

# **Capítulo 9**

## **Cosmologia**

Carlos Alexandre Wuensche

Revisado em 2017

LISTA DE FIGURAS.....	4
<b>9.1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>6</b>
9.1.1 UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA.....	6
9.1.2 O QUE É COSMOLOGIA?.....	8
<b>9.2 O UNIVERSO OBSERVÁVEL.....</b>	<b>10</b>
9.2.1 UMA VISÃO GERAL.....	11
9.2.2 LEI DE HUBBLE (OU A VELOCIDADE DE RECESSÃO DAS GALÁXIAS).....	14
9.2.3 TESTES CINEMÁTICOS: RELAÇÕES LUMINOSIDADE X REDSHIFT E DISTÂNCIA ANGULAR X REDSHIFT.....	15
9.2.4 CONTAGEM DE GALÁXIAS.....	16
9.2.5 O ARCABOUÇO TEÓRICO DE FRIEDMANN, LEMAITRE, ROBERTSON E WALKER.....	17
<b>9.3 O UNIVERSO PRIMORDIAL.....</b>	<b>19</b>
9.3.1 COMPOSIÇÃO.....	19
9.3.2 UMA BREVE HISTÓRIA TÉRMICA.....	20
9.3.3 INFLAÇÃO.....	22
9.3.4 NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL.....	24
9.3.5 A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS.....	25
<b>9.4 O UNIVERSO NÃO-HOMOGENEO.....</b>	<b>30</b>
9.4.1 COLAPSO GRAVITACIONAL.....	31

9.4.2	FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS.....	33
<b>9.5</b>	<b>O SETOR ESCURO.....</b>	<b>40</b>
9.5.1	MATÉRIA ESCURA.....	40
9.5.2	ENERGIA ESCURA .....	42
<b>9.6</b>	<b>O UNIVERSO HOJE .....</b>	<b>44</b>
9.6.1	A GEOMETRIA E EVOLUÇÃO DO UNIVERSO .....	46
9.6.2	O FUTURO DO UNIVERSO .....	48
<b>9.7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>9.8</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>52</b>

---

## LISTA DE FIGURAS

---

- Figura 9.1** – 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>).....9
- Figura 9.5** – À esquerda, o acoplamento causada pelo espalhamento Thomson obriga os fótons a percorrerem um caminho aleatório. Após a recombinação (à direita), os fótons podem ser propagar livremente pelo Universo. Fonte: <http://universeadventure.org> .....21
- Figura 9.6** – Diagrama descritivo da história do Universo. Os números na parte inferior descrevem, respectivamente, o tempo (época) e a energia (temperatura) correspondentes a cada evento. Cada linha magenta representa um grande evento na história cósmica. Da esquerda para a direita: época da Grande Unificação ( $10^{-44}$  s); inflação ( $10^{-32}$  s); desacoplamento das forças eletrofraca e forte ( $10^{-10}$  s); nucleossíntese primordial (entre  $10^{-2}$  s e 180 s); desacoplamento matéria-radiação ( $3 \times 10^5$  anos); formação de estruturas ( $1 \times 10^9$  anos); época atual ( $12 \times 10^9$  anos). Fonte: Particle Data Group, LBNL (2008).....22
- Figura 9.7** – Abundância relativa dos elementos leves em relação ao Hidrogênio. A linha vermelha central define os valores para cada um dos elementos, estimado a partir de medidas do satélite WMAP, considerando que a descrição do Universo concorda com o MCP (Fonte: <https://map.gsfc.nasa.gov/>).....25
- Figura 9.8** – Espectro de corpo negro teórico com  $T = 2,726$  K, 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> .....27
- Figura 9.9** – 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> .....28
- Figura 9.10** – 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 o período da recombinação. Fonte: Autoria própria.....29
- Figura 9.18** – 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/>.....39
- Figura 9.19** – 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 nesta imagem mostra a área do céu onde a nossa Via Láctea galáctica bloqueia a nossa visão de objetos distantes, que, nesta projeção, situa-se predominantemente ao longo das bordas da imagem. (Fonte: IPAC/Caltech) .....39
- Figura 9.20** – 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>) .....41

<b>Figura 9.21</b> – Curva de velocidade radial da nossa Galáxia espiral. Acredita-se que a diferença entre as curvas é causada pela presença de matéria escura (Fonte: <a href="http://astro.if.ufrgs.br">http://astro.if.ufrgs.br</a> ).....	42
<b>Figura 9.22</b> – Diagrama de fluxo (m-M) x 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: <a href="http://www.cfa.harvard.edu/oir/Research/supernova/HighZ.html">http://www.cfa.harvard.edu/oir/Research/supernova/HighZ.html</a> .....	44
<b>Figura 9.23</b> – Distribuição percentual dos componentes de matéria e energia no Universo.....	45
<b>Figura 9.24</b> – Comparação das diferentes geometrias no Universo (aberta, plana e fechada) e seu efeito na distribuição angular de temperaturas da RCFM. ....	47

## 9.1. 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. Nesse 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  $\Omega$ -CDM**. Discutiremos os constituintes do Universo, os principais pontos relacionados com sua origem e evolução. Finalizaremos este capítulo com uma breve discussão sobre o futuro do Universo.

### 9.1.1 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, enquanto “experimentador de técnicas mágicas”, 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 idéias egípcias, fenícias, mesopotâmias, minoanas 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 (de 800 a 1450 d.C.), a evolução do pensamento científico na civilização ocidental foi praticamente inexistente. O modelo de Ptolomeu (Universo Geocêntrico) transformou-se em dogma adotado pela religião cristã e, em consequência, pela civilização cristã. Era conveniente e alinhado com o pensamento eclesiástico da época admitir a Terra como centro do Universo. No séc. XV, o filósofo e astrônomo germânico Nicolau de Cusa (1401 – 1464) sugeriu, em seus trabalhos, imaginou 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 Galileu (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 forma quantitativa, separando-se cada vez mais da astrologia e marcando o início da chamada ciência moderna. A noção real de que um “universo” existe além do nosso sistema solar só veio aparecer no séc. XIX e a cosmologia, enquanto ciência individual, somente passou a ser considerada no séc. XX. Partiremos dessa época para nossa abordagem cosmológica.

### 9.1.2 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 vem 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-cabeças 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.

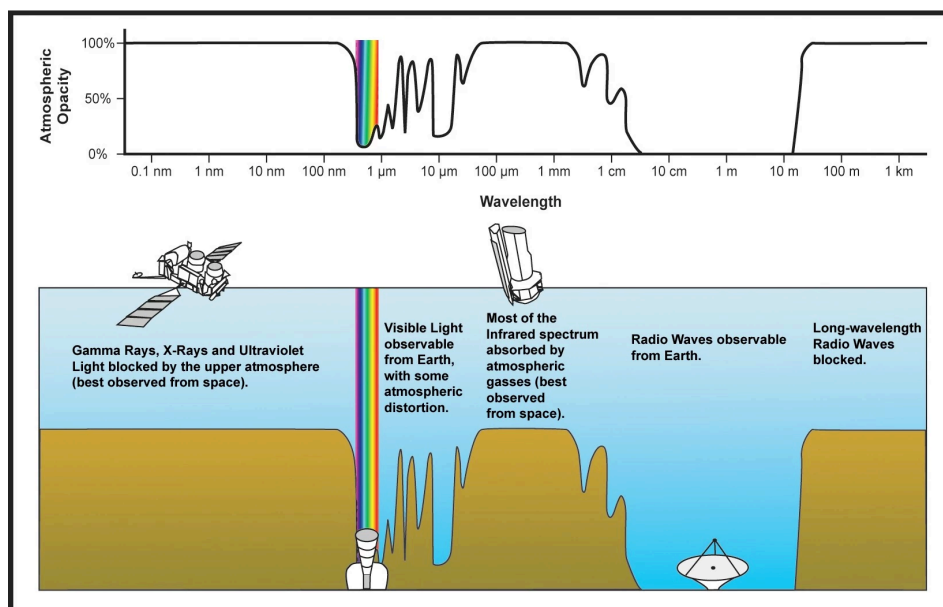
O estudo da cosmologia está intimamente ligado a uma teoria de gravitação, uma vez que a força que atua em escalas astronômicas e cosmológicas é a força gravitacional, uma das quatro forças conhecidas (além da gravitacional, as forças eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca). A principal teoria de gravitação utilizada na descrição do Universo em escalas muito grandes – maiores do que os aglomerados e super-aglomerados 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 Seção 9.3.1. 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, da região 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 9.1 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 9.1** – 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 (óptica 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 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?
- Porque 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 este 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.

## 9.2 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. Nessa 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 a partir de um estado inicial muito denso e quente, com fótons com energias inimagináveis 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?

