

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Física
Departamento de Astronomia

**As Leis de Kepler: uma problematização histórica,
epistemológica e teórica-observacional a partir do estudo dos
exoplanetas**

Andrey De Campos Francisco

Porto Alegre, RS

2024

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Instituto de Física

Departamento de Astronomia

**As Leis de Kepler: uma problematização histórica,
epistemológica e teórica-observacional a partir do estudo dos
exoplanetas**

Andrey De Campos Francisco

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Universidade Federal do Rio Grande do
Sul como requisito necessário para a obtenção
do grau de Bacharel em Física - Astrofísica

Orientador: Dr. Alan Alves-Brito

Porto Alegre, RS

2024

Agradecimentos

Uma das coisas que aprendi com a História da Astronomia é que aquele cientista isolado que faz tudo sozinho, ilustrado em livros e filmes, não existe. Eu, dentre tantos outros, sou mais uma evidência dessa conclusão.

Agradeço a meus pais, José Armando Francisco e Vilma Cristina de Campos, e minha irmã, Laíssa Cristina Francisco, pela oportunidade que me deram de estudar em outro estado, pelas videochamadas que realizamos nos fins de semana, e por me apoiarem de todas as formas a passar esses anos em Porto Alegre. Estendo essas palavras a todos os meus familiares e amigos de Foz do Iguaçu, Paraná.

Também agradeço à Natália Rosas Güntzel, pelo suporte emocional e amoroso que me proporcionou nos últimos 2 anos, em especial nesse semestre que precisei me ausentar em vários momentos. Mas você sempre esteve comigo, principalmente quando tomamos açaí. Só a tua presença já me ajuda imensamente. Estendo esse agradecimento a seus pais Paulo Güntzel, Adriane Rosas Güntzel e Joaquim Güntzel.

Gostaria de agradecer especialmente ao meu orientador, Alan Alves-Brito, por me receber de forma educada e respeitosa quando cheguei em sua sala com um tempo apertado para fazer um TCC. Insistiu muitas vezes para me dedicar mais, sempre com paciência, consideração e respeito. Você é um exemplo de pessoa, pesquisador e professor.

Gostaria de mencionar meus amigos da Pós, Derlandia de Araujo, Fellype Oliveira, Bruno Prates e Larissa Amorim pela rotina, pelas conversas (fofocas) e pelos momentos de descontração no RU ou na escalada. Em especial, agradeço a Matheus Barros, por ser meu co-orientador e me acompanhar nesse projeto, me ajudando imensamente em momentos desse período. Sem essas pessoas nas minhas semanas, esse período com certeza teria sido muito mais difícil.

E por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer aos meus amigos Marcus Campos, Laura Kagami e Barbara Lima. Pelas conversas importantes que tiveram comigo em crises que passei nos últimos anos e pelos muitos bons momentos que tivemos. Também incluo minha psicóloga Barbara Novelli, pela paciência e inúmeros conselhos que me fizeram crescer tanto desde que te conheci.

Resumo

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 do trabalho é apresentar uma problematização histórica, epistemológica e teórica-observacional das 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 detectados até o momento, por meio da missão Kepler, bem como a análise de fontes históricas e epistemológicas sobre o contexto de desenvolvimento das três leis. Em diálogo com dados da literatura, ressaltamos que há pouca discussão sobre as Três Leis de Kepler nos cursos de Física do país, por um lado, 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 o campo, esperando que os nossos resultados contribuam para o desenvolvimento de outras abordagens históricas, epistemológicas e teórico-observacionais nos cursos de Física/Astronomia/Astrofísica do país.

Palavras-chave: Astronomia Teórica e Observacional; História da Ciência; Leis de Kepler.

Resumen

En Física y Astronomía, las Tres Leyes de Kepler, en honor al astrónomo y matemático alemán Johannes Kepler, describen los movimientos de los planetas según modelos en los que el Sol ocupa el centro del Sistema Solar (modelos Heliocéntricos). El objetivo del trabajo es presentar una problematización histórica, epistemológica y teórico-observacional de las Tres Leyes de Kepler, a partir del estudio de exoplanetas. Metodológicamente, apoyamos la investigación en un enfoque cuanti-cualitativo, en el que trabajamos con datos observacionales obtenidos para más de cinco mil exoplanetas detectados hasta el momento, mediante la misión Kepler, así como el análisis de fuentes históricas y epistemológicas sobre el contexto del desarrollo de las Tres Leyes. En diálogo con los datos de la literatura, destacamos que hay poca discusión sobre las Tres Leyes de Kepler en los cursos de Física del país, por un lado, y, por otro, todavía hay poca superposición de los desdoblamientos de las consecuencias de las Leyes de Kepler y del estudio de los exoplanetas para el campo de la Física y la Astronomía. Presentamos, en este sentido, cuestiones fundamentales para el campo, esperando que nuestros resultados contribuyan al desarrollo de otros enfoques históricos, epistemológicos y teórico-observacionales en los cursos de Física/Astronomía/Astrofísica del país.

Palabras clave: Astronomía Teórica y de Observación; Historia de la Ciencia; Leyes de Kepler.

Lista de Figuras

Figura 1 Modelo epistemológico de desenvolvimento da ciência de Thomas Kuhn.	12
Figura 2 Modelo de Pitágoras com duas esferas.	19
Figura 3 Diagrama do modelo ptolomaico.	21
Figura 4 Modelo Ptolomaico com o epiciclo, equante, deferente e excêntrico.	22
Figura 5 Imagem adaptada representando o efeito Doppler da luz de uma estrela observado por um espectrógrafo na Terra conforme ela circula o centro de massa do sistema.	33
Figura 6 Velocidade Radial da estrela 51 Pegasi em função da fase.	34
Figura 7 Ângulos de vista de um exoplaneta e sua estrela.	36
Figura 8 Sistema HR 8799 obtido via Imageamento Direto.	37
Figura 9 Representação do método de microlenteamento causado por um sistema planetário .	38
Figura 10 Número de exoplanetas descobertos ao longo dos anos.	39
Figura 11 Representação da Primeira Lei de Kepler: um planeta percorre uma órbita elíptica ao redor do Sol.	42
Figura 12 Representação da segunda Lei de Kepler: um planeta varre áreas iguais em tempos iguais.	43
Figura 13 Órbita circular de um planeta com massa m à distância R de sua estrela com massa M	45
Figura 14 Representação da 3ª Lei de Newton.	46
Figura 15 Excentricidade dos exoplanetas em função do logaritmo do semieixo maior da órbita.	49
Figura 16 Distribuição das velocidades (em km/s) dos exoplanetas, e planetas do Sistema do Solar, calculadas a partir da segunda 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.	51
Figura 17 Velocidade dos planetas em função do semieixo maior para diferentes ranges de massa da estrela hospedeira.	52
Figura 18 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.	53
Figura 19 Distribuição de densidade dos exoplanetas em função de $\log(A)$	54

Lista de Tabelas

Tabela 1 Número de artigos retornados com base na pesquisa dos descritores em diferentes revistas **14**

Tabela 2 Número de dados válidos em cada parâmetro após filtragem de *KOI* e dados. **48**

Sumário

1. Introdução	1
2. Objetivos	3
3. Referenciais Metodológico	3
4. Referenciais Teóricos	4
4.1 A Epistemologia de Kuhn	5
4.2 Revisão da Literatura	13
4.2.1 Artigos da RBEF	14
4.2.2 Artigos da CBEF	15
4.2.3 Artigos da RBHC	16
4.2.4 Artigos da RLEA	17
5. Problematização histórica e epistemológica para as Leis de Kepler	19
5.1 A Revolução Copernicana	22
5.2 Kepler e Newton	25
6. As Leis de Kepler: problematização histórica-epistemológica e teórica-observacional a partir do estudo dos exoplanetas	29
6.1 Os exoplanetas	29
6.2 Métodos de Detecção	32
6.2.1 Velocidade Radial	32
6.2.2 Trânsito	35
6.2.3 Imageamento Direto	36
6.2.4 Microlentamento Gravitacional	37
6.3 A Missão Kepler	38
6.4 As Três Leis de Kepler	41
6.4.1 Dedução da Lei da Gravitação Universal	44
7. Tratamentos dos dados	47
8. À guisa de reflexão	55
8. Considerações Finais	56
Referências	58
Apêndice A	67

1. Introdução

Em Física e Astronomia, as Leis de Kepler, em homenagem ao astrônomo e matemático alemão Johannes Kepler (1571–1630), descrevem os movimentos dos planetas, de acordo com modelos em que o Sol ocupa o centro do Sistema Solar (modelos Heliocêntricos). Como veremos mais adiante, apesar da importância das Três Leis de Kepler (TLK), há pouca (ou quase nenhuma) discussão na literatura sobre a problematização histórica, epistemológica e teórica-observacional e, em particular, no que tange o estudo de exoplanetas (planetas que orbitam outras estrelas) em Astronomia. Muitos artigos da literatura discutem as leis de Kepler de forma teórica e observacional, mas poucos discutem sobre questões históricas e quase nenhum focado nas questões epistemológicas. Nossa motivação inicial é contribuir com o preenchimento desse espaço que há nas principais revistas e textos em português referentes aos aspectos abordados aqui. Outra parte de nossa motivação parte do fato de que, nos cursos de Física, quase sempre as Três Leis de Kepler são negligenciadas ou, quando abordadas, estas são apresentadas totalmente desarticuladas de questões teóricas e observacionais fundamentais que envolvem conceitos básicos de Física (princípios de conservação) e Astronomia (movimentos de planetas e, principalmente, dos exoplanetas).

Do ponto de vista histórico e epistemológico, o estudo das Três Leis de Kepler nos ajuda a compreender tensões que existem na Física e na Astrofísica sobre, por exemplo, os modelos de narrativa da ciência e sua eficácia na própria aprendizagem de Física. Há vastos debates na literatura sobre isso (Andery *et al.*, 2012; De Souza Cruz *et al.*, 1988; Dos Santos Lima Junior, 2024; Londero, 2014; Teixeira, 2003). Quase sempre, apesar das críticas mais recentes (Andery *et al.*, 2012; Dos Santos Lima Junior, 2024; Londero, 2014), a história da ciência moderna e contemporânea, nos livros de Física e Astronomia (da Silva; Bruno Gomes, 2017), é vista como se fosse pura, neutra, ingênua, atórica e ahistórica, descolada das questões sociais e culturais, masculina, construída por homens brancos (Silva; Alves-Brito; Massoni, 2024).

Entendemos que o contexto de enunciação das TLK, embora marcadamente colocado como um projeto de homens brancos europeus, precisa também ser aprofundado buscando desvelar outras vozes. Não é esse o nosso objetivo neste trabalho. Queremos notadamente destacar que ainda faltam elementos do episódio histórico da enunciação das TLK que precisam

ser também ampliados nos cursos de Física do país. Epistemologicamente, por exemplo, há quase nenhuma discussão sobre o fato de que Kepler, ao trabalhar com os dados passados a ele por seu colega Tycho Brahe (1546 - 1601), conforme expandiremos mais adiante nesse trabalho, tinha uma perspectiva teórica Heliocêntrica que divergia da perspectiva Geocêntrica de Brahe.

Esse fato é muito interessante levando em conta que há, mesmo na atualidade, um certo questionamento, um tanto vinculado à física (ao contexto de trabalho na área), sobre o que é ciência, se teoria ou observação, ou talvez sobre qual é a faceta mais importante da ciência, ainda que não estejamos de acordo com tal polaridade. É comum, no dia a dia do trabalho em física, que físicos(as) teóricos(as) disputem com os seus pares da física experimental qual é o campo mais relevante para traduzir o que é de fato ciência. Internacionalmente, alguns pesquisadores afirmaram nos últimos anos que, para uma teoria ser científica não precisa ser testada experimentalmente (Ellis; Silk, 2014).

Entre essas pessoas estão alguns pesquisadores que trabalham com Teoria das Cordas e outros com alguns ramos da Cosmologia, onde discutem a existência do multiverso. Há, portanto, em algumas áreas da física, uma discussão velada sobre o caráter e a natureza da ciência, se validada por sua perspectiva teórica e/ou experimental. Essa discussão é um tanto diferente de outras teorias testáveis através de observações como a existência de Matéria Escura ou do Modelo Padrão. Nosso trabalho vai na direção dessas hipóteses/teorias testáveis. Acreditamos que confirmações observacionais ou experimentais são um dos pilares (a saber, teoria, observação e experimento) da ciência moderna. Como veremos mais adiante, Kepler desenvolveu suas Leis do Movimento Planetário empiricamente, que mais tarde vieram a ser deduzidas das Leis do Movimento de Newton. Mesmo assim, não é óbvia a validade das TLK para sistemas planetários. Pode parecer trivial que os exoplanetas funcionem de acordo com as Leis de Kepler, mas quando falamos de galáxias sabemos que elas não funcionam (por exemplo, no caso do problema da Matéria Escura, via análise das curvas de rotação de galáxias espirais).

Nesse sentido, a nossa principal questão de pesquisa é: *de que forma, do ponto de vista histórico, epistemológico e teórico-observacional as Três Leis de Kepler podem nos ajudar a entender os processos da ciência moderna quando aplicada ao estudo contemporâneo de exoplanetas?*

Apresentamos, nesse sentido, questões fundamentais para o campo, esperando que os nossos resultados possam contribuir para o desenvolvimento de outras abordagens históricas,

epistemológicas e teórico-observacionais nos cursos de Física/Astronomia/Astrofísica do país quando do tratamento das Três Leis de Kepler.

2. Objetivos

O principal objetivo do trabalho é apresentar uma problematização histórica, epistemológica e teórica-observacional das Três Leis de Kepler, a partir do estudo de exoplanetas para a compreensão de questões basilares da mecânica clássica pouco discutidas nos cursos de graduação em Física, Astrofísica e Astronomia.

Especificamente, queremos:

- mostrar a dedução, em termos modernos, das leis de Kepler;
- analisar documentos e artigos da literatura que tratam de discussões históricas, epistemológicas e observacionais envolvendo as Leis de Kepler;
- explorar as técnicas e os métodos desenvolvidos até o presente momento na catalogação de parâmetros físicos fundamentais de exoplanetas confirmados dispostos no catálogo The Exoplanet Data Explorer (EOD);
- 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;
- contribuir para a contextualização das Leis de Kepler em todos os níveis da educação e divulgação da Física e da Astronomia.

3. Referenciais Metodológicos

Metodologicamente, adotamos os caminhos descritos em Mattar e Ramos (2021). A pesquisa de natureza básica e abordagem quanti-qualitativa, com objetivos exploratórios, explicativos e descritivos. Para tanto, consultamos documentos, bibliografias e livros de história da ciência (Pires, 2008; Andery *et al.*, 2012; Bennett *et al.*, 2014; Marcondes, 2016) que dão conta das questões ligadas à história e epistemologia dos estudos voltados às TLK.

Para a descrição teórico-observacional (quantitativa) do trabalho, adotamos o banco de dados *Exoplanet Orbit Database* (EOD, Eunhyu Han *et al.*, 2014)¹. Segundo a base pública:

O Exoplanet Data Explorer é uma tabela e ferramenta interativa de plots para explorar e exibir dados do banco de dados Exoplanet Orbit. O Exoplanet Orbit Database é uma compilação cuidadosamente construída de parâmetros orbitais espectroscópicos de qualidade de exoplanetas orbitando estrelas normais a partir da literatura revisada por pares, e atualiza o Catálogo de exoplanetas próximos. Uma descrição detalhada do banco de dados e exploradores de órbita de exoplanetas está publicada e está disponível no astro-ph. Além do Exoplanet Data Explorer, também fornecemos todo o banco de dados Exoplanet Orbit em formato CSV para download rápido e conveniente aqui². Uma lista de todos os CSVs arquivados está disponível³. A ajuda e a documentação para o Exoplanet Data Explorer estão disponíveis aqui. (EOD, 2024, tradução nossa).

Conforme destacado por Wright *et al.* (2011), o banco de dados EOD apresenta os parâmetros orbitais bem determinados de exoplanetas e as propriedades de suas estrelas hospedeiras. O EDE conta, na atualidade, com parâmetros orbitais, físicos e estelares de mais de 5700 objetos, sendo aproximadamente 3200 exoplanetas confirmados. A base de dados utilizada, *EOD*, é documentada por Eunhyu *et al.* (2014) e conta com dados de exoplanetas, candidatos a exoplanetas e estrelas hospedeiras. Além disso, para as análises referentes ao Sistema Solar, utilizamos os dados disponibilizados pela NASA, no *Planetary Fact Sheet*⁴. Apesar de serem dados precisos, não contam com margem de erro, como será explicado melhor na seção de análise de dados.

4. Referenciais Teóricos

Para a interpretação dos dados, levamos em conta questões internalistas (Martins, 2015) e externalistas (Moura; Guerra, 2016) da história da ciência. Livros e artigos⁵ fundamentais da literatura sobre as dinâmicas das ideias em Física e Astronomia foram também usados para traçar

¹ Disponível em: <http://exoplanets.org/>. Acesso em: 19 Nov. 2024.

² Disponível em: <http://exoplanets.org/csv>. Acesso em: 19 Nov. 2024.

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

⁴ Disponível em: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>. Acesso em: 10 Nov. 2024.

⁵ 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.

os dados dos principais cientistas que perfazem o período histórico conhecido como Revolução Copernicana (Andery *et al.*, 2012). Epistemologicamente, amparamos a discussão na perspectiva de Thomas Kuhn⁶ (2013). Conforme revisado por Ostermann (1996), discutimos os nossos resultados com base na epistemologia proposta por Kuhn a partir de alguns conceitos principais de sua teoria: paradigma, anomalia, crise, ciência normal, revolução científica e incomensurabilidade.

Para Thomas Kuhn (1922 - 1996), o desenvolvimento científico é cingido por uma série de períodos de ciência normal, em que um *paradigma* reúne as principais mobilizações da comunidade científica. Eventualmente, esses períodos de *normalidade* são interrompidos por revoluções científicas, responsáveis por rupturas caracterizadas por crises e/ou anomalias nos paradigmas utilizados. Sempre que há troca de paradigmas, as crises são restabelecidas e superadas. Não há, para Kuhn, possibilidade de comparação entre paradigmas distintos, pois, do contrário, cometeremos do ponto vista histórico e epistemológico falta de interpretação no que concerne ao princípio da incomensurabilidade.

A partir da obra de Thomas Kuhn, analisaremos epistemologicamente a construção e evolução que as Leis de Kepler permitiram para o desenvolvimento científico. Exploraremos as mudanças conceituais e estruturais que elas impactaram na teoria Newtoniana, na, já estabelecida, pesquisa dos exoplanetas e em como esses avanços impactaram no desenvolvimento científico. Nesse cenário, buscaremos 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. Identificamos assim os momentos de “crise” e “revolução científica” que possam caracterizar a evolução e as implicações das Leis de Kepler.

4.1 A Epistemologia de Thomas Kuhn

Um dos primeiros conceitos definidos por Kuhn (2013) é o de *realizações científicas*. Elas referem-se a descobertas ou teorias amplamente aceitas que proporcionam os fundamentos

⁶ 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.

para a prática científica, ou seja, como devemos resolver problemas/exercícios ou quais metodologias devemos seguir para fazer pesquisa (Kuhn, 2013).

As realizações científicas que possuem essa capacidade apresentam duas características centrais:

- suas conquistas inéditas atraem um novo grupo de pesquisadores, e com isso, afasta-os de outras atividades científicas concorrentes;
- são abertas o suficiente a ponto de permitir que esses novos pesquisadores solucionem diferentes tipos de problemas.

Kuhn (2013) afirma que as realizações científicas que apresentam as duas características acima citadas definem o conceito de paradigma, que carrega consigo compromissos, tradições e regras que os pesquisadores que o seguem compartilharam para a prática científica. Ou seja, os cientistas, cuja formação seguiram os mesmos paradigmas, estarão comprometidos com as mesmas regras e padrões para a realização da pesquisa. Esse comprometimento e consenso são pré-requisitos para seguirem com a tradição de pesquisa. Como veremos, essas características que um paradigma proporciona são sinais de maturidade de uma área científica, pois exige um consenso dos pesquisadores na articulação do paradigma.

O paradigma é o conceito mais fundamental da epistemologia de Kuhn (Ostermann, 1996). Apesar disso, quando a primeira edição de “A Estrutura das Revoluções Científicas” foi publicada, em 1965, Kuhn recebeu muitas críticas relacionadas ao uso desse conceito. Em especial, Masterman (1979), demonstrou que Kuhn utilizou-o de 22 formas diferentes. Por isso, no Posfácio da nova edição, de 1969, Kuhn esclareceu o que queria dizer com ele.

Alguns exemplos históricos de paradigma são: astronomia ptolomaica, astronomia copernicana, dinâmica newtoniana e óptica corpuscular. Os cientistas costumam fazer ilustrações quase padronizadas dos paradigmas que trabalham em livros, exercícios e conferências, (Kuhn, 2013). Por isso, quando um historiador investiga uma certa especialidade durante um período específico, para encontrar um paradigma procura por essas ilustrações, além de aplicações conceituais, instrumentais e observacionais. O estudo de alguns paradigmas, bem mais especializados como estes exemplos, é o que prepara o aluno para ingressar em uma determinada comunidade científica (Kuhn, 2013).

Um exemplo que Kuhn (2013) traz para ilustrar seus conceitos segue a história da óptica

física. Desde a antiguidade até o século XVII, houveram escolas concorrentes na pesquisa sobre a luz. Havia muitas concepções do que ela era feita e de como se comportava. Algumas escolas diziam que a luz era composta de partículas, outras de oscilações do meio que existia entre o olho e um corpo e outras ainda de combinações e variações das principais concepções existentes. O fato é que todas partiam de relações com alguma metafísica como as teorias de Epicuro, Aristóteles e Platão.

Por não haver um consenso sobre quais crenças deveriam partir, cada autor iniciava sua pesquisa desde os fundamentos. Ou seja, eram livres para escolher quais experiências e observações eles se dispunham a explicar, (Kuhn, 2013). E com isso, cada escola destacava os fenômenos ópticos que sua teoria conseguia explicar melhor, os problemas que conseguiam resolver ou então apresentavam explicações *ad hoc*⁷. Em último caso, se não conseguissem explicar um fenômeno, ficava como problema para as próximas gerações explicarem. Todas essas escolas fizeram contribuições significativas que viriam a ser usadas por Isaac Newton para extrair o primeiro paradigma quase uniformemente aceito pelos pesquisadores da óptica, publicado em seu livro *Óptica*, em 1704 (Newton, 1704).

