

UNIVERSIDADE CRUZEIRO DO SUL

ANDRÉ LUIZ DA SILVA

RADIOASTRONOMIA: UM TEXTO INTRODUTÓRIO

São Paulo

2010

ANDRÉ LUIZ DA SILVA

RADIOASTRONOMIA: UM TEXTO INTRODUTÓRIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
atividade obrigatória do Curso de *Lato Sensu* em
Ensino em Astronomia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. ANDERSON CAPRONI

São Paulo

2010

ANDRÉ LUIZ DA SILVA

RADIOASTRONOMIA: UM TEXTO INTRODUTÓRIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
atividade obrigatória do Curso de *Lato Sensu* em
Ensino em Astronomia.

Aprovado em

ORIENTADOR: Prof. Dr. ANDERSON CAPRONI

*Aos meus pais, Luiz e Otília,
ao meu irmão, Sérgio,
e aos amigos do coração,
pelo apoio recebido durante
a elaboração deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Anderson Caproni, por compartilhar comigo não só o conhecimento, indispensável para a elaboração deste trabalho, mas também a simpatia, e pela disposição sincera em ajudar.

À Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente, pela oportunidade de fazer parte da equipe da Divisão Técnica de Astronomia e Astrofísica e com isso ter entrado em contato com o notável potencial de difusão e ensino de Astronomia desta unidade junto ao público e pelo privilégio de ter confiado a mim a direção desta Divisão no período de 2008 a 2010.

Ao Prof. Dr. Oscar T. Matsuura, pelos valiosos conhecimentos, e pelo convite, feito há seis anos, para responder como chefe da Escola Municipal de Astrofísica e pela intensa dedicação ao projeto de revitalização desta mesma Escola, sem a qual a Divisão não disporia da atual gama de equipamentos de Radioastronomia.

À minha equipe de coordenadores na Divisão de Astronomia e Astrofísica à época de elaboração deste trabalho, Douglas Aceiro, Fernanda Calipo e Marcos Calil, pela dedicação, paciência e amizade que me concederam, em todos os dias da minha gestão, me permitindo reconhecer o verdadeiro significado do comprometimento e me proporcionando a dádiva de sentir o trabalho não só como fonte de crescimento profissional, mas pessoal. O mesmo se aplica aos demais membros da equipe que, com grande variedade de idades, experiências e histórias de vida, me proporcionaram, sempre, muitas oportunidades de aprendizado e orgulho por ajudar a construir uma pequena parte da rica história desta instituição.

Aos amigos Rafael Santucci e Elisa Arizono, pela ajuda na elaboração do material da Exposição Permanente da Escola Municipal de Astrofísica, cujo conteúdo se serviu de parte do presente trabalho, e, assim como a exposição, se beneficiou do gentil trabalho do jovem casal na elaboração de algumas belíssimas figuras que aqui aparecem.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o de ser um texto introdutório para uso dos alunos de cursos em que se utilizam técnicas elementares de Radioastronomia e também para os interessados em obter uma visão global desta área da Astronomia. Embora os primeiros esforços em perscrutar os céus nestas faixas de radiação já contem com quase oitenta anos, os textos ainda não são tão abundantes quanto aqueles devotados à Astronomia óptica. O presente texto, destarte, foi escrito com o intuito de preencher parte desta lacuna. Também foi pensado como um apoio à retomada do curso de Radioastronomia, constante na grade de cursos da Escola Municipal de Astrofísica, berço do primeiro radiotelescópio em território nacional. Também é intenção do autor que os alunos da Universidade Cruzeiro do Sul, em cursos introdutórios ministrados pelo Núcleo de Astrofísica Teórica, possam utilizar o presente trabalho. Sem a pretensão de ser um texto completo sobre o assunto, tivemos a preocupação de dosar, de forma resumida, alguns elementos básicos para compreensão da importância desta área da Astronomia, sua relação inevitável com aspectos da Física – ferramenta indispensável para sua compreensão e avanço – passando pela importante abordagem do aspecto humano que a envolve e molda, ou seja, o seu desenvolvimento histórico, mundial e nacional. Segue-se a isso uma visão geral sobre as ferramentas básicas do radioastrônomo: as ondas de rádio e os aparelhos construídos para detectá-las, os radiotelescópios, encerrando o trabalho com uma breve descrição dos campos atuais de pesquisa e com alguns exemplos ilustrativos envolvendo cálculos, encontrados em apêndice.

Palavras-chave: Radioastronomia, radiotelescópios, ondas de rádio.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	09
2	HISTÓRIA DA RADIOASTRONOMIA	11
2.1	HISTÓRIA DA RADIOASTRONOMIA NO BRASIL.....	21
3	FERRAMENTAS DA RADIOASTRONOMIA	28
3.1	UM POUCO DE FÍSICA.....	28
3.1.1	RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.....	28
3.1.2	NOÇÕES DE FÍSICA ONDULATÓRIA.....	33
3.1.3	MISCELÂNEA: UM POUCO MAIS DE FÍSICA.....	37
3.2	RADIOTELESCÓPIOS.....	45
3.2.1	RESOLUÇÃO E FIGURA DE RADIAÇÃO.....	50
3.2.2	INTERFEROMETRIA.....	54
3.2.3	GRANDES RADIOTELESCÓPIOS PELO MUNDO.....	58
4	PRINCIPAIS OBJETOS DE ESTUDO DA RADIOASTRONOMIA	63
4.1	SOL.....	63
4.2	PLANETAS.....	65
4.3	VIA LÁCTEA.....	67
4.3.1	MEIO INTERESTELAR.....	67
4.3.2	ESTRUTURA DA VIA LÁCTEA.....	72
4.4	NÚCLEOS ATIVOS DE GALÁXIAS.....	75
4.5	RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO.....	79
5	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICES	
	A.1 CÁLCULO DE VELOCIDADE E DISTÂNCIA DE CYGNUS A.....	86
	A.2 EXEMPLO DE CÁLCULO DE RESOLUÇÃO: ITAPETINGA.....	86
	A.3 EXEMPLO DE CÁLCULO DE RESOLUÇÃO: INTERFERÔMETRO.....	87

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Observação: as figuras não creditadas no texto foram elaboradas pelo autor.

Figura 2.1 – Radiotelescópio de Jansky.....	12
Figura 2.2 – Radiotelescópio de Reber.....	13
Figura 2.3 – Algumas antenas do ALMA.....	16
Figura 2.4 – Galáxia de Andrômeda.....	18
Figura 2.5 – Antena helicoidal da Escola Municipal de Astrofísica.....	22
Figura 2.6 – Montagem do radiotelescópio de Itapetinga.....	24
Figura 2.7 – Rádio-observatório de Itapetinga (ROI).....	25
Figura 2.8 – Rádio-observatório Espacial do Nordeste (ROEN).....	26
Figura 3.1 – Comprimento de onda e amplitude.....	29
Figura 3.2 – Espectro eletromagnético.....	30
Figura 3.3 – Janelas de observação do espectro eletromagnético.....	32
Figura 3.4 – Funcionamento de um telescópio newtoniano.....	34
Figura 3.5 – Reflexão num radiotelescópio.....	34
Figura 3.6 – O fenômeno da difração.....	35
Figura 3.7 – Figura de difração.....	35
Figura 3.8 – Interferência construtiva e destrutiva.....	36
Figura 3.9 – Planos de oscilação de campos elétricos e magnéticos.....	37
Figura 3.10 – Distribuição de Planck.....	38
Figura 3.11 – Trecho do espectro solar.....	39
Figura 3.12 – Amostra de catálogo de espectros.....	40
Figura 3.13 – Leis de Kirchoff.....	41
Figura 3.14 – Espectros estelares.....	41
Figura 3.15 – Esquema de um radiotelescópio.....	46
Figura 3.16 – Montagem altazimutal e montagem equatorial.....	47
Figura 3.17 – Antena Holmdel de Nova Jersey.....	48
Figura 3.18 – Radiotelescópio Kraus em Nancay.....	49

Figura 3.19 – Radiotelescópio parabólico cilíndrico.....	49
Figura 3.20 – Ângulo de resolução.....	52
Figura 3.21 – Figura de radiação.....	54
Figura 3.22 – Antenas captando ondas em fase e fora de fase.....	55
Figura 3.23 – Geometria do interferômetro de duas antenas.....	55
Figura 3.24 – O interferômetro VLA.....	57
Figura 3.25 – Radiotelescópio de Arecibo.....	58
Figura 3.26 – Radiotelescópio de Effelsberg.....	59
Figura 3.27 – Radiotelescópio Robert C. Byrd de Green Bank.....	60
Figura 3.28 – Radiotelescópio de Parkes.....	60
Figura 3.29 – O Very Large Array.....	61
Figura 3.30 – O arranjo MERLIN.....	62
Figura 3.31 – O conjunto VLBA.....	62
Figura 4.1 – Imagens do Sol em rádio e em luz visível.....	64
Figura 4.2 – Aglomerado das Plêiades.....	70
Figura 4.3 – A nebulosa planetária M57.....	71
Figura 4.4 – A radiofonte Cassiopeia A.....	72
Figura 4.5 – A nebulosa do Caranguejo.....	73
Figura 4.6 – A galáxia NGC 1672.....	73
Figura 4.7 – Visão esquemática da Via Láctea de perfil.....	74
Figura 4.8 – Concepção artística da Via Láctea vista de frente.....	75
Figura 4.9 – A radiofonte Cygnus A.....	78
Figura 4.10 – Concepção artística das fases de evolução do Universo.....	81

1. INTRODUÇÃO

A Astronomia, uma das mais antigas ciências, vem se desenvolvendo há muitos séculos. Inicialmente atrelada à única faixa de radiação que nossos olhos podem captar, permaneceu assim durante a maior parte do tempo, até que, nas últimas décadas do século XIX e nas primeiras do século XX, outras faixas de radiação foram sendo descobertas, revelando o fato do mundo se mostrar em diversas outras “cores”. Com isso, um novo e misterioso Universo revelou-se e ainda continua revelando-se. Este trabalho pretende abordar alguns aspectos de uma destas faixas, convencionalmente chamada de *ondas de rádio*. Os esforços solitários em desvelar os céus nesta faixa de radiação começaram na década de 1930. O estudo do céu, revelado por essas ondas, evidenciando a existência de novos fenômenos e astros até então desconhecidos, é o que chamamos hoje de Radioastronomia.

Este texto possui a intenção de introduzir o leitor interessado em aspectos básicos para o entendimento da Radioastronomia. Isto inclui um pouco de teoria, na qual encontraremos pequenas porções de Matemática e de Física (num nível tal que não devem ficar assustados aqueles que não se consideram muito talentosos nessas áreas), passando pelo ferramental tecnológico necessário – os radiotelescópios e alguns aspectos do funcionamento deles – sem esquecer o principal motivo de todo este aparato: os astros que estão muito longe, emitindo suas ondas de rádio, uma pequeníssima parte das quais esbarram em nossos radiotelescópios. E quem é o *leitor interessado*? Basicamente, todos os que possuem interesse em aprender mais sobre os corpos celestes, embora o texto tenha sido escrito pensando-se no aluno do curso secundário (Ensino Médio), interessado em ciências (e especialmente em Astronomia), nos alunos de cursos de graduação na área de exatas e de ensino de ciências, que se interessam pelo assunto, e também nos professores que reconheceram o fascínio que a ciência do céu exerce nos alunos e veem nela uma excelente oportunidade de enriquecer as suas aulas. O texto é dirigido, enfim, a todos os que gostariam de ter em mãos um texto com o qual pudessem dar os primeiros passos na Radioastronomia. Os conceitos físicos mencionados são explicados, sem assumir conhecimento prévio, de forma que os leitores de outras áreas também possam sentir-se à vontade. Nunca é demais alertar, todavia, as pessoas que não lidam frequentemente com textos da área de exatas que o entendimento por vezes exige uma maior atenção ou mesmo várias leituras. Nossa experiência, tanto pessoal quanto relacionada ao trabalho de divulgação científica, indica que muitos leitores desanimam quando não levam em conta este aspecto; conforme a pessoa, esta pode ser levada a pensar que não possui preparo ou inteligência para entender o assunto. Não que os textos de outras áreas sejam mais

fáceis: mas é comum em alguns campos tomarmos contato com alguns aspectos superficiais que podem nos dar impressão de um bom entendimento. Na literatura científica e no campo das exatas em especial, uma leitura superficial dificilmente revela um bom entendimento e talvez isso esteja relacionado às características próprias desta forma particular de apreensão do mundo: pequenos passos, um avanço lento, porém firmemente alicerçado, conclusões que são tiradas só a partir de exaustivo e paciente trabalho, um constante questionamento e ceticismo, sempre embalados pela imaginação e pela curiosidade. Assim, o conhecimento científico é revelado. E aos persistentes perscrutadores é reservado o delicado sabor do entendimento, um prêmio que justifica a frase de Demócrito de Abdera (séc. V A.C.):

“Prefiro entender bem uma causa a ser o rei dos persas”.

Na seção 3 daremos mais detalhes sobre as ondas de rádio e como elas se inserem no contexto mais geral do leque de radiações semelhantes, que incluem a luz visível – uma pequena faixa desta coleção para a qual nossos olhos são sensíveis. Este “leque” ou “coleção” é chamado de *espectro eletromagnético*, e desde já é conveniente que o leitor saiba que ele é composto por vários tipos de “luzes” para as quais nossos olhos não são sensíveis, mas que fomos capazes de criar técnicas que nos tornaram capazes de percebê-las. Dentre essas outras “luzes invisíveis” podemos citar as próprias ondas de rádio, a radiação infravermelha, a ultravioleta, os raios-x e os raios gama. Cada uma dessas faixas citadas é um tipo de radiação eletromagnética, e para que o leitor possa acompanhar alguns aspectos mais técnicos da discussão histórica que se segue, basta que saiba, por ora, que as radiações eletromagnéticas diferem entre si por seus *comprimentos de onda* – nome que se dá, nos fenômenos ondulatórios, à distância entre duas cristas, ou dois vales consecutivos de uma onda. Tudo se passa como se essas outras radiações invisíveis possuíssem diversas “cores” e a forma mais eficaz de nos referirmos a elas (mesmo àquelas que de fato são cores, na faixa da luz visível), é mencionando o seu comprimento de onda¹.

¹ Alternativamente, também podemos usar a frequência, mas isto pode esperar até a seção 3.

2. HISTÓRIA DA RADIOASTRONOMIA

Há muita história antes de 1931, quando, podemos dizer, a Radioastronomia nasceu. Os acontecimentos anteriores, porém, estavam mais relacionados ao entendimento e às ações que precisaram ser feitas para lidar com uma faixa de radiação menos energética que a luz que enxergamos, as *ondas de rádio*. Como exemplos de tais ações podemos citar a produção e detecção destas ondas em 1888 pelo físico alemão Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894), ou a transmissão de sinais em 1901, pelo italiano Guglielmo Marconi (1874-1937), reconhecido mundialmente como o “pai do rádio”².

Karl Guthe Jansky (1905-1950), físico norte-americano de origem tcheca, após aceitar uma proposta dos Laboratórios Bell para investigar a origem de ruídos que afetavam as comunicações do serviço de rádio-telefone transatlântico da companhia, começou a trabalhar com um tipo de antena, com 30 metros de comprimento por 4 metros de altura, num campo de batatas em Holmdel, no estado norte-americano de Nova Jersey (fig. 2.1). Ao longo de 1931, ele se pôs a captar os ruídos para descobrir a sua origem. Verificou que parte do ruído provinha de tempestades, e que outra possuía origem desconhecida, cuja máxima intensidade variava num período semelhante ao dia solar. Um exame mais cuidadoso mostrou que o período era de aproximadamente 23 horas e 56 minutos, o período em que as estrelas voltam à mesma referência local, como o horizonte leste, por exemplo. A constatação deste período descartou a hipótese de origem solar para os ruídos: o Sol “se atrasa” cerca de 4 minutos, todos os dias, em relação às estrelas devido ao fato de estarmos girando ao redor dele – daí a diferença entre os dois períodos (dia sideral – com as estrelas como referência – e dia solar, tendo o Sol como referência). Alguns meses se seguiram até ele descobrir a localização da fonte, situada na constelação de Sagitário, direção do centro do enorme conjunto contendo 100 bilhões de estrelas, incluindo o Sol – a Via Láctea³, nossa Galáxia. As pesquisas de Jansky, que levaram à primeira detecção de ondas de rádio de origem extraterrestre, marcam o início da Radioastronomia.

² Entretanto, há relatos de que o padre gaúcho Roberto Landell de Moura (1861-1928) tenha feito uma transmissão deste tipo por uma distância de 8 km entre a Av. Paulista e o Alto de Santana, na cidade de São Paulo, entre 1893 e 1894. Infelizmente, Landell de Moura teve parte de seus equipamentos destruídos por seus “fiéis”, que o acusaram de feitiçaria!

³ Há uma certa controvérsia em torno do nome “Via Láctea”: para alguns, ele deveria restringir-se apenas à faixa que vemos no céu, em lugares com pouca poluição luminosa, reservando-se o nome de Galáxia (com “g” maiúsculo) para todo o sistema. Neste trabalho, usaremos livremente tanto o termo “Galáxia” quanto “Via Láctea” para designar todo o sistema.

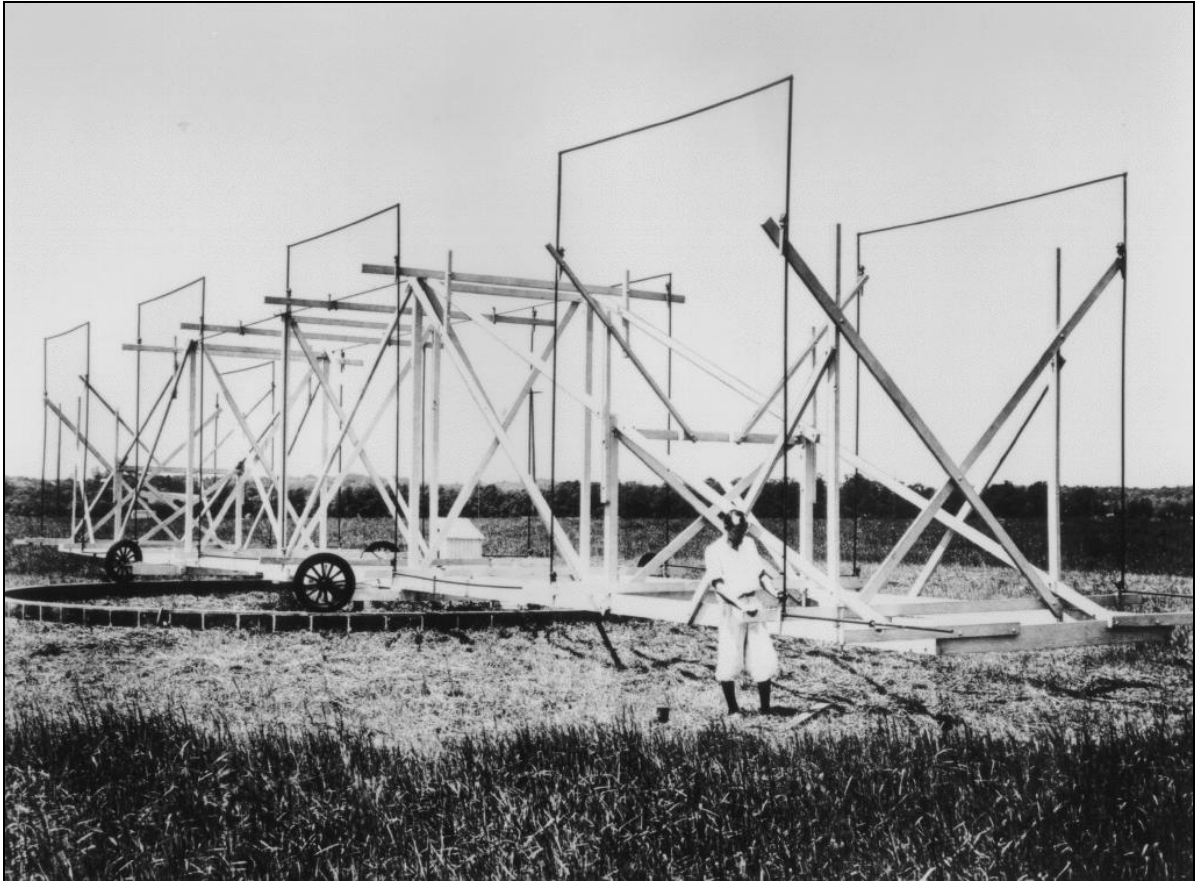


Figura 2.1. O radiotelescópio de Jansky. Crédito da imagem: National Radio Astronomy Observatory (NRAO).

Nos anos seguintes, o desenvolvimento das pesquisas em Radioastronomia só não estagnou completamente graças ao trabalho persistente e solitário de um jovem engenheiro e radioamador, Grote Reber (1911-2002). É bem verdade que algumas tentativas em captar ondas de rádio provenientes do espaço foram feitas, mas durante anos apenas o modesto radiotelescópio, construído pelo próprio Reber, foi o único “olhar” da Terra para esse universo invisível das ondas de rádio (fig. 2.2). A persistência e obstinação deste pesquisador eram notáveis. Mesmo com restrições financeiras e de tempo, ele não mediu esforços para construir e constantemente aperfeiçoar sua antena, fazendo suas pesquisas entre meia-noite e seis horas da manhã, indo para o trabalho logo depois, numa rotina de anos, mesmo sem resultados imediatos. Com sua história, Reber não nos transmitiu apenas dados, mas também sua intensa paixão pela pesquisa.

Inicialmente trabalhando com os comprimentos de onda de 9 e 33 centímetros, Reber só obteria resultados em 1939, quando passou para 1,87 metro. Neste comprimento de onda ele fez o primeiro radiomapa da Via Láctea, confirmando o resultado obtido por Jansky anos

antes, da fonte em Sagitário, e descobrindo dois outros emissores nas constelações de Cisne e Cassiopeia.

O trabalho de Reber foi solitário, em grande parte, pelo fato do mundo inteiro estar concentrado na conjuntura que levou à Segunda Guerra Mundial. Este grande conflito, responsável por tantas perdas para a Humanidade, exigiu o desenvolvimento dos radares. Ainda durante a guerra, foram detectadas, de forma acidental, ondas de rádio provenientes do Sol. As ondas, percebidas como interferências nos radares britânicos e confundidas com uma estratégia alemã, foram interpretadas corretamente como geradas por manchas observadas no astro-rei pelo físico James Stanley Hey (1909-1990). O fim do conflito trouxe uma grande força de trabalho e novas técnicas para este recém-nascido ramo da Astronomia.

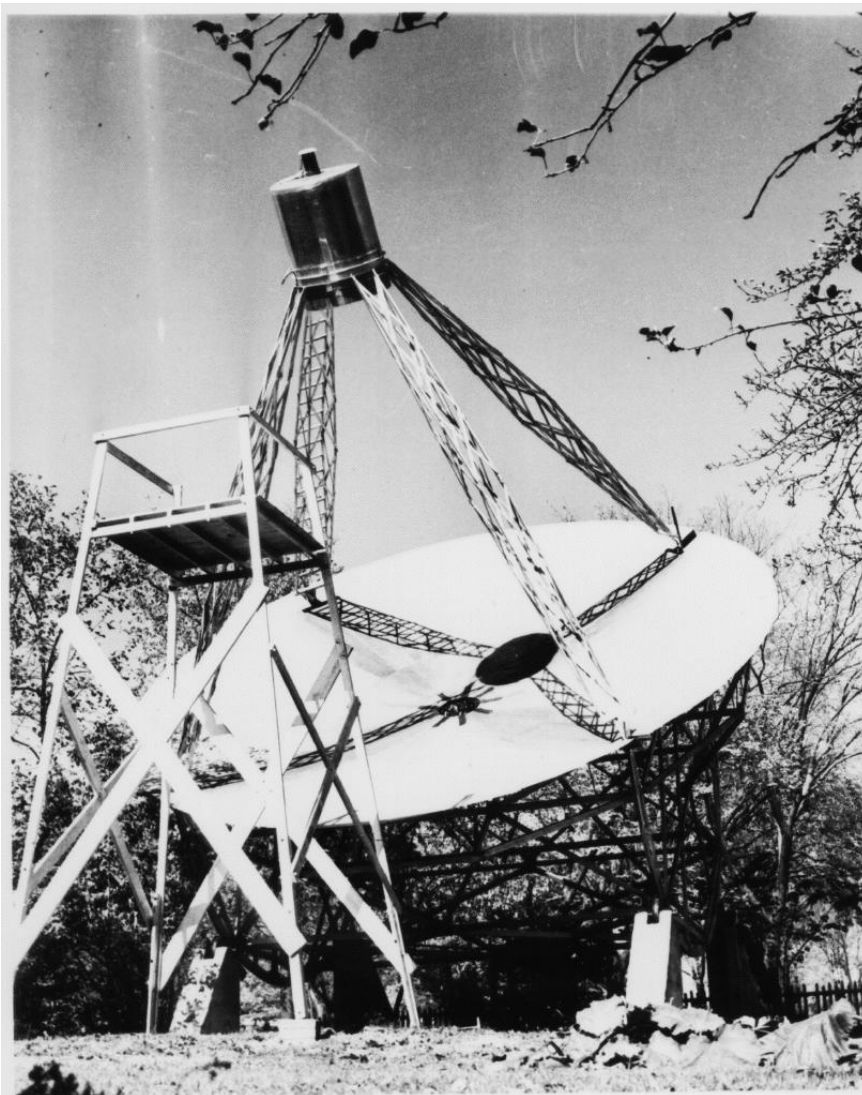


Figura 2.2. O radiotelescópio de Reber. Crédito da imagem: NRAO.

Muitos dos grandes centros de Radioastronomia se desenvolveram a partir de locais onde radares haviam sido instalados durante a guerra, ou se beneficiaram dos equipamentos que foram disponibilizados após seu uso para aplicações militares. Arthur Covington, no Canadá, observou atentamente, durante décadas, as ondas de 10,7 metros do Sol; na Holanda, foi possível confirmar a previsão teórica de H. C. Van de Hulst, de 1944, sobre a emissão de comprimento de onda de 21 cm do hidrogênio neutro; na Inglaterra, Martin Ryle e colaboradores fizeram observações que permitiram a identificação da forte emissão na constelação de Cassiopeia com um remanescente de supernova⁴ e outra fonte, na constelação de Cisne, com uma galáxia distante; na Austrália, a equipe liderada por J. L. Pawsey e J. G. Bolton fizeram observações do Sol e de outras radiofontes a partir da invenção de uma forma engenhosa de aumentar a acuidade das observações, fazendo uso da técnica de interferometria⁵ e tirando proveito da reflexão que alguns comprimentos de onda sofrem pela superfície oceânica.

No curto espaço que nos resta para falar da história da Radioastronomia, vamos agora descrever não uma sequência temporal de eventos, mas uma ramificação em diversos caminhos importantes da Radioastronomia, como o desenvolvimento instrumental, a descoberta de corpos celestes desconhecidos, a procura por inteligência extraterrestre e a descoberta de uma espécie de “eco” da “grande explosão”, ou Big Bang, que alguns estudiosos identificam como o instante da origem do próprio Universo.

O desenvolvimento posterior da Radioastronomia viu o nascimento de grandes radiotelescópios. Eles foram amplamente beneficiados pelas técnicas de radar, mas ainda careciam da acuidade dos telescópios ópticos. Rapidamente, a Radioastronomia deixa os domínios da dedicação solitária e se estende para um número cada vez maior de pesquisadores pelo globo. Em 1957, o radiotelescópio gigante de Jodrell Bank, com 76 metros de diâmetro (fig. 3.5 – seção 3), na Inglaterra, capta sinais do foguete propulsor do primeiro satélite artificial, o Sputnik 1, depois de inúmeras dificuldades enfrentadas ao longo de sua construção pelo seu idealizador, Bernard Lovell; em 1961, entra em operação o radiotelescópio de Parkes, com 64 metros de diâmetro, na Austrália; em 1963 foi concluída a

⁴ Supernova é uma das possíveis mortes estelares em que momentaneamente a estrela brilha com a luminosidade de dezenas de bilhões de sóis; após a explosão a estrela ejet material, que se torna uma nebulosa brilhante em expansão.

