

Francisco Conte



Uma História  
da astronomia a  
partir dos avanços  
tecnológicos



Francisco Conte

Uma História  
da astronomia a  
partir dos avanços  
tecnológicos

São Paulo, 2021

Revisão

Maria da Anunciação Rodrigues (Ção)

Maria Eduarda Frabasile

Guilherme Lindner de Azevedo Conte

Capa

Katia Huertas e Francisco Conte

Projeto gráfico e diagramação

Katia Huertas

(Colaboração Francisco Conte)

Orientador

Prof. Dr. Roberto Dell'Aglio Dias da Costa

Francisco A. A. Conte

Uma História

da astronomia a partir dos avanços tecnológicos

Astronomia

2021

Universidade de São Paulo

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

Departamento de Astronomia

Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Astronomia

Capa: Telescópio Gillett no topo do Mauna Kea. Foto: Francisco Conte

## **PREFÁCIO**

### **A IDEIA DO LIVRO**

A história da astronomia foi sendo construída, notadamente a partir do século XVII, sempre ligada diretamente ao desenvolvimento tecnológico. Toda vez que uma invenção importante, ou a criação de uma nova técnica, ou a incorporação de novas tecnologias provenientes de outra área da ciência aconteciam, em seguida ocorria um período de descobertas e uma grande ampliação do conhecimento. A evolução não é linear, é como subir uma escada, em que cada degrau dá acesso a um novo patamar, cada vez mais elevado. A ideia deste trabalho é contar um pouco de como essa evolução ocorreu, quais foram os avanços tecnológicos mais importantes e sempre que possível mostrar o que isso acarretou no conhecimento astronômico.

Outro ponto importante é caracterizar o que vem acontecendo nas últimas décadas, quando várias inovações tecnológicas em áreas diversas estão sendo incorporadas quase que simultaneamente na astronomia, resultando em uma era de grandes avanços no conhecimento, a um ritmo nunca visto anteriormente. Estamos compreendendo cada vez mais e de forma mais profunda como funciona o nosso universo.

## SUMÁRIO

<b>Introdução</b>	<b>8</b>
<b>Parte 1 – Uma nova astronomia</b>	<b>12</b>
Introdução: A astronomia apontando os rumos da nova ciência	12
Capítulo 1 - Vendo mais longe – A era do telescópio	16
Primeiros avanços técnicos	20
Telescópios refletores	22
William Herschel	29
Século XIX	33
Capítulo 2 - Arquivando a luz – Fotografia	39
Capítulo 3 - Espectroscopia, a chave de um novo conhecimento	52
Capítulo 4 - Rumo às montanhas – Temos um universo a descobrir	66
Capítulo 5 - Observando o invisível – Radioastronomia	88
Interferometria	104
Capítulo 6 - Satélites e sondas	108
Telescópios espaciais	113
Sondas do Sistema Solar	115
Capítulo 7 - Telescópios ópticos na década de 1970	122
<b>Parte 2 – Tudo ao mesmo tempo agora</b>	<b>132</b>
Introdução	132
Capítulo 8 - Telescópios ópticos nos anos 1980 e 1990 – A tecnologia muda o jogo	133
Capítulo 9 - Sondas do Sistema Solar na virada do milênio	147
Capítulo 10 - Telescópios espaciais na virada do milênio	157
Luz visível	157
Infravermelho	161
Telescópios solares	163
Micro-ondas	163
Futuro	164
Capítulo 11 - Astronomia de altas energias	165

Capítulo 12 - Novas janelas na astronomia	171
Raios cósmicos	172
Neutrinos	179
Ondas gravitacionais	185
Capítulo 13 - Radioastronomia na virada do milênio	190
Capítulo 14 - Telescópios ópticos na virada do milênio	200
Principais descobertas do período	207
Telescópios do futuro	212
Capítulo 15 - Astronomia amadora na virada do milênio	215
Capítulo 16 - <i>Big data, machine learning...</i> Para onde vamos?	223
<b>Apêndices</b>	
Apêndice 1 – Paralaxe e distâncias	228
Apêndice 2 – Magnitudes	230
Apêndice 3 – Características dos telescópios	232
Apêndice 4 – Tipos de telescópios	235
Apêndice 5 – Montagens	238
Apêndice 6 – Diagrama HR	242
Apêndice 7 – Espectro eletromagnético	244
<b>Bibliografia</b>	<b>247</b>

## INTRODUÇÃO

A partir de evidências arqueológicas encontradas em quase todas as partes do planeta podemos afirmar que a astronomia é a mais antiga das ciências da natureza. Entre os exemplos estão um osso entalhado com as fases da Lua da cultura Aurignaciana (França e Alemanha), com cerca de 34 mil anos de idade; Wurdi Youang, um campo com pedras alinhadas na Austrália, com cerca de 11 mil anos; Warren Field, na Escócia, um calendário lunar construído em pedra, datado de 8000 a.C.; o muito conhecido sítio de Stonehenge (ver figura 1); os desenhos de constelações nas ruínas de Puyang Tomb, na China, datados de 5000 a.C.; escritos astronômicos na Suméria e Babilônia, datados entre 3500 a.C. e 1200 a.C.; e, na América, os arranjos de pedras na Colômbia conhecidos como *infernitos*, com cerca de 2,8 mil anos de idade, e, no Amapá, o observatório de Calçoene, com idade estimada entre 500 e 2 mil anos.



Figura 1 - Stonehenge: monumento pré-histórico localizado no sul da Inglaterra. A construção, composta de pilares e vigas de pedra formando pórticos em uma disposição circular, tem 33 m de diâmetro, com pilares que chegam a 4 m de altura e a 25 toneladas de peso. Stonehenge deve ter sido um local para prática de rituais, mas vários alinhamentos astronômicos são percebidos, tanto para o Sol, como para a Lua e possivelmente para algumas estrelas como Sirius. O alinhamento mais importante ocorre no solstício de verão, quando numerosos grupos de turistas visitam o local. Foto: Francisco Conte.

Esse desenvolvimento precoce espalhado pelo mundo tem uma razão: a astronomia era necessária ao homem primitivo, seja para o desenvolvimento de calendários, capazes de antecipar as épocas corretas para o plantio de alimentos ou a chegada das estações frias ou chuvosas, seja para a navegação e orientação de viajantes que se deslocassem



em locais inóspitos ou desconhecidos, onde a observação do céu era essencial. A astronomia era vital também no cálculo das marés, que influenciavam a vida da maior parte da população do planeta que morava nas áreas litorâneas. Elaborar calendários, tabelas de marés e mapas para localização de viajantes exigia horas de observação sistemática do céu. Hoje vivemos dissociados desse processo, o homem moderno não precisa mais observar o céu, podendo consultar rapidamente qualquer informação a respeito de marés ou calendário em seu celular ou computador. Poucos têm consciência da importância da astronomia no seu cotidiano.

A astronomia é uma ciência intrinsecamente observacional e, ao longo de seu desenvolvimento, lentamente foram surgindo pequenos avanços tecnológicos, seja através da criação de instrumentos de medição que iam de um simples gnômon até aparelhos muito mais sofisticados, como o sextante, o oitante, as esferas armilares e os astrolábios (ver figura 2), seja pelo aprimoramento da medição de ângulos e posições de objetos celestes.

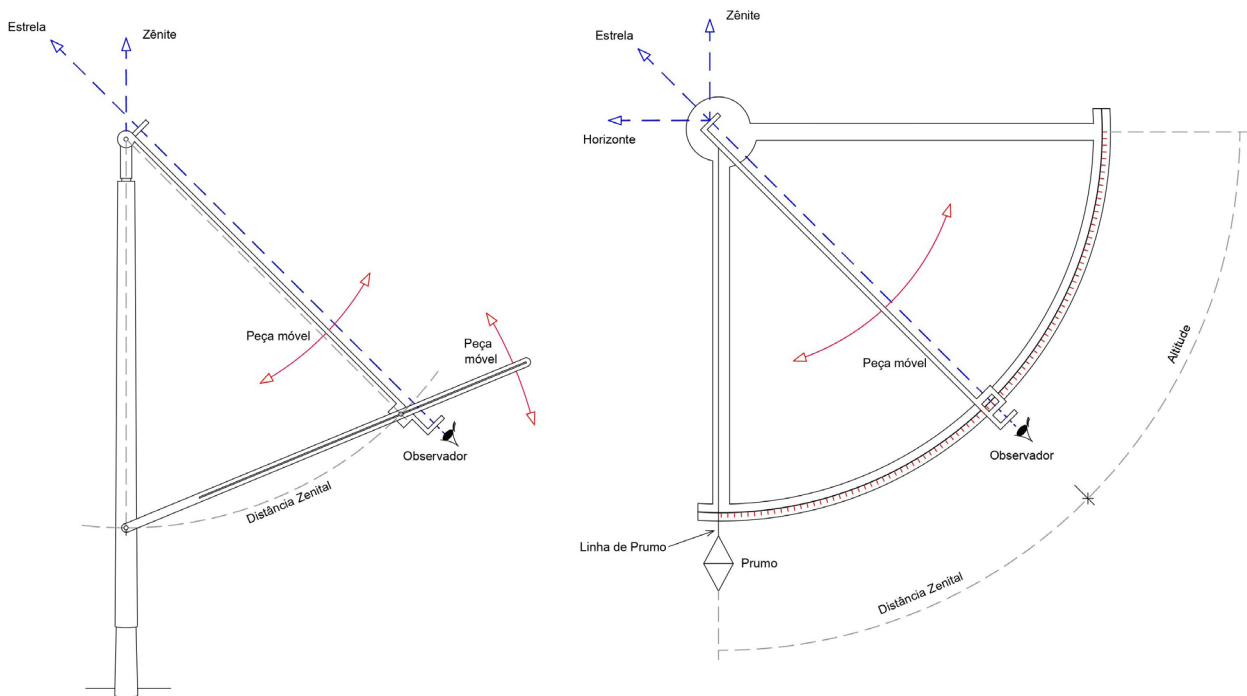


Figura 2 - O *triquetrum*, ou régua de Ptolomeu, à esquerda, e o quadrante. Dois instrumentos utilizados para medir a altura de um objeto celeste em relação ao horizonte. O ângulo pode ser medido olhando-se diretamente para o objeto a partir de um orifício feito na haste móvel. No quadrante o ângulo pode ser observado diretamente no arco graduado. No *triquetrum*, pode ser feita uma marcação na haste e posteriormente realizada a transferência do ângulo para um desenho. O *triquetrum* era muito mais facilmente construído, pois não exigia que fosse erguido um complexo arco graduado. Desenho: Francisco Conte, baseado em King (2003, p. 8).

Alguns registros em placas de argila com mais de três mil anos de idade mostram que a Babilônia possuía uma astronomia muito avançada, com o céu dividido em constelações, acompanhamento do movimento dos planetas e a crença em um universo heliocêntrico

(com o Sol no centro). Na Grécia antiga podemos encontrar vários trabalhos que se tornaram por séculos a base do conhecimento astronômico em todo o mundo. Tales de Mileto (624-546 a.C.) conseguia prever eclipses. Demócrito de Abdera (460-390 a.C.) acreditava que a Via Láctea era composta por muitos sóis distantes. Ao observar um eclipse lunar por volta do ano 350 a.C., Aristóteles deduziu, pela forma da sombra, que a Terra deveria ser esférica, embora acreditasse que ela era estática e que os céus girassem ao seu redor (sistema geocêntrico). Um século e meio depois, por volta do ano 200 a.C., o também grego Aristarco propôs que na verdade o Sol era o centro do universo e a Terra, os planetas e as estrelas giravam em sua volta.

Ainda na Grécia, utilizando apenas um simples gnômon, Eratóstenes, nascido em Cirene no ano de 276 a.C., conseguiu medir o diâmetro da Terra com boa precisão. Profundo estudioso de astronomia, Eratóstenes leu um texto que mencionava o fato de que ao meio-dia do dia de solstício de verão em Assuã o Sol ficava perfeitamente no zênite e a superfície de um poço profundo era iluminada apenas nesse momento. Se a Terra fosse plana, todos os pontos da superfície deveriam se comportar dessa mesma forma. Nessa época Eratóstenes morava em Alexandria. Ele mediu a sombra de uma simples estaca (o gnômon) e obteve o ângulo de  $7,2^\circ$ . Estando o Sol em uma posição distante, este ângulo só poderia ser causado por uma superfície curva. Contratou então um caminhante para medir a distância entre as duas cidades, obtendo o total de 5.040 estádios. Não havia padronização de medidas na época, e o valor do estádio não era fixo, mas pesquisadores modernos estimam que o estádio utilizado no trabalho de Eratóstenes equivaleria a pouco menos de 160 metros. A partir deste valor a estimativa para a circunferência da Terra pode ser calculada em 39.700 km, muito próxima dos valores obtidos atualmente para o perímetro polar da Terra, de aproximadamente 40.007,86 km (a medida de Eratóstenes foi feita aproximadamente na direção norte-sul).

Por volta do ano 130 a.C., o astrônomo Hiparco desenvolveu o mais avançado trabalho astronômico de seu tempo, um catálogo dos céus com a posição de centenas de estrelas e outros objetos celestes. Em seu catálogo Hiparco introduziu um equador celeste, assim como os polos norte e sul e a eclíptica, conceitos que são utilizados até hoje. Comparando a posição das estrelas no equinócio de outono com observações realizadas por Timocharis 150 anos antes do seu trabalho, ele percebeu que havia ocorrido um deslocamento, descobrindo assim o movimento de precessão da Terra.

Por volta do ano 110 d.C., o astrônomo chinês Zhang Heng explicou de maneira correta que a Lua não possuía luz própria e era iluminada pelo Sol. Pouco depois, por volta de 150 d.C., o matemático, geógrafo e astrônomo grego Ptolomeu escreveu três obras que sintetizaram o conhecimento da época e que norteariam a cultura ocidental até a época de Copérnico, incluindo o modelo geocêntrico e uma reedição revisada do catálogo de Hiparco.

Por volta do ano 530 d.C., o astrônomo indiano Aryabhata propôs que as estrelas no céu eram fixas, e que seu aparente movimento para o Oeste era causado pela rotação da Terra, um conceito abandonado desde a Grécia antiga. Em seus trabalhos, escritos por volta do ano 950, o persa Abd al-Rahman al-Sufi descreve uma “nuvem” que não se movia em relação às estrelas, permanecendo na mesma região do céu. O objeto é

uma galáxia anã conhecida hoje como Grande Nuvem de Magalhães. Foram mercadores persas que navegavam em direção ao sul que fizeram a observação, não Al-Sufi, mas ele incluiu a descoberta em suas compilações de catálogos de estrelas.

Em 1279, o astrônomo chinês Guo Shoujing conseguiu calcular a duração do ano solar com a maior precisão até então: 365 dias, cinco horas, 49 minutos e 12 segundos, muito próximo do valor correto. Por volta do ano 1437, no que hoje é o Azerbaijão, Ulugh Beg, ou Grande Líder, o pseudônimo de Mirza Muhammad Taraghay Bin Shakrukh, publica um catálogo de estrelas conhecido por Zij-Sultani (o catálogo de estrelas do Sultão). Nele Ulugh Beg descreve as posições de 1.022 estrelas contidas no *Almagesto*, corrigindo a posição de 922 destas; faz previsões para eclipses e para o momento de nascimento e pôr do Sol em várias épocas do ano e consegue estimar a duração do ano estelar, com um erro de apenas 20 segundos, entre outros feitos importantes. Para realizar esse trabalho ele havia construído o melhor observatório astronômico da história, com instrumentos gigantescos, incluindo um quadrante com mais de 11 metros de diâmetro. Infelizmente a maior parte desses instrumentos foi destruída após sua morte. Suas observações só foram superadas após mais de 150 anos por Tycho Brahe.

Aqui vale um comentário: a duração do ano solar não se ajusta perfeitamente com a duração do dia. O valor atual médio é de 365 dias, cinco horas, 48 minutos e 46 segundos. Essa sobra de pouco menos de seis horas implica a necessidade de algum tipo de procedimento para compensar a diferença. A solução adotada foi criar um ano bissexto com um dia a mais (29 de fevereiro), a cada quatro anos. Mas a diferença não é de exatas seis horas, mas um minuto e 14 segundos menor. Com o passar de grandes intervalos de tempo essa pequena diferença acaba se acumulando – após 400 anos, soma aproximadamente três dias. Isso exige a criação de outro procedimento para corrigir a diferença, pois sem esse ajuste as datas de solstícios e equinócios acabariam sendo alteradas. Para evitar o problema, ficou decidido que, a cada quatro anos bissextos terminados em 100, três deixariam de ter o dia extra. Desta forma, o ano 2000 foi bissexto, mas 2100, 2200 e 2300 não serão. Então 2400 voltará a ser bissexto. Esse ajuste no calendário foi incluído apenas no século XVI, mas fornece uma correção muito precisa, que adotamos até hoje.

Desde antigos tempos podemos perceber que a astronomia sempre foi praticada ativamente, com observadores espalhados pelo mundo. Eventualmente várias descobertas foram sendo feitas, ao mesmo tempo em que uma série de instrumentos eram desenvolvidos por comunidades independentes, de maneira a simplificar ou aprimorar as observações astronômicas, num processo contínuo de aperfeiçoamento, mesmo que nos estágios iniciais em um ritmo muito mais lento que nos séculos mais recentes. A intenção deste trabalho é descrever como a introdução de melhorias ou invenções tecnológicas alavancou a história da astronomia, uma vez que quase invariavelmente foram seguidas de um período de grandes descobertas astronômicas.

## PARTE 1 – UMA NOVA ASTRONOMIA

### Introdução: A astronomia apontando os rumos da nova ciência

O período que antecedeu a invenção do telescópio em muitos aspectos já antecipava a importância da tecnologia no desenvolvimento da astronomia, e também no surgimento da ciência moderna, baseada na observação e na criação de modelos teóricos que explicassem os fenômenos observados.

Esse período notável tem início com a publicação do livro de Nicolau Copérnico que propõe o sistema heliocêntrico, em 1543, ano de sua morte. Copérnico critica o modelo geocêntrico, mostrando que na verdade ele não era um sistema, mas uma série de explicações isoladas (sistemas) para a órbita de cada planeta. Já no sistema heliocêntrico a descrição da órbita aparente de cada planeta era dada por sua distância e movimento próprio deles em relação ao Sol, com um único modelo como base. A análise estava correta e o sistema solar é realmente heliocêntrico, mas as previsões que o sistema conseguia produzir não eram melhores do que aquelas que se podiam realizar com o sistema geocêntrico. A crítica copernicana estava mais ligada à beleza do modelo heliocêntrico em relação ao amontoado de modelos do sistema geocêntrico, embora não existissem observações que comprovassem essa ideia.

Isso começa a mudar com Tycho Brahe. Tyge Ottesen Brahe nasceu no castelo de Knutstorp, na época território da Dinamarca que hoje pertence à Suécia, em dezembro de 1546, pouco antes da publicação do livro de Copérnico. Era o filho mais velho, entre 12 irmãos, de uma abastada e nobre família. Teve uma refinada educação e desde cedo demonstrou interesse por astronomia. Em 1567 Tycho decide se dedicar à ciência e constrói um quadrante, que utiliza para fazer suas primeiras observações. Em 1571 ocorre a morte de seu pai e seu casamento com Kirsten Jørgensdatter, que não pertencia à nobreza. Tycho viveu com Kirsten por mais de 30 anos, até sua morte, tendo tido com ela oito filhos, dos quais seis chegaram à idade adulta. Ele ficou conhecido também por suas excentricidades, como ter um alce como animal de estimação ou usar uma prótese de nariz de prata, depois que perdeu parte do nariz em um duelo. Mas sua contribuição à ciência é incontestável.

Em 1572, Tycho faz a descoberta que muda sua vida. Na constelação de Cassiopeia ele observa o surgimento de uma estrela até então nunca vista. Ela era bastante brilhante, não possuía movimento próprio como os planetas nem uma paralaxe observável com os instrumentos da época, o que significava que sua distância era maior do que a da Lua. Essa constatação punha em xeque a cosmologia aristotélica, que dominava o pensamento das elites europeias de então, pois esta pregava que além da esfera da Lua se localizava a esfera das estrelas, que era imutável e perfeita. O surgimento de uma nova estrela contradizia o caráter permanente e imutável dos céus. Tycho observou a estrela por um período de cerca de um ano, percebendo que, após uma fase de grande brilho inicial, a estrela foi lentamente diminuindo de brilho, até desaparecer de maneira definitiva. Tycho publicou suas observações em um livro chamado *De nova stella* (A estrela nova), utilizando pela primeira vez o termo “nova” para designar esse tipo de astro. O livro tornou Tycho Brahe famoso em toda a Europa. Hoje o fenômeno que Tycho observou é chamado de “supernova”, e os remanescentes da explosão que ele viu receberam o nome de SN1572, mas ela também ficou conhecida como Supernova de Tycho.

Nos anos seguintes Tycho continuou a fazer observações e divulgá-las através de livros, que faziam com que sua fama de observador se espalhasse por toda a Europa. Depois, fez uma viagem para a Alemanha, Suíça e Itália, na qual desempenhou o papel de representante do rei da Dinamarca. O rei resolveu então premiar seu trabalho com uma posição no reino. Ao final, Tycho recebeu a ilha de Hven e uma verba para construir seu observatório. Note-se que antes o rei havia oferecido a Tycho a possibilidade de viver em um entre dois castelos a sua escolha, mas ele relutou em aceitar essas ofertas, já que preferia focar em seu trabalho científico.

Em Hven Tycho foi gradativamente montando uma estrutura admirável para a época, que em muito se assemelha ao que observatórios modernos fazem. Tycho construiu os melhores instrumentos astronômicos de seu tempo, maiores que os instrumentos utilizados no resto da Europa, o que aumentava a precisão. Além disso, eles eram firmemente apoiados no solo (a maioria dos observadores usava instrumentos manuais). Para isso, ele instalou tanto uma carpintaria quanto uma serralharia, pois dessa forma ele mesmo podia projetar e construir seus instrumentos. Incluiu ainda uma gráfica, para que ele próprio pudesse editar os livros, que passou a publicar frequentemente com suas observações e descobertas.

Entre os principais instrumentos fabricados por Tycho temos um quadrante azimutal de latão, do ano de 1576; um grande globo celeste, também de latão, do ano de 1580; no ano seguinte, construiu uma grande esfera armilar; em 1582, um sextante triangular; em 1585, uma grande armilar equatorial; um quadrante giratório de madeira no ano de 1586 e um quadrante giratório de aço em 1588 (Ver figuras 3 e 4).

Percebendo que a precisão de suas observações diminuía pela ação do vento e de agentes externos em seu palácio, conhecido como Uraniborg, literalmente Castelo de Urânia, a musa da astronomia, resolveu reconstruir o observatório, desta vez em um pavimento subterrâneo, com aberturas para observação. Isso se demonstrou um grande acerto. O novo observatório foi batizado de Stjerneborg, ou Castelo das Estrelas. Tycho, obcecado pela precisão, inventou e desenvolveu novas técnicas observacionais com excelentes resultados, acabando por realizar as melhores observações de seu tempo.



Figura 3 - O quadrante mural de Tycho Brahe em Uraniborg. Ilustração de autor desconhecido, do livro *Astronomiae instauratae mechanica*, de Wandsbeck, 1598. A gravura mostra o método de observação de Tycho em seu observatório, além de alguns de seus instrumentos. Fonte: Wikimedia Commons.

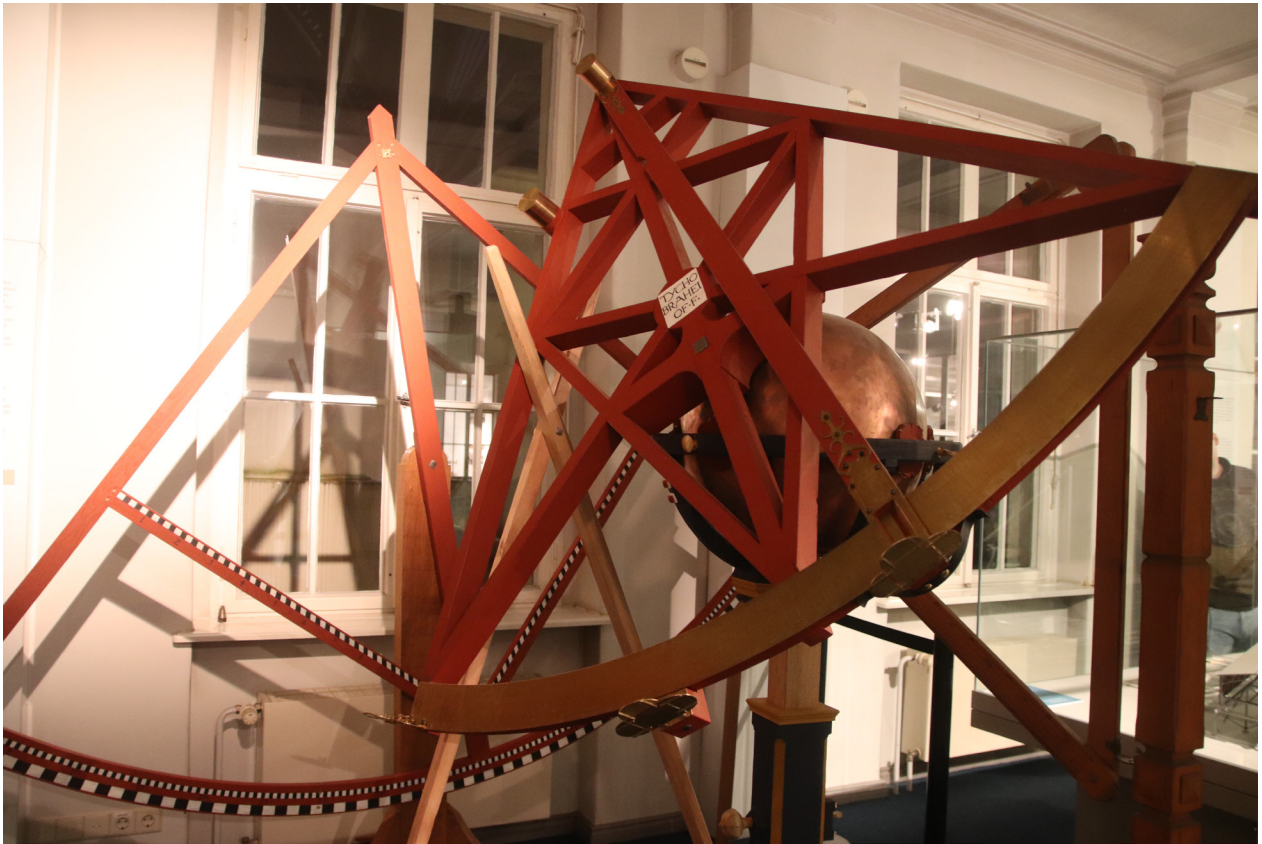


Figura 4 - Cópias em escala real de um sextante e um quadrante do observatório de Tycho Brahe, em exposição no Observatório Archenhold, em Berlim. Os instrumentos originais foram perdidos. Foto: Francisco Conte.

Em 1577 observou o Grande Cometa e comprovou que o mesmo não tinha paralaxe aparente (ver apêndice 1), devendo estar em uma posição mais distante que a Lua, contrariando a crença da época de que cometas seriam fenômenos de nossa atmosfera.

Por não conseguir observar a paralaxe em estrelas Tycho discordava das proposições de Copérnico, entendendo que a Terra não deveria se mover. Ele criou um sistema próprio em que o Sol girava em torno da Terra, mas todos os planetas giravam em torno do Sol. Sistemas similares já haviam sido propostos anteriormente e hoje possuem mais um caráter de curiosidade.

Em 1588, com a morte do rei Frederico II da Dinamarca e a consequente subida ao trono de seu herdeiro Cristiano IV, Tycho sentiu que todo o patrimônio científico que havia criado ao longo de décadas estava em risco. Tanto o observatório quanto suas oficinas, a gráfica e os colaboradores poderiam ser cortados. Tendo encontrado apoio e boas condições em Praga ele acabou emigrando para lá e instalando um novo observatório.

Tycho sempre montou ao redor de si um grupo de colaboradores de grande qualidade, seja para atividades observacionais, seja para a construção de instrumentos ou ainda outras especialidades. Em Praga conheceu e passou a trabalhar com um jovem assistente muito promissor, vindo da Alemanha, chamado Johannes Kepler. Ao que parece, os dois desenvolveram uma relação um pouco atribulada, e o jovem, que sempre demonstrou muita capacidade intelectual, nunca teve acesso livre aos registros das observações.

Kepler havia desenvolvido um grande interesse pela astronomia já aos seis anos de idade, quando observou o cometa de 1577. Desde pequeno demonstrou talento para a matemática, que veio a estudar posteriormente, assim como teologia. Quando estudava em Tübingen conheceu o trabalho de Copérnico e tornou-se um defensor do heliocentrismo. Aos 23 anos passou a ser professor de matemática na Escola Protestante de Graz, onde permaneceu até a mudança para Praga.

Com a morte de Tycho Brahe em 1601, Kepler passou a ter acesso a todos os registros do observatório, de grande importância para ele, já que se empenhava em compreender o funcionamento do sistema solar. Enquanto desenvolvia esse trabalho, observou uma supernova em 1604, na constelação de Ofiúco. Kepler realizou observações sistemáticas da nova estrela, assim como o seu mestre havia feito em 1572, e também publicou um livro com suas observações. Essa supernova chegou a ser visível durante o dia por um período de algumas semanas, sendo também observada por Galileu Galilei em Pádua.

Após trabalhar incansavelmente nas observações de Tycho Brahe, sobretudo nas posições do planeta Marte, Kepler finalmente conseguiu entender como funcionava o sistema heliocêntrico em seus detalhes, que foram resumidos em suas três leis:

1. Os planetas descrevem órbitas elípticas, com o Sol em um dos focos
2. O raio vetor que liga o planeta ao Sol descreve áreas iguais em intervalos de tempo iguais
3. Os quadrados dos períodos de revolução dos planetas são proporcionais aos cubos de suas distâncias ao Sol

Kepler conseguiu fazer uma descrição muito detalhada de como o sistema solar funciona, mas a explicação sobre as razões desse comportamento teria que esperar pelo trabalho de Isaac Newton.

O trabalho de Tycho e Kepler foi fundamental para a história da astronomia e também para o desenvolvimento da ciência moderna. Pela primeira vez na história, fenômenos naturais eram descritos matematicamente de maneira precisa. Além disso, o trabalho integrado de Tycho e Kepler, combinando a área observacional e a teoria, aponta claramente para a forma como a ciência vai se desenvolver a partir desse momento.

Por outro lado, o trabalho de Tycho e Kepler representa provavelmente um limite do que era possível ser realizado com a tecnologia da época. Para que a astronomia pudesse se desenvolver a partir desse ponto, seria necessária uma mudança radical na forma de observar o céu.

## CAPÍTULO 1

### Vendo mais longe – A era do telescópio

A invenção do telescópio foi a primeira grande revolução tecnológica ligada à astronomia e mudou por completo sua história e desenvolvimento. Logo após a introdução do telescópio, em um curto espaço de tempo ficou claro que um novo universo muito mais amplo e repleto de detalhes e novidades se abria para os observadores. Um simples tubo, com uma lente em cada ponta, transformou a astronomia para sempre.

Ninguém sabe exatamente quem inventou o telescópio, nem a época exata da invenção. A tecnologia necessária para a sua criação, a fabricação de lentes de vidro, já existia desde o século XIII. Quatro séculos depois, em 1608, um alemão residente na Holanda chamado Hans Lippershey patenteou um modelo de telescópio refrator, embora não exista nenhuma garantia de que ele tenha sido o primeiro a fabricar um instrumento desse tipo. O telescópio possuía aplicações variadas, notadamente para fins militares, o que fez com que a notícia de sua invenção se espalhasse rapidamente pela Europa.

Em Florença, na Itália, o grande cientista Galileu Galilei conseguiu um instrumento para seu uso assim que soube da invenção e já em 1609 produziu seus próprios telescópios, muito melhores do que os fabricados por seus contemporâneos. Galileu desenvolveu estudos em diversas áreas, como a matemática, a física, a astronomia e a filosofia. Foi pioneiro no estudo da resistência dos materiais, que influenciaria a arquitetura e a engenharia; desenvolveu os primeiros estudos do movimento acelerado e do movimento do pêndulo; enunciou o conceito de inércia, que influenciou o trabalho de Newton, e foi também o primeiro a pensar no conceito de relatividade, que seria desenvolvido por Einstein apenas no século XX. Desenvolveu instrumentos como a balança hidrostática, um tipo de compasso geométrico, um termômetro e estudos com pêndulos. Foi pioneiro na defesa do método empírico em oposição ao método aristotélico, sendo considerado por muitos o pai da ciência moderna (ver figuras 5 e 6).

Os telescópios construídos por Galileu em pouco tempo passaram de três aumentos para oito ou nove e até 30 aumentos. Embora possa haver uma pequena dúvida sobre quem foi a primeira pessoa a observar os céus noturnos com um telescópio, certamente Galileu foi o primeiro a divulgar suas observações e descobertas: distinguiu crateras e montanhas na superfície da Lua; observou que Júpiter possuía quatro satélites, que giravam em torno do planeta conforme este se deslocava no céu, dia após dia; constatou que o planeta Vênus tinha fases, embora essa descoberta só tenha sido publicada posteriormente. Não conseguiu perceber que Saturno tinha anéis, porque a resolução angular dos seus instrumentos não era



Figura 5 - Galileu mostrando ao Duque de Veneza como utilizar um telescópio. Afrisco de Giuseppe Bertini, 1858, Varese, Itália. Fonte: Wikimedia Commons.



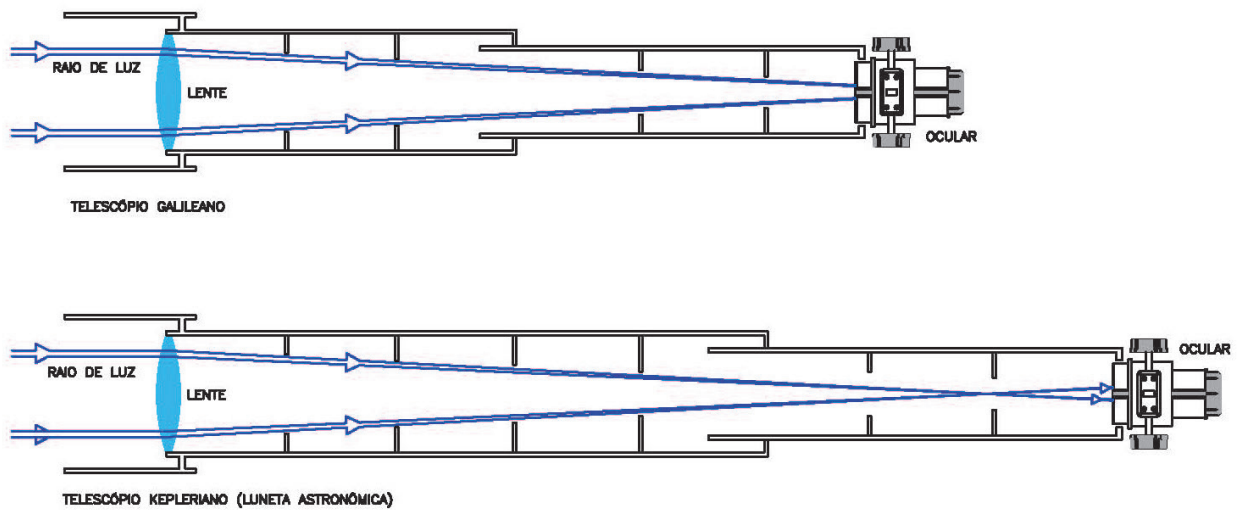


Figura 6 - Esquemas ópticos de dois tipos de telescópios refratores (que utilizam lentes). O esquema superior mostra um telescópio similar aos utilizados por Galileu. O desenho inferior mostra um refrator kepleriano, que, com uma lente similar, produz imagens com aumentos maiores, embora a imagem seja invertida (o que não é um problema para observações astronômicas). Desenho: Francisco Conte.

suficiente. Observou a princípio que o disco do planeta estava ladeado por outros dois discos menores e imaginou que se tratava de um planeta triplo, mas com o passar dos anos esses discos desapareceram e depois voltaram a aparecer. Observou também manchas solares tanto a olho nu quanto no telescópio; percebeu que o número de estrelas que podia observar no telescópio era muito maior que aquelas que via a olho nu em um mesmo campo; observando a Via Láctea, percebeu que uma área que parecia ser nebulosa era na verdade formada por um número imenso de estrelas. A astronomia entrava em uma nova era.

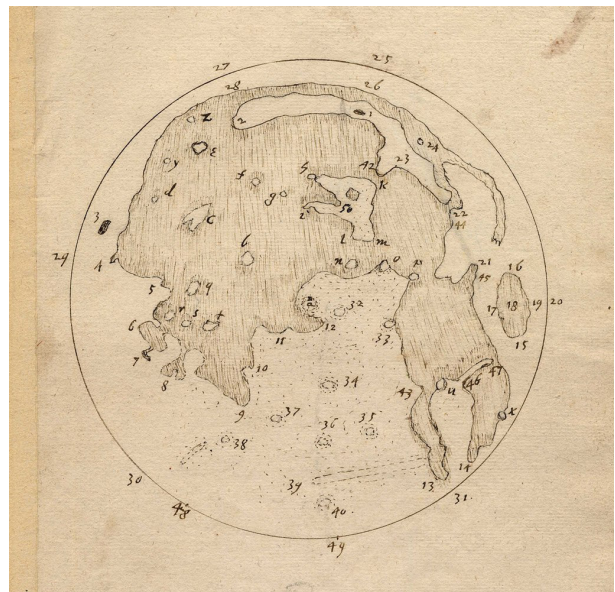
Analisando com cuidado o trabalho de Galileu com o telescópio, é importante ressaltar alguns fatos importantes. O primeiro é que os seus desenhos da Lua, embora ressaltassem bem alguns detalhes da superfície de nosso satélite, como as crateras, por exemplo, eram na realidade bastante esquemáticos, não muito fiéis ao relevo verdadeiro do satélite, não podendo ser entendidos como mapas lunares.

Ao contrário, a descoberta dos satélites de Júpiter revela um observador paciente e detalhista, que de início observou apenas três pequenas estrelas ao lado do planeta. Nos dias posteriores Galileu continuou a observar Júpiter, anotando cuidadosamente a posição destes objetos. Ele acabou percebendo que eram na verdade quatro e que elas se deslocavam junto ao planeta, girando em torno dele. Após uma série de observações, concluiu corretamente que Júpiter tinha quatro satélites. Eram os primeiros membros do sistema solar a ser descobertos desde a Antiguidade, descartando os cometas. Suas observações foram confirmadas por outros pioneiros no uso do telescópio, entre eles Thomas Harriot (que será mencionado no parágrafo seguinte), Joseph Gaultier de la Vaille e Nicolas-Claude Fabri. Poucos anos depois, em 1614, o astrônomo alemão Simon Marius publicou o livro *Mundus jovialis*, em que descrevia os quatro satélites de Júpiter e afirmava que os havia descoberto antes de Galileu, que imediatamente acusou Marius de plagiar o seu trabalho. Hoje em dia é aceito que Marius fez as observações de

maneira independente e aproximadamente na mesma época. Tendo publicado primeiro o trabalho, Galileu ficou com os méritos da descoberta. Fatos como este vão se repetir inúmeras vezes na história da astronomia. Marius, entretanto, teve uma pequena satisfação: em seu trabalho ele batizou os satélites de Io, Europa, Ganimedes e Calisto, nomes de conquistas amorosas do deus romano Júpiter e que foram aceitos pela comunidade científica e são usados até hoje. Por outro lado, coletivamente eles são conhecidos como satélites galileanos.

Recentemente descobriu-se que um inglês, Thomas Harriot, teria observado a Lua através de um telescópio cerca de quatro meses antes de Galileu, elaborando um desenho razoavelmente acurado do relevo do satélite (ver figuras 7 e 8). Harriot, entretanto, não divulgou seus trabalhos e seu feito passou despercebido por séculos. Apenas em 1900 foi publicada uma biografia pessoal em que o feito era descrito, mas o livro vendeu apenas 167 exemplares, só voltando a ser publicado em 1972. A nova publicação gerou certa agitação no Reino Unido, com base na ideia de ter sido Harriot o pioneiro a realizar observações astronômicas com um telescópio. Obviamente, é muito difícil comprovar a autenticidade das datas de seus trabalhos. Galileu merece todos os méritos, pois a revelação de suas descobertas causou um impacto imenso no conhecimento científico da época. Além disso, Galileu não se limitou a observar a Lua, ele também observou o Sol, os planetas e estrelas, praticamente todos os campos de interesse da astronomia. Reforçando esse caráter de divulgação de suas descobertas, Galileu escreveu em italiano, não em latim como se costumava fazer em sua época, para que a maioria das pessoas tivesse acesso a seu trabalho.

Um aspecto do trabalho de Galileu que infelizmente não pode deixar de ser



Figuras 7 e 8 - Desenhos da Lua feitos por Galileu (no alto) e Thomas Harriot. Como se pode observar, o desenho de Harriot é mais fiel ao relevo geral da Lua, mas os de Galileu, apesar de mais esquemáticos, apresentam detalhes mais definidos. Fonte: Wikimedia Commons.

mencionado é relativo aos problemas que ele enfrentou com a Igreja Católica no período da Inquisição. Em seus trabalhos, Galileu fazia algumas afirmações que entravam em conflito com dogmas religiosos da época. Por exemplo: ao descrever que o Sol apresentava manchas em sua superfície, o caráter “incompactível” dos objetos celestes era posto em xeque (incompactível, em questão, era usado no sentido de imutável). Em 1616, o Tribunal do Santo Ofício julgou que a teoria do sistema heliocêntrico era herética e que o conceito de que a Terra se movia era “teologicamente errado”. Galileu teve que ir a Roma para explicar suas ideias e foi pressionado a não mais ensinar o sistema heliocêntrico. Após os primeiros problemas com a Inquisição, Galileu frequentemente passou a “camuflar” suas descobertas, criando anagramas de frases em latim para as conclusões de seus trabalhos. Isso gerou uma dificuldade para os pesquisadores que estudavam a sua obra e deu origem a muitas especulações. Uma das mais interessantes é a possibilidade de Galileu ter descoberto Netuno, pois na época das observações de Júpiter o planeta desconhecido estava muito próximo ao gigante joviano, e Galileu chegou a registrá-lo como uma estrela. Posteriormente Galileu foi julgado e condenado pela Igreja, passando a viver em prisão domiciliar, além de ter sido obrigado a se retratar publicamente e impedido de continuar a divulgar suas ideias. Seus livros entraram para o Index de livros proibidos, embora continuassem a ser publicados em países protestantes. Pouco tempo antes, Giordano Bruno havia sido executado publicamente, por emitir opiniões astronômicas contrárias aos interesses da Igreja. Mas o interesse deste trabalho é outro e esse assunto não vai ser aprofundado, embora tenha que ser obrigatoriamente citado.

O telescópio trazia três grandes avanços em relação à observação a olho nu. Em primeiro lugar e provavelmente o mais importante é que a capacidade de coleta de luz de um telescópio é muito superior à do olho humano. Com um instrumento similar aos utilizados por Galileu era possível observar objetos celestes com magnitude até dez (ver apêndice 2), quatro magnitudes a mais do que podemos observar a olho nu, permitindo a visão de um número muito maior de estrelas. A coleta de luz é proporcional à área do elemento óptico, que passou dos poucos milímetros de diâmetro da pupila do olho humano para alguns centímetros de diâmetro da lente primária do telescópio, um ganho na casa das centenas de unidades. Em segundo lugar, houve uma melhoria na definição angular das imagens, sendo possível a observação de detalhes muito mais delicados dos objetos, o que, nessa fase inicial, era evidente na observação da Lua, por exemplo. Essa melhora na resolução angular era proporcional ao diâmetro da lente do telescópio. Por fim, houve uma ampliação da imagem, proporcional à distância focal do telescópio dividida pela distância focal da ocular. Embora para o público leigo o número de aumentos seja a característica mais desejada em um telescópio, é com certeza a característica menos importante das três.

Os telescópios utilizados por Galileu eram do tipo refrator, que utiliza lentes como elemento primário do instrumento. Pouco tempo depois Kepler aperfeiçoou o desenho dos telescópios esticando o tubo e aumentando a distância focal – e por consequência a ampliação proporcionada – utilizando o mesmo conjunto de lentes. O único inconveniente desse tipo de instrumento é que a imagem resultante é invertida, o que não faz diferença na observação astronômica, mas é inconveniente para o uso militar ou para observação de

paisagens. Telescópios refratores simples como esses dos primeiros tempos apresentam um problema crônico chamado aberração cromática, pois ao atravessar a lente de vidro as diferentes cores da luz sofrem difração em diferentes ângulos. Isso faz com que o foco de cada cor aconteça em um ponto levemente diferente do eixo óptico, tornando impossível focar todas as cores ao mesmo tempo. Assim, imagens pontuais como as de estrelas vão apresentar halos coloridos em torno do ponto central. No apêndice 3 é possível encontrar vários detalhes técnicos sobre telescópios.

## Primeiros avanços técnicos

O primeiro avanço técnico introduzido nos telescópios foi a instalação de um micrômetro acoplado ao instrumento, que permitia a medição de separações angulares entre objetos celestes com uma precisão nunca antes alcançada. A medição de ângulos era a pedra fundamental da astrometria, a forma mais tradicional de se fazer astronomia, que estuda a posição e o movimento dos objetos astronômicos. O inglês William Gascoigne, nascido em Leeds, provavelmente foi o primeiro a instalar um micrômetro em um telescópio, em 1639. Em 1659, William Huygens, que voltará a ser citado nos próximos parágrafos, desenvolveu um mecanismo diferente, com funcionamento similar. Pouco tempo depois, Robert Hooke construiu um terceiro tipo (ver figura 9). A partir dessa inovação, as minuciosas observações de Tycho Brahe foram superadas de maneira definitiva por vários astrônomos por toda a Europa. A nova tecnologia estabeleceu um novo patamar de precisão para observações astronômicas.

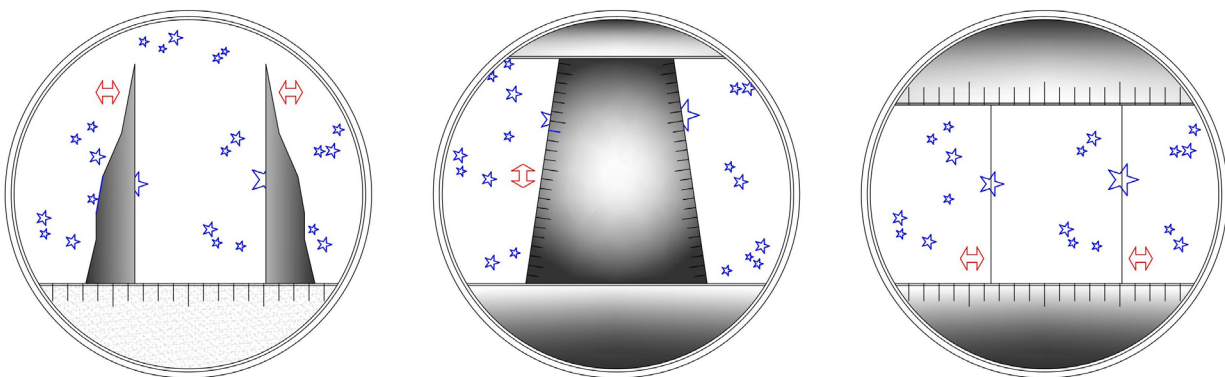


Figura 9 - Três diferentes abordagens na incorporação do micrômetro aos telescópios, em todas, aqui, sendo utilizados para medir a distância angular entre as duas estrelas mais brilhantes do mesmo campo. À esquerda vemos a solução de Gascoigne, com duas setas móveis, que podem ser ajustadas até enquadrar as duas estrelas; no centro, a *virgula* de Huygens, que usa uma única peça móvel em formato trapezoidal para a mesma finalidade; por fim, à direita, a solução de Hooke, com fios de cabelo. Desenho: Francisco Conte, baseado em King (2003, p. 97).

Em 1631, o francês Pierre Gassendi se tornou o primeiro homem a observar um trânsito planetário, evento que ocorre quando um planeta passa em frente ao disco solar. No caso, tratava-se de um trânsito de Mercúrio, previsto por Kepler. Trânsitos não são acontecimentos corriqueiros: os de Mercúrio ocorrem em número de 13 a 14 por século, ao passo que os de Vênus são muito mais raros, ocorrendo aos pares, separados por aproximadamente oito anos, só voltando a ocorrer depois de cerca de 120 anos. Alguns anos depois, um jovem astrônomo inglês, Jeremiah Horrocks, previu a ocorrência de um trânsito de Vênus em 4 de dezembro de 1639. O próprio Horrocks e seu colaborador

William Crabtree, usando dois telescópios independentes, conseguiram observar pela técnica de projeção o trânsito previsto. Gassendi também havia previsto o fenômeno, mas não pôde observá-lo de Paris, pois o Sol já estava se pondo no horário do evento.

No Brasil, durante o período da ocupação holandesa no Recife, particularmente no governo do conde Maurício de Nassau, entre os anos de 1637 e 1644, foi instalado um observatório astronômico na cidade, cuja operação ficou a cargo de Jorge Marcgrave. No observatório foram realizadas observações de um eclipse solar em 13 de novembro de 1640, além de eclipses lunares e movimentos planetários. Além disso, a partir das observações de um eclipse lunar, Marcgrave teria conseguido calcular a verdadeira longitude de Recife, comparando os dados obtidos com as previsões para o fenômeno feitas em Uraniborg, o único observatório da época em que se podiam encontrar tabelas com previsões astronômicas precisas. O observatório de Recife era bastante avançado para a época e possuía um quadrante e um sextante, ambos com cinco pés de comprimento (aproximadamente 1,5 metro), similares em dimensões aos instrumentos utilizados por Tycho Brahe em Uraniborg, além de uma luneta (telescópio refrator), provavelmente similar em dimensões e potência aos instrumentos utilizados por Galileu, conforme descrição de Matsuura (2013, vol. I, p. 171). Ao que parece o observatório foi desmantelado quando da partida de Nassau para a Holanda. Em 1654, Portugal, que havia se libertado de um período de sessenta anos de domínio espanhol em 1640, consegue finalmente expulsar os holandeses remanescentes, encerrando o período da Companhia das Índias Ocidentais no Brasil.

Em 1659, o astrônomo holandês Christiaan Huygens, que já havia explicado corretamente a existência dos anéis de Saturno e descoberto seu maior satélite, Titã, consegue medir pela primeira vez com precisão a paralaxe do Sol, o que permitiu compreender a real escala do sistema solar. Huygens aprimorou a construção de telescópios com a invenção de uma ocular com duas lentes, que diminuía a dispersão da luz e ficou conhecida como ocular huygeniana. Outra importante invenção de Huygens foi o relógio de pêndulo, em 1656, muito mais exato que os relógios existentes até então, que permitiu observações astronômicas mais precisas. Huygens desenvolveu uma teoria sobre óptica em que a luz possuía um caráter ondulatório, em oposição à teoria de Newton, que acreditava que a luz era composta de partículas. Hoje sabemos que os dois estavam certos e a luz apresenta um caráter dualístico partícula-onda. Sobre a explicação dos anéis de Saturno vale a pena fazer um comentário: talvez por não estar seguro de suas conclusões, ou por temer algum tipo de represália por grupos religiosos, Huygens, em vez de anunciar claramente o que havia descoberto, publicou em um de seus trabalhos uma fileira de letras sem significado, da mesma maneira que Galileu fazia para “esconder” suas descobertas. Quando essas letras eram dispostas da maneira apropriada, formavam uma frase em latim, que dizia: “Circundado por um anel fino e chato, sem tocar em nenhum ponto, inclinado para a eclíptica” (Asimov, 1981, p. 28). A inclinação para a eclíptica faz com que a visão dos anéis a partir da Terra mude periodicamente, de modo que em certas épocas o anel fique invisível para nossos observadores, uma vez que estamos observando o conjunto lateralmente, ao passo que nas épocas em que os anéis são vistos em sua inclinação máxima o aspecto geral do planeta se assemelha a um olho.

## Telescópios refletores

Já na década de 1630 começaram a surgir os primeiros esquemas ópticos que permitiriam a construção de telescópios refletores, que utilizariam espelhos em vez de lentes como elemento óptico principal. Em 1663, James Gregory desenha uma primeira solução que funcionaria, mas não consegue construir nenhum instrumento. Em 1672, Isaac Newton constrói o primeiro telescópio desse tipo e o apresenta na Royal Society (figuras 10 e 11). Os telescópios refletores não sofriam da aberração cromática como os refratores, que vamos comentar mais à frente. No ano seguinte foi construído o primeiro telescópio do tipo Cassegrain, com uma solução mais refinada para o esquema óptico que o do telescópio newtoniano. Pouco depois foram construídos também os primeiros telescópios do tipo gregoriano, baseados no esquema de James Gregory (ver Apêndice 4 – Tipos de telescópios).



Figura 10 - Réplica do primeiro telescópio refletor, construído por Isaac Newton, em exposição no Deutsches Museum, em Munique. Foto: Francisco Conte.

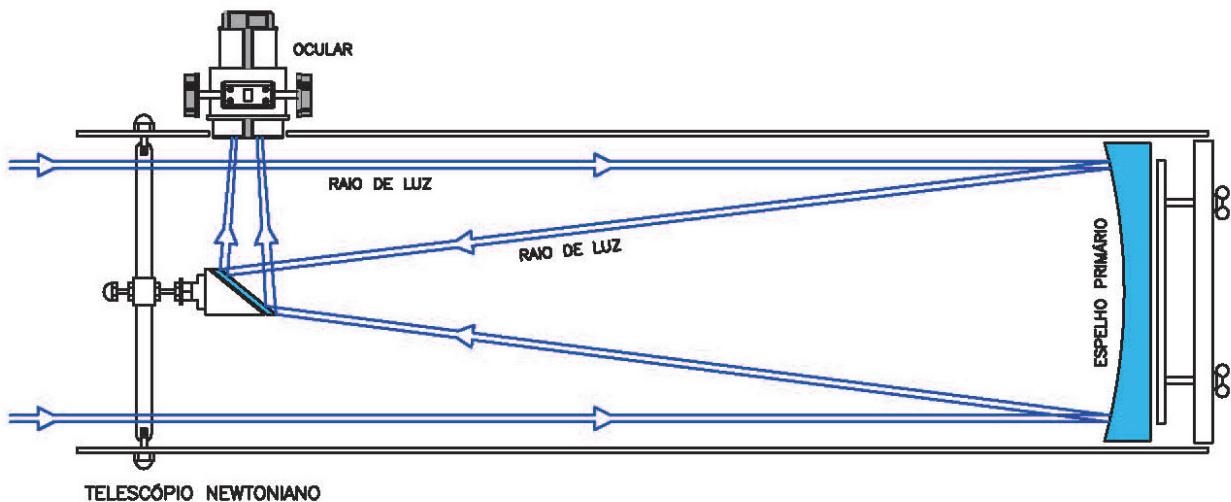


Figura 11 - Corte esquemático de um telescópio newtoniano. A luz que entra pelo tubo do telescópio é refletida primeiramente por um espelho côncavo e depois por um espelho plano, postado a 45 graus em relação ao plano óptico, que acaba por enviar a luz coletada para a lateral do instrumento, onde é feita a observação. Desenho: Francisco Conte.

Isaac Newton foi uma figura extremamente importante na história da ciência e também da astronomia, embora nunca tenha se dedicado a observações astronômicas. Além

da construção do primeiro telescópio refletor, Newton escreveu um tratado sobre óptica muito importante. Suas experiências com prismas e a luz solar culminaram na descoberta do espectro. Newton constatou que a luz branca do Sol era na verdade formada por um conjunto de luzes de cores diferentes que, ao atravessar um prisma, eram decompostas, de forma similar ao que vemos em um arco-íris. O trabalho de Newton sobre o espectro de luzes inspirou posteriormente cientistas como Herschel e Fraunhofer e levou a desenvolvimentos que mudaram a história da astronomia, como veremos mais à frente.

Quando Newton elaborou a lei da gravitação, explicou a razão dos movimentos planetários descritos por Kepler e demonstrou que as mesmas forças que regiam os céus também atuavam na Terra. Desse modo ele ligou pela primeira vez na história o homem com o cosmo e encerrou definitivamente a herança da cosmologia grega que separava o mundo perfeito dos céus do mundo imperfeito da Terra. A força gravitacional, que decaía com o quadrado da distância, explicava de uma vez as órbitas de cometas, planetas e satélites, que em decorrência dessa ação assumiam as formas das seções de cones (elipses, parábolas e hipérbolas) e as marés. A influência da obra de Newton na ciência é enorme, muitas de suas ideias serviram de base para a física que vai fornecer explicações de fenômenos naturais até o final do século XIX.

Em 1672 e 1673, o astrônomo italiano Giovanni Cassini, trabalhando no observatório de Paris, descobriu dois outros satélites de Saturno: Reia e Júpiter. Em 1675 ele percebeu uma divisão escura nos anéis de Saturno, uma faixa que tem aproximadamente cinco mil km de largura e ficou conhecida como Divisão de Cassini. Em 1684, descobriu mais dois satélites de Saturno: Tétis e Dione. Além dessas descobertas Cassini também desenvolveu uma série de trabalhos importantes, como calcular com um pouco mais de precisão a paralaxe do Sol que havia sido obtida por Huygens. Ele estimou os períodos de rotação de Marte e Júpiter e foi o primeiro astrônomo a descrever corretamente a luz zodiacal. Descobriu ainda, juntamente com Robert Hook, a grande mancha vermelha de Júpiter, sendo também o primeiro astrônomo a perceber que algumas faixas do planeta gigante tinham períodos de rotação diferentes.

Em 1676, o astrônomo dinamarquês Ole Rømer consegue calcular pela primeira vez a velocidade da luz. Rømer percebeu que os eclipses das luas de Júpiter sempre costumavam derrubar suas mais precisas previsões com alguns minutos de adiantamento ou atraso, com uma particularidade interessante: quando a Terra estava mais próxima de Júpiter esses eclipses sempre ocorriam adiantados em relação às previsões, ao passo que quando a Terra se localizava mais distante de Júpiter os eclipses sempre ocorriam atrasados em relação às previsões. Ele se dedicou a estudar especialmente o satélite Io, que costumava ser encoberto por Júpiter a cada 28 dias, e observou em torno de 140 desses eventos. Rømer resolveu desenhar os pontos em que Júpiter e a Terra estavam em relação ao Sol em cada um desses eventos e percebeu que a diferença de tempo nas previsões deveria estar relacionada à variação das distâncias entre os dois planetas em cada evento. A maior variação, de 17 minutos, ocorreu quando a Terra estava do lado oposto do Sol em relação a Júpiter, ocasião em que a luz teria que percorrer a mais o equivalente a duas vezes o diâmetro da órbita da Terra em relação aos momentos em que os dois planetas estivessem do mesmo lado. A explicação para o fenômeno é que a velocidade da luz não é infinita e assim o tempo para a observação dos eclipses

poderia variar de acordo com a distância entre os planetas a cada evento. Com os dados relativos à variação de tempo pela distância Rømer refez a tabela de previsões do eclipse e a apresentou à Academia de Ciências de Paris em 22 de agosto, acrescentando a explicação de que a diferença de tempo das previsões estava ligada ao tempo necessário para a luz percorrer a distância. Embora seus dados estivessem corretos, ele não chegou a efetuar o cálculo da velocidade. Isso foi feito por Christiaan Huygens, a partir dos dados de Rømer e das estimativas de distância da época, obtendo um resultado um tanto baixo para os valores atuais. De qualquer maneira, o trabalho de Rømer apresentava pela primeira vez uma prova irrefutável de que a velocidade da luz era finita. Como o raciocínio era intrinsecamente correto, foi possível mais tarde obter uma velocidade correta a partir de estimativas melhores das distâncias dos planetas (ver figura 12).

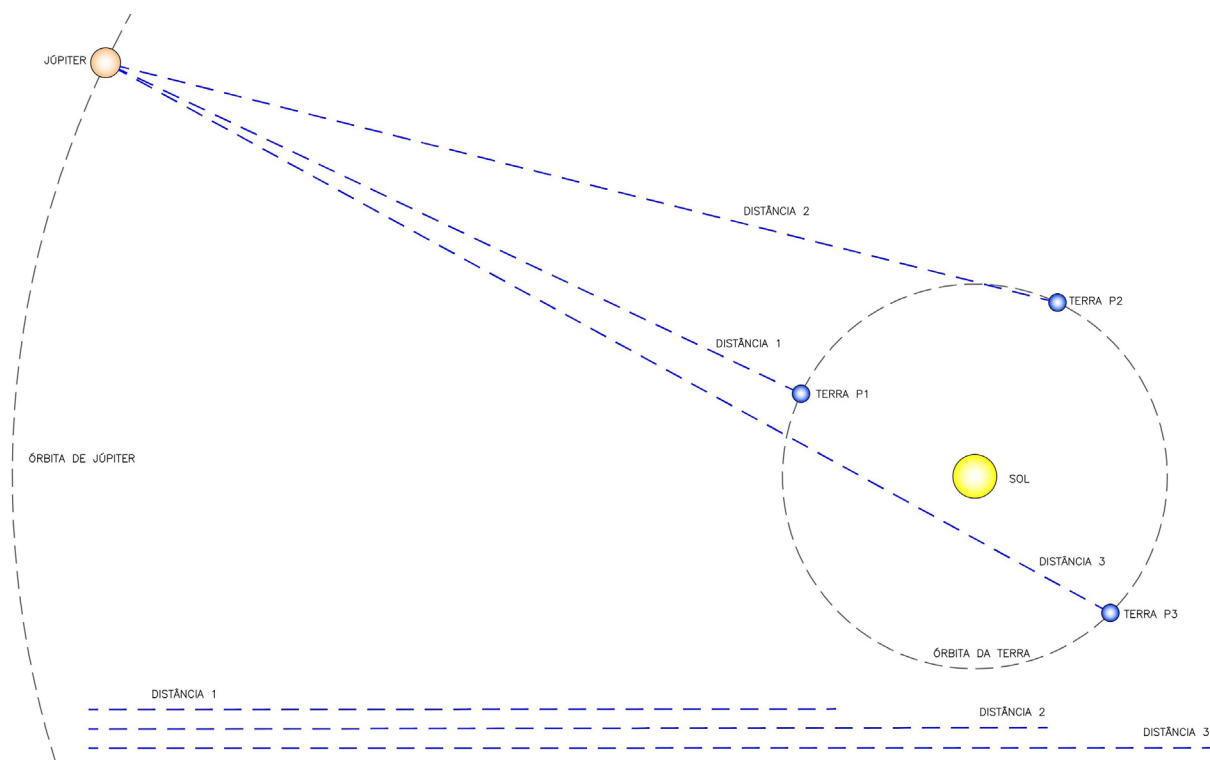


Figura 12 - Ole Rømer descobre que a velocidade da luz não é infinita ao analisar os atrasos na previsão dos eclipses de Júpiter e seus satélites. O mesmo eclipse pode ser visto de diferentes distâncias, dependendo da posição da Terra em torno do Sol. Desenho: Francisco Conte.

Um desenvolvimento de curta duração na história dos telescópios foi o chamado telescópio aéreo. Na tentativa de construir instrumentos que propiciassem um grande aumento, alguns fabricantes de lentes construíam peças com uma distância focal muito grande, o que inviabilizava a utilização de tubos, com a tecnologia da época. Assim, os primeiros telescópios aéreos tinham as objetivas instaladas em postes ou árvores, ligadas às oculares por sistemas de cordas, de maneira que o observador pudesse continuar em terra. A ideia é atribuída aos irmãos Christian e Constantine Huygens, que teriam construído os primeiros instrumentos no ano de 1686, mas alguns autores citam também os trabalhos de Adrien Auzot. Além disso, outras fontes afirmam que o conceito desse tipo de instrumento foi originalmente pensado pelo arquiteto Christopher Wren, famoso por projetar a Catedral de São Paulo, em Londres, e que também se dedicava à astronomia. Johannes Hevelius chegou a construir um instrumento desse tipo com uma objetiva de



15 cm de diâmetro e 50 m de distância focal, mas que deveria ser extremamente difícil de operar. A moda da utilização dos telescópios aéreos durou pouco. Já em 1721, John Hadley apresentou na Royal Society um telescópio refletor com um espelho de 16 cm de diâmetro, que foi comparado a um telescópio aéreo com uma lente de 19 cm de diâmetro, pertencente à coleção da sociedade. Constatou-se que o telescópio refletor, embora fosse menor, produzia um aumento semelhante, e imagens muito mais claras e nítidas que o telescópio aéreo, além de ter uma operação mais simples. Esse experimento decretou o fim da era desses instrumentos. Nos dias atuais, a poluição luminosa causada pela iluminação pública já tornaria inviáveis tais aparelhos.

O século XVIII se inicia com uma previsão feita por Edmond Halley, em 1706, acerca do retorno de um cometa em 1751. Halley, que era amigo de Newton, havia calculado a órbita do cometa quando de sua última passagem e estimou o período necessário para a sua volta em aproximadamente 76 anos. Ele procurou em arquivos por passagens similares de um cometa nas datas calculadas, no passado, e encontrou descrições muito semelhantes ao objeto que havia observado. Quando enfim o cometa retornou, Halley já havia falecido, mas o cometa foi nomeado em sua homenagem, iniciando uma tradição de batizar novos cometas com o sobrenome de seu descobridor.

No início da década de 1720, o astrônomo de Oxford James Bradley encontrou uma explicação para a aberração estelar. Aberração astronômica ou aberração estelar é um tipo de aberração da luz que faz com que os objetos celestes pareçam se deslocar na direção do deslocamento do observador quando este está em movimento. Bradley explicou corretamente que o desvio era causado por uma relação entre a velocidade do observador (a velocidade de translação da Terra), dividida pela velocidade da luz. Bradley posteriormente descobriu e explicou outra variação periódica na posição das estrelas, a nutação. Assim como a aberração estelar, o efeito da nutação é muito pequeno e é causado por interações entre as posições da Terra, da Lua e do Sol, provocando pequenas oscilações no movimento de precessão, que, como vimos anteriormente, havia sido descoberto por Hiparco, na Grécia antiga. Bradley publicou sua descoberta em 1748, após 20 anos de observações.

Um avanço importante no desenvolvimento dos telescópios aconteceu no ano de 1729, quando Chester Moore Hall desenvolveu o primeiro refrator acromático. Ele construiu uma lente objetiva dupla, na verdade formada por duas lentes, cada uma fabricada com um tipo diferente de vidro, com diferentes taxas de refração. A combinação do duplete fazia com que a trajetória dos raios de luz de cor azul e vermelha fosse alterada e que os dois feixes passassem a fazer o foco em um mesmo ponto, ou muito próximo disso, anulando ou minimizando em muito os efeitos da aberração cromática (ver figura 13). Alguns anos depois, o fabricante de telescópios John Dollond patenteou a invenção, embora, aparentemente, só tivesse efetivamente construído algum instrumento desse tipo depois de conhecer o trabalho de Hall através de George Bass, que também havia feito alguns telescópios de acordo com as instruções de Hall. A patente adicionava um custo a outros fabricantes de telescópios que viessem a construir instrumentos desse tipo. Após a morte de John Dollond, seu filho Peter Dollond tomou algumas providências com o objetivo de manter a patente, fazendo com que vários outros fabricantes se manifestassem contrários a isso – entre eles o próprio Bass, que havia mostrado seus trabalhos a Dollond, além de Benjamin Martin, Robert Rew e Jesse Ramsdem, entre

outros. Esses fabricantes conseguiram suspender judicialmente a patente, convencendo os juízes de que seria incorreto que os Dollond recebessem algum tipo de remuneração em detrimento de outros construtores que haviam desenvolvido o sistema anteriormente. Os custos legais da ação, entretanto, fizeram com que vários fabricantes de telescópios tivessem que fechar seus negócios.

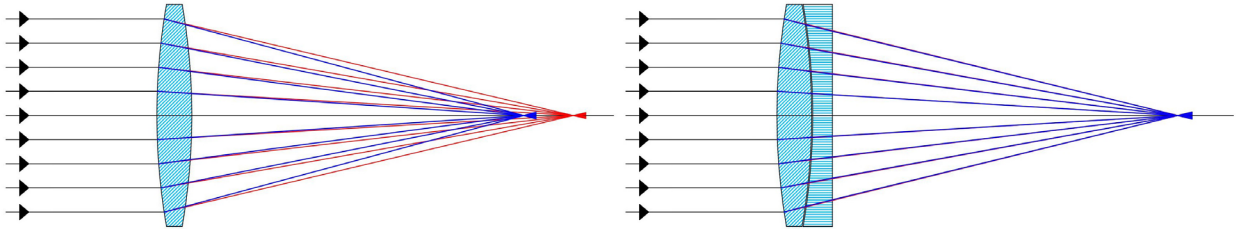


Figura 13 - À esquerda, aberração cromática, em que o foco das luzes de variadas cores não se forma no mesmo ponto. À direita, objetivas acromáticas: duas lentes com formatos diferentes e tipos de vidros diferentes, que, quando combinadas, resolveram o problema da aberração cromática. Desenho: Francisco Conte.

Apesar do caráter um tanto quanto duvidoso demonstrado na questão da patente dos refratores acromáticos, Dollond era considerado um bom fabricante de telescópios, com alguns de seus instrumentos ainda disponíveis no mercado de colecionadores. Os instrumentos de Dollond eram normalmente telescópios refratores com pequenos diâmetros, da ordem de 2 a 3 polegadas, ou seja, com 5,1 a 7,6 cm de diâmetro. Um de seus rivais na disputa da patente, Jesse Ramsdem era um construtor de telescópios bem conceituado e produziu alguns dos melhores instrumentos da época, tanto refratores como refletores. Um de seus telescópios era um gregoriano com 15 cm de diâmetro, o que demonstrava o avanço que esses instrumentos estavam alcançando na época (ver figura 14) .



Figura 14 - Telescópios históricos em exposição no Deutsches Museum, em Munique. O grande modelo gregoriano dourado à esquerda e a luneta verde foram fabricados por John Dollond, na primeira metade do século XVIII. Foto: Francisco Conte.

O ano de 1730 é aquele em que ocorrem as primeiras observações astronômicas no Brasil como colônia portuguesa. Na cidade do Rio de Janeiro, os jesuítas instalaram um observatório em seu colégio, no Morro do Castelo. Posteriormente, no mesmo local, em 1780, os astrônomos portugueses Sanches D'Orta e Oliveira Barbosa montaram um observatório e passaram a realizar observações regulares de astronomia e meteorologia.

Em 1750, o astrônomo e matemático Nicolas-Louis de Lacaille partiu da França para a África do Sul, onde se estabeleceu no Cabo da Boa Esperança. Ele instalou um observatório com a intenção de calcular a distância entre os planetas a partir da trigonometria, comparando posições observadas simultaneamente nos dois hemisférios. Porém, Lacaille não se limitou à observação de planetas: de seu novo observatório ele era capaz de observar uma faixa considerável do céu impossível de ser vista da Europa. Lacaille começou então a sistematicamente medir e anotar a posição de cerca de 10 mil estrelas do hemisfério sul, agrupando-as em 14 novas constelações que ele criou e que são reconhecidas e utilizadas até os dias atuais. Lacaille era um habilidoso, paciente e minucioso observador e foi o responsável por elaborar o primeiro catálogo de estrelas do Hemisfério Sul.

A tendência a construir telescópios de maior porte favorecia os fabricantes de telescópios refletores, que nessa época utilizavam espelhos metálicos feitos de ligas complexas que combinavam vários metais e outros elementos, variando de fabricante para fabricante. Um dos melhores construtores de telescópios da época foi James Short, que se especializou na fabricação de gregorianos, com um acabamento impecável e boas características técnicas. Entre 1750 e 1752 ele construiu seus dois maiores instrumentos, um com 45 cm de diâmetro e outro com 50 cm de diâmetro, com uma capacidade de coleta de luz muito superior à dos outros aparelhos de então. Nos anos seguintes, dois religiosos construíram os maiores instrumentos do período. Em 1761, o padre Noël, na França, construiu um telescópio gregoriano com 60 cm de diâmetro, mas com um fraco desempenho, razão pela qual foi convertido para foco newtoniano em 1796. Em 1780, o reverendo Mitchel construiu um refletor com 75 cm de diâmetro, mas as descrições do instrumento parecem indicar que não possuía boas características técnicas e que tinha um desempenho muito modesto para suas dimensões. Era inegável, no entanto, que os instrumentos do período já haviam progredido de maneira notável e eram tremendamente mais eficazes que os da época de Galileu.

O astrônomo amador inglês John Goodricke, com apenas 18 anos de idade, observou cuidadosamente a variação de brilho da estrela Algol, na constelação do Perseu, cuja variabilidade já era conhecida. Goodricke estava muito interessado em observar estrelas que apresentassem variações em seu brilho e recebeu de seu vizinho, o astrônomo Edward Pigott, uma lista de variáveis conhecidas. Durante seus poucos anos de observação Goodricke descobriu outras mais. Após analisar com muito cuidado a variação de brilho de Algol, Goodricke encontrou a explicação para a variação: tratava-se de fato de duas estrelas, girando uma em torno da outra. Quando uma das estrelas passava na frente da outra, a intensidade de brilho do par diminuía, e a mesma coisa ocorria, porém com diferente intensidade, quando acontecia o inverso. A explicação era correta e esta foi a primeira de uma série de estrelas que ficaram conhecidas como binárias eclipsantes – somente possíveis quando a órbita do par de estrelas está alinhada com o observador

(ver figura 15). Goodricke descobriu também que a estrela Delta Cephei variava de forma regular. Foi a primeira descoberta de uma classe de estrelas que chamamos de variáveis cefeidas, as quais posteriormente seriam a chave para o cálculo de distância de aglomerados distantes e galáxias. Goodricke apresentou seus trabalhos na Royal Society em 1873 e infelizmente faleceu pouco depois, de pneumonia, aos 21 anos.

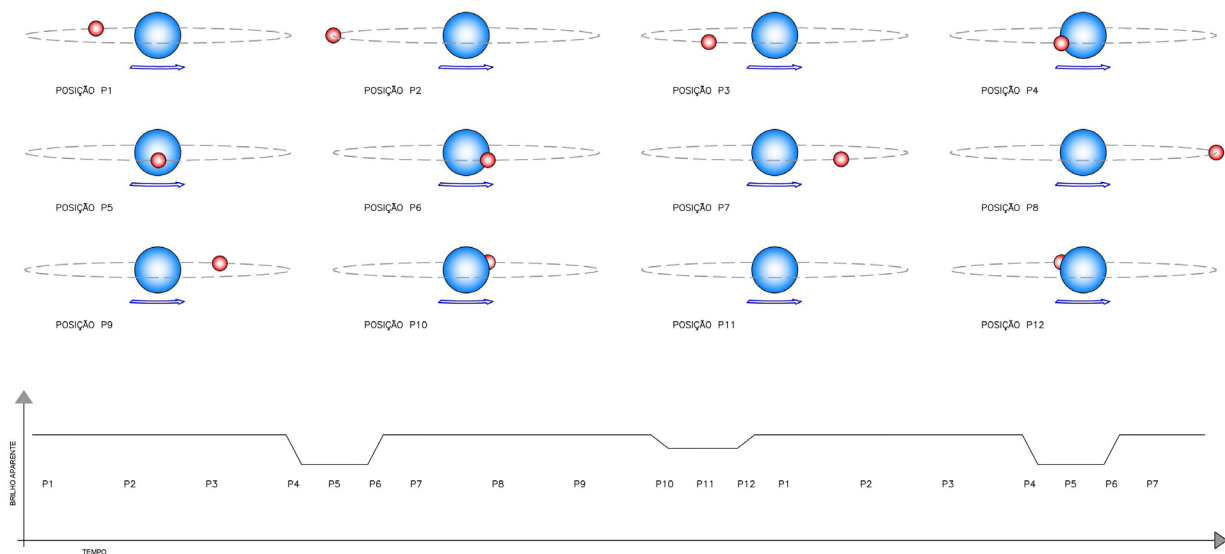


Figura 15 - Binárias eclipsantes: um sistema binário de estrelas, em que, eventualmente, uma passa pela frente da outra, com conseqüente redução do brilho total para o observador. Essa redução de brilho é diferente quando a estrela menos brilhante passa na frente ou atrás da estrela principal. Os dois eventos se repetem periodicamente, podendo ser prevista a data de um novo eclipse. Esse tipo de gráfico, que observamos na parte inferior da figura, onde foi plotado o brilho do objeto em função do tempo, é chamado de curva de luz. Desenho: Francisco Conte.

Em 1782 o astrônomo francês Charles Messier publicou o seu catálogo de objetos difusos, com 107 objetos, que posteriormente foi acrescido de três objetos descobertos por outros astrônomos. Messier era um astrônomo que tinha como obsessão encontrar novos cometas – ele descobriu nada menos que 20 durante sua carreira. Para facilitar sua busca, criou um catálogo de objetos difusos, já que estes podiam facilmente ser confundidos com um cometa. O catálogo se tornou extremamente popular e Messier é lembrado no meio astronômico por esse trabalho e não pelos cometas. Entre os astrônomos amadores existe um desafio de habilidades chamado de “Maratona Messier”, que consiste em observar todos os objetos do catálogo em uma única noite. A época mais propícia, para os observadores de latitudes baixas do hemisfério norte, vai de meados de março ao início de abril.

## William Herschel

O próximo personagem da história do desenvolvimento do telescópio e das descobertas feitas a partir da sua invenção sem dúvida é o maior observador de sua época e com certeza um dos maiores da história da astronomia, embora de início fosse um músico. William Herschel nasceu na Alemanha e mudou-se para a Inglaterra para trabalhar como organista e compositor, estabelecendo-se na cidade de Bath. Ele desenvolveu

uma paixão pela astronomia e, como tinha poucas posses, começou ele próprio a construir, com muita habilidade, seus próprios telescópios. Seu primeiro modelo foi concluído em 1774. Com o tempo ele construiu muitos instrumentos, aproveitando para vender alguns deles para ajudar a equilibrar suas finanças. Sempre auxiliado por sua irmã Caroline, que compartilhava seu entusiasmo pela astronomia, aos poucos Herschel acabou por praticamente transformar sua casa em Bath em uma oficina de fabricação de telescópios.

Em março de 1781 Herschel observou um objeto que, diferentemente das estrelas, aparecia ao telescópio como um pequeno disco de cor esverdeada. Ele continuou a observar o objeto por vários dias, percebendo que o mesmo estava se deslocando em relação às estrelas fixas. Herschel concluiu que o objeto era um planeta. Posteriormente batizado de Urano, esse planeta foi o primeiro a ser descoberto desde a Pré-História. Era um feito incrivelmente surpreendente para a sociedade da época. Sem saber, Flamsteed havia observado o planeta em seis ocasiões diferentes, e outro astrônomo, Pierre Lemonier, o avistou nada menos que 12 vezes, sendo quatro delas em noites consecutivas. O mais inusitado é que Urano, em condições ideais, pode ser visível a olho nu, tornando difícil entender como sua descoberta demorou tanto. O feito tornou Herschel famoso em toda a Europa (ver figuras 16 e 17) e fez com que o rei George III acabasse por lhe conceder o cargo de astrônomo da corte, com uma modesta remuneração anual. Posteriormente, ele foi aclamado membro da Royal Society. Em uma visita ao Observatório de Greenwich, Herschel levou alguns de seus instrumentos e escreveu à sua irmã Caroline muito feliz porque os telescópios construídos por eles haviam causado uma excelente impressão. Eles apresentaram um desempenho superior aos utilizados em Greenwich, uma vez que eram capazes de resolver facilmente algumas estrelas duplas, tarefa que os telescópios do observatório não conseguiam reproduzir.

Antes mesmo da descoberta de Urano, Herschel

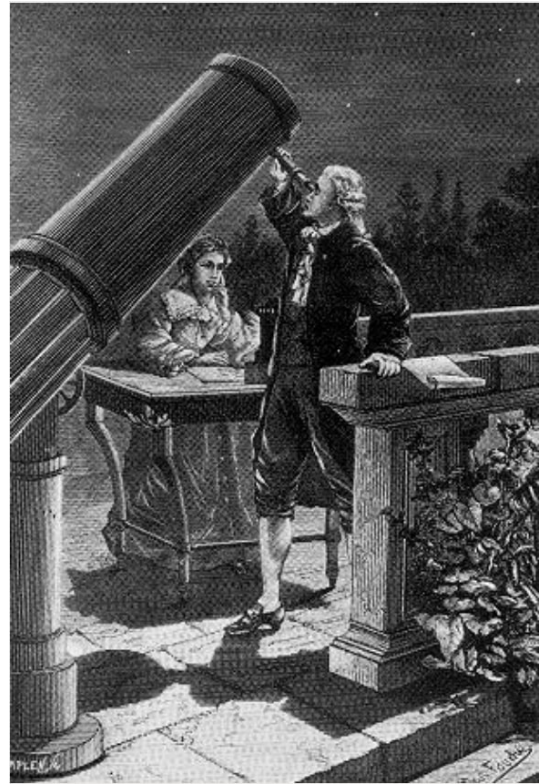


Figura 16 - William Herschel descobrindo Urano, com a colaboração de Caroline Herschel. Ilustração: Paul Fouché. Fonte: Wikimedia Commons.



Figura 17 - Telescópio fabricado pela família Herschel, semelhante ao que foi utilizado na descoberta de Urano, em exposição no Deutsches Museum, em Munique. Foto: Francisco Conte.

já havia feito trabalhos importantes. Por exemplo, em uma única noite (em 11 de abril de 1775), ele descobriu e catalogou uma série de 70 nebulosas, que hoje sabemos que na verdade eram galáxias, além de outras três que também eram galáxias, mas que já haviam sido observadas anteriormente pelo próprio Herschel. Na verdade, Herschel havia descoberto o aglomerado de galáxias de Coma Berenices, mas não se deu conta do fato. A descoberta do aglomerado, no entanto, é atribuída a Heinrich d'Arrest, que reconheceu o grupo muito posteriormente, em 1865.

Nos anos que se sucederam, Herschel fez uma série de descobertas astronômicas, como dois satélites de Saturno (Mimas e Encélado), além de dois de Urano (Titânia e Oberon). Ele percebeu que as calotas polares de Marte aumentavam e diminuavam de acordo com as estações do ano, conseguiu pela primeira vez entender e quantificar o movimento solar, percebendo que seu ápex estava na direção da estrela Lambda Herculis, apenas dez graus distante do ponto aceito atualmente. Herschel montou um catálogo de estrelas duplas e, baseado no catálogo de Messier, desenvolveu um catálogo de objetos difusos que contava com mais de dois mil objetos. Herschel foi o primeiro a perceber que algumas estrelas duplas eram na verdade sistemas binários e se comportavam de acordo com as leis de Newton e estimou o brilho aparente de muitas estrelas, dando os primeiros passos para o desenvolvimento de uma área pouco explorada da astronomia: a fotometria. Sua irmã, Caroline, descobriu nada menos que oito cometas, o que era um feito muito respeitável no meio astronômico da época, além de uma série de nebulosas, entre elas uma galáxia anã companheira de Andrômeda – uma descoberta tão notável que foi incorporada ao catálogo de Messier, sendo batizada como M110. Além disso, Caroline auxiliou o irmão em grande parte de suas observações.

Herschel foi um excepcional fabricante de telescópios, construindo os maiores e melhores instrumentos de seu tempo, sempre com a colaboração de Caroline. Embora seu melhor instrumento tenha sido um newtoniano com 47,5 cm de diâmetro, ele chegou a construir telescópios de grande porte, dois com 60 cm de diâmetro, um dos quais foi vendido ao governo da Espanha e destruído pelas tropas de Napoleão Bonaparte, e o outro ironicamente vendido a Lucien Bonaparte, irmão do imperador. Seu maior projeto, no entanto, foi um gigantesco telescópio de 1,22 m de diâmetro, o maior do mundo até então. O grande instrumento era, no entanto, difícil de ser operado e seu enorme espelho metálico tinha uma tendência a atingir o ponto de orvalho e condensar após um período de observação relativamente curto. Nessa época os espelhos eram construídos com ligas de metal, acrescidas de compostos diversos, que variavam de um construtor para outro. Os espelhos fabricados com essa mistura, chamada de *speculum*, ou *metal speculum*, refletiam apenas cerca de 60% da luz que recebiam e frequentemente oxidavam, o que obrigava à realização de novos polimentos em sua superfície, redundando em perda gradual da curvatura ideal e degradando as observações (ver figuras 18 e 19).

Herschel desenvolveu ainda dois trabalhos importantíssimos para a história da astronomia, sendo o primeiro deles a elaboração de um mapa do “universo”. Na verdade, hoje entendemos que esse mapa, completado por ele em 1785, abarca parte da nossa galáxia. Como não era possível calcular a distância das estrelas, Herschel dividiu o céu em partes iguais e contou o número de estrelas em cada uma dessas áreas. Nesse processo, ele descobriu que a distribuição das estrelas não era uniforme, já que existiam duas regiões principais, em lados opostos, onde o número de estrelas observado era

muito maior que nas demais. O que Herschel não sabia é que ele estava mapeando de maneira muito hábil o braço espiral de nossa galáxia, que só foi reconhecido como tal no século XX. Foi a primeira vez que um astrônomo conseguiu fazer um mapeamento do universo, apesar de todas as limitações, tanto instrumentais quanto teóricas, com um resultado concreto, que perdurou como nosso paradigma cosmológico até o final do século XIX.

O outro trabalho importante de Herschel foi a descoberta de uma luz que nossos olhos não conseguiam enxergar. Na virada do século, Herschel começou a trabalhar com espectros, que haviam sido descobertos por Isaac Newton. Em uma de suas experiências, realizada no ano de 1800, Herschel resolveu tentar descobrir se alguma das diversas luzes coloridas do espectro era a responsável pelo transporte do calor proveniente do Sol. Ele preparou um dispositivo

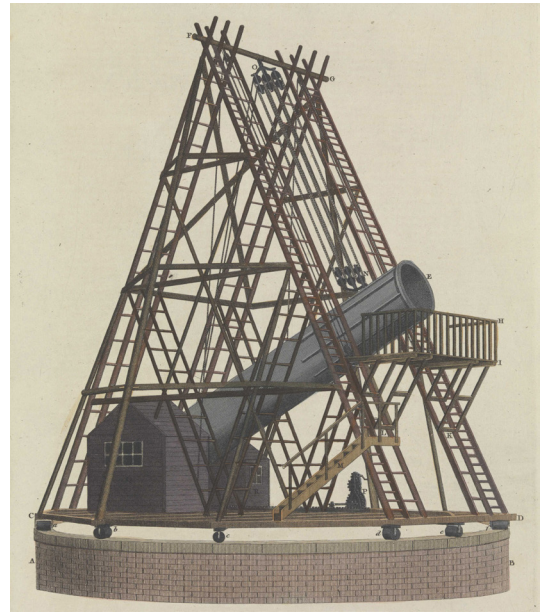


Figura 18 - Ilustração da *Encyclopedia Londinensis* de 1819, mostrando o grande telescópio de 1,22 m de diâmetro de William Herschel. Fonte: Wikimedia Commons.



Figura 19 - Parte do tubo do grande telescópio de 1,22 m de William Herschel, em exposição no Observatório de Greenwich, em Londres. O restante do tubo foi destruído pela queda de uma árvore. Foto: Francisco Conte.

que permitia a entrada de uma faixa estreita de luz, a qual atravessava um prisma e se decompunha em um espectro. Herschel direcionou a luz para uma mesa e sobre ela posicionou uma série de termômetros, cada um em uma cor diferente. Para aumentar o controle da experiência, instalou mais dois termômetros: ambos ficaram na parte escura, um ao lado da faixa azul, em uma ponta, e outro ao lado da faixa vermelha, na outra extremidade. Herschel percebeu que, entre as cores, aquela onde os termômetros apontavam para o maior aumento de temperatura era a luz vermelha. A grande surpresa é que de todos os termômetros o que apontou a temperatura mais elevada era o que ficava na faixa escura, ao lado da luz vermelha. A conclusão era surpreendente. Havia uma luz que nossos olhos não conseguíamos ver, mas que os termômetros percebiam. A essa descoberta foi posteriormente dado o nome de infravermelho, a luz que existe abaixo da faixa da luz vermelha. Foi uma descoberta muito importante, por ser a primeira frequência do espectro eletromagnético além da luz visível a ser conhecida. Esses trabalhos incentivaram pesquisas similares e, no ano seguinte, Johan Hitter descobriu o ultravioleta. Esta é provavelmente a mais importante descoberta de William Herschel em toda sua carreira, embora muitos historiadores da astronomia não façam menções a esse feito (ver figura 20).

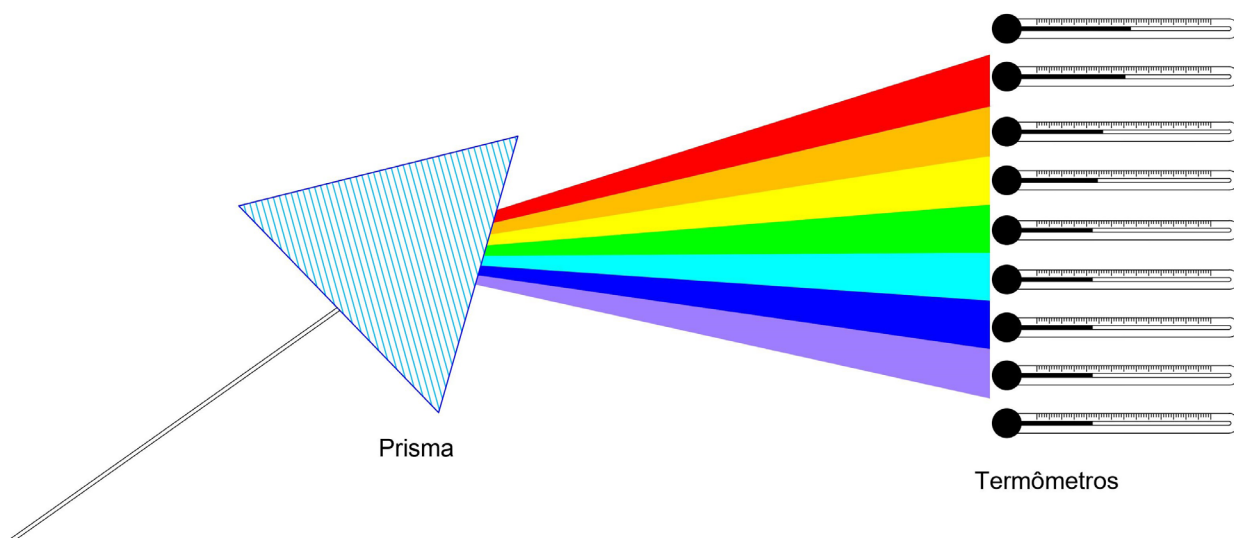


Figura 20 - Desenho esquemático da experiência de William Herschel que acabou por descobrir o Infravermelho. Herschel permitiu que uma fresta em um aposento fechado deixasse entrar a luz solar, fez com que esta atravessasse um prisma, decompondo a luz em suas várias cores, instalou termômetros em cada faixa de luz colorida e nas duas extremidades, onde estava escuro, como controle. Para sua surpresa o termômetro instalado no escuro, ao lado da luz vermelha, foi o que mais aqueceu. Desenho: Francisco Conte.

Para a astronomia, essa experiência significou o início de uma nova era, pois representa a utilização do primeiro detector astronômico que não era o olho humano. Durante todos os séculos em que a astronomia se desenvolveu antes da invenção do telescópio, o único instrumento óptico de que dispusemos foi o olho humano. Mesmo depois da invenção do telescópio, eram nossos olhos que detectavam a luz captada pelos instrumentos. Na experiência de Herschel a luz é captada pelos termômetros, o que nossos olhos vão observar não é a luz que vem diretamente das estrelas, mas sim o efeito que essa luz provoca nos detectores, neste caso os termômetros.



## Século XIX

O século XIX começa com uma descoberta logo na primeira noite. Em 1º de janeiro de 1801, o astrônomo italiano Giuseppi Piazzi descobre o asteroide, hoje planeta anão, Ceres. A órbita de Ceres está localizada entre as órbitas de Marte e Júpiter. Inicialmente Ceres foi classificado como planeta, mas a constatação de que era um objeto muito pequeno em comparação aos planetas e a descoberta de mais três objetos semelhantes nos anos seguintes (Palas, descoberto em 1802 por Olbers, Juno, descoberto em 1804 por Karl Harding, e Vesta, também descoberto por Olbers em 1807) fizeram com que se percebesse que uma nova classe de objetos astronômicos havia sido encontrada. O termo “asteroide” foi proposto por William Herschel, que na época era provavelmente o mais prestigiado astrônomo do mundo.

Em 1804, o físico, médico e egiptólogo Thomas Young publicou seus trabalhos sobre óptica, em que comprovava o caráter ondulatório da luz. Young realizou um experimento famoso, em que analisou o comportamento da luz ao atravessar duas fendas. Como resultado, ele constatou que ocorria um processo de interferência da luz, de maneira similar ao que acontece com as ondas em um tanque de água.

O resultado do chamado “experimento da dupla fenda” ratificou as suposições de Christiaan Huygens e posteriormente de René Descartes, Robert Hooke e Leonhard Euler, que defendiam o caráter ondulatório da luz em oposição à hipótese da luz como partícula, de Isaac Newton. Mas esta história não termina aqui.

O único filho de William Herschel, John Herschel, foi também um astrônomo de grande importância, complementando vários trabalhos iniciados por seu pai. John Herschel viajou para o Hemisfério Sul para completar o catálogo de objetos difusos e nebulares iniciado por seu pai. Ele se instalou na África do Sul levando um telescópio de grandes dimensões construído pela família. John Herschel catalogou 1.707 nebulosas do hemisfério sul, das quais 1.268 foram descobertas por ele. Desenhou o melhor mapa da época para a Grande Nuvem de Magalhães, que hoje sabemos ser uma galáxia anã satélite da Via Láctea, e observou uma mudança de brilho bastante significativa na estrela Eta Carinae. O catálogo, ampliado, foi publicado em 1864. Posteriormente ele seria complementado também por John Dreyer e ficou conhecido como *New General Catalog*, ou NGC.

Na época, a maioria dos observatórios profissionais optava por adquirir telescópios refratores, com uma crescente qualidade na fabricação de conjuntos de lentes acromáticas, embora a abertura dos equipamentos não fosse muito grande quando comparada à dos refletores do mesmo período (telescópios refletores haviam atingido até um diâmetro de 1,20 m). Os refratores do período eram bem menores, com diâmetros variando de 15 cm a 20 cm de abertura nos melhores casos. Essa opção um tanto conservadora tinha como razão as limitações dos sítios, que, apesar de muito escuros para os padrões de hoje, eram bastante inadequados para o desenvolvimento da astronomia. Os telescópios eram instalados normalmente em observatórios construídos nas cidades, abaixo da camada de inversão térmica, e em regiões sem clima apropriado, o que comprometia a qualidade das observações. Dessa forma, às vezes era contraproducente adquirir um instrumento caro, grande e de difícil operação, pois os resultados alcançados estariam comprometidos pela qualidade do sítio. Além disso, a astronomia da época era praticamente limitada

a trabalhos de astrometria, ou seja, à medição de posição dos astros, e à eventual descoberta de algum cometa ou asteroide, por exemplo.

Um dos principais fabricantes de telescópios do período foi Joseph von Fraunhofer, que começou a trabalhar ainda adolescente como ajudante em uma fábrica de vidros. Ele foi salvo de um desabamento na fábrica, e o príncipe Maximilian Joseph, que liderava o resgate, atuou a partir de então como seu benfeitor, dando condições para que Fraunhofer pudesse estudar. Ele acabou trabalhando no Instituto de Óptica, do qual acabou se tornando diretor. Lá, Fraunhofer ajudou a desenvolver vários tipos de vidros, que se destinavam a usos e finalidades diferentes. No instituto ele construiu aquele que seria considerado o primeiro refrator acromático moderno, que também possuía uma montagem equatorial, o que permitia o acompanhamento de objetos celestes por grandes períodos de tempo apenas girando um eixo do instrumento. Esse telescópio é o refrator de Dorpat, que foi instalado no Observatório de Tartu, na Estônia, que funcionava sob o comando do astrônomo Friedrich Wilhelm von Struve. O refrator de Dorpat era considerado o melhor telescópio de sua época. Mais à frente veremos a importante participação de Fraunhofer no capítulo referente à espectroscopia.

Em 1827 é criado no Brasil o Imperial Observatório, hoje Observatório Nacional, na cidade do Rio de Janeiro, uma das primeiras instituições científicas a operar no país. O observatório foi criado por ordem de Dom Pedro II e nos anos iniciais foi instalado no torreão da escola militar e dirigido pelo professor de matemática Pedro de Alcântara Bellegarde. Nas primeiras décadas de funcionamento do observatório o trabalho quase exclusivo da instituição foi o treinamento de alunos das escolas militares de mar e terra. A partir de 1871 o Observatório Nacional foi afastado de seu caráter militar e passou a dedicar-se exclusivamente à pesquisa e à prestação de serviços à população nas áreas de meteorologia, astronomia e geofísica e se tornou o órgão oficial a cuidar da medição do tempo e encarregado de anunciar a hora oficial.

Um dos grandes desafios da época, a partir da evolução dos instrumentos ópticos, era a medida da paralaxe estelar, que permitiria calcular a distância até as estrelas. O mesmo método já havia sido empregado para calcular a distância da Lua e posteriormente por Christian Huygens para finalmente compreendermos a escala do sistema solar. Acontece que calcular a distância para as estrelas era um feito muito difícil, por duas razões. A primeira é que a base necessária teria que ser muito grande. Isso podia ser resolvido com duas observações realizadas com seis meses de diferença, garantindo uma base com o dobro do raio da órbita da Terra ao redor do Sol, ou aproximadamente 300 milhões de km. A segunda é que mesmo com essa base, o ângulo de paralaxe seria muito pequeno. Uma série de estrelas que apresentavam um movimento próprio grande foram selecionadas como possíveis candidatas, pois seu grande movimento relativo seria uma indicação de sua proximidade. Em 1838, o astrônomo alemão Friedrich Bessel, trabalhando no Observatório de Königsberg, conseguiu medir a distância da estrela 61 Cygni, uma obscura estrela invisível a olho nu. Ela apresentava um ângulo de paralaxe de 0,314 segundos de arco, resultando em uma distância de 10,3 anos-luz (hoje as melhores medidas apontam para uma distância de 11,4 anos-luz). Quase ao mesmo tempo outros dois astrônomos apresentaram seus cálculos, mostrando a distância de outras duas estrelas: Friedrich Wilhelm von Struve, trabalhando no refrator de Dorpat, estimou a distância a Vega,

enquanto o escocês Thomas Harrison, que na época trabalhava no Observatório Real no Cabo da Boa Esperança, na África do Sul, conseguiu calcular a distância de Alfa Centauri, que é na verdade a estrela mais próxima do Sistema Solar. Como no caso de Galileu com as luas de Júpiter e os desenhos da Lua, o mérito da descoberta coube a Bessel, o primeiro a publicar o trabalho.

O planeta Mercúrio sofre perturbações periódicas em sua órbita que não podiam ser explicadas com os conhecimentos da época. Na verdade a explicação só viria com os trabalhos de Einstein no início do século XX, mas disso falaremos posteriormente. Uma das possíveis explicações seria a existência de um hipotético planeta desconhecido, que tivesse uma órbita mais próxima ao Sol do que Mercúrio. Esse planeta, na verdade inexistente, chegou até a receber um nome: Vulcan ou Vulcano. Vários astrônomos dedicaram-se a procurar esse novo planeta, que chegou inclusive a ser anunciado em algumas ocasiões. Um desses astrônomos, o alemão Samuel Schwabe, acabou por descobrir algo importante em suas observações do disco solar, à procura do planeta desconhecido: as manchas solares obedeciam a um ciclo que variava de um mínimo de manchas a um máximo de manchas a cada onze anos. Após essa descoberta, divulgada por Schwabe em 1826, o astrônomo Suiço Rudolf Wolf lançou-se em um trabalho hercúleo de análise de registros de observações de manchas solares, conseguindo remontar os ciclos até o ano de 1755, que passou a ser conhecido como o ciclo 1 (1755 a 1766). Hoje estamos iniciando o ciclo 25. Essa foi uma descoberta que direciona até os dias atuais o estudo do Sol.

Um dos pontos altos da astronomia na época foi a descoberta de Netuno, pois esta ocorreu devido a uma convergência entre a teoria física, boa capacidade observacional e o desenvolvimento tecnológico trabalhando em conjunto. Analisando a órbita de Urano, um planeta que havia sido descoberto algumas décadas antes, o químico e astrônomo francês Urbain Le Verrier percebeu algumas perturbações no movimento do planeta. Essas perturbações poderiam ser explicadas por outro corpo planetário de massa significativa que estivesse localizado mais afastado do Sol. Le Verrier iniciou um meticuloso cálculo para tentar encontrar a fonte das irregularidades usando a lei da gravitação de Newton. Após uma série de análises e repetições do processo, ele chegou ao final de seu trabalho com a certeza da existência de um novo planeta, incluindo sua localização aproximada no céu. Le Verrier apresentou suas conclusões na Académie de Sciences em Paris em 1846. Além disso, enviou cópias de seu trabalho a vários astrônomos. Em Berlim, o astrônomo Johann Galle recebeu sua cópia no dia 23 de setembro do mesmo ano. Pediu permissão aos diretores do observatório e foi autorizado a iniciar a busca pelo possível planeta. Ele e seu colaborador Heinrich d'Arrest acabaram por encontrar Netuno na mesma noite, afastado apenas 1 grau da posição prevista por Le Verrier (ver figura 21). Na mesma época dos trabalhos de Le Verrier, outro astrônomo, o inglês John Couch Adams, havia desenvolvido um trabalho independente e muito semelhante, com resultados similares, mas não publicou seus resultados antes da descoberta de Galle. Houve certa controvérsia quanto a quem deveria receber os créditos pelo achado, mas, segundo consta, até o próprio Adams entendia que o trabalho de Le Verrier era mais preciso e merecia as honras.



Figura 21 - O telescópio onde foi feita a descoberta de Netuno, por Galle e D'Arrest, em 1846, em Berlim. O telescópio foi fabricado pelo atelier de Fraunhofer, que na época já havia falecido. Em exposição no Deutsches Museum, em Munique. Foto: Francisco Conte.

Após a descoberta de Netuno, verificou-se que vários astrônomos já haviam observado o novo planeta, sem se dar conta do que estavam vendo. John Herschel observou Netuno em várias ocasiões. O mais surpreendente, porém, é que Netuno havia sido observado por Galileu, pois na época em que Galileu fez suas observações de Júpiter Netuno estava muito próximo. No Ano Internacional da Astronomia, em 2009, Netuno estava em posição similar, nas proximidades de Júpiter, e podia ser observado facilmente mesmo com binóculos.