### **9.2.1 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 radiotelescópios vão até cerca de 13 bilhões de anos luz, ou praticamente a 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 Microondas (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 forma indireta.

Temos um bom conhecimento sobre o Universo mais jovem, entre cerca de  $10^{-6}$  s e  $\sim 380$  mil anos de idade. Esse período é explorado a partir das informações que extraímos do estudo da RCFM, descoberta por Arno Penzias (1933 – ) 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,



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 90, a combinação dos resultados de medidas da RCFM com observações da distribuição de galáxias e aglomerados de galáxias, descritos com o arcabouço da TRG, possibilitaram 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, este 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 a 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 profissionais. 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  $6 \times 10^{26}$  cm, que equivalem a  $\sim 200$  milhões de parsecs ou  $\sim 6$  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 ( $\sim 13$  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.

O item 3 apresenta as evidências observacionais que sustentam o MCP, sendo que 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, a aceleração do Universo recentemente observada em medidas de supernovas tipo I e a velocidade de recessão das galáxias distantes são fortes evidências do processo de expansão do Universo. Eles serão descritos, separadamente, **nas seções 9.2.2, 9.3.4 e 9.3.5.**

## 9.2.2 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 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 estes 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** a partir do deslocamento causado pelo efeito Doppler medido nas linhas espectrais:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

em que  $\lambda$  é o comprimento de onda medido na estrela e  $\lambda_0$  é o comprimento de onda da linha em repouso, ou seja, medido no laboratório. Utilizando a relação acima, escrevemos  $v=zc$  e podemos escrever:

$$cz = v = H_0.D.$$

A constante **H<sub>0</sub>** é conhecida como constante de Hubble é  $71 \pm 6$  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 uma afastamento sistemático e isotrópico, e foram confirmadas até distâncias de centenas de milhões de pc. A **Figura 9.3** 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 calibrando as distâncias até o aglomerado de Virgem, e o resultado obtido aparece na **Figura 9.3 (esquerda)**.

Qualquer observador no 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”.

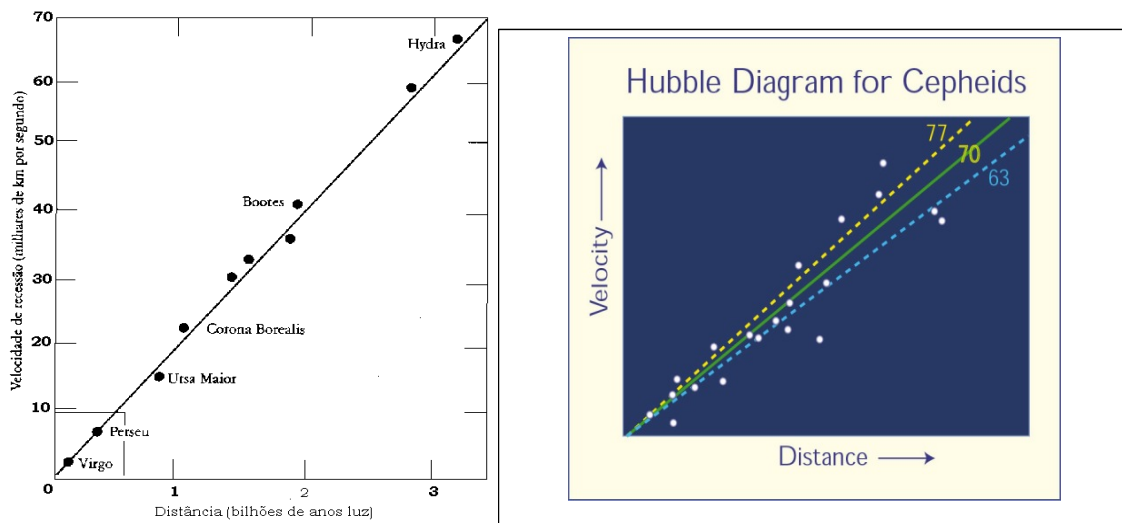
O gráfico à direita da **Figura 9.3** é baseado somente em dados coletados pelo Hubble, usando medidas de variáveis Cefeidas para determinar as distâncias. A inclinação da curva nos dá uma estimativa para a constante de Hubble de, aproximadamente, 70 km/s.Mpc. Com o Telescópio Hubble podemos, assim como Edwin Hubble, estudar Cefeidas, só que localizadas a distâncias trinta vezes maiores que as medidas feitas na década de 1920.

### 9.2.3 TESTES CINEMÁTICOS: RELAÇÕES LUMINOSIDADE X REDSHIFT E DISTÂNCIA ANGULAR X REDSHIFT

Objetos distantes podem ser estudados a partir da 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:

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

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



**Figura 9.3** – 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: adaptada de Ferris, pág. 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:

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

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

## 9.2.4 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:

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

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 seção 9.3.2**.



### 9.2.5 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 a partir das 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:

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

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,  $\Lambda$  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.

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”.

Ao descrever fenômenos no espaço tridimensional, utilizamos um sistema de coordenadas que caracteriza univocamente a posição de um corpo neste 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:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

Coordenadas esféricas ( $r, \theta, \varphi$ ) permitem descrever de maneira mais adequada a trajetória de um objeto em uma geometria esférica. Nesse caso, a equação (2) assume a forma:

$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2\theta d\phi^2.$$

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 (2) em:

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

ou

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2).$$

Em geral, relações que descrevem a distância  $ds$  entre dois pontos no espaço são chamadas de *métricas*. As métricas (4) e (5) 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: um Universo plano (ou Euclidiano, em que a soma dos ângulos internos de um triângulo é igual a 180 graus), um Universo aberto (em que a mesma soma é menor que 180 graus) ou 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 30 por Howard Robertson (1903 – 1961) e Arthur Walker (1909 – 2001) e é conhecida por métrica de Robertson-Walker:

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

Ela incorpora as três possibilidades de curvatura na variável  $\kappa$ , 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 (1) relacionam a evolução de  $R(t)$  com a pressão e a energia expressa em  $T_{\mu\nu}$ . Usando a métrica de Robertson-Walker, os termos de (1) são calculados explicitamente e, considerando que a energia no Universo pode ser tratada como um fluido perfeito, substituímos esses valores em (1) e o resultado são as chamadas equações de Friedmann, que descrevem um fluido homogêneo num Universo homogêneo e isotrópico em expansão:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 &= \frac{8\pi G\rho}{3} + \frac{\Lambda c^2}{3} + \left(\frac{\kappa c}{R}\right)^2 \\ \left(\frac{\ddot{R}}{R}\right) &= -\frac{4\pi G\rho}{3} \left(\frac{\rho + 3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3} \end{aligned}$$

Na equação (7a), o termo à esquerda descreve, de forma simplificada, a energia cinética da expansão, com dimensão de (velocidade)<sup>2</sup>. O lado direito possui diversos termos de inércia, caracterizando, de forma simplificada, as energias potenciais dos diversos parâmetros cosmológicos: a matéria-energia, representada por  $\rho$ , a energia do vácuo (sobre a qual falaremos quando tratarmos de energia escura), representada por  $\Lambda$  e a curvatura, representada por  $\kappa^2$ .

A segunda equação (7b) descreve a aceleração do Universo, e resume a física que governa a expansão, em que  $p$  a é pressão de radiação e  $\rho$  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  $\Lambda$  assume o papel da chamada Energia Escura), ocorrendo a aceleração da expansão.

## 9.3 O UNIVERSO PRIMORDIAL

### 9.3.1 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), léptons (elétrons e neutrinos), radiação e duas componentes desconhecidas, a Matéria Escura e a Energia Escura, que constituem a maior parte dessa composição. A proporção das componentes do Universo está

representada na **Figura 9.4**. Note o disco à direita, que representa TUDO o que pode ser diretamente observado por emissão de radiação eletromagnética no Universo.