⁵ Falaremos mais sobre a importante técnica da interferometria na próxima seção.

versão original do que é ainda hoje o radiotelescópio de maior diâmetro: o radiotelescópio de Arecibo, em Porto Rico, com 305 metros de diâmetro, que utiliza uma concha natural, sendo por isso fixo. Na próxima seção falaremos um pouco mais sobre os maiores telescópios atualmente em operação.

O problema da indefinição das imagens, comparativamente aos telescópios ópticos, ou, para introduzirmos um termo que veremos em breve na próxima seção, *a resolução*, exigiu o uso de telescópios combinados, a técnica da interferometria, já mencionada, que permite que conjuntos de radiotelescópios separados se comportem como um único radiotelescópio de dimensão equivalente à separação entre eles. Usando mais de uma antena e aproveitando o próprio movimento de rotação da Terra, o radioastrônomo inglês Martyn Ryle utilizou, de forma pioneira, na década de 1960, o método de *Síntese de Rotação da Terra*, simulando um radiotelescópio de 1,6 quilômetros de diâmetro, inicialmente, e depois com 5 quilômetros, em Cambridge, no Reino Unido. Dentre estes aparatos constituídos de uma série de antenas, o mais poderoso em operação é o VLA, sigla em inglês para *Very Large Array* – arranjo muito longo⁶, um conjunto formado por 27 antenas, cada qual com 25 metros de diâmetro, próximo à localidade de Socorro, Novo México, nos Estados Unidos. O VLA entrou em operação em 1976. Este sistema representa o limite para antenas conectadas diretamente, através de cabos, para que seus sinais sejam combinados para simular uma única antena que, neste caso, chega a 27 quilômetros, aproximadamente⁷. Porém, através de conexão via rádio, pode-se atingir distâncias maiores, como é o caso do MERLIN, *Multi Element Radio-Linked Interferometer* – interferômetro de multielementos conectados por rádio – que chegam a 217 quilômetros, unindo antenas em várias localidades no Reino Unido. Além disso, radiotelescópios que observam simultaneamente, mas que não estão conectados entre si, podem fazer seus registros utilizando relógios atômicos, de extrema precisão. Os dados são posteriormente combinados e o resultado é o de um radiotelescópio com diâmetro de dimensões continentais. Esta técnica é conhecida como VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*, interferometria de base muito longa). Há vários arranjos VLBI atualmente, destacando-se o EVN (*European VLBI Network*, rede VLBI europeia) e o VLBA (*Very Long Baseline Array*, arranjo de base muito longa), este

⁶ Note que traduzimos “*large*” por “longo”. A melhor tradução seria “grande”, mas como acontece ocasionalmente com outros termos de origem estrangeira, o termo “longo” ganhou mais notoriedade no meio radioastronômico nacional, tomando o lugar do termo mais correto.

⁷ Há quatro configurações possíveis para as antenas, com diferentes extensões. Cada uma delas faz o papel de uma antena com diâmetro e resolução correspondentes à separação entre as antenas. Como esta importante propriedade vale apenas na direção da linha que separa as antenas, os arranjos de interferômetros contemplam várias direções, como é o caso da configuração em “Y” do VLA, que pode ser vista na fig. 3.24 (seção 3.2.2).

último operando nos Estados Unidos. Com o VLBI, pode-se fazer pesquisa em Astronomia e também em Geofísica, através da observação de quasares (objetos tão distantes que podem ser usados como referência – falaremos deles em breve nesta seção), que permitem a detecção de pequenos movimentos da crosta terrestre, bem como de estrelas e outros corpos celestes mais próximos. Com o desenvolvimento de conexões mais rápidas, de *Gigabits por segundo*, as antenas distantes podem se comunicar em tempo real. É o e-VLBI, que já opera com sucesso em algumas antenas da rede europeia (EVN). A combinação de antenas em terra com antenas no espaço já é uma realidade, proporcionando separações entre as antenas que são ainda maiores que o diâmetro da Terra. É o SVLBI (*space-VLBI*, VLBI espacial). Um projeto deste tipo é mantido pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*, laboratório de jato propulsão), nos Estados Unidos e desenvolvido pelo Instituto de Espaço e Ciência Astronáutica do Japão: trata-se do VSOP, sigla em inglês para *VLBI Space Observatory Program*, programa de observatório espacial VLBI.

No momento em que este texto estava sendo escrito (2010), dois grandes projetos estão em andamento: o SKA e o ALMA.

O SKA (*Square Kilometre Array*, arranjo de quilômetro quadrado) é um esforço internacional, surgido das discussões entre os membros da URSI (*International Union of Radio Science*, União Internacional de Radio Ciência) e a IAU (*Internacional Astronomical Union*, União Astronômica Internacional), desde o ano 2000, para a construção de um único radiotelescópio com a maior área coletora construída até o momento. A construção, feita a partir de um consórcio envolvendo 10 países, incluindo Austrália, Canadá, China, Índia, países europeus e os Estados Unidos, deve ser iniciada em 2011.

O projeto ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*, ou grande arranjo milimétrico/submilimétrico do Atacama) é outro esforço internacional com colaboração de países da América do Norte, Europa e Ásia oriental. Num local a cinco mil metros de altitude, no deserto de Atacama, nos Andes chilenos, o conjunto de antenas, que deve começar a operar e produzir resultados científicos em 2011, encontra excelentes condições de observação em ondas de rádio. Embora as ondas de rádio possam atravessar extensas nuvens de gás e poeira no espaço, pequenas quantidades de água na atmosfera podem comprometer a qualidade das observações. Por isso, o sítio escolhido é um lugar extremamente seco (um dos

lugares de menor umidade relativa do planeta). Neste local será disposto um conjunto com 66 antenas de alta precisão, a grande maioria delas com 12 metros de diâmetro (fig. 2.3).



Figura 2.3. Algumas antenas do ALMA, em foto de Nick Whyborn no dia 03 de junho de 2010. Crédito da imagem: ALMA (ESO / NAOJ / NRAO).

No final dos anos 1940, a suspeita de que a Via Láctea era uma galáxia espiral começou a ser demonstrada pelo astrônomo norte-americano William Wilson Morgan (1906-1994). Galáxias são gigantescos conjuntos de estrelas, gás e poeira. Nossa Galáxia, a Via Láctea, é vista por nós apenas como uma faixa de aspecto leitoso, que vemos em localidades com pouca poluição luminosa, passando por várias constelações, tanto ao norte quanto ao sul, com a aparência de um rio ou de um caminho: daí o seu nome em latim – *Via Láctea* ou “Caminho de Leite”. Por analogia com a galáxia vizinha, Andrômeda, sugeria-se que a Via Láctea poderia ser semelhante a ela (fig. 2.4). Por estarmos dentro da Galáxia e o seu plano ser repleto de material que obscurece e bloqueia a luz visível proveniente das estrelas, é muito difícil, por meios puramente ópticos, delinear a sua estrutura. As ondas de rádio, por outro lado, com seus grandes comprimentos de onda, não são tão afetadas por esse material. Com a previsão e posterior confirmação da emissão no comprimento de onda de 21 cm pelo hidrogênio neutro, já mencionada, foi possível o primeiro mapeamento da estrutura espiral da nossa Galáxia, realizado por um grupo de observadores na Austrália (W. N. Christiansen e J. V. Hindman), em 1951. O estudo da estrutura de nossa Galáxia continua em plena atividade. Falaremos mais sobre a pesquisa nessa área na seção 4.



Figura 2.4. A Galáxia de Andrômeda, também chamada de M31. Crédito da imagem: Western Washington University Planetarium.

O ano era 1963 e o lugar era o rádio-observatório de Parkes, próximo a Sydney, Austrália, que havia iniciado suas operações apenas dois anos antes. Uma intensa radiofonte tinha sido observada na época, mas não se sabia identificar com precisão a direção exata, pois as técnicas de Radioastronomia ainda não tinham contornado satisfatoriamente o problema da resolução. Uma técnica limitada, utilizada para descobrir a localização de uma fonte, era usar as *ocultações lunares*. Quando a Lua, em seu movimento ao redor da Terra, passa em frente a uma radiofonte, ela bloqueia a radioemissão, como um eclipse em rádio. Como a posição da Lua é conhecida, pode-se então descobrir a localização exata da radiofonte. Este método foi executado pelos astrônomos para localizar a radiofonte catalogada como 3C 273. Com o uso do radiotelescópio de Parkes para a ocultação lunar de 3C 273, os astrônomos puderam saber com precisão a sua localização e obter uma imagem através de telescópio óptico. Com isso, descobriu-se que 3C 273, observada opticamente e até então catalogada como uma estrela de brilho azulado e pertencente à Via Láctea, era na realidade um objeto bastante compacto e distante, a mais de um bilhão de anos-luz⁸ e portanto, bem além da Via Láctea. Logo depois

⁸ O ano-luz é uma medida de *distância* mais apropriada para as separações com que os astrônomos normalmente lidam. Mede cerca de 9,5 trilhões de quilômetros e para termos uma pequena ideia das distâncias envolvidas, basta sabermos que até a estrela mais próxima do Sol são 4,3 anos-luz; que o diâmetro da Via Láctea é da ordem de 100 mil anos-luz e a distância até a galáxia de Andrômeda é de cerca de 2 milhões de anos-luz.

da identificação, outros objetos semelhantes ao 3C 273 foram descobertos. Tratava-se de objetos extremamente energéticos, diferentes de qualquer coisa que havia sido observada até então. Para serem confundidos com estrelas da Via Láctea e estarem tão distantes, esses objetos deveriam ser centenas de vezes mais brilhantes que galáxias inteiras. Por terem sido inicialmente confundidos com estrelas, eles foram chamados de *quasi stellar radio sources* (fontes de rádio quase estelares), termo que foi abreviado para *quasares*, denominação usada até hoje. Há um termo mais geral, “QSO”, que vem de *Quasi Stellar Object* (Objeto quase estelar). Este grupo engloba os quasares e inclui os objetos que têm pouca ou nenhuma emissão observável em rádio⁹. Atualmente, os QSOs são entendidos pela maior parte da comunidade astronômica como galáxias com núcleos extremamente ativos (seção 4.4).

Em 1965, dois radioastrônomos que trabalhavam para os laboratórios Bell, como Karl Jansky na década de 1930, descobriram uma radiação que permeava todo o céu, em micro-ondas. Esta radiação, conhecida hoje como *Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas (RCFM)* é a marca deixada após cerca de 400 mil anos pelo instante de máxima densidade do Universo, no qual tudo estava confinado a um mínimo de espaço e a um máximo de temperatura (chega-se a falar em tamanho zero e temperatura infinita! Números mais “razoáveis” falam de um tamanho menor que 10^{-50} metros e temperaturas de 10^{47} °C)¹⁰. Este instante é conhecido como *Big Bang*. Para alguns cosmólogos, o Big Bang marca o início de todo o Universo, com a criação do espaço, do tempo e da matéria/energia, há cerca de 14 bilhões de anos atrás. A descoberta da Radiação Cósmica de Fundo foi responsável por uma aceitação quase universal da teoria do Big Bang, que naquela época rivalizava fortemente com outra teoria cosmológica, a do Estado Estacionário, que dispensava um momento de extrema densidade e temperatura, em favor de um universo eterno, cuja aparência se mantinha sempre a mesma em virtude da lenta criação de matéria nos vazios causados pela expansão universal. As duas teorias contemplavam a expansão. Na teoria do Big Bang, todavia, a expansão (cujos indícios observacionais remontam ao final da década de 1920) teria se iniciado com o próprio Big Bang. O emprego das técnicas de Radioastronomia para o estudo da origem e evolução do Universo não se encerrou com esta importante

⁹ Esta distinção não é feita com frequência na literatura. O leitor provavelmente encontrará em muitas fontes o termo “quasar” como sinônimo de QSO, incluindo mesmo aqueles objetos que não são observados em rádio.

¹⁰ Para quem não está familiarizado com a notação de potências de 10, observe: $10^{-1} = 0,1$; $10^{-2} = 0,01$; desta forma, $10^{-50} = 0,000\dots(49 \text{ zeros depois da vírgula})\dots1$; pode o leitor acreditar que isso é bem pequeno (a cabeça de um alfinete mede 10^{-3} metros... Quanto aos números grandes: $10^2 = 100$; $10^3 = 1000$; 10^{47} é o número 1 seguido de 47 zeros! Só para termos uma ideia: a temperatura da superfície do Sol é da ordem de 10^4 °C!

descoberta. Atualmente, os radioastrônomos e cosmólogos se dedicam com extremo vigor ao estudo dos detalhes da própria RCFM. Destacamos as missões COBE (*Cosmic Background Explorer*, Explorador de Fundo Cósmico) e WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*, Sonda Wilkinson de Anisotropia em Micro-ondas), satélites dedicados ao estudo desta radiação. O primeiro atuou entre os anos de 1989 e 1993 e o segundo foi lançado em 2001 e ainda continua em operação. Em 2009 a missão Planck foi lançada e já está operando, devendo dar continuidade ao trabalho realizado pelas duas antecessoras.

Em 1967, uma equipe liderada pelo radioastrônomo Antony Hewish (1924-), em Cambridge, na Inglaterra, foi responsável pela descoberta de um novo tipo de corpo celeste, usando um radiotelescópio que mais se parecia com uma coleção de postes enfileirados. A radioastrônoma Jocelyn Bell, aluna de Hewish, captou pulsos muito regulares, na direção da constelação de Touro, numa nebulosa conhecida como Nebulosa do Caranguejo. Inicialmente suspeitou-se que as emissões eram provenientes de uma civilização alienígena, mas a hipótese foi logo descartada em favor de emissões de elétrons ultrarrápidos, espiralando por entre linhas de forte campo magnético de pequenas estrelas extremamente densas que rotacionam muito rapidamente, os *pulsares*. Falaremos mais desses objetos na seção 4.

Não poderíamos deixar de mencionar um pouco da história de um campo de pesquisa que tem um inegável apelo popular: a busca de sinais de vida inteligente. A Radioastronomia logo se tornou uma opção bem aceita para este tipo de pesquisa, dada a facilidade de geração de sinais e pelo fato dessas ondas se propagarem com relativa facilidade pelo meio interestelar, podendo ser captada, mesmo a grandes distâncias, por nossos radiotelescópios. A ideia, portanto, era a de que civilizações extraterrestres com nível tecnológico semelhante ao nosso poderiam já ter chegado ao desenvolvimento da Radioastronomia e, desta forma, poderiam tanto receber as nossas radioemissões quanto enviar as suas. A sugestão de Cocconi e Morrison, em setembro de 1959, em artigo da revista *Nature*, de se usar a Radioastronomia para este fim já se materializava em 1960, com o projeto Ozma, conduzido por Frank Donald Drake (1930-). Basicamente, ele colocou a antena de 26 metros de diâmetro de Green Bank (Virgínia Ocidental, EUA) para receber possíveis sinais enviados por civilizações extraterrestres habitando planetas em torno das estrelas Tau Ceti e Epsilon Eridani, estrelas semelhantes ao Sol e relativamente próximas (da ordem de 10 anos-luz). A este esforço seguiram-se as discussões do ambicioso projeto Cyclops, em 1971, prevendo o uso de 1026 radiotelescópios com 100 metros de diâmetro cada um, projeto que todavia não saiu do papel,

dado o seu elevado custo. No início da década de 1990, o HRMS, sigla em inglês para *High Resolution Microwave Survey* – levantamento em micro-ondas de alta resolução – tinha a intenção de usar os principais radiotelescópios do mundo para a pesquisa por um período de 10 anos, mas durou apenas um ano, pois as verbas foram cortadas pelo congresso norte-americano. O Instituto SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence* – busca por inteligência extraterrestre), uma organização privada, criada em 1984, administrou o programa Phoenix, também conduzido por Drake, depois do fracasso do programa HRMS. Como esses programas não acharam nenhum sinal conclusivo da existência de civilizações extraterrestres, e aliado ao fato de que não temos muitos dados para avaliar, com alguma certeza, se há chances de haver uma única civilização além da nossa na Via Láctea, ou mesmo em todo o Universo observável com cem bilhões de galáxias¹¹, há atualmente uma tendência de menor emprego de radiotelescópios profissionais nessa área, pelo menos com financiamento público. Há vários programas do Instituto SETI que procuram cobrir as possibilidades de contato por civilizações extraterrestres inteligentes. Podemos mencionar desde a busca por sinais ópticos, emitidos por laser (programa Coset), checagem de sinais recebidos pela Radioastronomia convencional, em busca de sinais embutidos (programa Serendip IV) e mais recentemente, a partir de 1999, a análise dos dados por usuários da internet por todo o mundo, que disponibilizam seu tempo ocioso de computador para processar os dados (programa SETI@home).

2.1. HISTÓRIA DA RADIOASTRONOMIA NO BRASIL

O primeiro registro radioastronômico no Brasil data de 11 de fevereiro de 1958. Foram observações solares feitas através de um interferômetro originalmente desenhado para rastrear satélites pelo pesquisador Hélio Guerra Vieira (1930-), aluno do professor Luiz Queiroz Orsini (1922-), com quem teve os primeiros contatos com as pesquisas em ondas de rádio. Estes pesquisadores estavam ligados à Universidade de São Paulo (USP). Nesta época, também se iniciaram pesquisas em Radioastronomia por um grupo que não tinha conhecimento do trabalho de Guerra Vieira, o AAASP (Associação dos Amadores de Astronomia de São Paulo). Este grupo, ao qual pertencia o prof. Pierre Kaufmann (1938-) e o prof. Aristóteles Orsini (1910-1998), fundador do Planetário do Ibirapuera e da Escola

¹¹ Veja, por exemplo, a lúcida discussão em Verschuur (2007) sobre a equação de Drake, uma forma de se avaliar o número de possíveis formas de vida inteligentes extraterrestres com condições de desenvolvimento da Radioastronomia.

Municipal de Astrofísica que hoje levam o seu nome, foi responsável pela instalação do primeiro radiotelescópio em território nacional, oficialmente inaugurado no dia 25 de janeiro de 1960, pelo então prefeito da cidade de São Paulo, Adhemar de Barros, e instalado ao lado do prédio do Planetário. Infelizmente, o instrumento funcionou por poucos meses, mas foi substituído por outros instrumentos, como o que se observa na fig. 2.5.

Entre 1961 e 1963, foi instalado, também no Ibirapuera, um detector de explosões solares, um receptor que operava em faixa de frequências muito baixas (VLF), doado à AAASP por um amador norte-americano, Gasper Hossfield, através de Jean Nicolini (1922-1991), ativo amador brasileiro, que hoje dá nome ao Observatório Municipal de Campinas. Este instrumento estimulou as primeiras pesquisas em física solar e as relações Sol-Terra e com o qual, além da pesquisa relacionada com o ciclo de atividade solar de 11 anos, pesquisava-se as alterações da influência do Sol na atmosfera com a alternância dia-noite.



Figura 2.5. Antena helicoidal de 13 espiras do radiotelescópio instalado no Ibirapuera em 1961. Crédito da imagem: Irineu G. Varella.

Em 1960, o professor Willie Maurer, matemático e diretor da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade Mackenzie criou o GRAM, Grupo de Radioastronomia Mackenzie, que em cooperação com a AAASP, foi responsável pela instalação dos novos equipamentos no Ibirapuera e a manutenção das pesquisas. Estas foram limitadas pelo crescente desenvolvimento urbano da região, que inevitavelmente carrega consigo uma interferência em ondas de rádio, prejudicando as observações.

Com um acordo de cooperação com a Comissão Nacional de Atividades Espaciais (CNAE), precursora do atual INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), os equipamentos foram transferidos para São José dos Campos, no Vale do Paraíba. Posteriormente, o GRAM transferiu os equipamentos para Campos do Jordão, criando o

rádio-observatório de Umuarama pois, segundo Capozzoli (2005), os problemas de relacionamento entre o grupo e a CNAE dificultaram o prosseguimento dos trabalhos.

A década de 1960 presenciou um importante evento para a Radioastronomia brasileira: o eclipse de Bagé, eclipse total do Sol com apenas 1,9 minutos de duração, visível na cidade gaúcha de Bagé, a 374 quilômetros de Porto Alegre, que contou com a presença de várias missões nacionais e estrangeiras. Entre elas, a observação solar com um radiotelescópio que trabalhava com comprimento de onda de quatro centímetros, capaz de medir o estado de polarização das rádio-ondas (veja seção 3). O trabalho foi realizado pelos pesquisadores Pierre Kaufmann, Oscar T. Matsuura (1939-) e Paulo Marques dos Santos (1927-).

Neste período, a pesquisa radioastronômica no Brasil ganhou consistência com a instalação de equipamentos modernos (o primeiro relógio atômico do Brasil foi instalado no rádio-observatório de Umuarama) e formação de recursos humanos, com introdução de pós-graduação. Data desta época (1967) a transformação do GRAM em CRAAM, Centro de Radioastronomia e Astrofísica da Universidade Mackenzie. Desta forma, estava aberto o caminho para o nascimento do rádio-observatório de Itapetinga, uma base definitiva para abrigar as pesquisas brasileiras na área, em franca expansão.

O principal instrumento do rádio-observatório de Itapetinga, a antena de 13,7 metros, chegou lá em 1971. O rádio-observatório fica num vale na cidade de Atibaia, interior de São Paulo, protegido naturalmente de interferência de origem urbana pelas elevações próximas. A antena fica abrigada numa redoma de 20 metros de diâmetro, para protegê-la das intempéries e não permitir a influência dos ventos em seu posicionamento (fig. 2.6 e 2.7).

Na época, o instrumento estava entre os mais modernos do mundo e motivou inúmeras cooperações internacionais, uma vez que a maior parte dos radiotelescópios se encontra no hemisfério norte da Terra e há muitos objetos de interesse que estão no hemisfério sul celeste.

O início da década de 1970 marca a chegada do casal de pesquisadores argentinos Federico Strauss (1942-1981) e Zulema Abraham (1942-), que iniciaram a pesquisa solar com a grande antena de 13,7 metros, alcançando resolução temporal de milissegundos, captando comportamentos não previstos da estrela mais próxima de nós, numa pesquisa



Figura 2.6. Montagem que sustenta a antena de 13,7 metros de Itapetinga. Ao redor, vê-se a estrutura da redoma protetora.

pioneira. Deste trabalho também participou o radioastrônomo Joaquim E. R. Costa. Estes trabalhos se estenderam até 1994, quando o rádio-observatório passou por reformas. É desta época a descoberta do primeiro *megamaser*, numa galáxia conhecida como NGC 4945, pelos pesquisadores Paulo Marques dos Santos e Jacques Lépine (1946-). “*Maser*” significa “*microwave amplification by stimulated emission of radiation*” (amplificação em micro-ondas por emissão estimulada de radiação). Trata-se de fenômeno semelhante ao laser, que ocorre no espectro visível, sendo que o maser ocorre na faixa de micro-ondas.

Apesar das grandes conquistas do rádio-observatório, dificuldades que são, infelizmente, frequentes em instituições científicas em nosso país, como a falta de verbas, de pessoal, e problemas de ordem burocrática, não proporcionaram ao equipamento a devida atualização e manutenção. Entre 1994 e 2004, Itapetinga passou por um longo período de reformas, incluindo a troca da redoma protetora, que já havia chegado ao limite de sua vida útil.



Figura 2.7. Rádio-observatório de Itapetinga, onde se vê a redoma protetora, com 20 metros de diâmetro. Crédito da imagem: Rafael Milloni Santucci.

Neste grande período, a comunidade nacional de radioastrônomos prescindiu de seu principal instrumento de coleta de dados, prejudicando o desenvolvimento desta área de pesquisa no Brasil. Costa, que também era responsável pela manutenção do rádio-observatório, relata em Capozzoli (2005) as dificuldades e frustrações deste período, bem como a esperada conclusão.

Além de Itapetinga, o Brasil conta atualmente com outros centros de pesquisa radioastronômica. Destacamos dois: o Rádio-Observatório Espacial do Nordeste (ROEN) e o *Brazilian Decimetric Array* (BDA – Arranjo Decimétrico Brasileiro). O ROEN, inaugurado em 1994, conta com uma antena de 14,2 metros de diâmetro proveniente do *National Radio Astronomical Observatory* (NRAO), em Green Bank (Virgínia Ocidental, E.U.A.). O ROEN (fig. 2.8) se localiza na cidade de Euzébio, no Ceará, e é voltado para pesquisas em Geodésia, através de arranjo em VLBI (veja sessão 2). O BDA, em sua versão final, prevê um moderno sistema interferométrico com 38 antenas, operando numa faixa de comprimentos de onda entre 5 e 25 centímetros e com separação máxima entre as antenas que chega a 2,27 quilômetros. Atualmente está em operação um protótipo do BDA (PBDA), com a composição

de 5 antenas de 4 metros cada e com separação máxima de 220 metros, na cidade de Cachoeira Paulista, interior de São Paulo. Há ainda que se mencionar o Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRS), que nasceu a partir dos esforços do radioastrônomo Nelson Schuch de montar o primeiro interferômetro brasileiro. O Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais localiza-se numa área ligada à Universidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul. Uma das subunidades do CRS é Observatório Espacial Sul, inicialmente pensado para pesquisas radioastronômicas, que atualmente fornece apoio às ciências atmosféricas e espaciais, pesquisas em engenharia e informática e é sede do programa antártico do INPE. Outros instrumentos atualmente à disposição da comunidade científica brasileira são dedicados à pesquisa solar, como *Solar Submillimeter Telescope* (SST – Telescópio Submilimétrico Solar) em San Juan, Argentina, e o *Brazilian Solar Spectroscope* (Espectroscópio Brasileiro Solar) em Cachoeira Paulista.



Figura 2.8. O ROEN, rádio-observatório espacial do nordeste, no Ceará. Crédito da imagem: Oliveira, F. K. S. e Saraiva, M. F. O. (2003).

Se já é difícil a implantação de rádio-observatórios num país como o nosso, com as dificuldades típicas de países em desenvolvimento, imaginemos como seria a iniciativa de instalação de equipamentos radioastronômicos com finalidades didáticas. Desta forma, a iniciativa idealizada pelo Prof. Oscar T. Matsuura, em 2004 (à época Diretor da Divisão Técnica de Astronomia e Astrofísica, que engloba a Escola Municipal de Astrofísica de São Paulo e os Planetários municipais), de instalação de equipamentos radioastronômicos na Escola Municipal de Astrofísica é de extrema importância e pioneirismo.

Os equipamentos foram adquiridos a partir de doação feita pela Fundação Vitae, Apoio à Cultura, Educação e Promoção Social, em convênio firmado com a Secretaria do Verde e do Meio Ambiente do Município de São Paulo e o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (IAG-USP). Com o equipamento, que deve entrar em operação em breve, o interesse de futuros radioastrônomos será despertado e desta forma os futuros pesquisadores e interessados em geral poderão ter o seu primeiro contato com a Radioastronomia através do curso que já constava na grade curricular da Escola e que em breve deverá ser retomado.

