



Rayrison Tobias Costa

UMA INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE EXOPLANETAS

Produto educacional apresentado ao Programa de Pós-Graduação Universidade Federal de Mato Grosso no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:
Dr. André Correia Risério do Bonfim

Cuiabá – MT
2021

EXOPLANETAS

Antes de entrarmos na discussão sobre os exoplanetas, vamos primeiro definir o que é um planeta. Essa definição pode ser encontrada em um conjunto de resoluções aprovadas em pleito pela União Astronômica Internacional (IAU). A cada 3 anos a IAU realiza uma Assembleia Geral para debater questões de caráter administrativo e realização de eventos científicos. Em 2006, durante o 26º encontro estava programada a apreciação de 6 resoluções, entre elas a que nos interessa: a resolução 5A – definição de planeta.

Conforme essa resolução os critérios para que um corpo celeste seja classificado como planeta são a) estar orbitando o Sol; b) ter massa suficiente para que sua própria gravidade se sobreponha as forças de corpo rígido tal que ele assuma em sua forma equilíbrio hidrostático (aproximadamente redonda); c) ter limpado as proximidades de sua órbita. Foi nessa mesma ocasião que Plutão foi rebaixado para a categoria de planeta-anão.

Apesar de não fazer mais parte dos planetas do sistema solar (na ilustração ao lado você pode ver Plutão sendo deixado de lado após seu rebaixamento), não precisa ficar triste pelo nosso astro, afinal existem outros 4 planetas anões em nosso sistema solar para lhe fazerem companhia.

Esses critérios foram

elaborados de maneira a caracterizar os planetas dentro do nosso sistema solar. Já os planetas que estão sendo encontrados orbitando outras estrelas, denominados planetas extrassolares ou exoplanetas, para que sejam qualificados adequadamente podemos incluir um adendo: a não existência de um processo nuclear de geração de energia interna.

Surpreendentemente Giordano Bruno (1548-1600) já especulava sobre a pluralidade de mundos além do sistema solar quase 4 séculos antes das primeiras detecções de exoplanetas. Ele acreditava na existência de infinitos outros girando em torno de seus Sóis, da mesma maneira que os planetas do nosso sistema giram em torno do Sol. Para ele só vemos os Sóis pois, os planetas são invisíveis devido ao

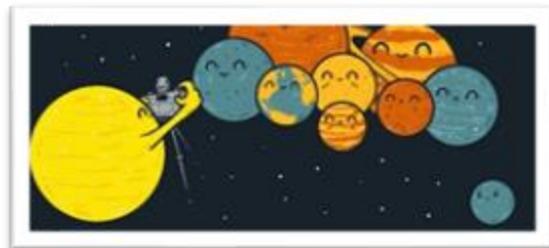


Figura 1. Planetas do sistema solar. Devido a novas especificações Plutão não faz mais parte do grupo.

Fonte: Megacurioso.com

imenso brilho e tamanho de sua estrela. Por essa e outras posições Giordano Bruno foi queimado vivo em praça pública pela inquisição romana.

A primeira comprovação experimental da existência de exoplanetas ocorreu somente no ano de 1992 com trabalho de Wolszczan e Frail que confirmava a presença de pelo menos dois corpos orbitando o pulsar PSR B1257+12. É provável que tanto os exoplanetas quanto o próprio pulsar tenham sido formados por remanescentes de uma supernova na região. A órbita peculiar em torno de uma estrela morta tornava improvável a presença de formas de vida.

Poucos anos mais tarde, em 1995, foi anunciada a descoberta do primeiro planeta extrassolar em torno de uma estrela como o Sol. Os autores da pesquisa são os astrônomos Mayor e Queloz que constataram a presença de um planeta nas proximidades da estrela Pegasi, a partir de medidas de sua velocidade radial. A terminologia utilizada na nomeação de planetas orienta para a utilização do nome da estrela a qual o planeta orbita seguida por uma letra minúscula começando pelo "b". Dessa forma, o novo planeta foi batizado de Pegasi b.

O trabalho de Mayor e Queloz tem maior relevância que o de Wolszczan e Frail por ter encontrado um planeta que orbita uma estrela da sequência principal (fusionando hidrogênio em hélio). Além disso, o novo planeta tem as mesmas dimensões de Júpiter, porém em uma órbita de apenas 4 dias, o que implicou em novas teorias de formação planetária. Inclusive, no ano de 2019, por esse trabalho Mayor e Queloz dividiram o prêmio Nobel de física com o também laureado James Peebles (por descobertas sobre a composição e a história do universo).

Desde as primeiras descobertas a tecnologia e o desenvolvimento científico evoluíram consideravelmente, permitindo a adição de novos métodos de detecção, o aperfeiçoamento de equipamentos e melhor processamento de imagens. O resultado de todo esse avanço somado ao empenho dos pesquisadores pode ser visto nos mais de 4000 novos exoplanetas descobertos e quase 5000 outros candidatos ainda não confirmados. O estudo dos exoplanetas ajuda a compreender o nosso universo e sua formação além de fortalecer a expectativa da existência de vida em outros planetas e quem sabe em um futuro longínquo, estabelecer colônias em planetas distantes.

Agora que já sabemos o que são os exoplanetas resta ainda a dúvida: Como é possível detectar esses corpos a distâncias tão grandes? Para essa pergunta a resposta é ligeiramente extensa, já que existe uma quantidade considerável de técnicas de detecção. Segue o nome de todas as técnicas que já detectaram pelo

menos um exoplaneta: astrometria, cinemática de disco, variações de tempo de eclipse, imagem direta, microlentes gravitacionais, modulação de brilho orbital, pulsar timing, variações do tempo de pulsação, velocidade radial, trânsito de planetas e variações do tempo de trânsito.

Entre os métodos citados alguns tem tido maior sucesso em detectar os exoplanetas. Trânsito de planetas, velocidade radial, microlentes gravitacionais e imagem direta foram responsáveis pela maior parte das descobertas. Como você pode observar no gráfico 1.

Métodos de detecção

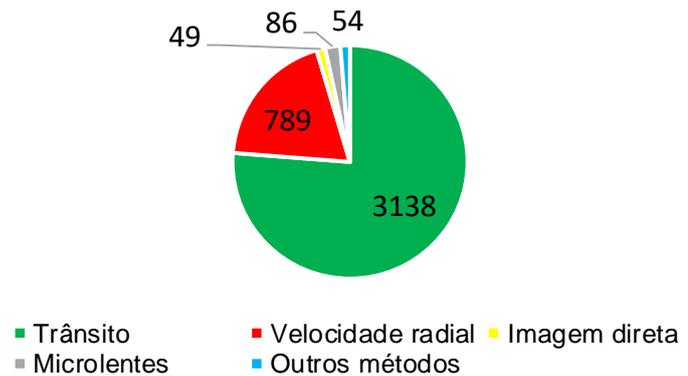


Gráfico 1. Principais métodos de detecção de exoplanetas.

A figura 2 mostra um acumulativo da quantidade de exoplanetas descobertos a cada ano. Perceba que o número de exoplanetas detectados a partir dos anos 2000 aumentou significativamente. Esse aumento é oriundo da grande quantidade de investimentos em pesquisas espaciais e do acréscimo de novos métodos de detecção.

