

Impacto da atividade das estrelas na habitabilidade de exoplanetas

Adriana Valio

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Resumo

O Sol e as estrelas apresentam atividade magnética na forma de manchas escuras em sua superfície, além de produzirem explosões e ejeções de massa de suas atmosferas. As assinaturas de manchas escuras na superfície das estrelas podem ser modeladas a fim de caracterizar seus tamanhos e temperaturas. Estrelas jovens e anãs M produzem energéticas superexplosões, as quais podem impactar os planetas em órbitas, principalmente os que estiverem bem próximos da sua estrela hospedeira. O fluxo de radiação ultravioleta destas explosões pode ser prejudicial para possíveis organismos vivos na superfície de exoplanetas orbitando na zona habitável de estrelas ativas. Entretanto, uma atmosfera com ozônio poderia protegê-los, ou então um oceano. Os ventos estelares também afetam as atmosferas planetárias, podendo ser responsáveis pela sua erosão.

Abstract

The Sun as well as the stars exhibit magnetic activity in the form of dark spots on their surface, in addition they also produce flares and mass ejections from their atmospheres. The signatures of dark spots on the surface of stars can be modeled so as to characterize their sizes and temperatures. Young and M dwarf stars produce energetic superflares, which can impact orbiting planets, especially those very close to their host star. The flux of ultraviolet radiation from these flares can be very harmful to potential organisms living on the surface of exoplanets orbiting in the habitable zone of active stars. However, an atmosphere with ozone could protect them, or perhaps an ocean. Winds also affect the planetary atmospheres and may be responsible for their erosion.

Palavras-chave: atividade solar, atividade estelar, manchas explosões estelares, exoplanetas, habitabilidade planetária.

Keywords: solar activity, stellar activity, spots, stellar flares, exoplanets, planetary habitability.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38943](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38943)

1 Introdução

Há mais de 4 séculos que o Sol, a estrela mais próxima da Terra, vem sendo monitorada. Inicialmente por telescópios rudimentares no solo, os quais possibilitaram a observação sistemática das manchas solares, e atualmente por uma pletera de missões espaciais. Embora nem seja considerado uma estrela ativa quando comparado às outras estrelas, a atividade solar como as explosões e ejeções de massa têm significativo impacto no nosso planeta, principalmente nos dispositivos de comunicação e satélites.

Entretanto, no passado há alguns bilhões de anos, os efeitos da atividade de um jovem Sol bem mais ativo podem ter sido muito mais danosos para os planetas terrestres do Sistema Solar. Radiação ultravioleta de superexplosões podem ter

impossibilitado a vida na superfície do planeta, restringindo-a aos oceanos e lagos numa época em que a camada de ozônio terrestre ainda não tinha se formado. Por outro lado, um forte vento solar pode ter varrido as atmosferas primordiais de Mercúrio e Marte.

Embora a existência de água líquida na superfície de planetas rochosos seja uma prerrogativa para a existência da vida, como a conhecemos na Terra, certamente a atividade estelar tem um papel restritivo na origem e manutenção da vida em planetas em torno de estrelas ativas. As estrelas mais ativas são as jovens com menos de 1 a 2 bilhões de anos e as completamente convectivas como as pequenas estrelas anãs vermelhas. Não obstante, a zona habitável de uma estrela de baixa massa, devido ao seu fraco brilho, é muito mais interna e bem próxima da estrela. Logo,

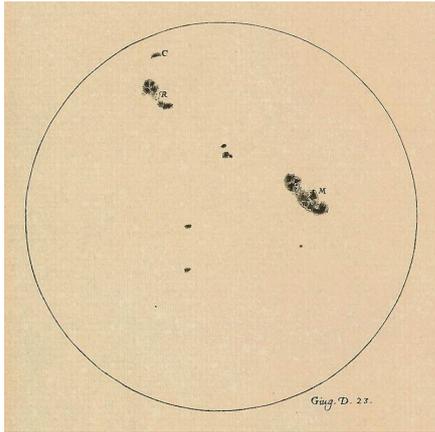


Figura 1: Desenho original de manchas solares feito por Galileo Galilei. Créditos: Projeto Galileo.

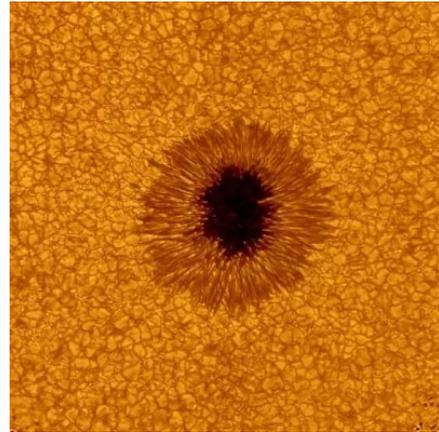


Figura 2: Foto de uma mancha solar tirada em 1º de julho de 2010 pelo New Solar Telescope do Observatório Solar de Big Bear (Califórnia, EUA).

planetas rochosos que venham a existir nesta região próxima da estrela, mesmo que a temperatura seja amena para a existência da água líquida, os fortes ventos estelares podem não permitir a retenção de uma atmosfera e suas superexplosões produzirem radiação UV esterilizante.

