

# COSMOLOGIA

## Uma introdução

Alfredo Barbosa Henriques

IST, Dep. de Física

4ª Escola de Gravitação e Astrofísica, Setembro 2008

### 1. A cosmologia moderna

Podemos considerar 1917 como o ano fundador da cosmologia moderna, a cosmologia relativista, data da publicação por Einstein do seu famoso trabalho “Considerações Cosmológicas sobre a Teoria da Relatividade Geral”. Pela primeira vez a ciência possuía um instrumento teórico à altura do problema de estudar o universo à sua maior escala. Oitenta e cinco anos passados vamos encontrar uma disciplina em pleno desenvolvimento, onde raros são os anos em que não fazem o seu aparecimento novos factos observacionais, outros tantos desafios à procura de novas ideias que os expliquem.

Sendo o universo como um todo o objecto de estudo da cosmologia, se nos lembrarmos que as observações envolvem sinais enviados das partes mais remotas, distâncias que a luz, o mais rápido dos sinais, levou milhões, centenas de milhões e mesmo milhares de milhões de anos a chegar até nós, emitida em épocas em que o universo era muito mais jovem do que actualmente, facilmente perceberemos que a história do universo, a sua evolução ao longo do tempo, é uma parte integrante deste estudo.

É claro que um projecto tão ambicioso, abrangendo vastidões enormes e estruturas tão complexas como diversificadas, exigirá à partida um mínimo de hipóteses simplificadoras. Estas hipóteses definirão o modelo cosmológico que utilizaremos. No que se vai seguir, esse modelo será o que hoje se convencionou designar por modelo standard da cosmologia, mais popularmente conhecido por modelo do Big-Bang (usaremos indiferentemente as duas designações), que tem o apoio quase consensual da comunidade científica. É neste momento o único modelo que parece ser capaz de explicar o conjunto conhecido de observações.

Chegar ao ponto em que hoje nos encontramos não foi, todavia, tarefa fácil. O citado trabalho de Einstein sobre cosmologia descrevia um universo

estático que, como as observações posteriores vieram a mostrar, estava longe da realidade, a qual se apresentava muito mais interessante.

A primeira idade heróica da cosmologia podemos situá-la na década que vai de 1920 a 1930. É por esta altura que o russo Friedmann encontra soluções das equações de Einstein correspondentes a um universo em expansão e que, um pouco mais tarde, Hubble descobre esta coisa espantosa: que o sistema das galáxias estava em expansão. Fê-lo usando o efeito de Doppler, que todos nós conhecemos: o apito de um comboio torna-se mais grave quando ele se afasta de nós. A frequência do som diminui, sendo a diminuição proporcional à velocidade com que o comboio se afasta de nós. Aplicado ao caso da luz este fenómeno é conhecido por desvio para o vermelho, porque no espectro visível as menores frequências correspondem à zona do vermelho. Foi este desvio que Hubble verificou estar a acontecer com a emissão de radiação por parte dos átomos das galáxias distantes, o que lhe permitiu calcular a velocidade com que elas se estavam a afastar de nós. Finalmente pôde relacionar estas velocidades com as distâncias das galáxias, utilizando nestas medições métodos que entretanto tinham vindo a ser desenvolvidos. O factor de proporcionalidade entre a velocidade e a distância dá-nos a famosa constante de Hubble.

Mas, curiosamente, foi só com Lemaître que, no final da década, se relacionaram as soluções teóricas de Friedmann com as observações de Hubble, pois até aí ainda se não tinha feito a ponte entre as observações dos astrónomos e os cálculos dos teóricos. O próprio Friedmann encarou as suas soluções como meras soluções matemáticas, sem as relacionar com o universo à sua volta.

Lemaître foi também o primeiro a perceber que, se o universo e o seu sistema de galáxias estavam em expansão, então, recuando no tempo, era forçoso concluir que o universo teria passado por uma fase primitiva muito mais densa e, possivelmente, muito mais quente que a fase actual, fase que designou por átomo primitivo. Compreender a estrutura e as propriedades deste átomo primitivo seria uma tarefa para a nova física quântica, que entretanto tinha vindo a desenvolver-se de forma espectacular.

Foi a partir destas ideias que nos finais dos anos 1940, princípios da década de 50, Gamow e os seus colaboradores Alpher e Herman

compreendem que, admitindo que Lemaître estava correcto, o universo primitivo teria sido aquele forno ideal onde foram sintetizados os elementos mais abundantes encontrados no cosmos, e que são, além do hidrogénio, o hélio, o deutério e o lítio. Deduzem ainda que, como resultado destas condições muito densas e quentes, uma quantidade enorme de radiação electromagnética teria sido libertada, que deveria existir hoje sob a forma de um banho ou gás de fotões, a famosa radiação de fundo cosmológica, cuja temperatura actual, tendo em conta a expansão do universo, eles tinham calculado ser da ordem de alguns graus acima do zero absoluto e que poderia vir a ser detectada na zona de frequências das micro-ondas.

A descoberta desta radiação em 1965 por Penzias e Wilson, com uma temperatura equivalente de 2.73 °K, marca o começo da idade adulta da cosmologia. Foi uma descoberta de grande impacto que levou à aceitação quase universal, por parte dos físicos e astrónomos, do modelo do Big-Bang como *o modelo* cosmológico por excelência, o único até hoje conhecido onde a radiação de fundo aparece de uma forma natural e com as características que lhe conhecemos.

