



Hualan
Patrício
Pacheco

A tranquilidade refletida no céu

vivendo
e entendendo
astronomia



INSTITUTO FEDERAL
Rondônia



Hualan
Patrício
Pacheco

A tranquilidade refletida no céu

vivendo
e entendendo
astronomia



INSTITUTO FEDERAL
Rondônia



2 0 2 5
São Paulo

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

P116m

Pacheco, Hualan Patrício -

A tranquilidade refletida no céu: vivendo e entendendo astronomia / Hualan Patrício Pacheco. – São Paulo: Pimenta Cultural, 2025.

Livro em PDF

ISBN 978-85-7221-510-7

DOI 10.31560/pimentacultural/978-85-7221-510-7

1. Ensino de Astronomia. 2. Astronomia da Antiguidade. 3. Sistema Solar. 4. Planetas anões. 5. Telescópios. I. Pacheco, Hualan Patrício. II. Título.

CDD 520.07

Índice para catálogo sistemático:

I. Astronomia

Simone Sales • Bibliotecária • CRB: ES-000814/0

Copyright © Pimenta Cultural, alguns direitos reservados.

Copyright do texto © 2025 o autor.

Copyright da edição © 2025 Pimenta Cultural.

Esta obra é licenciada por uma Licença Creative Commons:

Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional - (CC BY-NC-ND 4.0).

Os termos desta licença estão disponíveis em:

<<https://creativecommons.org/licenses/>>.

Direitos para esta edição cedidos à Pimenta Cultural.

O conteúdo publicado não representa a posição oficial da Pimenta Cultural.

Direção editorial	Patricia Biegging Raul Inácio Busarello
Editora executiva	Patricia Biegging
Gerente editorial	Landressa Rita Schiefelbein
Assistente editorial	Júlia Marra Torres
Estagiária editorial	Ana Flávia Pivisan Kobata
Diretor de criação	Raul Inácio Busarello
Assistente de arte	Naiara Von Groll
Editoração eletrônica	Andressa Karina Voltolini
Estagiária em editoração	Stela Tiemi Hashimoto Kanada
Imagens da capa	sebdeck, Eby_Studio21, ninjason1 - Freepik.com
Tipografias	Acumin, Coolvetica Crammed, Rockwell Nova
Revisão	Nathália Sôster
Autor	Hualan Patrício Pacheco

CONSELHO EDITORIAL CIENTÍFICO

Doutores e Doutoradas

Adilson Cristiano Habowski <i>Universidade La Salle, Brasil</i>	Bernadette Beber <i>Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil</i>
Adriana Flávia Neu <i>Universidade Federal de Santa Maria, Brasil</i>	Bruna Carolina de Lima Siqueira dos Santos <i>Universidade do Vale do Itajaí, Brasil</i>
Adriana Regina Vettorazzi Schmitt <i>Instituto Federal de Santa Catarina, Brasil</i>	Bruno Rafael Silva Nogueira Barbosa <i>Universidade Federal da Paraíba, Brasil</i>
Aguimario Pimentel Silva <i>Instituto Federal de Alagoas, Brasil</i>	Caio Cesar Portella Santos <i>Instituto Municipal de Ensino Superior de São Manuel, Brasil</i>
Alaim Passos Bispo <i>Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil</i>	Carla Wanessa do Amaral Caffagni <i>Universidade de São Paulo, Brasil</i>
Alaim Souza Neto <i>Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil</i>	Carlos Adriano Martins <i>Universidade Cruzeiro do Sul, Brasil</i>
Alessandra Knoll <i>Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil</i>	Carlos Jordan Lapa Alves <i>Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Brasil</i>
Alessandra Regina Müller Germani <i>Universidade Federal de Santa Maria, Brasil</i>	Caroline Chioquetta Lorenset <i>Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil</i>
Aline Corso <i>Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil</i>	Cassia Cordeiro Furtado <i>Universidade Federal do Maranhão, Brasil</i>
Aline Wendpap Nunes de Siqueira <i>Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil</i>	Cássio Michel dos Santos Camargo <i>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil</i>
Ana Rosangela Colares Lavand <i>Universidade Estadual do Norte do Paraná, Brasil</i>	Cecilia Machado Henriques <i>Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil</i>
André Gobbo <i>Universidade Federal da Paraíba, Brasil</i>	Christiano Martino Otero Avila <i>Universidade Federal de Pelotas, Brasil</i>
André Tanus Cesário de Souza <i>Faculdade Anhanguera, Brasil</i>	Cláudia Samuel Kessler <i>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil</i>
Andressa Antunes <i>Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil</i>	Cristiana Barcelos da Silva <i>Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil</i>
Andressa Wiebusch <i>Universidade Federal de Santa Maria, Brasil</i>	Cristiane Silva Fontes <i>Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil</i>
Andreza Regina Lopes da Silva <i>Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil</i>	Daniela Susana Segre Guertzenstein <i>Universidade de São Paulo, Brasil</i>
Angela Maria Farah <i>Universidade de São Paulo, Brasil</i>	Daniele Cristine Rodrigues <i>Universidade de São Paulo, Brasil</i>
Anísio Batista Pereira <i>Universidade do Estado do Amapá, Brasil</i>	Dayse Centurion da Silva <i>Universidade Anhanguera, Brasil</i>
Antonio Edson Alves da Silva <i>Universidade Estadual do Ceará, Brasil</i>	Dayse Sampaio Lopes Borges <i>Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Brasil</i>
Antonio Henrique Coutelo de Moraes <i>Universidade Federal de Rondonópolis, Brasil</i>	Deilson do Carmo Trindade <i>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Brasil</i>
Arthur Vianna Ferreira <i>Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil</i>	Diego Pizarro <i>Instituto Federal de Brasília, Brasil</i>
Ary Albuquerque Cavalcanti Junior <i>Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil</i>	Dorama de Miranda Carvalho <i>Escola Superior de Propaganda e Marketing, Brasil</i>
Asterlindo Bandeira de Oliveira Júnior <i>Universidade Federal da Bahia, Brasil</i>	Edilson de Araújo dos Santos <i>Universidade de São Paulo, Brasil</i>
Bárbara Amaral da Silva <i>Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil</i>	Edson da Silva <i>Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil</i>

Elena Maria Mallmann

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Eleonora das Neves Simões

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Eliane Silva Souza

Universidade do Estado da Bahia, Brasil

Elvira Rodrigues de Santana

Universidade Federal da Bahia, Brasil

Estevão Schultz Campos

Centro Universitário Adventista de São Paulo, Brasil

Éverly Pegoraro

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

Fábio Santos de Andrade

Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

Fabrícia Lopes Pinheiro

Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Fauston Negreiros

Universidade de Brasília, Brasil

Felipe Henrique Monteiro Oliveira

Universidade Federal da Bahia, Brasil

Fernando Vieira da Cruz

Universidade Estadual de Campinas, Brasil

Flávia Fernanda Santos Silva

Universidade Federal do Amazonas, Brasil

Gabriela Moysés Pereira

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

Gabriella Eldereti Machado

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Germano Ehlert Pollnow

Universidade Federal de Pelotas, Brasil

Geuciane Felipe Guerim Fernandes

Universidade Federal do Pará, Brasil

Geymeesson Brito da Silva

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

Giovanna Ofretorio de Oliveira Martin Franchi

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Handherson Leylton Costa Damasceno

Universidade Federal da Bahia, Brasil

Hebert Elias Lobo Sosa

Universidad de Los Andes, Venezuela

Helciclever Barros da Silva Sales

Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira, Brasil

Helena Azevedo Paulo de Almeida

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

Hendy Barbosa Santos

Faculdade de Artes do Paraná, Brasil

Humberto Costa

Universidade Federal do Paraná, Brasil

Igor Alexandre Barcelos Graciano Borges

Universidade de Brasília, Brasil

Inara Antunes Vieira Willerding

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Jaziel Vasconcelos Dorneles

Universidade de Coimbra, Portugal

Jean Carlos Gonçalves

Universidade Federal do Paraná, Brasil

Joao Adalberto Campato Junior

Universidade Brasil, Brasil

Jocimara Rodrigues de Sousa

Universidade de São Paulo, Brasil

Joelson Alves Onofre

Universidade Estadual de Santa Cruz, Brasil

Jónata Ferreira de Moura

Universidade São Francisco, Brasil

Jonathan Machado Domingues

Universidade Federal de São Paulo, Brasil

Jorge Eschriqui Vieira Pinto

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil

Jorge Luís de Oliveira Pinto Filho

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

Juliana de Oliveira Vicentini

Universidade de São Paulo, Brasil

Juliano Milton Kruger

Instituto Federal do Amazonas, Brasil

Juliano Pizzano Ayoub

Universidade Estadual de Ponta Grossa, Brasil

Julierme Sebastião Moraes Souza

Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

Junior César Ferreira de Castro

Universidade de Brasília, Brasil

Katia Bruginski Mulik

Universidade de São Paulo, Brasil

Laionel Vieira da Silva

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

Lauro Sérgio Machado Pereira

Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, Brasil

Leonardo Freire Marino

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Leonardo Pinheiro Mozdzenski

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

Letícia Cristina Alcântara Rodrigues

Faculdade de Artes do Paraná, Brasil

Lucila Romano Tragtenberg

Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, Brasil

Lucimara Rett

Universidade Metodista de São Paulo, Brasil

Luiz Eduardo Neves dos Santos

Universidade Federal do Maranhão, Brasil

Maikel Pons Giralt

Universidade de Santa Cruz do Sul, Brasil

Manoel Augusto Polastrelí Barbosa

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Marcelo Nicomedes dos Reis Silva Filho

Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil

Márcia Alves da Silva

Universidade Federal de Pelotas, Brasil

Marcio Bernardino Sirino

Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Marcos Pereira dos Santos

Universidad Internacional Iberoamericana del Mexico, México

Marcos Uzel Pereira da Silva

Universidade Federal da Bahia, Brasil

Marcus Fernando da Silva Praxedes

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil

Maria Aparecida da Silva Santandel

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil

Maria Cristina Giorgi

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Brasil

Maria Edith Maroca de Avelar

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

Marina Bezerra da Silva

Instituto Federal do Piauí, Brasil

Marines Rute de Oliveira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil

Maurício José de Souza Neto

Universidade Federal da Bahia, Brasil

Michele Marcelo Silva Bortolai

Universidade de São Paulo, Brasil

Mônica Tavares Orsini

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

Nara Oliveira Salles

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Neide Araujo Castilho Teno

Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Brasil

Neli Maria Mengalli

Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, Brasil

Patricia Biegging

Universidade de São Paulo, Brasil

Patricia Flavia Mota

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Patrícia Helena dos Santos Carneiro

Universidade Federal de Rondônia, Brasil

Rainei Rodrigues Jadejiski

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Raul Inácio Busarello

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Raymundo Carlos Machado Ferreira Filho

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Ricardo Luiz de Bittencourt

Universidade do Extremo Sul Catarinense, Brasil

Roberta Rodrigues Ponciano

Universidade Federal de Ubertândia, Brasil

Robson Teles Gomes

Universidade Católica de Pernambuco, Brasil

Rodiney Marcelo Braga dos Santos

Universidade Federal de Roraima, Brasil

Rodrigo Amancio de Assis

Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

Rodrigo Sarruge Molina

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Rogério Rauber

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil

Rosane de Fatima Antunes Obregon

Universidade Federal do Maranhão, Brasil

Samuel André Pompeo

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil

Sebastião Silva Soares

Universidade Federal do Tocantins, Brasil

Silmar José Spinardi Franchi

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Simone Alves de Carvalho

Universidade de São Paulo, Brasil

Simoni Urnau Bonfiglio

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

Stela Maris Vaucher Farias

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Tadeu João Ribeiro Baptista

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil

Taíza da Silva Gama

Universidade de São Paulo, Brasil

Tania Micheline Miorando

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Tarcísio Vanzin

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Tascieli Feltrin

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Tatiana da Costa Jansen

Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial, Brasil

Tayson Ribeiro Teles

Universidade Federal do Acre, Brasil

Thiago Barbosa Soares

Universidade Federal do Tocantins, Brasil

Thiago Camargo Iwamoto

Universidade Estadual de Goiás, Brasil

Thiago Medeiros Barros

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

Tiago Mendes de Oliveira

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

Vanessa de Sales Marruche

Universidade Federal do Amazonas, Brasil

Vanessa Elisabete Raue Rodrigues

Universidade Estadual do Centro Oeste, Brasil

Vania Ribas Ulbricht

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Vinicius da Silva Freitas

Centro Universitário Vale do Cricaré, Brasil

Wellington Furtado Ramos
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil

Wellton da Silva de Fatima
Instituto Federal de Alagoas, Brasil

Wenis Vargas de Carvalho
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

Yan Masetto Nicolai
Universidade Federal de São Carlos, Brasil

PARECERISTAS E REVISORES(AS) POR PARES

Avaliadores e avaliadoras Ad-Hoc

Alcidinei Dias Alves
Logos University International, Estados Unidos

Alessandra Figueiró Thornton
Universidade Luterana do Brasil, Brasil

Alexandre João Appio
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil

Artur Pires de Camargos Júnior
Universidade do Vale do Sapucaí, Brasil

Bianka de Abreu Severo
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Carlos Eduardo B. Alves
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Brasil

Carlos Eduardo Damian Leite
Universidade de São Paulo, Brasil

Catarina Prestes de Carvalho
Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, Brasil

Davi Fernandes Costa
Secretaria Municipal de Educação de São Paulo, Brasil

Denilson Marques dos Santos
Universidade do Estado do Pará, Brasil

Domingos Aparecido dos Reis
Must University, Estados Unidos

Edson Vieira da Silva de Camargos
Logos University International, Estados Unidos

Edwins de Moura Ramires
Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial, Brasil

Elislene Borges Leal
Universidade Federal do Piauí, Brasil

Elizabete de Paula Pacheco
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

Elton Simomukay
Universidade Estadual de Ponta Grossa, Brasil

Francisco Geová Goveia Silva Júnior
Universidade Potiguar, Brasil

Indiamaris Pereira
Universidade do Vale do Itajaí, Brasil

Jacqueline de Castro Rimá
Universidade Federal da Paraíba, Brasil

Jonas Lacchini
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Brasil

Lucimar Romeu Fernandes
Instituto Politécnico de Bragança, Brasil

Marcos de Souza Machado
Universidade Federal da Bahia, Brasil

Michele de Oliveira Sampaio
Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Nívea Consuêlo Carvalho dos Santos
Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial, Brasil

Pedro Augusto Paula do Carmo
Universidade Paulista, Brasil

Rayner do Nascimento Souza
Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial, Brasil

Samara Castro da Silva
Universidade de Caxias do Sul, Brasil

Sidney Pereira Da Silva
Stockholm University, Suécia

Suêlen Rodrigues de Freitas Costa
Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Thais Karina Souza do Nascimento
Instituto de Ciências das Artes, Brasil

Viviane Gil da Silva Oliveira
Universidade Federal do Amazonas, Brasil

Walmir Fernandes Pereira
Miami University of Science and Technology, Estados Unidos

Weyber Rodrigues de Souza
Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Brasil

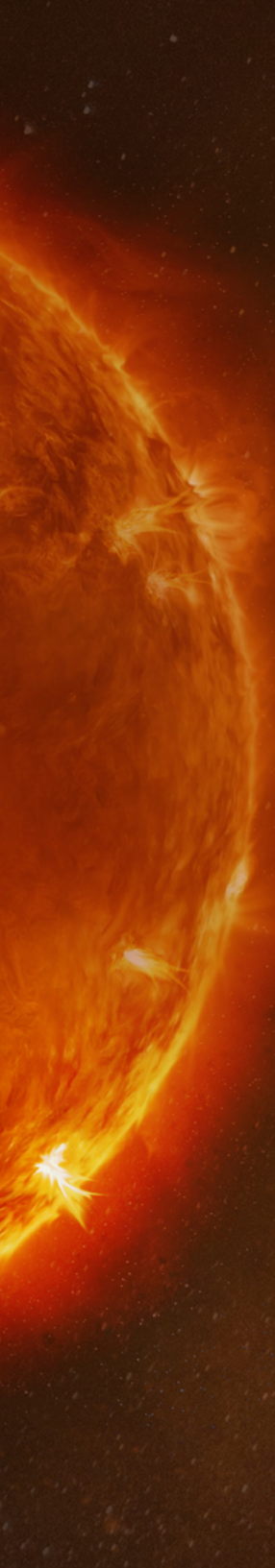
William Roslindo Paranhos
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Parecer e revisão por pares

Os textos que compõem esta obra foram submetidos para avaliação do Conselho Editorial da Pimenta Cultural, bem como revisados por pares, sendo indicados para a publicação.

AGRADECIMENTOS

Os dez anos que antecederam este trabalho foram dedicados ao ensino de Astronomia. Durante esse período, respondi a questionamentos de alunos nos corredores das escolas, tentei explicar conceitos a estudantes do Ensino Médio e Graduação e procurei orientá-los em sua trajetória nos estudos sobre esta ciência. Nessa busca por oferecer o meu melhor, acabei também me tornando melhor naquilo a que me propus e essa evolução só foi possível graças a cada um dos estudantes que me motivaram a seguir em frente. Poderia citar o nome de muitos aqui, mas inevitavelmente seria injusto com um ou outro. Por isso, agradeço a todos os estudantes e colegas/amigos que me acompanharam ao longo desses anos: aos que aprenderam comigo e, sobretudo, aos que me ensinaram.



A tranquilidade
refletida no céu

*"Já observo as estrelas há tanto
tempo que nem lembro quando
comecei. Sabe o que mais me
surpreende? Não foi conhecê-las.
Foi conhecer você. (17162)" - Arrival*

SUMÁRIO

Prefácio14

Apresentação 16

CAPÍTULO I

A História e a Construção do Saber19

Modelos do Sistema Solar 20

Eratóstenes e a medida do raio da Terra27

A distância Terra-Lua..... 33

CAPÍTULO II

**O Telescópio e o Nascimento
da Astronomia Moderna.....40**

O telescópio de Galileu e o início
da Astronomia moderna 41

Isaac Newton e o telescópio refletor:
a solução para o problema da aberração cromática 44

Telescópio Espacial Hubble:
a revolução na astronomia 47

CAPÍTULO III

**Órbitas, Leis do Movimento Planetário
e Gravitação Universal.....51**

A trajetória dos corpos ao redor do Sol 52

As leis de Kepler..... 56

CAPÍTULO IV

Medindo o Universo:

Raios, Distâncias e a Velocidade da Luz.....	60
Como medir o raio do Sol.....	61
A finitude da velocidade da luz.....	63
A Unidade Astronômica, o ano-luz e o Parsec.....	68

CAPÍTULO V

O Sol:

Nosso Astro-Rei	71
O Sol: O Nosso Astro-Rei	72

CAPÍTULO VI

Os Telúricos.....78

Mercúrio: o início da jornada.....	79
Vênus: a beleza do céu noturno	84
Terra: o planeta azul	89
Marte: o próximo passo para a colonização	96

CAPÍTULO VII

Os Jovianos104

Júpiter: o gigante do nosso Sistema Solar.....	105
--	-----

Saturno: o planeta dos anéis.....	111
--------------------------------------	-----

Urano: o outro azul, porém gasoso.....	116
---	-----

Netuno: o rei gelado.....	121
------------------------------	-----

CAPÍTULO VIII

Os Pequenos Esquecidos	126
-------------------------------------	------------

O conceito de planeta: novas fronteiras e novas classes	127
--	-----

Planetas anões e os quintais sujos.....	133
---	-----

O que são exoplanetas?	142
------------------------------	-----

CAPÍTULO IX

Assim Como a Voyager.....	147
----------------------------------	------------

Uma Perspectiva Geral do Universo: novos caminhos.....	148
---	-----

Sobre o autor	151
----------------------------	------------

PREFÁCIO

Escrever um prefácio para este livro é como tentar colocar em palavras a sensação de olhar para o céu numa noite silenciosa, sentindo que ali, entre as estrelas, há algo maior, não apenas no universo, mas dentro de nós.

Este livro nasceu do encontro entre o rigor da ciência e a sensibilidade de quem, desde criança, aprendeu a observar o céu da varanda da avó, sob a escuridão dos apagões amazônicos. É um trabalho que não foi escrito apenas com o conhecimento acumulado ao longo de dez anos de ensino, mas com a alma de alguém que jamais deixou de se encantar com o brilho de uma estrela, o silêncio de um planeta distante ou a trajetória de um cometa que talvez não volte a ser visto nesta vida.

O autor, e aqui permitam-me chamá-lo pelo que ele realmente é: um sonhador obstinado, percorreu muitos caminhos até este ponto. Ele não escreve como quem deseja mostrar o quanto sabe, mas como quem deseja dividir com o leitor o assombro do saber. E isso faz toda a diferença.

Conheço suas noites mal dormidas, suas batalhas silenciosas para tornar cada conceito compreensível, sua constante autocrítica, sua inquietação diante das próprias falhas. Mas também conheço sua força teimosa, seu riso quando acerta um cálculo de cabeça, seu olhar emocionado quando uma criança descobre Saturno pela primeira vez num telescópio.

Este livro não é apenas sobre astronomia. É sobre humanidade. É sobre o gesto de construir, com a filha, uma maquete do Sistema Solar numa noite comum. Sobre a decisão de transformar as perguntas difíceis dos alunos em pontes para o infinito. Sobre

a coragem de continuar escrevendo mesmo quando faltam os aplausos. E sobre a beleza de continuar olhando para cima mesmo quando tudo ao redor parece querer nos fazer olhar para baixo.

Ao escrever estas páginas, o autor conversou com cada um de nós, com ternura, com paciência, com encantamento. E isso é mais íntimo do que muitos abraços.

Seja você estudante, professor, curioso ou apenas alguém tentando encontrar sentido em meio às estrelas, este livro foi feito para você. Com honestidade. Com paixão. Com verdade.

Ao final da leitura, você não será o mesmo. E isso é um presente raro.

Boa viagem.

Um amigo que o conhece pelas palavras.

APRESENTAÇÃO

Minha primeira lembrança das estrelas vem da época em que minha cidade enfrentava constantes apagões durante as noites do inverno amazônico, período em que as chuvas são mais escassas e os rios diminuem seu volume. Eu tinha entre seis e sete anos, e sempre que o fornecimento de energia elétrica era suspenso, sentava-me na varanda da casa da minha avó para observar o céu. Às vezes, via estrelas com nitidez impressionante; em outras noites de lua cheia, era o brilho do satélite que dominava a paisagem escura.

Sempre que tenho oportunidade, compartilho essa lembrança, pois foi um momento marcante da minha vida. Naquela época, eu não fazia ideia do que era astronomia. Não conhecia a ciência, não entendia os astros, apenas sentia, de forma muito clara, que o universo era grande demais para caber dentro de qualquer explicação simples.

Muitos anos depois, já com conhecimento teórico acumulado, me peguei revivendo aquela mesma sensação ao subir um pequeno morro de menos de 400 metros de altitude. O céu estrelado me trouxe de volta à infância. Só que agora eu sabia que as estrelas mais avermelhadas tinham temperaturas superficiais mais baixas que as de brilho azulado. Sabia os nomes da maioria das constelações, o que é uma tarefa nada fácil, considerando as 88 definidas pela União Astronômica Internacional. Sabia por que Júpiter estava naquela região do céu e o que o fazia se mover ao longo da abóboda celeste. Ainda assim, o encantamento era o mesmo.

A astronomia tem esse poder: despertar em muitos de nós um senso de beleza, de escala, de pertencimento e mistério. Digo “muitos” (não “todos”), pois nem todo mundo se encanta com a vastidão do cosmos. Há quem prefira assuntos mais imediatos, e isso é

perfeitamente compreensível. Nossa civilização aprendeu a conviver com diferentes formas de se relacionar com o conhecimento.

Ao longo da história humana, a astronomia esteve na base da organização do tempo, das estações, da agricultura e da própria ideia de cidade. O céu era uma referência viva e as constelações, mapas que orientavam a sobrevivência e a cultura. Em meio às estrelas fixas, alguns astros “errantes” se deslocavam: os planetas. Desde cedo, aprendi a perceber esses movimentos. Quando comprei meu primeiro telescópio tardiamente aos vinte e seis anos (um newtoniano de 150 mm de abertura), observei Júpiter na constelação de Escorpião. Anos depois, o vi em outras constelações. Era a confirmação daquilo que os antigos já sabiam: os planetas viajam entre as estrelas fixas.

Esse telescópio me acompanhou por anos. Com ele, registrei imagens da Lua, de aglomerados estelares na constelação de Cruzeiro do Sul e no Centauro, dos planetas e de muitos outros objetos celestes. O estudo me levou à prática, me levou ao aperfeiçoamento e, em seguida, ao ensino. Passei a escrever textos e artigos sobre astronomia, muitos dos quais foram adaptados e integrados a este livro.

Desde 2016, tenho me dedicado à divulgação científica, em especial, à divulgação da astronomia. Mesmo depois de muitas leituras e experiências, ainda sinto que há degraus por subir. Talvez este livro seja um desses passos.

Por minha atuação ser na formação de professores e também na formação de planetaristas e multiplicadores do conhecimento sobre a astronomia, este texto tem como público-alvo os iniciantes, desde os alunos do Ensino Médio aos estudantes de graduação que tenham pouco conhecimento sobre a astronomia.

Aqui, este leitor iniciante encontrará explicações claras e acessíveis sobre diversos aspectos da astronomia. Abordaremos

desde os modelos que buscavam explicar o funcionamento do cosmos na Antiguidade até os métodos atuais de medição de distâncias astronômicas. O leitor conhecerá a trajetória das ideias científicas, os instrumentos que ampliaram nossa visão do universo, a estrutura do Sol, as características dos planetas e até mesmo o funcionamento dos telescópios modernos. Também será possível explorar os movimentos celestes, a origem dos cometas e a fascinante dinâmica dos corpos do Sistema Solar.

Qualquer sugestão ou correção que tenha passado despercebido pelo autor ou editor pode ser enviada para o e-mail *hualanp@gmail.com*, tenha a certeza que será recebida com carinho e atenção que merece. Que este livro sirva de guia e inspiração para quem deseja aprender, ensinar ou simplesmente se encantar com o céu. Afinal, entender o cosmos é também uma forma de entender a nós mesmos.



A HISTÓRIA E A CONSTRUÇÃO DO SABER

MODELOS DO SISTEMA SOLAR

Em uma noite qualquer de quarta-feira, antes de dormir, minha filha me avisou que no dia seguinte teria que entregar um trabalho. A atividade não era simples, embora ela fosse uma estudante do quarto ano do ensino fundamental, aquela tarefa iria demandar bastante tempo.

O tema era um dos primeiros contatos que temos com a Astronomia no ensino fundamental: construir uma maquete do Sistema Solar. Nesse dia usei minhas habilidades artísticas e fiz o meu melhor. Peguei umas bolinhas de isopor, um pedaço de EVA, umas tintas de pintura acrílica em tela, além de uma caixa de papelão. Comecei a construir, juntamente a ela, o melhor modelo do Sistema Solar que poderíamos.

As bolinhas de isopor pequenas eram os planetas chamados telúricos¹, ou rochosos, Mercúrio, Vênus, Terra e Marte, enquanto as bolinhas maiores eram os planetas gasosos, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno, esses quatro são chamados de planetas jovianos². Todas as bolinhas que representavam os planetas foram pintadas com cores distintas e com designs bem bonitos, sendo totalmente diferente uma da outra, e fixadas com linha de nylon na caixa com fundo preto de EVA.

Quando concluímos o trabalho dela, comentei que não era fácil fazer um modelo do Sistema Solar. Acho que ela pensou

1 A palavra telúrico deriva da palavra *tellus*, originária do latim, e significa Terra nesse idioma. Na astronomia ela se refere aos objetos celestes que têm composição semelhante ao nosso planeta, portanto os quatro primeiros planetas do sistema solar recebem essa nomenclatura para evidenciar que são rochosos e de composição semelhante.

2 *Joviano* vem de Júpiter e tem como objetivo, da mesma forma que o termo "telúrico", destacar os planetas que são semelhantes ao maior planeta do Sistema Solar.

que eu estava me referindo ao próprio trabalho, mas na verdade o meu comentário era bem mais direcionado aos modelos matemáticos e físicos que demoraram milênios para evoluírem ao que temos atualmente.

Geralmente, no componente de Ciências, este é o primeiro contato que temos com a astronomia e nele somos apresentados aos planetas e ao Sistema Solar. As imagens que são trazidas nos livros didáticos e que trazem a disposição dos planetas ao longo de uma linha imaginária não representa o que acontece realmente no Sistema Solar, na verdade, em termos de proporções, é praticamente impossível representar o Sol ante a todos os outros planetas em virtude do seu tamanho e também da distância com relação ao Sol que cada um ocupa.

Para que fosse possível ter um modelo matemático e físico do nosso Sistema Solar, foram necessários milênios de estudos e rompimento de concepções enraizadas na cultura e sociedade. Portanto, a tentativa humana de escrever um modelo para o Sistema Solar que fosse totalmente consistente com a realidade fez parte dos fatos mais notáveis da história da ciência, indo desde um reflexo do idealismo religioso à manifestação dos avanços científicos na direção da compreensão do cosmos.

O ponto de partida principal de discussão foi a posição ocupada pelo nosso planeta neste emaranhado de objetos. À medida que o nosso conhecimento avançava, observamos a evolução da concepção de universo com uma progressiva expansão dos limites espaciais que conhecemos.

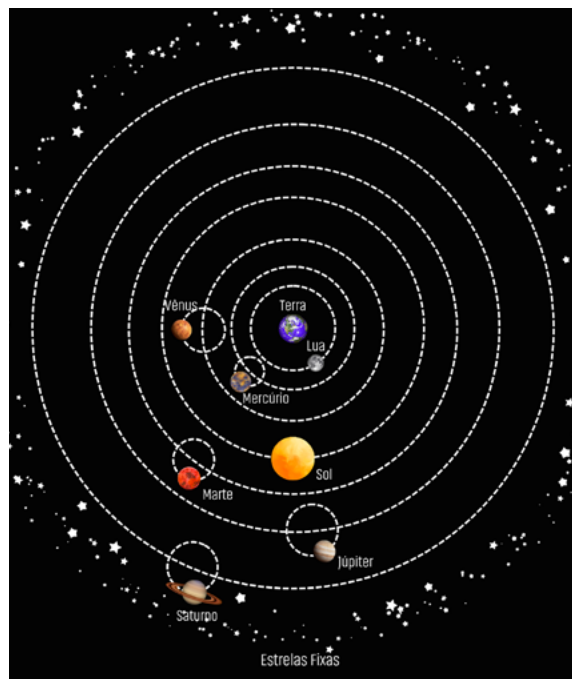
Sempre tivemos a necessidade de traduzir os fenômenos celestes por meio de modelos do sistema solar e através deles constituímos as primeiras leis do universo observável que

culminariam nas Leis de Kepler³ e na Lei de Gravitação Universal, de Isaac Newton (1643–1727). Cláudio Ptolomeu (100 d.C. – 170 d.C.), Aristarco de Samos (310 a.C. – 230 a.C.), Nicolau Copérnico (1473–1543) e outros contribuíram para que fosse possível entender essas nuances do Sistema Solar, bem como prever acontecimentos futuros.

Ptolomeu fez a compilação de cinco séculos de astronomia grega com base no modelo geostático (um modelo para o Sistema Solar em que a Terra está no centro e os outros corpos giram ao nosso redor) através do livro que conhecemos hoje como *Almagesto*. Uma série de artifícios geométricos foram implementados para explicar a posição dos corpos celestes errantes, ou seja, os planetas do Sistema Solar. Assim o excêntrico⁴, deferente⁵, epí-ciclo⁶ e equante⁷ foram sendo acrescentados ao modelo Ptolomaico na tentativa de adequar as previsões aos dados obtidos por meio de observações a olho nu.