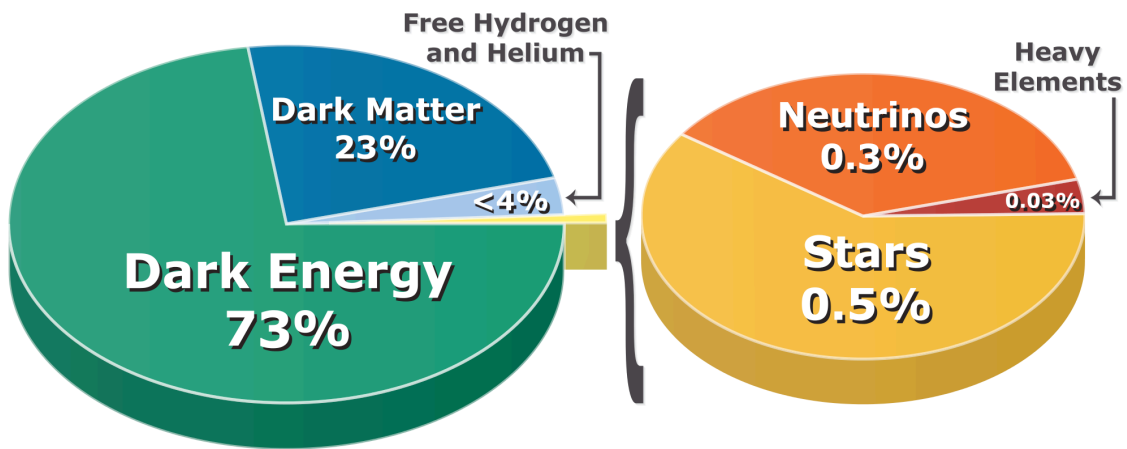


Figura 9.4 – Esquerda: Distribuição das componentes do Universo; Direita: distribuição de matéria ordinária, considerando bárions e léptons (neutrinos). Fonte: Wikimedia Commons (2017)

### 9.3.2 UMA BREVE HISTÓRIA TÉRMICA

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

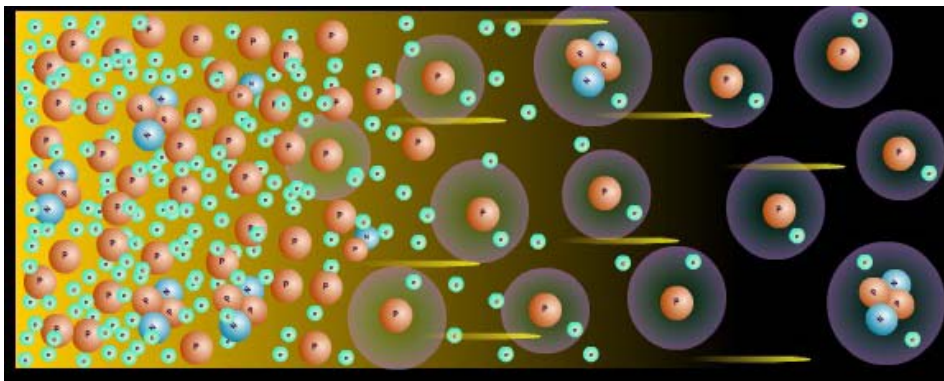
$$T_{RCFM}(z) = T_{RCFM_0}(1 + z).$$

e pode 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 neste 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 e, 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 ( $\sim 200$  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 **sec. 9.3.4**.
- 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 ( $\sim 1$  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 9.5**). 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. Este processo é conhecido como *desacoplamento*.

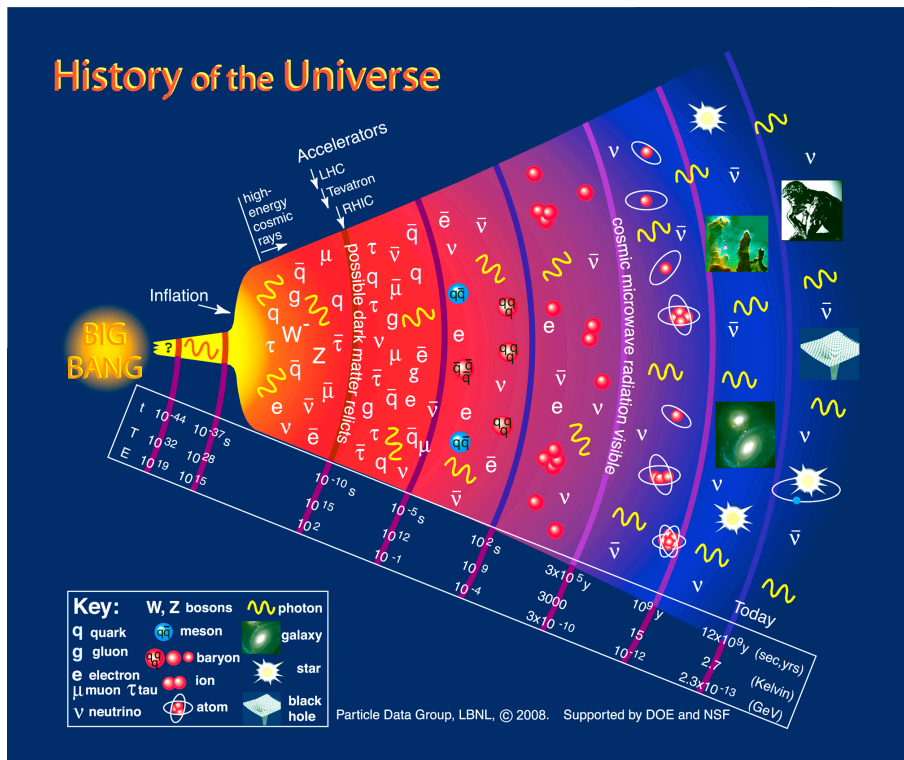


**Figura 9.5** –À esquerda, o acoplamento causada pelo espalhamento Thomson obriga os fótons a percorrerem um caminho aleatório. Após a recombinação (à direita), os fótons podem ser propagar livremente pelo Universo. Fonte: <http://universeadventure.org>.

- $10^{16} - 10^{17}$  s ( $T < 10$  K) – 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 9.6** 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.



**Figura 9.6** – Diagrama descritivo da história do Universo. Os números na parte inferior descrevem, respectivamente, o tempo (época) e a energia (temperatura) correspondentes a cada evento. Cada linha magenta representa um grande evento na história cósmica. Da esquerda para a direita: época da Grande Unificação ( $10^{-44}$  s); inflação ( $10^{-32}$  s); desacoplamento das forças eletrofraca e forte ( $10^{-10}$  s); nucleossíntese primordial (entre  $10^{-2}$  s e 180 s); desacoplamento matéria-radiação ( $3 \times 10^5$  anos); formação de estruturas ( $1 \times 10^9$  anos); época atual ( $12 \times 10^9$  anos). Fonte: Particle Data Group, LBNL (2008).

### 9.3.3 INFLAÇÃO

O Universo observável hoje é extremamente homogêneo e isotrópico e é difícil explicar porque partes do Universo muito distantes, e sem nenhuma conexão causal (ou seja, situadas a distância maior do que o raio do Universo hoje) que possa justificar essa

isotropia, tem as mesmas propriedades globais. Isso é conhecido, entre os especialistas, como *a questão do horizonte*.

A relação entre a lei de Hubble, 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 forma 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 forma 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 porque 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 (7b).

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 com as flutuações de temperatura da RCFM) e tensoriais (correlacionadas com ondas gravitacionais) e que produziriam um certo tipo de polarização na RCFM conhecido na literatura como modos B, ou rotacionais.

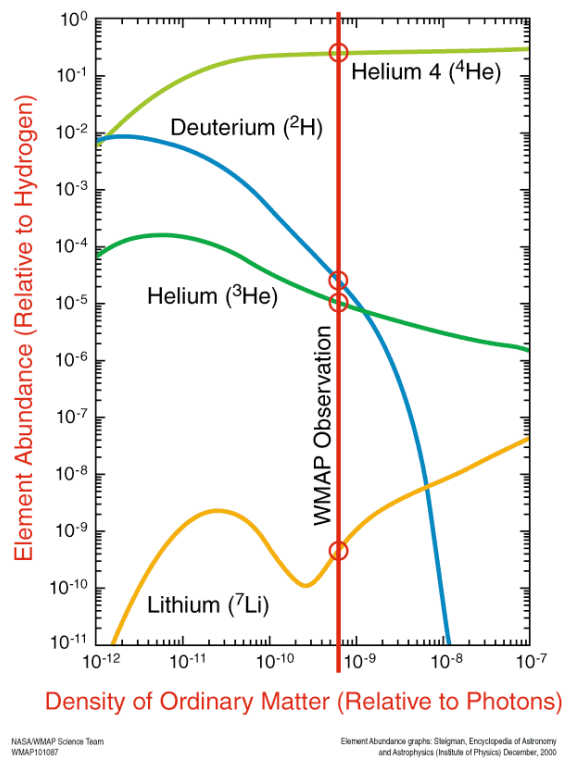
### 9.3.4 NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL

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  $\sim 200$  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 9.7**. 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.





**Figura 9.7** – Abundância relativa dos elementos leves em relação ao Hidrogênio. A linha vermelha central define os valores para cada um dos elementos, estimado a partir de medidas do satélite WMAP, considerando que a descrição do Universo concorda com o MCP (Fonte: <https://map.gsfc.nasa.gov/>).

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 através de cálculos, simulações e especulações teóricas.

