

Ecoss teóricoo-observacionais e epistemológicos da Revolução Copernicana: Um Olhar para os Exoplanetas a partir das Leis de Kepler e da Epistemologia de Kuhn

Theoretical-observational and epistemological echos of the Copernican Revolution: A Look at Exoplanets from Kepler's Laws and Kuhn's Epistemology

Andrey de Campos Francisco^{*1}, Matheus Barros^{2,3}, Alan Alves-Brito^{1,2}

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, Departamento de Astronomia, Porto Alegre, RS, Brasil.

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, Programa de Pós-graduação em Ensino de Física, Porto Alegre, RS, Brasil.

³Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Física, Museu Diversão com Ciência e Arte, Uberlândia, MG, Brasil.

Recebido em 31 de março de 2025. Revisado em 25 de julho de 2025. Aceito em 16 de agosto de 2025.

Em Física e Astronomia, as Leis de Kepler, em homenagem ao astrônomo e matemático alemão Johannes Kepler, descrevem os movimentos dos planetas de acordo com modelos em que o Sol ocupa o centro do Sistema Solar (modelos Heliocêntricos). O objetivo deste trabalho é apresentar uma discussão teórica-observacional e epistemológica sobre as Três Leis de Kepler, a partir do estudo de exoplanetas. Metodologicamente, amparamos a pesquisa em abordagem quanti-qualitativa, em que trabalhamos com dados observacionais obtidos para mais de cinco mil exoplanetas que constam na base de dados *Exoplanets Orbit Database*, bem como a análise de fontes históricas e epistemológicas sobre o contexto de desenvolvimento das Leis. Em diálogo com dados da literatura, ressaltamos que, por um lado, há pouca discussão sobre as Três Leis de Kepler e, por outro, há ainda escasso entrecruzamento dos desdobramentos das consequências das Leis de Kepler e do estudo dos exoplanetas para o campo da Física e da Astronomia. Apresentamos, nesse sentido, questões fundamentais para a área das ciências físicas, esperando que os nossos resultados contribuam para o desenvolvimento de abordagens históricas, epistemológicas e teórico-observacionais nos cursos de Física/Astronomia/Astrofísica do país.

Palavras-chave: Astronomia Teórica-Observacional, Leis de Kepler, Exoplanetas, Epistemologia de Kuhn.

In Physics and Astronomy, Kepler's Laws, named in honor of the German astronomer and mathematician Johannes Kepler, describe the movements of the planets based on the models where the Sun occupies the center of the Solar System (Heliocentric models). The aim of this work is to present an epistemological and theoretical observational discussion of Kepler's Three Laws, from the exoplanets research. Methodologically, the research adopts a quantitative and qualitative approach, using observational data from five thousand exoplanets in the *Exoplanets Orbit Database*, as well as a epistemological analysis of the context in which the three laws were developed. In dialog with the literature, we highlight that there is little discussion about the Kepler's Three Laws and a gap in connecting the consequences of Kepler's laws with the study of the exoplanets in the fields of Physics and Astronomy. In this context, we present fundamental questions for the field, with the hope that our findings contribute to the development of the historical, epistemological and theoretical-observational approach in the country's Physics/Astronomy/Astrophysics courses.

Keywords: Theoretical-Observational Astronomy, Kepler's Laws, Exoplanets, Kuhn's Epistemology.

1. Introdução

Johannes Kepler (1571–1630) desenvolveu suas Leis do Movimento Planetário empiricamente, que mais tarde vieram a ser deduzidas das Leis do Movimento de Newton. Nesse sentido, quando Isaac Newton (1643–1727) enunciou suas três leis, ele partiu de dois corolários: a conservação de momento linear e angular, em que conseguiu demonstrar que o momento linear de um objeto só muda se aplicarmos uma força sobre ele, senão,

permanece constante [1]. De forma análoga, Newton concluiu que, se não houver um torque, o momento angular do sistema planeta-estrela não muda. As conservações de momento angular e linear são consideradas pilares das Leis do Movimento, da Lei da Gravitação Universal e das Leis de Kepler. Isso ocorre porque elas estão na base de toda a argumentação de Newton, e do entendimento da Física e da Astronomia, sobre o funcionamento da natureza.

Neste contexto, a literatura mostra uma variedade de abordagens sobre as Leis de Kepler, os exoplanetas e figuras históricas como Copérnico. Contudo, boa parte dos trabalhos apresentam estrutura teórica, e seus focos

*Endereço de correspondência: andreycampos13@gmail.com

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

residem na verificação ou aplicação de leis a sistemas astronômicos, como [2–7]. Em especial, [2] verificam a terceira lei em diferentes contextos astronômicos – das luas de Galileu ao buraco negro Sagitário A*, o que evidencia também os limites da lei quando analisam curvas de rotação de galáxias como a Via Láctea e M31. Outros trabalhos, como [8–11], focam na didatização de conceitos ligados à detecção de exoplanetas, enquanto [12] resgata o papel histórico dos eclipses. Outros casos, como [13], realizam uma revisão sobre astrobiologia, em que relacionam os exoplanetas aos avanços dessa disciplina científica, contudo, não propõem discussões epistemológicas profundas.

Em trabalhos sobre Copérnico existem aqueles que discutem em outra perspectiva. Assim, destacamos que em [14–20] há um rompimento com a narrativa eurocêntrica ao valorizar influências árabes. Já em [21] e [22] são aprofundados aspectos historiográficos e pedagógicos, enquanto isso, em [23] é abordado sobre a recepção do copernicanismo na Argentina. Trabalhos como [24–27] retomam as Leis de Kepler com foco didático, entretanto, há pouca discussão epistemológica, especialmente quanto ao estudo dos exoplanetas.

Dessa forma, embora as Leis de Kepler sejam amplamente trabalhadas de forma teórica e educativa, há pouca discussão quanto aos aspectos epistemológicos do conhecimento astronômico que as envolvem, especialmente no campo dos exoplanetas.

Pode parecer trivial que exoplanetas (planetas que orbitam estrelas que não o Sol) funcionem de acordo com as Leis de Kepler, porém, não é óbvia a validade delas para outros sistemas planetários. Desse modo, acreditamos que um passo fundamental, para contribuir com a lacuna na discussão epistemológica sobre as Leis de Kepler, seja a articulação com seu estudo teórico e/ou observacional. Isto posto, Thomas Kuhn (1922–1996) em seus esforços de compreender e descrever como ocorre o desenvolvimento da ciência [28]¹, e também um dos mais estudados epistemólogos no campo das ciências físicas, pode nos dar suporte para a elaboração de uma visão mais completa e problematizadora sobre o estudo das Leis de Kepler em outros sistemas planetários além do nosso Sistema Solar.

O objetivo deste artigo é apresentar uma discussão teórico-observacional e epistemológica das Leis de Kepler, a partir do estudo de exoplanetas para a compreensão de questões basilares da Mecânica Clássica como contribuição para abordagens que permitam seu

aproveitamento em trabalhos de ensino e divulgação das ciências.

Mais especificamente, queremos, nesse estudo: i) explorar documentos e artigos da literatura que tratam de discussões históricas, epistemológicas e observacionais envolvendo as Leis de Kepler; ii) explorar o método de trânsito, o principal método de detecção desenvolvido até o presente momento para detectar e confirmar os exoplanetas dispostos no catálogo *Exoplanet Orbit Database* [29, 30]; iii) argumentar a favor da validade e da importância das Leis de Kepler, tanto para o desenvolvimento da ciência quanto para o nosso entendimento atual do Universo; iv) contribuir para a contextualização das Leis de Kepler na Educação e Divulgação da Física e da Astronomia, compreendendo o papel que elas têm para estabelecer conexões entre Física e Astronomia que são muitas vezes negligenciadas na Educação Básica e no Ensino Superior.

