

## COSMOLOGIA

Roberto D. Dias da Costa

## A EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE UNIVERSO

A Astronomia é uma das mais antigas ciências. As clássicas perguntas “De onde viemos?” ou “Como surgiu o mundo?” provavelmente são tão antigas como o próprio homem. Como ciência investigativa, seu princípio é tradicionalmente associado à necessidade de estabelecer-se um calendário confiável para fins agrícolas. Este passo ocorreu quando as tribos humanas passaram de caçadoras-coletoras nômades a agricultoras estabelecidas, marcando a aurora da civilização, isto há cerca de sessenta séculos.

As versões mais antigas da Cosmologia, aqui entendida como o estudo da estrutura em larga escala do Universo, sua formação e evolução, são os chamados *mitos cosmogônicos*. Descrições mitológicas sobre a origem dos elementos e dos seres vivos, ou seja, do *mundo*, aparecem em todas as culturas: seja na dos antigos sumérios ou caldeus, dos povos nativos do Brasil ou da África, dos esquimós, dos aborígenes australianos ou dos incas, todos tiveram (ou têm) mitos que descrevem o surgimento do seu mundo. A origem destes mitos é ainda mais remota, perdendo-se nas lendas e superstições que acompanham o homem desde sua aurora, agora perdida nas brumas do tempo.

Aqui não serão abordadas estas *Cosmologias*. Saltar-se-ão as fases das superstições e mitos para iniciar-se esta revisão sobre a evolução do conceito de Univer-

so, quando o mesmo despiu-se de sua indumentária mitológica pela primeira vez na cultura ocidental. Este passo foi dado pelos gregos do período helenístico clássico, em torno do século V a.C.

Os primeiros modelos cosmológicos *científicos* podem ser encontrados em obras de filósofos como Pitágoras de Samos (séc. VI a.C.) e Platão (séc. IV a.C.). O modelo platônico de Universo era composto por duas esferas: uma esfera terrestre, sobre a qual viviam os homens, e uma esfera celeste, na qual estavam *coladas* as estrelas. Os planetas eram corpos errantes que vagavam entre as duas esferas.

Uma contribuição significativa foi dada por Eudoxo (séc. IV a.C.), que propôs um modelo de esferas concêntricas, cada uma para um planeta, com a Terra ocupando a esfera central e as estrelas presas à esfera mais externa. Este foi basicamente o modelo de Universo incorporado à obra de Aristóteles, um dos grandes ícones da cultura grega. No Universo aristotélico os planetas moviam-se ligados a esferas transparentes concêntricas, numa ordem bem-definida; a Terra era composta pelos quatro elementos básicos: água, ar, terra e fogo, e os corpos celestes por um quinto elemento, o *éter*. Foi a cosmologia aristotélica que atravessou a Idade Média e veio a colidir com a concepção de Nicolau Copérnico para o Universo. Em torno do ano de 140 d.C., o astrônomo greco-egípcio Claudio Ptolomeu sintetizou os conhecimentos astronômicos da Antiguidade Clássica no seu livro, cujo título chegou aos nossos dias pelo seu nome árabe, *Almagesto*, que significa *O Grande Sistema*, através do qual o modelo geocêntrico (talvez, melhor fosse dizer antropocêntrico) difundiu-se e foi aceito como verdade inquestionável por cerca de quinze séculos.

A perenização da cosmologia aristotélica não deve excluir o exame de outras notáveis contribuições dos filósofos gregos à Cosmologia, que infelizmente ficaram à margem da ciência *oficial*. Demócrito, por exemplo, propunha que a Via Láctea fosse um conjunto muito grande de estrelas; Aristarco dizia que a Terra girava diariamente em torno do seu eixo e a cada ano em torno do Sol, enquanto Eratóstenes calculou o seu diâmetro com notável precisão. Estes conceitos, dentre tantos outros, indicam o quão profícua foi a cultura grega que, armazenada e posteriormente retransmitida por fontes bizantinas e árabes, veio a estimular a Renascença européia, entre os séculos XIV e XVI.

No século XIII, São Tomás de Aquino incorporou a cosmologia e a física aristotélicas ao cristianismo, incluindo-as em sua *Summa Teologica* e, deste modo, oficializando-as. Criou-se, assim, uma espécie de *oficialismo científico*, pelo qual muitos sábios tanto padeceriam, como Copérnico e Galileu, ou morreriam, como Giordano Bruno.