Apesar das dificuldades continuamente enfrentadas, os radioastrônomos brasileiros buscam retomar o lugar de destaque perante a comunidade radioastronômica mundial. Mesmo sem os avanços que a comunidade da Astronomia óptica brasileira obteve, como a integração aos consórcios Gemini e SOAR (colocando ao alcance dos astrônomos brasileiros equipamentos ópticos de última geração), aos poucos a Radioastronomia nacional caminha para uma maior integração. Um dos passos neste sentido é o Relatório da Subcomissão de Radioastronomia, elaborado para a Comissão Especial de Astronomia (CEA) do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), que procura traçar planos para o desenvolvimento futuro da Radioastronomia no Brasil e a sua inserção em projetos internacionais.

3. FERRAMENTAS DA RADIOASTRONOMIA

Nesta seção, trataremos das ferramentas com as quais os radioastrônomos sondam o Universo. Assim como nos outros campos da observação astronômica, a principal fonte de informação é a radiação que nos chega dos astros distantes. Em pouquíssimos casos os pesquisadores têm acesso a algum material proveniente dos astros, ou podem ir até eles para coletar alguma amostra ou fazer algum tipo de medição *in loco*. Por enquanto, isso é feito apenas para os astros, comparativamente muito próximos, em nosso Sistema Solar. Desta forma, já há bastante tempo os astrônomos se preocuparam em entender o máximo da luz que chega até nós, proveniente dos corpos celestes. Além disso, dedica-se todo o cuidado para aperfeiçoar os aparelhos que são capazes de tirar o máximo proveito da ínfima parcela de energia que chega à Terra: os telescópios e os detectores a eles acoplados. Nesta seção, portanto, trataremos de dois aspectos básicos: da natureza das ondas de rádio e dos aparelhos construídos para detectá-las, os radiotelescópios.

3.1. UM POUCO DE FÍSICA

Nas próximas subseções, falaremos um pouco dos aspectos físicos que envolvem a natureza das radiações captadas pelos radioastrônomos. Precisaremos, para isso, do auxílio da Física. Ela nos ajudará a entender o que são as ondas de rádio, suas semelhanças e diferenças em relação à luz, e um pouco da nomenclatura, das grandezas e unidades utilizadas pelos cientistas em suas pesquisas. Não pretendemos de forma alguma esgotar o assunto, pois há ótimas referências sobre o tema, algumas das quais são indicadas na bibliografia. A intenção é fornecer apenas um “aperitivo” para que o leitor interessado em aprofundar-se possa ficar estimulado a ampliar seus conhecimentos, buscando estas fontes.

3.1.1. RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A luz proveniente dos objetos que vemos, a radiação que aquece a água num forno de micro-ondas, as transmissões de rádio e TV, a radiação ultravioleta, com a qual devemos tomar cuidado nos dias ensolarados, os raios-X e os raios gama são, todas elas, manifestações do que chamamos de *radiações eletromagnéticas*. Para entender as diferenças entre esses diferentes tipos de radiação que possuem a mesma natureza, vamos nos deter sobre o *caráter ondulatório* dessas radiações.

As radiações eletromagnéticas são *ondas*, e como tais, têm associadas a si duas grandezas muito importantes, o *comprimento de onda* e a *frequência*. No caso das radiações

eletromagnéticas, cada comprimento de onda corresponde a uma frequência, o que permite designar uma onda por uma destas grandezas. A forma como estas duas grandezas se relacionam é tal que *quanto maior o comprimento de onda, menor a frequência*. Isto pode ser visto matematicamente como:

$$c = \lambda f \quad (3.1)$$

onde:

λ é o comprimento de onda;

f é a frequência;

c é a velocidade da luz, cerca de 300 mil km/s.

Para a luz visível em especial, frequências e comprimentos de ondas podem ser associadas às *cores*, de forma que as *maiores frequências* são percebidas como *violeta* e as *menores*, como *vermelho*.

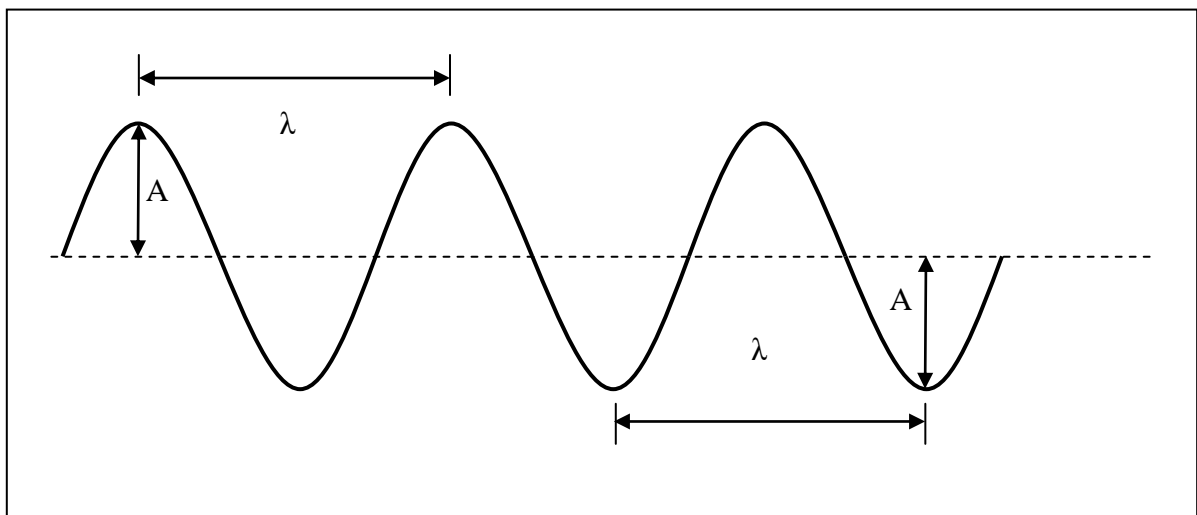


Figura 3.1. Comprimento de onda λ e amplitude A .

O comprimento de onda corresponde à distância entre dois picos ou entre dois vales consecutivos de uma onda (fig. 3.1). Por se tratar de uma distância, o comprimento de onda pode ser medido em metros. Já a frequência diz respeito ao número de picos (ou de vales) que

são percebidas por um observador a cada segundo. A frequência é medida em ciclos por segundo, unidade conhecida como Hertz (Hz). É muito comum ouvirmos falar de alguns múltiplos desta unidade: o quilohertz (kHz – mil hertz), o megahertz (MHz – 1 milhão de hertz) e o gigahertz (GHz – 1 bilhão de hertz). Uma grandeza que também aparece na figura 3.1 é a amplitude, que é a máxima altura ou profundidade da perturbação em relação a uma posição de equilíbrio, marcada como a linha tracejada na figura, e que será importante quando estivermos falando do fenômeno de interferência.

Ao conjunto de todos os comprimentos de onda possíveis para as radiações eletromagnéticas damos o nome de *espectro eletromagnético*. Como podemos ver na fig. 3.2, o espectro eletromagnético engloba uma gama enorme de diferentes comprimentos de onda. Nossos olhos são sensíveis apenas a uma pequena faixa compreendida entre os comprimentos de onda de 0,4 a 0,7 milésimos de milímetro, faixa esta chamada de *luz visível*.

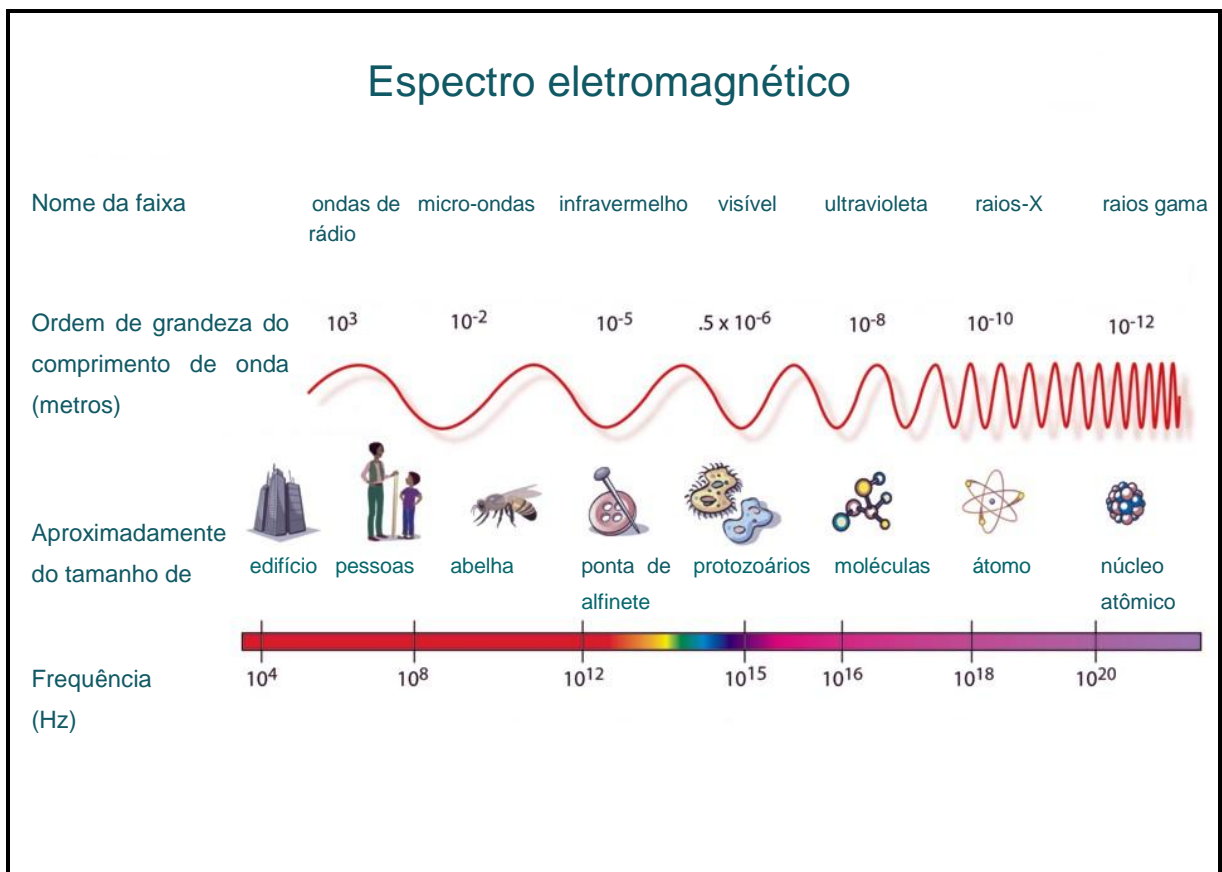


Figura 3.2. O espectro eletromagnético. Compare os tamanhos entre os comprimentos de onda da luz visível e as ondas de rádio. Crédito da imagem: NASA.

Dentre as diversas faixas de frequência das radiações eletromagnéticas, aquelas com comprimento de onda com tamanhos maiores do que cerca de 1 mm são chamadas de *ondas*

de rádio¹. Elas apresentam vastas aplicações no mundo moderno. Estamos captando ondas de rádio quando escutamos rádio, assistimos à TV ou quando nos comunicamos com aparelhos de telefonia celular. As antenas de alguns dispositivos estão relacionadas aos comprimentos de onda da faixa considerada. Desta forma, as antenas dos telefones celulares medem alguns centímetros, enquanto as antenas de TV têm cerca de 1 metro. A tabela 3.1 relaciona as denominações de algumas faixas. É interessante notar que as duas últimas linhas desta são faixas que pertencem ao grupo das chamadas micro-ondas, radiações com frequências um pouco mais altas, usadas nos fornos de mesmo nome.

Tabela 3.1. Diversas faixas das ondas de rádio.

Nome da Banda em português	Nome da Banda em inglês	Sigla	Frequência	Comprimento de onda
Frequência extremamente baixa	Extremely Low Frequency	ELF	3 – 30 Hz	100.000 km – 10.000 km
Frequência super baixa	Super Low Frequency	SLF	30 – 300 Hz	10.000 km – 1.000 km
Frequência ultra baixa	Ultra Low Frequency	ULF	300 – 3000 Hz	1.000 km – 100 km
Frequência muito baixa	Very Low Frequency	VLF	3 – 30 kHz	100 km – 10 km
Baixa frequência	Low Frequency	LF	30 – 300 kHz	10 km – 1 km
Média frequência	Medium Frequency	MF	300 – 3000 kHz	1 km – 100 m
Alta frequência	High Frequency	HF	3 – 30 MHz	100 m – 10 m
Frequência muito alta	Very High Frequency	VHF	30 – 300 MHz	10 m – 1 m
Frequência ultra alta	Ultra High Frequency	UHF	300 – 3000 MHz	1 m – 100 mm
Frequência super alta	Super High Frequency	SHF	3 – 30 GHz	100 mm – 10 mm
Frequência extremamente alta	Extremely High Frequency	EHF	30 – 300 GHz	10 mm – 1 mm

Nossa atmosfera não é transparente a todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Ela deixa passar algumas faixas apenas. Dizemos então que há “janelas de observação” para algumas faixas de comprimentos de onda. Dentre essas janelas, temos a

¹ Embora alguns radioastrônomos observem as chamadas ondas submilimétricas, que como o nome indica, têm comprimentos de onda de até 0,1 mm.

janela óptica, que nos permite observar o Universo em luz visível, e também uma janela de rádio, através da qual podemos captar as ondas de rádio emitidas pelos astros, sem sair da superfície da Terra. Na figura 3.3 podemos ver como a atmosfera se comporta em relação ao espectro eletromagnético, sendo totalmente opaca para alguns comprimentos de onda e transparente para outros. Note, na fig. 3.3, que a janela em rádio permite a observação de comprimentos de onda que se estendem de algumas frações de milímetro a cerca de 30 metros. Os comprimentos acima de 30 metros são refletidos por uma camada da atmosfera chamada ionosfera, enquanto que, próximo ao nível do mar, o vapor d'água absorve comprimentos de onda menores que dois milímetros. Radioastrônomos que pretendem observar comprimentos de onda milimétricos e submilimétricos devem colocar seus instrumentos, então, em regiões de grande altitude, onde há pouquíssimo vapor d'água.

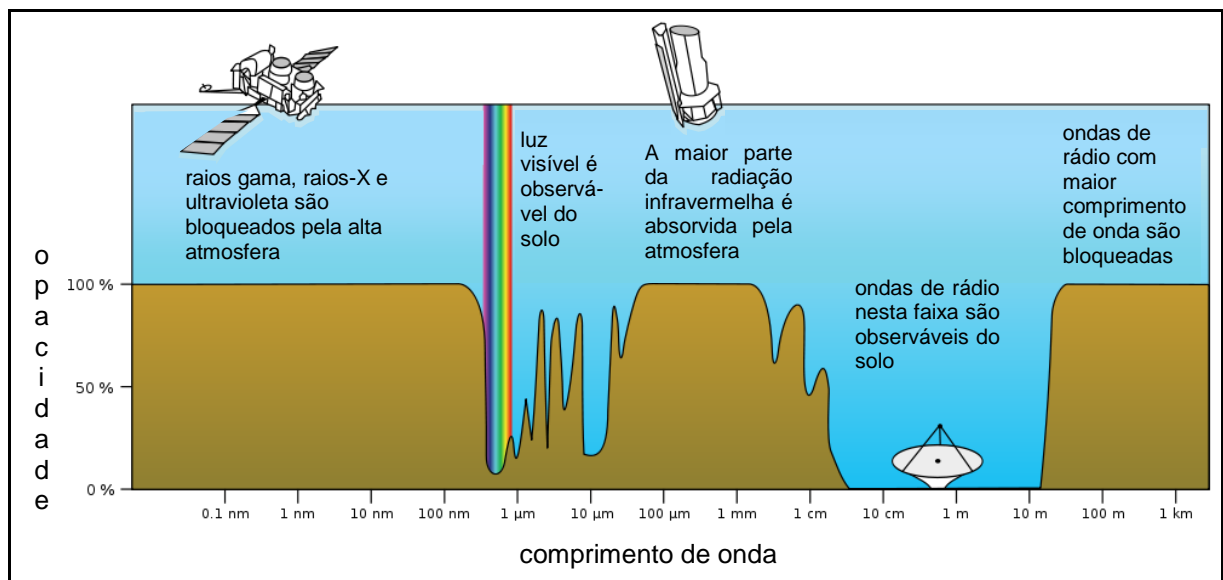


Figura. 3.3. Janelas de observação para o espectro eletromagnético. Os desenhos de satélites em cima das faixas correspondentes indicam que essas radiações são mais bem observadas a partir do espaço. Crédito da imagem: wikispaces.psu.edu, com adaptações do autor.

Os astros emitem radiação na faixa de rádio a partir de duas formas básicas: *processos não térmicos e térmicos*. Processos não térmicos podem se apresentar sob mais de uma forma, porém um processo muito comum está ligado a elétrons rápidos (velocidades próximas à da luz) que espiralam através de campos magnéticos. Este processo é conhecido como *síncrotron*. Já o processo térmico se origina de movimentos de elétrons no material emissor a velocidades menores (da ordem de dezenas ou centenas de quilômetros por segundo), e está ligado à emissão de corpo negro, como veremos em breve, na seção 3.1.3.

3.1.2. NOÇÕES DE FÍSICA ONDULATÓRIA

A radiação eletromagnética é um tipo de onda, e como tal, possui propriedades interessantes que merecem um exame mais cuidadoso, para podermos entender melhor o seu uso na Radioastronomia. Ondas são geralmente definidas como perturbações que se propagam em um meio. Se o meio é material, temos ondas mecânicas. Se o meio é o vácuo, temos ondas eletromagnéticas. É possível que existam outras ondas que se propagam no vácuo, como as ondas gravitacionais, que são aceitas teoricamente, mas cuja detecção ainda não foi realizada. Como toda onda, as ondas eletromagnéticas possuem propriedades bem conhecidas, como a reflexão, a refração, a difração, a interferência e a polarização. A refração, na qual não nos deteremos, diz respeito aos efeitos causados pela passagem da onda por diferentes meios, um assunto muito importante para a Astronomia óptica, pois é a partir da refração que podemos entender o funcionamento das lentes.

A *reflexão* é um fenômeno bem familiar a todos. É a reflexão que permite contemplarmos a nossa imagem num espelho. Neste caso, estamos falando de ondas luminosas e o espelho é uma superfície polida, ou seja, bem lisa, e isso permite que um feixe luminoso incida sobre ele e retorne sem grandes alterações, o que nos permite observar a nossa imagem. Se a superfície polida é côncava, como a parte da colher que enchemos, podemos ter, sob algumas circunstâncias, uma imagem ampliada. É o que acontece com os telescópios refletores, nos quais a superfície refletora é esférica ou parabólica, o que permite que raios paralelos, provenientes de objetos distantes, sejam refletidos para um ponto chamado *foco*. Na fig. 3.4, ilustramos o conceito através de um esquema de telescópio refletor, num arranjo conhecido como newtoniano. Neste arranjo, os raios luminosos, representados por setas, chegam paralelos ao espelho primário, que por ser côncavo converge os raios na direção de um pequeno espelho plano, engenhosamente colocado num ângulo de 45° para permitir que o foco seja colocado ao lado do tubo, permitindo a observação através de uma lente especial chamada ocular, não representada no esquema. Num radiotelescópio, também se faz uso da reflexão, de forma semelhante aos telescópios refletores. As ondas precisam chegar numa superfície refletora que, em boa parte das vezes, também é parabólica e permite que os raios converjam para um foco, onde é colocado um receptor. Isto está ilustrado na figura 3.5.

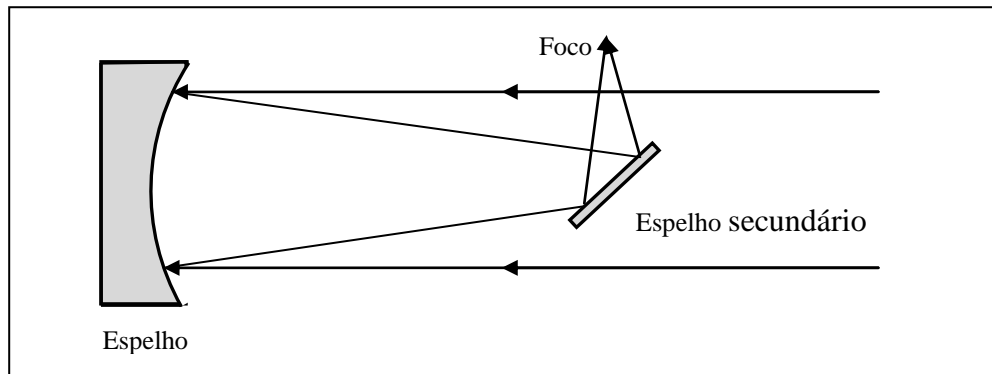


Figura 3.4. Representação esquemática de funcionamento de um telescópio newtoniano.

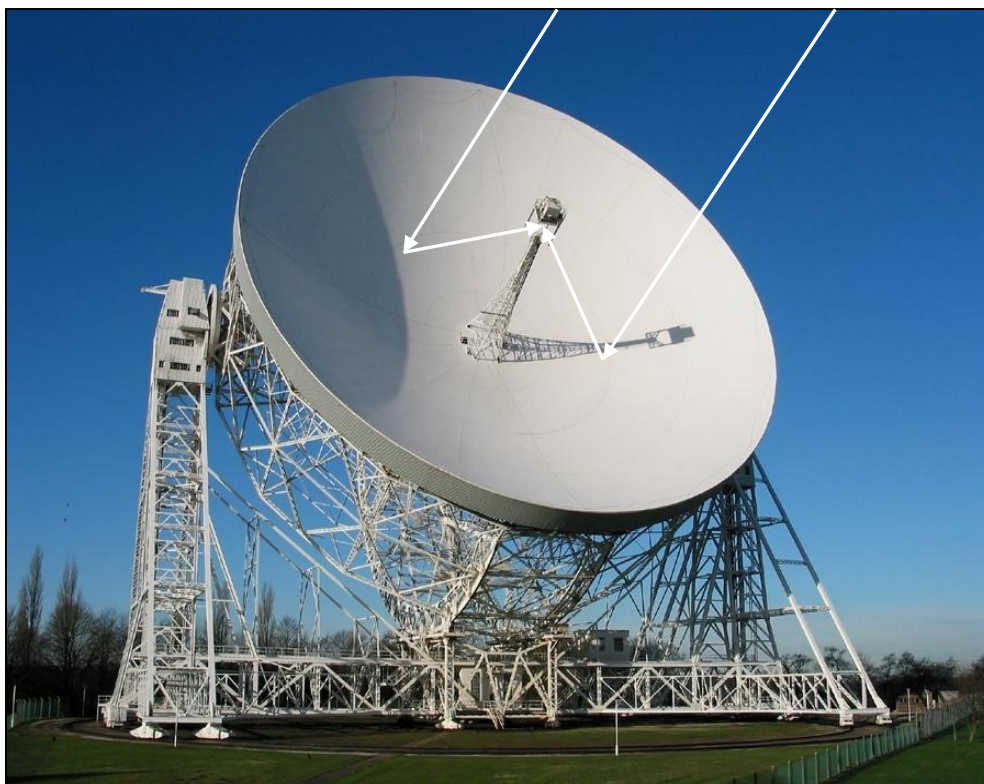


Figura 3.5. Reflexão num radiotelescópio. O radiotelescópio mostrado é o “Lovell” de Jodrell Bank, na Inglaterra, com 76 metros de diâmetro. Crédito da imagem: Jodrell Bank Centre for Astrophysics, University of Manchester.

A *difração* é o fenômeno que acontece às ondas quando elas encontram obstáculos que obstruem parcialmente o seu caminho (fig. 3.6). Há uma relação importante entre o tamanho do obstáculo e o comprimento da onda. Se o tamanho do obstáculo é da ordem do comprimento da onda, a difração é importante. Podemos ilustrar este fato com facilidade. Se pensarmos em duas crianças separadas por um muro alto, e uma delas usar uma lanterna direcionada para cima do muro, a outra criança não vê a luz. Por outro lado, se uma das crianças fala, a outra ouve. Tanto o som quanto a luz são ondas. Por que então uma das

crianças não vê a luz, mas pode ouvir a outra? Como o comprimento de onda sonora é da ordem do tamanho do muro, a difração se torna importante neste caso: a difração permite que a onda sonora contorne o muro e alcance a outra criança. Mas o comprimento de onda da luz é da ordem de *décimos de milésimos de milímetro*, muito menor que o tamanho do muro: a luz passa direto, sem difratar.

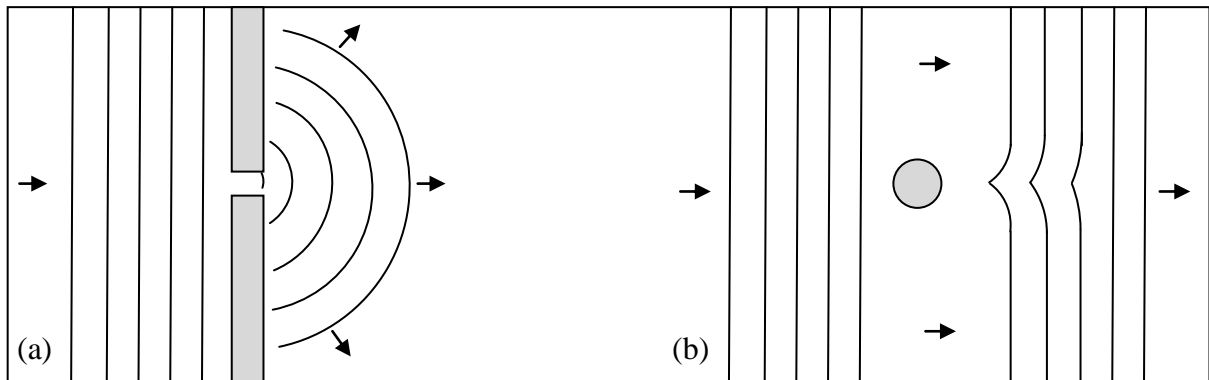


Figura 3.6. Com a difração, a onda se espalha ao passar por uma abertura (a) e se espalha ao contornar um obstáculo (b).

Em particular, quando uma onda passa por uma situação semelhante à da figura 3.6a, observa-se um padrão característico de distribuição da intensidade da energia recebida pelo observador após a passagem pela abertura. Este padrão é conhecido como *figura de difração* e nosso interesse em mencioná-la está em sua ligação com uma característica importante dos instrumentos astronômicos chamada *poder de resolução ou poder separador*, sobre a qual daremos mais detalhes na próxima subseção. Por enquanto, é útil saber que na situação em que a onda passa por uma abertura circular, a figura de difração é composta por um disco central mais luminoso, envolto por círculos de intensidade luminosa decrescente, à medida que se afastam do disco central (fig. 3.7).

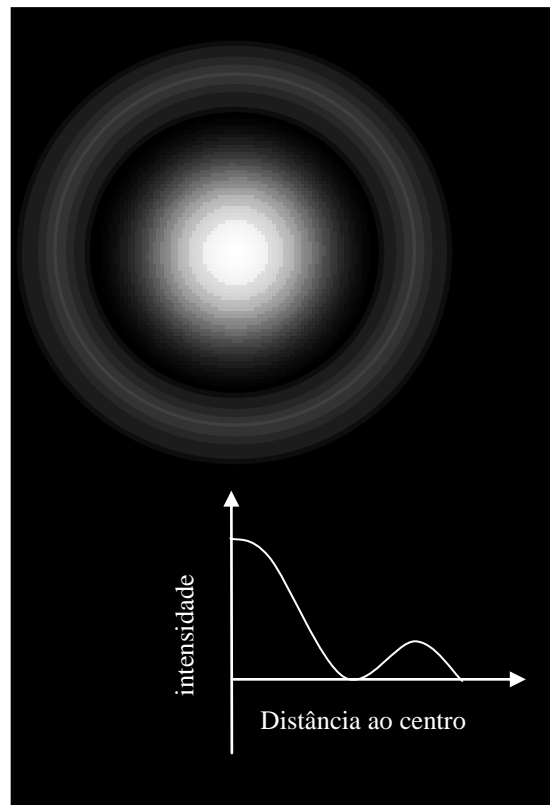


Figura 3.7. Representação esquemática da figura de difração e gráfico indicativo da variação da intensidade conforme a distância, mostrando apenas um dos anéis de difração ao redor do círculo central brilhante.