O paradigma que Newton extraiu dos conhecimentos da área proporcionou para a óptica física uma descrição física e matemática para a luz que fosse quase unanimemente aceita e que os pesquisadores seguintes utilizassem no desenvolvimento do campo, (Kuhn, 2013). Mas o paradigma de Newton, que descrevia a luz como composta de corpúsculos de matéria, não durou para sempre, o que se seguiu foi uma sequência de paradigmas. No início do século XIX, Young e Fresnel desenvolveram as concepções de que a luz era um movimento ondulatório transversal (Young, 1807; Fresnel 1821). E no século XX, Planck e Einstein descreveram a luz como feita de fótons, entidades quântico-mecânicas que exibem algumas características de onda e outras de partículas (Kuhn, 2013).

Um ponto importante a destacar é a diferença estrutural das pesquisas antes e depois dos trabalhos de Newton. Devido à ausência de um paradigma no período pré-Newton, cada autor reiniciava o processo de pesquisa desde os fundamentos de alguma metafísica, e com isso, a coleta de fatos iniciais se aproximava mais de uma atividade ao acaso (Kuhn, 2013). O que se seguiu depois dos trabalhos de Newton foi um padrão de desenvolvimento, ou seja, mudanças sucessivas de paradigmas, que Kuhn chama de revoluções científicas e que abordaremos mais

⁷ Uma hipótese *ad hoc* é criada para explicar uma observação que não se ajusta a teorias preexistentes.

adiante.

O que Kuhn (2013) observou é que o exemplo ilustrado pela óptica física não é exceção:

Excluindo áreas como a matemática e a astronomia, nas quais os primeiros paradigmas estáveis datam da pré-história, e também aquelas, como a bioquímica, que surgiram da divisão e combinação de especialidades já amadurecidas, as situações esboçadas acima são historicamente típicas. [...] A história sugere que a estrada para um consenso estável na pesquisa é extraordinariamente árdua (Kuhn, 2013, p. 77).

Ou seja, o desenvolvimento de um paradigma é uma evidência de maturidade no desenvolvimento de um campo científico. Quando estabelecido, um paradigma é um modelo majoritariamente aceito. Porém, dificilmente consegue explicar todos os problemas, frequentemente os paradigmas apresenta limitações e imprecisões, e por isso, é um objeto a ser desenvolvido, submetido a condições novas e rigorosas, para poder ser melhor articulado e apresentar uma precisão maior (Kuhn, 2013).

O que garante o *status* de um paradigma é conseguir ser mais bem-sucedido que seus competidores na resolução de alguns problemas classificados como graves pelos cientistas na época pré-paradigma. Note que, ser bem-sucedido não quer dizer que ele conseguiu resolver todos os problemas. O que Kuhn defende, é que grande parte do sucesso de um paradigma inicialmente vem de uma *promessa* de solucionar alguns problemas específicos (Kuhn, 2013).

O desenvolvimento dessa promessa constitui a *ciência normal*, que é caracterizada pelo(a):

- trabalho feito pelos cientistas com esse paradigma para resolver os problemas propostos;
- ampliação do entendimento dos fatos apresentados como importantes pelo paradigma;
- aumento da correlação entre esses fatos e as previsões do paradigma;
- articulação do próprio paradigma.

Com base nessas características, Kuhn (2013) define ciência normal como “pesquisa firmemente baseada em uma ou mais realizações científicas passadas” e está fortemente atrelada a um paradigma, pois o consenso e o compromisso proporcionados por um paradigma, são pré-requisitos para a ciência normal.

Outra característica importante da ciência normal, é que ela não pretende descobrir grandes novidades ou inventar teorias. Seu trabalho principal é diminuir ao máximo a distância

entre a natureza e o paradigma (Kuhn, 2013). E isso exige um esforço enorme, ocupando a carreira inteira da maioria dos cientistas. Um dos motivos para isso é que um paradigma é relativamente inflexível, então a ciência normal consiste na tentativa de forçar a natureza para dentro de um paradigma. Tanto que alguns fenômenos que não são explicados pelo paradigma em geral não são vistos, além de que muitos cientistas são intolerantes quanto a outras teorias inventadas (Barber, 1961; Kuhn, 2013).

Isso pode ser um defeito da ciência, mas devido ao fato de alguns campos serem tão específicos, esse comportamento evitativo acaba sendo essencial para o desenvolvimento da ciência. A dedicação total dos pesquisadores a alguns problemas os leva a um detalhamento tamanho que seria inalcançável de qualquer outra maneira (Kuhn, 2013).

Mas, se esse desenvolvimento da ciência normal exige tanto esforço, por que os cientistas estão dispostos a passar por ele? Kuhn dá algumas respostas para isso. A primeira delas é a contribuição significativa obtida pelos resultados para aumentar o alcance e a precisão de aplicação do paradigma (Kuhn, 2013). Não só isso, o desejo de ser útil, a excitação de explorar um território novo e o impulso de testar seus conhecimentos recém adquiridos também motivam o cientista. Mas, o principal motivo de um cientista para dedicar tanto esforço é o desafio apresentado pelos quebra-cabeças⁸, ou seja, problemas criados para testar nossas habilidades e engenhosidade na resolução de problemas:

Resolver um problema da pesquisa normal é alcançar o antecipado de uma nova maneira. Isso requer a solução de todo tipo de complexos quebra-cabeças instrumentais, conceituais e matemáticos. O indivíduo que é bem-sucedido nessa tarefa prova que é um perito na resolução de quebra-cabeças (Kuhn, 2013, p. 105).

Um exemplo desse comportamento é ilustrado na descoberta dos raios X, uma descoberta acidental feita pelo físico Wilhelm Röntgen em novembro de 1895. Até então, Röntgen estava dedicado à ciência normal relacionada aos raios catódicos, quando percebeu que uma tela de cianeto de platina e bário, colocada a uma distância específica da proteção, brilhava quando se produzia uma descarga (Kuhn, 2013). Röntgen dedicou sete semanas intensas para a solução desse fenômeno, saindo poucas vezes de seu laboratório até que identificasse as propriedades

⁸ O quebra-cabeça a que Kuhn se refere é uma categoria de problemas composto por peças que se unem para formar uma imagem em grande escala. Sendo que cada peça apresenta somente uma possibilidade de entrar na solução do quebra-cabeça.

desses novos raios. Por causa dessa descoberta, Röntgen foi laureado com o primeiro prêmio Nobel de Física, em 1901 (Nobel Media AB, 1901).

A descoberta de Röntgen iniciou quando percebeu que sua tela brilhava, quando não deveria fazê-lo. Tanto que, antes de anunciar a descoberta, Röntgen precisou se convencer de que o efeito não se devia aos raios catódicos, mas a algum fenômeno que continha semelhanças com a luz (Kuhn, 2013).

Por uma década, a descoberta dos raios X não causou qualquer transtorno da teoria científica. Não só por que os paradigmas da época não proibiam a existência dos raios X, mas, também porque as teorias aceitas pela comunidade utilizavam várias formas de radiação, como a luz infravermelha, visível e ultravioleta. Porém, os paradigmas que Röntgen e outros cientistas da área usavam, relacionados aos raios catódicos, não eram capazes de prever os raios X (Kuhn, 2013). Por tanto, os raios X foram recebidos com surpresa e com choque, pois muitos não podiam duvidar das evidências e por isso, sentiram-se confusos.

[...] a decisão de empregar um determinado aparelho e usá-lo de um modo específico baseia-se no pressuposto de que somente certos tipos de circunstâncias ocorrerão. Existem tanto expectativas instrumentais como teóricas que frequentemente têm desempenhado um papel decisivo no desenvolvimento científico (Kuhn, 2013, p. 136).

Quando um paradigma não prepara o investigador para um fenômeno, esse evento é chamado de *anomalia*, por Kuhn. Apesar da existência dos raios X não ter sido interdita pela teoria estabelecida, ela violava expectativas profundamente arraigadas (Kuhn, 2013). Os equipamentos de raios catódicos eram amplamente usados nos laboratórios europeus. Se o equipamento de Röntgen produzira esses raios, então outros cientistas também estariam produzindo sem saber. Além disso, trabalhos concluídos relacionados à ciência normal envolvendo raios catódicos teriam que ser refeitos, pois os cientistas não haviam reconhecido nem levado em conta essa nova variável relevante (Kuhn, 2013).

Os raios X abriram um novo campo de estudo aumentando o alcance da ciência normal, mas principalmente, modificaram campos já existentes. A sua descoberta implicou em mudanças fundamentais, de procedimentos e expectativas, para uma parcela significativa da comunidade científica (Kuhn, 2013). Consistindo em uma mudança de paradigma e participando da crise na física do século XX.

Descobertas podem tanto causar, quanto contribuir para mudanças de paradigma, mas não são as únicas formas de alteração de um paradigma. Por exemplo, a termodinâmica foi desenvolvida a partir da colisão de duas teorias físicas do século XIX e a teoria quântica surgiu de diversos problemas relacionados ao efeito fotoelétrico, à radiação de corpo negro e aos calores específicos (Kuhn, 2013).

Um aspecto importante da mudança de paradigma é a insegurança profissional, pois é consequência do questionamento de paradigmas já muito utilizados e de desenvolvimentos feitos durante o período de ciência normal. Essa insegurança é causada pelo fracasso em produzir resultados esperados pelo paradigma, e por isso, é necessária a busca por um novo paradigma.

Outro exemplo dado por Kuhn (2013) é relacionado ao sistema ptolomaico. Como veremos, no século 2 d.C., o sistema desenvolvido por Ptolomeu foi bem sucedido em prever a posição dos planetas de uma forma que nenhum outro sistema havia conseguido até então. Porém, quando confrontado com dados mais precisos, não se ajustava perfeitamente. Esse ajuste do modelo à natureza foi uma tarefa que ficou para os sucessores de Ptolomeu e, assim, constituiu um dos principais exercícios da pesquisa astronômica normal por séculos.

Porém, com o tempo, os ajustes realizados no modelo ptolomaico criaram um sistema tão complexo que os astrônomos começaram a questionar sua validade. Essa foi a principal causa da crise do modelo ptolomaico.

Aqui entra outro conceito importante para a epistemologia kuhniana, a *revolução científica*, que é definida por Kuhn como sendo episódios de desenvolvimento não cumulativo em que um paradigma é completa ou parcialmente substituído por um novo, incompatível com o anterior. As revoluções se iniciam com um sentimento, relacionado a uma pequena parte da comunidade científica, de que o paradigma até então usado parou de funcionar adequadamente no estudo de um aspecto da natureza.

Além disso, as revoluções não precisam abranger todas as comunidades científicas, apenas os que trabalham com o paradigma afetado. Por exemplo, a descoberta do raio X violou expectativas e paradigmas que trabalhavam com raios catódicos. Mas, para os astrônomos, foi facilmente aceita como uma nova radiação para estudar a natureza pois não entrava em conflito com nenhum paradigma utilizado.

A Figura 1, é uma representação da epistemologia de Kuhn, em que sua primeira versão foi proposta por Ostermann (1996) e aqui propomos uma reelaboração. 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 (Ostermann, 1996).

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 Kuhn (2013), é quando chamaram Copérnico de louco por afirmar que a Terra se movia. Kuhn diz que eles não estavam nem um 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.

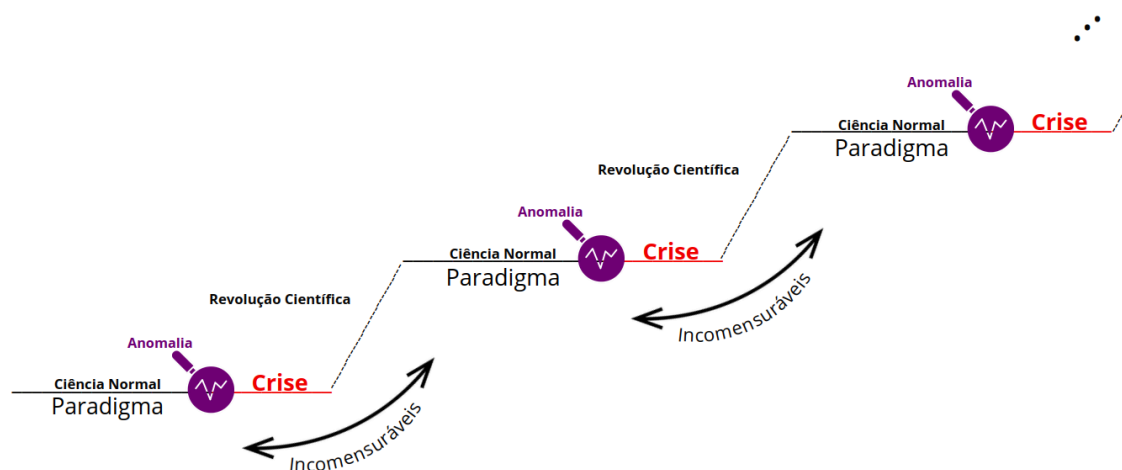


Figura 1: Modelo epistemológico de desenvolvimento da ciência de Thomas Kuhn.

Além disso, podemos ver na Figura 1 que, o fato do paradigma estar por baixo da ciência normal, está relacionada ao fato deste ser tanto um pré-requisito, quanto um pilar 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 quase reta, mas com pequenas 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 científica, vemos que não é possível, pois estão em lugares muito diferentes, e por isso, são incomensuráveis.

Com isso, a partir da teoria de Kuhn sobre paradigmas, ciência normal e revoluções científicas discutimos o período histórico em sinergia com as teorias sobre o movimento de exoplanetas.

4.2 Revisão da Literatura

Nesta subseção vamos descrever a revisão da literatura realizada sobre o tópico de exoplanetas a partir das perspectivas deste trabalho: história, epistemologia e teoria-observação.

Nos restringimos a analisar publicações em algumas das principais revistas de língua portuguesa, desde o surgimento das revistas até dezembro de 2024. Escolhemos as seguintes:

- Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF);
- Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF);
- Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RLEA);
- Revista Brasileira de História da Ciência (RBHC).

Pensando nos aspectos mais fundamentais deste trabalho, escolhemos os seguintes descritores: Exoplanetas, Leis de Kepler, Kepler e Revolução Copernicana. Esses termos refletem os tópicos centrais relacionados ao ensino de Física e História da Ciência abordados na revisão. Além disso, realizamos buscas adicionais combinando esses descritores com termos como Filosofia, Epistemologia e História, de modo a explorar conexões mais amplas e relevantes ao contexto.

A Tabela 1 resume o número de artigos retornados com relação aos descritores e as revistas selecionadas. Um detalhe importante é que qualquer pesquisa com o termo “Epistemologia” não apresentou nenhum resultado.

Descritores	RBEF	CBEF	RBHC	RLEA
Exoplanetas	8	1	0	2
Leis de Kepler	3	0	0	3
Kepler	73	4	1	4
Exoplaneta e História	0	0	0	1
Exoplaneta e Filosofia	0	0	0	1
Kepler e Filosofia	1	0	0	0
Revolução Copernicana	0	0	0	1
Copérnico	7	3	1	3

Tabela 1: Número de artigos retornados com base na pesquisa dos descritores em diferentes revistas.

4.2.1 Artigos da RBEF

A partir da busca na revista RBEF com o descritor “Kepler”, obtivemos 73 artigos entre os anos 1999 e 2024. O termo pode parecer genérico, mas obtivemos artigos relevantes que não constavam na pesquisa dos outros termos. Desses, descartamos:

- 15 artigos da área das ciências agrárias (14 com autores chamados Kepler; e, um equipamento de secagem de grãos que possui a marca chamada Kepler Weber);
- 11 artigos de engenharias e outras ciências aplicadas (autor chamado Kepler);
- 17 artigos da área de ciências da saúde (autor chamado Kepler).

Sendo assim, o termo não foi repetido quando buscado nos periódicos específicos, pois mesmo quando utilizamos e “Kepler AND (outro descritor)” não obtivemos resultados satisfatórios, ou seja, que apareceu algum artigo quando utilizados outros descritores.

Dos 30 artigos retornados para o termo “Kepler”, um é descartado por ser um trabalho matemático, onde tentam resolver o “problema de Kepler”, que não se refere à astronomia.

Alguns trabalhos retornados são majoritariamente teóricos, como Pereira e Velasquez-Toribio (2024), Menezes e Batista (2022), Diniz *et. al.* (2022), Moriconi (2022), Morgado e Soares (2015), Silva (2011). Outros apresentam algumas discussões históricas em sinergia com aplicações em sala de aula, como Praxedes e Peduzzi (2009), Damasio (2011), Porto (2015), Ribeiro (2018), Souza e Valio (2019), de Sá e Paulucci (2021), Ximenes e Aguiar (2023) e Menezes e Batista (2022).

Em especial, observamos o trabalho de Pereira e Velásquez-Toribio (2024) verificaram a terceira Lei de Kepler para alguns sistemas astronômicos, como as luas Galileanas de Júpiter, os planetas do Sistema Solar, o sistema planetário TOI 700, com 4 exoplanetas, e 6 estrelas que orbitam o Buraco Negro Sagitários A* do centro da Via Láctea. Nesses casos, os autores concluíram que a terceira Lei de Kepler está em concordância com os dados obtidos. Porém, quando analisaram as curvas de rotação da Via Láctea e da galáxia M31, ou seja, como a velocidade das estrelas se comporta conforme a distância delas ao centro da galáxia aumenta, observaram que a terceira Lei de Kepler não se aplica. Existem algumas tentativas de explicar essa discrepância entre os dados e a teoria, como o programa da MOND (em inglês, *Modified Newton Dynamics*), e o programa da Matéria Escutar (ver, por exemplo, a discussão detalhada feita por Lima; Alves-Brito; Nascimento, 2022).

4.2.2 Artigos da CBEF

Entre os 8 artigos retornados do *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* (CBEF), dois foram descartados por não atenderem diretamente ao foco desta revisão. O primeiro foi excluído por não tratar das Leis de Kepler e seu contexto; embora tenha sido identificado, pelo descritor “Kepler”, devido à citação do livro *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein* em uma das entrevistas analisadas. O segundo artigo, apesar de mencionar um clube de astronomia chamado *Clube Astronômico Johannes Kepler* (o que justificou sua inclusão inicial),

discute apenas os objetivos, metodologia e implementação do clube, sem abordar as Leis de Kepler propriamente ditas.

Dos artigos analisados da CBEF, o único sobre o descrito “Exoplanetas” (Quillfeldt, 2010) é uma revisão abrangente que explora o progresso da astrobiologia, destacando as bases metodológicas e os avanços recentes na busca por vida extraterrestre, com ênfase na presença de água no Sistema Solar e em exoplanetas. Os exoplanetas são abordados como sendo um dos principais impulsos na disciplina de astrobiologia. Nesse sentido, o autor apenas trás as primeiras descobertas de exoplanetas e seu rápido crescimento.

Sobre o termo “Kepler”, obtivemos 4 artigos, Lamberti (1996), que se propõe a descrever o cálculo da órbita de um satélite a partir apenas das Leis de Kepler e dos conceitos que Kepler tinha à época que as desenvolveu. Além disso, aproveitam a discussão para apresentar alguns aspectos históricos e conceituais acerca das Leis. Já em Oliveira (2010), o autor descreve muito brevemente o que Johannes Kepler pensava sobre um universo infinito e suas consequências.

Diante do termo “Copérnico”, Medeiros e Monteiro (2002) discutem os pressupostos e limitações do modelo copernicano, a partir de uma perspectiva histórica. Além disso, compara tal discussão com 31 livros didáticos de Física do ensino médio. Com esse trabalho, são capazes de concluir as “graves omissões e distorções introduzidas por tais textos na apresentação da citada teoria”.

Bassalo (1990) apresenta a segunda parte da Crônica da Gravitação, onde examinam o modelo de Ptolomeu, e sua influência no desenvolvimento da Astronomia árabe e chinesa. Além disso, examinam o trabalho de astrônomos europeus que contribuíram historicamente para que Copérnico desenvolvesse o modelo Heliocêntrico. Andrade (2005) discute duas questões do Enem relacionadas à Revolução Copernicana. Nelas a autora questiona a interpretação da equipe do Enem acerca (i) da figura atribuída a Galileu, quando realizou suas primeiras observações, e (ii) acerca da assimilação do copernicanismo à cultura, onde demonstram ser insustentável a fala de Shakespeare sobre o heliocentrismo.

4.2.3 Artigos da RBHC

Os únicos descritores que obtiveram artigos selecionados foram “Kepler” e “Copérnico”. No primeiro, Menezes, Batista e Gardelli (2020) apresentam um estudo sobre a astrologia de

Kepler. Levando principalmente em conta as características dos planetas. Ou seja, o artigo está mais atrelado à história e teoria acerca dos estudos de Kepler.

Já para o descrito “Copérnico”, Cardoso, Barcellos e Guerra (2021) discutem o episódio copernicano a partir das práticas científicas, onde destacam a influência de fatores sociais e culturais na produção científica. Além disso, eles utilizaram um dispositivo matemático chamado Tusi, desenvolvido pela astronomia árabe com o objetivo de unificar movimentos circulares e retilíneos. Essa abordagem ressalta a importância de autores árabes e do encontro de culturas no desenvolvimento científico, desafiando narrativas eurocêntricas tradicionais.

No campo da história da ciência, o texto inclui personagens e práticas marginalizadas. Epistemologicamente, questiona a independência das descobertas copernicanas, sugerindo que ele teve acesso a tratados árabes na Universidade de Pádua, um centro de intercâmbio intelectual no Renascimento. Quanto à relação teoria/observação, o Dispositivo de Tusi exemplifica como ferramentas matemáticas árabes ajudaram a resolver problemas astronômicos da época, permitindo o avanço teórico de Copérnico sem abandonar a geometria celeste clássica.

4.2.4 Artigos da RLEA

Removemos dois artigos referente ao termo pesquisado “Exoplanetas”, pois ambos tratam do ensino de Astronomia apenas. Estando fora de nosso escopo deste trabalho.

Diante do termo “Copérnico”, Carvalho e Nascimento (2019) apresentam um estudo historiográfico a partir de algumas obras de autores historiadores e da obra *Commentariolus* de Copérnico. Com o objetivo geral de apresentar uma visão mais ampla acerca da construção, defesa e disseminação dos trabalhos de Copérnico. Considerando o contexto e interpretando aspectos astronômicos, filosóficos e sociais que puderam influenciar sua teoria. Assim, o artigo analisa profundamente questões históricas, filosóficas e teóricas acerca do trabalho de Copérnico.