## 2. O modelo do Big-Bang (ou modelo standard da cosmologia)

As hipóteses nas quais se baseia o modelo do Big-Bang são, resumidamente, as seguintes:

1. A muito larga escala poderemos considerar o universo como razoavelmente homogéneo e isotrópico, isto é, as suas propriedades médias, e o aspecto com que ele se apresenta a um observador, são as mesmas, independentemente do ponto onde se encontra o observador e da direcção de observação.
2. O universo encontra-se em expansão, a distância média entre os seus constituintes aumentando com uma velocidade que é proporcional a essa mesma distância (é neste sentido genérico que usaremos o termo escala do universo e sua variação):

$$v=H(t).d.$$

É a famosa lei de Hubble, em que o factor de proporcionalidade é justamente designado por “constante” de Hubble, embora na realidade não seja uma constante.

3. A dinâmica da expansão é descrita pelas equações de Einstein da relatividade geral.
4. Esta expansão começou a partir de uma fase do universo extremamente densa e quente, durante a qual a densidade de energia do universo era dominada pela densidade de energia sob forma de radiação, de que resulta a radiação de fundo de micro-ondas acima referida.

A hipótese da homogeneidade tem como base cuidadosas observações astronómicas que mostram que, quando consideramos volumes de espaço suficientemente grandes, a distribuição das galáxias, ou melhor, a distribuição da massa a grande escala, é independente da direcção e da distância consideradas. Certamente, quando olhamos para volumes mais pequenos, com raios da ordem de um por cento ou menos do raio visível do universo, começam a predominar as irregularidades locais. É bem sabido que as galáxias tendem a aglomerar-se em enxames e estes em superenxames, estruturas grandiosas que, à primeira vista, poderiam indicar um universo altamente irregular. As investigações feitas mostram que, apesar destas estruturas, a distribuição das massas tende para a homogeneidade, quando aumentamos os volumes estudados.

A isotropia, isto é, a independência das propriedades médias do universo em relação à direcção de observação, esta está hoje muito bem verificada, a partir das observações efectuadas sobre a radiação de fundo de micro-ondas. Como explicaremos mais adiante, as propriedades da radiação de fundo reflectem as propriedades médias, especialmente temperatura e densidade de energia, do universo nessas épocas remotas, situadas a milhares de milhões de anos atrás, em que se teriam começado a formar as grandes estruturas cósmicas. Ora bem, esta radiação apresenta uma temperatura que é a mesma qualquer que seja a direcção em façamos a sua medição. As variações são, quando muito, da ordem de uma parte em cem mil. A uniformidade da sua temperatura é o testemunho mais directo que temos da uniformidade na distribuição da energia naquela época

A lei de Hubble, num universo em expansão, nada mais é do que uma consequência desta homogeneidade e isotropia do universo, da sua uniformidade a grandes escalas, quando interpretada à luz das equações de

Einstein. Tentemos visualizar o que se passa por meio de um exemplo simples.

Tomemos um balão de borracha e sarapintêmo-lo uniformemente de pontos negros. Se começarmos a encher o balão estes pontos, as nossas galáxias, afastam-se uns dos outros, mantendo a sua distribuição uniforme. É fácil verificar que, em cada instante, a velocidade relativa entre dois pontos quaisquer aumenta proporcionalmente à distância entre eles. Se tivéssemos tomado outros dois pontos, que nesse mesmo instante estivessem a uma distância dupla da dos dois pontos anteriores, a sua velocidade relativa seria também o dobro da anterior. É precisamente o que nos diz a lei de Hubble.

Um outro aspecto fundamental neste exemplo é o de que o movimento de afastamento mútuo dos pontos não é um movimento através do material do balão; ele resulta sim da expansão do próprio balão. Da mesma maneira, a expansão do sistema das galáxias, de acordo com a relatividade geral, resulta da expansão do *próprio* espaço. Mais, se fixarmos a nossa atenção num ponto qualquer sobre o balão, este ponto verá todos os outros pontos afastarem-se, qualquer que tenha sido o ponto escolhido. Nenhum deles é o centro da expansão. Todos o são. O facto de vermos as galáxias afastarem-se de nós não significa, pois, que estejamos no centro do universo, pois um observador situado numa outra galáxia qualquer veria todas as galáxias a afastarem-se dele. A nossa posição não é, de forma alguma, uma posição privilegiada. É o famoso Princípio Cosmológico, primeiro enunciado por Einstein, utilizado por Friedmann e Lemaître na procura das suas soluções.

Um resultado importante, consequência da aplicação da relatividade geral à cosmologia e respectiva interpretação geométrica, relaciona o desvio para o vermelho das galáxias com a escala do universo. Se designarmos pela letra  $z$  a relação  $(f_1 - f_0)/f_0$ , onde  $f_1$  é a frequência emitida por um átomo numa galáxia, tal como é medida por um suposto observador local, e  $f_0$  a sua frequência medida por outro observador aqui na Terra, então as equações mostram que  $1 + z = f_1/f_0 = R_0/R_1$ . Um desvio para o vermelho  $z=1$ , por exemplo, significa que  $R_0/R_1=2$ , o que por sua vez nos diz que o universo tinha metade do seu tamanho actual ou, mais rigorosamente, que as distâncias típicas entre as galáxias eram metade do seu valor actual, quando a radiação que estamos a receber foi emitida.