- 3 Johannes Kepler é considerado o primeiro astrofísico da história, embora o termo astrofísica só tenha sido criado muitos anos depois. Ele foi o primeiro a entender o movimento dos corpos com base em leis da física e utilizando a matemática para descrever esses movimentos. Antes dele, a astronomia era geométrica e descritiva.
- 4 O excêntrico é um ponto ligeiramente deslocado do centro da circunferência que, no modelo de Ptolomeu e Copérnico, tinha como função ajustar o movimento dos planetas preservando a característica de trajetória circular que estes modelos supunham existir.
- 5 Círculo imaginário usado na astronomia antiga para representar a órbita principal de um astro ao redor da Terra.
- 6 Círculo menor sobre o qual um planeta se move, usado para explicar variações como o movimento retrógrado.
- 7 Ponto geométrico a partir do qual o movimento de um planeta parece ocorrer com velocidade constante, apesar de a órbita não ser centrada nesse ponto.

Figura 1 - Ideia antiga de como era o Universo, baseada no modelo de Ptolomeu, em que a Terra ficava no centro e os outros astros giravam ao seu redor



Fonte: elaborado pelo autor.

*Os planetas conhecidos na época iam até Saturno, que era o mais distante. Esse modelo ajudava a prever eclipses do Sol e da Lua, mas não explicava as fases de Vênus e Mercúrio, que só foram entendidas depois, com o modelo do Sol no centro. A imagem representa de forma simples como os antigos viam o céu, cercado pela "esfera das estrelas fixas".

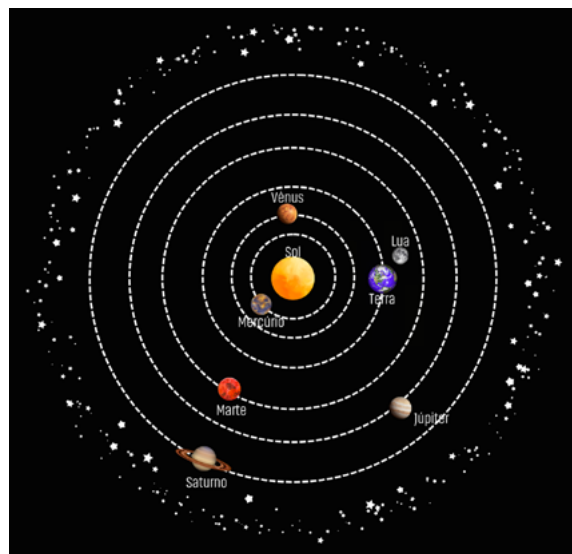
A motivação em satisfazer as concepções de Platão sobre o movimento e trajetória dos planetas influenciou diretamente o modelo ptolomaico. Assim, os círculos, que eram tidos como figuras perfeitas, deveriam descrever tais órbitas, bem como as velocidades constantes ao longo de suas trajetórias.

O modelo geocêntrico descrevia bem os movimentos dos corpos, no entanto, fisicamente era incorreto. Com o passar do tempo e com a acurácia nas medidas, os dados foram necessitando

de cada vez mais complementos e cada vez mais epiciclos eram adicionados. Por fim, foi resgatado o modelo heliocêntrico e Copérnico trouxe à tona um sistema solar centrado no sol.

Embora as ideias de Copérnico tenham sido colocadas de maneira a satisfazer certos aspectos menos ligados aos dados observacionais, é interessante levar em consideração a questão ideológica da época pré-renascentista em que a ideia de uma terra geostática era defendida por razões religiosas, tendo sido arraigada por séculos na mente das mais poderosas entidades dominantes da época e constituindo-se em dogma indispensável para a manutenção da estrutura social vigente.

Figura 2 - Modelo de Copérnico, onde o Sol está no centro do Sistema Solar, e os planetas, incluindo a Terra, giram ao seu redor



Fonte: elaborado pelo autor.

*Esse modelo foi importante porque explicava de forma mais simples o movimento dos planetas e as fases de Vênus e Mercúrio, que não eram explicadas pelo modelo antigo. Também tornava os eclipses e os trânsitos de planetas mais fáceis de entender. Na época, só se conheciam os planetas até Saturno, e as estrelas eram vistas como uma camada fixa ao fundo do Universo.

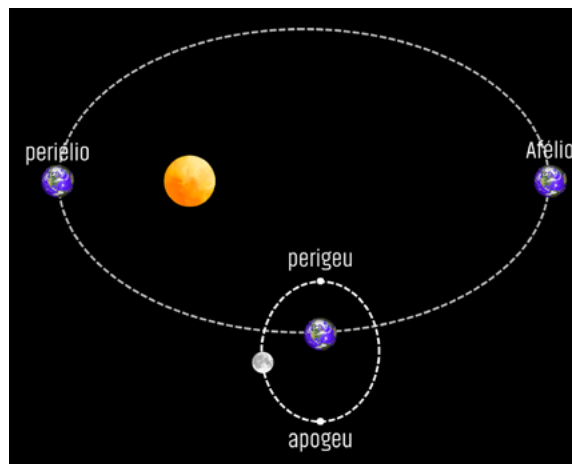
O modelo de Copérnico permitia que algumas previsões fossem feitas, inclusive o raio médio da órbita dos planetas internos (Vênus e Mercúrio). Ao utilizar o ângulo máximo de afastamento de Vênus e Mercúrio com relação ao Sol, era possível obter este valor com base no raio da órbita terrestre, sendo 0,72 e 0,38 raios terrestres, respectivamente. As fases de Vênus, observadas em 1609 pelo telescópio de Galileu Galilei (1564–1642), poderiam ser facilmente explicadas.

A perspectiva de que ainda existiam ajustes a serem feitos nos modelos propostos sempre deve levar em consideração o que é apresentado pela realidade, ou seja, aquilo que é sondado através de experimentos, neste caso a observação astronômica é o que deve ser tido como ponto de refinamento. Assim, as proposições sugeridas por Johannes Kepler (1571–1630), tendo como base os dados de Tycho Brahe (1546–1601), foram primordiais para que tivéssemos o entendimento das trajetórias dos planetas e outros objetos do Sistema Solar como resultado de elipses, tal como é enunciado na 1ª Lei de Kepler.

As três leis de Kepler, embora sejam importantíssimas para compreender o sistema planetário de maneira mais minuciosa, não serão objetivo do que propomos neste momento, falaremos das leis de Kepler em uma seção adiante.

No entanto, assim como em muitos ramos da Física, a Astronomia de trajetórias circulares ainda pode ser praticada, seja para fins de análise simplista ou ainda para aproximações rudimentares de aspectos quantitativos. As razões para isso residem no fato de a excentricidade das elipses (razão entre a distância dos dois focos desta figura geométrica e seu eixo maior) descritas por planetas ser demasiadamente pequena, tal como podemos observar na Figura 3, que ressalta diversas propriedades das elipses planetárias, apresentando, dentre estas, valores de excentricidade de órbitas de todos os planetas e Plutão.

Figura 3 - As órbitas da Terra ao redor do Sol e da Lua ao redor da Terra são elípticas



Fonte: elaborado pelo autor.

*No afélio, a Terra está mais distante do Sol; no periélio, mais próxima. Já a Lua atinge o apogeu quando está mais distante da Terra, e o perigeu quando está mais próxima. Essas variações influenciam fenômenos como superluas e mudanças sutis na intensidade da radiação solar.

A título de comparação, os valores de excentricidade, máxima e mínima, das órbitas planetárias são respectivamente 0,2 para Mercúrio e 0,009 para Netuno, sendo que este último ainda não havia sido descoberto na época de Kepler. Alguns corpos como cometas e planetas anões têm órbitas em que este parâmetro é significativamente maior ou mais aproximados à unidade, assim o tratamento a ser dado a esses objetos deve ser exclusivamente o de uma trajetória elíptica.

Métodos para determinar a excentricidade órbita terrestre consistem em medir o diâmetro do Sol visto da Terra quando esta passa pelo Afélio e Periélio permitindo que os dados nos levem ao valor de 0,0167. É possível realizar a medida desse parâmetro extraindo valores com erros de até 7,2% através de métodos caseiros de que dispomos hoje em dia.

Como vimos, a excentricidade das órbitas dos planetas ao redor de nossa estrela é realmente muito pequena para ser notada diretamente por meio do aumento do disco angular, tendo em vista os valores apresentados. O modelo do Sistema Solar atualmente, embora tenha tido diversos refinamentos, ainda é, em essência, um kepleriano. Voltaremos em alguns desses dados e conceitos ao longo deste livro e observaremos mais a fundo esses aspectos do Sistema Solar. Antes disso, verificaremos mais alguns aspectos históricos da astronomia, tais como o diâmetro equatorial da Terra e a distância Terra-Lua.

ERATÓSTENES E A MEDIDA DO RAIOS DA TERRA

Muitos feitos antigos são atribuídos a criaturas fictícias, seres mitológicos ou divinos e descreditados como algo fruto da capacidade humana. As pirâmides do Egito estão nesse rol, pois embora seja perfeitamente provável que tenhamos feito tais construções, é muito mais fácil achar explicações mais fantasiosas, em virtude da época em que foram feitas e também da tecnologia que existia na época se comparada com os aparatos tecnológicos de que dispomos hoje. Algumas ideias parecem ter sido dadas aos seres humanos da antiguidade como o resultado de um processo de iluminação, o que nos coloca supostamente em uma posição inferior quanto a capacidades técnicas e intelectuais no mundo do qual fazemos parte.

A medida da circunferência e raio do planeta Terra, quando investigada a fundo, também sofre, pelo menos em partes, desse processo de dúvida. Quando escutei pela primeira vez a história de que alguém havia medido esse parâmetro utilizando corda e uma

vareta, veio-me a ideia de que aquele responsável por tal ato havia sido realmente iluminado por uma sabedoria divina, no entanto, ao estudar mais a fundo sobre o tema, percebi que, nas condições em que Eratóstenes (276 a.C. – 194 a.C.) se encontrava, a situação era perfeitamente provável.

Outro ponto que contribui para que não acreditemos no homem como ser capaz de grandes feitos é o estudo dos modelos de universo que existiam na antiguidade. A concepção de mundo dos gregos na época em que viveu Eratóstenes era totalmente diferente do que acreditamos. A título de ilustração, Tales (624 a.C. – 546 a.C.), natural da antiga cidade de Mileto e um dos maiores pensadores pré-socráticos da Grécia Antiga que viveu no século VI a.C., acreditava que a Terra era plana, em formato de disco e repousava sob águas tranquilas, flutuando tal como um barco. Nesse caso o pensamento desse filósofo está enraizado no aspecto que ele considerava como sendo o primordial para a vida e que foi denominado de *arché*, assim a água era algo que se tornava essencial e sustentava a vida, e o planeta Terra de maneira literal.

Anaxímenes (586 a.C. – 526 a.C.), outro filósofo de Mileto, tinha concepção diferente de *arché*⁸: para ele o ar era o responsável pela vida e existia uma série de processos em que este “elemento” seria transformado em água, terra e fogo. Assim, a sua crença baseada na *arché* ar também influenciava a sua visão de mundo, que era compreendido com um cilindro em que só a parte superior seria habitável. Nesse sentido, as suas ideias se convergiam para as de Tales, no entanto, o “elemento” sustentador do Planeta Terra era o ar. Em outros aspectos, pode-se destacar o pensamento de Anaximandro (610 a.C. – 546 a.C.), que foi mais longe e postulou um “elemento” totalmente diferente para a compreensão do mundo, sua *arché* era o *apeyron* (indefinido, ilimitado). Através da separação do *apeyron*

quente, podíamos explicar o surgimento do Sol e da separação deste “elemento” mais frio teríamos a terra e água.

O planeta Terra novamente seria um cilindro que ficaria imóvel no centro do universo, tendo sido criada através da ação do Sol sob a terra e a água.

Esse é o cerne dos quatro elementos que são descritos posteriormente por Aristóteles (384 a.C. – 322 a.C.). Embora as teorias para a criação do universo sejam completamente desprovidas de censo científico, são também as primeiras concepções que estão igualmente desvinculadas de um censo religioso, tal como observamos nos mitos da criação. Não devemos julgar as concepções e modelos científicos do mundo como mais ou menos evoluídos, pois pertencem a tempos em que o conhecimento estava no processo inicial de construção, mas, sim, observar que é nesse ponto que a explicação racional passa a ganhar corpo.

Podemos lembrar que a concepção perfeita de um mundo é um conceito que está presente no cerne de muitas culturas, tal como a egípcia, que imaginava o que o planeta era plano e alongado tal como o mapa do território egípcio.

A escola pitagórica de Crotona foi a principal responsável pela introdução da concepção de que o planeta Terra tinha formato esférico. Esse sólido é considerado o mais perfeito de todos e teve influência até no pensamento de Johannes Kepler. No entanto, o avanço conceitual para esse aspecto geométrico do planeta é, sem dúvidas, a maior de todas as conquistas. Existiam embasamentos mais fortes além da perfeição esférica que deveria ter sido dada ao planeta no momento de sua criação e esses foram emitidos por Aristóteles em seu livro “Tratado do céu”.

Os gregos e outros povos tinham conhecimento de que a Lua não era um objeto que emitia luz, mas que era iluminado pelo

Sol, e sabiam também que as fases desse satélite natural, os eclipses e outros fenômenos lunares eram obtidos através da interposição da Terra entre Lua e Sol, os eclipses podiam ser observados de formas diferentes dependendo da localidade em que o observador se encontrava na Terra. Unindo essas informações, pode-se ter uma ideia da esfericidade da Terra, no entanto, esses efeitos poderiam ser os mesmos caso a Terra não fosse um disco, mas, sim, uma calota esférica.

Quando um viajante se deslocava para outros locais que ficavam mais ao norte ou ao sul, poderia visualizar as constelações de seu local de vivência sendo engolidas mais facilmente pelo horizonte ou até mesmo deixar de pertencer ao céu visível. Viagens de mercadores para locais distantes sempre evidenciavam isso, principalmente as que saíam de um ponto mais ao norte e se deslocavam para um ponto mais ao sul e vice-versa.

Em tempos mais recentes, essa experiência de mudança do aspecto do céu poderia ser mais evidenciada por escravos africanos trancafiados em navios negreiros, que saíam de suas terras natais mais ao sul e eram transportados em navios fechados para colônias mais ao norte. Quando tomamos esses dados observacionais como parâmetro para a prova definitiva da curvatura da Terra, devemos ter em mente que algumas perguntas de cunho geométrico deverão surgir na mente dos que se ocupam com esse problema.

Assim, fica quase instantâneo perguntar qual o valor do raio de curvatura do Planeta Terra, ou ainda a razão para os corpos que estariam em lados opostos do planeta não caírem devido à presença de uma direção preferencial para a ocupação do corpo celeste. A resposta para a primeira pergunta apareceu em um daqueles casos em que nos surpreendemos com a engenhosidade humana, um acontecimento em que a observação de fenômenos

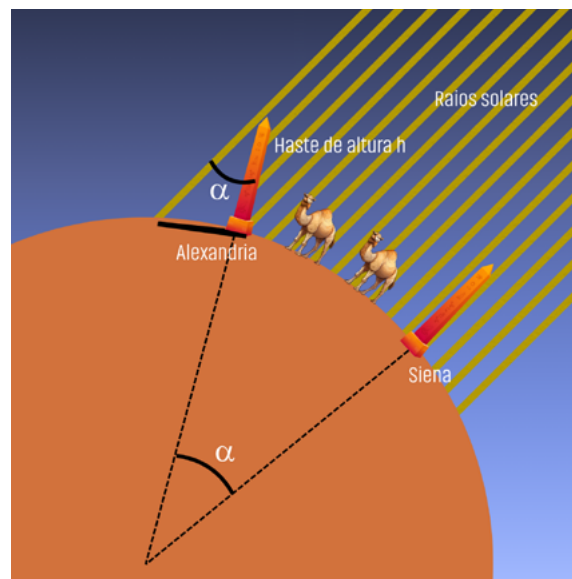
do nosso meio foi mais importante do que a presença de grandes materiais experimentais.

O mercador e astrônomo grego Eratóstenes, em suas vastas viagens pela Grécia e arredores, observou que a cidade antiga de Siena (que hoje denominamos de Assuan) ficava no mesmo meridiano de Alexandria (cidade batizada em nome do rei macedônio, Alexandre, o Grande) e que, por essa razão, o meio-dia aconteceria aproximadamente ao mesmo tempo em ambas as localidades, assim ao meio-dia em Siena deveríamos ter o meio-dia em Alexandria.

Caso o planeta Terra fosse plano, o tamanho das sombras produzidas por objetos de mesmo tamanho seriam iguais, devido à paralelidade dos raios solares, no entanto não foi o que pôde ser observado pelo astrônomo. Em razão do solstício de verão, o Sol se encontrava no zênite e iluminava o fundo de um poço localizado na cidade de Siena, ou seja, o tamanho da sombra de um gnômon era mínima, neste dia, no entanto, na cidade de Alexandria, as sombras e iluminação em poços não se mostravam iguais.

Então, Eratóstenes realizou a medida do ângulo de projeção da sombra de um gnômon em Alexandria, obtendo um ângulo próximo de $7,5^\circ$, depois restava saber o valor da distância entre as duas cidades, ou seja, a distância Siena-Alexandria. O matemático, contratou um bemetastistes (nome dado aos andarilhos especializados em calcular distâncias entre cidades) para medir o valor desse arco formado entre as duas cidades, obtendo um valor de aproximadamente 850 km. Através de uma expressão simples foi fácil calcular o resultado do raio do planeta Terra, próximo ao valor que conhecemos hoje em dia, de 6.495 km.

Figura 4 - Esquema do experimento de Eratóstenes



Fonte: elaborado pelo autor.

*Em Siena, os raios solares incidem verticalmente, sem formar sombra. Em Alexandria, a haste projeta sombra com ângulo α . A distância entre as cidades foi estimada por caravanas que faziam o percurso de camelo.

Esse resultado inspirou outras experiências, inclusive a de encontrar a parte do meridiano que consistia no arco entre Siena e Alexandria. Hoje podemos encontrar o raio do planeta Terra em muitos livros de física e certamente de astronomia que encontramos, no entanto, o achado de Eratóstenes foi pioneiro e, em certos casos de conversão das unidades de medidas que eram utilizadas pelos gregos na época, é possível que o resultado obtido pelo Matemático grego tenha sido de até 1% de erro.

Os resultados do experimento de Eratóstenes foram compilados no “De motu citculari corputum caelestium”, ou a “Teoria

do Movimento Circular dos Corpos Celestes”, de Cleômedes (I a.C. – II d.C.) (astrônomo grego). Os detalhes da medida e outras implicações são apresentados de maneira completa, dessa forma podemos alocar este experimento dentro do rol daqueles voltados à astronomia.

A DISTÂNCIA TERRA-LUA

Na história da Ciência, a obtenção de medidas precisas sempre desempenhou um papel fundamental, seja para validar teorias ou para satisfazer a curiosidade humana sobre o universo. Exemplos notáveis incluem a determinação da constante gravitacional na equação da gravidade formulada por Isaac Newton, realizada por Henry Cavendish no século XVIII⁹, e a medição da constante de Planck, feita por Robert Millikan no início do século XX¹⁰. Essas medições foram cruciais para consolidar os fundamentos da física moderna.

Por outro lado, algumas medidas não estão diretamente associadas à comprovação de teorias científicas, mas refletem o desejo do ser humano em compreender seu entorno. Entre essas, destaca-se a determinação da distância entre a Terra e a Lua, que por séculos foi objeto de interesse e estudo, representando um grande desafio técnico para as civilizações antigas. Na antiguidade,

9 Henry Cavendish encontrou o valor da constante Universal da Gravitação por meio de uma balança de torção muito sensível que media a força entre dois objetos, um com massa muito grande e outro com massa muito pequena. Assim, conhecendo a distância entre os objetos e as massas envolvidas, era possível determinar o valor da constante.

10 O experimento de Millikan foi o responsável por medir experimentalmente a constante de Planck, teorizada em 14 de dezembro de 1901, bem como provar a teoria de Einstein para a quantização da luz que explicava o efeito fotoelétrico descoberto em 1896 por Wilhelm Friedrich Hertz.

a precisão dos instrumentos e métodos era limitada, o que dificultava a obtenção de valores exatos. Uma das primeiras tentativas sistemáticas de estimar essa distância foi empreendida pelo astrônomo grego Hiparco, no século II a.C., cujos métodos demonstram um profundo entendimento da geometria e da observação astronômica.

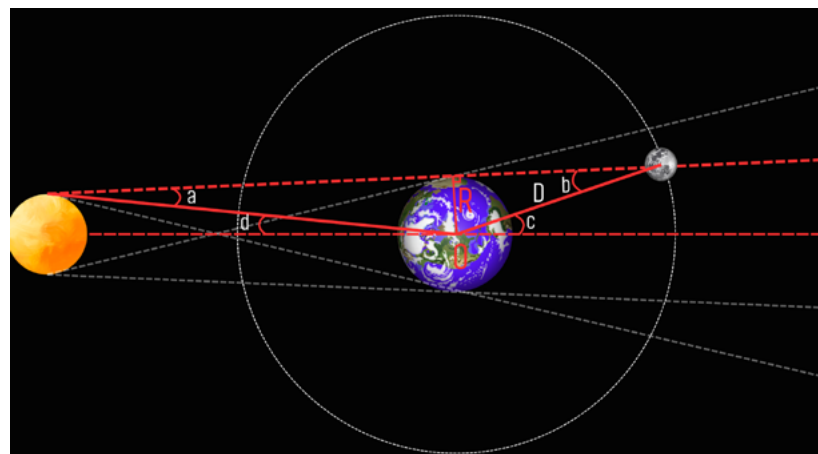
O fenômeno dos eclipses lunares serviu como base para essa medição. Durante um eclipse, a Lua atravessa a sombra da Terra, passando por diferentes regiões: inicialmente pela penumbra (uma sombra parcial), depois pela umbra (a sombra mais escura e completa), e retornando à penumbra antes de sair totalmente da sombra terrestre e voltar a ser iluminada pelo Sol. A observação cuidadosa dos tempos e durações dessas fases fornecia dados essenciais para estimar proporções e distâncias relativas entre a Terra, a Lua e o Sol.

Hiparco usou justamente essas observações e a geometria associada para relacionar a distância Terra-Lua ao raio da Terra, ainda desconhecido em sua época, mas que ele sabia ser uma unidade de referência importante. Para isso, ele considerou que o raio da sombra projetada pela Terra na distância da Lua era aproximadamente 2,5 vezes o raio lunar.

Observando o céu, sabe-se que o Sol tem um semidiâmetro angular, isto é, metade do seu tamanho aparente, de cerca de 16 minutos de arco, enquanto a Lua apresenta um diâmetro angular médio em torno de 31 minutos de arco. Essa proximidade no tamanho aparente é o que permite que a Lua cubra o Sol durante os eclipses totais.

A Figura 5 mostra a relação de ângulos e como calcular e medir os valores necessários para encontrar a distância Terra-Lua:

Figura 5 - Representação de um eclipse lunar



Fonte: elaborado pelo autor.

*A Terra projeta duas regiões de sombra: a umbra (sombra total) e a penumbra (sombra parcial).

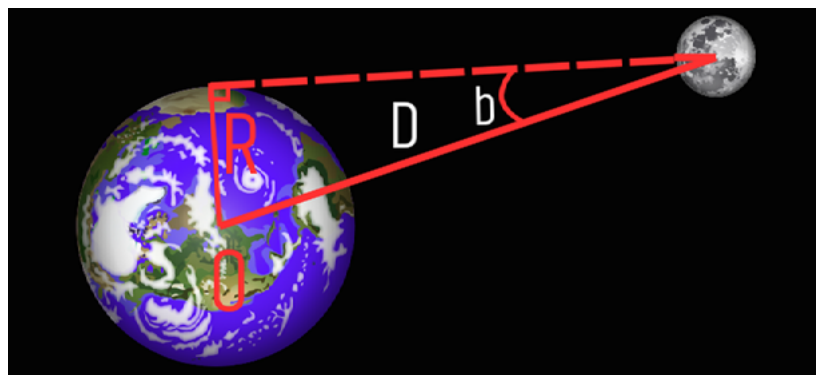
A Lua, ao atravessar essas regiões, pode originar eclipses penumbrais, parciais ou totais, dependendo de sua trajetória. As linhas vermelhas indicam os limites do cone de sombra terrestre formado pela luz do Sol.

Os ângulos a e b correspondem aos dois menores de um triângulo escaleno, assim, juntamente com o ângulo do vértice O , teremos como somatório o valor de 180° (a soma dos ângulos internos de um triângulo). O mesmo é repetido para os ângulos c e d , que somado com o mesmo ângulo interno ao vértice O nos dará 180° . Por fim, teremos a equação $a + b = c + d$. Em virtude das dimensões envolvidas nesse problema, o ângulo a pode ser desconsiderado, assim teremos a seguinte relação $b = c + d$.

Ao calcular o semiângulo aparente (c) correspondente ao raio do cone de sombra da Terra na distância lunar (usando a proporção de 1,25 vezes o raio lunar), chega-se a aproximadamente 38 minutos e 45 segundos de arco. Somando-se a esse valor o semidiâmetro angular do Sol (d), obtemos um ângulo total de cerca de 54 minutos e 45 segundos de arco, que representa o ângulo que necessitamos para realizar o cálculo proposto (b).

Esse ângulo é usado para calcular uma relação geométrica fundamental do seno desse ângulo, tal como é mostrado na Figura 6, que relaciona o cateto oposto (R) à hipotenusa (D). Nesta equação, isolando a variável de interesse resulta em aproximadamente $62,8 R$.

Figura 6 - Diagrama utilizado para estimar a distância da Terra à Lua



Fonte: elaborado pelo autor.

*Conhecendo o raio da Terra (R) e o ângulo aparente b , é possível aplicar relações trigonométricas no triângulo retângulo para calcular a distância D até a Lua.

Multiplicando esse número pelo raio da Terra, que hoje sabemos ser cerca de 6.371 km, temos uma estimativa da distância entre a Terra e a Lua próxima a 400.528 km. Essa aproximação é impressionante, considerando as limitações técnicas da época de Hiparco, e demonstra como a aplicação da geometria simples aliada a observações cuidadosas pode levar a descobertas precisas e importantes.

Hoje, a distância média entre a Terra e a Lua é conhecida com extrema precisão, cerca de 384.400 quilômetros. Essa medida foi refinada com o uso de tecnologias modernas, como a reflexão de pulsos de laser em retrorrefletores deixados na superfície lunar por astronautas das missões Apollo, que permite medições com precisão de centímetros. Esses avanços tecnológicos revolucionaram nosso entendimento do sistema Terra-Lua e continuam a fornecer dados cruciais para a ciência espacial.

Assim, a história da medição da distância Terra-Lua reflete a evolução do conhecimento humano, da observação empírica e da matemática antiga até as tecnologias modernas, exemplificando o progresso científico ao longo dos séculos e o poder do raciocínio geométrico aplicado a problemas reais do universo.

Para revisitar o método clássico de Hiparco com recursos contemporâneos, utilizamos uma astrofotografia do eclipse lunar total, na qual a sombra da Terra é projetada sobre a superfície lunar. A imagem produzida durante o eclipse de 25 de fevereiro de 2019 nos permite encontrar círculos que interpolem tanto a Lua quanto a sombra circular que é projetada nela. Na Figura 7, vemos o resultado da composição artística que foi obtida após processamento e composição artística.

Figura 7 - Sequência do eclipse lunar total registrado em 2019



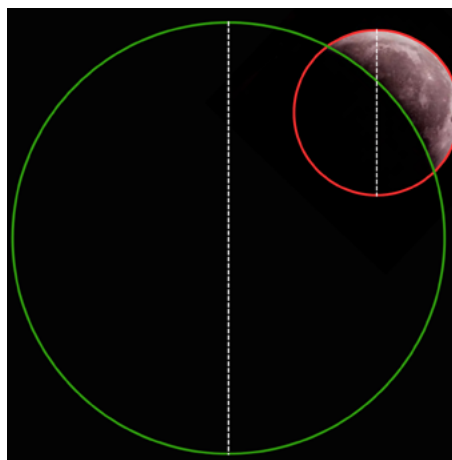
Fonte: elaborado pelo autor.

*Cortesia de Ariel Adorno, membro do Clube de Astronomia de Rondônia. Durante o eclipse total, a Lua entra completamente na sombra da Terra (umbra), mas não desaparece: ela adquire uma coloração avermelhada devido à dispersão da luz solar na atmosfera terrestre. A luz vermelha, que sofre menos desvio, é refratada e projetada na Lua – o mesmo fenômeno que dá cor aos pores do sol.

Observe que podemos selecionar a imagem em que a umbra aparece de maneira mais nítida. Após isso, o processo é digital e é

mostrado na Figura 8, em que se destacam dois círculos: o vermelho, que corresponde a uma interpolação manual da Lua e seu disco; e o verde, que corresponde à umbra. Duas retas tracejadas marcam o diâmetro desses círculos e os comprimentos destas podem ser medidos e encontraremos uma proporção entre ambas.

Figura 8 – Estimativa de quantas vezes o diâmetro da Lua cabe na sombra da Terra durante um eclipse lunar



Fonte: elaborado pelo autor.

*A circunferência verde representa a projeção da umbra terrestre, enquanto a vermelha corresponde ao disco lunar. A sobreposição permite calcular que aproximadamente 2,62 diâmetros lunares cabem dentro da sombra da Terra, valor fundamental para estimativas da distância Terra-Lua por métodos geométricos clássicos.

Na Figura 8 o diâmetro da Lua é medido como 5,4 cm, e o diâmetro da sombra projetada pela Terra é medido como 14 cm. Considerando que essas medidas são proporcionais às dimensões reais dos corpos celestes, podemos utilizar a relação entre os diâmetros para determinar a distância Terra-Lua em unidades do raio terrestre (R_T).

O ângulo a ser medido para c na Figura 8 é então o ângulo referente a 1,3 raios lunares, e não 1,25 raios lunares como foi utilizado anteriormente, levando-nos a 40 minutos e 24 segundos. O semiângulo

do Sol e que corresponde ao valor de c é de 16 minutos como havíamos utilizado anteriormente, assim o ângulo b , que novamente é a soma desses dois valores, resulta em 56 minutos e 24 segundos.

Novamente utilizando o triângulo apresentado na Figura 6, obteremos o seguinte cálculo:

$$D_{TL} = \frac{R_T}{\sin(56'24'')} = 60,96R_T = 388\,376\text{ km}$$

Como ressaltamos anteriormente, o raio médio da órbita lunar já foi encontrado, mas pode variar de 363.300 km (perigeu) a 405.500 km (apogeu) devido à excentricidade da órbita lunar. Podemos calcular o erro relativo ao valor médio apresentado o considerando real, resultando no seguinte:

$$Erro(\%) = \frac{|D_{Calculado} - D_{real}|}{D_{real}} \times 100$$

$$Erro(\%) = \frac{|388\,376 - 384\,400|}{384\,400} \times 100 = 1,03\%$$

O valor obtido na estimativa se encontra dentro do aceitável e está muito próximo da distância esperada e medida por outros métodos.

Mesmo com somente uma única imagem bem feita de um eclipse lunar, é possível aplicar relações geométricas simples para estimar, com boa precisão, a distância da Terra à Lua. A análise do tamanho da sombra da Terra projetada sobre a Lua, comparada ao seu próprio diâmetro, revela uma conexão direta entre ângulos pequenos e grandes distâncias, refletindo o mesmo tipo de raciocínio empregado por astrônomos antigos, agora potencializado por recursos fotográficos modernos.



O TELESCÓPIO E O NASCIMENTO DA ASTRONOMIA MODERNA

O TELESCÓPIO DE GALILEU E O INÍCIO DA ASTRONOMIA MODERNA

Os olhos do ser humano sempre serviram como principal fonte para a verificação das coisas que nos rodeiam, no entanto, por muito tempo só dependíamos disso para inspecionar o ambiente. Porém, no século XV, essa perspectiva iria ter uma série de modificações que nos permitiriam enxergar além dos limites oculares e observar com grandes detalhes as coisas que acontecem ou que estão a quilômetros de distância do nosso entorno.

O grande físico e matemático Galileu Galilei descreve em seu livro “O mensageiro das estrelas”, de março de 1610, a existência de um equipamento capaz de ampliar a visão humana e permitir enxergar planetas distantes e os satélites do Sistema Solar. Embora o próprio Galileu tenha nos informado sobre maneiras de construir esse equipamento, ainda hoje é possível observar pessoas que se maravilhem com a observação de luas e planetas de uma forma semelhante à que era realizada por diversos cientistas e pela população da época.

