

Exoplanetas e sistemas extrassolares: uma sequência didática para o ensino da gravitação universal no Ensino Médio

Rodrigo da Silva Sobrinho^{1.#}
Luciano Luiz Alencar de Oliveira²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.

²Instituto Santa Terezinha, Bragança, PA, Brasil.

RESUMO

No ensino de física, os estudos relacionados à astronomia têm chamado bastante atenção de alunos em diferentes níveis escolares, desde o Ensino Médio até o ensino superior. Nas últimas décadas, a busca por planetas que orbitam estrelas distantes tem interessado o público em geral, seja devido a diversos registros fotográficos, a documentários e/ou até mesmo a filmes/desenhos de ficção científica; contribuindo para a divulgação de áreas de estudos relacionadas aos exoplanetas. Atualmente, são mais de 4.300 planetas confirmados e que só foram detectados graças ao uso de técnicas muito precisas. Os métodos para a descoberta de exoplanetas são classificados como direto e indireto. A detecção indireta tem sido a maneira mais eficaz para encontrar outros planetas, localizados muito além do nosso sistema planetário. Nesse contexto, agregar os conhecimentos discutidos em sala de aula sobre os estudos da gravitação universal aos dados reais e precisos de planetas que orbitam estrelas distantes pode ser entendido como uma poderosa ferramenta pedagógica no ensino de física, cujos resultados possibilitam não apenas uma nova experiência de base educativa, mas perspectivas palpáveis que podem mudar as realidades filosófica e profissional.

Palavras-chave: astronomia; exoplanetas; ensino de física; sequência didática; leis de Kepler; gravitação universal

1. Introdução

Ensinar física é um desafio constante na vida do professor e vários motivos levam os alunos a terem aversão a essa disciplina. Nesse contexto, é sempre recomendável relacionar o tema a ser desenvolvido em sala com temáticas empolgantes e relevantes da vida do discente. Dessa forma, a astronomia é uma excelente fonte de assuntos e temáticas que podem servir de fio condutor para o ensino de física, uma vez que é notório o seu poder em despertar o imaginário e o fascínio tanto de adultos quanto de crianças [1].

Neste artigo, temos como objetivo apresentar uma sequência didática¹ para o ensino da gravitação universal no Ensino Médio, com ênfase na análise de dados astronômicos reais. Para tanto, buscamos usar o tema exoplanetas como meio de chamar a atenção do aluno, visando contribuir para melhorar a forma de ensinar física e apresentando mais uma possibilidade de estratégia didática disponível ao professor. O artigo está dividido, dessa forma: na seção 2, apresentamos um breve histórico sobre exoplanetas, destacando as principais técnicas de observação e detecção; na seção 3, é feita a dedução matemática de uma expressão para o cálculo da constante gravitacional e para a verificação da terceira lei de Kepler; na seção 4, por fim, é apresentada a atividade foco desse trabalho.

2. Exoplanetas

Costuma-se definir sistema planetá-

rio como um conjunto de corpos não estelares que estão ligados gravitacionalmente à órbita de uma estrela ou de um sistema estelar. Um sistema planetário é composto de pelo menos um planeta em órbita de sua estrela. Nosso sistema planetário é conhecido como *sistema solar* e contém oito planetas (em ordem de aproximação do Sol, são eles: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno). Além desses planetas,

ele é formado por corpos não planetários, como satélites naturais, meteoróides, asteroides, cometas, planetas anões e planetesimais. Todos esses corpos orbitam o Sol, que tem cerca de 99,85% da massa total do sistema solar.

Alguns termos - como *sistema extrasolar* ou *sistema extraplanetário* - são usados para designar quaisquer sistemas planetários diferentes do nosso. Analogamente, referem-se a *exoplanetas* ou *planetas extrassolares* quaisquer corpos planetários que orbitam uma estrela diferente do Sol. As especulações acerca da existência de outros planetas em torno de estrelas são datadas desde o século XVI, tendo Giordano Bruno como um dos defensores dessa ideia. Contudo, foi somente quatro séculos mais tarde que se pôde, efetivamente, conhecer os primeiros planetas em órbita de estrelas distantes.