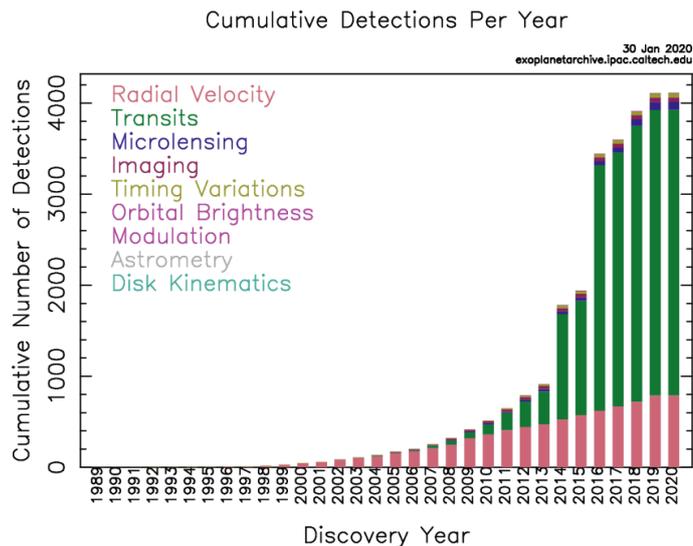


Figura 2. Detecções cumulativas por ano.

Fonte: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/>

Tipos de exoplanetas

De acordo com a *National Aeronautics and Space Administration* (Nasa), existem até a presente data, fevereiro de 2020, 4116 exoplanetas confirmados e mais 4971 que ainda precisam de confirmação, dentre esses é esperado que algo em torno de 80% e 90% sejam confirmados. Os exoplanetas já confirmados podem ser desde planetas rochosos e de massa similar a Terra até grandes planetas gasosos como Júpiter, por exemplo. Podemos verificar a incidência de cada tipo de planeta na tabela 1.

Tipos de planeta	Confirmados	Porcentagem (%)
Como Netuno	1378	33,48
Gigantes gasosos	1294	31,44
Superterras	1277	31,03
Terrestres	161	3,91
Desconhecidos	6	0,14
Total:	4116	100

Tabela 1. Tipos de exoplanetas.

Note que planetas como a Terra não são descobertos com tanta frequência como são os gigantes gasosos e os similares a Netuno. Os planetas são classificados como terrestres quando sua composição é predominantemente rochosa, independente da sua quantidade de massa. Os planetas Telúricos do Sistema Solar são exemplos de planetas do tipo terrestre. Vale ressaltar que apesar da grande maioria dos exoplanetas descobertos serem gigantes gasosos, isso não significa que a maioria dos exoplanetas são gigantes. Na verdade, o que ocorre é que os métodos de velocidade radial e trânsito planetário favorecem a descoberta desse tipo de planeta.

Assim como os planetas terrestres, as Superterras são planetas de formação rochosa. Entretanto, o principal critério para sua classificação é sua massa, que deve ser 1,5 e 10 vezes a massa da Terra ($5,9722 \cdot 10^{24}$ kg)

Os planetas do tipo gigantes gasosos são compostos, principalmente, por hidrogênio e hélio e possuem até 13 vezes a massa de Júpiter ($1,898 \cdot 10^{27}$ kg). Esses planetas são semelhantes a Júpiter e Saturno.

Os planetas Netunianos também são grandes planetas gasosos, porém menos massivos que os gigantes gasosos. Para manter hidrogênio em sua atmosfera eles precisam possuir pelo menos 3% da massa de Júpiter.

MÉTODOS DE DETECÇÃO

Como discutimos no primeiro tópico existem métodos que utilizam de técnicas específicas para detectar exoplanetas. Esses métodos podem ser classificados como diretos ou indiretos. O único método de detecção de forma direta é por imagem, todos os outros métodos são formas indiretas de detecção. No gráfico 1 verificamos que algumas técnicas se sobressaem em relação as outras no quesito quantidade de exoplanetas detectados. Por esse motivo daremos uma atenção especial a esses métodos através de um breve resumo de como eles funcionam.

Imagem

1 parsec (1 pc), unidade de medida bastante utilizada em astronomia, equivale a uma distância maior que $3 \cdot 10^{16}m$, por comparação, isso é mais que 100000 vezes a distância entre o Sol e a Terra. Refinando ainda mais a nossa comparação veja que a distância média entre o Sol e a Terra equivale a mais de 3700 voltas completas ao redor do nosso planeta. É muito longe! Imagine agora que fosse possível observar nosso sistema solar a uma distância de 10 pc. Veríamos uma estrela extremamente brilhante ofuscando qualquer outro corpo nas suas proximidades. Dificilmente conseguiríamos imagens diretas de qualquer um dos oito planetas que a orbitam. É isso que o método de imagem direta faz.

A dificuldade do método é clara: as estrelas são muito mais brilhantes que os planetas que hospedam. Além disso, as distâncias, até mesmo às estrelas mais próximas, são consideravelmente grandes. Devido a esses obstáculos o método por imagem direta tem devolvido poucos resultados, principalmente quando comparado aos métodos indiretos de detecção.

Para contornar essas barreiras os pesquisadores procuram desenvolver equipamentos capazes de bloquear a luz das estrelas ou pelo menos atenuá-lo, e assim obter imagens melhores dos objetos ao seu redor. Existem duas técnicas principais para isso. A primeira se chama coronografia, que consiste em posicionar um dispositivo de forma a impedir que a luz da estrela alcance o detector do telescópio. A segunda utiliza um equipamento chamado de “*starshade*” que bloqueia a luz antes de ela entrar no telescópio.

Na figura 3.A podemos observar o anteparo (coronógrafo) que será posicionado no interior do telescópio para bloquear a luz da estrela de modo que seja possível obter imagens dos arredores dela. Já a figura 3.B é uma concepção artística de um telescópio alinhado a um *starshade* usado para impedir que a luz estelar chegue ao telescópio.

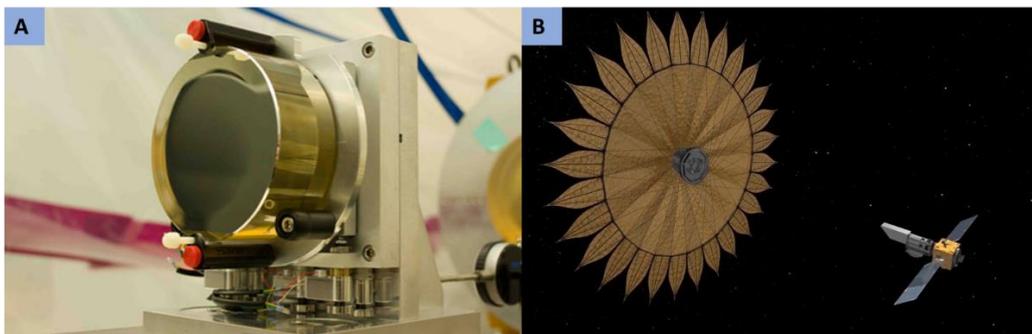


Figura 3. A) Coronógrafo: dispositivo utilizado para impedir que a luz atinja o detector do telescópio. **B)** Representação de um starshade posicionado para evitar que a luz da estrela chegue ao telescópio. **Crédito das imagens:**

A estrela Beta Pictoris está sendo observada a cerca de 30 anos. É uma estrela jovem da Via Láctea e está a 63,4 anos-luz da Terra. A figura 4 mostra um objeto detectado por imagem orbitando essa estrela. Trata-se do β Pictoris b, um dos planetas desse sistema solar, que possui em torno de 9 massas de Júpiter.