Galileu retrata, em seu livro, a descoberta desse equipamento e atribui aos rumores as informações preliminares para a sua completa construção pelo italiano. Segundo Galileu, há aproximadamente dez meses desde a escrita de seu livro, começou a circular o boato de que um belga teria criado uma luneta capaz de permitir a observação nítida de objetos muito distantes, como se estivessem próximos, embora os relatos sobre essa invenção fossem contraditórios – alguns a confirmavam, enquanto outros a negavam.

É interessante pensar como na época parecia inconcebível que um material que funcionasse para aumentar a capacidade de visão do homem, ou ainda sobrepor os limites de sua visão, fosse algo tão mágico e inimaginável para a grande parte da população. Na descrição de Galileu, observa-se, ainda, a necessidade de reconstrução

desse equipamento por meio do estudo daquilo que na época se constituía na teoria das refrações, mas que hoje denominamos de maneira ampla de Óptica Física.

Somente após os rumores terem sido confirmados por um colega próximo que Galileu se pôs a estudar mais sobre o objeto e sobre como ele funcionava, bem como realizar estudos e a reprodução desse mecanismo para a sua utilização. Embora alguns historiadores informem que a utilização da teoria das refrações não tenha sido compreendida totalmente por Galileu Galilei, observa-se que o emprego do método de tentativa e erro pelo descobridor das luas de Júpiter na construção da sua luneta foi algo dotado de sucesso, tendo em vista as suas contribuições no campo da Astronomia e Física e as características que são informadas no livro de Galileu.

Há momentos nos quais fica evidente que Galileu, mesmo sem dispor do conhecimento formalizado que viria a constituir a Óptica Geométrica, já demonstrava domínio sobre os efeitos práticos das lentes e de seus arranjos. A compreensão empírica de tais efeitos é notável em seus relatos sobre a construção e o uso da luneta. Segundo Galileu, tratava-se de um instrumento capaz de fazer com que objetos muito distantes parecessem estar próximos.

Em uma de suas descrições, Galileu afirma ter construído um tubo de chumbo com duas lentes de vidro ajustadas em suas extremidades.

Cada lente era plana de um lado, sendo que uma apresentava curvatura convexa na outra face, e a outra, côncava. Ao aproximar o olho da lente côncava, ele observou que os objetos apareciam significativamente maiores e mais próximos do que quando vistos a olho nu – especificamente, os objetos pareciam estar três vezes mais próximos e com um tamanho nove vezes maior.

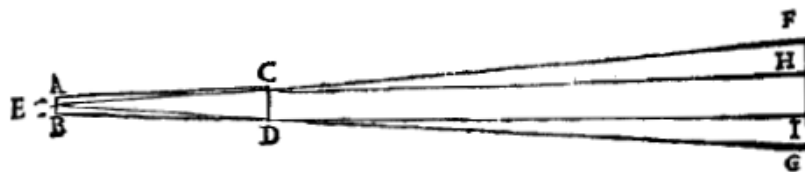
Quando Galileu informa essa proporção de aproximação e aumento (3 proporções para 1), ele nos revela o que atualmente

conhecemos como aumento linear transversal. Isso nos permite perceber que, mesmo sem o domínio do arcabouço teórico que viria a ser desenvolvido mais tarde, ele já compreendia, de maneira precisa, os aspectos práticos do instrumento e suas implicações na observação do mundo natural.

Ao comentar no seu livro sobre os resultados de suas pesquisas e sobre suas observações, Galileu Galilei nos informa, sob sua perspectiva, da felicidade de suas observações, ressaltando a alegria com a qual via as descobertas que havia feito. Ao tratar do seu invento, Galileu também nos comunica sobre a metodologia que deve ser empregada para que obtenham os mesmos resultados que ele.

Mesmo que este não seja considerado como o primeiro telescópio a ser criado, ainda assim podemos indicar esse manuscrito de Galileu como o primeiro que informa como construir um telescópio, tendo em vista que existem diversas figuras que trazem os resultados obtidos e o esquema óptico de construção do equipamento.

Figura 9 - Telescópio de Galileu através de esquemas



Fonte: Sidereus Nuncius, de Galileu Galilei (1610).

*Descrição do telescópio de Galileu através de esquemas mostrados pelo Físico e Matemático italiano em seu livro *Sidereus Nuncius*.

Na Figura 9, ABCD é o tubo óptico, e o observador e FG, o objeto, enquanto HI é o ângulo de observação ao qual é feita a medida do objeto. Em CD poderíamos aplicar cartões perfurados para medir as distâncias angulares HI e, de maneira simples, utilizando a tabela de senos, era realizada a medida necessária.

A implicação do livro de Galileu Galilei para a história da ciência é enorme, tendo em vista a utilização do método de observação e das gravuras que são colocadas para o grande público e para os pesquisadores e astrônomos da época. O telescópio de Galileu tinha uma deficiência que dificultaria as resoluções de imagens em momentos posteriores, a aberração cromática, que foi ponto principal para a revolução que Newton traria, ou seja, a criação de um telescópio que fosse refletor, que utilizaria um espelho côncavo¹¹ para mostrar a imagem de um corpo celeste distante.

ISAAC NEWTON E O TELESCÓPIO REFLETOR: A SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DA ABERRAÇÃO CROMÁTICA

Isaac Newton, em seu tratado sobre Óptica, apresenta, na Proposição 7 e Teorema 6, a ideia de que a limitação dos telescópios estaria relacionada à diferente refringência dos raios de luz. Essa consideração não se refere diretamente à construção do instrumento, mas trata da formação das imagens e da ocorrência de um fenômeno atualmente conhecido como aberração cromática.

A aberração cromática consiste na aparição de distorções e na separação de faixas de cores azuladas e avermelhadas nos

¹¹ Existem dois tipos de espelhos parabólicos: os convexos, que produzem imagens em geral menores que o objeto original, mas que ampliam o campo de visão e, por essa razão, são aplicados em retrovisores de caminhões, em pequenos mercados que não dispõem de recurso para instalação de câmeras de vigilância em todos os corredores, dentre outros; e os espelhos planos, que são o oposto, pois ampliam o objeto a ser observado, especialmente se estiver distante, e, por essa razão, são aplicados como espelhos de maquiagem, espelhos de dentistas e, por último, em espelhos de telescópios que fazem com que observemos objetos distantes como se fosse por meio de uma lente de aumento.

objetos observados por telescópios do tipo galileano, ou seja, refratores. Essa imperfeição é consequência dos diferentes desvios sofridos pelos raios de luz ao atravessarem as lentes, sendo o desvio maior para a luz azul e menor para a luz vermelha, o que está relacionado à relação inversa entre o comprimento de onda da luz e o grau de refração.

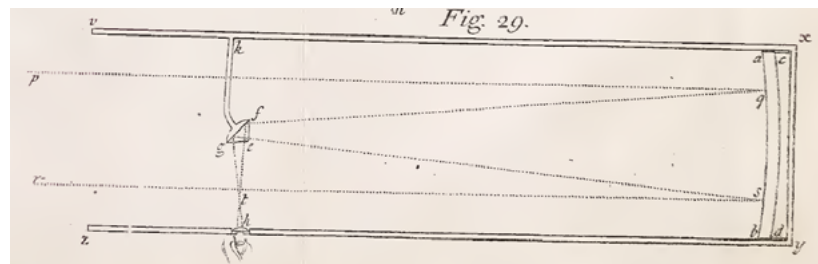
O fenômeno descrito por Newton compromete a forma real dos objetos celestes ao serem observados, fazendo com que corpos esféricos aparentem ser ovalados. Para um observador leigo, tal efeito poderia ser interpretado como uma característica intrínseca dos astros. A resolução das imagens de planetas do Sistema Solar, portanto, torna-se prejudicada, e em determinados casos, especialmente em telescópios com aberturas limitadas, a visualização detalhada de objetos distantes se torna inviável. Essa dificuldade, inclusive, foi vivenciada por Galileu, cuja descrição de Saturno demonstrava equívocos em função das limitações ópticas de seu instrumento.

Como resposta a esse problema, Newton propôs uma nova abordagem: o uso de espelhos em vez de lentes como elemento principal do telescópio. Ele desenvolveu um instrumento baseado na reflexão da luz, utilizando um metal côncavo no lugar da objetiva de vidro. O espelho foi moldado a partir de uma esfera com diâmetro de aproximadamente 63,5 cm, o que resultou em um tubo óptico com cerca de 16 cm. Esse telescópio foi concebido por volta de 1668 e, poucos anos depois, em 1671, Newton enviou um exemplar à Royal Society.

Sua invenção foi apresentada oficialmente à comunidade científica em 1672, por meio de um artigo publicado na *Philosophical Transactions*. O telescópio refletor descrito por Newton, posteriormente denominado telescópio newtoniano, possui um tubo mais curto do que os telescópios de Galileu, mas com um poder de resolução superior, uma vez que elimina os problemas provocados pela refração e pela aberração cromática. Embora continue

utilizando lentes nas oculares, como é comum em todos os tipos de telescópios, sua principal inovação está na substituição da objetiva por um espelho.

Figura 10 - Esquema do telescópio refletor de Newton



Fonte: Óptica, de Isaac Newton (1704).

*Imagem retirada do livro original de Isaac Newton. A luz entra pelo tubo, reflete no espelho côncavo (a b), é desviada pelo espelho plano/prisma (f) e direcionada ao ponto de observação (h). Esse design reduzia as aberrações ópticas comuns nos modelos da época.

Diferente da abordagem mais prática e resumida adotada por Galileu, Newton ofereceu em sua obra uma explicação detalhada sobre a construção do telescópio refletor. Ele discorreu sobre o processo de fabricação do espelho metálico, bem como sobre a possibilidade de substituí-lo por uma superfície vítrea, visando maior durabilidade. Também explicou como evitar distorções adicionais por meio do polimento simétrico da superfície refletora, assegurando que a curvatura fosse igual em todas as direções, e como o prisma utilizado no desvio da luz deveria ser ajustado para conduzir a imagem corretamente até a ocular. Ainda que o instrumento gerasse imagens invertidas, Newton sugeriu uma forma de corrigir essa inversão por meio do formato esfericamente convexo de certos elementos do prisma, de modo que os raios de luz fossem devidamente redirecionados antes e depois de atravessá-lo.

Antes de concluir sua análise sobre os telescópios, Newton também discutiu as limitações impostas pela atmosfera terrestre.

Destacou que, mesmo com o aperfeiçoamento teórico e técnico dos telescópios, haveria obstáculos que não poderiam ser superados do solo, devido à constante agitação do ar, visível pela cintilação das estrelas. Como alternativa, sugeriu a instalação de telescópios em locais elevados, como o topo de montanhas, acima das nuvens mais densas, a fim de minimizar os efeitos da atmosfera sobre a imagem observada.

Essa reflexão de Newton antecipa uma das grandes conquistas da astronomia moderna: a instalação de telescópios fora da atmosfera terrestre. Tal marco só seria alcançado séculos mais tarde, com o lançamento do Telescópio Espacial Hubble, em 1990, que finalmente permitiu a observação de objetos celestes com nitidez e sem as distorções provocadas pelo ar. A contribuição de Newton, portanto, permanece como um dos pilares do desenvolvimento da astronomia observacional, não apenas por apresentar um novo modelo de instrumento, mas por unir teoria e prática na busca por uma observação mais precisa e fiel do cosmos.

TELESCÓPIO ESPACIAL HUBBLE: A REVOLUÇÃO NA ASTRONOMIA

Uma das principais questões que dificultam a utilização de telescópios no nosso planeta é a atmosfera, que permite a vida humana na Terra, mas absorve ou reflete grande parte da luz proveniente de estrelas e planetas do nosso Sistema Solar. A luz, ao incidir na interface entre dois meios, tem uma proporção de sua intensidade refletida, enquanto a outra parte é refratada chegando ao observador, assim, a quantidade de luz que chega é menor, mais tênue do que a quantidade original emitida pelo corpo celeste e pelas estrelas distantes.

Outro ponto de grande dificuldade para as observações são as distorções que são causadas pelas camadas de ar da atmosfera que têm temperaturas diferentes e interagem de forma diferente com a luz. Essa interação e essa diminuição de intensidade são maiores à medida que nos afastamos do zênite, interferindo diretamente nas observações que fazemos de corpos e objetos celestes, tais como os planetas, estrelas, nebulosas etc.

Mais um problema de grande interferência na qualidade das observações diz respeito ao clima: em alguns momentos, os céus não estão favoráveis às observações e isso implica uma grande perda de tempo aos astrônomos. Para contornar esse aspecto, alguns telescópios são colocados em regiões muito áridas, tal como o Deserto do Atacama¹², no entanto, ainda assim não é possível ver todo o céu ao mesmo tempo, e sim uma faixa acima do horizonte, limitando as observações a algumas horas durante a noite (ou dia, dependendo do objeto celeste a ser observado).

Durante muito tempo, os astrônomos tentaram encontrar maneiras aqui na Terra de diminuir ainda mais as interferências da atmosfera e do clima nas observações celestes, porém a grande maioria das tentativas não foi frutífera a ponto de reduzir cada vez mais os empecilhos às observações celestes¹³. Foi com o desenvolvimento da tecnologia espacial e com o domínio dessas ferramentas que os cientistas conseguiram ampliar os horizontes da observação celeste e planejar um telescópio que ficasse fora da superfície terrestre, ou seja, em órbita ao redor de nosso planeta.

12 O Deserto do Atacama, localizado no Chile, é especialmente importante em virtude de alguns fatores: (i) a altitude varia entre 2.000 m e 5.000 m, isso faz com que a luz proveniente dos objetos tenha uma barreira menor de atmosfera para atravessar; (ii) a baixa precipitação de chuvas faz dele um dos lugares mais secos da Terra, já que, ao longo do ano alguns lugares deste deserto, há no máximo 30 mm de chuva por ano; e (iii) a baixíssima poluição luminosa, pois o local é afastado de grandes cidades e o Chile tem leis específicas contra a poluição luminosa em suas cidades.

13 Atualmente, existem configurações e tecnologias em telescópios que corrigem as distorções causadas pela turbulência atmosférica. Essas são conhecidas como óptica adaptativa e fazem parte das chamadas configurações ativas de telescópios.

A esse telescópio foi dado o nome de Telescópio Espacial Hubble (*Hubble Space Telescope* - HST), em homenagem a Edwin Powell Hubble (1889–1953), um grande astrônomo americano que foi pioneiro no desenvolvimento da teoria de expansão do Universo. Esse telescópio foi colocado em órbita em 1990 e orbita a uma distância de aproximadamente 500 km da superfície terrestre, ou seja, uma órbita baixa, fazendo com que dê uma volta ao redor da terra em aproximadamente 97 minutos. Todo o sistema de transmissão de dados, de giroscópio e navegação são acionados pela energia solar, gerada através de painéis fotovoltaicos que são colocados nas laterais do corpo do telescópio, que tem aproximadamente 13 metros de comprimento e 4 metros de diâmetro, com aproximadamente 11 toneladas.

Figura 11 - Telescópio Espacial Hubble, lançado em 1990



Fonte: science.nasa.gov/mission/hubble/, NASA (2025).

*O Telescópio Espacial Hubble, lançado em 1990, orbita a cerca de 500 km da superfície terrestre, livre das distorções atmosféricas que limitam os telescópios em solo. Graças a ele, foi possível registrar galáxias extremamente distantes e obter detalhes inéditos de planetas próximos.

O Telescópio Hubble é especial em virtude de seu posicionamento fora da atmosfera e, mesmo que sua óptica seja inferior (diâmetro de espelhos, abertura e distância focal) a alguns que existem aqui na Terra, as imagens que são provenientes desse equipamento superam qualquer um dos que foram construídos até então.

As galáxias mais distantes foram fotografadas pelo HST¹⁴, bem como as imagens com melhor resolução dos planetas próximos. Isso é resultado de uma série de avanços tecnológicos que permitiram a utilização de um telescópio que orbite a Terra, algo que não era pensado pelos astrônomos antigos, nem mesmo por Galileu Galilei a partir de 1609, quando utilizou sua luneta pela primeira vez.

14

Em dezembro de 2022 o Telescópio Espacial James Webb (JWST) quebrou o recorde do Telescópio Espacial Hubble. O James Webb, diferentemente do seu antecessor, captura imagem dos objetos na faixa do infravermelho, que possui comprimentos de onda maiores que os visíveis.



**ÓRBITAS, LEIS
DO MOVIMENTO
PLANETÁRIO
E GRAVITAÇÃO
UNIVERSAL**

A TRAJETÓRIA DOS CORPOS AO REDOR DO SOL

Um tempo atrás, peguei-me pensando em como a nossa mente é adaptada ao estudo e emprego das figuras planas e da geometria. Ao darmos nossos primeiros passos no desenho de objetos, ainda no ensino infantil, usamos as figuras planas, usamos triângulos, trapézios, retângulos e quadrados para desenhar uma casa, círculos para desenhar uma bola de futebol e desenhamos um carro juntando diversas figuras geométricas que nem sabíamos existir.

Conseguimos identificar essas formas nas construções civis, na natureza e em proporções do nosso corpo, tal como o homem vitruviano de Leonardo da Vinci. Da mesma forma que no nosso entorno existem essas figuras planas, nos céus também existirá o emprego dos mesmos princípios da geometria. Vamos ver como podemos usar esse ramo da matemática pra estudar a trajetória dos corpos celestes, indo desde os planetas até os cometas.

Duas figuras planas são essenciais para o nosso estudo: o círculo e a elipse. Observamos que uma delas é, na verdade, um caso especial da outra e que ambas podem facilmente ser desenhadas.

O círculo é uma figura plana bastante conhecida e sua matemática é bem definida desde tempos anteriores a Euclides (escritor do livro “Elementos”, que sintetiza toda a geometria conhecida até a sua época). Naquela época, em 300 a.C., a matemática era bem diferente da que temos atualmente, essa figura plana é definida através de uma equação (1) no plano xy , tal como escreveremos a seguir.

$$(1) \quad (x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$$

A equação (1) é denominada de equação reduzida do círculo e x e y são as coordenadas, enquanto a e b são as coordenadas dos

pares ordenados referentes ao centro do círculo. Quando essa figura está centrada na origem, pode-se escrever uma equação mais simples.

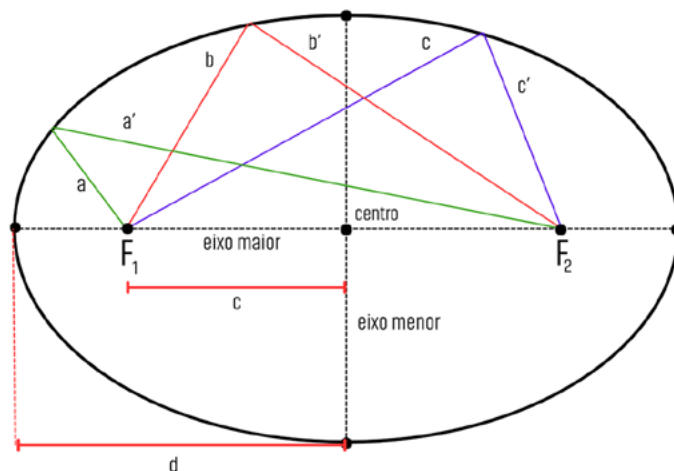
$$(2) \quad x^2 + y^2 = r^2$$

Quando nos referimos à elipse, observamos muitas semelhanças na equação dessa figura plana. A elipse é uma espécie de círculo achatado e podemos ter a equação (3) para essa figura:

$$(3) \quad \frac{(x - C_1)^2}{a^2} + \frac{(y - C_2)^2}{b^2} = 1$$

Na equação (3) os pontos C_1 e C_2 representam o centro da figura em questão. A elipse tem, como já mencionamos anteriormente, um eixo maior que o outro e, ao longo desse eixo, temos dois pontos que denominamos de focos.

Figura 12 - Elementos de uma elipse



Fonte: elaborado pelo autor.

*Os focos F_1 e F_2 , o eixo maior e o eixo menor estão destacados. A soma dos segmentos $a+a'$, $b+b'$ e $c+c'$ é constante e igual ao comprimento do eixo maior. A excentricidade pode ser estimada geometricamente pela razão d/a , onde d é a distância de um foco ao centro e a é o semieixo maior.

Quanto mais distantes forem esses focos um do outro, mais excêntrica é a elipse, ou seja, mais achatada é essa figura geométrica. Ao contrário, quando essa figura tem os focos muito próximos, mais próxima de um círculo se torna a elipse, de modo que, no limite dessa aproximação, uma figura tende à outra.

Os planetas, tal como foi defendido pelo astrônomo alemão Johannes Kepler, descrevem órbitas elípticas ao redor do Sol, estando a nossa estrela em um dos focos da elipse. Isso significa que ora o planeta está mais próximo do Sol, ora está mais afastado. No caso de alguns planetas do Sistema Solar, essa diferença entre o ponto máximo de afastamento, denominado de afélio, e o ponto mínimo, denominado de periélio, é muito pequena, fazendo com que no fim não se perceba a diferença visual no aumento ou diminuição do tamanho do Sol.

A Lua também descreve movimento elíptico ao redor da Terra que se posiciona em um dos focos dessa elipse. Em certos momentos, nosso satélite passa pela posição mais próxima do nosso planeta, denominada perigeu, bem como pela posição mais distante, denominada de apogeu.

A maior parte dos objetos descrevem naturalmente essa trajetória elíptica ao longo de sua translação ao redor do Sol, no entanto, é necessário diferenciá-las umas das outras, pois nem todos os corpos se deslocam com trajetórias próximas de uma circunferência. Um parâmetro importante para analisar as elipses é a excentricidade, a medida da proporção com que os focos se encontram afastados do centro da elipse. Os cometas descrevem trajetórias bem mais alongadas que os planetas. Ao longo de suas órbitas, eles se afastam por longos períodos, indo até os confins do Sistema Solar, chegando, em alguns casos, ao Cinturão de Kuiper, para depois retornar lentamente.

Um exemplo de um objeto que se desloca ao longo de uma trajetória elíptica é o Cometa Halley (1P/Halley), que tem período de aproximadamente 76 anos, tendo passado pela última vez no ano de 1986.

As nomenclaturas de cometas e alguns asteroides seguem uma regra específica. Inicialmente é colocado um número que indica a ordem de observação e descoberta do cometa, em seguida algumas letras devem ser acrescentadas (dentre as diversas, destaca-se: P – periódico; C – não periódico ou sem confirmação de retorno; D – desintegrou-se ao passar próximo ao Sol ou foi perdido durante sua trajetória; e I – cometa interestelar), por fim são colocadas algumas informações úteis, como o nome do descobridor ou uma sigla que remeta à data de sua descoberta.

Os cometas em geral são divididos em três partes: Núcleo, Coma e Cauda. O núcleo de um cometa é a parte que compõe quase toda a sua massa e da onde derivam as outras duas. Ele é composto por gelo, poeira e rocha e, por sofrer variações de temperatura ao longo de sua trajetória pelo Sistema Solar, é submetido à sublimação e congelamento sucessivamente.

Figura 13 - Registro do objeto interestelar Borisov (2I/Borisov) mostrando núcleo, cauda e coma, feito pelo Telescópio Hubble



Fonte: science.nasa.gov/asset/hubble/comet-2iborisov/, NASA (2019).

*Este objeto não tem origem no nosso Sistema Solar e segue trajetória hiperbólica, passando perto do Sol em um determinado tempo e em seguida sendo arremessado para fora do Sistema Solar novamente. Até o presente momento (julho de 2025), foram descobertos apenas três objetos interestelares, no entanto, esses objetos já estiveram presentes ao longo de toda a história do nosso Sistema Solar.

Ao chegar muito próximo da nossa estrela, os compostos do núcleo derretem progressivamente, dando origem ao coma, uma nuvem de gás e poeira que envolve o núcleo tal como uma atmosfera. A coma pode ter milhares de quilômetros e é resultado do processo de sublimação do gelo.

A Cauda do cometa é resultado da pressão de radiação proveniente do sol sobre a coma, que faz com que esta parte do cometa se alongue por milhares de quilômetros, tal como uma cauda de um animal, daí o nome sugestivo. Em geral essa estrutura aponta no sentido radial oposto ao sol. O comprimento da cauda dependerá de diversos fatores, tais como a aproximação do cometa com relação ao sol e também a quantidade de material disponível para sublimação, ou seja, a massa de gás e poeira, mas em geral essa estrutura tem milhares de vezes o tamanho do cometa.

Depois de fazermos esse tour pela trajetória dos corpos ao longo do Sistema Solar, poderemos entender como os corpos se deslocam ao redor do sol e qual a importância dessa informação no estudo dos planetas. No entanto, ainda é possível utilizar uma trajetória circular para fazer previsões sobre a posição dos planetas, estas são precisas e foram utilizadas largamente ao longo dos séculos, tais como vimos em momentos anteriores neste livro.

AS LEIS DE KEPLER

Por muitos séculos, o principal problema da Astronomia foi a determinação com precisão da posição dos planetas. Este trabalho de descrição perfeita da dança dos astros na abóboda celeste foi buscado por diversos modelos, alguns com grande precisão, é claro, mas nem todos foram tão convincentes quanto os modelos de Cláudio Ptolomeu e Nicolau Copérnico. Mesmo assim, o modelo de

Ptolomeu e posteriormente o de Copérnico para o Sistema Solar não conseguiam descrever com a precisão necessária a posição de Marte, em que ocorriam desvios de aproximadamente oito minutos de arco.

Embora os modelos de Copérnico e Ptolomeu tenham trazido grandes avanços para o entendimento do cosmos, tais como o cálculo de raios de órbitas, a medida da distância Terra-Sol ou ainda a medida da distância Terra-Lua, era necessário abandonar os sistemas propostos e refinar as considerações realizadas, permitindo que a exatidão fosse alcançada com novos modelos para o Sistema Solar.

Foi somente em 1608 que o matemático Johannes Kepler introduziu leis necessárias para acomodar os movimentos de todos os planetas e corrigir as discrepâncias entre o que era observado e o que era previsto pelos modelos utilizados até então. Kepler, através de dados observacionais de seu mentor, Tycho Brahe, e após muitas considerações realizadas, conseguiu descrever, ao final de vários anos, o Sistema Solar. Essas leis podem ser resumidas tal como a seguir:

1. Todos os planetas se movem em órbitas elípticas, estando o Sol em um dos focos da elipse.
2. O raio vetor que liga o Sol aos planetas percorre áreas iguais em tempos iguais.
3. O quadrado do período orbital de qualquer planeta é proporcional ao cubo do semieixo maior da órbita elíptica.

A primeira Lei de Kepler foi primordial para ajustar a órbita do planeta Marte aos dados experimentais, o que não foi possível mesmo com a utilização de Epíclis e outros artifícios que eram presentes nos modelos predecessores.

Existe, como mencionamos anteriormente, a dificuldade de detectar a excentricidade da órbita planetária do planeta Terra a olho nu, sendo uma tarefa possível apenas com aparatos tecnológicos

como telescópios e câmeras acoplados a ele. Por essa razão, não conseguimos, ao longo dos milênios, determinar qualquer variação do disco visual do Sol ou da Lua.

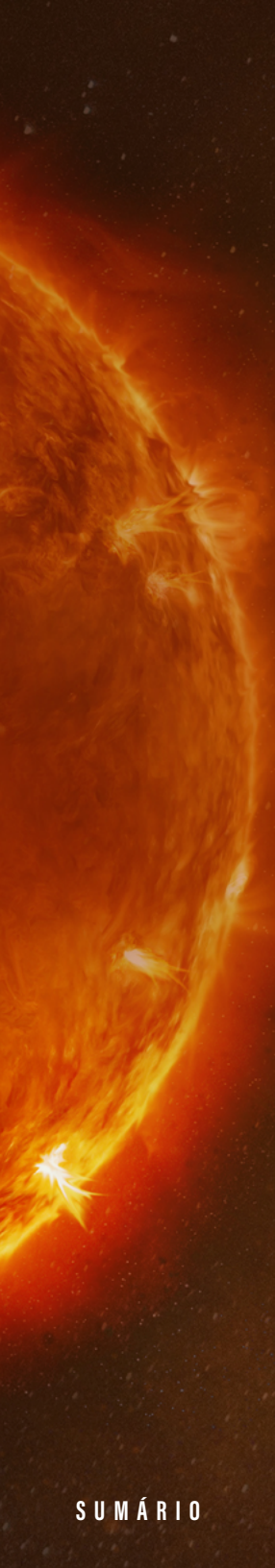
Quanto à segunda Lei de Kepler, observa-se a relação de aumento ou diminuição com relação à velocidade em órbita do planeta, sendo maior quando próxima ao periélio e menor próxima ao afélio. A área varrida pelo raio vetor que une o planeta ao Sol é constante ao longo da trajetória descrita pelo planeta, tendo em vista que a força gravitacional segue a lei do inverso do quadrado da distância entre as massas envolvidas. A força gravitacional não havia sido descrita na época do desenvolvimento da segunda Lei de Kepler, sendo somente publicada no ano de 1687.

A terceira Lei de Kepler também pode ser apresentada de acordo com a sua formulação matemática. Sendo T o período de revolução de um planeta cuja órbita tem raio R , podemos escrever:

$$\frac{T^2}{R^3} = \text{constante}$$

Kepler tentava encontrar relações entre as órbitas dos planetas do Sistema Solar desde a sua juventude e, embora essa relação só tenha sido publicada muito depois de suas duas predecessoras, foi exitosa tanto quanto, sendo aplicada aos planetas conhecidos até então.

Tendo em vista que as leis de Kepler são baseadas na lei do inverso do quadrado da distância entre as massas, observa-se que os corpos que estejam sob a ação dessas forças também seguirão as mesmas relações ou proposições apresentadas anteriormente. A constante associada à órbita dos corpos ao redor de um objeto massivo, após o advento da teoria da gravitação, passou a ser identificada como:


$$(4) \quad \frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

Na equação (4), G é a constante universal de gravitação e M , a massa do corpo central, assim podemos calcular o valor da constante de Kepler para qualquer sistema, desde que conheçamos o valor da massa do objeto central.

Podemos utilizar a equação (4) para calcular o valor da constante de Kepler ou, a partir de medidas experimentais, realizar previsões sobre o raio da trajetória de satélites naturais, o que, em verdade, foi realizado pelo idealizador da teoria, para Júpiter.

As leis de Kepler não apenas permitiram resolver as antigas discrepâncias nos modelos planetários, como também possibilitaram determinar uma constante característica para cada sistema gravitacional. No caso do Sistema Solar, ao tomarmos o período em anos e o raio orbital em unidades astronômicas, a constante de Kepler assume o valor aproximado de 1, isso pode ser visto aplicando a equação para a terceira lei de Kepler, simplificando significativamente os cálculos para os planetas ao redor do Sol.

No sistema de Júpiter e seus satélites, essa mesma razão (considerando o período em anos e o raio em unidades astronômicas) resulta numa constante próxima de 0,00015, refletindo a diferença de massa entre o Sol e Júpiter e evidenciando que cada sistema possui sua própria regularidade gravitacional.

No próximo capítulo, aplicaremos uma ideia geométrica simples para estimar o raio do Sol com base nos dados da distância entre Terra, Lua e Sol e o raio da própria Lua.

IV

MEDINDO O UNIVERSO:

RAIOS, DISTÂNCIAS
E A VELOCIDADE DA LUZ

COMO MEDIR O RAIOS DO SOL

Certo dia, durante uma viagem para divulgação de astronomia, um aluno me perguntou qual era o valor do raio do Sol. Eu não tinha disponível na memória o dado que ele havia solicitado, no entanto, eu lembrava de alguns outros valores para a Lua e também da distância da Terra até o Sol, então peguei uma calculadora que estava em minha bolsa e comecei a calcular. Prontamente apresentei o resultado ao aluno, que mostrou a real intenção dele ao fazer a pergunta: me testar.