Como o Sol é o laboratório de onde obtemos nosso conhecimento sobre atividade estelar, na Seção 2 apresentamos os fenômenos característicos da atividade solar como manchas, explosões e ejeções de massa coronal, assim como o vento solar. A atividade das estrelas é detalhada na Seção 3, especificamente suas manchas, explosões e ventos. Exoplanetas e o conceito de habitabilidade planetária são explicados na Seção 4, enquanto o impacto da atividade estelar, principalmente das superexplosões, é descrito na Seção 5. Finalmente a Seção 6 conclui o artigo.

2 Atividade do Sol

O Sol, embora considerado calmo para os padrões estelares, apresenta atividade na forma de manchas escuras em sua superfície, explosões e ejeções de massa que atrapalham a sociedade tecnológica aqui na Terra interferindo nos sinais de telefonia celular e GPS, entre outros. Toda esta atividade solar tem origem em campos magnéticos produzidos no seu interior. O vento solar, constituído de partículas da atmosfera solar, preenche todo o Sistema Solar até encontrar os ventos das estrelas vizinhas. Maiores detalhes sobre o Sol como um todo podem ser encontrados no livro de divulgação de Adriana Silva [1].

2.1 Manchas solares e seu ciclo

Nosso Sol vem sendo estudado há vários séculos. Chineses e outros povos antigos já relatavam a presença de manchas no Sol a olho nu [2]. Entretanto, foi no início do século XVII que teve início o monitoramento sistemático das manchas solares com Galileo e Scheiner entre outros com o auxílio de lunetas e telescópios [3]. Um exemplo do detalhamento dos estudos das manchas solares feito por Galileo Galilei é mostrado na Figura 1.

Hoje sabemos que as manchas solares são regiões mais frias (4.000–4.500 K) que a fotosfera (5.780 K) ao redor. Estas regiões são mais frias por causa da concentração de intensos campos magnéticos que há nelas [4]. O campo magnético atrapalha o transporte de calor das partes mais internas do Sol para a sua superfície (fotosfera). Uma imagem atual de uma mancha solar pode ser vista na Figura 2. A região central mais escura, onde o campo magnético é mais intenso (de centenas até alguns milhares de Gauss), é chamada de *umbra* enquanto a região ao redor é a *penumbra*. As manchas solares são os “pés” dos arcos magnéticos que perfuram a superfície solar. Estes arcos são vistos em imagens de ultravioleta e raio X do Sol (Figura 3).

Em 1843, Schwabe, um astrônomo amador alemão, descobriu que o número de manchas na superfície do Sol variava com uma periodicidade de aproximadamente 11 anos, conhecido atualmente como o ciclo de atividade do Sol [5]. Em períodos de máxima atividade centenas de manchas podem ser observadas no Sol, enquanto durante dias de mínima atividade nenhuma mancha é vista (Fi-

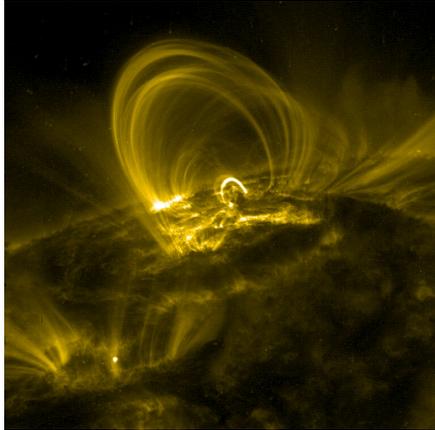


Figura 3: Foto de arcos magnéticos observados pelo satélite Transition Region and Coronal Explorer (TRACE), na linha de ultravioleta de 171 Å. Estes arcos têm temperaturas de aproximadamente 10^6 K.

gura 4).

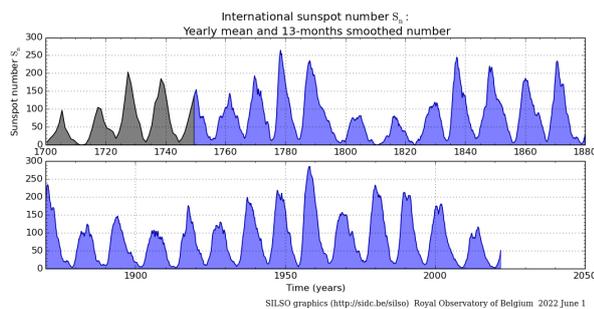


Figura 4: Média anual do número de manchas solares.

2.2 Explosões e ejeções de massa

As explosões solares estão entre os fenômenos mais energéticos do Sistema Solar, embora durem de alguns minutos a uma hora. Quando os arcos magnéticos, como os da Figura 3 se reconectam ou alteram a sua configuração, uma fração da sua energia magnética é liberada. Esta energia é suficiente para em questão de fração de segundo acelerar partículas até energias muito altas e também aquecer o plasma da atmosfera solar. Tanto as partículas energéticas quanto o plasma quente (milhões de graus) emitem radiação em todo o espectro eletromagnético de raios X até ondas de rádio, passando pelo ultravioleta, visível e infravermelho. As explosões mais intensas chegam a emitir até 10^{32} ergs [6].