2. Percorso Metodológico

Metodologicamente, adotamos os caminhos amparados na pesquisa por uma abordagem quanti-qualitativa, com objetivos exploratórios, explicativos e descritivos. Qualitativamente, consultamos documentos, bibliografias e livros² de história da ciência [31–34] que dão conta das questões ligadas à história e epistemologia dos estudos voltados às Leis de Kepler.

Para a descrição teórico-observacional (quantitativa) do trabalho, adotamos a base de dados *Exoplanet Orbit Database* (EOD, [29])^{3,4}. A base EOD apresenta os parâmetros orbitais bem determinados de exoplanetas e as propriedades de suas estrelas hospedeiras [29, 30]. A EOD conta, atualmente, com parâmetros orbitais, físicos e estelares de mais de 5700 objetos, sendo aproximadamente 3200 exoplanetas confirmados. Além disso, para as análises referentes ao Sistema Solar, utilizamos os dados disponibilizados pela NASA, no *Planetary Fact Sheet*⁵. Apesar de serem dados precisos, não possuem margem de erro, como será explicado melhor na seção de análise de dados.

Para a interpretação dos dados, levamos em conta questões internalistas [35] e externalistas [36] da história

¹ Thomas Kuhn se graduou em Física, pela Universidade de Harvard. Passou alguns anos durante a guerra fazendo pesquisas relacionadas ao radar. Obteve seu mestrado e seu doutorado também por Harvard, sendo sua pesquisa sobre aplicações da Mecânica Quântica na Física de Estado Sólido. Kuhn foi um dos filósofos da ciência mais influentes do século XX, sua obra “A Estrutura das Revoluções Científicas” é um dos livros mais citados da história. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/entries/thomas-kuhn/#LifeCare>>. Acesso em: 01 Dez. 2024.

² Para leitores iniciantes, sugerimos as obras: “Para Compreender a Ciência: uma Perspectiva Histórica” da Maria Andery, “*The Little Book of Exoplanets*” de Joshua Winn, e “Textos Básicos de Filosofia e História das Ciências: A Revolução Científica” de Danilo Marcondes. Além desses, utilizamos “*An Introduction to Modern Astrophysics*” de Bradley Carroll e Dale Ostlie, “A Estrutura das Revoluções Científicas”, de Thomas Kuhn, “Evolução das Ideias da Física” de Antônio Pires e “*The Cosmic Perspective*”, de Jeffrey Bennett e colaboradores.

³ Disponível em: <<http://exoplanets.org/>>. Acesso em: 19 Nov. 2024.

⁴ EOD é a base de dados, enquanto que EDE é uma tabela interativa com ferramentas para gerar gráficos com os dados da EOD.

⁵ Disponível em: <<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>>. Acesso em: 10 Nov. 2024.

da ciência. Livros e artigos⁶ fundamentais da literatura sobre as dinâmicas das ideias em Física e Astronomia foram também usados para traçar os dados dos principais cientistas que perfazem o período histórico conhecido como Revolução Copernicana [32].

Epistemologicamente, amparamos a discussão na perspectiva de [28], buscando aplicar na metodologia proposta os conceitos de Kuhn, que são amplos e, por vezes, interpretativos, mas que consistem de boa ferramenta teórica-epistemológica para olhar para contextos científicos específicos.

3. A Epistemologia de Thomas Kuhn

Buscamos, neste artigo, compreender a epistemologia proposta por Kuhn a partir de alguns conceitos principais de sua teoria como, por exemplo, *paradigma*; *anomalia*; *crise*; *ciência normal*; *revolução científica*; e *incomensurabilidade*. Apresentamos nosso olhar sobre a teoria, e buscando relacionar os principais conceitos da teoria que subsidiam a nossa discussão.

A Figura 1 é uma representação da epistemologia de Kuhn, adaptada e reelaborada do estudo de [37], onde a horizontal representa a progressão temporal e a vertical o desenvolvimento científico. Nela podemos ver que o desenvolvimento científico consiste em uma sequência de períodos de *ciência normal*, em que uma comunidade científica utiliza diversos *paradigmas* para explicar a natureza. Esses períodos são intercalados com revoluções científicas, causadas por *anomalias* e *crises* no *paradigma* utilizado [37].

Quando comparamos um *paradigma* antigo com o novo, vemos que são incompatíveis, pois compreendem a natureza de formas diferentes. Aliás, Kuhn diz que são mais que incompatíveis, são *incomensuráveis*, pois imaginam e descrevem de forma diferente os objetos do Universo e seus comportamentos. Um exemplo, dado por [28], é quando chamaram Copérnico de louco por afirmar que a Terra se movia. Kuhn diz que eles não estavam nem pouco, nem muito errados, pois para eles, o conceito de Terra estava intrinsecamente atrelado à uma posição fixa. Já para Copérnico, não era apenas uma questão de mover a Terra, mas sim de ver os planetas de uma forma totalmente diferente, tanto do ponto de vista conceitual, quanto físico e astronômico.

Quando um novo *paradigma* nasce de seu anterior, ele incorpora uma parte do vocabulário e das ferramentas conceituais e instrumentais que o anterior utilizava. Mas, raramente atribuem as mesmas utilizações e definições que se tinha, novas relações entre esses objetos são criadas e o resultado é uma incompreensão e dificuldade de comunicação entre os *paradigmas* concorrentes.

Além disso, podemos ver que, o fato do *paradigma* estar por baixo da *ciência normal*, está relacionado ao fato deste ser tanto um pré-requisito, quanto um pilar

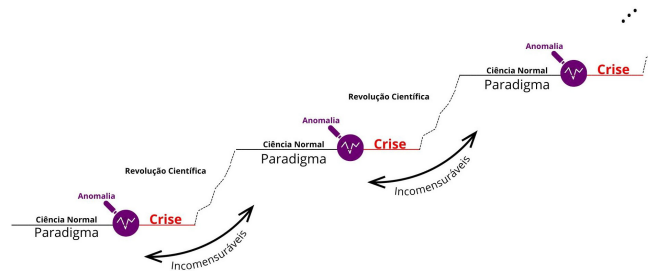


Figura 1: Modelo epistemológico de desenvolvimento da ciência de Thomas Kuhn. Adaptado de [37], acrescentamos os conceitos de *crise* e *anomalia*; ajustamos para a noção de que os paradigmas sustentam a ciência normal; conectamos paradigmas através da incomensurabilidade e adicionamos a ideia de temporalidade e instabilidade no período de revolução científica e de continuidade do avanço da ciência.

do período de *ciência normal*. Em seguida, vemos que a ocorrência de uma *anomalia* causa uma *crise* na *ciência normal*, representada em vermelho. A superação dessa *crise* é proporcionada pela *revolução científica*, que é retratada por uma linha pontilhada com variações que representam esse período conturbado. Além disso, a *revolução científica* está sendo representada por uma diagonal, pois sabemos que ela leva um tempo até de fato se estabelecer, utilizando um novo *paradigma* que, novamente, dará suporte à nova *ciência normal*. Por último, quando tentamos comparar esses degraus da evolução (dinâmica) científica, vemos que não é possível, pois estão em lugares muito diferentes, e por isso, são *incomensuráveis*.

4. O Estudo dos Exoplanetas: Questões Fundamentais

Historicamente, o Geocentrismo é um dos modelos mais antigos desenvolvidos pela ciência ocidental para descrever o Universo. Foi provavelmente proposto por Pitágoras⁷ no século V a.C., e tem esse nome por defender que o Sol, a Lua e os planetas conhecidos à época⁸ [38] orbitavam a Terra.

