



VOLUME 3

André de Castro Milone
Organizador

Introdução à Astronomia e Astrofísica





VOLUME 3

Introdução à Astronomia e Astrofísica



VOLUME 3

André de Castro Milone
Organizador

Introdução à Astronomia e Astrofísica



Copyright © 2024 Autores

Editor: José Roberto Marinho e Victor Pereira Marinho

Editoração Eletrônica: Horizon Soluções Editoriais

Revisão: Horizon Soluções Editoriais

Capa: Horizon Soluções Editoriais

Imagem da capa: Adobe Stock Photo

Texto em conformidade com as novas regras ortográficas do Acordo da Língua Portuguesa.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Introdução à astronomia e astrofísica: volume 3 / organização
André de Castro Milone. – São Paulo: LF Editorial, 2024.

Vários autores.

Bibliografia.

ISBN 978-65-5563-428-0

1. Astrofísica 2. Astronomia 3. Buracos negros (Astronomia)
4. Estrelas 5. Sol I. Milone, André de Castro.

24-194276

CDD-520

Índices para catálogo sistemático:

1. Astronomia 520

Aline Grazielle Benitez – Bibliotecária – CRB-1/3129

ISBN: 978-65-5563-428-0

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida sejam quais forem os meios empregados sem a permissão dos autores. Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107 da Lei n. 9.610, de 19 de fev. de 1998.

Impresso no Brasil • *Printed in Brazil*



LF Editorial

Fone: (11) 2648-6666 | Loja (IFUSP)

Fone: (11) 3936-3413 | Editora

www.livrariadafisica.com.br | www.lfeditorial.com.br

Conselho Editorial

Amílcar Pinto Martins

Universidade Aberta de Portugal

Arthur Belford Powell

Rutgers University, Newark, USA

Carlos Aldemir Farias da Silva

Universidade Federal do Pará

Emmánuel Lizcano Fernandes

UNED, Madri

Iran Abreu Mendes

Universidade Federal do Pará

José D'Assunção Barros

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Luis Radford

Universidade Laurentienne, Canadá

Manoel de Campos Almeida

Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Maria Aparecida Viggiani Bicudo

Universidade Estadual Paulista - UNESP/Rio Claro

Maria da Conceição Xavier de Almeida

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Maria do Socorro de Sousa

Universidade Federal do Ceará

Maria Luísa Oliveras

Universidade de Granada, Espanha

Maria Marly de Oliveira

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Raquel Gonçalves-Maia

Universidade de Lisboa

Teresa Vergani

Universidade Aberta de Portugal

Sumário

Prefácio	9
9 Galáxias	11
9.1 Introdução	11
9.2 A estrutura da nossa galáxia	12
9.3 As formas conhecidas: espirais, elípticas e irregulares	17
9.4 A formação das galáxias	21
9.5 Radiogaláxias e quasares	23
9.6 A escala de distância cosmológica	32
Referências	37
10 Cosmologia	39
10.1 Introdução	39
10.2 O universo observável	46
10.3 O universo primordial	58
10.4 O universo não homogêneo	75
10.5 O setor escuro	88
10.6 O universo hoje	94
10.7 Conclusão	101
Referências	103
11 Astrofísica de Ondas Gravitacionais	105
11.1 O que são ondas gravitacionais?	105
11.2 Como podemos detectar/observar ondas gravitacionais?	108
11.3 Fontes astrofísicas de ondas gravitacionais	120
11.4 A astrofísica de ondas gravitacionais foi inaugurada!	121
11.5 O que aprendemos com as primeiras ondas gravitacionais observadas?	123
11.6 E qual é o futuro da astrofísica de ondas gravitacionais?	129
Referências	132

Prefácio

A fascinação pelos mistérios do Universo faz parte da natureza humana desde o começo da civilização. Ao mesmo tempo que admiramos a sua extensão e beleza, sentimos o desafio de conhecê-lo e o desejo de descobrir a sua conexão conosco. Ao investigarmos o Cosmo estamos também indagando sobre a nossa própria origem.

É bem possível que o ser humano tenha perscrutado o céu antes da terra, mares e rios, que estavam bem mais próximos.

O ciclo das estações, a luz e o calor do Sol durante o dia, o luar e as estrelas à noite, a necessidade de se orientar em seus percursos de um lugar a outro e de estabelecer uma cronologia para os acontecimentos foram motivos suficientes para os humanos tentarem equacionar o Universo.

A princípio o Universo conhecido se restringia ao Sol, à Lua e alguns planetas. Com o aperfeiçoamento dos instrumentos astronômicos, e a própria evolução das ideias, o conhecimento humano foi se expandindo e o Cosmo se revelando de forma surpreendente.

O sistema solar é hoje esmiuçado pelas sondas espaciais. Os modernos telescópios parecem nos conferir visão de super-homens. Do Sol, partimos para as demais estrelas que, aos bilhões, permeiam a nossa galáxia, a Via Láctea. Mesmo sem conseguir penetrá-las, a astronomia vem decifrando o seu interior, a sua formação e evolução, tão ligadas à nossa própria existência, pois somos fruto das estrelas.

As gigantescas nuvens interestelares descortinam-se com suas formas curiosas e gases fluorescentes, e revelam-se como berçários de estrelas. Indo mais adiante, notamos que o Universo se organiza em grupos de estrelas, galáxias, e em superaglomerados, intercalados por imensos vazios.

Até onde os instrumentos podem satisfazer a nossa curiosidade, avançamos no espaço e retrocedemos no tempo, em direção aos limites do Universo, que nos mostram a sua infância e adolescência.

O conhecimento adquirido alimenta as respostas a algumas das indagações básicas do espírito humano: como surgiu e se desenvolve este imenso teatro, no qual a matéria e a energia produzem espetáculos fantásticos, em contínua transformação?

A evolução do Universo produziu o surgimento de um fenômeno singular: a Vida. O avanço científico e tecnológico vem fornecendo as bases para a pesquisa da existência de vida fora da Terra, um tema desafiador, inserido no campo da Astrobiologia. Particularmente, as observações indicam que os compostos necessários ao surgimento da vida estão disponíveis e espalhados no Universo há vários bilhões de anos. Mas o passo para a formação do primeiro sistema vivo ainda é desconhecido.

O avanço da ciência e tecnologia produziu também uma nova janela de investigação do Universo: a Astrofísica das Ondas Gravitacionais. A observação destas ondas poderá por exemplo nos informar se o Universo realmente teve início com o Big Bang, ou se existiu uma fase anterior a este momento. Poderá ainda contribuir com questões tão importantes como saber do que são formadas a matéria e a energia escuras.

Em resumo, em uma série de três volumes, são apresentados os tópicos fundamentais da astronomia e astrofísica, que também integram um curso de extensão oferecido pela Divisão de Astrofísica do INPE. O conteúdo aborda as linhas básicas do que a astronomia já conseguiu decifrar, delineando também um quadro da evolução das ideias e das técnicas utilizadas na pesquisa científica.

Particularmente, pretende-se ampliar o interesse de jovens (e adultos) na área e auxiliar os educadores nas várias disciplinas em que estes temas podem ser aplicados.



9. Galáxias

Carlos Alexandre Wuensche

9.1 Introdução

Numa noite escura e longe das luzes da cidade, vemos que, independente da região na Terra que estivermos, é notável a existência de uma faixa concentrada de estrelas que cruza o céu. Essa faixa é chamada de *Via Láctea*: a Galáxia onde nosso Sistema Solar está localizado. A forma mais simples de perceber que a Via Láctea é uma galáxia é observar a emissão na faixa de rádio ao longo do plano; a faixa de estrelas que vemos no céu é o plano da Galáxia. Veja um esboço da sua estrutura na Figura 1.

Ela possui a forma de uma espiral, sobre a qual falaremos nesta seção e é constituída de um disco com um núcleo (a região do plano) e um halo com forma aproximadamente esférica que envolve o disco.

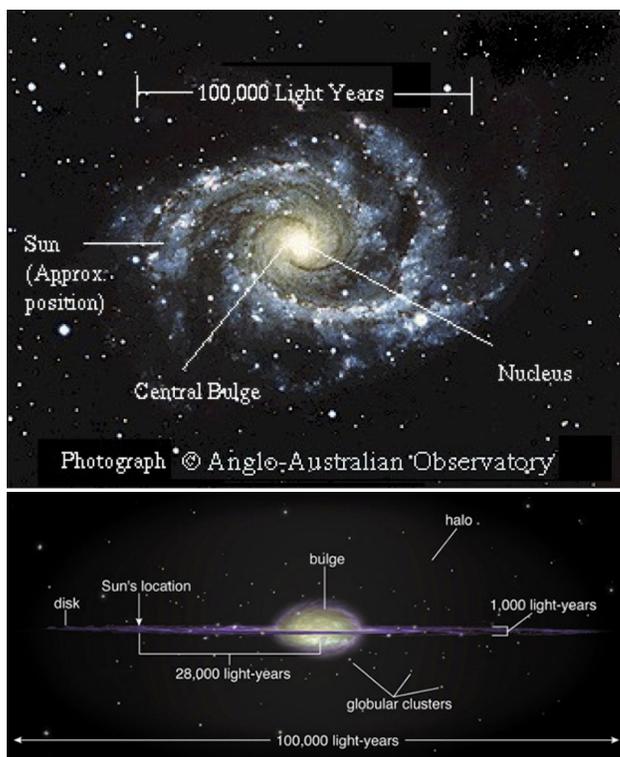


Figura 1 – Vista representativa da estrutura da nossa Galáxia, com o disco representado em branco. O halo tem uma forma circular e circunda todo o disco. A distância do Sistema Solar ao centro da Galáxia está representada do lado esquerdo da figura inferior: ~ 30 mil anos luz. (Fonte: <http://astronomy.nmsu.edu/tharriso/ast110/class21.html>.)

9.2 A estrutura da nossa galáxia

A olho nu, só podemos ver a faixa de estrelas que constituem o disco da Galáxia, mas existem outros dois componentes tão importantes quanto as estrelas: o gás interestelar e a poeira. Vamos então discutir qual é a forma da nossa Galáxia.

Conforme mencionamos, podemos entender a forma da Galáxia se pensarmos num disco com um bojo no centro, envolvido

por um halo esférico. O diâmetro desse disco, estimado com base nas medidas de hidrogênio através do plano, é da ordem de 100000 anos-luz. A espessura do disco é muito menor, da ordem de 2000 anos-luz. O nosso Sistema Solar encontra-se a cerca de 30000 anos-luz do centro da Galáxia, num dos braços espirais.

Como visto no capítulo sobre as estrelas, quando as observamos, notamos que a imensa maioria delas se distribui ao longo da sequência principal no diagrama HR. Tipicamente, as estrelas podem ser divididas em dois grupos: tipo I, que caracteriza as estrelas mais jovens e com composição química mais heterogênea (formadas de hidrogênio, hélio e uma fração de elementos mais pesados que os dois); e tipo II, as mais antigas, com composição química mais homogênea (praticamente só hidrogênio e hélio), semelhante à da nuvem-mãe que deu origem à Galáxia. As estrelas mais jovens acabam, pela estrutura dos braços espirais e gravidade local, concentrando-se em regiões próximas do plano. As estrelas mais antigas estão, principalmente, localizadas em aglomerados globulares, espalhados pelo halo.

Essa concentração de estrelas em aglomerados é normal e observada na nossa e em outras galáxias. Aglomerados estelares são extremamente importantes no estudo da evolução estelar e galáctica. Objetos formados em aglomerados possuem tipicamente a mesma composição química, a mesma idade e estão situados aproximadamente à mesma distância de nós. Então, estudar as estrelas em aglomerados nos permite ver objetos em estágios evolutivos diferentes, mas que foram formados baseando-se nas mesmas condições iniciais. Classificamos os aglomerados em abertos e globulares. Aglomerados abertos estão concentrados no disco e contêm, em média, 100 objetos, quase que só do tipo I. Eles são um grupo esperso, cujas componentes estão ligeiramente ligadas pela gravidade. Exemplos clássicos de aglomerados abertos são as Plêiades (Figura 2) e as Híades (na constelação de Touro).



Figura 2 – M45, um dos mais brilhantes e próximos aglomerados abertos conhecido. Também conhecido como Plêiades, ele contém cerca de 3.000 estrelas e encontra-se a ~ 400 anos-luz da Terra. (Fonte: <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod>.)

Já os aglomerados globulares (Figura 3), mencionados no parágrafo anterior, são fortemente ligados pela gravidade, possuem uma forma esférica bem definida (com raio da ordem de uns 100 anos-luz) e contêm cerca de 100.000 estrelas. A maioria das estrelas componentes é do tipo II. Vamos olhar agora para os outros componentes das galáxias: as nuvens de gás e poeira. As nuvens de gás interestelar são uma espécie de resíduo do processo de formação das estrelas. Regiões espalhadas pela nuvem se condensam e dão origem às estrelas; o gás que resta após o processo de formação continua espalhado entre as estrelas e “confinado” ali pela força da gravidade. A existência de nuvens ao longo do plano da Galáxia e em seus braços é responsável pelo obscurecimento (absorção da luz emitida pelas estrelas mais distantes) ao longo do plano. Partículas de poeira cósmica são também responsáveis pelo obscurecimento

ao longo do plano Galáctico na faixa óptica. O tamanho dos grãos de poeira é da ordem de alguns milésimos de milímetros e emitem principalmente radiação infravermelha. Essa emissão é uma forma de reprocessamento da luz visível, absorvida pelos grãos, utilizada para aquecê-los e depois retransmitida no infravermelho.



Figura 3 – Messier 80, um dos 147 aglomerados globulares conhecidos na Galáxia, localizado a 28000 anos-luz da Terra, M80 contém centenas de milhares de estrelas, ligadas por sua atração gravitacional mútua (Fonte: <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod>).

O astrônomo Robert Trumpler mostrou, em meados da década de 1930, que poeira e gás eram responsáveis pelo obscurecimento do plano Galáctico. Vemos uma grande quantidade de estrelas espalhadas pelo plano, mas não conseguimos ver outras galáxias através dele, exatamente por essa razão. Ao olhar para fora do plano, vemos menos estrelas e mais galáxias distantes. Trumpler mostrou que a luz emitida pelas estrelas é reduzida pela metade a cada 3000 anos-luz percorridos ao longo do plano galáctico. Assim, a radiação emitida do centro da Galáxia chega até nós (localizados a 30000 anos-luz do centro) com uma intensidade $(1/2)^{10}$, ou seja, apro-

ximadamente 0,001 vezes a intensidade inicial, devido à absorção pelas nuvens de gás e poeira. Como sabemos, então, que ela tem a forma de uma espiral, com braços ao redor de um núcleo? Mapeamos a estrutura de “disco + halo”, mencionada no começo desta seção, utilizando a emissão rádio e infravermelho, cujos comprimentos de onda são pouco absorvidos, para traçar o contorno da Galáxia usando medidas nos braços espirais (Figura 4).

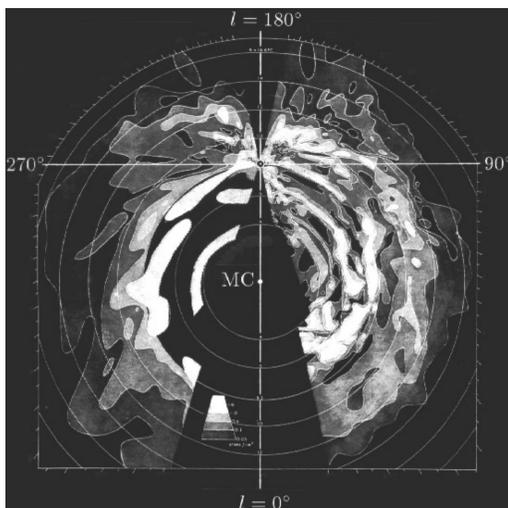


Figura 4 – Emissão de rádio no comprimento de onda de 21 cm, produzida por hidrogênio neutro, e usada para mapear os braços espirais da Via Láctea. (Fonte: OORT, J. H.; KERR, F. J.; WESTERHOUT, G. MNRAS 118, (1958) P. 379).

A Figura 5 mostra um mapa de emissão sincrotron de todo o céu, destacando o plano da nossa Galáxia, feito na frequência de 408 MHz. Esse mapa, feito por Haslam e colaboradores, é famoso por ter sido montado com base na combinação de medidas em diversos telescópios ao longo de 15 anos. A maior parte da emissão concentra-se no plano da Via Láctea (que tem a forma de uma “corcova”) e um bom número de radiofontes individuais dentro e fora da Galáxia aparecem também na figura.

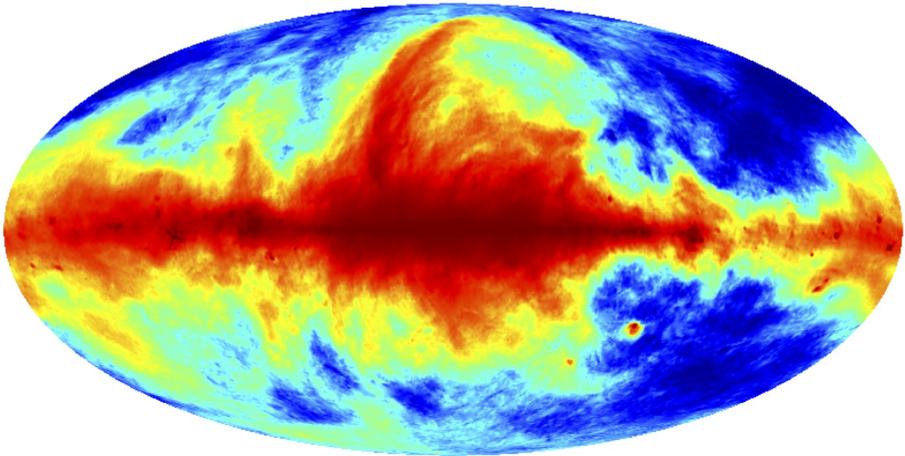


Figura 5 – Mapa de emissão síncrotron feito por Haslam e colaboradores. A frequência de observação é de 408 MHz e o plano da Galáxia é a faixa escura, situada no centro do mapa. Nesse mapa não se observa estrelas individuais, mas radiofontes extensas e restos de supernovas. (Fonte: Remazeilles, M. et al. MNRAS 451, 4311, 2015).

9.3 As formas conhecidas: espirais, elípticas e irregulares

A maior parte das galáxias possui características que permitem classificá-las como espirais ou elípticas. Galáxias elípticas possuem uma aparência oval e algumas são quase esféricas. Elas apresentam núcleos brilhantes com regiões externas mais tênues e não possuem uma borda claramente definida. Tipicamente, quase não contêm gás ou poeira, a matéria-prima que permite a formação contínua de estrelas e são formadas, em grande maioria, por estrelas de população II (velhas).

A faixa de massa e tamanho das galáxias elípticas é grande, cobrindo desde anãs (pouco maiores que um aglomerado globular) até raras gigantes (como M87) e supergigantes, com mil vezes a massa da nossa galáxia e cerca de 500000 anos-luz de diâmetro. A

maioria das galáxias (mais de 60%) é elíptica, em grande parte galáxias anãs. Na classificação de galáxias, as elípticas são identificadas pela letra E seguida de um número que define os diversos tipos de elípticas. Galáxias espirais, como a nossa, têm discos com núcleos e halos difíceis de serem vistos principalmente por causa do brilho do núcleo e do disco. Como o disco e os braços espirais são constituídos de estrelas de população I, jovens, e contêm bastante gás e poeira, especialmente nos braços, elas possuem uma taxa alta de formação de estrelas, que explica esse brilho. Já o halo é constituído de uma população de estrelas tipo II. Os braços espirais estão enrolados em torno do núcleo, dando não mais do que uma volta ao seu redor. As galáxias espirais formam duas sequências separadas: as espirais barradas (Sb) e as espirais normais (S). Espirais normais são subdivididas em Sa (núcleos grandes e pequenos braços enrolados), Sb (núcleos menores e braços mais soltos) e Sc (núcleos bem pequenos e braços quase “desacoplados” do núcleo). Cerca de um terço das galáxias espirais observadas são barradas, e sua subclassificação é a mesma: SBa, SBb e SBc. A razão da existência da barra ainda não é bem entendida pelos astrônomos. Seu intervalo de massa e tamanho é bem menor que o notado nas elípticas, variando entre 100 e algumas centenas de bilhões de vezes a massa do Sol.

As Figuras 6 e 7 mostram fotos de galáxias elípticas e espirais. Nota-se claramente a diferença em suas estruturas. Entretanto, não se tem uma ideia clara do porquê da existência dos braços espirais, ou melhor, da forma espiral. O dilema dos braços (como se formaram? Por que não se enrolam ao redor do núcleo da galáxia?) vem sendo estudado desde o início do século e a sugestão mais aceitável, dada pelo astrônomo sueco Bertil Lindblad e aperfeiçoada pelo matemático americano C.C. Lin, é que os braços das galáxias espirais são “cristas” de uma onda de densidade. Cada período dessa onda é da ordem de algumas dezenas de milhões de anos. Coincidentemente, esse é o tempo de vida das estrelas tipos O e B presentes nos braços das espirais.

Edwin Hubble classificou os vários tipos de galáxias em um diagrama semelhante a um diapasão, no qual as elípticas formam um grupo em um dos lados do diapasão e as espirais são divididas no “garfo” (Figura 8). A classificação é baseada na aparência das galáxias. Na junção dos três braços, Hubble colocou o tipo SO, que é bastante estranho e combina propriedades de ambos os tipos (Figura 9). Elas têm a forma e o disco das espirais, mas não têm gás e poeira que permitem a formação de estrelas. A velocidade de rotação e a quantidade de poeira crescem das elípticas para as espirais. Apesar dessas diferenças, não existe nenhuma evidência que um tipo de galáxia evolui para o outro. Provavelmente, as características que mencionamos aqui são todas determinadas nos instantes de formação de cada uma.

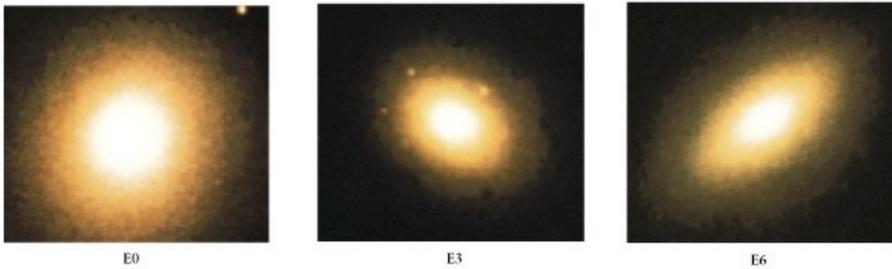


Figura 6 – Galáxia elíptica E0, E3 e E6. Nota-se o gradual aumento de excentricidade da esquerda para a direita. (Fonte: Elaboração do autor).



Figura 7 – Galáxias espirais Sa, Sb e Sc, com a clara variação na forma e estrutura dos braços. Nota-se a ausência, nesta foto, de espirais com barra. (Fonte: Elaboração do autor).

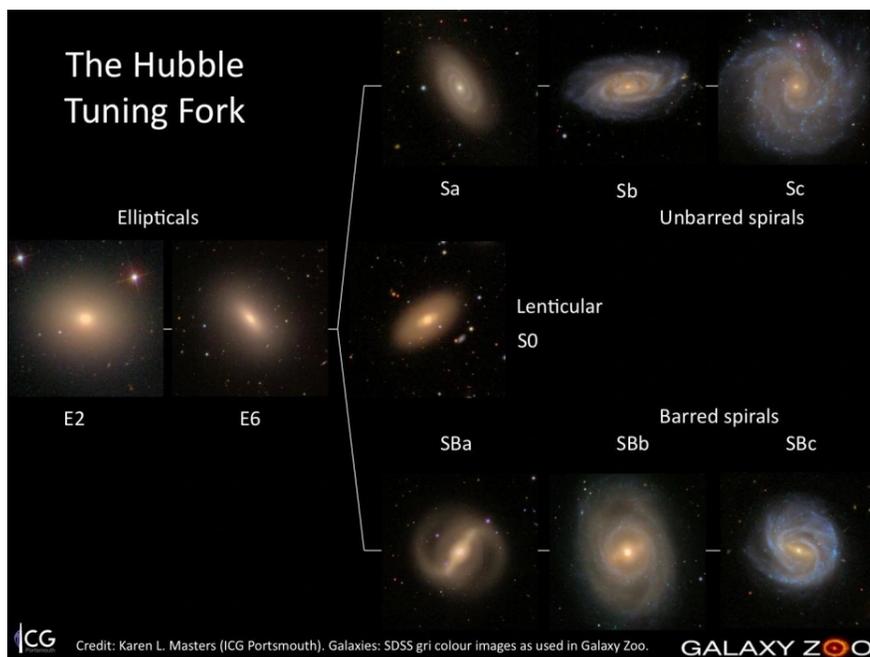


Figura 8 – Diagrama de Hubble para classificação de galáxias regulares (Fonte: Karen L. Masters, CG Portsmouth, Inglaterra).

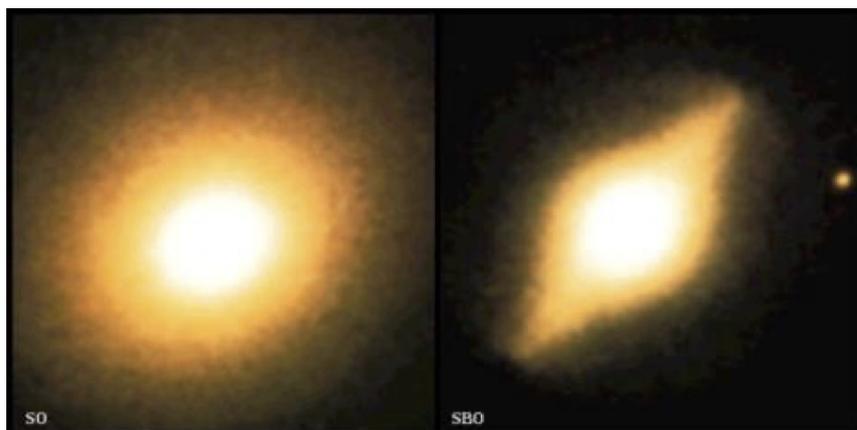


Figura 9 – Imagens de galáxias S0. Nota-se a presença de uma barra no objeto à direita (SB0). (Fonte: Elaboração do autor).

Uma pequena percentagem de galáxias estudadas não se encaixa nas classificações acima, sendo então denominadas *irregulares* (Irr). Nossas vizinhas mais próximas, a Pequena e a Grande Nuvem de Magalhães, são exemplos típicos de galáxias irregulares (Fig. 10).



Figura 10 – Da esquerda para a direita, Grande Nuvem e Pequena Nuvem de Magalhães. (Fonte: Elaboração do autor).

Existem ainda galáxias compactas e extremamente brilhantes e densas descobertas por Fritz Zwicky e, ainda, outras que apresentam formas distorcidas e estranhas. Em alguns casos, essas formas podem ser explicadas por interação com algum objeto próximo (galáxias vizinhas), mas em outros, a causa da distorção é, simplesmente, desconhecida.

9.4 A formação das galáxias

As galáxias devem ter sido criadas há bilhões de anos. Tanto quanto sabemos, todas elas possuem estrelas de população tipo II, logo, sua idade deve ser de, pelo menos, uns 10 a 11 bilhões de anos, que é a idade típica das estrelas de população II. O Universo hoje é muito velho para formar novas galáxias, porque o gás espalhado entre as galáxias e os aglomerados possui uma densidade muito baixa para formar novas estruturas. A densidade média de uma galáxia é da ordem de um átomo por centímetro cúbico. Essa seria

a densidade se todas as estrelas fossem dissolvidas e espalhadas uniformemente pelo volume da galáxia.

Embora extremamente baixa para os nossos padrões (a densidade do nosso corpo é de 1 g.cm^{-3} , ou 1×10^{24} átomos por centímetro cúbico), essa densidade ainda é cerca de um milhão de vezes maior do que a densidade do Universo hoje (cerca de $10\text{-}30 \text{ g.cm}^{-3}$). Entretanto, quando o sistema solar se formou, a densidade do Universo era cerca de 10 vezes maior do que a de hoje. Quando o Universo tinha cerca de 10 milhões de anos, sua densidade era cerca de um milhão de vezes maior do que hoje (um átomo de hidrogênio por centímetro cúbico) e as galáxias ainda estavam em processo de formação.

Basicamente, a teoria de formação e evolução das galáxias envolve uma participação importante da força gravitacional. A teoria do colapso sugere que galáxias, da mesma forma que estrelas, formaram-se com base em uma nuvem de hidrogênio e hélio, ambos criados nos primeiros instantes de vida do Universo (mais precisamente, nos três primeiros minutos). Inicialmente, essas nuvens se expandiam junto à expansão do próprio universo; depois de um certo tempo, a atração gravitacional de uma região um pouco mais densa dentro da nuvem fez com que ela se expandisse mais lentamente. Finalmente, após alguns milhões de anos, ao invés de continuar a expansão, a nuvem começou a se contrair e a separação entre diferentes nuvens foi aumentando. A Figura 11 mostra como esse processo provavelmente ocorreu.

As galáxias, em sua maioria, aparentam serem entidades independentes, interagindo umas com as outras devido à força gravitacional. Isso é uma “ilusão” causada pela impossibilidade de telescópios observarem a enorme quantidade de gás existente entre as galáxias. Uma enorme quantidade de gás parece existir em todos os aglomerados de galáxias e sua presença é notada devido à emissão de raios X, que ocorre quando o gás é acelerado pelo campo gravitacional das galáxias. Durante o processo evolutivo, colisões dos

mais diversos tipos devem acontecer entre galáxias, algumas bastante dramáticas, especialmente quando galáxias espirais estão envolvidas. Grupos e aglomerados certamente são afetados pela força gravitacional dos outros componentes e, muitas vezes, ocorre a fusão de duas galáxias para formar uma galáxia gigante ou, quando o evento é muito violento, uma onda de choque pode romper a estrutura estável e destruir as galáxias envolvidas na colisão.

9.5 Radiogaláxias e quasares

O início da observação do Universo na faixa de rádio do espectro eletromagnético ocorreu na década de 1930 com Karl Jansky e Grote Reber. A partir do final da Segunda Guerra Mundial, radiotelescópios começaram a ser construídos na Inglaterra e Austrália, e hoje, grande parte da pesquisa feita sobre o Universo distante é possível porque a emissão em rádio é capaz de viajar grandes distâncias sem sofrer nenhum tipo de absorção no meio intergaláctico.

Centenas de radiofontes foram descobertas nos últimos 50 anos e a grande maioria delas foi associada a um objeto também visível no óptico. Assim, Taurus A (a fonte mais intensa observada na constelação de Touro) foi associada à nebulosa do Caranguejo, uma nuvem de gás produzida por uma explosão de supernova no ano de 1054. Cygnus A (ou 3C 405) foi identificada com uma galáxia gigante a cerca de um bilhão de anos luz! A maior parte das fontes de rádio muito intensas também visíveis no óptico são galáxias e emitem milhões de vezes mais energia em rádio que a nossa galáxia. Elas emitem mais energia em rádio do que na faixa visível e, normalmente, são galáxias elípticas gigantes; em geral os objetos mais brilhantes dos aglomerados de galáxias. O mecanismo responsável por essa enorme geração de energia é chamado de emissão sincrotron. As ondas de rádio são emitidas por elétrons livres que se movem numa trajetória espiral em torno de campos magnéticos nessas radiofontes (Figura 12). Os elétrons possuem energias muito

grandes, mas, paradoxalmente, os campos magnéticos que os aprisionam são muito mais fracos que o campo magnético terrestre.

A Figura 13 mostra uma combinação de observações de Centaurus A, o AGN mais próximo da Terra, em vários comprimentos de onda. Cen A é uma galáxia elíptica gigante, localizada a cerca de 10 milhões de anos-luz da Terra. A imagem à esquerda é uma superposição de medidas nas faixas visível, raios X, infravermelho e rádio, mostradas separadamente à direita. Os jatos presentes na imagem à esquerda e na imagem em rádio são jatos de matéria ejetados do buraco negro central, fonte de energia do AGN.