Convém esclarecer o seguinte ponto. Quando acima falámos do deslocamento das galáxias devido à expansão do próprio espaço, não quer isto dizer que não existam outros movimentos puramente locais. Ao fim e ao cabo, a Terra gira em volta do Sol, movimento que nada tem a ver com a expansão do espaço. Nos enxames de galáxias existem importantes movimentos criados pelos campos gravíticos das galáxias desse enxame. É necessário até entrar em conta com estes movimentos, quando se pretende determinar a velocidade das galáxias devido à expansão universal. Felizmente que, à medida que a distância das galáxias aumenta, estas velocidades locais são cada vez menos importantes, quando comparadas com as velocidades devidas à expansão do espaço, sendo os possíveis erros cometidos proporcionalmente menores.

Se universo está em expansão e está imerso num banho de fótons, facilmente se conclui, como já dissemos, que no passado deveria ter sido muito mais denso e quente, tanto mais denso e quente quanto mais recuarmos no tempo. Sabemos que se comprimirmos um gás este aumenta de temperatura, devido à energia que lhe estamos a fornecer. É o que acontece com o gás de fótons que compõe a radiação de fundo. Recuando o suficiente no tempo, encontraremos uma época em que a sua temperatura era suficientemente alta para permitir que importantes reacções nucleares tivessem tido lugar. Usando física nuclear bem conhecida e partindo dos prótons, neutrões e fótons, que constituíam na altura a contribuição mais importante para a energia do universo, é possível mostrar que aproximadamente 77% da matéria do universo deverá existir sob forma de hidrogénio e cerca de 23% sob forma de hélio. Além destes, ter-se-iam também formado nessa altura quantidades residuais de deutério e de lítio. É a nucleossíntese primordial dos núcleos leves. Os elementos mais pesados foram posteriormente sintetizados no interior das estrelas.

Nestes cálculos têm papel relevante as equações de Einstein e a velocidade de expansão do universo que delas se deduz. As equações ajudam a definir uma janela dentro da qual, e só dentro da qual, a nucleossíntese é possível. Antes desse período, o universo era demasiado denso e quente e quaisquer núcleos formados teriam sido imediatamente destruídos pelas colisões com outras partículas; depois, o universo já era demasiado frio e as

energias e densidades em jogo demasiado pequenas, para a formação dos núcleos dos elementos leves, nas quantidades que as observações indicam.

A confirmação observacional das abundâncias dos núcleos leves, mais o facto de se ter mostrado que as estrelas não poderiam ter sintetizado, no seu interior, toda aquela quantidade de hélio, nem as quantidades observadas de deutério e de lítio, fazem destes cálculos um dos pilares em que assenta o modelo do Big-Bang. A todos estes resultados deveremos acrescentar a consistência entre a idade das estruturas mais antigas conhecidas e a idade do universo deduzida a partir das equações de Einstein, tal como a evidência crescente sobre a evolução das principais estruturas cósmicas. Tudo junto constitui um corpo de evidência considerável a favor deste modelo cosmológico, o que está na raiz do termo usado por Steven Weinberg de modelo standard da cosmologia.

### 3. A relatividade geral e a descrição do universo

A aplicação das equações de Einstein na descrição da expansão do universo vai-nos permitir avançar mais e tornar mais preciso tudo o que temos vindo a dizer. Como sabemos, na teoria da relatividade geral a presença das massas leva a uma modificação da geometria do espaço, originando uma curvatura deste proporcional à densidade de energia (sob todas as formas), efeito que poderemos sintetizar na equação

$$\text{Curvatura do espaço-tempo} = \text{Densidade de matéria}$$

A curvatura do espaço que resulta da presença de matéria é a forma moderna de descrever os efeitos do campo gravitacional, estando hoje bem confirmada por experiências de grande precisão e delicadeza.

A aplicação das equações da relatividade geral a uma geometria homogénea e isotrópica, que resulta de uma distribuição homogénea e isotrópica da matéria, conduz a consequências muito importantes. Uma consequência é que, numa tal geometria, a curvatura do espaço é uniforme em cada instante de tempo, embora varie com o tempo de uma forma que as equações descrevem.

Espaços homogêneos e isotrópicos, dizem-nos os matemáticos, podem ser de três tipos: de curvatura positiva, negativa ou nula, ou, usando uma linguagem diferente, espaços fechados, de volume finito (o primeiro caso), ou abertos, de volume infinito (os outros dois). Os espaços de curvatura positiva podem ser vistos como a generalização, para três dimensões, de uma superfície esférica, cuja área (volume, no caso de três dimensões) é finita - finita, mas sem fronteiras; fecham-se sobre si próprios. Os espaços de curvatura global nula não têm dificuldade, são os espaços planos da geometria de Euclides a que estamos habituados; a única diferença é que agora temos que o espaço está em expansão uniforme, significando isto que, dadas duas galáxias afastadas, a sua distância aumenta com o tempo. Os espaços de curvatura negativa são mais difíceis de visualizar. Uma curvatura negativa encontrámo-la, por exemplo, no mínimo de uma sela de cavalo.

