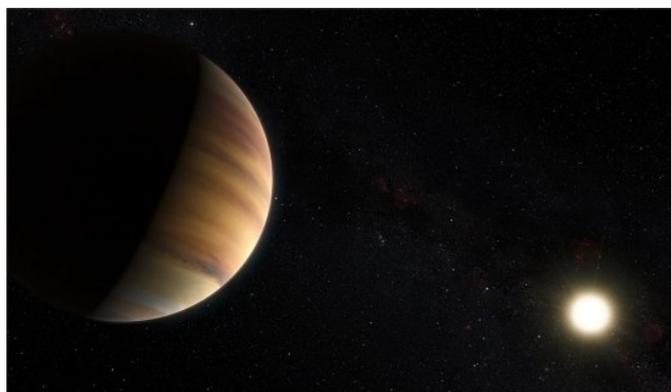


Figura 1. Ilustração do Exoplaneta 51 Pegasi b, que orbita uma estrela a cerca de 50 anos-luz de distância da Terra na constelação de Pégaso. Imagem: ESO/M.Kornmesser/NickRisinger. Fonte: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=primeira-luz-visivel-detectada-diretamente-exoplaneta&id=010130150423>.

Nesta aula estudaremos os exoplanetas, destacando as missões e as técnicas mais utilizadas para a detecção desses corpos fora do sistema solar, bem como definiremos biomarcadores e suas contribuições para os indícios de sinal de vida em exoplanetas.

2. Métodos de detecção de exoplanetas

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. Apesar da dificuldade, já existem imagens diretas de planetas, obtidas em infravermelho. Estas foram possíveis utilizando diversas técnicas, como o uso de coronógrafos, instrumentos que realizam eclipses artificiais da estrela. No entanto, os astrônomos têm vindo a desenvolver vários métodos de detecção de exoplanetas¹⁶. As principais técnicas utilizadas para detecção de exoplanetas são:

- Astrometria
- Medida de Velocidade Radial (Efeito Doppler)
- Fotometria (Trânsito de Planetas)
- Cronometria da chegada de Pulsos (pulsares)
- Observação Direta
- Micro-lentes Gravitacionais

2.1 – A Técnica de Astrometria

Muitos dos exoplanetas são grandes o bastante para provocar movimentos observáveis na estrela que ele órbita, em outras palavras, provocando um deslocamento da estrela ao redor do centro de gravidade do sistema. A Figura 2 ilustra o movimento de um planeta e de uma estrela ao redor do centro de gravidade do sistema formado por eles:

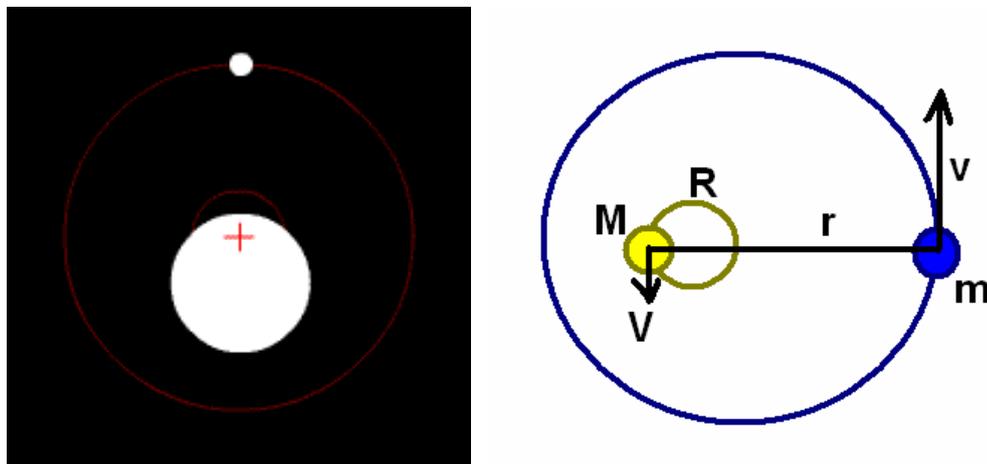


Figura 2. Movimento de um sistema planetário.

Obs: R , r , V , v são coordenadas e velocidades baricêntricas (em relação ao centro de massa do sistema).

O método da Astrometria envolve a medição do movimento próprio da estrela em busca dos efeitos causados por seus planetas; no entanto, variações no movimento próprio da estrela são muito pequenas, o que gera dificuldades extras para detecção e confirmação de exoplanetas por este método; além disso, outro fator importante é que as órbitas dos sistemas planetários a serem estudados devem se apresentar quase perpendicularmente a nossa linha de visada (face-on). Essa técnica é extremamente sensível para detecção de corpos de alta massa e razoavelmente afastados da sua estrela pois, como pode ser visto na equação acima, R ou V são proporcionais ao produto $m \times r$. Sendo assim, a técnica de astrometria permitiu a

descoberta de poucos exoplanetas (devido à pequena massa dos mesmos), mas de muitos sistemas de estrelas com uma anã marrom a mover-se ao seu redor (Mello, 2010).

2.2 A Técnica de Medida de Velocidade Radial (Efeito Doppler)

Uma maneira eficiente de investigar o movimento de uma estrela consiste em usar o efeito Doppler para medir a velocidade com que se desloca. Isto é feito medindo-se as variações nas posições das linhas do espectro da estrela. Esta técnica é a responsável pela quase totalidade das descobertas feitas (Mello, 2010). A velocidade medida resulta da composição de dois movimentos: o movimento da estrela ao redor do centro de gravidade do sistema - uma oscilação parecida com uma senóide - e o movimento de todo o sistema no espaço - uma constante.