Outro trabalho é o de Carvalho, Nascimento e Silva (2017), onde utilizaram textos históricos para apresentar uma abordagem pedagógica acerca da natureza da ciência, envolvendo os trabalhos de Copérnico. Com foco na história da ciência, o trabalho aborda a relevância de fatores além da ciência na construção e aceitação do conhecimento científico. A metodologia

propôs uma abordagem explícita e reflexiva, que integra história e epistemologia, ajudando futuros professores a compreender a interação entre teoria, observação e contexto sociocultural.

Já o trabalho de Cornejo e Santilli (2010), discute sobre o ensino de Astronomia na Argentina no século XX. O que eles trazem acerca de Copérnico são algumas influências que Copérnico teve em outros autores, em especial Domingo Sarmiento. Dessa forma os autores fazem uma discussão epistemológica e educativa sobre o ensino de Astronomia, e sobre como a influência positivista diferia dos objetivos educacionais no século XX.

Sobre os termos “Exoplanetas e História”, Dutra e Goulart (2014) pretendem preencher as lacunas das atividades práticas relacionadas ao conteúdo de Leis de Kepler nos livros-textos de Física do 1º ano do Ensino Médio. Pensando nisso, apresentam uma atividade prática de determinação da órbita de Marte. O aluno, combinando conceitos físicos com a geometria poderá vivenciar a experiência da descoberta da forma da órbita de Marte de modo similar ao realizado por Johannes Kepler. Consistindo assim, em um trabalho tanto educacional, quanto teórico acerca da aplicação das Leis de Kepler.

Quanto aos artigos referentes ao termo “Kepler”, dois artigos já discutidos aqui: Dutra e Goulart (2014) e Medeiros e Monteiro (2002). Pacheco (2019) faz uma análise didática e teórica acerca das Leis de Kepler. Já Bedaque e Caniato (2024) revisitam as Três Leis de Kepler de forma teórica, mas sempre pensando no Ensino como pano de fundo. Martins *et. al.* (2020) calculam o valor da Unidade Astronômica utilizando trânsito de Mercúrio. Assim como Bedaque e Caniato (2024), apresentam um trabalho teórico e educacional. Sobre o termo “Leis de Kepler”, os três artigos retornados já foram discutidos aqui.

Vemos assim, que, as Leis de Kepler são frequentemente discutidas na literatura, majoritariamente sendo trabalhadas de um ponto de vista teórico, muitos trabalhos visam o ensino de astronomia, e em uma proporção menor sendo discutidos os aspectos históricos e epistemológicos. Já sobre o estudo de exoplanetas, foram todos discutidos do ponto de vista teórico-observacional, com alguns apresentando algumas informações sobre a história das descobertas. Mas nenhum discutindo epistemologicamente seu estudo.

5. Problemática histórica e epistemológica para as Leis de Kepler

Do ponto de vista histórico, o Geocentrismo é um dos modelos mais antigos conhecidos pela ciência ocidental para representar o Universo. Ele foi criado por Pitágoras⁹ no século V a.C., e tem esse nome por defender que o Sol, a Lua e os planetas conhecidos à época¹⁰ orbitavam a Terra. Nele, o Universo é composto de 2 esferas: uma central com a Terra e outra externa com as estrelas (Alves-Brito; Cortesi, 2021; Oliveira; Saraiva, 2015), representado à esquerda na Figura 2. Os pitagóricos, membros da escola de Pitágoras, acreditavam que os corpos no céu eram esferas perfeitas e se moviam em círculos perfeitos, não ao redor da Terra, mas de um fogo cósmico central, além da visão humana, deslocado um pouco em relação ao centro da Terra (Harrison, 2012).

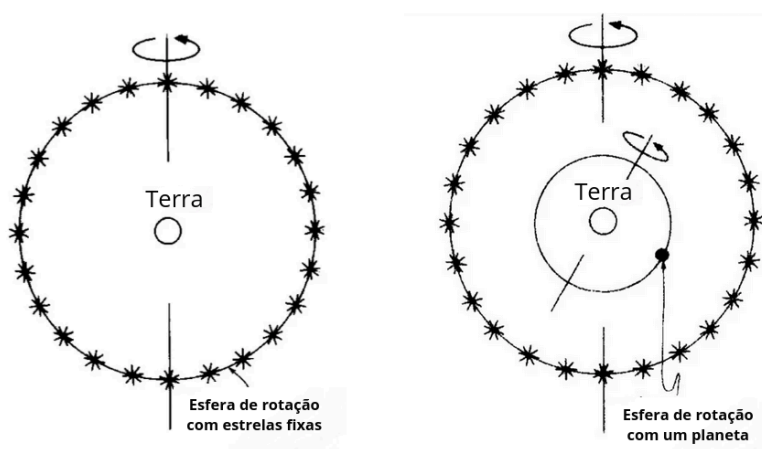


Figura 2: Modelo de Pitágoras com duas esferas. Adaptada de Harrison (2012, p. 30).

Quase dois séculos depois, o modelo de Pitágoras ainda era famoso na Academia de Platão, em Atenas. Eudoxus era um dos alunos e propôs, além das esferas do modelo de Pitágoras, que o Universo tivesse outras para suportar os planetas, com inclinações e períodos

⁹ 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. Com um monocórdio, instrumento musical com apenas uma corda, fez experimentos e descobriu os intervalos harmônicos, ou seja, quando uma corda vibra, ela emite um som que depende de seu comprimento (Pires, 2008).

¹⁰ Os 5 primeiros planetas do Sistema Solar visíveis a olho nú são Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. Disponível em: <http://www.each.usp.br/astroclube/planetas.htm#:~:text=S%C3%A3o%20em%20n%C3%BAmero%20de%205,%2C%20eles%20n%C3%A3o%20piscam%22>. Acesso em: 20 Nov. 2024.

variados, uma delas sendo representada à direita na Figura 2. A intenção de Eudoxus com a proposta era ser uma analogia, mas um outro aluno da Academia de Platão, Aristóteles¹¹, levou a ideia além.

Depois de estudar na escola de Platão, Aristóteles fundou a sua própria, chamada Liceu, conhecida também como peripatético, pois ele ensinava enquanto caminhava com seus alunos. Aristóteles adotou o modelo Geocêntrico das esferas de Pitágoras, mas, colocando a Lua, o Sol e os planetas conhecidos à época em 56 esferas para explicar seus movimentos. Normalmente, nos cursos de graduação em Física, pouco se é falado sobre esses modelos, e sobre a importância deles para seus desenvolvedores. Aristóteles não só acreditava que essas esferas eram reais, mas que eram transparentes e interconectadas, como as engrenagens de uma grande máquina (Bennett *et al.*, 2014). Nesse sentido, a obra de Aristóteles, *A Física*, foi utilizada como paradigma para definir quais problemas e métodos seriam válidos para serem utilizados pelas seguintes gerações de cientistas (Kuhn, 2013).

No entanto, o paradigma das esferas celestiais continha uma anomalia: não explicava satisfatoriamente o movimento retrógrado dos planetas. Ou seja, esse modelo não era capaz de explicar por que, do ponto de vista da Terra, os planetas percorreriam alguns trechos de sua órbita na direção contrária e teriam seu brilho aumentado durante essa fase.

Um dos mecanismos criados para resolver esses problemas foi o epiciclo, uma ideia que Claudius Ptolomeu¹², astrônomo e matemático do Museu de Alexandria, importou de Apollonius, outro filósofo grego discípulo de Pitágoras.

O epiciclo consiste em pequenos movimentos circulares adicionais que os planetas realizam em torno da trajetória principal, chamada deferente, em torno da Terra, representados na Figura 3. Podemos ver neste diagrama que, quando o planeta está no loop, consegue reproduzir o movimento retrógrado que observamos, e seu brilho é maior pelo fato de estar mais perto da Terra. Portanto, o epiciclo consegue explicar o movimento retrógrado dos planetas.

¹¹ O pai de Aristóteles era médico de Amintas, e avô de Alexandre, o Grande, e pode conceder a Aristóteles uma educação excelente: com 17 anos foi estudar com Platão, onde ficou por 20 anos. Apesar de ter produzido muitas obras, incluindo Lógica, Física, Metafísica, Biologia, Ética, Política e Retórica, muitas delas se perderam (Pires, 2008).

¹² Além da Astronomia, Ptolomeu contribuiu para a cartografia, introduzindo coordenadas geográficas e métodos para mapear a Terra. Sua obra mais importante, *Os 13 livros da composição matemática de Claudius Ptolomeu*, ficou conhecida como *Megale Sintaxis* (A grande composição), que, quando traduzida para o árabe, recebeu o nome de *al-megiste*, e no latim *Almagesto* (Pires, 2008).



Figura 3: Diagrama do modelo ptolomaico. Adaptada de Harrison (2012, p. 32).

Outro mecanismo desenvolvido para resolver esse problema foi o círculo excêntrico: a Terra continua no centro do Universo, mas cada planeta teria o centro de sua esfera deslocado em relação à Terra, como é representado na Figura 3, onde o centro do deferente não corresponde mais ao ponto onde a Terra está. Ptolomeu também utilizou em seu modelo a ideia de equante, um “ponto de equalização”, no qual o movimento de epiciclo estaria a uma velocidade angular constante, representado na Figura 4. Comparando este diagrama com a Figura 2, podemos ver o quanto o modelo Geocêntrico evoluiu para se encaixar nas observações da época. Como vimos na seção anterior, esse modelo ficou ainda mais complexo, o que acabou comprometendo a confiança dos pesquisadores em sua veracidade e utilização.

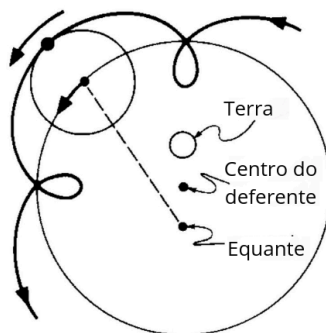


Figura 4: Modelo Ptolomaico com o epiciclo, equante, deferente e excêntrico. Adaptada de Harrison (2012, p. 32)

A maior contribuição de Ptolomeu foi adaptar e sintetizar diversas ideias em um único modelo de Universo em sua obra *Almagesto* (do árabe, *Almagest*, *O Grande Sistema*), publicada no século II (Bennett *et al.*, 2014). Ptolomeu contava com séculos de observações babilônias e gregas, além de suas próprias e, com isso, pôde combinar epiciclos, excêntricos e equantes de forma a reproduzir o movimento aparente dos planetas de uma forma que concordava razoavelmente bem, dentro de alguns graus de arco¹³, com as observações astronômicas, em um universo Geocêntrico (Bennett *et al.*, 2014; Pires, 2008). Epistemologicamente, o que Ptolomeu fez foi criar mecanismos para ajustar as observações às expectativas dos cientistas, servindo assim como uma evidência a favor do paradigma.

Com isso, o modelo ptolomaico permaneceu bem aceito, mas não de forma unânime. Assim como Aristóteles, a obra *Almagesto* de Ptolomeu constituiu um paradigma a ser utilizado pelos cientistas por aproximadamente 1400 anos, até ser superado pela Revolução Copernicana (Kuhn, 2013). Como vimos antes, os ajustes realizados pelos sucessores de Ptolomeu criaram um modelo tão complexo que dariam origem a uma crise na pesquisa astronômica normal. No século XIII, Alfonso X disse que teria dado alguns bons conselhos a Deus sobre a criação do mundo (Kuhn, 2013).

5.1 A Revolução Copernicana

O período de aproximadamente 150 anos (1543 - 1687) entre as obras de Copérnico e Newton é nomeado Revolução Copernicana e é considerado um dos marcos do início da Modernidade (Marcondes, 2016). Ela se inicia com Copérnico, quando publica seu modelo Heliocêntrico (Copérnico, 1543); continua com Tycho Brahe (1546 - 1601) (Brahe, 1602), Johannes Kepler (1571 - 1630) (Kepler, 1609; Kepler, 1619) e Galileo Galilei (1564 - 1642), que obtêm evidências observacionais robustas e aprimoramentos teóricos; e finaliza com Isaac Newton (1643 - 1727) (Newton, 1687), quando publica seu trabalho com suas 3 Leis do movimento e a Lei da Gravitação Universal, (Bennett *et al.*, 2014). Tal Revolução gerou mudanças profundas com relação ao pensamento medieval no campo da Física e da Astronomia.

¹³ Com o braço esticado, o dedo indicador corresponde a aproximadamente 1° de arco, e um punho fechado a 10°. A precisão do modelo de Ptolomeu era de alguns graus de arco no céu (Bennett *et al.*, 2014).

Além disso, marcou a transição do pensamento escolástico medieval e greco-romano para uma perspectiva moderna, representando um rompimento com a ciência antiga, predominantemente aristotélica (Marcondes, 2016). Como diz Marcondes (2016), “*Trata-se, portanto, de uma autêntica ‘revolução epistemológica’, uma vez que a concepção de conhecimento científico passa por profundas transformações tanto teóricas quanto metodológicas*”.

Em 1543, Nicolaus Copernicus¹⁴ (Copérnico, 1543) publicou sua obra *De revolutionibus orbium coelestium*, onde propôs um modelo Heliocêntrico do universo. Em seu prefácio, Copérnico escreveu como referência ao modelo ptolomaico, a tradição astronômica que herdara só tinha criado um monstro (Copérnico, 1543). Em sua obra, Copernicus proporcionou o próximo paradigma astronômico, argumentando que a Terra orbitava, assim como os demais planetas conhecidos à época, ao redor do Sol. Seu modelo apresentava vantagens em relação ao sistema ptolomaico, como a explicação do movimento retrógrado¹⁵ dos planetas e a possibilidade de calcular as distâncias relativas entre os planetas e o Sol (Pires, 2008). No entanto, muitos de seus resultados não ofereciam uma precisão superior ao modelo Geocêntrico. Isso é explicado pela falta de qualidade dos dados que se tinha e pelo fato de Copérnico partir da suposição das órbitas circulares. Apesar de ser nomeada Revolução Copernicana, Copérnico não foi uma pessoa revolucionária, pois para ajustar seu modelo aos dados, Copérnico utilizou os mesmos círculos e epiciclos de Ptolomeu (Kuhn, 2013; Pires, 2008).

Além disso, Copérnico formulou hipóteses que contrariavam aspectos centrais da teoria aristotélica¹⁶, bem como o que era permitido pela Igreja Católica à época, por exemplo, pensar que a Terra se movia e era um planeta como os outros. Curiosamente, sua obra só gerou controvérsias 50 anos depois, quando foi considerada inconciliável pela Igreja com algumas passagens bíblicas. Por exemplo, a passagem:

¹⁴ Copérnico nasceu em 1473, era tímido, estudioso e religioso. Com 18 anos foi para a Universidade de Cracóvia, onde se interessou pela Matemática e Astronomia. Em 1539, Copérnico 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*. Copérnico só veria o primeiro exemplar de sua obra algumas horas antes de morrer (Pires, 2008).

¹⁵ Como dito antes, o movimento retrógrado é quando, do ponto de vista da Terra, os planetas percorrem trechos de sua órbita na direção contrária e têm seu brilho aumentado nessa fase (Pires, 2008).

¹⁶ Como vimos na nota de rodapé 7, Aristóteles escreveu livros em várias áreas do conhecimento. Mas, ele também chegou a algumas conclusões que hoje sabemos estar erradas. Por exemplo, raciocinava que, se a Terra se movesse, quando soltassem um objeto de uma altura, ele não cairia exatamente abaixo de seu ponto de partida, pois a Terra teria se deslocado durante o tempo de queda. Além disso, os pássaros e as nuvens seriam deixadas para trás conforme a Terra percorresse sua órbita. Portanto, para Aristóteles, não havia como a Terra se mover (Pires, 2008).

Sol, detém-te sobre Gibeão, e tu, Lua, sobre o vale de Aijalom. E o sol se deteve, e a lua parou, até que o povo se vingou de seus inimigos. Isto não está escrito no livro de Jasher? O sol, pois, se deteve no meio do céu e não se apressou a pôr-se, quase um dia inteiro.” (Js 10: 12 - 13), (Marcondes, 2016, p. 24).

Um dos prováveis motivos da demora de gerar controvérsias é a escrita extremamente técnica de seu texto (Pires, 2008).

Demonstrar a superioridade do modelo copernicano sobre o ptolomaico foi uma tarefa complexa, principalmente devido à qualidade e à precisão dos dados disponíveis na época, que eram frequentemente antigos, imprecisos e, em alguns casos, até errôneos (Bennett *et al.*, 2014; Pires, 2008). Observacionalmente, foi Tycho Brahe¹⁷ (1546 - 1601) quem permitiu um avanço significativo para o paradigma copernicano. Graças a um financiamento substancial do governo Dinamarquês, instrumentos astronômicos altamente precisos¹⁸ e uma técnica observacional rigorosa, Tycho conseguiu determinar com precisão (com margem de erro de 1 minuto de arco) a posição dos planetas ao longo de décadas, levando em consideração erros instrumentais e registrando sistematicamente seus dados (Bennett *et al.*, 2014; Pires, 2008). Vale lembrar que, o telescópio foi inventado em 1608, sete anos depois da morte de Tycho, portanto, todas as suas observações eram feitas a olho-nú e se mantiveram como as melhores observações já feitas à época (Bennett *et al.*, 2014).

Johannes Kepler nasceu na região do Sacro Império Romano, onde hoje é o sul da atual Alemanha. Como sua família era pobre, Kepler não conseguiria seguir com seus estudos da escola se não fosse por um projeto dos duques de Wuerttemberg que fornecia bolsas de estudo para os melhores alunos. Assim, Kepler pode ir pra Universidade de Tübingen, onde estudou Astronomia com Michael Maestlin¹⁹, astrônomo que estava convencido de que o sistema copernicano era verdadeiro (Pires, 2008). Michael influenciou profundamente Kepler em sua

¹⁷ Em 1563, Tycho Brahe 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. Em 1572, Tycho observou um evento que hoje sabemos ter sido uma supernova. Um ano depois, publicou *De Nova Stella* (Brahe, 1573) onde relatava a descoberta de uma nova estrela, algo que contradizia a teoria aristotélica de perfeição do céu (Pires, 2008).

¹⁸ Por exemplo, um quadrante de quase 6 metros de raio, um sextante com 1,5 metros e um triquetro para medir a altitude das estrelas no céu. Disponível em: <<https://archive.org/details/tychobrahepictur00dreyrich/page/n17/mode/2up>> Acesso: 3 Dez. 2024.

¹⁹ Michael Maestlin foi um dos maiores astrônomos entre Copérnico e Kepler, passou muito tempo pesquisando sobre o Sol, a Lua e os eclipses. Trocava cartas com Kepler frequentemente e em uma delas afirmou que, apesar de não conseguir observar as fases de Vênus ou as luas de Júpiter como Galileu Galilei, foi capaz de observar as Luas de Júpiter, em 1613 (Jarrell, 1972).

visão do Cosmos, a ponto de mais tarde Kepler escrever um trabalho reconciliando o modelo copernicano com a Bíblia.

5.2 Kepler e Newton

Em 1600, Johannes Kepler (1571–1630) iniciou sua colaboração com Tycho Brahe e, após 18 meses de trabalho, herdou²⁰ as décadas de observações precisas realizadas por Tycho sobre as órbitas planetárias. Durante seu trabalho com Tycho, Kepler foi encarregado de determinar a órbita de Marte (Pires, 2008), e, após anos tentando modelá-la, conseguiu resumir suas descobertas em três leis empíricas. Ou seja, Kepler transformou a anomalia da órbita de Marte em uma extensão do paradigma copernicano. As Leis serão apresentadas aqui como são frequentemente enunciadas em livros textos de Física:

- 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.

Apesar de o modelo copernicano não atribuir nenhuma influência física entre o Sol e os planetas, Kepler acreditava que este emanava uma força que guiava os planetas e diminuía com o quadrado da distância. Além disso, foi capaz de expandir seus achados para os outros planetas do Sistema Solar e para as luas de Júpiter encontradas por Galileu. Uma vez que não se sabia quase nada sobre as estrelas, o Sistema Solar era praticamente tudo que era conhecido à época, nessa

²⁰ Em seu leito de morte, Tycho pediu para Kepler encontrar um sistema em que suas observações fizessem sentido, para que seu trabalho não tivesse sido em vão (Bennett *et al.*, 2014).

perspectiva, Kepler universalizou suas leis. Mas então, quais princípios estão por trás dessa universalidade?

Conforme discutiremos em detalhes mais adiante, Isaac Newton²¹ conseguiu responder a essa pergunta com suas leis do movimento e a Lei da Gravitação Universal, que será deduzida na seção seguinte. Quando ele enunciou suas três leis, ele partiu de dois corolários: a conservação de momento linear e angular. O momento linear é definido como sendo $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, onde m é a massa do objeto e \mathbf{v} o vetor velocidade em três dimensões. Além disso, definimos a aceleração como a variação da velocidade no tempo, ou seja,

$$\mathbf{a} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}, \quad (2)$$

portanto, podemos calcular a variação de momento linear como sendo

$$\frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t} = m \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = m\mathbf{a}. \quad (3)$$

Já a segunda lei de Newton diz que quando aceleramos um objeto de massa m , estamos aplicando uma força \mathbf{f} calculada como

$$\mathbf{f} = m\mathbf{a}, \quad (4)$$

assim, igualando a equação (4) à (3), podemos obter a variação de momento linear como sendo

$$\frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t} = \mathbf{f}. \quad (5)$$

Ou seja, o momento linear de um objeto só muda se aplicarmos uma força sobre ele, senão, seu momento linear se mantém constante.

Quando muitos objetos interagem em um sistema, podemos calcular o momento linear total \mathbf{P} do sistema como sendo a soma de \mathbf{p} de cada objeto e aplicar o mesmo raciocínio anterior, mas com \mathbf{P} e \mathbf{F} , onde \mathbf{F} é uma força externa ao sistema. Assim, obtemos a mesma conclusão: se não houver uma força externa sendo aplicada, o momento linear total do sistema não muda, (Newton, 1687).