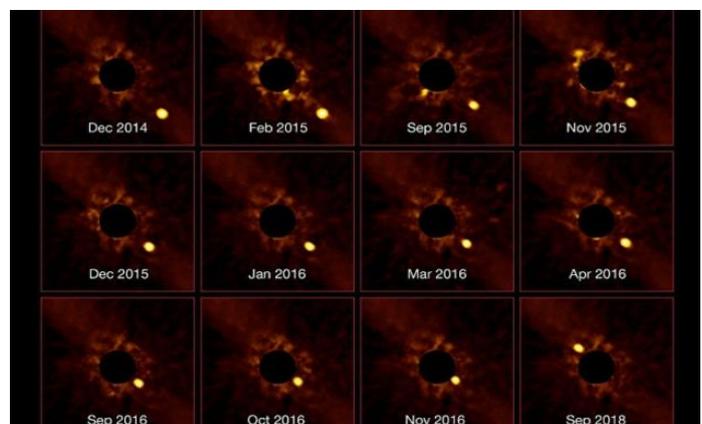


Figura 4. Observações diretas de β Pictoris b orbitando sua estrela. **Fonte:** LAGRANGE, et al. (2018, pg. 3)

O método por imagem ainda está dando os passos iniciais na descoberta de novos exoplanetas, entretanto é considerado promissor e acredita-se que no futuro será fundamental para localizar e caracterizar exoplanetas.

Trânsito planetário

Esse método consiste em observar a variação no brilho de uma estrela devido a passagem do planeta diretamente entre o observador e a estrela que orbita. A observação periódica dessa diminuição indica a presença de um planeta orbitando essa estrela. Esse método pode ser comparado ao que acontece durante um eclipse solar, quando a Lua atravessa o campo de visão entre o observador e o Sol, porém em menor escala.

A figura 5 é uma ilustração desse método. Observe que antes da passagem do planeta o brilho da estrela é constante e que durante o trânsito o brilho apresenta uma redução, retornando à intensidade inicial na sequência.

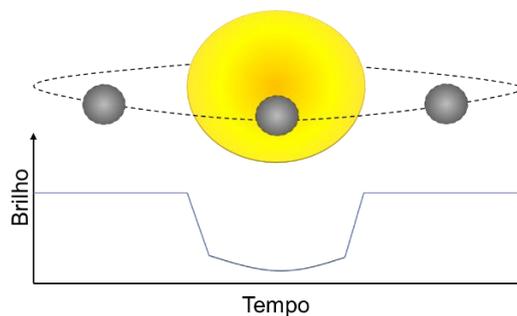


Figura 5. Representação, fora de escala, do comportamento do gráfico de brilho x tempo durante o trânsito planetário.

Como já foi mencionado, esse método favorece a descoberta de planetas gigantes, tendo em vista que planetas desse tipo provocam uma redução maior no brilho de sua estrela. Além disso, planetas com períodos orbitais menores são também mais frequentes, uma vez que é preciso observar a diminuição do brilho da estrela repetidas vezes. Por esse motivo é bem comum a descoberta de planetas gigantes com períodos orbitais menores que dez dias.

O planeta HD 209458 b foi o primeiro planeta a ser detectado por esse método. Um planeta do tipo gigante gasoso a distância de 158 anos-luz da Terra tendo uma massa de 0,73 Júpiteres e um período orbital de apenas 3,5 dias.

Microlentes gravitacionais

Einstein em sua Teoria da Relatividade Geral trouxe uma forma diferente de enxergar a gravidade caracterizando-a como uma propriedade geométrica do espaço-tempo. Essa nova interpretação abre portas para alguns fenômenos bem interessantes, como a deflexão da luz ao passar próximo de um corpo com grande concentração de massa. O método de microlentes faz uso dessa teoria ao analisar os desvios sofridos pela luz devido a presença de corpos muito massivos como estrelas ou planetas.

Assim como uma lente, a gravidade pode, às vezes, dobrar e focalizar a luz. As lentes ocorrem quando uma estrela focaliza a luz de outra estrela fazendo-a parecer temporariamente mais brilhante. Esse evento pode durar algumas dezenas de dias. Um efeito adicional de lente pode ocorrer caso essa estrela possua um sistema planetário e ele atravesse o nosso campo de visão durante o fenômeno. O efeito adicional é chamado de microlente e dura bem menos tempo do que a lente gravitacional. Essa passagem aumentará a curva de brilho da estrela ou fará surgir um segundo ponto de máximo, como você pode ver na figura 6.

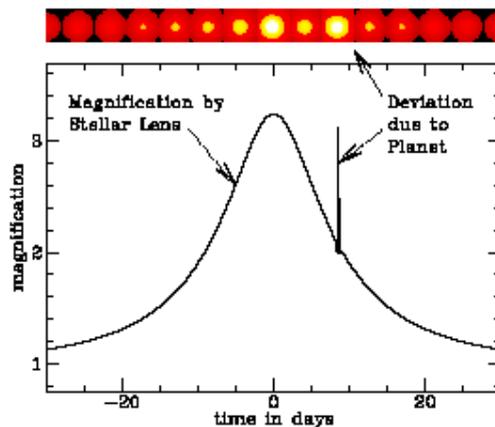


Figura 6. Lente gravitacional observada para uma estrela ao longo de vários dias. O segundo ponto de máximo se deve a microlente originada por um exoplaneta. **Fonte:** MEDEIROS (2019, pg. 50)

A raridade de um evento desse tipo e a impossibilidade de prever quando ocorrerá exigem uma observação contínua de uma grande quantidade de estrelas. Além disso, esse método requer uma configuração de alinhamento muito precisa entre o exoplaneta e a estrela “lente”, o que impede a repetição do experimento. No entanto, tem a vantagem de poder detectar até mesmo planetas pouco massivos, do tipo terrestre, e é o único método capaz de detectar planetas muito distantes.

Velocidade radial

Imagine o nosso sistema solar: todos os planetas, asteroides, luas orbitando a nossa estrela. Esse é um exercício mental bem simples, afinal é de conhecimento da maioria das pessoas que isso ocorre. Entretanto, o que não é de conhecimento de todos é que na verdade todos os corpos do sistema solar, inclusive o Sol, giram em torno do centro de massa desse sistema. Isso também ocorre para qualquer outra estrela que possua um sistema planetário. Fazendo uso de um fenômeno chamado de Efeito Doppler é possível determinar, entre outras coisas, a presença de exoplanetas, seu período orbital e a massa desses corpos. Esse método consiste, basicamente, em interpretar o Efeito Doppler proveniente de outras estrelas.

EFEITO DOPPLER

Entender o método de medida de velocidade radial exige uma compreensão mínima de como funciona o Efeito Doppler. Portanto, faremos uma explanação sobre esse fenômeno. A fim de facilitar nosso estudo, dividiremos o fenômeno em duas partes. Primeiramente estudaremos como funciona o Efeito Doppler para o som e na segunda parte o mesmo efeito para a luz.

Efeito Doppler para o som

Você já deve ter reparado que o som que você escuta quando uma ambulância, por exemplo, se aproxima de você é diferente do som produzido pela mesma ambulância quando ela está se afastando. O som da ambulância que se aproxima parece ser mais agudo, frequências maiores, já o som da ambulância que se afasta é mais grave, isto é, tem frequências menores. Isso é algo semelhante ao que ocorre com a luz das estrelas quando se aproximam ou se afastam em relação a um observador na Terra.