O que é ainda mais importante é que as equações permitem-nos relacionar o tipo de curvatura e a história da sua evolução no tempo, com a densidade de energia média do universo. Existe um valor crítico da densidade de energia, que pode ser calculado conhecendo o valor da constante de Hubble, tal que, para essa densidade, a curvatura do universo é nula. O universo a muito larga escala tem uma geometria plana, cujas propriedades médias são determinadas aplicando os métodos da geometria de Euclides. Das equações deduz-se que um tal universo expandir-se-á para sempre, tornando-se cada vez mais frio. O mesmo a um universo cuja densidade de energia seja inferior ao valor crítico, a diferença sendo que agora as propriedades geométricas, distâncias, áreas, volumes, são calculadas utilizando métodos que diferem dos da geometria euclidiana.

Igualmente interessante é o caso em que a densidade é superior ao valor crítico. O universo expande-se, mas não para sempre. Atingirá um valor máximo ao fim de um tempo finito, passando, a partir daí, a uma fase de contracção, durante a qual a sua temperatura irá aumentando cada vez mais. Matematicamente as equações mostram que acabará num estado de temperatura e densidade infinitas, muito parecido com o estado de que partiu no início da expansão. É altamente provável que as nossas equações percam a sua validade antes de se atingirem estes estados extremos da matéria, com o aparecimento de importantes efeitos quânticos a nível da teoria da relatividade



geral, levando a modificações desta teoria. O estudo destes efeitos é um dos tópicos mais quentes e mais difíceis da física e estamos ainda longe de uma solução do problema. É aqui que entra a famosa teoria das supercordas quânticas.

Terminemos esta parte com a indicação de alguns valores numéricos importantes, começando com a constante de Hubble. Da sua definição, dada atrás, vemos que as unidades de H são as de uma velocidade a dividir por uma distância. Convencionalmente usa-se o km/segundo, para a velocidade, e o megaparsec, para a distância. Um parsec, unidade muito usada pelos astrónomos, é igual à distância que a luz percorre em 3.3 anos, o que dá  $3.1 \times 10^{13}$  km, 3.1 seguido de treze zeros. Um megaparsec é igual a um milhão de parsecs. A constante de Hubble H, cujas unidades são o segundo<sup>-1</sup>, vem na prática expressa em (km/segundo/ megaparsec) e o seu valor é

$$H = (67 \pm 10) \text{ km/s/Mpc.}$$

Conhecido este valor, podemos calcular a densidade crítica ( $\rho_c$ ). A fórmula é muito simples e vale a pena escrevê-la:

$$\rho_c = 3 H^2 / (8 \pi G_N), \quad G_N = \text{constante gravitacional de Newton.}$$

Por substituição dos valores (atenção: usar um sistema homogéneo de unidades) obtemos  $\rho_c = 8.4 \times 10^{-30}$  g/cm<sup>3</sup>, aproximadamente 5 átomos de hidrogénio por cada m<sup>3</sup>. Matéria bem rarefeita! (Para evitar confusões, relembremos que segundo a teoria da relatividade podemos exprimir, indiferentemente, as densidades em termos de densidade de matéria, ou em termos de densidade de energia).

Outro valor que podemos calcular é a idade do universo, que é da ordem de 1/H. Fazendo um cálculo mais preciso, obtemos  $15 \times 10^9$  anos, quinze mil milhões de anos.

O passo mais importante que temos que dar a seguir é o de comparar a densidade crítica, obtida a partir de H, com os valores estimados pelos astrónomos a partir directamente de uma grande variedade de observações. E

a primeira surpresa aparece quando se verifica que toda a matéria do universo sob a forma mais comum, a matéria da qual as coisas que conhecemos são feitas, prótons, neutrões, electrões, fótons, etc., corresponde a uma densidade que é, quando muito, cinco por cento da densidade crítica. Nestes cálculos entram não só os valores obtidos a partir do estudo da luminosidade das galáxias, a matéria luminosa, mas ainda, e muito importante, certos limites muito bem conhecidos que resultam do estudo da nucleossíntese dos elementos leves.

Acontece que, com base em estudos da dinâmica dos enxames de estrelas da nossa galáxia, e da dinâmica doutras galáxias e enxames de galáxias, se foi levado a concluir que era necessário admitir a existência de uma quantidade de matéria muito superior àquela que acabamos de indicar. Esta matéria, que existirá sob uma forma que apenas podemos, neste momento, tentar teoricamente descrever, mas que temos todas as razões para supor que existe, e que não é a do tipo comum, é conhecida por *matéria escura*. Tentar observá-la, descrever as suas propriedades e inseri-la num quadro teórico, é um dos grandes desafios postos actualmente pela cosmologia.

Mas temos pela frente mais problemas. Se somarmos a quantidade de matéria comum com a matéria escura, encontramos um valor para a densidade que é no máximo trinta por cento da densidade crítica. Até aqui tudo bem, querendo este resultado simplesmente dizer que nos encontraríamos num universo aberto. Só que, desenvolvimentos mais recentes, entre os quais podemos incluir o modelo inflacionário, de que falaremos mais adiante, os estudos extremamente detalhados sobre a estrutura em larga escala do universo e as medições muito precisas das propriedades da radiação de fundo de micro-ondas, levaram os físicos a concluir que um universo com uma densidade muitíssimo próxima da densidade crítica era a hipótese mais provável, quando comparada com as outras alternativas.

