



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-7177-PUD/38**

## **CAPÍTULO 7**

### **COSMOLOGIA**

Carlos Alexandre Wuensche<sup>\*\*</sup>

e-mail: alex@das.inpe.br

INPE  
São José dos Campos  
2003



# COSMOLOGIA

LISTA DE FIGURAS .....	5
LISTA DE TABELAS .....	7
<b>7.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
7.1.1 UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA .....	9
<b>7.2 O QUE É COSMOLOGIA? .....</b>	<b>11</b>
7.2.1 QUAIS PROBLEMAS A COSMOLOGIA SE PROPÕE A RESOLVER? .....	12
<b>7.3 COSMOLOGIA E O UNIVERSO EM QUE VIVEMOS .....</b>	<b>14</b>
<b>7.4 O MODELO COSMOLÓGICO PADRÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>7.5 ESTRUTURA E EVOLUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>7.6 O SUPORTE OBSERVACIONAL DO BIG BANG .....</b>	<b>23</b>
7.6.1 A VELOCIDADE DE RECESSÃO DAS GALÁXIAS .....	24
7.6.2 A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS .....	26
7.6.3 A NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL E A QUÍMICA DO UNIVERSO .....	30
<b>7.7 AS ESTRUTURAS EM GRANDE ESCALA .....</b>	<b>32</b>
<b>7.8 MATÉRIA ESCURA? ENERGIA ESCURA? .....</b>	<b>34</b>
<b>7.9 O QUADRO ATUAL... ..</b>	<b>37</b>
<b>7.10 O FUTURO DO UNIVERSO .....</b>	<b>39</b>

7.11	<b>CONCLUSÃO</b> .....	43
7.12	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	45

---

## LISTA DE FIGURAS

---

- Figura 7.1 - Espectro da radiação eletromagnética, de raios gama até ondas longas de rádio. Na faixa inferior da figura, as regiões de absorção de radiação estão marcadas em cinza. A faixa superior mostra as faixas de radiação acessíveis a observações a bordo de satélites ou foguetes, acima da atmosfera. .... 12
- Figura 7. 2 – Fotografia em corte da história do Universo. Regiões mais próximas do vértice encontram-se mais próximas de nós no tempo. .... 16
- Figura 7.3 – O desacoplamento da matéria comum da radiação. Na figura à esquerda, o espalhamento Thomson obriga os fótons a percorrerem um caminho aleatório. Após a recombinação, os fótons podem ser propagar livremente pelo Universo..... 20
- Figura 7. 4 – Levantamento de galáxias em função do seu redshift, feito nas décadas de 70 e 80. O centro da figura representa o observador, ou seja, nós. A borda do círculo representa as regiões mais distantes do Universo. .... 23
- Figura 7. 5 – A lei de Hubble é válida por todo o Universo conhecido. Este diagrama inclui os dez maiores aglomerados de galáxias. O quadrado no canto inferior esquerdo representa as galáxias observadas por Hubble ao descobrir a lei (Adaptada de Ferris, pág. 157). .... 25
- Figura 7. 6 - Diagrama distância x velocidade com medidas de Cefeidas feitas pelo Telescópio Espacial. O valor estimado para a constante de Hubble,  $H_0$ , com essas medidas, é de 70 km/s.Mpc (Ref: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/1999>)..... 26
- Figura 7. 7 – Espectro da RCFM medido pelo satélite COBE. O pico encontra-se próximo da frequência de 6 cps e possui a forma de um corpo negro a 2,7 graus K.. ... 28
- Figura 7. 8 – Mapas das flutuações de temperatura, desde as medidas de Penzias e Wilson, passando pelo COBE até o WMAP. As manchas azuis (mais frias), verdes (no mapa superior correspondem a  $T=2,726$  K e nos mapas central e inferior, a  $T=0$  K) e vermelhas (mais quentes) correspondem às flutuações de temperatura no Universo jovem ..... 29
- Figura 7. 9 – Abundância relativa dos elementos leves em relação ao hidrogênio. A soma dos valores definidos na linha cinza central, para cada um dos elementos à direita, mais a porcentagem relativa ao hidrogênio (da ordem de 0,75), deve ser igual a 1..... 31

**Figura 7. 10** – Distribuição das galáxias vizinhas até cerca de 2 milhões de anos luz.. 33

Figura 7. 11 – Curva de velocidade radial de galáxia espiral. Note que a curva com os pontos é a combinação das curvas de disco, gás e halo e esperava-se que ela decrescesse para raios maiores que 20 ou 30 kpc..... 36

**Figura 7. 12** – Distribuição dos componentes de matéria-energia..... 38

**Figura 7. 13** – Representação das possíveis geometrias do Universo. .... 39

---

## LISTA DE TABELAS

---

TABELA 7. 1 - VALORES DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS COSMOLÓGICOS  
(EM FEVEREIRO DE 2003)..... 37



## **7.1. INTRODUÇÃO**

Nas últimas décadas temos percebido um aumento rápido no conhecimento sobre a nossa vizinhança cósmica e, com as observações de objetos mais e 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 galáxias pelos céus. Nosso futuro será fortemente influenciado pela apreciação e entendimento dos processos físicos que ocorrem no Universo. Nesse capítulo apresentaremos um breve resumo da História da Astronomia e discutimos os constituintes do Universo nas maiores escalas conhecidas, bem como as idéias relativas às suas origens e evolução. Discutiremos também as observações que nos permitem formular um modelo mais consistente de Universo, conhecido como o Modelo Cosmológico Padrão (MCP) e um pequeno ensaio sobre o futuro do Universo.

### **7.1.1 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 pouco conhecidas, cada civilização adequava 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 Homem vivia. Durante o curso da História da Astronomia, a associação de corpos errantes no céu com divindades nos remete diretamente ao conceito de magia, que hoje pode ser vista como uma forma de sintetizar o mundo natural e seu relacionamento com o Homem. Nessa época o Homem vivia num mundo de relacionamentos e afinidades, cuja pretensa manipulação era feita por magos, com o objetivo de compreender e tentar dominar as forças da natureza. Nesse sentido, enquanto “experimentador de técnicas mágicas”, o mago 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 inconstantes do Homem a respeito do céu e o desenvolvimento de suas idéias sobre a natureza serviram como um fio que guiou a espécie humana através do labirinto de diferenças culturais em várias civilizações. Essas crenças agiram também como um espelho, refletindo as atitudes científicas do Homem em função 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. Contudo, a mitologia grega era bem criativa. Essa civilização sofreu muita influência dos antigos egípcios e dos babilônicos 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 a evolução cultural proporcionados pelos antigos gregos. Foram os árabes que nomearam boa parte das estrelas e constelações. Entretanto, com exceção da civilização árabe, durante a Idade Média (de 800 a 1450 d.C.), a evolução do pensamento científico foi praticamente inexistente. O modelo de Ptolomeu (Universo Geocêntrico) transformou-se em dogma adotado pela religião cristã e, em consequência, pela civilização cristã. Era muito cômodo admitir a Terra do Homem como centro do Universo. No fim da era medieval, um estudante germânico (Nicolau de Cusa) imaginou que a Terra não era o centro do Universo propondo que a mesma girava em torno de seu eixo. 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 vem com a introdução do sistema heliocêntrico para o Universo, por Nicolau Copérnico, com a utilização do telescópio por Galileu e com a descoberta das Leis de Kepler. A partir desses três marcos e das descobertas científicas de Newton (séc. XVII), a Astronomia começou a evoluir de forma quantitativa, separando-se cada vez mais da astrologia e caracterizando-se como ciência *de fato*. Entretanto, 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. É dessa época que partiremos para nosso estudo do Universo.