Nossa compreensão sobre sistemas exoplanetários tem sido impulsionada devido aos avanços nas observações feitas nas últimas décadas. Há seis tipos de detecção de exoplanetas, que podem ser classificados em duas categorias: detecção *direta* e *indireta*. As formas de de-

A astronomia é uma excelente fonte de assuntos e temáticas que podem servir de fio condutor para o ensino de física, uma vez que é notório o seu poder em despertar o imaginário e o fascínio tanto de adultos quanto de crianças

#Autor de correspondência. E-mail: rodrigo.sobrinho@ifrn.edu.br.

tecção indireta são: método da velocidade radial (VR), trânsito planetário, pulsar timing, microlentes gravitacionais e astrometria. Enquanto isso, na detecção direta de exoplanetas, temos apenas a técnica por imageamento.

2.1. Técnicas de detecção de exoplanetas

Espera-se que as técnicas que se baseiam na detecção indireta sejam mais apropriadas para encontrar exoplanetas orbitando estrelas muito distantes. Quando o brilho total do disco de uma estrela é comparado com a porção que seu planeta pode refletir ao passar à sua frente, conclui-se que o brilho refletido do planeta será ofuscado pelo brilho de sua estrela. Imagine tentar observar um pequeno vaga-lume em frente a uma lâmpada de 20 kW (vinte mil watts). É uma tarefa bastante difícil!

Atualmente (dezembro de 2020, no momento em que esse trabalho foi elaborado), são conhecidos 4.389² exoplanetas, distribuídos por aproximadamente 3.260 sistemas planetários, e ainda há mais de 5.941 a serem confirmados. A aplicação das diferentes técnicas de detecção de exoplanetas tem contribuído para o grande avanço na busca desses planetas, contudo três técnicas têm se destacado nas últimas décadas, sendo elas: velocidade radial, trânsito planetário e microlentes gravitacionais. A Fig. 1 mostra, em porcentagem, a distribuição do número de exoplanetas encontrados por meio de algumas técnicas. A técnica de trânsito planetário é a que mais tem proporcionado a descoberta de exoplanetas, com cerca de 76,04%, e seguida da velocidade radial, com 19,11%. Por fim, a terceira técnica que mais tem permitido encontrar planetas em estrelas distantes é a das microlentes gravitacionais, com cerca de 2,45%. As demais técnicas (imageamento, astrometria, *pulsar timing* etc.) somam, juntas, um percentual de 2,41%. Por motivos didáticos, traremos uma discussão breve apenas sobre aquelas que mais possibilitaram a detecção de exoplanetas, como destacadas no gráfico da Fig. 1.

2.2. Método de Velocidade Radial (VR)

A detecção de um exoplaneta por

VR se baseia na variação da velocidade radial da estrela devido às perturbações causadas nela. A perturbação pode ser ocasionada por consequência da presença de uma companheira binária, ou devido a um ou mais planetas em sua órbita. A presença desses corpos na vizinhança gravitacional faz com que a estrela orbite o centro de massa do sistema, causando a variação em sua velocidade radial. Esse fato pode ser notado por meio do desvio causado nas linhas espectrais da estrela, como uma consequência do efeito Doppler [2]. A velocidade radial é responsável por aproximadamente 19% do total de planetas encontrados até o momento da elaboração deste artigo.

O primeiro exoplaneta poderia ter sido descoberto por VR em 1988, conforme publicado no trabalho apresentado por Campbell e seus colaboradores, se os autores não tivessem atribuído a variação da velocidade radial do sistema binário às atividades estelares na superfície da estrela principal. Em 2003, Hatzes e seus colaboradores confirmaram que a fonte da variação da VR era devido a um exoplaneta. Em 1995, com os esforços dos astrônomos suíços Michel Mayor e Didier Queloz, foi publicada a descoberta do primeiro exoplaneta orbitando uma estrela da sequência principal (*51 Pegasi*), cujas características físicas são semelhantes às do Sol [3]. O exoplaneta descoberto foi chamado de *51 Pegasi b* e orbita sua estrela em cerca de 4 dias. Esse sistema planetário está localizado a cerca de 50 anos-luz da Terra, na constelação de Pégaso.