### 9.3.5 A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS

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.

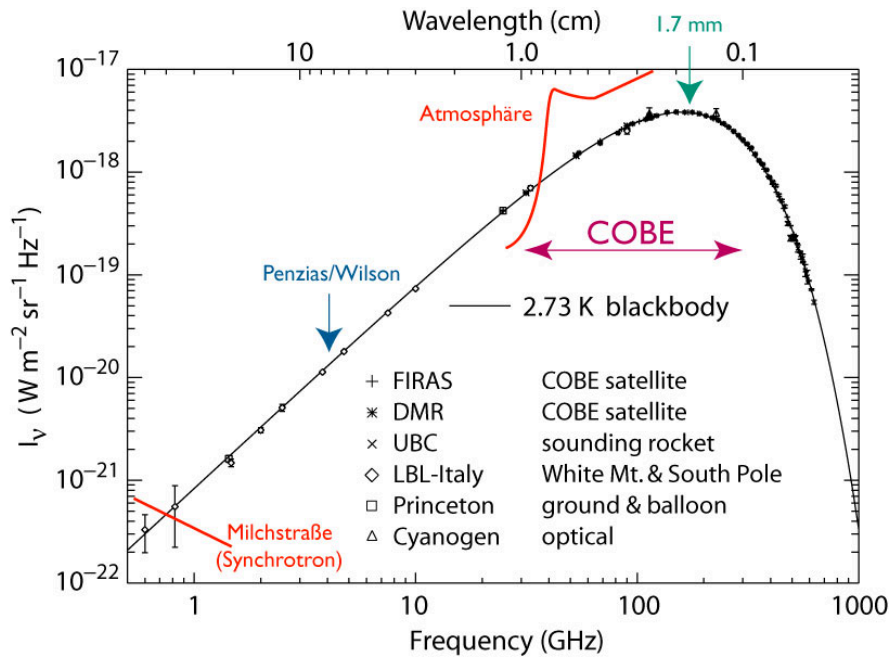
A RCFM, formada cerca de 380 mil anos após o Big Bang, foi-se resfriando por causa da expansão e hoje a temperatura medida é de 2,726 K. Essa temperatura corresponde à faixa de micro-ondas no espectro eletromagnético e é praticamente uniforme em todas as regiões do céu. Além disso, a potência dessa emissão 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 9.8**.

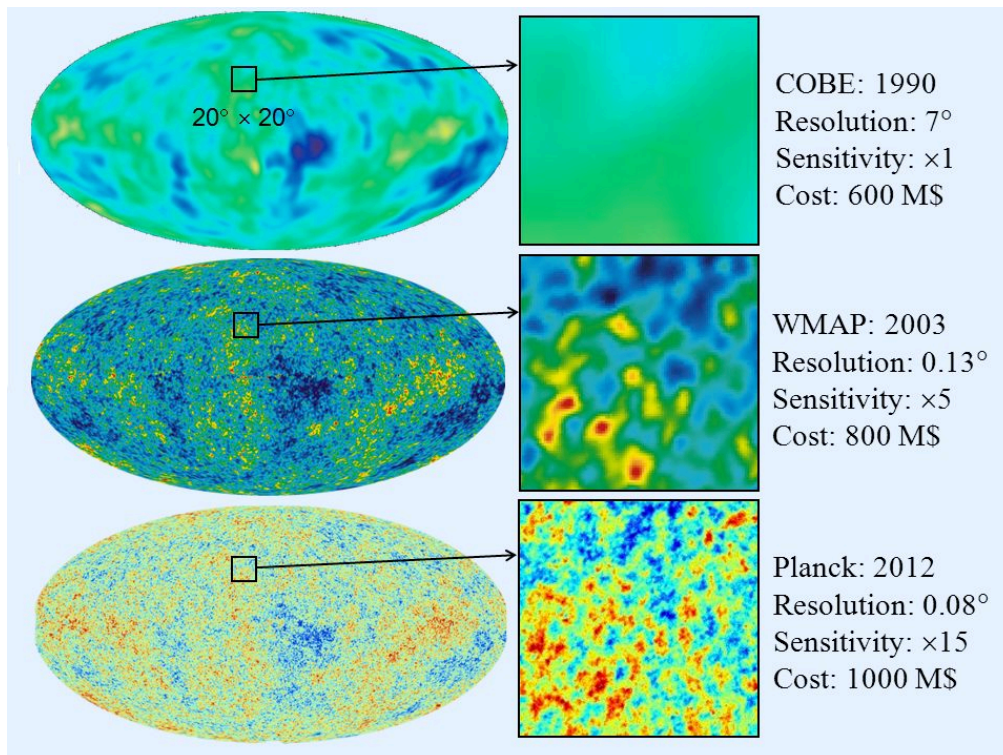
A medida do espectro indica que a temperatura da RCFM é de  $\sim 2,726 \pm 0,001$  K com o pico de emissão na faixa de micro-ondas. Como exemplo comparativo, o espectro de corpo negro do Sol, cuja temperatura é de 6000 K, possui o pico numa frequência correspondente à luz visível. O comportamento quase 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 9.8** – Espectro de corpo negro teórico com  $T = 2,726$  K, 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*, contém 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 km x 1 km, ao observa-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.

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 9.9, 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 Européia – ESA) publicaram resultados que mostram, em muito mais detalhes, exatamente o mesmo tipo de estrutura medida pelo COBE em 1992 (**Figura 9.9, centro e em baixo**).



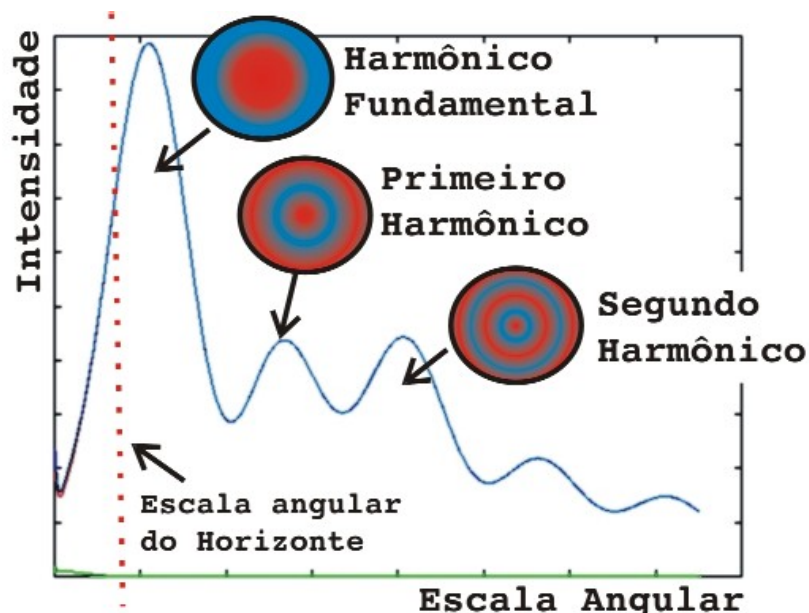
**Figura 9.9** – Comparação entre os mapas das flutuações de temperatura feitos pelos três satélites dedicados a medir a RCFM. As manchas azuis (mais frias) e vermelhas (mais quentes) correspondem às flutuações de temperatura no Universo jovem. Deve-se notar o aumento de qualidade dos mapas, correspondentes à melhor resolução dos detectores. Fonte: <http://slideplayer.com/slide/10583101>.

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 9.10**). 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 9.10** – 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 o período da recombinação. Fonte: Autoria própria.

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 70. Para a RCFM, esta 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

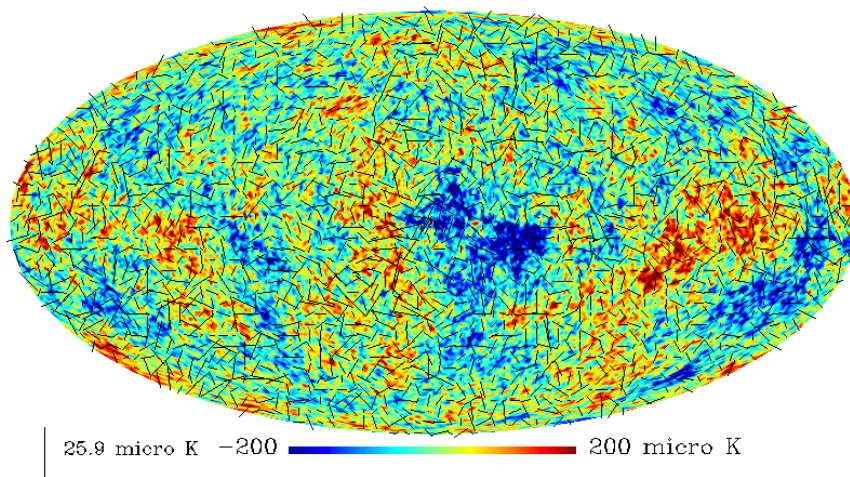
também interagiram com os fótons presentes no meio, inclusive aqueles da RCFM, polarizando-os numa taxa de  $\sim 1\%$ , escalas angulares de vários graus.

