Projeto Céu Profundo

PRIMEIRA LUZ

Uma Introdução à Observação do Céu

Wandeclayt Melo

Esta publicação pode ser baixada gratuitamente de:
www.ceuprofundo.com/primeira-luz



Projeto Céu Profundo

PRIMEIRA LUZ

Uma Introdução à Observação do Céu

Wandeclayt Melo

Esta publicação pode ser baixada gratuitamente de:
www.ceuprofundo.com/primeira-luz

2026

Certas marcas comerciais e fabricantes de equipamentos podem aparecer identificados no texto para descrever instrumentos ou procedimentos. Esta publicação não recebeu qualquer apoio financeiro ou material destas marcas e estas identificações não constituem recomendações implícitas ou explícitas de quaisquer marcas e fabricantes citados.

Projeto Céu Profundo
278 páginas (2026)

Esta publicação pode ser baixada gratuitamente de:
www.ceuprofundo.com/primeira-luz

Prefácio

O céu estrelado corresponde a um dos fenômenos naturais que mais exerceu fascínio sobre o ser humano. A disposição das estrelas captou a imaginação de inúmeros povos que nelas buscaram padrões reconhecíveis, passados às gerações vindouras através de narrativas orais. A regularidade com que o aspecto do céu se altera, atrelado às mudanças das estações do ano, permitiu a tradução de configurações celestes em conhecimento útil para uso na agricultura e na navegação, ainda atualmente válido para aqueles que o dominam. Tamanha majestosidade da noite ampliou a sensação de pequenez que o homem sente diante do Universo, motivando a criação de mitos e crenças profundamente arraigadas à nossa psique.

Tantos ainda ficam deslumbrados com a observação do céu noturno e quantos não se perguntam, nesse momento, onde poderiam aprender mais sobre o que há no céu. O mundo atual oferece muitas possibilidades para isso: há livros, vídeos e páginas online que descrevem desde o céu do mês às novidades recém-descobertas por astrônomos. Muitos desses recursos encontram-se em inglês, o que limita um tanto o público que os usará. Outros, em especial os recursos multimidiáticos, são produzidos e veiculados por canais de natureza flagrantemente comercial, mais interessados em ampliar o acesso do público através de polêmicas e informações imprecisas, por vezes conspiratórias, do que em transmitir o conhecimento com o rigor adequado.

É justamente por isso que Primeira Luz torna-se uma obra necessária. Temos aqui um livro sobre Astronomia feito com esmero para instruir novos astrônomos cidadãos, que poderão aprender como reconhecer o céu e participar dessa construção coletiva do conhecimento humano. Escrito por Wandeclayt Melo, do projeto Céu Profundo, Primeira Luz traz vários tópicos necessários para que o leitor possa apreciar e reconhecer o céu. Começamos pela descrição dos catálogos, para entender a nomenclatura dos astros, de onde vem os nomes das estrelas e outras tantas siglas alfanuméricas; afinal, damos nomes às coisas que buscamos conhecer. O livro prossegue, explorando os sistemas de coordenadas usadas na astronomia, fundamentais para a localização do corpo celeste na grande tela do firmamento. Um dos capítulos mais valiosos para o leitor há de ser aquele em que Wandeclayt descreve os equipamentos necessários para a realização das observações; ele o faz com a autoridade de quem possui anos e anos de observação noturna e astrofotografia, transmitindo em palavras o conhecimento prático que logrou adquirir ao longo dessas atividades. Por fim, temos capítulos dedicados aos principais alvos que podemos observar: o Sol, a Lua, os Planetas, os Cometas e as Estrelas, cada qual enriquecido por várias dicas sobre o que um astrônomo cidadão pode fazer na coleta de dados, inclusive na colaboração com a pesquisa de astrônomos profissionais.

Ao percorrer estas páginas, o leitor descobrirá que aprender a observar o céu é muito mais do que adquirir uma técnica ou um passatempo; é um ato de reconexão com uma tradição ancestral de questionamento e admiração. Ao decifrar as coordenadas celestes, ao identificar um planeta ou ao acompanhar o ritmo suave das fases lunares, o indivíduo não

apenas expande seu próprio horizonte, mas também cultiva uma percepção mais lúcida e humilde do seu lugar no cosmos. Essa consciência, que nasce do diálogo silencioso entre o observador e a imensidão estrelada, é talvez a maior contribuição da astronomia amadora: transformar a contemplação do infinito em um profundo entendimento sobre a finitude, a beleza e a interligação de tudo o que compõe o nosso mundo.

Helio J. Rocha-Pinto
Presidente da Sociedade Astronômica Brasileira entre 2020 e 2026

Palavras chave

astronomia, observação, telescópios, ciência cidadã, divulgação.

Conteúdo

Siglas e Acrônimos **xxiii**

1 O Céu **3**
- 1.1 O Que Há no Céu? 3
- 1.2 Uranometria - O Atlas Celeste de Johann Bayer 8
- 1.3 Flamsteed - O Primeiro Catálogo Telescópico 11
- 1.4 Messier - Cometas e Céu Profundo 13
- 1.5 NGC - O Legado da Família Herschel 17
- 1.6 Magnitude Aparente 25
- 1.7 O Céu Moderno 27

2 Coordenadas Celestes **32**
- 2.1 Coordenadas Geográficas 32
- 2.2 O Meridiano Principal 33
- 2.3 A Esfera Celeste 37
- 2.4 Coordenadas Celestes Equatoriais 41
- 2.5 Precessão 43
- 2.6 Coordenadas Horizontais 46
  - 2.6.1 Fênomenos Astronômicos em Coordenadas Horizontais 48
  - 2.6.2 Observador no Polo Norte 49
  - 2.6.3 Observador no Polo Sul 51
  - 2.6.4 Observador no Equador 53
  - 2.6.5 Observador em uma Latitude Arbitrária 54
- 2.7 Tempo Sideral e Ângulo Horário 55
- 2.8 Equação do Tempo 55
- 2.9 Coordenadas Eclípticas 56

3 Telescópios **60**
- 3.1 Por que Precisamos de Telescópios? 60
- 3.2 Resolução 69
- 3.3 Aumento 73
- 3.4 Refratores 75
- 3.5 Refletores 79
- 3.6 Catadióptricos 81
- 3.7 Oculares 83
- 3.8 Lentes Barlow 86
- 3.9 Binóculos 87
- 3.10 *Smart Telescopes* 89
- 3.11 Montagens 91
  - 3.11.1 Montagem Altazimutal 91
  - 3.11.2 Montagem Equatorial 94
- 3.12 Resumo 98

4 O Sol **99**
4.1 A Estrutura do Sol 100
4.2 A Fotosfera 103
4.3 A Descoberta das Manchas Solares 109
4.4 A Rotação Solar 115
4.5 O Ciclo Solar 123
4.6 Os *Flares* Solares 128
4.7 A Cromosfera 131
4.8 A Coroa 134
4.9 A Plataforma Helioviewer 135
4.10 Propriedades do Sol 139

5 A Lua **140**
5.1 Regras da IAU para nomenclatura lunar 145
5.2 Movimentos da Lua 149
5.3 Propriedades da Lua 155

6 Planetas **157**
6.1 Observando Planetas 158
6.2 Órbitas Planetárias 161
6.2.1 Leis de Kepler 161
6.2.2 Primeira Lei - Lei das Órbitas 161
6.2.3 Segunda Lei - Lei das Áreas 162
6.2.4 Terceira Lei - Lei Harmônica 162
6.3 Planetas Rochosos 166
6.3.1 Mercúrio e Vênus 167
6.3.2 Marte 169
6.4 Gigantes Gasosos 171
6.4.1 Júpiter e Saturno 171
6.4.2 Urano e Netuno 174
6.5 Planetas Anões 175

7 Cometas **176**
7.1 Observando Cometas 183
7.2 Órbitas 190
7.3 Cometas rasantes 192
7.4 Nomenclatura 194
7.5 O cometa interestelar 3I/ATLAS 195
7.6 Chuvas de Meteoros 196
7.7 Asteroides e NEOs 197

8 Estrelas **198**
8.1 Distâncias Estelares 200
8.2 Paralaxe 201
8.3 Determinando Distâncias na Prática 205

8.4 Classes Espectrais 207
8.5 O Diagrama H-R 207
8.6 Estrelas ao Telescópio 209
8.7 Estrelas Duplas 210
8.8 Estrelas Variáveis 210
8.8.1 Variáveis Pulsantes 210
8.8.2 Variáveis Cataclísmicas 210
8.8.3 Variáveis Eclipsantes 210

9 Objetos de Céu Profundo 211
9.1 Aglomerados Estelares 215
9.2 Nebulosas 223
9.3 Nebulosas Planetárias 226
9.4 Nebulosas Escuras 231
9.5 Restos de Supernova 235
9.6 Galáxias 237
9.6.1 Universos Ilha 237
9.6.2 O Universo em Expansão 242
9.6.3 Classificação de Hubble 243
9.7 Caçando Objetos de Céu Profundo (*Star hoping*) 244

Glossário 247

Referências 248

Apêndice A: Alfabeto Grego 257

Apêndice B: Lista de Constelações (IAU) 259

Apêndice C: Automatizando o Stellarium 262

Apêndice D: Demonstrações, Equações e Scripts 270
A Superlua é mesmo Super? 271
A terceira lei de Kepler 273
Magnitude limite 274
Magnitude absoluta 275
Propriedades dos Logaritmos 276
Image Magick 277

Apêndice E: Histórico de Versões 278

Lista de Figuras

Fig. 1 Gravura do livro L'Atmosphère: Météorologie Populaire, de Camille Flammarion (1888) retratando um missionário medieval encontrando o ponto onde o céu e a Terra se tocam. 3

Fig. 2 A constelação do Escorpião, no Livro das Estrelas Fixas, de Al-Sufi (Séc. X). Créditos: Library of Congress. 4

Fig. 3 Diagrama da constelação de Cassiopeia do catálogo de Tycho, exibindo a posição da supernova observada em 1572 (SN1572; B Cassiopeiae). Créditos: Library of Congress. 5

Fig. 4 Grande Quadrante de Tycho Brahe. Um de seus muitos instrumentos para medidas de posição descritos no livro *Astronomiæ instauratæ mechanica*. Créditos: Library of Congress. 6

Fig. 5 Primeira página do catálogo estelar de Tycho Brahe, incluído na obra *Astronomiæ instauratæ progymnasmata* (1602). Créditos: Library of Congress. 7

Fig. 6 Detalhe da arte da constelação de Órion no atlas Uranometria, de Johann Bayer (1603). Créditos: ETH-Bibliothek Zürich. 8

Fig. 7 Tabela da constelação de Órion, no Uranometria de Bayer. Créditos: ETH-Bibliothek Zürich. 9

Fig. 8 *Historiaæ Coelestis Britannicæ*, de John Flamsteed. 11

Fig. 9 Carta celeste com as trajetórias do cometa observado em 1531, 1607 e 1682 e com retorno previsto por Halley para o ano de 1758. Créditos: Bibliothèque nationale de France. 14

Fig. 10 Última versão publicada por Messier do Catálogo de Nebulosas e Aglomerados Estelares, no almanaque *Connoissance des Temps, ou Conoissance des Mouvemens Célestes Pour l'Année bissextile 1784*. Créditos: Bibliothèque nationale de France. 15

Fig. 11 O Catálogo de Estrelas, com os dados de observação de John Flamsteed, revisados por Caroline Hershel. 18

Fig. 12 O primeiro catálogo de estrelas duplas de William Herschel, de 1782, publicado no Philosophical Transactions of the Royal Society of London (1782). Créditos: The Royal Society. 19

Fig. 13 Apresentação do catálogo de 1000 novas nebulosas e aglomerados estelares de William Herschel. O primeiro catálogo de objetos de céu profundo dos Herschel, publicado no Philosophical Transactions of the Royal Society of London em 1786. Créditos: Internet Archive. 20

Fig. 14 Telescópio de 40 pés (12 m) de distância focal, o maior telescópio de sua época. Imagem publicada no Philosophical Transactions of the Royal Society of London (1795). Créditos: The Royal Society. 21

Fig. 15 O *Catálogo Geral de Nebulosas e Aglomerados de Estrelas*, de John F. W. Herschel, com 5079 objetos. Publicado em *Philosophical Transactions of the Royal Society* (1864). Créditos: The Royal Society. 22

Fig. 16 Suplemento ao Catálogo Geral de John F. W. Herschel, elaborado por J. L. E. Dreyer. O suplemento traz notas e correções e incorpora os objetos de número 5080 a 6251, após os 5079 objetos listados por John Herschel. Créditos: University of California Libraries/Internet Archive. 23
Fig. 17 New General Catalogue (NGC) de J. L. E. Dreyer, com 7840 objetos de céu profundo, publicado em 1888. Créditos: The Royal Astronomical Society/Internet Archive. 24
Fig. 18 Uma das linhas do New General Catalogue, correspondente ao objeto NGC 4590. Créditos: The Royal Astronomical Society/Internet Archive. 24
Fig. 19 Constelações de Órion, Touro, Gêmeos e Cão Menor no atlas Uranographia (1801) de Johann Elert Bode. No canto inferior direito aparece a constelação Harpa de George, não adotada pela IAU entre as constelações atuais. Créditos: ETH-Bibliothek Zürich 27
Fig. 20 A constelação do Cruzeiro do Sul. Carta gerada no programa *SkyCharts*. 29
Fig. 21 Interface do programa Stellarium. Na tela, uma porção do céu austral, exibindo objetos do céu profundo e as bordas das constelações. Informações sobe o aglomerado globular ω Centauri (NGC 5139) estão visíveis na tela. 30
Fig. 22 Interface do programa Sky Charts (Cartes du Ciel). 31
Fig. 23 Paralelos marcando latitudes a cada 10°. O paralelo 0° corresponde ao equador terrestre. Gráfico gerado com a biblioteca Cartopy. Créditos: Wandeclayt Melo. 32
Fig. 24 Meridianos espaçados de 10° a partir do meridiano central. Gráfico gerado com a biblioteca Cartopy. Créditos: Wandeclayt Melo. 33
Fig. 25 Resoluções I e II da *International Meridian Conference*, de 1884, adotando o meridiano de Greenwich, como meridiano central. 35
Fig. 26 Representação da esfera celeste envolvendo o globo terrestre. Créditos: Wandeclayt Melo. 37
Fig. 27 Projeção do equador e dos polos terrestres na esfera celeste, definindo o equador e os polos celestes. Créditos: Wandeclayt Melo. 38
Fig. 28 Esfera celeste com a representação da eclíptica e do equador e polos celestes. O plano do equador é inclinado $23,4^\circ$ em relação à eclíptica. Créditos: Wandeclayt Melo. 39
Fig. 29 Hemisférios celestes. O Equador divide a esfera celeste em Hemisfério Sul Celeste (esq. 41
Fig. 30 Esfera celeste com indicação dos paralelos de declinação. Créditos: Wandeclayt Melo. 42
Fig. 31 A Esfera Celeste com o Sistema de Coordenadas Equatoriais. A declinação (δ) é equivalente à latitude e a ascensão reta (α) equivale à longitude. O ponto vernal (Υ), uma das intersecções entre o equador celeste e a eclíptica, é a origem da coordenada Ascensão Reta, medida de 0 h a 24 h, com valores crescentes a leste. Créditos: Wandeclayt Melo. 43
Fig. 32 Precessão do eixo terrestre. 44

Fig. 33 Captura de tela do software Stellarium com informações do objeto NGC 5139 (ω Cen). 45
Fig. 34 Hemisfério celeste zenital (acima do horizonte). Estão representados o zênite, os pontos cardeais e o plano do meridiano local. Créditos: Wandeclayt Melo. 46
Fig. 35 Altura (em laranja) e distância zenital (em magenta). No exemplo da figura, a altura (A) do objeto é 60° e a distância zenital (Z) é $Z = 90^\circ - A = 30^\circ$. 47
Fig. 36 Um observador no polo norte terrestre teria o polo norte celeste no zênite e o hemisfério norte celeste estaria sempre visível acima do horizonte. 49
Fig. 37 Hemisfério Norte Celeste. Carta plotada utilizando script Python desenvolvido pelo Projeto Céu Profundo. 50
Fig. 38 Um observador no polo sul terrestre teria o polo sul celeste no zênite e o hemisfério sul celeste estaria sempre visível acima do horizonte. 51
Fig. 39 Hemisfério Sul Celeste. Carta plotada utilizando script Python desenvolvido pelo Projeto Céu Profundo. 52
Fig. 40 Equador celeste e meridiano de um observador sobre a linha do equador terrestre. 53
Fig. 41 Equador celeste, meridiano e polo sul celeste para um observador posicionado 23° ao sul do equador terrestre. 54
Fig. 42 Incidência da luz solar ao longo de um ano. Os gráficos simulam o ponto de vista de um satélite geoestacionário, sobre o equador e acima do meridiano de longitude 60° oeste. Gráficos gerados com a biblioteca python Cartopy. Créditos: Wandeclayt Melo. 57
Fig. 43 Incidência da luz solar nos solstícios e nos equinócios. Gráficos gerados com a biblioteca python Cartopy. Créditos: Wandeclayt Melo. 58
Fig. 44 Em condições como as encontradas no Observatório do Pico dos Dias, em Brazópolis, no sul de Minas Gerais, sob um céu escuro, preservado da poluição luminosa, a Via Láctea aparece como uma faixa brilhante cruzando o céu de inverno, facilmente vista a olho nu. Outros objetos de céu profundo como nebulosas e aglomerados estelares são também perceptíveis sem a ajuda de instrumentos. Créditos: Wandeclayt M. 60
Fig. 45 Parte do espectro eletromagnético compreendendo a faixa visível ao olho humano e as regiões do ultravioleta e do infravermelho próximo. Créditos: Wandeclayt M. 61
Fig. 46 Espectro eletromagnético, dos raios-X até as ondas de rádio. Créditos: Wandeclayt M. 61
Fig. 47 Sensibilidade relativa do olho humano em função do comprimento de onda da luz. A região de maior sensibildade observada na curva, em torno de 550 nm, corresponde à luz verde. Gráfico: Wandeclayt M. com dados de Warren J. Smith [1]. 62
Fig. 48 Espectro solar obtido com o telescópio SUNS. Dados: CRAAM/Mackenzie. Cortesia: Dr. Paulo Simões. 63

Fig. 49 Sensibilidade relativa dos cones azuis, verdes e vermelhos no olho humano. Gráfico: Wandeclayt M. com dados de Stockman & Sharpe[2] e Colour & Vision Research Laboratory, University College London. 63
Fig. 50 Curvas de sensibilidade relativa das visões fotópica e escotópica. Na visão escotópica (adaptada ao escuro), o pico de sensibilidade se desloca em direção aos comprimentos de onda mais curtos. Gráfico: Wandeclayt M. com dados de Warren J. Smith [1] 64
Fig. 51 Durante observação visual, o uso de iluminação vermelha é uma forma de preservar a adaptação da visão à escuridão. Foto: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 65
Fig. 52 Região da constelação de Orion, com indicação da posição da nebulosa M42 e de suas principais estrelas. Créditos: Wandeclayt M. 66
Fig. 53 Tela vermelha no modo noturno do aplicativo Star Chart. Aplicativos com uso em astronomia costumam implementar um modo noturno para preservar a adaptação visual ao escuro. 67
Fig. 54 Telescópio Perkin-Elmer de 1,60 m de diâmetro no Observatório do Pico dos Dias (OPD) em Brazópolis - MG. Este é o maior telescópio em solo brasileiro. Créditos: Wandeclayt Melo. 68
Fig. 55 Lei de Dawes: Abertura x Resolução. Créditos: Wandeclayt Melo. 69
Fig. 56 Simulação do padrão de difração de Airy em um telescópio de 200 mm. A escala de intensidade é logarítmica, para realçar os anéis concêntricos. Créditos: Wandeclayt Melo. 70
Fig. 57 Simulação da imagem de uma estrela observada com o mesmo aumento em telescópios de diferentes aberturas. Créditos: Wandeclayt Melo. 71
Fig. 58 Simulação da resolução de telescópios com aberturas de 200 mm, 300 mm e 400 mm ao observar duas estrelas com separação de 0,5 segundos de arco. Créditos: Wandeclayt Melo. 72
Fig. 59 Aberração cromática em uma lente simples (singleto). Diagrama: Wandeclayt Melo. 75
Fig. 60 Dubleto Acromático 76
Fig. 61 Telescópio refrator acromático de 120 mm Sky-Watcher. Créditos: Sky-Watcher. 77
Fig. 62 Telescópio refrator apocromático de 122 mm SVBONY. Créditos: SVBONY. 77
Fig. 63 Esquema óptico simplificado de um telescópio refrator. Diagrama gerado com a biblioteca Python KrakenOS [3]. Créditos: Wandeclayt Melo. 78
Fig. 64 Telescópio refletor de 114 mm de abertura Cosmos Sky Friend. Créditos: Telescópios Cosmos. 79
Fig. 65 Esquema óptico simplificado de um telescópio refletor newtoniano. Diagrama gerado com a biblioteca Python KrakenOS [3]. Créditos: Wandeclayt Melo. 80
Fig. 66 Telescópio Celestron Schmidt-Cassegrain de 8"em montagem altazimutal computadorizada. Créditos: Celestron. 81

Fig. 67 Esquema óptico simplificado de um telescópio refletor Cassegrain. Diagrama gerado com a biblioteca Python KrakenOS [3]. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo 82
Fig. 68 Ocular Celestron Omni Plössl de 15 mm, com campo (FOV) aparente 50º. Créditos: Celestron. 84
Fig. 69 Ocular TeleVue Plössl de 20 mm de distância focal, campo (FOV) aparente de 50º. Créditos: Tele Vue. 84
Fig. 70 Ocular Celestron Plössl de 40 mm, série Omni, com campo (FOV) aparente 43º. Créditos: Celestron. 84
Fig. 71 Ocular TeleVue Nagler de 31 mm, com campo (FOV) aparente 82º. Créditos: Tele Vue Optics. 85
Fig. 72 Lente Barlow 2X Celestron, série Omni. Créditos: Celestron. 86
Fig. 73 Binóculos Celestron série Cometron 7x50mm. Créditos: Celestron. 87
Fig. 74 Binóculos Celestron série SkyMaster 20x80mm. Créditos: Celestron. 88
Fig. 75 Binóculos Celestron série SkyMaster 20x80 mm montado em tripé. Créditos: Celestron. 88
Fig. 76 Smart Telescope ZWO Seestar S50, em frente ao prédio do telescópio Perkin-Elmer de 1,60 m do Observatório do Pico dos Dias (OPD). Créditos: Wandeclayt M. 89
Fig. 77 Imagem da Nebulosa Trífida (M20), com tempo total de exposição de 42 mim, capturada com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M. 90
Fig. 78 Telescópio refletor de 10" em montagem altazimutal dobsoniana. Créditos: Sky-Watcher. 91
Fig. 79 Tripé com montagem altazimutal Explore Scientific, modelo Twilight Nano, para telescópios de até 6 kg. Créditos: Explore Scientific. 92
Fig. 80 Telescópio Celestron CPC Deluxe 1100 HD em montagem altazimutal computadorizada. Créditos: Celestron. 93
Fig. 81 A rotação da Terra fica evidenciada nesta imagem com 30 minutos de tempo de exposição, registrada na cidade de Itatim, na Bahia. Créditos: Wandeclayt Melo. 94
Fig. 82 Montagem equatorial Sky-Watcher EQ5 com tripé de aço. Créditos: Sky-Watcher. 95
Fig. 83 Cunha Equatorial. Créditos: Celestron. 96
Fig. 84 Tracker modelo Star Adventurer. Créditos: Sky-Watcher. 96
Fig. 85 Montagem equatorial robótica Paramount de alta precisão. Créditos: Software Bisque. 97
Fig. 86 Óculos para observação direta do Sol, em conformidade com a norma ISO 12312-2:2015. Créditos: Wandeclayt M. 99

Fig. 87 Interior solar. As reações termonucleares responsáveis pela geração de energia ocorrem no núcleo. A energia gerada no núcleo é transportada principalmente na forma de radiacão através da zona radiativa e em seguida, através de convecção, na camada convectiva. Créditos: Wandeclayt Melo/Projeto Céu Profundo. Código disponível na plataforma Google Colab. 100
Fig. 88 Ciclo próton-próton, o principal mecanismo de produção de energia no núcleo solar. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. Código disponível na plataforma Google Colab. 101
Fig. 89 Simulação da travessia de um fóton, de sua geração no nucleo solar até escapar pela fotosfera. O tempo decorrido na travessia é da ordem de 100 mil anos. Simulação: *Solar Photon Randon Walk*, código escrito por Drew Onken. 102
Fig. 90 Manchas solares visívei no pôr do Sol de 31 de agosto de 2025 em São José dos Campos (SP). Com o Sol baixo no horizonte, visto através de uma camada densa de fumaça produzida pelas queimadas (infelizmente) comuns na estação seca, as manchas podem ser fotografadas sem filtros e podem ser vistas a olho nu. Mesmo nessas condições, evite olhar direta e prolongadamente para o Sol. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 103
Fig. 91 A fotosfera solar, observada em 07 de maio de 2025 pelo telescópio espacial Solar Dynamics Observatory (SDO), com destaque para um grande grupo de manchas solares associado a uma região ativa (AR4079). Créditos: NASA/SDO/HMI. 104
Fig. 92 Grupo de manchas solares na Região Ativa 4079, imageada pelo satélite Solar Dynamics Observatory (SDO) em 2025-05-04. A Terra aparece em escala para comparação. Créditos: NASA/SDO/HMI/Helioviewer. 105
Fig. 93 Mosaico com imagens de 4 de novembro de 2025 do Solar Dynamics Observatory (SDO) 106
Fig. 94 Setor do Sol registrado pelo observatório SDO com indicação de regiões ativas em 4 de novembro de 2025. Créditos: NASA/SDO/HMI/Helioviewer. 107
Fig. 95 Regiões ativas observadas em 2025-11-07T14:05:42 com classificação de Mount Wilson. Dados: SDO/HMI/AIA. 108
Fig. 96 A rivalidade entre Christoph Scheiner e Galileu Galilei sobre o pioneirismo na observação de manchas solares, está registrada na publicação da correspondência de Scheiner ao nobre alemão Marcus Welser e nas respostas de Galileu a essas cartas, entre 1612 e 1613. Créditos: Library of Congress e Internet Archive. Composição: Wandeclayt Melo. 109
Fig. 97 Satélites de Júpiter. Registro de observações de Galileu em abril de 1613. Incluído no *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti comprese in tre lettere*. Créditos: Lybrary of Congress. 110

Fig. 98 O modelo heliocêntrico, conforme apresentado Por Nicolau Copérnico em *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. Edição de 1617. Créditos: Boston College/Internet Archive. Composição: Wandeclayt Melo. 111
Fig. 99 Capa da edição de 1664 do *INDEX LIBRORVM PROHIBITORVM*, o índice de livros proibidos pela Igreja Católica. Créditos: Internet Archive. 112
Fig. 100 Diálogo Sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo. Livro de Galileu, publicado em 1632, que embora sugerisse apresentar argumentos para os modelos ptolomaico e copernicano, era claramente uma defesa do modelo de Copérnico. Créditos: Internet Archive. 113
Fig. 101 Página título de ***Prodromus pro sole mobili et terra stabili contra Academicum Florentinum Galilaeum a Galilaeis***. Obra póstuma de Christoph Scheiner, em defesa do geocentrismo, publicada em 1651 pela Companhia de Jesus. Créditos: ETH-Bibliothek Zürich. 114
Fig. 102 Manchas solares observadas por Christoph Scheiner em 1611. Ilustração incluída em correspondência a Marcus Welser[4]. Créditos: Internet Archive. 115
Fig. 103 Manchas solares observadas por Galileu. Desenho publicado em *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti comprese in tre lettere*, em 1613. Créditos: Lybrary of Congress. 116
Fig. 104 Observatório de Redhill, conforme gravura na página de rosto do catálogo de estrelas circumpolares de Carrington. Créditos: The Internet Archive. Montagem: Wandeclayt M. 117
Fig. 105 Observations of the spots on the sun, de Richard C. Carrington, publicado em 1863. Créditos: The Internet Archive. 118
Fig. 106 Carrington usou o sistema de projeção ilustrado acima para a observação das manchas solares em seu observatório em Redhill. O método é similar ao descrito por Christoph Scheiner em *Rosa Vrsina*[5]. 119
Fig. 107 Tabela de rotações do Sol, a partir de 1853, computadas por R. C. Carrington. 120
Fig. 108 Ilustração da rotação diferencial do Sol, seguindo a Lei de Snodgrass. Créditos: Wandeclayt M. 121
Fig. 109 Rotação solar evidenciada numa sequência de imagens diárias capturadas pelo telescópio espacial Solar Dynamics Observatory (SDO) entre 17 e 26 de abril de 2024. Imagens: NASA/SDO/HMI. Montagem: Wandeclayt Melo. 122
Fig. 110 Aspecto da fotosfera durante um período de mínimo do ciclo de atividade solar em outubro de 2020 (imagem da esquerda) e durante o período de máximo em agosto de 2024. Imagens: Solar Dynamics Observatory (SDO). Montagem: Wandeclayt Melo. 123
Fig. 111 Progressão da média de manchas solares de 1749 a 2025. Dados: WDC-SILSO, Observatório Real da Bélgica, Bruxelas, DOI: 10.24414/qnza-ac80. 124

Fig. 112 Cobertura média da superfície solar por manchas. Dados: Royal Greenwich Observatory – USAF/NOAA Sunspot Data, compilado por NASA/Marshall Solar Physics (David H. Hathaway). Gráfico: Wandeclayt M. 125
Fig. 113 Diagrama de Borboleta, exibindo a evolução na latitude de surgimento das regiões em cada hemisfério em função do tempo. Dados: Royal Greenwich Observatory – USAF/NOAA Sunspot Data, compilado por NASA/Marshall Solar Physics (David H. Hathaway). Gráfico: Wandeclayt M. 126
Fig. 114 Magnetograma composto com dados do observatório espacial SDO. A análise do magnetograma revela uma inversão na polaridade no campo magnético das regiões ativas a cada ciclo de 11 anos. A imagem da esquerda, capturada em 2013 durante o máximo do ciclo 24, 127
Fig. 115 Evento de Carrington. Primeiro flare solar registrado. Ilustração de Richard Carrington de evento observado em 1 de setembro de 1859, publicada na Monthly Notices of the Royal Astronomical Society e novembro do mesmo ano. 128
Fig. 116 Flare categoria X9.0 observado em 3 de outubro de 2024 pelo satélite SDO. Imagem capturada em ultravioleta (131 Å) pelo imageador AIA. Créditos: NASA/SDO/AIA. 129
Fig. 117 Nota à imprensa da Airbus [6], fabricante da família de aeronaves A320, sobre a provável contribuição de um *flare* solar num incidente que afetou um computador de comandos de voo de uma aeronave. 130
Fig. 118 Proeminências na cromosfera solar durante o eclipse total de 2 de julho de 2019. Imagem capturada em Vicuña, Chile. Imagem: Wandeclayt M. 131
Fig. 119 O Sol observado em hidrogênio alfa, em 15 de fevereiro de 2025, com telescópio Coronado SolarMax II de 60mm e câmera DSLR. Créditos: Wandeclayt M. 132
Fig. 120 Telescópio Coronado SolarMax II 60 mm. Um telescópio de 60 mm de abertura, com filtro integrado para observação solar em hidorgênio alfa. Créditos: Wandeclayt M. 133
Fig. 121 Coroa solar, observada durante a totalidade do eclipse solar de 2 de julho de 2019., em Vicuña (Chile). Imagem: Wandeclayt M. 134
Fig. 122 Plataforma Helioviewer. 135
Fig. 123 O Sol observado em 5 bandas do observatório SDO: 6173 Å, 4500 Å, 1700 Å, 304 Å e 1600 Å. Imagens acessadas através da plataforma Helioviewer. 136
Fig. 124 O Sol observado em 6 bandas do observatório SDO: 171 Å, 193 Å, 211 Å, 335 Å, 94 Å e 131 Å. Imagens acessadas através da plataforma Helioviewer. 137
Fig. 125 Face visível da Lua. Mosaico de imagens do satelite Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO). Créditos: NASA/Arizona State University (ASU). 140
Fig. 126 Cratera Tycho. Créditos: LROC/NASA/Arizona State University (ASU) 141
Fig. 127 Perfil de altitude da cratera Tycho. dados: LRO/LOLA/NASA. 141

Fig. 128 Cratera da Serra da Cangalha, no estado de Tocantins. Dados: USGS/NASA/LANDSAT 8. Processamento: Wandeclayt M./Projeto Ceu Profundo 142
Fig. 129 Mapa da Lua na obra *Almagestum Novum* de Riccioli (1651). Crédito: ETH-Bibliothek Zürich. 143
Fig. 130 Página de acesso à plataforma Quickmap. 146
Fig. 131 Scientific Visualization Studio - Fase da Lua e Libração 2025. 147
Fig. 132 *Montes Apenninus*, uma cadeia de montanhas na margem sudeste do *Mare Imbrium*. Créditos: NASA/Arizona State University (ASU). 148
Fig. 133 Fases da lua. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 149
Fig. 134 Conjunção entre a Lua, Mercúrio e o Aglomerado do Presépio (M44) na constelação de Câncer (2024-07-07). Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 150
Fig. 135 Órbita da Lua cortando o plano da Eclíptica (em amarelo). Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 151
Fig. 136 Posição dos planetas e da Lua durante o mês de setembro de 2024. Gráfico gerado a partir de código em linguagem Python usando o pacote astroquery para consultar as coordenadas de objetos do Sistema Solar na base de dados JPL/Horizons. [código: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo] 151
Fig. 137 Eclipse solar total de 2 de julho de 2019, em Vicuña, no Chile. [crédito: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo] 152
Fig. 138 Eclipse lunar total de 15 de maio de 2022. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo 153
Fig. 139 Ocultação de Marte pela Lua em 2020-09-05. Observado de São José dos Campos (SP).Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo 153
Fig. 140 Comparação de distâncias entre a Lua e a Terra no apogeu e no perigeu. As distâncias e diâmetros estão em escala. [dados: SVS/NASA. diagrama: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo] 154
Fig. 141 Variação da distância Terra-Lua durante o ano de 2025. [dados: JPL/Horizons, gráfico: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo] 154
Fig. 142 Lua e planetas no amanhecer de São José dos Campos (SP), em 25 de junho de 2022. É claro o alinhamento dos planetas ao longo da eclíptica. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 158
Fig. 143 Configurações orbitais. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 159
Fig. 144 Órbita de Mercúrio, conforme a primeira Lei de Kepler. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo 161
Fig. 145 Segunda lei de Kepler. Diagrama: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo 162
Fig. 146 Visualização da terceira lei de Kepler - Períodos orbitais e distâncias médias ao Sol dos oito planetas e de dois planetas anões. A linearidade mostra a constância da razão $A^3 : T^2$. Diagrama: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 164
Fig. 147 Posição heliocêntrica dos planetas no mês de setembro/2024. Dados: JPL / Horizons. Diagrama: Wandeclayt Melo/Projeto Céu Profundo. 165

Fig. 148 Elongação do planeta Mercúrio ao longo do ano de 2026. Os pontos azuis representam o planeta a oeste do Sol, visível no céu matutino. Os pontos laranja represenatam o planeta a leste do Sol, visível no céu vespertino. 167
Fig. 149 Elongação do planeta Vênus ao longo do ano de 2026. Os pontos azuis representam o planeta a oeste do Sol, visível no céu matutino. Os pontos laranja represenatam o planeta a leste do Sol, visível no céu vespertino. 168
Fig. 150 Oposições de Marte no intervalo 2016-2046. 170
Fig. 151 Mapa da atmosfera de Júpiter construído com um mosaico de imagens obtidas com o Hubble Space Telescope (HST) em 12 de dezembro de 2025, como parte do programa Outer Planets Atmosphere Legacy (OPAL). Créditos: NASA/ESA/HST/STScI. Programa OPAL (PI: Amy Simon). 172
Fig. 152 Evolução mensal dos satélites de Júpiter. Créditos: PDS Rings. 173
Fig. 153 As naves gêmeas Voyager 1 e 2, lançadas em 1977, exploraram os gigantes gasosos a partir de 1979. 174
Fig. 154 Cometa C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) em 2 de outubro de 2024. Empilhamento de 16 quadros com 3 segundos de exposição cada, capturados com Câmera DSLR Nikon D750, objetiva Rokinon 85 mm f/1.5, ISO 1600. Imagem: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 176
Fig. 155 Cometa C/2024 G3 (ATLAS) fotografado através de telescópio Schmidt-Cassegrain Celestron Nexstar 8 SE de 203 mm de abertura. Frame único, com 3 s de tempo de exposição em câmera DSLR. Imagem: Wandeclayt M. 177
Fig. 156 Sublimação no núcleo do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, registrado pela câmera OSIRIS NAC da missão Rosetta. No instante da imagem, o cometa se encontrava a 1,25 UA do Sol. Créditos: Sierks, H. e equipe OSIRIS Team, ROSETTA-ORBITER 67P OSINAC 4 ESC3-MTP019 RDR-INF-REFL V1.0, RO-C-OSINAC-4-ESC3-67P-M19-INF-REFL-V1.0, ESA Planetary Science Archive e NASA Planetary Data System, 2020. Processamento: Wandeclayt M. 179
Fig. 157 Curva de magnitude aparente plotada usando os dados de distância do cometa C/2026 A1 (MAPS) e o modelo fotométrico padrão ($m_{10} = H_{10} + 5\log_{10}(\Delta) + 10\log_{10}(r)$). Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo com dados do serviço Horizons. 180
Fig. 158 Curva de luz do cometa C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) entre agosto e dezembro de 2024. A curva é um ajuste para os dados fornecidos pelos contribuintes da rede COBS. 181
Fig. 159 Cometa C/2025 R2 (SWAN) 182
Fig. 160 Descobertas anuais de cometas, entre 1960 e 2010, registradas no catálogo do Minor Planet Center (MPC). 183
Fig. 161 Cometa C/2024 G3 (ATLAS) no campo do coronógrafo LASCO C2, a bordo da missão SOHO, nos dias 13 e 14 de janeiro de 2025. Dados: ESA/NASA/SOHO/LASCO C2. Processamento: Wandeclayt M. 184

Fig. 162 Deslocamento do Sol, planetas e dos Cometas C/2026 A1 (MAPS) e C/2025 R3 (PANSTARRS) na esfera celeste durante o mês de maio de 2026. Carta celeste plotada por Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 185
Fig. 163 Deslocamento diário do cometa C/2025 R3 (PANSTARRS) entre os dias 1º e 11 de maio de 2026, simulado para a latitude de São José dos Campos (SP) no aplicativo Stellarium (v 0.22.2). 186
Fig. 164 Cometa 3I/ATLAS em sua máxima aproximação com a Terra, em 19 de dezembro de 2025. Empilhamento de 10 imagens de 120 s totalizando 1200 segundos de exposição, com telescópio robótico de 61 cm de abertura. Durante as exposições, o telescópio seguiu o deslocamento do cometa, que permanece centralizado na imagem enquanto cada estrela aparece como uma sequência de pontos. Imagem/Processamento: Wandeclayt M. 187
Fig. 165 Interface web interativa do sistema Horizons. 188
Fig. 166 Visualização das órbitas dos cometas C/2025 A6 (Lemmon) e 1P/Halley gerada no aplicativo *Orbit Viewer* do portal Solar System Dynamics (SSD) do Jet Propulsion Laboratory (JPL). Todos os planetas, e muitos cometas, orbitam o Sol aproximadamente no plano da eclíptica, mas há cometas como o C/2025 A6 e o 1P/Halley que seguem órbitas com grandes inclinações. 190
Fig. 167 Inclinação da órbita dos cometas em função do semieixo maior (a distância média ao Sol). Há uma distribuição isotrópica na inclinação da órbita dos cometas de longo período, sugerindo a existência de um repositório de núcleos de cometas na forma de uma casca esférica envolvendo o Sistema Solar. **Gráfico**: Wandeclayt M. com dados do SBDB. 191
Fig. 168 Enter Caption 193
Fig. 169 Possível representação de um céu estrelado em pintura rupestre no sítio arqueológico do Lajedo de Soledade, em Apodi, no Rio Grande do Norte. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo 198
Fig. 170 Região em torno da constelação do Cruzeiro do Sul, com suas estrelas mais brilhantes identificadas. Créditos: Wandeclayt Melo/Projeto Céu Profundo. 200
Fig. 171 Efeito de paralaxe estelar. 201
Fig. 172 HIPPARCOS foi o primeiro satélite dedicado a astrometria. Lançado pela ESA em 1989, inaugurou uma era de alta precisão nos catálogos estelares. Créditos: Agência Espacial Europeia (ESA). 204
Fig. 173 Tela de pesquisa básica do SIMBAD: http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-fbasic. 205
Fig. 174 Tela de resultados da busca básica do SIMBAD. Use o valor da paralaxe no campo indicado pela seta para computar a distância até a estrela consultada. 206
Fig. 175 Visão 3D das estrelas mais brilhantes da constelação do Cruzeiro do Sul. 207
Fig. 176 Diagrama HR construído com dados de 1 milhão de estrelas localizadas a até 200 parsecs, com dados do satélite Gaia. Créditos: Gaia/ESA/DPAC, Wandeclayt M./Céu Profundo. 208

Fig. 177 Imagem reconstruída a partir de dados de interferometria da estrela Betelgeuse (α Ori) utilizando o algoritmo MIRA (Multi-aperture Image Reconstruction Algorithm). Créditos: Haubois et al. [7]. 209
Fig. 178 A Via Láctea ergue-se sobre o Mirante da Pedra de São Francisco, entre Monteiro Lobato e São Francisco Xavier, no interior de São Paulo. Imagem capturada em 15 de julho de 2023, com câmera DSLR e objetiva de 14 mm (20 s, f/2.8, ISO 3200). Créditos: Wandeclayt M. 211
Fig. 179 O plano da Via Láctea na direção da região central registrada com câmera DSLR e objetiva grande angular de 14 mm. Créditos: Wandeclayt M. 212
Fig. 180 Objetos de céu profundo na direção da região central da Via Láctea. Imagem capturada com câmera DSLR equipada com objetiva 85 mm f/1.5. Créditos: Wandeclayt M. 213
Fig. 181 Galileu conseguiu resolver as estrelas indivíduais do Aglomerado do Presépio (M44), uma região que a olho nu é percebida como uma nebulosidade na costelação de Câncer. Todas as estrelas visíveis no campo da imagem fazem parte da nebulosidade vista a olho nu. Imagem capturada com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M. 215
Fig. 182 *Omega Centauri* (NGC 5139), o mais brilhante dos aglomerados globulares, é facilmente percebido a olho nu a nordeste da constelação do Cruzeiro do Sul. Empilhamento de 61 imagens de 10s cada, com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M. 216
Fig. 183 Aglomerados globulares conforme classificação de Shapley-Sawyer. À esquerda NGC 6093/M 80 (Classe II), no centro NGC 104 (Classe III) e à direita NGC 6218/M 12 (Classe IX). Todos imageados com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M. 217
Fig. 184 O aglomerado aberto M 6 (Aglomerado da Borboleta) na constelação de Escorpião é visível a olho nu em céus suburbanos ou rurais. Tempo de exposição total de 60 s, com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M. 218
Fig. 185 Mapa de distribuição de aglomerados estelares em coordenadas galácticas. Os aglomerados abertos concentram-se no equador da projeção que coincide com o equador da Galáxia. Os aglomerados globulares distribuem-se nas regiões do bojo e do halo galáctico. Dados:MWSC/VizieR Gráfico: Wandeclayt M. 219
Fig. 186 Mapa de distribuição de aglomerados estelares em coordenadas equatoriais (J2000). Dados:MWSC/VizieR. Gráfico: Wandeclayt M. 220
Fig. 187 Um par de aglomerados abertos no mesmo campo, na constelação de Gêmeos. Na metade inferior da imagem, o aglomerado aberto M35, a uma distância estimada de 900 parsecs. Na metade superior, NGC 2158, com uma concentração maior de estrelas, mas significativamente mais distante, a 4300 parsecs. Créditos: Wandeclayt M. 221

Fig. 188 A Nebulosa da Águia (M 16), na direção da constelação de Sagitário, é uma região HII observável através de binóculos e pequenos telescópios. Sua cor avermelhada é produzida pela flourescência de átomos de hidrogênio. Imagem capturada com telescópio Seestar S50. 223
Fig. 189 A Grande Nebulosa de Órion (M42). Tempo total de Exposição 20 min, com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M. 224
Fig. 190 Imagens da Nebulosa Trífida (M20), revelam claramente regiões de emissão, reflexão e absorção. Tempo total de exposição 42 min, com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 225
Fig. 191 A Nebulosa do Anel (M 57/NGC 6720) é uma nebulosa planetária com magnitude visual 8.8 na constelação de Lira. Imagem capturada com telescópio Seestar S50, com 31,5 minutos de tempo de exposição. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 226
Fig. 192 Localização da Nebulosa do Anel (M 57), na constelação de Lira. A nebulosa pode ser encontrada com facilidade por observadores iniciantes, mesmo com instrumentos de pequena abertura, ao longo da linha que une as estrelas β e γ Lyrae. A estrela mais brilhante na carta é Vega, a alfa da constelação de Lira, com magnitude 0. Lira também abriga notáveis estrelas duplas: δLyr, ζLyr e εLyr. Carta gerada no aplicativo SkyCharts/Cartes du Ciel. 227
Fig. 193 Nebulosa planetária NGC 1514, descoberta por William Herschel em 1790. Imagem gerada no aplicativo Aladin, com dados do levantamento DSS2. O campo da imagem tem dimensões similares às da imagem anterior, da nebulosa M 57. 228
Fig. 194 Nebulosa da Hélice(NGC 7293), na direção da constelação de Aquário, com tamanho angular aproximado de 15' (aproximadamente metade do diâmetro aparente da Lua cheia). Imageada com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 229
Fig. 195 Nebulosa planetária NGC 6302, imageada com telescópio Seestar S50, com 920 s de tempo total de exposição, e pelo Telescópio Espacial Hubble (no detalhe). Imageamento com Seestar e processamento dos dados do Hubble: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 229
Fig. 196 M46 NGC 2438 230
Fig. 197 Nebulosa escura da Cabeça de Cavalo (Barnard 33), na constelação de Órion. A Cabeça de Cavalo é uma pequena região de um vasto complexo de nebulosas na direção de Órion. Imagem capturada com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 231

Fig. 198 Detalhe da Nebulosa da Cabeça de Cavalo (Barnard 33) observada em infravermelho pelo Telescópio Espacial Hubble. A imagem é um mosaico, composto por observações com filtros infravermelhos F110W e F160W. Créditos: Hubble Heritage Team (PI: Z. Levay, J. Mack, J. Sokol, T. Borders, M. Mutchler, W. Januszewski, M. Livio, C. Christian, L. Frattare (STScI); K. Noll (NASA/GSFC)). Processamento: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 232
Fig. 199 A Nebulosa da Lagoa (M8) é uma região HII localizada a aproximadamente 1300 parsecs, visível a olho nu na direção da constelação de Sagitário. No interior da nebulosa, vemos o aglomerado aberto NGC 6530. Os pontos escuros com o aspecto de "buracos" na nebulosa são gl´bulos de Bok. Há mais de uma dezena de glóbulos visíveis nesta imagem. Tempo total de exposição: 80 min, com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 233
Fig. 200 A região no cento da imagem, com o aspecto de um "buraco" no fundo de estrelas, é a nebulosa escura Barnard 68, uma nuvem molecular relativamente próxima (125 parsecs) evidenciada pelo contraste com o fundo estrelado na direção da região mais central da Galáxia. Imagem capturada com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 234
Fig. 201 Nebulosa escura do Saco de Carvão, e outros objetos de céu profundo nas vizinhanças da constelação do Cruzeiro do Sul. Imagem capturada com câmera DSLR e objetiva de 85 mm, f/1.5. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 234
Fig. 202 Galáxia espiral M33, na constelação do Triângulo, imageada com telescópio Seestar S50. Até o início do século XX, esses objetos eram chamados de Nebulosas Espirais, antes que se pudesse determinar que cada um deles era uma galáxia inteira, similar à Via Láctea. Créditos: Wandeclayt M. 237
Fig. 203 A descoberta da relação período-luminosidade das cefeidas, por Henrietta Leavitt, foi apresentada em um comunicado de apenas 3 páginas, na circular do Observatório de Harvard. 239
Fig. 204 Campo do aglomerado de galáxias da constelação de virgem, registrado pelo observatório Vera C. Rubin. Praticamente todos os objetos na imagem são galáxias. Créditos: NSF-DOE Vera C. Rubin Observatory 241
Fig. 205 Classificação de Hubble [8]. 243
Fig. 206 Carta de localização da Galáxia do Sombrero (M 104). Gerada com o aplicativo *Star Charts/Cartes du Ciel*. 244
Fig. 207 Galáxia do Sombrero (M 104), com magnitude visual 8 e localizada a aprroximadamente 10 Mpc (32,6 milhões de anos luz), é um dos objetos mais distantes observáveis visualmente através de pequenos telescópios. Tempo total de exposição: 30 min, com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. 245

Fig. 208 Tela do planetário virtual Stellarium, exibindo a constelação do Escorpião e informações sobre a estrela Antares 262
Fig. 209 Console de scripts do Stellarium. 263
Fig. 210 Hello World 265
Fig. 211 Analema, exibido no céu do Observatório do Pico dos Dias (OPD). Créditos: Wandeclayt M. 269

Lista de Tabelas

Tab. 1 Magnitudes visuais aparentes de alguns objetos astronômicos 26
Tab. 2 Origem das constelações tornadas oficiais pela Assembleia Geral da IAU de 1922 28
Tab. 3 Coordenadas equatoriais J2000.0 do aglomerado globular NGC 5139, ω Centauri 45
Tab. 4 Altura e distância zenital do Sol nos crepúsculos civil, náutico e astronômico 48
Tab. 5 Resolução angular de acordo com a Lei de Dawes 73
Tab. 6 Vantagens e desvantagens dos principais tipos de telescópios 98
Tab. 7 Classificação magnética de Mount Wilson para grupos de manchas solares 107
Tab. 8 Classes de *flares* solares em raios-X. 129
Tab. 9 Canais dos instrumentos HMI e AIA do Solar Dynamics Observatory 138
Tab. 10 Tipos de formações nomeadas na superfície da Lua segundo a nomenclatura da IAU/USGS 144
Tab. 11 Convenções de nomenclatura para formações lunares segundo a IAU/USGS 145
Tab. 12 Planetas interiores - Configurações orbitais. 160
Tab. 13 Planetas exteriores - Configurações orbitais. 160
Tab. 14 Semieixo maior e período orbital dos planetas, de Ceres e de Plutão 163
Tab. 15 Propriedades dos planetas rochosos 166
Tab. 16 Oposições de Marte entre 2016 e 2046 169
Tab. 17 Propriedades dos planetas gigantes 171
Tab. 18 Semieixo maior e período orbital dos satélites galileanos de Júpiter 172
Tab. 19 Semieixo maior e período orbital dos planetas anões 175
Tab. 20 Missões espaciais para estudo de cometas. 178
Tab. 21 Classes de órbitas de cometas (PDS-SBN) 192
Tab. 22 Elementos orbitais (Small-Body DataBase (SBDB)) 192
Tab. 23 Grupos de cometas rasantes e *near-Sun* observados pelo SOHO: parâmetros típicos ou médios 193
Tab. 24 Designação de Cometas 194
Tab. 25 Chuvas anuais de meteoros e corpos associados 196
Tab. 26 Classes de órbitas de asteroides (PDS-SBN) 197
Tab. 27 Paralaxes e distâncias das estrelas mais brilhantes do Cruzeiro do Sul 206
Tab. 28 Objetos de céu profundo indicados na figura 180. 214
Tab. 29 Comparação entre aglomerados estelares abertos e globulares 222
Tab. 30 Principais classes de objetos de céu profundo designados como nebulosas 236
Tab. 31 Alfabeto grego 258
Tab. 32 Códigos, nomes latinos, genitivos e traduções em português das constelações 259

Siglas e Acrônimos

2MASS Two Micron All-Sky Survey. 218

AIA Atmospheric Imaging Assembly. 105

ATLAS Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System. 195

CNEN Comissão Nacional de Energia Nuclear. 130

COBS Comet Observation Database. 181

DSO Deep Sky Objects. 212

ESA European Space Agency. 178

GNSS Global Navigation Satellite System. 36

GOES Geostationary Operational Environmental Satellites. 129

HMI Helioseismic and Magnetic Imager. 104, 105

HST Hubble Space Telescope. xvi, 172

IAU União Astronômica Internacional. 1, 28, 143, 194

IC Index Catalogues. 216

IERS International Earth Rotation Service. 36

IOE Indivíduo Ocupacionalmente Exposto. 130

ITRF International Terrestrial Reference Frame. 36

JPL Jet Propulsion Laboratory. xvii, 190

LASCO Large Angle and Spectrometric Coronagraph. 134

LRO Lunar Reconnaissance Orbiter. 140

MIC Museu Interativo de Ciências. 1

MPC Minor Planet Center. xvi, 183, 187, 194

MSFC Marshall Space Flight Center. 126

MWSC Milky Way Star Clusters. 218

NGC New General Catalogue. 216

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration. 106

OPAL Outer Planets Atmosphere Legacy. xvi, 172

OSINAC OSIRIS NARROW ANGLE CAMERA. 178

OTA Optical Tube Assembly. 91

PNC Polo Norte Celeste. 53

PSC Polo Sul Celeste. 53

RGO Royal Greewnwich Observatory. 126

SBDB Small-Body DataBase. xxii, 192

SDO Solar Dynamics Observatory. xiii, 104, 122, 123

SI Sistema Internacional de Unidades. 129, 130

SILSO Sunspot Index and Long-term Solar Observations. 124

SIMBAD **S**et of **I**dentifications, **M**easurement and **B**ibliography for **A**stronomical **D**ata. 205

SOHO Solar and Heliospheric Observatory. 134, 183

SSD Solar System Dynamics. xvii, 187, 190

SUVI Solar Ultraviolet Imager. 129

SWPC Space Weather Prediction Center. 106

TNO Objeto Transnetuniano. 157

TOPCAT **T**ool for **OP**erations on **C**atalogues and **T**ables. 205

UHV Vácuo Ultra Alto. 223

USAF U. S. Air Force. 126

Introdução

"Uma experiência de aprendizado é algo que te diz:
- Sabe isso que você acabou de fazer? Não faça de novo!

Douglas Adams

"***Primeira Luz***" é a expressão que usamos para nos referir à primeira observação feita com um telescópio ou outro instrumento astronômico. É a primeira exposição desse instrumento ao céu. Um batismo de luz.

"***Primeira Luz***" é também o nome deste livro e do curso de introdução à observação do céu e à Astronomia Cidadã ministrado pelo **Projeto Céu Profundo** com apoio do **Museu Interativo de Ciências (MIC)** em São José dos Campos - SP e do **Observatório de Astronomia e Física Espacial da UNIVAP**.

O curso e o livro pretendem apresentar os fundamentos da observação do céu em um programa acessível, mas abrangente, englobando desde o reconhecimento do céu até o uso de ferramentas avançadas de planejamento, análise e visualização de dados astronômicos.

A proposta deste texto é servir como um primeiro passo em direção ao conhecimento do céu e como uma porta de entrada à observação, entrelaçando visões históricas e culturais a uma introdução técnica indispensável ao manuseio de instrumentos astronômicos.

Em muitos tópicos, preocupamo-nos em buscar fontes primárias e escavar os aspectos históricos por trás da Astronomia como a conhecemos e praticamos hoje. Apresentamos a origem de nomenclaturas, designações, padrões e convenções, mostrando como o reluzente tecido da astronomia contemporânea foi fiado através dos séculos.

Praticamente todos os gráficos e diagramas são inéditos, gerados para ilustrar com rigor os conceitos apresentados no texto, utilizando principalmente scripts desenvolvidos em linguagem Python. O ineditismo também se aplica às imagens astronômicas incluídas, geradas a partir de dados públicos de grandes telescópios e missões espaciais ou capturadas diretamente pelo autor. Em qualquer um desses casos, esforços não foram medidos para que os recursos de imagem se adequassem tão perfeitamente quanto possível ao desenvolvimento textual.

O texto se alicerça em referências bibliográficas que vão desde resoluções da União Astronômica Internacional (IAU) e recentes manuais de softwares até o longínquo Alma-

gesto, de Cláudio Ptolomeu, no Séc. II, passando pelas publicações de Tycho e Kepler, pelos primeiros atlas celestes, pelos catálogos de William, Caroline e John Herschel e pelas bases de dados abertas e observatórios virtuais que formam o sólido alicerce da pesquisa contemporânea em Astronomia. Mas ainda que repousemos sobre os ombros de gigantes, temos certeza de que falhas e inconsistências podem eventualmente ser encontradas no texto e ficaremos felizes em receber e incorporar correções que nos ajudem a aprimorar este trabalho.

Descortinando esse universo vasto, mas acessível aos olhos que sabem reconhecê-lo, esperamos despertar em você não apenas a curiosidade e o interesse pela observação, mas um verdadeiro amor pelo céu e suas maravilhas, pois como escreveu Olavo Bilac:

> *"Amai para entendê-las, pois só quem ama pode ter ouvido, capaz de ouvir e entender estrelas"*.

1. O Céu

1.1 O Que Há no Céu?

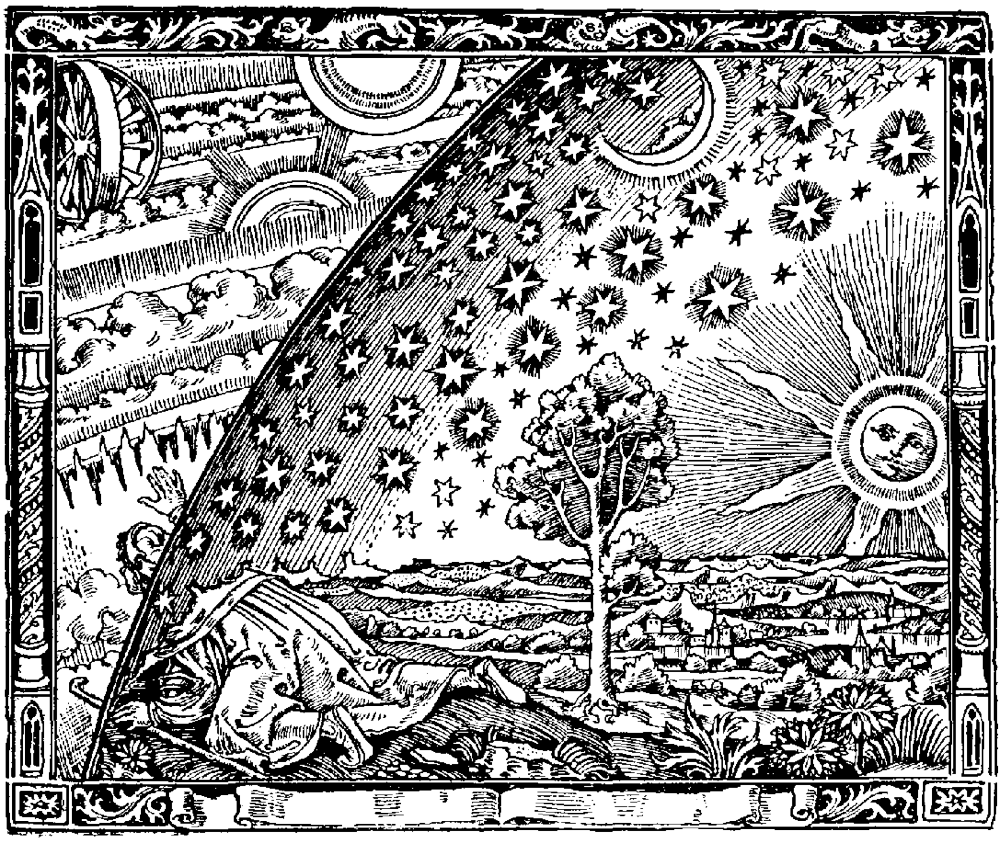


Fig. 1. Gravura do livro L'Atmosphère: Météorologie Populaire, de Camille Flammarion (1888) retratando um missionário medieval encontrando o ponto onde o céu e a Terra se tocam.

Ao observar o céu noturno, o ser humano, inevitavelmente, independente de suas raízes culturais e de suas crenças, encontrou padrões e regularidades no movimento diurno dos astros, na disposição das estrelas e no movimento de certos objetos especiais. Ao perceber que as estrelas formavam agrupamentos fixos, foi possível mapear e nomear esses grupos. Ao perceber as regularidades e padrões que se repetem ciclicamente, foi possível marcar a passagem do tempo e estabelecer calendários baseados em fenômenos celestes.

Mas o céu é muito mais do que um relógio e um calendário. É também um livro de histórias. A diversidade cultural da humanidade está representada nos desenhos que cada povo enxergou nos agrupamentos de estrelas ou em como nomeou os corpos celestes.

Quando nos familiarizamos com o céu e começamos a identificar as constelações, somos apresentados às lendas, mitos e histórias representados na esfera celeste. Aprendemos uma nova forma de leitura.

Embora cada povo tenha associado suas próprias tradições e mitos aos grupos de estrelas, as constelações ocidentais modernas são essencialmente uma herança do catálogo elaborado pelo astrônomo e matemático grego Hiparcos no séc. II a.C. e por seus antecessores Eudoxus (Séc. IV a.C.) e Eratóstenes (Séc. III a.C.).

No séc. II, Claudio Ptolomeu elabora o Almagesto, um compêndio da Astronomia grega que inclui, e atualiza, o catálogo de Hiparcos. Ptolomeu lista 48 constelações.

O Almagesto foi traduzido, preservado e transmitido através da Idade Média principalmente por astrônomos do mundo islâmico, como o persa Abd al-Rahman al-Sufi, autor do *Livro das Estrelas Fixas*[1], no séc. X (Fig. 2).



Fig. 2. A constelação do Escorpião, no Livro das Estrelas Fixas, de Al-Sufi (Séc. X). Créditos: Library of Congress.

Al-Sufi descreveu cada uma das 48 constelações definidas por Ptolomeu, incorporando suas próprias correções. Para cada constelação estão incluídas listas de estrelas, com posição, brilho (magnitude) e seus nomes árabes e traduções dos nomes próprios greco-romanos, além de ilustrações das constelações.

[1]Do árabe "*Kitāb ṣuwar al-kawākib*".

No séc. XVI, os avanços da Astrometria, a parte da Astronomia que se ocupa de medidas de posição, permitiram que posições de objetos celestes fossem determinadas com crescente precisão, levando à necessidade de revisão e atualização dos antigos catálogos.

O Almagesto tinha então 1400 anos e, mesmo aplicando correções decorrentes da já bem conhecida precessão do eixo da Terra, era necessário eliminar tanto erros originais quanto os erros de transcrição e tradução ao longo dos séculos.

Essa revisão era uma necessidade urgente para o astrônomo dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601), um minucioso observador cujos refinados dados de posição do planeta Marte permitiram a Johannes Kepler (1571-1630), seu discípulo, estabelecer as leis do movimento planetário.

John Dreyer[9] aponta que a obra completa de Tycho inclui observações de planetas, de uma estrela *nova*[2] na constelação de Cassiopeia (Fig. 3) no ano de 1572 e de 9 cometas, além de um novo catálogo estelar.



Fig. 3. Diagrama da constelação de Cassiopeia do catálogo de Tycho, exibindo a posição da supernova observada em 1572 (SN1572; B Cassiopeiae). Créditos: Library of Congress.

[2]A estrela também conhecida como a Supernova de Tycho era na verdade uma supernova do tipo Ia, hoje catalogada como SN1572 ou B Cassiopeiae.

Apesar de suas observações antecederem o uso de telescópios na Astronomia, Tycho era capaz de medir posições com grande precisão usando instrumentos como quadrantes, sextantes e esferas armilares. A fabricação e o uso desses instrumentos estão descritos em seu livro *Astronomiæ instauratæ mechanica*[10]. A Fig. 4 mostra o Grande Quadrante, um dos muitos instrumentos usados por Tycho em suas observações.

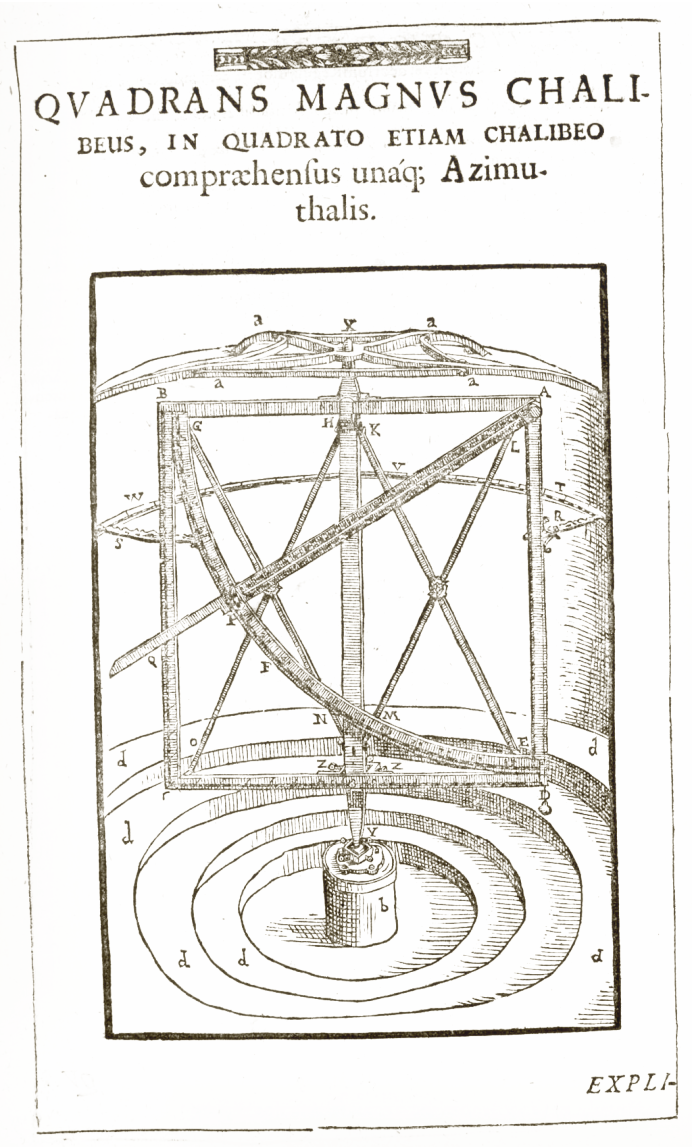
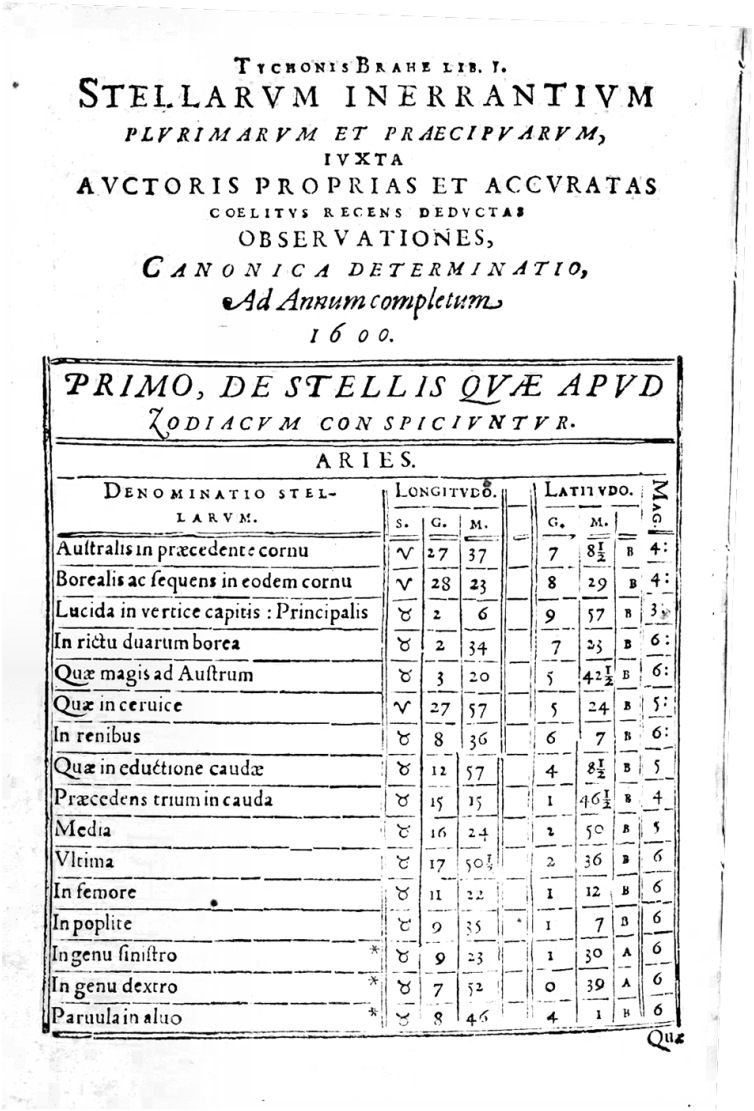


Fig. 4. Grande Quadrante de Tycho Brahe. Um de seus muitos instrumentos para medidas de posição descritos no livro *Astronomiæ instauratæ mechanica*. Créditos: Library of Congress.

As observações de Tycho desferiram fortes golpes na filosofia aristotélica que tomava o céu supralunar como perfeito e imutável. Primeiro pelo registro do surgimento de uma estrela (a supernova em Cassiopeia, em 1572) e depois, determinando de maneira decisiva

que os cometas eram objetos celestes e não fenômenos atmosféricos.

O catálogo estelar elaborado por Tycho foi publicado postumamente em 1602, em uma edição preparada por Johannes Kepler. Uma página deste trabalho pode ser vista na Fig. 5, iniciando por Áries, a primeira constelação do zodíaco. O título da página pode ser traduzido como: *"Determinação canônica das Estrelas Fixas, das mais numerosas e das mais importantes, segundo as próprias e precisas observações do céu recentemente deduzidas pelo autor, para o ano completo de 1600"*. O catálogo lista coordenadas e magnitudes e identifica as estrelas por seus nomes próprios ou descrevendo suas posições na figura representada pela constelação, ainda sem uma forma sistemática de designação.



TYCHONIS BRAHE LIB. I.

STELLARVM INERRANTIVM
PLVRIMARVM ET PRAECIPVARVM,
IVXTA
AVCTORIS PROPRIAS ET ACCVRATAS
COELITVS RECENS DEDVCTAS
OBSERVATIONES,
CANONICA DETERMINATIO,
Ad Annum completum
1600.

PRIMO, DE STELLIS QVÆ APVD ZODIACVM CONSPICIVNTVR.

ARIES.

Denominatio stellarvm.	Longitvdo. S.	G.	M.	Latitvdo. G.	M.		Mag.
Avstralis in præcedente cornu	♈	27	37	7	8½	B	4:
Borealis ac sequens in eodem cornu	♈	28	23	8	29	B	4:
Lucida in vertice capitis : Principalis	♉	2	6	9	57	B	3.
In rictu duarum borea	♉	2	34	7	23	B	6:
Quæ magis ad Avstrum	♉	3	20	5	42½	B	6:
Quæ in ceruice	♈	27	57	5	24	B	5:
In renibus	♉	8	36	6	7	B	6:
Quæ in eductione caudæ	♉	12	57	4	8½	B	5
Præcedens trium in cauda	♉	15	15	1	46½	B	4
Media	♉	16	24	2	50	B	5
Vltima	♉	17	50½	2	36	B	6
In femore	♉	11	22	1	12	B	6
In poplite	♉	9	35	1	7	B	6
In genu sinistro *	♉	9	23	1	30	A	6
In genu dextro *	♉	7	52	0	39	A	6
Paruula in aluo *	♉	8	46	4	1	B	6

Qua

Fig. 5. Primeira página do catálogo estelar de Tycho Brahe, incluído na obra *Astronomiæ instauratæ progymnasmata* (1602). Créditos: Library of Congress.

1.2 Uranometria - O Atlas Celeste de Johann Bayer

Os catálogos até então existentes incluíam apenas as constelações visíveis a partir do hemisfério norte - consequência de uma Terra esférica. Mas a expansão das navegações europeias levou também a uma expansão na cobertura dos catálogos e mapas celestes, incorporando listas de estrelas visíveis do hemisfério sul, trazidas por navegadores retornando de viagens exploratórias.

Em 1603, em seu atlas celeste Uranometria[11], Johann Bayer (1572-1625), um advogado e astrônomo amador alemão, publica cartas que cobrem ambos os hemisférios celestes, com novas constelações preenchendo o céu austral.

Bayer rotula as estrelas com letras gregas minúsculas, em ordem alfabética seguindo aproximadamente a ordem de brilho das estrelas. Após as 24 letras gregas, Bayer prossegue com o alfabeto latino, iniciando com a letra "*A*" maiúscula, seguida das demais letras minúsculas, de "*b*" a "*z*", omitindo o "*j*" e o "*v*". As demais letras latinas maiúsculas foram usadas para rotular objetos não estelares, estrelas não pertencentes à constelação representada na carta ou estrelas temporárias, como a Supernova de Tycho, em Cassiopeia, rotulada com a letra "B".



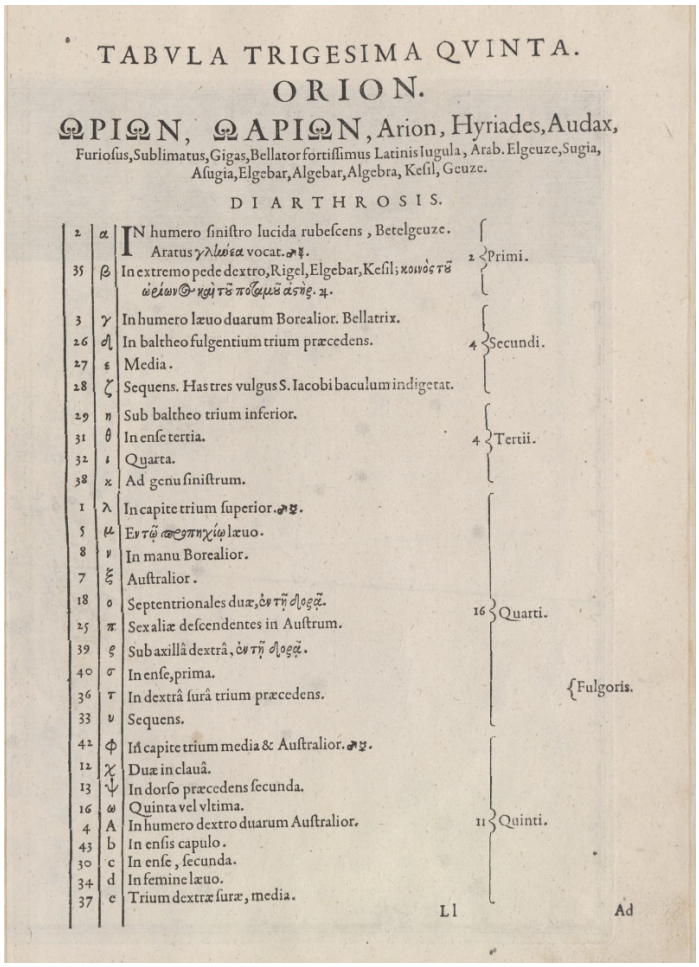
Fig. 6. Detalhe da arte da constelação de Órion no atlas Uranometria, de Johann Bayer (1603). Créditos: ETH-Bibliothek Zürich.

O catálogo de Bayer, assim como os de seus antecessores, usa uma escala de valores inteiros para as magnitudes, não discriminando diferenças menores de brilho dentro de cada

grandeza. Dessa falta de refinamento, resulta que a ordem alfabética atribuída por Bayer não coincida exatamente com a ordem decrescente de brilho das estrelas.[3]

Na Fig. 7, vemos a tabela associada à prancha da constelação Órion. Bayer contabiliza 2 estrelas de primeira magnitude, 4 de segunda, 4 de terceira, 16 de quarta, 11 de quinta e 12 de sexta, sem um ordenamento mais refinado quanto à fotometria (Fig. 7).

A primeira coluna da tabela é numérica e Ian Ridpath[12] sugere que sejam referências a uma lista preliminar compilada por Bayer, mas que não foi integralmente utilizada no Uranometria, uma vez que há descontinuidades nesses índices.



TABVLA TRIGESIMA QVINTA.

ORION.

ΩPIΩN, ΩAPIΩN, Arion, Hyriades, Audax, Furioſus, Sublimatus, Gigas, Bellator fortiſſimus Latinis Iugula, Arab. Elgeuze, Sugia, Aſugia, Elgebar, Algebar, Algebra, Keſil, Geuze.

DIARTHROSIS.

2	α	IN humero ſiniſtro lucida rubeſcens, Betelgeuze. Aratus γλωώεα vocat.	2	Primi.
35	β	In extremo pede dextro, Rigel, Elgebar, Keſil; κοινὸς τῶ ὠείων ⊙ καὶ τῶ πολαμῶ ἀστὴρ. μ.		
3	γ	In humero læuo duarum Borealior. Bellatrix.	4	Secundi.
26	δ	In baltheo fulgentium trium præcedens.		
27	ε	Media.		
28	ζ	Sequens. Has tres vulgus S. Iacobi baculum indigetat.		
29	η	Sub baltheo trium inferior.	4	Tertii.
31	θ	In enſe tertia.		
32	ι	Quarta.		
38	κ	Ad genu ſiniſtrum.		
1	λ	In capite trium ſuperior.	16	Quarti.
5	μ	Ἐν τῶ ἀετῶπηχίῳ læuo.		
8	ν	In manu Borealior.		
7	ξ	Auſtralior.		
18	ο	Septentrionales duæ, ἐν τῆ ὀλοχῆ.		
25	π	Sex aliæ deſcendentes in Auſtrum.		
39	ρ	Sub axillâ dextrâ, ἐν τῆ ὀλοχῆ.		
40	σ	In enſe, prima.		Fulgoris.
36	τ	In dextrâ ſurâ trium præcedens.		
33	υ	Sequens.		
42	φ	In capite trium media & Auſtralior.	11	Quinti.
12	χ	Duæ in clauâ.		
13	ψ	In dorſo præcedens ſecunda.		
16	ω	Quinta vel vltima.		
4	A	In humero dextro duarum Auſtralior.		
43	b	In enſis capulo.		
30	c	In enſe, ſecunda.		
34	d	In femine læuo.		
37	e	Trium dextræ ſuræ, media.		

Ll Ad

Fig. 7. Tabela da constelação de Órion, no Uranometria de Bayer. Créditos: ETH-Bibliothek Zürich.

A segunda coluna traz os rótulos alfabéticos de α até ω, seguidos dos caracteres latinos *A*, *b*, *c*, *d*, *e*.

[3]Nas tabelas que acompanham as pranchas do atlas (Fig. 7), Bayer emprega os termos *Fulgoris*, *Quátitatis*, *Magnitudinis* e *Luminis* para se referir às magnitudes.

A próxima coluna é uma descrição da posição das estrelas na constelação e traz alguns nomes estelares próprios (*Betelgeuze*, *Rigel* e *Bellatrix*). Colchetes à direita da página agrupam as estrelas por magnitude. Seguindo a tradição de Hiparcos, as estrelas mais brilhantes são as de primeira magnitude e as estrelas no limite da visibilidade a olho nu são as de sexta magnitude.

Das estrelas de primeira magnitude,"*Betelgeuse, a estrela de brilho vermelho no ombro esquerdo*"[4] do caçador foi rotulada como α. A estrela "*no extremo do pé direito, Rigel*"[5], foi rotulada como β. A α, no entanto, é menos brilhante que a β. No total, 16 constelações[6] tiveram estrelas que não são as mais brilhantes rotuladas como α. Nos mais de quatro séculos que se passaram desde a primeira impressão do Uranometria, novas constelações foram definidas e outras foram desmembradas. Mas a designação alfabética de Bayer segue em uso e estabeleceu-se como a maneira mais comum de se referir às estrelas mais brilhantes de uma constelação.

Na forma completa da designação, acrescentamos à letra grega ou latina que rotula a estrela, o genitivo em latim da constelação. Assim, a estrela rotulada como α na constelação do Centauro é a α *Centauri*. A estrela rotulada como β na constelação de Órion é a β *Orionis*. A estrela rotulada como δ na constelação do Cruzeiro do Sul (Crux) é a δ *Crucis*.

[4]Em latim: "*In humero sinistro, ludida rubescens, Betelgeuze.*"

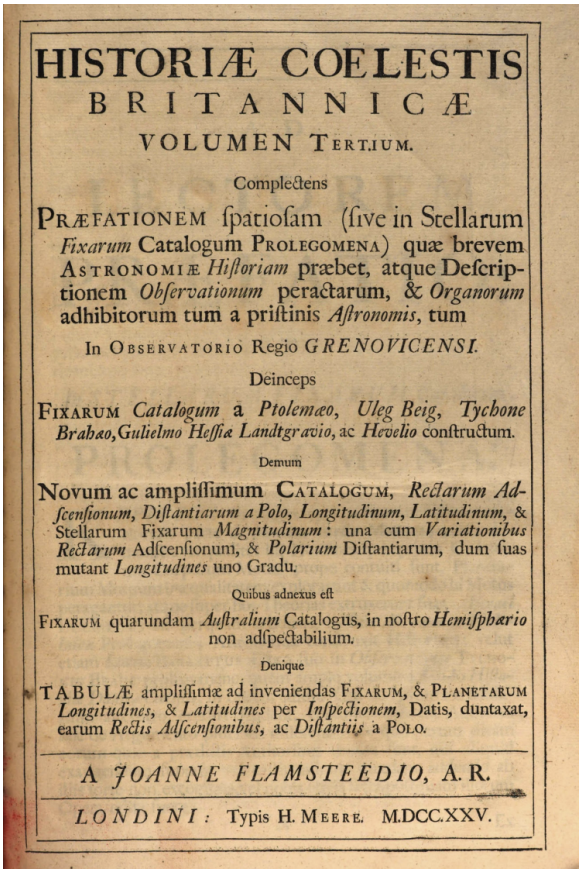
[5]"*In extremo pede dextro, Rigel*".

[6]Câncer, Capricórnio, Baleia (*Cetus*), Corvo, Taça (*Crater*), Golfinho, Dragão, Gêmeos, Hércules, Libra, Órion, Pégaso, Peixes, Seta (*Sagitta*), Sagitário, e Triângulo.[12]

1.3 Flamsteed - O Primeiro Catálogo Telescópico

Os catálogos não são apenas uma lista de estrelas. São uma ferramenta para a observação astronômica, trazendo dados importantes de posição (Astrometria[7]) e brilho (Fotometria[8]). Esses dados são necessários, por exemplo, para calcular as coordenadas ou estimar o brilho de um cometa. Mas, embora Galileu tivesse introduzido o telescópio como instrumento de observação astronômica em 1609, os catálogos e atlas celestes publicados ao longo do Séc. XVII baseavam-se em observações a olho nu, limitando a precisão na determinação de posição e nas estimativas fotométricas.

Foi John Flamsteed (1646–1719), o primeiro Astrônomo Real da Inglaterra, que inaugurou a era dos catálogos telescópicos, utilizando o recém-criado Observatório de Greenwich para compilar seu *Stellarum Inerrantium Catalogus Britannicus*[9], publicado postumamente, em 1725, no *Historiæ Coelestis Britannicæ*.



HISTORIÆ COELESTIS
BRITANNICÆ
VOLUMEN TERTIUM.

Complectens

PRÆFATIONEM ſpatioſam (ſive in Stellarum *Fixarum* Catalogum PROLEGOMENA) quæ brevem ASTRONOMIÆ *Hiſtoriam* præbet, atque Deſcriptionem *Obſervationum* peractarum, & *Organorum* adhibitorum tum a priſtinis *Aſtronomis*, tum

In OBSERVATORIO Regio *GRENOVICENSI*.

Deinceps

FIXARUM *Catalogum* a *Ptolemæo*, *Uleg Beig*, *Tychone Brahæo*, *Gulielmo Heſſiæ Landtgravio*, ac *Hevelio* conſtructum.

Demum

Novum ac ampliſſimum CATALOGUM, *Rectarum Aſcenſionum*, *Diſtantiarum a Polo*, *Longitudinum*, *Latitudinum*, & Stellarum Fixarum *Magnitudinum*: una cum *Variationibus Rectarum* Adſcenſionum, & *Polarium* Diſtantiarum, dum ſuas mutant *Longitudines* uno Gradu.

Quibus adnexus eſt

FIXARUM quarundam *Auſtralium* Catalogus, in noſtro *Hemiſphærio* non adſpectabilium.

Denique

TABULÆ ampliſſimæ ad inveniendas FIXARUM, & PLANETARUM *Longitudines*, & *Latitudines* per *Inſpectionem*, Datis, duntaxat, earum *Rectis Aſcenſionibus*, ac *Diſtantiis* a POLO.

A *JOANNE FLAMSTEEDIO*, A. R.

LONDINI: Typis H. MEERE. M.DCC.XXV.

Fig. 8. *Historiaæ Coelestis Britannicæ*, de John Flamsteed.

Em seu terceiro volume, o *Historiaæ Coelestis Britannicæ* [13] faz um retrospecto dos

[7] A astrometria é o ramo da Astronomia que se ocupa das medidas de posição dos astros.
[8] A fotometria é o ramo da Astronomia que se ocupa de determinar o fluxo luminoso dos astros.
[9] *Catálogo Britânico das Estrelas Fixas*.

catálogos estelares, republicando os catálogos de Ptolomeu, Ulugh Beg (1394-1449), Tycho e Hevelius (1611-1687). E apresenta o novo *Catalogus Britannicus*.

As estrelas do Catalogus Britannicus estão listadas em ordem crescente da coordenada Ascensão Reta (ou seja, de leste para oeste), diferente do Uranometria de Bayer, que agrupava suas estrelas conforme o brilho aparente.

A edição revisada do catálogo de Flamsteed publicada na França em 1783 por Joseph Jérôme de Lalande (1732–1807) no *Éphémérides des movemens celestes* [14], contendo 2962 estrelas, acrescenta uma coluna inicial às tabelas, atribuindo um índice numérico a cada entrada do catálogo. Estes índices, ausentes na edição original, tornaram-se o que hoje conhecemos como *designação de Flamsteed*.

A exemplo da designação de Bayer, acrescenta-se aos índices numéricos de Flamsteed o genitivo em latim da respectiva constelação.[10]

EM CONSTRUÇÃO - DESCULPE-NOS O TRANSTORNO.

[10] A estrela Antares, a mais brilhante na constelação do Escorpião (*Scorpius*) é a vigésima primeira listada por Flamsteed na constelação. Assim, na designação de Flamsteed, ela é a 21 Scorpii (21 Sco) e pela designação de Bayer, α Scorpii (α Sco).

1.4 Messier - Cometas e Céu Profundo

O Séc. XVII viu nascer a ciência moderna. As observações telescópicas de Galileu mostraram que Júpiter possuía seus próprios satélites e que a Lua não era uma esfera perfeita, mas sim um corpo coberto de crateras. Dois fatos que, junto com a constatação por Tycho Brahe de que os cometas não eram fenômenos meteorológicos, mas sim corpos que se moviam a distâncias maiores que a da Lua e de que uma estrela havia surgido na constelação de Cassiopeia em 1572, faziam ruir a ideia de que a Terra era o centro do Universo e de que o céu supralunar era imutável.

Johannes Kepler, discípulo de Tycho, desvendou o movimento dos planetas e elaborou suas três leis do movimento planetário.

Isaac Newton (1643-1727) publica suas três leis da mecânica e a teoria da Gravitação Universal e paralelamente a Leibiniz (1646-1716) cria ferramentas matemáticas que permitem calcular com precisão órbitas de objetos a partir dos dados observacionais.

Empregando essas novas ferramentas e a Física de Newton, o astrônomo e matemático Edmond Halley (1656-1742), sucessor de John Flamsteed como Astrônomo Real Britânico, estava convicto de que os cometas observados em 1531 por Peter Apian (1495-1552), em 1607 por Kepler e Christen Longomontanus (1562-1647) e em 1682 pelo próprio Halley, eram o mesmo cometa e que este retornaria em 1758[11].

Nas páginas 21 e 22 de *A Synopsis of the Astronomy of Comets*[15], Halley escreveu:

> "*O principal uso desta Tabela de Elementos do Movimento [dos cometas] e o que me motivou a construí-las, é, que sempre que um novo cometa apareça, sejamos capazes de saber, comparando seus elementos, se ele é um dos que já apareceram previamente, e consequentemente determinar seu período, o eixo de sua órbita e prever o seu retorno. E, de fato, há muitas coisas que me fazem crer que o cometa observado por Apian no ano de 1531 era o mesmo que Kepler e Longomontanus detectaram e descreveram em 1607 e que eu mesmo vi retornar e observei em 1682. [...]*
> *Isso também confirma, em minha opinião, que este seja o mesmo que no ano de 1456, no verão, um cometa foi observado passando retrógrado entre a Terra e o Sol, da mesma maneira. Embora ninguém tenha feito observações, pelo seu período e pela maneira do seu trânsito, não posso pensar que seja diferente dos que acabei de mencionar. Portanto, ouso prever que ele retornará novamente no ano de 1758.*[12] "

[11] O cometa é hoje designado 1P/Halley e foi o primeiro cometa periódico confirmado.

[12] *The principal use therefore of this Table of the Elements of their Motions, and that which induced me to construct it, is, That whenever a new Comet shall appear, we may be able to know, by comparing together the Elements, whether it be any of those which has appear'd before, and consequently to determine its Period, and the Axis of its Orbit, and to foretell its Return. And, indeed, there are many Things which make me believe that the Comet which Apian observ'd in the Year 1 531. was the same with that which Kepler and Longomontanus took Notice of and describ'd in the Year 1607. and which I my self have seen return, and observ'd in the Year 1682.*
[...]*This, moreover, confirms me in my Opinion of its being the same, that in the Year 1456. in the Summer*



Fig. 9. Carta celeste com as trajetórias do cometa observado em 1531, 1607 e 1682 e com retorno previsto por Halley para o ano de 1758. Créditos: Bibliothèque nationale de France.

Entre os astrônomos que buscavam o cometa previsto por Halley estava Charles Messier (1730-1817), o jovem assistente de Joseph-Nicholas Delisle[13] (1688–1768), no Observatório Naval em Paris. Seguindo as orientações de Delisle, que havia recalculado a data da passagem pelo periélio[14] do cometa para abril de 1759, Messier inicia sua campanha no verão europeu de 1758.

Na noite de 21 de janeiro de 1759, Messier redescobre o cometa de Halley, mas Delisle acreditava se tratar de um objeto diferente, já que estava fora de sua trajetória recalculada. Sem a aprovação de Delisle, Messier não publicou sua descoberta e prosseguiu com a busca por três meses até que ficasse claro que Delisle havia cometido um erro em seus cálculos. Além disso, tomou conhecimento de que aproximadamente um mês antes, na noite de Natal de 1758, Johann Georg Palitzch (1723-1788), um astrônomo amador na região de Dresden, havia observado o cometa de Halley[16].

Após a frustração com o Halley, a caça de cometas tornou-se uma obsessão para Messier. Seu trabalho, no entanto, era puramente observacional, sem incluir a determinação de órbitas, trabalho que era repassado a colaboradores como Bochart de Saron (1730-1794), magistrado e astrônomo amador francês que tinha como *hobby* a mecânica celeste e determinou que Urano, observado por William Herschel em abril de 1781, era um novo planeta e não um cometa[17].

Messier dedicou seu tempo a cuidadosas campanhas observacionais enquanto sua visão permitiu. Em seu manuscrito *Notas sobre meus cometas*[18], sobre o grande cometa de

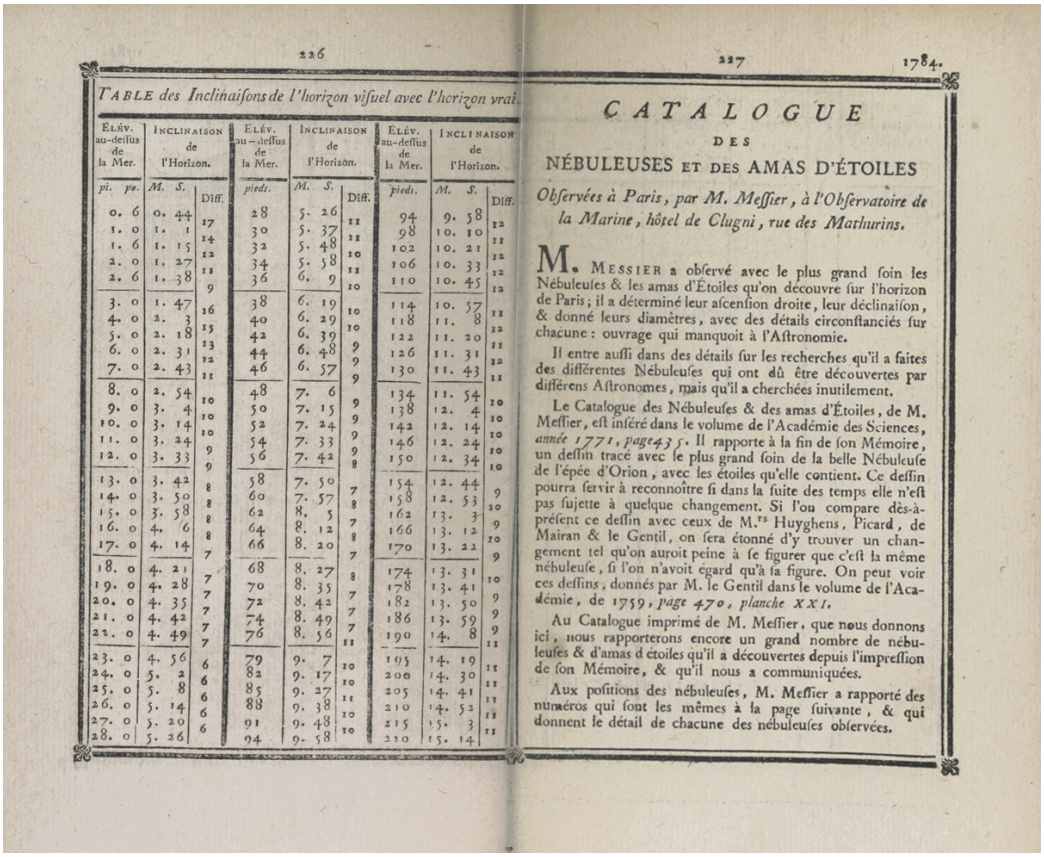
time, a Comet was seen passing Retrograde between the Earth and the Sun, much after the same manner : Which, tho' no Body made Observations upon it, yet from its Period, and the Manner of its Transit, I cannot think different from those I have just now mention'd. Hence I dare venture to foretell, That it will return again in the Year 1758.

[13]Também grafado *de l'Isle*.

[14]O periélio é o ponto mais próximo do Sol na órbita de um objeto do Sistema Solar. Ao se aproximar do periélio parte do gelo que compõe os cometas sublima, dando origem a uma cauda e à cabeleira, o envoltório gasoso do núcleo.

1807, escreveu: "*Nestas observações, utilizei pela primeira vez uma pessoa que cronometrava e marcava as divisões do instrumento que meus olhos não podiam mais perceber.*" [15]. - Sua dedicação o levou a se tornar o maior caçador de cometas de seu tempo, observando sistematicamente 44 cometas, tendo descoberto 21 deles. Não foi, no entanto, sua prolífica descoberta destes astros o seu maior legado.

Antes do episódio com o Halley, ao observar o cometa descoberto por de la Nux em 1758[16], na constelação de Touro, Messier se deparou com uma nebulosa desconhecida, cuja aparência poderia levá-la a ser confundida com um cometa. Este episódio o motivou a elaborar um catálogo de objetos de aspecto nebuloso (Fig. 10) que poderiam atrapalhar a atividade de caça e observação de cometas.



226

TABLE des Inclinaisons de l'horizon visuel avec l'horizon vrai.

Élév. au-dessus de la Mer. pi. po.	Inclinaison de l'Horizon. M. S.	Diff.	Élév. au-dessus de la Mer. pieds.	Inclinaison de l'Horizon. M. S.	Diff.	Élév. au-dessus de la Mer. pieds.	Inclinaison de l'Horizon. M. S.	Diff.
0. 6	0. 44	17	28	5. 26	11	94	9. 58	12
1. 0	1. 1	14	30	5. 37	11	98	10. 10	11
1. 6	1. 15	12	32	5. 48	10	102	10. 21	12
2. 0	1. 27	11	34	5. 58	11	106	10. 33	12
2. 6	1. 38	9	36	6. 9	10	110	10. 45	12
3. 0	1. 47	16	38	6. 19	10	114	10. 57	11
4. 0	2. 3	15	40	6. 29	10	118	11. 8	12
5. 0	2. 18	13	42	6. 39	9	122	11. 20	11
6. 0	2. 31	12	44	6. 48	9	126	11. 31	12
7. 0	2. 43	11	46	6. 57	9	130	11. 43	11
8. 0	2. 54	10	48	7. 6	9	134	11. 54	10
9. 0	3. 4	10	50	7. 15	9	138	12. 4	10
10. 0	3. 14	10	52	7. 24	9	142	12. 14	10
11. 0	3. 24	9	54	7. 33	9	146	12. 24	10
12. 0	3. 33	9	56	7. 42	8	150	12. 34	10
13. 0	3. 42	8	58	7. 50	7	154	12. 44	9
14. 0	3. 50	8	60	7. 57	8	158	12. 53	10
15. 0	3. 58	8	62	8. 5	7	162	13. 3	9
16. 0	4. 6	8	64	8. 12	8	166	13. 12	10
17. 0	4. 14	7	66	8. 20	7	170	13. 22	9
18. 0	4. 21	7	68	8. 27	8	174	13. 31	10
19. 0	4. 28	7	70	8. 35	7	178	13. 41	9
20. 0	4. 35	7	72	8. 42	7	182	13. 50	9
21. 0	4. 42	7	74	8. 49	7	186	13. 59	9
22. 0	4. 49	7	76	8. 56	11	190	14. 8	11
23. 0	4. 56	6	79	9. 7	10	195	14. 19	11
24. 0	5. 2	6	82	9. 17	10	200	14. 30	11
25. 0	5. 8	6	85	9. 27	11	205	14. 41	11
26. 0	5. 14	6	88	9. 38	10	210	14. 52	11
27. 0	5. 20	6	91	9. 48	10	215	15. 3	11
28. 0	5. 26	6	94	9. 58	10	220	15. 14	11

227 1784.

CATALOGUE
DES
NÉBULEUSES ET DES AMAS D'ÉTOILES

Observées à Paris, par M. Messier, à l'Observatoire de la Marine, hôtel de Clugni, rue des Mathurins.

M. MESSIER a observé avec le plus grand soin les Nébuleuses & les amas d'Étoiles qu'on découvre sur l'horizon de Paris; il a déterminé leur ascension droite, leur déclinaison, & donné leurs diamètres, avec des détails circonstanciés sur chacune: ouvrage qui manquoit à l'Astronomie.

Il entre aussi dans des détails sur les recherches qu'il a faites des différentes Nébuleuses qui ont dû être découvertes par différens Astronomes, mais qu'il a cherchées inutilement.

Le Catalogue des Nébuleuses & des amas d'Étoiles, de M. Messier, est inséré dans le volume de l'Académie des Sciences, *année 1771, page 435*. Il rapporte à la fin de son Mémoire, un dessin tracé avec le plus grand soin de la belle Nébuleuse de l'épée d'Orion, avec les étoiles qu'elle contient. Ce dessin pourra servir à reconnoître si dans la suite des temps elle n'est pas sujette à quelque changement. Si l'on compare dès-à-présent ce dessin avec ceux de M.rs Huyghens, Picard, de Mairan & le Gentil, on sera étonné d'y trouver un changement tel qu'on auroit peine à se figurer que c'est la même nébuleuse, si l'on n'avoit égard qu'à la figure. On peut voir ces dessins, donnés par M. le Gentil dans le volume de l'Académie, de *1759, page 470, planche XXI.*

Au Catalogue imprimé de M. Messier, que nous donnons ici, nous rapporterons encore un grand nombre de nébuleuses & d'amas d'étoiles qu'il a découvertes depuis l'impression de son Mémoire, & qu'il nous a communiquées.