Um ponto importante na história do modelo geocêntrico foi a publicação, no século II, de *Almagesto* [33], em que Ptolomeu sintetizou diversas ideias em um único sistema do Universo. Com isso, Ptolomeu proporcionou um período de *ciência normal* [28] para os(as) próximos(as) astrônomos(as), ou seja, um período de pesquisa dedicada a aproximar cada vez mais o modelo geocêntrico aos dados observados, que se manteve por quase 1400 anos.

⁷ Pitágoras de Samos (570–495 a.C) era filósofo, matemático grego e fundador da irmandade pitagórica. Acredita-se que foi a primeira pessoa a afirmar que a Terra é uma esfera e o primeiro a usar a palavra *Cosmos* para descrever o Universo como harmonioso [31].

⁸ Os cinco primeiros planetas do Sistema Solar visíveis a olho nu são Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. Utilizamos “*An Introduction to Modern Astrophysics*” de Bradley Carroll e Dale Ostlie.

⁶ Conforme nota de rodapé 2.

4.1. A Revolução Copernicana

Com o tempo, os ajustes realizados no modelo ptolomaico criaram um sistema tão complexo que os astrônomos começaram a questionar sua validade, levando Nicolaus Copérnico⁹ a publicar, em 1543, sua obra *De revolutionibus orbium coelestium* [39]. Nela, Copérnico desenvolveu o próximo *paradigma* astronômico, argumentando que, assim como os demais planetas conhecidos à época, a Terra orbitava ao redor do Sol, modelo chamado de Heliocentrismo.

O período de quase 150 anos (1543–1687) entre as publicações das obras de Copérnico e Isaac Newton é nomeado Revolução Copernicana e é considerado um dos marcos do início da Modernidade [34]. Ele gerou mudanças profundas com relação ao pensamento medieval no campo da Física e da Astronomia, que eram predominantemente aristotélicas. Como diz [34, p. 7], “*Trata-se, portanto, de uma autêntica ‘revolução epistemológica’, uma vez que a concepção de conhecimento científico passa por profundas transformações tanto teóricas quanto metodológicas*”.

Observacionalmente, Tycho Brahe¹⁰ permitiu um avanço significativo para o *paradigma* copernicano. Graças a instrumentos astronômicos altamente precisos e uma técnica observacional rigorosa, conseguiu determinar com precisão a posição dos planetas ao longo de décadas [28, 31, 33]. Em 1600, Johannes Kepler¹¹ iniciou sua colaboração com Tycho Brahe, onde ficou encarregado de explicar o movimento orbital de Marte, pois a órbita circular não explicava os dados observacionais que indicavam eventuais laçadas nas trajetórias (o chamado movimento retrógrado). Dezoito meses após sua chegada, Kepler herdou as observações de Tycho das posições planetárias. Nos anos seguintes, Kepler foi capaz de transformar a anomalia da órbita de Marte em uma extensão do modelo copernicano e resumiu suas descobertas em três Leis que serão apresentadas aqui como são frequentemente enunciadas em livros textos de Física (ver, por exemplo, [40]):

- Primeira Lei: a órbita de qualquer planeta ao redor do Sol é uma elipse com o Sol em um dos focos;

- Segunda Lei: o segmento de linha que liga um planeta até o Sol varre áreas iguais em tempos iguais;
- Terceira Lei: o quadrado do período orbital (P) de um planeta é proporcional à sua distância média ao Sol (A) ao cubo, ou seja,

$$\frac{P^2}{A^3} = k, \quad (1)$$

onde k é uma constante.

Um ponto importante na história de Kepler remete a seus estudos na Universidade de Tübingen. Lá, teve aulas com Michael Maestlin, um astrônomo convencido de que o sistema copernicano era verdadeiro [31] e que influenciou profundamente Kepler em sua visão do Cosmos. Portanto, do ponto de vista teórico, Kepler se tornou um convicto heliocentrista e por isso, sempre analisou os dados herdados através do modelo de Copérnico [31]. Possivelmente, se não fosse tão convicto, não teria chegado às suas três Leis [32].

Quase 150 anos depois, Isaac Newton¹² desenvolveu suas Três Leis do Movimento. Com elas, deduziu a Lei da Gravitação Universal que utilizou para formalizar as Leis de Kepler. Nesse momento, além de empíricas, as Leis de Kepler passaram a ser consequências de leis físicas fundamentais e, portanto, funcionavam para quaisquer objetos que se orbitassem no Universo [33]. As leis de Kepler e de Newton carregam, assim, uma ideia de *universalidade* que é muito importante para o sucesso da Física e da Astronomia como modelos de ciência no âmbito do projeto moderno e contemporâneo [28]. No entanto, vale destacar que, do ponto de vista histórico e epistemológico, [30] fazem uma interessante discussão sobre a ideia de universalidade/localidade quando outros referenciais culturais são levados em conta.

4.2. Os exoplanetas

Na época de Pitágoras, gregos como Anaxágoras (500 a.C.–428 a.C.) e Aristarco de Samos (310 a.C.–230 a.C.) teorizaram sobre a existência de outros mundos e a singularidade da Terra. Porém, evidências de que as estrelas se moviam só seriam descobertas, bem mais tarde, em 1838, quando Friedrich Bessel enviou uma carta a Sir J. Herschel, descrevendo suas medidas da paralaxe do sistema binário *61 Cygni*. Com elas, pode determinar que as duas estrelas estão a 10,3 anos-luz da

⁹ Com 66 anos, Copérnico (1473, 1543) recebeu a visita do professor de Matemática da Universidade Luterana de Wittenberg, Jorge Joaquim Rético, que insistiu para que Copérnico escrevesse *De revolutionibus orbium coelestium*. Porém, Copérnico só veria o primeiro exemplar de sua obra algumas horas antes de morrer [31].

¹⁰ Em 1563, Tycho Brahe (1546–1601) observou Saturno e Júpiter tão próximos que eram indistinguíveis. Ao comparar as previsões para esse evento, percebeu que as tabelas de Ptolomeu estavam erradas por quase um mês e as de Copérnico por vários dias. Foi nesse momento que decidiu dedicar sua vida à observação cuidadosa dos astros [31].

¹¹ Johannes Kepler nasceu na região do Sacro Império Romano, onde hoje é o sul da Alemanha. Como sua família era pobre, Kepler não conseguiria seguir com seus estudos da escola se não fosse por um projeto dos duques de Württemberg que fornecia bolsas de estudo para os melhores alunos.

¹² Em 1665, pouco antes de se Newton se graduar, a Grande Praga, uma das maiores epidemias da História, fez Cambridge fechar. Durante esse período, ele escreveu um artigo chamado *As Leis do Movimento*, onde descrevia seus trabalhos iniciais em Mecânica e apresentava os princípios de conservação de momento linear e angular. Também foi nessa época em que começou a desenvolver sua teoria da gravitação, onde imaginava a mesma força que mantinha uma maçã sendo estendida até a Lua [31].

Com a maior câmera digital equipada para observações do espaço sideral até então, combinada a técnicas de ponta na medição do brilho estelar,²⁸ Kepler possuía uma alta precisão que o permitia descobrir planetas como a Terra ao redor de estrelas parecidas com o Sol. Dessa forma, ele foi capaz de encontrar aproximadamente 3000 exoplanetas, aumentando o censo que se tinha, até então, em um fator de 5 [47, p. 108]. O telescópio tinha como objetivos científicos (i) determinar características como abundância, tamanho, massa e possíveis companheiros dos exoplanetas; (ii) estimar a distribuição de tamanhos, formas e variabilidade das órbitas; e (iii) identificar as propriedades das estrelas hospedeiras desses sistemas planetários [48].