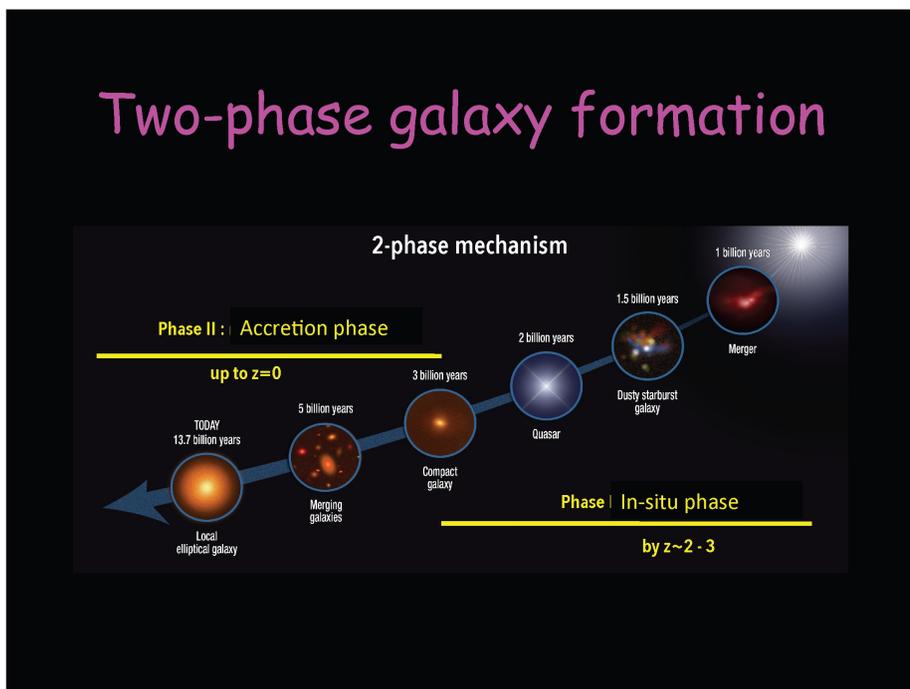


Figura 11 – De cima para baixo, vemos uma nuvem de gás em expansão; no centro, a nuvem começa a colapsar sob o efeito da matéria concentrada em seu interior. Embaixo, estrelas de população II são formadas no núcleo. As regiões externas do globo caem para o centro e criam um disco de gás em rotação onde estrelas de população I irão, futuramente, se formar (Fonte: Forbes, D. *Galaxies*, 5(2), 27, 2017. <https://doi.org/10.3390/galaxies5020027>).

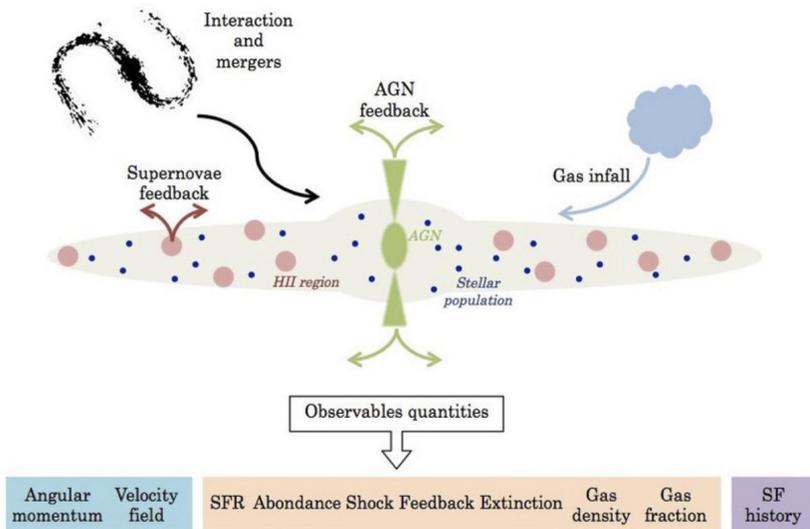


Figura 12 – Representação de um núcleo ativo de galáxia (AGN). O feixe perpendicular (acima e abaixo) ao disco são emissões de alta intensidade, causadas provavelmente pela aceleração de partículas pelo campo magnético do AGN. (Fonte: NASA, CXC, SAO, astrofotografia de Rolf Olsen, NASA-JPL, Caltech, NRAO, AUI, NSF, UOH, M. J. Hardcastle).

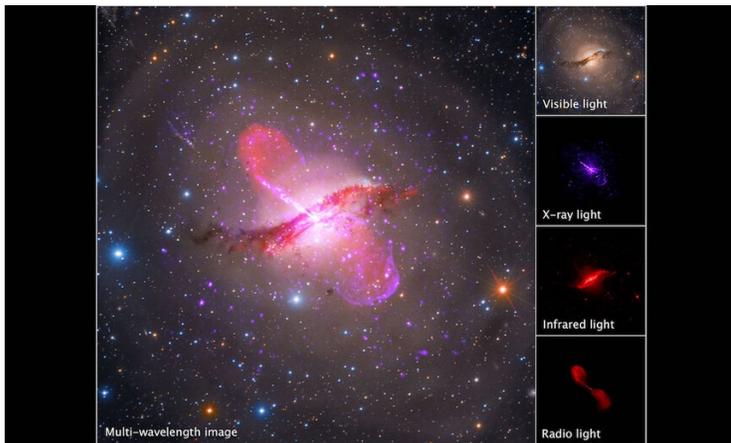


Figura 13 – Centaurus A, o núcleo ativo de galáxia mais próximo. Esquerda: imagem combinada. Direita: Imagem em comprimentos de onda específicos. (Fonte: Elaboração do autor).

Atualmente, com os modernos radiotelescópios, é possível estudar em detalhes a estrutura das radiofontes e descobriu-se algo bastante interessante sobre sua forma geral. A maioria delas tem uma estrutura “dupla” e a emissão de rádio localiza-se principalmente nas extremidades dessa estrutura, em regiões que chamamos de componentes extensas (Figura 14). Elas encontram-se separadas por centenas de milhares de anos-luz e a radiogaláxia situa-se entre ambas as componentes. Frequentemente, a região central é também uma radiofonte que igualmente contém duas componentes emissoras separadas tipicamente por somente algumas centenas de anos-luz. Dividimos, então, as radiofontes em extensas (as estruturas externas) e compactas (as regiões na própria radiogaláxia).

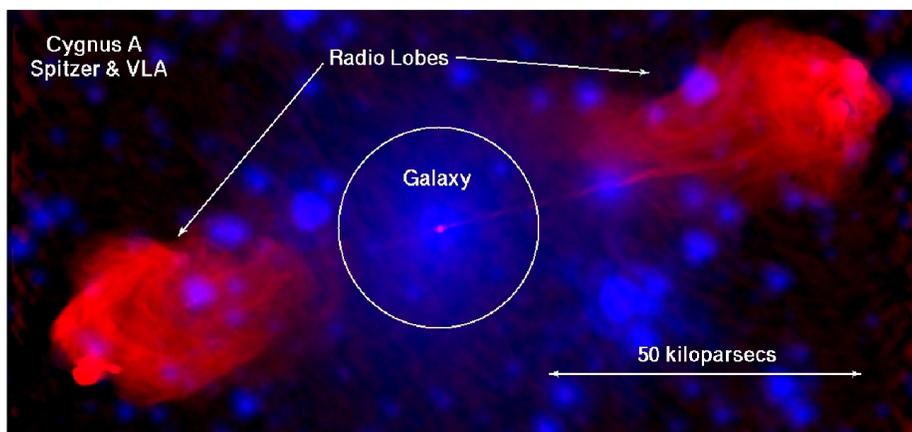


Figura 14 – Mapa em rádio de Cygnus A, uma radiofonte clássica. A imagem central (circulo branco) representa a região emissora no óptico. As duas estruturas simétricas em relação ao centro são os chamados lobos emissores e emitem uma enorme quantidade de energia na faixa de rádio e infravermelho distante. O tamanho típico dessas estruturas em rádio é da ordem de centenas de milhares de anos-luz. (Fonte: Springmann, A. Relatório Técnico, Stanford Linear Accelerator Center, EUA (2006). <https://doi.org/10.2172/892607>).

Os quasares foram inicialmente identificados como radiofontes fracas e, posteriormente, na nossa própria Galáxia, como estrelas estranhas que eram fortes emissoras de rádio. A descoberta de

sua real natureza aconteceu em 1963, quando Maarten Schimdt descobriu que as linhas espectrais do objeto 3C 273 estavam deslocadas de sua posição original no laboratório de cerca de 16%, na direção de comprimentos de onda mais longos. Em outras palavras, a fonte tinha um desvio para o vermelho (ou “redshift”) de 0,16 e estava se afastando de nós com uma velocidade de 16/100 da velocidade da luz. Nota-se, na Figura 15, a diferença entre as posições das linhas no espectro de diversas galáxias distantes e as posições das linhas H e K do cálcio, deslocadas em função da distância.

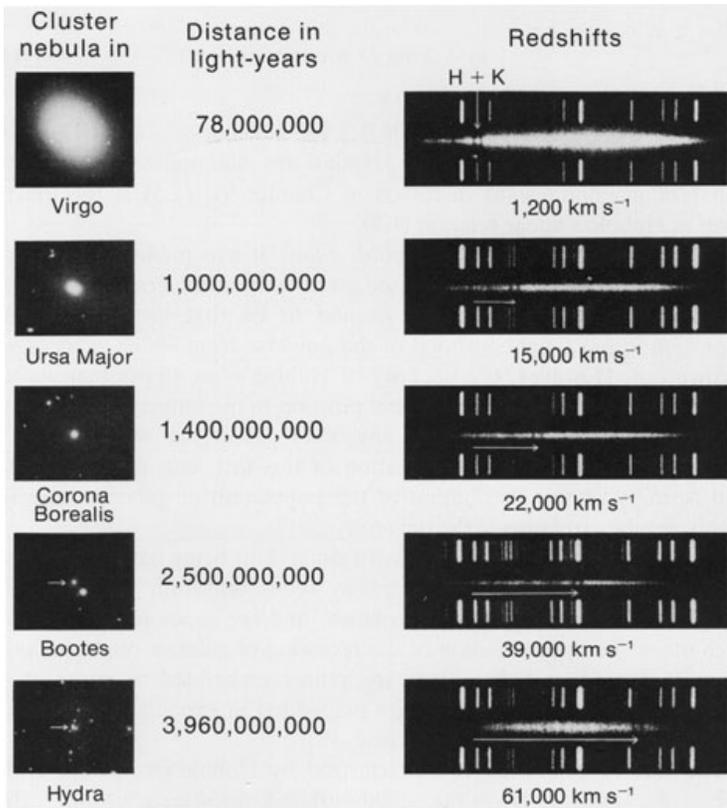


Figura 15 – Relação *redshift* x distância para diversas fontes extragalácticas. As flechas à direita indicam o deslocamento das linhas H e K do cálcio. (Fonte: Observatório Palomar.).

Por hora, é interessante comentar que um desvio para o vermelho de 0,16 corresponde, grosseiramente, a uma distância de 2 bilhões de anos-luz. Depois disso, muitas outras radiofontes foram identificadas como objetos semelhantes a estrelas, mas com grande desvio para o vermelho. O nome *QUASAR* vem da contração de *QUASI-STELLAR RADIO SOURCE* e está hoje associado a fontes remotas que emitem grandes quantidades de energia e que apresentam um grande desvio para o vermelho em suas linhas espectrais (Figura 16).

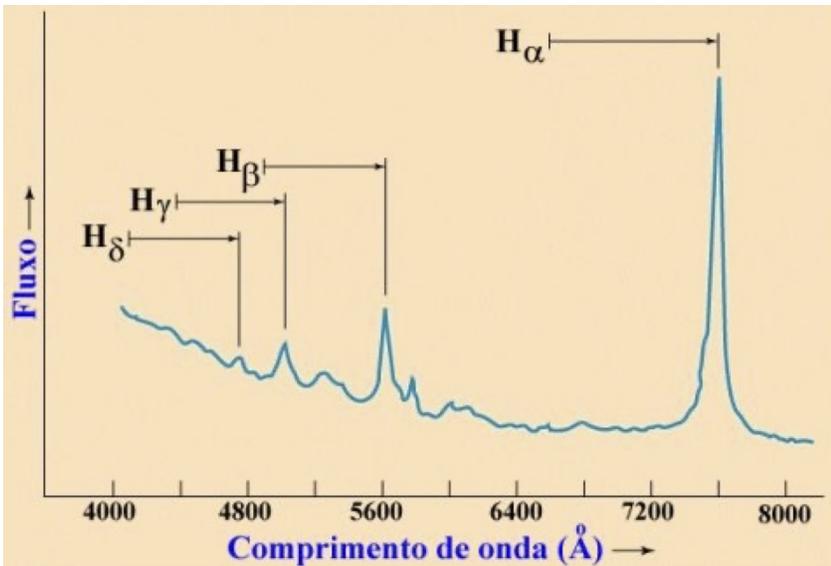


Figura 16 – Posição das linhas de emissão do H observadas em quasares típicos. As linhas horizontais em $H_{\alpha,\beta,\gamma,\delta}$ representam a magnitude do deslocamento, em unidades de comprimento de onda. (Fonte: Elaboração do autor).

Mas o que são os quasares? Ainda não se tem uma resposta satisfatória para essa pergunta... A resposta mais aceita (mas absolutamente não unânime) é que eles são objetos semelhantes a galáxias, mas localizados a distâncias muito maiores! E, para aparecerem no céu com o aspecto de estrelas fracas, mas situados a distâncias tão grandes, sua taxa de geração de energia deve ser fenomenal!

Além disso, os quasares apresentam uma variação, às vezes regular, na emissão de radiação que é notável em alguns poucos dias (no óptico) ou mesmo horas (em raios X) de observação. Como a variabilidade na emissão de um objeto não pode acontecer num tempo menor do que a luz leva para se propagar de um lado a outro desse mesmo objeto, a variação na luminosidade emitida nos dá uma estimativa do tamanho dele.

Observações de quasares na faixa de raios X e uma interpretação cosmológica (associada à idade e à distância que tais objetos se encontram) sugerem que o núcleo de um quasar deve ter o tamanho aproximado do nosso sistema solar, mas emitindo uma energia cerca de 10 trilhões de vezes maior que a do Sol. É natural, portanto, que essa hipótese não seja um consenso entre astrônomos, devido à sua desproporção.

Os quasares são bastante semelhantes às radiogaláxias e também podem ter componentes compactas ou extensas. Na verdade, nem sempre os astrônomos conseguem distinguir perfeitamente entre um quasar e o núcleo brilhante de uma radiogaláxia (Figura 17). Possivelmente, quasares e núcleos de radiogaláxias são o mesmo objeto, que se comporta de modo diferente ao longo de sua evolução.

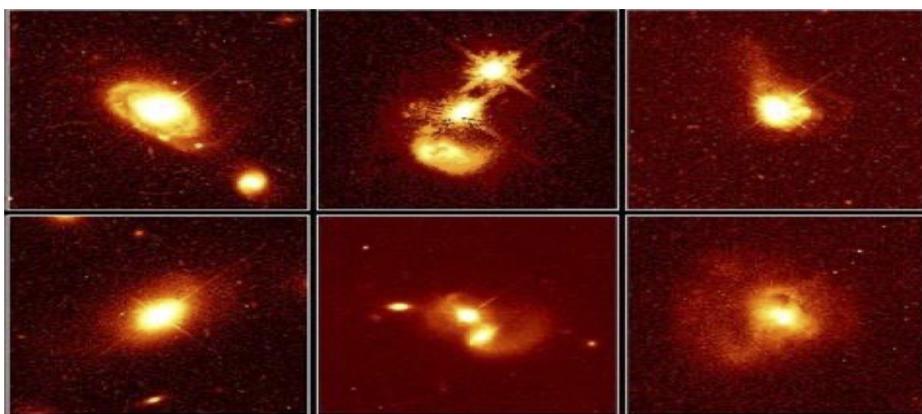


Figura 17 – Regiões hospedeiras de quasares. (Fonte: Elaboração do autor.).

Ainda não se sabe também qual é o mecanismo que alimenta essa produção fenomenal de energia. Parece ser consenso que a transformação de energia gravitacional em energia luminosa é o mecanismo alimentador, mas isso pode ocorrer de diversas maneiras. Hipóteses vêm sendo levantadas por astrônomos nas últimas décadas, como a contração do gás que sobrou após o processo de formação da galáxia, estrelas supermassivas girando a enormes velocidades e possuindo um campo magnético intenso (conhecidas como spinars) ou mesmo buracos negros gigantes no núcleo de uma galáxia.

A hipótese do buraco negro central é a mais aceita atualmente e justificaria, ao mesmo tempo, o tamanho compacto da fonte e sua intensa produção de energia, uma vez que um buraco negro com um bilhão de vezes a massa do Sol é capaz de gerar, durante a sua vida, uma energia equivalente a 100 milhões de vezes essa mesma massa. Ela pode, inclusive, explicar o porquê de um quasar ser uma fonte de ondas de rádio, utilizando a hipótese de que o gás sugado para dentro do buraco negro pode – devido ao movimento espiralado semelhante ao da água correndo para dentro de um ralo de pia – atuar como um dínamo e produzir feixes de partículas que seriam ejetados em direções opostas.

Esses feixes ativariam as regiões extensas mencionadas no começo desta seção. A Tabela 1 contém uma lista de diversos objetos que, embora sejam também galáxias, foram classificados separadamente em função de algumas características peculiares, mencionadas na segunda coluna da tabela. A Figura 18 mostra uma imagem do quasar 3C 273 no óptico e em rádio. O jato estende-se por centenas de milhares de anos-luz além da galáxia central, como pode ser visto na imagem óptica à direita, feita com o Telescópio Espacial Hubble. O jato é a pequena linha branca, abaixo à direita da imagem. Para referência, a escala é de 86.000 anos luz. A imagem central feita com o radio interferômetro High Sensitivity Array (HSA) mede 40 anos luz, e a imagem da esquerda, feita de uma combinação dos radio

interferômetros Global Millimetre VLBI Array (GMVA) e Atacama Large Millimetre / submillimetre Array (ALMA), mede 2 anos luz.

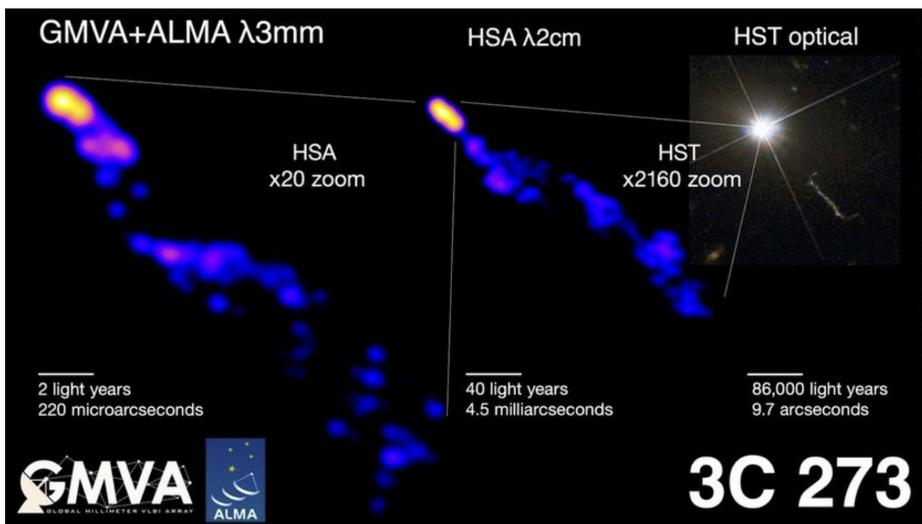


Figura 18 – Imagens combinadas do quasar 3C 273. A imagem à direita foi produzida pelo Hubble Space Telescope. As imagens ao centro e à esquerda foram produzidas com radiotelescópios, nos comprimentos de onda de 2 cm e 3 mm. (Fonte: Hiroki Okino e Kazunori Akiyama (imagens GMVA+ALMA), Okino et al. (imagens HSA), ESA/Hubble & NASA (Imagens HST).).

Tabela 1 – Diversos tipos de galáxias ativas e suas características principais. (Fonte: Elaboração dos autores.).

GALÁXIAS ATIVAS	
Seyferts	Galáxias espirais com núcleo brilhante. A observação do núcleo mostra linhas de emissão e emissão em rádio.
Galáxias N	Galáxias elípticas com núcleo brilhante. Algumas são radiofontes.
Objetos BL Lacertae	Provavelmente galáxias elípticas com núcleo muito brilhante. A observação do núcleo mostra uma emissão contínua sem nenhuma particularidade e polarização bastante variável.
QSOs	Objetos quase estelares semelhantes aos quasares, mas que não apresentam a emissão na faixa de rádio característica daqueles. Apresenta também desvios para o vermelho bastante grandes.

Segundo Fred Hoyle, um famoso astrônomo britânico, falecido em 2002, o entendimento do motivo de existem diferentes tipos de galáxias e como elas se formaram é um dos problemas mais importantes que existem hoje na astronomia. As propriedades das estrelas individuais que formam as galáxias é assunto abordado pela astrofísica e astronomia, enquanto o fenômeno da formação das galáxias toca a área da cosmologia. Pode-se dizer que o estudo das galáxias cria uma ponte entre a astronomia e a astrofísica convencional de um lado e a cosmologia de outro.

9.6 A escala de distância cosmológica

Todo o estudo da astronomia depende, fundamentalmente, de se conhecer a que distância se encontra o objeto estudado para, com base nisso, determinar o seu brilho intrínseco e estudar as propriedades da radiação que chega até nós. Historicamente, os modelos cosmológicos concebidos pelo Homem envolviam a Terra, a Lua, o Sol, os planetas e as estrelas distantes e, desde o tempo da civilização grega, tem-se feito determinações do tamanho da Terra e das distâncias Terra-Sol e Terra-Lua. O aparecimento dos telescópios, no séc. XVII, só veio a aumentar a necessidade de se “mapear a estrada cósmica”, começando com a nossa vizinhança mais próxima.

A ideia – que se acredita ser inicialmente formulada por Emanuel Kant – que nebulosas elípticas eram na verdade aglomerados enormes de estrelas, trouxe ao Homem a necessidade de entender melhor os diferentes objetos que ele avistava no céu. A descoberta dos aglomerados de galáxias e da expansão do Universo, no séc. XX, acentuou esse problema. Os astrônomos resolveram, então, sistematizar as maneiras de determinar as distâncias até esses objetos, para poder realizar o “mapeamento cósmico”. Nesta seção, vamos estabelecer as bases para a discussão, feita no capítulo sobre Cosmologia, que diz que quanto maior a distância de um objeto em re-

lação a nós, maior a velocidade com que ele se afasta. A pergunta a ser respondida nesta seção é como os astrônomos medem as distâncias aos objetos extragalácticos.

Conforme comentado nos capítulos anteriores, medidas de paralaxe são utilizadas para estimar as distâncias a estrelas próximas. Entretanto, os erros nessas medidas limitam o uso das paralaxes a distâncias inferiores a cerca de 100 anos-luz. Estrelas Cefeidas e estrelas Novas podem ser usadas para medir distâncias na nossa Galáxia e até galáxias próximas. Eles possuem características bastante marcantes (tais como a intensidade do brilho ou a variabilidade regular) que permitem sua identificação em outra galáxia. A comparação é feita entre objetos do mesmo tipo, cuja paralaxe de um deles tenha sido determinada. Como a intensidade da luz emitida decai com o inverso do quadrado da distância entre a fonte e o observador, é possível estimar a distância até objetos mais distantes.

Os métodos utilizando Cefeidas permitem medidas razoavelmente seguras de distâncias até cerca de 10 milhões de anos-luz; a partir daí torna-se mais e mais difícil identificar Cefeidas individuais nas galáxias. Para atingir distâncias maiores, é necessário utilizar outros calibradores padrão, cujo brilho e/ou tamanho angular intrínsecos conhecidos podem ser comparados ao brilho e ao tamanho de objetos semelhantes, mas localizados a distâncias maiores. Naturalmente, o truque nesse processo é ter certeza que escolhemos um critério adequado para reconhecer que observamos o mesmo tipo de objeto visto na nossa vizinhança.

Com o “mapeamento da estrada cósmica” até algumas centenas de milhões de anos-luz da Terra, uma nova questão aparece claramente aos astrônomos: por que existem algumas escalas de aglutinação preferenciais no Universo? Em outras palavras, por que o Universo segue uma hierarquia de distribuição de matéria, mas somente até certo ponto?

9.6.1 Hierarquias

Se tirássemos uma “radiografia” do Universo, veríamos que sua estrutura é hierárquica. Além das galáxias em pares, observamos grupos (constituído de alguns poucos a algumas dezenas de objetos, num raio de cerca de 1 milhão de anos-luz – essa é a hierarquia mais comum, com a maior parte das galáxias sendo encontrada em grupos), aglomerados (alguns milhares de objetos, num raio de cerca de 10 milhões de anos-luz) e superaglomerados (contêm cerca de 100 a 1000 aglomerados num raio de aproximadamente 100 milhões de anos-luz). Encontramos uma espécie de parede de galáxias a uma distância de aproximadamente 450 milhões de anos-luz e, a partir daí, não existe nenhuma evidência de outro nível na hierarquia de aglutinação da matéria (Figura 19). Aparentemente, ao tentar enxergar o Universo além de 450 milhões de anos-luz, não encontramos nenhuma estrutura porque estamos olhando para uma região/época em que as galáxias ainda não haviam se formado. Conforme mencionamos antes, olhar para os confins do Universo é a mesma coisa que observar regiões num passado remoto, perto da época em que o próprio Universo se formou.

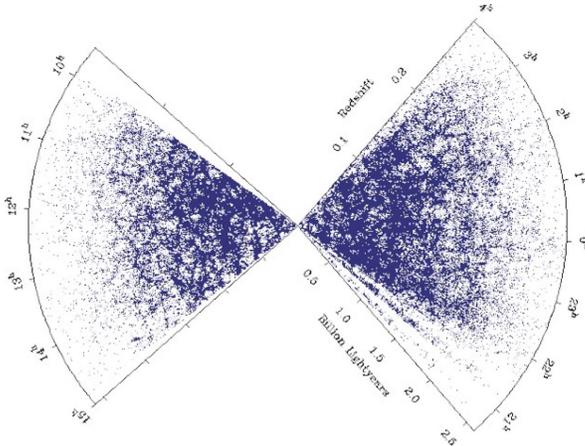


Figura 18 – A distribuição de galáxias no Universo próximo feita pelo 2dF Survey. (Fonte: <http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/>).

O aglomerado mais próximo de nós é o aglomerado de Virgem, localizado a cerca de 50 milhões de anos-luz (na direção da constelação de Virgem). Ele contém cerca de 200 galáxias brilhantes, das quais 68% são espirais, 19% são elípticas e o resto é constituído de galáxias irregulares ou não classificadas (já visto nas Figuras 7, 9 e 10). Localizado a cerca de 350 milhões de anos-luz, o aglomerado de Coma é o segundo mais próximo e contém alguns milhares de galáxias de todos os tipos já comentados. Ao contrário de Virgem, em Coma, a maioria das galáxias são elípticas ou SO (cerca de 80%) e somente uns 15% são classificadas como espirais ou irregulares. Duas características são notáveis nos aglomerados ricos como Coma: a) a relativa ausência de galáxias espirais; e b) a existência de uma ou duas supergigantes elípticas próximas ao centro do aglomerado.

9.6.2 Distâncias típicas

Estamos acostumados, no nosso dia a dia, a pensar e trabalhar com distâncias e medidas em termos das nossas próprias dimensões; quando precisamos pensar em coisas muito grandes e muito pequenas, dimensões menores que décimos ou centésimos de milímetros, ou milhares de quilômetros, é difícil de quantificar mentalmente. Se pensarmos, então, nas distâncias típicas que envolvem os fenômenos astronômicos, veremos que elas encontram-se, muitas vezes, além da nossa realidade e mesmo da imaginação. Vamos montar uma tabela que nos mostra, em termos gerais, as relações de tamanho entre objetos no Universo que conhecemos:

É interessante frisar que, em Astrofísica Extragaláctica e Cosmologia, trabalhamos com as maiores distâncias que um ser humano pode imaginar; algo entre 22 e 26 ordens de grandeza maior que suas próprias dimensões! Não é de se admirar que, ao extrapolar as distâncias para valores cada vez maiores, as incertezas envolvidas sejam também grandes. Tipicamente, a incerteza sobre o tamanho do Universo e, indiretamente, sobre sua idade, vem dos problemas em se calibrar e extrapolar a distância até os objetos mais distantes.

A Lei de Hubble, que descreve a velocidade de recessão das galáxias, pode ser usada para estimar as dimensões típicas do nosso Universo e será discutida em detalhes no capítulo sobre Cosmologia.

Tabela 2 – Escala do Universo conhecido. (Fonte: Adaptada de Ferris, p. 225.).

Raio (metros)	Objetos característicos
10^{26}	Universo observável
10^{24}	Superaglomerados de galáxias
10^{23}	Agglomerados de galáxias
10^{22}	Grupos de galáxias
10^{21}	Nossa Galáxia (Via Láctea)
10^{18}	Nebulosas gigantes
10^{12}	Sistema Solar
10^{11}	Atmosfera exterior das estrelas gigantes vermelhas
10^9	Sol
10^8	Planetas gigantes (Júpiter, por exemplo)
10^7	Estrelas anãs, planetas como a Terra
10^5	Asteroides, núcleos de cometas
10^4	Estrelas de nêutrons
1	Seres humanos
10^{-2}	Molécula de DNA (eixo longo)
10^{-5}	Células vivas
10^{-9}	Molécula de DNA (eixo curto)
10^{-10}	Átomos
10^{-14}	Núcleos dos átomos pesados
10^{-15}	Prótons e nêutrons
10^{-35}	Escala de Planck; quantum de espaço

Referências

Além da bibliografia em português e inglês consultada, incluo alguns outros textos que talvez despertem a atenção daqueles que tiveram uma formação em ciências exatas. Eles foram escolhidos com base pura e simplesmente no meu gosto pessoal.

“O despertar da Via Láctea”. Thmothy Ferris. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1990. Texto de divulgação, um pouco romancado, mas que cobre de modo bastante fiel a história da astronomia, desde seus primórdios. O autor é um dos grandes jornalistas ligados à divulgação científica nos EUA “A Brief History of Time”. Stephen Hawking. Random House Publishing Group (1998). Um dos livros mais divulgados sobre Cosmologia, traduzido para o português sob o título “Uma breve história do tempo” (Ed. Intrínseca, 2015). Um texto muito interessante, por mostrar a visão de Universo de um dos grandes físicos da segunda metade do século XX.

“Shadows of Creation: Dark Matter and the Structure of the Universe”. Michael Riordan e David Schramm. W. H. Freeman and Co.: Nova York, 1991. Texto de divulgação científica, escrito com o objetivo de passar ao leitor os conceitos básicos do processo de formação de estruturas e da existência de matéria escura no Universo.

“The Physical Universe”. Frank Shu. Herndon: University Science Books, 1982. Livro texto adotado em diversas universidades americanas, em geral usado para apresentar um curso de um ano em astronomia para alunos que não vão seguir a carreira científica.

Revistas “Scientific American Brasil” e “Ciência Hoje”. Existem diversos artigos ligados à formação do Universo e à interação entre galáxias. Vale a pena pesquisar.

“Foundations of Astronomy”. Michael Seeds. Wadsworth Publising Co.: Belmont, 1997. Livro texto de introdução à astronomia, com textos claros e excelentes ilustrações. Um dos pontos altos do livro são as caixas de texto com questionamentos e as perguntas no final de cada capítulo.

ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA. KEPLER DE SOUZA OLIVEIRA FILHO/ MARIA DE FÁTIMA OLIVEIRA SARAIVA. Editora Livraria da Física (4ª. edição, 2017). Do ponto de vista técnico, provavelmente o melhor livro de introdução à astronomia em língua portuguesa. Escrito por dois colegas da Univer-

cidade Federal do Rio Grande do Sul, o livro começou como um hipertexto, transformou-se em edição física e o site do livro é atualizado regularmente pelos autores. Recomendo fortemente a visita ao endereço eletrônico do livro: <http://astro.if.ufrgs.br/#gsc.tab=0>.



10. Cosmologia

Carlos Alexandre Wuensche

10.1 Introdução

Nas últimas décadas temos percebido um aumento rápido no conhecimento sobre a nossa vizinhança cósmica e, com as observações de objetos cada vez mais distantes, a fronteira do Universo parece ter sido empurrada para os confins do tempo. Somos a primeira geração de seres humanos capazes de perceber os grandes detalhes da História Cósmica, das origens do Universo até o desfile das estrelas pelos céus, da formação de sistemas planetários próximos ao nosso próprio sistema solar à descoberta que moléculas essenciais para a formação da vida encontram-se espalhadas por toda a nossa Galáxia e outras galáxias. Nossa percepção de mundo e, quiçá, do futuro da humanidade sobre a Terra, será fortemente influenciado pela apreciação e entendimento dos processos físicos que ocorrem no Universo. Neste capítulo, faremos um breve resumo da História da Cosmologia e apresentaremos uma visão da Cosmologia dentro do paradigma observacional que permite formular um modelo mais consistente de Universo: o chamado **Modelo Cosmológico Padrão (MCP)**, ou Ω -CDM. Discutiremos os constituintes

do Universo, os principais pontos relacionados com suas origens e evolução. Finalizaremos este capítulo com uma breve discussão sobre o futuro do Universo.