Aux positions des nébuleuses, M. Messier a rapporté des numéros qui sont les mêmes à la page suivante, & qui donnent le détail de chacune des nébuleuses observées.

Fig. 10. Última versão publicada por Messier do Catálogo de Nebulosas e Aglomerados Estelares, no almanaque *Connoissance des Temps, ou Conoissance des Mouvemens Célestes Pour l'Année bissextile 1784*. Créditos: Bibliothèque nationale de France.

[15] "*At these observations, I have made use of help for the first time during all my observations by a person who counted at the clock and marked the divisions of the Instrument which my eyes could no more perceive.*" Traduzido para o inglês por Hartmut Frommert e disponível em http://messier.lamost.org/seds/seds.org/messier/en/xtra/history/notes-c.html

[16] Cometa C/1758 K1 (De la Nux), na nomenclatura moderna.

Três versões de seu catálogo foram elaboradas. A primeira, com 45 objetos, foi concluída em 1771. A segunda versão, com 68 objetos, foi publicada em 1780.

Com a colaboração de Pierre Méchain (1744-1804), a versão final de seu catálogo, com 103 objetos, *Catalogue des Nébuleuses et des Amas d'Etoiles*[19] foi publicada no anuário *Connoissance des Temps, ou Conoissance des Mouvemens Célestes Pour l'Année bissextile 1784*, em 1781 .

Embora Pierre Méchain tenha permanecido ativo e realizado novas descobertas após a publicação da terceira versão do catálogo, nenhuma outra versão foi publicada por Messier. Ainda assim, a versão atual do catálogo contabiliza 110 objetos, incorporando atualizações do Séc. XX que consideram objetos observados e descritos por Messier e Méchain, mas que não foram listados originalmente.

O catálogo de Messier chega aos nossos dias como uma coletânea de tesouros celestes do céu profundo, incluindo nebulosas, galáxias (na época também chamadas de nebulosas) e aglomerados estelares, observáveis por instrumentos modestos e que fazem parte do repertório da grande maioria dos astrônomos amadores. A compilação de objetos, considerados como indesejáveis em sua busca por cometas, consolidou-se como a maior herança de Messier, transpondo os limites acadêmicos e tornando-se o mais popular catálogo de objetos astronômicos já publicado.

No Séc. XX um complemento ao catálogo Messier listando 109 objetos é elaborado pelo astrônomo amador e divulgador Patrick Moore[17]. O catálogo Caldwell incorpora objetos brilhantes que foram deixados de fora da lista de Messier além de trazer objetos do hemisfério sul celeste, não visíveis por Messier e Méchain a partir da França.

[17] Sir Patrick Alfred Caldwell-Moore (1923-2012).

1.5 NGC - O Legado da Família Herschel

No Séc. XVIII, um casal de irmãos músicos, nascidos em Hanover, então parte do Sacro Império Romano-Germânico, largou as partituras para iniciar a construção de um legado que inclui a descoberta de um novo planeta, a revisão do catálogo estelar de Flamsteed e a elaboração de um catálogo com milhares de objetos de céu profundo. [20]

Obsessão talvez seja a palavra mais adequada para descrever a intensidade do interesse de William Herschel (1738-1822)[18] pela Astronomia. Ainda como astrônomo amador, tornou-se um dos mais competentes construtores de telescópios de sua época e seus instrumentos superavam a capacidade de telescópios instalados em instituições profissionais como o Observatório de Greenwich. Foi com um destes telescópios que ele descobriu o planeta Urano em 13 de março de 1781[19].

William havia deixado Hanover e se estabelecido na cidade de Bath, na Inglaterra, onde garantia sua sobrevivência com sua remuneração como músico, enquanto lutava para garantir tempo para a observação do céu e para a construção de telescópios. Mas a descoberta de um novo planeta[20], o primeiro em milênios, chamou a atenção do Rei George III (1738-1820) e abriu as portas para sua carreira como astrônomo profissional. Contratado como uma espécie de astrônomo pessoal do Rei, William finalmente teve como se dedicar integralmente à Astronomia, ainda que por um salário inferior aos seus rendimentos como músico, tendo apenas a tarefa de ocasionalmente levar telescópios portáteis ao castelo de Windsor e de receber visitantes do Rei em seu observatório.

A nova carreira de William como astrônomo profissional mudou também a vida de sua irmã, Caroline Herschel (1750-1848), que deixou Hanover em 1772 para seguir carreira musical, acompanhando William e apresentando-se como solista [21].

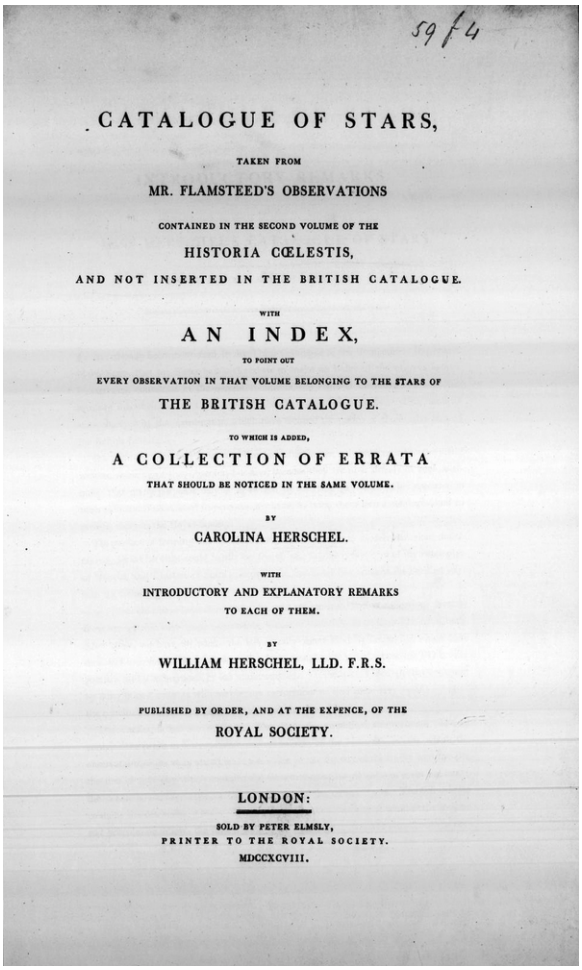
Caroline atuou inicialmente como assistente nas observações de seu irmão, mas construiu uma carreira sólida com suas próprias descobertas, incluindo oito cometas e diversas nebulosas, além de revisar os registros de observação de John Flamsteed, identificando 559 estrelas que não foram incluídas entre as 2969 do *Catalogus Britannicus*. A Fig.11 é a página frontal do *Catálogo de Estrelas* de Caroline (*Catalogue of Stars, taken from Mr.*

[18] William Herschel foi um músico talentoso e prolífico, tendo composto 24 sinfonias, 12 concertos, 9 sonatas para cravo, 12 sonatas para violino e várias peças de música para órgão. Suas partituras estão disponíveis gratuitamente em formato PDF em https://herschelpress.co.uk/. William foi o quarto de dez filhos de Isaac Herschel (1707-1767), e assim como o pai e seu irmão mais velho Jacob (1734-1792), serviu como músico na banda da Guarda Hanoveriana, subordinada ao Rei George II (1683–1760) da Grã-Bretanha. Mas foi a paixão pela Astronomia que guiou sua vida.

[19] William reportou sua descoberta inicialmente como sendo um cometa. Foi Bochart de Saron [17] que, ao calcular a órbita do corpo, anunciou, em 8 de maio de 1781, que o objeto se encontrava mais distante do que se supunha, levando à conclusão de que na verdade se tratava de um planeta até então desconhecido, além da órbita de Saturno. Encorajado por colegas, William propôs nomear o planeta como *Georgium Sidus* (Estrela de George), em homenagem ao monarca George III. Felizmente, a proposta nunca foi amplamente adotada e prevaleceu o nome Urano, sugerido pelo astrônomo alemão Johann Elert Bode (1747–1826), à epoca, diretor do Observatório de Berlim.

[20] Os cinco outros planetas conhecidos na época (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno) são visíveis a olho nu e eram conhecidos desde a pré história.

Flamsteed's Observations contained in the second volume of Historiæ Cœlestis and not inserted into the British Catalogue), publicado pela Royal Society em 1798 [22]. Caroline ainda deixou seu nome marcado na história como a primeira mulher astrônoma profissional.



59 f 4

CATALOGUE OF STARS,

TAKEN FROM

MR. FLAMSTEED'S OBSERVATIONS

CONTAINED IN THE SECOND VOLUME OF THE

HISTORIA CŒLESTIS,

AND NOT INSERTED IN THE BRITISH CATALOGUE.

WITH

AN INDEX,

TO POINT OUT

EVERY OBSERVATION IN THAT VOLUME BELONGING TO THE STARS OF

THE BRITISH CATALOGUE.

TO WHICH IS ADDED,

A COLLECTION OF ERRATA

THAT SHOULD BE NOTICED IN THE SAME VOLUME.

BY

CAROLINA HERSCHEL.

WITH

INTRODUCTORY AND EXPLANATORY REMARKS

TO EACH OF THEM.

BY

WILLIAM HERSCHEL, LLD. F.R.S.

PUBLISHED BY ORDER, AND AT THE EXPENCE, OF THE

ROYAL SOCIETY.

LONDON:

SOLD BY PETER ELMSLY,

PRINTER TO THE ROYAL SOCIETY.

MDCCXCVIII.

Fig. 11. O Catálogo de Estrelas, com os dados de observação de John Flamsteed, revisados por Caroline Hershel.

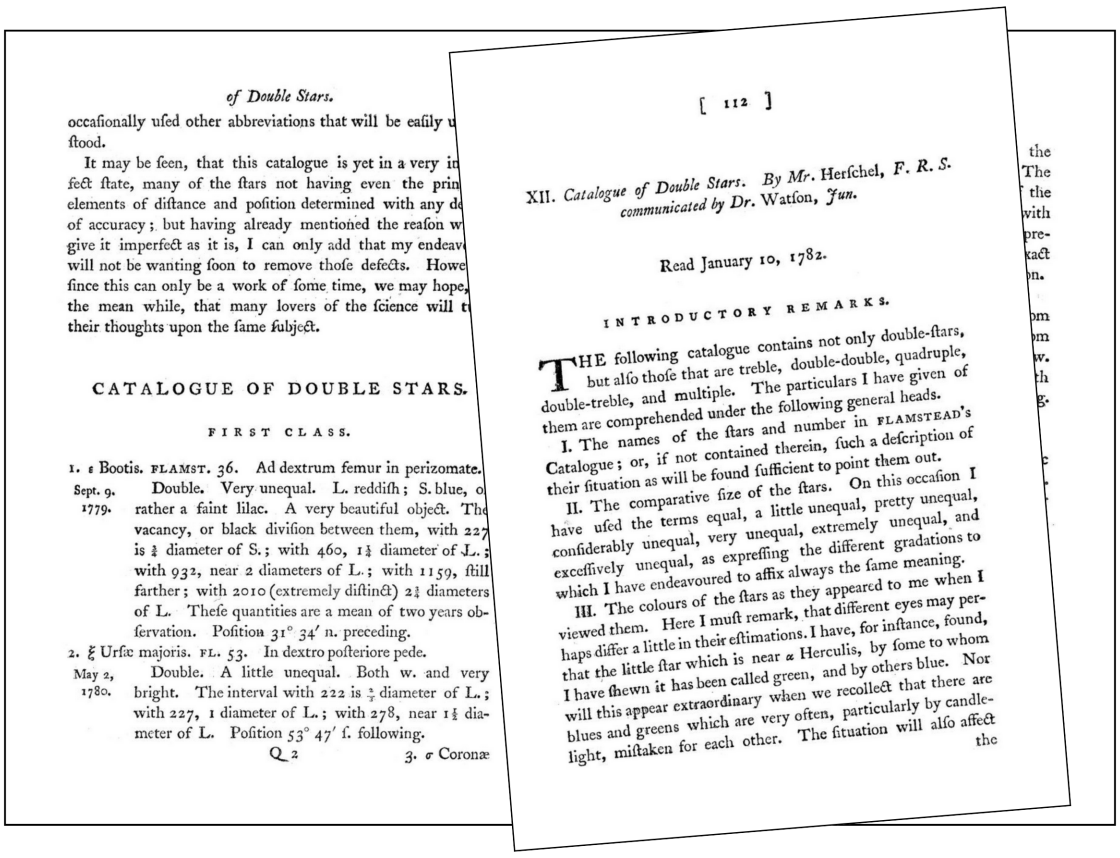
Os diversos catálogos produzidos pelos Herschel são o fruto de repetidas varreduras[21] sistemáticas do céu, refazendo medidas de coordenadas já publicadas em outros catálogos, buscando e catalogando estrelas duplas e, por último, também buscando e catalogando nebulosas[22] e aglomerados estelares.

[21] William chamava as varreduras de "*Sweeps*".

[22] Até o início do Séc. XX o termo "nebulosa" era utilizado para identificar objetos de natureza bem distinta: galáxias, nebulosas gasosas, nebulosas planetárias e restos de supernova. As galáxias só passaram a ser entendidas como objetos fora da Via Láctea a partir das medidas de distância executadas por Edwin Hubble (1889-1953) a partir do método desenvolvido por Henrietta Swan Leavitt (1868-1921).

Interessado no problema da determinação da distância até as estrelas[23], William submete o artigo *On the parallax of the fixed stars* (1782), publicado no *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 72, onde propõe a medida da paralaxe a partir da variação na separação entre estrelas duplas quando observadas de pontos opostos da órbita terrestre [23].

William iniciou então uma varredura do céu em busca de estrelas duplas que resultou na publicação de dois catálogos. A Fig. 12 mostra o primeiro deles, publicado no mesmo volume do Philosophical Transactions.



of Double Stars.

occaſionally uſed other abbreviations that will be eaſily u
ſtood.

It may be ſeen, that this catalogue is yet in a very in
fect ſtate, many of the ſtars not having even the prin
elements of diſtance and poſition determined with any de
of accuracy; but having already mentioned the reaſon w
give it imperfect as it is, I can only add that my endeav
will not be wanting ſoon to remove thoſe defects. Howe
ſince this can only be a work of ſome time, we may hope,
the mean while, that many lovers of the ſcience will t
their thoughts upon the ſame ſubject.

CATALOGUE OF DOUBLE STARS.

FIRST CLASS.

1. ε Bootis. FLAMST. 36. Ad dextrum femur in perizomate.
Sept. 9. 1779. Double. Very unequal. L. reddiſh; S. blue, o
rather a faint lilac. A very beautiful object. The
vacancy, or black diviſion between them, with 227
is ⅔ diameter of S.; with 460, 1⅓ diameter of L.;
with 932, near 2 diameters of L.; with 1159, ſtill
farther; with 2010 (extremely diſtinct) 2⅔ diameters
of L. Theſe quantities are a mean of two years ob-
ſervation. Poſition 31° 34′ n. preceding.

2. ξ Urſæ majoris. FL. 53. In dextro poſteriore pede.
May 2, 1780. Double. A little unequal. Both w. and very
bright. The interval with 222 is ⅔ diameter of L.;
with 227, 1 diameter of L.; with 278, near 1⅓ dia-
meter of L. Poſition 53° 47′ ſ. following.

Q 2 3. σ Coronæ

[112]

XII. *Catalogue of Double Stars. By Mr.* Herſchel, *F. R. S. communicated by Dr.* Watſon, *Jun.*

Read January 10, 1782.

INTRODUCTORY REMARKS.

THE following catalogue contains not only double-ſtars, but alſo thoſe that are treble, double-double, quadruple, double-treble, and multiple. The particulars I have given of them are comprehended under the following general heads.

I. The names of the ſtars and number in FLAMSTEAD's Catalogue; or, if not contained therein, ſuch a deſcription of their ſituation as will be found ſufficient to point them out.

II. The comparative ſize of the ſtars. On this occaſion I have uſed the terms equal, a little unequal, pretty unequal, conſiderably unequal, very unequal, extremely unequal, and exceſſively unequal, as expreſſing the different gradations to which I have endeavoured to affix always the ſame meaning.

III. The colours of the ſtars as they appeared to me when I viewed them. Here I muſt remark, that different eyes may perhaps differ a little in their eſtimations. I have, for inſtance, found, that the little ſtar which is near α Herculis, by ſome to whom I have ſhewn it has been called green, and by others blue. Nor will this appear extraordinary when we recollect that there are blues and greens which are very often, particularly by candle-light, miſtaken for each other. The ſituation will alſo affect the

Fig. 12. O primeiro catálogo de estrelas duplas de William Herschel, de 1782, publicado no Philosophical Transactions of the Royal Society of London (1782). Créditos: The Royal Society.

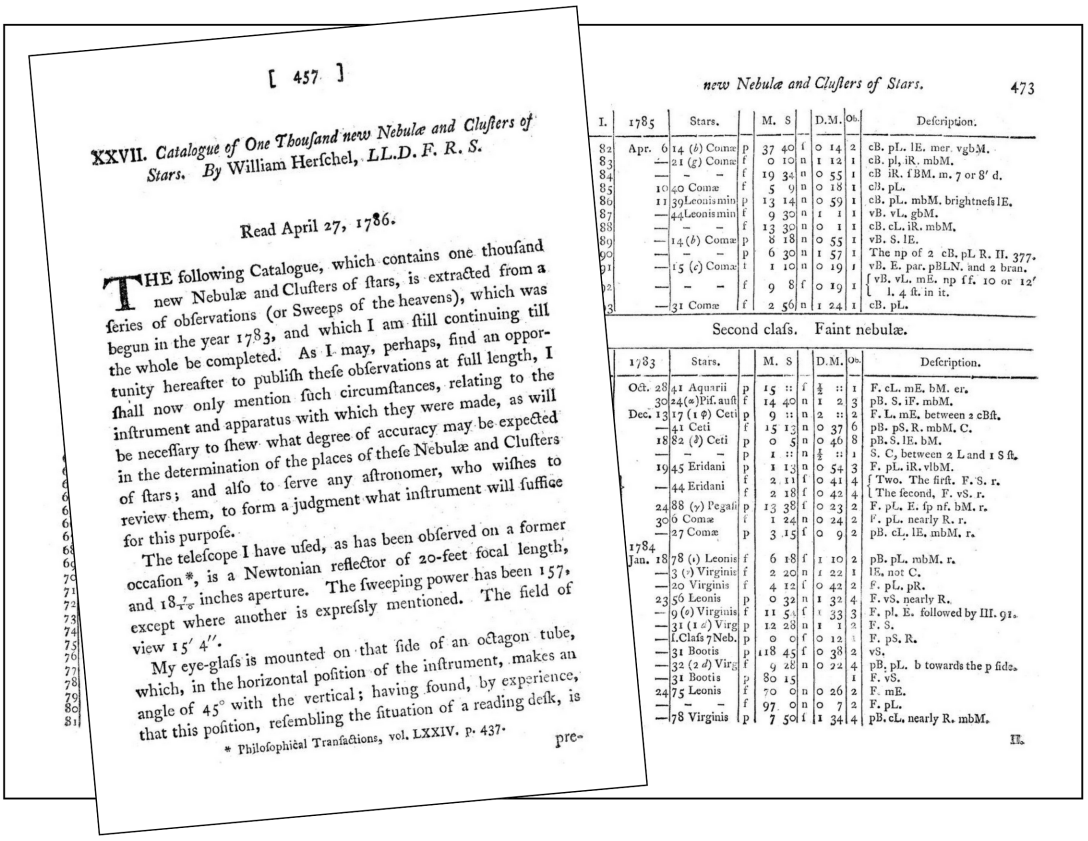
Deixando as estrelas próximas e mergulhando nos objetos distantes do céu profundo, o primeiro catálogo de nebulosas e objetos estelares publicado por William Herschel, em 1786, continha 1000 objetos, o que multiplicava por 10 a escala do famoso catálogo de Charles Messier, que em sua última versão, publicada em 1784, listava 103 objetos.

William chegou a um número final de 2500 objetos nebulosos e aglomerados estelares com outros dois catálogos, acrescentando 1000 objetos em 1789 e 500 objetos em

[23] Apresentamos o método de medida da paralaxe anual para determinar distâncias estelares na seção 8.2.

1802[24].

Esses resultados não foram apenas o fruto da dedicação e talento de William e Caroline em suas varreduras observacionais, mas também da inigualável qualidade dos telescópios projetados e construídos pela dupla, com a colaboração de um terceiro irmão: Johann Alexander Herschel (1745-1821). Também um músico profissional, Alexander tinha como hobby a metalurgia e contribuiu com a mecânica dos telescópios que celebrizaram os Herschels.



[457]

XXVII. *Catalogue of One Thousand new Nebulæ and Clusters of Stars.* By William Herschel, LL.D. F. R. S.

Read April 27, 1786.

THE following Catalogue, which contains one thousand new Nebulæ and Clusters of stars, is extracted from a series of observations (or Sweeps of the heavens), which was begun in the year 1783, and which I am still continuing till the whole be completed. As I may, perhaps, find an opportunity hereafter to publish these observations at full length, I shall now only mention such circumstances, relating to the instrument and apparatus with which they were made, as will be necessary to shew what degree of accuracy may be expected in the determination of the places of these Nebulæ and Clusters of stars; and also to serve any astronomer, who wishes to review them, to form a judgment what instrument will suffice for this purpose.

The telescope I have used, as has been observed on a former occasion *, is a Newtonian reflector of 20-feet focal length, and $18\frac{7}{10}$ inches aperture. The sweeping power has been 157, except where another is expressly mentioned. The field of view 15′ 4″.

My eye-glass is mounted on that side of an octagon tube, which, in the horizontal position of the instrument, makes an angle of 45° with the vertical; having found, by experience, that this position, resembling the situation of a reading desk, is

* Philosophical Transactions, vol. LXXIV. p. 437.

pre-

new Nebulæ and Clusters of Stars. 473

I.	1785	Stars.		M.	S		D.M.	Ob.	Description.
82	Apr. 6	14 (*b*) Comæ	p	37	40	f	0 14	2	cB. pL. lE. mer. vgbM.
83	—	21 (*g*) Comæ	f	0	10	n	1 12	1	cB. pl, iR. mbM.
84	—	— —	f	19	34	n	0 55	1	cB iR. fBM. m. 7 or 8′ d.
85	10	50 Comæ	f	5	9	n	0 18	1	cB. pL.
86	11	39 Leonis min	p	13	14	n	0 59	1	cB. pL. mbM. brightnefs lE.
87	—	44 Leonis min	f	9	30	n	1 1	1	vB. vL. gbM.
88	—	— —	f	13	30	n	0 1	1	cB. cL. iR. mbM.
89	—	14 (*b*) Comæ	p	8	18	n	0 55	1	vB. S. lE.
90	—	— —	p	6	30	n	1 57	1	The np of 2 cB. pL R. II. 377.
91	—	15 (*c*) Comæ	f	1	10	n	0 19	1	vB. E. par. pBLN. and 2 bran.
92	—	— —	f	9	8	f	0 19	1	{ vB. vL. mE. np ff. 10 or 12′ l. 4 ft. in it.
93	—	31 Comæ	f	2	56	n	1 24	1	cB. pL.

Second clafs. Faint nebulæ.

1783	Stars.		M.	S		D.M.	Ob.	Description.
Oct. 28	41 Aquarii	p	15	::	f	½ ::	1	F. cL. mE. bM. er.
30	24 (*e*) Pif. auft	f	14	40	n	1 2	3	pB. S. iF. mbM.
Dec. 13	17 (1 *p*) Ceti	p	9	::	n	2 ::	2	F. L. mE. between 2 cBft.
—	41 Ceti	f	15	13	n	0 37	6	pB. pS. R. mbM. C.
18	82 (*s*) Ceti	p	0	5	n	0 46	8	pB. S. lE. bM.
—	— —	p	1	::	n	½ ::	1	S. C, between 2 L and 1 S ft.
19	45 Eridani	p	1	13	n	0 54	3	F. pL. iR. vlbM.
—	44 Eridani	f	2	11	f	0 41	4	{ Two. The firft. F. S. r.
—		f	2	18	f	0 42	4	{ The fecond, F. vS. r.
24	88 (γ) Pegafi	p	13	38	f	0 23	2	F. pL. E. fp nf. bM. r.
30	6 Comæ	f	1	24	n	0 24	2	F. pL. nearly R. r.
—	27 Comæ	p	3	15	f	0 9	2	pB. cL. lE. mbM. r.
1784								
Jan. 18	78 (*i*) Leonis	f	6	18	f	1 10	2	pB. pL. mbM. r.
—	3 (*r*) Virginis	f	2	20	n	1 22	1	lE. not C.
—	20 Virginis	f	4	12	f	0 42	2	F. pL. pR.
23	56 Leonis	p	0	32	n	1 32	4	F. vS. nearly R.
—	9 (*e*) Virginis	f	11	54	f	1 33	3	F. pl. E. followed by III. 91.
—	31 (1 *s*) Virg	p	12	28	n	1 1	2	F. S.
—	f. Clafs 7 Neb.	p	0	0	f	0 12	1	F. pS. R.
—	31 Bootis	p	118	45	f	0 38	2	vS.
—	32 (2 *d*) Virg	f	9	28	n	0 22	4	pB. pL. b towards the p fide.
—	31 Bootis	p	80	15			1	F. vS.
24	75 Leonis	f	70	0	n	0 26	2	F. mE.
—	— —	f	97	0	n	0 7	2	F. pL.
—	78 Virginis	p	7	50	f	1 34	4	pB. cL. nearly R. mbM.

II.

Fig. 13. Apresentação do catálogo de 1000 novas nebulosas e aglomerados estelares de William Herschel. O primeiro catálogo de objetos de céu profundo dos Herschel, publicado no Philosophical Transactions of the Royal Society of London em 1786. Créditos: Internet Archive.

Essa busca pela superioridade instrumental culminou com a construção do telescópio refletor de 1,2 m de abertura (48") e 12 metros de distância focal (40 pés), que durante muitos anos foi o maior telescópio de sua época. A construção foi patrocinada pelo Rei George III e durou de 1785 a 1789. No artigo em que descreve a construção do instrumento [25], William cita que em 26 de agosto de 1789, data que considera como a de conclusão da construção, o sexto satélite de Saturno foi descoberto utilizando o telescópio.

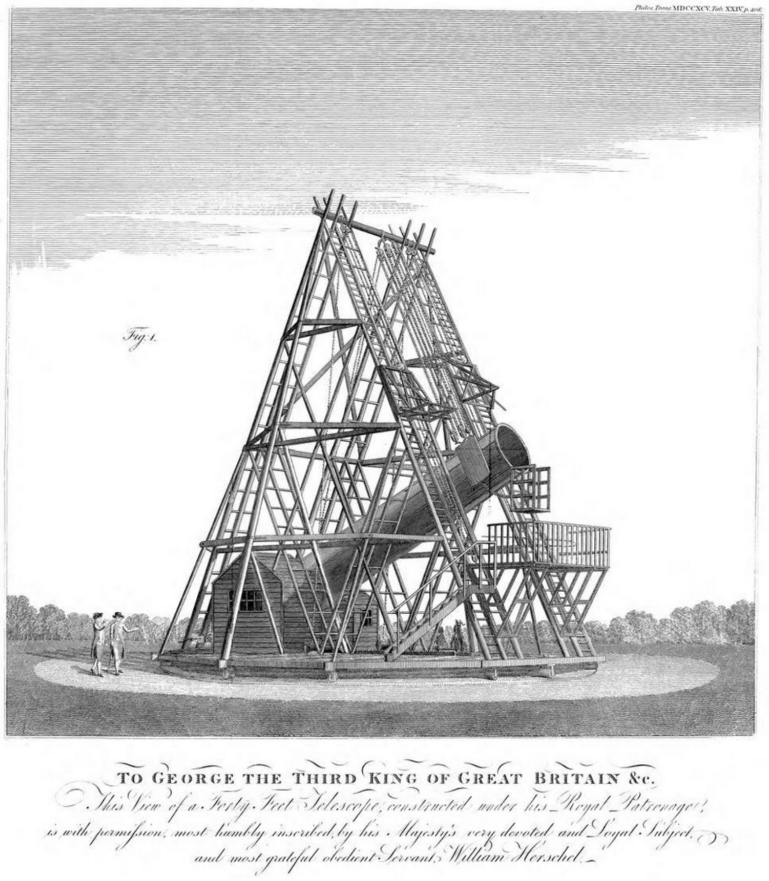
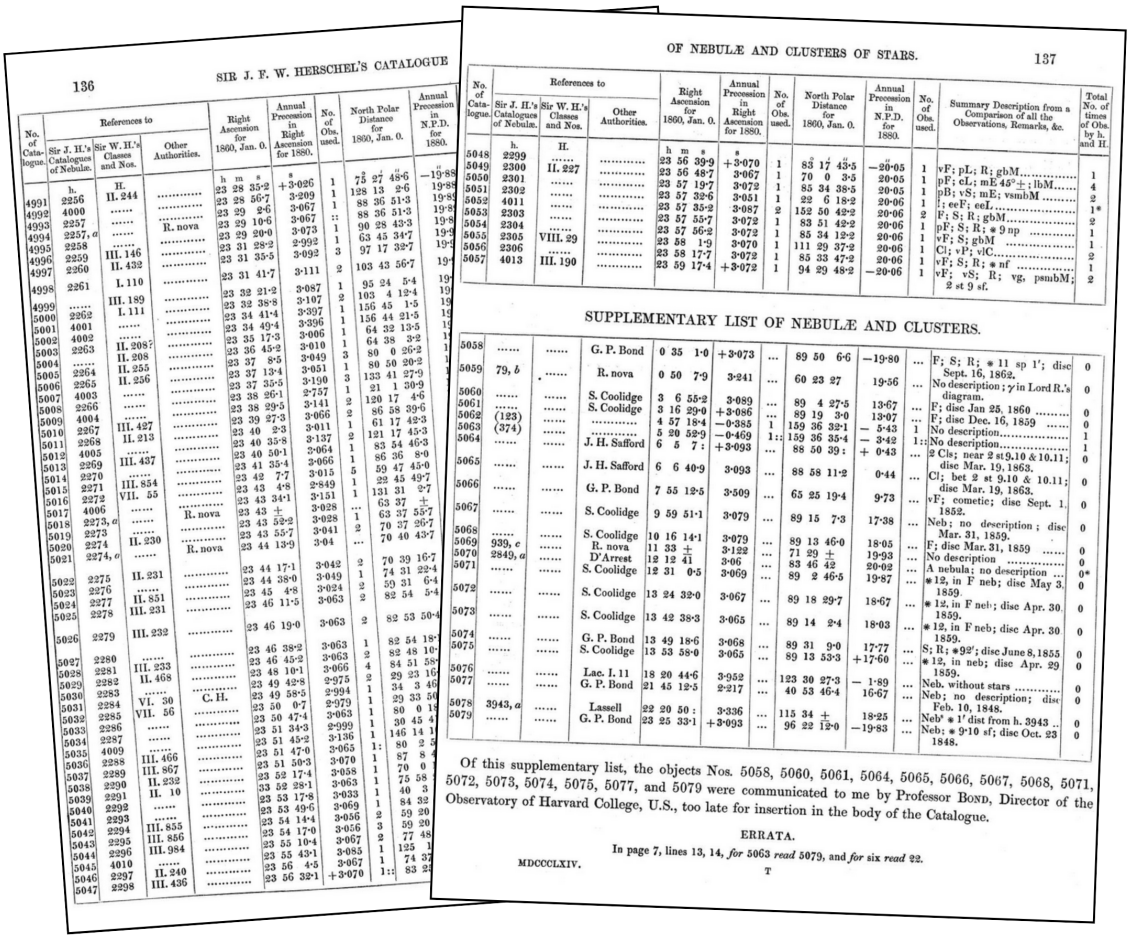


Fig. 14. Telescópio de 40 pés (12 m) de distância focal, o maior telescópio de sua época. Imagem publicada no Philosophical Transactions of the Royal Society of London (1795). Créditos: The Royal Society.

Munidos dos melhores telescópios de sua época, os irmãos Herschel, movidos principalmente pela obstinação de William, deixaram uma vasta produção de catálogos e descobertas. Mas sua cobertura do céu era limitada aos objetos visíveis das cidades de Bath e Windsor, na Inglaterra, de onde os Herschels realizaram suas observações. Foi John Frederick William Herschel (1792-1871), filho de William, que deu números finais ao catálogo de objetos nebulosos. Seguindo os passos do pai e da tia, John varreu os céus do hemisfério sul, a partir do Cabo da Boa Esperança, na África do Sul. Acrescentando suas descobertas às revisões dos catálogos anteriores, John cria um grande catálogo que pretende ser um *"catálogo geral de todas as nebulosas e aglomerados estelares conhecidos, em ambos os hemisférios, ordenado pela coordenada Ascenção Reta (A.R.) e com coordenadas atualizadas [...] que permita ao observador apontar seu instrumento para qualquer uma delas ou ao encontrar qualquer objeto dessa natureza reconhecer se é uma nova descoberta ou*

se trata-se de um objeto previamente observado"[24]. O *Catalogue of nebulæ and clusters of stars* (Fig. 15), de John F. W. Herschel, com 5079 objetos, foi publicado em 1864.



136 SIR J. F. W. HERSCHEL'S CATALOGUE

OF NEBULÆ AND CLUSTERS OF STARS. 137

SUPPLEMENTARY LIST OF NEBULÆ AND CLUSTERS.

Of this supplementary list, the objects Nos. 5058, 5060, 5061, 5064, 5065, 5066, 5067, 5068, 5071, 5072, 5073, 5074, 5075, 5077, and 5079 were communicated to me by Professor BOND, Director of the Observatory of Harvard College, U.S., too late for insertion in the body of the Catalogue.

ERRATA.

In page 7, lines 13, 14, *for* 5063 *read* 5079, and *for* six *read* 22.

MDCCCLXIV. T

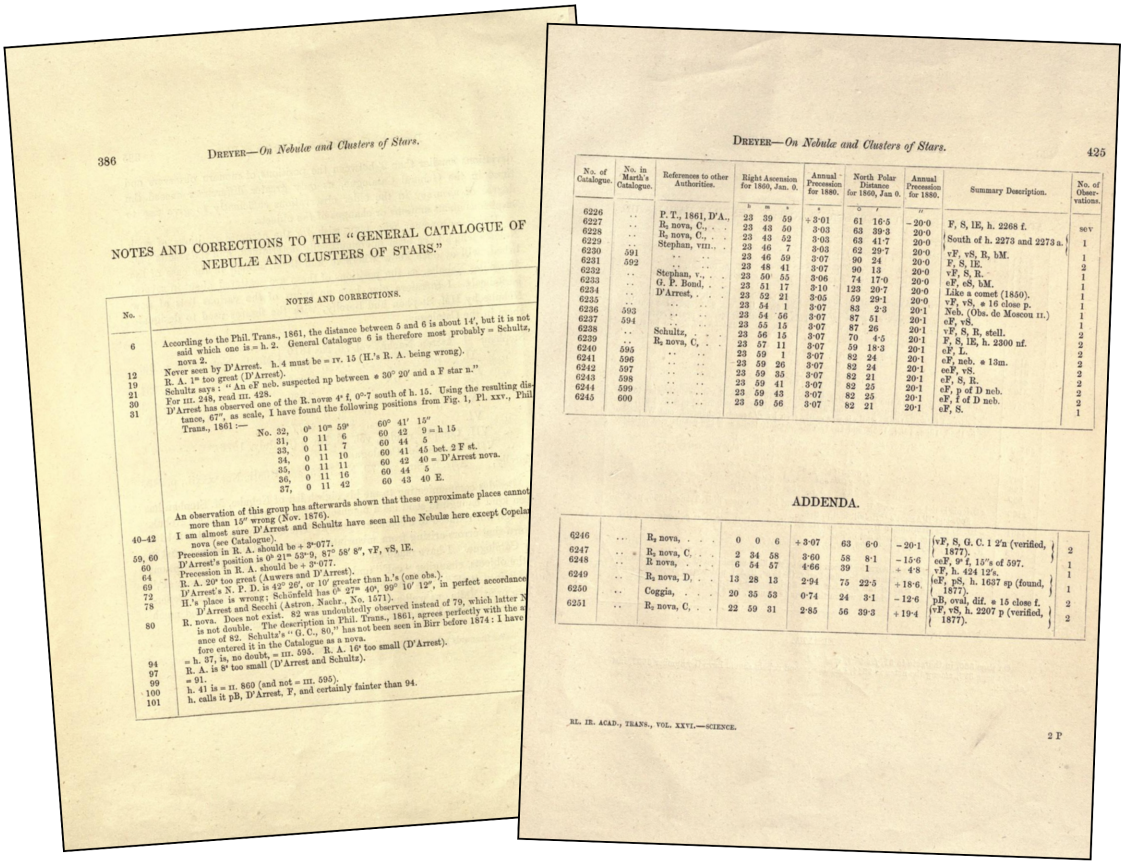
Fig. 15. O *Catálogo Geral de Nebulosas e Aglomerados de Estrelas*, de John F. W. Herschel, com 5079 objetos. Publicado em *Philosophical Transactions of the Royal Society* (1864). Créditos: The Royal Society.

A organização do Catálogo Geral era muito conveniente, com objetos listados por ordem crescente da coordenada Ascensão Reta, ou seja, o catálogo listava os objetos em sequência, de leste para oeste. De maneira similar à ordem adotada no catálogo estelar de Flamsteed.

[24] "[...]*extremely desirable to have presented in one work, without the necessity of turning over many volumes, a general catalogue of all the nebulæ and clusters of stars actually known, both northern and southern, arranged in order of right ascension and reduced to a common and sufficiently advanced epoch which may serve as a general index to them, and enable an observer at once to turn his instrument on any one of them, as well as to put it in his power immediately to ascertain whether any object of this nature which he may encounter in his observations is new, or should be set down as one previously observed.*"

No entanto, a adição de novos objetos a esse catálogo, com numeração posterior aos 5079 objetos originais, em um suplemento elaborado por John Louis Emil Dreyer (1852-1926) e publicado em 1878, quebra essa sequência.

Os novos objetos, publicados no *A supplement to Sir John Herschel's "General catalogue of nebulae and clusters of stars."* numerados de 5080 a 6245 formam uma nova sequência de leste para oeste. Além disso, nesta mesma publicação, um adendo com os objetos numerados de 6246 a 6251 também compõe uma sequência à parte.



386 DREYER—*On Nebulæ and Clusters of Stars.*

NOTES AND CORRECTIONS TO THE "GENERAL CATALOGUE OF NEBULÆ AND CLUSTERS OF STARS."

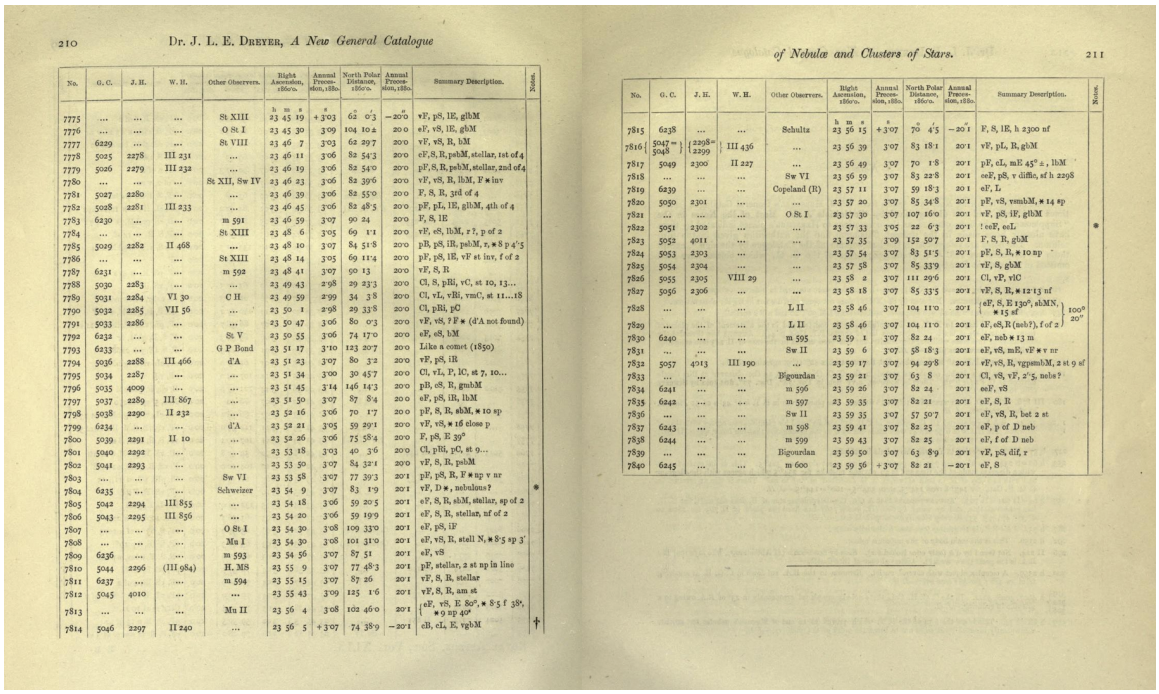
DREYER—*On Nebulæ and Clusters of Stars.* 425

ADDENDA.

Fig. 16. Suplemento ao Catálogo Geral de John F. W. Herschel, elaborado por J. L. E. Dreyer. O suplemento traz notas e correções e incorpora os objetos de número 5080 a 6251, após os 5079 objetos listados por John Herschel. Créditos: University of California Libraries/Internet Archive.

Em 1888, chegamos finalmente ao *New General Catalogue* (NGC)[26]. Uma nova expansão do *General Catalogue*, elaborada também por J. L. E. Dreyer, chegando a um total de 7840 objetos. Desta vez, Dreyer reinicia a numeração, colocando a totalidade do catálogo novamente em ordem crescente de Ascensão Reta. O NGC é, ainda hoje, um dos mais utilizados catálogos de objetos de céu profundo.

Assim como nos catálogos publicados anteriormente (e mesmo posteriormente), o NGC está organizado em colunas que trazem a numeração do objeto no próprio catálogo, a numeração em catálogos anteriores, as coordenadas celestes e as mudanças nessas coordenadas



210 Dr. J. L. E. Dreyer, *A New General Catalogue*

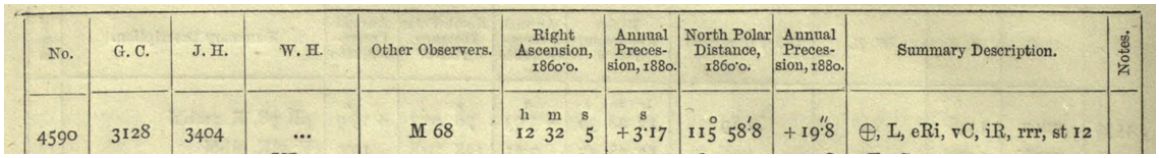
No.	G. C.	J. H.	W. H.	Other Observers.	Right Ascension, 1860·0.	Annual Precession, 1880.	North Polar Distance, 1860·0.	Annual Precession, 1880.	Summary Description.	Notes.
					h m s	s	° ′	″		
7775	...	...	...	St XIII	23 45 19	+3·03	62 0·3	−20·0	vF, pS, lE, glbM	
7776	...	...	...	O St I	23 45 30	3·09	104 10·2	20·0	eF, vS, lE, glbM	
7777	6239	...	...	St VIII	23 46 7	3·03	62 29·7	20·0	vF, vS, R, bM	
7778	5025	2278	III 231	...	23 46 11	3·06	82 54·3	20·0	cF, S, R, pbM, stellar, 1st of 4	
7779	5026	2279	III 232	...	23 46 19	3·06	82 54·0	20·0	pF, S, R, pbM, stellar, 2nd of 4	
7780	...	...	...	St XII, Sw IV	23 46 23	3·06	82 39·6	20·0	vF, vS, R, lhM, F * inv	
7781	5027	2280	...	...	23 46 39	3·06	82 55·0	20·0	F, S, R, 3rd of 4	
7782	5028	2281	III 233	...	23 46 45	3·06	82 48·5	20·0	pF, pL, lE, glbM, 4th of 4	
7783	6230	...	...	m 591	23 46 59	3·07	90 24	20·0	F, S, lE	
7784	...	...	...	St XIII	23 48 6	3·05	69 1·1	20·0	vF, eS, lbM, r f, p of 2	
7785	5029	2282	II 468	...	23 48 10	3·07	84 51·8	20·0	pB, pS, iR, pbM, r, * 8 p 4·5	
7786	...	...	...	St XIII	23 48 14	3·05	69 11·4	20·0	pF, pS, lE, vF st inv, f of 2	
7787	6231	...	...	m 592	23 48 41	3·07	90 13	20·0	vF, S, R	
7788	5030	2283	...	...	23 49 43	2·98	29 23·3	20·0	Cl, S, pRi, vC, st 10, 13...	
7789	5031	2284	VI 30	C H	23 49 59	2·99	34 3·8	20·0	Cl, vL, vBi, vmC, st 11...18	
7790	5032	2285	VII 56	...	23 50 1	2·98	29 33·8	20·0	Cl, pRi, pC	
7791	5033	2286	...	...	23 50 47	3·06	80 0·3	20·0	vF, vS, 7 F * (d'A not found)	
7792	6232	...	...	St V	23 50 55	3·06	74 17·0	20·0	eF, eS, bM	
7793	6233	...	...	G P Bond	23 51 17	3·10	123 20·7	20·0	Like a comet (1850)	
7794	5036	2288	III 466	d'A	23 51 23	3·07	80 3·2	20·0	vF, pS, iR	
7795	5034	2287	...	...	23 51 34	3·00	30 45·7	20·0	Cl, vL, P, lC, st 7, 10...	
7796	5035	4009	...	...	23 51 45	3·14	146 14·3	20·0	pB, eS, R, gmbM	
7797	5037	2289	III 867	...	23 51 50	3·07	87 8·4	20·0	eF, pS, iB, lbM	
7798	5038	2290	II 232	...	23 52 16	3·06	70 1·7	20·0	pF, S, R, sbM, * 10 sp	
7799	6234	...	...	d'A	23 52 21	3·05	59 29·1	20·0	vF, vS, * 16 close p	
7800	5039	2291	II 10	...	23 52 26	3·06	75 58·4	20·0	F, pS, F 39°	
7801	5040	2292	...	...	23 53 18	3·03	40 3·6	20·0	Cl, pRi, pC, st 9...	
7802	5041	2293	...	...	23 53 50	3·07	84 32·1	20·0	vF, S, R, pbM	
7803	...	...	...	Sw VI	23 53 58	3·07	77 39·3	20·1	pF, pS, R, F * np v nr	
7804	6235	...	...	Schweizer	23 54 9	3·07	83 1·9	20·1	vF, D *, nebulous?	*
7805	5042	2294	III 855	...	23 54 18	3·06	59 20·5	20·1	eF, S, R, sbM, stellar, sp of 2	
7806	5043	2295	III 856	...	23 54 20	3·06	59 19·9	20·1	eF, S, R, stellar, nf of 2	
7807	...	...	...	O St I	23 54 30	3·08	109 33·0	20·1	eF, pS, iF	
7808	...	...	...	Mu I	23 54 30	3·08	101 31·0	20·1	eF, vS, R, stell N, * 8·5 sp 3'	
7809	6236	...	...	m 593	23 54 56	3·07	87 5·1	20·1	eF, vS	
7810	5044	2296	(III 984)	H, MS	23 55 9	3·07	77 48·3	20·1	pF, stellar, 2 st np in line	
7811	6237	...	...	m 594	23 55 15	3·07	87 2·6	20·1	vF, S, R, stellar	
7812	5045	4010	...	...	23 55 43	3·09	125 1·6	20·1	vF, S, R, am st	
7813	...	...	...	Mu II	23 56 4	3·08	102 46·0	20·1	eF, vS, E 80°, * 8·5 f 38', * 9 np 40'	
7814	5046	2297	II 240	...	23 56 5	+3·07	74 38·9	−20·1	cB, cL, E, vgbM	†

of Nebulæ and Clusters of Stars. 211

No.	G. C.	J. H.	W. H.	Other Observers.	Right Ascension, 1860·0.	Annual Precession, 1880.	North Polar Distance, 1860·0.	Annual Precession, 1880.	Summary Description.	Notes.
					h m s	s	° ′	″		
7815	6238	...	...	Schultz	23 56 15	+3·07	70 4·5	−20·1	F, S, lE, h 2300 nf	
7816	5047 = 5048	2298 = 2299	III 436	...	23 56 39	3·07	83 18·1	20·1	vF, pL, R, glbM	
7817	5049	2300	II 227	...	23 56 49	3·07	70 1·8	20·1	pF, cL, mE 45° ±, lbM	
7818	...	...	...	Sw VI	23 56 59	3·07	83 22·8	20·1	eeF, pS, v diffic, sf h 2298	
7819	6239	...	...	Copeland (R)	23 57 11	3·07	59 18·3	20·1	eF, L	
7820	5050	2301	...	...	23 57 20	3·07	85 34·8	20·1	pF, vS, vmbM, * 14 sp	
7821	...	...	...	O St I	23 57 30	3·07	107 16·0	20·1	vF, pS, iF, glbM	
7822	5051	2302	...	...	23 57 33	3·05	22 6·3	20·1	eeF, eeL	*
7823	5052	4011	...	...	23 57 35	3·09	152 50·7	20·1	F, S, R, glbM	
7824	5053	2303	...	...	23 57 54	3·07	83 51·5	20·1	pF, S, R, * 10 np	
7825	5054	2304	...	...	23 57 58	3·07	85 33·9	20·1	vF, S, glbM	
7826	5055	2305	VIII 29	...	23 58 2	3·07	111 29·6	20·1	Cl, vF, vlC	
7827	5056	2306	...	...	23 58 18	3·07	85 33·5	20·1	vF, S, R, * 12·13 nf	
7828	...	...	...	L II	23 58 46	3·07	104 11·0	20·1	eF, S, E 130°, sbMN, * 15 sf	100° 20″
7829	...	...	...	L II	23 58 46	3·07	104 11·0	20·1	eF, eS, R (neb?), f of 2	
7830	6240	...	...	m 595	23 59 1	3·07	82 24	20·1	eF, neb * 13 m	
7831	...	...	...	Sw II	23 59 6	3·07	58 18·3	20·1	eF, vS, mR, vF * v nr	
7832	5057	4013	III 190	...	23 59 17	3·07	94 29·8	20·1	vF, vS, R, vgpmbM, 2 st 9 sf	
7833	...	...	...	Bigourdan	23 59 21	3·07	63 8	20·1	Cl, vS, vF, 2', 5, nebs?	
7834	6241	...	...	m 596	23 59 26	3·07	82 24	20·1	eeF, vS	
7835	6242	...	...	m 597	23 59 35	3·07	82 21	20·1	eF, S, R	
7836	...	...	...	Sw II	23 59 35	3·07	57 50·7	20·1	eF, vS, R, bet 2 st	
7837	6243	...	...	m 598	23 59 41	3·07	82 25	20·1	eF, p of D neb	
7838	6244	...	...	m 599	23 59 43	3·07	82 25	20·1	eF, f of D neb	
7839	...	...	...	Bigourdan	23 59 50	3·07	63 8·9	20·1	vF, pS, dif, r	
7840	6245	...	...	m 600	23 59 56	+3·07	82 21	−20·1	eF, S	

Fig. 17. New General Catalogue (NGC) de J. L. E. Dreyer, com 7840 objetos de céu profundo, publicado em 1888. Créditos: The Royal Astronomical Society/Internet Archive.

causadas pela precessão do eixo da Terra e um conjunto de abreviaturas que descrevem a natureza e a aparência do objeto. Como exemplo, a Fig. 18 mostra a linha correspondente ao objeto NGC 4590.



No.	G. C.	J. H.	W. H.	Other Observers.	Right Ascension, 1860·0.	Annual Precession, 1880.	North Polar Distance, 1860·0.	Annual Precession, 1880.	Summary Description.	Notes.
					h m s	s	° ′	″		
4590	3128	3404	...	M 68	12 32 5	+3·17	115 58·8	+19·8	⊕, L, eRi, vC, iR, rrr, st 12	

Fig. 18. Uma das linhas do New General Catalogue, correspondente ao objeto NGC 4590. Créditos: The Royal Astronomical Society/Internet Archive.

Na coluna *Other Observers* vemos que o objeto listado como NGC 4590 corresponde ao objeto listado por Messier como M68. Na coluna *Summary Description* encontramos a sequência "⊕, L, eRi, vC, iR, rrr, st 12" que, conforme legenda apresentada no catálogo, nos informa se tratar de um aglomerado globular (⊕), grande (L), extremamente rico em estrelas(eRi), muito compacto (vC), de forma redonda irregular (iR), com estrelas muito bem resolvidas (rrr), com estrelas de magnitude até 12 (st 12).

1.6 Magnitude Aparente

Os catálogos de Tycho, Bayer, Flamsteed e demais catálogos estelares produzidos a partir do Séc. XVII preservaram a tradição de Hiparcos e Ptolomeu, classificando as estrelas conforme seu brilho em uma escala de *grandezas*, com as estrelas mais brilhantes do céu correspondendo à **primeira grandeza** e as estrelas mais tênues, no limite da percepção visual, correspondendo à sexta grandeza.

A luminosidade assim percebida é a **magnitude aparente** da estrela, pois leva em consideração apenas o fluxo luminoso observado e não a distância do objeto. O que queremos dizer com isso é que um objeto com brilho intrínseco muito alto, mas posicionado a uma grande distância, pode parecer menos luminoso que um objeto menos brilhante, mas posicionado mais próximo do observador.

Derek Jones descreve em *Norman Pogson and the Definition of Stellar Magnitude*[27] as iniciativas dos Herschels e de astrônomos do Séc. XIX, como William Rutter Dawes (1799-1868) e Manuel John Johnson (1805-1859), buscando estabelecer uma relação matemática consistente para descrever a razão entre o fluxo luminoso de objetos de diferentes magnitudes, até chegarmos ao sistema atual, sugerido por Norman Pogson.

Pogson adotou em 1856, em uma tabela de efemérides de asteroides publicada na *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*[28], uma razão de exatamente 2,512 vezes entre os fluxos de dois objetos com uma magnitude de diferença. Ou seja, o telescópio recebe 2,512 vezes mais luz de uma estrela com magnitude 1 do que de uma estrela com magnitude 2.

A escala de magnitudes assim estabelecida é, portanto, uma escala comparativa entre fluxos, onde cada salto de uma magnitude corresponderá sempre a uma razão de 2,512 vezes entre os fluxos das estrelas comparadas[25].

A escala de magnitudes varia em progressão aritmética, enquanto o fluxo varia em progressão geométrica.

Uma diferença de duas magnitudes corresponde então a uma razão de $2,512 \times 2,512 = 6,310$ vezes entre os fluxos comparados.[26]

[25] Pogson aponta a conveniência da escolha da razão $R = 2,512$ na simplificação do termo

$$\left(\frac{\log R}{2}\right)^{-1},$$

que assume o valor 5.

[26] De forma geral, a razão entre os fluxos F_1 e F_2 de duas estrelas de magnitude m_1 e m_2 é

$$\frac{F_1}{F_2} = 2,512^{(m_2 - m_1)}.$$

De acordo com esta definição, uma estrela de magnitude 1 é 100 vezes mais brilhante que uma de magnitude 6 (uma diferença de 5 magnitudes). Esta é uma relação que já havia sido sugerida por John Herschel.

$$\frac{F_1}{F_2} = 2,512^{6-1} = 2,512^5 \approx 100.$$

Este sistema tem o mérito de preservar aproximadamente o sistema tradicional de classificação do brilho estelar aparente, mantendo a magnitude 6 como o limite visual e estabelecendo uma relação matemática que define a razão entre fluxos luminosos a partir de diferenças de magnitude.

Também mantendo a tradição, um valor de magnitude numericamente maior significa um menor brilho. Nesta escala, a estrela Vega, na constelação de Lira, tem magnitude 0. Objetos menos brilhantes que Vega apresentam valores positivos de magnitude. Objetos mais brilhantes apresentam valores negativos. A Tab. 1 apresenta objetos com valores de magnitude acima e abaixo da estrela Vega.

Tabela 1. Magnitudes visuais aparentes de alguns objetos astronômicos

Magnitude	**Objeto**
-26	Sol
-12	Lua Cheia
-4	Vênus, em máximo brilho
$-2{,}67$	Júpiter, durante a oposição
$-1{,}46$	*Sirius* (α Canis Majoris)
0,03	**Vega** (α Lyrae)
0,91	Antares (α Sco)
3,59	*Ginan*/Intrometida (ε Crucis)
5,62	Urano, durante a oposição
11	*Proxima Centauri*

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Sol, extremamente mais brilhante, corresponde à magnitude -26. O planeta Urano, com magnitude 5,62, está no limiar da visibilidade a olho nu. *Proxima Centauri*, a estrela mais próxima de nosso Sistema Solar, com magnitude 11, é 100 vezes menos luminosa que o limite de visibilidade a olho nu.[27]

[27]
$$\frac{F_{\text{limite}}}{F_{\text{Proxima}}} = R^{(M_{\text{Proxima}} - M_{\text{limite}})} = 2{,}512^5 = 100.$$

1.7 O Céu Moderno

Chegamos ao Séc. XX com dois novos grandes planetas descobertos[28], com estrelas (incluindo estrelas duplas e estrelas variáveis) e objetos de céu profundo catalogados nos dois hemisférios celestes e com dois sistemas de designação[29] para estrelas mais brilhantes.

No entanto, inexistia uma padronização para a definição das constelações e diferentes atlas acumulavam-se e concorriam entre si, agrupando em novas constelações as estrelas não associadas às constelações clássicas. Em alguns casos, essas novas constelações buscavam homenagear patronos e monarcas. A Fig. 19 mostra um desses exemplos, com a constelação Harpa de George, incluída por Johann Elert Bode (1747-1826) em seu atlas *Uranographia* (1801) como homenagem ao Rei George III.

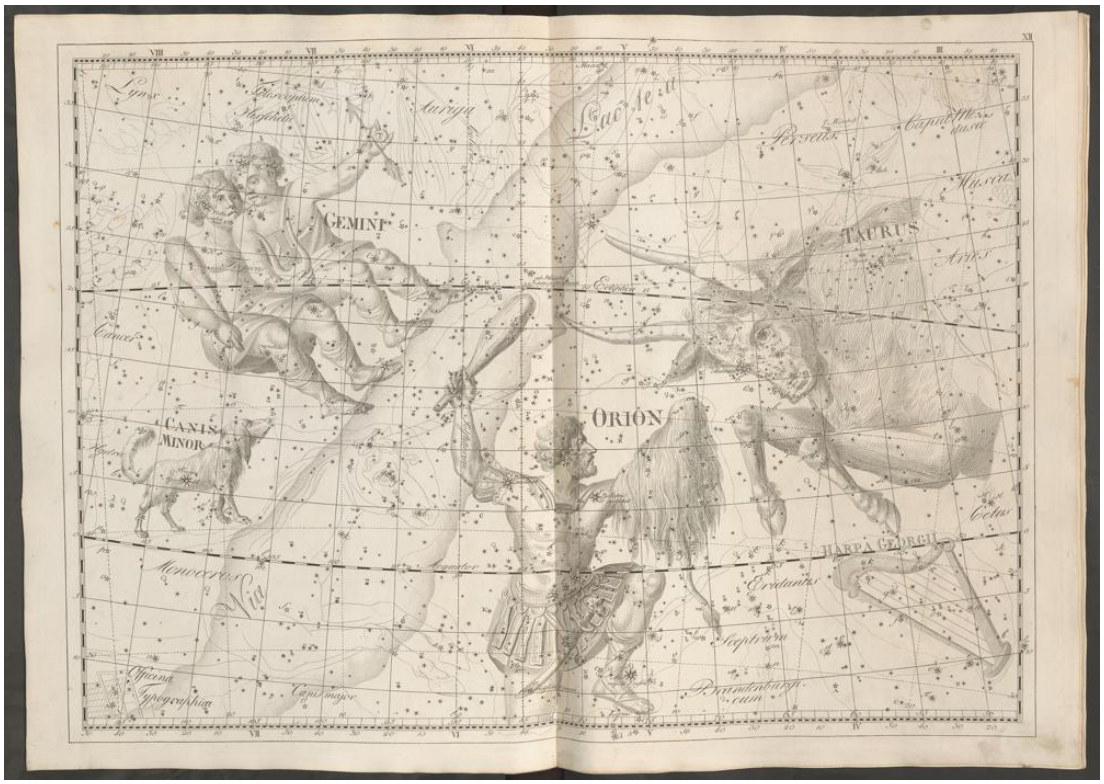


Fig. 19. Constelações de Órion, Touro, Gêmeos e Cão Menor no atlas Uranographia (1801) de Johann Elert Bode. No canto inferior direito aparece a constelação Harpa de George, não adotada pela IAU entre as constelações atuais. Créditos: ETH-Bibliothek Zürich

[28] Perturbações na órbita Urano (descoberto em 13 de março de 1781 por William Herschel), levaram à hipótese da existência de um oitavo planeta. A posição do suposto planeta foi calculada independentemente por Urbain Le Verrier(1711-1877), na França, e por John Couch Adams (1819-1892), na Inglaterra. O planeta Netuno foi observado pela primeira vez em 23 de setembro de 1846, por Johhan Gottfried Gale (1812-1910), no Observatório de Berlim, a menos de 1º da posição prevista por Le Verrier. Além de Urano e Netuno, uma nova classe de objetos do Sistema Solar havia sido descoberta: os asteroides.

[29] As designações de Bayer e Flamsteed.

A matéria passa a ser pacificada com o surgimento da União Astronômica Internacional (IAU), uma entidade fundada em 1919, com a missão de promover e salvaguardar a ciência da Astronomia em todos os seus aspectos, incluindo pesquisa, comunicação, educação e desenvolvimento, através da cooperação internacional.

Entre as muitas atribuições da IAU está a padronização de sistemas de coordenadas astronômicas e o estabelecimento de regras para nomenclatura de corpos celestes e de formações nas superfícies desses corpos.

Em sua primeira Assembleia Geral, em 1922, a IAU estabelece uma lista definitiva com 88 constelações, padronizando seus nomes e um sistema de abreviaturas com três letras (A lista completa de constelações, com suas traduções, abreviações e genitivos latinos pode ser encontrada nos apêndices, na pág. 259).

A lista da IAU, tornada oficial, inclui as 48 constelações gregas clássicas apresentadas por Ptolomeu no Almagesto. Uma delas, o Navio Argo (*Argo Navis*), dividida no Séc. XVII por Nicolas Louis de Lacaille (1713-1762) em três novas constelações: Popa (*Puppis*), Quilha (*Carina*) e Vela. Inclui também 7 novas constelações criadas por Johannes Hevelius (1611–1687)[30], 14 constelações austrais criadas por Lacaille[31] e 12 constelações austrais criadas por Pieter Dirkszoon Keyser e Frederick de Houtman[32], 4 constelações adicionadas por Petrus Plancius (1552–1622)[33] e, por fim, uma constelação[34] considerada pelos gregos como parte do Leão e representada separadamente pelo matemático e cartógrafo alemão Caspar Vopel (1511-1561) em 1536 e incluída pelo cartógrafo holandês Gerardus Mercator (1512–1594) em seu globo celeste de 1551.[29]

Tabela 2. Origem das constelações tornadas oficiais pela Assembleia Geral da IAU de 1922

Origem	**Núm. de constelações**
Ptolomeu	47
Caspar Vopel e Mercator	1
Keyser e de Houtman	12
Petrus Plancius	4
Hevelius	7
Lacaille	14
Navio Argos (Lacaille)	3
Total	**88**

Fonte: RIDPATH, I. *Constellations*. Disponível em: http://www.ianridpath.com/constellations1.html. Acesso em: 16 mar. 2025.

[30] Cães de Caça, Lagarto, Leão Menor, Lince, Escudo, Sextante, Raposinha.

[31] Máquina Pneumática, Cinzel, Compasso, Fornalha, Relógio, Mesa, Microscópio, Esquadro, Oitante, Pintor, Bússola, Retículo, Escultor, Telescópio.

[32] Ave-do-Paraíso, Camaleão, Dourado, Grou, Hidra Macho, Índio, Mosca, Pavão, Fênix, Triângulo Austral, Tucano, Peixe Voador.

[33] Camelopardalis, Columba, Crux, Monoceros.

[34] Cabeleira de Berenice (*Coma Berenices*)

O uso científico das constelações, no entanto, requer não apenas a definição de uma lista oficial de constelações a ser adotada, mas também o estabelecimento de limites claros que permitam designar sem ambiguidade a constelação em que uma estrela variável foi descoberta, por exemplo.

Em 1925, na segunda Assembleia Geral da IAU, em Cambridge (Inglaterra), um sistema de bordas para as constelações, desenhadas ao longo de linhas de ascensão reta e de círculos de declinação (equivalentes aos meridianos e paralelos na Terra) foi proposto por Eugène Delporte, astrônomo do Observatório Real de Bruxelas. A IAU acatou a sugestão, designando Delporte para a tarefa. Os novos limites foram aprovados na Assembleia Geral de 1928, em Leiden (Holanda), e publicados em 1930 em *Délimitation Scientifique des Constellations* e no *Atlas Céleste*.

Com essas publicações, as constelações deixam de ser definidas como um grupo de estrelas, ou uma figura no céu, e passam a corresponder a uma região com contornos bem delimitados. Como exemplo, a constelação do Cruzeiro do Sul (*Crux*) corresponde a toda área em verde na Fig. 20 e não apenas à figura em forma de cruz.

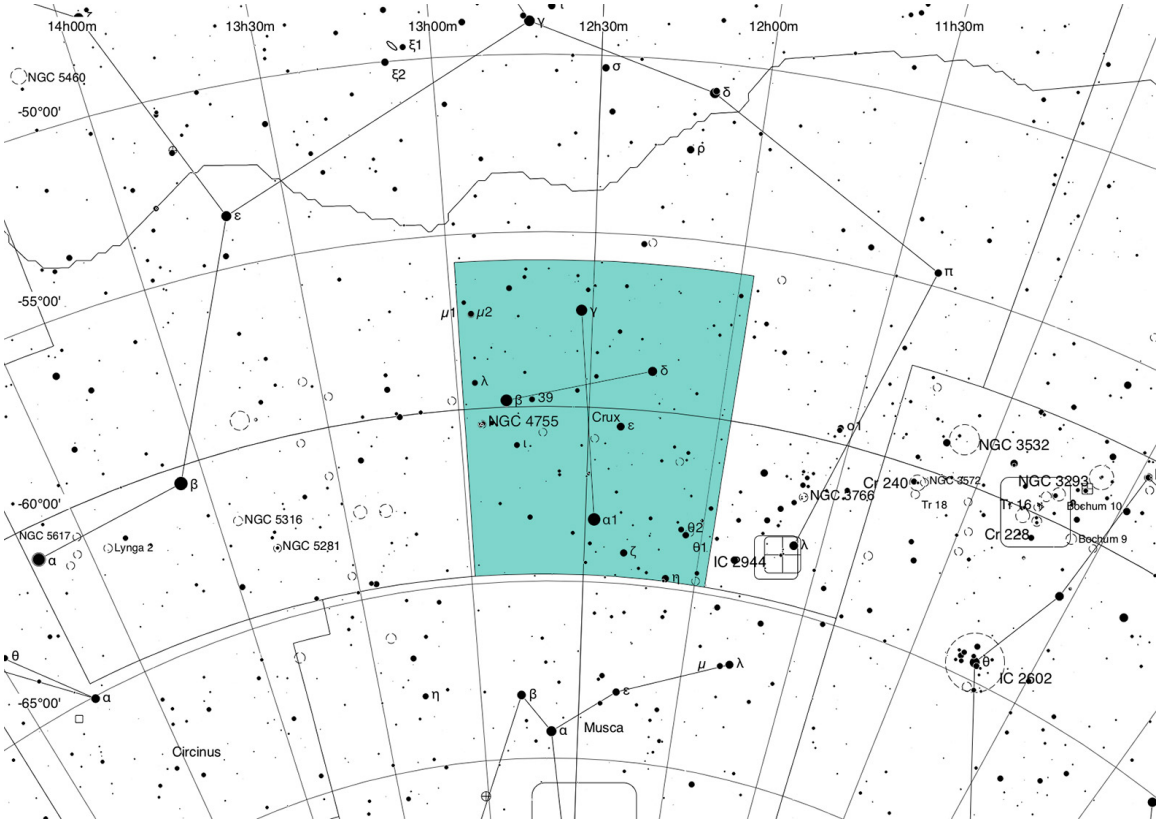


Fig. 20. A constelação do Cruzeiro do Sul. Carta gerada no programa *SkyCharts*.

Explorar o céu a olho nu é um excelente primeiro passo em nossa jornada rumo a uma convivência mais íntima com o céu. É a partir desse reconhecimento que saberemos para onde apontar nossos olhos, nossos binóculos e nossos telescópios.

Aplicativos para dispositivos móveis são bons aliados para identificar constelações e objetos celestes, mas ter uma visão mais ampla, aumentando sua consciência situacional, pode acelerar o desenvolvimento da intimidade com o céu, suas regularidades e seus objetos. Essa visão mais ampla pode ser obtida com cartas impressas do céu ou com aplicativos para computadores, capazes de exibir o céu em uma tela de maiores dimensões.

Os aplicativos *Stellarium* (Fig. 21) e *Sky Charts (Cartes du Ciel)* (Fig. 22) são ferramentas gratuitas, disponíveis para os principais sistemas operacionais contemporâneos e oferecem uma visão de todo o céu, com recursos avançados para o planejamento de observações.

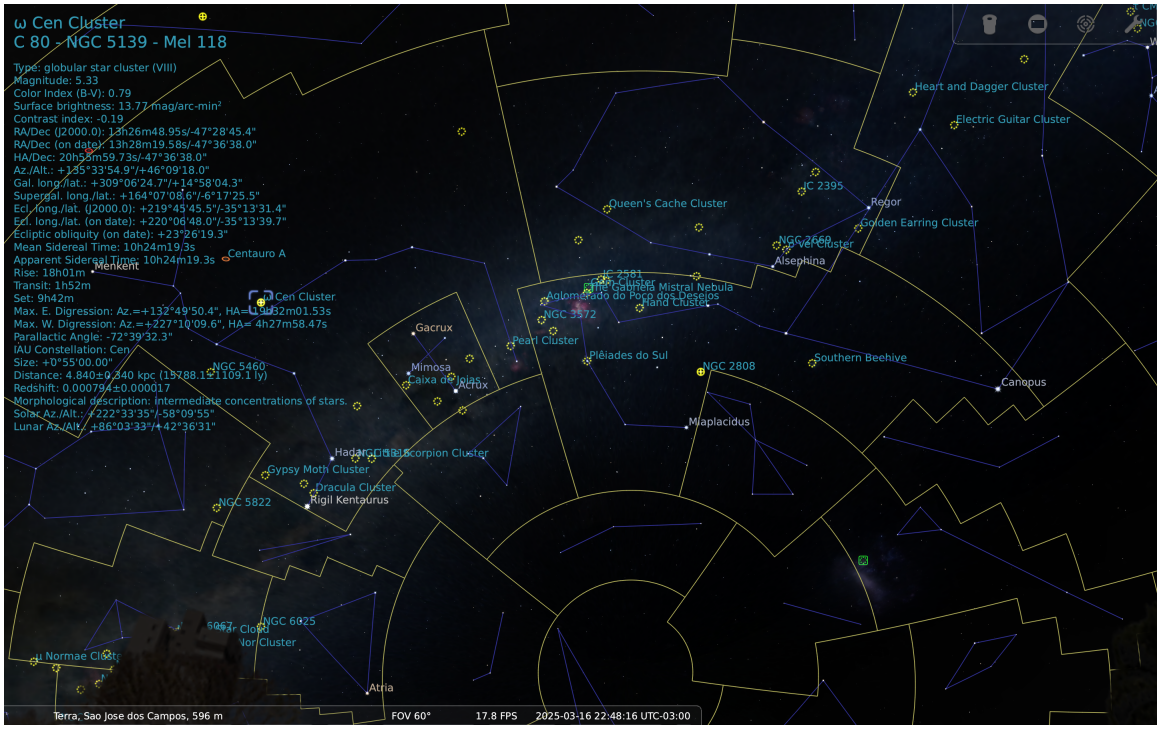


Fig. 21. Interface do programa Stellarium. Na tela, uma porção do céu austral, exibindo objetos do céu profundo e as bordas das constelações. Informações sobe o aglomerado globular ω Centauri (NGC 5139) estão visíveis na tela.

O Stellarium [30] é um planetário desktop de código aberto para os sistemas operacionais Linux/Unix, Windows e macOS. Ele simula de maneira realista o céu visto a olho nu ou através de binóculos ou telescópios. Iniciantes podem utilizar sem grandes dificuldades suas funções básicas, enquanto usuários avançados podem se beneficiar de recursos poderosos de automação das simulações e de integração com telescópios. Seu desenvolvimento foi iniciado por Fabien Chéreau em 2001 e o projeto hoje está hospedado na plataforma Github.

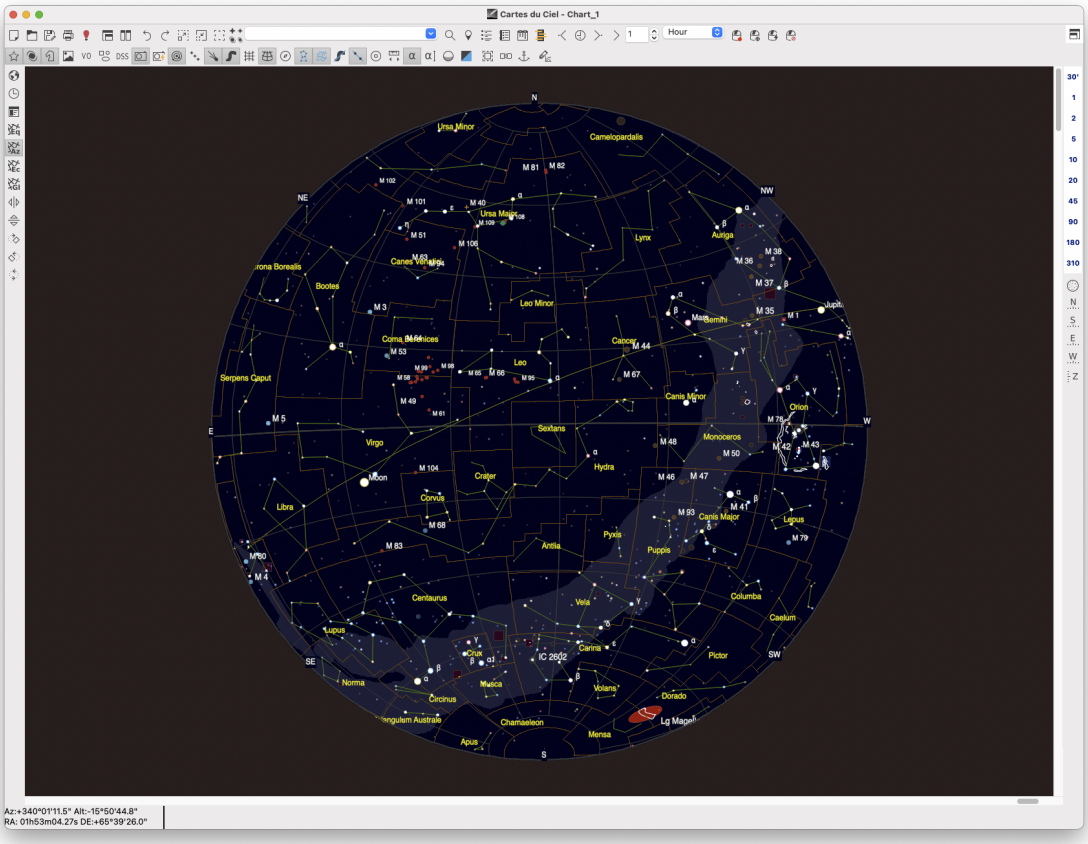


Fig. 22. Interface do programa Sky Charts (Cartes du Ciel).

EM CONSTRUÇÃO - DESCULPE-NOS O TRANSTORNO.

2. Coordenadas Celestes

2.1 Coordenadas Geográficas

Para localizar um ponto na superfície de uma esfera, seja ela a esfera celeste ou o globo terrestre, precisamos definir um sistema de coordenadas que permita, sem ambiguidade, endereçar cada ponto nessa superfície esférica.

Na Terra, apesar de estarmos lidando com um objeto tridimensional (o globo terrestre), precisamos definir apenas duas coordenadas para identificar, inequivocamente, qualquer ponto confinado à sua superfície.

A definição desse sistema de coordenadas geográficas[35] vale-se da rotação terrestre para determinar um plano fundamental: o equador. O plano do equador é perpendicular ao eixo de rotação da Terra e divide o planeta em dois hemisférios - norte e sul.

A primeira coordenada, a ***latitude***, define círculos paralelos ao equador (Fig. 23). A coordenada latitude varia de 0°, no equador, até $\pm 90°$ nos polos, com valores positivos correspondendo ao hemisfério norte e negativos, ao hemisfério sul. Conhecendo a latitude, sabemos a distância, em graus, do ponto até o equador.

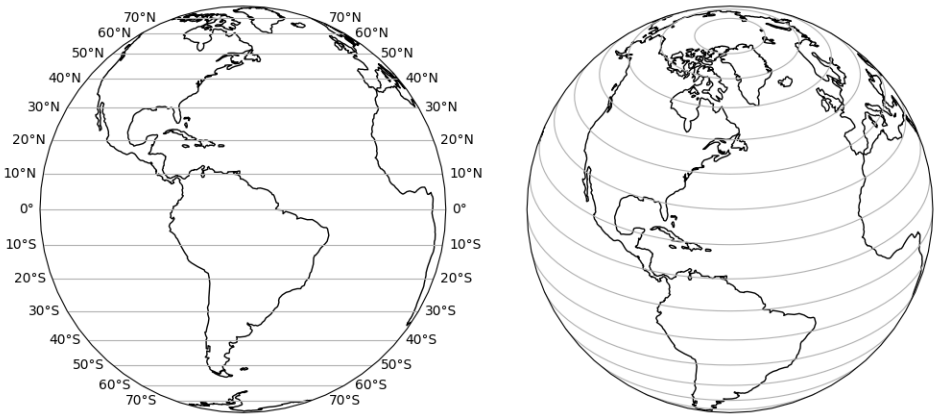


Fig. 23. Paralelos marcando latitudes a cada 10°. O paralelo 0° corresponde ao equador terrestre. Gráfico gerado com a biblioteca Cartopy. Créditos: Wandeclayt Melo.

Precisamos agora de uma segunda coordenada, a ***longitude***, para determinar completamente a posição de um ponto. A longitude é definida pelos meridianos, linhas que ligam

[35] De acordo com o *Explanatory supplement to the Astronomical almanac[31]: "O termo coordenadas geográficas refere-se à longitude e latitude terrestres quando determinadas por observações astronômicas em relação ao polo celeste e ao meridiano local, considerando a vertical local; e à altitude acima do geoide, frequentemente denominada altitude acima do nível médio do mar. Os termos coordenadas astronômicas e coordenadas terrestres também são empregados para essas coordenadas."*

os polos norte e sul, cruzando perpendicularmente o equador.

A longitude varia de 0°, no meridiano que passa por Greenwich (Inglaterra), até $\pm 180°$, com valores positivos a leste e negativos a oeste (Fig. 24)

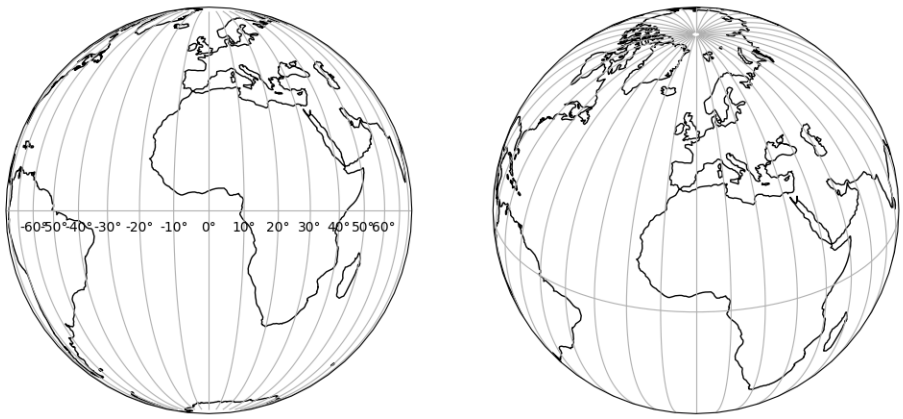


Fig. 24. Meridianos espaçados de 10° a partir do meridiano central. Gráfico gerado com a biblioteca Cartopy. Créditos: Wandeclayt Melo.

Mas, enquanto o equador - a origem da coordenada latitude - é definido por uma referência bem estabelecida (o plano perpendicular ao eixo de rotação e que divide a Terra em dois hemisférios), a origem para a coordenada longitude é uma escolha arbitrária.

2.2 O Meridiano Principal

Até o Séc. XIX, cartas de navegação usavam múltiplos meridianos de origem, não havendo uma padronização internacional para a origem da coordenada longitude. Historicamente, a determinação de uma longitude de referência e a determinação da hora local são realizadas por métodos astronômicos, observando e cronometrando a passagem de astros de coordenadas celestes conhecidas sobre o meridiano local.

Telescópios especiais, conhecidos como *círculos meridianos* [36], foram projetados especialmente para este tipo de medida. Estes telescópios possuem um único eixo, movendo-se apenas em elevação, mantendo fixo o azimute, alinhado com a direção norte-sul. A escolha de um meridiano principal passa então pela escolha de um observatório de referência, capaz de realizar as medidas de tempo e posição necessárias.

[36] No Brasil, o Observatório Abrahão de Moraes (OAM) do Instituto Astronômico e Geofísico (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), em Valinhos (SP), recebeu um círculo meridiano, instalado em 1975 e que operou em conjunto com um instrumento similar no Observatório de Bourdeax, na França.

À necessidade de um meridiano principal comum, somava-se também a necessidade de um padrão de hora e data universal, motivada pelo desenvolvimento das telecomunicações através da disseminação da telegrafia.

O meridiano que passa pela luneta meridiana de Airy[37], no Observatório Real de Greenwich (Inglaterra), foi proposto como meridiano principal na *International Meridian Conference*[32], em 1884 em Washington, D.C. (EUA). A Conferência foi um congresso intergovernamental, a convite do Governo dos Estados Unidos "*com o propósito de estabelecer um meridiano apropriado a ser empregado como zero comum de longitude e como padrão para a medição do tempo em todo o globo.*" [38].

Um argumento pragmático pesava em favor de Greenwich: estimava-se que 72% do comércio marítimo mundial, em volume, e 65%, em número de embarcações, utilizavam cartas náuticas que referenciavam o meridiano inglês.

A conferência contou com a presença de 41 delegados de 25 nações, incluindo o Brasil, representado pelo diretor do Observatório Imperial, Dr. Luis Cruls.

Em seu ato final (Fig. 25), a recomendação para a adoção de um único meridiano principal, em lugar dos múltiplos meridianos iniciais adotados à época, foi aprovada por unanimidade.

Em seguida, foi aprovada a proposta de adoção do meridiano de Greenwich como a origem das longitudes. A votação desta resolução, no entanto, teve duas abstenções importantes, a do Brasil e a da França.

O representante brasileiro, Luis Cruls, justificou que suas instruções o permitiam participar das discussões, mas não o autorizavam a comprometer o governo com uma decisão vinculativa quanto à escolha de um meridiano. Pela parte francesa, a abstenção foi motivada pela oposição à adesão a um meridiano central que não fosse neutro e imparcial. Em acaloradas discussões, registradas na ata do evento, a delegação francesa, composta pelo astrônomo Jules Jansen[39] e pelo cônsul Alexis Lefaivre[40], propunha:

> "Que o meridiano inicial deve ter um caráter de absoluta neutralidade. Ele deve ser escolhido exclusivamente de forma a assegurar à ciência e ao comércio internacional todas as vantagens possíveis e, em particular, não deve atravessar nenhum grande continente – nem a Europa nem a América."[41]

---

[37] O círculo meridiano no Observatório de Greenwich foi projetado pelo Astrônomo Real George Bidell Airy (1801-1892) e operou de 1851 a 1954.

[38] *The Delegates to the International Meridian Conference, who assembled in Washington upon invitation addressed by the Government of the United States to all nations holding diplomatic relations with it, "for the purpose of fixing upon a meridian proper to be employed as a common zero of longitude and standard of time-reckoning throughout the globe" held their first conference to-day, October 1, 1884, in the Diplomatic Hall of the Department of State.*[32]

[39] Pierre Jules César Janssen (1824-1907).

[40] Alexis Albert Lefaivre ((1830-1907).

[41] *"That the initial meridian should have a character of absolute neutrality. It should be chosen exclusively so as to secure to science and to international commerce all possible advantages, and in particular especially should cut no great continent—neither Europe nor America."*

FINAL ACT.

The President of the United States of America, in pursuance of a special provision of Congress, having extended to the Governments of all nations in diplomatic relations with his own, an invitation to send Delegates to meet Delegates from the United States in the city of Washington on the first of October, 1884, for the purpose of discussing, and, if possible, fixing upon a meridian proper to be employed as a common zero of longitude and standard of time-reckoning throughout the whole world, this International Meridian Conference assembled at the time and place designated; and, after careful and patient discussion, has passed the following resolutions:

I.

"That it is the opinion of this Congress that it is desirable to adopt a single prime meridian for all nations, in place of the multiplicity of initial meridians which now exist."

This resolution was unanimously adopted.

II.

"That the Conference proposes to the Governments here represented the adoption of the meridian passing through the centre of the transit instrument at the Observatory of Greenwich as the initial meridian for longitude."

Fig. 25. Resoluções I e II da *International Meridian Conference*, de 1884, adotando o meridiano de Greenwich, como meridiano central.

Esta proposta recebeu apenas três votos (França, Brasil e San Domingo) e prevaleceu a indicação do meridiano de Greenwich como resolução no ato final.

A Conferência aprovou sete resoluções ao todo, versando sobre a recomendação de um meridiano principal comum e de um dia universal, iniciando à meia-noite do meridiano principal. As resoluções listadas no Ato Final da conferência e publicadas nos *proceedings*[32] do encontro são:

I Que é opinião deste Congresso que é desejável adotar um único meridiano principal para todas as nações, em lugar da multiplicidade de meridianos iniciais que atualmente existem..

II Que a Conferência propõe aos governos aqui representados a adoção do meridiano que passa pelo centro do instrumento de trânsito do Observatório de Greenwich como o meridiano inicial para a longitude.

III Que, a partir deste meridiano, a longitude deverá ser contada em duas direções até

180 graus, com a longitude a leste sendo positiva e a longitude a oeste negativa.

IV Que a Conferência propõe a adoção de um dia universal para todos os fins para os quais possa ser considerado conveniente, e que não interfira com o uso do tempo local ou de outro padrão de tempo onde for desejável.

V Que este dia universal deverá ser um dia solar médio; deverá começar para todo o mundo no momento da meia-noite média do meridiano inicial, coincidindo com o início do dia civil e a data desse meridiano; e deverá ser contado de zero até vinte e quatro horas.

VI Que a Conferência expressa a esperança de que, assim que for possível, os dias astronômicos e náuticos sejam organizados em todos os lugares para começar à meia-noite média.

VII Que a Conferência expressa a esperança de que os estudos técnicos destinados a regular e ampliar a aplicação do sistema decimal à divisão do espaço angular e do tempo sejam retomados, a fim de permitir a extensão dessa aplicação a todos os casos em que ela apresente vantagens reais.

O texto integral da ata da conferência foi digitalizado pelo Project Gutenberg e está disponível online em https://www.gutenberg.org/ebooks/17759.

Apesar da falta de unanimidade em algumas votações, o meridiano de Greenwich tornou-se, de fato, o meridiano principal para a cartografia e para o estabelecimento de um padrão de hora universal, sendo a base para os atuais Sistemas de Navegação Global por Satélite (GNSS) [42].

Há, no entanto, um desvio de 102 m a leste entre a longitude 0 indicada por receptores GNSS e o círculo meridiano de Airy, em Greenwich. Este desvio é justificado pela deflexão da vertical da gravidade local. Ou seja, o método utilizado para alinhar o plano do instrumento astronômico verticalmente depende da gravidade, que está sujeita a não-homogeneidades que fazem com que uma linha de prumo local não aponte exatamente para o centro de massa da Terra. O plano que define o meridiano principal no International Terrestrial Reference Frame (ITRF)[43] é um plano paralelo ao plano do círculo meridiano de Airy, deslocado 102 m a leste e passando pelo centro de massa da Terra[33].

[42] Global Navigation Satellite System (GNSS) - Os sistemas de navegação GNSS operam a partir de sinais emitidos por constelações de satélites. Por sua importância econômica e estratégica em aplicações de defesa, potências espaciais como EUA (GPS), Rússsia (GLONASS), Europa (Galileo) e China (BeiDou) possuem suas próprias constelações de GNSS. Índia (INRSS) e Japão (QZSS) operam constelações reduzidas provendo informação de posicionamento regional.

[43] O ITRF é um referencial geocêntrico, com centro de massa definido para toda a Terra, incluindo oceanos e atmosfera. É mantido pelo International Earth Rotation Service (IERS). O IERS é uma organização estabelecida pela União Astronômica Internacional (IAU) e pela União Internacional de Geodésia e Geofísica (IUGG).

2.3 A Esfera Celeste

A ***esfera celeste*** é uma esfera concêntrica ao globo terrestre, de raio arbitrariamente grande, onde projetamos os diversos sistemas de coordenadas celestes, negligenciando - a princípio - as diferentes distâncias a que se encontram os objetos astronômicos, confinando-os à superfície dessa esfera. A esfera celeste é uma abstração indispensável para a definição e compreensão dos sistemas de coordenadas celestes.

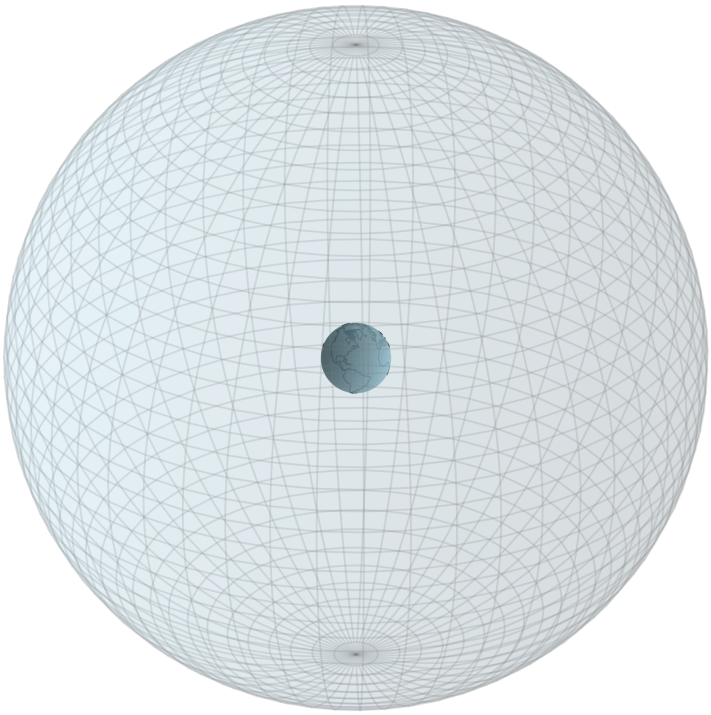


Fig. 26. Representação da esfera celeste envolvendo o globo terrestre. Créditos: Wandeclayt Melo.

Dizer que negligenciamos as distâncias dos objetos significa dizer que essas distâncias são tão grandes, comparadas com as dimensões da Terra e de sua órbita em torno do Sol, que as estrelas podem ser consideradas como pontos fixos na superfície de uma esfera de raio infinito.

Isso resume os sistemas de coordenadas celestes a sistemas bidimensionais, que definem a direção de um corpo através de ângulos medidos a partir de dois planos de referência, sem considerar suas distâncias. A rigor, quando dizemos "posição" de um astro, estamos na verdade nos referindo à sua direção.

Embora o deslocamento diurno dos astros, surgindo no horizonte leste e se pondo no horizonte oeste, seja causado pela rotação da Terra de oeste para leste, consideraremos, por conveniência, que a esfera celeste esteja girando de leste para oeste e nos referiremos a esse movimento como o **movimento diurno aparente** dos astros

Ao admitir que a esfera celeste esteja regularmente em rotação, admitimos, por extensão, a existência de um eixo de rotação e de polos em torno dos quais se dá esse movimento.

Podemos também definir um plano, perpendicular ao eixo de rotação e que contenha o centro da esfera celeste e do globo terrestre. Este plano, que coincide com o plano do equador terrestre, é chamado **equador celeste**.

O plano do equador celeste corta a esfera celeste definindo um **grande círculo**. Em qualquer esfera, chamamos de **grande círculo** a um círculo máximo, que divide a esfera em duas metades iguais, ou hemisférios (Fig. 27).

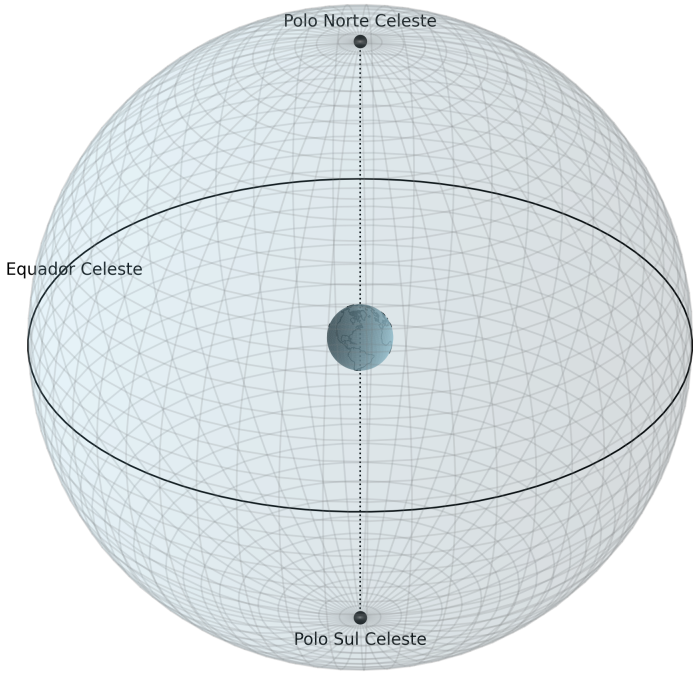


Fig. 27. Projeção do equador e dos polos terrestres na esfera celeste, definindo o equador e os polos celestes. Créditos: Wandeclayt Melo.

Ao considerar a Terra como um objeto fixo e observando, ao longo de um ano, a trajetória descrita pelo centro do Sol com relação às estrelas fixas, veríamos que essa trajetória

corresponderia também a um grande círculo na esfera celeste. Esse grande círculo é chamado de **eclíptica**. O plano da eclíptica é, na verdade, o plano da órbita terrestre[44].

A eclíptica e o equador celeste definem grandes círculos distintos na esfera celeste, inclinados $23,4°$ entre si. Os dois pontos em que a eclíptica corta o equador são chamados de **equinócio vernal**[45] e **equinócio autunal**[46], marcados como (Υ) e ($\simeq$), respectivamente, na Fig. 28. Os termos "vernal" e "autunal" referem-se ao início das estações primavera e outono no hemisfério norte.

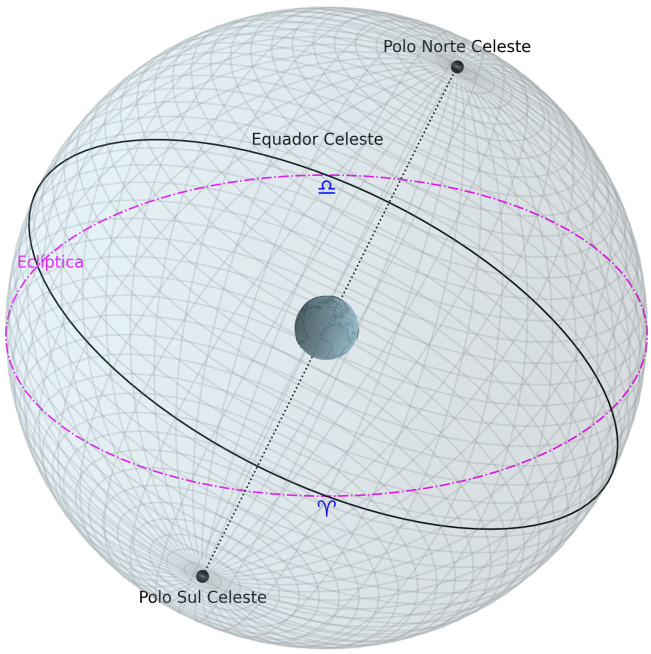


Fig. 28. Esfera celeste com a representação da eclíptica e do equador e polos celestes. O plano do equador é inclinado $23,4°$ em relação à eclíptica. Créditos: Wandeclayt Melo.

Os polos celestes, a eclíptica e o equador celeste são elementos que nos ajudarão a construir os sistemas de coordenadas esféricas que nos permitirão indicar as direções dos

[44] A **Resolução B1**[34] adotada na Assembleia Geral da União Astronômica Internacional de 2006 define a eclíptca não em função da órbita terrestre, mas da órbita do centro de massa do sistema Terra-Lua: *"that the ecliptic pole should be explicitly defined by the mean orbital angular momentum vector of the Earth-Moon barycenter in the Barycentric Celestial Reference System (BCRS), and this definition should be explicitly stated to avoid confusion with other, older definitions"*.

[45] Do latim *Vernalis*.

[46] Do latim *Autumnalis*.

astros na esfera celeste.

Este não é um sistema adequado para estudar a dinâmica orbital de corpos do Sistema Solar, onde a Física se beneficia de um referencial centrado no Sol[47]. Todavia, esses movimentos aparentes são perfeitamente adequados para medir a passagem do tempo e para mapear as estrelas fixas e objetos de céu profundo, utilizando coordenadas projetadas na esfera celeste.

As coordenadas celestes, assim como as medidas de tamanho aparente ou de separação entre dois astros na esfera celeste, são angulares. Ou seja, quando dizemos que o diâmetro aparente do Sol é de aproximadamente $0,5^\circ$ ou que a separação entre duas estrelas é de $10''$, não estamos nos referindo ao diâmetro real do Sol ou à distância entre as duas estrelas no espaço, mas sim, dizendo que o disco do Sol, visto da Terra, corresponde a um ângulo de $0,5^\circ$ (ou $30'$) e que a separação entre as duas estrelas, também para um observador na Terra, corresponde a um ângulo de $10''$ (10 segundos de arco), independente da distância real entre esses astros.

[47] O centro de massa (CM) do Sistema Solar não coincide exatamente com o centro do Sol. A contribuição da massa de todos os corpos nas vizinhanças do Sol, especialmente os planetas de maior massa, deslocam a posição do CM, que em certas configurações, pode inclusive estar ligeiramente fora do Sol.

2.4 Coordenadas Celestes Equatoriais

Definida a esfera celeste, passamos à escolha de um plano fundamental para estabelecer um sistema de coordenadas esféricas. Tomando o equador celeste como plano fundamental, construímos um sistema de **Coordenadas Celestes Equatoriais**.

O equador celeste é um círculo máximo da esfera celeste e a divide em **Hemisfério Norte Celeste** e **Hemisfério Sul Celeste** (Fig. 29).