Esse fenômeno é chamado de Efeito Doppler e ocorre quando existe movimento relativo entre a fonte emissora e o observador. O fenômeno recebe esse nome em homenagem ao físico austríaco Johann Christian Doppler que propôs o efeito em 1842, porém foi estudado experimentalmente em 1845 por Buys Ballot.

No que diz respeito ao amparo matemático podemos considerar algumas situações. Tomemos o caso em que tanto a fonte emissora das ondas quanto o observador estão em repouso, como está representado na figura abaixo:

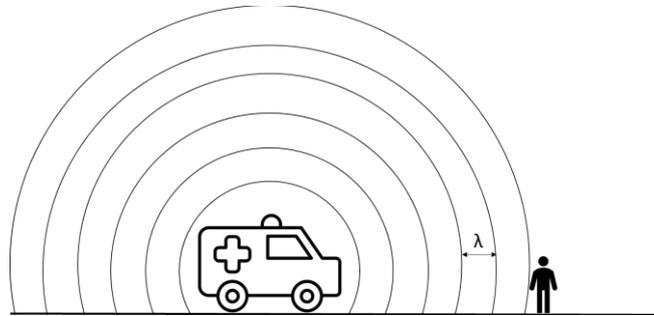


Figura 7. Observador e fonte de onda em repouso.

A equação fundamental que descreve a propagação das ondas sonoras com a fonte em repouso é

$$v = \lambda \cdot f$$

onde v é a velocidade do som, λ seu comprimento de onda e f a sua frequência. Observe que como a fonte e o observador estão ambos em repouso, ambos irão medir os mesmos valores dessas grandezas.

Vamos assim rapidamente demonstrar como podemos obter a equação acima:

O som se propaga num movimento uniforme na atmosfera. Neste caso o módulo da velocidade é dado por $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$. Se Δx for um comprimento de onda (λ), Δt será seu período. Então $v = \frac{\lambda}{T}$. Como a frequência é o inverso do período $f = 1/T$, obtemos $v = \lambda \cdot f$.

Observador aproximando-se de uma fonte emissora em repouso

Neste caso, nada ocorre com as ondas emitidas pois a fonte continua em repouso. Mas a frequência percebida pelo observador em movimento é alterada.

O observador irá encontrar um maior número de frentes de onda do que se estivesse em repouso. Ou seja, a frequência tem que aumentar. Chamaremos essa nova frequência observada de f' . O comprimento de onda continua sendo λ , mas a **velocidade relativa** entre o observador e as cristas de onda passa a ter módulo v' .

Como ele se aproxima temos que $v' = v + v_0$, onde v_0 é a velocidade do observador em relação a atmosfera.

A nova frequência é dada, portanto, por

$$f' = f + \frac{v_0}{\lambda}$$

mas λ pode ser escrito como $\lambda = v/f$ então

$$f' = f + \frac{v_0}{\left(\frac{v}{f}\right)} = f + \frac{f \cdot v_0}{v}$$

$$f' = f \left(1 + \frac{v_0}{v}\right)$$

Observador afastando-se de uma fonte emissora em repouso

Neste caso o raciocínio é totalmente análogo, mas agora a frequência observada diminui. Então sendo v_0 o módulo da velocidade do observador e v a velocidade do som, obtemos a subtração

$$f' = f \left(1 - \frac{v_0}{v}\right)$$

Fonte aproximando-se de um observador em repouso

Vamos analisar agora os casos em que a fonte é que se desloca com velocidade v_f em direção ao observador em repouso. Levando em consideração que a velocidade de propagação da onda depende apenas do meio onde ela se propaga, e, portanto, será constante independente da velocidade da fonte. Entretanto o movimento da fonte em direção ao observador modifica o comprimento de onda e por consequência a frequência registrada por ele.

Como podemos ver na figura 8 ao mesmo tempo em que emite uma frente de onda a própria fonte se

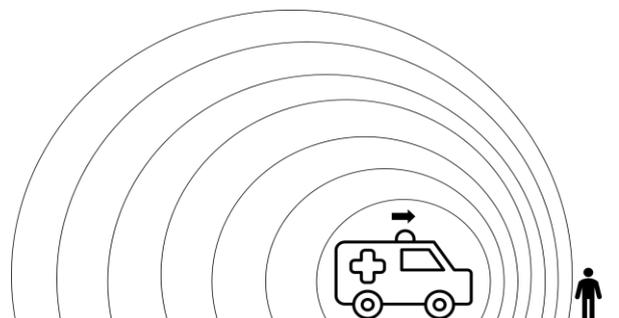


Figura 8. Fonte deslocando-se em direção ao observador.

desloca com velocidade v_f em direção ao observador provocando um encurtamento no comprimento de onda.

Para nossa análise vamos considerar o intervalo de tempo entre a emissão de duas frentes de onda consecutivas. No instante $t = 0$ a primeira frente de onda é emitida e ao final do intervalo de tempo terá se deslocado $v.T$ em direção ao observador e a fonte emitirá a segunda frente de onda. No mesmo intervalo a própria fonte se aproxima do observador com velocidade v_f o que faz com que o comprimento de onda que se propaga nessa direção seja reduzido por $v_f.T$. Uma vez que o intervalo de tempo que consideramos inicialmente é o próprio período da onda (intervalo de uma oscilação completa) podemos substituí-lo pela relação

$$T = \frac{1}{f}$$

Desse modo o comprimento de onda efetivo que seria igual a $v.T - v_f.T$ poderá ser determinado por

$$\lambda' = \frac{v}{f} - \frac{v_f}{f}$$

Já a frequência aparente será

$$f' = \frac{v}{\lambda'} \Rightarrow f' = \frac{v}{\frac{v - v_f}{f}}$$

$$\boxed{f' = f \left(\frac{v}{v - v_f} \right)}$$

Como podemos constatar pela equação acima a redução efetiva do comprimento de onda implicará que a frequência captada pelo observador será maior do que a emitida na fonte. Para o ouvido humano o resultado do encurtamento do comprimento de onda será percebido na forma de sons mais agudos do que seriam em repouso.

Fonte afastando-se de um observador em repouso

Para a fonte que se afasta do observador o som percebido será mais grave e os comprimentos de onda maiores, como visto na figura 9.

Sendo que o comprimento de onda que chega ao observador será o resultado da soma

$$\frac{v}{f} + \frac{v_f}{f}$$

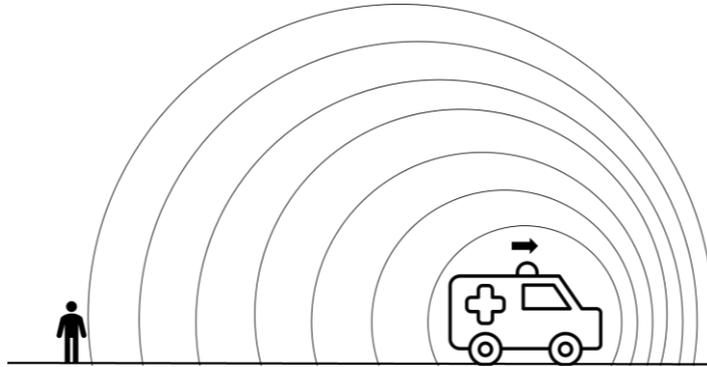


Figura 9. Fonte afastando-se do observador.