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. Este 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 9.11**). Já uma simulação dos modos rotacionais (ou tensoriais) pode ser vista na **Figura 9.12**.

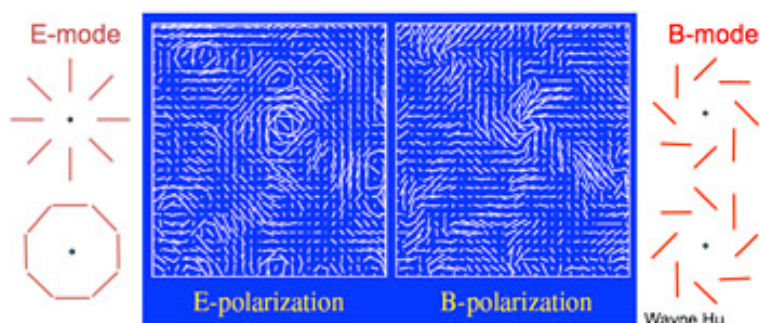
#### 9.4 O UNIVERSO NÃO-HOMOGÊNEO

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.



**Figura 9.11** – Mapa de flutuações de temperatura da RCFM, com resolução angular de  $1^\circ$ , 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 9.12** – 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 ótico da RCFM. Fonte: Wayne Hu (2001).

A dinâmica do Universo representado pelo MCP parte da 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, tem essencialmente a mesma amplitude.

As perguntas que o MCP deixa sem resposta, entretanto, são tão interessantes quanto as que ele responde: porque 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 nesse texto.

### 9.4.1 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 a partir de 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 a partir do 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  $\rho$  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 através do chamado formalismo de Jeans, que descreve o colapso de uma estrutura gravitacionalmente ligada, a partir da relação de dispersão

$$\omega^2 = c_s^2 \kappa^2 - 4\pi G \rho_0$$

em que  $c_s$  é a velocidade das perturbações no meio,  $\kappa$  é o inverso do comprimento de onda  $\lambda$  da perturbação ( $=2\pi/\lambda$ ),  $\rho_0$  é a densidade das perturbações e  $G$  é a constante de gravitação Universal. Daí, derivamos o comprimento de onda típico de uma



perturbação,  $\lambda_J$ , que define o tamanho típico que uma perturbação deve ter para resistir ao colapso gravitacional:

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

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

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

em que  $\Omega_0$  é a densidade crítica do Universo. O caso relativístico não será discutido nesse texto, mas podemos destacar o seguinte: o crescimento das perturbações depende do fator de escala, crescendo inversamente à variação do *redshift*, seguindo a forma:

$$\rho_o = \rho_0(t_0) a^{-3}(t).$$

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

$$\begin{aligned} \delta_+(t) &= \delta_+(t_i) \left( \frac{t}{t_i} \right)^{2/3} \\ \delta_-(t) &= \delta_-(t_i) \left( \frac{t}{t_i} \right)^{-1} \end{aligned}$$

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 a partir do 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.

#### 9.4.2 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 80 e 90 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.

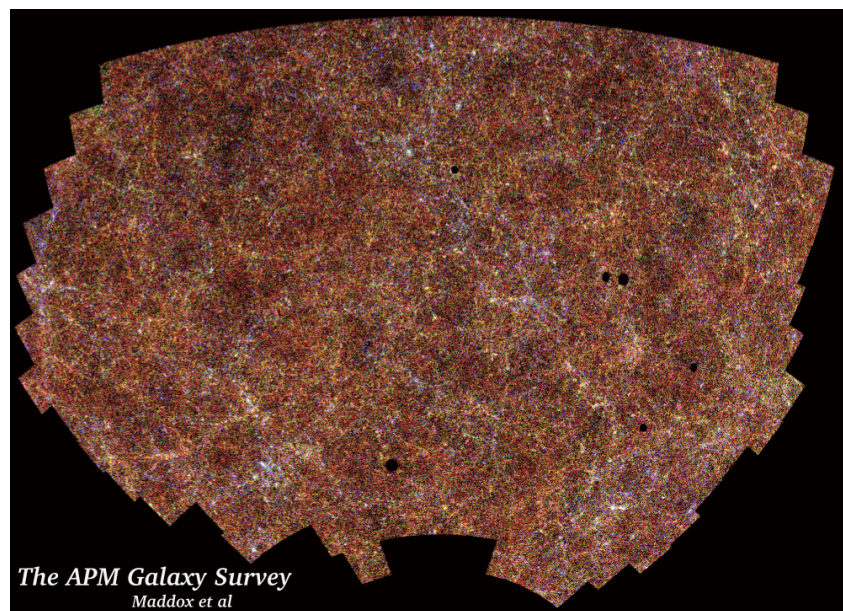
A teoria é baseada na TRG e busca resolver as equações que descrevem a evolução das perturbações de densidade do Universo. Os cálculos supõem que o Universo jovem possui perturbações aleatórias, energia escura e diversos tipos de matéria escura. As equações que descrevem o acoplamento gravitacional e outros processos físicos relevantes são resolvidas numericamente por supercomputadores. Os cálculos mostram que as flutuações crescem, conforme previsto nas teorias que envolvem instabilidades gravitacionais, conforme apresentado na seção 9.3.1. 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 da 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.

Fazer mapas de galáxias em três dimensões requer um conhecimento de quão distantes os objetos se encontram de nós. Isso é feito a partir da 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, SSDS, cada um com milhares a milhões de objetos mapeados. Em contraste, há 40 anos atrás, o número médio de galáxias com *redshift* conhecido era de apenas 2700.

Resultados recentes mostram evidências de que existem diversas estruturas com dimensões extraordinárias ( $\sim 80 \times 100 \times 100$  Mpc,  $\sim 70 \times 140 \times 140$  Mpc). Existem ainda evidências, por observações da linha de emissão do Hidrogênio da série de Lyman, de que existem objetos a distâncias até 2700 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 forma 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 pólo sul da Via Láctea (**Figura 9.13**). 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.

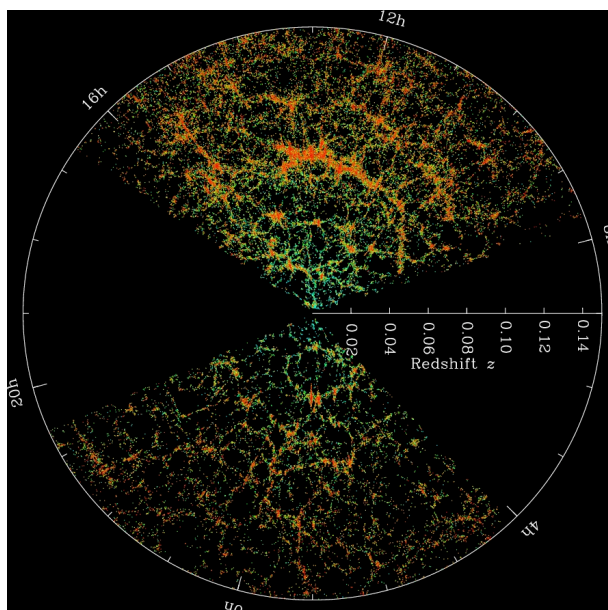


**Figura 9.13** – Levantamento APM, realizado durante a década de 80, com mais de 2 milhões de galáxias observadas. Fonte: [https://apod.nasa.gov/apod/image/0306/galaxies2\\_apm\\_big.gif](https://apod.nasa.gov/apod/image/0306/galaxies2_apm_big.gif).

A **Figura 9.14** 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 IV, que cobrirá o período 2014 – 2020. Os mapas mais recentes do SDSS são os DR13 (Data Release 13), liberados em 2013, tendo observado ao todo, mais de 4 milhões de espectros de ~ 1.5 milhões de galáxias e ~ 160.000 quasares.