É importante ressaltar o trabalho de dois astrônomos que construíram os maiores telescópios do período. O primeiro foi William Lassell, que construiu um telescópio com 1,20 m de diâmetro, aproximadamente o mesmo tamanho do telescópio gigante construído por William Herschel, ainda utilizando espelhos de ligas metálicas, porém com uma montagem muito mais avançada, e o instalou na ilha de Malta, no ano de 1855. Lassell previamente já havia descoberto o satélite Hipérion, de Saturno, os satélites Ariel e Umbriel, de Urano, e o satélite Tritão, de Netuno.

O outro astrônomo a construir um telescópio gigante foi o rico aristocrata William Parsons, Lorde Rosse, que construiu aquele que se tornaria o maior telescópio do mundo, com um espelho com mais de 1,80 m de diâmetro, instalado no Castelo de Birr, em Parsonstown, na República da Irlanda (ver figura 22). Esse instrumento ficou conhecido como Leviatã. O telescópio era uma maravilha tecnológica e representava em muitos

aspectos um limite para as possibilidades da época. Ele foi concluído em 1845, mas o local de sua instalação era pouco apropriado para observações astronômicas, além de sua operação ser bastante limitada devido ao conjunto óptico muito pesado. Rosse instalou seu instrumento entre duas paredes de alvenaria, que limitavam seu ângulo de operação. Para compensar essa limitação, a orientação da montagem foi feita no sentido do meridiano, o que permitia que o telescópio observasse quase todo o céu. O espelho construído em *speculum* apresentava problemas de condensação após algumas horas de operação. Com esse instrumento, Lorde Rosse conseguiu observar pela primeira vez as estruturas em espiral de algumas nebulosas que hoje sabemos serem galáxias.



Figura 22 - O Leviatã de Parsonstown, construído pelo Lorde Rosse, o maior telescópio de seu tempo. Foi neste instrumento que pela primeira vez se observaram as estruturas de braços em espiral de galáxias. Fonte: Wikimedia Commons.

Em 1856 o astrônomo Norman Robert Pogson, do Radcliffe Observatory em Oxford, publica um trabalho sobre o sistema de magnitudes, criado na Grécia antiga por Hiparco de Niceia. Considerando que para uma diferença de cinco magnitudes o aumento real de luminosidade necessário seria da ordem de cem vezes, ele calculou a razão de aumento para cada magnitude em 2,512. Com esse valor, que ficou conhecido como Taxa de Pogson, tornou-se possível calcular a relação entre luminosidades de duas estrelas.

A origem dessa taxa está ligada diretamente à forma como o cérebro humano compreende a luz captada pelos nossos olhos. Nossa visão entende a luz de forma logarítmica e não linear. Uma forma simples de entender esse funcionamento é a utilização de velas para iluminar uma sala escura. Se já existe uma vela acesa e se acende uma segunda, nossa percepção é de um grande aumento de luminosidade; ao acendermos mais duas velas esperando o mesmo aumento, somos surpreendidos com uma diferença quase imperceptível para nosso cérebro. É possível ver o assunto mais detalhadamente no apêndice sobre magnitudes. Pogson era também um ótimo astrônomo observacional e descobriu não menos do que oito asteroides, 106 estrelas variáveis e um cometa.

Gradualmente alguns avanços iam sendo incorporados aos telescópios. Nos anos 1860, Edward Pickering, trabalhando em Cambridge (EUA), desenvolveu vários tipos de fotômetros, instrumentos dedicados à medição da quantidade de luz de um objeto celeste. A empresa Alvan Clark & Sons construiu vários desses instrumentos de acordo com os projetos ópticos de Pickering. Um deles, chamado Polaris, consistia em um aparato com um tubo fixo, apontado para a estrela Polar, e permitia também a observação de uma segunda estrela. Com um sistema de prismas acoplado a um botão giratório era possível calibrar o instrumento até que o brilho das duas estrelas ficasse similar, possibilitando a estimativa da diferença de brilho entre os dois objetos. O instrumento era acoplado em um telescópio refrator, e normalmente o trabalho era realizado em dupla, com Pickering sendo em geral acompanhado por Arthur Searle ou por Oliver Wendell. Cada astrônomo fazia quatro medidas independentes de cada estrela, num total de oito medições. Durante uma noite típica de trabalho a equipe conseguia medir o brilho de várias centenas de estrelas. As medições eram passadas a uma computador, Nettie Farrar, que tabulava os dados e comparava com a magnitude da estrela Polar. Após uma série de cálculos levando em conta a média das medições era feita uma estimativa da magnitude aparente de cada estrela. Em três anos de utilização do instrumento a equipe havia conseguido fazer a medição de magnitude de todas as estrelas que podiam ser observados naquele telescópio em todo o céu noturno de Cambridge, como pode ser visto em Sobel (2016, p. 12).

Na segunda metade do século XIX, os telescópios refratores utilizados na maioria dos observatórios profissionais já permitiam a observação de objetos celestes com brilho muito fraco, com magnitude aparente na casa de 14, o que representava uma diferença de quatro magnitudes em relação aos primeiros telescópios utilizados por Galileu e seus contemporâneos. Essa diferença é a mesma de quando os primeiros telescópios suplantaram as observações a olho nu. Em pouco mais de 200 anos a tecnologia desenvolvida havia dobrado a capacidade de observação dos astrônomos.

Chegamos aqui ao fim do período marcado pela primeira revolução tecnológica na astronomia moderna. Isso não quer dizer que os telescópios tenham parado de ser utilizados – o diferencial, a partir desse momento, foi que inovações surgidas em duas áreas distintas – a fotografia e a espectroscopia – começaram a alterar drasticamente o curso da história da astronomia, como veremos nos próximos capítulos.

## CAPÍTULO 2

### Arquivando a luz – Fotografia

A fotografia é uma arte ou aplicação que consiste na obtenção de imagens duradouras em uma superfície através de processos químicos, a partir de materiais sensíveis à luz. A introdução da fotografia causou um grande impacto na sociedade do século XIX, influenciando costumes e a história da arte, além de um grande número de aplicações práticas. A história da astronomia foi bastante influenciada e beneficiada através da introdução desta técnica.

Antes de falarmos da fotografia, vamos ver como funciona o olho humano (ver figura 23), que durante milênios foi o único detector disponível para a observação astronômica. Na parte interior de nossos olhos se encontra a retina, que possui uma rede de células que funcionam como detectores de luz. Estas células são conectadas através de fibras nervosas até o nervo óptico e deste até o cérebro. As células detectoras da retina são de quatro tipos diferentes: três tipos de cones e os bastonetes. Os nomes dessas células foram atribuídos devido a seus formatos. Os vários tipos de cones são diferenciados pelo pico de sensibilidade na captação de luz, sendo que o primeiro possui o pico na faixa de comprimento de onda dos 400 nm (entre o violeta e o azul), o segundo na faixa dos 520 nm (verde) e o terceiro na faixa dos 580 nm (amarelo). A combinação desses três tipos de células nos faz perceber as cores. Os cones, entretanto possuem baixa sensibilidade.

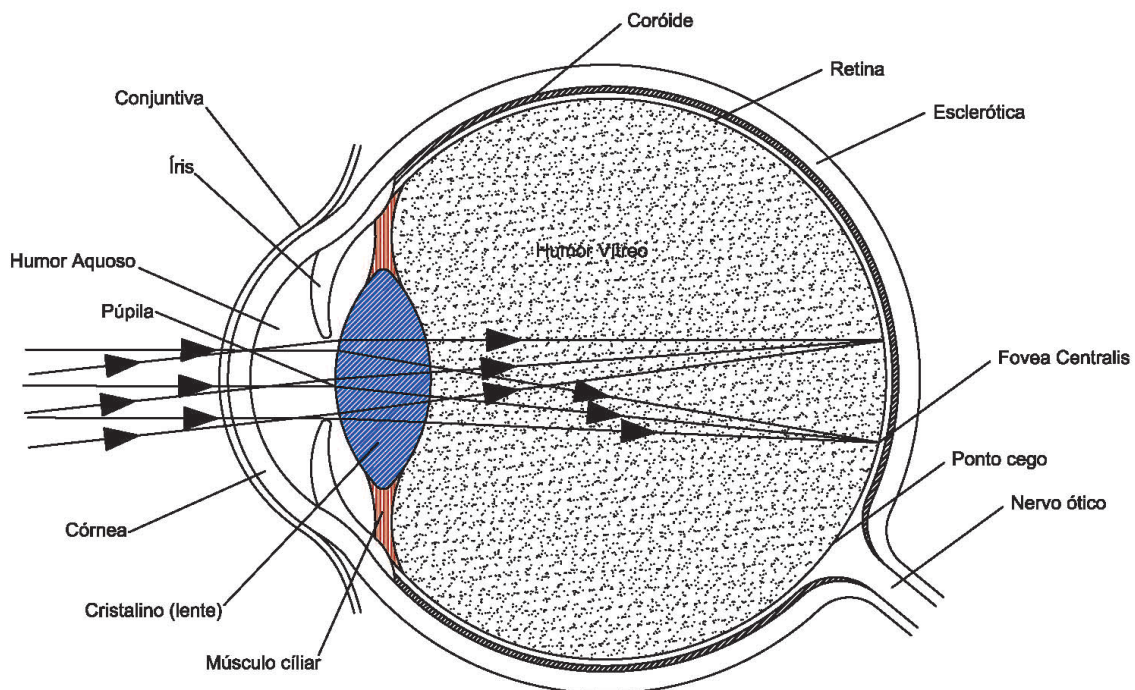


Figura 23 - Corte esquemático do olho humano. Desenho: Francisco Conte, baseado em Kitchin (2009, p. 3).

Os bastonetes são todos de um único tipo, com pico de sensibilidade na faixa dos 510 nm (verde) (ver figura 24). Em um olho humano típico existem aproximadamente  $10^8$  bastonetes e cerca de  $6 \times 10^6$  cones, com apenas  $10^6$  fibras nervosas, o que resulta em que várias células são ligadas a uma mesma fibra nervosa. Os cones são mais abundantes na *fovea centralis*, que é a área central da retina, onde chega a luz de um objeto para o qual se está olhando diretamente. Os bastonetes são mais comuns nas áreas periféricas da retina, ao passo que os cones vão rareando à medida que se afastam das áreas centrais.

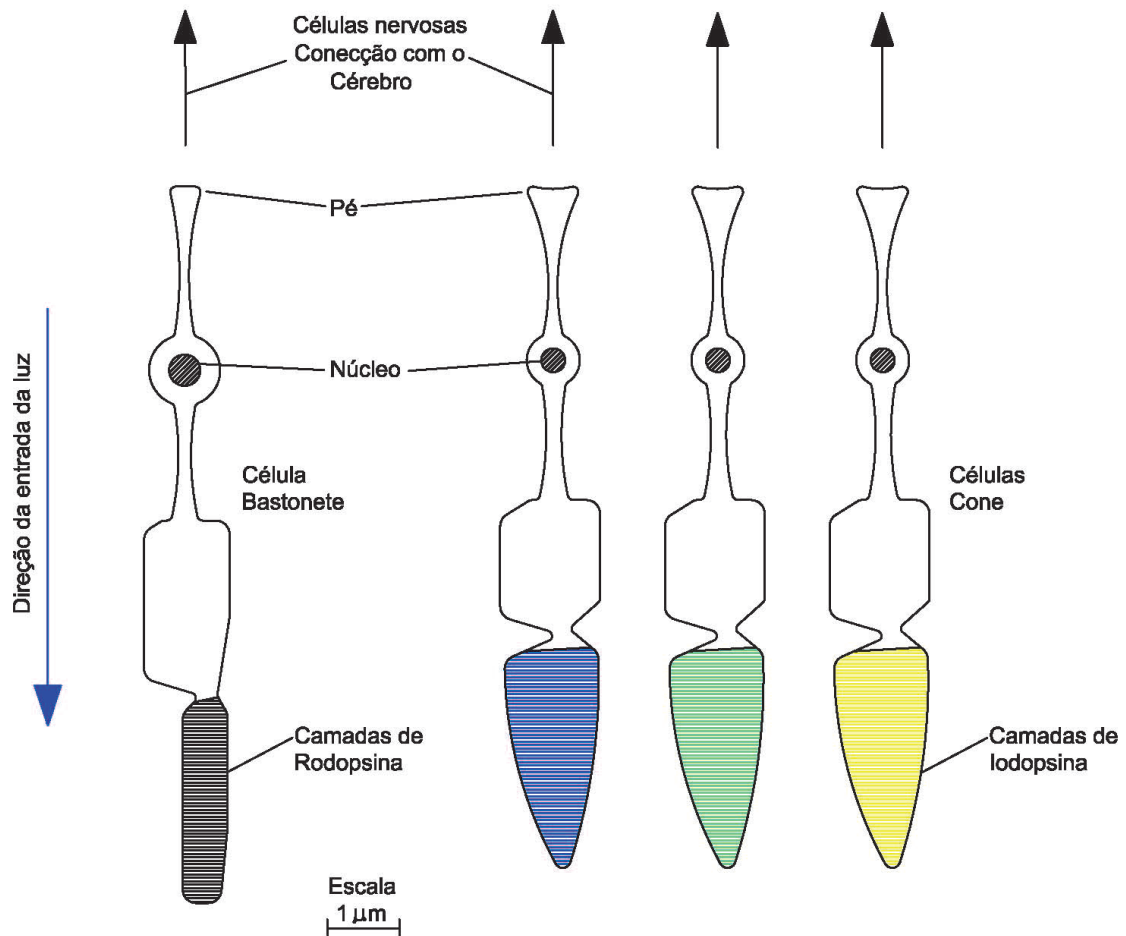


Figura 24 - Células detectoras de luz do olho humano: cones (três tipos, com pico de sensibilidade em cores diferentes) e bastonetes. Desenho: Francisco Conte, baseado em Kitchin (2009, p. 4).

O componente sensível à luz dos bastonetes é uma molécula chamada rodopsina (no caso dos cones é a fopsina). Quando submetida a altos níveis de iluminação, a rodopsina é fortemente inibida e os bastonetes funcionam com baixa sensibilidade. Em ambientes com baixa iluminação, a rodopsina se regenera em um período que vai de 20 a 30 minutos, variando de pessoa para pessoa e com a idade. O aumento da taxa de



rodopsina causa uma ampliação de aproximadamente cem vezes na sensibilidade dos bastonetes, que atingem seu pico e passam virtualmente a controlar todo o processo da visão. Para o observador astronômico esse fato traz duas consequências: a primeira é o conhecido fenômeno da adaptação noturna, facilmente perceptível quando se começa a observar o céu à noite em um local escuro. Em um primeiro momento o observador não enxerga muitas coisas, mas aos poucos percebe que passou a ver muito mais claramente os objetos celestes. Se durante o período de observação noturna o olho for submetido a iluminação intensa, mesmo que breve (a luz de uma lanterna, por exemplo), a rodopsina será destruída rapidamente, e um novo período de adaptação será necessário. Mas, como a rodopsina é sensível apenas a frequências que variam de 380 nm a 600 nm, se o astrônomo utilizar uma lanterna vermelha, de luz com comprimento de onda maior que 600 nm, ele não vai perder a adaptação noturna. A outra consequência vem do fato de existir apenas um tipo de bastonete. Em baixos níveis de iluminação, a sensibilidade do olho humano em perceber cores cai drasticamente. Assim, quando um astrônomo observa um objeto pouco luminoso, como uma galáxia, por exemplo, não vai conseguir distinguir as cores que facilmente aparecem em uma foto do mesmo objeto.

Além disso, a distribuição dos cones e bastonetes na retina do olho humano faz com que os observadores experientes criem algumas técnicas de observação. Uma bastante utilizada é observar utilizando a visão periférica. Isso se faz não olhando diretamente para o objeto, mas sim para um ponto imediatamente ao seu lado, e fazendo com que esse objeto fique alinhado com as partes externas da retina, onde existe um maior número de bastonetes, com maior sensibilidade à observação de objetos pouco luminosos. Utilizando essa técnica o observador consegue ver objetos que não seriam percebidos caso observados diretamente. Este procedimento requer treinamento por parte do observador, pois o impulso natural ao se perceber o objeto em questão é olhá-lo diretamente.

Outra característica importante do olho humano é que sua resposta à luz é logarítmica, o que faz com que não enxerguemos o aumento de iluminação de forma linear, como vimos no capítulo anterior no exemplo das velas em uma sala escura. A escala de magnitudes estelares, que é usada para avaliar o brilho aparente de estrelas, está diretamente ligada a essa característica de nossos olhos. Para notarmos uma diferença de seis magnitudes é necessário um aumento real de cem vezes na fonte iluminante. A partir dessa medida podemos estimar em 2,512 a razão entre o aumento de luz na fonte iluminante e a quantidade de luz percebida pelos nossos olhos. Assim, para nosso olho sentir uma diferença para o dobro da luz inicial é necessário um aumento de 2,512 vezes; para perceber um aumento de três vezes é necessário um aumento de luz real de 6,31 vezes; para perceber um aumento de quatro vezes é necessário um aumento de luz de 15,85 vezes; para um aumento de cinco vezes é necessário um aumento real de 39,81 vezes; finalmente, para um aumento de seis vezes percebido pelo nosso olho é necessário um aumento de luz de cem vezes. Como a razão é logarítmica, o aumento acontece de maneira cada vez mais acentuada; para um aumento de luz percebido pelo olho humano como de 12 vezes é necessário um aumento real de 10.000 vezes da fonte de luz. Em termos técnicos o olho humano percebe o aumento de luz em uma escala não linear, assim como ocorre com a fotografia (ver figura 25).

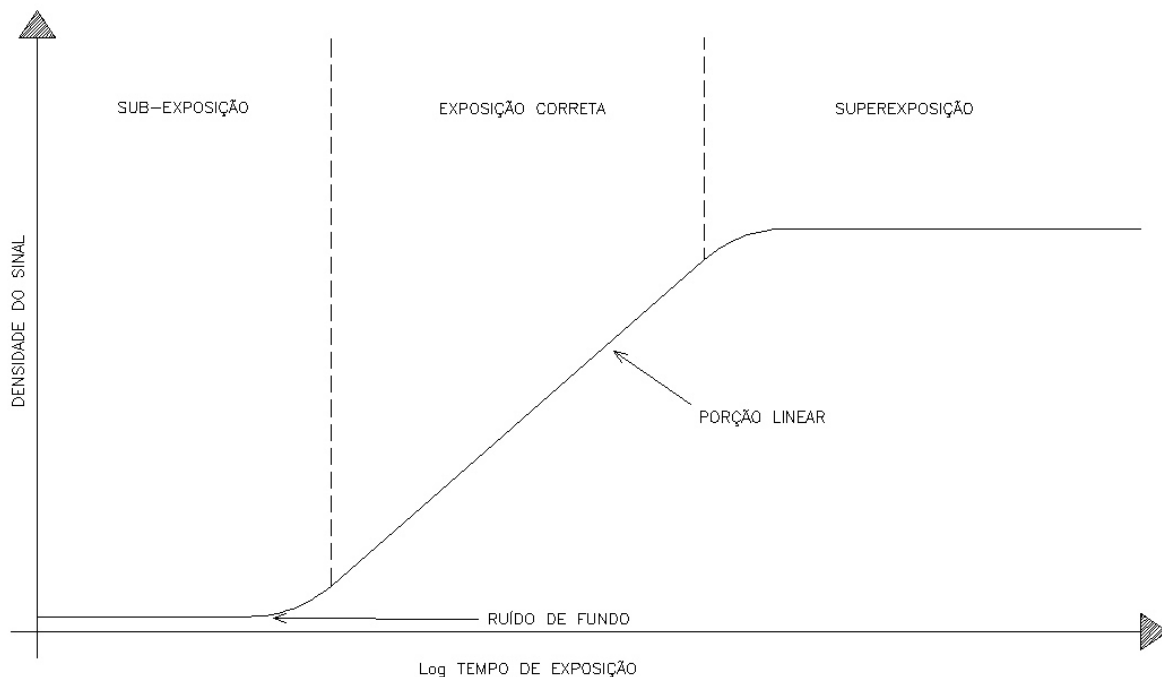


Figura 25 - Gráfico com o desempenho de detecção da luz da fotografia, levando em conta o tempo de exposição, pela densidade do sinal. Desenho: Francisco Conte, baseado em Smith (2007, p. 50).

A invenção da fotografia não pode ser atribuída a uma única pessoa, pois seu aparecimento foi fruto de um processo que perdurou por décadas, desde o final do século XVIII até meados do século XIX. Apenas um ano após a descoberta do infravermelho por William Herschel, o físico alemão Johan Wilhelm Ritter, que nessa época pesquisava materiais que reagiam à luz, fez uma experiência utilizando cloreto de prata. De maneira similar ao trabalho de Herschel, Ritter decompôs a luz solar através de um prisma, observando a reação causada por cada cor na substância. A intensidade da reação era maior quando se observavam as cores mais azuladas, com o pico da intensidade no violeta, que é justamente o limite da luz visível. Ele resolveu então testar a parte escura do espectro ao lado do violeta e percebeu que a reação do cloreto de prata nessa região era ainda mais intensa, tornando claro que existia um tipo de luz que nossos olhos não podiam enxergar. O nome ultravioleta veio a partir do grego, em que “*ultra*” significa “além de”, para designar uma região do espectro além do violeta.

Ritter não era o único cientista a pesquisar substâncias que reagiam à luz. Muito trabalho estava sendo desenvolvido na época nessa direção. A mais antiga fotografia conhecida foi feita por Nicéphore Niépce, na França, em 1826 ou 1827, com um processo que demorava oito horas para cada imagem obtida. Seus trabalhos foram aperfeiçoados por seu seguidor Louis Daguerre, que conseguiu diminuir a duração do processo para alguns minutos. Em Campinas, Brasil, no ano de 1832, o francês Hercule Florence desenvolveu um método de fotografia com a criação de uma imagem negativa e depois outra positiva, processo que seria adotado como regra em todo mundo. Além disso, Florence foi o primeiro a utilizar o termo “fotografia”. Na Inglaterra, William Fox Talbot começou a realizar fotografias em papel e John Herschel, filho de William Herschel,

colaborou desenvolvendo novas técnicas (ver figura 26), assim como Frederick Scott Archer e Gabriel Lippmann. Em 1861, Thomas Sutton conseguiu produzir a primeira fotografia colorida, aplicando um método proposto pelo físico James Clerk Maxwell em um trabalho publicado em 1855.

A primeira tentativa de fazer uma fotografia astronômica foi realizada por Daguerre em 1839, com o objetivo de obter uma imagem da Lua, mas problemas de acompanhamento durante a longa exposição para obtenção da luz necessária resultaram em uma imagem borrada e indistinta. Em março de 1840, John Draper, professor de química da Universidade de New York, conseguiu realizar a primeira fotografia astronômica de sucesso, obtendo uma imagem da Lua num daguerreótipo, utilizando um telescópio refletor de 13 cm de diâmetro com uma exposição de 20 minutos (ver figura 27).

Após os trabalhos iniciais de Hercule Florence, a fotografia se difundiu rapidamente no Brasil. Em 1840, o abade Louis Compte desembarcou no Rio de Janeiro trazendo um daguerreótipo, e fez uma demonstração ao imperador Dom Pedro II, que em pouco tempo adquiriu uma câmera e tornou-se um fotógrafo e entusiasta. Durante o século XIX vários fotógrafos surgiram pelo país, desenvolvendo trabalhos importantes de documentação da vida nas cidades e da natureza, como Marc Ferrez, Alberto Henschel e Militão Augusto de Azevedo, entre outros.

A primeira fotografia do Sol foi feita por Léon Foucault e Hippolyte Fizeau em 1845. Em 28 de julho de 1851 foi feita a primeira imagem de um eclipse solar, por Julius Berkowski, do Observatório de Königsberg (hoje Kaliningrado), utilizando um telescópio refrator de 17 cm de diâmetro e um daguerreótipo, com uma exposição de 40 a 45 segundos (ver figura 28).

Figura 26 - Fotografia do telescópio gigante de William Herschel, feita por seu filho, John Herschel, uma das mais antigas fotos produzidas no mundo. Fonte: Wikimedia Commons.

Figura 27 - Primeira fotografia astronômica de sucesso: a Lua, por John Draper, em 1840. Fonte: Wikimedia Commons.

Figura 28 - Primeira imagem de um eclipse solar, por Julius Berkowski, em 1851. Fonte: Wikimedia Commons.

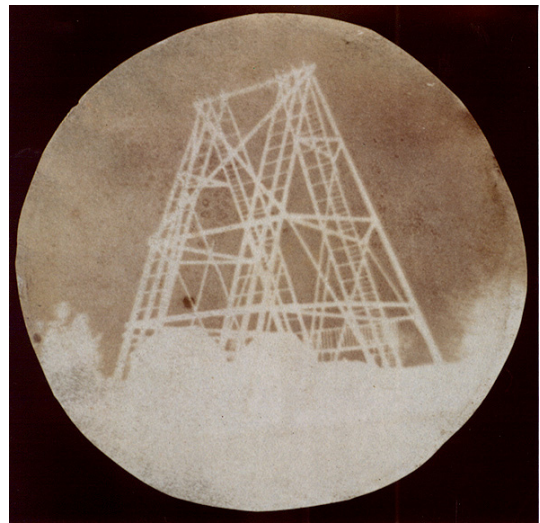


Figura 26



Figura 27

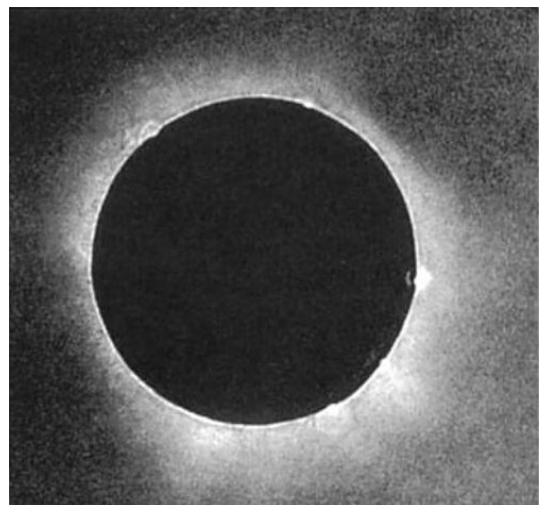


Figura 28

A primeira fotografia de uma estrela do céu noturno foi feita pelo astrônomo William Cranch Bond e pelo fotógrafo John Adams Wipple, que em 16 e 17 de julho de 1850 obtiveram uma imagem de Vega, utilizando o grande refrator da Universidade de Harvard.

Em 1872, o médico e astrônomo amador Henry Draper conseguiu obter a primeira fotografia do espectro de uma estrela, como veremos com mais detalhes no próximo capítulo. Em 1874 ele liderou uma expedição para fotografar um trânsito de Vênus. Em 1880 tornou-se o primeiro astrônomo a fotografar a Nebulosa de Orion, utilizando um telescópio refrator de 11 polegadas (27,5 cm) fabricado pela Clark Brothers, com uma exposição de 50 minutos. No mesmo ano conseguiu obter uma foto do espectro de Júpiter.

A introdução da fotografia trouxe de imediato uma série de benefícios à prática da astronomia. O primeiro benefício é que uma observação astronômica feita utilizando a fotografia gera uma imagem, em papel ou chapa de vidro, que pode ser arquivada e consultada quando necessário. Até essa época o astrônomo fazia sua observação em condições geralmente desfavoráveis: no meio da noite, sujeito ao frio, ao cansaço, à pressão pela busca de resultados etc. etc. Além disso, o astrônomo que estivesse com os olhos na ocular era frequentemente o único no local a observar o céu naquele dado momento, não podendo compartilhar nada sobre o objeto observado, a não ser suas anotações ou desenhos. Após a fotografia passou a ser possível analisar as observações com calma, em um local confortável, repetidas vezes, comparar imagens de um mesmo objeto feitas em ocasiões distintas; os pesquisadores puderam compartilhar a imagem com seus colegas, consultar outros astrônomos sobre um assunto específico etc. As imagens poderiam ser arquivadas e consultadas posteriormente. Além disso, ficou muito mais fácil comprovar uma descoberta, mesmo nos casos em que outros astrônomos não tivessem condições de realizar observações similares.

O segundo benefício importante da fotografia era o fato de que, diferentemente de nossos olhos, uma chapa fotográfica tinha a capacidade de acumular a luz durante todo o tempo em que a imagem estivesse sendo feita, enquanto o diafragma estivesse aberto. Isso permitia que fossem observados objetos muito menos brilhantes do que aqueles que seriam vistos por nossos olhos, mesmo utilizando o mesmo telescópio nas duas observações. Essa característica causou uma revolução no design dos telescópios, pois exigiu que os novos instrumentos passassem a ter algum tipo de montagem que permitisse o acompanhamento do objeto por longos períodos de tempo para permitir a captura de quantidades suficientes de luz para a obtenção da imagem de objetos pouco luminosos. Na época, os únicos tipos de montagem que possibilitavam essas operações eram as montagens equatoriais (ver apêndice 4). Montagens equatoriais possuem um eixo que é alinhado com o eixo de rotação da Terra, bastando assim a introdução de um motor de passo para que o objeto seja acompanhado pelo telescópio durante longos períodos de tempo.

No caso dos telescópios refratores a introdução da fotografia também teve seu impacto. Desde a invenção do telescópio muita pesquisa prática foi feita com o objetivo de produzir vidros de qualidade para a construção de instrumentos cada vez mais potentes e refinados do ponto de vista técnico. Isso fez com que se utilizassem com frequência tipos de vidro que fossem otimizados para a visualização de cores que variavam do laranja ao vermelho, faixas do espectro eletromagnético que são captadas com muita eficiência pelo

olho humano. No caso da fotografia, a exigência era diferente: as emulsões fotográficas de meados do século XIX eram mais eficientes na coleta da luz azul e violeta e inclusive do ultravioleta, que não era captado por nossos olhos, mas que era facilmente registrado em fotografias. Isso fez com que excelentes instrumentos, como o Grande Refrator de Harvard, fossem inadequados para o uso em astrofotografia. No caso dos telescópios refletores esse problema não existe, pois os raios de luz não atravessam o conjunto óptico.

Outro benefício era o fato de as fotografias poderem ser duplicadas, assim como também publicadas. Isso fez com que as imagens observadas pelos astrônomos pudessem ser compartilhadas por outros astrônomos e pelo público em geral, que nunca teria uma chance de observar o céu através de um telescópio – o que aumentou consideravelmente o apelo popular da astronomia, uma característica que se mantém até os dias de hoje. Isso também tornava possível que astrônomos de países diferentes tivessem a chance de compartilhar resultados e pesquisas de uma maneira até então impensável. Outro ponto interessante é que as imagens poderiam ficar guardadas por anos e ser consultadas posteriormente, o que inclusive tornou possível alguns tipos de pesquisa que demandavam observações feitas com vários anos de diferença, por exemplo no estudo de movimentos próprios de estrelas.

Por pelo menos cem anos após a primeira utilização da fotografia em astronomia a observação visual continuou sendo uma contribuição importante entre os astrônomos profissionais, sendo a observação de planetas uma das principais áreas onde a fotografia demorou a se impor. Isso se deve ao fato de que na observação visual era possível aproveitar alguns pequenos intervalos de poucos segundos em que a atmosfera da Terra estabilizava e a imagem do objeto melhorava incrivelmente, tornando possível perceber pequenos detalhes na superfície dos planetas, sobretudo na observação de Marte. Astrônomos chamam essa qualidade da atmosfera do local, que pode distorcer as imagens observadas, de *seeing*. As diferenças entre um local com um bom *seeing* ou não estão ligadas às turbulências da atmosfera, que são criadas por diferenças de temperatura entre as várias áreas da superfície, que vão criar um movimento contínuo de compensação entre regiões com comportamentos diferentes umas das outras. Quando fazemos uma filmagem de uma estrela de pouco brilho, com um grande aumento, podemos observar que a estrela parece se mover erraticamente em várias direções, sempre retornando a seu ponto inicial. Quando o *seeing* está bom esses deslocamentos da estrela parecem ocorrer mais lentamente e em saltos menores, de pequenas dimensões. Quando o *seeing* é ruim esses saltos aumentam significativamente de tamanho e parecem ocorrer mais rapidamente. Quando se faz uma fotografia com uma exposição mais prolongada, a imagem feita em um local com *seeing* ruim vai se transformar de um objeto pontual em uma mancha borrada. Quanto melhor o *seeing* mais a imagem vai se tornar nítida e o objeto mais pontual. Além disso, sabemos que mesmo em locais adequados o *seeing* pode variar de um dia para o outro, ou mesmo durante uma mesma noite de observação.

Um problema óbvio, no entanto, estava relacionado aos custos da pesquisa astronômica baseada em fotografias. As imagens eram normalmente feitas em placas de vidro, que tinham um valor bastante elevado e implicavam também em processos químicos de alto custo e em espaços apropriados para estocagem e manutenção das chapas existentes.

Na Inglaterra, o astrônomo William Huggins e sua mulher Margaret Huggins começaram a trabalhar com espectros no início dos anos 1870. Os dois construíram um observatório na própria casa, em Londres, no distrito de Tulse Hill. O casal Huggins foi pioneiro na utilização de fotografia através do processo de placa seca, também conhecido como “processo da prata coloidal”. Esse processo consiste na aplicação de uma suspensão de sais de prata em uma gelatina coberta com um filme de acetato ou resina e então deixada para secar – daí o nome “placa seca”. O material fica estável por meses, ao contrário do processo de placa molhada, que o precedeu.

A primeira imagem fotográfica na faixa do infravermelho foi feita em 1874, pelo químico inglês William de Wiveleslie Abney. Abney utilizou materiais sensíveis ao vermelho e ao infravermelho. Esse avanço tecnológico, no entanto, demorou muito para ser utilizado na astronomia.

Em 1880, Henry Draper conseguiu fotografar a Nebulosa de Orion, a primeira imagem de um objeto de céu profundo, utilizando um telescópio refrator de 21 cm de diâmetro construído por Alvan Clark, com uma exposição de 51 minutos. Apenas três anos depois, Andrew Ainslie Common, utilizando um telescópio refletor de 91 cm de diâmetro construído por ele mesmo, realizou uma série de imagens da mesma nebulosa, fazendo uso do processo de placa seca e exposições de cerca de uma hora. A incrível qualidade das imagens de Common em comparação com a imagem de Draper atesta a rápida evolução da fotografia no período (ver figuras 29 e 30).



Figuras 29 e 30 (ver página seguinte) - Duas das primeiras imagens de céu profundo, ambas da Nebulosa de Orion, a primeira de 1880, por Henry Draper, e a segunda, de 1883, por Andrew Ainslie. É incrível a rápida evolução da astrofotografia. Fonte: Wikimedia Commons.

No Brasil da época havia uma disputa entre dois grupos sobre o destino da astronomia nacional. Um desses grupos pregava o desenvolvimento de uma astronomia ligada à pesquisa e mais integrada com o tipo de trabalho realizado principalmente na Europa; o outro grupo, composto principalmente por militares, entendia que deveríamos desenvolver apenas uma astronomia dedicada a propósitos práticos, como a demarcação de fronteiras e o ensino dessas técnicas, tanto para o exército, quanto para a marinha. Em 1870, Emmanuel Liais assumiu a chefia do Imperial Observatório do Rio de Janeiro, que posteriormente se tornaria o Observatório Nacional, e, durante sua gestão, tentou introduzir na instituição as novas práticas que estavam sendo desenvolvidas no Hemisfério Norte (ver figura 31). Seu sucessor, Luiz Cruls, iniciou trabalhos em astrofísica e em fotometria fotográfica, uma técnica que estava despontando rapidamente. O Brasil se comprometeu a participar do programa *Cartes du Ciel*, que pretendia fazer um levantamento fotográfico de todo o céu nos dois hemisférios, chegando a adquirir instrumentos astronômicos para realizar a missão. Houve também a aquisição de um foto-heliógrafo para registrar



Figura 30 - Ver descrição na página anterior.

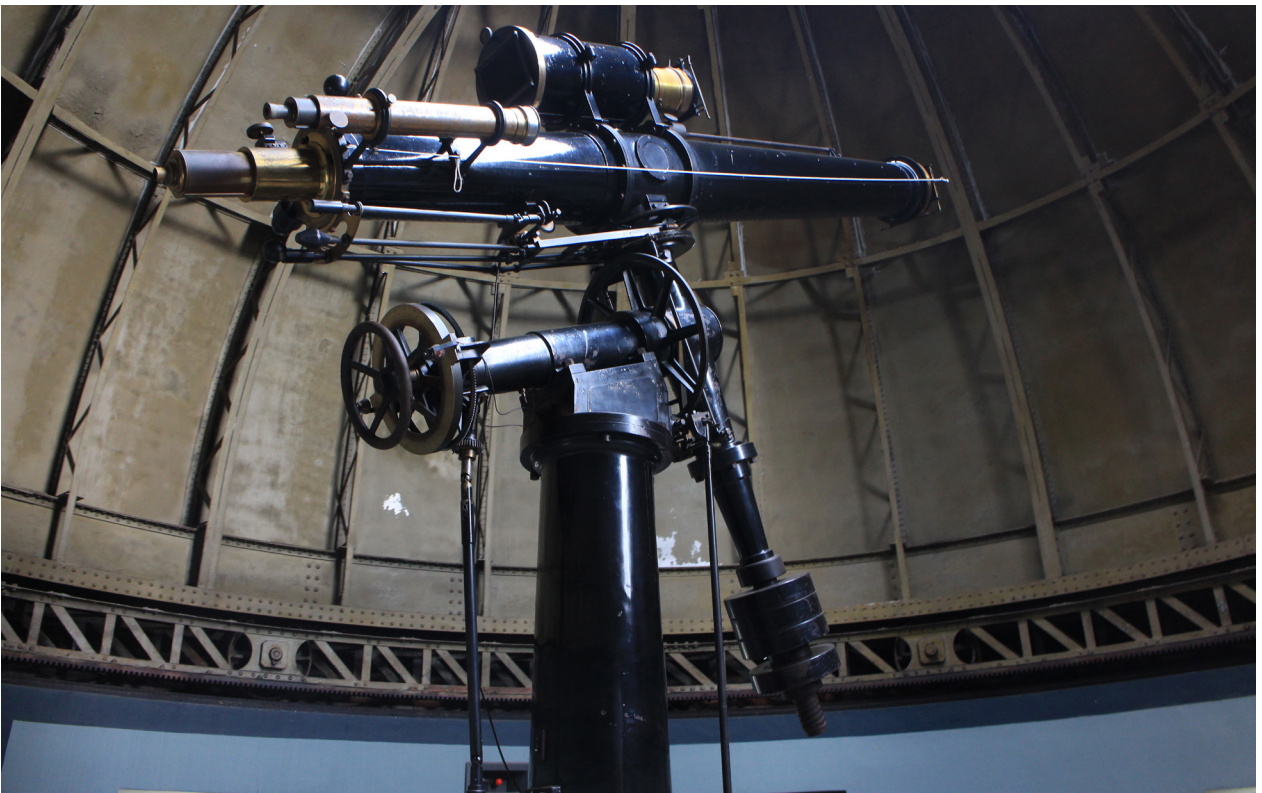


Figura 31 - Um telescópio refrator que pertenceu ao Observatório Nacional. Hoje, apesar de se manter no mesmo local, faz parte do acervo do Museu de Astronomia do Rio de Janeiro. Foto: Francisco Conte.

imagens do Sol e desenvolver uma pesquisa conjunta com pesquisadores e instituições do Hemisfério Norte. Infelizmente, após a proclamação da República e a subida dos militares ao poder o Observatório Nacional assumiu um papel menos importante, pelo menos até o início do século XX. Apenas como informação complementar, a participação do Brasil no programa *Cartes du Ciel* acabou por nunca se concretizar.

Voltando ao cenário internacional, em 1885 William Henry Pickering (irmão de Edward) se graduou no MIT e começou a lecionar fotografia astronômica, ensinando técnicas avançadas para captura de objetos em movimento, o que vale para qualquer objeto astronômico em longas exposições. Em uma de suas imagens, que cobria uma estreita faixa do céu onde existiam 55 objetos cadastrados, podiam ser vistas claramente 462 estrelas, o que permite compreender como o uso da fotografia aumentava as capacidades de observação do pesquisador. Além disso, em fotografias as medições de fotometria eram muito mais precisas do que as obtidas em métodos visuais, permitindo que a área evoluísse muito rapidamente, como visto em Sobel (2016, p. 19).

Em 1892, os astrônomos William Pickering e Solon Bailey, que na época trabalhavam em Arequipa, no Peru, enviam ao Observatório de Harvard um lote com mais de 2 mil placas fotográficas, incluindo imagens e espectros, do céu do Hemisfério Sul. Incrivelmente, durante o transporte dessa primeira remessa de fotografias – mais de uma tonelada de material –, que incluiu carroças, uma viagem de navio de várias semanas e mais o desembarque, nenhuma placa se quebrou ou foi riscada. A imensa quantidade de fotografias dá uma ideia de quanto a pesquisa fotográfica em astronomia avançou em um tempo relativamente curto. No ano seguinte, a universidade construiu um edifício para comportar todas as chapas fotográficas de vidro de seu acervo, que incluía todo o material obtido no hemisfério norte, algo como 13 mil placas e oito toneladas de peso. O zeloso diretor do observatório da universidade, Edward Pickering, se esforçou para manter o acervo de imagens em um local protegido do fogo e da umidade. A chegada das placas do Peru também representa um momento na história em que os astrônomos do hemisfério Norte puderam trabalhar com material obtido no hemisfério sul e comparar objetos astronômicos de ambos os hemisférios, passando a ter uma visão completa do céu noturno – fato que nunca havia acontecido até então.

No final do século XIX, no topo do Monte Hamilton, nos EUA, foi aos poucos edificado o Observatório Lick, que deu novos rumos à história da astronomia. Esse episódio vai ser descrito detalhadamente mais à frente. No local, James Keeler começou a utilizar um telescópio refletor construído por Andrew Common, na Inglaterra, em 1879. Com o instrumento, desprezado pela maior parte dos astrônomos do observatório, Keeler conseguiu obter as melhores imagens astronômicas de seu tempo, causando um impacto no meio astronômico similar ao que as imagens do Hubble Space Telescope teriam nos anos 1990 (ver figura 32). Uma das ironias é que Keeler era um excepcional desenhista – devido às limitações de orçamento causadas pelo alto custo das chapas fotográficas do período, ele fez, por exemplo, excelentes desenhos de Saturno. O trabalho de Keeler foi muito importante por deixar claro para a maior parte do meio astronômico que os telescópios refletores de grande porte poderiam obter imagens melhores que os grandes refratores, com uma fração dos custos de construção, tanto do telescópio, quanto da montagem, além de terem operação muito mais barata. Até essa época, a maioria dos



observatórios astronômicos insistia na construção de telescópios refratores, mas esse panorama seria radicalmente alterado em breve.

Em 16 de agosto de 1898, William Pickering descobriu o nono satélite de Saturno, que foi batizado de Febe. Esse foi o primeiro satélite planetário encontrado através da fotografia. O aspecto marcante desse evento foi que nenhum outro satélite do sistema solar, depois desse, foi descoberto visualmente. Todas as descobertas posteriores foram feitas através de observações fotográficas.

Em 1903, Henrietta Leavitt começou a trabalhar em Harvard. No próximo capítulo iremos ver como o grupo de mulheres do Observatório de Harvard, do qual ela fazia parte, contribuiu para o desenvolvimento da espectroscopia, assim como para o nosso conhecimento sobre as estrelas. Um dos primeiros trabalhos de Miss Leavitt foi dedicado

ao estudo e busca de estrelas variáveis, uma área da astronomia que contava com um interesse crescente por parte dos astrônomos. Annie Jump Cannon, também de Harvard, havia publicado recentemente um catálogo com mais de mil estrelas variáveis, sendo a maioria delas de longo período. Após ter descoberto mais de 50 variáveis do tipo Wolf-Rayet na região da nebulosa de Orion, ela passou a trabalhar com uma nova técnica, desenvolvida por Edward King, chefe dos fotógrafos do observatório. O método de King consistia em criar uma chapa em positivo da região a ser observada. Sobre essa chapa, onde as estrelas apareciam em branco contra um fundo cinza escuro, era sobreposta outra chapa em negativo (o padrão de arquivamento das imagens na época), obtida em data diferente. Ao se sobrepor corretamente os objetos nas duas imagens, era possível observar estrela por estrela com a ajuda de uma lente de aumento. Quando uma estrela mantinha seu brilho estável as duas imagens, negativa e positiva, tendiam a se neutralizar; já no caso de estrelas que variavam o brilho era possível observar alterações e as variáveis eram percebidas mais facilmente. Analisando chapas fotográficas do céu do hemisfério sul obtidas no Peru, Miss Leavitt rapidamente identificou cerca de 200 variáveis nas duas Nuvens de Magalhães. Somente no ano de 1905, ela descobriu nada menos que 900 estrelas variáveis na Pequena Nuvem de Magalhães.

No ano de 1908, Henrietta Leavitt havia descoberto nada menos que 1.777 estrelas variáveis. Nesse ano ela publicou os resultados de suas observações nos Anais do Observatório Astronômico de Harvard. Em 1912 é publicado o seu principal trabalho. Analisando as variáveis de tipo Cefeida da Pequena Nuvem de Magalhães e



Figura 32 - Imagem da Nebulosa de Orion por John Keeler, do Observatório Lick, localizado no topo do Monte Hamilton. Provavelmente obtida em 1899 ou 1900. Fonte: Wikimedia Commons.

considerando que a grande distância do aglomerado tornava irrelevante a diferença de distância em relação às estrelas individuais, Leavitt plotou um gráfico onde verificou que o brilho de cada Cefeida era proporcional ao logaritmo do período de variação de luminosidade (ver figura 33). Isso permitia fazer uma estimativa do brilho intrínseco de uma Cefeida a partir do seu período. O artigo publicado foi assinado por Edward Pickering, mas na primeira linha do texto ele destaca que todo trabalho havia sido feito por Henrietta Leavitt. Essa descoberta acabou por se tornar muito importante na história da astronomia, ajudando a resolver problemas como a localização do centro de nossa galáxia, assim como a dúvida em relação à existência de outras galáxias, como veremos a seguir.

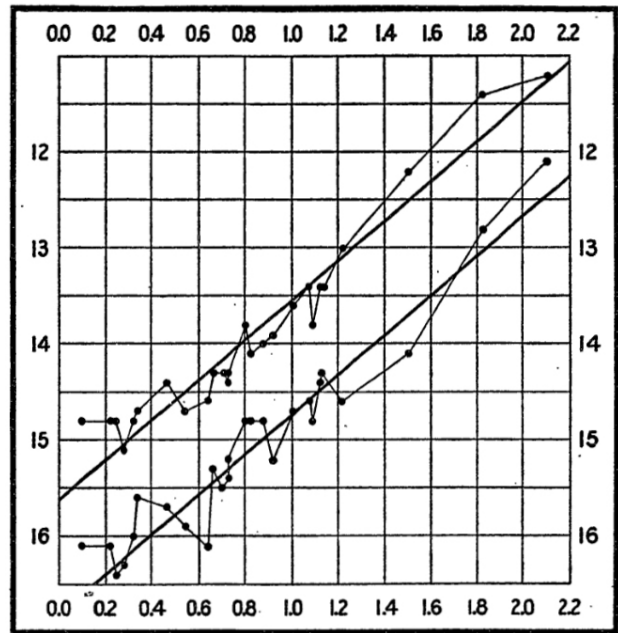
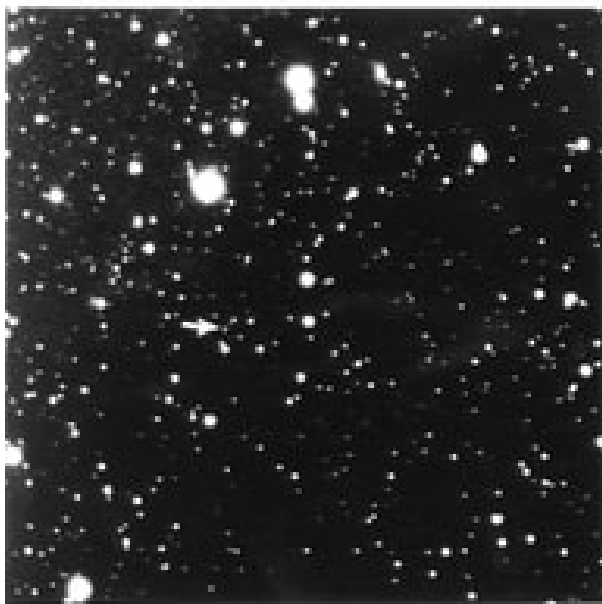


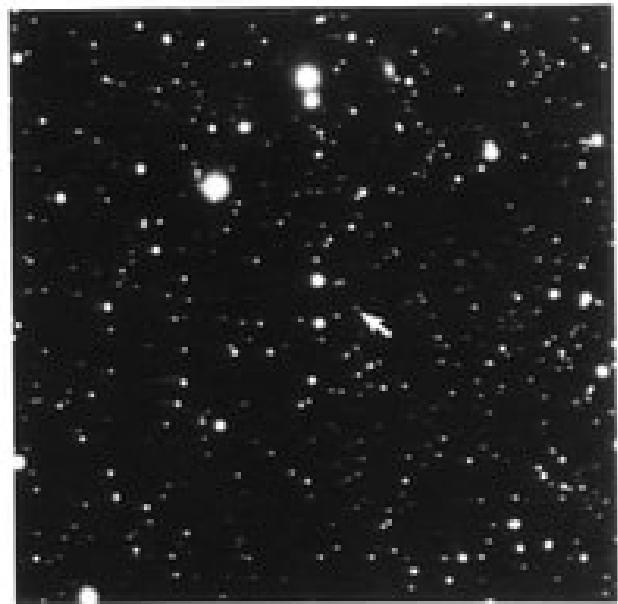
FIG. 2.

Figura 33 - Gráfico de Henrietta Leavitt em que foi descoberta a relação período-luminosidade das Cefeidas. Fonte: Wikimedia Commons.

## DISCOVERY OF THE PLANET PLUTO



January 23, 1930



January 29, 1930

Figura 34 - Imagens das duas placas fotográficas utilizadas por Clyde Tombaugh na descoberta de Plutão. A imagem da esquerda, realizada anteriormente, mostra o campo; na imagem da direita podemos observar o pequeno ponto intruso, hoje um planeta anão. Fonte: Wikimedia Commons.

Em 1930, observando algumas imagens fotográficas em um *blink comparator*, um instrumento que substituía rapidamente uma imagem de um determinado campo por outra da mesma área, de modo a evidenciar objetos que eventualmente apresentassem alguma mudança de brilho ou posição, o astrônomo Clyde Tombaugh, do Observatório Lowell, em Flagstaff, no Arizona, descobriu Plutão, que imediatamente foi classificado como o nono planeta do sistema solar (ver figura 34). Observações posteriores demonstrariam que sua órbita era uma elipse bastante achatada, quando comparada à dos outros planetas, fazendo com que Plutão em algumas épocas ficasse mais próximo do Sol do que Netuno. Posteriormente descobriu-se que Plutão, embora esférico, era muito menor e muito menos pesado que Mercúrio, o menor planeta do sistema solar.

Também em 1930, o norte-americano Charles W. Hetzler, usando o grande telescópio refrator de Yerkes, conseguiu fazer a primeira astrofotografia na faixa do infravermelho, obtendo uma imagem de um campo estelar. Nas imagens captadas por Hetzler foi possível observar uma grande quantidade de estrelas frias, com temperaturas de superfície da ordem de 1000 a 2000 K. Estrelas desse tipo emitem muito pouca luz visível, sendo muito difíceis de observar, mas são bastante ativas na faixa do infravermelho. A técnica havia sido desenvolvida por Abner ainda no século XIX, mas demorou muito tempo para ser empregada na astronomia.

No próximo capítulo, que trata de espectroscopia, vamos continuar a ver alguns dos desenvolvimentos feitos na utilização da fotografia na astronomia. As duas técnicas, fotografia e espectroscopia, surgiram mais ou menos em paralelo e rapidamente se uniram para ampliar enormemente as possibilidades de pesquisa dos astrônomos do período.

## CAPÍTULO 3

### Espectroscopia, a chave de um novo conhecimento

A espectroscopia se desenvolveu a partir de meados do século XIX, do ponto de vista cronológico, paralelamente ao desenvolvimento da fotografia. O avanço que essa nova técnica trouxe à astronomia e à ciência de modo geral é quase impossível de ser supervalorizado, não importa a quantidade de superlativos que sejam usados na descrição. A espectroscopia é uma das principais ferramentas utilizadas para o estudo de composição de elementos químicos e vem tendo uma imensa gama de aplicações comerciais e de pesquisa desde a sua introdução. O impacto causado pela espectroscopia na história da astronomia é em essência muito maior do que o da invenção do telescópio, pois abriu toda uma gama de informações até então inacessíveis aos cientistas, criando um novo ramo da astronomia, que foi batizado de astrofísica.

Até a introdução da espectroscopia a astronomia se dedicava à observação de objetos celestes, descrevendo com crescente precisão suas posições e movimentos aparentes (estes últimos quando pensamos em objetos no sistema solar). Além disso, podíamos estimar o brilho desses objetos. No caso de planetas, do Sol, da Lua e de algumas nebulosas também podiam ser observados alguns detalhes de suas superfícies. Podíamos estimar as distâncias da maioria dos corpos do sistema solar e de algumas estrelas. Também era possível estimar a massa de alguns desses objetos, graças aos estudos sobre a gravidade de Newton. Isso era tudo. Não sabíamos o que era exatamente uma estrela, não sabíamos por que o Sol brilhava, não tínhamos ideia das temperaturas dos objetos celestes nem de sua composição química. Era um universo sobre o qual realmente podíamos afirmar muito pouca coisa. O universo se mantinha um desconhecido.

A espectroscopia deu início à astrofísica, que estuda as características físicas de estrelas e outros corpos celestes. A quantidade de informações obtidas com a utilização dessa técnica é tão grande, que atualmente cerca de dois terços do tempo de observação de qualquer telescópio óptico de pesquisa é destinado a ela. A seguir veremos como aconteceu o desenvolvimento dessa técnica.

Isaac Newton foi a primeira pessoa a descrever a decomposição da luz ao atravessar um prisma, separando-a em luzes de cores diversas num contínuo que batizou de espectro da luz. O fenômeno não era inteiramente novo, o arco-íris é a forma natural da ocorrência da decomposição de luz, que aparece muitas vezes após a passagem de uma nuvem de chuva ou em cachoeiras. Nessas situações, minúsculas gotículas de água suspensas na atmosfera acabam por funcionar como pequenos prismas, produzindo a difração da luz. Embora muitos outros pesquisadores tenham utilizado prismas e a decomposição de luz para estudos de óptica, na astronomia sua aplicação permaneceu muito limitada por muitos anos após os estudos de Newton. A experiência de William Herschel que resultou na descoberta da radiação infravermelha foi uma aplicação isolada dessa técnica, que de certa forma antecipou a importância que a espectroscopia teria a partir do século XIX.

O panorama começou a se alterar com os estudos de Joseph von Fraunhofer (ver figura 35). Como vimos anteriormente, Fraunhofer era provavelmente o melhor construtor de telescópios refratores de sua época, assim como de vários instrumentos

ópticos, em grande parte devido ao seu profundo conhecimento do processo de fabricação de vidros de vários tipos e também graças à série de estudos práticos que desenvolveu sobre óptica. Fraunhofer construiu um equipamento que acoplava prismas a um tubo óptico e onde podia substituir as lentes (ver figura 36). Seu objetivo era estudar a refração de cada receita de vidro e de diferentes perfis de lentes, já que esse tipo de conhecimento era muito importante para um fabricante de seu nível. Devemos lembrar que uma lente acromática implica no uso de pelo menos dois tipos diferentes de lentes com dois tipos diferentes de vidro.



Figura 35 - "Fraunhofer demonstrando o espectroscópio". Fotogravura a partir de um quadro de Richard Wimmer, 1900. Fonte: Wikimedia Commons.

Em 1814, quando Fraunhofer começou a utilizar seu novo instrumento, logo percebeu que o espectro solar obtido não era realmente contínuo, mas que quando observado em detalhe apresentava um grande número de linhas escuras. Ele substituiu as lentes utilizadas por outras, com perfis diferentes e receitas de vidro diferentes, e constatou que as linhas continuavam visíveis e aparentemente mantinham-se nos mesmos locais anteriormente observados. Mesmo quando observadas em dias e horários diferentes as linhas se comportavam da mesma maneira. Não havia dúvidas, as linhas faziam parte do espectro da luz solar.

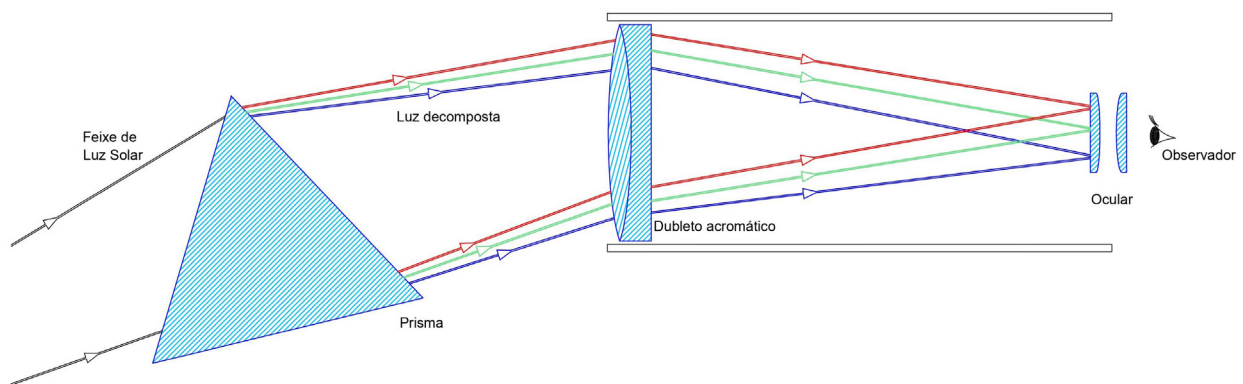


Figura 36 - Esquema óptico do espectroscópio de Fraunhofer. O feixe de luz é decomposto por um prisma, em seguida é encaminhado para um dubleto acromático e por fim vai para a objetiva, onde o espectro pode ser observado. Desenho: Francisco Conte.

Na verdade, ele não foi o primeiro a perceber essas linhas. Em 1802, o físico e químico inglês William Hyde Wollaston havia observado as linhas escuras do espectro solar quando realizava trabalhos de óptica. Wollaston descreveu o observado, mas não deu prosseguimento ao trabalho. Ele foi um cientista muito importante, tendo descoberto dois elementos químicos: o paládio e o ródio. É sabido que Fraunhofer conhecia vários

trabalhos contemporâneos na área da óptica, em particular aqueles realizados por Young sobre interferência da luz, assim como os de François Arago e Augustin-Jean Fresnel. Alguns desses trabalhos estimularam Fraunhofer a desenvolver suas próprias pesquisas em óptica, mas até onde se sabe ele desconhecia completamente os trabalhos de Wollaston.

Provavelmente a principal razão pela qual o trabalho de Fraunhofer, posterior ao de Wollaston, acabou por influenciar mais a história da astronomia foi o fato de Fraunhofer ter aprofundado sua pesquisa. Depois da descoberta inicial, ele iniciou um trabalho de catalogação das linhas, constatando que o padrão de linhas se mantinha idêntico e sem alterações de posição ou intensidade, não importando a época do ano ou o horário da observação. Fraunhofer percebeu que algumas dessas linhas eram muito mais fortes que as outras e criou então um sistema de classificação, batizando essas linhas mais fortes com letras maiúsculas, do vermelho até o violeta, com a primeira linha recebendo o nome de *A* e a última o nome de *K*. Duas linhas muito próximas localizadas na faixa do amarelo receberam os nomes de  $D_1$  e  $D_2$ . Quando o grupo principal estava todo nomeado passou para o grupo seguinte, uma série de linhas um pouco menos intensas, as quais foram batizadas com letras minúsculas, também do vermelho ao violeta, com a primeira sendo chamada de *a* e a última de *h*. No total Fraunhofer descreveu mais de 570 linhas (ver figura 37). Atualmente, com instrumentos de observação muito mais poderosos, é possível observar milhares de linhas de absorção no espectro solar. Além do Sol, Fraunhofer também conseguiu obter espectros da Lua, de Vênus e Marte e de algumas estrelas, entre elas Betelgeuse. Fraunhofer morreu cedo, em 1826, décadas antes de se perceber as inúmeras possibilidades e aplicações de sua descoberta, assim como as explicações para a ocorrência deste fenômeno.

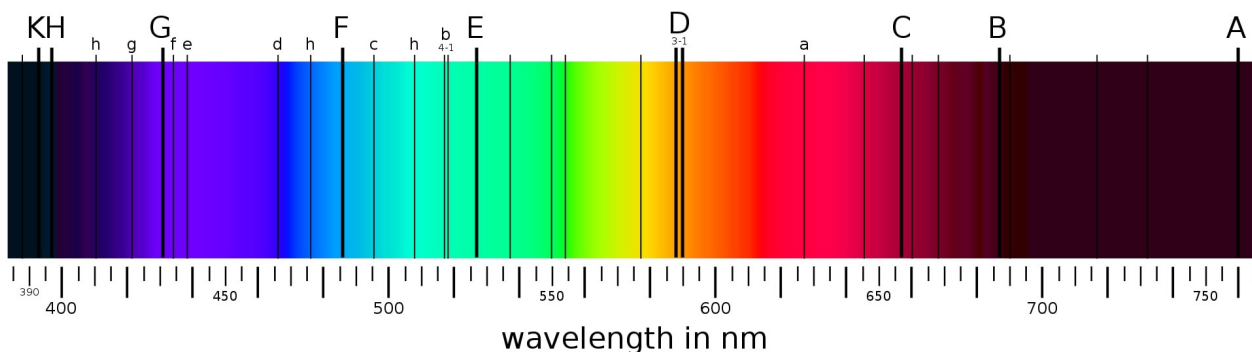


Figura 37 - Disposição das linhas de Fraunhofer. Fonte: Wikimedia Commons.

Antes de prosseguirmos com a evolução da espectroscopia, vamos fazer um adendo, para um comentário divertido: em 1835, o filósofo francês Auguste Comte (meu sobrenome é Conte, não temos parentesco), um pensador positivista que muito influenciou a cultura de nosso país, inclusive no lema de nossa bandeira, escreveu que para os astrônomos sempre seria possível estudar o Sol e as estrelas, vendo suas formas, sua distância, mas nunca a sua composição química. Isso seria impossível, devido às distâncias envolvidas. Pouco tempo depois essa afirmação categórica seria irremediavelmente desmentida.

No mesmo ano do texto de Comte, 1835, o físico inglês Charles Wheatstone, que contribuiu em inúmeras áreas da ciência, incluindo a criação do primeiro telégrafo

comercial, em parceria com William Cooke, e a invenção de instrumentos musicais, realizou um importante trabalho em espectroscopia, percebendo que era possível reconhecer metais diferentes pelas linhas brilhantes que estes produziam ao se observar através de um prisma a luz emitida quando eram aquecidos e derretiam em uma fornalha. Cada metal produzia um conjunto específico de linhas. Com essa técnica foram posteriormente descobertos o rubídio e o tálio.

Em 1849, o físico francês Jean Bernard León Foucault percebeu que um mesmo elemento químico produzia linhas brilhantes ou escuras no espectro, nas mesmas posições, dependendo da temperatura. Veremos isto com mais cuidado mais à frente. Atualmente são denominadas como linhas de emissão (brilhantes) e absorção (escuras). Em 1853, o físico sueco Anders Jonas Ångström apresentou na Real Academia de Ciências da Suécia um trabalho similar ao de Foucault, tendo trabalhado de forma independente. Outros pesquisadores do período fizeram estudos semelhantes, como George Stokes e William Thomsom (Lorde Kelvin). Ångström também conseguiu medir com precisão as linhas do hidrogênio no visível, que ficariam posteriormente conhecidas como Série de Balmer. Em 1854 e 1855, o físico David Alter realizou importantes trabalhos em espectroscopia de metais e gases e de maneira independente também descreveu a Série de Balmer.

A partir do segundo semestre de 1859, dois cientistas alemães, Gustav Robert Kirchhoff e Robert Wilhelm Eberhard Bunsen, começaram a trabalhar com espectros na Universidade de Heidelberg (ver figura 38). Os dois aplicaram as técnicas ópticas de Fraunhofer, aperfeiçoadas pelo uso da chama incolor do bico de Bunsen, trabalhando sistematicamente na observação do espectro de vários elementos químicos. Eles estabeleceram relações entre cada elemento e seu respectivo conjunto de linhas espectrais, iniciando assim a técnica da análise espectral. Kirchhoff e Bunsen conseguiram fazer a ligação entre linhas de emissão e de absorção dos elementos de maneira definitiva, demonstrando que as linhas de emissão de determinado elemento seriam as mesmas que suas linhas de absorção. Por fim, os dois conseguiram determinar os processos que geram linhas de emissão e absorção, sintetizados nas três leis de Kirchhoff de espectroscopia, através da análise da radiação térmica (ver figura 39):

1. Um sólido, líquido ou gás incandescente sob alta pressão vai emitir um espectro contínuo
2. Um gás aquecido a baixa pressão vai emitir através de linhas de emissão



Figura 38 - Gustav Robert Kirchhoff e Robert Wilhelm Eberhard Bunsen, os pais da espectroscopia. Fonte: Wikimedia Commons.

3. O espectro contínuo de um objeto que atravessa uma nuvem de gás mais fria do que a fonte de luz vai apresentar linhas de absorção

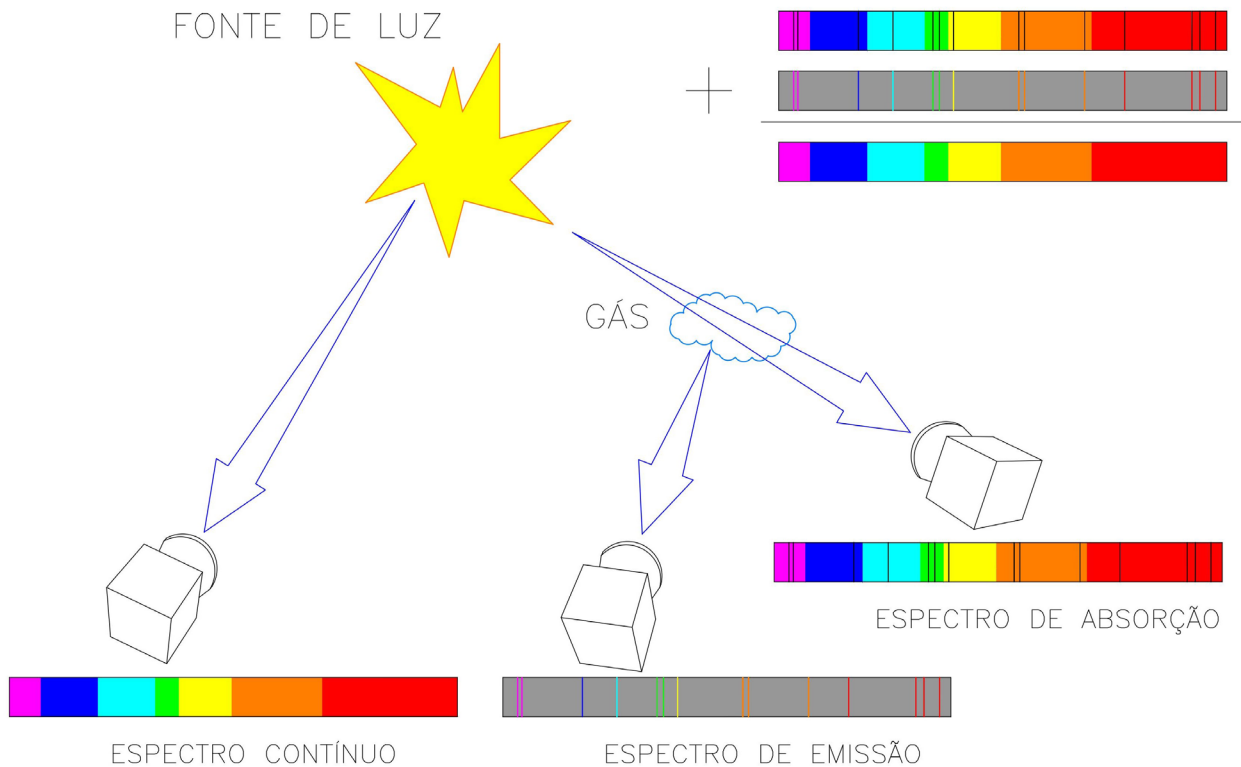


Figura 39 - As três leis da espectroscopia: um corpo aquecido emite um contínuo; um gás excitado produz linhas de emissão; a luz (espectro contínuo) produzida por um corpo aquecido, quando atravessa um gás mais frio que a fonte, cria um espectro contínuo com linhas de absorção. Desenho: Francisco Conte.

Após o trabalho de Kirchhoff e Bunsen ficou estabelecida uma ligação entre espectroscopia e análise de elementos químicos, além de ficarem claros os processos físicos que produzem as linhas espectrais. A previsão de Auguste Comte foi desmentida poucas décadas após sua formulação. A astronomia entraria em uma nova era.

Em meados do século XIX, o padre Angelo Secchi, que era astrônomo do Vaticano, passou a estudar espectros estelares com regularidade. Observando os espectros de centenas de estrelas e outros objetos, ele logo percebeu que existiam padrões que se repetiam, tornando possível dividir espectros similares em categorias distintas. No ano de 1866 publicou um trabalho classificando cerca de 400 espectros, em que dividia as estrelas em quatro tipos espectrais definidos por suas principais características. Naquela época as observações dos espectros ainda eram feitas visualmente. Os tipos foram denominados por numerais romanos de I a IV. A classe I era constituída por estrelas branco-azuladas como Sirius e Vega, que possuíam quatro fortes linhas indicando a presença de hidrogênio; a Classe II incluía estrelas amarelas como o Sol, com o espectro apresentando uma série de linhas finas de ferro, cálcio e outros elementos; As classes III e IV eram compostas ambas por estrelas vermelhas, que se diferenciavam por padrões observados em suas bandas espectrais escuras (ver figura 40). Até o final de sua vida Secchi estudou mais de 4 mil espectros de estrelas, como pode ser visto em Sobel (2016, p. 25).



Em 1868 ocorreu uma descoberta muito importante através da espectroscopia. Na Índia, durante o eclipse solar de 18 de agosto, o astrônomo francês Jules Janssen observou uma linha muito brilhante na cromosfera solar, na faixa dos 587,49 nanômetros. Inicialmente pensou-se que essa linha era produzida pelo sódio. No mesmo ano, em 20 de outubro, o inglês Norman Lockyer observou uma linha não muito forte na parte amarela do espectro solar, situada próxima das linhas  $D_1$  e  $D_2$  de Fraunhofer, ambas pertencentes ao sódio. Lockyer batizou a linha de  $D_3$ . Logo se constatou que essas duas linhas não pertenciam a nenhum elemento químico conhecido. Chegou-se a especular que talvez fossem provocadas por um elemento que só existisse no Sol ou em estrelas. Finalmente, o químico inglês Edward Frankland batizou o elemento com o nome hélio, o nome do Deus Sol em grego. Em 1881, o cientista italiano Luigi Palmieri observou as linhas de hélio em material sublimado em uma erupção do vulcão Vesúvio. Apenas em março de 1895 foi que o químico escocês Sir

William Ramsay conseguiu isolar o hélio durante um processo de tratamento da uraninita. A espectroscopia era uma ferramenta tão poderosa que tornou possível a descoberta de um novo elemento químico fora de nosso planeta. Henry Draper, pioneiro em fotografia astronômica e cujos trabalhos no campo da espectroscopia vamos ver a seguir, disse em uma palestra em 1866 que “a análise espectral deu aos químicos braços com milhões de milhas de comprimento” (SOBEL, 2016, p. 25).

Como vimos no capítulo anterior, em 1872 Henry Draper obteve o primeiro espectro de uma estrela e poucos anos depois conseguiu captar um espectro do planeta Júpiter. Em ambos os casos o espectro era caracterizado por linhas de absorção. Esse fato abria o caminho para uma série de avanços na área da espectroscopia. No caso do espectro de Vega, Draper utilizou um telescópio refletor com 28 polegadas de diâmetro (aproximadamente 71 cm), com uma montagem equatorial. Mesmo para um objeto brilhante como Vega, que tem magnitude aparente zero, foi necessária a utilização de um telescópio de grande porte para a época.

Na Inglaterra, William Huggins e sua mulher, Margaret, desenvolveram uma série de estudos espectrais a partir de fotografias que utilizaram de maneira pioneira a

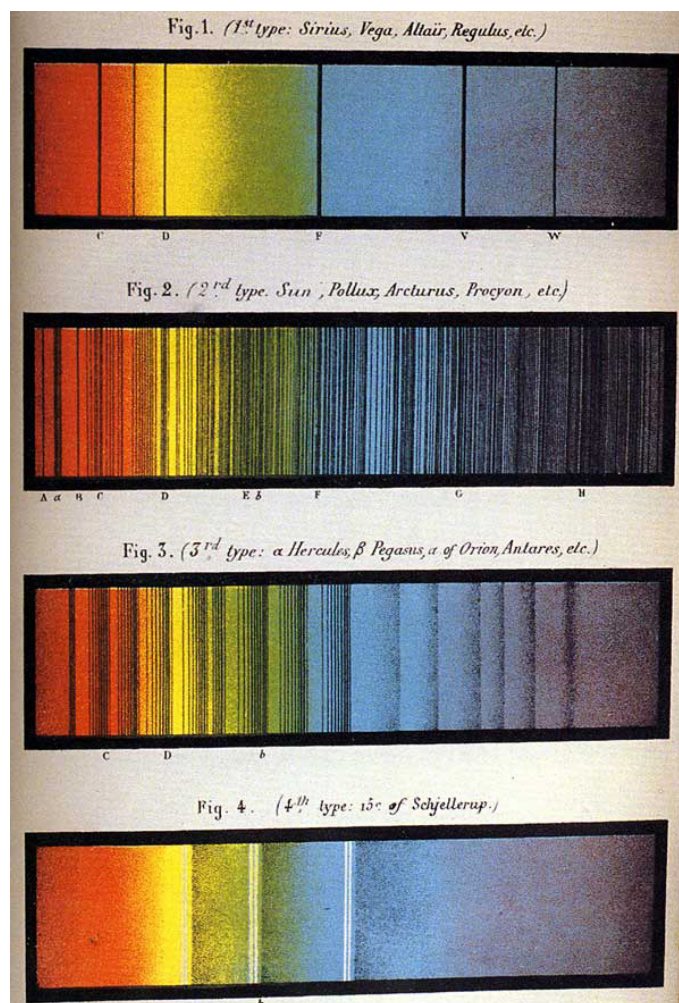


Figura 40 - Classificação de espectros estelares elaborada pelo padre Secchi. Fonte: Wikimedia Commons.

técnica da placa seca. Os trabalhos iniciais de William Huggins sobre espectroscopia foram realizados em colaboração com o professor W. A. Miller. Nessa fase inicial eles conseguiram obter com sucesso alguns espectros estelares. Nos anos seguintes, já trabalhando em companhia de Margaret, Huggins obteve um número maior de espectros estelares e com uma resolução maior. Analisando o espectro de várias dessas estrelas, o casal pôde provar que elas são compostas pelos mesmos elementos químicos que formam a Terra e o Sol, embora a intensidade das linhas fosse diferente em vários casos. Além disso, percebeu a semelhança entre os espectros estelares e o do Sol, compostos exclusivamente por linhas de absorção.

Mas a contribuição dos Huggins na espectroscopia não parou por aí e várias descobertas foram feitas pelo casal nos anos seguintes. Eles utilizaram o observatório que haviam construído na própria casa em Tulse Hill, Londres, onde frequentemente eram acrescentados novos telescópios e instrumentos. Um dos trabalhos mais importantes do casal foi a descoberta de dois tipos de nebulosas. O primeiro tipo apresentava apenas linhas de emissão em seu espectro, o que indicava que a sua origem se relacionava a um gás excitado. Isso foi observado, por exemplo, na Nebulosa de Orion. Já na então chamada Nebulosa de Andrômeda, o espectro obtido se assemelhava ao das estrelas, com a presença de linhas de absorção. Era uma evidência clara de que Andrômeda é na verdade uma galáxia e não uma nebulosa, mas seriam necessárias mais algumas décadas para que essa descoberta fosse totalmente compreendida. Em 1881, o casal Huggins observou o cometa b1881. Eles conseguiram obter o seu espectro, e nele identificaram linhas espectrais de moléculas, uma delas o cianogênio. A química do espaço cada vez mais se assemelhava à da Terra.

A observação de linhas de emissão em uma nebulosa pelos Huggins foi bastante importante por outro aspecto. Algumas das linhas observadas não eram compatíveis com nenhum elemento conhecido na Terra. Assim como no caso do hélio, imaginou-se que deveria se tratar de um novo elemento químico, provavelmente característico de nebulosas, pois tampouco era observado no espectro de estrelas. Assim, o possível novo elemento foi batizado provisoriamente de nebulio, por ser característico de nebulosas. Em 1927, o astrônomo da Caltech Ira Sprague Bowen demonstrou que na verdade as linhas eram produzidas por oxigênio duplamente ionizado em uma densidade extremamente baixa. As densidades das nebulosas são muito menores que o melhor vácuo produzido em laboratório. Nessas condições, os átomos comportam-se de maneira distinta do que observamos em nosso cotidiano. São criadas algumas linhas que em condições normais de temperatura e pressão não se formariam. Damos a esse tipo de linha espectral que só ocorre em condições de baixíssimas densidades o nome de linhas proibidas. Normalmente, elas são as linhas mais fortes que podemos observar no espectro de nebulosas (ver figura 41). O nebulio, diferentemente do hélio, nunca existiu.

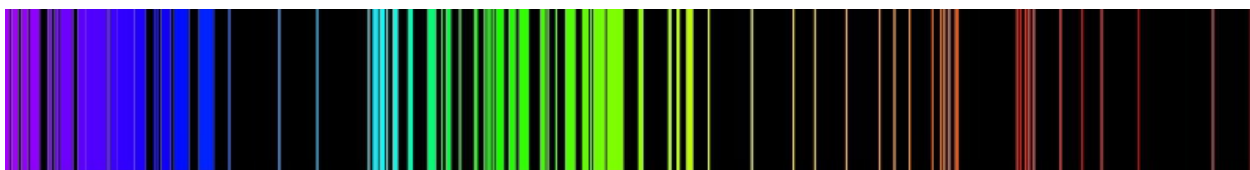


Figura 41 - Linhas de emissão como as observadas pelo casal Huggins em nebulosas. Fonte: Wikimedia Commons.

Nos Estados Unidos, Henry Draper, que mantinha contato com Huggins, começou a utilizar a técnica da placa seca, conseguindo obter uma série de espectros estelares, e tornou-se um dos pioneiros desse trabalho nas Américas.

Em 1885, Johann Balmer, um matemático suíço, encontra uma equação empírica que fornece diretamente o comprimento de onda de cada uma das linhas do hidrogênio no visível, cujo conjunto passa a ser conhecido como a série de Balmer. Apesar disso, não se sabia a razão pela qual as linhas espectrais do hidrogênio têm essa distribuição. Apenas no século XX, com o trabalho de Niels Bohr, foi possível explicar o comportamento das linhas espectrais.

Por volta de 1885, a Universidade de Harvard começa a trabalhar com muita ênfase em espectroscopia. Seu novo diretor, Edward Pickering, inicia um programa de observação que une espectros e fotografia. Contando com a colaboração financeira de Mary Anna Draper, viúva de Henry Draper, que queria de alguma forma expandir o legado de seu marido, começa a recrutar uma equipe para trabalhar no observatório da universidade. Para o trabalho de análise das observações que seriam capturadas em placas de vidro com emulsão fotográfica (um método caro, mas menos sujeito a deformações e imprecisões que as chapas fotográficas), Pickering começou a recrutar mulheres, que em sua opinião produziam tanto quanto os homens, mas recebiam salários menores, o que permitia a formação de uma equipe maior e mais produtiva. A abordagem de Pickering pode parecer machista nos dias atuais, mas na época ele era um dos poucos cientistas que aceitariam recrutar mulheres e nos trabalhos desenvolvidos por elas ele garantia que elas assinassem a autoria, o que não era regra entre os pesquisadores. Desse modo, o grupo de Harvard começou um trabalho que mudaria a história da astronomia (ver figura 42).



Figura 42 - O grupo de mulheres computadoras de Harvard, responsável por inúmeras descobertas e pela classificação espectral de estrelas: Antonia Maury usando a lupa, ao fundo e Williamina Fleming (de pé). A foto foi feita em 1891. Fonte: Wikimedia Commons.

Uma das primeiras inovações que Pickering introduziu no trabalho de espectroscopia foi uma nova técnica de obtenção de espectros. Os Drapers obtinham suas fotos de espectros introduzindo um prisma depois da ocular e colhiam um espectro estelar por vez. Na nova técnica de Pickering, prismas eram instalados em caixas de latão antes da objetiva. Dessa forma obtinha-se uma foto de toda uma região do céu, com duzentos a trezentos espectros de baixa definição, distribuídos de acordo com a posição das estrelas no céu. A técnica permitia a execução rápida de um levantamento de grandes áreas do céu noturno, reduzindo drasticamente os custos envolvidos no processo. Com o levantamento era possível também escolher estrelas cujo espectro chamasse mais a atenção para futuros estudos mais aprofundados e detalhados.

Mesmo assim, o estudo dos espectros obtidos em Harvard era um trabalho árduo. Cada placa fotográfica apresentava centenas de espectros – os mais fortes, obtidos das estrelas mais brilhantes, possuíam um comprimento de aproximadamente 1 centímetro, e os mais fracos algo em torno de 6 milímetros. Cada um desses espectros tinha que ser numerado e catalogado em função de sua posição e posteriormente analisado com o auxílio de lupas ou outros instrumentos ópticos. Aos poucos foi ficando claro que havia uma variedade muito maior de tipos de espectros que as quatro classes propostas pelo padre Secchi. O trabalho de análise e redução de dados era imenso e o número de placas fotográficas aumentava constantemente. Para o grupo de mulheres computadoras de Harvard, e para muitos astrônomos desde então, a astronomia passou a ser uma atividade diurna, com as placas fotográficas de imagens ou espectros estelares substituindo as estrelas.

É importante perceber a forma como trabalhava a equipe de Harvard. Assim como ocorrera com Tycho e Kepler, o trabalho era dividido entre um grupo responsável pelas observações, fossem elas de imagens ou espectros, e outro dedicado à análise de dados, embora em muitas ocasiões a análise dos dados fosse feita por astrônomos que também trabalhavam na área observacional. De qualquer maneira, já existiam profissionais de astronomia que trabalhavam exclusivamente na análise de dados, o que é algo absolutamente comum nos dias atuais. A partir dessa época é possível afirmar que as descobertas astronômicas passam a ocorrer durante o dia, na fase de análise de dados, estes, sim, colhidos no período noturno.

Em 1887 Edward Pickering percebeu um fato estranho num espectro da estrela Mizar (*Zeta Ursae Majoris*): naquela data a estrela apresentava suas linhas espectrais dobradas, com um dos grupos ligeiramente desviado para o azul e o outro para o vermelho. Outras observações da mesma estrela feitas anteriormente não apresentavam essa característica. Ele prosseguiu observando a estrela, a partir daí com a ajuda de Antonia Maury, uma das mulheres da equipe do observatório e também sobrinha de Henry Draper. Não se pense aqui em nenhuma forma de nepotismo, Miss Maury tinha uma formação científica muito forte, tendo sido graduada com louvor em física pelo renomado Vassar College. Os dois continuaram observando as variações espectrais de Mizar por um bom período, até que em 1889 conseguiram encontrar uma explicação para o fato: Mizar era, na verdade, um sistema binário com duas estrelas de mesmo tipo espectral, com um período de rotação de 15 dias, e a mudança de posição das linhas em direção ao azul e ao vermelho podia

ser explicada pela aproximação ou afastamento de cada uma das duas estrelas (ver figura 43). Mizar se tornou a primeira binária espectroscópica, uma classe de estrelas na qual a binaridade foi descoberta a partir de seu espectro. Com o tempo muitas dessas estrelas se tornam também binárias visuais, à medida que os instrumentos astronômicos evoluem e vão ficando mais poderosos. Alguns meses depois Miss Maury descobriu o mesmo padrão de linhas duplicadas e simples em outra estrela, Beta Aurigae, com um período de rotação de apenas quatro dias. Antes do final de 1889, o astrônomo alemão Hermann Carl Vogel, do Observatório de Potsdam, descobriu uma terceira estrela, demonstrando claramente que o evento observado não era um fato isolado.

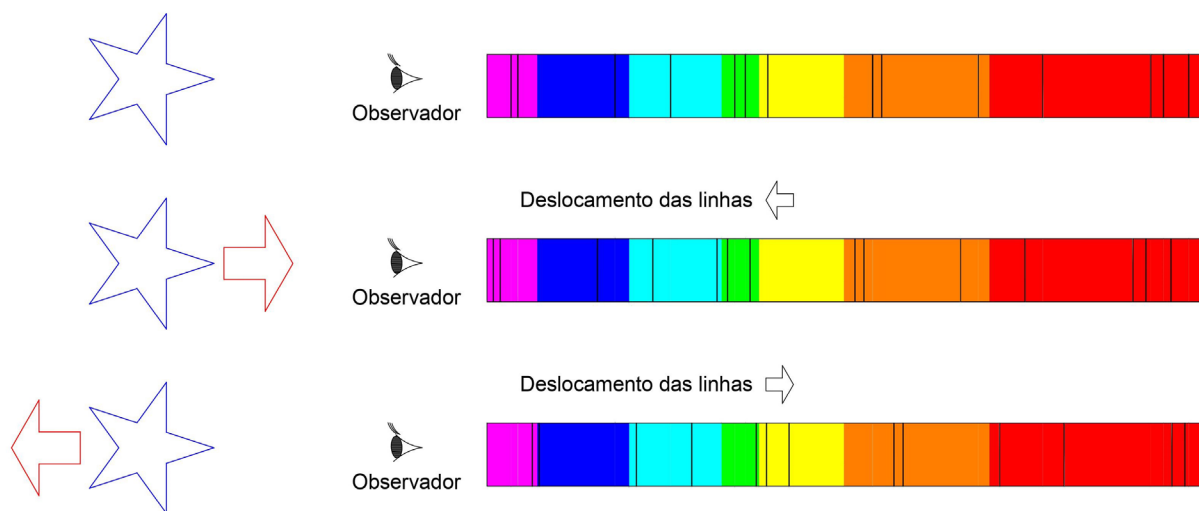


Figura 43 - Desvio das linhas espectrais: quando o objeto está se aproximando do observador suas linhas se desviam para o azul, quando se afasta elas se desviam para o vermelho. O efeito foi proposto por Doppler e complementado por Fizeau e é similar ao que ocorre com o som. Desenho: Francisco Conte.

Em 1890, o Observatório de Harvard publica o primeiro “Catálogo Draper de espectros estelares”, organizado e coordenado por Williamina Fleming, que comandava o time de mulheres computadoras. No início, o trabalho de redução de dados era liderado por Nettie Farrar, que pouco depois acabou se casando e abandonou o encargo. Mas a maior parte do trabalho foi coordenada e realizada por Williamina Fleming. A realização dessa primeira etapa do trabalho foi feita a partir de 7.883 fotografias. O catálogo apresentava, mesmo em uma fase inicial, mais de 400 páginas, cada uma com tabelas de 50 linhas, cada uma representando uma estrela, e 20 colunas, onde constavam alguns dados específicos do espectro de cada uma delas. A astronomia começava a entrar na era do grande volume de dados.

Em 1893, Williamina Fleming estava analisando os espectros do céu do Hemisfério Sul que haviam sido enviados por William Pickering e Solon Bailey do Peru, quando encontrou um espectro estelar muito peculiar na constelação da Norma (Compasso). Ela havia observado recentemente um espectro similar e percebeu imediatamente que se tratava de uma assim chamada “nova”. Conferindo várias imagens da região que haviam sido enviadas no mesmo pacote, conseguiu identificar a estrela que havia se tornado a nova como uma apagada estrela de sétima magnitude, invisível a olho nu. Desde a descoberta da nova de Tycho Brahe, que hoje sabemos que era na verdade uma supernova, e daquela observada por Kepler e Galileu, apenas sete outras haviam sido descobertas,

entre os anos de 1670 e 1891. Mina Fleming era a décima pessoa a descobrir uma estrela nova, e isso através de seu espectro, com pelo menos uma dezena de brilhantes linhas de emissão. Apenas dois anos antes, em 1891, um astrônomo amador inglês chamado Thomas David Anderson havia descoberto visualmente através de um telescópio uma nova na constelação de Auriga, e comunicando o fato à comunidade astronômica através de um cartão anônimo. Os observatórios de Potsdam e Oxford conseguiram fotografar a nova poucos dias após sua descoberta. Edward Pickering comparou os espectros das novas de Auriga e Norma e percebeu que eram quase idênticos. O amador Thomas Anderson descobriu uma segunda nova, na constelação de Perseu, em 1901.

Em 9 de abril de 1895, James Keeler conseguiu obter um espectro dos anéis de Saturno. A análise das linhas espectrais era uma prova direta de que os anéis não eram rígidos e sim formados por miríades de partículas que circulavam em uma órbita em torno do planeta, de acordo com as regras da gravitação propostas por Newton. James Clerk Maxwell havia feito uma previsão dessa situação em 1856, a partir de então confirmada com a ajuda da tecnologia.

O grupo de Harvard logo percebeu que a classificação estelar proposta pelo padre Secchi não conseguia enquadrar as estrelas de maneira adequada. Os vários subtipos observados necessitavam de uma forma de classificação mais ampla e precisa. A primeira integrante do grupo a tentar montar um novo sistema de classificação foi Antonia Maury, mas foi Annie Jump Cannon quem acabou por desenvolver um sistema de classificação estelar, baseado em espectros, que se mantém em uso até os dias de hoje. Cannon dividiu as estrelas em sete classes, O-B-A-F-G-K-M, com base na temperatura de superfície de cada estrela, sendo O a classe mais quente e M a classe mais fria. Uma forma simples de lembrar a sequência é memorizar a frase *Oh, be a fine girl, kiss me*, em uma tradução livre: “ei, seja uma boa menina, beije-me”. Um tanto machista para os dias atuais, mas mulheres também podem pensar em *Oh, be a fine guy, kiss me*. Posteriormente, cada classe foi dividida em dez subtipos, numerados de 0 a 9, de modo que uma estrela poderia ser classificada como O5, ou A9, por exemplo, aumentando muito a precisão da classificação. Annie Cannon publicou seu primeiro catálogo seguindo essa classificação em 1901. Um fato importante é que nessa época ainda sabíamos muito pouco sobre o funcionamento e a vida das estrelas. O conhecimento nessa área se alterou enormemente no século XX, mas o sistema de classificação de Harvard conseguiu manter sua utilidade e é ainda bastante utilizado por astrônomos em todo o mundo.

Ejnar Hertzsprung, no início do século XX, conseguiu provar por análise espectral que existem dois tipos de estrelas vermelhas: anãs e gigantes. Ele verificou que havia uma diferença na espessura das linhas de absorção (as gigantes vermelhas apresentavam linhas estreitas enquanto as anãs apresentavam linhas largas). Hertzsprung percebeu também que as estrelas vermelhas que apresentavam linhas estreitas possuíam movimentos aparentes muito pequenos, comportamento distinto das que apresentavam linhas largas, o que era um indicativo de estarem situadas a grandes distâncias. Essa diferença na espessura das linhas já havia chamado a atenção de Antonia Maury em Harvard, que acreditava na existência de dois tipos distintos.

Em 1910, Hans Rosenberg publicou um diagrama relacionando estrelas do aglomerado das Plêiades, a partir de sua magnitude aparente, com linhas espectroscópicas do cálcio

e duas linhas do hidrogênio da série de Balmer, que eram indicativas da temperatura da estrela. Foi a primeira tentativa de relacionar a luminosidade das estrelas com suas temperaturas. No ano seguinte, Ejnar Hertzsprung começou a trabalhar com esse mesmo tipo de gráficos, porém relacionando classes espectrais de estrelas, um indicativo muito mais forte de temperatura, com sua luminosidade. Hertzsprung trabalhou com aglomerados, considerando o princípio de que o fato de as estrelas estarem agrupadas tornava a distância entre elas insignificante em relação à distância do aglomerado. Em 1913, Henry Norris Russell começou a trabalhar em um diagrama idêntico, porém utilizando estrelas que tivessem paralaxes conhecidas, para poder estimar sua verdadeira luminosidade. Com o tempo, esse tipo de diagrama começou a ser cada vez mais utilizado, e em grande parte ele se tornou um instrumento muito importante para a compreensão da evolução das estrelas durante sua vida. Com o tempo, os diagramas do tipo luminosidade x temperatura ficaram conhecidos como Diagramas Hertzsprung-Russell, ou mais frequentemente como Diagramas HR.

Um Diagrama HR típico tem no eixo vertical a luminosidade da estrela, que aumenta de baixo para cima, ficando então os objetos muito luminosos na parte superior do gráfico e os pouco luminosos na parte inferior. É importante ressaltar que não é o brilho aparente do objeto que se observa no gráfico, mas sim a sua luminosidade, ou a sua magnitude absoluta, embora neste último caso se invertam os valores, com magnitudes baixas (objetos de grande luminosidade) na parte superior do gráfico e grandes magnitudes (objetos pouco luminosos) na parte inferior. No eixo horizontal teremos sempre alguma indicação de temperatura, com as temperaturas mais altas na esquerda do gráfico e as mais baixas na direita do gráfico. Nesse eixo, em vez da temperatura pode estar marcada a classe espectral da estrela, que também é um indicativo de temperatura, com as classes O-B-A-F-G-K-M e suas subdivisões dispostas da esquerda para a direita. Também pode ser usado o índice de cor, uma técnica que consiste na observação de objetos celestes de cores diferentes e na qual se subtraem as medidas obtidas em um filtro específico de outro – o que também é uma forma de aferição da temperatura de superfície das estrelas, com os números mais baixos à esquerda e os mais altos à direita. Não importa qual desses indicadores seja utilizado, um Diagrama HR sempre indica uma relação entre a luminosidade no eixo vertical e a temperatura no eixo horizontal (ver figura 44).

A análise de grandes grupos de estrelas através do Diagrama HR permitiu enormes avanços no entendimento da evolução das estrelas durante seu ciclo de vida. Observar um grande grupo de estrelas, como de uma galáxia, no Diagrama HR é como fazer um instantâneo de todas as estrelas que compõem essa galáxia: jovens e velhas, brilhantes e obscuras, grandes e pequenas. Um primeiro comentário que pode facilitar o entendimento do gráfico é que a luminosidade de uma estrela é decorrente de dois fatores principais: o quadrado de seu diâmetro (uma estrela com o dobro do diâmetro é quatro vezes mais luminosa) e sua temperatura à quarta potência, ou seja: se você dobrar a temperatura de uma estrela, ela aumentará sua luminosidade 16 vezes.

Noventa por cento das estrelas em um Diagrama HR típico vão estar em uma faixa diagonal que vai do canto inferior direito, com estrelas frias e pouco luminosas, até o canto superior esquerdo, com estrelas brilhantes e quentes. Dizemos que esse grupo de estrelas está na Sequência Principal, que é a fase da vida de uma estrela em que ela

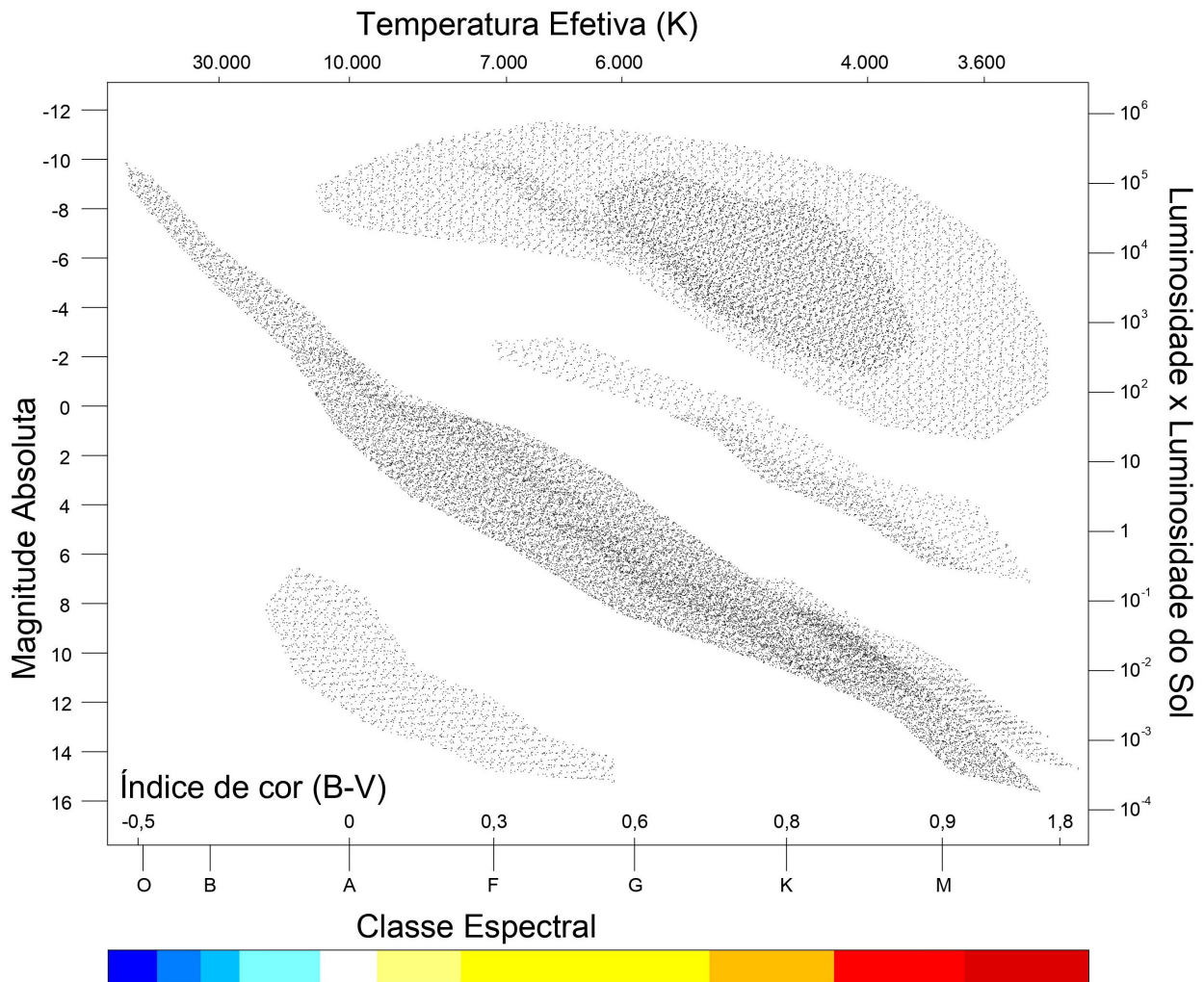


Figura 44 - Exemplo de um diagrama HR, importante ferramenta para o estudo da evolução estelar. Desenho: Francisco Conte.

passa mais tempo, cerca de 90% de sua vida. Hoje sabemos que essas estrelas brilham por causa da energia obtida na fusão de átomos de hidrogênio, que se transformam em átomos de hélio.

Acima da Sequência Principal, no canto superior direito do Diagrama HR, vemos um grupo de estrelas frias e muito luminosas. Para uma estrela fria produzir tanta luminosidade ela deve ser muito grande, milhares de vezes maior que o Sol. Chamamos este grupo de estrelas de gigantes vermelhas. Existem também as supergigantes vermelhas, ainda maiores e mais luminosas. Estas estrelas estão em fases mais avançadas de sua vida e próximas de seu final.

Por fim existe um grupo de estrelas localizado na parte inferior do Diagrama HR e mais ao centro ou à esquerda do gráfico, o que indica a presença de estrelas quentes, mas muito pouco luminosas. Para que isso ocorra, devem ser estrelas muito pequenas, do tamanho de um planeta rochoso, como a Terra. A esse grupo de estrelas damos o nome de anãs brancas. São estrelas em uma fase final de vida, sem a presença de processos nucleares de fusão atômica. A estrela basicamente brilha pela enorme pressão gravitacional e vai esfriar progressivamente com o passar do tempo.



Em 1940, Arnold O. Beckman inventa um novo instrumento, o espectrofotômetro, um instrumento que transforma um espectro em um gráfico de intensidades, tornando muito mais prático e simples o trabalho dos astrônomos (ver figura 45). Imediatamente o instrumento foi adotado em todo o mundo e hoje em dia é possível afirmar que possivelmente todo o trabalho de pesquisa em espectroscopia é realizado dessa forma.

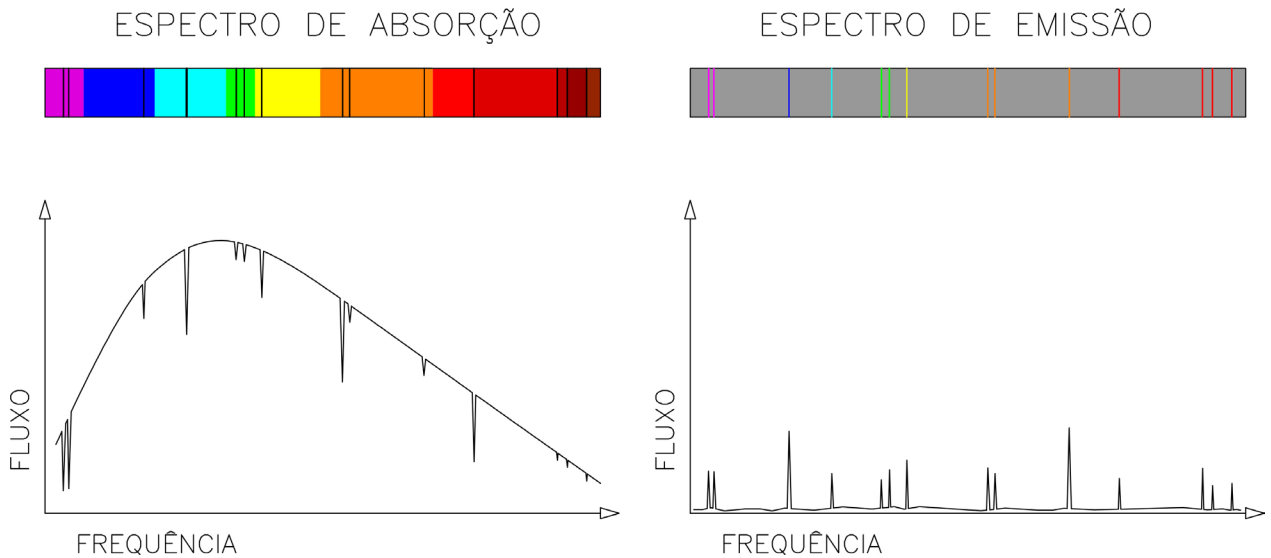


Figura 45 - Exemplos de gráficos gerados pelo espectrofotômetro. Na esquerda vemos um típico espectro de absorção, no qual fica muito mais evidente a visualização do contínuo e são muito claras as linhas. Na direita vemos um espectro de emissão, com suas linhas muito intensas. Desenho: Francisco Conte.