A revolução copernicana, no século XVI, foi conseqüência natural da retomada da cultura clássica durante a Renascença. Nicolau Copérnico (1473-1543), um clérigo católico polonês, propôs um modelo para o Universo ainda baseado

em esferas concêntricas como o modelo aristotélico, porém, tendo o Sol como o corpo central e os outros planetas, inclusive a Terra, girando em torno dele. Seu livro *As Revoluções dos Corpos Celestes*, publicado no ano de sua morte, é o marco da teoria heliocêntrica. Copérnico dispendeu muitos anos de sua vida tentando calcular as órbitas dos planetas de acordo com sua teoria, utilizando-se das *tabelas alfonsinas*, uma compilação de dados sobre as posições dos planetas, publicada pelo rei Alfonso X de Castela, no século XIII. Este empreendimento fracassou pela simples razão de as órbitas serem, na realidade, elípticas e não-circulares; o passo seguinte, de extrema importância, foi dado por Tycho Brahe (1546-1601) e Johann Kepler (1571-1630). Tycho, um nobre dinamarquês, pela primeira vez estabeleceu uma base observacional precisa e sólida, sobre a qual os astrônomos posteriores puderam trabalhar. Até então, trabalhava-se sobre dados gregos, antigos e de precisão absolutamente não-confiável. Foi trabalhando com os dados de Tycho que Kepler estabeleceu suas leis empíricas para o movimento dos planetas, descobrindo que as suas órbitas são elípticas, aceleram-se no periélio e os períodos são proporcionais ao semi-eixo maior das elipses.

Galileu Galilei (1564 - 1642), construindo o primeiro telescópio, pela primeira vez pôde confirmar a velha hipótese de Demócrito, de que a Via Láctea era mesmo composta por estrelas. Com seus trabalhos em diversas áreas das ciências físicas, como a cinemática e a óptica, Galileu estabeleceu as bases do moderno método científico da experimentação.

Em meados do século XVII, a evolução do conceito de Universo já havia se estendido para muito além do modelo heliocêntrico; ele era descrito como um conjunto muito grande (quicá infinito) de estrelas como o Sol. O trabalho de Isaac Newton (1642-1727) sintetizou todos os esforços anteriores de mentes brilhantes como as de Copérnico, Kepler e Galileu, reunindo-os pela primeira vez dentro de uma estrutura teórica sólida, a Mecânica Celeste, que era embasada num formalismo matemático poderoso, o cálculo infinitesimal.

Os modelos de Universo existentes até meados do século XVIII não se preocupavam muito com a sua origem. Foram Immanuel Kant (1724-1804) e, posteriormente, Pierre de Laplace (1749-1827) os formuladores do primeiro modelo cosmogônico moderno, que descrevia a formação do Sistema Solar a partir de uma nuvem discoidal de matéria em rotação, conceito este que, modernizado, continua válido. A principal divergência entre eles estava na natureza das chamadas *nebulosas espirais*, como Andrômeda. Enquanto Kant propunha que elas deveriam ser universos-ilha, semelhantes à Via Láctea, Laplace acreditava que elas seriam sistemas solares em formação. Esta discussão prolongou-se entre os astrônomos por mais de um século, sendo resolvida apenas após os trabalhos de Hubble, nas décadas de 20 e 30, que finalmente provaram que a razão estava com Kant.

Ao encerrar-se o século XIX, a visão humana do Universo era clara: as estrelas povoavam um volume muito extenso (virtualmente infinito) de espaço. William Herschell (1738-1822), através de um extenso trabalho observacional, estabeleceu que o Sol, uma destas estrelas, localizava-se próximo ao centro da distribuição.

Esta visão do Universo alterou-se incontáveis vezes com o rápido avanço da ciência e da tecnologia do século XX. Entre os principais passos dados neste século para o alargamento da visão do Universo, pode-se destacar, em ordem cronológica:

- Em 1912, Henrietta Leavitt descobriu a relação período-luminosidade das Cefeidas, proporcionando, assim, aos astrônomos uma “régua” confiável para medir distâncias de outros sistemas estelares.
- Entre 1915-17, Albert Einstein publicou a Teoria da Relatividade Geral, estabelecendo leis que governam as relações entre matéria, energia e a geometria do espaço. Esta teoria proporcionou a formulação do primeiro modelo teórico-matemático para a estrutura do Universo.
- Em 1918, Harlow Shapley demonstrou que o centro da Via Láctea fica a dezenas de milhares de anos-luz do Sol, estudando a distribuição e as distâncias dos aglomerados globulares.
- Em 1922, o físico russo Alexander Friedmann formulou o chamado *modelo-padrão* do Universo, base para todos os modelos desenvolvidos posteriormente, a partir das equações da Teoria da Relatividade Geral.
- Entre 1922-24, usando o recém-inaugurado telescópio de 2,5 m de Mount Wilson, Edwin P. Hubble (1889-1953) descobriu Cefeidas em Andrômeda e estabeleceu, assim, sua distância. Tal descoberta sepultou a visão galactocêntrica do Universo, estabelecendo o caráter extragaláctico das nebulosas espirais, que são nada menos que outras galáxias, como a Via Láctea.