Quase todas as observações astronómicas de interesse para a cosmologia dependem do problema de encontrar um método adequado de estimar as distâncias dos objectos observados. Este problema é muito complicado quando lidamos com distâncias muito grandes. Se tivéssemos uma

espécie de vela padrão, um objecto astronómico cuja luminosidade absoluta fosse bem conhecida, suficientemente potente para poder ser visto a distâncias muito grandes, e comum no universo, o problema estava resolvido. Medindo a sua luminosidade relativa e comparando-a com a luminosidade absoluta ou intrínseca, automaticamente ficaríamos a conhecer a distância a que se encontrava o objecto. Infelizmente tem sido muito difícil encontrar objectos com estas características. As galáxias, que à partida poderiam fornecer essa vela padrão, diferem imenso nas suas propriedades e os resultados obtidos, utilizando-as, ressentem-se disso.

Recentemente, descobriu-se que existe uma correlação acentuada entre a luminosidade absoluta máxima e a taxa de declínio da luminosidade, em certo tipo de supernovas. As supernovas são estrelas no fim de vida e que, uma vez esgotado o seu combustível nuclear, implodem com uma violência inaudita, atingindo por breves horas luminosidades da ordem de grandeza da luminosidade de uma galáxia inteira, o que permite detectá-las, quando situadas em galáxias a distâncias muito grandes. Como a taxa de declínio se pode medir com rigor, conhecida esta, sabemos imediatamente qual o valor da luminosidade absoluta da supernova. Comparando este valor com o da luminosidade medida pelo observador, a luminosidade relativa, conhecemos a distância da supernova e a da galáxia em que ela se encontra. Este método permite, segundo os especialistas, calcular as distâncias com uma precisão inferior a 10%.

Foi este método permitiu aos astrónomos determinarem a constante de Hubble com uma precisão muito superior ao que era habitual. O valor que atrás indicámos é o resultado destas medições. Foi possível determinar com muito maior precisão a relação entre o desvio para o vermelho ( $z$ ), a já referida diminuição da frequência da radiação emitida pelas galáxias distantes, com a luminosidade relativa das supernovas, logo com a distância. Tal relação depende da geometria do universo e é possível calculá-la teoricamente. Os resultados obtidos parecem indicar, por um lado, que o universo é plano, logo com uma densidade muito próxima da densidade crítica e, por outro, o que foi uma surpresa, que se encontra numa fase de expansão acelerada.

Para compreendermos o significado destes resultados, e donde vem a energia que corresponde à diferença entre a densidade crítica e o valor que os

físicos tinham estimado ser apenas de trinta por cento desta densidade, como já descrevemos, será conveniente lembrar o seguinte. A gravitação é um fenómeno universal, que leva a que toda a matéria se atraia. É pois razoável esperar que a esta atracção mútua entre os corpos corresponda uma diminuição, ao longo do tempo, da velocidade de expansão do universo. Que, ao invés disso, o universo mostre estar a expandir-se com uma velocidade crescente, com uma aceleração positiva, levanta um problema exigindo uma explicação. E a explicação encontrada foi re-introduzir nas equações uma constante que em 1917 Einstein tinha introduzido pelas razões erradas - a constante cosmológica.

Esta constante, convenientemente introduzida nas equações, origina uma repulsão gravitacional que compensa a força de atracção entre as massas, permitindo assim uma descrição de um universo globalmente estático. Notemos que em 1917 o movimento de expansão do sistema de galáxias não era ainda conhecido e muitos astrónomos suspeitavam que o universo se reduzia à nossa galáxia, a Via Láctea. Foi este tipo de universo que Einstein tinha em mente, quando fez aquelas modificações nas suas equações, o que levou a que a glória de prever teoricamente a expansão do universo lhe tivesse escapado por entre os dedos e que ele tivesse considerado a introdução da constante como o maior erro por ele alguma vez cometido.

Se dermos à constante cosmológica um valor ligeiramente superior ao valor necessário para compensar a atracção entre as massas, compreendemos que isto criará um universo em que o movimento de expansão, em vez de estar em desaceleração, se encontre, pelo contrário, em aceleração. Veremos na secção 7 que existem processos mais sofisticados, baseados em campos físicos, permitindo explicar a aceleração do universo.

É esta a situação em que de momento nos encontramos. É ainda cedo para se tirarem conclusões definitivas, mas não há dúvida que, a confirmarem-se os resultados das observações, temos um importante desafio pela frente: tentar compreender qual a origem física última deste fenómeno. Existem, por outro lado, razões de sobra para se pensar que esta aceleração é, em termos relativos, recente e, provavelmente, passageira. No passado, a expansão do universo teria sido aquela que nos é dada pelo modelo standard.