De fato, o efeito Doppler mede a projeção sobre a linha de visada, dá a velocidade da estrela em relação ao observador, que também está em movimento, o que tem que ser considerado detalhadamente na análise das medidas feitas. As figuras abaixo ilustram como o comprimento de onda da radiação eletromagnética emitida por uma estrela se altera por causa do efeito Doppler:

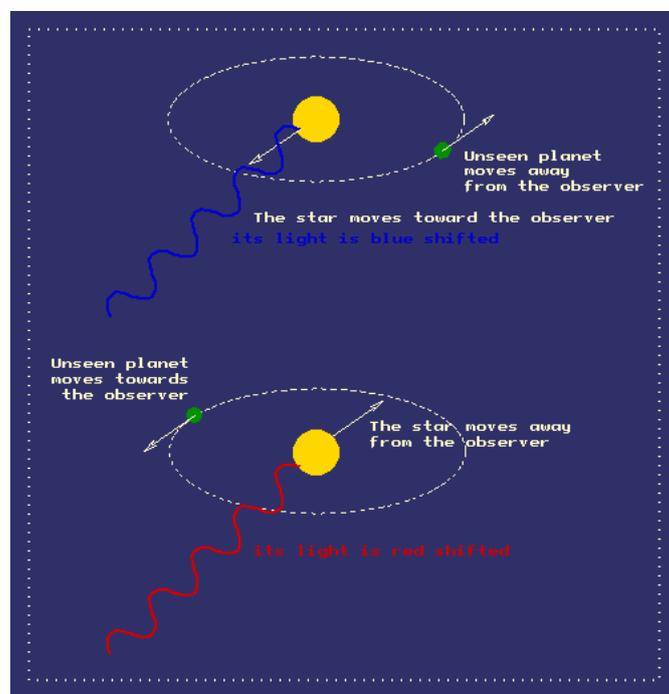


Figura 3. Esquema de como funciona o método da velocidade radial através do Efeito Doppler. Fonte: <http://www.cfa.harvard.edu/afoe/doppler>

Uma grande dificuldade deste método é que o sistema planetário precisa estar numa posição relativa que chamamos de edge-on, ou seja, quase de perfil. Obviamente nem todos os sistemas estudados estão nessa posição relativa, e precisam, portanto, serem abordados por um outro método.

2.3 Fotometria (Trânsito de Planetas)

Outra técnica importante para a busca de planetas extra-solares é a fotometria das estrelas. Se ao orbitar uma estrela o exoplaneta apresenta uma órbita vista de frente (edge-on) em relação à Terra, em outras palavras, se o planeta se interpõe entre a estrela e a Terra, ocorre uma diminuição da quantidade de luz vinda da estrela, e que é medida na Terra similar a um eclipse. A observação dessa diminuição repetidas vezes permite identificar sua causa como sendo o trânsito de um planeta em frente à estrela. Essa técnica está sendo usada para a busca de exoplanetas a partir de telescópios espaciais, como por exemplo o COROT. A Figuras 4 mostra um exemplo da diminuição do brilho de uma estrela pela passagem de um planeta entre a estrela e a Terra.

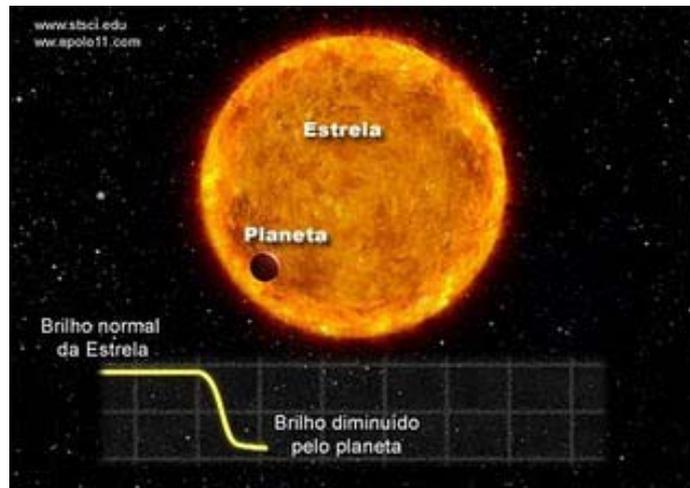


Figura 4: imagem artística do trânsito de um planeta entre a Terra e uma estrela. Fonte: <http://bit.ly/9qEMFI>

2.4 Cronometria da chegada de Pulsos (pulsares)

Pulsares são estrelas de nêutrons em rotação, emitindo rádio-ondas na direção do seu eixo magnético. Essa radiação é detectada por rádio-telescópios sempre que o eixo magnético do pulsar estiver apontando na nossa direção. Em geral os pulsares dirigem seu feixe de rádio-ondas para nós em períodos da ordem de milissegundos. Quando existe algum corpo orbitando o pulsar, seja um exoplaneta ou não, a frequência com que esses pulsos chegam à Terra é afetada pela velocidade relativa da fonte que os emite (efeito Doppler).

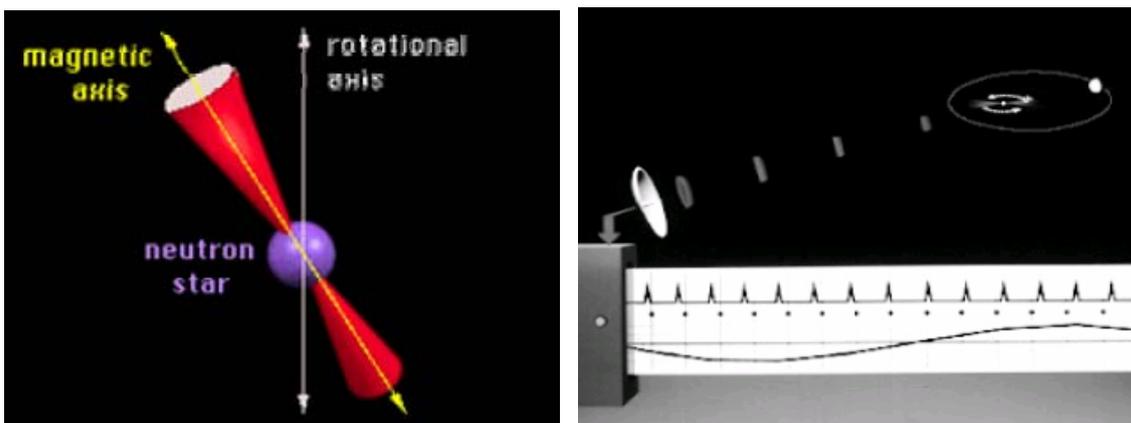


Figura 5: Esquerda) Esquema de uma estrela de Neutron (Pulsar). Direita) Uma Simulação de posição para detecção de pulsos.