Pode-se parar a esta altura esta breve descrição da evolução do conceito de Universo. Partiu-se das duas esferas de Platão e chegou-se ao Universo preenchido por incontáveis galáxias, que se estendem pelo espaço-tempo curvo de Einstein. Este empreendimento, que de forma alguma está completo, ocupou 25 séculos de engenho de algumas das mais brilhantes mentes que já surgiram, e certamente ocupará muitas outras pelos séculos a vir.

## EXPANSÃO DO UNIVERSO

O estudo da estrutura em larga escala do Universo deve partir de um pressuposto básico que assegure a validade de tais estudos: *em escalas suficientemente*

*grandes, todos os lugares devem ser iguais.* A validade desta assertiva aparentemente tão simples é absolutamente indispensável, senão, como poderíamos nós, restringir a superfície de nosso pequeno planeta, especular sobre a imensidão cósmica? Tal conjectura baseia-se neste pressuposto, conhecido como Princípio Cosmológico: o Universo é homogêneo e isotrópico. Por *homogeneidade*, entende-se que todos os lugares devem ser iguais (a menos quanto às diferenças em escala local) para um viajante cósmico; por *isotropia*, entende-se que todas as direções devem ser iguais para um observador imóvel.

Nosso senso comum diz, porém, que a homogeneidade e a isotropia não existem. Afinal, a terra em que pisamos, ou a água, são bem mais densas que o ar e este é muito mais denso que o meio interplanetário. O braço da Galáxia em que fica o Sol, por sua vez, tem muito mais matéria por unidade de volume que o espaço entre as galáxias, e mesmo as galáxias reúnem-se em aglomerados. Este aparente paradoxo pode ser explicado se lembrarmos que o Princípio Cosmológico só vale em grande escala; e esta escala certamente é maior que a escala de tamanho dos aglomerados de galáxias.

As evidências da expansão do Universo surgiram nos anos 20 deste século, graças aos trabalhos de astrônomos como Shapley, Slipher e, principalmente, Edwin Hubble. Seu extenso trabalho de medidas de velocidades radiais de galáxias, juntamente com a descoberta de Cefeidas nas galáxias mais próximas, trouxe à comunidade astronômica as evidências de que o Universo está se expandindo.

Velocidades radiais podem ser medidas através do efeito Döppler óptico, nas linhas de emissão ou absorção do espectro da galáxia. A linha desvia-se de seu comprimento de onda de laboratório ( $\lambda_0$ ) para outro ( $\lambda$ ), e esta diferença, conhecida como *desvio espectral* pode ser explicada pela velocidade da galáxia:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}, \quad (13.1)$$

onde  $v$  é velocidade radial da galáxia e  $c$  é velocidade da luz.

Medindo velocidades radiais de galáxias, Hubble foi o primeiro a notar que a maioria dos desvios espectrais é para o vermelho, indicando que as galáxias estão se afastando umas das outras e da Via Láctea. Determinando simultaneamente as distâncias destas galáxias, ele demonstrou que a velocidade de recessão de uma galáxia, ou seja, a velocidade com que ela está se afastando da Via Láctea, é diretamente proporcional a sua distância.

O desvio espectral resulta, portanto, da própria expansão do Universo e a expressão matemática daí derivada, a chamada *lei de Hubble*, é uma medida de como se dá esta expansão.

Na Figura 13.1 pode-se examinar o tipo de resultados a partir dos quais foi deduzida a lei de Hubble. Ali estão as distâncias e velocidades radiais para uma amostra de galáxias e pode-se notar que existe uma clara correlação entre elas: às velocidades radiais maiores correspondem maiores distâncias. Aos pontos pode ser ajustada uma reta cujo declive corresponde ao valor atual da *constante de Hubble*. A expressão analítica da lei de Hubble é:

$$v = H_0 d, \quad (13.2)$$

onde  $v$  é a velocidade de recessão de uma galáxia,  $H_0 \sim 50 - 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  é a constante de Hubble e  $d$  é a distância da galáxia.

Pode-se notar que  $H_0^{-1}$  tem dimensão de tempo. Mais especificamente, para  $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , tem-se  $H_0^{-1} \approx 2 \times 10^{10}$  anos, que é o chamado *tempo de Hubble*, um valor aproximado para a idade do Universo.