10.1.1 Uma perspectiva histórica

As origens históricas de uma visão cosmológica do Universo estão diretamente ligadas aos conceitos míticos que povoaram as religiões dos povos antigos. Como as fronteiras do “mundo conhecido” eram praticamente desconhecidas, cada civilização associava seu “universo” ao mundo terreno, Sol, Lua e planetas. Essa associação tinha raízes numa necessidade de organizar o “Cosmos” e, de alguma forma, explicar a origem do lugar onde o ser humano vivia.

Durante boa parte do curso da História, a associação de corpos errantes no céu com divindades nos remete diretamente ao conceito de magia, que hoje pode ser vista como uma tentativa de manipular a influência do ser humano no mundo natural. Nessa época, vivíamos num mundo de relacionamentos e afinidades, cujo pretense controle era feito por sacerdotes e magos, com o objetivo de tentar compreender e dominar as forças da natureza.

Nesse sentido, o sacerdote pode ser considerado como o antepassado do cientista e – por que não? – do astrônomo, uma vez que muitas das crenças mágicas envolviam rituais em que a necessidade de se prever ou aproveitar os ciclos celestes era premente. As crenças humanas a respeito do Cosmos e o desenvolvimento de suas ideias sobre a natureza serviram como um fio que guiou a espécie humana através do labirinto de diferenças culturais em várias civilizações e ao longo do tempo. Essas crenças agiram também como um espelho, refletindo a visão científica de sua época.

A cosmologia na Idade Antiga pode ser bem representada pela astronomia egípcia e mesopotâmica e seu apogeu ocorreu no florescer da Grécia Clássica. A civilização grega clássica (600 a.C.) foi a sociedade antiga que mais avançou em Astronomia e em outras

áreas do conhecimento humano, como filosofia, matemática e artes. Ao mesmo tempo, a mitologia grega era bem criativa. Essa civilização foi bastante influenciada pelos antigos egípcios e babilônios, tanto na área mitológica como na científica. A cosmologia grega, por exemplo, foi uma fusão evoluída das ideias egípcias, fenícias, mesopotâmicas, minoicas e micênicas. Muitos filósofos, pensadores e cientistas gregos contribuíram para o crescimento da astronomia.

A civilização árabe deu continuidade à busca do conhecimento científico e à evolução cultural proporcionados pelos antigos gregos. Foram os árabes que nomearam boa parte das estrelas e constelações com o nome que conhecemos hoje. Por outro lado, durante a Idade Média, período histórico entre os séculos V e XV, a evolução do pensamento científico no mundo ocidental avançou muito pouco, sendo predominante a visão religiosa. O modelo de Ptolomeu (Universo Geocêntrico), alinhado com o pensamento eclesiástico da época, admitia a Terra como centro do Universo. No séc. XV, o filósofo e astrônomo germânico Nicolau de Cusa (1401 – 1464) sugeriu, em seus trabalhos, que a Terra não era o centro do Universo, propondo que a mesma girava em torno de seu eixo, e imaginou que as estrelas fossem outros sóis situados a distâncias diferentes num espaço infinito.

Entretanto, somente com o Renascimento Europeu, associado ao período das grandes viagens de navegação, a Ciência Ocidental retomou seu crescimento. O início da revolução astronômica veio com a introdução do sistema heliocêntrico para o Universo, proposto por Nicolau Copérnico (1473 – 1543), e a visão de Universo de Giordano Bruno (1548 – 1600), seguido pela utilização do telescópio por Galileu Galilei (1564 – 1642) e pela descoberta das leis que levam o nome do astrônomo Johannes Kepler (1571 – 1630), entre os sécs. XV e XVII. A partir desses três marcos e das descobertas científicas de Isaac Newton (1643 – 1727), no séc. XVIII, a Astronomia começou a evoluir de maneira quantitativa, marcando o início da chamada ciência moderna. A noção real de que um “universo” existe além do nosso sistema solar só apareceu no séc. XIX, e a cosmologia, en-

quanto ciência individual, somente passou a ser considerada no séc. XX. Partiremos dessa época para nossa abordagem cosmológica.

10.1.2 O que é Cosmologia?

A Cosmologia é a ciência que estuda a origem, estrutura e evolução do Universo e é uma ciência multidisciplinar. Seu objetivo é entender como o Universo se formou, por que ele tem a forma que hoje vemos e qual será o seu destino no futuro. As principais ferramentas utilizadas para esse entendimento vêm da Física, Matemática e Astronomia. Da Física vêm as leis que descrevem fenômenos físicos nos laboratórios da Terra e, ao verificarmos que elas descrevem fenômenos semelhantes em lugares distantes do Universo, podemos reafirmar seu caráter universal. De certa maneira, um cosmólogo utiliza o Universo como um imenso laboratório. A Matemática nos dá a linguagem utilizada para registrar os processos observados e que permitem uma descrição precisa dos fenômenos astronômicos. Da Astronomia tomamos emprestadas as técnicas de observação do céu, medição do tempo e determinação das escalas de distância envolvidas. Observações astronômicas de objetos e fenômenos distantes são utilizadas pelos cosmólogos na montagem do quebra-cabeça que é entender o Universo. Podemos ainda incluir, no rol das ferramentas, a Química e a Filosofia. A primeira é importante no estudo da composição da matéria no meio interestelar e a segunda fornece o arcabouço que insere a Cosmologia na hierarquia do pensamento humano.

O estudo da cosmologia está intimamente ligado a uma teoria de gravitação, uma vez que a força que atua em escalas astronômicas e cosmológicas é a força gravitacional, uma das quatro forças conhecidas (além da gravitacional, existem as forças eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca). A principal teoria de gravitação utilizada na descrição do Universo em escalas muito grandes – maiores do que os aglomerados e superaglomerados de galáxias – é a **Teoria da Relatividade Geral** (TRG), proposta por Albert Einstein

(1879 – 1955). Ela veio substituir a **Teoria Clássica da Gravitação**, proposta por Isaac Newton, e, em linhas gerais, descreve como a matéria molda o espaço-tempo em que está inserida, ao mesmo tempo em que o espaço-tempo define as propriedades de dinâmicas (isto é, de movimento) da matéria. Ela será brevemente descrita na Subseção 10.3.1. Algumas variantes da TRG existentes hoje serão também rapidamente abordadas.

Ao observar o céu, o ser humano pode “definir” o tamanho do seu Universo (no jargão astronômico, o “Universo observável”, muito menor do que o Universo inteiro) em função das limitações dos instrumentos disponíveis e, conseqüentemente, do volume cosmológico acessível a seus instrumentos. Isso não quer dizer que não existam fenômenos além das regiões que conseguimos ver. Nosso universo tem as fronteiras tecnológicas (que vão sendo superadas à medida que inventamos instrumentos mais sensíveis) e as impostas pelas leis físicas. Nesse caso estamos limitados pela velocidade com que a informação transportada pela radiação eletromagnética (que pode ser luz, ondas de rádio, raios X e radiação medida em outros comprimentos de onda) se propaga. Assim, é possível estender o raciocínio e imaginar que existem fenômenos astronômicos que já aconteceram, mas cujo sinal eletromagnético (na forma de ondas de rádio, por exemplo) ainda não chegou até nós porque a fonte encontra-se muito distante da Terra.

Além da questão da distância existe o problema da absorção da radiação eletromagnética incidente, em quase todo o espectro eletromagnético, pela atmosfera da Terra. As únicas “janelas” visíveis do solo estão nas faixas óptica e rádio do espectro. A Figura 1 apresenta um diagrama que relaciona os comprimentos de onda com o mecanismo de absorção dentro da atmosfera. Estudando a radiação eletromagnética emitida por objetos celestes, podemos estimar a que distância eles se encontram, mapear o Universo e, em última instância, procurar respostas para algumas perguntas fundamentais formuladas pelo ser humano desde que este começou a olhar

para o céu... Em última instância, sempre estaremos questionando nossas origens: quem somos? De onde viemos? Para onde vamos?

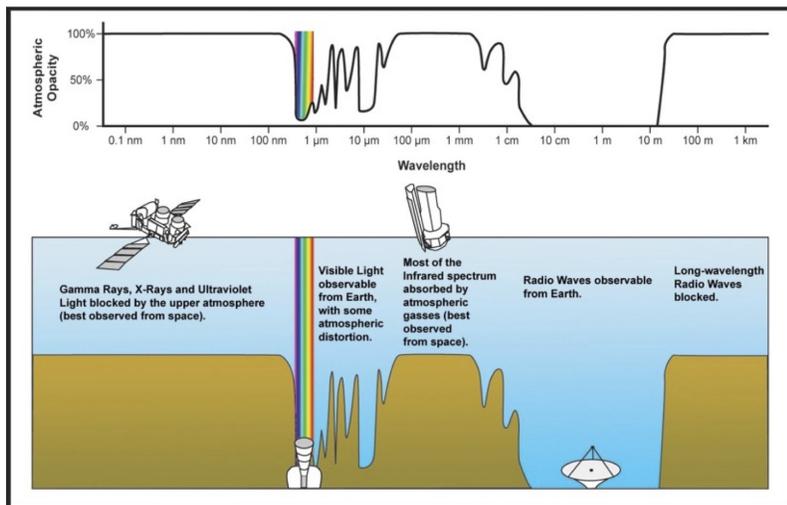


Figura 1 – Espectro da radiação eletromagnética, de raios gama até ondas longas de rádio. A parte superior mostra a opacidade da atmosfera em função do comprimento de onda. A pequena banda colorida é a faixa óptica do espectro e à esquerda estão localizadas as faixas do ultravioleta, raios X e raios gama. Na parte inferior da figura, as regiões que absorvem radiação estão marcadas em marrom, com desenhos de satélites para observações fora da atmosfera e as duas bandas (óptico e rádio) observadas da superfície da Terra com telescópios. (Fonte: <https://physics.stackexchange.com/questions/135260>).

Contudo, a motivação recente para o estudo da Cosmologia vem de questões em aberto na Física e na Astronomia, tais como:

- Como o Universo foi criado? Como ele terminará?
- Como as estruturas de matéria em grande escala se formaram?
- Qual é o tamanho e a geometria do Universo?
- Qual é a composição química do Universo?
- O que são a matéria e a energia escura?
- Como descrever os fenômenos do Universo primordial através do modelo padrão da Física de Partículas?

- Por que o Universo está acelerando?
- Qual será o destino do Universo?

A pesquisa fundamental em Cosmologia envolve técnicas e instrumentação extremamente sofisticadas, muitas vezes desenvolvidas especificamente para esse tipo de pesquisa. Parte da motivação para se desenvolver os supercomputadores vem da necessidade de se usar processadores mais e mais poderosos para simular a formação e evolução das primeiras galáxias. Além disso, certas condições físicas no Cosmos são tão extremas que jamais poderão ser conseguidas na Terra, de modo que a Cosmologia associa-se à Física para utilizar o Universo como um grande laboratório. Nas palavras de Yacob B. Zel'dovich (1914 – 1987) “O Universo é o acelerador de partículas dos pobres”. Nos primeiros momentos do Universo, em que as energias são extremamente altas, a melhor descrição física é obtida com os conceitos da Física de Partículas. Fenômenos como o desacoplamento das forças eletrofraca e nuclear forte da força gravitacional, um possível momento em que houve a **Grande Unificação**, com as quatro forças sendo descritas por uma única teoria e a própria nucleossíntese primordial, quando foram formados os primeiros átomos de Deutério e Hélio, logo após os quarks livres serem confinados nos hádrons que constituem prótons e nêutrons, estão no âmbito da Física de Partículas, e o Universo pode, de fato, ser considerado como o “grande acelerador de partículas”.

Finalmente, o apelo intelectual e o conhecimento das perspectivas sobre o Universo em que vivemos podem servir até como fator de orientação ética, direcionando as ideias do ser humano e fornecendo parâmetros para nortear escolhas que podem definir o futuro da nossa espécie. Sob esse aspecto, a Física, a Astronomia e a Cosmologia não geram conhecimento supérfluo e irrelevante – sua importância é vital.

10.2 O universo observável

O objetivo final da Cosmologia é explicar o Universo em termos de uma teoria simples e esteticamente atraente. Entretanto, de todas as ciências, a Cosmologia é a mais exigente em termos de extrapolação de resultados e conceitos, já que as escalas de tempo e distância envolvidas nos problemas cosmológicos são da mesma ordem de grandeza da idade e tamanho do Universo que queremos observar. Além disso, ao contrário de um experimento em laboratório, não podemos criar (ou não existem) vários universos para que possamos fazer uma análise estatística completa de suas propriedades. Nesta seção serão discutidos alguns dos testes e observáveis usados para mapear a escala de distância cósmica

Ao estudarmos a distribuição de matéria no Universo, da forma apresentada neste curso, por exemplo, partimos dos menores constituintes para o “todo”. É fácil perceber que existe uma hierarquia no Universo, em que matéria vai se juntando para formar uma determinada estrutura que, numa escala maior, comporta-se como uma pequena parte que será juntada às outras para formar uma estrutura ainda maior, e assim sucessivamente, até um limite em que o Universo torna-se homogêneo, isto é, sem estruturas aparentes.

A teoria mais aceita no momento é que o Universo foi criado com base em um estado inicial muito denso e quente, com fótons com energias extremamente altas e pares de partículas sendo criados e aniquilados a cada instante. Deixamos para a reflexão do leitor a questão de como o Universo “se organizou”, aparentemente violando a Segunda Lei da Termodinâmica?

10.2.1 Uma visão geral

Nossa descrição do Universo primordial baseia-se mais nos cálculos e no conhecimento que temos sobre as leis da Física. As escalas de distância cobertas pelos telescópios ópticos e radiotelescó-

pios vão até cerca de 13 bilhões de anos luz, ou praticamente à borda do Universo, já que estimamos que ele tenha cerca de 13,9 bilhões de anos. A última medida direta de um observável astronômico é a Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas (doravante RCFM), com praticamente 13,9 bilhões de anos, e situada em $z \sim 1100$. Os outros observáveis, tais como neutrinos primordiais e os primeiros núcleos de elementos (H, He, D, Li) somente podem ser estimados de maneira indireta.

Temos um bom conhecimento sobre o Universo mais jovem, entre cerca de 10^{-6} s e ~ 380 mil anos de idade. Esse período é explorado com base nas informações que extraímos do estudo da RCFM, descoberta por Arno Penzias (1933 – 2024) e Robert Wilson (1936 –) em 1964, e da sua associação com o estado primordial denso e quente mencionado anteriormente.

As galáxias mais próximas são brilhantes e permitem um estudo mais detalhado de suas propriedades. À medida que observamos objetos mais e mais distantes, a quantidade de radiação que recebemos é cada vez menor e, por essa razão, astrônomos sempre estão desenvolvendo instrumentos mais sofisticados. Olhando “mais fundo” no Universo, os astrônomos tentam conhecer mais detalhes sobre a época de nascimento das galáxias, sua distribuição no espaço e sua evolução. Essa distribuição é conhecida como **Estrutura em Grande Escala** (Figura 2).

O *redshift* (do inglês, deslocamento para o vermelho) é uma propriedade observada nas linhas espectrais das galáxias, que são deslocadas para maiores comprimentos de onda, na direção da parte vermelha do espectro eletromagnético (região de menor energia). A variação da frequência em função do movimento do corpo emissor é conhecida como efeito Doppler, e a variação é tanto maior quanto mais distante estiver a galáxia observada. O mapa apresentado na Figura 2 é baseado nas medidas de *redshift* das galáxias e aglomerados.

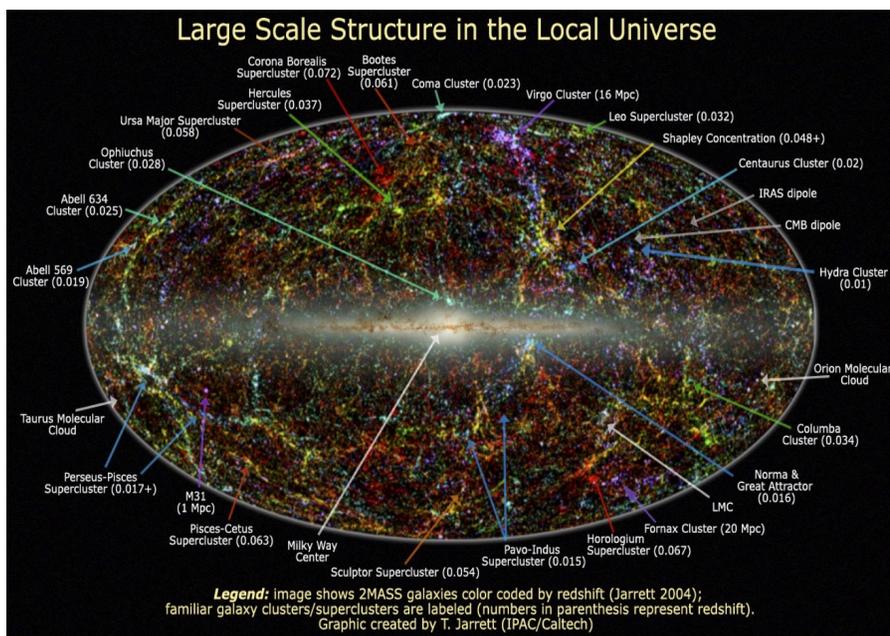


Figura 2 – Levantamento de galáxias 2MASS, distribuídas em função do *redshift*, com cerca de 1,6 milhões de galáxias, feito pela equipe do Center for Astrophysics (CfA) nas décadas de 1970 e 1980.. A faixa brilhante no centro é a Via Láctea, onde estamos localizados. O centro da figura representa o observador, ou seja, nós. Os números entre parênteses representam a distância em unidades de megaparsecs (1 parsec (pc) = 3,26 anos luz = $3,09 \times 10^{13}$ km, logo 1 Megaparsec (Mpc) = 10^6 pc = $3,09 \times 10^{19}$ km.) ou, quando somente um número, o *redshift*. Os pontos mais distantes estão representados em vermelho e estão um *redshift* $\sim 1,0$. Muitas galáxias estão ligadas pela atração gravitacional, formando aglomerados que, por sua vez, se agrupam em superaglomerados e em estruturas ainda maiores. (Fonte: IPAC/Caltech: https://apod.nasa.gov/apod/image/0712/lss_2mass_big.jpg).

Não sabemos exatamente em que época começou o processo de formação dessas estruturas, porque temos muito pouca informação sobre esse período do Universo, mas sabemos que isso deve ter acontecido quando o Universo tinha entre 200 e 500 milhões de anos de idade, conforme dados obtidos pelos satélites Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) e Planck, lançados, respectivamente, em 2001 e 2009.

A partir do início da década de 1990, a combinação dos resultados de medidas da RCFM com observações da distribuição de galáxias e aglomerados de galáxias, descritos com o arcabouço da TRG, possibilitou a criação de um paradigma de modelo cosmológico, conhecido como **Modelo Cosmológico Padrão** (doravante MCP). Ele é baseado na métrica de Robertson-Walker, nas equações de Friedmann e em observações que dão a sustentação para o MCP. Apesar de ainda deixar uma série de perguntas sem resposta, esse modelo é o que melhor descreve o Universo que observamos e é baseado nos seguintes pontos:

- Não há região ou observador no espaço que ocupe uma posição preferencial em relação à outra qualquer. Essa afirmativa é conhecida como Princípio Cosmológico.
- O Universo é homogêneo e isotrópico em escalas suficientemente grandes.
- A existência e as propriedades da RCFM, a abundância de determinados elementos químicos leves (Hidrogênio, deutério, Hélio e Lítio), a observação da velocidade relativa de afastamento de galáxias distantes e a expansão acelerada do Universo são observações que sustentam o arcabouço teórico do MCP.

O item 1 foi enunciado por Nicolau Copérnico em fins do século XV e vem sendo utilizado na maioria dos modelos cosmológicos desde então. Como praticamente todos os processos observados na evolução das estrelas e galáxias podem ser descritos em termos da Física conhecida, acredita-se que as leis que descrevem os fenômenos físicos na nossa Galáxia são as mesmas em qualquer parte do Universo. Essa crença vem de podermos observar e descrever fenômenos que ocorrem em galáxias distantes com exatamente o mesmo formalismo matemático usado para descrever fenômenos locais.

O item 2 vem sendo estudado em detalhes nos últimos anos e verificado com base em resultados de diversos levantamentos de galáxias, ou “*redshift surveys*”, como são conhecidos entre os pro-

fissionais. Podemos citar, como exemplo, o Center for Astrophysics/CfA Survey, o Sloan Digital Sky Survey/SDSS, o Six Degree Field Survey/6dF, e o Automated Plate Measuring/APM Survey, entre outros. Os “*redshift surveys*” atingem distâncias menores que 1 bilhão de parsecs, ou cerca de 3 bilhões de anos luz (correspondendo a um *redshift* $z \sim 0.2$). A homogeneidade e isotropia do Universo começam a ser verificadas a partir de distâncias da ordem de 600 milhões de anos luz (cerca de 6×10^{26} cm, que equivalem a ~ 200 milhões de parsecs ou ~ 6 bilhões de trilhões de quilômetros). Até distâncias dessa ordem ainda são observados diversos tipos de estrutura, tais como vazios, paredes e estruturas filamentosas. Desse ponto até o ponto onde se formou a RCFM ($\sim 13,7$ bilhões de anos luz, equivalentes a $1,23 \times 10^{28}$ cm ou 120 bilhões de trilhões de quilômetros) existe uma lacuna de informações, mas estimativas teóricas sugerem que esse foi o intervalo de tempo necessário para que a distribuição inicial de matéria evoluísse para formar as primeiras estruturas do Universo.

Veremos mais à frente as evidências observacionais que sustentam o MCP. A abundância dos elementos químicos nos traz informações sobre o processo da nucleossíntese primordial; a RCFM reflete o estado de equilíbrio termodinâmico no Universo jovem. As medidas de velocidade de recessão das galáxias distantes e a aceleração da expansão do Universo, recentemente observada em medidas de supernovas tipo I, são fortes evidências do processo de expansão do Universo.

10.2.2 Lei de Hubble (ou a velocidade de recessão das galáxias)

Em 1923, o astrônomo Edwin Hubble começou um estudo de estrelas Cefeidas em “nebulosas espirais”, incluindo a nossa vizinha Andrômeda (a galáxia M31), visível a olho nu. Usando a **relação período-luminosidade** para as Cefeidas, ele calculou a distância a que elas se encontravam da Terra, obtendo um valor de 800.000 anos luz para Andrômeda e valores semelhantes para outros objetos.

Os resultados mostraram que esses sistemas eram enormes conjuntos de estrelas e, definitivamente, encontravam-se fora da nossa Galáxia. Eles passaram a ser também chamados de galáxias e o conceito de “distância extragaláctica” estava criado.

Mas a mais importante descoberta de Hubble foi que as galáxias distantes se afastavam de nós e umas das outras. Seu resultado baseou-se na descoberta de uma relação linear entre a distância D das galáxias até nós (determinada pela relação período-luminosidade, por exemplo) e a velocidade v , determinada pela determinação do *redshift* das linhas espectrais observadas. Definimos o *redshift* z com base no deslocamento causado pelo efeito Doppler medido nas linhas espectrais:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad (10.1)$$

em que λ é o comprimento de onda medido na estrela e λ_0 é o comprimento de onda da linha em repouso, ou seja, medido no laboratório. Utilizando a relação acima, escrevemos $v = zc$ e podemos escrever:

$$cz = v = H_0.D. \quad (10.2)$$

A constante H_0 , conhecida como constante de Hubble, é 71 ± 6 km/(s.Mpc). Esse valor tem dimensão $[t]^{-1}$, logo é possível, usando os valores medidos de d e v , fazer uma estimativa da idade do Universo. Essa estimativa fica como um exercício para o leitor.

Note que essa expressão só é linear para pequenos “*redshifts*” (tipicamente, $z < 1$). Essas observações mostraram um afastamento sistemático e isotrópico, e foram confirmadas até distâncias de centenas de milhões de pc. A Figura 3 apresenta um diagrama com as primeiras observações feitas por Hubble, publicadas em 1929, e a extrapolação usando medidas de objetos mais distantes, em 1931. Hubble foi forçado a fazer sua descoberta passo a passo, utilizando Cefeidas, variáveis RR Lyrae e estrelas supergigantes para ir cali-

brando as distâncias até o aglomerado de Virgem, e o resultado obtido aparece na Figura 3 (esquerda).

Qualquer observador em nosso Universo, situado numa galáxia distante, perceberá exatamente esse mesmo fenômeno. É como se o próprio espaço estivesse se expandindo e um observador em qualquer parte dele visse a mesma expansão, em qualquer direção que olhasse. Em homenagem a Edwin Hubble, a NASA colocou seu nome em um telescópio espacial que foi lançado em abril de 1990. Entre vários resultados espetaculares que o Telescópio Espacial Hubble obteve, nos interessa o “Hubble Cepheid Key Project”.

O gráfico à direita da Figura 3 é baseado somente em dados coletados pelo telescópio Hubble, usando medidas de variáveis Cefeidas para determinar as distâncias. A inclinação da curva nos dá uma estimativa para a constante de Hubble de, aproximadamente, 70 km/s.Mpc. Com o Telescópio Hubble, podemos, assim como Edwin Hubble, estudar Cefeidas, só que localizadas a distâncias trinta vezes maiores que as medidas feitas na década de 1920.

10.2.3 Testes cinemáticos: relações luminosidade x *redshift* e distância angular x *redshift*

Objetos distantes podem ser estudados com base na sua luminosidade aparente e, com instrumentos suficientemente sensíveis, é possível medir seu diâmetro angular. Tanto a luminosidade aparente quanto o diâmetro angular dependem dos parâmetros cosmológicos que descrevem o Universo em que vivemos e seus valores variam com o *redshift* em que o objeto se encontra. O diâmetro angular de uma fonte distante é dado por:

$$\Delta\theta = \frac{d}{D}(1 + z) \quad (10.3)$$

em que d é o comprimento físico do objeto, D é a distância cosmológica até ele, θ é o tamanho angular aparente e z é o *redshift*. O termo $D/(1+z)$ é a chamada *distância de diâmetro angular*.

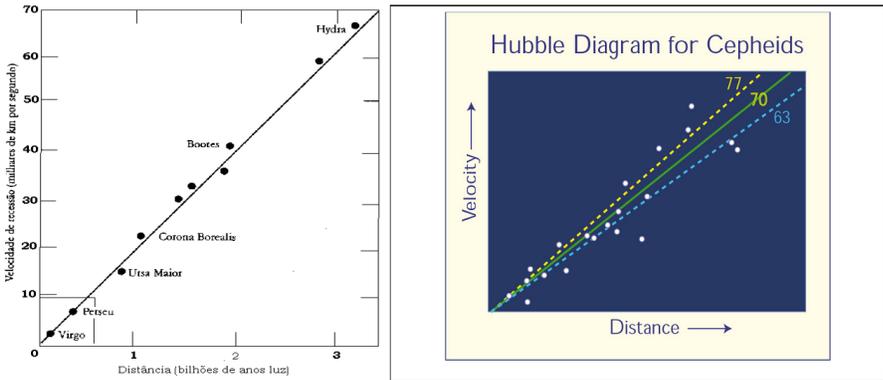


Figura 3 – Gráfico da Lei de Hubble inclui os dez maiores aglomerados de galáxias (esquerda). O quadrado no canto inferior esquerdo representa as galáxias observadas por Hubble (Fonte: Adaptado de Ferris, p. 157). O diagrama à direita foi produzido somente com medidas de variáveis Cefeidas feitas pelo Telescópio Espacial Hubble. (Fonte: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/1999/>).

Raciocínio semelhante é usado para o cálculo da intensidade aparente e sua relação com a luminosidade intrínseca de um objeto distante. Sabendo que há um decréscimo na intensidade em função da distância da fonte, e que há um aumento adicional em função da expansão do Universo, podemos escrever a relação entre o fluxo recebido na Terra e a luminosidade intrínseca emitida pela fonte, incluindo o efeito do *redshift*, da seguinte forma:

$$F_{obs} = \frac{L_{fonte}}{4\pi D^2(1+z)^2} \quad (10.4)$$

em que o termo $D^2(1+z)^2$ é conhecido como *distância de luminosidade*.

10.2.4 Contagem de galáxias

Um outro teste cinemático é baseado na contagem dos objetos cosmológicos dentro um dado intervalo de *redshifts*. Seja $N(z)$ o número de galáxias por unidade de volume em um determinado *redshift* z . Supondo que esse número é espacialmente uniforme, o número de galáxias distribuídas no intervalo de *redshifts* entre z e $z + \Delta z$, dentro de um ângulo sólido $\Delta\Omega$, é:

$$\frac{dN}{d\Omega dz} \propto \frac{N(z)}{(1+z)^3} \quad (10.5)$$

As expressões para as relações de diâmetro angular, luminosidade e contagem de galáxias podem, todas, ser reescritas colocando-as em termos dos parâmetros cosmológicos primários, que serão apresentados na Subseção 10.3.1.

10.2.5 O arcabouço teórico de Friedmann, Lemaitre, Robertson e Walker

Até cerca de 1950, a Cosmologia era uma ciência essencialmente teórica, com praticamente nenhum suporte observacional ou atividade experimental que pudesse validar os modelos de Universo então vigentes. Esses modelos possuíam as mais diversas características e a imensa maioria evoluiu com base nas soluções das equações propostas por Albert Einstein em 1915, como parte da sua TRG, para descrever o movimento de corpos em referenciais acelerados. A versão mais completa, em formato tensorial das equações, tem a forma:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (10.6)$$

em que $g_{\mu\nu}$ é o tensor que define a métrica do espaço-tempo, $R_{\mu\nu}$ é o tensor de curvatura de Ricci, R é o escalar de curvatura, Λ é a

constante cosmológica, $T_{\mu\nu}$ é o tensor stress-energia, G é a constante de gravitação e c é a velocidade da luz. Esse conjunto de equações foi resolvido em 1922, para um universo homogêneo e isotrópico em expansão, no contexto da TRG, por Alexander Friedmann (1888 – 1925), resultando nas chamadas equações de Friedmann, descritas na próxima seção.

Esse conjunto de equações foi resolvido em 1922, para um universo homogêneo e isotrópico em expansão, no contexto da TRG, por Alexander Friedmann (1888 – 1925). O abade Georges Lemaitre (1894 – 1966) também trabalhou na compreensão das equações de Einstein e foi o primeiro a propor a teoria da expansão do Universo, erroneamente atribuída a Edwin Hubble. Ele foi o primeiro a deduzir o que é hoje conhecido como Lei de Hubble e fez as primeiras estimativas da constante de Hubble, publicadas em 1927, dois anos antes do artigo de Hubble. Lemaitre também propôs o que posteriormente ficou conhecido como o modelo do Big Bang sobre a origem do Universo, chamado por ele de “hipótese do átomo primordial” ou “Ovo Cósmico”. A combinação do trabalho de ambos levou as chamadas equações de Friedmann-Lemaitre, um formato das equações de Einstein aplicadas à cosmologia.

Ao descrever fenômenos no espaço tridimensional, utilizamos um sistema de coordenadas que caracteriza univocamente a posição de um corpo nesse espaço. Em coordenadas cartesianas, provavelmente mais conhecidas do leitor, o elemento de linha que descreve a trajetória de um objeto no espaço Euclidiano é escrito como:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (10.7)$$

Coordenadas esféricas (r, θ, ϕ) permitem descrever de maneira mais adequada a trajetória de um objeto em uma geometria esférica. Nesse caso, a equação (10.2) assume a forma:

$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \quad (10.8)$$

Se mantivermos r constante, o objeto somente se movimenta sobre uma superfície esférica. Caso r varie, teremos movimento “para dentro” ou “para fora” da superfície. Ao descrever fenômenos que variam no espaço e no tempo, devemos incluir uma variável temporal no elemento de linha Euclidiano, transformando a equação (10.2) em:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad (10.9)$$

ou

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2) \quad (10.10)$$

Em geral, relações que descrevem a distância ds entre dois pontos no espaço são chamadas de *métricas*. As métricas (10.9) e (10.10) são também conhecidas como métricas de Minkowski, bastante usadas em cálculos na Teoria da Relatividade Restrita. Como tentamos descrever o Universo com modelos baseados na **TRG**, é necessário que sejamos capazes de incluir a forma do espaço-tempo que descreve o Universo na métrica desejada. Como veremos mais à frente, supomos, como hipótese de trabalho, que o Universo é homogêneo e isotrópico. De várias métricas possíveis, existem somente três que satisfazem às condições de homogeneidade e isotropia:

- a métrica que descreve um Universo plano (ou Euclidiano, em que a soma dos ângulos internos de um triângulo é igual a 180 graus);
- a métrica que descreve um Universo aberto (em que a mesma soma é menor que 180 graus);
- a métrica que descreve um Universo fechado (em que a soma é maior que 180 graus).