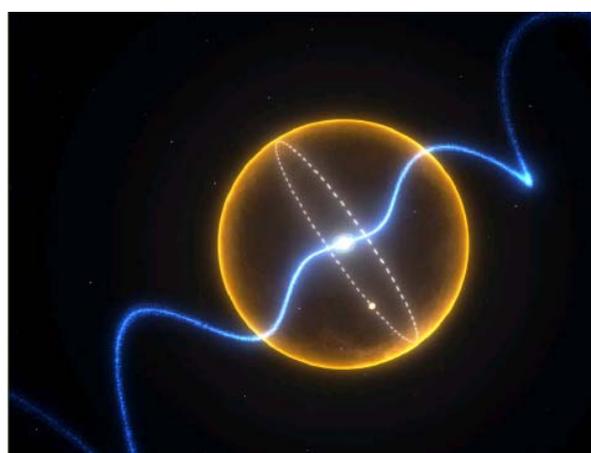


Figura 6: Simulação de planeta orbitando um pulsar e afetando o feixe de rádio-ondas.

2.5 Efeito de Microlente gravitacional

O efeito de microlente gravitacional acontece quando, num sistema planetário, os campos gravitacionais do planeta e da estrela agem de modo a magnificar a luz de uma estrela distante ou promover a distorção do feixe luminoso emitido por essa estrela. Para que o efeito ocorra, o sistema planetário deve passar quase diretamente entre a estrela distante e o observador. Em outras palavras seria semelhante a um “eclipse” promovido por um sistema planetário em uma estrela de fundo. Uma vez que esses eventos são raros, um número muito grande de estrelas distantes deve ser continuamente monitorado de modo a permitir a detecção de planetas a uma taxa razoável. Devido ao movimento da Terra e dos corpos celestes em geral, uma dada configuração de microlente gravitacional só ocorre uma vez, portanto é impossível repetir ou reconfirmar este experimento. Apesar disto, este é o método mais promissor para detecção de planetas localizados entre a Terra e o centro da galáxia, já que as partes centrais da galáxia fornecem um grande número de estrelas distantes de fundo. O efeito da microlente pode ser visualizado na figura 7.

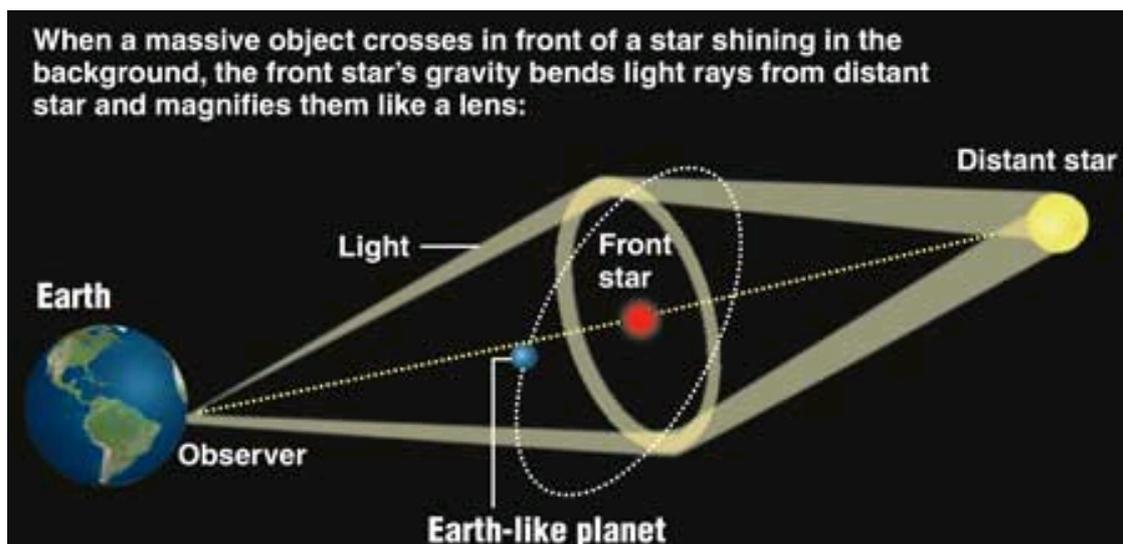


Figura 7: Simulação do efeito Microlente gravitacional causado por um sistema planetário.

3 - Algumas propriedades detectadas em exoplanetas

Após a descoberta de vários exoplanetas orbitando estrelas próximas, um sistema de classificação foi adotado para diferenciar os tipos de corpos encontrados, de acordo com a massa:

- **Exoplaneta:** $massa < 13 M_J$
- **Anã marron:** $13 M_J < massa < 74 M_J$
- **Estrela:** $massa > 74 M_J$

O limite entre exoplanetas e anãs marrons refere-se ao fato de que essas últimas já terem iniciado o ciclo de ignição nuclear de deutério. Acredita-se que a duração da fase de queima de deutério nas anãs marrons dura até cerca de dez milhões de anos, após o qual a estrela esfria, até tornar-se uma rocha gelada. Segundo Encrenaz (2003), dos dados obtidos com os exoplanetas descobertos, as seguintes características principais podem ser deduzidas:

- Uma grande fração de estrelas próximas têm ao menos um companheiro massivo: $> 1 M_J$ à 1 UA, e $> 2 M_J$ à 5 UA. Cerca de 5% dessas estrelas tem uma companheira entre 0,5 e 5 M_J em uma distância de menos de 2.5 UA.
- Parece haver uma correlação entre o número de planetas em torno de estrelas e a sua metalicidade: a proporção de elementos pesados em estrelas que possuem planetas parece ser maior do que a de estrelas sem planetas.

- Devido à dificuldade em se detectar corpos de baixa massa, a distribuição de massa dos exoplanetas descobertos tende para corpos com massas maiores que 10MJ, mas um número cada vez maior de corpos de menor massa têm sido descobertos.
- Há um acúmulo de grandes exoplanetas com períodos de 3 dias, e baixa excentricidade, com casos raros de objetos com períodos mais curtos. Exoplanetas com períodos longos tendem a ter maiores excentricidades. Há raros corpos na região de 30-50 MJ, o que tem sido chamado de “deserto das anãs marrons”.

4. Grupos de pesquisa na descoberta de exoplanetas

4.1 Missão Corot

Lançado em 27 de dezembro de 2006 e desenvolvido pela Agência Espacial francesa (CNES) juntamente com vários parceiros internacionais, inclusive o Brasil.

A sonda, pertencente à série Proteus, é equipada com um telescópio afocal de 27cm de diâmetro, e uma câmera com 4 CCD's, sensíveis o bastante para detectar pequenas variações na intensidade da luz vinda das estrelas.