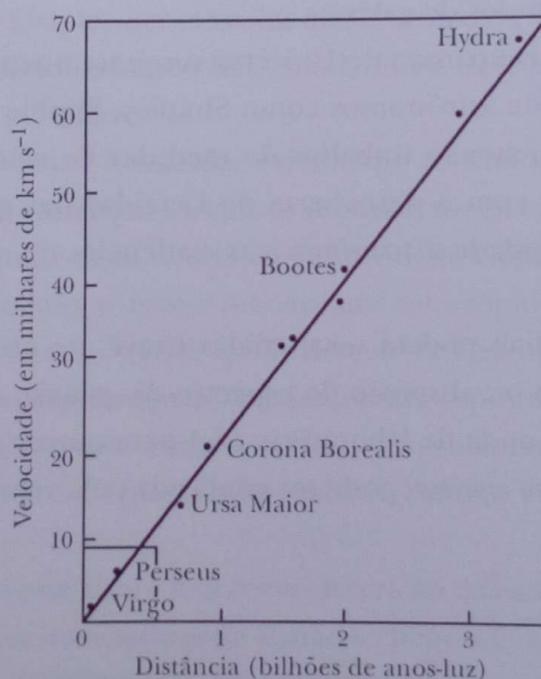


Figura 13.1. A dedução observacional da lei de Hubble: à medida que aumentam as velocidades de recessão, aumentam as distâncias das galáxias. O quadrado inferior esquerdo mostra os limites de distância e velocidade investigados pelo próprio Hubble para formular a lei que hoje leva seu nome.

## MODELOS DE UNIVERSO

Sob o ponto de vista da Cosmologia Física, um modelo de Universo é uma representação matemática da nossa concepção do mesmo, passível de ser testada. Em outras palavras, pode-se dizer que um modelo de Universo é uma rela-

ção entre os parâmetros físicos que o caracterizam como um todo, mostrando a evolução temporal destes parâmetros.

Os mais importantes parâmetros cosmológicos observáveis são:

- *Parâmetro de Densidade.* É a densidade média do Universo em relação à densidade crítica, definida, por sua vez, como aquela necessária para eventualmente deter a expansão, fazendo que a ela se siga uma contração do Universo como um todo.
- *Constante de Hubble.* É uma medida da idade do Universo; ainda que derivada diretamente das observações, ela pode ser também expressa em termos de um modelo cosmológico.
- *Parâmetro de Desaceleração.* É uma medida da variação da velocidade de expansão, ou seja, mostra como o Universo está se expandindo.
- *Desvio Espectral.* É uma medida da expansão do Universo, obtida através da velocidade de recessão das galáxias. Como a constante de Hubble, ele pode ser também expresso em termos de modelos cosmológicos.

Modernamente, estudam-se os *modelos relativísticos*, que são aqueles baseados na Teoria da Relatividade Geral, desenvolvida por Albert Einstein e divulgada em 1915. Aqui, ficaremos restritos a uma visão qualitativa dos modelos cosmológicos clássicos, já que um desenvolvimento formal dos mesmos implicaria o uso de um formalismo matemático que está além do escopo desta publicação. Assumiremos também o conceito de que o Universo está se expandindo; este conceito, como foi visto anteriormente, tem fortes evidências observacionais e é aceito pela quase totalidade dos especialistas em Cosmologia.

#### ■ O Universo de Einstein

Num artigo científico publicado em 1917, Einstein propôs aquele que foi o primeiro modelo cosmológico moderno. Para adequar seu modelo à visão da época anterior às descobertas de Hubble sobre a expansão, o modelo era estacionário, sem expansão e com a introdução de uma força artificial representada por  $\Lambda$  e denominada *constante cosmológica*, cuja finalidade era contrabalançar a força da gravidade que tenderia a contrair o Universo como um todo. O Universo assim representado era finito, fechado e esférico, com a matéria homogeneamente distribuída e sem nenhum movimento em escala cosmológica.

#### ■ O Universo de De Sitter

O holandês Willem De Sitter (1872-1935) propôs um modelo alternativo para o Universo no mesmo ano de 1917, derivado também da Teoria da Relatividade. Seu modelo descrevia o Universo com uma geometria euclidiana

(era, portanto, *plano* no sentido geométrico) e em expansão, tendo o mérito de mostrar que não havia um único modelo relativístico possível, como Einstein supunha; porém, no seu modelo o Universo era completamente desprovido de matéria. Assim, enquanto o modelo de Einstein era de um Universo estático e com matéria, o de De Sitter era de um Universo vazio e em expansão. Vê-se que estes dois modelos estão longe de serem descrições do Universo real, porém, ambos representam as primeiras tentativas modernas de se descrever a estrutura geral do Universo.