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,

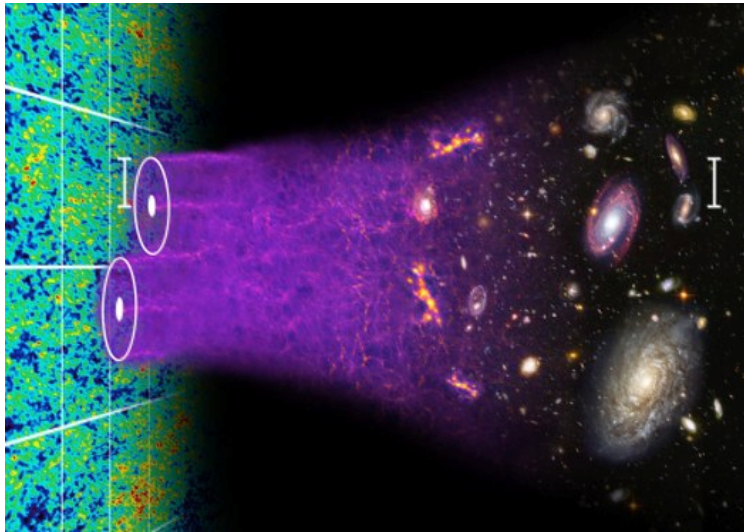


**Figura 9.14** – Mapa de redshifts de  $\sim 1.500.000$  galáxias produzido com dados do SDSS DR13. Note-se as estruturas presentes no mapa, em diferentes redshifts. Fonte: <http://www.sdss.org/science/>.

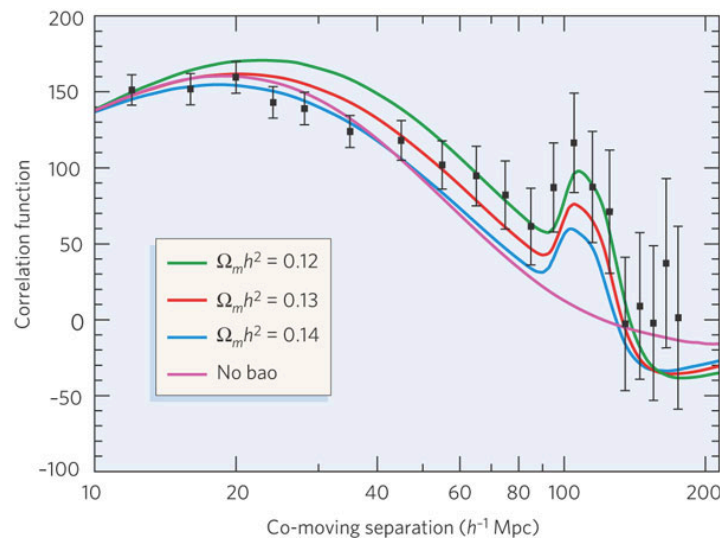
Os mapas de alta precisão do SDSS de história de expansão cósmica usando BAO têm sido especialmente importantes na quantificação desses resultados, colocando vínculos sobre a geometria e conteúdo energético do universo. BAO foram detectados primeiramente no agrupamento de galáxias pelo SDSS-I e no 2dFGRS 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  $\sim 150$  Mpc, chamada de escala acústica, e prevista a partir das medidas das flutuações de temperatura da RCFM, e podem ser usadas como régua padrão para medir a evolução das flutuações de densidade (**Figura 9.15**). O pico acústico observado em BAO permite estimar a distância entre os redshifts  $z = 0,35$  (distribuição da galáxias) e  $z = 1100$  (RCFM) com uma precisão melhor do que 4% (**Figura 9.16**).

Os levantamentos apresentados nas **Figuras 9.17** e **9.18** 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 Massachussets (EUA) e realizado pelo IPAC, mantido pelo JPL/NASA e pelo CALTECH.



**Figura 9.15** – 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>.

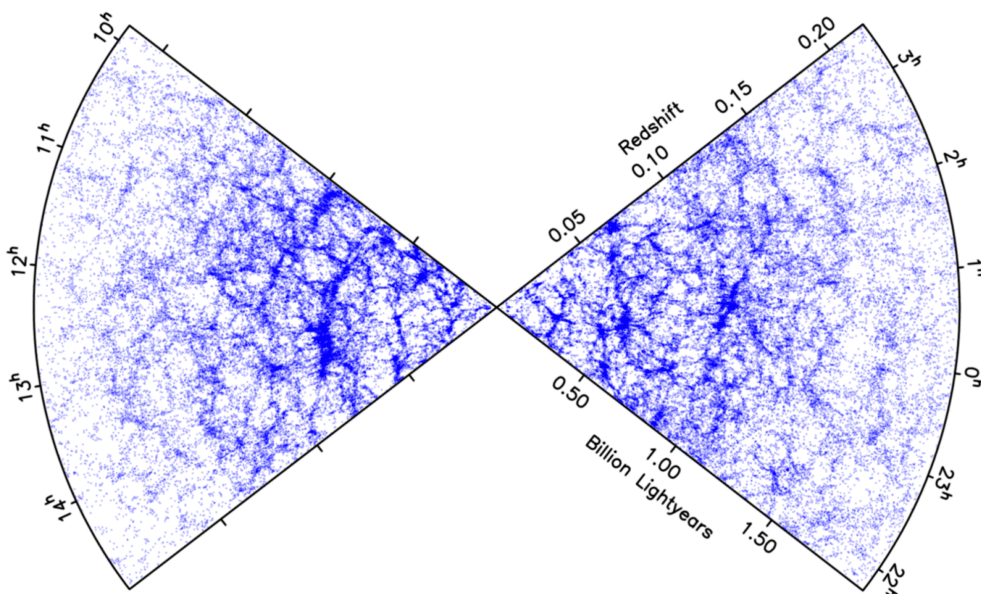


**Figura 9.16** - Função de correlação de 2 pontos da distribuição de matéria do Universo, com um pico correspondente aos BAO em  $\sim 150$  Mpc. Note-se a dependência do ajuste dos modelos à existência do pico de oscilação. Fonte: C. Bennett (Nature 2006).

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  $\sim 245.000$  objetos, principalmente galáxias, e obteve-se redshifts confiáveis para 221.000 galáxias. As galáxias cobrem uma área de aproximadamente 1500 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 9.17** 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 observações 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.

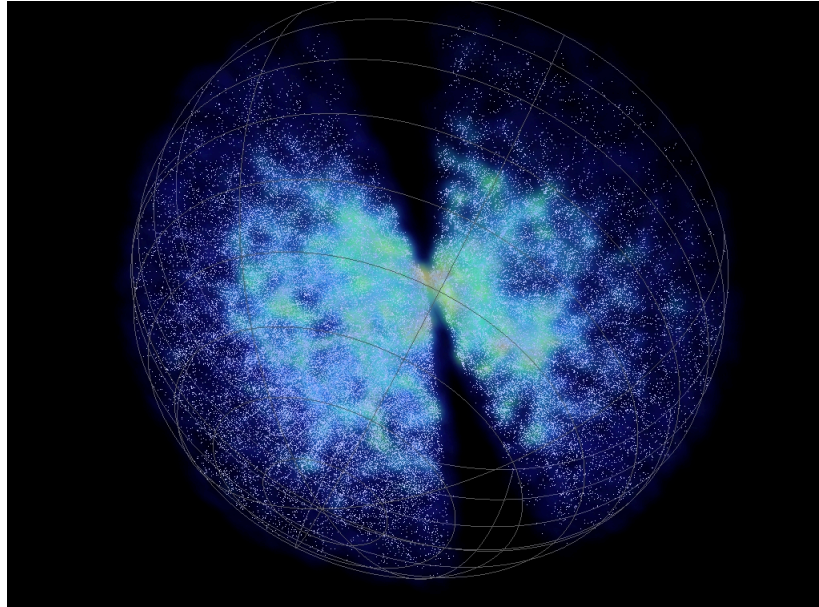


**Figura 9.17** – Distribuição das  $\sim 245.000$  galáxias do 2dF. Note-se a presença das estruturas filamentos nos mesmos redshifts observados nos levantamentos anteriores. Fonte: <http://www.roe.ac.uk/~jap/2df/>

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 9.18**). Lembramos que o Observatório Anglo-Australiano foi responsável também pelo 2dFGRS. 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 mapear o universo próximo. O 6dF mapeou quase todo o Hemisfério Sul, observando mais de 100000 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.