É fácil perceber que isso resultará apenas na troca de sinais da equação para a fonte que se aproxima, portanto

$$f' = f \left(\frac{v}{v + v_f} \right)$$

A partir dos resultados obtidos podemos fazer duas constatações: a primeira é que caso exista movimento relativo de aproximação entre a fonte e o observador a frequência aparente, ou seja, a frequência que chega ao observador, será maior do que a frequência emitida pela fonte da onda. Entretanto, se o movimento entre o observador e a fonte for de afastamento a frequência aparente será menor do que a frequência da fonte.

Ainda utilizando os resultados encontrados, podemos generalizar a equação para o Efeito Doppler na seguinte forma:

$$f' = f \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_f} \right)$$

- Sinais superiores quando o movimento relativo entre a fonte e o observador for de aproximação.
- Sinais inferiores se o movimento relativo entre fonte e observador for de afastamento.

Na imagem a seguir temos um breve comparativo do comportamento da frequência da onda em três situações diferentes medidas em um mesmo intervalo de tempo.

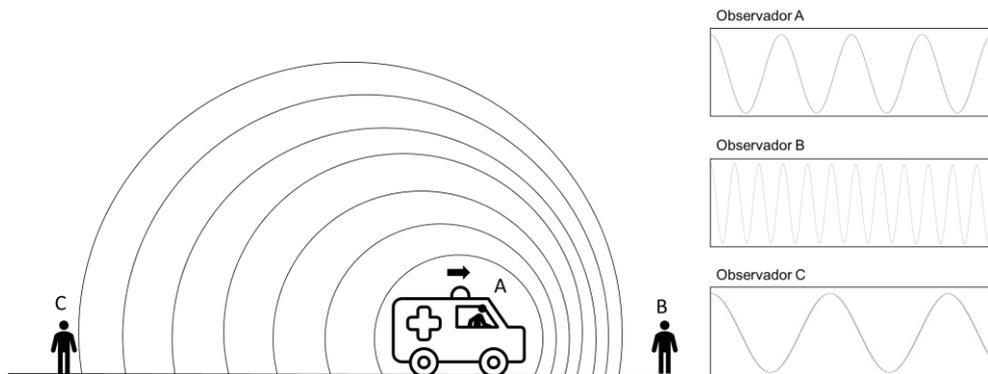


Figura 10. Comparativo de frequência aparente para 3 observadores diferentes.

O observador A dentro da ambulância percebe a frequência natural do som emitido pela ambulância, sem qualquer alteração. No entanto, para B a frequência efetiva é maior do que a emitida na fonte, o que torna o som da sirene mais agudo. Por fim, para C a frequência da onda é menor do que a emitida na fonte, o que faz com que ele escute um som mais grave.

Velocidades supersônicas

Nos casos anteriores assumimos que a velocidade de deslocamento da fonte é inferior a velocidade de propagação do som no ar. No entanto, caso a fonte se desloque com a velocidade do som, isto é, $v_f = v$, em direção ao observador, ele verá que a fonte é tão rápida que alcança as próprias frentes de onda, assim como vemos na figura 11. Isto implica, de acordo com a equação geral do efeito Doppler, que a frequência f' medida por um observador estacionário tende ao infinito.

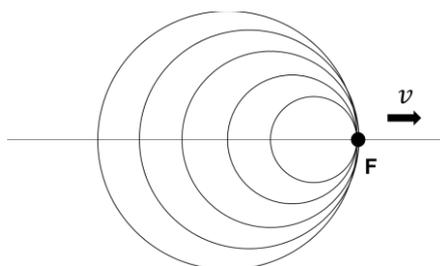


Figura 11. Fonte F se desloca com velocidade igual a velocidade do som, acompanhando, portanto, as frentes de onda por ela emitidas.

Porém quando a velocidade da fonte é superior a velocidade do som, ou seja, quando a fonte tem velocidade supersônica as equações que utilizamos nos outros casos deixam de ser válidas. As frentes de onda emitidas por uma fonte supersônica ficam contidas em uma cobertura em forma de cone, cujo vértice é a própria fonte. O cone que se forma é chamado de *cone de Mach*. Uma representação bidimensional do fenômeno pode ser vista na figura 12. Cada frente de onda gerada nessa condição, após o intervalo de tempo t , correspondente ao tempo de deslocamento da fonte depois de ter emitido a onda, tem raio $v \cdot t$, sendo v a velocidade do som.

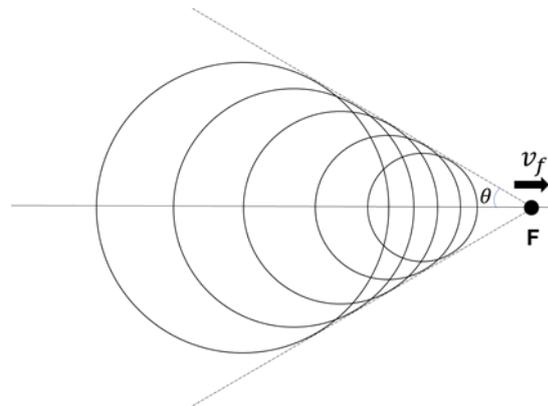


Figura 12. Enquanto a fonte F se desloca com velocidade supersônica as frentes de ondas emitidas por ela se agrupam em um envoltório em forma de V.

Os súbitos aumentos e diminuições de pressão causados pelo acúmulo de frentes de onda produzem na superfície do cone uma onda de choque. Por vezes é possível visualizar uma pequena nuvem formada pela condensação da água cobrindo a onda de choque (efeito da abrupta queda de pressão do ar). O som estrondoso, chamado de estrondo sônico, semelhante ao som de uma explosão só é experimentado pelo observador após ele ser atingido pela superfície do cone. A abertura do semiângulo θ , visto na Fig. 12, também chamada de ângulo de Mach, é dada por

$$\sin \theta = \frac{v}{v_f}$$

onde v_f é a velocidade fonte e v a velocidade do som.

O valor adimensional obtido pela razão v_f/v é chamado de número de Mach e representa que múltiplo da velocidade do som foi atingido. Por exemplo, um jato que voa a Mach 2 se move com duas vezes a velocidade do som.

Doppler para luz

No tópico anterior fizemos uma análise do efeito Doppler para o som. Porém, como sabemos a luz também é um tipo de onda e por esse motivo está sujeita aos mesmos efeitos. O efeito Doppler para luz é particularmente mais interessante para nosso estudo, tendo em vista que é a partir desse fenômeno que se obtém um dos métodos de detecção de planetas extra-solares.

No caso do som verificamos que uma maior ou menor frequência está relacionada com sons mais agudos ou mais graves, para o caso de uma onda eletromagnética, a luz visível por exemplo, essa frequência está ligada a cor percebida pelo observador. Observe abaixo o espectro da luz visível:

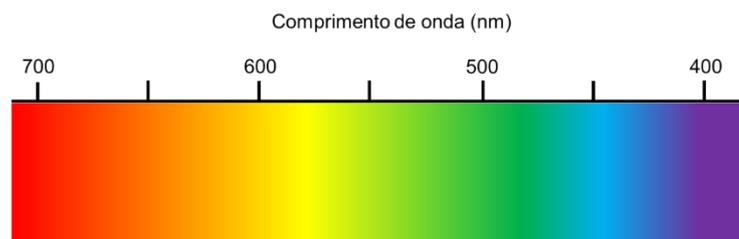


Figura 13. Espectro da luz visível.