Os instrumentos do COROT tornam possível, com um método chamado sismologia estelar, conhecer a estrutura interna das estrelas, assim como detectar planetas extrasolares pela observação de micro-eclipses periódicos que ocorrem quando um planeta transita em frente da estrela do seu sistema planetário.

A missão tem como objetivo:

- Procura de planetas extra-solares, em particular planetas telúricos.
- Detecção e estudo de oscilações estelares (astrossismologia);

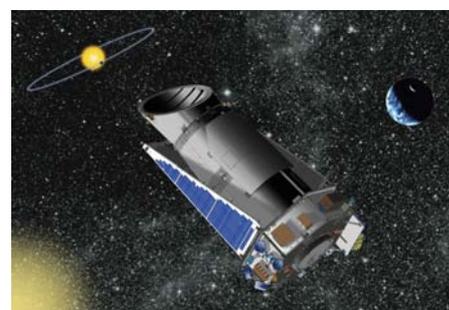
Resultados: Vários planetas descobertos, aprimoramento das técnicas de detecção, dados para estudo de curva de luz de sistemas planetários e etc

4.2 Missão Kepler

Lançada em 2009, a sonda Kepler consiste em um observatório espacial projetado pela NASA que procura por planetas extrasolares, além de explorar suas estruturas e diversidades desses sistemas planetários.

Para esta finalidade, a sonda deverá observar cerca de 100 000 estrelas por um período de quatro anos. Para descobrir exoplanetas, a missão Kepler utiliza-se do método de fotometria, a fim de detectar alguma ocultação periódica de uma estrela por um de seus planetas.

A sonda Kepler não permanece em órbita da Terra, mas sim em uma órbita de perseguição à órbita solar da Terra, a fim de que a Terra não oculte estrelas que estejam sendo estudadas pela sonda. O seu principal instrumento é um fotômetro de 0,95 m de diâmetro. Para realizar sua missão, a sonda Kepler deverá bater uma foto da região de interesse a cada três segundos.



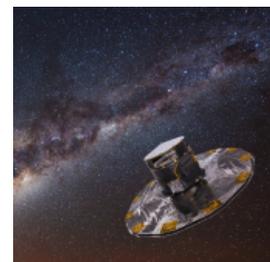
4.3 Missão Darwin

A sonda Darwin é projeto de sonda espacial não tripulada, proposta pela Agência Espacial Européia para ser lançado em 2015 com o objetivo de lançar um conjunto de telescópios orbitais a fim de detectar planetas próximos a outras estrelas e analisar sua atmosfera para verificação de assinaturas químicas de vida.



4.4 Missão Gaia

É uma ambiciosa missão com o objetivo de montar um gráfico tridimensional da nossa galáxia, revelando seu processo de formação, evolução e sua composição. Combinando esses dados com as informações astrofísicas de milhares de estrelas, incluindo a detecção e classificação orbital de sistemas planetários. Previsão de lançamento: 2013.



4.5 Missão SIM Lite

É um projeto da Nasa, que pretende lançar Observatório astrométrico com um interferômetro Michelson que tem como objetivo identificar planetas terrestres nas zonas habitáveis de suas estrelas, determinar a massa e as luminosidades de estrelas, anãs marrons, estrelas de Nêutrons e buracos negros, além do estudo da determinação da idade da Via Láctea, distribuição de matéria escura, etc.

5 - Dificuldades na detecção de exoplanetas

Desde quando os primeiros exoplanetas foram descobertos, nos anos de 1990, astrônomos trabalham para aumentar os limites da tecnologia necessária para detectar mais sistemas planetários com planetas semelhantes à Terra. Discutimos aqui algumas das dificuldades tecnológicas encontradas atualmente na busca por exoplanetas, dificuldades essas que pode ser basicamente de duas naturezas: limitações tecnológicas e limitações observacionais.

Em termos de tecnologia, os astrônomos estão limitados pelo poder de resolução dos telescópios. Pelo método da visualização direta, isso implica que, quanto menor o telescópio, mais difícil é observar o planeta separadamente de sua estrela hospedeira. Na astrometria, equipamentos pouco potentes não permitem determinar com boa precisão a posição das estrelas, então, qualquer pequena oscilação produzida pela passagem de um planeta invisível, não será visível.

Na técnica de velocidade radial, uma limitação tecnológica é o poder de resolução das fendas utilizadas em espectroscopia. Astrônomos têm que estar aptos a separar luz em uma resolução bastante alta, para assim observar o pequeno desvio Doppler que um planeta induz em sua estrela hospedeira.

O segundo tipo de limitação é relacionado ao tempo em que estamos procurando por exoplanetas com a atual tecnologia, pois o tempo mínimo necessário de observação, para que possamos concluir que o efeito de um dado planeta sobre sua estrela hospedeira indique que ali realmente existe um planeta, pode ser muito grande. Para um planeta com a órbita como a de Júpiter, são necessários pelo menos 12 anos terrestres de observação, e para um planeta como Saturno, pelo menos 29 anos terrestres de observação.

Dadas essas dificuldades, um estudo feito por Lawson et al. (2004), com objetivo de prever os limites teóricos na detecção de exoplanetas, indica que a descoberta de planetas semelhantes à Terra ainda está além do que a tecnologia atual pode prover. O resumo de tal estudo pode ser visto na Figura 8, onde cada ponto representa um exoplaneta conhecido. Os círculos azuis com letras dentro representam 7 planetas em nosso Sistema Solar. A barra verde, no centro inferior da figura, representa a zona de habitabilidade.

Cada uma das diferentes linhas do gráfico representa os limites de várias técnicas de observação. Qualquer coisa acima das linhas deve ser possível de ser observado com a respectiva técnica descrita na figura. Qualquer coisa abaixo das linhas indica que está abaixo do limite de detecção.