Vimos neste capítulo como o nosso conhecimento em espectroscopia permitiu aos astrônomos conhecer o funcionamento e o entendimento das estrelas. No próximo capítulo abordaremos o surgimento de um novo ramo da astronomia a partir do surgimento de uma nova geração de telescópios.

## CAPÍTULO 4

### Rumo às montanhas – Temos um universo a descobrir

O próximo capítulo importante na história da astronomia não vem de nenhuma invenção importante, como o telescópio, nem da introdução de um elemento tecnológico novo, como a fotografia ou a espectroscopia. O fato importante que marca um novo paradigma no início do século XX é a adoção de um padrão de qualidade total em relação ao que era possível na época, algo como fez Tycho Brahe no final do século XVI. O início do novo século é marcado pelo surgimento de novos observatórios, construídos com máxima excelência, nos melhores locais, com a mais avançada tecnologia disponível. Além disso, eles combinavam todas as inovações criadas nos períodos anteriores recentes: montagens equatoriais motorizadas que permitiam o acompanhamento de objetos durante uma noite de observações, utilização de placas fotográficas e espectroscópios instalados em locais apropriados.

Esta nova era se iniciou principalmente nos Estados Unidos, com a construção dos observatórios localizados em topos de montanhas, em locais com clima perfeito para a instalação de telescópios, com novas tecnologias na construção de espelhos e erguendo os maiores instrumentos até então. As montagens permitiam que os astrônomos acompanhassem um objeto astronômico muito pouco luminoso por horas, acumulando luz para impressionar chapas fotográficas para imagens ou para espectroscopia. A precisão das observações atingiu um novo patamar e descobertas incríveis foram feitas, tornando possível a criação de um novo ramo da astronomia: a cosmologia científica.

Este período se inicia com a construção, no final do século XIX, do Observatório Lick, no Monte Hamilton, com 1.283 m de altitude, localizado ao sul da cidade de São Francisco (ver figura 46). Tudo começou na época em que James Lick, um marceneiro e construtor de pianos que enriqueceu da noite para o dia negociando terrenos quando eclodiu a Corrida do Ouro na Califórnia, resolveu realizar alguma obra importante para deixar seu nome na história. Sua primeira ideia foi erguer uma pirâmide na Union Square, em São Francisco. Ele foi então convencido por George Ellery Hale a construir o maior telescópio do mundo. Houve um acordo com a cidade de Santa Clara, que abriu uma estrada de primeira classe para o acesso ao Monte Hamilton. Era um antigo sonho dos astrônomos construir um observatório no topo de uma montanha em um local de clima seco e apropriado para a realização de observações astronômicas. Algumas experiências já haviam sido feitas, com pequenos telescópios sendo levados por curtos períodos de tempo e de maneira improvisada ao topo de montanhas, já deixando bem claras as vantagens de tal tipo de instalação.



Figura 46 - Vista externa da entrada do Observatório Lick, localizado no topo do Monte Hamilton, na Califórnia. Foto: Francisco Conte.

Vale a pena ressaltar que o Observatório Lick, além de estar instalado no topo de uma montanha, está em um local de clima seco, com grande quantidade de noites por ano apropriadas à observação astronômica e com muito pouca turbulência atmosférica.

Os trabalhos para a construção do primeiro observatório permanente a ser instalado no topo de uma montanha iniciaram-se em 1876. O primeiro telescópio a operar no local foi um refrator de 30 cm de diâmetro fabricado por Alvan Clark. O astrônomo Edward Barnard utilizou o instrumento para fazer fotos magníficas de cometas e nebulosas.

O telescópio financiado por Lick, um refrator de 91 cm de diâmetro, era o maior telescópio de seu tipo construído até então. O instrumento viu sua primeira luz em 1888. A empresa Warner & Swasey construiu a montagem e o tubo do telescópio, enquanto o conjunto óptico foi fabricado por um dos filhos de Alvan Clark, Alvan Graham (ver figura 47). Em 1892, Barnard, utilizando esse telescópio, descobriu Amalteia, o primeiro satélite de Júpiter encontrado desde Galileu. Na descoberta de Amalteia não foram utilizados processos fotográficos. Na verdade, essa foi a última descoberta de um satélite do sistema solar feita visualmente, marcando o fim de uma era. O próximo satélite a ser encontrado no sistema solar, Febe, de Saturno, foi descoberto por William Pickering, em 1898, já por meio da fotografia. O refrator de 91 cm também foi utilizado em seus primeiros anos para fazer espectros estelares por W. W. Campbell, que trabalhava na estimativa de velocidades radiais de estrelas.



Figura 47 - Vista do grande telescópio refrator do Observatório Lick. Foto: Francisco Conte.

Em 1895, outro telescópio é instalado no Monte Hamilton, embora muito menos famoso e comentado que o refrator de 91 cm: o Crossley, um refletor com o mesmo diâmetro (ver

figura 48). O Crossley havia sido construído em 1879, na Inglaterra, por Andrew Ainslie Common, que o utilizou em Londres até 1886, comprovando a eficácia do instrumento na obtenção de fotografias de longa exposição. O telescópio era um dos primeiros refletores construídos sobre uma base de vidro, sobre a qual era aplicada uma fina camada de prata, com resultados muito superiores aos dos antigos refletores construídos a partir de ligas metálicas. Essa técnica foi desenvolvida inicialmente por Justus Liebig e posteriormente aperfeiçoada em 1857 por Carl von Steinheil e Léon Foucault. Sua vantagem principal, além da estabilidade do conjunto, é que a camada de prata, quando deteriorada, pode ser retirada por meio de processos químicos. Eles preservam o perfil parabólico do bloco, bastando ser aplicada uma nova camada para o espelho voltar às suas características originais. Como mencionado anteriormente, com esse instrumento o astrônomo James Keeler obteve as melhores fotografias astronômicas de seu tempo, consolidando a reputação de grandes telescópios refletores para a astronomia de ponta.



Figura 48 - Vista da cúpula do telescópio Crossley, no Monte Hamilton, que conseguiu obter as melhores imagens astronômicas de seu tempo. Foto: Francisco Conte.

Keeler notou em suas imagens um número muito grande de nebulosas espirais, que hoje sabemos serem galáxias. Na época essa foi uma observação importante e inesperada, que teria desdobramentos importantes em um ramo da astronomia que estava prestes a florescer: a cosmologia. A descoberta de Keeler era ainda mais importante pelo fato de que essas nebulosas espirais eram sempre observadas longe da faixa da Via Láctea, que é o trecho do céu onde vemos a maior concentração de estrelas. Será que esse tipo de objeto tendia a evitar as estrelas? Devemos lembrar que com outros tipos de nebulosas – por exemplo as irregulares, como a Nebulosa de Orion, ou as nebulosas planetárias, que

eventualmente lembravam o formato de um planeta – ocorria exatamente o oposto: elas eram sempre observadas nas proximidades ou no interior da faixa da Via Láctea.

Logo após a virada do século, em um novo sítio na Califórnia, iniciou-se a construção de um observatório que se tornaria um dos mais importantes da história da astronomia: no Monte Wilson, muito próximo à cidade de Los Angeles, com altitude de 1.742 m, com condições climáticas tão boas quanto as do Observatório Lick. O primeiro instrumento a ser instalado no local foi o Snow Telescope, em 1905, um telescópio solar, o primeiro de seu tipo de grande porte, posto que até então telescópios solares eram sempre aparelhos portáteis que podiam ser deslocados até os pontos de observação. O Snow Telescope foi construído a partir de uma verba doada por Helen Snow, de Chicago, convencida pelo astrônomo George Hale, na época diretor do Observatório Yerkes. Hale sabia muito bem a importância de instalar seu novo instrumento em um local apropriado para as observações, sendo o sudoeste dos Estados Unidos uma opção muito mais indicada que a região de Chicago, no centro-oeste. Hale era um astrônomo nascido em uma família muito rica, e ainda jovem demonstrou interesse por astronomia, construindo seu primeiro telescópio aos 20 anos. O pai, percebendo o entusiasmo do filho, instalou para ele no quintal da residência da família um refrator com foco longo. De qualidade profissional, o instrumento era também adaptado para espectroscopia, com cúpula e montagem equatorial, podendo competir com a maioria dos telescópios de seu tempo.

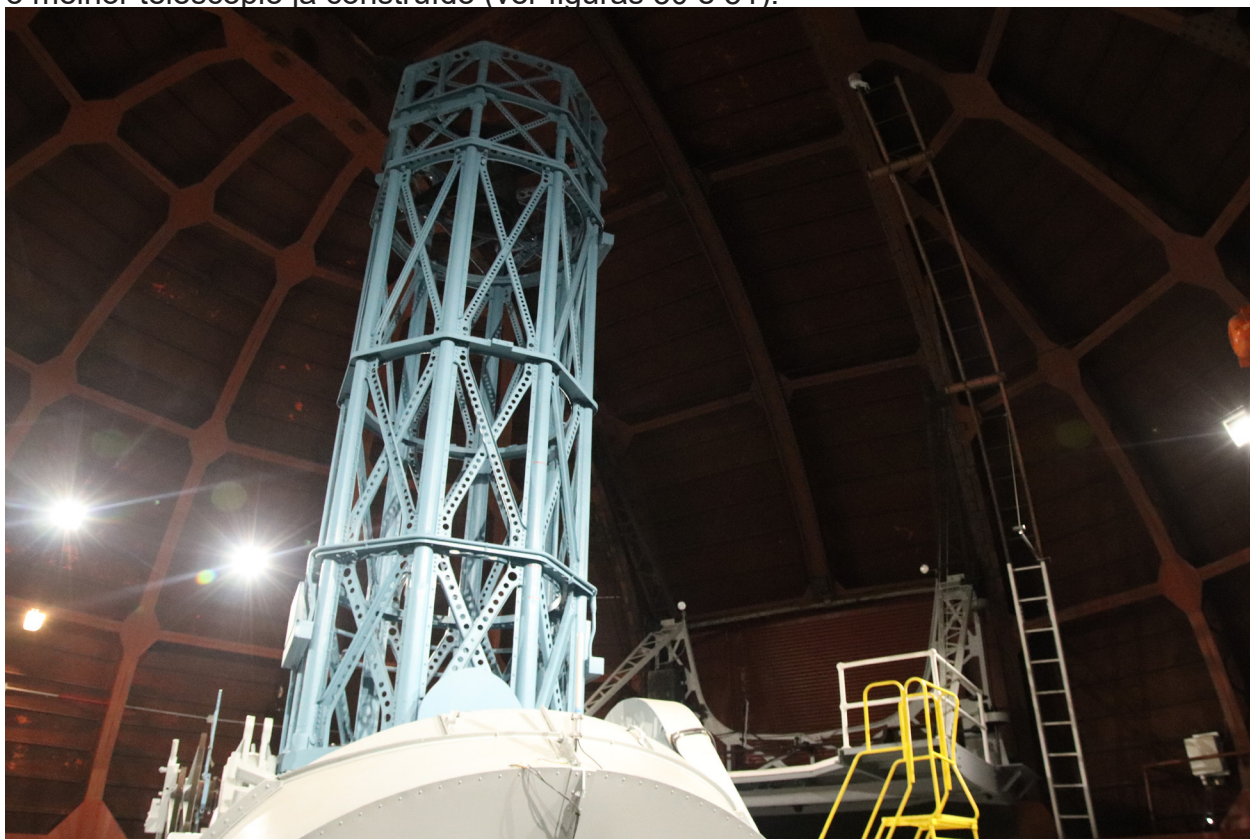
Hale teria uma importância enorme na astronomia do século XX, conseguindo angariar verbas para a construção de um grande número de telescópios importantes no período. Em 1908 dois telescópios foram construídos no local: a torre solar de 60 ft (60 *feet*, ou pés, ou seja, com cerca de 18 metros de altura) e o telescópio refletor de 60” (60 polegadas, ou mais ou menos 1,50 m de diâmetro). A torre solar foi projetada para melhorar a resolução das imagens em relação ao Snow Telescope (ver figura 49). Os primeiros anos de utilização desse telescópio demonstraram que o seu desenho horizontal apresentava um problema difícil de ser contornado: o calor do Sol aquecia o solo em torno do instrumento, fazendo com que a qualidade das imagens obtidas diminuísse com o tempo de observação. A torre concentrava boa parte de sua óptica no topo da instalação, evitando em grande parte o efeito de degradação causado



Figura 49 - Um dos telescópios solares do observatório de Monte Wilson. Hale descobriu a correlação entre os fenômenos solares e seu campo magnético utilizando estes instrumentos. Foto: Francisco Conte.

pelo aquecimento do solo. Foi nesse instrumento que Hale, em 1908, observando algumas imagens do espectro solar em regiões que apresentavam manchas, percebeu a duplicação de algumas linhas espectrais. Esse fenômeno é conhecido como efeito Zeeman e é causado por um campo magnético forte. A descoberta da correlação entre os fenômenos solares (manchas, *flares* etc.) e o magnetismo é uma das mais importantes da astronomia solar.

Para a construção do telescópio de 60", como ficou conhecido, George Hale recebeu de presente de seu pai um bloco de vidro, que foi utilizado na fabricação do espelho pela empresa Saint-Gobain, da França. O bloco tinha uma espessura de 19 cm e pesava 860 kg. Em 1904, Hale conseguiu uma verba da Fundação Carnegie para iniciar a construção do telescópio. A montagem e a estrutura do telescópio haviam sido fabricadas em São Francisco e quase foram destruídas no terremoto de 1906. O transporte e a instalação de todo o conjunto em Monte Wilson foram uma grande façanha. O instrumento viu sua primeira luz em 8 de dezembro de 1908. Nessa época ele havia se tornado o maior telescópio do mundo, pois o Leviatã de Parsonstown tinha sido desmantelado no início dos anos 1890. De qualquer forma, devido à sua construção com base em um bloco de vidro, era um instrumento muito superior ao Leviatã em todos os aspectos. Isso mesmo se não levarmos em conta a robusta e motorizada montagem equatorial, a utilização de chapas fotográficas, os instrumentos que podiam ser acoplados ao telescópio, como os espectrógrafos, a instalação em um sítio muito superior do ponto de vista técnico, a cúpula protetora etc. Sem o menor medo de cometer qualquer tipo de injustiça, esse era o melhor telescópio já construído (ver figuras 50 e 51).



Figuras 50 e 51 (ver página seguinte) - Duas vistas do telescópio de 60" (1,50 m) de Monte Wilson. Foto: Francisco Conte.

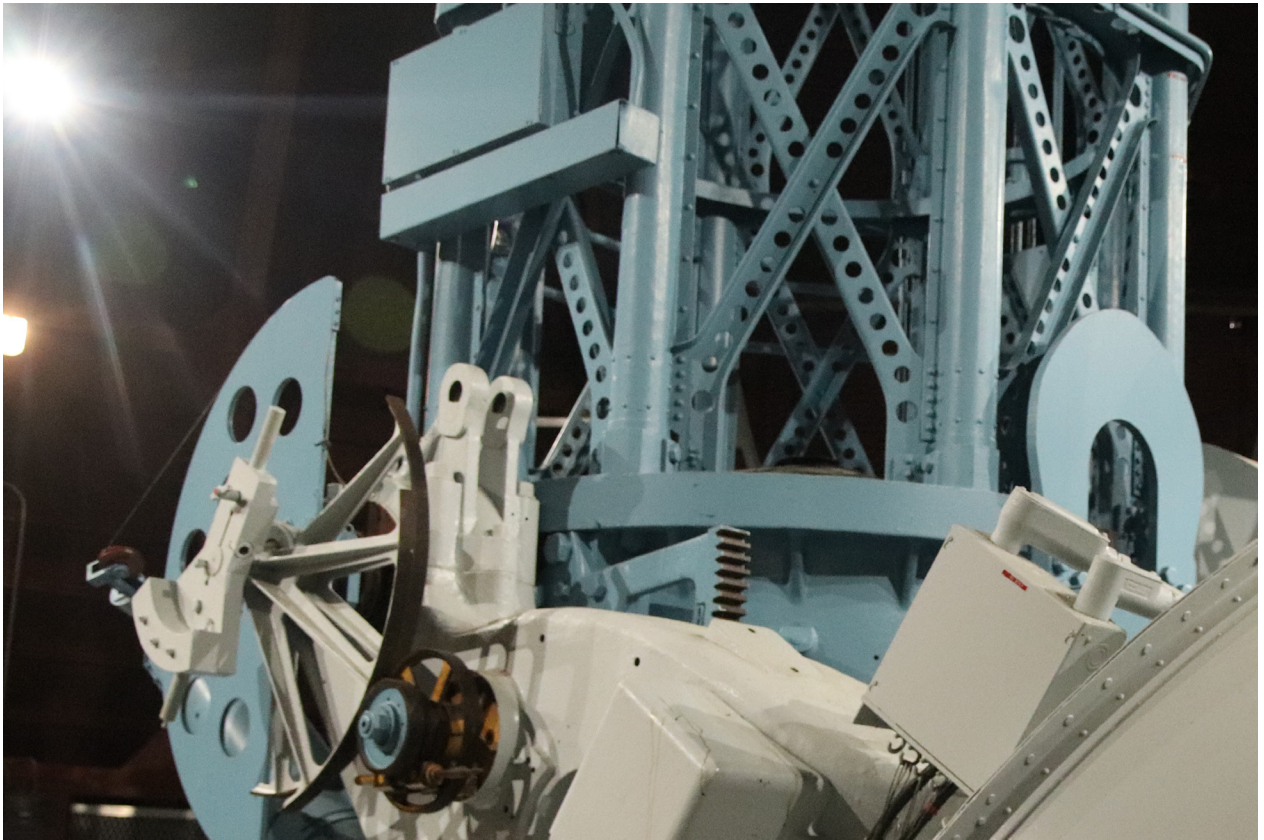


Figura 51

Utilizando esse telescópio, o astrônomo Harlow Shapley realizou um importante trabalho observacional, mapeando todos os aglomerados globulares conhecidos (ver figura 52). Aglomerados globulares são conjuntos de estrelas unidas gravitacionalmente, com uma forma aproximadamente esférica, e que contam com um número variável de estrelas, de cerca de 100 mil até 1 milhão. Hoje sabemos que esses aglomerados fazem parte de nossa galáxia e se distribuem na região do halo. Shapley desenvolveu um trabalho de peso envolvendo a realização de uma estimativa de distância desses aglomerados. Como era impossível estimar a distância pelo método da paralaxe, Shapley utilizou a relação período-luminosidade das Cefeidas, descoberta por Henrietta Leavitt em Harvard. Para tanto, Shapley teve que descobrir Cefeidas em todos os aglomerados globulares que observou. Calculadas as distâncias de todos e sabendo suas direções, foi possível fazer um mapa tridimensional da distribuição desses aglomerados. A surpresa é que essa distribuição era quase esférica em torno

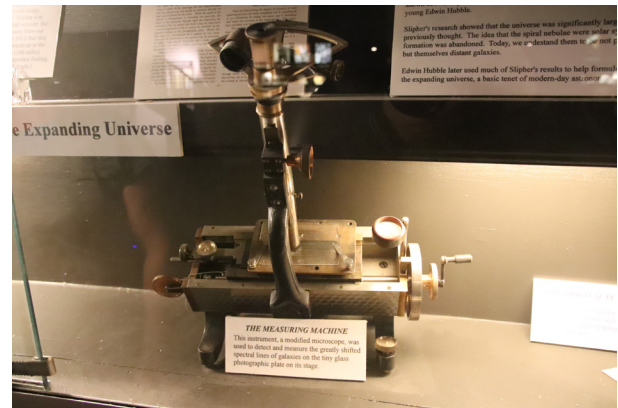
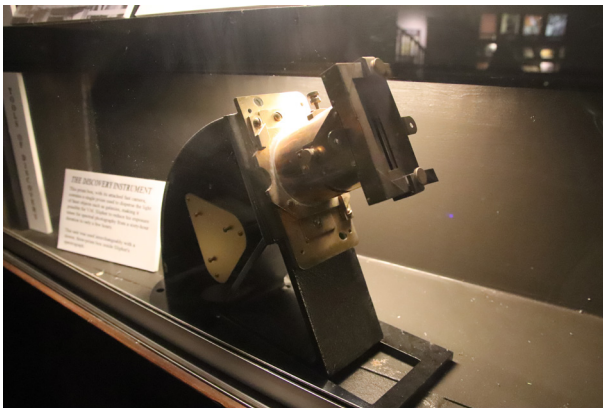


Figura 52 - Harlow Shapley realizou um trabalho importante de mapeamento de aglomerados globulares, que forneceu a indicação de que o Sol não estava no centro de nosso universo (de nossa galáxia). Fonte: Wikimedia Commons.

de um ponto na região do Sagitário, na parte mais pronunciada da Via Láctea, a faixa nebulosa que cruza o céu noturno. O que ele havia descoberto era que o centro de nossa galáxia estava localizado nessa região. E que o nosso sistema solar está localizado longe desse centro. Deixávamos definitivamente de ser o centro do universo.

Shapley desenvolveu outro trabalho de expressão nesse período, que foi a melhor estimativa do tamanho da nossa galáxia até então. Ele estimou o diâmetro de nossa galáxia em 300 mil anos-luz, o que é um pouco alto para os valores que se tem hoje, mas que acabou servindo de parâmetro para essa geração de astrônomos.

No final do século XIX, nas proximidades de Flagstaff, no Arizona, Percival Lowell construiu um observatório particular. Lowell era fascinado por Marte e acreditava que havia vida inteligente no planeta vermelho. Assim, através de seus próprios meios instalou um grande telescópio refrator (61 cm de diâmetro) no sítio, que não tinha um clima tão bom quanto o da Califórnia, mas era localizado em uma altitude ainda maior que a do Lick e do Monte Wilson: 2.210 m acima do nível do mar. Lowell realizou ele mesmo uma série de observações, mas também criou um programa observacional, contratando astrônomos para executar os trabalhos. Em 1930, um desses astrônomos, um jovem chamado Clyde Tombaugh, descobriu Plutão, mas os trabalhos mais importantes feitos em Flagstaff foram realizados por Vesto Melvin Slipher. No período de 1912 a 1914, Slipher obteve o espectro de uma série de nebulosas espirais, que hoje sabemos serem galáxias espirais (ver figuras 53 e 54). Analisando as linhas espectrais, Slipher percebeu um pronunciado desvio das linhas em relação à posição que elas tinham em laboratório. Isso podia ser explicado pelo efeito Doppler, mas implicava que essas galáxias estavam se movendo em velocidades muito altas em direção à Terra, fato que parecia indicar uma grande distância em relação a esses objetos.



Figuras 53 e 54 - Instrumentos de espectroscopia utilizados por Vesto Slipher em Flagstaff para descobrir o grande desvio para o vermelho das linhas de absorção dos espectros de galáxias. Fotos: Francisco Conte.

O sucesso dos primeiros anos de operação dos telescópios no Monte Wilson incentivou Hale a tentar dar passos maiores. Hale convenceu o magnata do aço americano John D. Hooker a doar fundos para a construção do maior telescópio do mundo, que seria batizado com o nome de seu mecenas. O projeto elaborado foi a construção de um telescópio de 100" (100 polegadas, ou 2,50 m de diâmetro), que teria quase três vezes a área de coleta de luz do telescópio de 60".



A construção do espelho de 2,50 m para o telescópio Hooker de Monte Wilson era um desafio tecnológico muito grande, pois representava um volume de vidro quase oito vezes maior que o do telescópio de 1,50 m e o peso total do espelho acabado era de mais de quatro toneladas (ver figura 55). Todo o processo de fabricação era muito difícil – o resfriamento do bloco de vidro após sua fundição demora meses, e se for feito de forma demasiado rápida pode gerar trincas e outros problemas técnicos. O primeiro bloco de vidro construído apresentou muitas bolhas e foi inicialmente descartado. A empresa francesa Saint-Gobin, que havia construído essa peça, foi convencida a fundir um segundo bloco, que igualmente apresentou problemas. Após essas duas tentativas, a empresa desistiu de tentar refazer a fundição do espelho por uma terceira vez, criando um impasse entre o fabricante e o pessoal do observatório. Finalmente, Hale analisou os dois blocos e chegou à conclusão de que seria possível utilizar o primeiro para a construção do espelho, pois as bolhas estavam concentradas na região central da peça e eventualmente poderiam não influir na performance do telescópio. Assim, foi concluído o telescópio, assumindo-se um risco técnico razoável devido aos problemas de fabricação do espelho principal. De fato, o espelho acabou se comportando muito bem e o telescópio Hooker se tornou o mais importante do mundo pelas décadas seguintes. A pesquisa observacional de ponta na astronomia havia se transferido da Europa para a América do Norte, pois não havia como competir com os novos observatórios construídos no sudoeste dos EUA.

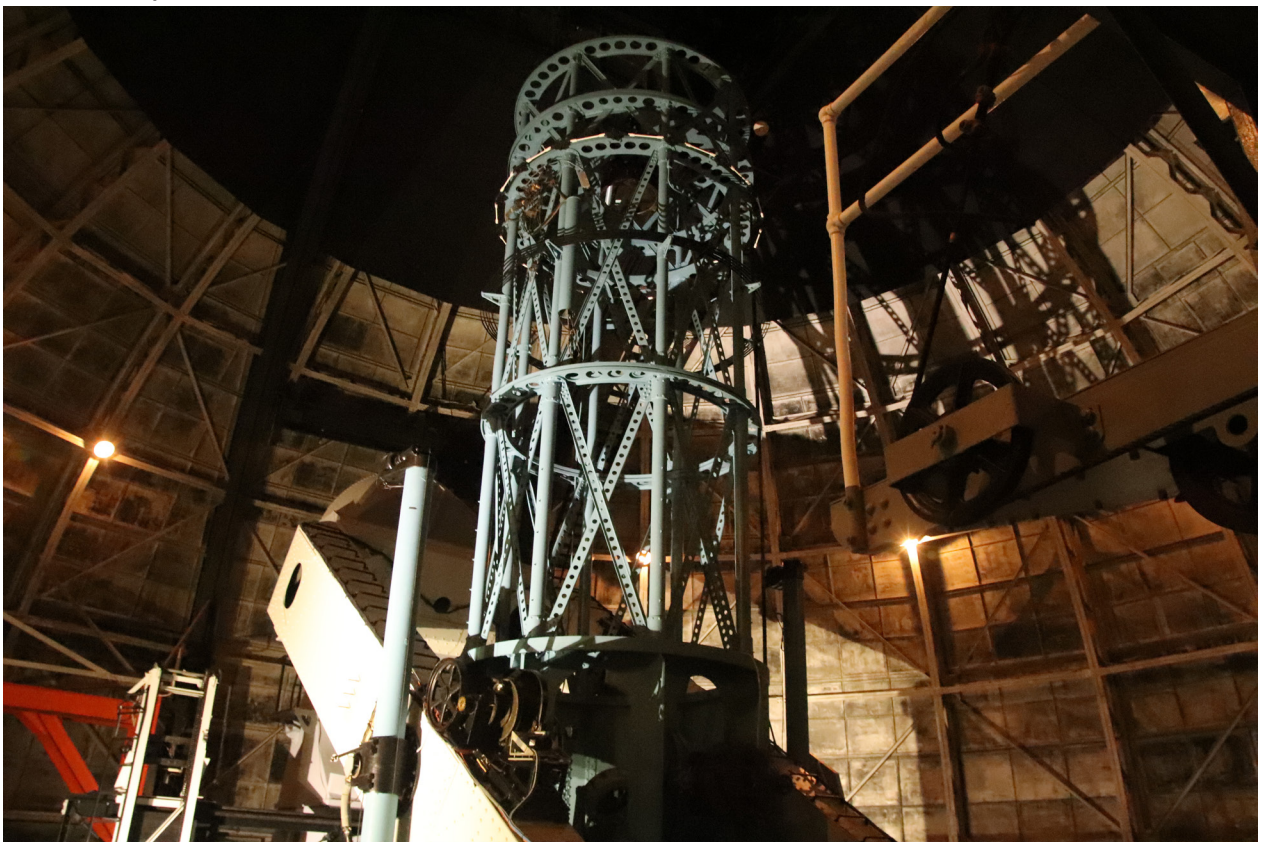


Figura 55 - Vista do telescópio Hooker, de 2,50 m de diâmetro, em Monte Wilson. Foto: Francisco Conte.

Neste ponto a atenção afasta-se um pouco da descrição do que ocorria no topo das montanhas para deter-se sobre alguns avanços que ocorriam na Europa. O final do século XIX e início do XX foi um período de extremo desenvolvimento teórico, com os

primeiros trabalhos ligados à teoria quântica, realizados por Max Planck. Em 1905, Albert Einstein publica três artigos importantíssimos para a física. No primeiro deles explica o movimento browniano, comprovando a existência dos átomos; no segundo, dedicado ao efeito fotoelétrico, fornece uma explicação quântica para um fenômeno ligado à luz, comprovando que, como Newton afirmava, a luz era composta por partículas (embora saibamos que também se comporta como onda); no terceiro, apresenta a relatividade especial, que acaba com o conceito de observador absoluto e de tempo absoluto. Segundo essa teoria, alguns experimentos vão ser observados de formas diferentes por observadores em repouso e em movimento, mas todas as observações são válidas, e o tempo também é relativo e pode passar mais lentamente ou mais rapidamente dependendo do observador, caso este esteja em repouso ou em movimento. O que era constante em todos os casos era a velocidade da luz no vácuo. Após alguns séculos de consolidação da mecânica newtoniana a física estava sendo totalmente reformulada em sua essência teórica.

Em 1915 Einstein publica seu trabalho sobre a relatividade geral, que no fundo é uma nova lei de gravitação. Esse trabalho acaba com o conceito de uma força gravitacional que atua instantaneamente, não importando a distância, como na proposição de Newton. Na relatividade geral a gravidade aparece como uma deformação geométrica do espaço-tempo. Uma massa muito grande deforma o espaço-tempo ao seu redor, causando efeitos como o desvio de um raio de luz vindo de uma fonte distante. Em 1919, a observação de um eclipse solar em Sobral, no Ceará, e na Ilha do Príncipe, no litoral da África, confirmou as previsões de Einstein, que se tornou uma celebridade instantânea, e abriu as portas para a divulgação de uma nova física.

A relatividade geral de Einstein era uma descrição da gravitação muito mais detalhada que a newtoniana. Com ela, pela primeira vez era possível abordar os aspectos gerais do universo, suas origens, desenvolvimento e destino do ponto de vista teórico. O próprio Einstein foi o primeiro a tentar montar um modelo cosmológico realmente científico. Seus trabalhos foram publicados em 1917, e tinham três importantes pressupostos: a matéria era formada por um fluido perfeito sem pressão; o universo era homogêneo e isotópico; o universo era finito e estático. Para viabilizar esse modelo, Einstein criou um termo conhecido como constante cosmológica, que atuava em oposição à gravidade e era responsável por manter o universo estático. No mesmo ano, Willem De Sitter desenvolveu um modelo no qual o universo era também estático, sem a utilização de uma constante cosmológica, mas sem matéria. Só em 1922, porém, é que foram concebidos modelos mais elaborados e realistas para o universo. De maneira muito surpreendente o autor desses modelos era Alexander Friedmann, um meteorologista russo que adorava matemática e física e tinha entrado em contato com os trabalhos de Einstein. Friedmann criou os primeiros modelos expansionistas do universo e enviou seus trabalhos a Einstein, adicionando uma correção de um erro que havia encontrado no modelo einsteiniano. Obviamente Einstein relutou um pouco em aceitar o trabalho de Friedmann, mas acabou por reconhecer seu valor e publicou uma carta afirmando que ele estava correto, adicionando que a constante cosmológica era o maior erro de sua vida. O interessante é que nos trabalhos de Friedmann este considera a possibilidade teórica da existência de uma constante cosmológica e seus modelos funcionam tanto com quanto sem ela. Em pouco tempo o trabalho de Friedmann mostraria a sua importância.

Retornando à astronomia observacional, vamos perceber que esta também passava por uma fase de grande agitação. As últimas décadas do século XIX e o início do século XX haviam visto uma melhora expressiva na qualidade e quantidade de observações astronômicas. Grande parte delas era registrada em chapas fotográficas que permitiam múltiplas análises e comparações de objetos ao longo do tempo, além de apresentarem uma grande quantidade de objetos que nunca haviam sido observados. E tudo isso ainda podia ser complementado pelo estudo dos espectros desses objetos. Um tipo de objeto que despertou muito interesse foram as nebulosas espirais, que hoje sabemos serem galáxias espirais. Observadas pela primeira vez por Lorde Rosse em seu *Leviatã*, assim que os observatórios começaram a fazer fotografias de longa exposição em seus novos e potentes telescópios, ficou muito claro que as nebulosas espirais eram um tipo de objeto bastante comum. A observação mais detalhada de algumas delas parecia indicar a existência de estrelas em seu interior, embora na maioria dos casos a aparência difusa indicasse uma origem nebular. Conforme os observatórios do sudoeste americano foram produzindo um número cada vez maior e mais detalhado de imagens desses objetos, iniciou-se um debate entre os astrônomos sobre a real condição das nebulosas espirais: seriam elas objetos nebulares localizados em nossas cercanias, ou seriam grupos imensos de estrelas, como a nossa Via Láctea, localizados a uma distância muito maior do que imaginado inicialmente? Além disso, se fossem conjuntos de estrelas poderiam ser algo como os “universos-ilhas” descritos por Immanuel Kant em 1755 (estruturas totalmente independentes da galáxia da qual fazíamos parte)?

Em pouco tempo a real identidade das nebulosas espirais se tornou um dos principais problemas da astronomia do período, mas o tipo de trabalho que resolveria definitivamente a questão exigiria um esforço observacional extremo, mesmo contando com os mais novos e potentes observatórios e técnicas. Antes que o problema fosse solucionado, o meio astronômico viveu um período de idas e vindas, com trabalhos não conclusivos e muitas vezes contraditórios. Como vimos anteriormente, Vestu Slipher havia medido as velocidades de deslocamento de algumas nebulosas espirais através do efeito Doppler, obtendo velocidades radiais elevadas, que pareciam confirmar a ideia de objetos muito distantes formados por estrelas. Trabalhos feitos por Harlow Shapley pareciam indicar que a nossa galáxia, que nesse momento ainda considerávamos ser todo o universo, era muito maior do que havíamos suposto até então. Um astrônomo de origem holandesa, Adriaan van Maanen, fez um trabalho observando imagens de uma galáxia espiral vista “de frente”, ou *face-on*, e afirmou ter encontrado indicações de que entre as duas imagens havia conseguido perceber uma pequena rotação do objeto. Essa afirmação parecia indicar que esses objetos não poderiam ser muito grandes, e que portanto estariam em nossas cercanias. Van Maanen era um observador muito conceituado, então por algum tempo suas conclusões tiveram um peso grande dentro da comunidade astronômica.

Como essa questão estava atraindo um número maior de pesquisadores, no início de 1920 a Academia de Ciências de Washington resolveu organizar um debate entre astrônomos partidários das duas visões. Para defender o grupo que acreditava que as nebulosas espirais eram objetos localizados no interior de nossa galáxia foi convocado o astrônomo Harlow Shapley, e para argumentar em favor do grupo que acreditava na existência de múltiplos “universos-ilhas” foi chamado o astrônomo Heber Curtis. O debate

ocorreu no dia 20 de abril do mesmo ano e, segundo a maior parte das pessoas que participaram do evento, Curtis causou melhor impressão, pois era um orador muito enfático e se preparou muito para o evento, ao passo que Shapley mostrou-se mais burocrático e menos convincente. O resultado do debate, no entanto, foi indefinido, pois na verdade nenhum dos lados possuía argumentos definitivos acerca do problema em questão. Esse tipo de encontro, na verdade, não é realizado na expectativa de elucidar o problema, mas provavelmente para mostrar o “estado da arte” no conhecimento sobre o assunto, incentivando talvez novos pesquisadores a trabalharem nele. Mas a resposta para a questão não demoraria em aparecer. Pouco tempo depois do debate Harlow Shapley foi contratado como diretor do Observatório da Universidade Harvard, onde permaneceria até 1951. Era um cargo muito importante, onde ele passaria a trabalhar com a equipe que havia feito os maiores avanços na área de espectroscopia estelar, mas que o afastava da pesquisa de ponta realizada no Observatório Monte Wilson. Em dezembro de 1920, Albert Michelson utiliza o telescópio Hooker para uma experiência em interferometria óptica que vai ser vista em detalhes em outro capítulo.

No início dos anos 1920, o astrônomo Edwin Hubble mudou-se para Monte Wilson (ver figura 56). Hubble era uma figura ímpar. É praticamente impossível descrever seus trabalhos sem dedicar algumas palavras a descrever sua figura. Nascido no Missouri, muitas vezes ele é apresentado como egocêntrico e até em alguns momentos prepotente. Era alto e forte e suas habilidades atléticas o ajudaram a ser admitido na Universidade de Chicago, onde conseguiu habilitações tanto em direito quanto em astronomia, atividade que praticava como amador desde criança. Hubble era também muito inteligente e mostrou grandes capacidades no desenvolvimento de seus estudos. Após obter seus diplomas, Hubble foi selecionado para uma bolsa de três anos em Oxford, na Inglaterra, onde inicialmente estudou jurisprudência, em vez de ciência, seguindo uma promessa que tinha feito a seu pai. Posteriormente, estudou literatura e espanhol, recebendo créditos para um mestrado. Hubble fez também alguns cursos de matemática e ciência. Após a morte de seu pai, em 1913, retornou aos EUA, onde não teve motivação para trabalhar como advogado e começou a dar aulas de espanhol, física e matemática na New Albany High School, em Indiana, onde também era o treinador do time de basquete. Mais tarde, voltou a estudar astronomia no Observatório Yerkes, onde obteve o doutorado em 1917, com uma tese sobre análises fotográficas de nebulosas. No mesmo ano, após os EUA declararem guerra à Alemanha, alistou-se como voluntário e foi integrado no segundo batalhão de infantaria do regimento 343. Embarcando para lutar na Primeira Guerra Mundial na



Figura 56 - Edwin Hubble, o astrônomo que realizou duas importantes descobertas da astronomia enquanto trabalhava em Monte Wilson. Fonte: Wikimedia Commons.

Europa, não chegou, no entanto, a entrar em combate. Após o término da guerra voltou a seu país, onde recebeu uma oferta da Carnegie Institution for Science para trabalhar no observatório de Monte Wilson. Hubble chegou ao observatório vestindo-se como um dândi e falando com sotaque inglês, sempre acompanhado de seu cachimbo. Essa sua reinvenção um tanto quanto teatral é muito comentada em suas várias biografias; seu trabalho, no entanto, se tornaria um dos mais importantes e inovadores na história da astronomia.

Vale aqui um comentário sobre a tese de 1917 de Hubble. Nessa época, ele estava em Yerkes, o telescópio refrator de 1 metro de diâmetro era a estrela do observatório e Hubble, como estudante, tinha um acesso muito limitado ao instrumento. Havia, no entanto, um telescópio refrator no observatório a que poucos astrônomos davam atenção, que ficava ocioso boa parte do tempo. Era um telescópio com 60 cm de diâmetro, que havia sido comprado por George Ritchey para competir com o muito produtivo Crossley Reflector do Observatório Lick. Hubble utilizou esse instrumento para fazer fotografias de nebulosas. Uma delas, em especial, a NGC 2261, uma nuvem de gás com aparência muito parecida com um cometa, foi cuidadosamente analisada por ele. Comparando suas exposições com outras imagens obtidas anteriormente em outros observatórios, foi possível encontrar diferenças consideráveis em sua aparência, o que indicava que a nebulosa deveria ser pequena e estar localizada em nossas proximidades – o que foi comprovado posteriormente através de novas observações. Durante sua carreira, Hubble voltou a observar esse objeto em várias ocasiões. A NGC 2261 atualmente também é conhecida por Nebulosa Variável de Hubble.

Hubble foi então incorporado à equipe de astrônomos do Observatório Monte Wilson. De imediato, passou a ter acesso aos dois impressionantes telescópios, de 60" e de 100" (ver figura 57). Hubble passou a fazer parte de um grupo que já tinha Harlow Shapley, Van Maanen e George Hale, entre outros. No início de 1923, Hubble começou a fazer imagens de um objeto descoberto por Barnard em 1884, conhecido por NGC 6822. O objeto observado pelos poderosos telescópios de Monte Wilson demonstrava claramente ser um agrupamento de estrelas muito similar às Nuvens de Magalhães, que hoje sabemos tratar-se de duas galáxias satélites da nossa Via Láctea. Shapley havia feito uma estimativa de distância do objeto, levando em conta seu diâmetro angular, comparando com as Nuvens de Magalhães, e chegou a uma distância aproximada de 1 milhão de anos-luz. Essa distância colocava o objeto claramente fora de nossa galáxia, que o próprio Shapley havia estimado possuir um diâmetro de cerca de 300 mil anos-luz, mas a dificuldade de confirmar essa distância acabou por manter a questão em aberto. Observando NGC 6822 com muito cuidado, e levando em conta sua característica similar às Nuvens de Magalhães, Hubble decidiu procurar estrelas variáveis, como havia feito Henrietta Leavitt algumas décadas antes. Examinando meticulosamente as imagens que havia obtido do objeto com vários dias de diferença, Hubble encontrou pelo menos 15 estrelas variáveis, e destas pelo menos 11 eram Cefeidas. Ele conseguiu então utilizar a relação período-luminosidade para calcular a distância desse agrupamento de estrelas, encontrando o resultado de 700 mil anos-luz, bem menor do que a distância considerada hoje, de aproximadamente 1,6 milhão de anos-luz, mas suficiente para colocar o objeto fora de nossa galáxia. Mas a avaliação da distância de NGC 6822 não foi o ponto final na

discussão sobre os universos-ilhas, pois de qualquer maneira esse tipo de objeto, similar às Nuvens de Magalhães, era muito raro e podia indicar apenas a existência de uns poucos satélites de nosso universo (galáxia). Uma forma segura de encerrar o debate seria descobrir qual era a real natureza das nebulosas espirais.



Figura 57 - Vista externa da cúpula do telescópio Hooker. Foto: Francisco Conte.

Em outubro de 1923, apesar de as condições de observação não serem ideais, Hubble conseguiu fazer uma imagem razoável de M31, a nebulosa espiral de Andrômeda, um objeto facilmente visível a olho nu e com um diâmetro aparente maior que o da Lua. Na imagem Hubble conseguiu identificar três estrelas, que ele imediatamente imaginou tratar-se de novas. Hubble resolveu então procurar nos arquivos de Monte Wilson outras imagens de M31 capturadas por outros astrônomos do observatório, a mais antiga delas de 1909. Comparando as imagens com a sua exposição, Hubble conseguiu confirmar que duas delas eram realmente novas e que não apareciam em nenhuma das imagens anteriores. Quando o tempo melhorou na Califórnia, em fevereiro de 1924, Hubble fez uma série de imagens de M31, com o objetivo de observar o comportamento da terceira estrela que havia observado. Nas imagens ele percebeu que ela variava de brilho, chegando a uma mudança maior que uma magnitude. O acompanhamento revelou que esta estrela era claramente uma Cefeida. A placa onde ele fez sua descoberta mostra as anotações das posições das duas novas marcadas a lápis com uma letra “N” e na indicação da terceira estrela a letra N está marcada com um “X” e ao lado está escrito “VAR”. Após Hubble estimar com precisão o período de variação da Cefeida, ele pode calcular a distância de M31, que estimou em aproximadamente 1 milhão de anos-luz. Nos meses que se seguiram, Hubble descobriu outras Cefeidas em M31, chegando a um total de 36 ainda em 1924. Os cálculos feitos com essas estrelas adicionais confirmavam e reforçavam

suas conclusões iniciais. Esse trabalho deixou claro que as nebulosas espirais eram na verdade “universos-ilhas” situados além de nossa galáxia. Nosso universo era muito maior do que acreditávamos até então. M31 era na verdade a Galáxia de Andrômeda.

Hubble ainda arranhou tempo para se casar em 26 de fevereiro desse mesmo ano. O jornal *The New York Times* publicou uma reportagem sobre sua descoberta em 23 de novembro de 1924. No dia 1º de janeiro de 1925, Henry Norris Russell apresentou o trabalho de Hubble na reunião anual da American Astronomical Society, em uma Washington coberta de neve. Hubble relutou em comparecer à reunião, mas Russell entendeu que a descoberta era importante demais para não ser apresentada. Além disso, Russell convenceu o grupo da reunião a indicar o trabalho de Hubble para o prestigiado prêmio da AAAS (American Association for the Advancement of Science). Hubble acabou recebendo o prêmio por sua descoberta, dividido com o parasitologista Lemuel Cleveland, que desenvolveu um estudo sobre protozoários. Com o dinheiro do prêmio Hubble comprou um terreno onde acabou por construir sua própria casa. Surpreendentemente, somente no ano de 1929 é que finalmente ele publicou um artigo formal sobre esses estudos em uma revista científica, fato impensável nos dias atuais. Quando fez a publicação, o artigo tinha mais de 60 páginas, estava muito mais fundamentado por todos os dados acumulados durante quase cinco anos e incluía a galáxia-anã elíptica M33, um satélite de Andrômeda. De qualquer maneira, esse trabalho de Hubble mudou os paradigmas da astronomia de sua época, acabando por fim com o debate da existência ou não de galáxias.

Não deixa de ser surpreendente que a questão dos universos-ilhas tenha demorado tanto para ser resolvida. Obviamente um fator é a utilização do telescópio mais poderoso do mundo, o Hooker de 100”. Porém, analisando os fatos, o telescópio de 60” de Monte Wilson, construído muito antes, já seria capaz de realizar observações com qualidade suficiente para encontrar Cefeidas em galáxias espirais próximas. É possível que até o Crossley, do Observatório Lick, também fosse capaz. A surpresa é que Hubble não foi o primeiro astrônomo a descobrir uma estrela variável em uma galáxia espiral. Na verdade, o primeiro foi John Duncan, do Wellesley College, que teve acesso tanto ao telescópio de 60” quanto ao Hooker de 100” durante um trabalho de busca de novas, em 1920. Nesse período, Duncan descobriu três estrelas variáveis na Galáxia do Triângulo. Infelizmente, ele não obteve uma quantidade suficiente de imagens para poder estimar o período de variação das estrelas que descobriu. A última das três estrelas descobertas era uma Cefeida. Outro ponto surpreendente é que Shapley havia feito o seu trabalho mais importante descobrindo Cefeidas em aglomerados globulares. Ele teria o conhecimento e a técnica necessários para a missão, além de acesso livre aos telescópios de Monte Wilson, reunindo todos os meios necessários para a descoberta, mas não a fez. O que parece ter impedido Shapley de realizar esse feito foi sua convicção de que o modelo da grande galáxia estava correto. Shapley não encontrou Cefeidas em galáxias espirais porque acreditava que estas eram sistemas nebulares onde estrelas estariam em um processo de formação, sendo inútil qualquer busca.

O trabalho de Hubble estabeleceu, como vimos, um novo paradigma para a astronomia observacional. Muitas das observações com resultados conflitantes realizadas nos anos anteriores deveriam ser revisadas a partir desse novo padrão. Para alguns trabalhos isso significou um reconhecimento, como no caso do cálculo das velocidades radiais das galáxias feito por Vesto Slipher. Com a confirmação da enorme distância das

galáxias, as grandes velocidades radiais que elas apresentavam passavam a fazer sentido, pois a distância justificava a ausência de movimentos ou mudança de aparência nesses objetos. Por outro lado, a alegação de Van Maanen de que havia observado um componente rotacional em algumas galáxias espirais havia sido mortalmente ferida. Para que pudéssemos perceber astrometricamente a rotação de uma galáxia, ela não poderia ser muito distante, pois implicaria em uma velocidade muito elevada, indicando que a observação deveria estar errada. De fato, até hoje, mesmo com instrumentos muito mais poderosos, não é possível perceber a rotação das galáxias através de observações astrométricas, apenas a espectroscopia tornou esta medição possível. Esse fato criou um problema de relacionamento grande no Observatório de Monte Wilson, onde tanto Van Maanen quanto Hubble trabalhavam. A situação se agravou pela demora de Van Maanen em reconhecer seu erro, mas também pelo caráter genioso de Hubble, que mais uma vez se manifestava. Depois de alguns anos houve um esforço geral do pessoal do observatório para apaziguar os ânimos, incluindo um simbólico aperto de mão entre os dois e a elaboração de um trabalho conjunto sobre o tema, com a participação de outros astrônomos do observatório. Mas Hubble e Van Maanen mantiveram uma relação distante, limitada aos cumprimentos, quando se encontravam na montanha.

O próximo passo da pesquisa, um tanto óbvio, era ampliar o trabalho, tentando encontrar variáveis do tipo Cefeida em outras galáxias espirais, similares à Galáxia de Andrômeda. Hubble passou a dedicar-se ao problema e nessa fase passou a contar com a colaboração de Milton Humason, que havia começado a trabalhar no observatório no transporte de peças para os telescópios em tropas de mulas, passando em seguida à função de zelador do observatório e posteriormente à de assistente voluntário para as observações noturnas. Em 1919, Hale finalmente reconheceu o talento de Humason para essas atividades e acabou por contratá-lo como membro do observatório. Humason era excelente na aquisição de imagens astronômicas e também de espectros de objetos distantes e de pouco brilho. A obtenção de um espectro de uma galáxia espiral distante frequentemente demorava horas, sendo um trabalho bastante tedioso e realizado em condições climáticas terríveis, muitas vezes em temperaturas abaixo de zero. Apenas para ilustrar o que foi comentado no parágrafo anterior, quando foi decidido que Humason iria fazer parte da equipe de astrônomos de Monte Wilson, foi estabelecido também que alguns membros do observatório dariam a ele um treinamento, com conteúdo teórico e prático, para que tivesse mais condições para desenvolver o seu trabalho. Shapley, que era um de seus orientadores, deu a ele algumas chapas fotográficas para serem analisadas com a técnica de *blink*, onde duas ou mais imagens de um mesmo objeto são projetadas sucessivamente, em um processo repetitivo, de modo a destacar os objetos que tiveram algum tipo de alteração nas imagens, seja esta uma mudança de brilho ou de posição. Humason identificou algumas estrelas que pareciam ser variáveis em imagens de galáxias espirais, anotando suas posições com uma caneta. Consta que Shapley explicou pacientemente a Humason que as nebulosas espirais eram regiões de formação estelar, de modo que não poderíamos observar estrelas variáveis nessas regiões, e apagou as marcações, não percebendo a oportunidade que tiveram para fazer história. Como afirmou Louis Pasteur: “Nos campos da observação, a chance favorece apenas as mentes preparadas” (Bartuziak, 2010, p. 217).

A associação entre Hubble e Humason foi muito importante na sequência das pesquisas, pois havia duas frentes independentes de trabalho: primeiro, o cálculo de



distância feito para M31 precisava ser estendido para outras galáxias; ao mesmo tempo, a descoberta das velocidades radiais de Vesto Slipher era uma informação importante demais para ser ignorada. Será que existiria alguma ligação entre as distâncias das galáxias e suas velocidades radiais? Talvez dessa relação pudessem surgir novas pistas para o entendimento de nosso universo. Hubble tinha vasta experiência na detecção de Cefeidas, o que seria fundamental nos cálculos de distância, ao passo que Humason era provavelmente o mais habilidoso de todos os observadores de Monte Wilson no que se referia a conseguir obter um bom espectro de objetos muito pouco brilhantes, o que seria fundamental para a determinação das velocidades radiais.

O trabalho foi executado em um prazo curto, e em 1929 eles já estavam prontos para publicar um artigo sobre o tema. Logo após o trabalho sobre M31, ainda em 1925, Hubble já estava fazendo progressos no estudo de pelo menos três galáxias: M81 (galáxia descoberta em 1774 pelo astrônomo alemão Johann Bode), M101 (conhecida como Galáxia do Catavento ou, em inglês, Pinwheel) e NGC 2403 (que havia sido descoberta em 1788 por William Herschel). Humason dedicou-se duramente à tarefa de obtenção de espectros dessas galáxias, o que se mostrou um trabalho realmente árduo. Para exemplificar, vejamos a mais difícil das galáxias analisadas: NGC 7619, uma galáxia espiral localizada na constelação do Pegasus. Na primeira tentativa, Humason fez uma exposição que durou nada menos que 33 horas, o que implicava em vários dias de trabalho duro. A observação só era possível utilizando-se os limites da tecnologia da época e muito esforço. Durante todo o processo o telescópio tinha que estar perfeitamente apontado para o objeto, o que exigia realinhar o telescópio a cada noite, para captar os raros fótons que chegavam da fraquíssima fonte, em um ambiente tedioso, solitário e frio. Mas a imagem não ficou boa o suficiente, e Humason acabou por fazer outra exposição, que durou 45 horas, como podemos ver em Bartuziak (2010, p. 232). Após a realização dessa tarefa hercúlea, temos que lembrar que captar o espectro era apenas a fase inicial do trabalho. Depois disso, Humason teria que passar várias horas analisando as linhas do espectro para poder medir o *redshift* de cada galáxia, o que também era uma tarefa bastante desafiadora, para dizer o mínimo. Após a medição, Humason encaminhava seus resultados a uma computadora, Elizabeth MacCormack, lembrando que Humason não tinha recebido uma formação em matemática como os outros astrônomos de Monte Wilson. No caso de NGC 7619, a velocidade radial estimada foi de 3.779 km/s, mais que o dobro da maior velocidade apurada por Vesto Slipher em seus estudos.

Ao término dessa etapa de trabalho, Hubble montou um gráfico onde no eixo horizontal se marcavam as distâncias das galáxias e no eixo vertical as velocidades radiais obtidas pelo deslocamento das linhas espectrais. Apesar de certa dispersão dos dados, uma clara tendência podia ser observada: Quanto mais distante estivesse uma galáxia, maior a sua velocidade de afastamento em relação ao observador. O que Hubble e Humason haviam descoberto é que o nosso universo estava se expandindo, assim como havia sido previsto nos modelos teóricos de Alexander Friedmann. Estava aberta uma nova época na história da astronomia, em que pela primeira vez tanto os desenvolvimentos teóricos como os observacionais tornavam possível a compreensão de todo o universo. Era o início de um novo ramo da astronomia: a cosmologia observacional.

O artigo final tem apenas seis páginas e é assinado só por Hubble, embora este faça menções às estimativas de velocidade radial obtidas por Humason. Ele comenta

que já haviam sido realizadas algumas tentativas de fazer a correlação entre distâncias de galáxias e suas velocidades radiais, chamando o próprio trabalho de “reexame”. O artigo apresenta a velocidade radial de 46 galáxias, mas apenas consegue estimar as distâncias de 24 destas, devido às dificuldades de observação de estrelas isoladas em sistemas tão distantes. A impossibilidade técnica da execução da avaliação de distância das galáxias aparentemente mais distantes, pois estas eram menos brilhantes e menores em tamanho angular do que as galáxias em que a medição foi possível, serve, no entanto, para reforçar a ideia de que as galáxias continuam a se afastar em velocidades cada vez maiores conforme aumenta a distância. O nome de Vesto Slipher não é citado no artigo, embora ele seja mencionado em textos posteriores de Hubble. Mas foi Slipher que descobriu as altas velocidades radiais das galáxias, em que se baseia todo o trabalho exposto no artigo. Além disso, apesar de Humason ter calculado os desvios das linhas espectrais a partir de espectros obtidos por ele, nada menos do que 28 desses *redshifts* haviam sido estimados anteriormente por Slipher com valores tão bons quanto os obtidos em Monte Wilson. Outro ponto interessante que aparece em muitos de seus escritos da época é que se pode perceber uma certa reserva de Hubble em aceitar os valores das velocidades radiais como um dado real. Muitas vezes estas eram descritas por ele como “velocidades radiais aparentes”. Por fim, no último parágrafo do trabalho, Hubble faz pequenos comentários sobre o fato de a correlação entre velocidade radial e distância das galáxias possivelmente representar uma manifestação do efeito de De Sitter, estando ligado dessa forma à curvatura do universo, e menciona novamente uma cosmologia de De Sitter, o que comprova o conhecimento de Hubble de parte do debate dos modelos cosmológicos baseados na relatividade de Einstein. Hubble, no entanto, não menciona Einstein nem Friedmann, este último provavelmente por desconhecer seu trabalho, pouco divulgado na época, mas que tanta relação tinha a descoberta.

Uma das implicações da descoberta de Hubble e Humason é a chamada Lei de Hubble, que implica em dois postulados. No primeiro admitimos que qualquer objeto celeste localizado a mais de 10 megaparsecs apresentará um *redshift*, a ser interpretado como uma velocidade radial de afastamento da Terra; o segundo é que esse *redshift* será proporcional à distância entre o objeto e a Terra. Na época isso não era muito conhecido, mas dois anos antes da publicação do artigo de Hubble e Humason, um astrônomo e padre católico belga chamado Georges Lemaître (ver figura 58) havia publicado em francês um artigo que antecipava essa descoberta, e inclusive fazia uma previsão do valor para a constante que seria proporcional à distância das galáxias. Esse artigo de Lemaître era baseado na relatividade de Einstein. Recentemente, a IAU reconheceu a validade do trabalho de Lemaître e recomendou que passemos a nos referir a esse fenômeno como Lei de Hubble-Lemaître.



Figura 58 - Georges Lemaître, primeiro astrônomo a publicar um artigo sobre a expansão do universo. Fonte: Wikimedia Commons.

Nos anos seguintes, Hubble dedicou muito de seu trabalho a montar um sistema de classificação de galáxias a partir de sua morfologia. O sistema possui uma forma de garfo, colocando as galáxias elípticas em um lado, com uma série de variações que ele classificou de E0 até E7; no ponto de convergência do diagrama há as galáxias lenticulares, de tipo S0; e do outro lado do diagrama, uma bifurcação, com, no lado superior, as galáxias espirais, divididas em três classes – Sa, Sb e Sc –, e no lado inferior as espirais barradas, divididas também em três classes – SBa, SBb e SBc. Esse sistema de classificação é largamente empregado em astronomia, embora não inclua galáxias irregulares e galáxias anãs (ver figura 59). Mais tarde um astrônomo francês chamado Gérard de Vaucouleurs ampliou a classificação, incluindo variações mais sutis, como a existência de anéis, criou uma categoria para galáxias com barras pouco pronunciadas e uma forma muito mais detalhada de classificação dos braços espirais. O sistema de De Vaucouleurs é tridimensional, diversamente do de Hubble, para poder compreender todas as variações entre os subtipos. Assim como o de Hubble, o sistema de De Vaucouleurs não abarca as galáxias irregulares nem as galáxias anãs, mas acaba por gerar um sistema de classificação que descreve os vários subtipos de uma forma muito mais detalhada.

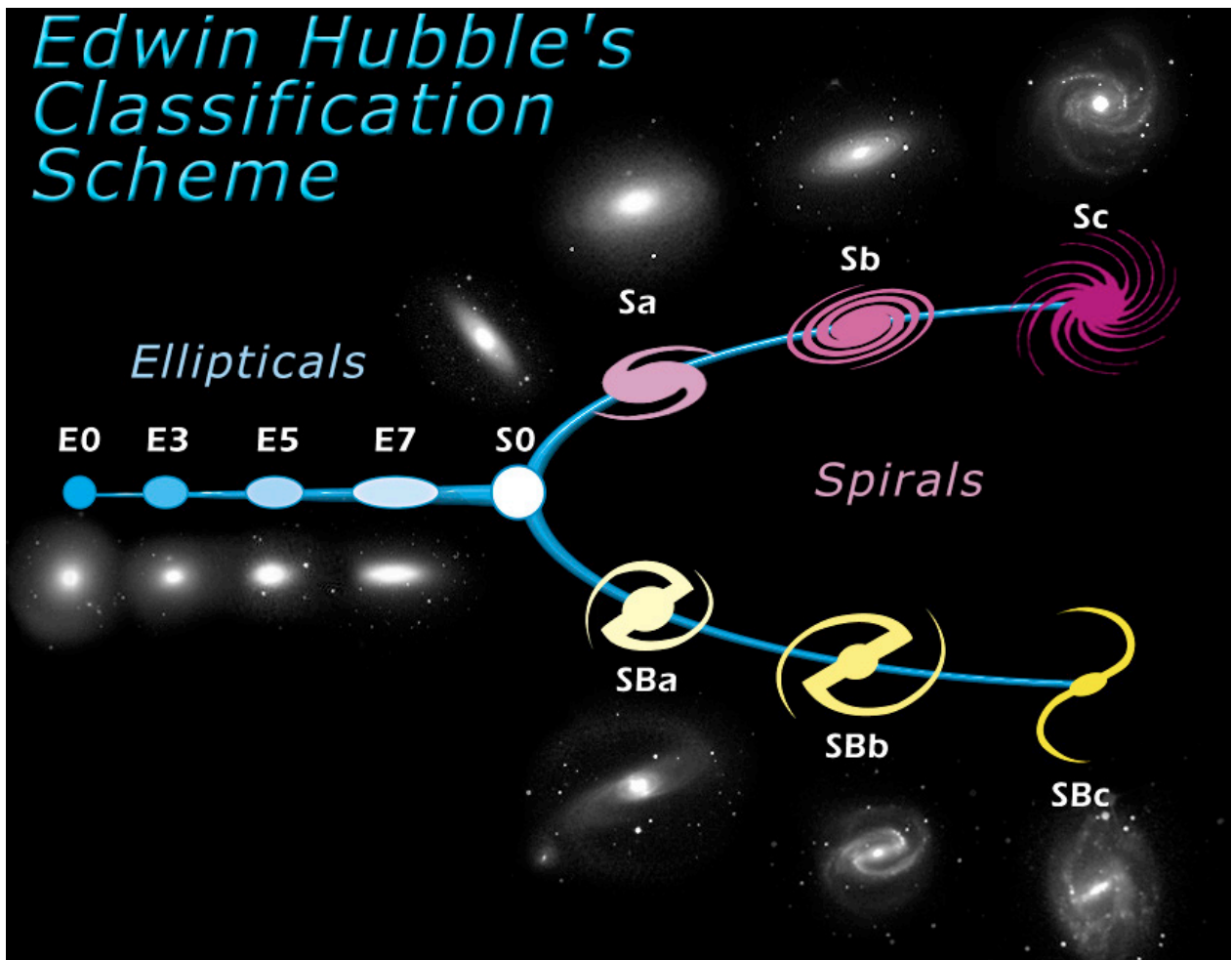


Figura 59 - Sistema de classificação de galáxias de Hubble: à esquerda vemos as galáxias elípticas, com suas várias divisões; no centro as galáxias lenticulares e à direita as galáxias espirais e espirais barradas, com suas subdivisões. Este diagrama não contempla galáxias irregulares nem galáxias anãs. Fonte: Wikimedia Commons.

Um outro sistema de classificação de galáxias, conhecido por Sistema Morgan ou Sistema Yerkes, foi desenvolvido por William Wilson Morgan, astrônomo de Chicago. Ele classifica as galáxias não apenas por suas características morfológicas, mas também pela classe espectral de suas estrelas mais representativas. Na classificação de Morgan cada galáxia era definida por entre duas e quatro letras e um número, da seguinte forma: a primeira designação, que podia ter uma ou duas letras minúsculas, indicava a classe espectral das estrelas principais da galáxia, a para galáxias com estrelas do tipo A, af para galáxias com estrelas dos tipos A e F. Na sequência teríamos uma letra maiúscula, às vezes acompanhada por uma minúscula, que denotava a forma da galáxia, como por exemplo B para espirais barradas, E para elípticas, S para espirais e Ep para elípticas com poeira. Por fim, um número de 1 a 7 indicava o grau de inclinação da galáxia em relação ao observador, com 1 para as galáxias do tipo *face-on* (vistas de frente) e 7 para galáxias *edge-on* (vistas de perfil). Como exemplo, a Galáxia de Andrômeda seria classificada como kS5, ou seja, com proeminência de estrelas do tipo K, espiral e com inclinação acentuada, próxima à visão de perfil. Morgan também criou o termo galáxia cD para designar gigantescas galáxias elípticas que são vistas apenas no centro de grandes aglomerados de galáxias. São as galáxias mais massivas conhecidas.

Posteriormente, em 1970, Morgan e a astrônoma Laura Bautz criaram um sistema de classificação para aglomerados de galáxias, que ficou conhecido como Sistema Bautz-Morgan. Nesse sistema, os mais densos aglomerados, aqueles que possuem galáxias do tipo cD (gigantes elípticas) em seu interior, são classificados como aglomerados tipo I.

No início dos anos 1930, dois astrônomos europeus vieram se juntar ao grupo de trabalho de Monte Wilson, o alemão Walter Baade e o búlgaro Fritz Zwicky. Ambos realizaram trabalhos muito importantes e foram os responsáveis pelas principais descobertas feitas no observatório nesse período.

Quando foi para os EUA, Walter Baade tinha bastante experiência e já havia realizado o feito de descobrir um asteroide: Hidalgo, que era o primeiro de uma nova classe chamada de Centauros, que cruzam os limites do cinturão de asteroides atravessando as órbitas dos planetas gasosos. Zwicky era formado na Politécnica de Zurique e havia feito pesquisas em diversas áreas. Juntos eles realizaram dois trabalhos que foram muito importantes na área de astronomia estelar. Um deles foi a compreensão de que havia dois tipos de novas. Primeiro, as novas que conhecíamos do sistema solar, que eram um tipo de fenômeno que ocorre em sistemas binários de estrelas que faz com que o brilho de uma delas aumente consideravelmente em um período. Esse fenômeno não destrói a estrela e em muitos casos uma mesma estrela pode passar por vários episódios em que se transforma em nova. Já o segundo caso eles descobriram que é um fenômeno diferente, muito mais energético, que eles batizaram de supernova, em que o brilho da estrela também aumenta de maneira considerável, mas devido a uma explosão, que vai terminar por destruir a estrela. Mais tarde se descobriu que existem dois tipos de supernova, um tipo que representa a morte de uma estrela de grande massa através de uma explosão e outro no qual uma estrela do tipo anã branca, que pertence a um sistema binário, fica instável e explode. Durante o curto período de observação de uma supernova ela chega a emitir tanta energia quanto uma galáxia inteira. O desconhecimento da existência das supernovas criou uma certa confusão observacional antes do cálculo de distância de M31 por Hubble. Algumas supernovas foram observadas em galáxias espirais e isso levou alguns astrônomos a admitirem erroneamente que estas estavam localizadas a

pouca distância, pois achavam que se tratava de uma nova, um fenômeno muito menos energético.

No caso de uma supernova causada pela explosão de uma estrela de alta massa, todas as camadas externas da estrela são ejetadas para o espaço, com exceção do núcleo, que, dependendo da massa, pode gerar um buraco negro ou – em casos em que a massa do objeto não for suficiente para isso – uma estrela de nêutrons. Esta foi justamente a segunda descoberta teórica importante feita por Zwicky e Baade. Os dois previram a existência de uma estrela na qual a ação da gravidade seria tão grande que todos os núcleos atômicos seriam comprimidos e acabariam por absorver todos os elétrons disponíveis, transformando todas as partículas em nêutrons. Algumas décadas depois elas foram detectadas observacionalmente.

Durante a Segunda Guerra Mundial, Walter Baade passou por uma situação inusitada. Como era alemão, não podia circular livremente pelas cidades, mas foi autorizado a permanecer no Observatório Monte Wilson, inclusive podendo trabalhar. No mesmo período, a maior parte dos astrônomos do observatório estavam envolvidos em atividades ligadas ao conflito. Hubble, por exemplo, estava colaborando com as forças armadas calculando a trajetória de tiros da artilharia. Então, os telescópios estavam relativamente ociosos. Além disso, a cidade de Los Angeles, que se localiza perto do observatório, ficava em blecaute durante as noites. Assim, Baade teve os melhores telescópios à disposição e um céu bastante escuro por anos, podendo trabalhar nos projetos que mais o interessassem.

Aproveitando essas circunstâncias especiais, Baade fez um trabalho muito importante observando galáxias espirais em detalhe. Ele percebeu que existiam dois tipos de populações de estrelas, com as estrelas localizadas no núcleo da galáxia sendo mais antigas que as estrelas do disco da galáxia, a região onde se localizam os braços espirais. Baade percebeu nessa análise que existem dois tipos de Cefeidas, o que permitiu que ele reavaliasse o trabalho de Hubble sobre a distância de M31. O que ele descobriu foi que na verdade a distância real da galáxia era aproximadamente o dobro da estimativa inicial de Hubble, ou seja, Andrômeda não estava localizada a 1 milhão de anos-luz, mas sim a 2,2 milhões de anos-luz, o que redimensionou todo o universo que conhecemos.

Fritz Zwicky também faria trabalhos importantes sem a colaboração de Baade. Utilizando a relatividade especial de Einstein ele previu a existência de lentes gravitacionais. Objetos de grande massa que se localizassem em posições específicas entre os observadores localizados na Terra e algum objeto mais distante poderiam deformar o espaço, desviando a luz emitida pelo objeto distante e funcionando como uma lente de aumento. O fenômeno poderia também criar imagens múltiplas de um mesmo objeto. Zwicky fez essa previsão em 1937, e a primeira lente gravitacional foi descoberta em 1979.

Outra descoberta incrível de Zwicky foi a existência da “matéria faltante”, que hoje chamamos de matéria escura. Zwicky observou alguns aglomerados de galáxias e resolveu estimar sua massa a partir do brilho que aparentavam, algo que podemos chamar de massa luminosa, pois é calculada a partir da luminosidade do objeto. Zwicky resolveu então calcular a massa necessária para manter esse conjunto de galáxias unido pela atração de gravidade. A diferença era enorme: para manter o aglomerado de galáxias unido, a quantidade de matéria necessária era cerca de dez vezes maior que a observada pelo brilho das galáxias. Havia algum tipo de matéria que não podíamos

observar, e isso levando-se em conta observações feitas em qualquer comprimento de onda (infravermelho, ultravioleta etc.). Apesar da forte comprovação observacional e teórica do trabalho, ele não atraiu muita atenção por décadas. Apenas em meados dos anos 1980, quando trabalhos sobre a rotação de galáxias começaram apontar o mesmo tipo de resultado, foi que essa matéria escura passou a ser considerada e estudada pela comunidade astronômica.

O sucesso do telescópio Hooker levou os astrônomos americanos a pensar em um instrumento ainda maior. O telescópio Hale, em Monte Palomar, foi um tremendo desafio tecnológico. A construção do seu imenso bloco de vidro foi muito mais complexa do que fora o de Monte Wilson. O diâmetro do espelho deveria ser de 200" (200 polegadas, ou 5 metros), o dobro do diâmetro do Hooker. O peso e o volume do bloco de vidro variam com o cubo do diâmetro. Ou seja, com o dobro do diâmetro, o peso (e o volume) do bloco de vidro deveria ser oito vezes maior. O bloco, construído pela empresa Corning, de Nova York, pesa 13 toneladas e foi feito com um tipo de vidro com baixo coeficiente de dilatação térmica, o Pyrex, essencial para lidar com as deformações causadas pelas diferenças de temperatura enfrentadas durante as observações durante o ano. A fábrica de Saint-Gobin, que havia enfrentado diversos problemas para fabricar o espelho do telescópio de Monte Wilson, obviamente recusou o projeto. A Corning foi tão cuidadosa na construção do bloco de vidro que montou um segundo bloco com 3,05 m de diâmetro apenas para testar o perfil do novo telescópio gigante. A montagem seria muito maior que a do Hooker, pelas dimensões do espelho, e apresentava um desenho muito mais avançado, com um pivô em forma de ferradura, que viabilizava a observação da região polar, algo impossível no Hooker de 100". Após uma série de contratemplos o telescópio iniciou suas atividades em 1949 (ver figura 60).



Figura 60 - Vista externa da cúpula do telescópio Hale, em Monte Palomar. Foto: Francisco Conte.

Após a construção do telescópio Hale em Monte Palomar, a astronomia passou por um período de algumas décadas em que muito poucos telescópios ópticos de grande porte foram criados. Uma série de razões pode justificar esse acontecimento, mas uma das principais está ligada a dois avanços técnicos muito importantes que aconteceram no período e que serão descritos nos próximos dois capítulos. Essas novas tecnologias acabaram por captar a maior parte dos recursos destinados à pesquisa astronômica, mas impulsionaram de maneira radical o conhecimento astronômico no século XX.

## CAPÍTULO 5

### Observando o invisível – Radioastronomia

O início do século XX marca uma mudança muito forte no modo de vida das pessoas, causada pela disseminação de novas tecnologias, como a iluminação e o motor elétricos, que permitiram o desenvolvimento de vários equipamentos domésticos, como as máquinas de lavar. Os fonógrafos e gramofones tornaram a música um acontecimento cotidiano, mas poucos inventos causaram um impacto tão grande como o rádio, que aproveitava o deslocamento das ondas eletromagnéticas de grandes comprimentos de onda para transmitir informações e diversão para todos. Logo começaram a surgir muitas empresas de radiodifusão em todo o mundo, e esse mercado permitiu o crescimento das empresas que inventavam, desenvolviam e fabricavam equipamentos radiofônicos.

A existência das ondas de rádio foi prevista em um trabalho do matemático e físico James Clerk Maxwell publicado em 1867. Maxwell havia percebido as propriedades ondulatórias da luz e as similaridades com relação a observações elétricas e magnéticas. O trabalho de Maxwell, hoje conhecido como equações de Maxwell, descreve a luz visível, o infravermelho e o ultravioleta como ondas eletromagnéticas que viajam pelo espaço (ver Apêndice 5 – Espectro eletromagnético). Em 1887, Heinrich Hertz comprovou a previsão de Maxwell gerando ondas de rádio em seu laboratório e demonstrando que elas possuíam as mesmas propriedades ondulatórias da luz, tais como difração, refração e polarização. Em 1895, o italiano Guglielmo Marconi utilizou pela primeira vez as ondas de rádio na comunicação, fazendo uma transmissão radiofônica através de seus transmissores e receptores. Nos primeiros anos após sua descoberta, as ondas de rádio eram chamadas de ondas hertzianas, mas por volta de 1912 o seu nome atual acabou se popularizando.

O desenvolvimento da radioastronomia teve início a partir de uma descoberta casual. No início dos anos 1930, os fabricantes de rádios enfrentavam um problema que comprometia o funcionamento dos aparelhos: a estática das transmissões radiofônicas, também conhecida pelo termo radiointerferência. Muitos esforços já haviam sido empreendidos para tentar minimizar seus efeitos, sem que algum progresso significativo fosse sentido. O mercado de aparelhos de rádio estava crescendo muito rapidamente, o que gerava quantias imensas de dinheiro. Os Laboratórios Bell passaram ao físico Karl Jansky, um de seus contratados, a missão de pesquisar a origem da estática em transmissões de rádio de ondas curtas, que prejudicava o desempenho dos instrumentos fabricados pela empresa. Jansky projetou e construiu uma antena receptora e direcional, que podia ser apontada para qualquer direção, utilizando para tanto quatro rodas do lendário Ford Modelo T. A antena tinha um diâmetro aproximado de 30 m e cerca de 7 m de altura, e foi construída com uma estrutura de madeira e tubos de latão. A intensidade dos sinais captados em cada direção podia ser medida por um aparato que foi instalado em um pequeno galpão ao lado da antena e registrava cada sinal detectado com um lápis em uma folha de papel, produzindo ao final de um período de observação um gráfico com as variações medidas. A antena captava sinais na frequência de 20,5 MHz (ver figura 61). Após um período inicial de observações, Jansky conseguiu distinguir três tipos principais de fontes de estática que poderiam interferir em sinais radiofônicos. Logo ficou claro que o primeiro grupo de sinais estava associado à ocorrência de tempestades próximas à



antena. Da mesma maneira, a origem do segundo grupo de sinais foi também claramente ligado à ocorrência de tempestades, mas quando ocorriam a distâncias maiores em relação à antena.

Restava ainda um terceiro tipo de estática de origem desconhecida, que causava um sinal de baixa intensidade e tinha um comportamento bastante distinto dos dois anteriores. Esse tipo de estática apresentava picos a cada 23 horas e 56 minutos, período idêntico ao do dia sideral da Terra, estando provavelmente relacionado com a

rotação de nosso planeta. Inicialmente Jansky pensou que a causa poderia ser o Sol, mas após alguns testes percebeu que esse pico de atividade estava associado ao momento em que a antena apontava na direção dos braços da Via Láctea. Jansky notou também que o sinal ficava mais forte quando a antena estava direcionada especificamente para a região de Sagitário, onde se encontra o centro da nossa galáxia. A publicação do artigo “Perturbações elétricas de origem aparentemente extraterrestre”, no qual Jansky descrevia seu trabalho, atraiu grande atenção da mídia, inclusive em uma reportagem do *New York Times*, em 1933. Jansky, no entanto, não aprofundou sua pesquisa, pois os Laboratórios Bell não demonstraram interesse em desenvolver uma investigação mais aprofundada na área. De qualquer maneira, o seu trabalho demonstrava claramente a possibilidade de observar o céu utilizando ondas de rádio.

Um elemento importante a considerar na radioastronomia é que o método de detecção de ondas de rádio é fundamentalmente diferente do utilizado na detecção da luz visível por nossos olhos, telescópios ou fotografia. Enquanto na luz visível o fóton atinge um elétron diretamente, como uma partícula, no caso das ondas de rádio o que é captado pelos detectores é a variação de fase do campo eletromagnético. A radiação incidente excita um campo alternado no detector, sendo detectada eletronicamente como uma voltagem de corrente alternada. Devido a essa forma diferente de detecção, na radioastronomia são utilizadas as propriedades ondulatórias dos fótons. A onda pode ser descrita por duas propriedades: a amplitude, que pode ser medida pela intensidade da onda, e a fase, que mede qual a parte da onda que está passando pelo detector em um dado momento, como pode ser visto em Smith (2007, p. 101). Através da radioastronomia é possível conseguir certos tipos de informação que não são obtidos de maneira usual na astronomia óptica.

Nos anos seguintes, poucos deram atenção à radioastronomia, com a exceção de Grote Reber (ver figura 62), então um astrônomo amador e radioamador, nascido em Wheaton, Illinois, que iniciou praticamente sozinho as pesquisas nessa área. Depois de ler o trabalho de Jansky



Figura 61 - Vista de uma réplica da antena desenvolvida por Karl Jansky, instalada no observatório de Green Bank. A original foi destruída. Fonte: Wikimedia Commons.



Figura 62 - Grote Heber, o primeiro radioastrônomo da história, realizou um grande levantamento de fontes de rádio no céu do Hemisfério Norte. Fonte: Wikimedia Commons.

e percebendo as possibilidades criadas por uma possível nova forma de fazer astronomia, ele decidiu criar um telescópio para observar na faixa do rádio. Reber projetou e ergueu uma antena receptora e direcionável, com um design muito mais avançado que a antena utilizada por Karl Jansky.

O radiotelescópio construído por Reber, na verdade o primeiro da história, foi instalado no quintal de sua casa, para surpresa de seus vizinhos, que especulavam qual a finalidade daquela enorme geringonça. A antena tinha um disco parabólico com diâmetro de 9 m e uma distância focal de 8 m, instalada em uma montagem alinhada com o meridiano, que possuía ajustes apenas para a altura, mas que permitia apontar o instrumento para todo o céu visível no local (ver figura 63). Essa montagem é muito similar ao desenho dos círculos meridianos, que na época eram utilizados em trabalhos de astrometria. Heber não apenas



Figura 63 - Foto de época da antena de Grote Heber, instalada no quintal de sua casa em Wheaton, Illinois. Fonte: Wikimedia Commons.

construiu o seu instrumento como arcou com todas as despesas envolvidas no processo. Inicialmente, a antena operava com um *receiver* que operava na faixa dos 3.300 MHz e comprimento de onda de 9 cm, mas não obteve sucesso no objetivo de captar sinais de fontes do espaço exterior. Ele instalou, então, um segundo instrumento que operava na faixa dos 900 MHz (com um comprimento de onda de 33 cm), que também não teve um desempenho aceitável. Finalmente, Reber utilizou um terceiro *receiver* que operava na faixa de 160 MHz e ondas com 1,87 m de comprimento, e que passou a funcionar a partir de 1938. Nesse momento, os resultados começaram a aparecer, confirmando a descoberta de Jansky. Um aspecto interessante da radioastronomia é que podem ser realizadas observações diurnas, pois nessa faixa do espectro eletromagnético o Sol não emite radiação suficiente para impossibilitar sua execução, ao contrário do que acontece com a luz visível, em que o Sol impede qualquer observação científica, excetuando-se obviamente observações do próprio Sol, com telescópios solares, ou de eclipses solares totais. Grote Reber, no entanto, preferia trabalhar nas madrugadas, após as duas horas da manhã, enquanto seus vizinhos dormiam, pois pequenas atividades cotidianas, como o simples fato de dar a partida em um carro nas imediações, podiam afetar as observações, criando um ruído indesejável. Durante um período de quase uma década Reber foi o único radioastrônomo do planeta, desenvolvendo técnicas de observação e acumulando resultados. Inicialmente ele deu prosseguimento ao estudo de fontes de rádio emitidas pela Via Láctea, mas também iniciou um meticuloso levantamento do céu

do hemisfério norte, encontrando importantes radiofontes, como Cassiopeia A e Cignus A. As observações de Reber começaram a indicar a existência de um número muito grande de fontes de baixa energia em comparação com as de alta energia, contrariando suas próprias expectativas.

O tamanho da antena de Reber é uma consequência direta do grande comprimento de onda que caracteriza as ondas de rádio, as maiores do espectro eletromagnético. A resolução angular de um instrumento astronômico é obtida pelo comprimento de onda observado dividido pelo diâmetro do instrumento que vai captar o sinal. O maior telescópio óptico da época, o Hooker, de Monte Wilson, tinha um diâmetro de 2,50 m, pequeno em relação à antena de 9 m de Reber, mas para obter uma resolução de imagem similar à do telescópio da Califórnia, para uma onda com comprimento de 30 cm, seria necessária uma antena com diâmetro aproximado de 2.000 km, um feito tecnicamente impraticável. Nas fases iniciais da radioastronomia, a resolução das imagens obtidas era muito limitada. Outro problema que acaba por comprometer a qualidade das observações em rádio, principalmente em algumas frequências específicas, é a crescente emissão de ondas por emissoras de rádio e televisão e outros sistemas de telecomunicação, da mesma forma que a crescente iluminação pública das cidades interfere cada vez mais nas observações de telescópios ópticos.

Outro aspecto interessante das ondas de rádio é que elas carregam quantidades de energia muito menores que a transportada pela luz visível ou nas faixas de menor comprimento de onda (ultravioleta, raios X e raios gama). A energia total provida de fontes externas ao sistema solar que é captada por todos os radiotelescópios da Terra é muito menor que a energia de um único floco de neve colidindo com o solo, como visto em Sagan (1982, p. 261).

A Segunda Guerra Mundial influenciou dramaticamente o mundo no final dos anos 1930 e na primeira metade dos anos 1940. Em muitos aspectos, a tragédia humana apresentava como contraponto um desenvolvimento tecnológico muito intenso em várias áreas, incluindo a medicina e o desenvolvimento da tecnologia do radar, sigla em inglês para *radio detection and ranging*, algo como detecção e acompanhamento de rádio. Um radar é basicamente um radiotelescópio que também emite sinais e espera a volta do sinal refletido em algum avião ou navio e estima a direção e distância do objeto. Muita pesquisa na área do radar foi desenvolvida durante o conflito, dos dois lados do Atlântico, e esse avanço logo traria resultados.

Em 1942, o físico inglês James Stanley Hey foi um dos vários cientistas britânicos convocados para colaborar com o esforço de guerra. Após um curso de seis semanas, ele acabou nomeado conselheiro militar na área de radar. Nos dias 27 e 28 de fevereiro, as transmissões de radar das forças aliadas ficaram quase inoperantes durante a maior parte do dia, por causa de intensas interferências na recepção dos sinais, impedindo o funcionamento das baterias antiaéreas e permitindo que navios alemães penetrassem pelo Canal da Mancha. A suspeita é que os alemães tivessem desenvolvido algum tipo de contramedidas para o sistema de radar. Após analisar alguns dados, Hey desconfiou que as interferências, que só ocorriam no período diurno, pudessem estar associadas à atividade solar. Ligou para o observatório de Greenwich e recebeu como resposta que o Sol nesses dias tinha passado por um período incomum de atividade, com o surgimento de

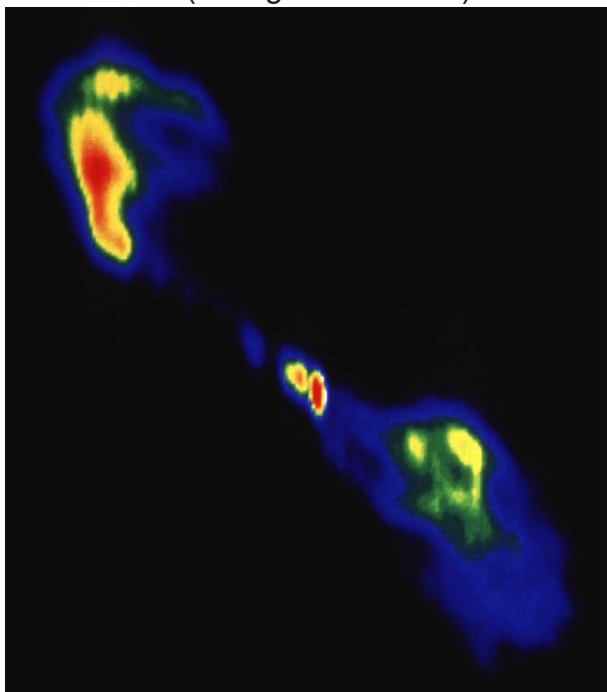
grandes manchas. Como físico, Hey sabia que, sob o efeito de um forte campo magnético, os elétrons livres podiam emitir ondas de rádio, o que poderia acontecer com o surgimento de manchas solares. Hey havia provado que o Sol também era uma radiofonte, embora essa informação fosse mantida como segredo militar até o fim do conflito. Posteriormente, naquele e no ano seguinte, tanto Grote Heber como o físico George Clark Southworth, que trabalhava nos laboratórios da Bell Telephone, descobriram independentemente o mesmo fenômeno.

O final da Segunda Guerra representou o encerramento da era solitária da radioastronomia. Em pouco tempo, astrônomos de várias partes do globo começaram a se dedicar a essa nova janela de visualização do universo. Um dos primeiros problemas era entender que tipo de fenômeno físico estava atuando nas primeiras fontes detectadas. Em uma reunião do grupo de astronomia do Observatório de Leiden, na Holanda, um jovem astrônomo, Hendrik Christoffel van de Hulst, previu que átomos de hidrogênio interestelar deveriam emitir ondas de rádio no comprimento de 21 cm, sugerindo aos colegas tentar observar nessa faixa do espectro eletromagnético. Essa previsão traria uma série de bons desdobramentos para o desenvolvimento da radioastronomia.

Já vimos anteriormente que o radar é um instrumento muito similar a um radiotelescópio, com a diferença de que o radar emite e capta ondas de rádio, ao passo que o radiotelescópio apenas recebe as ondas. Mas será que é possível utilizar um radar para fazer astronomia? A resposta é sim. Pouco depois do final da Segunda Guerra Mundial, Sir Bernard Lovell, que seria um dos grandes desenvolvedores da radioastronomia, percebeu que havia uma grande coincidência entre alguns sinais captados em radares e meteoros observados visualmente. Ele organizou um experimento fazendo a triangulação de estações de radar localizadas em Surrey, Kent e Suffolk, comprovando a eficácia do método. Em 1946, o físico húngaro Zoltán Lajos Bay mandou um feixe de micro-ondas para a Lua e conseguiu detectar seu retorno após refletir-se na superfície do satélite – um evento que muitos consideram o início da astronomia de radar. Uma equipe do corpo de sinaleiros do exército americano, de maneira independente e quase simultânea, realizou uma experiência idêntica, utilizando um equipamento mais poderoso e obtendo resultados ainda mais claros.

Uma das primeiras técnicas de observação em rádio que visavam melhorar a resolução dos detectores foi a da ocultação. Durante um eclipse solar, parcial ou total, utilizava-se uma antena para observar as áreas não eclipsadas do Sol e media-se a variação de radiação a cada segundo do período observado. Os primeiros a utilizar essa técnica foram Robert Dicke e R. Beringer, de Princeton, em um eclipse em 9 de julho de 1945. No ano seguinte, no eclipse de 23 de novembro, o canadense A. E. Covington também foi bem-sucedido na observação. Em 1947, durante o eclipse de 20 de maio, que durou extensos 5,2 minutos, os astrônomos russos S. Khaikin e B. Chikhachev obtiveram sucesso ao observar o evento no deque de um navio, na costa brasileira. Durante a fase de ocultação total foi possível registrar pulsações de rádio provenientes da coroa solar. No ano seguinte, W. N. Christiansen, D. E. Yabsley e B. Y. Mills repetiram o procedimento em um eclipse na costa australiana, em 1º de novembro. A técnica era eficiente, mas infelizmente não era aplicável no cotidiano, podendo ser realizada uma ou duas vezes por ano e normalmente em locais afastados, o que na prática limitava a instrumentação a equipamentos portáteis.

Outro aspecto que diferencia a prática da radioastronomia da astronomia no visível é o tipo de instrumentos de pesquisa utilizados. No visível temos dois tipos básicos de telescópios, o refrator e o refletor, sendo que, no início do século XX, estávamos presenciando o início da era dos telescópios refletores. Na radioastronomia, vamos encontrar uma extensa variedade de instrumentos: temos os discos parabólicos, como o instrumento de Grote Reber, que lembram muito o desenho dos telescópios refletores, mas também antenas do tipo dipolo, espinha de peixe e outros menos usuais, incluindo sistemas de múltiplas antenas, que comentaremos mais à frente. Além disso, ao observarmos um objeto astronômico em rádio e compararmos com o que é observado no óptico, algumas vezes veremos cenários totalmente diferentes, pois fenômenos diferentes são mais perceptíveis em um ou no outro. Um exemplo muito claro dessa situação é a galáxia Centaurus A: no óptico observamos a forma da galáxia elíptica bloqueada parcialmente por uma faixa de poeira, ao passo que no rádio visualizamos principalmente dois jatos colimados de partículas perpendiculares ao eixo galáctico ejetados pelo seu núcleo ativo (ver figuras 64 e 65).



Figuras 64 e 65 - Centaurus A. A imagem da esquerda foi feita em rádio, pelo VLA, em 1980. A imagem da direita foi feita no visível pelo astrofotógrafo Carlos Palhares, em 2019. As duas imagens mostram exatamente o mesmo campo, mas são completamente diferentes. No visível observamos o bojo da galáxia, poeira e estrelas em primeiro plano; no rádio observamos apenas o jato de matéria emitido pelo núcleo da galáxia. Fonte da figura 64: Wikimedia Commons. Figura 65: foto de Carlos Palhares, com corte e alinhamento feitos por Francisco Conte.

Diferentemente de um telescópio óptico, onde se observa um campo inteiro com várias estrelas e galáxias ao mesmo tempo, por exemplo, um radiotelescópio só consegue captar uma pequena área pontual, como um único pixel da imagem por vez. Isso torna a operação de um radiotelescópio muito diferente de um telescópio tradicional. O radiotelescópio pode fazer dois tipos de observação: objetos pontuais ou um campo. Observações pontuais são simples de fazer, bastando apontar o instrumento para o objeto e fazer as medições de intensidade. Podem ser feitas várias medições de um objeto em pequenos

intervalos de tempo, dependendo da sensibilidade do radiotelescópio e da intensidade do sinal emitido pela fonte. Essa característica permitiu a descoberta de fontes de rádio que variavam sua emissão em intervalos de tempo frequentemente muito pequenos.

A observação de um campo é muito mais trabalhosa, sendo necessário um procedimento mais meticuloso para sua execução. Vamos ver um exemplo: inicia-se a imagem fazendo uma medição em um dos cantos do campo, por exemplo o canto superior esquerdo. Depois, mantendo-se o alinhamento com a borda do campo, faz-se uma medição do ponto imediatamente ao lado, à direita, e assim sucessivamente até chegar ao fim da linha, no canto superior direito do campo. Em seguida aponta-se o telescópio para o ponto imediatamente abaixo desse, rente à borda do campo, e faz-se outra medição, em seguida a medição do ponto imediatamente à esquerda do anterior, continuando o processo até chegar novamente à borda da esquerda do campo, fechando a segunda linha. A observação segue nesse zigue-zague até completar a medição do campo inteiro. Normalmente, ao término desse processo se repete o procedimento de esquadriñar toda a área do campo, mas dessa vez na vertical. Esse mecanismo de observação será repetido até que se consiga um resultado satisfatório. Quando toda a aquisição de dados se completa, somam-se os resultados das várias medições em cada ponto, seguindo sua distribuição espacial, montando-se um gráfico com as intensidades de cada ponto do campo observado. Em seguida são unidos os pontos de mesma intensidade como em um mapa de topografia, podendo-se atribuir cores às áreas delimitadas pelas linhas de mesma intensidade. O aspecto final se apresenta como uma imagem do campo. Em alguns instrumentos o nível de detalhamento é tão grande que as imagens obtidas se assemelham a uma fotografia (ver figura 66).

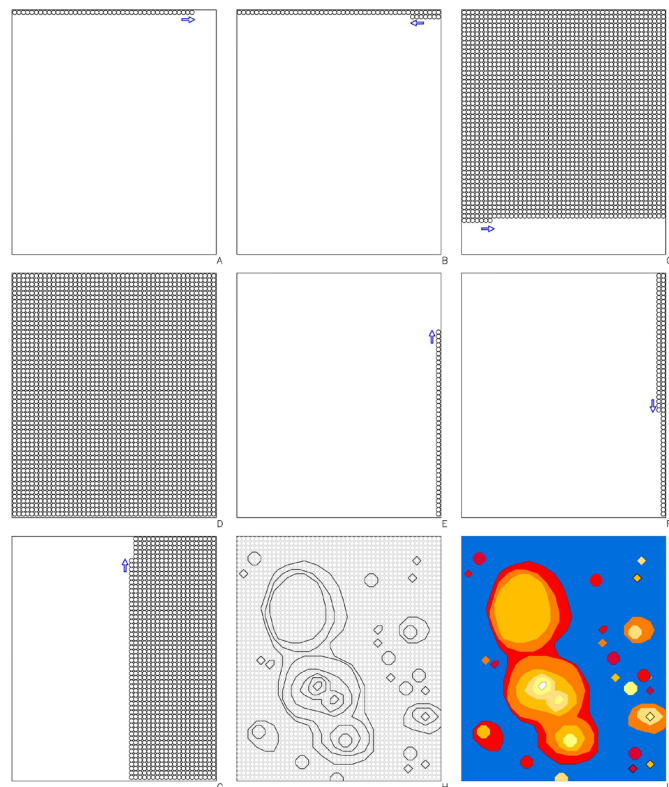


Figura 66 - Como fazer uma observação de campo em radioastronomia. O observador tem que fazer imagens de todos os pontos do campo, no exemplo primeiramente na horizontal, ponto por ponto, seguindo as linhas em zigue-zague até cobrir toda a imagem (A até D). Repetir o processo na vertical, tantas vezes quantas necessárias (E até G). Cada ponto dos gráficos superiores equivale a uma medição. Ao término da observação é montado um gráfico com a intensidade de sinal de cada um dos pontos do campo (H). Ligam-se os pontos de mesma intensidade. Por fim, podem-se colorir as áreas demarcadas, obtendo-se uma imagem do campo (I). Desenho: Francisco Conte.

Sir Bernard Lovell, que havia iniciado seus trabalhos em radioastronomia pesquisando meteoros através da técnica de radar, resolveu aprofundar seus estudos construindo um novo instrumento em um local remoto, uma fazenda chamada Jodrell Bank, mais apropriada para suas pesquisas. Em 1947, Lovell e seu assistente John Clegg construíram uma antena de

grandes dimensões: utilizando fios de ferro montaram uma grande estrutura parabolóide, horizontal, com um diâmetro de 66 m, bordas que atingiam mais de 7 m e a antena central com 38 m de altura. Era o mais potente radiotelescópio de seu tempo, embora fosse um instrumento fixo, que apenas podia observar o zênite, o que limitava muito a sua atuação. De qualquer forma, esse instrumento acabou observando sinais dos restos da supernova de Tycho e também sinais provenientes da Galáxia de Andrômeda, um dos primeiros a serem detectados de uma fonte extragalática em rádio.

Os resultados obtidos, no entanto, incentivaram Lovell a tentar construir um radiotelescópio ainda mais poderoso e que fosse direcional, para poder observar o céu inteiro do hemisfério norte. Na busca por apoio das universidades e por verbas, Lovell argumentava que um grande radiotelescópio permitiria que o Reino Unido readquirisse a liderança que sempre teve no campo da astronomia, mas que havia sido perdida com os grandes telescópios dos observatórios das montanhas nos Estados Unidos. Com esse forte argumento em mãos, ele conseguiu o apoio inicial para a construção de seu projeto, embora a conclusão dos trabalhos ainda demorasse vários anos, com vários percalços e estouros de orçamento durante todo o processo.

O telescópio Mark I, ou como é mais conhecido atualmente Telescópio Lovell, foi um prodígio de engenharia para a época: 76,2 m de diâmetro, instalados em uma robusta montagem metálica que permite o apontamento em qualquer direção, o que acabou se tornando um padrão para a maioria dos instrumentos importantes construídos depois dele (ver figura 67).



Figura 67 - O primeiro radiotelescópio gigante do mundo: o Mark I, de Jodrell Bank, na Inglaterra. Foto: Francisco Conte.

Em 1957, o orçamento havia estourado, e muito, e o instrumento ainda não tinha sido completamente finalizado. Seu criador, Lovell, atravessava um período muito difícil, acumulando dívidas e sem recursos para a conclusão do radiotelescópio, quando um acontecimento inesperado, que vai ser analisado com mais profundidade no próximo capítulo, surpreendeu o mundo: o lançamento do primeiro satélite artificial, o Sputnik I. Bastou uma entrevista com Lovell, na qual ele declarava que o grande radiotelescópio de Jodrell Bank havia conseguido não apenas detectar os sinais do Sputnik, como também acompanhar o seu percurso orbital, ser publicada em um jornal inglês para a opinião pública encarar a captura dos sinais como um grande feito da Inglaterra. De um momento para o outro, o grupo de Jodrell Bank passou de vilão a herói e o telescópio adquiriu grande popularidade, tornando possível a obtenção de novas verbas para completar a construção do instrumento, que entrou em plena operação (Capozzoli, 2005, p. 67).

A capacidade de acompanhar satélites do telescópio de Jodrell Bank foi muito utilizada nos primeiros anos da corrida espacial. Ele acompanhou tanto naves soviéticas quanto americanas, sendo em muitos casos o único instrumento do mundo capaz de realizar esse feito. Em 1960, o radiotelescópio enviou comandos para o satélite americano Pioneer 5, incluindo um comando para o satélite fazer o desacoplamento de seu lançador. Em fevereiro de 1966, foi solicitado pelos soviéticos que o telescópio acompanhasse o satélite Luna 9, que pousaria na superfície da Lua. O instrumento foi capaz de receber as imagens enviadas por fac-símile, o que permitiu que os jornais ingleses publicassem as imagens antes mesmo que os soviéticos as recebessem.

Além de rastrear satélites, o radiotelescópio de Jodrell Bank utilizava boa parte de seu tempo de funcionamento para pesquisas científicas. Em seus primeiros trabalhos, eles utilizaram a técnica de radar para calcular as distâncias até a Lua e até Vênus.

As primeiras experiências em radioastronomia realizadas no Brasil foram feitas no IAG em São Paulo, em 1957, quando Hélio Guerra Vieira e Luiz de Queiroz Orsini, utilizando um receptor de rádio, conseguiram captar sinais emitidos pelo satélite Sputnik 1, como descrito em Capozzoli (2005, p. 200). O primeiro radiotelescópio construído no Brasil foi feito pelo professor universitário Pierre Kauffman e um grupo de astrônomos amadores, a AAASP (Associação dos Amigos da Astronomia de São Paulo), que frequentava o Planetário Municipal e a Escola Municipal de Astrofísica. Iniciado no ano de 1959 e contando com a colaboração de uma verba da prefeitura municipal, complementada por doações dos próprios membros, o grupo construiu, dentro do Parque do Ibirapuera, às margens do lago, uma antena de grande porte, composta por cabos, arames e estrutura metálica. O instrumento foi inaugurado no dia do aniversário da cidade, em 25 de janeiro de 1962. O aparelho, no entanto, começou a operar apenas três meses depois. Após um curto período de funcionamento, a instalação foi destruída por um grupo de burros pertencentes à prefeitura municipal e que se alimentavam nas áreas gramadas do parque (Capozzoli, 2005 p. 209). Nos anos seguintes, o grupo da AAASP ainda conseguiu construir e operar dois instrumentos de menor porte.

Após a construção da grande antena de Jodrell Bank, vários países começaram a instalar instrumentos de grande porte, como a antena de Parkes, na Austrália, com 64 m de diâmetro, que começou a operar em 1961 (ver figura 68). Em 1963, passou



a funcionar a gigantesca antena de 300 m de diâmetro de Arecibo, em Porto Rico, que, embora não fosse amplamente direcionável, por décadas se manteve como o maior radiotelescópio do mundo (ver figura 69). Ainda em 1963, começou a operar o radiotelescópio apelidado de Big Ear (grande orelha), da Universidade do Estado de Ohio, uma gigantesca estrutura apoiada no solo, em forma retangular, que tinha uma sensibilidade de observação similar à de uma antena parabólica com 56 m de diâmetro. Em 1966, o Canadá construiu a antena parabólica do Observatório de Algonquin, com 46 m de diâmetro. Vários outros equipamentos foram criados ao redor do mundo, pois a maior parte dos investimentos em instrumentos na área de astronomia era destinada à construção de radiotelescópios.

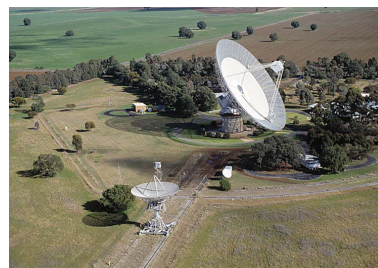


Figura 68 - O rádio-observatório de Parkes, na Austrália. Foto: John Sarkissian. Fonte: Wikimedia.



Figura 69 - A antena de 300 m de diâmetro do observatório de Arecibo, em Porto Rico. Fonte: Wikimedia Commons.