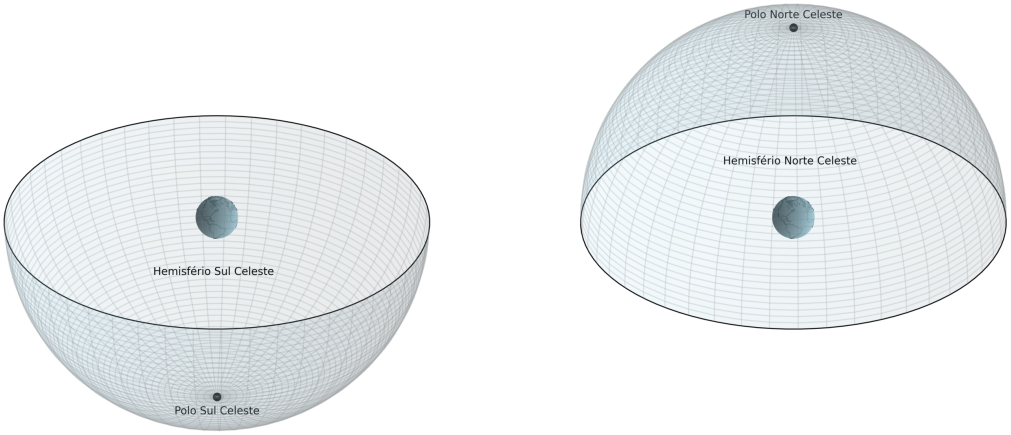


Fig. 29. Hemisférios celestes. O Equador divide a esfera celeste em Hemisfério Sul Celeste (esq. e Hemisfério Norte Celeste (dir.). Créditos: Wandeclayt Melo.

A primeira coordenada, análoga à latitude nas coordenadas geográficas, é a **Declinação**. A declinação, simbolizada pela letra grega delta minúscula (δ), nos dá a separação angular do objeto até o equador celeste, em graus ($^\circ$), variando de 0° a $\pm 90^\circ$, com valores positivos no hemisfério norte e negativos no hemisfério sul. Ou seja, um objeto posicionado exatamente sobre o equador celeste tem declinação $\delta = 0^\circ$. Um objeto no hemisfério sul celeste, separado de 10° do equador celeste, tem declinação $\delta = -10^\circ$. Um objeto exatamente na direção do polo norte celeste tem declinação $\delta = 90^\circ$.

A declinação define círculos paralelos ao equador celeste (Fig. 30).

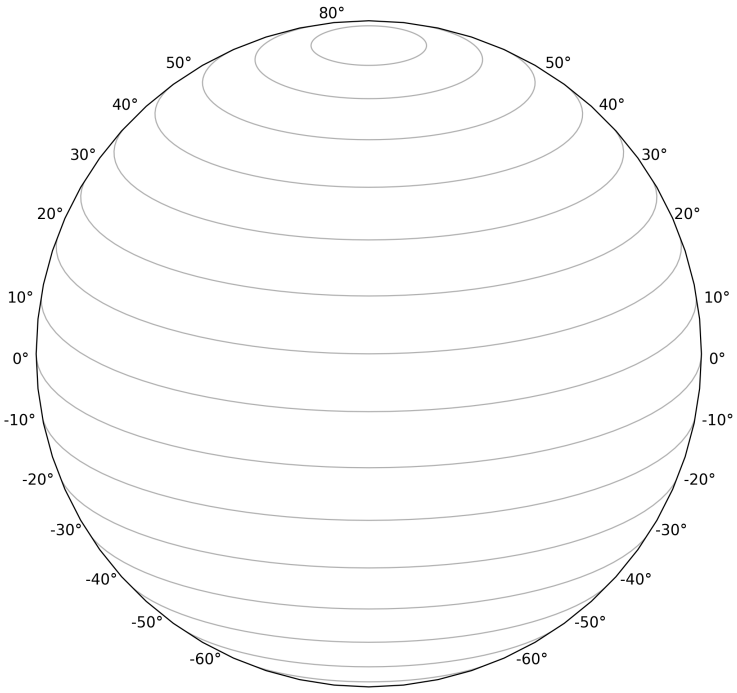


Fig. 30. Esfera celeste com indicação dos paralelos de declinação. Créditos: Wandeclayt Melo.

Passamos agora para a definição de uma coordenada longitudinal, completando nosso sistema de coordenadas. O passo inicial é a definição de uma origem.

Na Terra, o meridiano que passa pelo Observatório Real de Greenwich, na Inglaterra, foi escolhido arbitrariamente como o meridiano principal (Seção. 2.2) e, a partir dele, medimos a longitude a leste e a oeste.

No sistema de coordenadas celestes equatoriais, apesar da origem da coordenada longitudinal não ser um ponto arbitrário, ela não é definida pela posição de um objeto físico.

Vimos na Seção 2.3 dois planos que desenham grandes círculos na esfera celeste: o equador, definido pela rotação da Terra, e a eclíptica, definida pela órbita terrestre em torno do Sol. Vimos também que esses planos são inclinados entre si, com uma obliquidade de $23,4^\circ$. Quando dizemos que o eixo da Terra é inclinado, estamos falando dessa inclinação cuja referência é o plano orbital (o plano da eclíptica).

Tomamos como origem para a coordenada longitudinal, chamada **Ascensão Reta** (α), o ponto Υ, correspondente ao cruzamento do Sol pelo equador celeste, quando o Sol passa do hemisfério sul para o hemisfério norte celeste (Fig. 31).

A ascensão reta é medida em horas, minutos e segundos, variando de 0 h a 24 h, com valores crescendo a leste.

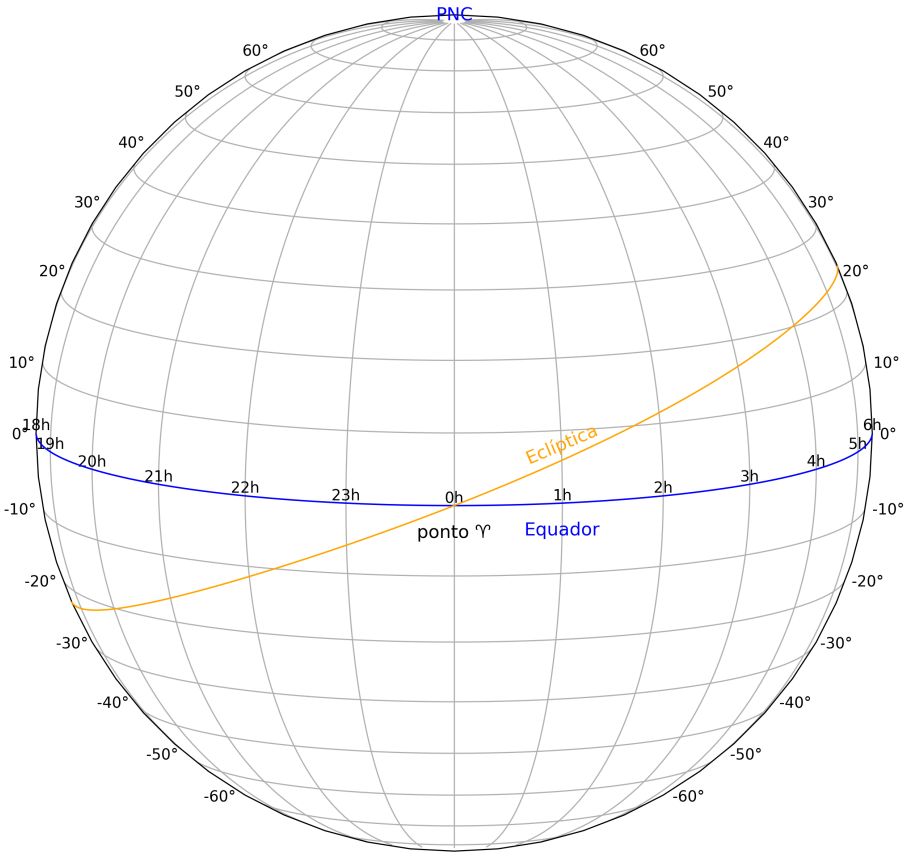


Fig. 31. A Esfera Celeste com o Sistema de Coordenadas Equatoriais. A declinação (δ) é equivalente à latitude e a ascensão reta (α) equivale à longitude. O ponto vernal (Υ), uma das intersecções entre o equador celeste e a eclíptica, é a origem da coordenada Ascensão Reta, medida de 0 h a 24 h, com valores crescentes a leste. Créditos: Wandeclayt Melo.

Construímos assim um sistema completo de coordenadas celestes, tomando como plano fundamental o equador celeste, a partir do qual medimos a declinação do astro, e como meridiano principal, aquele que passa pelo ponto Υ, a partir do qual medimos a coordenada ascensão reta.

2.5 Precessão

Para a origem da coordenada ascensão reta, o ponto escolhido (Υ) tem significado astronômico, não carregando a arbitrariedade que caracterizou a escolha da origem para a longitude nas coordenadas geográficas.

No entanto, embora arbitrário, o meridiano de Greenwich permanece fixo na Terra. Enquanto o ponto vernal desloca-se sobre a eclíptica ao longo de um ciclo com período de aproximadamente 26 mil anos.

No Livro VII do Almagesto[35], Ptolomeu cita que Hiparcos, no Séc. II a.C., já havia

detectado que as estrelas mantinham uma configuração constante, conservando o aspecto das constelações e mantendo distâncias constantes entre si e por isso podiam ser chamadas de *estrelas fixas* [48], mas que o mesmo não podia ser dito da esfera celeste, onde as estrelas estariam "incrustadas", que parecia mudar a orientação de seu eixo de rotação com relação ao plano da eclíptica.

Não estamos falando aqui do movimento diurno da esfera celeste, resultante da rotação terrestre. Mas de um lento deslocamento dos polos celestes, causado pela mudança de orientação do eixo de rotação terrestre.

A Fig. 32 ilustra o movimento percebido por Hiparcos e confirmado por Ptolomeu. As configurações representadas na figura correspondem à mudança de orientação do eixo da Terra em um intervalo de 13 mil anos.

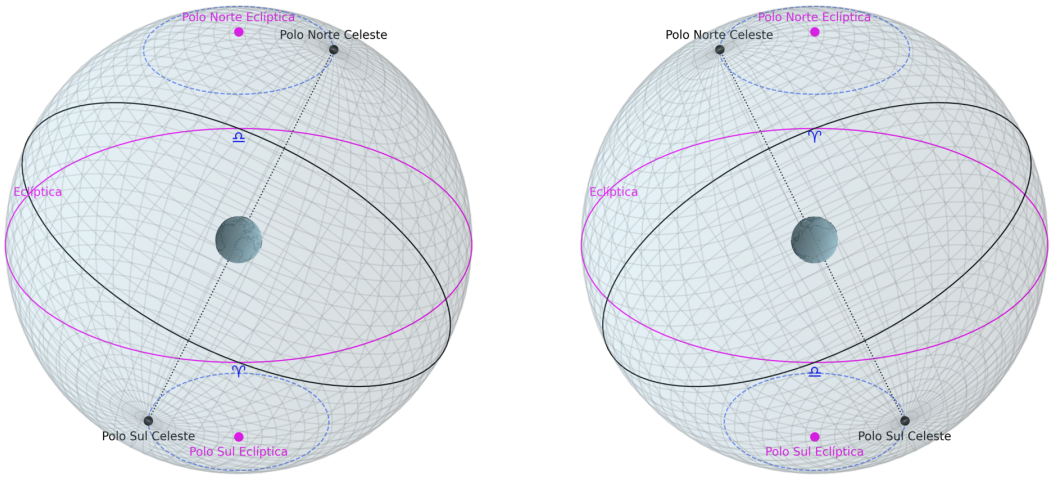


Fig. 32. Precessão do eixo terrestre.

Este movimento de **Precessão** do eixo terrestre, é similar ao movimento de um pião. A precessão faz com que o plano do equador terrestre varie, fazendo variar, por consequência, os pontos onde o equador celeste e a eclíptica se cruzam.

Em 13 mil anos, após meio ciclo do movimento de precessão, os pontos ♈ e ♎ estarão invertidos.

Na prática, isso significa que as coordenadas equatoriais para um astro variam em função da data. Ao consultar, no catálogo online **SIMBAD** (*the Set of Identifications, Measurements and Bibliography for Astronomical Data*), as coordenadas do aglomerado de estrelas NGC 5139 (*ω Centauri*) encontraremos os seguintes valores:

Essas coordenadas correspondem à configuração do equador celeste, em relação à eclíptica, em primeiro de janeiro do ano 2000, às 12:00 (TT)[49]. Para encontrar as coordenadas

[48] O termo *estrelas fixas* as diferencia dos planetas, que são "*astros errantes*".

[49] TT = Tempo Terrestre.

Tabela 3. Coordenadas equatoriais J2000.0 do aglomerado globular NGC 5139, ω Centauri

Objeto	A.R.	Dec.	Época
NGC 5139	13h 26min 47,28s	$-47^\circ\ 28'\ 46{,}1''$	J2000.0

Fonte: Elaborado pelo autor.

válidas para a data da observação, é preciso computar a precessão entre a data de referência (J2000.0) e a data atual. Sistemas de apontamento de telescópios profissionais e mesmo planetários digitais como o Stellarium são capazes de computar as coordenadas (RA/Dec) da data, a partir das coordenadas J2000 (Fig. 33).

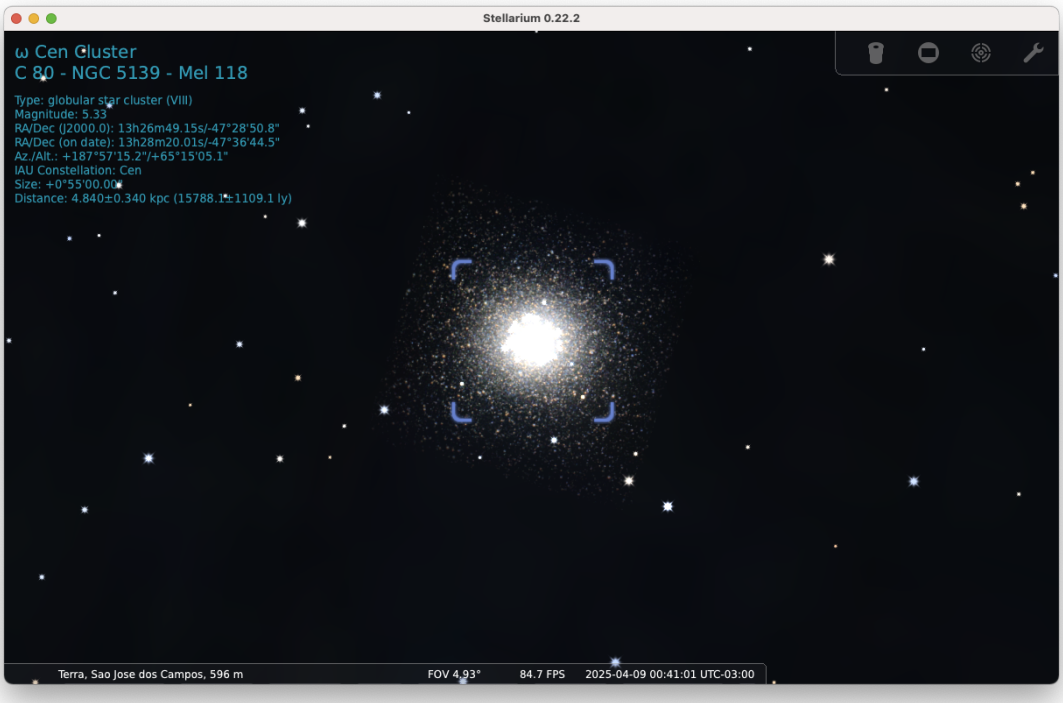


Fig. 33. Captura de tela do software Stellarium com informações do objeto NGC 5139 (ω Cen).

2.6 Coordenadas Horizontais

O sistema horizontal (ou altazimutal) de coordenadas é um referencial local, centrado no observador, e seu plano fundamental é o plano do horizonte, a partir do qual é medida a coordenada ***elevação***, ou ***altura***, do astro.

A Fig. 34 representa o **hemisfério zenital**, a metade visível da esfera celeste acima do horizonte. O observador está localizado no centro do plano horizontal e vemos a indicação da direção norte em azul.

A linha vertical vermelha passa pelo observador. Dois pontos localizados ao longo dessa vertical que passa pelo observador e pelo centro da Terra recebem nomes especiais. O ***zênite*** é o ponto localizado acima do observador, com 90° de elevação acima do horizonte. O ponto oposto ao zênite chama-se ***nadir***.

O plano vertical, orientado ao longo da direção norte-sul, que define um grande círculo na esfera celeste, passando pelo zênite, é o **Meridiano Local** do observador.

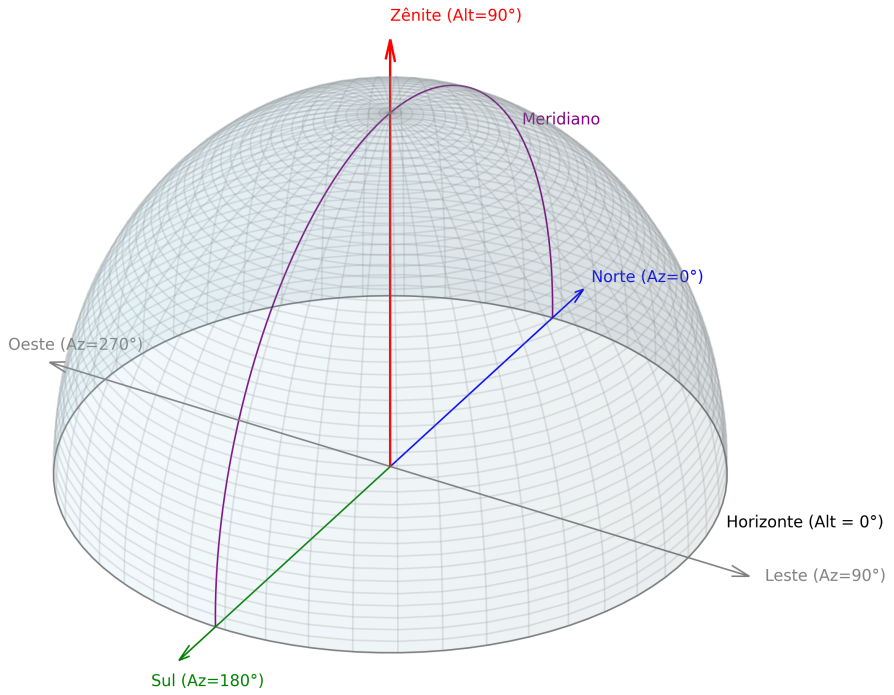


Fig. 34. Hemisfério celeste zenital (acima do horizonte). Estão representados o zênite, os pontos cardeais e o plano do meridiano local. Créditos: Wandeclayt Melo.

As coordenadas no sistema horizontal são a **altura** e o **azimute**. A altura varia de 0° no horizonte a 90° no zênite. Valores de altura negativos descrevem objetos abaixo do horizonte. O **azimute** é medido ao longo do horizonte, com origem no ponto cardeal norte e crescendo a leste. O azimute varia de 0° a 360°, com 0° correspondendo ao ponto cardeal norte, 90° ao leste, 180° ao sul e 270° ao oeste.

Altura de um astro (A) e sua distância ao zênite (Z) são complementares (Fig.35), valendo a igualdade: $A + Z = 90°$.

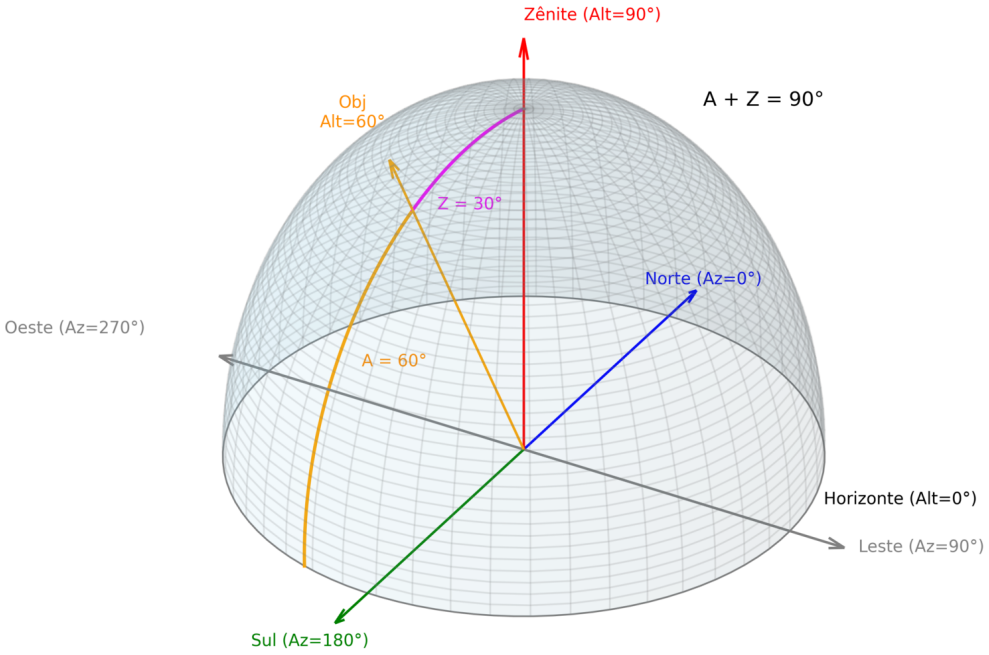


Fig. 35. Altura (em laranja) e distância zenital (em magenta). No exemplo da figura, a altura (A) do objeto é 60° e a distância zenital (Z) é $Z = 90° - A = 30°$.

As coordenadas altazimutais permitem um apontamento rápido, sem necessidade de um alinhamento polar[50] preciso da montagem do telescópio, sendo necessário apenas conhecer a direção do norte verdadeiro[51]. Por ser um referencial estritamente local [52], a altura e o azimute precisam ser calculados não apenas para o instante da observação, mas também para as coordenadas geográficas de cada observador.

[50]

[51] O norte encontrado com a utilização de uma bússula é o norte magnético. Caso uma bússula seja utilizada, é preciso aplicar a correção da declinação magnética do local para encontrar o norte verdadeiro.

[52] Diferente das coordenadas equatoriais, que são geocêntricas – ou seja, definidos em relação ao centro da Terra – as coordenadas horizontais são topocêntricas. Seu plano fundamental, o horizonte, é tangente à superfície da Terra no ponto onde se encontra o observador.

2.6.1 Fênomenos Astronômicos em Coordenadas Horizontais

O nascer, o ocaso e a passagem meridiana de um astro são fenômenos descritos em função de coordenadas horizontais.

Para o Sol e a Lua, os instantes do nascimento e ocaso dados nas tabelas referem-se ao aparecimento da borda superior do limbo desses astros no horizonte, ou seja, dão o instante em que o centro do Sol, ou da Lua, está meio diâmetro abaixo do horizonte, incluindo o efeito da refração atmosférica.

O *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac* [31] detalha que os horários calculados do nascer e pôr do Sol correspondem aos instantes em que o centro do Sol atinge uma distância zenital de $90°50'$ (dos $50'$ adicionados aos $90°$, $34'$ são efeito da refração e $16'$ são o semi-diâmetro aparente do Sol).

Antes do nascer e após o pôr do Sol, o espalhamento da luz solar nas camadas superiores da atmosfera forma o crepúsculo. São definidos três tipos de crepúsculo. Após o crepúsculo civil, as estrelas mais brilhantes já se tornam visíveis. Após o crepúsculo náutico, o horizonte marítimo deixa de ser discernível. E por fim, após o crepúsculo astronômico, temos a noite escura.

Tabela 4. Altura e distância zenital do Sol nos crepúsculos civil, náutico e astronômico

Crepúsculo	**Altura do Sol**	**Distância zenital**
Fim do crepúsculo civil	$-6°$	$96°$
Fim do crepúsculo náutico	$-12°$	$102°$
Fim do crepúsculo astronômico	$-18°$	$108°$

Fonte: Elaborado pelo autor.

A passagem meridiana ou trânsito meridiano de um astro é a passagem desse objeto pelo meridiano local do observador. Durante a passagem meridiana, o objeto atinge sua altura máxima em relação ao horizonte.

É na passagem meridiana que encontramos as melhores condições para observação de um astro, com uma menor massa atmosférica a ser atravessada por sua luz antes de atingir o instrumento de observação.

2.6.2 Observador no Polo Norte

Imaginemos agora um observador posicionado no polo norte terrestre (latitude $+90^\circ$). Esse observador veria o PNC exatamente em seu zênite. O hemisfério celeste norte estaria sempre acima do horizonte, enquanto o hemisfério celeste sul estaria sempre abaixo do horizonte e jamais seria visível para esse observador (Fig. 36).

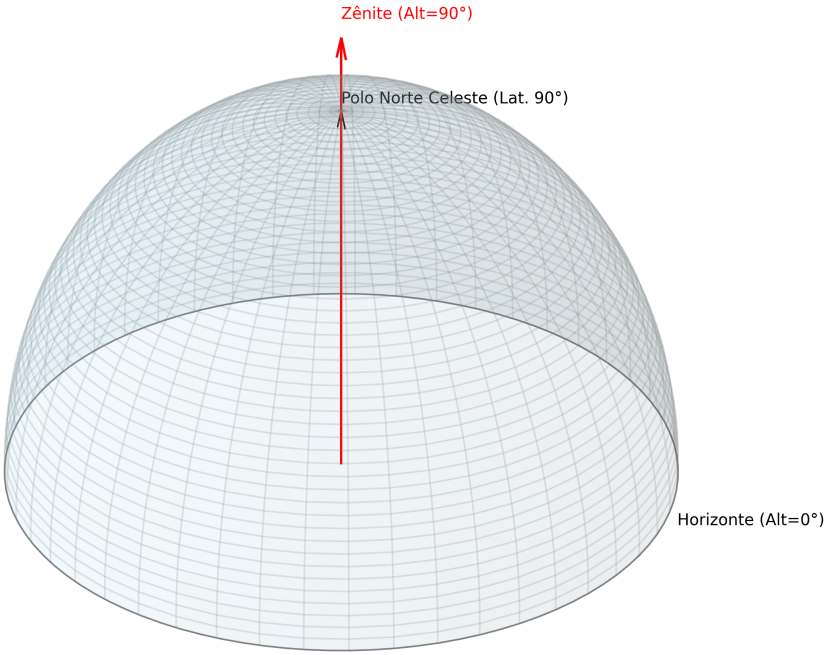


Fig. 36. Um observador no polo norte terrestre teria o polo norte celeste no zênite e o hemisfério norte celeste estaria sempre visível acima do horizonte.

Como consequência da rotação terrestre, esse observador veria as estrelas girando em torno do zênite, que coincidiria com o PNC. A posição da estrela *Polaris* (α Ursæ Minoris), de magnitude 2, é muito próxima do PNC (Fig. 37), o que torna essa estrela uma referência importante para a navegação no hemisfério norte.

À medida que um observador se afasta do polo norte terrestre e se aproxima do equador,

verá Polaris se afastar do zênite e se aproximar do horizonte. Ou seja, a altura de Polaris[53] corresponde à latitude do observador no hemisfério norte.

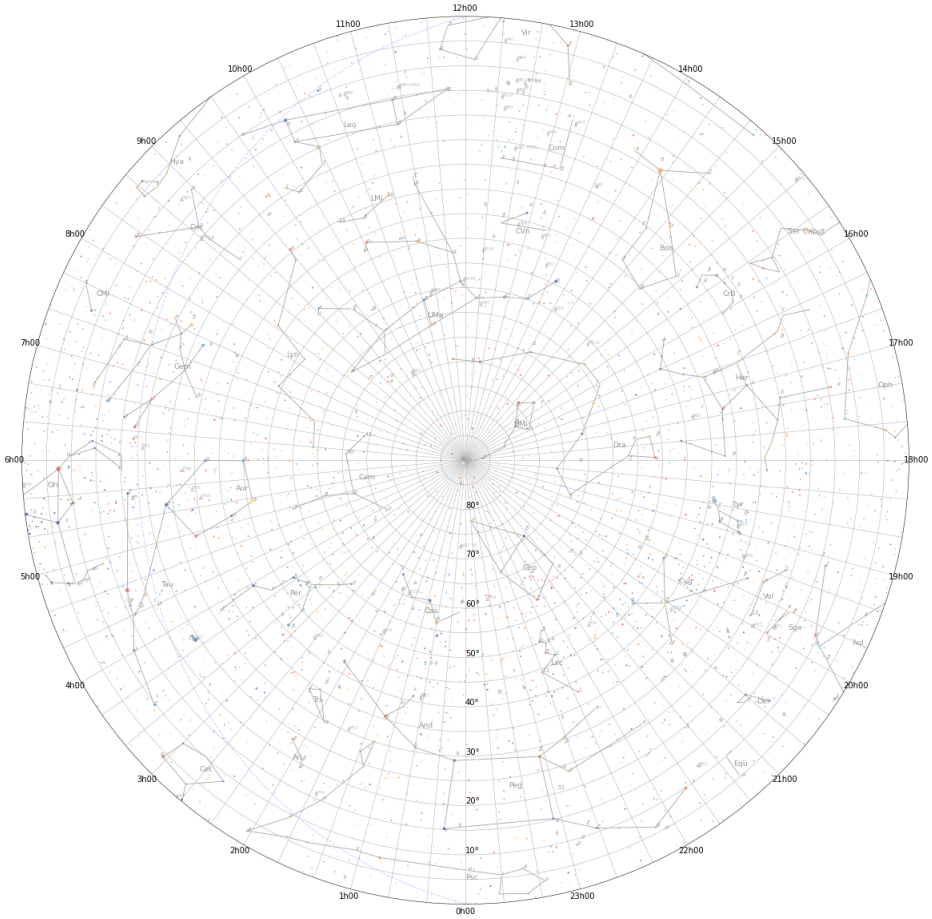


Fig. 37. Hemisfério Norte Celeste. Carta plotada utilizando script Python desenvolvido pelo Projeto Céu Profundo.

[53] Também chamada Estrela Polar.

2.6.3 Observador no Polo Sul

Analogamente, um observador no polo sul terrestre (latitude $-90°$) veria o PSC no seu zênite e o hemisfério sul celeste estaria permanentemente acima de seu horizonte (Fig. 38). O hemisfério norte celeste, por sua vez, seria inacessível para esse observador.

Assim como o observador no polo norte, o observador no polo sul terrestre veria as estrelas girando em torno do zênite, que, nesse caso, coincide com o PSC.

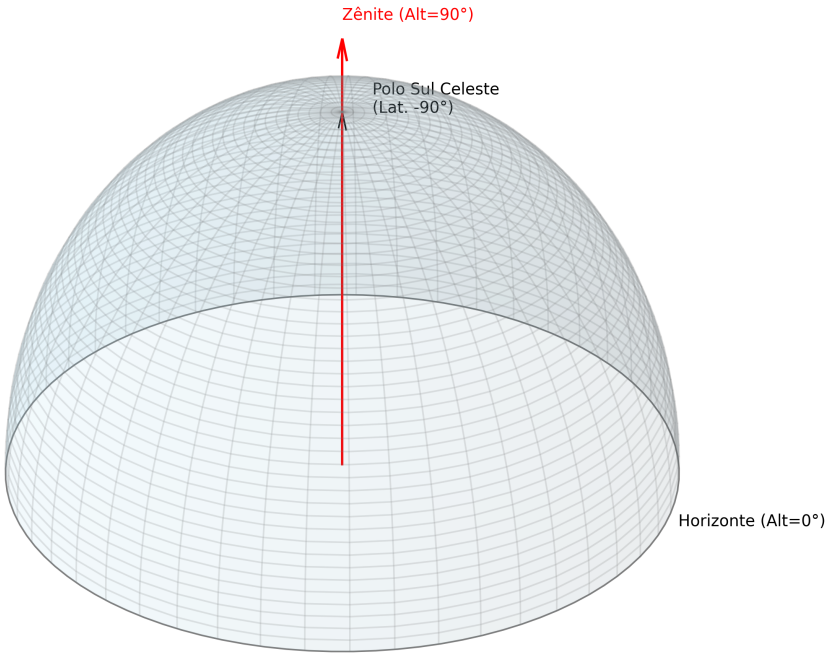


Fig. 38. Um observador no polo sul terrestre teria o polo sul celeste no zênite e o hemisfério sul celeste estaria sempre visível acima do horizonte.

Infelizmente, como vemos na Fig 39, não há uma estrela brilhante como *Polaris* tão próxima do polo sul celeste. A estrela *Sigma Octantis* (σ Oct), com magnitude 5,42, é a referência mais próxima do PSC, mas seu brilho é insuficiente para ser percebida em locais com interferência de poluição luminosa. E mesmo em locais escuros, ela é uma estrela tênue, no limite da visibilidade a olho nu.

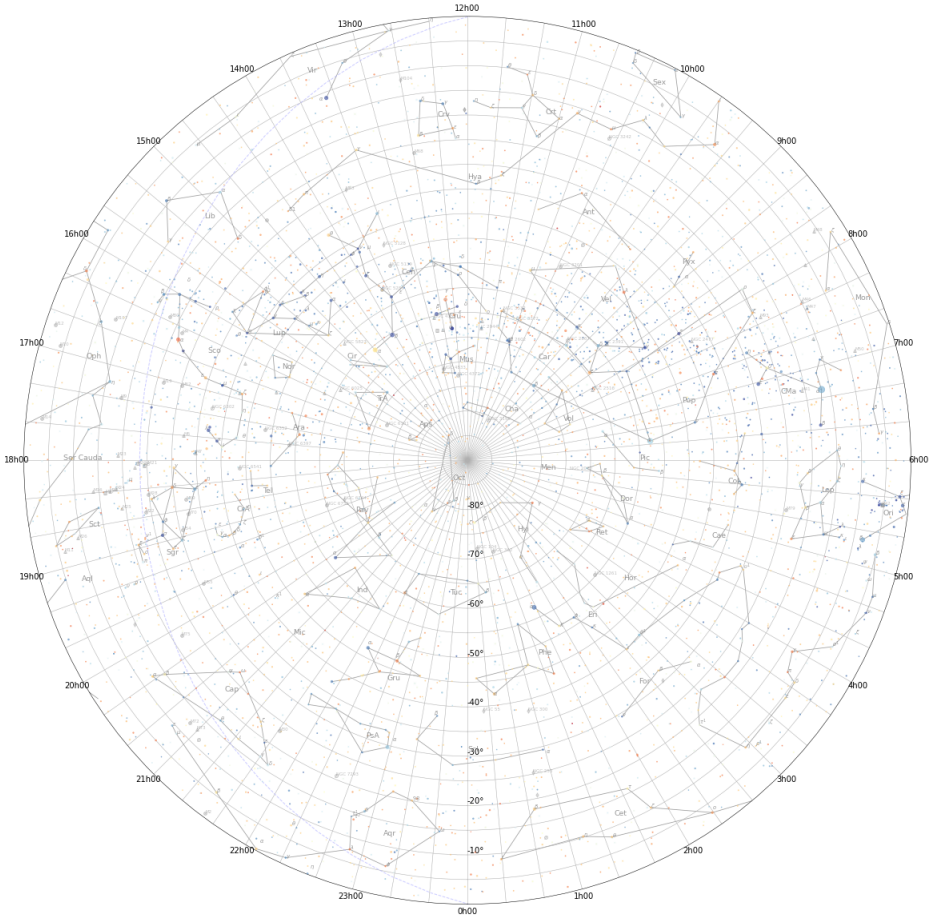


Fig. 39. Hemisfério Sul Celeste. Carta plotada utilizando script Python desenvolvido pelo Projeto Céu Profundo.

2.6.4 Observador no Equador

Exploramos até aqui a visão de observadores em dois pontos extremos, os polos sul e norte terrestres. Para esses observadores, o zênite coincide com um dos polos celestes e o equador celeste coincide com o horizonte. Vimos também que nos polos apenas um hemisfério celeste é observável.

Passemos agora ao caso de um observador posicionado sobre o equador terrestre.

O equador celeste corta perpendicularmente o plano do meridiano. Para um observador posicionado sobre o equador terrestre (latitude 0°), o plano do equador celeste passa pelo zênite, orientado ao longo da direção leste-oeste, e o Polo Norte Celeste (PNC) e o Polo Sul Celeste (PSC) coincidem com os pontos cardeais Norte e Sul, respectivamente (Fig. 40).

A Fig. 40 mostra, para um observador na latitude 0° (sobre o equador terrestre), os planos do meridiano local e do equador celeste. Estes planos cruzam-se perpendicularmente no zênite do observador. O polo sul celeste e o polo norte celeste estarão na altura do horizonte e coincidirão com os pontos cardeais sul e norte, respectivamente.

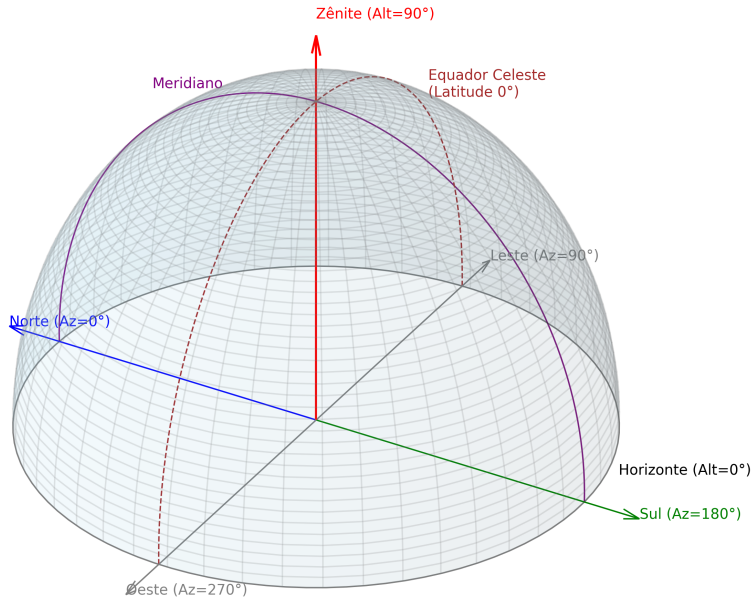


Fig. 40. Equador celeste e meridiano de um observador sobre a linha do equador terrestre.

2.6.5 Observador em uma Latitude Arbitrária

Para qualquer outro observador, fora da linha do equador, o plano do equador celeste terá uma inclinação em relação à vertical igual à latitude local. Para um observador na latitude 23° ao sul (latitude −23°), o plano do equador celeste estará afastado 23° do zênite, e o PSC estará elevado 23° do ponto cardeal sul (Fig. 41).

Para este observador, o PNC está 23° abaixo do horizonte e objetos separados até 23° do PNC nunca serão visíveis.

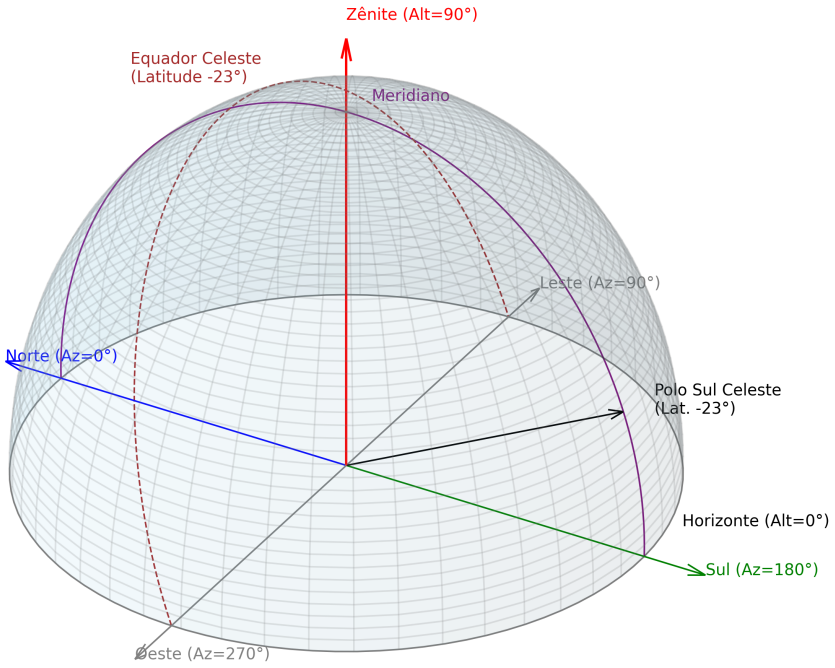


Fig. 41. Equador celeste, meridiano e polo sul celeste para um observador posicionado 23° ao sul do equador terrestre.

2.7 Tempo Sideral e Ângulo Horário

O Ângulo Horário Local do ponto vernal é conhecido como Hora Sideral Local e é incrementado em 24 h a cada dia sideral [31].

Para um objeto celeste X vale a relação:

$$\text{AHL X} = \text{HSL} - \text{RA X}, \tag{1}$$

2.8 Equação do Tempo

A diferença entre a Hora Local Média (HLM) e a Hora Solar Aparente (HSA) é conhecida como a equação do tempo.

although the equation of time used to be regarded as the correction to be applied to apparent time to obtain mean time. The principal contributions to the equation of time arise from the eccentricity of the Earth's orbit around the Sun (which causes a nonuniformity in the apparent motion of the Sun around the ecliptic) and the inclination of the plane of the ecliptic to the plane of the equator. The equation of time varies through the year in a smoothly periodic manner by up to 16 minutes, as shown in Figure 1.233.1

$$\text{HLA} = \text{HLM} + 12^h = \tag{2}$$

EM CONSTRUÇÃO - DESCULPE-NOS O TRANSTORNO.

2.9 Coordenadas Eclípticas

A interseção do plano da órbita da Terra em torno do Sol com a esfera celeste define a *eclíptica*. Isto quer dizer que, do ponto de vista de um observador na Terra, o Sol sempre aparecerá sobre a eclíptica.

> *"Another remarkable region in the heavens is the zodiac, not from any thing peculiar in its own constitution, but from its being the area within which the apparent motions of the sun, moon, and all the greater planets are confined. To trace the path of any one of these, it is only necessary to ascertain, by continued observation, its places at successive epochs, and entering these upon our map or sphere in sufficient number to form a series, not too far disjoined, to connect them by lines from point to point"*
> *Jonh F. W. Herschel. Treatise on Astronomy (p. 163)*

EM CONSTRUÇÃO - DESCULPE-NOS O TRANSTORNO.

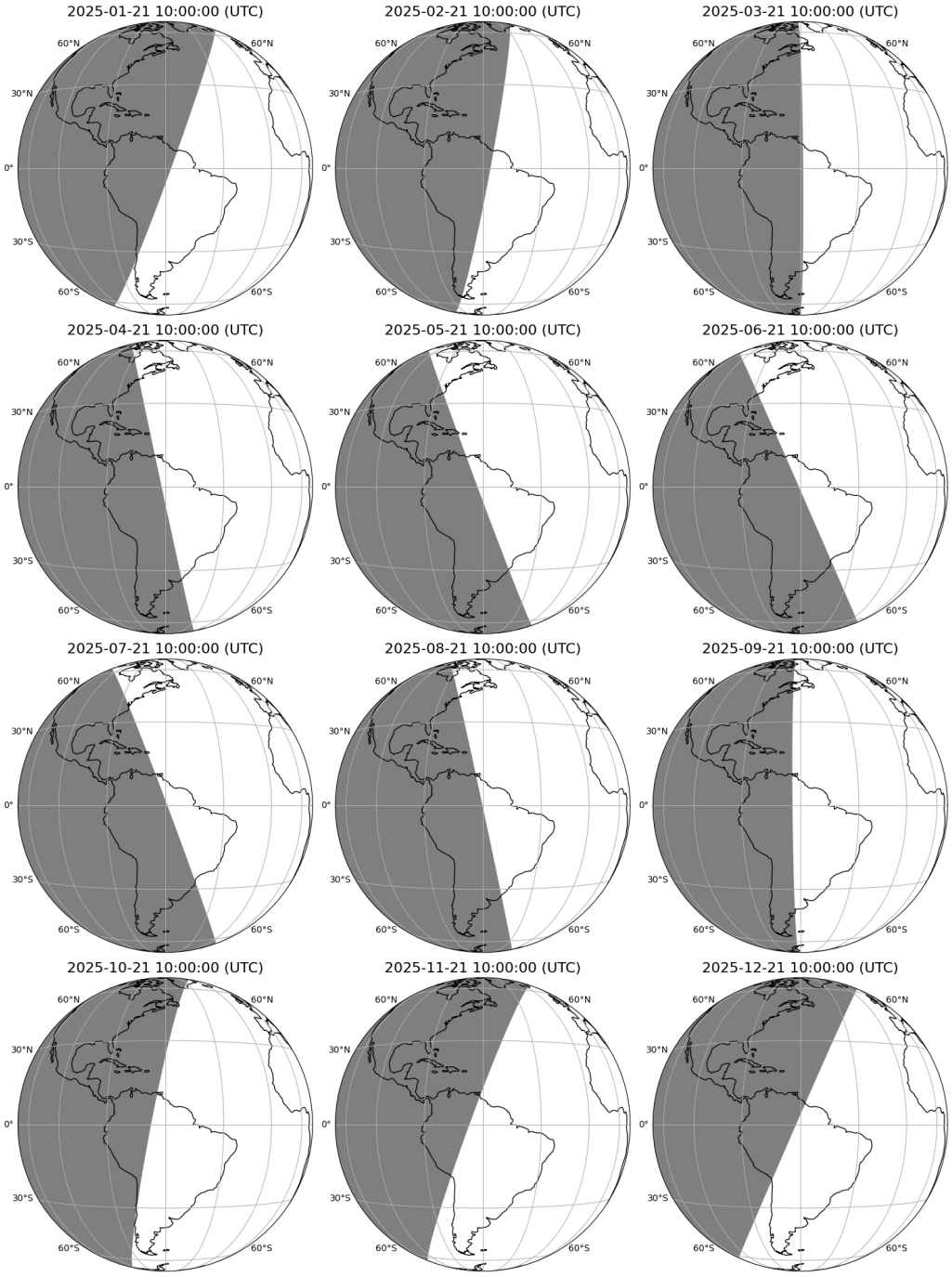


Fig. 42. Incidência da luz solar ao longo de um ano. Os gráficos simulam o ponto de vista de um satélite geoestacionário, sobre o equador e acima do meridiano de longitude 60° oeste. Gráficos gerados com a biblioteca python Cartopy. Créditos: Wandeclayt Melo.

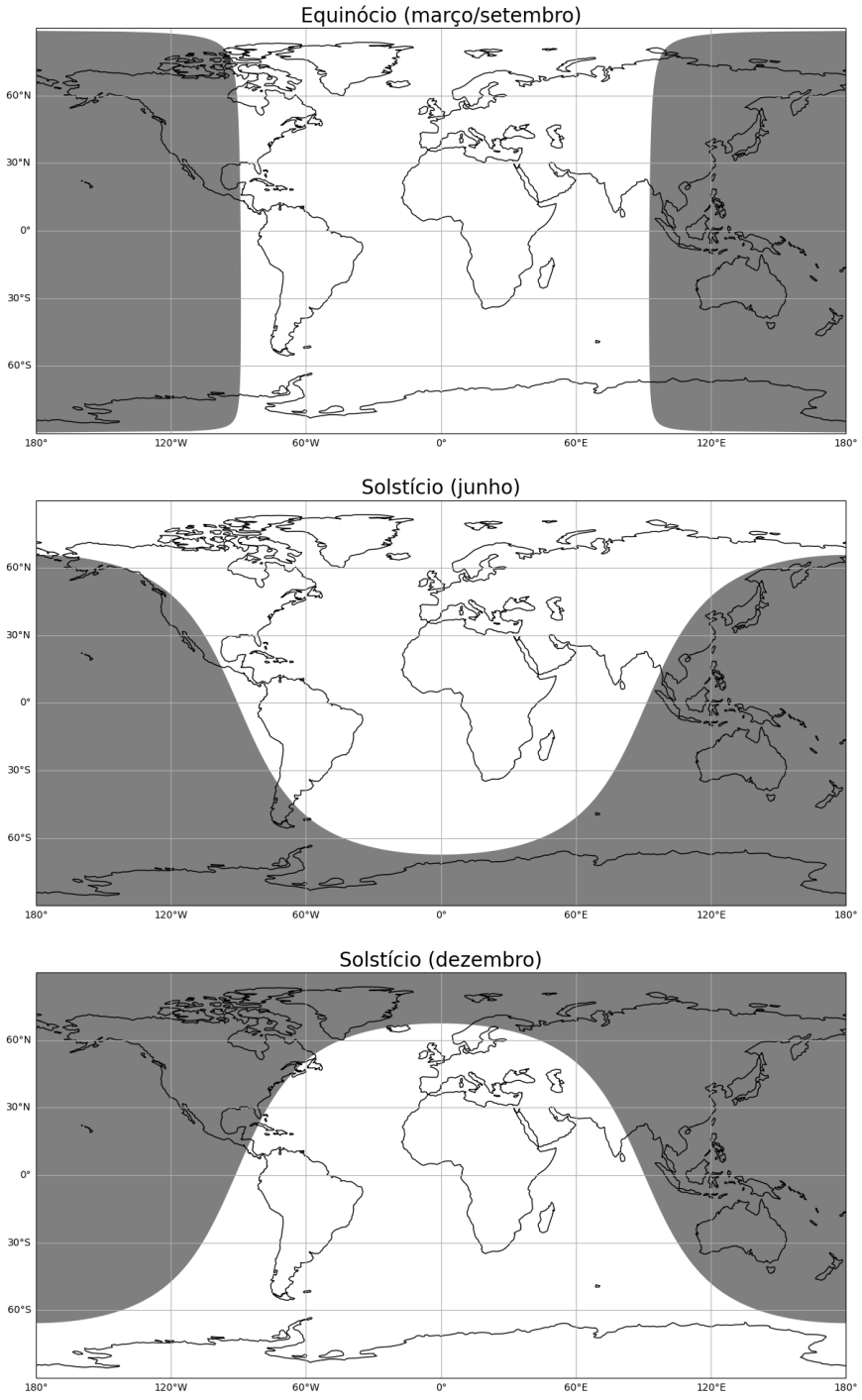


Fig. 43. Incidência da luz solar nos solstícios e nos equinócios. Gráficos gerados com a biblioteca python Cartopy. Créditos: Wandeclayt Melo.

EM CONSTRUÇÃO - DESCULPE-NOS O TRANSTORNO.

Mapas impressos de todo o céu - planisférios - são também ferramentas poderosas. Usando esses recursos, podemos explorar o céu de diferentes localidades e em diferentes datas, prevendo os objetos que estarão visíveis e simulando sua visão através de diversos instrumentos.

Há, literalmente, um Universo inteiro para ser observado. Começando com nossa vizinha mais próxima, a Lua, passando pelo Sol, pelos planetas, planetas anões, asteroides e cometas em nosso Sistema Solar e, finalmente, chegando aos objetos de céu profundo: aglomerados estelares, nebulosas e galáxias, até o limite do que nossos instrumentos podem alcançar.

Telescópios podem descortinar um espetáculo completamente novo para nossos olhos, mas a observação com binóculos ou à vista desarmada também nos traz visões deslumbrantes. Cometas, aglomerados de estrelas, a Via Láctea, algumas nebulosas e outros objetos extensos são alvos perfeitos para os campos amplos e luminosos proporcionados por binóculos. A olho nu, conjunções entre planetas ou entre a Lua e os planetas são visões memoráveis. Mas não importa se nossa observação é munida ou não de instrumentos: é sempre necessário conhecer o céu e os objetos que se abrigam na esfera celeste.

Nos próximos capítulos, nos esforçaremos para apresentar um repertório robusto para mergulharmos em nossas observações. Apresentaremos objetos celestes, instrumentos ópticos, ferramentas computacionais e técnicas de observação. Esperamos que, ao longo da leitura, você possa experimentar na prática cada proposta de atividade apresentada. Mas esperamos ainda mais que você possa experimentar o prazer da descoberta e o fascínio pelo céu que nos motivou a escrever este texto.

3. Telescópios

3.1 Por que Precisamos de Telescópios?

Até o século XVI, nenhum instrumento óptico havia sido utilizado para observar o céu. Eram conhecidos cinco planetas (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno), mas, observados a olho nu, eram indistinguíveis das estrelas, exceto pelo seu movimento, deslocando-se entre os padrões formados pelas estrelas fixas.

Também a olho nu, conhecíamos a Via Láctea (Fig. 44), a faixa leitosa que cruza o céu com um aspecto nebuloso, mas ignorávamos que ela é, na verdade, formada por estrelas que a vista desarmada é incapaz de resolver individualmente.

A existência de estrelas duplas, aglomerados estelares, satélites em outros planetas e de um acidentado relevo na superfície da Lua estava muito além dos limites do observável.



Fig. 44. Em condições como as encontradas no Observatório do Pico dos Dias, em Brazópolis, no sul de Minas Gerais, sob um céu escuro, preservado da poluição luminosa, a Via Láctea aparece como uma faixa brilhante cruzando o céu de inverno, facilmente vista a olho nu. Outros objetos de céu profundo como nebulosas e aglomerados estelares são também perceptíveis sem a ajuda de instrumentos. Créditos: Wandeclayt M.

Instrumentos como quadrantes, sextantes e oitantes eram utilizados pelos astrônomos para medir a posição de estrelas e outros objetos celestes, mas nenhum deles dispunha de recursos ópticos de ampliação.

Mesmo os importantes dados de posição do planeta Marte registrados por Tycho Brahe e utilizados por Johannes Kepler para formular suas Leis do Movimento Planetário foram obtidos com observações realizadas integralmente a olho nu.

Nossos olhos, contudo, são um instrumento limitado. Primeiro, pela abertura de nossas pupilas, que atingem no máximo 7 mm de diâmetro quando completamente adaptadas à escuridão e deixam passar muito pouco da luz dos tênues objetos celestes. Segundo, pela faixa de sensibilidade de nossa visão[54]. Enxergamos apenas uma pequena faixa de comprimentos de onda da radiação eletromagnética, que chamamos de luz visível (Fig. 45).

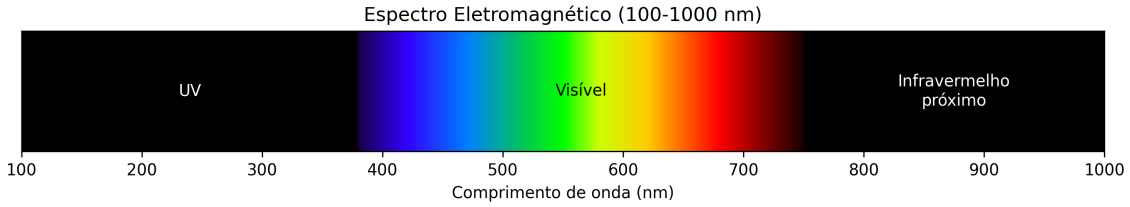


Fig. 45. Parte do espectro eletromagnético compreendendo a faixa visível ao olho humano e as regiões do ultravioleta e do infravermelho próximo. Créditos: Wandeclayt M.

Toda a nossa percepção visual do mundo que nos cerca, a olho nu, é resumida à pouca luz que coletamos através da pequena abertura de nossas pupilas e da estreita faixa do espectro eletromagnético à qual nossos olhos são sensíveis. Objetos astronômicos, no entanto, emitem em todo o espectro eletromagnético (Fig. 46), dos raios-X e raios gama, passando pelo ultravioleta, visível e infravermelho e chegando aos comprimentos mais longos das micro-ondas e das ondas de rádio.

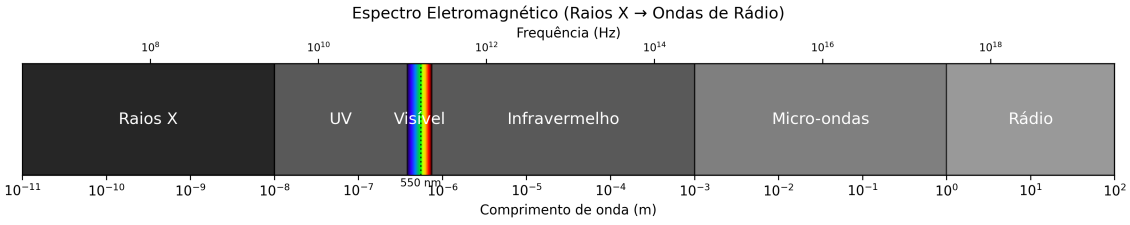


Fig. 46. Espectro eletromagnético, dos raios-X até as ondas de rádio. Créditos: Wandeclayt M.

Enxergando tão pouca luz e em uma faixa tão estreita do espectro, somos todos, exceto

[54]Somos também limitados em resolução. Podemos ver a Lua, por exemplo, sem dificuldade, mas não conseguimos discernir pequenos detalhes em sua superfície. Vemos também facilmente estrelas como Alfa Centauri ou Beta Cygni, mas somos incapazes de identificar que são estrelas duplas.

por aquela pequena faixa que chamamos de luz visível, essencialmente cegos quando se trata de observar o céu.

Ainda assim, somos capazes de enxergar maravilhas astronômicas com nossos olhos.

Mesmo sem a capacidade de resolver suas estrelas individuais, podemos ver com certa facilidade as duas galáxias satélites da Via Láctea, a Pequena e a Grande Nuvem de Magalhães. Podemos identificar como pequenas manchas no céu, nebulosas como a Grande Nebulosa de Órion, a Nebulosa da Lagoa e a nebulosa na região da estrela Eta Carinae. Os aglomerados globulares mais brilhantes, como Omega Centauri, 47 Tucanae e M 13, aparecem como estrelas borradas. Cometas exibem suas caudas, muitas vezes estendendo-se por vários graus, proporcionando um espetáculo à vista desarmada. E para observar a olho nu qualquer um desses objetos, basta ter um céu escuro à disposição e conhecer sua posição.

Em condições normais de luminosidade, o pico da sensibilidade do olho humano (Fig. 47) se localiza por volta do comprimento de onda associado à cor verde (550 nm).

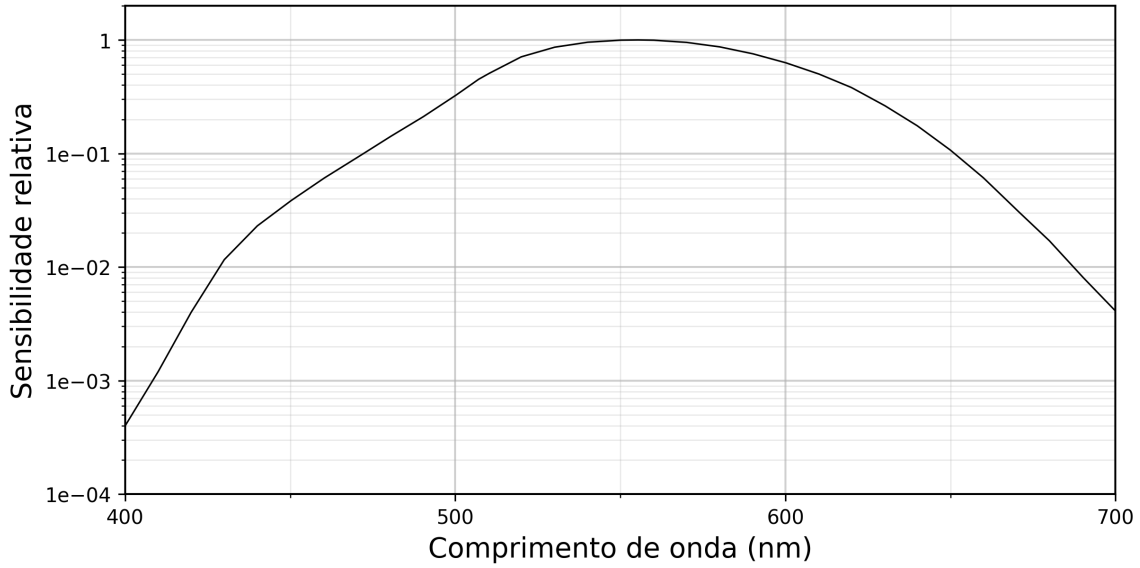


Fig. 47. Sensibilidade relativa do olho humano em função do comprimento de onda da luz. A região de maior sensibildade observada na curva, em torno de 550 nm, corresponde à luz verde. Gráfico: Wandeclayt M. com dados de Warren J. Smith [1].

O pico de sensibilidade no gráfico da Fig. 47 coincide com o pico de intensidade na emissão do espectro solar (Fig. 48).

Nestas condições, conhecidas como "*visão fotópica*", a luz é detectada predominantemente por células receptoras chamadas de cones. Há três tipos de cones no olho humano, cada um deles com faixas de sensibilidade diferentes, com picos de sensibilidade nas regiões do espectro correspondentes à luz azul, verde e vermelha, respectivamente (Fig. 49).

No entanto, nas condições de baixa luminosidade, esperadas para a observação astronômica noturna, os cones são pouco eficientes e um segundo grupo de células receptoras de luz entra em ação: os bastonetes.

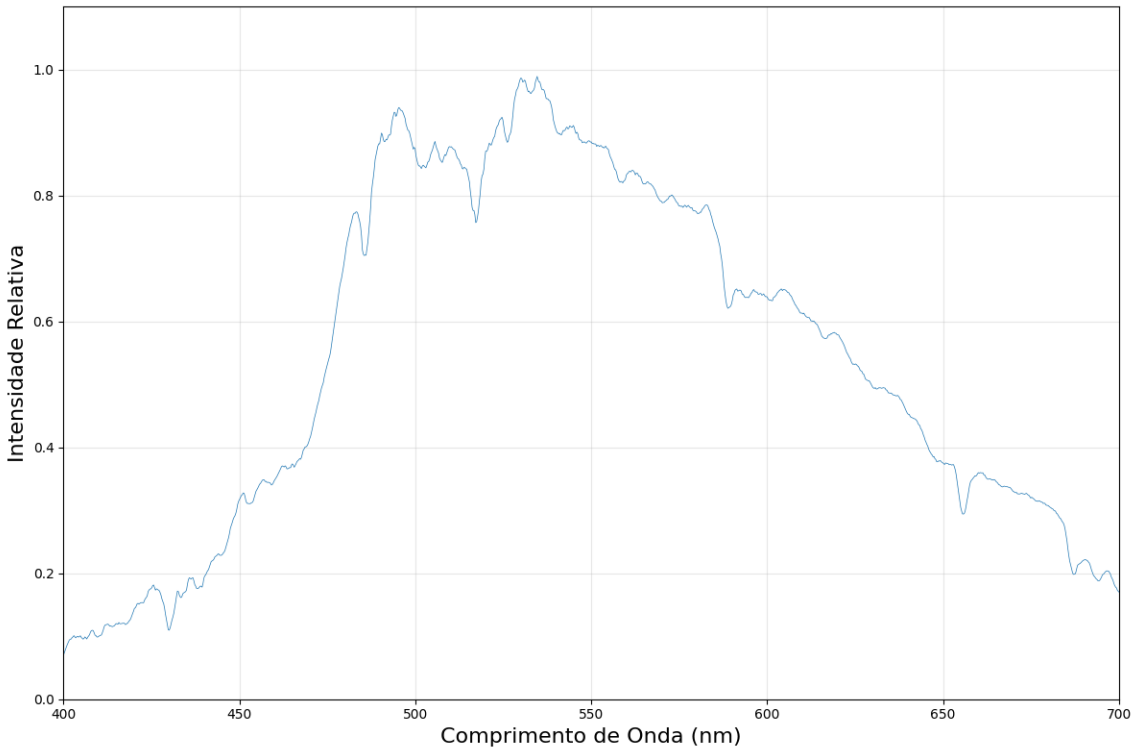


Fig. 48. Espectro solar obtido com o telescópio SUNS. Dados: CRAAM/Mackenzie. Cortesia: Dr. Paulo Simões.

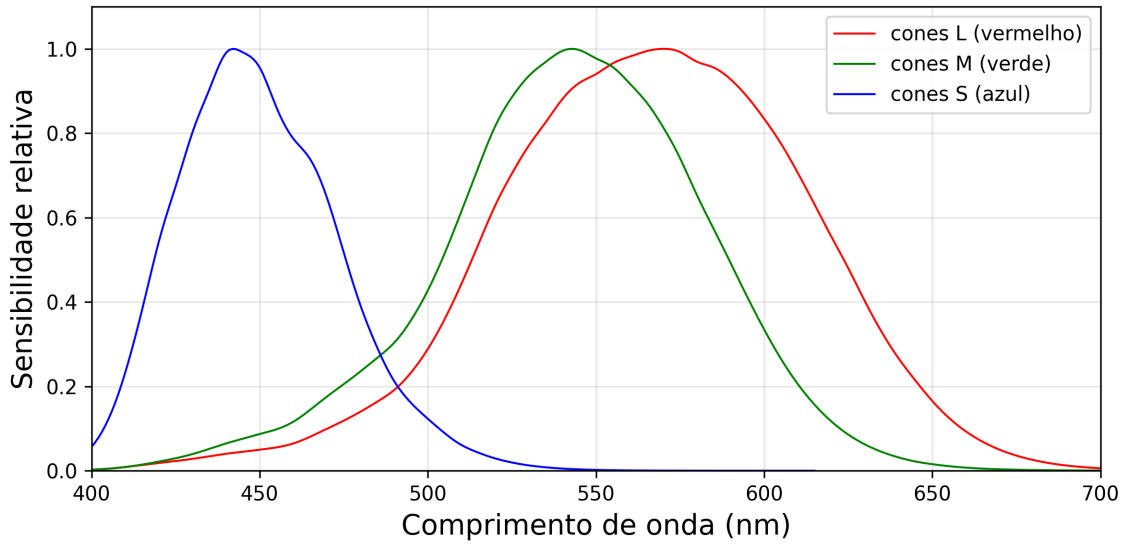


Fig. 49. Sensibilidade relativa dos cones azuis, verdes e vermelhos no olho humano. Gráfico: Wandeclayt M. com dados de Stockman & Sharpe[2] e Colour & Vision Research Laboratory, University College London.

Enquanto os cones populam a região central da retina, os bastonetes são mais abundantes na região periférica. Os bastonetes respondem à luz de maneira diferente dos cones. Primeiro, por serem sensíveis a intensidades luminosas mais baixas. Segundo, por não serem capazes de discriminar cores. Isso significa que os objetos nebulosos de céu profundo que podem exibir cores intensas quando capturados através de câmeras astronômicas, são vistos a olho nu ou através da ocular do telescópio como manchas acinzentadas.

A sensibilidade relativa da visão em condições de baixa luminosidade, utilizando os bastonetes (visão escotópica), também tem seu pico numa posição do espectro diferente do pico da visão em condição de iluminação diurna, usando os cones (visão fotópica).

Os bastonetes possuem seu pico de sensibilidade deslocado em direção aos comprimentos de onda mais curtos e são incapazes de detectar os comprimentos de onda mais longos, na região vermelha do espectro (Fig. 50).

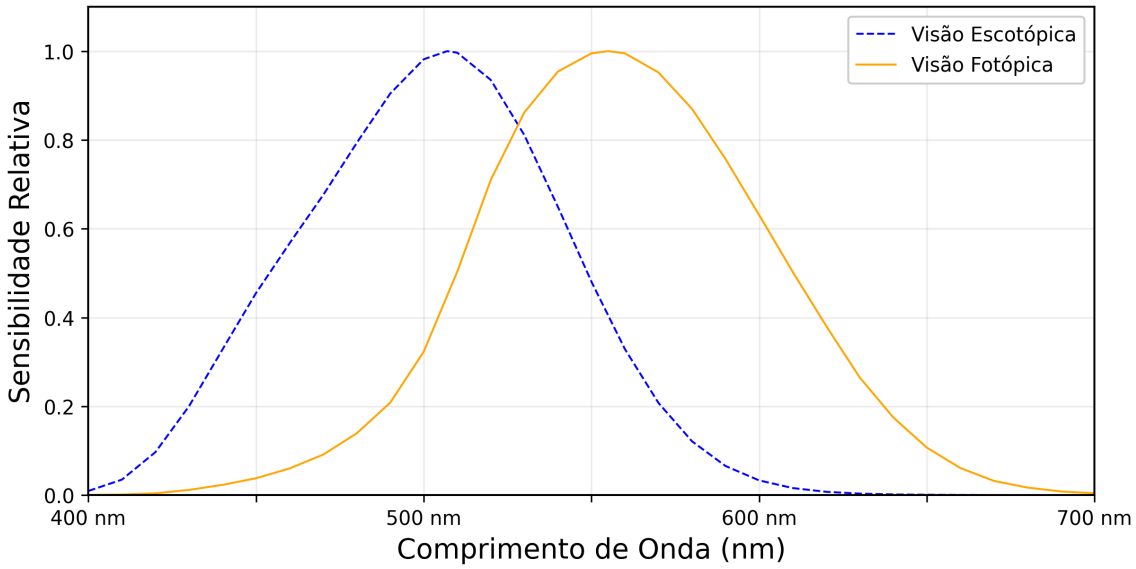


Fig. 50. Curvas de sensibilidade relativa das visões fotópica e escotópica. Na visão escotópica (adaptada ao escuro), o pico de sensibilidade se desloca em direção aos comprimentos de onda mais curtos. Gráfico: Wandeclayt M. com dados de Warren J. Smith [1]

Por esse motivo, lâmpadas vermelhas são empregadas na iluminação de observatórios, e astrônomos amadores e astrofotógrafos utilizam lanternas vermelhas em campo (Fig. 51) quando alguma luz artificial é necessária (para leitura de mapas ou montagem de equipamentos, por exemplo). Os bastonetes são insensíveis à luz vermelha, que só é percebida pelos cones, na região central da retina. Assim, sob luz vermelha, os bastonetes permanecem adaptados ao escuro e garantem uma melhor percepção de objetos de brilho fraco na ocular do telescópio.



Fig. 51. Durante observação visual, o uso de iluminação vermelha é uma forma de preservar a adaptação da visão à escuridão. Foto: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

Preservar a adaptação ao escuro é uma parte importante do ritual a ser seguido em uma sessão de observação, seja ela a olho nu, com binóculos ou telescópios. Evite olhar para fontes de luz branca ou telas. Tipicamente, pode-se levar até meia hora para adaptar completamente os olhos à escuridão. Perder essa adaptação olhando para a tela de um celular durante uma sessão de observação pode arruinar completamente sua experiência, mesmo que você esteja sob um céu espetacularmente escuro.

Em ambientes com mais observadores, lembre-se que a luz de sua tela ou de sua lanterna branca afetará também a visão de seus companheiros de observação. Evite a todo custo usar luzes desnecessárias.

Aplicativos para computadores e dispositivos móveis utilizados durante observações astronômicas também costumam implementar um modo noturno, com tela predominantemente vermelha.

Tudo isso tem como objetivo garantir que a adaptação de nossos olhos à escuridão não seja perdida durante uma sessão de observação noturna.

A predominância dos bastonetes na região periférica da retina nos leva a adotar uma importante técnica na observação visual: o uso da visão periférica. Para perceber melhor objetos de brilho fraco ou difuso, não olhamos diretamente para eles. Desviamos o olhar para uma região próxima, e com a borda da visão, usando os bastonetes, vemos o objeto com mais facilidade.

A constelação de Órion abriga uma brilhante nebulosa visível a olho nu. A posição da Grande Nebulosa de Órion (M42) está identificada na Fig. 52. Para observar M42

a olho nu, não olhamos diretamente para ela. Em vez disso, direcionamos o olhar para uma estrela próxima, como Rigel, Saiph, ou uma das "*Três Marias*" (Alnitak, Anilam, Mintaka). Ao desviar o olhar para uma estrela próxima, a nebulosa entra no campo de nossa visão periférica, onde predominam os bastonetes, e parece mais brilhante.

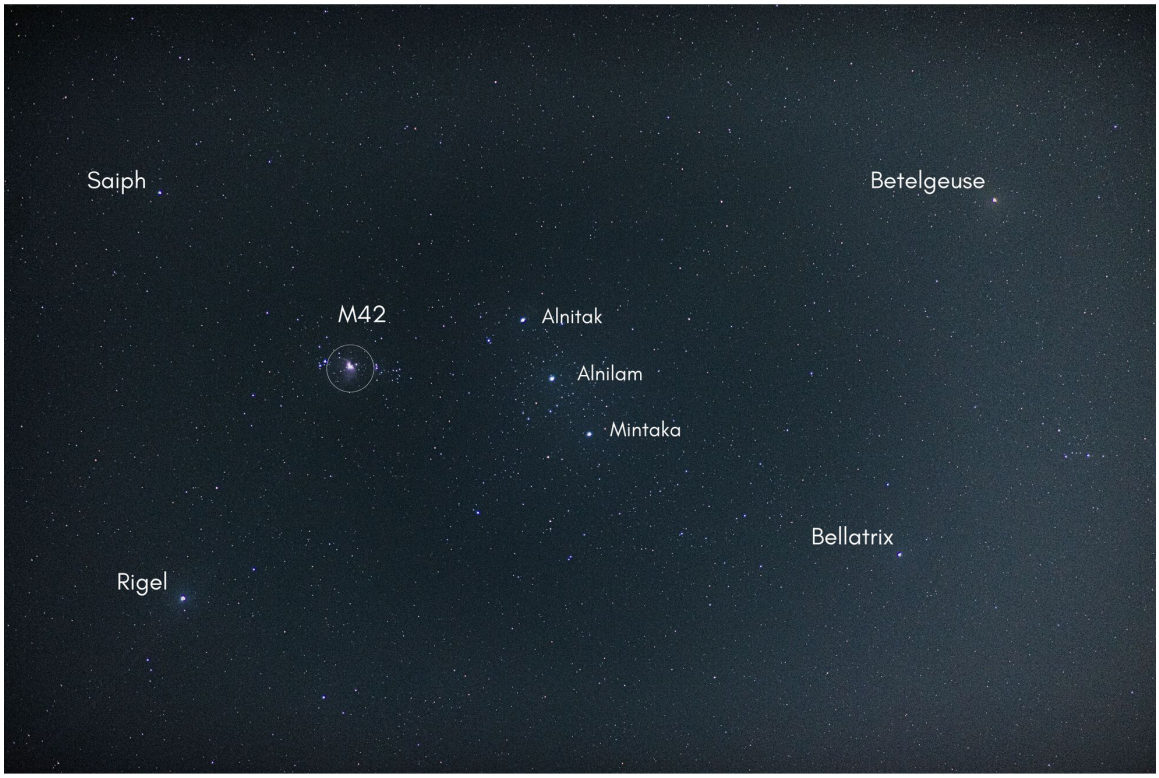


Fig. 52. Região da constelação de Orion, com indicação da posição da nebulosa M42 e de suas principais estrelas. Créditos: Wandeclayt M.

Treine esta técnica sob um céu escuro numa noite sem nuvens, após permanecer ao menos 15 minutos na escuridão, adaptando a visão ao escuro. Utilize uma carta celeste impressa (lembre-se de não usar luz branca) ou um aplicativo de reconhecimento de céu com a tela em modo noturno (Fig. 53).

Esta técnica também é válida nas observações através de binóculos ou da ocular do telescópio. Ao observar objetos de céu profundo mais desafiadores, como certas nebulosas e galáxias, pode ser preciso olhar para a borda da imagem na ocular, para assim perceber melhor o fraco objeto que esteja enquadrado no centro da imagem.

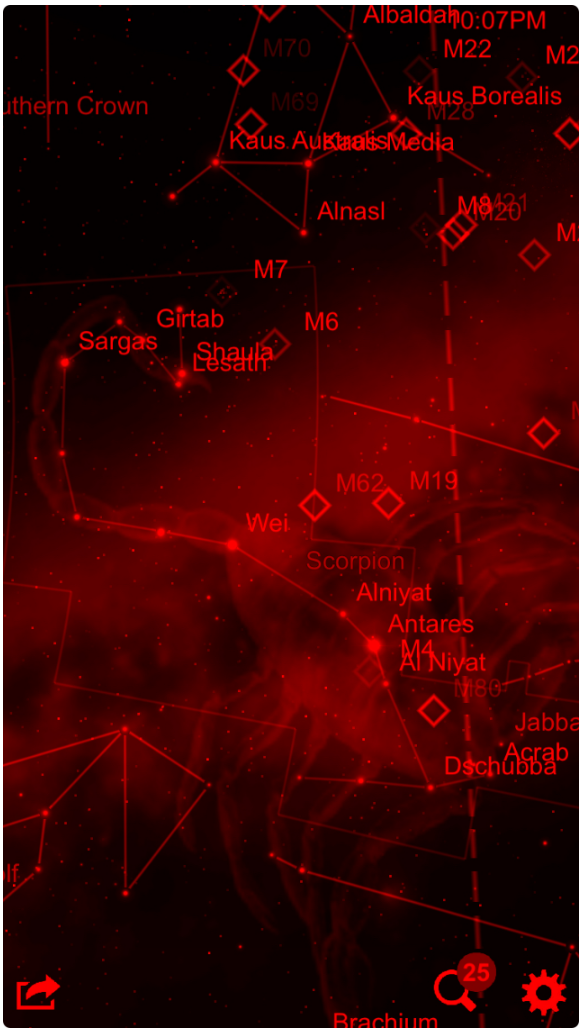


Fig. 53. Tela vermelha no modo noturno do aplicativo Star Chart. Aplicativos com uso em astronomia costumam implementar um modo noturno para preservar a adaptação visual ao escuro.

.

Foi somente em 1609 que Galileu Galilei inaugurou uma nova era na astronomia observacional, apontando para o céu uma luneta capaz de ampliar imagens e de captar mais luz do que o olho humano.

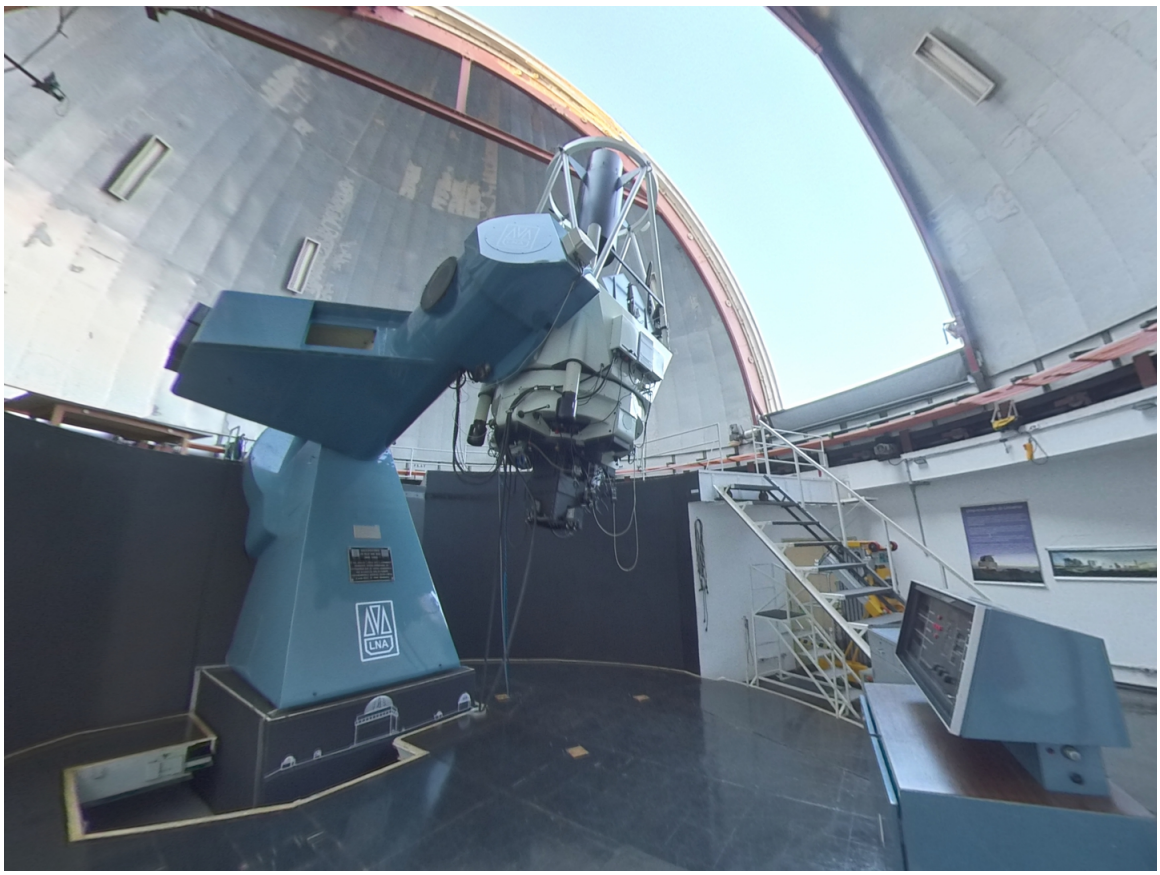


Fig. 54. Telescópio Perkin-Elmer de 1,60 m de diâmetro no Observatório do Pico dos Dias (OPD) em Brazópolis - MG. Este é o maior telescópio em solo brasileiro. Créditos: Wandeclayt Melo.

Possuindo uma abertura substancialmente maior que a de nossas pupilas, o telescópio de Galileu permitiu-lhe enxergar fontes pouco brilhantes e separar objetos que a olho nu aparecem como um só.

Em suas observações, ele identificou pela primeira vez satélites orbitando o planeta Júpiter e registrou estruturas inesperadas no planeta Saturno (Galileu representou Saturno em seus desenhos com alças ou orelhas unidas ao planeta).

Nos mais de 4 séculos desde as primeiras observações de Galileu, a tecnologia de construção de telescópios nos levou de uma luneta com poucos centímetros de diâmetro até grandes telescópios refletores com dezenas de metros de abertura.

Essa busca por instrumentos cada vez maiores tem um motivo muito claro: quando o assunto é óptica, tamanho é documento. Diâmetros maiores significam que objetos cada vez menos luminosos podem ser observados e que maiores resoluções podem ser atingidas.

3.2 Resolução

A abertura (ou diâmetro) da objetiva[55] é o principal parâmetro para caracterizar um telescópio. Esse valor nos informa quanta luz o instrumento é capaz de captar e a sua resolução.

A resolução é a capacidade de resolver [56] como objetos distintos duas fontes pontuais que se encontrem muito próximas uma da outra e depende também do comprimento de onda (ou cor) da luz observada.

O astrônomo William Rutter Dawes (1799-1868), no séc. XIX, estabeleceu uma relação empírica para a resolução óptica de um telescópio, conhecida hoje como Lei de Dawes:

$$\theta = \frac{116}{D}, \tag{3}$$

Onde θ é a resolução em segundos de arco [57] e D é a abertura do telescópio em mm.

O gráfico da Fig. 55 mostra como a resolução varia com a abertura (diâmetro) do telescópio de acordo com a lei de Dawes.

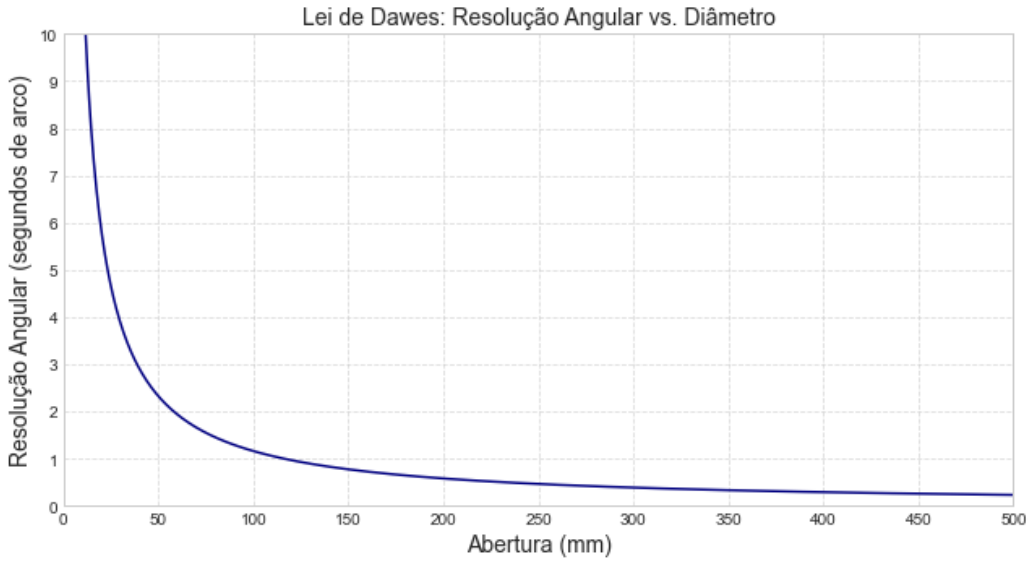


Fig. 55. Lei de Dawes: Abertura x Resolução. Créditos: Wandeclayt Melo.

Em resumo: telescópios com aberturas maiores são capazes de separar objetos mais

[55] A objetiva é o principal componente óptico do telescópio. É o espelho ou lente que capta a luz do objeto. No outro extremo do telescópio temos a ocular, o componente responsável por ampliar e formar a imagem. É onde colocamos nosso olho durante a observação.

[56] Em óptica, e consequentemente em Astronomia, usamos a palavra resolver com o sentido de separar, ou distinguir.

[57] O segundo de arco ($''$) é uma medida de ângulo. 1 grau equivale em 60 minutos de arco ($1^\circ = 60'$) e 1 minuto de arco equivale a 60 segundos de arco ($1' = 60''$), logo, 1 grau equivale a 3600 segundos de arco ($1^\circ = 3600''$). Ao longo do texto o uso de graus, minutos e segundos de arco para indicar o tamanho aparente ou a separação entre objetos celestes será comum.

próximos, como fica evidente no gráfico. Além disso, telescópios maiores formam imagens menores das estrelas. E isso é bom!

As estrelas estão tão distantes que se apresentam como fontes pontuais. No entanto, a imagem formada pelos telescópios não é um ponto[36].

A frente da onda luminosa sofre desvios ao atravessar a abertura circular do telescópio, formando no plano focal uma região circular conhecida como disco de Airy[58][37], cercada por anéis concêntricos de brilho sucessivamente menor.

De maneira mais simples: uma estrela aparece ao telescópio não como um ponto, mas como um borrão circular. Esse borrão possui uma região central mais brilhante, envolvida por anéis mais apagados. Esse borrão diminuirá, melhorando a definição da imagem, à medida que o diâmetro do telescópio aumenta.

Ou seja, quanto maior o telescópio, menores as estrelas aparecerão na imagem formada. E é isso que desejamos: estrelas com imagens menores, para que possamos resolvê-las individualmente.

A Fig. 56 simula o padrão de difração criado por uma abertura circular, similar a uma estrela observada ao telescópio, empregando grandes aumentos e em uma noite com atmosfera calma.

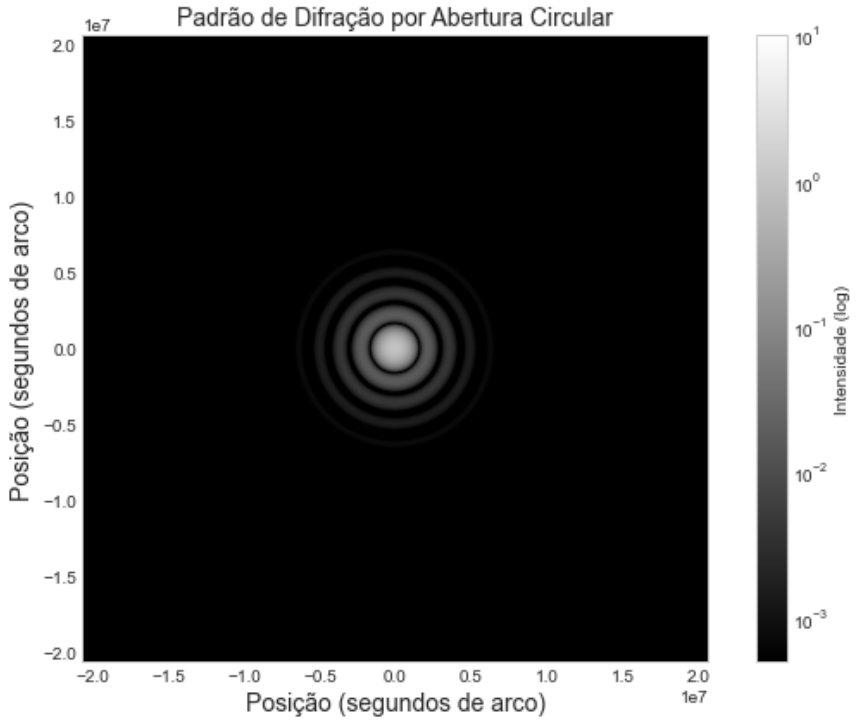


Fig. 56. Simulação do padrão de difração de Airy em um telescópio de 200 mm. A escala de intensidade é logarítmica, para realçar os anéis concêntricos. Créditos: Wandeclayt Melo.

[58]Em homenagem ao matemático e astrônomo real britânico George Biddell Airy (1801-1892)

Mesmo com aumentos moderados, as imagens das estrelas são difusas. No entanto, como seria de se esperar, uma estrela observada com o mesmo aumento em telescópios de diferentes diâmetros apresentará um perfil de intensidade mais concentrado - ou seja, parecerá menor, embora mais brilhante - no telescópio de maior diâmetro. Este efeito está ilustrado nas simulações apresentadas na Fig. 57.

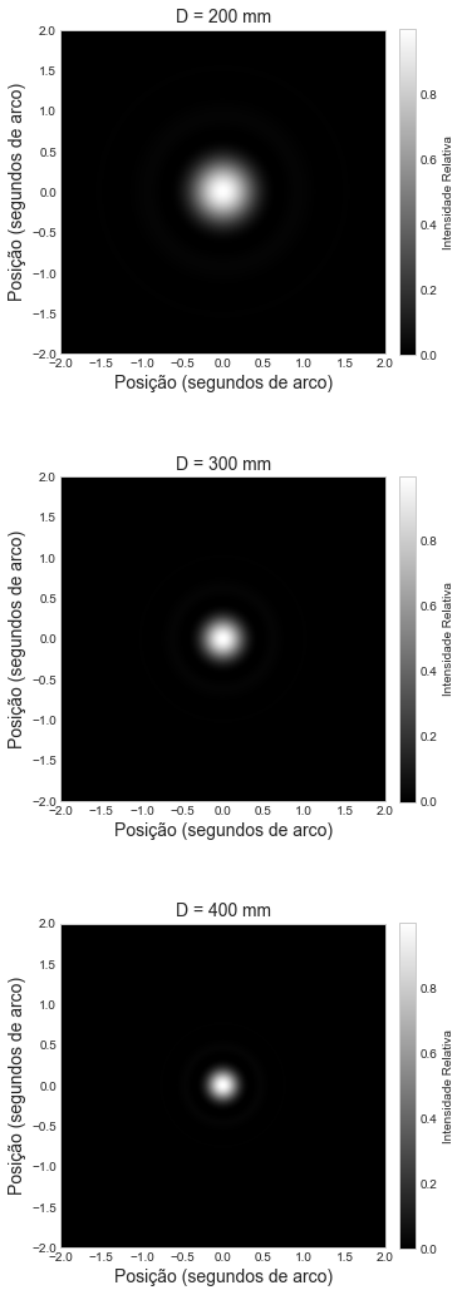


Fig. 57. Simulação da imagem de uma estrela observada com o mesmo aumento em telescópios de diferentes aberturas. Créditos: Wandeclayt Melo.

A resolução dos telescópios é um parâmetro importante para a observação de estrelas duplas. Na Fig. 58 simulamos duas estrelas com separação de 0,5 segundos de arco entre si, observadas com o mesmo aumento, em telescópios de 200 mm, 300 mm e 400 mm de diâmetro.

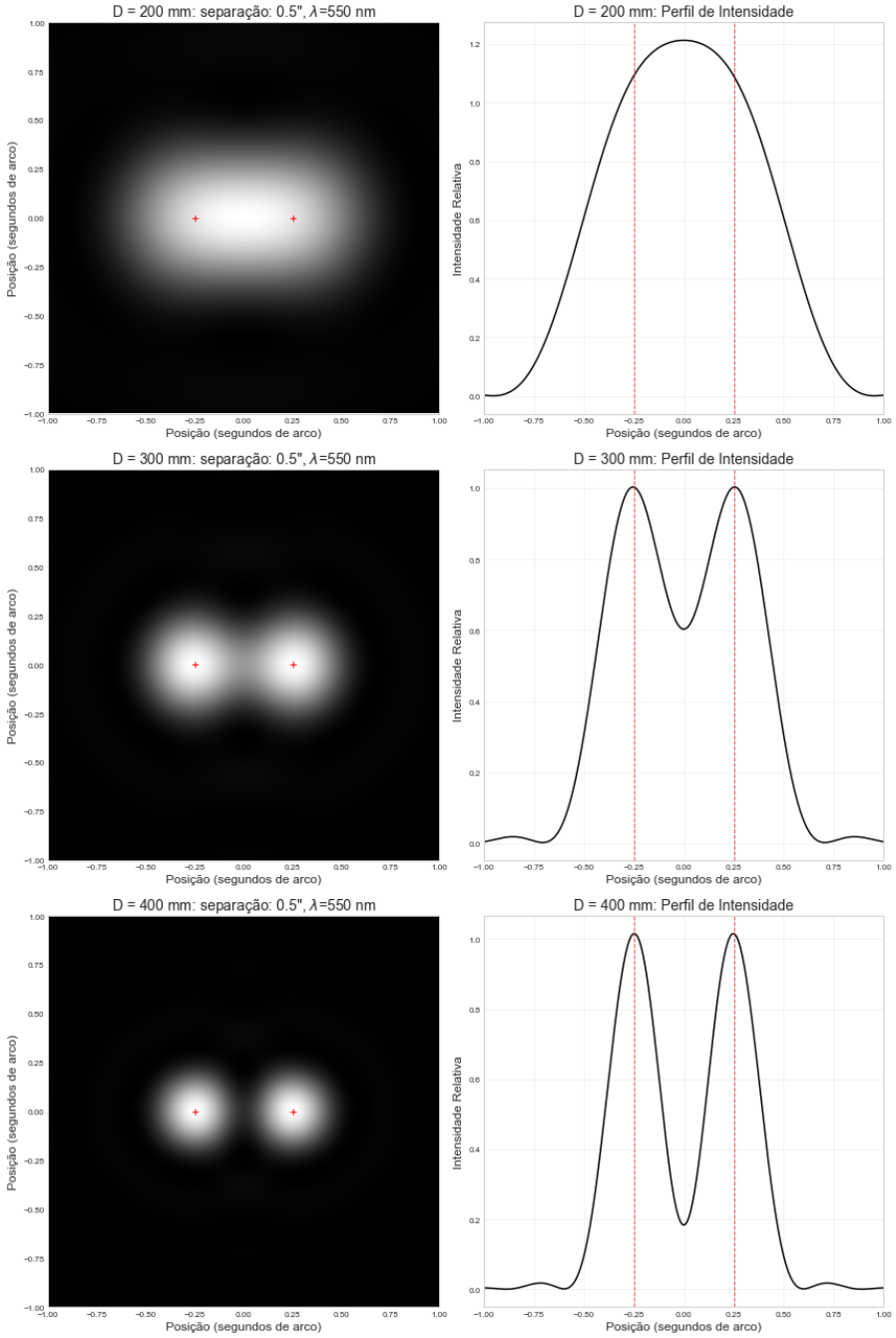


Fig. 58. Simulação da resolução de telescópios com aberturas de 200 mm, 300 mm e 400 mm ao observar duas estrelas com separação de 0,5 segundos de arco. Créditos: Wandeclayt Melo.

Na Fig. 58 as cruzes vermelhas marcam a posição das estrelas no campo. A separação de 0,5 segundos de arco é aproximadamente 3600 vezes menor que o diâmetro aparente da Lua Cheia. Utilizando o telescópio de 200 mm de abertura, a imagem das estrelas se funde. Empregando o mesmo aumento, com o telescópio de 300 mm conseguimos identificar que se tratam de duas estrelas. Ainda com o mesmo aumento, no telescópio de 400 mm, as estrelas estão perfeitamente resolvidas individualmente.

A simulação é consistente com os resultados da Eq. 3 para os diâmetros apresentados:

Tabela 5. Resolução angular de acordo com a Lei de Dawes

Abertura (Diâmetro ∅)	**Resolução (segundos de arco)**	**Estrelas resolvidas a 0,5 segundos de arco**
200 mm	0,58	Não
300 mm	0,39	Sim
400 mm	0,29	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

As simulações anteriores consideram telescópios com uma óptica perfeita, livre de aberrações, com resolução limitada apenas pelo efeito de difração da luz pela abertura do telescópio.

Na prática, outros efeitos, sobretudo sob grandes ampliações, degradam o desempenho do telescópio, reduzindo sua resolução e fazendo com que as estrelas apareçam nas imagem bem maiores que as simuladas considerando o limite de difração.

Um efeito externo com grande impacto na resolução em imagens astronômicas tem origem na turbulência da atmosfera. Esse efeito, que percebemos a olho nu como a cintilação das estrelas, produz imagens “alargadas"das estrelas. Chamamos esse efeito de “*seeing*".

É possível avaliar as condições do *seeing* a olho nu a partir da frequência e intensidade da cintilação das estrelas. Numa noite de atmosfera calma, apenas as estrelas mais próximas do horizonte cintilarão de maneira mais rápida e intensa. Sob condições mais turbulentas, mesmo as estrelas mais altas, próximas ao zênite [59], podem cintilar.

3.3 Aumento

Além da capacidade de separar (resolver) objetos próximos, telescópios podem magnificar a imagem dos objetos. Dentro dos limites de resolução, podemos obter imagens que detalham a superfície de planetas e da Lua ou que revelam estruturas de objetos de céu profundo, como braços de galáxias ou regiões contrastantes em nebulosas.

É normal, quando temos o primeiro contato com instrumentos astronômicos, buscar os maiores aumentos disponíveis. E é ainda mais normal que essa busca resulte em frustração.

Grandes aumentos frequentemente extrapolam os limites de resolução do instrumento, produzindo imagens sem nitidez e evidenciando defeitos da óptica e o efeito do *seeing*.

[59] O zênite é o ponto acima da cabeça do observador.

Uma regra prática é usar aumentos que correspondam, no máximo, à abertura do instrumento em milímetros.

Podemos calcular o aumento, conhecidas as distâncias focais do telescópio e da ocular, usando a Eq. (4) [38, 39]:

$$\text{Aumento} = \frac{F_{(telescopio)}}{F_{(ocular)}} \tag{4}$$

De onde vemos que oculares com distâncias focais mais curtas proporcionam maiores ampliações.

Como a distância focal da objetiva é fixa, controlamos o aumento através da substituição das oculares.

3.4 Refratores

A luneta de Galileu era um telescópio que utilizava somente lentes em sua construção. Telescópios que utilizam apenas lentes são chamados de refratores e são sinônimos de luneta. Como seu nome sugere, estes telescópios baseiam-se na refração da luz ao cruzar a interface entre dois meios de propagação, como o ar e o vidro.

A velocidade de propagação da luz no ar é de aproximadamente 3×10^8 m/s. Esta velocidade é diferente (mais baixa) em outros meios de propagação, como o vidro usado na construção de lentes.

Ao cruzar a interface entre esses meios, a luz é desviada em sua direção de propagação. Esta mudança na geometria dos raios é o que chamamos de refração e é ela a responsável pelos efeitos de ampliação e de concentração de luz que buscamos nos telescópios. No entanto, comprimentos de onda (cores) diferentes sofrem desvios diferentes. Introduzindo uma dispersão nas cores observadas. Chamamos esse defeito na formação da imagem de aberração cromática.

A Fig. 59 ilustra como uma lente tem pontos focais diferentes para luz de comprimentos de onda diferentes. Os raios de luz branca (contendo todas as cores) de uma fonte no infinito chegam paralelos pelo lado esquerdo da imagem e são desviados ao atravessar a lente. Cada cor converge para um ponto distinto e a imagem produzida possui uma aura colorida. A cor azul é mais desviada e tem seu foco mais próximo à lente. A cor vermelha sofre um desvio menor e tem seu foco em um ponto mais afastado.