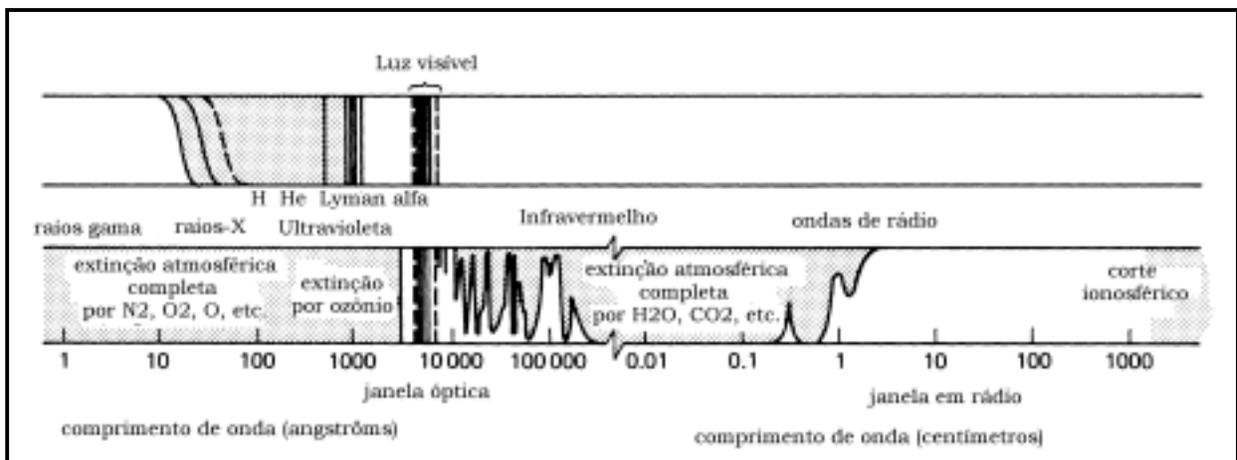
## **7.2 O QUE É COSMOLOGIA?**

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 da 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.

### 7.2.1 QUAIS PROBLEMAS A COSMOLOGIA SE PROPÕE A RESOLVER?

Ao observar o céu, o homem pode “definir” o tamanho do seu Universo em função das limitações dos instrumentos disponíveis e, conseqüentemente, da região acessível a seus olhos. Isso não quer dizer que não existam fenômenos além das regiões que conseguimos ver. Nosso universo tem as fronteiras tecnológicas (que serão superadas assim que inventarmos instrumentos mais potentes) e as impostas pelas leis físicas. Nesse caso estamos limitados pelas velocidades com que a radiação eletromagnética (que pode ser luz, ondas de rádio, raios X) se propaga.

Assim, é fácil estender o raciocínio e imaginar que existem fenômenos astronômicos que já aconteceram, mas cuja informação (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 de que a atmosfera da Terra absorve a radiação eletromagnética incidente em quase todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. As únicas “janelas” visíveis do solo são a óptica e a faixa em rádio. A Figura 7.1 apresenta um diagrama que relaciona os comprimentos de onda com o mecanismo de absorção dentro da atmosfera.



**FIGURA 7.1** - Espectro da radiação eletromagnética, de raios gama até ondas longas de rádio. Na faixa inferior da figura, as regiões de absorção de radiação estão

marcadas em cinza. A faixa superior mostra as faixas de radiação acessíveis a observações a bordo de satélites ou foguetes, acima da atmosfera

Estudando a radiação eletromagnética que essas fontes emitem, podemos estimar a que distância elas se encontram, mapear o Universo e procurar respostas para muitas das perguntas fundamentais formuladas pelo Homem desde que começou a olhar para o céu... Em última instância, sempre estaremos questionando nossas origens: quem somos? De onde viemos? Para onde vamos? Contudo, parte da motivação para o estudo da Cosmologia vem do aparecimento de questões mais recentes, relacionadas com o desenvolvimento da Ciência em geral, tais como:

- Como o Universo foi formado e como ele terminará?
- Como as estruturas de matéria em grande escala se formaram?
- Qual o tamanho e a geometria do Universo?
- O que se pode aprender sobre a física estudando o Universo?
- As leis da Física oferecem uma descrição aceitável da criação?

A pesquisa fundamental em Cosmologia envolve técnicas e instrumentação extremamente sofisticadas, muitas vezes desenvolvida 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 extremas e jamais poderão ser conseguidas na Terra, de modo que a Cosmologia associa-se à Física para utilizar o Universo como um grande laboratório. 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 idéias do Homem e fornecendo parâmetros para nortear escolhas que podem definir o futuro da nossa

espécie. Nesse sentido, a Física, a Astronomia e a Cosmologia não geram conhecimento supérfluo e irrelevante – sua importância é vital.

### **7.3 COSMOLOGIA E O UNIVERSO EM QUE VIVEMOS**

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 discutidas as maiores escalas de distância em que a matéria consegue se agrupar. Elas são também as maiores observadas pelo homem e constituem o que chamamos de “Universo Observável”.

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 extremamente denso e quente, com fótons com energias inimagináveis e pares de

partículas sendo criados e aniquilados a cada instante. Como o Universo passou desse estado totalmente desorganizado (o "plasma primordial") para o estado organizado que observamos hoje, aparentemente violando a Segunda Lei da Termodinâmica? Essa é uma das perguntas que vamos tentar responder neste capítulo.

As galáxias mais próximas são brilhantes e permitem um estudo mais detalhado de suas propriedades. À medida que olhamos para objetos mais e mais distantes, fica mais difícil medir a radiação emitida e por essa razão astrônomos e cosmólogos sempre estão desenvolvendo instrumentos mais sofisticados. Olhando “mais fundo” no Universo, é possível estimar a época de nascimento e a evolução das galáxias e a sua distribuição inicial no espaço. Essa distribuição descreve as chamadas estruturas em grande escala. Não sabemos exatamente em que época isso aconteceu, porque temos muito pouca informação sobre esse período do Universo, mas sabemos que isso deve ter acontecido quando o Universo tinha entre 100 milhões e 1 bilhão de anos de idade.

Em contraste, sabemos muito mais sobre o Universo mais jovem, com cerca de 380 mil anos de idade! Esse período é explorado a partir das informações que extraímos do estudo da RCFM (doravante RCFM), descoberta por Arno Penzias e Robert Wilson em 1965, e da sua associação com o estado primordial denso e quente mencionado anteriormente.

A Figura 7.2 mostra uma fatia do Universo com a Terra, nos dias de hoje, localizada no vértice das duas regiões em forma de pizza. Conforme olhamos para pontos mais e mais longe do vértice, olhamos para objetos mais e mais distantes de nós e, como consequência, cada vez mais jovens. Propriedades dos objetos mais próximos podem ser medidas diretamente com os equipamentos disponíveis atualmente para os astrônomos, de modo que a Figura 7.2 é mais precisa no vértice. À medida que nos afastamos, nosso conhecimento baseia-se menos nas observações diretas e mais nos cálculos e no

conhecimento que temos sobre as leis da Física.