Ele funcionava da seguinte forma: tinha sua própria órbita ao redor do Sol e mantinha-se apontado para a mesma região do céu por 90 dias, até que girava 90° em torno de seu próprio eixo para manter seus painéis solares apontados para o Sol. Além disso, o telescópio Kepler media a luz de todas as estrelas a cada meia hora, pois o trânsito de um planeta do tipo da Terra pode durar apenas uma hora [33].

Histórica e epistemologicamente, o telescópio Kepler propagou ecos da Revolução Copernicana, pois a grande maioria dos exoplanetas conhecidos até 2009 era do tamanho de Júpiter. Com a sensibilidade do telescópio, foi possível determinar planetas cada vez menores, mais próximos de suas estrelas e em grande números, mostrando que a Via Láctea está cheia deles. A missão Kepler mostrou que há muitos sistemas planetários, estrelas com mais de um planeta e planetas que orbitam mais de uma estrela. Além disso, mostrou que a classe de planetas mais comum é algo entre o tamanho da Terra e de Netuno²⁹, também chamados de super-Terras [33]. Graças às contribuições de telescópios como Kepler e GAIA, hoje sabemos que, dependendo do tamanho, o número de exoplanetas por estrela pode chegar a 1 [49]. Ou seja, quando comparamos o entendimento da astronomia acerca dos planetas antes e depois da missão Kepler, vemos que são compreensões totalmente diferentes acerca do Universo. São visões *incomensuráveis*, pois olham para Universos totalmente diferentes. De acordo com a NASA,

Kepler abriu nossos olhos para a diversidade de planetas que existem em nossa galáxia. Análises das descobertas de Kepler concluem que 20 a 50 por cento das estrelas visíveis no céu de noite provavelmente têm planetas pequenos, possivelmente rochosos, similares em tamanho à Terra e localizados dentro da zona habitável de suas estrelas hospedeiras.³⁰

²⁸ Disponível em: <<https://science.nasa.gov/mission/kepler/>>. Acesso: 16 jun 2025.

²⁹ A massa de Netuno equivale a cerca de 17 vezes a massa da Terra.

³⁰ Tradução nossa. Disponível em: <<https://science.nasa.gov/mission/kepler/#h-planets-are-everywhere>>. Acesso: 16 Dez 2024.

É importante notar que essas estatísticas ainda estão em construção, pois, além da análise realizada pelos pesquisadores e de testes de verificação da existência de exoplanetas, ainda há muito o que ser descoberto e entendido sobre a natureza desses objetos. E, com as contribuições relevantes do telescópio Kepler que, em interpretações de Kuhn, constitui hoje a *pesquisa normal* relacionada aos exoplanetas, outros conhecimentos poderão ser desenvolvidos com o auxílio dos telescópios TESS, JWST (*James Webb Space Telescope*), entre outros, [47].

Ainda que exista outros métodos para a detecção de exoplanetas (ver, por exemplo, [50]), o método de trânsito contribuiu significativamente com a *revolução científica* nos últimos anos nessa área da Astronomia, além de ter detectado aproximadamente 80% (2636 de 3261) dos exoplanetas de nossa base de dados³¹. E, por isso, detalhamos um pouco melhor esse método.

4.4. Método de trânsito

Pelo fato dos exoplanetas não produzirem luz própria, e por suas dimensões serem relativamente pequenas quando comparados com suas estrelas hospedeiras, é muito difícil obtermos alguma observação direta desses objetos. Para contornar essa dificuldade, foi necessário desenvolver diversos métodos de detecção, além de missões espaciais dedicadas exclusivamente na busca por exoplanetas.

O método de trânsito (Figura 3) consiste em observarmos a diminuição do brilho de uma estrela à medida que o exoplaneta bloqueia uma pequena fração do seu brilho. Com a porcentagem decaída do brilho, obtemos o tamanho relativo entre o planeta e a estrela e, com as repetições desse decaimento, podemos obter com precisão o período de rotação (normalmente os pesquisadores exigem três observações para confirmar um exoplaneta, ou seja, duas medidas de períodos iguais) [33].

Como veremos mais adiante, era assim que o Telescópio Kepler funcionava, utilizando um fotômetro de

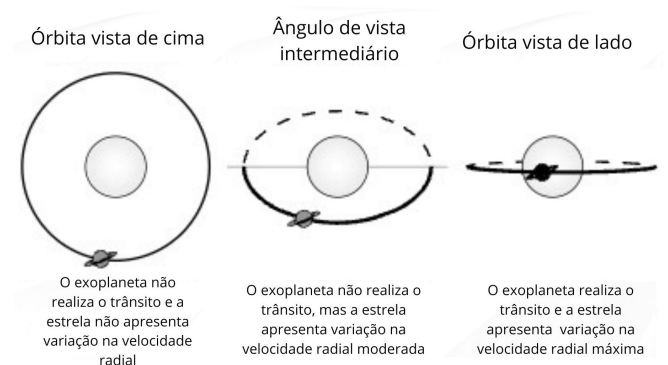


Figura 3: Ângulos de visada de um exoplaneta e sua estrela. Adaptada de [47, p. 67].

³¹ Resultado extraído da análise da base de dados.

Tabela 1: Número de dados válidos em cada parâmetro após filtragem de *KOI* e dados nulos.

	NAME	ECC	δECC	A	δA	MSTAR	$\delta MSTAR$	PER	δPER
Contagem	3261	2404	820	3247	3166	2549	2465	3247	3166

0,95 metros, podia acompanhar centenas de milhares de estrelas ao mesmo tempo [45]. Porém, o método de trânsito exige que o exoplaneta passe exatamente na linha de vista entre a Terra e sua estrela, como visto na Figura 3, justamente para que bloqueie o brilho da estrela que chega até a Terra.

A probabilidade geométrica de um trânsito ocorrer pode ser dada por $P(R, a, e) = \frac{R_*}{A(1-e^2)}$, onde R_* é o raio da estrela, A é o semieixo maior e e a excentricidade da órbita [47]. Outra limitação do método é que há um viés para planetas com menor período. Isso ocorre porque exigem menos tempo para completar as três órbitas necessárias para confirmação.

5. Tratamento e Análise dos Dados EDO

Inicialmente, a nossa amostra de dados retirada do site da EDO³² continha 314 parâmetros de 5747 objetos. Para nossa análise de dados, desenvolvemos códigos na linguagem *Python*³³, com as bibliotecas *(i) matplotlib*, para criar gráficos; *(ii) a numpy*, para realizar ajustes lineares com a função *polyfit*; e *(iii) a pandas*, para selecionar, filtrar e realizar cálculos com a nossa amostra. Os parâmetros de interesse selecionados são: nome (NAME, para identificação), período orbital (PER) em anos, semieixo maior (A) em UA, excentricidade (ECC), massa da estrela hospedeira (MSTAR) em $M_\odot$ ³⁴ e suas respectivas margens de erro (δP , δA , δECC e $\delta MSTAR$). Vale ressaltar que as margens de erro são separadas em superior e inferior, mas que serão representadas aqui conjuntamente por δ .

A base de dados conta com objetos *KOI* (*Kepler Objects of Interest*), que são observações com características periódicas feitas com o Telescópio Kepler, mas ainda não confirmados como provenientes de um exoplaneta [48]. Como esses objetos não fazem parte do escopo do presente trabalho, foram descartados, restando 3261 exoplanetas. Além disso, há muitos dados faltantes, em quantidades diferentes para cada parâmetro, em especial as margens de erro da excentricidade, com 2441 dados nulos. Para contornar esse problema, em cada análise selecionamos as colunas de interesse e filtramos os dados válidos.