O método de detecção de exoplanetas por VR também tem sido usado para confirmar candidatos a planetas encontrados por outros métodos. Contudo, uma das limitações dessa técnica está associada à determinação da massa do planeta. Em geral, a inclinação da órbita planetária não é conhecida, o que possibilita encontrarmos valores para a massa menores do que realmente são quando comparados aos casos em que o sistema planetário é observado frontalmente. As medições de VR da estrela são importantes para determinar a presença de exoplanetas ou candidatos, portanto é necessário utilizar instrumentos de alta resolução, como o espectrógrafo

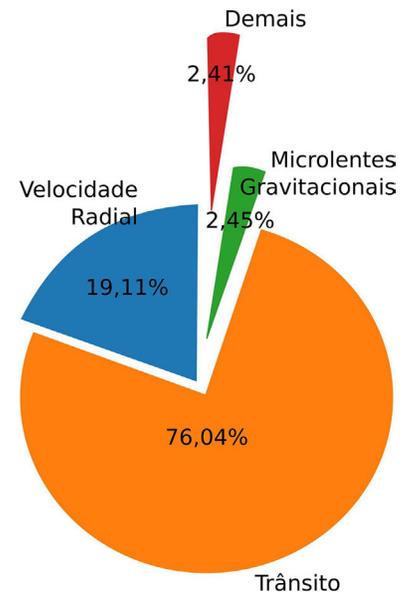


Figura 1 - Distribuição percentual de exoplanetas detectados pelas técnicas de trânsito planetário (76,04%), de velocidade radial (19,11%), de microlentes gravitacionais (2,45%) e pelas demais técnicas (2,41%).

HARPS (*High Accuracy Radial velocity Planet Searcher*), que foi idealizado pelo ganhador do Nobel de física Michel Mayor [4] e está localizado na cidade de La Silla, no Chile (ESO com 3,6 metros).

2.3. Método de Trânsito Planetário

No trânsito planetário, é observada a passagem do corpo à frente de um objeto (em relação à sua linha de visada), comparativamente mais massivo e raio maior. Por exemplo, podemos citar o trânsito de Mercúrio e Vênus em relação ao Sol. Conforme mencionado anteriormente, o método supracitado é responsável por 76,04% de exoplanetas detectados até o momento da preparação deste artigo, portanto esta técnica tem contribuído fortemente para nosso entendimento sobre o assunto. O primeiro exoplaneta encontrado usando essa técnica foi em 2002, por Charbonneau e seus colaboradores [5]. Além da descoberta, os autores também detectaram, na atmosfera do exoplaneta *HD 209454 b*, elementos ricos em sódio. Posteriormente, também foram encontrados oxigênio e carbono na atmosfera do planeta [6]. Naturalmente, os planetas têm menos massa que suas estrelas, gerando um decaimento muito pequeno do brilho estelar quando elas transitam à sua frente.

Como podemos imaginar, o método de trânsito planetário necessita do uso de instrumentos de alta precisão e com

A detecção de um exoplaneta pelo método de velocidade radial se baseia na variação da velocidade radial da estrela devido às perturbações causadas nela

sensibilidade fotométrica, uma vez que os exoplanetas escurecem a superfície de sua estrela a uma medida menor que 1% do seu brilho total [7]. Entretanto, da Terra, a precisão fotométrica é bastante limitada devido à turbulência atmosférica, o que diminui as precisões fotométricas para estrelas de brilho mais fraco e reduz a possibilidade de observar exoplanetas ao seu redor. Por essa razão, justifica-se o investimento em missões espaciais com instrumentos de observação acoplados, como os telescópios espaciais CoRoT (*Convection, Rotation and planetary Transits*) [8] e *Kepler* [9], lançados em 2006 e 2009, respectivamente.

As missões espaciais CoRoT e *Kepler* têm obtido, juntas, alguns milhares de centenas de dados fotométricos para diferentes tipos de estrelas em seus diferentes estágios evolutivos. Esses dados também são conhecidos como curva de luz e mostram como o brilho da luz da estrela varia em função do tempo. A Fig. 2(a) mostra o brilho de uma estrela quando ela não tem planetas em sua órbita nem manchas solares. Em média, seu brilho permanece constante por todo o tempo de observação. Por outro lado, quando há um planeta orbitando essa estrela e ele pode ser observado por um instrumento fotométrico, à medida que o planeta passa à frente de sua estrela, o brilho sofre um decaimento, como mostrado na Fig. 2(b).