No início dos anos 1960, equipes de radioastrônomos utilizando técnicas de radar conseguiram, pela primeira vez, estimar o período de rotação dos planetas Vênus e Mercúrio. Esse feito era impossível com base em observações no comprimento da luz visível, porque a atmosfera de Vênus impedia a observação de qualquer detalhe de sua superfície e é muito difícil obter imagens da superfície do planeta Mercúrio devido à sua proximidade com o Sol. Mercúrio tem um dia extremamente longo, equivalente a 58,7 dias terrestres, mais da metade da duração de um ano do planeta, que dura 88 dias. Com

Vênus aconteceu algo ainda mais surpreendente: primeiro se descobriu que sua rotação era reversa em relação à dos outros planetas e depois que o seu dia, que durava 243,1 dias terrestres, era maior que o seu ano, que corresponde a apenas 224,7 dias terrestres.

O desenvolvimento da radioastronomia levou a uma série de descobertas muito importantes, que alteraram o rumo da história da astronomia.

A primeira delas aconteceu no início dos anos 1960. Durante a década de 1950, a Universidade de Harvard realizou um programa de busca de fontes de rádio, com a subsequente publicação de um catálogo. Algumas das fontes pontuais encontradas, aparentemente, não possuíam um objeto correspondente observado no visível. Em 1958, Allan Sandage e Thomas A. Mathews conseguiram associar uma dessas fontes, a 3C48 (o quadragésimo oitavo objeto do terceiro catálogo de fontes de rádio de Harvard), a um objeto que se assemelhava a uma pálida estrela azul. Outros astrônomos obtiveram um espectro do objeto, que apresentava um conjunto anômalo de linhas de emissão, sem correspondência com outros espectros estelares.

Em 1962, dois astrônomos trabalhando no radiotelescópio Parkes, na Austrália, John Bolton e Cyril Hazard, junto com Maarten Schmidt, que trabalhava no Telescópio Hale, no Monte Palomar, conseguiram associar outro objeto aparentemente estelar à fonte de rádio 3C273 (o objeto de número 273 do terceiro catálogo de Harvard). Nos dias seguintes a essa descoberta, Schmidt obteve o espectro do objeto, que, assim como 3C48, apresentava linhas de emissão intensas. Maarten Schmidt, no entanto, conseguiu associar essas linhas às de hidrogênio com um enorme desvio para o vermelho, da ordem de 15,8%. O objeto não era uma estrela e estava localizado a uma distância imensa, similar à das mais distantes galáxias conhecidas até então, e portanto deveria ter uma energia imensa. Foi dado a esses objetos o nome “quasar”, uma abreviação de *quasi-stellar object*, e hoje sabemos que são os núcleos ativos de galáxias muito distantes.

A descoberta dos quasares era muito surpreendente. Eram objetos relativamente pequenos, talvez do tamanho do sistema solar, mas com uma energia imensa, maior que toda a energia produzida por uma galáxia como a nossa. De onde viria tamanha quantidade de energia? Por que não observamos um quasar em nossa vizinhança? Hoje acreditamos que os quasares são formados por buracos negros supermassivos, localizados no centro das galáxias, que estão sugando enormes quantidades de matéria orbitando suas proximidades, em um processo que libera quantidades imensas de energia. Com o tempo esses buracos negros acabam por consumir toda a matéria disponível à sua volta, o que explica a pequena quantidade desses objetos em nossa proximidade. Essa é a razão de que normalmente avistamos estes objetos a grandes distâncias, o que significa que eram mais comuns no passado, nas fases iniciais da evolução do universo. Outros objetos similares foram descobertos posteriormente, como os BL Lacs, que eram provocados por processos semelhantes. Apenas para ilustrar a sensibilidade de nossos detectores, a energia captada por um radiotelescópio proveniente de um quasar distante é de aproximadamente um quadrilionésimo de watt, como visto em Sagan (1982, p. 261).

Invertendo um pouco a ordem cronológica, vamos ver primeiro a terceira grande descoberta: em 1967, a estudante de astronomia Jocelyn Bell (hoje Jocelyn Bell Burnell) e seu orientador Antony Hewish descobriram que a fonte de rádio PSR B1919+21

apresentava uma variação regular de intensidade, como uma pulsação, a cada 1,3373 segundo. Inicialmente acreditaram se tratar de algum ruído, em seguida chegaram a aventar a possibilidade de algum sinal emitido por uma civilização extraterrestre e como brincadeira chegaram a cogitar o nome para o objeto de LGM 1, de *Little Green Men 1* (pequenos homens verdes 1), mas depois encontraram outros objetos que se comportavam da mesma forma. Os objetos foram batizados de pulsares, devido à sua variação regular de brilho. Finalmente a explicação foi encontrada em um objeto que já havia sido previsto décadas antes dessa detecção: essas fontes eram estrelas de nêutrons.

Em uma conferência em dezembro de 1933, apenas dois anos após a descoberta dos nêutrons por James Chadwick, os astrônomos Walter Baade e Fritz Zwicky propuseram a existência das estrelas de nêutrons como objetos criados a partir de explosões de supernovas, o fim das estrelas de grande massa. Após sair da sequência principal, onde o hidrogênio é transformado em hélio no núcleo da estrela, esta passa a transformar hélio em carbono, nitrogênio e oxigênio, produzindo, sucessivamente, elementos cada vez mais pesados, até que o núcleo da estrela passe a ser composto exclusivamente de ferro, momento no qual os processos nucleares se acabam. Em poucos segundos toda a estrela colapsa em direção ao seu núcleo, dominada pela força gravitacional. Ocorre então uma explosão de supernova (SN), que vai lançar ao espaço toda a camada externa da estrela, com exceção do seu núcleo, agora inerte. Este vai colapsar sobre si mesmo, restando uma estrela de nêutrons ou um buraco negro, dependendo da massa remanescente.

No caso dos buracos negros, a atração gravitacional é tão grande que nada vai conter seu colapso. Sua atração gravitacional vai ser tão alta que nem mesmo a luz vai ser capaz de escapar. Porém, se não temos no núcleo remanescente da SN massa suficiente para gerar um buraco negro, vamos ter a formação de uma estrela de nêutrons.

No caso das estrelas de nêutrons a pressão gravitacional é tão grande que os elétrons da eletrosfera são comprimidos até se fundirem aos núcleos atômicos, transformando os prótons em nêutrons. E a pressão de degenerescência dos nêutrons, ou seja, a pressão que cada nêutron causa aos seus vizinhos, é que vai impedir que os restos da estrela se transformem em um buraco negro. Estrelas de nêutrons vão ter entre pouco mais de uma até pouco mais de duas massas solares, dependendo de algumas variáveis, como rotação e campo magnético. Toda essa massa é comprimida em um raio da ordem de apenas 10 a 12 km. Isso vai fazer com que estrelas de nêutrons possuam densidades da ordem de  $3,7$  a  $5,9 \times 10^{17}$  kg/cm<sup>3</sup>, o que faz um volume de uma colher de chá de seu material pesar algo como 900 vezes a massa da grande Pirâmide de Gizé. São objetos extremamente quentes, com temperaturas da ordem de  $10^{11}$  a  $10^{12}$  K logo após sua formação, mas que rapidamente decaem para  $10^6$  K, com a maior parte de sua energia sendo emitida na faixa dos raios X. Estrelas de nêutrons possuem campos magnéticos extremamente fortes e um período de rotação muito rápido, que varia entre alguns segundos e milésimos de segundos, velocidade que regularmente vai decrescendo.

A maior parte das estrelas de nêutrons também emite em rádio. E, na maioria dos casos, seus polos magnéticos, através dos quais é emitida a maior parte de sua luz visível

e também das ondas de rádio, normalmente não coincide com o seu eixo de rotação. Caso um observador distante esteja em uma posição favorável, observará um evento de aumento de brilho em cada rotação por um pequeno período de tempo, quando o polo magnético do pulsar estiver apontando diretamente para ele. Durante o resto do período de rotação esse polo magnético estará apontando para outras direções e o observador perceberá uma queda no brilho. Dessa forma são observados os pulsares. Todo pulsar é uma estrela de nêutrons.

Essas duas descobertas relacionadas, pulsares e estrelas de nêutrons, surpreenderam a comunidade astronômica internacional, demonstrando a todos que o universo era mais complexo do que acreditávamos. Mas a década de 1960 ainda nos deu outra descoberta bombástica, e para entendermos sua importância é bom fazermos uma volta no tempo.

A descoberta de Hubble e Lemaître de que nosso universo estava se expandindo levou os astrônomos a uma reflexão: se voltássemos no tempo veríamos um universo cada vez menor. Se voltássemos o suficiente ele acabaria por se juntar em um único ponto, que poderíamos considerar o início do universo. Esse raciocínio acabou levando ao que costumamos chamar de a teoria do Big Bang.

Muitos astrônomos e físicos achavam essa hipótese pouco satisfatória. Isso significava que o universo deveria ter um começo e que estava passando por transformações o tempo todo, o que parecia contradizer nossos sentidos e conhecimento, pois ele aparentava ser estático e eterno. Aos poucos alguns grupos começaram a propor soluções para o problema. Uma das propostas acabou por ganhar grande popularidade entre os cientistas e se chamava teoria do estado estacionário. Nessa proposição, o universo sempre existiu e está se expandindo, mas, à medida que se expande, mais matéria é criada. Assim, o universo seria eterno e manteria sempre a mesma aparência para um observador, não importando a época em que a observação fosse realizada. Sei que o leitor vai provavelmente argumentar que a criação de matéria do nada é um conceito meio estranho, mas a quantidade de matéria que deveria ser criada era muito pequena, como alguns átomos a cada ano em um volume imenso de espaço, algo realmente imperceptível. Além do mais, em algum momento do universo a matéria foi criada, então por que não a cada momento? De qualquer forma, essa proposição ganhou muitos adeptos dentro da comunidade científica e vamos chegar à segunda metade do século XX com um grande debate entre o Big Bang e o estado estacionário.

Durante os anos de 1940 e 1950, o russo George Gamow e seus dois principais colaboradores, Ralph Alpher e Robert Herman, publicaram uma série de artigos teóricos que analisavam o universo em expansão originário a partir de um Big Bang. Em um desses trabalhos, eles demonstravam como teriam surgido os primeiros elementos químicos do universo: hidrogênio e hélio. Os outros elementos foram produzidos em um momento posterior, principalmente no interior das estrelas, como pode ser visto no artigo de 1947 escrito pelo casal Burbidge (Geoffrey e Margaret), William Fowler e Fred Hoyle. Esse artigo ficou conhecido na astronomia como F<sup>2</sup>BH. Em outro artigo do grupo de Gamow foi feita uma previsão de que, se realmente o universo tivesse se desenvolvido a partir de um ponto mínimo, deveria existir uma radiação remanescente do momento em que ele teria deixado de ser dominado pela energia, entrando numa era de domínio da matéria.

Esse momento da evolução cosmológica teria acontecido cerca de 300 mil anos depois do início do universo e seu resultado poderia ser observado através de uma radiação na faixa de micro-ondas, que deveria existir em todo o universo, não importando em que direção o observador fizesse a sua medição. No cálculo inicial, eles estimaram que essa radiação equivaleria ao nosso universo apresentar uma temperatura cerca de 7 graus acima do zero absoluto (que corresponde a  $-273^{\circ}\text{C}$ ), ou à temperatura de 7 K.

Na década de 1960, um grupo de astrônomos da Universidade de Princeton, aparentemente sem conhecer o trabalho da equipe de Gamow, tinha chegado a conclusões semelhantes e estava construindo um equipamento que pudesse tentar detectar essa radiação remanescente do Big Bang.

Na mesma época, Arno Penzias e Robert Wilson trabalhavam para os Laboratórios Bell (assim como Karl Jansky). Eles estavam em início de carreira e receberam uma missão interessante: uma antena de rádio, que havia sido utilizada para rastreamento e acompanhamento de satélites, tinha sido substituída por equipamentos mais modernos e estava ociosa. Alguém da diretoria acreditava que a antena tinha potencial para ser utilizada de outras maneiras, como a radioastronomia. A missão da dupla seria tentar adaptar o valioso equipamento para essa função (ver figura 70).

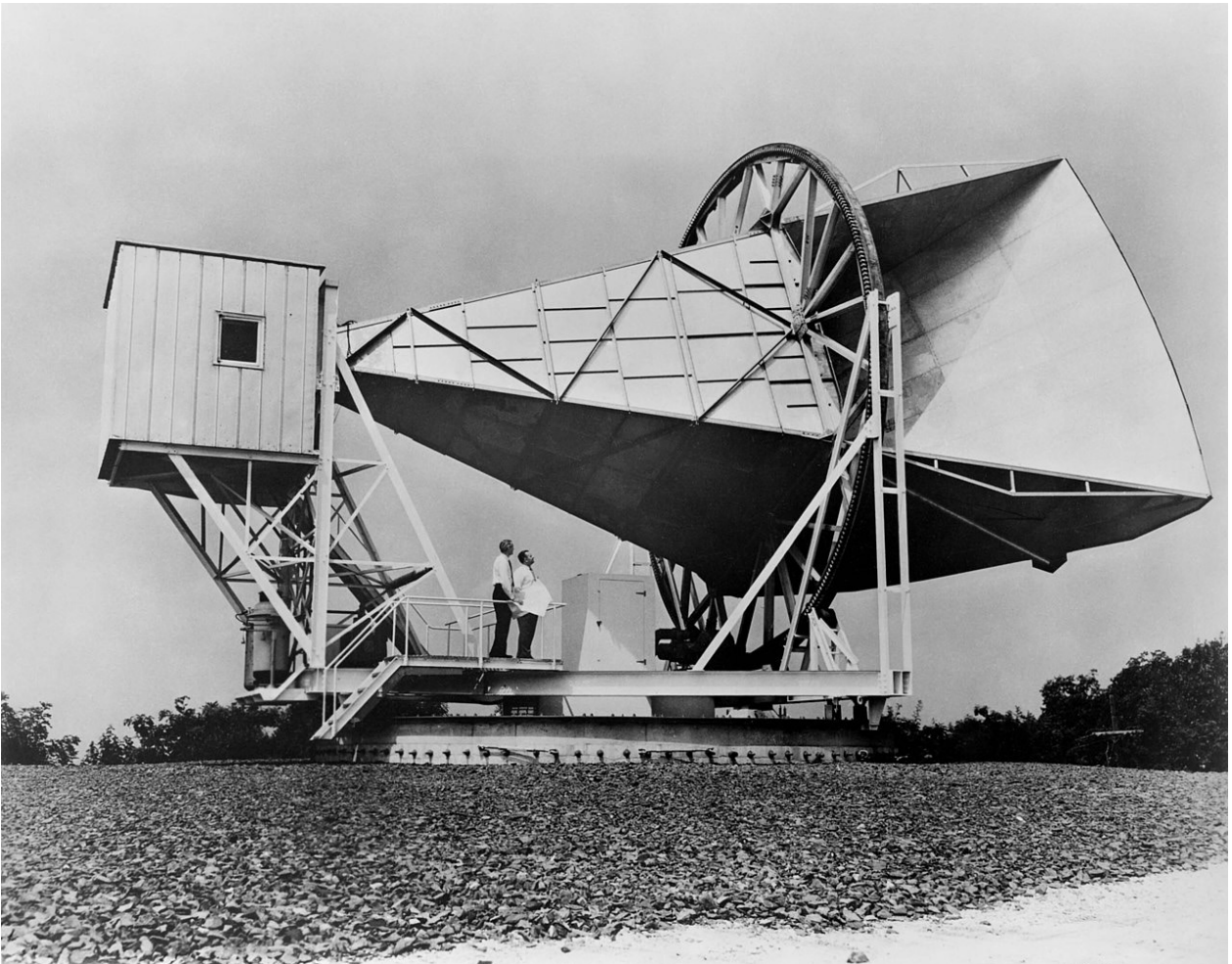


Figura 70 - A antena utilizada por Arno Penzias e Robert Wilson ao descobrir a radiação cósmica de fundo de microondas. Fonte: Wikimedia Commons.

Os dois começaram a trabalhar na manutenção da antena e a testar suas capacidades. O equipamento tinha uma sensibilidade muito apurada para a medição de fontes pontuais, o que seria ótimo para realizar observações em campos com muitas fontes próximas, que poderiam ser facilmente separadas, sem que as emissões de uma fonte se confundissem com as de outras.

Mas a dupla encontrou um problema: não importava a direção para que apontassem a antena, havia sempre um fraco sinal que interferia na observação. Esse fraco sinal indicava uma temperatura de cerca de 3 K em todas as direções do céu. A dupla realizou um esforço brutal para tentar anular essa interferência, o que incluiu afugentar um grupo de pombos que havia escolhido o interior da antena como habitação, além de limpar a antena de todo o material deixado em seu interior pelos pombos. O ruído continuava.

Um dia, em uma conversa com um amigo cientista, Penzias revelou o problema e o amigo sugeriu que eles se comunicassem com o pessoal de Princeton. Penzias entrou em contato com Robert Dicke, e após alguns encontros ficou claro que ele e Wilson haviam encontrado o resquício de radiação do Big Bang que o grupo de Princeton estava procurando. Essa descoberta teve um impacto profundo no estudo da cosmologia, acabando com os argumentos dos defensores do estado estacionário e confirmando as previsões dos adeptos da teoria do Big Bang, que a partir de então se tornou hegemônica entre os astrônomos, embora ainda viesse a ter vários desenvolvimentos.

Essas três grandes descobertas feitas pela radioastronomia mudaram significativamente o pensamento astronômico do final do século XX e abriram um enorme campo para novas pesquisas.

Em 1972, na Alemanha, começa a funcionar o radiotelescópio de Effelsberg, uma antena parabólica com 100 m de diâmetro, que por algumas décadas se manteve como o maior radiotelescópio totalmente direcionável do mundo. Os Estados Unidos também construíram sua antena gigante em uma área no estado da Virginia, onde fontes de radiotransmissão são proibidas por lei. Nesse local foi instalado o Observatório de Green Bank, com uma série de radiotelescópios. Em setembro de 1972, o maior dos telescópios então instalados em Green Bank começou a funcionar: Era uma antena parabólica com aproximadamente 90 m de diâmetro, conhecida como 300 Foot Telescope. O telescópio operava muito bem, até que toda a estrutura colapsou em 15 de novembro de 1988. Mas a maior antena parabólica do mundo utilizada para radioastronomia foi construída em Arecibo, Porto Rico, com 300 m de diâmetro, instalada em um vale em forma de taça. A antena era fixa, mas seus detectores podiam ser deslocados, permitindo a observação de uma área maior do céu.

Em 1974, começa a operar um imenso radiotelescópio construído pela União Soviética, o Ratan-600, acrônimo para Radiotelescópio da Academia de Ciências – 600, em russo. O Ratan-600 tinha um diâmetro de 576 m, mas não era uma antena parabólica. Na verdade era um conjunto de 895 painéis refletores de 2 x 7,4 m, dispostos em uma circunferência, rebatendo a radiação para um refletor cônico situado no centro do conjunto, ou para um dos cinco refletores secundários cilíndricos. Os painéis podiam ser direcionados para refletir a radiação incidente para qualquer um dos captadores. O efeito geral é similar ao de uma antena parcialmente direcionável. O Ratan-600 funciona primariamente como

um telescópio de trânsito (como um círculo meridiano). Sua área de coleta de radiação é pequena para um instrumento de dimensões tão espetaculares: 1.200 m<sup>2</sup>. O instrumento foi instalado próximo à cidade de Zelenchukskaya, a uma altitude de 970 m.

Ainda na década de 1970, a União Soviética constrói cinco enormes radiotelescópios do tipo antena parabólica e completamente direcionáveis. Desses, três com um diâmetro de 70 m. O primeiro foi instalado perto da cidade de Yevpatoria, o segundo perto do platô de Suffa e o terceiro perto da cidade de Galenki. Os outros dois, com 64 m de diâmetro, instalados em Kalyazin e em Medvezhyi Ozera (Bear Lakes). Os cinco telescópios podem ser utilizados em pesquisas de radioastronomia, ou como radares de exploração planetária e também na comunicação com satélites de pesquisa. Esses instrumentos, que estavam entre os maiores do mundo, mostram a importância que os soviéticos deram à radioastronomia.

Em 1974, começa a operar, na cidade paulista de Atibaia, um radiotelescópio com uma antena de 13,7 m de diâmetro, trabalhando em frequências entre 20 e 100 GHz. O Rádio-Observatório de Itapetinga, nome do bairro em que foi instalado, se tornou o principal instrumento de pesquisas do Brasil em radioastronomia por décadas (ver figura 71).



Figura 71 - Vista externa do radiotelescópio de Itapetinga, em Atibaia. Foto: Francisco Conte.

## Interferometria

A interferometria é uma técnica que utiliza as propriedades ondulatórias da luz. Ela consiste em combinar duas ou mais ondas de entrada, em amplitude e em fase (de mesmo comprimento de onda e sincronizadas), que vão se transformar em uma nova onda, que é a soma das anteriores. A técnica pode ser aplicada em astronomia, mecânica quântica, oceanografia e sismologia, entre outras áreas. Um de seus primeiros usos foi através dos trabalhos de Albert Michelson, depois acompanhado por Edward Morley, na procura do éter luminífero (uma substância que existiria em todo o universo e que permitiria o deslocamento das ondas do espectro eletromagnético). Tais trabalhos terminaram por não encontrar indícios da existência do éter, que, ao que sabemos hoje, de fato não existe. Utilizando um interferômetro, Michelson conseguiu calcular a velocidade da luz com uma precisão mil vezes maior que os valores conhecidos até então. Por fim, em 1920, Michelson, trabalhando em conjunto com Francis Pease, criou o primeiro interferômetro astronômico, utilizando o Telescópio Hooke de Monte Wilson, então o maior do mundo, que será descrito em mais detalhes em capítulo mais à frente.

Mas foi na radioastronomia que a interferometria começou a ser utilizada em larga escala por astrônomos do mundo todo. A ideia é combinar o sinal captado por vários radiotelescópios para obter uma resolução angular equivalente à de um imenso radiotelescópio, com diâmetro igual à distância entre os vários instrumentos. É importante ressaltar que a capacidade de coleta de luz não será equivalente a esse radiotelescópio gigante, mas sim à da soma das áreas dos vários radiotelescópios utilizados no processo. Apenas a resolução é ampliada. Por operar com ondas de comprimento muito maior que as ondas de luz visível, é muito mais simples trabalhar com interferometria no rádio. Além disso, o radiotelescópio transforma as ondas de rádio em sinais elétricos, muito mais fáceis de serem transportados e combinados que na interferometria óptica, em que a luz captada por cada telescópio tem que percorrer uma trajetória por dentro de tubulações (com vácuo em seu interior), até poder ser combinada, o que limita muito o tamanho dos instrumentos, encarecendo e dificultando sua operação.

De maneira surpreendente, a primeira aplicação da interferometria em radioastronomia foi feita com um único receptor: a equipe formada por Joseph Lade Pawsey e Lindsay McCready, em 26 de janeiro de 1946, nas proximidades de Sidney, Austrália. Eles usaram uma antena de radar convertida em radiotelescópio e fizeram uma observação em uma escarpa à beira do mar. O instrumento foi utilizado de maneira a receber a radiação direta proveniente do Sol e também a radiação solar refletida na superfície do mar. Os dois sinais combinados formavam uma linha de base de aproximadamente 200 m (ver figura 72). A inspiração do grupo veio da observação de franjas de interferência em radares causadas por esta configuração: ondas de radar provenientes diretamente da fonte, combinadas com outras que haviam sido refletidas na superfície do oceano. O fenômeno foi descrito por independentes equipes de radar da Segunda Guerra Mundial que operaram na Austrália, Irã e Reino Unido.

Poucos meses depois desse trabalho pioneiro, em julho, os britânicos Martin Ryle e Derek Vonberg conseguiram observar o Sol em rádio, utilizando duas antenas em espaçamentos que variavam de poucas dezenas de metros a até 220 metros. Martin Ryle, Antony Hewish e o grupo de radioastronomia da Universidade de Cambridge desenvolveram um método



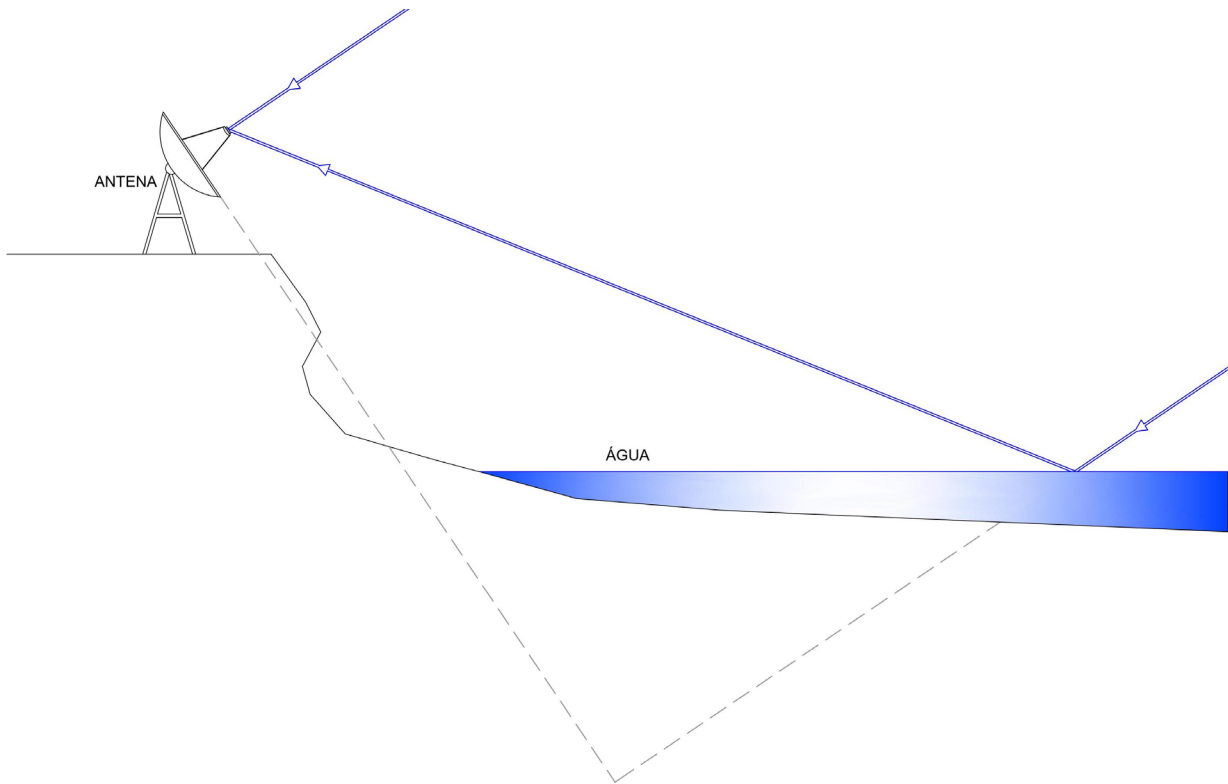


Figura 72 - Primeira observação interferométrica em rádio, executada com uma única antena e utilizando a superfície da água do mar como um espelho. Desenho: Francisco Conte.

batizado de síntese de abertura, para obter imagens de altíssima resolução utilizando a interferometria. O método consiste em combinar sinais de vários instrumentos, cujas ondas captadas devem possuir a mesma amplitude e estar na mesma fase (ver figura 73). A combinação dos sinais vai produzir uma quantidade imensa de medições durante a observação. Esses dados podem ser combinados matematicamente através de síntese de Fourier, produzindo uma imagem. A imensa quantidade de dados obtida durante uma observação exige a utilização de computadores para execução dos cálculos.

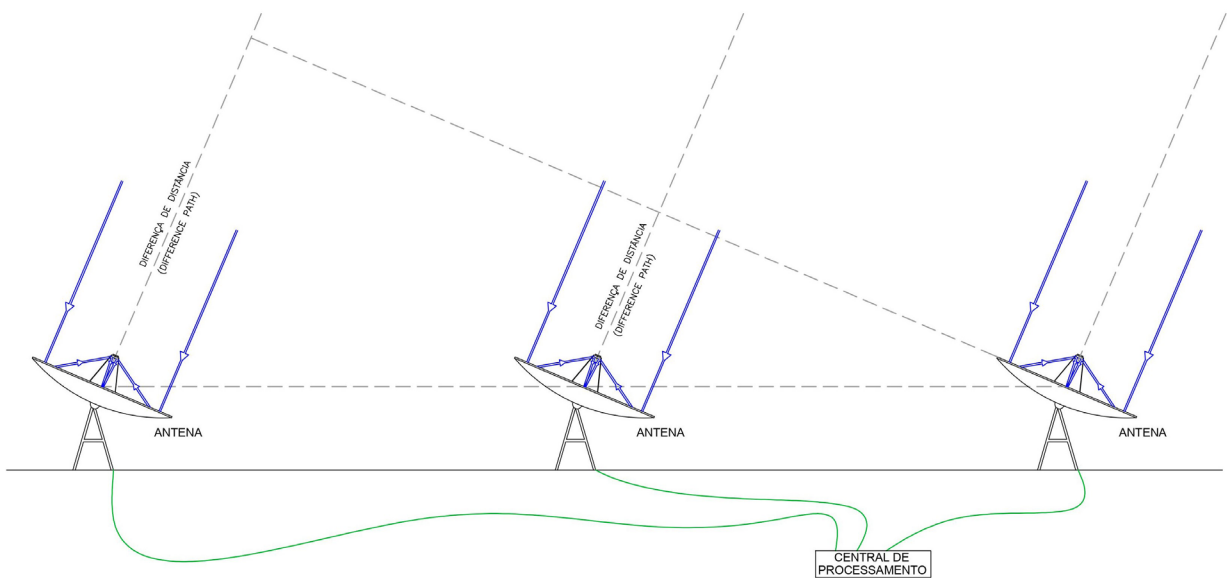


Figura 73 - Esquema de um interferômetro formado por três antenas. Desenho: Francisco Conte.

Em 1964, começa a operar na Inglaterra o One-Mile Telescope, em Cambridge, um radiointerferômetro composto por três antenas, duas fixas e uma móvel, todas com 18 m de diâmetro. A antena móvel podia ser deslocada através de trilhos por uma distância de 800 m. Nesse percurso, existiam 60 estações de trabalho que podiam ser utilizadas de acordo com o tipo de observação a ser executado. O instrumento trabalhava com frequências que variavam de 408 MHz (comprimento de onda de 75 cm) a 1,4 GHz (comprimento de onda de 21 cm). Foi o primeiro radio-observatório a utilizar a técnica de síntese de abertura, que utiliza a rotação da Terra na formação de imagens. Foi o primeiro instrumento a conseguir produzir imagens em rádio com definição superior à do olho humano (quando operando em 1,4 GHz). Nos mais de vinte anos de operação deste equipamento foram feitas observações de objetos individuais, assim como vários levantamentos de campo profundo.

Em 1967, termina a construção de um radiointerferômetro em Green Bank, Estados Unidos, formado por três antenas parabólicas com 26 m de diâmetro cada, dispersas em uma linha de base com 2,4 km de comprimento. O conjunto posteriormente foi acrescido de um quarto telescópio de menor porte, que era móvel e aumentava muito a capacidade de resolução angular do instrumento.

Em 1970, começa a funcionar em Westerbork, Holanda, um interferômetro com um conjunto de 14 antenas de 25 m, com dez antenas fixas e quatro que podem ser movidas através de trilhos.

Em 1980, termina a construção do Very Large Array, em Socorro, Novo México, EUA, o mais impressionante interferômetro da época, com 27 antenas parabólicas, cada uma com 25 m de diâmetro, dispostas em um conjunto em forma de "Y". Todas as antenas podem ser movidas através de trilhos e seu arranjo mais aberto atinge 32 km de diâmetro (ver figura 74).

Nesse período a radioastronomia se encontrava em um momento de construção de novos e potentes equipamentos, no início da utilização de técnicas como a interferometria e com grandes projetos e expectativas para a virada do século.

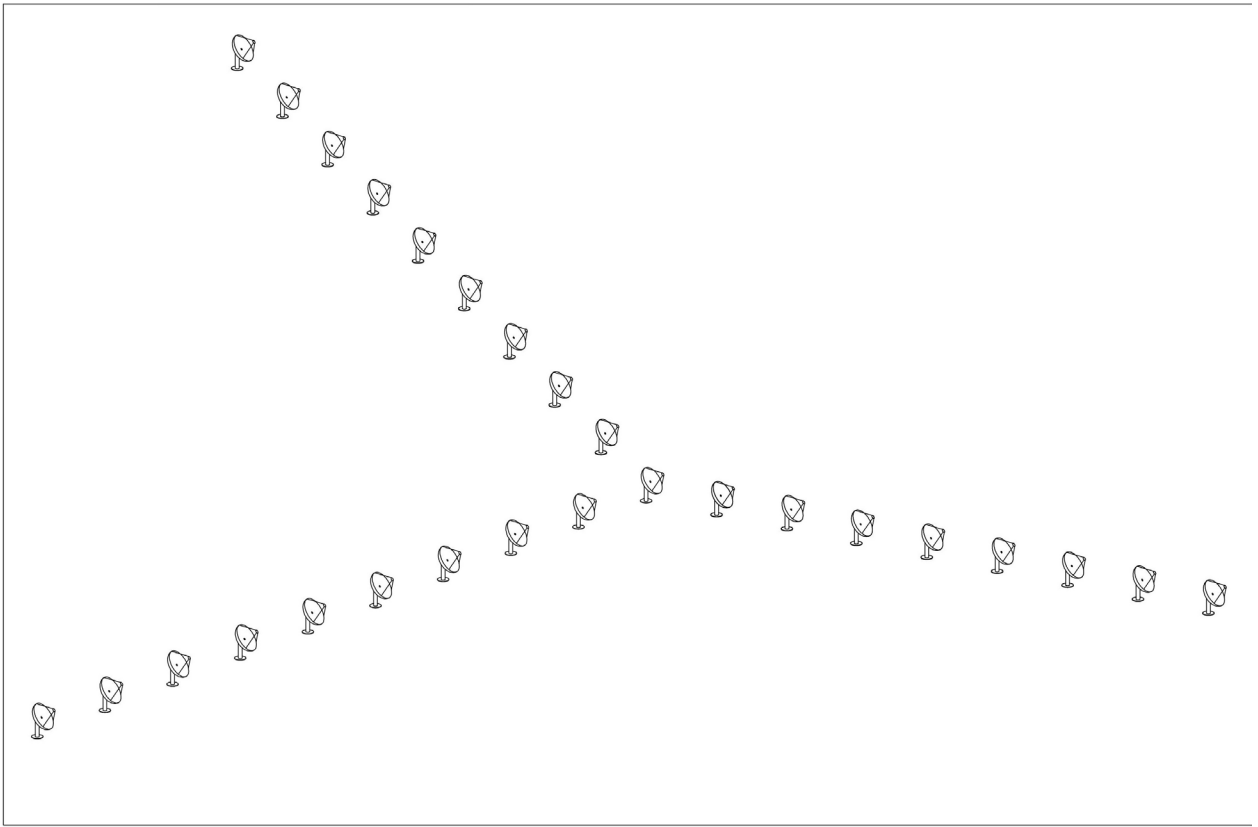


Figura 74 - Configuração geral do VLA (Very Large Array), com 27 antenas parabólicas de 25 m de diâmetro cada uma. Desenho: Francisco Conte.

## CAPÍTULO 6

### Satélites e sondas

No dia 4 de outubro de 1957 o mundo ficou chocado com a notícia de que os soviéticos haviam lançado um satélite no espaço, o Sputnik. O impacto psicológico e cultural foi imenso. Os Estados Unidos iniciaram um esforço imenso para não ficar atrás dos soviéticos e lançaram seu primeiro satélite poucos meses depois, em 31 de janeiro de 1958. Novamente a União Soviética assombrou o mundo ao colocar o primeiro cosmonauta em órbita, Yuri Gagarin, em 12 de abril de 1961. O mundo observou no período um imenso esforço das duas superpotências para se destacar na astronáutica – a chamada corrida espacial –, com um enorme dispêndio de recursos e trabalho, resultando em um imenso desenvolvimento tecnológico na área. No ano de 1969 os americanos conseguiram pousar uma nave tripulada na Lua, fato que marca o final dessa fase inicial e representa um marco no pensamento humano sobre os limites do que era possível ser realizado (ver figura 75).

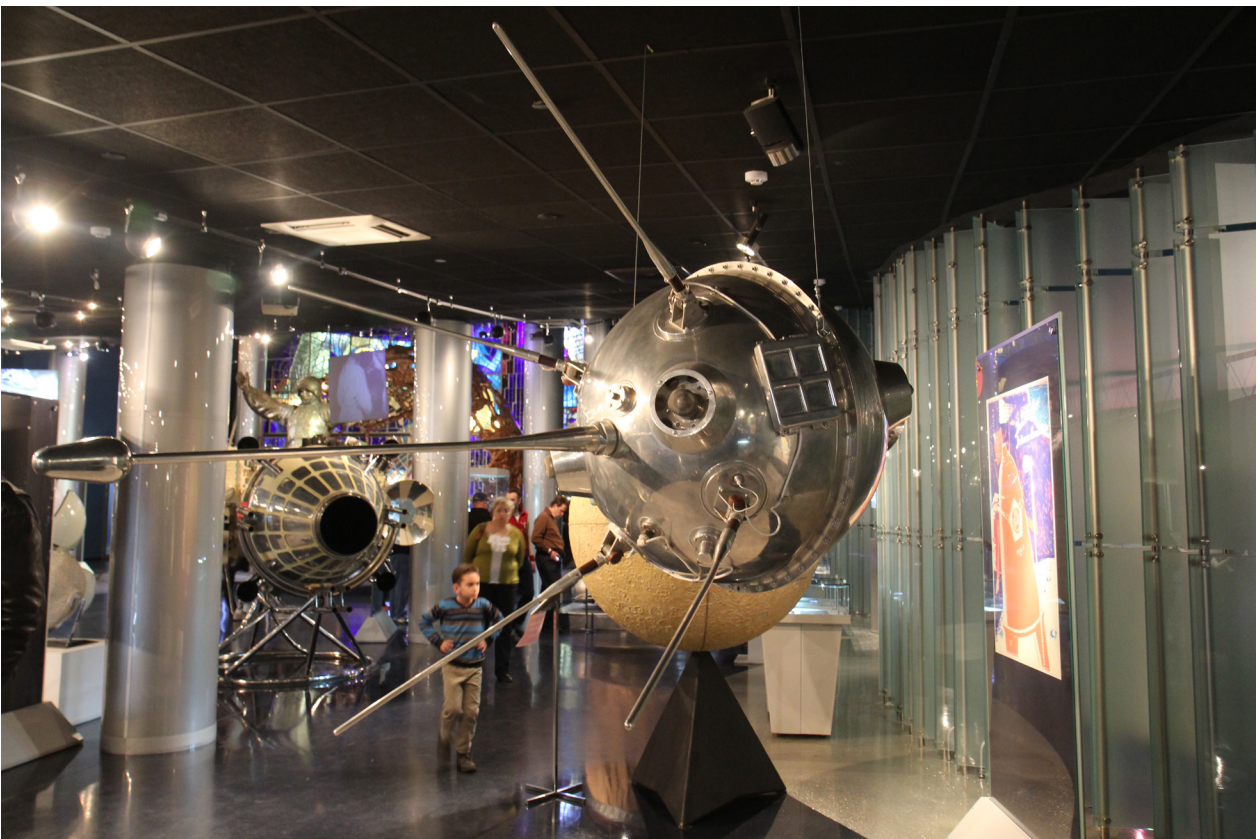


Figura 75 - Réplica de um dos primeiros satélites lançados ao espaço pela então União Soviética, exposta no Museu e Mausoléu dos Cosmonautas de Moscou. Foto: Francisco Conte.

A corrida espacial era primordialmente política, com cada um dos lados se esforçando para demonstrar sua superioridade ao outro, mas os cientistas aos poucos foram criando uma série de instrumentos e missões dedicadas à pesquisa científica, com grandes aplicações na área da astronomia. Uma nova era estava se iniciando.

Este capítulo nem existiria se não fossem os foguetes, isso é claro, mas vamos nos ater muito pouco à astronáutica e aos modelos específicos de lançadores etc. O que vamos analisar são as missões que contribuíram para o desenvolvimento da astronomia. Os lançadores espaciais com o tempo se tornaram um grande negócio tanto para fins comerciais (telecomunicação, meteorologia, sensoriamento remoto etc.) quanto militares. Vamos nos centrar nas relativamente poucas missões, em relação ao total, que se dedicam à pesquisa astronômica.

A primeira descoberta científica da era espacial ocorreu em 31 de janeiro de 1958, com o satélite Explorer 1, lançado pelos americanos, que descobriu o Cinturão de Van Allen, uma região de partículas eletricamente carregadas em torno de nosso planeta, causada pelo campo magnético da Terra. O instrumento que realizou a descoberta foi desenvolvido por James Van Allen, um físico da Universidade do Estado de Iowa. Posteriormente foram descobertos cinturões similares em outros planetas.

Em fevereiro de 1959 a nave Vanguard II, lançada pelos EUA, faz as primeiras imagens da Terra a partir de um satélite artificial. Em setembro desse mesmo ano a nave soviética Luna 2 atingiu a Lua, tornando-se o primeiro objeto feito pelo homem a manter contato com outro corpo celeste.

Em outubro de 1959, a nave Luna 3, lançada pela União Soviética, consegue obter as primeiras imagens do lado oculto da Lua, iniciando a exploração espacial por sondas – astronaves que viajam em direção a seu objeto de estudo. Os soviéticos foram pioneiros em muitos objetivos nesse tipo de missão: em 1961 enviaram a primeira nave em missão a outro planeta, Vênus, a Venera 1 e em 1966 conseguiram pousar e emitir dados a partir da superfície da Lua, em uma missão não tripulada, a Luna 9.

A grande vantagem de instalar um telescópio de qualquer tipo no espaço é poder realizar as observações sem a influência da atmosfera terrestre. Um dos principais aspectos da forma como a atmosfera terrestre interfere na radiação eletromagnética proveniente do espaço é que grande parte dela é bloqueada, sendo absorvida pelos gases ou refletida para fora do planeta, e apenas uma pequena parte consegue atingir o solo. São estas as janelas atmosféricas (ver figura 76). Assim, as frequências de rádio de comprimento de onda muito grande, quase todo o infravermelho, quase todo o ultravioleta e todas as emissões de raios-X e raios gama são bloqueados para um observador no solo, tornando impossível a construção de instrumentos de pesquisa nessas faixas do espectro eletromagnético instalados em terra. Mais à frente vamos ver que existe uma pequena exceção para os raios gama, mas de forma indireta. Dessa forma, um dos grandes avanços provenientes da corrida espacial foi a possibilidade de criar observatórios que são colocados em órbita e dedicados à observação de frequências até então inexploradas do espectro eletromagnético.

Podemos dividir as missões espaciais em tripuladas e não tripuladas, sendo as últimas as que tiveram maior importância na história da astronomia. As missões tripuladas tiveram como ápice a missão Apollo, culminando com o pouso do homem na Lua no mês de julho de 1969. Um total de seis missões Apollo pousou com sucesso na Lua. A primeira, como sabemos, foi a Apollo 11, em que dois astronautas permaneceram na superfície lunar por 21 horas e 36 minutos depois de pousar no Mar da Tranquilidade. Os astronautas trouxeram várias amostras de rochas lunares e instalaram no solo alguns experimentos ou equipamentos científicos. Um deles foi o Lunar Laser Ranging Experiment, um conjunto

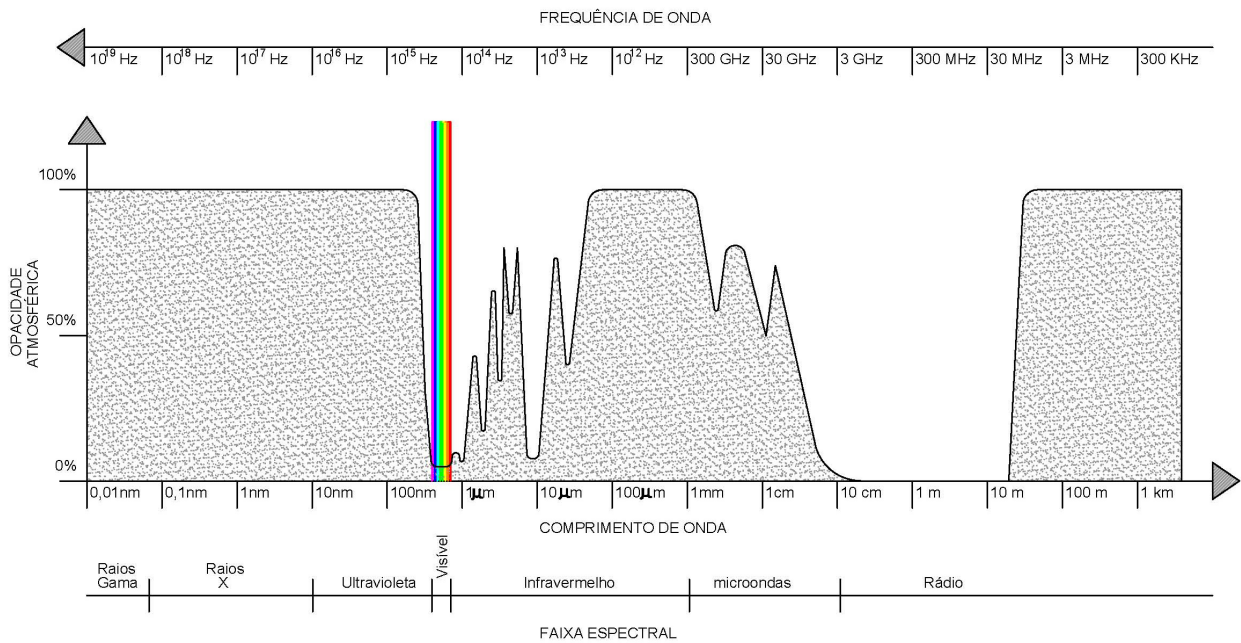


Figura 76 - Janelas atmosféricas. Desenho: Francisco Conte.

de espelhos que refletem a luz na mesma direção de sua emissão. Com esse experimento é possível mandar um pulso de *laser* a partir da Terra e esperar seu retorno, calculando com precisão a distância até o nosso satélite. Isso permitiu que descobríssemos que a Lua se afasta da Terra aproximadamente 3 centímetros a cada ano. A tripulação era composta por Neil Armstrong e Edwin Aldrin, que pousaram na Lua, e Michael Collins, que permaneceu em órbita lunar (ver figura 77).



Figura 77 - Protótipo do módulo espacial que pousou na Lua com as missões Apollo, exposto no Smithsonian Museum of Air and Space, em Washington DC. Foto: Francisco Conte.

A missão Apolo 12 foi enviada em novembro de 1969. Charles Conrad e Alan Bean desceram à Lua por um dia e sete horas, enquanto Richard Gordon permaneceu em órbita. A nave pousou próxima à sonda americana Surveyor 3, que havia pousado na Lua em abril de 1967, e a tripulação por duas vezes chegou a visitar a sonda, levando de volta para a Terra algumas de suas partes. A tripulação da Apolo 12 teve a oportunidade de observar um eclipse solar a partir da Lua.

A Apolo 13 falhou em pousar na Lua. Em janeiro de 1971, a Apolo 14 pousou na região de Fra Mauro, local inicialmente destinado ao pouso da Apolo 13. Alan Shepard e Edgar Mitchell desceram à Lua, enquanto Stuart Roosa permanecia em órbita do satélite. A tripulação permaneceu 33 horas e meia na superfície lunar, coletando mais de 40 kg de amostras de rochas. Entre elas havia uma, batizada de Big Bertha, que em análises posteriores descobriu-se que era um meteorito proveniente da Terra, com 4 bilhões de anos de idade. A missão seguinte, Apolo 15, lançada em julho do mesmo ano, representou um grande avanço nas missões da série, pois foi a primeira de longa duração, com a tripulação permanecendo três dias e três horas na superfície lunar, e a primeira a usar um veículo elétrico para se locomover, o que permitiu a exploração de uma área muito mais vasta que as missões anteriores. A tripulação era composta por David Scott e James Irwin, que recolheram cerca de 70 kg de material lunar, e Alfred Worden, que pilotou o módulo orbital. Nessa missão também foram utilizados um espectrômetro de raios gama e outros instrumentos científicos. A nave retornou à Terra sem problemas apesar de ter perdido um de seus três paraquedas na descida. As Apolos 16 e 17, lançadas em abril e dezembro de 1972, foram similares em duração à Apolo 15 e foram as últimas missões tripuladas ao nosso satélite. A última delas contou com a presença de um geólogo profissional, Harrison Schmitt. Os trabalhos com as amostras de rochas coletadas na Lua permitiram esclarecer como foi o processo de formação de nosso satélite. Hoje acreditamos que a Lua se formou após a colisão com a Terra de um corpo com o peso aproximado de Marte, resultando em uma enorme quantidade de material expelido. Parte desse material acabou por se agrupar devido à força gravitacional e se transformou no nosso satélite.

Antes do pouso tripulado na Lua, tanto americanos quanto soviéticos já haviam construído e enviado sondas de sucesso ao satélite, que realizaram as primeiras pesquisas e fizeram as primeiras imagens da superfície de outro corpo celeste. A primeira nave a realizar esse feito foi a Luna 9, soviética, em fevereiro de 1966. Em junho do mesmo ano os americanos igualaram a façanha com a Surveyor 1. Em outubro e dezembro os soviéticos conseguiram pousar as Lunas 12 e 13, sendo que esta última produziu as primeiras imagens de televisão a partir da Lua. Em abril de 1967 os EUA pousaram a Surveyor 3. Em setembro e novembro voltaram, com as Surveyors 5 e 6, e em janeiro com a Surveyor 7 (ver figura 78).



Figura 78 - Réplica em escala natural de uma das sondas do programa Surveyor, que pousaram na Lua na década de 1960, exposta no Smithsonian Museum of Air and Space, em Washington DC. Foto: Francisco Conte.

Após o sucesso das missões tripuladas Apollo dos americanos, os soviéticos realizaram uma série de missões robóticas à Lua com resultados expressivos. Em setembro de 1970 a nave Luna 16 conseguiu enviar para a Terra amostras do solo lunar (ver figura 79). O feito foi repetido em fevereiro de 1972 com a nave Luna 20 e depois com a Luna 24, em agosto de 1976. Além disso, em novembro de 1970 eles conseguiram desembarcar na Lua um *rover* robotizado, o primeiro Lunokhod 1, que funcionou até janeiro de 1971 e percorreu uma distância de 10 km (ver figura 80). Em janeiro de 1973 eles repetiram o êxito com o Lunokhod 2, que percorreu uma distância de 36 km, estabelecendo um recorde que só seria batido várias décadas depois por um *rover* marciano.

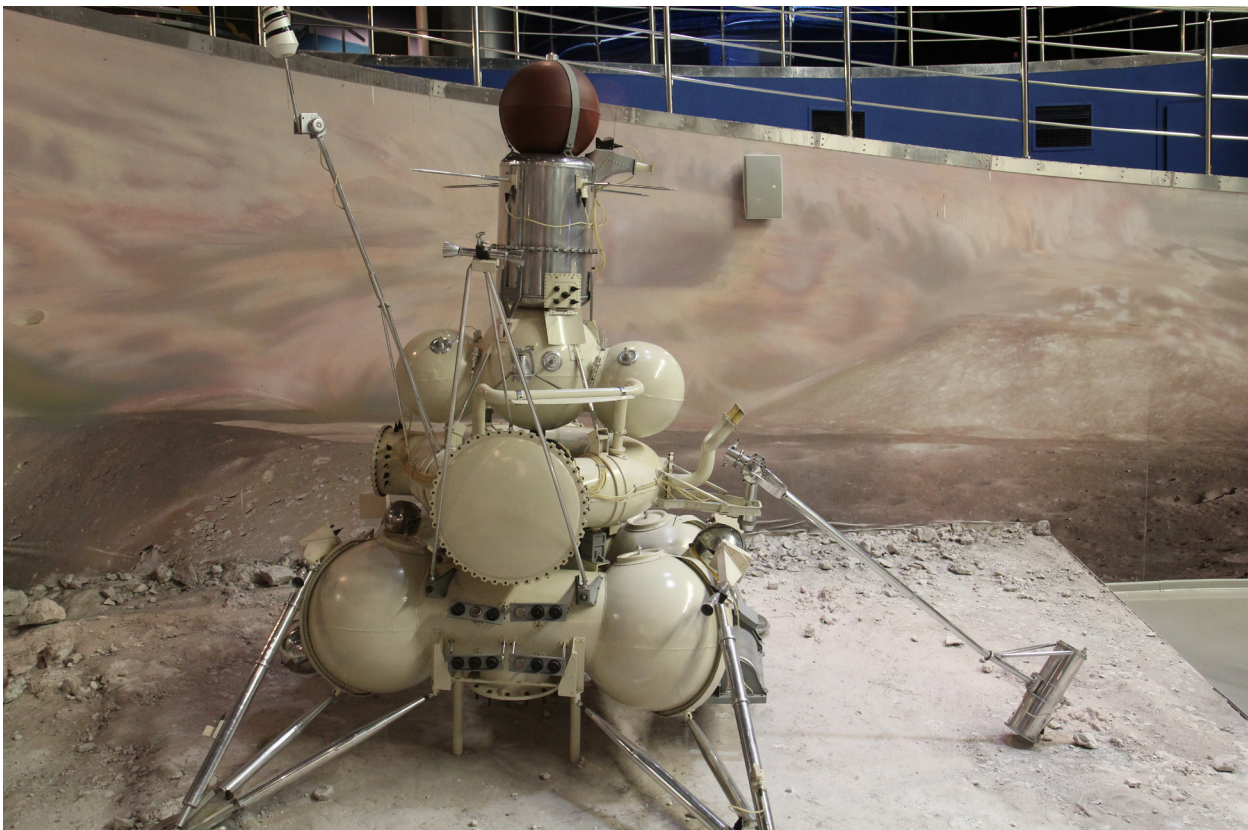


Figura 79 - Réplica em tamanho natural da Luna 16, primeira nave a voltar da Lua com amostras da superfície. A missão foi um grande sucesso e demonstrou claramente o futuro das missões espaciais não tripuladas de pesquisa astronômica. Exposta no Museu e Mausoléu dos Cosmonautas em Moscou. Foto: Francisco Conte.

Outra vertente de pesquisas muito importante das missões tripuladas foi a criação de laboratórios espaciais, que podiam desenvolver múltiplos experimentos para diversos fins. A primeira estação espacial americana foi a Skylab, que funcionou durante 24 semanas, entre maio de 1973 e fevereiro de 1974. Durante seu período de operações as tripulações conseguiram desenvolver parte do trabalho realizado, mas desde o início a missão sofreu com vários problemas, incluindo a perda de um de seus painéis solares já no desacoplamento. O acúmulo de problemas levou a um final prematuro da missão. Durante esse período a União Soviética lançou no espaço nada menos que sete estações de pesquisa, batizadas de Salyut 1 a 7, a primeira em 1971, algumas delas com atividades de pesquisa científica e outras com finalidades militares, todas com curtos períodos de funcionamento. Em 1986 os soviéticos lançaram a estação Mir, que funcionou até 2001, demonstrando uma capacidade incrível em manter tripulações no espaço.



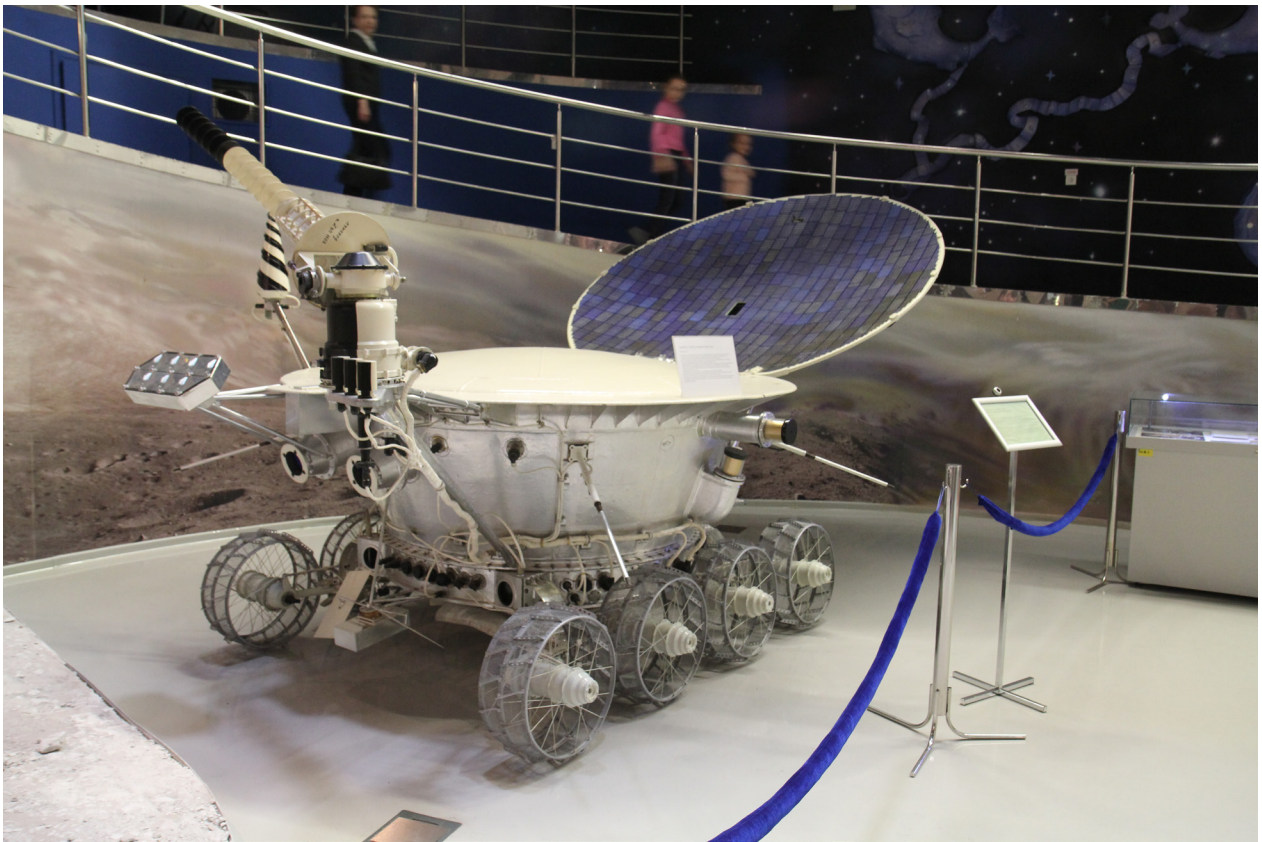


Figura 80 - Réplica em tamanho natural de um Lunokhod, os rovers que os soviéticos enviaram à Lua na década de 1970. Exposto no Museu e Mausoléu dos Cosmonautas em Moscou. Foto: Francisco Conte.

A maior parte das missões espaciais com resultados significativos para a astronomia, no entanto, foi feita por naves não tripuladas. O custo extremamente elevado de manter um ser humano vivo por um período grande no espaço complica terrivelmente qualquer tipo de missão desse tipo. Naves não tripuladas são muito mais leves, muito mais simples, muito mais baratas e na maioria das vezes mais eficientes.

Podemos dividir as missões espaciais não tripuladas em dois tipos: o primeiro consiste em um instrumento de pesquisa, como um telescópio, que é posto em órbita e trabalha dessa forma durante toda a sua vida útil. O segundo tipo é composto por missões que são lançadas em direção ao seu objeto de estudo, que pode ser um planeta ou um asteroide, por exemplo, passando então a orbitá-lo, ou que em alguns casos pousa no mesmo. O primeiro tipo pode incluir pesquisas muito variadas, desde observação solar até monitoramento de quasares e galáxias distantes, ao passo que o segundo tipo fica limitado a pesquisas no sistema solar, devido às grandes distâncias envolvidas.

## Telescópios espaciais

Até a década de 1970, os telescópios espaciais lançados tanto por americanos quanto por soviéticos e europeus eram totalmente direcionados às altas energias, ou seja, tinham detectores de raios gama, raios X e ultravioleta. Os primeiros observatórios espaciais para luz visível, infravermelho e ondas de rádio só vão começar a surgir a partir dos anos 1980.

Uma das mais importantes descobertas ocorreu em 1967, com os chamados GRBs (*gamma-ray bursts*), que são explosões extremamente energéticas mas com uma duração que pode variar de alguns milissegundos até algumas horas. Os GRBs são os eventos mais energéticos já observados em astronomia e suas causas só foram descobertas décadas após as primeiras detecções. Além disso, não foi um satélite de pesquisa científica que os observou pela primeira vez. Na verdade, foram satélites militares americanos da série Vela, lançados para vigiar possíveis testes atômicos feitos pelos soviéticos no espaço ou na atmosfera. Como o programa era secreto, a descoberta foi mantida em sigilo por vários anos. Ela foi revelada em 1973, com a publicação de um artigo, e só então a comunidade científica passou a conhecer o fenômeno.

O início da astronomia de raios X aconteceu na década de 1920, quando alguns experimentos feitos na ionosfera detectaram radiação de ultravioleta e raios X em altas altitudes. Em 1946 um instrumento lançado em um foguete de pesquisa conseguiu detectar raios X provenientes do Sol. A partir de 1949, raios X solares começaram a ser monitorados por diversos experimentos. O primeiro deles utilizou um míssil balístico V2 alemão da Segunda Guerra Mundial para levar um instrumental de detecção de raios X a grandes altitudes.

Em 1970 os americanos lançaram o satélite Uhuru, ou SAS-A, um observatório de raios X que representou um avanço impressionante na astronomia de altas energias, com a descoberta, por exemplo, de Cygnus X1, o primeiro forte candidato a buraco negro, várias fontes binárias de raios X, incluindo Cen X-3, Vela X-1 e Her X-1, além de diversas fontes extragalácticas. O sucesso do Uhuru inspirou o lançamento de outros satélites de raios X nos anos seguintes: o Astronomical Netherlands Satellite (1974), o Ariel V (1974), o indiano Aryabhata (1975), o SAS-C e o Cos-B, em 1975, o CORSA, em 1976, e o HEAO-1, em 1977.

A partir de 1966, os Estados Unidos lançaram uma série de quatro satélites com detectores de ultravioleta, chamados de Orbiting Astronomical Observatory – OAO. O primeiro foi o OAO-1, o segundo o OAO-2, o terceiro foi batizado de OAO-B, mas foi o último da série, o OAO-3 Copernicus, lançado em 1972, que produziu os mais expressivos resultados. Esse satélite era uma colaboração da NASA e do Science Research Council, do Reino Unido, ou seja, uma cooperação binacional. O satélite conseguiu produzir centenas de espectros de alta resolução de estrelas quentes e descobriu uma série de pulsares de longo período, alguns com vários minutos de duração, em contraste com os conhecidos até então, com períodos de poucos segundos ou menos de um segundo.

Em 1978 uma colaboração americana, europeia e do Reino Unido lançou o satélite International Ultraviolet Explorer – IUE, que continuou em operação até o ano de 1996 e também fez um trabalho muito importante, com observações de todos os planetas do Sistema Solar (com exceção de Mercúrio, por estar localizado muito próximo ao Sol), pesquisas estelares, sobre anãs brancas e ventos estelares. Ele realizou ainda o acompanhamento da supernova 1987A e fez pesquisas sobre o meio interestelar e sobre núcleos ativos de galáxias, um ramo novo da astronomia que se iniciou após a descoberta dos quasares.

## Sondas do Sistema Solar

Em março de 1960, os Estados Unidos lançaram uma sonda para pesquisar o Sol, a Pioneer 5, que se manteve ativa até o mês de abril. Durante esse período ela assumiu uma órbita solar e executou várias medições do campo magnético da nossa estrela, estudou partículas emitidas pelos *flares* solares e fez medidas da ionização do espaço interplanetário. Em 1965, 1966, 1967 e 1968, são lançadas a Pioneer 6 (que vai funcionar até o ano 2000), a Pioneer 7 (até 1995), a Pioneer 8 (até 2001) e a Pioneer 9 (até março de 1983), todas para monitorar a atividade solar, incluindo a medição de raios cósmicos, do vento solar e do campo magnético. Em 1969 a Pioneer-E, que completaria o programa, foi perdida, não conseguindo atingir a órbita desejada.

Depois de seis tentativas frustradas por falhas (cinco soviéticas e uma americana), a sonda Mariner 2, lançada em agosto de 1962, conseguiu realizar um *flyby*, uma passagem rasante, a 37,4 mil km da superfície de Vênus, tornando-se a primeira nave a realizar com sucesso uma missão a outro planeta. Durante sua aproximação, ela conseguiu fazer algumas medições de temperatura da atmosfera externa de Vênus, permitindo perceber que não havia diferenças importantes entre a parte iluminada e a parte escura – um fato que parecia indicar uma superfície muito quente. Quando observado em telescópios de base terrestre, Vênus não apresenta nenhum detalhe, sua camada de nuvens nunca permitiu que os astrônomos conhecessem sua natureza mais profunda. A era espacial começava a alterar profundamente essa história.

Em 1965, outra nave americana, a Mariner 4, consegue realizar um *flyby* a uma distância de 9,8 mil km de Marte, obtendo as primeiras imagens aproximadas da superfície marciana, e as mais nítidas, mostrando uma região com várias crateras de impacto. Foi um grande azar a nave observar justamente uma região com essas características – e durante anos os astrônomos acreditaram que Marte seria semelhante à Lua. As imagens foram obtidas com uma câmera de TV adaptada e um gravador de dados, que armazenou a informação e enviou para a Terra com o sistema de radiofoto, encaminhando cada fotografia ponto a ponto. Além disso, outros instrumentos da nave conseguiram realizar suas medições (temperatura, química etc.).

Em 18 de outubro de 1967, os soviéticos finalmente conseguiram enviar uma espaçonave a Vênus, em sua décima sexta tentativa. A nave Venera 4 conseguiu penetrar na atmosfera superior do planeta e se manteve ativa até a altitude de 25 km, um feito para um ambiente absolutamente hostil, com uma temperatura elevadíssima e uma atmosfera dezenas de vezes mais densa que a terrestre. No dia seguinte a nave americana Mariner 5 conseguiu fazer um *flyby* sobre o planeta. Em maio de 1969, duas naves soviéticas conseguiram novamente penetrar na atmosfera de Vênus, as Venera 5 e 6. As duas naves foram construídas de forma muito robusta, e funcionaram perfeitamente, mas acabaram por sucumbir a temperaturas da ordem de 305° C e uma pressão atmosférica altíssima. Vênus mostrava sua natureza extremamente hostil.

Em julho e agosto de 1969, as naves americanas Mariner 6 e 7 realizaram dois *flybys* em Marte. As duas naves conseguiram obter as primeiras imagens do planeta inteiro tiradas do espaço, mas com uma qualidade de resolução muito baixa.

Em dezembro de 1970, os soviéticos conseguem um feito extraordinário: a nave Venera 7 pousa na superfície de Vênus, um ambiente extremamente adverso, com temperaturas da ordem de 460° C e uma pressão atmosférica 90 vezes maior que a da Terra. A sonda incrivelmente consegue funcionar por 25 minutos depois do pouso, enviando valiosos dados para o controle de terra. Em julho de 1972 a nave Venera 8 repete o feito e se mantém em funcionamento por 51 minutos (ver figura 81).

O mês de novembro de 1971 vai presenciar duas sondas, uma americana, a Mariner 9, e uma soviética, a Mars 2, entrarem em órbita em torno do planeta Marte. A Mariner 9, que entrou em órbita no dia 14, se tornou a primeira nave espacial a realizar essa façanha na história. Quando as duas sondas chegaram ao planeta, este estava debaixo de uma grande tempestade, que cobria toda a sua superfície. A tempestade durou até a metade de janeiro seguinte. A nave soviética sofreu mais com o atraso da programação e não pôde produzir dados de qualidade. A Mariner 9 conseguiu obter muitas fotos da superfície do planeta, inclusive de vales e vulcões, descortinando uma visão mais completa

da topografia marciana. Em 1972 e 1973 os americanos lançam as Pioneer 10 e 11, as primeiras naves a visitar os grandes planetas gasosos. As duas naves passaram próximas a Júpiter em dezembro de 1973 e 1974 respectivamente, e a Pioneer 11 passou próxima a Saturno em setembro de 1979. As missões foram um grande sucesso. Embora a qualidade das imagens obtidas ainda fosse decepcionante, sem grandes avanços em relação ao que era obtido em terra, as naves conseguiram fazer também medições dos campos magnéticos dos planetas e da quantidade de hidrogênio e hélio tanto no espaço interplanetário quanto em Júpiter e Saturno. Foram as duas primeiras naves a iniciar uma viagem sem volta para o sistema solar em direção ao espaço.

Em 1974, a União Soviética envia três sondas a Marte, que vão orbitar o planeta com sucesso: as Mars 5, 6 e 7. As Mars 6 e 7, além de orbitarem o planeta, enviaram pequenas sondas que deveriam pousar na superfície. Costumamos chamar essas



Figura 81 - Protótipo de uma das sondas Venera, que conseguiram pousar e operar com sucesso nas difíceis condições do planeta Vênus. Um grande feito para a exploração do sistema solar. Em exposição no Museu e Mausoléu dos Cosmonautas de Moscou. Foto: Francisco Conte.

sondas de *landers*. O *lander* da Mars 7 não conseguiu alcançar o planeta. O *lander* da Mars 6 conseguiu pousar perfeitamente na superfície marciana, mas perdeu contato com o controle na Terra apenas 148 segundos após o seu pouso.

O ano de 1974 viu também em março o *flyby* de uma nave americana pelo planeta Mercúrio. A sonda era a americana Mariner 10, que antes havia passado por Vênus, tornando-se assim a primeira nave a realizar uma missão em dois planetas. A Mariner 10 conseguiu obter as primeiras imagens de boa qualidade da superfície de Mercúrio, mostrando que o planeta se assemelhava muito à Lua, com uma superfície recoberta de crateras de impacto. Além disso, a nave ainda realizaria mais dois *flybys* em Mercúrio, um em setembro de 1974 e o outro em março de 1975. Além das imagens da superfície, a missão coletou muita informação sobre o planeta.

Em 1972 e 1973, os americanos lançaram duas sondas muito importantes: as Pioneer 10 e 11. Em novembro de 1973, a Pioneer 10 se aproximou de Júpiter e obteve as melhores imagens do planeta gigante até então. Em dezembro de 1974 a Pioneer 11 fez o seu *flyby* por Júpiter, repetindo o sucesso de sua irmã. Em setembro de 1979, a Pioneer 11 fez um *flyby* por Saturno, conseguindo entre outros feitos captar as melhores imagens do planeta já obtidas até aquela época e também de sua lua Titã. Foram as primeiras naves a pesquisar os gigantes gasosos do sistema solar. A partir da passagem das duas sondas por seus planetas-alvo, as duas naves iniciaram a segunda parte da missão, coletando dados do vento e radiação solares enquanto se afastavam do Sol. A Pioneer 10 enviou seu último sinal para a Terra em fevereiro de 2003, e os últimos dados de qualidade da Pioneer 11 foram recebidos em 1995. As duas naves atingiram uma velocidade que vai fazer com que um dia abandonem o Sistema Solar, sendo as duas primeiras sondas lançadas com esta aptidão. Por iniciativa do astrônomo Carl Sagan, cada uma das duas naves leva uma placa com uma mensagem da humanidade, para a eventualidade de algum dia serem capturadas por outra civilização (ver figura 82).



Figura 82 - Vista de um protótipo de uma das sondas Pioneer 10 e Pioneer 11, as primeiras naves a visitar os planetas gasosos e também a abandonar o sistema solar ao fim de sua missão, em exposição no Smithsonian Museu of Air and Space, em Washington DC. Ao fundo podem ser vistos o X15, o avião mais rápido a ser construído, e alguns foguetes espaciais. Foto: Francisco Conte.

Outubro de 1975 assiste à chegada de duas sondas soviéticas a Vênus: as Venera 9 e 10. Cada uma das naves era composta por um orbitador e um *lander*. Sucesso total: os dois orbitadores tiveram êxito ao realizar suas funções e os dois *landers* conseguiram entre outros feitos obter as primeiras imagens feitas por uma sonda pousada na superfície de outro planeta, apesar da extrema dificuldade de um instrumento resistir às condições extremas do planeta.

Em 1976, os Estados Unidos conseguem realizar um feito semelhante ao dos soviéticos no ano anterior. Duas sondas – as Viking 1 e 2, compostas por um orbitador e um *lander* cada –, chegaram ao planeta vermelho e realizaram suas missões com total sucesso. Os *landers* conseguiram produzir as primeiras imagens da superfície de Marte e continuaram em atividade até o início dos anos 1980. Os orbitadores também sobreviveram por tempo equivalente e fizeram um grande levantamento da superfície marciana durante sua vida útil (ver figura 83).

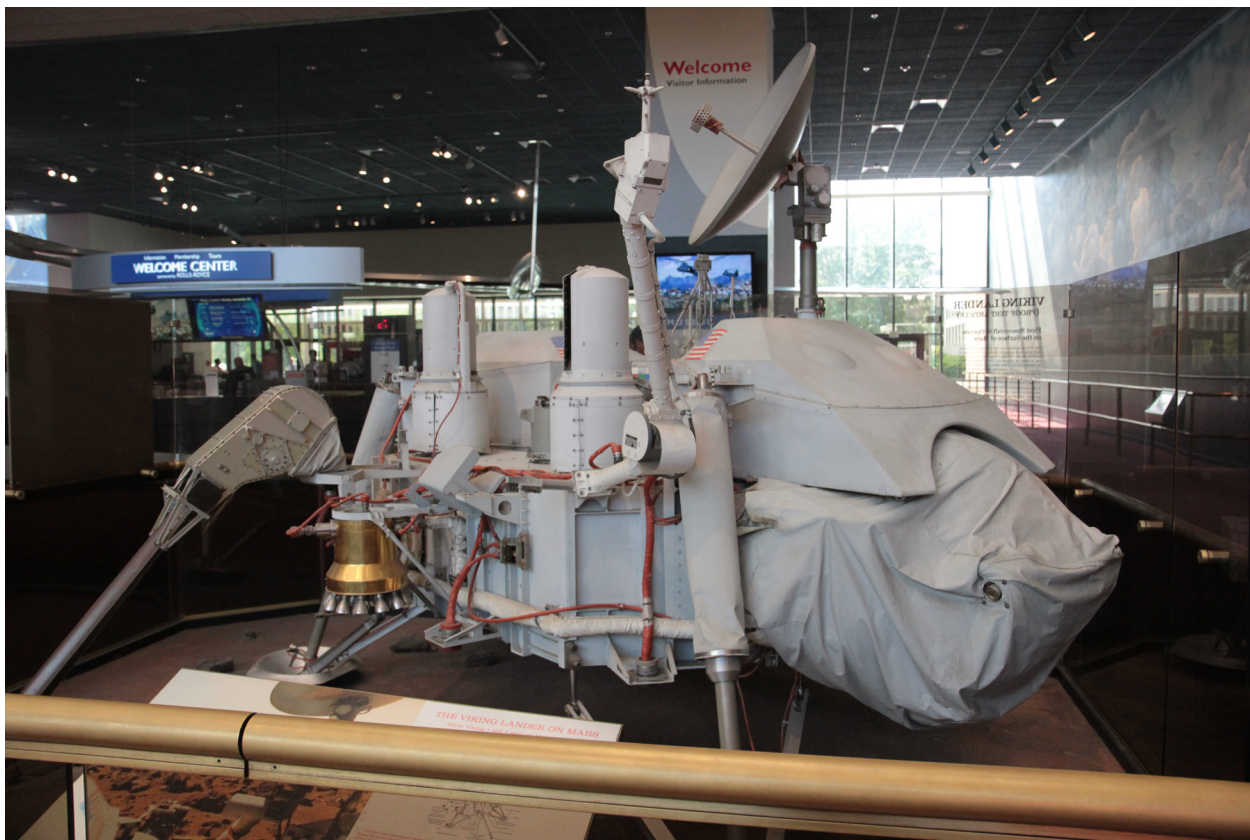


Figura 83 - Protótipo de um dos landers da missão Viking, que pousou com sucesso na superfície de Marte em 1976. Smithsonian Museum of Air and Space, Washington DC. Foto: Francisco Conte.

Antes do final da década os Estados Unidos mandaram duas sondas para o planeta Vênus: a Pioneer Venus Orbit e a Pioneer Venus Multiprobe. As duas chegaram ao seu destino em dezembro de 1978. A orbitadora continuou a funcionar até o ano de 1992, realizando estudos e medições da atmosfera e do fraco campo magnético do planeta. A Multiprobe lançou quatro sondas que foram realizando medições de vários tipos enquanto penetravam na densa atmosfera do planeta. Uma das quatro sondas, batizada de Day Probe, sobreviveu ao impacto com a superfície do planeta e continuou a mandar informações por um período de mais de uma hora. Poucos dias depois, ainda em 1978, os soviéticos conseguiram pousar em Vênus as Veneras 11 e 12.

O final da década de 1970 é marcado, no entanto, pela mais incrível missão do período, a das Voyager 1 e 2, que visitaram todos os quatro planetas gigantes do sistema solar. A Voyager 1 foi lançada em setembro de 1977 e a Voyager 2 um pouco antes, em agosto do mesmo ano. Em janeiro de 1979 a Voyager 1 fez o seu *flyby* por Júpiter e a Voyager 2 fez o seu em julho do mesmo ano. As duas naves encontraram 13 novas luas do planeta, descobriram que Júpiter tinha um pequeno sistema de anéis muito mais tênue que o de Saturno e mesmo que o de Urano, descoberto alguns anos antes. As naves constataram que algumas faixas da atmosfera do planeta rodavam no sentido contrário ao da maioria das faixas. Verificaram ainda que a grande mancha vermelha, uma característica do planeta descoberta há séculos, era na verdade um grande sistema de tempestade, que ainda está ativo.

Mas provavelmente as descobertas mais impressionantes dessa passagem estavam ligadas aos satélites galileanos: Calisto era o corpo do sistema solar mais bombardeado por crateras de impacto visto até então, o que sugere que sua superfície seja bastante antiga. Ganimedes, o maior satélite do sistema solar, era também cravejado de crateras de impacto, mas apresentava algumas estruturas em sua superfície que indicavam a existência de algum tipo de movimento interno. As imagens das outras duas luas causaram muito mais impacto: Europa apresentava uma superfície bastante clara e lisa, mas totalmente marcada por riscos mais escuros, como rachaduras. As análises demonstraram que Europa tinha uma superfície coberta por gelo, que provavelmente recobre um grande oceano interno de água no estado líquido. Desde que essa descoberta foi feita, o satélite galileano se tornou o mais provável candidato a detecção de vida em todo o sistema solar, fora da Terra. Io, o mais interno e menor dos quatro satélites galileanos, tinha uma aparência ainda mais estranha, lembrando uma pizza. Muito colorido, com tons de amarelo e vermelho, parecia que sua superfície tinha derretido, apresentando também alguns pontos mais escuros. Uma das imagens captadas quando uma das Voyagers já estava se afastando do satélite mostrava claramente uma pluma causada por erupção vulcânica. Io é o corpo com vulcanismo mais ativo de todo o Sistema Solar. A causa desse improvável vulcanismo era um mistério, pois um corpo do tamanho e com a massa de Io já deveria ter se resfriado. A explicação se deve ao extremamente forte efeito de marés causado por sua órbita elíptica e tão próxima ao redor de Júpiter, acentuado pelas passagens de Europa, Ganimedes e Calisto (ver figura 84). O mesmo efeito de marés é a causa do aquecimento interno de Europa, que acabou por criar o seu imenso oceano interno. A passagem das Voyagers por Júpiter utilizou uma técnica chamada de estilingue gravitacional, que acelerou e redirecionou as naves para seu próximo desafio.

Em novembro de 1980, a Voyager 1 fez o seu *flyby* em Saturno, enquanto a Voyager 2 fez o seu em agosto de 1981. Novamente a passagem das Voyager é acompanhada por uma série de descobertas: O sistema de anéis era feito na verdade por milhares de anéis emparelhados, como na superfície de um disco de vinil ou de um DVD; além disso, complexas formações podiam ser percebidas no sistema de anéis. Assim como no caso de Júpiter, as duas sondas descobriram cinco novos satélites. A atmosfera superior de Saturno apresentava aproximadamente 7,5% de sua composição de hélio, sendo o restante constituído por hidrogênio. Essa proporção era aproximadamente a metade da encontrada em Júpiter, o que parecia indicar que o hélio da atmosfera de Saturno estava lentamente afundando para o interior do planeta.

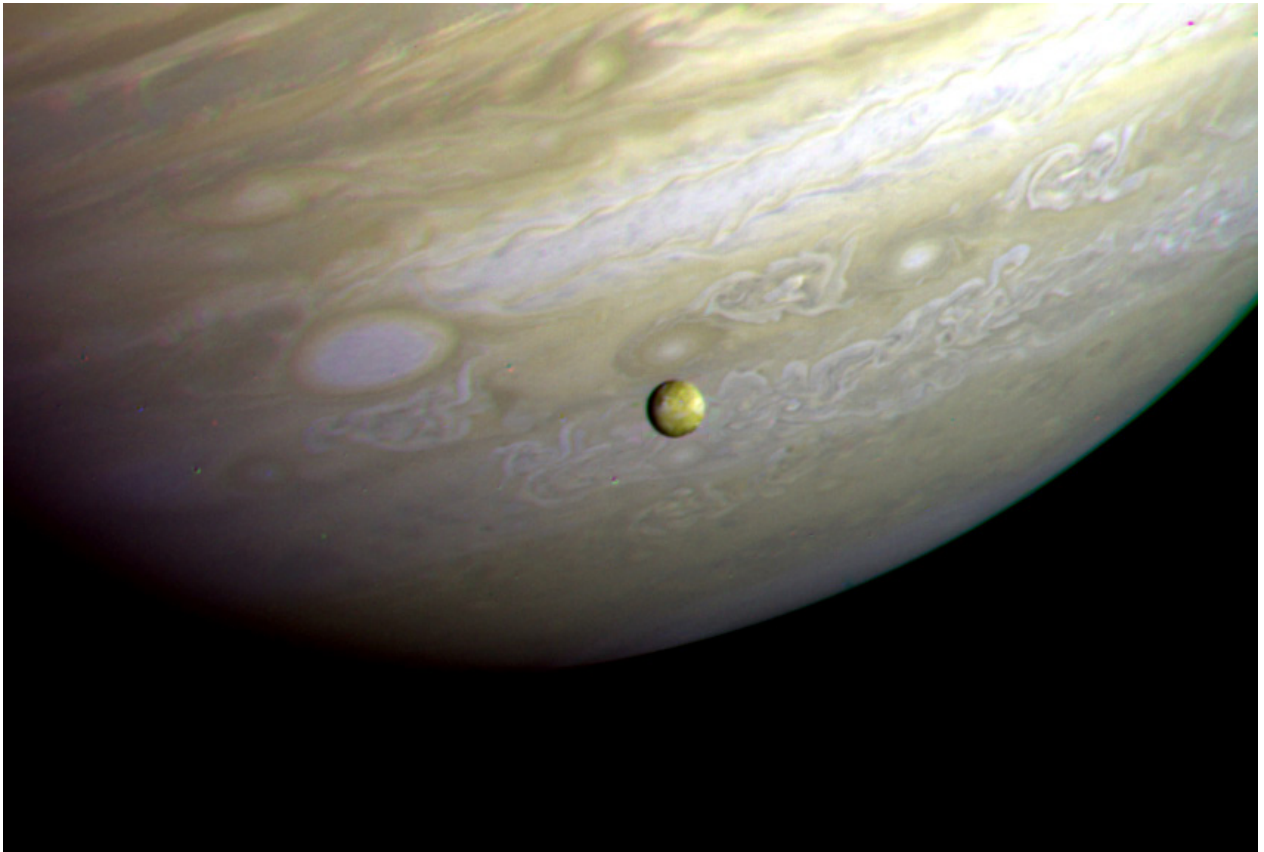


Figura 84 - Vista de Júpiter com sua lua Io em primeiro plano. Foto obtida por uma das naves Voyager. Fonte: Wikimedia Commons.

As imagens de alguns satélites de Saturno trouxeram muitas surpresas: Mimas apresentava uma cratera gigante, que ocupava cerca de um terço da área de um de seus hemisférios. Já se sabia que Titã, o maior de seus satélites, tem uma atmosfera, porém com a passagem das Voyager constatou-se que ela era muito mais densa do que se pensava. Jápeto apresentava um hemisfério muito mais claro do que o outro.

Após a passagem por Saturno a Voyager 1 iniciou a segunda parte de sua missão, em direção às estrelas, saindo lentamente do Sistema Solar. Alguns de seus instrumentos foram desativados para economia de energia para uma nova busca, agora dos limites do nosso sistema. A Voyager 2 ainda tinha trabalho a fazer na pesquisa dos planetas mais afastados do Sol.

Após receber outra assistência do estilingue gravitacional, agora de Saturno, a Voyager 2 finalmente acabou por fazer um *flyby* em Urano em janeiro de 1986. A sonda confirmou a descoberta de um sistema de anéis que havia sido encontrado recentemente (ver no próximo capítulo). Urano se apresentava como uma imensa e lisa esfera de cor azul clara, sem nenhuma característica marcante em sua superfície.

A Voyager 2 descobriu 11 novas luas em Urano. A maioria de seus satélites lembrava a Lua, com a presença de inúmeras crateras na superfície. Miranda apresentava algumas características muito marcantes, com alguns cânions tão pronunciados que eram facilmente visíveis mesmo em imagens que mostravam todo o satélite.



Em 1989 a Voyager 2 realizou seu último *flyby*, desta vez no planeta Netuno. Novamente grandes surpresas acompanharam a chegada: diferentemente de Urano, Netuno apresentava algumas marcas características em sua superfície, entre elas um sistema de tempestade bastante pronunciado que lembrava, pelas suas proporções e distância do equador a Grande Mancha de Júpiter. Além disso, Netuno também mostrava faixas e algumas manchas mais claras relativas a nuvens. A Voyager descobriu um sistema de anéis, semelhante ao de Urano, porém menos distinto, além de seis novas luas. Observou em detalhe o maior satélite de Netuno, Tritão, que apresentava uma topografia mais dinâmica do que podia se supor anteriormente. Sua superfície possui menos crateras de impacto do que a maioria das luas do sistema solar. A Voyager observou indícios da existência de criovulcanismo, com gêiseres que entram em atividade mesmo a baixas temperaturas. Essa atividade é a responsável pela renovação da superfície do satélite. Descobriu-se que Tritão possui uma atmosfera muito fina, composta principalmente de nitrogênio. Essas descobertas surpreenderam os astrônomos especializados no Sistema Solar, pois não se esperava encontrar tanta atividade em uma região tão distante e fria, dentro do nosso sistema. Após a passagem por Netuno a Voyager 2 passou também para a segunda fase de sua missão, em busca dos limites do nosso sistema planetário.

Após o término de sua extremamente bem-sucedida missão planetária, as duas Voyagers, que ainda estavam funcionando bem, passaram para uma nova fase de pesquisas. Em 25 de agosto de 2012, a Voyager I cruzou a heliopausa, a região em que a influência do campo magnético do Sol se encerra e se inicia o espaço exterior. Nesse dia, a nave estava a uma distância de 122 Unidades Astronômicas (cerca de 18 bilhões de quilômetros). A Voyager 2 cruzou a heliopausa em 5 de novembro de 2018. As duas naves continuam em funcionamento e enviando mensagens para a Terra com dados de radiação e partículas captadas por seus instrumentos. Infelizmente, ambas as sondas estão chegando ao final de sua vida útil.

Ainda antes de rumar em direção a Júpiter, a Voyager 1 realizou a primeira imagem da dupla Terra e Lua feita do espaço, sendo possível a observação dos dois corpos em sua totalidade. Bem mais tarde, em fevereiro de 1990, a Voyager 1 fez uma imagem em direção ao Sol, onde aparecem também a Terra, além de Vênus, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno (Mercúrio não é visível por estar muito próximo do Sol e Marte estava alinhado com o Sol no momento em que a imagem foi feita). A foto foi tirada de uma distância de 6 bilhões de quilômetros e ficou conhecida como “Pálido ponto azul”, em referência à aparência do nosso planeta na imagem.

Em 300 anos as Voyager deverão alcançar a borda interior do cinturão de Kuiper e então levarão mais 30 mil anos para cruzar toda a sua extensão. Depois disso vão atingir a Nuvem de Oort, o último limite do Sistema Solar.

O final da década de 1970 mostra um panorama positivo para o programa espacial. Os americanos estavam investindo pesadamente na construção de um veículo lançador reaproveitável, enquanto os soviéticos avançavam na ideia de construir um laboratório permanente no espaço. Havia também o sonho do lançamento de um telescópio óptico de grande porte. Em poucos anos, todos esses planos acabaram se concretizando, mas veremos isso em um capítulo mais à frente.

## CAPÍTULO 7

### Telescópios ópticos na década de 1970

Após o período de construção dos grandes observatórios no topo de montanhas, que culminou com o telescópio Hooker no Monte Wilson e algumas décadas mais tarde com o Hale no Monte Palomar, poucos telescópios de grande porte foram construídos no mundo nos 20 anos seguintes. Uma das poucas exceções foi o telescópio Shane, no Observatório Lick, com um espelho primário de 3,05 m de diâmetro. Ele teve sua primeira luz em 1959 e foi por muito tempo o segundo maior do mundo (ver figuras 85 e 86); na verdade, utilizou um espelho que havia sido construído apenas para testar o de 5 m do telescópio Hale e se encontrava disponível. Além do Shane, na década de 1960 foram construídos dois telescópios um pouco maiores que o Hooker, no Monte Wilson. O primeiro foi o Shajn Telescope, com 2,60 m de diâmetro, instalado na Crimeia, inaugurado em 1961. Já o Harlan J. Smith Telescope, do Observatório McDonald, com 2,72 m de diâmetro, foi instalado no topo do Monte Locke, no Texas, e teve sua primeira luz em 1969.



Figuras 85 e 86 - Vistas externa e interna do telescópio Shane, do observatório Lick. O maior telescópio construído no mundo nas décadas de 1950 e 60, utilizando um espelho de teste feito para o Hale em Monte Palomar. Fotos: Francisco Conte.

As razões para esse fato são diversas. Os países mais desenvolvidos em astronomia ainda estavam se recuperando da Segunda Guerra Mundial, o que diminuiu a verba destinada às ciências. Além disso, a maior parte dos recursos disponíveis na astronomia foi empregada na construção de radiotelescópios, uma área que vivia rápido desenvolvimento. Muito dinheiro também foi investido no início dos programas espaciais, com a construção e lançamento de diversos foguetes e satélites.

Construir um telescópio do porte do Hale em Monte Palomar, por exemplo, era muito caro. Espelhos de grande porte eram extremamente custosos, de fabricação demorada e tecnicamente difíceis de executar. Só o resfriamento do bloco de vidro durava

literalmente meses. Como vimos anteriormente, o custo do espelho varia de acordo com o cubo do diâmetro, pois, para obter um elemento óptico mais estável, é preciso aumentar a espessura do espelho. Para economizar a quantidade de vidro no bloco, a superfície inferior do espelho era nervurada, normalmente imitando a estrutura de um favo de mel (*honeycomb*), criando espaços vazios sem perda de rigidez no conjunto. Esse procedimento possuía uma vantagem extra: depois do espelho finalizado, os vazios aumentavam muito a área de contato do bloco de vidro com o ar do entorno, acelerando o processo de aclimatação (ver figura 87). As montagens equatoriais, utilizadas para permitir o acompanhamento de objetos no céu noturno, tinham que dar sustentação a esses espelhos, sendo também muito volumosas e pesadas, com altos custos de construção e manutenção. Além disso, a turbulência atmosférica degradava as imagens obtidas pelos telescópios de grande porte, impedindo que apresentassem um ganho de resolução angular em relação a instrumentos de pequeno porte. Ou seja, um telescópio grande captava mais luz, mas não apresentava detalhes mais finos do objeto observado.

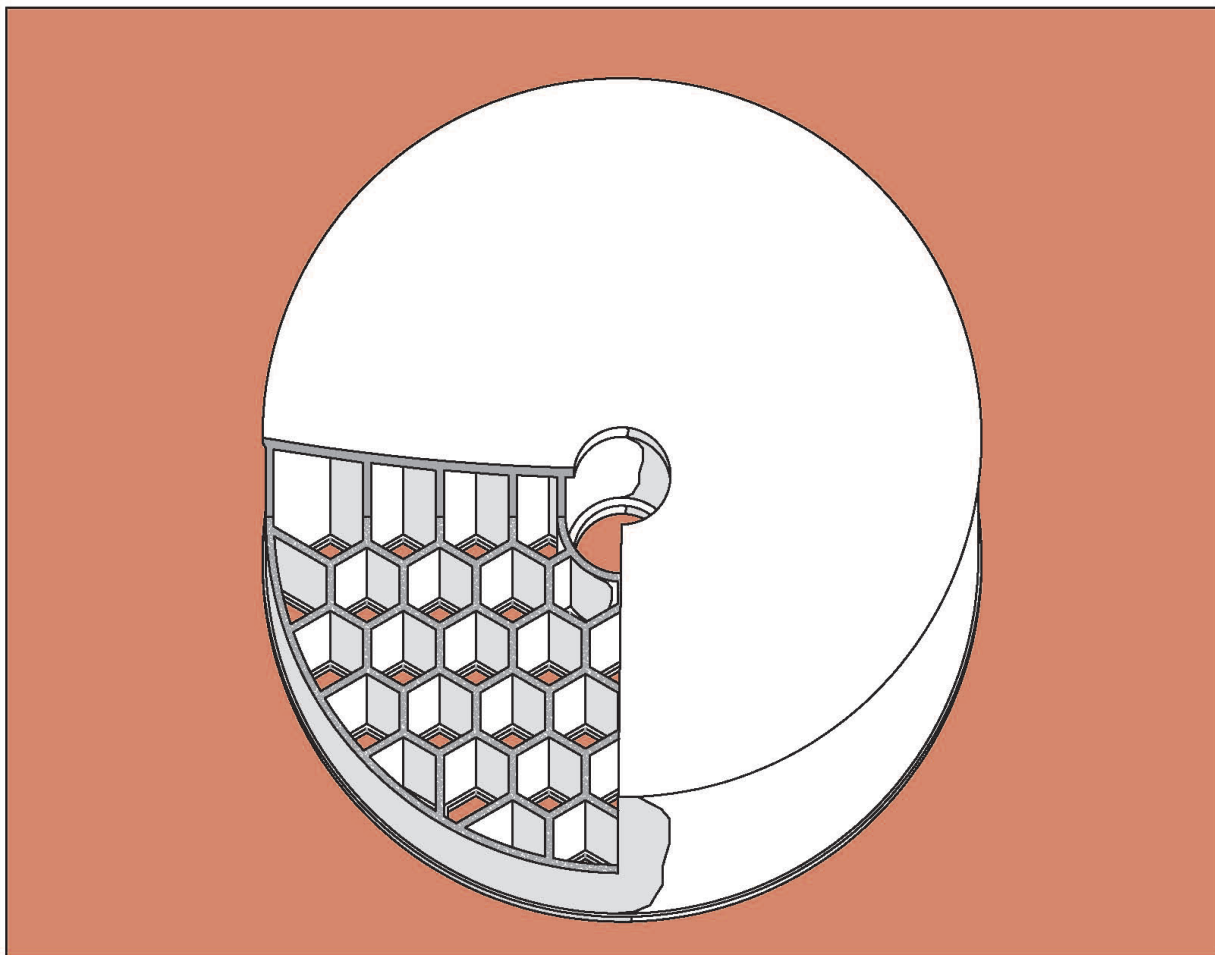
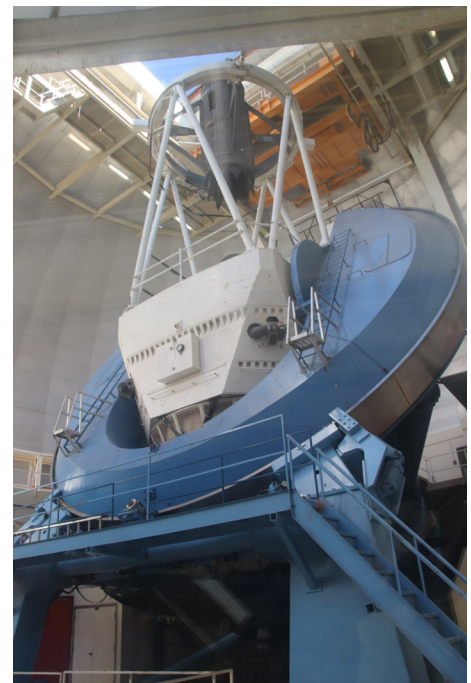


Figura 87 - Vista de um espelho primário de telescópio no sistema *honeycomb*. O desenho mostra como se retirássemos cerca de um quarto da parte superior, permitindo observar as nervuras que imitam a estrutura de um favo de mel. Esta configuração tem duas vantagens: economiza material na construção do espelho sem perda de rigidez e, após finalizado o espelho, permite uma aclimatação muito mais rápida com o ambiente. Desenho: Francisco Conte.

Apesar de todos esses pontos negativos, a década de 1970 viu a situação mudar drasticamente com a construção de vários telescópios relevantes, impulsionada por importantes avanços tecnológicos. O Hale de Monte Palomar manteria o seu reinado, mas agora com companheiros de peso.

O primeiro telescópio importante a entrar em operação foi o Mayall, instalado em Kitt Peak, no Arizona, um excelente sítio astronômico, com altitude de 2.096 m. O Mayall, que começou a operar em 1973, tem um espelho primário com 4 m de diâmetro, o que fazia dele à época o segundo maior telescópio do mundo, com enorme importância para a astronomia americana (ver figuras 88 e 89). O Mayall foi construído pelo National Optical Astronomy Observatory (NOAO), sendo o primeiro telescópio de grande porte construído pelo governo dos EUA. Todos os outros observatórios americanos até então pertenciam a universidades (Monte Wilson, Palomar, Lick etc.). A construção de um instrumento que pudesse ser utilizado por qualquer instituto de astronomia americano democratizava a pesquisa astronômica em um país que indubitavelmente possuía os mais importantes observatórios ópticos no mundo. Em 1976, uma observação feita no Mayall apontou a existência de gás metano em Plutão.



Figuras 88 e 89 - Vistas interna e externa do telescópio Mayall em Kitt Peak, o primeiro telescópio de grande porte pertencente ao governo americano. Os anteriores pertenciam a universidades. Fotos: Francisco Conte.

No mesmo sítio de Kitt Peak, outro instrumento importante havia sido instalado no ano de 1962: o telescópio solar McMath-Pierce, o maior de seu tipo por várias décadas. O telescópio principal possui um espelho primário com 1,60 m de diâmetro.

Ainda mais importante para a astronomia no período foi a construção dos primeiros grandes observatórios em montanhas no hemisfério sul, cuja ausência impedia a execução de observações astronômicas avançadas em boa parte do céu austral. O primeiro telescópio de grande porte a entrar em funcionamento no hemisfério sul foi o Anglo-Australian Telescope, em Siding Spring, um sítio astronômico localizado no sudeste da Austrália, com uma altitude de 1.164 m. Possuindo um espelho com 3,89 m de diâmetro,

era na época de sua inauguração, em 1974, o terceiro maior telescópio do mundo. Como seu nome sugere, o telescópio é operado tanto pela Austrália quanto pelo Reino Unido.

Dois anos depois começou a operar o Víctor Blanco Telescope, um gêmeo do Mayall de Kitt Peak, localizado em Cerro Tololo, ao lado da cidade de Vicuña, no Chile, a 2.207 m de altitude. Com um espelho primário de 4 m de diâmetro, o Víctor Blanco dividia o status de segundo maior telescópio do mundo na época. Ele foi construído pelo governo americano, que o opera através do NOAO, embora o Chile, por ceder o local, tenha direito a parte do tempo de observação. O Víctor Blanco teve um papel muito importante para os pesquisadores dos Estados Unidos, por permitir a eles o acesso ao céu do hemisfério sul.

Em 1977 começou a funcionar o telescópio de 3,60 m de Cerro de La Silla, também no Chile, um sítio localizado a 2.400 m de altitude. O 360 é um telescópio europeu, operado pelo ESO (European Southern Observatory), com parte do tempo de observação destinado ao Chile. O telescópio possui um espelho primário com 3,57 m de diâmetro (ver figura 90).



Figura 90 - Vista externa do telescópio de 3,60 m de diâmetro de Cerro de La Silla, um dos primeiros telescópios de grande porte instalados no Hemisfério Sul. Foto: Francisco Conte.

Ainda em 1977, começam as atividades do Du Pont Telescope, com 2,54 m de diâmetro, em Cerro Las Campanas (ao lado de La Silla), a 2.380 m de altitude, operado por um consórcio de instituições norte-americanas e pelo Chile. Em Las Campanas, em 24 de fevereiro de 1987, os astrônomos Ian Shelton e Oscar Duhalde descobriram a Supernova 1987A1, visualmente, sem o auxílio de binóculos ou telescópios. Era a primeira supernova observada a olho nu desde aquela vista por Kepler e Galileu, em

1604, e a única supernova descoberta até os dias de hoje em que se conhecia a estrela progenitora.

Dois telescópios construídos na década de 1970, porém, começaram a apontar os futuros caminhos do desenho de instrumentos de ponta para a virada do século e além. O primeiro desses dois projetos foi o BTA, Bolshoi Teleskop Alt-Azimutalny, instalado perto de Zelenchukskaya, a uma altitude de 2.070 m, na União Soviética, hoje Rússia, que iniciou suas atividades em 1975. O BTA tinha um espelho primário com 6 m de diâmetro e assim que começou a operar tornou-se o maior telescópio do mundo. O telescópio como um todo, entretanto, era extremamente problemático: seu espelho era feito em um bloco maciço de vidro, uma escolha muito inadequada para um instrumento desse porte, pois o bloco de vidro era extremamente pesado e volumoso. Isso fazia com que o telescópio tivesse uma inércia térmica muito grande, levando o aparelho a demorar literalmente horas para equalizar a temperatura do espelho com a atmosférica, fato que causava uma degradação brutal das imagens obtidas. Além disso, o espelho apresentava problemas de acabamento incompatíveis com um instrumento de pesquisa: sua superfície tinha rachaduras visíveis, que para não piorar a qualidade das imagens haviam sido recobertas com piche. Esse espelho foi substituído alguns anos depois da primeira luz do observatório, mas seu sucessor também era muito limitado no aspecto técnico. Uma conclusão direta era que o telescópio tinha uma finalidade muito mais política que científica: era importante para a URSS ter em operação o maior telescópio do mundo.