A Tabela 1, mostra o número de dados válidos em cada parâmetro, depois da retirada de objetos *KOI* e dos dados faltantes:

Cada parâmetro, no banco EOD, é obtido de diferentes formas e a partir de diferentes métodos. Por exemplo, os períodos são obtidos, principalmente, pelo método de trânsito utilizado pelo telescópio Kepler, ou seja, uma medição direta. O semieixo maior foi calculado por nós a partir da Terceira Lei de Kepler, de acordo com a Equação (1) considerando $k = 1$ ³⁵. Já a excentricidade é calculada a partir da Mecânica Orbital³⁶ e de cálculos computacionais, o que explica ser o parâmetro com mais dados faltantes, principalmente quando consideramos a margem de erro. Além disso, a massa das estrelas hospedeiras é obtida por métodos indiretos, por exemplo: pela curva de luz da estrela, que fornece informações sobre variações no brilho, enquanto o tipo espectral é determinado por espectroscopia e auxilia na estimativa da luminosidade e massa da estrela.

Para a primeira análise, mostrada pela Figura 4, graficamos a excentricidade versus o logaritmo do período. A amostra selecionada é de apenas 811 elementos, pois são os exoplanetas que apresentam concomitantemente dados não nulos de ECC, δECC , PER e δPER . Podemos observar que de fato, o número de exoplanetas com excentricidade diferente de 0 (representados em azul), ou seja, que realizam um movimento de elipse em torno da sua respectiva estrela é predominante. Na verdade, apenas 13% (108 de 811) dos exoplanetas de nossa amostra têm excentricidade igual a 0 (representados em

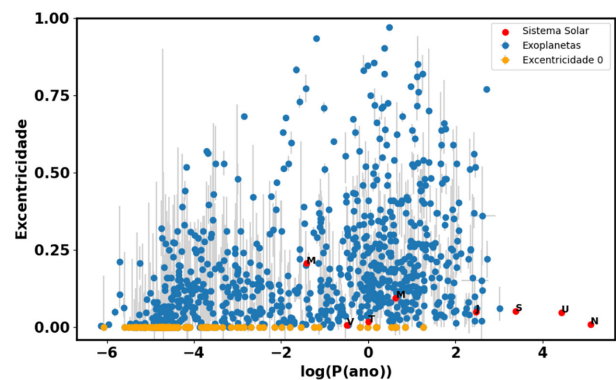


Figura 4: Excentricidade dos exoplanetas em função do logaritmo do período do planeta com as barras de erro em cinza. Alguns pontos em azul têm a barra de erro menor que os símbolos, já os em vermelho não apresentam barra de erro.

³² Disponível em: <<http://exoplanets.org/csv>>. Acesso em: 19 Nov. 2024.

³³ Disponível em: <<https://github.com/Drey-cf/ArtigoExoplanetas>>. Acesso: 17 fev 2025.

³⁴ 1 $M_\odot$ é a massa do Sol, equivalente a $1,98 \times 10^{30}$ quilogramas.

³⁵ Para simplificar os cálculos, utilizamos os dados da Terra, ou seja, $P = 1$ ano e $A = 1$ UA e massa da estrela de $1 M_\odot$ e obtemos $k = 1$. A Equação pode ser utilizada para determinar diretamente um parâmetro se tivermos o outro, ou seja, $P^2 = A^3$.

³⁶ Área da física que estuda o movimento de corpos que orbitam uns aos outros sob a influência da gravidade, como planetas, satélites e estrelas.

amarelo). Confirmando a validade da Primeira Lei de Kepler para planetas fora do Sistema Solar.

Também podemos observar que os planetas do Sistema Solar apresentam uma excentricidade baixa em relação à nossa amostra. Esse é um dos motivos pelos quais os astrônomos demoraram tanto para descrever corretamente as órbitas dos planetas. De fato, Mercúrio é o que tem maior excentricidade, mas é frequentemente bloqueado pelo Sol. Já Marte, o segundo com maior excentricidade apresenta uma janela de tempo muito maior para ser estudado. Foram esses motivos que fizeram tanto Tycho Brahe encarregar Johannes Kepler de determinar a órbita de Marte, quanto Kepler determinar de fato suas Leis do Movimento Planetário.

Além disso, a Primeira Lei de Kepler, representada na Figura 4, é uma forma de interpretar o fato de que a Lei da Gravitação Universal é uma força conservativa que cai com o raio quadrado. Essa análise é detalhadamente feita por [51] e demonstram que, se a Força Gravitacional decaísse com uma potência maior ou igual a 3, nenhuma órbita estável seria possível. Na verdade, eles demonstram que os únicos valores que geram órbitas fechadas³⁷ na interação de dois corpos são para $F \propto r$ e $F \propto r^{-2}$. Como observamos que a força não aumenta com a distância, a única forma estável e fechada de uma órbita é consequência direta da Força Gravitacional cair com o quadrado da distância.

Quando Newton demonstrou a Segunda Lei de Kepler, partiu especialmente da conservação de momento angular, ou seja, se não houver um *torque* no sistema planeta-estrela (uma força que faça a velocidade angular do planeta variar) o momento angular do sistema não muda.

Como a força gravitacional é central, ou seja, ela depende somente da distância “ r ” entre os objetos e age na linha que os ligam, não há qualquer componente perpendicular para gerar torque. Portanto, considerando a órbita elíptica de um planeta e supondo que ele não perca nem ganhe massa, quando sua distância r até a estrela diminui (aumenta), para manter L constante, sua velocidade angular aumenta (diminui) [47]. Resulta que a taxa de área com que ele varre na elipse é constante. Em outras palavras, o planeta varre áreas iguais em tempos iguais.

Para a análise a seguir, realizaremos o gráfico da velocidade dos planetas em função do semieixo maior. Essa análise é relacionada à Terceira Lei de Kepler, conhecida como a versão da velocidade, sendo que a velocidade orbital pode ser calculada pela Lei da Gravitação Universal.

Em qualquer ponto da órbita do planeta, a força gravitacional é igual à força centrípeta, ou seja,

$$\mathbf{F}_g = \mathbf{F}_c, \quad (2)$$

³⁷ Quando um corpo em movimento sob a ação de uma força central retorna exatamente à mesma posição e velocidade após um certo período de tempo.

utilizando a Lei da Gravitação Universal e a fórmula da força centrípeta, obtemos

$$G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \quad (3)$$

simplicando a massa do planeta e a distância, podemos isolar v ,

$$v = \sqrt{G \frac{M}{R}}. \quad (4)$$

Para o caso da Terra, M é a massa do Sol definida por $1 M_\odot$, R é a distância da Terra até o Sol, dada por 1 UA , e $v_\oplus$ é a velocidade da Terra. Por tanto,

$$v_\oplus = \sqrt{G}. \quad (5)$$

Como a excentricidade da órbita da Terra é de 0,0167, podemos aproximá-la para um círculo. Assim, podemos calcular a velocidade da Terra como sendo

$$v_\oplus \approx \frac{2\pi R}{P} \approx 2\pi \frac{150 \times 10^6 \text{ km}}{31536000 \text{ s}} = 29,88 \text{ km/s}$$

e a velocidade de qualquer exoplaneta como sendo

$$v = v_\oplus \sqrt{\frac{M}{R}}. \quad (6)$$

Ou seja, a partir da Lei da Gravitação Universal, que é uma lei deduzida de princípios físicos, e introduzindo a Terceira Lei de Kepler, que é uma lei empírica, encontramos a velocidade de cada exoplaneta. Como a massa e o semieixo maior são obtidos por métodos indiretos, temos uma forma de reforçar o entendimento de que a Terceira Lei de Kepler se aplica a outros sistemas planetários.