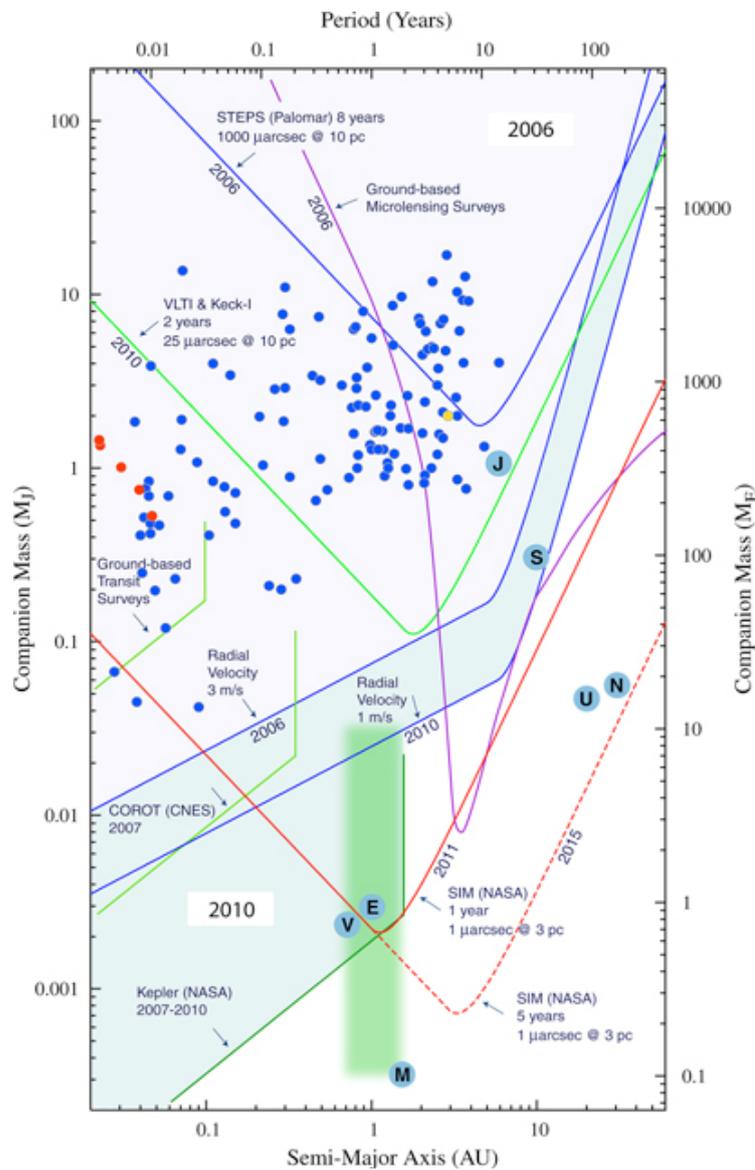


Figura 8: Image shows the current and future theoretical limits of finding extrasolar planets in terms of their distance from their parent star vs. mass. Figure from Lawson, Unwin, & Beichman (2004).

6 – Exoplanetas e a possibilidade de vida extraterrestre

6.1 Zona de habitabilidade

Um dos principais ingredientes para a vida como a conhecemos é a água líquida. Existe água como um líquido entre 273K e 373K, considerando alguns fatores como a pressão. A região do sistema solar (ou qualquer outro sistema planetário), onde a temperatura está nesse intervalo é chamada de **zona habitável**¹⁷.

As temperaturas em volta de uma estrela definem a sua zona de habitabilidade. Os planetas que têm a sua órbita muito perto da estrela são quentes demais para que as moléculas possam resistir e, deste modo para as interações complexas produzirem vida. Ao contrário, os planetas que estão muito longe da estrela não poderão manter a vida baseada em água no estado líquido. Assim é improvável que as moléculas complexas da vida se formem aí¹⁸. Na imagem abaixo, a banda azul representa a localização da zona habitável. Observem, como esperado, que para baixa massa, estrelas frias da região é mais perto da estrela, e para o aumento de massa, as estrelas mais quentes, a região está mais distante da estrela. Neste exemplo particular, a Terra parece ser precisamente no meio da zona de habitação para o Sol

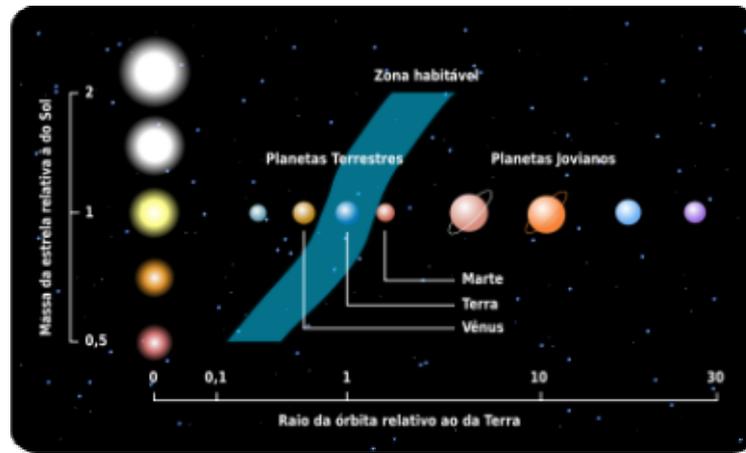


Figura 9. Escala de uma região do espaço que teoricamente poderia haver zonas habitáveis composta por estrelas de diferentes tamanhos (nossosistema solar está no centro) ¹⁹.

A zona habitável é a região em torno de uma estrela onde um planeta tem pressão atmosférica suficiente para manter a água líquida em sua superfície. Um *candidato planeta habitável* implica um planeta terrestre dentro da zona, e com condições mais ou menos comparáveis às da Terra (ou seja, um análogo da Terra) e, portanto, potencialmente favoráveis à vida. Apenas cerca de uma dúzia de planetas foram confirmados na zona habitável, mas a nave espacial Kepler identificou mais 54 candidatos. Estimativas sugere que há "pelo menos 500 milhões de" tais planetas na Via Láctea²¹.

6.2 Exoplanetas com Potencial para abrigar vida.

É possível que diversos planetas extra-solares também estejam em zonas estelares temperadas ou habitáveis, ou seja, situam-se em órbitas à volta das suas estrelas que têm condições favoráveis ao surgimento de vida. Tal parece ser o caso dos planetas denominados Gliese 581 d, Gliese 581 c e Gliese 581 g descobertos pela Equipa de Missão do Observatório Espacial Kepler, entre outros exoplanetas conforme podemos ver na figura a seguir.