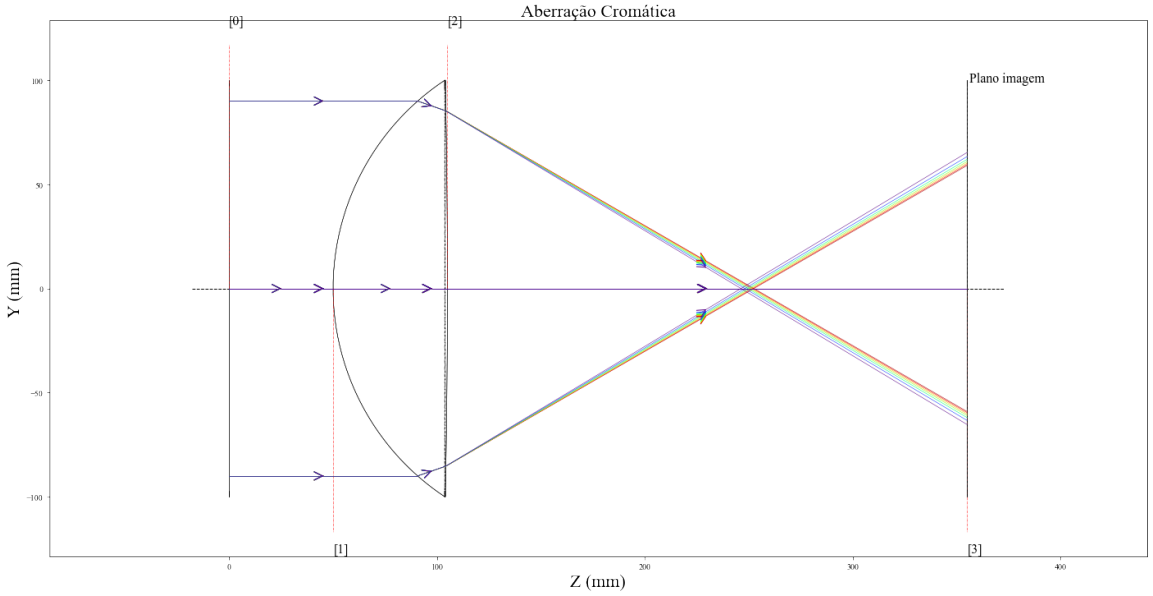


Fig. 59. Aberração cromática em uma lente simples (singleto). Diagrama: Wandeclayt Melo.

A aberração cromática é um defeito que acomete todos os sistemas que usem lentes (telescópios refratores, binóculos, oculares) e exige o uso de mais elementos ópticos para

minimizá-lo, empregando em vez de uma única lente (singleto), como mostrado no diagrama da Fig. 59, conjuntos com duas (dubletos) ou três (tripletos) lentes.

O arranjo mostrado na Fig. 60 é um dubleto acromático. Este arranjo é otimizado para que a luz vermelha e a luz azul tenham o mesmo ponto focal. Neste arranjo, a objetiva tem duas componentes. A segunda lente (bicôncava) compensa a dispersão de cores da primeira lente (biconvexa).

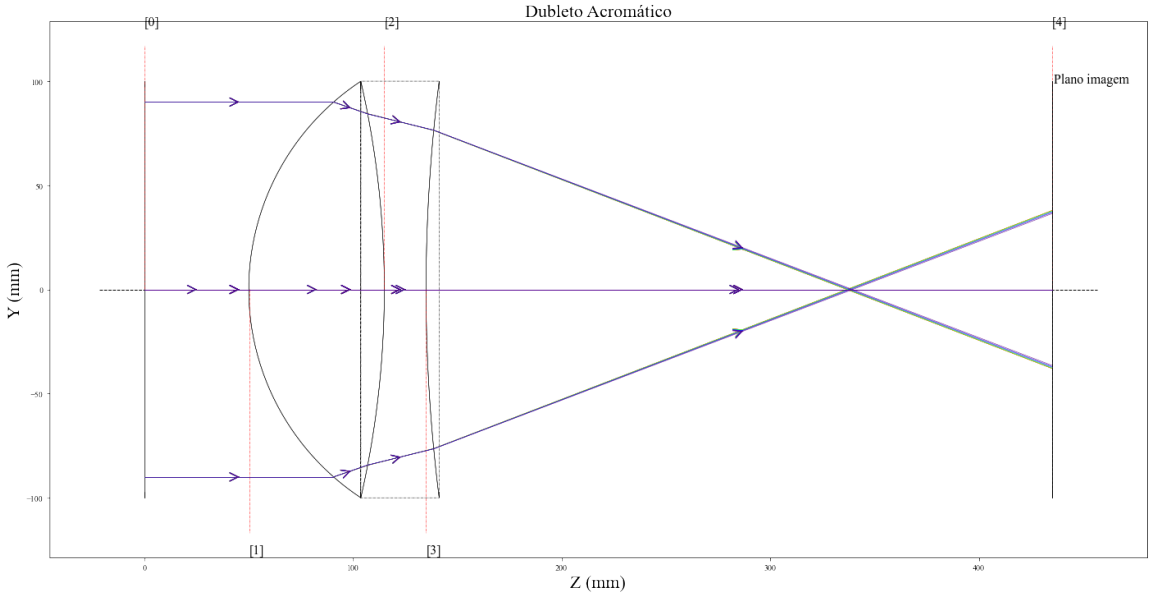


Fig. 60. Dubleto Acromático

O dubleto acromático é uma solução criada por Chester Moor Hall [40], no Séc. XVIII, para o problema da aberração cromática que limitava o diâmetro das lentes usadas nos telescópios refratores. Além da geometria diferente, os elementos do dubleto também usam vidros diferentes, combinando o vidro comum do tipo *crown* com vidro do tipo *flint* que possui óxido de chumbo em sua composição.

Embora a configuração acromática seja um grande avanço em relação ao singleto, trazendo a luz azul e a luz vermelha para o mesmo foco, ainda há uma aberração residual, correspondendo à diferença entre esse foco e o da luz verde. Um arranjo mais complexo, envolvendo três lentes e que traz uma melhora significativa em comparação com o **dubleto acromático** é o **tripleto apocromático**.

Esse aumento na complexidade das lentes e o consequente ganho na qualidade de imagem explicam a diferença de preço entre os pequenos e baratos refratores encontrados em lojas de departamento e os refratores acromáticos e apocromáticos de maior desempenho.

A Fig. 62 mostra um telescópio refrator moderno, com 120 mm de abertura.

Os telescópios refratores não possuem nenhuma obstrução central na área de coleta de luz e tendem a produzir imagens mais luminosas e contrastadas em comparação com refletores de mesmo diâmetro.



Fig. 61. Telescópio refrator acromático de 120 mm Sky-Watcher. Créditos: Sky-Watcher.



Fig. 62. Telescópio refrator apocromático de 122 mm SVBONY. Créditos: SVBONY.

Na Fig. 63 vemos um diagrama da configuração óptica de um telescópio refrator. A objetiva, à esquerda, é uma lente ou conjunto de lentes que coleta a luz dos objetos. À direita, a ocular forma a imagem no plano focal e pode ser trocada para mudar o aumento do instrumento.

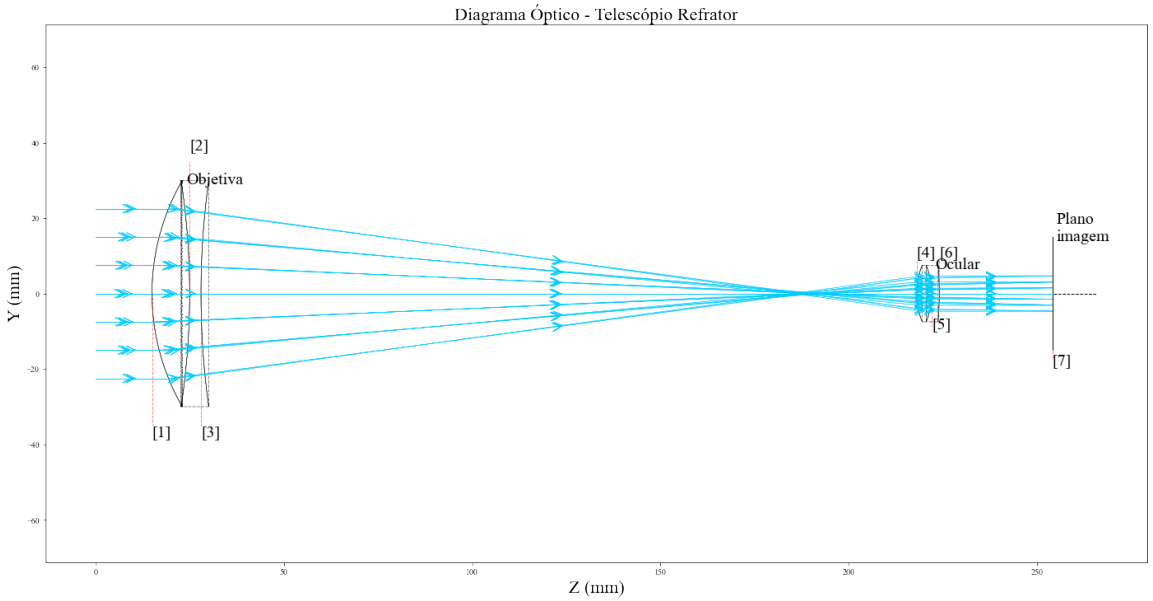


Fig. 63. Esquema óptico simplificado de um telescópio refrator. Diagrama gerado com a biblioteca Python KrakenOS [3]. Créditos: Wandeclayt Melo.

Telescópios refratores de grande abertura são pouco comuns. As lentes são fixadas ao tubo somente por suas bordas, o que faz com que objetivas de maior diâmetro precisem também ser espessas, para resistir a deformações. Com o aumento da espessura das lentes surgem os problemas do peso e da redução da transparência, já que a luz precisará atravessar uma camada maior de vidro. Tipicamente, refratores disponíveis comercialmente são encontrados com diâmetros inferiores a 200 mm.

3.5 Refletores

Quando o elemento óptico que capta a luz do céu é um espelho, o telescópio é chamado de refletor. Na configuração newtoniana, a mais comum, a luz que entra pelo tubo é coletada por um espelho primário côncavo, localizado no fundo do tubo, e refletida em direção ao foco da curvatura desse espelho. Antes do ponto focal, um espelho plano, posicionado a 45º, desvia a luz perpendicularmente.

Telescópios refletores são os mais baratos para grandes aberturas. Podem ser construídos artesanalmente, desde o desbaste e polimento de seus espelhos até a construção de seus sistemas de montagem. Há excelentes construtores de telescópios nacionais, oferecendo uma variada gama de diâmetros que atendem desde iniciantes até observadores como mais experiência e interesse em imageamento avançado.

A Fig.64 mostra um telescópio newtoniano de fabricação nacional em montagem dobsoniana, indicado para iniciantes.



Fig. 64. Telescópio refletor de 114 mm de abertura Cosmos Sky Friend. Créditos: Telescópios Cosmos.

Telescópios refletores são leves e baratos, mas requerem cuidado no seu armazenamento, já que a superfície dos espelhos fica exposta ao ambiente, sujeitando-se a poeira e

umidade. O cuidado é necessário porque a limpeza dos espelhos não é um procedimento trivial. A limpeza, quando necessária, deve ser feita de maneira a não danificar a fina camada refletora de alumínio depositada sobre o vidro.

Além da limpeza, ocasionalmente pode ser necessário alinhar (colimar) os espelhos, que sofrem desalinhamento com o transporte, vibrações e pancadas.

A Fig. 65 mostra um diagrama óptico simplificado de um refletor newtoniano. A luz entra pelo lado esquerdo do tubo, é coletada por um espelho primário côncavo na posição [1] e refletida em direção ao foco da curvatura desse espelho. Um espelho secundário plano é posicionado a 45º na posição [2], desviando a luz a 90º em direção ao plano focal [5] onde instalamos as oculares[3].

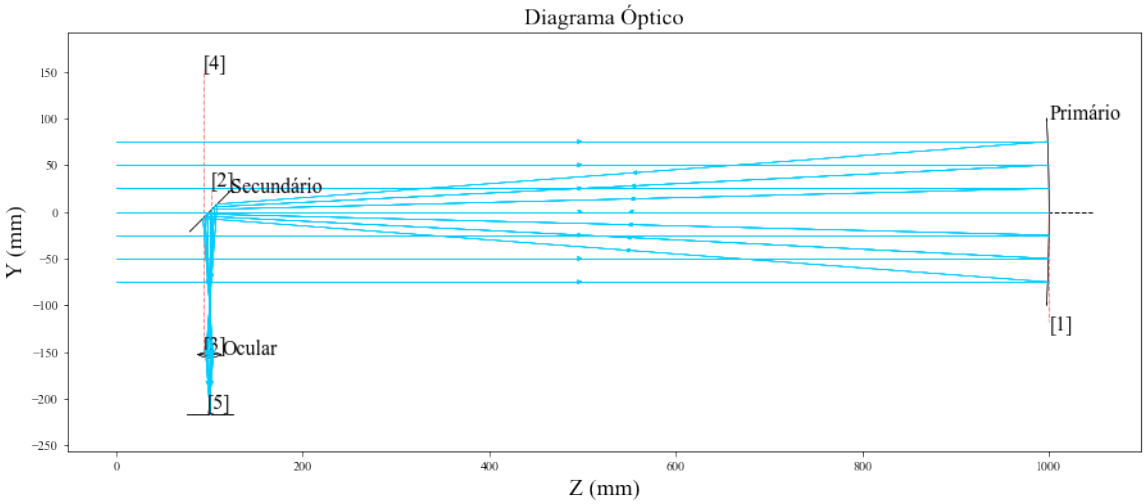


Fig. 65. Esquema óptico simplificado de um telescópio refletor newtoniano. Diagrama gerado com a biblioteca Python KrakenOS [3]. Créditos: Wandeclayt Melo.

3.6 Catadióptricos

Utilizando uma combinação de lentes e espelhos, os telescópios catadióptricos compõem uma classe de telescópios com tubos compactos, preço competitivo e excelente desempenho óptico. Sua configuração mais comum incorpora uma lente corretora a um telescópio refletor do tipo Cassegrain.

São telescópios que combinam vantagens dos refletores e dos refratores.



Fig. 66. Telescópio Celestron Schmidt-Cassegrain de 8"em montagem altazimutal computadorizada. Créditos: Celestron.

A Fig. 65 mostra um diagrama óptico simplificado de um refletor Cassegrain. A luz entra pelo lado esquerdo do tubo, é coletada por um espelho primário côncavo na posição [1] e refletida em direção ao foco da curvatura desse espelho. Um espelho secundário convexo na posição [2] reflete a luz de volta, através de um orifício central no espelho primário em direção ao plano focal [3] onde instalamos as oculares. Esta configuração reduz as dimensões do tubo do telescópio, resultando em tubos compactos mesmo para grandes distâncias focais.

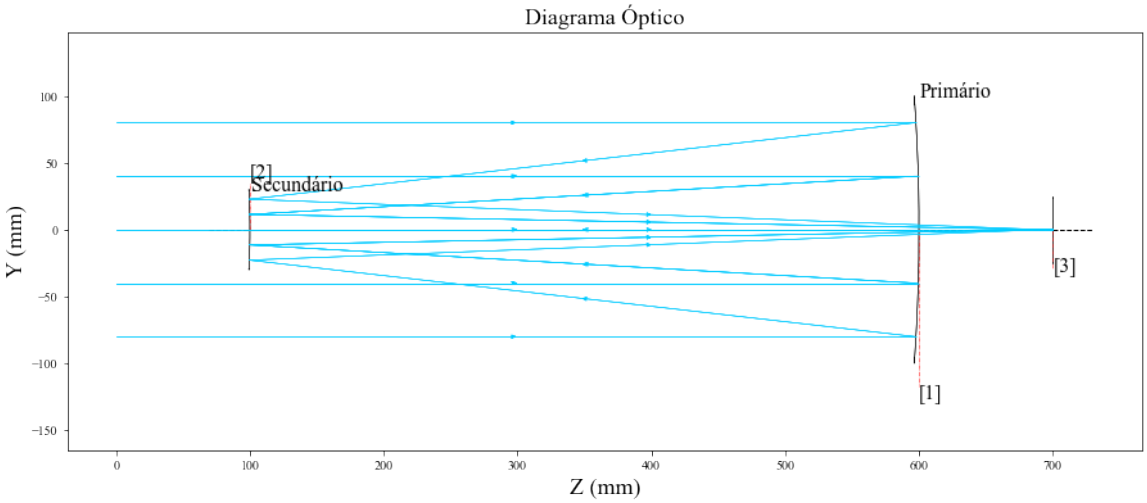


Fig. 67. Esquema óptico simplificado de um telescópio refletor Cassegrain. Diagrama gerado com a biblioteca Python KrakenOS [3]. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo

Para este telescópio se tornar um catadióptrico, uma lente corretora é instalada na entrada do tubo, reduzindo aberrações como curvatura de campo e coma, que afetam a qualidade da imagem, sobretudo nas regiões mais afastadas do eixo óptico.

3.7 Oculares

Oculares são um componente crítico. São os últimos elementos ao longo do caminho óptico e são responsáveis pela ampliação da imagem observada. Um telescópio com um sistema óptico de boa qualidade pode ter sua imagem arruinada por oculares que introduzam aberrações na imagem.

Por serem compostas inteiramente por lentes, são susceptíveis a aberração cromática, por isso é comum que seus projetos ópticos empreguem vários conjuntos de lentes, visando diminuir este tipo de aberração. As oculares do tipo ***Plössl*** (Fig. 68) são compostas por quatro elementos agrupados em dois dubletos[60] e oferecem bom desempenho por custo aceitável. Oculares Plössl, tipicamente, proporcionam um campo aparente de 50º[40].

É importante entender o que significa "campo aparente": dizer que uma ocular tem um campo aparente de 50º significa que a imagem formada vai ocupar uma área equivalente a 50º em nosso campo de visão.

O campo (FOV[61]) aparente é uma variável importante para determinar o campo de visão real no céu, conforme a Eq. 5:

$$\text{FOV}_{real} = \frac{\text{FOV}_{aparente}}{\text{Aumento}}. \tag{5}$$

Assim, utilizando uma ocular de 15 mm, com campo de 50º em um telescópio com F=1200 mm, relembrando a Eq. 4, teremos um aumento de

$$\text{Aumento} = \frac{\text{F}_{telescopio}}{\text{F}_{\text{ocular}}} = \frac{1200\text{ mm}}{15\text{ mm}} = 80.$$

E um campo de visão (FOV) real de

$$\text{FOV}_{real} = \frac{50^\circ}{80} = 0,625^\circ = 37,5'.$$

O "*campo real*" se refere ao ângulo compreendido no céu. A Lua Cheia tem o diâmetro aparente de aproximadamente $30'$ e poderia ser observada integralmente dentro deste campo de $37,5'$.

As oculares Plössl tornaram-se um padrão no mercado, colocando em desuso famílias mais de desenho mais simples, com campo aparente mais estreito e mais sucetíveis a aberrações como as Huygens, Ramsden e Kellner. Apesar de terem um campo típico de 50º, oculares Plössl mais longas, como a 40 mm, tem um campo mais estreito, restrito pelo diâmetro do tubo.

Outras famílias de oculares como Nagler, Erfle e Ortoscópicas são mais complexas. E como se pode esperar, o preço sobe com a complexidade e qualidade das oculares, não sendo impossível gastar em oculares tanto quanto se pode gastar em um telescópio. Entre as famílias de oculares de mais alto desempenho, destacam-se as Nagler (Fig. 71), proporcionando um grande campo aparente de 82º com imagens de alto contraste.

[60] Conjuntos de duas lentes.
[61] *Field of view*.



Fig. 68. Ocular Celestron Omni Plössl de 15 mm, com campo (FOV) aparente 50º. Créditos: Celestron.



Fig. 69. Ocular TeleVue Plössl de 20 mm de distância focal, campo (FOV) aparente de 50º. Créditos: Tele Vue.



Fig. 70. Ocular Celestron Plössl de 40 mm, série Omni, com campo (FOV) aparente 43º. Créditos: Celestron.

Além da distância focal e do campo aparente, um outro parâmetro precisa ser observado ao selecionar oculares: o diâmetro do tubo. As bitolas mais comuns são 2” e 1,25” mas há também as mais exóticas oculares de 0,965"(24,5 mm). Ao adquirir oculares, certifique-se da compatibilidade entre as bitolas da ocular e do telescópio, ou providencie adaptadores.

As oculares também diferem na distância máxima entre o olho e última superfície da ocular para uma visão completa do campo. Esta distância de “alívio ocular” (*eye relief*) é importante para uma observação confortável, sobretudo quando se usa óculos. Oculares Plössl de distância focal curta proporcionam menores distaâncias de *eye relief* dificultando a observação com o uso de óculos.

Outros detalhes importantes na construção das oculares são os revestimentos anti reflexo e a pintura interna do cilindro, reduzindo reflexões internas, aumentando a transmissão de luz e garantindo imagens com mais contraste.

Os cilindros devem também possuir roscas internas, permitindo o acoplamento de filtros.

Um kit essencial de oculares deve garantir um conjunto de aumentos fortes (para observação de planetas, estrelas duplas e detalhes da superfície lunar), aumentos médios (para campos intermediários e alguns objetos de céu profundo menos extensos) e aumentos fracos (para nebulosas e aglomerados extensos e para observação da Lua e Sol - com filtros apropriados).



Fig. 71. Ocular TeleVue Nagler de 31 mm, com campo (FOV) aparente 82º. Créditos: Tele Vue Optics.

3.8 Lentes Barlow

O uso de lentes multiplicadoras do tipo Barlow (Fig. 72) pode reduzir seu investimento em oculares. Lentes do tipo Barlow são comumente com fatores de ampliação de 2X, 3X e 5X. Quando acopladas a uma ocular, multiplicam seu aumento pelo fator de ampliação. Assim, é possível ter, por exemplo, 6 configurações disponíveis de aumento, com apenas três oculares e uma Barlow.



Fig. 72. Lente Barlow 2X Celestron, série Omni. Créditos: Celestron.

Uma das vantagens do uso da Barlow é manter a distância de *eye relief* da ocular mesmo sob fortes aumentos, o que não costuma ser possível, sobretudo com oculares Plössl de pequena distância focal.

3.9 Binóculos

Alguns objetos são bem mais extensos que o campo de visão dos telescópios. Esse tipo de objeto se beneficia dos campos largos e luminosos proporcionados pelos binóculos. Além do grande campo, estes instrumentos agregam outras vantagens: custo mais baixo, peso e tamanho reduzidos, facilidade de transporte e armazenamento, baixa manutenção.

Binóculos são caracterizados por sua abertura e pela sua magnificação. Sua designação é da forma "aumento x abertura (em mm)". Assim, binóculos designados como 7x50 (Fig. 73), proporcionam aumento de 7 vezes e possuem objetivas com abertura de 50 mm.

Com estas características ópticas, a pupila de saída desse instrumento é de 7,1 mm (Eq. 6), ou seja, a luz captada pela objetiva é projetada na saída em uma região circular de 7,1 mm de diâmetro, coincidindo com a abertura máxima da pupila de um humano adulto, quando adaptada ao escuro. Nestas condições, nosso olho aproveita toda a luz captada pelas objetivas.

$$\text{Pupila} = \frac{\text{Abertura}}{\text{Aumento}} \tag{6}$$

O campo de visão real de binóculos 7x50 mm é de mais de 6º. Este grande campo de visão é ideal para observação de cometas, das Nuvens de Magalhães, das estrelas de fundo da Via Láctea, de aglomerados próximos como as Plêiades (M45) e outros objetos extensos.



Fig. 73. Binóculos Celestron série Cometron 7x50mm. Créditos: Celestron.

Com grandes aumentos e aberturas, os binóculos passam a ter dimensões e pesos que exigem o uso de tripés para uma observação confortável, podendo sair de menos de 800 g para binóculos como o Celestron Cometron de 7x50 mm, para ultrapassar 2 kg em binóculos 20x80 mm da série SkyMaster (Fig. 74), também da Celestron.

Mesmo com um grande aumento, o campo de visão proporcionado por este instrumento (3,7º) ainda é muito maior que o dos telescópios, proporcionando imagens brilhantes e con-

trastadas de campos largos e ricos do céu. Apesar de exigir um tripé (Fig. 75) para garantir imagens estáveis, ainda é um instrumento portável o suficiente para ser transportado na mochila em expedições a regiões afastadas da poluição luminosa, além de ser pouco sensível a pequenos impactos, vibrações e intempéries.



Fig. 74. Binóculos Celestron série SkyMaster 20x80mm. Créditos: Celestron.



Fig. 75. Binóculos Celestron série SkyMaster 20x80 mm montado em tripé. Créditos: Celestron.

Binóculos são os instrumentos ideais de entrada. Mas isso não significa que você vai abandoná-los ao adquirir um telescópio. Eles seguirão sendo companheiros de viagem, de caça a cometas e de noites prazerosas sob o céu estrelado. É um investimento para toda a vida.

3.10 *Smart Telescopes*

Os *Smart Telescopes* são uma nova classe de telescópios compactos, de baixo custo e completamente automatizados. Esses telescópios inteligentes são dedicados à captura de imagens e não permitem a observação visual, através da ocular. No entanto, apesar de sua pequena abertura, são capazes de registrar com sucesso objetos de céu profundo como galáxias, nebulosas e aglomerados estelares, mesmo em condições severas de poluição luminosa em céus urbanos.



Fig. 76. Smart Telescope ZWO Seestar S50, em frente ao prédio do telescópio Perkin-Elmer de 1,60 m do Observatório do Pico dos Dias (OPD). Créditos: Wandeclayt M.

Dotados de sistemas internos de processamento de imagem e geolocalização, esses telescópios alinham-se de forma autônoma e apontam, reconhecem e acompanham alvos no céu durante capturas de longa exposição, além de realizar internamente o processamento das imagens capturadas, empilhando uma série de exposições curtas e gerando uma imagem final com alta relação sinal-ruído (SNR) [62].

É possível selecionar os alvos através da biblioteca de objetos ou navegando através de um atlas. Durante o apontamento, o telescópio reconhece visualmente o campo, garantindo

[62] A relação sinal ruído é uma indicação da qualidade da imagem. Em imagens de exposições curtas de objetos pouco brilhantes, o ruído na imagem é alto comparado ao nível do sinal. Combinando uma sequência de imagens num processo de empilhamento é possível eliminar o ruído e realçar o sinal.

que o alvo esteja centralizado no campo do detector.

Uma das opções no mercado é o Seestar S50. O telescópio ***Seestar S50*** é um *Smart Telescope* da fabricante chinesa ZWO. É um telescópio de 50 mm de abertura, com 250 mm de distância focal, equipado com um sensor Sony IMX462 que registra imagens de 1920x1080 pixels, que podem ser combinadas em mosaicos de maiores dimensões. É leve (3 kg), facilmente transportável e é equipado com uma bateria de longa duração (6 h de uso).



Fig. 77. Imagem da Nebulosa Trífida (M20), com tempo total de exposição de 42 mim, capturada com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M.

As imagens geradas trazem informações de horário da captura e geolocalização do telescópio e carregam as informações de coordenadas celestes do campo registrado.

Embora não seja possível observar visualmente, se o objetivo é o registro de imagens, sobretudo sem a necessidade do domínio de técnicas avançadas de processamento de imagens astronômicas, os *Smart Telescopes* são uma opção muito adequada para iniciantes ou mesmo para observadores experientes que busquem um instrumento portátil e que produza imagens sem grande carga de trabalho no pós-processamento.

3.11 Montagens

3.11.1 Montagem Altazimutal

Falamos até agora sobre os tubos ópticos[63] que constituem os telescópios. Mas estes tubos precisam estar acoplados a uma montagem que dará ao mesmo tempo estabilidade e mobilidade ao tubo. As montagens se dividem em dois tipos: altazimutais e equatoriais.

O telescópio na Fig. 78 é um refletor newtoniano instalado em uma base altazimutal dobsoniana. Esta é uma montagem simples, portátil e de baixo custo, idealizada pelo astrônomo amador e popularizador da astronomia John Lowry Dobson[64] (1914-2015).



Fig. 78. Telescópio refletor de 10" em montagem altazimutal dobsoniana. Créditos: Sky-Watcher.

Montagens altazimutais, como a dobsoniana, movem-se em torno de um eixo horizontal (azimute) e de um eixo de elevação vertical (altura). É uma montagem popular entre

[63] Em inglês é comum se referir ao tubo como Optical Tube Assembly (OTA)

[64] Além de construir telescópios, John Dobson idealizou com dois alunos (Bruce Sams e Jeff Rollof) a associação *San Francisco Sidewalk Astronomers* em São Francisco, na California, em 1968. Os membros do movimento eram astronomos amadores, popularizadores da Astronomia que montavam telescópios nas calçadas e convidavam o público a observar gratuitamente.

construtores de telescópio amadores (ATM[65]) que as utilizam para construir telescópios de grandes aberturas sem sacrifício da portabilidade.

Este não é o tipo de montagem mais adequado para astrofotografia, podendo, no entanto, ser usada para fotografar objetos que usualmente não requerem longas exposições como a Lua e o Sol.

Para manter um objeto no campo da ocular do telescópio, são necessárias correções simultâneas nos eixos de elevação e azimute, tornando o acompanhamento mais complexo em montagens motorizadas. Mas essas dificuldades são irrelevantes em sessões de observação visual (não fotográficas) em que realizamos o acompanhamento manualmente.

Telescópios dobsonianos são uma excelente opção de telescópio de entrada. Dispensam um alinhamento preciso no início da sessão, suportam telescópios de grandes dimensões sem o uso de contra-pesos e não necessitam de alimentação elétrica.

Além da montagem dobsoniana há outras configurações altazimutais, como a mostrada na Fig. 79. Essa montagem é adequada sobretudo para telescópios refratores (lunetas) de distância focal curta e outros pequenos telescópios.



Fig. 79. Tripé com montagem altazimutal Explore Scientific, modelo Twilight Nano, para telescópios de até 6 kg. Créditos: Explore Scientific.

[65] Amateur Telescope Makers.

A complexidade (e o custo) das montagens altazimutais podem escalar rapidamente para sistemas motorizados e computadorizados, que incluem sistemas de guiamento e busca de objetos automatizada (sistemas *Go-To*), como o telescópio mostrado na Fig. 80. Este modelo incorpora recursos avançados de geolocalização, alinhamento e acompanhamento, além de uma biblioteca interna de objetos astronômicos para apontamento automático.



Fig. 80. Telescópio Celestron CPC Deluxe 1100 HD em montagem altazimutal computadorizada. Créditos: Celestron.

3.11.2 Montagem Equatorial

A Fig. 81 é uma fotografia noturna com 30 minutos de tempo de exposição, capturada na cidade de Itatim, na Bahia, em fevereiro de 2023. A câmera está apontada para a direção do ponto cardeal sul. No primeiro plano vemos um *inselberg*, ou ilha de pedra, uma formação comum em Itatim, enquanto no céu as estrelas descrevem arcos de circunferência em torno de um ponto que parece fixo. Este ponto é a projeção no céu do polo sul terrestre.

Este movimento aparente das estrelas é causado pelo movimento de rotação da Terra. Para eliminar este efeito e permitir a captura de imagens de longa exposição, sem que os objetos se desloquem no campo, um telescópio deve ser capaz de compensar esse movimento e acompanhar os objetos para os quais o telescópio seja apontado.



Fig. 81. A rotação da Terra fica evidenciada nesta imagem com 30 minutos de tempo de exposição, registrada na cidade de Itatim, na Bahia. Créditos: Wandeclayt Melo.

Montagens do tipo equatorial possuem um eixo que deve ser posicionado paralelamente ao eixo de rotação da Terra e um eixo que varre o céu ao longo dos meridianos. Desta maneira, se a montagem é corretamente alinhada, é possível manter um objeto no campo do telescópio compensando o movimento de rotação da Terra através da correção em apenas um eixo. Esse alinhamento do eixo da coordenada "ascenção reta" da montagem com o eixo de rotação da Terra é chamado de alinhamento polar. No hemisfério sul, o eixo deve apontar para o Polo Sul Celeste (PSC), o ponto que aparece fixo no céu na Fig. 81.

Não há nenhuma estrela muito brilhante nas proximidades do Polo Sul Celeste, mas é possível determinar sua posição a partir da latitude local e de uma bússola que indique o norte verdadeiro (não magnético).

A elevação do Polo Celeste coincide com a latitude do observador e se encontra na direção do ponto cardeal sul.

Além do alinhamento, é importante balancear a carga sobre a montagem com o uso de contra-pesos. O balanceamento evita a sobrecarga dos motores da montagem (no caso das montagens motorizadas) e o desgaste prematuro de buchas e engrenagens. É importante consultar o limite de carga útil informado pelo fabricante, adequando a montagem ao peso do telescópio, contabilizando também os acessórios acoplados ao instrumento como câmeras, buscadora, rodas de filtro e *autoguiders*.



Fig. 82. Montagem equatorial Sky-Watcher EQ5 com tripé de aço. Créditos: Sky-Watcher.

Montagens equatoriais são mais complexas, mas são as mais adequadas para astrofotografia, uma vez que as montagens altazimutais geram uma rotação indesejada no campo em imagens de longa exposição. Para eliminar essa rotação, as montagens altazimutais podem ser acopladas a uma dispositivo chamado “cunha equatorial", mostrado na Fig. 83, que converte sua configuração de altazimutal para equatorial.



Fig. 83. Cunha Equatorial. Créditos: Celestron.

Nem todas as montagens são projetadas para o uso com telescópios. Para astrofotografia de grande campo, utilizando câmeras equipadas com objetivas de menor distância focal, há montagens portáteis, conhecidas como *trackers* (Fig. 84). Os *trackers* são capazes de suportar cargas da ordem de 5 kg e podem ser acoplados a tripés comuns para câmeras fotográficas.



Fig. 84. Tracker modelo Star Adventurer. Créditos: Sky-Watcher.

A portabilidade de um tracker o torna um excelente aliado na fotografia de cometas e de chuvas de meteoros, que frequentemente exigem o deslocamento para sítios escuros, afastados da poluição luminosa, e que podem envolver acessos íngremes onde seria difícil chegar com tripés e montagens maiores e mais pesadas. Como toda montagem equatorial,

os trackers precisam estar corretamente alinhados com relação ao eixo polar, para garantir o correto acompanhamento do céu.

Dependendo de sua capacidade de carga e de sua precisão, o custo de uma montagem pode variar de uma centena até dezenas de milhares de dólares, como a montagem robótica apresentada na Fig. 85.



Fig. 85. Montagem equatorial robótica Paramount de alta precisão. Créditos: Software Bisque.

3.12 Resumo

Cada tipo de telescópio apresenta vantagens e desvantagens. Além da construção óptica do instrumento, o tipo de montagem utilizada (equatorial, azimutal, dobsoniana) também influi diretamente na adequação do telescópio para fins específicos.

Experimentar telescópios com diferentes aberturas e diferentes conjuntos de oculares e, sobretudo, interagir com grupos de observadores, trocando impressões e experiências, é sempre muito produtivo para decidir que telescópio adquirir. É comum, inclusive, que muitos observadores tenham mais de um telescópio, para diferentes atividades.

Tabela 6. Vantagens e desvantagens dos principais tipos de telescópios

Tipo de Instrumento	**Vantagens**	**Desvantagens**
Refrator	Imagens nítidas e contrastadas; fácil manutenção, pois não requer colimação; bom para observação de planetas e objetos brilhantes.	Aberração cromática em telescópios com lentes simples, ou singletos; lentes grandes são caras e difíceis de fabricar; geralmente mais caros para grandes aberturas.
Refletor	Grande abertura a um custo menor; sem aberração cromática; ideal para observação de objetos fracos e distantes, como objetos de céu profundo.	Requer colimação frequente; tubo aberto, expondo os espelhos à poeira; maior sensibilidade ao clima e às condições atmosféricas.
Catadióptrico	Tubos curtos, mesmo em grandes distâncias focais; combina características de refratores e refletores; boa correção de aberrações.	Geralmente mais caro que refletores de abertura semelhante; pode apresentar ligeira perda de contraste devido à obstrução central; requer tempo maior para equalização térmica.
Binóculos	Leve e de baixo custo. Facilmente transportável. Proporcionam grandes campos, ideais para a observação de cometas, da Via Láctea e outros objetos extensos.	Instrumentos de maior abertura e aumento são pesados e exigem o uso de tripé para estabilizar a imagem, comprometendo a portabilidade.
SmartScope	Leve e compacto. Apontamento e acompanhamento automáticos. Operação simplificada. Captura e processa internamente imagens de objetos de céu profundo. Custo baixo para um sistema completo de aquisição e processamento de imagem.	Operação restrita à captura de imagens. Não é possível observar através de ocular.

4. O Sol

O Sol é certamente o objeto astronômico com o movimento aparente mais previsível. Você sabe que, a cada dia, ele cruzará o céu[66]. Sabe aproximadamente as direções em que ele nasce e se põe. E, obviamente, sabe localizá-lo quando está acima do horizonte. Pode parecer, então, que o Sol é um bom alvo para aqueles que desejam dar os primeiros passos na observação do céu.

Na verdade, não é bem assim. Olhar para o Sol sem a proteção adequada, a olho nu ou através de instrumentos, pode causar danos imediatos e irreversíveis à visão.

É necessário usar filtros certificados, inclusive na observação a olho nu (Fig. 86), sem improvisos, e tomar uma série de precauções para proteger seus olhos e os de quem mais estiver na área de observação. Observação solar é uma **atividade de risco**.



Fig. 86. Óculos para observação direta do Sol, em conformidade com a norma ISO 12312-2:2015. Créditos: Wandeclayt M.

O conselho que damos a qualquer iniciante com intenções de observar o Sol sem a supervisão de observadores mais experientes é: **NÃO OBSERVE O SOL!**

Procure astroclubes, planetários e observatórios voltados à divulgação astronômica em sua região. Acompanhe sessões de observação solar com astrônomos experientes e entenda os riscos envolvidos e as estratégias para mitigá-los. Observe através de diferentes filtros e instrumentos e perceba o que cada configuração tem a oferecer. Após essa etapa de familiarização, você poderá dar os primeiros passos na observação solar com muito mais segurança.

Dito isto, podemos passar a apresentar o Sol e os instrumentos e técnicas para sua observação segura e um pouco da história da observação solar.

[66] A menos que você esteja dentro do círculo polar ártico ou antártico, onde o Sol passa meses abaixo ou acima do horizonte.

4.1 A Estrutura do Sol

O interior solar pode ser dividido em três diferentes zonas, ou camadas: núcleo, zona radiativa e zona convectiva. A temperatura e a densidade da matéria decaem gradualmente a partir do centro, caindo de 15×10^9 K no núcleo até aproximadamente 6000 K na fotosfera, a camada opaca que definimos como a superfície do Sol.

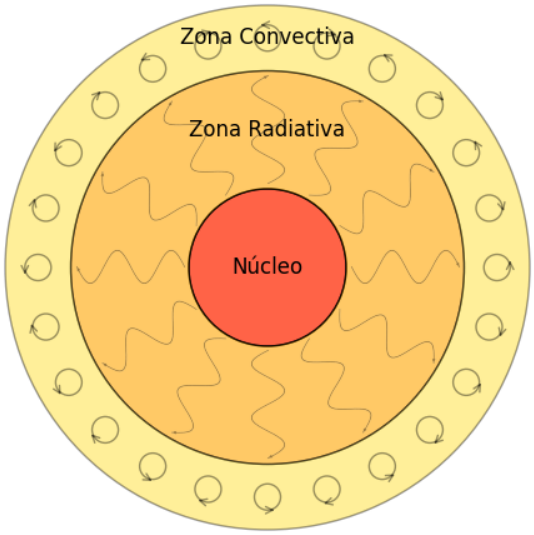


Fig. 87. Interior solar. As reações termonucleares responsáveis pela geração de energia ocorrem no núcleo. A energia gerada no núcleo é transportada principalmente na forma de radiacão através da zona radiativa e em seguida, através de convecção, na camada convectiva. Créditos: Wandeclayt Melo/Projeto Céu Profundo. Código disponível na plataforma Google Colab.

A energia liberada na fotosfera tem origem em reações termonucleares no núcleo solar. No Sol, o principal mecanismo envolvido nessas reações é a fusão de núcleos de hidrogênio formando núcleos do elemento hélio, num processo conhecido como ciclo próton-próton, responsável por 98% da geração de energia no Sol.[41].

O ciclo (Fig. 88) se inicia com a fusão de dois núcleos de hidrogênio (prótons), formando um núcleo de deutério (^2H) e emitindo um neutrino (ν) e um pósitron (e^+):

$$p^+ + p^+ \rightarrow^2 H + e^+ + \nu_e.$$

Na próxima etapa do ciclo, o deutério se funde com um próton para formar um núcleo de ^{3}He, com a emissão de raios gama:

$$^2H + p^+ \rightarrow \ ^3He + \gamma.$$

Na terceira etapa, dois núcleos de ^{3}He se fundem, formando ^{4}He e liberando dois prótons:

$$^3He + ^3He \rightarrow \ ^4He + p^+ + p^+.$$

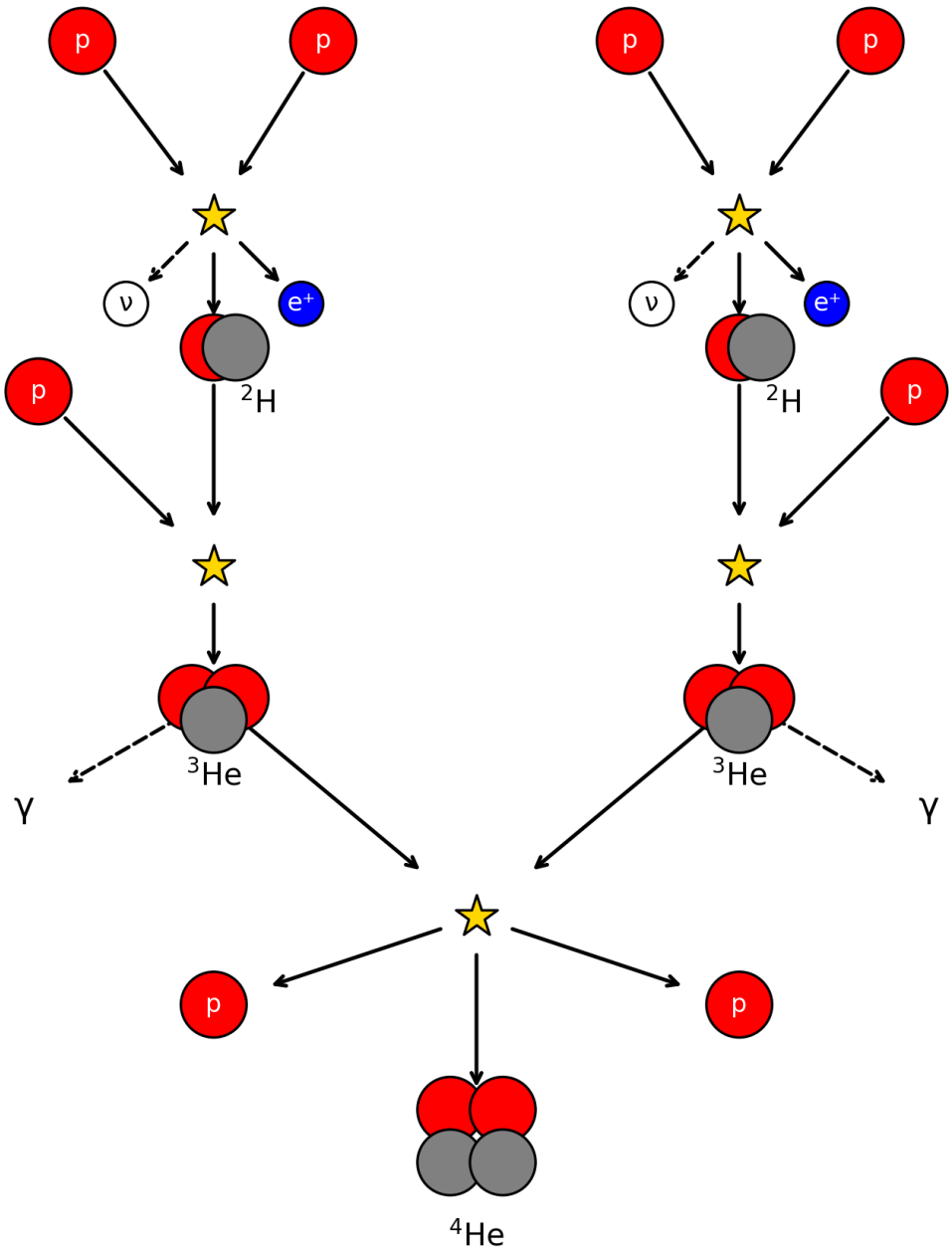


Fig. 88. Ciclo próton-próton, o principal mecanismo de produção de energia no núcleo solar. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo. Código disponível na plataforma Google Colab.

Os fótons de alta energia produzidos no núcleo precisam atravessar um longo caminho até atingir a superfície. Esta travessia envolve colisões, absorções e reemissões, fazendo com que fótons de raios gama percam energia e cheguem à superfície com comprimentos de onda mais longos, com pico de emissão na faixa visível. O tempo decorrido nessa travessia é da ordem de 100 mil anos.

O aplicativo *Solar Photon Random Walk*[42] simula a trajetória de um fóton do núcleo do Sol até a fotosfera, baseado em parâmetros de opacidade e densidade do interior solar. A Fig. 89 mostra uma das trajetórias simuladas, com um tempo estimado de escape de aproximadamente 111 mil anos.

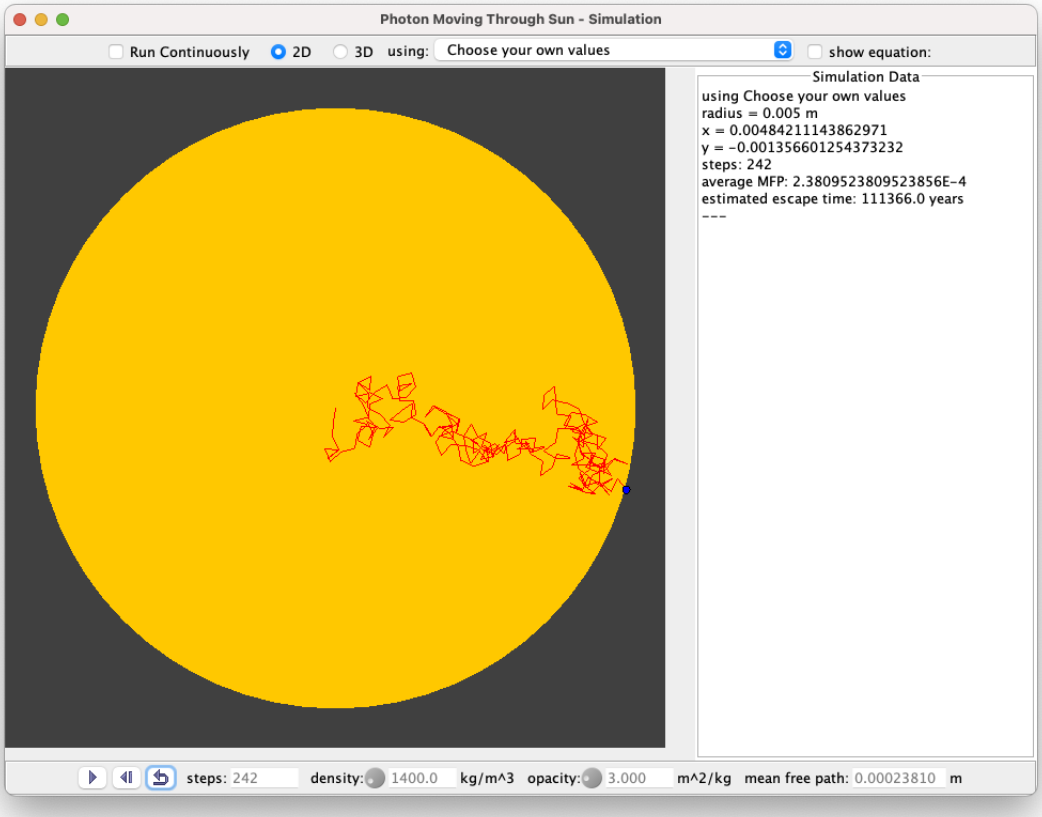


Fig. 89. Simulação da travessia de um fóton, de sua geração no nucleo solar até escapar pela fotosfera. O tempo decorrido na travessia é da ordem de 100 mil anos. Simulação: *Solar Photon Randon Walk*, código escrito por Drew Onken.

4.2 A Fotosfera

A fotosfera é a superfície visível do Sol. É uma camada delgada com espessura de até 500 km, onde a combinação do turbulento movimento convectivo sob a superfície, da rotação diferencial[67] e do complexo campo magnético solar dá origem às manchas solares, estruturas que podem ser observadas em luz visível, com técnicas adequadas que atenuam o brilho, permitindo observar o Sol com segurança[43].

As manchas solares são a formação mais evidente na fotosfera, podendo inclusive ser percebidas a olho nu quando o Sol está próximo ao horizonte ou atenuado por uma camada densa de nuvens ou poluição. (Ainda que o Sol não cause ofuscamento nessas condições, evite olhar direta e prolongadamente para ele! Embora atenuada, parte da radiação ainda é nociva.).



Fig. 90. Manchas solares visívei no pôr do Sol de 31 de agosto de 2025 em São José dos Campos (SP). Com o Sol baixo no horizonte, visto através de uma camada densa de fumaça produzida pelas queimadas (infelizmente) comuns na estação seca, as manchas podem ser fotografadas sem filtros e podem ser vistas a olho nu. Mesmo nessas condições, evite olhar direta e prolongadamente para o Sol. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

Em luz visível, mas sempre com o uso de filtros adequados, imagens telescópicas revelam outras estruturas além das manchas solares. As mais evidentes são áreas claras chamadas fáculas [44] e um padrão de granulação gerado pelos movimentos convectivos que

[67] O Sol não é um corpo rígido e seu equador gira mais rápido que as regiões polares. Essa rotação com taxas diferentes, com velocidades decrescentes do equador para os polos, é o que chamamos de *rotação diferencial*. Falaremos disso na seção 4.4.

transportam energia para a superfície. Essas estruturas podem ser vistas na imagem abaixo (Fig. 91), registrada pelo instrumento Helioseismic and Magnetic Imager (HMI)[68] do observatório espacial Solar Dynamics Observatory (SDO). As fáculas são melhor percebidas próximas ao limbo[69].

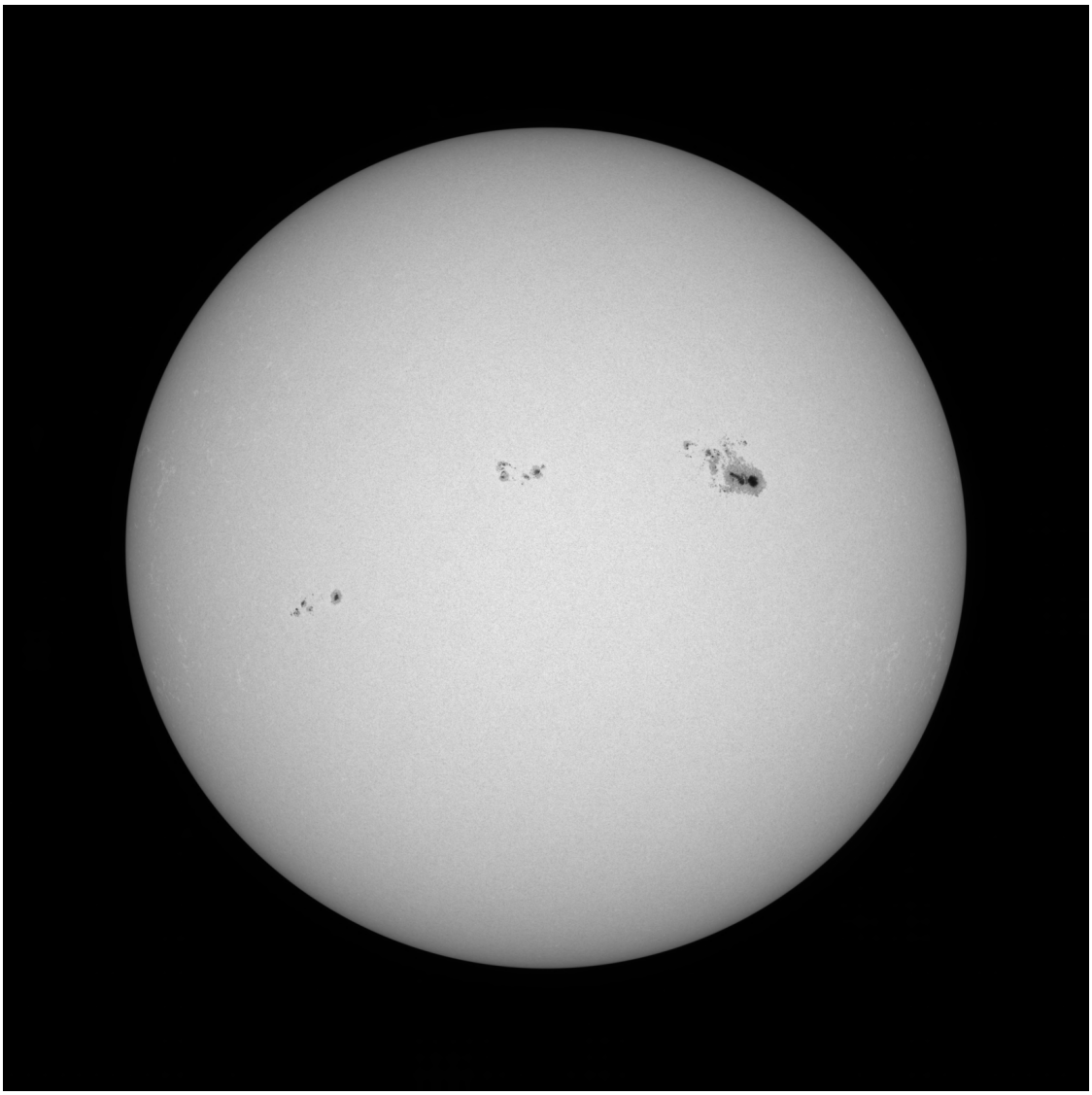


Fig. 91. A fotosfera solar, observada em 07 de maio de 2025 pelo telescópio espacial Solar Dynamics Observatory (SDO), com destaque para um grande grupo de manchas solares associado a uma região ativa (AR4079). Créditos: NASA/SDO/HMI.

As manchas solares surgem em áreas de grande concentração das linhas do campo mag-

[68] Imagens em diversos formatos do instrumento HMI podem ser consultadas e acessadas diretamente no HMI Archive

[69] Chamamos de limbo a borda do disco visível.

nético e são regiões relativamente mais frias ($\approx$ 4000 K) em comparação com a temperatura média da fotosfera ($\approx$ 6000 K)[45]. São formações transitórias, com duração variando da ordem de dias a semanas, mas que podem evoluir significativamente em um intervalo de horas. Grupos de manchas solares podem evoluir até atingir dimensões de centenas de milhares de quilômetros.

Grandes manchas solares revelam uma região central mais escura, chamada de *umbra*, cercada por uma região mais clara, chamada de *penumbra* (Fig. 92). Na umbra, as linhas de campo magnético estão mais concentradas e são perpendiculares à superfície da fotosfera. Na penumbra, as linhas cruzam a fotosfera obliquamente.

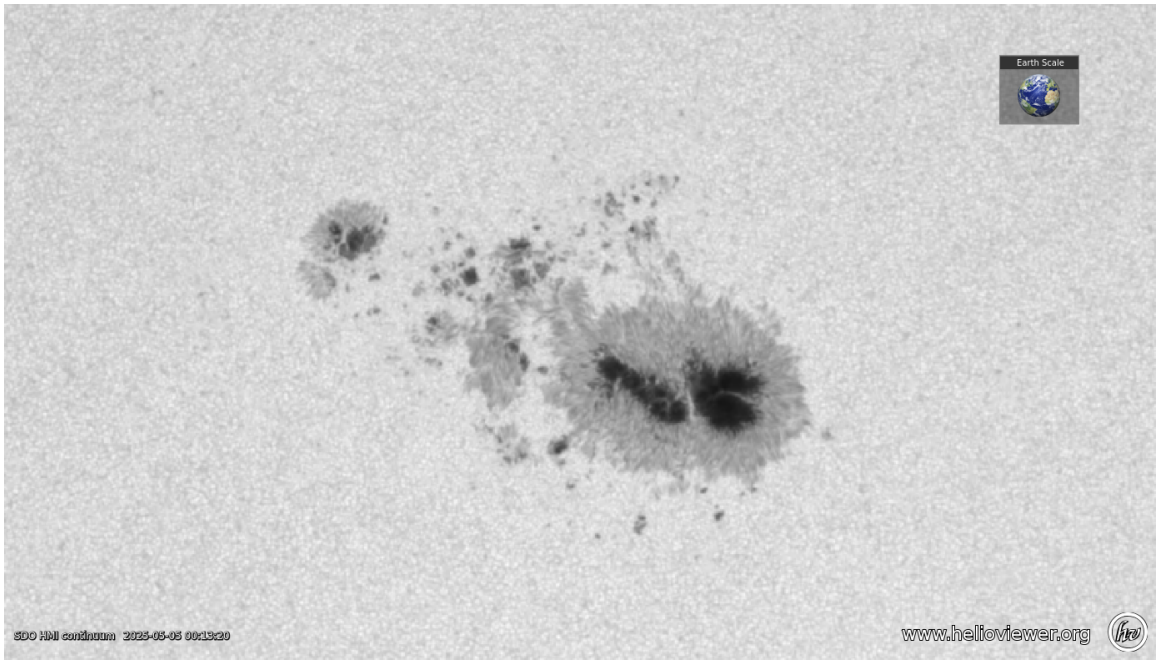


Fig. 92. Grupo de manchas solares na Região Ativa 4079, imageada pelo satélite Solar Dynamics Observatory (SDO) em 2025-05-04. A Terra aparece em escala para comparação. Créditos: NASA/SDO/HMI/Helioviewer.

É possível visualizar a geometria e medir a intensidade do campo magnético na superfície solar utilizando instrumentos especiais instalados em observatórios solares. O telescópio espacial SDO é um dos telescópios espaciais dedicados à observação contínua do Sol. O instrumento Atmospheric Imaging Assembly (AIA)[70] no telescópio SDO registra a atmosfera solar a uma cadência de pelo menos 1 imagem a cada 10 segundos. Imagens do AIA no ultravioleta podem revelar a geometria das linhas do campo magnético ao registrar o plasma[71] confinado nas linhas de campo. O instrumento Helioseismic and Magnetic Imager (HMI)[72] estuda as oscilações e o campo magnético na fotosfera. O HMI produz

[70] https://aia.lmsal.com/
[71] Plasma é o gás quente e ionizado encontrado em condições extremas, como a atmosfera solar.
[72] http://hmi.stanford.edu/

imagens da fotosfera no espectro visível[73], mapas de velocidade da superfície ao longo da linha de visada (dopplergramas) e mapas do campo magnético (magnetogramas).

O mosaico da figura 93 mostra três imagens de uma mesma região do Sol capturadas simultaneamente com o telescópio SDO. A imagem à esquerda é uma captura da atmosfera solar em ultravioleta no comprimento de onda 171 Å, utilizando o instrumento AIA. A complexidade da geometria das linhas de campo é visível neste canal do instrumento. O painel central é uma imagem em luz visível capturada pelo HMI. As manchas solares (áreas escuras) e fáculas (áreas brilhantes) são visíveis. Na última imagem, um magnetograma produzido pelo instrumento HMI, vemos a intensidade e a polaridade do campo magnético na superfície. As áreas pretas correspondem à polaridade negativa e as áreas brancas, à positiva.

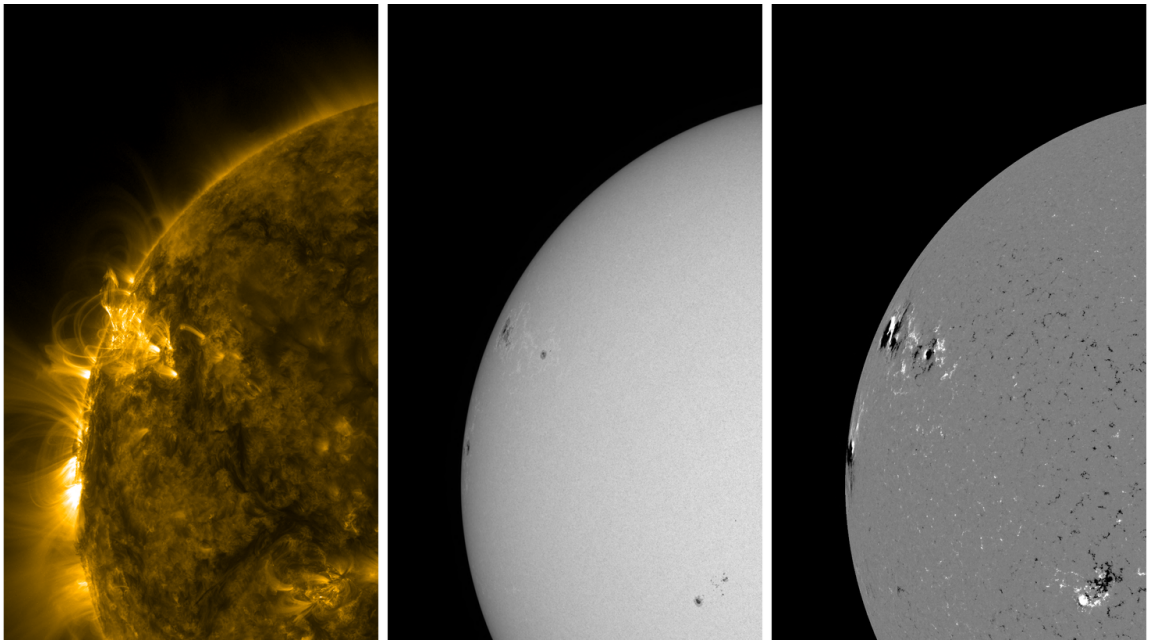


Fig. 93. Mosaico com imagens de 4 de novembro de 2025 do Solar Dynamics Observatory (SDO)

Manchas individuais não são identificadas ou catalogadas, mas grandes áreas de intenso fluxo magnético, que podem abrigar até dezenas de manchas e dar origem a eventos eruptivos, constituem formações chamadas Regiões Ativas e recebem um número atribuído pelo Space Weather Prediction Center (SWPC) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Esse sistema de numeração foi iniciado em 5 de janeiro de 1972, utilizando o formato "**ARxxxx**", onde "**xxxx**" é um número de quatro dígitos, incrementado sequencialmente. Em 14 de junho de 2002, esta sequência ultrapassou a designação **AR9999**. Para manter a compatibilidade com sistemas preparados para lidar apenas com quatro dígitos, é comum suprimir o dígito das dezenas de milhares e designar as regiões acima da numeração 10000

[73]Em torno da linha de absorção de 6173 Å, dos átomos neutros de ferro (Fe I).

usando apenas seus últimos 4 dígitos. A imagem na Fig. 94 é um registro de um setor do limbo leste do Sol em 4 de novembro de 2025, pelo observatório SDO. As três regiões ativas visíveis aparecem identificadas com a númeraçao completa, no formato “AR1xxxx”, e com o dígito das dezenas de milhares suprimido, no formato “ARxxxx”.

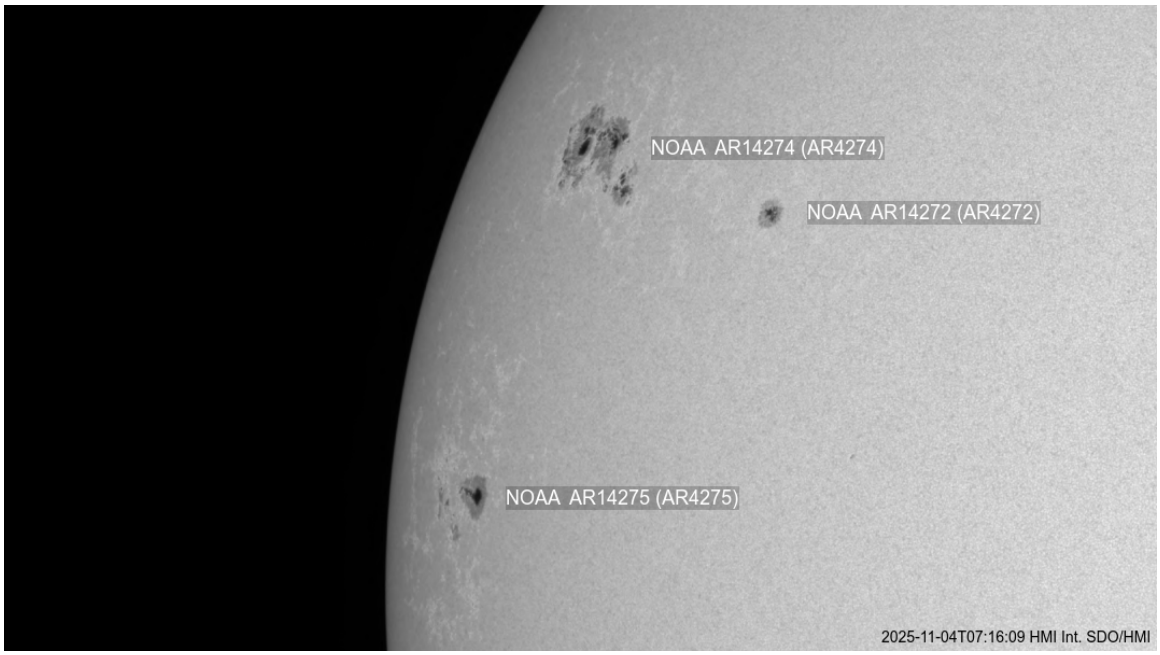


Fig. 94. Setor do Sol registrado pelo observatório SDO com indicação de regiões ativas em 4 de novembro de 2025. Créditos: NASA/SDO/HMI/Helioviewer.

Além da numeração atribuída às regiões ativas, há sistemas de classificação para categorizar as regiões de acordo com a complexidade do campo magnético dos grupos de manchas na região. A Tabela 7 mostra o sistema de classificação de Mount Wilson.

Tabela 7. Classificação magnética de Mount Wilson para grupos de manchas solares

Classe	Descrição
α	Grupo de manchas unipolar.
β	Grupo com polaridades magnéticas positiva e negativa, com uma divisão clara entre as polaridades.
$\beta\gamma$	Grupo bipolar, mas sem uma linha contínua separando as polaridades opostas.
δ	Grupo com configuração complexa, consistindo de umbras com polaridades opostas dentro da mesma penumbra.
γ	Região ativa complexa, com polaridades magnéticas distribuídas irregularmente.

Fonte: HANSLMEIER, A. The Sun and Space Weather [45].

A Fig. 95 mostra a classificação de Mount Wilson em regiões ativas observadas em 7 de novembro de 2025 pelo observatório SDO. No topo, uma imagem em luz visível revela três

grupos de manchas solares na região central do disco. A imagem central é um magnetograma onde se pode visualizar a estrutura e polaridade do campo magnético na superfície. Nota-se que a mancha que domina a região AR 4272 é unipolar, recebendo a classificação α. Na região AR 4275, as áreas de polaridade opostas são claramente separadas, recebendo a classificação β. Por fim, a região AR 4274 apresenta uma configuração complexa, sem uma linha clara dividindo as áreas de polaridades opostas, correspondendo à classificação $\beta\gamma$ no sistema de Mount Wilson. A imagem final é uma captura em ultravioleta (171 Å) onde as linhas de campo ficam evidenciadas pelo plasma confinado.

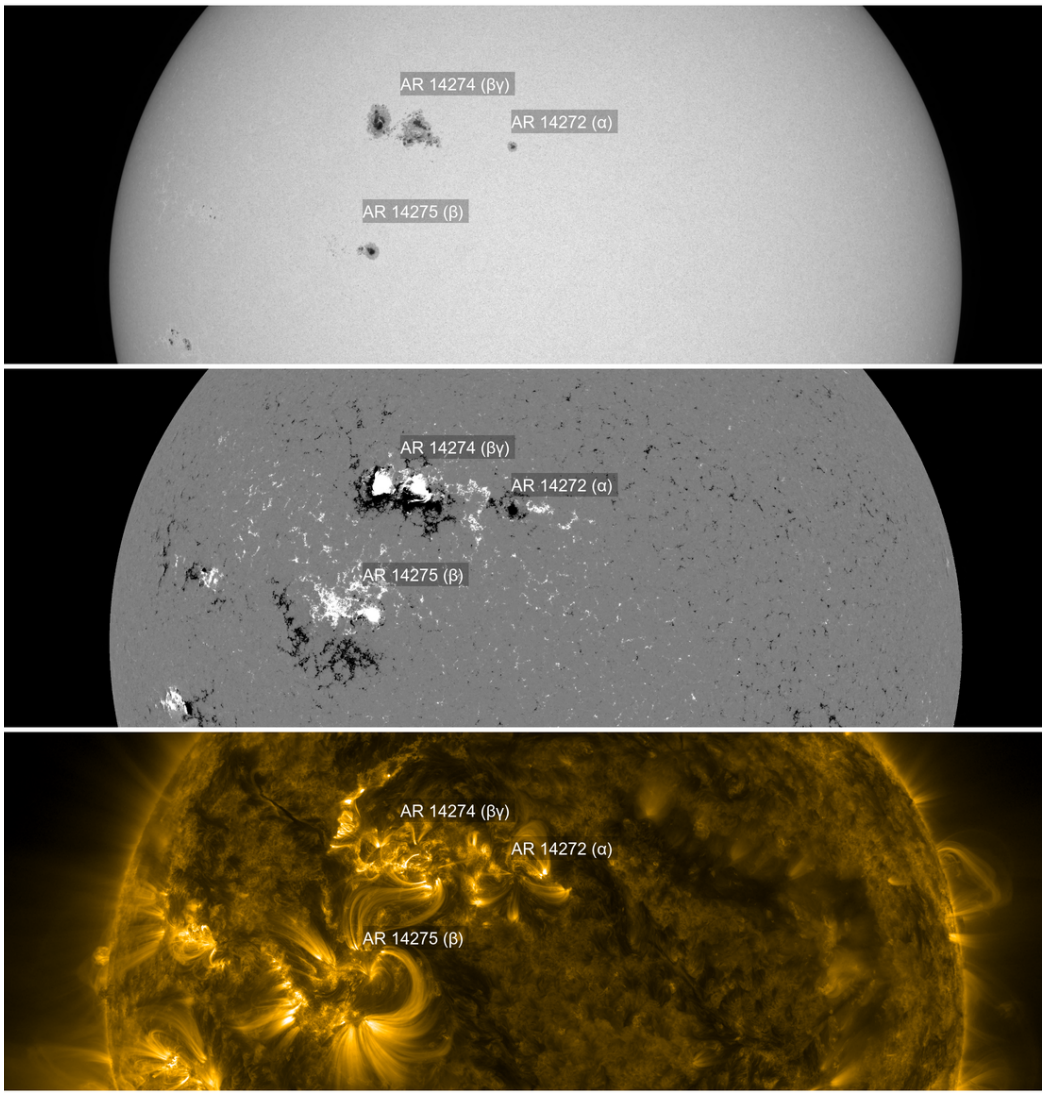


Fig. 95. Regiões ativas observadas em 2025-11-07T14:05:42 com classificação de Mount Wilson. Dados: SDO/HMI/AIA.

4.3 A Descoberta das Manchas Solares

Registros sistemáticos da observação de manchas solares foram realizados ainda no século XVII, no alvorecer da era telescópica da astronomia observacional, por Johann Fabricius (1587-1616)[46], Galileu Galilei (1564-1642)[47], Christoph Scheiner (1573-1650)[48] e Thomas Harriot (1560-1621)[49].

O crédito pela descoberta das manchas foi motivo de acalorada disputa, sobretudo entre Scheiner e Galileu [50].

Scheiner, além de matemático e astrônomo, era um padre jesuíta. Na ausência de periódicos científicos, e provavelmente precisando driblar seus superiores jesuítas para publicar uma descoberta que possivelmente contrariava o dogma católico, Scheiner reportou suas descobertas em cartas endereçadas a Marcus Welser (1558-1614), um influente político e erudito de Augsburg (atual Alemanha) que também tinha laços com Galileu Galilei [50].

Convencido por Welser, Scheiner aceita publicar suas cartas anonimamente em dois volumes: ***Tres epistolae de macvlis solaribvs : scriptae ad Marcvm Velservm ... Cum obseruationum iconismis***[74] e ***De macvlis solarib. et stellis circa Iouem errantibus : accvratior disqvisitio, ad Marcvm Velservm ... perscripta. Interiectis obseruationum delineationibus*** [75], em 1612 sob o pseudônimo *Apelle* [4][51].



Fig. 96. A rivalidade entre Christoph Scheiner e Galileu Galilei sobre o pioneirismo na observação de manchas solares, está registrada na publicação da correspondência de Scheiner ao nobre alemão Marcus Welser e nas respostas de Galileu a essas cartas, entre 1612 e 1613. Créditos: Library of Congress e Internet Archive. Composição: Wandeclayt Melo.

A natureza das manchas também era objeto de debate. Scheiner relutaria inicialmente em aceitar que as manchas fizessem parte da superfície do Sol, uma vez que essa ideia

[74] Três cartas sobre as manchas solares: escritas a Marcus Welser... Com ilustrações das observações.

[75] Sobre as manchas solares e os astros que vagam em torno de Júpiter: uma investigação mais precisa, dirigida a Marcus Welser... com interposição de representações gráficas das observações.

ia de encontro ao conceito aristotélico da perfeição e imutabilidade dos objetos celestes, defendido pela Igreja Católica.

Galileu, por sua vez, argumentava que as manchas faziam parte do Sol ou que ao menos estariam a uma pequena distância da superfície. Scheiner chegou a considerar que as manchas fossem planetas transitando em frente ao Sol e defendeu essa proposta em sua correspondência com Welser.

Em resposta às cartas de Scheiner, Galileu publica ***Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti comprese in tre lettere*** [76], em 1613, reivindicando para si a descoberta das manchas solares e refutando a sugestão de que as manchas seriam planetas.

Este não era o único motivo de contenda entre Galileu e Scheiner. Scheiner defendia que a Terra era imóvel e que todos os objetos celestes, incluindo o Sol, revolucionavam em torno dela. Galileu coloca essa visão em cheque, sobretudo pela descoberta de satélites em Júpiter e das fases de Vênus, que incontestavelmente mostravam que havia objetos celestes que não orbitavam a Terra (Fig 97).

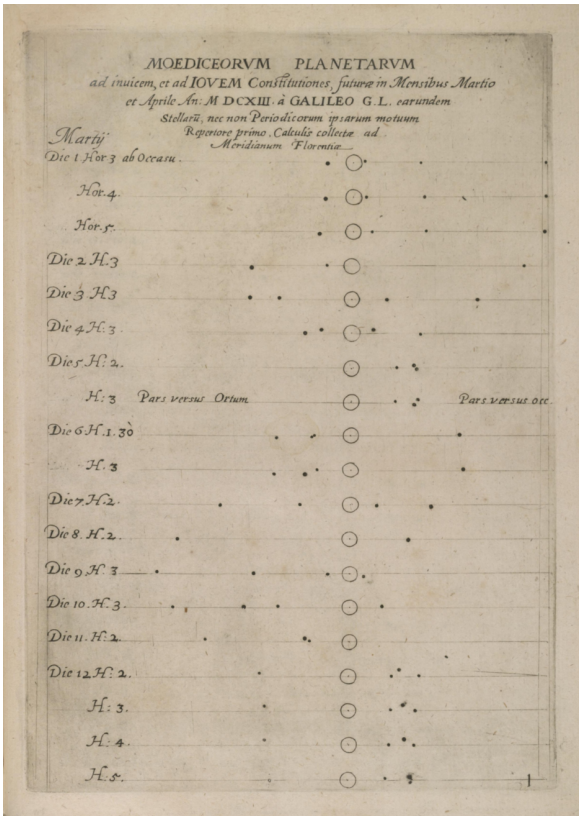


Fig. 97. Satélites de Júpiter. Registro de observações de Galileu em abril de 1613. Incluído no *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti comprese in tre lettere*. Créditos: Lybrary of Congress.

A descoberta das fases de Vênus e dos satélites de Júpiter fornecia evidências obser-

[76] História e demonstrações sobre as manchas solares e seus acidentes, contidas em três cartas.

vacionais à defesa do modelo heliocêntrico de Nicolau Copérnico (1473-1543)[52], ao mesmo tempo em que o trabalho do astrônomo e matemático alemão Johannes Kepler (Seção 6.2.1), que havia estabelecido leis matemáticas que descreviam o movimento planetário em torno do Sol e com quem Galileu mantinha correspondência, fornecia a base teórica para consolidar o heliocentrismo.

Uma revolução científica estava em curso e a teoria heliocêntrica copernicana, antes apresentada como pura abstração matemática, ganhava força como uma descrição real do mundo. As publicações de Galileu que davam força à experimentação e à observação, em detrimento da reverência aos textos da Antiguidade, causavam desconforto na Inquisição romana, por divulgar o heliocentrismo não como hipótese, mas como uma consequência real de suas observações.



Fig. 98. O modelo heliocêntrico, conforme apresentado Por Nicolau Copérnico em *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. Edição de 1617. Créditos: Boston College/Internet Archive. Composição: Wandeclayt Melo.

Esse desconforto se materializou em forma de denúncia à Inquisição romana em 1615. Galileu não chegou a ser julgado imediatamente, mas, em 1616, o Santo Ofício declara que a ideia de que a Terra se movia era errônea e que a proposta de um Sol imóvel era contrária às Escrituras e, portanto, herética. Galileu foi então instruído a abandonar suas opiniões, podendo ser preso caso não prometesse abdicar de ensinar, defender e discutir sua doutrina ou opinião [53].

Galileu recebeu a advertência em 26 de fevereiro de 1616, comprometendo-se a seguir as ordens do Santo Ofício.

A obra de Copérnico *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, no entanto, não havia até então despertado a desconfiança da Igreja. Copérnico, além de tê-la dedicado ao Papa Paulo III, teve o cuidado de dar ênfase aos aspectos matemáticos de seu modelo sem declarada-

mente atacar o dogma do modelo de Aristóteles e Ptolomeu.

Somente em 5 de março de 1616, o Papa decreta a inclusão das obras de Copérnico no *Index Librorvm Prohibitorvm*, o catálogo de livros proibidos pela Igreja, até que fossem corrigidas, enfatizando que seu conteúdo era hipotético e não a descrição da realidade e, portanto, não era contrário às Escrituras [77].

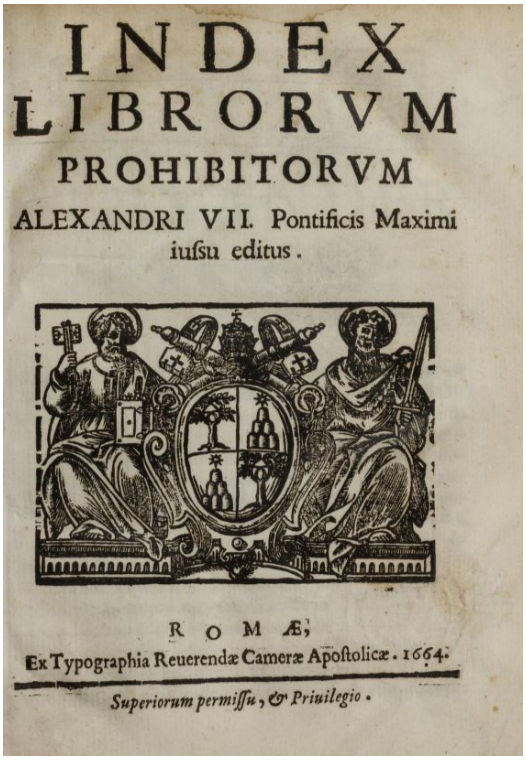

INDEX
LIBRORVM
PROHIBITORVM
ALEXANDRI VII. Pontificis Maximi
iuſsu editus.
ROMÆ,
Ex Typographia Reuerendæ Cameræ Apoſtolicæ. 1664.
Superiorum permiſſu, & Priuilegio.

Fig. 99. Capa da edição de 1664 do *INDEX LIBRORVM PROHIBITORVM*, o índice de livros proibidos pela Igreja Católica. Créditos: Internet Archive.

Apesar da censura imposta, Galileu mantém sua boa relação com o Papa Paulo V e ou-

[77] "E porque chegou também ao conhecimento da mencionada Sagrada Congregação que essa falsa doutrina pitagórica, totalmente contrária à Sagrada Escritura, sobre o movimento da Terra e a imobilidade do Sol — ensinada por Nicolau Copérnico em '*Das Revoluções dos Orbes Celestes*' e por Diego de Zúñiga ('*Didacus Astunica*') no Comentário a Jó — já está sendo divulgada e aceita por muitos (como se vê numa certa carta impressa de um Padre Carmelita, intitulada 'Carta do Rev. Pe. Mestre Paolo Antonio Foscarini, Carmelita, sobre a opinião dos Pitagóricos e de Copérnico acerca do movimento da Terra e da estabilidade do Sol, e o novo Sistema Pitagórico do Mundo', Nápoles, por Lazzaro Scoriggio, 1615), na qual o referido Padre tenta demonstrar que a mencionada doutrina da imobilidade do Sol no centro do mundo e do movimento da Terra está de acordo com a verdade e não se opõe à Sagrada Escritura: portanto, para que tal opinião não se espalhe ainda mais, em detrimento da verdade Católica, [a Congregação] decidiu que as obras de Nicolau Copérnico (Das Revoluções dos Orbes) e de Diego de Zúñiga (Comentário a Jó) devem ser suspensas até que sejam corrigidas. Quanto ao livro do Padre Paolo Antonio Foscarini, Carmelita, é totalmente proibido e condenado, assim como todos os outros livros que ensinam o mesmo, conforme o presente Decreto os proíbe, condena e suspende respectivamente." Decreto XIV, pp. 307-308. *Index Librorvum Prohibitorvum* (1664).

tras autoridades da Igreja, incluindo o Cardeal Barberini, futuro Papa Urbano VIII. Mesmo colecionando opositores e desafetos, a reputação de Galileu seguia inabalada.

No entanto, desrespeitando a instrução de 1616, Galileu manobra para conseguir a aprovação dos censores da Igreja para a publicação de uma nova obra em 1632, que dissimuladamente defendia o modelo heliocêntrico de Copérnico. Em ***Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo***, Galileu apresenta em forma de discussão entre três personagens, Salviati, Sagredo e Simplicio, argumentos a favor dos modelos ptolomaico (geocêntrico) e copernicano. No entanto, Simplicio, o defensor do geocentrismo no livro, é, na melhor das hipóteses, intelectualmente ingênuo, enquanto Salviati, o defensor do heliocentrismo, é racional e perspicaz. O terceiro personagem, Sagredo, é culto e supostamente neutro, questionando ambos os lados e conduzindo o diálogo.



Fig. 100. Diálogo Sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo. Livro de Galileu, publicado em 1632, que embora sugerisse apresentar argumentos para os modelos ptolomaico e copernicano, era claramente uma defesa do modelo de Copérnico. Créditos: Internet Archive.

A ousadia de Galileu não passou despercebida. Por ter desobedecido à ordem do Santo Ofício, ter quebrado sua promessa de 1616 e ter tratado a teoria copernicana como verdade e não como hipótese, Galileu foi intimado a Roma, onde foi interrogado, julgado e, em 22 de junho de 1633, condenado pelo tribunal da Inquisição e sentenciado à prisão e a renegar as ideias heliocêntricas. O *Dialogo* foi incluído no *Index*.

Galileu cumpriu pena de prisão domiciliar até sua morte em 8 de janeiro de 1642.

Mas aparentemente nem a condenação nem a morte de Galileu aplacaram o ressentimento dos Jesuítas, que publicam, em 1651, "***Prodromus pro sole mobili et terra stabili contra Academicum Florentinum Galilaeum a Galilaeis*** [78]". O ***Prodromvs*** (Fig. 101)

[78]Prefácio sobre o Sol móvel e a Terra estável contra o Acadêmico Florentino Galileu Galilei.

foi escrito por Scheiner por volta de 1630 e publicado pela Companhia de Jesus no ano seguinte à sua morte.

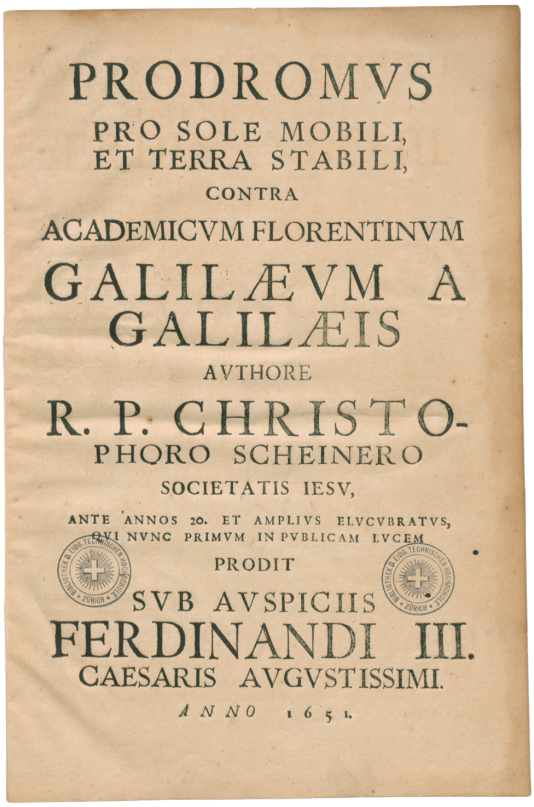

PRODROMVS
PRO SOLE MOBILI,
ET TERRA STABILI,
CONTRA
ACADEMICVM FLORENTINVM
GALILÆVM A
GALILÆIS
AVTHORE
R. P. CHRISTO-
PHORO SCHEINERO
SOCIETATIS IESV,
ANTE ANNOS 20. ET AMPLIVS ELVCVBRATVS,
QVI NVNC PRIMVM IN PVBLICAM LVCEM
PRODIT
SVB AVSPICIIS
FERDINANDI III.
CAESARIS AVGVSTISSIMI.
ANNO 1651.

Fig. 101. Página título de ***Prodromus pro sole mobili et terra stabili contra Academicum Florentinum Galilaeum a Galilaeis***. Obra póstuma de Christoph Scheiner, em defesa do geocentrismo, publicada em 1651 pela Companhia de Jesus. Créditos: ETH-Bibliothek Zürich.

Embora Scheiner, após aceitar que as manchas estavam na superfície solar, tentasse apresentar o movimento das manchas como um argumento contra a imobilidade do Sol, as leis do movimento planetário de Kepler, deduzidas empiricamente a partir das observações precisas de seu mentor Tycho Brahe, já se consolidavam e serviriam inclusive como uma validação experimental para a futura teoria da gravitação de Newton. Eram os últimos suspiros de um modelo baseado na autoridade dos antigos textos e o alvorecer da ciência moderna, baseada na experimentação.

4.4 A Rotação Solar

Christoph Scheiner permaneceu fiel à visão de um Universo geocêntrico até sua morte em 1650, mas suas séries de observações de manchas solares foram fundamentais para confirmar a esfericidade do Sol e para revelar detalhes de sua rotação.

A Fig. 102 traz uma sequência de observações realizadas entre outubro e dezembro de 1611 por Scheiner, publicada originalmente nas cartas a Welser, sob o pseudônimo Apelle, e, posteriormente, no livro ***Rosa Vrsina; sive, Sol ex admirando facvlarvm & macularum suarum phoenomeno varivs***[79], de 1630, assinando com seu nome real [5].

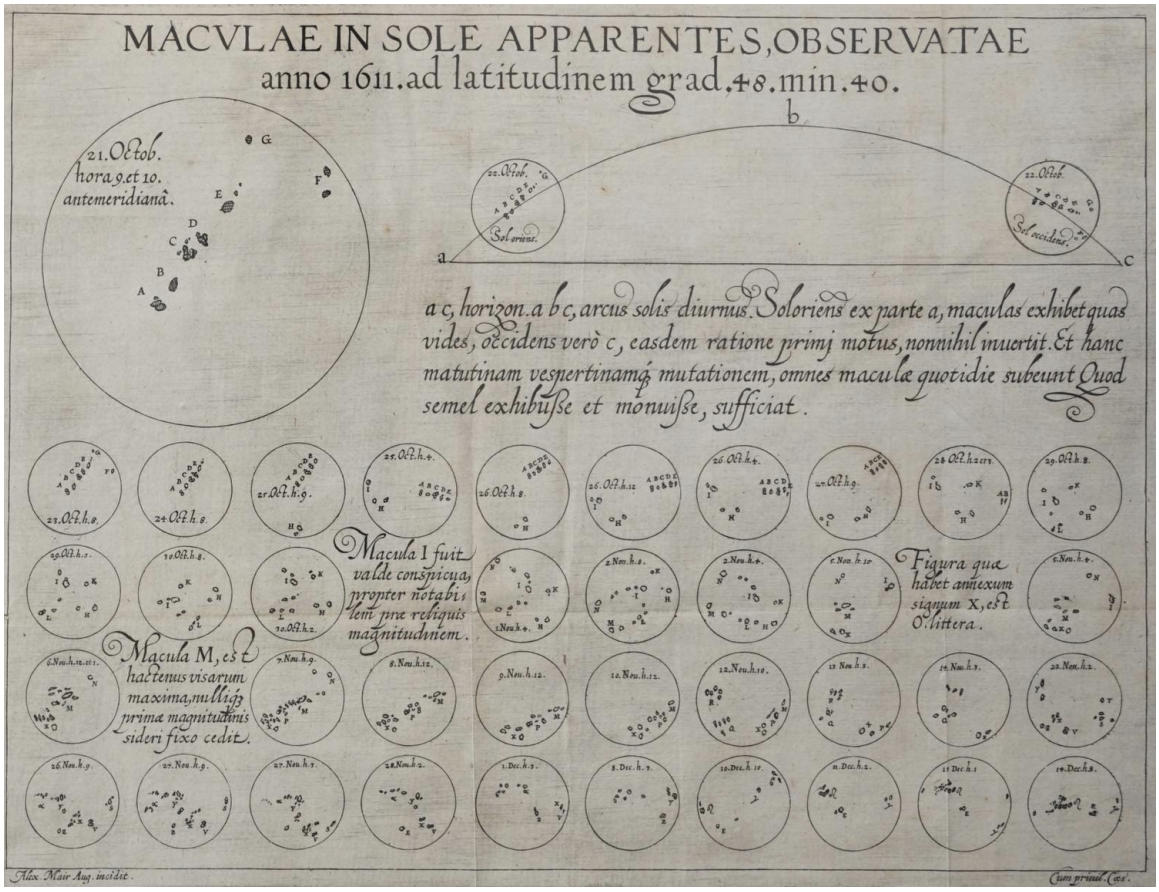


Fig. 102. Manchas solares observadas por Christoph Scheiner em 1611. Ilustração incluída em correspondência a Marcus Welser[4]. Créditos: Internet Archive.

Apesar de negar o modelo heliocêntrico, o livro de Scheiner é um importante tratado sobre o estudo do Sol e assentou as bases para o estudo telescópico da fotosfera solar nos séculos seguintes. Seu método de observação, projetando a imagem do Sol produzida pelo telescópio sobre um anteparo, seguiu sendo usado pelas gerações seguintes de astrônomos.

[79] A Rosa Vermelha; ou, O Sol, a partir do admirável e variado fenômeno de suas chamas e manchas.

Assim como Scheiner, Galileu registrou a evolução diária e o deslocamento de grupos de manchas através do disco solar (Fig. 103).

Registros sequenciais como os de Scheiner e Galileu compõem uma base de dados que permite reconstruir o histórico de atividade solar do início do Séc. XVI até o presente, além de levar à conclusão não apenas de que as manchas são formações na superfície do Sol, mas também que o Sol não gira como um corpo rígido, ou seja, diferentes latitudes giram com velocidades diferentes.

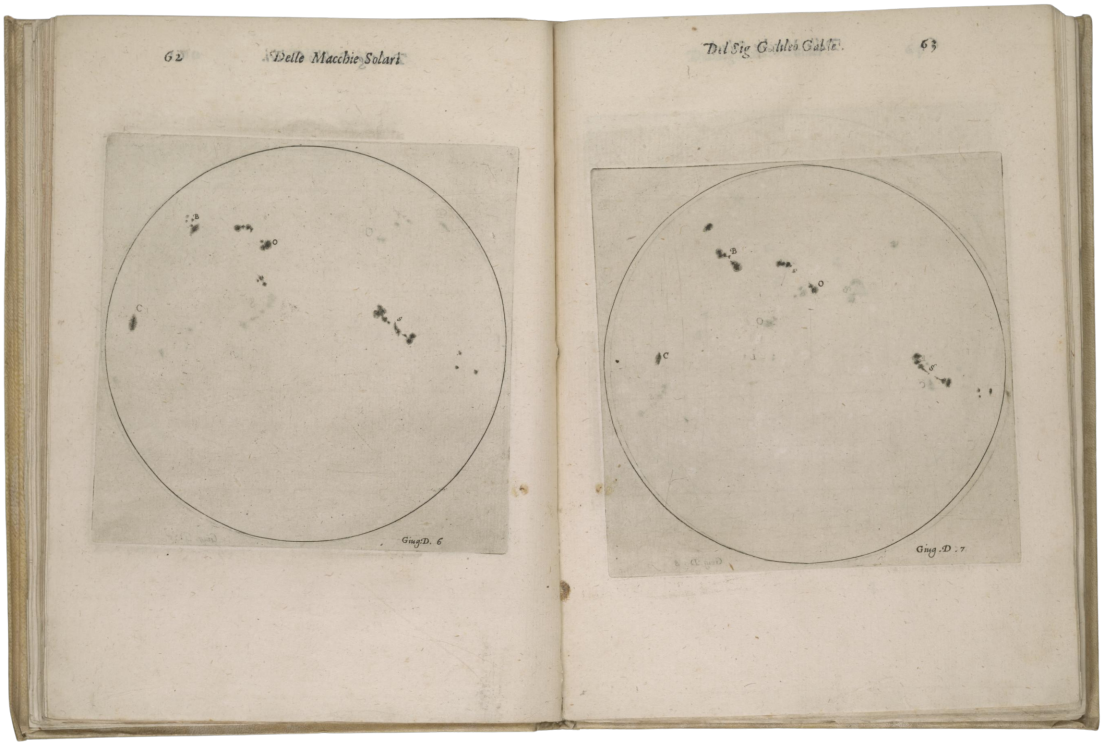


Fig. 103. Manchas solares observadas por Galileu. Desenho publicado em *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti comprese in tre lettere*, em 1613. Créditos: Lybrary of Congress.

Observadores nos séculos XVIII e XIX, como Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875) [54], Johann Rudolph Wolf (1816-1893) [55] e Warren de la Rue (1815-1889) [56], seguiram monitorando e registrando a atividade solar, encontrando padrões no número e posição das manchas, refinando as medidas da rotação solar e melhorando também o valor da inclinação do eixo de rotação do Sol.

Na segunda metade do século XIX, Richard Christopher Carrington (1826-1875) [57], um abastado astrônomo amador, membro da *Royal Astronomical Society*, estabeleceu um observatório privado em Redhill (Fig. 104), na Inglaterra, equipado com uma luneta equatorial de 4,5"(11,2 cm) de abertura e uma luneta meridiana de 5"(12,5 cm), onde dedicou-se

primariamente a elaborar um catálogo de estrelas circumpolares [80] que foi publicado em 1857: ***A catalogue of 3735 circumpolar stars observed at Redhill in the years 1854, 1855, and 1856 and reduced to mean positions for 1855.0*** [58].



Fig. 104. Observatório de Redhill, conforme gravura na página de rosto do catálogo de estrelas circumpolares de Carrington. Créditos: The Internet Archive. Montagem: Wandeclayt M.

Mas foi sua tarefa secundária, de observação de manchas solares, que eternizou seu nome no panteão da Astronomia em expressões como *Rotação de Carrington* e *Evento de Carrington*.

Motivado pela descoberta de um período regular de 11 anos na atividade das manchas solares por Schwabe (Seção 4.5), Carrington se propôs a observar o Sol ao longo de todo um ciclo de atividade, concentrando seu trabalho em traçar as regularidades na distribuição das manchas, detectar o período real de rotação do Sol e determinar se havia algum movimento próprio mensurável das manchas. [81]

[80] Estrelas circumpolares são aquelas que, na latitude do observador, circulando o polo celeste visível, jamais se põem.

[81] "In coming to this arrangement it is proper to observe that I did not propose to myself "Solar Physics" in their entirety. The distribution of radiative power, the position of the thermal equator, the numerical amount of illuminating power and its possible variations, the estimation even of the degree of energy exhibited in the production of spots, and many other features were consciously left aside, and the subject before my mind reduced pretty much to tracing regularity in the distribution of the maculae, detecting the true period of Rotation of the Body of the Sun, and the determination of the systematic movements or currents of the surface, if such existed in any definable manner." [59].

Carrington foi persistente em suas observações e meticuloso em seus métodos de registro e redução[82] de dados para estabelecer a longitude e latitude das manchas com grande precisão, construindo uma grande e consistente base de dados para o estudo do movimento da fotosfera.

O trabalho monumental de observação solar de Carrington foi publicado em 1963 em seu *Observations of the Spots on the Sun* (Fig. 105), compilando observações realizadas entre 9 de novembro de 1853 e 24 de março de 1861 no observatório de Redhill [59].

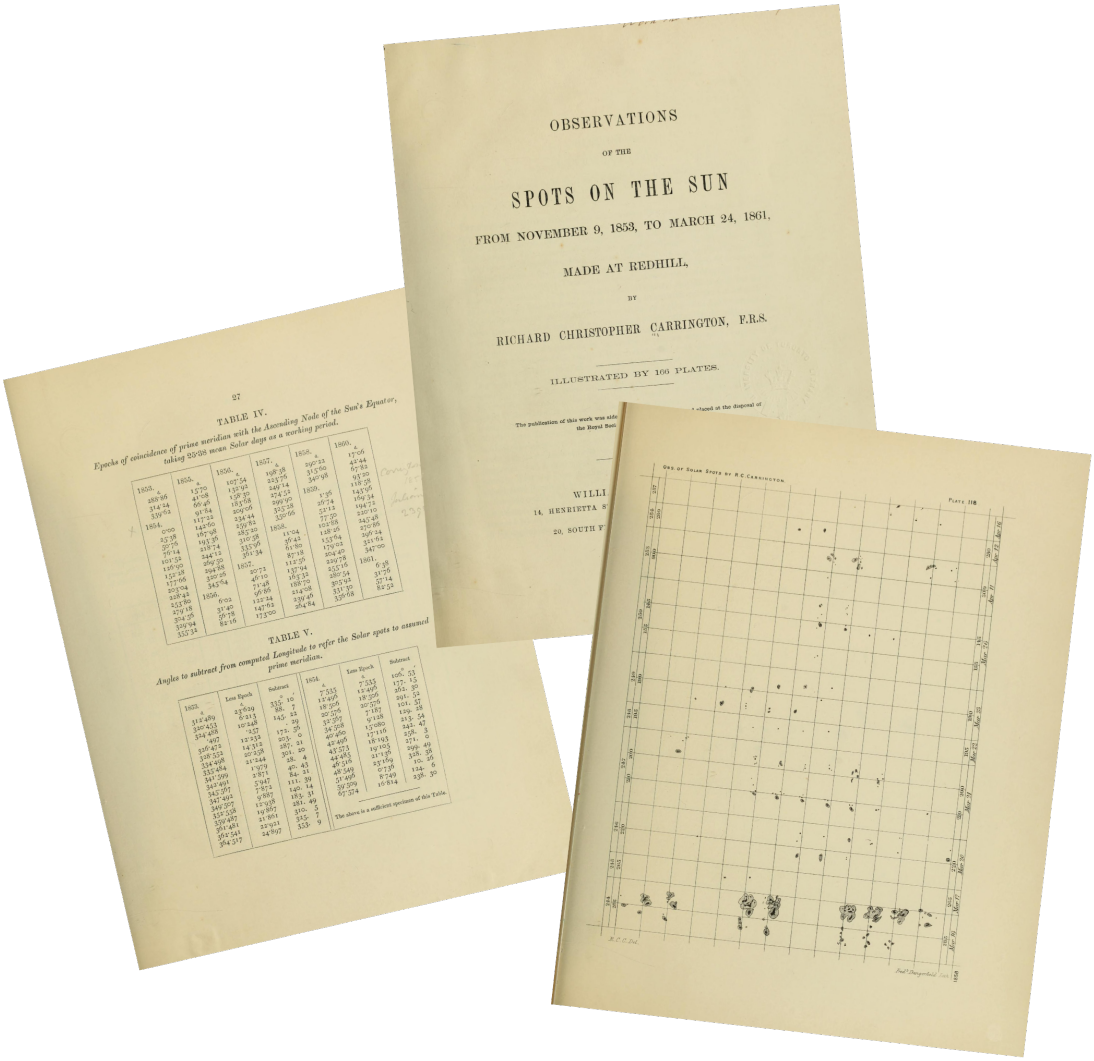


Fig. 105. Observations of the spots on the sun, de Richard C. Carrington, publicado em 1863. Créditos: The Internet Archive.