Sem entrar em detalhes, vamos mencionar que a métrica que incorpora essas três possibilidades foi descrita na década de 1930

por Howard Robertson (1903 – 1961) e Arthur Walker (1909 – 2001), e é conhecida por métrica de Robertson-Walker:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - \kappa r^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right) \quad (10.11)$$

Ela incorpora as três possibilidades de curvatura na variável κ e a expansão do Universo, no termo $R(t)$, também chamado “fator de escala”. É ele quem descreve se distâncias cósmicas estão aumentando ou diminuindo com o passar do tempo. Podemos imaginar essa métrica como uma extensão da métrica de Minkowski para um espaço homogêneo e isotrópico, não plano e não estático.

As equações de Einstein (10.6) relacionam a evolução de $R(t)$ com a pressão e a energia expressa em $T_{\nu\mu}$. Usando a métrica de Robertson-Walker (10.11), os termos de (10.6) são calculados explicitamente e, considerando que a energia no Universo pode ser tratada como um fluido perfeito, substituímos esses valores em (10.6) e o resultado são as chamadas equações de Friedmann-Lemaître, que descrevem um fluido homogêneo num Universo homogêneo e isotrópico em expansão:

$$\left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} + \frac{\Lambda c^2}{3} + \left(\frac{\kappa c}{R} \right)^2 \quad (10.12)$$

$$\left(\frac{\ddot{R}}{R} \right) = -\frac{4\pi G\rho}{3} \left(\frac{\rho + 3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3} \quad (10.13)$$

Na equação (10.12), o termo à esquerda descreve, de maneira simplificada, a energia cinética da expansão, com dimensão de (velocidade)². O lado direito possui diversos termos de inércia, caracterizando, de maneira simplificada, as energias potenciais dos diversos parâmetros cosmológicos: a matéria-energia, representada por ρ , a energia do vácuo (sobre a qual falaremos quando

tratarmos de energia escura), representada por Λ , e a curvatura, representada por κ^2 .

A equação (10.13) descreve a aceleração do Universo e resume a física que governa a expansão, em que p é pressão de radiação e ρ é a densidade de matéria-energia. No caso de $p \ll \rho$, o Universo é desacelerado pela presença de matéria (caso em que o Universo será não relativístico). Para um universo dominado por matéria relativística ($p = \rho/3$), a desaceleração será o dobro do caso não relativístico. No caso de $p = -\rho$, o Universo é dominado pela energia do vácuo (em que Λ assume o papel da chamada Energia Escura), ocorrendo a aceleração da expansão.

10.3 O universo primordial

10.3.1 Composição

O cenário previsto pelo MCP sugere que o Universo foi **criado** há cerca de 14 bilhões de anos, a partir de um estado de densidade, temperatura e pressão extremamente altas. Esse evento é conhecido como Big Bang (Grande Explosão), e considera-se que o Universo começou a expandir-se e resfriar-se a partir desse instante, considerado o “instante zero ($t = 0$)”. Todas as referências a intervalos de tempo cosmológicos são, em geral, feitas em relação ao “instante zero”.

Até cerca de 0,01 segundos, a temperatura era muito alta e havia formação e aniquilação incessante de pares de partículas elementares. Essa época era conhecida como a “fase hadrônica”, quando o plasma de quarks e glúons (constituído dos pares acima mencionados) transformou-se em “hádrons” após a temperatura cair para valores abaixo de 1 bilhão de graus K. Nesse momento, a produção e aniquilação de pares e as reações nucleares cessaram, deixando como resultado elétrons, prótons e nêutrons (nossos conhecidos,

que formam a matéria comum que constitui a Terra e as moléculas orgânicas presentes nos organismos vivos). Também restaram fótons e neutrinos, partículas difíceis de serem detectadas e que possuem massa extremamente pequena (cujo valor foi recentemente estimado) e carga elétrica nula. A composição do Universo, hoje, inclui

- hádrons (prótons e nêutrons): essa componente é a chamada Matéria Bariônica
- léptons (elétrons e neutrinos)
- radiação
- duas componentes desconhecidas: Matéria Escura e a Energia Escura, que constituem a maior parte dessa composição.

A proporção das componentes do Universo está representada na Figura 4. Note o disco à direita, que representa TUDO o que pode ser diretamente observado por emissão de radiação eletromagnética no Universo.

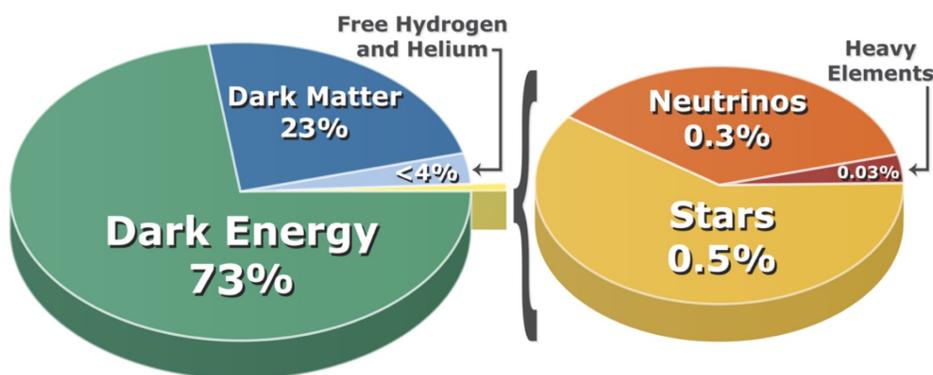


Figura 4 – Esquerda: Distribuição das componentes do Universo; direita: distribuição de matéria ordinária, considerando bárions e léptons (neutrinos). (Fonte: Wikimedia Commons (2017).).

10.3.2 Uma breve história térmica

A temperatura da RCFM diminui com a expansão do Universo e está diretamente ligada ao *redshift* pela relação

$$T_{RCFM}(z) = T_{RCFM_0}(1 + z) \quad (10.14)$$

e pode ser usada como alternativa ao tempo ou ao *redshift* para parametrizar a história do Universo. Os principais eventos da história térmica do Universo são:

- $t < 10^{-43}$ s ($E > 10^{19}$ GeV) – momentos próximos à chamada escala de Planck, em que a relatividade geral deixa de ser válida, e o Universo encontra-se no regime da gravitação quântica. A questão do que é a singularidade de onde o Universo foi formado é extremamente importante nesse regime.
- $10^{-43} - 10^{-14}$ s (10^{19} GeV – 10 TeV) – a energia disponível logo após a separação da força gravitacional das outras forças, em $\sim 10^{-43}$ s. Nesse período o Universo entra no regime da relatividade geral, embora sua composição “química” seja incerta. O processo de expansão inflacionária, que será descrito adiante, ocorre nesse intervalo ($t \sim 10^{-33}$ s), bem como o surgimento da assimetria matéria – antimatéria.
- $10^{-14} - 10^{-10}$ s (10 TeV – 100 GeV) – nesse regime, o modelo em que as forças eletrofraca e nuclear forte é válido e as reações que ocorrem nesse intervalo de energias pode ser reproduzido nos aceleradores de partículas atuais.
- 10^{-5} s (~ 200 MeV) – a transição glúon – quark ocorre nessa faixa de energias, confinando-os em bárions e mésons e criando os prótons e nêutrons usados na nucleossíntese primordial.
- 0,2 s ($\sim 1 - 2$ MeV) – os neutrinos primordiais desacoplam-se das demais partículas nessa época e a razão entre prótons e nêutrons é estabilizada. O número de nêutrons livres nessa

época determina a abundância dos elementos leves descrito na Subseção 10.3.4.

- 1 s ($\sim 0,5$ MeV) – a energia disponível é da ordem da massa de repouso dos elétrons e pósitrons. A aniquilação de pares deixa um excesso residual de elétrons sobre pósitrons da ordem de 1 elétron para cada bilhão de fótons produzidos, que encontram-se em equilíbrio térmico.
- 200 – 300 s ($\sim 0,005$ MeV) – a energia disponível favorece as reações nucleares e permite a junção de prótons e nêutrons livres em átomos de Deutério, Hélio e Lítio.
- 10^{11} s (~ 1 eV) – essa época corresponde à igualdade entre as densidades de matéria e radiação, separando as épocas de dominação de cada uma sobre a dinâmica do Universo.
- 10^{12} – 10^{13} s ($< 0,1$ eV) – nessa época, prótons e elétrons que se encontravam livres até então passaram gradualmente a se combinar para formar átomos de Hidrogênio. Com a combinação, o processo de interação entre fótons e elétrons, conhecido como espalhamento Thomson, tornou-se insignificante e o Universo tornou-se transparente à radiação (Figura 5). A trajetória de um fóton, antes limitada, devido às colisões sucessivas com os elétrons livres, passou a ser da mesma ordem de grandeza do Universo. Esse processo é conhecido como *desacoplamento*.

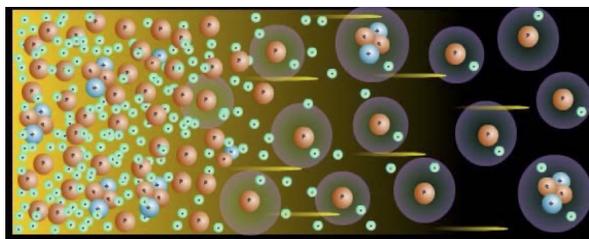
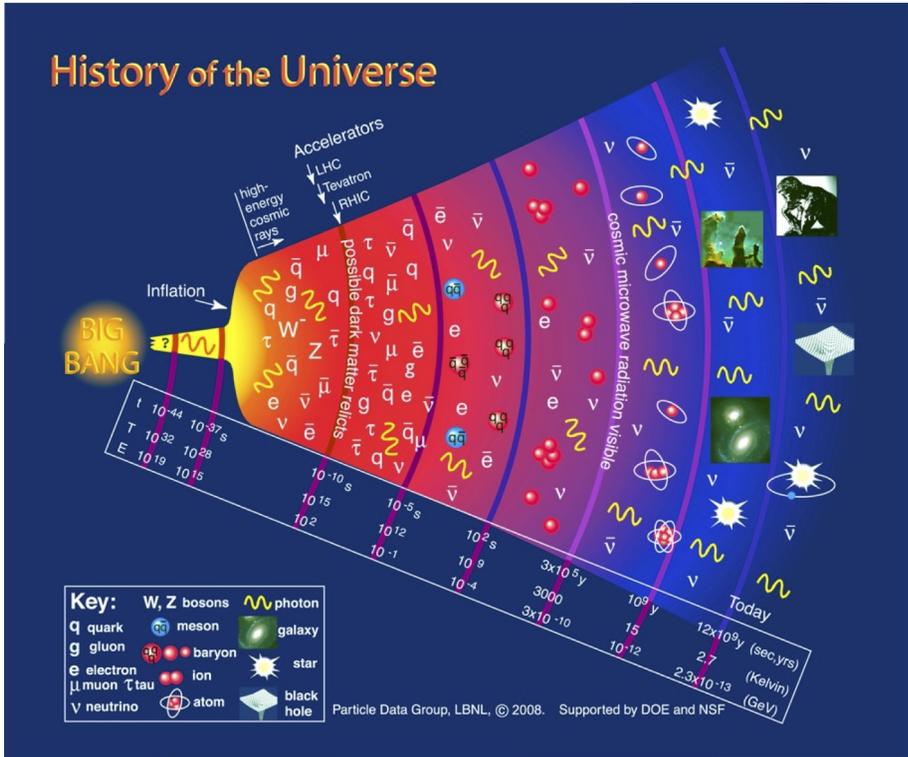


Figura 5 – À esquerda, o acoplamento causado pelo espalhamento Thomson obriga os fótons a percorrerem um caminho aleatório. Após a recombinação (à direita), os fótons podem se propagar livremente pelo Universo. (Fonte: <http://universeadventure.org>.)

- $10^{16} - 10^{17}$ s ($T < 10K$) – início da formação de estruturas a partir das flutuações de densidade primordial, como consequência das instabilidades gravitacionais. Duas questões não resolvidas aparecem nessa época: a natureza da matéria e da energia escuras. A temperatura dos fótons da RCFM **decrece** proporcionalmente à taxa de expansão do Universo, mas mantendo suas características. Hoje, sua temperatura é de $\sim 2,7260$ K, praticamente uniforme em todo Universo, e nos permite estimar que o aumento relativo do tamanho do Universo nesse período, considerando que a temperatura na época do desacoplamento entre a matéria e a radiação era cerca de 3000 K, foi de um fator 1000 ($\sim 3000/3$). Logo, o Universo, hoje, é mil vezes maior que na época da recombinação. A Figura 6 apresenta um resumo da história térmica, com os equivalentes em energia, temperatura e tempo. Conforme olhamos para pontos mais distantes do vértice, olhamos para objetos mais distantes de nós e, como consequência, cada vez mais jovens.



maior do que o raio do Universo hoje) que possa justificar essa isotropia, têm as mesmas propriedades globais. Isso é conhecido, entre os especialistas, como *a questão do horizonte*.

A relação entre a Lei de Hubble (equação 10.2), que governa a expansão do Universo, e a gravidade, que a desacelera, também parece ser extremamente bem ajustada. Um pequeno desvio nesse balanço entre energia cinética e potencial poderia causar um colapso imediato do Universo ou uma expansão tão rápida que não haveria tempo de formar estruturas. Assim, a densidade do Universo (que, de maneira simplificada, pode ser comparada à razão entre as energias cinética e potencial) tem que ser igual à unidade. A implicação disso é que o Universo deve ser plano. No jargão cosmológico, esse é o chamado *problema da planura*.

A proposta de um Universo em expansão extremamente rápida, num intervalo de tempo extremamente curto, é possível se, nesse tempo, a gravidade exerça uma pressão negativa acelerando o Universo, de modo que o fator de escala $a \sim e^{t/T}$, em que t é o tempo próprio do Universo e T é a temperatura (ou energia média). Esse processo é chamado de *Inflação*, e foi inicialmente proposto por Alan Guth (1947 –) e Paul Steinhardt (1952 –) em 1980. A Inflação deve ter ocorrido entre 10^{-34} s e 10^{-32} s, causando o aumento do raio do Universo por um fator $\sim e^{100} \sim 10^{43}$ (10^{-26} m para $\sim 10^{17}$ m).

A Inflação permite que os problemas da planura e do horizonte sejam resolvidos de uma forma elegante, fazendo com que regiões causalmente desconectadas no Universo hoje possam apresentar as mesmas propriedades, uma vez que, antes da Inflação, elas estavam em contato causal. A definição mais geral de Inflação é “uma época de expansão exponencial do Universo, quando a gravidade atua como uma força negativa”.

Alguns problemas, entretanto, surgem ao adotarmos a ideia de um Universo Inflacionário. Por exemplo, como explicar por que a gravidade torna-se repulsiva durante um infinitésimo de segundo? Qual seria o mecanismo disparador do processo inflacionário? Os

modelos de física de partículas conseguem explicar a energia necessária para essa aceleração em termos da relação entre pressão e densidade existente na eq. de Friedmann (10.13).

Por outro lado, uma das grandes previsões da Inflação, confirmada na década seguinte, é que deveria haver pequenos desvios dessa homogeneidade em grande escala, e que essas “perturbações” deveriam ter um espectro característico, que são vistas hoje diretamente como as perturbações da RCFM. Sua origem são as flutuações quânticas, presentes no fluido matéria-radiação; durante a Inflação seus comprimentos de onda são amplificados como todo o resto do Universo, tornando-se macroscópicos. O resultado, hoje, é um espectro de flutuações de matéria com basicamente as mesmas propriedades em num enorme intervalo de comprimentos de onda, ou *invariantes em escala*.

As perturbações produzidas durante o processo inflacionário são do tipo escalar (que estão correlacionadas às flutuações de temperatura da RCFM) e tensoriais (correlacionadas a ondas gravitacionais), e que produziriam um certo tipo de polarização na RCFM, conhecido na literatura como modos B, ou rotacionais.

10.3.4 Nucleossíntese primordial

Embora a análise espectral da luz emitida por estrelas e galáxias seja dominada por elementos mais pesados que o Hidrogênio e o Hélio, aqueles são muito mais raros do que os dois mais leves. Comparativamente, menos de 2% da massa da Galáxia é composta de elementos mais pesados que o Hélio. Pode-se aproximar essa abundância dizendo que, se pesarmos toda a massa disponível no Universo, cerca de 75% é Hidrogênio, 24% é Hélio e 1% corresponde a todo o resto dos elementos presentes na natureza. Os físicos e cosmólogos acreditam que a razão da composição química do Universo ser assim é porque Hidrogênio e Hélio foram criados nos primeiros instantes do Universo.

O processo de criação, que ocorreu de $\sim 0,01$ s a ~ 200 s, dependia das fases anteriores, em que a quantidade de elétrons, neutrinos, prótons e nêutrons livres ditaram a taxa de reações. Particularmente, a diferença de massa entre próton e nêutron, e o fato de nêutrons livres terem uma meia-vida bastante curta (cerca de 10 minutos), combinados com a expansão do Universo, definiram a composição química inicial. Um Universo com a taxa de expansão diferente ou com um valor da constante de estrutura fina $\alpha \neq 1/137$ certamente teria uma outra forma.

A primeira análise das condições extremas do Universo jovem foi feita por George Gamow (1904 – 1968) e colaboradores, em 1948, que descobriram que a composição do Universo jovem não deveria conter outros elementos além do H, D, He e Li. Os cálculos atuais indicam que sua distribuição obedece às proporções mostradas na Figura 7. É sabido pelos astrônomos que praticamente todos os elementos mais pesados que o Hélio são formados no interior das estrelas, durante as reações nucleares que as fazem brilhar, ou na fase de supernovas, quando os elementos mais pesados que o Ferro (até o Urânio) são sintetizados. O trabalho teórico sobre a nucleossíntese explicou completamente a origem dos primeiros elementos mais pesados que o Hidrogênio, e somente restou uma explicação cosmológica para a abundância observada do Hidrogênio e do Hélio. A teoria de Gamow aplicada ao MCP fornece a proporção exata observada dos dois elementos, sendo que o momento da formação ocorreu nos primeiros minutos depois do Big Bang, quando a temperatura era da ordem de 1 bilhão de graus Kelvin. As observações da abundância de Hélio no Universo atual permitem determinar, indiretamente, as condições físicas cerca de dois a três minutos após a criação do Universo. A partir desse ponto “para trás”, isto é, na direção do “instante zero”, somente podemos deduzir algo sobre o Universo por meio de cálculos, simulações e especulações teóricas.

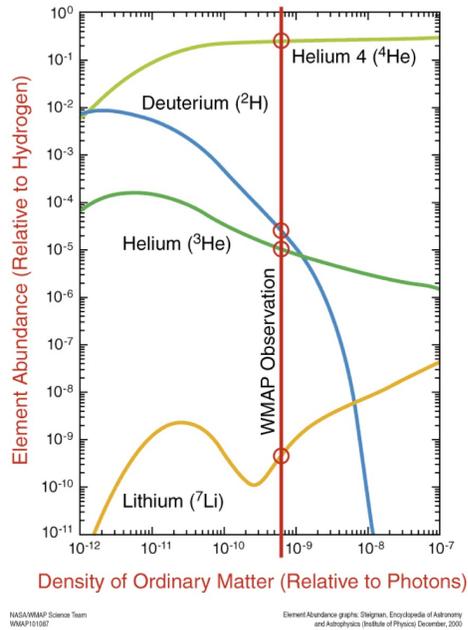


Figura 7 – Abundância relativa dos elementos leves em relação ao Hidrogênio. A linha vermelha central define os valores para cada um dos elementos, estimado com base em medidas do satélite WMAP, considerando que a descrição do Universo concorda com o MCP. (Fonte: <https://map.gsfc.nasa.gov/>).

10.3.5 A radiação cósmica de fundo em micro-ondas

A RCFM é uma forte evidência de que o Universo, em uma época distante no passado, era muito mais denso e quente do que é hoje. Para produzir uma radiação com suas características, o Universo deveria ser completamente diferente do que vemos hoje nos céus. Nessa época não existiam ainda planetas, estrelas e galáxias, pois o Universo estava completamente preenchido pelo “plasma primordial”, constituído somente de radiação e partículas elementares extremamente quentes. Sua descoberta em 1964 trouxe uma nova era de observações para confrontar os modelos cosmológicos, até então praticamente restritos a considerações teóricas.

A RCFM, formada cerca de 380 mil anos após o Big Bang, foi-se resfriando por causa da expansão e hoje a temperatura medida é de aproximadamente 2,726 K. Essa temperatura corresponde à faixa de micro-ondas no espectro eletromagnético e é praticamente uniforme em todas as regiões do céu. Além disso, a potência dessa emissão é distribuída num grande intervalo de frequências, ao invés de estar concentrada numa única frequência, como acontece com um transmissor de rádio normal.

Medidas da RCFM são feitas num intervalo entre dezenas e centenas de GHz, em toda a esfera celeste, preferencialmente fora do plano da Via Láctea. Das medidas feitas desde sua descoberta, em 1964, concluímos que ela tem praticamente as mesmas características de quando foi criada, exceto pela temperatura, que diminuiu por causa da expansão do Universo. A evolução posterior do Universo, durante o processo de formação de estruturas, não afetou significativamente as propriedades a RCFM, de modo que a temperatura hoje pode ser relacionada com a temperatura em um *redshift*, como descrito anteriormente.

A RCFM é considerada um resíduo cósmico praticamente intocado e nos oferece uma excelente oportunidade de estudar os detalhes do Universo jovem. Os mecanismos de origem e evolução das estruturas que vemos hoje no Universo estão diretamente ligados às condições físicas no Universo jovem, impressas nas características da RCFM, de modo que estudá-la ajuda nossa compreensão daqueles processos. A RCFM pode ser estudada através de seu espectro, sua distribuição angular de temperatura e sua polarização.

O MCP prevê que a RCFM deve apresentar um espectro conhecido como *espectro de corpo negro*, cuja forma depende somente da temperatura do corpo emissor, descrito como um conjunto de medidas da intensidade em diferentes frequências. O melhor resultado até a presente data foi obtido pelo satélite COBE, em 1994, e pode ser visto na Figura 8.

A medida do espectro indica que a temperatura da RCFM é de $\sim 2,726 \pm 0,001K$ com o pico de emissão na faixa de micro-ondas. Como exemplo comparativo, o espectro de corpo negro do Sol, cuja temperatura é de 6000 K, possui o pico numa frequência correspondente à luz visível. O comportamento quase perfeito de corpo negro da RCFM indica que houve poucos fenômenos globais que afetassem o equilíbrio termodinâmico entre radiação e partículas antes de 380.000 anos.

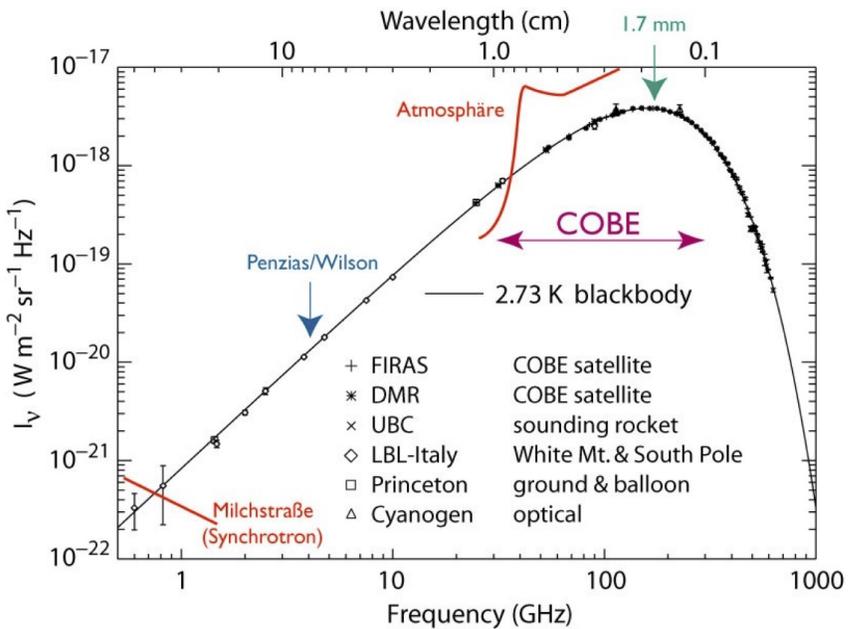


Figura 8 – Espectro de corpo negro teórico com $T = 2,726K$, superposto a medidas feitas por diferentes instrumentos no solo, a bordo de balão, a bordo de foguete e a bordo do satélite COBE. O pico encontra-se próximo da frequência de 200 GHz. A escala de intensidade no eixo Y é de intensidade por ângulo sólido por frequência. (Fonte: <https://inspirehep.net/record/1295471/plots>).

O estudo da distribuição angular da RCFM mostra a existência de pequenas flutuações de temperatura em torno de 2,7 K. Essas flutuações, ou *anisotropias*, contêm informação sobre a distribuição de matéria no Universo jovem. Sua amplitude é da ordem de uma

parte em 100.000, ou 10^{-5} . Podemos fazer uma comparação para ilustrar essa diferença. Se pudéssemos esticar “perfeitamente” um lençol de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, ao observá-lo, de longe, teríamos a sensação de que ele não possui nenhuma ruga ou amassado. Isso é o equivalente a observar a distribuição de 2,7 K na RCFM. As flutuações de temperatura corresponderiam a pequenas ondulações no lençol, de poucos centímetros de amplitude. Apesar de sua baixa amplitude, são elas que deram origem às estruturas extremamente complexas que observamos hoje no Universo.

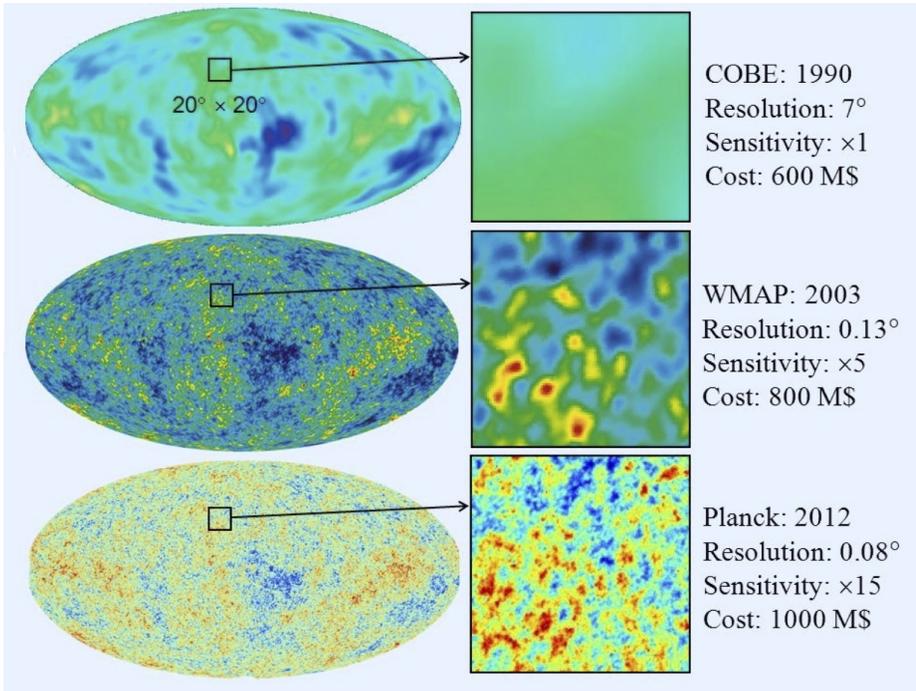


Figura 9 – Comparação entre os mapas das flutuações de temperatura feitos pelos três satélites dedicados a medir a RCFM. As manchas azuis (mais frias) e vermelhas (mais quentes) correspondem às flutuações de temperatura no Universo jovem. Deve-se notar o aumento de qualidade dos mapas, correspondentes à melhor resolução dos detectores. (Fonte: <http://slideplayer.com/slide/10583101>).

Em 1992, o satélite COBE (**C**osmic **B**ackground **E**xplorer), lançado pela NASA com o propósito de estudar as características da RCFM, detectou, de maneira conclusiva, que a distribuição de temperatura da RCFM apresenta anisotropias da ordem de 10^{-5} (Figura 9, superior). Logo após o resultado do COBE, diversos experimentos confirmaram a existência de flutuações na RCFM em diferentes escalas angulares. Em 2003 e 2013, os satélites WMAP (**W**ilkinson **M**icrowave **A**nisotropy **P**robe, da NASA) e Planck (da Agência Espacial Europeia – ESA) publicaram resultados que mostram, em muito mais detalhes, exatamente o mesmo tipo de estrutura medida pelo COBE em 1992 (Figura 9, centro e em baixo).

Devido ao acoplamento entre matéria e radiação no Universo jovem, esperava-se que existissem oscilações, equivalentes às ondas acústicas, no fluido. A distribuição das anisotropias da RCFM apresenta uma série de picos, chamados de *picos acústicos*, descritos como um oscilador harmônico amortecido (Figura 10). Esses picos, cuja posição e amplitude variam em função da escala dos processos físicos, contêm informações sobre a quantidade e o tipo de matéria que constitui o Universo, sua idade e sua geometria.

A terceira característica da RCFM é a existência de um grau de polarização na distribuição angular, devido a diferentes processos físicos: espalhamento devido à interação dos elétrons com os fótons na última superfície de espalhamento (espalhamento Thomson); injeção de radiação durante a formação das primeiras estrelas; e a distorção do espaço-tempo causada por ondas gravitacionais produzidas durante a Inflação. Uma onda eletromagnética é dita linearmente polarizada quando o seu campo elétrico se encontra oscilando sempre numa mesma direção. Caso a direção varie com o tempo, a onda será circularmente polarizada. Em geral, um campo de radiação qualquer, que é a superposição de ondas eletromagnéticas polarizadas em todas as direções, apresenta apenas uma porcentagem de sua intensidade total com uma polarização bem definida, gerando um padrão que pode ser mapeado.

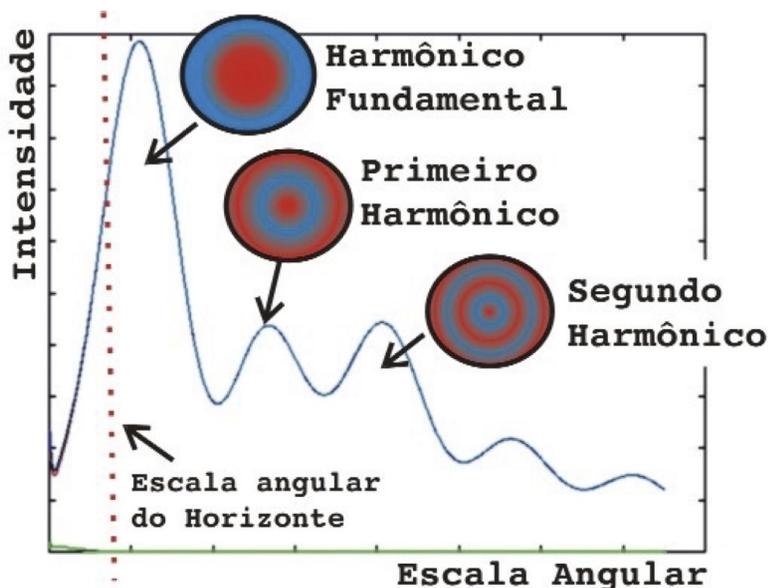


Figura 10 – Espectro de potência angular das flutuações de temperatura da RCFM. Em destaque encontram-se os picos acústicos, causados por diferentes processos físicos antes e durante do período da recombinação. (Fonte: Elaboração do autor).

O padrão de polarização observado segue o padrão das flutuações observadas na RCFM. Os primeiros resultados de medidas de polarização só foram anunciados em 2002, apesar de as primeiras tentativas para detectá-la terem começado na década de 1970. Para a RCFM, essa fração polarizada corresponde de 0,1% a 1% da amplitude das flutuações de temperatura, dependendo do processo físico que deu origem à polarização.

A distribuição da polarização no plano do céu pode ser sempre decomposta em uma componente gradiente e uma componente rotacional, da mesma forma que um campo vetorial pode ser descrito pela soma dos termos gradiente e rotacional. Essa técnica é extremamente útil, pois os processos físicos que geram polarização produzem componentes rotacional, ou tensorial (ondas gravitacionais), e gradiente, ou escalar (espalhamento Thomson).