Às vezes as explosões vêm acompanhadas da ejeção de enormes quantidade de matéria da atmosfera solar para o meio interplanetário, como foi o caso da explosão da Figura 5. Estas são

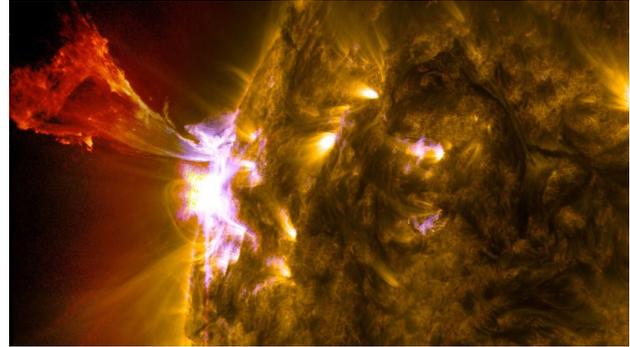


Figura 5: Explosão solar observada pelo satélite Solar Dynamics Observatory, da NASA, em 28 de outubro de 2021.

conhecidas como “ejeções de massa coronal” [7]. A coroa, camada mais externa do Sol, é muito quente com temperatura de milhões de graus. Em média, 10^{12} kg de plasma solar é arremessado, entrelaçado por campos magnéticos. As maiores ejeções de massa também são tão energéticas quanto as explosões mais intensas. Entretanto, as ejeções de massa também podem acontecer sem que tenha havido uma explosão. Mas a fonte de energia destas também é de origem magnética.

Ocasionalmente, algumas das ejeções são direcionadas para a Terra. Quando toda esta matéria que foi ejetada alcança o nosso planeta alguns dias depois, vários são os distúrbios causados. Por exemplo, fortes tempestades geomagnéticas que alteram o campo magnético terrestre causando o comportamento errático de instrumentos de navegação como bússolas; alterações na ionosfera as quais afetam as comunicações de longa distância; curto circuitos em satélites picos de correntes nas linhas de alta tensão; apagões; alterações na camada de ozônio, entre outros. Também podem alterar as órbitas dos satélites e interferir no do sinal de GPS. As lindas auroras boreais (hemisfério Norte) e austrais (hemisfério Sul) também são produzidas quando as partículas ionizantes das ejeções penetram na nossa atmosfera. Felizmente o campo magnético do nosso planeta nos protege da maior parte das partículas ionizadas destas ejeções de massa. Contudo a radiação das explosões pode ser letal para astronautas desprotegidos.

2.3 Vento solar

A coroa, última camada da atmosfera solar, por se encontrar a temperaturas tão altas, emana um fluxo contínuo de partículas conhecido como

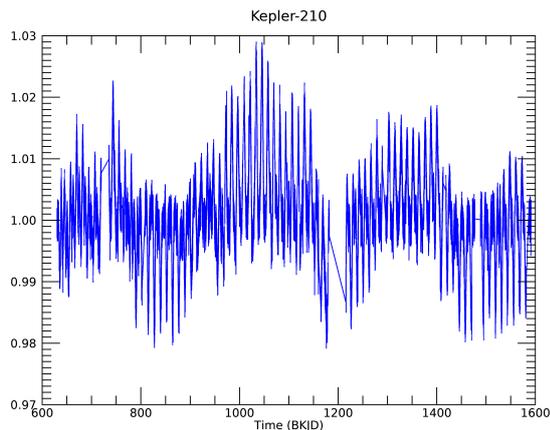


Figura 6: Curva de luz da estrela Kepler-210 observada pela missão espacial Kepler da NASA.

o vento solar. O vento solar permeia toda a heliosfera, a bolha de material solar permeada pelo campo magnético solar, que inclui todo o Sistema Solar. Trabalhos recentes mostraram que a heliosfera tem o formato de um croissant [8].

Em 1959, Parker foi o primeiro a descrever matematicamente a dinâmica do vento solar [9]. Atualmente sabe-se que toda a atividade solar é gerada por um campo criado no seu interior por um mecanismo de dínamo (o $\alpha\Omega$ dínamo), proposto pela primeira vez por Parker [10].

No caso do nosso Sol, por ser uma estrela de meia idade, o vento solar atual não causa danos à nossa atmosfera, mas este pode não ser o caso para planetas muito mais próximos de suas estrelas. E certamente não é o caso de estrelas bem mais jovens que possuem um vento bem mais intenso.

3 Atividade estelar

Assim como o nosso Sol, a atividade das estrelas se manifesta na forma de manchas e explosões. Esta atividade provém do campo magnético estelar. Embora a atividade solar muitas vezes tenha impacto em nosso planeta Terra, de um modo geral, nossa estrela é tida como inativa quando comparada às estrelas ativas. Toda esta atividade das estrelas ativas, juntamente com o vento estelar, podem afetar a atmosfera dos exoplanetas até causando sua evaporação e/ou erosão. Além disso, o fluxo aumentado de radiação ultravioleta durante as intensas explosões estelares podem in-

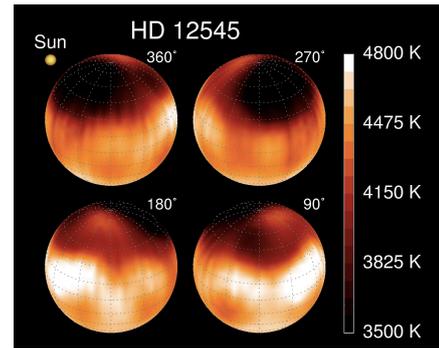


Figura 7: Mapa de temperatura da superfície reconstruído a partir da técnica de imageamento Doppler [12].

viabilizar a vida na superfície dos planetas em órbita, mesmo em sua zona habitável.