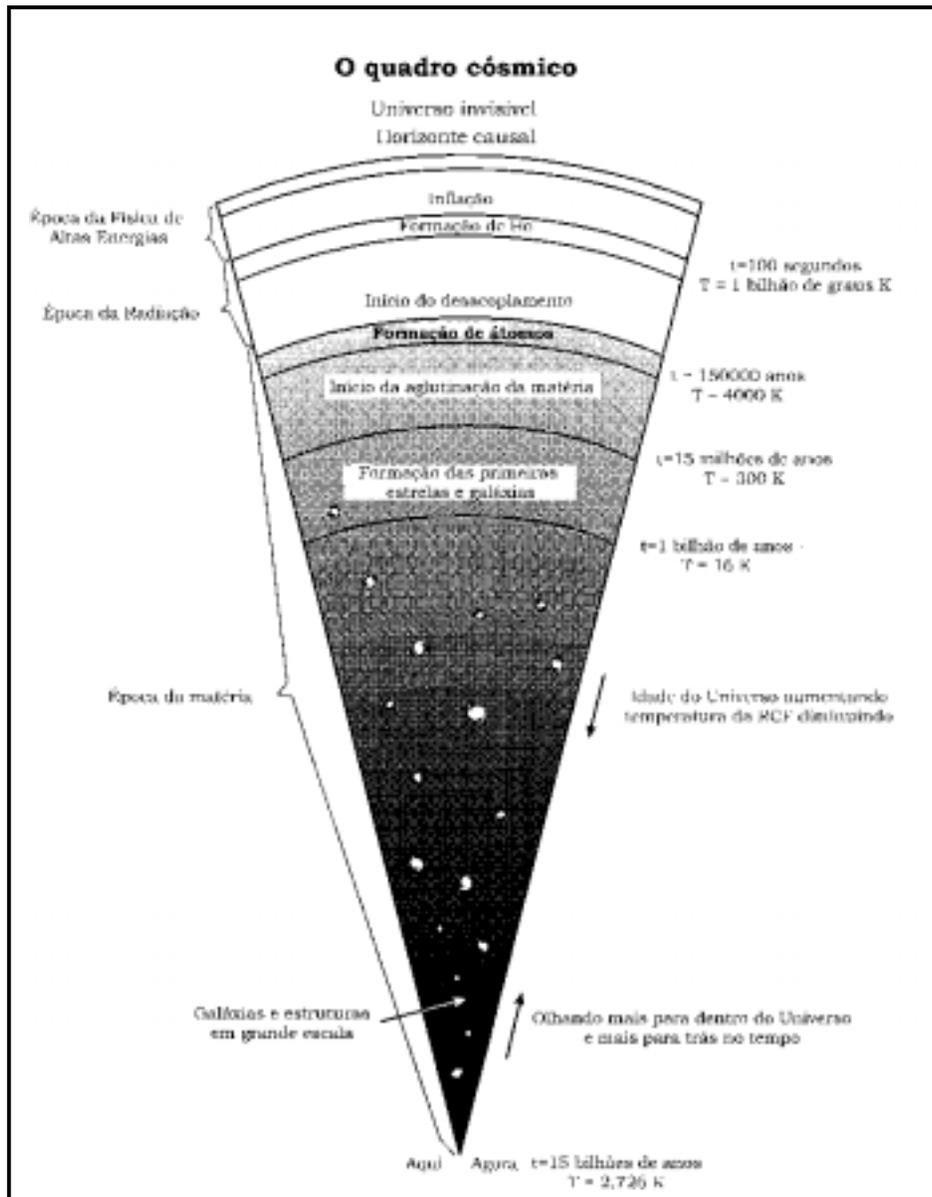


FIGURA 7. 2 – Fotografia em corte da história do Universo. Regiões mais próximas do vértice encontram-se mais próximas de nós no tempo.

## 7.4 O MODELO COSMOLÓGICO PADRÃO

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 que Albert Einstein propôs para descrever o movimento de corpos em referenciais acelerados: a chamada Teoria da Relatividade Geral, ou TRG. Recentemente, alguns fatos experimentais, em conexão com a TRG, criaram um paradigma de modelo cosmológico, conhecido como Modelo Cosmológico Padrão (doravante MCP). Embora criticado por alguns cientistas, este modelo é o que melhor descreve o Universo que observamos e baseia-se 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 o Princípio Cosmológico;
- Universo é homogêneo e isotrópico em escalas suficientemente grandes e;
- A existência da RCFM, a abundância de determinados elementos químicos leves (hidrogênio, deutério, hélio e lítio) e a observação da velocidade relativa de afastamento de galáxias distantes, que são observações que dão consistência ao MCP.

O item 1 foi enunciado por Nicolau Copérnico em fins do século XV e vem sendo utilizado na imensa 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 da 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 distâncias de galáxias (os “redshift surveys”, feitos em instituições como o Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics – CfA e o 2dF). A homogeneidade e isotropia do Universo começam a ser verificadas a partir de distâncias da ordem de 600 milhões de anos luz ( $\sim 6 \times 10^{26}$  cm, que equivalem a  $\sim 6$  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 e a velocidade de recessão das galáxias distantes é a maior evidência do processo de expansão do Universo.

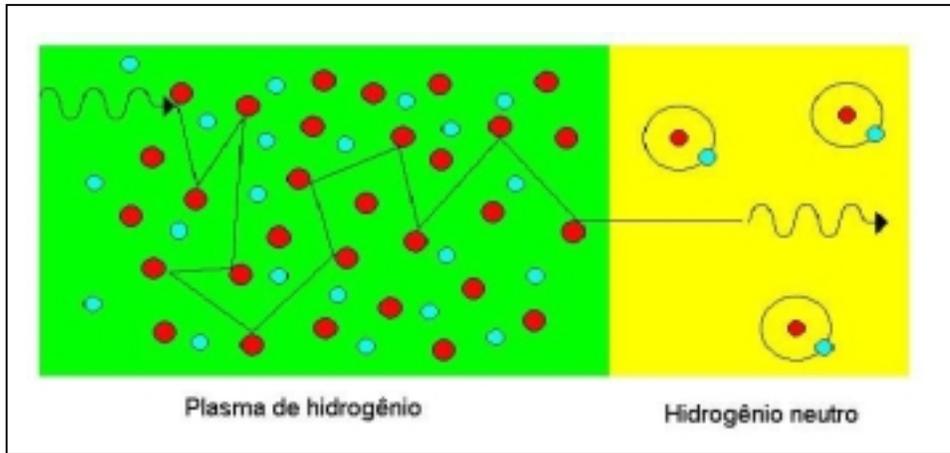
O cenário previsto pelo MCP, baseado nos pontos acima, sugere que o Universo foi criado há cerca de 13,7 bilhões de anos, a partir de um estado de densidade, temperatura e pressão infinitas. Esse processo é conhecido como BIG BANG (Grande Explosão) e o Universo começou a expandir-se e resfriar-se a partir desse instante, considerado o “instante zero ( $t=0$ )”. Todas as referências a intervalos de tempo cosmológicos são feitas, em geral, 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. Após a temperatura cair para valores abaixo de 1 bilhão de graus K, 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 a partir das quais nosso organismo é formado). 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 combinação de prótons e nêutrons deu origem aos primeiros elementos químicos formados no Universo: deutério (D), hélio (He) e lítio (Li). Com o Universo em expansão e conseqüente resfriamento, a temperatura atingiu o valor de 3000 K, 380 mil anos após a explosão. Nesse momento, prótons e elétrons - que encontravam-se livres até então - começaram a combinar-se para formar átomos de hidrogênio e o plasma de matéria e radiação deixou de existir. 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 7.3). 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*. Devido ao processo de expansão, a temperatura dos fótons da RCFM vem decrescendo proporcionalmente à taxa de expansão, mas mantendo exatamente as mesmas características. Hoje sua temperatura é de aproximadamente 2,726 graus K, sendo praticamente uniforme em todo Universo.

Como a variação de temperatura é inversamente proporcional à taxa de expansão, podemos estimar o aumento relativo do tamanho do Universo nesse período. Se a temperatura na época do desacoplamento entre a matéria e a radiação era cerca de 3000 K, e a temperatura atual é da ordem de 3 K (a temperatura equivalente de um objeto imerso em hélio líquido), o fator de decréscimo foi 1000 (3000/3). Logo, o Universo

hoje é mil vezes maior que na época da recombinação. Por outro lado, a partir dessa época a matéria estava livre para condensar-se em estruturas que evoluíram nas galáxias que hoje observamos, já que a pressão exercida pela energia dos fótons não mais estava presente. Os átomos puderam então se associar, aumentando a atração gravitacional e o colapso das nuvens de hidrogênio primordial, criando as primeiras estruturas do Universo.



**Figura 7.3** – O desacoplamento da matéria comum da radiação. Na figura à esquerda, o espalhamento Thomson obriga os fótons a percorrerem um caminho aleatório. Após a recombinação, os fótons podem ser propagar livremente pelo Universo.

Uma das sugestões mais atraentes (e também a mais simples) para explicar esse processo de formação é que a gravidade foi atraindo matéria para regiões que eram inicialmente um pouco mais densas que suas vizinhanças. Durante 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.

O quadro acima pode ser resumido da seguinte maneira: a dinâmica do Universo pode ser descrita pela Teoria da Relatividade Geral e o suporte observacional é dado pelas observações da RCFM, da velocidade de recessão das Galáxias 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?

## **7.5 ESTRUTURA E EVOLUÇÃO**

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 ele teve um começo! Nosso primeiro desafio é medir seu tamanho, idade e forma. 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 dessa 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 estruturas parecem ter sido formadas a partir de pequenos desvios do equilíbrio no Universo jovem e a força da gravidade fez com que regiões mais

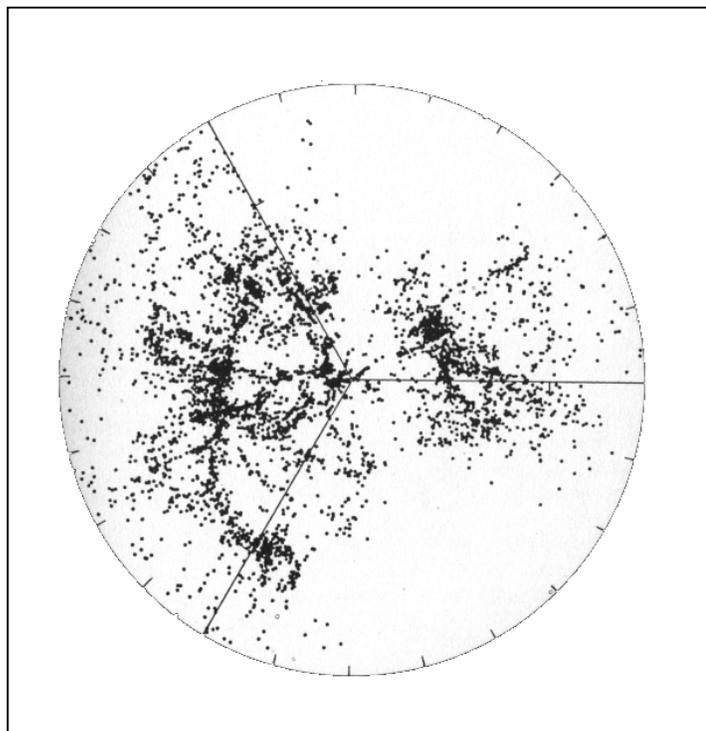
densas (com mais matéria) se expandissem mais lentamente e se aglutinassem para formar galáxias estruturas.