#### ■ Os Universos de Friedmann

Entre 1922 e 1924, o russo Alexander Friedmann (1888-1925) formulou os modelos que são hoje conhecidos como os modelos-padrão de Universo. Seu trabalho nesta área foi iniciado com a descoberta por ele de um erro no já então clássico trabalho de Einstein, de 1917, sobre a estrutura do Universo. Friedmann descobriu que a introdução da constante cosmológica  $\Lambda$  poderia levar a um modelo estático, porém, a sua supressão não invalidava os modelos daí derivados, que passavam a ser modelos com movimento (expansão ou contração). Esta descoberta deu-se exatamente na época em que começavam a aparecer os primeiros resultados observacionais de Hubble e Slipher, indicando a existência de uma expansão no Universo. Assim, os inúmeros desdobramentos destes modelos fizeram com que eles tenham se tornado a base para todos os modelos surgidos posteriormente, sendo conhecidos atualmente como os *modelos-padrão*.

Em todos os modelos de Friedmann a expansão desacelera-se (devido à força da gravidade) ao longo do tempo; conforme a taxa de desaceleração pode-se ter a situação em que a expansão eventualmente cessa e a ela se segue uma contração. A desaceleração depende, é claro, da densidade média do Universo e os modelos resultantes de cada situação são caracterizados por diferentes geometrias e curvaturas.

Quando se fala em geometria, vêm logo à mente os conceitos da chamada geometria euclidiana (aquela que todos aprendem no colégio), cujos princípios básicos foram estabelecidos pelo matemático grego Euclides, no século III a.C.; porém, quando se fala em Cosmologia Relativística, surge logo a expressão *espaço curvo* e fala-se em espaços de curvatura positiva ou negativa. Estes conceitos são pouco intuitivos, porém, algumas das propriedades que caracterizam espaços de curvatura positiva ou negativa, bem como espaços sem curvatura (ou euclidianos), podem ser demonstradas imaginando-se três figuras geométricas simples: um plano, uma esfera e o topo de uma sela de montaria, como está esboçado na Figura 13.2. No plano, que é uma superfície de curvatura constante e igual a zero, aparecem propriedades bem conhecidas da geometria: a soma dos ângulos internos de um triângulo é de 180 graus; por um ponto fora de uma

reta pode-se traçar apenas uma reta paralela à primeira; tendo-se um círculo de raio  $r$ , seu perímetro é  $C = 2\pi r$  e sua área é  $A = \pi r^2$ . O espaço tridimensional de curvatura nula é euclidiano e, assim como um plano, é infinito.

Sobre uma superfície esférica, estas propriedades se alteram: a soma dos ângulos internos de um triângulo é maior que 180 graus,  $C < 2\pi r$ ,  $A < \pi r^2$  e por um ponto fora de uma reta não se pode traçar nenhuma reta paralela à primeira. Estas propriedades caracterizam uma superfície de curvatura positiva. Um espaço tridimensional de curvatura constante positiva, analogamente a uma esfera, tem volume finito e é *fechado*.

Sobre uma sela, tem-se que a soma dos ângulos internos de um triângulo é menor que 180 graus,  $C > 2\pi r$ ,  $A > \pi r^2$  e por um ponto fora de uma reta pode-se traçar muitas retas paralelas à primeira. Um espaço tridimensional de curvatura constante negativa (ou hiperbólico) é dito *aberto* e tem volume infinito.

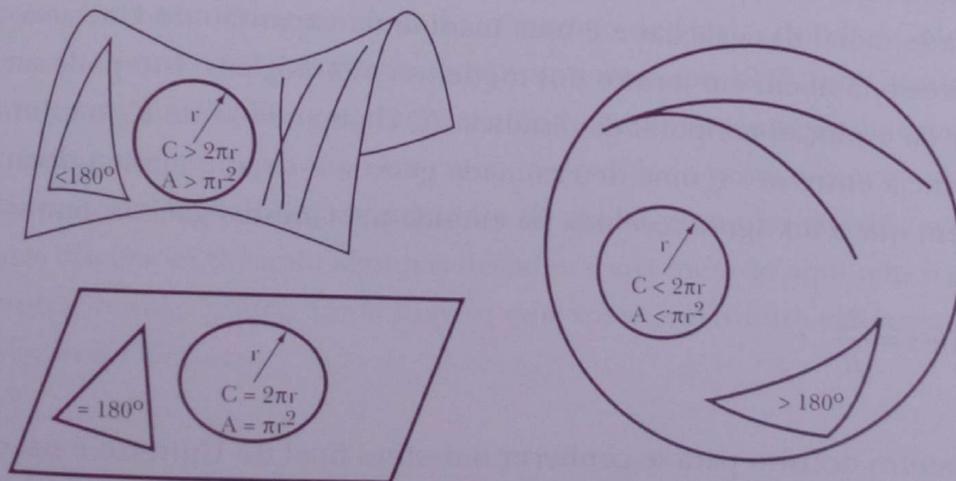


Figura 13.2. Propriedades geométricas das superfícies plana, esférica e hiperbólica.