Em um dos aspectos de seu projeto, no entanto, o BTA mostrou o caminho do futuro: pela primeira vez um telescópio de grande porte usava uma montagem altazimutal em vez de equatorial. Montagens equatoriais possuem um eixo alinhado com o eixo de rotação da Terra, o que permite que um objeto seja acompanhado pelo telescópio durante horas com a utilização de um único motor de passo. Montagens altazimutais possuem dois eixos móveis, um deles no sentido azimutal, permitindo o apontamento para qualquer direção horizontal, e o outro em altura, viabilizando a observação de objetos desde próximos ao horizonte até o zênite. Para realizar o apontamento de um objeto no céu, uma montagem altazimutal necessita de três motores trabalhando coordenadamente: um controlando o eixo azimutal, outro controlando o eixo de altura e um terceiro rotacionando a câmera para compensar a rotação do céu noturno. Logicamente, a coordenação desses três motores é bastante complexa, e tem que ser feita de maneira ininterrupta por toda a duração da observação. Isso inviabilizava a opção por esse tipo de montagem. Mas a introdução dos computadores tornou a tarefa de coordenar o movimento dos três motores rotineira e simples. Em poucos anos, todos os observatórios de porte em todo o mundo passaram a utilizar montagens altazimutais. Em comparação com as montagens equatoriais, as altazimutais são extremamente compactas, muito leves e sua construção e operação são muito mais baratas.

O segundo instrumento cujo desenho veio a influenciar o futuro dos telescópios foi o Multiple Mirror Telescope, instalado no topo do Monte Hopkins, no Arizona, em um sítio muito bom do ponto de vista astronômico, a 2.700 m de altitude. O nome “telescópio de múltiplos espelhos” já antecipa o seu design revolucionário: em vez de um espelho primário, ele possuía um conjunto óptico com nada menos que seis espelhos de

1,80 m de diâmetro, além de um espelho central com um sétimo espelho com 80 cm de diâmetro, que servia como guia, sem colaborar com a coleta de luz do instrumento. Os espelhos eram alinhados por um feixe de *lasers* e toda a luz recebida pelos seis espelhos era encaminhada para um mesmo ponto. A área total de coleta de luz equivalia à de um telescópio com 4,5 m de diâmetro. O instrumento não produzia imagens, apenas espectros, e tinha uma operação complexa, mas custou uma fração do preço de um telescópio convencional com abertura equivalente (ver figura 91). O conjunto óptico estava instalado em uma montagem compacta do tipo altazimutal e em uma cúpula de desenho revolucionário, que mais parecia uma caixa, mas que funcionava perfeitamente. Todo o edifício da cúpula girava em conjunto com a montagem. Essa característica produziu um dos acidentes mais bizarros da história da astronomia, quando a cúpula abalroou um carro estacionado em local proibido, em 1984. O instrumento era um enorme desafio tecnológico e havia um grande risco de não funcionar como planejado. No entanto, pouco após o início das operações do observatório, o MMT descobriu uma das primeiras lentes gravitacionais, um duplo quasar, que na verdade eram duas imagens do mesmo objeto, demonstrando claramente as capacidades do telescópio.

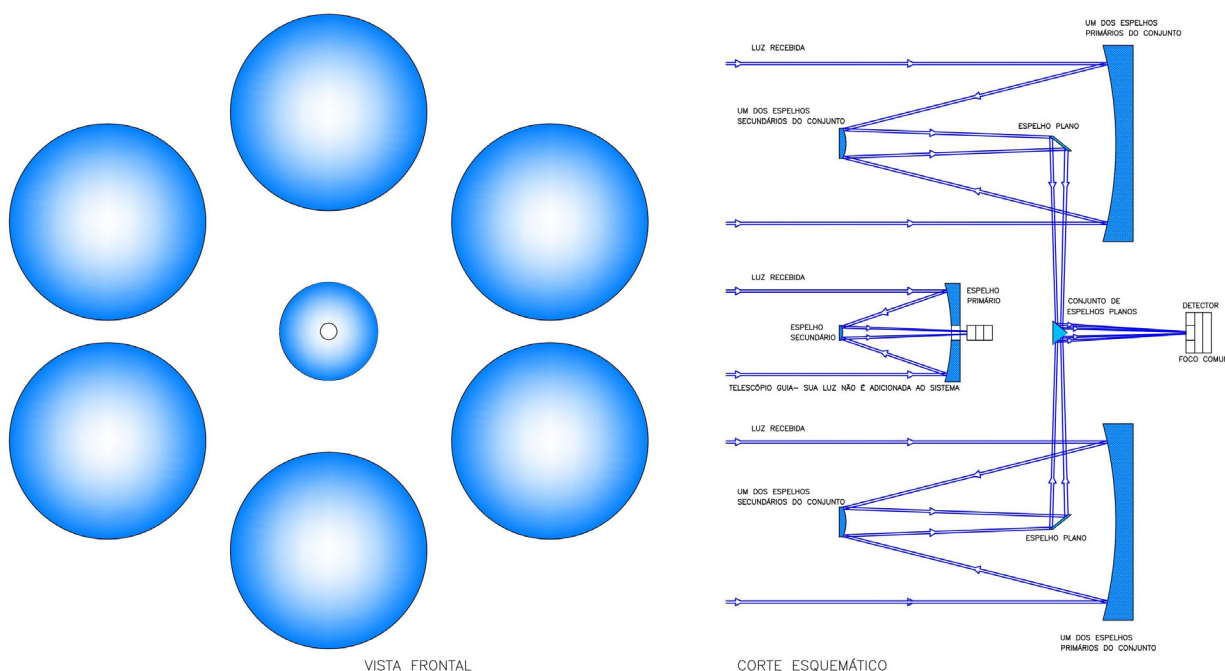


Figura 91 - Esquema óptico do MMT (Multiple Mirror Telescope), frontal e corte. O MMT foi um dos mais revolucionários telescópios da história, utilizando seis espelhos de 1,80 m, que equivalem em área a um espelho de 4,50 m, por uma fração do custo. Foi também um dos primeiros telescópios a utilizar uma montagem altazimutal. Desenho: Francisco Conte.

Outro telescópio de grande porte foi construído naqueles anos: o Canada-France-Hawaii Telescope, operado por um consórcio de instituições canadenses, francesas e havaianas. O telescópio foi instalado no Havaí, no topo do Mauna Kea, um vulcão adormecido, a 4.200 m de altitude, até hoje um dos melhores sítios astronômicos e um dos observatórios mais altos do mundo (ver figura 92). O telescópio tinha um espelho primário com 4 m de diâmetro, e quando iniciou suas operações tornou-se provavelmente o maior rival do Hale de Monte Palomar, pela combinação de tamanho e do seu excepcional sítio.



Figura 92 - Vista externa do Canada-France-Hawaii, um dos primeiros instrumentos a serem instalados no excepcional sítio astronômico do Mauna Kea. Foto: Francisco Conte.

Ainda antes do final da década, dois outros telescópios que trabalhavam exclusivamente no infravermelho começaram a operar no topo do Mauna Kea: o UKIRT (United Kingdom Infrared Telescope) (ver figura 93) e o NASA Infrared Telescope Facility (IRTF). O primeiro, operado pelo conselho britânico de ciência e tecnologia, iniciou atividades em 1978 e possui um espelho primário de 3,80 m de diâmetro. A partir de 2014, passou a ser operado pela Universidade do Havaí, pela Universidade do Arizona e pelo Lockheed Martin Advanced Technology Center. O segundo telescópio viu a primeira luz em 1979 e possui um espelho primário com 3 m de diâmetro.

O MMT, assim como o 360 de Cerro de La Silla, o Victor Blanco de Cerro Tololo, o Anglo Australian Telescope e o Canada-France-Hawaii, apontam para duas tendências que se tornariam cada vez mais fortes. A primeira é o consórcio de entidades de vários países para a construção de instrumentos melhores e mais avançados, dividindo custos e tempo de utilização, prática que vem se fortalecendo com o passar do tempo. A segunda é a de construir os novos observatórios em sítios com excelentes características de altitude e clima. No início do século XX foram instalados os primeiros observatórios em topo de montanha no sudoeste dos Estados Unidos, que ainda se mantêm na ponta dos sítios astronômicos. Na década de 1970 vimos o surgimento de excelentes sítios no Chile (Cerro Tololo, Cerro de La Silla e Cerro Las Campanas), na Austrália (Siding Spring) e no topo do Mauna Kea no Havaí, a mais de 4.000 m de altitude, provavelmente o melhor até aquela data.





Figura 93 - Vista externa do UKIRT (United Kingdom Infrared Telescope), um telescópio de grande porte e que opera exclusivamente no infravermelho. Foto: Francisco Conte.

Durante a década de 1970, iniciaram-se no Brasil os planos de construção de um telescópio de porte médio para a época. O local escolhido foi o Pico dos Dias, no sul de Minas Gerais, um sítio a 1.864 m de altitude, porém em uma área de clima tropical úmido, não muito apropriado para a astronomia. O telescópio iniciou suas atividades no ano de 1981 e possuía um espelho com 1,60 m de diâmetro. Apesar de suas limitações, o observatório foi muito importante no desenvolvimento da astronomia brasileira e é intensamente utilizado até hoje (ver figura 94).

Um outro telescópio óptico muito inovador começou a operar nesta década. Era um telescópio do tipo Cassegrain de pequeno porte, com apenas 0,91 m de diâmetro, instalado em um Lockheed C-141A Starlifter, um avião cargueiro adaptado. Batizado de Kuiper Airborne Observatory (KAO), apesar de suas limitações, tinha algumas vantagens importantes: operava em altitudes muito elevadas, da ordem de 9.000 m acima do nível do mar, e podia ser deslocado para um local apropriado para uma observação



Figura 94 - Vista interna do telescópio de 1,60 m do Pico dos Dias, até hoje o maior telescópio operado em território brasileiro. Foto: Francisco Conte.

específica, em qualquer parte do globo. A operação em altas altitudes minimizava tremendamente os problemas causados pela turbulência atmosférica. Aproveitando sua característica mobilidade, o KAO foi utilizado em março de 1977 para observar uma ocultação de uma estrela brilhante pelo planeta Urano. Essas ocultações são muito importantes na astronomia, pois sua duração exata pode fornecer dados sobre o diâmetro dos objetos astronômicos ou até permitir a constatação da existência de uma atmosfera em um planeta, por exemplo. Na observação de Urano, a equipe composta por James Elliot, Edward Dunhan e Jessica Mink percebeu uma série de cinco pequenas ocultações antes de a estrela ser ocultada por Urano, e novamente cinco pequenas ocultações após a passagem. A única explicação possível era que Urano possuía um sistema de anéis. Uma descoberta incrível do KAO, que operou entre 1974 e 1995.

Em 1979, o astrônomo americano J. W. Christy descobriu um satélite do então planeta Plutão. Utilizando um jogo de imagens obtidas pelo telescópio astrométrico do Observatório Naval em Flagstaff, Arizona, Christy percebeu que em algumas das imagens o pequeno disco de Plutão apresentava um pequeno apêndice. A análise das imagens permitiu estimar o período de translação entre os dois objetos. O satélite foi batizado de Caronte.

Duas notas importantes: ainda no ano de 1969, no observatório de Kitt Peak, foi feita a primeira observação remota da história. E, em abril de 1970, uma equipe composta por Gil Amelio, Michael Tompsett e George Smith produziu o primeiro sensor eletrônico do tipo CCD (*charge-coupled device*). Em 1976, Jim Janesick, da Universidade do Arizona, faz o primeiro uso de CCDs na astronomia. Tanto os CCDs como as observações remotas tenderiam a se tornar cada vez mais comuns na astronomia.

Em 1971, Louise Webster e Paul Murdin, do Observatório de Greenwich, conseguiram identificar uma estrela que correspondia ao objeto Cygnus X-1; a estrela já era catalogada como HDE 226868. Ao analisar o espectro da estrela, eles perceberam que ela possuía um companheiro massivo que não era observado. Era a primeira grande evidência da existência de buracos negros. Charles Thomas Bolton, do Observatório David Dunlap, da Universidade de Toronto, também fez a mesma descoberta, de maneira independente.

Em 1979, no Observatório Steward, no Texas, foi utilizada pela primeira vez uma nova técnica de observação que ampliaria enormemente as capacidades de detecção: a espectroscopia multiobjeto. Usando um instrumento desenvolvido no próprio observatório e batizado de MEDUSA, que utilizava um sistema de fibras ópticas conectadas a uma placa, estabeleciam-se previamente os pontos do campo de visão em que estariam localizados os objetos a serem observados. Cada conexão de fibra óptica conseguia produzir um espectro de alta resolução de um objeto astronômico, aumentando exponencialmente as capacidades do telescópio (ver figura 95).

Apesar de todo esse esforço, ainda havia o problema da turbulência atmosférica, que limitava o desempenho dos novos observatórios. A astronomia óptica parecia ter chegado a um impasse. Para tentar contornar essa situação desfavorável, astrônomos americanos e europeus começaram a planejar o lançamento ao espaço de um telescópio óptico de porte razoável. O projeto que viria a se concretizar com o Hubble Space Telescope traria a promessa de observações astronômicas sem as limitações causadas pela atmosfera.

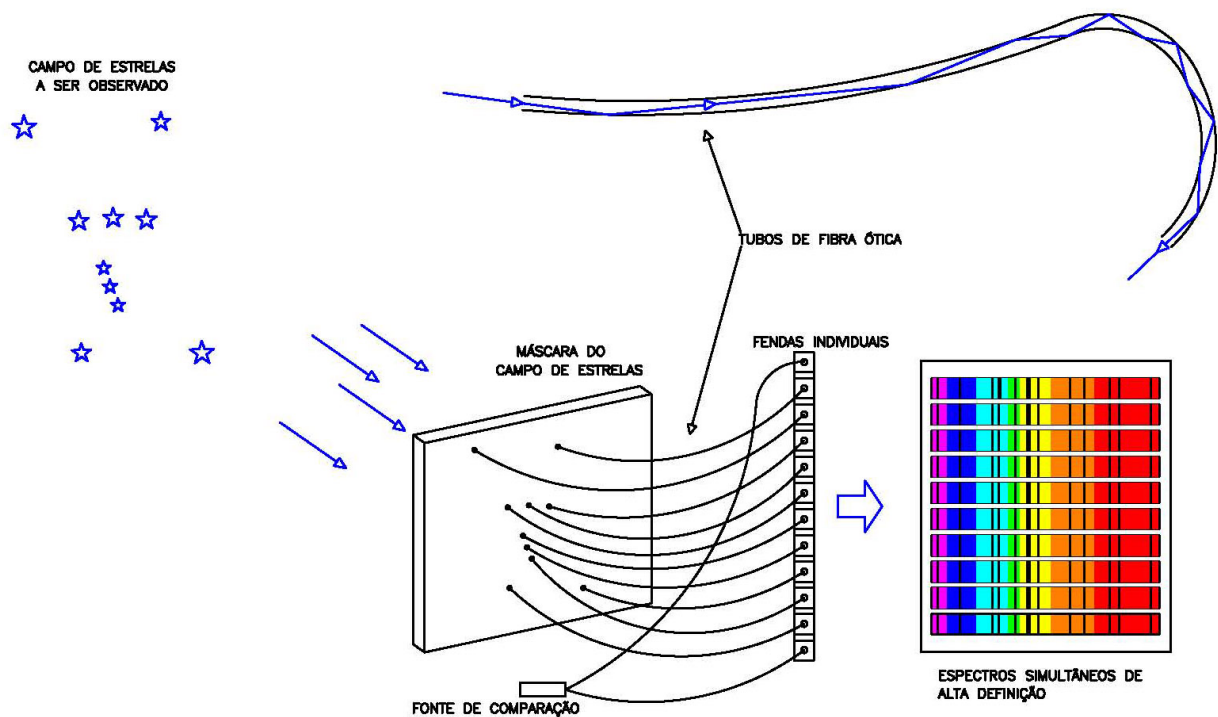


Figura 95 - Esquema de funcionamento de um sistema de espectroscopia multiobjeto. Um campo de estrelas é transferido para uma placa, onde são encaixados cabos de fibras ópticas em cada uma das aberturas destinadas às estrelas. As fibras ópticas são enviadas para uma central, que captura todos os sinais separadamente, permitindo a obtenção de uma série de espectros de alta definição ao mesmo tempo. Desenho: Francisco Conte.

A estimativa era que a resolução das imagens poderia melhorar em até dez vezes. Uma nova época de descobertas parecia estar se aproximando.

## PARTE 2 – TUDO AO MESMO TEMPO AGORA

### Introdução

A primeira metade deste livro termina com a comunidade astronômica sendo surpreendida por novas descobertas e conhecimentos: a radiação cósmica de fundo de micro-ondas, os quasares e outras formas de núcleos ativos de galáxias, os pulsares e a indicação de que alguns entes teóricos como buracos negros existiam na realidade. Mas o próximo período viria a trazer ainda mais surpresas.

Apartir de meados da segunda metade do século XX, até os dias atuais, o desenvolvimento da astronomia tem sido extraordinário em praticamente todos os campos de estudo. Isso se deve à introdução de uma série de inovações técnicas, como a construção de espelhos de grandes diâmetros e a criação de novos tipos de detectores eletrônicos e técnicas de coleta de dados; o surgimento de novas técnicas de observação, que minimizam ou anulam a degradação das imagens causada pela turbulência atmosférica; o desenvolvimento da interferometria óptica; o lançamento de telescópios espaciais com instrumentos trabalhando em comprimentos de onda nunca antes observados; a criação de consórcios entre países e universidades para a construção de novos e mais poderosos instrumentos e a cooperação entre observatórios para grandes programas conjuntos; e a observação de um mesmo evento em vários comprimentos de onda e em outros meios, como as ondas gravitacionais, ou por neutrinos, entre outros avanços importantes. Além disso, a partir do início dos anos 1990, o uso de computadores se espalhou pelo mundo, impactando diretamente a astronomia, que entrou em uma nova era, cada vez mais informatizada, culminando com o que hoje chamamos de *big data*. Todos esses eventos resultaram em inúmeras descobertas e em um avanço incrível no conhecimento astronômico.

Você talvez não perceba, mas estamos no meio de uma época de ouro na história da astronomia. Para quem acompanha os acontecimentos que estamos vivenciando nos tempos recentes é evidente um avanço exponencial na área. Entender o panorama completo exige um esforço constante para se manter atualizado com todos os desenvolvimentos e avanços importantes dos últimos tempos.

Esta segunda parte do livro é uma tentativa de descrição dessa situação, com acontecimentos e descobertas que estão ocorrendo de forma praticamente simultânea, alavancando a novos patamares o conhecimento astronômico de nosso período.

## CAPÍTULO 8

### Telescópios ópticos nos anos 1980 e 1990 – A tecnologia muda o jogo

Em comparação com a década de 1970, quando assistimos a construção de vários telescópios de grande porte, a década de 1980 foi uma época de calmaria. No entanto, as inovações tecnológicas criadas nesse período causaram um impacto enorme no desenvolvimento astronômico.

Em 1989, dois telescópios, o NTT (New Technology Telescope) e o NOT (Nordic Optical Telescope), iniciaram uma nova era na história dos telescópios ópticos baseados em terra. Eles foram os primeiros telescópios a utilizar conceitos avançados de controle da óptica que aumentariam em muito a capacidade de observação da nova geração de telescópios. A primeira inovação técnica a ser instalada foi a óptica ativa. O NOT começou a operar alguns meses antes e possuía um espelho primário com 2,50 m de diâmetro, não muito grande para os padrões da época. Ele foi instalado em La Palma, Ilhas Canárias, um ótimo sítio astronômico. Muito mais poderoso, o NTT (New Technology Telescope) foi instalado em Cerro de La Silla, tinha um espelho primário com abertura de 3,58 m e em pouco tempo se tornou um padrão de qualidade para observatórios ópticos (ver figura 96). Ambos utilizavam uma nova técnica chamada óptica ativa. O NOT utilizava esse recurso no espelho primário e o NTT tanto no primário quanto no secundário.



Figura 96 - O NTT (New Technology Telescope), localizado no Cerro de La Silla, foi o primeiro telescópio de grande porte a utilizar a técnica de óptica ativa. Seu design *high-tech* nem sequer lembra um telescópio tradicional. Foto: Francisco Conte.

Muito mais poderoso, o NTT (New Technology Telescope) foi instalado em Cerro de La Silla, tinha um espelho primário com abertura de 3,58 m e em pouco tempo se tornou um padrão de qualidade para observatórios ópticos (ver figura 96). Ambos utilizavam uma nova técnica chamada óptica ativa. O NOT utilizava esse recurso no espelho primário e o NTT tanto no primário quanto no secundário.

Mas o que é a óptica ativa? Até os anos 1980, grandes telescópios utilizavam, para a construção de espelhos, blocos de vidro volumosos e que pesavam várias toneladas, mesmo quando era adotado o sistema de *honeycomb* (ver figura 87, pg. 123), muito mais leve que um espelho maciço. A situação era grave. Durante uma observação, à medida que esses espelhos mudavam de inclinação, o enorme peso do conjunto óptico se distribuía de maneira desigual por todo o bloco de vidro. Isso acabava por causar pequenas deformações no perfil da superfície do espelho, que resultavam em degradação das imagens obtidas. Além disso, outros fatores como vento e temperatura também influíam sobre o espelho, fazendo com que ele perdesse o seu perfil ideal durante grande parte da observação. Os fabricantes tentavam minimizar o problema construindo espelhos mais espessos, o que significava um aumento de custos exponencial em relação ao diâmetro do espelho, além de criar uma série de problemas técnicos relacionados à inércia do corpo e também à aclimação térmica.

Já a óptica ativa utiliza um espelho muito fino, com proporções similares às de uma lente de contato. No dorso do espelho existe um conjunto de sensores que mede o peso de cada parte em tempo real. Junto a esses sensores existe um conjunto de atuadores que pressiona cada trecho de maneira a manter o perfil do espelho em condições perfeitas durante toda a observação (ver figura 97). O sistema produz imagens com qualidade muito superior à dos telescópios tradicionais e o espelho é muito mais barato e leve, assim como sua montagem, o que acaba por baratear enormemente os custos de construção e operação dos telescópios. Além disso, existem algumas vantagens inesperadas: o espelho do NTT foi construído com uma falha no seu perfil, similar à que viria a ocorrer no telescópio espacial Hubble alguns anos depois, porém a óptica ativa do NTT foi capaz de corrigir o problema sem a necessidade de um novo polimento.

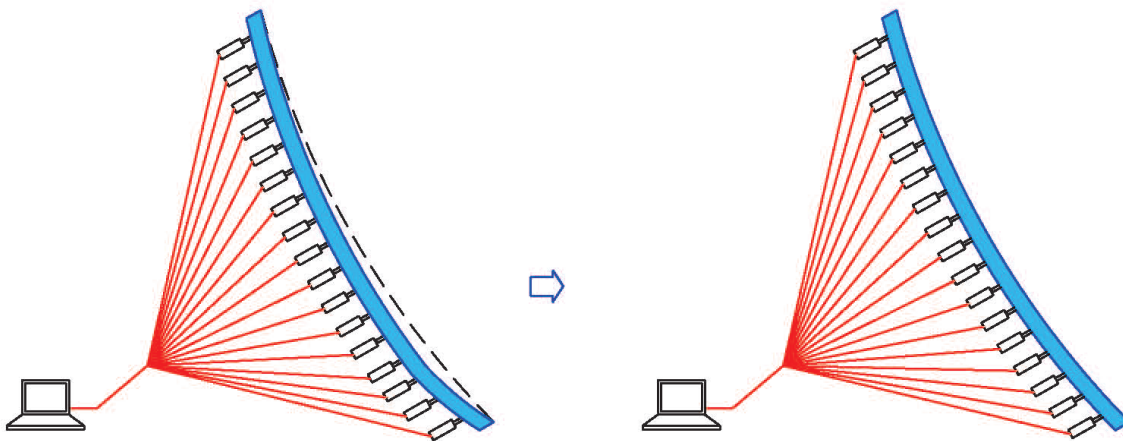


Figura 97 - Óptica ativa: à esquerda vemos de maneira exagerada as deformações causadas em um espelho primário pela ação da gravidade; à direita podemos ver o perfil do espelho corrigido pelos sensores e atuadores do sistema de óptica ativa. Desenho: Francisco Conte.

Outro problema é a atmosfera terrestre, que é um meio muito mais denso do que o espaço interestelar ou intergaláctico. Esse fato bastaria para ela interferisse de maneira negativa em uma observação astronômica, mas como já vimos são as turbulências que ocorrem na atmosfera que mais vão comprometer o desempenho dos instrumentos ópticos de pesquisa astronômica.

A quantidade de energia absorvida pela atmosfera depende de uma série de fatores, dentre os quais podemos incluir: hora do dia, latitude, estação do ano, umidade, altitude, pressão, cobertura de nuvens, poeira em suspensão, assim como a quantidade de luz refletida pelo solo (albedo) de cada região. O resultado dessa multiplicidade de fatores é que as várias partes da atmosfera são aquecidas de maneira diferente. Mesmo em um céu aparentemente limpo e claro, podem estar ocorrendo uma grande quantidade de movimentos de massas de ar e variações de temperatura nas várias camadas da atmosfera, mesmo que toda essa agitação seja praticamente invisível a nossos olhos. O ar quente tende a refratar menos a luz visível que o ar frio. Dessa maneira, a luz proveniente do espaço pode atravessar bolsões diferenciados de atmosfera, o que vai fazer com que a frente de onda, originalmente plana, quando produzida por um objeto

astronômico, seja severamente distorcida pelas turbulências atmosféricas. Esse efeito pode ser percebido a olho nu quando se observa à distância a camada de ar sobre uma estrada asfaltada em um dia quente. É esse tipo de turbulência que provoca a cintilação das estrelas.

A quantificação dessa turbulência em um dado local é chamada pelos astrônomos de *seeing*. Em teoria, quanto maior o diâmetro do espelho primário de um telescópio, melhor deveria ser a resolução angular do instrumento. Na prática, entretanto, isso não acontece. Ao analisarmos imagens obtidas com telescópios com tamanhos diversos de espelho primário, vamos perceber que a partir de um diâmetro de apenas 20 cm praticamente não se percebem mais melhorias no detalhamento das imagens. Assim, a definição de imagem do gigantesco telescópio Hale, de Monte Palomar, com seus 5 m de diâmetro, não apresenta um desempenho muito melhor que um telescópio amador de 20 cm de diâmetro. Obviamente, para a astronomia o telescópio de Monte Palomar ainda vai ser um instrumento muito superior, devido ao seu poder de coleta de luz.

Em 1953, Horace Babcock propôs pela primeira vez que seria possível eliminar, ou minimizar, as distorções atmosféricas na frente de onda de luz ao aplicar a inversa distorção pouco antes do plano focal da imagem. O princípio funcionaria da mesma maneira que a utilização de óculos para corrigir os problemas de focalização do olho humano. Pode parecer simples de descrever, mas é bastante complexo de ser executado, pois as condições atmosféricas mudam muito rapidamente e os “óculos corretivos” teriam que se adaptar a todas as alterações durante o período de observação. Para funcionar, seria necessário ajustar o perfil da lente corretiva a cada 5 a 10 milissegundos, implicando que nesse exíguo período de tempo a frente de onda deveria ser analisada, o perfil de lente corretivo deveria ser calculado e algum mecanismo deveria executar a alteração de perfil. Tudo isso de maneira contínua, durante todo o período de observação. Todas essas dificuldades técnicas deixaram o conceito de óptica adaptativa como uma ótima ideia difícil ou impossível de ser realizada por aproximadamente 25 anos.

O mundo vivia, nesse período, uma intensa guerra fria entre americanos e soviéticos, e verbas literalmente astronômicas eram gastas anualmente em ações de espionagem. Satélites espiões utilizando câmeras de altíssima resolução sofriam com a degradação de imagens por causa da turbulência atmosférica; da mesma forma, telescópios militares baseados em terra rastreavam os céus noturnos à procura de satélites inimigos, convivendo com as mesmas limitações que os telescópios astronômicos. Em meados dos anos 1970, a força aérea norte-americana iniciou um programa para o desenvolvimento de técnicas que corrigissem os problemas causados pela turbulência atmosférica. Durante esse período, uma série de técnicas e instrumentos foram desenvolvidos. As primeiras imagens a utilizar essas técnicas foram obtidas em Haleakalā, no Havaí, em um telescópio com 1,60 m de diâmetro, no ano de 1982. Era o início da era da óptica adaptativa, mas todas as informações eram classificadas como segredos militares e ninguém no meio astronômico sabia de sua existência, ou de seus resultados.

A partir do final dos anos 1980, grupos de astrônomos começaram a dedicar tempo e experimentos para desenvolver sistemas de óptica adaptativa, sem contar, porém, com as verbas e os recursos dos militares. O ESO conseguiu desenvolver um sistema ainda limitado, chamado COME-ON, que foi instalado em 1990 no telescópio de 3,60 m de Cerro de La Silla. Em 1991, com o fim da Guerra Fria, a força aérea norte-americana

decidiu desclassificar como segredo militar os instrumentos e técnicas de óptica adaptativa e tornar públicos os detalhes de funcionamento dos sistemas. Essa decisão possibilitou o maior salto de qualidade das observações astronômicas desde a invenção dos telescópios.

Na verdade, o que convencionamos chamar de óptica adaptativa é um conjunto de técnicas e equipamentos, não um único sistema. Uma das técnicas mais simples utilizadas é chamada de Shack-Hartmann Wavefront Sensor (SHWFS). Um aparelho do tipo SHWFS consiste em um arranjo feito com várias pequenas lentes (chamadas de *lenslets*) em um arranjo compacto instalado à frente de uma placa de CCD (*charge-coupled device*). O processo se inicia observando um objeto pontual, como uma estrela. A frente de onda da luz proveniente desse objeto atravessa cada uma das *lenslets* e então atinge o sensor. Cada *lenslet* produzirá o foco em um ponto específico e a direção particular de cada uma será registrada no CCD. A distribuição dos vários pontos de foco poderá ser analisada por computadores que calcularão a deformação em toda a frente de onda. A partir desse dado, atuadores poderão ser ativados para aplicar uma tensão específica em cada parte da base do espelho, fazendo com que sua superfície adquira uma forma que anule a deformação da frente de onda (ver figura 98). Esse processo é repetido centenas de vezes por segundo, durante toda a observação.

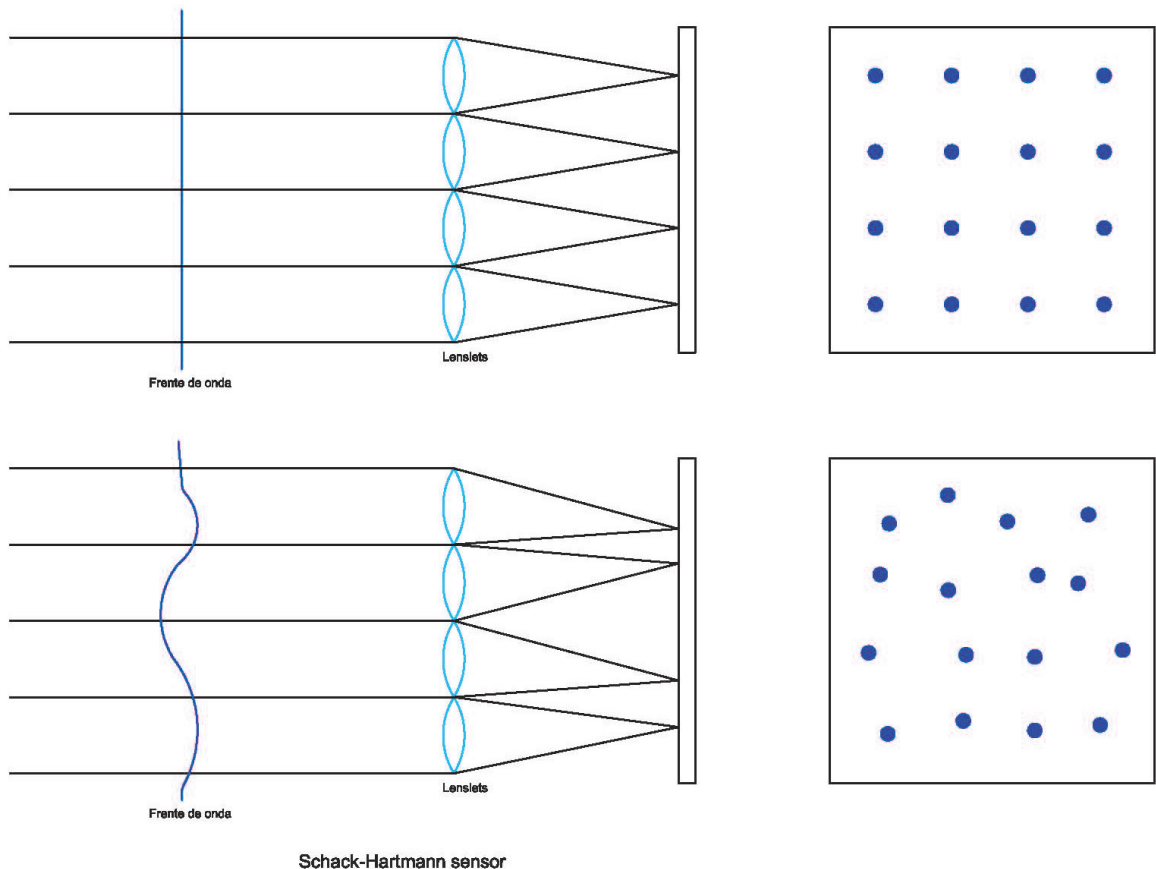
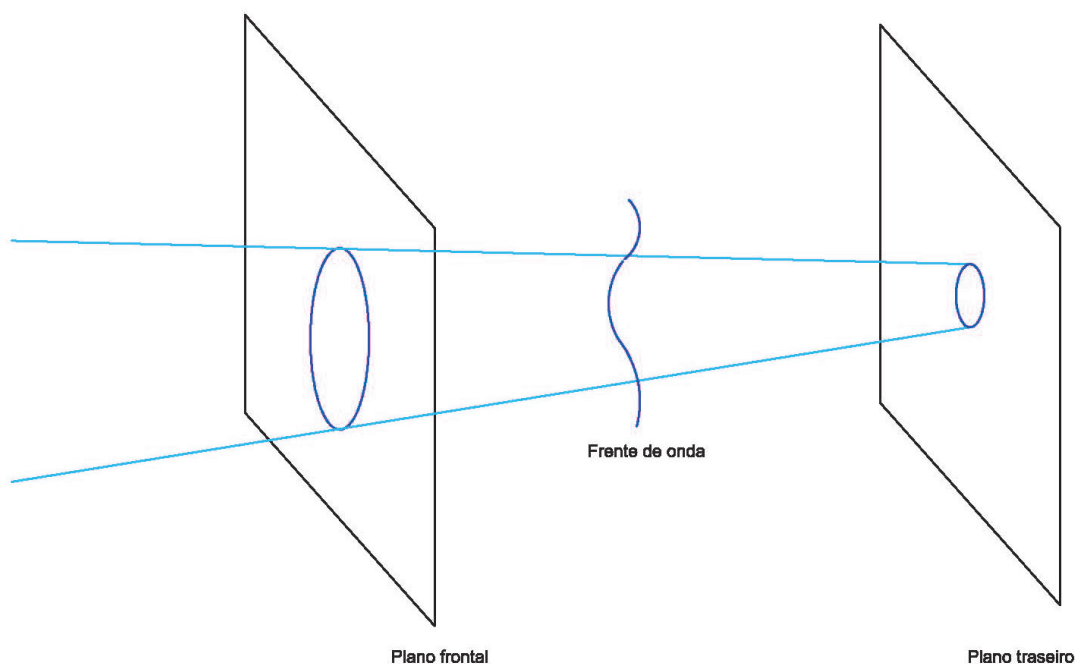


Figura 98 - O Shack-Hartmann Wavefront Sensor (SHWFS) consiste em um arranjo feito com várias pequenas lentes (chamadas de *lenslets*) em um arranjo compacto instalado à frente de uma placa de CCD. A frente de onda deformada pelas turbulências atmosféricas, depois de atravessar cada uma das *lenslets*, vai produzir focos em pontos distintos. Um computador pode analisar essa distribuição deformada e calcular automaticamente correções para o perfil de um espelho, anulando a deformação. Na parte superior vemos uma frente de onda plana, sem deformação. Desenho: Francisco Conte.



Os sensores do tipo SHWFS não são os únicos utilizados em óptica adaptativa. Um dos sistemas mais inventivos foi desenvolvido a partir dos trabalhos do casal François e Claude Roddier, que após sua formação em Paris e um período de trabalho na Universidade de Nice, se transferiram para o Havaí e acabaram por criar os chamados sensores de curvatura. A ideia básica consiste em instalar um sensor um pouco à frente do plano focal do telescópio e outro sensor um pouco atrás. Dessa forma, a distribuição de brilho é dividida em dois planos. A depender da deformação da frente de onda, o sensor da frente é menos iluminado, enquanto o sensor posterior é mais iluminado, ou o oposto. Analisando-se as diferenças de iluminação entre os dois planos é possível calcular a deformação total da onda (ver figura 99).



### SENSOR DE CURVATURA

Figura 99 - Sensor de curvatura, outra solução para o problema de calcular a deformação da frente de onda causada pela turbulência atmosférica. Desenho: Francisco Conte.

Uma vez calculada a deformação da frente de onda é necessário fazer a sua correção. Esse processo pode ser realizado de diversas maneiras, mas a solução mais comum é a utilização de um espelho deformável. Essa técnica consiste na construção de um espelho muito delgado apoiado em uma série de atuadores, cada um deles capaz de empurrar ou puxar uma área do espelho, permitindo que sua superfície assumira uma série imensa de perfis, de maneira a cancelar a deformação da frente de onda. Esse processo, como dito anteriormente, é repetido incessantemente de 100 a 200 vezes a cada segundo durante todo o tempo de duração da observação (ver figura 100).

Embora conceitualmente simples, a implantação de técnicas efetivas de óptica adaptativa foi um processo que demorou vários anos para se tornar viável. Um dos maiores problemas a ser superado foi a criação de um sistema de computadores capaz de realizar o volume imenso de cálculos exigidos pelo processo. Essa é uma das razões para o sistema ser implantado inicialmente com mais sucesso em observatórios que trabalham na faixa do infravermelho, que exige menos cálculos do que a faixa da luz visível.

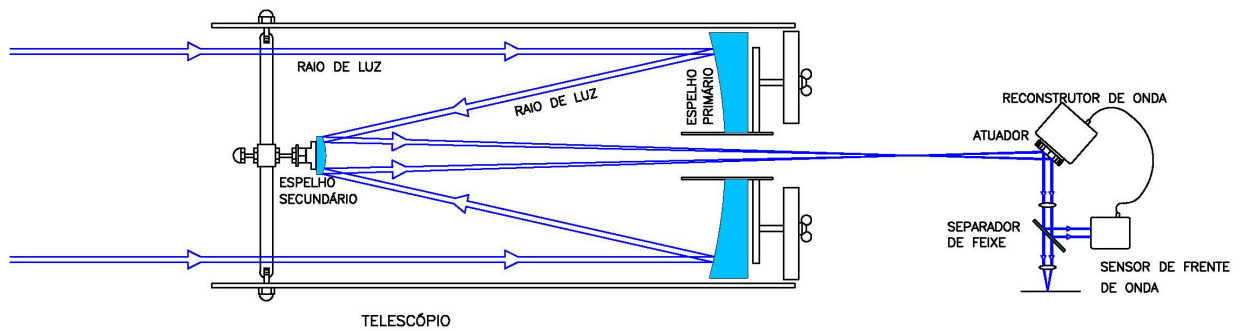


Figura 100 - Esquema de um sistema de óptica adaptativa. A luz captada pelo telescópio atravessa um aparato que bifurca o feixe óptico, a parte refletida passa por um sistema que analisa a frente de onda e automaticamente corrige o perfil do espelho para neutralizar as deformações. O processo é repetido centenas de vezes por segundo. Desenho: Francisco Conte.

Outro problema para a utilização da óptica adaptativa é que nem sempre existe um objeto pontual (estrela) brilhante nas proximidades do objeto a ser observado que permita a análise da frente de onda. Uma solução interessante, que produz resultados razoáveis, é a criação de estrelas artificiais utilizando um forte laser de sódio, na faixa de 589 nm (de coloração amarelo-alaranjada), que tende a refletir como um ponto a 90 km de altitude, onde existe uma tênue camada de átomos de sódio. A técnica, no entanto, tem suas limitações. Manter um poderoso laser na faixa dos 589 nm e com uma potência de 10 w trabalhando por todo o período da observação não é uma tarefa simples, que normalmente exige a construção de uma sala separada fora da cúpula principal. Apesar de melhorar sensivelmente a qualidade das imagens obtidas, o sistema com lasers ainda não produz resultados tão bons se comparados com os produzidos com a utilização de uma estrela de verdade. Várias equipes de diversos países trabalham no desenho de novos sistemas que devem utilizar múltiplos lasers, refinando os resultados da óptica adaptativa e gerando imagens com definição próxima do limite de difração. O ESO já utiliza um sistema com cinco lasers. O primeiro telescópio astronômico a utilizar a óptica adaptativa com um laser foi o Shane, no Observatório Lick, em 1996.

A eletrônica digital está sendo, progressivamente, mais utilizada na astronomia. Além do seu uso na óptica ativa e na óptica adaptativa, cada vez mais são utilizados detectores eletrônicos, que ampliam enormemente a capacidade dos instrumentos de pesquisa, alterando inclusive a forma de atuação dos astrônomos, com a popularização de observações remotas.

Detectores eletrônicos como os fotomultiplicadores (ver figura 101) já eram usados há algumas décadas, mas a utilização cada vez maior dos CCDs acabou por alterar a astronomia por diversas razões: primeiro porque esse tipo de detector possui uma sensibilidade muito maior na captura dos fótons – sua eficiência quântica está na casa dos 90%, contra 3% a 10% das chapas fotográficas; segundo porque placas fotográficas são muito caras, enquanto os CCDs, após o investimento inicial, acumulam muitas observações em dispositivos eletrônicos de forma extremamente barata; terceiro porque uma observação que demoraria horas em um telescópio utilizando placas fotográficas pode ser feita em poucos minutos com CCDs. Além disso, os CCDs, assim como os fotomultiplicadores, podem transformar todas as observações em números, o que simplifica muito a atuação dos astrônomos, ampliando enormemente as possibilidades de pesquisa (ver figura 102).

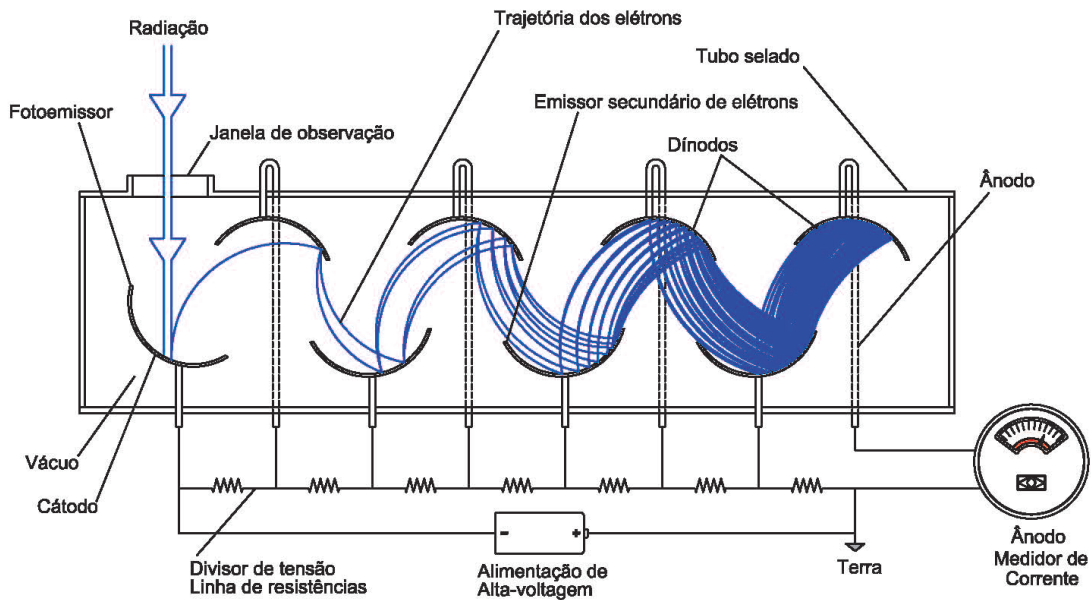


Figura 101 - Esquema de funcionamento de um fotomultiplicador. Quando um fóton penetra no interior do fotomultiplicador e atinge sua parede interna, dois elétrons são emitidos e cada um deles vai colidir novamente com a parede, emitindo novamente dois elétrons. Esse processo consegue ampliar incrivelmente sinais fracos de uma observação. São também instrumentos de resposta muito rápida, podendo registrar fenômenos de duração muito curta. Desenho: Francisco Conte.

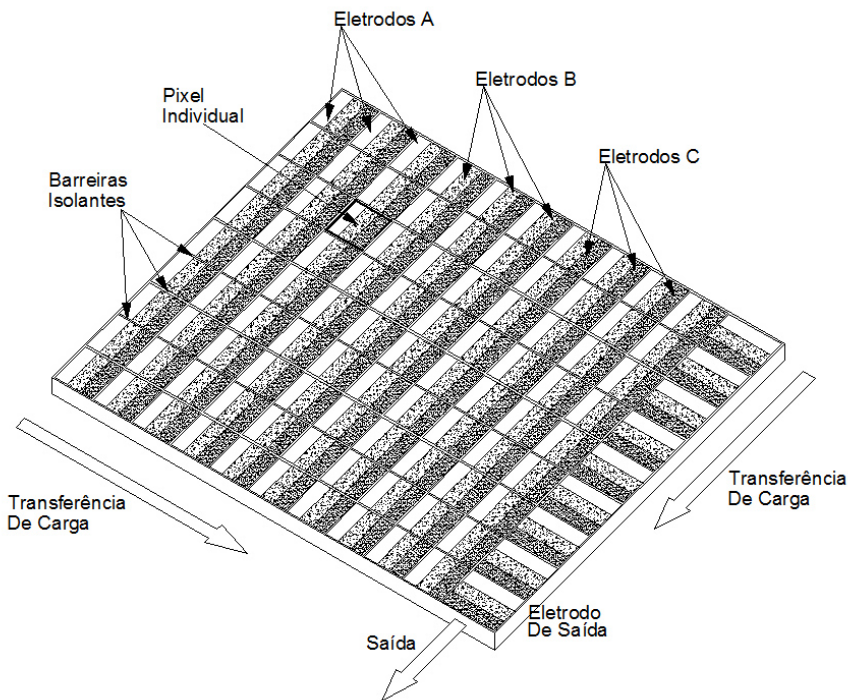


Figura 102 - Desenho esquemático de uma placa de CCD (*charge-coupled device*), onde se pode observar como é feito o transporte da informação captada em cada conjunto de eletrodos. Desenho: Francisco Conte.

Eletrônica à parte, o espelho primário é a alma de um telescópio óptico. A tecnologia da óptica ativa criava condições para a construção de espelhos de grande porte utilizando muito menos material (vidro), com conseqüente redução de custos tanto do próprio espelho

quanto de sua montagem. O início dos anos 1990 testemunhou a chegada dos primeiros telescópios de grande porte de nova geração. A seguir veremos alguns exemplos.

A Universidade da Califórnia queria construir um telescópio de grande porte, para o início dos anos 1990. Jerry Nelson propôs uma abordagem muito inovadora: produzir um espelho fragmentado a partir da junção de vários espelhos pequenos, formando um mosaico. Para convencer a comunidade científica local de que suas ideias eram exequíveis, Nelson montou uma pequena equipe e começou a construir pequenos protótipos de espelhos utilizando o seu conceito.

Em meados dos anos 1980, a universidade procurava fundos para a construção de um telescópio de 10 m de diâmetro, com Nelson no comando. De maneira surpreendente, quando a universidade estava quase completando a cota de doações para o telescópio, a família de J. M. Keck resolveu doar a verba total para o projeto, desde que o telescópio fosse batizado com o nome do doador. Percebendo a oportunidade, a universidade mudou os seus planos iniciais e resolveu construir não um, mas dois telescópios de 10 m, a serem erigidos no topo do vulcão Mauna Kea, no Havaí, que, como já vimos anteriormente, é um excepcional sítio astronômico.

O projeto para os dois Kecks previa a construção de um espelho segmentado, montado a partir de 36 peças hexagonais, com cerca de 1,80 m de diâmetro cada. As peças seriam agrupadas em um suporte único, afixado em um conjunto de sensores e atuadores de óptica ativa, garantindo o perfil parabólico correto em cada segundo da observação. Como o perfil do espelho segmentado seria parabólico, os espelhos hexagonais deveriam ter perfis diferentes, à medida que se afastavam radialmente do centro do conjunto. Dessa forma, três perfis diferentes de espelhos tiveram que ser desenvolvidos para permitir o funcionamento do sistema.

A solução adotada, com um conjunto de 36 espelhos hexagonais, surgiu após uma série de análises: quanto menor o espelho, mais fácil de trabalhar o bloco de vidro e conseguir o perfil desejado e o polimento, assim como espelhar a superfície. Porém, com menores espelhos seria necessário um número maior de peças para atingir a área desejada de coleta de luz, o que implicaria em um aumento de dificuldades no conjunto de detectores e atuadores que formam o sistema de controle da superfície. Os espelhos foram fabricados pela empresa Shott Glaswerke, em Mainz, Alemanha, utilizando blocos de um tipo especial de vidro chamado Zerodur, que possui um baixíssimo coeficiente de dilatação. O desafio de trabalhar o vidro até atingir o perfil correto era multiplicado por 36, e seria muito trabalhoso e demorado obter os espelhos com as técnicas convencionais. Nelson contou com a colaboração de Jacob Lubliner, que era professor da Universidade da Califórnia em Berkeley. Eles desenvolveram uma técnica chamada de *stress-polishing*, que consiste em aplicar uma pressão em áreas determinadas do fundo do bloco de vidro, causando uma leve deformação na superfície frontal do espelho. O polimento da superfície era feito, então, até que esta ficasse plana. Nesse ponto a pressão na parte do fundo era retirada e o bloco de vidro retornava a seu estado normal, mas na operação o polimento executado resultava no perfil desejado para o espelho (Zirker, 2005, pp. 131-141) (ver figura 103). O primeiro telescópio Keck passou a operar em 1992 e o segundo em 1996. A era dos telescópios gigantes se iniciava. Cada um dos Kecks possuía uma

área de captação de luz quatro vezes maior que o Hale de Monte Palomar, com uma óptica muito superior (ver figura 104).

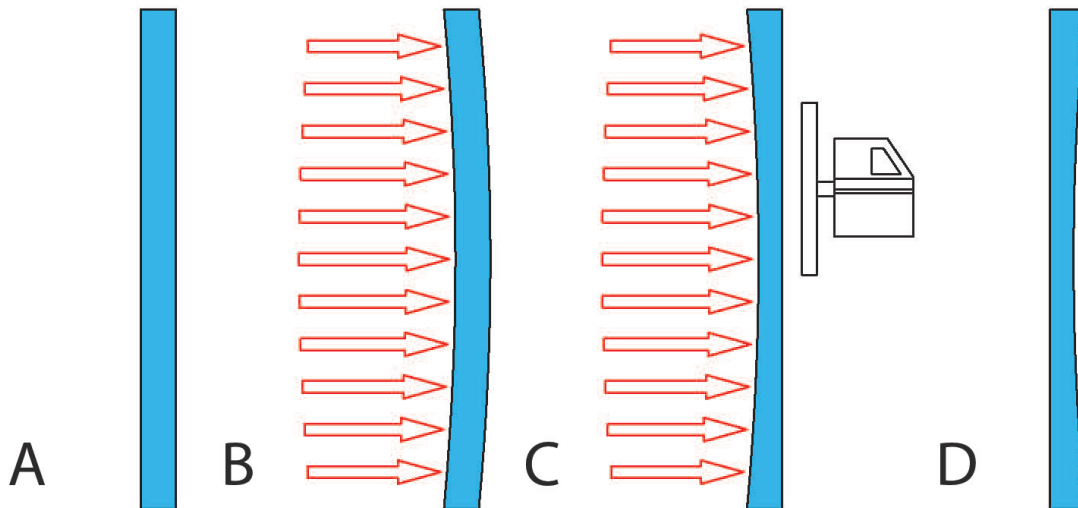


Figura 103 - Método de *stress polishing*, usado para polir espelhos segmentados. Na posição A vemos o bloco de vidro em repouso (vista lateral); na posição B o bloco de vidro recebeu uma pressão calculada na parte posterior e ficou deformado na parte da frente, que ficou curva; na posição C vemos o polimento feito na parte da frente, até que esta fique plana; na posição D vemos que, quando é retirada a pressão na parte posterior, o bloco de vidro volta à posição de repouso e a parte da frente que recebeu o polimento adquire o perfil curvo desejado. Desenho: Francisco Conte.



Figura 104 - Os dois telescópios Keck no alto do Mauna Kea. Foto: Francisco Conte.

Em 1997, entra em funcionamento outro telescópio de grande porte, o Hobby-Eberly Telescope, ou HET, que foi planejado para ser um aparelho poderoso, com um custo extremamente baixo. A redução de custos em relação a um telescópio convencional atinge a marca dos 80%. Para conseguir esse objetivo, ele foi otimizado para trabalhar apenas com espectroscopia, o que diminuiu o custo da instrumentação. A sua inclinação é fixa, simplificando e barateando a sua montagem, que apenas se move no sentido azimutal. Assim como o Keck, o HET também possui um espelho segmentado, mas com perfil semiesférico, o que torna muito mais fácil o trabalho de fabricação de cada peça hexagonal, pois são todas idênticas, com a mesma curvatura (no caso do Keck, com perfil parabólico, as peças mudam de curvatura de acordo com a distância para o centro do espelho). O espelho do HET é na verdade maior que o do Keck, mas o seu sistema de operação permite que se aproveite apenas parte de sua área total (ver figura 105). O conjunto funciona como se o telescópio tivesse um espelho primário com 9,20 m de diâmetro. Como o telescópio não se move no eixo de altitude, a sua cúpula é mais simples que a da maioria dos observatórios. Essa montagem simplificada permite que o aparelho faça observações em 70% do céu noturno. O HET foi instalado no Texas, no sítio do histórico Observatório McDonald, a 2.026 m de altitude, e é operado por um consórcio de universidades americanas e alemãs.

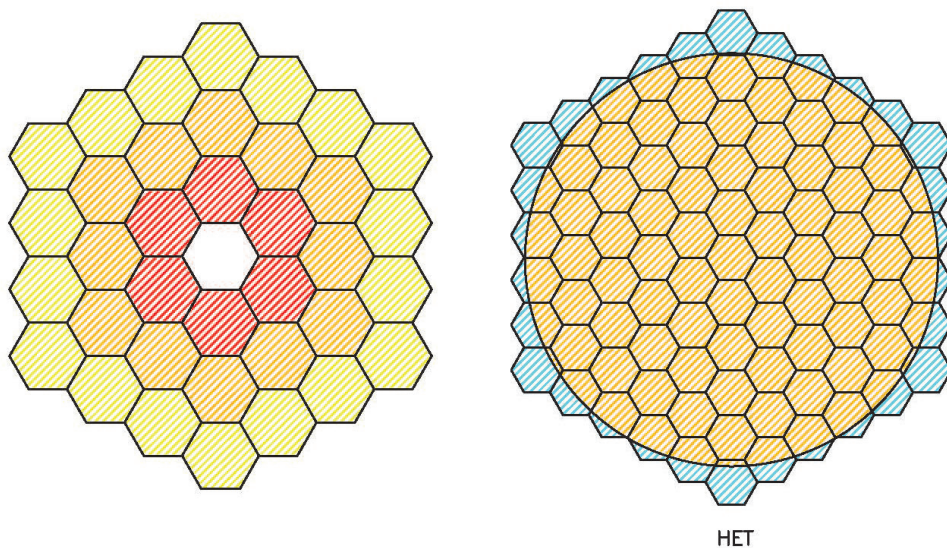


Figura 105 - Comparação entre os espelhos primários dos Kecks com o do Hobby-Eberly Telescope. Os 36 espelhos dos Kecks são maiores e, como o perfil geral é parabólico, a partir do centro os espelhos devem possuir perfis diferentes (aqui marcados com cores diferentes). No Hobby-Eberly Telescope todos os 91 espelhos segmentados são polidos de maneira igual, pois o perfil é semiesférico. Além disso, no HET os detectores só conseguiam coletar parte da luz captada pelos espelhos. Desenho: Francisco Conte.

Pode parecer estranho, depois de mencionar esses gigantes, falar de um telescópio de porte médio, mesmo para os anos 1970, mas o Sloan Digital Sky Survey é um projeto muito interessante, que utiliza um telescópio com 2,50 m de diâmetro e um largo campo de visão, instalado do topo do Apache Point, no estado do Novo México, a 2.788 m de altitude. O SDSS trabalha dedicado apenas à observação de galáxias a grandes redshifts, obtendo imagens e espectros multibanda dos objetos observados. O levantamento do SDSS cobre cerca de 35% do céu noturno, produzindo cerca de 200 GB de dados a cada noite de trabalho.

Mas os espelhos segmentados não eram a única possibilidade para a construção de um telescópio de grande porte. A primeira empresa a construir um espelho monolítico gigante, na classe dos 8 metros, foi a Schott Glaswerke, com os espelhos para as duas primeiras unidades das quatro previstas para o VLT (Very Large Telescope). Vou explicar em mais detalhes o projeto do VLT em um capítulo mais à frente. A primeira unidade entrou em funcionamento em 1998 e a segunda viu a primeira luz em 1999. A empresa optou pela construção de um espelho bastante delgado, denominado menisco, que utilizava a óptica ativa para manter o perfil do espelho sempre otimizado para a observação astronômica. Os telescópios das unidades do VLT utilizam espelhos de Zerodur com 8,20 m de diâmetro. O Zerodur é basicamente um vidro cerâmico, feito à base de aluminossilicato de lítio, patenteado pela Schott desde 1968 (ver figura 106). O mesmo material foi utilizado na construção de outros telescópios de grande porte, incluindo os Kecks, com seus espelhos segmentados. O Zerodur é um material que reúne excelentes qualidades para utilização na astronomia, com um baixíssimo coeficiente de dilatação térmica e homogeneidade muito alta, com incidência de formação de bolhas quase inexistente. Possui resistência à abrasão similar à de um borossilicato – o que permite um trabalho de polimento mais simples que alguns vidros mais duros –, baixa porosidade, alta afinidade para receber aluminização ou algum outro tipo de *coating* e também é um material bastante estável. O método de fabricação dos blocos pela Schott inclui a utilização de dois tipos diferentes de fornos, sendo um deles rotativo.

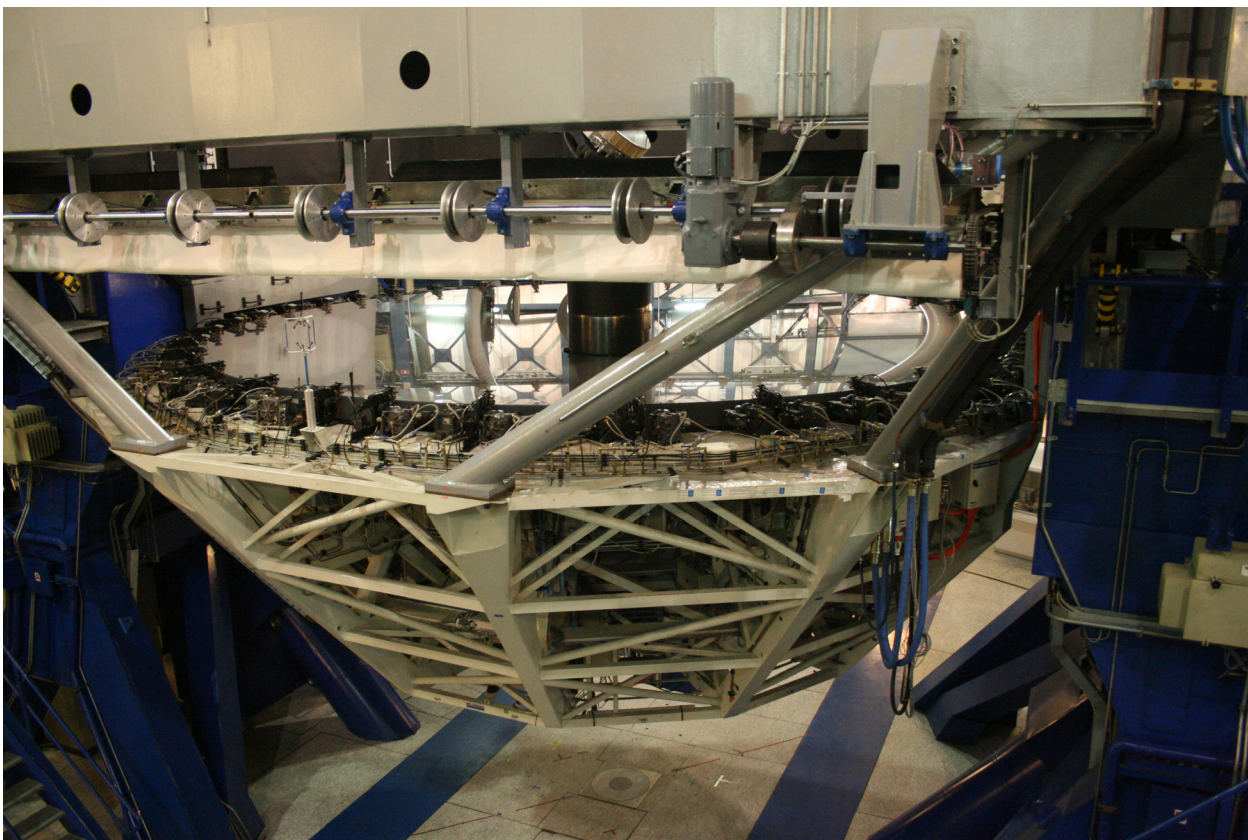


Figura 106 - Vista do espelho primário de uma das unidades do VLT, no caso o Melipal (terceiro a ficar pronto). Na imagem é possível ver também um pedaço do espelho terciário, um pouco acima do primário. Foto: Francisco Conte.

Todo esse avanço tecnológico, além do investimento na construção de novos observatórios e de atualizações em vários telescópios que já estavam em operação, resultou em uma série de importantes descobertas no período. Algumas delas serão descritas nos próximos parágrafos.

Após um período pesquisando quasares e grupos de galáxias, a astrônoma norte-americana Vera Rubin começou a trabalhar com curvas de rotação de galáxias espirais na década de 1980. Esse era um bom método para estimar a quantidade de matéria desses objetos. Nesse trabalho, Vera Rubin mediria a velocidade de rotação das estrelas em torno do núcleo galáctico. Pelas regras da gravitação e pela distribuição de estrelas dentro da galáxia, esperava-se uma curva em que as maiores velocidades se encontrariam próximas ao centro da galáxia, reduzindo-se progressivamente à medida que as estrelas estudadas se localizassem mais e mais distantes do centro. O que ela observou foi muito diferente: a velocidade de rotação tendia a se manter em patamares idênticos mesmo nos limites da galáxia. Várias galáxias foram estudadas e o mesmo fenômeno acontecia repetidamente. Em alguns casos, a velocidade até aumentava nas bordas da galáxia. Essa era uma indicação de que as galáxias deveriam possuir muito mais matéria do que era possível observar. A matéria faltante era muito maior que a observada, entre cinco e dez vezes maior. Isso lembrava muito as conclusões do trabalho da década de 1930 de Fritz Zwicky com grupos de galáxias. A essa matéria detectável apenas por sua influência gravitacional foi dado o nome de matéria escura, e essa continua a ser uma das grandes fronteiras da pesquisa astronômica da atualidade.

Em 1987 foi utilizada pela primeira vez uma nova técnica de observação, que amplia enormemente a capacidade de análise de um objeto astronômico específico: a espectroscopia de campo integral, também conhecida mais popularmente como cubo de dados. A ideia havia sido proposta em 1982 por G. Courtès, mas o desenvolvimento técnico necessário demorou ainda alguns anos. A primeira utilização da técnica foi feita no Canada-France-Hawaii Telescope, no Mauna Kea, através de um instrumento batizado de TIGER (Traitement Intégral des Galaxies par l'Étude de leurs Raies). Com o instrumento era possível obter ao mesmo tempo imagens e espectro do objeto estudado. Vários sistemas atuais permitem a obtenção de um espectro de alta definição para cada pixel da imagem observada. A técnica possibilita análises impossíveis de conseguir de outras formas, permitindo uma observação em 3D do objeto, sendo duas dimensões espaciais e uma espectroscópica. Com os dados recebidos é possível remontar imagens integrais do objeto em cada comprimento de onda do espectro obtido (ver figura 107).

Em 30 de agosto de 1992, uma equipe chefiada por David Jewitt e Jane Luu descobriu o 1992 QB<sub>1</sub>, o primeiro objeto encontrado dentro do cinturão de Kuiper desde a descoberta de Plutão por Tombaugh em 1930. Seis meses depois, a equipe encontrou um segundo objeto: 1993 FW. Sinais claros de que uma nova era de descobertas no sistema solar estava se avizinando. O objeto foi batizado posteriormente com o nome Albion.

Em 6 de outubro de 1995, Didier Queloz e Michel Mayor descobriram o primeiro planeta extrassolar. O planeta orbitava a estrela 51 Pegasi, tinha 0,45 massas de Júpiter e orbitava a estrela a uma distância de apenas 0,0534 UA. Ele dava uma volta em torno da estrela a cada 4,23 dias. Foi o primeiro de uma classe conhecida como júpiteres quentes. Os dois astrônomos receberam em 2019 o Prêmio Nobel de Física pela descoberta.



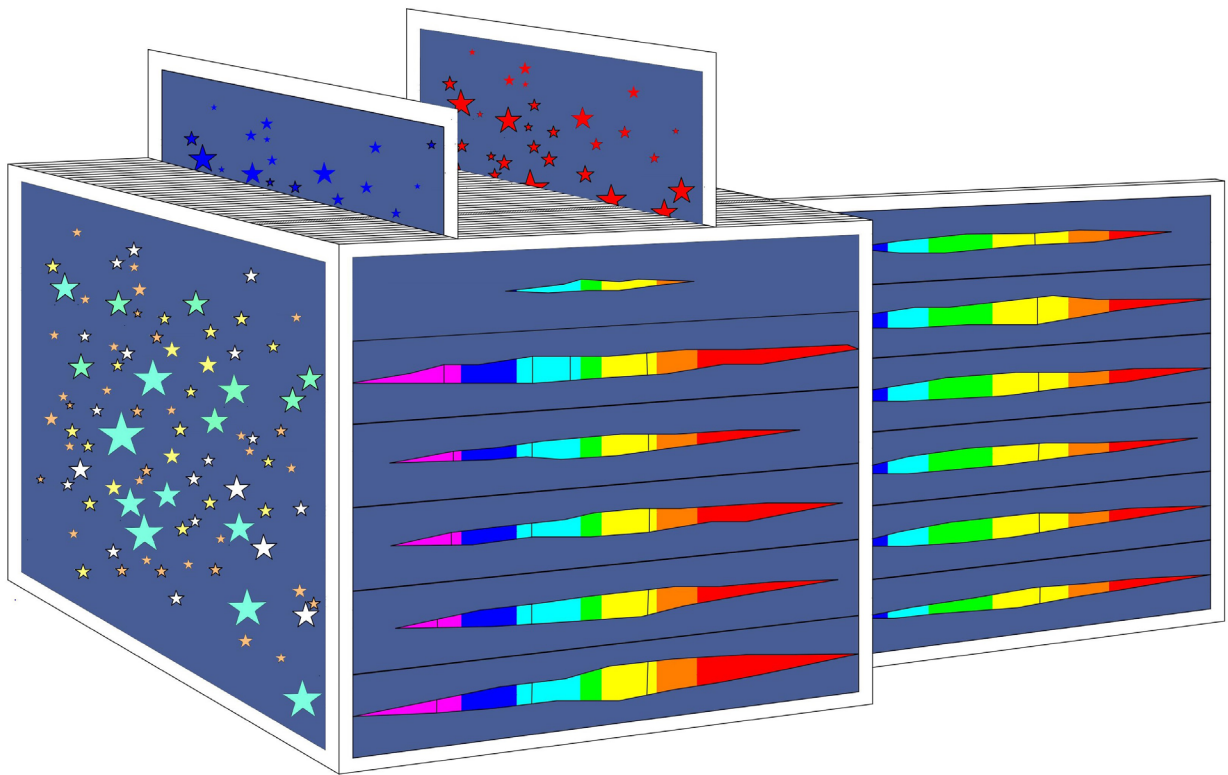


Figura 107 - Espectroscopia de campo integral, uma nova técnica de observação. Ao mesmo tempo em que se produz uma imagem de um campo, são feitos espectros de baixa definição de cada pixel da imagem. A técnica permite também que sejam obtidas imagens integrais do campo em cada comprimento de onda, possibilitando inúmeros tipos de análises comparativas. A técnica produz uma quantidade imensa de dados e uma visão tridimensional do objeto observado, sendo duas dimensões na imagem e mais uma dimensão espectroscópica. Devido a esse fato a técnica também é conhecida na astronomia como cubo de dados. Desenho: Francisco Conte.

Em 1998, o mundo da astronomia, sobretudo da cosmologia, foi impactado com uma descoberta bombástica: duas equipes distintas, o High-Z Supernova Search Team, liderado pelos astrônomos Brian Schmidt e Nicholas Suntzeff, e o Supernova Cosmology Project, liderado pelo astrônomo Saul Perlmutter, descobriram que o universo está se expandindo de maneira acelerada. Desde os anos 1960, a comunidade astronômica passou a assumir a hipótese do Big Bang. Nosso universo teve início em uma singularidade, em um volume extremamente pequeno, há cerca de 13,8 bilhões de anos e desde então vem se expandindo e criando o seu espaço à medida que se expande. Como o único impulso para essa expansão foi o original do Big Bang e a única força conhecida que atuava em larga escala era a gravidade, que é atrativa, existia uma certeza de que nosso universo deveria estar em uma expansão desacelerada. A descoberta da expansão acelerada do universo foi um choque. Algo, ou alguma força que não sabíamos o que era, estava influenciando no destino do universo de maneira determinante. Passados mais de 20 anos dessa descoberta, continuamos a não saber a causa dessa aceleração, mas essa causa recebeu o nome de energia escura. Desde então todas as observações realizadas continuam a confirmar as descobertas dos dois grupos de 1998 e muita pesquisa está sendo feita para descobrir o que é exatamente a energia escura. Acredita-se que ela seja responsável por aproximadamente 75% de toda a matéria e energia do universo. A matéria

escura, que atua sobre as galáxias e grupos de galáxias, deve representar algo em torno de 21% do universo, e a matéria normal, bariônica, que forma tudo o que conhecemos – estrelas, planetas, galáxias etc. – deve representar apenas 4%. Brian Schmidt e Saul Perlmutter ganharam o Prêmio Nobel de Física em 2011 por sua descoberta (ver figura 108).

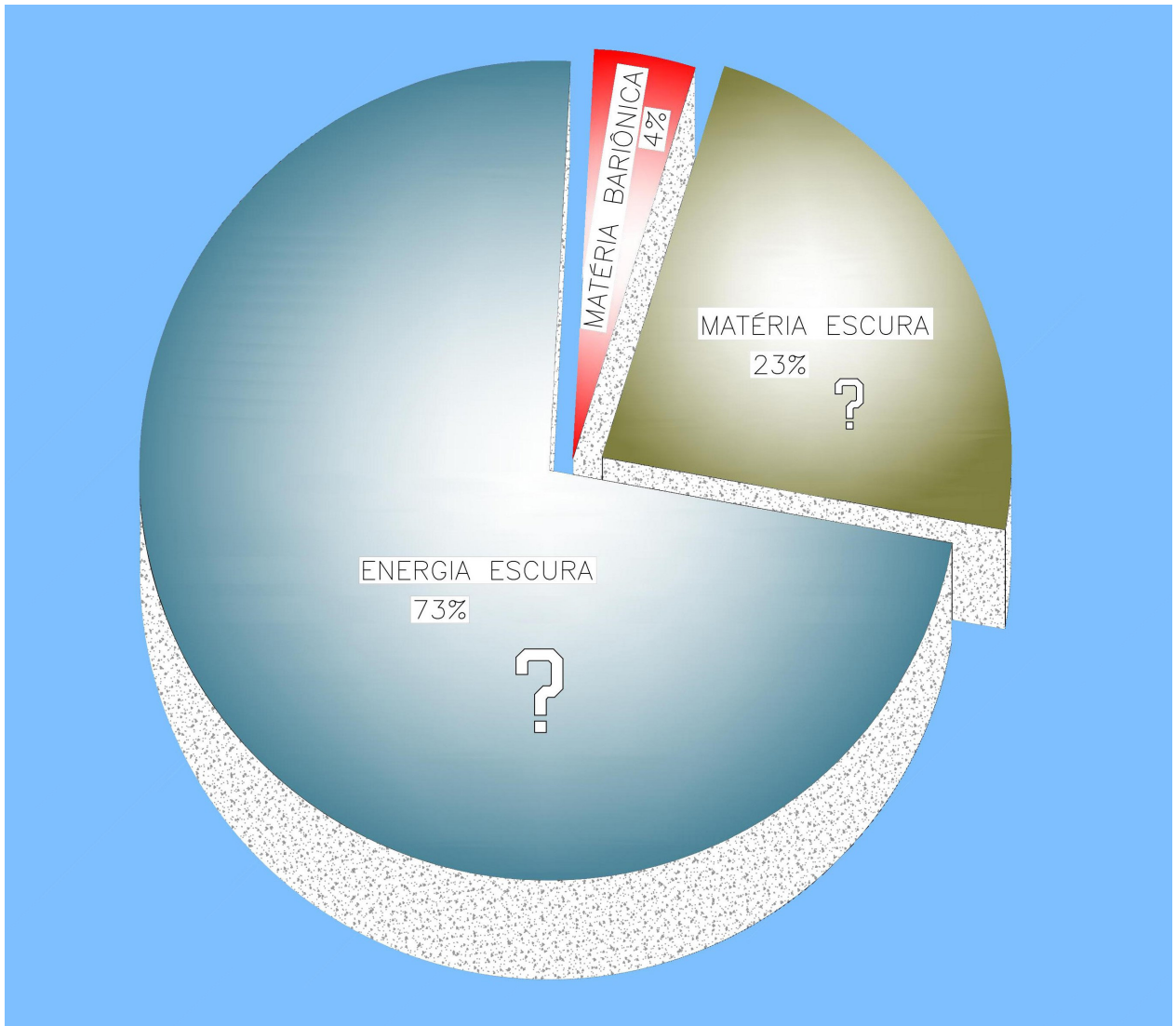


Figura 108 - Do que é feito o universo? Toda a matéria que podemos observar – galáxias, poeira, estrelas, neutrinos etc. – corresponde a apenas 4% do total de matéria e energia que compõem o nosso universo. Os restantes 96% do total são constituídos de matéria escura e energia escura, que ainda não sabemos exatamente o que são. Desenho: Francisco Conte.

## CAPÍTULO 9

### Sondas do Sistema Solar na virada do milênio

Após um período de intensa exploração do Sistema Solar através de sondas nos anos 1970, incluindo os pousos das Veneras em Vênus, das Vikings em Marte e o lançamento das Voyagers, que representou o ápice do período, a década seguinte foi, comparativamente, muito pouco produtiva. Os soviéticos continuaram mandando suas missões para Vênus com grande sucesso. Foi um total de seis naves visitando o planeta, mais os orbitadores e sondas que pousavam na superfície, incluindo as Vega 1 e 2, que chegaram a lançar dois balões atmosféricos que funcionaram por 46 horas cada (ver figura 109). Os soviéticos enviaram ainda duas naves para Marte, uma das quais perdeu o contato antes de chegar ao planeta e a outra falhou em lançar sondas para pousar na lua Fobos. Os americanos lançaram uma nave que visitou o cometa Giacobini-Zinner em 1986 e que, posteriormente, conseguiu fazer observações a uma grande distância do cometa Halley.



Figura 109 - Vista da superfície de Vênus, um tremendo feito tecnológico, considerando as condições extremas do clima local. No início dos anos 1980 a União Soviética ainda enviou uma série de naves ao planeta. Fonte: Wikimedia Commons.

A passagem do cometa Halley de 1986 foi o único momento grandioso da pesquisa do sistema solar por sondas nos anos 1980. Uma flotilha acompanhou o viajante: duas naves japonesas, duas naves soviéticas e uma nave europeia – a Giotto, que anos depois ainda visitou o cometa Grigg-Skjellerup. As sondas coletaram numerosas informações sobre a composição química e a razão de ejeção do material cometário e a Giotto conseguiu obter a melhor imagem de um cometa até então. Todas as missões ao Halley cumpriram suas pesquisas, mas a década significou um retrocesso em relação aos prolíficos anos 1960 e 1970.

O colapso da União Soviética no início da década de 1990, acabou por afastar a Rússia de novas missões espaciais por um longo tempo, mas o país ainda tinha um laboratório espacial em órbita e muita tecnologia na área de lançamentos, pesquisa e controle de missões espaciais. Os Estados Unidos sofreram com cortes de orçamento da NASA e tiveram esse período marcado por acidentes. Em janeiro de 1986, o ônibus espacial Challenger explodiu, matando toda a tripulação de sete astronautas. Os outros dois lançadores de foguetes americanos – o Titan e o Delta – sofreram perdas no lançamento em agosto de 1985 e em maio de 1986, respectivamente. Esses desastres seguidos causaram a suspensão imediata de todas as missões espaciais americanas. Os ônibus espaciais só voltaram a voar em setembro de 1988.

Os anos 1990 seriam diferentes. Logo em agosto de 1990 chega a Vênus a nave americana Magellan, que ficaria por quatro anos em órbita fazendo um grande mapeamento por radar de toda a superfície do planeta. Mais cedo ainda, em fevereiro de 1990, passa por Vênus a nave Galileo, mas seu destino final é Júpiter. Ela passa por Vênus apenas para receber uma assistência gravitacional para acelerar até o gigante gasoso. No caminho, a Galileo passou pelo asteroide 951 Gaspra, em 29 de outubro de 1991, fornecendo as primeiras imagens de alta definição de um asteroide. Em 28 de agosto de 1993, a nave passou por outro asteroide, 243 Ida, e descobriu que o minúsculo corpo celeste possuía um satélite, que foi batizado de Dactyl. A missão encontrou problemas desde seu lançamento: uma antena que seria responsável por enviar os dados em elevada taxa de emissão não abriu e ficou inativa durante toda a duração de suas atividades. Uma antena secundária, mas que enviava os dados muito mais lentamente; salvou a missão de um fracasso total. Em 23 de março de 1993, enquanto a Galileo estava em sua jornada em direção a Júpiter, uma equipe de três astrônomos – Carolyn e Eugene Shoemaker e David Levy – fez uma descoberta fantástica, um cometa. Batizado de Shoemaker-Levy 9 (era o nono cometa descoberto pela equipe), o cometa havia se fragmentado ao passar próximo do gigante joviano e tinha a aparência de um colar de pérolas, com um total de 21 fragmentos de grande porte. Quando se fez o cálculo da órbita do cometa, descobriu-se que ele iria colidir com Júpiter em julho de 1994, entre os dias 16 e 22, pois cada um de seus fragmentos colidiria em seu próprio tempo. Astrônomos de todo o mundo se prepararam para o evento, mas havia uma limitação: o impacto ocorreria no lado oposto de Júpiter, impossibilitando a visão direta do fenômeno. Mas a Galileo estava em um ponto de sua órbita onde seria possível observar as colisões, e a nave pôde fazer os registros e enviá-los à Terra. Voltaremos a falar do cometa em outro capítulo. A Galileo chegou ao sistema de Júpiter em 7 de dezembro de 1995, entrando em seguida em órbita ao redor do planeta. Pouco tempo antes já havia lançado uma pequena sonda, que penetrou na atmosfera joviana em julho do mesmo ano, coletando uma série de dados sobre sua composição, até ser esmagada pela pressão dos gases das camadas mais profundas. A nave continuou em operação até dezembro de 2003. Durante esse período completou 34 órbitas em torno do planeta e realizou diversos estudos sobre sua atmosfera, seus satélites e sistema de anéis, incluindo observações que dão suporte à hipótese que sua lua Europa possua um oceano abaixo da camada de gelo da superfície. Finalmente a nave mergulhou na atmosfera do gigante, após o término de sua missão. A astrônoma brasileira Rosaly Lopes, que trabalha no JPL, Laboratório de Propulsão a Jato, descobriu nada menos que 71 vulcões ativos em Io, tornando-se a pessoa que mais descobriu vulcões no universo.

Em 4 de julho de 1997, chega a Marte uma nova missão americana, a primeira em 21 anos desde o pouso das Vikings. Era uma missão complexa que contava com um orbitador, o Mars Global Surveyor, que desempenhou sua missão até o ano de 2006, um *lander*, o Mars Pathfinder e um pequeno *rover*, o Sojourner, com 65 cm de comprimento e pesando apenas 15 kg, que funcionava com energia solar. A missão foi um sucesso, mas tanto o *lander* como o *rover* sobreviveram apenas por poucos meses. O Sojourner percorreu uma distância de apenas 100 m durante seu tempo de vida, mas a repercussão na imprensa internacional foi bastante boa e o veículo ficou bem popular (ver figura 110).



Figura 110 - Vista do rover Sojourner explorando a superfície marciana. Fonte: Wikimedia Commons.

Na mesma época, outra missão da NASA, a NEAR Shoemaker, lançou uma nave que fez um bem-sucedido *flyby* no asteroide 253 Mathilde, no dia 27 de junho de 1997, e prosseguiu para um encontro com o asteroide 433 Eros, que acabou acontecendo em fevereiro de 2000. Após o término das atividades previstas, que incluíam uma série de imagens e estudos químicos do asteroide, a equipe na Terra resolveu tentar fazer um pouso suave em Eros, que acabou ocorrendo com sucesso no dia 12 de fevereiro de 2001.

Em outubro de 1997, a NASA e a ESA (European Space Agency) lançam a sonda Cassini para uma missão até Saturno. A nave foi dirigida inicialmente a Vênus, para aproveitar o efeito de estilingue gravitacional para acelerar, passou novamente pela Terra, aproveitou novamente a assistência gravitacional e foi então para Júpiter, com o mesmo objetivo. Finalmente chegou à órbita de Saturno em 2004, onde continuou funcionando até 2017, embora os planos iniciais previssem que a nave trabalharia por apenas quatro anos. Em dezembro de 2004, a nave lançou em direção ao satélite Titã uma sonda batizada de Huygens, construída pela ESA, que mergulhou na espessa atmosfera da lua até pousar em seu solo, fazendo uma série de medições de temperatura, ventos e composição química, além de imagens espetaculares. Titã é um mundo gelado, mas possui lagos e possivelmente um oceano de metano líquido, que segue um regime de chuvas similar ao da Terra. As pesquisas em Titã são de grande interesse para pesquisadores que estudam as possibilidades de vida fora de nosso planeta. A Cassini produziu imagens incríveis de Saturno, de seu imenso sistema de anéis e de suas luas (ver figura 111), incluindo as surpreendentes Hipérion, que parece ter uma estrutura similar a uma esponja; Jápeto, que possui um alargamento em sua faixa equatorial, que faz com que o satélite se assemelhe a uma noz; a pequena Pan, que tem a mesma característica, porém muito mais acentuada, o que a faz se assemelhar a um ravióli, além de imagens incríveis de Mimas, Tétis, Metone, entre outros. A sonda descobriu que o satélite Encélado tinha

uma cobertura de gelo similar àquela encontrada na lua Europa de Júpiter, o que parecia indicar a existência de água em seu interior. Isso ficou confirmado quando, em outra passagem, a Cassini observou jatos similares a gêiseres sendo lançados de sua superfície para o espaço. Essas descobertas tornaram Encélado um alvo para futuras pesquisas. A Galileo realizou também uma série de medições e imagens do sistema de anéis de Saturno, conseguindo obter dados sobre os tamanhos das partículas que compõem cada parte dele. Ela também observou o surgimento de tempestades na atmosfera e uma curiosa formação hexagonal que existe na região polar de Saturno. Finalmente, em 15 de setembro de 2017, a sonda Galileu mergulhou na atmosfera do planeta, encerrando uma extremamente bem-sucedida e prolongada missão de pesquisa. A NASA planeja enviar uma sonda chamada Dragonfly para explorar Titã. O lançamento está proposto para 2025 e prevê a utilização de um *lander* dotado de um rotor, como um helicóptero, que permitirá que o explorador se desloque por grandes distâncias no satélite. A combinação de uma atmosfera densa e de uma atração gravitacional sensivelmente menor que a da Terra torna a tarefa de voar cerca de 40 vezes mais fácil que aqui.

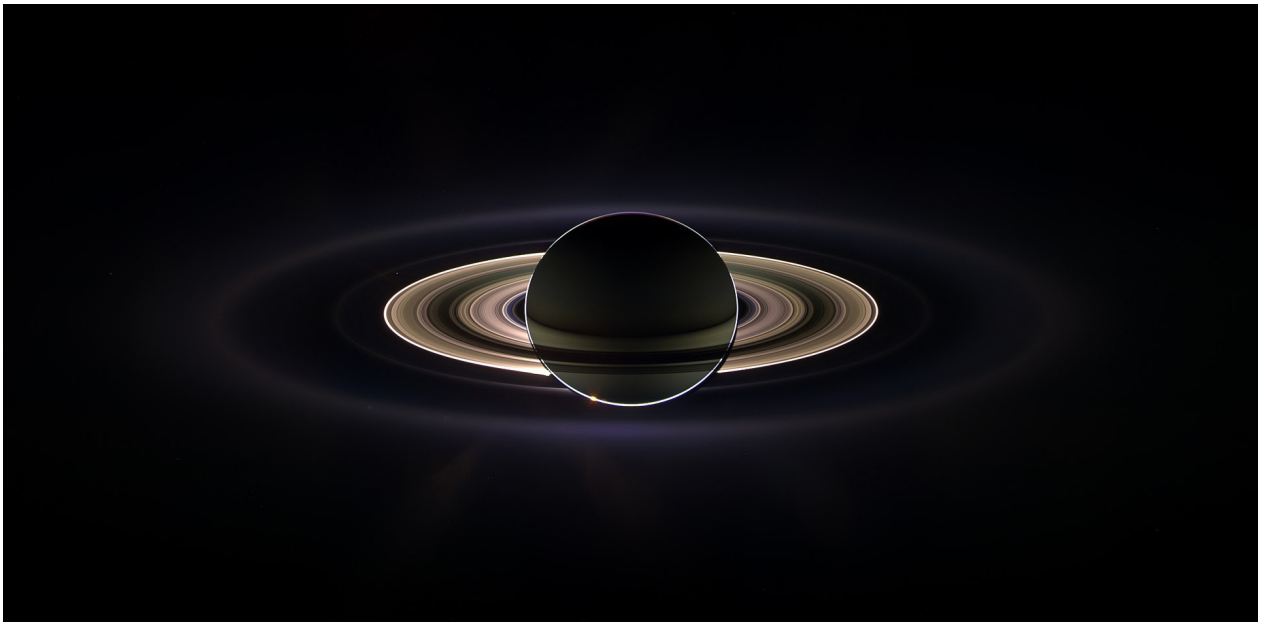


Figura 111 - Impressionante vista do sistema de anéis de Saturno, com o planeta eclipsando o Sol. Fonte: Wikimedia Commons.

Em 2004, chegam a Marte dois poderosos *rovers* produzidos pela NASA: o Spirit, que pousou no interior da cratera Gusev e o Opportunity, que pousou em uma região conhecida como Meridiani Planum. Os dois *rovers* foram planejados para funcionar por um prazo aproximado de cem dias, mas tiveram uma vida útil muito maior. Eles pesavam 180 kg e mediam 2,30 m de largura e 1,60 m de comprimento. O Spirit continuou em funcionamento até março de 2010 (ver figura 112), tendo percorrido uma distância de 7,73 km. Ele passou pelas crateras Bonneville, Columbia Hills e seguiu em direção a Husband Hill. Em 9 de março de 2005, filmou um *dust devil* – um redemoinho de vento que passou a poucos metros dele. Conseguiu subir até o topo do Husband Hill e continuou seu caminho, passando por McCool Hill e Low Ridge Haven, e chegou a Silica Valley. Em 2009, ficou preso em um atoleiro de areia do qual conseguiu escapar, mas uma de suas rodas ficou inoperante até o fim da missão. Durante sua vida operacional, o Spirit

examinou e analisou o solo e rochas marcianas, produziu inúmeras imagens e, inclusive, funcionou como um telescópio, fazendo uma imagem da Terra vista no céu marciano em 2004, além de registrar inúmeros trânsitos solares das luas marcianas Fobos e Deimos. A carreira do Opportunity foi ainda mais brilhante. O *rover* trabalhou até o ano de 2018, 55 vezes mais do que o planejado, e percorreu 45,16 km, um recorde para veículos espaciais. O Opportunity descobriu meteoritos na superfície marciana, fez um estudo de dois anos inteiros na cratera Victoria e encontrou as maiores evidências da existência de água no passado do planeta vermelho.

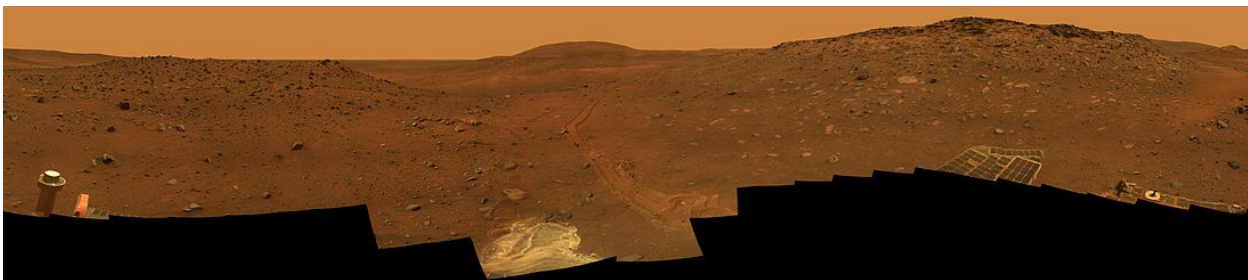


Figura 112 - Vista panorâmica da superfície de Marte feita pelo *rover* Spirit. Fonte: Wikimedia Commons.

Em 1999 foi lançada uma ousada missão de exploração cometária, a Stardust, da NASA. A sonda encontrou o cometa 81P/Wild 2 em 2004. Entre seus instrumentos havia um coletor de partículas. Semelhante a uma raquete de tênis, esse dispositivo tinha placas de uma substância chamada aerogel, um gel a base de silício que coletaria pequenas partículas emitidas pelo cometa. A missão foi um sucesso e as amostras foram reenviadas à Terra, tendo o veículo portador das amostras entrado em nossa atmosfera em 15 de janeiro de 2006, em uma locação próxima a Spring Creek, em Nevada. A análise do material permitiu estimar os tamanhos e composição dos grãos emitidos pelo cometa, além de coletar também material do espaço interplanetário e pelo menos uma partícula de origem interestelar. Com a espaçonave ainda em funcionamento, a equipe na Terra resolveu estender a missão e visitar também o cometa 9P/Tempel 1, o que ocorreu em 2011.

Outra missão importante, a Deep Impact, igualmente da NASA, havia visitado o mesmo cometa 9P/Tempel 1, com uma tarefa também complexa: lançar um impactador que colidiria com o cometa, para estudar a emissão de partículas. A colisão do impactador ocorreu perfeitamente em 4 de julho de 2005. Os dados coletados surpreenderam os cientistas, pois havia muito mais poeira e muito menos gelo do que o previsto. Após o bem-sucedido encontro com o 9P/Tempel 1, a missão foi prolongada e a Deep Impact conseguiu executar *flybys* nos cometas Hartley 2, em novembro de 2007, Garradd (C/2009 P1), em fevereiro de 2012, e ISON (C/2012 S1), em fevereiro de 2013. A sonda perdeu contato com a Terra em setembro de 2013. Não menos importante foi a missão Rosetta, lançada pela ESA (European Southern Agency), que encontrou o cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko em agosto de 2006, após ter realizado *flybys* nos asteroides 21 Lutetia e 2867 Steins. A sonda, além de orbitar o cometa e conseguir obter imagens de altíssima resolução, também lançou com sucesso o *lander* Philae, que pousou no cometa em 12 de novembro de 2014. O *lander*, porém, teve problemas de ancoragem, demorando para se estabilizar. Depois, teve dificuldades para obter potência suficiente de

suas baterias solares, que ficaram mal alinhadas. Conseguiu manter contato esporádico e breve com o controle na Terra, mas logo parou de transmitir. Em 29 de novembro de 2016 o orbitador colidiu intencionalmente com o cometa, encerrando a missão.

Em janeiro de 2008, chega a Mercúrio a sonda Messenger da NASA, que após dois *flybys* entrou em órbita do planeta e continuou em operação até o ano de 2015. Antes de alcançar Mercúrio, a trajetória da Messenger se afastou e depois de um *flyby* na Terra, para ganhar assistência gravitacional, fez ainda dois *flybys* em Vênus. Durante seu período de atividade, a sonda fotografou e mapeou toda a superfície de Mercúrio, descobrindo evidências da existência de água, materiais orgânicos e vulcanismo, que surpreenderam os astrônomos. Encerrada a missão, no dia 30 de abril de 2015, a nave mergulhou e colidiu com a superfície do planeta (ver figura 113). No momento em que este livro está sendo escrito, uma nova sonda, a BepiColombo, se dirige ao planeta Mercúrio. Ela deve fazer seu primeiro *flyby* sobre o planeta em outubro de 2021, entrar em órbita em 2025 e se manter em operação até março de 2026.

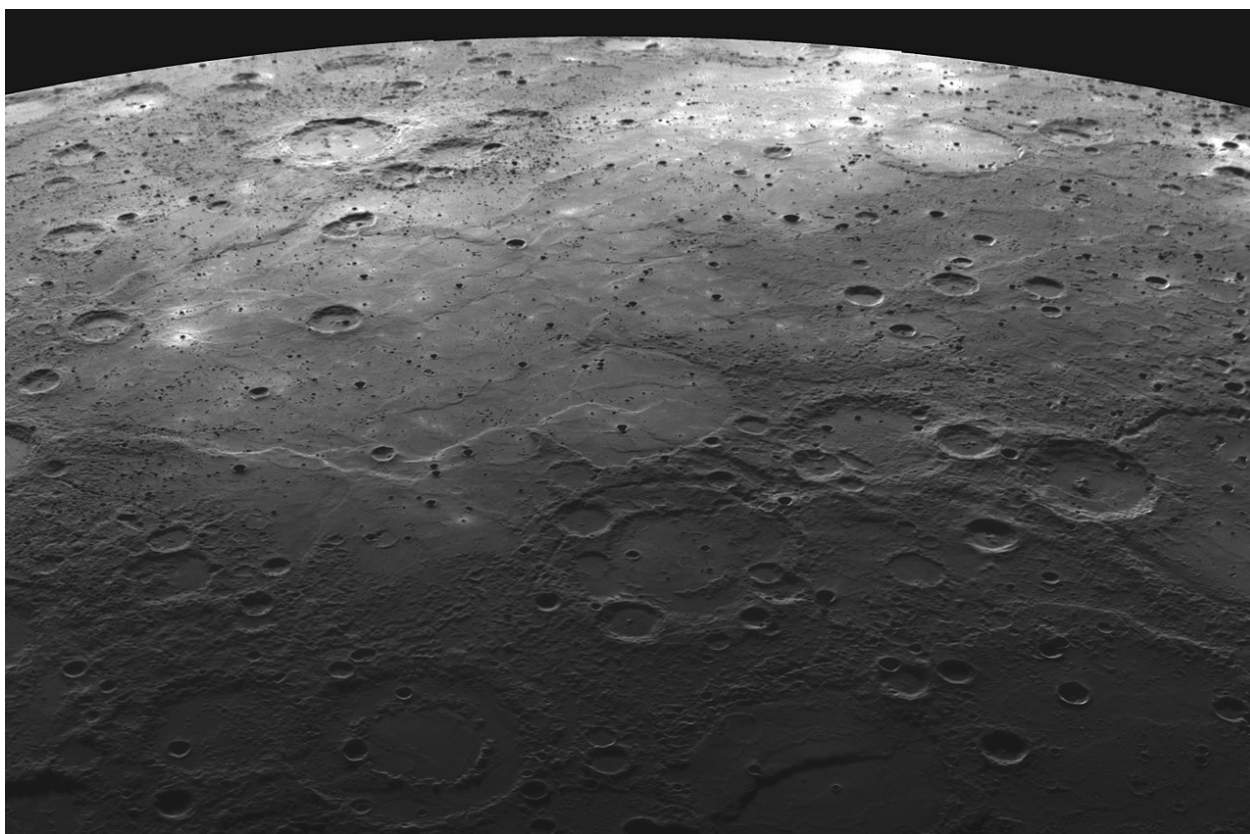


Figura 113 - Impressionante vista da superfície de Mercúrio obtida pela sonda Messenger. Fonte: Wikimedia Commons.

Em 2015, depois de uma viagem de nove anos, a sonda New Horizons realizou um *flyby* no planeta anão Plutão. A maior aproximação ocorreu no dia 14 de julho. A nave foi lançada no dia 19 de janeiro de 2006, quando Plutão ainda era classificado como planeta. Na sua trajetória em direção ao cinturão de Kuiper e além, a nave passou por Júpiter, conseguindo grandes imagens em infravermelho do planeta e dos quatro satélites galileanos, com destaque para uma imagem de Io com uma visão incrível de uma pluma vulcânica nas proximidades do seu polo norte. Mesmo com o Hubble Space Telescope e a nova geração de telescópios ópticos, tanto Plutão como sua grande lua Caronte



não passavam de dois pequenos borrões. A New Horizons forneceu imagens incríveis: o disco de Plutão apresentava uma grande formação em seu hemisfério sul que lembrava um coração (ver figura 114). Em imagens mais aproximadas foi possível observar crateras de impacto, montanhas e vulcões, com indícios de atividade recente (possivelmente vulcanismo frio). A sonda fez boas imagens do globo de Caronte, onde também se observaram cadeias de montanhas e algumas crateras de impacto, e conseguiu realizar ainda imagens dos pequenos satélites Nix, Hidra, Cérbero e Estige. Quando já tinha ultrapassado o planeta e se dirigia ao espaço interestelar, fez uma imagem de Plutão iluminado por trás pelo Sol, na qual ficava clara a



Figura 114 - Imagem da superfície de Plutão obtida pela sonda New Horizons. Fonte: Wikimedia Commons.

existência de atmosfera. A sonda realizou uma série de medições e análises espectrais de Plutão e seus satélites. Terminada a missão, a equipe na Terra começou a analisar possíveis alvos para a sonda. Em 2015, um segundo objetivo surgiu: um *flyby* no KBO (*Kuiper belt object* – objeto do cinturão de Kuiper) Arrokoth, que também era conhecido pelo apelido de Ultima Thule. Em 1º de janeiro de 2019, a maior aproximação em relação a Arrokoth mostrou claramente um corpo formado pela junção de dois objetos menores, o que reforçava a teoria de formação de corpos do sistema solar. A nave terá condições de ser manobrada até o ano de 2030, existindo ainda a possibilidade de um novo encontro com algum membro do cinturão de Kuiper. A sonda ainda realiza medições de intensidade do vento solar e de raios cósmicos.

Em novembro de 2011, a NASA lançou a missão Mars Science Laboratory, que transportava um grande *rover* em direção a Marte. Em 6 de agosto de 2012, a nave pousou na cratera Gale e o Curiosity iniciou sua missão, que ainda está em andamento. O Curiosity é o maior *rover* já enviado ao planeta vermelho: com um peso de 899 kg, o veículo de seis rodas tem o tamanho próximo ao de um automóvel pequeno (ver figura 115). Carregando um incrível pacote de instrumentos científicos, incluindo espectrômetros, medidores de radiação e imageadores, o *rover* consegue se locomover a uma velocidade de 90 m por hora. Em março de 2013, a NASA emitiu uma declaração informando que o Curiosity havia encontrado evidências de que as condições geotérmicas do sítio da cratera Gale eram adequadas para o surgimento de vida microbial. A declaração também informava que o *rover* havia detectado água, dióxido de carbono, oxigênio, sulfeto de hidrogênio, clorometano e diclorometano. Em maio de 2014, o *rover* encontrou um meteorito metálico, que foi batizado de Lebanon. Em 17 e 27 de março de 2019, o Curiosity registrou dois trânsitos de Deimos e Fobos, respectivamente. Em julho de 2020, o Curiosity estava explorando o Monte Sharp, totalmente operacional, e já havia percorrido uma distância

de 22 km, tendo no período subido 327 m, desde o local em que havia pousado. Em 26 de novembro de 2018, pousou na superfície de Marte a sonda InSight, um *lander* que realiza estudos sísmicos e geodésicos. Tanto o InSight, quanto o Curiosity continuam em atividade.

Mas a exploração de Marte não se resume aos *landers* e *rovers* que exploram diretamente a sua superfície. Uma série de missões com orbitadores ainda se mantém na ativa, estudando o planeta: a veterana 2001 Mars Odyssey (NASA), que desde outubro de 2001 faz estudos climáticos e de geologia; a também veterana Mars Express (ESA), que desde 2003 faz imagens da superfície e mapeamentos; o Mars Reconnaissance Orbiter (NASA), que também faz imagens da superfície e mapeamentos desde março de 2006; a Mangalyaan – Mars Orbiter Mission (Índia), que faz estudos da atmosfera marciana desde 24 de setembro de 2014; a sonda americana MAVEN, que entrou em órbita do planeta no dia seguinte à sonda indiana e desde então faz o mesmo tipo de estudo que ela, e a sonda ExoMars Trace Gas Orbiter (ESA/Rússia), que desde outubro de 2016 também faz estudos atmosféricos.

No ano de 2020, enquanto este livro estava sendo escrito, tivemos o lançamento da Mars 2020, da NASA, que pretende colocar um *rover* e um helicóptero *drone* na superfície marciana. No início de 2021 temos duas missões a caminho de Marte: a Emirates Mars Mission, dos Emirados Árabes Unidos, um orbitador que vai fazer estudos atmosféricos, e a bem mais arrojada Tianwen-1, uma missão chinesa composta por um orbitador e um *rover*, que deve atingir o planeta em 2021. A missão tem por objetivo estudar a atmosfera e o solo marciano. A segunda ExoMars, construída pela Rússia e pela ESA, perdeu a janela de lançamento, devendo ser lançada apenas em 2022. Marte é um dos principais alvos de pesquisa no sistema solar, e várias missões estão planejadas para sua exploração nos próximos anos, incluindo uma sonda japonesa que pretende extrair amostras da superfície de Fobos e retornar à Terra.