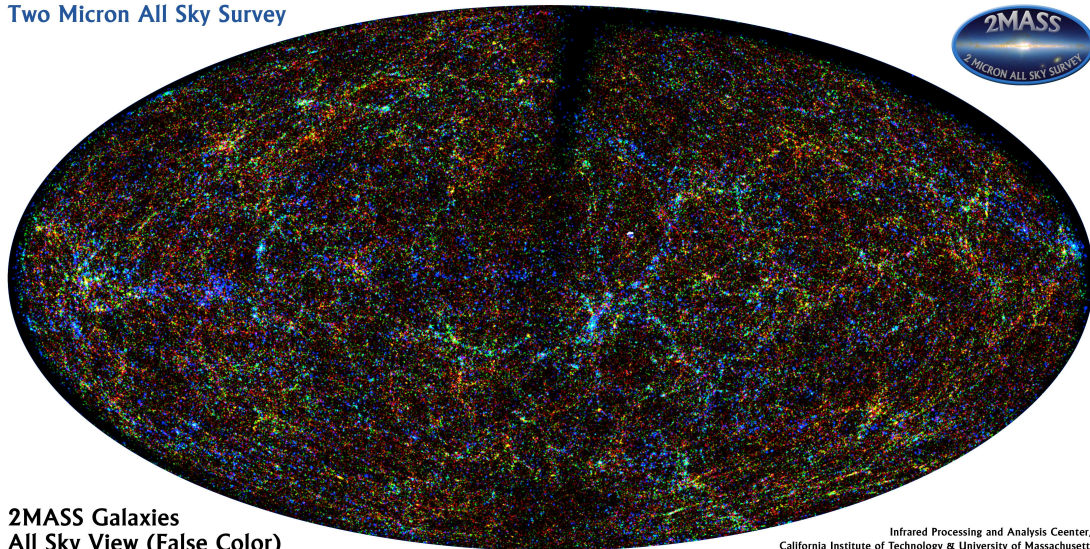
Os levantamentos anteriores foram todos feitos na faixa óptica do espectro eletromagnético. Já o 2MASS (Two Micron All Sky Survey, **Figura 9.19**) opera na faixa infravermelho e, utilizando novos detectores podem agora detectar objetos astronômicos mais de 100 milhões de vezes mais fracos do que aqueles 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 9.18** – 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



2MASS Galaxies  
All Sky View (False Color)

Infrared Processing and Analysis Center/  
California Institute of Technology & University of Massachusetts

**Figura 9.19** – 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 nesta imagem mostra a área do céu onde a nossa Via Láctea galáctica bloqueia a nossa visão de objetos distantes, que, nesta projeção,

situa-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 2MASS 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 através 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 brilhante 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 Localizado no plano Galáctico).

## 9.5 O SETOR ESCURO

### 9.5.1 MATÉRIA ESCURA

Na década de 80, os astrônomos observaram um fato bastante estranho ao estudar a curva de rotação das galáxias espirais. A **Figura 9.20** 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 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 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



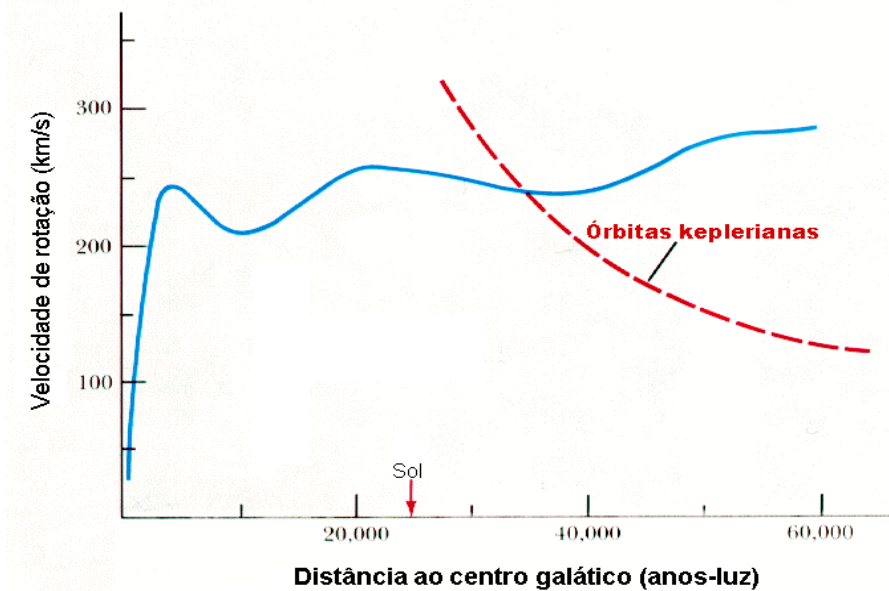
potencial gravitacional e a energia cinética de um elemento de matéria a uma distância  $r$  do centro da Galáxia, de acordo com a 2ª lei de Newton, é dada por:

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{V^2}{r}$$

determinando, a partir daí, uma relação para a massa contida dentro de uma esfera de raio  $R$ :

$$M = \frac{rV^2}{G}$$

o que sugere que, a velocidade deve aumentar proporcionalmente à massa e, fora dos limites do objeto, cair rapidamente a zero. A **Figura 9.20** 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.

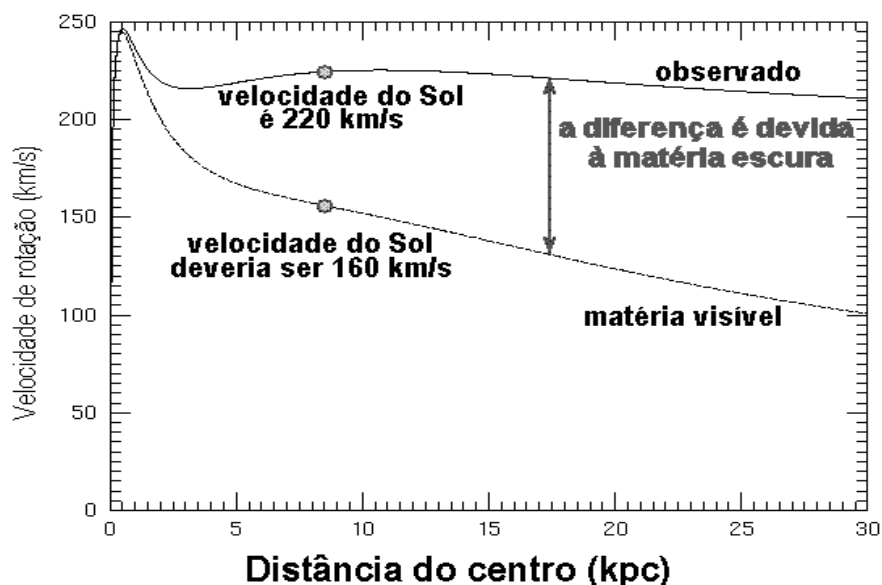


**Figura 9.20** – Curva de velocidade radial da nossa Galáxia, uma espiral. A curva azul é a combinação das curvas de disco, gás e halo e esperava-se que ela decrescesse para raios maiores que 20 ou 30 kpc, conforme a curva vermelha, de acordo com as leis de Newton (Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br>).

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 9.21**. As estimativas dinâmicas (via leis de Newton) dessa matéria não-luminosa (“escura”) indicam que ela é quase 10 vezes maior que a quantidade de matéria bariônica, como pode ser visto na Tabela 9.1.

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 constituídos 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...



**Figura 9.21** – 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>).

### 9.5.2 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 descreviam 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 garantia 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.

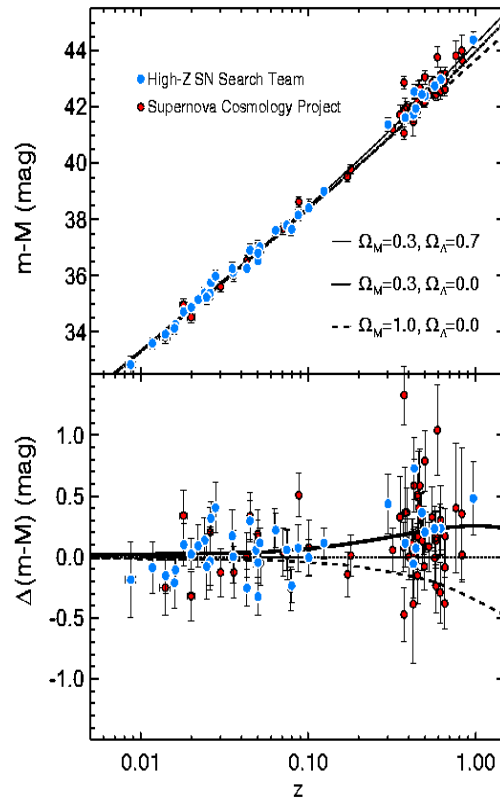
Porém, em 1929, Hubble mostrou que o Universo estava em expansão e Einstein pode descartar a Constante Cosmológica. Ela voltou à moda algumas vezes durante o séc XX, para reconciliar problemas relativos à idade do Universo e reapareceu em grande estilo no final do séc. XX, quando os grupos de Saul Perlmutter 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 no Prêmio Nobel de Física de 2011.

A **Figura 9.22** 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 9.22**, ambos os grupos concluíram que a aceleração explicava o fato 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 forma acelerada.