Fenômenos presentes no momento da recombinação produziram polarização escalar através do espalhamento Thomson dos fótons pelos elétrons do fluido primordial, com uma intensidade da ordem de 1%. Mais tarde, quando as primeiras estrelas de grande massa surgiram (cerca de 200 milhões de anos após o Big Bang), a luz que elas emitiram foi capaz de ionizar as moléculas de Hidrogênio que permeavam o Universo, num processo conhecido como *reionização*. Os elétrons liberados durante a reionização também interagiram com os fótons presentes no meio, inclusive aqueles da RCFM, polarizando-os numa taxa de $\sim 1\%$, escalas angulares de vários graus.

Deformações no espaço-tempo, decorrentes da passagem de ondas gravitacionais produzidas durante a Inflação, distorcem o plasma primordial, introduzindo uma orientação na distribuição de temperatura no espaço-tempo, que é descrita por um tensor. O espalhamento dos fótons pelos elétrons, nesse caso, polariza a radiação por uma fração $< 0,1\%$, devido à pequena amplitude das ondas gravitacionais. Esse tipo de polarização tem características distintas e permitem uma completa caracterização das ondas gravitacionais que a produziram.

O padrão de polarização gradiente (ou escalar) da RCFM, feito com os dados de 5 anos coletados pelo satélite WMAP, é representado pelos segmentos de reta pretos, sobre a distribuição das flutuações de temperatura (Figura 11). Já uma simulação dos modos rotacionais (ou tensoriais) pode ser vista na Figura 12.

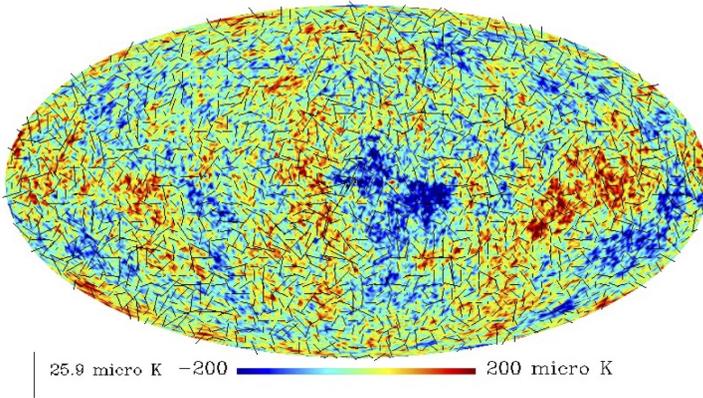


Figura 11 – Mapa de flutuações de temperatura da RCFM, com resolução angular de 1° , contendo os segmentos de reta superpostos às flutuações, produzido com os dados de 5 anos do satélite WMAP. (Fonte: Kim et al. ArXiv:0810.4008 [astro-ph] (2008)).

Polarization Patterns

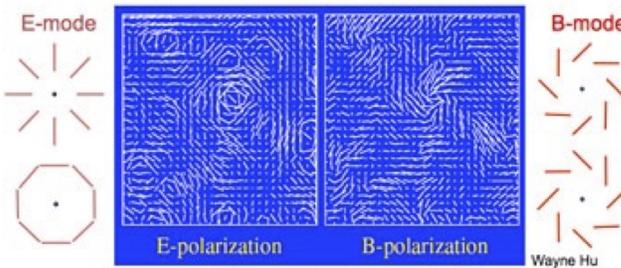


Figura 12 – O padrão gradiente (escalar) é chamado de modo E (E-mode) no jargão dos pesquisadores da RCFM. O padrão escalar é simétrico, refletindo as condições físicas que o geraram (espalhamento Thomson). O padrão rotacional (tensorial) indica uma distorção da radiação devido à interação com objetos massivos pelos quais ela passou (ou pela altíssima densidade do Universo primordial, onde ela também pode ter sido gerada), permitindo o mapeamento da distribuição de matéria ao longo do caminho óptico da RCFM. (Fonte: Wayne Hu (2001)).

10.4 O universo não homogêneo

Uma das sugestões mais atraentes (e também a mais simples) para explicar o processo de formação de estruturas é considerar que a gravidade causou a aglutinação de matéria em regiões que, após o desacoplamento entre matéria e radiação, eram inicialmente um pouco mais densas que suas vizinhanças. Durante milhões e milhões de anos, esse processo foi acontecendo, sem interrupção, e foi comprimindo essas regiões porque, à medida que mais matéria ia sendo trazida, a gravidade tornava-se mais e mais forte, até que galáxias e outros objetos começaram a se formar.

A dinâmica do Universo representado pelo MCP é descrita pela TRG, o suporte observacional é dado pelas observações da RCFM, da velocidade de recessão das Galáxias, da expansão acelerada hoje observada no Universo e pela abundância de elementos leves (H, He, D, Li). O paradigma da instabilidade gravitacional é responsável por utilizar as flutuações de matéria para formar as estruturas que observamos, e consideramos que essas flutuações, não importa o tamanho, têm essencialmente a mesma amplitude.

As perguntas que o MCP deixa sem resposta, entretanto, são tão interessantes quanto as que ele responde: por que a geometria do Universo deve ser aproximadamente plana? Por que a RCFM apresenta flutuações tão pequenas? Quem gerou as flutuações de densidade que evoluíram para formar as estruturas? Onde estão as partículas estranhas, previstas pela Física de Partículas e provavelmente criadas no Universo jovem? As respostas a essas perguntas são tratadas como uma extensão ao MCP e, apesar de interessantes e parcialmente respondidas no contexto do Universo Inflacionário, não serão discutidas neste texto.

10.4.1 Colapso gravitacional

Conforme mencionamos anteriormente, observamos que as galáxias distantes estão se afastando umas das outras e deduzimos que o Universo está em expansão. Isso nos leva a pensar que o Big Bang foi o começo de tudo. As principais motivações da Cosmologia são medir tamanho, idade e forma do Universo. Por tamanho entendemos a maior distância que podemos estudar; a idade é contada em relação ao instante zero e a forma está ligada à geometria do Universo, definida pela quantidade de matéria existente.

A Cosmologia tenta traçar um perfil da evolução do Universo da época densa e quente, quando o Universo era composto de uma mistura de gás e radiação em equilíbrio térmico, para o estado extremamente complexo e diversificado que vemos hoje, com galáxias, estrelas e planetas concentrados em certas partes do céu e regiões vazias em outras. As grandes estruturas observadas no céu hoje (aglomerados e superaglomerados de galáxias) parecem ter sido formadas com base em pequenos desvios do equilíbrio no Universo jovem, e a força da gravidade fez com que regiões mais densas (com mais matéria) se expandissem mais lentamente e, colapsando sob o efeito de sua própria gravidade, se aglutinassem para formar os primeiros objetos. Ainda hoje, sabemos pouco sobre esse processo de evolução.

Resultados dos satélites WMAP e Planck indicam que a formação dos primeiros objetos ocorreu cerca de 100 – 200 milhões de anos após o Big Bang, e daí para formação das primeiras galáxias foram mais algumas centenas de milhões de anos. Acredita-se também que o processo de formação aconteceu das pequenas para as grandes estruturas, com estrelas se formando primeiro e juntando-se posteriormente para formar galáxias (uma evolução hierárquica conhecida como *bottom-up*).

O entendimento atual é que as grandes estruturas se formaram com base no colapso inicial da matéria escura, interagindo somente através da gravidade. Embora o tratamento completo do colapso exija o uso da TRG, uma compreensão razoável do fenômeno pode

ser obtida usando-se o formalismo mais simples, baseado nas leis de Newton.

Podemos considerar o contraste de densidade $\delta\rho/\rho$, em que ρ é a densidade de matéria, para descrever os cenários de colapso gravitacional. O regime em que $\delta\rho/\rho \leq 1$ é um regime linear, quando as perturbações crescem lentamente. Quando $\delta\rho/\rho > 1$, o crescimento das perturbações torna-se não linear, desacoplando-se da expansão cósmica em que estava contido até então, formando as estruturas singulares, independentes e gravitacionalmente ligadas que são observadas hoje.

As questões a serem respondidas sobre o colapso gravitacional das perturbações de densidade primordial dizem respeito: 1) aos mecanismos de evolução em um Universo em expansão e 2) às condições iniciais necessárias para a formação de estruturas. O problema do colapso pode ser abordado por meio do chamado *formalismo de Jeans*, que descreve o colapso de uma estrutura gravitacionalmente ligada, com base na relação de dispersão:

$$\omega^2 = c_s^2 \kappa^2 - 4\pi G \rho_0 \quad (10.15)$$

em que c_s é a velocidade das perturbações no meio, κ é o inverso do comprimento de onda λ da perturbação ($= 2\pi/\lambda$), ρ_0 é a densidade das perturbações e G é a constante de gravitação Universal. Daí, derivamos o comprimento de onda típico de uma perturbação, λ_J , que define o tamanho típico que uma perturbação deve ter para resistir ao colapso gravitacional:

$$\lambda_J \equiv c_s \left(\frac{\pi}{G\rho} \right)^{1/2} \quad (10.16)$$

A região em que a perturbação se encontra torna-se instável se $\lambda > \lambda_J$. O passo seguinte é tratar o problema considerando que a região que pode colapsar encontra-se em um Universo em expansão, de

modo que a densidade média decai com a expansão. Nesse caso, o contraste de densidade pode ser escrito como:

$$\Delta = \frac{\delta\rho}{\rho} = \frac{\rho(a) - \rho_0(a)}{\rho_0(a)} = \frac{3}{5} \left(\frac{\Omega_0 - 1}{\Omega_0} \right) \quad (10.17)$$

em que Ω_0 é a densidade crítica do Universo. O caso relativístico não será discutido neste texto, mas podemos destacar o seguinte: o crescimento das perturbações depende do fator de escala, crescendo inversamente à variação do *redshift*, seguindo a forma:

$$\rho_0 = \rho_0(t_0)a^{-3}(t) \quad (10.18)$$

As soluções para as flutuações de densidade $\delta \sim \delta\rho/\rho$ para $\lambda \gg \lambda_J$ são da forma:

$$\delta_+(t) = \delta_+(t_i) \frac{t^{2/3}}{t_i} \quad (10.19)$$

$$\delta_-(t) = \delta_-(t_i) \frac{t^{-1}}{t_i} \quad (10.20)$$

em que a solução (+) descreve o crescimento das perturbações com o tempo. É interessante chamar a atenção para a diferença entre os colapsos estáticos e dinâmicos com base no comprimento de onda de Jeans: a expansão do Universo retarda o crescimento exponencial das instabilidades e resulta no crescimento, para os modos instáveis, que obedece a uma lei de potência.

10.4.2 Formação de estruturas

Face ao que já comentamos sobre as flutuações de densidade primordial, não é surpresa notar que galáxias existam, em sua maioria, em grupos e aglomerados. Galáxias e estruturas em grande escala são uma consequência das condições a que o Universo jovem estava sujeito. O que surpreendeu os astrônomos nas décadas de

1980 e 1990 não foi a existência, mas o tamanho das estruturas. Vazios típicos de até 200 milhões de anos luz e uma estrutura conhecida como “A Grande Muralha”, que se estende por mais de 500 milhões de anos luz e é a maior estrutura identificada no Universo até a presente data, são alguns dos resultados encontrados nos levantamentos de objetos distantes.

A lógica por trás do processo de formação de estruturas é que, embora galáxias distantes se afastem umas das outras à medida que o universo se expande, a gravidade atrai galáxias vizinhas entre si, formando grupos, aglomerados e enormes filamentos constituídos por centenas de milhares de galáxias. Muitas dessas estruturas são visíveis em mapas que cobrem regiões de milhares de graus quadrados no céu.

A teoria é baseada na TRG e busca resolver as equações que descrevem a evolução das perturbações de densidade do Universo. Os cálculos supõem que o Universo jovem possui perturbações aleatórias, energia escura e diversos tipos de matéria escura. As equações que descrevem o acoplamento gravitacional e outros processos físicos relevantes são resolvidas numericamente por supercomputadores. Os cálculos mostram que as flutuações crescem, conforme previsto nas teorias que envolvem instabilidades gravitacionais. Os resultados das simulações computacionais são comparados com as observações feitas, ajustes são feitos nos modelos que os computadores produzem e os cálculos são refeitos. A análise dessas comparações também é capaz de ajudar a colocar limites nos parâmetros que descrevem a matéria escura e a energia escura no Universo.

O objetivo de mapear essas estruturas, em diferentes distâncias, é entender os processos de formação e aglomeração das estruturas do Universo. Note que aqui estamos usando, de modo pouco rigoroso, o fato de que, quanto mais longe em distância podemos enxergar, mais “para trás no tempo” estamos indo. Esses mapeamentos podem ser comparados a fotografias do Universo em diferentes épocas, permitindo mapear a evolução desde pouco depois

do surgimento da RCFM (após o desacoplamento entre a matéria e a radiação), até períodos bem mais recentes, quando o Universo já estava “aglomerado” e muito mais diferenciado.

10.4.3 Os grandes levantamentos de galáxias

Fazer mapas de galáxias em três dimensões requer um conhecimento de quão distantes os objetos se encontram de nós. Isso é feito com base na determinação dos *redshifts*: quanto maior o *redshift*, maior a velocidade e mais distante o objeto se encontra de nós. Hoje existem alguns levantamentos, tais como APM, 2MASS, 6dF, 2dF, SDSS, cada um com milhares a milhões de objetos mapeados. Em contraste, há 40 anos, o número médio de galáxias com *redshift* conhecido era de apenas 2.700.

Resultados recentes mostram evidências de que existem diversas estruturas com dimensões extraordinárias ($\sim 80 \times 100 \times 100 \text{Mpc}$, $\sim 70 \times 140 \times 140 \text{Mpc}$). Existem ainda evidências, por observações da linha de emissão do Hidrogênio da série de Lyman, de que existem objetos a distâncias até 2.700 Mpc, embora eles sejam poucos e espalhados pelo Universo observável (em termos de distribuição angular). As distâncias envolvidas no estudo das estruturas em grande escala variam de alguns milhões (tamanhos típicos de pequenos grupos de galáxias) a várias centenas de milhões de anos luz (distâncias da ordem da “Grande Muralha”).

O primeiro dos grandes levantamentos feito de maneira automatizada foi o APM (Automated Plate Measuring), liderado pela Universidade de Cambridge e publicado em 1990, por John Maddox (1925 – 2009) e colaboradores. Mais de 2 milhões de galáxias foram observadas em uma região de 100 graus de diâmetro centrada em direção ao polo sul da Via Láctea (Figura 13). As regiões brilhantes indicam mais galáxias, enquanto as cores mais azuis indicam galáxias médias maiores. As elipses escuras excluem regiões em que as estrelas locais brilhantes dominam o céu. Muitas descobertas científicas

resultaram das análises dos dados desse mapa, incluindo o fato, confirmado posteriormente por todos os outros levantamentos, de que o universo era surpreendentemente complexo em grandes escalas.

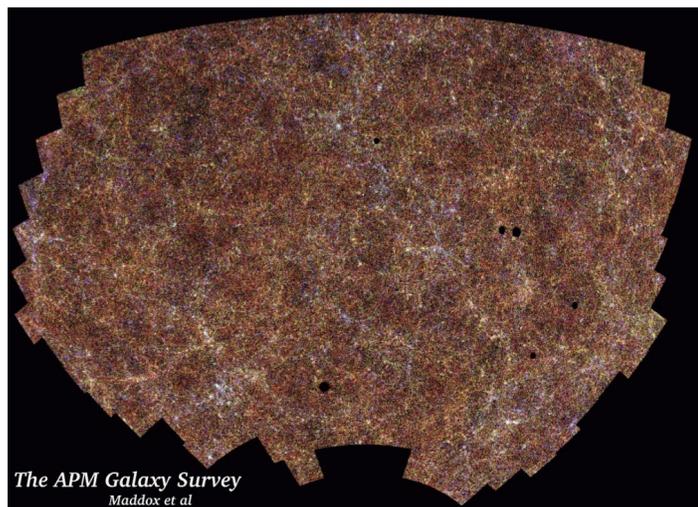


Figura 13 – Levantamento APM, realizado durante a década de 1980, com mais de 2 milhões de galáxias observadas. (Fonte: https://apod.nasa.gov/apod/image/0306/galaxies2_apm_big.gif.)

A Figura 14 é o resultado do levantamento de *redshifts* conhecido como Sloan Digital Sky Survey (SDSS), financiado pela Alfred P. Sloan Foundation e pelo Departamento de Energia (EUA) e constituído pelo Consórcio de Pesquisa em Astrofísica para as instituições participantes da colaboração SDSS. As medidas do SDSS começaram em 2000 e hoje ele se encontra na chamada Fase V. Os mapas mais recentes do SDSS são os DR18 (Data Release 18), liberados em 2023. As fases anteriores do SDSS (I – IC) produziram uma enorme quantidade de dados, tendo observado ao todo, mais de 4 milhões de espectros de ~ 1.5 milhões de galáxias e ~ 160.000 quasares. O foco do SDSS-V tem 3 programas científicos principais ou “Mappers”: o Milky Way Mapper (MWM – Mapa da Via Láctea), the Black Hole Mapper (BHM – Mapa de Buracos Negros), e the Local Volume Mapper (Mapa do Volume Local).

Medidas de estrutura em grande escala com os mapas do SDSS de galáxias, quasares e gás intergaláctico tornaram-se um pilar central do modelo cosmológico padrão que descreve nossa compreensão da história e do futuro do Universo. Os dados do SDSS ajudaram a demonstrar que o Universo é dominado por matéria escura invisível e energia escura e penetrante e semeado com estrutura por flutuações quânticas no Universo jovem. Essas flutuações evoluíram para formar as estruturas em grande escala observadas hoje. O SDSS foi também responsável pelas primeiras medidas de oscilações acústicas de bárions (em inglês, BAO), detectadas durante a Fase I do SDSS.

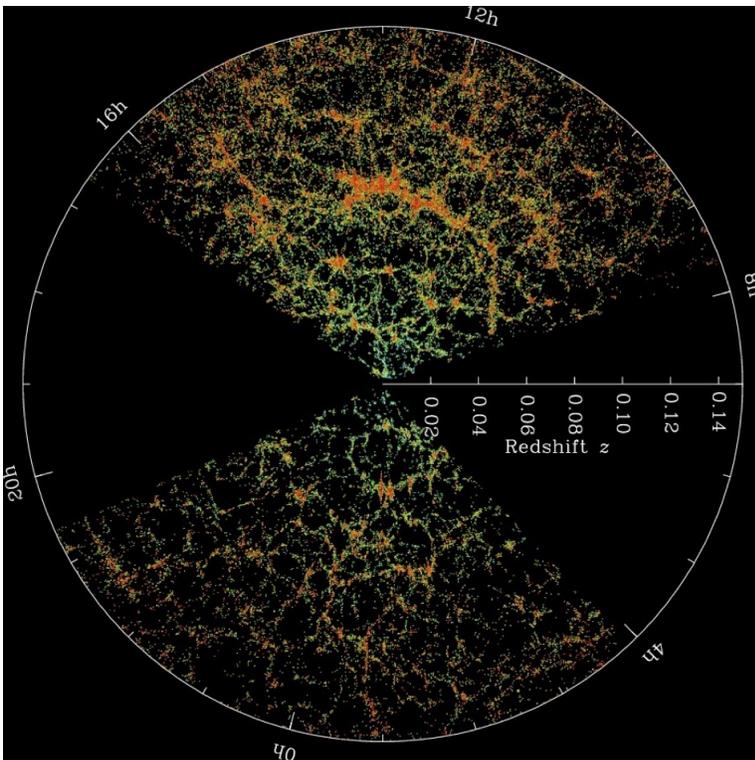


Figura 14 – Mapa de *redshifts* de $\sim 1.500.000$ galáxias produzido com dados do SDSS DR13. Nota-se as estruturas presentes no mapa, em diferentes *redshifts*. (Fonte: <http://www.sdss.org/science/>.)

Os mapas de alta precisão do SDSS de história de expansão cósmica usando BAO têm sido especialmente importantes na quantificação desses resultados, colocando vínculos sobre a geometria e conteúdo energético do universo. BAO foram detectados primeiramente no agrupamento de galáxias pelo SDSS-I e no 2dFGRS e, desde então, também foram detectados no gás de hidrogênio intergaláctico usando medidas de Lyman-alfa.

BAO são uma consequência das flutuações de densidade de matéria no Universo, ocorrendo em uma escala característica de ~ 150 Mpc, chamada de *escala acústica*, e prevista com base nas medidas das flutuações de temperatura da RCFM, e podem ser usadas como régua padrão para medir a evolução das flutuações de densidade (Figura 15). O pico acústico observado em BAO permite estimar a distância entre os *redshifts* $z = 0,35$ (distribuição de galáxias) e $z = 1100$ (RCFM) com uma precisão melhor do que 4% (Figura 16).

Os levantamentos apresentados nas Figuras 17 e 18 foram feitos, respectivamente, pelos consórcios 2dFGRS e 6dFGRS, realizados pelo Observatório Anglo-Australiano, com colaboração de várias universidades inglesas e australianas, e o 2MASS, coordenado pela Universidade de Massachusetts (EUA) e realizado pelo IPAC, mantido pelo JPL/NASA e pelo CALTECH.

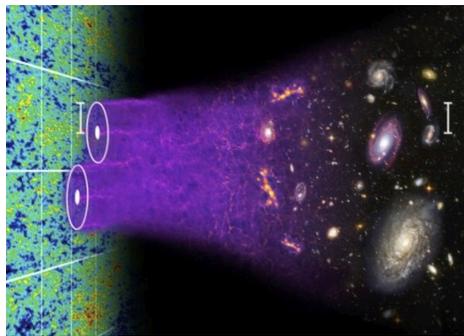


Figura 15 – Representação da evolução das estruturas, com a escala característica de BAO, em 150 Mpc, marcada à esquerda. (Fonte: <http://www.sdss3.org/surveys/boss.php>.)

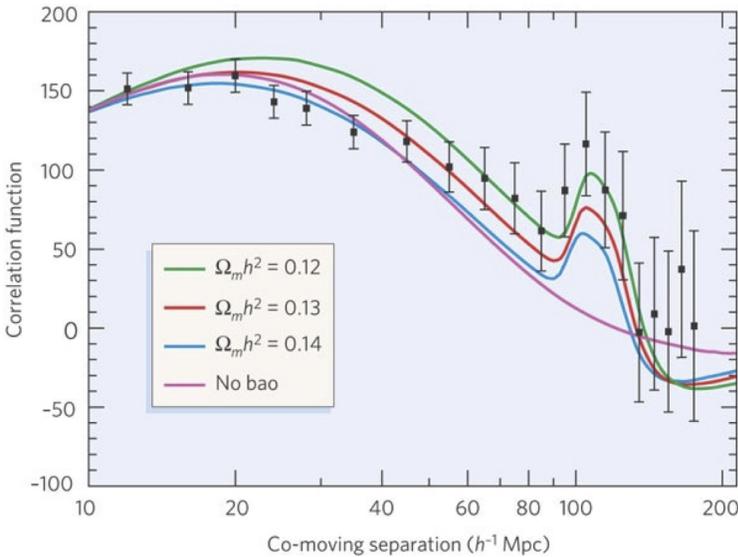


Figura 16 – Função de correlação de 2 pontos da distribuição de matéria do Universo, com um pico correspondente aos BAO em ~ 150 Mpc. Nota-se a dependência do ajuste dos modelos à existência do pico de oscilação. (Fonte: C. Bennett (Nature, 2006))

O 2dF Galaxy Redshift Survey (2dFGRS) utilizou a instalação 2dF (do inglês, campo de 2 graus), construída pelo Observatório Anglo-Australiano. O 2dFGRS obteve espectros para ~ 245.000 objetos, principalmente galáxias, e obteve-se *redshifts* confiáveis para 221.000 galáxias. As galáxias cobrem uma área de aproximadamente 1.500 graus quadrados selecionados do APM Galaxy Survey estendido em três regiões: uma faixa no Polo Norte Galáctico (em inglês, NGP), outra no Polo Sul Galáctico (em inglês, SGP) e campos aleatórios espalhados pela faixa SGP.

A Figura 17 mostra o mapa da distribuição de galáxias produzida com os dados do 2dF ao final do projeto. Alguns dos vários resultados de impacto do 2dF foram: uma medição precisa do espectro de potência da aglomeração de galáxias em escalas de até $300h^{-1}$ Mpc, permitindo determinações precisas da densidade de massa total do universo e da fração de bárions, medidas, em combinação com ob-

servações da RCFM, da constante de Hubble e densidade de bárions, evidência de uma constante cosmológica não zero (energia escura) e restrições na equação de estado da energia escura; as funções de luminosidade para galáxias com diferentes tipos espectrais, tanto no campo como em clusters e a variação nas propriedades de agrupamento de galáxias como funções de luminosidade e tipo espectral.

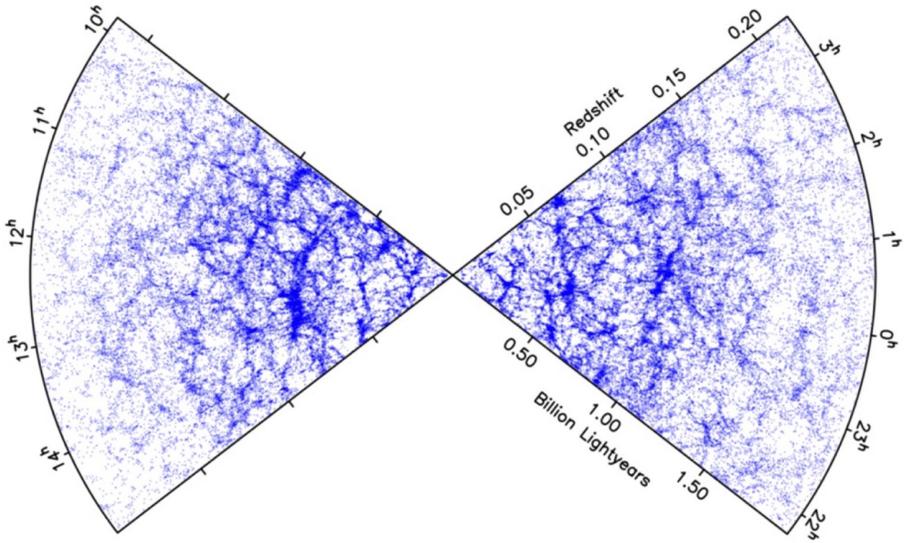


Figura 17 – Distribuição das ~ 245.000 galáxias do 2dF. Nota-se a presença das estruturas filamentosares nos mesmos *redshifts* observados nos levantamentos anteriores. (Fonte: [http://www.roe.ac.uk/jap/2df/.](http://www.roe.ac.uk/jap/2df/))

O 6dF é uma referência para o instrumento de campo de 6 graus, um dispositivo que usa fibras ópticas e tecnologia de posicionamento robótico, aumentando poder de observação do Telescópio Britânico Schmidt do Observatório Anglo-Australiano em mais de 100 vezes sua capacidade original (Figura 18). Lembramos que o Observatório Anglo-Australiano foi responsável também pelo 2dF-GRS. Dezenas de pequenos prismas de vidro do tamanho da ponta de um dedo permitem que o telescópio veja até 150 estrelas ou galáxias ao mesmo tempo – tornando 6dF a máquina final para ma-

pear o universo próximo. O 6dF mapeou quase todo o Hemisfério Sul, observando mais de 100.000 galáxias. O resultado final é uma nova maneira de ver a forma como as galáxias se aglomeram e se movem no nosso universo local, e como isso aconteceu.

Os levantamentos anteriores foram todos feitos na faixa óptica do espectro eletromagnético. Já o 2MASS (Two Micron All Sky Survey, Figura 19) opera na faixa infravermelho e, utilizando novos detectores, pode agora detectar objetos astronômicos mais de 100 milhões de vezes mais fracos do que aqueles detectados nos levantamentos anteriores. Além de fornecer um contexto para a interpretação de resultados obtidos em infravermelho e outros comprimentos de onda, o 2MASS está fornecendo respostas diretas a perguntas imediatas sobre a estrutura em larga escala da Via Láctea e do Universo Local.

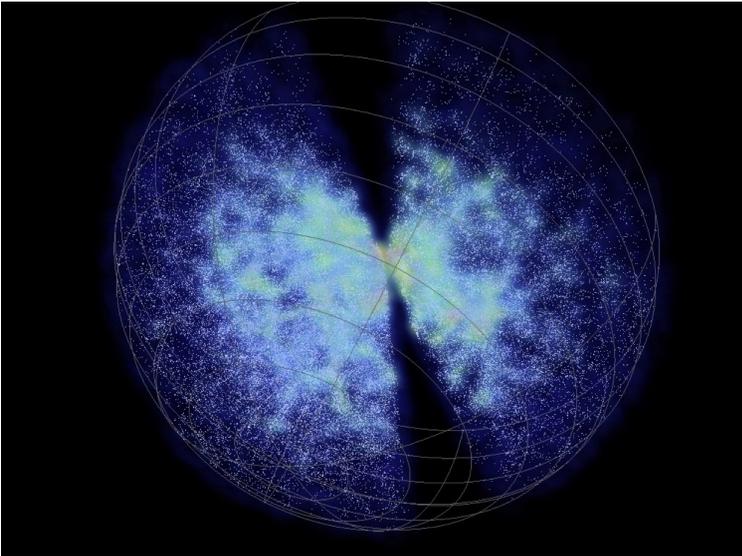


Figura 18 – Distribuição das galáxias com $z \leq 1$ (~ 2 milhões de anos luz), no Hemisfério Sul, medidas pelo 6dF Galaxy Redshift Survey. O mapa contém 136.304 galáxias e mostra, claramente, a distribuição de estruturas no Universo próximo e uma rarefação à medida que o *redshift* aumenta na direção das bordas da esfera. (Fonte: <http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/>.)

Two Micron All Sky Survey

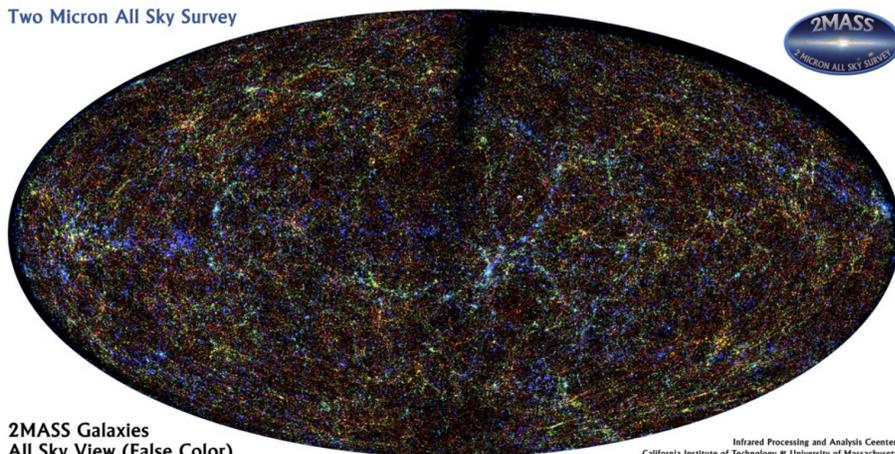


Figura 19 – Foto do levantamento de galáxias 2MASS (2 Micron All Sky Survey) contendo cerca de 1,6 milhões de galáxias em todo o céu. As galáxias mais brilhantes e mais próximas são representadas em azul, e as mais fracas, as mais distantes, estão em vermelho. A faixa escura nessa imagem mostra a área do céu onde a nossa Via Láctea galáctica bloqueia a nossa visão de objetos distantes, que, nessa projeção, situam-se predominantemente ao longo das bordas da imagem. (Fonte: IPAC/Caltech.)

O 2MASS digitalizou todo o céu em três bandas de infravermelho, próximo para detectar e caracterizar fontes pontuais mais brilhantes do que cerca de 1 mJy em cada banda, com relação sinal / ruído (SNR) maior que 10, utilizando dois telescópios automatizados de 1,3 m, um no Monte Hopkins (Arizona, EUA) e um no CTIO (Cerro Tololo, Chile). O 2MASS Norte começou as operações de rotina em junho de 1997 e o 2 MASS Sul, em março de 1998, operando até fevereiro de 2001.

A Universidade de Massachusetts (EUA) foi responsável pelo gerenciamento geral do projeto e pelo desenvolvimento de câmeras infravermelhas e sistemas de computação no local em ambas as instalações. O Centro de Processamento e Análise de Infravermelhos (IPAC) é responsável por todo o processamento de dados por meio do Pipeline de Produção e construção e distribuição dos produtos de

dados. O 2MASS envolve a participação de membros de diversas instituições, tendo sido financiado pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e pela National Science Foundation (NSF).