A figura de difração surge em virtude de outro fenômeno que acontece com as ondas, a *interferência*. Para simplificar, vamos pensar em duas ondas idênticas. Se elas se encontram e estão em fase, isto é, as cristas e os vales coincidem, suas amplitudes são somadas, reforçando-se, o que chamamos de *interferência construtiva*. Por outro lado, se um vale de uma onda encontra a crista da outra, elas se anulam e temos uma *interferência destrutiva* (fig. 3.8). Tudo se passa como se, ao passar por uma fenda, a onda original se comportasse como se fosse emitida por minúsculas fontes que agora se localizam na fenda, cada fonte emitindo suas próprias ondas que, desta forma, podem interferir construtiva ou destrutivamente com as demais (princípio de Huygens). Na subseção 3.2.2 daremos os detalhes de como isso acontece no caso de duas antenas, para o entendimento da importante técnica da interferometria, usada com frequência nas observações em rádio.

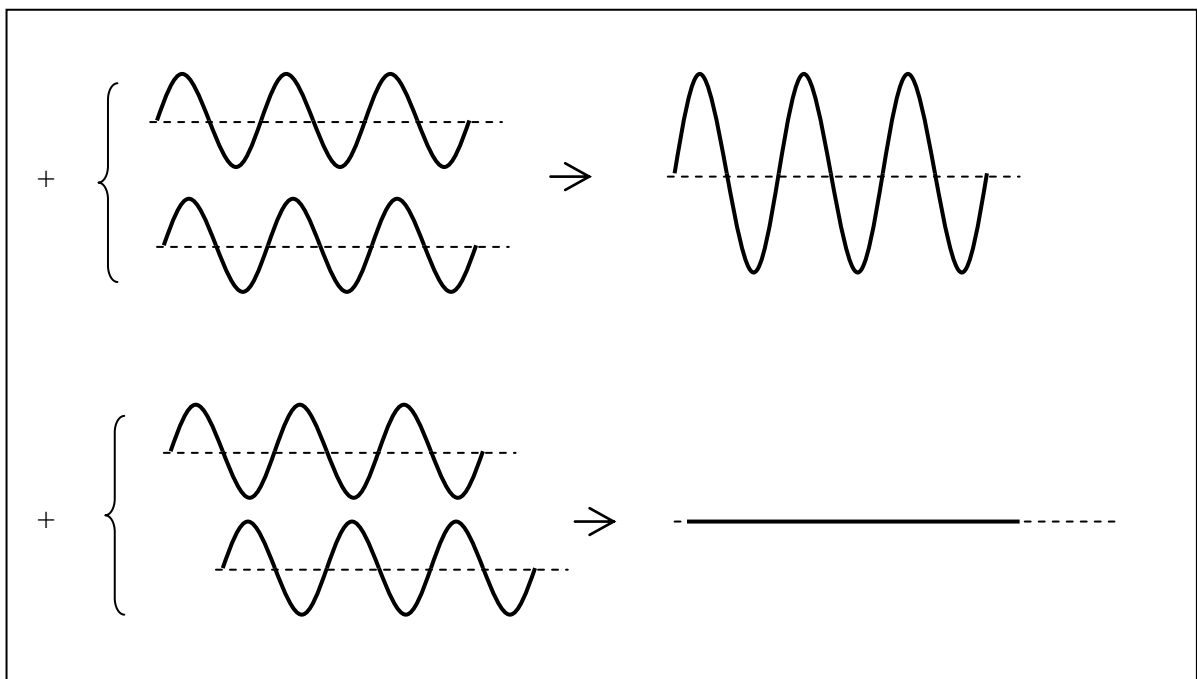


Figura 3.8. Interferência construtiva e destrutiva.

As ondas eletromagnéticas são constituídas por campos elétricos e magnéticos que oscilam de acordo com as frequências das faixas mencionadas (luz visível em cerca $3 \cdot 10^{14}$ Hz e ondas de rádio de 10 cm em 3 GHz, por exemplo). Esses campos oscilam em fase e viajam no vácuo com a velocidade da luz, cerca de 300 mil quilômetros por segundo. A fig. 3.9 dá uma ideia disso. Normalmente, uma fonte emite esses campos sem uma direção privilegiada, emitindo ondas cujos campos magnéticos e elétricos podem oscilar em diversos planos. Todavia, características especiais da fonte emissora ou da região em que as ondas se

propagam podem fazer com que as ondas que chegam aos nossos receptores tenham uma direção preferencial de oscilação; dizemos, então, que as ondas estão *polarizadas*. Um exemplo importante disso é a presença de grãos de poeira no meio interestelar, que se alinham com o campo magnético da Galáxia e produzem polarização na luz estelar, permitindo aos astrônomos obter importantes informações sobre este material.

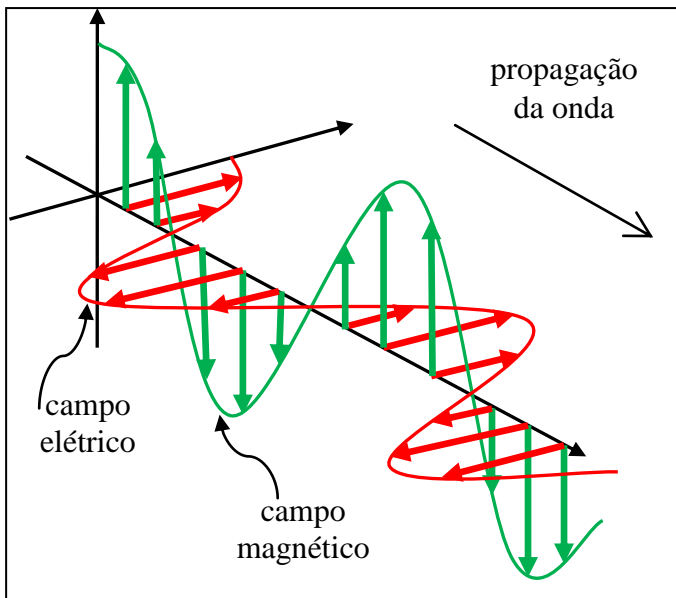


Figura 3.9. Planos de oscilação dos campos elétrico (em vermelho) e magnético (em verde). Os planos de oscilação são perpendiculares entre si e os campos se propagam na direção indicada.

3.1.3. MISCELÂNIA: UM POUCO MAIS DE FÍSICA

Reunimos nesta subseção alguns tópicos adicionais envolvendo outros aspectos de Física que serão úteis para entendermos melhor as técnicas com que os astrônomos e radioastrônomos deduzem várias propriedades dos astros em estudo, como temperaturas, velocidades e até composições químicas.

Corpo Negro. Todos os corpos emitem radiação eletromagnética. Porém, é necessário que o corpo esteja a temperaturas relativamente altas para emitir luz visível. Um prego levado ao fogo inicialmente não emite luz visível, mas à medida que é aquecido, emitirá primeiramente uma luz de coloração avermelhada e progressivamente, irá emitir luz com mais componentes azulados, passando, antes disso, a emitir uma luz alaranjada, amarelada e branco-amarelada. O estudo sistemático desse fenômeno, ainda no século XIX, levou os físicos a chegarem ao conceito de *corpo negro*. O corpo negro seria um perfeito emissor de radiação, bem como um

perfeito receptor: à temperatura ambiente, todas as radiações que incidem sobre ele são absorvidas e isso fará com que ele tenha o aspecto de um corpo totalmente negro². Temos aproximações deste conceito na vida cotidiana: uma camiseta preta absorve mais radiação do que uma camiseta branca, daí a recomendação de usarmos roupas claras em dias muito quentes. Descobriu-se que materiais que se aproximavam do conceito de corpo negro, quando submetidos a altas temperaturas, irradiavam de forma muito semelhante, independente da sua composição química. A forma como esses corpos irradiam é conhecida como *Distribuição de Planck*, em homenagem ao físico alemão que, em 1900, deduziu corretamente a expressão matemática que governava o fenômeno, usando argumentos que iniciaram o entendimento da física quântica. Não entraremos em detalhes sobre esta expressão, pois isso fugiria um pouco do escopo deste trabalho, mas é interessante contemplar e refletir sobre os gráficos que delineiam o comportamento da emissão do corpo negro, para diferentes temperaturas, que vemos na fig. 3.10.

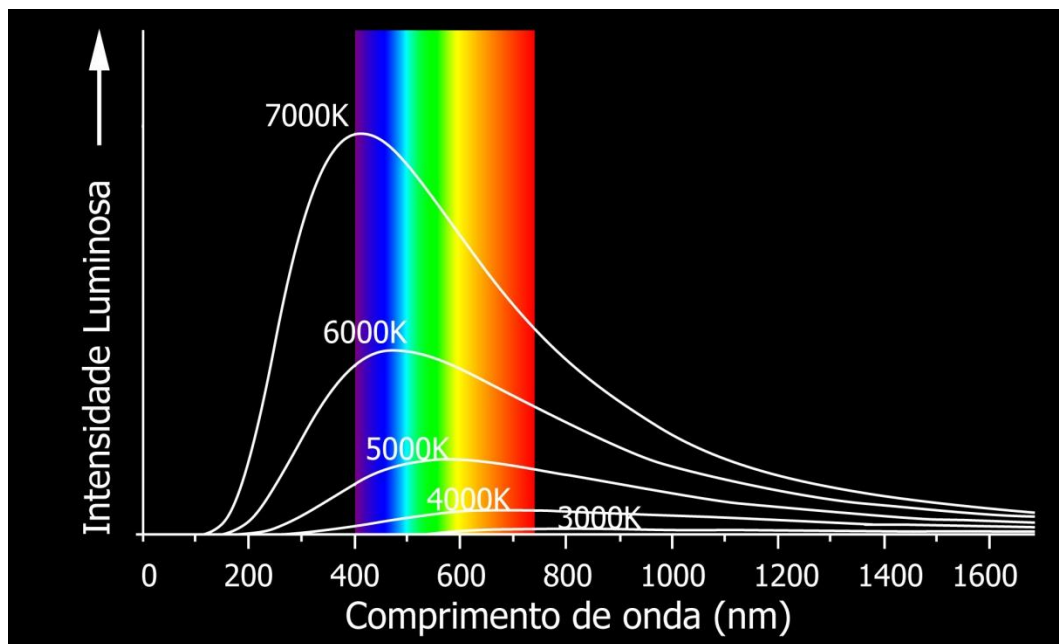


Figura. 3.10. Curvas que descrevem a distribuição da intensidade luminosa de um corpo negro para diferentes temperaturas. O espectro ao fundo, com as cores familiares do arco-íris, é indicativo e não corresponde, com precisão, à posição das cores em relação aos comprimentos de onda. Crédito da imagem: Rafael M. Santucci e Elisa C. Arizono.

² Lembre o leitor que os objetos coloridos que vemos se apresentam assim por absorção e reflexão *seletiva* das cores constituintes da luz branca, que é a soma de todas as cores. Assim, um objeto que tem a cor azul (não luminoso) é aquele que absorve todas as outras cores, refletindo *apenas* o azul. Um objeto branco reflete todas as cores e um objeto que vemos como negro é visto assim porque ele absorve todas as cores.

Um exame desta figura nos permite perceber que corpos a temperaturas menores têm seus picos de emissão deslocados para *maiores* comprimentos de onda (ou seja, mais para o vermelho). Por outro lado, corpos com maior temperatura têm picos de emissão em direção a comprimentos de onda *menores* (ou seja, mais para o violeta). Na figura, note que o corpo negro à temperatura de 7.000 K tem o pico de emissão próximo a 400 nanômetros³, ou seja, no violeta, como pode ser visto no espectro que foi colocado ao fundo. Note também que mesmo que um corpo emita mais radiação num determinado comprimento de onda, não significa que ele não emita outros comprimentos de onda também. A cor de um objeto luminoso será uma composição das diversas cores que ele emite. Assim, mesmo que um corpo negro tenha pico de emissão no verde, não o veremos como a luz verde de um farol de trânsito. Como ele emitirá outras cores e como verde ocupa uma faixa muito estreita do espectro visível, ele será visto como um objeto branco-amarelado, o que, de fato, corresponde ao caso do Sol, que é uma estrela amarela com pico de emissão no verde. Corpos com temperaturas mais baixas têm picos de emissão em comprimentos de onda ainda maiores que o vermelho: o infravermelho e as ondas de rádio. Desta forma, a emissão de corpo negro de fontes a baixas temperaturas (emissão térmica) é uma das formas que frequentemente são observadas em Radioastronomia, como mencionamos no final da seção 3.1.1. Assumindo que as estrelas irradiam como corpos negros, basta medir a distribuição da sua energia nos diversos comprimentos de onda, montando um gráfico semelhante à fig. 3.10. Dependendo de onde caia o pico de emissão, poderemos determinar a temperatura do corpo emissor.

Espectroscopia. Quando decompomos a radiação proveniente de um astro, obtemos o seu *espectro*. Desde o século XIX, observou-se que os espectros obtidos da luz das estrelas e do Sol apresentavam um fundo contínuo, com a distribuição das cores familiares do arco-íris. Sobrepostas a este contínuo, os astrônomos observaram linhas escuras, que não estavam distribuídas ao acaso, mas seguiam um padrão que se repetia em várias estrelas (fig. 3.11).

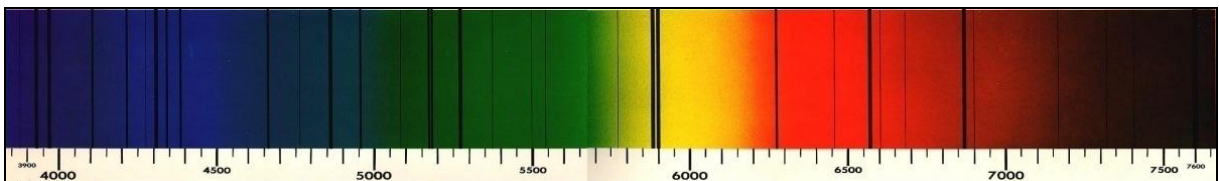


Figura 3.11. Trecho do espectro solar abarcando o espectro visível com as principais linhas de absorção. Crédito da imagem: Rafael M. Santucci e Elisa C. Arizono.

³ Um *nanômetro* é uma unidade de distância que equivale a um bilionésimo de metro (10^{-9} m).

Mais tarde, descobriu-se que estes padrões e a sua posição no espectro correspondiam a “impressões digitais” dos elementos químicos (e às vezes das moléculas) presentes na atmosfera dessas estrelas. O fundo contínuo com as cores do arco-íris correspondem à emissão de corpo negro proveniente das camadas mais quentes, logo abaixo da atmosfera. A atmosfera, mais fria, composta de gases como hidrogênio, hélio e elementos mais pesados, absorve parte da emissão de corpo negro e vemos esta absorção como as linhas escuras no espectro. Cada elemento químico ou molécula tem um padrão característico de absorção, e isso pode ser obtido até em laboratórios na Terra, de forma que, uma vez observados estes padrões, podemos saber que elemento ou molécula está presente na atmosfera estelar, consultando um catálogo de espectros (fig. 3.12). O espectro com fundo contínuo com linhas escuras sobrepostas é apenas um tipo de espectro, chamado *espectro de absorção*. Há também *espectros de emissão* e também aqueles em que observamos apenas o contínuo, sem linhas de emissão ou absorção. A ocorrência de cada tipo é governada pelas chamadas *leis de Kirchoff* (fig. 3.13), físico alemão que se dedicou ao seu estudo ainda no século XIX.

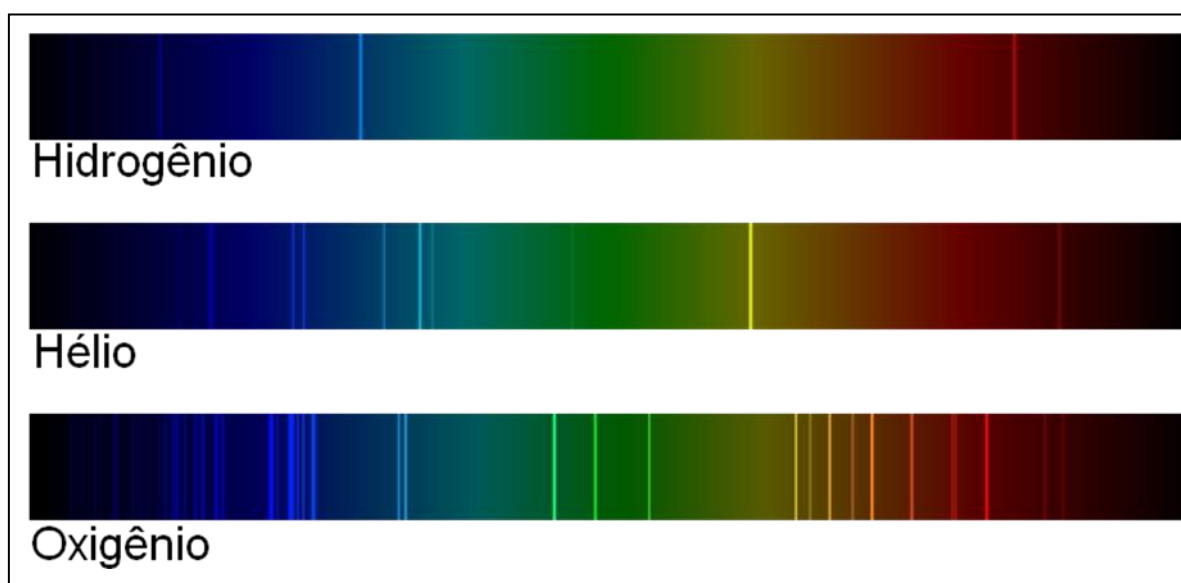


Figura 3.12. Amostra de catálogo de espectros. Cada elemento químico possui uma “assinatura espectral”. Os espectros mostrados são espectros de emissão (ver fig. 3.13). Crédito da imagem: Roberto Boczko.

Modernamente, em Radioastronomia e mesmo em Astronomia óptica, os espectros são visualizados como curvas e as linhas ou bandas (faixas que correspondem à presença de moléculas) são vistas como picos ou decréscimos nessas curvas. Os picos correspondem às linhas ou bandas de emissão e os decréscimos como linhas ou bandas de absorção, que estão “envelopadas” por uma curva de fundo que corresponde ao contínuo (fig 3.14).

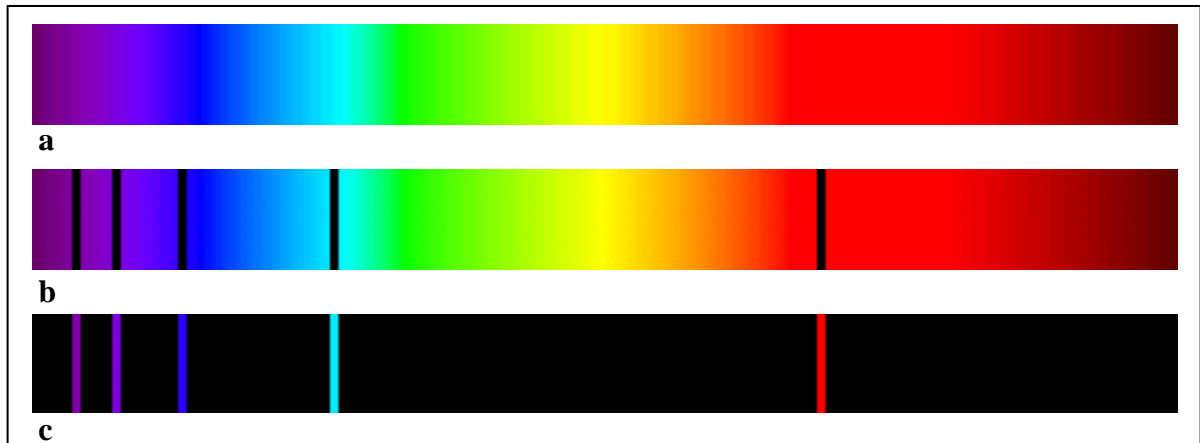


Figura 3.13. Leis de Kirchoff:

a: espectro contínuo, emitido por gases a alta pressão, sólidos e líquidos incandescentes;

b: espectro de absorção emitido por gases a baixas densidades, à frente de uma fonte emissora de espectro contínuo mais quente;

c: espectro de emissão, emitido por gases a baixas densidades e excitados por uma fonte de radiação.

Crédito da imagem: Elisa C. Arizono.

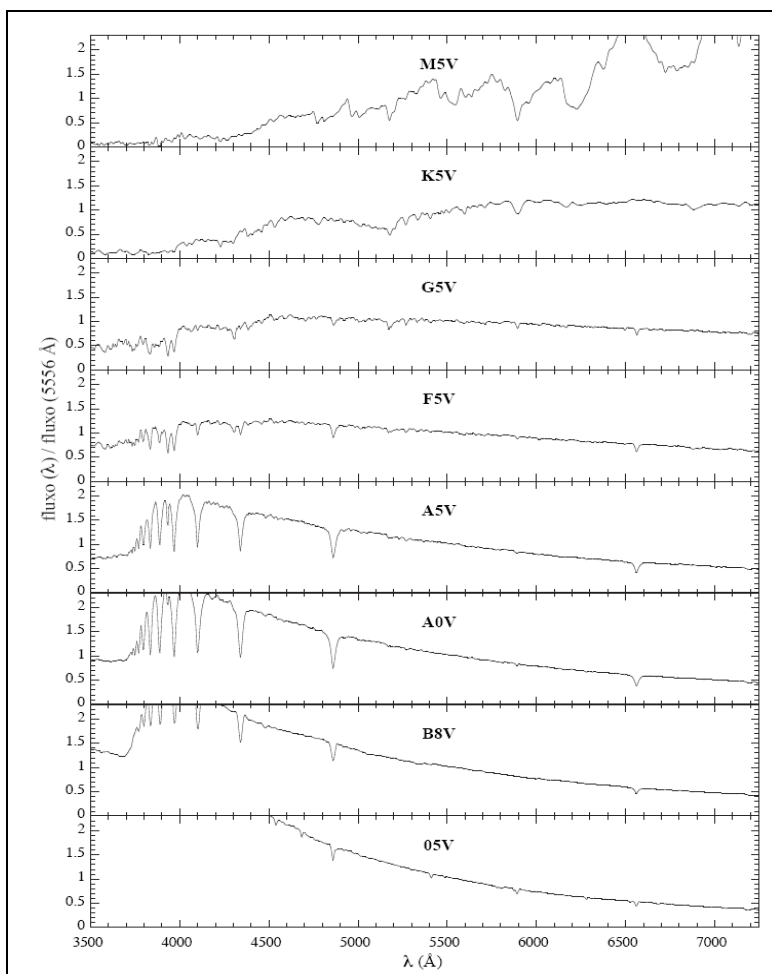


Figura 3.14. Espectros estelares. No eixo vertical encontramos o comprimento de onda, λ , em angstroms. Um angstrom (\AA) equivale a um décimo bilionésimo de um metro. No eixo vertical há uma indicação da energia luminosa recebida em cada comprimento de onda. Várias curvas de espectros estelares são mostradas. Ao lado de cada curva vemos uma referência ao tipo espectral da estrela, que descreve várias de suas características como cor, temperatura e intensidade de linhas de absorção. As linhas de absorção são vistas como os decréscimos nas curvas que são aproximadamente de corpos negros. Crédito da imagem: Lima Neto (2009).

Efeito Doppler. É muito familiar a experiência de ouvirmos o som de uma fonte sonora em movimento. Uma ambulância ou o apito de um trem são exemplos bem conhecidos. O apito do trem ou a sirene da ambulância soam mais agudos quando estão se aproximando e mais graves quando estão se afastando de nós. Isto é conhecido como efeito Doppler, em homenagem ao astrônomo e físico austríaco Christian Doppler (1803-1853), que estudou o assunto no século XIX. O efeito Doppler também é aplicável à luz e outras radiações eletromagnéticas e, nestes casos, recebe o nome de efeito Doppler-Fizeau, pois foi o físico francês Hippolyte Fizeau (1819-1896) que estendeu o entendimento do fenômeno às ondas luminosas. De forma análoga à do som, fontes que se deslocam afastando-se do observador têm suas emissões desviadas para maiores comprimentos de onda (e no caso da luz visível isto significa para o lado vermelho do espectro). Fontes que se aproximam são vistas apresentando emissões deslocadas para menores comprimentos de onda (em direção ao azul para a luz visível). Assim, fala-se em *redshift* (desvio para o vermelho) para fontes que estão se afastando de nós e *blueshift* (desvio para o azul) para as que estão se aproximando. Na observação astronômica e radioastronômica, o efeito Doppler (Doppler-Fizeau, para sermos precisos, mas vamos simplificar mencionando apenas efeito Doppler daqui para frente) é de extrema importância. A velocidade da fonte em relação ao observador, de afastamento ou de aproximação, pode ser medida a partir da identificação das linhas espectrais. Em laboratório (fonte em repouso), as linhas são observadas em comprimentos de onda bem conhecidos. Se uma fonte se afasta de nós, vemos estas linhas deslocadas para o sentido de maiores comprimentos de onda (*redshift*). Este deslocamento das linhas pode ser medido e pode-se mostrar que está relacionado com a velocidade da fonte através da seguinte relação:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad (3.2)$$

Onde:

$\Delta\lambda$ é a diferença entre os comprimentos de onda, $\lambda - \lambda_0$, sendo que λ é o comprimento de onda em que a linha é observada na fonte *em movimento* e λ_0 é o comprimento de onda em que se observa a linha em laboratório (fonte *em repouso em relação ao observador*);

λ_0 , repetindo, é o comprimento de onda em que se observa a linha em laboratório;

v é a velocidade da fonte em relação ao observador;

c é a velocidade da luz, cerca de 300 mil quilômetros por segundo.

A equação 3.2 serve para fontes com velocidades baixas, isto é, muito menores do que a velocidade da luz. Para fontes que se deslocam com velocidades próximas à da luz, não se pode ignorar efeitos relativísticos (relacionados com a teoria da Relatividade Especial de Einstein, de 1905) e para estes casos, vale a seguinte relação:

$$1 + \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{1 + v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (3.3)$$

A quantidade $\Delta\lambda/\lambda_0$ é o que se chama, de forma mais precisa, de deslocamento para o vermelho ou *redshift* e recebe o símbolo z . A equação 3.3 pode se apresentar também sob a seguinte forma:

$$\frac{v}{c} = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} \quad (3.4)$$

A partir da equação 3.4, obtemos a velocidade para objetos que se deslocam a frações consideráveis da velocidade da luz. Isto acontece com objetos muito distantes, extragalácticos, como galáxias e quasares, e está relacionado a efeitos cosmológicos, ligados à expansão do Universo (seção 2). A velocidade assim obtida fornece uma indicação das distâncias envolvidas, uma vez que se descobriu, logo nas primeiras décadas do século XX, que a velocidade de afastamento desses objetos está relacionada com a sua distância de nós através da *Lei de Hubble*:

$$v = H_0 d \quad (3.5)$$

Onde:

v é a velocidade da fonte, como antes;

H_0 é a constante de Hubble, cujo valor aceito atualmente é de $72 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$ (a unidade se lê “quilômetro por segundo por megaparsec”, e significa que a cada megaparsec – cerca de 3 milhões de anos luz – os objetos se afastam 72 km/s mais rapidamente de nós devido à expansão universal);

d é a distância, em megaparsec (1 megaparsec $\approx 3,26$ milhões de anos-luz).