Uma questão que sempre perturbou os físicos desde que a existência de  $\Lambda$  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 que um par de partícula e antipartícula possa 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 a partir de considerações de mecânica quântica, temos um problema sério: essa energia é da ordem de  $10^{133}$  eV/m<sup>3</sup>. Isso é **124 ordens de magnitude maior** do que

a densidade crítica do Universo e representa uma discrepância absurda entre teoria e observação. Ainda não sabemos quase nada sobre a energia do vácuo 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 9.22** – Diagrama de fluxo ( $m-M$ ) x 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>.

## 9.6 O UNIVERSO HOJE

A combinação dos resultados observacionais discutidos nas seções anteriores constituem 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 separadas fornecem intervalos de valores maiores

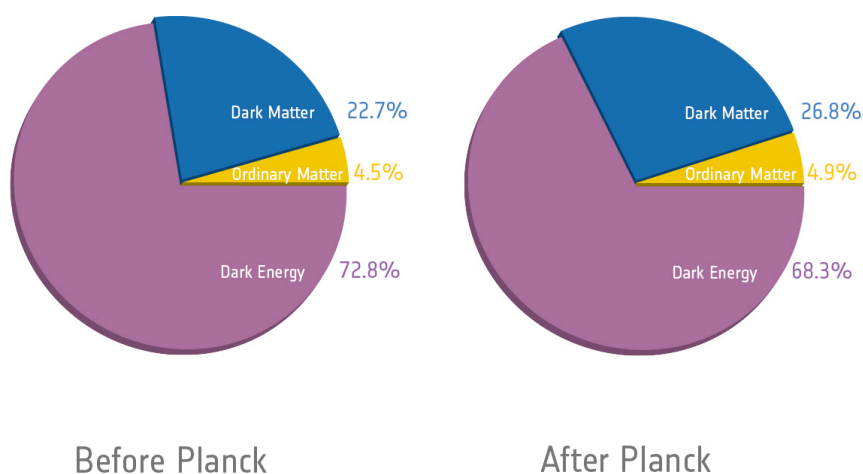
para os parâmetros cosmológicos, enquanto a combinação de duas ou mais estreitam os intervalos de possibilidades.

A **Tabela 9.1** apresenta os valores dos principais parâmetros cosmológicos, obtidos a partir de uma análise combinada entre os resultados mencionados e os principais componentes da densidade de matéria e energia estão representados na **Figura 9.23**. Isso nos permite concluir, conforme mencionado na Seção 9.6, 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.

**TABELA 9.1 – VALORES DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS COSMOLÓGICOS (FONTE: ADE ET AL., PLANCK COLLABORATION 2016)**

Parâmetro cosmológico	Valor (a)	Valor (b)
Densidade total $\Omega_t$	1,02±0,02	1,02±0,02
Densidade de bárions $\Omega_b$	0,0484±0,0002	0,0483±0,0002
Densidade de matéria escura $\Omega_{CDM}$	0,258±0,002	0,257±0,001
Densidade de matéria escura $\Omega_M$	0,308±0,012	0,306±0,007
Densidade de energia escura $\Omega_\Lambda$	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
Sigma 8	0,815±0,009	0,815±0,009
Redshift 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
Redshift 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) Somente usando dados do satélite Planck; (b) Planck + medidas do parâmetro de Hubble, de BAO e de supernovas tipo I.



**Figura 9.23**– Distribuição percentual dos componentes de matéria e energia no Universo.

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.

### 9.6.1 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:

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

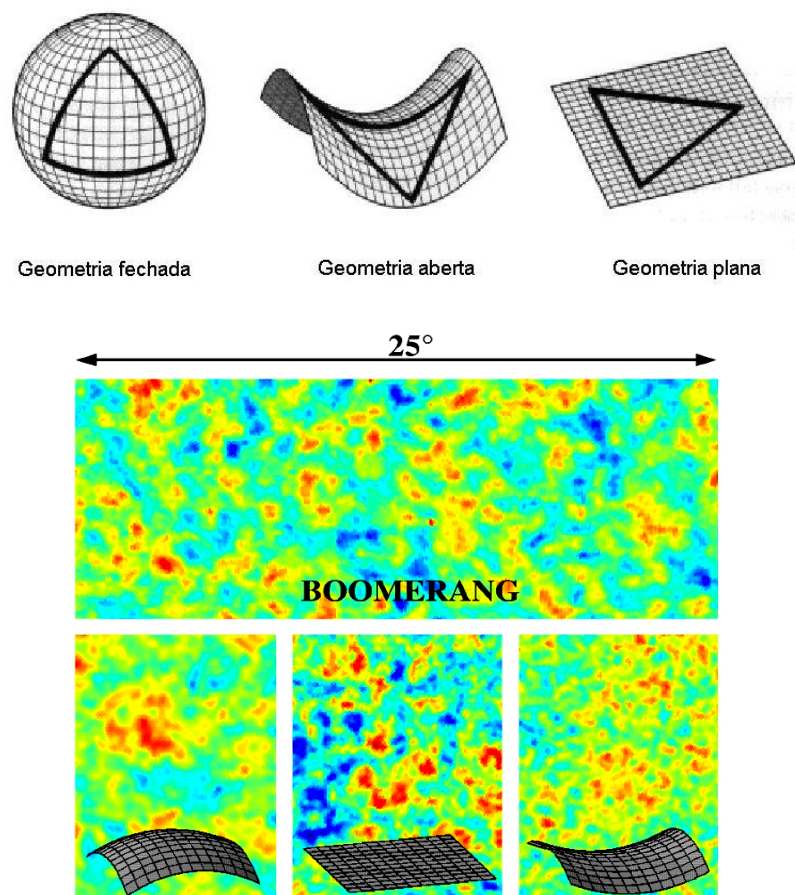
em que  $G$  é a constante de gravitação,  $\rho$  é a densidade de matéria-radiação do Universo,  $H_0$  é a constante de Hubble e  $\Omega_{crit}$  é a densidade crítica do Universo. Se a densidade for baixa, o Universo seguirá eternamente no processo de expansão em que se encontra atualmente. Entretanto, 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 seção 9.3.2, 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, diversas observações indicam que a constituição do

Universo é praticamente desconhecida, com propriedades bastante estranhas. Na verdade, a composição química de cerca de 96% do Universo é desconhecida. Dividimos essa parte desconhecida entre matéria e energia escuras e, para conhecer o destino do Universo – e, em consequência, também o nosso – é necessário determinar o que são esses componentes e como eles influenciam na 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  $180^\circ$ ; geometrias abertas ou hiperbólicas tem a soma menor que  $180^\circ$  enquanto a plana, ou Euclidiana, é a que normalmente nos lembramos, em que a soma é igual a  $180^\circ$  (**Figura 9.24**).



**Figura 9.24** – Comparação das diferentes geometrias no Universo (aberta, plana e fechada) e seu efeito na distribuição angular de temperaturas da RCFM.

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,  $\rho_c$ , a expansão seria interrompida e o movimento se inverteria, conduzindo o Universo a um colapso, ou *Big Crunch*. Para valores menores que  $\rho_c$  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.

## 9.6.2 O FUTURO DO UNIVERSO

Ao longo desse 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 então 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, feitas principalmente de prótons, devem decair, aumentando o campo de radiação e “decompondo” toda a matéria existente no Universo.

O Universo estará, 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 direito qual seja), estaremos presenciando a morte térmica do Universo. Essa 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  $\rho_c$ , 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 tem 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 que hoje observamos. Para terminar de montar o quadro, 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.

## 9.7 CONCLUSÃO

A Cosmologia é uma ciência que trabalha para tentar entender o conteúdo, estrutura e 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. Teóricos, observadores e experimentalistas estão desenvolvendo uma grande variedade de técnicas e instrumentos para responder as questões fundamentais que levantamos ao longo desse capítulo. O progresso ao longo dos

últimos 30 anos foi enorme, mas na década de 90, 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 vem medindo a RCFM e resultados dos levantamentos de galáxias mencionados na seção 9.3.2 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 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) estão fazendo ou farão novas medidas e estudar o Universo de formas inimagináveis há 40 anos atrás. 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- $\alpha$ , 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 80 e 90 que foram respondidas recentemente pelos resultados do satélite WMAP (2003 e 2006) e pelos levantamentos de objetos distantes (diversos resultados em 2004, 2005 e 2006).

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 nessa versão de 2017.

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

## 9.8 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 romancado, mas que cobre de forma 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 Publising Co., 1997. Livro texto de introdução à astronomia, com textos claros e excelentes ilustrações.
- “O Universo inflacionário”. **Alan Guth**. Editora Campus, 1997. Texto excelente escrito por um dos criadores do modelo inflacionário.

- “O passado e o presente do Cosmos”. Scientific American Brasil, Ed. Especial, no. 1, Setembro 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  $\Lambda$ 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).