3.1 Manchas estelares

Muito provavelmente, todas as estrelas frias com um envelope convectivo como o Sol têm manchas suas superfícies. A principal característica de uma estrela ativa é a presença de muitas manchas escuras em sua superfície. Estas manchas chegam a causar variações de alguns porcentos no brilho total da estrela ao longo de dias. No caso da estrela do tipo espectral K, Kepler-210, observada pelo satélite Kepler, a variação do brilho total da estrela chega a $\pm 2\%$ (Figura 6), enquanto que as manchas solares sequer causam variações de 0,1%. A evidente periodicidade do brilho da estrela é causada pela rotação da estrela conforme manchas escuras entram e saem da nossa visão. Portanto, o período de rotação da estrela é facilmente estimado, no caso da Kepler-210, este período é de 12,35 dias.

Os telescópios atuais não possuem resolução espacial para detectar manchas individuais semelhantes às manchas solares. No entanto, existem basicamente três métodos para identificar e caracterizar as manchas estelares: (1) imageamento Doppler, (2) modulação fotométrica e (3) mapeamento por trânsito planetário.

O imageamento Doppler usa as deformações observadas nos perfis de linhas espectrais causadas pela rotação da estrela para recuperar a distribuição de temperatura da superfície estelar [11]. Porém, o método de imageamento Doppler só pode ser aplicado em estrelas com rápida rotação. Um exemplo da distribuição da temperatura na superfície da estrela gigante K0 HD 12545 é mostrada na Figura 7 [12].

Como mencionado anteriormente, a rotação da

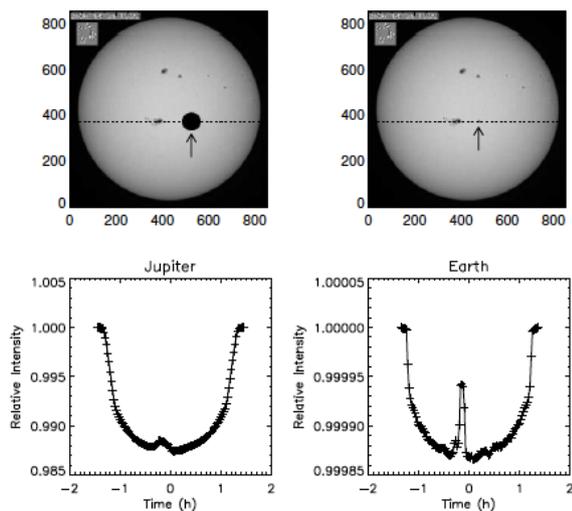


Figura 8: Imagem do Sol com a simulação de trânsito de um planeta do tamanho de Júpiter (esquerda) e da Terra (direita) em frente a uma mancha solar. [15].

estrela induzirá variações periódicas em seu brilho total, exemplificado na Figura 6. Esta modulação fotométrica da curva de luz pode ser ajustada por modelos para inferir as características dessas manchas [13, 14]. Este modelo é conhecido como o Modelo da Máxima Entropia, onde a superfície da estrela é dividida em um número fixo de pixels [14]. Em um dado instante, a cada pixel é atribuída uma certa intensidade (mais escura para manchas e mais brilhante para *faculae*) de forma que o brilho total naquele instante seja ajustado.

O último dos três métodos, mapeamento de manchas por trânsito planetário, foi idealizado por mim em 2003 [16] e aplicado pela primeira vez à estrela HD 102458. Quando um planeta transita na frente de sua estrela hospedeira, há uma chance de que ele oculte uma ou mais manchas na superfície da estrela. O resultado é uma pequena variação durante a curva de luz de trânsito, a qual depende das características da mancha como tamanho e intensidade.

Na Figura 8 é mostrado uma simulação do sinal causado pela mesma mancha, de uma imagem real do Sol, ocultada pelo trânsito de um planeta do tamanho de Júpiter (esquerda) e da Terra (direita) [15]. Notem que o trânsito de um planeta como Júpiter causa uma diminuição de 1% no brilho total da estrela, enquanto que o trânsito de uma Terra, 10 vezes menor, causa uma diminuição de apenas 0,01%. Porém no caso da Terra, o sinal da mancha é relativamente bem mais evi-

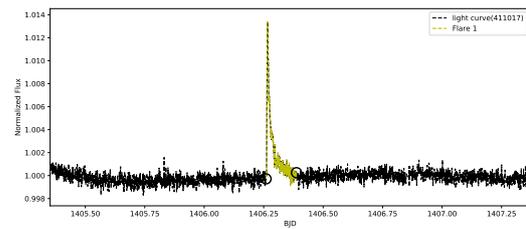


Figura 9: Maior *superflare* observada na curva de luz da estrela Kepler-411, do tipo espectral K [18].

dente. A partir da modelagem das assinaturas das manchas nas curvas de luz de trânsitos é possível estimar seu tamanho, temperatura e até intensidade do campo magnético [17, 18].

3.2 Explosões

Outra manifestação da atividade estelar são as explosões, ou *flares* em inglês, súbitos aumentos de brilho que também podem chegar a alguns por cento do brilho da estrela, porém em questão de minutos. Geralmente são bem mais energéticas que as contrapartidas solares, chegando a emitir de 1.000 a 10.000 vezes mais energia que as explosões do Sol e, portanto, também são conhecidas como *superflares*.

O satélite Kepler (NASA) monitorou continuamente mais de 160.000 estrelas [19]. Os aumentos repentinos observados no brilho de uma estrela indicam a ocorrência de uma explosão, como mostrado na Figura 9. Essas superexplosões liberam quantidades significativas de raios X, radiação ultravioleta extremo (EUV) e ultravioleta (UV).