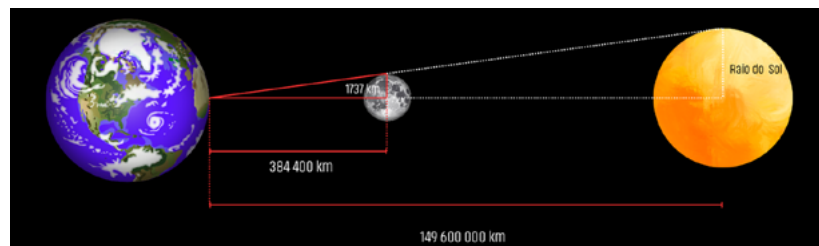
É comum que apareçam esses alunos e encarar com naturalidade esses momentos faz parte da carreira docente, que está em perfeita consonância com o estabelecimento de uma confiança na relação professor-aluno.

Então expliquei para ele o método que utilizei e ainda falei sobre outro ponto de grande importância para a astronomia, os eclipses e transições planetárias.

No céu, tanto a lua quanto o sol exibem as mesmas características quanto ao ângulo sólido que ocupam no céu. Dentre essas coincidências que a natureza exhibe, essa foi a que eu utilizei para calcular o tamanho do Sol, ou seja, para calcular o seu raio. Vamos então ao método.

A Terra está a uma distância de aproximadamente 149 milhões de quilômetros da nossa estrela central, enquanto a Lua está a uma distância de 384.400 km da Terra, e esse valor varia ligeiramente ao longo do ano. O nosso satélite natural, a Lua, tem um raio de 1.737 km e é responsável pelas marés por atrair gravitacionalmente as massas de água em sua direção ao longo do seu movimento de translação ao redor do nosso planeta.

Figura 14 - Distâncias médias entre a Terra, a Lua e o Sol, bem como os respectivos raios da Lua e do Sol



Fonte: elaborado pelo autor.

*A Lua está a cerca de 384.400 km da Terra, enquanto o Sol está a aproximadamente 149.600.000 km. Os corpos celestes estão com tamanhos exagerados para expressar melhor o método utilizado.

Usando a semelhança de triângulos, temos uma boa aproximação para o raio do Sol, nos dando um valor aproximado de 672.000 km, sendo que o valor atualmente aceito para o raio do Sol é de 696.340 km, ou aproximadamente 700.000, usado anteriormente.

É um cálculo simples, tal como foi mostrado, no entanto, isso abriu um espaço para diversas discussões como mencionei, tal como os eclipses e a formação da Lua, que será comentada adiante.

Os eclipses ocorrem anualmente em diversos locais do planeta e exibem ciclos de aproximadamente 18 anos (ciclo de Saros). Esse fenômeno natural ocorre em virtude de a Lua orbitar nosso planeta em um plano quase igual ao plano que a Terra orbita o Sol. Em certos momentos, a nossa visão desses objetos compartilhará a mesma linha de visão, causando os fenômenos que foram relatados e que estão no cerne de nossa discussão. Se ambos, Lua e Sol, estivessem no mesmo plano de órbita, teríamos eclipses mensalmente (sempre na fase de Lua nova – Eclipse solar – e na fase de Lua cheia – Eclipse Lunar), o que, de fato, não ocorre.

Existem dois tipos de eclipses: o que denominamos total, que é quando a Lua esconde o Sol totalmente de nossa visão, e o anular, quando a Lua tampa parcialmente o Sol, deixando somente

um anel solar. Já comentamos anteriormente a razão para isso, sendo a de que a Lua não orbita o nosso planeta seguindo uma trajetória circular, mas, sim, uma trajetória elíptica, ou seja, uma trajetória em que por certos momentos se encontra mais próxima e em outros se encontra mais afastada. Esses pontos são denominados de perigeu e apogeu, que são o ponto mais próximo e o mais distante da Lua com relação à Terra respectivamente. Assim, quando um eclipse ocorre, e neste momento a Lua está mais próxima da Terra, temos o eclipse total; ao contrário, teremos o eclipse anelar.

Essa aproximação e esse afastamento da Lua com relação à Terra não são tão grandes, já que a excentricidade da elipse descrita pela Lua em seu movimento de translação é pequena, ou seja, o percentual de achatamento da elipse a torna quase um círculo.

Ao término das nossas discussões sobre a Lua, sobre eclipses e raios, observei que o estudante queria perguntar mais coisas, no entanto as questões dele agora estavam mais voltadas ao quesito de curiosidade do que de questionamentos para me testar. Tratamos de outros assuntos, como a formação da Lua e as suas crateras, no final me senti como se tivesse saído de uma aula, não uma aula formal, mas ainda assim uma aula. Os temas que tratamos enquanto seguíamos nosso caminho para o hotel ainda serão visitados ao longo deste livro, conseguiremos mostrar que a Lua é tão interessante quanto bela.

A FINITUDE DA VELOCIDADE DA LUZ

A luz sempre foi um dos fenômenos mais intrigantes da natureza, somos questionadores do que ela é, sua velocidade, sua composição etc. desde muito tempo antes de nossa era. Grandes revoluções científicas foram embasadas nos conceitos e estudos

sobre a natureza da luz e físicos como Albert Einstein (1879–1955), Max Planck (1858–1947), Aristóteles, Christian Huygens (1629–1695) e Isaac Newton se enveredaram na tentativa de buscar a teoria perfeita que descrevesse as propriedades desse ente da natureza. Quase todos eles não conseguiram ver a resposta final sobre os aspectos da velocidade da luz, por exemplo, ou ainda a verificação das hipóteses referentes à natureza da luz.

A luz tem comportamento dual: ora como onda e ora como partícula, variando em comportamentos de acordo com o arranjo experimental utilizado ou ainda o nível de observação: macroscópico ou microscópico. Além de questionamentos sobre a natureza da luz, durante muitos séculos nos perguntamos sobre a velocidade desse ente da natureza ser finita ou não.

A resposta, tendo em vista a difusão de conhecimentos científicos que existe hoje em dia, pode parecer óbvia, no entanto, em outros tempos, a velocidade da luz era algo unimaginável ou ainda infinita. Esses debates tomaram corpo ainda na Grécia e tanto a finitude de sua velocidade quanto o oposto tinham defensores ferrenhos.

Físicos como Johannes Kepler, René Descartes (1596–1650) e outros tantos gênios de tempos diversos ainda contabilizavam a velocidade da luz como sendo de um valor infinito. A velocidade de aproximadamente 300.000 km/s só foi calculada muito tempo depois e demonstrado experimentalmente igualmente tarde. Até os primórdios do Renascimento, era creditado o valor infinito para a velocidade da luz.

Empédocles (495 a.C. – 435 a.C.), pensador grego da época de Aristóteles, era um dos que defendiam uma velocidade finita para a luz, mas seu pensamento foi ofuscado pelo de Aristóteles, que acreditava no oposto, ou seja, a velocidade infinita da luz. Alguns fatos foram trazidos por Aristóteles para demonstrar a propriedade da velocidade dessa manifestação eletromagnética.

Dizia Aristóteles que, ao fecharmos os olhos em uma noite escura sob a luz das estrelas ou do luar, não obteríamos luz alguma sendo detectada, no entanto, ao abrirmos os olhos, os nossos sentidos perceberiam instantaneamente a luz desses corpos celestes, provando, assim, que a sua velocidade era infinita. Quando o Sol se escondia atrás das nuvens, observávamos automaticamente a queda na luminosidade, mesmo a nuvem estando muito acima de nossas cabeças. Esse era o efeito causado pela velocidade da luz, que, na concepção dele, era infinita.

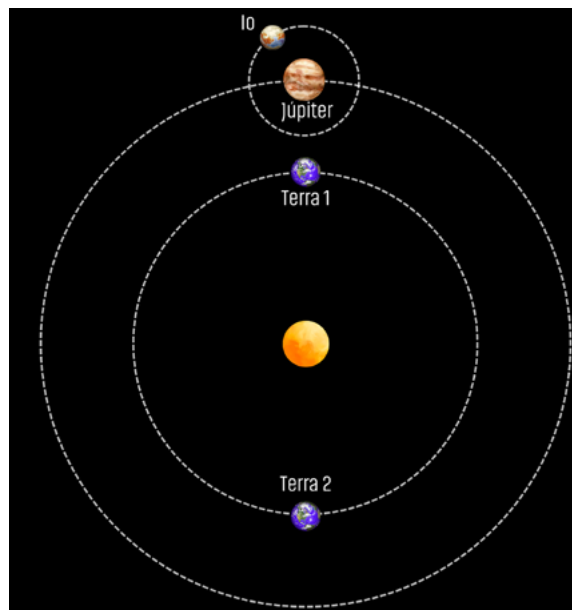
A distância que pode ser percorrida pela luz em um segundo é de aproximadamente 7,5 vezes o valor da circunferência do equador terrestre. Mesmo se tomarmos o limiar de percepção da visão do ser humano, ainda assim teremos uma distância considerável. Para esse limite de percepção da visão humana (1/24 s), é necessária uma distância de 12.500 km, o que é quase o dobro da distância entre Alexandria e a antiga cidade de Siena, palco do experimento de Eratóstenes.

Na época de Empédocles e Aristóteles, não era possível realizar um experimento que provasse uma teoria ou outra sobre a luz. Foram necessários anos de evolução da ciência e dos métodos científicos para que pudéssemos pôr fim às dúvidas que pairavam sobre o tema.

Alguns pensadores gregos sabiam que os sentidos não eram confiáveis, no entanto, as ideias de Aristóteles perduraram até depois da Idade Média, e foram fortemente questionadas pelo gênio científico de Galileu. Embora o Físico e Matemático italiano não tenha demonstrado em suas experimentações o valor finito da velocidade da luz, era comum encontrar, em seus escritos sobre o tema, a questão da finitude dela. Em 1632, em seu célebre livro "Diálogos sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano", eram apresentadas as bases do pensamento de Galileu sobre a velocidade da luz e também outras propostas que iam de encontro ao que Aristóteles havia falado tempos atrás.

Essa questão só ganhou vislumbre de sua solução após observações astronômicas divulgadas pelo astrônomo Giovanni Cassini (1625–1712), que constatou discrepâncias entre medidas observacionais de eclipses na primeira lua de Júpiter. Quando a Terra e o gigante gasoso estavam em oposição (Figura 15 – Terra 1), ocorriam adiantamentos na imersão e emersão dessa lua com relação ao cone de sombra formado por Júpiter (Ocultação), e o oposto quando ocorre a conjunção entre esses dois planetas (Figura 15 – Terra 2). Essa ideia foi abandonada por ele, pois o efeito só pode ser notado para a primeira lua, nada foi constatado para as demais, mas a possibilidade de estudos posteriores continuou pairando sobre as cabeças de vários astrônomos da época.

Figura 15 – Terra em configuração planetária com Júpiter



Fonte: elaborado pelo autor.

*Terra 1 – em configuração planetária de oposição com Júpiter, marcando o ponto de maior proximidade durante aquele ciclo; Terra 2 – em configuração planetária de conjunção com Júpiter, marcando o ponto de maior afastamento durante aquele ciclo.

As observações de Cassini dos atrasos dos eclipses da Lua por Júpiter só poderiam ser explicadas devido à finitude da velocidade da luz. O astrônomo dinamarquês Ole Roemer (1644–1710), utilizando observações semelhantes, indicou que o Eclipse do primeiro satélite de Júpiter, previsto para o dia 9 de novembro, ocorreria com aproximadamente 1.000 segundos de atraso, tendo em vista a posição de conjunção entre os dois planetas e a diferença entre o caminho que haveria de ser percorrido pela luz, que nesse caso seria significativamente maior. O ano era 1676 e a previsão foi anunciada na Academia Real de Ciências e confirmada.

A medida da velocidade da luz era impossibilitada para a época, devido à imprecisão da distância Terra-Sol, que ainda não havia sido medida através das paralaxes do Sol no decorrer do ano devido à variação de posição do Sol no céu visto da Terra. As distâncias médias tidas como mais confiáveis eram de 120.750.000 km, que difere 19,30% do valor considerado hoje (149.600.000 km). Com os dados da época, teríamos uma velocidade de 241.500 km/s. No entanto, Roemer não fez o cálculo dessa velocidade *a priori*, contentando-se apenas em discutir a finitude da velocidade da luz em seu comunicado à comunidade científica da época.

Os dados referentes ao raio da órbita da Terra ao redor do Sol foram sendo refinados pelo próprio Giovanni Cassini, em colaboração com outros astrônomos, e assim foi se tornando cada vez mais possível encontrar um valor aproximado para a velocidade da luz. O próprio Roemer chegou a um valor de 225.000 km/s para a velocidade da luz, utilizando dados referentes ao valor do diâmetro da Terra e fazendo previsões mais precisas do atraso dos eclipses.

É possível refazermos os experimentos de Roemer e chegarmos aos valores conseguidos por ele nos dias atuais, no entanto, com a pouca disponibilidade de dados experimentais que existiam na época, em que a civilização acabava de emergir de um período de trevas científicas, e tendo poucos materiais de

precisão, é necessário mais do que ressaltar os números e evidenciar a genialidade dos métodos adotados, pois estes, sim, são de valor incomensurável.

A UNIDADE ASTRONÔMICA, O ANO-LUZ E O PARSEC

No estudo do Sistema Solar e do universo em geral, frequentemente lidamos com distâncias extremamente grandes – da ordem de milhões ou até bilhões de quilômetros. Algumas sondas que foram enviadas para estudar o nosso Sistema Solar externo já percorreram dezenas de bilhões de quilômetros e continuarão percorrendo o espaço por um tempo indefinido. Para facilitar a representação e a comparação dessas distâncias, foi estabelecido o uso de unidades de medida astronômicas, ou seja, padrões de referência baseados em distâncias conhecidas.

Desde a Antiguidade, especialmente com a difusão dos modelos heliocêntricos, a distância entre a Terra e o Sol passou a ser adotada como uma dessas unidades padrão. Essa medida foi chamada de Unidade Astronômica (UA).

Atualmente, define-se 1 UA como a distância média entre a Terra e o Sol, que equivale a aproximadamente 149,6 milhões de quilômetros. Essa unidade é amplamente utilizada para expressar distâncias dentro do Sistema Solar.

Além da UA, outra unidade muito comum em Astronomia é o ano-luz. Apesar do nome, o ano-luz não é uma medida de tempo, como muitas pessoas imaginam, mas, sim, uma medida de distância. Ele representa o percurso que a luz percorre no vácuo ao longo de um ano.

Sabendo que a luz viaja a cerca de 3×10^8 m/s e que um ano possui aproximadamente 31.536.000 segundos, o cálculo do ano-luz resulta em uma distância de cerca de 9,461 trilhões de quilômetros.

Apesar de parecerem números excessivamente grandes, essas unidades são essenciais para expressar as dimensões astronômicas do universo. Por exemplo, a estrela mais próxima da Terra, a Próxima Centauri, está localizada a aproximadamente 4,246 anos-luz de distância. Se fôssemos expressar essa distância em metros, teríamos um valor da ordem de 10^{16} metros, o que dificultaria enormemente a compreensão e o uso prático.

O Parsec é uma unidade de medida astronômica utilizada para expressar distâncias astronômicas em termos de paralaxe estelar. O termo "parsec" deriva da combinação de "parallax" e "arc-second", representando a distância a que uma estrela precisa estar para que sua paralaxe angular seja de um segundo de arco.

Em termos mais simples, 1 parsec é a distância a que uma estrela mostra uma paralaxe angular de 1 segundo de arco quando observada da Terra. Isso equivale a aproximadamente 3,26 anos-luz ou cerca de $3,09 \times 10^{13}$ quilômetros.

A origem do parsec remonta ao trabalho de astrônomos como Friedrich Bessel no século XIX, que perceberam que a posição aparente de uma estrela muda à medida que a Terra se move ao redor do Sol. O parsec é uma ferramenta crucial para calcular distâncias interestelares e é fundamental na compreensão da escala do universo.

A estrela tomada como referência para a definição do parsec é chamada de "estrela paralaxe" ou "estrela padrão de paralaxe". Inicialmente, a estrela escolhida para esse propósito foi a estrela Vega.

Entretanto, devido ao movimento próprio das estrelas, a escolha da estrela de referência foi ajustada ao longo do tempo. Atualmente, a Estrela de Referência Fundamental ICRS (*International*

Celestial Reference System) é utilizada para definir o sistema de coordenadas celestes, incluindo a unidade de parsec.

Em resumo, o parsec é uma medida que nos permite contextualizar e compreender as vastas distâncias no espaço interestelar, sendo uma unidade indispensável na astronomia moderna. O parsec é uma unidade de medida baseada na paralaxe estelar, e a estrela usada como referência para sua definição pode variar, mas, atualmente, é referenciada ao sistema ICRS.



O SOL:
NOSSO ASTRO-REI

O SOL: O NOSSO ASTRO-REI

O Sol foi formado há aproximadamente 5 bilhões de anos, tendo sua formação ligada a uma série de fenômenos que, hoje em dia, são totalmente compreensíveis e seguindo um caminho que conhecemos muito bem. As estrelas são formadas nas galáxias devido à presença de gás, especialmente os gases frios, e, no caso do nosso Sol, gases compostos predominantemente de Hidrogênio (elemento mais simples e mais abundante do universo) e Hélio (um gás nobre, o segundo mais leve da tabela periódica e formado a partir da junção de núcleos de hidrogênio nas fornalhas do universo, as estrelas, e também no universo primordial).

É provável que tenha sido formado juntamente de outras estrelas, ditas irmãs gêmeas do Sol e que possuem a mesma classe espectral, sendo categorizadas de maneira simplista como anãs amarelas. Embora a estrela mais próxima do Sol, Próxima Centauri¹⁵, esteja a “apenas” 4,24 anos-luz do nosso astro-rei, elas não têm a mesma composição e não possuem idades aproximadas.

O Sol possui massa de aproximadamente $1,99 \times 10^{30}$ kg, e seu raio é cerca de 700.000 km. Por ser a estrela mais próxima da Terra, o Sol serve como referência para o estudo de outras estrelas. É comum, por exemplo, encontrar informações sobre buracos negros com massas dezenas ou até milhões de vezes maiores que a do Sol, ou estrelas com cerca de 30 vezes sua massa. Por esse motivo, o Sol

15

O Sistema de Alpha Centauri é formado por três estrelas, Alpha Centauri A, Alpha Centauri B e a Próxima Centauri. As duas primeiras orbitam em torno de um ponto em comum, sendo um sistema binário ou duplo. Estas duas estão distantes uma da outra por uma distância de 23 UA, enquanto a Próxima Centauri (uma anã vermelha) está a uma distância de 12.000 UA das duas primeiras citadas. A órbita da Próxima Centauri é longa e lenta, o que a torna, sim, uma estrela mais próxima da Terra.

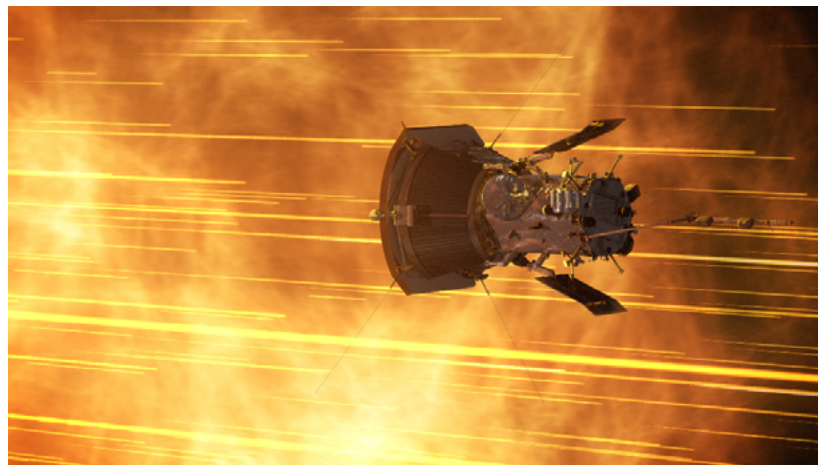
é adotado como unidade padrão de massa na Astronomia e, inclusive, em muitas áreas.

As estrelas são formadas a partir de nuvens e a evolução dessas massas de gás e poeira culmina na criação de condições para a fusão nuclear. Inicialmente tem-se uma *nuvem de gás e poeira*, proveniente de uma outra estrela que morreu e expulsou os gases restantes para o meio interestelar. Em seguida, por causa de agentes externos (uma explosão de uma estrela massiva próxima), essa nuvem de gás e poeira passa a se aglutinar em um espaço cada vez menor, ou seja, começa a encolher. E, por fim, forma-se a *protoestrela*, uma fase anterior à estrela propriamente dita. Essa protoestrela é uma nuvem de gás que aumenta progressivamente a sua massa e, por fim, acende-se a fusão nuclear, mecanismo pelo qual as estrelas produzem energia.

Ao término de todo esse processo, a estrela entra na fase estável e passa a queimar o seu combustível e transformar átomos leves em átomos pesados ao longo dos bilhões de anos de sua vida. Quando ela entra nesse período de estabilidade, dizemos que ela se encontra na fase principal, uma maneira de classificar as estrelas em virtude de seus brilhos e temperaturas.

Assim como outras estrelas, o Sol é formado por diferentes camadas, que vão desde as regiões mais internas até as partes externas. O núcleo solar, onde ocorrem reações de fusão nuclear, atinge temperaturas da ordem de $1,5 \times 10^7$ K (15 milhões de Kelvin). É nessa região que núcleos de hidrogênio se fundem para formar hélio, liberando a energia que será posteriormente irradiada.

A coroa solar é a região mais externa do Sol e ainda pouco compreendida. Apesar de sua distância em relação ao núcleo, pode atingir temperaturas superiores a 1 milhão de Kelvin e se estender por milhões de quilômetros. É visível em momentos específicos, tais como os eclipses em que o espaço escuro ao fundo do Sol contrasta com o brilho dessa região de nossa estrela.

Figura 16 - Sonda Solar Parker

Fonte: science.nasa.gov/science-research/heliophysics/, NASA (2025).

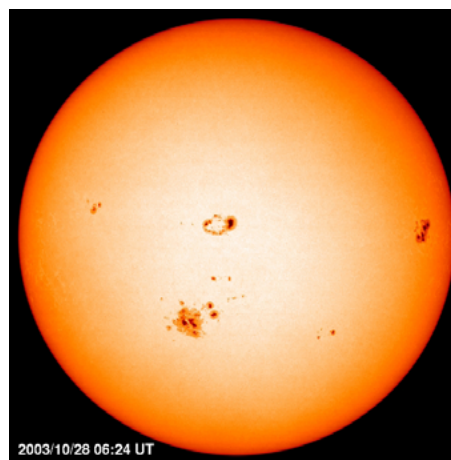
*A Sonda Solar Parker (Parker Solar Probe) tem como objetivo não somente o estudo do Sol, mas também "tocá-lo". Lançada em 12 de agosto de 2018, ela conta com um escudo de térmico de carbono que suporta temperaturas extremas. Esse escudo tem 11 cm de espessura e protege todos os sistemas da sonda de radiação e da transferência de calor por irradiação proveniente do Sol. Em 2021 a sonda adentrou a coroa solar, ou seja, passou pela *superfície crítica de Alfvén*, uma linha imaginária que serve para definirmos quando começa o Sol propriamente dito. A missão está prevista para durar até 2025 e a perspectiva é que ela chegue a uma distância de 6,2 milhões de quilômetros da fotosfera solar, uma distância pouco menor que 10 vezes a distância Mercúrio-Sol.

A cromosfera é a segunda região mais externa de nossa estrela e trata-se de uma fina camada de plasma (estado da matéria em que os elétrons e os núcleos dos átomos estão dissociados, separados, em virtude das altas temperaturas existentes) com temperaturas que variam de 6.000 a 100.000 Kelvin de temperatura, sendo observada comumente durante os eclipses, tal como a coroa solar.

Por baixo dessa camada – a cromosfera –, existe a fotosfera, que é a "superfície" do Sol. É nela que acontecem os fenômenos que foram inicialmente vistos por Galileu Galilei, as chamadas Manchas Solares. Essas regiões da fotosfera possuem temperatura mais baixa que o restante e são resultado de distorções no campo magnético

solar. Essas manchas solares são em geral maiores do que a Terra, chegando a alcançar dezenas de vezes o raio da Terra. Podemos utilizá-las para fazer a medida da velocidade de rotação do nosso astro central. Tal como o célebre Físico e Matemático italiano fez, chegaremos a conclusões semelhantes e veremos que o Sol tem movimentos diferentes no equador e nos polos, demorando em torno de 25 dias para regiões próximas ao equador, 27 dias para os locais com latitudes médias (até 45°) e 35 dias para os polos.

Figura 17 - Região ativa 10486



Fonte: soho.nascom.nasa.gov/gallery/images/, NASA (2020).

*O Observatório solar heliosférico, ou SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), fotografou a região ativa 10486, que causou um fenômeno impressionante, a chamada erupção de classe x do Sol, que é a erupção solar de maior intensidade. Essas erupções têm classificações que vão desde as mais baixas (erupções de classe C), passam pelas intermediárias (erupções de classe M) e chegam até as mais intensas (erupções de classe X). Além da classificação de acordo com um sistema de letras (C, M e X), ainda acompanham números que indicam quantas vezes essa erupção é mais intensa que a mais básica da classe, assim uma erupção de classe X1,0 é a menor dessa classe, enquanto que a X3,7 é 3,7 vezes mais intensa que a X1,0 e assim por diante. Essas erupções causam uma emissão de ondas eletromagnéticas que, dependendo da classe, podem causar inutilização em redes elétricas, apagões e a desativação de satélites. A maior mancha da figura tem uma área total equivalente a 15 planetas Terras e corresponde a uma erupção de classe X17,2. A erupção solar mais intensa foi a de 4 de novembro de 2003, em que foi registrada uma erupção de classe X28,0.

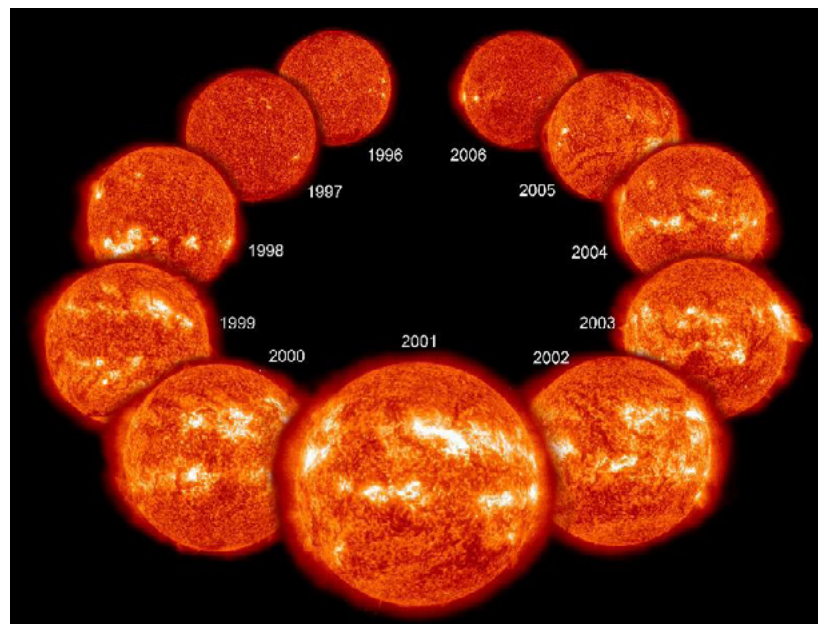
O Sol é o principal responsável pela emissão de vento solar e pela geração da energia que sustenta a vida na Terra. Ele é o elemento central do sistema do qual a Terra faz parte, sendo essencial para o funcionamento dos processos naturais e climáticos do nosso planeta. A fotosfera tem temperatura média de 5.700 K e é a zona vista de maneira direta por telescópios solares.

Além dessas três regiões, temos a zona convectiva e a radiativa, que são camadas solares que transferem a energia proveniente do núcleo predominantemente por irradiação e convecção, que são duas, de três, formas de transferir calor de uma região mais quente para outra mais fria.

Completa-se o sexteto de regiões com o núcleo, que, além das características citadas anteriormente, funciona como o coração de todas as estrelas, a região onde temos as mais altas temperaturas e onde são produzidos inicialmente os fótons de luz que demoram milhares de anos para chegar até a superfície do nosso planeta.

O Sol possui um ciclo de atividades de aproximadamente 11 anos, ou seja, nesse período a nossa estrela aumenta e diminui o número de manchas solares e também muda o seu campo magnético. Quando eu comecei a astrofotografar o Sol com filtro Baader, o Sol estava num período de mínimo, portanto quase não havia manchas para serem observadas. Ainda bem que não estávamos no Mínimo de Maunder, um período entre 1645 e 1715 em que as manchas solares e consequentemente a atividade solar diminuíram significativamente. Nesse período foram observadas menos de 50 manchas, em contraste com um número significativo nos ciclos normais. Os ciclos de 11 anos são chamados de Ciclos de Schwabe e desde 1715 não ocorreram variações significativas que indicassem que uma nova pausa seria realizada.

Figura 18 - Ciclo solar de Schwabe de 1996 a 2006



Fonte: soho.nascom.nasa.gov/gallery/images/, NASA (2020).

*O ciclo solar de Schwabe, de 1996 a 2006, durou aproximadamente 12 anos e 7 meses e teve o seu ápice em 2001. Em 2003, como já falamos anteriormente, desde o momento do início dos monitoramentos contínuos, este foi o maior ciclo em que tivemos a maior erupção solar, uma erupção de classe X28. Observe que, com o passar dos anos, a quantidade de manchas aumenta.

O Sistema Solar abriga uma imensa variedade de corpos celestes, muitos dos quais não foram mencionados aqui. Estamos a uma distância média de 8,3 minutos-luz e nossa estrela central tem aproximadamente 99,9% da massa de todo o Sistema Solar e completa uma volta ao redor do centro da Via Láctea (nossa galáxia) a cada 225 milhões de anos.

Ainda existem muitas questões a serem resolvidas pelos cientistas e mesmo próximo do nosso planeta, se comparado com a escala cósmica, ainda é um mistério. Nas próximas seções, poderemos conhecer mais corpos do nosso Sistema Solar.

VI

OS TELÚRICOS

MERCÚRIO: O INÍCIO DA JORNADA

Quando iniciamos nossa viagem pelo Sistema Solar, sempre partimos do planeta mais interno ao Sol para o mais externo, assim o primeiro planeta do Sistema Solar, seguindo essa perspectiva, é Mercúrio.

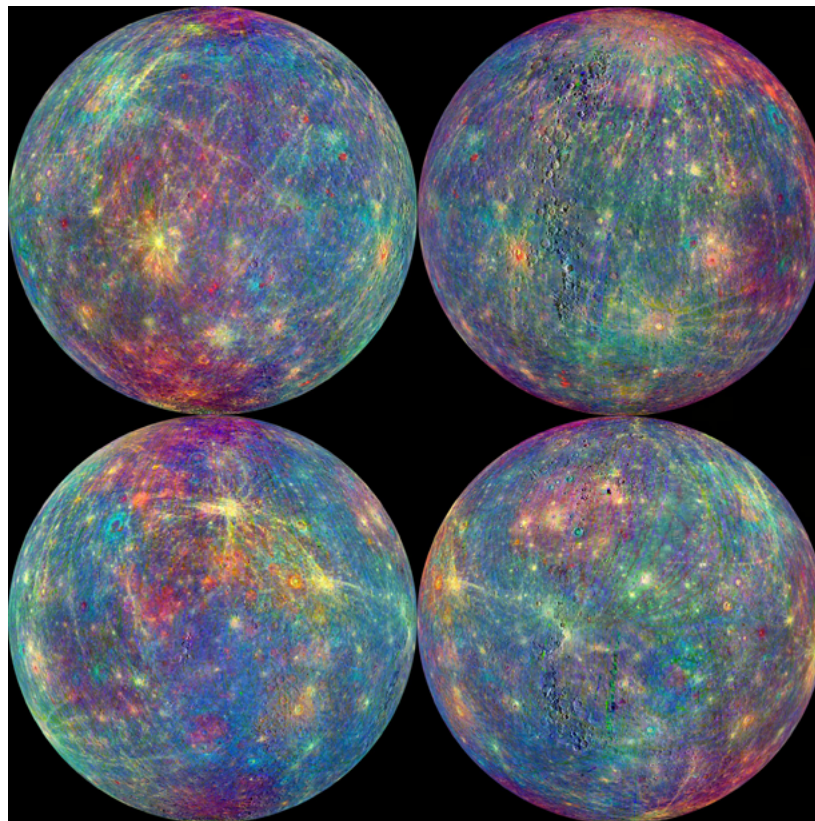
O nome desse astro tem origem no deus romano de mesma denominação e que, por ser muito rápido, era responsável por levar mensagens entre os deuses e alguns seletos humanos.