[82]Na astronomia, *reduzir* dados significa calibrar e processar os dados brutos adquiridos para encontrar as grandezas que se precisa medir. A redução de dados de imagem, consiste em corrigir não homogeneidades do detector e eliminar fontes de ruído.

Carrington adaptou um sistema de projeção da imagem solar (Fig. 106) em sua luneta equatorial, numa configuração similar à adotada por Scheiner.

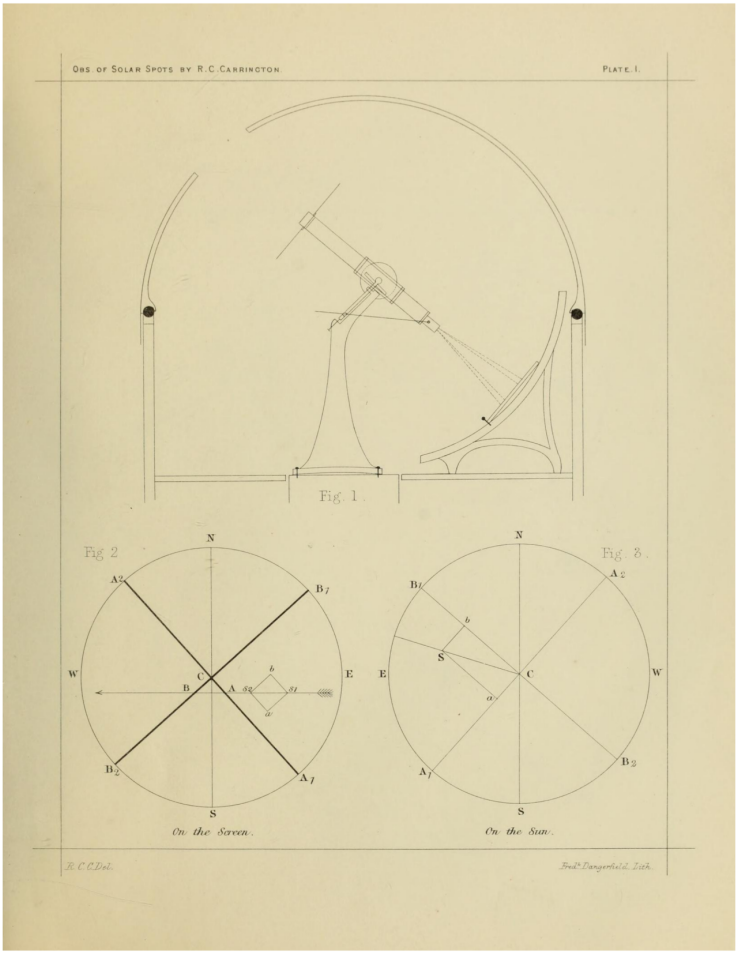


Fig. 106. Carrington usou o sistema de projeção ilustrado acima para a observação das manchas solares em seu observatório em Redhill. O método é similar ao descrito por Christoph Scheiner em *Rosa Vrsina*[5].

O período de rotação sideral[83] do Sol, com duração de 25,38 dias solares[84], conhecido como ***Rotação de Carrington***, aparece no *Observations of the Spots of the Sun* como o período de referência definido por Carrington para estudar o movimento de manchas solares[85].

Cada um dos períodos de 25,38 dias corresponde a uma rotação de Carrington e essa contagem sequencial de rotações é mantida até o presente, com início na rotação 1 em 9 de novembro de 1853. A rotação de número 2000 teve início em 20 de fevereiro de 2003[86].

A Fig. 107 mostra uma tabela elaborada por Carrington, com o início de cada rotação entre 9 de novembro de 1853 e 24 de março de 1861, computado como o instante da passagem do meridiano principal pelo nodo ascendente do equador solar[87]. Os valores listados na tabela correspondem ao dia do ano e à fração do dia.

27

TABLE IV.

Epochs of coincidence of prime meridian with the Ascending Node of the Sun's Equator, taking 25·38 mean Solar days as a working period.

1853.	1855.	1856.	1857.	1858.	1860.
d.	d.	d.	d.	d.	d.
288·86	15·70	107·54	198·38	290·22	17·06
314·24	41·08	132·92	223·76	315·60	42·44
339·62	66·46	158·30	249·14	340·98	67·82
1854.	91·84	183·68	274·52	1859.	93·20
0·00	117·22	209·06	299·90	1·36	118·58
25·38	142·60	234·44	325·28	26·74	143·96
50·76	167·98	259·82	350·66	52·12	169·34
76·14	193·36	285·20	1858.	77·50	194·72
101·52	218·74	310·58	11·04	102·88	220·10
126·90	244·12	335·96	36·42	128·26	245·48
152·28	269·50	361·34	61·80	153·64	270·86
177·66	294·88	1857.	87·18	179·02	296·24
203·04	320·26	20·72	112·56	204·40	321·62
228·42	345·64	46·10	137·94	229·78	347·00
253·80	1856.	71·48	163·32	255·16	1861.
279·18	6·02	96·86	188·70	280·54	6·38
304·56	31·40	122·24	214·08	305·92	31·76
329·94	56·78	147·62	239·46	331·30	57·14
355·32	82·16	173·00	264·84	356·68	82·52

Fig. 107. Tabela de rotações do Sol, a partir de 1853, computadas por R. C. Carrington.

[83] O período de rotação sideral é aquele medido no referencial das estrelas fixas.

[84] 1 dia solar médio = 24h. É o período médio de rotação terrestre medido em relação ao Sol. Quando a rotação é medida com relação às estrelas temos o dia sideral, com duração de 23h56min.

[85] Carrington estabeleceu um meridiano central coincidindo com o nodo ascendente do equador solar às 0h de primeiro de janeiro de 1854 e completando uma rotação em relação ao referencial das estrelas a cada 25,38 dias solares.

[86] É possível determinar rapidamante a rotação de Carrington para uma data qualquer usando o módulo Sunpy em um script Python.

[87] Os nodos são os pontos em que o equador do Sol cruzam a eclíptica, o plano da órbita terrestre. O nodo ascendente é aquele no qual um ponto sobre o equador solar cruza a eclíptica do sul para o norte.

Descontando a taxa de rotação de $14^{\circ}11'/dia$ (correspondendo a uma rotação a cada 25,38 dias), Carrington encontrou diferentes velocidades médias de rotação para cada latitude do Sol e descreveu, baseado em sua robusta base de dados, a rotação diferencial da fotosfera solar.

Carrington detectou que manchas mais próximas ao equador se adiantavam, enquanto manchas com latitudes mais elevadas atrasavam-se, em relação ao meridiano central definido.

Nos anos finais do período das observações de Carrington, o fotoheliógrafo, um telescópio especializado no registro fotográfico do Sol e das manchas solares, estava em desenvolvimento por Warren de la Rue (1815-1889). Este instrumento, um refrator de 3"(7,5 cm) de abertura, que registrava a imagem do Sol sobre uma placa fotográfica, foi instalado no Observatório de Kew, em 1858 e transferido para o Observatório de Greenwich em 1872.

Beneficiando-se de técnicas mais precisas, não disponíveis nos dias de Carrington, medições subsequentes seguiram refinando o modelo da rotação da fotosfera. Atualmente, magnetogramas e dados de heliosismologia permitem medir não apenas a rotação na camada superficial da fotosfera, mas também sondar o interior solar [60].

Em 1983, Herschel B. Snodgrass publica uma expressão empírica da rotação diferencial [61], com a forma [88]:

$$\omega(\phi) = A - B\ sin^2(\phi) - C\ sin^4(\phi)\ \mu rad\ s^{-1},$$

Onde ω é a velocidade (angular) em função da latitude solar ϕ e A, B e C são parâmetros determinados experimentalmente.

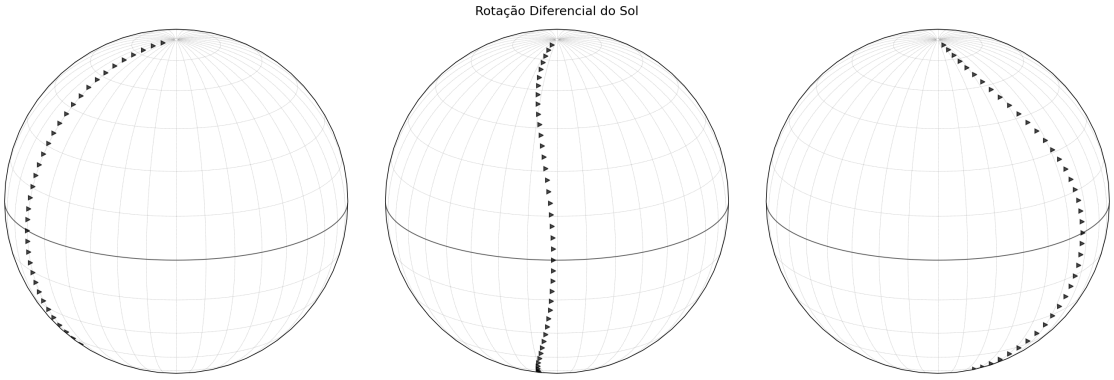


Fig. 108. Ilustração da rotação diferencial do Sol, seguindo a Lei de Snodgrass. Créditos: Wandeclayt M.

Registros diários atuais da fotosfera podem ser acessados através da plataforma helioviewer, que reúne dados públicos de telescópios solares terrestres e em órbita.(Fig. 109).

[88] Com os parâmetros publicados por Snodgrass em 1983, a expressão fica: $\omega(\phi) = 2.902 - 0.464 sin^2(\phi) - 0.328 sin^4(\phi)\ \mu rad\ s^{-1}$. Esses parâmetros seguem sendo atualizados com dados de instrumentos mais recentes, como os encontrados a bordo dos telescópios espaciais SOHO e SDO.

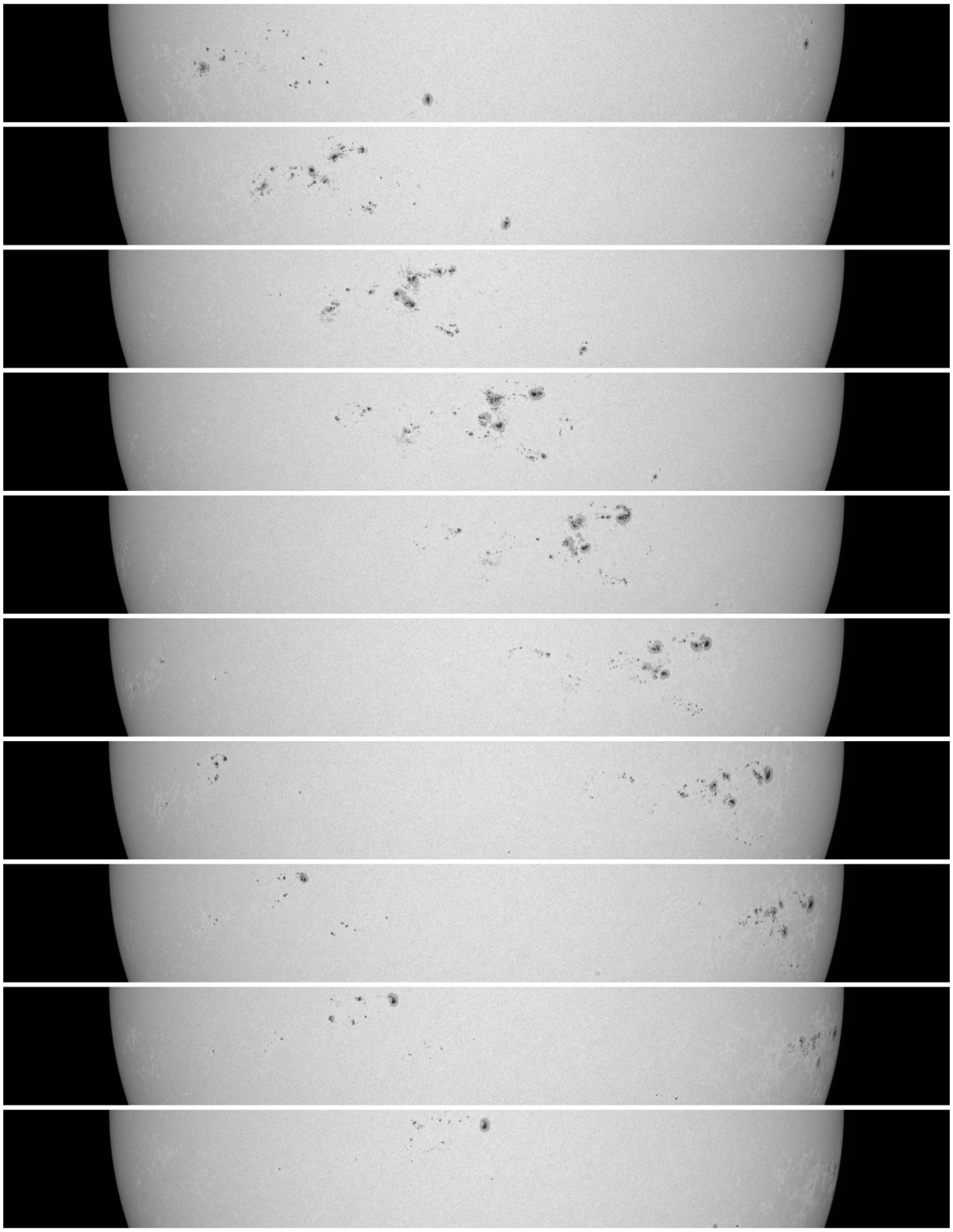


Fig. 109. Rotação solar evidenciada numa sequência de imagens diárias capturadas pelo telescópio espacial Solar Dynamics Observatory (SDO) entre 17 e 26 de abril de 2024. Imagens: NASA/SDO/HMI. Montagem: Wandeclayt Melo.

4.5 O Ciclo Solar

Vimos na seção 4.4 que as manchas solares forneceram as primeiras evidências da rotação solar. Mas, além de evidenciar o movimento da fotosfera, as manchas solares são um indicador de atividade solar, e a evolução no número diário de manchas revela a existência de um ciclo com duração aproximada de 11 anos.

A descoberta desse ciclo é mais um dos grandes feitos da Astronomia amadora. Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875) foi um observador amador da Lua, planetas e, principalmente, do Sol. Schwabe iniciou suas observações em outubro de 1825, motivado pela busca de um planeta interno à órbita de Mercúrio. Obviamente, sua busca por um planeta intramercurial falhou, mas seus dados acumulados de observação de manchas solares forneceram evidências robustas da existência de um ciclo de aproximadamente 10 anos no número médio de manchas visíveis diariamente.

A Fig. 110 mostra a mudança no aspecto do disco do Sol observado em luz visível no mínimo e no máximo de um ciclo de atividade solar. Em outubro de 2020, durante o período de mínima atividade ao fim do ciclo 24, há apenas uma pequena mancha visível no disco. Em agosto de 2024, já no pico de atividade do ciclo 25, o disco está preenchido com grandes regiões ativas.

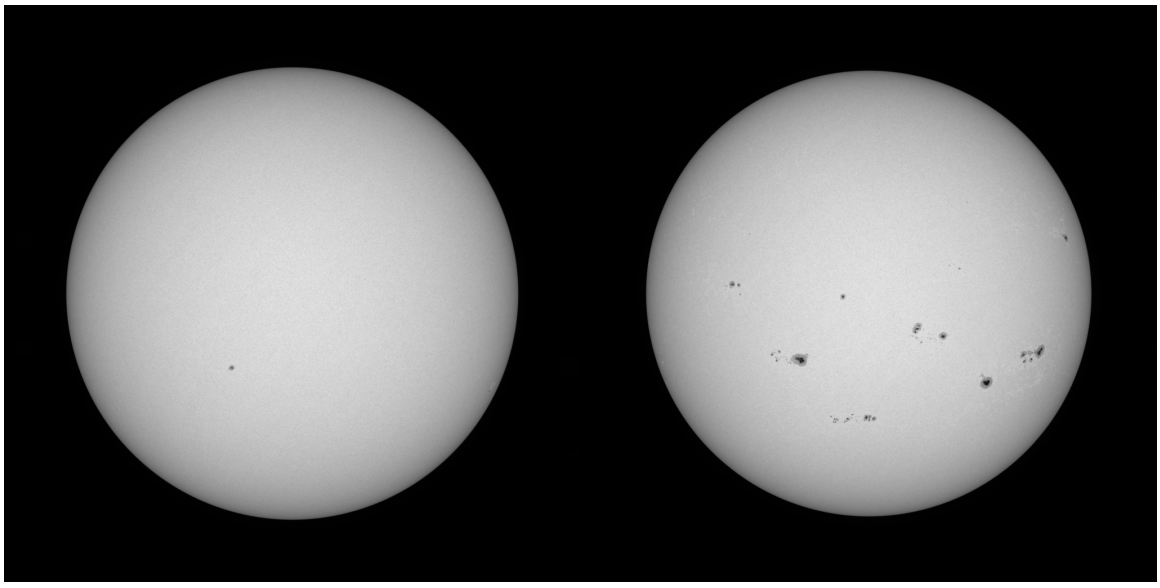


Fig. 110. Aspecto da fotosfera durante um período de mínimo do ciclo de atividade solar em outubro de 2020 (imagem da esquerda) e durante o período de máximo em agosto de 2024. Imagens: Solar Dynamics Observatory (SDO). Montagem: Wandeclayt Melo.

A regularidade encontrada no comportamento das manchas solares renovou o interesse pela observação do Sol no Séc. XIX, sobretudo por uma coincidência percebida de maneira independente por três pesquisadores. Os suíços Johann Rudolph Wolf(1816-1893)[55] e Alfred Gautier (1793-1881) e o irlandês Edward Sabine (1788-1883) notaram a correlação

entre o ciclo descoberto por Schwabe e perturbações no campo magnético terrestre, o que poderia indicar uma conexão real entre a atividade solar e o geomagnetismo [50].

Registros telescópicos das manchas solares foram realizados desde o Séc. XVII por observadores com diferentes instrumentos e diferentes habilidades, o que resultava também em números discrepantes originados nessas observações.

Concentrado na tarefa de recuperar e unificar esses dados de observações desde o Séc. XVII, Wolf definiu um parâmetro chamado número relativo de manchas, R, que permitiu consolidar observações de diferentes instrumentos e observadores, estabelecendo uma série temporal única e consistente de monitoramento da atividade solar:

$$R = k(10g + n),$$

onde k é uma constante atribuída ao observador e ao instrumento, g é o número de grupos observados e n é o número de manchas individuais por grupo

Os dados consolidados por Wolf permitem acompanhar a evolução mensal do número médio de manchas, pelo menos desde janeiro de 1749. Esses dados são disponibilizados hoje pelo Observatório Real da Bélgica na base de dados Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO).

Um gráfico dos valores mensais médios de R ao longo do tempo revela um padrão de picos sucessivos no número de manchas, com um intervalo de aproximadamente 11 anos. Outros parâmetros, como a área das manchas solares, a quantidade e a intensidade das ejeções de massa coronal e das erupções solares, a irradiância total, o campo magnético e a abundância de radioisótopos em anéis de crescimento de árvores, variam seguindo esse mesmo padrão do número de manchas solares[62].

A Fig. 111, mostra a série temporal, iniciada em 1749, do número médio mensal de manchas solares. O gráfico revela a natureza periódica da média mensal de manchas, com ciclos de aproximadamente 11 anos. Os ciclos são numerados a partir do 0, com início no ciclo em curso em 1749. O ciclo 25 atingiu seu pico entre 2024 e 2025.

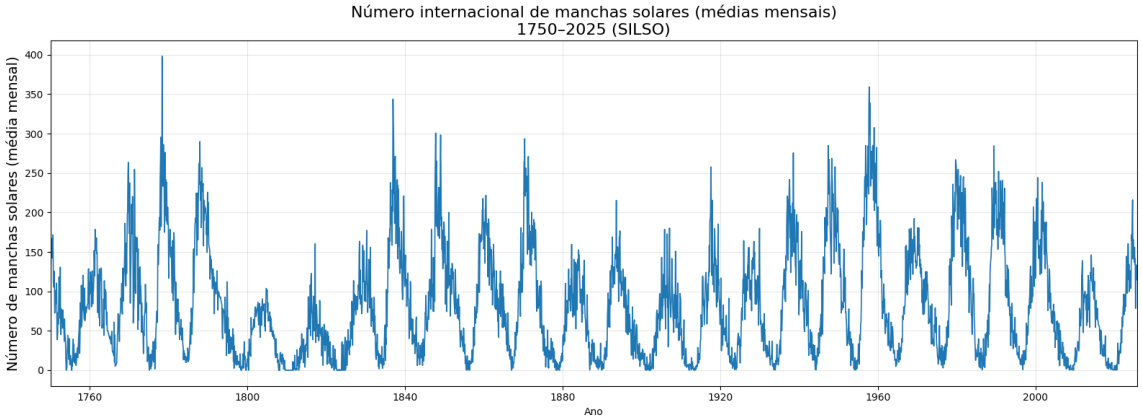


Fig. 111. Progressão da média de manchas solares de 1749 a 2025. Dados: WDC-SILSO, Observatório Real da Bélgica, Bruxelas, DOI: 10.24414/qnza-ac80.

Nem todos os picos possuem a mesma intensidade, e é notável na série de dados na Fig. 111 o baixo número de manchas nos picos dos ciclos 5, 6 e 7, correspondente a um período conhecido como *Mínimo de Dalton*[63].

Períodos de baixa atividade anteriores à série histórica iniciada em 1749 também são conhecidos. Apesar da ausência de uma série ininterrupta de observações diárias sistemáticas antes de 1749, é possível reconstruir ciclos de atividade anteriores, inclusive com a corroboração de outros indicadores, como os fornecidos pelo estudo de anéis de crescimento de árvores centenárias expostas à atividade solar no período e de abundância de certos radioisótopos[89] em camadas de gelo.

Análise desses dados anteriores a 1749 revela um período de atividade excepcionalmente baixa, caracterizado por uma quase ausência de manchas solares no período de 1645 a 1715, conhecido como *Mínimo de Maunder*[64].

Além do número, a área ocupada pelas manchas solares também varia ao longo de um ciclo de atividade solar. A Fig. 112 indica a área da superfície solar coberta por manchas, repetindo o mesmo padrão e revelando a mesma periodicidade encontrada no gráfico do número de manchas.

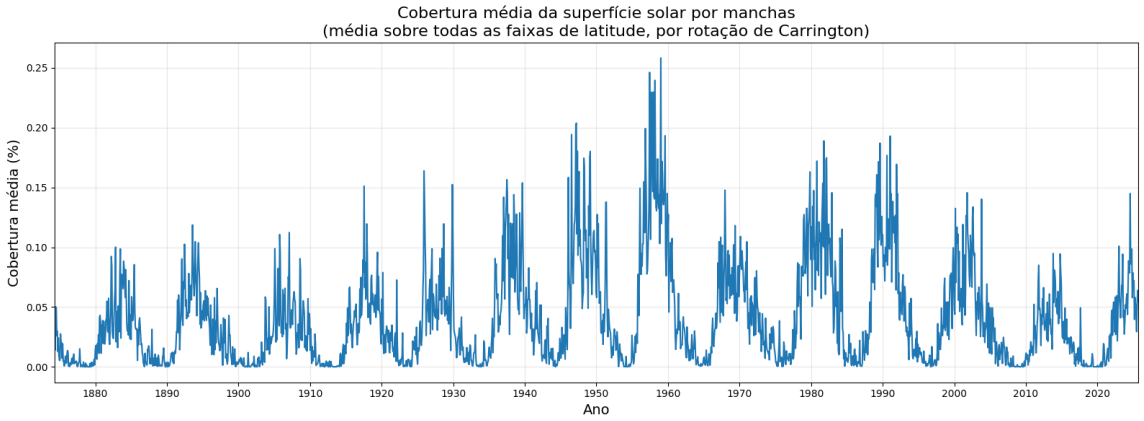


Fig. 112. Cobertura média da superfície solar por manchas. Dados: Royal Greenwich Observatory – USAF/NOAA Sunspot Data, compilado por NASA/Marshall Solar Physics (David H. Hathaway). Gráfico: Wandeclayt M.

Ao longo do ciclo, varia também a latitude onde as manchas se formam. No início de um ciclo, as regiões ativas concentram-se em latitudes médias, por volta de 30°, em ambos os hemisférios. No fim do ciclo, o surgimento de novas manchas migra em direção ao equador.

[89] Os radioisótopos ^{14}C e ^{10}Be são produzidos na estratosfera terrestre pela colisão de raios cósmicos galácticos com o ^{14}N e o ^{16}O. O ^{14}C reage com o O_2 para formar o CO_2, que é absorvido pelas plantas e, em particular, pelas árvores, onde se fixa nos anéis anuais de crescimento. O ^{10}Be sofre oxidação e se fixa a aerossóis que podem se precipitar como neve, fixando-se em depósitos anuais de gelo. O fluxo de raios cósmicos é modulado pelo ciclo solar, e medições das variações da abundância atmosférica do ^{14}C e ^{10}Be podem fornecer dados sobre a intensidade da atividade solar em ciclos passados.[62]

Esse deslocamento da latitude de surgimento das manchas durante o ciclo fica evidenciado em um gráfico conhecido como diagrama de borboleta (Fig. 113), onde a latitude das manchas é plotada em função do tempo[90]. O gráfico ressalta também a simetria entre os hemisférios em cada ciclo solar, com grupos de manchas solares surgindo em faixas de latitude similar em ambos os hemisférios [62][65].

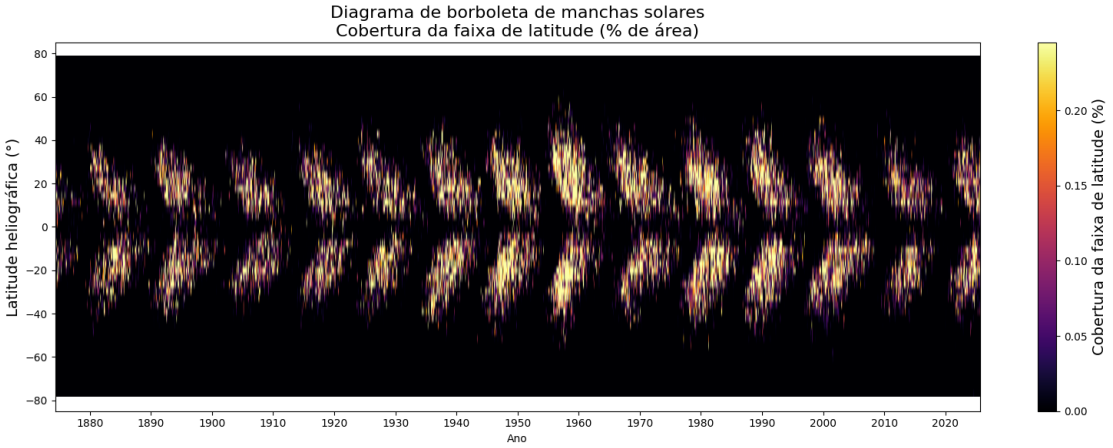


Fig. 113. Diagrama de Borboleta, exibindo a evolução na latitude de surgimento das regiões em cada hemisfério em função do tempo. Dados: Royal Greenwich Observatory – USAF/NOAA Sunspot Data, compilado por NASA/Marshall Solar Physics (David H. Hathaway). Gráfico: Wandeclayt M.

A observação do campo magnético associado a grupos de manchas bipolares revela um segundo período na atividade solar: A cada ciclo de 11 anos, observa-se uma inversão na configuração da polaridade dos grupos de manchas bipolares, caracterizando um ciclo magnético de 22 anos [45].

Na Fig. 114, a imagem da esquerda é um magnetograma produzido pelo instrumento HMI do observatório SDO durante o período de máxima atividade do ciclo 24 em 2013. No hemisfério norte, a polaridade das manchas situadas à frente das regiões ativas (de acordo com o sentido de rotação do Sol) é negativa. No hemisfério sul, as manchas à frente apresentam polaridade positiva. A imagem da direita, capturada durante o máximo do ciclo 25, 11 anos depois da primeira imagem, mostra uma inversão de polaridade, com as manchas à frente no hemisfério norte apresentando polaridade positiva e no hemisfério sul apresentando polaridade negativa.

[90]Os dados do gráfico são do Royal Greewnwich Observatory (RGO), da U. S. Air Force (USAF) e NOAA compilados pelo grupo de Física Solar do Marshall Space Flight Center (MSFC) da NASA (https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/bflydata.txt)

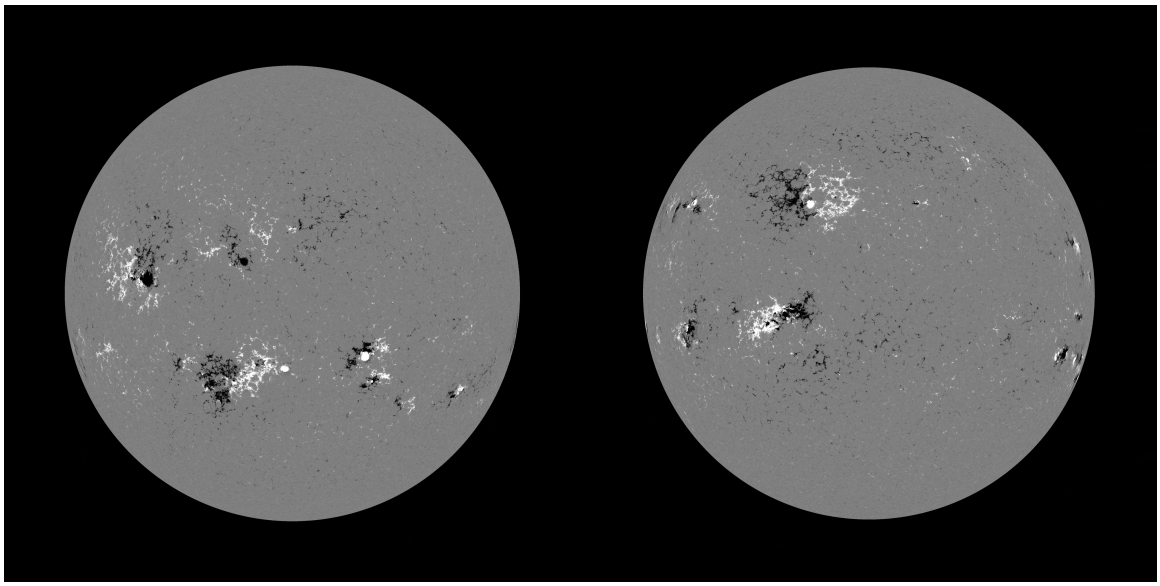


Fig. 114. Magnetograma composto com dados do observatório espacial SDO. A análise do magnetograma revela uma inversão na polaridade no campo magnético das regiões ativas a cada ciclo de 11 anos. A imagem da esquerda, capturada em 2013 durante o máximo do ciclo 24,

EM CONSTRUÇÃO - DESCULPE-NOS O TRANSTORNO!

4.6 Os *Flares* Solares

Em primeiro de setembro de 1859, Richard Carrington e Richard Hodgson (1804-1872) observaram simultaneamente o que Carrington descreveu como "duas regiões de luz intensa branca e brilhante"[91] associados a um grupo de manchas solares [66] [67].

Carrington registrou essas regiões em um diagrama (Fig. 115) publicado na Monthly Notices of the Royal Astronomical Society em novembro de 1859. Em seu relato, Carrington descreve o surgimento de duas regiões brilhantes associadas a um grande grupo de manchas solares nas áreas marcadas como *A* e *B* na figura. O fênomeno durou aproximadamente 5 minutos, extinguindo-se nas áreas marcadas como *C* e *D*.

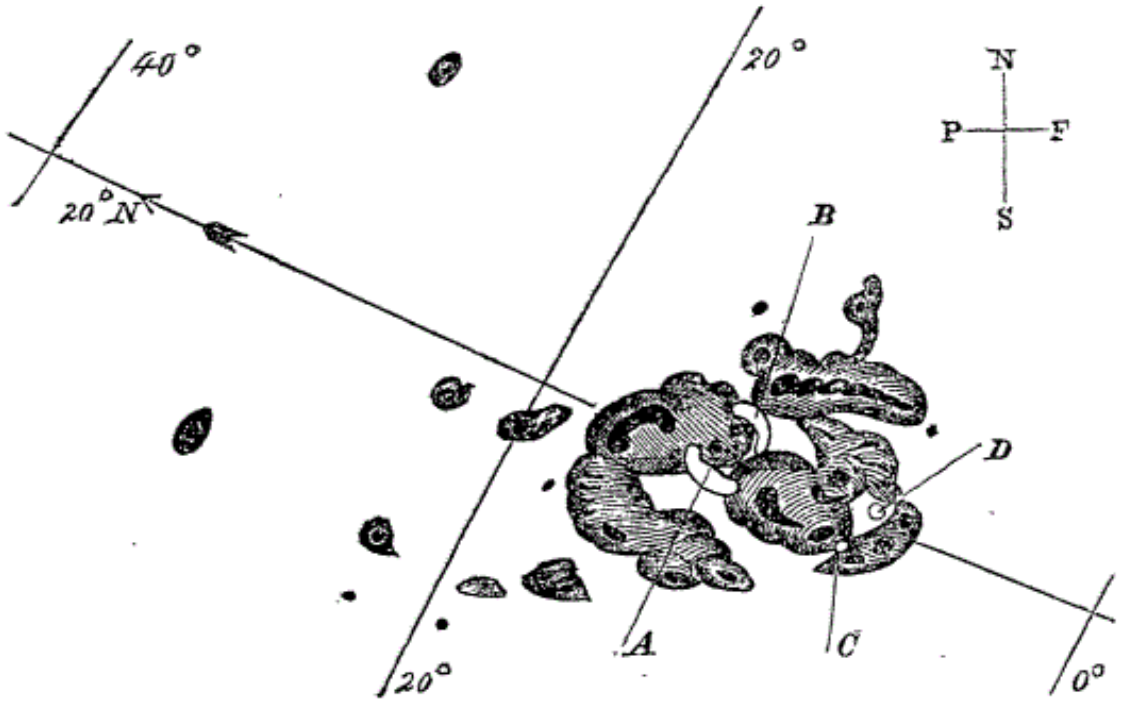


Fig. 115. Evento de Carrington. Primeiro flare solar registrado. Ilustração de Richard Carrington de evento observado em 1 de setembro de 1859, publicada na Monthly Notices of the Royal Astronomical Society e novembro do mesmo ano.

Essa foi a primeira observação de um *flare* solar, um repentino e rápido aumento de brilho, causado pela liberação de energia armazenada no campo magnético solar. Embora Carrington e Hodgson tenham observado o fenômeno na luz visível, *flares* também são observáveis nas bandas mais energéticas do espectro eletromagnético, como ultravioleta, raios-x e raios gama.

Registrar um *flare* não é mais uma questão de sorte. Telescópios em terra e uma frota de telescópios espaciais monitoram constantemente a atividade solar, auxiliando a predição

[91] *Two patches of intensely bright and white light.*

de eventos importantes do clima espacial, que podem afetar telecomunicações, redes de transmissão de energia elétrica e operação de satélites.

Flares são detectados e observados em tempo real por imageadores operando no ultravioleta, como o AIA no SDO da NASA e o Solar Ultraviolet Imager (SUVI) em satélites da família Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES). A Fig. 116 mostra um intenso *flare* associado à região ativa AR 13842, registrado em 3 de outubro de 2025, pelo instrumento AIA do observatório SDO[92]. Esta é uma imagem capturada no ultravioleta, com comprimento de onda de 131 Å.

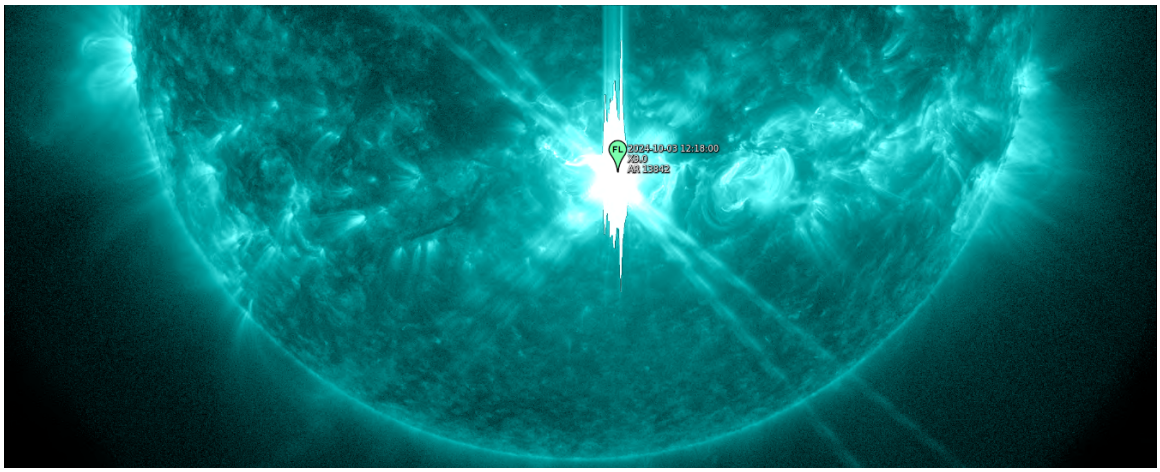


Fig. 116. Flare categoria X9.0 observado em 3 de outubro de 2024 pelo satélite SDO. Imagem capturada em ultravioleta (131 Å) pelo imageador AIA. Créditos: NASA/SDO/AIA.

Desde 1970, os flares recebem uma classificação de acordo com a intensidade do pico do fluxo de raios-x medidos por satélites na Terra[93] (Tab. 8). *Flares* das classes A e B só podem ser detectados durante os períodos de mínima atividade solar, quando o nível médio de raios-x emitidos pelo Sol é mais baixo [45].

Classe	Intensidade de Pico
A	$\geq 0,01\ \mu\mathrm{W/m^2}$
B	$\geq 0,1\ \mu\mathrm{W/m^2}$
C	$\geq 1\ \mu\mathrm{W/m^2}$
M	$\geq 10\ \mu\mathrm{W/m^2}$
X	$\geq 100\ \mu\mathrm{W/m^2}$

Tabela 8. Classes de *flares* solares em raios-X.

No Sistema Internacional de Unidades (SI) o fluxo de raios-X é dado em watts por metro quadrado. Cada classe tem um limite mínimo para o pico de intensidade 10 vezes

[92] O pico do fluxo de raios X medido por satélites na Terra para este evento foi de $9 \times 10^{-4}\mathrm{W/m^2}$ ou 900 $\mu\mathrm{W/m^2}$.

[93] Na faixa entre 0,1 e 0,8 nm (“Raios-x moles").

maior do que o da classe anterior, e um índice pode ser atribuído para definir com mais precisão a intensidade do evento. Um *flare* de classe M4.0, por exemplo, corresponde a um evento com pico de $4 \times 10\ \mu\mathrm{W/m^2}$. Para as classes A, B, C e M o índice deve ser menor do que 10. A classe X não possui limite superior.

Apesar do alto pico de radiação medido por satélites durante os *flares* mais intensos, a dose de radiação recebida na superfície terrestre é significativamente menor, atenuada pela atmosfera que é opaca na faixa dos raios-X. No entanto, aeronautas em voos de grande altitude ou astronautas, especialmente durante atividades extraveiculares, estão expostos a doses de radiação comparáveis a uma ou mais radiografias de tórax [94].

Além de organismos, dispositivos tecnológicos também precisam ser protegidos dos efeitos da radiação.

Sistemas eletrônicos em satélites, veículos espaciais e aeronaves também são sensíveis à radiação. A investigação de um incidente aeronáutico ocorrido em 30 de outubro de 2025, quando uma aeronave da família A320[95] realizou uma manobra inadvertida antes de ter sua atitude estabilizada pelo piloto automático, apontou a radiação solar como possível fator contribuinte (Fig. 117).

Toulouse, France, 28 November 2025 – Analysis of a recent event involving an A320 Family aircraft has revealed that intense solar radiation may corrupt data critical to the functioning of flight controls.

Airbus has consequently identified a significant number of A320 Family aircraft currently in-service which may be impacted.

Fig. 117. Nota à imprensa da Airbus [6], fabricante da família de aeronaves A320, sobre a provável contribuição de um *flare* solar num incidente que afetou um computador de comandos de voo de uma aeronave.

[94] Os efeitos à saúde causados pela radiação dependem da energia absorvida pelos orgãos ou tecidos expostos. As grandezas que quantificam essa energia são a dose equivalente, definida como a dose absorvida média no volume de um órgão ou tecido, considerando um fator de peso para o tipo da radiação (para os raios-X, o fator é igual a 1) e a dose efetiva, definida como a soma das doses equivalentes, considerando um fator de peso para cada órgão ou tecido exposto[68]. A unidade de dose no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o joule por quilograma ($\mathrm{J/kg}$), que recebe a denominação especial sievert (Sv).

Um ser humano de 60 kg, exposto sem proteção a um *flare* de categoria X1.0, com duração de 1 minuto, receberia uma dose de $10^{-4}\mathrm{W/m^2} \cdot 0{,}5\ \mathrm{m^2} \cdot 60\ \mathrm{s}/60\ \mathrm{kg} = 50 \times 10^{-6}\ \mathrm{J/kg} = 50\mu\mathrm{Sv}$, ou o correspondente a duas vezes e meia a dose equivalente à uma ou mais radiografias do tórax

No Brasil, os limites de dose para um Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE) à radiação e para indivíduos do público é definido pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) na norma CNEN NN 3.01 Requisitos Básicos de Radioproteção e Segurança Radiológica de Fontes de Proteção. O limite no acréscimo da dose efetiva (no corpo inteiro) para um IOE estabelecido na norma é de 20 mSv por ano. Para aeronautas, o nível de referência para exposição é de 5 mSv por ano.

[95] Aeronave Modelo A320-232, matrícula N605JB, operado pela companhia Jetblue.

4.7 A Cromosfera

Enquanto as manchas solares são fenômenos observados na fotosfera, flares, proeminências e filamentos são fenômenos da cromosfera, a camada da atmosfera solar imediatamente acima da fotosfera, com espessura de aproximadamente 2 mil quilômetros.

A olho nu, a cromosfera pode ser observada brevemente durante a totalidade de um eclipse solar (Somente durante a totalidade é seguro olhar diretamente para o Sol sem proteção!). Com a fotosfera completamente bloqueada pela Lua, é possível perceber proeminências na cromosfera como pequenas formações de tonalidade avermelhada. Na Fig. 118 estão destacadas as proeminências visíveis durante a totalidade do eclipse de 2 de julho de 2019, fotografado em Vicuña (Chile).



Fig. 118. Proeminências na cromosfera solar durante o eclipse total de 2 de julho de 2019. Imagem capturada em Vicuña, Chile. Imagem: Wandeclayt M.

Com instrumentos, o uso de filtros especiais permite isolar a luz emitida na cromosfera, evidenciando formações como proeminências, filamentos e *plages*. Há modelos de telescópios dedicados para a observação solar, com filtros integrados que selecionam apenas a luz em uma faixa estreita de comprimentos de onda em torno de 656 nm. Este é um comprimento de onda importante para a astronomia, correspondendo à linha de emissão conhecida como hidrogênio alfa ou H-alfa[96], abundante em ambientes onde átomos de

[96] A emissão em 656,28 nm, também abreviada como Ha ou Hα, é produzida quando um elétron excitado do átomo de hidrogênio cai do terceiro para o segundo nível mais baixo de energia. Átomos ionizados de hidrogênio (prótons que perderam seu elétron) podem emitir a linha do Hα quando recapturam um elétron, formando um novo átomo. A radiação é emitida quando o elétron recém capturado passa do terceiro para o

hidrogênio são excitados pela radiação ultravioleta, como a atmosfera do Sol, nebulosas planetárias e regiões de formação estelar.

Na Fig. 119 vemos o Sol através de um telescópio Hα (Coronado SolarMax II) de 60 mm de abertura. As cores na imagem reproduzem o vermelho intenso da emissão do hidrogênio alfa na visão da ocular do telescópio. No limbo, à esquerda, destacam-se grandes proeminências e, na região central do disco, são visíveis longos filamentos.

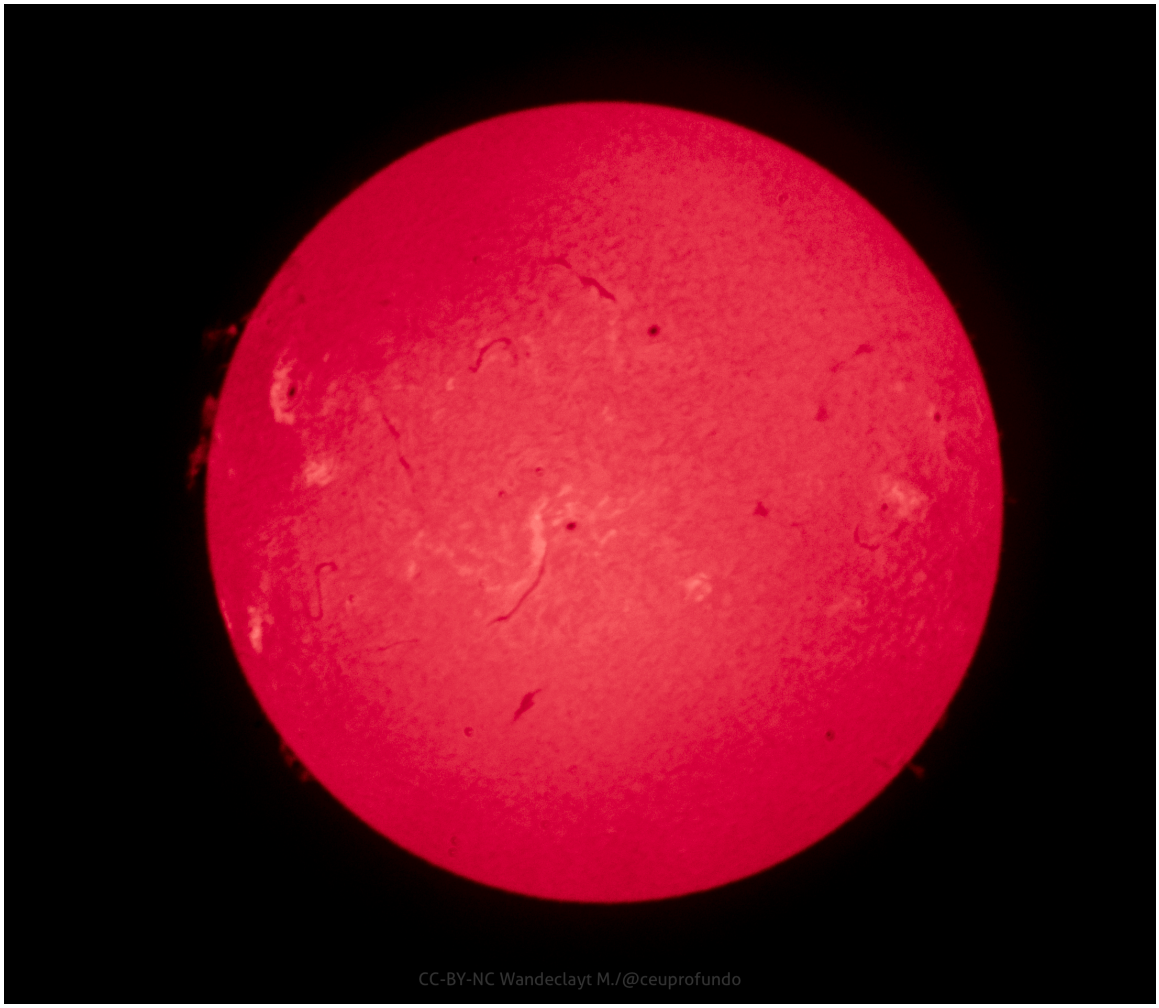


Fig. 119. O Sol observado em hidrogênio alfa, em 15 de fevereiro de 2025, com telescópio Coronado SolarMax II de 60mm e câmera DSLR. Créditos: Wandeclayt M.

Proeminências e filamentos são, na verdade, o mesmo tipo de estrutura. Aparecem escuras quando vistas sobre o disco ou brilhantes quando vistas no limbo, contra o fundo escuro do céu. Os telescópios com filtros Hα integrados, que permitem a observação dessas estruturas, são os mais seguros para a observação solar, mas seu custo é elevado e seu uso

segundo nível de energia.

é restrito à observação do Sol, já que o filtro não pode ser removido para a observação dos objetos muito menos luminosos do céu noturno.

O custo de telescópios com filtros de banda estreita Hα integrados, como o Coronado (Fig. 120), é elevado, em comparação com telescópios de mesma abertura para uso geral, e seu uso é restrito à observação do Sol. Mas esses são os instrumentos mais seguros para a observação solar.



Fig. 120. Telescópio Coronado SolarMax II 60 mm. Um telescópio de 60 mm de abertura, com filtro integrado para observação solar em hidorgênio alfa. Créditos: Wandeclayt M.

A fabricante dos telescópios da marca Coronado encerrou suas atividades, mas há telescópios Hα de outros fabricantes disponíveis no mercado.

4.8 A Coroa

Acima da cromosfera, eleva-se a coroa, a tênue última camada da atmosfera solar. A coroa é moldada pela geometria das linhas do campo magnético acima da superfície, criando linhas abertas (*streamers*) e *loops* fechados.

Assim como a cromosfera, a coroa só pode ser observada em luz visível com a fotosfera completamente eclipsada, ainda que esse eclipse seja produzido artificialmente. Na Fig. 121 vemos a coroa fotografada durante a totalidade do eclipse solar de 2 de julho de 2019. Nesta fase do eclipse, é possível visualizar a olho nu a estrutura da coroa.

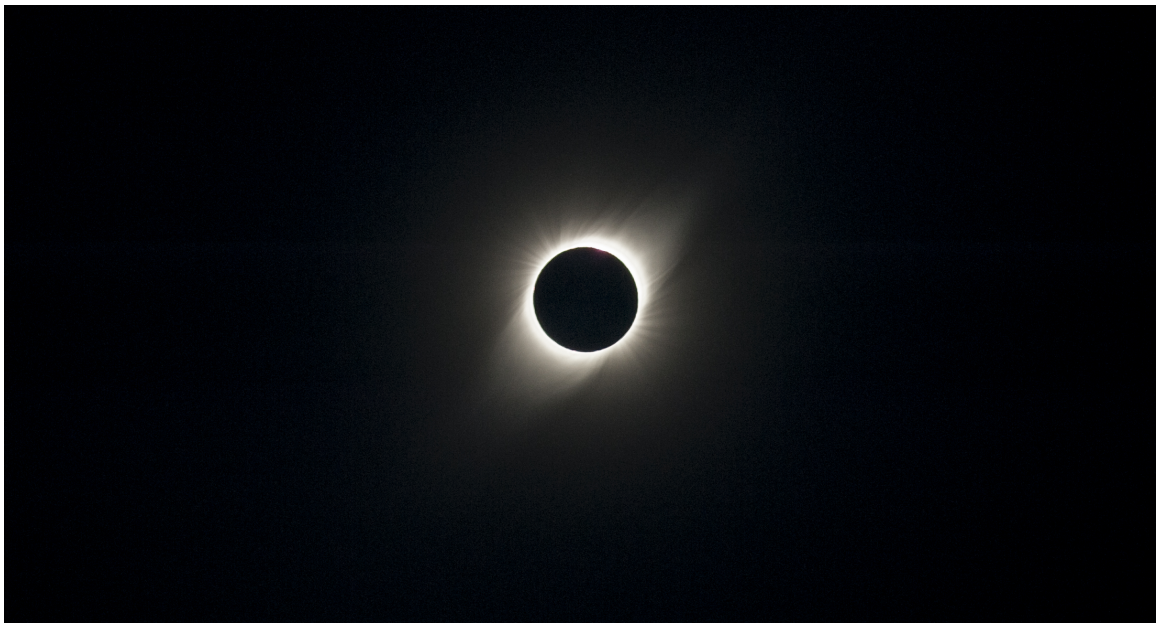


Fig. 121. Coroa solar, observada durante a totalidade do eclipse solar de 2 de julho de 2019., em Vicuña (Chile). Imagem: Wandeclayt M.

Para produzir um eclipse artificial, utiliza-se um instrumento chamado coronógrafo. Inventado na década de 1930 por Bernard Lyot[69], o coronógrafo possui um anteparo que oculta completamente o disco solar, e sua construção minimiza a reflexão e o espalhamento da luz no interior do tubo óptico, permitindo observar a estrutura das camadas exteriores da atmosfera solar. O satélite Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), lançado em 1995 e ainda em operação, é um observatório solar dedicado e possui entre seus instrumentos um conjunto de coronógrafos chamado Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO).

Além de estudar a coroa, os coronógrafos do SOHO permitem visualizar cometas em trajetórias rasantes ao Sol[97].

[97] Os *sungrazers* são cometas que passam muito próximos à superfície solar. Esses cometas podem sublimar completamente e desaparecer na passagem pelo periélio.

4.9 A Plataforma Helioviewer

Se inicialmente jogamos um balde de água fria em suas pretensões de observar diretamente o Sol através de telescópios (relembrando: observar o Sol é uma atividade de risco que pode danificar seu equipamento e lesionar permanentemente seus olhos) chegou a hora de acender seu entusiasmo com a possibilidade de observar remotamente o Sol em tempo (quase) real, utilizando telescópios em órbita e no solo através da plataforma Helioviewer.

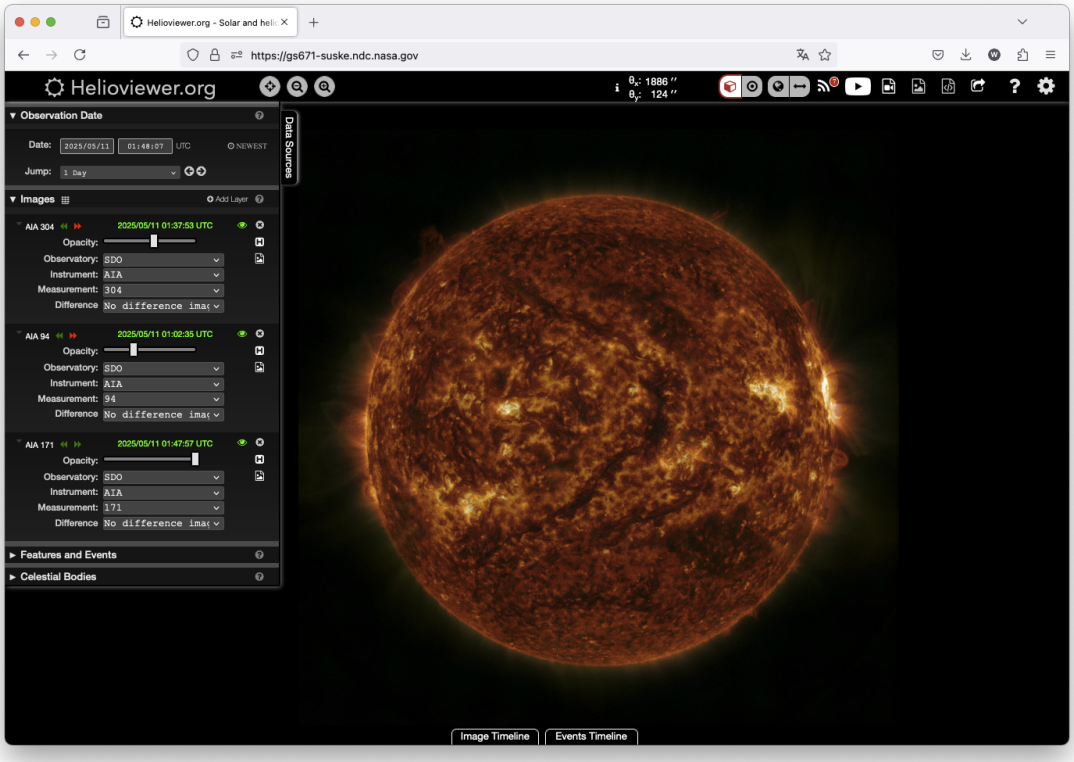


Fig. 122. Plataforma Helioviewer.

A interface da plataforma Helioviewer permite selecionar e visualizar dados de imagem de diversos telescópios e instrumentos dedicados à observação solar. É possível exportar imagens estáticas e vídeos gerados a partir de dados de instrumentos a bordo dos satélites SOHO, SDO, GOES e outros.

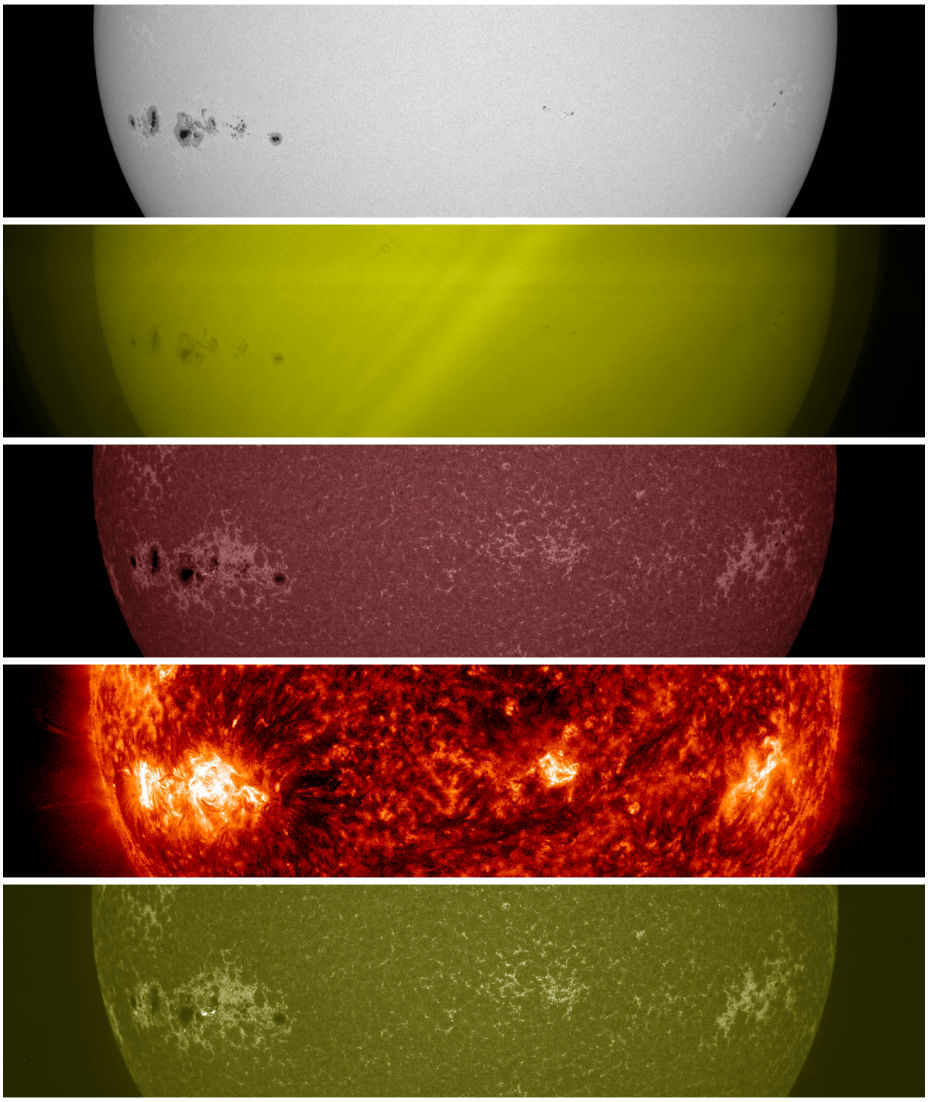


Fig. 123. O Sol observado em 5 bandas do observatório SDO: 6173 Å, 4500 Å, 1700 Å, 304 Å e 1600 Å. Imagens acessadas através da plataforma Helioviewer.

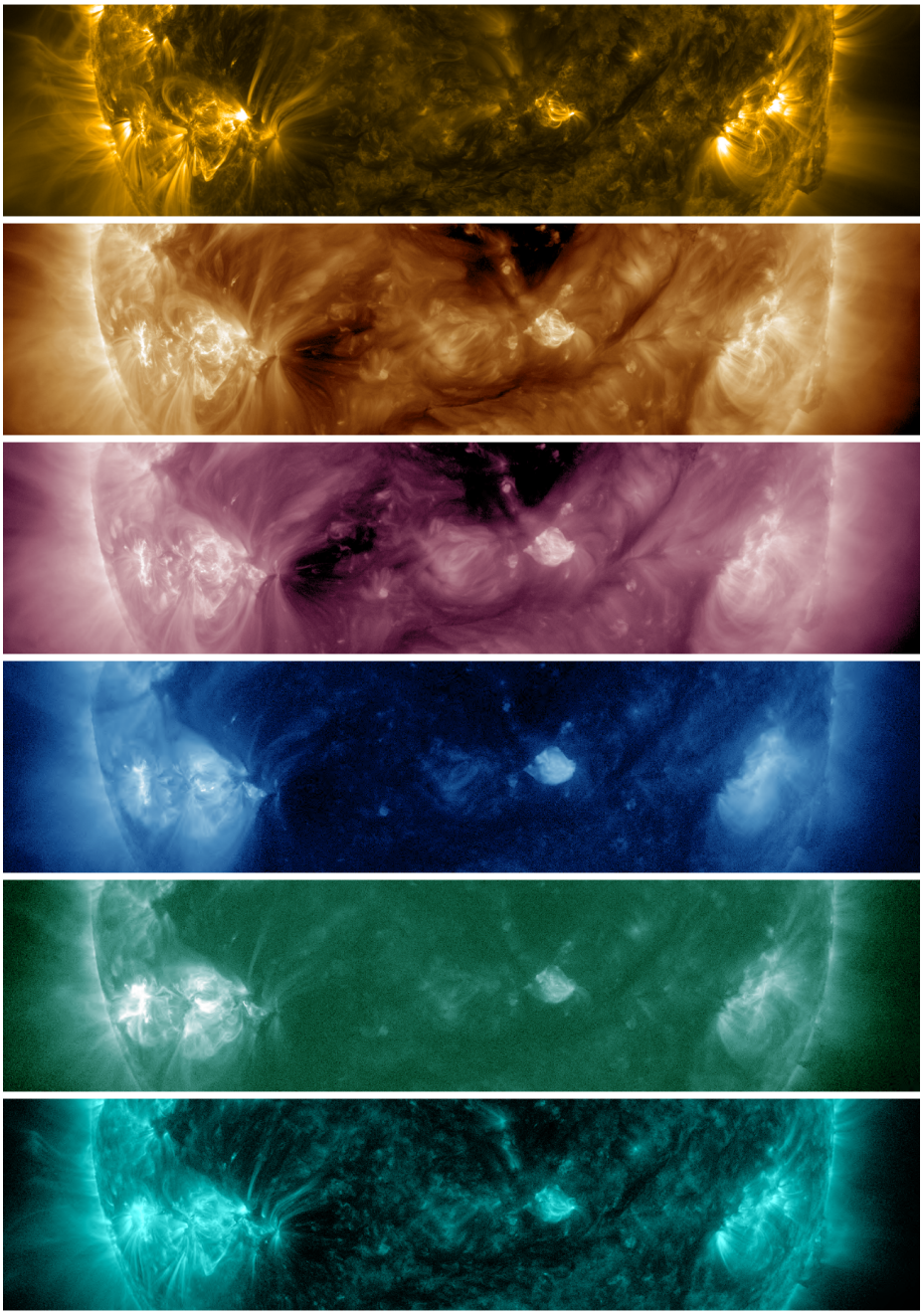


Fig. 124. O Sol observado em 6 bandas do observatório SDO: 171 Å, 193 Å, 211 Å, 335 Å, 94 Å e 131 Å. Imagens acessadas através da plataforma Helioviewer.

Tabela 9. Canais dos instrumentos HMI e AIA do Solar Dynamics Observatory

Banda	**Largura** $\Delta\lambda$	**Linhas de emissão**	**Região da atmosfera solar**	**Temperatura típica** $\log T$ [K]
6173 Å	75 mÅ	Fe I	Intensidade, velocidade e campo magnético na fotosfera.	3,7
4500 Å	500 Å	Contínuo	Fotosfera.	3,7
1700 Å	200 Å	Contínuo	Fotosfera e região de temperatura mínima.	3,7
304 Å	12,7 Å	He II	Cromosfera e região de transição.	4,7
1600 Å	200 Å	C IV, contínuo	Região de transição e topo da fotosfera.	5,0
171 Å	4,7 Å	Fe IX	Topo da região de transição e coroa calma.	5,8
193 Å	6,0 Å	Fe XII, XXIV	Coroa e plasma quente associado a *flares*.	6,1; 7,3
211 Å	7,0 Å	Fe XIV	Coroa, especialmente em regiões ativas.	6,3
335 Å	16,5 Å	Fe XVI	Coroa, especialmente em regiões ativas.	6,4
94 Å	0,9 Å	Fe XVIII	Regiões de *flare*.	6,8
131 Å	4,4 Å	Fe XX, XXIII	Regiões de *flare*.	7,0; 7,2

Fonte: NASA/SDO. *SDO Data: AIA/HMI Browse Data Channels*. Disponível em: https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/channels.php. Acesso em: 19 maio 2026.

4.10 Propriedades do Sol

```
PARÂMETROS FÍSICOS (atualização 2024-Out-30):
  Raio Médio Volumétrico     = 695700  km
  Raio (fotosfera)           = 696500  km
  Raio (IAU)                 = 695700 km
  Densidade Média            = 1,408 g/cm^3
  Massa                      =~ 1,988 x 10^30 kg
  Aceleração Superf.         = 274,0 m/s^2
  Diâmetro angular médio     = 1919,3"
  Período de Rot. Sideral    = 25,38 dias
  Velocidade de Escape       = 617,7 km/s
  Luminosidade               = 382,8 x 10^24 J/s
  Constante Solar (a 1 UA)   = 1367,6 W/m^2
  Temperatura Efetiva        = 5772 K
  Ciclo de Manchas Solares   = 11,4 anos
  Espessura da fotosfera     =~ 500 km
  Espessura da Cromosfera    =~ 2500 km
  Taxa de conv. Massa-Energ. = 4,260 x 10^9 kg/s
  Inclinação do Equador Solar em relação à Eclíptica = 7.25°
```

5. A Lua

O alvo mais óbvio para um pequeno telescópio certamente é a Lua. Fácil de identificar e de localizar e brilhante o suficiente para ser observada mesmo num céu urbano sob as mais severas condições de poluição luminosa, o nosso satélite natural tem muito a nos mostrar através da ocular ou de imagens capturadas através do telescópio.

Sua superfície cravejada de crateras de impacto e com vastas planícies alagadas por material vulcânico proporciona visões com variações dramáticas de contraste ao longo de uma lunação. A variação no ângulo de incidência dos raios solares pode revelar ou ocultar formações no terreno, exigindo algum planejamento quando pretendemos observar alguma região em particular na face da Lua.

Na Fig. 125 vemos um mosaico em alta resolução da face visível da Lua, composto por imagens do satélite Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO). Percebe-se facilmente a diferença no albedo e na densidade de crateras entre os mares (as regiões mais baixas e escuras na imagem) e as regiões mais elevadas do terreno.

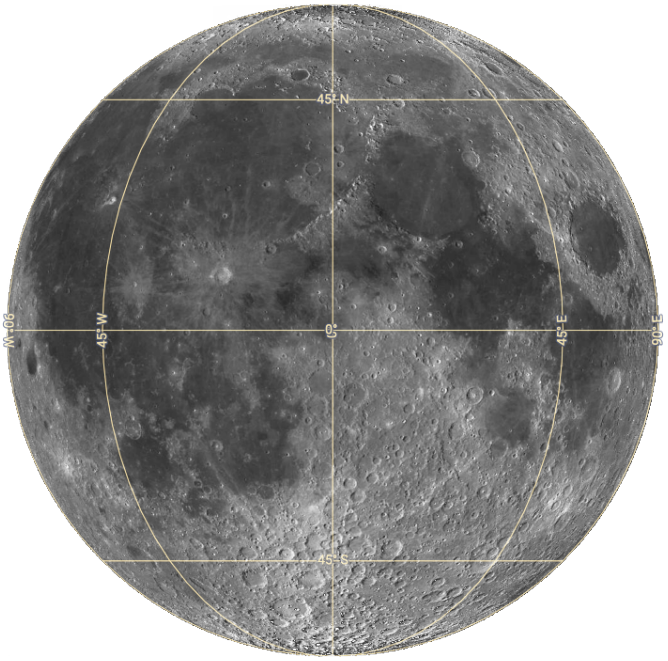


Fig. 125. Face visível da Lua. Mosaico de imagens do satelite Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO). Créditos: NASA/Arizona State University (ASU).

As crateras, em sua maioria, formadas por violentos impactos com objetos do sistema solar, podem chegar a medir mais de uma centena de quilômetros de diâmetro e podem exceder 3 quilômetros de profundidade. A Fig. 126 mostra a cratera Tycho, medindo 85 km de diâmetro e nomeada em homenagem ao astrônomo Tycho Brahe.

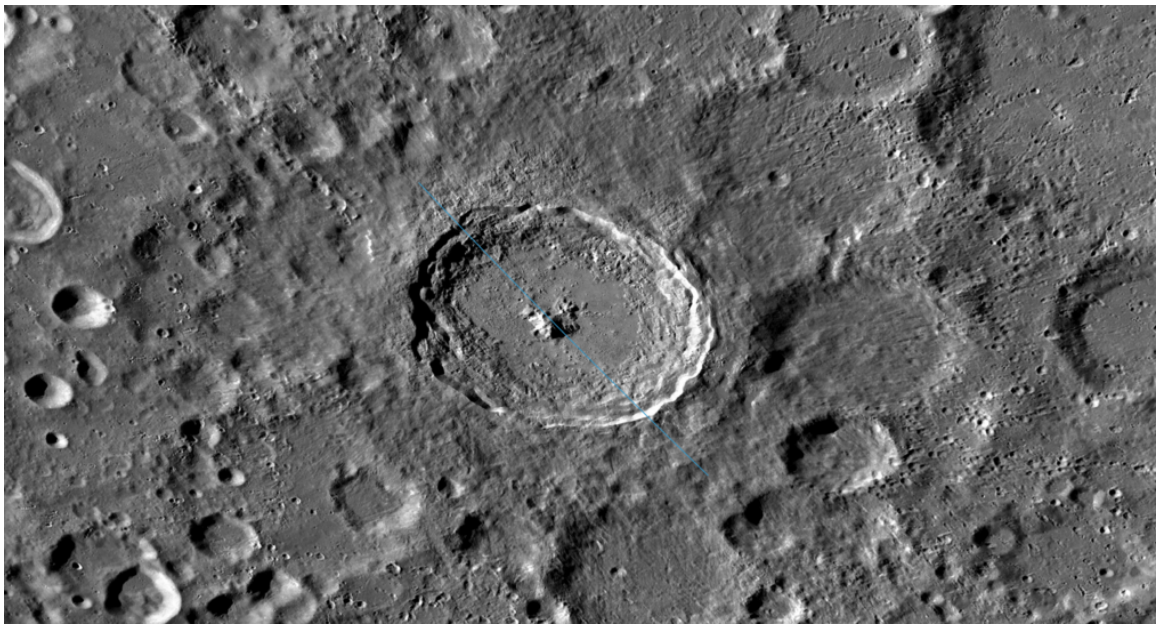


Fig. 126. Cratera Tycho. Créditos: LROC/NASA/Arizona State University (ASU)

Tycho apresenta um proeminente pico central e borda em degraus. Um perfil de altitude ao longo da linha azul na Fig 126, construído com dados de altimetria da Lunar Reconnaissance Orbiter é mostrado na Fig. 127.

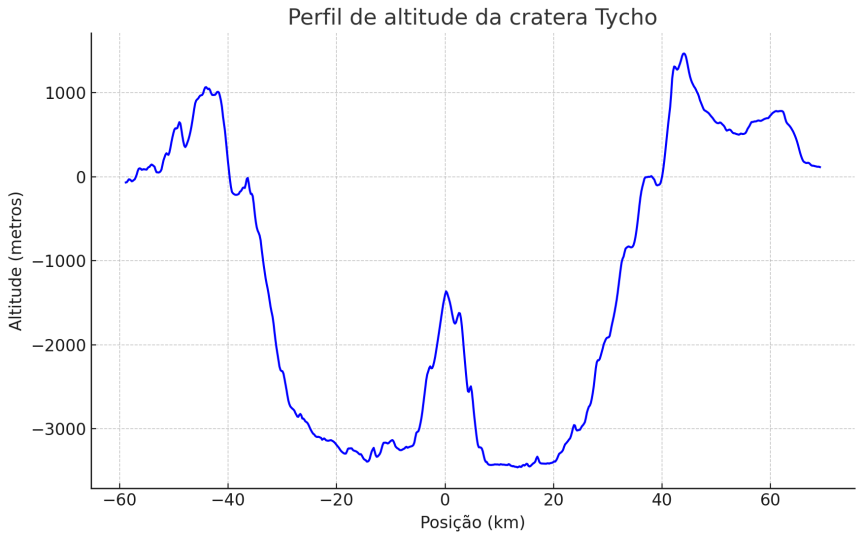


Fig. 127. Perfil de altitude da cratera Tycho. dados: LRO/LOLA/NASA.

Crateras de impacto não são formações exclusivas da superfície da Lua. Essas estruturas são comuns em corpos do Sistema Solar, especialmente nos que não contam com a proteção de uma atmosfera densa o suficiente para fornecer proteção contra a entrada de

meteoroides. A presença de uma atmosfera densa na Terra não apenas impede que a maioria dos corpos cheguem intactos na superfície, como também promove, através do vento e das chuvas, a erosão das crateras formadas em eventuais colisões. Ainda assim, há vestígios de crateras formadas por grandes colisões em diversos pontos de nosso planeta, incluindo a colisão com um asteroide de diâmetro estimado em 10 km há 65 milhões de anos, que coincide com a extinção dos dinossauros no final do período Cretáceo [70]. No Brasil, a cratera da Serra da Cangalha [71], em Tocantins, é a mais preservada e pode ser vista em imagens de satélite. A Fig. 128 é uma imagem processada a partir de dados do satélite LANDSAT 8.

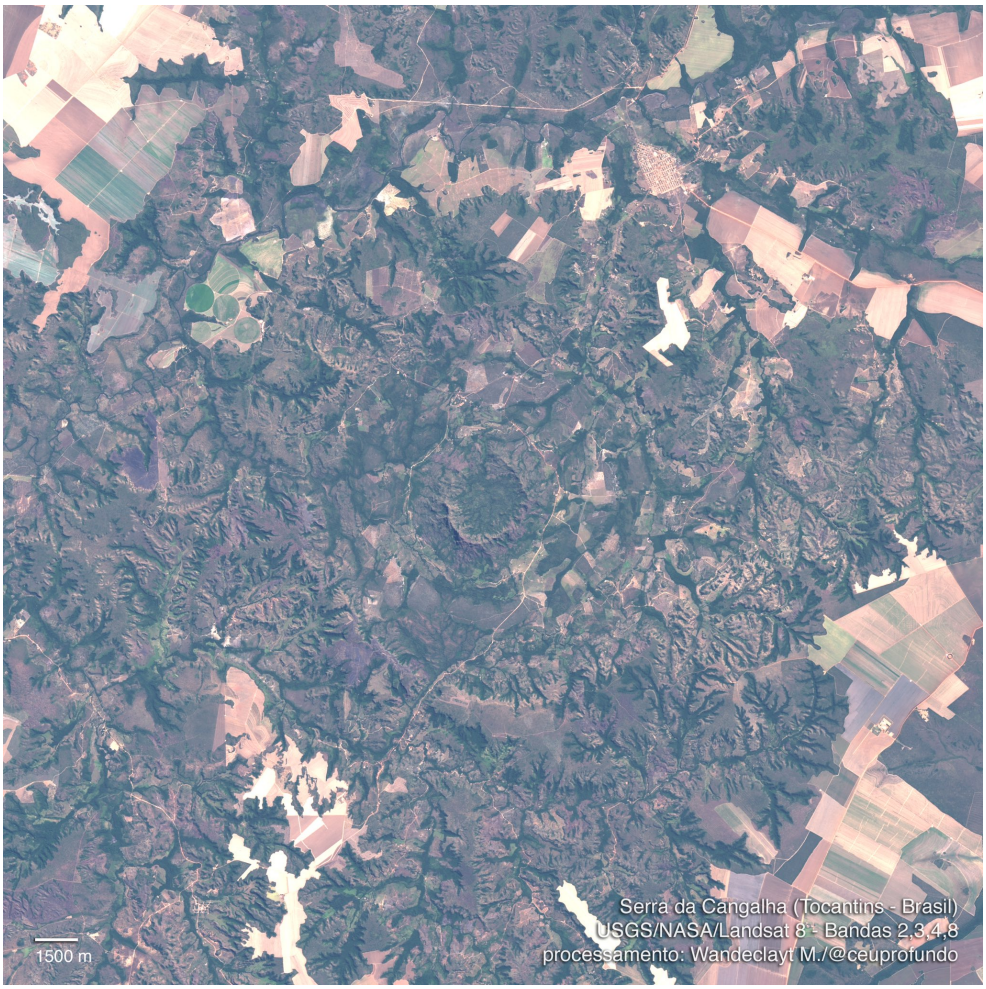


Fig. 128. Cratera da Serra da Cangalha, no estado de Tocantins. Dados: USGS/NASA/LANDSAT 8. Processamento: Wandeclayt M./Projeto Ceu Profundo

Apesar de não haver na superfície lunar massas de água em estado líquido, há formações batizadas de “mares”, “lagos”, “pântanos”, “oceanos” e “baías” , mantendo a tradição dos primeiros cartógrafos da Lua do séc. XVII. Grande parte dessa nomenclatura é herdada do mapa (Fig. 129) publicado em 1651 por Giovanni Riccioli em seu compêndio *Alma-*

gestum Novum [72]. Johann Hevelius, contemporâneo de Riccioli, publicou o atlas lunar *Selenographia* [73] em 1647, incluindo mapas que também nomeavam as regiões escuras como mares. No entanto, foi o esquema de Riccioli, que batizava seus mares com nomes de fenômenos da natureza (Mar das Chuvas, Oceano das Tempestades...) e estados de espírito (Mar da Tranquilidade, Mar da Serenidade...) que prevaleceu na nomenclatura moderna. O sistema adotado por Riccioli para a nomenclatura de crateras, homenageando cientistas, filósofos, matemáticos, navegadores e engenheiros já falecidos também foi incorporado às regras modernas de nomenclatura lunar.

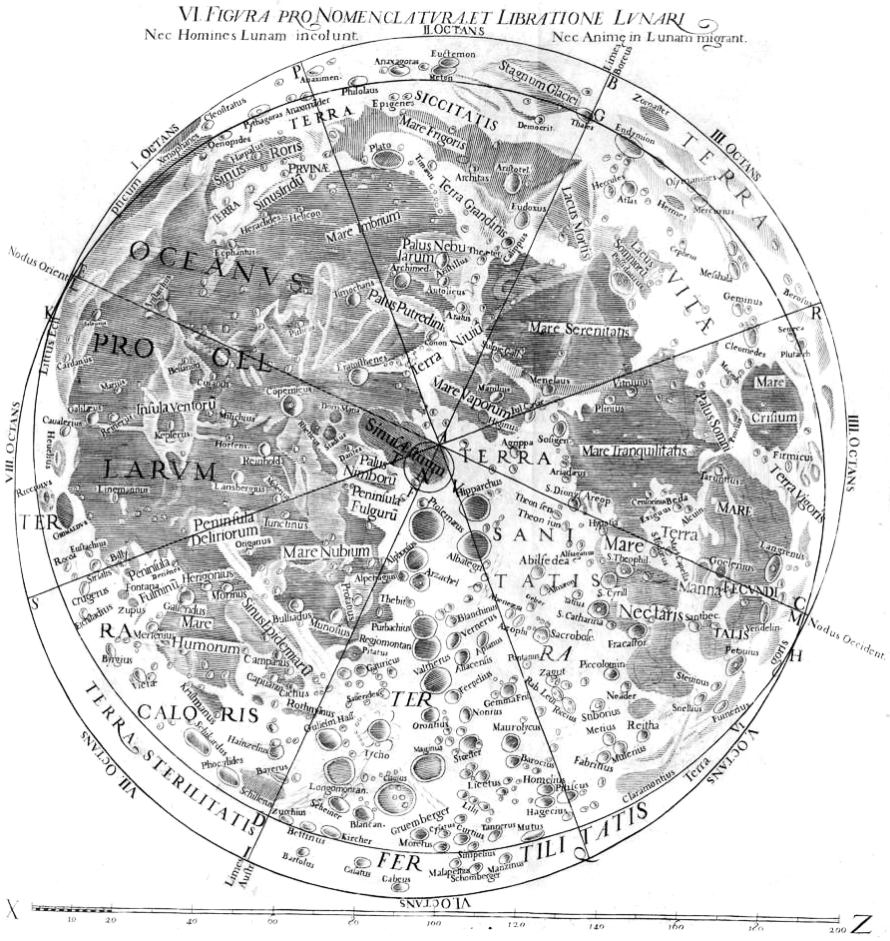


Fig. 129. Mapa da Lua na obra *Almagestum Novum* de Riccioli (1651). Crédito: ETH-Bibliothek Zürich.

Além das crateras e mares, outras formações como vales, sulcos, escarpas e cadeias de montanhas são também nomeadas e podem ser observadas através de pequenos telescópios. A Tab. 10 traz uma lista completa dos tipos de formações encontradas na superfície lunar com a designação oficial dada pela União Astronômica Internacional (IAU).

Tabela 10. Tipos de formações nomeadas na superfície da Lua segundo a nomenclatura da IAU/USGS

Designação IAU / latim	Tipo em português	Descrição
Albedo Feature	Figura de albedo	Região desenhada pelo contraste entre áreas de diferente refletividade no terreno.
Astronaut-named features	Formações nomeadas por astronautas	Formações lunares situadas nos locais de pouso Apollo ou em suas proximidades.
Catena	Cadeia de crateras	Sequência ou cadeia de crateras.
Crater	Cratera	Depressão circular com bordas elevadas.
Dorsum	Dorso ou crista	Crista ou elevação alongada.
Fossa	Fossa ou depressão alongada	Depressão longa e estreita.
Lacus	Lago	Pequena planície; na nomenclatura lunar, geralmente uma área relativamente lisa, menor que um mar lunar.
Mare	Mar lunar	Planície escura, de baixo albedo, extensa e pouco craterizada.
Mons/Montes	Monte, montanha ou montes	Montanha ou elevação. A forma plural *Montes* é usada para conjuntos ou cadeias montanhosas.
Oceanus	Oceano lunar	Área escura muito extensa na Lua, maior que os mares lunares tradicionais.
Palus	Pântano	Pequena planície; termo histórico da nomenclatura lunar.
Planitia	Planície baixa	Planície baixa.
Promontorium	Promontório	Cabo, saliência ou promontório que se projeta sobre uma planície ou mar lunar.
Rima	Rima, fenda ou sulco	Fissura, fenda ou sulco na superfície.
Rupes	Escarpa	Escarpa ou desnível abrupto.
Satellite Feature	Formação satélite	Formação que compartilha o nome de uma formação adjacente. Inclui crateras identificadas com nomes seguidos de uma letra.
Sinus	Baía	Pequena planície em forma de baía, geralmente associada à borda de um mar lunar.
Statio	Estação ou local de pouso	Local de pouso de espaçonave.
Vallis	Vale	Vale ou depressão alongada.

Nota: Os termos descritores da IAU/USGS indicam categorias morfológicas ou cartográficas das formações nomeadas na superfície lunar, não necessariamente sua origem geológica.
Fonte: IAU/USGS Gazetteer of Planetary Nomenclature, páginas *Target: The Moon* e *Descriptor Terms*. Disponível em: https://planetarynames.wr.usgs.gov/. Acesso em: 23 maio 2026.

5.1 Regras da IAU para nomenclatura lunar

A nomenclatura oficial das formações na superfície lunar é estabelecida pela IAU através de um grupo de trabalho dedicado à nomenclatura de objetos do Sistema Solar e das formações associadas a esses objetos. Os nomes adotados pela IAU seguem uma série de regras e convenções visando garantir clareza e evitar ambiguidades. As regras, atualizadas em 1973 na XV Assembleia Geral da IAU [74], vetam o uso de nomes de importância política, militar ou religiosa, exceto o de figuras políticas anteriores ao século XIX. Com exceção dos astronautas do projeto Apollo e dos cosmonautas soviéticos, são também vetadas as homenagens com nomes nas formações lunares a personalidades vivas.

Tabela 11. Convenções de nomenclatura para formações lunares segundo a IAU/USGS

Tipo de formação lunar	**Convenção de nomenclatura**
Crateras	Cientistas, engenheiros e exploradores, assim como outras pessoas relacionadas à astronomia, à pesquisa planetária ou espacial, que tenham feito contribuições excepcionais ou fundamentais em suas áreas. Cosmonautas russos são homenageados com crateras em e ao redor do *Mare Moscoviense*. Astronautas americanos são homenageados com crateras em e ao redor da cratera *Apollo*. Locais apropriados serão disponibilizados no futuro para outras nações que exploram o espaço. Primeiros nomes são usados para pequenas crateras de interesse especial.
Montes	Cadeias de montanhas terrestres, crateras próximas ou cientistas com contribuições excepcionais ou fundamentais em suas áreas.
Mares, lagos, oceanos, baías e pântanos	Termos em latim que descrevem fenômenos meteorológicos e substantivos abstratos.
Vales e escarpas	Compartilham o nome de crateras e outras formações próximas.
Sulcos, fendas e cadeias de crateras	Compartilham o nome de crateras próximas.
Formações satélites	Compartilham o nome de crateras adjacentes, seguidas de uma letra latina como sufixo.

Fonte: IAU/USGS Gazetteer of Planetary Nomenclature, páginas *Target: The Moon* e *Rules and Conventions*. Disponível em: https://planetarynames.wr.usgs.gov/. Acesso em: 25 maio 2026.

As regras para nomenclatura podem ser consultadas através da página *Gazeteer Of Planetary Nomenclature* mantida pelo *United States Geological Survey (USGS)* e os nomes aprovados para formações na lua podem ser consultados na seção de Nomenclatura Lunar. Vale chamar atenção para o fato de que dos 1608 nomes de crateras aprovados até 2024 pela IAU, apenas 9 nomes tem origem nas Américas Central e do Sul.

Assim como a nomenclatura, dados de imagem da Lua são acessíveis através de bases de dados abertas. Especialmente útil é a plataforma Quickmap (Fig 130), para visualização de dados da Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC).

Outra ferramenta de grande utilidade no planejamento de observações lunares está disponível em Scientific Visualization Studio - Fase da Lua 2025 (Fig. 131).

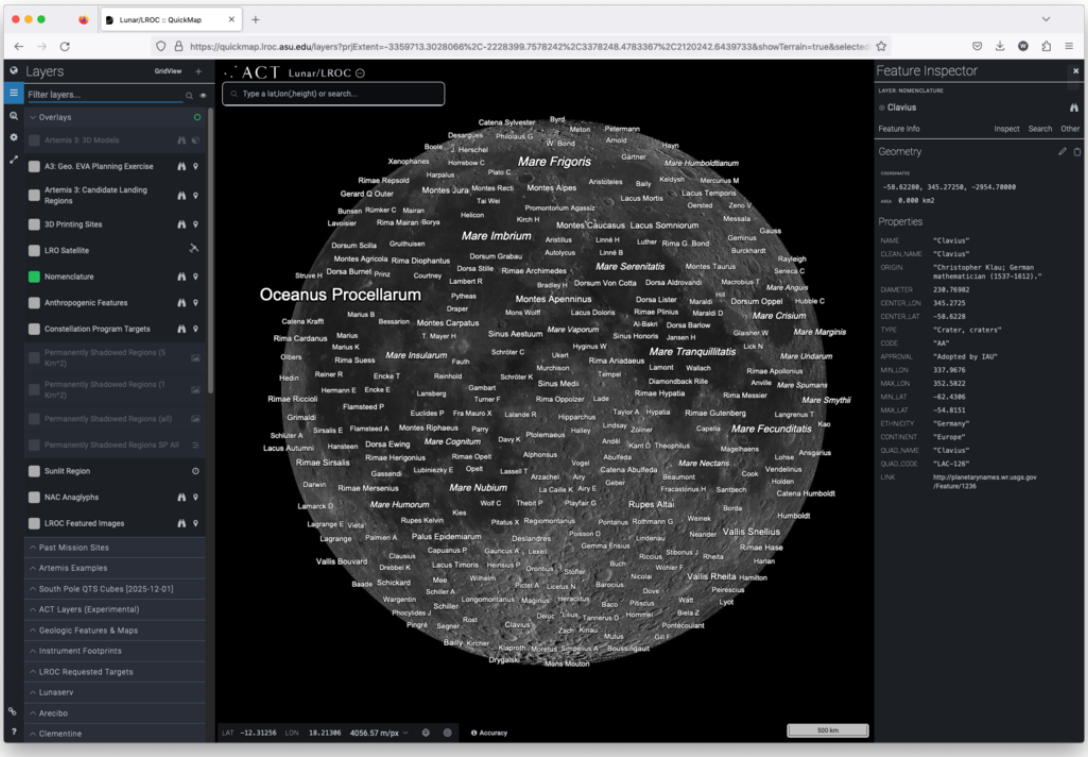


Fig. 130. Página de acesso à plataforma Quickmap.

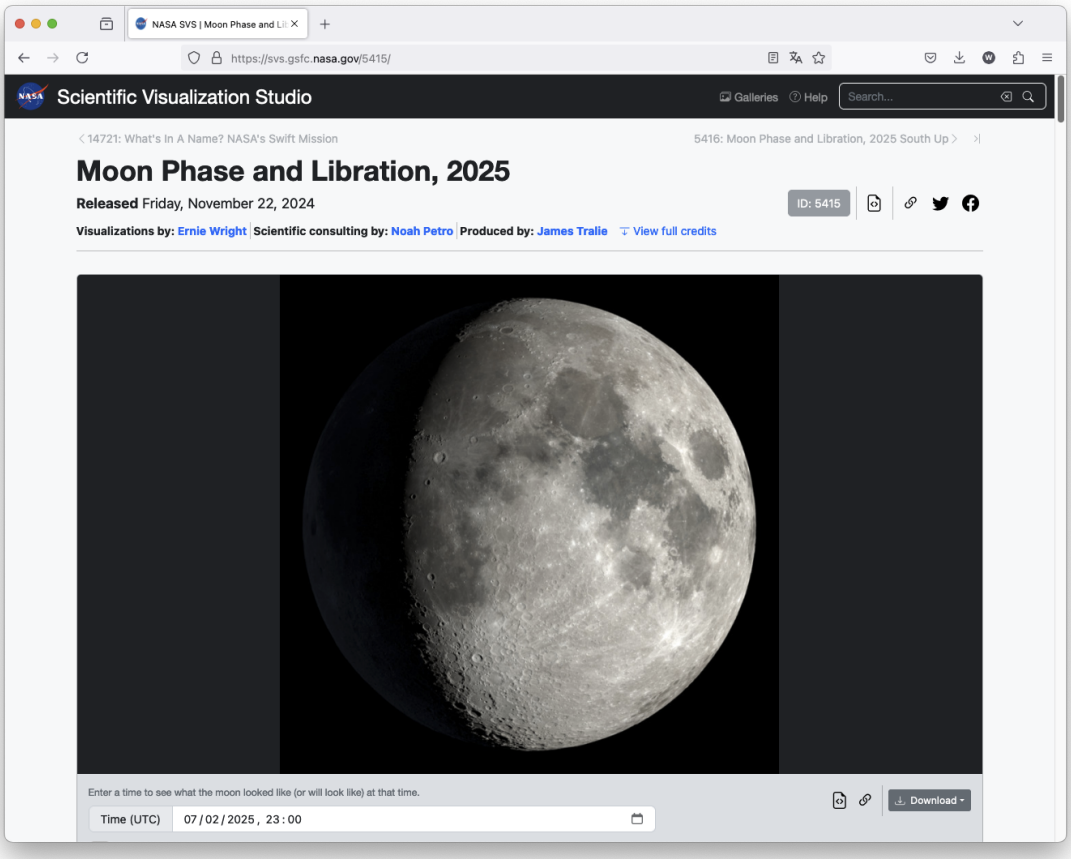


Fig. 131. Scientific Visualization Studio - Fase da Lua e Libração 2025.

A plataforma Scientific Visualization Studio (SVS) da NASA disponibiliza anualmente esta interface de visualização do aspecto da Lua para a data e horário selecionados.

O uso combinado das plataformas Quickmap e SVS é um grande auxílio no planejamento de observacões e na identificação de formações capturadas através de imagens. Entre os recursos oferecidos no quickmap estão a identificacão de locais de pouso de missões lunares e de outras formações e objetos antropogênicos, como crateras criadas por impactos com estágios de veículos espaciais e instrumentos científicos deixados pelas missões Apollo.

Na Fig. 132 vemos a cadeia de montanhas *Montes Apenninus* margeando o *Mare Imbrium* (Mar das Chuvas).



Fig. 132. *Montes Apenninus*, uma cadeia de montanhas na margem sudeste do *Mare Imbrium*. Créditos: NASA/Arizona State University (ASU).

5.2 Movimentos da Lua

Orbitando a Terra a uma distância média de 384 mil km, a Lua é o corpo celeste mais próximo de nós, e o único no qual o ser humano já pisou, com o primeiro pouso de uma missão tripulada em 20 de julho de 1969.

A mudança mais evidente no aspecto da Lua é o seu ciclo de fases, ou lunação, resultante da variação da porção iluminada pelo Sol da face visível da Lua. Ao longo de um período de 29,53 dias, a Lua varia de um disco 100% iluminado, nascendo no pôr do Sol e reduzindo a cada dia sua fração iluminada, até aparecer como um arco delgado nascendo ao amanhecer, para em seguida aparecer também como um arco delgado no horizonte oeste se pondo logo após o Sol e aumentando sua face iluminada a cada dia até retornar aos 100% de iluminação. Estas fases são causadas por seu movimento orbital em torno da Terra e estão ilustradas na Fig. 133. Chamamos este ciclo completo de fases de lunação e chamamos de **período sinódico** a duração média de uma lunação[75].

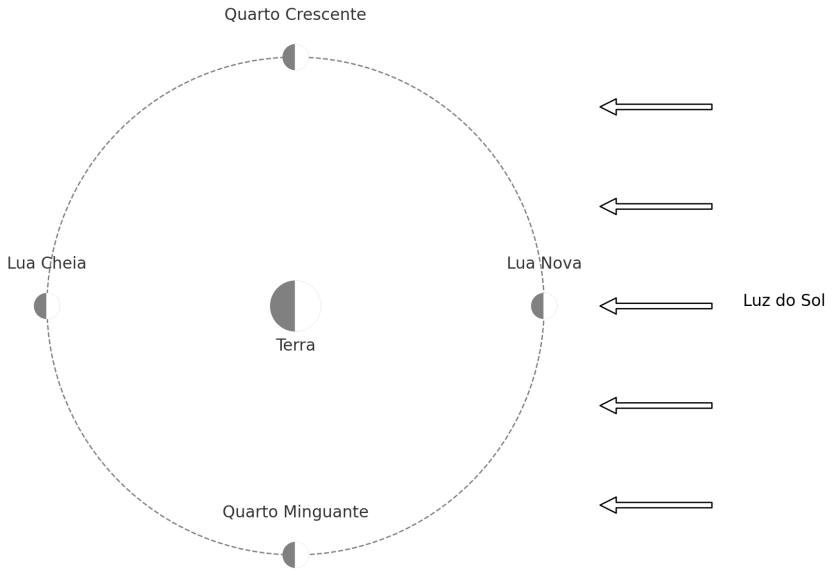


Fig. 133. Fases da lua. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

No diagrama anterior (Fig. 133) o Sol está posicionado à direita e ilumina a Lua e a Terra simultaneamente. Como durante a Lua Nova a face lunar voltada para a Terra não está iluminada, não é possível visualizar a Lua. No entanto, nos dias que imediatamente antecedem e sucedem a Lua Nova, um interessante fenômeno pode ser observado: a luz cinérea. Enquanto apenas um fino arco da Lua aparece iluminado diretamente pelo Sol, a luz solar refletida na Terra ilumina a face escura da Lua, tornando-a também visível. A Fig.

134 é o registro de uma conjunção entre a Lua, o planeta Mercúrio e o aglomerado estelar Messier 44 na constelação de Câncer no dia 7 de julho de 2024, dois dias após a Lua Nova.



Fig. 134. Conjunção entre a Lua, Mercúrio e o Aglomerado do Presépio (M44) na constelação de Câncer (2024-07-07). Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

A Fig. 133 também nos permite concluir que um eclipse solar (quando a Lua se posiciona entre a Terra e o Sol, projetando sua sombra na superfície terrestre) só pode acontecer durante a Lua Nova. Analogamente, um eclipse lunar (quando a Lua passa pela sombra da Terra) só pode ocorrer durante a Lua Cheia. No entanto, o plano da órbita lunar é inclinado 5,145° em relação ao plano da órbita terrestre, a eclíptica, evitando a ocorrência de eclipses a cada Lua Cheia ou Nova. Os pontos de intersecção entre a órbita lunar e o plano da eclíptica são chamados de nodos. Para que um eclipse aconteça, é necessário que a Lua Cheia ou Nova ocorra durante a passagem da Lua por um dos nodos.

A Fig. 135 mostra a órbita da Lua (representada pela linha tracejada) cortando o plano da eclíptica (representado pelo plano amarelo). A inclinação foi exagerada para melhor visualização. O nodo ascendente é o ponto da órbita lunar ocupado pela Lua ao cruzar o plano da eclíptica no sul para o norte. Ao contrário, o nodo descendente é ocupado pela Lua ao cruzar a eclíptica do norte para o sul.

A Fig. 136 mostra a posição da Lua e dos planetas do Sistema Solar no mês de setembro/2024. A posição da Lua é representada em intervalos de 24 h e as posições para os

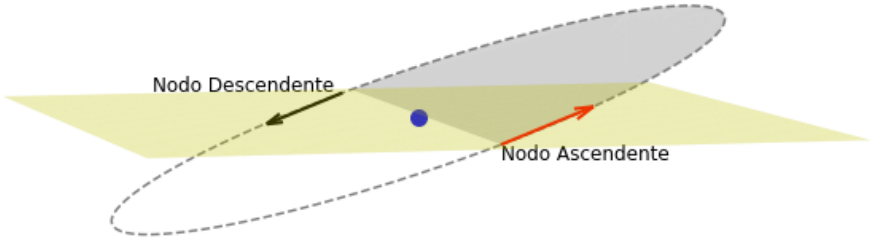


Fig. 135. Órbita da Lua cortando o plano da Eclíptica (em amarelo). Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

dias 1, 8, 15 e 22/09 estão identificadas. O movimento da Lua na carta é da direita para a esquerda e o movimento de cada um dos planetas está indicado pelo sentido das setas. A eclíptica está representada como uma linha tracejada.