Os benefícios científicos imediatos da pesquisa 2MASS incluem o primeiro censo fotométrico de galáxias mais brilhantes do que 13,5 magnitudes. O catálogo de mais de 1.000.000 de galáxias fornecerá medições fotométricas em três comprimentos de onda e alguns parâmetros estruturais para grandes amostras de galáxias em diferentes ambientes, e permitirá procurar objetos raros, frios e extremamente vermelhos (por exemplo, estrelas de luminosidade extremamente baixa e anãs marrons) ou muito obscurecidos em comprimentos de onda ópticos (por exemplo, AGNs e aglomerados globulares obscurecidos por poeira localizados no plano galáctico).

10.5 O setor escuro

10.5.1 Matéria escura

Na década de 1980, os astrônomos observaram um fato bastante estranho ao estudar as curvas de rotação das galáxias espirais. A Figura 20 mostra a curva de velocidade de rotação devida ao disco, gás e halo da nossa Galáxia, em azul, e a curva teórica, prevista pelas Leis de Kepler. Devido à grande diferença observada entre a curva da galáxia e a curva do disco, foi levantada a hipótese de que o halo continha muito mais matéria do que o imaginado e que essa matéria somente sofria a ação da gravidade, não emitindo nenhum tipo de radiação eletromagnética. Daí o nome “matéria escura”.

Podemos mostrar que a curva de rotação de uma galáxia espiral deve variar em função da posição do elemento de massa com a distância até o centro. A relação entre a energia potencial gravitacio-

nal e a energia cinética de um elemento de matéria a uma distância r do centro da Galáxia, de acordo com a 2ª lei de Newton, é dada por:

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{V^2}{r} \quad (10.21)$$

determinando, com base nisso, uma relação para a massa contida dentro de uma esfera de raio R :

$$M = \frac{rV^2}{G} \quad (10.22)$$

o que sugere que a velocidade deve aumentar proporcionalmente à massa e, fora dos limites do objeto, cair rapidamente a zero. A Figura 20 nos mostra algo completamente diferente. A curva combinada com toda a massa da Galáxia (azul) deveria cair como a curva do disco, caso a matéria do halo fosse desprezível em relação à massa do disco, que é o que se supõe para gerar a curva vermelha.

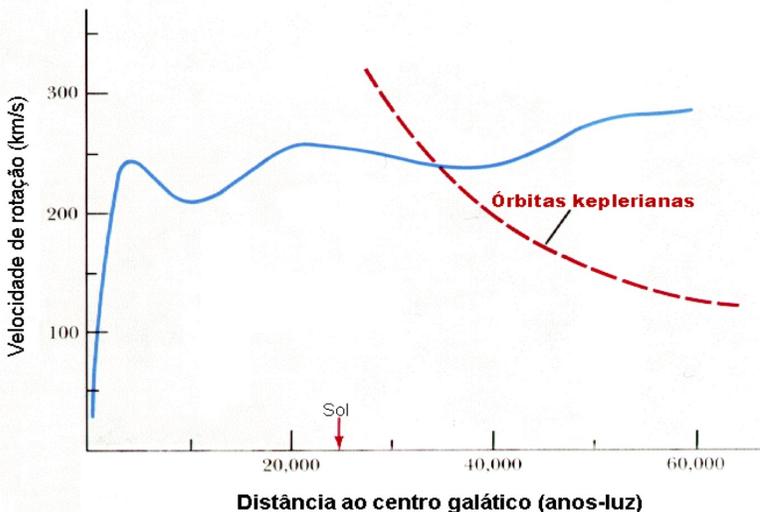


Figura 20 – Curva de velocidade radial da nossa Galáxia, uma espiral. A curva azul é a combinação das curvas de disco, gás e halo e esperava-se que ela decrescesse para raios maiores que 20 ou 30 kpc, conforme a curva vermelha, de acordo com as leis de Newton. (Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br>)

Entretanto, nota-se claramente que a velocidade do halo também cresce e, para raios maiores que os raios determinados por meio de observações ópticas, tende à velocidade de toda a Galáxia, conforme vemos na Figura 21. As estimativas dinâmicas (via leis de Newton) dessa matéria não-luminosa (“escura”) indicam que ela é cerca de seis vezes maior que a quantidade de matéria bariônica, como pode ser visto na Tabela 1.

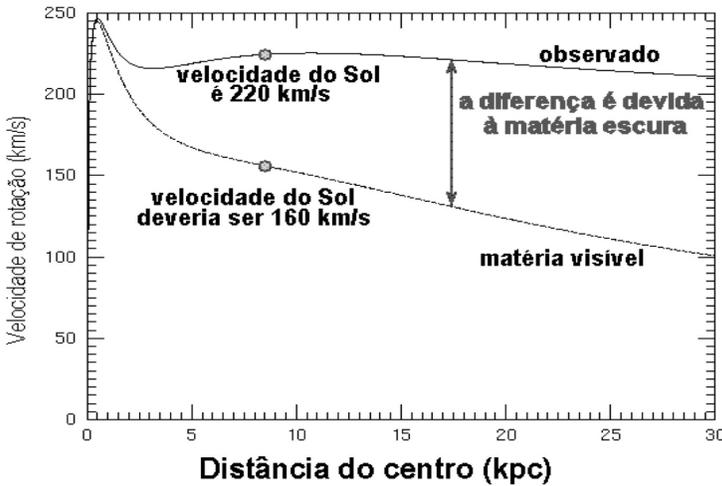


Figura 21 – Curva de velocidade radial da nossa Galáxia espiral. Acredita-se que a diferença entre as curvas é causada pela presença de matéria escura. (Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br>.)

Sabemos que também existe matéria escura bariônica em anãs negras, nuvens moleculares frias (“escuras”) e outros objetos que não emitem luz visível. A resposta é que sempre será possível tentar medir esses objetos feitos de bárions por meio da emissão infravermelho ou rádio. Quanto à matéria não-bariônica, ela somente pode ser percebida através de efeitos da gravidade; pois não emite radiação eletromagnética. Para ela existem diversos candidatos, entre eles o neutrino, que é o mais conhecido. A matéria escura é responsável por cerca de 23% de toda a densidade do Universo e concluímos então que, mesmo falando somente de matéria, somos cons-

tituídos de matéria que é a exceção do que existe no Universo. Em outras palavras, praticamente desconhecemos de que tipo de matéria o Universo é feito...

10.5.2 Energia escura

A energia escura é uma grandeza ainda mais complicada de definir, porque simplesmente não sabemos o que ela é ou como medi-la. Pode-se dar a ela diversos significados, todos mais ou menos relacionados com um termo conhecido como Constante Cosmológica, colocado por Einstein nas equações da Relatividade Geral para garantir que suas equações descreviassem um Universo real. Naquela época, supunha-se que o Universo continha somente matéria comum e radiação e, devido ao tamanho estimado, a contribuição da matéria para a densidade total era muito maior do que a da radiação. Daí a ideia de que vivíamos num Universo não relativístico e sem pressão. A constante introduzida por Einstein contrabalançaria a atração gravitacional exercida pela matéria não relativística e garantiria que o Universo não se contrairia, mantendo a situação estática.

Entretanto, a introdução de uma constante para balancear as observações da época era algo que desagradava bastante Einstein, devido à “quebra da beleza formal da teoria”. Além disso, uma constante para garantir o equilíbrio nas condições em que foi introduzida criava um equilíbrio instável no Universo modelado pelas equações de Einstein. Como a constante não dependia de nenhuma partícula, caso houvesse um pequeno desequilíbrio e o Universo ficasse ligeiramente maior, ela superaria a densidade de matéria, uma vez que esta depende do volume (que aumentaria um pouco). Esse processo se alimentaria e haveria uma expansão acelerada. Caso contrário, seguindo o mesmo raciocínio de a densidade de matéria aumentar com o decréscimo do volume, o Universo seguiria rapidamente para um colapso.

Porém, em 1929, Hubble mostrou que o Universo estava em expansão e Einstein pode descartar a Constante Cosmológica. Ela voltou à moda algumas vezes durante o séc. XX, para reconciliar problemas relativos à idade do Universo e reapareceu em grande estilo no fim do séc. XX, quando os grupos de Saul Perlmutter e colaboradores (Supernova Cosmology Project) e de A. Riess e colaboradores (High-z Supernova Search Team), estudando supernovas tipo I, localizadas a centenas de milhões de anos-luz da Terra, independentemente encontraram resultados que só poderiam ser explicados supondo-se que o Universo estava sofrendo um processo de aceleração. A importância do resultado obtido por ambos os grupos e sua relevância para a Cosmologia resultou o Prêmio Nobel de Física de 2011.

A Figura 22 mostra os resultados de ambos os grupos, comparando o fluxo (ou diferença de magnitudes $m - M$) em função da distância (z). Caso o Universo não sofresse aceleração, esse fluxo deveria decrescer proporcionalmente ao quadrado da distância. Para um dado valor de z , um universo acelerado fornece magnitudes com fluxos menores (distâncias reais maiores) do que um universo desacelerado. Ao olhar os dados utilizados para produzir a Figura 22, ambos os grupos concluíram que a aceleração explicava o fato de que as supernovas observadas em *redshift* $z \sim 0,5$ eram, em média, 0,25 magnitudes mais fracas do que deveriam ser, caso o Universo não estivesse se expandindo de modo acelerado.

Uma questão que sempre perturbou os físicos desde que a existência de Λ foi proposta é o sentido físico que ela deveria ter. Em outras palavras, que componente do Universo poderia manter a densidade de energia constante durante a expansão (ou contração)? A resposta mais aceita atualmente – não necessariamente a única – é que a energia do vácuo pode representar esse papel. Essa energia vem de uma consideração quântica, ligada ao princípio da incerteza de Heisenberg, que permite um par de partícula e antipartícula ser criado do vácuo. Esse processo de criação ou aniquilação não depende da expansão ou contração do Universo.

O principal problema com essa associação é que, se calcularmos a densidade de energia do vácuo com base em considerações de mecânica quântica, temos um problema sério: essa energia é da ordem de 10^{133} eV/m³. Isso é **124 ordens de magnitude maior** do que a densidade crítica do Universo e representa uma discrepância absurda entre teoria e observação. Apesar da energia escura constituir cerca de 69% do Universo, ainda não sabemos quase nada sobre sua constituição e esta é uma área em que astrônomos podem ajudar bastante os físicos de partículas, pois estudando o Universo nas maiores escalas conhecidas, estamos indiretamente examinando a estrutura do vácuo em escalas muito pequenas. O estudo da Energia Escura, sua origem e propriedades é um dos tópicos mais ativos e interessantes na Cosmologia hoje.

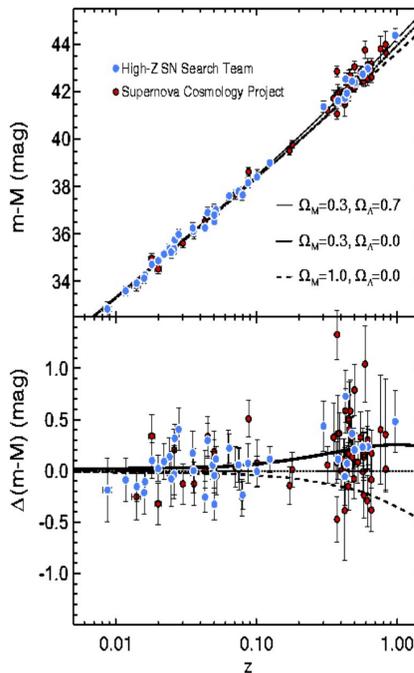


Figura 22 – Diagrama de fluxo ($m - M$) \times distância para supernovas tipo I observadas pelos grupos de Perlmutter e Riess. O painel inferior mostra a diferença entre os dados e as previsões de modelo com $\Lambda = 0$ e $\Omega_M = 0, 3$. (Fonte: <http://www.cfa.harvard.edu/oir/Research/supernova/HighZ.html>.)

10.6 O universo hoje

A combinação dos resultados observacionais discutidos nas seções anteriores constitui hoje o conjunto de informações mais detalhado e importante para estudar a origem e a evolução do Universo. As medidas da RCFM, da distribuição de supernovas tipo I distantes, de BAO, dos objetos distantes com linhas Lyman alfa e os levantamentos de *redshifts*, combinados, mostram um quadro bastante completo das propriedades do Universo. Medidas de parâmetros cosmológicos obtidos somente de um observável estão sujeitas a uma incerteza maior, enquanto a combinação de duas ou mais medidas as reduzem.

Tabela 1 – Valores dos principais parâmetros cosmológicos. (a) Somente usando dados do satélite Planck; (b) Planck + medidas do parâmetro de Hubble, de BAO e de supernovas tipo I. (Fonte: Ade et al., Planck Collaboration, (2016).)

Parâmetro cosmológico	Valor (a)	Valor (b)
Densidade total Ω_t	1,02±0,02	1,02±0,02
Densidade de bárions Ω_b	0,0484±0,0002	0,0483±0,0002
Densidade de matéria escura Ω_{CDM}	0,258±0,002	0,257±0,001
Densidade de matéria escura Ω_M	0,308±0,012	0,306±0,007
Densidade de energia escura Ω_Λ	0,692±0,012	0,694±0,007
Constante de Hubble H_0 (km/s.Mpc)	67,800±0,009	67,900±0,006
Índice espectral das flutuações n_s	0,968±0,006	0,968±0,004
Profundidade óptica na recombinação	0,066±0,016	0,067±0,013
Σ 8	0,815±0,009	0,815±0,009
<i>Redshift</i> da reionização z_{rei}	8,8±1,6	8,8±1,6
Idade do Universo t_0 ($\times 10^9$ anos)	13,80±0,02	13,80±0,02
Época do desacoplamento t_{dec} ($\times 10^3$ anos)	377,7 ± 3,2	377,7 ± 3,2
<i>Redshift</i> do desacoplamento z_{dec}	1090,09±0,42	1090,09±0,42
Temperatura da RCFM (K)	2,726±0,001	2,726±0,001

A Tabela 1 apresenta os valores dos principais parâmetros cosmológicos, obtidos com base em uma análise combinada entre os resultados mencionados e os principais componentes da densidade de matéria e energia, representados na Figura 23. Isso nos permite concluir, conforme mencionado anteriormente, que a combinação

da matéria ordinária, Matéria Escura e Energia Escura indicam uma geometria Euclidiana para o Universo e que 96% de sua composição, constituída pela Matéria Escura e pela Energia Escura, é desconhecida.

Com relação ao mecanismo de expansão, devido à presença da energia escura, sabemos que o Universo, apesar de plano e com densidade de matéria menor que a densidade crítica, possui uma densidade de energia que, além de complementar o balanço de densidades para garantir um Universo plano, ainda é responsável pela aceleração do processo de expansão. Assim, em termos dinâmicos, podemos dizer que o Universo atual é plano e, ao invés de ter a expansão gradualmente freada pela gravidade da matéria existente, a expansão é dominada pela presença da energia escura, causando uma aceleração da expansão.

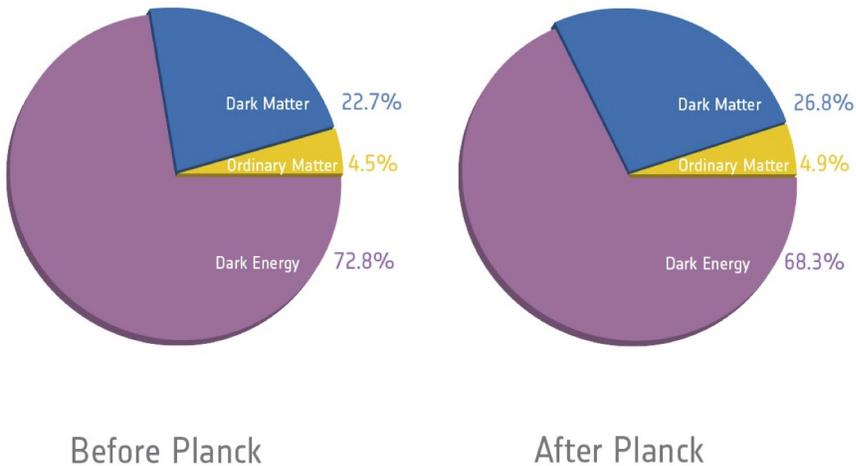


Figura 23 – Distribuição percentual dos componentes de matéria e energia no Universo. (Fonte: Elaboração do autor.)

10.6.1 A geometria e evolução do universo

A questão do futuro do Universo está ligada, diretamente, à quantidade de matéria que o Universo possui. A combinação da matéria comum (prótons, nêutrons, elétrons e neutrinos), matéria e energia escura determina não só a dinâmica do Universo (expansão retardada ou acelerada), mas também a geometria (casos em que ele é aberto, fechado ou plano). A combinação de matéria ordinária, matéria escura e energia escura definem a geometria do Universo e, conseqüentemente, o destino do Universo. Igualando-se as energias cinética e potencial do Universo, considerando que a velocidade da expansão é dada pela Lei de Hubble e considerando a densidade de matéria e energia do Universo, podemos escrever:

$$\Omega_{crit} = \frac{8\pi G\rho}{3H_0^2} \approx 10^{-29} g.cm^{-3} \quad (10.23)$$

em que G é a constante de gravitação, ρ é a densidade de matéria-radiação do Universo, H_0 é a constante de Hubble e Ω_{crit} é a densidade crítica do Universo. Se a densidade for baixa, o Universo seguirá eternamente no processo de expansão em que se encontra atualmente. Entretanto, se a densidade for maior do que a densidade crítica, a força da gravidade tem intensidade suficiente para reverter esse processo de expansão, fazendo com que o Universo, eventualmente, termine em uma grande contração.

Já o destino do Universo é determinado pela sua densidade, geometria e taxa de expansão. Resultados dos satélites COBE, WMAP e Planck, bem como de observações de aglomerados de galáxias nos levantamentos descritos na subseção 10.4.3, sugerem que o Universo é plano, ou seja, que a geometria que descreve as grandes escalas é a chamada geometria “Euclidiana”, nossa velha conhecida. Densidades diferentes definem geometrias esféricas ou hiperbólicas.

Na ausência de uma constante cosmológica ou termo equivalente, nas equações de Friedmann, podemos dizer que a densidade

define a geometria e, por conseguinte, o destino do Universo. Finalmente, como comentado ao longo deste capítulo, as propriedades do Universo em que vivemos são bastante estranhas e praticamente desconhecidas. Para conhecer o destino do Universo – e, em consequência, também o nosso –, é necessário determinar as propriedades da matéria e energia escuras e como elas influenciam a dinâmica do Universo.

Uma das formas de identificação dessa geometria é simplesmente olhar os ângulos dos triângulos representados sobre as superfícies: geometrias fechadas ou esféricas têm a soma maior que 180° ; geometrias abertas ou hiperbólicas têm a soma menor que 180° , enquanto a plana, ou Euclidiana, é a que normalmente nos lembramos, em que a soma é igual a 180° (Figura 24).

A geometria define a dinâmica do Universo. Essa força depende da densidade média de matéria-energia no Universo. A densidade de matéria atual do Universo não é suficiente para interromper a expansão ($= 0,23\Omega_0$) e, pensando somente em termos de matéria, a geometria seria aberta e o Universo se expandiria para sempre. Entretanto, a densidade de energia escura, que funciona como uma pressão negativa e é responsável pela expansão acelerada do Universo, contribui para a densidade total, fazendo com que $\Omega_0 = \Omega_T / \Omega_{crit} = 1$.

Se a densidade total fosse maior que a densidade crítica, ρ_c , a expansão seria interrompida e o movimento se inverteria, conduzindo o Universo a um colapso, ou *Big Crunch*. Para valores menores que ρ_c , a expansão aconteceria eternamente. Conforme foi discutido anteriormente, toda a matéria que forma a nossa galáxia, outras galáxias e aglomerados pode ser estimada por meios dinâmicos, isto é, aplicando-se as leis de Newton e as leis de conservação de energia. Essa relação entre a energia cinética (que quantifica o movimento das galáxias) e a energia gravitacional (que “atrapalha” o movimento, tendendo a puxar as galáxias umas ao encontro das outras) é chamada de *teorema do Virial*. Por estudos dos resultados da

aplicação do teorema do Virial, chegamos à conclusão que a quantidade de matéria escura no Universo é cerca de 7 – 8 vezes maior do que a quantidade de matéria normal.

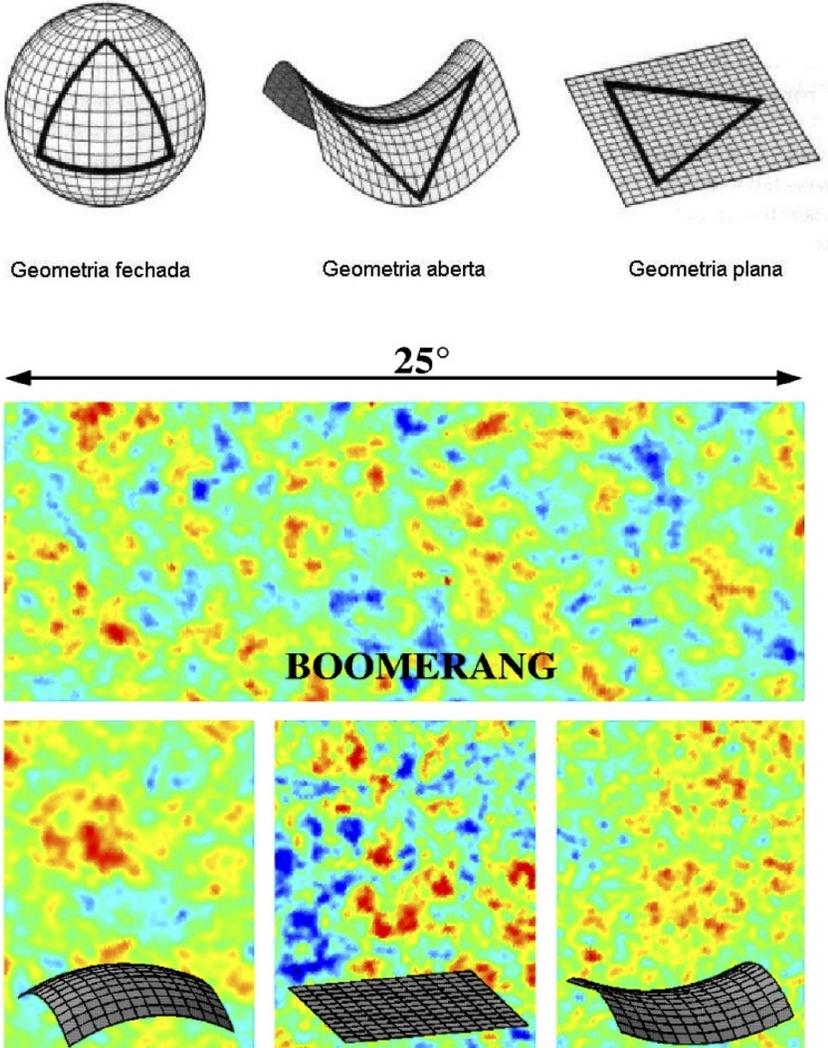


Figura 24 – Comparação das diferentes geometrias no Universo (aberta, plana e fechada) e seu efeito na distribuição angular de temperaturas da RCFM. (Fonte: Elaboração do autor.)

10.6.2 O futuro do universo

Ao longo deste texto ressaltamos um fato notável: toda a dinâmica da evolução do Universo obedece a um delicado equilíbrio de forças, uma espécie de “*cabo de guerra*” entre a força da gravidade e diversas outras forças que, em diferentes épocas da vida de um sistema planetário, de uma estrela ou de um aglomerado de galáxias, atuam contrabalançando a tendência da gravidade de atrair os corpos. Então, se imaginarmos que o Universo não tem matéria suficiente para interromper completamente o processo de expansão, o que vai acontecer com o passar do tempo?

Sabemos que estrelas se formam de nuvens de Hidrogênio, de modo que, daqui a muitos bilhões de anos, teremos a seguinte situação: todo o Hidrogênio disponível para virar estrela terá sido consumido nas reações nucleares e os átomos que não foram consumidos não terão mais como se agrupar para formar estrelas, porque a expansão terá separado as nuvens que são, naturalmente, o local onde acontece formação de estrelas. E as galáxias? Nas galáxias de campo, que se encontram sozinhas, as estrelas mais velhas já terão queimado todo o seu combustível e a galáxia apagará, porque não haverá mais formação estelar. As galáxias que se encontram em grupos e aglomerados, provavelmente entrarão em estado de equilíbrio gravitacional ou então se fundirão em um só objeto. O que acontece com as estrelas das galáxias de campo também acontecerá com as galáxias em grupos: elas “apagarão”.

Juntando a isso as consequências da Segunda Lei da Termodinâmica, que diz que, sempre que acontece um evento irreversível no Universo, a entropia (que pode ser comparada ao grau de desorganização de um determinado sistema) permanece constante ou aumenta, caminhamos então para um estado em que não haverá mais energia disponível no Universo para que aconteçam eventos quaisquer. Além disso, após cerca de 10^{32} anos, os constituintes básicos da matéria, feitos principalmente de prótons, devem decair,

aumentando o campo de radiação e “decompondo” toda a matéria existente no Universo.

O Universo chegará, então, no seu estado de energia mínima – onde não há como perturbá-los sem que mais energia seja introduzida – e de entropia máxima, caminhando para seus momentos finais. Se não houver nenhum processo inesperado que modifique esse quadro (e que nem podemos imaginar hoje qual seja), estaremos presenciando a morte térmica do Universo. Essa, provavelmente, é uma das consequências naturais de um modelo de Universo que começa com um Big Bang e cuja quantidade de matéria não é suficiente para interromper o processo de expansão.

Por outro lado, caso a densidade fosse maior do que ρ_c , e supondo que vivemos num Universo que começou com uma grande explosão, teríamos um instante (não sabemos exatamente quando) em que a expansão do Universo seria interrompida e ele começaria a se contrair. A gravidade puxaria, então, os corpos novamente uns de encontro aos outros e, seguindo as leis da Termodinâmica, a temperatura do Universo novamente aumentaria. Com a diminuição do volume e aumento gradual da densidade, teríamos uma contração acelerada e o final desse processo seria um *Big Crunch*, com o Universo voltando a uma singularidade e levando consigo todo o espaço-tempo. O quadro atual das observações praticamente descarta essa possibilidade, mas modelos cíclicos e estacionários ainda são estudados e têm um atrativo teórico interessante, que é justificar o processo de criação contínua de matéria.

Ainda não sabemos responder se o quadro que descreve a morte térmica do Universo acontecerá exatamente desse modo. As questões formuladas pelos cientistas que trabalham com a física de partículas se juntam às dos cosmólogos nessa tentativa de definir qual será o futuro do Universo hoje observado. Para chegarmos a um cenário plausível, as respostas procuradas pela Cosmologia são cruciais, pois os valores precisos da taxa de expansão do Universo, sua

idade e composição são essenciais para entender o quebra-cabeças cosmológico.

10.7 Conclusão

A Cosmologia é uma ciência que trabalha para tentar entender o conteúdo, a estrutura e a evolução do Universo, lidando com enormes tempos e distâncias. Ela tenta também entender como o Universo jovem se comportou sob condições extremas de densidade, temperatura e energia. Cientistas de diversas especialidades estão desenvolvendo uma grande variedade de técnicas observacionais, ferramentas computacionais e instrumentos para responder as questões fundamentais que levantamos ao longo deste capítulo. O progresso ao longo dos últimos 30 anos foi enorme, mas na década de 2000, em particular, a Cosmologia tornou-se o que chamamos de ciência madura, dispondo de uma enorme quantidade de dados, informações diversas e teoria e instrumentação avançando rapidamente.

Observações recentes dos satélites WMAP e Planck, de outros experimentos que vêm medindo a RCFM e resultados dos levantamentos de galáxias mencionados na subseção 10.4.3 responderam algumas das questões sobre a história térmica e a evolução do Universo. Observações das estruturas em grande escala vêm sendo feitas por diversos grupos no mundo, usando dados de telescópios no solo e a bordo de satélites (Telescópio Hubble). Nosso conhecimento sobre a distribuição e o movimento peculiar (causado pela distribuição de massa no Universo) das galáxias ainda é incompleto, mas já temos uma boa ideia sobre a dinâmica do Universo que nos cerca e de suas propriedades físicas mais importantes. Uma nova geração de experimentos (telescópios gigantes, satélites e experimentos cuja tecnologia teve que ser desenvolvida especialmente para eles) está fazendo ou fará novas medidas e estudar o Universo de formas inimagináveis há 40 anos. Estimativas da idade do Universo e da quantidade de matéria escura estão em andamento, com o Telescópio

Espacial Hubble, diversos levantamentos de objetos em diferentes comprimentos de onda (2MASS, 2dF, 6dF SDSS, SNI, objetos Lyman- α etc.). Vários experimentos estão em andamento para identificar candidatos à matéria escura, como os experimentos de neutrinos e WIMPS (Weak Interactive Massive Particles) KamLand, Edelweiss, Sudbury. O INPE participa ativamente de vários desses projetos, tanto para estudar a RCFM quanto no estudo de simulações de interação de galáxias. Estamos assistindo a um enorme avanço no entendimento da evolução das galáxias e das estruturas em grande escala nesta década. Ainda não sabemos exatamente qual é a natureza da matéria escura ou da energia escura, mas certamente ambas são resultado de processos que ocorreram no Universo jovem.

Os problemas principais que a Cosmologia tenta resolver são bem formulados, mas muitas das soluções têm permanecido obscuras por décadas. Finalmente, com o aumento da quantidade de informações obtidas a partir do avanço dos experimentos, computadores e o conseqüente avanço da teoria, parte das questões fundamentais aqui apresentadas começam a ser resolvidas. Vários dos pesquisadores da DAS estão diretamente envolvidos nessa corrida ao conhecimento e estão trabalhando atentos aos novos resultados que, diariamente, aparecem na literatura científica.

A primeira versão dessa monografia, escrita em 1998, continha diversas informações conflitantes com o conteúdo atual e algumas questões formuladas nas décadas de 1980 e 1990 foram respondidas recentemente pelos resultados de diversos satélites (WMAP, Planck, James Webb Space Telescope, entre outros) e pelos levantamentos de objetos distantes nas faixas do óptico e rádio feitos por telescópios no solo (DES, SDSS, NVSS, Pan-Starrs, Wiggle-Z, entre outros).

A segunda versão, escrita em 2006, apresentou diversas atualizações de resultados e algumas novidades nas estimativas de parâmetros cosmológicos, mas ainda não conteve resultados significativamente diferentes da versão de 1998. As questões em aberto sobre a polarização tensorial da RCFM, uma explicação teoricamente bem

fundamentada e comprovada observacionalmente sobre a origem da Energia Escura e a identificação definitiva do(s) constituinte(s) da Matéria Escura ainda aguardam respostas nas duas últimas versões, em 2017 e 2024.

Se uma monografia sobre este mesmo tema for escrita daqui a 10 anos, temos certeza que ela será ainda mais distinta das que foram escritas em 1998, 2006, 2017 e 2024, no que diz respeito aos problemas fundamentais que a Cosmologia pretende resolver.

Referências

Além da bibliografia em português e inglês consultada, incluo alguns outros textos que talvez despertem a atenção daqueles que tiveram uma formação em ciências exatas. Eles foram escolhidos com base pura e simplesmente no meu gosto pessoal, estando ordenadas por ordem crescente de dificuldade.

“O despertar da Via Láctea”. Timothy Ferris. Ed. Campus, 1990. Texto de divulgação, um pouco romaneado, mas que cobre de maneira bastante fiel a história da astronomia, desde seus primórdios. O autor é um dos grandes jornalistas ligados à divulgação científica nos EUA.

“A Brief History of Time”. Stephen Hawking. Um dos livros mais divulgados sobre Cosmologia, lamentavelmente muito mal traduzido para o português, sob o título “Uma breve história do tempo”. Texto muito interessante, por mostrar a visão de Universo de um dos grandes físicos da segunda metade do século XX.

“Shadows of Creation: Dark Matter and the Structure of the Universe”. Michael Riordan e David Schramm. W. H. Freeman and Co., New York, 1991. Texto de divulgação científica, de um dos especialistas em nucleossíntese primordial, busca transmitir os conceitos básicos do processo de formação de estruturas e da existência de matéria escura no Universo.

“A radiação cósmica de fundo e a formação de estrutura em larga escala no Universo: uma visão atual”. Carlos Alexandre Wuensche. *Revista Humanidades*, 38:142-151, 1994. Ensaio sobre o problema da formação de estruturas no Universo, escrito para uma revista basicamente voltada para um público de ciências humanas.