Ainda assim pouco sabemos sobre esse processo de evolução... Quanto tempo depois do BIG BANG a matéria levou para se aglutinar em galáxias? E quanto tempo foi gasto na formação das primeiras estrelas e planetas? O processo aconteceu das pequenas para as grandes estruturas, com estrelas e aglomerados de estrelas se formando primeiro e se juntando para formar galáxias (uma evolução hierárquica conhecida como “bottom-up”), ou aconteceu ao contrário, com os enormes superaglomerados se fragmentando em nuvens menores que formaram estruturas do tamanho das galáxias (conhecido também como “top-down”)?

O destino do Universo será determinado pela sua densidade média, que está, por sua vez, ligado à geometria e à taxa de expansão. 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 um certo valor crítico (da ordem de  $10^{-29}$  g.cm<sup>-3</sup>), a força da gravidade poderá ser capaz de frear e mesmo reverter esse processo de expansão, fazendo com que o Universo se contraia e, eventualmente, termine sua “vida” numa grande contração. Finalmente, ainda existem as fortes evidências que o Universo é composto de algo desconhecido, com propriedades bastante estranhas; na verdade, cerca de 97% da composição química do Universo é desconhecida. Dividimos essa parte desconhecida entre matéria e energia escuras: os termos serão explicados mais a frente. Como 97% da composição do Universo é constituída de matéria e energia escuras, para conhecer seu destino – e o nosso também – é necessário determinar o que são esses componentes e como eles influenciam na dinâmica do Universo.

## 7.6 O SUPORTE OBSERVACIONAL DO BIG BANG

Embora a intensidade da RCFM seja extremamente uniforme em todo o céu, a distribuição local de galáxias é extremamente irregular, com flutuações na densidade de galáxias por volume sendo extremamente alta. Mapas dessa distribuição, feitos a partir da medida de seus “redshifts”, revelam um padrão notável de estruturas semelhantes a filamentos conectando concentrações de galáxias entremeadas com regiões vazias e aproximadamente esféricas. A Figura 7.4 é resultado de anos de levantamentos de espectros durante as décadas de 70 e 80, com telescópios relativamente modestos. Essa distribuição de galáxias, filamentos e vazios é conhecida como estrutura em grande escala. Discutiremos aqui o suporte observacional mencionado na seção anterior, cujas informações devem ser capazes de traçar o perfil de evolução do Universo desde seus primeiros instantes até o momento atual.



**FIGURA 7. 4** – Levantamento de galáxias em função do seu redshift, feito nas décadas de 70 e 80. O centro da figura representa o observador, ou seja, nós. A borda do círculo representa as regiões mais distantes do Universo.

### 7.6.1 A VELOCIDADE DE RECESSÃO DAS GALÁXIAS

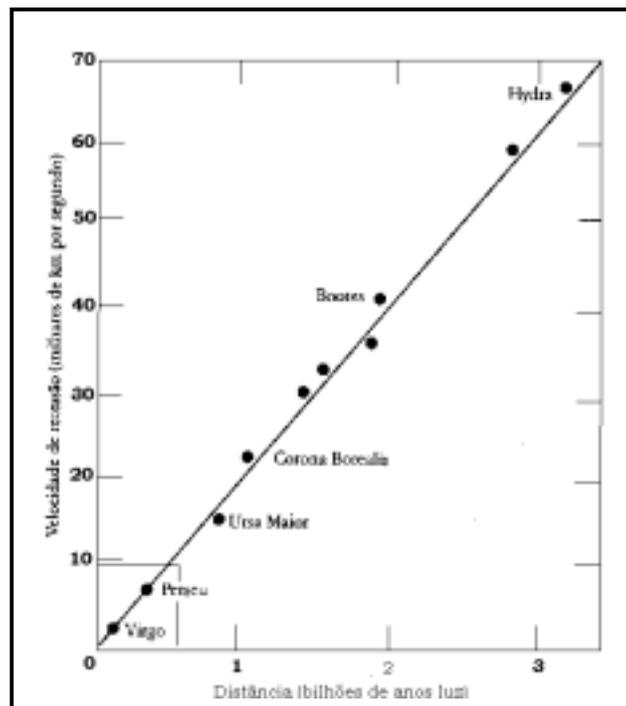
O que é, exatamente, a velocidade de recessão das galáxias? Em 1923, o astrônomo Edwin Hubble começou um estudo de Cefeidas em “nebulosas espirais”, incluindo a nossa vizinha Andrômeda (a galáxia M31), visível a olho nu. Usando a **relação período-luminosidade** para as Cefeidas, ele calculou a distância 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), escrita da forma **D = H<sub>0</sub>.v**. A constante H<sub>0</sub> é a chamada constante de Hubble. Essas observações mostraram uma “recessão” sistemática e isotrópica, e foram confirmadas até distâncias extremamente grandes. A Figura 7.5 apresenta um diagrama com as primeiras observações feitas por Hubble e a extrapolação usando medidas de objetos mais distantes. 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 (Virgo).

Qualquer observador numa galáxia distante (num Universo em expansão) e que obedece a Lei de Hubble 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. O valor atual para a constante de Hubble **H<sub>0</sub>**, estimada a partir da relação acima é de 71 km/s.Mpc. Esse valor tem dimensão [t]<sup>-1</sup>,

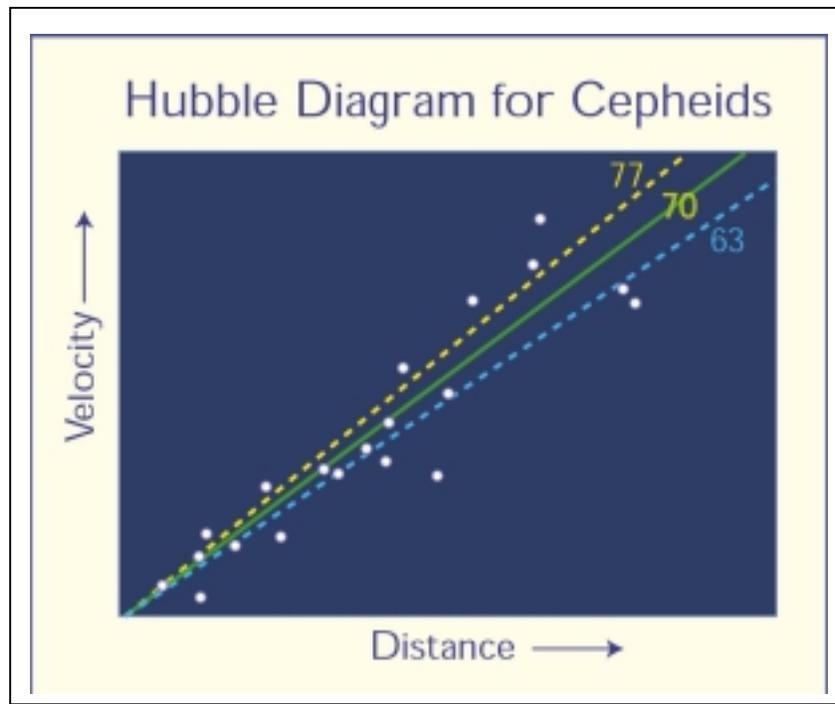
logo é possível, usando os valores medidos de  $d$  e  $v$ , fazer uma estimativa da idade do Universo (lembrando que  $1 \text{ Mpc} = 1 \text{ Mega parsec} \approx 3 \times 10^{24} \text{ cm}$ ).

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”. A Figura 7.6 é uma versão da Figura 7.5, baseada somente em dados coletados pelo Telescópio Hubble, feita usando medidas de variáveis Cefeidas para determinar as distâncias. A inclinação da curva nos dá o valor da constante de Hubble e a figura mostra que o melhor ajuste às observações é dado pelo valor  $70 \text{ km/s.Mpc}$ . Com o Telescópio Hubble podemos, assim como Edwin Hubble, estudar Cefeidas, só que localizadas a distâncias 30 vezes maiores que as medidas na época de Hubble.