Algumas sondas foram feitas especialmente para estudar o Sol. Uma das mais importantes foi a missão Stereo, composta por duas naves, Stereo A e Stereo B. As duas sondas entraram em órbita solar, a sonda A um pouco mais próxima do Sol que a Terra e a sonda B um pouco mais distante. Elas produziram uma quantidade imensa de imagens



Figura 115 - Autorretrato do rover Curiosity na superfície de Marte. Fonte: Wikimedia Commons.

tridimensionais da atividade solar, incluindo ejeções de massa coronal, que permitiram um estudo muito aprofundado do comportamento de nossa estrela mais próxima. A sonda Stereo B perdeu contato com a Terra em 2018, mas a Stereo A continua em funcionamento, embora hoje não sejam mais possíveis as imagens em 3D. Outra sonda solar importante é a Parker Solar Probe, que foi lançada em agosto de 2018 e em outubro do mesmo ano se tornou o objeto artificial a permanecer mais próximo do Sol em toda a história. Sua órbita em elipse bastante excêntrica faz com que a sonda se aproxime periodicamente do Sol, de onde pode realizar estudos sobre campos eletromagnéticos e sobre o vento solar.

Em dezembro de 2013, a China lançou com sucesso a missão lunar Chang'e 3, que incluía um *lander* e um *rover*. Era o primeiro pouso suave de uma nave na Lua desde 1976. O *lander* pesava 1.200 kg e o *rover* 140 kg. A missão foi um grande sucesso. Ainda mais ousada foi a missão Chang'e 4, que pousou um *lander* e um *rover* no lado afastado da Lua, a primeira missão desse tipo a incluir também um orbitador para poder enviar os dados para a Terra. A missão foi realizada entre maio e dezembro de 2018 e abre caminho para a sonhada instalação de um radiotelescópio no lado afastado da Lua, o único local do sistema solar livre da interferência de rádio terrestre. Em 17 de dezembro de 2020, a missão chinesa Chang'e 5 retornou da Lua com sucesso, trazendo cerca de 2 kg de rochas lunares, a primeira missão em mais de 40 anos a realizar essa proeza. Poucos dias antes, em 6 de dezembro, uma cápsula enviada pela sonda Hayabusa 2 retornou à Terra com amostras de material do asteroide Ryugu, coletadas em 2018, quatro anos depois do lançamento da missão.

O sucesso da missão NEAR Shoemaker levou a outras propostas de sondas para o estudo de asteroides. A principal missão desse tipo foi a DAWN, lançada pela NASA em setembro de 2007. A nave cumpriu uma longa missão. Orbitou o asteroide Vesta de julho de 2011 até setembro de 2012, quando abandonou a atração gravitacional do asteroide e se dirigiu para seu segundo e principal objetivo, o planeta anão Ceres, primeiro asteroide a ser descoberto, em 1801. A DAWN entrou em órbita de Ceres em 23 de abril de 2015, onde realizou vários estudos até outubro de 2018, quando a missão foi formalmente encerrada (a nave não tinha mais propelente para realizar qualquer manobra em torno do asteroide), ficando em uma órbita estável em torno do planeta anão. A DAWN foi a primeira sonda espacial a orbitar dois corpos celestes (Vesta e Ceres).

A exploração do sistema solar através de sondas tem produzido resultados incríveis, impossíveis de se obter de outra forma. Todos os planetas do sistema solar, um satélite, dois planetas anões, alguns cometas e asteroides e um membro do cinturão de Kuiper foram visitados com sucesso (ver figura 116). Novas importantes missões estão sendo propostas, outras já se encontram em fase de construção e algumas já estão, inclusive, a caminho de seus alvos. Alguns países como Japão, China, Índia e Emirados Árabes Unidos se juntaram ao clube que já tinha como membros os Estados Unidos, a Europa e a Rússia. Todos esses fatores indicam que esse tipo de pesquisa astronômica vai continuar a se desenvolver nas próximas décadas.

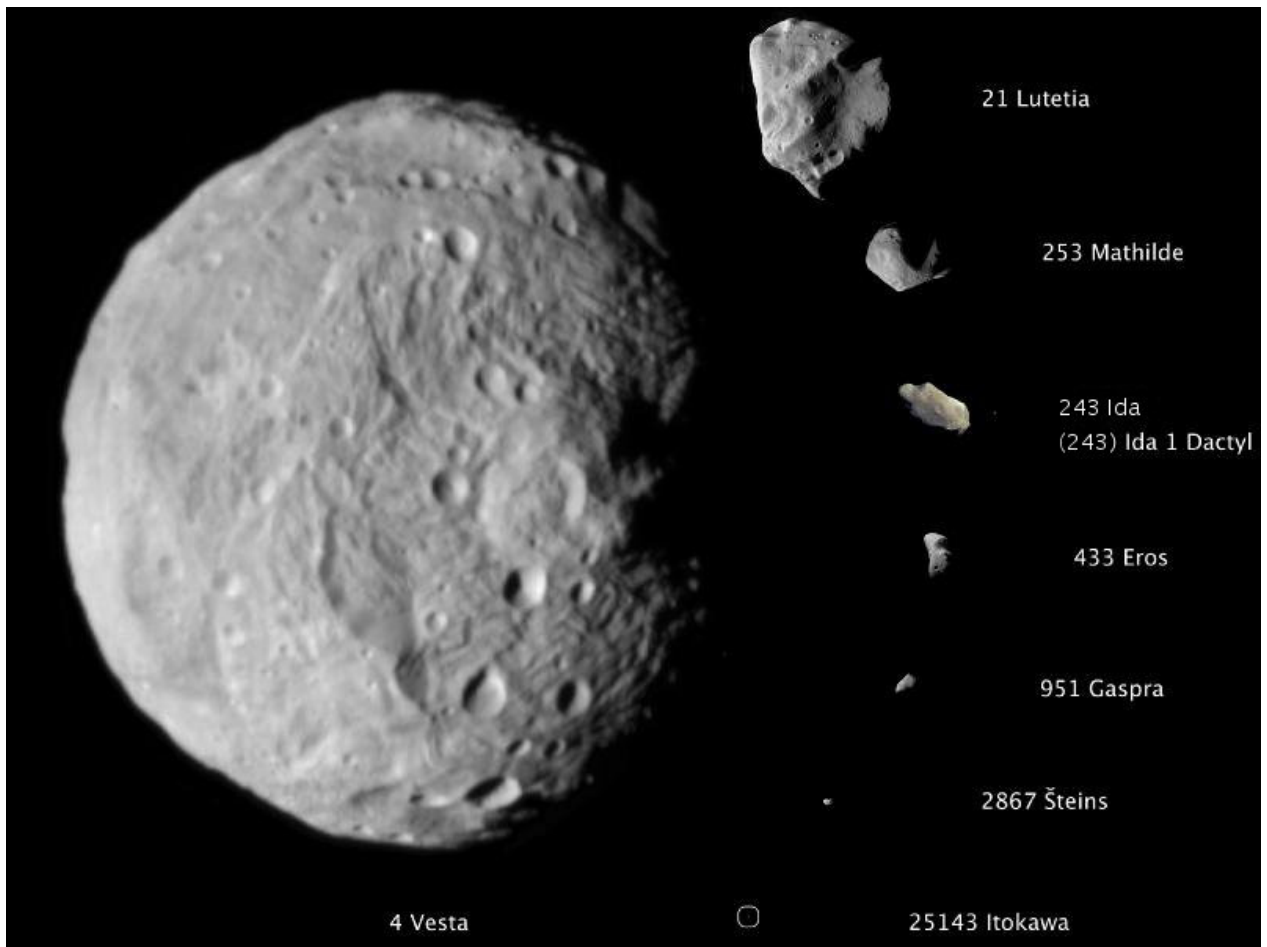


Figura 116 - Imagem em escala de vários asteroides visitados por sondas durante as últimas décadas.  
Fonte: Wikimedia Commons.

## CAPÍTULO 10

### Telescópios espaciais na virada do milênio

Nas duas décadas finais do século XX e no início do século XXI o mundo acompanhou o lançamento de vários telescópios espaciais, que diferentemente das sondas, examinadas no capítulo anterior, não eram lançados em direção a seu objeto de estudo, mas ao espaço, para evitar os problemas observacionais causados pela atmosfera terrestre. Neste capítulo vamos ver alguns dos principais observatórios espaciais lançados a partir da década de 1990.

#### Luz visível

##### Hubble Space Telescope

A instalação de um telescópio óptico no espaço era um sonho antigo de muitos astrônomos. No espaço, o telescópio poderia funcionar livre dos problemas originados por nossa turbulenta atmosfera. O Hubble Space Telescope (HST) foi a realização de um sonho de décadas de muitos astrônomos observacionais, mas por pouco esse sonho não se transformou em um pesadelo de proporções astronômicas devido a problemas no seu espelho primário (ver figura 117).

O Hubble foi planejado para ser o mais importante observatório astronômico do final do século XX. Seu projeto previa a construção de um telescópio com um espelho primário de 2,40 m de diâmetro, um limite imposto pelo compartimento de cargas dos ônibus espaciais. O espelho primário era o principal elemento do projeto, mas o projeto como um todo deveria representar o estado da arte da pesquisa astronômica, incluindo os seus detectores e a instrumentação.

Duas companhias concorriam para a fabricação do espelho: a Eastman Kodak e a Perkin-Elmer/Goodrich. A segunda venceu a concorrência, apresentando um projeto com um orçamento de 70 milhões de dólares. A fabricação utilizou o material ULE (*ultra-low expansion*), e, para minimizar o peso do espelho, foi empregada a



Figura 117 - Vista de um protótipo do Hubble Space Telescope exposto no Smithsonian Museum of Air and Space, Washington DC. Foto: Francisco Conte.

técnica de *honeycomb*, ou seja, o espelho foi montado a partir de três células que foram fundidas em um único bloco, que ao final pesava cerca de 900 kg. Após a fundição, houve as etapas de raspagem do bloco de vidro, para adquirir a curvatura desejada, e finalmente seu polimento. Este foi muito cuidadoso, pois o projeto exigia que a maior irregularidade da superfície não superasse um máximo de 10 nanômetros, com o objetivo de que o espelho tirasse o maior proveito possível das condições praticamente perfeitas de observação em que o telescópio deveria operar. Para entender o quanto a superfície desses espelhos é perfeita, podemos imaginar que, se o espelho tivesse o tamanho do Brasil, a maior imperfeição não poderia passar de 10 cm de altura.

Para garantir as qualidades ópticas do espelho, seria necessário testar o seu perfil óptico. O antigo teste normalmente utilizado para esses procedimentos era chamado de *refractive null test*. A Perkin-Elmer/Goodrich resolveu utilizar um novo tipo de teste, inovador, e potencialmente mais preciso, batizado de *reflective null test*. O espelho foi testado algumas vezes, mas apenas utilizando o novo teste. Nenhuma vez ele foi testado pelo procedimento tradicional. A Eastman-Kodak, perdedora da concorrência, não ficou de mãos vazias: a NASA resolveu contratar a empresa para construir um espelho similar ao da Perkin-Elmer/Goodrich, para utilização em testes em solo, enquanto o HST estivesse operando no espaço.

O projeto sofreu alguns atrasos durante seu desenvolvimento, incluindo uma mudança no planejamento de todos os lançamentos de ônibus espaciais depois do acidente da Challenger, em 1986. Finalmente, o HST foi enviado ao espaço em abril de 1990. A imprensa alardeava as qualidades do telescópio espacial, afirmando constantemente que seu espelho era o mais preciso jamais fabricado, o que não era verdade. Alguns espelhos de menores dimensões possuíam uma superfície ainda mais perfeita que a do Hubble, enquanto alguns espelhos de maior porte tinham um perfil apenas ligeiramente inferior do ponto de vista técnico.

Poucas semanas depois do lançamento do telescópio espacial, começaram a surgir na imprensa os primeiros rumores sobre o mau funcionamento do HST. Finalmente, a NASA se pronunciou oficialmente, admitindo os problemas nas imagens obtidas pelo instrumento, que estavam muito abaixo da qualidade esperada, embora em muitos tipos de observações o HST ainda produzisse imagens superiores às obtidas com instrumentos no solo. O projeto previa uma resolução de 0,1 segundo de arco, mas o telescópio conseguia apenas imagens com resolução de 1 segundo de arco. Alguns dos problemas se originaram em aspectos mecânicos provocados pelo deslocamento do HST no espaço. O telescópio cruza a linha que divide o dia da noite a cada 50 minutos. O rápido resfriamento e aquecimento dos painéis solares e do próprio telescópio faziam com que o instrumento chacoalhasse rapidamente, o que acabava por embaçar as imagens obtidas.

O principal problema estava no espelho primário. Após uma extensa análise das imagens produzidas, percebeu-se uma anomalia na curvatura do perfil do espelho principal, um erro de apenas 2,2 micra, que pode parecer pequeno, mas é suficiente para borrar as imagens obtidas. O avançado teste utilizado pela Perkin-Elmer/Goodrich não foi capaz de perceber um erro facilmente detectável em testes muito mais simples e corriqueiros. O projeto foi salvo porque o planejamento da missão HST previa missões de manutenção e reparos, que seriam realizadas a cada três anos, utilizando os ônibus espaciais. Assim, tornou-se fundamental que a primeira missão de manutenção planejada, a ser executada

em 1993, conseguisse reparar os problemas. Foi projetado um novo sistema óptico que utilizava duas lentes em uma montagem que seria acoplada ao Hubble, na tentativa de solucionar os problemas relacionados ao perfil do espelho. A missão foi um sucesso, e finalmente o Hubble passou a produzir algumas das imagens mais impressionantes já obtidas por um telescópio. Valem algumas ressalvas: apesar do sucesso da missão de reparo, foram praticamente perdidos três anos de funcionamento do telescópio espacial. Da mesma forma, por mais que a imprensa mundial afirmasse o contrário, a intervenção da óptica corretora não permitiu que se atingisse o mesmo nível de perfeição do projeto inicial do Hubble, embora o resultado obtido ficasse próximo dele, e a qualidade das imagens obtidas fosse boa o suficiente para nos deixar maravilhados e surpresos. Como último comentário, o espelho construído pela Eastman Kodak, que ficou em terra, não apresentava o mesmo problema, e teria funcionado perfeitamente desde o início caso fosse lançado ao espaço. O HST foi um dos primeiros telescópios a utilizar os CCDs para captura de suas imagens.

Durante seu tempo de funcionamento o Hubble realizou uma série de trabalhos que impactaram de maneira significativa a história da astronomia: a imagem da Nebulosa da Águia, em Orion, que ficou conhecida como Pilares da Criação – pela primeira vez astrônomos conseguiram observar em detalhes uma região de formação estelar (ver figura 118); graças às observações feitas pelo telescópio melhoramos significativamente nossas estimativas de idade do universo, em torno de 13,8 bilhões de anos; imagens de alta resolução e espectros feitos pelo HST forneceram fortes evidências da existência de buracos negros no centro de praticamente todas as galáxias em nossa proximidade, inclusive reforçando o conceito de que esse buraco negro central está diretamente relacionado com a evolução de cada galáxia.



Figura 118 - “Pilares da Criação”, imagem do HST da Nebulosa da Águia, uma região de formação estelar. Fonte: Wikimedia Commons.

Entre as contribuições mais importantes do HST estão os levantamentos Hubble Deep Field, Hubble Deep Field South, Hubble Ultra Deep Field e Hubble Extreme Deep Field (ver figura 119). Em todos esses trabalhos, o telescópio era apontado para um ponto escuro do céu, onde anteriormente nenhum objeto era detectado. Esse ponto era, então, observado por várias horas, dias inteiros dependendo do levantamento, e quando se olhava a imagem obtida, via-se que estava polvilhada de galáxias. Esses levantamentos permitiram aos astrônomos estimar o número total de galáxias no universo observável – e esse número parece chegar à casa dos trilhões.

O HST realizou descobertas no Sistema Solar, como a lua Styx de Plutão; fez as melhores imagens das colisões dos pedaços do cometa Shoemaker-Levy 9 em Júpiter

em 1994, e medidas obtidas graças a esse telescópio durante a ocorrência de auroras no satélite Ganimedes, de Júpiter, forneceram indícios muito fortes de que o objeto possui um oceano interno de água salgada.

Até 2018, mais de 15 mil artigos científicos haviam sido publicados utilizando dados colhidos pelo Hubble, além de incontáveis comunicações apresentadas em conferências e congressos. Além disso, esses trabalhos foram muito significativos, pois, se aproximadamente um terço do total de artigos astronômicos publicados não recebem citações em trabalhos posteriores, no caso do Hubble o número de artigos sem citações posteriores é de apenas 2%.

Hoje, 30 anos após o seu lançamento, o Hubble Space Telescope ainda funciona e as várias missões de manutenção, reparos e aperfeiçoamentos tornaram-no um instrumento muito mais poderoso. Os ônibus espaciais foram aposentados, e não existem mais missões possíveis para reparos. Então, nos próximos anos, esse incrível telescópio vai parar de funcionar. Mas outros instrumentos, incluindo o Telescópio Espacial James Webb, irão substituí-lo no futuro.

Antes do Hubble, houve outro telescópio espacial que operou na faixa de luz visível, o Hipparcos, da ESA, em funcionamento entre 1989 e 1993. O Hipparcos utilizava um espelho principal com apenas 29 cm de diâmetro e era dedicado somente à astrometria de precisão. Antes de seu lançamento, apenas umas poucas dezenas de estrelas tinham sua distância medida através de paralaxe. O Hipparcos produziu um catálogo com a paralaxe de 118.218 estrelas, aumentando em muito a precisão de estimativas de distâncias por outros métodos. Das paralaxes medidas pelo satélite, em cerca de 20 mil a precisão era da ordem de 10%, e em cerca de 50 mil, da ordem de 20%. Nas restantes, a precisão era ainda menor, mas isso era incrivelmente melhor do que existia anteriormente. Além do mais, com os dados levantados, o Hipparcos produziu outros dois catálogos, Tycho-1 e Tycho-2, com dados astrométricos de pouco mais de 1 milhão de estrelas, o primeiro, e 2 milhões de estrelas, o segundo.

Outra missão similar, porém muito mais poderosa, o satélite GAIA, também da ESA, foi lançado em 2013. O projeto óptico, bastante complexo, previa dois conjuntos separados de três espelhos, os dois conjuntos instalados com um ângulo de  $106,5^\circ$  entre eles. Os espelhos são retangulares, com o comprimento maior no sentido em que é necessária a maior resolução de imagem. Os dois espelhos primários medem  $1,40 \times 0,50$  m. A luz é captada por um conjunto de 106 CCDs de  $4500 \times 1966$  pixels cada. A missão GAIA orbita a Terra no ponto L2, o segundo ponto estável calculado pelo matemático Lagrange, situado

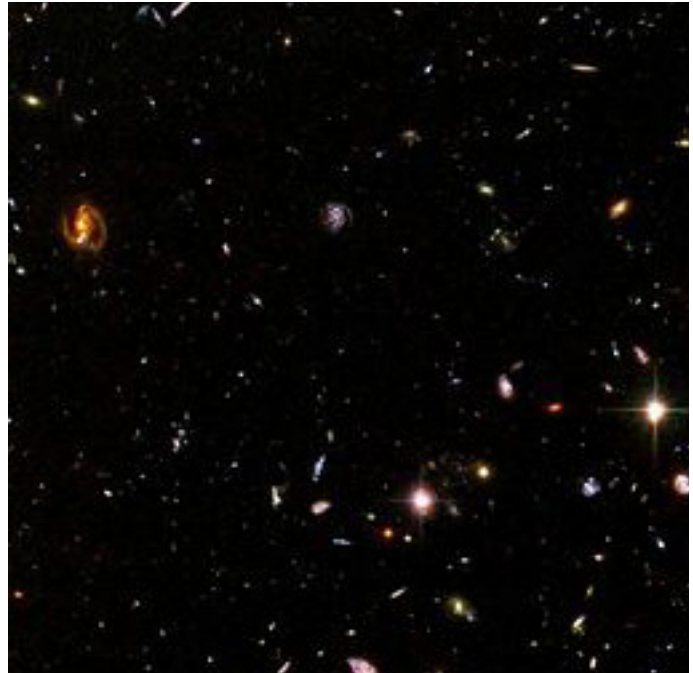


Figura 119 - O “Hubble Ultra Deep Field”, um dos trabalhos mais importantes do HST, mostra uma quantidade imensa de galáxias em uma região muito pequena do espaço e aparentemente vazia. Fonte: Wikimedia Commons.



exatamente na linha Sol-Terra, aproximadamente 1.500.000 km mais distante do Sol que nosso planeta. O GAIA está em plena atividade e já divulgou dois *releases* completos de dados e uma parcial do seu futuro terceiro *release*, que será divulgado na íntegra em 2022. A missão tem observado um número imenso de objetos, com uma precisão incrivelmente maior que a alcançada pelo Hipparcos, mas isso vai ser comentado com mais detalhes em outro capítulo.

Durante o período de março de 2009 a outubro de 2018, esteve operando em órbita o telescópio espacial Kepler, da NASA. Era um telescópio óptico, com um espelho de 95 cm de diâmetro especializado na busca de planetas extrassolares através do método de trânsito, no qual o instrumento mede a diminuição periódica de brilho da estrela observada no momento em que o planeta passa na frente da estrela. O telescópio observou sempre a mesma área de cerca de 115° quadrados, pegando parte das constelações de Cygnus, Lyra e Draco. Durante seu período de operação, o Kepler descobriu 5.011 estrelas candidatas a possuir pelo menos um exoplaneta e confirmou a existência de 2.512 estrelas que possuem pelo menos um exoplaneta em sua órbita. Foi o maior número de exoplanetas descoberto por qualquer observatório. Hoje encontra-se em operação um satélite similar, o TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), também operado pela NASA, lançado em 2018 e que deve se manter em operação até 2022. O TESS observa uma área de 24° x 24°, focando a busca em aproximadamente 200 mil estrelas das classes espectrais G, K e M. Até setembro de 2019, o TESS havia confirmado a descoberta de 29 exoplanetas e divulgado uma lista de 1.000 candidatos.

## Infravermelho

O primeiro satélite a operar na faixa do infravermelho foi o IRAS (Infrared Astronomical Satellite), da NASA, com participação do Reino Unido e da Holanda, que entrou em órbita em janeiro de 1983. O IRAS era um telescópio do tipo Ritchey-Chrétien (variação do Cassegrain), com 0,53 m de diâmetro. A missão realizou o primeiro levantamento completo do céu em infravermelho e atraiu muita atenção da mídia ao observar um excesso de radiação infravermelha na estrela Vega, com a possível explicação de que talvez existisse um sistema planetário em formação em torno dela. Nessa época ainda não haviam sido descobertos planetas fora do sistema solar. Posteriormente, o satélite encontrou a mesma característica em outras estrelas: Beta Pictoris, Fomalhaut e Epsilon Eridani. O IRAS também descobriu alguns cometas e quatro asteroides.

Em agosto de 2003, entrou em órbita o Spitzer Space Telescope (SST), da NASA, que, assim como o IRAS, também tinha a configuração Ritchey-Chrétien, com 0,85 m de diâmetro (ver figura 120). Logo que iniciou suas

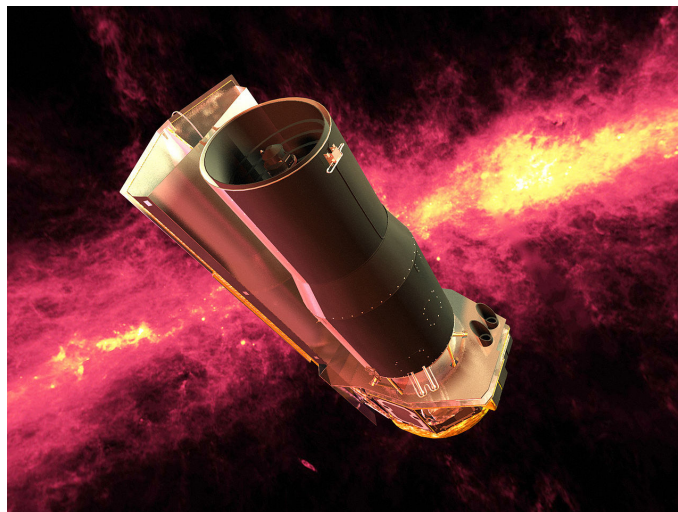


Figura 120 - O telescópio espacial Spitzer, que operava no infravermelho. Fonte: Wikimedia Commons.

operações, o SST conseguiu realizar imagens incríveis, várias delas merecendo grande divulgação da mídia mundial, em muitos aspectos rivalizando com o Hubble Space Telescope (ver figura 121). Em 2005, ele se tornou o primeiro satélite a conseguir captar luz direta de dois exoplanetas: HD 209458 b e TrES-1 b. No mesmo ano, pesquisadores da Universidade de Wisconsin, com base em 400 horas de observação, comprovaram que a Via Láctea possui uma estrutura de espiral com barra muito mais proeminente do que se pensava anteriormente. Entre setembro e outubro de 2016, o Spitzer encontrou cinco exoplanetas em órbita da estrela TRAPPIST-1. Posteriormente, outros telescópios descobriram mais dois.

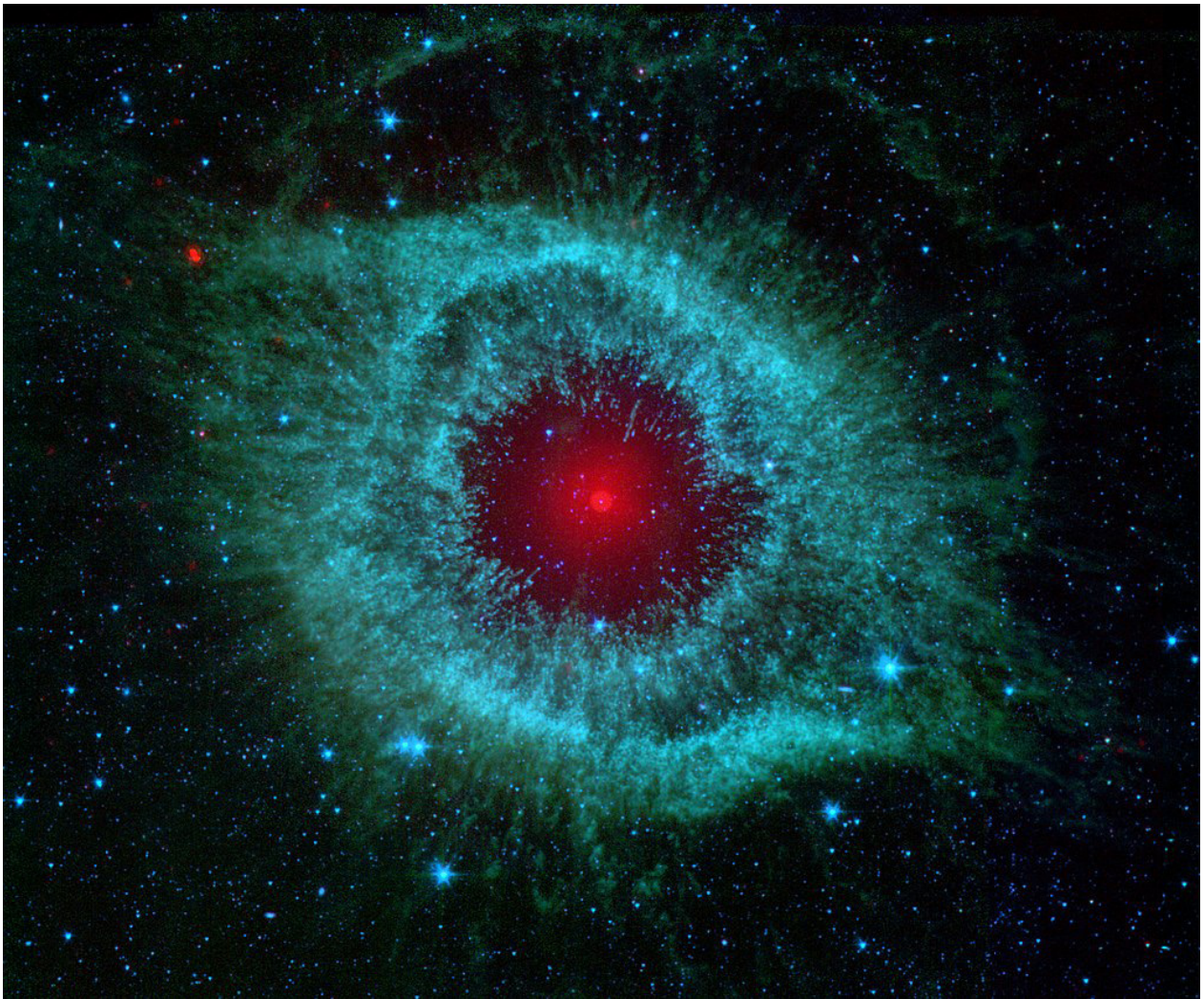


Figura 121 - Imagem da Helix Nebula pelo Spitzer. Fonte: Wikimedia Commons.

Entre 2009 e 2013, o telescópio Herschel, lançado pela ESA, se tornou o maior observatório espacial na faixa do infravermelho, com um espelho primário de 3,50 m. Ele operou no ponto L2 de Lagrange e realizou uma série de trabalhos importantes, entre eles a descoberta de vapor de água emitido pelo planeta anão Ceres.

Em 2009, a NASA lança o observatório WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer), com um espelho primário de apenas 40 cm. O satélite fez um levantamento de aproximadamente 99% do céu noturno, em faixas pouco exploradas dentro do infravermelho. Durante seu

período inicial de observação, acabou por descobrir milhares de asteroides e um grande número de aglomerados abertos. Depois de uma fase de hibernação, que durou de 2011 a 2013, o WISE voltou a operar, embora sem seus sistemas de criogenia, que resfriavam o telescópio. Dessa maneira, o satélite perde grande parte da sensibilidade que possuía em seus primeiros dias. A missão continua em funcionamento.

## **Telescópios solares**

Além de telescópios dedicados à observação específica de algum tipo de frequência do espectro eletromagnético, existem alguns telescópios voltados exclusivamente ao monitoramento da atividade solar. Esses observatórios muitas vezes possuem instrumentos variados, que trabalham em diferentes comprimentos de onda e são muito importantes, inclusive com o objetivo de diminuir possíveis danos causados por tempestades solares ou por violentas ejeções de massa coronal que sejam emitidas em direção à Terra.

Um dos mais importantes instrumentos desse tipo foi o SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), lançado em 1996 pela ESA e pela NASA, que se encontra no final do seu ciclo de operação, devendo parar de funcionar nos próximos meses. O SOHO adotou uma órbita no ponto L1 de Lagrange, muito estratégico para um telescópio solar, pois fica mais próximo do Sol, e alinhado com o nosso planeta. Em caso de uma ejeção de massa coronal em nossa direção, o telescópio pode enviar um alerta para a base, o que vai fazer com que sejam tomadas medidas de proteção em satélites e usinas elétricas próximas às zonas polares, para minimizar os possíveis danos. Além disso, nessa órbita, a missão tem a visão do Sol desobstruída durante todo o tempo. O SOHO possui uma suíte de instrumentos que realizam observações da zona coronal, espectroscópios, um observador de rádio de baixas frequências, instrumentos operando em várias faixas dentro do ultravioleta etc. O SOHO tem prestado excelentes serviços e produzido imagens incríveis da atividade solar. Uma área inesperada na qual se destacou foi a descoberta de dezenas de cometas, sendo a sonda espacial que mais descobriu objetos desse tipo. Vários desses cometas acabaram por se chocar com o Sol. As sondas WIND, lançada em 1994, e ACE, lançada em 1997, ambas da NASA, também continuam em operação até hoje e fazem estudos sobre a atmosfera solar. Assim como a SOHO, tanto a WIND como a ACE operam em L1.

Mais recentemente, duas sondas, a DSCOVR (Deep Space Climate Observatory), lançada em 2015 pela NASA, e a SoLO (Solar Orbiter), lançada pela ESA em fevereiro de 2020, continuam a monitorar a atividade solar com alto nível de detalhamento. A DSCOVR adotou uma órbita em torno de L1, enquanto a SoLO assumiu uma órbita elíptica que varia entre 0,28 e 0,91 Unidades Astronômicas.

## **Micro-ondas**

Em novembro de 1989 foi lançado ao espaço o satélite COBE (Cosmic Background Explorer), que operou até 1993. Com uma antena de apenas 19 cm de diâmetro, ele realizou vários trabalhos, entre eles um mapeamento de céu completo, com uma sensibilidade impossível de ser obtida com equipamentos baseados em terra. O resultado

comprovou a detecção da radiação de fundo cósmica de micro-ondas descoberta por Arno Penzias e Robert Wilson, mas apresentou um universo com pequenas anisotropias, ou seja, pequenas variações na temperatura das várias regiões do universo primordial, da ordem de 1/3 de milésimo de grau. Essas pequenas anisotropias seriam as responsáveis pela formação das estruturas que observamos hoje, como galáxias e estrelas. Pelo seu trabalho no COBE, George Smoot e John Mather ganharam o Prêmio Nobel de física de 2006 (ver figura 122).

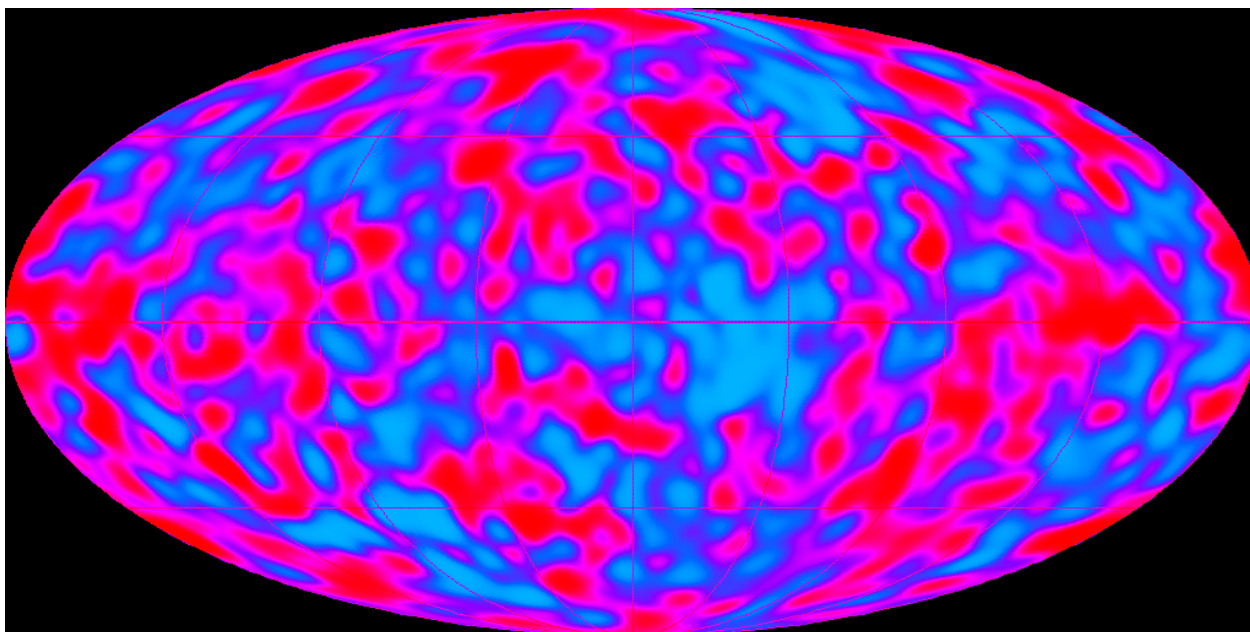


Figura 122 - Imagem de céu inteiro em micro-ondas pelo satélite Cobe. As diferenças de temperatura observadas são da ordem de um terço de milésimo de grau, mostrando que nosso universo é bastante homogêneo e confirmando a hipótese do Big Bang. Fonte: Wikimedia Commons.

Em 2010, a NASA lançou o sucessor do COBE, o satélite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), que, com uma antena de 1,40 m de diâmetro, produziu um mapa celeste muito mais detalhado que o de seu antecessor. Em 2013, a ESA lançou a missão Planck, similar ao WMAP, mas com uma antena ainda maior, com 1,90 m de diâmetro. O Planck conseguiu produzir um mapa ainda mais detalhado, onde é possível observar com muito mais precisão as anisotropias que deram origem às estruturas básicas do universo.

## Futuro

Vários telescópios espaciais estão planejados para entrar em funcionamento nos próximos anos, e entre eles o que mais causa expectativa é o Telescópio Espacial James Webb, da NASA, o sucessor do Hubble. Ao contrário de seu predecessor, o James Webb não vai trabalhar na faixa do visível, mas no infravermelho próximo. Com um espelho primário de 6,50 m de diâmetro, o telescópio deverá causar um enorme impacto no conhecimento astronômico. A escolha do infravermelho está ligada ao objetivo do observatório de estudar objetos muito distantes, das fases iniciais do universo, que devido ao alto *redshift* são mais facilmente observados em comprimentos de onda mais longos.

## CAPÍTULO 11

### Astronomia de altas energias

A astronomia de altas energias estuda os fenômenos mais violentos do universo, incluindo estrelas de massa muito grande e fenômenos ligados à existência de buracos negros ou objetos muito compactos e densos. Esta área ganhou um enorme impulso desde o início da era espacial, pois, como vimos anteriormente, a nossa atmosfera bloqueia a maior parte do ultravioleta e praticamente toda a faixa de raios X e raios gama provenientes do espaço. A grande questão que permanecia entre os astrônomos estava ligada à descoberta dos GRBs (*gamma-ray bursts*), pois havia muitas dúvidas referentes a sua origem e distância: seriam objetos oriundos de nossa própria galáxia ou fontes muito distantes e, conseqüentemente, muito mais violentas?

Em 1990, a NASA e a DLR (Agência Espacial da Alemanha Ocidental) lançaram o satélite Rosat (abreviação de Röntgensatellit), que originalmente deveria funcionar por 18 meses, mas acabou trabalhando por nove anos. O Rosat criou um catálogo com 150 mil fontes de raios X, além de um catálogo de fontes em extremo ultravioleta com 479 objetos. Os dois catálogos cobriam o céu inteiro, além de estudar a morfologia de restos de supernovas e observar a emissão de raios X em cometas. No ano seguinte a NASA lançou a missão Compton Gamma Ray Observatory, um telescópio espacial com quatro telescópios distintos, que trabalhavam principalmente na faixa dos raios gama, mas também em raios X. O Compton montou um catálogo com 271 fontes de raios gama, além de obter as primeiras indicações de que os GRBs deveriam ser emissões muito colimadas e distantes (ver figura 123).



Figura 123 - Foto do satélite Compton Gamma Ray sendo lançado em órbita terrestre. Fonte: Wikimedia Commons.

A partir de 1996 começa a operar o satélite BeppoSAX, uma colaboração ítalo-holandesa, que operou ininterruptamente por sete anos na faixa dos raios X. Seu principal instrumento era um telescópio Wolter Tipo 1, com 16 cm de diâmetro (ver figura 124). Alguns modelos teóricos sobre os GRBs previam que após a emissão inicial de raios gama, poderia existir uma emissão em comprimentos mais longos criada pela colisão da radiação inicial com gás intergaláctico. Essas emissões foram batizadas de *afterglows*. Em fevereiro de 1997, o BeppoSAX conseguiu detectar o GRB 970228 e observar a posição de seu *afterglow*. Vinte horas depois, o William Herschel Telescope conseguiu identificar a fonte de forma visível: era uma galáxia muito distante. Pouco depois, o BeppoSAX detectou o *afterglow* do GRB 970508, e este foi observado de forma visível apenas

quatro horas após sua descoberta, o que permitiu que os astrônomos obtivessem muito mais dados. Pelo espectro do objeto foi possível estimar sua distância em aproximadamente 6 bilhões de anos-luz (*redshift* 0,835). O evento seguinte detectado pelo BeppoSAX, o GRB 980425, foi seguido nos dias posteriores pelo aparecimento de uma brilhante supernova. A origem dos GRBs finalmente começava a ser decifrada.



Figura 124 - Ilustração que mostra o satélite BeppoSAX operando em órbita terrestre. Fonte: Wikimedia Commons.

Mesmo antes do trabalho do BeppoSAX já sabíamos que havia dois tipos de GRBs: os longos, a maioria, com mais de dois segundos de duração, e os curtos, com menos de dois segundos, que representavam cerca de 30% dos eventos observados. Por muito tempo, todos os GRBs em que se conseguiu identificar a posição do *afterglow* eram do tipo longo e estavam claramente relacionados com supernovas do tipo II, ou seja, o final do ciclo de vida de uma estrela de grande massa. Entre os astrônomos surgiu a suspeita de que os GRBs curtos deveriam estar ligados a outro tipo de fenômeno. A principal hipótese estava relacionada à fusão de duas estrelas de nêutrons, ou à fusão de uma estrela de nêutrons e um buraco negro, produzindo um fenômeno batizado de kilonova. A confirmação da hipótese só ocorreu em 2017, com o GRB 170817A, mas falaremos dele com mais detalhes em outro capítulo mais à frente. Apenas para finalizar por agora, o GRB 178117A era realmente uma fusão de estrelas de nêutrons.

Os GRBs são eventos extremamente energéticos, mas hoje se sabe que a emissão de raios gama é fortemente colimada e acontece apenas nos polos magnéticos. Esse fato implica em duas constatações: a primeira é que a energia envolvida em cada evento é muito menor do que se pensava inicialmente, quando se considerava que o fluxo observado seria emitido em todas as direções. A segunda é que como o observador só consegue avistar aqueles GRBs cujos polos magnéticos estão apontados em sua direção, o número total de eventos é muitas vezes maior que o observado. Isto significa que a energia total emitida por todos os GRBs é a mesma calculada inicialmente, pois o número maior de eventos compensa a menor energia emitida em cada evento.

Em 1999 é lançado ao espaço o satélite Chandra X-Ray Observatory, operado pela NASA e pelo SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory). O telescópio foi chamado inicialmente de AXAF (Advanced X-Ray Astrophysics Facility), mas foi rebatizado para homenagear o astrofísico Subrahmanyan Chandrasekhar (ver figura 125). O telescópio era do tipo Wolter 1 (ver figura 126) e possuía um diâmetro de 1,20 m. O Chandra continua em operação até a atualidade e realizou uma série de descobertas importantes, entre elas a observação de um anel em torno da Nebulosa do Caranguejo, um remanescente

de supernova; detectou as primeiras emissões de raios X em Sagitarius A, um buraco negro massivo no centro de nossa galáxia; fez imagens de raios X da onda de choque da supernova 1987A; mediu a constante de Hubble-Lemaître em 76,9 km/s/Mpc; forneceu evidências da existência da matéria escura no Bullet Cluster; e observou um halo de gás em torno da Via Láctea, entre outras. No mesmo ano, a ESA lançou ao espaço um satélite similar, o XMM-Newton, que também continua

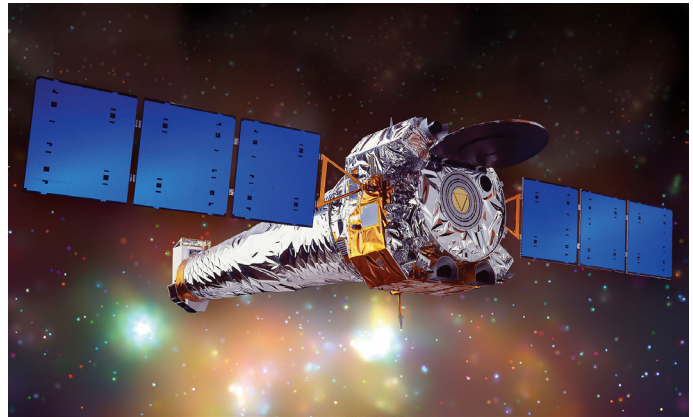


Figura 125 - Ilustração mostrando o satélite de raios X Chandra. Fonte: Wikimedia Commons.

em operação, com um telescópio do tipo 3X Wolter de 0,72 m de diâmetro e resolução de imagem bastante inferior à do Chandra. Apesar dessa limitação, o XMM-Newton conseguiu realizar trabalhos importantes, como no objeto SCP 06F6, descoberto pelo Hubble, que também emitia raios X, com uma energia cem vezes maior que uma supernova.

Como vimos anteriormente, as janelas atmosféricas impedem a detecção de fótons

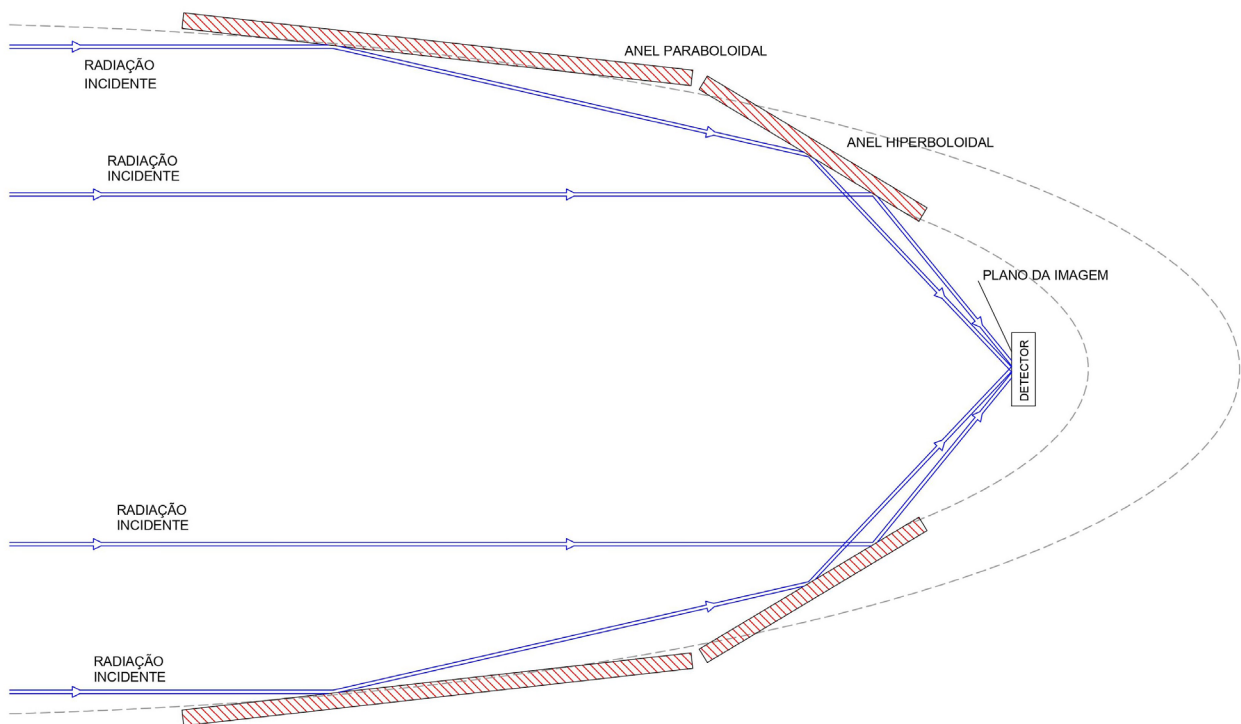


Figura 126 - Esquema óptico básico de um telescópio do tipo Wolter. Existem variações desta configuração. Desenho: Francisco Conte.

de altas energias (ultravioleta distante, raios X e raios gama) na superfície, pois nossa atmosfera absorve esses tipos de radiação. Isso exige que as pesquisas que envolvam esses comprimentos de onda sejam realizadas em balões estratosféricos ou através de satélites, o que acaba por encarecê-las. Num caso específico, porém, existe uma alternativa possível de observação indireta: os raios gama, quando colidem com gases

em nossa alta atmosfera, podem produzir uma cascata de partículas, da mesma forma que ocorre com os raios cósmicos, que veremos em um capítulo mais à frente. Nessa cascata de partículas, eventualmente são produzidas algumas partículas que vão se deslocar em nossa atmosfera mais rapidamente que a luz, produzindo o chamado efeito Cherenkov, ou radiação Cherenkov, emitindo fótons de cor azul. Esse fenômeno é muito rápido, exigindo a construção de detectores de resposta muito rápida. Dessa forma é possível observar o efeito que os raios gama provenientes do espaço causam em nossa alta atmosfera.

Em 1989, o Whipple Telescope, um refletor com 10 m de diâmetro formado por inúmeros espelhos, utilizando fotomultiplicadores como detectores e instalado no Monte Hopkins, no estado do Arizona, mesmo sítio do MMT, conseguiu detectar emissões de raios gama provenientes da Nebulosa do Caranguejo, um remanescente de supernova. Na mesma época, um instrumento similar, o HEGRA (High Energy Gamma Ray Astronomy) entrava em operações em La Palma, nas Ilhas Canárias. Esses primeiros instrumentos alavancaram outros projetos similares (ver figura 127).

O MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes), instalado no



Figura 127 - Foto dos dois espelhos compostos do telescópio Cherenkov HEGRA, localizado nas Ilhas Canárias. Fonte: Wikimedia Commons.

Roque de los Muchachos Observatory, em La Palma, nas Ilhas Canárias, mesmo sítio do HEGRA, começou a operar em 2004, substituindo o instrumento anterior. O MAGIC é composto por dois telescópios refletores de 17 m de diâmetro, formados com múltiplos espelhos. Os telescópios possuem sensibilidade para captar fótons com energia entre 50 GeV e 30 TeV (50 gigaelétron-volts e 30 teraelétron-volts).

No mesmo Monte Hopkins foi instalado um sucessor do Whipple, o projeto VERITAS



(Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System), com quatro antenas de 12 m de diâmetro, separadas aproximadamente 100 m entre si, com maior sensibilidade para raios gama com energia entre 100 GeV e 10 TeV (100 gigaelétron-volts a 10 teraelétron--volts). Os telescópios podem ser apontados para qualquer direção do céu. O VERITAS iniciou suas operações em 2005 e com plena capacidade a partir de 2007 (ver Figura 128).

Em 2012, começou a operar na Namíbia com capacidade total o telescópio HESS (High



Figura 128 - Vista geral do detector Cherenkov VERITAS. Fonte: Wikimedia Commons.

Energy Stereoscopic System), acrônimo que homenageia Victor Hess, o descobridor dos raios cósmicos. O HESS é um conjunto de quatro telescópios refletores, com espelhos múltiplos, de 12 m de diâmetro, distanciados 120 m uns dos outros, além de mais um telescópio central, com 28 m de diâmetro. O HESS iniciou suas operações parcialmente em 2002. Em 2014 ele já havia descoberto 160 fontes de raios gama com energia na casa de 1 TeV.

O maior projeto deste tipo, que deve revolucionar as pesquisas na área, é o CTA (Cherenkov Telescope Array), que prevê a construção de dois observatórios, um em cada hemisfério (ver figura 129). No Norte será utilizado o Observatório Roque de los Muchachos, nas Ilhas Canárias, onde já opera o MAGIC; no Sul, o local será o entorno do Cerro Paranal, ao lado do VLT e do futuro ELT (que veremos mais à frente). Cada um dos observatórios contará com nada menos que 99 telescópios refletores, sendo quatro com 23 m de diâmetro, 25 com 12 m de diâmetro e 70 com 4 m de diâmetro. Esses 99 instrumentos estarão distribuídos em uma área com aproximadamente 2 km de diâmetro. Os detectores possuirão sensibilidade para captar sinais entre 20 GeV e 300 TeV. Do projeto participam nada menos que 31 países, inclusive o Brasil. Prevê-se que as primeiras operações se iniciem em 2022 e que a construção total se complete em 2025. No início de 2021, quando este livro foi escrito, havia certo temor de que a pandemia de Covid-19 pudesse adiar esses planos.

A astronomia de altas energias tem se desenvolvido bastante nas últimas décadas, o número de fontes conhecidas aumentou significativamente e grandes descobertas foram feitas na área. Tudo indica que esses avanços em pesquisa devam se manter nos próximos anos, seja pela construção dos dois observatórios do CTA, seja pelo lançamento de novos satélites. Muitas dúvidas que temos sobre eventos de alta carga energética deverão ser esclarecidas.

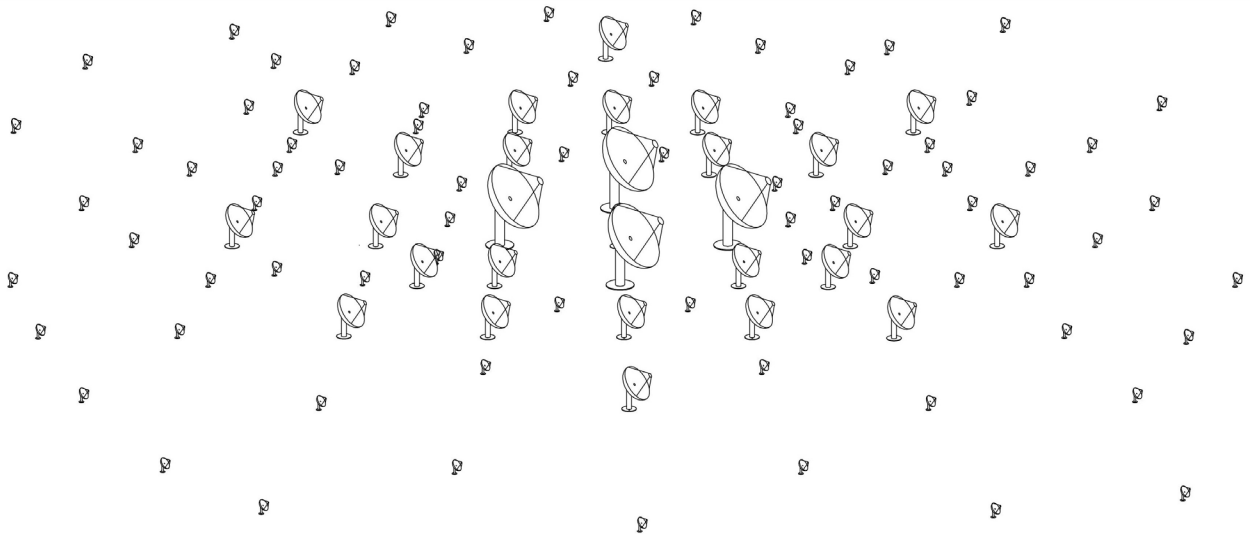


Figura 129 - Desenho esquemático da distribuição dos telescópios de três tamanhos do Cherenkov Telescope Array. Desenho: Francisco Conte.

## CAPÍTULO 12

### Novas janelas na astronomia

Como pode ser percebido através de tudo que vimos até aqui, a astronomia é uma ciência que se desenvolveu através da observação da radiação eletromagnética que recebemos do Sol, das estrelas, planetas, cometas, nebulosas e demais objetos celestes, na maior parte da história observando apenas a luz visível, mas depois também através das ondas de rádio, infravermelho etc. Quase todo o conhecimento astronômico foi obtido através da observação e análise das ondas eletromagnéticas.

Até o início do século XX, a única outra fonte de informação e conhecimento da astronomia além da luz era o estudo de meteoritos. Estes objetos que atingem com frequência o nosso planeta fornecem muitos dados importantes que nos ajudam a compreender a formação e evolução do sistema solar e mesmo do nosso planeta. Depois das sondas que visitaram diversos corpos do sistema solar, descobrimos vários meteoritos que eram provenientes da Lua e de Marte, pois as características destes meteoritos eram equivalentes a amostras colhidas na Lua ou analisadas por *landers* em Marte. No caso dos meteoritos lunares, foi possível comparar as características destes com as amostras coletadas e trazidas pelas naves do programa Apollo, bem como com amostras também trazidas por sondas, não tripuladas, da antiga União Soviética. O caso dos meteoritos marcianos é ainda mais interessante, pois alguns deles acabaram por encapsular pequenas porções da atmosfera marciana na época em que algum objeto colidiu com o planeta e ejetou uma grande quantidade de rochas de superfície para o espaço. Essas rochas ficaram vagando até que algumas delas acabaram por cair em nosso planeta. São as únicas amostras de Marte que existem à disposição dos cientistas, posto que nenhuma missão ao planeta vermelho retornou ou enviou amostras para a Terra.

No ano de 1996, o presidente americano Bill Clinton chamou uma entrevista coletiva onde anunciou a possível descoberta de indícios de uma forma ancestral de vida extraterrestre a partir de um meteorito marciano descoberto em 1984 na Antártida e batizado como ALH 84001. Estudos feitos pela equipe de astrobiologia, liderada por David McKay, encontraram estruturas que se assemelhavam muito a bactérias, embora de dimensões muito menores que as existentes na Terra (ver figura 130). Não houve grande aceitação da hipótese por parte da comunidade científica, com muitas instituições ao redor do mundo apontando problemas nas conclusões do estudo. A controvérsia se mantém até os dias de hoje, e o meteorito ainda é estudado por diferentes equipes, gerando uma série de publicações.

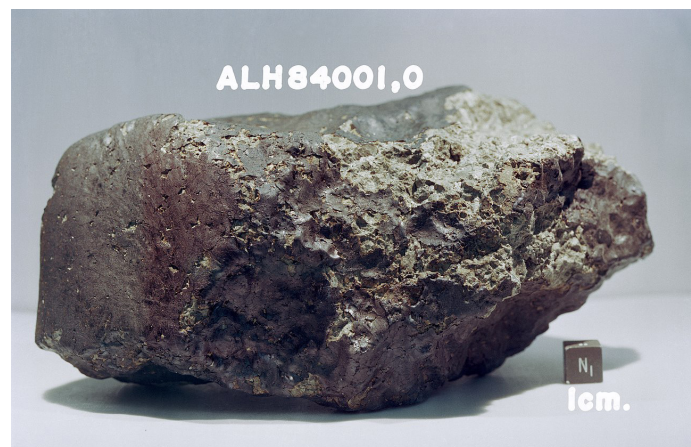


Figura 130 - O meteorito ALH 84001, que supostamente apresentaria evidências de vida ancestral em Marte, embora nunca tenha havido consenso sobre o fato na comunidade científica. Fonte: Wikimedia Commons.

Não existe consenso e os astrônomos continuam a buscar uma evidência definitiva da existência de vida fora da Terra.

Porém, a partir do início do século passado, começamos a encontrar novas formas de obter informações e dados astronômicos, seja através de partículas que atingem o nosso planeta, seja, mais recentemente, por um tipo diferente de ondas, cuja existência era prevista pela relatividade de Einstein. Assim, aos poucos os astrônomos foram capazes de desenvolver uma nova forma de astronomia, através dos estudos dos raios cósmicos, dos neutrinos e das ondas gravitacionais. A seguir detalharemos um pouco cada um desses novos meios de obtenção de dados:

## Raios cósmicos

Enquanto você lê este texto, seu corpo está sendo bombardeado: a cada segundo ele é atravessado por dezenas de partículas invasoras, sem que você se dê conta. Essas partículas são criadas por raios cósmicos de alta energia, provenientes de regiões distantes do espaço, que colidem com núcleos atômicos de gases da nossa atmosfera, produzindo uma cascata de radiação e partículas em profusão. Cada evento desses pode produzir até algumas centenas de bilhões de partículas, que vão atingir o solo. Muitas, como vimos, atingem você, leitor.

Após a descoberta da radioatividade por Becquerel em 1896, muitos cientistas acreditavam que a ionização atmosférica (eletricidade atmosférica) seria causada pela radiação proveniente de elementos radioativos existentes no solo. Surpreendentemente, as primeiras tentativas de medição da ionização pareciam indicar um aumento da taxa de ionização proporcional ao aumento da altitude. Em 1909, o padre jesuíta e físico holandês Theodor Wulf realizou uma experiência com um eletrômetro selado. Ele fez medições na base e no topo da Torre Eiffel, encontrando níveis maiores de ionização no topo. Em 1911,



Figura 131 - Domenico Pacini, um dos pioneiros do estudo de raios cósmicos, realizando medições. Fonte: Wikimedia Commons.

Domenico Pacini realizou experiência similar em um lago, com medidas na superfície e depois a três metros de profundidade. Ele encontrou um nível de radiação menor embaixo d'água e concluiu que deveriam existir outras fontes de radiação além daquela produzida por elementos radioativos no subsolo (ver figura 131). Mas esses trabalhos não tinham despertado muito interesse no meio científico.

Em 1912, Victor Hess fez uma série de medições utilizando três eletrômetros em um balão. Hess chegou até a altitude de 5.200 m, encontrando um nível de radiação quase quatro vezes maior do que aquele observado na superfície. Hess imaginou que essa radiação fosse proveniente do Sol, mas repetiu a experiência durante um eclipse do Sol,

com a radiação solar quase totalmente bloqueada pela Lua, e as medições indicavam praticamente o mesmo nível de ionização obtido em condições normais. Durante suas experiências, Hess foi fazendo o registro de suas medições ao mesmo tempo em que o balão subia, de modo a poder estimar qual era a taxa de aumento de radiação em cada trecho (ver figura 132). Sua conclusão foi que deveria existir uma radiação penetrante que se originava acima de nossa atmosfera. Nos anos seguintes, Werner Kolhörster confirmou os resultados obtidos por Hess, conseguindo fazer medições até a altitude de 9.000 m. Em 1936 Hess ganhou o Nobel de Física por seu trabalho.



Figura 132 - Victor Hess em seu balão, pouco antes de fazer um voo para medição de raios cósmicos. Fonte: Wikimedia Commons.

Em 1927, o físico holandês Jacob Clay, que regressava para sua casa em Delft depois de passar um período no Instituto de Tecnologia de Bandung, na Indonésia, decidiu acrescentar à sua viagem de retorno um propósito científico: durante o trajeto do cruzeiro

ele foi sistematicamente registrando o nível da radiação cósmica em vários pontos de seu itinerário. Como resultado, ele percebeu que o fluxo variava com a latitude, aumentando a incidência conforme se afastava do Equador. Corretamente, Clay interpretou que a radiação estava sendo defletida para o espaço pelo campo magnético da Terra, o que indicava que essa radiação deveria ser causada por partículas carregadas e não por fótons.

A partir da década de 1930 a pesquisa em raios cósmicos passou a seguir duas direções distintas: a primeira consistia em descobrir que tipos de partículas constituíam os raios cósmicos e qual a sua origem; a outra se empenhava em usar a elevadíssima energia dos raios cósmicos para bombardear átomos e moléculas de maneira a buscar o entendimento da constituição básica da matéria, da mesma forma que em um acelerador de partículas. Nos anos 1940 foi descoberta a primeira partícula observada através da decomposição atômica causada por raios cósmicos: o pósitron, a antipartícula do elétron.

Em 1938, o físico francês Pierre Auger descobriu que o impacto de um raio cósmico contra os gases de nossa atmosfera produz uma cascata de partículas. A experiência que Auger realizou foi feita em Paris e em Jungfrauoch, nos Alpes. O trabalho consistia em utilizar detectores do tipo contador Geiger para observar raios cósmicos. Auger utilizava dois contadores e, quando havia concordância de sinal entre ambos, ele considerava

que havia capturado um evento de decomposição a partir de raios cósmicos. Após os primeiros sucessos, Auger passou a utilizar um terceiro detector, que era posicionado mais distante que o par original. Auger conseguiu observar a correlação em um evento, mesmo com o terceiro detector situado a uma distância de 300 metros. Isso indicava que eventos com uma origem comum poderiam se espalhar espacialmente através de uma cascata de reações entre partículas. Esse fenômeno foi batizado por Auger como “chuveiro aéreo extenso”. Hoje sabemos que os chuveiros de partículas podem atingir dezenas ou centenas de quilômetros quadrados.

No Brasil, o estudo de raios cósmicos teve início em 1934, com a produção de trabalhos em dois centros diferentes de pesquisa: no Instituto Nacional de Tecnologia, no Rio de Janeiro, sob a coordenação do físico alemão Bernhard Gross, e em São Paulo, na Universidade de São Paulo, com a coordenação de dois professores estrangeiros, o ítalo-russo Gleb Wataghin e o italiano Giuseppe Occhialini.

Em 1939, o grupo formado por Gleb Wataghin, Marcello Damy e Paulus Pompéia descobriu um novo tipo de chuveiro, com partículas com uma capacidade extremamente elevada de penetração da matéria, muitas vezes mais eficientes que os raios X. Mais tarde descobriu-se que essas partículas eram múons. Uma das etapas do experimento foi realizada no túnel da Avenida Nove de Julho, em São Paulo.

Nos anos 1940, o físico brasileiro César Lattes, trabalhando em conjunto com Occhialini e Cecil Powell, descobriu o méson pi, ou píon, estudando raios cósmicos em Cerro Chacaltaya, na Bolívia. Lattes, que posteriormente, em 1948, conseguiu produzir o píon também em um acelerador de partículas, foi também o responsável pelo cálculo da massa da nova partícula.

Hoje sabemos que raios cósmicos são partículas, basicamente fragmentos atômicos de processos energéticos, normalmente prótons (núcleos de hidrogênio que representam aproximadamente 84% dos casos observados), partículas alfa, ou núcleos de hélio, que representam aproximadamente 14%, além de outros núcleos atômicos (cerca de 1%) e elétrons e pósitrons (elétrons com carga positiva), com cerca de 1% do total de eventos. Todas essas partículas se deslocam a velocidades relativísticas e possuem uma energia que pode variar incrivelmente, como veremos mais à frente. Os raios cósmicos menos energéticos ficam na casa de  $10^9$  eV (elétron-volts). Para se ter uma ideia do que isso significa, basta imaginar que essa é uma energia aproximadamente similar à de um próton em repouso.

O fato de os raios cósmicos serem partículas eletromagneticamente carregadas faz com que sofram forte influência de campos magnéticos, o que os diferencia dos fótons, as partículas responsáveis pela propagação das radiações do espectro eletromagnético, que não possuem carga elétrica. Essa característica torna particularmente complexo o trabalho de identificação das fontes.

Na atualidade, o termo “vento solar” é usado por convenção entre os cientistas para definir os raios cósmicos provenientes do Sol, e o termo “raios cósmicos” apenas para as partículas que tiveram sua origem fora do sistema solar, não importando se a origem é galáctica ou extragaláctica. Existe uma clara diferença no comportamento dos dois tipos: O vento solar é muito mais frequente e representa a maioria das partículas que atingem a

Terra, embora essas partículas sejam quase todas de baixa energia; já os raios cósmicos são menos numerosos, mas são a maioria entre as partículas de alta energia.

Existem inúmeros tipos de instrumentos utilizados nas pesquisas de raios cósmicos, que podem ser divididos em três grupos, de acordo com os métodos adotados. O primeiro grupo é o dos chamados métodos de tempo real, que fazem observações instantâneas das partículas e suas interações, gerando informações acerca da direção, energia e composição química das partículas. O segundo tipo é denominado método de trilha residual, onde a passagem da partícula através de algum tipo de material pode ser observada algum tempo após a ocorrência do evento, o que pode significar de horas a milhões de anos. Por último, temos os métodos indiretos, onde o fluxo de raios cósmicos pode ser detectado a grandes distâncias, ou em grandes intervalos de tempo no passado, estudando-se as consequências de sua presença (ver figura 133).

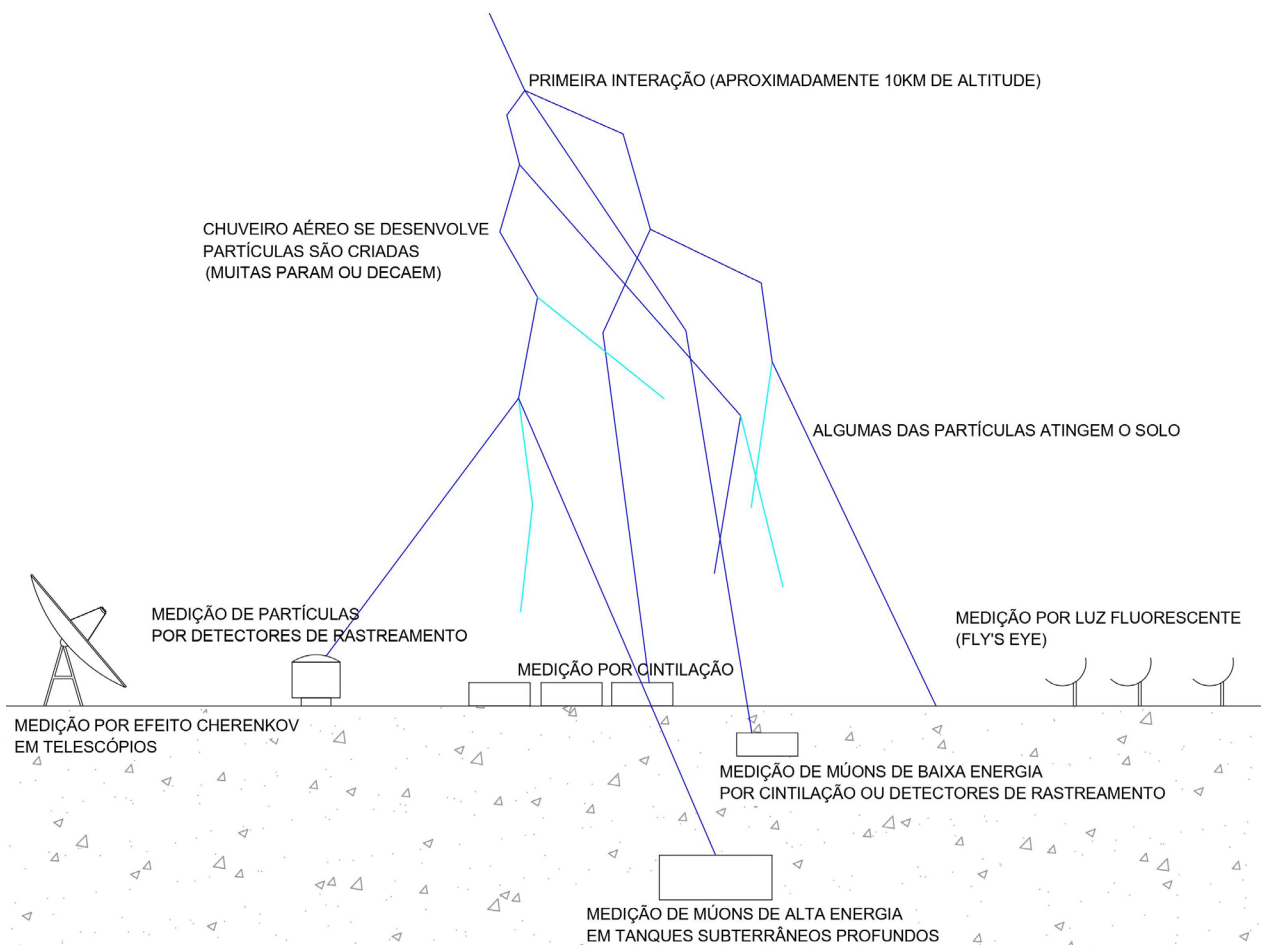


Figura 133 - A figura mostra várias formas de detecção de raios cósmicos: telescópios Cherenkov; medição por luz fluorescente; medição por cintilação; detectores de rastreamento; medição de múons de alta e baixa energia. Desenho: Francisco Conte.

Entre os detectores do grupo dos métodos de tempo real encontramos os eletrômetros utilizados por Victor Hess e os contadores Geiger, que utilizam correntes elétricas criadas pela passagem das partículas. Dois tipos muito usados atualmente são os detectores de cintilação e os detectores Cherenkov. Os detectores de cintilação normalmente utilizam folhas de plástico translúcidas que detectam as partículas produzidas em um chuvaire. As

partículas colidem com a superfície da folha de plástico, removendo elétrons e ionizando algumas moléculas. Elétrons das proximidades vão ser capturados por essas moléculas, emitindo fótons no processo. Esses fótons são capturados por fotomultiplicadores, que detectam os *flashes* de luz. O material utilizado precisa ser transparente para permitir o funcionamento do sistema. Como exemplo de um detector de cintilação temos o experimento de Volcano Ranch, instalado no Novo México em 1959. Detectores Cherenkov observam a radiação produzida por partículas que se movem com velocidade superior à da luz na atmosfera, lembrando sempre que essa velocidade sempre será menor que a velocidade da luz no vácuo.

Na categoria de detectores do tipo trilha residual, podemos citar aqueles que utilizam emulsões fotográficas, como os empregados por César Lattes em Cerro Chacaltaya. Existem também neste grupo os chamados *ionization damage detectors*, normalmente construídos com material plástico com moléculas relativamente complexas. As partículas ionizantes danificam a estrutura das moléculas. O grau de dano dos detectores vai permitir que se façam estimativas da massa e da energia dos raios cósmicos, assim como sua carga e velocidade, mesmo que as medições sejam feitas posteriormente.

Por último, temos os métodos indiretos. Raios cósmicos podem ser observados em rádio. Quando as partículas colidem com a alta atmosfera terrestre, produzem emissões de baixa frequência que podem ser detectadas por radiotelescópios. Outro método indireto é o do carbono 14. O carbono 14 é produzido na atmosfera por nêutrons criados em chuvaras de raios cósmicos, e assim a abundância de carbono 14 na atmosfera é diretamente ligada à frequência e intensidade de raios cósmicos. O carbono 14 tem uma meia-vida relativamente curta, de 5.730 anos, e sem a presença dos raios cósmicos teria desaparecido da Terra, ou existiria em baixíssimas quantidades. Alguns tipos de telescópios de raios gama que observam a radiação Cherenkov, que veremos mais detalhadamente em outro capítulo, também são capazes de observar raios cósmicos.

No dia 7 de agosto de 1962 (por coincidência, exatos 50 anos do experimento no balão de Victor Hess), o detector de raios cósmicos de Volcano Ranch, nas proximidades de Albuquerque, Novo México, um arranjo de 20 detectores de cintilação instalados no solo, cobrindo uma área de aproximadamente 9 km<sup>2</sup>, capturou um raio cósmico com uma energia estimada em 10<sup>20</sup> eV, muito acima de qualquer medição realizada até então e o primeiro evento de raios cósmicos de altíssima energia a ser detectado. A razão de energia entre esse evento e os raios cósmicos de baixa energia está na casa de cem bilhões de vezes. Para um evento como esse detectado em Volcano Ranch, podemos dizer que a colisão de apenas 1 miligrama dessas partículas contra a Terra seria equivalente a um objeto com a massa do Monte Everest colidindo a 200 mil km/h.

Uma característica marcante dos raios cósmicos é que a sua energia é proporcional à quantidade de eventos, sendo os mais fracos extremamente comuns e os mais violentos extremamente raros. A proporção encontrada é que para um aumento de dez vezes na energia, existe uma queda de mil vezes na quantidade de raios cósmicos coletados. Assim, esperamos que ocorram raios cósmicos de baixa energia em uma taxa de 10 mil eventos por metro quadrado por segundo, ao passo que para os de extremamente alta energia (acima de 10<sup>19</sup> eV) a taxa é de um evento por quilômetro quadrado por século,





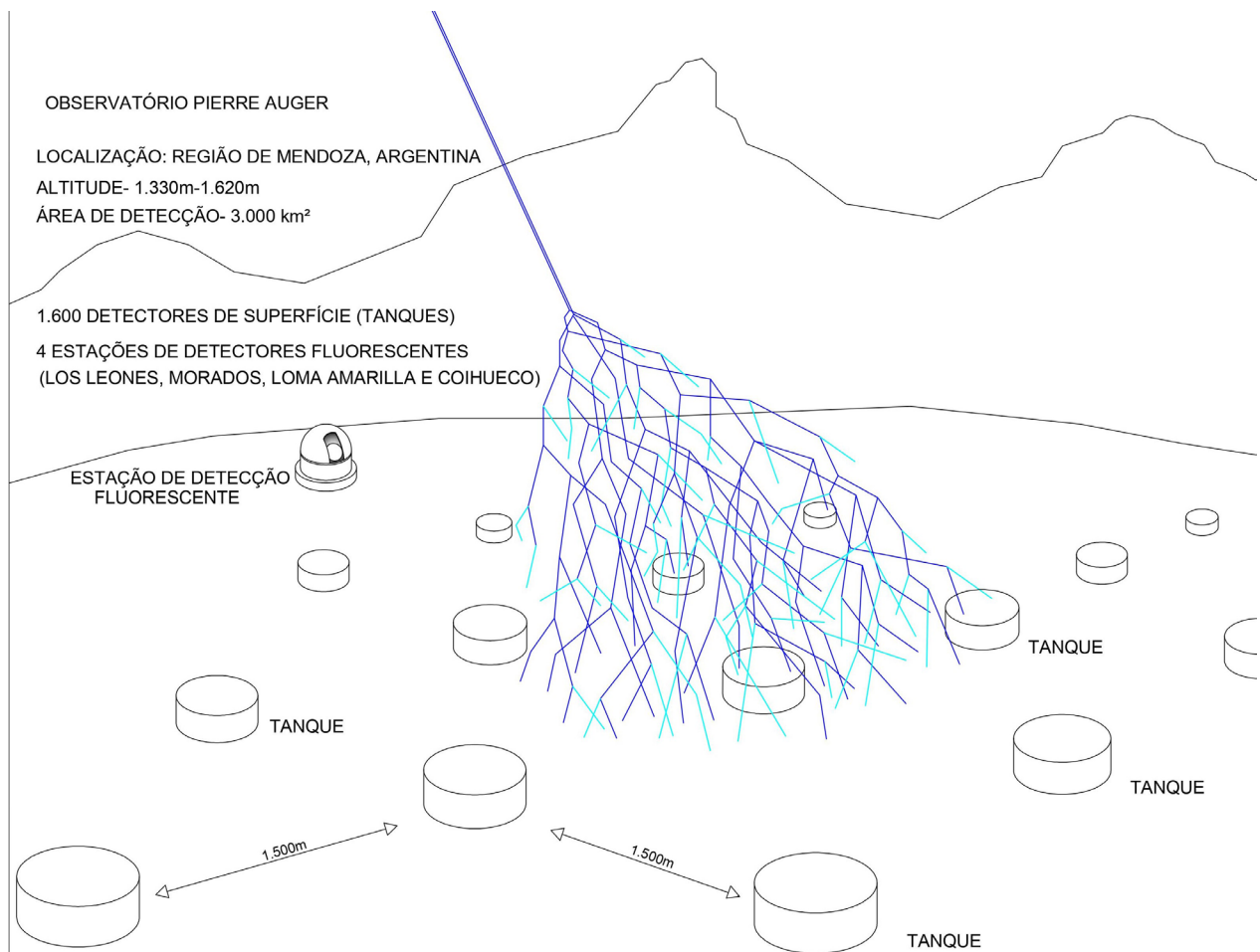


Figura 134 - A ilustração mostra o esquema de funcionamento do Observatório Pierre Auger, que tem um sistema híbrido, com detectores de superfície e estações de monitoramento por cintilação. Desenho: Francisco Conte.

Os detectores ópticos ficam em quatro estações diferentes, instaladas nos limites do conjunto de tanques, voltados para o interior, de maneira a observar o chuveiro de partículas. Cada estação possui um total de seis telescópios e cada um deles é basicamente um telescópio óptico, otimizado para observação em radiação ultravioleta. Esses telescópios têm um conjunto de pequenos espelhos que formam um conjunto óptico com cerca de 3,70 m de diâmetro. A luz captada por cada conjunto óptico é refletida para um grupo de 440 fotomultiplicadores, que convertem a luz em sinal elétrico e conseguem captar emissões de luz de curtíssima duração. A sensibilidade de cada um dos telescópios corresponde à capacidade de observar uma lâmpada de 4 W, a 15 km de distância. O sistema, no entanto, funciona apenas em noites de céu limpo, sem nuvens.

O observatório começou a operar em 2003, antes mesmo de sua conclusão, e teve a construção completada em 2005. Assim que passou a funcionar já era considerado o mais importante observatório de raios cósmicos em operação. A combinação dos dois tipos de detectores permitiu observações muito mais completas, tanto de direção como de intensidade das partículas, embora os detectores ópticos só operem à noite. Existe a previsão para a construção de um conjunto similar, embora de maiores dimensões, a ser instalado no hemisfério norte, no estado americano do Colorado.

Os primeiros resultados obtidos pelo Observatório Pierre Auger pareciam indicar com grande concordância que os raios cósmicos de altíssima energia seriam originários de núcleos ativos de galáxias. Mas, com o passar do tempo e com um número muito maior de observações realizadas, essa concordância desapareceu, e o problema se encontra em aberto, embora muitos estudos estejam sendo feitos nessa área.

No hemisfério norte existe atualmente outro observatório híbrido em operação, embora com uma capacidade inferior à do Pierre Auger: o Telescope Array Project, uma colaboração entre instituições dos Estados Unidos, Japão, Bélgica, Coreia do Sul e Rússia. Instalado em uma altitude de 1.400 m, em um deserto próximo a Millard County, Utah, o Telescope Array é formado por 507 detectores plásticos de cintilação na superfície, espalhados por uma área de 762 km<sup>2</sup>. De maneira similar ao Observatório Pierre Auger, o Telescope Array possui três estações com telescópios ópticos, cada uma com um telescópio formado a partir de um arranjo de 18 pequenos espelhos hexagonais, cada um dos quais envia a luz ultravioleta captada para um conjunto de 256 fotomultiplicadores.

No dia 7 de agosto de 2012, exatos cem anos após o primeiro experimento de Vitor Hess em um balão, a nave Mars Science Laboratory, um *rover* que acabara de pousar na superfície de Marte, utilizou um instrumento para medir a intensidade de raios cósmicos na superfície, o primeiro a operar em outro planeta. Os resultados obtidos pela sonda indicaram que os riscos de uma missão tripulada a Marte eram muito maiores do que estimado anteriormente. Se considerarmos que a Voyager 2 realizou medições na frequência de raios cósmicos e do vento solar até a heliopausa, podemos considerar que nossos telescópios que chegaram mais longe da Terra são detectores de raios cósmicos.

## Neutrinos

Se você ficou chocado com o bombardeio de partículas dos raios cósmicos, vai ficar muito mais impressionado com o bombardeio de neutrinos: a cada segundo a unha do seu dedo é atravessada por aproximadamente 65 bilhões de neutrinos vindos do Sol, não importando se é noite ou dia. Neutrinos são partículas de baixíssima interação com a matéria, podendo atravessar nosso planeta com extrema facilidade.

A existência dos neutrinos foi prevista. Wolfgang Pauli escreveu uma carta em 1930, para ser lida em uma conferência em Tübingen, Alemanha, em que afirmava que deveria existir uma partícula com carga neutra, possivelmente sem massa e que explicasse a diferença de energia observada em reações do tipo decaimento beta. Desde 1914 os físicos conheciam o decaimento beta e não tinham como explicar um fato perturbador: quando ele ocorria, um elétron era emitido pelo núcleo atômico, mas quando se fazia o balanço energético da reação a energia do elétron somada à do núcleo recém-criado era ligeiramente menor que a do núcleo original. Por mais que a experiência fosse repetida a discrepância continuava a aparecer e nenhuma explicação razoável aparecia. Chegou-se a cogitar que um fóton de raios gama pudesse estar também sendo emitido, mas experimentos realizados em 1927 comprovaram que não era esse o caso. Essa diferença contrariava o princípio da conservação de energia, um dos pilares da física moderna. Em 1932, na Inglaterra, James Chadwick descobriu o nêutron, mas logo ficou claro que não era a partícula que Pauli havia proposto, pois tinha uma massa muito grande, similar

à do próton. Demorariam algumas décadas para que a desesperada proposta de Pauli fosse confirmada. O nome neutrino foi proposto por Enrico Fermi, que usou o termo pela primeira vez em uma conferência em Paris em 1932. Neutrino em italiano significaria algo como um nêutron pequeno.

A primeira detecção da partícula ocorreu em 1956, por uma equipe composta por Clyde Cowan, Frederick Reines, F. Harrison, H. Kruse e A. McGuire (ver figura 135). A equipe instalou seu detector nas proximidades da usina atômica de Savannah River, na Carolina do Sul. O trabalho recebeu o Nobel de Física de 1958. Em 1965 foi feita a primeira detecção de um neutrino na natureza, em uma mina de ouro na África do Sul, onde foi instalado um detector por uma equipe de cientistas liderada por Friedel Sellschop. Em 1962, Leon Lederman, em colaboração com Melvin Schwartz e Jack Steinberger realizou uma importante experiência que comprovou a existência de que neutrinos poderiam ser de tipos diferentes, com a detecção do primeiro neutrino do múon. Pelo trabalho o grupo recebeu o Nobel de 1988.

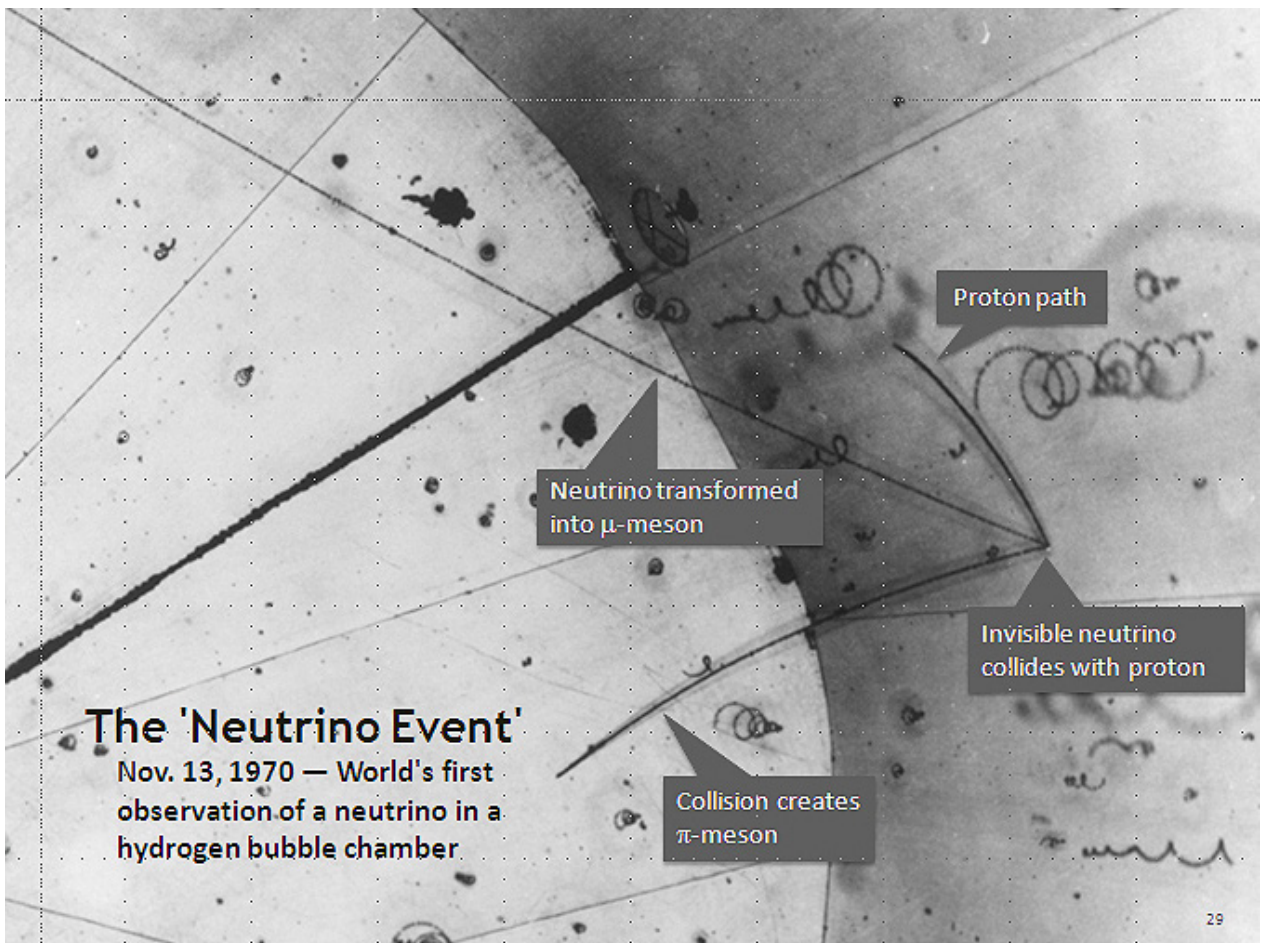


Figura 135 - Primeira detecção de um neutrino. Fonte: Wikimedia Commons.

A dificuldade em detectar um neutrino é imensa, e só é possível porque são extremamente abundantes. Para entender como é difícil a sua interação com a matéria, vamos imaginar um grupo com dez neutrinos de energia mediana sendo arremessados contra uma parede de chumbo com um ano-luz de espessura (9,5 trilhões de quilômetros) e constatar que quase todos, ou todos, vão conseguir atravessar a barreira sem maiores problemas.

Além dos neutrinos solares, mencionados no início deste capítulo, nosso corpo é atingido por cerca de 50 bilhões de neutrinos por segundo causados pela radioatividade natural da Terra e por 10 bilhões a 100 bilhões de neutrinos por segundo produzidos por usinas atômicas ao redor do mundo, de acordo com a sua localização. Mas somos produtores de neutrinos também. Em nosso corpo vamos encontrar aproximadamente 20 mg de potássio 40, um elemento radioativo, uma quantidade que produz cerca de 10 milhões de neutrinos a cada hora.

A partir de meados dos anos 1950, vários experimentos de detecção de neutrinos vão ser criados em todo o mundo, divididos em dois tipos principais: os que trabalham em conjunto com usinas nucleares e os que se dedicam à pesquisa de fontes astronômicas. Neste capítulo vamos nos dedicar apenas aos detectores astronômicos.

Em 1970 começou a funcionar o experimento de Homestake, instalado na mina de ouro de Homestake, localizada em Lead, Dakota do Sul. O instrumento era um grande tanque de 380 m<sup>3</sup>, instalado a uma profundidade de 1.478 m abaixo do solo, para evitar partículas provenientes de raios cósmicos (ver figura 136). O experimento era um detector químico: o tanque era completado com percloroetileno, uma substância normalmente utilizada em procedimentos de limpeza. A substância é rica em cloro. Quando um neutrino interage com

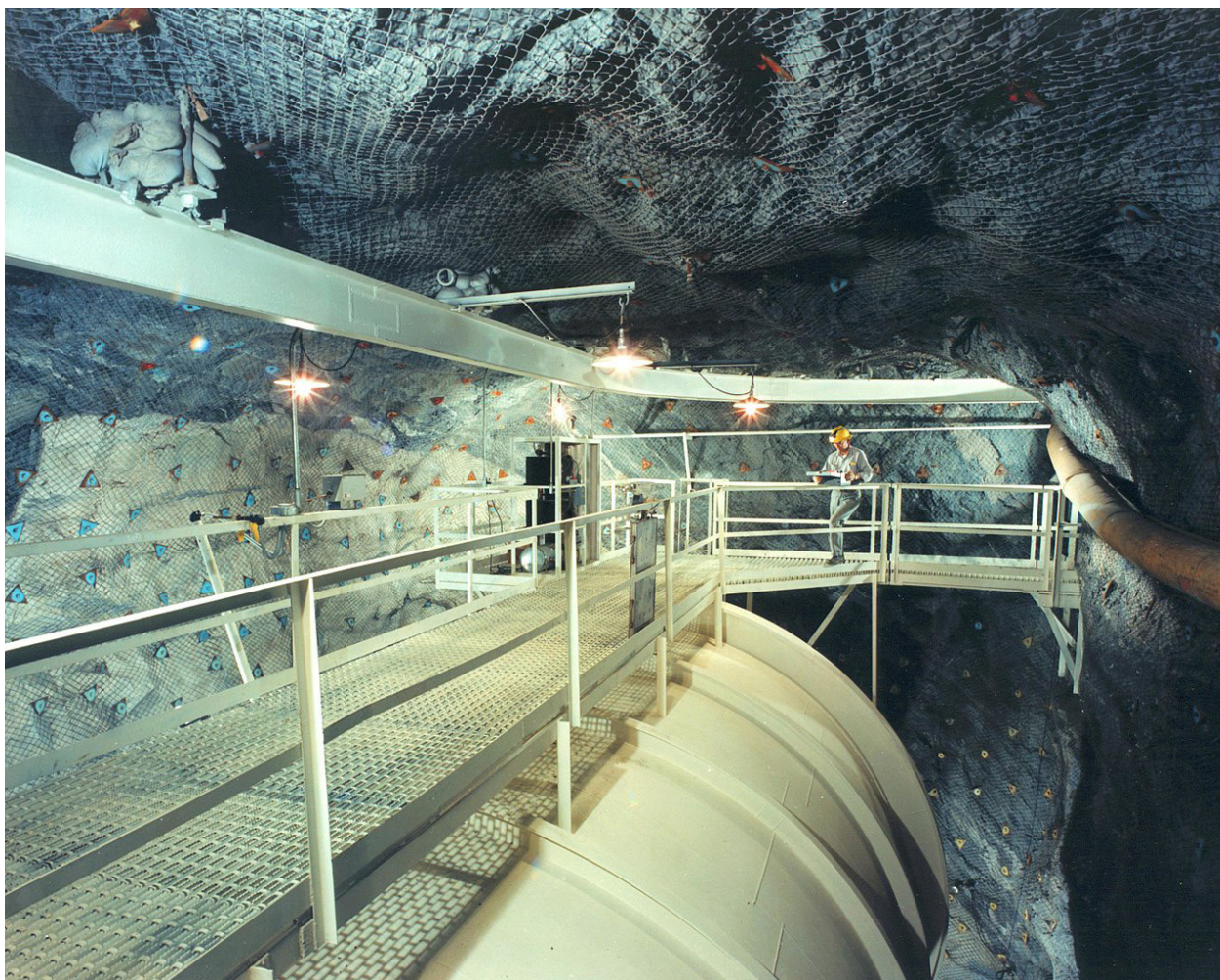


Figura 136 - Detector de neutrinos instalado na mina de Homestake. Fonte: Wikimedia Commons.

o percloroetileno, o cloro 37 se transforma em argônio 37, uma substância radioativa que pode ser facilmente extraída do tanque. Após um período de tempo, o interior do tanque era examinado e a quantidade de argônio permitia a indicação de quantos neutrinos haviam interagido com o detector durante o período de estudo. O tanque de Homestake continha  $10^{30}$  átomos de cloro (o número um seguido de trinta zeros) e ao longo dos quase 30 anos de funcionamento do experimento foram capturados aproximadamente 2 mil átomos de argônio, embora fossem esperados 7 mil.

As medições do detector de Homestake causaram grande alvoroço na comunidade científica, pois o número de interações de neutrinos observadas era muito menor que o previsto teoricamente. Esse fato ficou conhecido como o problema do neutrino solar e acabou por despertar o interesse de vários pesquisadores e a criação de novos experimentos na tentativa de solucionar a discrepância. Homestake continuou em operação até o ano de 1994.

Em 1982, no Japão, na mina de Kamioka, foi construído um novo tipo de detector que utilizava um grande tanque de água cilíndrico, de água purificada, medindo 16 m de altura e 15,6 m de diâmetro. Nas paredes internas do tanque foi instalada uma série de fotomultiplicadores, que conseguiam observar o efeito Cherenkov a partir do decaimento de prótons. O experimento funcionou até 1985, sem conseguir obter resultados positivos. Em 1985 o instrumento foi reformado e passou a ser chamado de Kamiokande, uma contração de Kamioka Nucleon Decay Experiment. O instrumento foi o primeiro a detectar neutrinos provenientes do Sol. Em outro desdobramento conseguiu identificar neutrinos produzidos na superfície terrestre.

O trabalho mais surpreendente realizado no instrumento ocorreu em 22 de fevereiro de 1987, quando o detector conseguiu captar neutrinos da Supernova 1987A1, localizada na Grande Nuvem de Magalhães, a 160 mil anos-luz de distância da Terra. O evento deve ter produzido o incrível número de  $10^{58}$  neutrinos (um seguido de cinquenta e oito zeros), dos quais cerca de  $10^{16}$  atravessaram o tanque de Kamioka. Destes, 12 foram capturados. Um feito incrível.

Essa detecção confirmava uma previsão teórica muito importante chamada Processo Urca, proposta em 1940 pelo físico brasileiro Mário Schenberg e pelo americano nascido na Ucrânia George Gamow. Schenberg e Gamow perceberam que no núcleo de uma estrela que estivesse se transformando em uma supernova ocorreria uma reação dominante, em que os núcleos atômicos perderiam energia com a absorção de um elétron e com a emissão de um neutrino e um antineutrino. Esse processo faria com que a estrela perdesse grande parte de sua energia térmica, fazendo todo o sistema entrar em colapso. O bem-humorado nome Processo Urca veio da semelhança entre uma estrela perdendo rapidamente sua energia térmica e um turista que perdia rapidamente o seu dinheiro no Cassino da Urca, no Rio de Janeiro.

A Itália construiu um detector que usava uma técnica similar à do Homestake, mas utilizando como reagente o gálio triclорide-hidrocloride. Instalado no interior da Montanha de Gran Sasso, em 1991, e batizado de GALLEX, ele tinha um tanque de 101 toneladas do reagente. O detector operou até 1997 com essa designação, mas foi reformado e rebatizado como GNO (Gallium Neutrino Observatory), continuando em operação até o ano de 2003. Em 2007 começou a funcionar no mesmo local o detector Borexino, um cintilador com um tanque de 16,9 m de altura e 18 m de largura.

Outro experimento foi construído em uma mina de níquel em Sudbury, na província de Ontário, Canadá. O detector foi instalado a uma profundidade de 2.100 m. Seu detector é um tanque esférico, geodésico, com um raio de 8,5 m, preenchido por água pesada, cujas moléculas têm um átomo de oxigênio, um átomo de hidrogênio e um átomo de deutério (um hidrogênio com um nêutron). O detector de Sudbury era muito mais complexo do que seus antecessores e possibilitava inclusive que se descobrisse a direção da origem dos neutrinos, tornando possível a análise separada daqueles que eram provenientes do Sol (ver figura 137). A água pesada permitia a ocorrência de três tipos diferentes de interação com os neutrinos.

A primeira interação ocorre quando o neutrino é absorvido pelo nêutron do deutério, transformando-se em um próton e criando um elétron no processo. O próton produzido não tem energia suficiente para ser detectado, mas os elétrons produzidos são emitidos em várias direções, mas primordialmente na direção do movimento do neutrino. Este processo é conhecido como condução carregada.

O segundo tipo de interação é chamado de corrente neutra, e no processo o neutrino dissocia o deutério, separando o próton do nêutron, sem ser absorvido, mas perde parte de sua energia. Quando o nêutron é novamente capturado por um próton, constituindo um deutério, um fóton de raio gama é produzido. A direção em que esse raio gama é expelido nada tem em comum com a direção do neutrino que iniciou o processo. O raio gama acaba colidindo com um elétron, que é acelerado no processo, produzindo radiação Cherenkov. A terceira interação era idêntica àquela observada no detector de água comum de Kamioka.

O detector de Sudbury conseguia detectar um segundo tipo de neutrino, o neutrino do múon (até aquele momento todos os detectores capturavam neutrinos do elétron). Essa foi a chave para solucionar o problema do neutrino solar descoberto em Homestake. Uma equipe encabeçada por Arthur McDonald publicou em 2001 um trabalho que demonstrava claras evidências de que os neutrinos oscilavam, quer dizer, um neutrino do elétron podia se transformar espontaneamente em um neutrino do múon, confirmando

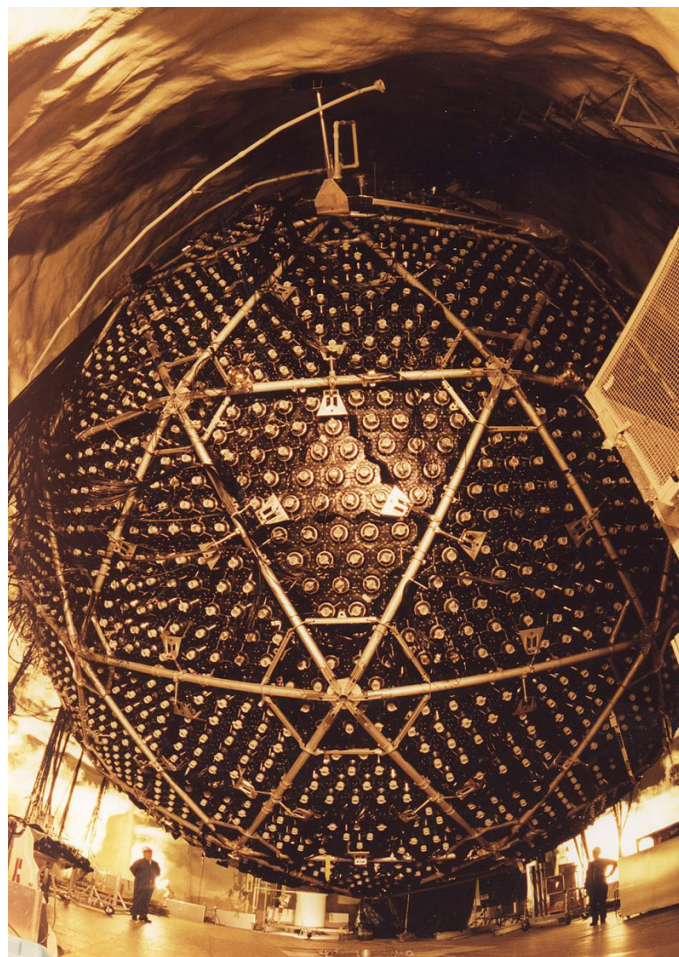


Figura 137 - Detector de Sudbury, experimento que tinha a capacidade de observar neutrinos provenientes do Sol. Fonte: Creative Commons.

uma hipótese teórica do físico Bruno Pontecorvo. Essa oscilação implicava em que os neutrinos possuíam massa, sendo o múon mais pesado que o elétron. Por esse trabalho McDonald recebeu o Nobel de 2015.

Em 1996 começa a operar um novo detector japonês na mina de Mozumi, a 1.000 m de profundidade: o Super-Kamiokande, um tanque de água com 40 m de altura e 39,3 m de diâmetro, com um total de 11.146 tubos fotomultiplicadores, cada um com 50 cm de diâmetro e 1,83 m de comprimento. Em 12 de novembro de 2001 ocorreu um acidente no detector. Aparentemente, um dos fotomultiplicadores arrebentou e a movimentação da água no tanque produziu uma reação em cadeia em que 6.600 dos tubos fotomultiplicadores foram destruídos. O detector foi aos poucos reconstruído e alterado, buscando evitar a repetição de eventos desse tipo. Entre os principais resultados do Super-Kamiokande está a observação da oscilação de neutrinos do múon para neutrinos do tau, em 1998.

Entre os novos detectores de neutrinos devemos destacar o ANTARES, instalado no fundo do Mar Mediterrâneo, a 2.500 m de profundidade, que começou a operar em 2008. Ele conta com 75 módulos de detecção óptica, cada um com 350 m de comprimento, que monitoram o efeito Cherenkov criado a partir do decaimento de partículas na água. Outro projeto incrível é o Ice Cube, instalado próximo ao Polo Sul, na Antártida, com 60 módulos de detecção óptica, que funcionam entre as profundidades de 1.450 m e 2.450 m, observando os eventos no gelo transparente do polo. O Ice Cube foi concluído no ano de 2010 (ver figura 138).



Figura 138 - Vista das instalações do detector de neutrinos Ice Cube, localizado quase exatamente no Polo Sul. O detector propriamente dito é todo subterrâneo. Fonte: Creative Commons.