Vale ressaltar que a frequência é inversamente proporcional ao comprimento de onda, ou seja, apesar de o vermelho ter o maior comprimento de onda ele também tem a menor frequência.

Como já foi verificado, quando a fonte e o observador têm movimento relativo de aproximação o comprimento de onda recebido pelo observador será menor do que o que foi emitido pela fonte. Como o comprimento de onda é menor a frequência será maior, o que significa dizer que a cor observada será desviada para o violeta. Já no caso oposto, quando observador e fonte se afastam os comprimentos de onda vistos pelo observador serão maiores do que os emitidos na fonte e, portanto, a frequência será menor e a cor observada terá um desvio para o vermelho.

Vamos tomar como exemplo uma estrela que emite luz amarela. Caso essa estrela esteja se aproximando do nosso sistema solar, um telescópio posicionado em um ponto qualquer Terra captará a luz dessa estrela mais esverdeada e talvez até azul. Caso essa mesma estrela se afaste do nosso sistema solar a cor aparente da estrela será mais próxima do vermelho. Observe como as frequências são percebidas por dois observadores diferentes, de acordo com a figura 14.

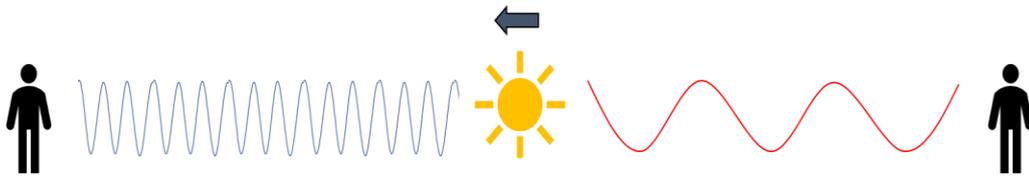


Figura 14. Cor aparente de uma estrela amarela para dois observadores diferentes.

Porém, a forma mais comum de se medir a velocidade de afastamento ou aproximação da fonte em relação ao observador é através da análise de seu espectro de absorção. Esse espectro é caracterizado por apresentar bandas negras provenientes da passagem da luz de uma fonte luminosa através de um gás. De modo simplificado, pode-se dizer que toda fonte de luz emite um espectro característico que varia de acordo com a abundância de elementos químicos presentes na fonte e no gás e de sua temperatura. Essas bandas negras são chamadas de linhas de absorção. Podemos verificar o efeito Doppler para a luz quando as linhas de absorção estão fora da posição em que deveriam estar. Por exemplo, quando são desviadas em direção ao vermelho, podemos afirmar que a fonte de luz se afasta do observador e o contrário quando o desvio é para o azul.

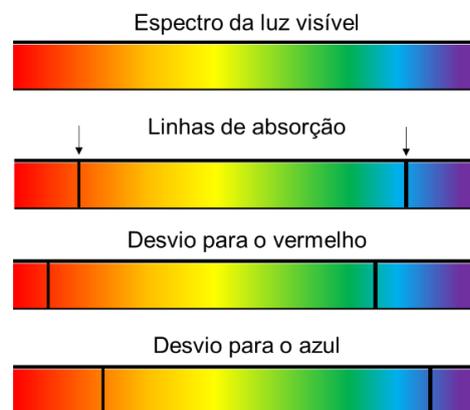


Figura 15. Efeito Doppler em espectros de absorção.

Como a luz se propaga a altíssima velocidade, o efeito Doppler só é perceptível para grandes velocidades relativas entre a fonte e o detector. Para esses casos o efeito Doppler é relativístico. Como a velocidade de afastamento de uma galáxia, por exemplo. Justamente por ser relativístico não é possível fazer qualquer distinção entre o movimento da fonte e do detector, considerando que os intervalos de tempos medidos nesses dois referencias seriam diferentes. Portanto, as equações utilizadas

para o efeito Doppler do som, também chamado de efeito Doppler clássico, não são validadas para o efeito Doppler relativístico.

Tomados esses apontamentos e sendo f_0 a frequência própria emitida pela fonte, podemos determinar a frequência f medida por um observador cujo movimento relativo à fonte é de afastamento pela expressão:

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$$

Onde β é a razão entre a velocidade do observador e a velocidade da luz. A mesma equação é validada para movimento relativo de aproximação, mas β deverá ser substituído por $-\beta$.

VELOCIDADE RADIAL

Esse método já vinha sendo utilizado para estudar sistemas binários. Embora um planeta seja muito menos massivo que uma estrela ele ainda é capaz de produzir efeitos sobre sua estrela hospedeira. A atração gravitacional do planeta faz com que a estrela “balance” em torno do centro de massa do conjunto. Para um observador na Terra, esse balanço será percebido pela oscilação das frequências emitidas pela estrela. Ora as frequências são desviadas para azul, ora para o vermelho.

Como já vimos, essas variações aparentes na frequência ocorrem devido ao Efeito Doppler e podem ser entendidas como movimentos de aproximação ou afastamento da fonte emissora. É fácil perceber que esse método é mais sensível para exoplanetas de maior massa e menor período orbital. O que pode ser visto como um ponto fraco do método. Além disso, só é possível verificar o Efeito Doppler para uma estrela oscilando próximo ou sobre o plano da linha de visada (linha imaginária que une o observador a estrela). Você pode observar isso na figura 16.A onde é possível medir a velocidade da estrela e na figura 16.B onde nenhuma variação na luz emitida pela estrela seria notada.

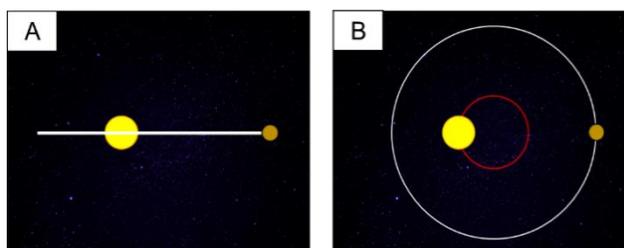


Figura 16. A)

Sistema planetário visto sobre a linha de visada. **B)** Mesmo sistema planetário observado a partir de outro ponto de vista.

O fato de a frequência de luz emitida pela estrela oscilar de forma periódica aponta para a presença de um exoplaneta ou até vários. Uma simplificação desse método pode ser vista na figura 17. Veja que o bamboleio da estrela em torno do centro de massa do sistema é percebido pelo observador na Terra como uma mudança aparente na cor da estrela. A representação não está em escala, os desvios na frequência da luz são bem mais sutis.

Apesar das dificuldades, esse é um dos métodos de maior sucesso, a quantidade de exoplanetas descobertos por ele já é de várias centenas. Para mais, a velocidade radial também é utilizada para confirmar exoplanetas detectados por outros métodos e complementar com informações tais como, período orbital e massa.