Desta forma, uma fonte extragaláctica com *redshift* de 0,06 está a uma distância de 790 milhões de anos-luz, e uma fonte com *redshift* de 5 se encontra a uma distância de 12,8 bilhões de anos-luz.

Um exemplo de cálculo de distância a partir do *redshift* pode ser visto no apêndice A.1.

3.2. RADIOTELESCÓPIOS

Nesta e nas próximas subseções, discutiremos aspectos relacionados aos radiotelescópios. Falaremos tanto de aspectos gerais quanto de tópicos mais técnicos, envolvendo estes instrumentos que são os “olhos” com os quais podemos enxergar o Universo em ondas de rádio.

Um radiotelescópio é um instrumento que precisa ter uma grande sensibilidade, pois a energia que chega até nós, proveniente das radiofontes, é muito pequena. Para termos uma ideia disso, uma radiofonte muito brilhante, o que não se encontra com frequência, é uma fonte cuja energia por intervalo de tempo, por unidade de área e por intervalo de frequência (quantidade essa tecnicamente conhecida como *densidade de fluxo*) é dada pela unidade comumente encontrada em Radioastronomia, o Jansky (Jy):

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$$

Para o leitor não familiarizado com exatas, o número citado pode não fazer muito sentido. Vamos dar a ele um pouco mais de significado, então. O número acima diz que num intervalo de 1 Hertz (digamos entre 1.420.000 Hz e 1.420.001 Hz para usarmos uma frequência famosa), cada metro quadrado do radiotelescópio recebe 10^{-26} watts. Ora, 10^{-26} watts é uma potência *muito* pequena. Para termos uma ideia de quão pequena é, um cálculo simples mostra que para recolhemos dessa fonte uma potência equivalente à emitida por uma simples lâmpada comum de 60 watts, que mal ilumina uma pequena sala, precisaríamos de um radiotelescópio com área equivalente à de cerca de *50 trilhões de vezes a área de todo o planeta Terra*, incluindo aí a área dos oceanos e não só a dos continentes!

Um radiotelescópio é composto não só pela parte refletora, que capta as ondas que chegam provenientes do espaço, mas também pela montagem (responsável pela sustentação da parte refletora e instrumentos, apontamento e acompanhamento dos objetos de estudo¹) e também pelos equipamentos a ele acoplados, que colhem, ampliam e registram as

¹ Lembre-se que a Terra está em rotação e que os astros parecem girar em torno de nós dia após dia, com o chamado *movimento diurno*, de forma que um instrumento astronômico precisa compensar este movimento se o pesquisador quiser acompanhar o objeto de estudo por um bom tempo.

características da radiação focalizada pela parte refletora. A fig. 3.15 mostra um radiotelescópio típico e seus principais componentes.

Embora as antenas mais utilizadas tenham a forma parabólica, como a mostrada na figura 3.15, há diversos tipos de antenas. Até mesmo um único fio pode servir como antena de um radiotelescópio: esta é uma antena de dipolo. Neste caso, naturalmente, o sinal obtido será demasiadamente fraco. Se, todavia, colocarmos vários desses fios próximos, já teremos um sinal mais forte. Um arranjo assim, composto por milhares de postes cobrindo dois hectares, na década de 1960, foi o instrumento utilizado para descobrir os pulsares (seção 2): trata-se do radiotelescópio de Cambridge, na Inglaterra.

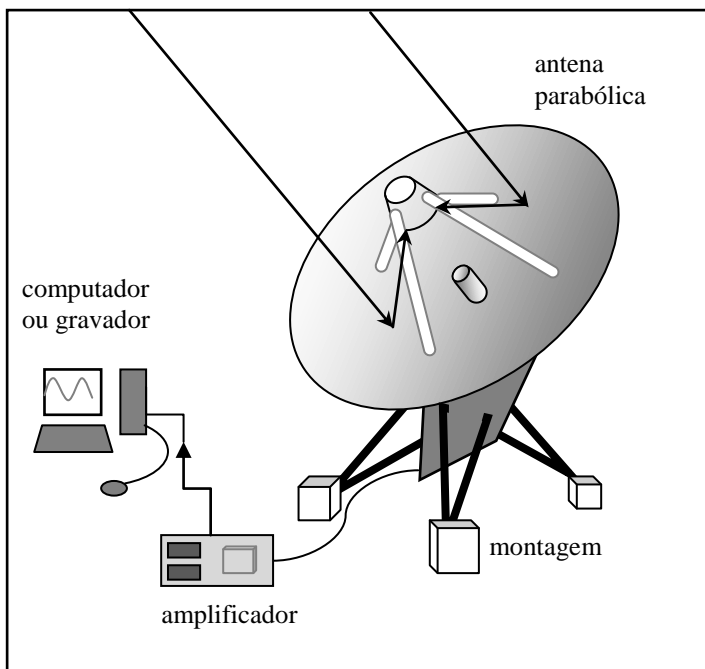


Figura 3.15. Esquema de um radiotelescópio.

Um radiotelescópio como o de Cambridge não pode ser apontado para uma região específica do céu e simplesmente espera-se que o objeto de estudo, em seu movimento aparente pelo céu, passe acima do conjunto de antenas durante um breve período, para coletar os dados. Para outros estudos, nos quais é necessário um apontamento para uma região específica ou a coleta de dados num bom intervalo de tempo (minutos ou horas), os radioastrônomos, assim como seus colegas da Astronomia óptica, fazem uso das montagens. Basicamente, há três tipos de montagens: altazimutal, equatorial e de trânsito. Na montagem altazimutal, o telescópio pode se movimentar em dois eixos: um vertical, que permite o

movimento em azimute, e outro horizontal, que permite o movimento em altura² (fig. 3.16a). Já na montagem equatorial, um dos dois eixos em que o radiotelescópio pode se movimentar, o chamado *eixo polar*, aponta na direção do *polo celeste* visível no hemisfério da Terra em que o radiotelescópio está instalado (fig. 3.16b). Em tese, uma vez apontado para o objeto, basta o movimento ao redor do eixo polar para compensar o movimento aparente do astro. Assim como na montagem altazimutal, o radiotelescópio se movimenta em dois eixos, que permitem o movimento em ascensão reta (eixo polar) e declinação³. A montagem de trânsito lembra a montagem equatorial, com a diferença que só há movimento em declinação.

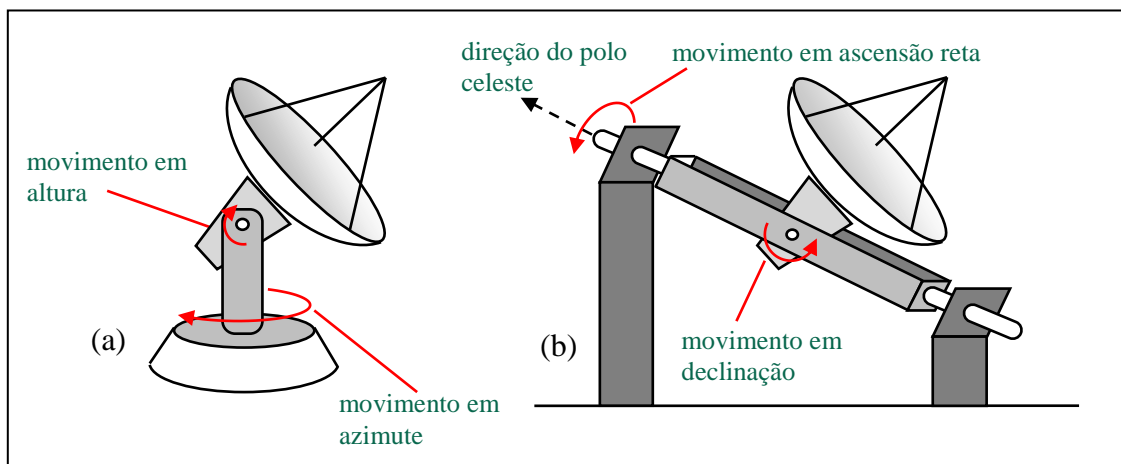


Figura 3.16. Montagem altazimutal (a) e montagem equatorial (b).

O equivalente ao eixo polar nesta montagem não precisa estar apontando para o polo celeste, mas precisa estar na direção norte-sul. Assim, a antena fica direcionada no *plano meridiano*, que é o plano imaginário que divide a abóbada celeste vista pelo observador em dois hemisférios, oriental e ocidental. De forma semelhante ao telescópio de dois hectares de Cambridge, nesta montagem a radiofonte pode ser observada num curto intervalo de tempo, durante a sua *passagem meridiana*, também chamada de *trânsito*, daí o nome desta montagem.

² Altura e azimute são duas coordenadas que têm como referência o horizonte do observador. A altura se refere à distância angular do astro ao horizonte, enquanto o azimute mede a distância angular no próprio horizonte, e geralmente toma como ponto de partida um ponto cardeal, o Norte, por exemplo, no sentido N-E-S-W.

³ Ascensão reta e declinação são coordenadas de outro sistema de coordenadas, que usa como referência o Equador Celeste, e é análogo às coordenadas geográficas, sendo que a latitude geográfica corresponde à declinação e a longitude geográfica corresponde à ascensão reta.

Voltando aos tipos de antenas, vimos que há antenas de dipolo e antenas parabólicas, sendo estas as mais comuns. Há também antenas em forma de corneta, como a utilizada na descoberta da Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas, em 1965 (fig. 3.17), antenas esféricas, como a de Arecibo, em Porto Rico (fig. 3.25 – seção 3.2.3), a antena do radiotelescópio de Kraus, como a de Nancay, na França (fig. 3.18) e a do radiotelescópio parabólico cilíndrico, como a encontrada na Universidade de Illinois, Estados Unidos (fig. 3.20), entre outras.

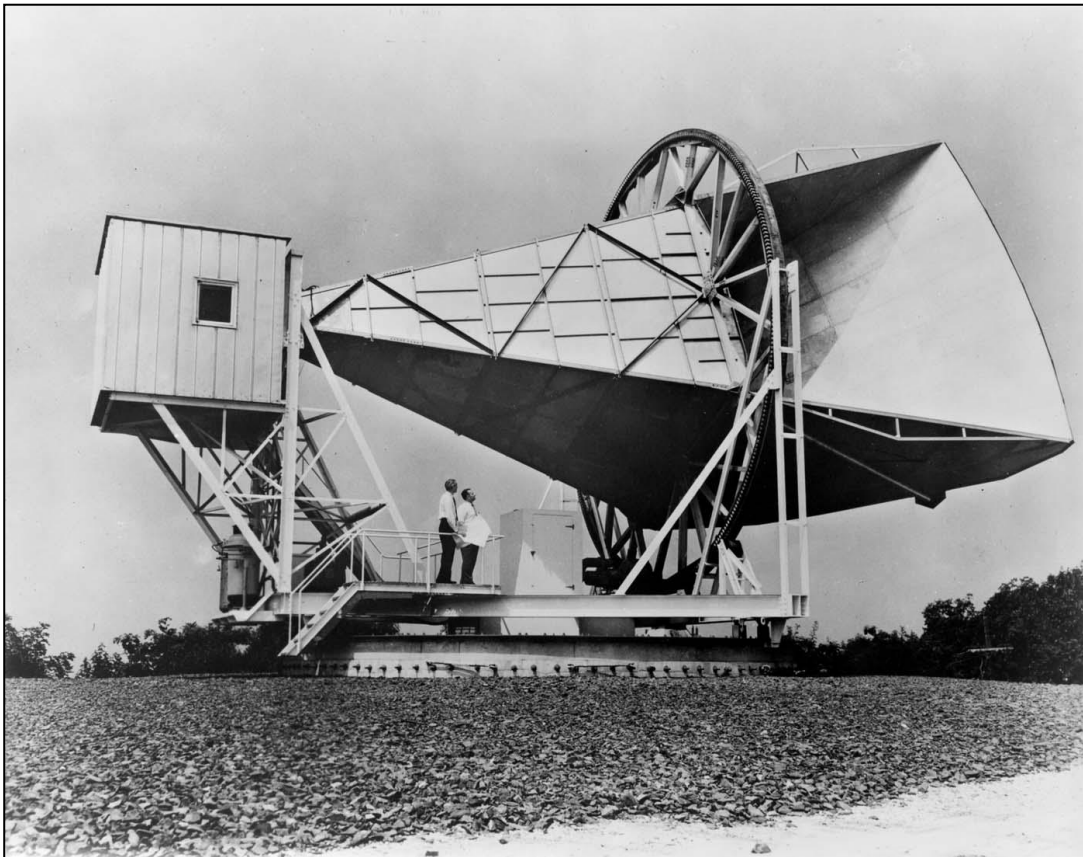


Figura 3.17. Antena Holmdel, em Nova Jersey, E.U.A. Crédito da imagem: Bell Laboratories.

Os radiotelescópios se subdividem em dois grandes grupos: o de feixe único e os interferômetros. Os radiotelescópios de feixe único são compostos por uma única antena. Os interferômetros são composições de dois ou mais radiotelescópios de feixe único, combinados através de técnicas de interferometria (veja seção 3.2.2).

A seguir, falaremos com um pouco mais de detalhe de um parâmetro de extrema importância para os estudos em Radioastronomia: a *resolução*, já mencionada em seções anteriores. A partir do estabelecimento deste conceito, abordaremos técnica da interferometria

e finalizaremos esta seção (um tanto árdua) com um passeio pelos maiores radiotelescópios da atualidade.



Figura 3.18. Radiotelescópio Kraus em Nancay, França. Crédito da imagem: Setileague.

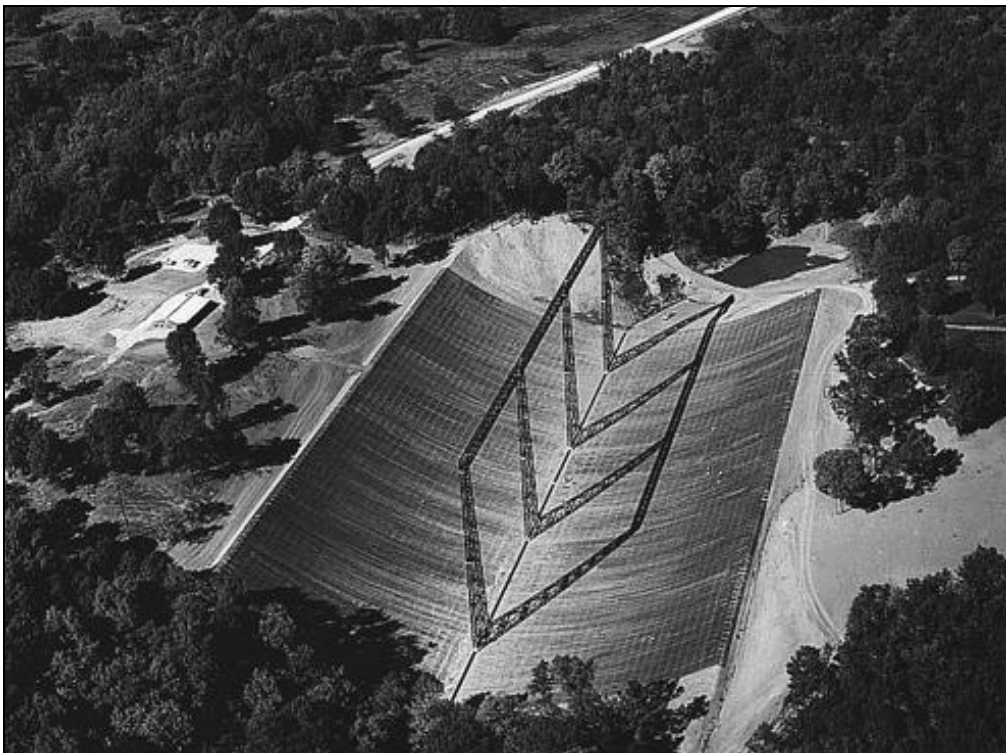


Figura 3.19. Radiotelescópio parabólico cilíndrico da Universidade de Illinois, E.U.A. Crédito da imagem: Universidade de Illinois.

3.2.1. RESOLUÇÃO E FIGURA DE RADIAÇÃO

Embora haja muitas semelhanças entre o funcionamento de um telescópio óptico e um radiotelescópio, há diferenças importantes que implicam em outra forma de “ver” os astros, conforme o tipo de radiação. Uma diferença importante é a *resolução*. Hoje em dia, todos nós temos uma noção do conceito de resolução graças à disseminação de aquisição e distribuição de imagens proporcionada pelos computadores e câmeras digitais. Intuitivamente, sabemos que uma imagem com boa resolução é aquela que permite distinguir maiores detalhes. Basicamente, podemos transportar esta ideia para a Astronomia: se uma imagem ou sinal obtido por um instrumento apresenta boa resolução, podemos distinguir mais detalhes, obter mais informações sobre o objeto de estudo. Infelizmente, a definição exata de resolução se refere ao *menor ângulo* no qual um instrumento é capaz de discernir algum detalhe. O conceito popular de resolução, então, está mais próximo de *poder separador, ou poder de resolução*. Assim, se duas fontes luminosas são vistas como um único ponto por um telescópio e outro telescópio consegue distinguir os dois pontos, dizemos que este outro telescópio apresenta maior poder separador ou maior poder de resolução. Matematicamente:

$$PR = \frac{1}{\theta_{\min}} \quad (3.6)$$

onde:

PR é o poder de resolução;

θ_{\min} é o ângulo de resolução, normalmente dada em segundos de arco (").

A equação 3.6 nos informa então que *quanto maior o ângulo de resolução de um instrumento, menor será o seu poder de resolução*, e que para termos acesso a maiores detalhes, o ângulo de resolução deve ser bem pequeno.

Como vimos na seção 3.1, em especial na fig. 3.2, ondas de rádio possuem comprimentos de onda muito maiores que os das ondas luminosas. Para que enxergássemos, em ondas de rádio, com o mesmo poder de resolução que enxergamos os astros com telescópios ópticos, precisaríamos de radiotelescópios tão grandes quanto a relação entre os comprimentos de onda dessas duas faixas. Explicando melhor: a razão entre os tamanhos dos

comprimentos de onda de rádio e da luz visível é da ordem de 10^5 . Com isso em mente, se quiséssemos construir um radiotelescópio com o mesmo poder de resolução de uma luneta comumente encontrada do mercado, com lente objetiva de 60 mm de diâmetro, com a qual podemos discernir as principais crateras lunares, as luas galileanas de Júpiter ou os anéis de Saturno, precisaríamos de um pouco mais de espaço, já que ele seria 10^5 vezes maior, ou seja, o diâmetro do radiotelescópio seria de 6 km!

Vamos agora ver uma importante relação entre o ângulo de resolução e o diâmetro do instrumento:

$$\theta_{\min} = 1,22 \frac{\lambda}{D} \text{ rad} \quad (3.7)$$

A equação 3.7 fornece uma relação muito simples entre o ângulo de resolução, θ_{\min} , o comprimento de onda, λ , e o diâmetro do radiotelescópio, D . O fator 1,22 se refere ao uso de funções de Bessel aplicadas ao fenômeno de difração (falamos de difração na seção 3.1.2). Este detalhamento, por questões de nível matemático, está fora do escopo deste trabalho. Todavia, podemos entender em linhas gerais como chegamos a este ângulo. Recordando o que vimos na seção 3.1.2, sabemos que a figura de difração semelhante à fig. 3.20 surge quando uma onda passa por uma abertura circular. A resolução pode ser definida a partir dessa figura. Usamos para isso o chamado *Critério de Rayleigh*¹:

Duas fontes são resolvíveis se o máximo central de uma estiver a uma distância igual ou maior ao do primeiro mínimo da outra.

Ou seja, em termos de distância angular, o ângulo de resolução, segundo o Critério de Rayleigh corresponde, muito simplesmente, *ao ângulo entre o centro do círculo de máxima intensidade e o primeiro mínimo* (fig.3.20).

Para efeitos de entendimento, a equação 3.7 nos dá uma visão clara da relação entre essas importantes grandezas. Mas não é muito prática, já que normalmente não lidamos com

¹ Em homenagem ao físico inglês John William Strutt (1842-1919), conhecido como Lord Rayleigh.

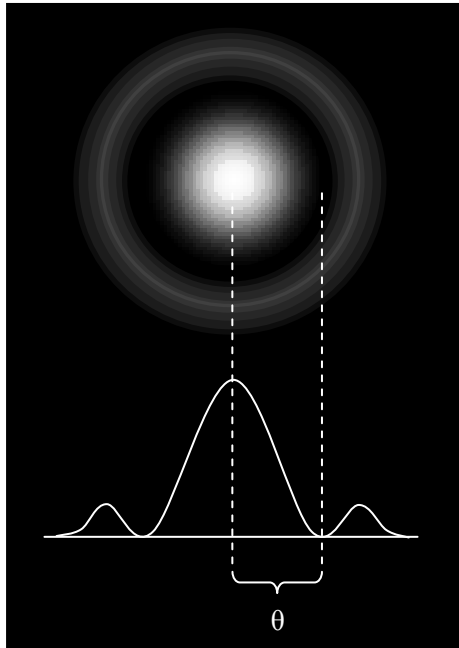


Figura 3.20. Ângulo de resolução utilizando o Critério de Raileigh.

ângulos em radianos, em Astronomia. Para torná-la mais utilizável, mostramos abaixo (equação 3.8) outras formas equivalentes, sendo que nelas o ângulo obtido sairá em segundos de arco (") e na última forma utilizamos a alternativa de expressar a relação em termos de frequência (simbolizada pela letra f), ao invés de comprimento de onda, fazendo uso da equação 3.1:

$$\begin{aligned} \theta_{\min} &= 1,22 \frac{\lambda}{D} \text{ rad} = 251643,06 \left(\frac{\lambda}{D} \right)'' = \\ &= 7544,07 \left(\frac{f}{\text{GHz}} \right)^{-1} \left(\frac{D}{10 \text{ m}} \right)^{-1}'' \end{aligned} \quad (3.8)$$

Um exemplo de cálculo de resolução foi deixado para o apêndice A.2.

Outra diferença importante entre os instrumentos ópticos e aqueles utilizados em Radioastronomia, além do poder de resolução, é a forma como o radiotelescópio “vê” uma porção do céu. Por razões que estão relacionadas à grande diferença entre os comprimentos de onda observados, um telescópio óptico nos fornece uma imagem que pode ser registrada como uma foto, dando um quadro geral da área do céu em estudo, mesmo que o campo observado seja pequeno. Podemos, então, contemplar uma imagem que é rica em detalhes como cores, formas, intensidades, tudo de uma só vez. Com um radiotelescópio, não é tão simples. Os sinais de rádio são convertidos em voltagens, e é necessário fazer uma varredura² do campo observado, medindo-se as diferentes intensidades e direções e compor essa varredura para se ter um quadro geral do que é observado. Uma boa analogia, descrita por Costa (2006) é pensar que tudo se passa como se observássemos o mundo com os nossos olhos, mas tendo à nossa frente um anteparo com um pequeno furo coberto por um material translúcido. Para compormos um quadro do que está à nossa volta, precisaríamos então varrer

² O termo “varredura” é bastante adequado: o radiotelescópio faz um movimento semelhante ao de uma vassoura, em zigue-zague, ou ainda como um pincel imaginário, “pintando” a região a ser observada, garantindo desta forma que toda a área seja coberta e que dela não escape nenhuma informação relevante.

todas as direções e fazer várias anotações de como variam a intensidade luminosa e a posição de tudo que passasse por este furo. Provavelmente captaríamos, dependendo da precisão dos nossos registros, apenas contornos pouco definidos, e perceberíamos, por exemplo, que de um lado há um objeto “claro e grande” e de outro lado há algo “pequeno e pouco iluminado”, ou algo assim. Levando esta analogia um pouco mais adiante, perceberíamos que o quadro que faríamos seria mais detalhado à medida que o furo se tornasse menor, pois poderíamos captar detalhes de porções cada vez mais reduzidas. Se o furo é muito grande – e lembre-se que é coberto de material translúcido e não de material transparente – veríamos apenas borrões à nossa volta. Nesta analogia, o tamanho do furo corresponderia à chamada *largura do feixe*. O feixe, ou *figura de radiação*, é a forma como a antena irradiaria se no lugar de receber estivesse enviando sinais (fig. 3.21)³. Dependendo das características do radiotelescópio, há direções nas quais ele irradia de forma mais intensa. Felizmente, essas direções não se distribuem de forma aleatória, havendo uma “área” projetada no céu⁴ em torno da região em que o radiotelescópio está apontado que concentra esta região de maior intensidade de emissão. O leitor deve estar se perguntando no que isso ajuda, já que em boa parte dos casos os radiotelescópios estão recebendo a radiação proveniente dos astros e não emitindo⁵. Também neste caso temos outra feliz constatação⁶: a figura de radiação também serve para nos informar como o radiotelescópio recebe. Além do mais, ela está intimamente relacionada ao ângulo de resolução.

Na fig. 3.21 vemos que há de fato uma região que concentra quase toda a radiação captada em torno do eixo do lóbulo primário. A figura exagera as proporções, mas na prática esta região é relativamente estreita. Todavia, há outras direções em que o radiotelescópio também captará radiação, felizmente com bem menos eficácia, representadas pelos lóbulos secundários. Na figura também podemos ver um ângulo θ , não por acaso a mesma letra usada para a resolução: é que se trata do próprio ângulo de resolução do radiotelescópio, que identificamos com a metade da largura do feixe à meia intensidade. A figura fala por si, mas

³ Embora não seja muito evidente, a figura de radiação na fig.3.21 corresponde ao gráfico da fig. 3.20, transferida para outro sistema de coordenadas, chamado coordenadas polares.

⁴ Há um nome apropriado para esta “área”: *ângulo sólido*. Contudo, para os objetivos deste trabalho, não entraremos em mais detalhes.

⁵ Radiotelescópios são usados como emissores (radares) na pesquisa planetária. Em 1974 o radiotelescópio de Arecibo foi usado para emissão de uma mensagem para uma possível civilização num aglomerado estelar distante.

⁶ Esta “feliz constatação” se chama *teorema da reciprocidade*, que não demonstraremos. Os leitores que se interessarem, todavia, poderão acompanhar a demonstração em Wilson (2009).

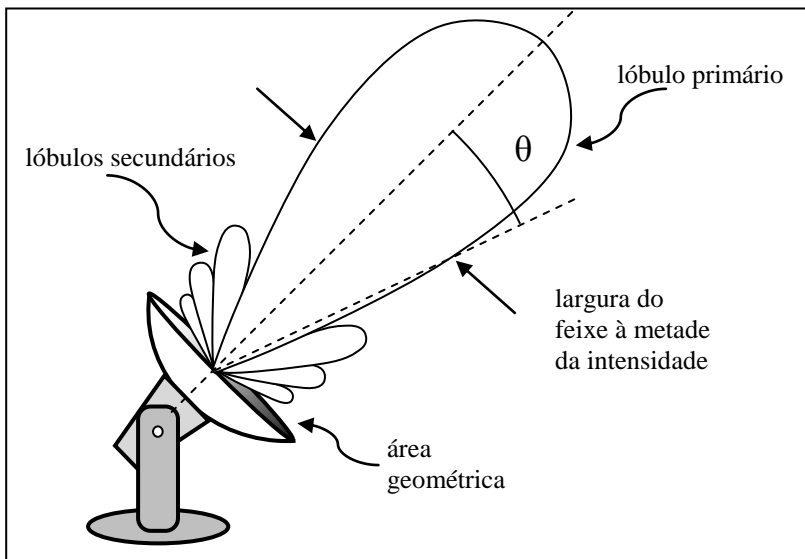


Figura. 3.21. Figura de radiação. Na figura, as proporções foram exageradas por uma questão de clareza.

pode ser mais bem entendida assim: tomando-se a metade do comprimento do eixo do lóbulo principal, verificando-se a largura angular da figura e tomando-se a metade deste valor – eis o ângulo de resolução do radiotelescópio.