Mercúrio é um planeta rochoso, da classe dos telúricos, juntamente da Terra, Vênus e Marte, ou seja, os quatro primeiros planetas do Sistema Solar.

Assim como Vênus, o planeta não tem um satélite natural que o orbite e isso se deve a diversos fatores, dentre os quais o principal é sua distância com relação ao Sol.

Esse primeiro planeta tem raio de órbita média igual a 57,9 milhões de quilômetros, pouco mais que 0,38 UA (Unidade Astronômica), fazendo com que, devido à proximidade, o planeta seja varrido constantemente por ventos solares, que carregam partículas carregadas eletricamente pelo espaço. O periélio do planeta, ou seja, o ponto em que se aproxima mais do Sol, é de 46 milhões de quilômetros, enquanto que o afélio, o ponto mais afastado de nossa estrela, é de 69,8 milhões de quilômetros.

Figura 19 - Composição multiespectral feita pela sonda MESSENGER, lançada em 3 de agosto de 2004 e encerrada em 30 de abril de 2015



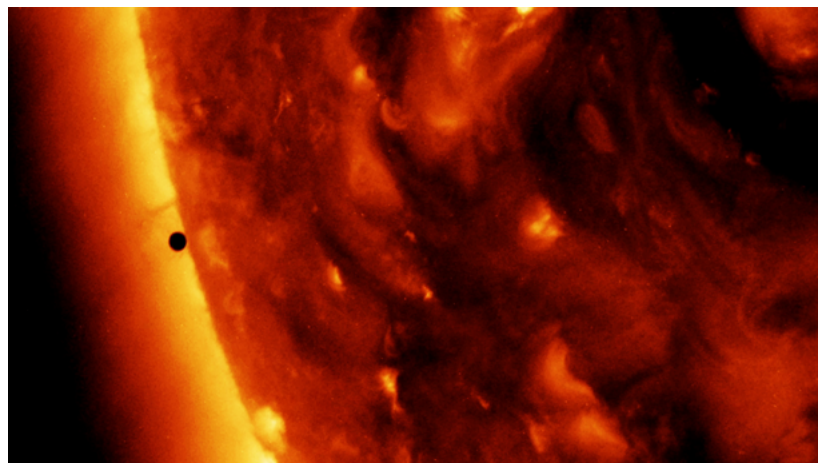
Fonte: nasa.gov/missions/small-collisions-make-big-impact-on-mercurys-thin-atmosphere/, NASA (2017).

*A imagem realça variações na composição da superfície de Mercúrio que não são visíveis a olho nu, permitindo estudar diferentes minerais e processos geológicos do planeta mais próximo do Sol.

A excentricidade de Mercúrio é de 0,205, sendo a maior dos planetas do nosso Sistema Solar. Em comparação, esse valor é quase 13 vezes maior que o exibido pela órbita da Terra, que tem excentricidade de 0,016.

Pela proximidade com o nosso astro-rei, os dados de sua órbita são os mais rápidos de todo o Sistema Solar. Para começar, Mercúrio tem um ano equivalente a 88 dias terrestres e sua observação a olho nu é dificultada por essa proximidade com nossa estrela, sempre sendo restrita a poucas horas ou minutos antes de o Sol se pôr ou nascer.

Figura 20 - Trânsito de Mercúrio capturado pelo satélite SOHO, lançado em 2 de dezembro de 1995 e ainda em operação



Fonte: www.nasa.gov/missions/nasa-team-studies-middle-aged-sun-by-tracking-motion-of-mercury/, NASA (2018).

*A imagem mostra o planeta passando em frente ao disco solar, visto como um pequeno ponto negro. Esse fenômeno raro, conhecido como trânsito de Mercúrio, permite estudar com precisão a órbita do planeta e foi fundamental para confirmar previsões da relatividade geral de Einstein.

Ao contrário do seu ano curto, os dias de Mercúrio são longos, chegando quase ao tempo de um ano completo, tendo duração de 59 dias terrestres. Dessa forma uma parte de Mercúrio fica muito exposta ao Sol durante um período longo, enquanto em outro momento a parte oposta fica livre dessa radiação por outro tempo mais longo.

Se você observar estes números, 59 dias para uma rotação completa em torno do próprio eixo e 88 dias para uma rotação em torno do Sol, verá que ocorre uma sincronia quase perfeita, ou seja, uma relação de 3 para 2. Assim, de acordo com essa proporção, observa-se que a cada três anos no planeta Mercúrio passam-se dois dias.

Outro ponto importante é que o período sinódico desse corpo (tempo necessário para o corpo reaparecer no mesmo local no céu após sucessivas conjunções) é de 115,8 dias, o que, tomado com os 59 dias de período de rotação, nos dará quase uma proporção de 2 para 1, fazendo com que o planeta nos mostre sempre a mesma face.

A sua órbita é constantemente afetada pelo Sol, fazendo com que os limites da gravitação universal de Newton tenham pouca precisão ao tentarmos definir a órbita do planeta. Por essa razão, a teoria da relatividade geral de Einstein tem que ser utilizada para que possamos definir com precisão a precessão da órbita de Mercúrio.

O planeta possui uma densidade média muito alta, em torno de $5,427 \text{ g/cm}^3$, sendo o segundo maior em termos de densidade média (perdendo somente para a Terra, com densidade média de $5,513 \text{ g/cm}^3$). Atualmente acredita-se que o planeta tenha um núcleo com proporções de ferro muito grandes (estima-se que mais de 70% da composição do planeta seja feita de ferro).

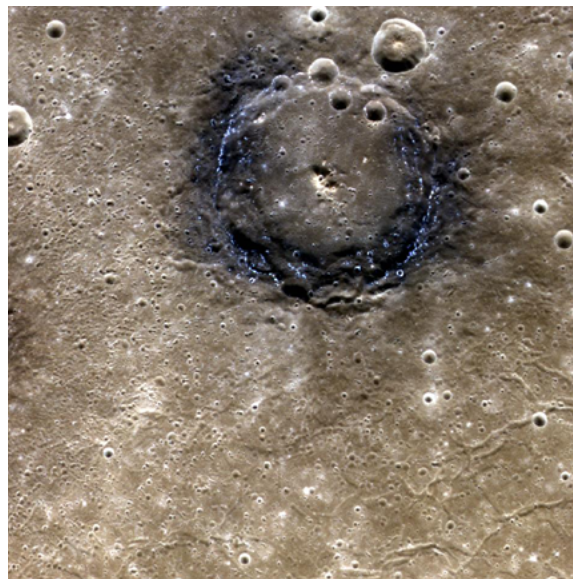
O diâmetro equatorial de Mercúrio é razoavelmente pequeno, sendo de 4.878 km, no entanto, sendo maior que o diâmetro da nossa Lua, de 3.474 km. Esse número torna esse planeta o menor do nosso Sistema Solar, porém a aceleração gravitacional do planeta é de aproximadamente $3,70 \text{ m/s}^2$, muito próxima àquela proporcionada pelo planeta Marte, de aproximadamente $3,71 \text{ m/s}^2$.

É de se pensar que esse planeta, na distância que está do Sol, é muito quente e praticamente impossível de ter temperaturas abaixo de zero, no entanto, as temperaturas as quais esse planeta

está submetido variam entre 430 °C (face voltada diretamente para o Sol) e -180 °C (face diametralmente oposta ao sol).

Entre 2011 e 2015, a sonda MESSENGER (*Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry and Ranging* – Superfície, Ambiente Espacial, Geoquímica e Órbita de Mercúrio) orbitou Mercúrio e realizou importantes descobertas, detectando água em estado sólido nos polos do planeta, em crateras que não são iluminadas diretamente pela luz solar. Através dessa sonda foi possível estimar com precisão algumas variáveis de Mercúrio, incluindo a bacia Caloris, a maior cratera de impacto do Sistema Solar, com 1.525 km de diâmetro.

Figura 21 - Cratera Degas em Mercúrio, registrada pela sonda MESSENGER



Fonte: science.nasa.gov/solar-system/planets/mercury/mercurys-strange-hollows/, NASA (2023).

*A imagem em cores realçadas mostra detalhes da ejeção escura ao redor da cratera e feições internas bem preservadas, indicativas de um impacto relativamente recente. A foto foi obtida com a câmera de ângulo restrito (NAC), realçando variações de composição da superfície.

VÊNUS: A BELEZA DO CÉU NOTURNO

Se você é daquelas pessoas que gostam de um friozinho, pode ter certeza que esse não será o planeta que lhe agradará para passar os seus dias de férias.

Vênus é o segundo planeta do Sistema Solar e possui raio de órbita média de 108,2 milhões de quilômetros, ou seja, 0,72 UA.

A característica que mais impressiona em Vênus é a sua temperatura média, que está em torno de 462 °C. Isso é causado pela atmosfera muito densa, rica em dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa, que aprisionam o calor fornecido pelo Sol, aumentando a temperatura do corpo celeste.

A atmosfera de Vênus também reflete grande parte da luz fornecida pelo Sol e o torna o terceiro objeto celeste mais brilhante do céu, atrás apenas do nosso satélite natural, a Lua, e do Sol. Em alguns pontos de suas nuvens densas existem gotículas de ácido sulfúrico que também dão a característica peculiar ao planeta, tornando-o completamente inóspito à vida que conhecemos. Em alguns momentos da órbita de Vênus com relação à Terra, podemos observá-lo até mesmo durante o dia, mesmo com a visão desarmada de telescópios ou binóculos, embora tenhamos que fazer um esforço muito grande e tomar bastante cuidado para realizar tal feito.

Como se não bastasse a temperatura e a chuva de ácido sulfúrico no planeta, observamos também uma pressão atmosférica enorme de aproximadamente 92 vezes a pressão atmosférica da Terra a nível do mar, ou seja, 92 atm. Essa pressão é equivalente a estar imerso no oceano a uma profundidade de aproximadamente 910 m, impedindo que, atualmente, missões tripuladas não sejam viáveis.

Figura 22 - Planeta Vênus registrado pela sonda Mariner 10



Fonte: science.nasa.gov/image-detail/amf-61883af6-98cf-4d1d-b68e-84db3b21248c/, NASA (2025).

*A sonda Mariner 10, ao se afastando do planeta Vênus, capturou a imagem do planeta, não revelando a hostilidade do mundo que repousa inerte no espaço e que é inóspito à vida que conhecemos. A sonda, lançada em 3 de novembro de 1973, não tinha como objetivo principal a inspeção do planeta Vênus, mas utilizou a gravidade do planeta para chegar até Mercúrio, sendo a primeira sonda a utilizar a assistência gravitacional de um planeta para alcançar o seu objetivo.

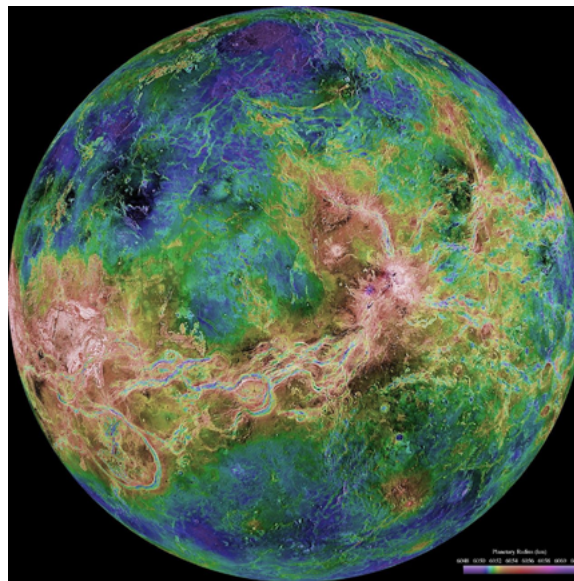
Alguns dos dados de Vênus são semelhantes ou próximos aos da Terra, nosso parâmetro de comparação. Podemos começar pelo raio equatorial desse corpo celeste, que é de 6051,8 km, equivalente a 95% do valor apresentado pelo nosso planeta. Essa característica permitiu que diversas lendas fossem criadas sobre a origem de Vênus e seu parentesco com a Terra. Em dado momento, ele foi chamado de gêmeo, no entanto, ao iniciarem as explorações mais precisas, observaram que esse parentesco era só nas dimensões.

A densidade média de Vênus é de $5,243 \text{ g/cm}^3$, conferindo-lhe o posto de terceiro planeta mais denso do nosso Sistema Solar. Unido a isso e às suas dimensões, observamos uma aceleração

gravitacional de $8,87 \text{ m/s}^2$, um valor próximo ao que experimentamos aqui na Terra, os $9,82 \text{ m/s}^2$.

A superfície venusiana é composta de planícies vulcânicas e existem dois planaltos semelhantes a continentes, um no hemisfério norte do planeta e outro no hemisfério sul. O planeta tem um ano que dura menos que seu dia, girando em torno do próprio eixo a cada 243 dias da Terra e girando em torno do Sol a cada 225 dias terrestres.

Figura 23 - Vista hemisférica de Vênus, registrada pela sonda Magellan



Fonte: science.nasa.gov/image-detail/amf-ed32cd82-638b-4693-867b-d0574d769e54/, NASA (2025).

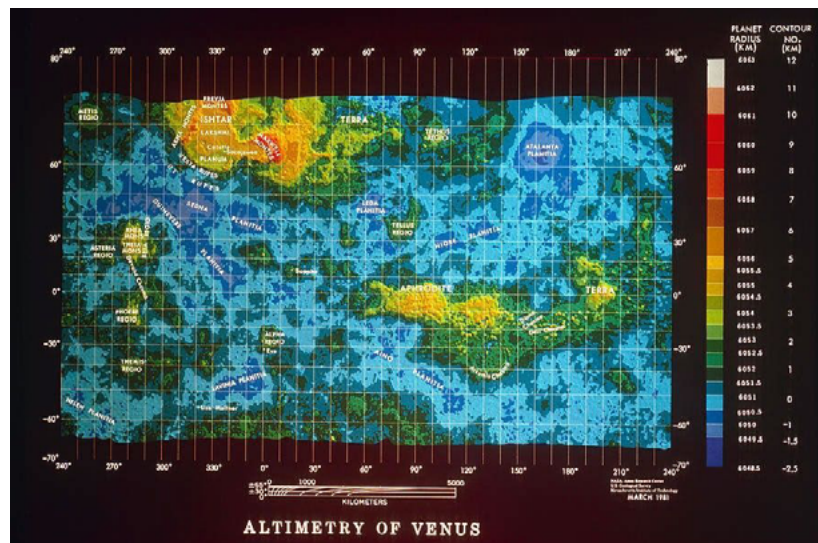
*A vista hemisférica de Vênus foi obtida por meio da sonda Magellan, que se utilizou de seu equipamento de radar para enxergar através das densas nuvens do planeta. A sonda da NASA foi lançada no dia 4 de maio de 1989 e mapeou 98% da superfície venusiana, encontrando crateras de impacto e planícies vulcânicas. Em 12 de outubro de 1994, a missão foi encerrada com o direcionamento da sonda para as nuvens densas do segundo planeta rochoso do Sistema Solar.

Vênus possui fases iguais às aquelas que são observadas na Lua quando vistos a partir da Terra. Isso é resultado de sua posição com relação ao nosso planeta, ou seja, por ser um planeta de órbita inferior, mostra uma face iluminada que variará em proporção de iluminação de acordo com a posição relativa à Terra.

A órbita de Vênus tem excentricidade bem baixa, em torno de 0,006, já que no afélio sua distância ao Sol é de 108,9 milhões de quilômetros e no periélio a distância é de 107,5 milhões de quilômetros. Como resultado da distância e da formação desse planeta, não é possível encontrar satélites naturais em virtude da atração gravitacional que deveria ser exercida sobre qualquer corpo que se formasse ou viesse a ser capturado pelo planeta.

Vênus é mais plano que a Terra, no entanto, ele possui extremos, ou seja, possui uma montanha mais alta que o Monte Everest e um Cânion mais profundo que o Grand Cânion dos Estados Unidos da América. Essas informações foram coletadas ao longo dos anos de exploração espacial, especialmente após a conclusão da missão Pioneer Venus Orbiter, foi essa sonda a responsável por descobrir que Vênus não possuía campos magnéticos e que as nuvens são compostas principalmente de ácido sulfúrico. A missão foi planejada para durar apenas oito meses, mas, ao término de 14 anos de atividade e coleta de dados impressionantes, a sonda queimou todo o seu combustível e afundou nas nuvens venusianas.

Figura 24 - Mapa altimétrico de Vênus obtido pela sonda Pioneer Venus Orbiter, lançada pela NASA em 20 de maio de 1978



Fonte: science.nasa.gov/resource/pioneer-venus-orbiter-map-of-venus/, NASA (2019).

*Equipada com radar altimétrico e instrumentos de sensoriamento remoto, a nave mapeou a superfície do planeta através da densa atmosfera usando ondas de rádio. Este mapa mostra as variações de altitude, com áreas mais altas em tons quentes e regiões mais baixas em tons frios. A Pioneer Venus foi pioneira no estudo sistemático da atmosfera e topografia venusianas, orbitando o planeta de 1978 até 1992.

Era de se esperar que as condições venusianas para a presença de vida fossem mais hospitaleiras que a do nosso planeta, tendo em vista a origem de seu nome (Vênus, a deusa da beleza e do amor). No entanto, os antigos não tinham os dados das sondas que pousaram no planeta, que foi o primeiro a ser procurado por uma missão de exploração interplanetária (Mariner 2) e o primeiro corpo onde uma espaçonave ou sonda pousou (Venera 7).

A Mariner 2 obteve sucesso no sobrevoo de Vênus em 14 de dezembro de 1962 quando, durante 42 minutos, coletou dados sobre a atmosfera e superfície de Vênus antes de continuar com sua

órbita heliocêntrica. Outras naves de exploração foram enviadas não só pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), mas também por corporações russas, europeias e japonesas. Uma dessas, a Venera 7, fez um pouso na superfície do planeta em 15 de dezembro de 1970 e conseguiu enviar dados por aproximadamente 23 minutos, antes de ser esmagada pela pressão da atmosfera de Vênus.

TERRA: O PLANETA AZUL

Eu poderia citar uma série de números sobre o planeta Terra, sobre o seu raio médio (6.371 km), sobre a sua distância com relação à Lua (384.400 km) e ao Sol (149.597.870 km), sobre o formato da Terra (um esferoide oblato, achatado nos polos). Poderia falar sobre a maneira com que a atmosfera se comporta com o passar dos meses, produzindo, em virtude da diferença de temperatura e pressão, tempestades que destroem e ao mesmo tempo constroem algo para algum ser no nosso planeta, mas podemos fazer isso de outras maneiras.

Falar da Terra é como apresentar a nossa casa para alguém e, se eu fosse apresentar a minha casa para alguém, eu falaria, com certeza, dos pontos mais bonitos dela. Da varanda onde pensei muito sobre muitas coisas. Da cama quente nos dias de domingo pela manhã, da janela em que batia a primeira chuva quando a compreí... da sensação de liberdade ao entrar nela e ver que a construí por completo. Ser sensível sobre o local em que moramos também é astronomia, afinal moramos aqui, moramos na Terra, um planeta único no Sistema Solar, local em que nos desenvolvemos, sobrevivemos e iremos evoluir, mesmo que a história pareça dizer que não, mesmo que constantemente tenhamos repetido os erros de outrora.

Figura 25 - Earthrise



Fonte: science.nasa.gov/moon/, NASA (1968).

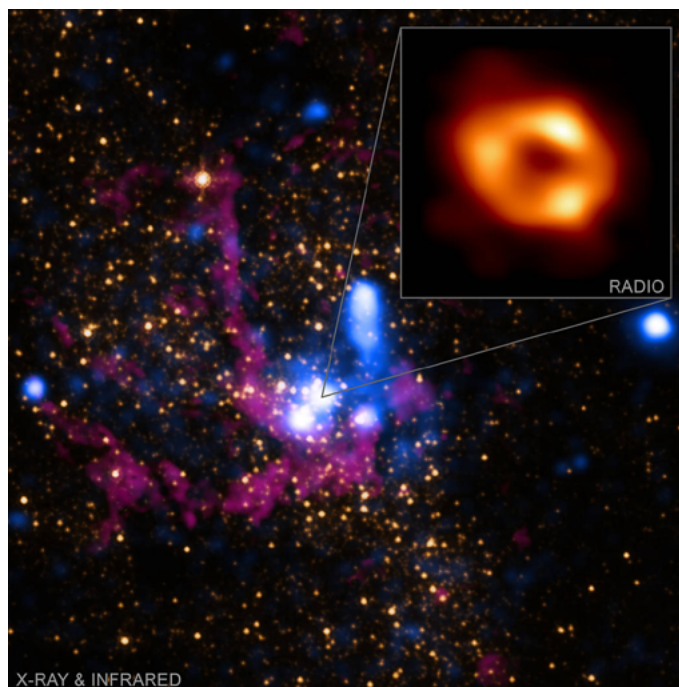
*A Terra desponta sobre o horizonte lunar, em uma das fotografias mais icônicas da história da exploração espacial. Registrada durante a missão Apollo 8 em 1968, esta imagem, conhecida como *Earthrise*, revela a fragilidade e a beleza do nosso planeta suspenso no vazio do espaço, visto a partir da órbita da Lua.

Foi nesse planeta que inventamos um calendário com o qual medimos todos os eventos do Sistema Solar, todos do universo, foi aqui que moldamos o dia em 24 horas, com base nesse arranjo deixado pelos babilônios (que usavam um sistema sexagesimal com base 60 e que influenciou outros povos posteriores) e egípcios (que passaram a dividir os dias em duas partes iguais de 12 períodos).

Foi aqui que descobrimos o primeiro buraco negro que conhecemos. Eu sempre lembro disso quando quero me gabar de ser um *humano comum*. Falo que nunca vi um alienígena publicar uma foto de buraco negro (eu nunca vi um alienígena, assim como vocês). Eu me lembro do dia que vi a notícia, foi um alvoroço mundial, lá em 10 de abril de 2019, as pessoas compartilhando avidamente o que havia sido fotografado. A rede de telescópios do Event

Horizon Telescope (EHT) constitui-se de uma série de telescópios que somados têm o tamanho do nosso planeta e conseguimos com isso registrar uma imagem de um objeto que se situa a 55 milhões de anos-luz do nosso planeta.

Figura 26 - Centro da Via Láctea destacando Sagitário A, o buraco negro supermassivo da nossa galáxia



Fonte: www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/03/sgra.jpg, NASA (2022).

*A imagem de fundo combina observações em raios X (azul, pelo observatório Chandra) e infravermelho (dourado e rosa, pelo telescópio espacial Spitzer), revelando nuvens de gás e estrelas ao redor. No destaque, a primeira imagem direta de Sagitário A, obtida em 2022 pelo Event Horizon Telescope (EHT) em ondas de rádio, mostrando a silhueta do buraco negro cercada por matéria em rotação.

Foi aqui, na Terra, que fizemos uma expedição que mediu o maior ponto de profundidade dos mares terrestres. A Fossa das Marianas (Abismo Challenger), com 10.984 metros de profundidade,

foi descoberta e medida pelo navio HMS Challenger. Esse navio usou as chamadas linhas de sondagem, ou seja, cabos que possuíam um peso na ponta que era submerso até que chegasse ao fundo daquilo que se queria medir. Se eu encontrasse algo tão profundo navegando pelo mar, me sentiria como o primeiro a voar pelos céus (o brasileiro Santos Dumont), afinal, eu estaria ali, acima... muito acima do assoalho da Terra.

Se eu fosse apresentar minha casa para uma visita, eu falaria das qualidades, não dos defeitos, falaria do cheiro do ar, da decoração escolhida por mim, de cada objeto que tem na casa, de cada coisa que me remete a boas memórias. Não falaria das guerras e batalhas que travo, você também seria assim ao falar do nosso planeta. Falaria da quantidade imensa de água que cobre a nossa superfície (71% da superfície do planeta é coberta por água e os outros 29% são terra firme). Aqui cabe uma analogia, talvez não só analogia, mas uma constatação de uma noite de domingo: a água do planeta, grande parte dela, é um presente, um grato presente. A Terra e tudo que tem nela são presentes raríssimos no Universo.

Durante o processo de formação do planeta Terra, há aproximadamente 4,5 bilhões de anos, as temperaturas eram altas, fazendo com que a água evaporasse ou tivesse suas moléculas destruídas. Ao longo dos milhões de anos que se passaram, diversos meteoritos e cometas foram trazidos no que chamamos de bombardeio pesado e tardio (um momento de formação do planeta em que tivemos um aumento dos choques de outros objetos do Sistema Solar na Terra), trazendo essas moléculas e compondo grande parte do que conhecemos hoje.

A analogia de que a Terra é o nosso lar ainda é rasa. Ela é mais que isso, é lar de todos aqueles que você conhece e por isso a Terra é o meu planeta favorito. Falamos aqui diversas vezes da Lua e de como foram obtidos os dados dela de distância e de trajetória, mas parte da vida no nosso planeta é devido a ela. Não é por ser

a única presença noturna que acompanha os casais de namorados durante uma ou duas noites iluminadas, mas, sim, por ser uma reguladora das marés.

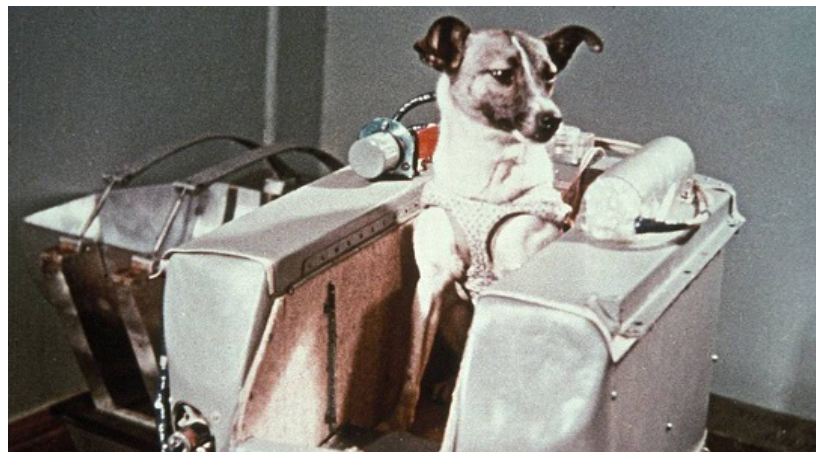
Eu sempre me perguntei como a Lua fazia a água se mexer e, quando era criança, ficava cético ao pensar que ela pudesse fazer isso mesmo, até que descobri que tanto ela quanto o Sol (em menor escala) fazem com que as massas de água da Terra sejam deformadas pela chamada Força Gravitacional. Esse processo também dá origem às ondas, fazendo com que tenhamos um movimento das massas de água ao longo da Terra.

Pela Terra já passaram diversos pensadores, diversas personalidades, em algum momento você se dará conta de que foi colega de quarto cósmico de Newton, Einstein, César Lattes (Físico brasileiro que descobriu o *méson pi*, ou *píon*), Galileu Galilei, Vera Rubin e Caroline Herschel, Erwin Schroedinger e, claro, os péssimos colegas de quarto que são inomináveis e que atentaram contra a vida dos próprios humanos.

Foi nesse local, que tem seis continentes, que você lutou e venceu, lutou e perdeu, foi aqui, com uma população de oito bilhões de pessoas, que você alcançou a paz depois de descansar abaixo das 88 constelações que estão separadas na abóboda celeste.

A Terra é nossa primeira casa, mas não será a única. Em 1969, quando pousamos na Lua, iniciamos uma trajetória de exploração em que usamos primeiramente sondas (Sputnik, lançado em 4 de outubro de 1957) e foguetes como o V2 (*Vergeltungswaffe 2* – “Arma de vingança” 2 – produzido pelos alemães para bombardear países como a Bélgica e a Inglaterra durante a Segunda Guerra Mundial). Usamos infelizmente animais indefesos como a, internacionalmente conhecida, Laika (Kudryavka), que não tinha raça definida e foi escolhida por estar acostumada a condições de frio, estresse e fome, portanto “perfeita” para a missão e treinamento espacial.

Figura 27 - Laika, a cadela soviética que se tornou o primeiro ser vivo a orbitar a Terra, a bordo da espaçonave Sputnik 2, em 1957



Fonte: rarehistoricalphotos.com/laika-dog-in-space/, RARE HISTORICAL PHOTOS (2023).

**A missão marcou um passo importante na corrida espacial, embora Laika não tenha sobrevivido ao voo, levantando questões éticas sobre o uso de animais em experimentos espaciais.*

Nosso planeta tem os vulcões mais belos, as paisagens mais belas e os fenômenos mais belos até que se prove o contrário. NOSSO PLANETA.

Entre as majestosas características geográficas, destaca-se o Monte Everest, a montanha mais alta do mundo, erguendo-se imponente a 8.848 metros acima do nível do mar. Por outro lado, a Cratera de Chicxulub, no México, remonta a eventos cruciais na história da Terra, associados à extinção dos dinossauros. Com cerca de 150 km de diâmetro, essa cratera testemunha o impacto cataclísmico de um asteroide que alterou irreversivelmente o curso da vida no planeta.

Adentrando as camadas internas, a Terra revela uma estrutura complexa. Sua crosta sólida, fragmentada em placas tectônicas, flutua sobre o manto semirrígido, cuja composição rochosa define os processos geológicos em constante evolução. Os núcleos interno e externo, predominantemente constituídos por ferro e níquel,

desempenham um papel crucial na geração do campo magnético terrestre. É essa característica, juntamente dos ventos solares, que produzem um dos meus sonhos, a aurora boreal. Você já se imaginou em uma viagem para as paisagens geladas próximas ao círculo polar ártico ao ver, nas imagens disponíveis na internet, as luzes de diversas cores que são produzidas quando as partículas carregadas provenientes do vento solar se chocam com as moléculas e átomos da atmosfera. Isso é um sentimento humano! A sensação de sonhar e de tentar fazer aquilo se tornar realidade.

A atmosfera, fina camada gasosa que envolve a Terra, sustenta a vida ao proporcionar oxigênio e condições climáticas variadas. Composta principalmente por nitrogênio e oxigênio, a atmosfera abriga camadas específicas, como a ionosfera, rica em íons, e a estratosfera, onde a camada de ozônio desempenha um papel vital na proteção contra a radiação ultravioleta prejudicial.

Figura 28 - Estação Espacial Internacional (ISS), lançada em 20 de novembro de 1998



Fonte: www.nasa.gov/international-space-station/, NASA (2025).

*A Estação Espacial Internacional (ISS) orbita a Terra a 28.000 km/h e completa uma volta a cada 90 minutos. Serve como laboratório científico em microgravidade e cooperação internacional. Mais de 270 astronautas e cosmonautas já passaram por ela desde 2000.

A densidade média do planeta é de cerca de 5.515 kg/m^3 , fazendo-o ser o planeta mais denso do Sistema Solar. Um dia perguntaram-me se o planeta Terra ainda continuaria abrigando a vida mesmo se os seres humanos dobrassem em número, mesmo se os seres humanos triplicassem... quadruplicassem.

Respondi, de maneira automática, que a vida não é composta por somente aquilo que está diante dos nossos olhos e pode ser visto diretamente pela visão, a Terra ainda tem locais inexplorados e, mesmo quando limpamos a nossa casa e pensamos ter passado todo o detergente possível, ainda assim poderá ter ficado uma formiga caminhando pelo balcão da cozinha e pela mesa da sala durante uma macarronada de um domingo à noite.