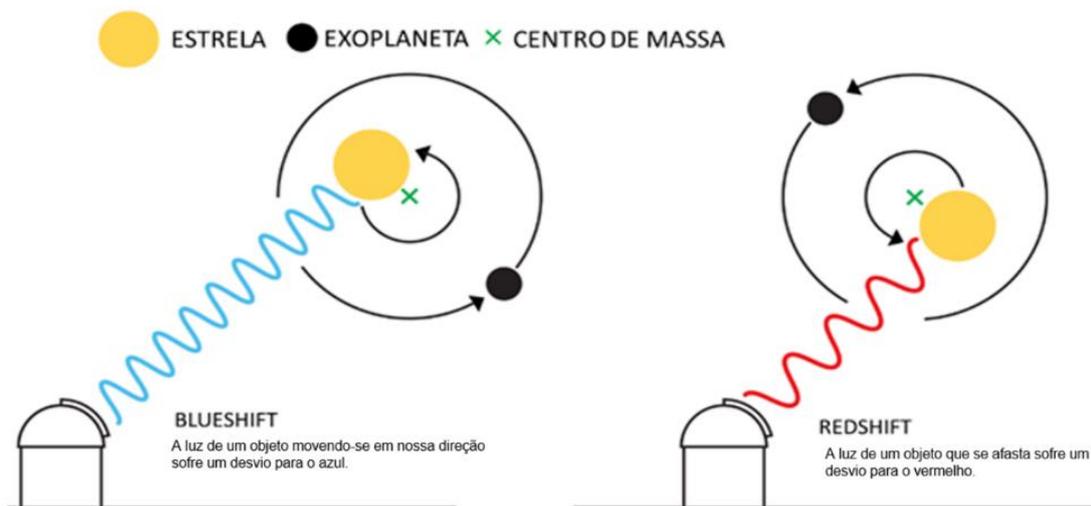


Figura 17. Frequência aparente observada pelo bamboleio da estrela devido a presença de um exoplaneta. Adaptado de <https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/fig4_fy_in_radialvelocitymethod.pdf>

KEPLER O PRIMEIRO “CAÇADOR DE PLANETAS”

Em março de 2009 a sonda espacial Kepler foi lançada ao espaço com o objetivo de encontrar planetas como o nosso em outros sistemas solares. A sonda, que custou quase meio bilhão de dólares, durante aproximadamente 9 anos conseguiu descobrir mais de 2,6 mil novos exoplanetas. Um grande êxito! Uma parcela muito pequena desses planetas apresenta condições necessárias para que a vida se desenvolva, mas nos ajudam a compreender melhor o universo que fazemos parte.

Inicialmente a missão tinha a expectativa de que a sonda permanecesse ativa por quase quatro anos. No entanto, na data de lançamento, devido a alguns ajustes de engenharia a capacidade de combustível que poderia ser levada foi ampliada e a expectativa se estendeu para aproximadamente 10 anos. Nesse período Kepler observou mais de 530 mil estrelas o que gerou 678 GB de dados, segundo site oficial a NASA.

Quatro anos após o seu lançamento, o giroscópio de duas das quatro rodas apresentou falhas. Esse equipamento é responsável pela estabilidade do telescópio para que ele permaneça apontado na direção correta. A inviabilidade de reparo nos giroscópios a distância quase levou ao abandono da missão e do telescópio. A solução encontrada foi contrabalancear a pressão exercida pelas rodas com a pressão do vento solar, o que garantiu a nave um equilíbrio instável. Antes das falhas dos giroscópios o telescópio estava sempre voltado em direção a constelação de Lira, o que permitia a coleta de dados por anos das mesmas estrelas observadas. Com o novo plano de trabalho o telescópio variava seu campo de visão em período entre 80 e 90 dias. Essa segunda fase foi batizada de missão K2.

Ao final de outubro de 2018 a NASA considerou a missão Kepler encerrada declarando a “aposentadoria” da sonda. Como já era esperado o combustível de propulsão se esgotou. Nessa mesma época os últimos dados coletados foram baixados e a comunicação com a sonda foi desligada. Kepler seguirá solitária orbitando nosso sistema solar.

Contudo, mesmo antes do encerramento da missão Kepler sua sucessora já havia sido lançada ao espaço. A missão Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) continuará a vasculhar o espaço em busca de novos exoplanetas por pelo menos dois anos.

BUSCA POR VIDA EM OUTROS PLANETAS

Antes de se pensar em procurar vida em outros planetas primeiramente precisamos saber onde procurar. Entre os mais de 4000 exoplanetas confirmados pouquíssimos apresentam as condições para que a vida se desenvolva (pelo menos da forma que a conhecemos).

Como já vimos, a grande maioria dos exoplanetas encontrados são gigantes e possuem formação gasosa com poucas chances de possuírem uma superfície

rochosa onde a água poderia se acumular para formar lagos, rios e oceanos. Aliás, até onde sabemos, possuir água no estado líquido parece ser uma condição inegociável para o surgimento de vida. Planetas rochosos e de tamanho comparável ao da Terra mostram-se como os melhores candidatos para abrigar seres vivos.

Denomina-se zona habitável a região nos arredores de uma estrela onde a temperatura seja adequada para manter a água em estado líquido. A influência e o tamanho da zona habitável são determinados pelo tipo de planeta e estrela e como ocorrem as interações entre eles. Por exemplo, para uma estrela muito brilhante e temperatura muito elevada a zona habitável é deslocada para uma região mais afastada da estrela do que seria para uma pequena estrela fria.

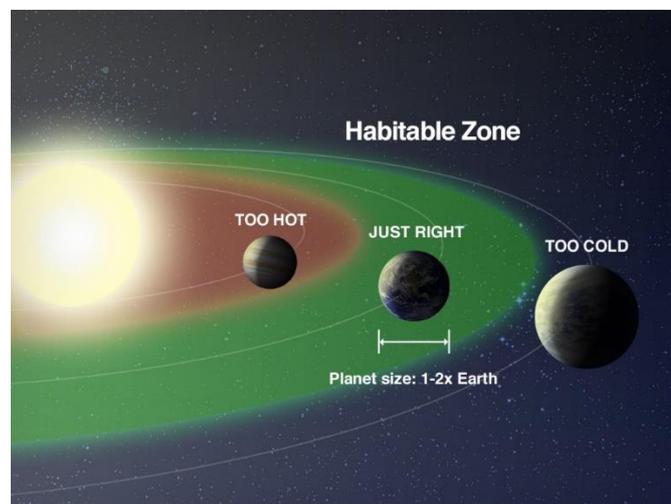


Figura 18. Tamanho da zona habitável. Disponível em <https://exoplanets.nasa.gov/>

A região que aparece em vermelho na figura 18 está muito próxima de sua estrela e por esse motivo é muito quente (*too hot*). A essa distância a água evaporaria. Já a região em azul está muito afastada e as temperaturas muito baixas (*too cold*) nessas condições a água congelaria. O espaço em verde está a distância adequada (*just right*) para que a água permaneça em estado líquido.

Outro fator fundamental é o tempo para que a vida se desenvolva. Mesmo um planeta rochoso, como a Terra, posicionado confortavelmente na zona habitável de sua estrela pode não ter tempo suficiente para a formação de microrganismos. Isso se deve ao fato de que uma estrela muito grande e brilhante queima seus gases por “apenas” alguns milhões de anos, enquanto estrelas menores podem sobreviver por

bilhões de anos. Na Terra, estimasse que o surgimento das primeiras formas microscópicas de vida tenha ocorrido um bilhão de anos após sua formação. Pelo menos mais 3 bilhões de anos para que seres mais complexos caminhassem sobre o solo e somente nos últimos 120 mil anos vida inteligente habita esse planeta

Após que todos os requisitos sejam cumpridos, como comprovaremos a presença de vida? Recorremos novamente a espectroscopia, porém agora em busca de bioassinaturas. Bioassinaturas são objetos, substâncias ou variações temporais que exigem um agente biológico (um ser vivo) para sua produção.