3.2.2. INTERFEROMETRIA

Um grande problema com as observações em ondas de rádio diz respeito à resolução, como já mencionamos. Este problema tem sido contornado com a importante técnica da interferometria. Em sua forma mais simples, a técnica prevê o funcionamento de duas antenas idênticas, separadas por uma distância D . Se a radiofonte está sendo observada diretamente acima das antenas, as duas então observam as ondas perfeitamente em fase (fig 3.22a). Neste caso, os sinais combinados dos dois radiotelescópios se reforçam. Porém, à medida que o tempo passa, a fonte vai ficando mais baixa no céu, de tal maneira que as duas antenas captam ondas que não estão mais em fase (fig. 3.22b). Pois bem, nesta última situação, *poderemos ter um ângulo θ tal que as ondas, chegando a cada antena, fiquem defasadas de um ângulo de π radianos (180°)*. Neste caso, as ondas captadas pelas duas antenas se cancelam. Essas antenas “enxergam” o céu em rádio como padrões de claros e escuros ou *franjas de interferência*, como aquelas produzidas por duas fendas no caso óptico. A seguir, vamos entender um importantíssimo resultado obtido com a técnica de interferometria: *tudo se passa como se as duas antenas fossem pequenas superfícies localizadas numa estreita faixa de largura igual ao diâmetro das antenas, mas fazendo parte de um radiotelescópio maior, de diâmetro igual a D* .

Vamos analisar melhor a situação, para obtermos uma expressão para o ângulo de resolução. A geometria da fig. 3.22b nos permite construir uma figura mais detalhada, a figura 3.23.

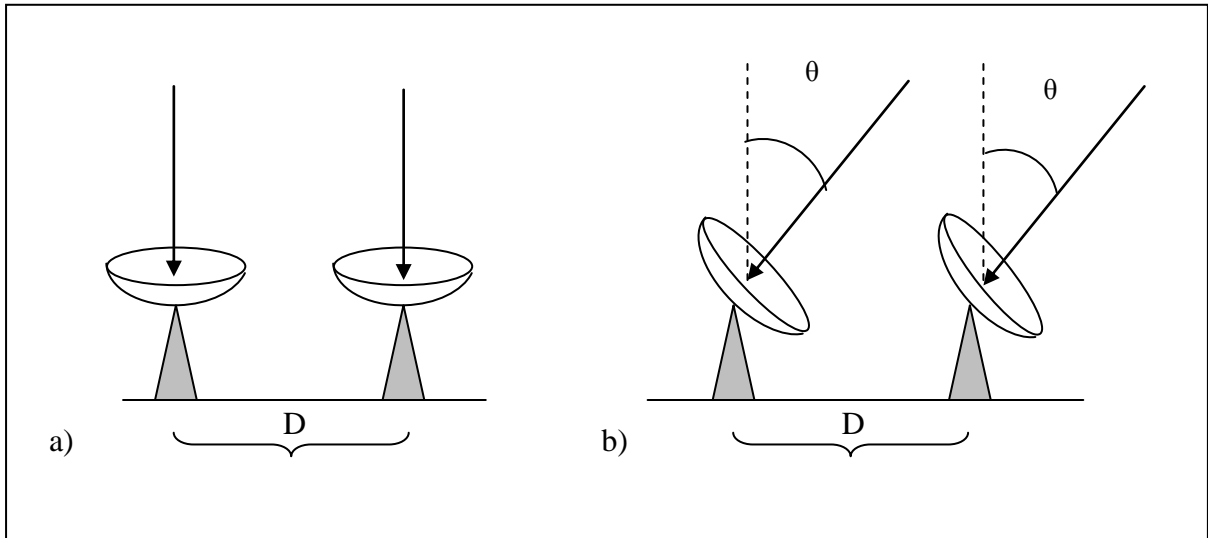


Figura 3.22. Antenas captando as ondas em fase (a) e fora de fase, observadas a partir de um ângulo θ em relação ao ponto diretamente e acima das antenas (b).

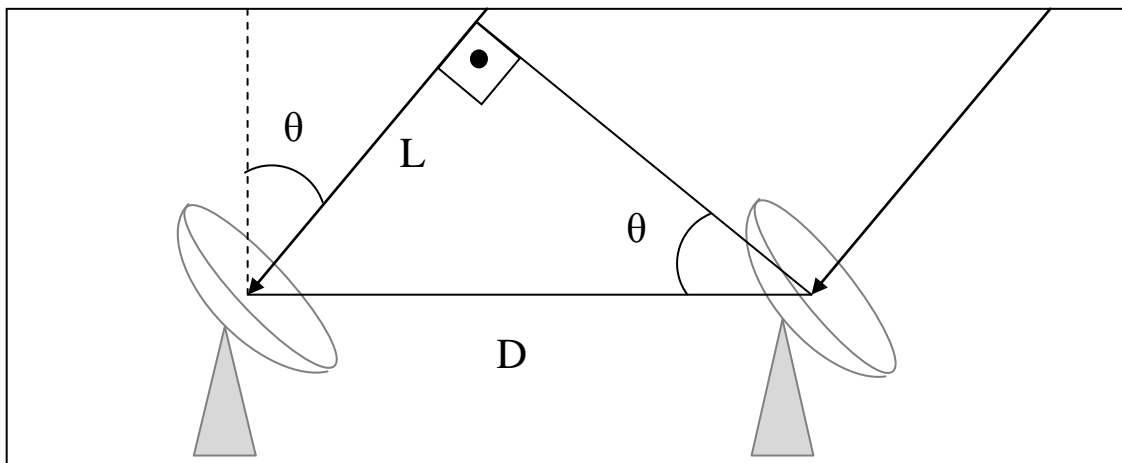


Figura 3.23. Geometria do interferômetro de duas antenas. A onda recebida na antena da esquerda teve que se propagar por uma distância adicional L , além daquela percorrida pela onda recebida pela antena da direita.

Podemos ver na fig. 3.23 que a distância adicional que a onda percorre na antena da esquerda corresponde a L . Utilizando a definição de seno, relacionamos muito facilmente a distância L , o ângulo θ e a distância D que separa as duas antenas:

$$L = D \sin \theta \quad (3.9)$$

Para termos a condição de interferência *constructiva* (recorde olhando a fig.3.8 – seção 3.1.2) é necessário que a distância adicional que a onda da esquerda percorre, ou a defasagem, corresponda a um múltiplo do comprimento de onda, λ :

$$L = m\lambda \quad (3.10)$$

Onde m é um número inteiro. Como as duas equações se referem à mesma quantidade, L , podemos escrever, então:

$$D \sin\theta = m\lambda \Rightarrow \sin\theta = \frac{m\lambda}{D}$$

Para ângulos muito pequenos, o *seno do ângulo é aproximadamente igual ao ângulo*, para ângulos em radianos. Matematicamente, expressamos isto assim:

$$\theta \approx \frac{m\lambda}{D} \quad (3.11)$$

Ora, supondo que a distância adicional L seja tal que a onda da esquerda esteja defasada em exatamente 1 comprimento de onda, teremos $m = 1$ e a equação 3.11 fica:

$$\theta \approx \frac{\lambda}{D} \quad (3.12)$$

Esta equação pareceu familiar ao leitor? Se não pareceu, dê uma olhada na equação 3.7: é praticamente igual, a não ser pelo fator 1,22. Podemos então aproximar a resolução do radiotelescópio com este ângulo θ !

Mesmo que os detalhes da dedução possam ter escapado ao leitor, permita-se constatar a felicidade desta conclusão:

As duas antenas, separadas por uma distância D , apresentam agora uma resolução equivalente à de uma única antena cujo diâmetro é esta mesma distância D !

Infelizmente, isso só vale ao longo da linha que separa estas duas antenas. Na direção perpendicular à linha que separa as antenas da fig. 3.23, a resolução volta a depender apenas do diâmetro das antenas, como no caso de uma única antena (eq. 3.7). Para minimizar este efeito, costuma-se dispor vários pares em outras direções. É o caso do VLA (*Very Large Array*), localizado nos EUA), em que as antenas são dispostas sob a forma de um “Y” (fig. 3.24).



Figura 3.24. Interferômetro VLA (*Very Large Array*), próximo a Socorro, Novo México, nos Estados Unidos. Crédito da imagem: Dave Finley, AUI, NRAO, NSF.

Um exemplo de cálculo de ângulo de resolução de um interferômetro pode ser acompanhado no apêndice A.3.

3.2.3. GRANDES RADIOTELESCÓPIOS PELO MUNDO

Vamos agora conhecer alguns dos grandes radiotelescópios em operação na atualidade. O maior radiotelescópio de antena única é o radiotelescópio de Arecibo, em Porto Rico (fig. 3.25). A estrutura que vemos acima do prato principal é chamada de sub-refletor e está a 137 metros de altura em relação à parte baixa do prato. Arecibo possui uma antena esférica e opera no intervalo de frequências de 50 MHz a 10 GHz.



Figura 3.25. Radiotelescópio de Arecibo. Crédito da imagem: NAIC-Arecibo Observatory, a facility of the NSF.

O radiotelescópio de Effelsberg (fig. 3.26) se localiza na Alemanha e possui um diâmetro de 100 metros, operando na frequência de 0,8 a 48 GHz.

Também com 100 metros, o radiotelescópio Robert C. Byrd de Green Bank, nos Estados Unidos (fig. 3.27), apresenta uma antena que foi construída de tal forma a se ajustar às variações térmicas (devido à incidência da luz solar, por exemplo) e gravitacionais (dependendo da posição do radiotelescópio, o seu próprio peso pode interferir na curvatura da superfície refletora, prejudicando a recepção das ondas). Ele faz isso através de um sistema

semelhante ao que é usado em alguns telescópios ópticos, que altera a superfície refletora para se ajustar às condições de observação (óptica adaptativa). Green Bank opera na faixa de frequências de 290 MHz a 48 GHz. Foi construído para substituir um radiotelescópio um pouco menor que surpreendentemente ruiu em 1988, graças à fadiga do material. O nome do novo radiotelescópio é uma homenagem a um senador americano que interviu na construção do instrumento.



Figura 3.26. Radiotelescópio de Effelsberg. Crédito da imagem: Max-Planck-Institut für Radioastronomie.

Apesar de ser um dos primeiros radiotelescópios, Jodrell Bank, na Inglaterra, ainda continua sendo um dos maiores radiotelescópios em operação, com 76 metros de diâmetro (fig. 3.5 – seção 3). Após um recente restauro e atualização, ele recebeu o nome do seu fundador, Bernard Lovell, sendo conhecido como radiotelescópio Lovell. O radiotelescópio Lovell opera nas frequências de 151 MHz a 24 GHz.



Figura 3.27. Radiotelescópio Robert C. Byrd em Green Bank, Virgínia Ocidental, E.U.A. Crédito da imagem: NRAO/AUI.



Figura 3.28. Em primeiro plano, o radiotelescópio “*The Dish*” de Parkes, próximo a Sydney, Austrália. Crédito da imagem: <http://outreach.atnf.csiro.au/visiting/parkes>

O Radiotelescópio de Parkes, na Austrália, tem 64 metros de diâmetro (fig. 3.28). Operando num intervalo de frequências que vai de 400 MHz a 24 GHz, Parkes é conhecido mundialmente por ser um dos primeiros grandes radiotelescópios e por ter sido a partir dele a identificação do quasar 3C 273, até então confundido com uma estrela na nossa Galáxia.

O VLA, sigla em inglês para *Very Large Array*, é um conjunto de 27 antenas de 25 metros de diâmetro cada, que perfazem uma formação em “Y”, com cada braço se estendendo por 20 quilômetros (fig. 3.29). A máxima separação é de 36 quilômetros. O VLA opera em frequências que vão de 74 MHz a 43 GHz.



Figura 3.29. O VLA, próximo a Socorro, Novo México, E.U.A. Crédito da imagem: VLA, NRAO.

O MERLIN, *Multi Element Radio-Linked Interferometer*, se estende por uma grande área no Reino Unido, com separação que chega a 217 quilômetros. Reúne 5 antenas de 25 metros, uma de 32 metros, além do radiotelescópio Lovell, de Jodrell Bank, completando o conjunto de 7 antenas que vemos na fig. 3.30. O MERLIN atua num intervalo de frequências que vai de 151 MHz a 24 GHz.

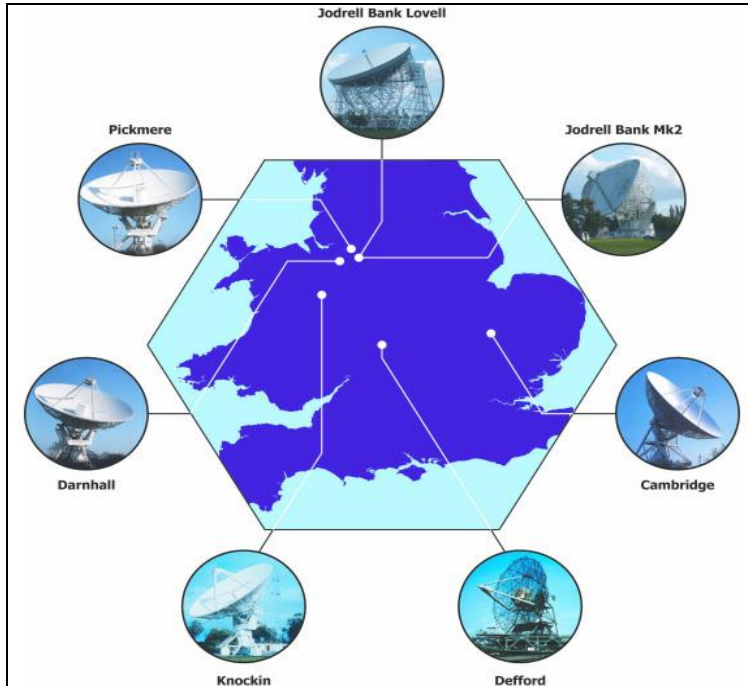


Figura 3.30. O arranjo MERLIN, no Reino Unido. Crédito da imagem: University of Manchester.

O VLBA, *Very Large Baseline Array*, é um conjunto de 10 antenas, cada qual com 25 metros de diâmetro, se estendendo por uma distância máxima de 8 mil quilômetros, nos Estados Unidos (fig. 3.31). O VLBA cobre frequências de 327 MHz a 86 GHz.

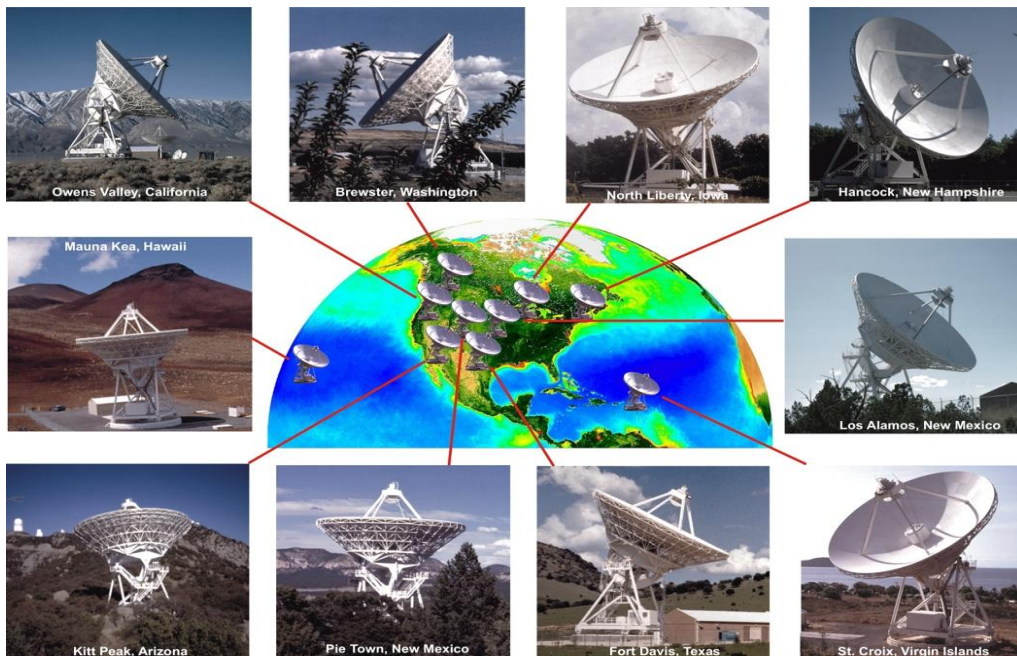


Figura 3.31. O conjunto de antenas VLBA, nos Estados Unidos. Crédito da imagem: NRAO/AUI; imagem da Terra: SeaWiFS Project NASA/GSFC e ORBIMAGE.

4. PRINCIPAIS OBJETOS DE ESTUDO DA RADIOASTRONOMIA

Agora que estamos minimamente familiarizados com alguns conceitos relacionados aos radiotelescópios e à radiação que eles recebem, vamos nos deter sobre alguns dos principais campos de estudo da Radioastronomia. Adotaremos a abordagem de começar pela nossa “vizinhança” – o Sol e o Sistema Solar – nos afastando cada vez mais e vislumbrando um pouco das surpreendentes descobertas que cada grande área de estudo do céu em rádio pode nos proporcionar.

4.1. SOL

O Sol é a estrela mais próxima de nós. Não é considerada uma das maiores nem mais brilhantes dentre as conhecidas, embora haja muitas que lhe sejam inferiores em tamanho e brilho. Não nos deteremos muito em descrever a sua estrutura e seus múltiplos e curiosos aspectos, pois isso é feito em muitas obras introdutórias em Astronomia. De uma forma geral, podemos pensar no Sol como uma gigantesca bola de gás ionizado¹, com pouco menos que um milhão e meio de quilômetros de diâmetro: um volume tal que englobaria cerca de 1 milhão e trezentos mil planetas como a Terra. O brilho do Sol provém de reações nucleares que ocorrem em sua região mais central – o núcleo. Estas reações permitem a fusão de núcleos atômicos de hidrogênio em núcleos de hélio, produzindo fantásticas quantidades de energia, responsáveis pela manutenção da fornalha solar pelos quase cinco bilhões de anos de sua existência e garantindo-lhe ainda um tempo equivalente a este no futuro. Em seu núcleo ardente reinam temperaturas de cerca de 15 milhões de graus Celsius (°C). Em sua superfície, chamada de fotosfera², encontramos temperaturas bem menores, de 6.000°C. Embora a temperatura da fotosfera seja de menos de um milésimo da encontrada no núcleo solar, a esta temperatura nenhum material pode resistir em forma líquida ou sólida e a mistura de gases de diversos elementos químicos submetidos a tal temperatura consiste de um estado especial da matéria chamado de *plasma*. O plasma da fotosfera, constituído em grande parte³ por hidrogênio e hélio com traços de elementos mais pesados (como acontece com quase toda a

¹ O gás ionizado é uma “sopa” de elétrons e núcleos atômicos ou átomos que perderam elétrons (veja nota de rodapé n° 6).

² De forma mais precisa, a superfície é identificada como a base da fotosfera, camada com cerca de 400 km de espessura. Assim, a própria fotosfera é uma camada atmosférica, assim como as outras duas, mais externas, a *cromosfera* e a *coroa*.

³ Mais precisamente: 92,1% de hidrogênio, 7,8% de hélio e 0,1% de outros elementos.

substância solar, à exceção do núcleo onde o hélio está sendo produzido) apresenta um comportamento característico, com formação de bolhas ou *células de convecção*, semelhantes às correntes convectivas que observamos na água fervente. Estas células são entremeadas por linhas de campo magnético que se entrelaçam, se torcem e eventualmente quebram, comportamento que está relacionado à *rotação diferencial* do Sol, que gira mais rápido nas regiões equatoriais do que nas latitudes intermediárias. Esse mecanismo de enrolamento e posterior reconfiguração das linhas de campo se repete em ciclos de 11 anos e neste período observamos uma crescente disseminação de manchas escuras na fotosfera. Dependendo do estado de tensão a que estão submetidas as linhas de campo, elas podem repentinamente liberar grandes quantidades de energia armazenada, produzindo explosões solares, observadas inclusive como forte ruído em ondas de rádio.

Além da emissão térmica e não térmica (seção 3.1.1), há um terceiro processo de emissão de rádio-ondas pelo Sol que é o de *oscilações do próprio plasma*, que geram frequências iguais ou múltiplas de sua própria oscilação.

Na fig. 4.1 vemos duas imagens do Sol. A imagem da esquerda foi obtida pelo Radioheliógrafo de Nobeyama, no Japão, na frequência de 17 GHz. A da direita foi obtida em luz branca, pelo Observatório Solar Culgoora, na Austrália. Ambas são do dia 15 de julho de 2010. Note, na imagem da esquerda, a mancha que aparece mais brilhante que o restante do disco solar. A mesma região, em luz visível (imagem da direita) aparece como uma pequena mancha escura, um pouco acima do centro do disco. As manchas solares são regiões

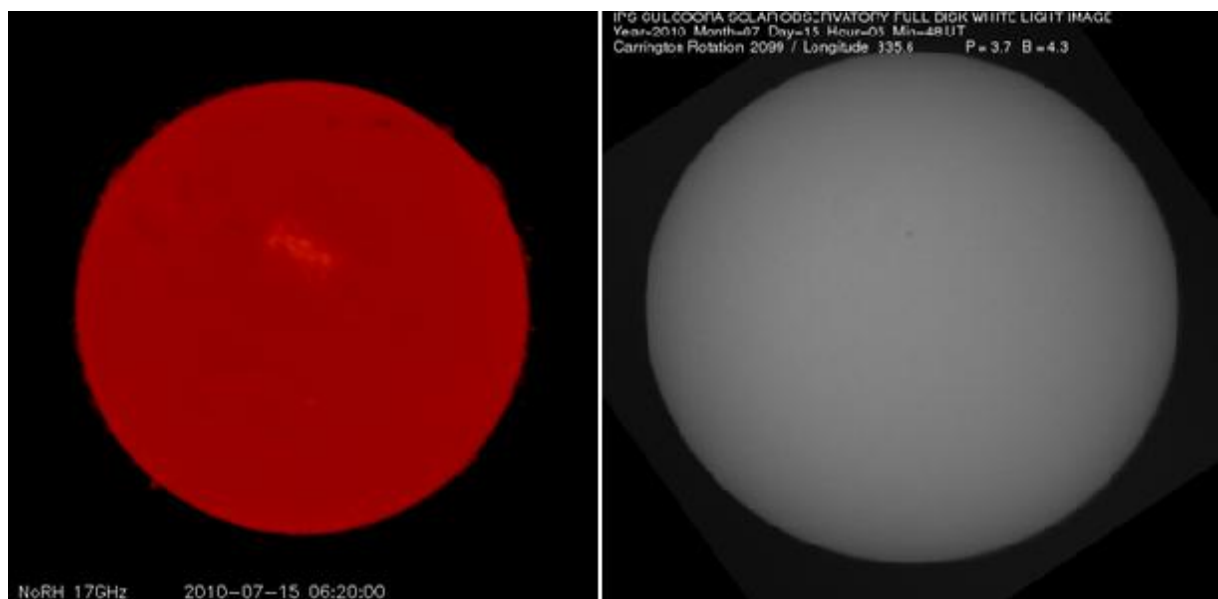


Figura 4.1. Imagens do Sol do dia 15 de julho de 2010. Crédito das imagens: esquerda: Radioheliógrafo de Nobeyama, Japão; direita: Observatório Solar Culgoora, Austrália.

que inibem a convecção fotosférica, diminuindo a temperatura localmente. Enquanto na luz visível elas são vistas como manchas escuras, por se encontrarem em temperaturas menores podem emitir mais ondas de rádio do que o restante da fotosfera, sendo percebidas mais brilhantes em rádio: daí a importância de se observá-las nessas faixas de radiação.

4.2 PLANETAS

Além do Sol, os planetas do Sistema Solar também se apresentam como radioemissores. Antes de falar disso, vamos resumir brevemente algumas características destes corpos que orbitam o Sol.

Os planetas mais próximos do Sol apresentam tamanhos modestos, composição predominantemente rochosa e finas camadas atmosféricas. “Tamanhos modestos” e “finas camadas atmosféricas” são expressões que podem ser usadas com muito acerto quando comparamos estes mundos com os gigantes que se localizam a partir de uma distância equivalente a cinco vezes à distância Terra-Sol⁴. A Terra, o maior dentre os pequenos planetas, chamados de rochosos ou *telúricos* (ou também, *terrestres*) possui um diâmetro de cerca de 12.700 km e uma camada atmosférica que mal se estende até o limite de mil km (termosfera), sendo que 80% da massa de gases se concentra nos primeiros 14 km (troposfera). Comparativamente, Júpiter, o maior dentre os planetas gigantes, chamados de *jovianos*, apresenta um diâmetro de cerca de 142 mil quilômetros e, em todo o seu volume, uma superfície sólida é uma conjectura, de forma que o planeta pode não possuir nada parecido com um chão firme, onde uma nave pudesse pousar. O volume de Júpiter é mil e trezentas vezes maior do que o da Terra.

Para os planetas, de uma forma geral, a radioemissão está ligada aos processos térmicos. Mas os processos não térmicos também aparecem, e podem estar ligados aos movimentos de elétrons na magnetosfera do planeta, que produzem radiação síncrotron, mas também se manifestam sob a forma de descargas elétricas, como os relâmpagos observados na Terra e em Júpiter.

Dentre os planetas telúricos, Vênus, o segundo em distância ao Sol, não demorou em surpreender os radioastrônomos. Em 1956, as observações em rádio revelaram uma temperatura superficial bem acima da esperada: 327°C, bem contrastante com a temperatura do alto das suas nuvens, que chegavam a esperados -40°C. A alta temperatura verificada se

⁴ Distância esta conhecida no meio astronômico como *Unidade Astronômica (UA)* e que vale cerca de 150 milhões de quilômetros.

deve ao efeito estufa, proporcionado pela sua atmosfera densa e carregada de dióxido de carbono (CO_2), que é transparente à luz visível, mas retém o infravermelho. As sondas soviéticas que pousaram na superfície do planeta posteriormente mediram temperaturas que chegam aos 450°C .

A intensa radioemissão de Júpiter, o maior dentre os planetas jovianos, foi descoberta acidentalmente em 1955 pelos radioastrônomos norte-americanos B. F. Burke e K. L. Franklin. A radioemissão do planeta foi detectada como uma interferência no sinal recebido de uma intensa fonte, a nebulosa do Caranguejo, um remanescente de supernova (fig. 4.5). Por acaso, Júpiter estava próximo à região do céu em que se observa a nebulosa. Um tanto céticos a uma sugestão feita por um colega, os dois resolveram observar Júpiter, já que não tinham outra explicação. Detectaram erupções fortes em rádio que lembravam aquelas observadas no Sol. Foi uma das grandes descobertas da Radioastronomia. É curioso notar que qualquer astrônomo amador com conhecimento de observação do céu provavelmente teria suspeitado da presença de Júpiter, já que este planeta, muito facilmente visível a olho nu, se encontrava próximo à constelação de Touro, direção onde se observa a nebulosa do Caranguejo. Mas estes radioastrônomos nem sabiam ao certo localizar Júpiter a olho nu. Nem tinham ideia de que a localização dele era próxima da direção para a qual dirigiam o seu radiotelescópio! Isso mostra que, contrariamente ao que se acredita, dependendo da área de atuação, o conhecimento das constelações e posições dos astros deixou de ser essencial ao trabalho dos astrônomos: a quantidade de assuntos e técnicas para um pesquisador avançar em sua área de estudo é tão grande atualmente, que um astrônomo pode saber mais sobre eletrônica e estatística e não saber praticamente nada sobre reconhecimento do céu. Outra constatação surpreendente no caso da descoberta da radioemissão de Júpiter é que algumas semanas depois da descoberta, radioastrônomos australianos descobriram que já haviam observado essas “interferências” por cinco anos, sem saber que se tratava da radioemissão de Júpiter. Assim, além da descoberta, os pesquisadores foram presenteados ao mesmo tempo com mais cinco anos de dados para analisar. As erupções em rádio mostraram-se como consequência da interação de Júpiter com um grande satélite que lhe fica muito próximo: Io. A interação Io-Júpiter é responsável pela formação de uma crosta coberta por vulcões neste satélite, que entram em erupção e ejetam material que entra no campo magnético de Júpiter, emitindo radiação de forma não térmica. As erupções se relacionam não só com a ejeção de material de Io, mas também, de forma ainda não completamente entendida, com a inclinação orbital do planeta e a posição do satélite na sua órbita em relação

a nós. Os elétrons ejetados dos vulcões e gêiseres de Io e capturados pelo campo magnético de Júpiter são responsáveis pela emissão síncrotron que é observada em comprimentos de onda mais longos, chegando a temperaturas de 70.000°C. A observação da radioemissão, associada ao campo magnético do planeta, permitiu uma determinação mais precisa do seu período de rotação: 9 horas, 55 minutos e 29,71 segundos.