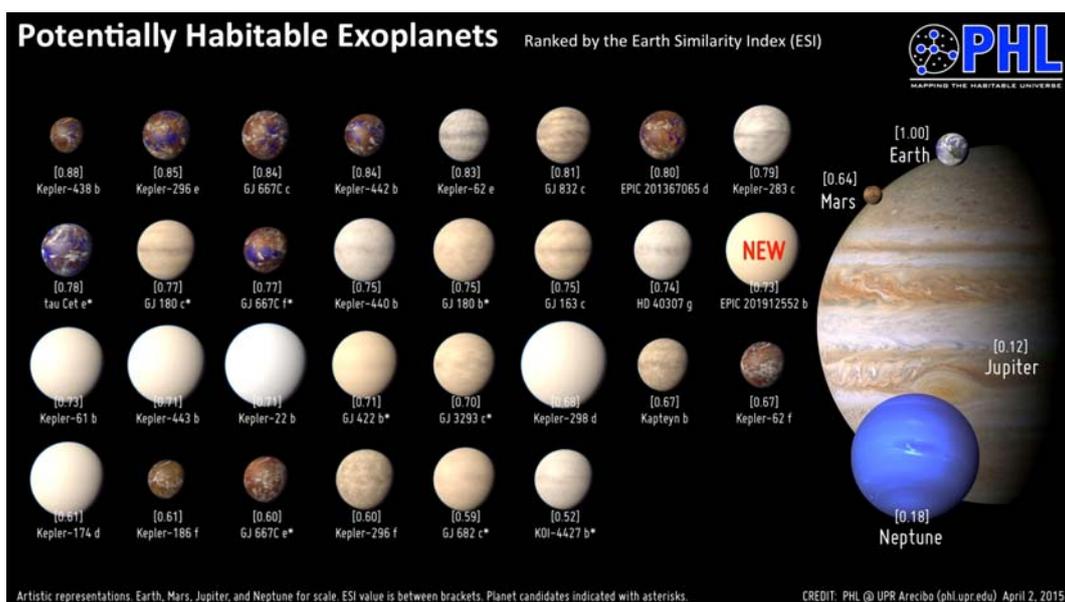


Figura 10. Representações artísticas de exoplanetas potencialmente habitáveis.

Também existe muita probabilidade de vida em outras super-Terras como: Gliese 163 c (embora possa não ser muito complexa), Gliese 667 Cc, Kepler-22b, HD 40307 g, HD 85512 b e mais alguns planetas²². Existe também planetas gigante gasosos na zona habitável, mas como são gasosos não tem crosta terrestre o que impossibilitava a existência de vida. Porém visto que alguns planetas gigantes gasosos são maior e com maior massa que Júpiter, o maior planeta do sistema solar, poderiam ter luas com dimensões e gravidade comparáveis à da Terra que tivessem água no estado líquido; como é o caso de: 55 Cancri f, Gliese 876 b, Gliese 876 c, HD 28185 b, HD 99109 b, Upsilon Andromedae d, entre outros¹⁹.

Um exoplaneta com grande possibilidade para abrigar vida citado acima é o Gliese 581c que está a 20 anos-luz da Terra. O planeta foi descoberto em 2007, utilizando o método de detecção de velocidade radial. Na época de sua descoberta foi o menor exoplaneta detectado em torno de uma estrela da seqüência principal. Gliese 581c orbita uma anã vermelha, a estrela Gliese 581 que tem uma massa cerca de um terço da massa do sol. É um dos candidatos mais promissor a abrigar alguma forma de vida até o momento. Esse exoplaneta estaria dentro da ZH da estrela.



Figura 11. Impressão artística do exoplaneta Gliese 581c orbita sua estrela anã vermelha, um dos exoplanetas com grande potencial para abrigar vida.

Algumas características de Gliese 581c são:

- Localizado na Zona de Habitabilidade de uma estrela fria: Gliese 581;
- Exoplaneta menos massivo já descoberto;
- Possivelmente rochoso ($M \sim 5,1 M_{Terra}$ e $R \sim 1,5 R_{Terra}$);
- Temperatura superficial estimada do planeta: entre $0^{\circ}C$ e $40^{\circ}C$;
- Possivelmente em rotação síncrona com a estrela devido a proximidade (1/2 hemisfério permanentemente iluminado).

Gliese 581c é o exoplaneta menos massivo (e possivelmente rochoso) descoberto até o momento. A descoberta foi feita pelo grupo suíço do Observatório de Genebra, que opera o espectrógrafo HARPS no ESO/La Silla, no Chile. Situado numa órbita de 13 dias de período e, portanto, na Zona de Habitabilidade da estrela Gliese 581, que é uma anã vermelha de tipo espectral M3, isto é, com temperatura superficial de cerca de 3200 K. Essa estrela tem um terço da massa do Sol e é 50 vezes menos luminosa do que ele. Está situada apenas a 16,3 pc de nós. Os autores da descoberta estimam que a temperatura superficial do planeta esteja entre $0^{\circ}C$ e $40^{\circ}C$, em condições, portanto, de conter água no estado líquido.

Kepler-62 e, Kepler-62 f

7 – Biomarcadores em atmosferas planetárias/lunares

Um investigação sobre a possibilidade de vida em outros corpos do Universo pode ser conduzida apropriadamente à distância, *in-situ*, ou mesmo por meio de amostras trazidas de fora da Terra. A procura por vida extraterrestre busca por sinais de processos físicos e/ou químicos que estejam ligados à vida, incluindo a abundância de certas moléculas, a produção de biomassa e dejetos, a emissão de ondas eletromagnéticas (semelhantes às usadas em telecomunicações), entre outros; estes fenômenos seriam

sustentados pela presença da vida, e seus indícios são o que chamamos de **biomarcadores** (biosignatures, ou biomarkers, em inglês).

Um biomarcador é qualquer substância - como um elemento, isótopo, molécula, ou fenômeno - que fornece possíveis evidências de passado ou presente de vida. Um exemplo de biomarcador pode ser a presença de moléculas orgânicas complexas e/ou estruturas cuja formação é praticamente inatingível na ausência de vida. Contudo, Marais et al. (2008) completam que, quando uma evidência da presença de vida fora da Terra for encontrada, ela deve ser analisada sempre sob a ótica da possibilidade de ser resultado tanto de uma origem biótica, quanto abiótica. Através da análise espectral da atmosfera de um planeta extra-solar é possível avaliar se as condições do planetas são favoráveis ao desenvolvimento de vida ou mesmo se já ocorreu crescimento de algum tipo de organismo.