Voltando-se aos modelos de Friedmann, na Figura 13.3 mostra-se a evolução temporal da distância  $R$  entre dois objetos separados por distâncias cosmológicas em três diferentes cenários. Para  $k = -1$ , tem-se uma expansão perpétua e o Universo assim representado tem curvatura aberta, é descrito por uma geometria hiperbólica e seu destino será a expansão perpétua; a força gravitacional de seus constituintes nunca deterá a expansão. Na situação em que  $k = 0$ , a distância  $R$  também cresce com o tempo, sem haver uma contração posterior ao final da expansão. Um Universo assim pode ser descrito por uma geometria plana e é aberto. Para  $k = +1$ , tem-se um limite superior para a expansão e o que se segue é uma contração da distância  $R$ ; o Universo nesta situação é fechado, descrito por uma geometria esférica, e seu destino será voltar ao estado inicial após transcorrido um certo tempo.

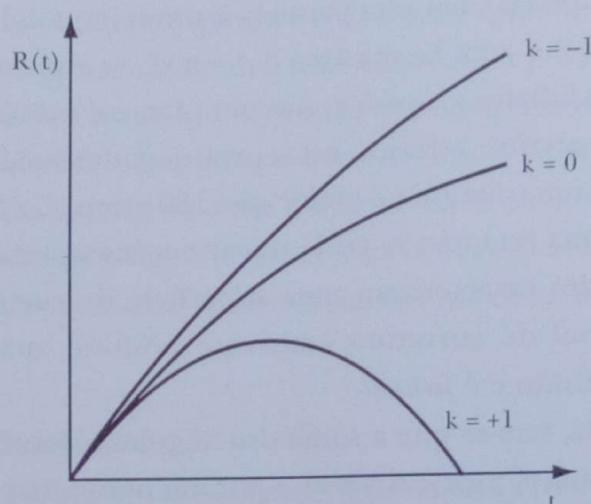


Figura 13.3. Evolução dos modelos de Friedmann para diferentes geometrias.

Como foi mencionado anteriormente, o desvio espectral  $z$ , que é obtido da velocidade radial das galáxias e é uma medida da expansão do Universo, pode ser expresso também em termos dos modelos cosmológicos. Isto pode ser feito a partir da evolução temporal da distância  $R$ ; chamando-se de  $R_0$  o valor *atual* da distância entre nós e uma determinada galáxia e de  $R$  a mesma distância à época em que a luz agora recebida foi emitida pela mesma galáxia, tem-se que

$$1 + z = \frac{R_0}{R} . \quad (13.3)$$

O parâmetro decisivo para se conhecer o destino final do Universo é sua densidade. O comportamento de cada curva na figura depende do *parâmetro de densidade*, a razão entre a densidade do modelo e a densidade crítica. Esta é dada por

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} , \quad (13.4)$$

onde  $G$  é a constante da gravitação. Assumindo-se que o valor atual para a constante de Hubble é  $50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , tem-se que o valor atual para a densidade crítica é:

$$\rho_{c,0} \sim 10^{-30} \text{ g cm}^{-3} . \quad (13.5)$$

Deve-se ter em mente que as investigações sobre a densidade do Universo estão relacionadas com o desenvolvimento de novos e modernos detetores de luz que permitem a visão de objetos a distâncias cada vez maiores, bem como



do que o Universo sempre havia sido como é agora, com o já descoberto movimento de recessão das galáxias explicado como um fenômeno que ocorria apenas em escalas locais.

O que levou então ao atual estado do conhecimento, quando a hipótese do Big-Bang é aceita por virtualmente toda a comunidade científica? Em 1948, George Gamow, um físico russo naturalizado americano, demonstrou a partir dos modelos de expansão do Universo que o mesmo havia passado por um estado inicial de alta temperatura, com volume muito pequeno e densidade muito grande, quando não poderia existir matéria, apenas energia, numa fase que ele denominou Era da Radiação. Mais ainda, ele demonstrou que, com a expansão do Universo até seu volume atual, a radiação inicial havia em grande parte se convertido em matéria, através da clássica expressão da Teoria da Relatividade que relaciona massa ( $m$ ) e energia ( $E$ ),