Na Ref. [20], os autores detectaram 365 superexplosões em 9.751 estrelas do tipo solar. Essas explosões atingiram energias de 10^{35} ergs em 148 estrelas. Estrelas anãs M do tipo tardio têm uma frequência de explosões 1.000 vezes maior que a do Sol. Dependendo da energia da explosão, podem ocorrer mudanças na atmosfera planetária, como perda atmosférica por foto-evaporação e também alteração da composição química da alta atmosfera. Além disso, os prótons energéticos das explosões podem produzir nitrogênio ímpar e hidrogênio ímpar na camada superior da atmosfera e mesosfera. Estes elementos podem destruir o ozônio, o que afeta a origem e a evolução da vida [21].

3.3 Ventos

Ventos estelares podem causar erosão da atmosfera dos planetas em órbita, caso estes não tenham um campo magnético protetor. Acredita-se que isso tenha acontecido com Marte no passado, quando existia água corrente em sua superfície, provavelmente mantida por um atmosfera que mais tarde foi perdida.

As ejeções de massa coronal também contribuem para a perda de uma atmosfera planetária. Embora até o momento nenhuma ejeção de massa de uma estrela foi observada.

Na Ref. [22] investigaram-se as interações entre o vento estelar de uma típica estrela M e a atmosfera superior, rica em hidrogênio, de um planeta semelhante à Terra e de uma super-Terra na zona habitável (aproximadamente 0,24 UA). A formação e evolução de uma extensa atmosfera foi estudada dependendo da radiação X e UV a estrela, das características do vento estelar, como densidade e velocidade, e se o planeta tinha ou não uma magnetosfera. De acordo com os autores, o escape não térmico de átomos de hidrogênio ionizados arrastados ao longo da vida de um planeta varia entre 0,4 quantidades equivalentes de hidrogênio no oceano da Terra e geralmente é várias vezes menor que o escape atmosférico térmico.

A atividade em estrelas do tipo solar depende da rotação da estrela. Mas a rotação diminui com a idade da estrela devido à perda de momento angular causada pelo vento estelar ao longo do tempo de vida na sequência principal [23]. Em estrelas do tipo solar, a relação idade-atividade é bem definida, com estrelas jovens tendo forte emissão nas linhas H e K do CaII cujo fluxo é proporcional a $t^{-1/2}$, onde t é a idade da estrela. Essa frenagem atua até cerca de 2 bilhões de anos [24]. Uma relação idade-atividade semelhante a de Skumanich também é encontrada para estrelas gêmeas solares [25].

4 Exoplanetas e habitabilidade

Atualmente já são mais de 5.000 exoplanetas (planetas em torno de outra estrela que não o Sol) descobertos pelos mais variados métodos de detecção, sendo o método do trânsito o mais prolífico (70%) graças ao satélite Kepler.¹ Acredita-se que em torno de cada uma das estrelas da Via

¹<http://exoplanet.eu>

Láctea existe pelo menos um planeta, mais provavelmente múltiplos planetas.

Uma das mais importantes descobertas da missão espacial Kepler foi que a maioria dos exoplanetas não se parece em nada com planetas do nosso Sistema Solar. Mais da metade dos planetas, cujo raio é conhecido (basicamente pelo método de trânsito), são do tipo Super-Terra ou Mini-Netuno, planetas com raios entre 1,5 e 3 raios terrestres. As Super-Terras são planetas rochosos e em princípio capazes de abrigar vida em sua superfície se localizadas na Zona Habitável de sua estrela. Já os Mini-Netunos são mais parecidos com os gigantes de gelo do nosso Sistema Solar, com uma atmosfera espessa de hidrogênio e hélio.

A Zona Habitável (HZ) de uma estrela é a região onde a temperatura da superfície de um planeta terrestre seria entre 0°C e 100°C, isto é, capaz de reter água líquida. Claro a presença e o tipo de atmosfera que o planeta possua influencia a existência de água no estado líquido na superfície. Esta região depende do brilho da estrela, responsável principal pela temperatura do planeta, e, portanto, da sua massa. No caso do Sol, a ZH varia entre 0,95 e 1,37 UA, colocando a Terra confortavelmente dentro da zona habitável da nossa estrela.

Entretanto, as estrelas mais comuns na nossa Galáxia são as anãs M, com massas entre 0,6 e 0,08 massas solares, e brilho entre 7% e 0,03% do nosso Sol. Isto significa que a ZH destas estrelas se encontra muito próxima destas. Por exemplo, a estrela fria TRAPPIST-1 com massa de apenas 9% da massa do Sol possui 7 planetas terrestres em órbita. Dada a sua baixa massa, a ZH ao seu redor se encontra entre 0,02 e 0,05 UA, isto é, bem mais interna até que a órbita do planeta Mercúrio (0,387 UA). Mesmo assim, 3 dos planetas TRAPPIST-e, TRAPPIST-f e TRAPPIST-g se encontram na Zona Habitável da estrela. Por estarem tão próximos de sua estrela, estes planetas estão sujeitos a toda sorte de perigos provenientes da atividade estelar. E estrelas completamente convectivas como as anãs M frias são extremamente ativas.