Enquanto o momento linear está relacionado ao movimento linear, o momento angular está relacionado a movimentos angulares, como a rotação e translação de objetos, e por isso é o mais importante dos dois para o estudo dos planetas. Ele é definido como

²¹ Newton estudou na Universidade de Cambridge, onde realizava alguns trabalhos para se manter, como limpar botas e banheiros de estudantes mais afortunados. Em 1665, pouco antes de se graduar, a Grande Praga, uma das maiores epidemias da História, fez Cambridge fechar. Durante esse período, 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 que começou a desenvolver sua teoria da gravitação, onde imaginava a mesma força que mantinha uma maçã sendo estendida até a Lua (Pires, 2008).

$$L = mr^2\omega, \quad (6)$$

onde m é a massa do planeta, r é a distância até a estrela, e ω a velocidade angular definida, analogamente à velocidade v , como $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$, ou seja, quantos graus varia em um determinado tempo. De forma análoga ao momento linear, podemos concluir que, se não houver um *Torque*, ou seja, uma força que faça a velocidade angular do planeta variar, o momento angular do sistema planeta-estrela não muda.

A segunda Lei de Kepler foi a mais fácil de Newton provar, por que acaba sendo uma consequência direta da conservação de momento angular do sistema. Como a força gravitacional é central, ou seja, ela depende somente da distância “ r ” entre os objetos e age na linha que liga-os, 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) (Winn, 2023). Resulta que a taxa de área com que ele varre na elipse é constante. Em outras palavras, o planeta varre áreas iguais e tempos iguais.

Após desenvolver uma área totalmente nova da Matemática, o Cálculo, Newton mostrou que, o fato da força gravitacional decair com a distância na forma $\frac{1}{r^2}$ implica naturalmente em órbitas elípticas para os planetas com o Sol em um dos focos (Bennett *et al.*, 2014).

A terceira lei de Kepler, por sua vez, origina-se do fato de a gravidade do Sol decair com a distância. Kepler escreveu suas leis para os planetas do Sistema Solar orbitando o Sol, mas Newton demonstrou que elas são aplicáveis para quaisquer objetos que se orbitem. O detalhe nesse processo que pouco é debatido em sala de aula, é que as conservações de momento angular e linear são os pilares das Leis do movimento de Newton, da Lei da Gravitação Universal e das Leis de Kepler. Isso ocorre, pois elas estão na base de toda a argumentação de Newton, e do funcionamento da natureza.

As deduções de Newton garantiram o sucesso da Revolução Copernicana. Antes dos trabalhos de Newton, ainda se tinha dúvidas se as leis de Kepler eram apenas outro modelo que apenas se encaixava melhor aos dados ou se representavam um modelo real do Universo. As Leis de Kepler eram leis *empíricas*, por isso, quando Newton *deduziu* as Leis de Kepler, a partir de leis físicas fundamentais, ele não só retirou qualquer dúvida por trás da legitimidade do modelo

Heliocêntrico, mas também estendeu as leis de Kepler para quaisquer objetos que se orbitassem no Universo (Bennett *et al.*, 2014).

Aqui entra um ponto importante desse trabalho, pois um passo importante da ciência moderna e contemporânea é verificar experimental ou observacionalmente as teorias desenvolvidas. O universo não tem responsabilidade nenhuma em funcionar conforme nossas crenças. Mesmo que Newton tenha demonstrado que as Leis de Kepler são fatos do Sistema Solar, e para corpos que se orbitem gravitacionalmente, ainda é necessário verificar para outros sistemas planetários. Tanto que para as galáxias, sabemos que elas não funcionam (a menos no caso do comportamento da curva de rotação), por isso que hoje temos propostas com a Matéria Escura para explicar as discrepâncias.

Epistemologicamente, a Revolução Copernicana (Andery *et al.*, 2012) não apenas desafiou o modelo Geocêntrico, como também trouxe contribuições cruciais para o estabelecimento do paradigma moderno da ciência. Kepler era, do ponto de vista teórico, um convicto heliocentrista e, sem isso, provavelmente não teria chegado às suas três leis, que são empíricas (Andery *et al.*, 2012). Além disso, os estudos de Kepler influenciaram marcadamente o trabalho de Isaac Newton, que propôs suas próprias Três Leis do Movimento, em 1687, no livro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Newton, 1687; Bennett *et al.*, 2014). Com elas, Newton conseguiu explicar as Leis de Kepler e deduzir a relação entre período e distância, o que corrobora com mais um argumento a favor de Kepler. Particularmente, a Lei da Gravitação Universal

$$\mathbf{F} = G \frac{Mm}{r^2} \mathbf{r}, \quad (7)$$

que diz que a força \mathbf{F} entre quaisquer dois objetos, sendo um de massa m e outro de massa M , separados a uma distância r , é uma generalização das Três Leis de Kepler. Ou seja, para Newton as Leis de Kepler são consequência da Lei da Gravitação Universal. Essas questões, ademais, estão epistemologicamente vinculadas às leis de conservação em Astronomia.

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 (Kuhn, 2013). No entanto, vale destacar, do ponto de vista histórico e epistemológico, Alves-Brito; Macedo (2022) fazem uma interessante discussão sobre a ideia de universalidade/localidade quando outros referentes culturais são levados em conta.

6. As Leis de Kepler: problematização histórica-epistemológica e teórica-observacional a partir do estudo dos exoplanetas

6.1. Os exoplanetas

Os gregos antigos, como Anaxágoras (500 a.C. – 428 a.C.) e Aristarchus (310 a.C. - 230 a.C), teorizaram sobre a existência de outros mundos e a singularidade da Terra. No entanto, as evidências de que as estrelas eram corpos semelhantes ao Sol, e que planetas as orbitavam, ainda estavam muito distantes de serem descobertas. Em 1584, Giordano Bruno (1548–1600) argumentou que “inumeráveis corpos celestes, estrelas, globos, sóis e terras podem ser percebidos por nós de forma sensível, e um número infinito deles pode ser inferido por nossa própria razão.” (Hetherington, 1993, p. 419). Um século depois, Newton escreveu em sua obra *Principia*: “Se as verdadeiras estrelas fixas fossem centros de sistemas semelhantes, todos seriam construídos de acordo com um design semelhante” (Newton, 1687), sugerindo que esses sistemas poderiam, da mesma forma, conter estrelas e planetas orbitando ao seu redor.

Até então, mesmo com o uso de telescópios não era possível observar o movimento aparente das estrelas. A tentativa de Galileu, com o uso do telescópio, resultou apenas na conclusão de que elas estavam extremamente distantes e que eram muito mais numerosas do que se imaginava (Pires, 2008). Um avanço significativo só foi acontecer em 1838, quando Friedrich Bessel enviou uma carta a Sir J. Herschel, descrevendo suas medidas da paralaxe do sistema binário *61 Cygni*, e determinando que as duas estrelas estão a 10,3 anos luz da Terra^{22,23}. Atualmente, o valor calculado pela missão Gaia é de $11,40 \pm 0,03$ anos luz (Gaia *et al.*, 2022).

Em 1952, Otto Struve publicou uma proposta de como poderíamos encontrar exoplanetas partindo do seguinte modelo: supondo um objeto a uma distância de $\frac{1}{50}$ UA (Unidade Astronômica²⁴), utilizando a terceira lei de Kepler, obtemos que seu período seria de aproximadamente 1 dia. Reescrevendo a Terceira Lei de Kepler como $V^3 \sim \frac{1}{P}$, e sabendo que a velocidade da Terra em torno do Sol é de 30 km/seg, obtemos que a velocidade desse possível planeta seria de 200 km/seg. Se esse objeto tivesse a massa de Júpiter, faria a velocidade da

²² Disponível em: <https://academic.oup.com/mnras/article/4/17/152/1064462>. Acesso em: 20 Nov. 2024.

²³ Um ano-luz é a distância que a luz percorre em um ano e equivale a 9,46 trilhões de quilômetros (Bennett *et al.*, 2014).

²⁴ 1 UA corresponde a 150 milhões de quilômetros aproximadamente.

estrela oscilar com uma amplitude de 2 km/seg, uma quantidade mensurável pelos espectrógrafos de Coudé da época (Struve, 1952).

Além disso, Struve (1952) defendeu que esse possível exoplaneta passaria na frente da estrela, diminuindo o seu brilho a ponto de ser detectado por telescópios sensíveis. Sendo um exoplaneta com a massa de Júpiter a uma distância tão próxima de sua estrela, podemos afirmar que Struve previu a existência de Júpiteres quentes, uma classe de exoplanetas pouco comum, mas que são de extrema importância, e diversos modelos foram criados para explicar sua formação, como *In situ formation*, *Disk migration* e *High-eccentricity tidal migration* (Dawson; Johnson, 2018). Apesar das propostas de detecção e da possível existência de exoplanetas, seu trabalho teve pouca influência na época.

Assim como vimos no exemplo de Kuhn sobre a óptica física, mas em escala bem menor, algumas pessoas fizeram especulações sobre a existência dos exoplanetas, mas sempre reiniciando esse processo a partir de alguma metafísica ou teoria científica. O que Struve (1952) fez foi dar início ao desenvolvimento do paradigma que viria a ser utilizado posteriormente no estudo dos exoplanetas.

Algumas tentativas de detecção de exoplanetas foram publicadas ao longo dos primeiros anos, por exemplo o trabalho de van de Kamp (1953). Porém, além de outros pesquisadores não terem conseguido reproduzir os achados, foi explicado por Hershey (1973), que as mudanças na posição que van de Kamp observou, coincidiam com os ajustes técnicos das lentes objetivas do telescópio.

Nas décadas seguintes, houveram outras publicações sobre possíveis descobertas, mas os primeiros planetas extrassolares confirmados só foram descobertos em 1992 (Wolszczan; Frai, 1992) orbitando o pulsar PSR B1257+12, a 2300 anos-luz de distância da Terra. Pulsares são estrelas de nêutron rotativas altamente magnetizadas que emitem feixes de radiação pelos pólos magnéticos (Lorimer; Kramer, 2005). A emissão desses pulsos é extremamente regular e precisa. Com o radiotelescópio de Arecibo, os pesquisadores monitoraram rotineiramente o tempo de chegada dos pulsos, medida conhecida como *time-of-arrival* (TOA), do então recém descoberto PSR B1257+12. E, com mais de 4000 observações TOAs, identificaram uma variabilidade incomum nessa medida, associada a um pequeno desvio (aproximadamente 1') na posição do pulsar (Wolszczan; Frai, 1992).

Além disso, utilizaram o Very Large Array para determinar a posição do pulsar PSR B1257+12 e, após a redução e análise dos dados, foi descoberto uma variação quase periódica dos TOAs que poderiam ser explicadas pela presença de pelo menos dois exoplanetas, com massas estimadas em 2,8 e 3,4 M_{\oplus} ²⁵, orbitando a 0,47 e 0,36 UA com períodos de 98,2 e 66,6 dias, respectivamente. Além disso, um terceiro exoplaneta foi posteriormente confirmado por Wolszczan (1994), com uma massa de 0,015 M_{\oplus} , orbitando a 0,19 UA do pulsar.

Desde então, mais de 5.600 exoplanetas foram confirmados e vários métodos de detecção foram desenvolvidos, como Velocidade Radial, Imageamento Direto e Trânsito (Wei, 2018), conceitos que serão detalhados mais adiante nesse texto. Além disso, grandes telescópios foram lançados com a missão de descobrir e entender em detalhes sistemas planetários, como o *Kepler*²⁶, o *MINERVA*²⁷ e o *TESS*²⁸.

Os métodos de detecção, junto dos telescópios e das teorias físicas, compõem as ferramentas dos paradigmas relacionados aos exoplanetas. Em especial, os métodos que serão trabalhados aqui já estão bem estabelecidos, são majoritariamente aceitos pelos cientistas e fazem parte do ensino dos astrônomos que trabalham com exoplanetas.

Com o crescente número de exoplanetas, foi crescendo a necessidade de catalogar tanto os exoplanetas confirmados quanto os candidatos. Conforme já destacado na seção sobre Metodologia, um dos principais catálogos criados foi o *Exoplanet Orbit Database*, EOD²⁹ (Eunkyu Han *et al.* 2014), que conta, por exemplo, com parâmetros orbitais, físicos e estelares de mais de 5700 objetos, sendo aproximadamente 3200 exoplanetas confirmados.

6.2 Métodos de detecção

Nessa seção, descreveremos alguns métodos utilizados na pesquisa normal dos exoplanetas. Daremos enfoque ao método de trânsito, utilizado pelo Telescópio Espacial Kepler,

²⁵ 1 M_{\oplus} , ou seja, uma massa terrestre, equivale a $5,9 \times 10^{24}$ quilogramas.

²⁶ Disponível em: <<https://science.nasa.gov/mission/kepler>>. Acesso em: 21 Abr. 2024.

²⁷ Disponível em:

<<https://www.cfa.harvard.edu/facilities-technology/telescopes-instruments/miniature-exoplanet-radial-velocity-array>>. Acesso em: 21 Abr. 2024.

²⁸ Disponível em: <<https://tess.mit.edu/>>. Acesso em: 21 Abr. 2024.

²⁹ Disponível em: <<http://exoplanets.org/>>. Acesso em: 21 Abr. 2024.

pois contribuiu com uma revolução científica nos últimos anos nessa área da Astronomia.

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.

6.2.1 Velocidade Radial:

Historicamente, esse método foi um dos primeiros utilizados na detecção de exoplanetas, pois já era possível acompanhar a velocidade radial das estrelas com certa precisão há décadas, como já discutimos no trabalho de Otto Struve. O método consiste em medir o comprimento de onda da luz emitida pela estrela em função do tempo. Se houver um planeta orbitando-a, a estrela fará um movimento em torno do centro de massa do sistema, provocando o efeito Doppler da luz. Esse efeito é bastante conhecido no nosso dia a dia para o caso do som. Quando uma ambulância se aproxima (se afasta), percebemos que seu som fica mais agudo (grave). O mesmo acontece com a luz, ou seja, quando a luz da estrela se aproxima (se afasta) da Terra, o comprimento de onda diminui (aumenta) e vemos a luz mais azul (vermelha) (Doppler, 1842).

Como vemos na Figura 5, quando a luz da estrela chega na Terra, ela passa por um espectrógrafo para que observemos suas linhas de absorção (as linhas escuras)³⁰. Vemos que os comprimentos de onda absorvidos deslocam para o azul (chamado *blueshift*) quando a estrela se aproxima da Terra e para o vermelho (chamado *redshift*) quando se afasta. Como esse efeito está diretamente relacionado com a velocidade relativa entre o emissor (a estrela) e o observador (o telescópio), conseguimos calcular a velocidade da estrela conforme ela orbita seu centro de massa.

³⁰ Segue um vídeo desenvolvido pela European Southern Observatory (ESO) ilustrando o fenômeno. Disponível em: <https://www.eso.org/public/videos/eso1035g/>. Acesso em: 19 Dez. 2024.

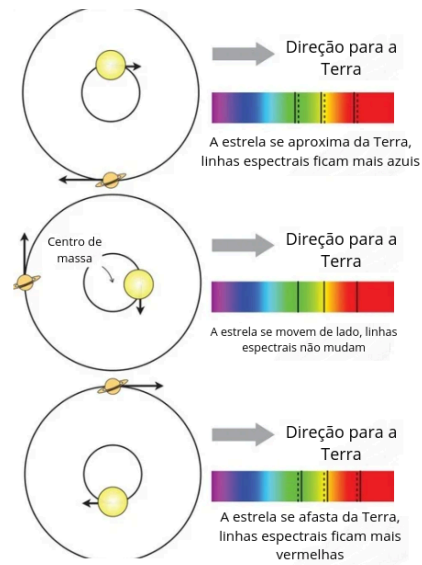


Figura 5: Imagem adaptada representando o efeito Doppler da luz de uma estrela observado por um espectrógrafo na Terra conforme ela circula o centro de massa do sistema.

Adaptada de Winn, (2023, p. 138)

Em 1995, Michel Mayor e Didier Queloz descobriram o primeiro exoplaneta orbitando uma estrela como o Sol utilizando esse método (Michel; Queloz, 1995). Com o espectrógrafo ELODIE, no Observatório Haute-Provence, observaram que o espectro da estrela 51 Pegasi alternava entre blueshift e redshift a cada 4 dias. Na Figura 6, podemos ver o gráfico gerado pelos pesquisadores da velocidade radial da estrela em função da fase, e observamos como a estrela se aproxima e se afasta periodicamente da Terra. Vemos também pelo gráfico que a velocidade radial da 51 Pegasi oscila entre aproximadamente $+70$ m/s e -70 m/s, enquanto que as barras de erro são da ordem de 20 m/s, ou seja, se a estrela oscilasse entre $+10$ m/s e -10 m/s, o telescópio não seria capaz de observar com nitidez a oscilação periódica da velocidade radial, e portanto, os pesquisadores não seriam capazes de confirmar se uma pequena variação das medidas era algum erro aleatório ou consequência da oscilação da estrela. O fato das oscilações serem periódicas, e com alta amplitude são fortes indícios de que algo físico está ocorrendo no sistema.

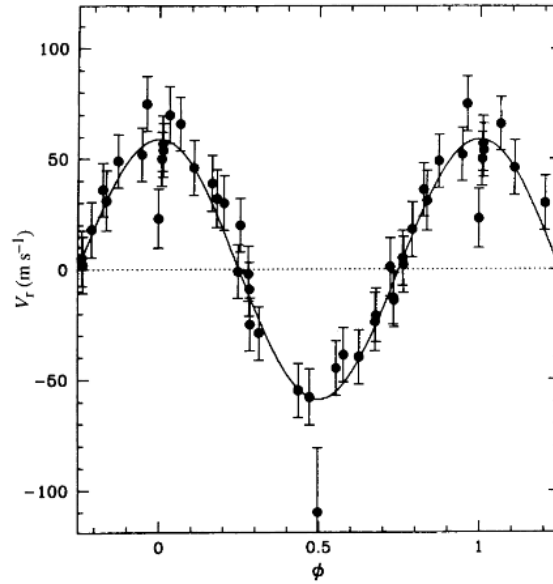


Figura 6: Velocidade Radial da estrela 51 Pegasi em função da fase. Fonte: Michel; Queloz, (1995).

Podemos comparar essa situação com a evolução dos modelos ptolomaico e copernicano. Enquanto os dados eram antigos, às vezes não confiáveis e com margens de erro de alguns graus de arco, não era possível definir qual dos dois modelos descrevia, e previa, melhor o comportamento dos planetas. Só quando Tycho Brahe fez observações mais rigorosas, confiáveis e precisas (da ordem de minutos de arco) foi que Kepler pôde ver claramente o comportamento de Marte e formular um aprimoramento do modelo copernicano, resumido em suas três leis.

Com o uso de espectrômetros modernos, como o HARPS (*High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher*) podemos acompanhar a velocidade radial com precisão de aproximadamente 1 m/s, o que permitindo realizar levantamentos sobre as características dos exoplanetas (Souza *et al.*, 2008).

Porém, o método de Velocidade Radial possui algumas limitações. O método se baseia na influência gravitacional que o planeta causa na estrela, e, de acordo com a Lei da Gravitação Universal, podemos ver que, quanto mais massivo e próximo da estrela maior a força, e portanto, maior a velocidade da estrela ao redor do centro de massa. Foi com essa lógica que Michel e Didier foram capazes de determinar que a massa mínima do exoplaneta deve ser da ordem de $0.5 M_J$ ³¹(Michel; Queloz, 1995). Em reconhecimento a essa contribuição, os pesquisadores

³¹ M_J é a massa de Júpiter, e equivale a $1,9 \times 10^{27}$ Kg (Bennett *et al.*, 2014, p. 381).

receberam o Prêmio Nobel de Física em 2019 (Nobel Media AB, 2019).

A outra limitação do método, ocorre devido ao fato de que, para acompanhar um desvio tão pequeno causado pelo planeta na velocidade da estrela, o telescópio precisa estar totalmente dedicado a ela. Ou seja, só conseguimos acompanhar uma estrela de cada vez. No começo da busca por exoplanetas isso não era um problema, mas como veremos no método de Trânsito, essa característica acabou se tornando uma limitação do método.

6.2.2 Trânsito

O método de trânsito 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 do exoplaneta (normalmente os pesquisadores exigem 3 observações para confirmar um exoplaneta) (Bennett *et al.*, 2014). A grande vantagem desse método em relação à Velocidade Radial, é que o telescópio pode observar centenas de milhares de estrelas ao mesmo tempo. Como veremos mais adiante, é assim que o Telescópio Kepler funcionava, utilizando um fotômetro de 0,95 metros, podia acompanhar centenas de milhares de estrelas ao mesmo tempo (Thompson, 2016). Porém, esse método exige que o exoplaneta passe exatamente na linha de visita entre a Terra e sua estrela, como visto na Figura 7, justamente para que bloqueie uma parte do brilho da estrela que chega até a Terra. Outra limitação é que, como o método da Velocidade Radial, o Trânsito também tem um viés para planetas com menor período. Isso porque os astrônomos exigem 3 órbitas do planeta (duas medidas de período iguais) para confirmar um exoplaneta. A probabilidade geométrica de um trânsito ocorrer pode ser dada por $P(R, a, e) = \frac{R_{\star}}{A(1-e^2)}$, onde R_{\star} é o raio da estrela, A é o semieixo maior e e a excentricidade da órbita (Winn, 2023).

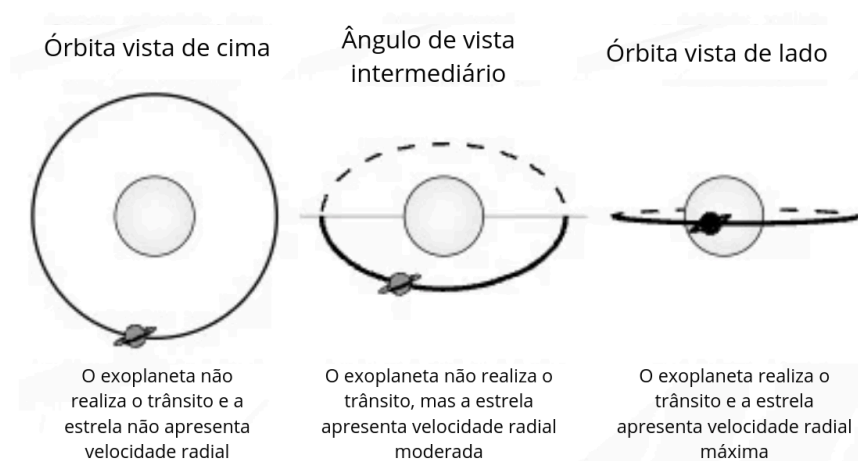


Figura 7: Ângulos de vista de um exoplaneta e sua estrela. Adaptada de Winn (2023, p. 67)

6.2.3 Imageamento Direto

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. Christian Marois e seus colaboradores utilizaram esse método para observar o sistema HR 8799³², representado na Figura 8, (Marois *et al.*, 2008). A equipe utilizou tanto o telescópio Keck quanto o Gemini para detectar 3 planetas orbitando a estrela HR 8799 com semieixos maiores de 24, 38 e 68 UA.