A partir do valor observado para a aceleração, é possível calcular a constante cosmológica, ou o equivalente dela, e qual o valor da densidade de energia que lhe está associada. Este valor vem praticamente igual à diferença entre a densidade crítica e a densidade correspondente à matéria normal mais a matéria escura, cerca de setenta por cento da densidade crítica. De acordo com as observações, habitamos um universo aberto, plano (densidade praticamente igual à densidade crítica), em que setenta por cento da matéria total existe numa forma cujas propriedades físicas e cuja origem estamos longe de compreender em detalhe.

À energia associada com a constante cosmológica é costume designá-la por energia escura (dark energy), para a distinguirmos da matéria escura (dark matter), cuja presença já era conhecida desde os anos 1930, devido ao trabalho de astrónomos como Zwicky.

#### 4. Uma história resumida do universo

Com base no que acabamos de descrever, podemos avançar e tentar resumir a história do universo e da sua evolução ao longo dos tempos.

Comecemos com um resultado teórico muito importante. Esquecendo de momento a possível presença de uma constante cosmológica no universo actual, olhando para este como um todo, podemos dividir a sua composição em dois tipos distintos: por um lado temos a matéria, normal ou escura, e por outro temos radiação. Estes dois tipos de componentes têm comportamentos distintos face à expansão do universo.

Sabemos que a densidade da matéria é inversamente proporcional ao volume, isto é, quando a escala do universo (genericamente designada por  $R$ ) varia, mantendo-se o número de partículas constante, o que iremos supor, esperamos que a densidade seja proporcional a  $1/R^3$ . Mas a radiação tem um comportamento diferente. Relembremos que esta pode ser encarada como um gás de fótons, que a energia de cada fóton é proporcional à frequência da radiação e esta, por sua vez, é inversamente proporcional ao comprimento de onda. Resulta das equações de Einstein que o comprimento de onda da radiação aumenta na mesma proporção em que aumenta a escala do universo  $R$ , donde resulta ser a frequência, logo a energia de cada fóton, inversamente proporcional a  $R$ . Portanto, à medida que o universo se expande, o número de

fotões variará com  $1/R^3$ , como acontece com o número de partículas da matéria, mas teremos neste caso um factor adicional de  $1/R$  que resulta da energia de cada fotão estar a diminuir. Resumindo, à medida que varia a escala  $R$ , a energia contida na radiação varia com  $1/R^4$ , mais rapidamente que a energia contida na matéria.

A conclusão a tirar é que, se recuarmos no tempo,  $R$  diminui, a energia da matéria e da radiação aumentam, esta mais rapidamente do que aquela, e haverá uma época, no passado do universo, em que necessariamente dominava a energia contida na radiação. Das propriedades termodinâmicas do gás de fotões resulta que a sua energia está relacionada com a temperatura, a qual é inversamente proporcional à escala  $R$  do universo, o que faz com que, quando a escala do universo  $R$  era aproximadamente mil milhões de vezes mais pequena do que actualmente, a sua temperatura fosse cerca de mil milhões de vezes superior, temperaturas estas a que correspondem energias apropriadas às reacções nucleares. Foi nessa altura que tiveram lugar os fenómenos que originaram a formação dos núcleos leves, hidrogénio, hélio, deutério e lítio. É a famosa história dos três primeiros minutos.

A partir desta altura o universo continuará a expandir-se, dominado ainda pela energia da radiação e demasiado quente para que electrões e núcleos se possam juntar, para formarem por sua vez os átomos e moléculas que tão bem conhecemos. A matéria forma aquilo que em física se chama um *plasma*, com as cargas positivas e negativas separadas umas das outras. E assim continuará durante cerca de 300 000 anos. As interacções entre os fotões e a restante matéria são muito violentas, com colisões constantes, a radiação exercendo uma pressão sobre a matéria que impede a formação de condensações de matéria. Mas ao fim daquele tempo duas coisas acontecem: por um lado, a temperatura do universo baixa para valores que permitem a formação de átomos e moléculas e, por outro, a energia contida na matéria começa a ser superior à energia da radiação, entrando-se na era dominada pela matéria.

Com a formação dos átomos e das moléculas, que são corpos neutros, desaparece igualmente aquela forte interacção dos fotões com a matéria. O universo torna-se praticamente transparente à radiação, que globalmente mantém as características que tinha naquela altura, a chamada época de

recombinação, excepto no que diz respeito à sua temperatura que, essa, continuará a diminuir com  $1/R$ . É por isso que, estudando em detalhe a radiação de fundo, nós podemos aprender tanto sobre as propriedades do universo. A radiação de fundo de micro-ondas dá-nos como que uma radiografia do universo, quando ele tinha aproximadamente 300 000 anos de vida.

Desaparecendo aquelas interacções e a correspondente pressão que a radiação exerce sobre a matéria, o universo encontra-se finalmente em condições de ver formarem-se, lentamente, muito lentamente, as estruturas que hoje observamos, desde os planetas aos imponentes enxames e superenxames de galáxias.

Tendo começado a nossa história na época da nucleossíntese dos elementos, poderemos perguntar-nos o que é que sabemos sobre os estados anteriores do universo, pois este não começou naquela altura, a sua história contendo épocas anteriores mais densas e mais quentes.