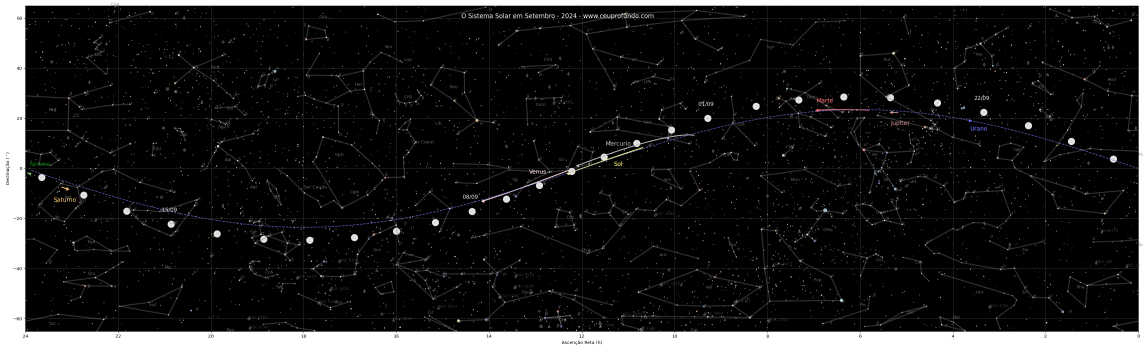


Fig. 136. Posição dos planetas e da Lua durante o mês de setembro de 2024. Gráfico gerado a partir de código em linguagem Python usando o pacote astroquery para consultar as coordenadas de objetos do Sistema Solar na base de dados JPL/Horizons. [código: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo]

Considerando o movimento de translação da Lua em torno da Terra tomando as estrelas como referência, mediremos um período orbital de 27,32 dias. Chamamos esse intervalo de **período sideral**. Ao longo de um período sideral, a Lua percorre toda a sua órbita, eventualmente se alinhando com o Sol (na Lua Nova) e em algum instante com cada um dos planetas do Sistema Solar. Chamamos esses alinhamentos de **conjunções**.

Quando a Lua Nova acontece durante a passagem da Lua por um dos nodos, temos um Eclipse Solar. Durante um eclipse Solar, a Lua se coloca entre a Terra e o Sol, projetando

sua sombra na superfície terrestre. Uma feliz coincidência é o fato de que apesar de o diâmetro da Lua corresponder a apenas 0,25% do diâmetro solar, seus diâmetros aparentes, vistos da Terra, são praticamente idênticos, correspondendo a aproximadamente $0,5^{\circ}$. Esta coincidência faz com que, num eclipse solar total, a Lua oculte exatamente o disco solar. A Fig. 137 é uma imagem do eclipse solar total de 2 de julho de 2019, registrada em Vicuña (Chile). Na imagem, capturada durante a totalidade do eclipse, o disco da Lua se ajusta exatamente sobre o Sol. Com o intenso brilho solar bloqueado, as tênues estruturas da coroa solar tornam-se visíveis.

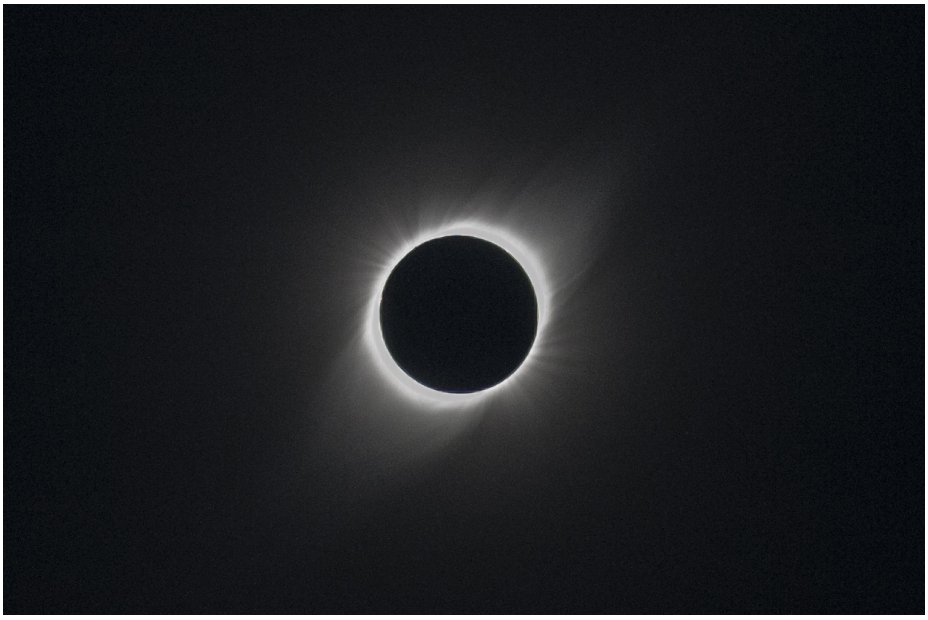


Fig. 137. Eclipse solar total de 2 de julho de 2019, em Vicuña, no Chile. [crédito: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo]

Quando a Lua Cheia ocorre durante a passagem da Lua pelas proximidades de um nodo, temos a ocorrência de um eclipse lunar. O formato da sombra projetada pela Terra fica evidente durante um eclipse lunar. A Fig. 138 é uma composição de imagens capturadas durante o eclipse lunar total de 15 de maio de 2022, no Observatório Astronômico da UNIVAP, em São José dos Campos.

Mas não é apenas o disco Solar que pode ser ocultado pela Lua. Em seu movimento orbital, vemos a Lua se alinhar e por vezes ocultar, estrelas e planetas. A Fig. 139 é um registro da ocultação de Marte pela Lua em 5 de setembro de 2020, através do telescópio Schmidt-Cassegrain de 0,30 m do Observatório Astronômico da UNIVAP em São José dos Campos (SP).

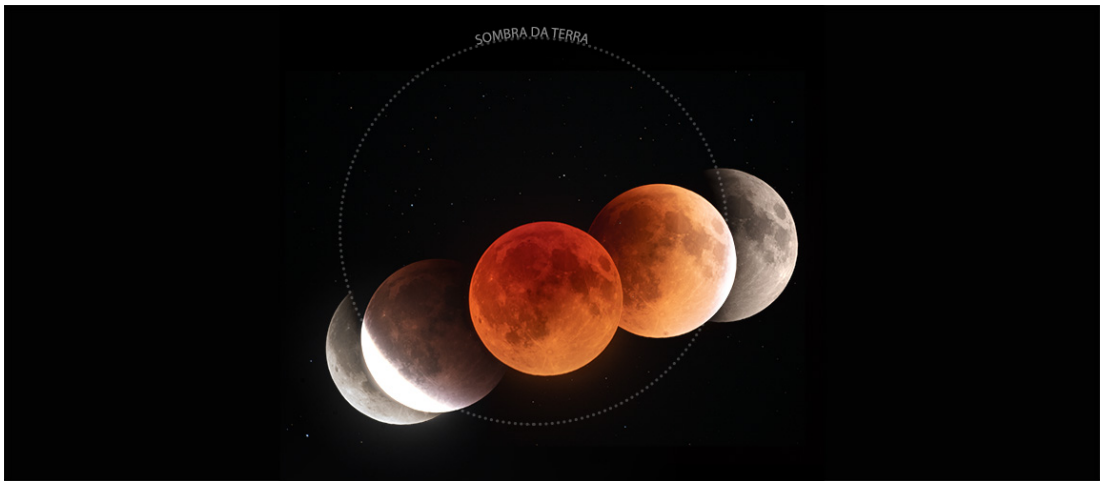


Fig. 138. Eclipse lunar total de 15 de maio de 2022. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo



Fig. 139. Ocultação de Marte pela Lua em 2020-09-05. Observado de São José dos Campos (SP).Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo

O site https://www.timeanddate.com/eclipse/ fornece previsões da ocorrência e visibilidade de eclipses.

A órbita lunar traça uma elipse em torno da Terra. Com distância média (semi-eixo maior) de 384400 km e com excentricidade 0,05490. A partir destes valores computamos

uma distância mínima (perigeu) de 363,3 mil km e uma distância máxima (apogeu) de 405,5 mil km (Fig. 140). No entanto, esses parâmetros são perturbados por outros corpos do Sistema Solar, especialmente pelo Sol, e a Lua pode se aproximar e se afastar além desses valores médios computados. O gráfico na Fig. 141 mostra a variação da distância Terra-Lua ao longo do ano de 2025.

Uma consequência imediata dessa variação de distância é a variação no diâmetro aparente da Lua. Considerando os valores extremos da distância Terra-Lua, o diâmetro lunar aparente no perigeu pode ser 14% maior do que no apogeu. Essa é uma diferença discreta e embora as ocasiões em que a Lua Cheia ocorre durante o perigeu sejam apelidadas de "superlua", não é realmente uma diferença superlativa que seja facilmente identificada a olho nu.

Vale também lembrar que ao telescópio podemos utilizar grandes ampliações ao observar a Lua, fazendo que qualquer oportunidade de observação transforme a Lua em uma verdadeiramente "superlua"[98].

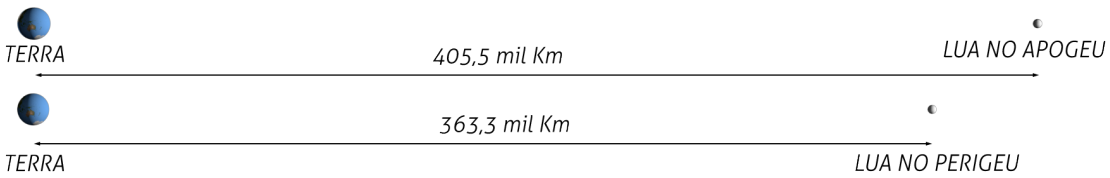


Fig. 140. Comparação de distâncias entre a Lua e a Terra no apogeu e no perigeu. As distâncias e diâmetros estão em escala. [dados: SVS/NASA. diagrama: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo]

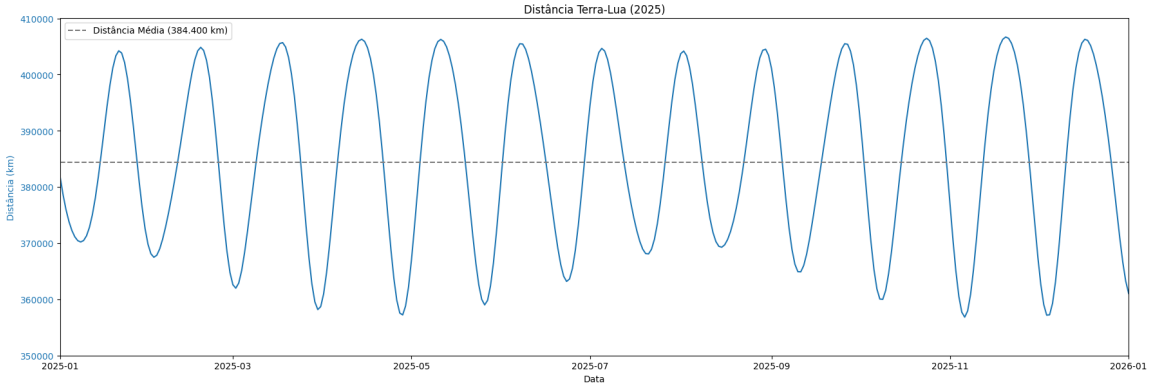


Fig. 141. Variação da distância Terra-Lua durante o ano de 2025. [dados: JPL/Horizons, gráfico: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo]

[98]No apêndice calculamos a variação de brilho e de diâmetro aparente da Lua entre o perigeu e o apogeu.

5.3 Propriedades da Lua

```
DADOS GEOFÍSICOS (atualização 2018-Ago-15):
  Raio médio volumétrico     = 1737.53+-0.03 km
  Raio (gravitacional)       = 1738.0 km
  Raio (IAU)                 = 1737.4 km
  Densidade                  = 3.3437 g/cm^3
  Massa                      = 7.349 x10^22 kg
  Aceleração superf.         = 1.62 m/s^2
  Razão massa Terra/Lua      = 81.3005690769
  Densidade méd. da crosta   = 2.97+-.07 g/cm^3
  Esp. crosta (face visível) = 58+-8 km
  Esp. crosta (face oposta)  = ~80 - 90 km
  Diâmetro angular médio     = 31'05.2"
  Albedo geométrico          = 0.12
  Obliquidade da órbita      = 6.67 graus
  Semi-eixo maior, a         = 384400 km
  Excentricidade             = 0.05490
  Movimento médio            = 2.6616995x10^-6 rad/s
  Período Apsidal            = 3231.50 dias
  Período nodal              = 6798.38 dias
  Inclinação                 = 5.145 graus
  Dia solar médio            = 29.5306 dias
  Período Orbital            = 27.321582 dias

fonte: https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.htm
```

Exercícios

1. Utilizando a plataforma Quickmap para acessar os dados de imagem da LRO e suas respectivas nomenclaturas, identifique as crateras Tycho, Copernicus, Clavius e Teophilus. Use a janela de buscas da plataforma e pesquise nominalmente pelas crateras. Qual o diâmetro de cada cratera encontrada? Quais são visíveis durante a fase crescente? Quais são visíveis durante a fase minguante?

2. No menu *Layers* (Camadas) da plataforma Quickmap, habilite na opção *Overlays* (Sobreposições) a exibição da camada *Antropogenic Features*. Identifique os locais de pouso das missões Apollo. No zoom máximo da plataforma, cada pixel corresponde a 50 cm na superfície da Lua. Com este zoom você consegue identificar artefatos deixados pelas missões nos locais de pouso, como a base do módulo lunar, rastros dos astronautas e dos jipes lunares?

6. Planetas

Dos oito planetas do Sistema Solar, cinco são visíveis a olho nu (ou seis, se contabilizarmos a Terra, que, afinal de contas, também é perfeitamente visível sem instrumentos).

O desafio passa a ser apenas identificar quais daqueles pontos luminosos no céu não são estrelas e sim astros muito mais próximos, orbitando também em torno do Sol.

Ao observar sistematicamente o céu, podemos perceber que certos astros parecem se deslocar com relação aos padrões formados pelas estrelas. Foi esse movimento de Mercúrio, Vênus, Marte, Saturno e Júpiter na esfera celeste, deslocando-se entre as "estrelas fixas", que deu a estes corpos a alcunha de "*astros errantes*", ou "$\pi\lambda\alpha\nu\eta\tau\eta\varsigma$" (*planétes*) em grego.

Além dos planetas visíveis a olho nu, o Sistema Solar tem ainda mais dois planetas, que, embora gigantes, não são visíveis sem instrumentos: Urano e Netuno. Completando a família de objetos de nosso Sistema Solar, somam-se os planetas anões, os satélites e os "*Pequenos Corpos do Sistema Solar*".

A resolução B5 da União Astronômica Internacional (IAU) [76], adotada em agosto de 2006 na XXV Assembleia Geral, em Praga, estabelece a definição moderna de planeta e cria a categoria *planeta anão*:

1. Um planeta é um corpo celeste que
   (a) está em órbita em torno do Sol,
   (b) tem massa suficiente para assumir uma forma em equilíbrio hidrostático (aproximadamente redonda), e
   (c) limpou as vizinhanças de sua órbita.
2. Um "*planeta anão*" é um corpo celeste que
   (a) está em órbita em torno do Sol,
   (b) tem massa suficiente para assumir uma forma em equilíbrio hidrostático (aproximadamente redonda),
   (c) não limpou as vizinhanças de sua órbita, e
   (d) não é um satélite.
3. Todos os outros objetos, exceto satélites, orbitando o Sol devem ser chamados coletivamente de "Pequenos Corpos do Sistema Solar".

A resolução B6, adotada na mesma data, estabelece que, por estas regras, Plutão é um planeta anão e o reconhece como o protótipo de uma nova categoria, como um Objeto Transnetuniano (TNO).

6.1 Observando Planetas

Todos os planetas do Sistemas Solar orbitam o Sol aproximadamente no mesmo plano definido pela órbita terrestre. Isto significa que os planetas são sempre observados próximos à eclíptica, ou seja, encontraremos, necessariamente, os planetas distribuídos ao longo de uma faixa estreita no céu (Fig. 142). O plano da órbita lunar, com uma inclinação de aproximadamente 5° em relação ao plano da eclíptica, também está confinado à essa faixa.

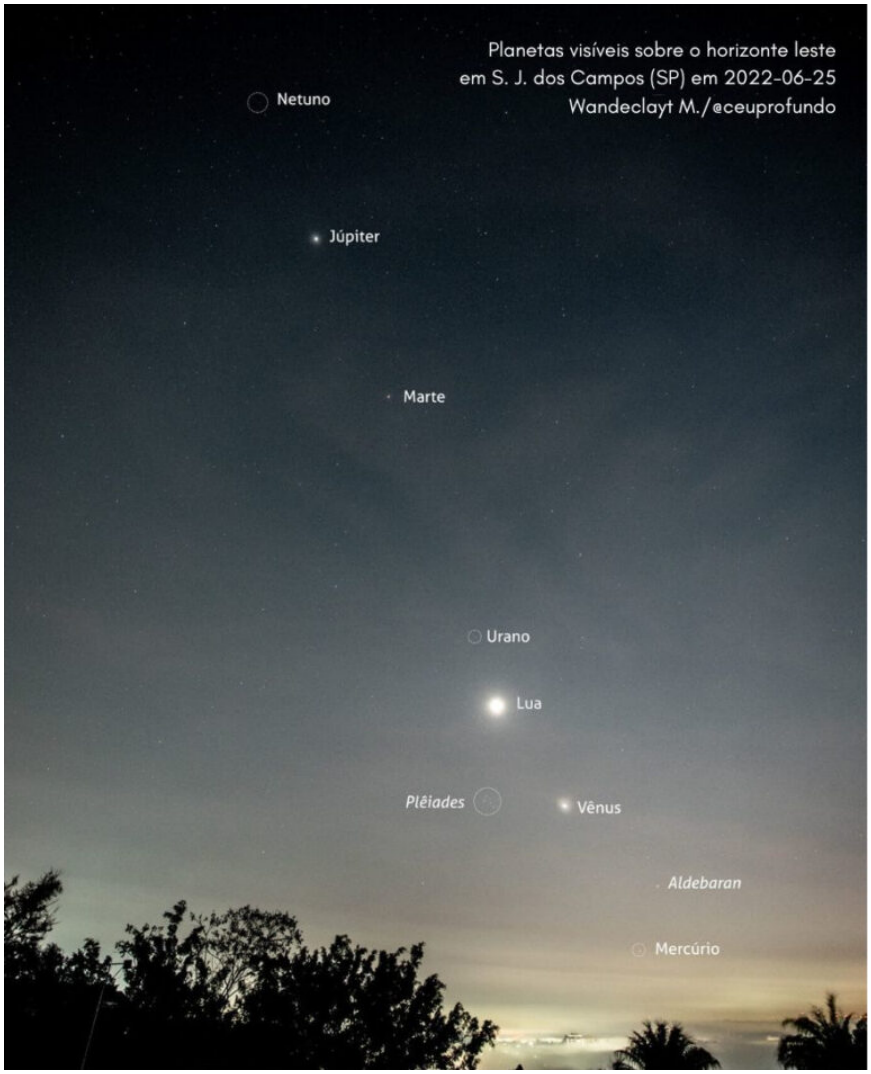


Fig. 142. Lua e planetas no amanhecer de São José dos Campos (SP), em 25 de junho de 2022. É claro o alinhamento dos planetas ao longo da eclíptica. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

A melhor condição para a observação de um planeta é quando seu afastamento em relação ao Sol, a *elongação*, é máximo. É nessa condição que o planeta aparece mais brilhante e permanece visível por mais tempo no céu noturno. A situação inversa ocorre

quando o planeta está na mesma direção do Sol e permanece no céu apenas durante o dia claro. Certas posiçoes relativas entre os planetas, a Terra e o Sol recebem deignações epeciais e estão ilustradas na Fig. 143.

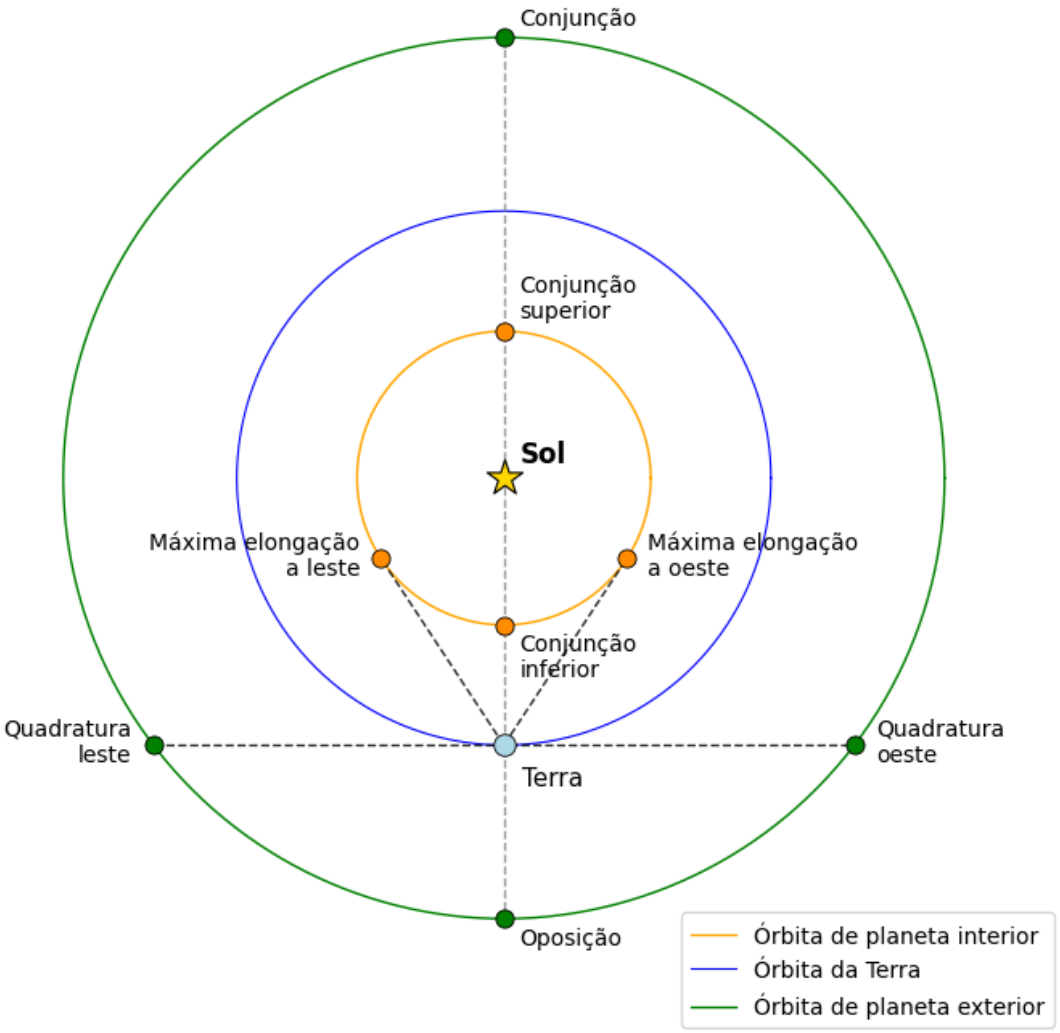


Fig. 143. Configurações orbitais. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

Para os planetas com órbitas exteriores à orbita terrestre, a elongação máxima é de 180°, com o planeta aparecendo no céu em posição oposta à do Sol. Esta configuração é chamada ***oposição***. Nesta configuração, além do planeta estar na menor distância à Terra, atingindo seu maior brilho e tamanho aparente, ele será visível durante toda a noite, nascendo ao pôr do Sol e se pondo ao amanhecer, cruzando o meridiano local no meio da noite. Apenas os planetas exteriores, aqueles com órbitas externas à órbita da Terra, podem atingir a

oposição.

A melhor condição para a observação de Mercúrio e Vênus, os planetas interiores, é a ***máxima elongação*** a leste, quando o planeta é visível após o pôr do Sol, e a oeste, quando o planeta é visível antes do amanhecer.

As configurações em que, vistos da Terra, os planetas se encontram na mesma direção que o Sol são as ***conjunções***. No caso dos planetas interiores, Mercúrio e Vênus, há duas possibilidades de conjunção: a ***conjunção inferior***, com o planeta entre a Terra e o Sol, e a ***conjunção superior***, com o Sol entre a Terra e o planeta. Em qualquer um desses casos, o planeta não é visível.

Tabela 12. Planetas interiores - Configurações orbitais.

Configuração	**Visibilidade**
Conjunção superior	Planeta não visível.
Conjunção inferior	Planeta não visível.
Máxima elongação a leste	Afastamento máximo entre o planeta e o Sol. Planeta com brilho máximo, visível após o pôr do Sol.
Máxima elongação a oeste	Afastamento máximo entre o planeta e o Sol. Planeta com brilho máximo, visível antes do nascer do Sol.

Nota: Para planetas interiores, a elongação nunca atinge 180°.

Tabela 13. Planetas exteriores - Configurações orbitais.

Configuração	**Visibilidade**
Conjunção	Planeta não visível.
Quadratura leste	
Quadratura oeste	
Oposição	

Nota: Para planetas exteriores, a oposição corresponde à elongação de 180°.

6.2 Órbitas Planetárias

6.2.1 Leis de Kepler

Todas essas configurações são consequência do movimento orbital, que obedece às leis enunciadas pelo astrônomo e matemático Johannes Kepler no início do séc. XVII. Kepler baseou-se nos dados precisos das coordenadas de Marte, obtidos pelo astrônomo Tycho Brahe, para elaborar suas três leis do movimento planetário:

1. A órbita dos planetas é uma elipse, com o Sol em um dos focos.
2. O raio vetor que une o planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais.
3. O quadrado do período orbital é proporcional ao cubo do semi-eixo maior das órbitas.

6.2.2 Primeira Lei - Lei das Órbitas

A órbita dos planetas é uma elipse, com o Sol em um dos focos.

A Fig. 144 mostra a geometria da órbita de Mercúrio, conforme a primeira lei de Kepler. O Sol está posicionado em um dos focos. O ponto C é o centro da elipse. O ponto $F2$ é o segundo foco. O periélio é o ponto da órbita mais próximo do Sol e o afélio, o mais distante.

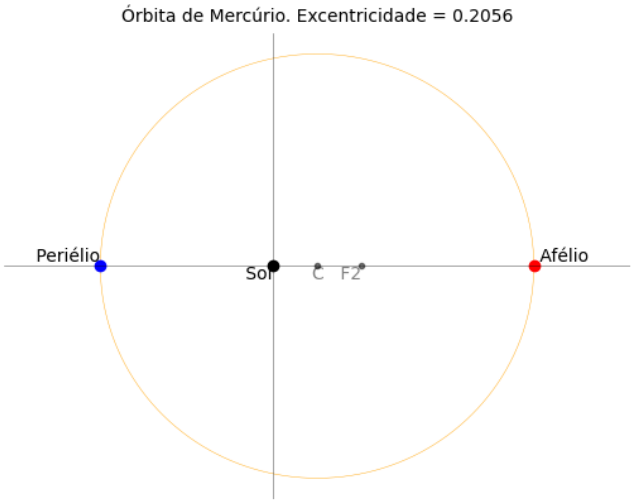


Fig. 144. Órbita de Mercúrio, conforme a primeira Lei de Kepler. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo

A excentricidade e é uma medida do alongamento da elipse e seu valor varia no intervalo $0 \leq e < 1$. Uma elipse de excentricidade $e = 0$ é um círculo.

No Sistema Solar, Mercúrio é o planeta cuja órbita apresenta a maior excentricidade ($e = 0,206$). A órbita da Terra tem excentricidade $e = 0,017$.

6.2.3 Segunda Lei - Lei das Áreas

O raio vetor que une o planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais.

A segunda lei de Kepler é uma descrição do movimento planetário. Ela está ilustrada na Fig. 145: Se as áreas preenchidas em azul e em cinza são iguais, o tempo que o planeta leva para se deslocar do ponto A ao ponto B é o mesmo que ele leva para se deslocar de C a D.

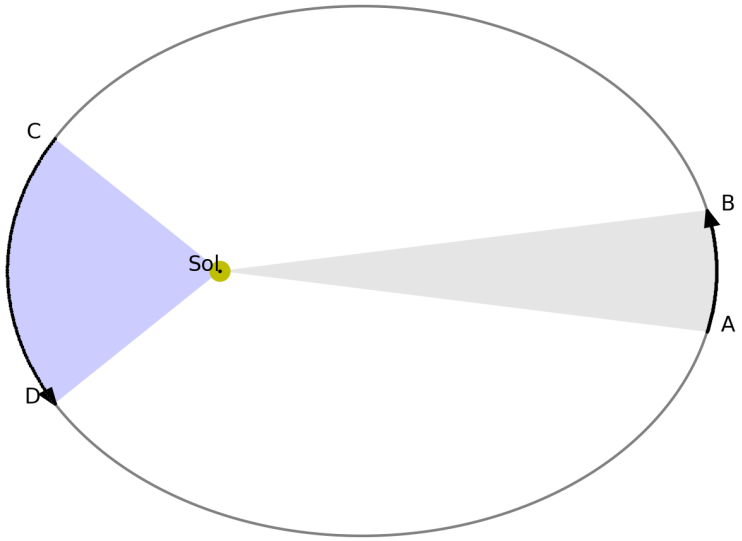


Fig. 145. Segunda lei de Kepler. Diagrama: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo

6.2.4 Terceira Lei - Lei Harmônica

O quadrado do período orbital é proporcional ao cubo do semieixo maior das órbitas.

A terceira lei enunciada por Kepler relaciona o período orbital e a distância média do planeta ao Sol. Kepler estabelece que a razão entre o cubo da distância média do planeta ao Sol e o quadrado do período orbital é uma constante, para todos os planetas:

$$A^3 : T^2 = \text{constante}.$$

A Tab. 14 traz o semieixo maior (distância média do objeto ao Sol) dos oito planetas do Sistema Solar e de dois planetas anões, em unidades astronômicas, e seus períodos orbitais, dados em anos terrestres. A última coluna da tabela traz explicitamente a razão $A^3 : T^2$, onde fica evidente a constância desta razão.

Tabela 14. Semieixo maior e período orbital dos planetas, de Ceres e de Plutão

Objeto	A **(au)**	T **(anos)**	A^3	T^2	$A^3 : T^2$
Mercúrio	0,387	0,241	0,058	0,058	1,000
Vênus	0,723	0,615	0,378	0,378	1,000
Terra	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Marte	1,524	1,881	3,540	3,538	1,001
Ceres	2,768	4,603	21,208	21,188	1,001
Júpiter	5,203	11,862	140,852	140,707	1,001
Saturno	9,537	29,457	867,432	867,715	1,000
Urano	19,191	84,011	7067,939	7057,848	1,001
Netuno	30,069	164,790	27186,729	27155,744	1,001
Plutão	39,482	247,920	61545,660	61464,326	1,001

Nota: A representa o semieixo maior da órbita, em unidades astronômicas[99], e T representa o período orbital, em anos terrestres. A razão $A^3 : T^2$ ilustra a terceira lei de Kepler. As pequenas diferenças em relação ao valor unitário decorrem do arredondamento dos valores de A e T apresentados na tabela.
Fonte: Elaborado pelo autor, com dados orbitais do NASA/JPL Solar System Dynamics, sistema *Horizons*, e do JPL Small-Body Database. Disponível em: https://ssd.jpl.nasa.gov/. Acesso em: 25 maio 2026.

Assim como as duas primeiras leis, publicadas em 1609 [77], a terceira lei de Kepler, publicada em 1619 [78], foi deduzida de maneira empírica, baseada somente em dados observacionais. Uma formulação teórica que permitiria deduzir analiticamente as leis de Kepler, surge apenas décadas mais tarde, quando Isaac Newton enuncia sua lei da gravitação universal, em 1687, na seminal obra *Philosophiae naturalis principia mathematica* [79]:

$$F_g \propto \frac{M_1 M_2}{r^2},$$

da qual as Leis de Kepler passam a ser uma consequência[100].

Em sua formulação original, Newton apenas apresenta a gravidade como uma força atrativa entre os corpos, proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre seus centros, sem determinar o valor da constante de proporcionalidade que hoje usualmente simbolizamos por G[101].

Visualmente, a constância da razão $A^3 : T^2$ fica também evidente em um gráfico da distância média versus período orbital, com eixos logarítmicos (Fig. 146).

[100] Para uma demonstração da dedução da terceira lei de Kepler a partir da lei da Gravitação Universal, veja o apêndice 9.7.

[101] O valor de G foi determinando experimentalmente por Henry Cavendish (1731-1810), utilizando um aparato experimental idealizado por John Michell (1724-1793) para medir diretamente a força de atração entre dois corpos, no que hoje é conhecido como o *Experimento de Cavendish* [80].

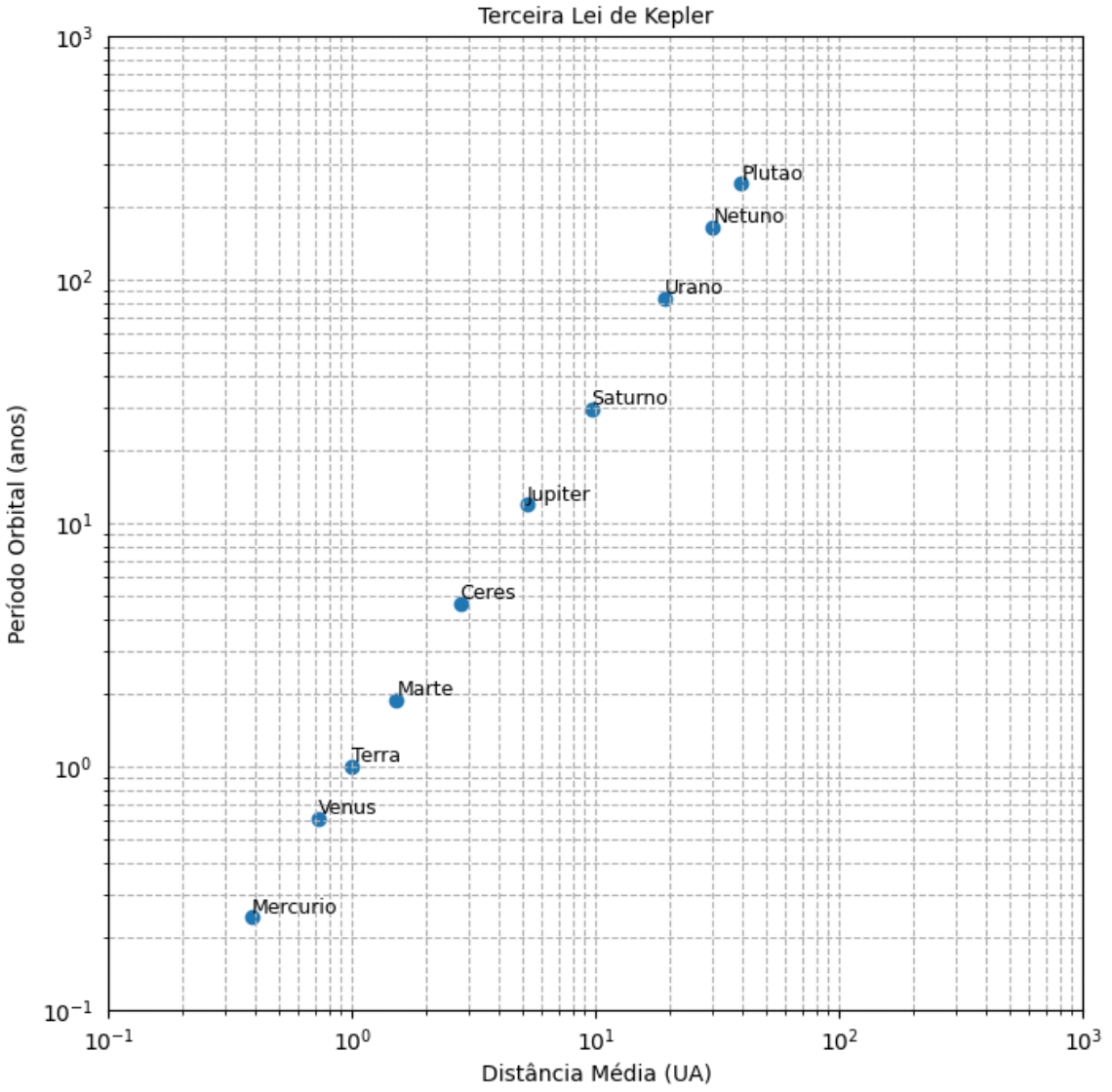


Fig. 146. Visualização da terceira lei de Kepler - Períodos orbitais e distâncias médias ao Sol dos oito planetas e de dois planetas anões. A linearidade mostra a constância da razão $A^3 : T^2$. Diagrama: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

A Fig. 147 exibe a configuração dos planetas do Sistema Solar durante o mês de setembro de 2024.

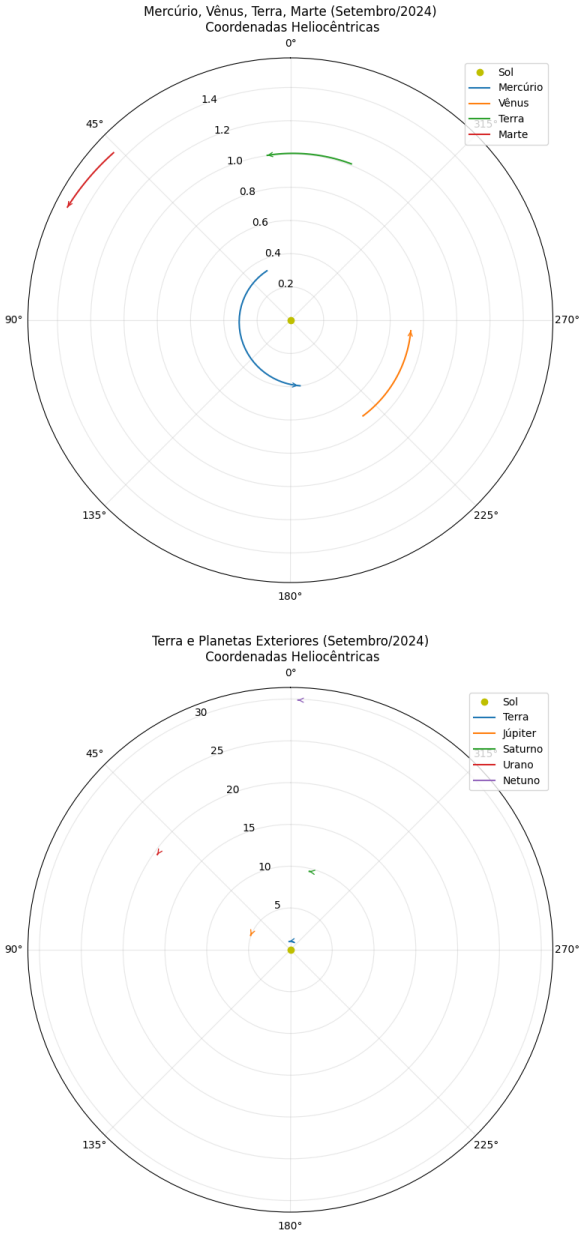


Fig. 147. Posição heliocêntrica dos planetas no mês de setembro/2024. Dados: JPL / Horizons. Diagrama: Wandeclayt Melo/Projeto Céu Profundo.

6.3 Planetas Rochosos

Os quatro planetas mais próximos do Sol são corpos rochosos, com dimensões comparáveis às da Terra (Tab. 17). Apesar de serem objetos mais próximos da Terra, sua observação oferece mais dificuldades do que a observação de Júpiter e Saturno, planetas muito mais afastados.

Tabela 15. Propriedades dos planetas rochosos

Propriedade	**Mercúrio**	**Vênus**	**Terra**	**Marte**
Massa, M (10^{24} kg)	0,330103	4,86731	5,97217	0,641691
Massa, M ($M_\oplus$)	0,0553	0,8149	1,0000	0,1074
Raio equatorial, $R_{\rm eq}$ (km)	2440,53	6051,8	6378,1366	3396,19
Raio equatorial, $R_{\rm eq}$ ($R_\oplus$)	0,3826	0,9488	1,0000	0,5325
Semieixo maior, a (UA)	0,38709927	0,72333566	1,00000261	1,52371034
Período orbital sideral, $P_{\rm orb}$ (anos)	0,2408467	0,61519726	1,0000174	1,8808476
Período orbital sideral, $P_{\rm orb}$ (dias)	87,969	224,701	365,256	686,980
Período de rotação sideral, $P_{\rm rot}$ (h)	1407,51	−5832,43	23,93	24,62
Período de rotação sideral, $P_{\rm rot}$ (dias)	58,646	−243,018	0,997	1,026
Inclinação orbital, i (°)	7,00	3,39	0,00	1,85
Obliquidade axial, ε (°)	0,01	177,4	23,4	25,2

Notas: $M_\oplus$ = massa da Terra; $R_\oplus$ = raio equatorial da Terra. $P_{\rm rot} < 0$ indica rotação retrógrada. A obliquidade axial ε é a inclinação do eixo do planeta em relação à normal de seu plano orbital. Uma obliquidade $\varepsilon = 0$ significa que o eixo do planeta é perpendicular ao plano de sua órbita. Para a Terra, o valor de a e de i corresponde ao baricentro Terra–Lua, listado pelo JPL como *EM Bary*. Os períodos de rotação sideral foram convertidos de dias para horas.
Fonte: JPL Solar System Dynamics, *Planetary Physical Parameters* e *Approximate Positions of the Planets*. As obliquidades foram adotadas dos valores usuais de inclinação axial planetária usados em fichas planetárias da NASA/JPL. https://ssd.jpl.nasa.gov/planets/

Apesar de serem visíveis a olho nu, o pequeno tamanho aparente dos planetas rochosos exige instrumentos de maior abertura e ampliações fortes para sua observação telescópica. No entanto, embora a primeira experiência observando esses objetos pela ocular possa ser frustrante, passando longe da exuberância de Júpiter e Saturno, sob condições especiais, as observações podem se tornar bastante recompensadoras. Vênus, por exemplo, pode ser observado a olho nu à luz do dia. Formações superficiais de Marte podem ser resolvidas durante as oposições periélicas. E mesmo o pequeno Mercúrio, pouco maior que nossa Lua, revela ao telescópio que, assim como Vênus, possui fases.

6.3.1 Mercúrio e Vênus

A mais notável peculiaridade na observação de Mercúrio e Vênus é o limite na separação entre esses planetas e o Sol. Percorrendo órbitas interiores á orbita da Terra, Mercúrio e Vênus jamais atingem a oposição, por isso, a melhor condição para a observação dos planetas interiores é quando estes atingem a máxima elongação a leste ou a oeste. Mas mesmo sob condições ideais, a observação dos planetas interiores não revela detalhes das superfícies desses corpos. Seja pelo reduzido tamanho aparente, no caso de Mercúrio, ou pela presença de uma espessa camada de nuvens, no caso de Vênus, o único aspecto facilmente observável desses planetas ao telescópio é a variação de fase e do tamanho aparente.

Mercúrio é visível a olho nu nas proximidades das elongações máximas, podendo atingir aproximadamente $27,5°$, quando o planeta está próximo ao afélio. Esta é uma condição desafiadora, com o planeta desfavoravelmente posicionado muito próximo ao horizonte.

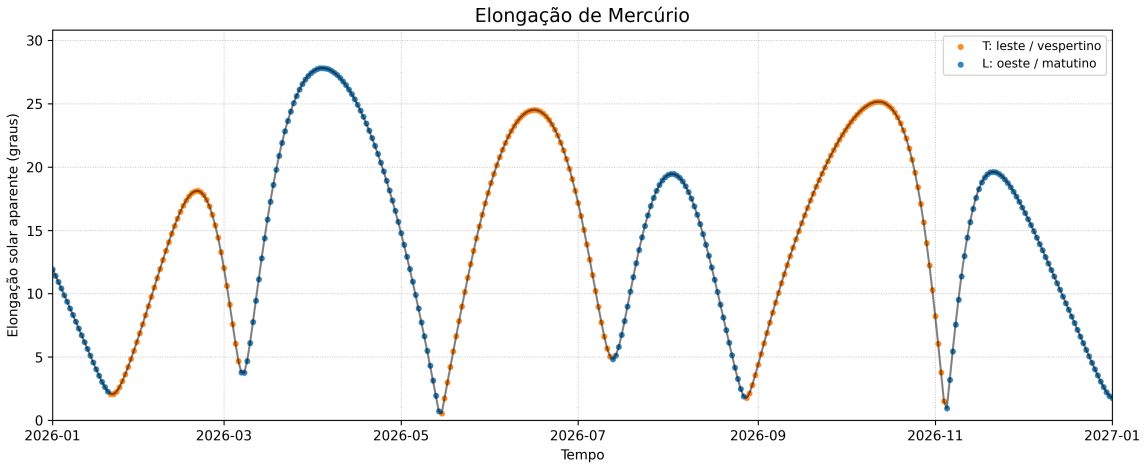


Fig. 148. Elongação do planeta Mercúrio ao longo do ano de 2026. Os pontos azuis representam o planeta a oeste do Sol, visível no céu matutino. Os pontos laranja represenatam o planeta a leste do Sol, visível no céu vespertino.

.

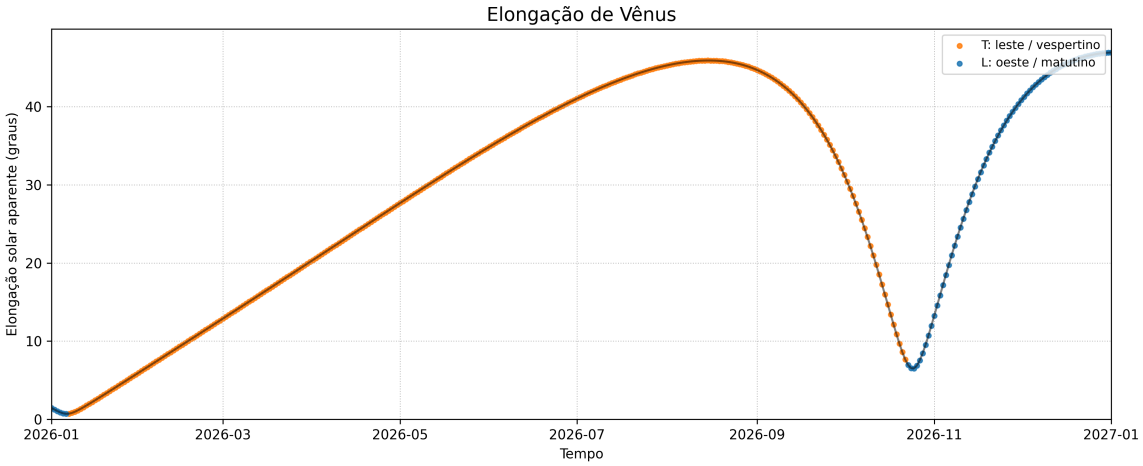


Fig. 149. Elongação do planeta Vênus ao longo do ano de 2026. Os pontos azuis representam o planeta a oeste do Sol, visível no céu matutino. Os pontos laranja represenatam o planeta a leste do Sol, visível no céu vespertino.

.

6.3.2 Marte

Tabela 16. Oposições de Marte entre 2016 e 2046

Data	Distância (UA)	Distância (10^6 km)	Diâmetro aparente ($''$)	Elongação (graus)
22/05/2016	0,509	76,2	18,4	178,84
27/07/2018	0,386	57,8	24,2	173,53
14/10/2020	0,419	62,7	22,3	177,01
08/12/2022	0,550	82,2	17,0	177,70
16/01/2025	0,644	96,3	14,6	175,71
19/02/2027	0,678	101,4	13,8	175,54
25/03/2029	0,649	97,1	14,4	176,69
04/05/2031	0,559	83,6	16,8	179,46
28/06/2033	0,427	63,9	21,9	175,44
16/09/2035	**0,382**	**57,1**	**24,5**	**174,36**
19/11/2037	0,499	74,7	18,8	179,26
02/01/2040	0,613	91,8	15,3	176,20
06/02/2042	0,672	100,5	13,9	175,44
11/03/2044	0,668	99,9	14,0	176,08
17/04/2046	0,601	89,9	15,6	178,15

Nota: $1\,\text{ua} = 149\,597\,870{,}7$ km. O diâmetro aparente de Marte foi calculado adotando o diâmetro físico médio $D = 6792$ km e a distância geocêntrica Δ em km, pela relação $\theta = 2\arctan\left(D/2\Delta\right)$, com o resultado convertido de radianos para segundos de arco. Para ângulos pequenos, essa expressão é praticamente equivalente a $\theta \simeq D/\Delta$, em radianos.

Fonte: dados calculados a partir de efemérides do JPL Horizons, usando coordenadas heliocêntricas da Terra e de Marte.

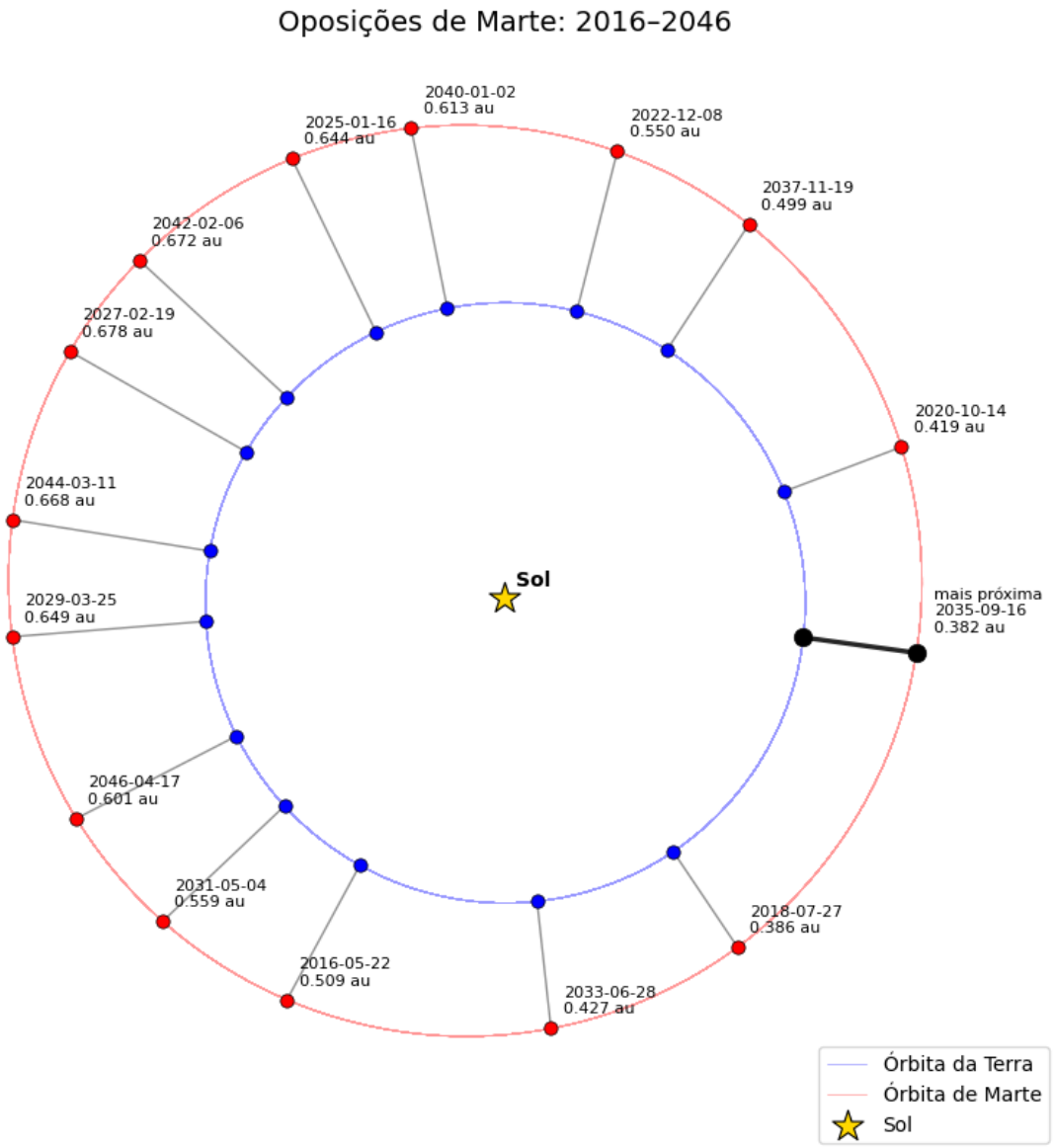


Fig. 150. Oposições de Marte no intervalo 2016-2046.

6.4 Gigantes Gasosos

Os planetas do Sistema Solar localizados além da órbita de Marte apresentam características muito distintas daquelas dos planetas interiores. São planetas gigantes, de grande massa, mas compostos principalmente por gás.

Tabela 17. Propriedades dos planetas gigantes

Propriedade	**Júpiter**	**Saturno**	**Urano**	**Netuno**
Massa, M (10^{24} kg)	1898,125	568,317	86,8099	102,4092
Raio equatorial, R_{eq} (km)	71492	60268	25559	24764
Semieixo maior, a (UA)	5.20248019	9,536676	19,189165	30,069923
Período orbital sideral, P_{orb} (anos)	11,862	29,447498	84,016846	164,791320
Período de rotação sideral, P_{rot} (h)	9,92	10,66	$-17{,}24$	16,11
Inclinação orbital, i ($^\circ$)	1,30	2,49	0,77	1,77
Obliquidade axial, ε ($^\circ$)	3,1	26,7	97,8	28,3

Notas: $P_{\mathrm{rot}} < 0$ indica rotação retrógrada. A obliquidade axial ε é a inclinação do eixo do planeta em relação à normal de seu plano orbital. Uma obliquidade $\varepsilon = 0$ significa que o eixo do planeta é perpendicular ao plano de sua órbita.
Fonte: JPL Solar System Dynamics, *Planetary Physical Parameters* e *Approximate Positions of the Planets*.

Apesar de gigantes, apenas dois desses planetas, Júpiter e Saturno, são visíveis a olho nu. Embora seu brilho atinja magnitude visual menor que 6, o que o coloca dentro do limite de visibilidade a olho nu, Urano só foi descoberto em 1781, através de um dos grandes telescópios construídos por William Herschel. Netuno foi observado pela primeira vez em 1846, tendo sua posição prevista de maneira independente por Urbain Le Verrier, na França, e John Adams, na Inglaterra, graças a perturbações de natureza gravitacional observadas na órbita de Urano.

6.4.1 Júpiter e Saturno

Júpiter é em todos os sentidos, um planeta superlativo. O maior raio e a maior massa entre os planetas do Sistema Solar, o mais curto período de rotação sideral, realizando uma rotação em pouco menos de 10h.

Embora Júpiter seja um planeta gasoso, há formações semipermanentes observáveis no topo de sua atmosfera. Uma dessas formações, a Grande Mancha Vermelha, é observada há mais de 3 séculos. Diferenças de coloração em faixas paralelas ao equador joviano[102] podem ser observadas mesmo em pequenos telescópios.

[102] ***Joviano*** é o adjetivo relativo à Júpiter.

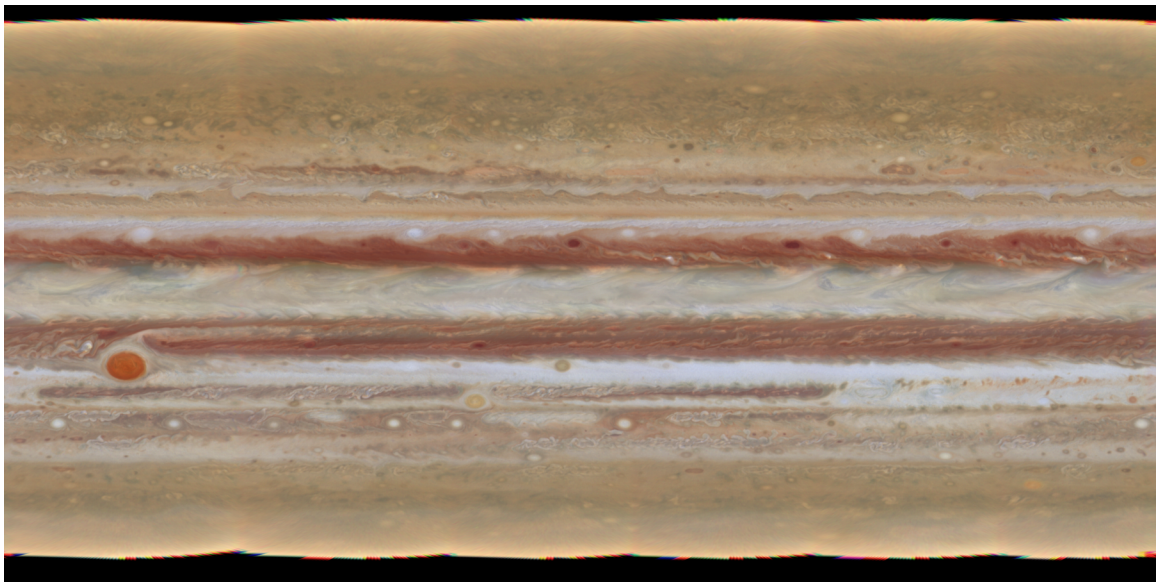


Fig. 151. Mapa da atmosfera de Júpiter construído com um mosaico de imagens obtidas com o Hubble Space Telescope (HST) em 12 de dezembro de 2025, como parte do programa Outer Planets Atmosphere Legacy (OPAL). Créditos: NASA/ESA/HST/STScI. Programa OPAL (PI: Amy Simon).

Tabela 18. Semieixo maior e período orbital dos satélites galileanos de Júpiter

Satélite	A (D_J)	T **(dias)**	A^3	T^2	$A^3 : T^2$
Io	2,949	1,769	25,654	3,129	8,198
Europa	4,694	3,551	103,395	12,610	8,200
Ganimedes	7,486	7,155	419,543	51,194	8,195
Calisto	13,167	16,689	2282,869	278,523	8,196

Nota: A = semieixo maior da órbita em diâmetros equatoriais de Júpiter (D_J). T = período orbital (dias terrestres). A razão $A^3 : T^2$ da terceira lei de Kepler é válida também para satélites que orbitam o mesmo corpo central. Como as unidades D_J e dias, a razão permanece constante mas é diferente de 1.
Fonte: Elaborado pelo autor, com dados orbitais e físicos da NASA Solar System Exploration e do NASA/JPL Solar System Dynamics. Para a conversão, foi adotado o diâmetro equatorial de Júpiter $D_J = 142\,984$ km. Disponível em: https://science.nasa.gov/jupiter/ e https://ssd.jpl.nasa.gov/. Acesso em: 25 maio 2026.

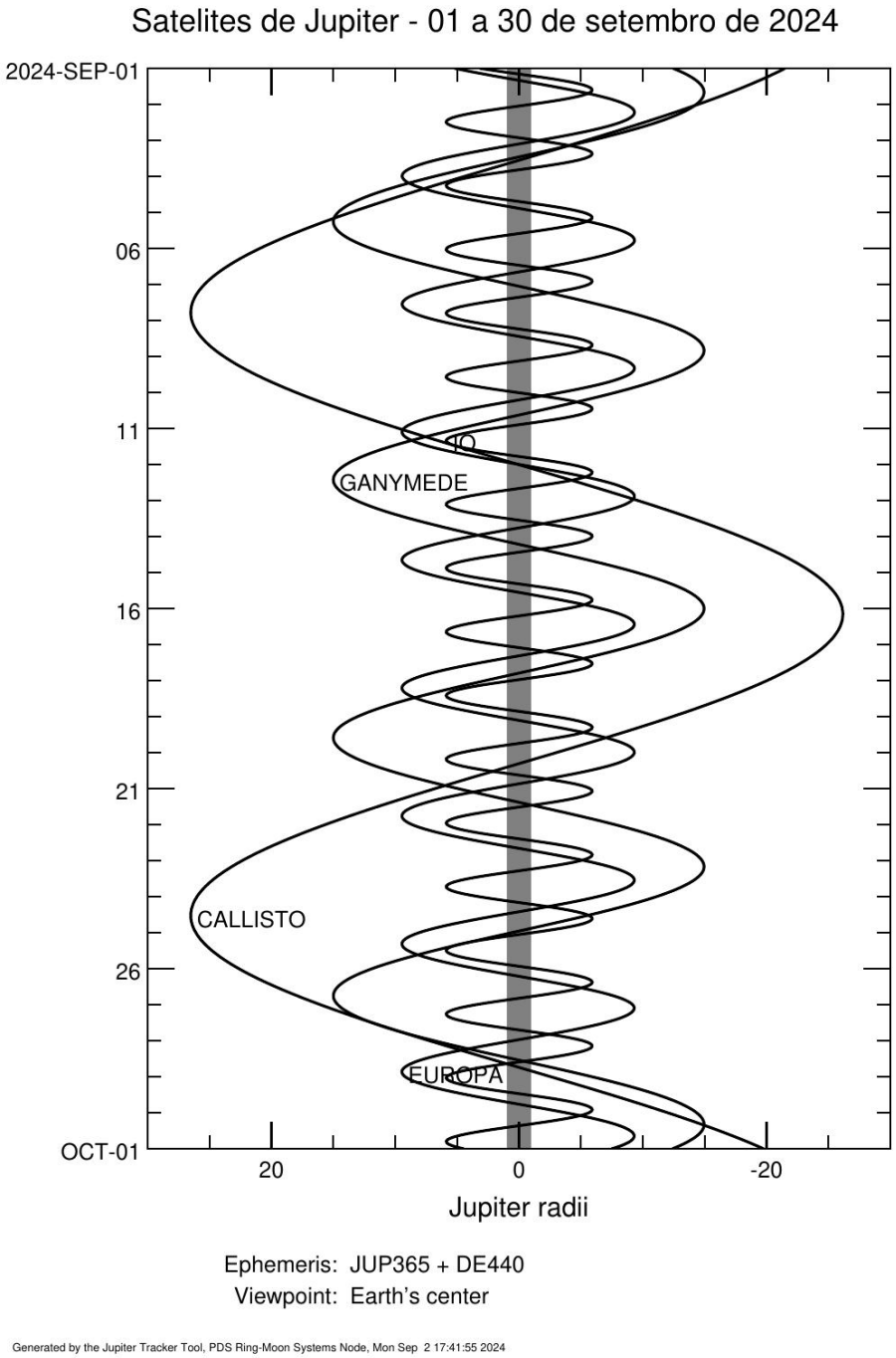


Fig. 152. Evolução mensal dos satélites de Júpiter. Créditos: PDS Rings.

6.4.2 Urano e Netuno



Fig. 153. As naves gêmeas Voyager 1 e 2, lançadas em 1977, exploraram os gigantes gasosos a partir de 1979.

6.5 Planetas Anões

Tabela 19. Semieixo maior e período orbital dos planetas anões

Objeto	A **(au)**	T **(anos)**	A^3	T^2	$A^3 : T^2$
Ceres	2,768	4,604	21,208	21,197	1,001
Plutão	39,482	247,940	61545,660	61474,244	1,001
Haumea	43,220	284,100	80733,594	80712,810	1,000
Makemake	45,560	307,500	94569,512	94556,250	1,000
Éris	67,860	559,100	312493,916	312592,810	1,000

Nota: A = semieixo maior da órbita (AU). T = período orbital, em anos terrestres. A razão $A^3 : T^2$ ilustra a terceira lei de Kepler.
Fonte: Elaborado pelo autor, com dados orbitais do Minor Planet Center, página *Dwarf Planets*. Disponível em: https://www.minorplanetcenter.net/dwarf-planets. Acesso em: 26 maio 2026.

7. Cometas

Em um céu aparentemente imutável, objetos difusos que surgem de forma imprevisível e evoluem rapidamente, deslocando-se entre as estrelas fixas e, por vezes, tornando-se exuberantemente visíveis a olho nu, sempre capturaram a atenção dos observadores.

Além do aspecto difuso da região central, resultante de um envelope gasoso chamado de cabeleira ou *coma* em torno do núcleo, uma das características mais marcantes e visualmente impressionantes da atividade cometária é a presença de uma formação alongada, chamada cauda, estendendo-se na direção oposta ao Sol.

Na Fig. 154 vemos um dos cometas mais brilhantes da última década, o C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) fotografado de São José dos Campos (SP) na madrugada de 2 de outubro de 2024, cinco dias após sua passagem pelo periélio. A extensão da cauda visível na imagem é de mais de 10º, o equivalente a 20 vezes o diâmetro aparente da Lua Cheia.



Fig. 154. Cometa C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) em 2 de outubro de 2024. Empilhamento de 16 quadros com 3 segundos de exposição cada, capturados com Câmera DSLR Nikon D750, objetiva Rokinon 85 mm f/1.5, ISO 1600. Imagem: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

Apesar de poucos cometas atingirem brilho suficiente para a observação a olho nu, cometas menos brilhantes, mas dentro do limite observável por binóculos ou pequenos telescópios, são objetos razoavelmente comuns, geralmente com mais de uma ocorrência todos os anos.

Cometas brilhantes, com caudas extensas como a do Tsuchinshan-ATLAS, proporcionam visões deslumbrantes a olho nu, mas, quando se trata de observá-los com instrumentos, os binóculos costumam oferecer uma experiência superior à da observação por telescópios. O campo estreito dos telescópios (Fig. 155) é importante para caracterizar a geometria da coma e para medições de posição (astrometria) e brilho (fotometria), mas limita a observação a uma pequena região em volta do núcleo, deixando de fora toda a exuberância da longa cauda. Binóculos, por sua vez, englobam campos largos, com imagens bem contrastadas, excelentes para a observação visual de cometas em sua totalidade, sobretudo em locais menos afetados pela poluição luminosa.



Fig. 155. Cometa C/2024 G3 (ATLAS) fotografado através de telescópio Schmidt-Cassegrain Celestron Nexstar 8 SE de 203 mm de abertura. Frame único, com 3 s de tempo de exposição em câmera DSLR. Imagem: Wandeclayt M.

Inicialmente considerados fenômenos atmosféricos, foi só no Séc. XVI que medidas de paralaxe realizadas por Tycho Brahe confirmaram que o Grande Cometa de 1577 se encontrava além da órbita da Lua e somente no Séc. XVII que Edmund Halley previu o retorno do cometa que hoje leva seu nome, reconhecendo, assim, o primeiro cometa periódico e estabelecendo os cometas como uma classe de objetos em órbita no Sistema Solar [81].

Em 1866, Giovanni Schiaparelli sugere pela primeira vez a relação entre cometas e chuvas de meteoros, apontando que a órbita dos meteoros Perseídeos coincide com a do

cometa 109P/Swift-Tuttle, descoberto quatro anos antes.

Os cometas são pequenos corpos do Sistema Solar que experimentam a sublimação[103] de materiais voláteis quando se aproximam do Sol. Os gelos de água (H_2O), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2) são os compostos voláteis mais abundantes, em número de moléculas, nos núcleos cometários. O gás, a poeira e partículas de gelo liberados no processo de sublimação criam um envoltório em torno do núcleo (a cabeleira) e formam a cauda quando soprados pela pressão de radiação e pelo vento solar.

Além das observações realizadas por instrumentos em solo e por telescópios espaciais, nossa compreensão dos cometas foi complementada por observações a curta distância, realizadas por missões não tripuladas que coletaram diretamente partículas da coma e capturaram imagens de alta resolução dos núcleos (Tab. 20).

Tabela 20. Missões espaciais para estudo de cometas.

Missão	**Agência**	**Cometa**	**Ano**
Vega 1	USSR/FR	1P/Halley	1986
Vega 2	USSR/FR	1P/Halley	1986
Giotto	ESA	1P/Halley	1986
	ESA	26P/Grigg-Skjellerup	1992
Deep Space 1	NASA	19P/Borrelly	2001
Stardust	NASA	81P/Wild 2	2004
Deep Impact	NASA	9P/Tempel 1	2005
EPOXI	NASA	103P/Hartley	2010
Stardust Next	NASA	9P/Tempel 1	2011
Rosetta	NASA	67P/Churyumov-Gerasimenko	2014-2016

Fonte: Cometary Nuclei—From Giotto to Rosetta [82] .

Após uma série de missões que realizaram sobrevoos limitados dos núcleos cometários, entre maio de 2014 e setembro de 2016, a missão Rosetta, da European Space Agency (ESA), fez um longo acompanhamento do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, estudando sua composição, morfologia e evolução durante um grande intervalo em torno da passagem pelo periélio.

Um dos componentes mais ambiciosos da missão Rosetta foi o módulo de pouso Philae, projetado para realizar experimentos na superfície do cometa. No entanto, devido a uma falha no sistema de atracamento à superfície, o módulo ricocheteou após o contato inicial com a superfície, atingindo uma posição final desfavorável, o que impediu que seus paineis solares fossem adequadamente iluminados e limitou o funcionamento do módulo.

A Fig. 156 mostra detalhadamente o núcleo do cometa 67P. A sublimação do núcleo na área exposta à insolação é claramente visível nesta imagem, registrada pela Rosetta em julho de 2015, a uma distância de apenas 169 km do centro do cometa. O campo horizontal do instrumento utilizado para capturar a imagem, a OSIRIS NARROW ANGLE CAMERA (OSINAC), é de 2,21°, correspondendo, nesta distância, a um campo real de 7,25 km.

[103] A sublimação é a passagem direta do estado sólido para o estado gasoso.

Na ocasião, o cometa encontrava-se a 1,25 UA de distância do Sol, nas proximidades do periélio. Esta aproximação dos cometas com o Sol aumenta a taxa de sublimação, alimentando cabeleira e cauda com gases e poeira. O aumento no brilho dos cometas ao se aproximar do Sol é resultado da reflexão e do espalhamento da luz solar nos grãos de poeira e da emissão por fluorescência do gás na cabeleira e na cauda[83].

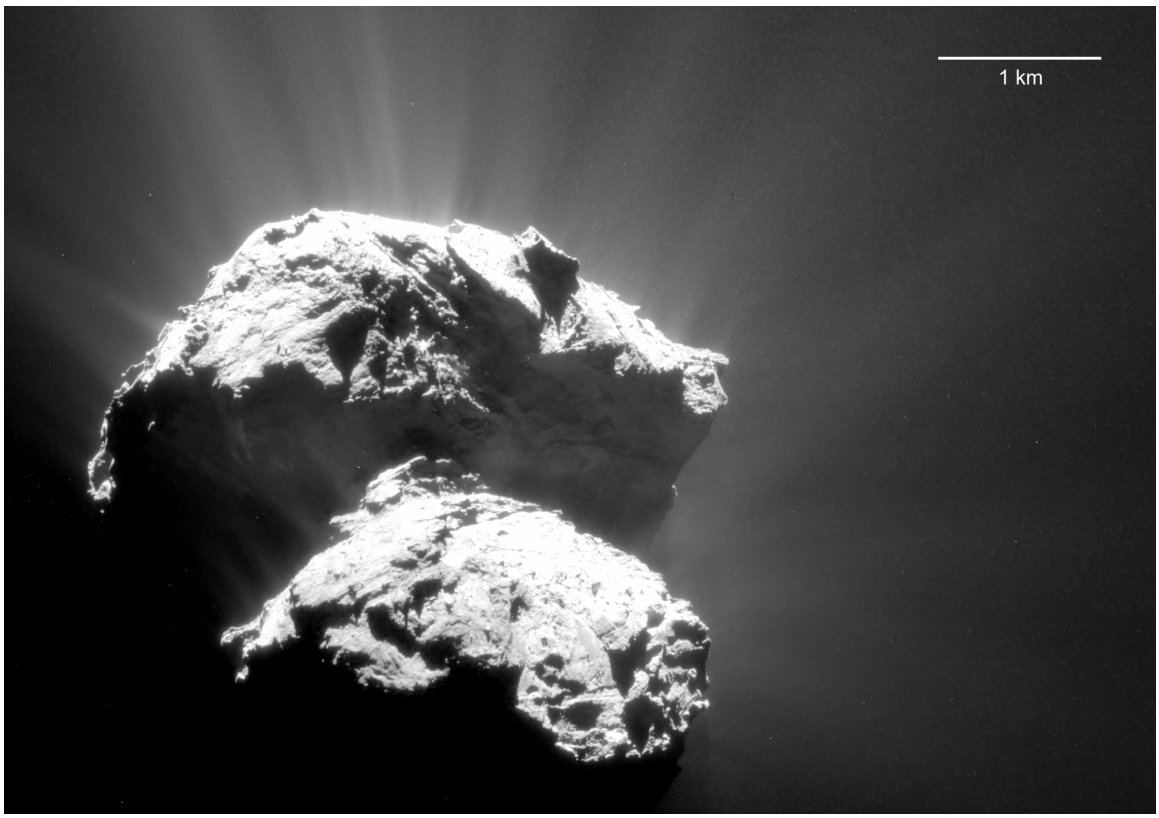


Fig. 156. Sublimação no núcleo do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, registrado pela câmera OSIRIS NAC da missão Rosetta. No instante da imagem, o cometa se encontrava a 1,25 UA do Sol. Créditos: Sierks, H. e equipe OSIRIS Team, ROSETTA-ORBITER 67P OSINAC 4 ESC3-MTP019 RDR-INF-REFL V1.0, RO-C-OSINAC-4-ESC3-67P-M19-INF-REFL-V1.0, ESA Planetary Science Archive e NASA Planetary Data System, 2020. Processamento: Wandeclayt M.

Quanto mais próximo da Terra e do Sol e quanto maior a atividade do núcleo (alimentando a coma com gás e poeira), maior o brilho aparente observado. Após um número suficiente de observações de um cometa recém-descoberto, é possível determinar sua trajetória, conhecendo, assim, sua posição e sua distância em relação ao Sol e à Terra. Esses dados permitem prever a magnitude aparente do cometa através de um modelo fotométrico simplificado dado pela expressão:

$$m_1 = H_0 + 5\ \log_{10}(\Delta) + 2{,}5\ n\ \log_{10}(r).$$

Onde m_1 é a magnitude aparente total observada, H_0 é a magnitude absoluta, definida

como a magnitude do cometa a 1 UA do Sol e 1 UA da Terra, Δ é a distância do cometa à Terra, r é a distância do cometa ao Sol e n é um índice de atividade, que calibra a dependência do brilho do cometa com a distância ao Sol [84].

Uma expressão mais genérica adota $n = 4$ como valor médio padrão para o índice de atividade, resultando em

$$m_{10} = H_{10} + 5\ \log_{10}(\Delta) + 10\ \log_{10}(r).$$

Na prática, obtemos uma curva como a da Fig. 157 com um pico estreito associado à máxima aproximação da Terra e ao periélio.[104].

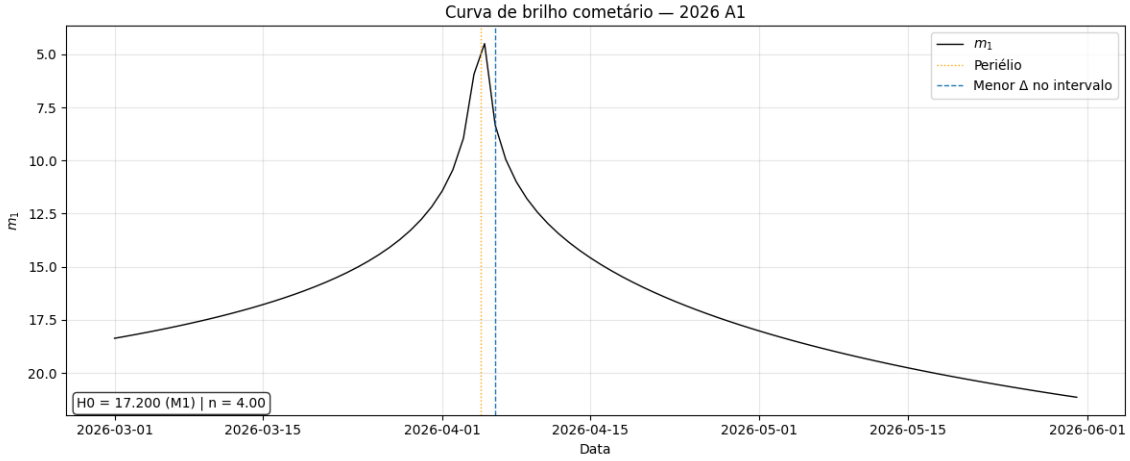


Fig. 157. Curva de magnitude aparente plotada usando os dados de distância do cometa C/2026 A1 (MAPS) e o modelo fotométrico padrão ($m_{10} = H_{10} + 5\ \log_{10}(\Delta) + 10\ \log_{10}(r)$). Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo com dados do serviço Horizons.

O brilho observado pode, no entanto, divergir significativamente da previsão do modelo teórico por motivos como fragmentação do núcleo ou incertezas e variações do índice n com a distância heliocêntrica, por exemplo. Podem também ocorrer aumentos repentinos de atividade e, consequentemente, de brilho (*outbursts*) ou mesmo desintegrações que levem à extinção completa do cometa.

Para refinar os parâmetros envolvidos nos modelos e fornecer curvas de luz que descrevam a evolução real do brilho do cometa, a contribuição de observatórios amadores é

[104] Modelos mais gerais podem utilizar valores diferentes do índice de atividade n para diferentes setores da órbita, variando com a distância heliocêntrica e incorporar um termo dependente do ângulo de fase α. O ângulo de fase é definido como o ângulo Sol-cometa-observador, e para ângulos de fase próximos de 180°, o espalhamento da luz solar nos grãos de poeira da cabeleira produz um incremento de brilho do cometa, resultando ocasionalmente em cometas brilhantes visíveis à luz do dia[85]:

$$m = H + 5\ \log_{10}(\Delta) + 2{,}5\ n\ \log_{10}(r) - 2{,}5\ \log_{10}\Phi(\alpha).$$

fundamental. Embora dotados de instrumentos mais potentes, os observatórios profissionais não dispõem de tempo disponível para as longas campanhas de observação necessárias para o acompanhamento de cometas.

A Fig. 158 mostra a curva de brilho do cometa C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS), sobreposta aos dados observacionais da plataforma Comet Observation Database (COBS). A plataforma recebe e disponibiliza gratuitamente dados de observações de cometas, fornecidos principalmente por amadores. Esse conjunto robusto de dados permite acompanhar a evolução do brilho do cometa, identificando transientes como *outbursts* e estimando com maior confiança seu comportamento futuro.

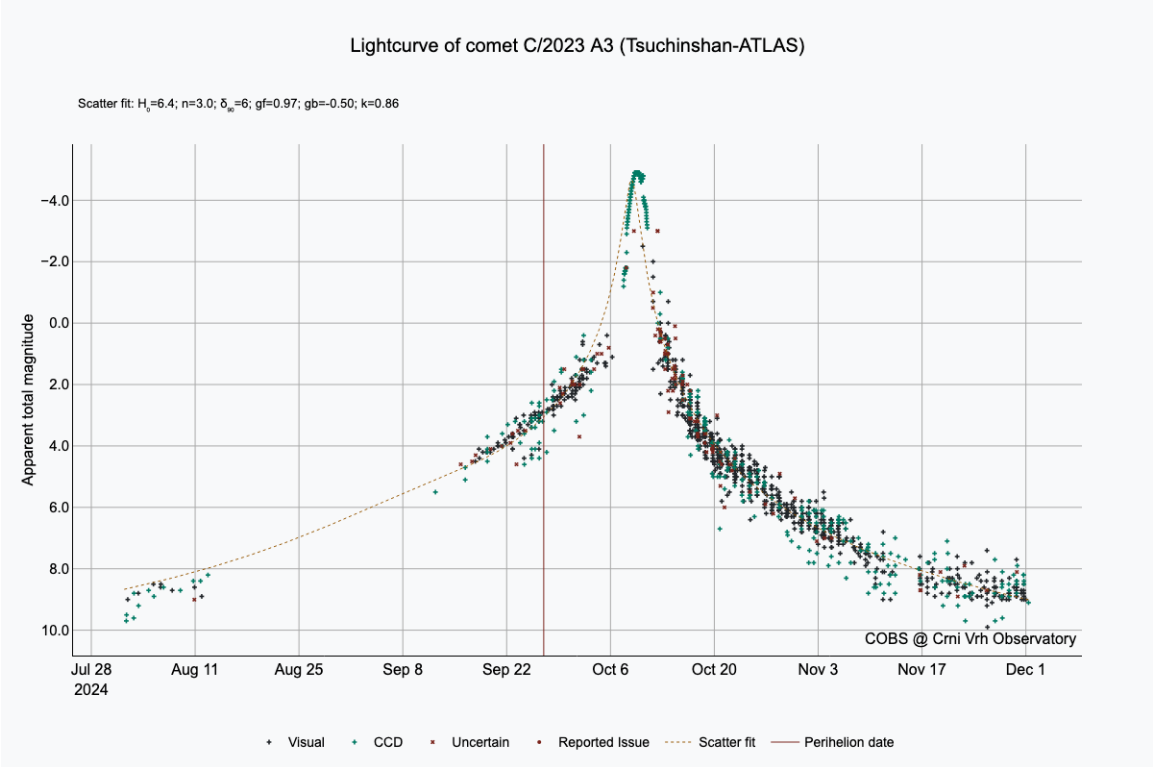


Fig. 158. Curva de luz do cometa C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) entre agosto e dezembro de 2024. A curva é um ajuste para os dados fornecidos pelos contribuintes da rede COBS.

O gráfico mostra que após sua passagem pelo periélio, o cometa C/2023 A3 atingiu magnitudes comparáveis ao planeta Vênus ($\approx -4,5$), mas isso não significa que ele tenha se tornado um objeto facilmente observável. Outras variáveis precisam ser levadas em consideração ao julgar a observabilidade de um cometa a olho nu. Em primeiro lugar, é preciso considerar sua elongação[105] e em seguida, sua elevação acima do horizonte para a latitude do observador. É comum que, nos períodos de maior brilho, o cometa esteja imerso na luz do crepúsculo matutino ou vespertino, com baixo contraste contra o céu

[105] A separação angular entre o cometa e o Sol.

ainda claro e, por isso, é fundamental ter conhecimento da posição do cometa no instante da observação.

Além da evolução diária no brilho aparente observado, há mudanças constantes no aspecto da coma e da cauda. Cada observação de um mesmo cometa é única e, até durante uma mesma sessão de observação, é possível registrar mudanças visíveis no cometa. Essa constante evolução é uma motivação para a observação continuada dos cometas, seja por propósitos científicos ou pelo não menos importante prazer de observar um dos mais dinâmicos fenômenos do Sistema Solar. Para isso, no entanto, é indispensável conhecer a trajetória do cometa na esfera celeste.



Fig. 159. Cometa C/2025 R2 (SWAN)

7.1 Observando Cometas

É comum que novos cometas sejam descobertos significativamente antes de sua passagem pelo periélio e, muitas vezes, até antes de exibirem atividade cometária, como pontos deslocando-se contra o fundo de estrelas fixas. Historicamente, astrônomos amadores foram responsáveis pela descoberta de um grande número de cometas. Observadores amadores experientes, conhecedores do céu e munidos de bons instrumentos, são especialmente capacitados para reconhecer novos objetos nos campos observados. A partir do final do séc. XX, no entanto, programas automatizados de varredura do céu (*surveys*) e telescópios espaciais equipados com instrumentos que permitem a observação de campos muito próximos do Sol passam à frente das descobertas por observadores individuais, registrando milhares de novos cometas. A Fig. 160 mostra a evolução no número de cometas descobertos anualmente por indíviduos (linha laranja sólida) e por programas de varredura e telescópios espaciais (linha tracejada verde) num intervalo de 50 anos, entre 1960 e 2010.

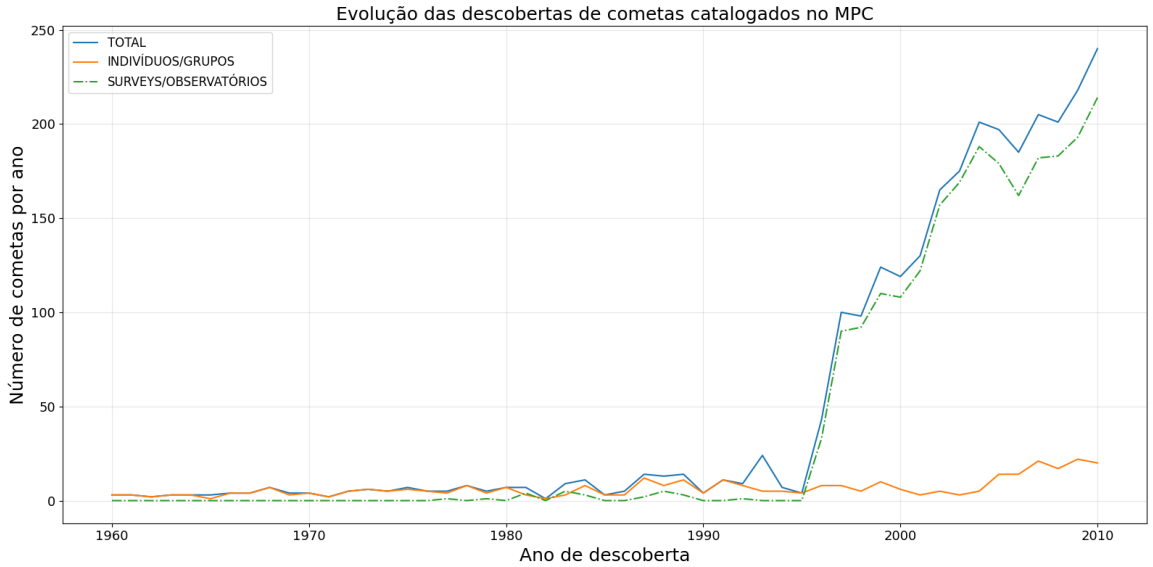


Fig. 160. Descobertas anuais de cometas, entre 1960 e 2010, registradas no catálogo do Minor Planet Center (MPC).

O grande salto observado na metade dos anos 1990 marca o início da operação do telescópio espacial Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), um telescópio localizado num ponto especial do espaço, onde as forças gravitacionais do Sol e da Terra se equilibram, mantendo o instrumento em uma órbita sincronizada com a da Terra, de onde é possível observar ininterruptamente o Sol. Embora este nunca tenha sido o objetivo da missão, o SOHO tornou-se rapidamente um recordista na descoberta de pequenos cometas com órbitas rasantes ao Sol, atingindo em 2010 a marca de 2000 cometas descobertos em seus dados e ultrapassando os 5000 cometas em 2024.

Além de novos cometas descobertos através dos instrumentos do SOHO, é possível observar no campo de seus coronógrafos LASCO C2 e C3 cometas já conhecidos, mas

com pequenos ângulos de elongação em trechos de suas órbitas que são completamente inacessíveis para outros telescópios. A Fig. 161 mostra o cometa C/2024 G3 (ATLAS) no campo do instrumento LASCO C2 durante sua máxima aproximação com o Sol nos dias 13 e 14 de janeiro de 2025. O disco central escuro e a haste diagonal são partes do anteparo que produz um eclipse artificial, ocultando o Sol e permitindo a observação da coroa solar e, eventualmente, de cometas cruzando o campo.

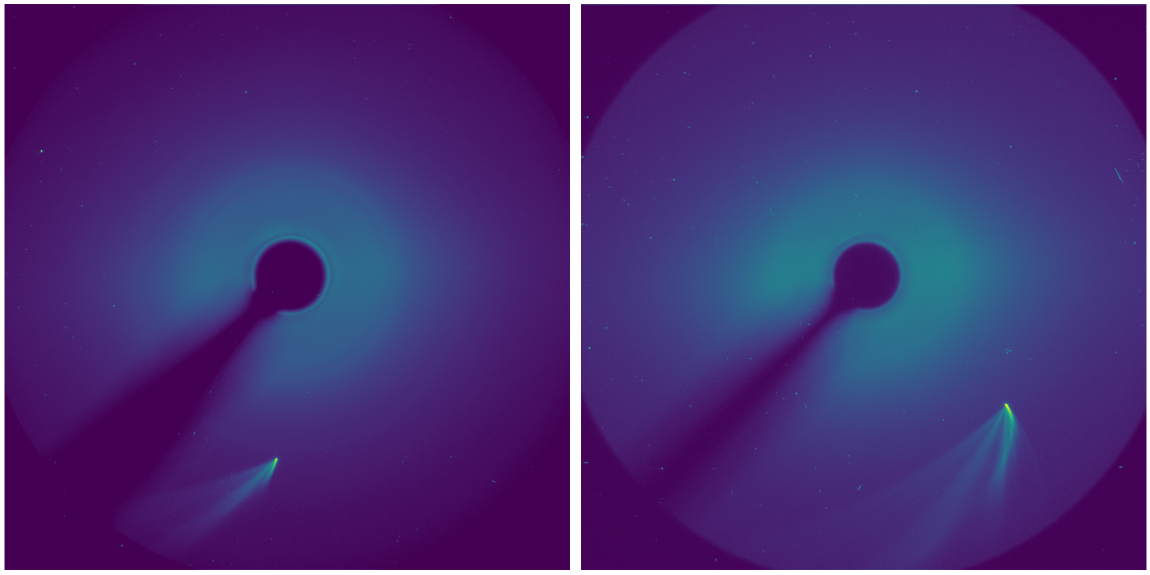


Fig. 161. Cometa C/2024 G3 (ATLAS) no campo do coronógrafo LASCO C2, a bordo da missão SOHO, nos dias 13 e 14 de janeiro de 2025. Dados: ESA/NASA/SOHO/LASCO C2. Processamento: Wandeclayt M.

Independente de como tenha ocorrido a descoberta do cometa, após a confirmação da detecção e determinação da órbita é possível prever sua trajetória na esfera celeste e planejar sua observação.

Durante a passagem de um cometa pelas vizinhanças do Sol, seu deslocamento diário pode ser de vários graus, o que significa que é necessário conhecer sua posição para o instante exato da observação. Isso também significa que há uma janela curta para a observação dos cometas durante sua fase mais brilhante, próxima à sua passagem pelo periélio, tipicamente durando poucos dias ou, no melhor caso, poucas semanas.

A Fig. 162 mostra o deslocamento do Sol, dos planetas e dos cometas C/2026 A1 (MAPS) e C/2025 R3 (PANSTARRS) na esfera celeste durante o mês de maio de 2026. A extensão do deslocamento dos cometas é comparável à dos planetas Mercúrio, Vênus e Marte. No entanto, enquanto as órbitas dos planetas aparecem agrupadas em torno da eclíptica, os cometas aparecem cruzando a constelação de Órion, significativamente ao sul da eclíptica. Esta é uma característica importante dos cometas: muitos deles descrevem órbitas de grande inclinação em relação ao plano da eclíptica.

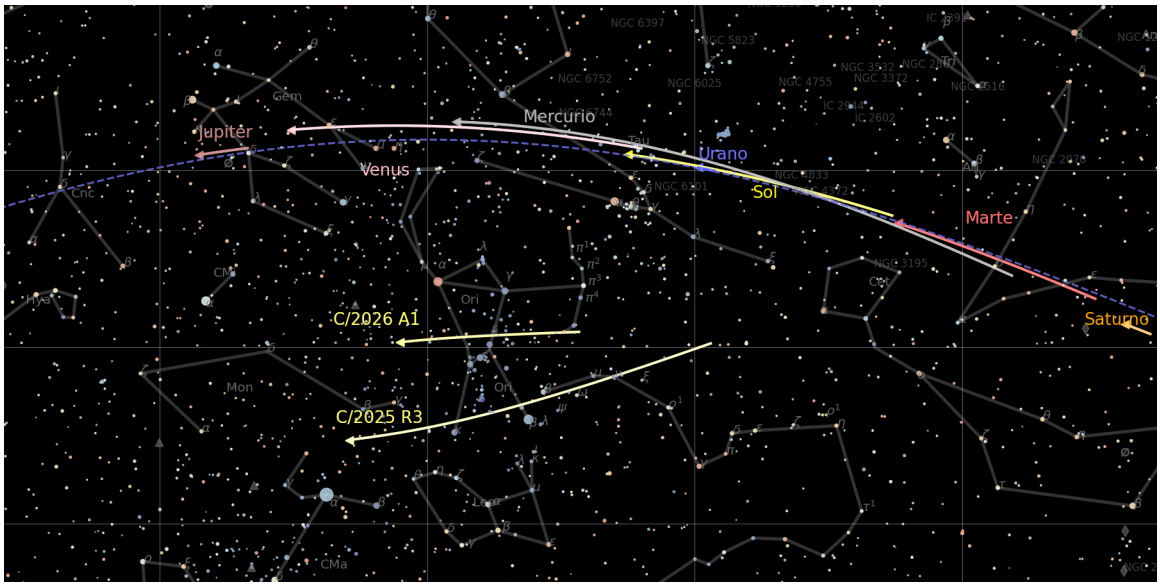


Fig. 162. Deslocamento do Sol, planetas e dos Cometas C/2026 A1 (MAPS) e C/2025 R3 (PANSTARRS) na esfera celeste durante o mês de maio de 2026. Carta celeste plotada por Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

A posição geográfica do observador também tem grande impacto na observabilidade dos cometas. Dependendo da latitude da observação, um cometa pode aparecer mais ou menos elevado sobre o horizonte. Cometas brilhantes, perfeitamente visíveis em um hemisfério, podem estar completamente imersos na luz do crepúsculo no hemisfério oposto.

A alternativa menos técnica e mais amigável para localizar cometas e outros corpos do Sistema Solar é utilizar o planetário virtual Stellarium, simulando o céu para a posição do observador no período de interesse.

A Fig. 163 simula a posição do cometa C/2025 R3 (PANSTARRS), no período de 1º a 11 de maio de 2026 para um observador na latitude da cidade de São José dos Campos (SP). Na imagem simulada, cada ponto representa uma posição do cometa em maio de 2026, iniciando no dia 1º (na posição mais baixa) e encerrando no dia 11 (na posição mais alta). Nestas condições, o cometa permanece visível por pouco tempo antes de se por. É uma observação desafiadora, devido à pequena elevação do cometa e ao céu ainda não completamente escuro[106].

Com o deslocamento diário para o leste, o cometa se afasta do Sol e aparece mais alto sobre o horizonte no poente, melhorando as condições de observação. Embora seu brilho diminua, o contraste contra o fundo do céu aumenta, tornando mais fáceis a observação visual e a captura de imagens.

[106] A noite escura começa após o crepúsculo astronômico, com o Sol 18° abaixo do horizonte.

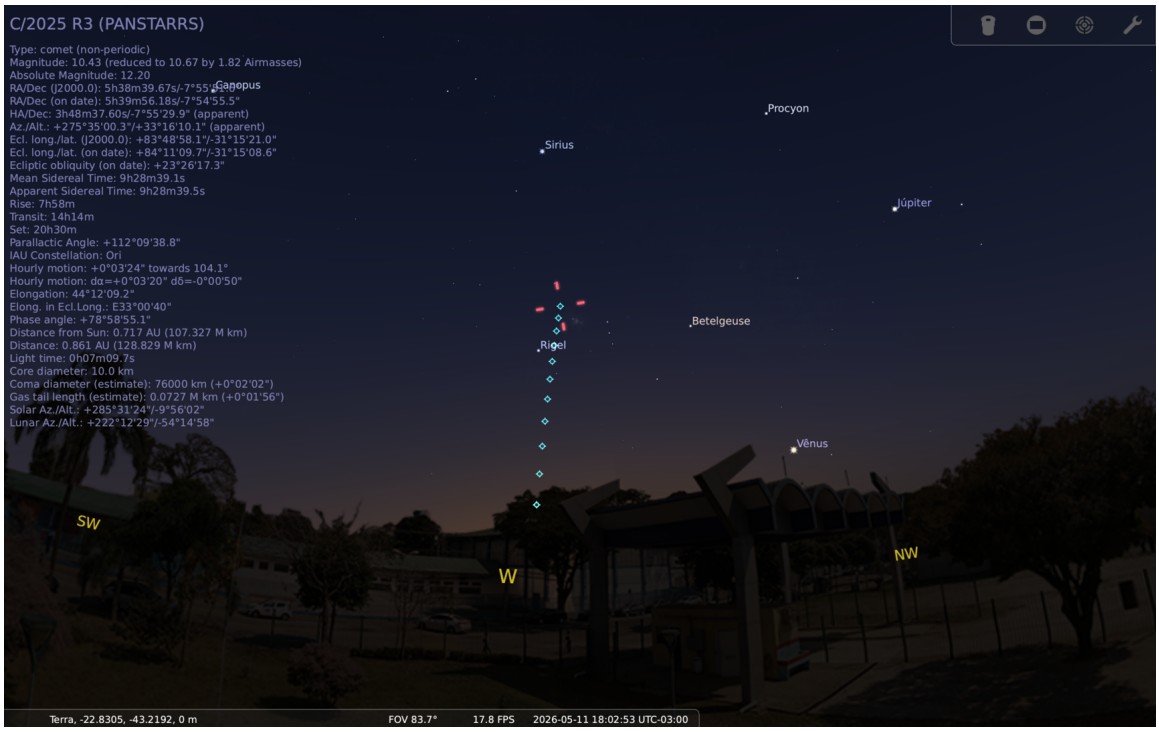


Fig. 163. Deslocamento diário do cometa C/2025 R3 (PANSTARRS) entre os dias 1º e 11 de maio de 2026, simulado para a latitude de São José dos Campos (SP) no aplicativo Stellarium (v 0.22.2).

O deslocamento dos cometas em relação às estrelas é imperceptível a olho nu, mesmo no periélio, quando sua velocidade orbital é maior. No entanto, esse movimento é evidente em imagens de longa exposição. O empilhamento de uma sequência de imagens guiadas, centradas no cometa, mostra as estrelas como sequências de pontos ou como linhas, enquanto o cometa aparece bem resolvido no centro. Na Fig. 164 vemos 10 imagens do cometa 3I/ATLAS, cada uma com 120 s de tempo de exposição, empilhadas. As imagens foram capturadas com um telescópio robótico de 61 cm de diâmetro, rastreando o movimento do cometa. O resultado é uma imagem bem resolvida do cometa, mostrando claramente a coma como uma região difusa em torno do núcleo, enquanto as estrelas aparecem como uma sequência de pontos alinhados na direção do movimento do cometa.

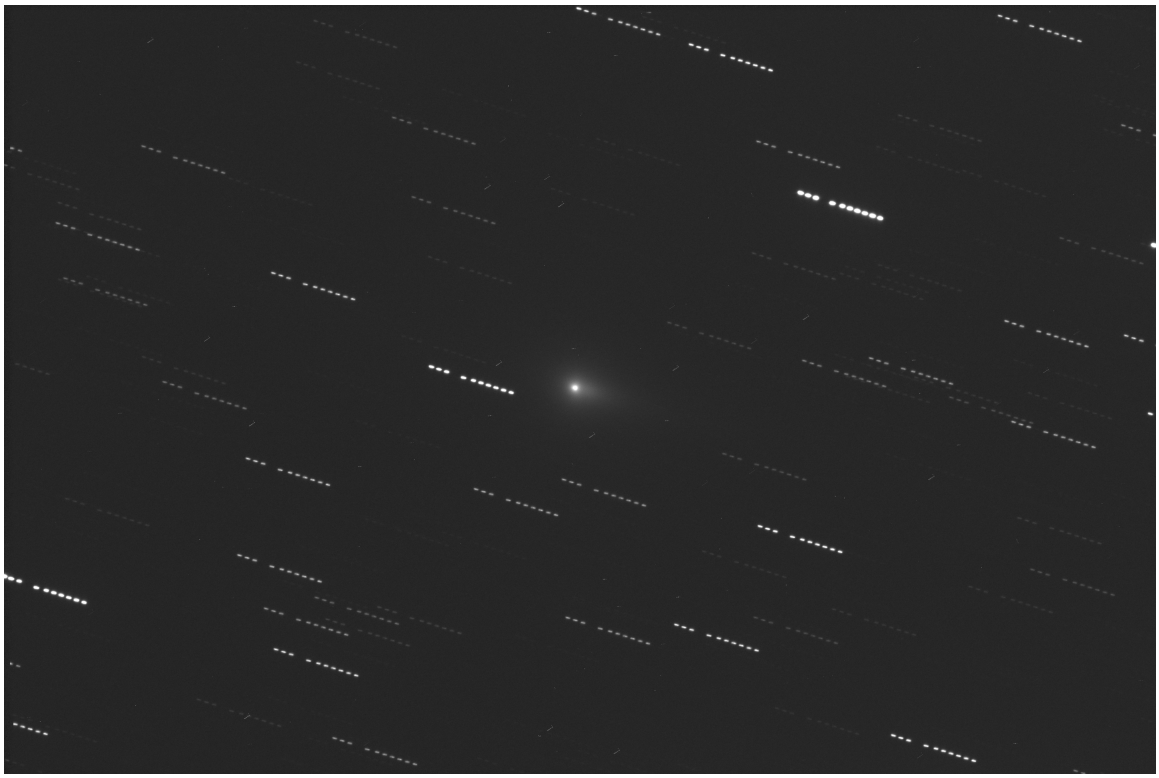


Fig. 164. Cometa 3I/ATLAS em sua máxima aproximação com a Terra, em 19 de dezembro de 2025. Empilhamento de 10 imagens de 120 s totalizando 1200 segundos de exposição, com telescópio robótico de 61 cm de abertura. Durante as exposições, o telescópio seguiu o deslocamento do cometa, que permanece centralizado na imagem enquanto cada estrela aparece como uma sequência de pontos. Imagem/Processamento: Wandeclayt M.