**FIGURA 7. 5** – A lei de Hubble é válida por todo o Universo conhecido. Este diagrama inclui os dez maiores aglomerados de galáxias. O quadrado no canto

inferior esquerdo representa as galáxias observadas por Hubble ao descobrir a lei (Adaptada de Ferris, pág. 157).



**FIGURA 7. 6** - Diagrama distância x velocidade com medidas de Cefeidas feitas pelo Telescópio Espacial. O valor estimado para a constante de Hubble,  $H_0$ , com essas medidas, é de 70 km/s.Mpc (Ref: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/1999>).

### 7.6.2 A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS

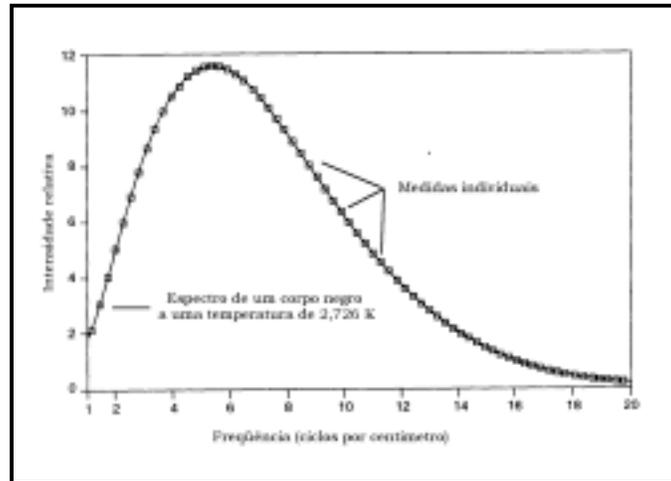
A RCFM é uma forte evidência de que o Universo, em uma época qualquer no passado, era muito mais denso e quente do que é hoje. Para produzir uma radiação com suas características, o Universo deveria ser completamente diferente do que vemos hoje nos céus. Nessa época não era possível a existência de planetas, estrelas e galáxias. Ele deveria estar completamente preenchido pelo “plasma primordial”, constituído de radiação e partículas elementares extremamente quentes.

Como já dissemos, a idade do Universo é da ordem de 14 bilhões de anos e, desde sua criação, ele vem se expandindo sem parar. A RCFM, formada cerca de 380 mil anos após a criação, foi-se resfriando por causa da expansão e hoje a temperatura medida é de 2,726 graus K. Essa temperatura corresponde à faixa de microondas no espectro eletromagnético e vem de 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.

O estudo da RCFM é feito medindo-se essa emissão ao longo desse intervalo de frequências e em todas as direções do céu. Das medidas feitas desde sua descoberta (há quase 40 anos atrás), concluímos que ela tem praticamente as mesmas características de quando foi criada, exceto pela temperatura, que vem abaixando por causa da expansão do Universo. A evolução posterior do Universo, durante o processo de formação de estruturas não afetou a RCFM. Ela é considerada um resíduo cósmico praticamente intocado, e nos dá uma excelente oportunidade de estudar os detalhes do Universo jovem. Para que os cosmólogos sejam capazes de entender a origem e a evolução das estruturas que vemos hoje no Universo, é essencial que saibam como eram as condições físicas que existiam naquela época; as características da RCFM são diretamente dependentes dessas condições, de modo que estudar a RCFM certamente ajuda a entender melhor a física do Universo jovem.

O espectro da RCFM pode ser entendido como um conjunto de medidas da intensidade da RCFM em diferentes frequências. O melhor resultado até a presente data foi obtido pelo satélite COBE e pode ser visto na Figura 7.7. O MCP prevê que a RCFM deve ter um espectro bem peculiar, conhecido entre os físicos como espectro de corpo negro, cuja forma bem definida depende somente da temperatura do corpo emissor. Essa é a primeira característica marcante da RCFM: possuir um espectro de corpo negro a temperatura de 2,726 graus K! O pico dessa curva fica na faixa de microondas; o espectro de corpo negro do Sol, cuja temperatura é de 6000 K, possui o pico numa

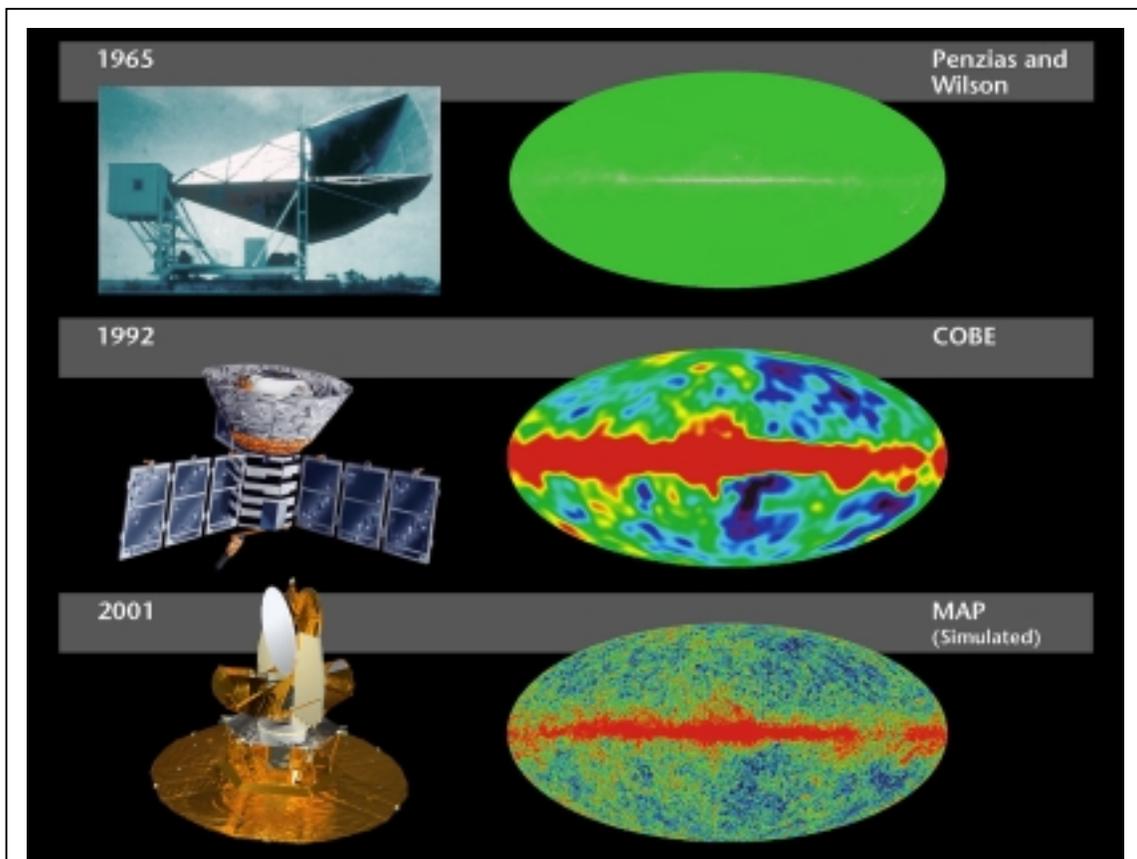
frequência correspondente à luz visível. A explicação mais simples para a forma de corpo negro do espectro da RCFM é que o Universo todo se encontrava a uma mesma temperatura durante os primeiros instantes de sua história. O espaço foi todo preenchido rapidamente com gás quente e partículas, todos à mesma temperatura, mas que se expandiam e resfriavam rapidamente.



**FIGURA 7. 7** – Espectro da RCFM medido pelo satélite COBE. O pico encontra-se próximo da frequência de 6 cps e possui a forma de um corpo negro a 2,7 graus K.

A segunda característica importante da RCFM é a existência de pequenas variações, em cada ponto do céu, na temperatura de 2,726 K. Essas variações, também chamadas de anisotropias, contém informação sobre a distribuição da matéria no Universo jovem. Os cosmólogos estimaram que a amplitude das anisotropias é de, aproximadamente, uma parte em 100.000 (ou, como dizem os astrônomos, da ordem de  $10^{-5}$ ). Como exemplo, podemos comparar essa amplitude a pequenas dobras de 1 mm de altura num lençol de 100 m por 100 m!!! Apesar de pequenas, acredita-se que elas estão relacionadas às sementes das estruturas extremamente complexas que vemos no céu atualmente.