2.4. Método de microlentes gravitacionais

Microlentes gravitacionais é um efeito que ocorre quando os campos gravitacionais de uma estrela e de seu planeta ampliam a luz de outra fonte mais distante. Essa técnica é utilizada para detectar os exoplanetas em órbita de estrelas distantes, pois não seria pos-

sível encontrá-los por meio das técnicas mencionadas anteriormente. Considera-se que a microlente gravitacional é a técnica mais eficaz na busca de planetas e sua principal vantagem está relacionada às possibilidades que ela proporciona de encontrar planetas com características terrestres - como a massa e o raio -, pois ela depende apenas das relações entre a massa do planeta e a de sua estrela.

A teoria de microlentes gravitacionais é baseada no fenômeno de lentes gravitacionais descrito por Albert Einstein, em 1936. Segundo o físico alemão, quando um corpo massivo deforma o espaço-tempo, a luz oriunda de uma fonte distante - que pode ser uma estrela ou uma galáxia -, ao passar pelo campo gravitacional do corpo massivo, sofre mudanças em sua trajetória retilínea e segue a trajetória curva do espaço modificado até o observador.

Os sinais de microlentes ocasionados por exoplanetas duram somente alguns dias. Por essa razão, faz-se necessário um acompanhamento dedicado e com cadência alta e multilocal para que sejam distinguidas as microlentes decorrentes de outros objetos, como as estrelas binárias. Essa é a única desvantagem das microlentes gravitacionais, pois o sinal exoplanetário não se repetirá e teremos apenas uma única chance para observar a natureza planetária da curva de luz ampliada pela microlente [7]. Todavia, em caso de uma amostra maior de sinais de microlentes ocasionados por um exoplaneta, será possível extrair mais parâmetros planetários fundamentais, como a massa e a distância orbital. Quando temos dados suficientemente observados tanto por meio de telescópios terrestres quanto de espaciais, como o *Spitzer*, é possível

aumentar nossos campos amostrais e obter mais informações decorrentes das microlentes gravitacionais ocasionadas pelos exoplanetas.

3. A lei da gravitação universal

A gravidade é uma das manifestações da natureza mais perceptíveis para nós. O nosso peso e a força de atração exercida pela Terra sobre objetos próximo à superfície são alguns exemplos dessa familiaridade. Estudando o movimento da Lua e dos demais astros do Sistema Solar, Isaac Newton (1643-1727) descobriu o caráter fundamental da atração gravitacional entre dois corpos quaisquer. Newton publicou a lei da gravitação em 1687 com as três leis do movimento.

Segundo a lei da gravitação universal, cada partícula do universo atrai qualquer outra partícula com uma força diretamente proporcional ao produto das respectivas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. Em módulo, a lei da gravitação universal pode então ser expressa matematicamente da forma

$$F_g = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{r^2}, \quad (1)$$

onde G é a constante gravitacional universal, cujo módulo é $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$; m_1 e m_2 são as massas das partículas; e r é a distância entre elas (Fig. 3).

A Eq. (1) nos mostra que a força gravitacional entre dois corpos diminui com o aumento do quadrado da distância: se a distância dobra, a força diminui quatro vezes; se a distância triplica, a força se reduz a um nono da inicial. As forças gravitacionais atuam ao longo da linha que une as duas partículas,

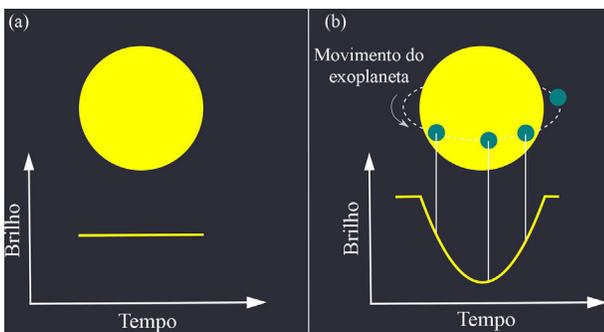


Figura 2 - Esquema da distribuição do brilho de uma estrela em função do tempo. (a) O brilho é constante na ausência de corpos na órbita da estrela ou de manchas solares em sua superfície. (b) Na presença de um exoplaneta, como uma variante do tempo.