Saturno e a Terra também apresentam erupções semelhantes às de Júpiter. As erupções de Saturno podem ser observadas em 500 kHz, e as da Terra em 60 Hz, a mesma frequência da rede elétrica em muitos países. Mas trata-se apenas de coincidência: as erupções em rádio da Terra se devem às auroras polares (aurora boreal e aurora austral) e não são observadas do solo, pois a atmosfera reflete estas radioemissões para o espaço.

4.3. VIA LÁCTEA

Sob este título, esta subseção pretende abarcar os temas que procuram elucidar as questões envolvidas com todo o sistema que chamamos de Via Láctea, nossa Galáxia, e também com os campos de estudo compreendidos pelas distâncias além-Sistema Solar, mas ainda não tão distantes para abarcar as outras galáxias. Estes temas incluem o meio interestelar (o meio que permeia o espaço entre as estrelas dentro da Via Láctea), onde encontramos diversas nebulosas que são fontes de rádio, e a própria estrutura e características da Via Láctea, como distribuição química, rotação, entre outras.

4.2.1 MEIO INTERESTELAR

O ambiente que permeia o espaço entre as estrelas é chamado de meio interestelar, tendo como constituintes gás, poeira e campos magnéticos. Em 1930, Robert Julius Trumpler (1886-1956) observou um avermelhamento na luz das estrelas, que era tanto maior quanto mais distante estas estivessem. Esta foi uma evidência direta da existência do meio interestelar e hoje sabemos que este avermelhamento se deve a presença de minúsculos grãos, com tamanhos comparáveis ao comprimento de onda da luz vermelha (700 nm, ou 700 bilionésimos de metro) e compostos por silicatos, ferro e grafite. Além destes grãos, chamados de *poeira*, há também gases, que se distribuem sob a forma de diversos tipos de nuvens. Algumas destas nuvens podem ser vistas mesmo a olho nu. É o caso da Nebulosa de Órion, uma região de formação estelar mais próxima de nós, ou do Saco do Carvão, nuvem escura na direção da constelação do Cruzeiro do Sul.

O meio interestelar é composto basicamente por poeira e gás. Ele contribui com 10 a 20% da massa da Via Láctea e tem uma densidade extremamente baixa. Para termos uma ideia do quão tênue é este meio, a sua densidade chega a menos de uma partícula por centímetro cúbico, o que faz com que os melhores vácuos conseguidos em laboratórios terrestres sejam 100 milhões de vezes mais densos que estes ambientes. Podem ser distintos cinco componentes como constituintes do meio interestelar:

1. Nuvens moleculares: nuvens frias e densas, com temperaturas de 10 K (263°C negativos), com densidade alta para os padrões do espaço interestelar (mil moléculas por centímetro cúbico). Com sua alta densidade, elas contêm uma parte substancial da massa do meio interestelar, mesmo ocupando apenas 1% do seu volume;
2. Regiões HI: nuvens difusas de hidrogênio neutro; regiões frias, com temperatura em torno de 100 K (-173°C), geralmente com cerca de 15 anos-luz de extensão e contendo 50 massas solares;
3. Regiões⁵ HII: regiões com temperaturas típicas de 8 mil kelvins em torno de estrelas jovens e quentes. Estas estrelas emitem uma grande quantidade de radiação ultravioleta; elas ionizam⁶ e aquecem o gás. À medida que esta região de ionização se expande, vai tornando o gás quente e diminuindo a sua densidade;
4. Meio internuvens: gás relativamente quente (5.000 a 10.000 K) composto por hidrogênio neutro e que contém 20% de gás ionizado. A alta temperatura resulta em densidades baixas e este material termina ocupando um quinto do volume do meio interestelar, envolvendo as outras nuvens mais densas;
5. Gás coronal: gás ainda mais quente que o meio internuvens (1 milhão de kelvins), com baixíssima densidade: precisamos juntar 100 centímetros cúbicos para achar uma única partícula, em média. Este material preenche o restante do espaço interestelar. Ele envolve os outros componentes de forma que sua grande extensão e sua temperatura alta fazem analogia

⁵ A notação “HII” e “HI” dizem respeito, respectivamente, ao hidrogênio uma vez ionizado (que perdeu um elétron) e ao hidrogênio neutro. A mesma notação pode ser usada para qualquer elemento químico. Assim, OIII significa oxigênio que perdeu dois elétrons.

⁶ Ionizar significa criar íons. Íons são átomos (ou núcleos atômicos, sem elétrons ligados a eles) e elétrons separados, carregando consigo, cada qual, a sua carga elétrica: os elétrons com carga negativa e os átomos (ou núcleos atômicos), despidos de alguns (ou de todos) os seus elétrons, exibindo carga positiva.

com a coroa solar, camada atmosférica mais externa do Sol e que exibe temperatura de milhões de graus.

Vamos resumir um pouco do que os estudos em Radioastronomia atualmente revelam sobre a complexidade do meio interestelar:

- Nuvens de gás neutro caem em direção ao plano da Galáxia, provenientes de regiões distantes, a altas velocidades, chegando a 500 km/s;
- As explosões de supernovas criam bolhas ejetando material para fora da Via Láctea. Essas bolhas abrem chaminés, por onde material flui, alcançando grandes distâncias do plano galáctico;
- As observações sugerem que o Sol ocupa a região interna de uma bolha, denominada bolha local. A bolha local se conecta com outras bolhas, formando cavidades e conchas, por onde material próximo do plano pode fluir e alcançar a região mais externa da Galáxia, denominada halo;
- No meio interestelar já foram detectadas mais de 120 moléculas, dentre elas moléculas mais complexas, como a do formaldeído (H_2CO) e do metanol (CH_3OH);
- Inicialmente, supunha-se que a existência de moléculas no meio interestelar fosse uma ocorrência rara, já que a radiação proveniente das estrelas deveria prontamente dissociar as moléculas que porventura se formassem. Este cenário foi mudando intensamente nas últimas décadas e hoje se sabe que metade da massa do meio interestelar está sob a forma de moléculas e em especial, entre 9 e 21 mil anos-luz do centro, há um anel molecular cuja constituição é de 90% de material molecular. Provavelmente, a presença dos grãos está ligada à disseminação de moléculas no meio interestelar, fornecendo uma espécie de escudo de proteção contra a radiação estelar;
- Também se descobriu a existência de água e de outras moléculas que são usadas em laboratórios para sintetizar aminoácidos e nucleotídeos, constituintes básicos da matéria encontrada em seres vivos na Terra. A descoberta de moléculas complexas no meio interestelar mostrou que as condições básicas para a formação da vida, tal como a conhecemos, são mais comuns do que se imaginava.

Além do conteúdo mencionado acima, o espaço interestelar é povoado por outros tipos de nebulosa: remanescentes de supernova, nebulosas planetárias e nebulosas de reflexão.

As nebulosas de reflexão são nuvens iluminadas por estrelas que estão distantes ou não possuem luminosidade suficiente para ionizar o gás. É o caso da nebulosidade encontrada no aglomerado das Plêiades (fig. 4.2).



Figura 4.2. O aglomerado das Plêiades. Este aglomerado está a uma distância de 440 anos-luz e pertence à constelação de Taurus, o Touro. Crédito da imagem: NASA, ESA e AURA/Caltech.

As nebulosas planetárias (fig. 4.3) são o resultado dos estágios finais de evolução de estrelas de pouca massa, como o Sol. São ejeções das camadas exteriores da estrela e são semelhantes às regiões HII: nuvens de gás, predominantemente hidrogênio, ionizadas por estrelas quentes. Neste caso, todavia, a estrela excitadora do gás é pequena, com dimensões semelhantes ao planeta Terra (diâmetros de cerca de dez mil quilômetros), com temperaturas superficiais extremamente elevadas, chegando a 100 mil °C, chamadas de *anãs brancas*.

Os remanescentes de supernovas são os restos de um dos eventos mais catastróficos conhecidos. Supernovas marcam os estágios evolutivos finais de estrelas de grande massa,

isto é, estrelas com mais de oito vezes a massa do Sol⁷. A mais brilhante fonte de rádio do céu, além do Sol, é uma nebulosa deste tipo, a Cassiopeia A (fig.4.4).



Figura 4.3. A nebulosa planetária M57, conhecida como Nebulosa do Anel. Ela pertence à constelação de Lyra, a Lira. A nebulosa possui diâmetro de cerca de 1 ano-luz e se encontra à distância de 2 mil anos-luz de nós. Crédito da imagem: *The Hubble Heritage* (AURA/STScI/NASA).

Sua contrapartida óptica é muito pouco visível, provavelmente devido à presença de poeira entre nós e o remanescente, que se localiza a 10 mil anos-luz. Cálculos levando em conta a velocidade dos filamentos observados indicam que a estrela que deu origem à nebulosa deve ter explodido no ano 1680 de nossa era. Curiosamente, não há registros desta explosão. Diferentemente de Cassiopeia A, outro remanescente de supernova que é uma brilhante fonte de rádio é Taurus A, e apresenta não só uma contrapartida óptica bem visível – a Nebulosa do Caranguejo (fig. 4.5) – como também registros da explosão da estrela que lhe deu origem. Os cálculos indicam que a explosão aconteceu no ano de 1054, onde se encontram registros feitos por astrônomos chineses e por índios norte-americanos. No interior destas nebulosas encontra-se em alguns casos o caroço que sobrou da explosão: uma estrela ainda menor que uma anã branca, com dimensões da ordem de apenas dez quilômetros,

⁷ Há uma distinção entre os tipos de supernovas observados. As do tipo I são as que não apresentam hidrogênio em seus espectros e nas do II é observada a presença deste elemento. As supernovas a que nos referimos e que são produto da evolução estelar são as do tipo II, Ib e Ic. As do tipo Ia são estrelas que explodem “auxiliadas” pela contribuição de matéria de uma estrela companheira.

submetidas a condições que lhe conferem uma rotação muito rápida⁸ e densidades inimagináveis. Uma colher de chá de matéria de uma destas estrelas pesaria o mesmo que dois mil transatlânticos de 100 mil toneladas cada um (!). Estas estrelas são os pulsares, detectados pela primeira vez em 1967.

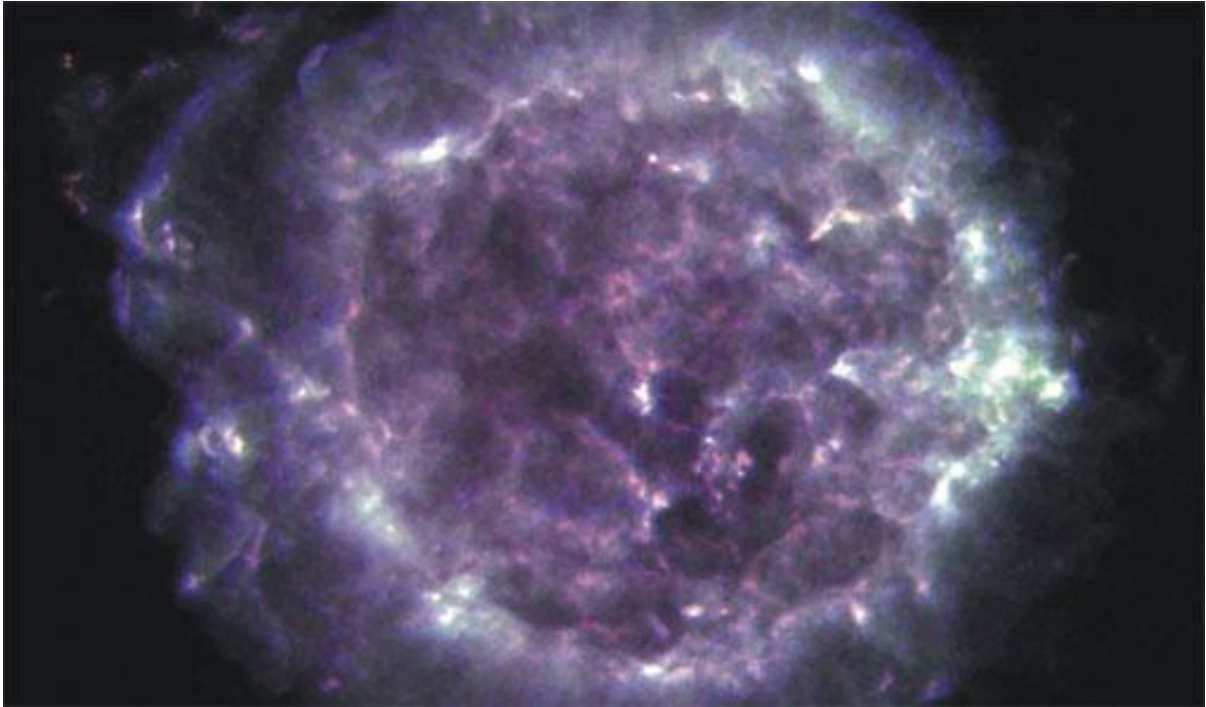


Figura 4.4. A radiofonte Cassiopeia A, um remanescente de supernova. Pertencente à constelação de Cassiopeia, esta radiofonte se encontra à distância de 10 mil anos-luz da Terra. Crédito da imagem: NRAO/AUI.

4.2.2 ESTRUTURA DA VIA LÁCTEA

Inicialmente, vamos entender um pouco melhor a forma e a estrutura básica da nossa Galáxia. A Via Láctea é uma galáxia espiral, possivelmente do tipo barrada. Se pudéssemos vê-la de frente, ela apresentaria aspecto semelhante ao mostrado na fig. 4.6. Observacionalmente falando, temos acesso ao seu perfil, que apresenta uma forma que evidencia as suas duas estruturas básicas, o bojo – central e de forma lenticular – e o disco, maior, mais fino e mais plano. O disco e o bojo estão mergulhados numa estrutura maior e de forma aproximadamente esférica, o halo. A estrutura básica é mostrada esquematicamente na fig. 4.7. Não é simples determinar a forma da Via Láctea, o número de braços, o tamanho do bojo e outras características que vemos facilmente em outras galáxias. A dificuldade reside no fato de nos encontrarmos dentro dela e, além disso, no disco. Se o Sol pertencesse a um dos

⁸ No caso da Nebulosa do Caranguejo, a estrela gira 30 vezes por segundo.

aglomerados globulares que orbitam a Via Láctea (fig. 4.7), situando-se bem acima do plano galáctico, seria mais fácil.

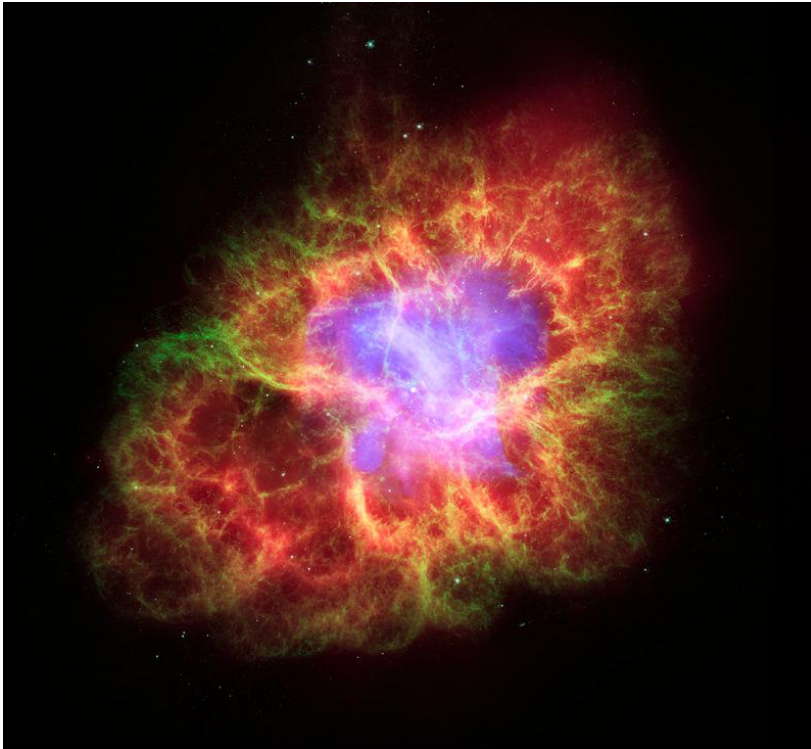


Figura 4.5. A nebulosa do Caranguejo, um remanescente de supernova. Imagem composta por dados dos telescópios espaciais Chandra (raios-X), Spitzer (infravermelho) e Hubble (visível). A nebulosa se localiza na constelação de Taurus, o Touro, e se situa a 6.500 anos-luz da Terra. Crédito da imagem: NASA, ESA, CXC, JPL-Caltech, J. Hester and A. Loll (Arizona State Univ.), R. Gehrz (Univ. Minn.) e STScI.



Figura 4.6. Uma galáxia semelhante à Via Láctea, a NGC 1672. Numa galáxia espiral barrada, como esta, os braços não partem diretamente do centro, mas da barra. Crédito da imagem: Telescópio Espacial Hubble (NASA, ESA e Hubble Heritage (STScI/AURA)-colaboração ESA/Hubble).

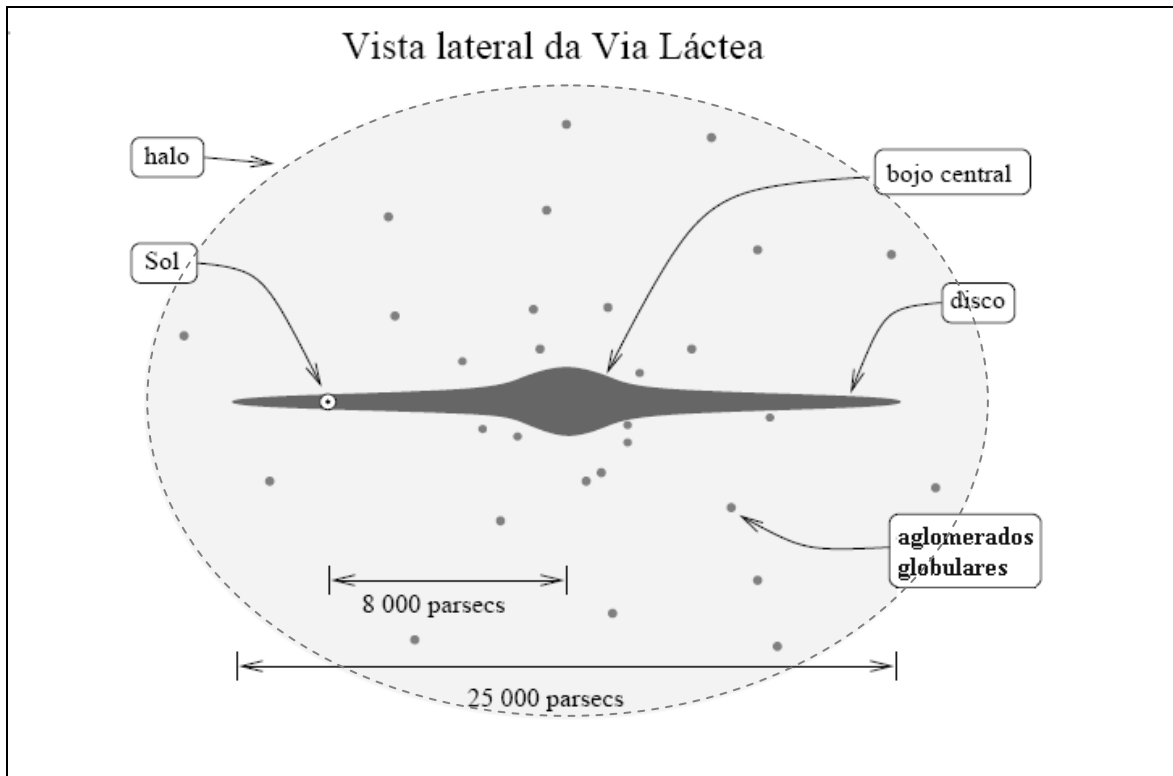


Figura 4.7. Desenho esquemático da forma e dimensões da Via Láctea. As distâncias estão indicadas em parsecs. Um parsec equivale a 3,26 anos-luz. Crédito da imagem: Oliveira, F. K. S. e Saraiva, M. F. O. (2003).

A poeira se concentra no plano do disco, obstruindo e avermelhando a luz de objetos distantes que observamos em sua direção. Desta forma, a visibilidade de objetos galácticos distantes e na direção do plano do disco fica bastante comprometida, pelo menos para a luz visível. Neste ponto entra a Radioastronomia. A partir da observação do comprimento de onda de 21 cm (frequência de 1420 MHz), da emissão dos átomos de hidrogênio neutro, que remonta à década de 1950, foi possível fazer um mapeamento das nuvens que são indicadoras da estrutura espiral da Via Láctea. Isto é feito usando-se o efeito Doppler (seção 3.1.3). Observando-se uma nuvem que emite nesta radiofrequência, um movimento de afastamento ou de aproximação da nuvem resulta numa frequência um pouco menor (afastamento) ou maior (aproximação). Com isso, pode-se determinar um componente da velocidade, chamada *velocidade radial* (a velocidade de afastamento ou aproximação, ao longo da linha de visada). A partir de considerações geométricas é possível deduzir a distribuição destas nuvens que, a exemplo do que é observado em outras galáxias espirais, acompanham a estrutura espiral da Galáxia e servem como *traçadoras* desta estrutura.

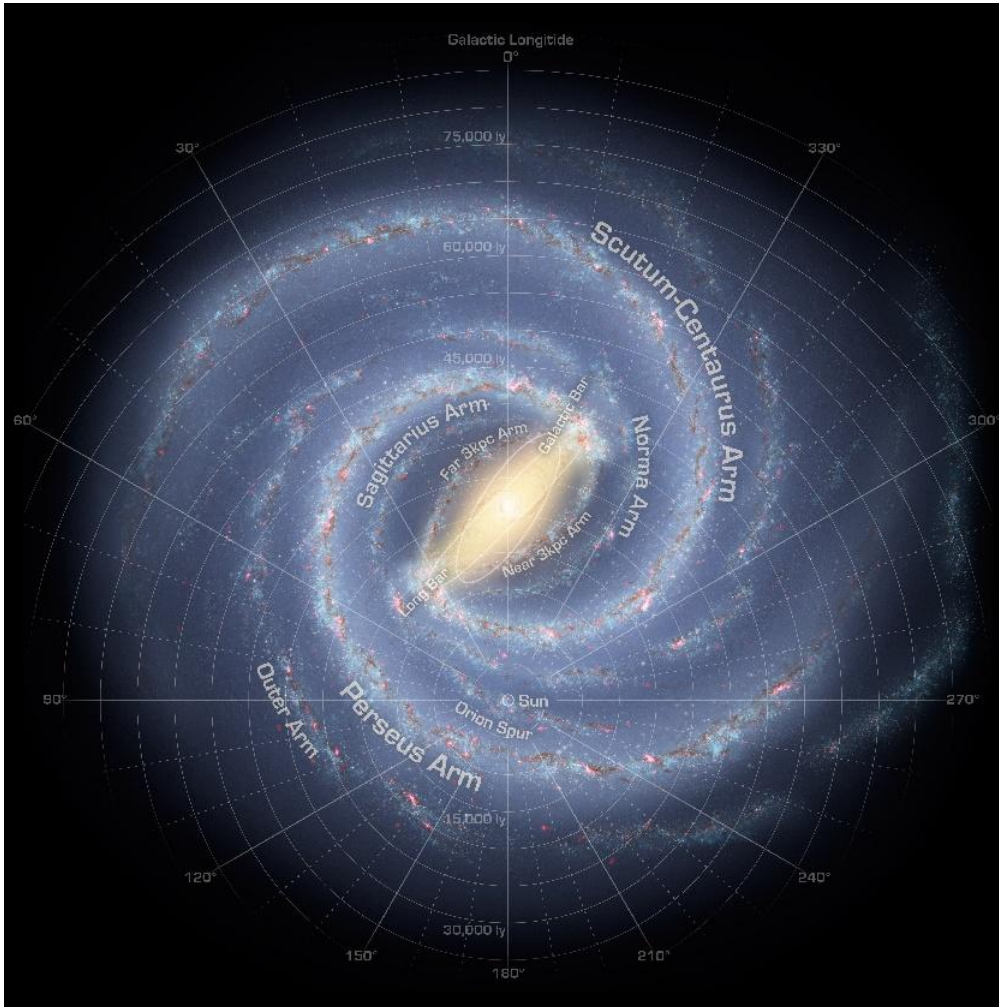


Figura 4.8. Representação artística da Via Láctea, mostrando a estrutura espiral. Crédito da imagem: NASA/JPL-Caltech.

A fig. 4.8 ilustra os resultados de um estudo recente da NASA. Na figura, note que a posição do Sol (Sun) é indicada como centro de convergência de um gradil de coordenadas, chamadas *coordenadas galácticas*, e as diferentes direções que saem como raios do ponto onde se encontra o Sol são as diferentes longitudes galácticas, sendo que o centro galáctico corresponde à direção de longitude galáctica zero. Os braços mais proeminentes são os de Perseus e o de Scutum-Centaurus, vistos no céu nas direções correspondentes às constelações de Perseu, de Escudo e de Centauro, respectivamente.

4.4 NÚCLEOS ATIVOS DE GALÁXIAS

Apesar da Via Láctea ter sido a primeira radiofonte observada, descobriu-se que há objetos que emitem muito mais em rádio do que a nossa Galáxia. A forte radioemissão proveniente deles foi uma das primeiras evidências da existência de uma extensa classe de objetos que hoje é conhecida como *núcleos ativos de galáxias* (NAGs, ou AGNs, na sigla em

inglês). Galáxias são conjuntos contendo milhões a centenas de bilhões de estrelas. Elas existem em diferentes formas e tamanhos e a classificação dos diferentes tipos encontrados atualmente não é tarefa fácil. No entanto, uma classificação simples, proposta por Edwin P. Hubble (que deu nome ao telescópio espacial) nas primeiras décadas do século XX, sobrevive até hoje e basicamente distingue elípticas (E), espirais (S), espirais barradas (SB) e irregulares (Irr). Há um tipo intermediário entre as espirais e elípticas: são as lenticulares (S0). A classificação inclui números para as elípticas que vão de 0 a 7, partindo das que parecem mais redondas chegando àquelas mais alongadas, como um grão de arroz. As espirais, por sua vez, recebem letras que avaliam tamanho do núcleo e abertura dos braços espirais. Os NAGs são galáxias que podem ser de qualquer um destes tipos mas que têm a característica de emitir uma quantidade de energia maior que as galáxias “normais”. Os principais NAGs são⁹:

- Galáxias Seyfert;
- Objetos BL Lac (algumas vezes chamados de blazares);
- LINERS;
- Galáxias *starburst*;
- Radiogaláxias;
- QSOs (que incluem os quasares).