$$E = mc^2 . \quad (13.6)$$

Porém, segundo Gamow, parte do que seria a radiação inicial do Big-Bang teria permanecido na forma de energia e deveria permear o Universo todo. Estimando a quantidade inicial de energia que deveria ter sobrado da conversão energia  $\rightarrow$  matéria e a taxa de expansão do Universo, foi possível chegar-se, então, ao valor que esta radiação de fundo deveria ter atualmente. Em 1965, dois pesquisadores da empresa Bell Telephone, Arno Penzias e Robert Wilson, que procuravam minimizar ao máximo as fontes de interferência em uma antena de rádio, descobriram que, uma vez descontadas todas as fontes de ruído, permanecia ainda um “chiado”, ou seja, um ruído de fundo no receptor. Este ruído era independente da direção no céu para a qual a antena (em forma de corneta) estava apontada, bem como do dia ou noite, das estações do ano ou de qualquer outro efeito externo, tornando-se evidente sua origem extraterrestre. Além disto, o sinal tinha a frequência bem-definida de 4 080 MHz, o que corresponde a uma temperatura equivalente de cerca de 3 K. Os resultados referentes à descoberta foram publicados e, no mesmo ano, pesquisadores em Cosmologia identificaram-na como a radiação de fundo original do Big-Bang prevista por Gamow anos antes, tendo havido uma notável coincidência entre as previsões teóricas e a temperatura obtida por Penzias e Wilson que, em 1978, ganharam o Prêmio Nobel de Física por sua descoberta.

Desta forma, pode-se dizer que existem duas evidências até agora irrefutáveis de que houve um Big-Bang: a radiação de fundo de 3 K que permeia todo o Universo e o movimento de recessão das galáxias, cujas evidências são todas de que tenha um caráter realmente cosmológico, refletindo a expansão desencadeada pelo Big-Bang.

Vamos examinar, então, o chamado *modelo-padrão de Big-Bang*. A rigor, não se pode iniciar o estudo da evolução do Universo desde o instante inicial, ou seja,  $t = 0$ . Isto porque os atuais limites do conhecimento impõem uma barreira até agora intransponível: nada se pode dizer da evolução do Universo desde o instante inicial ( $t = 0$ ) até  $t = 10^{-43}$  segundos, quando o Universo tinha  $10^{-33}$  cm de raio, durante a chamada Era de Planck. Deste intervalo de tempo, que apesar de diminuto *não é* nulo, nada se pode falar, pois a Teoria da Relatividade (a física do macrocosmo) e a Mecânica Quântica (a física do microcosmo) são inaplicáveis simultaneamente nesta situação, como seria necessário.

Assim, a descrição da evolução começa com a chamada Era das Partículas Pesadas. A partir de uma singularidade surgida a cerca de 15 bilhões de anos atrás, o Universo iniciou sua expansão; no começo, devido à brutal densidade de energia, tudo o que havia eram fótons de alta energia. Com a expansão do volume, a densidade de energia começou a cair rapidamente e um milionésimo de segundo ( $10^{-6}$  s) após a “explosão” começaram a se formar as partículas elementares muito pesadas e instáveis, como os híperons e os mésons, que por sua vez decaíram em outras menos pesadas, mas estáveis, como os prótons e nêutrons, mais os neutrinos. As partículas pesadas são usualmente chamadas *hádrons*.

Com um décimo de milésimo de segundo ( $10^{-4}$  s) de idade, o Universo já estava suficientemente frio para que fossem formadas as partículas leves (ou *léptons*), como os elétrons e os pósitrons. Esta Era das Partículas Leves acabou quando havia se passado 1 segundo da “explosão” inicial.

Uma vez formadas as partículas elementares, o Universo era ainda dominado pela radiação, e a era seguinte é denominada Era da Nucleossíntese Primordial. Nesta época, a expansão e a conseqüente diminuição da temperatura proporcionaram às partículas elementares as condições para que elas se combinassem formando os elementos químicos de menor massa atômica. Foram assim formados o hidrogênio, o deutério (um isótopo pesado do hidrogênio), o hélio e, uma vez que não existem núcleos atômicos estáveis com massa atômica 5 e 6, traços de lítio e de berílio. A formação dos elementos mais pesados foi impossível inicialmente porque a densidade de energia era muito alta e eles seriam imediatamente dissociados, e depois porque a rápida expansão do volume (com o conseqüente decréscimo na densidade de partículas) impediu a fusão nuclear que formaria os demais elementos, que só viriam a ser formados posteriormente nos núcleos estelares.