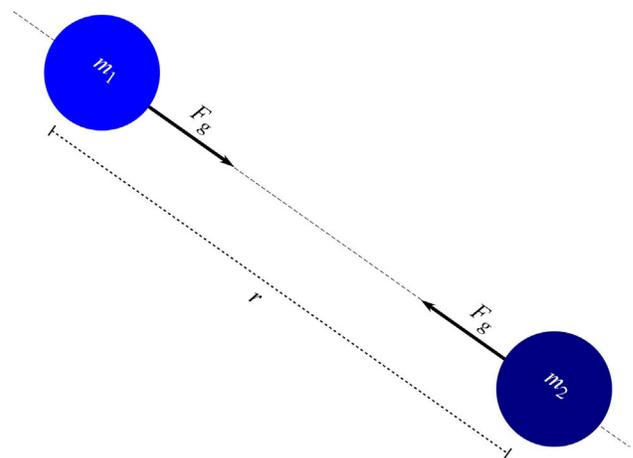


Figura 3 - Forças gravitacionais entre duas partículas de massas m_1 e m_2 .

constituindo um par ação-reação. Desse modo, essas forças também têm o mesmo módulo.

3.1. Uma expressão para o cálculo da constante gravitacional e a verificação da terceira lei de Kepler

Os principais objetivos da nossa atividade são analisar a validade da terceira lei de Kepler e determinar o valor da constante gravitacional através da análise de dados reais de exoplanetas. Nesse sentido, é necessário encontrar uma relação matemática que nos permita calcular a constante gravitacional em função da distância do exoplaneta até sua estrela hospedeira e a massa dela.

Considerando um exoplaneta de massa m em órbita de uma estrela de massa M , podemos reescrever a Eq. (1) da forma

$$F_g = \frac{G \cdot M \cdot m}{r^2}. \quad (2)$$

Nesse caso, a força centrípeta que mantém o planeta em uma órbita circular em torno da estrela é

$$F_{cp} = \frac{m \cdot v^2}{r}. \quad (3)$$

Igualando as Eqs. (2) e (3), temos

$$\begin{aligned} \frac{G \cdot M \cdot m}{r^2} &= \frac{m \cdot v^2}{r}, \\ \frac{G \cdot M}{r} &= v^2, \\ G &= \frac{v^2 \cdot r}{M}. \end{aligned} \quad (4)$$

Por fim, podemos fazer $v = \omega \cdot r$ na Eq. (4). Lembrando também que $\omega = 2\pi/T$, onde T é o período de revolução do planeta em torno da estrela. Assim, temos:

$$\begin{aligned} G &= \frac{\omega^2 \cdot r^3}{M}, \\ G &= \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{M \cdot T^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

A Eq. (5) nos mostra também a expressão para a terceira lei de Kepler, que nos diz que o período de revolução de um planeta ao quadrado é proporcional ao cubo da distância média do planeta à estrela. Nesse caso, podemos usá-la para verificar a universalidade da terceira lei de Kepler, que é um dos objetivos da nossa sequência didática.

4. A sequência didática proposta

Buscamos aqui propor uma sequência didática para o estudo da gravitação universal, com ênfase na análise de dados reais de exoplanetas e sistemas extrassolares. Nesse contexto, o professor já deve ter trabalhado as leis de Kepler e a gravitação de Newton com os alunos. Assim, essa atividade servirá como uma ferramenta de aprofundamento do conteúdo³ e poderá ser aplicada antes do conteúdo de gravitação. Sugerimos que ela seja dividida em três etapas. Para a efetivação dessa sequência didática, faz-se necessário o acesso à internet⁴ (*smartphone*, computador, entre outros). Sugere-se que a atividade seja realizada em momentos síncronos (caso não seja possível presencialmente), especialmente a etapa 1 dessa sequência.

4.1. Etapa 1 - exoplanetas e sistemas extrassolares

Para a efetivação da etapa 1 da sequência didática, é recomendada uma aula de 50 min (ou 45 min, dependendo da escola). Nesse encontro, o docente expõe os aspectos teóricos e históricos relacionados aos exoplanetas e aos sistemas extrassolares, buscando aguçar a curiosidade do aluno. Nessa etapa, o uso de ilustrações e vídeos é bastante incentivado. É nesse estágio que o professor deve incentivar o debate e a dis-

cussão entre os alunos, pois a experiência em sala de aula mostra que assuntos atinentes à astronomia sempre geram diversas perguntas e curiosidades. É preciso se esforçar ao máximo para responder a todas as indagações que surgirem. Além disso, controlar o tempo é necessário.