Para dados mais precisos de posição ou para a geração de tabelas que podem ser utilizadas por ferramentas computacionais, é possível consultar as efemérides (a tabela com os dados de posição do objeto) e os elementos orbitais de cometas, asteroides e outros corpos do Sistema Solar em serviços online como o Minor Planet & Comet Ephemeris Service, do Minor Planet Center (MPC), acessível em https://www.minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html ou a plataforma *Horizons* do grupo Solar System Dynamics (SSD) do JPL, acessível em em https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html. Esses dados são constantemente atualizados, incorporando objetos recém descobertos e novas observações de objetos conhecidos.

O serviço Horizons pode ser acessado manualmente através de um navegador web ou através de rotinas automatizadas por software. Na versão web interativa (Fig. 165) selecionamos manualmente o objeto de interesse (*Target Body*), a posição do observador e a janela temporal da observação, além dos campos da tabela a serem fornecidos.

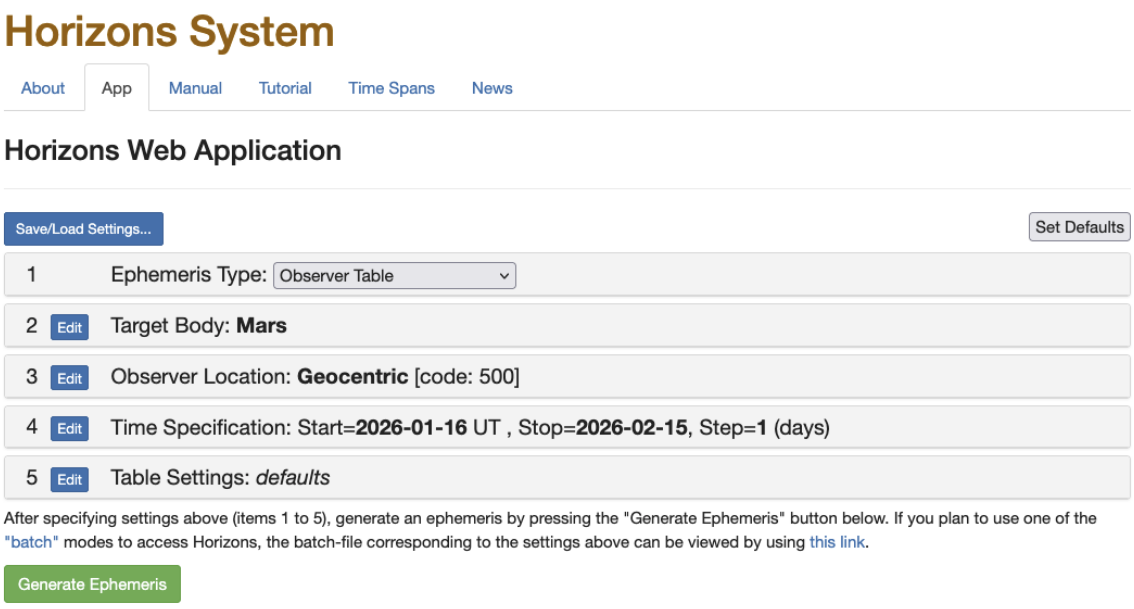


Fig. 165. Interface web interativa do sistema Horizons.

A tabela abaixo é um exemplo simplificado das efemérides fornecidas pelo sistema Horizons para o cometa C/2025 R3 (PANSTARRS) no período de 20 a 30 de abril de 2026, com as coordenadas (R.A. e DEC) e o ângulo de separação, em graus, entre o objeto alvo e o Sol (S-O-T):

```
*****************************************************
 Date__(UT)__HR:MN     R.A._____(ICRF)_____DEC     S-O-T /r
*****************************************************
$$SOE
2026-Apr-20 00:00     00 29 44.61 +16 23 28.6   20.1170 /L
2026-Apr-21 00:00     00 44 57.31 +15 30 07.4   17.1421 /L
2026-Apr-22 00:00     01 01 38.39 +14 26 47.4   13.8033 /L
2026-Apr-23 00:00     01 19 40.56 +13 13 02.7   10.1659 /L
2026-Apr-24 00:00     01 38 50.34 +11 49 10.8    6.4412 /L
2026-Apr-25 00:00     01 58 48.21 +10 16 24.7    3.6538 /L
2026-Apr-26 00:00     02 19 09.94 +08 36 55.0    4.9871 /T
2026-Apr-27 00:00     02 39 29.04 +06 53 38.8    8.8414 /T
2026-Apr-28 00:00     02 59 19.88 +05 09 55.2   13.0760 /T
2026-Apr-29 00:00     03 18 20.43 +03 28 55.1   17.2382 /T
2026-Apr-30 00:00     03 36 14.15 +01 53 16.3   21.1663 /T
$$EOE
*****************************************************
```

As coordenadas permitem plotar a posição do objeto em cartas celestes ou alimentar

diretamente os sistemas de apontamento automático (GO-TO) de telescópios com montagens computadorizadas. Outras colunas podem ser adicionadas à tabela com dados como distância heliocêntrica, elevação e azimute para a posição do observador (caso o código do observatório ou as coordenadas sejam informadas) presença do Sol ou da Lua acima do horizonte e código da constelação onde o objeto se encontre [107].

[107] Um tutorial detalhado pode ser encontrado em https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/tutorial.html

7.2 Órbitas

Na seção 6.1 vimos que, de acordo com as Leis de Kepler, as órbitas planetárias são necessariamente elipses com o Sol em um dos focos. Cometas periódicos, aqueles com órbitas fechadas e que retornam regularmente às próximidades do Sol, seguem órbitas elípticas keplerianas, mas essas não são as únicas órbitas possíveis para os cometas. Esses pequenos corpos podem descrever trajetórias parabólicas ou hiperbólicas, abertas e não periódicas, passando uma única vez pelo Sistema Solar interior e não mais retornando.

Diferente das órbitas planetárias, que estão aproximadamente no mesmo plano da órbita terrestre, as órbitas cometárias podem apresentar inclinações que divergem significativamente do plano da eclíptica. A Fig. 166 mostra a órbita do cometa C/2025 A6 (Lemmon), com inclinação $i = 143,66°$ em relação ao plano da eclíptica e o cometa periódico 1P/Halley com inclinação $i = 162,19°$. Uma inclinação superior a 90° indica que a órbita descrita pelo objeto é retrógrada, ou seja, no sentido contrário ao da órbita dos planetas.

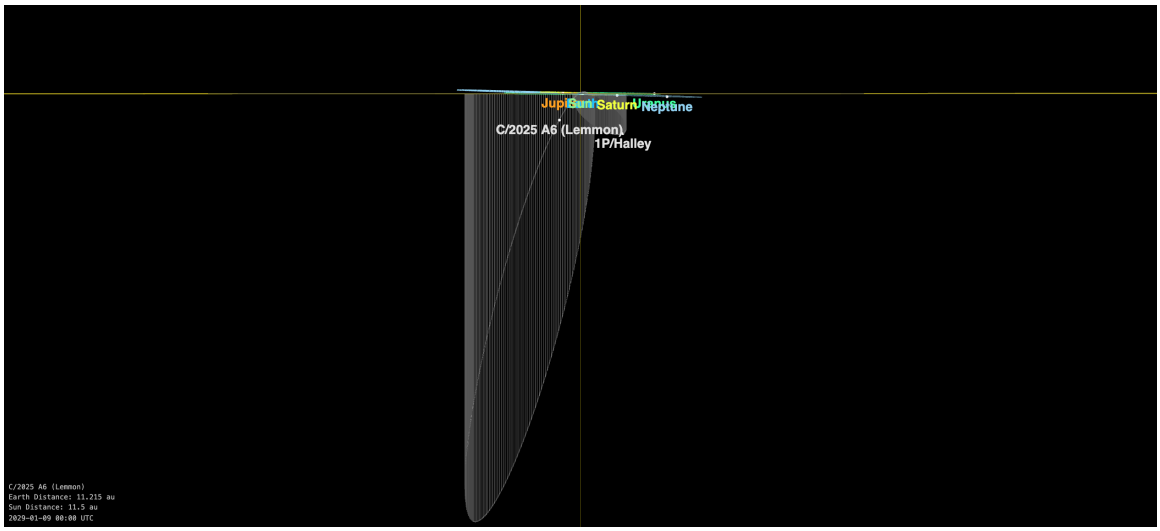


Fig. 166. Visualização das órbitas dos cometas C/2025 A6 (Lemmon) e 1P/Halley gerada no aplicativo *Orbit Viewer* do portal Solar System Dynamics (SSD) do Jet Propulsion Laboratory (JPL). Todos os planetas, e muitos cometas, orbitam o Sol aproximadamente no plano da eclíptica, mas há cometas como o C/2025 A6 e o 1P/Halley que seguem órbitas com grandes inclinações.

Um gráfico da inclinação orbital em função do semieixo maior (a distância média do cometa ao Sol) da órbita dos cometas conhecidos é mostrado na Fig. 167. Há uma notável concentração de órbitas com baixa inclinação ($i \leq 40°$) para cometas de curto período ($a \leq 10$ UA), no entanto, para cometas de longo período há uma grande dispersão nos valores de inclinação, com valores distribuídos isotropicamente entre 0° e 180°.

Esse fluxo isotrópico[108] de cometas de longo período, com órbitas de alta excentricidade levou o astrônomo holandês Jan Hendrik Oort, a propor em 1950 a existência de um

[108] Esses cometas parecem vir de qualquer direção do céu, não estando confinados ao plano da eclíptica.

envelope esférico envolvendo o Sistema Solar, abrigando estes objetos até que perturbações gravitacionais os enviem em direção às regiões mais internas do Sistema Solar [86].

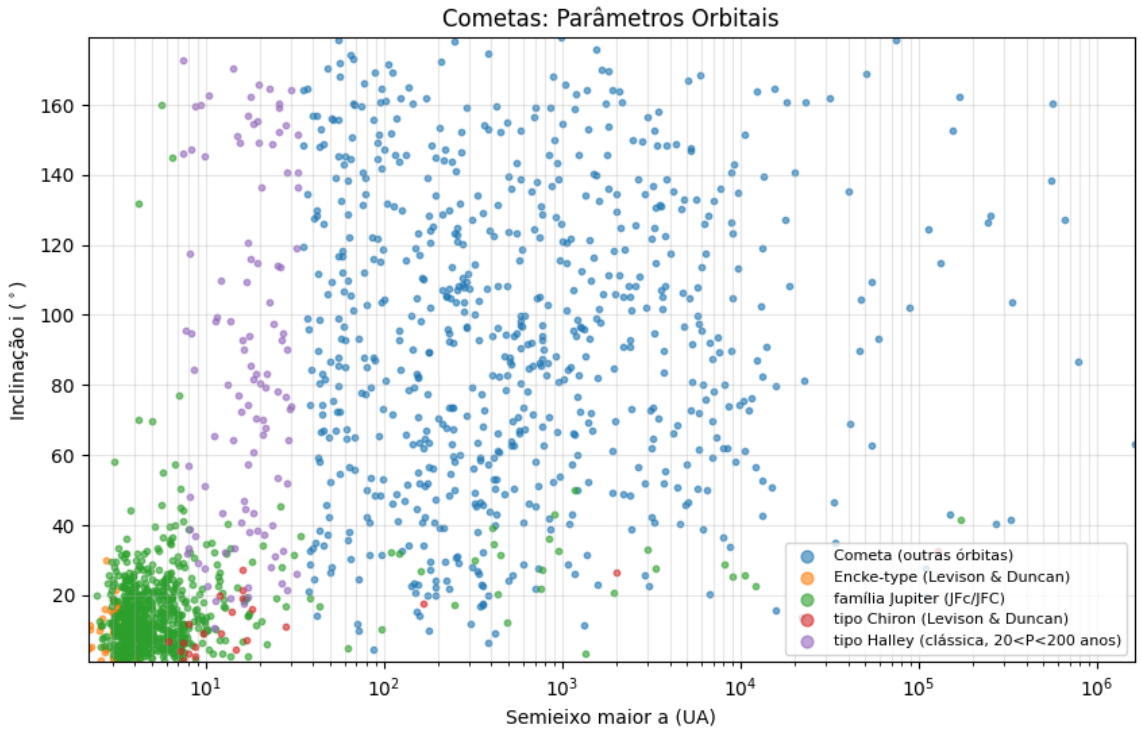


Fig. 167. Inclinação da órbita dos cometas em função do semieixo maior (a distância média ao Sol). Há uma distribuição isotrópica na inclinação da órbita dos cometas de longo período, sugerindo a existência de um repositório de núcleos de cometas na forma de uma casca esférica envolvendo o Sistema Solar. **Gráfico**: Wandeclayt M. com dados do SBDB.

Tabela 21. Classes de órbitas de cometas (PDS-SBN)

Abrev.	Título	Descrição
COM	Cometa	Órbita de cometa que não se encaixa em nenhuma classe definida.
CTc	Cometa do tipo Quíron	(Levison & Duncan): $T_J > 3$; $a > a_J$.
ETc	Cometa do tipo Encke	(Levison & Duncan): $T_J > 3$; $a < a_J$.
HTC*	Cometa do tipo Halley*	Definição clássica: 20 anos $< P <$ 200 anos.
HYP	Cometa hiperbólico	Cometas em órbitas hiperbólicas ($e > 1{,}0$).
JFc	Cometa da família de Júpiter	(Levison & Duncan): $2 < T_J < 3$.
JFC*	Cometa da família de Júpiter*	Definição clássica: $P <$ 20 anos.
PAR	Cometa parabólico	Cometas em órbitas parabólicas ($e = 1{,}0$).

Fonte: PDS Small Bodies Node, *Object Classification*.
Nota: a=semieixo maior; P=período; e=excentricidade; a_J=semieixo maior de Júpiter; T_J=parâmetro de Tisserand em relação a Júpiter. *Classes marcadas como "clássicas" na tabela original.

Tabela 22. Elementos orbitais (Small-Body DataBase (SBDB))

Abrev.	Parâmetro	Descrição
q	Distância no periélio	
Q	Distância no afélio	
i	Inclinação	
a	Semieixo maior	
e	Excentricidade	
ω	Argumento do periélio	
Ω	Longitude do nodo ascendente	
Tp	Tempo da passagem pelo periélio	

Fonte: PDS Small Bodies Node, *Object Classification*.

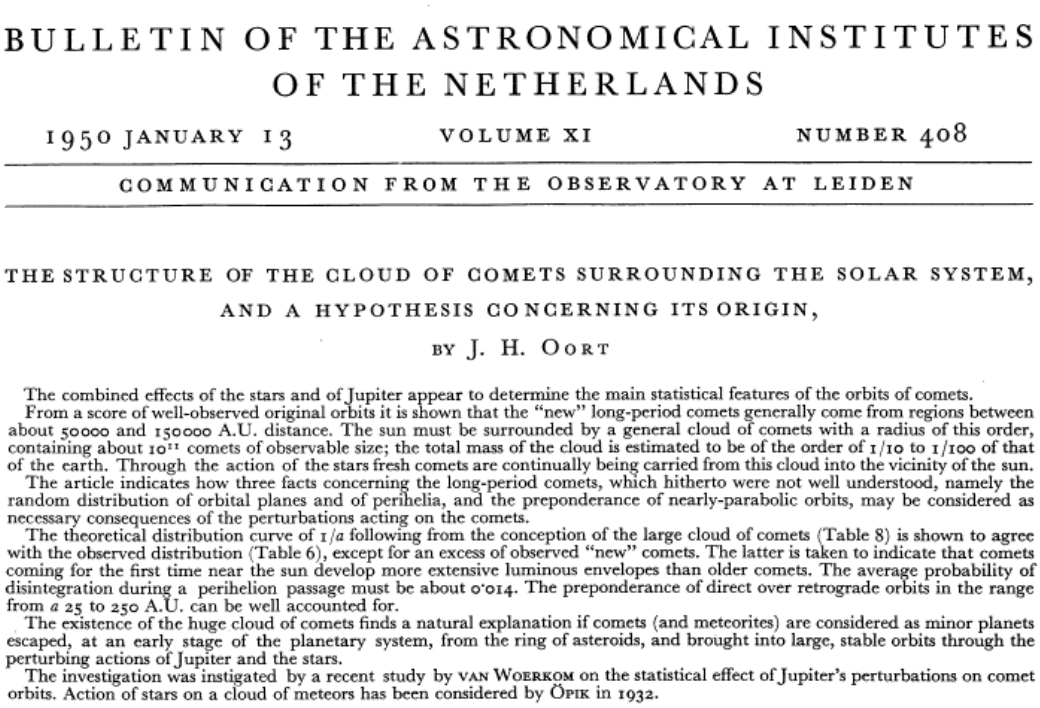
7.3 Cometas rasantes

Classificando as órbitas planetárias de menor distância periélica, surgem agrupamentos em torno de certos parâmetros orbitais que sugerem uma origem comum, com a fragmentação de um corpo progenitor. As famílias Kreutz, Meyer, Kracht e Marsden correspondem a grupos de cometas com órbitas similares [87].

Tabela 23. Grupos de cometas rasantes e *near-Sun* observados pelo SOHO: parâmetros típicos ou médios

Grupo	q ($\mathbf{R}_\odot$)	e	i (°)	ω (°)	Ω (°)	**Período**
Kreutz	1,20	$> 0{,}9999$	143,2	80,0	0,4	500–1000 a
Meyer	7,74	$\sim 1{,}0$	72,6	57,4	73,1	desconhecido
Marsden	10,32	0,984	26,5	24,2	79,0	5,30–6,10 a
Kracht	9,68	0,984	13,4	58,8	43,8	4,81–5,81 a

Nota: q é a distância de periélio, e é a excentricidade orbital, i é a inclinação, ω é o argumento do periélio e Ω é a longitude do nodo ascendente.
Fonte: Battams, K.; Knight, M. M. et al. *SOHO comets: 20 years and 3000 objects later*.



BULLETIN OF THE ASTRONOMICAL INSTITUTES OF THE NETHERLANDS

1950 JANUARY 13 VOLUME XI NUMBER 408

COMMUNICATION FROM THE OBSERVATORY AT LEIDEN

THE STRUCTURE OF THE CLOUD OF COMETS SURROUNDING THE SOLAR SYSTEM, AND A HYPOTHESIS CONCERNING ITS ORIGIN,

BY J. H. OORT

The combined effects of the stars and of Jupiter appear to determine the main statistical features of the orbits of comets.
From a score of well-observed original orbits it is shown that the "new" long-period comets generally come from regions between about 50000 and 150000 A.U. distance. The sun must be surrounded by a general cloud of comets with a radius of this order, containing about 10^{11} comets of observable size; the total mass of the cloud is estimated to be of the order of 1/10 to 1/100 of that of the earth. Through the action of the stars fresh comets are continually being carried from this cloud into the vicinity of the sun.
The article indicates how three facts concerning the long-period comets, which hitherto were not well understood, namely the random distribution of orbital planes and of perihelia, and the preponderance of nearly-parabolic orbits, may be considered as necessary consequences of the perturbations acting on the comets.
The theoretical distribution curve of $1/a$ following from the conception of the large cloud of comets (Table 8) is shown to agree with the observed distribution (Table 6), except for an excess of observed "new" comets. The latter is taken to indicate that comets coming for the first time near the sun develop more extensive luminous envelopes than older comets. The average probability of disintegration during a perihelion passage must be about 0·014. The preponderance of direct over retrograde orbits in the range from a 25 to 250 A.U. can be well accounted for.
The existence of the huge cloud of comets finds a natural explanation if comets (and meteorites) are considered as minor planets escaped, at an early stage of the planetary system, from the ring of asteroids, and brought into large, stable orbits through the perturbing actions of Jupiter and the stars.
The investigation was instigated by a recent study by VAN WOERKOM on the statistical effect of Jupiter's perturbations on comet orbits. Action of stars on a cloud of meteors has been considered by ÖPIK in 1932.

Fig. 168. Enter Caption

7.4 Nomenclatura

O formato atual de designação de cometas sob responsabilidade do Minor Planet Center (MPC) da União Astronômica Internacional (IAU), resume as informações sobre a natureza do objeto e sobre a ocasião do descobrimento. A estrutura geral do formato é

[**P/C/D/X/A**]/*YYYY* **Q***N* (Nome do Descobridor).

A designação inicia com um prefixo (Tab. 24) que caracteriza a órbita ou sinaliza a desintegração do cometa. O prefixo **A** pode ser usado para objetos confirmados como asteroides (sem atividade cometária). Após o prefixo, separados por uma barra, quatro dígitos representam o ano do descobrimento.

Tabela 24. Designação de Cometas

Prefixo	**Descrição**
P	Cometa periódico (P< 200 anos).
C	Cometa não periódico.
D	Cometa extinto.
X	Objeto com órbita não caracterizada.
A	Objeto sem atividade cometária (asteroide).

Fonte: https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/CometResolution.html

Letra	Datas	Letra	Datas
A	Jan. 1-15	B	Jan. 16-31
C	Fev. 1-15	D	Fev. 16-29
E	Mar. 1-15	F	Mar. 16-31
G	Abr. 1-15	H	Abr. 16-30
J	Mai 1-15	K	Mai 16-31
L	Jun 1-15	M	Jun 16-30
N	Jul 1-15	O	Jul 16-31
P	Ago. 1-15	Q	Ago. 16-31
R	Set. 1-15	S	Set. 16-30
T	Out. 1-15	U	Out. 16-31
V	Nov. 1-15	W	Nov. 16-30
X	Dez. 1-15	Y	Dez. 16-31

I é suprimido e Z não chega a ser usado.

No grupo de caracteres seguinte, uma letra indica a quinzena do ano em que ocorreu a descoberta, seguido de um número que indica a ordem da descoberta naquela quinzena. A designação A3, por exemplo, corresponde ao terceiro objeto descoberto na primeira quinzena do ano.

Por fim, acrescenta-se o nome do descobridor, que pode ser um ou mais observadores individuais ou um projeto de observação ou *survey*[109].

Assim, o cometa C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) é o terceiro objeto descoberto na primeira quinzena de 2023, em observações independentes realizadas pelo observatório Tsuchinshan, na China, e pelo observatório de Sutherland, na África do Sul, utilizando telescópio integrante do programa Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System (ATLAS).

7.5 O cometa interestelar 3I/ATLAS

The physics of cometary antitails as observed in 3I/ATLAS

Hubble Space Telescope Observations of the Interstellar Interloper 3I/ATLAS

A Physical Model for the Ice Coma of 3I/ATLAS

[109] Um *survey*, ou levantamento, é um projeto de varredura sistemática do céu.

7.6 Chuvas de Meteoros

Além de formar a cauda, a poeira liberada pela sublimação do núcleo cometário dá origem a uma corrente de partículas, chamadas meteoroides, que segue uma órbita similar à do cometa. Se a órbita da Terra interceptar a trajetória dessas partículas podemos ter a ocorrência de uma chuva de meteoros [88].

Meteoros são um fenômeno luminoso observado quando partículas sólidas entram em alta velocidade na atmosfera terrestre e tornam-se incandescentes devido ao calor gerado pelo atrito. Durante uma chuva de meteoros de origem cometária, observamos partículas com trajetórias paralelas, parecendo irradiar de um ponto fixo no céu chamado radiante da chuva.

As chuvas anuais de meteoros são nomeadas de acordo com a posição do radiante. Assim, os *Geminídeos* são uma chuva com metoros que parecem irradiar de um ponto na direção da constelação de Gêmeos (Gem).

Alguns desses eventos podem apresentar taxas de mais de uma centena de meteoros visíveis por hora, quando observados de condições ideiais (céu escuro, longe da poluição luminosa, sem interferência do brilho da Lua e com visão ampla do céu, com o radiante posicionado no zênite do observador).

Tabela 25. Chuvas anuais de meteoros e corpos associados

Chuva	**Corpo associado**	**Período de atividade segundo a IMO**
Perseídeos	109P/Swift-Tuttle	17 jul.–24 ago.
Leonídeos	55P/Tempel-Tuttle	6 nov.–30 nov.
Orionídeos	1P/Halley	2 out.–7 nov.
Eta Aquarídeos	1P/Halley	19 abr.–28 maio.
Andromedídeos	3D/Biela	Atividade fraca e irregular, observada por radar entre nov.-dez. [89]
Geminídeos	3200 Phaethon	4 dez.–20 dez.
Lirídeos	C/1861 G1 (Thatcher)	14 abr.–30 abr.

Fonte: Elaborado pelo autor, com datas de atividade da International Meteor Organization (IMO), *Meteor Shower Calendar 2026*.

7.7 Asteroides e NEOs

Tabela 26. Classes de órbitas de asteroides (PDS-SBN)

Abrev.	Título	Descrição
AMO	Amor	NEO tipo 1221 Amor: $a > 1{,}0$ UA; $1{,}017$ UA $< q < 1{,}3$ UA.
APO	Apollo	NEO que cruza a órbita da Terra: $a > 1{,}0$ UA; $q < 1{,}017$ UA.
AST	Asteroide	Órbita de asteroide que não se encaixa em nenhuma classe definida.
ATE	Aten	NEO tipo 2062 Aten: $a < 1{,}0$ UA; $Q > 0{,}983$ UA.
CEN	Centauro	Objetos com órbitas entre Júpiter e Netuno: $5{,}5$ UA $< a <$ $30{,}1$ UA.
HYA	Asteroide hiperbólico	Asteroides em órbitas hiperbólicas ($e > 1{,}0$).
IEO	Objeto interior à Terra	Órbita inteiramente dentro da órbita da Terra: $Q < 0{,}983$ UA.
IMB	Cinturão principal interno	$a < 2{,}0$ UA; $q > 1{,}666$ UA.
MBA	Cinturão principal	$2{,}0$ UA $< a < 3{,}2$ UA; $q > 1{,}666$ UA.
MCA	Cruzador de Marte	Cruza a órbita de Marte: $1{,}3$ UA $< q < 1{,}666$ UA; $a < 3{,}2$ UA.
OMB	Cinturão principal externo	$3{,}2$ UA $< a < 4{,}6$ UA.
PAA	Asteroide parabólico	Asteroides em órbitas parabólicas ($e = 1{,}0$).
TJN	Troiano de Júpiter	Presos em L4/L5 de Júpiter: $4{,}6$ UA $< a < 5{,}5$ UA; $e < 0{,}3$.
TNO	Objeto transnetuniano	Objetos com órbitas além de Netuno: $a > 30{,}1$ UA.

Fonte: PDS Small Bodies Node, *Object Classification*.
Nota: a=semieixo maior; q=periélio; Q=afélio; e=excentricidade; UA = unidade astronômica.

8. Estrelas

Além de suas aplicações práticas na navegação e na contagem do tempo, o conhecimento do céu também integra o patrimônio cultural de praticamente todos os grupos humanos ao longo da história. O céu e as estrelas inspiram os mitos, a poesia, as artes visuais, a filosofia e a ciência, e são elementos presentes em pinturas rupestres, na tradição oral e nos escritos das diversas mitologias.

O mesmo céu estrelado representado na arte rupestre nas ravinas do Lajedo de Soledade, em Apodi, no Rio Grande Norte, ou por Van Gogh (1853-1890) na Holanda do Séc. XIX, inspira nossa curiosidade através das oculares dos telescópios.

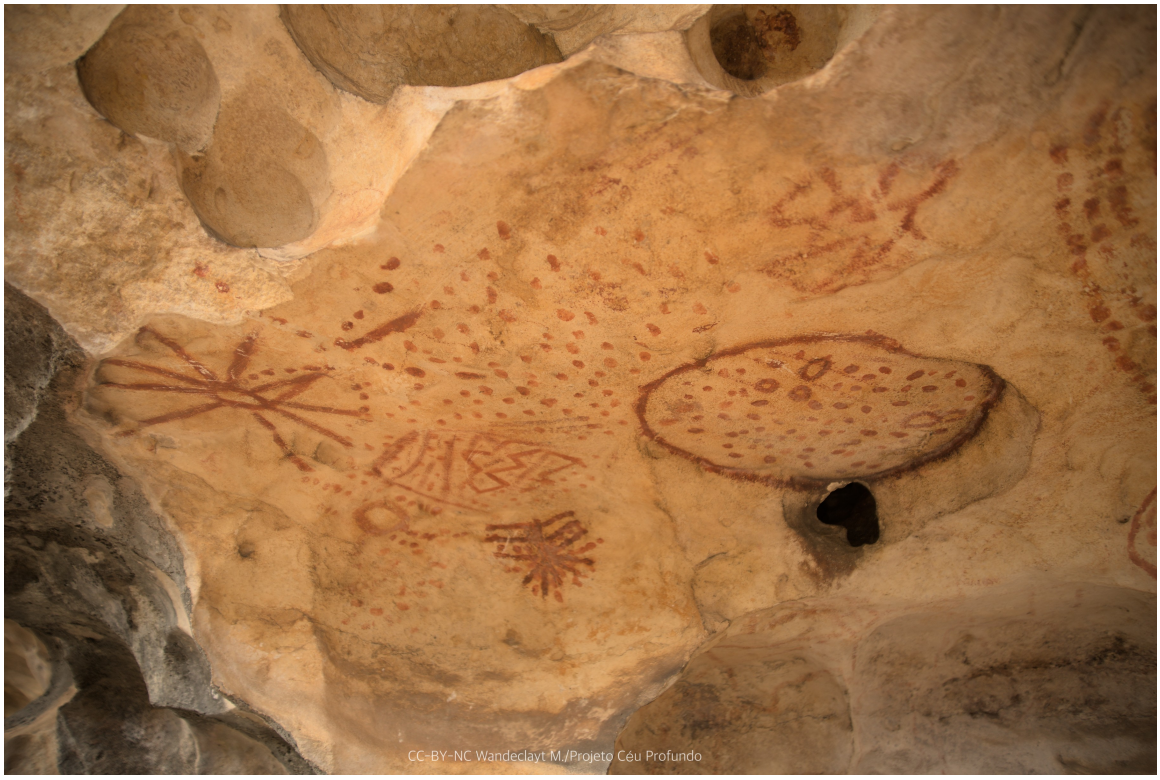


Fig. 169. Possível representação de um céu estrelado em pintura rupestre no sítio arqueológico do Lajedo de Soledade, em Apodi, no Rio Grande do Norte. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo

No entanto, para a surpresa e frustração de muitos, a observação visual de estrelas individuais no telescópio não difere significativamente do que se pode ver a olho nu.

A introdução do telescópio na observação das estrelas trouxe, certamente, um grande ganho na determinação de posições e na medição de brilho e permitiu resolver sistemas de estrelas duplas ou múltiplas (que aparecem, a olho nu, como uma única estrela ou como um objeto de aspecto nebuloso), mas a imagem de cada estrela individual continua se apresentando como um ponto.

Mas, se telescópios não ampliam a imagem das estrelas, que propriedades estelares são observadas (e medidas) através dos instrumentos?

Já no Séc. XX, quando uma geração de grandes telescópios começava a entrar em operação e expandir as fronteiras observacionais, mas ainda num período anterior ao conhecimento da estrutura e evolução estelar, em 1914, o astrônomo britânico Sir. Arthur S. Eddington (1882-1944), no livro *Stellar Movements and the Structure of the Universe* [90], lista as propriedades observáveis no estudo das estrelas:

1. Posição aparente no céu;
2. Magnitude;
3. Tipo espectral, ou cor;
4. Paralaxe;
5. Movimento próprio;
6. Velocidade radial.

Posição, paralaxe, movimento próprio e velocidade radial são os objetos de estudo da Astrometria, enquanto a Fotometria e a Espectroscopia se ocupam da determinação do fluxo luminoso (magnitude) e da cor. A partir dessas propriedades observáveis diretamente, outros parâmetros, como distância, temperatura, massa e densidade das estrelas podem ser estimados, por métodos indiretos.

8.1 Distâncias Estelares

Embora atualmente missões como a do telescópio espacial Gaia, lançado e operado pela Agência Espacial Europeia (ESA), tenham realizado medições de aproximadamente dois bilhões de objetos celestes, gerando dados que permitem determinar suas distâncias com precisão inédita, a medição de distâncias estelares representou um desafio intransponível durante milênios.

Na Fig. 170 identificamos as estrelas α, β, γ, δ e ε Crucis. As 5 mais brilhantes da constelação do Cruzeiro do Sul. Apesar de seu aparente agrupamento no céu, este arranjo está distribuído ao longo de uma gama vasta de distâncias. Com a mais próxima de nós localizada a aproximadamente 88 anos-luz e a mais distante, a mais de 450 anos-luz. Medir essas distâncias, no entanto, é uma tarefa desafiadora e em grande medida dependente da tecnologia observacional disponível.



Fig. 170. Região em torno da constelação do Cruzeiro do Sul, com suas estrelas mais brilhantes identificadas. Créditos: Wandeclayt Melo/Projeto Céu Profundo.

8.2 Paralaxe

O método geométrico necessário para medir indiretamente as distâncias até as estrelas mais próximas é conceitualmente simples e está representado no diagrama da Fig. 171. Observamos uma estrela a partir de uma posição da órbita terrestre e registramos sua posição. Seis meses depois, a Terra estará numa posição diametralmente oposta em sua órbita e, portanto, a aproximadamente 300 milhões de quilômetros distante da posição anterior. Fazemos uma nova observação e registramos o deslocamento aparente sofrido pela estrela, devido à mudança do ponto de vista de nossa observação. Chamamos esse deslocamento aparente de "paralaxe" e ele vai variar com a distância da estrela.



Fig. 171. Efeito de paralaxe estelar.

A paralaxe estelar é, portanto, o ângulo correspondente a 1 Unidade Astronômica na distância da estrela observada. Estrelas mais próximas apresentarão uma paralaxe maior. Estrelas mais distantes, uma paralaxe menor.

Você pode testar esse método olhando para o seu dedo indicador, com o braço esticado, alternadamente com cada um dos olhos. Você vai perceber que o dedo vai parecer se deslocar à medida que você troca de olho ao observá-lo. Aproxime o dedo um pouco mais do rosto. O deslocamento vai parecer maior.

Mas, se o método é assim tão simples, por que Hiparco e Tycho não poderiam medir a distância até as estrelas mais próximas? Aí aparecem dois problemas: O primeiro deles é que a distância até as estrelas é muito maior do que qualquer pensador da antiguidade, ou mesmo do Renascimento, se arriscou a estimar, e a paralaxe estelar é muito pequena. E o segundo é que imperava o modelo geocêntrico do Universo, que acabava sendo reforçado pela falha na detecção da paralaxe estelar, afinal, se não há paralaxe, a Terra deveria estar mesmo imóvel e ser o centro do Universo!

A largada da corrida para medir a paralaxe estelar só é dada com o triunfo do heliocentrismo e com a compreensão do movimento orbital da Terra, graças inicialmente às leis do movimento planetário enunciadas por Kepler e, em seguida, à gravidade de Newton. A partir do momento em que tínhamos certeza de que a Terra orbitava o Sol, necessariamente deveria haver alguma paralaxe a ser medida, ainda que muito pequena.

Mas quanto é uma paralaxe "muito pequena"?

Vamos introduzir mais alguns conceitos para deixar isso mais claro. Na Astrometria usamos medidas angulares para falar da posição ou da separação entre objetos na esfera celeste ou do diâmetro aparente desses objetos.

Um círculo é tradicionalmente dividido em 360 partes iguais chamadas de graus (°). A separação entre o horizonte e o zênite (o ponto no céu que fica acima da sua cabeça) é de 1/4 de círculo ou de 90º. O Sol e a Lua representam no céu um diâmetro de 0,5°.

Essa divisão do círculo em 360 graus é uma herança do sistema de numeração sexagesimal da Babilônia e remonta a mais de 2000 anos antes de Cristo. Nesse sistema, cada grau é dividido em 60 partes chamadas "minutos de arco" (ou 60') e cada minuto de arco é dividido em 60 segundos de arco (ou 60"). Ou seja, 1º equivale a 3600".

A paralaxe é, portanto, uma medida angular e há, inclusive, uma unidade de distância definida a partir da paralaxe, o ***parsec***.

A distância em parsecs pode ser calculada de maneira direta, a partir da paralaxe ϖ medida (em segundos de arco), usando a Eq. 7:

$$\mathrm{dist(pc)} = \frac{1}{\varpi}. \tag{7}$$

Um parsec é a distância na qual um objeto exibe uma paralaxe de 1 segundo de arco, e equivale a 3,26 anos-luz.

Aí está o grande desafio! Como nenhuma estrela, além do Sol, está localizada a menos de um parsec, a paralaxe a ser medida é menor que 1 segundo de arco, ou mais de 3600 vezes menor do que 1°. É então comum usar o submúltiplo milissegundo de arco (*mas*) para as medidas de paralaxe e determinar as distâncias através da Eq. 8:

$$\mathrm{dist(pc)} = \frac{1000}{\varpi\,\mathrm{(mas)}}. \tag{8}$$

Michael Perryman em *The History of Astrometry*[91] aponta que Tycho Brahe alcançou uma resolução de 20 segundos de arco em suas melhores observações, bem longe da resolução necessária para medir a paralaxe estelar.

No Séc. XVIII, os irmãos William e Caroline Herschel realizaram grandes descobertas com telescópios de dimensões nada modestas (seu maior telescópio tinha 12 metros de distância focal). Entre as contribuições dos irmãos Herschel para a Astronomia estão a descoberta de Urano e duas de suas luas, de duas luas de Saturno e a detecção do movimento orbital em estrelas binárias. William tinha consciência de que a paralaxe a ser medida seria muito pequena e escreveu em seu artigo *On the parallax of the fixed stars* de 1782, no Philosophical Transactions of the Royal Society [23]:

'Suponhamos agora que a paralaxe das estrelas fixas não atinja um segundo [de arco], ainda assim o caso não é desesperador; e embora a dificuldade de medir segundos [de arco] dê ideia dos extraordinários aumentos e nitidez do telescópio e da exatidão do micrômetro requeridos para medir terços[110] *[de arco], isso não deve de modo algum nos desencorajar de tentar."*[111]

Mas eles falharam na detecção da paralaxe estelar. Não por limitações instrumentais, mas por não terem selecionado estrelas próximas o suficiente para exibir uma paralaxe mensurável. Uma melhor seleção de estrelas candidatas a exibir uma maior paralaxe (e portanto estarem mais próximas) surge a partir de critérios sugeridos pelo astrônomo Wilhelm Struve (1793-1864) na primeira metade do século XIX: estrelas brilhantes, com grande movimento próprio [112] e, no caso de estrelas binárias, estrelas que estejam bem separadas, a julgar por seu movimento orbital[91].

Foi na década de 1830 que as primeiras medidas confiáveis de paralaxe foram finalmente publicadas. Struve anunciou uma paralaxe de 1/8 de segundo de arco para Vega (a alfa de Lira) e Friedrich Bessel encontrou uma paralaxe de 0,314 segundos de arco para a estrela 61 Cygni. Trabalhos seguidos pela determinação da paralaxe de Alfa Centauri, por Thomas Henderson em 1839.

Embora Alfa Centauri faça parte do sistema estelar mais próximo do Sistema Solar, ela está fora do alcance de observadores nas latitudes da Europa (consequências de uma Terra esférica) e foi observada por Henderson em uma campanha no Cabo da Boa Esperança.

Nos anos seguintes a Astrometria seguiu avançando e mapas cobrindo ambos os hemisférios celestes foram produzidos, incorporando dados cada vez mais precisos de coordenadas celestes, movimento próprio e distância, até que a própria atmosfera terrestre tornou-se o principal limitante para o que poderia ser medido com telescópios instalados na superfície.

O novo salto de qualidade vem com a proposta apresentada em 1967 pelo francês Pierre Lacroute [92]: um telescópio dedicado a astrometria e fotometria em órbita da Terra, acima da atmosfera, onde poderia catalogar estrelas muito menos brilhantes e atingir precisão sem precedentes nas medidas astrométricas, além de cobrir inteiramente ambos os hemisférios celestes (outra restrição encontrada pelos telescópios na superfície é a impossibilidade de observar todo o céu).

A ideia culminou no lançamento do satélite Hipparcos (Fig. 172) (**HI**gh **P**recision **PAR**allax **CO**llecting **S**atellite), pela Agência Espacial Europeia (ESA) em 1989. O satélite coletou dados até 1993, dando origem inicialmente ao catálogo Hipparcos, com quase 120

[110] O terço de arco equivale a 1/60 do segundo de arco. Não é uma subunidade usual de medida de ângulos. Em vez disso, utilizamos milissegundos de arco.

[111] *" Let us now suppose that the parallax of the fixed stars does not amount to a single second, yet still the case is by no means desperate; and though the difficulty of measuring seconds will soon suggest to us what extraordinary powers and distinctness of the telescope, and accuracy of the micrometer, are required to measure thirds, this ought by no means to discourage us in the attempt."*

[112] Além do efeito da paralaxe, as estrelas estão realmente se movendo no céu e um movimento próprio mais rápido pode significar que a estrela está mais próxima de nós.

mil estrelas. Seus dados geraram ainda os catálogos Tycho e Tycho 2, extrapolando a marca de 2,5 milhões de estrelas catalogadas.

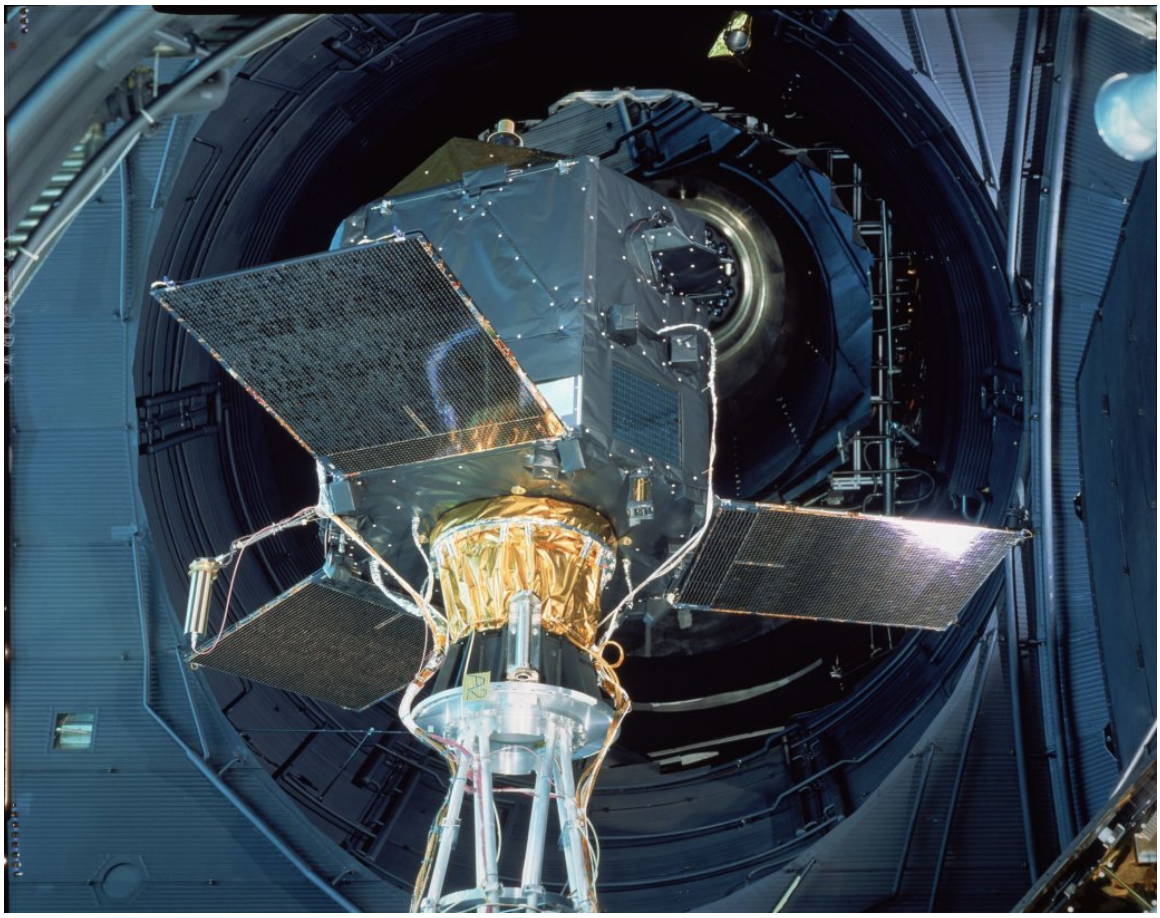


Fig. 172. HIPPARCOS foi o primeiro satélite dedicado a astrometria. Lançado pela ESA em 1989, inaugurou uma era de alta precisão nos catálogos estelares. Créditos: Agência Espacial Europeia (ESA).

2,5 milhões de estrelas parecem muito? E é! Mas o lançamento, em 2013, também pela ESA, de um novo satélite astrométrico, o Gaia, multiplicou por 1000 esse número, ultrapassando 1,8 bilhão de fontes catalogadas na terceira liberação de dados da missão (Gaia Data Release 3).

8.3 Determinando Distâncias na Prática

Mas afinal, como podemos saber a distância até cada estrela do Cruzeiro do Sul[113]?

Os catálogos Hipparcos, Tycho, Tycho 2 e Gaia são públicos. Isso significa que qualquer pessoa pode ter acesso a todos os parâmetros de astrometria e fotometria medidos pelos satélites. É possível acessá-los usando ferramentas especializadas em operações com dados astronômicos como o **T**ool for **OP**erations on **C**atalogues and **T**ables (TOPCAT) (https://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/) ou através de recursos disponíveis em ferramentas de visualização de imagens e dados como o SAO Image DS9 (https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9). O acesso também pode ser feito através de bibliotecas em Python ou diretamente em bases de dados como o **S**et of **I**dentifications, **M**easurement and **B**ibliography for **A**stronomical **D**ata (SIMBAD) (http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/).

Para determinar a distância até qualquer estrela catalogada, podemos consultar sua paralaxe através da pesquisa básica do SIMBAD (Fig. 173) (http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-fbasic) [93] e aplicar esses dados diretamente na Eq. 8.

Para as cinco estrelas mais brilhantes do Cruzeiro do Sul, consulte: “alf cru”, “bet cru”, “gam cru”, “del cru” e “eps cru”[114].

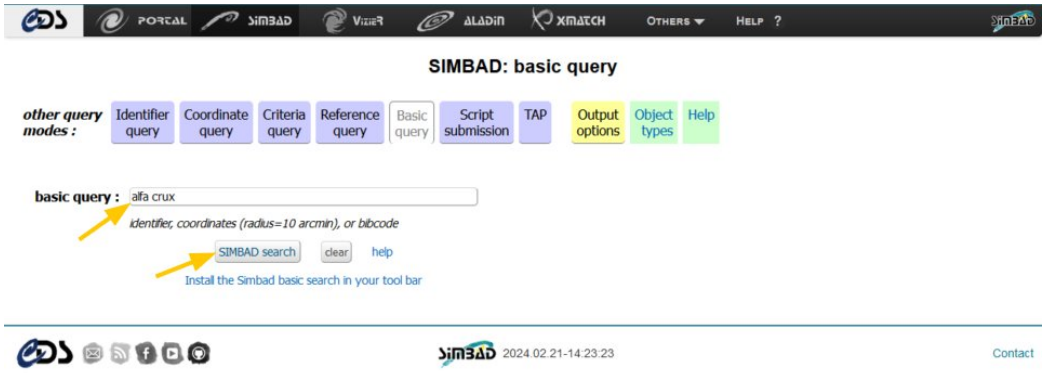


Fig. 173. Tela de pesquisa básica do SIMBAD: http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-fbasic.

Além do valor da paralaxe, a busca deve retornar as coordenadas celestes (***ICRS***[115] *Coord*), valores de brilho (*fluxes*), tipo espectral (*Spectral type*), movimento próprio e velocidade radial de cada estrela pesquisada.

Repetimos a busca para cada uma das estrelas, registrando o valor listado no campo “Parallaxes (*mas*)”(Fig. 174).

[113] Vamos fazer umas continhas aqui e está tudo bem se você pular essa seção, mas garantimos que o resultado é divertido e vai valer a pena se você tentar nos acompanhar aqui.

[114] Uma mesma estrela recebe diversas designações diferentes, incluindo nomes próprios para algumas estrelas mais brilhantes. Por exemplo: Betelgeuse, α Orionis, alf Ori, 58 Orionis, HD 39801 ou HIP 27989, são designações da mesma estrela.

[115] ICRS - International Celestial Reference System. O padrão de referência de coordenadas celestes adotado pela IAU (União Astronômica Internacional).

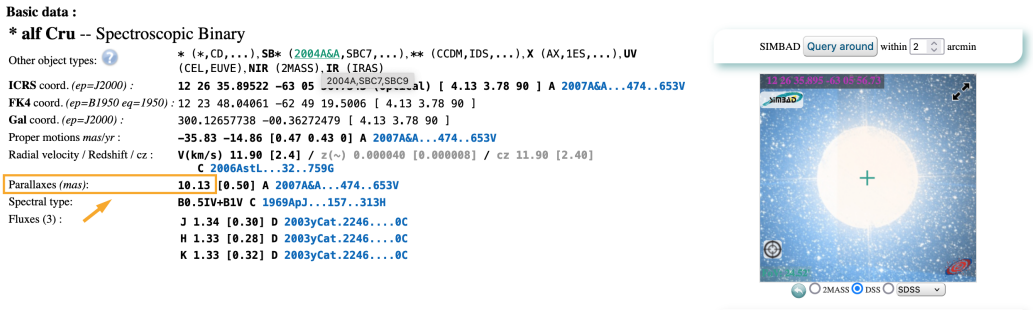


Fig. 174. Tela de resultados da busca básica do SIMBAD. Use o valor da paralaxe no campo indicado pela seta para computar a distância até a estrela consultada.

A Tab. 27 compila os dados de paralaxe e de distância em *parsecs* e em *anos-luz* das estrelas mais brilhantes do Cruzeiro do Sul. Cada coluna inclui sua respectiva incerteza. Este é um parâmetro importante ao representar qualquer quantidade medida, uma vez que todo processo experimental de medição possui incertezas em seus resultados. As incertezas na determinação da paralaxe se convertem em incertezas na determinação das distâncias. Assim, conforme a tabela, a estrela δ Crucis está a uma distância de 455 anos-luz, com uma incerteza de 45,35 anos-luz para mais ou para menos.

Tabela 27. Paralaxes e distâncias das estrelas mais brilhantes do Cruzeiro do Sul

Estrela	**Paralaxe mas**	**Distância pc**	**Distância anos-luz**
α Crucis	$10{,}13 \pm 0{,}50$	$98{,}72 \pm 4{,}87$	$321{,}97 \pm 15{,}89$
β Crucis	$11{,}71 \pm 0{,}98$	$85{,}40 \pm 7{,}15$	$278{,}53 \pm 23{,}31$
γ Crucis	$36{,}83 \pm 0{,}18$	$27{,}15 \pm 0{,}13$	$88{,}56 \pm 0{,}43$
δ Crucis	$7{,}17 \pm 0{,}71$	$139{,}51 \pm 13{,}91$	$455{,}01 \pm 45{,}35$
ε Crucis	$14{,}20 \pm 0{,}11$	$70{,}42 \pm 0{,}53$	$229{,}69 \pm 1{,}73$

Fonte: Elaborado por Wandeclayt Melo, com dados do SIMBAD.

A Fig. 175 é um modelo tridimensional, representando a distribuição espacial das estrelas mais brilhantes do Cruzeiro do Sul, construído a partir dos dados calculados acima.

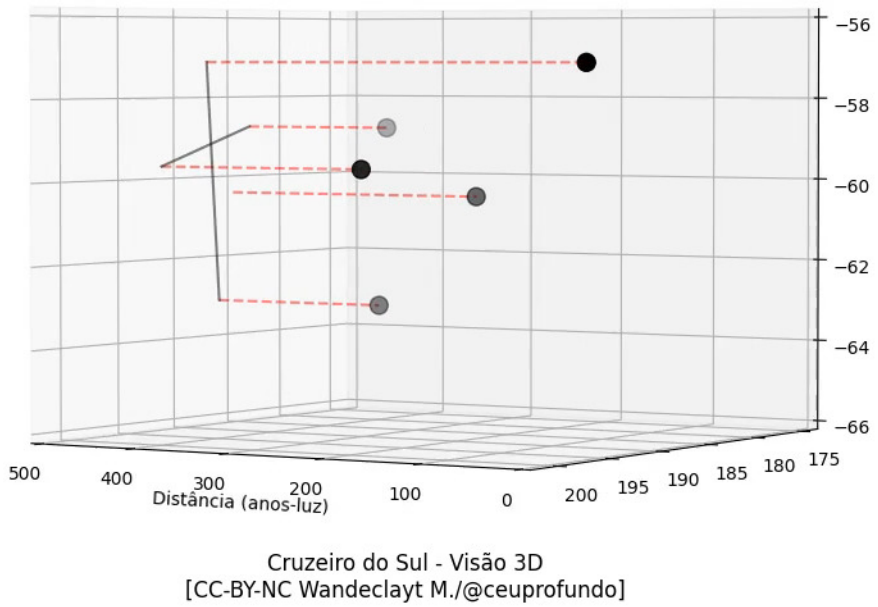


Fig. 175. Visão 3D das estrelas mais brilhantes da constelação do Cruzeiro do Sul.

8.4 Classes Espectrais

8.5 O Diagrama H-R

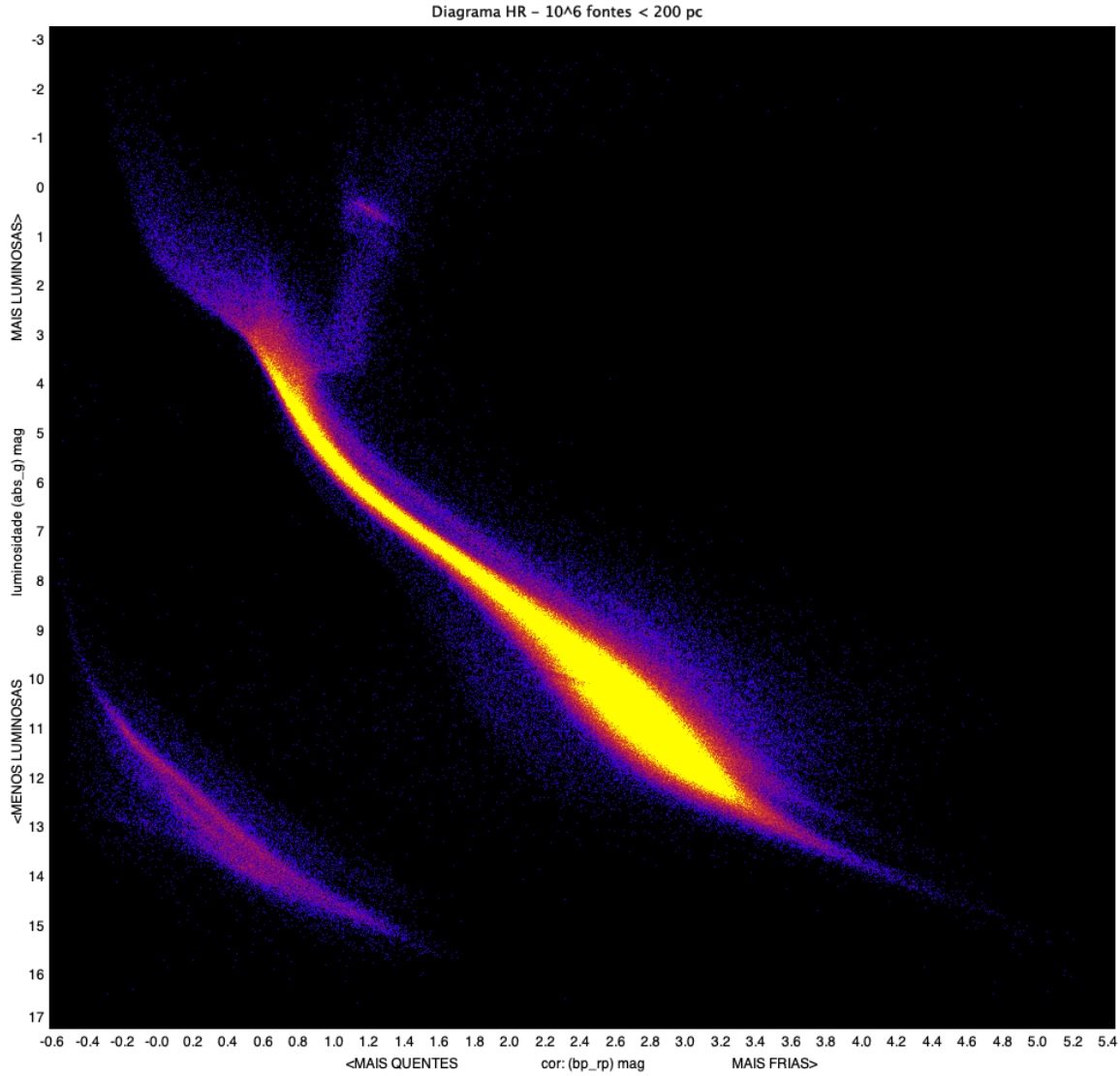


Fig. 176. Diagrama HR construído com dados de 1 milhão de estrelas localizadas a até 200 parsecs, com dados do satélite Gaia. Créditos: Gaia/ESA/DPAC, Wandeclayt M./Céu Profundo.

8.6 Estrelas ao Telescópio

Talvez isso não seja uma conclusão muito intuitiva, mas quando observadas ao telescópio as estrelas parecem menores do que quando as observamos a olho nu. Na verdade, quanto maior a abertura e a qualidade da óptica e quanto melhores as condições atmosféricas, menores as estrelas aparecerão na ocular ou nas imagens capturadas através do telescópio.

Estrelas estão tão distantes que são essencialmente fontes pontuais. Ou seja, em geral, não tem dimensão mensurável ao telescópio e o que pode parecer com o diâmetro da estrela, costuma ser apenas o resultado da difração, um efeito óptico causado pela passagem da luz pela abertura circular do telescópio.

Poucas são as estrelas próximas e grandes o suficiente para permitir a observação de sua superfície.

O imageamento da superfície de estrelas, além do Sol, requer o uso de técnicas especiais, normalmente empregando o uso de múltiplos telescópios (interferometria), como na obtenção da imagem da supergigante vermelha Betelgeuse (α Orionis) (Haubois et al.[7]) mostrada na Fig. 177, revelando duas regiões brilhantes (*bright spots*) e medindo um diâmetro aparente de aproximadamente 45 milissegundos de arco.

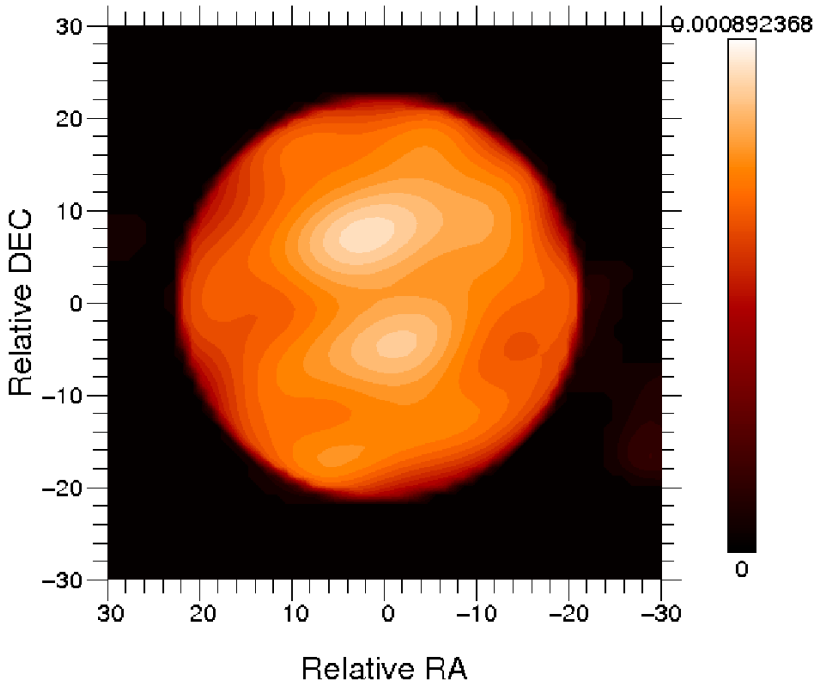


Fig. 177. Imagem reconstruída a partir de dados de interferometria da estrela Betelgeuse (α Ori) utilizando o algoritmo MIRA (Multi-aperture Image Reconstruction Algorithm). Créditos: Haubois et al. [7].

A imagem acima foi gerada a partir de dados obtidos com o interferômetro de três telescópios IOTA (Infrared Optical Telescope Array) localizado no observatório de Mount Hopkins no Arizona (EUA). Além do uso de técnicas e instrumentos avançados, a obtenção

de uma imagem resolvida do disco de Betelgeuse é possível por ser ela uma super gigante vermelha razoavelmente próxima, a uma distância estimada de 500 anos-luz da Terra.

Voltando à nossa programação normal, com telescópios de proporções modestas e observando estrelas ordinárias, o aspecto das estrelas na ocular ou nas imagens capturadas é essencialmente pontual.

8.7 Estrelas Duplas

8.8 Estrelas Variáveis

8.8.1 Variáveis Pulsantes

RR Lyrae [94]

8.8.2 Variáveis Cataclísmicas

8.8.3 Variáveis Eclipsantes

9. Objetos de Céu Profundo

Muito além dos limites do Sistema Solar, uma grande variedade de objetos de aspecto nebuloso está ao alcance não apenas dos telescópios, mas também dos binóculos e da vista desarmada. Talvez o mais impressionante desses objetos seja a faixa clara desenhada pela nossa galáxia, a Via Láctea, visível em regiões onde o céu não está contaminado pela poluição luminosa.

Na Fig. 178 o plano do equador galáctico aparece cortando o céu sobre o Mirante da Pedra de São Francisco, nas proximidades de São José dos Campos, na região do Vale do Paraíba no interior de São Paulo. O clarão no canto inferior direito é a poluição luminosa do tipo "*skyglow*", sobre São José dos Campos, que já ameaça a vista do céu estrelado sobre o mirante.



Fig. 178. A Via Láctea ergue-se sobre o Mirante da Pedra de São Francisco, entre Monteiro Lobato e São Francisco Xavier, no interior de São Paulo. Imagem capturada em 15 de julho de 2023, com câmera DSLR e objetiva de 14 mm (20 s, f/2.8, ISO 3200). Créditos: Wandeclayt M.

Na mitologia clássica, essa longa faixa esbranquiçada que circula a esfera celeste é o leite de Hera, esposa de Zeus, que jorrou quando ela afastou de seu peito o bebê Heráclès, filho de Zeus com a mortal Alcmena, em um dos muitos relacionamentos extraconjugais do soberano do Olimpo. O mito explica o nome "Via Láctea", com origem no latim clássico ***via lactea***, para o caminho desenhado pelo leite de Hera no céu. Em sua obra His-

tória Natural, o naturalista e historiador romano Plínio, o Velho (23-79), escreve também ***lacteus circulus*** [95], o "círculo leitoso". Com o mesmo significado, a expressão grega $\gamma\alpha\lambda\alpha\kappa\tau o\varsigma\ \kappa\upsilon\kappa\lambda o\varsigma$ (*galactos kuklos*) deu origem ao termo "Galáxia".

No Brasil, a maioria das etnias dos tupi-guarani chamam essa faixa de "Caminho da Anta" (*Tapi'i Rape*) [96].

Galáxia e o adjetivo ***galáctico*** são formas de se referir à nossa galáxia, a ***Via Láctea***. Até as primeiras décadas do Séc. XX, a única galáxia conhecida. Mas, além da Via Láctea, outras nebulosidades despontam. Muitas delas visíveis a olho nu ou com pequenos instrumentos (Fig. 179).



Fig. 179. O plano da Via Láctea na direção da região central registrada com câmera DSLR e objetiva grande angular de 14 mm. Créditos: Wandeclayt M.

Coletivamente, todos esses objetos nebulosos remotos são chamados de ***objetos de céu profundo*** [116]. Idealmente, para a observação dos objetos de céu profundo, utilizam-se instrumentos de maior abertura, com distância focal curta e aumentos fracos. Muitos desses objetos são consideravelmente extensos, exigindo campos mais amplos (e, portanto, aumentos mais fracos) para serem observados integralmente. Para estes últimos, binóculos são uma excelente opção.

Com exceção das cores nas regiões de nebulosidade, detectáveis apenas pelos sensores fotográficos, as imagens anteriores reproduzem muito bem a experiência que se pode ter a olho nu em localidades com céu escuro.

Se você ainda não viveu esta experiência e nunca viu com seus próprios olhos a Via Láctea, a boa notícia é que não é preciso viajar para o Deserto do Atacama ou outros

[116] Deep Sky Objects (DSO), no inglês.

destinos internacionais. Dentro do Brasil, as áreas de preservação dos Parques Nacionais e Parques Estaduais conservam também a escuridão dos céus e são excelentes destinos para o astroturismo. Experiências de observação muito satisfatórias também são oferecidas a partir de zonas rurais, suficientemente afastadas de áreas urbanas. Como exemplo, as imagens anteriores foram capturadas em um mirante a poucas dezenas de quilômetros das áreas urbanas de Taubaté e São José dos Campos, duas cidades de médio porte e sem controle de poluição luminosa.

O hemisfério sul celeste é privilegiado para a observação de objetos de céu profundo. As regiões da Via Láctea mais ricas em nebulosas e aglomerados estelares, incluindo sua região central, estão ao sul do equador celeste, favorecendo observadores no hemisfério sul. Vimos na Seção 1.4 que esse tipo de nebulosidade levou Charles Messier a elaborar seu famoso catálogo de objetos nebulosos. Messier tinha como objetivo apenas evitar que esses objetos fossem confundidos com cometas, mas, hoje, seu catálogo é um verdadeiro baú do tesouro com 110 alvos suficientemente brilhantes para serem observados por amadores com instrumentos de pequena abertura

A Figura 180 mostra um campo de 24º×16º da rica região central da imagem anterior[117] com alguns dos muitos objetos de céu profundo visíveis identificados na Tabela 28.

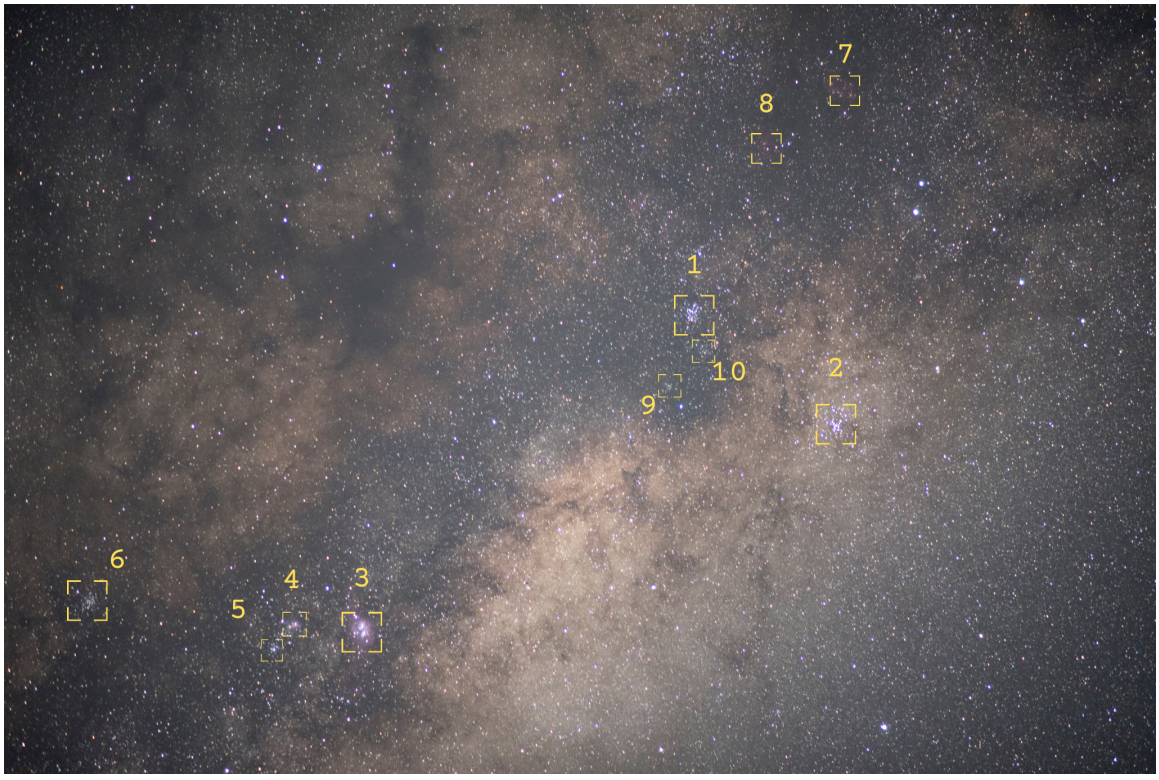


Fig. 180. Objetos de céu profundo na direção da região central da Via Láctea. Imagem capturada com câmera DSLR equipada com objetiva 85 mm f/1.5. Créditos: Wandeclayt M.

[117] A largura deste campo corresponde aproximadamente a 48 vezes o diâmetro aparente da Lua Cheia.

Esta região, entre as constelações de Escorpião e Sagitário, é visível durante toda a noite no inverno austral.

Tabela 28. Objetos de céu profundo indicados na figura 180.

Obj.	Designação	Classe
1	M 6 (Aglomerado da Borboleta)	Aglomerado aberto
2	M 7 (Aglomerado de Ptolomeu)	Aglomerado aberto
3	M 8 (Nebulosa da Lagoa)	Nebulosa de emissão
4	M 20 (Nebulosa Trífida)	Nebulosa de emissão e aglomerado
5	M 21	Aglomerado aberto
6	M 23	Aglomerado aberto
7	NGC 6334 (Nebulosa da Pata de Gato)	Resto de supernova
8	NGC 6357 (Nebulosa da Lagosta)	Região H II
9	NGC 6425	Aglomerado aberto
10	NGC 6416	Aglomerado aberto

.

9.1 Aglomerados Estelares

Galileu, no Séc. XVII, percebeu com sua pequena luneta que a faixa leitosa, aparentemente contínua, da Via Láctea era na verdade composta por estrelas individuais. Ele conseguiu também resolver outras manchas, mais concentradas, como agrupamentos de estrelas, ou aglomerados estelares [118].

Uma dessas manchas é o objeto de número 44 no catálogo Messier (Fig. 181), também conhecida como Aglomerado do Presépio, visível a olho nu como uma pequena nebulosidade na direção da constelação de Câncer, mas que é claramente resolvido como um grupo de estrelas mesmo através de binóculos.



Fig. 181. Galileu conseguiu resolver as estrelas indivíduais do Aglomerado do Presépio (M44), uma região que a olho nu é percebida como uma nebulosidade na costelação de Câncer. Todas as estrelas visíveis no campo da imagem fazem parte da nebulosidade vista a olho nu. Imagem capturada com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M.

Edwin Hubble [8] conta que, no Séc. XVIII, William Herschel chegou a postular que todos os objetos nebulosos poderiam ser resolvidos como estrelas, se observados por telescópios com poder de resolução suficiente. Mais tarde, Herschel convenceu-se que havia nebulosas compostas não por estrelas, mas por um "fluido luminoso". A identificação desse "fluido" como um gás veio apenas no fim do Séc. XIX, com as observações do espectro das nebulosas difusas por William Huggins (1824-1910).

Convencidos que certos objetos eram intrínsecamente nebulosos, os extensos catálogos elaborados pelos irmãos William e Caroline Herschel, seguidos por John, filho de William,

[118] Em Portugal, chamam-se "enxames" de estrelas.

dividiam os objetos de céu profundo em dois grandes grupos: nebulosas e aglomerados estelares. A sequência de catálogos dos Herschel culminou no New General Catalogue (NGC), com 7840 objetos, publicado por John L. E. Dreyer (1852-1926) em 1888 (Seção 1.5) e nos Index Catalogues (IC) publicados, também por Dreyer, como suplementos do NGC em 1895 e 1908, com 5386 objetos adicionais.

Os aglomerados estelares aparecem nos catálogos classificados como aglomerados abertos (como o Aglomerado do Presépio) ou como aglomerados globulares (Fig. 182), apresentando características morfológicas bastante distintas. Em ambas as classes, admitimos como aglomerados os grupos que estão gravitacionalmente ligados e não os alinhamentos casuais com a linha de visada.



Fig. 182. *Omega Centauri* (NGC 5139), o mais brilhante dos aglomerados globulares, é facilmente percebido a olho nu a nordeste da constelação do Cruzeiro do Sul. Empilhamento de 61 imagens de 10s cada, com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M.

Os aglomerados globulares são agrupamentos de alta massa, fortemente ligados gravitacionalmente, podendo conter milhões de estrelas. Apresentam uma distribuição aproximadamente esférica, justificando sua denominação. Aglomerados globulares são fósseis do período de formação de nossa galáxia, constituídos de estrelas muito velhas, originadas em nuvens moleculares que não haviam sido enriquecidas por elementos mais pesados, sintetizados nos núcleos de outras estrelas[119]. Sua forte ligação gravitacional garante sua estabilidade como um aglomerado, impedindo sua dispersão, mesmo após bilhões de anos de sua formação e diversas órbitas em torno do centro da Galáxia [97] [98].

[119] Essa primeira geração de estrelas é chamada de **População II**.

A olho nu ou com telescópios de menor resolução, a aparência dos aglomerados globulares é a de uma estrela "desfocada" ou de um chumaço de algodão. Com telescópios maiores, passamos a resolver essa região borrada como uma coleção de pontos. Fotograficamente, ou mesmo visualmente em telescópios de maior abertura, é possível perceber que diferentes aglomerados apresentam gradientes distintos na concentração de estrelas, com uma densidade central que cai mais ou menos rapidamente em direção à periferia.

Uma classificação morfológica, de acordo com essa concentração central das estrelas do aglomerado, foi proposta em 1927 por Harlow Shapley e Helen B. Sawyer, ordenando os aglomerados globulares em 12 classes, com a maior concentração correspondendo à Classe I, e a menor, à Classe XII [99]. Segundo essa classificação, Omega Centauri (NGC 5139), o aglomerado na imagem anterior, é rotulado como Classe VIII. A figura 183 mostra os globulares M 80 (NGC 6093), 47 Tucanae (NGC 104) e M 12 (NGC 6218), com diferentes concentrações centrais, representativos de classes distintas de Shapley-Sawyer.



Fig. 183. Aglomerados globulares conforme classificação de Shapley-Sawyer. À esquerda NGC 6093/M 80 (Classe II), no centro NGC 104 (Classe III) e à direita NGC 6218/M 12 (Classe IX). Todos imageados com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M.

As classes de Shapley-Sawyer são uma categorização essencialmente qualitativa. O Catálogo de Aglomerados Globulares da Via Láctea, compilado por William Harris, da McMaster University, por sua vez, adota parâmetros quantitativos para os 157 objetos listados na versão de 2010 do catálogo [100][120].

A densidade e a geometria dos aglomerados globulares, especialmente os mais massivos e concentrados, costumam deixar pouca dúvida quanto a sua identificação como con-

[120]O arquivo de dados do Milky Way Globular Clusters Catalog (2010) e a descrição dos campos na tabela podem ser encontrados em: https://heasarc.gsfc.nasa.gov/w3browse/all/globclust.html

juntos gravitacionalmente ligados. A identificação dos aglomerados abertos (Fig. 184), no entanto, é mais sutil. Alinhamentos ocasionais e asterismos[121] podem ser confundidos com aglomerados abertos reais, fisicamente ligados, enquanto aglomerados de menor densidade podem passar despercebidos, confundidos com estrelas do campo. É necessário determinar parâmetros astrofísicos (distância, velocidade radial, movimento próprio, entre outros) para estabelecer se o agrupamento é, de fato, um aglomerado aberto.



Fig. 184. O aglomerado aberto M 6 (Aglomerado da Borboleta) na constelação de Escorpião é visível a olho nu em céus suburbanos ou rurais. Tempo de exposição total de 60 s, com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M.

Iniciativas para a classificação e catalogação dos aglomerados estelares partem dos dados dos catálogos estelares produzidos por missões espaciais, como HIPPARCOS ou Gaia, ou por levantamentos de céu inteiro (*all-sky surveys*) realizados por telescópios terrestres, como USNO-B1.0 e Two Micron All-Sky Survey (2MASS). Essas iniciativas buscam identificar novos aglomerados, classificar apropriadamente aglomerados estelares conhecidos, ou reclassificá-los como asterismos ou como grupos de estrelas ocasionalmente próximas, mas não ligadas gravitacionalmente.

Um desses esforços para a criação de um censo dos aglomerados estelares é o catálogo Milky Way Star Clusters (MWSC) de 2013 listando um total de 3006 objetos, com 147 aglomerados globulares e 2808 aglomerados abertos confirmados [101].

Em trabalhos mais recentes, utilizando os dados da missão Gaia (Gaia DR3), o número de aglomerados abertos, ou candidatos a aglomerados, mais que dobra, levando a uma

[121] Asterismos são formações de estrelas agrupadas ao longo da linha de visada mas que não estão, de fato, próximas no espaço ou gravitacionalmente ligadas

estimativa de um total de $1,3 \times 10^5$ aglomerados abertos na Via Láctea, dos quais apenas 4% são hoje conhecidos [102].

A figura 185 apresenta a distribuição dos aglomerados do catálogo MWSC em um mapa do céu representado em coordenadas galácticas. O equador da projeção coincide com o equador galáctico, assim como os polos correspondem aos polos galácticos.

A distribuição observada revela a própria estrutura da Galáxia. Os aglomerados abertos, em azul, concentram-se na região equatorial, delineando o plano do disco galáctico. É nas regiões de formação estelar do disco, rico em gás, que novos aglomerados se formam e onde encontramos uma população estelar mais jovem, com composição mais rica em núcleos atômicos mais pesados[122]. Essa concentração no plano da Galáxia leva os aglomerados abertos a serem também chamados de **aglomerados galácticos**.

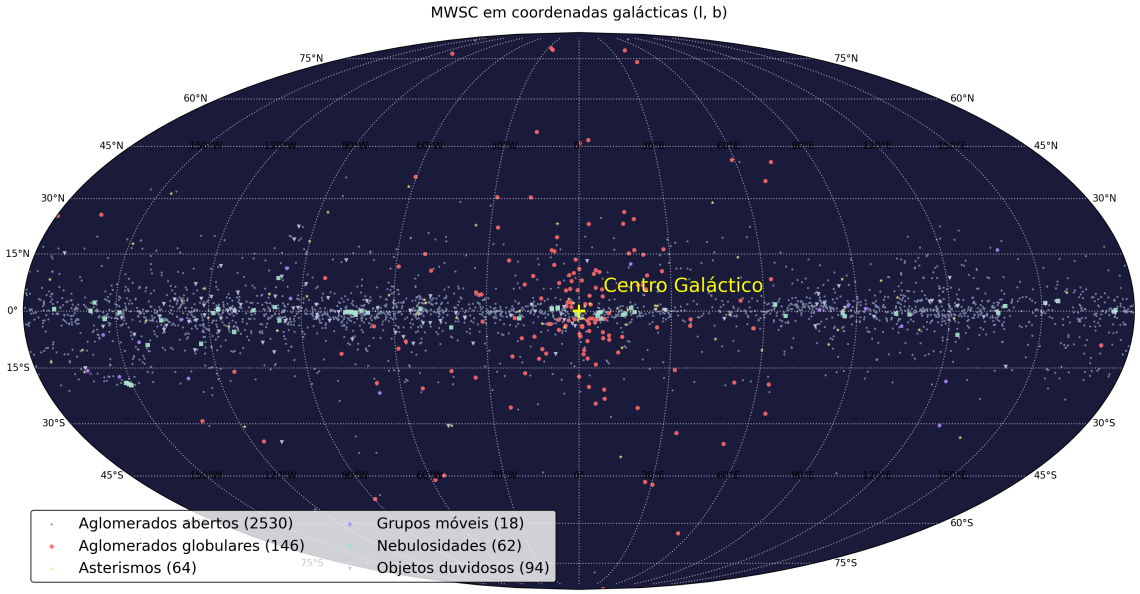


Fig. 185. Mapa de distribuição de aglomerados estelares em coordenadas galácticas. Os aglomerados abertos concentram-se no equador da projeção que coincide com o equador da Galáxia. Os aglomerados globulares distribuem-se nas regiões do bojo e do halo galáctico. Dados:MWSC/VizieR Gráfico: Wandeclayt M.

Os aglomerados globulares, em vermelho, distribuem-se no bojo, uma região densa em torno do núcleo da Galáxia que se estende acima e abaixo do disco [103], e no halo, o envelope esférico, ou esferoidal, de baixa densidade que envolve toda a Galáxia [104] onde predominam estrelas velhas.

Além de ajudarem a entender a morfologia e a delimitar as dimensões da Galáxia, os aglomerados estelares são um importante laboratório para o estudo da evolução estelar, já

[122] Estrelas de **População I** apresentam em sua composição núcleos atômicos sintetizados por estrelas de gerações anteriores.

que todas as estrelas em um aglomerado têm aproximadamente a mesma idade e composição química original.

Numa visualização mais familiar, a figura 186 apresenta os mesmos dados do MWSC plotados no sistema de coordenadas equatoriais (RA e DEC), com o equador da projeção coincidindo com o equador celeste, onde fica evidente a concentração privilegiada de ambos os tipos de aglomerados no hemisfério sul celeste.

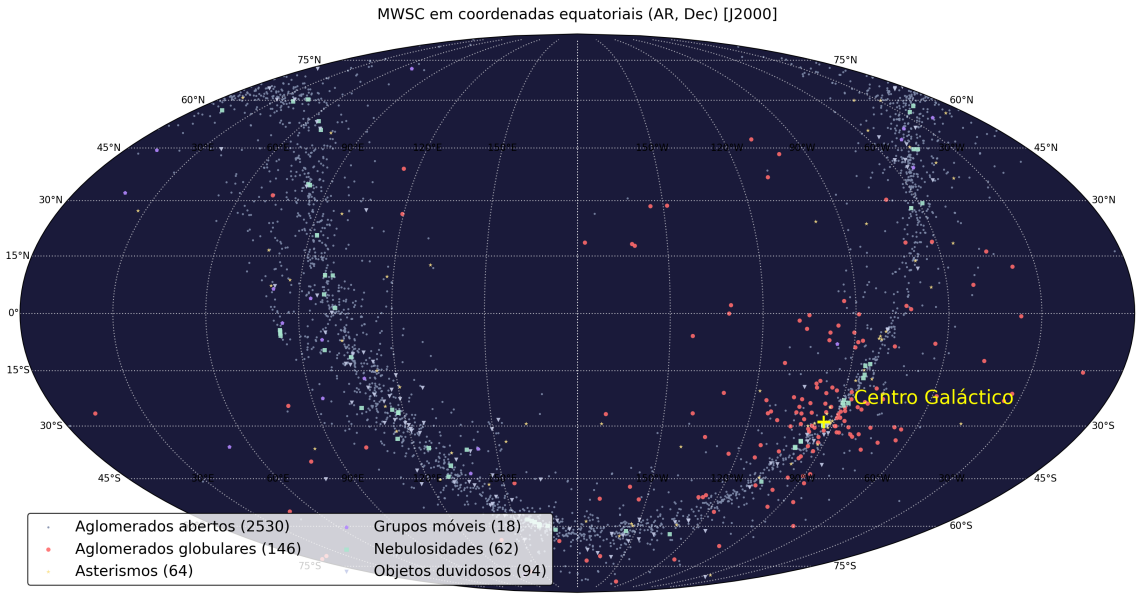


Fig. 186. Mapa de distribuição de aglomerados estelares em coordenadas equatoriais (J2000). Dados:MWSC/VizieR. Gráfico: Wandeclayt M.

Essa região de maior densidade de aglomerados estelares coincide com a direção das constelações de Escorpião e Sagitário, com melhor visualização durante o inverno do hemisfério sul.



Fig. 187. Um par de aglomerados abertos no mesmo campo, na constelação de Gêmeos. Na metade inferior da imagem, o aglomerado aberto M35, a uma distância estimada de 900 parsecs. Na metade superior, NGC 2158, com uma concentração maior de estrelas, mas significativamente mais distante, a 4300 parsecs. Créditos: Wandeclayt M.

Tabela 29. Comparação entre aglomerados estelares abertos e globulares

Característica	Aglomerados abertos	Aglomerados globulares
Número típico de estrelas	De algumas dezenas a algumas centenas; em classificações mais amplas, podem chegar a milhares.	De dezenas de milhares a milhões de estrelas.
População estelar	Predominantemente associados à População I, isto é, estrelas relativamente mais ricas em elementos pesados.	Predominantemente associados à População II, isto é, estrelas velhas e pobres em metais.
Idade típica	Em geral mais jovens; muitos têm menos de 1 bilhão de anos, embora existam exceções mais antigas.	Muito antigos, tipicamente da ordem de 11 a 13 bilhões de anos.
Localização na Galáxia	Concentram-se no disco galáctico, especialmente nas regiões das espiras.	Encontram-se principalmente no halo galáctico e também na região do bojo central.
Forma / morfologia	Estruturas mais irregulares, difusas e pouco concentradas.	Estruturas aproximadamente esféricas, compactas e fortemente concentradas para o centro.
Ligação gravitacional	Fracamente ligados gravitacionalmente.	Fortemente ligados gravitacionalmente.
Estabilidade dinâmica	Menor estabilidade; tendem a se dispersar com o tempo por interações internas e externas.	Alta estabilidade; podem sobreviver por bilhões de anos.
Metallicidade	Em geral mais alta, por terem se formado em um meio interestelar já enriquecido por gerações anteriores de estrelas.	Em geral mais baixa, refletindo formação em fases muito antigas da história da Galáxia.
Cor / tipo das estrelas mais brilhantes	Podem apresentar estrelas azuis e quentes em muitos casos, sobretudo nos aglomerados jovens.	Predominam estrelas mais velhas e avermelhadas entre as mais brilhantes.
Relação com formação estelar	Frequentemente associados a regiões de formação estelar e, em alguns casos, a nebulosidade remanescente.	Não estão associados à formação estelar atual; em geral não possuem gás e poeira suficientes para gerar novas estrelas.
Distribuição na Via Láctea	São muito mais numerosos no disco da Galáxia.	São menos numerosos, com cerca de 150 conhecidos na Via Láctea.
Importância astrofísica	Úteis para estudar evolução estelar, estrutura do disco galáctico e regiões de formação estelar.	Úteis para estudar a formação inicial da Via Láctea, populações estelares antigas e evolução química da Galáxia.

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em OpenStax (*Astronomy 2e*), NASA Science, ESA/Hubble e Encyclopaedia Britannica.

9.2 Nebulosas

Objetos de naturezas bastante distintas recebem a designação geral de nebulosas: regiões de gás interestelar, como a Nebulosa da Águia (Fig. 188), restos de supernovas, nuvens moleculares escuras, nebulosas planetárias. Em todas elas, independentemente de sua natureza, a luz observada é resultado da interação com uma ou mais estrelas, seja pela reflexão, absorção ou pela ionização do gás em nebulosas de emissão.

As nebulosas gasosas podem ser classificadas em dois tipos principais: **nebulosas difusas** (ou regiões HII)[123] e **nebulosas planetárias**.



Fig. 188. A Nebulosa da Águia (M 16), na direção da constelação de Sagitário, é uma região HII observável através de binóculos e pequenos telescópios. Sua cor avermelhada é produzida pela flourescência de átomos de hidrogênio. Imagem capturada com telescópio Seestar S50.

As condições de temperatura e pressão são únicas em uma nebulosa gasosa, com um gás extremamente rarefeito aquecido a altíssimas temperaturas. A densidade típica do gás em uma nebulosa é de apenas 10^2 partículas por cm^3, podendo chegar a 10^4 partículas por cm^3. Este é um ambiente de altíssimo vácuo, com uma densidade de partículas menor do que a atingida em laboratórios especiais, como os grandes aceleradores de partículas[124].

[123] HII (lê-se H dois) é o hidrogênio ionizado positivamente (H^+), ou seja, que perdeu o seu elétron. O numeral romano indica o grau de ionizaçao. **I** corresponde ao átomo neutro, **II**, ao primeiro grau de ionização (perda de um elétron) e assim sucessivamente.

[124] No complexo de aceleradores do CERN, a maior parte das linhas opera com pressões entre 10^{-9} e 10^{-12} mbar, equivalendo a uma densidade de 10^7 a 10^4 cm^{-3}. Esta condição é classificada como Vácuo Ultra Alto (UHV) [105].

A fonte de energia que alimenta a emissão de luz nas nebulosas difusas é, em geral, a radiação ultravioleta de estrelas jovens e muito quentes [125] no interior ou nas proximidades da nebulosa. Essencialmente, o processo para a emissão de luz em uma nebulosa é a transformação da radiação ultravioleta de uma ou mais estrelas em luz visível. Este processo inicia-se com a perda do elétron de átomos neutros de hidrogênio, arrancado por um fóton ultravioleta, no fenômeno chamado *fotoionização*. O elétron arrancado, eventualmente, volta a ser capturado por um próton. Este segundo processo é chamado *recombinação*.

Elétrons podem se recombinar ao próton ocupando diretamente o nivel de energia fundamental e emitindo um fóton ultravioleta ou ocupando níveis de energia mais altos, atingindo o nível fundamental através de uma cascata de decaimentos que emitem fótons de menor energia. Um desses decaimentos corresponde à transição do terceiro para o segundo nível de energia, resultando na emissão de um fóton com comprimento de onda $\lambda = 656,3$ nm [106]. Este comprimento de onda corresponde à emissão conhecida como Hα[126] e confere o vermelho característico às imagens de nebulosas, como a Grande Nebulosa de Órion, vista aqui em uma captura com tempo total de exposição de 20 minutos, com telescópio Seestar S50 (Fig. 189) [127] .



Fig. 189. A Grande Nebulosa de Órion (M42). Tempo total de Exposição 20 min, com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M.

[125] Estrelas com temperatura superficial efetiva maior que 3×10^4 K.

[126] Leia "hidrogênio alfa" ou "agá alfa".

[127] A emissão de certas linhas ocorre apenas sob as condições de baixa densidade e alta temperatura do gás rarefeito das nebulosas. Emissões não observadas em laboratórios terrestres levaram à especulação da existência de um novo elemento químico, chamado *nebulium*. Posteriormente, essas linhas foram identificadas como associadas ao oxigênio duplamente ionizado (OIII).

Capturas fotográficas da Nebulosa Trífida (M20) (Fig. 190), evidenciam, além das regiões de emissão (com brilho avermelhado, cuja maior contribuição é devida ao hidrogênio), as regiões de reflexão (azuladas) e filamentos escuros de poeira que absorvem a luz dos objetos ao fundo. Embora a estrutura possa ser vista também na observação direta através da ocular, essas cores não são percebidas pelo olho através do telescópio.



Fig. 190. Imagens da Nebulosa Trífida (M20), revelam claramente regiões de emissão, reflexão e absorção. Tempo total de exposição 42 min, com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

Essa é mais uma característica comum a todos os tipos de nebulosas: são uma fonte inesgotável de frustração quando observadas por iniciantes na ocular do telescópio. A expectativa gerada pelas exuberantes imagens coloridas, como as que acabamos de mostrar, sublima tão rapidamente quanto um cometa Kreutz mergulhando na atmosfera solar. A luz que recebemos de nebulosas e galáxias, mesmo quando observadas com telescópios de maior abertura, é insuficiente para sensibilizar os cones, as células oculares responsáveis pela percepção de cor. Os bastonetes, as células sensíveis a níveis mais baixos de luminosidade, como vimos na seção 3.1, são incapazes de discernir cores. Como resultado, podemos resolver detalhes mais finos na estrutura de objetos nebulosos quando observamos com telescópios maiores, mas, ainda assim, não perceberemos as cores como capturadas nas fotografias.

Essa limitação na percepção de cores está longe de reduzir o prazer da experiência de localizar, identificar e observar objetos astronômicos difusos com os próprios olhos. A observação de objetos de céu profundo segue inabalável como uma das atividades mais desafiadoras, mas igualmente recompensadora e estimulante na astronomia amadora.

9.3 Nebulosas Planetárias

Muito mais compactas que as nebulosas difusas, as nebulosas planetárias são, na verdade, um envelope gasoso em expansão, envolvendo em seu núcleo uma estrela de alta temperatura superficial, responsável pela excitação do gás. Embora o mecanismo por trás da radiação emitida pelas nebulosas planetárias seja o mesmo que alimenta as nebulosas difusas, suas dimensões, origem e morfologia são bastante distintas.

Enquanto as nebulosas difusas estão associadas a estrelas jovens, as nebulosas planetárias são objetos associados a estrelas evoluídas. As nebulosas planetárias são formadas pelo gás perdido por uma gigante vermelha, uma estrela com grande raio, mas de massa pequena a intermediária (1 a 8 $M_{\odot}$)[128], em um estágio avançado de sua evolução, a caminho de se tornar uma anã branca [107].

A designação *nebulosa planetária* é uma herança histórica, um termo usado no Séc. XVIII por William Herschel para descrever objetos com aspecto de um disco, com contornos geralmente bem definidos e brilho uniforme, similar à aparência de um planeta.

A Nebulosa do Anel (M 57), localizada a aproximadamente 800 parsecs, na direção da constelação de Lira, é uma das mais famosas nebulosas planetárias (Fig. 191).



Fig. 191. A Nebulosa do Anel (M 57/NGC 6720) é uma nebulosa planetária com magnitude visual 8.8 na constelação de Lira. Imagem capturada com telescópio Seestar S50, com 31,5 minutos de tempo de exposição. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

Com magnitude visual ≈ 9 e localizada convenientemente sobre a linha que une as estrelas β e γ da constelação de Lira, a Nebulosa do Anel é um alvo fácil, inclusive para

[128] É usual empregar a massa solar, simbolizada por $M_{\odot}$, como unidade de massa estelar. $1\ M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$kg.

iniciantes munidos de pequenos telescópios. Ela é melhor observada entre os meses de julho e agosto, quando permanece visível durante a maior parte da noite. Para encontrá-la, utilize como referência a carta da figura 192.

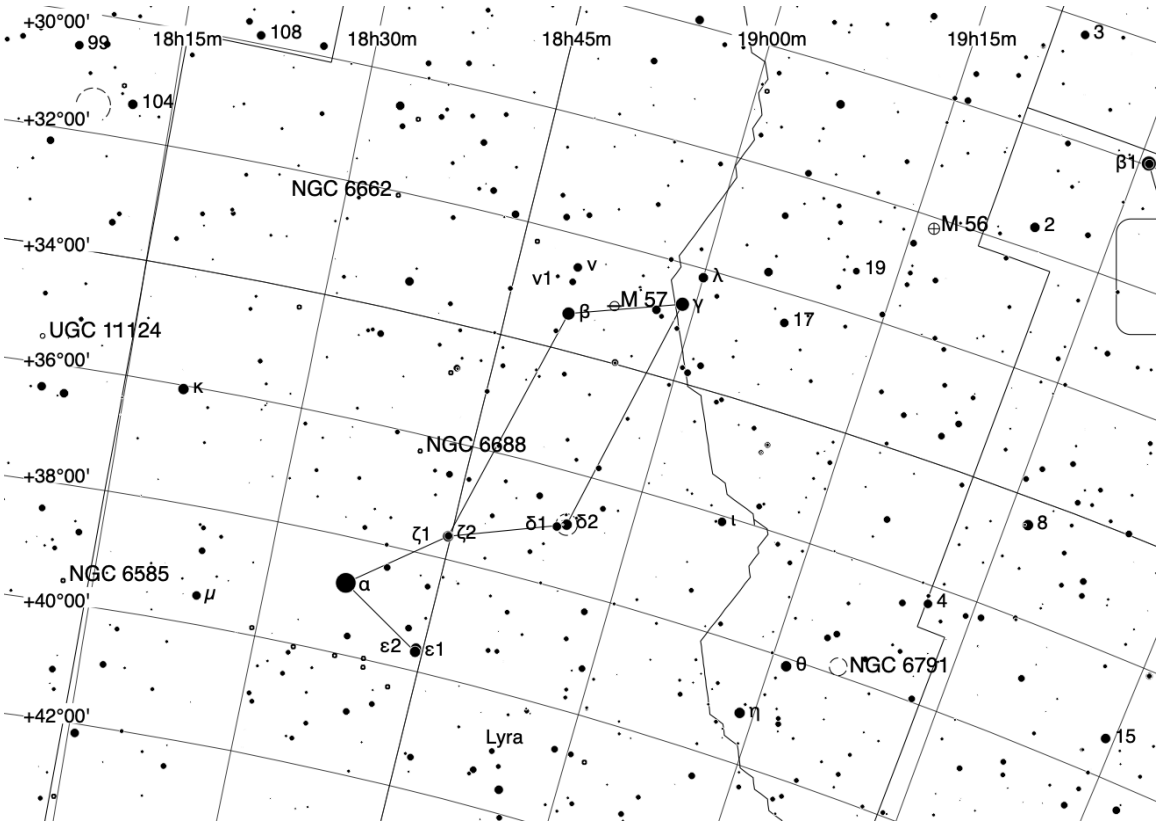


Fig. 192. Localização da Nebulosa do Anel (M 57), na constelação de Lira. A nebulosa pode ser encontrada com facilidade por observadores iniciantes, mesmo com instrumentos de pequena abertura, ao longo da linha que une as estrelas β e γ Lyrae. A estrela mais brilhante na carta é Vega, a alfa da constelação de Lira, com magnitude 0. Lira também abriga notáveis estrelas duplas: δLyr, ζLyr e εLyr. Carta gerada no aplicativo SkyCharts/Cartes du Ciel.

Estrelas de massa baixa a intermediária passam a maior parte de sua vida na sequência principal, convertendo hidrogênio em hélio em seus caroços[129] e sem variar a temperatura e a luminosidade. Na fase seguinte, empobrecida em hidrogênio, cessa a produção de hélio. Nesta etapa, o caroço se contrai, elevando a temperatura e ignitando um novo ciclo de reações nucleares ao seu redor. O aquecimento resultante desse novo ciclo faz com que o envoltório da estrela se expanda, aumentando o raio e a área da fotosfera. Com um raio e uma área da fotosfera muito maiores, a gravidade e a temperatura na superfície da estrela diminuem. Essa estrela de grande raio e baixa temperatura está no estágio de gigante vermelha.