Quando a radiação e as partículas produzidas pela atividade solar atingem da Terra, eles podem causar muitos danos à nossa sociedade altamente tecnológica, mas também as altas doses de radiação ultravioleta podem ser fatais para

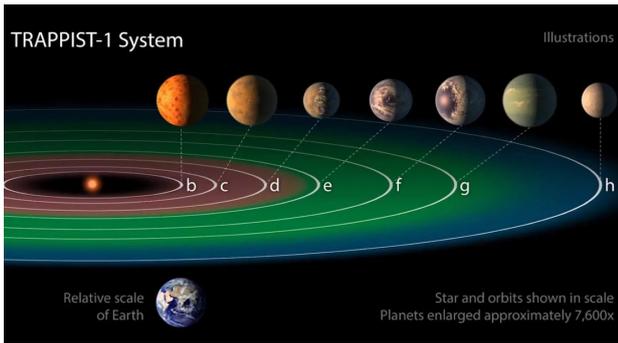


Figura 10: Sistema TRAPPIST-1 com os 7 planetas terrestres. A região verde representa a zona habitável da estrela.

astronautas não protegidos pela nossa atmosfera, principalmente pela camada de ozônio. Da mesma forma, também perigosa para os planetas em órbita é a atividade de sua estrela hospedeira na forma de explosões e ejeções de massa. Além disso, o vento estelar pode impactar severamente a atmosfera de exoplanetas que estão muito próximos da estrela ou não tem magnetosfera, erodindo-a [26].

5 Impacto da atividade estelar

A radiação ultravioleta contínua de estrelas jovens e a produzida repentinamente durante as explosões induzem a foto-evaporação dos gases atmosféricos, portanto, impossibilitando a habitabilidade dos planetas, especialmente aqueles em órbitas próximas. Os ventos estelares também contribuem para a perda de atmosfera de exoplanetas podendo comprometer sua habitabilidade. Também possivelmente fatal para seres vivos na superfície de um planeta é a radiação UV produzida durante explosões.

5.1 Explosões

Com o objetivo de determinar qual o impacto das superexplosões para um possível vida presente na superfície/oceano dos planetas, nós analisamos o efeito da radiação UV de explosões em um planeta hipotético semelhante à Terra orbitando a 1 UA uma estrela como o Sol, Kepler-96 [27], e nos três planetas na zona habitável da estrela TRAPPIST-1 [28].

Kepler-96 é uma estrela semelhante ao Sol, porém com uma idade de 2,2 bilhões de anos que corresponde ao final da Era Arqueana aqui na

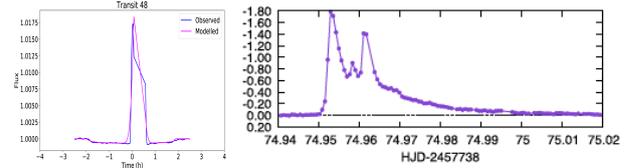


Figura 11: Esquerda: Maior explosão da Kepler-96 observada durante o 48o trânsito da Super-Terra Kepler96b [27]. Direita: Maior explosão da TRAPPIST-1 observada durante a missão K2 [29].

Terra, quando ocorreu o Grande Evento de Oxigenação. Este grande aumento de oxigênio favoreceu o desenvolvimento de organismos multicelulares aqui na Terra. Três superexplosões foram detectadas durante os trânsitos de Kepler-96b, uma Super-Terra muito perto da estrela. A maior destas explosões (painel esquerdo da Figura 11) liberou uma energia de $1,8 \times 10^{35}$ ergs. Dois modelos de atmosfera foram considerados para a Terra hipotética a 1 AU [27]: (1) Arqueana (3,9 Gyr – 2,5 Gyr) com 80% N_2 e 20% CO_2 e (2) Atual, com 80% N_2 e 20% O_2 .

Superflares aumentam o fluxo de UV emitido pela estrela durante um curto período de tempo. Para estimar o fluxo total de UV irradiado durante estas superexplosões, consideramos a mais forte explosão solar já registrada, que ocorreu em 28 de outubro de 2003 [30]. O fluxo UV desta explosão totalizou 12% do fluxo total (4×10^{32} ergs) da explosão solar. Uma simples proporcionalidade entre as explosões solar e da Kepler-96 revela que a superexplosão deve ter aumentado a quantidade de radiação UV que atingiu o planeta hipotético em 5.400% [27].

Se a atmosfera de um planeta tem gases como N_2 , CO_2 , ou O_2 , os comprimentos de onda curtos (0,1–200 nm) da radiação UV são absorvidos no topo da atmosfera. Além disso as radiações UVB e UVC (200–300 nm) serão atenuadas por uma camada de ozônio. No entanto, para um planeta sem uma camada de ozônio, o DNA de um organismo vivo será danificado principalmente pela radiação UVC e UVB. A resposta de um corpo biológico depende do comprimento de onda e da duração de exposição. Portanto, é necessário ponderar o fluxo incidente pelo espectro de ação, uma função que expressa a eficácia da resposta biológica a diferentes comprimentos de onda da radiação.

Consideramos o espectro de ação de duas bactérias: *Escherichia coli* e *Deinococcus radiodurans*.

rans [27]. Esta última uma bactéria extremófila que sobrevive em condições ambientais extremas como vácuo, desidratação e altas dosagens de radiação UV. O resultado do cálculo mostrou que, no caso de uma superexplosão, tanto a *E. coli* quanto a *D. radiodurans* só sobreviveriam na superfície da hipotética Terra em órbita de Kepler-96 se uma camada de ozônio estivesse presente na atmosfera do planeta.