Entretanto, era um fato conhecido dos cientistas que seria muito difícil explicar como o Universo passou do “plasma primordial” para o estado extremamente complexo que vemos no céu, caso não se detectasse as anisotropias da ordem de  $10^{-5}$ , ou seja, se a distribuição das temperaturas da RCFM fosse exatamente 2,726 K em todo o céu (Figura 7.8, imagem superior). Em 1992, o satélite COBE (Cosmic Background Explorer), 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 7.8, imagem central). Logo após o resultado do COBE, diversos experimentos vêm confirmando a existência de flutuações na RCFM em diferentes escalas angulares. Em 2003, um outro satélite da NASA, o WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) publicou resultados que mostravam, em detalhes, exatamente o mesmo tipo de estrutura medida em 1992 (Figura 7.8).



**FIGURA 7. 8** – Mapas das flutuações de temperatura, desde as medidas de Penzias e Wilson, passando pelo COBE até o WMAP. As manchas azuis (mais frias), verdes

(no mapa superior correspondem à  $T=2,726$  K e nos mapas central e inferior, a  $T=0$  K) e vermelhas (mais quentes) correspondem às flutuações de temperatura no Universo jovem.

A interpretação da distribuição das flutuações de temperatura está ligada às flutuações de matéria na época do Universo jovem. Devido ao acoplamento entre matéria e radiação, esperava-se que existissem oscilações no fluido, da mesma forma que o som é causado por oscilações no ar (também um fluido). Ao estudar a distribuição das anisotropias encontrou-se a consequência dessas oscilações: uma série de picos, chamados de picos acústicos, que são perfeitamente descritos pela teoria física do oscilador harmônico amortecido. Esses picos, que variam em função da abertura do telescópio utilizado (também chamada de escala angular), contém informações sobre o tipo de matéria que constitui o Universo, qual é a sua idade e se a quantidade de matéria que existe no Universo é capaz de freiar a expansão que hoje observamos.

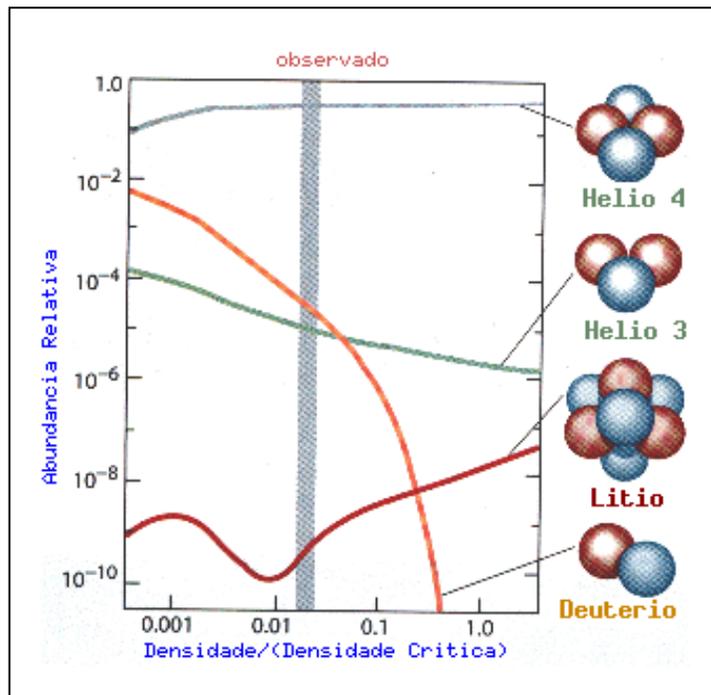
### **7.6.3 A NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL E A QUÍMICA DO UNIVERSO**

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.

A primeira análise nas condições extremas do BIG BANG foi feita por George Gamow, que descobriu que a composição do Universo jovem não deveria conter outros elementos além do H, D, He e Li, nas proporções mostradas na Figura 7.9. Já foi visto

no capítulo sobre estrelas que praticamente todos os elementos mais pesados que o hélio são formados no interior das estrelas, durante as reações nucleares que as fazem brilhar.

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. Gamow preparou este terreno, em fins da década de 40 e o MCP fornece a proporção exata observada dos dois elementos: o momento da formação ocorreu entre 0,01 e 100 segundos 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, somente podemos deduzir algo sobre o Universo através de cálculos, simulações e especulações teóricas.



**FIGURA 7. 9** – Abundância relativa dos elementos leves em relação ao hidrogênio. A soma dos valores definidos na linha cinza central, para cada um dos elementos à

direita, mais a porcentagem relativa ao hidrogênio (da ordem de 0,75), deve ser igual a 1.

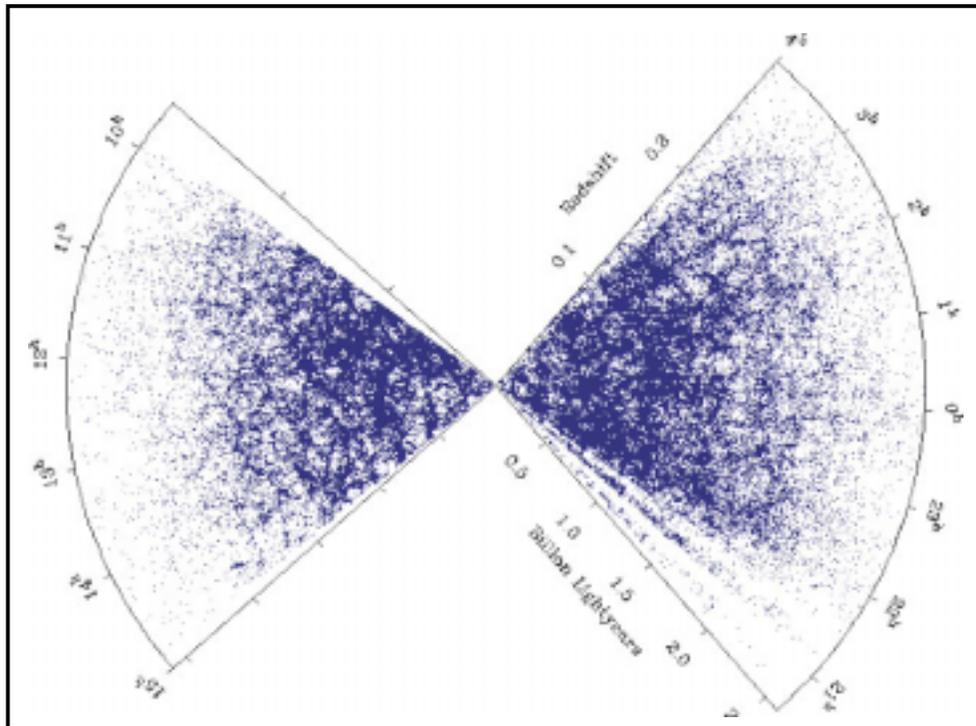
## **7.7 AS ESTRUTURAS EM GRANDE ESCALA**

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 consequência das mesmas condições a que o Universo jovem estava sujeito, no início de sua vida. 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 (note a faixa filamentar no lado esquerdo da Figura 7.4) são alguns dos resultados encontrados nos levantamentos de objetos distantes. Já a Figura 7.10 é o resultado preliminar do levantamento de redshifts conhecido como 2dF. Ela mostra, em coordenadas celestes x redshift, a posição de mais de 2 milhões de Galáxias até cerca de 0,7 Mpc da Terra.

Resultados recentes mostram evidências de que existem diversas super-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, que encontramos objetos a distâncias até 2700 Mpc, embora eles sejam poucos e espalhados pelo Universo observável (em termos de distribuição angular). De qualquer maneira, a transição entre a região homogênea do Universo (caracterizada pela RCFM) e a região irregular (caracterizada pelas estruturas em grande escala) acontece num intervalo de tempo entre aproximadamente 4-8 bilhões de anos-luz. As distâncias envolvidas no estudo das estruturas em grande escala variam de alguns milhões (tamanhos típicos de pequenos grupos de galáxias) a algumas centenas de milhões de anos luz (distâncias da ordem da “Grande Muralha”). A combinação de medidas dessas

estruturas e das flutuações de temperatura na RCFM são as ferramentas mais poderosas de que dispomos hoje para estudar o Universo jovem e responder as questões formuladas no começo desse capítulo.

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. Dispomos atualmente de alguns catálogos (2MASS, SDSS, 2dF, SSDS, etc.), cada um com vários milhões de objetos mapeados, enquanto há 20 anos atrás, o número médio de galáxias com redshift conhecido era de apenas 2700.