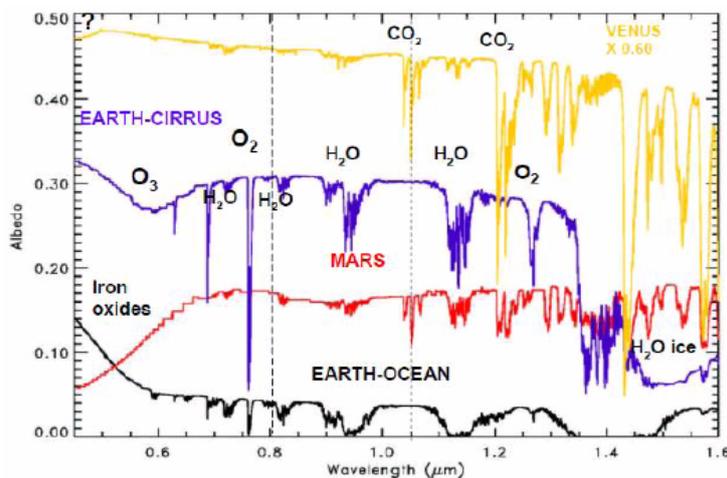


Figura 12: Espectro de Vênus, Terra e Marte.

Principais biomarcadores em exoplanetas:

- CO² (Dióxido de Carbono) – Além de ser resultante de atividades biológica, sua presença na atmosfera contribui para o efeito estufa, evitando a condensação da atmosfera do planeta e favorecendo o aquecimento da superfície a ponto de permitir a presença de água líquida.
- O (Oxigênio) – Pode ter origem por dissociação de moléculas de água por radiação porém devido à extrema reatividade só pode ser encontrado em altas concentrações através de um ciclo ativo, alimentado principalmente pela respiração das plantas e cianobactérias.
- O³ (Ozônio) – Formado devido à alta concentração de oxigênio liberado na atmosfera que reage com a radiação ultra violeta em grandes altitudes.
- CH₄ (Metano) – Pode ter origem em atividade vulcânica e processos de decomposição de resíduos orgânicos e processos digestivos dos animais.

Apenas a presença desses biomarcadores na atmosfera de um planeta fora do sistema solar não é suficiente para a afirmação de existência de vida nesse ambiente. Somente um estudo detalhado de todo o contexto do ambiente pode determinar se existem condições ou não para a formação e evolução da vida.

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 H₂O 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_2 e CH_4 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 13 ilustra bem essa técnica.

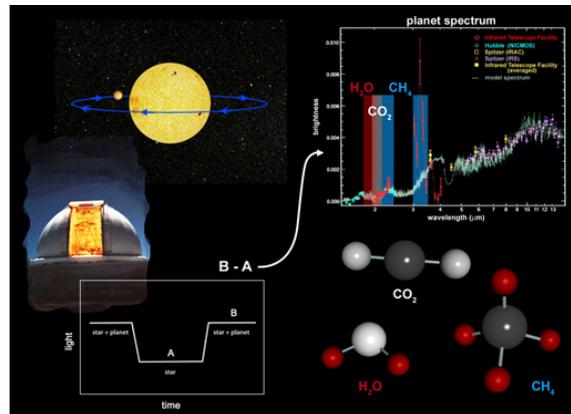


Figura 13. Técnica aplicada para um sistema de estrela, chamado HD 189733, para detectar as substâncias químicas na sua atmosfera a partir de um telescópio em terra. **Crédito da Ilustração:** NASA.

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 [2]. Observações de trânsito e eclipse até à data têm sido utilizados para inferir a presença de moléculas de H_2O , CO , CO_2 , CH_4 nas troposferas e estratosferas de planetas extrassolares gigantes.

7.1 Atmosfera do exoplaneta XO-1b

XO-1b é um planeta extrasolar a cerca de 560 anos-luz de distância na constelação de Corona Borealis. O planeta foi descoberto em órbita da estrela XO-1 em 2006.



Figura 14. Concepção artística do XO-1b que transita pelo seu sol.

As observações utilizando o espectrógrafo NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer) do telescópio espacial Hubble detectou a presença de vapor de água (H_2O), metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), e, possivelmente monóxido de carbono (CO) na atmosfera de XO-1b.

7.2 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.

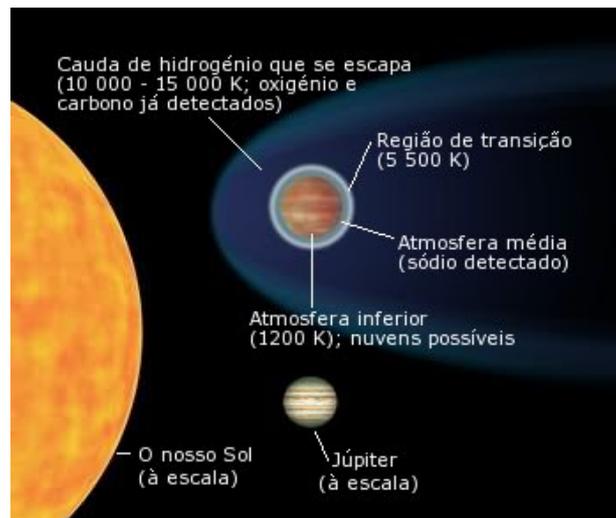


Figura 15. Ilustração da estrutura da atmosfera do exoplaneta HD 209458b. Crédito: NASA/ESA.

Observações em infravermelho próximo revelaram a presença de moléculas mais profundas na atmosfera deste exoplaneta com detecções de CO e H₂O. 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.

7.3 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 ^[4]. Devido a proximidade de sua estrela, a temperatura é de cerca de 2 500 K, sendo assim um dos planetas extrassolares mais quentes.



Figura 16. 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, CH₄, traços de H₂O. Madhusudhan et al. (2011) relatou que observações do telescópio espacial Spitzer mostram fortes características de absorção de CH₄ 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 H₂O.