Quando a luz de uma estrela atravessa a atmosfera de um planeta ela forma um espectro. Bandas negras aparecem no espectro, obedecendo certos padrões, quando um gás está disponível na atmosfera. Determinado padrão indica a presença de oxigênio, um padrão diferente para metano e uma combinação desses dois é um indício muito forte da existência de alguma forma de vida respirando e liberando esses gases na atmosfera.

Por enquanto, a Terra ainda é o único planeta em que podemos afirmar que formas de vida se estabeleceram. Entretanto, as limitações das nossas observações ainda são grandes. Nós apenas conhecemos alguns planetas de um pequeno grupo de estrelas de um universo abundantemente vasto. Não conseguimos nem mesmo observar todas as estrelas da nossa galáxia (ainda falta bastante). Porém os resultados conseguidos até agora são animadores e as expectativas são que para o futuro sejam ainda melhores.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

1. A verificação experimental do efeito Doppler foi realizada em 1845 quando Buys Ballot observou que as notas emitidas por grupo de trompetistas que ocupavam o vagão de uma locomotiva em movimento era diferente do esperado. Sobre esse experimento, responda:

- a) Como deve ter sido a frequência percebida por Ballot durante a aproximação da locomotiva?
- b) Os trompetistas, dentro do vagão, também podem perceber o efeito Doppler? Justifique.

2. Considere um veículo trafegando por uma rodovia com velocidade de 72 km/h e ao longe avista um posto da polícia federal. Para cumprimentar os policiais o motorista buzina levemente. Sabendo que a frequência de fábrica da buzina é de 800 Hz, determine qual a frequência percebida pelos policiais. (velocidade do som no ar é de 340 m/s)

3. O movimento relativo entre uma fonte sonora e um observador distorce a forma como o observador percebe os sons. No caso em que a fonte se afasta do observador como se comporta o comprimento de onda e a frequência verificada pelo observador em relação as emitidas na fonte? O som será mais grave, mais agudo ou não apresentará diferença?

4. Para realizar um experimento, dois físicos, dispõem de um apito e um dispositivo para medir frequências sonoras. O experimento consiste em verificar a frequência captada pelo medidor que está preso a roupa de um deles que segue correndo em direção ao outro que está em repouso em relação ao solo e faz soar o apito. Sabendo que a frequência natural do apito é de 450 Hz, e a frequência captada é de 460 Hz, determine a velocidade com que o medidor se aproxima do apito. (velocidade do som no ar é de 340 m/s)

5. O efeito Doppler está comumente associado a fenômenos sonoros. Seria então esse um fenômeno restrito ao som? Justifique.

6. Rigel é a estrela mais brilhante na constelação de Orion. Tem cerca de 85 000 vezes a luminosidade do Sol e aproximadamente 18 vezes sua massa. Apresenta um brilho branco azulado e é considerada uma supergigante azul. Por ter coloração azulada podemos considerar que Rigel é uma estrela que aproxima-se do nosso sistema solar? Comente sua resposta.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. **Estudo da topologia de microlentes gravitacionais e a descoberta de exoplanetas do tipo Terra na zona habitável**. 2017. 102f. Dissertação (Mestrado em Física). Departamento de Física teórica e experimental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- AMORIM, R. G. G.; SANTOS, W. C. Determinação da massa e dados orbitais de exoplanetas pelo método Doppler. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 1, 2017.
- BERNARDES, L. **Exoplanetas, Extremófilos e Habitabilidade**. 2013. 208f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Astronomia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- BOND, I. A. et al. OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53: a planetary microlensing event. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 606, n. 2, p. L155, 2004.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, J. W. Fundamentos de Física, volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica: 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- LAGRANGE, A. M. Direct imaging of exoplanets. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 372, n. 2014, p. 20130090, 2014.
- MAYOR, M., QUELOZ, D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star, **Nature**, v. 378, p. 355-359, 1995.
- MEDEIROS, E. C. **Exoplanetas: classificação, habitabilidade e métodos de detecção**. 2019. 87 f. Trabalho de conclusão de curso de graduação (Licenciatura em Ciências: Matemática e Física) - Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara-AM, 2019.
- TIPLER, P. A.; MOSCA, G. Física para cientista e engenheiros, volume 1: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica: 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- UNIÃO ASTRONÔMICA INTERNACIONAL. **IAU 2006: General Assembly: Result of the IAU Resolution votes**. Praga, 2006. Disponível em: <http://www.iau.org/public_press/news/detail/iau0603>. Acesso em: 15 abr, 2020.
- VÁLIO, A. Procuram-se planetas. **Ciência e Cultura**, v. 61, n. 4, p. 28-32, 2009.
- WOLSZCZAN, A.; FRAIL, D. A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. **Nature**. vol. 355, p. 145-147, 1992.

Apêndice A

Questionário pré e pós-teste

Avaliação prévia de Física	
Instituto Federal de Mato Grosso – campus Cáceres	
Professor: Rayrison Tobias Costa	Data: ___ / ___ / ___

1. Em 1600, Giordano Bruno foi queimado vivo em uma fogueira após ser condenado por heresia pela inquisição romana. Entre outros motivos, ele propôs que as estrelas que vemos no céu, são outros sóis e que elas abrigam seus próprios mundos onde também poderia existir vida, assim como na Terra. Qual a sua opinião em relação as ideias defendidas por Giordano Bruno?

2. Proxima Centauri é a estrela conhecida mais próxima do nosso sistema solar. Ela fica a distância de aproximadamente 4 anos-luz ($4 \cdot 10^{13} km$) da Terra. Essa estrela não pode ser vista a olho nu, além disso, somente é possível observá-la a partir do hemisfério sul, entretanto já foi confirmado que pelo menos um planeta orbita essa estrela. Como você imagina que planetas fora do sistema solar podem ser descobertos?

3. Apesar de serem fenômenos distintos, entre som e luz existem alguns elementos em comum. De que maneira é possível relacionar o som e a luz e quais são os elementos que ambos possuem?

4. Em emergências é comum que as ambulâncias se desloquem com velocidade maior do que a permitida. Ao ligar a sirene e o giroflex a ambulância sinaliza para os outros motoristas que precisa que a passagem seja facilitada. Talvez você já tenha percebido que o som da sirene enquanto a ambulância se aproxima é diferente do som emitido ao se afastar. Como você explicaria esse fenômeno?

5. Dentro dos estudos de ondulatória um tópico recorrente trata sobre os “fenômenos ondulatórios”. Esses fenômenos ocorrem por diversos fatores como, por exemplo, a interação de uma onda com um obstáculo. A seguir estão listados alguns desses fenômenos, marque as caixas dos fenômenos que você já conhecia previamente (faça isso mesmo que você não compreenda completamente o fenômeno).

- a) Reflexão
- b) Refração
- c) Difração
- d) Interferência
- e) Efeito Doppler

6. Você está seguro quanto ao seu entendimento de algum desses fenômenos? Caso sim, descreva de forma breve aqueles que você compreende bem.

7. Tente relacionar os fenômenos ondulatórios com possíveis métodos de detecção de exoplanetas. Quais fenômenos parecem mais eficazes?