Por outro lado, um oceano de água líquida em um planeta na zona habitável da estrela poderia proteger possíveis organismos vivos do aumento da radiação UV devido às superexplosões, permitindo que a vida prospere. Portanto, analisamos se um oceano poderia preservar os seres vivos da agressividade das superexplosões. A resposta é positiva para profundidades de até 28 m para *E. coli* e apenas 12 m para *D. radiodurans* [27]. Estas profundidades estão dentro da zona fótica (até 200 m) no caso da Terra, onde organismos vivos se proliferam.

O mesmo cálculo foi realizado para os 3 planetas na zona habitável da estrela anã M TRAPPIST-1. Observações mostraram a grande atividade desta estrela, com 47 explosões detectadas em aproximadamente um mês com energias entre 10^{30} e 10^{33} ergs [29]. A maior explosão detectada liberou uma energia total de $1,24 \times 10^{33}$ ergs ao longo de 43 min (painel direito da Figura 11). Para estimar a contribuição do fluxo UV da explosão da TRAPPIST-1 utilizamos o fluxo UV medido para as explosões da estrela Ad Leo, também uma anã vermelha M [31], enquanto o modelo de atmosfera para os planetas foi obtido da Ref. [32]. O resultado foi semelhante ao da hipotética Terra em torno de Kepler-96. Bactérias como *E. coli* e *D. radiodurans* só poderiam sobreviver na superfície dos planetas TRAPPIST-1 na HZ se houvesse uma camada de ozônio presente em suas atmosferas, ou nas águas rasas de um lago ou oceano [28].

5.2 Ventos

A evolução da atmosfera de um planeta depende fortemente das propriedades de sua estrela hospedeira. Estrelas mais jovens produzem ventos mais fortes e intensa emissão de raios X e UV. Planetas que orbitam anãs M são particularmente afetados devido à sua proximidade da estrela hospedeira.

Para determinar se esses planetas em ZH pró-

ximas da estrela conseguem manter uma atmosfera, é necessário quantificar o impacto do vento estelar e dos fluxos de UV ao longo da vida dos planetas.

A perda atmosférica depende da velocidade e densidade do vento e da seção de choque do planeta que varia com seu raio ao quadrado. A velocidade do vento pode ser estimada usando-se a solução da Ref. [9] para o vento a partir da temperatura coronal da estrela. Para o cálculo da diminuição da velocidade do vento com a idade da estrela utilizamos como *proxy* o período de rotação da estrela. A perda de massa devido ao vento estelar foi então calculada em função do tempo, e acumulada até a idade do planeta para determinar o total de perda de massa atmosférica primordial, dominada por H/He.

Já a perda de massa por fotoevaporação é proporcional ao fluxo de UV estelar e inversamente proporcional à densidade do planeta. O fluxo de UV é estimado a partir de observações do fluxo de raio X das estrelas.

Analisando 38 planetas na ZH de estrelas anãs do tipo M descobrimos que o vento estelar só pode remover uma pequena fração do envelope H/He de exoplanetas do tamanho da Terra [33]. Já o cálculo da perda de massa por fotoevaporação causada por um intenso fluxo UV é muito mais efetiva para remover quantidades significativas de H/He. Em torno de um terço dos planetas estudados tiveram sua atmosfera primordial totalmente evaporada pela radiação UV, enquanto que 8% perderam sua atmosfera pelos dois mecanismos (vento e radiação UV). Por outro lado, planetas orbitando a distâncias maiores que 0,1 UA não perdem seu envelope primordial pela ação do vento estelar nem por fotoevaporação.

6 Conclusão

Viver em torno de uma estrela ativa pode ser muito perigoso, principalmente devido aos ventos estelares, superexplosões e ejeções de massa coronal. Estes fenômenos ativos podem arrancar a atmosfera planetária ou produzir dosagens letais de raios X e radiação UV para organismos vivos na superfície. A presença de uma magnetosfera pode ajudar a prevenir a perda atmosférica de um planeta. Assim, caracterizar a atividade estelar é fundamental para entender o clima espacial dos planetas em órbita.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os meus colaboradores que ao longo dos anos contribuíram para as minhas pesquisas tanto em física solar, quando em atividade estelar. Principalmente, muitos dos resultados apresentados neste artigo não seriam possíveis sem a parceria de meus alunos de pós-graduação a quem sou extremamente grata.

Sobre a autora

Adriana Valio (avalio@craam.mackenzie.br) é especialista em atividade solar e estelar, principalmente em explosões e manchas. Foi a primeira a desenvolver o método de mapeamento das manchas estelares a partir de trânsitos planetários.