³² Um dos membros da equipe fez um vídeo dos planetas orbitando a estrela. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=gcHXGZaS_6M>. Acesso em: 20 Nov. 2024. Ver também, para mais detalhes, Winn (2023).

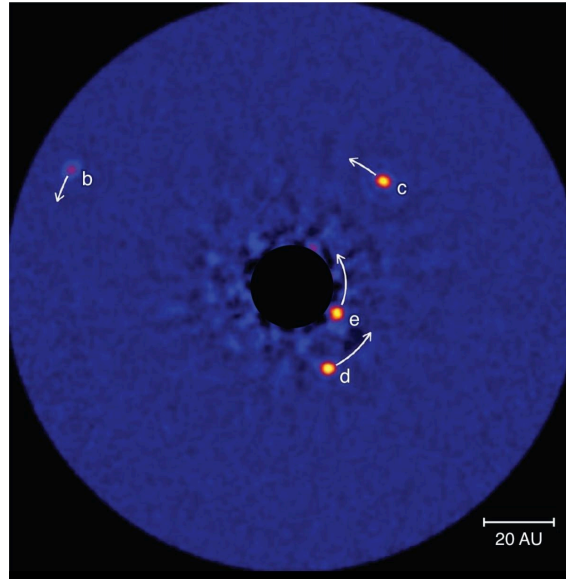


Figura 8: Sistema HR 8799 obtido via Imageamento Direto. Fonte: (Marois *et al.*, 2008)

Infelizmente, esse método ainda é extremamente difícil de ser utilizado por causa dos efeitos combinados de pequena separação angular entre os planetas e a estrela e do grande contraste de luminosidade entre o planeta e a estrela, (Marois, Christian, *et al.*, 2008).

6.2.4 Microlenteamento Gravitacional

No início do século XX, Albert Einstein³³ (1879 - 1955) publicou sua Teoria da Relatividade Geral, onde re-descreveu a gravidade (Einstein, 1916). Como veremos mais adiante, Newton não tinha sido capaz de encontrar uma causa para a gravidade. No conceito de espaço-tempo de Einstein, a gravidade é a própria deformação do espaço-tempo, causada por um objeto massivo. É desse conceito que o microlenteamento se baseia para detectar exoplanetas. Vemos pela Figura 9, que a luz da fonte sofre uma deformação ao chegar em uma região do espaço deformada pelo sistema planetário, ou seja, ele age analogamente a uma lente, pois concentra a luz do objeto mais brilhante do fundo em um ponto do espaço. No gráfico do canto

³³ Quando criança, Albert Einstein demorou tanto para aprender a falar que seus parentes pensaram que ele tinha algum dano cerebral. Além disso, durante a adolescência, abandonou o Ensino Médio por sugestão de um professor que lhe disse que nunca seria alguém na vida. Alguns anos depois, em 1905, publicou cinco trabalhos na revista anual de Física da Alemanha. Três deles resolveram três dos maiores problemas da Física na época.

da Figura 9, vemos que a luz que chega até o planeta Terra na parte inferior da imagem tem um ponto máximo com essa concentração, e um mini-pico ao lado causado pela presença de um exoplaneta no sistema.

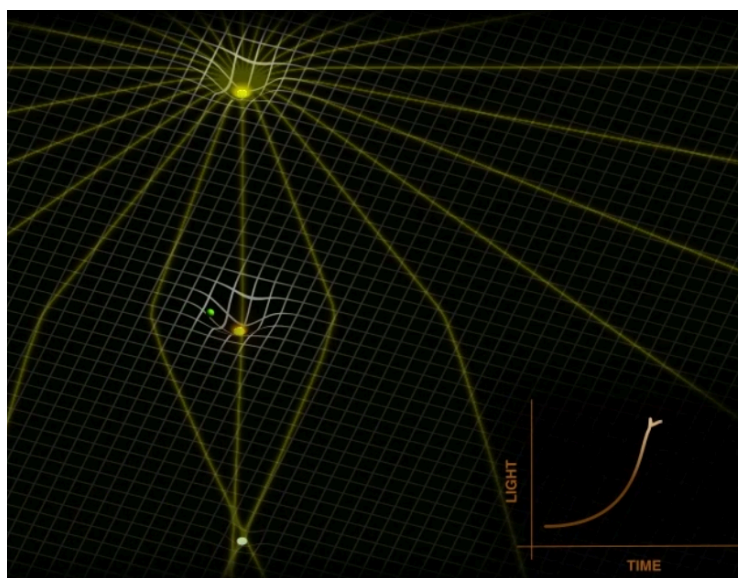


Figura 9: Representação do método de microlenteamento causado por um sistema planetário.

Fonte: NASA³⁴

6.3 A missão Kepler

Desde os anos 1990, o número de exoplanetas observados/confirmados cresceu quase exponencialmente (Figura 10). Muito desse avanço se deve ao Telescópio Espacial Kepler, nomeado em homenagem a Johannes Kepler e lançado em 2009 pela NASA para monitorar, através do método de Trânsito durante 4 anos, cerca de 150 mil estrelas da constelação de Cygnus, com o objetivo principal de determinar qual a fração de estrelas do tipo solar contêm planetas do tipo Terra dentro da zona habitável^{35,36}(Thompson, 2016).

³⁴ Disponível em: <https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/ways-to-find-a-planet/?intent=021#/4>. Acesso em: 20 Nov. 2024.

³⁵ A Zona Habitável é uma região em volta de uma estrela em que a água estaria em estado líquido.

³⁶ Roadmap feito pela NASA com os principais eventos na história do Telescópio Kepler. Disponível em: <https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/kepler-timeline/#roadmap-for-planet-hunting>. Acesso em: 20 Nov. 2024.

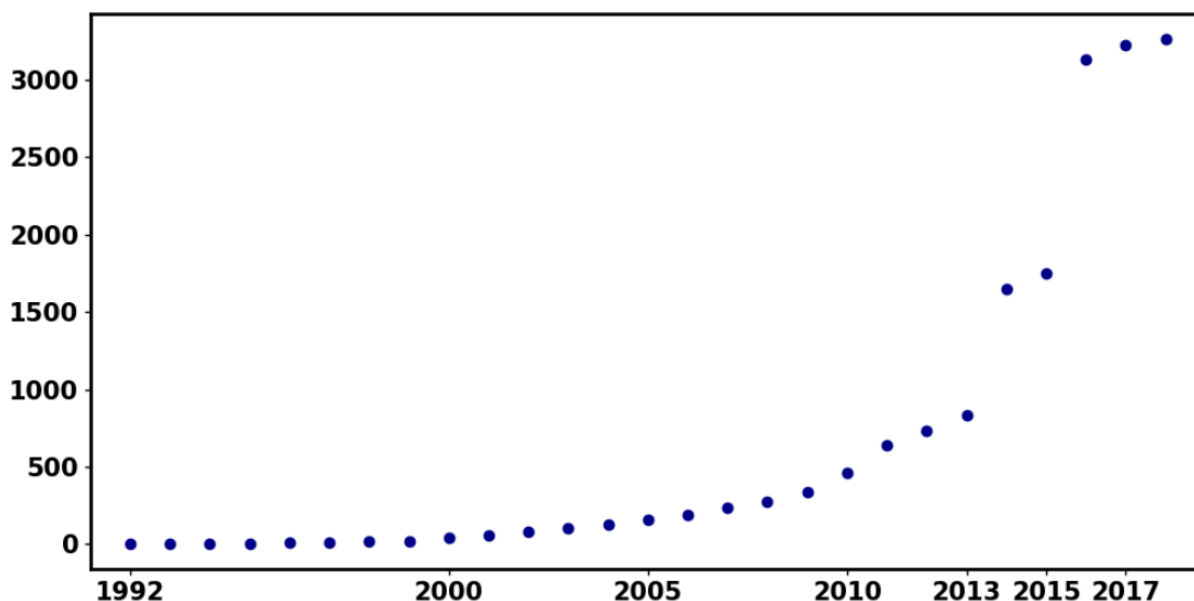


Figura 10: Número de exoplanetas descobertos ao longo dos anos. Gerado com código *Python* que se encontra no Apêndice.

Com a maior câmera digital já construída pela humanidade até então, de 0,95 metros de abertura, Kepler possuía uma alta precisão que o permitia descobrir planetas como a Terra ao redor de estrelas parecidas como o Sol. Dessa forma, ele foi capaz de encontrar aproximadamente 3000 exoplanetas, aumentando o censo de exoplanetas que se tinha por um fator de 5 (Winn, 2023, p. 108). O telescópio Kepler 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 (Borucki, 2016).

Ele funcionava da seguinte forma: Kepler 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, 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 (Bennett *et al.*, 2014).

A missão estava prevista para durar 4 anos, mas em 2012 e 2013 o telescópio perdeu 2 das 4 rodas de reação que o mantinham estável e a primeira missão do telescópio Kepler se encerrou. Os engenheiros da NASA descobriram como contornar o problema e reviveram o telescópio, mas agora com a missão K2. Perceberam que era possível, por alguns meses, manter

a posição de Kepler estável apenas para observação das estrelas da eclíptica (Howell *et al.*, 2014). A missão K2 terminou em 2018 depois de acabar com seu, já danificado, sistema de combustível.

Histórica e epistemologicamente, o telescópio Kepler proporcionou uma revolução científica no estudo dos exoplanetas. A grande maioria dos exoplanetas conhecidos até 2009 era do tamanho de Júpiter. Com a sensibilidade do telescópio Kepler, foi possível determinar planetas cada vez menores, mais próximos de suas estrelas e em grande números, mostrando que a galáxia está cheia deles. Além disso, Kepler mostrou que há muitos sistemas planetários, estrelas com mais de um planeta e planetas que orbitam mais de uma estrela. A missão Kepler também mostrou que a classe de planetas mais comum é algo entre o tamanho da Terra e Netuno, também chamados de super-Terras (Bennett *et al.*, 2014). Graças às contribuições de Kepler, hoje sabemos que todas as estrelas do céu têm, em média, pelo menos um planeta orbitando-a (Bennett *et al.*, 2014).

Ou seja, quando comparamos o entendimento da astronomia acerca dos planetas antes e depois da missão Kepler, vemos que são entendimentos totalmente diferentes acerca do universo. São visões incomensuráveis, pois olham para universos totalmente diferentes, em contextos históricos, políticos, culturais e sociais distintos. 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.³⁷

É importante notar que essas estatísticas ainda estão em construção. Esse trabalho é parte do legado do telescópio Kepler, e o que constitui hoje a pesquisa normal relacionada aos exoplanetas, sendo desenvolvida com o auxílio dos telescópios TESS, JWST, entre outros, (Winn, 2023).

³⁷ Tradução nossa. Disponível em: <<https://science.nasa.gov/mission/kepler/#h-planets-are-everywhere>>. Acesso: 16 Dez 2024

6.4 As Três Leis de Kepler

Como já foi previamente destacado, em 1600, Johannes Kepler (1571–1630) iniciou sua colaboração com Tycho Brahe e, após 18 meses de trabalho, herdou as décadas de observações precisas realizadas por Tycho sobre as órbitas planetárias. Nesse período, Kepler foi encarregado de determinar a órbita de Marte, a mais difícil de ajustar aos dados, devido à sua excentricidade orbital (0,093), a maior entre os planetas visíveis a olho nu e que não são obscurecidos pela proximidade ao Sol, como no caso de Mercúrio (Pires, 2008).

Kepler dedicou anos ao estudo da órbita de Marte, abandonando desde o início as concepções tradicionais de esferas celestiais e de velocidade uniforme. Seu modelo inicial, com órbitas circulares, previa a posição de Marte no céu, mas com discrepâncias de até 8 minutos de arco além das observações de Tycho Brahe, cuja margem de erro era de 1 minuto de arco, (Bennett *et al.*, 2014). Confiando nos dados de Tycho, Kepler abandonou anos de trabalho e seguiu em busca de uma solução mais precisa. Kepler escreveu sobre esse evento (Bennett *et al.*, 2014): “Se eu tivesse acreditado que poderíamos ignorar esses oito minutos [de arco], eu teria ajustado minha hipótese de acordo. Mas, como não era permissível ignorá-los, esses oito minutos apontaram o caminho para uma completa reforma na Astronomia.”

Essa decisão de confiar nas observações, que não estavam de acordo com suas crenças, marcou uma transição importante na História da Astronomia, pois permitiu que Kepler abandonasse os círculos perfeitos e descrevesse o movimento dos planetas como elipses. Epistemologicamente, esse comportamento é um dos pilares da ciência moderna, e a não realização dele define uma atitude pseudocientífico/negacionista. Essa é a definição de um critério de demarcação, ou seja, como definimos o que é ciência e o que não é. Ou então, quais critérios tomamos para definir o que é ciência e o que é pseudociência? Será que, a depender dos critérios de demarcação adotados, devemos caracterizar como pseudocientistas, e talvez ignorar suas contribuições, cientistas que tiveram papéis históricos no desenvolvimento da ciência e da sociedade?

E se, cientistas da atualidade tiverem comportamentos que, daqui a décadas, serão classificados como não-científicos? Os cientistas do futuro deverão nos classificar com pseudocientistas? Acontece que, a ciência deve ser entendida com respeito aos processos históricos e contextuais de cada indivíduo e sociedade. Kepler encontrou sua terceira Lei porque

acreditava profundamente que havia uma ligação entre a música e os planetas. Por isso que sua obra se chama *A Harmonia do Mundo*, era uma tentativa de encontrar os harmônicos que explicavam as órbitas celestes (Pires, 2008). Hoje separamos a ciência da magia, mas por séculos as duas eram uma só.

Kepler ficou muito conhecido pelas suas 3 Leis das órbitas planetárias, que serão enunciadas aqui como são frequentemente enunciadas em livros texto de Física. Porém, elas só foram receber o título de Lei anos depois das publicações. Wilson (2000, p. 225) defende que Leibniz foi a primeira pessoa a se referir às Leis de Kepler como Leis, em 1689 na sua obra *Tentamen de motuum coelestium causis* (Leibniz, 1689), e Voltaire repetiu a ação em 1738 em sua obra *Elements of the Philosophy of Newton*, (Voltaire, 1738).

Na tentativa de determinar o formato da órbita de Marte, encontrou uma equação capaz de prever com precisão a posição de Marte em sua órbita: $R = 1 + \text{ecos}\beta$, representada pela Figura 11. Foi então que enunciou sua primeira Lei:

- a órbita de um planeta é uma elipse com o Sol em um dos focos.

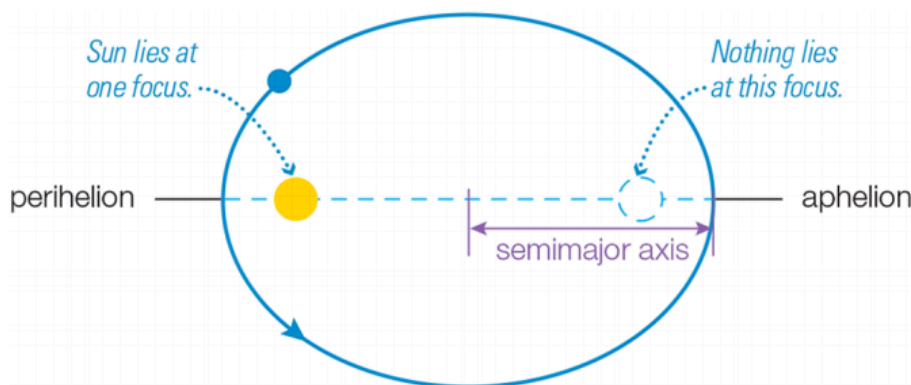


Figura 11: Representação da Primeira Lei de Kepler: um planeta percorre uma órbita elíptica ao redor do Sol. Fonte: (Bennett *et al.*, 2014)

Historicamente, Kepler encontrou sua segunda lei antes da primeira e usou a segunda na dedução da primeira enquanto estudava a órbita da Terra, pois precisava entender melhor seu movimento uma vez que estaria observando a posição de Marte a partir da Terra (Martens, 2017; Pires, 2008). Demonstrou que, assim como os demais planetas, a velocidade da Terra é máxima

quando está mais próxima do Sol (periélio) e mínima quando está mais distante (afélio). E, ao tentar determinar a posição da Terra em função do tempo, Kepler acreditou ter provado que sua velocidade variava inversamente com a distância ao Sol, ou seja, o tempo necessário para percorrer uma parte da órbita era proporcional à distância percorrida. Embora seus cálculos contivessem erros (Martens, 2017) e se apoiassem em duas suposições incorretas (de que a órbita da Terra era circular e sua velocidade variava inversamente com sua distância ao Sol) (Pires, 2008), Kepler concluiu que a área varrida pela linha que liga o planeta ao Sol, representada na Figura 12, mede o tempo gasto pelo planeta para ir de um ponto ao outro, ou seja,

- o segmento de linha que liga um planeta até o Sol varre áreas iguais em tempos iguais.

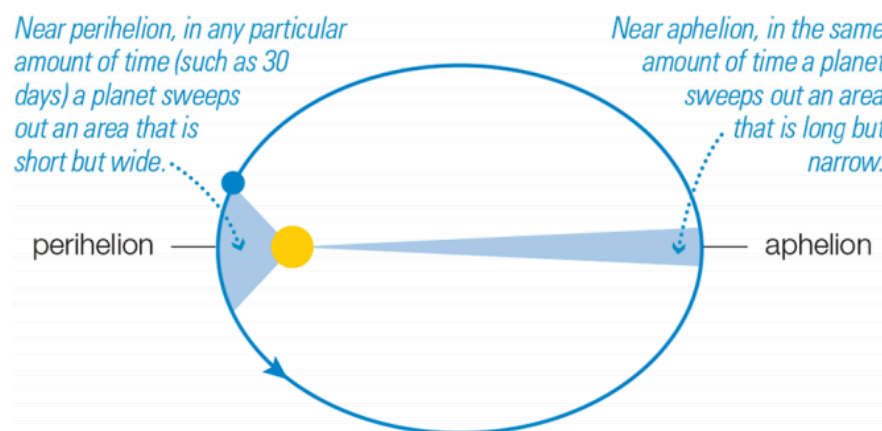


Figura 12: Representação da segunda Lei de Kepler: um planeta varre áreas iguais em tempos iguais. Fonte: (Bennett *et al.*, 2014)

Em 1609, Johannes Kepler publicou sua obra *Astronomia Nova* (Kepler, 1609), onde enunciou suas duas primeiras Leis do movimento planetário e em *Epitome Astronomiae Copernicae* (Kepler, 1618), Kepler as estendeu para todos os planetas do Sistema Solar e para as luas de Júpiter, descobertas por Galileu Galilei (Pires, 2008).

Sua Terceira Lei seria enunciada apenas em 1619, em seu livro *A Harmonia do Mundo* (Kepler, 1619). Como dito antes, Kepler havia voltado a procurar por relações harmônicas entre

as distâncias dos planetas em relação ao Sol, suas primeiras tentativas de relacionar as distâncias planetárias ao Sol com seus respectivos períodos fracassaram. As relações não funcionavam e algumas distâncias estavam erradas. Diferentemente das duas primeiras Leis, a Terceira foi fruto de muitas tentativas pacientes (Koestler, 1961) e pode ser enunciada como:

- o quadrado do período orbital (P) de um planeta é proporcional à sua distância média ao Sol (A) ao cubo, ou seja,

$$\frac{P^2}{A^3} = k,$$

onde k é uma constante.

Apesar de o modelo copernicano não atribuir nenhuma influência física do Sol com o planetas, Kepler acredita que este emanava uma força que guiava os planetas e diminuía com o quadrado da distância. Desde a antiguidade, foi a primeira vez que tentou-se atribuir uma causa física ao movimento dos planetas.

Além disso, o que podemos fazer com a Terceira Lei é igualar aos dados da Terra. Ou seja, com $P = 1$ ano e $A = 1$ UA, obtemos $k = 1$. E a equação pode ser utilizada para determinar diretamente um parâmetro se tivermos o outro, ou seja,

$$P^2 = A^3. \quad (8)$$

6.4.1 Dedução da Lei da Gravitação Universal

Um resultado importante para Física e a Astrofísica, conforme dedução discutida em detalhes por Bradley W. Carroll e Dale A. Ostlie (2014) e Moysés Nussenzveig (2022), é a Lei da Gravitação Universal de Newton, obtida a partir da Terceira Lei de Kepler.

Considere um sistema gravitacional composto por dois objetos: um planeta de massa m e uma estrela de massa M , separados por uma distância R . O planeta percorre uma órbita circular ao redor da estrela, completando uma revolução em um período P , conforme ilustrado na Figura 13.

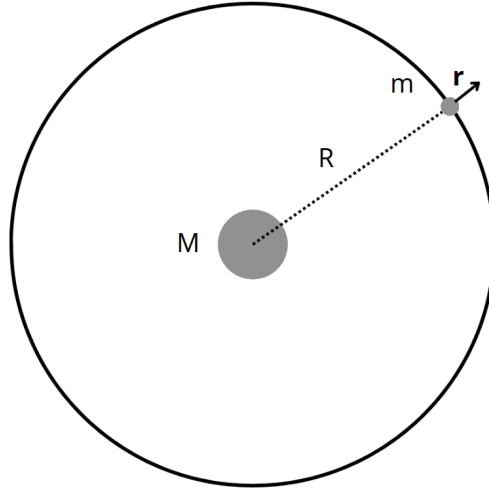


Figura 13: Órbita circular de um planeta com massa m à distância R de sua estrela com massa M .

A Terceira Lei de Kepler nos diz que

$$P^2 = k R^3.$$

A partir da definição de velocidade $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, calculamos a velocidade do planeta em torno da órbita como sendo

$$v = \frac{2\pi R}{P}. \quad (9)$$

Assim, podemos expressar o período como

$$P = \frac{2\pi R}{v} \quad (10)$$

e substituí-lo na 3ª Lei de Kepler:

$$\frac{4\pi^2 R^2}{v^2} = k R^3 \quad (11)$$

Isolando o termo $\frac{v^2}{R}$ e multiplicando ambos os lados por m ,

$$m \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 m}{k r^2} \quad (12)$$

onde, o lado esquerdo da equação corresponde à força centrípeta de um movimento circular.