Sobre as épocas imediatamente anteriores alguma coisa sabemos. Sabemos, por exemplo, que um pouco antes da altura da nucleossíntese primordial se teria formado uma radiação de fundo de neutrinos, partículas neutras, muito leves, de spin igual ao do electrão, com um papel determinante nas reacções que estão na origem da energia das estrelas. São partículas muito elusivas, o que torna extremamente difícil a sua detecção. Recuando ainda mais, uma altura haverá em que todas as partículas que conhecemos, neutrões, prótons, electrões e outras, se encontravam juntas, sobrepondo-se; grosso modo poderemos, talvez, descrever o universo nesta altura como um monumental saco de quarks e de glúons, os constituintes básicos dos neutrões e dos prótons, à mistura com os electrões, os fótons e os neutrinos. Tudo isto formava um plasma de quarks com temperaturas entre os  $10^{13}$  °K e os  $10^{16}$  °K, cujas complicadas propriedades são hoje objecto de intensos estudos nos maiores aceleradores.

Paramos neste ponto? Não podemos, pois certamente existiram fases ainda mais remotas, mais densas e mais quentes. Uma das perguntas a que teremos que tentar responder é a razão pela qual, quando olhamos à nossa volta, só vemos matéria. Ora nós sabemos que a anti-matéria existe. Todos os

dias ela é criada nos aceleradores de partículas, com propriedades muito semelhantes às da matéria. Teria sido o universo criado só com matéria? É difícil aceitá-lo. O mais natural é supor que o universo era, nos seus inícios, simétrico em relação aos seus constituintes. Sabe-se que de facto a anti-matéria não se comporta de uma maneira exactamente igual à da matéria. A diferença é muito subtil, muito pequena, mas é o suficiente para abrir uma janela de possibilidades através da qual poderemos, eventualmente, vir a perceber porque é que num universo, inicialmente simétrico, a matéria acabou por vir dominar de uma forma tão completa. É o estudo da bariogénese, palavra que vem de barião, nome por que são conhecidas partículas como o próton, o neutrão e outras mais pesadas de spin semi-inteiro.

De acordo com a teoria, estes fenómenos ter-se-iam passado quando o universo tinha temperaturas muito maiores que as anteriormente referidas, temperaturas entre os  $10^{25}$  e os  $10^{28}$  graus Kelvin. A estas temperaturas a energia cinética média dos constituintes do universo era cerca de  $10^{12}$  -  $10^{15}$  vezes a energia contida na massa de um próton. Energia brutais, difíceis de imaginar que alguma vez possam vir a ser obtidas em laboratório, e que tornam o universo primitivo o único “acelerador” capaz de alguma vez as ter produzido. Daí que uma das áreas mais interessantes e fascinantes da cosmologia moderna seja o estudo do universo muito primitivo, domínio de interface entre a cosmologia e a física das altas energias, estudo da matéria ao nível mais fundamental e elementar.

Mas a história ainda não acabou. Existem problemas no modelo do Big-Bang cuja solução, ou, pelo menos, aquela solução que de momento tem o apoio da maioria dos especialistas, parece apontar para uma fase, anterior à da bariogénese, durante a qual, por brevíssimos instantes ( $10^{-35}$  segundos!), o universo se teria expandido a uma velocidade enorme e que, apropriadamente, tem sido designada por fase inflacionária.

E antes? Teria havido no passado do universo, no seu início, uma singularidade, um ponto de densidade de energia infinita? A resposta está longe de ser conhecida, tudo indicando que teriam sido determinantes no comportamento do universo fenómenos quânticos associados com a gravitação, sobre os quais pouco sabemos, que não estão contemplados nas equações da relatividade geral, e que são o objectivo último do estudo das



supercordas. Teremos que esperar pelos desenvolvimentos destas teorias para podermos ter, pelos menos, a ferramenta matemática que nos permita formular convenientemente e responder a este tipo de perguntas.

## 5. A radiação de fundo de micro-ondas

A radiação de fundo tem-nos fornecido tantas informações sobre o universo, que merece bem mais algumas palavras a ela dedicadas. Descrevemos a sua origem nos primeiros minutos e como é que ela nos fornece uma radiografia do universo na época da recombinação. E o que é que a radiografia nos diz?

Antes da época de recombinação o universo apresentava-se sob a forma de um plasma, interagindo fortemente com os fótons da radiação de fundo. Isto fazia com que, do ponto de vista termodinâmico, matéria e radiação se encontrassem em equilíbrio mútuo. Quando isto acontece sabemos, desde o século XIX, que a curva que descreve a intensidade da radiação em função da frequência toma a forma típica designada por radiação do corpo negro. Estudada durante muitos anos, a explicação da sua forma veio finalmente a ser encontrada por Planck, com a introdução do conceito de quantum de radiação, que esteve na origem dessa grande revolução que foi a física quântica. Daí que a previsão de Gamow e colaboradores incluisse esta forma para a curva da radiação de fundo de micro-ondas. Tal forma veio a ser confirmada, de modo definitivo, pelo satélite COBE em 1990. O universo apresentava-se-nos, qualquer que fosse a direcção para onde olhássemos, como o corpo negro mais perfeito alguma vez observado.