Ainda na primeira etapa, o professor deve dividir a turma em grupos de 4 a 5 alunos e estipular um tempo para que os discentes possam acessar o site *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*⁵ para se familiarizarem com os dados e as ferramentas disponíveis nele. O professor deve acessar o site com seus alunos e sanar as possíveis dúvidas que surgirem. A Fig. 4 mostra a página inicial do *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*.

4.2. Etapas 2 e 3 - análise dos dados

Os objetivos destas etapas (sugere-se que elas sejam realizadas em duas aulas) são a verificação da universalidade da terceira lei de Kepler (etapa 2) e o cálculo da constante gravitacional G (etapa 3). No caso da terceira lei de Kepler, vamos nos valer da Eq. (5), reescrita da seguinte forma:

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M} = k, \quad (6)$$

onde k é uma constante de proporcionalidade. Para verificar a universalidade

The screenshot shows the Exoplanet.eu website interface. At the top, there is a navigation bar with links for Home, All Catalogs, Diagrams, Bibliography, Research, Meetings, and Other Sites. Below this is a 'Catalog' section with search filters for Status and Dection, and a 'Filter' button. The main content area displays a table of exoplanets with the following columns: Planet, Mass (M_{Jup}), Radius (R_{Jup}), Period (day), a (AU), e, i (deg), Ang. dist. (arcsec), Discovery, and Update. The table lists several planets, including SW Sex b, TOI-178 d, TOI-178 g, TOI-178 f, TOI-178 e, TOI-178 c, TOI-178 d, and HD 106906 (AB) b.

Planet	Mass (M _{Jup})	Radius (R _{Jup})	Period (day)	a (AU)	e	i (deg)	Ang. dist. (arcsec)	Discovery	Update
SW Sex b	---	---	13357	---	---	---	---	2019	2020-12-15
TOI-178 d	0.0091	0.2355	6.557694	0.059	---	88.44	---	2018	2020-12-14
TOI-178 g	0.01303	0.2596	20.70946	0.128	---	88.833	---	2020	2020-12-14
TOI-178 f	0.02498	0.21224	15.23193	0.1042	---	88.73	---	2019	2020-12-14
TOI-178 e	4.04	0.19351	9.961872	0.0782	---	88.67	---	2020	2020-12-14
TOI-178 c	0.01498	0.1526	3.238458	0.0371	---	88.04	---	2018	2020-12-14
TOI-178 d	0.00475	0.10501	1.914557	0.02604	---	88	---	2020	2020-12-14
HD 106906 (AB) b	11	---	---	850	---	56	---	2013	2020-12-11

Figura 4 - Página inicial do *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*.

Planet	Mass (M_{Jup})	Radius (R_{Jup})	Period (day)	a (AU)	e	i (deg)	Ang. dist. (arcsec)	Discovery	Update
HD 110014 c	---	---	130	0.64	0.44	---	---	2015	2021-04-12
HD 11014 b	---	---	835.477	2.14	0.462	---	0.023778	2009	2021-04-12
Kepler-102 b	0.01353	0.042	5.28696	0.055	---	---	---	2014	2021-04-12
Kepler-102 c	0.00944	0.052	7.07142	0.067	---	---	---	2014	2021-04-12
Kepler-102 f	0.01636	0.079	27.4536	0.165	---	---	---	2014	2021-04-12
Kepler-109 c	0.06859	0.225	21.2227	---	0.03	---	---	2014	2021-04-12
Kepler-109 b	0.02297	0.211	6.48163	---	0.21	---	0.020708	2014	2021-04-12
HD 177830 A b	---	---	934.3	1.2218	0.009	---	---	1999	2021-04-12

Figura 5 - Página da *The Extrasolar Planets Encyclopaedia* com destaque para o sistema extrassolar da estrela *Kepler-102*.

de da terceira lei de Kepler, os alunos devem ter o cuidado de trabalhar com sistemas extrassolares e não com exoplanetas isolados. Aqui, o professor pode questionar os discentes do porquê dessa restrição (ou explicar o motivo caso a atividade seja realizada antes da ministração dos conteúdos referentes às leis de Kepler). A Fig. 5 mostra um print da página da *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*. Nela, podemos visualizar a informação que nos permite encontrar um sistema extrassolar.