Escrevendo F na forma vetorial, agregamos o versor \mathbf{r} do lado direito da equação

$$\mathbf{F} = \frac{4\pi^2 m}{k r^2} \mathbf{r} \quad (13)$$

Essa deve ser a força gravitacional que mantém o planeta em órbita ao redor da estrela, sendo que, pela 3ª Lei de Newton, ela sente uma força de mesma intensidade, mas de sentido contrário ao do planeta. Portanto, a equação da força gravitacional assume uma forma simétrica, mas com M no lugar de m, ou seja,

$$\mathbf{F} = - \frac{4\pi^2 M}{k' r^2} \mathbf{r} \quad (14)$$

onde o sinal negativo significa que a força é central e atrativa, voltada para a estrela, Como representado na Figura 14.

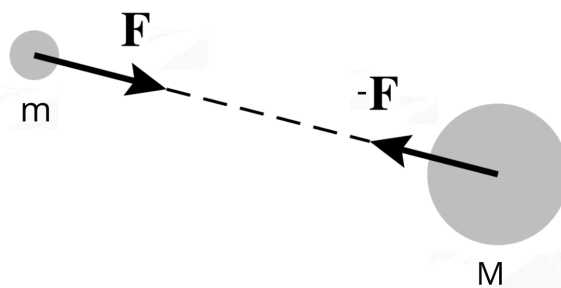


Figura 14: Representação da 3ª Lei de Newton. Fonte: Carroll e Ostlie (2014, p. 40)

Assim, a força gravitacional que age entre o planeta e a estrela pode ser expressa como

$$\mathbf{F} = -G \frac{Mm}{R^2} \mathbf{r}$$

onde G é uma constante de proporcionalidade, também conhecida como *Constante Gravitacional*, atualmente valendo $6.674215 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ (Gunlach; Markowitz, 2000).

A Lei da Gravitação Universal permitiu que explicassem o movimento dos corpos celestes de forma mecânica e desenvolvessem a *Mecânica Celeste* (Marcondes, 2016), pilar no entendimento de exoplanetas e da exploração espacial. Mas, apesar de Newton ter conseguido deduzí-la, não conseguiu encontrar a causa da gravidade. Como disse com suas próprias palavras:

Até hoje não fui capaz de descobrir a causa dessas propriedades da gravidade a partir dos fenômenos, e eu não construo hipóteses; pois tudo aqui que não é

deduzido dos fenômenos deve ser chamado de hipótese; e as hipóteses, sejam elas metafísicas ou físicas, sejam elas dotadas de qualidades ocultas ou mecânicas, não têm lugar na filosofia experimental. Nessa filosofia, as proposições particulares são inferidas dos fenômenos e depois generalizadas por indução. (Pires, 2008, p. 215)

7. Tratamentos dos dados

Nessa etapa do projeto, dedicamos tempo para elaborar os resultados do banco de dados EDO.

Inicialmente, a nossa base de dados continha 314 parâmetros de 5747 objetos. Para nossa análise de dados, desenvolvemos códigos na linguagem *Python*, disponibilizados no Apêndice, 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 contas com nossa amostra. Os parâmetros de interesse selecionados são: nome (NAME, para identificação), período orbital (P), semieixo maior (A), excentricidade (ECC), massa da estrela hospedeira (MSTAR) e suas respectivas margens de erro (δP , δA , δECC , $\delta MSTAR$). Vale ressaltar que as margens de erro são separadas em superior e inferior, mas que serão representadas aqui conjuntamente pelo 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 (Borucki, 2016). Como esses objetos não fazem parte do escopo do presente trabalho, foram descartados. Além disso, há muitos dados faltantes, principalmente as margens de erro da excentricidade, com 4926 dados nulos. Para contornar esse problema, em cada análise selecionamos as colunas de interesse e filtramos os dados de interesse.

A Tabela 2, mostra o número de dados válidos em cada parâmetro, depois da retirada de objetos *KOI* e dos dados faltantes:

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

Tabela 2: Número de dados válidos em cada parâmetro após filtragem de *KOI* e dados nulos.

Para a realização dos três principais gráficos que retratam as Leis de Kepler usando dados do EDO, utilizamos os seguintes parâmetros:

- Nome do exoplaneta (NAME);
- Método de detecção (PLANETDISCMETH);
- Excentricidade (ECC), e suas margens de erro (ECCLOWER e ECCUPPER);
- Semieixo maior (A), e suas margens de erro (ALOWER e AUPPER), em UA;
- Período (PER), e suas margens de erro (PERLOWER e PERUPPER), em anos;
- Massa da estrela hospedeira (MSTAR), e suas margens de erro (MLOWER e MUPPER), em M_{\odot} ;

Cada dado 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. O semieixo maior foi calculado por nós a partir da Terceira Lei de Kepler, de acordo com a equação (8). Já a excentricidade é calculada a partir da Mecânica Orbital e de cálculos computacionais. O fato dela não ser um resultado obtido tão diretamente, diminui o número de exoplanetas que apresentam esse parâmetro calculado, principalmente quando consideramos a margem de erro da excentricidade. Como vimos na Tabela 2, o número de exoplanetas que apresenta ambos a excentricidade e a margem de erro é de 820.

Para a primeira análise, mostrada pela Figura 15, plotamos a excentricidade versus o logaritmo do semieixo maior. 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 preponderante. Na verdade, apenas 13% (108 de 811) dos exoplanetas de nossa amostra têm excentricidade igual a 0 (representados em 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 demoramos 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 Tycho Brahe encarregar Johannes Kepler de determinar a órbita de Marte, e também para que Kepler determinasse de fato suas Leis do Movimento Planetário.

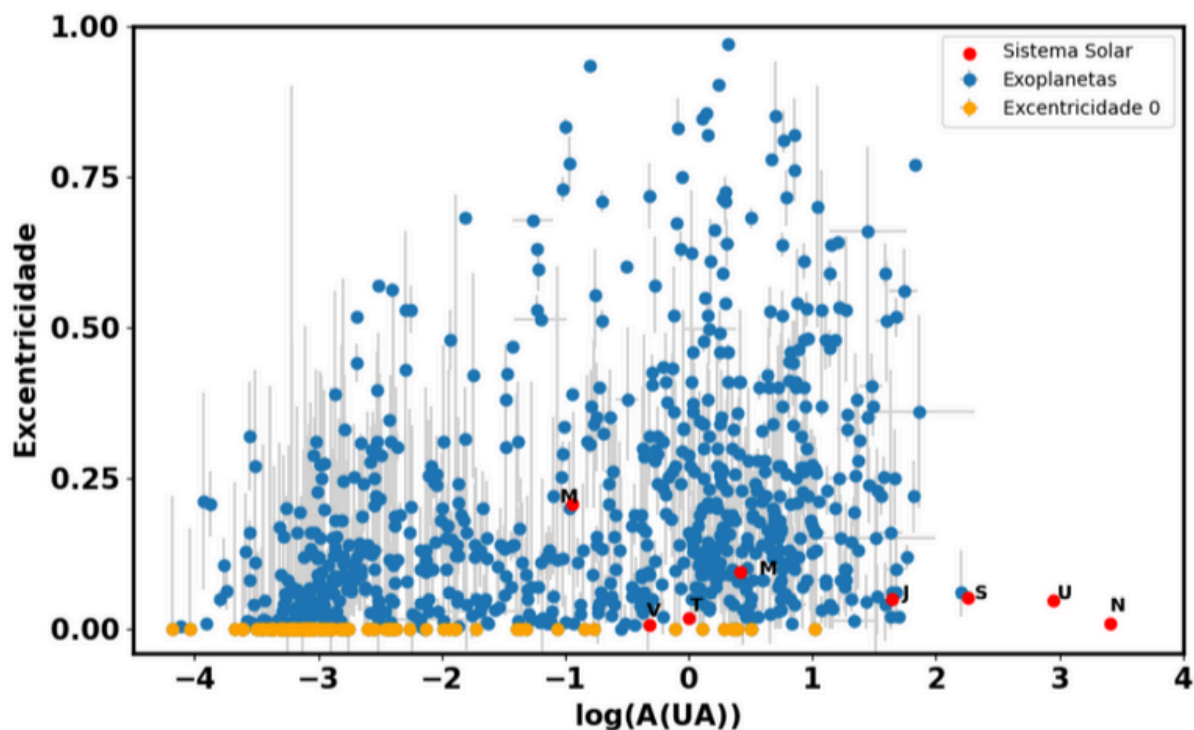


Figura 15: Excentricidade dos exoplanetas em função do logaritmo do semieixo maior da órbita.

A Primeira Lei de Kepler, representada na Figura 15, 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 Thornton e Marion (2004) 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 fechadas³⁸ na interação de dois corpos são para $F \propto r$ e $F \propto r^{-2}$. Como a força não pode aumentar com a distância, a única forma estável e fechada de uma órbita é consequência direta da Força Gravitacional cair com o quadrado da distância.

³⁸ 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

Para a análise a seguir, realizaremos o plot 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 de duas formas: pela Terceira Lei de Kepler ou pela Lei da Gravitação Universal.

Na equação (12), obtivemos o seguinte resultado utilizando a Terceira Lei de Kepler

$$\frac{4\pi^2 R^2}{v^2} = k R^3,$$

se simplificarmos os Rs e isolarmos a velocidade v, obteremos

$$v = \sqrt{\frac{4\pi^2}{k R}} = \frac{2\pi}{\sqrt{k R}}, \quad (15)$$

ou melhor,

$$v = \frac{b}{\sqrt{R}}, \quad (16)$$

onde b é uma constante. Ou seja, a Terceira Lei de Kepler, que é uma lei empírica, nos diz que a velocidade decai com a raiz da distância do exoplaneta.

Também podemos deduzir essa velocidade de outra maneira. Em qualquer ponto da órbita do planeta, a força gravitacional é igual à força centrípeta, ou seja,

$$\mathbf{F}_g = \mathbf{F}_c, \quad (17)$$

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

$$G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \quad (18)$$

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

$$v = \sqrt{G \frac{M}{R}}. \quad (19)$$

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_T é a velocidade da Terra. Por tanto,

$$v_T = \sqrt{G}. \quad (20)$$

Assim, podemos calcular a velocidade da Terra como sendo

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

e a velocidade de qualquer exoplaneta como sendo

$$v = v_T \sqrt{\frac{M}{R}}. \quad (21)$$

Utilizando a Lei da Gravitação Universal, que é uma lei deduzida, encontramos a mesma velocidade. Ou seja, temos uma forma de encontrar a validade da Terceira Lei de Kepler. Na Figura 16, plotamos a velocidade de 2465 exoplanetas, e dos 8 planetas do Sistema Solar, calculada diretamente da equação acima. Ou seja, utilizamos a massa das estrelas hospedeiras e o semieixo maior dos exoplanetas, para realizar o plot. Além disso, plotamos a função $y = \frac{29,88}{\sqrt{A}}$, para comparar o quanto a função se aproxima da velocidade calculada para os exoplanetas. Vale destacar que, utilizar o semieixo maior como parâmetro é válido pois, a média da distância do planeta até a estrela, em cada ponto de sua órbita, é exatamente o semieixo maior.

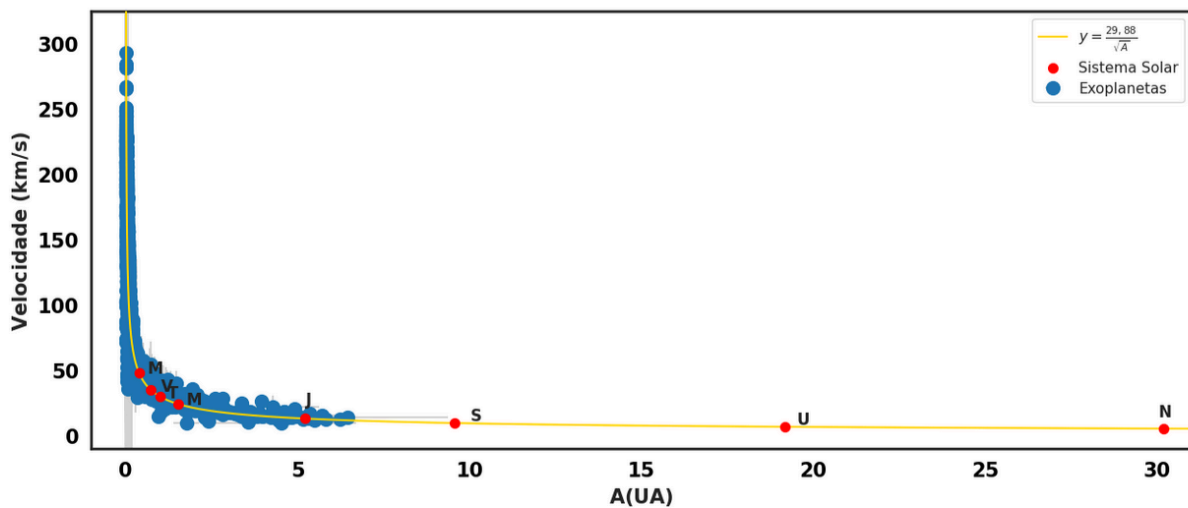


Figura 16: Distribuição das velocidades (em km/s) dos exoplanetas, e planetas do Sistema do Solar, calculadas a partir da segunda lei de Kepler na forma das velocidades. Conta também com

uma função $y = \frac{29,88}{\sqrt{A}}$, onde A é o semieixo maior de cada órbita.

Dependendo do método de detecção utilizado para observar o exoplaneta, obtemos parâmetros diferentes. No caso do telescópio Kepler, por exemplo, obtêm-se o período dos exoplanetas pela repetição do mesmo trânsito observado na estrela. Da terceira Lei de Kepler, nós calculamos o semieixo maior, de acordo com a equação (8). Já a massa da estrela é obtida por métodos indiretos, por exemplo pela curva de luz da estrela, que fornece informações sobre o

brilho, magnitude e variações de luminosidade relacionadas ao tipo espectral da estrela. Portanto, a Figura 16 é uma evidência da Terceira Lei de Kepler.

Vale ressaltar que a Figura 16 é uma consequência direta do princípio de conservação do momento angular, em que para varrer áreas iguais em tempos iguais, os planetas terão que fazer valer o princípio de conservação do momento angular experimentado. Além disso, diferentemente das outras figuras que estão em escala logarítmica, o fato da Figura 17 estar em escala linear deixa bem evidente a diferença em escala do Sistema Solar com os 2600 exoplanetas da amostra, o que deixa as seguintes perguntas: será que, diante de tantos sistemas solares da amostra, o nosso é especial? E se não, quantos exoplanetas estamos deixando de catalogar?

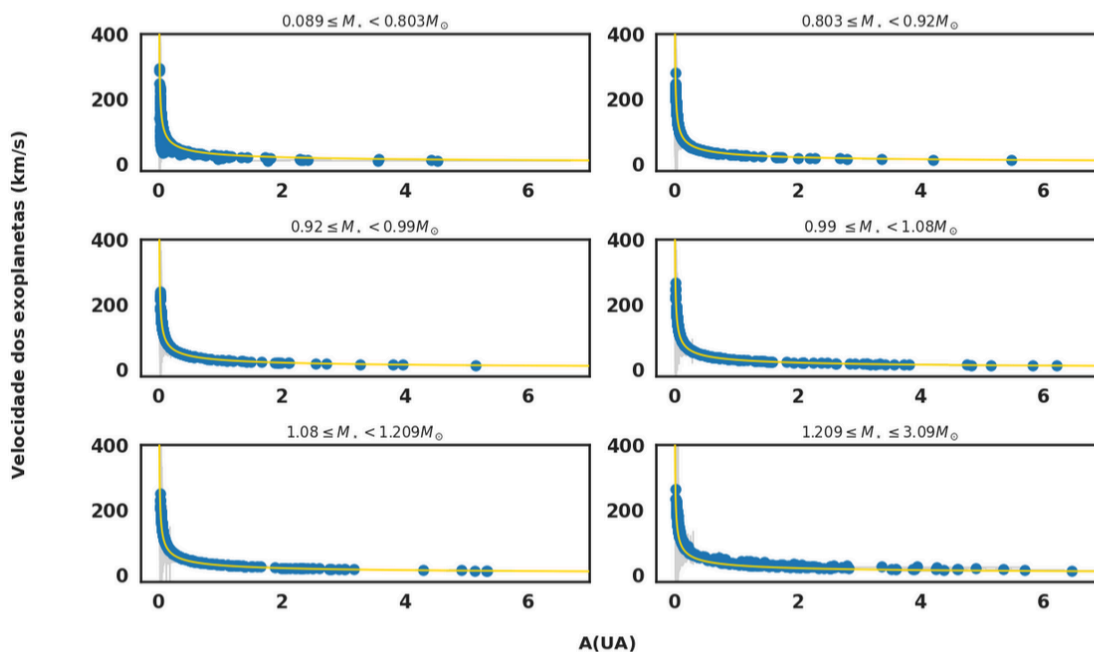


Figura 17: Velocidade dos planetas em função do semieixo maior para diferentes ranges de massa da estrela hospedeira.

Na Figura 17, conseguimos ver mais especificamente como a velocidade dos planetas se comporta para diferentes intervalos de massa da estrela hospedeira. 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 estrelas com massa do tipo estelar. Em todos os intervalos os pontos estão bem próximos da função plotada.

Mas, note que há uma leve distância dos planetas à curva para os intervalos mais distantes de $1 M_{\odot}$, cujas massas das estrelas hospedeiras estão nos seguintes intervalos $0,089 M_{\odot} \leq M_* < 0,803 M_{\odot}$ e $1,209 M_{\odot} \leq M_* < 3,09 M_{\odot}$.

Na Figura 18, realizamos o plot dos períodos e semieixos maiores segundo a Terceira Lei de Kepler cujas estrelas hospedeiras têm massas próximas à do Sol, $0,9 M_{\odot} \leq M_* < 1,1 M_{\odot}$. 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, obtinha o período observando o trânsito de cada planeta e nós calculamos o semieixo maior segundo a Terceira Lei de Kepler. Foi necessário realizar o plot em escalas logarítmicas para comparar os exoplanetas com os planetas do Sistema Solar.

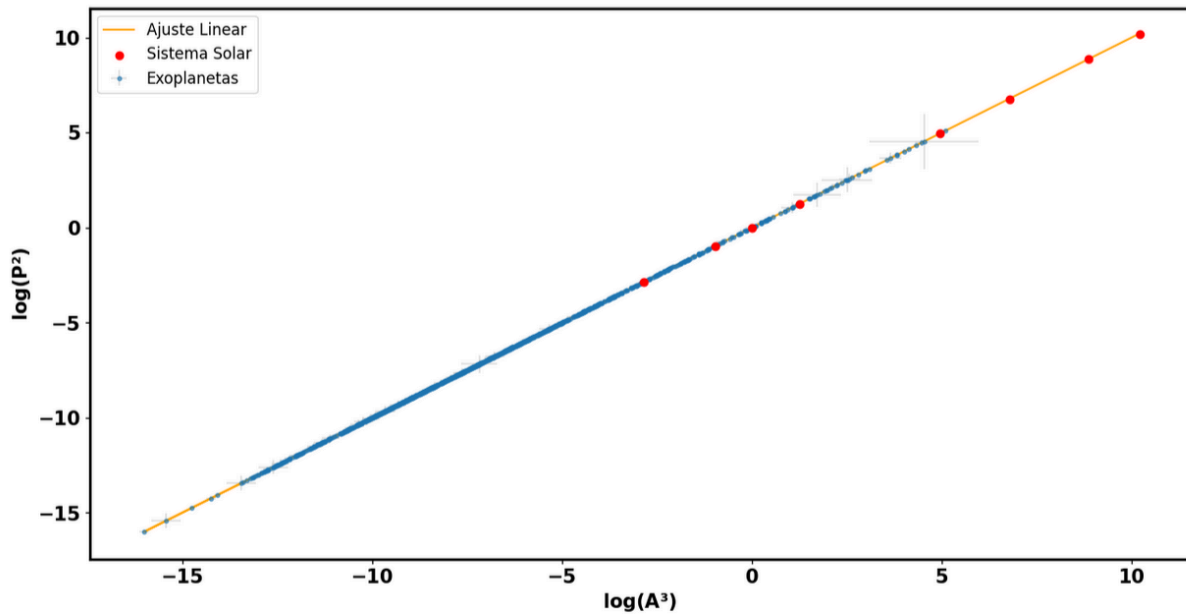


Figura 18: Gráfico de dispersão dos exoplanetas cuja estrela hospedeira tem massa entre $0,9$ e $1,1 M_{\odot}$, mostrando a relação entre P^2 e A^3 , em escala logarítmica. Os pontos em azul representam os exoplanetas com suas respectivas margens de erro propagadas, enquanto a linha laranja é o ajuste linear dos pontos.

A Figura 19 apresenta a distribuição dos 3154 exoplanetas em função do semieixo maior. Vale ressaltar a alta concentração de exoplanetas com A menor que $\log 1$ (onde se situa a Terra)³⁹, 89,8% (2833 de 3154) dos exoplanetas encontram-se a menos de 1 UA de sua estrela hospedeira. Essa concentração é uma consequência do viés de seleção criado majoritariamente pelos métodos de detecção de Trânsito e Velocidade Radial, como discutido anteriormente.

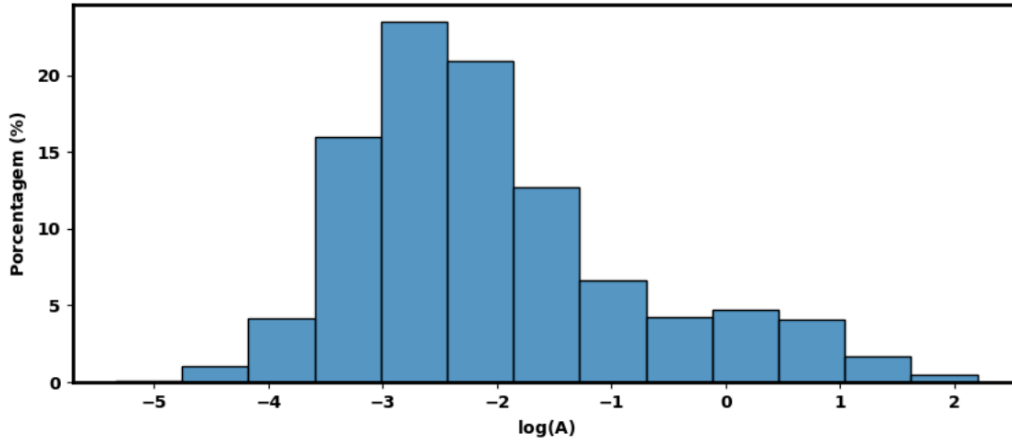


Figura 19: Distribuição de densidade dos exoplanetas em função de $\log(A)$.