“Os Três Primeiros Minutos”. Steven Weinberg. Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980. Escrito por um físico de partículas que se aventurou no terreno da Cosmologia, esse texto apresenta, numa linguagem clara e simples, um resumo do Universo primordial. Um dos primeiros textos de divulgação escrito sobre Cosmologia (1977), com um apêndice matemático relativamente simples...

“O Big Bang”. Joseph Silk. Editora UnB, 2a. ed., 1989. Um dos papas da área, Joseph Silk apresenta o modelo do Big Bang de forma simples, e introduz alguns conceitos matemáticos, também concentrados em um apêndice, um pouco mais complexos que os apresentados no livro de Weinberg.

“Foundations of Astronomy”. Michael Seeds. Wadsworth Publishing Co., 1997. Livro texto de introdução à astronomia, com textos claros e excelentes ilustrações.

“O Universo inflacionário”. Alan Guth. Editora Campus, 1997. Excelente texto escrito por um dos criadores do modelo inflacionário.

“O passado e o presente do Cosmos”. Scientific American Brasil, Ed. Especial, no. 1, set. 2003.

“O que é Cosmologia”. Mario Novello. Editora Zahar, 2006.

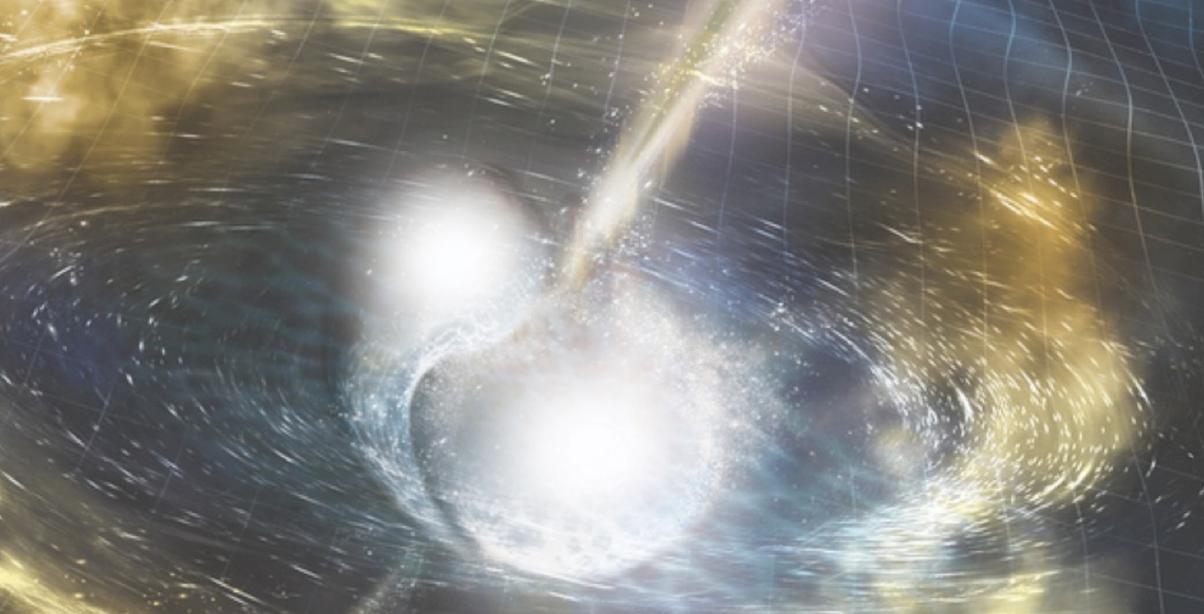
Os artigos abaixo são mais técnicos, escritos em inglês, mas com uma excelente quantidade de informação atualizada.

“Connecting Quarks to Cosmos: Eleven Science Questions for the New Century”. Committee on the Physics of the Universe, National Research Council. National Academic Press, 2003.

“Beyond Λ CDM: Problems, solutions, and the road ahead”. Philip Bull *et al.* ArXiv:1512.05356v2 (2015).

“Challenges in Cosmology from the Big Bang to Dark Energy, Dark Matter and Galaxy Formation”. Joseph Silk. ArXiv:1611.09846v2 (2016).

“The Cosmological Parameters”. O. Lahav e A. Liddle, Review of Particle Physics (2016).



11. Astrofísica de Ondas Gravitacionais

Odylio Denys Aguiar

11.1 O que são ondas gravitacionais?

O conceito de ondas gravitacionais só pode ser entendido à luz da teoria da relatividade geral de Albert Einstein. Sem ela, não podemos entender o que são ondas gravitacionais. Mas explicaremos melhor isso mais adiante.

Começemos com a teoria da gravitação de Isaac Newton, publicada no livro “Principia” em 1687. Para Newton, a gravidade era uma força invisível que agia à distância, proporcional ao produto das duas massas, que se atraíam, e ao inverso do quadrado da distância entre elas. Essa *lei da gravitação*, como ficou conhecida, não dizia nada sobre a velocidade de propagação da força gravitacional. Aliás, esse foi um assunto de debate por mais de dois séculos: qual seria a velocidade de propagação da força da gravidade? O próprio Newton não tinha certeza da resposta.

Hoje, muitos cientistas interpretam que a lei da gravitação de Newton implicava que a velocidade de propagação da força da gravidade era infinita e, portanto, segundo essa lei, se uma massa mudasse a sua posição, todo o Universo receberia esta informação instantaneamente. Porém, isto não parece correto. Se no lugar de conhecermos todas as equações de Maxwell, conhecêssemos apenas a lei de Coulomb para as cargas elétricas, também seríamos levados a pensar, erroneamente, que a força elétrica se propagava instantaneamente. A lei da gravitação é para a gravitação o mesmo que a lei de Coulomb para o eletromagnetismo, um pedaço do todo, não a teoria completa. De posse de todas as equações de Maxwell, podemos provar que as ondas eletromagnéticas existem e elas, assim como a força elétrica e a força magnética, se propagam com a velocidade da luz. Também podemos provar o mesmo para a gravitação, mas para isto foi necessária uma teoria mais completa que a teoria de Newton, foi preciso a teoria da relatividade geral de Albert Einstein.

Einstein foi o primeiro cientista a perceber que nenhuma informação poderia viajar a uma velocidade maior que a da luz. Ele percebeu isso já na sua teoria da relatividade especial, publicada em 1905. Como consequência desse limite de velocidade para todas as coisas, Einstein percebeu também que o espaço não era independente do tempo, mas formava com ele uma entidade que ele chamou de espaço-tempo. Por que ele concluiu isso? Muito simples. Imagine que você está viajando em um foguete com velocidade próxima da velocidade da luz e que um colega ou uma colega esteja em outro foguete também com velocidade próxima da velocidade da luz, porém em direção oposta, se aproximando de você. Segundo a teoria da relatividade especial, a velocidade relativa entre os dois foguetes é a velocidade da luz, e não duas vezes a velocidade da luz. Ora, para conciliar essa mágica matemática, o espaço precisa estar ligado ao tempo e vice-versa. Quanto maior a velocidade do referencial, mais o espaço se contrai e o tempo se dilata. Se você tivesse um irmão gêmeo ou uma irmã gêmea e viajasse naquele foguete por muito tempo, quando voltasse à Terra, o seu irmão ou sua irmã já

estariam velhinhos e você não teria envelhecido quase nada. Esse efeito é real, o Global Positioning System (GPS), para funcionar direito, vive corrigindo os tempos dos satélites em relação ao tempo na Terra, porque os satélites estão com velocidades maiores. Mas Einstein ainda estava por descobrir o mais surpreendente.

Se você acha que a velocidade da luz ser a velocidade limite para todas as coisas ou que o tempo estar ligado ao espaço são conceitos estranhos e difíceis de acreditar, você nem imagina o que Einstein descobriu 10 anos depois, com a sua teoria da relatividade geral, publicada em 1915. Ele descobriu que quando o espaço-tempo se curvava (entortava!?!), ele produzia o efeito gravitacional, ou seja, o cientista descobriu a origem da gravitação. Dessa forma, os corpos com massa não se atraíam por causa de uma força invisível, mas sim porque eles sentiam o espaço-tempo curvo em volta deles e, portanto, “escorregavam” um em direção ao outro. É como você imaginar uma bola de boliche em cima de um colchão de borracha (Figura 1). O peso dela deforma o colchão, de maneira que as bolas menores (de bilhar) sentem esta deformação e “escorregam” em direção à bola de boliche.

Agora fica fácil para explicar as ondas gravitacionais. Imagine duas estrelas orbitando uma em torno da outra. Cada uma delas deforma o espaço-tempo em volta dela, mas como elas estão em órbita, uma em torno da outra, as duas carregam essas deformações com elas. Acontece, nesse momento, uma coisa diferente. Se as deformações ficassem paradas, nada aconteceria, mas estando em movimento, elas se propagam para fora, da mesma forma que não conseguimos evitar que as ondas produzidas pela queda de uma pedra na superfície de um lago se propaguem em todas as direções, para fora do ponto da queda. Einstein batizou essas deformações que se propagam para fora dos corpos em órbita, que as produziram, de *ondas gravitacionais*. Ele descobriu isso em 1916, com base nas equações da sua teoria da relatividade geral. Também baseando-se nessas equações, ele provou que essas ondas se propagam também à velocidade da luz.

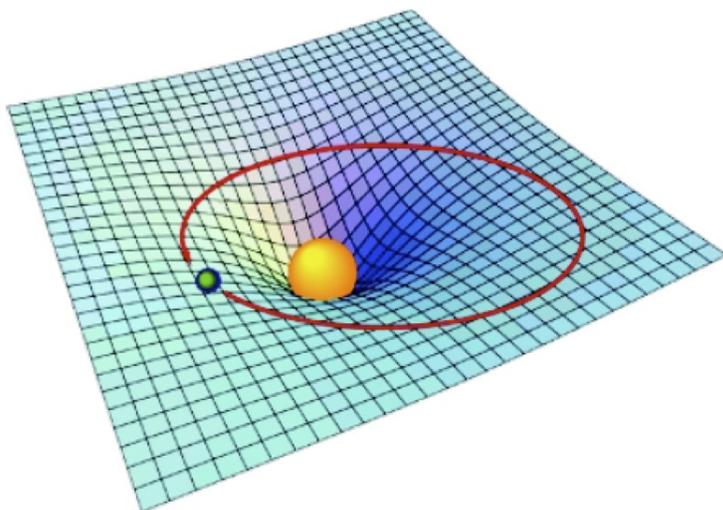


Figura 1 – Na teoria da Relatividade Geral de Einstein, as massas, principalmente as grandes, causariam deformação no espaço-tempo, de modo semelhante à deformação causada por uma bola de boliche em um colchão de borracha. (Fonte: Elaboração do autor.)

Depois da confirmação da existência das ondas eletromagnéticas por Heinrich Hertz em 1887, alguns cientistas, como Oliver Heaviside, Hendrik Lorentz e Henri Poincaré, suspeitaram e, em alguns casos afirmaram, que a velocidade da força da gravidade era a mesma que a da luz, mas foi a partir da teoria da relatividade geral de Einstein que se conseguiu provar matematicamente que isso era verdade.

11.2 Como podemos detectar/observar ondas gravitacionais?

Em 1918, Einstein descobriu, com base em sua teoria da relatividade geral, que as ondas gravitacionais são produzidas quando existe uma variação do momento de quadrupolo de massa de um objeto ou sistema e que, por causa disso, devem apresentar duas polarizações fundamentais lineares, chamadas de *polarizações mais (+)*

e *cruzada* (\times), a partir das quais todas as outras polarizações podem ser obtidas. Polarização em uma onda gravitacional é mais ou menos a forma como ela oscila no espaço. Vamos explicar isso melhor. Suponha que uma onda gravitacional esteja se deslocando ao longo do eixo z , no sentido $z+$ (Figura 2), perpendicular ao plano xy . A polarização mais (+) faria uma circunferência de partículas teste (no formato de um bambolê) oscilar no plano perpendicular ao eixo z , de modo a se esticar e contrair nas direções paralelas aos eixos x e y . Já a polarização cruzada (\times) faria a circunferência de partículas oscilar no plano perpendicular ao eixo z , mas com contrações e elongações em direções formando ângulos de 45° com os eixos x e y .

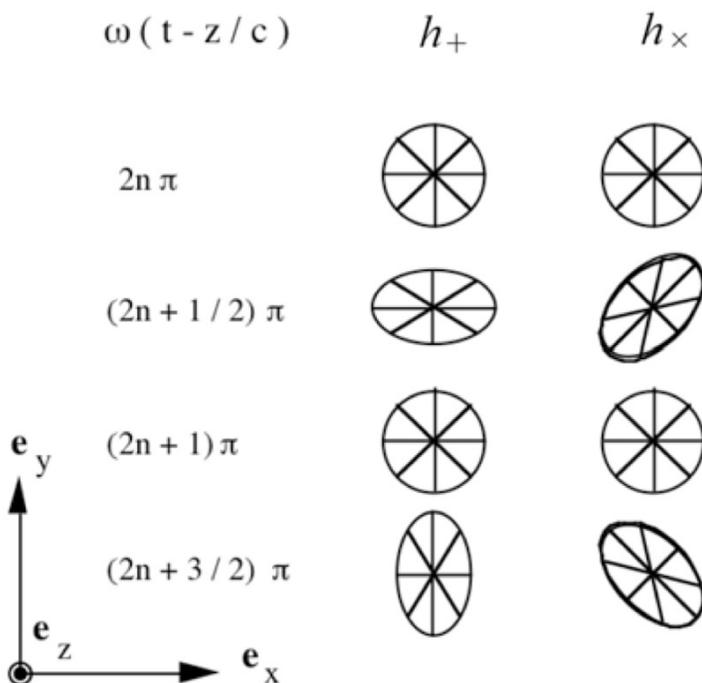


Figura 2 – Deformação de uma circunferência devido a forças induzidas por ondas h_+ ou h_\times puras. (Fonte: Elaboração do autor.)

Poderíamos definir uma amplitude h para a onda gravitacional como sendo a razão entre a deformação espacial ΔL que ela causa num determinado comprimento L e esse comprimento L , ou seja, $h = \Delta L/L$. Note que essa amplitude, como foi definida, é adimensional (sem dimensão). Essa amplitude h seria uma composição das duas amplitudes das polarizações mais e cruzada.

$$h = \Delta L/L = ((h_+)^2 + (h_\times)^2)^{1/2} \quad (11.1)$$

Uma onda, com determinadas amplitude e polarização, poderia ser decomposta nas duas polarizações lineares puras mais (+) e cruzada (\times), com amplitudes que satisfizessem a equação acima e fases que pudessem compor a polarização da onda original. Para o caso especial, no qual a diferença de fase entre as duas polarizações lineares puras é de 0° , a polarização formada ainda é uma polarização **linear**, mas o ângulo que as contrações e elongações formam com os eixos x e y vai depender das amplitudes das duas polarizações puras. Se as amplitudes forem iguais, o ângulo será de $22,5^\circ$. Se as amplitudes forem diferentes, o ângulo vai ser mais próximo da polarização linear pura que tiver a maior amplitude.

Outro caso especial é quando a diferença de fase entre as polarizações lineares mais (+) e cruzada (\times) é de 90° e elas têm a mesma amplitude. Nesse caso, a polarização resultante será circular, e veremos a circunferência de partículas passar a ter o formato de uma elipse em rotação no plano $x - y$ (perpendicular a z).

No caso geral, de um ângulo diferente de 0° , 90° , 180° e 270° e amplitude qualquer, a polarização é a **elíptica**, que corresponde às partículas teste descreverem uma elipse em rotação, cuja excentricidade estaria variando à medida que a elipse rodasse. As ondas gravitacionais que chegassem à Terra, produzidas por um sistema binário composto por dois buracos negros ou duas estrelas de nêutrons, por exemplo, apresentariam polarização linear, circular ou elíptica, se o sistema estivesse orientado “*edge-on*”, “*face-on*”, ou em qualquer outra orientação diferente dessas duas, respectivamente.

Bom, então a conclusão é que se uma onda gravitacional passasse por nós, ela iria provocar uma contração e alongação dos nossos corpos, de modo que em um momento ficaríamos baixos e gordos e em outro ficaríamos altos e magros. Nisso, você se perguntaria: eu não sinto nada disso, portanto, essas ondas não devem existir!

Não, as ondas existem sim. A explicação é que elas têm amplitudes muito, muito, muito pequenas. Uma onda gravitacional gigantesca, digamos uma onda *tsunami* com amplitude $h \sim 10^{-18}$, raríssima, que passa por nós a cada ~ 100 anos, não conseguiria mudar a nossa altura mais do que a milésima parte do diâmetro de um próton! Portanto, felizmente, as ondas gravitacionais não vão causar nenhuma dor nos nossos corpos. Por outro lado, infelizmente, elas são muito difíceis de serem detectadas, por causa das amplitudes tão pequenas que possuem. Só com instrumentos muito sensíveis, construídos com altíssima tecnologia, é que foi possível detectá-las.

11.2.1 Prova de que elas existem

Muito antes de conseguirmos detectar ondas gravitacionais, a comunidade científica da área de relatividade geral e gravitação já tinha certeza de que elas existiam. Primeiro, houve um convencimento do ponto de vista teórico e depois um do ponto de vista observacional, apesar de indireto.

O convencimento do ponto de vista teórico não ocorreu quando Einstein propôs a existência das ondas gravitacionais em 1916, mas sim meio século depois. Durante cinco décadas, ocorreu um debate teórico na comunidade científica especializada em relatividade geral e gravitação a respeito da existência física das ondas gravitacionais. Muitos achavam que as ondas gravitacionais eram apenas um artifício matemático derivado da teoria da relatividade geral, sem existência real física. O próprio Einstein chegou a duvidar que elas fossem reais. Ele quase publicou um artigo na década de 1930 negando a existência dessas ondas. Felizmente, o trabalho dele foi mo-

dificado antes da publicação, graças ao cientista encarregado para julgar o trabalho, H. P. Robertson, que não concordou com Einstein. Porém, Einstein, até a sua morte em 1955, não tinha certeza se afinal as ondas gravitacionais que ele tinha derivado com base em sua teoria da relatividade geral tinham realmente existência física.

Somente em 1957, a comunidade de físicos relativistas chegou a um consenso sobre esta questão. Em janeiro daquele ano, a Força Aérea Americana, por causa do interesse de entender o fenômeno da gravitação, patrocinou uma conferência sobre o papel da gravitação na física, também conhecida como Conferência Chapel Hill, ou ainda como GR1. Nessa conferência, Felix Pirani, do King's College, deu a solução para o problema das ondas gravitacionais, demonstrando que ondas gravitacionais realmente carregavam energia e, portanto, teriam existência física, embora Bondi (e/ou Feynman) geralmente recebam o crédito.

A prova observacional da existência de ondas gravitacionais ocorreu na segunda metade da década de 1970. Russell Hulse e Joseph Taylor descobriram em 1974 um sistema binário formado por duas estrelas de nêutrons, das quais uma delas era um *pulsar*. Uma estrela de nêutrons é um objeto astrofísico formado principalmente por nêutrons, que tem um diâmetro de aproximadamente 25 km e uma massa um pouco maior que a do Sol. Um *pulsar* é uma estrela de nêutrons que apresenta uma combinação de campo magnético e rotação suficientemente altos para emitir um feixe de rádio capaz de ser detectado na Terra, se esse feixe “varrer” o nosso planeta pela rotação da estrela (da mesma forma como o fecho de luz de um farol “varre” o nosso rosto).

O feixe de rádio era detectado pelo radiotelescópio de Arecibo, em Porto Rico, aquele mesmo radiotelescópio do filme “Contato”. Como o *pulsar* tinha uma rotação extremamente regular, conhecia-se o seu período de rotação com 14 casas decimais (o seu período era de 0,059029997929613 s)! Dessa forma, Hulse pode observar a variação da chegada dos pulsos do pulsar à medida que este orbi-

tava a outra estrela de nêutrons, graças ao efeito Doppler. Quando o *pulsar*, durante a órbita, se aproximava da Terra, os pulsos chegavam em intervalos menores que aquele período do *pulsar*. Quando ele se afastava, o contrário ocorria, os pulsos se intervalavam de um tempo maior que o período do *pulsar*. Ficava claro que essa sequência se repetia, e, logicamente, o período dessa repetição cíclica era o período da órbita do *pulsar* em torno da sua estrela de nêutrons companheira. Era o primeiro sistema binário formado por duas estrelas de nêutrons descoberto. Outros sistemas como esse seriam observados anos depois. Porém, o mais interessante estava para ser revelado. Taylor continuou a medir o período orbital desse sistema nos anos que se seguiram e os resultados mostravam que esse período estava diminuindo na mesma proporção prevista pela teoria da relatividade geral em razão da emissão de ondas gravitacionais pelo sistema binário. Já em 1979, havia dados suficientes para ficar clara essa concordância. Taylor continuou a fazer as contas nos anos seguintes e, finalmente, em 1993, a Academia Sueca deu a eles (Hulse e Taylor) o prêmio Nobel de Física, por causa dessa descoberta. As ondas gravitacionais não estavam sendo detectadas, mas o efeito de retirada de energia do sistema pela emissão dessas ondas estava sendo observado, portanto era uma prova indireta da existência de ondas gravitacionais.

11.2.2 Métodos de detecção e detectores de ondas gravitacionais

Ora, se ondas gravitacionais retiram energia de um sistema mecânico formado por duas estrelas de nêutrons no processo de emissão, então, deveria ser possível absorver energia dessas ondas no processo inverso, o de detecção. Levando-se em conta as polarizações lineares puras das ondas gravitacionais, poderiam ser projetados detectores adequados para a detecção dessas ondas.

Foi Joseph Weber quem primeiro propôs a construção de um detector de ondas gravitacionais que poderia funcionar. A proposta

dele, publicada em 1960, consistia de uma barra maciça de alumínio em formato cilíndrico, de aproximadamente 1,5 metros de comprimento e um metro de diâmetro, e de alta figura de mérito de oscilação mecânica. Essa barra era suspensa pela região central por uma haste muito fina (poucos milímetros de diâmetro) e forte, cujas duas extremidades eram presas a um arco metálico apoiado sobre duas pilhas de blocos de aço e borracha, para amortecer as vibrações do chão do laboratório, e mantida dentro de uma câmara de vácuo de modo a deixá-la livre para oscilar, sem a influência de ruído sonoro ou sísmico. Dezenas de cristais piezoelétricos eram colados na região central da barra e conectados em série. Cristais piezoelétricos, quando deformados, produzem voltagens (eles são usados, por exemplo, em acendedores de fogão, quando comprimidos). Quando eles são conectados em série, a voltagem resultante é a soma das voltagens de todos os cristais. Mesmo para pequenas deformações da barra, causadas pela passagem de uma onda gravitacional, a voltagem resultante poderia, se não fosse tão fraca, ser detectada. Esses cristais piezoelétricos faziam o papel de transdutores (sensores), que transformavam as energias vibracionais mecânicas em elétricas. Quando a onda gravitacional passasse, parte da energia da onda era convertida em energia mecânica de oscilação da barra. A conversão era maximizada se a onda chegasse perpendicular à barra e tivesse polarização mais (+), considerando que o eixo da barra estava alinhado com o eixo x (ou y). Utilizando esse princípio, essas barras de Weber chegaram a ter sensibilidade para medir uma onda com amplitude adimensional h da ordem de 10^{-15} , o que, infelizmente, não foi suficiente para uma detecção, apesar de Weber ter sempre afirmado que havia detectado ondas gravitacionais em 1969.

A geração seguinte de barras foi construída a partir da década de 1970. Elas eram, na sua maioria, barras com 3 metros de comprimento e 60 cm de diâmetro e eram todas resfriadas a temperaturas próximas da temperatura de ebulição do hélio líquido (4,2 K). Dessa forma, o ruído térmico (Browniano) era muito menor. Para ajudar, nessas baixas temperaturas, as figuras de mérito mecânica

dos sólidos (Q_m) eram bem maiores que as mesmas figuras de mérito à temperatura ambiente, e a propriedade de supercondutividade do nióbio poderia ser utilizada para a operação dos transdutores. Assim, os novos transdutores puderam “aposentar” os cristais piezoelétricos que estavam sendo utilizados à temperatura ambiente. As barras criogênicas, como eram chamadas, operaram nas décadas de 1980, 1990 e anos 2000. Elas agora já estão todas “aposentadas” (Niobe aposentada em 2001, Allegro em 2007, Explorer em 2010, Nautilus e Auriga em 2014). Elas chegaram a sensibilidades, em uma banda de 30 Hz em torno de 900 Hz, da ordem de $10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$, que para sinais *bursts* (impulsivos), em ~ 100 Hz da banda desses detectores, correspondia a um $h \sim 10^{-20}$.

A terceira geração de “barras”, na verdade, é melhor chamá-las de *massas ressonantes*, foram as esferas de cobre-alumínio que compunham os detectores Mini-GRAIL, construído na Holanda, e o Mario Schenberg, construído no Brasil. O princípio ainda era o mesmo: o de absorção de parte da energia da onda gravitacional, agora por esferas de 68 cm e 65 cm de diâmetro, que correspondiam a massas de 1300 kg e 1150 kg, respectivamente. O Mini-GRAIL operou até 2009 na Universidade de Leiden. O Schenberg operou no IFUSP até 2015 e encontra-se desmontando no INPE, aguardando uma oportunidade para ser remontado no laboratório de ondas gravitacionais Sérgio Ricardo Furtado, no INPE. Ambos chegaram a operar em uma banda de ~ 70 Hz em torno de ~ 3 kHz, com sensibilidade da ordem de $10^{-20} \text{ Hz}^{-1/2}$. Maiores sensibilidades podem ser alcançadas se esses projetos tiverem continuidade. A sensibilidade de projeto é algo em torno de $10^{-22} \text{ Hz}^{-1/2}$.

Também na década de 1970, foram construídos os primeiros interferômetros laser para detecção de ondas gravitacionais. De maneira semelhante a um interferômetro Michelson-Morley, os braços do interferômetro para detecção de ondas gravitacionais são horizontais e perpendiculares entre si. O princípio de detecção desses equipamentos se baseia na simples variação das distâncias relativas entre os espelhos, produzida pela passagem de uma onda gravi-

tacional. O sinal é maximizado quando a onda gravitacional chega perpendicular ao plano que contém o interferômetro e com a polarização mais (+), supondo que os braços estão alinhados com as direções x e y , respectivamente. O princípio de funcionamento do interferômetro do tipo Michelson-Morley se baseia na detecção da variação relativa dos comprimentos dos braços. Vejamos o porquê: O feixe que sai do laser é inicialmente dividido em dois feixes perpendiculares, por um divisor de feixes (um espelho 50% refletor colocado em um ângulo de 45° com o feixe inicial. Cada um dos feixes divididos percorre um dos braços perpendiculares. Ao final de cada braço, esses feixes encontram espelhos 100% refletores que os enviam de volta ao ponto de partida: o divisor de feixes, que os divide novamente. Parte do feixe que voltou de um braço é juntada com parte do feixe que voltou do outro braço e enviada a um sensor de luz (fotodiodo ou fotodetector). Então, as distâncias entre os espelhos são ajustadas para que os dois feixes fiquem com fases 180° entre si (fases contrárias). Dessa forma, não é registrada nenhuma luz no fotodetector. A chegada de uma onda gravitacional muda essa situação de interferência máxima, fazendo com que alguma luz seja registrada no fotodetector.

Na prática, os interferômetros LIGO (*Laser Interferometer Gravitational wave Observatory*), que realizaram as primeiras detecções de ondas gravitacionais, são um pouco mais complicados do que isso. Primeiro porque os feixes de luz em cada braço não vão e voltam apenas uma vez, mas várias. Existem espelhos quase 100%, mas não exatamente 100%, que são colocados próximos do divisor de feixe, formando as chamadas *cavidades de Fabry-Perot* com os espelhos 100% no final de cada braço. Esses espelhos adicionais fazem com que os feixes façam várias viagens de ida e volta ao longo dos braços, acumulando uma potência em circulação nos braços que pode chegar a 100 kW ou mais, apesar de a fonte de laser ser de apenas algumas poucas dezenas de Watts (20 W, por exemplo). Segundo porque existem espelhos que refletem a luz laser que tenta voltar para a fonte de laser, são os chamados *espelhos de reciclagem*

de energia, para não desperdiçar luz laser no detector, aproveitando toda ela. E terceiro porque também existem espelhos que ficam na frente dos fotodetectores, os chamados *espelhos de reciclagem de sinal*. Eles têm a finalidade de aumentar a sensibilidade do interferômetro para frequências específicas (desde que esteja dentro da faixa de sensibilidade do interferômetro), em busca de sinais periódicos nessas frequências específicas.

Os interferômetros LIGO têm braços de 4 km de comprimento e estão localizados nos municípios de Livingston (estado de Louisiana) e Hanford (estado de Washington), nos EUA, separados por cerca de 3 mil km entre si (uma onda gravitacional viajando de um sítio para o outro levaria 10 ms para fazer o percurso). O comprimento de onda do laser utilizado é de 1064 nm ou 1,064 μm (mícron) e a faixa de frequências na qual o LIGO tem a sua maior sensibilidade é de 50 Hz até 1 kHz. Em torno de 200 Hz a sua sensibilidade chega a $\sim 10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$, mas vai melhorar ainda mais. O grupo do INPE é um dos dois grupos no Brasil que participam da Colaboração Científica LIGO (sigla LSC em inglês), atuando nela desde 2011. Existem ainda outros interferômetros: o Virgo, em Cascina (perto de Pisa), na Itália, com braços de 3 km, o GEO600, em Hannover, na Alemanha, com braços de 600 metros, o KAGRA, na mina de Kamioka, no Japão, subterrâneo, com braços de 3 km e espelhos resfriados, e um projeto em construção na Índia, o LIGO Índia.

Existem também projetos de interferometria laser no espaço, tais como o Laser *Interferometer Space Antenna* (LISA), o *Deci-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory* (DECIGO) e o *Big Bang Observer* (BBO). O mais famoso deles é o LISA, desenvolvido pela ESA e a NASA, que pretende colocar três espaçonaves em órbita do Sol, à mesma distância que a Terra se encontra dele, mas cerca de 20° atrasada em relação à órbita da Terra. Essas três espaçonaves formariam um triângulo equilátero de 2,5 milhões de quilômetros de lado. Feixes de laser de 2 W seriam enviados de cada espaçonave para as duas outras e recebidos por elas por telescópios refletivos. O lançamento está previsto para ocorrer no meio da década de 2030.

Uma boa parcela do sucesso dessa missão já ocorreu no lançamento e funcionamento do *LISA Pathfinder*. A sensibilidade alcançada em aceleração medida ultrapassou todos os requisitos previstos para o *LISA Pathfinder* e inclusive os necessários para o LISA. Diante desse excelente desempenho e da recente detecção de ondas gravitacionais por interferometria laser, o projeto LISA recebeu várias aprovações que o colocaram novamente na previsão de lançamento, voltando a receber apoio da NASA. O LISA vai ter a sua melhor sensibilidade na faixa em frequências de 1 mHz a 100 mHz e o DECIGO na faixa de 100 mHz a 10 Hz. O BBO também vai ter sensibilidade nessa faixa do DECIGO e pretende descobrir se o universo “nasceu” no Big Bang ou teve uma existência anterior e, neste caso, a existência do Big Bang não ocorreu como é descrito no modelo padrão.

Outro método de detecção de ondas gravitacionais é o *pulsar timing array*. Trata-se do uso de radiotelescópios para monitorar a chegada dos pulsos dos pulsares mais regulares que existem sendo observados. Atualmente, são cerca de 80 o número de pulsares regulares que são observados. Eles são pulsares isolados, que mantêm uma regularidade excepcional no seu período de rotação. Dessa forma, podemos prever com precisão os momentos exatos da chegada dos seus pulsos, levando-se em conta as correções Doppler devidas à rotação da Terra em torno de si mesma e devidas à translação da Terra em torno do Sol. Comparamos, então, esses momentos teóricos de chegada dos pulsos, previstos pelo modelo, com os momentos reais observados com radiotelescópios, procurando por desvios ou resíduos, ou seja, discrepâncias entre os tempos teóricos previstos e os medidos/observados. Esses resíduos seriam indícios de que uma onda gravitacional passou pelo pulsar ou pela Terra. A maior sensibilidade desses projetos está na faixa de 10^{-9} a 10^{-8} Hz, que corresponde a períodos da ordem de décadas. Portanto, os 80 pulsares não precisam ser monitorados continuamente. Basta que observemos cada um, por cerca de algumas horas, a cada seis meses. Em 29 de junho de 2023, a colaboração NANOGrav (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves) anunciaram

que haviam detectado um sinal estocástico de ondas gravitacionais, ao longo dos últimos 15 anos, que provavelmente seria o fundo produzido pelas binárias de buracos negros supermassivos que existem no Universo, apesar dessa origem ainda não estar confirmada. Com este anúncio, passaram a ser duas as técnicas de tiveram sucesso, até 2023, na detecção de ondas gravitacionais: interferometria laser e pulsar timing arrays. Há alguns anos atrás, outra técnica afirmou ter realizado também uma detecção de ondas gravitacionais, mas teve que desmentir o feito, após revisão dos dados.