Na Fig. 5, temos um exemplo de uma estrela (*Kepler-102*) com três planetas em sua órbita (*Kepler-102 b*, *Kepler-102 c* e *Kepler-102 f*). Tais planetas têm parâmetros físicos como massa (*Mass*), raio (*Radius*) e período (*Period days*) já determinados. A massa e o raio dos planetas são apresentados em comparação ao planeta gasoso Júpiter.

Para a verificação da universalidade da terceira lei de Kepler, cada grupo precisará escolher um sistema extrassolar no catálogo e registrar as informações de período e distância de

cada planeta à estrela hospedeira do sistema planetário em questão. Essas informações constam no site em unidades diferentes do Sistema Internacional (SI), porém não será necessária a conversão, uma vez que o que desejamos é apenas verificar a proporcionalidade. Aqui, o professor pode indagar os alunos do porquê de isso ocorrer, o que necessitará de competências relacionadas à matemática. A Tabela 1 expõe o exemplo do cálculo de k para o sistema extrassolar *Kepler-102*. Nela, é visto que os valores foram bem próximos entre si, o que evidencia o caráter universal da terceira lei de Kepler. Nesse momento, o professor pode ressaltar as incertezas estatísticas nas medidas científicas, que geram as pequenas diferenças nos valores encontrados de k .

Para encontrar o valor da constante gravitacional G (etapa 3), usa-se a Eq. (5). Nesse caso, podemos considerar o valor de π como sendo 3,14. Porém, cada grupo pode usar o valor de π com mais casas decimais se assim desejar,

Tabela 1: Cálculo da constante k para o sistema extrassolar *Kepler-102*.

Planeta	Período (dias)	Distância (UA)	k
<i>Kepler-102 b</i>	5,28696	0,055	168005,7
<i>Kepler-102 c</i>	7,07142	0,067	166260,4
<i>Kepler-102 f</i>	27,4536	0,165	167782,5

utilizando calculadoras. Nessa etapa da atividade, é atentar às unidades dos dados reais. É preciso uma conversão para que o valor de G encontrado esteja no SI. Nesse momento, o professor pode incentivar cada grupo a encontrar os fatores de conversão necessários, como a massa de Júpiter ou da Terra, a massa do Sol e a distância entre a Terra e o Sol. Cada grupo ficará livre para explorar o catálogo de exoplanetas e escolher com quais irão trabalhar. Essa escolha pode ser feita com base nos parâmetros dos planetas ou das estrelas ou no método de detecção ou concepção artística do exoplaneta (Fig. 6).

De acordo com a Eq. (5), os dados necessários para o cálculo da constante gravitacional são o período de revolução do exoplaneta em torno da estrela, a distância do exoplaneta até a estrela em que orbita e a massa da estrela. Nessa situação, diferentemente do caso da terceira

lei de Kepler (etapa 2), podem-se utilizar exoplanetas isolados. A Tabela 2 mostra valores da constante gravitacional calculados utilizando a Eq. (5).

Ao final da etapa 3, os grupos deverão compartilhar seus resultados de acordo com os exoplanetas escolhidos. A avaliação pode ser baseada na exposição oral dos resultados obtidos por cada grupo. Nesse momento, é interessante analisar quais dificuldades foram encontradas pelos alunos e refletir sobre estratégias para superá-las em aulas posteriores.



Figura 6 - Concepção artística do exoplaneta *11 Comae Berenices b*. Fonte: <https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/6988/11-comae-berenices-b/>.

Tabela 2: Valores da constante gravitacional G calculados utilizando a Eq. (5).

Planeta	Período (s)	Distância (m)	Massa da estrela (kg)	G
Terra	$3,1536 \times 10^7$	$1,496 \times 10^{11}$	$1,989 \times 10^{30}$	$6,68 \times 10^{-11}$
HD 29399 b	$7,71 \times 10^7$	$2,87 \times 10^{11}$	$2,29 \times 10^{30}$	$6,84 \times 10^{-11}$
GJ 317 b	$6,01 \times 10^7$	$1,73 \times 10^{11}$	$8,36 \times 10^{29}$	$6,72 \times 10^{-11}$

5. Considerações finais

Neste artigo, apresentamos uma sequência didática para o ensino de gravitação para alunos do Ensino Médio. Nosso objetivo tem se baseado na possibilidade de criar, alternativamente, uma discussão física e realística acerca de exoplanetas para professores interessados em temas da astronomia, que são alinhados aos conteúdos centrais da física. A capacidade de acessar, decodificar e tratar os dados reais de exoplanetas, além de ser estimulante, é fundamentalmente importante para o processo de aprendizagem dos tópicos teóricos abordados em sala de aula (leis de Kepler e força gravita-