Na próxima seção, visitaremos o planeta Marte e veremos que, embora seja um planeta rochoso, ele não tem o que torna o nosso planeta especial com condições para a vida humana.

MARTE: O PRÓXIMO PASSO PARA A COLONIZAÇÃO

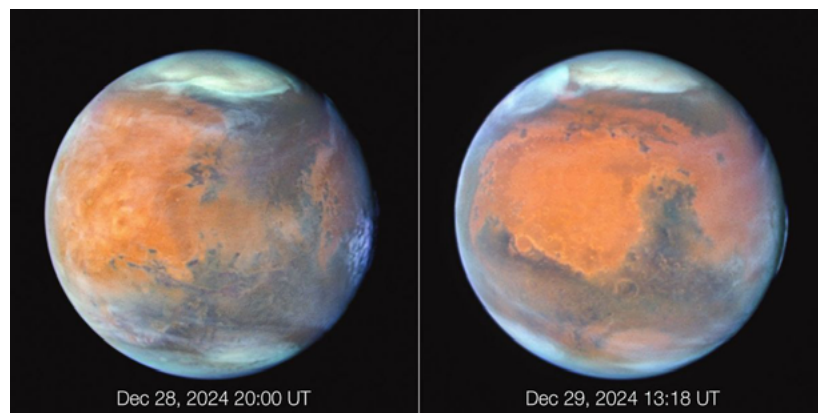
Até o final da década de 1990, perduravam, nos desenhos animados e filmes, a temática de alienígenas de tons de pele esverdeados que seriam provenientes do planeta Marte, que possuíam uma alta tecnologia e que invadiam nosso planeta causando destruição ou ainda sendo heróis improváveis, tal como na Liga da Justiça. Com o crescimento da exploração espacial, essa visão foi sendo deixada de lado e o planeta vermelho passou a ser sinônimo de um deserto que hoje em dia não abriga a vida, mas que possivelmente já teve habitantes ao longo da sua história geológica.

Marte é o quarto planeta a partir do Sol, após Mercúrio, Vênus e Terra. O planeta vermelho possui um diâmetro equatorial

de aproximadamente 6.800 km, sendo quase o dobro do tamanho da nossa Lua. O planeta é avermelhado em virtude da presença do óxido de ferro (Fe_2O_3), um pó de coloração castanho avermelhado, tal como a superfície do planeta.

Esse planeta rochoso tem algumas características que lembram o nosso planeta, uma delas é a presença de calotas polares, tanto na parte sul quanto na parte norte do planeta. Nessas calotas ocorre a presença de grandes quantidades de dióxido de carbono e água, estas se expandem à medida que o clima esfria (inverno) e diminuem de tamanho quando a temperatura aumenta (verão). Essas calotas polares têm papel importante na regulação do clima e têm sido estudadas por diversas sondas, tanto na superfície quanto em órbita do planeta.

Figura 29 - Duas faces diferentes de Marte, fotografadas em 28 e 29 de dezembro de 2024 por telescópios espaciais



Fonte: science.nasa.gov/solar-system/resources/resource-packages/mars-resources/, NASA (2024).

*As regiões brancas visíveis são as calotas polares, compostas de dióxido de carbono congelado.

As áreas azuladas indicam névoas e nuvens de gelo na atmosfera fina do planeta. As manchas vermelhas correspondem ao solo rico em óxidos de ferro, enquanto as regiões escuras revelam áreas com menos poeira, como antigos fluxos de lava ou terrenos basálticos. As imagens destacam a diversidade da superfície e da atmosfera marciana.

Marte possui algumas crateras importantes, seja por estarem sendo estudadas por sondas ou ainda por apresentarem possibilidade de presença de vida microbiana. A Cratera Victória (Figura 30) é localizada em Marte e consiste em uma cratera de impacto que possui características suaves, ou seja, tem grande diâmetro se comparado com sua profundidade ou seus depósitos de materiais. Ela possui aproximadamente 730 m de largura por 70 m de profundidade, sendo continuamente afetada pela erosão, e foi visitada em 2006 pela nave Opportunity, após esse veículo viajar por 21 meses até Marte.

Figura 30 - Cratera Vitória, localizada em Meridiani Planum, em Marte

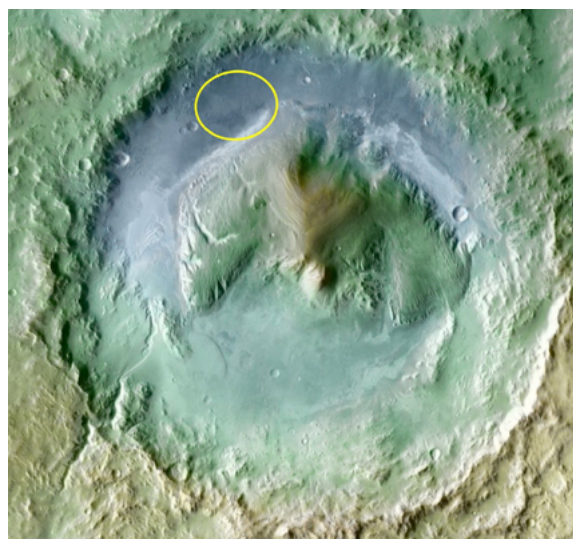


Fonte: science.nasa.gov/resource/oblique-view-of-victoria-crater/, NASA (2009).

**A Cratera Vitória, localizada em Meridiani Planum, Marte, tem cerca de 800 metros de diâmetro e foi formada por impacto de meteoro. Explorada pelo rover Opportunity entre 2006 e 2008, suas camadas expostas revelam processos geológicos antigos, incluindo a possível presença de água. Estruturas internas são formadas por dunas e depósitos eólicos. O estudo dessa cratera ajudou a entender melhor o clima antigo de Marte e a presença de água líquida no passado.*

A Cratera Gale (Figura 31) é de impacto e possui 150 km de diâmetro e um montículo em seu centro (conhecido como Monte Sharp) que tem entre 4,5 km e 5 km acima das bordas da cratera. Muitas crateras de impacto na Lua têm configurações semelhantes e, por essa razão, faz-se necessário, em Astronomia, estudar esse ponto específico de Marte.

Figura 31 - Cratera Gale, em Marte



Fonte: science.nasa.gov/resource/gale-crater/, NASA (2024).

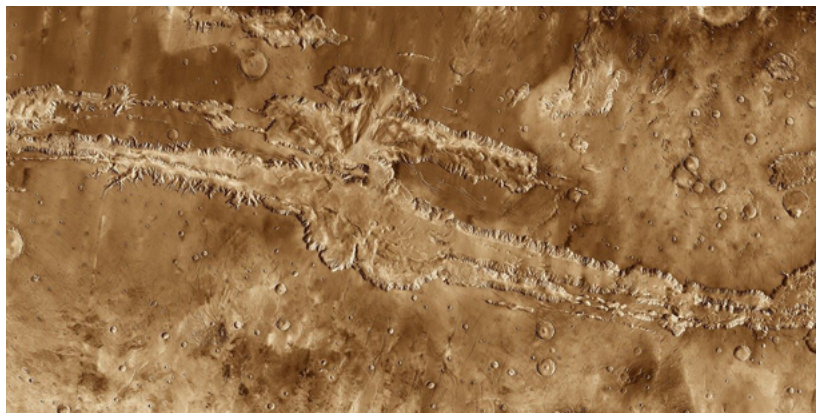
*A Cratera Gale foi sondada pelo Rover Curiosity da NASA e seu pouso (elipse amarela) ocorreu no dia 6 de agosto de 2012. O objetivo do Rover era investigar se Marte teve condições de existência de vida microbiana no passado por meio da inspeção do solo.

A Região de Tharsis é um platô vulcânico localizada no equador de Marte, onde é possível encontrar diversos montes que antes eram vulcões ativos, incluindo um dos maiores do nosso Sistema Solar, denominado Monte Olimpo, que possui aproximadamente 27 km de altura e mais de 600 km de diâmetro, sendo cercado por uma escarpa de até 6 km de altura. O platô foi formado há aproximadamente

3,7 bilhões de anos e formou diversos outros relevos da superfície de Marte, incluindo o Cânion de Valles Marineris.

O Cânion de Valle Marineris (Figura 32) tem aproximadamente 3.000 km de extensão e 600 km de largura. Por comparação, a extensão desse cânion é maior que a distância que separa o leste e o oeste dos Estados Unidos. O Valle Marineris é situado no equador do planeta e outra teoria de formação para essa região afirma que existia uma grande quantidade de água fluindo até formar o cânion que conhecemos hoje, que possui, em alguns pontos, 8 km de profundidade.

Figura 32 - Valle Marineris, localizado na região equatorial de Marte



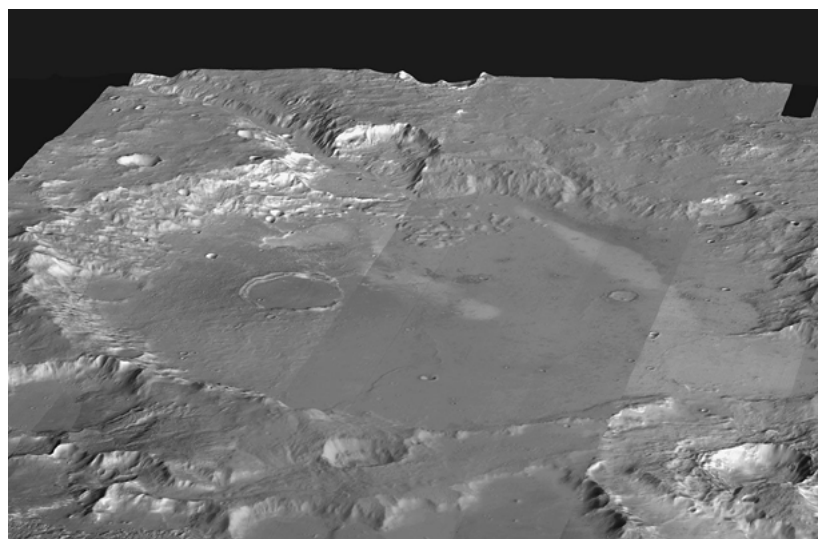
Fonte: science.nasa.gov/resource/the-grand-canyon-of-mars-valles-marineris-13-mar-2006/, NASA (2006).

*O Valle Marineris é o maior sistema de cânions do Sistema Solar e se localiza na região equatorial de Marte. Até o presente momento (2025), nenhum Rover fez uma visita à região, que é monitorada constante pelo Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Essa sonda foi lançada em 12 de agosto de 2005 e chegou no planeta vermelho em 10 de março de 2006. Sua projeção de funcionamento era por dois anos, no entanto, até os dias atuais funciona plenamente. Diferentemente dos Rovers, que pousam e exploram o planeta *in loco*, a MRO o faz como um satélite artificial, por meio de câmeras e outros sensores que investigam o planeta de maneira completa.

A Cratera Gusev (Figura 33) é de impacto, com diâmetro de aproximadamente 180 km, e acredita-se que tenha sido formada há

alguns bilhões de anos (entre 3 e 4 bilhões de anos). Este relevo é de grande importância, pois foi visitado pela espaçonave Spirit em 3 janeiro de 2004. Essa cratera fica em um local que supostamente foi, em um passado longínquo, um leito de rio. Por essa razão, esperava-se que existissem indícios de água que poderiam ser captados pelo veículo de exploração.

Figura 33 - Cratera Gusev, em Marte



Fonte: science.nasa.gov/resource/gusev-crater/, NASA (2024).

*A Cratera Gusev registrada por meio de um mosaico e a partir de imagens com câmeras infravermelhas, obtida pelo sistema de câmeras da sonda espacial Mars Odyssey. A Mars Odyssey já concluiu, desde seu início em fevereiro de 2002, mais de 100.000 órbitas ao redor do planeta vermelho e foi a primeira nave a mapear globalmente todos os elementos químicos e minerais da superfície de Marte.

A Cratera Jezero (Figura 34) fica na região da Planície (Bacia) Isidise e provavelmente foi, em algum momento da história de Marte, inundada por água e possivelmente abrigou vida. A cratera possui 45 km de diâmetro e 750 metros de profundidade, tendo a nomenclatura inspirada em algumas línguas eslavas que dão significado

de “lago” à palavra que denomina a cratera. A cratera foi visitada pelo rover Perseverance e a região tem interesse de pesquisa devido às evidências de fluxo de rio antigo formando um delta que há muito tempo está seco.

Figura 34 - Cratera Jezero, em Marte



Fonte: science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/, NASA (2025).

*A Cratera Jezero, situada em Marte, destaca-se como uma das formações geológicas mais intrigantes do planeta. Originada há bilhões de anos em decorrência do impacto de um meteoro, a cratera abrigou, aproximadamente há 3,5 bilhões de anos, um antigo lago. Em sua região mais significativa encontra-se um delta de rio fossilizado, evidência de intensa atividade hídrica pretérita. Com cerca de 45 km de diâmetro, Jezero foi explorada pela sonda Perseverance, da NASA, que ali aterrissou em 18 de fevereiro de 2021. A missão tem como objetivos principais a busca por possíveis vestígios de vida microbiana ancestral e o estudo da composição geológica e mineralógica do local.

Marte possui duas luas, chamadas de Fobos e Deimos, falaremos adiante sobre elas, assim como sobre os satélites naturais dos planetas gasosos e da nossa Lua. O planeta tem uma aceleração gravitacional de aproximadamente $3,71 \text{ m/s}^2$, o que corresponde a pouco mais de $1/3$ da gravidade da Terra. Os mistérios de Marte

são inúmeros e esse é o segundo planeta que mais conhecemos no Sistema Solar, tanto em virtude de sua proximidade com o nosso planeta, quanto em termos de sondas que foram enviadas para esse corpo celeste para que pudéssemos inspecionar as suas características peculiares e sua superfície. Atualmente diversas sondas ainda operam no planeta, já que ele é o maior candidato a abrigar a vida terrestre por meio de colonizações espaciais futuras.

Você deve ter percebido que os planetas mais internos do Sistema Solar, Mercúrio, Vênus, Terra e Marte, são rochosos e têm, sim, uma explicação para isso: durante o processo de formação do Sistema Solar, a pressão de radiação proveniente do Sol não foi suficiente para empurrar para fora todos os objetos e matéria mais pesadas, tendo ficado estas mais próximas de nossa estrela. Na parte externa, após o cinturão de asteroides que separa Marte de Júpiter existirão outros planetas, gigantes gasosos e congelados, que são maiores que os mais internos, que possuem luas e outros corpos que orbitam ao redor destes. Vamos conhecê-los adiante.

VII

OS JOVIANOS

JÚPITER: O GIGANTE DO NOSSO SISTEMA SOLAR

Chegamos então aos planetas que são os colossos do Sistema Solar, a partir daqui teremos diversas luas, sistemas de anéis e massas muito maiores que a massa da Terra. Júpiter é o primeiro deles, Saturno vem logo em seguida e fechamos a contagem com Urano e Netuno, os dois gigantes gelados.

Júpiter, o gigante gasoso do Sistema Solar, destaca-se por diversas características fascinantes, começando por suas dimensões impressionantes. Com um diâmetro aproximadamente 11 vezes maior que o da Terra (142.984 km) e uma massa cerca de 318 vezes maior que a do nosso planeta, Júpiter exerce uma influência gravitacional significativa, desempenhando um papel crucial na dinâmica do Sistema Solar.

A composição atmosférica de Júpiter é predominantemente hidrogênio e hélio, mas também inclui vestígios de metano, vapor d'água e amônia. Sua atmosfera apresenta faixas e zonas distintas, resultado de padrões complexos de ventos atmosféricos em movimento, criando uma paisagem dinâmica.

A Grande Mancha Vermelha, uma tempestade gigante que persiste há séculos, é uma característica marcante na atmosfera joviana. Essa tempestade é apenas uma das várias manchas atmosféricas observadas em Júpiter, indicando sua atmosfera turbulenta e dinâmica.

Figura 35 – A Grande Mancha Vermelha (GMV), em Júpiter



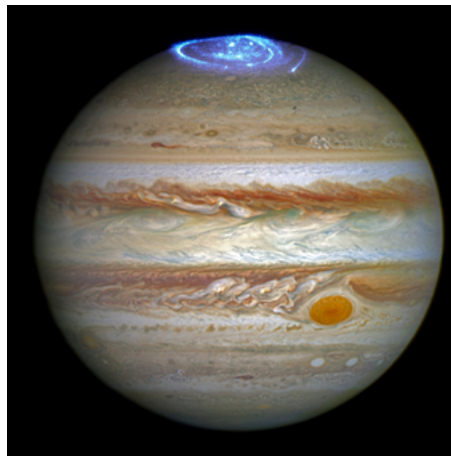
Fonte: science.nasa.gov/image-detail/amf-pia01527/, NASA (2024).

*Registro realizado pela sonda Voyager 1, em que é mostrada a Grande Mancha Vermelha (GMV). As sondas Voyager foram um marco na história da astronomia, pois aproveitaram uma boa oportunidade de alinhamento dos planetas (utilizaram assistência gravitacional) para poder explorar os planetas gasosos. O registro foi feito em 3 de julho de 1979.

Os anéis de Júpiter, embora menos proeminentes do que os de Saturno, são compostos por partículas de poeira e material rochoso. Sua presença contribui para a complexidade do sistema de Júpiter, revelando mais sobre a evolução e formação desses anéis planetários.

O campo magnético de Júpiter é extraordinariamente poderoso, cerca de 20.000 vezes mais intenso que o da Terra. Essa característica resulta em auroras brilhantes nas regiões polares, indicando a interação intensa entre o campo magnético de Júpiter e as partículas carregadas provenientes do vento solar.

Figura 36 - Auroras brilhantes sobre o polo norte de Júpiter



Fonte: science.nasa.gov/gallery/jupiter/, NASA (2025).

*Auroras brilhantes dançam sobre o polo norte de Júpiter nesta impressionante imagem capturada pelo telescópio espacial Hubble em parceria com observações da sonda Juno, da NASA. Essas auroras são geradas pela intensa interação entre o poderoso campo magnético do planeta e partículas carregadas provenientes do Sol e de suas luas, especialmente Io. A missão Juno tem sido fundamental para desvendar os mistérios da magnetosfera joviana e entender como esses espetáculos luminosos se formam em escala tão grandiosa.

Em virtude de sua distância média com relação ao Sol ser de 5,2UA (778 milhões de quilômetros), a temperatura média de Júpiter gira em torno de -110 °C. Devido a sua massa e também a essa distância, o planeta consegue acumular satélites naturais em maior número que os planetas internos, chegando a quase uma centena destes (99 até o ano de 2024).

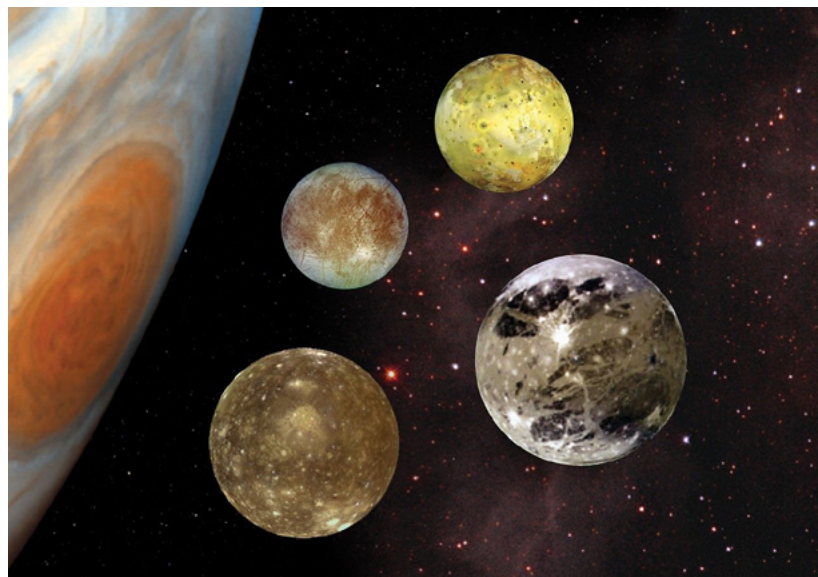
Júpiter possui esse extenso sistema de luas, no entanto, as quatro maiores são conhecidas como luas galileanas: Io, Europa, Ganimedes e Calisto. Cada uma dessas luas apresenta características únicas e intrigantes.

Io, por exemplo, é o objeto mais vulcanicamente ativo do Sistema Solar, com erupções vulcânicas constantes. Europa, por

outro lado, é coberta por uma crosta de gelo que esconde um oceano subterrâneo, levantando questões sobre a possibilidade de abrigar formas de vida.

Ganimedes, a maior lua de Júpiter e do Sistema Solar, tem um campo magnético próprio e é maior até mesmo que o planeta Mercúrio. Calisto, embora menos conhecida, possui uma superfície marcada por crateras antigas e é considerada uma das luas mais antigas do Sistema Solar.

Figura 37 - Conceito artístico das quatro luas galileanas de Júpiter



Fonte: science.nasa.gov/image-detail/amf-4ef72a46-78c0-4a0d-858a-fd9f2efda334/, NASA (2025).

*De cima para baixo: Io, Europa, Ganimedes e Calisto.

Cada uma dessas luas possui órbita com raios diferentes umas das outras e, portanto, terão períodos diferentes. Na Tabela 1, vemos os dados referentes a esses objetos.

Tabela 1 - Principais características orbitais dos quatro maiores satélites de Júpiter, conhecidos como luas galileanas

Lua Galileana	Distância média até Júpiter (km)	Período orbital (em dias terrestres)
Io	421 769	1,769
Europa	671 079	3,551
Ganímedes	1 070 428	7,155
Calisto	1 882 759	16,689

Fonte: elaborado pelo autor.

*Observa-se que, quanto maior a distância média da lua em relação ao planeta, maior é seu período orbital, o que está de acordo com a terceira lei de Kepler. Esses dados são fundamentais para o estudo das interações gravitacionais no sistema joviano.

Diversas sondas espaciais exploraram Júpiter, oferecendo *insights* valiosos sobre esse mundo distante. A sonda Galileu, lançada pela NASA, proporcionou observações detalhadas de Júpiter e suas luas, enquanto a sonda Juno, atualmente em órbita, está revelando informações cruciais sobre a atmosfera, o campo magnético e a estrutura interna do planeta.

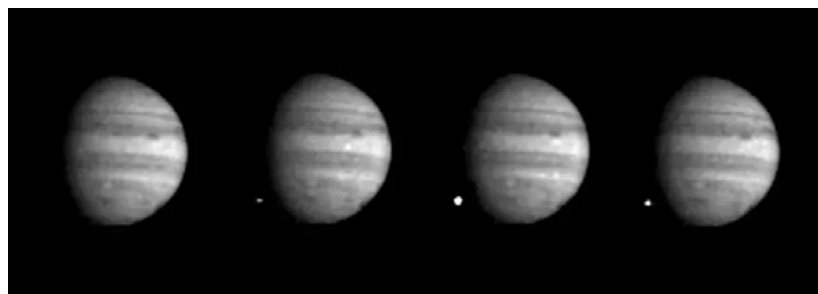
As luas de Júpiter foram uma evidencia crucial para mostrar que os corpos mais leves orbitam os corpos mais pesados. Quando Galileu Galilei mostrou que quatro estrelinhas orbitavam o maior planeta do Sistema Solar, ele, além de evidenciar que existem outros sistemas dentro do nosso Sistema Solar, ainda mostrou que nem tudo orbita ao redor da Terra como pensavam no seu tempo.

Para que Galileu pudesse demonstrar sua teoria sobre as luas de Júpiter, ele fez observações diárias ao longo dos dias e detalhou progressivamente as posições dos objetos no seu livro “O mensageiro das estrelas”. Isso foi um importante passo para que o céu pudesse ser interpretado a partir de leis físicas e com um método de observação estruturado.

Júpiter e suas inúmeras peculiaridades nos proporcionaram, no ano de 1994, a visão de um cometa colidindo com um planeta. No ano de 1993, no dia 24 de março, Carolyn Schoemaker, Eugene Schoemaker e David Levy, com a utilização do telescópio do Observatório Palomar, na Califórnia, observaram o que poderia ter sido um corpo massivo orbitando o maior dos gigantes gasosos do nosso Sistema Solar.

Acredita-se que esse cometa (que recebeu o nome de P/Schoemaker-Levy 9 – SL9 – SL é a junção das iniciais dos nomes dos pesquisadores e 9 é em virtude de este ter sido o 9º cometa descoberto por eles) tenha passado no ano de 1992 muito próximo de Júpiter, que o capturou. Nesse processo de captura gravitacional e por meio de forças de marés intensas, o cometa se fragmentou em mais de 20 pedaços visíveis, que colidiram com o planeta entre os dias 16 e 22 de junho de 1994. O telescópio Hubble, assim como a sonda Galileu, capturaram esse momento e mostraram ao mundo o efeito do bombardeio de um planeta por corpos tão massivos.

Figura 38 – Cometa colidindo com Júpiter



Fonte: science.nasa.gov/image-detail/amf-d787480b-8f66-48af-b45b-17e9451584f7/, NASA (2025).

*Registro feito pela sonda Galileu, em que aparece progressivamente um ponto luminoso que aumenta e em seguida diminui de magnitude. Os registros estão separados por aproximadamente dois segundos e meio um do outro, mostrando o quão rápido foi o impacto.

Júpiter é um planeta extraordinário que continua a intrigar os cientistas e entusiastas da exploração espacial. Suas características distintas, desde o turbilhão atmosférico até as luas galileanas fascinantes, oferecem uma visão única da complexidade e diversidade do nosso Sistema Solar.

Esse é sem dúvida meu planeta preferido, não só por ter me despertado interesse em alguns trabalhos, mas porque foi o primeiro planeta que observei com clareza por meio do telescópio.

SATURNO: O PLANETA DOS ANÉIS

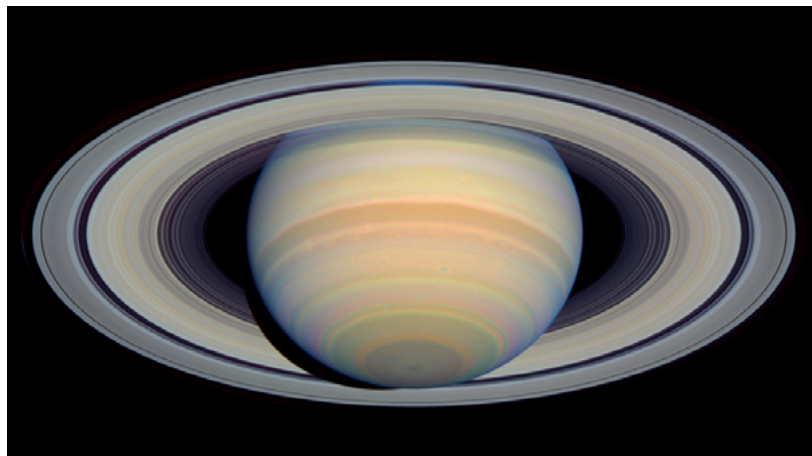
Em diversas sessões de planetário que realizei, este planeta é o que mais chama atenção dos expectadores, por diversos motivos, mas talvez o principal deles é o sistema de anéis que encanta a todos, principalmente quando ele toma toda a cúpula em um zoom que aproxima os olhos de cada um de nós de uma forma que até o momento não é possível ser feito na vida real.

Saturno é um dos planetas mais fascinantes do Sistema Solar, apresentando uma série de características intrigantes. Seu tamanho colossal, aproximadamente nove vezes o diâmetro da Terra (o diâmetro equatorial de Saturno é de 120.536 km), e sua massa, cerca de 95 vezes maior que a terrestre, conferem-lhe uma imponente gravidade que influencia não apenas suas dezenas de luas, mas também a dinâmica orbital de outros corpos celestes próximos.

Os anéis de Saturno, como já falamos anteriormente, são sua característica mais distintiva, compreendendo uma vasta extensão de partículas de gelo, poeira e rochas. James Clerck Maxwell

(1831–1879), no século XIX, desvendou parte de seu mistério e publicou o artigo intitulado “On the Stability of the Motion of Saturn’s Rings” (Sobre a Estabilidade do Movimento dos Anéis de Saturno), que demonstrava que esses anéis não eram sólidos, mas, sim, compostos de inúmeras partículas em órbita, um feito que a sonda Cassini, no século XXI, expandiu ao analisar sua composição detalhada.

Figura 39 – Saturno com destaque para os seus anéis

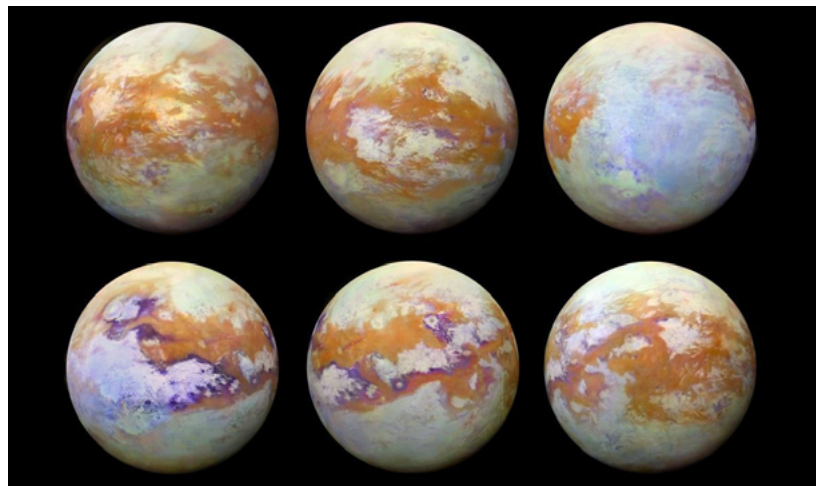


Fonte: science.nasa.gov/image-detail/hubble-saturn-visible-light/, NASA (2024).

*Os anéis de Saturno são compostos majoritariamente por gelo de água e partículas rochosas. A faixa escura visível entre os anéis A e B é a Divisão de Cassini, causada pela influência gravitacional da Lua Mimas.

A sonda Cassini-Huygens, lançada em 1997, representou uma conquista notável na exploração de Saturno. Em 2004, Cassini soltou a sonda Huygens, que pousou com sucesso na maior lua de Saturno, Titã, ampliando nosso entendimento sobre essa lua intrigante.

Figura 40 - Imagens em falso colorido de Titã, obtidas pela sonda Cassini usando radar e infravermelho



Fonte: science.nasa.gov/gallery/titan-images/, NASA (2025).

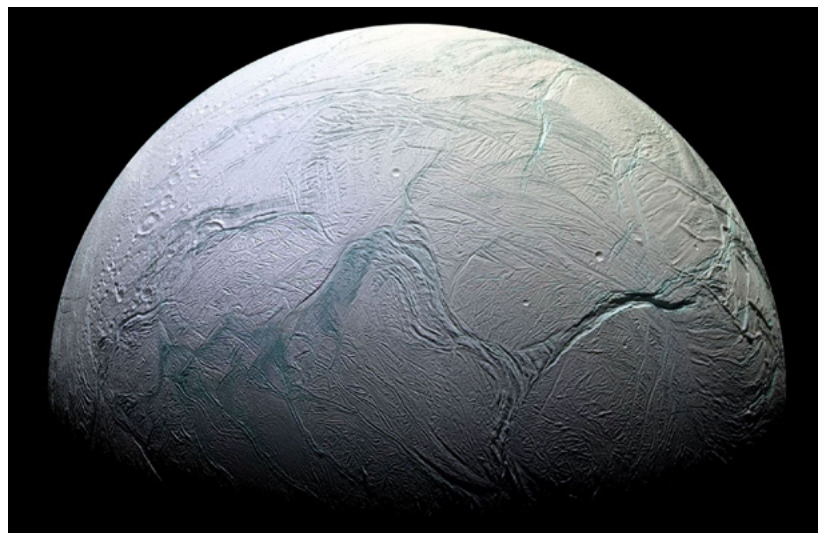
*As cores revelam detalhes da superfície ocultos pela espessa camada de névoa alaranjada. É possível observar mares de metano líquido, dunas e terrenos montanhosos.