Ainda sobre a Equação (6), vale destacar que, utilizar o semieixo maior A como parâmetro equivalente à distância R dos exoplanetas é válido, pois, a média de R ao longo da órbita, é exatamente A , como bem calculado por [7].

Após selecionar uma amostra com dados não nulos de A , δA , $MSTAR$ e $\delta MSTAR$, calculamos diretamente da Equação (6) e graficamos a velocidade de 2329 exoplanetas e dos oito planetas do Sistema Solar, junto das respectivas margens de erro propagadas, representadas pelas linhas cinzas. Ou seja, utilizamos a massa das estrelas hospedeiras e o semieixo maior da órbita dos exoplanetas, para realizar o gráfico. Além disso, graficamos a função $y = \frac{29,88}{\sqrt{A}}$, para comparar o quanto ela se aproxima da velocidade calculada para os exoplanetas. Vale ressaltar que a função ajusta a distribuição dos planetas do Sistema Solar porque foi adotado o valor de $k = 1$ para estimar A .

Diferentemente das outras figuras que estão em escala logarítmica, o fato da Figura 5 estar em escala linear deixa bem evidente a diferença dos planetas do Sistema Solar para os exoplanetas de outros sistemas

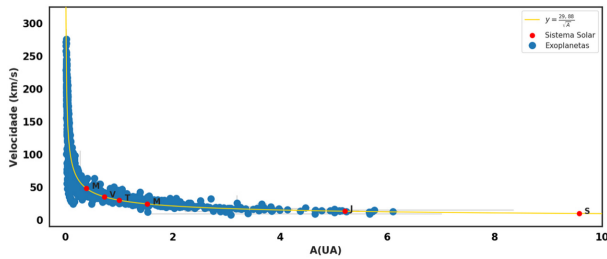


Figura 5: Distribuição das velocidades (em km/s) dos exoplanetas, e planetas do Sistema Solar (M , V , T , M e J), calculadas a partir da Terceira lei de Kepler na forma das velocidades. Conta também com uma função $y = \frac{29,88}{\sqrt{A}}$, onde A é o semieixo maior de cada órbita.

planetários de nossa amostra. Saturno, Urano e Netuno encontram-se a, respectivamente, 9,6, 19,2 e 30,2 UA do Sol. Nenhum exoplaneta de nossa base está acima de 8,3 UA (considerando a margem de erro). O que deixa as seguintes perguntas: será que, diante de tantos sistemas planetários, o nosso é especial? E se não, quantos exoplanetas estamos deixando de observar?

Além disso, é importante destacar a alta concentração de exoplanetas com A menor que 1 (ou seja, exoplanetas que se encontrariam dentro da órbita da Terra) de 88,4% (2060 de 2329). Essa concentração é uma consequência do viés de seleção criado majoritariamente pelos métodos de detecção de Trânsito e Velocidade Radial, como discutido anteriormente. Portanto, uma indicação de que o nosso Sistema Solar não seja especial, e que o problema de viés de seleção pode ser amenizado se utilizarmos o imageamento direto³⁸, capaz de determinar exoplanetas mais distantes de suas estrelas hospedeiras.

A dispersão de pontos ao redor da função $y = \frac{29,88}{\sqrt{A}}$ pode ser explicada pelo seguinte fato: quando Newton deduziu a Terceira Lei de Kepler, observou que o valor de k dependia da massa do planeta e da estrela hospedeira. Como a massa das estrelas é muito maior que a massa dos planetas, podemos aproximar k a uma constante, mas a realidade é que ele pode variar. Como há uma distribuição de massas das estrelas em nossa amostra, é natural que haja uma dispersão de pontos em torno da Equação que é válida para o Sistema Solar.

A Figura 6, criada a partir da amostra da Figura 5, ressalta melhor essas variações. Nela conseguimos ver mais especificamente como a velocidade dos planetas se comporta para diferentes intervalos de massa das estrelas hospedeiras. Sendo que os exoplanetas estão quase igualmente distribuídos, contendo entre 355 e 414 exoplanetas por gráfico. Pela diferença no tamanho dos intervalos, podemos ver que há uma alta concentração de

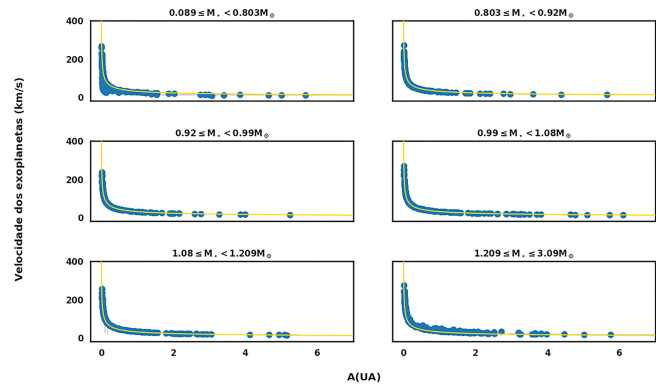


Figura 6: Velocidade dos planetas em função do semieixo maior para diferentes intervalos de massa da estrela hospedeira. A curva amarela representa a função válida para sistemas cuja estrela hospedeira tem aproximadamente $1 M_{\text{Sol}}$. Uma certa dispersão é mais notável para os gráficos de massas menores (topo à esquerda) e maiores (base à direita).

estrelas com massa do tipo solar. Além disso, vemos que em todos os intervalos os pontos estão bem próximos da função graficada, principalmente para estrelas cuja massa é próxima à do Sol. E, conforme os intervalos de massas se distanciam de $1 M_{\odot}$, a dispersão dos pontos se acentua.

Na Figura 7, utilizando uma amostra com 3166 exoplanetas, realizamos o gráfico dos períodos e semieixos maiores segundo a Terceira Lei de Kepler cujas estrelas hospedeiras têm massas próximas à do Sol, $0,9 M_{\odot} = M_* < 1,1 M_{\odot}$. No que tange os resultados apresentados, cada um dos parâmetros, período e semieixo maior, podem ser obtidos de diferentes formas, a depender do método de detecção. Como explicado anteriormente, o telescópio Kepler obteve o período observando o trânsito de cada planeta e nós calculamos o semieixo maior segundo a Terceira Lei de Kepler. Foi necessário realizar o gráfico em escalas logarítmicas para comparar os exoplanetas com os planetas do Sistema Solar e para

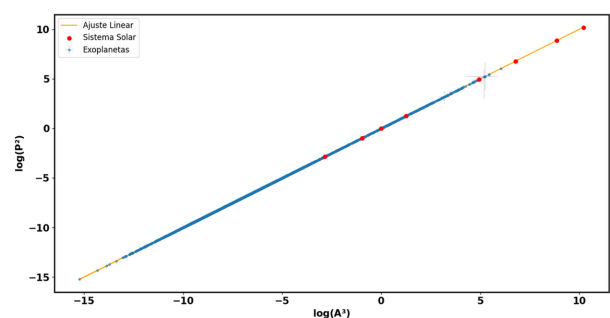


Figura 7: Gráfico de dispersão dos exoplanetas cuja estrela hospedeira tem massa entre 0,9 e 1,1 $M_{\odot}$, mostrando a relação entre P^2 e A^3 , em escala logarítmica. Os pontos em azul representam os exoplanetas com suas respectivas margens de erro propagadas, enquanto a linha laranja é o ajuste linear dos pontos.

³⁸ Uma possibilidade de detecção direta de um exoplaneta seria tirar uma foto do sistema planetário. O problema é que o brilho da estrela hospedeira é milhões de vezes o brilho refletido pelo planeta. O método do Imageamento Direto contorna esse problema utilizando um dispositivo chamado coronógrafo, que é instalado dentro do telescópio para bloquear a luz que vem da estrela antes que ela chegue ao detector do telescópio.

podermos observar melhor a distribuição dos planetas, como discutida anteriormente.