Como já sabemos, o educador que deseja modificar suas práticas de ensino não deve fixar seus parâmetros didáticos em um único método, mas sim diversificá-los com temas atuais e instigantes

cional). Embora isso não seja o objetivo central deste trabalho, e portanto pode ser tratado de modo opcional, discussões em níveis estatísticos também são bem-vindas, pois, além de ampliarem nossos entendimentos acerca de exoplanetas, permitem ao aluno fazer observações mais profundas sobre o assunto. Essa interdisciplinaridade, além de possibilitar ao professor que aprimore suas práticas de docência em física, viabiliza novas perspectivas educativas, filosóficas e até mesmo profissionais aos seus discentes.

Como já sabemos, o educador que deseja modificar suas práticas de ensino não deve fixar seus parâmetros didáticos em um único método, mas sim

diversificá-los com temas atuais e instigantes. A abordagem de temas da astronomia, como a detecção e a busca por exoplanetas, é uma das ferramentas didáticas que permitem ao professor agregar conceitos estabelecidos no campo da física clássica (como a gravitação universal) à reflexão crítica do aluno acerca dos assuntos debatidos em sala de aula. Além disso, permite que o discente observe como os conceitos clássicos estão inseridos em diferentes problemas da ciência, podendo variar entre os níveis simples e avançado.

Este artigo deve ser entendido como mais uma ferramenta para o ensino de física, e não como um modelo engendrado, portanto pode ser adaptada pelo docente à sua realidade. Esperamos que os apontamentos aqui levantados possam enriquecer a prática do professor no âmbito de sua sala de aula, além de auxiliá-lo na busca de novos horizontes didáticos com base nos conceitos relacionados aos estudos de gravitação universal e, como consequência, aos estudos de astronomia.

Recebido em: 26 de Dezembro de 2020
Aceito em: 9 de Julho de 2021

Notas

¹Sequência Didática é um conjunto de atividades educacionais articuladas entre si, que tem como objetivo investigar o conhecimento dos discentes e buscar um aprofundamento desses conhecimentos, de forma organizada, reflexiva e participativa. http://nemat.gente.eti.br/public/upload/noticias/20130304121045guimaraes_oliveira_e_ribeiro.pdf

²<https://exoplanets.nasa.gov/discovery/exoplanet-catalog/>; <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>.

³Embora tenhamos sugerido que nossa proposta seja aplicada após as aulas de leis de Kepler e gravitação universal, nada impede que o docente utilize os recursos dessa sequência didática como forma de despertar os alunos para o tema da gravitação. Portanto, a proposta poderá ser apresentada antes dos temas citados acima.

⁴Essa atividade poderá ser realizada remotamente.

⁵<http://exoplanet.eu/catalog/>.

Referências

- [1] S.M. Bisch, *Astronomia no Ensino Fundamental: Natureza e Conteúdo do Conhecimento de Estudantes e Professores*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1998.
- [2] S.O. Kepler, M. de F.O. Saraiva, *Astronomia e Astrofísica* (Instituto de Física - UFRGS, Porto Alegre, 2017) 4ª ed.
- [3] M. Mayor, D. Queloz, G. Marcy, *IAUC* **6251**, 1 (1995).
- [4] M. Mayor, F. Pepe, D. Queloz, *The Messenger* **114**, 20 (2003).
- [5] D. Charbonneau, T.M. Brown, R.W. Noyes, R.L. Gilliland, *ApJ* **568**, 377 (2002).
- [6] A. Vidal-Madjar, J.-M. Désert, A. Lecavelier des Etangs, *ApJ* **604**, L69 (2004).
- [7] Y.J. Lee, A. García Muñoz, T. Imamura, M. Yamada, T. Satoh, A. Yamazaki, S. Watanabe, arXiv:2011.09271 (2020).
- [8] A. Baglin, M. Auvergne, L. Boisnard, in: *36th COSPAR Meeting*, Beijing, p. 3749 (2006).
- [9] D.G. Koch, W.J. Borucki, G. Basri, *ApJL* **713**, L79 (2010).