**Figura 7. 10** – Distribuição das galáxias vizinhas até cerca de 2 milhões de anos luz.

O objetivo de mapear essas estruturas é ir tão fundo em distância de modo a mapear galáxias perto da mesma época em que a RCFM foi criada. 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 serão equivalentes a tirar fotos do Universo em diferentes épocas e mapear então a evolução desde a época da criação da RCFM (após o desacoplamento entre a matéria e a radiação), até períodos mais recentes, quando o Universo já estava muito mais diferenciado e irregular.

A teoria por trás do estudo das estruturas em grande escala se baseia na solução de equações que descrevem a evolução do Universo. Os cálculos supõem que o Universo jovem possui flutuações aleatórias, energia escura e diversos tipos de matéria escura. As equações que descrevem o acoplamento gravitacional e outros processos físicos relevantes são resolvidas numericamente por supercomputadores. Os cálculos mostram que as flutuações crescem, conforme previsto nas teorias que envolvem instabilidades gravitacionais. Os resultados das simulações computacionais são comparados com as observações feitas, ajustes são feitos nos modelos que os computadores produzem e os cálculos são refeitos. A análise cuidadosa dessas comparações também é capaz de ajudar a selecionar valores confiáveis para a natureza da matéria escura e da energia escura no Universo.

## **7.8 MATÉRIA ESCURA? ENERGIA ESCURA?**

Na década de 80, os astrônomos observaram um fato bastante estranho ao estudar as curvas de rotação das galáxias espirais. A Figura 7.11 mostra as curvas de velocidade de rotação devidas ao disco, gás e halo de uma galáxia espiral típica. 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

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

e determinando uma relação para a massa contida dentro de uma esfera de raio  $R$ , obtemos:

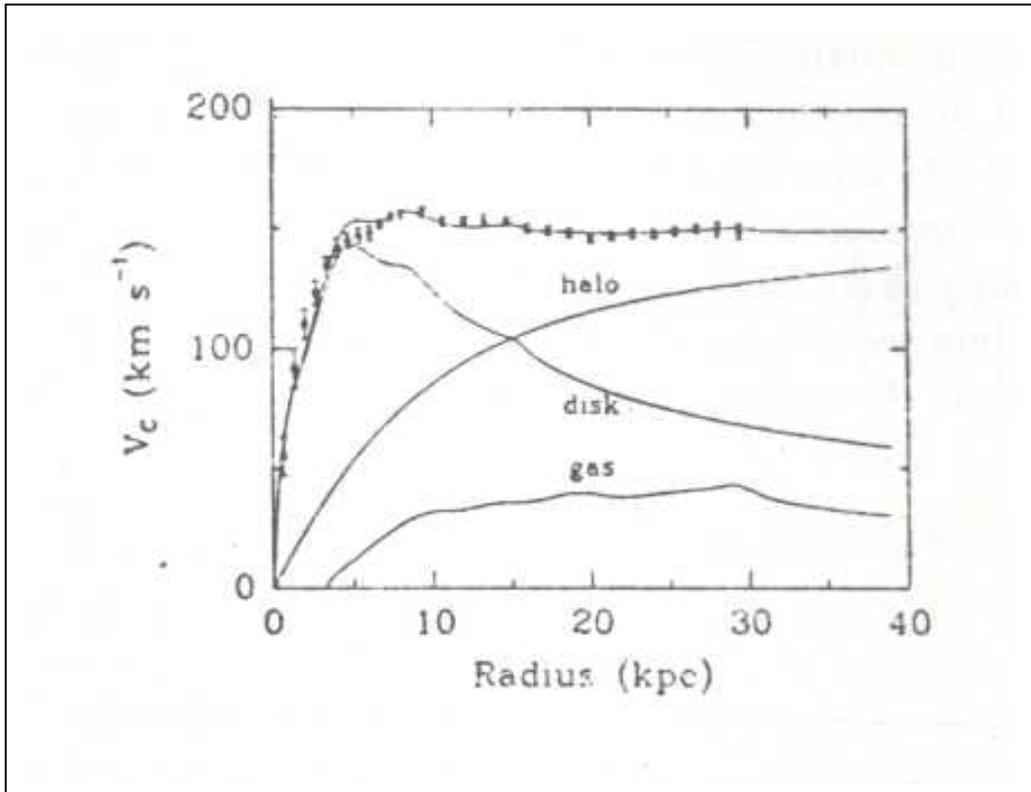
$$M = \frac{V^2 r}{G}$$

o que sugere que, a velocidade deve aumentar proporcionalmente à massa e, fora dos limites do objeto, cair rapidamente a zero. A Figura 7.11 nos mostra algo completamente diferente:

A curva combinada da Figura 7.11 deveria cair como a curva do disco, caso a matéria do halo fosse desprezível em relação à massa do disco. 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. 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 comum (bariônica), como pode ser visto na Tabela 7.1.

Pode-se argumentar que também existe matéria escura bariônica: 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. Veremos

que a matéria escura é responsável por algo da ordem de 30% 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 7. 11** – Curva de velocidade radial de galáxia espiral. Note que a curva com os pontos é a combinação das curvas de disco, gás e halo e esperava-se que ela decrescesse para raios maiores que 20 ou 30 kpc.

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 constante colocado por Einstein nas suas equações da Relatividade Geral para garantir que sua representação do Universo fosse estática. Porém, em 1929, Hubble mostrou que o Universo estava em expansão e a constante colocada por Einstein saiu de moda.

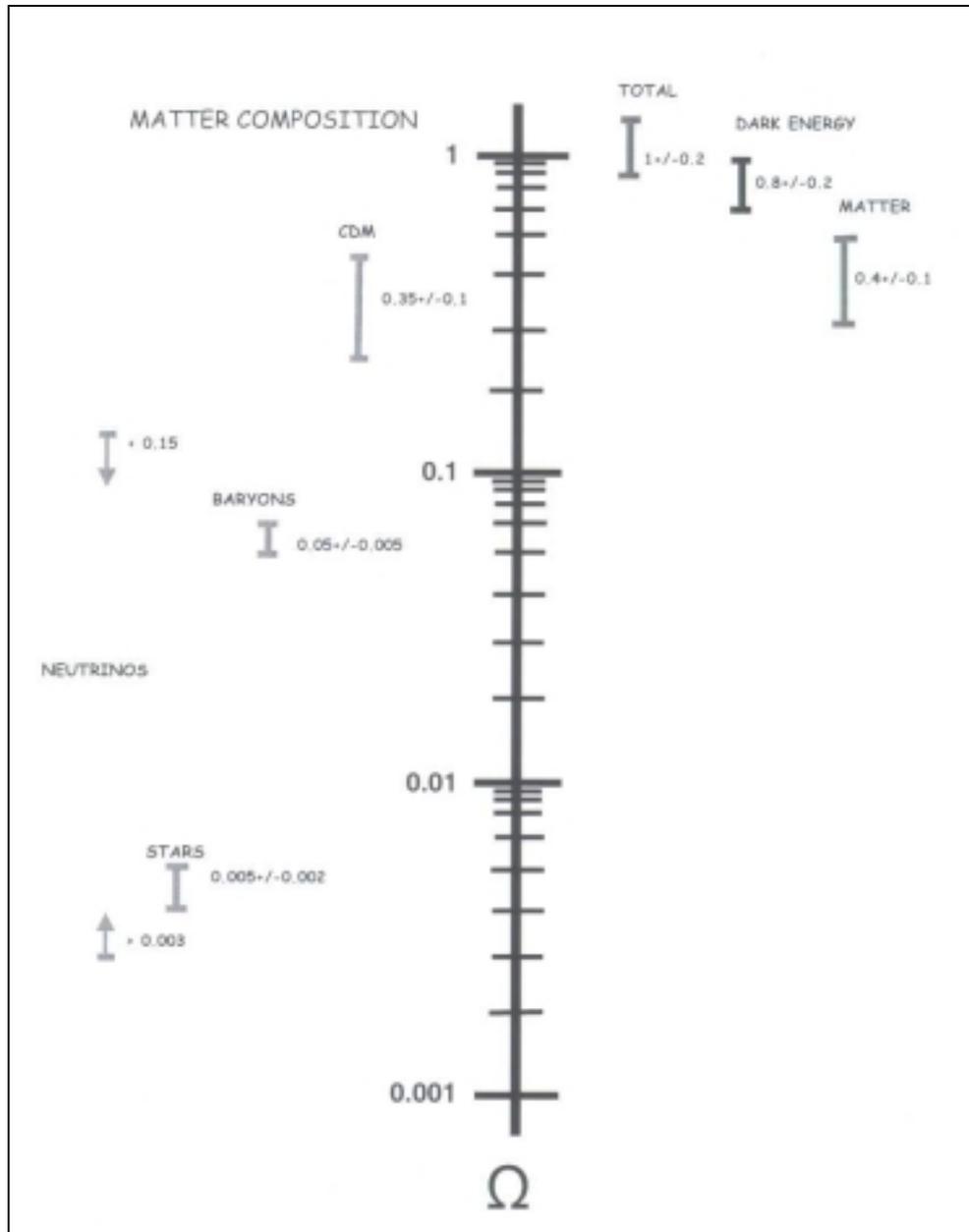
## 7.9 O QUADRO ATUAL...