Para as análises gráficas da Terceira Lei de Kepler, foi necessário calcular as respectivas propagações de erro.

Para o cálculo da velocidade dos exoplanetas, calculamos a partir da representação em velocidade

$$V = cte \sqrt{\frac{M}{A}}$$

Primeiro definimos uma variável intermediária $Q = \frac{M}{A}$, e, considerando a seguinte equação de propagação de erros não correlacionados de uma função $f(x, y)$

$$\delta f = f \sqrt{\left(\frac{\delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\delta y}{y}\right)^2}$$

calculamos δQ como sendo

³⁹ Lembrando que $\log 1 = 0$.

$$\delta Q = Q \sqrt{\left(\frac{\delta M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A}\right)^2}$$

e em seguida calculamos $V = \sqrt{Q}$, onde

$$\delta V = \frac{\delta Q}{2\sqrt{Q}}.$$

Assim, conseguimos calcular $V \pm \delta V$ necessários.

A seguinte propagação de erro necessária é da Terceira Lei de Kepler. Para uma função $f(x)$,

$$\delta f = \frac{df}{dx} \delta x$$

Calculando as propagações de P^2 e A^3 ,

$$\delta(P^2) = 2P \cdot \delta P$$

$$\delta(A^3) = \delta(P^2)$$

e, para a escala logarítmica, calculamos $\delta f = \frac{df}{dx} \delta x$ para $f(x) = \log x$, e obtemos

$$\delta f = \frac{\delta x}{x \ln 10}$$

ou seja,

$$\delta(P^2) = \frac{\delta P^2}{P^2 \ln 10}$$

$$\delta(A^3) = \frac{\delta A^3}{A^3 \ln 10}$$

7.1 À guisa de reflexão: questões epistemológicas fundamentais

A partir da análise da obra de Thomas Kuhn (2013) e tendo Ostermann (1996) como referência, entrelaçamos, a seguir, as quatro palavras/expressões cruciais que previamente destacamos como categorias importantes de discussão para a compreensão epistemológica kuhniana, a saber: *paradigma*, *ciência normal*, *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, o conceito de *paradigma* é importante quando da análise das implicações sobre a mudança de perspectiva cosmológica ocorrida no século XVII na transição entre o modelo Geocêntrico e o modelo Heliocêntrico, por um lado, e, por outro,

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. Plutão, por questões políticas, passou a ser incorporado como planeta do Sistema Solar em 1930 (Bennett *et al.*, 2014), mas deixou de ser classificado como planeta em 2006⁴⁰. Em 1992, como vimos, o *paradigma* sobre a existência de planetas fora do Sistema Solar se altera completamente.

E, desde então, temos experimentado uma verdadeira *revolução científica* no estudo dos exoplanetas. Sendo que boa parte dessa revolução foi causada pelo Telescópio Espacial Kepler. Reformando completamente nossa visão de universo. Graças a ele, passamos a olhar as estrelas com outro olhar: agora sabemos que quase todas as estrelas apresentam ao menos um planeta orbitando. Nossos horizontes de conhecimento foram ampliados a um ponto que somente foi especulado na história.

Ainda que a Astrofísica tenha trazido consigo um bojo de paradigmas, a forma de pensar as soluções tem seguido a receita da ciência normal pensada por Kuhn, ou seja, os cientistas trabalhando na área ainda não têm sido completamente livres de analisar criticamente os fundamentos teóricos, conceituais, metodológicos, instrumentais e observacionais que têm utilizado na agenda de pesquisa. Para Kuhn (2013), 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. Não há como estabelecer essas comparações. As ideias de cada um deles são incompatíveis, pois são desenvolvidas em contextos distintos.

8. Considerações Finais

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

⁴⁰ Disponível em: https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf. Acesso: 22 Nov 2024

artigos da literatura que tratam de discussões históricas, epistemológicas e observacionais envolvendo as Leis de Kepler. Além disso, exploramos as técnicas e os métodos desenvolvidos até o presente momento na catalogação de parâmetros físicos fundamentais de exoplanetas confirmados, como período, massa e excentricidade, 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, refletindo sobre a incipiente contextualização das Leis em distintos níveis da educação e divulgação da Física e da Astronomia.

Do ponto de vista histórico e epistemológico, as Três Leis de Kepler são cruciais para refletirmos, no presente, sobre o papel da teoria e da observação nos estudos da Astrofísica, que é extremamente observacional. Do ponto de vista epistemológico, há uma sutileza quase sempre negligenciada ao longo da formação discente. 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 de August 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 comportar os dados. Não há, portanto, no âmbito da ciência moderna, como separar teoria e observação. Ao contrário do que vimos na Introdução sobre alguns teóricos das cordas e cosmólogos que trabalham com o multiverso.

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 quase sempre negligenciado. Ao longo da nossa formação em Física/Astronomia/Astrofísica as Leis de Kepler são pouco interpretadas e/ou debatidas. Ao longo do nosso curso estudantes por vezes confundem as Leis de Newton com as Leis de Kepler.

Tecnicamente, as Leis de Kepler são empíricas, ou seja, antecedem um desenvolvimento teórico. No entanto, elas são fundamentais para o trabalho de Newton que, ao expandi-las, fundamenta uma Teoria Mecânica de descrição do Universo que colocar 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.

Observacionalmente, o estudo dos exoplanetas têm revolucionado o campo da Astronomia, dinamizando as perspectivas teóricas e experimentais na área. Exigindo o desenvolvimento de uma multiplicidade de telescópios e instrumentos sensíveis a diferentes faixas do espectro eletromagnético.

Do ponto de vista epistemológico (e metafísico) a detecção de um planeta Terra 2.0 mudará completamente a nossa perspectiva cosmológica, nos colocando em outro lugar de relação no universo observável. Vivemos, em pleno século XXI, uma nova Revolução Copernicana. Obviamente que, do ponto de vista histórico, tampouco o estigma *revolucionário* coube a Copérnico. Ele foi, antes de tudo, um conservador (Pires, 2008), pois não largou completamente os mecanismos teóricos do paradigma anterior. Em que pese os desafios de analisar o passado com os olhos do presente, prática que deve ser evitada, compreendemos que precisamos construir outras formas de abordagem na formação de professores e cientistas quando do tratamentos das TLK. Quase sempre negligenciadas ao longo da nossa formação em Física/Astrofísica, apontamos aqui distintos aspectos históricos, epistemológicos, teóricos e observacionais que o estudo das TLK nos permite expandir para além da simples enunciação de cada uma delas como por vezes acontecem em aulas e livros textos principais do campo.

Referências

A BÍBLIA SAGRADA. Tradução de João Ferreira de Almeida, revista e corrigida. Barueri: Sociedade Bíblica do Brasil, 2009.

ALVES-BRITO, Alan; CORTESI, Arianna. Complexidade em Astronomia e Astrofísica. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 43, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0418>>

ALVES-BRITO, Alan; MACEDO, José Rivair. A história da ciência e a educação científica pelas perspectivas ameríndia e amefricana. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 15, p. 400-417, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.53727/rbhc.v15i2.804>>

ANDERY, Maria Amália; *Para Compreender a Ciência: uma Perspectiva Histórica*. 6ª ed. São Paulo: EDUC, 1996.

BARBER, Bernard. *Resistance by Scientists to Scientific Discovery*, Science, v. 134, p. 596-602, 1961.

BENNETT, Jeffrey; DONAHUE, Megan; SCHNEIDER, Nicholas; VOIT, Mark. *The Cosmic Perspective*. 7ª ed. São Francisco: Pearson Education, 2014.

BRAHE, Tycho. *Astronomiae Instauratae Progymnasmata*. Editado por Johannes Kepler. Praga: 1602.

BRAHE, Tycho. *De Nova Stella*. Copenhagen: 1573.

BORUCKI, William. *KEPLER Mission: development and overview*. **Reports on Progress in Physics**, Moffett Filed, v. 79. n. 3, p. 036901, Fev 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0034-4885/79/3/036901>>

CARROLL, Bradley W.; OSTLIE, Dale A. *An Introduction to Modern Astrophysics*, 2ª ed. London: Person, 2014.

COPÉRNICO, Nicolau. *De revolutionibus orbium coelestium*. Nuremberg: Johannes Petreius, 1543.

DAWSON R.; JOHNSON J. The Origin of Hot Jupiters. **Annual Review of Astronomy & Astrophysics**, Cambridge, v. 56, p. 175-221, sep. 2018. Disponível em : <<https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-051853>>

DOPPLER, Christian. Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels. Praga: 1842.

ELLIS, George; SILK, Joe. Defend the integrity of physics. **Nature**, v. 516, p. 321 - 323. Dec. 2024. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/516321a.pdf>>. Acesso em: 10 Dez. 2024

EUROPEAN SPACE AGENCY. *Gaia mission: third data release*. Disponível em: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia. Acesso em: 20 nov. 2024.

EINSTEIN, Albert. *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*. Annalen der Physik, v. 49, p. 769-822, 1916.

GUNLACH; Markowitz. Measurement of Newton's Constant Using a Torsion Balance with Angular Acceleration Feedback **Physics Review Letters**, v. 85, 2869 – Published 2 October, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.2869>>

HAN, Eunkyū; Wang, Sharon X. ; Wright, Jason T.; Feng, Y. Katherina; Zhao, Ming; Fakhouri, Onsi; Brown, Jacob I.; Hancock, Colin. Exoplanet Orbit Database. II. Updates to Exoplanets.org **Astronomical Society of the Pacific**, v. 126, Issue 943, p. 827, sep 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.7709>>

DE SOUZA CRUZ, Frederico Firmo et al. Mesa-redonda: influência da história da ciência no ensino de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, p. 76-92, 1988.

DOS SANTOS LIMA JUNIOR, José Gidauto; SOARES, Narciso Neves; GOMES, Luiz Moreira; FERREIRA, Fernanda C. L. A História da Ciência como estratégia metodológica no ensino aprendizagem de Física. **Scientia Plena**, [S. l.], v. 13, n. 1, 2017. DOI: 10.14808/sci.plena.2017.012721. Disponível em: <https://scientiaplena.emnuvens.com.br/sp/article/view/3508>. Acesso em: 20 nov. 2024.

HARRISON, Edward. *Cosmology: The Science of the Universe*. 2. ed. Nova York: Cambridge University Press, 2012.

HERSHEY J. L. Astrometric analysis of the field of AC +65 6955 from plates taken with the Sproul 24-inch refractor. **Astronomical Journal**, Swarthmore, v. 78, p. 421-425, jun 1973. Disponível em: <<https://doi:10.1086/111436>>

HOWELL, Steve B. ; Sobeck, Charlie ; Haas, Michael ; Still, Martin ; Barclay, Thomas; Mullally, Fergal; Troeltzsch, John ; Aigrain, Suzanne; Bryson, Stephen T. ; Caldwell, Doug; Chaplin, William J. ; Cochran, William D. ; Huber, Daniel ; Marcy, Geoffrey W. ; Miglio, Andrea ; Najita, Joan R. ; Smith, Marcie ; Twicken, J. D. ; Fortney, Jonathan J. **Astronomical Society of the Pacific**, v. 126, Issue 938, p. 398, apr 2014. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1402.5163>>

HETHERINGTON, Norriss. *Encyclopedia of Cosmology: Historical, Philosophical, and Scientific Foundations of Modern Cosmology*. Londres: Routledge, 1993.

JARRELL, Richard A.«The Life and Scientific Work of the Tübingen Astronomer Michael Maestlin», 1972.

KEPLER, Johannes. *Astronomia nova*. Praga: Typis Andreae Episcopii, 1609.

KEPLER, Johannes. *Epitome astronomiae copernicanae. Lentijs ad Danubium: Excudebat J. Plancus, 1618-1621*.

KEPLER, Johannes. *Harmonices mundi*. Linz: Typis Godofredi Tampachii, 1619.

KOESTLER, Arthur. *Os Sonâmbulos*. Trad. Alberto Denis. São Paulo: Ibrasa, 1961

KRAMER, Michael; LORIMER, Duncan. *Handbook of Pulsar Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

KUHN, Thomas Samuel. *A Estrutura das Revoluções Científicas*. 12ª ed. São Paulo: The University of Chicago, 2013.

LONDERO, Leandro. O modelo atômico de Bohr e as abordagens para seu ensino na escola média. **Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias**, ISSN: 2346-4712. v. 9, n. 1, p.13-37, Ene 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/f17405d5-193b-4119-8fbe-205f602928f0/content>>

LEIBNIZ, Gottfried Wilhelm. *Tentamen de motuum coelestium causis*. Leipzig: Christoph Günther, 1689. Disponível em: <https://wiki.uibk.ac.at/noscemus/Tentamen_de_motuum_coelestium_causis>. Acesso: Dez. 2024

MAROIS, Christian; Macintosh, Bruce; Barman, Travis; Zuckerman, B.; Song, Inseok; Patience, Jennifer; Lafrenière, David; Doyon, René. Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799, **Science**, Volume 322, Issue 5906, pp. 1348- (2008). Disponível em: <<https://doi.org/10.48550/arXiv.0811.2606>>

MARCONDES, Danilo. *Textos Básicos de Filosofia e História das Ciências: A Revolução Científica*. Rio de Janeiro: Zahar, 2016.

MATTAR, João; RAMOS, Daniela. Metodologia de pesquisa em educação: abordagens qualitativas, quantitativas e mistas. São Paulo: Edições 70, 2021. Disponível em: <https://almedina.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/pdf_preview/material-de-apoio.pdf> Acesso em: 20 nov. 2024.

MAYOR Michel; QUELOZ Didier. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. **Nature**, v. 378, Issue 6555, p. 355-359, nov 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/378355a0>>

MARTINS, A. F. P. Natureza da Ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em “temas” e “questões”. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 703–737, 2015. DOI: 10.5007/2175-7941.2015v32n3p703. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2015v32n3p703>. Acesso em: 20 nov. 2024.

MOURA, C. B. de, & Guerra, A.. História Cultural da Ciência: Um Caminho Possível para a Discussão sobre as Práticas Científicas no Ensino de Ciências?. **Revista Brasileira De Pesquisa Em Educação Em Ciências**, v. 16(3), 725–748, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/4497>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

NEWTON, Isaac. *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. London: Royal Society, 1687

NEWTON, Isaac. *Opticks: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. 4. ed. Londres: Samuel Smith, 1704.

NUSSENZVEIG, Moysés. *Curso de Física Básica: Mecânica*. 5ª ed. São Paulo: Blucher, . 2013

NOBEL MEDIA AB. *The Nobel Prize in Physics 2019*. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2019/summary/>. Acesso em: 28 nov. 2024.

NOBEL MEDIA AB. *The Nobel Prize in Physics 1901*. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/summary/>. Acesso em: 7 dez. 2024.

OLIVEIRA, K.; SARAIVA, M.F. *Astronomia e Astrofísica*. São Paulo: Livraria da Física, 2015.

OSTERMANN, Fernanda. A epistemologia de Kuhn. **Caderno Brasileiro De Ensino De Física**, v.13(3), p. 184–196, 1996. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7045>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

PIRES, António Sérgio Teixeira. *Evolução das Ideias da Física*. Lisboa: Gradiva, 2008.

RHONDA MARTENS, *Kepler and Newton, Oxford Handbooks Online*, 2017

S. E. Thompson, D. Fraquelli, J. E. v. Cleve, and D. A. Caldwell, Kepler Archive Manual. Space Telescope Science Institute, 2016.

SILVA, Isadora Santos da; ALVES-BRITO, Alan; MASSONI, Neusa Teresinha. História e conhecimento experiencial de pessoas negras na física e nas ciências: uma revisão da literatura. *Investigações em ensino de ciências*. Porto Alegre. Vol. 29, n. 1 (abr. 2024), p. 272–290, 2024.

SOUZA S.G.; SANTOS N. C.; MAYOR M.; S. UDRY; CASAGRANDE L.; ISRAELIAN G.; PEPE F.; QUELOZ D.; MONTEIRO M. Spectroscopic parameters for 451 stars in the HARPS GTO planet search program, **Astronomy & Astrophysics**, v. 487, p. 373-381, apr 2008 Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/0004-6361:200809698>>

STRUVE, Otto. Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work. **The Observatory**, v. 72, p. 199-200, out 1952. Disponível em: <<https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1952Obs....72..199S>>

VAN DE KAMP, P. Astrometric study of Barnard's star from plates taken with the 24-inch Sproul refractor. **Astronomical Journal**, Vol. 68, p. 515-521, Sep 1963. Disponível em: <<https://doi.org/10.1086/109001>>

VOLTAIRE. *Éléments de la philosophie de Newton*. Amsterdam: Chez Jacques Desbordes, 1738.

WINN, Joshua. *The Little Book of Exoplanets*. Princeton: Princeton University Press, 2023.

WEI, Jason W. A Survey of Exoplanetary Detection Techniques. **Astrophysics - Earth and Planetary Astrophysics**, mai, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.02771>>

WOLSZCZAN A.; Frail D. A. A Planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12. **Nature**, v. 355, Issue 6356, p. 145-147, 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/355145a0>>

WILSON, Curtis. *Astronomy from Kepler to Newton*. London: Routledge, 1989

WRIGHT, J. T. The Exoplanet Orbit Database **Astronomical Society of the Pacific**, v.123, Issue 902, pp. 412, abril 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.48550/arXiv.1012.5676>>

Referências utilizadas na revisão sistemática

A JOHANNES, Carta de Tycho Brahe; EM GRAZ, Kepler. Carta de Tycho Brahe a Johannes Kepler em Graz1.

AMORIM, Ronni Geraldo Gomes; SANTOS, Wytler Cordeiro dos. Determinação da massa e dados orbitais de exoplanetas pelo método Doppler. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 39, 2016.

BARROSO, Renato Rodrigues; OLIVEIRA, Alexandre Lopes de; JESUS, Vitor Luiz de. Simulação da detecção de exoplanetas pelo método do trânsito utilizando o pêndulo cônico e o smartphone. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, p. e20200161, 2020.

BARROS-PEREIRA, Humberto Antonio de. Astronomia islâmica entre Ptolomeu e Copérnico: tradição Maraghah. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, p. 4603, 2012.

BASSALO, José Maria Filardo. A crônica da gravitação. Parte II: da Grécia antiga à idade média. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 7, n. 3, p. 212-224, 1990.

CAETANO, Thiago Costa et al. Construção de uma sequência de ensino e aprendizagem orientada por Design-Based Research sobre o tema exoplanetas. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, n. 36, 2023.

CARDONA, Carlos Alberto. Neopythagoreanism in the work of Johannes Kepler. *Manuscrito*, v. 39, p. 91-120, 2016.

CARDOSO, Emanuel; BARCELLOS, Marcília; GUERRA, Andreia. O episódio copernicano revisitado pela via das práticas científicas e a utilização do Dispositivo de Tusi. *Revista Brasileira de História da Ciência*, v. 14, n. 1, p. 66-78, 2021.

- CORNEJO, Jorge Norberto; SANTILLI, Haydée. La enseñanza de la astronomía en la Argentina del siglo XIX. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, n. 10, p. 55-70, 2010.
- DAMASIO, Felipe. O início da revolução científica: questões acerca de Copérnico e os epiciclos, Kepler e as órbitas elípticas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, p. 3602, 2011.
- DE ANDRADE, Napoleão Laureano. A revolução copernicana: considerações sobre duas questões do ENEM. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 22, n. 2, p. 263-283, 2005.
- DE CARVALHO, Hermano Ribeiro; DO NASCIMENTO, Lucas Albuquerque. Copérnico e a Teoria Heliocêntrica: contextualizando os fatos, apresentando as controvérsias e implicações para o ensino de ciências. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, n. 27, p. 7-34, 2019.
- DE CARVALHO, Hermano Ribeiro; DO NASCIMENTO, Lucas Albuquerque; DA CRUZ SILVA, Boniek Venceslau. Uso de textos históricos para uma abordagem pedagógica sobre a natureza da ciência. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, n. 23, p. 7-37, 2017.
- DE MENEZES, Luana Paula Goulart; BATISTA, Michel Corci; GARDELLI, Daniel. Alguns aspectos da astrologia em Kepler. *Revista Brasileira de História da Ciência*, v. 13, n. 2, p. 227-237, 2020.
- DE SÁ, Clayton Dantas; PAULUCCI, Laura. Desenvolvimento de um sistema de RPG para o ensino de Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, p. e20210005, 2021.
- DIAS, Penha Maria Cardoso. Tradução comentada de um clássico de Copérnico. 2004.
- DINIZ, G. Zuza et al. O escurecimento de limbo via modelagem de trânsitos e inferência bayesiana. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 44, p. e20220170, 2022.
- DUTRA, Carlos Maximiliano; GOULART, Andressa Rossini. Determinando a forma da órbita de Marte no ensino médio. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, n. 18, p. 11-25, 2014.
- FREITAS, Daniel Brito de. Eclipses: revelando a vida secreta das estrelas e da natureza humana. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 41, n. Suppl 1, p. e20190198, 2019.
- GARMS, Marco Antonio; CALDAS, Iberê Luiz. Síntese das leis de Kepler. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 40, 2017.
- HASLER, Johann FW. Contribuciones de Kepler a la continuidad y transformación de la tradición de la música de las esferas. *Per Musi*, n. 32, p. 171-196, 2015.

ITOKAZU, Anastasia Guidi. A natureza matemática: da alma da Terra como potência geometrizar no opúsculo *Da neve hexagonal* de Johannes Kepler. *Trans/Form/Ação*, v. 31, p. 73-86, 2008.

KEPLER, Souza Oliveira. O universo. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 27, nesp, p. 698-722, dez. 2010.

LAMBERTI, Pedro W. Astronáutica Kepleriana. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 13, n. 2, p. 154-164, 1996.

MARQUES, Mayra Meirelles; NASCIMENTO-DIAS, Bruno Leonardo do. A origem dos planetas: Catorze bilhões de anos de evolução cósmica. 2021.

MARTINS, Alessandro et al. Cálculo do valor da unidade astronômica: como o trânsito de Mercúrio nos indica a nossa distância ao Sol. *Revista Latino*, 2020.