Referências

- [1] A. V. R. Silva, *Nossa Estrela: o Sol* (Livraria da Física, São Paulo, 2006).
- [2] A. D. Wittmann e Z. T. Xu, *A catalogue of sunspot observations from 165 BC to AD 1684*, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series* **70**(1), 83 (1987). Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987A&AS...70...83W>, acesso em ago. 2022.
- [3] J. A. Eddy, *The Maunder Minimum*, *Science* **192**(4245), 1189 (1976).
- [4] A. Valio et al., *Correlations of Sunspot Physical Characteristics during Solar Cycle 23*, *Solar Physics* **295**(9), 120 (2020).
- [5] H. Schwabe, *Die Sonne. Von Herrn Hofrath Schwabe*, *Astronomische Nachrichten* **20**(17), 283 (1843).
- [6] H. Hudson e J. Ryan, *High-Energy Particles In Solar Flares*, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* **33**, 239 (1995).
- [7] S. W. Kahler, *Solar flares and coronal mass ejections.*, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* **30**, 113 (1992).
- [8] M. Opher et al., *Magnetized jets driven by the Sun: The structure of the heliosphere revisited—Updates*, *Physics of Plasmas* **23**(5), 056501 (2016).
- [9] E. Parker, *Extension of the Solar Corona into Interplanetary Space*, *Journal of Geophysical Research* **64**(11), 1675 (1959).
- [10] E. N. Parker, *Hydromagnetic Dynamo Models.*, *The Astrophysical Journal* **122**, 293 (1955).
- [11] S. S. Vogt e G. D. Penrod, *Doppler imaging of spotted stars : application to the RS Canum Venaticorum star HR 1099.*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **95**, 565 (1983).
- [12] K. G. Strassmeier, *Doppler imaging of stellar surface structure. XI. The super starspots on the K0 giant HD 12545: larger than the entire Sun*, *Astronomy & Astrophysics* **347**, 225 (1999). Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999A&A...347..225S>, acesso em ago. 2022.
- [13] A. F. Lanza et al., *Modelling the rotational modulation of the Sun as a star*, *Astronomy & Astrophysics* **403**, 1135 (2003).
- [14] A. F. Lanza et al., *Magnetic activity in the photosphere of CoRoT-Exo-2a. Active longitudes and short-term spot cycle in a young Sun-like star*, *Astronomy and Astrophysics* **493**(1), 193 (2009). [ArXiv:0811.0461](https://arxiv.org/abs/0811.0461).
- [15] A. Silva-Válio, *Starspot detection from planetary transits observed by CoRoT*, in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica Conference Series* (2009), vol. 35, 13–18. Disponível em <https://www.astroscu.unam.mx/RMxAC/vol35.html>, acesso em ago. 2022.
- [16] A. V. Silva, *Method for spot detection on solar-like stars*, *The Astrophysical Journal Letters* **585**(2), L147 (2003).
- [17] A. Valio et al., *Activity and rotation of Kepler-17*, *The Astrophysical Journal* **835**(2), 294 (2017).
- [18] A. Araújo e A. Valio, *Kepler-411 differential rotation from three transiting planets*, *The Astrophysical Journal Letters* **907**(1), L5 (2021).
- [19] W. J. Borucki et al., *Kepler planet-detection mission: introduction and first results*, *Science* **327**(5968), 977 (2010).

- [20] H. Maehara et al., *Superflares on solar-type stars*, *Nature* **485**(7399), 478 (2012).
- [21] A. Segura et al., *The effect of a strong stellar flare on the atmospheric chemistry of an Earth-like planet orbiting an M dwarf*, *Astrobiology* **10**(7), 751 (2010).
- [22] K. G. Kislyakova et al., *XUV-Exposed, Non-Hydrostatic Hydrogen-Rich Upper Atmospheres of Terrestrial Planets. Part II: Hydrogen Coronae and Ion Escape*, *Astrobiology* **13**(11), 1030 (2013). [ArXiv:1212.4710](#).
- [23] A. Skumanich, *Time Scales for Ca II Emission Decay, Rotational Braking, and Lithium Depletion*, *The Astrophysical Journal* **171**, 565 (1972).
- [24] G. Pace, *Chromospheric activity as age indicator. An L-shaped chromospheric-activity versus age diagram*, *Astronomy and Astrophysics* **551**, L8 (2013). [ArXiv:1301.5651](#).
- [25] D. Lorenzo-Oliveira et al., *The Solar Twin Planet Search. The age-chromospheric activity relation*, *Astronomy and Astrophysics* **619**, A73 (2018). [ArXiv:1806.08014](#).
- [26] V. S. Airapetian et al., *Impact of space weather on climate and habitability of terrestrial-type exoplanets*, *International Journal of Astrobiology* **19**(2), 136 (2020). [ArXiv:1905.05093](#).
- [27] R. C. Estrela e A. S. Valio, *Superflare ultraviolet impact on Kepler-96 system: A glimpse of habitability when the ozone layer first formed on Earth.*, *Astrobiology* **18**(11), 1414 (2018).
- [28] R. Estrela, S. Palit e A. Valio, *Surface and Oceanic Habitability of Trappist-1 Planets under the Impact of Flares*, *Astrobiology* **20**(12), 1465 (2020). [ArXiv:2008.09147](#).
- [29] K. Vida et al., *Frequent Flaring in the TRAPPIST-1 System—Unsuited for Life?*, *The Astrophysical Journal* **841**(2), 124 (2017). [ArXiv:1703.10130](#).
- [30] T. N. Woods et al., *Solar irradiance variability during the October 2003 solar storm period*, *Geophysical Research Letters* **31**(10), L10802 (2004).
- [31] S. L. Hawley e B. R. Pettersen, *The Great Flare of 1985 April 12 on AD Leonis*, *The Astrophysical Journal* **378**, 725 (1991).
- [32] J. T. O'Malley-James e L. Kaltenegger, *UV surface habitability of the TRAPPIST-1 system*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **469**(1), L26 (2017). [ArXiv:1702.06936](#).
- [33] A. Modi, R. Estrela e A. Valio, *Modeling the Atmospheric Evolution of Small Planets Orbiting M-dwarfs due to Stellar Wind and Photoevaporation* (2022), submetido ao Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.