Entre os principais desafios de pesquisa para esses novos detectores está a interação de observações de neutrinos e GRBs (*gamma-ray bursts*) em observatórios de raios gama. Outras frentes importantes são as pesquisas que nos permitirão descobrir a natureza intrínseca da matéria escura (falaremos dela em detalhes em um capítulo posterior) e as observações cosmológicas: hoje nossas observações mais profundas de qualquer tipo são da radiação cósmica de fundo de micro-ondas, que ocorreu cerca de 300 mil anos depois do Big Bang; com os neutrinos, seria possível observar o universo com poucos minutos de idade. A procura pelo decaimento do próton – uma pesquisa que ainda perdura – e o estudo de neutrinos solares e de supernovas também continuarão sendo importantes. São muitos os desafios de pesquisa ligados a essas partículas de detecção tão difícil.



No dia 22 de setembro de 2017, o IceCube detectou um neutrino do múon extremamente energético, com energia de 290 TeV. O evento recebeu o nome de IceCube-170922A. Pouco tempo depois o satélite Fermi detectou uma fonte de raios gama na mesma região, dentro da constelação do Orion. A fonte foi identificada como o Blazar TXS 0506+056. Em seguida, o evento foi observado no infravermelho, no rádio, no espectro visível e em raios X. O blazar se tornou a terceira fonte de neutrinos associada a um objeto astronômico, além do Sol e da Supernova 1987A. O evento é um dos primeiros de uma nova era da astronomia que comentaremos no final do capítulo.

## Ondas gravitacionais

Previstas como uma consequência da relatividade geral de Einstein, as ondas gravitacionais foram estudadas por décadas como objetos teóricos. A partir dos anos 1960 começaram a ser construídos experimentos na tentativa de obter uma detecção que confirmasse as previsões. Um dos primeiros trabalhos no setor foi feito por Joseph Weber, na Universidade de Maryland. Seus instrumentos, hoje conhecidos como *Weber bars* (barras de Weber), eram cilindros de alumínio com dois metros de comprimento por um metro de diâmetro. Ele chegou a afirmar em 1969 que havia conseguido detectar as primeiras ondas gravitacionais, e a partir de 1970 relatou que estava regularmente detectando sinais provindos do centro de nossa galáxia. No entanto, suas afirmações não foram confirmadas e na prática demorou muito tempo para que tivéssemos a certeza de uma comprovação.

Ainda nas décadas de 1960 e 1970, várias outras equipes pelo mundo realizaram experimentos dedicados à descoberta de ondas gravitacionais. Os primeiros detectores eram do tipo antena de massa ressonante, como as *Weber bars*, e tinham como princípio a detecção de pequenas vibrações causadas por ondas gravitacionais.

Em 1974, Russell Alan Hulse e Joseph Hooton Taylor descobriram o primeiro pulsar binário. A taxa de desaceleração da rotação do par se ajustava precisamente à existência de ondas gravitacionais, e durante décadas essa foi a prova indireta mais contundente de sua existência. Por essa descoberta, a dupla recebeu o Nobel de Física em 1993.

Nos anos 1970 e 1980, na União Soviética, o professor Vladimir Braginsky, da Universidade de Moscou, construiu um aparato que media pequenas oscilações em uma safira cilíndrica com 500 kg de peso. A escolha da safira foi feita porque esse mineral tem a tendência a continuar vibrando por mais tempo que a maioria dos outros materiais. Um dos problemas com o experimento é que a temperaturas muito baixas, necessárias para a diminuição do ruído, a safira tende a se comportar como um supercondutor, afetando as observações.

Durante a década de 1990 vários projetos mais avançados foram instalados pelo mundo, notadamente os seguintes: AURIGA (em Pádua, Itália), NAUTILUS (Roma), EXPLORER (pertencente ao CERN, Suíça), ALLEGRO (Louisiana, EUA) e NIOBE (Perth, Austrália). Esses experimentos aliavam um desenho mais refinado de antena a processos criogênicos avançados, destinados a manter o detector a baixíssimas temperaturas, de maneira a aumentar as chances de captar as ondas gravitacionais. Embora eventualmente um ou outro grupo chegasse a anunciar uma detecção, a verdade é que, apesar de todos os esforços, ainda não havia ocorrido um evento definitivo, e este ainda demoraria a ocorrer.

No início do século XXI duas equipes desenvolveram um trabalho conjunto, na Holanda, com a antena MiniGrail, e no Brasil, com a antena Mário Schenberg: duas antenas idênticas, esféricas, com 65 cm de diâmetro e 1,15 tonelada de peso. Os dois experimentos continuam a funcionar, com a antena holandesa na Universidade de Leiden e a Mário Schenberg tendo sido transferida recentemente do Instituto de Física da USP (Universidade de São Paulo), em São Paulo, para a cidade de São José dos Campos, onde é operada pela USP e pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

A partir de finais dos anos 1960, outro tipo de detector de ondas gravitacionais começou a ser planejado, utilizando a técnica de interferometria. Em 1980 foi construído no Caltech (California Institute of Technology) um protótipo com dois braços de 40 m de comprimento. Na mesma época, um estudo do MIT (Massachusetts Institute of Technology) apontava que a detecção seria possível, porém em uma escala muito maior, com pelo menos 1 km de comprimento.

No final dos anos 1990 começou a ser construído o LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Iniciando suas atividades em 2002, o LIGO na verdade é constituído por dois observatórios idênticos, um instalado em Hanford, no estado de Washington (ver figura 139) e o outro na cidade de Livingston, estado da Louisiana (ver figura 140), distantes 3.030 km um do outro. Cada observatório tem dois túneis de 4 km de comprimento, formando um ângulo de 90°, por onde são lançados feixes de lasers que são refletidos em um espelho e retornam ao ponto inicial, devendo atingir o centro ao mesmo tempo. As ondas gravitacionais podem eventualmente influir no braço de uma direção e não no outro, fazendo com que os sinais retornem com uma ligeira diferença. O efeito é muito pequeno e exige uma imensa precisão para ser detectado.



Figura 139 - Vista aérea aproximada de um dos braços do detector LIGO localizado em Hanford, estado de Washington. Fonte: Creative Commons.

No ano seguinte, 2003, na vila de Santo Stefano a Macerata, região de Pisa, na Itália, começou a operar o VIRGO (nome dado em referência ao aglomerado de galáxias da constelação de Virgo), um instrumento similar ao LIGO, mas com os dois braços ligeiramente menores, com 3 km cada (ver figura 141). O VIRGO e o LIGO passaram a trabalhar integrados. Mesmo assim, nos primeiros anos ainda nenhuma detecção havia ocorrido.

Alguns projetos similares porém de menor escala surgiram, como o GEO600, da Alemanha, instalado na cidade de Hannover, com dois braços de 600 m de comprimento, e o TAMA 300, no Japão, operado pela Universidade de Tóquio, com dois braços de 300 m.

Entre 2008 e 2015, foi realizada uma extensa reforma no LIGO, que ampliou em muito a resolução do detector. O VIRGO passou por processo semelhante entre 2011 e 2016.

Finalmente, em 15 de setembro de 2015, o LIGO conseguiu realizar a primeira detecção de ondas gravitacionais. O evento observado foi a fusão de um sistema binário de buracos negros, um deles com 36 e o outro com 29 massas solares. O evento detectado durou meros 0,2 segundos e a distância do sistema até a Terra é de cerca de 410 milhões de parsecs, ou 1,4 bilhão de anos-luz. O evento foi batizado de GW150914 (ver figura 142).

O detector captou o momento final da fusão: os dois buracos negros estão muito próximos e giram em torno um do outro em uma velocidade muito alta, próxima da velocidade da luz. O sistema produz, dessa forma, uma intensa variação no campo gravitacional, devido ao movimento dos objetos. Quando próximo da fusão o movimento acelera violentamente, à medida que os dois corpos se aproximam, e cessa de maneira brusca quando os dois finalmente se fundem. Na aproximação final, cerca de 3 massas solares são irradiadas na forma de ondas gravitacionais. O montante de energia emitido no evento é estimado em  $3,6 \times 10^{49}$  watts. Para entendermos o que isso significa, é aproximadamente 50 vezes mais energia do que a emitida por todas as estrelas do universo observável no mesmo período de tempo.

Uma colisão de buracos negros só pode ser observada através de ondas gravitacionais. O VIRGO, na época da detecção, estava ainda na fase final de suas reformas e inoperante. Outros detectores de ondas gravitacionais, como o GEO600, não tinham sensibilidade



Figura 140 - Vista aérea do LIGO de Livingston, estado da Louisiana. Cortesia: Caltech/MIT/LIGO Laboratory.



Figura 141 - Vista aérea do detector VIRGO, localizado na Itália. Fonte: Creative Commons.

suficiente para capturar o sinal. De qualquer forma, os procedimentos adotados pelas equipes dos dois observatórios do LIGO tinha um grau de confiança da ordem de 99,99994%. Nos anos que se seguiram, o novo VIRGO ficou pronto. Outras detecções foram feitas pelos três detectores, entre elas uma ainda mais energética, entre dois buracos negros com 50,6 e 34,3 massas solares, em 29 de julho de 2017. Mas faltava alguma coisa.

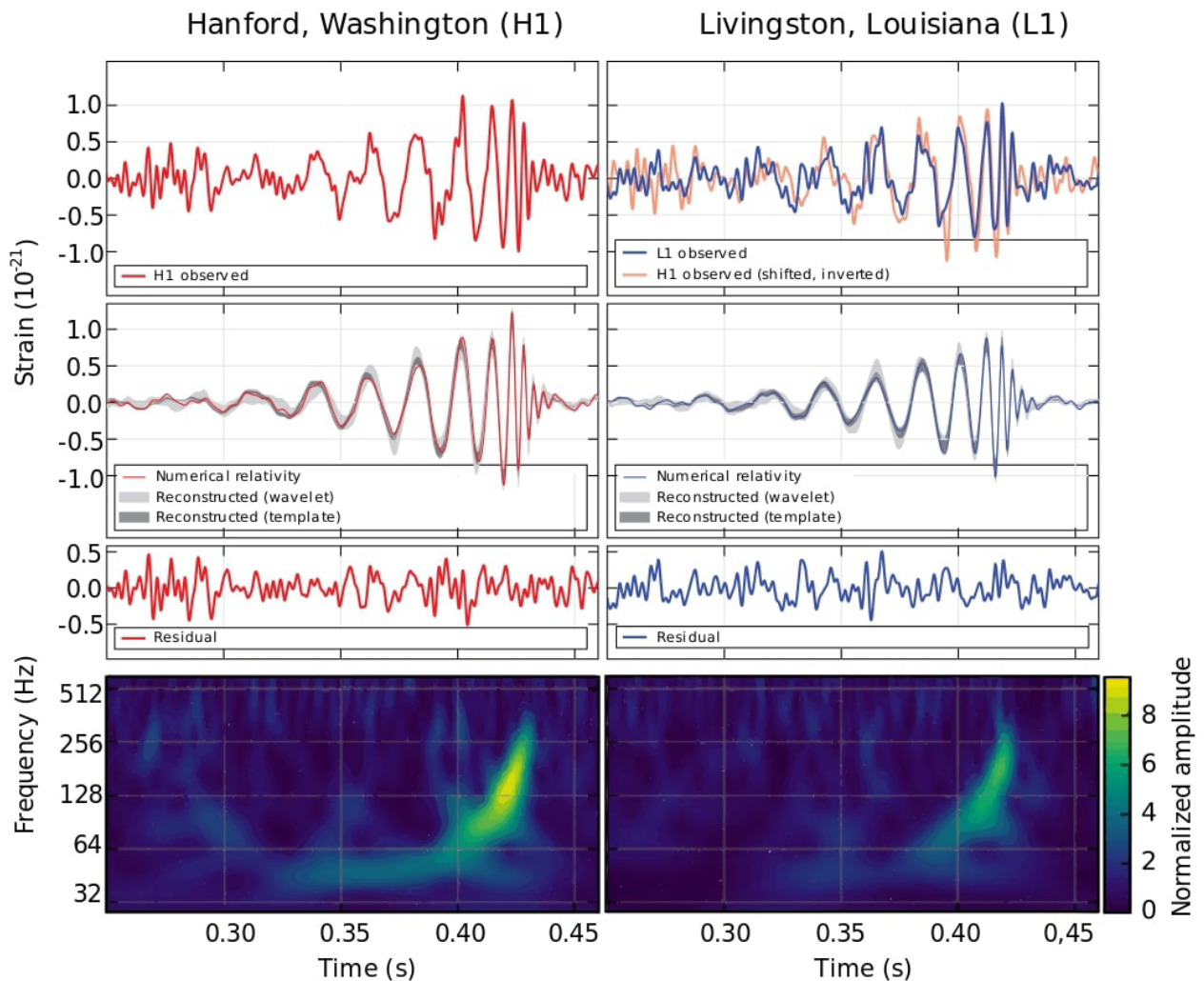


Figura 142 - Gráficos que mostram a primeira detecção de ondas gravitacionais pelos observatórios do LIGO. Fonte: Creative Commons.

Então aconteceu. Em 17 de agosto de 2017, um sinal que durou por cerca de 100 segundos. O primeiro a detectá-lo foi o VIRGO. Após 22 milissegundos, o mesmo sinal foi captado pelo LIGO de Livingston. Mais 3 milissegundos e também o LIGO Hartford conseguiu a detecção. As características e a intensidade do sinal pareciam indicar a fusão de duas estrelas de nêutrons. A duração do sinal permitiu que se fizesse uma estimativa da região do céu em que o evento havia ocorrido. Agora ele se chamava GW 170817.

Apenas dois segundos após a detecção em ondas gravitacionais, o satélite de raios gama Swift captou o evento na forma de um GRB. Instantaneamente o evento foi também batizado como GRB 170817A. Em apenas 14 segundos estava sendo emitido um alerta, que foi recebido pela comunidade astronômica muito antes daquele emitido pelos detectores de ondas gravitacionais. O primeiro observatório baseado em terra a captar o evento foi o Swope Telescope, em Cerro Las Campanas, Chile, com uma imagem em infravermelho. Em um intervalo de apenas 90 minutos, outros cinco telescópios conseguiram observar o objeto, incluindo o VISTA, em Cerro Paranal, e o Victor Blanco, em Cerro Tololo, utilizando a câmera DECam. Posteriormente o objeto foi observado em raios X pelo Telescópio Espacial Chandra e em rádio pelo Very Large Array, no Novo México. Dois anos depois o Hubble Space Telescope captou os restos da explosão. O objeto ainda é observado em raios X pelo Chandra. Infelizmente, não foram observados neutrinos pelo Ice Cube ou pelo Pierre Auger.

Essa detecção pode ser a primeira de uma nova era, em que seja possível observar um evento astronômico em todas as faixas do espectro eletromagnético, em ondas gravitacionais e neutrinos, permitindo uma análise e compreensão dos fenômenos em um nível nunca antes alcançado. Um número enorme de trabalhos científicos sobre o evento foi publicado (aproximadamente cem), com coautoria de mais de 4 mil astrônomos. A diferença de tempo entre o sinal captado pelos detectores de ondas gravitacionais e pelos detectores de raios gama permitiu aos físicos teóricos refinar a diferença entre as velocidades das ondas do espectro eletromagnético e das ondas gravitacionais em 14 ordens de magnitude (14 algarismos depois da vírgula). Além disso, as observações realizadas pelos diversos observatórios permitiram, por exemplo, detectar átomos de vários elementos pesados produzidos na explosão, estimar a energia liberada em raios gama e, graças aos observatórios de ondas gravitacionais, fazer uma estimativa muito próxima da massa das duas estrelas de nêutrons (aproximadamente, 1,6 e 1,2 massas solares). Outra detecção de fusão de estrelas de nêutrons, confirmada por observações em raios gama, ocorreu em 25 de abril de 2019.

O VIRGO e o LIGO continuam trabalhando e fazendo literalmente dezenas de novas detecções, o que vai tornando o processo cada vez mais corriqueiro. Em 2017, Kip Thorne, Rainer Weiss e Barry Barish ganharam o Prêmio Nobel de Física por seus trabalhos na área das ondas gravitacionais. Novos projetos para a área incluem o lançamento de um interferômetro de ondas gravitacionais no espaço, que poderia ampliar enormemente a sensibilidade das detecções. É uma área da astronomia que promete muitos avanços e descobertas nos próximos anos.

A astronomia está entrando em uma nova era, que chamamos de “*multi-messenger astronomy*”, astronomia de multimensageiros ou astronomia multimensageira, em que detecções de neutrinos ou ondas gravitacionais são complementadas por observações em vários comprimentos de onda, permitindo uma compreensão muito mais ampla dos fenômenos. A detecção da colisão de duas estrelas de nêutrons em agosto de 2017 e a do Ice Cube de setembro de 2017 são pioneiras nesse segmento.

## CAPÍTULO 13

### Radioastronomia na virada do milênio

A radioastronomia havia passado por um rápido desenvolvimento, principalmente a partir do pós-guerra. Em poucas décadas vimos o surgimento de instrumentos cada vez maiores e mais potentes e o surgimento de técnicas avançadas como a interferometria. No período que se inicia após o término dos anos 1970, pudemos presenciar o surgimento de vários projetos interessantes, principalmente em faixas das ondas de rádio até então pouco exploradas, como as ondas milimétricas e submilimétricas e também com ondas longas. A seguir veremos alguns dos projetos mais importantes.

Ainda em meados da década de 1980 começa a ser construído no platô de Bure, França, a 2.550 m de altitude, um interferômetro com seis antenas, cada uma com 15 m de diâmetro, trabalhando na faixa milimétrica e submilimétrica. A construção terminou em 1988 e o instrumento foi um dos primeiros observatórios de grande porte a realizar observações nessa faixa do espectro eletromagnético.

Em 1992, os astrônomos Aleksander Wolszczan e Dale Frail, trabalhando no observatório de Arecibo, descobriram que em torno do pulsar PSR B1257+12 orbitavam dois planetas. O primeiro tinha 3,4 e o outro 2,8 massas da Terra. Era a primeira detecção de planetas fora do Sistema Solar – uma notícia pela qual os astrônomos esperavam havia décadas. A descoberta, no entanto, não pôs fim ao debate sobre a existência de planetas orbitando outras estrelas, pois era possível que os dois planetas tivessem se formado na nuvem de detritos gerada pela supernova, ou que se tratasse de um sistema binário de estrelas e que após a explosão da supernova a atmosfera externa da companheira tivesse sido arrancada e o material resultante tivesse se transformado em um planeta, ou ainda que essa perda de massa da estrela companheira tivesse ocorrido devido à radiação emitida pelo pulsar.

Em 1995 a Índia completa a construção de um grande interferômetro, oficialmente batizado de Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT), composto por 30 antenas com 45 m de diâmetro cada, localizado nas proximidades de Narayangaon. O observatório opera apenas com a observação de ondas de grande comprimento, de 21 cm a 6 m. Devido a essa característica, o perfil parabólico das antenas é composto por uma tela muito vazada, conseqüentemente muito leve. Cada uma das antenas pesa aproximadamente 120 toneladas, em contraste com as 235 toneladas de cada uma das antenas do VLA, que têm diâmetro muito menor (25 m). O conjunto possui uma grande área de coleta, equivalente à de uma antena de 250 m de diâmetro. Por essas características, o GMRT normalmente trabalha na pesquisa de fontes muito fracas, como pulsares distantes e radio galáxias, que estariam acima da capacidade de observação de equipamentos de menor porte (ver figura 143).

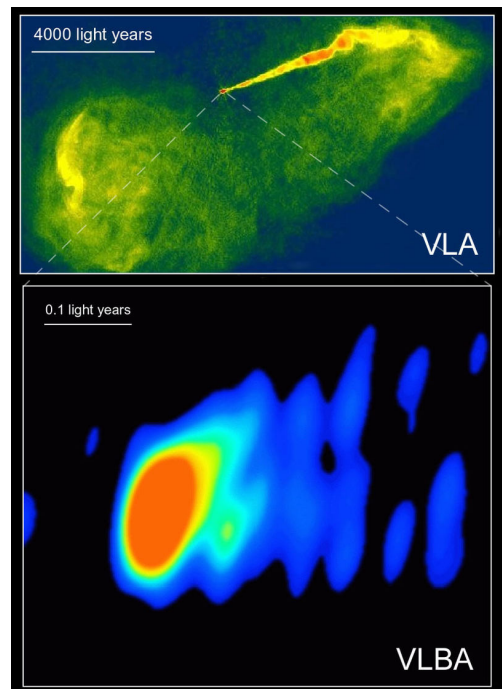
Na mesma época os Estados Unidos estavam investindo num projeto bastante ousado: a construção de um interferômetro de longa base, o VLBA (Very Large Baseline Array), que contava com dez antenas de 25 m de diâmetro, localizadas no Mauna Kea (Havai), em Hancock (New Hampshire, no nordeste dos EUA) e em St. Croix (Ilhas Virgens). Sua linha de base tinha 8.611 km. O instrumento era capaz de realizar observações com grande resolução angular, da ordem de milissegundos de arco. O conjunto regularmente



Figura 143 - Uma das 30 antenas de 45 m de diâmetro do GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope).  
Fonte: Creative Commons.

trabalhava em parceria com outros radiotelescópios, formando o High-Sensitivity Array (HSA), que incluía ainda o grande radiotelescópio de Green Bank, o gigante radiotelescópio de Arecibo, em Porto Rico, o Very Large Array e o radiotelescópio de Effelsberg, na Alemanha. O HSA possuía uma área de coleta sensivelmente maior que o VLBA, conseguindo também montar imagens com maior resolução angular, cujo limite era de 0,15 milissegundos de arco, quando trabalhava com ondas de 7 cm de comprimento (ver figura 144) Esse tipo de arranjo, entre telescópios localizados a grandes distâncias, é o que se convencionou chamar de VLBI (*very-long-baseline interferometry*), ou seja, interferometria de longa linha de base.

Figura 144 - Comparativo de imagens obtidas pelo VLA e pelo VLBA, com o último podendo atingir a incrível resolução de 0,15 milissegundos de arco. Fonte: Wikimedia Commons.



Do outro lado do Atlântico foi criada a EVN (European VLBI Network), um consórcio de instituições de vários países, principalmente europeus, mas também da China, África do Sul e Porto Rico (Arecibo). Entre os membros europeus estava o Reino Unido, com todos os radiotelescópios do sítio de Jodrell Bank, a Holanda (com o interferômetro de Westerbork, com 12 antenas de 25 m), a Itália (Sardenha, Medicina e Noto), a Alemanha (Effelsberg e Wettzel), a Rússia (Zelenchukskaya, Badary e Svetloe), a Suécia, a Espanha, a Letônia, a Polônia e a Finlândia. A partir de 2004 todos os observatórios passaram a ser ligados por conexões de fibras ópticas, e o grupo foi rebatizado como e-EVN.

No início dos anos 1980 começam a funcionar os primeiros radiotelescópios, que vão operar na faixa das ondas milimétricas e submilimétricas, uma região do espectro eletromagnético que se situa quase no limite entre o infravermelho e as ondas de rádio. Um dos primeiros instrumentos de porte a iniciar suas operações foi o telescópio IRAM 30m (Institute for Radio Astronomy in the Millimeter Range), instalado a 2.850 m de altitude na Sierra Nevada, Espanha.

Em 1985, no topo do Mauna Kea, no Havaí, onde já operavam alguns telescópios ópticos, foi construído o CSO (Caltech Submillimeter Observatory), um radiotelescópio com 10,4 m de diâmetro, que trabalhava na faixa das ondas milimétricas. Apenas dois anos depois começou a operar no mesmo local, a poucos metros de distância, o JCMT (James Clerk Maxwell Telescope), batizado em honra ao matemático e físico escocês, que realizou um trabalho definitivo sobre a radiação eletromagnética. Com 15 m de diâmetro, o radiotelescópio realizou os primeiros trabalhos de interferometria na faixa das ondas milimétricas e submilimétricas em conjunto com o CSO e continua em atividade nos dias de hoje. Infelizmente, o CSO foi desativado no ano de 2015. Tanto o CSO quanto o JCMT possuem uma aparência que lembra mais a de um telescópio óptico que de um radiotelescópio, pois ambos são protegidos por uma cúpula giratória que se abre quando o instrumento está trabalhando (ver figura 145).

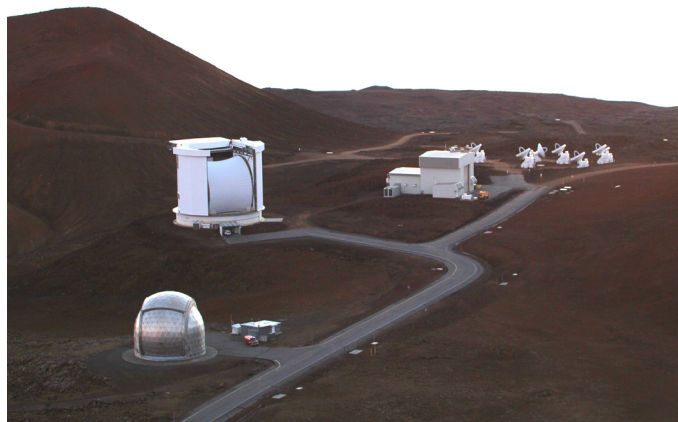


Figura 145 - O grupo de telescópios de ondas milimétricas e submilimétricas do Mauna Kea. Abaixo, à esquerda, vemos o CSO, recentemente desativado; acima, à esquerda, o JCMT e ao fundo, à direita, as antenas do SMA (Submillimeter Array). Foto: Francisco Conte.

Em 1993, começa a operar no estado do Arizona, no topo do Monte Graham, a 3.200 m de altitude, o HHT (Heinrich Hertz Telescope), com uma antena parabólica de 10 m de diâmetro. Ele lembra muito em conceito tanto o CSO como o JCMT, trabalhando também na faixa de ondas milimétricas e submilimétricas.

Em 1997, o Japão lança o primeiro satélite espacial dedicado à radioastronomia. Com uma antena de 8 m de diâmetro, o HALCA (Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy) foi projetado para trabalhar em conjunto com telescópios



em terra do tipo VLBI. Outro nome para o projeto era VSOP (VLBI Space Observatory Programme). A nave seguia uma órbita bastante elíptica, com perigeu a 560 km e apogeu a 21.400 km. O satélite continuou a realizar operações de VLBI até 2003, encerrando-as definitivamente em 2005. Entre seus trabalhos, fez observações em masers e pulsares, conseguiu produzir franjas de interferência com telescópios de base terrestre do quasar PKS1519-273 e realizou rotineiramente imagens em VLBI de quasares e radiogaláxias.

No ano de 2000 começa a operar o radiotelescópio de 100 m de diâmetro do Observatório de Green Bank, nos Estados Unidos. Essa antena de desenho inovador, que permite a captação de ondas de rádio em toda a extensão do disco parabólico, passou a ser, desde então, o maior radiotelescópio totalmente direcionável do mundo (ver figura 146). Ele foi construído para substituir o 300 Foot Telescope, que havia colapsado e se transformado em uma pilha de sucata na década de 1980. Logo em seus primeiros anos de operação o radiotelescópio de 100 m descobriu três pulsares na faixa de milissegundos, no aglomerado globular Messier 62, e a mais massiva estrela de nêutrons conhecida.

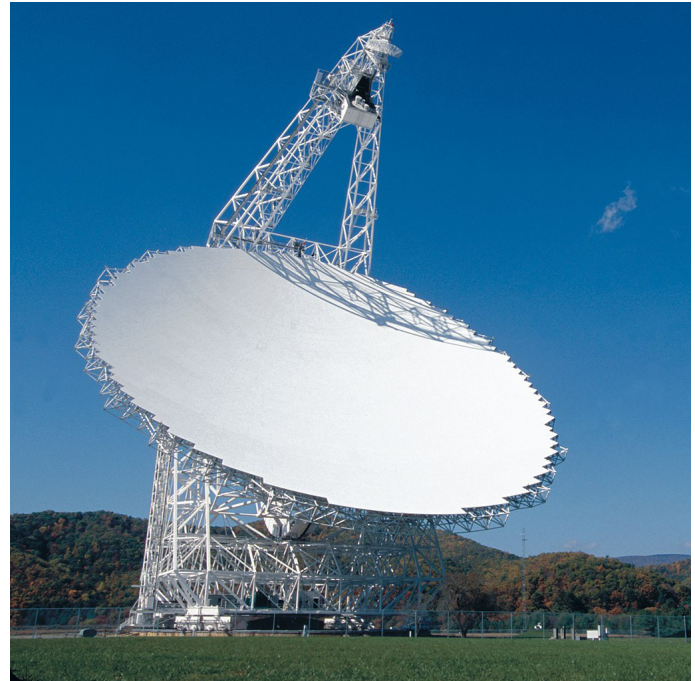


Figura 146 - O novo radiotelescópio de 100 m de diâmetro de Green Bank. Fonte: Creative Commons.

Em 2004, foi instalado ao lado do CSO e do JCMT, no topo do Mauna Kea, a 4.080 m de altitude, o SMA (Submillimeter Array), um conjunto de oito antenas de 6 m de diâmetro. As antenas são móveis e podem criar uma linha de base de até 509 m, que podia ser estendida para mais de 700 m quando trabalhava em conjunto com o CSO e JCMT (ver figura 145, na página anterior).

Aqui no Brasil, além do radiotelescópio de Itapetinga, em 2003 foi construído um interferômetro composto de cinco antenas parabólicas de 4 m de diâmetro em São José dos Campos, operado pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e financiado pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo). Em 2004 o conjunto foi transportado para a cidade de Cachoeira Paulista. Além disso, em 2010 foram acrescentadas ao instrumento mais nove antenas e feita uma linha de base no sentido Norte-Sul com 14 elementos e 166 m de comprimento e 12 antenas no sentido Leste-Oeste, com uma linha de base de 252 m. Existe um projeto para ampliar o número de antenas para 38, com uma linha de base de 2,27 km no sentido Leste-Oeste e 1,17 km no sentido Norte-Sul, mas essa nova fase de ampliação ainda não foi iniciada. O instrumento é conhecido como Brazilian Decimetric Array. Poucos anos antes, o INPE iniciou a operação de um radiotelescópio do tipo antena parabólica, com 14,2 m de diâmetro, na cidade de Eusébio, Ceará. O Radio-Observatório Espacial do Nordeste começou a funcionar no ano de 1993, dedicando-se a trabalhos de VLBI.

No século XXI, presenciamos a instalação de um radiotelescópio em um dos mais inóspitos pontos do planeta, localizado a poucos metros do Polo Sul, a uma altitude de 2.800 m. Trata-se de um excelente sítio astronômico, onde a extremamente limpa camada de atmosfera que recobre o observatório é praticamente isenta de vapor de água por causa das baixíssimas temperaturas, o que influi muito favoravelmente em observações feitas na faixa milimétrica. O principal instrumento instalado no local é o South Pole Telescope (SPT), operado por um consórcio de instituições, em sua maioria norte-americanas. Sua antena parabólica tem um diâmetro de 10 m e é totalmente direcionável. O telescópio trabalha em ondas de rádio padrão, mas também em ondas milimétricas e submilimétricas. O SPT iniciou suas atividades em 2007.

O maior projeto na área de radioastronomia do mundo, no início do século XXI, foi o ALMA (Atacama Large Millimeter Array), um consórcio firmado entre o ESO (European Southern Observatory), a NSF (National Science Foundation), o Conselho de Ciências do Canadá, os Institutos Nacionais de Ciências Naturais do Japão e a Academia Sinica de Taiwan, além do governo da República do Chile, onde o projeto foi instalado. Em 2004, foi instalada no mesmo local do ALMA a APEX (Atacama Pathfinder Experiment), uma antena com um disco parabólico com 12 m de diâmetro, para testar as condições de observação (ver figura 147).



Figura 147 - A antena APEX, instalada em Cerro Chajnantor, no Chile. Foto: Francisco Conte.

O sítio do ALMA é um dos melhores do mundo: o platô de Chajnantor, próximo de San Pedro de Atacama, a 5.060 m acima do nível do mar, no deserto mais seco do mundo, garante condições excepcionais de observação. O ALMA é um interferômetro composto por 66 antenas, sendo 12 antenas de 7 m de diâmetro e 54 antenas de 12 m

de diâmetro (ver figura 148). O ESO construiu 25 antenas, os americanos outras 25 e os países asiáticos as restantes 16. O conjunto trabalha na faixa de ondas milimétricas e submilimétricas e possui uma resolução angular de 10 milissegundos, dez vezes melhor que o VLA e cinco vezes melhor que o Hubble Space Telescope, mas fica abaixo dos interferômetros de VLBI e dos interferômetros ópticos.



Figura 148 - As três primeiras antenas prontas do ALMA, ao lado do prédio de operações do observatório, poucos dias antes de serem levadas ao Llano de Chajnantor. Foto: Francisco Conte.

O ALMA iniciou suas operações em 2011 e logo em seus primeiros trabalhos conseguiu obter vários resultados surpreendentes. Sua primeira imagem científica mostrava maciças concentrações de gás em áreas de colisão de galáxias, material para a formação de futuras estrelas. Outro trabalho, realizado com apenas quatro de suas antenas, mostrou um disco de poeira e gases em torno da estrela Fomalhaut. Ele observou ainda uma surpreendente estrutura espiral no material que orbitava R Sculptoris, uma estrela gigante vermelha, e encontrou moléculas de açúcar no gás que circundava uma jovem estrela semelhante ao nosso Sol.

No ano de 2007 começa a operar o ATA (Allen Telescope Array), um conjunto de 42 antenas com 6,1 m de diâmetro, instalado no Hat Creek Radio Observatory, em Shasta County, Norte da Califórnia. O interferômetro é dedicado a observações astronômicas e também ao programa SETI, de busca de sinais de civilizações extraterrestres.

Em 2010, termina a construção do observatório com a maior antena parabólica direcionável do mundo para observação de ondas milimétricas e submilimétricas, o Large Millimeter Telescope (LMT), com 50 m de diâmetro. Instalado no topo da Sierra Negra,

a quinta mais alta montanha do México, a 4.850 m de altitude, é um dos mais altos observatórios do mundo. O LMT é uma parceria binacional, operada pelo Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) e pela Universidade de Massachusetts Amherst.

Em 2011 entrou em funcionamento o segundo radiotelescópio instalado em um satélite espacial, o Spektr-R, operado pela Rússia. Com uma antena de 10 m de diâmetro, ele apresenta uma órbita altamente elíptica, com um perigeu a 10.651,6 km e apogeu a 338.541,5 km (mais distante que a Lua). Assim como seu antecessor, o HALCA, o Spektr-R foi projetado para operar em conjunto com telescópios terrestres em trabalhos do tipo VLBI. A órbita adotada pelo satélite permitia linhas de base muito extensas, tendo como resultado uma altíssima definição de imagens. O Spektr-R trabalhou em conjunto com observatórios e interferômetros de vários países, mantendo-se em operação até janeiro de 2019.

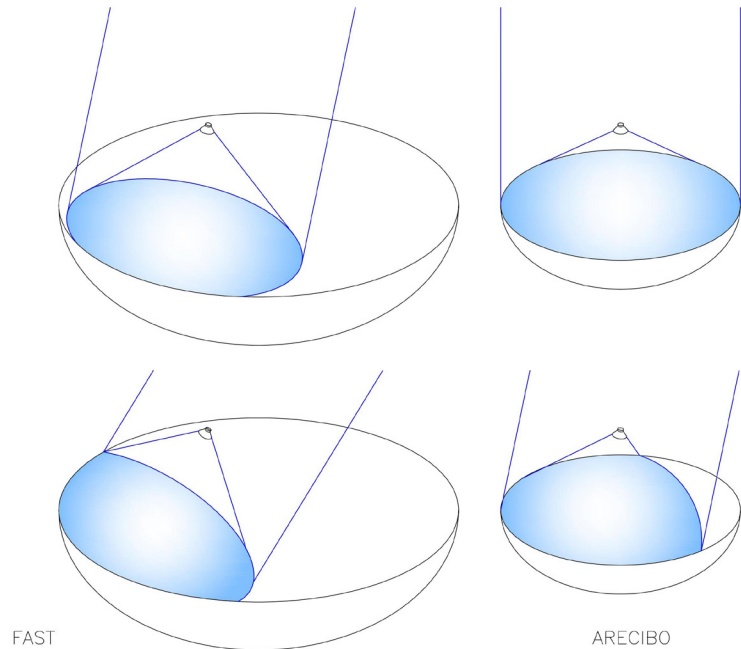
Um projeto inovador iniciou suas atividades em 2012, o LOFAR (Low Frequency Array), composto por mais de 20 mil pequenas antenas distribuídas em pelo menos 48 estações diferentes, a maior parte delas situadas na Holanda, mas com instalações complementares na Alemanha, Suécia, França, Grã-Bretanha, Irlanda, Polônia, Itália e Finlândia. A área total de captação de sinais é de aproximadamente 300.000 m<sup>2</sup>. O telescópio funciona como uma rede coletora de sinais, que não são combinados em tempo real. Os sinais captados são digitalizados e enviados para um computador central, que utiliza um software que simula o funcionamento de uma antena convencional. Algumas das aplicações do LOFAR podem abrir caminho para a solução de problemas da astronomia atual, como a origem dos raios cósmicos de altíssima energia ou a busca por evidências de emissão da linha de hidrogênio neutro no início do universo, entre outros.

Em 2012 começa a operar na Austrália o projeto ASKAP (Australian Square Kilometre Array Pathfinder), um potente arranjo de radiotelescópios com 36 antenas idênticas de 12 m de diâmetro, que operam em uma larga faixa de frequências. O ASKAP é um demonstrador tecnológico do que vai ser o SKA, que veremos mais à frente neste capítulo. O ASKAP enfrentou um grande desafio tecnológico por utilizar um sistema de arranjo faseado de antenas, nunca testado anteriormente em astronomia: todas as antenas possuem um conjunto de detectores, que podem receber até 36 feixes de ondas de direções diferentes ao mesmo tempo. A captação desses sinais por cada detector em cada antena é direcionada eletronicamente a partir do controle de um computador central. Este coordena detectores específicos de cada uma das antenas, para que sejam recebidos simultaneamente os sinais de uma dada região do céu, calculando o atraso necessário para que todas as antenas captem os sinais em fase. Esse processo faz com que os dados sejam captados muito mais rapidamente que em interferômetros comuns, que observam um único objeto por vez. Em novembro de 2020 essa capacidade foi demonstrada de maneira inquestionável quando o ASKAP conseguiu produzir um mapeamento com 3 milhões de galáxias distantes em apenas 300 horas de observação, trabalho que poderia durar mais de dez anos em arranjos tradicionais de radiotelescópios.

Após 53 anos, o mundo viu entrar em operação um radiotelescópio com uma antena maior que a de Arecibo. A China começou a operar em 2016 o gigantesco FAST (Five-

hundred-meter Aperture Spherical Telescope), construído na depressão de Dawodang, na região de Ghizhou, no sudoeste do país. A antena tem um diâmetro de 500 m, com uma área mais de duas vezes e meia maior que a de Arecibo. O conjunto ainda é menor que a área ocupada pelo Ratan-600, que vimos no capítulo 5.

Ainda assim, falando do ponto de vista operacional, não existiu grande avanço em relação à antena de Porto Rico. O perfil do radiotelescópio chinês na verdade não é realmente esférico. Além disso, seus detectores não conseguem captar toda a radiação refletida pela gigantesca antena: na verdade, eles captam apenas a radiação de uma área esférica com diâmetro de 300 m, isto para inclinações de até  $26,56^\circ$ ; quando o aparelho aponta para o ângulo máximo de observação, que é de  $60^\circ$ , a área de radiação captada cai para cerca de 200 m de diâmetro. Nessas áreas em que os detectores conseguem coletar a radiação celeste, o perfil da antena é parabólico. Assim, o nome do telescópio é bastante inapropriado: o telescópio não é na verdade esférico, nem tem uma



FAST

ARECIBO

Figura 149 - Desenho comparativo entre o FAST e o radiotelescópio de Arecibo. A antena do FAST é muito maior, mas o observatório coleta a radiação de apenas uma parte da antena (em azul), muito similar à capacidade de Arecibo. O telescópio pode, no entanto, observar uma área muito mais ampla do céu do que a antena de Porto Rico, como ilustra a parte inferior da figura. Desenho: Francisco Conte.

abertura de 500 m. De qualquer maneira, é um instrumento muito poderoso, com uma capacidade de coleta de radiação levemente superior à que o telescópio de Arecibo tinha, mas que consegue observar uma faixa muito maior do céu e acompanhar fontes muito fracas por muito mais tempo (ver figura 149). Prova de que se trata de um instrumento de altíssima capacidade é que em 2018 ele já havia descoberto 44 pulsares. Além disso, mesmo durante a pandemia, em julho de 2020, o telescópio se tornou o primeiro a conseguir detectar hidrogênio neutro em fontes fora da Via Láctea.

Entre os projetos para futuros radiotelescópios existe o LLAMA (Large Latin American Millimeter Array), uma antena de 12 m de diâmetro destinada a trabalhar na faixa de milímetros e submilímetros, que está sendo construída pelo Brasil e pela Argentina, nos Andes argentinos. Uma das principais utilidades da antena seria trabalhar em conjunto com o ALMA, aumentando em muito a resolução das imagens. Outro projeto interessante é a possível construção de uma nova estação do projeto LOFAR em Nançay, França, que aumentaria consideravelmente a capacidade do observatório.

O maior projeto para construção de instrumentos em radioastronomia no momento é o SKA (Square Kilometre Array). O projeto está sendo planejado para ser realizado em duas fases. A primeira fase corresponde à implantação de um conjunto de radiotelescópios na

Austrália e na África do Sul. Quando completado, o SKA combinará o sinal de milhares de antenas, com uma área de coleta de radiação de 1 km<sup>2</sup>, ou 1.000.000 m<sup>2</sup>, o que o tornará o mais poderoso radiotelescópio do mundo. O instrumento poderia trabalhar em uma ampla faixa do espectro eletromagnético. O projeto engloba a participação dos seguintes países: Austrália, África do Sul, Canadá, China, Alemanha, Índia, Itália, Portugal, Nova Zelândia, Portugal, Espanha, Suécia, Suíça, Holanda e Reino Unido. A segunda fase prevê a adição de mais antenas, fazendo com que o SKA se torne 50 vezes mais sensível e 10 mil vezes mais rápido que qualquer outro radiotelescópio ou interferômetro do planeta.

Em 2014, uma equipe do ALMA conseguiu produzir uma imagem de um disco de gás e poeira em torno da estrela HL Tauri, a primeira imagem de um sistema planetário em formação em torno de uma estrela. Em 2018, outra campanha de observação também realizada no ALMA resultou em 20 imagens similares em outras estrelas. O trabalho representa um salto na resolução das imagens de sistemas planetários em formação e contribui sensivelmente para o entendimento do processo de formação de planetas, confirmando parcialmente alguns dos modelos propostos.

O trabalho mais importante da radioastronomia neste início de século foi o Event Horizon Telescope (EHT). O EHT foi um consórcio de vários observatórios de ondas milimétricas que realizou um projeto conjunto na tentativa de obter a primeira imagem de um buraco negro. Não exatamente de um buraco negro, mas da matéria que é absorvida por um buraco negro. O projeto englobava a participação dos seguintes telescópios e interferômetros: o ALMA e a antena APEX em Cerro Chajnantor; o Heinrich Hess Submillimeter Telescope, no Monte Graham; o IRAM 30m Telescope na Espanha; o James Clerk Maxwell Telescope e o Submillimeter Array, em Mauna Kea; o Large Millimeter Telescope, no México, e o South Pole Telescope, no Polo Sul, nada menos que 60 instituições de 20 países diferentes. No dia 10 de abril de 2019, através de seis conferências simultâneas, o grupo anunciava que tinha conseguido obter a primeira imagem direta de um buraco negro, no caso um buraco negro supermassivo localizado no centro da galáxia M87, uma gigante elíptica. Os resultados do trabalho foram divulgados em seis artigos publicados no *The Astrophysical Journal Letters*. Foi um dos maiores feitos da astronomia dos últimos anos, uma grande realização técnica e observacional (ver figura 150). Além disso, a imagem servia como um teste

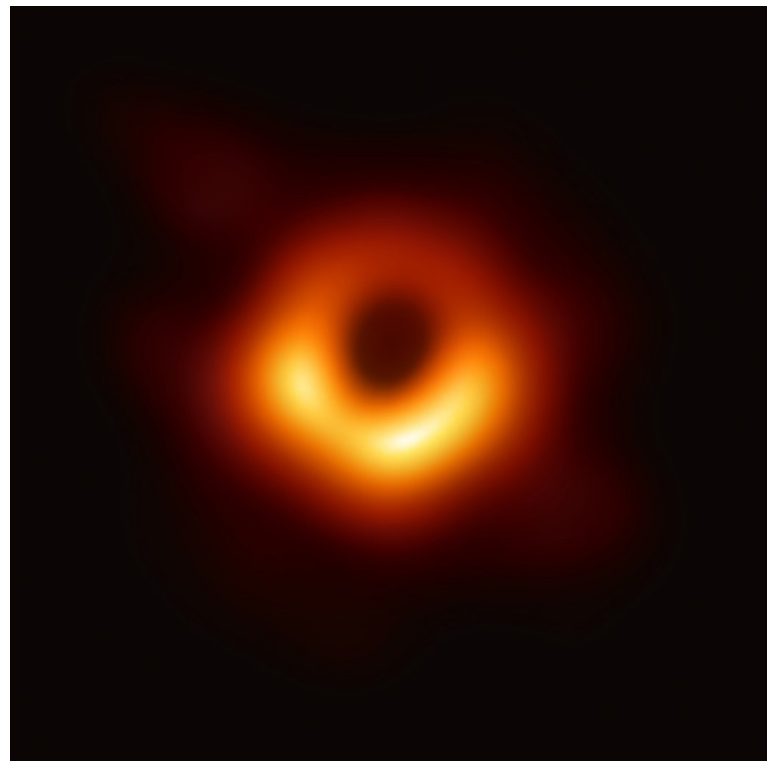


Figura 150 - Um dos grandes feitos da astronomia na virada do milênio, a obtenção da imagem de um buraco negro pelo projeto Event Horizon. Fonte: Wikimedia Commons.

em condições extremas para a teoria da relatividade geral de Einstein, evidenciando uma grande coincidência entre as previsões teóricas e as observações. Estas serviram também para aprimorar os dados sobre o tamanho incrível (270 UA) e a enorme massa ( $6,5 \pm 0,7$  bilhões de massas solares) do buraco negro de M87. A imagem obtida exigiu uma quantidade imensa de dados coletados em todos os observatórios, e quatro equipes diferentes trabalharam a partir deles no processo de criá-la. Em abril de 2020 o EHT divulgou imagens de um quasar, 3C279, a partir de dados coletados em quatro noites de observação em abril de 2017. O grupo vai continuar a trabalhar em colaboração, tanto para observar novos objetos, como para aumentar a resolução das imagens já obtidas.

Como nota triste, temos a desativação do radiotelescópio de Arecibo. Após dois colapsos parciais da estrutura, a NSF (National Science Foundation) comunicou a desativação do observatório em novembro de 2020. No dia 2 de dezembro de 2020 a plataforma suspensa com os detectores teve parte de seus cabos cortados intencionalmente e colapsou sobre a antena, dando início ao processo de demolição do instrumento.

A radioastronomia tem conseguido grandes resultados, como o do Event Horizon Telescope, que têm atestado a importância dos trabalhos compartilhados por vários observatórios. Ao mesmo tempo, novos projetos demonstram que é uma área com grandes expectativas de descobertas nos próximos anos.

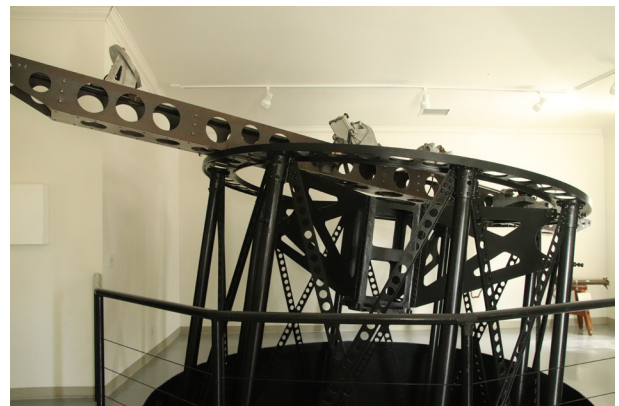
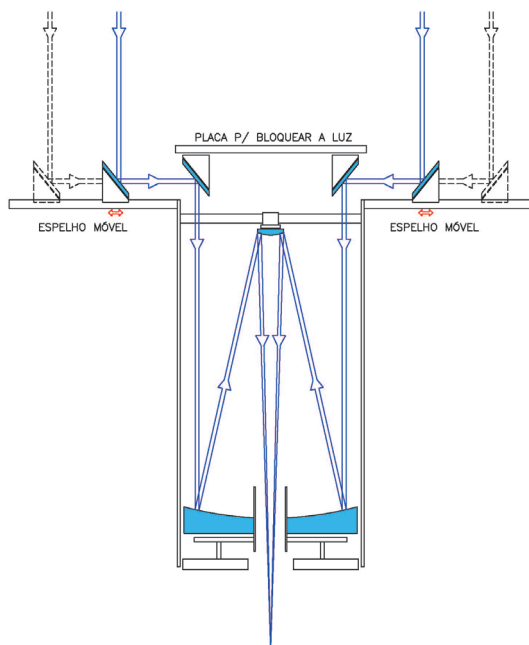
## CAPÍTULO 14

### Telescópios ópticos na virada do milênio

A virada do milênio marcou um período de desenvolvimento sem paralelos na história dos telescópios. Entre 1992 e 2002 foram criados nada menos que onze telescópios maiores que qualquer outro construído até então. Nunca se havia visto tamanha proliferação de instrumentos de grande porte em tão pouco tempo. Apesar do desenvolvimento da astronomia em novos comprimentos de onda do espectro eletromagnético e de novos meios de pesquisa como neutrinos, raios cósmicos e ondas gravitacionais, a astronomia no visível ainda é o centro da pesquisa astronômica, com a maior quantidade de fontes catalogadas e o maior número de pesquisadores e instrumentos de pesquisa. Em grande parte, isso ocorre pelas facilidades que a astronomia da faixa visível proporciona, como sítios bons e acessíveis e instrumentos com custos mais baixos de construção e operação.

Antes de falarmos do VLT, vamos voltar ao passado. Em dezembro de 1920, o físico Albert Michelson, auxiliado pelo astrônomo Francis Pease, instalou um aparato no telescópio Hooker do Monte Wilson, o maior do mundo na época, e fez funcionar o primeiro interferômetro astronômico da história (ver figuras 151 e 152). Esse aparato utilizava um sistema de espelhos planos móveis, que podiam ser ajustados durante uma observação. Com o instrumento não era possível obter imagens dos objetos astronômicos, mas a dupla conseguiu estimar o diâmetro da estrela Betelgeuse com boa precisão. Entre 1963 e 1974, na Austrália, o físico Robert Hanbury Brown, utilizando um interferômetro óptico, conseguiu estimar o diâmetro angular de 32 estrelas. Mas esses eram exemplos isolados e a interferometria só passou a ser utilizada regularmente com o avanço da radioastronomia, como vimos anteriormente.

O VLT (Very Large Telescope), já mencionado no capítulo anterior, provavelmente o projeto mais importante do período, é composto por um conjunto de quatro telescópios com 8,20 m de diâmetro e mais quatro telescópios em instalações móveis, com 1,80 m de



Figuras 151 e 152 - À esquerda vemos o esquema óptico do interferômetro instalado por Michelson no telescópio Hooker no Monte Wilson; à direita vemos um modelo em escala do aparato construído por Michelson para o interferômetro do Monte Wilson. Desenho e foto: Francisco Conte.



diâmetro cada, que tanto podem funcionar separadamente como em conjunto, através de interferometria. Esse é um projeto muito audacioso por se tratar de interferometria óptica, que tem operação muito mais complexa que aquela em rádio (ver figura 153). Um dos problemas da interferometria no visível é que as ondas possuem um comprimento muito menor que no rádio e, além disso, no rádio os sinais são captados na forma de sinais elétricos, o que simplifica terrivelmente o processo. Na interferometria óptica, a luz de cada telescópio deve ser combinada com a luz proveniente dos outros. Para tanto, são utilizadas complexas tubulações com vácuo e espelhos para redirecionar e sincronizar todos os feixes luminosos, e isso tem que ser ajustado várias vezes por segundo, durante toda a observação. Dependendo da configuração utilizada, o VLT Interferometer pode ter uma linha de base de até 200 m, o que garante uma resolução angular 25 vezes melhor que a de um dos quatro telescópios de 8 metros sozinho. Os quatro telescópios grandes foram batizados de Antu, Kueyen, Melipal e Yepun, respectivamente Sol, Lua, Cruzeiro do Sul e Vênus no idioma mapuche, falado por índios da região. O VLT foi instalado no topo do Cerro Paranal, no Atacama chileno, a uma altitude de 2.635 m. As primeiras observações utilizando interferometria, com dois telescópios, foram realizadas em fevereiro de 2005. Em fevereiro de 2012, foi feita com sucesso a primeira observação interferométrica com todos os quatro grandes telescópios. Em março de 2019, usando a interferometria óptica, o VLT (ver figura 154) conseguiu a primeira detecção direta de um exoplaneta, com a observação de HR 8799.



Figura 153 - Vista parcial do VLT onde é possível ver os quatro telescópios com 8,2 m de diâmetro (à direita) e dois telescópios móveis com 1,80 m de diâmetro (esquerda). Foto: Francisco Conte.



Figura 154 - Outra vista do VLT, onde é possível ver um dos telescópios de 8,20 m de diâmetro (cortado, à esquerda), dois telescópios móveis de 1,80 m de diâmetro e o edifício do interferômetro, onde é combinada a luz proveniente dos diversos telescópios. Foto: Francisco Conte.

Em 1999, dois telescópios começam a operar no topo do Mauna Kea, no Havaí, ao lado dos dois Kecks já em atividade no local. Um deles é o Subaru Telescope, um telescópio japonês com 8,30 m de diâmetro (ver figura 155). Seu nome, escolhido através de uma eleição, remete à palavra japonesa que designa as Plêiades, um aglomerado aberto visível a olho nu, localizado na constelação do Touro. O outro telescópio é o Gemini Norte, hoje rebatizado como Gillett Telescope, com 8,10 m de diâmetro e operado por um consórcio de vários países, incluindo o Brasil (ver figura 156). O Gemini é um projeto ousado, que previa a construção de dois telescópios gêmeos, instalados um no hemisfério norte e outro no sul, permitindo a seus operadores cobrir o céu inteiro em suas pesquisas. No ano seguinte, 2000, começou a operar o Gemini Sul, instalado no topo do Cerro Pachón, no Sul do Deserto do Atacama, a 2.772 m de altitude. Tanto o Subaru Telescope como os dois Geminis têm em comum um projeto arrojado para suas cúpulas, visando controlar ao máximo as turbulências atmosféricas que poderiam ocorrer no interior delas. O Subaru adotou uma cúpula cilíndrica, enquanto que os Geminis optaram por um desenho *high-tech*, com uma série de janelas móveis que permitem uma rápida equalização entre as temperaturas interna e externa do observatório.

Outro ponto em comum entre os Geminis e o Subaru é que seus espelhos primários foram construídos pela Corning, uma empresa tradicional na fabricação de instrumentos astronômicos, tendo sido a responsável pela construção do espelho de 5 m de diâmetro do telescópio Hale, em Monte Palomar, ainda nos anos 1930. A técnica utilizada pela Corning



Figura 155 - Vista do Subaru Telescope, no topo do Mauna Kea. Foto: Francisco Conte.



Figura 156 - Vista do Gillett Telescope, anteriormente conhecido como Gemini Norte (à direita), telescópio que conta com a participação do Brasil. Ao fundo, à esquerda, podemos ver o Canada-France-Hawaii Telescope. É muito interessante comparar a cúpula *high-Tech* do Gemini com a mais tradicional do CFH. Foto: Francisco Conte.

na construção de seus blocos de vidro também foi a de *meniscus*, como a empregada pela Schott Glaswerke, mas com algumas soluções diferentes. A Corning utiliza para a construção de seus blocos de vidro um material muito especial, com baixíssimo coeficiente de deformação térmica (o que é muito importante para observatórios astronômicos que operam frequentemente no topo de montanhas, em regiões de clima muito frio) denominado ULE (*ultra-low expansion*), um vidro em que o silício, elemento básico, é acrescido de dióxido de titânio (cerca de 10% da massa total), que é incorporado a este através do método de vaporização, um processo patenteado, exclusividade da empresa. O ULE é produzido inicialmente em placas hexagonais, que são fundidas em um forno especial.

Para compreender como evoluiu tão rapidamente a tecnologia de construção de telescópios, o melhor exemplo talvez seja o que ocorreu com o MMT (Multiple Mirror Telescope), o mais inovador observatório construído nos anos 1970. Apesar de continuar com o mesmo nome, o telescópio deixou de ter espelhos múltiplos no ano 2000. Os seis espelhos de 1,80 m foram substituídos por um único espelho monolítico de 6,50 m de diâmetro. A mudança conseguiu aproveitar a sua cúpula em forma de caixa, com adaptações mínimas, assim como a sua montagem, apenas com a substituição dos suportes das partes ópticas. A troca dos seis espelhos pelo espelho único mais que dobrou a capacidade de coleta de luz do telescópio, além de tornar a operação do instrumento muito mais simples, sem a utilização dos sistemas a laser para alinhamento dos vários espelhos. Como última vantagem, o novo espelho, já construído para trabalhar com a óptica ativa, era muito mais barato que os espelhos tradicionais e o novo MMT também utilizava a óptica adaptativa, o que o tornava um instrumento de pesquisa muito mais poderoso.

O espelho do novo MMT foi construído por um terceiro fornecedor de espelhos de grande porte, mas que não é um gigantesco fabricante de vidros, e sim um departamento de uma universidade. Roger Angel, após completar seu doutorado em física no Caltech, se transferiu para a Universidade do Arizona, onde começou a desenvolver instrumentos ópticos. Ele inventou um espectroscópio que trabalhava com fibras ópticas em 1979, e posteriormente passou a se dedicar à tarefa de construir espelhos de grande porte para telescópios. Em 1983, Angel e sua equipe fabricaram seu primeiro espelho, com 1,80 m de diâmetro, para a Universidade de Calgary. Em 1985, construiu seu primeiro forno rotativo. Em 1988, fez um espelho de 3,50 m para o observatório de Apache Point, no Novo México. Apenas oito meses depois construiu outro idêntico para o telescópio WIYN, instalado em Kitt Peak, no Arizona, e ainda um terceiro espelho de 3,50 m para a Força Aérea. A partir dessa época ficou público o fato que o Steward Observatory Mirror Lab, da Universidade do Arizona, podia produzir espelhos do porte dos maiores do mundo até então. O método de Angel utilizava um forno rotativo que permitia mudar a distância focal do espelho, variando-se apenas a velocidade de rotação (entre 6 e 7 rpm). Além disso, diferentemente dos outros fabricantes de blocos de vidro, a equipe do SOML realizava também o polimento do espelho, garantindo a qualidade de todo o processo. Angel trabalhava com borossilicatos com coeficiente de dilatação maior que o de seus concorrentes, pois o vidro empregado não era tão avançado tecnicamente como o Zerodur e o ULE. Mas, diferentemente da Schott e da Corning, seus espelhos eram construídos no sistema *honeycomb*, no qual, apesar de aparentemente ser usado

um bloco de vidro mais espesso, na verdade ele é praticamente oco, apenas reforçado com a adição de algumas nervuras que imitam a estrutura hexagonal dos favos de uma colmeia na parte inferior. Dessa forma, produz-se um espelho muito estável e com a área de contato entre o vidro e a atmosfera muito maior que no sistema *meniscus*, o que permite uma equalização muito rápida entre a temperatura do bloco de vidro e do ambiente e evita a degradação das imagens, mesmo com a utilização de um tipo de vidro mais barato. Com a construção do espelho do novo MMT, o SOML entrou para o clube de fabricantes de espelhos de grande porte e logo estaria desenvolvendo novos projetos.

O próximo trabalho do Steward Observatory Mirror Lab foi a construção de mais dois espelhos idênticos ao do novo MMT para o Magellan Project Telescope. O projeto Magellan, operado pela Carnegie Institution for Science, previa a construção de dois telescópios de grande porte em La Serena, sul do deserto de Atacama, no Chile, a 2.516 m de altitude, em um sítio onde já operavam outros instrumentos desde os anos 1970. O primeiro telescópio iniciou suas atividades no ano 2000 e foi posteriormente batizado de Walter Baade Telescope. O segundo viu a primeira luz no ano de 2002 e foi posteriormente batizado de Landon Clay Telescope.

Um projeto muito interessante começou a operar em 2003 no histórico sítio do Monte Wilson, na Califórnia: o CHARA (Center for High Angular Resolution Astronomy), um conjunto de seis telescópios pequenos, com 1 m de diâmetro, dispostos em uma configuração em “Y”, que funciona apenas como interferômetro (ver figura 157). A linha de base do conjunto é de 330 m, maior até que a do VLT, o que garante uma resolução angular na casa dos 200 microssegundos de arco, ou 0,0002”. O projeto é extremamente barato, em termos de construção de um telescópio óptico de pesquisa, mas é muito poderoso em termos de resolução angular, embora esteja limitado a observar objetos razoavelmente luminosos, devido a sua pequena área de coleta de luz, em comparação com telescópios contemporâneos.



Figura 157 - Um dos seis telescópios do CHARA, um interferômetro que funciona no topo do Monte Wilson. Foto: Francisco Conte.

Em 2004, começa a operar o SOAR (Southern Astrophysical Research Telescope), um telescópio com 4,10 m de diâmetro com grande participação do Brasil, representado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), que controla

aproximadamente 30% do tempo útil do telescópio, além do NOAO (National Optical Astronomy Observatory), da Universidade da Carolina do Norte e da Universidade Estadual de Michigan. Instalado no Cerro Pachón, ao lado do Gemini Sul, o SOAR significou um grande avanço na capacidade de pesquisas para a astronomia brasileira.

A África do Sul inaugura em 2005 seu grande projeto astronômico, o SALT (Southern African Large Telescope), um telescópio quase idêntico ao Hobby-Eberly Telescope, que participou ativamente no projeto, desenvolvimento e construção do novo telescópio. O espelho, como o do HET, possui 91 peças hexagonais que formam um conjunto com aproximadamente 11,1 x 9,8 m, com área de captação de luz equivalente a um telescópio da classe de 10 m de diâmetro. O SALT foi instalado em Sutherland, a uma altitude de 1.789 m e confirmou o sucesso do conceito do HET na construção de um poderoso, porém extremamente barato, telescópio de grande porte. O conjunto de espelhos foi fabricado na Rússia pela Kodak Company, utilizando um tipo de vidro cerâmico de baixo coeficiente de dilatação, o Astrosital.

Ainda em 2005 começa a funcionar parcialmente um projeto arrojado de telescópio no deserto do Arizona, o LBT (Large Binocular Telescope), com o início de operação do primeiro espelho. O segundo espelho começaria suas atividades em 2006 e os dois em conjunto em 2008. O telescópio foi instalado no topo do Mount Graham, a uma altitude de 3.330 m, um excepcional sítio astronômico onde já operavam o Telescópio do Vaticano e o Heinrich Hess Submillimeter Telescope. O LBT possui uma robusta montagem altazimutal com seus dois imensos espelhos, fabricados pelo Steward Observatory Mirror Lab, instalados um ao lado do outro. Pela concepção do projeto, os dois espelhos poderiam trabalhar em conjunto, através de interferometria, o que foi feito em testes, mas que não tem sido realizado em suas operações regulares. No entanto, o LBT continua sendo uma ferramenta de pesquisa muito poderosa, que pode observar um objeto produzindo imagens com filtros de cores diferentes, ou produzindo imagens e espectros ao mesmo tempo, utilizando equipamentos diferentes em cada telescópio, por exemplo, oferecendo uma nova série de possibilidades a seus operadores. O LBT é operado pelo Istituto Nazionale di Astrofisica, da Itália, por um grupo de universidades americanas (Universidade do Arizona, Universidade de Minnesota, Universidade de Notre Dame, Universidade de Ohio e Universidade da Virgínia), e por algumas instituições alemãs (o Instituto Max Planck de Heidelberg, de Bonn e de Munique, o Landessternwarte e o Instituto Leibniz de Astrofisica de Potsdam).

A astronomia serve também para compreendermos um pouco da alma humana. Você deve ter reparado em uma pequena diferença entre os diâmetros de cada telescópio, ou grupo de telescópios, quando da descrição dos grandes telescópios de espelhos monolíticos. A situação era esta: a recente tecnologia da óptica ativa permitiria a construção de espelhos com um diâmetro em torno de 8 m, e havia quatro grupos de pesquisa desenvolvendo projetos nessa área, cada um com seus objetivos e prazos. A primeira equipe a chegar a seu prazo final foi a dos telescópios Gemini, que optou por um diâmetro de 8,10 m. A segunda equipe, do ESO, que construiria as quatro unidades do VLT, optou por 8,20 m, para ter os maiores telescópios. Chegou então o momento da equipe do Subaru escolher o diâmetro de seu telescópio, e a opção foi por 8,30 m, maior que o ESO e o Gemini. Por fim, a equipe do LBT optou pelo diâmetro de 8,40 m, para ter o maior telescópio de todos.

Em La Palma, Ilhas Canárias, em 2007, começa a operar o Grantecan (Gran Telescopio Canarias), operado pela Espanha, México e pela Universidade da Flórida. O Grantecan possui um espelho segmentado, feito em Zerodur, fabricado pela Schott Glaswerk, com 36 peças hexagonais, com uma área efetiva igual à de um telescópio com 10,4 m de diâmetro. O Grantecan está instalado no topo do Roque de Los Muchachos, a uma altitude de 2.267 m. Seu conjunto óptico funciona no sistema Ritchey-Chrétien, ajustado por um sistema de óptica ativa.

O Keck Observatory, durante seus vários anos de atividade, chegou a realizar observações com interferometria óptica utilizando seus dois telescópios. Havia um plano do observatório para aprimorar esse tipo de atividade com a construção de quatro pequenos telescópios de 1,80 m de diâmetro no entorno do edifício do observatório. Esses quatro telescópios criariam uma linha de base de mais de 80 m, garantindo uma excelente resolução angular. O projeto encontrou a resistência de uma tribo de nativos locais, que considerava o Mauna Kea uma montanha sagrada. Teve início uma batalha judicial que acabou por impedir temporariamente a construção dos novos telescópios. Finalmente, os administradores do observatório optaram por abrir mão dessa ampliação em 2012 e interromperam o programa de observações interferométricas.

A entrada em funcionamento de todos esses instrumentos, somada a sistemas que foram incorporados aos telescópios existentes, à disseminação do uso de computadores e de detectores eletrônicos como os CCDs, à criação de novas técnicas de observação, à popularização das observações remotas, enfim todo um contexto de inovações e melhorias alterou profundamente o caráter e a capacidade de pesquisa dos astrônomos em um período relativamente curto. Todos esses fatores interagiram para que uma nova série de descobertas, que na verdade já tinha se iniciado na década de 1990, se aprofundasse ainda mais. Estamos tendo a sorte de vivenciar na astronomia um período de transformações e ampliação do conhecimento que nos surpreende com incrível frequência. É difícil ter uma visão clara de todo o panorama, talvez seja necessário um tempo para digerir tanta informação, mas a verdade é que nada indica que esse processo vá diminuir seu ímpeto nos próximos anos. A seguir veremos apenas alguns exemplos do que descobrimos recentemente.

## **Principais descobertas do período**

Plutão foi descoberto em 1930, mas somente em 1992 foi descoberto Albion, o segundo objeto na região conhecida atualmente como cinturão de Kuiper. Hoje, o número de objetos transnetunianos atinge a casa de 678 já numerados e aproximadamente 2.000 ainda não numerados, aguardando classificação. Alguns desses objetos possuem um tamanho similar ao de Plutão, como Quaoar, Sedna, Makemake, Haumea e Gonggong, mas em 2005 Mike Brown e sua equipe, que trabalhavam no observatório de Monte Palomar, descobriram Éris, com dimensões quase iguais a Plutão, porém provavelmente maior. Hoje sabemos que Éris tem diâmetro pouco menor que o de Plutão, mas sua massa é cerca de 27% maior. A descoberta levou a uma reclassificação de Plutão, na assembleia da IAU (International Astronomical Union) em 2006. Na reunião foi criada uma nova categoria, batizada de “planeta anão”, que não é um planeta, sendo incluídos nela o próprio Plutão, Éris, Makemake, Haumea e Ceres (o primeiro asteroide descoberto).

Essa classificação pode ser aumentada nos próximos anos, pois alguns dos membros citados do cinturão de Kuiper são maiores e mais massivos do que Ceres (Gonggong, Sedna, Quaoar, Orcus etc.).

Além dos próprios KBOs (*Kuiper belt objects* – objetos do cinturão de Kuiper), descobrimos que vários deles estavam acompanhados. Já sabíamos, desde os anos 1970, que Plutão possuía um satélite, Caronte, mas em 2005 foram descobertos mais dois: Nix e Hidra. Logo após a descoberta de Éris, foi observado um satélite ao seu redor, batizado de Dysnomia. Haumea possuía dois satélites, chamados de Namaka e Hi'iaka, descobertos em 2005, além de um anel, descoberto em uma ocultação em 2017. Makemake também possui um satélite, denominado MK2; Gonggong tem um satélite, Xiangliu; Quaoar tem um satélite, Weywot; Orcus tem um satélite, Vanth, e Salacia também tem um, Actaea. Por fim, foram descobertos mais dois satélites em órbita de Plutão: Cérbero, em 2011, e Estige, em 2012, aumentando o número total para cinco. Dos dez maiores objetos do cinturão de Kuiper, nada menos que oito possuem satélites.

O asteroide 10199 Chariklo havia sido descoberto em 1977 por James Scotti e é classificado como um centauro, pois sua órbita está localizada entre Saturno e Urano. Em 3 de junho de 2013 foi organizado um programa observacional para acompanhar um trânsito do objeto. O programa foi liderado pelo astrônomo Felipe Braga-Ribas, do Observatório Nacional, utilizando telescópios localizados no Brasil, Chile e Dinamarca. Surpreendentemente, os pesquisadores detectaram a presença de dois anéis. Era a primeira vez que se descobria um sistema de anéis em torno de um objeto pequeno; apenas se conheciam anéis em torno dos gigantes gasosos. Os dois anéis foram batizados de Oiapoque e Chuí, dois pontos extremos do Brasil. Após essa descoberta foram detectados anéis em torno do planeta anão Haumea e do asteroide Quíron.

Em 19 de outubro de 2017, o astrônomo Robert Weryk, do projeto PAN-STARS, um complexo instalado em Haleakalã, no Havaí, com dois telescópios de 1,80 m de diâmetro que estão realizando um grande levantamento de objetos que se deslocam nas proximidades da Terra, descobriu o primeiro objeto de origem extrassolar a cruzar nossa vizinhança. O objeto, batizado de Oumuamua, era um cometa com formato de charuto, com cerca de 1.000 m de comprimento por 100 m de largura. A trajetória da órbita, combinada com a velocidade de deslocamento, deixavam claro que o objeto tinha origem fora do sistema solar. Até o momento, nenhum objeto desse tipo havia sido encontrado. Em agosto de 2019, um segundo objeto desse tipo, batizado de Borisov, foi descoberto pelo astrônomo amador Gennady Borisov, utilizando um telescópio de 60 cm de diâmetro.

Após a descoberta do primeiro exoplaneta, na década de 1990, vários grupos passaram a se dedicar à busca de planetas extrassolares. As maiores contribuições foram feitas pelo telescópio espacial Kepler, mas o ritmo de novas descobertas é crescente. Até o início de 2021, foram descobertos 4.333 planetas, em 3.200 sistemas planetários diferentes, sendo que destes 708 possuem mais de um planeta conhecido. Nos primeiros anos após a descoberta inicial, os planetas encontrados eram sempre muito grandes, com massas maiores que Júpiter, em estrelas anãs vermelhas, com massa muito inferior à do Sol e com órbitas muito próximas à sua estrela, mais próximas que Mercúrio em relação ao Sol. Com o tempo foram desenvolvidas várias técnicas de detecção, que



incluíam a constatação de trânsitos por meio de construção da curva de luz; a análise da velocidade radial (medindo-se a mudança de posição da estrela causada pela atração gravitacional do planeta girando ao seu redor), microlentes gravitacionais etc. Hoje já foram detectados planetas inclusive em torno de sistemas múltiplos de estrelas, também planetas semelhantes à Terra e já se sabe até que a estrela mais próxima do sistema solar, Próxima Centauri, também possui um planeta. Um dos sistemas que ganhou mais destaque da mídia internacional foi Trappist 1, com nada menos que sete planetas, todos parecidos com a Terra em dimensões e massa e com possibilidade de apresentar água em estado líquido, uma das condições consideradas essenciais para a existência de vida fora da Terra.

A busca por exoplanetas levou à descoberta de um novo tipo de objeto, conhecido como anã marrom (*brown dwarf*). Esse tipo de objeto havia sido previsto teoricamente como algo intermediário entre um planeta e uma estrela. A primeira anã marrom descoberta foi Gliese 229B, por uma equipe do Caltech formada por Tadashi Nakajima, Keith Matthews e Rebecca Oppenheimer. Hoje classificamos como anãs marrons objetos com massa de 15 a 75 vezes maior que a de Júpiter. Anãs marrons não possuem um interior quente o bastante para realizar a fusão do hidrogênio e se transformar em uma estrela. Algumas delas, entretanto, atingem uma temperatura suficiente para realizar a fusão do deutério, um isótopo do hidrogênio que possui um nêutron no núcleo. A quantidade de deutério em uma estrela, no entanto, é muito pequena, e a anã marrom não consegue iniciar um processo contínuo de fusão, como o que ocorre nas estrelas.

A primeira imagem direta de uma anã marrom foi obtida no telescópio Hale de Monte Palomar em 27 de outubro de 1994, utilizando um sistema de óptica adaptativa recém-instalado. Os alvos foram a estrela Gliese 229 e sua companheira Gliese 229B. Pouco mais de um ano depois, o Hubble Space Telescope obteve uma imagem do mesmo sistema com uma resolução superior.

A primeira imagem de um exoplaneta foi realizada no telescópio Yepun, uma das quatro unidades do VLT, em 2004 (ver figura 158). O exoplaneta orbitava a anã marrom 2M1207. Em 8 de setembro de 2008, o astrônomo David Lafrenière e sua equipe, utilizando o Gemini Norte, obteve uma imagem direta de um exoplaneta orbitando a jovem estrela 1RXS J160929.1-210524, na constelação do Escorpião. A estrela tem aproximadamente 0,85 massa solar. O exoplaneta tem aproximadamente oito vezes a massa de Júpiter. Em 13 de novembro do mesmo ano, uma equipe liderada por Christian Marois, utilizando tanto os telescópios Keck como o Gemini Norte, conseguiu obter uma imagem da estrela HR 8799, na qual

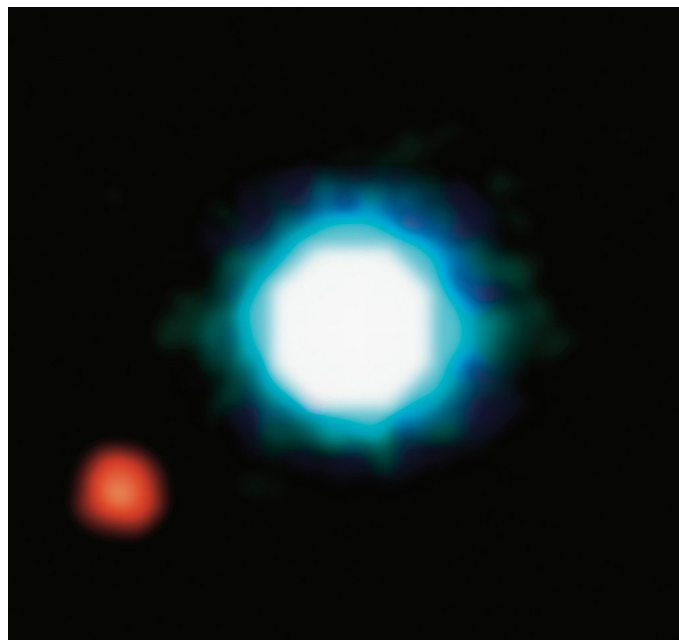


Figura 158 - Primeira imagem de um exoplaneta, feita pelo telescópio Yepun, uma das unidades do VLT. Fonte: Creative Commons.

podiam ser observados nada menos que três exoplanetas. Posteriormente, em 2010, a equipe conseguiu obter outra imagem com mais um quarto planeta. Era a primeira vez que se conseguia visualizar um sistema planetário em torno de uma estrela. Ainda em 2008, no dia 21 de novembro, foi anunciado que uma equipe do VLT havia obtido uma imagem de um exoplaneta em torno da estrela Beta Pictoris, no meio de um grande disco de poeira que circunda a estrela. A imagem foi obtida utilizando uma técnica similar a um coronógrafo, no qual a luz da estrela foi bloqueada por um artefato óptico, tornando possível a observação de seu entorno. As imagens haviam sido realizadas originalmente em 2003. No outono de 2009, a equipe conseguiu obter outra imagem com exoplaneta no outro lado da estrela, após um período em que esta o encobriu. Hoje, já temos imagens diretas de pelo menos 23 planetas ou sistemas planetários orbitando estrelas.

Em outubro de 2002, um grupo internacional de astrônomos, liderado por pesquisadores do Instituto Max Planck de Física Extraterrestre, utilizando o Yepun, um dos quatro telescópios do VLT, e sua óptica adaptativa, apresentaram um trabalho no qual, ao compilar observações seguidas, conseguiram traçar a órbita de uma estrela batizada de S2 em torno de Sagittarius A, no centro de nossa galáxia. O trabalho compilou também imagens obtidas pelo NTT de Cerro de La Silla e de um dos Keck, no observatório do Mauna Kea. A equipe conseguiu acompanhar dois terços da órbita de S2, estimando o seu período em 15 anos. Em sua maior aproximação, S2 chega a uma distância menor do objeto central invisível que a distância de Plutão ao Sol, deslocando-se a uma incrível velocidade de 5.000 km/s. Em comparação, o objeto Sedna, localizado no cinturão de Kuiper, com uma órbita um pouco menor que S2, tem uma velocidade orbital média de 1,04 km/s e dá uma volta em torno do Sol a cada 11.400 anos. Com base nesses dados, é possível estimar a massa de Sagittarius A em 4 milhões de massas solares. Na época da publicação do trabalho, era a prova mais evidente da existência de buracos negros. Por esse trabalho, Andrea Ghez (Keck Telescope) e Reinhard Genzel (Max Planck) ganharam o Nobel de Física de 2020.

A estrela Eta Carinae é com certeza uma das estrelas mais observadas e estudadas da nossa galáxia. Em meados do século XIX, ela foi aumentando de brilho até atingir magnitude aparente de -1, tornando-se a segunda estrela mais brilhante nos céus, só ficando atrás da estrela Sirius. Após esse período, a estrela foi ficando cada vez mais apagada, até atingir uma magnitude em torno de 7, que a tornava invisível à observação sem a ajuda de binóculos ou telescópios. A partir da década de 1930, seu brilho foi progressivamente aumentando, até atingir, nos dias de hoje, a magnitude aparente 4. Eta Carinae é o exemplo de uma estrela de grande massa que já se encontra em suas fases finais de vida e deve morrer como uma violenta hipernova, razão pela qual atrai a atenção de inúmeros pesquisadores por todo o mundo. Em 1996, o astrônomo Augusto Damineli e sua equipe, do IAG/USP, publicaram um trabalho analisando dados espectrais da estrela, coletados no Observatório do Pico dos Dias. Percebendo uma variação periódica nos espectros, o grupo propôs que na verdade Eta Carinae era um sistema binário, com eclipses periódicos perceptíveis através da espectroscopia. A estrela não pode ser observada diretamente, pois o evento do século XIX criou uma densa nuvem de poeira e gás que envolve a estrela. A equipe previu a ocorrência de novos eclipses que foram confirmados através de observações em 2003. A partir de então passou a ser um consenso na comunidade astronômica o caráter de sistema binário de Eta Carinae.

Em 21 de julho de 2010, foi publicado um artigo no qual uma equipe do ESO (European Southern Observatory), liderada por Paul Crowther, da Universidade de Sheffield, anunciava a descoberta da mais massiva estrela conhecida, R136a1, com 265 massas solares. A notícia era surpreendente para a comunidade astronômica, pois muitos modelos de formação estelar prescreviam que algo em torno de 150 massas solares seria o limite máximo que uma estrela podia alcançar. R136a1 está localizada na nebulosa da Tarântula, na Grande Nuvem de Magalhães, uma galáxia anã que orbita a Via Láctea e possui uma metalicidade muito menor que a da nossa galáxia, fator que pode ter contribuído para a formação de uma estrela tão grande. R136a1 é também a estrela mais luminosa conhecida, com cerca de 6 milhões de vezes o brilho intrínseco do Sol (ver imagem 159).

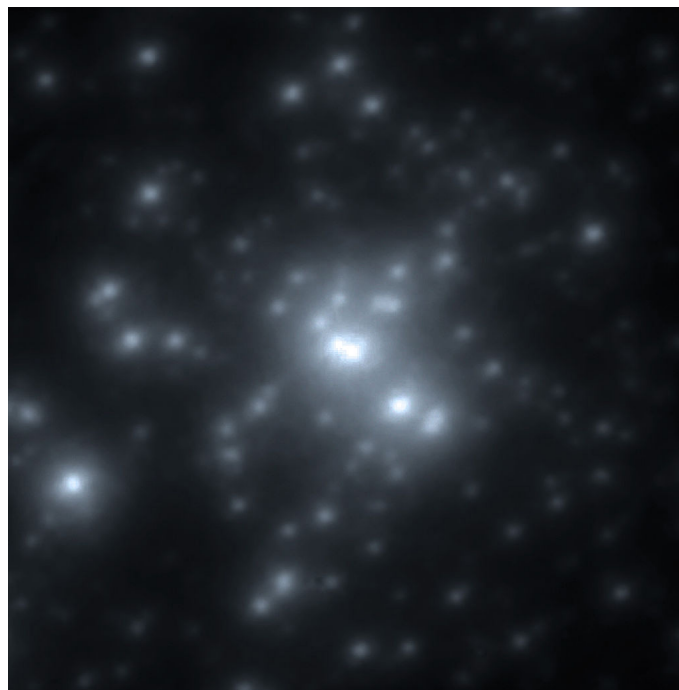


Figura 159 - Vista da parte central do aglomerado R136, localizado na Grande Nuvem de Magalhães. R136a1 é a estrela mais brilhante vista no centro da imagem, uma proeza técnica possível apenas pela utilização da técnica de interferometria. Fonte: Creative Commons.

Em 31 de dezembro de 2012, uma equipe coordenada por Norbert Christlieb, pesquisador da Universidade de Hamburgo, com a participação da brasileira Silvia Rossi, do IAG/USP, descobriu a mais antiga estrela conhecida, utilizando um telescópio com 2,30 m de diâmetro do Observatório de Siding Spring, na Austrália, e posteriormente um dos telescópios do VLT, no Chile. A estrela, batizada de HE0107-5240, uma gigante vermelha com 0,8 massa solar, possuía uma baixíssima metalicidade e a mais baixa abundância de ferro registrada até então. Hoje, a estrela mais antiga conhecida é BPS CS31082-0001, conhecida por Cayrel's Star. Com uma idade estimada em 12,5 bilhões de anos, ela foi descoberta por Tim C. Beers e equipe, utilizando um telescópio de Cerro Tololo e depois o VLT. O estudo deste tipo de objeto é importante para o refinamento dos modelos de formação estelar, assim como para o estudo da cosmologia.

Em setembro de 2006, um grupo de astrônomos liderados por Douglas Clowe, da Universidade do Arizona, apresentou um trabalho que mesclava observações realizadas com o satélite de raios X Chandra, o Hubble Space Telescope e os telescópios Magellan, em Las Campanas. A composição de imagens mostrava aquele que ficaria conhecido como o Bullet Cluster, uma colisão de dois aglomerados de galáxias que tinha uma particularidade: cada aglomerado se direcionava para um dos cantos da imagem. No centro era observada uma grande atividade na faixa do infravermelho, em razão de colisões de poeira e gás dos aglomerados, com grande atrito entre as partículas de cada grupo que acabaram ficando para trás. Afastando-se dessa área central, nas duas

extremidades, era possível observar no visível as galáxias de cada grupo, com suas estrelas, que passaram pela colisão com menos atividade que a poeira e o gás e, surpreendentemente, à frente das galáxias, nas extremidades dos dois aglomerados, uma atividade de alta energia, observada na faixa dos raios X, exatamente da maneira que se esperava que ocorresse nos casos de colisões de blocos de matéria escura. O Bullet Cluster se tornou, na época, a maior evidência da existência física da matéria escura (ver imagem 160). Outro aglomerado descoberto em 2007, batizado de MACS J0025.4-1222, apresentava características muito similares.

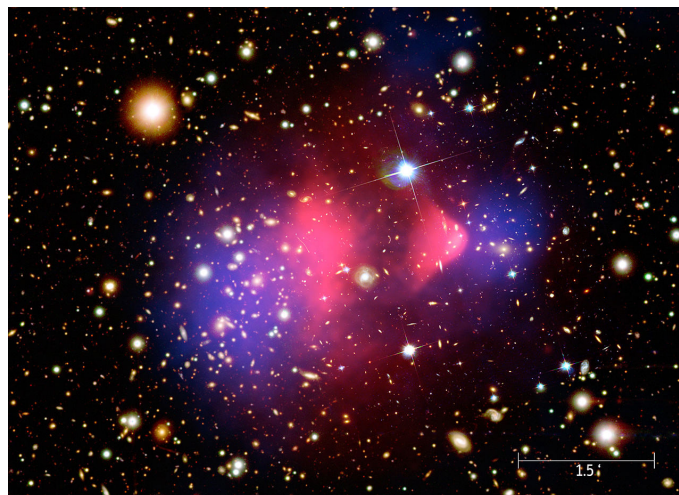


Figura 160 - Imagem do Bullet Cluster, a maior evidência da existência da matéria escura. A imagem é uma combinação de dados colhidos na luz visível, infravermelho e raios X. Fonte: Wikimedia Commons.

## Telescópios do futuro

Como vimos nos exemplos citados nas páginas anteriores, estamos no meio de uma fase de incrível atividade e cheia de descobertas provindas dos observatórios que trabalham na faixa do visível, mas uma nova geração de novos telescópios deve entrar em operação nos próximos anos, o que indica que muita coisa deve ser descoberta nas décadas a seguir e que muitas de nossas perguntas profundas no campo da astronomia podem estar próximas de receber respostas adequadas. Além disso, o avanço tecnológico acompanha a criação de novos instrumentos. O ESO, por exemplo, está desenvolvendo novos sistemas de óptica adaptativa com múltiplos lasers que devem ampliar a capacidade de nossos instrumentos de pesquisa. O telescópio Mayall de Kitt Peak está passando por uma reforma, com a instalação de um sistema com 5 mil sensores de fibra óptica, com a finalidade de analisar milhões de galáxias e quasares simultaneamente, calculando detalhadamente seu movimento próprio na tentativa de esclarecer a essência do que é a matéria escura.

O primeiro dos novos telescópios que deve entrar em operação nos próximos anos é o Vera C. Rubin Observatory, conhecido anteriormente como LSST (Large Synoptic Survey Telescope), um telescópio com um espelho de 8,40 m de diâmetro, produzido pelo laboratório da Universidade do Arizona, a ser instalado no Cerro Pachón, ao lado do SOAR e do Gemini Sul. Apesar de ter uma abertura semelhante à de telescópios já em funcionamento, o Vera C. Rubin Observatory tem um projeto radicalmente inovador. O espelho primário é também o espelho terciário; o bloco de vidro tem uma dupla curvatura, com a área interna possuindo uma curvatura diferente da área externa. Essa configuração jamais havia sido utilizada na história da astronomia. A configuração óptica de um telescópio com três espelhos permite a obtenção de um campo bastante grande, de 3,5° de diâmetro. O telescópio vai receber uma câmera com 3,2 gigapixels e deve

cobrir todo o céu visível a cada três dias de observação, permitindo o acompanhamento de todos os objetos que apresentam alguma variação de brilho ou de posição no céu. O Vera C. Rubin deve entrar em operação em 2021 e voltaremos a falar dele no último capítulo.

Dos telescópios gigantes de nova geração, o primeiro a entrar em funcionamento deve ser o GMT (Giant Magellan Telescope), a ser instalado em Las Campanas, Chile. O telescópio apresenta uma configuração inusitada, com sete espelhos de 8,40 m de diâmetro, fabricados pelo laboratório da Universidade do Arizona. Aparentemente a configuração lembra o primeiro MMT, mas no caso do GMT, do ponto de vista óptico, todos os espelhos atuam como uma peça única (ver figura 161). O conjunto vai funcionar como um telescópio com um espelho de 24,5 m de diâmetro. Atualmente cinco dos sete espelhos já foram construídos e o sexto encontra-se em fase final de fabricação. Além disso, deve ser construído um oitavo espelho, para ser utilizado quando algum dos seis espelhos externos estiver em manutenção. O espelho central tem um perfil idêntico ao dos grandes telescópios atuais, mas os seis espelhos externos possuirão um perfil *off-axis* (fora do eixo), para que todo o conjunto funcione com um foco único. Em Las Campanas, a parte de fundação da edificação está completa e o grupo estima o início de operações do telescópio para 2025, embora os primeiros trabalhos ocorram com apenas quatro espelhos. O GMT será gerido por um consórcio de operadores de cinco países: os Estados Unidos, que lideram o projeto; a Coreia do Sul e a Austrália; o Chile, como país hospedeiro, e o Brasil, pelo estado de São Paulo, através da FAPESP, a partir dos esforços do IAG/USP.

O segundo telescópio gigante da próxima geração a entrar em operação está sendo construído pelo ESO no Chile. Trata-se do ELT (Extremely Large Telescope), a ser instalado em Cerro Armazones, próximo ao Cerro Paranal, a uma altitude de 3.046 m. O ELT terá um espelho primário segmentado, com um diâmetro de 39,3 m, sendo o maior de sua geração. O espelho primário, a ser construído pela Schott Glaswerk, terá nada menos que 798 segmentos hexagonais, com um diâmetro de 1,40 m cada, devendo produzir imagens com uma definição angular 16 vezes melhor que o Hubble Space Telescope. O observatório deverá entrar em operação em 2025.

O último dos telescópios gigantes de próxima geração será o TMT (Thirty Meter Telescope), com 30 m de diâmetro, como seu nome antecipa, a ser instalado no topo do Mauna Kea, no Havaí. O espelho principal será fragmentado, com 492 peças hexagonais de 1,40 m de diâmetro. O projeto deverá ser o maior telescópio do Hemisfério Norte e será operado por um consórcio de instituições dos Estados Unidos, Japão, China, Índia e Canadá. O observatório estava previsto para entrar em atividade em 2027, mas com a pandemia de Covid-19 talvez possam ocorrer atrasos no cronograma de operações. Vale a pena comentar a batalha judicial e política que resultou na aprovação da construção do TMT no Mauna Kea, que é considerada uma montanha sagrada por alguns nativos locais. O acordo incluiu a desativação de dois telescópios no sítio.

Quando essa nova geração de telescópios entrar em atividade, pela primeira vez na história o Hemisfério Sul terá um poder de observação através de telescópios maior que o Hemisfério Norte.

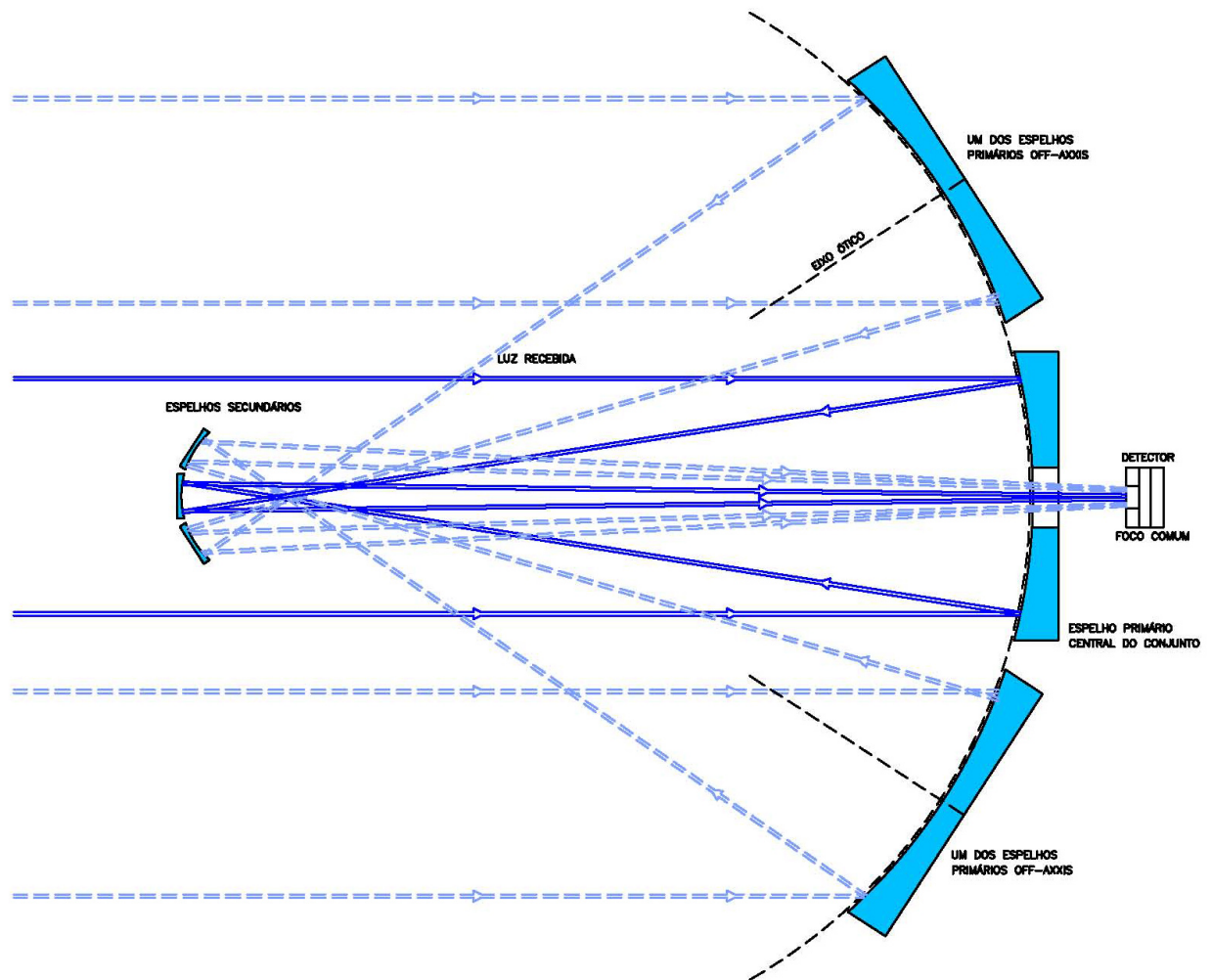


Figura 161 - Esquema óptico do Giant Magellan Telescope, que apesar de lembrar a configuração do antigo Multiple Mirror Telescope, é diferente e muito mais simples: todos os sete espelhos fazem um foco único, como se fossem um só espelho. Desenho: Francisco Conte.

## CAPÍTULO 15

### Astronomia amadora na virada do milênio

A astronomia é uma das raras áreas da ciência em que um amador pode colaborar com seu desenvolvimento. Há inúmeros exemplos ao longo da história; basta lembrar que, quando William Herschel descobriu Urano, ele ainda não era um astrônomo profissional, ou que Lorde Rosse — e seu gigantesco *Leviatã* — sempre foi amador. Há ainda o casal Huggins, que tantas colaborações deu ao desenvolvimento da espectroscopia e da fotografia, assim como seu contemporâneo Henry Draper. E, no capítulo anterior, mencionamos o feito de Borisov, que descobriu o segundo objeto extrassolar descoberto em nossas proximidades.

Os exemplos citados acima são naturalmente casos extremos, mas muitos astrônomos amadores têm desenvolvido atividades úteis para o campo, bastando lembrar que boa parte dos cometas que conhecemos foram descobertos por amadores, assim como várias novas. O acompanhamento do comportamento de estrelas variáveis é um grande exemplo, pois seria muito caro gastar um número imenso de horas para seguir o comportamento de uma única estrela em um observatório profissional. Desde o final do século XIX astrônomos amadores espalhados pelo mundo se encarregaram de realizar as observações da variação de brilho de inúmeras estrelas. Em 1911 foi fundada a AAVSO (American Association of Variable Star Observers), que passou a coordenar mundialmente os registros de observações de astrônomos profissionais, mas principalmente de amadores. A AAVSO tem catalogada uma média de cem mil observações anuais, possui cerca de dois mil membros e alcançou a marca de 20 milhões de registros em 2011. Há décadas essa tem sido a principal fonte de informações sobre estrelas variáveis, e é acessível a qualquer pesquisador que queira utilizar os seus dados.

Esses são alguns exemplos da importância da astronomia amadora em pesquisas, mas existem muitas outras práticas, como a observação de chuvas de meteoros, a de planetas e outros objetos do sistema solar, a observação solar etc. Além disso, os amadores também se dedicam à divulgação científica e outras atividades.

Acontece que a astronomia amadora também foi incrivelmente beneficiada pelo desenvolvimento tecnológico das últimas décadas, a exemplo da utilização de detectores eletrônicos e de computadores, fazendo com que vários grupos espalhados pelo mundo iniciassem atividades impensáveis inclusive para observatórios profissionais de algumas décadas atrás.

Além de astrônomos amadores avançados, com o advento da internet, surgiu a possibilidade de que um número muito maior de interessados conseguisse fazer algum tipo de colaboração com pesquisas avançadas. Um excelente exemplo é o Galaxy Zoo, um grande programa de classificação morfológica de galáxias. Na época de sua implantação, com início em 2007, programas de reconhecimento automático com computadores haviam encontrado imensas dificuldades na classificação de galáxias a partir de sua forma. Um estudo realizado com voluntários demonstrou que colaboradores humanos sem formação em astronomia, mas com um treinamento básico adequado, obtinham resultados muito superiores. O Galaxy Zoo trabalharia com dados colhidos pelo Sloan Digital Sky Survey

(SDSS). A ideia inicial seria conseguir de 20 mil a 30 mil voluntários para classificar 900 mil galáxias. Um estudante de pós-graduação em astrofísica que trabalhasse 24 horas por dia, sete dias por semana, demoraria de três a cinco anos para classificar todas as galáxias uma única vez (para diminuir o erro, o ideal seria repetir a classificação mais vezes). No primeiro Galaxy Zoo, em 175 dias, cem mil voluntários realizaram nada menos que 40 milhões de classificações. A atuação efetiva dos voluntários acelerou em muito a obtenção dos resultados e liberou profissionais da área para a realização de outras atividades de pesquisa. Esse tipo de atividade passou a ser conhecido como “ciência cidadã”. O sucesso do primeiro Galaxy Zoo acabou por levar a uma segunda etapa do programa, onde foi feita uma classificação morfológica ainda mais aprofundada das 250 mil mais brilhantes galáxias do SDSS. Uma terceira etapa do programa foi feita com a análise de 120 mil galáxias fotografadas pelo Hubble Space Telescope, e a última etapa, o Galaxy Zoo 4, iniciada em 2016, estudou imagens de 40 mil galáxias feitas pelo Hubble e pelo SDSS. Além disso, ocorreram dois projetos paralelos, entre 2009 e 2012: um deles específico para galáxias em processo de fusão e o outro para a descoberta de supernovas nas galáxias estudadas. O sucesso do Galaxy Zoo foi muito importante no estudo da evolução de galáxias e produziu uma série de descobertas inesperadas, tais como um grupo de galáxias elípticas azuladas, que indicava a presença de formação estelar recente, assim como de galáxias espirais vermelhas, onde não se observavam novos processos de formação estelar. Uma das descobertas, muito surpreendente, tornou famosa a sua descobridora, a voluntária holandesa Hanny van Arkel, a primeira pessoa a visualizar uma galáxia com um apêndice esverdeado, muito incomum em astronomia extragaláctica. O objeto ficou conhecido como Hanny’s Voorwerp (“Objeto de Hanny”, em holandês) e após muitos estudos foi explicado como um eco de uma emissão causada por um quasar no centro da galáxia. O Galaxy Zoo descobriu também outro grupo de objetos incomuns, denominados Green Pea Galaxies (“galáxias ervilha verde”), que são galáxias muito compactas, com um brilho esverdeado.

Outros programas de ciência cidadã na astronomia exigem ainda menos esforço de seus colaboradores. O SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence), que utiliza radiotelescópios na busca por civilizações extraterrestres, criou um programa chamado SETI@home (SETI at home). No programa, os voluntários instalam em seus computadores um software que atua como um protetor de tela. Quando o computador está ocioso, esse software recebe um pacote de dados obtidos pelos radiotelescópios do SETI e inicia uma análise em busca de sinais extraterrestres, até que o usuário volte a utilizar o computador. Quando o protetor de tela for ativado novamente, recomeça a mesma análise, até que se complete o pacote de dados. Quando isso ocorre, o usuário recebe um novo pacote de dados. Uma grande rede de voluntários proporciona ao SETI uma incrível capacidade de análise de dados. O SETI@home chegou a ter 666.078 voluntários de 229 países, dos quais 68.901 no Brasil. O programa parece ter sido paralisado em março de 2020, sendo ainda incerta a sua continuação.

Um programa similar ao SETI@home é o Einstein@home (Einstein at home), com o mesmo tipo de organização do primeiro, mas dedicado à busca de pulsares e à detecção de ondas gravitacionais. Utilizando dados captados pelo Fermi Gamma-Ray Space Telescope, pelo rádio-observatório de Parkes, na Austrália, e, até algum tempo atrás,



pelo radiotelescópio de Arecibo, o Einstein@home registrou aproximadamente 440 mil voluntários desde 2005. Em 2010, o projeto fez sua primeira descoberta, um pulsar binário batizado de PSR J2007+2722. Até o momento, o programa já descobriu 55 pulsares de rádio e 25 pulsares de raios gama. Um campo avançado, onde raramente poderia se supor que a colaboração de amadores pudesse de fato resultar em descobertas científicas.

Voltemos aos astrônomos amadores que realmente se dedicam à observação. Alguns deles possuem habilidades notáveis; entre eles está o reverendo australiano Robert Evans. Com memória eidética, ele lembra com detalhes a aparência de aproximadamente 1.500 galáxias, que observa em seu telescópio newtoniano com montagem dobsoniana de 30 cm de diâmetro. Evans descobriu, desde 1968, nada menos que 40 supernovas, todas visualmente. Um feito notável, sobretudo frente à concorrência de grupos que emulam seu método de busca com recursos eletrônicos.