A temperatura de Titã é conservada ao longo de sua superfície, mantendo-se nos -179°C e isso faz com que metano e etano apareçam em estado líquido, pois a temperatura de fusão (passagem do líquido para o sólido e do sólido para o líquido) apresenta-se em -182°C e -183°C , respectivamente. A presença desse líquido na superfície do planeta cria um ciclo, chamado de ciclo do metano. Mesmo com a presença desse líquido, não é garantida a presença de vida na lua, sendo este um ponto a ser observado em pesquisas posteriores.

Encélado, outra lua saturniana, exhibe jatos de vapor d'água lançados de sua superfície, sugerindo a presença de um oceano subsuperficial. A possibilidade de água embaixo da superfície não é algo raro no Sistema Solar, especificamente nas luas, no entanto apenas essa lua de Saturno consegue fazer essa exposição do seu material interno para os visitantes do Sistema Solar externo, ou seja, para as naves que cruzam com Saturno e seu sistema de luas.

Embora seja pequena (500 km de diâmetro) se comparada com outras luas do Sistema Solar, Encélado consegue contribuir para a formação dos anéis de Saturno de maneira invejada por outras luas desse sistema. Os jatos de água, ao alcançarem o espaço, transformam-se em cristais de gelo e são absorvidos pelos anéis de saturno sem a menor cerimônia. Por ser coberta de gelo, a lua reflete bem a pouca luz do Sol que recebe, afinal Saturno está muito distante do Sol, conferindo-lhe temperaturas baixas, sempre algumas centenas de graus Celsius negativos. Portanto Encélado é o corpo mais refletivo do Sistema Solar.

Figura 41 - Superfície congelada de Encélado, uma das luas de Saturno



Fonte: science.nasa.gov/saturn/moons/enceladus/, NASA (2024).

*Esta impressionante imagem mostra a superfície congelada de Encélado, uma das luas mais intrigantes de Saturno. O mosaico foi montado a partir de dados obtidos pela sonda Cassini, da NASA, durante seus sobrevoos rasantes em meados dos anos 2000. As linhas e rachaduras visíveis, conhecidas como "listras de tigre," marcam regiões ativas próximas ao polo sul, onde ocorrem jatos de vapor d'água e partículas orgânicas, possivelmente vindos de um oceano subterrâneo. A missão Cassini orbitou Saturno entre 2004 e 2017, sendo responsável por revelar que Encélado pode abrigar condições favoráveis à vida.

Cassini, ao longo de sua missão, proporcionou uma visão detalhada dos anéis e das tempestades em Saturno, contribuindo significativamente para nossa compreensão do planeta.

Saturno é marcado por tempestades atmosféricas, sendo a maior delas a tempestade hexagonal no polo norte, uma estrutura hexagonal persistente que intriga os cientistas. Além disso, seu campo magnético é robusto, com uma magnetosfera extensa que interage com o vento solar.

A composição atmosférica de Saturno é predominantemente de hidrogênio e hélio, mas também inclui metano, amônia e outros compostos. Suas camadas atmosféricas exibem faixas e zonas, semelhantes às de Júpiter, criando uma paisagem atmosférica complexa e dinâmica.

O método de descoberta da lua Titã por Giovanni Cassini foi baseado na observação atenta do astrônomo italiano. Usando telescópios aprimorados, Cassini notou uma estrela que parecia desaparecer e reaparecer periodicamente próximo a Saturno, indicando a presença de uma lua.

Saturno, com sua grandiosa presença no céu noturno, continua a ser alvo de fascínio e exploração. As informações coletadas por sondas e telescópios fornecem uma riqueza de dados, desvendando mistérios e revelando a complexidade desse majestoso planeta, tornando Saturno um ponto central nas investigações sobre a formação e evolução dos planetas gasosos e seus sistemas de anéis e luas.

URANO: O OUTRO AZUL, PORÉM GASOSO

Urano, o sétimo planeta do Sistema Solar, é um mundo intrigante com características únicas. Sua descoberta é atribuída a Willian Herschel (1738–1822), um astrônomo inglês que teve grandes contribuições não somente para a Astronomia, mas também para a própria Física com a descoberta da radiação infravermelha¹⁶.

Com o seu telescópio construído com as próprias mãos (12 m de comprimento de tubo óptico do tipo newtoniano), Willian Herschel tentava catalogar estrelas duplas e, ao fazer suas observações pelos céus noturnos, deparou-se com um ponto brilhante que se movia lentamente entre as estrelas fixas. A princípio ele achava ter encontrado um cometa, no entanto, ao longo dos cálculos de trajetória da órbita, ele viu que a excentricidade daquele objeto celeste era baixa, o contrário de um cometa, como observamos em seções anteriores.

Portanto o astrônomo supôs ser um planeta, pois os dados experimentais de observações sucessivas indicavam essa conclusão. A descoberta de Urano é um dos muitos momentos em que o cientista estava no lugar certo na hora certa. Caso a mesma observação/caça às estrelas duplas tivesse acontecido seis meses antes, o planeta Urano não teria sido descoberto, já que esses planetas gasosos aparecem por aproximadamente seis meses no céu noturno e em seguida passam a ocupar o céu diurno, não podendo ser vistos.

16

A radiação infravermelha é a parte do espectro que, de acordo com o comprimento de onda, fica depois da luz de coloração vermelha. A descoberta foi realizada ao passar a luz por um prisma e observar que, mesmo depois que um termômetro era colocado após a luz vermelha, a sua temperatura ainda continuava a subir, indicando que o equipamento de medida de temperaturas ainda recebia energia que não era experimentada pela visão humana.

Isso levou Herschel a ter prestígio no mundo científico por ter sido o primeiro homem a descobrir um planeta utilizando um telescópio. A descoberta lhe rendeu patrocínio de aristocratas e reis, bem como a possibilidade de dar continuidade às suas pesquisas e permitir que as suas gerações futuras também ingressassem nos estudos da astronomia.

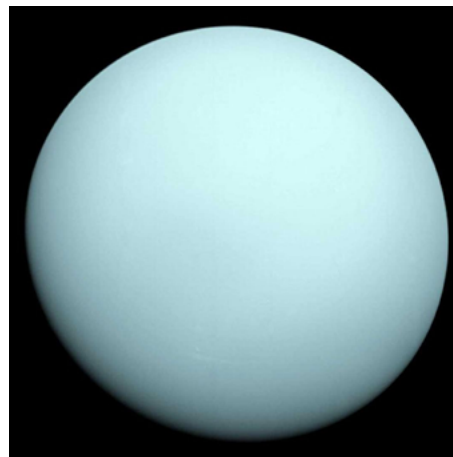
Um aspecto a que poucos se atentam é que a irmã de Willian, Caroline Herschel (1750–1848), também estava presente no momento da descoberta do planeta Urano, já que o telescópio não poderia ser manejado sozinho. Mesmo que auxiliar na utilização do telescópio fosse uma das tarefas de Caroline, ainda assim não era a única: ela compilou dados do que viria ser o planeta Urano e foi muito importante para essa descoberta.

Com uma densidade média de cerca de 1,27 vezes a da água, Urano é classificado como um gigante gasoso, predominantemente composto de hidrogênio e hélio, com vestígios de água, amônia e metano em sua atmosfera.

Seu tempo de rotação em torno do próprio eixo é peculiar, levando aproximadamente 17 horas e 14 minutos para uma rotação completa, enquanto sua órbita ao redor do Sol é muito mais extensa, com um período de translação de cerca de 84 anos terrestres.

Com um raio equatorial de aproximadamente 25.360 quilômetros e um diâmetro de cerca de 51.118 quilômetros, Urano é um dos maiores planetas do Sistema Solar. Sua órbita tem um raio médio de aproximadamente 2.870.972.200 quilômetros, equivalente a cerca de 19,22 unidades astronômicas.

Figura 42 – Urano, registrado pela sonda Voyager 2, em 1986



Fonte: science.nasa.gov/uranus/, NASA (2025).

*A câmera da sonda captou Urano como uma esfera azul esverdeada quase sem detalhes visíveis, reflexo das limitações tecnológicas da época e da atmosfera espessa e homogênea do planeta.

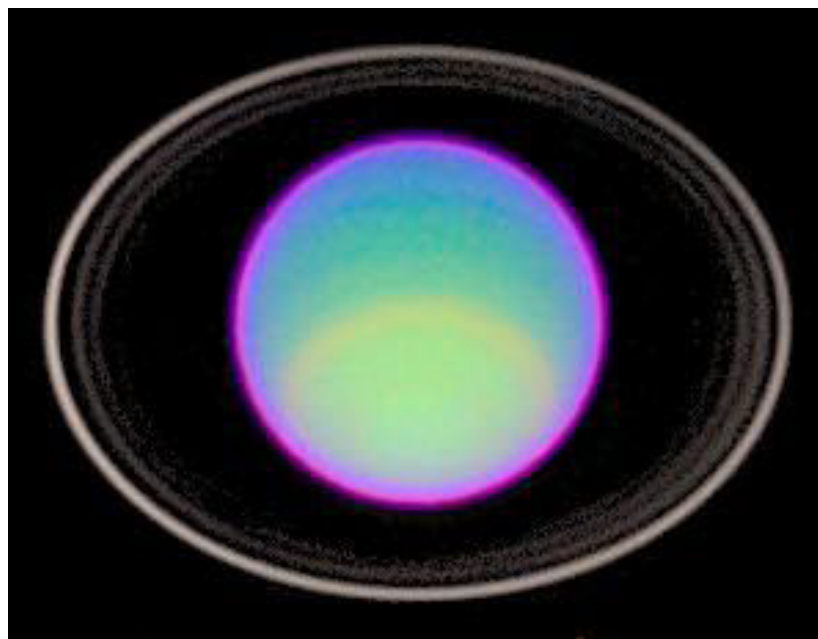
Urano apresenta inclinação axial extrema, resultando em estações extremas e um padrão de rotação peculiar. Sua tonalidade azul-esverdeada é atribuída à presença de metano em sua atmosfera, que absorve luz vermelha e reflete luz azul.

Várias missões espaciais, incluindo a Voyager 2 em 1986, visitaram Urano, proporcionando imagens detalhadas e dados valiosos sobre sua atmosfera, anéis e luas, ampliando nossa compreensão desse mundo distante. Urano continua a intrigar cientistas e entusiastas do espaço, oferecendo um vislumbre de nossa vasta e diversa vizinhança cósmica.

Urano foi fotografado diversas vezes ao longo da história da astronomia contemporânea, por sondas como a Voyager, por telescópios como o Hubble e como o James Webb. Após o ano de 1977, Urano passou a ser observado de maneira diferente. Foi constatado que o planeta possuía anéis que foram descobertos de maneira

acidental. Ao passar por uma região e ser observado da Terra, foi constatado que uma estrela era ocultada por alguma estrutura ligada gravitacionalmente a Urano, mas que não era vista da Terra, assim foi descoberto um sistema de anéis no planeta, e mais tarde esse sistema passou a ser compreendido de maneira mais aprofundada, resultando em 13 anéis conhecidos.

Figura 43 - Registro em falso colorido de Urano pelo Telescópio Espacial Hubble, usando filtros no infravermelho próximo



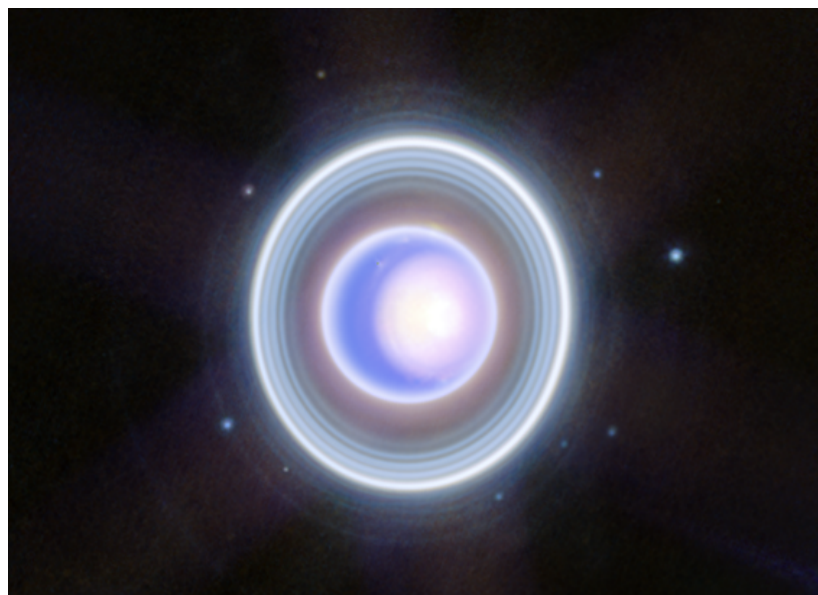
Fonte: science.nasa.gov/resource/hubble-captures-detailed-image-of-uranus-atmosphere/, NASA (2024).

*A imagem destaca feições atmosféricas e o sistema de anéis de Urano, revelando detalhes invisíveis na luz visível. Essa técnica tem sido essencial para o estudo da composição e dinâmica da atmosfera do planeta.

Esses anéis são constituídos, provavelmente, por estruturas e compostos carbonáceos que absorvem muito mais luz do que as partículas de gelo e poeira que compõem os anéis de Saturno.

Estima-se que esses objetos têm tamanhos que variam entre alguns centímetros até alguns metros. O planeta tem um giro praticamente lateral, ou seja, o planeta Urano gira de lado, fazendo com que os invernos e verões durem bastante, aproximadamente 42 anos. Suas luas mais importantes são Titânia, que tem um diâmetro de 1.578 km, e Oberon, que possui 1.523 km, no entanto, o planeta possui 27 luas conhecidas. Ariel, Umbiel e Miranda são outros satélites famosos do gigante gelado. Todos esses nomes são referências a obras de William Shakespeare e Alexander Pope.

Figura 44 - Urano com seus anéis e atmosfera com mais contraste, registrado pelo Telescópio Espacial James Webb



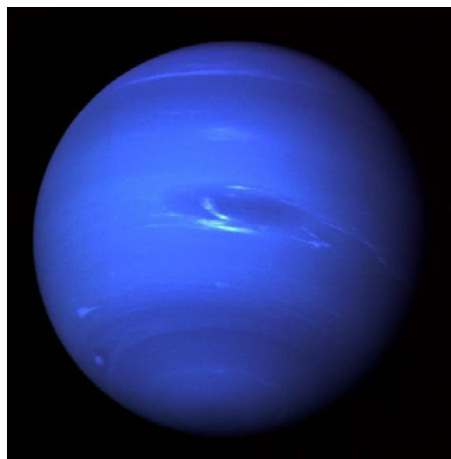
Fonte: science.nasa.gov/uranus/, NASA (2025).

*Capturada pelo Telescópio Espacial James Webb, a imagem revela Urano com seus anéis e atmosfera com mais contraste, além de diversas luas ao fundo. O avanço óptico e infravermelho permitiu revelar estruturas antes invisíveis, marcando uma nova era na astrofotografia planetária.

NETUNO: O REI GELADO

Netuno, o oitavo planeta do Sistema Solar, possui uma fascinante história mitológica que permeia seu nome e características. Denominado em homenagem ao deus romano do mar, Netuno, o planeta é um gigante gasoso com densidade média de aproximadamente $1,64 \text{ g/cm}^3$. Sua composição principal consiste em hidrogênio e hélio, com traços de água, amônia e metano em sua atmosfera.

Figura 45 - Netuno, registrado pela sonda Voyager 2, no ano de 1989



Fonte: science.nasa.gov/neptune/, NASA (2025).

*O registro acima foi feito pela sonda Voyager 2, no ano de 1989, tendo sido esta a primeira nave espacial a visitar o gigante gelado. Nele podemos ver em destaque uma grande tempestade, tal como em Júpiter, mas aqui a Grande Mancha Escura é mais estável e não tem diminuído seu tamanho como no maior dos planetas do Sistema Solar.

A história de descobrimento de Netuno é fascinante e o planeta é a amostra de que a previsão matemática é uma das formas mais poderosas de entender a natureza. Após a descoberta

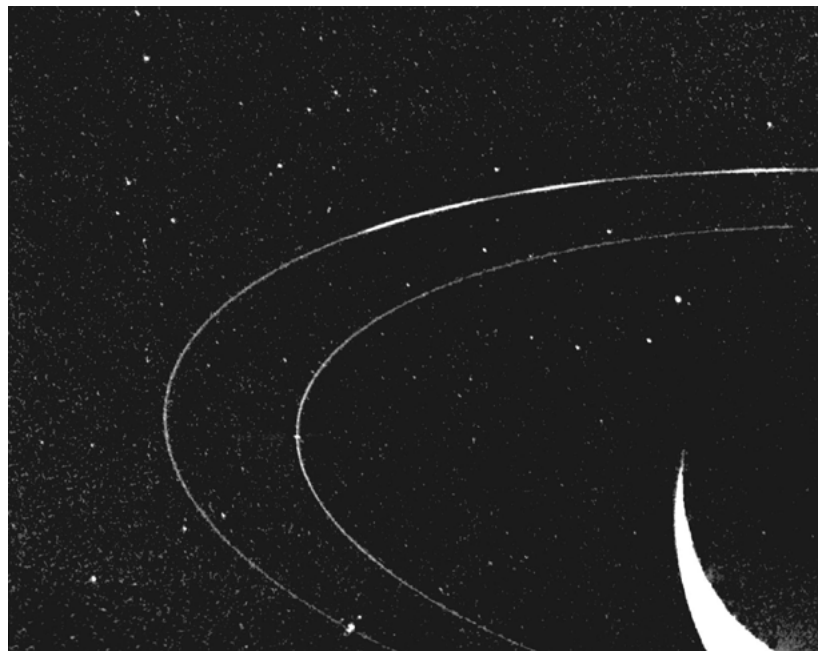
de Urano, os astrônomos passaram a acompanhar esse astro e monitorar continuamente a sua órbita. Em determinado momento, esses estudiosos perceberam que a órbita do planeta de Herschel não se comportava da maneira como era previsto pela física de Newton, portanto havia duas possíveis soluções: assumir que a física newtoniana não tinha validade no local em que Urano se encontrava; ou que existia algo que não estava sendo observado, mas que estava interferindo na órbita de Urano. A segunda opção era a mais óbvia.

Dois astrônomos, de maneira independente, Urbain Le Verrier (1811–1877) e John Couch Adams (1819–1872), fizeram cálculos que previam, com base nos desvios na órbita de Urano, o planeta faltante. Em 23 de setembro, com base nos cálculos de Le Verrier, o astrônomo Johann Galle (1812–1910), do observatório de Berlin, observou o 8º planeta do Sistema Solar.

Em relação aos seus movimentos, Netuno possui um tempo de rotação em torno do próprio eixo de cerca de 16 horas e 6 minutos, enquanto seu período de translação ao redor do Sol é de aproximadamente 165 anos terrestres. Com um raio equatorial de cerca de 24.622 quilômetros e um diâmetro de aproximadamente 49.244 quilômetros, Netuno é menor que seu planeta vizinho, Urano.

Assim como os outros planetas gasosos, Netuno também possui um sistema de anéis. Esse sistema tem características próprias, como a formação de arcos nos anéis, ou seja, estruturas sólidas e estáveis que se mantêm assim desde a sua descoberta na década de 1980.

Figura 46 - Anéis de Netuno, registrados pela sonda Voyager 2 em 1989



Fonte: science.nasa.gov/neptune/neptune-facts/, NASA (2025).

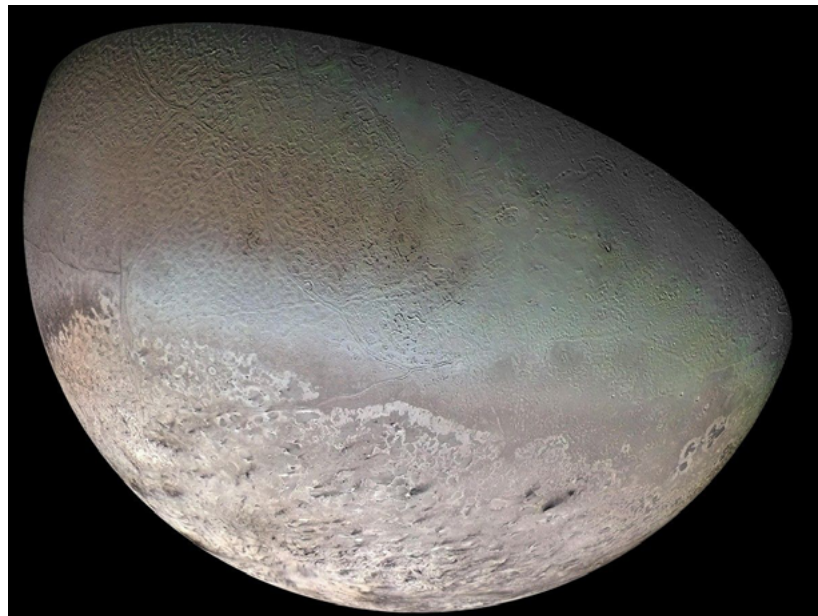
*A foto, em preto e branco, revela com destaque trechos brilhantes dos anéis, especialmente o arco Adams. Essa luminosidade concentrada ocorre devido ao fenômeno de espalhamento para frente da luz solar, em que partículas finas refletem intensamente a luz quando observadas contra o Sol. Diferente dos anéis contínuos de Saturno, os anéis de Netuno são compostos por arcos, regiões com maior densidade de partículas que não se dispersam uniformemente por causa da influência gravitacional de luas pastoras, como Galateia, que mantêm os arcos estáveis e confinados.

Essa estrutura de arcos nos anéis de Netuno não seria possível se não houvesse luas (luas pastoras) que permitissem a estabilidade dessa formação, assim, Galatéia é a possível responsável por manter essas estruturas ao longo do planeta como um todo.

Outra lua importante de Netuno é Tritão, um mundo congelado que orbita em uma direção oposta ao movimento de rotação do planeta ao qual está ligada gravitacionalmente. A temperatura dessa

lua está na casa dos -230°C , fazendo-a ocupar o posto de lua mais fria do Sistema Solar.

Figura 47 - Tritão, lua de Netuno



Fonte: science.nasa.gov/resource/global-color-mosaic-of-triton/, NASA (2024).

*A lua mais famosa de Netuno, Tritão, tem raio de 1.350 km e é cerca de 22% menor que a Lua, juntamente com a Terra e Titã, é um mundo com atmosfera composta por nitrogênio. O mosaico foi registrado conjuntamente pela sonda Voyager 2 em 1989 e por telescópios na Terra com filtros de diferentes cores, dando assim a profundidade proporcionada pelas cores fantasias mostradas nas imagens.

Em virtude da origem do nome de Netuno, as luas desse planeta receberam nomes que têm características específicas ligadas ao mar e à mitologia grega, assim, Galateia, Tritão, Proteu, Nereida e outras têm sua nomenclatura ligada à mitologia antiga da Grécia.

Localizado a uma distância média de cerca de 4,5 bilhões de km do Sol, equivalente a aproximadamente 30,07 UA, Netuno orbita em um ritmo mais lento que os planetas internos do Sistema Solar.

Sua cor azul profunda é atribuída à presença de metano em sua atmosfera, que absorve luz vermelha e reflete luz azul.

Netuno tem uma rica história mitológica, sendo associado ao deus romano do mar devido à sua cor azul e sua posição distante no Sistema Solar. Sua descoberta, em 1846, foi um marco na astronomia e foi realizada após cálculos baseados em perturbações observadas na órbita de Urano. Nenhuma sonda pousou nesse planeta ou em qualquer uma de suas luas, portanto Netuno continua intacto no vasto oceano cósmico.

Assim finalizamos nossa viagem pelos planetas, com a certeza de que ainda existem mais coisas a serem exploradas, tais como os planetas anões que visitaremos na próxima unidade.



**OS PEQUENOS
ESQUECIDOS**

O CONCEITO DE PLANETA: NOVAS FRONTEIRAS E NOVAS CLASSES

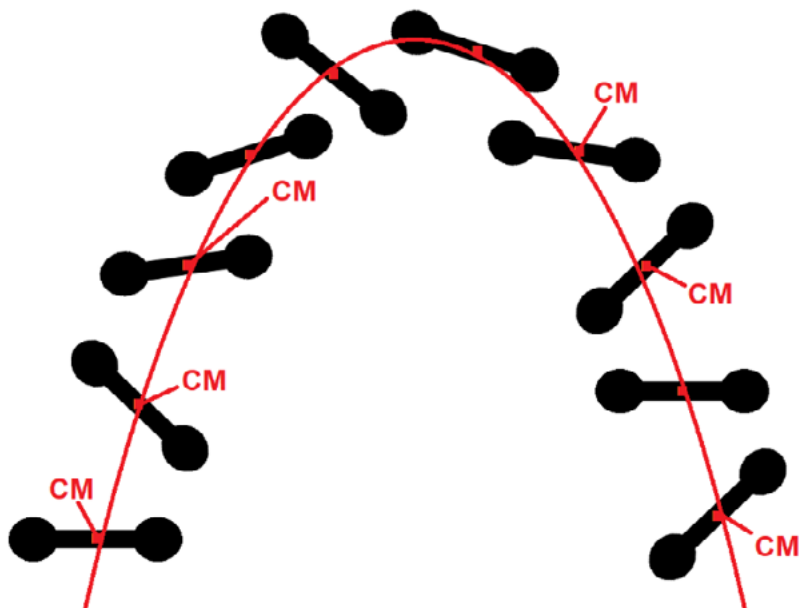
O centro de massa de um sistema de partículas (duas partículas ou mais em uma dada configuração de posições) é tido como o ponto pelo qual a análise do movimento pode se tornar mais facilitada em termos de trajetória, conservação de momento e outros aspectos de origem mecânica. Podemos definir duas características básicas para o centro de massa de um sistema de partículas: a primeira é que o centro de massa de um sistema de partículas é o ponto que se move como se toda a massa do sistema estivesse concentrada nesse ponto; e a segunda característica é que podemos assumir que todas as forças externas estão aplicadas nesse ponto.

Para verificarmos a primeira assertiva, imagine duas bolas de bilhar que foram conectadas através de uma mola e lançadas para cima de maneira que se aproximassem ou se afastassem uma da outra. Podemos, de maneira equivalente, discutir o movimento caótico de cada massa envolvida a fim de saber a trajetória do sistema, ou ainda, de maneira mais simples, calcular a posição do centro de massa desse mesmo sistema e obter a descrição completa da trajetória como se toda a massa do sistema estivesse concentrada no ponto que foi mostrado através das equações.

Quanto à segunda afirmação, observe que, se toda a massa estiver concentrada em um único ponto, poderá existir uma equivalência entre o movimento do centro de massa de um sistema de partículas e o movimento de um ponto material. Quando lançamos obliquamente um objeto qualquer e observamos somente o centro de massa deste, verificamos a trajetória parabólica descrita, tal como quando lançamos uma bola de gude que se comporta como um ponto material para esse caso.

A Figura 48 evidencia o que colocamos até aqui e pode ser obtida através de fotografias de longa exposição. Marcamos a posição do centro de massa de um altere e o lançamos de maneira oblíqua, fazendo com que rotacionasse ao mesmo tempo que descrevia o movimento de translação.

Figura 48 - Trajetória parabólica do centro de massa de um altere



Fonte: elaborado pelo autor.

Podemos utilizar uma equação simples pra calcular o centro de massa de um sistema composto por dois corpos. A equação aparece a seguir:

$$(5) \quad X_{CM} = \frac{M_1 x_1 + M_2 x_2}{M_1 + M_2}$$

Nessa equação, observamos que a massa M_1 e a coordenada de posição x_1 são referentes ao primeiro objeto do sistema, enquanto M_2 e x_2 são relativos ao segundo objeto, sendo estes considerados pontos materiais. A equação (5) é unidimensional e serve muito bem aos propósitos deste trabalho, no entanto, para um caso bidimensional, ou seja, com vários corpos dispostos no plano, ou ainda para o caso tridimensional, podemos nos valer de uma equação vetorial análoga com componentes X_{CM} , Y_{CM} e Z_{CM} que não apresentamos, pois não faz parte dos objetivos do nosso trabalho.

Aplicaremos adiante a equação (5) ao caso de dois objetos massivos, tais como os corpos celestes do nosso Sistema Solar, permitindo que calculemos o centro de massa de um sistema muito importante e que tem sido causa de discussões acaloradas entre o público leigo em Astronomia.

Plutão esteve, ao longo de muitos anos, no cerne das discussões sobre Astronomia e também se tornou parte integrante da revisitação do conceito científico de planeta. No ano de 2006, durante a 26ª Assembleia Geral da União Astronômica Internacional, o corpo celeste foi rebaixado à categoria de planeta-anão. Algumas considerações foram feitas com relação a essa nova categoria, todas elas com base em aspectos referentes à evolução desse conceito ao longo da história da humanidade. Essas discussões levavam em consideração a descoberta de outros corpos celestes, tais como Cérís, Éris e Caronte, estando estes no Cinturão de Asteroides e também no Cinturão de Kuiper, local de encontro de Plutão.

A nova definição e a mudança de classificação de Plutão são potencialmente problemas motivadores da discussão da natureza da ciência, tendo em vista essa recente classificação. O entendimento do fazer científico é uma das maneiras de permitir que os cidadãos tenham em mente como atua a produção de conhecimento e o

desenvolvimento de novas tecnologias para serem utilizadas no dia a dia, tem relação também com o entrelaçamento da Ciência com a sociedade e como isso impacta nos conceitos e na evolução destes ao longo do tempo.

O entendimento do fazer científico pode ter como consequência o estabelecimento de objetivos dentro das aulas de ciências, que têm sido inundadas de falta de significados e utilizando-se de fórmulas e equações que são recitadas sem que nem mesmo os discentes conheçam o conteúdo e o impacto no seu dia a dia.

O ensino sobre a natureza da ciência atualmente tem ganhado contornos sociais bastante importantes e impactantes. Quando tratamos desses temas no contexto social, somos levados ao papel de desmistificar crenças, ritos, mitos e distinguir a ciência da pseudociência, que por sua vez desagrega valor à produção de conhecimento e produz a desinformação aos cidadãos.

O conceito científico de planeta teve evolução ao longo dos anos, séculos e milênios, partindo de pequenos pontos luminosos que se movem tendo como fundo as estrelas fixas da abóbada celeste, até conceitos que envolvem critérios para a sua classificação. Essa evolução com relação à complexidade desses corpos celestes é fruto da evolução do pensamento humano e também da Ciência como fundamentação do conhecimento que serve à sociedade.

As chamadas estrelas errantes, já na antiguidade, foram as primeiras formas de classificação e diferenciação das estrelas fixas para os planetas. Hoje sabemos que naquele momento eram observados os planetas Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, que eram os conhecidos até então. Observações referentes aos planetas Netuno e Urano só foram possíveis com advento dos grandes telescópios e também de estudos referentes a perturbações nas órbitas de planetas já conhecidos.

Assim, a concepção de planeta foi sendo modificada e passou então a incluir estes dois últimos (Urano e Netuno) como parte do grupo seletivo de corpos do Sistema Solar. Dessa maneira, em 2006 foram colocados os seguintes critérios para a definição do que vem a ser um planeta.

Os membros da IAU, na Assembleia Geral de 2006, concordaram que um planeta é definido como um corpo celeste que: a) está em órbita ao redor do Sol; b) tem massa suficiente para que sua autogravidade supere as forças de corpo rígido de modo que ele assuma uma forma de acordo com o equilíbrio hidrostático (aproximadamente redondo); e c) limpa a vizinhança em torno de sua órbita.

Um planeta anão é um corpo celeste que: a) está em órbita ao redor do Sol; b) tem massa suficiente para que sua autogravidade supere as forças de corpo rígido de modo que ele assuma uma forma de acordo com o equilíbrio hidrostático (aproximadamente redondo); c) não limpa claramente a vizinhança em torno de sua órbita; e d) não é um satélite.

Isso significa que o Sistema Solar consiste de oito “planetas”: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. Uma nova categoria de objetos chamada “planeta anão” também foi decidida. Os primeiros membros da categoria “planeta anão” são Ceres, Plutão e Eris.