Após cerca de dois mil anos da nucleossíntese primordial, a quantidade de matéria no Universo passou a ser finalmente maior que a quantidade de radiação disponível, e este sai da Era da Radiação e entra na Era da Matéria. Finalmente, quando a densidade de energia baixou o suficiente, a radiação passou a transitar no Universo independentemente da matéria, ocorrendo o cha-

mado *desacoplamento* da matéria e da radiação. A partir daí, matéria e radiação passaram a evoluir de modo independente. Uma vez que observar um objeto remoto no Universo implica sempre em olhar para trás no tempo (a informação viaja à velocidade da luz), deve-se notar que o desacoplamento, que ocorreu cerca de 300 mil anos após o Big-Bang, define também um limite observacional: não se poderá jamais observar radiação eletromagnética de um objeto que esteja a uma distância de nós tal que o estejamos vendo como ele era a menos de 300 mil anos do Big-Bang. A Tabela 13.1 mostra a seqüência em que ocorreram os principais eventos da formação do Universo, adotando-se que o tempo transcorrido do Big-Bang à época atual foram 15 bilhões de anos.

Tabela 13.1. As etapas iniciais da evolução do Universo.

Tempo Cósmico	Era	Evento
0	Singularidade	Big-Bang
até $10^{-43}$ s	Era de Planck	(ainda desconhecida)
até $10^{-6}$ s	Era dos Hádrons	Criação das partículas pesadas
até 1 segundo	Era dos Léptons	Criação das partículas leves
1 minuto	Era da Radiação	Formação de hélio e Deutério
10 mil anos	Era da Matéria	A matéria torna-se predominante
300 mil anos	Desacoplamento	O Universo torna-se transparente
1 bilhão de anos		Formação das galáxias e grandes estruturas
10,5 bilhões de anos		Inicia-se a formação do Sol
15 bilhões de anos		Época atual

Ainda que o modelo-padrão tenha mostrado excelentes resultados, ele não explica algumas evidências observacionais importantes, o que levou a refinamentos e adições ao mesmo. Os pontos mais críticos não explicados pelo modelo-padrão são:

- *Assimetria matéria-antimatéria*: claramente a matéria ocorre no Universo em maior abundância que a antimatéria e o modelo-padrão prevê iguais probabilidades de ocorrência para ambas.
- *Achatamento*: as evidências observacionais são que o Universo é virtualmente “plano”, no sentido geométrico, implicando uma densidade *igual* à densidade crítica, o que é improvável pelo modelo-padrão.

- *Formação das galáxias:* como hoje se sabe que existem galáxias quase tão velhas quanto o Universo, elas devem ter sido formadas no Universo primitivo, por flutuações locais de densidade, as quais não são previstas pelo modelo-padrão.

Para explicar tais características, cujas origens devem estar nos processos físicos que ocorreram no primeiro segundo após o Big-Bang, foi proposto no início dos anos 80 o chamado Modelo Inflacionário. Esta teoria está baseada nos grandes esforços teóricos e experimentais que têm sido feitos pelos físicos com o objetivo de obter uma expressão unificada para as quatro forças que existem na natureza: a força gravitacional, a força eletromagnética, a força nuclear forte e a força nuclear fraca. Cada vez mais fica evidente que o domínio da física das partículas elementares é indispensável para a solução dos problemas cosmológicos e é neste sentido que o Modelo Inflacionário caminha. Este nome refere-se a uma expansão extremamente rápida do Universo, aproximadamente entre  $10^{-35}$  e  $10^{-25}$  segundos após  $t = 0$ ; tal efeito, quando introduzido nas equações, produz resultados que explicam (ao menos parcialmente) os problemas expostos acima.

Iniciamos este capítulo com as perguntas clássicas: “De onde viemos?” e “Como surgiu o mundo?” A busca das respostas a estas questões persegue o homem desde sua origem mais remota, e a Cosmologia é nada mais que uma das nossas tentativas de obter (ou melhorar) as respostas. Desde as duas esferas de Platão até às equações da Teoria da Relatividade Geral percorreu-se um longo caminho, porém, a busca está longe de se encerrar; hoje, o estudo da estrutura em larga escala e da evolução do Universo é uma matéria interdisciplinar em que juntam esforços a física de partículas elementares, as teorias de campos unificados de forças, a Astrofísica feita com grandes telescópios, as modernas técnicas de imageamento e a modelagem numérica feita nos melhores computadores existentes.

Talvez a razão da busca de conhecimentos em toda a Astrofísica, e na Cosmologia em particular, esteja expressa nos versos do poema *Little Gidding*, do poeta inglês T. S. Eliot:

*Nós nunca cessaremos de explorar  
E o fim de toda nossa exploração  
Será voltarmos ao lugar de onde partimos  
E o conhecer pela primeira vez*