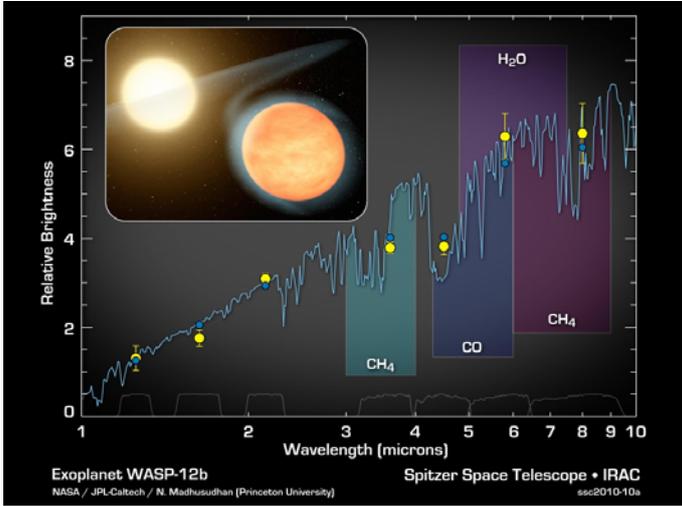


Figura 17. Este lote de dados do Telescópio Espacial Spitzer da NASA indica a presença de moléculas no planeta WASP-12b. Crédito de imagem: NASA.

Isso sugere que o CH₄ e CO são dominantes e que H₂O é menos abundante na atmosfera de WASP-12b. Assumindo equilíbrio químico e energia solar $[C]/[O] = 0,54$, H₂O e CO deveriam ser as espécies dominante e CH₄ e CO₂ menos abundante. Portanto, uma razão solar $[C]/[O]$ está descartada. Concluem que, para explicar a abundância observada de CH₄ e CO, WASP-12b deve ter $[C]/[O] \geq 1$, o que implica que ele é um planeta rico em carbono.

7.4 HAT-P-11b

HAT-P-11b, orbita uma estrela que está a 120 anos-luz da Terra, na constelação de Cygnus. Tem um tamanho semelhante a Netuno, com um raio de quase quatro vezes maior que a da Terra. O planeta se encaixa aos modelos em 90% elementos pesados. A temperatura esperada é de 878 K.

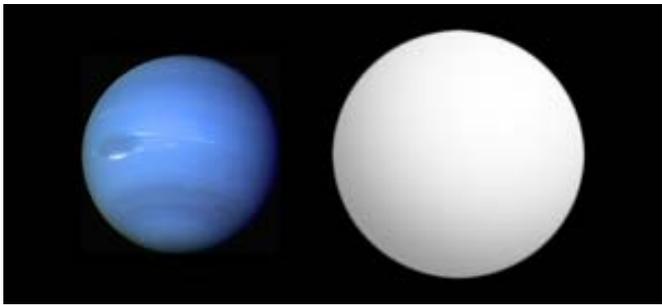


Figura 18. Comparação de tamanho de HAT-P-11b (cinza) com Netuno²³.

Uma equipe internacional de astrônomos de os EUA, Chile, Reino Unido e Suíça detectaram vapor de água na atmosfera desse exoplaneta²⁴. Este é o primeiro exoplaneta do tamanho de Netuno conhecido por ter um ambiente relativamente livre de nuvens e, assim, a primeira vez que moléculas, neste caso vapor de água, foi encontrado em um exoplaneta relativamente pequeno²³. A descoberta foi possível graças à técnica de espectroscopia de transmissão, o qual determina a presença de moléculas tal como a água em atmosferas

planetárias ou lunares, o que é de grande interesse na astrobiologia para detectar esses biomarcadores nesses ambientes espaciais.

Além desses exoplanetas destacados aqui neste material há ainda muitos outros exoplanetas que possuem atmosferas com a presença de Biomarcadores.

8. Conclusão

Estudamos nesta aula os exoplanetas, destacando as missões e as técnicas mais utilizadas para a detecção desses corpos fora do sistema solar, características físico-químicas importantes, definimos zona de habitabilidade, biomarcadores e suas contribuições para os indícios de sinal de vida em exoplanetas.

Dessa forma, conhecer os exoplanetas e suas características é de grande interesse no campo da astrobiologia já que muitos desses corpos podem apresentar condições físico-químicas similares às do planeta terra, locais em que poderiam, portanto, desenvolver formas de vida ou trazer informações sobre a origem da vida na terra.

Referências

[1] Hot-Jupiters and hot-Neptunes: A common origin? Baraffe, I.; Chabrier, G.; Barman, T. S.; Selsis, F.; Allard, F.; Hauschildt, P. H.

[2] <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>

[3] Are hot Neptunes partially evaporated hot Jupiters? Boué, G.; Figueira, P.; Correia, A. C. M.; Santos, N. C.

[4] Wikipedia – Exoplanetas, Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Exoplaneta>

[5] Exoplanet Data Explorer – Disponível em <http://exoplanets.org/>

[6] The Extrasolar Planets Encyclopaedia – Disponível em: <http://exoplanet.eu/>

[7] The Planetary society – Disponível em : <http://www.planetary.org>

[8] Mello, Sylvio Ferraz, Grupo de dinâmica de sistemas planetários, disponível em: <http://www.astro.iag.usp.br/~sylvio/>

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

[10] Exoplanets, disponível em <http://exoplanet.eu/pictures.html>

[11] Discovery of OGLE 2005-BLG-390Lb, the first cool rocky/icy exoplanet, disponível em <http://planet.iap.fr/OB05390.news.html>

[12] Scientists directly image an extra-solar planet's orbit around a young star, disponível em: <http://www.wsws.org/articles/2010/jul2010/plan-j19.shtml>

[13] <http://exoplanet.eu/catalog/?f=>

[14] <http://en.wikipedia.org/wiki/Exoplanet>

[15] <http://www.univasf.edu.br/~militao.figueredo/MNPEF/fisicacomtemporanea/Monografias/Exoplanetas%20-%20Tiago%20Ferraz%20Rodrigues.pdf>

[16] <http://www.cienciaviva.pt/img/upload/Astrobiologia%287%29.pdf>

[17] <http://www.astro.sunysb.edu/fwalter/AST101/habzone.html>

[18] <http://exo-biologia.blogspot.com.br/2012/10/zona-de-habitabilidade.html>

[19] http://pt.wikipedia.org/wiki/Zona_habit%C3%A1vel

[20] https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/112_p4.html

[21] http://simple.wikipedia.org/wiki/Habitable_zone

[22] http://pt.wikipedia.org/wiki/Zona_habit%C3%A1vel#Planetas_de_Zona_Habit.C3.A1vel_Circumestelar

[23] <https://en.wikipedia.org/wiki/HAT-P-11b>

[24] <http://www.agenciasinc.es/Noticias/Detectan-agua-en-la-atmosfera-de-un-exoplaneta-del-tamano-de-Neptuno>