Após a crescente descoberta de outros corpos do Sistema Solar presentes no Cinturão de Kuiper, um impasse se formou: ou era necessária a consideração de que os outros corpos descobertos fossem considerados planetas, ou Plutão deveria ser retirado dessa categoria e incluído em uma nova. Assim foi feita a resolução e definição do conceito de planeta e planeta anão.

As várias mudanças das categorias de alguns dos corpos celestes de acordo com o modelo de universo, geocêntrico ou

heliocêntrico, exemplificam o caráter transitório e temporário do conhecimento científico, tal como os casos de Ceres e Plutão, que tiveram sua classificação alterada em consequência das implicações decorrentes de descobertas de asteroides ao seu redor.

Plutão possui cinco luas, Nix, Hidra, Cérbero, Estige e Caronte. Esta última é a maior de todas e estabelece com o planeta anão uma relação especial, já que a massa de Caronte é de 12,2%.

Essa proximidade em massa tem uma consequência curiosa: o centro de massa do sistema não está dentro de Plutão, como acontece na maioria dos sistemas planeta-lua. Por meio da equação (5), podemos calcular o centro de massa a partir do centro de Plutão. A massa de Plutão e Caronte são, respectivamente, kg e kg e estão distantes um do outro em 19.640 km. Colocando Plutão na coordenada de origem, ou seja, $x = 0$, e utilizando a referida equação, obtemos que o centro de massa desse sistema é de 2.130 km, levando em conta que Plutão tem raio de 1.188 km. O valor calculado se encontra fora da superfície do planeta. Isso significa que Plutão e Caronte orbitam um ponto em comum, como dois dançarinos girando ao redor de um centro compartilhado.

Além disso, os dois corpos estão gravitacionalmente travados, um fenômeno chamado de rotação sincronizada. Isso quer dizer que Plutão e Caronte mostram sempre a mesma face um para o outro, girando em sincronia perfeita. Essa característica é rara e reforça a ideia de que o sistema é mais equilibrado do que o de um planeta dominante com uma lua subordinada.

Por todos esses motivos, muitos astrônomos consideram que Plutão e Caronte formam um sistema binário de planetas anões, ou um sistema de planetas duplos. Mesmo que, oficialmente, Caronte ainda seja classificado como uma lua de Plutão pela União Astronômica Internacional, do ponto de vista da física orbital, esse sistema se comporta de maneira muito diferente das duplas planeta-lua

mais comuns. Por isso, Plutão e Caronte são frequentemente apresentados como um dos melhores exemplos de um sistema planetário duplo em nosso Sistema Solar. A maior parte dos dados que são encontrados sobre esse sistema foram obtidos pela sonda New Horizons de 2015.

É comum que, principalmente entre o público leigo, os conceitos de planeta anão e exoplaneta sejam confundidos. Embora ambos os termos estejam ligados ao estudo dos corpos celestes, eles se referem a categorias muito diferentes dentro da astronomia.

Nas seções a seguir, vamos esclarecer essa diferença e entender por que Plutão, apesar de ter sido considerado durante muito tempo o planeta mais distante do Sistema Solar, não pode ser classificado como um exoplaneta. Veremos também outros objetos que estão na mesma classe de Plutão, alguns com luas, outros com sistema de anéis etc.

PLANETAS ANÕES E OS QUINTAIS SUJOS

De acordo com as definições atuais, os planetas anões são corpos celestes que não satisfazem aos três critérios que definem um planeta. Ou seja, ou não atingiram o equilíbrio hidrostático necessário para adquirir forma aproximadamente esférica, ou não orbitam diretamente o Sol, ou, ainda, não limpam a vizinhança ao redor de sua órbita (possuindo, de certa forma, os quintais sujos). Plutão, Makemake, Ceres, Haumea, entre outros são classificados como planetas anões. Em geral, são corpos rochosos e se distribuem desde o cinturão de asteroides até os confins do Sistema Solar.

Plutão é um corpo bastante querido pela população leiga em Astronomia. Ele foi reclassificado como planeta anão em 2006

mesmo antes de completar uma rotação em torno do Sol, pois seu período de translação é de 248 anos desde sua descoberta, em 1930. Seu nome foi dado por uma pré-adolescente de 11 anos que sugeriu que ele fosse nomeado de acordo com o deus romano do submundo de mesmo nome. Plutão tem uma temperatura média de -232°C , pois sua distância média com relação ao Sol é de 5,91 bilhões de quilômetros, ou seja, 39,48 UA.

Figura 49 - Tombaugh Regio, região em forma de coração de Plutão



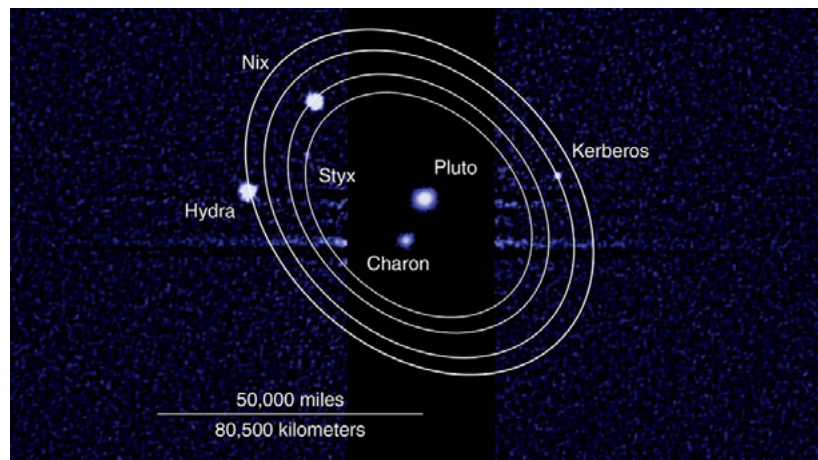
Fonte: science.nasa.gov/gallery/pluto/, NASA (2025).

*A imagem destaca a região chamada Tombaugh Regio, formada por gelo de nitrogênio. Essa área clara contrasta com outras mais escuras da superfície. Plutão possui uma atmosfera extremamente tênue, composta por nitrogênio, metano e monóxido de carbono. Essa atmosfera se expande e contrai conforme sua distância ao Sol e, mesmo rarefeita, ela forma neblinas em camadas.

A órbita de Plutão é inclinada $17,16^{\circ}$ com relação ao plano que chamamos de eclíptica, que é o plano em que o Sol e a Lua se deslocam vistos da Terra. Além disso, Plutão tem uma órbita bastante excêntrica e, em certos momentos, o planeta anão se torna mais próximo do Sol do que Netuno.

As luas de Plutão, como ressaltamos anteriormente, são Caronte, Nix, Hidra, Cérbero e Estige. Caronte é a mais importante, pois seu tamanho é comparável ao planeta anão o qual ele orbita.

Figura 50 - Plutão e suas cinco luas



Fonte: science.nasa.gov/gallery/pluto/, NASA (2025).

*O sistema de luas orbita o centro de massa do sistema duplo Plutão-Charonte. Somente Caronte tem formato circular e é a que está mais próxima do corpo mais massivo do sistema.

Caronte demora 153 horas para rotacionar ao redor de Plutão, ao passo que Plutão demora o mesmo tempo para rotacionar em todo do próprio eixo. Nix e Hidra foram descobertas em 2005 pelo telescópio Hubble e têm diâmetros de 49 km e 43 km respectivamente. Cérbero foi descoberta em 2011 e Estige em 2012, tendo, respectivamente, 19 km e 16 km de diâmetro. Todas essas quatro luas têm formatos irregulares, não se parecendo em nada com Caronte.

Figura 51 - Caronte, maior lua de Plutão



Fonte: science.nasa.gov/gallery/pluto/, NASA (2025).

*Descoberta em 22 de junho de 1978 por James Christy, Caronte foi fotografada com detalhes pela missão New Horizons, lançada pela NASA em 19 de janeiro de 2006. A sonda viajou por quase 10 anos até alcançar o sistema de Plutão em 14 de julho de 2015. Um fato curioso é que a cápsula levava parte das cinzas de Clyde Tombaugh, o astrônomo que descobriu Plutão em 1930. A New Horizons usou a gravidade de Júpiter para ganhar velocidade durante o trajeto. Essa foi a primeira visita humana ao planeta anão e à sua lua. As imagens revelaram a geologia surpreendente de Caronte e sua interação gravitacional com Plutão.

Haumea é um planeta anão que tem um formato peculiar, sendo ovalado, tendo 1.740 km de diâmetro equatorial. Esse planeta anão orbita o Sol a uma distância de 6,5 bilhões de quilômetros e possui período orbital de 285 anos terrestres e um peculiar sistema de anéis, juntamente com duas luas. O sistema de luas de Haumea foi descoberto em 2017 e é o primeiro objeto conhecido do cinturão de Kuiper com essa característica específica.

Dois grupos reivindicam a descoberta do planeta anão, um com relatos de observação de 2003 e outro com relatos de observação de 2004, no entanto, a descoberta não foi atribuída oficialmente a nenhum destes.

Suas luas e o próprio corpo celeste têm nomes que destoam dos demais corpos celestes conhecidos amplamente, Haumea é o nome dado à deusa da fertilidade. As luas, Namaka e Hi'iaka, receberam os mesmos nomes dados às filhas de Haumea na mitologia havaiana, sendo Namaka a lua mais interna e o nome dado ao espírito da água, enquanto Hi'iaka é a lua mais externa e o nome dado à deusa padroeira das ilhas do Havaí e das dançarinas de hula.

Essas luas de Haumea não orbitam no mesmo plano, tendo uma diferença de aproximadamente 13° entre suas órbitas. Por mais que pareça um sistema estranho, as órbitas das luas permanecerão estáveis por muito tempo, não se afastando nem se aproximando significativamente uma da outra ao longo dos milhões, ou até mesmo bilhões de anos. O fato mais empolgante desses planetas anões é que eles não estão no mesmo plano orbital de todos os planetas. O planeta anão Haumea está em um plano orbital de 28° , uma inclinação muito alta, mas não a maior. Falaremos adiante de um planeta anão que orbita num plano de 44° com relação à eclíptica.

Makemake é um planeta anão que teve grande importância na criação dessa categoria de objetos celestes, ele foi observado no telescópio do Observatório Palomar, na Califórnia, e foi descoberto pouco antes da Páscoa. Por essa razão, foi chamado inicialmente de coelhinho da Páscoa (embora mais tarde tenha recebido o nome oficial de FY9). Ele leva 305 anos terrestres para descrever uma órbita ao redor do Sol e seu nome tem origem no deus criador da humanidade e da fertilidade da ilha da cultura Rapa Nui (a cultura Rapa Nui é oriunda do povo da Ilha de Páscoa, no final foi encontrado algo que remete à época de sua primeira observação).

Ele foi observado em março de 2005 e possui uma lua o orbitando. Makemake tem um raio de aproximadamente 715 km e tem raio orbital de 45,8 Unidades Astronômicas. Makemake completa uma rotação em torno do seu próprio eixo em 22 horas e

meia, e possui uma lua, chamada MK2, uma clara referência ao nome do corpo principal desse sistema, em que se juntou as consoantes da abreviação do nome do planeta anão. Essa lua tem 80 km de raio, e eu não vou dizer que esse valor é pequeno, pois o meteoro que atingiu a Terra há 65 milhões de anos atrás possuía 10 km de diâmetro.

Esse planeta anão é o segundo mais brilhante do cinturão de Kuiper, ficando atrás apenas de Plutão, que, com certeza, reina soberano nessa parte do Sistema Solar. A inclinação da sua órbita é de 29°, no entanto, ainda é bem menor que a inclinação do Eris, que será o próximo planeta anão a ser tratado.

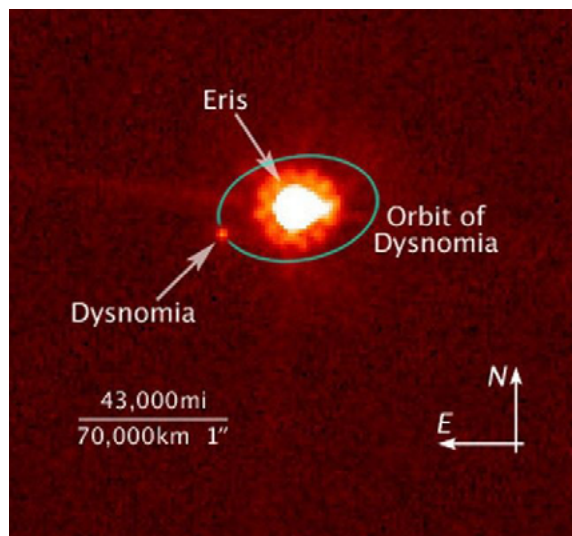
Eris é um planeta com dimensões aproximadas às de Plutão, no entanto, sua distância é quase três vezes a distância do mesmo planeta anão. Eris está a uma distância de aproximadamente 10 bilhões de quilômetros do Sol, ou seja, 68 UA. Eris tem 1.188 km de raio, o que o torna pouco menor que Plutão.

A descoberta de Eris foi primordial para que os astrônomos tivessem que reclassificar alguns corpos, tal como foi falado anteriormente, por essa razão ele foi batizado com o nome que remete à deusa grega da discórdia e da luta. O planeta anão demora aproximadamente 557 anos terrestres para completar uma órbita ao redor do Sol e está em um plano de 44° com relação à eclíptica. Projeções de astrônomos ao redor do mundo informam que o corpo celeste tem uma temperatura que varia entre -217 °C e -243 °C, por essa razão é pouco provável que tenha vida na superfície desse planeta anão.

Eris tem uma lua, com um nome bem significativo, Disnomia. É uma lua pequena, com cerca de 350 km de raio e possui uma órbita quase circular, completada pelo satélite desse corpo no período de 16 dias. Disnomia recebeu esse nome em homenagem à filha de Eris, que é o espírito ou a deusa grega da desordem civil e da ilegalidade.

Esse satélite de Eris foi descoberto pelo telescópio Hubble, que, como vimos, foi o grande responsável por verificar as características dos planetas anões, incluindo as luas e anéis. Os planetas anões são mundos isolados, embora não sejam somente posicionados no cinturão de Kuiper, ainda fazem parte do nosso Sistema Solar. Alguns planetas anões têm origens bem misteriosas, indo desde uma formação há 4,5 bilhões de anos atrás, juntamente do Sistema Solar, até a captura ao passar nos domínios gravitacionais da nossa estrela.

Figura 52 - Planeta anão Eris e sua lua Disnomia

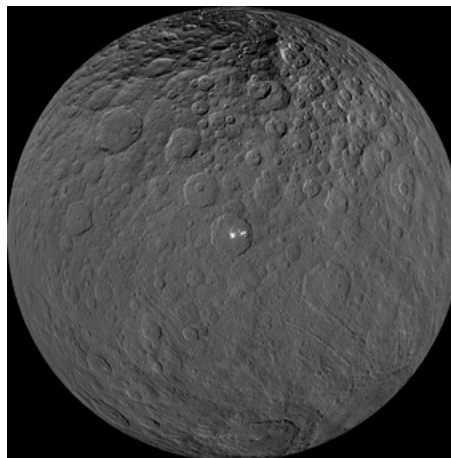


Fonte: science.nasa.gov/asset/hubble/hubble-view-of-eris-and-dysnomia/, NASA (2007).

*A imagem foi registrada pelo Telescópio Espacial Hubble, em 10 de agosto de 2006, e mostra o planeta anão Eris e sua lua Disnomia, com a órbita desta indicada em cor verde azulada. Para captar o brilho tênue de Disnomia, a câmera do Hubble utilizou um tempo de exposição prolongado, o que também fez com que Eris parecesse mais brilhante e difuso. A separação entre os corpos, cerca de 70.000 km, permitiu determinar a massa de Eris com base no movimento orbital da lua. Essa imagem foi essencial para confirmar que Eris era comparável a Plutão.

Ceres sofreu o oposto do que aconteceu com Plutão. Ele foi reclassificado como planeta anão, antes era um asteroide, que fica no cinturão de asteroides entre Marte e Júpiter. Essa região, apesar de conter milhares de corpos, não tem massa total elevada, não ultrapassando 4% da massa da Lua.

Figura 53 - Ceres, o maior objeto do cinturão de asteroides



Fonte: science.nasa.gov/resource/high-resolution-ceres-view/, NASA (2024).

*A imagem em alta resolução mostra Ceres, o maior objeto do cinturão de asteroides, registrada pela sonda Dawn da NASA. Lançada em 2007, Dawn foi a primeira missão a visitar um planeta anão, chegando a Ceres em 2015 após explorar o asteroide Vesta. Um dos destaques da superfície é a cratera Occator, que abriga depósitos brilhantes de carbonato de sódio, sugerindo atividade geológica passada e possível presença de água salgada sob a crosta. A missão revelou que Ceres é um corpo complexo e ativo, com características que o aproximam de mundos oceânicos.

Ceres não possui luas, o que é algo anormal, tendo em vista que até agora todos os planetas anões foram apresentados juntamente de suas luas, pelo menos uma. O raio equatorial do planeta anão é de 473 km e o seu período orbital é de 4,6 anos terrestres, com 2,77 UA de raio orbital.

Figura 54 - A superfície de Ceres em meia-luz



Fonte: science.nasa.gov/resource/dawn-navigating-ceres/, NASA (2017).

*A imagem revela crateras marcantes como Urvara (ponto vermelho) e Kerwan (ponto azul), esta última com cerca de 280 km de diâmetro. Occator, com 92 km de diâmetro, é famosa por suas manchas brancas formadas por carbonato de cálcio, cloreto de potássio e outros sais. O registro foi feito pela sonda Dawn da NASA. A cena evidencia a complexidade geológica do maior corpo do cinturão de asteroides.

A massa do planeta anão é de 1,3% da massa da Lua, uma constatação da baixa massa dos objetos do cinturão de asteroides deste cinturão.

Os planetas anões representam não somente corpos espalhados pelo Sistema Solar, mas também o processo de acreção de seixos, mecanismo responsável pela explicação da formação de planetas como o nosso. São inertes, estéreis e é bem provável que sejam sem vida, pertencem, na sua grande maioria, a uma região bem extensa do nosso sistema, composta majoritariamente por gelo e rocha, o cinturão de Kuiper. Apenas a sonda New Horizons explorou diretamente essa região, é como se ela tivesse sido a pioneira nessa ação. Agora ela vaga pelo deserto cósmico sem a chance de ver

nenhum outro objeto para ser estudado. Eu sempre penso em como será daqui a umas centenas de anos, quando desenvolvermos os propulsores mais modernos que nos levem para longe com velocidades muito altas e possamos alcançar sondas como essa ou ainda como as Voyager 1 e 2, o que faremos? Deixaremos vagarem pelo espaço ou as recuperaremos como uma lembrança dos tempos em que o homem ainda estava engatinhando na exploração espacial?

O espaço é frio, pouco convidativo, é pouco denso em termos de matéria e muita coisa ainda pode ser descoberta. Muito ainda pode ser encontrado no vasto vazio cósmico, mas a sensação que tenho é que o ser humano já foi mais corajoso, mais compelido a explorar o inexplorável. Espero que, em poucos anos, voltemos à Lua e finalmente consigamos explorar os outros corpos do Sistema Solar como uma verdadeira ação de satisfação da curiosidade, não como o fruto de uma disputa contra um país ou um regime, tal como foi na época da Guerra Fria.

O QUE SÃO EXOPLANETAS?

A palavra “planeta”, de origem grega, está ligada ao conceito de “estrela viajante” e foi a primeira forma, ainda que rudimentar, de diferenciar no céu os corpos celestes que até hoje carregam essa nomenclatura. Na abóbada celeste, algumas estrelas não são fixas, pois possuem movimentos retrógrados e parecem passear ao longo dos anos pelas constelações. Atualmente, o conceito de planeta não é mais o mesmo que os gregos utilizavam. Muitos refinamentos foram incorporados e uma definição moderna, baseada em critérios físicos e em um maior conhecimento do Sistema Solar, foi construída. Hoje essas definições permitem diferenciar planetas, planetas anões e exoplanetas em qualquer lugar do universo conhecido, orbitando as mais diversas estrelas, algo que não era possível há algumas décadas.

Embora esses conceitos, do ponto de vista científico, estejam bem definidos, não podemos afirmar o mesmo sobre a concepção popular. Certa vez, ao perguntar para um grupo de alunos o que era um exoplaneta, as respostas foram diversas e, em meio a elas, percebi uma confusão frequente entre os conceitos de planeta anão e exoplaneta. Essa confusão, de certo modo, é compreensível, especialmente porque o planeta anão mais conhecido – Plutão – encontra-se muito distante da Terra, com um periélio de 29,7 unidades astronômicas (UA) e um afélio de 49,3 UA. No entanto, são classes bem diferentes e essa diferença já pode ser percebida pela morfologia das palavras. No caso dos exoplanetas, temos a junção do prefixo grego “exo”, que significa “fora”, com o termo “planeta”, o que indica que esse corpo celeste está fora do Sistema Solar. Portanto, exoplaneta é o nome dado aos planetas que orbitam estrelas que não o Sol, ou seja, planetas localizados além do nosso Sistema Solar.

Os exoplanetas estão espalhados por estrelas em todo o universo e, até o momento, existem algumas formas principais de detectá-los. Uma dessas técnicas é conhecida como método do trânsito: quando uma estrela é observada a partir da Terra, mede-se uma magnitude específica de seu brilho, que tende a se manter constante ao longo do tempo. Entretanto, se um planeta passar em frente a essa estrela, na linha de visão do observador, haverá uma diminuição momentânea da quantidade de luz recebida. Esse fenômeno indica que a estrela é orbitada por um exoplaneta. A partir dessa redução na luminosidade, é possível estimar o tamanho do planeta, sua órbita e outros aspectos importantes. Contudo, esse método apresenta uma limitação significativa, pois só funciona para sistemas cujos planos orbitais estão alinhados em relação à Terra.

Outro método muito utilizado é o da velocidade radial: a presença de um planeta provoca pequenas oscilações gravitacionais na estrela que ele orbita. Assim, a estrela passa a se mover levemente em torno do centro de massa do sistema, provocando alterações no seu espectro de luz, que se desloca ora para o vermelho, quando a

estrela se afasta, ora para o azul, quando se aproxima. Esse efeito é chamado de efeito Doppler e permite determinar características do planeta, como sua massa mínima e sua órbita. Contudo, esse método é mais sensível a planetas de grande massa, uma vez que estes produzem oscilações mais intensas na estrela.

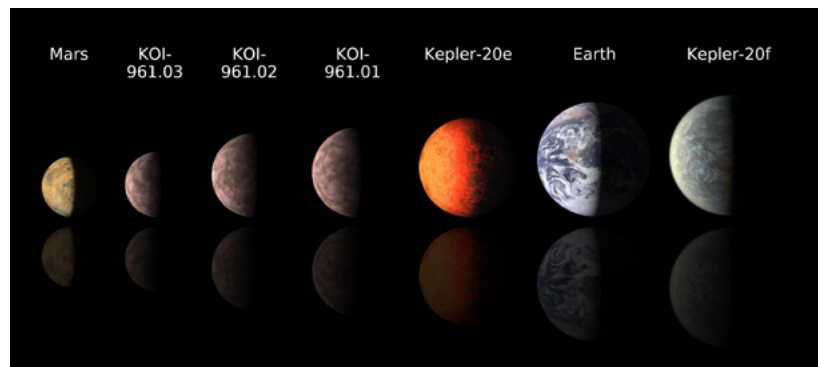
A astrometria, por sua vez, consiste na detecção direta dos planetas. Ela se baseia na obtenção de imagens onde o planeta é registrado visualmente, o que permite a análise direta de suas características. Como os planetas não emitem luz própria, mas apenas refletem a luz da sua estrela hospedeira, esse método é extremamente desafiador. Contudo, quando bem-sucedido, permite determinar informações valiosas sobre esses corpos, como temperatura, composição atmosférica e características orbitais.

Existe, ainda, o método das microlentes gravitacionais, baseado em previsões da Teoria da Relatividade Geral de Einstein. Esse fenômeno ocorre quando a luz de uma estrela distante é desviada ao passar próxima a um corpo massivo, como uma estrela ou até mesmo um planeta. Esse desvio gera um efeito de lente, amplificando a luz da estrela ao fundo. A detecção de um exoplaneta ocorre quando, além da estrela que atua como lente, existe um pequeno desvio adicional causado pela presença do planeta. Embora seja um método extremamente sensível e capaz de detectar planetas a grandes distâncias, ele tem a desvantagem de ser um evento único, que não pode ser repetido, e necessita de confirmação por outros métodos para que suas características sejam devidamente estudadas.

Após a detecção de um exoplaneta, é possível estudar sua atmosfera, quando ela existe, por meio das linhas de absorção presentes no espectro da luz da estrela hospedeira. Quando a luz da estrela atravessa a atmosfera do planeta durante um trânsito, alguns comprimentos de onda são absorvidos por elementos e moléculas presentes nessa atmosfera. Assim, ao comparar o espectro da estrela sem trânsito com aquele obtido durante o trânsito, os astrônomos

conseguem identificar a composição da atmosfera do planeta. Essa é uma das funções mais importantes desempenhadas atualmente pelo Telescópio Espacial James Webb, que possui instrumentos altamente sensíveis para captar essas variações espectrais, impulsionando significativamente a busca por bioassinaturas e condições de habitabilidade em outros mundos.

Figura 55 - Comparativo do tamanho de alguns exoplanetas com planetas conhecidos



Fonte: science.nasa.gov/exoplanets/, NASA (2025).

*Atualmente são conhecidos mais de 5.900 exoplanetas, com pelo menos mais 7.000 ainda não confirmados. Esse número cresceu vertiginosamente após o lançamento do telescópio James Webb, que tem instrumentos que possibilitam essa detecção.

O primeiro exoplaneta descoberto orbitando uma estrela similar ao Sol foi o 51 Pegasi b, identificado em 1995 pelos astrônomos Michel Mayor e Didier Queloz, da Universidade de Genebra, na Suíça. Esse exoplaneta orbita sua estrela hospedeira, 51 Pegasi, a uma distância de apenas 7 milhões de quilômetros, consideravelmente mais próximo de sua estrela do que Mercúrio está do Sol, visto que o planeta mais interno do nosso Sistema Solar possui um semieixo maior de aproximadamente 58 milhões de quilômetros. 51 Pegasi b é um gigante gasoso com uma massa equivalente a cerca de 0,46 vezes a massa de Júpiter. Sua descoberta foi realizada

utilizando-se o método da velocidade radial, que, à época, representava uma inovação tecnológica de grande precisão.

A estrela 51 Pegasi, que dá nome ao exoplaneta, localiza-se na constelação de Pegasus, a aproximadamente 50 anos-luz de distância da Terra. A partir dessa descoberta histórica, iniciou-se uma nova era na astronomia, que hoje conta com milhares de exoplanetas confirmados, transformando profundamente nossa compreensão sobre a formação e diversidade dos sistemas planetários no universo.

IX

**ASSIM COMO
A VOYAGER**

UMA PERSPECTIVA GERAL DO UNIVERSO: NOVOS CAMINHOS

As sondas Voyager partiram da Terra no final dos anos 1970 (agosto e setembro de 1977). Cruzaram os limites dos planetas conhecidos e hoje seguem sozinhas no espaço interestelar, atravessando a escuridão absoluta entre as estrelas. Elas carregam discos com sons e imagens da humanidade, vozes, músicas, saudações em dezenas de idiomas, na esperança de que um dia alguém ou algo as encontre. Mas, na verdade, sabemos que talvez ninguém as ouça. E, ainda assim, as enviamos.

Há algo profundamente humano nesse gesto. O desejo de seguir adiante mesmo sem garantias. A coragem de avançar mesmo sabendo que há solidão no caminho. Porque explorar é isso. É se lançar para onde ninguém foi. É abrir mão da companhia, porque nem todos têm disposição ou coragem de seguir na trilha do desconhecido.

Assim como as Voyagers, cada um de nós carrega uma mensagem. Algo que deseja compartilhar com o mundo, mesmo sem saber se será ouvido. Alguns ficarão à margem do tempo. Outros serão encontrados. Mas todos, de alguma forma, lançaram-se no escuro.

A astronomia nos ensina que o universo é imenso, que somos pequenos, que tudo o que amamos está num frágil ponto azul. Essa consciência pode ser esmagadora, mas também libertadora. Porque, ao entender que a Terra é só uma entre bilhões, passamos a compreendê-la melhor. Passamos a ver que o tempo aqui é breve, e por isso precisa ser vivido com significado.

A humanidade, por mais grandiosa que se veja, é apenas uma presença passageira num planeta que um dia deixará de existir. Quando o Sol começar a se expandir (daqui a aproximadamente 5

bilhões de anos), é possível que já não estejamos mais aqui. Talvez tenhamos nos espalhado por outros mundos, levado conosco lembranças de rios, montanhas, árvores e nomes. Mas, mesmo longe, ainda seremos filhos da Terra.

Este planeta é uma dádiva. Um abrigo improvável em meio à vastidão. E embora o futuro nos convoque a explorar, precisamos lembrar que nenhuma conquista vale se não soubermos de onde viemos. Não se pode plantar em outros mundos se esquecermos as raízes que nos formaram.

A história da astronomia é também a história de povos que caminharam por este mundo e já não existem mais. Povos que olharam o céu sem satélites, sem foguetes, mas com espanto e reverência. Eles não deixaram apenas ruínas, deixaram perguntas. E parte de nossas respostas ainda são tentativas de honrar o que eles iniciaram.

No fim, estudar o universo é estudar a si mesmo. Cada órbita descrita, cada eclipse previsto, cada estrela catalogada é um modo de perguntar “quem somos?” e “para onde devemos ir?”. Talvez as respostas não cheguem tão rápido. Talvez nunca cheguem por completo. Mas enquanto houver alguém disposto a olhar para o céu, haverá também alguém disposto a continuar a busca.

Os homens e mulheres pertencentes à raça humana, individualmente, são como uma nave solitária lançada entre estrelas. Nem sempre serão compreendidos, nem sempre serão acompanhados, mas ainda assim seguimos. Porque há dentro de nós uma força que nos empurra para além. Uma força que nos faz buscar sentido até onde os olhos não alcançam.

Seja você um estudante, um professor, um curioso ou apenas alguém tentando entender o que sente quando olha o céu, saiba: olhar para o céu é o menor caminho para o encontro com todos os seres humanos que passaram por essa pequena esfera telúrica que flutua no espaço, pois o céu de povos antigos, datados de 4 mil anos,

ainda é o mesmo céu que vemos hoje em dia, com mudanças que o olho humano não conseguira perceber.

Mas também é observar o espaço onde nasce o assombro. O mesmo assombro que guiou as Voyagers rumo ao desconhecido.

Que nunca percamos a capacidade de nos deslumbrar com o desconhecido e com a perspectiva de enxergar mais longe que as gerações anteriores.

SOBRE O AUTOR

Hualan Patrício Pacheco é natural de Porto Velho, Rondônia. Licenciado em física (2008 - 2013), tem mestrado em Ensino de Física (2014 - 2017) e Doutorado Profissional em Educação Escolar (2019 - 2023) pela Fundação Universidade Federal de Rondônia (UNIR), sendo desde 2016 docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia. Fundou o AstrolFRO no ano de 2017 e, juntamente com o professor Fernando Dall'Igna, o Grupo de Pesquisa em Astronomia em Cosmologia do IFRO - GPAC no ano de 2023 (maior Grupo de Divulgação Científica do Estado de Rondônia). Foi coordenador estadual do projeto de pesquisa vinculado ao CNPq "Semeando Ciências" que destinou recursos para a aquisição do primeiro planetário móvel do Estado de Rondônia, sob sua supervisão. Ainda no contexto dos planetários foi o presidente da comissão responsável pela construção do projeto do Planetário Céus de Rondônia. É pesquisador na área de ensino de astronomia desde o ano de 2016 e publicou diversos artigos neste campo de estudos, contribuindo para a área de divulgação de ciências e astronomia em Rondônia.

www.pimentacultural.com

A tranquilidade refletida no céu

vivendo
e entendendo
astronomia



INSTITUTO FEDERAL
Rondônia