Galáxias Seyfert são um tipo de galáxia cujas primeiras representantes foram descobertas pelo astrônomo Carl Seyfert, em 1943. As fotografias destas galáxias indicam núcleos brilhantes, sendo na maior parte dos casos, espirais. Além disso, seu espectro revela a presença de *linhas de emissão* (seção 3.1.3) mais largas que as encontradas em galáxias normais.

Os objetos BL Lac são conhecidos pela abreviatura do nome do seu protótipo, BL Lacertae (catalogado inicialmente como estrela variável na constelação de Lacerta, o Lagarto). Eles se diferenciam das galáxias de Seyfert por serem elípticos, apresentarem linhas de emissão fracas ou não observáveis em alguns casos e se mostrarem como fontes não-térmicas, predominantemente no infravermelho e rádio. Eles apresentam uma grande variabilidade de luminosidade. De uma noite para outra suas luminosidades podem variar até 30%.

⁹ Para sermos bem coerentes com a nomenclatura, os NAGs deveriam incluir apenas os objetos com intensa atividade em seus *núcleos*, usando o termo geral de *galáxias ativas* para os objetos mencionados, já que alguns deles apresentam atividade distribuída em toda a sua extensão e não apenas no núcleo, como é o caso das galáxias *starburst*. No entanto, o termo NAG é usado frequentemente como sinônimo de galáxia ativa.

Galáxias *starburst* e LINERS são NAGs com menor atividade, comparadas aos outros tipos. “*Starburst*” pode ser traduzido do inglês como “surto de formação estelar” e isto sugere a fonte de energia destes objetos: por algum motivo, a galáxia passa por uma fase de intensa taxa de formação estelar, aumentando consideravelmente a sua luminosidade¹⁰. O termo LINERS significa “*Low Ionization Nuclear Emission RegionS*”, ou seja, regiões de emissão nuclear de baixa ionização. Estas galáxias têm espectros semelhantes aos das regiões HII (vide seção 4.2.1).

Nem todos os NAGs são radioemissores, mas alguns foram notados logo no início das pesquisas radioastrômicas como fontes brilhantes em rádio: as *radiogaláxias*. Uma galáxia “normal” como a Via Láctea emite ondas de rádio. Um valor típico da quantidade emitida em rádio é de 10^{33} watts. Para termos uma ideia melhor do significado deste valor de potência, vamos comparar com o valor da potência emitida pelo Sol, em todos os comprimentos de onda: 3.9×10^{26} watts. Para produzir uma potência dessas, precisaríamos de 27.800 *trilhões* usinas como a de Itaipu. Uma galáxia “normal”, então, emite uma potência em rádio equivalente à emitida por cerca de 2,6 milhões de estrelas como o Sol. Radiogaláxias emitem, só considerando a emissão em rádio, uma potência que pode chegar a *10 mil vezes o valor de uma galáxia “normal”!* O termo radiogaláxia é reservado para as galáxias que emitem em rádio potências maiores que 10^{33} watts.

Há dois tipos de radiogaláxias: as extensas e as compactas. As extensas apresentam radioemissões em regiões maiores que aquelas abarcadas pelas suas imagens em luz visível. Já as compactas mostram radioemissão do mesmo tamanho ou menores que suas imagens ópticas. Um exemplo muito conhecido de radiogaláxia é Cygnus A (fig. 4.9). O padrão é bem típico de radiogaláxias extensas: uma região central radioemissora que coincide com o núcleo da galáxia, jatos bem colimados e lóbulos bem extensos e relativamente simétricos.

Também se observa outro tipo de objeto que até recentemente não era tratado como um NAG, embora a tendência atual seja a de que eles sejam explicados pelos mesmos mecanismos, de forma que também podem ser considerados como mais um representante desta classe: são os QSOs¹¹. Como vimos na seção 2, os primeiros QSOs descobertos eram

¹⁰ A fonte de atividade atribuído a este tipo de NAG se diferencia do modelo padrão que atualmente é cogitado para outros tipos (com a possível exceção dos LINERS), como veremos adiante.

¹¹ Os QSOs incluem os quasares, que são os QSOs radioemissores (ver seção 2).

quasares e tinham sido catalogados como estrelas da nossa própria Galáxia, antes de terem sido identificados como fontes extragalácticas. “Quasares” é abreviatura de “fontes de rádio

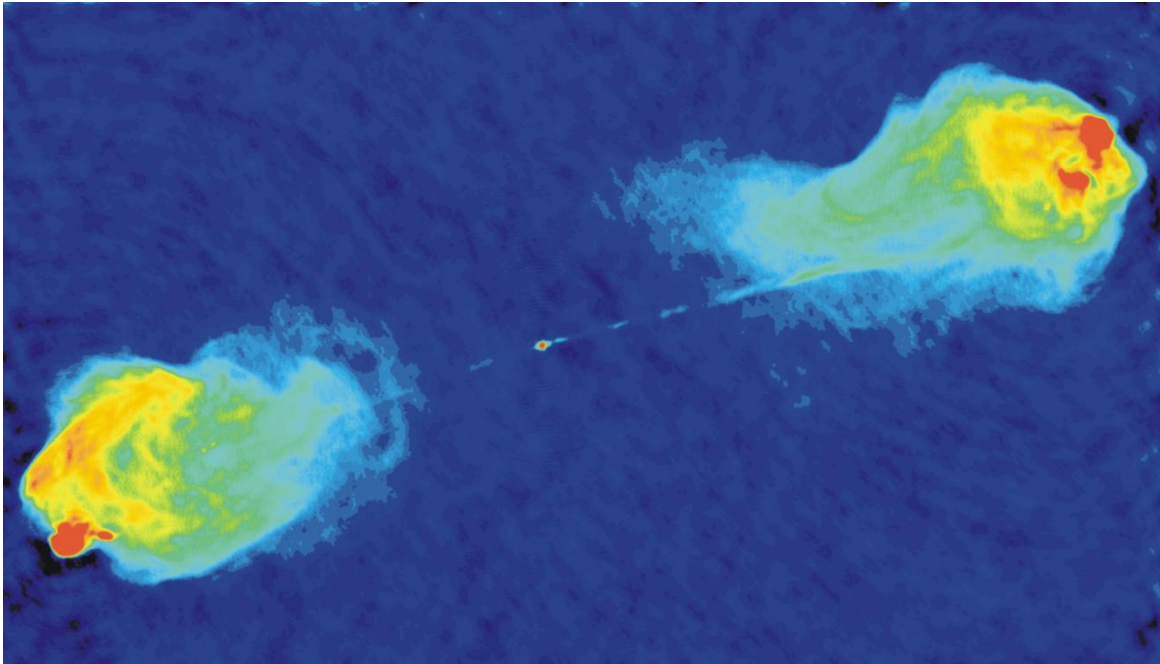


Figura 4.9. A radiofonte Cygnus A. Crédito da imagem: Very Large Array.

quase estelares” e provém deste fato. As linhas espectrais dos primeiros quasares observados não foram identificadas com facilidade. Uma radiofonte já tinha sido identificada com um objeto visível opticamente: a radiofonte 3C 48, sendo que “3C” significa o terceiro catálogo de Cambridge. Mas as linhas não puderam ser identificadas. Quando se tornou possível observar a parte óptica de mais uma radiofonte, o 3C 273, foi possível descobrir o mistério por trás das linhas espectrais: elas estavam muito deslocadas para o vermelho, ou seja, o *redshift* (seção 3.1.3) destes objetos têm valores muito grandes, comparáveis aos das galáxias mais distantes. Para estar a tamanha distância e mesmo assim passar por uma estrela da nossa própria Galáxia, estes objetos precisam emitir uma quantidade muito grande de energia.

Os quasares correspondem a 10% dos QSOs. Foram observadas nestas radiofontes estruturas de emissão semelhantes às das radiogaláxias. Os espectros ópticos também revelaram semelhanças com as galáxias Seyfert.

À medida que se descobriam outros QSOs, o estudo destes objetos permitiu verificar que tinham variações rápidas de luminosidade, em períodos de um ano, e alguns mostravam variações ainda mais rápidas, de dias ou semanas. O tempo de variação da luminosidade está ligado ao tamanho da região responsável pela emissão: não pode ser maior que a velocidade

da luz multiplicada pelo tempo de variação. Assim, se a variação é de um ano, a fonte não pode ser maior que um ano-luz; se a variação é de um dia, a fonte não excederá ao tamanho de um dia-luz (26 bilhões de quilômetros ou cerca de 6 vezes a distância Sol-Netuno). Como regiões tão pequenas podem ser responsáveis por uma emissão de energia que chega a ser mil vezes maior que a energia emitida por toda uma galáxia como a Via Láctea, que possui 100 bilhões de estrelas e tem uma extensão de 100 mil anos-luz? Durante décadas, os astrônomos se fizeram esta pergunta. Havia hipóteses que iam de buracos brancos (o oposto do buraco negro, uma região que supostamente jorrava a matéria que caiu em um buraco negro em algum outro lugar do espaço e do tempo) a explosões de supernovas em cadeia e surtos de formação estelar. Hoje em dia, com o refinamento das técnicas observacionais, inclusive das técnicas radioastronômicas, a comunidade científica tem se posicionado favorável à ideia de que os núcleos dos QSOs, como se supõe acontecer com os outros NAGs, possuem buracos negros com massas muito grandes. O brilho muito intenso destes objetos ofusca as estruturas galácticas circundantes, dando o aspecto estelar a estes objetos. Há também um consenso de que buracos negros com massas de milhões de massas solares devam ser comuns nos centros galácticos, mesmo naquelas “bem comportadas” como a Via Láctea. Nos QSOs, estes objetos são apenas mais ativos. Um fluxo de matéria, sob a forma de gás e estrelas, cai em direção ao buraco negro. Como acontece com buracos negros menores, produtos da evolução estelar e com companheiras estelares próximas, um disco de matéria se forma ao redor do buraco negro, lembrando um pouco o rodaminho de escoamento da água pelo ralo de um tanque. Os campos magnéticos deste *disco de acreção*¹² seriam responsáveis pela colimação dos jatos observados. A matéria, submetida a um tal estado de pressão e temperatura, explica a emissão em vários comprimentos de onda observados, dos raios gama às ondas de rádio. Nos jatos, a matéria é acelerada a velocidades próximas à da luz em muitos casos. Com um mecanismo poderoso como este, a matéria pode atingir distâncias de milhões de anos-luz, até que por fim seja freada pelo gás do espaço intergaláctico, criando os lóbulos que observamos.

4.5 RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO

Como vimos na seção 2, em 1965 dois radioastrônomos detectaram uma radiação que permeia todo o céu. Esta radiação é conhecida hoje com o nome de Radiação Cósmica de

¹² A palavra “acresção” não existe em língua portuguesa. Um termo correto poderia ser “agregação”. Mas o neologismo vem sendo usado com tanta frequência na literatura astronômica nacional que decidimos aderir a ele.

Fundo em Micro-ondas (RCFM) e é uma das principais ferramentas para o estudo da origem do Universo.

Há um consenso, dentre os cosmólogos, de que o Universo passou por uma fase de densidade e temperaturas extremas. Alguns estudiosos identificam este momento com a criação do próprio Universo. Outros são inclinados a pensar que o Universo apenas passou por este período extremo, não tendo sido criado por ele. De uma forma geral, todavia, a maior parte dos estudiosos do assunto aceita a existência desta fase quente e densa do Universo, que foi chamada de *Big Bang*. Após o Big Bang, que ocorreu a 13,7 bilhões de anos, segundo as estimativas mais aceitas, o Universo passou a se expandir e, com isso, também a se esfriar. Trezentos e oitenta mil anos depois do Big Bang, a temperatura caiu o suficiente¹³ para que a *matéria* – em sua maior parte núcleos de hidrogênio e elétrons – e a *radiação*, sob a forma de fótons (partículas que compõem as radiações eletromagnéticas) se separassem. A marca deixada por este momento importante, chamado *época da recombinação*, foi o que observamos hoje como a RCFM.

A RCFM é, desta forma, uma radiação fóssil, e o seu estudo cuidadoso permite aos cientistas a inferência sobre várias características do Universo jovem, num período anterior ao nascimento das galáxias e das estrelas. A sua descoberta foi interpretada como uma confirmação da teoria do Big Bang, pois ela já havia sido prevista desde a década de 1940 pelo físico russo George Gamow (1904-1968) e pelos seus colegas Ralph Alpher (1921-2007) e Robert Herman (1914-1997). A radiação deveria ter um espectro de corpo negro, o que foi parcialmente observado pelos radioastrônomos Arno Penzias e Robert Wilson, em 1965, que detectaram a radiação na frequência de 4 GHz. A confirmação de que se tratava de fato de uma emissão de corpo negro veio só na década de 1990, com as observações do satélite COBE (*Cosmic Background Explorer*, ou explorador do Ruído de Fundo Cósmico). Além de confirmar o caráter de corpo negro da RCFM, o COBE também pode demonstrar que havia uma minúscula variação da frequência, conforme a direção em que era observada, devido ao efeito Doppler. Como a Terra e todo o Sistema Solar se movem em relação a este pano de fundo cósmico, era de se esperar que em metade do céu a radiação revelasse uma ligeira variação de frequência, observando-se frequências maiores (aproximação) e a outra metade uma variação semelhante, só que na direção de frequências menores (afastamento). Isto

¹³ A temperatura neste momento era de 2,7 mil °C. Hoje, por comparação, a temperatura média do Universo é de -270,3°C, ou seja, 2,7 graus acima do zero absoluto, ou zero Kelvin.

atestou que a RCFM tinha origem cosmológica, não sendo uma radiação local, emitida pelo Sistema Solar ou pela Via Láctea.

Os dados fornecidos pelo COBE foram de extrema importância. Contudo, ainda careciam de resolução suficiente para que se percebesse pequenas anisotropias na RCFM, permitindo aos cientistas estudar a formação das galáxias. Foram feitos vários esforços através de experimentos no solo e através do uso de balões. Em 2001, foi lançado o satélite WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* – Sonda Wilkinson para Anisotropia em Micro-ondas), que possui uma sensibilidade 45 vezes maior que o COBE e uma resolução 33 vezes melhor. O esforço para perceber cada vez mais detalhes nesta radiação fóssil prossegue. Em 2009, a Agência Espacial Europeia (ESA) lançou o satélite Planck. As sutilezas apresentadas pela RCFM são uma poderosa ferramenta para o entendimento da origem e evolução do Universo. Além de ter servido como principal evidência da ocorrência do Big Bang, a RCFM também está fazendo o papel de árbitro para decidir entre as diversas hipóteses criadas pelos teóricos sobre o que aconteceu nos primeiros momentos do Universo. Na fig. 4.10, vemos uma representação esquemática dos diversos momentos pelos quais passou o Universo, nos 13,7 bilhões de anos desde o Big Bang.

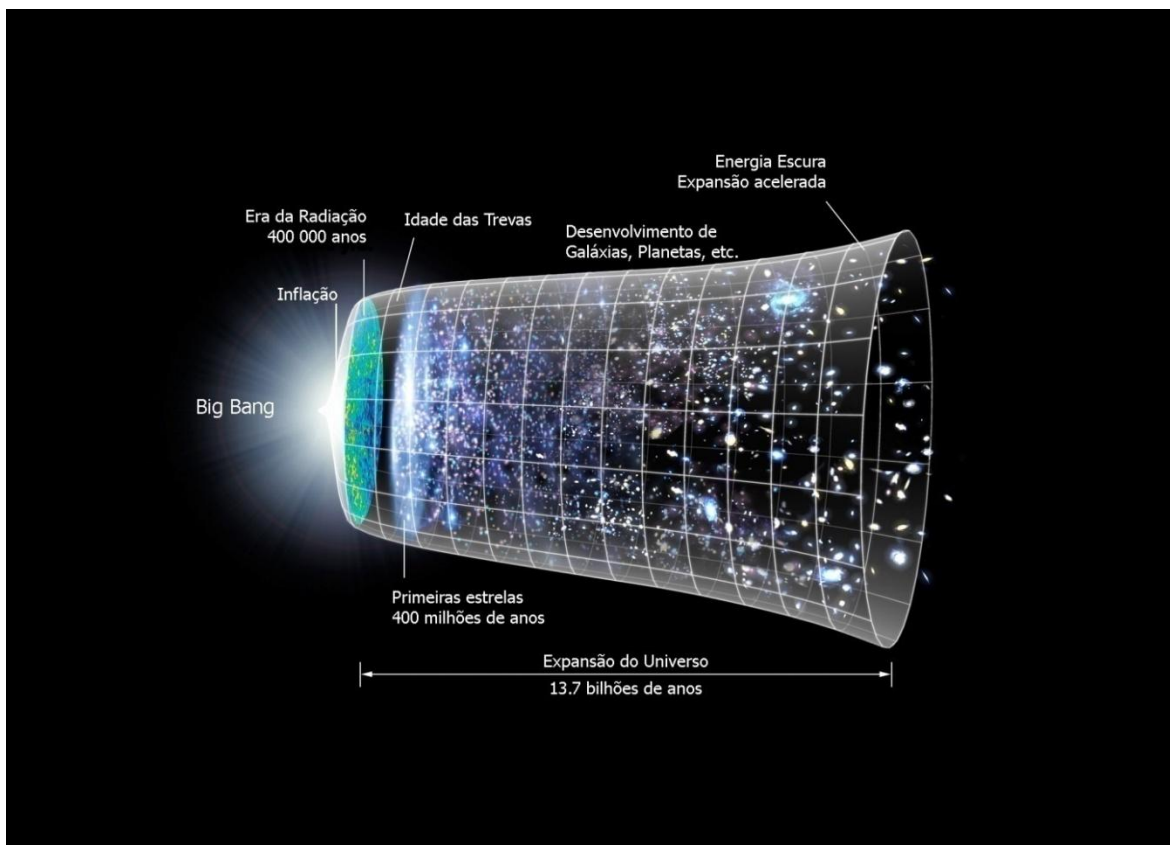


Figura 4.10. Evolução do Universo, segundo a visão mais aceita. Créditos da imagem: NASA/WMAP Science Team/Elisa C. Arizono.

1. CONCLUSÃO

A Radioastronomia, como vimos ao longo de todo o texto, é uma parte essencial da Astronomia e se consolidou notavelmente ao longo de pouco tempo, se compararmos estes 80 anos com os milhares de anos de existência da Astronomia. Com muitas dificuldades iniciais e não sem uma boa dose de resistência dos próprios astrônomos, a Radioastronomia se estabelece hoje com técnicas e equipamentos indispensáveis à compreensão do Universo que nos cerca. Grandes esforços mundiais estão sendo realizados atualmente nesta área, destacando-se projetos como o ALMA. No Brasil, a comunidade radioastronômica tenta recuperar o patamar atingido na década de 1970, quando o rádio-observatório de Itapetinga figurava como um dos mais modernos do mundo.

Acreditamos, ao finalizar este texto, que se trata apenas de uma primeira versão. Como parte de um grande esforço para a retomada do curso de Radioastronomia da Escola Municipal de Astrofísica de São Paulo e de levar ao público interessado um texto de nível introdutório, a conclusão deste trabalho é apenas um primeiro passo. Durante a elaboração deste trabalho, foi-se confirmando nossa impressão, que em parte motivou a escolha do tema, de que os textos nesta área são raríssimos, pelo menos no nível proposto aqui. A maior parte dos livros introdutórios em Astronomia falam sobre a Radioastronomia, mas fazem isso ao longo de poucas linhas, não dando muitos detalhes sobre as técnicas ou sobre o que se faz especificamente nesta área. Outros são demasiadamente técnicos, escritos para os próprios pesquisadores, ou para engenheiros e profissionais ligados às áreas de tecnologia de comunicações. Esperamos que este trabalho estimule a elaboração de outros textos voltados para o iniciante.

Temos certeza de que muito do que foi exposto aqui será ampliado, melhorado e modificado, seja através da opinião de colegas e de pesquisadores que, esperamos, possam dedicar algum tempo à sua leitura crítica (pela qual o autor agradece, antecipadamente), seja através da prática do ensino e dos questionamentos com que frequentemente os alunos nos impulsionam a rever trechos, extrair ou modificar partes, sempre em favor de um melhor entendimento, não só deles mas também nosso, nesta jornada interminável – e agradável –

pelo conhecimento. Fica aqui, mais uma vez, o agradecimento ao orientador deste trabalho, o Prof. Anderson Caproni, um radioastrônomo ativo (diferentemente do autor, que neste momento inicia sua dedicação ao mestrado em Astrofísica teórica e que à época da elaboração deste trabalho apenas passeava pelas áreas da Astronomia, em sua função de levar o conhecimento astronômico ao grande público), que em meio a tantos afazeres, teve tempo de dedicar umas boas horas à análise e correção deste trabalho bem como às perguntas (nem sempre sagazes!) do autor. Que este texto seja útil àqueles que dele fizerem uso e dos quais também esperamos as críticas e sugestões para poder fazer dele um instrumento cada vez melhor.

REFERÊNCIAS

ABRAHAM, Zulema. **Curso de astronomia galáctica**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005. Notas de aula.

_____. **Radiotelescópios**. São Paulo: Universidade de São Paulo, [ca. 2000]. Não publicado. 77 p.

CAPOZZOLI, Ulisses. **No reino dos astrônomos cegos**. Rio de Janeiro: Record, 2005. 335 p.

CAPRONI, Anderson. **Curso de astronomia observacional**. São Paulo: Universidade Cruzeiro do Sul, 2009. Notas de aula.

_____. **Telescópios ópticos**: tema de exame de qualificação. São Paulo: Universidade de São Paulo, [ca. 2000]. 28 p.

COSTA, Joaquim E. R. Conceitos básicos em radioastronomia. In: **I Escola de Radioastronomia**. Atibaia: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006. p. 2-10.

COSTA, Joaquim E. R.; CAPRONI, Anderson; BOTTI, Luiz C. L. Rádialáxias e quasares. In: **I Escola de Radioastronomia**. Atibaia: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006. p. 59-75.

COX, Artur N. **Allen's astrophysical quantities**. New York: Springer, 1999. 699 p.

FRIAÇA, Amâncio C. S. *et al.* **Astronomia**: uma visão geral do universo. São Paulo: EDUSP, 2003. 278 p.

HENBEST, Nigel; MARTEN, Michael. **The New Astronomy**. Cambridge: Cambridge University, 1986. 240 p.

LIMA NETO, Gastão B. **Curso de astronomia extragaláctica**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009. Notas de aula.

MACIEL, Walter J. (Ed.). **Astronomia e astrofísica**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1991. 303 p.

MOORE, Patrick. **Universo em expansão**. São Paulo: Melhoramentos, 1986. 256 p.

MOURÃO, Ronaldo R. F. **Dicionário enciclopédico de astronomia e astronáutica**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira/CNPq, 1987. 914 p.

OLIVEIRA, Francisco K. S.; SARAIVA, Maria de Fátima O. **Astronomia e astrofísica**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004. 557 p.

REES, Martin. **Enciclopédia ilustrada do Universo**. São Paulo: Duetto, 2008. 538 p.

SILK, Joseph. **O Big Bang**: a origem do universo. Brasília: Universidade de Brasília, 1985. 379 p.

SILVA, Adriana V. R. **Nossa estrela**: o Sol. São Paulo: Livraria da Física, 2006. 166 p.

SMIT, Jaroslav. **Microondas**. São Paulo: Érica, 1987. 135 p.

_____. **Radioastronomia**. São Paulo: Érica, 1988. 88 p.

SOUZA, Ronaldo E. **Introdução à cosmologia**. São Paulo: Edusp, 2004. 315 p.

VERSCHUUR, Gerrit. **The invisible universe**: the story of radio astronomy. 2nd ed. Menphis: Springer, 2007. 156 p.

VIEGAS, Sueli M. M.; OLIVEIRA, Fabíola (Orgs.): **Descobrimo o Universo**. São Paulo: Edusp, 2003. 380 p.

VILLELA NETO, Thyrso. O ruído do universo: a radiação cósmica de fundo. In: IVANISSEVICH, Alícia.; WUENSCHÉ, Carlos Alexandre.; ROCHA, Jaime Fernando V. (Orgs.). **Astronomia hoje**. Rio de Janeiro: Instituto Ciência Hoje, 2010. p. 138-149.

WILSON, Thomas L.; ROHLFS, Kristen; HÜTTEMEISTER, Susanne. **Tools of Radio Astronomy**. 5th. ed. Berlin: Springer, 2009. 515 p.

ZEILIK, Michael; GREGORY, Stephen, A. **Introductory astronomy and astrophysics**. 4th. ed. Fort Worth: Saunders College, 1998. 518 p.

APÊNDICES

A.1 CÁLCULO DE VELOCIDADE E DISTÂNCIA DE CYGNUS A

A seguir calculamos a velocidade e a distância da radiofonte Cygnus A (uma radiogaláxia, vide seção 4.4), sabendo que seu *redshift* é de $z = 0,06$.

Usando a equação 3.4, temos:

$$\frac{v}{c} = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} = \frac{(0,06+1)^2 - 1}{(0,06+1)^2 + 1} = \frac{0,1236}{2,1236} = 0,0582;$$

Usando-se o valor da velocidade da luz obtido de Cox (1999):

$c = 2,99792458 \cdot 10^5$ km/s, temos:

$$v = 0,0582 \times 2,99792458 \cdot 10^5 = 17.447,9 \text{ km/s}$$

A distância, dada pela equação 3.5, é de:

$$d = \frac{v}{H_0} = \frac{17.447,9}{72} = 242,3 \text{ Mpc} = 790 \text{ milhões de anos-luz}$$

A.2 EXEMPLO DE CÁLCULO DE RESOLUÇÃO: ITAPETINGA

Mostramos abaixo um exemplo de cálculo de resolução. Calculamos a resolução do radiotelescópio de Itapetinga, que apresenta diâmetro de 13,7 m e opera com frequência de 43 GHz (1GHz = 1 bilhão de Hz).

Aplicando a última forma da equação 3.3, temos:

$$\theta_{\min} = 7544,07 \left(\frac{f}{\text{GHz}} \right)^{-1} \left(\frac{D}{10 \text{ m}} \right)^{-1} = 7544,07 \left(\frac{43 \text{ GHz}}{\text{GHz}} \right)^{-1} \left(\frac{13,7 \text{ m}}{10 \text{ m}} \right)^{-1} = 128,06'' = 2,13'$$

Lembramos que 1' (um minuto de arco) tem 60'' (sessenta segundos de arco). Desta forma, a resolução do radiotelescópio é de cerca de 2 minutos de arco, o que corresponde, em termos de ordem de grandeza, à resolução do olho humano, para as ondas luminosas.

A.3 EXEMPLO DE CÁLCULO DE RESOLUÇÃO: INTERFERÔMETRO

Exibimos, a seguir, um exemplo de cálculo de resolução de um interferômetro. Escolhemos calcular o ângulo de resolução de duas antenas do conjunto MERLIN (seção 2 e fig. 3.30 – seção 3.2.3), no Reino Unido, separadas por uma distância de 133 quilômetros, observando com um comprimento de onda de 1,3 cm.

$$\theta_{\min} \approx \frac{\lambda}{D} = \frac{(1,3 \cdot 10^{-2})}{133,0 \cdot 10^3} = 9,8 \cdot 10^{-8} \text{ rad} = 0,02''$$

Ou seja, para este arranjo, a resolução é da ordem de um centésimo de segundo de arco, aproximadamente igual ao de cada um dos telescópios de 10 metros de diâmetro do observatório Keck em operação no Havaí, um dos maiores telescópios ópticos do mundo.