A partir de meados dos anos 1980, começaram a surgir grupos de busca de supernovas, levando a um passo além o processo do reverendo Evans com a inclusão de avanços da era digital. As primeiras tentativas aconteceram nos Estados Unidos, graças aos esforços dos astrônomos profissionais Alexei Filippenko e Weidong Li, em conjunto com astrônomos amadores. Para implementar o programa de busca de supernovas, o grupo inicialmente preparava uma lista com galáxias possíveis de observar com o equipamento disponível, levando em conta suas características físicas e morfológicas: principalmente galáxias espirais ou irregulares, com grande massa etc. Depois, preparava-se um catálogo fotográfico de todas as selecionadas, com suas coordenadas e dados principais. Após a conclusão do banco de imagens, o trabalho real se inicia. Normalmente utilizam-se telescópios automatizados e se fazem imagens de algumas dezenas ou centenas de galáxias por noite. Um software especializado compara as imagens obtidas no dia com as cadastradas no banco de imagens, selecionando aquelas em que foram percebidas diferenças. Algum dos membros do grupo faz a checagem das imagens selecionadas, descartando as que possam ter sido causadas por outros fatores, tais como passagem de asteroides ou de satélites artificiais, raios cósmicos etc. Após todas as checagens, eventualmente pode ser observada uma supernova. O passo seguinte é encaminhar um aviso para o CBAT (Central Bureau for Astronomical Telegrams), o órgão da IAU que coordena as notificações de possíveis supernovas, novas ou cometas, que eventualmente confirma a descoberta. Um desses grupos, o BOSS (Backyard Observatory Supernova Search), formado por seis astrônomos amadores norte-americanos, descobriu 189 supernovas desde 1981.

No Brasil, funcionou entre 2003 e 2010 um grupo amador de busca de supernovas, o BRASS (Brazilian Supernovae Search), formado por membros paulistas e mineiros, utilizando principalmente o observatório CEAMIG-REA (Centro de Estudos Astronômicos de Minas Gerais – Rede de Astronomia Observacional), instalado na cidade de Belo Horizonte e operado remotamente. Durante seu tempo de atividade, o grupo descobriu 15 supernovas, sendo que duas delas atraíram muito a atenção de pesquisadores profissionais: a SN2005af, por ser uma das supernovas mais próximas descobertas nas últimas décadas, localizada a 3,9 megaparsecs, e a supernova SN2006D, por ter sido uma das raras descobertas antes de atingir o seu pico de brilho.

A maior parte das descobertas de supernovas é realizada por astrônomos profissionais em programas de busca que adotam o mesmo princípio utilizado pelos amadores, mas a colaboração destes é importante. Na década de 1980 o número de supernovas descobertas por ano girava na casa de dez, praticamente todas por profissionais. Hoje o número gira em torno de mil, principalmente graças à utilização de computadores com softwares dedicados e à utilização de detectores eletrônicos.

Em 19 de julho de 2009, o astrônomo amador australiano Anthony Wesley observou uma mancha pouco usual na superfície gasosa do planeta Júpiter. A mancha, com aproximadamente 8 mil km de comprimento, lembrava muito as marcas de impacto causadas pelos fragmentos do cometa Shoemaker-Levy 9. Observações espectrais realizadas por observatórios profissionais confirmaram que Wesley havia detectado um impacto de proporções similares aos de 1994. Pouco tempo depois, em 3 de junho de 2010, o mesmo Wesley registrou em uma imagem um impacto de menores proporções no planeta. Outro astrônomo amador, Christopher Go, conseguiu filmar o mesmo evento.

Impactos em Júpiter foram captados por outros astrônomos amadores em 2012, 2016 e 2019, todos eventos similares em intensidade ao de 2010. Graças a amadores sabemos que impactos em Júpiter são eventos relativamente comuns. O interessante a ser ressaltado é que essas detecções seriam impossíveis de captar, mesmo por instrumentos profissionais, na década de 1970. O avanço tecnológico proporcionado pelos detectores eletrônicos, além da utilização de novas técnicas permitidas por esses instrumentos, tem revolucionado o estudo da atmosfera de Júpiter e Saturno.

Uma das técnicas que permitem aos amadores a realização de imagens de grande qualidade da atmosfera superior de Júpiter, por exemplo, é conhecida como “empilhamento de imagens”. O observador realiza uma série de imagens do objeto — para o caso de Júpiter, dependendo do equipamento, algo como 200 imagens por segundo, durante um minuto, o que gera a produção de 12 mil imagens (ver imagem 162). Um software dedicado seleciona as imagens que não apresentam problemas ou distorções, restando normalmente algo em torno de 3 mil imagens, que são somadas e editadas, resultando em um



Figura 162 - Imagem de Júpiter com a sombra da lua Ganimedes, feita pelo astrofotógrafo Carlos Palhares, do grupo Alfa Crucis (ver do mesmo autor a figura 65). Foto: Carlos Palhares.

excepcional aumento de definição angular, com detalhes muito claros da superfície, que só conseguimos observar quando da passagem das Voyagers (nem os telescópios da época, nem as Pioneer 10 e 11, conseguiram imagens com essa qualidade).

Outro trabalho impressionante que alguns grupos de amadores estão desenvolvendo é a busca de transientes, objetos que sofrem alguma alteração de brilho ou posição quando observados regularmente durante um período. Essa variação pode durar de alguns segundos a dias. Como exemplo de grupos que desenvolvem esse trabalho, temos no Brasil o projeto BRATS (Brazilian Transient Search), que agrupa amadores de São Paulo, Minas Gerais e Brasília. O grupo descobriu duas novas na Grande Nuvem de Magalhães, um feito que seria literalmente impossível há poucas décadas, mesmo para observatórios profissionais (ver imagem 163). Conseguir identificar uma variação de brilho em um campo com uma densidade de estrelas tão elevada só é possível com o auxílio de computadores e com um software dedicado muito eficiente. Outro dado incrível do trabalho desse grupo é que eles nem sequer utilizam um telescópio para suas observações. Tudo é feito com uma câmera Canon 6D, equipada com uma lente fixa de 200 mm, com abertura f1.8. Isso mostra o quanto a tecnologia dessa área avançou nos últimos anos. O grupo iniciou suas atividades em 2019 e utiliza duas estações independentes para realizar as observações.



Figura 163 - Vista da nova LMCN 2019-07a, descoberta pelo grupo BRATS de busca de transientes em 27 de julho de 2019. Na imagem, obtida três dias após a descoberta, a nova está marcada pela seta vermelha. Foto: Leonardo Amaral.

Um campo da astronomia em que podemos observar tanto o trabalho de astrônomos profissionais como o de amadores é o levantamento de NEOs (*near-Earth objects*), que são asteroides cuja órbita se localiza próxima à Terra, eventualmente podendo trazer

algum risco de colisão com nosso planeta. Um exemplo de iniciativa profissional foi o programa LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research), operado pela força aérea americana, que esteve em atividade entre 1998 e 2005 e descobriu 2.423 NEOs e 279 cometas. Mais recentemente temos o programa Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System), com dois telescópios de 1,8 m de diâmetro, localizados em Haleakala, no Havaí, que descobriu um número enorme de NEOs, cerca de 20 mil objetos no cinturão de Kuiper e mais de cem mil troianos de Júpiter.

Vários grupos amadores também têm se dedicado à busca de NEOs por todo o mundo. Alguns desses grupos de maior porte, notadamente nos Estados Unidos, inclusive recebem verbas da NASA e outros institutos para incrementar sua capacidade de pesquisa. Há membros que vivem exclusivamente desses recursos, criando uma categoria que ironicamente poderíamos chamar de astrônomos “amadores profissionais”, que se diferenciariam dos profissionais apenas pela ausência de formação acadêmica.

No Brasil temos um grupo em Minas Gerais, o SONEAR (Southern Observatory for Near Earth Asteroids Research), que tem se destacado na área, tendo já descoberto 32 asteroides com órbitas que se aproximam da Terra, 27 asteroides do cinturão principal, três asteroides que cruzam a órbita de Marte e nove cometas.

Outro grupo que tem desenvolvido trabalhos muito interessantes é o Alfa Crucis, formado inicialmente por amadores de São Paulo e que agora tem também membros de Minas Gerais e Brasília. O Alfa Crucis é dividido em grupos especializados que se dedicam a atividades diversas, como a astrofotografia e a espectroscopia. Um dos grupos especializados de maior interesse está realizando o acompanhamento de trânsitos de exoplanetas já catalogados. A tarefa é bastante complexa, pois a diminuição do brilho da estrela é muito pequena, exigindo que o equipamento óptico, o sistema de acompanhamento e a detecção com CCD sejam extremamente bem calibrados, além de muito trabalho na redução de dados e análise. O grupo já conseguiu acompanhar vários trânsitos de exoplanetas diferentes (ver imagem 164) e está tentando estabelecer um cronograma de atividades bem audacioso nos próximos semestres.

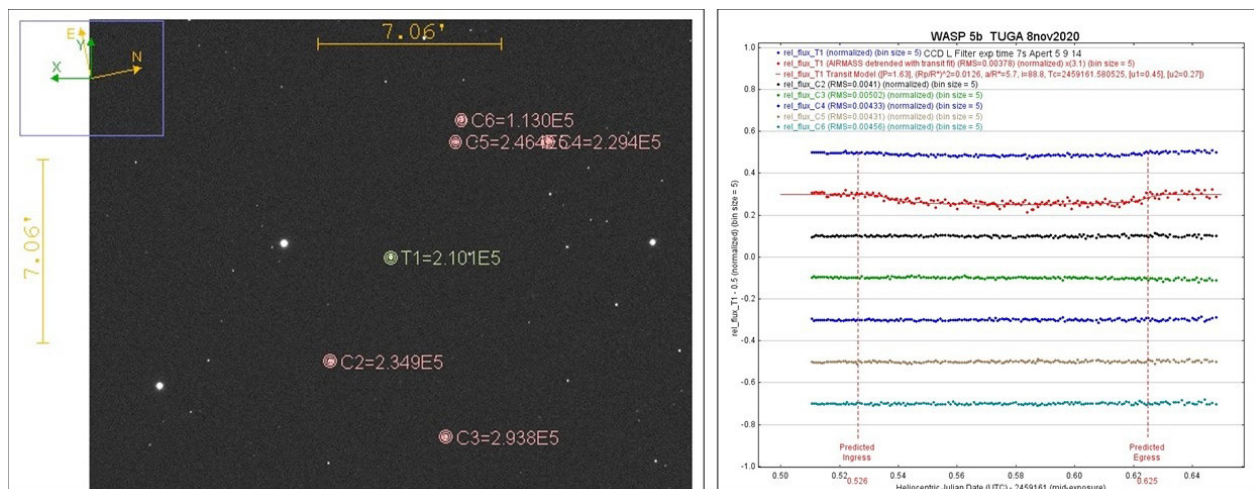


Figura 164 - Imagem e gráfico com redução de dados do trânsito do exoplaneta WASP-5 b. No trabalho, feito por membros do grupo Alfa Crucis, foram realizadas 942 imagens durante a ocorrência do trânsito, com a avaliação da variação do brilho da estrela em cada uma delas. No campo apresentado à esquerda, a estrela WASP-5 aparece marcada em branco e as estrelas de comparação em rosa. Aquisição de imagens de Sergio G. Silva, com redução de dados de Ester Olim, Denis Kulh, Ção Rodrigues, Renata Treü e Patricia Aguiar.

Uma última iniciativa muito interessante entre os amadores é o acompanhamento de meteoros no céu noturno. Após algumas iniciativas particulares, em 2014 foi criada a BRAMON (Brazilian Meteor Observation Network, ou Rede Brasileira de Observação de Meteoros). A rede iniciou seus trabalhos com apenas três estações, mas outros interessados poderiam se juntar ao grupo, bastando para isso instalar uma câmera em local apropriado, normalmente o teto da própria casa, ligá-la a um computador com internet e instalar um software que já faz uma análise prévia das imagens obtidas na noite anterior, selecionando aquelas nas quais podem ter sido observados meteoros. Hoje o grupo conta com 88 membros e 155 câmeras de monitoramento, espalhados por 20 estados. É um dos maiores grupos desse tipo no mundo. Em 2017, o grupo teve confirmada a descoberta de sua primeira chuva de meteoros, a épsilon Gruídeos. A BRAMON descobriu 25 chuvas de meteoros, confirmadas pela IAU, e outras 104 já foram detectadas, mas ainda não foram descritas em artigos por limitação de pessoal. Duas dessas chuvas estão relacionadas a asteroides descobertos pelo SONEAR, outro grupo mencionado anteriormente. No ano de 2019, a BRAMON esteve envolvida na busca do meteorito Aguas Zarcas, que caiu na Costa Rica, refazendo a trajetória do bólido até as proximidades de sua queda. Com os dados da BRAMON, pesquisadores conseguiram recuperar aproximadamente 27 kg de material do meteorito em diversas partes. A rapidez foi um fator importante, pois o meteorito era do tipo condrito carbonáceo, que se deteriora facilmente na presença de água, e a Costa Rica é um local de clima muito úmido.

Claro que a imensa maioria dos estudos e descobertas astronômicos são realizados por astrônomos profissionais, mas a participação de amadores é possível em alguns nichos de pesquisa, em que o custo para realizar observações em observatórios profissionais seja descabido ou que eventualmente exijam um tempo muito grande de observação em um telescópio. Enfatizei neste capítulo a participação de amadores brasileiros, mas a maior parte dos trabalhos amadores em astronomia é realizada nos Estados Unidos, que possui um número imenso de praticantes e um clima muito favorável para observações astronômicas em boa parte do território. Europeus, japoneses, australianos produzem também muitos trabalhos na área.

Um projeto muito interessante está começando a ser desenvolvido no Brasil e demonstra com muita clareza as possibilidades de colaboração entre astrônomos amadores e profissionais. A proposta foi iniciada pela astrônoma profissional Duília de Mello, radicada nos EUA, que tem realizado um trabalho de pesquisa ligado a regiões externas a galáxias elípticas, onde são formados bolsões (*shells*) de formação estelar a partir do gás que é ejetado quando ocorre o processo de fusão com outras galáxias. A descoberta desses *shells* é relativamente recente e a pesquisa de tais objetos, por seu brilho muito tênue (magnitude aparente 20 ou maior), até agora era realizada apenas por telescópios de médio e grande porte (mais de 4 m de diâmetro), ou pelo Hubble Space Telescope. Um trabalho realizado por David Martínez-Delgado em 2019 demonstrou que um conjunto de telescópios amadores poderia ser utilizado para a obtenção de imagens de céu ultraprofundo, com magnitudes da ordem necessária para a observação de *shells* em torno de galáxias elípticas. Em 2019, Duília entrou em contato com um grupo de astrônomos amadores brasileiros, de diversos estados, e que já faziam parte de associações como o BRATS, o SONEAR, o CEAMIG e o Alfa Crucis, entre outros. O

grupo foi batizado de DIM (Deep Images of Mergers), por trabalhar com *shells* formados a partir da fusão de galáxias. Como teste inicial fizeram uma imagem da galáxia Centaurus A, com 40 horas de integração de imagens de cinco telescópios diferentes. A imagem foi posteriormente trabalhada através de softwares específicos e de um algoritmo que amplificava os sinais obtidos e eliminava boa parte do ruído. O resultado foi muito positivo, pois o trabalho permitia a visualização de vários *shells* que já haviam sido identificados em observações realizadas com telescópios de grande porte, mas o mais importante foi que a imagem possibilitou também a identificação de vários *shells* que nunca haviam sido observados anteriormente. Esse bem-sucedido trabalho inicial foi apresentado em um congresso e atraiu a atenção de outros amadores de várias partes do mundo. Hoje o DIM está buscando novos colaboradores no Brasil e também no exterior para aumentar o grupo e iniciar um programa de observação de galáxias do mesmo tipo (ver figura 165).

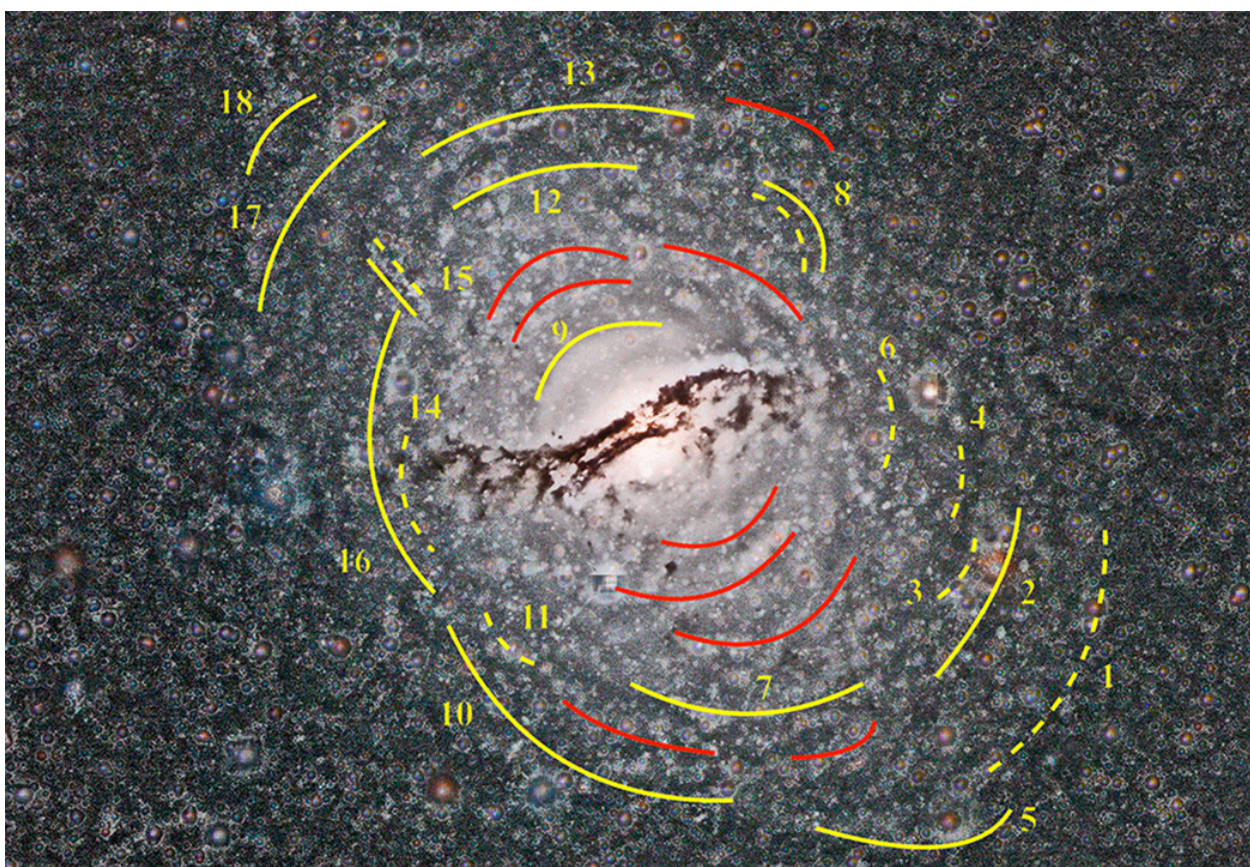


Figura 165 - Imagem da galáxia Centaurus A pela equipe do projeto DIM. Em amarelo estão destacadas as *shells* já conhecidas de trabalhos anteriores, feitos com telescópios de grande porte. Em vermelho estão destacadas nove *shells* nunca observadas anteriormente. Imagem com exposição de 40 horas realizada por João Mattei, Cristóvão Jacques, Sergio G. Silva, Marcelo Domingues e Eduardo Oliveira.

Astrônomos amadores também se dedicam à divulgação científica e ao ensino da astronomia – eu mesmo tenho feito esse papel nos últimos 20 anos junto ao Clube de Astronomia de São Paulo, o CASP. Vários outros grupos se dedicam a essa atividade no Brasil e no mundo.

## CAPÍTULO 16

### ***Big data, machine learning... Para onde vamos?***

Vamos começar este capítulo voltando a falar de um telescópio óptico muito especial: o GAIA. Na verdade, ele é um satélite que se dedica à maneira mais tradicional de se fazer astronomia, que é a astrometria — a medição, cada vez mais precisa, da posição das estrelas. A astrometria permite a obtenção do ângulo de paralaxe das estrelas, que por sua vez possibilita o cálculo de suas distâncias. Até a década de 1980, só conhecíamos a paralaxe de poucos milhares de estrelas. Com o satélite Hipparcos, aumentamos esse número para pouco mais de 100 mil, e com uma precisão maior do que a obtida em terra, mas ainda com limitações.

A estimativa de distâncias é provavelmente a tarefa mais difícil da astronomia, mas sua importância é enorme. A distância precisa é a chave para obtermos resultados melhores em praticamente todas as áreas, pois uma distância diferente pode significar um diâmetro menor que o previsto para uma estrela de nêutrons, por exemplo; ou pode significar que aquela supernova que foi observada há dois anos é a mais brilhante conhecida. Em áreas como a cosmologia, a precisão das estimativas de distância é fundamental, pois as detecções estão no limite de nossa capacidade observacional.

O GAIA continua trabalhando e sua equipe em terra também, compilando uma quantidade cada vez maior de dados. A cada novo conjunto de medições, mais precisos ficam os números. O grupo divulga periodicamente boletins de dados do satélite. A versão prévia do terceiro boletim (a completa só sairá em 2022) foi divulgada em 3 de dezembro de 2020. Os dados desse levantamento já eram incrivelmente mais precisos que os obtidos pelo Hipparcos, e eles ainda vão melhorar com a divulgação de novos boletins nos próximos anos (ver figura 166). Alguns dos números já divulgados pela missão:

- 1.811.709.771 posições estelares
- 1.806.254.432 de dados de brilho de estrelas na luz branca
- 1.467.744.818 estrelas com cálculo de paralaxe e movimento próprio
- 1.542.033.472 de dados de brilho de estrelas no filtro azul
- 1.544.997.939 de dados de brilho de estrelas no filtro vermelho
- 1.540.770.489 de dados de cor de estrelas
- 161.497.595 de estrelas com temperatura de superfície estimada
- 76.956.778 medições de raio e luminosidade de estrelas
- 7.224.631 medições de velocidades radiais de estrelas
- 550.737 fontes variáveis catalogadas
- 87.733.672 estimativas de poeira no alinhamento de estrelas
- 14.099 objetos do sistema solar descobertos
- 1.614.173 fontes extragaláticas catalogadas

Os números são assustadores e difíceis de estimar. Vamos ao topo da lista: um bilhão e oitocentos e onze milhões de medições de posições de estrelas. Se um astrônomo resolvesse checar manualmente cada medição, e conseguisse manter a média de uma

medição por segundo, supondo que não dormisse e trabalhasse todos os dias da semana e feriados, demoraria cerca de 60 anos para concluir o trabalho. Como conseguir tirar alguma informação importante no meio de todos esses dados? Por onde começar?

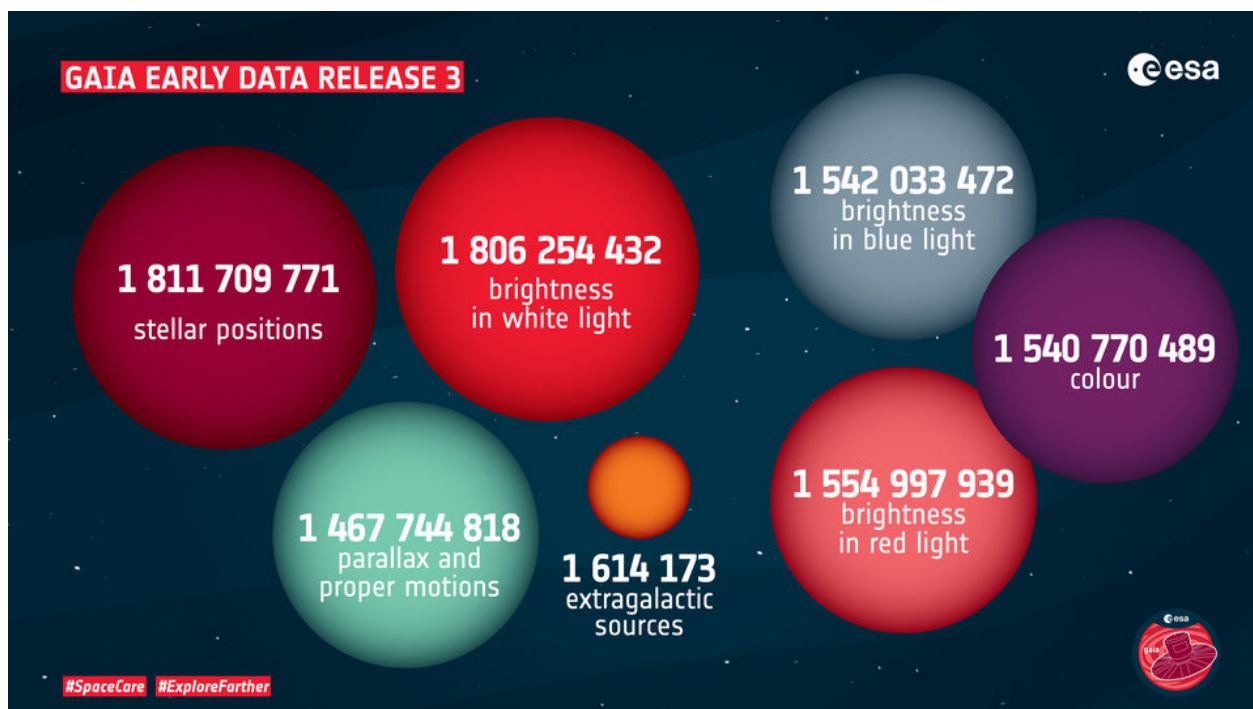


Figura 166 - Imagem de divulgação do *release 3* parcial de dados do observatório GAIA. Fonte: Wikimedia Commons.

Vejam também o caso do Vera Rubin Observatory. Já o mencionamos anteriormente; apesar de ser um telescópio de dimensões comparáveis a vários outros que já se encontram em operação, a combinação entre sua imensa câmera e seu amplo campo de visão possibilitará cobrir todo o céu noturno a cada três dias. O Vera Rubin produzirá 200 mil imagens por ano, que significam 1,28 petabytes de dados (sem compressão). Além disso, a previsão é que os sistemas automáticos de análise de imagens do telescópio devam produzir entre 1 milhão e 10 milhões de alertas de transientes por noite de observação. Esse volume de dados é muito maior do que a capacidade de revisão por seres humanos seria capaz de executar.

Os dois telescópios gêmeos de 4 m de diâmetro — o Mayall, em Kitt Peak, e o Victor Blanco, em Cerro Tololo — e o BOK, de 2,3 m de diâmetro, também localizado em Kitt Peak, estão em reforma para tornar-se telescópios dedicados. O empreendimento foi batizado de DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument). Eles farão nos próximos anos um extenso levantamento espectral de galáxias e quasares distantes. O trabalho cobrirá cerca de um terço do céu noturno (evitando a região da Via Láctea), devendo observar algo em torno de 1,6 bilhão de objetos. O levantamento poderá fornecer preciosas informações sobre a distribuição e características da matéria escura e da energia escura. Outros dois programas similares são o Prime Focus Spectrograph, do Subaru Telescope, e o J-PAS (Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey), que utiliza um telescópio de 2,5 m de diâmetro instalado na Espanha. Esses dois projetos têm colaboração do Brasil.



Os exemplos citados são apenas alguns dos projetos de grande porte que estão em andamento ou em vias de entrar em operação. O já mencionado projeto Pan-STARRS produz diariamente um volume de dados imenso. Nos próximos anos vamos ver os três telescópios gigantes entrando em operação, além do radiotelescópio SKA, que fornecerá um volume de dados ainda maior que o Vera Rubin. A eles vão se somar novos projetos em tecnologias como rádio e altas energias, entre outras. Estamos em uma era em que os dados coletados em pesquisas são extremamente abundantes e há que se encontrar formas de lidar com todo esse volume.

Uma primeira ferramenta quando se trabalha com essa quantidade enorme de dados é o uso de computadores, que já auxilia inicialmente na catalogação, de acordo com critérios adotados pelo grupo de pesquisa. Assim, como primeira abordagem, o grupo do GAIA pode criar uma rotina no programa, onde cada fonte analisada pode, por exemplo, ser catalogada por suas coordenadas, o que já permite que se organize um grande banco de dados com cada objeto observado.

Em um segundo passo, é possível utilizar um software que execute algum tipo de análise nos dados coletados em uma observação, por exemplo, e faça trabalhos que possam ajudar o grupo de pesquisas. Um exemplo são os grupos de busca de supernovas, asteroides e transientes que vimos no capítulo anterior. Todos utilizam softwares que auxiliam o trabalho de pesquisa (ver figura 167). Em todos os casos, temos um banco de dados com imagens de regiões do céu, que são comparadas com imagens captadas pelos grupos de pesquisa. Quando encontra



alguma alteração na imagem obtida, o software a seleciona para que possa ser analisada em maior profundidade por algum membro do grupo, que vai confirmar se realmente mostra o aparecimento de uma supernova ou se houve algum problema com a imagem, ou um asteroide cruzou o campo, ou um raio cósmico comprometeu a observação etc. Esse software pode eventualmente ser aperfeiçoado para que já elimine os eventos mais comuns e o trabalho de revisão fique cada vez mais refinado. Mas isso ainda não é o suficiente.

A ideia por trás do *machine learning*, termo mais utilizado que “aprendizado de máquina” ou “aprendizado automático”, é desenvolver um algoritmo que permita que o software aprenda a partir de sua própria operação. O *machine learning* utiliza um algoritmo baseado no raciocínio indutivo, que extrai regras e padrões a partir de um grande conjunto de dados. Como vimos, a pesquisa astronômica é uma excelente produtora

Figura 167 - Vista de uma das salas de operações do VLT. O trabalho dos astrônomos está cada vez mais associado ao uso de computadores e softwares especializados para lidar com um número sempre crescente de dados coletados. Foto: Francisco Conte.

de grandes conjuntos de dados. O *machine learning* é utilizado em várias aplicações práticas, como no reconhecimento de fala, reconhecimento de escrita, reconhecimento óptico de caracteres e em diagnósticos médicos, por exemplo. Ele já faz parte de nossa vida cotidiana, embora poucas pessoas se deem conta disso.

Existem três tipos de problemas ou tarefas em *machine learning*. O primeiro é chamado de aprendizado supervisionado, em que o programa recebe exemplos de entradas e saídas desejadas, de maneira que o computador compreenda uma regra geral para seu trabalho. O segundo é o aprendizado não supervisionado, em que nenhum tipo de etiqueta é fornecido ao algoritmo de aprendizado, para que o mesmo encontre sozinho seus procedimentos, podendo constituir todo o processo de atuação ou apenas uma parte do trabalho geral. Por fim, temos o aprendizado por reforço, em que o programa atua sozinho em um trabalho dinâmico, no qual deve desempenhar um determinado objetivo (por exemplo, guiar um veículo por um percurso), e algum tipo de resposta é fornecido regularmente ao programa, relativo a seus erros e acertos. Todos esses tipos de tarefa são aplicáveis em astronomia, dependendo do tema de estudo. *Machine learning* e estatística são campos intimamente ligados.

Existem várias abordagens distintas que podem ser utilizadas em *machine learning*. A primeira é conhecida como aprendizado baseado em árvores de decisão, em que uma sequência de decisões realizadas pelo algoritmo mapeia as observações sobre determinado item, atribuindo a esse item um valor objetivo específico. A segunda é o aprendizado por regras de associação, que se utiliza do algoritmo para encontrar relações importantes em uma grande base de dados, com muitas possibilidades de aplicação em projetos de astronomia que geram uma quantidade imensa de dados. As redes neurais artificiais, em que um algoritmo de aprendizado é baseado na estrutura e em aspectos funcionais de uma rede neural biológica, funcionam como neurônios artificiais. Essa estratégia pode ser levada ao extremo, em abordagens do tipo aprendizado profundo, ou *deep learning*, que consiste em múltiplas camadas atuando em uma grande rede neural para tentar emular o funcionamento do cérebro humano. Essas são apenas algumas formas de abordagem utilizadas em *machine learning*, um campo em franco desenvolvimento.

No capítulo anterior comentamos a experiência do Galaxy Zoo, que contava com colaboradores cidadãos, pois na época (2007) os computadores não conseguiam identificar tão bem galáxias por sua morfologia quanto os seres humanos (depois de receber um treinamento básico). Pois apenas três anos após o início do Galaxy Zoo, um artigo assinado por Adam Gauci, Kristian Zarb Adami e John Abela, da Universidade de Malta, expunha o resultado de uma pesquisa feita com alguns algoritmos dedicados à identificação morfológica de galáxias, com 98,4% de acerto para galáxias elípticas, 96,67% para galáxias espirais e 87,50% para galáxias irregulares, estrelas e outros objetos, já superando a capacidade dos humanos.

Outra aplicação interessante foi um algoritmo de *machine learning* conseguir identificar as estrelas que pertenciam a um aglomerado aberto, em um campo bastante povoado de estrelas, tendo recebido apenas os dados relativos a um pacote de imagens feitas com os filtros U-B-V-R-I (ultravioleta, azul, visual, vermelho e infravermelho). Isso mesmo sem ele ter recebido qualquer tipo de aprendizado ou informação na área de formação

e evolução estelar. A quantidade imensa de dados permitiu que o algoritmo encontrasse padrões e conseguisse identificar grupos que possuíam características similares.

Nos próximos anos certamente vamos testemunhar a manutenção dessa sequência de descobertas e novos conhecimentos. Da mesma forma que não sabíamos se existiam outros planetas fora do sistema solar e hoje conhecemos milhares, nos próximos anos talvez encontremos as respostas para questões importantes, tais como se existe vida fora da Terra, ou qual a natureza real da matéria escura e da energia escura. Mas, frente a essas respostas, com certeza surgirão questões ainda mais profundas e mais complexas, que nem sequer sabemos que existem (ver figura 168). Ainda vamos nos maravilhar muito com o que a astronomia tem para nos oferecer nas próximas décadas. Esperemos, pois.

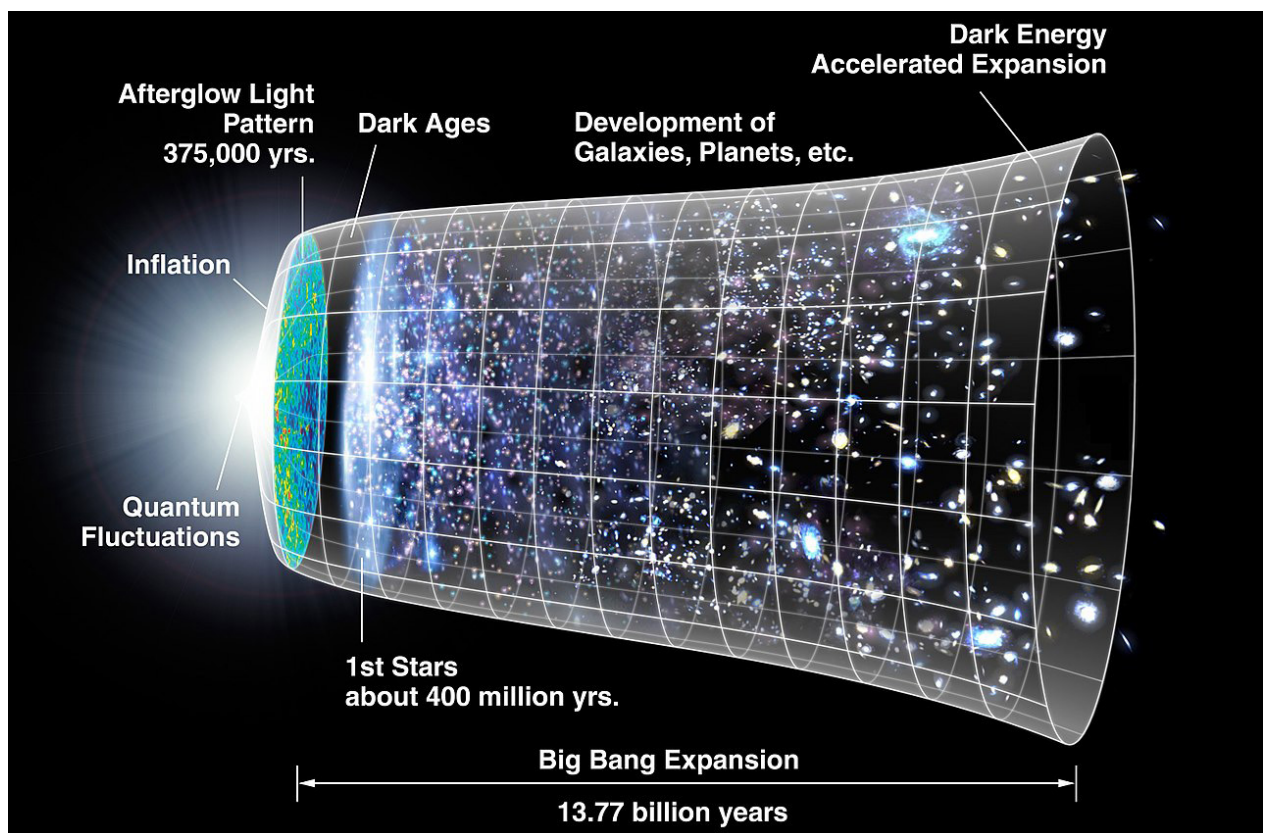


Figura 168 - Ilustração que sintetiza grande parte do conhecimento que temos do nosso universo. Na imagem vemos uma linha do tempo, com o Big Bang à esquerda, a inflação, a radiação cósmica de fundo de micro-ondas (a visão mais antiga que temos do universo) e depois a aceleração da expansão do universo. Quais serão as respostas para nossas questões mais profundas? Fonte: Wikimedia Commons.

## Apêndice 1 – Paralaxe e distâncias

Paralaxe é a mudança aparente de posição de um objeto quando se altera o local da observação. Uma experiência comum para entender como a paralaxe funciona consiste em esticar o braço e apontar algum objeto distante com o dedo e observar que, ao se fechar alternadamente os olhos, a ponta do dedo se move de maneira aparente em relação ao fundo. Se o observador aproximar o dedo de seu rosto e repetir o procedimento, vai perceber que o deslocamento aparente do dedo em relação ao fundo imóvel é maior do que o que ocorreu com o braço esticado, pois a distância entre o objeto observado e os pontos de observação diminuiu.

Na prática, a paralaxe pode ser utilizada para efetuar cálculos de distância. Quando se conhece a distância entre os dois pontos de observação e o ângulo de deslocamento aparente, ou ângulo de paralaxe, é possível calcular a distância do objeto através da trigonometria.

Na astronomia utilizamos a paralaxe para calcular a distância de planetas ou da Lua, bastando fazer duas medições simultâneas em pontos suficientemente distantes na superfície da Terra.

Para o cálculo da paralaxe de estrelas, o método é mais complexo: normalmente são realizadas duas observações com seis meses de diferença entre elas, pois nesse caso os dois pontos de observação estarão separados por duas vezes o raio orbital da Terra, ou 300 milhões de km. Com essa técnica, Friedrich Bessel conseguiu medir pela primeira vez a distância de uma estrela (ver figura 169).

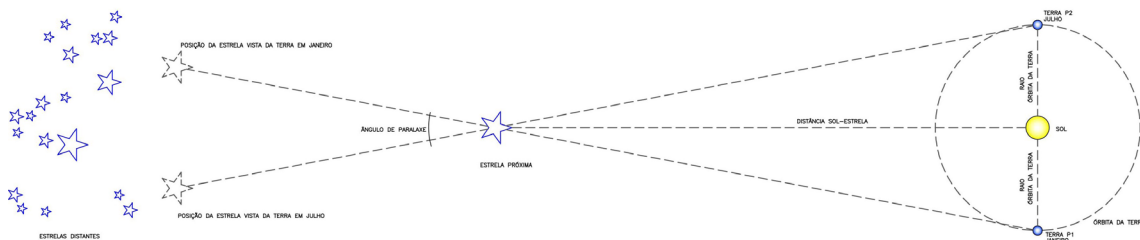


Figura 169 - Paralaxe estelar: a estrela próxima parece se mover em relação às estrelas distantes, quando observada com seis meses de diferença. Conhecendo-se a distância entre os pontos de observação e o ângulo do deslocamento, é possível estimar a distância da estrela. Desenho: Francisco Conte.

A escala gigantesca do universo e as imensas distâncias envolvidas dificultam o uso das unidades com que estamos acostumados, como o metro, ou a milha, por exemplo. A distância entre a Terra e a Lua é de aproximadamente 380 mil km, mas quando falamos dos outros membros do Sistema Solar as distâncias são muito maiores. Seria pouco prático dizer que a distância média entre a Terra e Júpiter é de cerca de 778 milhões de km. Assim, para o Sistema Solar foi adotada uma medida chamada de Unidade Astronômica, ou UA, que equivale à distância média da Terra ao Sol, ou aproximadamente 150 milhões de km. Assim, podemos dizer que a distância média da Terra a Júpiter é de 5,2 UA, ou 5,2 vezes a distância entre a Terra e o Sol. Fica muito mais fácil de compreender as escalas envolvidas.

Mas mesmo a Unidade Astronômica é inadequada para entendermos as distâncias estelares. A estrela mais próxima do Sistema Solar é Alfa Centauri, um sistema triplo. A distância entre Alfa Centauri e o Sol é de 276.363 UA, o que torna muito difícil a compreensão e aplicações práticas desse dado. Assim, foi proposta uma nova unidade, o ano-luz, para podermos compreender as distâncias estelares. O conceito de ano-luz é simples de entender: é a distância percorrida pela luz, que se desloca a cerca de 300 mil km por segundo, durante um ano, o que dá aproximadamente 9,5 trilhões de km (9.500.000.000.000 km). A distância de Alfa Centauri até o Sol é de 4,37 anos-luz. Ou seja, a luz que sai de Alfa Centauri demora mais de quatro anos para chegar até nós. Caso ela parasse de brilhar neste instante demoraria mais de quatro anos para percebermos o ocorrido. Quando olhamos para as estrelas, olhamos para o passado, como elas aparentavam ser há alguns anos, dependendo da distância. O Sol, em comparação, está localizado a apenas 8 minutos-luz, ou seja, a luz do Sol demora aproximadamente 8 minutos para chegar até a Terra, porque a distância da Terra ao Sol é de 150 milhões de km. A luz da Lua demora pouco mais de 1 segundo, pois a distância média entre a Terra e a Lua é de 380.000 km.

No seu trabalho diário, os astrônomos costumam utilizar outra medida para se referir às distâncias estelares: o parsec (abreviado como pc). Para entendermos o parsec é interessante observarmos novamente a figura 169. Nela vemos a medida do ângulo de paralaxe de uma estrela, a partir de dois pontos de observação localizados nos extremos da órbita terrestre, afastados aproximadamente 300 milhões de km (duas unidades astronômicas, ou duas vezes a distância entre a Terra e o Sol). O parsec é, por definição, a distância de um objeto cuja paralaxe seja um segundo de arco, ou 1". Um segundo de arco equivale a um grau dividido por 60, que chamamos de minuto de arco, e depois dividido novamente por 60, ou seja, um ângulo muito pequeno. A distância correspondente ao ângulo de paralaxe de 1" é de aproximadamente 3,26 anos-luz e essa é a medida de 1 parsec. Como vimos anteriormente, mesmo a estrela mais próxima do Sol, Alfa Centauri, está mais distante do que isso, o que implica em um ângulo de paralaxe menor que 1 segundo de arco e distância de 1,34 pc.

Quando falamos em galáxias vamos enfrentar distâncias muito maiores, da ordem de milhões ou bilhões de anos-luz. Nesses casos os astrônomos costumam expressar as distâncias em megaparsecs (Mpc), ou seja, milhões de parsecs, e gigaparsecs (Gpc), bilhões de parsecs.

## Apêndice 2 – Magnitudes

O sistema de magnitudes foi criado na Grécia Antiga pelo astrônomo Hiparco, com o objetivo de avaliar o brilho aparente de cada estrela. Infelizmente o trabalho original não chegou até os nossos dias, mas através da obra de Ptolomeu tivemos acesso a ele. A escala de Hiparco é invertida, com as estrelas mais brilhantes sendo classificadas como de primeira magnitude e as mais apagadas, no limite da visibilidade do olho humano, classificadas como de sexta magnitude.

Em 1856, Norman Pogson formalizou o sistema de magnitudes, mantendo o sistema invertido criado por Hiparco, que já era muito popular entre os astrônomos. Pogson conseguiu estimar a diferença real de luminosidade de cem vezes para cinco magnitudes. Dessa forma, ele concluiu que nosso olho funcionava de maneira logarítmica, com uma razão de 2,512 vezes para a diferença de uma magnitude.

A escala de Hiparco era discreta, com as estrelas recebendo apenas valores inteiros, o que implicava, em muitos casos, que estrelas classificadas com a mesma magnitude possuísem brilhos aparentes diferentes. Já a escala de magnitudes moderna, definida por Pogson, é contínua, com as magnitudes podendo assumir valores fracionários, permitindo estimar com precisão muito maior as diferenças de brilho entre as estrelas.

Pogson considerou a estrela Vega como a estrela de referência, conferindo a ela a magnitude zero. A partir dessas determinações, algumas poucas estrelas que eram mais brilhantes que Vega passaram a ostentar magnitudes negativas. Como exemplo clássico temos Sirius, a mais brilhante estrela do céu noturno, com magnitude -1,46. O Sol apresenta uma magnitude aparente de -26,74 e a lua cheia de -12,9. Vênus na fase de máximo brilho pode chegar a -4,47. É importante notar que aqui estamos tratando de magnitudes aparentes, ou seja, quão brilhante é um objeto para um observador na Terra. Existem casos em que a magnitude é variável: a estrela Mira pode ir de magnitude 2 até 10, ou seja, dependendo da época ela pode ser uma estrela brilhante ou ficar invisível a olho nu.

Um conceito interessante utilizado para comparar a luminosidade das estrelas, propriedade intrínseca a elas, é a magnitude absoluta. Nesse caso, realiza-se um cálculo para se estimar o brilho de qualquer estrela para a distância de 10 parsecs (aproximadamente 32,6 anos-luz). Assim, uma estrela próxima como Sirius teria uma magnitude absoluta de 1,42 (2,88 magnitudes menos brilhante que sua magnitude aparente) e uma estrela distante como Rigel, com magnitude aparente 0,12, teria uma magnitude absoluta de -6,7, mesmo ela sendo uma estrela brilhante para um observador terrestre, muito mais luminosa que Sirius. A Estrela de Barnard, que se situa a apenas seis anos-luz do Sol (Só o sistema Alfa Centauri é mais próximo), é tão pouco luminosa que sua magnitude aparente é de 9,5, sendo invisível a olho nu e possui uma magnitude absoluta de 13,2.

Existe também o conceito de magnitude limite, que é o objeto menos brilhante que se consegue observar em uma determinada situação. Em locais de céu escuro, numa noite sem Lua, o olho humano enxerga até magnitude 6, mas na Avenida Paulista, em São Paulo, dificilmente observará uma estrela com magnitude maior que 3. Um telescópio de 8 m, como o Subaru, consegue observar objetos com magnitude 27,7, e o Hubble Space Telescope até magnitude 31,5.

### Apêndice 3 – Características dos telescópios

Os telescópios ópticos são instrumentos que funcionam a partir de propriedades básicas da luz: refração e reflexão. Telescópios refratores possuem como elemento primário de captação de luz as lentes. Já os telescópios refletores utilizam, para essa função, espelhos. No imaginário popular o telescópio é um instrumento capaz de ampliar as imagens de objetos distantes. Na verdade, o telescópio tem três funções básicas: aumentar o poder de captação de luz, ampliar o tamanho das imagens observadas e aumentar a resolução angular da imagem (melhorar a definição da imagem). Para aplicações científicas, e mesmo na astronomia amadora, a ampliação da imagem é, na maioria das vezes, a função menos importante. A seguir veremos algumas dessas características:

**Coleta de luz** – A capacidade de coleta de luz de um telescópio é simples de entender e está associada à sua área de captação de luz. A coleta de luz cresce com a área da lente objetiva ou espelho primário do telescópio, que normalmente são circulares. Assim, se triplicarmos o diâmetro do espelho primário de um telescópio, seu poder de captação de luz aumentará nove vezes. O diâmetro do elemento primário de um telescópio é também chamado de abertura.

Se compararmos um binóculo que possui duas lentes de diâmetro de 100 mm com um telescópio com uma lente de mesmo diâmetro, constataremos que o binóculo capta o dobro da quantidade de luz do telescópio, mas se compararmos esse mesmo telescópio com outro que possua uma lente com o dobro do diâmetro (200 mm), o poder de captação de luz do segundo instrumento será quatro vezes maior (ver figura 170).

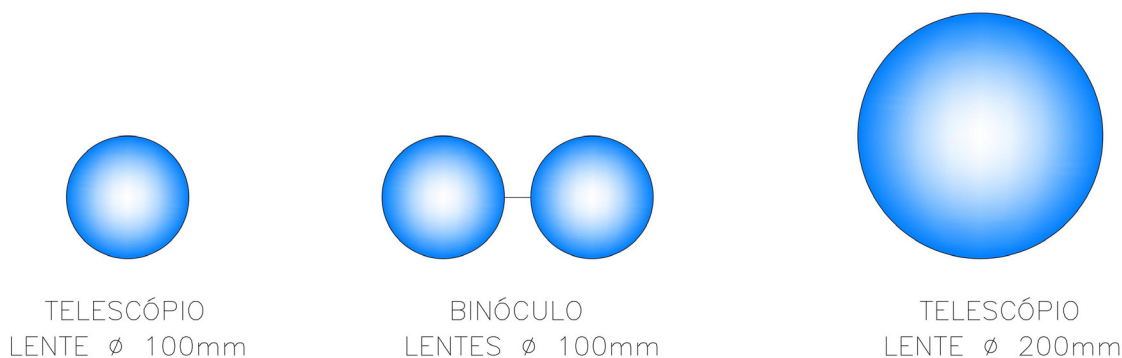


Figura 170 - Desenho que apresenta em escala a lente primária de um telescópio de 100 mm, as duas lentes de um binóculo com lentes com diâmetro de 100 mm e a lente primária de um telescópio de 200 mm de diâmetro. A área de coleta de luz do binóculo é o dobro da do telescópio de 100 mm. O telescópio de 200 mm tem uma área de coleta de luz quatro vezes maior que o telescópio de 100 mm. Desenho: Francisco Conte.

**Resolução angular** – Quando a luz gerada por uma fonte pontual passa por uma abertura, como a boca de um telescópio, ao focar-se em um plano vai ser formada uma imagem com a aparência de um ponto impreciso circundado por fracos anéis concêntricos, como em um alvo. Essa imagem é chamada de disco de Airy, pois foi descrita pela primeira vez por George Airy. Essa propriedade da



luz impõe um limite de definição da imagem captada por qualquer instrumento óptico e pode ser expressa, de maneira simplificada, a partir da seguinte equação:

$$Pr = \frac{120}{D}$$

onde: Pr é o poder resolutivo (resolução angular) em segundos de arco e D é o diâmetro do elemento primário em milímetros.

A resolução será expressa em segundos de arco. Nessa equação, quanto maior o diâmetro da lente primária, ou espelho primário, menores serão os detalhes observados, e portanto melhor será a resolução angular. É importante lembrar que esse limite de resolução é teórico, pois a turbulência atmosférica pode comprometer o ganho de definição pelo aumento do diâmetro. Observando-se a figura 168, podemos fazer algumas ponderações: em relação ao telescópio com lente de 100 mm, o binóculo vai apresentar uma melhor resolução angular, mas apenas no sentido horizontal – não haverá melhoria na definição da imagem no eixo vertical. Já no telescópio com 200 mm de diâmetro haverá um ganho de resolução em todas as direções, mas enquanto a coleta de luz aumenta com a área, ou seja, com o quadrado do diâmetro, a resolução aumenta apenas em razão direta do diâmetro: no caso dos dois telescópios da figura 170, do menor para o maior a resolução angular dobra, enquanto a área de coleta aumenta quatro vezes.

**Aumento da imagem** – Em um telescópio, o aumento da imagem depende da relação entre a distância focal do espelho primário, ou lente, e a distância focal da lente ocular utilizada. Distância focal é a distância entre o elemento óptico (espelhos primários, lentes etc.) e o local onde é formado o foco desse elemento (ver figura 171). A fórmula para o cálculo do aumento é a seguinte:

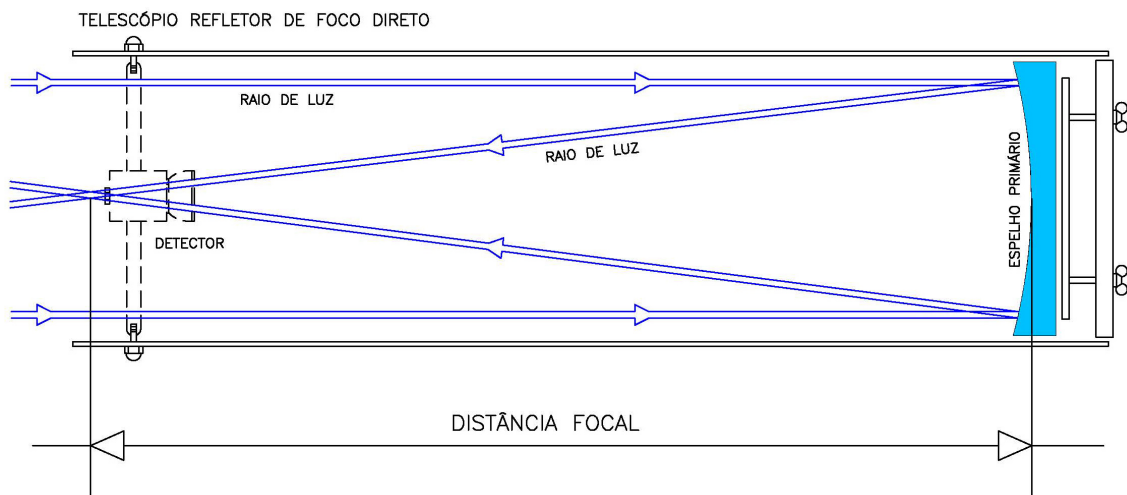


Figura 171 - Distância focal de um telescópio: a distância entre o elemento primário (no caso um espelho) e o ponto onde é formado o foco. Desenho: Francisco Conte.

$$A = \frac{F}{f}$$

onde: A = aumento da imagem; F = distância focal da objetiva; f = distância focal da ocular (as medidas de F e f devem ser expressas na mesma unidade).

Assim, para um telescópio que possui um jogo de oculares, é possível variar o aumento da imagem observada. Imaginemos um telescópio com distância focal de 1000 mm, com duas oculares: uma com distância focal de 8 mm e outra com distância focal de 40 mm. Ao utilizar a primeira ocular o aumento será de 125 vezes, enquanto a segunda proporcionará um aumento de 25 vezes.

## Apêndice 4 – Tipos de telescópios

Os telescópios se dividem em dois tipos básicos: os refratores, que utilizam como elemento principal de sua óptica uma lente, ou conjunto de lentes, e os refletores, que utilizam como elemento principal um espelho. Existem também os telescópios catadióptricos, que combinam os dois sistemas, usando uma lente corretora e um espelho como elementos fundamentais de sua óptica. Além disso, esses tipos principais são divididos em vários subtipos, que possuem ainda variações que aumentam muito a gama de instrumentos utilizados por profissionais e amadores. Abaixo apresentaremos uma descrição dos tipos principais de telescópios disponíveis, comentando, sempre que possível, as suas aplicações e utilidades.

Na figura 6 (Capítulo 1, pág. 17), podemos ver um corte esquemático dos dois tipos básicos de telescópios refratores. Os dois desenhos mostram instrumentos com lentes de mesmo diâmetro. O desenho de cima é o de um telescópio do tipo usado por Galileu, o de baixo mostra um instrumento do tipo desenvolvido por Kepler. Podem-se perceber as diferenças básicas entre os dois tipos: o telescópio galileano é mais compacto, enquanto o kepleriano é maior. Telescópios do tipo kepleriano possuem, portanto, uma distância focal maior e, por conseguinte, um aumento maior da imagem. Além disso, por ocorrer a inversão dos raios luminosos no interior do instrumento, o telescópio kepleriano produz imagens invertidas, ou seja, de cabeça para baixo (o que não é um problema em observações astronômicas). Telescópios refratores são, nos tempos atuais, utilizados quase exclusivamente por astrônomos amadores, e praticamente qualquer modelo disponível no mercado é do tipo kepleriano. Nos instrumentos de grande porte, as lentes tendem a se deformar durante as observações, pois todo o seu enorme peso é suportado apenas pelas bordas. Além disso, a espessura muito grande do bloco de vidro absorve grande parte da luz coletada.

Para o caso dos telescópios refletores, a variedade de tipos é muito maior. Além do newtoniano, que vimos anteriormente, existem os tipos gregoriano e Cassegrain, que são mais utilizados em telescópios de pesquisa, ou por amadores avançados. O telescópio gregoriano foi o primeiro desenho viável para a construção de um telescópio refletor, mas seu idealizador, James Gregor, não conseguiu construir um instrumento antes de Newton. O sistema inventado por Gregor utilizava um espelho primário côncavo, com perfil parabólico, possuindo um orifício na sua região central. A luz que entra pelo tubo óptico é refletida para um espelho secundário de pequenas dimensões, também côncavo e com perfil elipsoidal; este reflete novamente a luz, que passa então pelo orifício do espelho principal, onde é instalada a ocular ou algum tipo de detector. No caminho que a luz percorre entre o espelho principal e o secundário, o feixe de luz é invertido, pois o secundário é instalado após a formação do foco, como pode ser visto na ilustração. Esse fato faz com que a imagem não se forme invertida, como em outros tipos de telescópios refletores (newtoniano e Cassegrain).

Os telescópios do tipo Cassegrain, assim como os do tipo gregoriano, também possuem um orifício na parte central do espelho principal. A luz, que entra pelo

tubo óptico, é refletida pelo espelho principal, côncavo, com perfil parabólico; atinge o espelho secundário, convexo, que possui um perfil hiperbólico, e é direcionada para o orifício do espelho principal, onde são instalados a ocular ou algum tipo de detector. O Cassegrain é de longe o tipo de telescópio mais utilizado em observatórios profissionais e é também muito popular entre os astrônomos amadores. A popularidade dos Cassegrains pode ser atribuída a duas características: são mais compactos que os gregorianos e conseguem observar um maior campo no céu, comparando-se espelhos de mesmo diâmetro (ver figura 172).

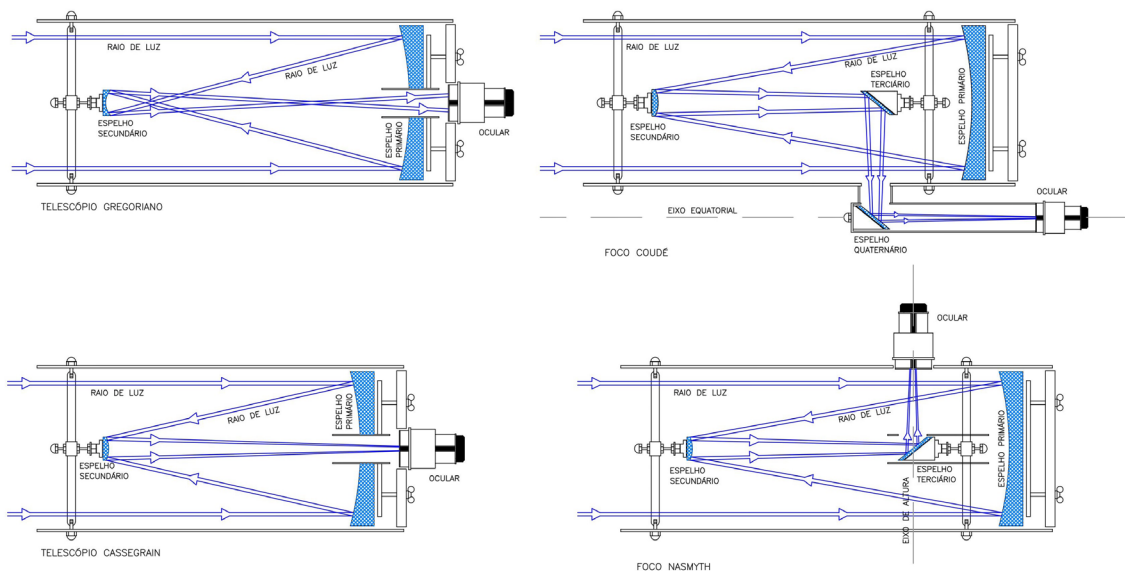


Figura 172 - Desenho de quatro esquemas ópticos de telescópios refletoras: acima, à esquerda, um telescópio gregoriano; abaixo, à esquerda, um telescópio Cassegrain; acima, à direita, um telescópio com foco Coudé e abaixo, à direita, um telescópio com foco Nasmyth. Desenho: Francisco Conte.

Para instrumentos profissionais existem dois tipos de telescópios com desenhos ópticos mais complexos, que são o Coudé e o Nasmyth. O foco do tipo Coudé é sempre utilizado em associação com telescópios com montagens equatoriais, que veremos no próximo apêndice. O Coudé tem como característica um design semelhante ao dos telescópios do tipo Cassegrain, mas seu espelho primário não possui um orifício em seu centro, pois um espelho plano inclinado em um ângulo de 45°, localizado entre os espelhos primário e secundário, desvia o feixe de luz para a lateral do instrumento, como em um telescópio newtoniano. Na área externa do telescópio, um segundo espelho plano inclinado desvia o feixe de luz para a parte posterior do aparelho, exatamente no alinhamento do eixo primário do telescópio. Dessa forma, mesmo com o aparelho em movimento, o foco vai ser formado sempre no mesmo local. Os telescópios do tipo Nasmyth, por sua vez, são usados para proporcionar um foco estático para telescópios com montagem do tipo altazimutal. A configuração é mais simples que a do tipo Coudé, e se assemelha à solução encontrada nos telescópios newtonianos. O feixe de luz que é refletido pelo espelho secundário é desviado para a lateral do

instrumento por um espelho plano inclinado a 45°, o que permite que os sistemas de captação de imagens sejam instalados em um suporte ao lado do telescópio. Isso viabiliza a instalação de pesados equipamentos de captação de imagens sem comprometer o equilíbrio do conjunto. Esse espelho pode ser ainda girado para o lado oposto, permitindo a instalação de dois módulos distintos de sensores (ver figura 172). Essa configuração é muito utilizada nos telescópios de pesquisa de nova geração.

Na figura 173 podemos ver dois tipos de telescópios catadióptricos, também conhecidos como telescópios compostos: à esquerda um Schmidt-Cassegrain e à direita um Maksutov. Os telescópios do tipo catadióptico surgiram apenas a partir da década de 1930, e usam tanto lentes como espelhos como elementos principais de sua óptica. Os telescópios do tipo Schmidt-Cassegrain utilizam uma placa corretora (lente), um espelho primário côncavo de perfil esférico e um espelho secundário hiperbólico, em um arranjo bastante similar ao dos Cassegrains. Os telescópios que adotam essa configuração são muito compactos e se tornaram populares entre astrônomos amadores avançados, posto que são oferecidos por vários fabricantes comerciais.

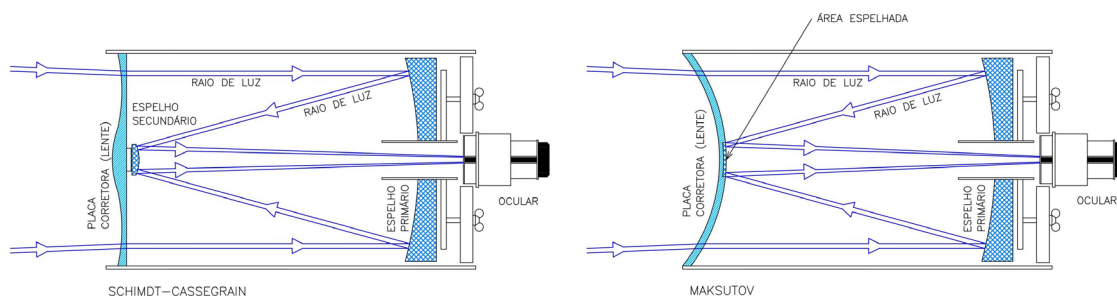


Figura 173 - Esquemas ópticos de dois telescópios catadióptricos: à esquerda um Schmidt-Cassegrain e à direita um Maksutov. Desenho: Francisco Conte.

Os telescópios do tipo Maksutov, também bastante utilizados por astrônomos amadores avançados, têm configuração óptica similar à dos telescópios do tipo Cassegrain, mas, como característica fundamental de projeto, todos os seus elementos ópticos são esféricos. O feixe de luz entra pela boca do telescópio, onde há uma placa corretora, que é uma lente côncava de perfil esférico (nas duas superfícies) e é direcionado para o final do tubo óptico, onde existe o espelho primário, também côncavo e esférico. Este reflete a luz na direção do centro da parte posterior da placa corretora, que é aluminizado e funciona como um espelho, direcionando o feixe de luz para o orifício no centro do espelho primário, onde se instalam as oculares ou sensores de captação de imagem. Os telescópios do tipo Maksutov são muito compactos, sendo tecnicamente quase impossível construir telescópios desse tipo com espelhos primários de grandes dimensões.

## Apêndice 5 – Montagens

Logo nos primórdios da era dos telescópios, ficou claro que algum tipo de suporte era necessário para auxiliar os astrônomos em suas observações. No início as exigências para uma boa montagem (nome dado a esse tipo de mecanismo) eram muito simples, tipicamente um tripé com algum tipo de presilha que permitisse ao astrônomo apontar o seu instrumento para qualquer direção no céu.

No século XIX, com a introdução das chapas fotográficas, o papel das montagens foi radicalmente alterado, pois, como mencionado anteriormente, a fotografia tem a capacidade de acumular a luz dos objetos através de exposições prolongadas. A partir desse momento, as montagens deveriam ser capazes de acompanhar precisamente o movimento de um objeto no céu. A única solução possível naquela época era a utilização de montagens do tipo equatorial, e essa situação se manteve inalterada por aproximadamente um século, até o surgimento das primeiras montagens do tipo altazimutal controladas por computadores, na década de 1970. A seguir vamos fazer uma pequena descrição desses dois tipos de montagens.

Montagens equatoriais são aquelas que possuem um eixo (eixo primário) alinhado com o eixo de rotação da Terra. Dessa forma, depois de localizar determinado objeto no céu, basta girar o eixo primário na velocidade correta, e o telescópio fará o acompanhamento preciso do alvo por longos períodos de tempo. Isso pode ser realizado com a introdução de um único motor. A utilização de montagens desse tipo permitiu a observação de objetos celestes de muito pouco brilho. Na figura 174 vemos uma montagem equatorial do tipo germânico (à esquerda), na qual o eixo primário, que está alinhado com o polo celeste, aparece representado pela linha tracejada vermelha. O telescópio é instalado em um dos lados da montagem, e no lado oposto é instalado um contrapeso

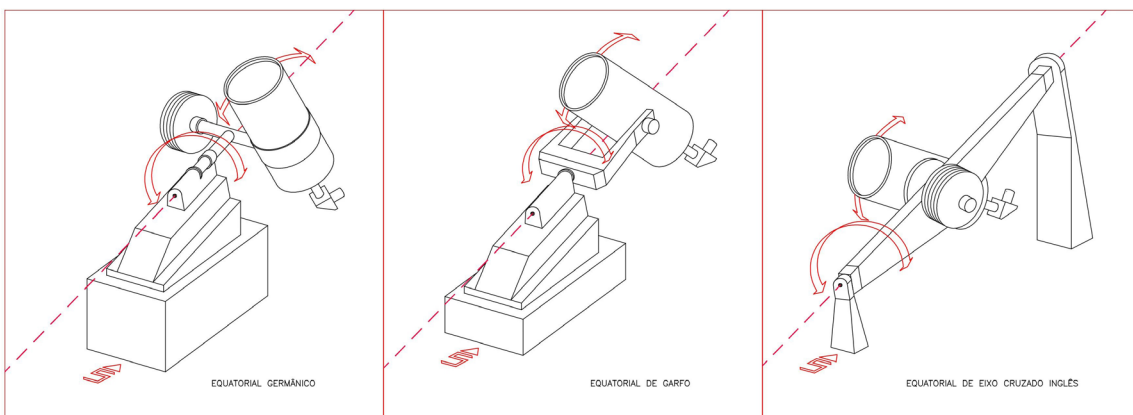


Figura 174 - Três tipos diferentes de montagens equatoriais: à esquerda, equatorial germânica; no centro, equatorial de garfo e, à direita, equatorial de eixo cruzado inglês. Desenho: Francisco Conte.

que equilibra o conjunto. Esse tipo de montagem foi utilizado em profusão em telescópios profissionais no final do século XIX, a era do auge e ocaso dos grandes refratores. Vemos montagens desse tipo nos observatórios Yerkes, Lick,

de Meudon e em muitos outros. Para instrumentos de maior porte, as montagens equatoriais do tipo germânico ficariam muito pesadas e caras, tornando-se impraticáveis.

Existem vários tipos diferentes de montagens equatoriais. Ainda na figura 174, podemos ver mais duas soluções: à esquerda uma montagem do tipo “garfo” e à direita um exemplar do tipo eixo cruzado inglês, utilizada no telescópio refletor Harlan J. Smith, do Observatório McDonald, com 2,70 m de diâmetro. Na figura 175 vemos mais três exemplos de montagens do tipo equatorial, todas variações do que chamamos de equatorial de berço. A da esquerda é muito similar àquela utilizada pelo telescópio Hooker, de 2,50 m de diâmetro, localizado em Monte Wilson, na Califórnia. Esse tipo específico de montagem apresenta um problema prático, pois o posicionamento do pivô que permite o giro do eixo primário impede a observação das áreas polares. Na variação do centro, chamada de “equatorial de ferradura”, esse problema é solucionado: o espaço vazio no centro da “ferradura” permite a observação dessas áreas. Esse tipo de montagem foi utilizado no telescópio Hale, em Monte Palomar. O último tipo é uma variação do

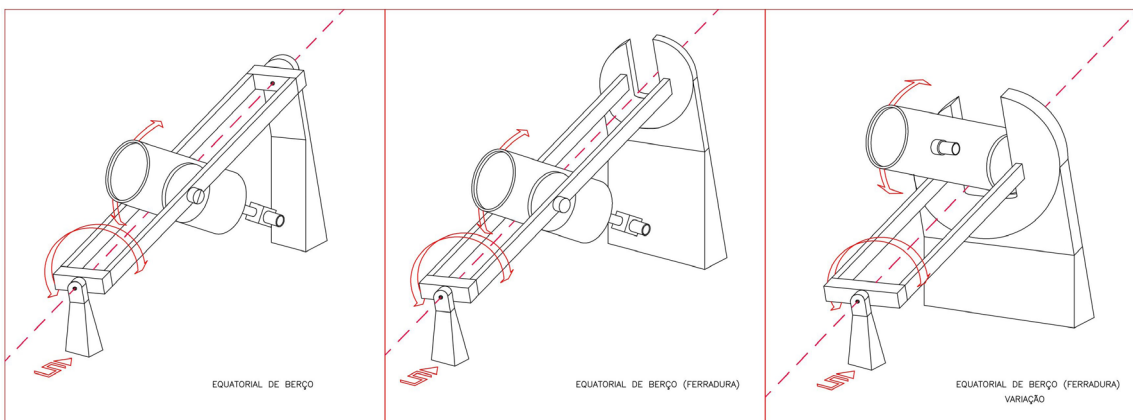


Figura 175 - Três tipos de montagens equatoriais de berço: com pivô (que impede a observação da área polar), ferradura e variação da ferradura. Desenho: Francisco Conte.

tema da ferradura.

Montagens do tipo altitude-azimute, ou altazimutal, são muito mais simples e compactas que as equatoriais. O telescópio é guiado por dois eixos, um que permite o giro azimutal, ou seja, em todas as direções desde o norte até o sul, e outro eixo, independente do primeiro, que controla o ângulo de altura durante a observação (ver figura 176). Esse tipo de montagem é muito usado por astrônomos amadores, especialmente devido a uma variação desenvolvida por John Dobson, conhecida como dobsoniana. No caso dos instrumentos profissionais, ele não era utilizado até meados dos anos 1970, quando o advento de computadores permitiu que se controlassem e coordenassem os três motores necessários ao acompanhamento de objetos no céu: um para o eixo de altitude, outro para o eixo azimutal e um terceiro para girar a câmera, acompanhando o movimento de giro do campo celeste. Por ser um tipo de montagem muito mais compacta e barata que as equatoriais, é utilizada por praticamente todos os telescópios de médio e grande porte construídos a partir de 1980. Para ter ideia dessas diferenças, basta perceber que a montagem equatorial que opera o telescópio Hale em Monte

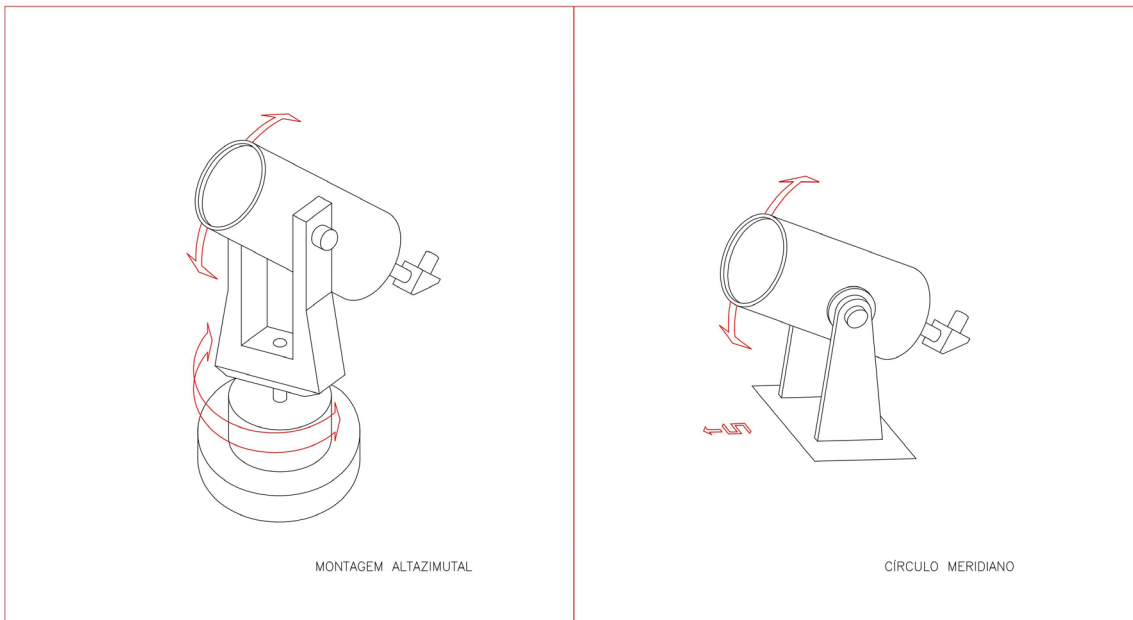


Figura 176 - À esquerda vemos uma montagem do tipo altazimutal e à direita um círculo meridiano. Desenho: Francisco Conte.

Palomar, com 5 m de diâmetro, é muito maior que as que operam os telescópios Keck, no Havaí, com 10 m de diâmetro.

Apesar de suas vantagens, as montagens do tipo altazimutal possuem também algumas limitações. Mesmo com uma tecnologia avançada de controle de guiagem, elas são incapazes de acompanhar de maneira gradual objetos localizados próximos ao zênite, impedindo a realização de observações, justamente na área do céu em que a influência da atmosfera é menor e as imagens obtidas possuem maior definição angular. Mesmo assim, as vantagens que esse sistema possui compensam as limitações.

Um tipo de montagem bastante específico, que hoje em dia está caindo em desuso, é o círculo meridiano. Esse tipo de montagem era utilizado por telescópios que trabalhavam apenas com astrometria (ver figura 176). Nas montagens do tipo círculo meridiano, o conjunto só se movimenta em elevação, com o alinhamento azimutal fixo na direção do meridiano local (direção norte-sul). Hoje, porém, o desenvolvimento dos computadores permite a realização de precisas medições astrométricas sem a necessidade da observação ser realizada no sentido do meridiano local.

Mais recentemente encontramos dois tipos de montagens desenvolvidos para instrumentos específicos e propósitos especiais. No Hobby-Eberly Telescope e no seu gêmeo do hemisfério sul, o SALT, encontramos um tipo de montagem com inclinação fixa e movimentação apenas no sentido azimutal. Essa configuração permite a observação de 70% do céu noturno, com um custo de produção muito menor que uma montagem do tipo altazimutal, possibilitando a construção de telescópios gigantes com um custo muito baixo.



Por último, vamos mencionar as montagens giratórias utilizadas em telescópios de espelhos líquidos. Esse tipo de telescópio, empregado durante um período por algumas instituições, usa o elemento mercúrio em uma plataforma giratória, cuja velocidade acaba por garantir que o metal líquido assuma um perfil parabólico, excelente para observações astronômicas, por ter um custo muito inferior ao de um espelho convencional (ver figura 177). O conceito tinha seus problemas, pois obrigava os operadores a usar máscaras para evitar intoxicação pelos vapores de mercúrio, que também tinha a tendência a oxidar com o passar do tempo, exigindo procedimentos de purificação periodicamente. Além disso, o telescópio de espelhos líquidos só pode observar a região zenital. Talvez por essas razões o uso desse tipo de instrumento está cada vez mais raro, com vários dos telescópios existentes sendo desativados.

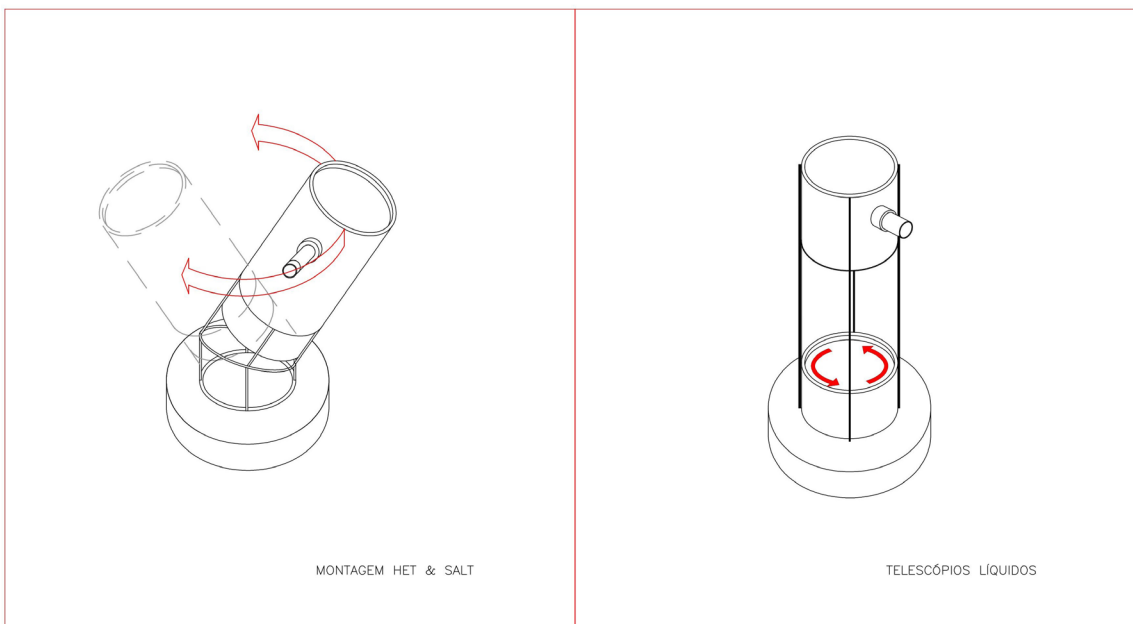


Figura 177 - Desenho que ilustra dois tipos de montagens desenvolvidos para baratear o custo de construção de telescópios ópticos: À esquerda vemos uma montagem azimutal com inclinação fixa, utilizada no Hobby-Eberly Telescope e no South African Large Telescope, que apesar das limitações mostrou um desempenho muito satisfatório, continuando em operação. À direita vemos uma montagem típica para a utilização em telescópios de espelhos líquidos, que utilizam o metal mercúrio como elemento óptico. Esta parecia ser uma opção promissora para o uso em astronomia, mas nos últimos anos, temos observado a paulatina desativação da maioria dos instrumentos deste tipo. Desenho: Francisco Conte.

## Apêndice 6 – Diagrama HR

O Diagrama HR é provavelmente a mais importante ferramenta utilizada para compreender os processos de evolução estelar. Nele podemos relacionar a distribuição das estrelas em função de sua temperatura (eixo horizontal, crescendo da direita para a esquerda) e de sua luminosidade (eixo vertical, crescendo de baixo para cima).

A primeira constatação que fazemos quando coletamos dados de um grupo bastante numeroso de estrelas, como uma galáxia, é que aproximadamente 90% do total de estrelas vai se concentrar em uma faixa que cruza em diagonal o diagrama, indo do canto superior esquerdo (estrelas quentes e luminosas) até o canto inferior direito (estrelas frias e pouco luminosas). A essa faixa damos o nome de Sequência Principal. Hoje sabemos que ela corresponde a uma fase

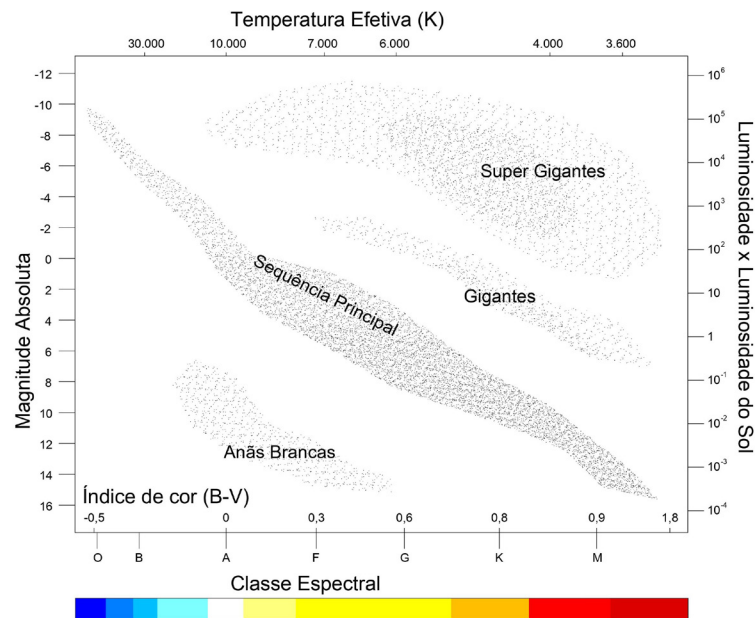


Figura 178 - Desenho típico de um Diagrama HR, onde podem ser observadas as principais subdivisões de estrelas: Sequência Principal; ramo das gigantes; ramo das supergigantes e anãs brancas. Desenho: Francisco Conte.

evolutiva das estrelas, em que elas passam a maior parte de sua vida, e durante a qual elas estão realizando a fusão de hidrogênio, com produção de hélio no núcleo da estrela. Além disso, a Sequência Principal apresenta uma relação com as massas das estrelas que a compõem: as estrelas com mais massa se localizam na parte superior esquerda (estrelas quentes e luminosas), enquanto as mais frias localizam-se na parte inferior direita (estrelas frias e apagadas), estas últimas representando de longe o tipo mais comum de estrelas, as anãs vermelhas. O Sol localiza-se no trecho central da Sequência Principal, com classe espectral G. Exemplos de estrelas quentes e luminosas são Spica e Zeta Eridani. Entre as estrelas do tipo anã vermelha estão a Estrela de Barnard e a Próxima Centauri, que, embora sejam das mais próximas ao sistema solar, não são visíveis a olho nu, devido a sua baixíssima luminosidade (ver figura 178).

Acima da Sequência Principal, vemos dois grupos de estrelas: o ramo das gigantes e o das supergigantes. Os dois grupos são formados por estrelas que já estão em suas fases finais de vida. Como exemplo de estrelas gigantes podemos apontar Polux, Mira e Aldebaran. As estrelas deste grupo têm baixa temperatura de superfície, mas uma luminosidade alta, o que indica que possuem diâmetros

muito grandes quando comparadas às estrelas da Sequência Principal. Lembrando que o principal fator para a luminosidade da estrela é sua temperatura, seguido de seu volume.

As estrelas localizadas na faixa das supergigantes são as mais luminosas conhecidas. Elas se dividem em dois grupos principais: supergigantes azuis e supergigantes vermelhas (as maiores estrelas conhecidas). Estes grupos de estrelas estão em seu estágio final de vida e passam uma parte muito pequena de sua existência nessa fase. Como exemplos de estrelas supergigantes azuis temos Rigel e Deneb, enquanto Antares e Betelgeuse são exemplos de supergigantes vermelhas. Boa parte das estrelas classificadas como gigantes ou supergigantes podem apresentar variação no brilho.

Por último, temos as anãs brancas, que são o estágio final de vida das estrelas de baixa massa. Na verdade essas estrelas nem sequer produzem mais a fusão nuclear em seu núcleo. Elas são muito pequenas, com o diâmetro parecido com o do planeta Terra, mas com uma massa que muitas vezes é maior que a massa do Sol, o que confere às anãs brancas uma densidade extremamente alta. São estrelas extremamente quentes, mas com luminosidade muito baixa devido ao seu pequeno diâmetro. São exemplos de anãs brancas as estrelas Sirius B e Procyon B.

## Apêndice 7 – Espectro eletromagnético

Desde o século XIX já se sabia que tanto cargas elétricas como ímãs possuíam a capacidade de alterar as regiões em torno deles, e com base nesse fenômeno criou-se o conceito de campo, que pode ser percebido na ação de um ímã sobre limalha de ferro (campo magnético) ou quando sentíamos nossos cabelos se eriçando quando próximos a um aparelho antigo de televisão sendo desligado (campo elétrico). Os cientistas descobriram que os campos elétricos e magnéticos estavam relacionados intimamente, pois a passagem de corrente elétrica criava um campo magnético ao seu redor, assim como as oscilações em um campo magnético criavam correntes elétricas em seu entorno. Foi o físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) que completou o trabalho de correlacionar matematicamente a eletricidade e o magnetismo, através de quatro equações que hoje são conhecidas como Equações de Maxwell. Ele também previu, com base em sua teoria, a existência da radiação eletromagnética e que sua propagação seria feita através de ondas que não necessitariam de um meio físico para se deslocar. Esse fato foi constatado 17 anos depois por Heinrich Hertz.

Na radiação eletromagnética os campos elétrico e magnético sempre estão dispostos de maneira perpendicular entre si e a onda se propaga numa direção perpendicular a ambos os campos (ver figura 179). É dessa forma que a luz visível, assim como todos os outros tipos de radiação eletromagnética, se desloca e transporta sua energia através do vácuo.

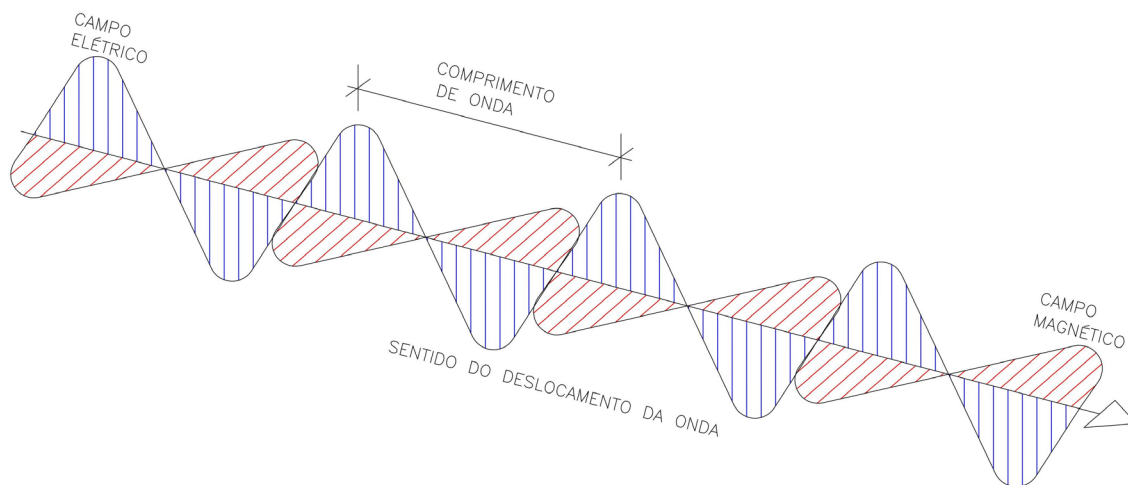


Figura 179 - Deslocamento de uma onda do espectro eletromagnético. O campo elétrico é perpendicular ao campo magnético e ambos são perpendiculares ao sentido de propagação da onda. Também é possível observar na figura o comprimento de onda, definido pela distância entre dois picos, que vai caracterizar o tipo de onda eletromagnética (visível, infravermelho etc.). Desenho: Francisco Conte.

Todas as formas de radiação eletromagnética, das ondas de rádio aos raios gama, passando pela luz visível, possuem algumas propriedades comuns, que veremos seguir:

1. Ondas eletromagnéticas podem se deslocar no vácuo, ao contrário de outros tipos de ondas, como as ondas sonoras, que necessitam de um meio físico para se propagar.
2. Todas as formas de REM (radiação eletromagnética) viajam no vácuo em linha reta, à mesma velocidade, que chamamos de  $c = 299.800 \text{ km/s}$  (a chamada velocidade da luz). Em meios mais densos, como o ar ou a água, a velocidade será sempre menor, e seu valor dependerá diretamente das características do meio em questão.
3. Chamamos de *comprimento de onda* (indicado pela letra grega  $\lambda$ , ou lambda), a distância entre o topo de duas cristas de onda consecutivas (ou o ponto mais baixo de dois vales consecutivos). As unidades de medida mais comuns para  $\lambda$  são o angstrom (indicado por Å), que vale  $10^{-10} \text{ m}$ , e o nanômetro (nm), que vale  $10^{-9} \text{ m}$ . Fica claro que cada nanômetro corresponde a dez angstroms. Cada um dos tipos de radiação eletromagnética tem seu comprimento de onda característico. Assim, a luz visível apresenta comprimentos de onda que vão desde aproximadamente  $4000 \text{ Å}$  (violeta) até quase  $7000 \text{ Å}$  (vermelho).
4. Outra propriedade das ondas eletromagnéticas é a frequência ( $f$ ), que pode ser definida como o número de ondas que passam por um determinado ponto por segundo. A frequência é geralmente medida em hertz (Hz), que significa um ciclo por segundo, e seus múltiplos, quilo-hertz, mega-hertz, giga-hertz.
5. Outra característica da radiação eletromagnética é que o seu comprimento de onda e a sua frequência são inversamente proporcionais. Ou seja: quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda, e quanto maior o comprimento de onda, menor a frequência. O produto do comprimento de onda pela frequência nos dará a velocidade da onda (no caso, a velocidade da luz). Em outras palavras, comprimento de onda e frequência relacionam-se pela equação:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Ao conjunto de todos os tipos de radiações eletromagnéticas, classificadas por seu comprimento de onda, ou por sua frequência, chamamos *espectro eletromagnético*. A tabela da página seguinte mostra o espectro eletromagnético completo, dividido em suas principais regiões, segundo seus parâmetros de identificação. É possível perceber, pela tabela, como é pequena a faixa de comprimentos de onda que correspondem à luz visível: variando apenas 300 nanômetros (um nanômetro equivale a  $10^{-9} \text{ m}$ ). Compare este intervalo com as faixas de rádio e infravermelho, por exemplo.

Tabela 1 – Comprimentos de onda em nanômetros e em centímetros e frequências para as regiões do espectro eletromagnético. Tabela: Francisco Conte.

Região	Comprimento de onda (nanômetros)	Comprimento de onda (centímetros)	Frequência (Hz)
Rádio	$> 10^8$	$> 10$	$< 3 \times 10^9$
Micro-ondas	$10^5$ a $10^8$	0,01 a 10	$3 \times 10^9$ a $3 \times 10^{12}$
Infravermelho	700 a $10^5$	$7 \times 10^{-5}$ a 0,01	$3 \times 10^{12}$ a $4,3 \times 10^{14}$
Luz visível	400 a 700	$4 \times 10^{-5}$ a $7 \times 10^{-5}$	$4,3 \times 10^{14}$ a $7,5 \times 10^{14}$
Ultravioleta	1 a 400	$10^{-7}$ a $4 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{14}$ a $3 \times 10^{17}$
Raios X	0,01 a 1	$10^{-9}$ a $10^{-7}$	$3 \times 10^{17}$ a $3 \times 10^{19}$
Raios gama	$< 0.01$	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$

Milhões de anos de evolução fizeram com que nossos olhos, que na verdade não passam de *detectores* extremamente sofisticados, se desenvolvessem para captar o máximo de radiação que vem do Sol, que é uma estrela amarela que emite radiações eletromagnéticas em uma ampla faixa de comprimentos de onda – mas apresenta o máximo de sua emissão exatamente na faixa da luz visível. A fisiologia de nossos olhos simplesmente se adaptou à nossa estrela.

Da mesma forma que podemos dividir as várias faixas do espectro eletromagnético por seus correspondentes comprimentos de onda e frequências, também podemos fazer o mesmo com as diversas cores da luz visível. Na tabela que apresentamos a seguir podemos ver uma relação entre os comprimentos de onda e as frequências correspondentes a cada cor do espectro visível:

Tabela 2 – Comprimentos de onda e frequências respectivas das cores da luz visível. Tabela: Francisco Conte.

Cor	Comprimento de onda (nanômetros)	Frequência (* $10^{14}$ Hz)
Violeta	400 a 460	7,5 a 6,5
Índigo	460 a 475	6,5 a 6,3
Azul	475 a 490	6,3 a 6,1
Verde	490 a 565	6,1 a 5,3
Amarelo	565 a 575	5,3 a 5,2
Laranja	575 a 600	5,2 a 5,0
Vermelho	600 a 700	5,0 a 4,3

## BIBLIOGRAFIA

- ABDALLA, M. C.; VILLELA NETO, T. **Novas janelas para o Universo**. São Paulo: Fundação da Editora da UNESP (FEU), 2005.
- ANDERSEN, G. **The telescope**: Its history, technology, and future. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press. 2007. (Publicado inicialmente na Austrália e Nova Zelândia com o título **Eye on the sky**, Exisle Publishing, 2006).
- ANJOS, J.; SHELLARD, R. C.; TORRES DE MELO NETO, J. R. Raios cósmicos – Energias extremas no Universo. **Revista do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas**. Campinas, SP: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2004, pp. 74-93.
- ARSENAULT, R. et al. The adaptive optics facility: Commissioning progress and results. **The Messenger**, n. 168. Parsdorf, Alemanha: ESO, 2017, pp. 8-14.
- ASIMOV, I. **Alpha Centauri**, Título original: Alpha Centauri, the nearest star. Rio de Janeiro, RJ: Livraria Francisco Alves Editora, 1981.
- ASIMOV, I. **Saturno**. Título original: Saturn and beyond. Rio de Janeiro, RJ: Livraria Francisco Alves Editora, 1981.
- BARTUSIAK, M. **The day we found the Universe**. New York, USA: Vintage Books, 2010.
- BIRNEY, D. S.; GONZALEZ, G.; OESPER, D. **Observational Astronomy**. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.
- BRUNIER, S.; LAGRANGE, A.-M. **Great observatories of the world**, Título original: Les grands observatoires du monde. Buffalo, NY, USA: Firefly Books, 2005.
- CAPOZZOLI, U. **No reino dos astrônomos cegos**: Uma história da radioastronomia. Rio de Janeiro, RJ: Distribuidora Record de Serviços de Imprensa, 2005.
- CHEN, P. K.; SINNOTT, R. W. e TYTELL, D.; SCHILLING, G. Visions of today's giant eyes; A galaxy of telescopes; Giant eyes of the future. (Três artigos em uma edição especial.) **Sky and Telescope**. Cambridge, Massachusetts, USA: Sky Publishing Corporation, agosto de 2000, pp. 34-56.
- CROWTHER, P.; SCHNURR, O.; BOFFIN, H. **Stars just got bigger – A 300 solar mass star uncovered**. ESO 1030, 21/07/2010. Disponível em: <https://www.eso.org/public/news/eso1030/> . Acesso em 18/06/2020.
- DAMINELI, A. **Hubble – A expansão do Universo**. São Paulo, SP: Odysseus Editora, 2003.
- DAMINELI, A; STEINER, J. **Fascínio do universo**. São Paulo, SP: Odysseus Editora, 2010.
- DOELEMAN, S. S. et al. **Astronomers capture first image of a black hole**. ESO 1907, 10/04/2019. Disponível em: <https://www.eso.org/public/news/eso1907/?lang>. Acesso em 18/06/2020.
- ESO European Southern observatory. Disponível em <https://www.eso.org> Acesso em: 12/12/2020.

- FRIAÇA, A. C. S. et al. **Astronomia, uma visão geral do Universo**. São Paulo, SP: Edusp Editora, segunda edição, 2003.
- GALAXY ZOO. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy\\_Zoo](https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy_Zoo). Acesso em: 21/01/2021.
- GAMMA, E. Liquid Astronomy. **Sky and Telescope**. Cambridge, Massachusetts, USA: Sky and Telescope Media, abril de 2013, pp. 26-30.
- GILMOZZI, R.; LABEYRIE, A. Telescópios gigantes do futuro e hipertelescópios de amanhã. **Scientific American Brasil**, edição especial História do telescópio. São Paulo: Duetto Editorial, 2007.
- GUZZO, M. M. Neutrinos – As misteriosas partículas-fantasmas. **Revista do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas**. Campinas, SP: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2004, pp. 124-139.
- HERBERT, N. **A realidade quântica**. Título original: Quantum reality. Rio de Janeiro, RJ: Livraria Francisco Alves Editora, 1989.
- HOFMANN, W. The Cherenkov Telescope Array: Exploring the very-high-energy sky from ESO's Paranal site. **The Messenger**, n. 168. Parsdorf, Alemanha: ESO, 2017, pp. 21-26.
- JAYAWARDHANA, R. The age of Behemoths. **Sky and Telescope**. Cambridge, Massachusetts, USA: Sky Publishing Corporation, fevereiro de 2002, pp 30-37.
- KING, H. C. **The history of the telescope**. Unaltered republishing of the work originally published in 1955. Mineola, NY, USA: Dover Books, 2003.
- KITCHIN, C. **Astrophysical techniques**. 5th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press-Taylor & Francis Group, 2009.
- KITCHIN, C. **Telescopes and techniques**: An introduction to practical astronomy. 2nd ed. London, UK: Springer-Verlag, 2003.
- LIGO Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. Disponível em <https://www.ligo.caltech.edu/> Acesso em: 19/08/2020.
- LOWE, J. Tomorrow's monster telescopes. **Sky and Telescope**. Cambridge, Massachusetts, USA: New Track Media, abril de 2008, pp. 20-25.
- MARTÍNEZ-DELGADO, D. **Ultra-deep imaging with amateur telescopes**. Heidelberg, Germany: Proceedings IAU Symposium, 2019.
- MATSUURA, O. et al. **História da Astronomia no Brasil**. Vols. I e II, Rio de Janeiro/Pernambuco: Museu de Astronomia e Ciências Afins/Cepe Editora, 2013.
- McGRAY, W. P. **Giant telescopes**: Astronomical ambition and the promise of technology. 1st paperback ed. Cambridge, Massachusetts, USA: Harvard University Press, 2004.
- MEECH, K. J. et al. **ESO observations show first interstellar asteroid is like nothing seen before**. ESO 1737, 20/11/2017. Disponível em: <https://www.eso.org/public/news/eso1737/?lang>. Acesso em: 18/06/2020.



- MILHORN, H. T. **The history of Astronomy and Astrophysics**. College Station, USA: Virtualbookworm.com Publishing Incorporation., 2008.
- MITTON, J. **Cambridge illustrated dictionary of Astronomy**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- MITTON, J.; HUGHES, D.; DINWIDDIE, R.; JOHNSON, P.; JACKSON, T. **The Astronomy book**. London, UK: Penguin Random House, 2017.
- MOURÃO, R. R. F. **As inteligências extraterrestres**. 2ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Livraria Francisco Alves Editora, 1982.
- MOURÃO, R. R. F. **Em busca de outros mundos**. Rio de Janeiro, RJ: Livraria Francisco Alves Editora, 1982.
- MURDIN, P.; PENSTON, M. (eds.) **The Firefly encyclopedia of Astronomy**. Buffalo, NY, USA: Firefly Books Inc., 2004.
- NASA National Aeronautics and Space Administration. Disponível em <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/dictionary/Astronomy.html> Acesso em: 23/12/2020.
- NOBEL PRIZE. Disponível em <https://www.nobelprize.org/> Acesso em: 25/07/2020.
- OVERBYE, D. **Corações solitários do cosmo**. Título original: Lonely hearts of the cosmos. São Paulo, SP: Editora Mercuryo, 1991.
- RIDPATH, I. **Oxford dictionary of Astronomy**. 2nd ed. New York, USA: Oxford University Press, 2007.
- RIGAUT, F. **A brief history of adaptive optics**. Powerpoint de palestra. Mount Stromlo Observatory, Austrália: Australia National University, 2016.
- RONNEY, A. **A história da astronomia**. São Paulo, M. Books do Brasil Editora, 2018.
- SAGAN, C. **Cosmos**. Título original: Cosmos, Rio de Janeiro, RJ: Livraria Francisco Alves Editora, 1982.
- SAGAN, C. **Pálido ponto azul**: Uma visão do futuro da humanidade no espaço. Título original: Pale red dot – A vision of human future in space. São Paulo, SP: Editora Schwarcz, 1996.
- SCHILLING, G. Adaptive optics comes of age. **Sky and Telescope**. Cambridge, Massachusetts, USA: Sky Publishing Corporation, outubro de 2001, pp. 30-40.
- SMITH, R. C. **Observational Astrophysics**. Melbourne, Australia: Cambridge University Press, 2007, pp. 1-98.
- SOBEL, D. **The glass universe**, How the ladies of the Harvard Observatory took the measure of the stars. New York, USA: Penguin Books, 2016.
- YENNE, B. et al. **The illustrate guide to Astronomy**. New Jersey, USA: Chartwell Books, 1993.
- ZIMMERMAN, R. Astronomy's crystal ball. **Sky and Telescope**. Cambridge, Massachusetts, USA: Sky & Telescope Media, março de 2011, pp. 22-29.

ZIRKER, J. B. **An acre of glass**: A history and forecast of the telescope. Baltimore, Maryland, USA: The Johns Hopkins University Press, 2005.

Figura da contracapa- Pôr do sol em Mauna Kea, com vista do Subaru Telescope, à esquerda e de um dos Kecks, à direita.