[129] O termo ***caroço*** é usado na literatura em português como tradução de ***core***. É uma boa solução para evitar a repetição do termo ***núcleo***, que já é usado para se referir a átomos e íons.

Com uma gravidade superficial mais baixa, as camadas mais externas da estrela podem ser expulsas pelo vento estelar. Instabilidades no fim da evolução da gigante vermelha podem levar a sucessivas contrações e expansões, resultando em perda de massa e na expulsão do envoltório que forma a nebulosa planetária. O caroço exposto da gigante vermelha é a estrela central da nebulosa, um objeto compacto com altíssima temperatura superficial (da ordem de $1,5 \times 10^5$K). A nebulosa dispersa-se rapidamente ($\approx 2 \times 10^3$ anos), em comparação com o período de vida das estrelas, deixando apenas a estrela central, uma anã branca [108]. Este é o destino esperado para o Sol, dentro de 5 ou 6 bilhões de anos. Ao estudar as nebulosas planetárias, estamos, portanto, estudando também o futuro do Sistema Solar.

Foi a observação da nebulosa planetária NGC 1514 (Fig. 193), descrita como uma "*estrela de oitava magnitude, com uma tênue atmosfera luminosa, de forma circular, com cerca de 3' de diâmetro*" que convenceu Herschel da existência de nebulosidades reais, mudando sua concepção de que todas as nebulosas fossem aglomerados estelares distantes não resolvidos[109].



Fig. 193. Nebulosa planetária NGC 1514, descoberta por William Herschel em 1790. Imagem gerada no aplicativo Aladin, com dados do levantamento DSS2. O campo da imagem tem dimensões similares às da imagem anterior, da nebulosa M 57.

Enquanto M 57 e NGC 1514 são objetos de tamanho angular modesto ($< 5'$), a Nebulosa da Hélice (NGC 7293) (Fig. 194), a aproximadamente 200 parsecs, excede $15'$ de tamanho angular, o que equivale a metade do diâmetro aparente da Lua Cheia. As nebulosas planetárias não se restringem, contudo, ao formato de disco que deu origem à sua designação. São comuns nebulosas com estrutura bipolar, como a Nebulosa da Borboleta (NGC 6302) (Fig. 195) ou com estruturas complexas e múltiplas camadas em expansão.



Fig. 194. Nebulosa da Hélice(NGC 7293), na direção da constelação de Aquário, com tamanho angular aproximado de 15' (aproximadamente metade do diâmetro aparente da Lua cheia). Imageada com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

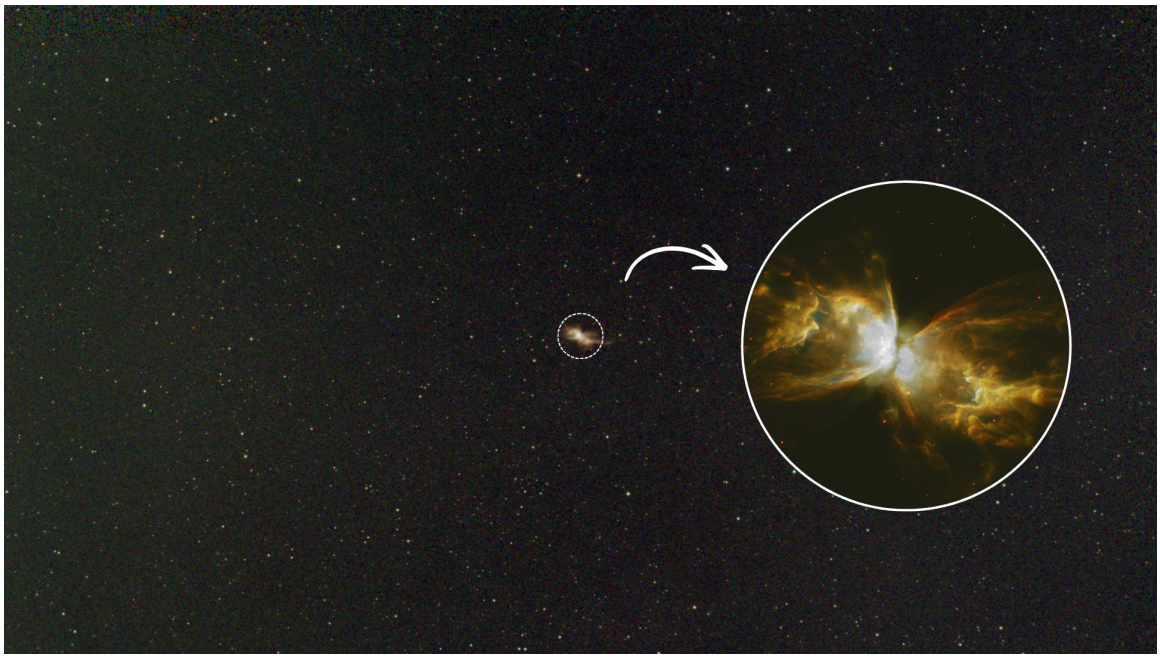


Fig. 195. Nebulosa planetária NGC 6302, imageada com telescópio Seestar S50, com 920 s de tempo total de exposição, e pelo Telescópio Espacial Hubble (no detalhe). Imageamento com Seestar e processamento dos dados do Hubble: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

A nebulosa planetária NGC 2438 está alinhada com nossa linha de visada na direção do aglomerado aberto M 46, na constelação da Popa (*Puppis*).



Fig. 196. M46 NGC 2438

9.4 Nebulosas Escuras

Nem todas as nebulosas são percebidas pelo seu brilho. Há regiões que são percebidas pela absorção da radiação visível das estrelas localizadas ao fundo, produzindo regiões com aspecto de "buracos" no céu (Fig. 197).

John Herschel descreveu essas regiões como "campos sem estrelas"[130], sem associá-las a nebulosidades. A natureza nebulosa desses objetos fica definitivamente estabelecida com as observações e a publicação, em 1919, pelo astrônomo Edward Emerson Barnard (1857-1923), de uma lista de 182 regiões escuras, identificadas em suas imagens da Via Láctea [110]. A versão final do catálogo, publicada postumamente em 1927, compreende 349 objetos [111] e pode ser acessada através do serviço Vizier [131].



Fig. 197. Nebulosa escura da Cabeça de Cavalo (Barnard 33), na constelação de Órion. A Cabeça de Cavalo é uma pequena região de um vasto complexo de nebulosas na direção de Órion. Imagem capturada com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

Estas regiões de gás molecular e poeira são opacas aos comprimentos de onda de luz visível e ultravioleta, absorvendo e espalhando os comprimentos de onda mais curtos, mas transparentes em comprimentos de onda mais longos, no infravermelho[132] e no rádio. Observações com telescópios espaciais, como Hubble e JWST, capazes de registrar o infravermelho, conseguem enxergar através do que, em observações ópticas, são nuvens escuras e

[130] "starless fields".

[131] Catálogo de Barnard: https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/Cat?VII/220A#/article

[132] A radiação de comprimento de onda similar às dimensões das moléculas e partículas de poeira é absorvida e espalhada pela nuvem, enquanto comprimentos de onda mais longos, a partir da faixa do infravermelho, atravessam a nebulosa.

revelar estrelas e outros objetos ao fundo. A imagem no detalhe da figura 198 corresponde à região central (a Cabeça do Cavalo) na nebulosa Barnard 33 e foi produzida com dados do Telescópio Hubble capturados no infravermelho próximo (Proposal ID = 12812). Além de estrelas (e até algumas galáxias) ao fundo é possível resolver detalhes na estrutura da nuvem e não apenas a silhueta escura observada no óptico.

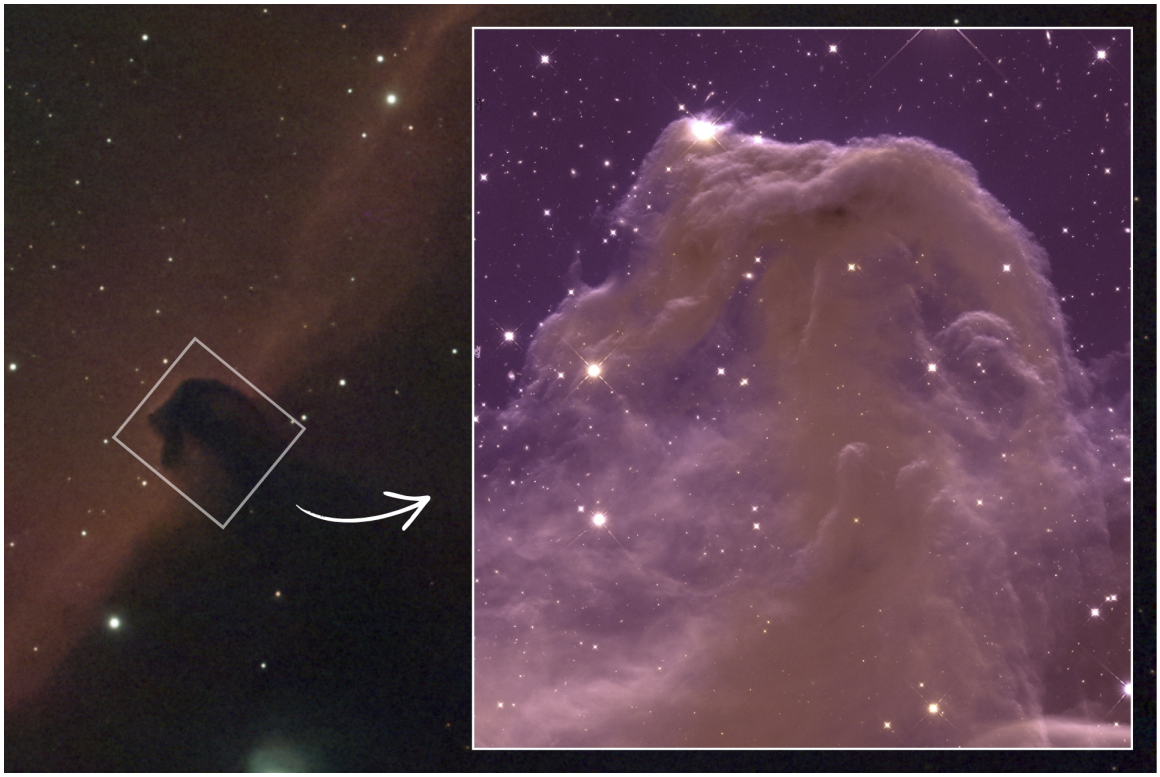


Fig. 198. Detalhe da Nebulosa da Cabeça de Cavalo (Barnard 33) observada em infravermelho pelo Telescópio Espacial Hubble. A imagem é um mosaico, composto por observações com filtros infravermelhos F110W e F160W. Créditos: Hubble Heritage Team (PI: Z. Levay, J. Mack, J. Sokol, T. Borders, M. Mutchler, W. Januszewski, M. Livio, C. Christian, L. Frattare (STScI); K. Noll (NASA/GSFC)). Processamento: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

Além de extensas nuvens opacas, as nebulosas escuras também podem aparecer como objetos compactos e localizados, colapsando sob o efeito da gravidade. Essas pequenas nuvens escuras, isoladas e compactas, são conhecidas como ***glóbulos de Bok*** e foram descritas por Bart Jan Bok e Edith Reilly em 1947 [112]. Muitos desses glóbulos são encontrados em nebulosas, em regiões de formação estelar, e podem se condensar, dando origem a estrelas de baixa massa [113]. É comum a presença de glóbulos de Bok em nebulosas de emissão (regiões HII), como a Nebulosa da Lagoa (M 8) (Fig. 199), onde são percebidos mais facilmente pelo contraste com o fundo brilhante da nebulosa. Mais de duas dezenas de glóbulos são visíveis na Nebulosa da Lagoa, como pequenas regiões muito escuras, de contornos bem definidos, contrastando com o brilho da nebulosa . Barnard já havia percebido esses

glóbulos em 1908.



Fig. 199. A Nebulosa da Lagoa (M8) é uma região HII localizada a aproximadamente 1300 parsecs, visível a olho nu na direção da constelação de Sagitário. No interior da nebulosa, vemos o aglomerado aberto NGC 6530. Os pontos escuros com o aspecto de "buracos" na nebulosa são gl´bulos de Bok. Há mais de uma dezena de glóbulos visíveis nesta imagem. Tempo total de exposição: 80 min, com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

Fora das nebulosas, é possível detectar a presença de nebulosas escuras e glóbulos de Bok em campos ricos de estrelas no plano da Galáxia, aparecendo como "buracos" no fundo estrelado.

O objeto Barnard 68, na direção da constelação do Serpentário (*Ophiucus*), é um glóbulo de Bok, localizado a 125 parsecs de distância [114] e, apesar de não estar associado a uma nebulosa brilhante, sua presença é evidenciada pelo contraste contra um campo rico de estrelas da região mais central da Galáxia (Fig. 200).

A nebulosa escura do Saco de Carvão ocupa uma grande área a sudeste da constelação do Cruzeiro do Sul (Fig. 201) e é facilmente percebida a olho nu em regiões de céu escuro. Na imagem, são também visíveis os aglomerados abertos NGC 3766 e NGC 4755, e a nebulosa IC 2944 (Nebulosa da Galinha Correndo).

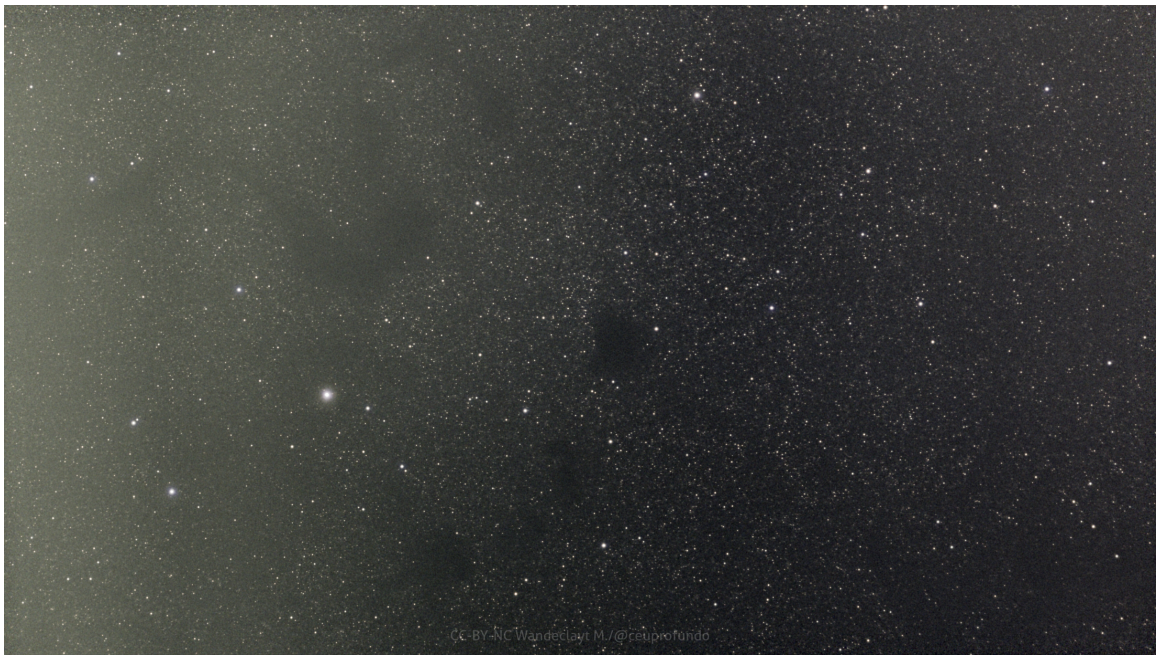


Fig. 200. A região no cento da imagem, com o aspecto de um "buraco" no fundo de estrelas, é a nebulosa escura Barnard 68, uma nuvem molecular relativamente próxima (125 parsecs) evidenciada pelo contraste com o fundo estrelado na direção da região mais central da Galáxia. Imagem capturada com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

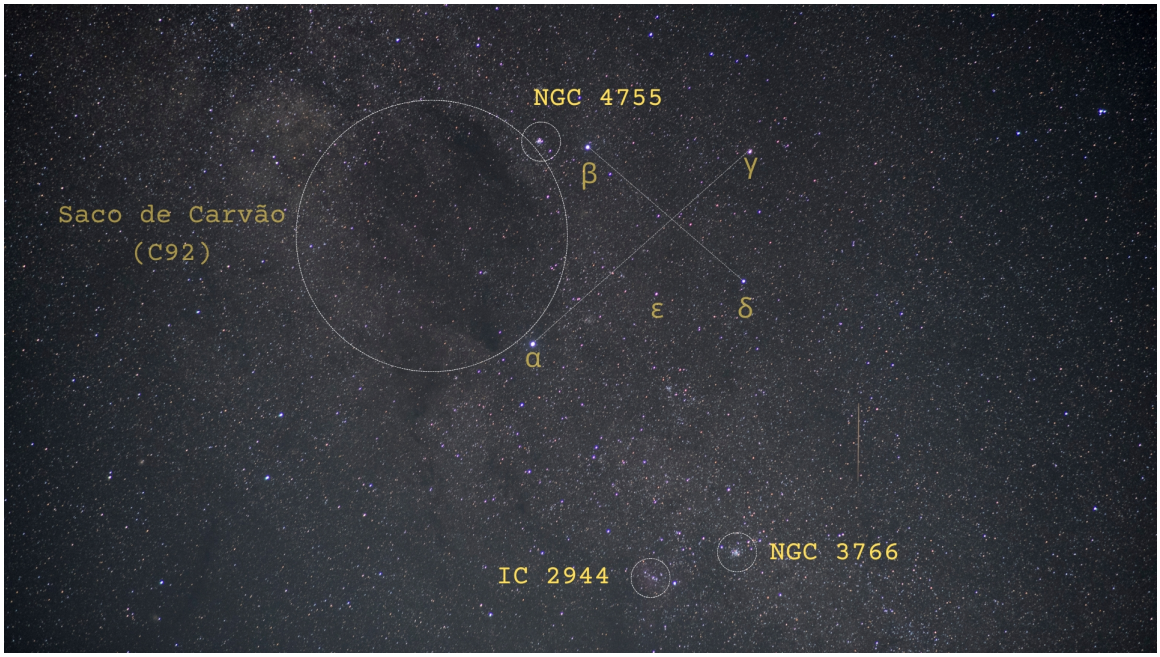


Fig. 201. Nebulosa escura do Saco de Carvão, e outros objetos de céu profundo nas vizinhanças da constelação do Cruzeiro do Sul. Imagem capturada com câmera DSLR e objetiva de 85 mm, f/1.5. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

9.5 Restos de Supernova

EM CONSTRUÇÃO - DESCULPE-NOS O TRANSTORNO.

Tabela 30. Principais classes de objetos de céu profundo designados como nebulosas

Classe	Definição	Mecanismo físico dominante	Aparência típica	Exemplos famosos
Nebulosa de emissão	Nuvem de gás interestelar que emite luz própria. Muitas são regiões H II associadas à formação estelar.	O gás é ionizado pela radiação ultravioleta de estrelas quentes próximas e reemite energia em linhas espectrais, como Hα e [O III].	Brilhante e difusa, frequentemente com regiões extensas e bem destacadas em imagens astronômicas.	M42 (Nebulosa de Órion), M8 (Nebulosa da Lagoa)
Nebulosa de reflexão	Nuvem de poeira que não emite luz própria de forma dominante, mas reflete e espalha a luz de estrelas vizinhas.	Espalhamento da luz estelar por grãos de poeira interestelar; comprimentos de onda menores tendem a ser espalhados com maior eficiência.	Nebulosidade suave ao redor de estrelas, muitas vezes com coloração azulada em imagens coloridas.	Nebulosidade das Plêiades (M45), NGC 1999
Nebulosa escura ou de absorção	Nuvem densa de gás e poeira que bloqueia parcial ou totalmente a luz proveniente de estrelas ou nebulosas situadas ao fundo.	Extinção, absorção e espalhamento da luz por poeira interestelar.	Regiões escuras, faixas opacas ou silhuetas recortadas contra um fundo estelar ou nebuloso mais brilhante.	Barnard 33 (Cabeça de Cavalo), Saco de Carvão
Nebulosa planetária	Invólucro gasoso expelido por uma estrela de baixa ou média massa em estágios finais de evolução.	As camadas externas da estrela são ejetadas, e o gás resultante é ionizado pelo núcleo quente remanescente.	Estruturas em anel, concha, lóbulos bipolares ou formas complexas e simétricas.	M57 (Nebulosa do Anel), NGC 7293 (Hélice)
Remanescente de supernova	Nebulosa produzida pela explosão de uma estrela como supernova.	Expansão do material ejetado e interação da onda de choque com o meio interestelar ao redor.	Filamentos, cascas em expansão e estruturas turbulentas observáveis em múltiplos comprimentos de onda.	M1 (Nebulosa do Caranguejo), Nebulosa do Véu (Cygnus Loop)
Região de formação estelar	Termo descritivo para regiões onde ocorre nascimento de estrelas, frequentemente combinando emissão, reflexão e absorção.	Colapso de nuvens moleculares, ionização por estrelas jovens e iluminação/reflexão por poeira.	Regiões complexas com gás brilhante, poeira escura e estrelas recém-formadas.	M16 (Nebulosa da Águia), NGC 3372 (Nebulosa da Carina)

9.6 Galáxias

9.6.1 Universos Ilha

Todos os aglomerados estelares e os diversos tipos de nebulosas que vimos até aqui são objetos da Galáxia ou de sua vizinhança. Mas a natureza de um outro tipo de objeto, as "nebulosas espirais" (Fig. 202), permanecia como uma questão em aberto nas primeiras décadas do Séc. XX. Essas nebulosas faziam parte da Galáxia? Ou eram elas próprias objetos muito distantes, comparáveis à Via Láctea?

Carecendo de métodos adequados para medir a distância até essas "nebulosas", não era possível estimar corretamente suas dimensões ou determinar com confiança se tratavam-se de objetos galácticos ou extragalácticos.



Fig. 202. Galáxia espiral M33, na constelação do Triângulo, imageada com telescópio Seestar S50. Até o início do século XX, esses objetos eram chamados de Nebulosas Espirais, antes que se pudesse determinar que cada um deles era uma galáxia inteira, similar à Via Láctea. Créditos: Wandeclayt M.

Em 26 de abril de 1920, no que ficou conhecido como *O Grande Debate* [115], os astrônomos Harlow Shapley (1885-1972) e Heber D. Curtis (1872-1942), num evento histórico, apresentavam, baseados nas evidências observacionais disponíveis, argumentos sobre as dimensões da Via Láctea e a distância e natureza das nebulosas espirais, em palestras para a *National Academy of Sciences*[133].

Shapley defendia que as nebulosas espirais eram de fato nebulosidades e não sistemas estelares e que o diâmetro da Via Láctea seria da ordem de 300 mil anos-luz, multiplicando

[133] A Academia Nacional de Ciências dos EUA.

por um fator de 10 as estimativas então vigentes. Curtis, por sua vez, defendia a hipótese dos "universos ilha", em que cada nebulosa espiral era um sistema estelar distante, e que a Via Láctea não teria um diâmetro superior a 30 mil anos-luz.

Um fato notável sobre a distribuição da espirais na esfera celeste é que elas não são observadas no plano galáctico[134]. Curtis justifica essa distribuição pela presença de poeira no equador galáctico, absorvendo a luz e obstruindo a visão de objetos distantes e aponta que as espirais também exibem regiões escuras em seus planos equatoriais. Além disso, o espectro das nebulosas espirais seria consistente com o espectro de um objeto cuja luz fosse emitida majoritariamente por estrelas. Por fim, Curtis também aponta que uma estrutura em espiral também já havia sido sugerida para a Via Láctea. Uma versão impressa das apresentações de Shapley e Curtis foi publicada no *Bulletin of the National Research Council*, em 1921[116].

A controvérsia era alimentada por observações que geravam interpretações conflitantes e pela dificuldade de calibrar os métodos de medir distâncias astronômicas na escala necessária para estimar a distância das nebulosas espirais.

Na impossibilidade de empregar os mesmos métodos astrométricos, baseados na paralaxe anual, usados para determinar a distância de estrelas em nossas vizinhanças, a estimativa de grandes distâncias depende da existência de *velas padrão*.

A resposta para o dilema nasce do trabalho observacional de Edwin P. Hubble (1889-1953) e de uma descoberta fundamental da astrônoma Henrietta Swan Leavitt (1868-1921). Em 1908, ao observar uma certa classe de estrelas variáveis nas Nuvens de Magalhães, Leavitt encontrou uma correlação entre o brilho máximo dessas estrelas e o período de variabilidade, com as estrelas mais brilhantes apresentando períodos mais longos. O anúncio definitivo da descoberta de Leavitt veio em 1912, em um breve comunicado de três páginas submetido por Edward C. Pickering (1846-1919) na circular 173 do Observatório de Harvard (Fig. 203), reportando o período de pulsação de 25 estrelas variáveis com comportamento similar à estrela δ Cephei, por isso chamadas *Cefeidas*, observadas na Pequena Nuvem de Magalhães e destacando a notável relação entre período e luminosidade nessas estrelas [117].

As Cefeidas são estrelas variáveis do tipo pulsante, cujo brilho cresce rapidamente e decai mais lentamente. Cada estrela apresenta um período regular, muito bem definido, mas variando de estrela para estrela. Ao observar a Pequena Nuvem de Magalhães, Leavitt tinha à sua disposição uma amostra de Cefeidas que se encontravam todas, aproximadamente, à mesma distância, já que as dimensões da Nuvem são pequenas comparadas à sua distância. Isso significa que ao comparar suas magnitudes aparentes estamos encontrando também a diferença entre as magnitudes absolutas (Seção 9.7).

A correlação encontrada por Leavitt é importante porque permite determinar indireta-

[134] O adjetivo "galáctico" é usualmente empregado para se referir à Via Láctea.

mente a magnitude absoluta de uma cefeida uma vez que se conheça seu período.

Isso permite que se adotem as estrelas variáveis do tipo cefeidas como velas padrão. Isso significa que, assim como as chamas de todas as velas apresentam aproximadamente o mesmo brilho, Cefeidas de mesmo período também apresentam a mesma magnitude absoluta. Assim, é possível, através da comparação entre a magnitude aparente observada e a magnitude absoluta, estimada a partir do período, determinar a distância até uma cefeida de período conhecido.



HARVARD COLLEGE OBSERVATORY.

CIRCULAR 173.

PERIODS OF 25 VARIABLE STARS IN THE SMALL MAGELLANIC CLOUD.

The following statement regarding the periods of 25 variable stars in the Small Magellanic Cloud has been prepared by Miss Leavitt.

A Catalogue of 1777 variable stars in the two Magellanic Clouds is given in H.A. 60, No. 4. The measurement and discussion of these objects present problems of unusual difficulty, on account of the large area covered by the two regions, the extremely crowded distribution of the stars contained in them, the faintness of the variables, and the shortness of their periods. As many of them never become brighter than the fifteenth magnitude, while very few exceed the thirteenth magnitude at maximum, long exposures are necessary, and the number of available photographs is small. The determination of absolute magnitudes for widely separated sequences of comparison stars of this degree of faintness may not be satisfactorily completed for some time to come. With the adoption of an absolute scale of magnitudes for stars in the North Polar Sequence, however, the way is open for such a determination.

Fifty-nine of the variables in the Small Magellanic Cloud were measured in 1904, using a provisional scale of magnitudes, and the periods of seventeen of them were published in H.A. 60, No. 4, Table VI. They resemble the variables found in globular clusters, diminishing slowly in brightness, remaining near minimum for the greater part of the time, and increasing very rapidly to a brief maximum. Table I gives all the periods which have been determined thus far, 25 in number, arranged in the order of their length. The first five columns contain the Harvard Number, the brightness at maximum and at minimum as read from the light curve, the epoch expressed in days following J.D. 2,410,000, and the length of the period expressed in days. The Harvard Numbers in the first column are placed in Italics, when the period has not been published hitherto. A remarkable relation between the brightness of these variables and the length of their periods will be noticed. In H.A. 60, No. 4, attention was called to the fact that the brighter variables

John G. Wolbach Library, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics • Provided by the NASA Astrophysics Data System

have the longer periods, but at that time it was felt that the number was too small to warrant the drawing of general conclusions. The periods of 8 additional variables which have been determined since that time, however, conform to the same law.

TABLE I.

PERIODS OF VARIABLE STARS IN THE SMALL MAGEL

H.	Max.	Min.	Epoch.	Period.	Res. M.	Res. m.
5336					−0.6	−0.5
537					−0.3	+0.1
520					−0.3	+0.1
5502					+0.1	+0.1
5352					−0.2	−0.5
3					−0.3	−0.1
1					+0.2	+0.2
97					+0.3	+0.0
7					0.0	−0.1
96					+0.1	+0.2
1					+0.3	+0.1
5					+0.2	−0.1
95					−0.2	−0.4

H.	Max.	Min.
1400	14.1	14.8
1355	14.0	14.8
1374	13.9	15.2
818	13.6	14.7
1610	13.4	14.6
1360	13.8	14.8
1351	13.4	14.4
827	13.4	14.3
822	13.6	14.6
823	12.2	14.1
824	11.4	12.8
821	11.2	12.1

graphically in Figure 1, in pressed in days, and the or s af maxima and at mini and one for minima, are su gure 2, the abscissas are e inates to the corresponding readily be drawn among maxima and minima, thus the brightness of the va od increases by about 0.

The residuals of the n in Figure 2 are given is possible that the dev an absolute scale of m rrections that need to b eed that the average

variables alike, is about 1.2 magnitudes. Since the variables are probably at nearly the same distance from the Earth, their periods are apparently associated with their actual emission of light, as determined by their mass, density, and surface brightness.

FIG. 1.

FIG. 2.

The faintness of the variables in the Magellanic Clouds seems to preclude the study of their spectra, with our present facilities. A number of brighter variables have similar light curves, as UY Cygni, and should repay careful study. The class of spectrum ought to be determined for as many such objects as possible. It is to be hoped, also, that the parallaxes of some variables of this type may be measured. Two fundamental questions upon which light may be thrown by such inquiries are whether there are definite limits to the mass of variable stars of the cluster type, and if the spectra of such variables having long periods differ from those of variables whose periods are short.

The facts known with regard to these 25 variables suggest many other questions with regard to distribution, relations to star clusters and nebulae, differences in the forms of the light curves, and the extreme range of the length of the periods. It is hoped that a systematic study of the light changes of all the variables, nearly two thousand in number, in the two Magellanic Clouds may soon be undertaken at this Observatory.

MARCH 3, 1912. EDWARD C. PICKERING.

John G. Wolbach Library, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics • Provided by the NASA Astrophysics Data System

Fig. 203. A descoberta da relação período-luminosidade das cefeidas, por Henrietta Leavitt, foi apresentada em um comunicado de apenas 3 páginas, na circular do Observatório de Harvard.

Na prática, isso é como estimar a distância de uma vela distante ao comparar seu brilho com o de outra vela a uma distância conhecida. O fator de escala necessário para calibrar as magnitudes absolutas das cefeidas pode ser determinado por meio da observação de estrelas próximas, cujas distâncias podem ser determinadas pelo método da paralaxe (Seção 8.2).

Em resumo, Henrietta Leavitt descobriu a existência de uma relação que permite conhecer o brilho intrínseco de uma classe de estrelas variáveis, a partir da determinação do seu período de variabilidade. No entanto, é necessário estabelecer um fator de calibração, um "ponto zero" que corresponda a uma distância conhecida, para que a relação seja efetivamente aplicável na estimativa de distâncias até os objetos de interesse.

A detecção de cefeidas em nebulosas espirais, seguida da determinação de seus períodos de variabilidade seria então uma maneira de estimar as distâncias até essas nebulosas. Em 1925, Edwin Hubble reporta a detecção de estrelas variáveis, incluindo cefeidas, nas duas nebulosas espirais mais brilhantes: M 31, na constelação de Andrômeda e M 33, no Triângulo [118].

Em observações fotográficas com os telescópios de 100" e 60" do Observatório de Mount Wilson, o período e o brilho máximo das cefeidas foi medido, levando à primeira estimativa de distância das nebulosas espirais. Apesar da distância apresentada por Hubble estar subestimada (285 kpc ou 930 mil anos-luz)[135], ela ja colocava M 31 e M 33 além dos limites da Via Láctea, apontando para a natureza extragaláctica das nebulosas espirais. Em publicações subsequentes, Hubble revisa para baixo a distância de M 33 para 263 kpc (ou 840 mil anos-luz) [119] e de M 31 para 275 kpc (ou 900 mil anos-luz) [120]. Estas variações nas estimativas de distância evidenciam as incertezas no fator de calibração da relação período-luminosidade estabelecido por Shapley para a Pequena Nuvem de Magalhães.

A correção desse fator, pelo astrônomo Walter Baade (1893-1960) ajusta a distância de M 31 para 730 kpc, estabelecendo a escala atualmente aceita para distâncias extragalácticas [121].

que passam a ser entendidas como galáxias inteiras e a Via Láctea passa a ser vista como apenas uma entre muitas galáxias.

[135] Medidas atuais colocam a distância de M 31 entre 700 e 800 kpc, e a de M 33 entre 700 e 900 kpc.



Fig. 204. Campo do aglomerado de galáxias da constelação de virgem, registrado pelo observatório Vera C. Rubin. Praticamente todos os objetos na imagem são galáxias. Créditos: NSF-DOE Vera C. Rubin Observatory

A determinação da distância e, consequentemente, das dimensões das "nebulosas espirais" pacificou o debate. Cada uma dessas "nebulosas" é uma galáxia inteira, e a Via Láctea é apenas mais uma entre muitas galáxias.

9.6.2 O Universo em Expansão

EM CONSTRUÇÃO - DESCULPE-NOS O TRANSTORNO.

9.6.3 Classificação de Hubble

EM CONSTRUÇÃO - DESCULPE-NOS O TRANSTORNO.

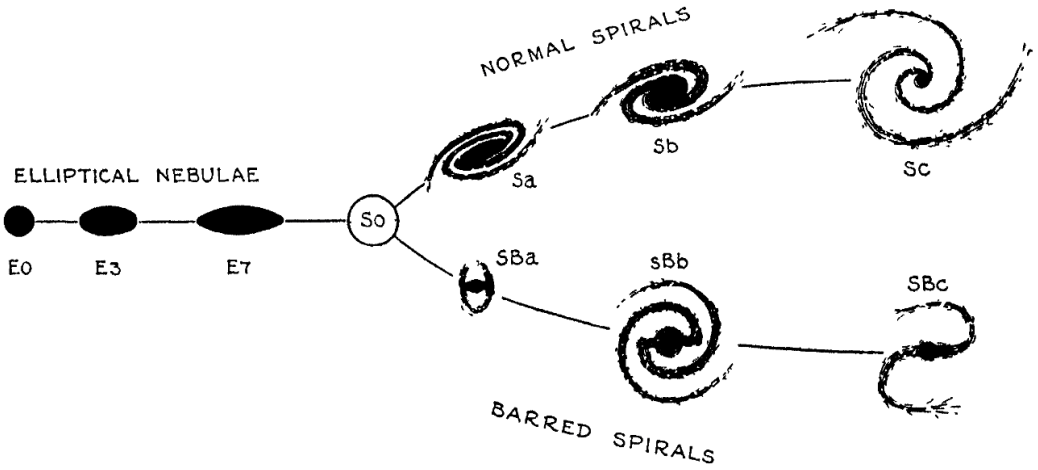


FIG. 1. *The Sequence of Nebular Types.*

Fig. 205. Classificação de Hubble [8].

.

9.7 Caçando Objetos de Céu Profundo (*Star hoping*)

Embora telescópios modernos, dotados de recursos para apontamento e acompanhamento automático de objetos, estejam hoje disponíveis por custos cada vez mais acessíveis, a habilidade de localizar e identificar visualmente objetos de céu profundo ainda é um diferencial dos astrônomos amadores.

Uma das técnicas de apontamento manual é conhecida como *star hoping*[136] e consiste em partir de um objeto conhecido, ou mais facilmente visível, e em seguida "saltar" por campos sucessivos até chegar ao objeto alvo.

A Fig. 206 é uma carta de localização da Galáxia do Sombrero (M 104) e mostra uma sequência de campos para a utilização da técnica do *star hoping*.

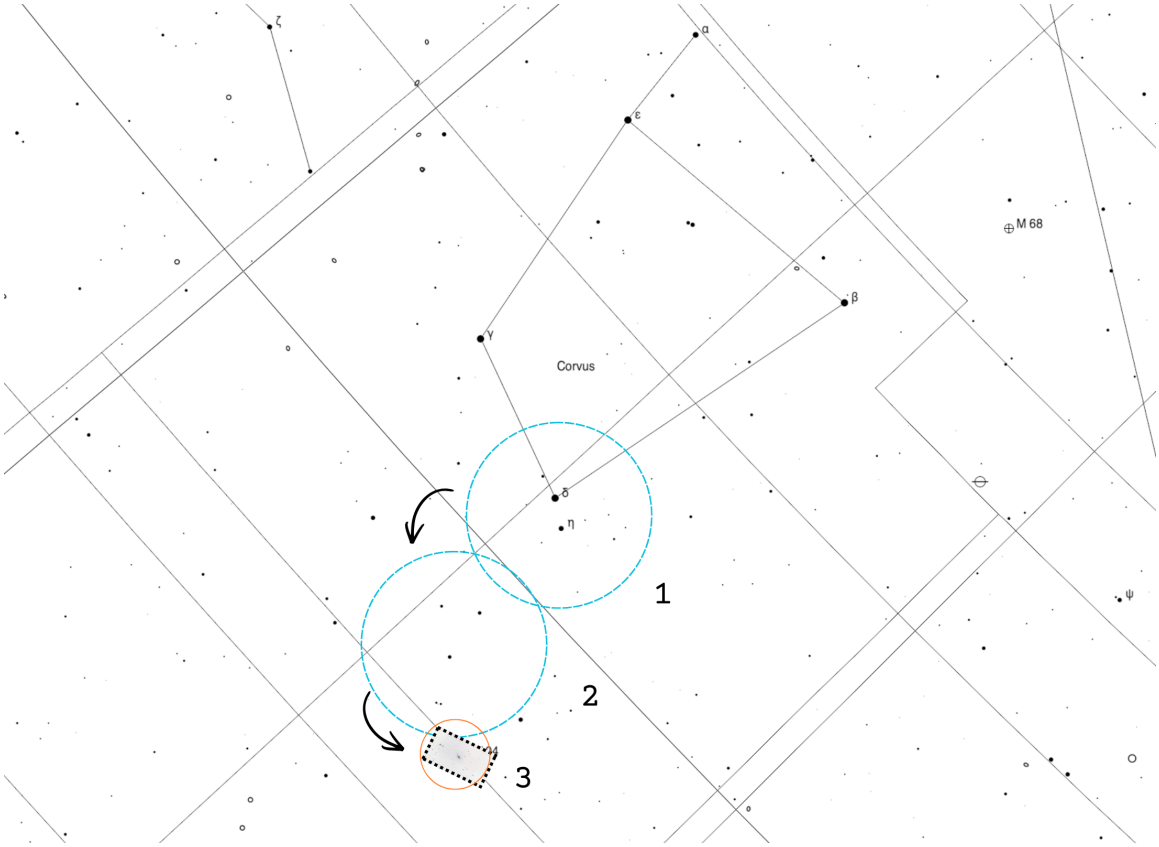


Fig. 206. Carta de localização da Galáxia do Sombrero (M 104). Gerada com o aplicativo *Star Charts/Cartes du Ciel*.

A ideia inicial é localizar as estrelas δ e η da constelação do corvo, visíveis a olho nu, e enquadrá-las no campo da luneta de busca (campo 1). Em seguida, deslocamos o telescópio até enquadrar na buscadora um asterismo convenientemente em formato de seta (campo 2). A "seta" do campo anterior aponta aproximadamente na direção da Galáxia do Sombrero.

[136] Algo equivalente a "saltar de estrela em estrela".

O campo 3 corresponde aproximadamente à visão na ocular com aumento moderado e o retângulo pontilhado corresponde ao campo da imagem da Fig. 207.

Se você tiver sucesso, terá no campo da ocular a visão de um tênue “fiapo” de aspecto esfumaçado . Esse pouco expressivo objeto é, na verdade, um dos objetos mais distantes observáveis com nossos próprios olhos através da ocular de um pequeno telescópio: a Galáxia do Sombrero, a mais de 30 milhões de anos luz de distância.



Fig. 207. Galáxia do Sombrero (M 104), com magnitude visual 8 e localizada a aprroximadamente 10 Mpc (32,6 milhões de anos luz), é um dos objetos mais distantes observáveis visualmente através de pequenos telescópios. Tempo total de exposição: 30 min, com telescópio Seestar S50. Créditos: Wandeclayt M./Projeto Céu Profundo.

Glossário

Ascensão Reta A coordenada *Ascensão Reta* é o equivalente em coordenadas celestes equatoriais à coordenada terrestre longitude. 22

Barlow Lente multiplicadora, usada em conjunto com as oculares de telescópios. 86

dia sideral O dia sideral é o período de rotação da Terra em relação ao referencial das estrelas fixas. Sua duração é de 23h56min. 55

dia solar O dia solar é o período de rotação da Terra, tomando como referência a passagem meridiana do Sol. O dia solar possui duração variável ao longo do ano e sua duração média é 24 h (86400 s). 36

fotosfera A superfície visível do Sol em luz branca. É na fotosfera que vemos as manchas solares e fáculas. 103

magnitude absoluta A magnitude aparente de uma estrela se ela estivesse posicionada a uma distância padrão de 10 parsecs (3,26 anos-luz) do Sistema Solar. 239

parsec Unidade de distância, equivalente a 3,26 anos-luz. Corresponde à distância a que uma estrela deva estar do Sistema Solar para apresentar uma paralaxe anual de 1 segundo de arco (1”). 202

Referências

[1] SMITH, W. J. *Modern Optical Engineering - The Design of Optical Systems*. McGraw-Hill, 1966. 111 p. Disponível em: <https://archive.org/details/modernopticaleng0000smit/>.

[2] STOCKMAN, A.; SHARPE, L. T. Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Research*, v. 40, p. 1711–1737, 2000.

[3] HERRERA, J. et al. KrakenOS: Python-based general exact ray tracing library. *Optical Engineering*, SPIE, v. 61, n. 1, p. 015101, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/1.OE.61.1.015101>.

[4] SCHEINER, C. *Tres epistolae de macvlis solaribvs : scriptae ad Marcvm Velservm ... Cum obseruationum iconismis*. Avgvstae Vindelicorvm : Ad insigne Pinus, 1612. Disponível em: <https://archive.org/details/tresepistolaedem00sche/>.

[5] SCHEINER, C. *Rosa Vrsina sive sol ex admirando facvlarvm [et] macularum suarum phoenomeno varius : necnon circa centrum suum [et] axem fixum ab occasu in ortum annua, circaq. alium axem mobilem ab ortu in occasum conuersione quasi menstrua, super polos proprios, libris quatuor mobilis ostensus*. Bracciani : apud Andream Phaeum typographum ducalem, 1630. Disponível em: <https://archive.org/details/A148130/>.

[6] AIRBUS. *Press Release*. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2025-11-airbus-update-on-a320-family-precautionary-fleet-action>. Acesso em: 16 de dezembro de 2025.

[7] HAUBOIS, X. et al. Imaging the spotty surface of betelgeuse in the h band. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 508, n. 2, p. 923–932, oct 2009. ISSN 1432-0746. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/200912927>.

[8] HUBBLE, E. *The Realm of the Nebulae*. New Haven: Yale University Press, 1936. (Mrs. Hepsa Ely Silliman Memorial Lectures). Disponível em: <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.212163/>.

[9] DREYER, J. L. E. *Tycho Brahe: A Picture of Scientific Life and Work in the Sixteenth Century*. A. & C. Black, 1890. Disponível em: <https://archive.org/details/tychobraheapict00dreygoog>.

[10] BRAHE, T. *Astronomiæ instauratæ mechanica*. Levinus Hulsius, Nuremberg, 1602. Disponível em: <https://www.loc.gov/resource/gdcwdl.wdl$_0$4304>.

[11] BAYER, J. *Uranometria*. [S.l.]: Augustae Vindelicorum : excudit Christophorus Mangus, 1603.

[12] RIDPATH, I. *Star Tales*. [S.l.]: Lutterworth Press, 2018. ISBN 978-0718894788.

[13] FLAMSTEED, J. *Historiae Coelestis Britannicae*. H. Meere, London, 1725. Disponível em: <https://www.digitale-sammlungen.de/en/view/bsb10485041>.

[14] LALANDE, J. J. de. *Éphémérides des movemens celestes*. [S.l.]: Hérissant, Paris, 1783.

[15] HALLEY, E. *A synopsis of the astronomy of comets*. John Senex, 1705. 21-22 p. Disponível em: <https://archive.org/details/synopsisofastron00hall/>.

[16] STOYAN, R. et al. *Atlas of the Messier Objects - Highlights of the Deepp Sky*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-0-521-89554-5.

[17] BOCHART de Saron, 1730–1794. *Nature*, v. 125, n. 3142, p. 95, 1930. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/125095a0>.

[18] MESSIER, C. Notices sur mes comètes. Tradução para o inglês por Hartmut Frommert. 1810. Disponível em: <http://messier.lamost.org/seds/seds.org/messier/en/xtra/history/notes-c.html>.

[19] MESSIER, C. Connoissance des temps, ou conoissance des mouvemens célestes pour l'année bissextile 1784. In: ____. L'Imprimerie Royale, 1781. cap. Catalogue des Nébuleuses et des Amas d'Etoiles, p. 226–269. Disponível em: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6514280n/>.

[20] HOSKIN, M. *William and Caroline Herschel, Pioneers in Late 18th-Century Astronomy*. [S.l.]: Springer, 2014.

[21] HERSCHEL, C. L. *Correspondence*. John Murray, London, 1879. 382 p. Https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/18701. Disponível em: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/58351>.

[22] HERSCHEL, C. *Catalogue of Stars, taken from Mr. Flamsteed's Observations contained in the second volume of Historiæ Cœ lestis and not inserted into the British Catalogue*. Royal Society, 1798. Disponível em: <https://archive.org/details/bim$_e ighteenth - century_c atalogue - of - stars - take_f lamsteed - john_1$798>.

[23] HERSCHEL, W. On the parallax of the fixed stars. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1782.

[24] HERSCHEL, W. Catalogue of 500 new nebulae, nebulous stars, planetary nebulae, and clusters of stars; with remarks on the construction of the heavens. *Philosophical Transactions of The Royal Society of London*, p. 477–528, 1802. Disponível em: <https://archive.org/details/philtrans06090694>.

[25] HERSCHEL, W. Description of a forty-feet reflecting telescope. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 85, p. 347–409, 1795. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rstl.1795.0021>.

[26] DREYER, J. L. E. *A New General Catalogue of Nebulæ and Clusters of Stars*. The Royal Astronomical Society, London, 1888. Disponível em: <https://archive.org/details/newgeneralcatalo00dreyrich/newgeneralcatalo00dreyrich>.

[27] JONES, D. Norman pogson and the definition of stellar magnitude. *Astronomical Society of the Pacific Leaflets*, n. 469, p. 145–152, 1968. Disponível em: <https://articles.adsabs.harvard.edu//full/1968ASPL...10..145J/0000150.000.html>.

[28] POGSON, N. Magnitudes of thirty-six of the minor planets for the first day of each month of the year 1857. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 17, n. 1, p. 12–15, 11 1856. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/17.1.12>.

[29] RIDPATH, I. *Constellations*. acesso em 16 de março de 2025. Disponível em: <http://www.ianridpath.com/constellations1.html>.

[30] CHÉREAU, F. et al. *Stellarium: Planetarium for your computer*. 2026.

Astrophysics Source Code Library, record ascl:2603.001. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2026ascl.soft03001C>.

[31] SEIDELMANN, P. K. *Explanatory supplement to the Astronomical almanac*. University Science Books, 2006. ISBN 978-1-891389-45-0. Disponível em: <https://archive.org/details/explanatorysuppl00pken/>.

[32] INTERNATIONAL CONFERENCE HELD AT WASHINGTON FOR THE PURPOSE OF FIXING A PRIME MERIDIAN AND A UNIVERSAL DAY. Protocols of the Proceedings. Gibson Bros, 1884. Disponível em: <https://www.gutenberg.org/files/17759/17759-h/17759-h.htm>.

[33] MALYS, S. et al. Why the greenwich meridian moved. *Journal of Geodesy*, v. 89, p. 1263–1272, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00190-015-0844-y>.

[34] IAU. *Resolution B1: "Precession Theory and Definition of the Ecliptic"*. International Astronomical Union, 2006. Disponível em: <https://www.iau.org/Iau/Publications/List-of-Resolutions>.

[35] HUTCHINS, R. M. *Great Books of The Western World - Ptolemy, Copernicus, Kepler*. Enciclopædia Britannica, 1952. 223-232 p. Disponível em: <https://archive.org/details/almagest00ptol/>.

[36] GRANEY, C. M.; GRAYSON, T. P. On the telescopic disks of stars: A review and analysis of stellar observations from the early seventeenth through the middle nineteenth centuries. *Annals of Science*, Taylor & Francis, v. 68, n. 3, p. 351–373, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00033790.2010.507472>.

[37] ARGYLE, B.; ARGYLE, R. W. Observing and measuring visual double stars. In: ____. Springer New York, NY, 2012. cap. The Resolution of a Telescope, p. 105–115. ISBN 978-1-4614-3945-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3945-$5_1$0>.

[38] KITCHIN, C. R. *Telescopes and Techniques*. 3. ed. [S.l.]: Springer, New York, NY, 2013. (Undergraduate Lecture Notes in Physics). ISBN 978-1-4614-4891-4.

[39] NICOLINI, J. *Manual do Astrônomo Amador*. 2. ed. Campinas, SP: Editora Papirus, 1991. ISBN 85-308-0167-9.

[40] WALKER, B. *Optical Design for Visual Systems*. SPIE, 2000. TT45. (SPIE tutorial texts, TT45). ISBN 9780819438867. Disponível em: <https://spie.org/Publications/Book/391324>.

[41] CHITRE, S. M. Overview of solar physics. In: ____. *Lectures on Solar Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 1–26. ISBN 978-3-540-36963-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/3-540-36963-5_1>.

[42] ONKEN", D. *Solar Photon Random Walk*. 2011. Disponível em: <https://psrc.aapt.org/items/detail.cfm?ID=11349>.

[43] AMBASTHA, A. The active and explosive sun. In: ____. *Lectures on Solar Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 127–172. ISBN 978-3-540-36963-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/3-540-36963-5_4>.

[44] TOPKA, K. P.; TARBELL, T. D.; TITLE, A. M. Properties of the smal-

lest solar magnetic elements. ii. observations versus hot wall models of faculae. *The Astrophysical Journal*, v. 484, n. 1, p. 479, jul 1997. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1086/304295>.

[45] HANSLMEIER, A. *The Sun and Space Weather*. 1. ed. Fluwer Academic Publishers, 2002. ISBN 1-4020-0684-5. Disponível em: <https://doi-org/10.1007/0-306-48211-8>.

[46] CHARBONNEAU, P. Fabricius, johann. In: ____. *Biographical Encyclopedia of Astronomers*. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 690–691. ISBN 978-1-4419-9917-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9917-7$_4$33>.

[47] FINOCCHIARO, M. A. Galilei, galileo. In: ____. *Biographical Encyclopedia of Astronomers*. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 772–775. ISBN 978-1-4419-9917-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9917-7$_4$92>.

[48] KANT, H. Scheiner, christoph. In: ____. *Biographical Encyclopedia of Astronomers*. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 1930–1931. ISBN 978-1-4419-9917-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9917-7$_1$229>.

[49] DOBBINS, T. A. Harriot, thomas. In: ____. *Biographical Encyclopedia of Astronomers*. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 908–909. ISBN 978-1-4419-9917-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9917-7$_5$83>.

[50] BRODY, J. *The enigma of sunspots : a story of discovery and scientific revolution*. Edinburgh: Floris Books, 2002. 46-49 p. ISBN 0-86315-370-4. Disponível em: <https://archive.org/details/enigmaofsunspots0000brod>.

[51] SCHEINER, C. *De maculis solarib. et stellis circa Iouem errantibus : accuratior disquisitio, ad Marcum Velserum ... perscripta. Interiectis obseruationum delineationibus*. Augustae Vindelicorum : Ad insigne Pinus, 1612. Disponível em: <https://archive.org/details/demaculissolarib00sche/>.

[52] GINGERICH, O. Copernicus, nicolaus. In: ____. *Biographical Encyclopedia of Astronomers*. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 462–465. ISBN 978-1-4419-9917-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9917-7$_3$03>.

[53] CONWAY, B. L. *Studies in Church History*. B. Herder, 1915. 155-184 p. Disponível em: <https://www.loc.gov/item/15021646/>.

[54] SHEEHAN, W. Schwabe, samuel heinrich. In: ____. *Biographical Encyclopedia of Astronomers*. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 1959–1960. ISBN 978-1-4419-9917-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9917-7$_1$246>.

[55] CHARBONNEAU, P. Wolf, johann rudolf. In: ____. *Biographical Encyclopedia of Astronomers*. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 2366–2368. ISBN 978-1-4419-9917-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9917-7$_1$495>.

[56] HIRSHFELD, A. W. De la rue, warren. In: ____. *Biographical Encyclopedia of Astronomers*. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 546–547. ISBN 978-1-4419-9917-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9917-7$_3$44>.

[57] SHEEHAN, W. Carrington, richard christopher. In: ____. *Biographical Encyclopedia of Astronomers*. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 373–375. ISBN 978-1-4419-9917-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9917-7$_9$034>.

[58] CARRINGTON, R. C. *A catalogue of 3735 circumpolar stars observed at Redhill in the years 1854, 1855, and 1856 and reduced to mean positions for 1855.0*. London: G.E. Eyre and W. Spottiswoode, 1857. Disponível em: <https://archive.org/details/catalogueof3735c00carrrich/>.

[59] CARRINGTON, R. C. *Observations of the spots on the sun from November 9, 1853, to March 24, 1861, made at Redhill*. London: Williams and Norgate, 1863. Disponível em: <https://archive.org/details/observationsofs00carr/>.

[60] SCHOU, J. et al. Helioseismic studies of differential rotation in the solar envelope by the solar oscillations investigation using the michelson doppler imager. *The Astrophysical Journal*, IOP, v. 505, n. 1, p. 390, sep 1998. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1086/306146>.

[61] SNODGRASS, H. B. Magnetic rotation of the solar photosphere. *Astrophysical Journal*, v. 270, p. 288–299, jul 1983. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1983ApJ...270..288S>.

[62] HATHAWAY, D. H. The solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, Springer Science and Business Media LLC, v. 12, n. 1, sep 2015. ISSN 1614-4961. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>.

[63] HAYAKAWA, H. et al. Thaddäus derfflinger's sunspot observations during 1802-1824: A primary reference to understand the dalton minimum. *The Astrophysical Journal*, The American Astronomical Society, v. 890, n. 2, p. 98, feb 2020. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab65c9>.

[64] Spoerer, F. W. G.; Maunder, E. W. Prof. Spoerer's researches on Sun-spots. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 50, p. 251, fev. 1890. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1890MNRAS..50..251S>.

[65] MAUNDER, E. W. Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitude, 1874 to 1902. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 64, n. 8, p. 747–761, 06 1904. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/64.8.747>.

[66] CARRINGTON, R. C. Description of a singular appearance seen in the sun on september 1, 1859. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 20, n. 1, p. 13–15, 11 1859. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/20.1.13>.

[67] HODGSON, R. On a curious appearance seen in the sun. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 20, n. 1, p. 15–16, 11 1859. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/20.1.15a>.

[68] CNEN. *Requisitos Básicos de Radioproteção e Segurança Radiológica de Fontes de Radiação*. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/acesso-rapido/normas/grupo-3/NormaCNENNN3.01.pdf>.

[69] STIX, M. *The Sun*. 2. ed. Springer, 2002. ISBN 978-3-642-56042-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56042-2>.

[70] BERGH, S. van den. Astronomical catastrophes in earth history. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, The Astronomical Society of the Pacific, v. 106, n. 701, p. 689, jul 1994. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1086/133431>.

[71] VASCONCELOS, M. A. R. et al. The serra da cangalha impact struc-

ture, brazil: Geological, stratigraphic and petrographic aspects of a recently confirmed impact structure. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 45, p. 316–330, 2013. ISSN 0895-9811. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981113000448>.

[72] RICCIOLI, G. B. *Almagestum novum*. [S.l.]: ETH-Bibliothek Zürich, 1651.

[73] HEVELIUS, J. *Selenographia*. [S.l.]: ETH-Bibliothek Zürich, 1647.

[74] IAU. *Commission 17: The Moon (La Lune). Transactions of the International Astronomical Union.* [S.l.]: Cambridge University Press, 1973. 109-115 p.

[75] BOZCKO, R. *Conceitos de Astronomia*. 2. ed. São Paulo, SP: Universidade de São Paulo. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, 2022.

[76] IAU. *Resolutions B5 and B6: "Definition of a Planet in the Solar System"AND "Pluto"*. International Astronomical Union, 2006. Disponível em: <https://www.iau.org/Iau/Publications/List-of-Resolutions>.

[77] KEPLER, J. *Astronomia nova: seu physica coelestis, tradita commentariis de motibus stellae Martis*. Heidelberg: Voegelin, 1609. Disponível em: <https://www.e-rara.ch/zut/content/titleinfo/162514>.

[78] KEPLER, J. *Harmonices mundi libri V*. Linz: Johann Planck, 1619. Disponível em: <https://library.si.edu/digital-library/book/ioanniskepplerih00kepl>.

[79] NEWTON, I. *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Londini: Jussu Societatis Regiae ac typis Josephi Streater, 1687. Liber III, Prop. VII, Theor. VII, p. 411. Disponível em: <https://archive.org/details/philosophiaenatu00newt$_0$>.

[80] CAVENDISH, H. Experiments to determine the density of the earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 88, p. 469–526, 1798. Disponível em: <https://archive.org/details/philtrans07861996>.

[81] LEVY, D. *The Quest for Comets - An Explosive Trail of Beauty and Danger*. 1. ed. New York, NY: Springer, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5998-0>.

[82] KELLER, H. U.; KüHRT, E. Cometary nuclei—from giotto to rosetta. *Space Science Reviews*, v. 216, 2020. ISSN 1572-9672. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11214-020-0634-6>.

[83] ARNOLD, G. E. 67P/Churyumov-Gerasimenko-Rosetta mission shortly before second landing on a comet: a review. In: STROJNIK, M. (Ed.). *Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXIV*. SPIE, 2016. v. 9973, p. 99730Q. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.2237158>.

[84] HUGHES, D. W. Cometary absolute magnitudes, their significance and distribution. In: LAGERKVIST, C.-I. et al. (Ed.). *Asteroids, Comets, Meteors III*. Uppsala: Uppsala University Reprocentralen, 1990. p. 327–342. Disponível em: <https://articles.adsabs.harvard.edu//full/1990acm..proc..327H/0000327.000.html>.

[85] MARCUS, J. N. Forward-scattering enhancement of comet brightness. i. background and model. *International Comet Quarterly*, v. 29, n. 2, p. 39–66, 2007. Disponível em: <http://www.icq.eps.harvard.edu/marcus$_icq29_39.pdf$>.

[86] DONN, B. Comets, interstellar clouds and star clusters. *International Astronomical*

Union Colloquium, v. 25, n. Part2, p. 663–672, 1976.

[87] KALINICHEVA, O. V. Comets of the marsden and kracht groups. *Open Astronomy*, v. 27, n. 1, p. 303–309, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/astro-2018-0032>.

[88] WILLIAMS, I. P. The origin and evolution of meteor showers and meteoroid streams. *Astronomy & Geophysics*, v. 52, n. 2, p. 2.20–2.26, 04 2011. ISSN 1366-8781. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1468-4004.2011.52220.x>.

[89] WIEGERT, P. A. et al. The return of the andromedids meteor shower. *The Astronomical Journal*, v. 145, n. 3, p. 70, 2013. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-6256/145/3/70>. Acesso em: 19 maio 2026.

[90] EDDINGTON, A. S. *Stellar Movements and the Structure of the Universe*. London: Macmillan and Co., Limited, 1914. xii, 266 p. (Macmillan's Science Monographs). Disponível em: <https://archive.org/details/stellarmovements00eddirich/page/2/mode/1up>. Acesso em: 17 maio 2026.

[91] PERRYMAN, M. The history of astrometry. *The European Physical Journal H*, v. 37, n. 5, p. 745–792, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1140/epjh/e2012-30039-4>.

[92] ESA. *Hipparcos Overview*. acesso em 2/2/2025. Disponível em: <https://www.esa.int/Science$_E xploration/Space_S cience/Hipparcos_o verview$>.

[93] WENGER, M. et al. The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects. *Astronomy and Astrophysics*, v. 143, p. 9–22, apr 2000. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000AAS..143....9W>.

[94] MARTIN, C.; PLUMMER, H. C. RR Lyræ, On the short-period variable. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 75, p. 566, maio 1915. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1915MNRAS..75..566M>.

[95] PLÍNIO, o Velho. *Histoire naturelle de Pline*: édition littré. tome 1: les premiers 19 livres de la naturalis historia, gallice et latine. Garnier, Nisard et Firmin Didot, 1851. Edição bilíngue latim-francês, consultada em reprodução digital no Internet Archive. Disponível em: <https://archive.org/details/HistoireNaturelleDePlineEditionLittre.Tome1LesPremiers19LivresDeLa/page/

[96] AFONSO, G. B. *Mitos e estações no céu Tupi-Guarani*. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, 2022. Publicado originalmente em Scientific American Brasil, Edição Especial: Etnoastronomia, v. 14, p. 46–55, 2006. Disponível em: <https://revistacienciaecultura.org.br/?artigos=mitos-e-estacoes-no-ceu-tupi-guarani>. Acesso em: 01 maio 2026.

[97] DIRE, J. Globular star clusters. In: ____. *Exploring the Universe: A Practical Guide for Hobbyists*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 217–240. ISBN 978-3-031-65346-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-65346-9$_1$2>.

[98] CARNEY, B. W.; HARRIS, W. E. *Star Clusters*: Saas-fee advanced course 28: Lecture notes 1998 swiss society for astrophysics and astronomy. 1. ed. Berlin; Heidelberg:

Springer-Verlag, 2001. v. 28. 418 p. (Saas-Fee Advanced Course, v. 28). ISBN 978-3-540-67646-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/3-540-31634-5>.

[99] SHAPLEY, H.; SAWYER, H. B. A Classification of Globular Clusters. *Harvard College Observatory Bulletin*, v. 849, p. 11–14, ago. 1927. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1927BHarO.849...11S>. Acesso em: 2026-03-30.

[100] HARRIS, W. E. *A New Catalog of Globular Clusters in the Milky Way*. 2010. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1012.3224>.

[101] KHARCHENKO, N. V. et al. Global survey of star clusters in the milky way. ii. the catalogue of basic parameters. *Astronomy & Astrophysics*, v. 558, 2013.

[102] HUNT, E. L.; REFFERT, S. Improving the open cluster census. iii. using cluster masses, radii, and dynamics to create a cleaned open cluster catalogue. *Astronomy & Astrophysics*, v. 686, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348662>. Acesso em: 2026-03-24.

[103] GONZALEZ, O. A.; GADOTTI, D. A. The milky way bulge: Observed properties and a comparison to external galaxies. 2015. Acesso em: 14 abr. 2026. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1503.07252>.

[104] BLAND-HAWTHORN, J.; GERHARD, O. The galaxy in context: Structural, kinematic, and integrated properties. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 54, p. 529–596, 2016. Acesso em: 14 abr. 2026. Disponível em: <https://www.physics.usyd.edu.au/ jbh/S/ARAA$_2$016.*pdf*>.

[105] AL-DMOUR, E. Fundamentals of vacuum physics and technology. In: CERN ACCELERATOR SCHOOL. *CAS – CERN Accelerator School: Vacuum for Particle Accelerators*. Glumslöv, 2017. p. 23–43. Disponível também como arXiv:2006.01464. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2006.01464>. Acesso em: 27 abr. 2026.

[106] GURZADYAN, G. A. *The Physics and Dynamics of Planetary Nebulae*. 1. ed. Berlin; Heidelberg: Springer, 1997. 513 p. (Astronomy and Astrophysics Library). ISBN 978-3-662-03448-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03448-4>. Acesso em: 22 abr. 2026.

[107] FREW, D. J.; PARKER, Q. A. Planetary nebulae: Observational properties, mimics, and diagnostics. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, v. 27, n. 2, p. 129–148, 2010. ArXiv:1002.1525. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/AS09040>. Acesso em: 23 abr. 2026.

[108] CUISINIER, F. Fósseis para o estudo arqueológico de galáxias. In: VIEGAS, S. M. M.; OLIVEIRA, F. de (Ed.). *Descobrindo o Universo*. São Paulo, SP: Editora da Universidade de São Paulo, 2004. cap. 20, p. 215–222. ISBN 85-314-0794-X.

[109] HOSKIN, M. William herschel and the planetary nebulae. *Journal for the History of Astronomy*, v. 45, n. 2, p. 209–225, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/002182861404500205>. Acesso em: 22 abr. 2026.

[110] FRANKS, W. S. Visual Observations of Dark Nebulæ. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 90, p. 326, jan. 1930. Disponível em:

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1930MNRAS..90..326F>.
[111] BARNARD, E. E. *Catalogue of 349 dark objects in the sky*. [s.n.], 1927. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1927cdos.book.....B>.
[112] BOK, B. J.; REILLY, E. F. Small Dark Nebulae. , v. 105, p. 255, mar. 1947. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1947ApJ...105..255B>.
[113] KULKARNI, P. V. BOK globules. *Bulletin of the Astronomical Society of India*, v. 19, n. 3-4, p. 177–182, set. 1991. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1991BASI...19..177K>.
[114] ELYAJOURI, M.; COX, N. L. J.; LALLEMENT, R. The 15 273 Å diffuse interstellar band in the dark cloud Barnard 68. *Astronomy & Astrophysics*, v. 605, p. L10, set. 2017. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AA...605L..10E>.
[115] TRIMBLE, V. The 1920 shapley-curtis discussion: Background, issues, and aftermath. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, The Astronomical Society of the Pacific, v. 107, n. 718, p. 1133, dec 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1086/133671>.
[116] SHAPLEY, H.; CURTIS, H. D. The Scale of the Universe. *Bulletin of the National Research Council*, v. 2, n. 11, p. 171–217, maio 1921. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1921BuNRC...2..171S>.
[117] LEAVITT, H. S.; PICKERING, E. C. Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. *Harvard College Observatory Circular*, v. 173, p. 1–3, mar. 1912. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1912HarCi.173....1L>.
[118] HUBBLE, E. P. Cepheids in spiral nebulae. *The Observatory*, v. 48, p. 139–142, maio 1925. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1925Obs....48..139H>.
[119] HUBBLE, E. P. No. 310. A spiral nebula as a stellar system. Messier 33. *Contributions from the Mount Wilson Observatory / Carnegie Institution of Washington*, v. 310, p. 1–39, jan. 1926. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1926CMWCI.310....1H>.
[120] HUBBLE, E. P. A spiral nebula as a stellar system, Messier 31. , v. 69, p. 103–158, mar. 1929. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1929ApJ....69..103H>.
[121] BAADE, W. The Period-Luminosity Relation of the Cepheids. , v. 68, n. 400, p. 5, fev. 1956. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1956PASP...68....5B>.

Apêndice A: Alfabeto Grego

Tabela 31. Alfabeto grego

Maiúscula	Minúscula	Nome
A	α	alfa
B	β	beta
Γ	γ	gama
Δ	δ	delta
E	ε	épsilon
Z	ζ	zeta
H	η	eta
Θ	θ	teta
I	ι	iota
K	κ	capa
Λ	λ	lambda
M	μ	mi
N	ν	ni
Ξ	ξ	csi
O	o	ômicron
Π	π	pi
P	ρ	rô
Σ	σ	sigma
T	τ	tau
Y	υ	ípsilon
Φ	ϕ	fi
X	χ	qui
Ψ	ψ	psi
Ω	ω	ômega

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apêndice B: Constelações Oficiais (IAU), Abreviaturas, Genitivos, Tradução.

Tabela 32. Códigos, nomes latinos, genitivos e traduções em português das constelações

Código	Nome latino	Genitivo	Tradução em português
And	Andromeda	Andromedae	Andrômeda
Ant	Antlia	Antliae	Máquina Pneumática
Aps	Apus	Apodis	Ave-do-paraíso
Aql	Aquila	Aquilae	Águia
Aqr	Aquarius	Aquarii	Aquário
Ara	Ara	Arae	Altar
Ari	Aries	Arietis	Carneiro
Aur	Auriga	Aurigae	Cocheiro
Boo	Boötes	Bootis	Boieiro
Cae	Caelum	Caeli	Cinzel
Cam	Camelopardalis	Camelopardalis	Girafa
Cnc	Cancer	Cancri	Caranguejo
CVn	Canes Venatici	Canum Venaticorum	Cães de Caça
CMa	Canis Major	Canis Majoris	Cão Maior
CMi	Canis Minor	Canis Minoris	Cão Menor
Cap	Capricornus	Capricorni	Capricórnio
Car	Carina	Carinae	Quilha
Cas	Cassiopeia	Cassiopeiae	Cassiopeia
Cen	Centaurus	Centauri	Centauro
Cep	Cepheus	Cephei	Cefeu
Cet	Cetus	Ceti	Baleia
Cha	Chamaeleon	Chamaeleontis	Camaleão
Cir	Circinus	Circini	Compasso
Col	Columba	Columbae	Pomba
Com	Coma Berenices	Comae Berenices	Cabeleira de Berenice
CrA	Corona Australis	Coronae Australis	Coroa Austral
CrB	Corona Borealis	Coronae Borealis	Coroa Boreal
Crv	Corvus	Corvi	Corvo
Crt	Crater	Crateris	Taça
Cru	Crux	Crucis	Cruzeiro do Sul
Cyg	Cygnus	Cygni	Cisne
Del	Delphinus	Delphini	Golfinho
Dor	Dorado	Doradus	Dourado
Dra	Draco	Draconis	Dragão
Equ	Equuleus	Equulei	Potro
Eri	Eridanus	Eridani	Eridano
For	Fornax	Fornacis	Fornalha

Continua na próxima página

Tabela 32. Códigos, nomes latinos, genitivos e traduções em português das constelações – continuação

Código	Nome latino	Genitivo	Tradução em português
Gem	Gemini	Geminorum	Gêmeos
Gru	Grus	Gruis	Grou
Her	Hercules	Herculis	Hércules
Hor	Horologium	Horologii	Relógio
Hya	Hydra	Hydrae	Hidra
Hyi	Hydrus	Hydri	Hidra Macho
Ind	Indus	Indi	Índio
Lac	Lacerta	Lacertae	Lagarto
Leo	Leo	Leonis	Leão
LMi	Leo Minor	Leonis Minoris	Leão Menor
Lep	Lepus	Leporis	Lebre
Lib	Libra	Librae	Balança
Lup	Lupus	Lupi	Lobo
Lyn	Lynx	Lyncis	Lince
Lyr	Lyra	Lyrae	Lira
Men	Mensa	Mensae	Mesa
Mic	Microscopium	Microscopii	Microscópio
Mon	Monoceros	Monocerotis	Unicórnio
Mus	Musca	Muscae	Mosca
Nor	Norma	Normae	Esquadro
Oct	Octans	Octantis	Octante
Oph	Ophiuchus	Ophiuchi	Serpentário
Ori	Orion	Orionis	Órion
Pav	Pavo	Pavonis	Pavão
Peg	Pegasus	Pegasi	Pégaso
Per	Perseus	Persei	Perseu
Phe	Phoenix	Phoenicis	Fênix
Pic	Pictor	Pictoris	Pintor
Psc	Pisces	Piscium	Peixes
PsA	Piscis Austrinus	Piscis Austrini	Peixe Austral
Pup	Puppis	Puppis	Popa
Pyx	Pyxis	Pyxidis	Bússola
Ret	Reticulum	Reticuli	Retículo
Sge	Sagitta	Sagittae	Flecha
Sgr	Sagittarius	Sagittarii	Sagitário
Sco	Scorpius	Scorpii	Escorpião
Scl	Sculptor	Sculptoris	Escultor
Sct	Scutum	Scuti	Escudo
Ser	Serpens	Serpentis	Serpente

Continua na próxima página

Tabela 32. Códigos, nomes latinos, genitivos e traduções em português das constelações – continuação

Código	Nome latino	Genitivo	Tradução em português
Sex	Sextans	Sextantis	Sextante
Tau	Taurus	Tauri	Touro
Tel	Telescopium	Telescopii	Telescópio
Tri	Triangulum	Trianguli	Triângulo
TrA	Triangulum Australe	Trianguli Australis	Triângulo Austral
Tuc	Tucana	Tucanae	Tucano
UMa	Ursa Major	Ursae Majoris	Ursa Maior
UMi	Ursa Minor	Ursae Minoris	Ursa Menor
Vel	Vela	Velorum	Vela
Vir	Virgo	Virginis	Virgem
Vol	Volans	Volantis	Peixe Voador
Vul	Vulpecula	Vulpeculae	Raposa

Apêndice C: Automatizando o Stellarium

O Stellarium é um planetário virtual distribuído como software livre (gratuito e de código aberto) que permite simular e visualizar o céu a partir do local e instante definidos pelo usuário.

A versão desktop do Stellarium (Fig. 208) está disponível para os principais sistemas operacionais atuais (Linux, MacOS e Windows) e pode ser baixada gratuitamente no site www.stellarium.org

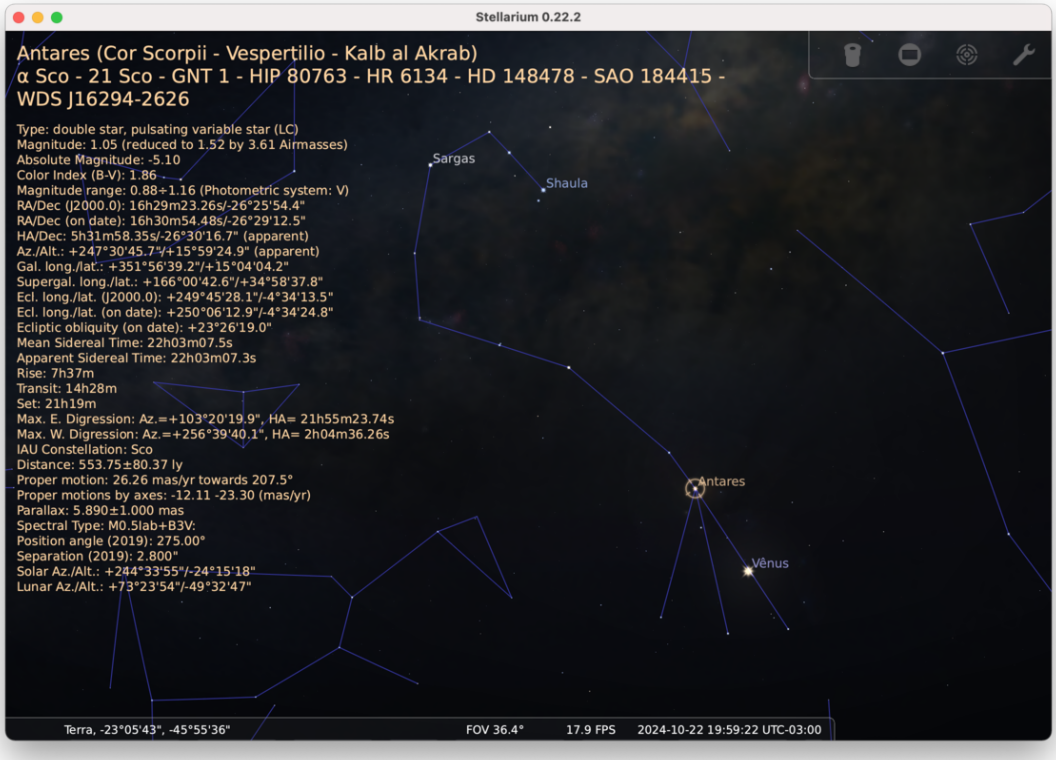


Fig. 208. Tela do planetário virtual Stellarium, exibindo a constelação do Escorpião e informações sobre a estrela Antares

Além dos arquivos de instalação, você encontrará uma documentação completa e clara. Dominando suas principais funções, é possível criar sessões de planetário interativas na tela de seu computador ou mesmo comandar projeções em uma cúpula real de um planetário.

O programa recebe comandos através de sua interface gráfica ou de atalhos no teclado, mas, com um pouco de dedicação e com o apoio da documentação oficial disponível no site, você pode dar um passo à frente e explorar as capacidades de automação do Stellarium utilizando scripts.

A seguir, introduziremos, com exemplos, o básico da automação do Stellarium.

Scripts - O Básico

As sessões do *Stellarium* podem ser enriquecidas, automatizando movimentos e outras mudanças de parâmetros. É possível, por exemplo, criar uma animação suave variando a posição do observador para mostrar a diferença na visualização de determinado evento em função da latitude. Sem necessidade de interromper a execução para inserir a nova localidade a cada passo da sessão.

Essa automação é possível com o uso de scripts que podem ser importados ou escritos diretamente no console de scripts do aplicativo (Fig. 209).

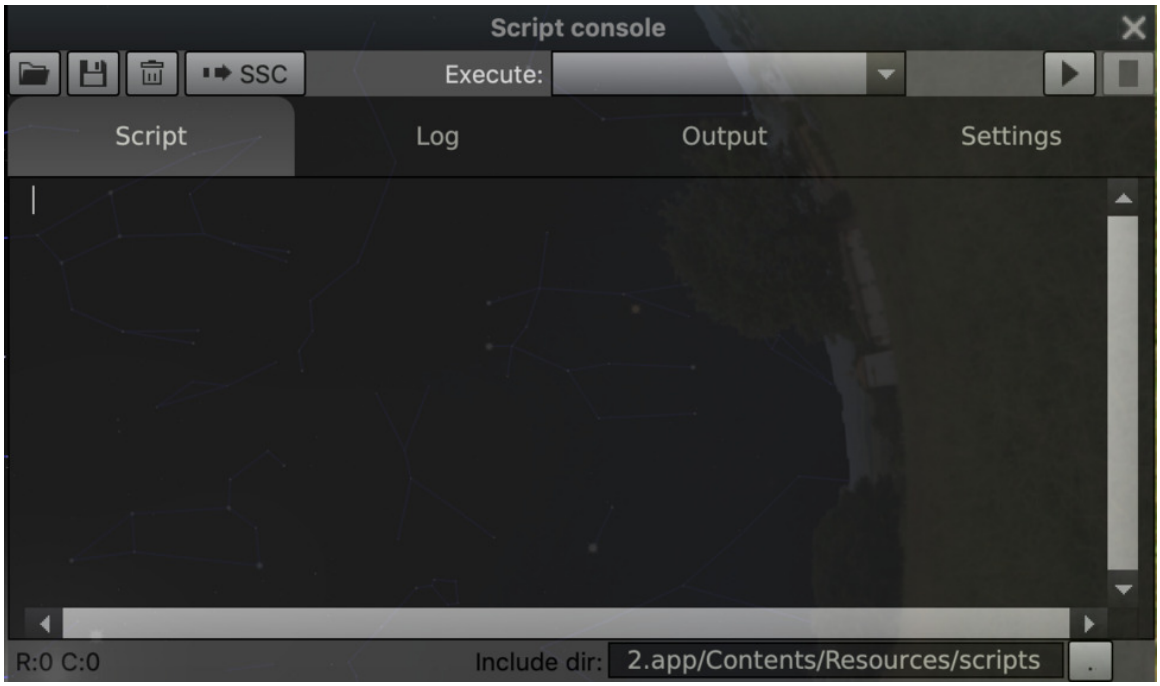


Fig. 209. Console de scripts do Stellarium.

Esse tipo de interação é possível porque partes do código de execução do Stellarium são disponibilizadas para acesso por meio de um interpretador de scripts. Os scripts permitem acessar essas funcionalidades para manipular e controlar parâmetros e variáveis do Stellarium, ativar funções e estabelecer rotinas e condições seguindo um roteiro definido no script.

Hello World!

A linguagem utilizada é a ECMAScript, que define a estrutura e os padrões de sintaxe, mas as funções disponíveis são herdadas inteiramente do código do Stellarium.

Acesse o *Script Console* através da tecla de função F12 e digite o código a seguir:

```
1  //primeiro vamos limpar a tela, apagando
2  //rotulos que possam estar exibidos
3  LabelMgr.deleteAllLabels();
4
5  //criamos variaveis para cada parametro
6  var mensagem = "Hello World!";
7  var posicaoX = 200;
8  var posicaoY = 400;
9  var tamanhoFonte = 36;
10 var corFonte = "#FFFF00" //amarelo
11
12 //exibicao da mensagem
13 LabelMgr.labelScreen(mensagem, posicaoX, posicaoY,
14                       true, tamanhoFonte, corFonte);
```

Listing 1. Hello World

O código acima exibe na tela a mensagem “Hello World!” na posição (200, 400), com coordenadas medidas a partir do canto superior esquerdo da tela (Fig. 210).



Fig. 210. Hello World

Certos parâmetros admitem apenas os valores `true` (verdadeiro) e `false` (falso) e habilitam ou desabilitam visualizações ou modos do aplicativo. Por exemplo: Para exibir os rótulos das constelações, use:

```
ConstellationMgr.setFlagLabels(true)
```

Para ocultar os rótulos, use:

```
ConstellationMgr.setFlagLabels(false)
```

Outros parâmetros admitem valores numéricos ou uma lista, que pode incluir elementos numéricos ou alfanuméricos.

Guia de Referência

Core (Funções Básicas) - Parâmetros de Tempo e Posição

- `core.setDate(''aaaa-mm-ddThh:mm:ss'', ''local/utc'')` - Ajusta a data/hora.
- `core.setDate(''now'')` - Ajusta a data/hora para a data e hora atual do sistema.
- `core.wait(i)` - Introduz uma pausa de i segundos.
- `core.setTimeRate(i)` - Ajusta a velocidade da simulação (0=tempo interrompido, 1=velocidade natural, n=tempo acelerado n vezes.)
- `core.waitFor(''aaaa-mm-ddThh:mm:ss'', ''local/utc'')` - Espera até a data e hora indicadas.
- `core.setObserverLocation(lon, lat, alt, duração, nome, planeta)`

Core (Funções Básicas) - Parâmetros de Exibição

- `core.clear(''natural'')` - Limpa as opções de exibição. Apaga linhas, marcadores e rótulos. Exibe atmosfera e paisagem.
- `core.setGuiVisible(true/false)` - exibe/oculta a interface gráfica.
- `core.setFlagGravityLabels(true/false)` - habilita/desabilita rótulos orientados com o horizonte.
- `core.selectConstellationByName(const)` - Seleciona a constelação indicada. Use o nome da constelação em latim ou o código de três letras (ex: "Virgo" ou "Vir").
- `core.selectObjectByName(''nome do objeto'')` - Seleciona um objeto celeste. Use a designação do objeto em um catálogo de céu profundo (NGC, Messier...), uma designação estelar (Bayer, Flamsteed, HD...), o nome de uma constelação - em latim ou usando a designação de 3 letras da IAU - ou o nome de um planeta (em inglês).
- `core.moveToAltAzi(atura, azimute, duração)` - aponta para a atura e azimute indicados.
- `core.moveToObject(''nome do objeto'', duração)` - aponta para um objeto celeste indicado. Use a designação do objeto em um catálogo de céu profundo (NGC, Messier...), uma designação estelar (Bayer, Flamsteed, HD...), o nome de uma constelação - em latim ou usando a designação de 3 letras da IAU - ou o nome de um planeta (em inglês).
- `core.moveToSelectedObject(duração)` - Aponta para um objeto selecionado.

http://stellarium.org/doc/head/classStelMainScriptAPI.html

LandscapeMgr (Atributos de Cenário)

```
LandscapeMgr.setFlagCardinalPoints(false) //Pontos cardeais.
LandscapeMgr.setFlagAtmosphere(true/false) //Atmosfera.
```

GridLinesMgr (Atributos de Linhas)

Exibir(true)/ocultar(false) atributos de linhas:

```
GridLinesMgr.setFlagEquatorGrid(true/false) //Grade equatorial
GridLinesMgr.setFlagEquatorLine(true/false) //Equador celeste
GridLinesMgr.setFlagAzimuthalGrid(true/false) //Grade azimutal
GridLinesMgr.setFlagEclipticLine(true/false) //Eclíptica
GridLinesMgr.setFlagMeridianLine(true/false) //Meridiano local
GridLinesMgr.setFlagCircumpolarCircles(true/false) //Círculos
    circumpolares
GridLinesMgr.setFlagCelestialPoles(true/false) //Polos celestes
```

http://stellarium.org/doc/head/classGridLinesMgr.html

ConstellationMgr (Atributos de constelações)

```
ConstellationMgr.setFlagArt(true/false) //Arte.
ConstellationMgr.setFlagBoundaries(true/false) //Bordas
ConstellationMgr.setFlagLines(true/false) //Linhas
ConstellationMgr.setFlagLabels(true/false) //Rotulos
```

StelMovementMgr ()

```
StelMovementMgr.lookZenith() //aponta para o zênite.
StelMovementMgr.deselection() //desfaz a seleção de objeto.
StelMovementMgr.zoomTo(campo em graus, duração) //ajusta zoom.
```

http://stellarium.org/doc/head/classStelMovementMgr.html

Loop for

Estrutura:

```
for (i=0; i<valorFinal; i++)
{
//Sequencia de comandos
}
```

Exemplo - Marcar a posição do cometa C/2025 R2 (SWAN) em 10 dias sucessivos, a partir de 20 de setembro de 2025.

```
//Titulo - Cometa C/2025 R2
//Author: Wandeclayt M./@ceuprofundo
//License: CC-BY-NC 4.0

MarkerMgr.deleteAllMarkers(); //limpa todos os marcadores
core.setDate("2025-09-20T22:00:00", "UTC-3"); //ajusta data inicial
core.setTimeRate(0); //interrompe movimento diurno

var pause = 1 //define duracao da pausa
var objeto = "C/2025 R2 (SWAN)" //define o objeto

for (i=0; i<10; i++)
{
MarkerMgr.markerObject(objeto);
var hora = core.getDate();
core.wait(pause);
core.setDate("hora + 1days");
}
```

Listing 2. Exemplo de Script: Posição de um Objeto

Exemplo - Analema.

```
//Titulo - Analema
//Author: Wandeclayt M./@ceuprofundo
//License: CC-BY-NC 4.0

MarkerMgr.deleteAllMarkers();
core.setDate("2025-09-22T17:10:00", "local");
core.setTimeRate(0);

StelMovementMgr.zoomTo(60, 3);
StelMovementMgr.lookWest();

for (i=0; i<54; i++)
    {
        var sun = core.getObjectInfo("Sun");
        var azi = sun.azimuth;
        var alt = sun.altitude;
        MarkerMgr.markerHorizon(azi,  alt, true,
            "crossed-circle", "#CCCCAA", 5, false, 0);
        core.wait(0.5)
        core.setDate("+ 7 days");
    }
```

Listing 3. Exemplo de Script: Analema



Fig. 211. Analema, exibido no céu do Observatório do Pico dos Dias (OPD). Créditos: Wandeclayt M.

Apêndice D: Demonstrações, Equações e Scripts

A Superlua é mesmo Super?

A Lua Cheia de perigeu costuma receber o apelido de Superlua e ser amplamente noticiada como um evento em que a Lua aparece muito maior e mais brilhante do que quando a Lua Cheia ocorre em outro ponto da órbita lunar.

Podemos, conhecendo as distâncias médias da Lua no perigeu e no apogeu, determinar a diferença de diâmetro aparente e magnitude da Lua entre esses pontos e concluir se a Superlua é mesmo Super.

A formula geral para calcular a magnitude aparente de um objeto celeste é

$$m = m_0 - 2,5 \log\left(\frac{F}{F_0}\right), \tag{9}$$

Onde m é a magnitude aparente, m_0 é a magnitude de referência, e F/F_0 é a razão entre o fluxo de radiação observado e o o fluxo de referência. Este é um processo de comparação de magnitudes e é necessária uma magnitude de referência m_0 para determinar a magnitude aparente m de um segundo objeto ou do mesmo objeto em instantes diferentes.

Como o fluxo observado da Lua corresponde à fração da radiação solar refletida pela superfície lunar, podemos escrever

$$F = \frac{L \cdot A \cdot S}{d^2}. \tag{10}$$

Onde L é a constante solar, ou seja, o fluxo de radiação solar recebido na superfície da Lua. A é o albedo lunar, a fração da radiação solar refletida pela Lua. S é a área da superfície lunar visível da Terra. E d é a distância entre a Terra e a Lua.

Como L, A e S permanecem constantes no perigeu e no apogeu, a razão F/F_0 se torna

$$\frac{F}{F_0} = \frac{d^2}{d_0^2}. \tag{11}$$

A variação na magnitude aparente da Lua entre o pergieu e o apogeu fica então

$$\Delta m = m_{\text{apogeu}} - m_{\text{perigeu}} = -2,5 \log\left(\frac{d^2_{\text{perigeu}}}{d^2_{\text{apogeu}}}\right). \tag{12}$$

Utilizando os valores médios de distância entre a Terra e a Lua no perigeu e no apogeu, $d_{\text{perigeu}} = 363300$ km e $d_{\text{apogeu}} = 405500$ km, encontramos

$$\Delta m = -5 \log\left(\frac{363300}{405500}\right) \approx -5 \log(0,896) \approx 0,24. \tag{13}$$

No perigeu a Lua é 0,24 magnitudes mais brilhante que no apogeu. Esta é uma diferença sutil, dificilmente perceptível a olho nu.

O diâmetro aparente da Lua também é um parâmetro que varia com a distância e é dado por

$$\theta = 2\arctan\frac{D}{2d}, \tag{14}$$

onde θ é o diâmetro aparente (angular) da Lua, D é o diâmetro real da Lua ($D = 3478,8$ km) e d é a distância geocêntrica entre a Terra e a Lua.

A razão entre o diâmetro aparente no perigeu e no apogeu fica

$$\frac{\theta_{\text{perigeu}}}{\theta_{\text{apogeu}}} = \frac{2\arctan(D/2d_{\text{perigeu}})}{2\arctan(D/2d_{\text{apogeu}})}. \tag{15}$$

Para pequenos ângulos, $\arctan(x) \approx x$, e a razão $\theta_{\text{perigeu}}/\theta_{\text{apogeu}}$ pode ser simplificada como

$$\frac{\theta_{\text{perigeu}}}{\theta_{\text{apogeu}}} \approx \frac{D/2d_{\text{perigeu}}}{D/2d_{\text{apogeu}}} = \frac{d_{\text{apogeu}}}{d_{\text{perigeu}}}. \tag{16}$$

Utilizando os valores médios de distância no apogeu e no perigeu, resulta

$$\frac{\theta_{\text{perigeu}}}{\theta_{\text{apogeu}}} = \frac{405,5}{363,3} \approx 1,116, \tag{17}$$

indicando um diâmetro aparente 11,6% maior no perigeu. Assim como a diferença de brilho entre os pontos extremos da órbita lunar, de apenas 0,24 magnitudes, a diferença no diâmetro aparente também é sutil e dificilmente perceptível.

Leis de Kepler

Terceira lei de Kepler

A força gravitacional entre dois corpos de massas M e m separados por uma distância r é proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles e é direcionada ao longo da linha que une os corpos:

$$\vec{F}_g = G\frac{M.m}{r^2}\hat{r} \tag{18}$$

A força centrípeta que leva um corpo de massa m a descrever uma órbita circular de raio r, com módulo de velocidade v é:

$$\vec{F}_{cp} = m.\vec{a}_{cp} = m\frac{v^2}{r}\hat{r} \tag{19}$$

Fica claro que, no caso de órbitas planetárias, a força centrípeta é a força gravitacional:

$$\vec{F}_g = \vec{F}_{cp} \tag{20}$$

Igualando as equações 18 e 19:

$$G\frac{M.m}{r^2}\hat{r} = m\frac{v^2}{r}\hat{r} \tag{21}$$

Dividindo ambos os lados da equação por m e fazendo $v = 2\pi r/T$, onde T é o período órbital e r é o raio da órbita, resulta:

$$G\frac{M}{r^2} = \frac{v^2}{r} = \left(\frac{2\pi.r}{T}\right)^2\frac{1}{r} \tag{22}$$

Reordenando os termos, encontramos:

$$\frac{GM}{4\pi^2} = \frac{r^3}{T^2}. \tag{23}$$

Como $GM/4\pi^2$ é constante, demonstramos que a razão $r^3 : T^2 =$ constante, conforme enunciado por Kepler em sua terceira lei.

Kepler publicou suas leis entre 1609 e 1619, elaborando-as de maneira puramente empírica, baseando-se nas observações realizados por seu mentor, o astrônomo Tycho Brahe. A mecânica e a gravitação newtoniana usados nesta demonstração não estavam disponíveis para Kepler, uma vez que Newton só nasceria décadas mais tarde.

Perceba que é possível isolar M na eq. 23 e que conhecendo r e T de um objeto de massa $m << M$ orbitando um corpo central, podemos encontrar a massa M:

$$M = \frac{4\pi^2}{G}\cdot\frac{r^3}{T^2}. \tag{24}$$

Magnitude limite

A capacidade de um telescópio e de nossa pupila de captar luz depende da área de sua abertura. Assim, uma pupila completamente adaptada ao escuro e dilatada, representa a melhor condição para a observação a olho nu. Nessa condição é possível perceber estrelas de magnitude 6. Considerando uma abertura máxima da pupila de 7 mm, teremos uma área de

$$a = \pi \times r_{\text{pupila}}^2 = \pi \times \left(\frac{7 \text{ mm}}{2}\right)^2 = 38,5 \text{ mm}^2.$$

Em comparação, em um telescópio refletor de 200 mm de diâmetro, a área do espelho primário é:

$$A = \pi \times r_{\text{telesc}}^2 = \pi \times \left(\frac{200 \text{ mm}}{2}\right)^2 = 31415 \text{ mm}^2.$$

Isso representa uma área 816 vezes maior que a de nossa pupila. Ou seja, um telescópio de 200 mm (8") tem capacidade de coletar 816 vezes mais luz do que nossa pupila.

Considerando as propriedades logarítimicas da escala de magnitudes, podemos determinar o incremento na magnitude limite observável através do telescópio comparada ao limite observável a olho nu pela expressão:

$$\Delta_m = 2,5 \log_{10}\left(\frac{A}{a}\right). \tag{25}$$

A razão entre as áreas pode ser simplificada como

$$\frac{A}{a} = \frac{\pi(D/2)^2}{\pi(d/2)^2} = \left(\frac{D}{d}\right)^2,$$

onde D e d são, respectivamente, o diâmetro do telescópio e da pupila dilatada.

Podemos agora reescrever a Eq. 25 como

$$\Delta_m = 2,5 \log_{10}\left(\frac{D}{d}\right)^2 = 5(\log_{10} D - \log_{10} d). \tag{26}$$

A magnitude limite observada com o telescópio corresponderá ao limite a olho nu, acrescido de Δ_m:

$$m_{\text{limite (telesc)}} = m_{\text{limite (olho nu)}} + \Delta_m. \tag{27}$$

Considerando a abertura máxima da pupila de 7 mm e o limite a olho nu de 6 magnitudes encontramos a expressão:

$$\begin{aligned} m_{\text{limite (telesc)}} &= 6 + 5 \log_{10} 7 + 5 \log_{10} D_{\text{telesc}} \\ &= 1,775 + 5 \log_{10} D_{\text{telesc}}. \end{aligned} \tag{28}$$

Magnitude Absoluta

Quando medimos o fluxo luminoso de uma estrela, como a vemos da Terra, estamos determinando sua magnitude aparente. Aparente porque uma estrela muito luminosa pode parecer pouco brilhante se sua distância até a Terra é muito grande. Ao contrário, Sírius, uma estrela razoavelmente modesta, mas próxima, aparece para nós como a estrela mais brilhante do céu noturno.

Para comparar apropriadamente as luminosidades estelares, precisamos definir uma nova quantidade: a magnitude absoluta. A magnitude absoluta corresponde à magnitude observada com as estrelas a uma distância padrão, definida como 10 parsecs (32,6 anos-luz).

A magnitude aparente da estrela está relacionada com a magnitude absoluta e a distância até a estrela pela relação

$$m_{ap} = m_{abs} - 2{,}5\log_{10}\left(\frac{F}{F_0}\right), \tag{29}$$

onde F é o fluxo medido na Terra e F_0 é o fluxo a 10 parsecs.

Sendo o fluxo inversamente proporcional ao quadrado da distância, podemos reescrever:

$$\begin{aligned} m_{ap} &= m_{abs} - 2{,}5\log_{10}\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \\ &= m_{abs} - 5\log_{10}\left(\frac{d_0}{d}\right) \\ &= m_{abs} - 5\log_{10} d_0 + 5\log_{10} d \end{aligned} \tag{30}$$

A distância em parsecs pode ser encontrada a partir das paralaxes medidas, em milissegundos de arco(*mas*), e disponibilizadas em catálogos abertos como o produzido pela missão Gaia. A relação para a distância é simplesmente

$$d = \frac{1000}{\varpi}, \tag{31}$$

onde ϖ é a paralaxe em *mas*. Fazendo $d_0 = 10$parsecs e $d = 1000/\varpi$, a Eq. (30) fica:

$$\begin{aligned} m_{ap} &= m_{abs} - 5\log_{10} 10 + 5\log_{10}(1000/\varpi) \\ &= m_{abs} - 5\log_{10} 10 + 5\log_{10} 1000 - 5\log_{10}\varpi \\ &= m_{abs} - 5\log_{10}\varpi + 10. \end{aligned} \tag{32}$$

Reorganizando os termos, encontramos a equação para computar a magnitude absoluta apartir da magnitude aparente e da paralaxe:

$$m_{abs} = m_{ap} + 5\log_{10}\varpi - 10. \tag{33}$$

Propriedades dos logaritmos.

$$\log_b A = x \implies b^x = A. \tag{34}$$

$$\log_b(AB) = \log_b A + \log_b B \tag{35}$$

$$\log_b\left(\frac{A}{B}\right) = \log_b A - \log_b B \tag{36}$$

$$\log_b(A^n) = n\log_b A \tag{37}$$

$$\log_b(A) = \frac{\log_c A}{\log_c b} \tag{38}$$

$$\log_b(1) = 0 \tag{39}$$

$$\log_b(b) = 1 \tag{40}$$

Image Magick

O ImageMagick é uma ferramenta gratuita e de código aberto para manipulação e processamento de imagens digitais. Ela foi usada extensivamente para editar muitas das imagens que aparecem neste trabalho. O software e sua documentação podem ser obtidos em https://imagemagick.org. Abaixo, listamos alguns exemplos de uso do ImageMagick usando o terminal:

1. Conversão de todos os arquivos com extensão jp2 para png.

```
magick mogrify -format png *.jp2
```

2. Corte de uma faixa horizontal de 512 px abaixo do centro da imagem.

```
magick *.png -crop 4096x512+0+2048 *.png
```

3. Mosaico.

```
magick montage arquivo0.png arquivo1.png ... arquivo9.png
       -tile 1x10 -geometry +0+10 -background white \
       arquivodesaida.png
```

4. Redimensionamento.

```
magick arquivo.png -resize 50% arquivoredimensionado.jpg
```

5. Texto sobre imagem (1).

```
magick arquivo.png -font Arial -pointsize 20 \
       -draw "gravity south fill white text x,y 'texto' " \
       arquivoanotado.png
```

Apêndice E: Histórico de Versões

V 0.1.0 β - 2025-09-20.

V 0.1.1 β - 2025-11-25.

V 0.2.0 β - 2026-05-01.

V 0.2.1 β - 2026-05-25. Inclusão de lista de tabelas. Justificação de legendas. Inclusão de tabelas (semieixo maior e período orbital) dos planetas e planetas anões e dos satélites galileanos.