A combinação dos resultados observacionais discutidos acima formam o conjunto de informações mais detalhado e importante existente atualmente para estudar a origem e a evolução do Universo. As medidas da RCFM, da distribuição de supernovas tipo I distantes, dos objetos distantes com linhas Lyman alfa e os levantamentos de redshifts, combinados, mostram um quadro do Universo interessante. Medidas separadas fornecem intervalos de valores maiores para os parâmetros cosmológicos, enquanto a combinação de duas ou mais estreitam os intervalos de possibilidades.

**TABELA 7. 1 - VALORES DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS COSMOLÓGICOS (EM FEVEREIRO DE 2003)**

Parâmetro cosmológico	Valor
Época da reionização $t_{rei}$	$180 \times 10^6$ anos
Idade do Universo $t_0$	$13,7 \pm 0,2 \times 10^9$ anos
Época do desacoplamento $t_{dec}$	$379 \times 10^5$ anos
Redshift do desacoplamento $z_{dec}$	$1089 \pm 1$
Densidade total $\Omega_t$	$1,02 \pm 0,02$
Densidade de bárions $\Omega_b$	0,045
Densidade de matéria $\Omega_m$	0,267
Constante de Hubble $H_0$	71 km/s. Mpc
Composição Química	4,4% - bárions 22,6% - matéria escura 73% - energia escura

A Tabela 7.1 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 7.12.

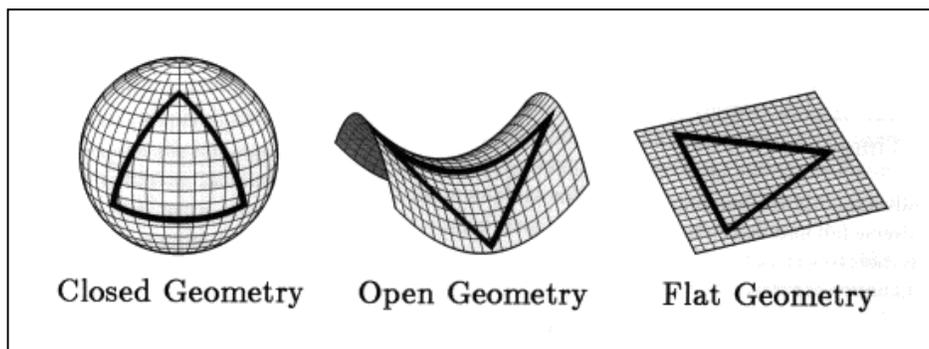


**Figura 7. 12** – Distribuição dos componentes de matéria-energia.

Isso nos permite concluir que o Universo possui uma geometria praticamente plana, isto é, em grandes escalas a geometria Euclidiana também é válida, com composição química desconhecida em mais de 96%. 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 complementar o balanço de densidades para 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 freitada pela gravidade da matéria existente, ele tem a expansão gradualmente acelerada pela energia escura. A idade estimada, via constante de Hubble, é de 13,7 bilhões de anos.

## 7.10 O FUTURO DO UNIVERSO

A questão do futuro do Universo está ligada, diretamente, à quantidade de matéria que o Universo possui. A combinação da matéria comum (formada de prótons, nêutrons e elétrons), matéria e energia escura (que não sabemos exatamente do que é feita) determina a dinâmica do Universo (expansão retardada ou acelerada) mas também a geometria (se ele é um Universo aberto, fechado ou plano). A combinação de matéria ordinária, matéria escura e energia escura definem a geometria do Universo, que pode ser esférica, plana ou hiperbólica (Figura 7.13).



**Figura 7.13** – Representação das possíveis geometrias do Universo.

Uma das formas de identificação dessa geometria é simplesmente olhar os ângulos dos triângulos representados sobre as superfícies: geometrias fechadas ou esféricas tem 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  $180^\circ$ .

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 ( $= 0,27 \Omega_0$ ) 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 ela torne-se igual a 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. O valor de  $\rho_c$  é facilmente calculado. Ele depende da inclinação da reta na Figura 7.6 e do valor da constante de gravitacional  $G$ . A melhor estimativa é que  $\rho_c \sim 10^{-29} \text{ g.cm}^{-3}$ .

Conforme discutimos 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 10 vezes maior do que a quantidade de matéria normal.

Ao longo dessa monografia podemos ressaltar 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, 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?

Bom, estrelas se formam de nuvens de hidrogênio... 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, mais cedo ou mais tarde, com as galáxias em grupos: elas “apagarão”.

Juntando a isso as conseqüências 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 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 conseqüências 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 as idéias sobre a morte térmica do Universo apresentadas acima acontecerão 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 o valor da taxa de expansão do Universo, sua idade e composição química são essenciais para entender o quebra-cabeças cosmológico.

## 7.11 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 do satélite WMAP e de outros experimentos 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 idéia 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 planejam fazer novas medidas e estudar o Universo de formas inimagináveis há 25 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, SDSS, SDOSS, SNI, objetos Lyman- $\alpha$ , etc.). O INPE participa ativamente em vários desses projetos, tanto para estudar a RCFM quanto no estudo de simulações de interação de galáxias.

Esperamos 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 resíduos do Universo jovem. Vários experimentos estão em andamento para detectar ou eliminar candidatos, como os experimentos de neutrinos e WIMPS (Weak Interactive Massive Particles) KamLand, Edelweiss, Sudbury. O estudo da distribuição de supernovas tipo I distantes permite descrever a expansão acelerada do Universo e, em consequência, conhecer melhor as propriedades da energia escura.

Os problemas principais que a Cosmologia tenta resolver são bem formulados, mas muitas das soluções tem permanecido obscuras por décadas. Finalmente, com o aumento da quantidade de informações obtidas a partir do avanço dos experimentos, computadores e o consequente avanço da teoria, uma boa parte das questões fundamentais apresentadas nesse capítulo estão começando 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 recentemente respondidas (mesmo que ainda sujeitas a confirmação) pelos resultados do satélite WMAP e dos levantamentos de objetos distantes. Se uma monografia sobre esse mesmo tema for escrita dentro de 10 ou 20 anos, temos certeza que ela será ainda mais distinta da escrita em 1998, no que diz respeito aos problemas fundamentais que a Cosmologia pretende resolver.

## 7.12 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 romanceado, 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.
- “Cosmology: a research briefing”. National Science Foundation – Board on Physics and Astronomy. National Academic Press, 1995. Um texto escrito pelo comitê assessor de uma das agências financiadoras da pesquisa básica nos EUA, sugerindo as diretrizes a serem seguidas no séc. XXI e os principais problemas a serem atacados em astrofísica e cosmologia. Escrito para não especialistas, é uma excelente introdução aos problemas atuais.
- “The Physical Universe”. Frank Shu. University Science Books, 1982. Livro texto adotado em diversas universidades americanas, em geral usado para apresentar um curso de um ano em astronomia para alunos que não vão seguir a carreira científica.
- ASTRONOMIA: Uma Visão Geral do Universo. Orgs. Amâncio Friaça, Elisabete Dal Pino, Laerte Sodré, Jr. e Vera Jatenco-Pereira, EDUSP, 2000.
- Revistas “Scientific American Brasil” e “Ciência Hoje”. Existem diversos artigos ligados à formação do Universo e à interação entre galáxias. Vale a pena pesquisar.
- “Foundations of Astronomy”. Michael Seeds. Wadsworth Publishing Co., 1997. Livro texto de introdução à astronomia, com textos claros e excelentes ilustrações. Menos técnico e mais bem ilustrado que o “The Physical Universe”.
- “O Universo inflacionário”. Alan Guth. Editora Campus, 1997. Um texto claro e instigante, escrito por um dos pais do modelo inflacionário.