MEDEIROS, Alexandre; MONTEIRO, Maria Amélia. A invisibilidade dos pressupostos e das limitações da teoria copernicana nos livros didáticos de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, n. 1, p. 29-52, 2002.

MENEZES, L. P. G.; BATISTA, M. C. Entre considerações físicas e geométricas: um estudo sobre as hipóteses astronômicas na primeira parte da obra *Astronomia Nova* de Johannes Kepler. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 44, p. e20220048, 2022.

MORGADO, Bruno Eduardo; SOARES, Vitorvani. Construção geométrica da órbita de Marte pelo método de Kepler. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 37, p. 1305, 2015.

MORICONI, M. Elementary Solution of Kepler Problem (and a few other problems). *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 44, p. e20210365, 2022.

OLIVEIRA, Bernardo Jefferson de; FREIRE-JUNIOR, Olival. Uma conversa com Gerald Holton. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 23, n. 3, p. 315-328, 2006.

OLIVEIRA, Camila Muniz de. Literatura e astronomia: uma análise descritiva do conto ‘O nosso sistema solar’ da obra *Serões de Dona Benta* de Monteiro Lobato. 2021.

PACHECO, Hualan Patricio. Proposta didática para o ensino de configurações planetárias em sala de aula. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, n. 27, p. 93-108, 2019.

PEREIRA, C. C.; VELÁSQUEZ-TORIBIO, A. M. A Terceira Lei de Kepler em diferente escalas: de luas até galáxias. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 46, p. e20230329, 2024.

PORTO, C. M. Panorama geral da obra astronômica de Kepler. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 37, n. 3, p. 3601-1-3601-13, 2015.

PRAXEDES, Gilmar; PEDUZZI, Luiz OQ. Tycho Brahe e Kepler na escola: uma contribuição à inserção de dois artigos em sala de aula. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, p. 3601.1-3601.10, 2009.

QUILLFELDT, Jorge Alberto. Astrobiologia: água e vida no sistema solar e além. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, p. 685-697, 2010.

RIBEIRO, Jair Lúcio Prados. O Sonho de Johannes Kepler: uma tradução do primeiro texto de hard sci-fi. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 40, 2017.

SANCHES, Paulo; CANIATO, Rodolfo. Revisitando a Lei das Áreas. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, n. 38, p. 7-26, 2024.

SANTOS, Wytler Cordeiro dos; AMORIM, Ronni Geraldo Gomes de. Descobertas de exoplanetas pelo método do trânsito. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 39, p. e2308, 2017.

SILVA, M. F. Quantidades médias no movimento de um corpo em trajetória elíptica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, p. 1-17, 2011.

SOUZA, Alexandre Araujo de; VALIO, Adriana. Estudo da atividade estelar da Kepler-289 a partir da modelagem de trânsitos planetários. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 41, p. e20180323, 2019.

TOSSATO, Claudemir Roque. Apenas um lado do jogo: Kepler condicionado por seu tempo? 2006.

TOSSATO, Claudemir Roque. Discussão cosmológica e renovação metodológica na carta de 9 de dezembro de 1599 de Brahe a Kepler. *Scientiae Studia*, v. 2, p. 537-565, 2004.

TOSSATO, Claudemir Roque. Os fundamentos da óptica geométrica de Johannes Kepler. *Scientiae Studia*, v. 5, p. 471-499, 2007.

TOSSATO, Claudemir Roque. Os primórdios da primeira lei dos movimentos planetários na carta de 14 de dezembro de 1604 de Kepler a Mästlin. *Scientiae Studia*, v. 1, p. 195-206, 2003.

TOSSATO, Claudemir Roque; MARICONDA, Pablo Rubén. O método da astronomia segundo Kepler. *Scientiae Studia*, v. 8, p. 339-366, 2010.

TREVISAN, Rute Helena; LATTARI, Cleiton Joni Benetti. Comunicações clube de astronomia como estímulo para a formação de professores de ciências e Física: uma proposta. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 17, n. 1, p. 101-106, 2000.

VELÁSQUEZ-TORIBIO, Alan Miguel; OLIVEIRA, Marcos. Discutindo o modelo de Ptolomeu e sua equivalência com o modelo de Copérnico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, p. e20190293, 2020.

Apêndice A

A seguir, apresentamos os códigos desenvolvidos usando a linguagem *Python* para gerar os gráficos apresentados no texto.

A.1 Limpeza de Dados

Primeiramente importamos as bibliotecas utilizadas:

```
import pandas as pd
import plotly.express as px
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
```

Em seguida, acessamos os dados baixados e selecionamos as colunas que utilizaremos

```
dados = pd.read_csv('exoplanets.csv', low_memory = False)
df_g = dados[['NAME', 'ECC', 'ECCUPPER', 'ECCLOWER', 'A', 'ALOWER', 'AUPPER',
'MSTAR', 'MSTARUPPER', 'MSTARLOWER', 'PER', 'PERUPPER', 'PERLOWER',
'PLANETDISCMETH']]
```

Para a limpeza de dados, começamos pela retirada dos dados do tipo *KOI*.

```
df_g = df_g.query("not NAME.str.contains('KOI')")
```

Como vimos nas últimas seções, para não perder tantos dados úteis, realizaremos a limpeza dos dados nulos na realização de cada gráfico. Também incorporamos os dados dos planetas do sistema solar, já calculando os valores utilizados na Terceira Lei de Kepler:

```
df_planetas = {"Planeta": ["Mercúrio", "Vênus", "Terra",
"Marte", "Júpiter", "Saturno", "Urano", "Netuno"],
```

```

    "Período (ano)": [88.0/365.25, 224.7/365.25, 365.2/365.25,
687.0/365.25, 4331/365.25, 10747/365.25, 30589/365.25, 59800/365.25],
    "Semieixo maior (UA)": [57.9/149.6, 108.2/149.6, 149.6/149.6,
228.0/149.6, 778.5/149.6, 1432.0/149.6, 2867.0/149.6, 4515.0/149.6],
    "Excentricidade": [0.206, 0.007, 0.017, 0.094, 0.049, 0.052,
0.047, 0.010]}

```

```

planetas = pd.DataFrame(df_planetas)
planetas['PER^2'] = planetas['Período (ano)']**2
planetas['A^3'] = planetas['Semieixo maior (UA)']**3

```

A.2 Gráfico do número de exoplanetas descobertos/confirmados em função do tempo

Para realização do gráfico do número de exoplanetas

```

df_descobertas = dados[['NAME', 'DATE']]
df_desc_sem_koi = df_descobertas.query('not NAME.str.contains("KOI")')
df_desc_limpo = df_desc_sem_koi.replace(0, np.nan).dropna().reset_index(drop =
True)
frequencia = df_desc_limpo.groupby('DATE').count()
frequencia_ac = frequencia.cumsum()

'''Realizando o plot'''
plt.style.use('default')
fig, ax = plt.subplots(figsize = (12, 6))
ax.scatter(x=frequencia_ac.index, y = frequencia_ac.values, color='#1f77b4')
ax.set_title(r'$\mathbf{Número\ de\ exoplanetas\ descobertos\ ao\ longo\ dos\ anos}$',
fontsize= 15)
ax.set_xlabel('', fontsize = 15)
ax.set_xticks([1992, 2000, 2005, 2010, 2013, 2015, 2017])
ax.set_xlim(1991, 2019)
ax.tick_params(axis='both', colors='black', width= 1)
bordas(ax)
fig.show()

```

A.3 Gráfico da Primeira Lei de Kepler

Para a realização do gráfico, selecionamos as seguintes colunas e limpamos o data frame:

```
df_ecc = df_g[['NAME', 'ECC', 'ECCUPPER', 'ECCLOWER', 'A', 'ALOWER', 'AUPPER']]
df_ecc = df_ecc.dropna().reset_index(drop = True)
df_ecc_0 = df_ecc[df_ecc['ECC'] == 0] #planetas com excentricidade = 0
plt.style.use('default')
fig, ax = plt.subplots(figsize = (10, 6))

'''Plotando os dados com margem de erro'''
ax.errorbar(x = np.log(df_ecc['A']), y = df_ecc['ECC'], xerr =
[df_ecc['ALOWER']/df_ecc['A'], df_ecc['AUPPER']/df_ecc['A']], yerr =
[df_ecc['ECCLOWER'], df_ecc['ECCUPPER']], fmt = 'o', color='#1f77b4',
ecolor='#d3d3d3', alpha = 1, label = 'Exoplanetas')

ax.errorbar(x = np.log(df_ecc_0['A']), y = df_ecc_0['ECC'], xerr =
[df_ecc_0['ALOWER']/df_ecc_0['A'], df_ecc_0['AUPPER']/df_ecc_0['A']], yerr =
[df_ecc_0['ECCLOWER'], df_ecc_0['ECCUPPER']], fmt = 'o', color='orange',
ecolor='#d3d3d3', alpha = 1, label = 'Excentricidade 0 ')

ax.set_xlabel(r'$\mathbf{\log(A \text{ (UA)})}$', fontsize = 15)
ax.set_ylabel(r'$\mathbf{\text{Excentricidade}}$', fontsize = 15)
ax.set_yticks([0, 0.25, 0.5, 0.75, 1])
ax.set_xlim(-4.5, 4)
ax.set_ylim(-0.04, 1)
def bordas(ax):
    ax.spines['top'].set_linewidth(2)
    ax.spines['right'].set_linewidth(2)
    ax.spines['left'].set_linewidth(2)
    ax.spines['bottom'].set_linewidth(2)
    ax.xaxis.set_tick_params(labelsize = 15)
```

```

ax.yaxis.set_tick_params(labelsize = 15)

for label in ax.get_xticklabels() + ax.get_yticklabels():
    label.set_fontweight('bold')
bordas(ax)

plt.scatter(x=np.log(planetas['Semieixo maior (UA)']), y=
planetas['Excentricidade'], c = 'red', zorder = 10, label = 'Sistema Solar')
ax.annotate(xy = (np.log(0.35), 0.21), text = r'$\mathbf{M}$', zorder = 10)
ax.annotate(xy = (np.log(0.7), 0.02), text = r'$\mathbf{V}$', zorder = 10)
ax.annotate(xy = (np.log(1), 0.03), text = r'$\mathbf{T}$', zorder = 10)
ax.annotate(xy = (np.log(1.75), 0.09), text = r'$\mathbf{M}$', zorder = 10)
ax.annotate(xy = (np.log(5.6), .05), text = r'$\mathbf{J}$', zorder = 10)
ax.annotate(xy = (np.log(10), .05), text = r'$\mathbf{S}$', zorder = 10)
ax.annotate(xy = (np.log(19.5), .05), text = r'$\mathbf{U}$', zorder = 10)
ax.annotate(xy = (np.log(30), .03), text = r'$\mathbf{N}$', zorder = 10)
ax.legend()
fig.show()

```

Perceba que criamos a função `bordas(ax)` para ajustar as bordas dos gráficos e para simplificar os códigos.

A.4 Gráfico da Terceira Lei de Kepler

Iniciamos calculando a velocidade orbital, de cada planeta do sistema solar, com a massa do Sol de 1 massa solar, de acordo com a equação (21).

```

planetas['MSUN'] = 1
planetas['VELO']=np.sqrt(planetas['MSUN']/planetas['Semieixo maior (UA)'])
*29.78

```

Em seguida, limpamos o dataframe principal e calculamos a velocidade para cada exoplaneta

```

df = df_g[['NAME', 'A', 'AUPPER', 'ALOWER', 'MSTAR', 'MSTARLOWER',
'MSTARUPPER']]
df_velo_limpo = df.replace(0, np.nan).dropna().reset_index(drop = True)
df_velo_limpo['VELO'] = df_velo_limpo['MSTAR']/df_velo_limpo['A']
df_velo_limpo['VELO'] = df_velo_limpo['VELO']**.5
df_velo_limpo['Q'] = df_velo_limpo['MSTAR']/df_velo_limpo['A']
df_velo_limpo['QUPPER'] =
df_velo_limpo['Q']*np.sqrt((df_velo_limpo['MSTARUPPER']/df_velo_limpo['MSTAR']
)**2 +\

(df_velo_limpo['AUPPER']/df_velo_limpo['A'])**2)
df_velo_limpo['QLOWER'] =
df_velo_limpo['Q']*np.sqrt((df_velo_limpo['MSTARLOWER']/df_velo_limpo['MSTAR']
)**2 + (df_velo_limpo['ALOWER']/df_velo_limpo['A'])**2)
df_velo_limpo['VELO'] = np.sqrt(df_velo_limpo['Q'])
df_velo_limpo['VELOUPPER'] =
np.sqrt(df_velo_limpo['QUPPER'])/2*np.sqrt(df_velo_limpo['Q'])
df_velo_limpo['VELOLOWER'] =
np.sqrt(df_velo_limpo['QLOWER'])/2*np.sqrt(df_velo_limpo['Q'])
df_velo_limpo['VELO'] = df_velo_limpo['VELO']*29.88
df_velo_limpo['VELOUPPER'] = df_velo_limpo['VELOUPPER']*29.88
df_velo_limpo['VELOLOWER'] = df_velo_limpo['VELOLOWER']*29.88
df_velo_limpo.drop(columns = ['Q', 'QUPPER', 'QLOWER'], inplace = True)
sns.set_theme(style = 'white')
fig, ax = plt.subplots(figsize = (15, 6))

ax.errorbar(x = df_velo_limpo['A'], y = df_velo_limpo['VELO'],
            xerr = [df_velo_limpo['ALOWER'], df_velo_limpo['AUPPER']],
            yerr = [df_velo_limpo['VELOUPPER'], df_velo_limpo['VELOLOWER']],
            fmt = 'o', color='#1f77b4', ecolor='#d3d3d3',
            alpha = 1, label = 'Exoplanetas', markersize = 10)

ax.set_xlabel(r'$\mathbf{A (UA)}$', fontsize = 15)

```



```

ax.set_ylabel(r'$\mathbf{Velocidade\ (km/s)}$', fontsize = 15)
ax.set_ylim(-10, 324.5)
ax.set_xlim(-1, 31)

ax.tick_params(axis='both', colors='black', width= 1)
bordas(ax)
x = []
z = []
for i in np.arange(0.001, 100, 0.0001):
    x.append(i)
    z.append((1/i**.5)*29.88)
ax.plot(x, z, alpha = 1, label = r'$y = \frac{29,88}{\sqrt{A}}$', c = 'gold',
zorder = 10)      # gera o plot

ax.annotate(xy = (0.6, 1.6*29.88), text = r'$\mathbf{M}$')
ax.annotate(xy = (1, 1.15*29.88), text = r'$\mathbf{V}$')
ax.annotate(xy = (1.2, .97*29.88), text = r'$\mathbf{T}$')
ax.annotate(xy = (1.75, 0.8*29.88), text = r'$\mathbf{M}$')
ax.annotate(xy = (5.2, .8*29.88), text = r'$\mathbf{J}$')
ax.annotate(xy = (10, .4*29.88), text = r'$\mathbf{S}$')
ax.annotate(xy = (19.5, .3*29.88), text = r'$\mathbf{U}$')
ax.annotate(xy = (30, .5*29.88), text = r'$\mathbf{N}$')
ax.scatter(x = planetas['Semieixo maior (UA)'], y = planetas['VELO'], color =
'red', zorder = 10, label = 'Sistema Solar', s = 50)

plt.legend()
plt.show()

```

A.5 Separação por massas

```
df_massas = df_velo_limpo.sort_values(by = 'MSTAR').reset_index(drop = True)
```

```

classe_a = df_massas.iloc[:390]
classe_b = df_massas.iloc[391:805]
classe_c = df_massas.iloc[805:1170]
classe_d = df_massas.iloc[1170:1572]
classe_e = df_massas.iloc[1572:1927]
classe_f = df_massas.iloc[1927:]
sns.set_theme(style = 'white')
fig, ax = plt.subplots(nrows = 3, ncols = 2, figsize = (14, 8))
fig.subplots_adjust(hspace = 0.5, wspace = 0.15)

def grafico(axx, axy):
    x = []
    y = []
    for i in np.arange(0.002, 12, 0.0001):
        x.append(i)
        y.append((1/i**.5)*29.88)
    ax[axx, axy].plot(x, y, c = 'gold', zorder = 10)      # gera o plot
    ax[axx, axy].set_ylim(-20, 400)
    ax[axx, axy].set_xlim(-.3, 7)
    ax[axx, axy].set_xticks([0, 2, 4, 6])
    bordas(ax[axx, axy])

ax[0, 0].errorbar(x = classe_a['A'], y = classe_a['VELO'],
                  xerr = [classe_a['ALOWER'], classe_a['AUPPER']],
                  yerr = [classe_a['VELOUPPER'], classe_a['VELOLOWER']], fmt = 'o',
                  color='#1f77b4', ecolor='#d3d3d3',
                  markersize = 8)
grafico(0, 0)
ax[0, 0].set_title(r'$0.089 \leq M_{\star} < 0.803 M_{\odot}$')

ax[0,1].errorbar(x = classe_b['A'], y = classe_b['VELO'],
                  xerr = [classe_b['ALOWER'], classe_b['AUPPER']],

```

```

        yerr = [classe_b['VELOUPPER'], classe_b['VELOLOWER']], fmt = 'o',
color='#1f77b4', ecolore='#d3d3d3',
        markersize = 8)
grafico(0, 1)
ax[0, 1].set_title(r'$0.803 \leq M_{\star} < 0.92 M_{\odot}$')

ax[1,0].errorbar(x = classe_c['A'], y = classe_c['VELO'],
        xerr = [classe_c['ALOWER'], classe_c['AUPPER']],
        yerr = [classe_c['VELOUPPER'], classe_c['VELOLOWER']], fmt = 'o',
color='#1f77b4', ecolore='#d3d3d3',
        markersize = 8)
grafico(1, 0)
ax[1, 0].set_title(r'$0.92 \leq M_{\star} < 0.99 M_{\odot}$')

ax[1,1].errorbar(x = classe_d['A'], y = classe_d['VELO'],
        xerr = [classe_d['ALOWER'], classe_d['AUPPER']],
        yerr = [classe_d['VELOUPPER'], classe_d['VELOLOWER']], fmt = 'o',
color='#1f77b4', ecolore='#d3d3d3',
        markersize = 8)
grafico(1, 1)
ax[1, 1].set_title(r'$0.99 \leq M_{\star} < 1.08 M_{\odot}$')

ax[2,0].errorbar(x = classe_e['A'], y = classe_e['VELO'],
        xerr = [classe_e['ALOWER'], classe_e['AUPPER']],
        yerr = [classe_e['VELOUPPER'], classe_e['VELOLOWER']], fmt = 'o',
color='#1f77b4', ecolore='#d3d3d3',
        markersize = 8)
grafico(2, 0)
ax[2, 0].set_title(r'$1.08 \leq M_{\star} < 1.209 M_{\odot}$')

ax[2,1].errorbar(x = classe_f['A'], y = classe_f['VELO'],
        xerr = [classe_f['ALOWER'], classe_f['AUPPER']],

```

```

        yerr = [classe_f['VELOUPPER'], classe_f['VELOLOWER']], fmt = 'o',
color='#1f77b4', ecolord='#d3d3d3',
        markersize = 8)
grafico(2, 1)
ax[2, 1].set_title(r'$1.209 \leq M_{\star} \leq 3.09 M_{\odot}$')

fig.supylabel(r'$\mathbf{Velocidade\ dos\ exoplanetas\ (km/s)}$')
fig.supxlabel(r'$\mathbf{A\ (UA)}$')
plt.show()

```

A.6 Plot da Terceira Lei de Kepler

```

df_m_solares = pd.concat([classe_a, classe_b, classe_c])
df_m_solares['A^3'] = df_m_solares['PER^2']
df_m_solares['deltaAUPPER^3'] = df_m_solares['deltaPERUPPER^2']
df_m_solares['deltaALOWER^3'] = df_m_solares['deltaPERLOWER^2']

'''definindo o estilo da imagem e criando a figura'''
plt.style.use('default')
fig = plt.figure(figsize = (12, 6))
ax = fig.add_axes([0, 0, 1, 1]) # Adicionando os eixoss

'''Realizando o ajuste dos pontos'''
inclinacao, intercept =
np.polyfit(np.log(pd.concat([df_m_solares['A^3'], planetas['A^3']])),
            np.log(pd.concat([df_m_solares['PER^2'],
                                planetas['PER^2']])), 1)

'''Plotando o gráfico com as margens de erro e a reta ajustada'''
ax.errorbar(x = np.log(df_m_solares['A^3']), y =
np.log(df_m_solares['PER^2']),
            xerr = [df_m_solares['deltaALOWER^3']/df_m_solares['A^3'],
df_m_solares['deltaAUPPER^3']/df_m_solares['A^3']],

```

```

        yerr = [df_m_solares['deltaPERLOWER^2']/df_m_solares['PER^2'],
df_m_solares['deltaPERUPPER^2']/df_m_solares['PER^2']],
        fmt = '.', color='#1f77b4', ecolord='#d3d3d3', alpha = 0.6, label =
'Exoplanetas', zorder = 0)

ax.plot(np.log(pd.concat([df_m_solares['A^3'],planetas['A^3']])), inclinacao *
np.log(pd.concat([df_m_solares['A^3'],planetas['A^3']]))) + intercept, color =
'orange',
        label = 'Ajuste Linear', zorder = 0) # plot da reta
ax.scatter(np.log(planetas['A^3']), np.log(planetas['PER^2']), color = 'red',
marker = 'o', label = 'Sistema Solar')

'''Editando o gráfico principal'''
ax.set_xlabel(r'$\mathbf{\log(A^3)}$', fontsize = 15)
ax.set_ylabel(r'$\mathbf{\log(P^2)}$', fontsize = 15)
ax.tick_params(axis='both', colors='black', width= 1)
bordas(ax)

'''Calculando R²'''
y = np.log(df_m_solares['PER^2'])
coef = np.polyfit(np.log(df_m_solares['A^3']), np.log(df_m_solares['PER^2']),
1)
p = np.poly1d(coef)
y_pred = p(np.log(df_m_solares['A^3']))
ss_res = np.sum((y - y_pred) ** 2) # Soma dos quadrados dos resíduos
ss_tot = np.sum((y - np.mean(y)) ** 2) # Soma dos quadrados totais
r_squared = 1 - (ss_res / ss_tot)

'''Realizando o Plot'''
ax.legend(loc = 'upper left', fontsize = 12)
fig.show()

```