6. Discussão e Reflexões: Questões Teórico-observacionais e Epistemológicas Fundamentais

A partir da análise da obra de [28] e tendo [37] como referência, entrelaçamos as seis palavras/expressões cruciais que previamente destacamos como categorias importantes de discussão para a compreensão epistemológica kuhniana, a saber: *paradigma*, *ciência normal*, *anomalia*, *crise*, *revolução científica* e *incomensurabilidade*.

O conceito de *paradigma* passou a ter sentido muito amplo na história da ciência, sendo usado em distintos contextos. No nosso caso, por um lado, o conceito de *paradigma* é importante para a análise das implicações sobre a mudança de perspectiva cosmológica ocorrida no século XVII na transição entre o modelo Geocêntrico e o modelo Heliocêntrico, e, por outro lado, quando da mudança de perspectiva acerca dos planetas conhecidos no Universo. Desde que Galileu Galilei apontou a luneta para o céu, em 1609, tínhamos apenas catalogados, para além da Terra, os cinco planetas observados a olho nú.

Em 1992, como vimos, o *paradigma* sobre a existência de planetas fora do Sistema Solar se altera completamente. E, desde então, temos experimentado reverberações da Revolução Copernicana no estudo dos exoplanetas, sendo que boa parte dessas reverberações foi causada pelo Telescópio Espacial Kepler, ecoando os impactos da revolução Copernicana e contribuindo para uma nova visão de Universo. Graças a ele, agora sabemos que a maioria das estrelas apresentam ao menos um planeta em sua órbita. Saímos da especulação teórica para a corroboração observacional de profundas relações *estrela-planeta*.

Ainda que a Astrofísica tenha trazido consigo um bojo de *paradigmas*, a forma de pensar soluções tem seguido a receita da *ciência normal* pensada por Kuhn, ou seja, os cientistas trabalhando na área ainda não têm sido completamente livres para analisar criticamente os fundamentos teóricos, conceituais, metodológicos, instrumentais e observacionais que têm utilizado na agenda de pesquisa. Para [28], o período de *ciência normal* (existência de um só *paradigma*) é o que diferencia a ciência de outras práticas de conhecimento e mesmo de pseudociência.

A *incomensurabilidade* se coloca no sentido de que é impossível, por exemplo, no bojo da *revolução científica*, comparar ideias do modelo Geocêntrico e/ou Heliocêntrico. Para Kuhn, os padrões científicos e definições são diferentes para cada *paradigma*. É impossível, por exemplo, comparar a ideia de gravidade em Newton, Einstein ou mesmo Galileu e Aristóteles [28].

Em síntese, mostramos, no presente trabalho, a importância das Leis de Kepler por intermédio dos estudos contemporâneos dos exoplanetas. Analisamos

documentos e artigos da literatura que tratam de discussões históricas, epistemológicas e observacionais envolvendo as Leis de Kepler. Além disso, exploramos a importância do método de Trânsito na catalogação de parâmetros físicos de exoplanetas confirmados dispostos no catálogo *Exoplanet Orbit Database*. Argumentamos a favor da validade e da importância das Leis de Kepler, tanto para o desenvolvimento da ciência quanto para o nosso entendimento atual do Universo.

Do ponto de vista histórico e epistemológico, as Leis de Kepler são cruciais para refletirmos, no presente, sobre o papel da teoria e da observação nos estudos da Astrofísica. Do ponto de vista epistemológico, há uma sutileza quase sempre negligenciada ao longo das discussões [2–13]. Diferentemente da Física, grande parte dos dados disponíveis em Astrofísica não são experimentais, mas observacionais. Em outras palavras, os dados não são tratados diretamente em laboratório. Os objetos astrofísicos estão longe. Conhecer e descrever em riqueza de detalhes os parâmetros físicos e atmosféricos de exoplanetas, por exemplo, dependerá da construção de equipamentos cada vez mais potentes e precisos.

Há, nesse sentido, uma ruptura com a perspectiva positivista da ciência, no âmbito das ideias de Auguste Comte (1798–1857). Para Comte, enviesado pela perspectiva da realização *in loco* do experimento, somente os conhecimentos científicos são verdadeiros. Além disso, Kepler, do ponto de vista histórico, era um convicto heliocentrista. Ao trabalhar com os dados de Brahe ele já tinha previamente desenhado em sua estrutura mental uma forma de interpretar os dados. Não há, portanto, no âmbito da ciência moderna, como separar teoria e observação e/ou teoria, experimento e observação.

No que tange às questões teórico-observacionais envolvendo o estudo das Leis de Kepler e os exoplanetas, reafirmamos que ilustrar a aplicabilidade (e a discussão da universalidade) das Leis de Kepler por meio dos exoplanetas pode ser um exercício interessante de conexão entre a Física e a Astronomia.

Tecnicamente, as Leis de Kepler são empíricas, ou seja, antecedem um desenvolvimento teórico. No entanto, elas foram fundamentais para o trabalho de Newton que, ao expandi-las, fundamenta uma Teoria Mecânica de descrição do Universo que coloca a Física (e consequentemente a Astronomia) no lugar das ciências que serão modelo para o desenvolvimento do que vai ser chamado de ciência moderna e contemporânea. Mais do que isso, as Leis de Kepler estão implicitamente alicerçadas nos princípios de conservação (de momento linear e angular) que são a base da Mecânica Newtoniana.

Do ponto de vista epistemológico (e metafísico) a detecção de um planeta Terra 2.0 mudará completamente a nossa perspectiva cosmológica, nos colocando em um outro lugar de relação no Universo observável. Vivemos, em pleno século XXI, os ecos da Revolução Copernicana. Obviamente que, do ponto de vista histórico, tampouco o estigma *revolucionário* coube a Copérnico. Ele foi, antes de tudo, um conservador [31], pois não abandonou

completamente os mecanismos teóricos do *paradigma* anterior. Em que pese os desafios de analisar os desafios epistemológicos na construção do conhecimento científico em Astronomia e Astrofísica [35, 36, 52], compreendemos que precisamos construir outras formas de abordagem na formação de professores e cientistas quando do tratamentos das Leis de Kepler. Apontamos aqui distintos aspectos históricos, epistemológicos, teóricos e observacionais que o estudo das Leis de Kepler nos permite expandir para além da simples enunciação de cada uma delas, como por vezes acontecem em aulas e livros textos principais do campo.

7. Considerações Finais

Este trabalho argumenta sobre a relevância das Leis de Kepler para além de um marco histórico da Astronomia, demonstrando como elas formam pilares fundamentais para a compreensão contemporânea do Universo, especialmente no contexto dos exoplanetas. A discussão epistemológica, amparada na perspectiva kuhniana, mostrou como as anomalias e crises no paradigma geocêntrico impulsionaram a Revolução Copernicana, implicando na proposição das três Leis de Kepler e, posteriormente, na formalização newtoniana. Dessa forma, tal percurso histórico encontra um eco notável na era dos exoplanetas, onde o Telescópio Espacial Kepler, por exemplo, revolucionou nossa percepção sobre a abundância e diversidade de sistemas planetários, expandindo nossos horizontes de conhecimento de maneiras que, antes, eram apenas especulativas.

A análise quanti-qualitativa da base EOD reforçou a universalidade das Leis de Kepler, evidenciando sua aplicabilidade em sistemas planetários além do nosso Sistema Solar e confirmando a predominância de órbitas elípticas. Essa aplicabilidade, no entanto, também expôs os vieses observacionais atuais, o que instigou a incomensurabilidade entre diferentes “visões de Universo” e a necessidade de abordagens metodológicas diversas para superar as limitações atuais na detecção de exoplanetas mais distantes.