Foi em 2014, o grupo do projeto *Bicep2* anunciou que havia detectado ondas gravitacionais. Infelizmente, uma análise mais detalhada dos dados mostrou que isso não havia ocorrido, entretanto, essa metodologia de busca continua sendo utilizada até hoje. O que esses grupos buscam são indicações de polarização do modo B na radiação cósmica de fundo eletromagnética em micro-ondas. Elas seriam evidências de ondas gravitacionais na faixa de frequência de 10^{-18} a 10^{-15} Hz (que correspondem a comprimentos de onda da ordem do universo observável) e teriam origem no Big Bang e no período do universo em que ele sofreu a inflação e estariam registradas nos fótons que conseguiram desacoplar com a matéria quando o universo foi ficando cada vez menos denso e passou a ser transparente para esses fótons. Isso ocorreu quando o universo tinha cerca de 380 mil anos de idade – na teoria na qual ele “nasceu” no Big Bang.

Existem ainda outros métodos de detecção, porém menos explorados. São poucos e pequenos os grupos tentando esses métodos. Eles procuram detectar ondas gravitacionais em frequências mais altas (acima de 100 kHz), mas como não são previstos processos físicos/astrofísicos muito eficientes para a produção de ondas gravitacionais nessas faixas de frequências e as sensibilidades desses detectores não são muito boas ou promissoras, esses métodos não serão mencionados neste capítulo.

11.3 Fontes astrofísicas de ondas gravitacionais

Todas as tentativas de produção artificial de ondas gravitacionais pelo homem capazes de serem detectadas pelos detectores atuais estão condenadas ao fracasso. Mesmo envolvendo energias fornecidas por bombas atômicas ou de hidrogênio, as amplitudes produzidas estão ordens e ordens de magnitude aquém do detectável.

Entretanto, existem fontes astrofísicas no universo capazes de produzir sinais tão fortes em ondas gravitacionais (variações significativas de momento de quadrupolo de massa), que mesmo estando a milhões ou bilhões de anos-luz ($a - l$) da Terra, os sinais poderiam ser detectados (como foram realmente).

Existem várias fontes astrofísicas de ondas gravitacionais:

- sistemas binários compactos, tais como pares de buracos negros (estelares ou supermassivos), pares de estrelas de nêutrons ou pares envolvendo um buraco negro e uma estrela de nêutrons, tanto na sua fase orbital, como na coalescência e *ring-down*;
- sistemas binários de outras estrelas (anãs-brancas e/ou estrelas comuns);
- supernovas;
- buracos negros em oscilação, por causa de algo que caiu neles;
- estrelas de nêutrons em oscilação, por causa de algo que caiu nelas;
- estrelas de nêutrons em rotação não axialmente simétrica (presença de uma “montanha”, por exemplo);
- o Big Bang e o período inflacionário;
- objetos astrofísicos exóticos, cuja existência ainda não foi confirmada, tais como: cordas cósmicas, buracos negros primordiais, bolhas cósmicas, estrelas de bósons, nuvens de bósons e estrelas estranhas;

- fundo cosmológico produzido por um conjunto muito grande de fontes astrofísicas (sistemas binários e supernovas, principalmente);

De todas essas fontes, as primeiras a serem detectadas foram sistemas binários de buracos negros estelares, como vamos ver na próxima seção.

11.4 A astrofísica de ondas gravitacionais foi inaugurada!

Em 14 de setembro de 2015, ainda durante o período de testes de engenharia (chamado de ER8), as versões avançadas dos interferômetros LIGO (os aLIGO) detectaram um sinal forte de ondas gravitacionais vindo de uma região do céu próxima do polo sul da Terra. Foi uma surpresa, por dois aspectos: primeiro, porque os aLIGO iam entrar em operação de busca astrofísica (a chamada O1) somente a partir do dia 18 de setembro e, portanto, ninguém estava esperando uma detecção tão cedo (o fato é que eles já estavam com excelente sensibilidade); segundo, porque o sinal era muito forte ($h \sim 10^{-21}$) e com componentes em frequências (de 30 Hz a 250 Hz) exatamente na faixa de maior sensibilidade dos aLIGO. Parecia um sinal artificial introduzido no sistema de aquisição de dados, num processo conhecido por injeção de sinal, já utilizado algumas vezes para verificar se os programas computacionais construídos eram capazes de detectar sinais de ondas gravitacionais nos dados. Entretanto, foi verificado que não ocorreram injeções artificiais e após um mês de análises, os membros das colaborações LIGO e Virgo tinham mais de 5σ (cinco sigma) em significância estatística para este evento e se deram conta que estavam lidando com um sinal verdadeiro, que foi batizado de GW150914, em razão da data na qual foi detectado.

Este sinal, com duração de aproximadamente 0,2 segundos, começou a ser detectado primeiro no interferômetro de Livingston (es-

tado da Louisiana) e cerca de 7 milissegundos mais tarde no de Hanford (estado de Washington). Após a análise completa, concluiu-se que se tratava do sinal composto pelas ondas gravitacionais emitidas nas últimas ~ 5 órbitas e coalescência de dois buracos negros estelares pertencentes a um sistema binário. As massas dos buracos negros eram de aproximadamente 36 e 29 massas solares. Após a coalescência, restou um buraco negro de 62 massas solares com um spin igual a 0,65 (1 é o máximo). Cerca de 3 massas solares foram emitidas no pulso final de ondas gravitacionais! A energia libertada pelo pico do evento GW150914 foi mais do que dez vezes maior do que a luz combinada de todas as estrelas e galáxias no universo observável. A potência no pico da emissão foi de $3,6 \times 10^{56}$ erg/s. Esse evento ocorreu a uma distância de 1,3 bilhões de anos-luz da Terra. Antes do choque, os buracos negros chegaram a orbitar entre si com 60% da velocidade da luz! Imagine dois gigantes num “pega” a essa velocidade! Para os aLIGO detectarem esse evento, eles foram capazes de perceber uma variação na distância entre os espelhos de apenas $\sim 10^{-18}$ metros, o que é mil vezes menor que o diâmetro de um próton! Uma imagem dessas ondas pode ser vista na Figura 3.

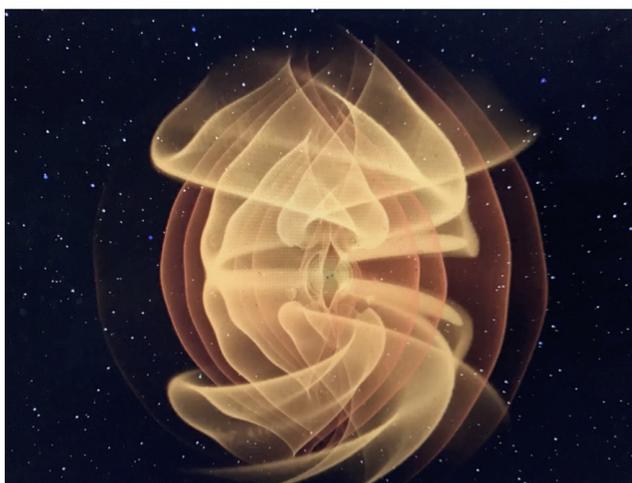


Figura 3 – Ondas gravitacionais de GW150914.

(Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=kkKDs59zcdI>.)

Em 12 de outubro de 2015 foi detectado outro evento na corrida O1, mas a significância estatística era baixa (menor que 2σ) e, portanto, não foi levado muito a sério, mas posteriormente, em uma análise de revisão, ele foi incorporado no catálogo em 2018. Porém, em 26 de dezembro de 2015, chegou outro também com significância estatística em torno de 5σ . No total, foram detectadas, até o final da corrida O2 (a qual se encerrou em 25 de agosto de 2017) e após a revisão dos dados, as últimas órbitas e coalescência de dez binárias de buracos negros (batizadas, respectivamente de GW150914, GW151012, GW151226, GW170104, GW170608, GW170729, GW170809, GW170814, GW170818, GW170823), além de uma binária de estrelas de nêutrons. Essa última binária (GW170817), detectada no dia 17 de agosto de 2017, deu um show após a coalescência das estrelas de nêutrons.

Com o evento GW150914, foi inaugurada a Astronomia ou Astrofísica de Ondas Gravitacionais, uma nova janela para se observar o universo, mas com o evento GW170817 foi inaugurada outra nova astronomia, a Astronomia Multimessageira envolvendo Ondas Gravitacionais que talvez, com mais probabilidade que a primeira, vá revolucionar o conhecimento que temos do universo.

A primeira descoberta (GW150914) foi tão importante que re-deu o prêmio Nobel de Física de 2017. Os três agraciados: Rainer Weiss, Kip S. Thorne e Barry C. Barish, representam bem a colaboração que detectou esses eventos.

11.5 O que aprendemos com as primeiras ondas gravitacionais observadas?

Como mencionado na seção anterior, até a segunda corrida observacional O2, que se encerrou em 25 de agosto de 2017, foram detectados dez eventos envolvendo pares de buracos negros e um evento envolvendo um par de estrelas de nêutrons. Na Tabela 10.1, estão resumidos os parâmetros principais obtidos para os (primei-

ros) dez pares de buracos negros detectados até O2 (outros quatro pares foram anunciados depois) por meio da análise dos sinais *chirp* (gorjeio) da evolução das suas órbitas, seguidos da coalescência e *ring down* (ressoar) devido ao choque do par.

Tabela 1 – Parâmetros dos eventos envolvendo pares de buracos negros em O1 e O2 (a-l é anos-luz). (Fonte: Elaboração do autor.)

	GW150914	GW151012	GW151226	GW170104	GW170608
Razão S/R	23,7	-	13,0	13	13
Taxa de falso alarme	(~ 400 mil anos) ⁻¹	-	(~ 400 mil anos) ⁻¹	(70 mil anos) ⁻¹	(160 mil anos) ⁻¹
M primária	35,6 M _⊙	23,3 M _⊙	13,7 M _⊙	31,0 M _⊙	10,9 M _⊙
M secundária	30,6 M _⊙	13,6 M _⊙	7,7 M _⊙	20,1 M _⊙	7,6 M _⊙
X_{eff}	-0,01	0,04	0,18	-0,04	0,03
Massa final	63,1 M _⊙	35,7 M _⊙	20,5 M _⊙	49,1 M _⊙	17,8 M _⊙
Spin final	0,69	0,67	0,74	0,66	0,69
E irradiada	3,1 M _⊙ c ²	1,5 M _⊙ c ²	1,0 M _⊙ c ²	2,2 M _⊙ c ²	0,9 M _⊙ c ²
Pico de Luminosidade	3,6 x 10 ⁵⁶ erg/s	3,2 x 10 ⁵⁶ erg/s	3,4 x 10 ⁵⁶ erg/s	3,3 x 10 ⁵⁶ erg/s	3,5 x 10 ⁵⁶ erg/s
Distância de luminosidade	430 Mpc (1,4 G a-l)	1060 Mpc (3,5 G a-l)	440 Mpc (1,4 G a-l)	960 Mpc (3,1 G a-l)	320 Mpc (1,0 G a-l)
<i>Redshift</i>	0,09	0,21	0,09	0,19	0,07
$\Delta\Omega/\text{grau}^2$	179	1555	1033	924	396
	GW170729	GW170809	GW170814	GW170818	GW170823
Razão S/R	-	-	15	-	-
Taxa de falso alarme	-	-	(140 mil anos) ⁻¹	-	-
M primária	50,6 M _⊙	35,2 M _⊙	30,7 M _⊙	35,5 M _⊙	39,6 M _⊙
M secundária	34,3 M _⊙	23,8 M _⊙	25,3 M _⊙	26,8 M _⊙	29,4 M _⊙
X_{eff}	0,36	0,07	0,07	-0,09	0,08
Massa final	80,3 M _⊙	56,4 M _⊙	53,4 M _⊙	59,8 M _⊙	65,6 M _⊙
Spin final	0,81	0,70	0,72	0,67	0,71
E irradiada	4,8 M _⊙ c ²	2,7 M _⊙ c ²	2,7 M _⊙ c ²	2,7 M _⊙ c ²	3,3 M _⊙ c ²
Pico de Luminosidade	4,2 x 10 ⁵⁶ erg/s	3,5 x 10 ⁵⁶ erg/s	3,7 x 10 ⁵⁶ erg/s	3,4 x 10 ⁵⁶ erg/s	3,6 x 10 ⁵⁶ erg/s
Distância de luminosidade	2750 Mpc (9,0 G a-l)	990 Mpc (3,2 G a-l)	580 Mpc (1,9 G a-l)	1020 Mpc (3,3 G a-l)	1850 Mpc (6,0 G a-l)
<i>Redshift</i>	0,48	0,20	0,12	0,20	0,34
$\Delta\Omega/\text{grau}^2$	1033	340	87	39	1651

Diferentemente dos sete primeiros, que foram detectados apenas pelos dois interferômetros aLIGO, GW170814 e GW170818 também foram detectados pelo interferômetro Virgo. Por essa razão, a localização desses eventos foi muito mais precisa que as dos anteriores. Se apenas usássemos as informações dos dois aLIGO, o evento GW170814 seria localizado em uma área de 1160 graus (com 90% de credibilidade). Adicionando as informações do interferômetro Virgo, a área de localização fica reduzida para apenas 87 graus!

As detecções triplas de GW170814 e GW170818 também permitiram que fosse possível testar a natureza das polarizações das ondas gravitacionais, permitindo, assim, uma nova classe de testes fenomenológicos da gravitação e da teoria da Relatividade Geral de Einstein. Foi descoberto que os dados favorecem fortemente as polarizações tensoriais puras de ondas gravitacionais, sobre as polarizações escalares ou vetoriais puras. Um resultado que vai no sentido da comprovação da relatividade geral, já que ela só prevê as componentes tensoriais (mais e cruzada).

Em média, as massas encontradas para os buracos negros detectados foram maiores do que se esperava, com base no conhecimento que tínhamos dos sistemas binários emissores de raios-X. Isso fez com que a própria teoria de evolução estelar, para explicar como esses buracos negros com mais massa foram formados, fosse colocada em cheque. Por outro lado, também foi levantada a hipótese de que esses buracos negros mais massivos não teriam origem na evolução estelar, mas seriam produtos do universo primordial, ou seja, teriam origem no nascimento do universo, como defeitos topológicos do Big Bang. Nessa hipótese, eles estariam contribuindo para uma parcela da massa da matéria escura no universo.

Essas detecções também serviram para limitar a massa da partícula gráviton, que na teoria quântica seria o quantum do campo de ondas gravitacionais e, portanto, a sua partícula mediadora. A massa do gráviton, caso ele tenha massa (a teoria da relatividade

geral postula que ele não tem, ou seja, que a massa dele é zero), não poderia ser maior que 10^{-58} kg!

Vários outros testes de teorias da gravitação (que incluem a relatividade geral) foram feitos com os resultados desses cinco eventos envolvendo binárias de buracos negros, porém eles estão fora do escopo desta apostila, em razão de serem de um nível mais técnico e avançado da física.

Distintamente de todos os dez eventos descritos anteriormente, envolvendo pares de buracos negros, o evento observado em 17 de agosto de 2017, portanto batizado de GW170817, emitiu muita radiação no espectro eletromagnético.

O evento GW170817 tratava-se das ondas gravitacionais observadas das últimas 1500 órbitas e coalescência de um par de estrelas de nêutrons. A duração do evento registrado foi de aproximadamente 56 segundos! Batendo de longe o recorde anterior de GW151226, envolvendo buracos negros, que havia demorado $\sim 1,7$ segundos! Ele também foi o mais próximo, distante “apenas” 40 Mpc (130 M a-l). Os parâmetros desse evento são apresentados na tabela 10.2, supondo que as estrelas de nêutrons não tinham muita rotação (spin).

Por ter sido detectada por três interferômetros, a localização do evento, com 90% de confiança, ficou restrita a uma área no céu relativamente pequena. Isso ajudou muito todos os outros grupos de astrônomos que tinham acordos de colaboração com as colaborações LIGO e Virgo e que observavam no espectro eletromagnético a localizarem em qual galáxia o evento ocorreu. E eles tinham muitas razões para fazerem isso. Cerca de 1,7 segundos depois do horário que os interferômetros laser haviam registrado que as estrelas de nêutrons haviam coalescido, os satélites *Fermi* (NASA) e INTEGRAL (ESA) detectaram um pulso de raios-gama. Ficava claro que se tratava de uma coalescência de estrelas de nêutrons e que elas realmente, como se suspeitava, eram a causa de *bursts* de raios-gama de curta duração. Foi um alarme geral para a comunidade de astrônomos que havia as-

sinado acordos de busca multimessageira com a Colaboração Científica LIGO. Essa comunidade, formada por cerca de 70 grupos, começou uma busca implacável por sinais eletromagnéticos nas bandas de rádio, infravermelho, óptico, ultravioleta, raios-X e por raios cósmicos e neutrinos. Tanto a busca, como os resultados da busca foram interessantíssimos e os resultados acabaram sendo publicados em vários artigos científicos, e em um deles com mais de 3700 autores.

Tabela 2 – Parâmetros do evento GW170817 (a-l é anos-luz).
(Fonte: Elaboração do autor.)

Razão S/R	32,4
Taxa de falso alarme	(1,1 milhões anos) ⁻¹
M primária	1,46 M _⊙
M secundária	1,27 M _⊙
χ_{eff}	0,00
Massa final	$\leq 2,8 M_{\odot}$
Spin final	$\leq 0,89$
E irradiada	$\geq 0,04 M_{\odot}c^2$
Pico de Luminosidade	$\geq 0,1 \times 10^{56}$ erg/s
Distância de luminosidade	40 Mpc (130 M a-l)
<i>Redshift</i>	0,01
$\Delta\Omega/\text{grau}^2$	16

O primeiro sinal eletromagnético detectado depois das ondas gravitacionais e do pulso de raios-gama foi um sinal no óptico. Ele foi encontrado pelo grupo do telescópio *Swift*, quase 11 horas depois, na galáxia NGC4993. Essa galáxia está justamente localizada dentro da área no céu que os interferômetros laser disseram ter ocor-

rido o evento e dista 130 milhões de anos-luz da Terra, a mesma distância na qual eles haviam dito que o evento ocorrera. Vários outros grupos, observando no óptico, detectaram em seguida. Entre eles estão o grupo da *Dark Energy Camera* e o do *T80 South*, ambos com participação de brasileiros (e brasileiras). Em seguida, foram detectados sinais, ainda dentro das primeiras 24 horas da coalescência, no infravermelho e no ultravioleta. Sinais em raios-X e rádio só apareceram 9 e 16 dias depois, respectivamente, quando os sinais no ultravioleta e no óptico já tinham desaparecido e o sinal em infravermelho estava por terminar. O sinal de raios-X durou apenas poucas horas. Porém, o de rádio foi o de mais longa duração. Ele durou meses, com um pico há 149 dias depois da coalescência.

A primeira conclusão de toda essa observação multimensageira, pelo fato do pulso de raios-gama ter chegado apenas 1,7 segundos depois da coalescência das duas estrelas de nêutrons, foi que a velocidade das ondas gravitacionais não pode diferir mais do que uma parte em 10^{15} da velocidade das ondas eletromagnéticas. Dessa forma, uma série de teorias de gravitação que previam diferenças de velocidades maiores do que essa, tiveram que ser descartadas ou revisadas.

As ondas gravitacionais sozinhas forneceram elementos suficientes no caso de GW170817 para se tirar três conclusões (entre outras tantas): novamente, as polarizações das ondas gravitacionais são consistentes com a natureza tensorial e a massa do gráviton não poderia ser maior que 10^{-58} kg, resultados que estão em concordância com a teoria da Relatividade Geral, e pôde-se dizer algo sobre a equação de estado da matéria nuclear de estrelas de nêutrons.

Também foi concluído, dessa vez com base nas curvas de luz no espectro eletromagnético, que o choque das duas estrelas de nêutrons desencadeou um evento chamado na literatura de *Quilonova*, o qual, no caso de GW170817, teria sido o responsável por produzir, pelo menos, $\sim 0,05$ massas solares (ou cerca de 17 mil Terras) de elementos pesados, com número atômico maior que o do ferro, in-

cluindo ouro, platina e urânio, demonstrando que coalescências de estrelas de nêutrons desempenham um papel no processo r de nucleossíntese no Universo. Finalmente, a observação de GW170817 permitiu o cálculo da constante de Hubble de modo independente dos métodos astronômicos clássicos. O resultado foi consistente com os valores obtidos anteriormente por observações no espectro eletromagnético. Precisão maiores são previstas em detecções futuras de ondas gravitacionais.

Infelizmente, não foi possível determinar se as duas estrelas de nêutrons, após coalescerem, formaram uma estrela de nêutrons mais massiva (de $\sim 2,7M_{\odot}$) ou um buraco negro. O sinal em ondas gravitacionais, que indicaria qual teria sido o produto final, foi fraco demais para ser detectado pelos interferômetros laser aLIGO e Virgo. No futuro, esses detectores e outros a serem construídos deverão estar operando com maior sensibilidade e/ou podemos ter sorte de observar coalescências mais próximas de estrelas de nêutrons.

11.6 E qual é o futuro da astrofísica de ondas gravitacionais?

Detectores de ondas gravitacionais, desde os tempos de Weber, sempre estiveram em contínuo aperfeiçoamento. Não foi diferente com o LIGO e o Virgo. Nesse processo de aperfeiçoamento, esses dois últimos acabaram detectando ondas gravitacionais de fato: o LIGO, na sua versão aLIGO, pela primeira vez em 2015, e o Virgo em 2017. Eles vão continuar a ser aperfeiçoados, com o objetivo de observar mais eventos, mais fracos e/ou mais distantes. A próxima versão do LIGO, que substituiu o aLIGO, é o A+, que entrou em operação em 1º de abril de 2019, juntamente a uma versão aperfeiçoada do Virgo avançado, na chamada *terceira corrida observacional (O3)*. Nessa versão A+ do LIGO, está sendo realizado o *squeezing* da luz laser, uma técnica que melhora a precisão das medidas e, com isso, a sensibilidade do interferômetro. O A+ vai sofrer alguns ajustes e ainda ope-

rar por mais duas corridas: O4 e O5. Depois, ele sofrerá modificações substanciais. Os espelhos de 40 kg de sílica (vidro) serão trocados por espelhos de 200 kg de silício, os quais serão resfriados e mantidos à temperatura de 123K, na qual o silício apresenta um ruído térmico muito reduzido por causa de uma variação anômala na sua expansão térmica nessa temperatura. Essa versão se chama *LIGO Voyager*, e o grupo de ondas gravitacionais do INPE (GWINPE) tem participação direta no desenvolvimento desse projeto, que deverá estar operacional em torno de 2027. Outra parte do GWINPE trabalha na identificação dos ruídos e na análise de dados e vai trabalhar em todas essas corridas, inclusive nas do *LIGO Voyager*.

A sensibilidade da versão A+ na corrida O5 será cerca de três vezes melhor em amplitude que a versão que operou em O2. Isso significa que os interferômetros LIGO A+ vão conseguir observar objetos a distâncias três vezes maiores, ou seja, volumes do universo 27 vezes maiores (o volume vai com o cubo da distância). A consequência disso é muito animadora. Ora, detectamos dez pares de buracos negros e um par de estrelas de nêutrons em O1 e O2, e 82 novos sistemas binários em O3. O5 vai ser uma corrida mais longa que O1, O2 e O3 juntas, portanto, espera-se mais de uma centena de observações para O5, e a versão *LIGO Voyager* deve observar centenas a cada ano, depois que todos os ajustes forem feitos nela.

Paralelamente à operação do LIGO Voyager será iniciada a construção de outro interferômetro, em outro local dos EUA, o chamado *Cosmic Explorer*. Além de ter, também, os espelhos resfriados, para diminuir o ruído Browniano, ele terá braços de 40 km! A previsão é que ele vai ser capaz de observar centenas de milhares de eventos em alguns anos de operação. Mas para isso, ele não pode trabalhar sozinho. Um grande interferômetro também será construído na Europa, chamado de *Einstein Telescope* ou *ET*, com braços de 10 km, em forma triangular, também com espelhos resfriados e subterrâneo, como o KAGRA japonês. Esses dois interferômetros são da chamada terceira geração (3G). Quem sabe a comunidade de cientistas latino-americanos também consiga em futuro próximo construir e operar

um interferômetro 3G na América do Sul: o SAGO (South American Gravitational wave Observatory).

Esses novos interferômetros *Cosmic Explorer* e *ET* estarão operando a partir da década de 2030, juntamente ao LISA. Outra coisa muito interessante é que binárias de buracos negros estelares e estrelas de nêutrons que o LISA detectar entrarão na faixa de detecção daqueles interferômetros de solo cerca de 10 anos depois – para coalescerem! Portanto, poderemos prever com dez anos de antecedência o momento e local exato no céu dessas coalescências, permitindo que os astrônomos/astrofísicos multimensageiros planejem com bastante antecedência programas de observação. Vai haver tempo até para submeterem projetos de observação nas agências de fomento à pesquisa! Paralelamente, as técnicas de *Pulsar Timing* e Modo B da radiação cósmica de fundo eletromagnética em micro-ondas já deverão ter mais frutos observacionais.

Dessa forma, tudo indica que o futuro para a Astrofísica de Ondas Gravitacionais no século XXI e nos subsequentes será brilhante.

Um aspecto muito interessante é que a observação de ondas gravitacionais vai permitir que se descubra se o universo “nasceu” no Big Bang ou teve uma existência anterior ao momento que dizemos ter ocorrido o Big Bang (há 13,8 bilhões de anos), isso porque, diferentemente das ondas eletromagnéticas, o universo sempre foi transparente para as ondas gravitacionais, mesmo durante a monstruosa densidade no momento do Big Bang. Dessa forma, as ondas gravitacionais poderão nos dizer exatamente o que ocorreu com o universo no seu “nascimento”. Essa informação vai estar registrada no espectro da radiação de fundo cosmológica em ondas gravitacionais. Se houve um Big Bang, o espectro vai ter uma “cara”. Se, por outro lado, houve uma fase do universo anterior, este se contraiu, mas não chegou a se reduzir a um ponto, e sim a um volume finito não nulo; o espectro de fundo vai ter outra “cara”, diferente da primeira. Sabemos identificar, com base na “cara” dos espectros de fundo, o que aconteceu com o universo. Portanto, seremos capazes

de descobrir como o universo nasceu, basta que consigamos medir esse espectro de fundo cosmológico em ondas gravitacionais.

Além de nos dizer como o universo teve início, a astronomia de ondas gravitacionais vai revolucionar o nosso conhecimento sobre física e astrofísica e, provavelmente, nos ajudar a responder às suas principais questões da atualidade, tais como a matéria escura e a energia escura.

Provavelmente uma nova física vai ser reescrita com informações obtidas por meio das observações multimensageiras envolvendo ondas gravitacionais. Certamente, engenheiros no futuro vão, com base nessa nova física, desenvolver novas tecnologias, que revolucionarão a maneira como vivemos o dia a dia.

Referências

ABBOTT, B. P. et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters (Print)*, v. 116, p. 061102-1-061102-16, 2016.

ABBOTT, B. P. et al. GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence. *Physical Review Letters (Print)*, v. 116, p. 241103-1-241103-14, 2016.

ABBOTT, B. P. et al. Binary Black Hole Mergers in the First Advanced LIGO Observing Run. *Physical Review X*, v. 6, p. 041015-1-041015-36, 2016.

ABBOTT, B. P. et al. GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2. *Physical Review Letters*, v. 118, p. 221101-1-221101-17, 2017.

ABBOTT, B. P. et al. GW170608: Observation of a 19 Solar-mass Binary Black Hole Coalescence. *The Astrophysical Journal*, v. 851, p. L35, 2017.

ABBOTT, B. P. et al. GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence. *Physical Review Letters*, v. 119, p. 141101-1 a 141101-16, 2017.

ABBOTT, B. P. et al. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. *Physical Review Letters*, v. 119, p. 161101-1 a 161101-1, 2017.

ABBOTT, B. P. et al. GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs. arXiv:1811.12907.

AGUIAR, O. D. Past, present and future of the Resonant-Mass gravitational wave detectors. *Research in Astronomy and Astrophysics*, v. 11, p. 1-42, 2011.

AGUIAR, O. D.; BARROSO, J. J.; CARVALHO N. C.; CASTRO, P. J.; DE CEDEÑO M. C. E.; DA SILVA COSTA, C. F.; DE ARAUJO, J. C. N.; EVANGELISTA, E. F. D.; FURTADO, S. R.; MIRANDA, O. D.; MORAES, P. H. R. S.; PEREIRA, E. S.; SILVEIRA, P. R.; STELLATI, C.; OLIVEIRA JR, N. F.; GRATENS, X.; DE PAULA, L. A. N.; DE SOUZA, S. T.; MARINHO JR., R. M.; OLIVEIRA, F. G.; FRAJUÇA, C.; BORTOLI, F. S.; PIRES, R.; BESSADA, D. F. A.; MAGALHÃES, N. S.; Status Report of the Schenberg Gravitational Wave Antenna. *Journal of Physics. Conference Series (Print)*, v. 363, p. 012003, 2012.

Gravitational Wave Astronomy, <https://gravitationalwaveastronomy.org/>.

LIGO, <https://www.ligo.org> e <https://www.ligo.caltech.edu>.

Virgo, <https://www.virgo-gw.eu>.

GEO600, <https://www.geo600.org>.

KAGRA, <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>.

LIGO <https://www.ligo.org> e <https://www.ligo.caltech.edu>.

ET – The Einstein Telescope, <http://www.et-gw.eu> e <https://www.etest-emr.eu>.

CE – Cosmic Explorer, <https://cosmicexplorer.org>.

LISA, <https://www.elisascience.org> e <http://lisa.nasa.gov/>.

DECIGO, http://tamago.mtk.nao.ac.jp/spacetime/decigo_e.html.

BBO - Big Bang Observer, https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang_Observer.

IPTA - International Pulsar Timing Array, <http://ipta4gw.org>.

EPTA - European Pulsar Timing Array, <http://http://www.epta.eu.org/>.

NANOGrav - North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves, <http://nanograv.org/>.

Indian Pulsar Timing Array Project, <https://inpta.gitlab.io/profile/index.html>.

PPTA – Parkes Pulsar Timing Array,
<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/ppta/>.

OzGrav, <https://www.ozgrav.org>.

TianQin, <https://en.wikipedia.org/wiki/TianQin>.

Taiji Program in Space,
https://en.wikipedia.org/wiki/Taiji_Program_in_Space.

BICEP and Keck Array,
https://en.wikipedia.org/wiki/BICEP_and_Keck_Array.

POLARBEAR – POLARization of the Background Radiation,
<https://en.wikipedia.org/wiki/POLARBEAR>.

Mario Schenberg, [https://en.wikipedia.org/wiki/Mario_Schenberg_\(Gravitational_Wave_Detector\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Mario_Schenberg_(Gravitational_Wave_Detector)).

MINIGRAIL, <http://www.minigrail.nl/>.

Ultra-High-Frequency Gravitational Wave Projects (HFGW),
<http://www.ctc.cam.ac.uk/activities/UHF-GW.php>.

<http://indico.ictp.it/event/9006/>.

<https://indico.cern.ch/event/1074510/>.

<http://www.sr.bham.ac.uk/gravity/project.php?project=MHzDetector>.

Lunar Gravitational-Wave Antenna, <https://arxiv.org/abs/2010.13726>.

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/abe5a7>.

Gravitational-wave Lunar Observatory for Cosmology,
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1475-7516/2021/06/044/meta>.

MIGO – the Matter-wave Interferometric Gravitational-wave Observatory,
<https://arxiv.org/abs/gr-qc/0312096>.

AMIGO – Astrodynamical Middle-frequency Interferometric Gravitational wave Observatory, <https://arxiv.org/abs/1909.04995>.



1ª. edição: Maio de 2024
Tiragem: 300 exemplares
Formato: 16 x 23 cm
Mancha: 12,3 x 19,9 cm
Tipografia: Crimson Pro 12
Libertinus Sans 8/10/12/14/18
Palatino Linotype 10/11/12
Impressão: Offset 90 g/m²
Gráfica: Prime Graph