Ademais, reafirmamos que o estudo das Leis de Kepler, quando contextualizado com os avanços recentes na pesquisa de exoplanetas e permeado por discussões históricas e epistemológicas, oferece uma boa oportunidade para a formação de cientistas e educadores. Nesse sentido, esse tipo de abordagem transcende a mera enunciação de fórmulas, promovendo uma compreensão profunda acerca da natureza da ciência, da inseparabilidade entre teoria e observação, e do impacto revolucionário do conhecimento astronômico em nossa cosmovisão. Projetos como o James Webb Space Telescope e o Vera C. Rubin Observatory continuam a desvendar os mistérios do cosmos, aprofundando ainda mais os ecos da Revolução Copernicana que estamos vivenciando no século XXI. Seria importante, em trabalhos futuros, abordar o problema das Leis de Kepler no contexto dos

exoplanetas por meio de outras epistemologias também utilizadas em Educação e em Ensino de Ciências, como a fenomenologia, o materialismo histórico crítico, entre outras teorias pós-modernas.

Esperamos que esse trabalho inspire novas investigações e práticas pedagógicas que elevem os estudos das Leis de Kepler ao seu merecido patamar de complexidade e relevância na Educação e Divulgação das Ciências.

Disponibilidade de Dados

Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo foi disponibilizado no site da base EOD e pode ser acessado em exoplanets.org/csv.

Referências

- [1] I. Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Royal Society, London, 1687).
- [2] C.C. Pereira e A.M. Velásquez-Toribio, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **46**, e20230329 (2024).
- [3] L.P.G. Menezes e M.C. Batista, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20220048 (2022).
- [4] G. Zuza Diniz, G.W.C. Rocha, E.N. Velloso, E.G. Costa e J.D. Nascimento Jr., *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20220170 (2022).
- [5] M. Moriconi, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20210365 (2022).
- [6] B.E. Morgado e V. Soares, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **37**, 1305 (2015).
- [7] M.F. Silva, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 1 (2011).
- [8] R.G.G. Amorim e W.C. Santos, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e1310 (2016).
- [9] W.C. Santos e R.G.G. Amorim, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e2308 (2017).
- [10] R.R. Barroso, A.L. Oliveira e V.L. Jesus, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200161 (2020).
- [11] M.M.M. Marques e B.L. Nascimento-Dias, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210027 (2021).
- [12] D.B. Freitas, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20190198 (2019).
- [13] J.A. Quillfeldt, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **27**, 685 (2010).
- [14] P.W. Lamberti, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **13**, 154 (1996).
- [15] K.O. Oliveira, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física. Florianópolis* **27**, 698 (2010).
- [16] A. Medeiros e M.A. Monteiro, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **19**, 29 (2002).
- [17] J.M.F. Bassalo, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **7**, 212 (1990).
- [18] N.L. Andrade, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **22**, 263 (2005).
- [19] L.P.G. Menezes, M.C. Batista e D. Gardelli, *Revista Brasileira de História da Ciência* **13**, 227 (2020).
- [20] E. Cardoso, M. Barcellos e A. Guerra, *Revista Brasileira de História da Ciência* **14**, 66 (2021).

- [21] R.H. Carvalho e L.A. Nascimento, *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia* **27**, 7 (2019).
- [22] H.R. Carvalho, L.A. Nascimento e B.V.C. Silva, *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia* **23**, 7 (2017).
- [23] J.N. Cornejo e H. Santilli, *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia* **10**, 55 (2010).
- [24] C.M. Dutra e A.R. Goulart, *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia* **18**, 11 (2014).
- [25] H.P. Pacheco, *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia* **27**, 93 (2019).
- [26] P. Bedaque e R. Caniato, *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia* **38**, 07 (2024).
- [27] A. Martins, T.O. Lima, M.J.A. Bolzan, P.A. Sousa, V.B. Lima Filho, A. Pancotti e J.C.M. Castro Neto, *Revista Latino* **30**, 51 (2020).
- [28] T.S. Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas* (The University of Chicago, São Paulo, 2013), 12 ed.
- [29] E. Han, S.X. Wang, J.T. Wright, Y.K. Feng, M. Zhao, O. Fakhouri, J.L. Brown e C. Hancock, *Astronomical Society of the Pacific* **126**, 827 (2014).
- [30] J.T. Wright, *The Exoplanet Orbit Database* *Astronomical Society of the Pacific* **123**, 412, (2011).
- [31] A.S.T. Pires, *Evolução das Ideias da Física* (Gradiva, Lisboa, 2008).
- [32] M.A. Andery, N. Micheletto, T.M.P. Sério, D.R. Rubano, M. Moroz, M.E. Pereira, S.C. Gioia, M. Gianfaldoni, M.R. Savioli e M.L. Zanotto, *Para Compreender a Ciência: uma perspectiva histórica* (Garamond/EDUC, Rio de Janeiro/São Paulo, 2012), 16 ed.
- [33] J. Bennett, M. Donahue, N. Schneider e M. Voit, *The Cosmic Perspective* (Pearson Education, São Francisco, 2014).
- [34] D. Marcondes, *Textos Básicos de Filosofia e História das Ciências: A Revolução Científica* (Zahar, Rio de Janeiro, 2016).
- [35] A.F.P. Martins, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 703 (2015).
- [36] C.B. Moura e A. Guerra, *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências* **16**, 725 (2016).
- [37] F. Ostermann, *Caderno Brasileiro De Ensino De Física* **13**, 184 (1996).
- [38] B.W. Carroll e D.A. Ostlie, *An Introduction to Modern Astrophysics* (Person, London, 2014), 2 ed.
- [39] N. Copérnico, *De revolutionibus orbium coelestium* (Johann Petreius, Nuremberg, 1543).
- [40] M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica: Mecânica* (Blucher, São Paulo, 2013), 5 ed.
- [41] EUROPEAN SPACE AGENCY, *Gaia mission: third data release*, disponível em: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia, acessado em: 20/11/2024.
- [42] O. Struve, *The Observatory* **72**, 199 (1952).
- [43] A. Wolszczan e D.A. Frail, *Nature* **355**, 145 (1992).
- [44] J.W. Wei, arXiv:1805.02771 (2018).
- [45] S.E. Thompson, D. Fraquelli, J.E. Cleve e E.D.A. Caldwell, *Kepler Archive Manual* (Space Telescope Science Institute, Baltimore 2016).
- [46] S.B. Howell, C. Sobeck, M. Haas, M. Still, T. Barclay, F. Mullally, J. Troeltzsch, S. Aigrain, S.T. Bryson, D. Caldwell *et al.*, *Astronomical Society of the Pacific* **126**, 398 (2014).
- [47] J. Winn, *The Little Book of Exoplanets* (Princeton University Press, Princeton, 2023).
- [48] W. Borucki, *Reports on Progress in Physics*, Moffett Filed **79**, 036901 (2016).
- [49] Y. Dai, H. Liu, D. An e J. Zhou, *The Astronomical Journal* **162**, 1 (2021).
- [50] K. Oliveira e M.F. Saraiva, *Astronomia e Astrofísica* (Livraria da Física, São Paulo, 2015).
- [51] S. Thornton, M. Stephen e J. Marion, *Dinâmica clássica de partículas e sistemas* (Cengage Learning, São Paulo, 2013), 5 ed.
- [52] A. Alves-Brito e J.R. Macedo, *Revista Brasileira de História da Ciência* **15**, 400 (2022).