O mais perfeito, mas não inteiramente assim. A sua isotropia reflectia a isotropia do universo naquela época, constituindo um dos pilares do modelo standard. No entanto, se esta isotropia fosse perfeita, teríamos dificuldade em explicar a formação das estruturas cósmicas que hoje vemos. A partir do estudo destas estruturas, e da forma como elas hoje se apresentam, foi possível deduzir, andando para trás no tempo, que era necessário terem existido, na época da recombinação, pequenas irregularidades na distribuição da matéria que, por sua vez, se deveriam reflectir em pequeníssimas variações na temperatura da radiação de fundo. As irregularidades indicariam zonas onde a densidade média de energia era superior, ou inferior, ao valor médio. As

galáxias e os seus enxames ter-se-iam formado a partir do colapso lento da matéria existente nestas zonas, onde a densidade era ligeiramente superior à densidade média. Campo de importantes investigações, ponto onde a astrofísica em larga escala se encontra com a cosmologia.

A descoberta das flutuações na temperatura da radiação de fundo foi outra importante vitória do modelo standard, um importante teste da correcção geral das nossas ideias sobre o universo e sua evolução. Mas será possível, por sua vez, explicar a origem e deduzir as propriedades destas flutuações da temperatura? Veremos que sim.

## 6. Algumas dificuldades teóricas do modelo do Big-Bang

Referimos muito brevemente, na secção 3, que nos seus inícios o universo teria passado por uma fase inflacionária, muito breve, mas durante a qual se teria expandido enormemente. Vamos tentar descrever, sucintamente, quais os problemas que levaram os cosmólogos a postular uma fase com estas características e como é que é possível implementá-la teoricamente. Vale a pena fazê-lo, pois o modelo inflacionário não só tem sido objecto de um esforço muito grande de investigação, como leva a previsões novas, algumas delas já confirmadas, e outras que o serão (ou não!) num futuro mais ou menos próximo.

Existem vários problemas no modelo actual que não têm resposta simples dentro dele, a não ser postulando condições iniciais, no passado remoto do universo, muito específicas e pouco naturais. Por uma questão de simplicidade, limitar-nos-emos a dois problemas, designados respectivamente por problema da planaridade do universo e por problema do horizonte.

Primeiro o problema da planaridade. Em que consiste?

As observações conhecidas e a teoria indicam um universo cuja densidade é muito próxima da densidade crítica, um universo plano. Existem boas razões para nos sentirmos satisfeitos com estes resultados, entre elas uma razão de peso, que se relaciona com facto das equações serem extremamente sensíveis a qualquer afastamento do valor da densidade em relação à densidade crítica. Se imaginarmos que no seu passado o universo tinha uma densidade total de energia ligeiramente inferior ao valor crítico, as equações mostram que ao longo do tempo este afastamento aumentaria de

uma forma tão drástica e tão rapidamente e, simultaneamente, a velocidade de expansão seria tão rápida, que hoje teríamos um universo praticamente vazio, onde nunca teriam existido as condições mínimas para a formação de qualquer tipo de estrutura complexa.

O universo seria pois muito diferente daquilo que observamos. Mais, tais consequências apareceriam, mesmo que a diferença para a densidade crítica fosse muito, muito pequena, por exemplo, um afastamento da ordem de uma parte em mil milhões na época da nucleossíntese! Este comportamento resulta directamente das equações e tem, surpreendentemente, a ver com a pequenez da constante de Newton da gravitação universal. São equações extremamente sensíveis a qualquer afastamento do valor da densidade crítica.

E se esta diferença existisse, mas no sentido contrário, um universo em que a densidade fosse muito ligeiramente superior à densidade crítica? As consequências seriam igualmente catastróficas. O universo teria tido uma vida extremamente curta, nunca chegando a atingir a idade vetusta que já possui, pois há muito que se teria expandido e colapsado.

Antes de tentarmos descrever a solução encontrada, vejamos qual é o outro problema, o do horizonte. Este problema resulta de a velocidade máxima a que são propagados os fenómenos físicos ser a velocidade da luz, velocidade finita. Outra propriedade da luz, importante neste contexto, é que ela se propaga segundo uma linha a que os matemáticos chamam geodésica; coincide com a linha recta no caso de uma geometria plana. É a linha mais curta entre dois pontos. Sobre a superfície de uma esfera esta linha coincide com os círculos máximos, de que os meridianos do globo terrestre são um exemplo (mas atenção, não o são os paralelos!).

A conjugação destas duas propriedades levanta um problema, quando consideramos a isotropia da radiação de fundo de micro-ondas. Consideremos dois fotões, dessa radiação, que supomos emitidos na época de recombinação e que nos atingem num determinado momento. Suponhamos que estes fotões vinham segundo direcções diferentes, fazendo entre si um ângulo superior a dois graus e tentemos refazer o seu percurso, andando pois para trás no tempo, ao longo das geodésicas que eles percorreram. Estas geodésicas começaram na época da recombinação e é aí que vamos ter, mas vamos ter, claro, a pontos diferentes.

E começam as dificuldades. É que, se calcularmos a distância a que estes pontos se encontram, verificamos que essa distância é superior ao produto da velocidade da luz pelo tempo de vida do universo, contado desde o seu começo até à época em que foram emitidos aqueles fotões, tempo que é aproximadamente igual a 300 000 anos. O que, por sua vez, significa que esses pontos nunca tiveram a possibilidade de terem estado em contacto causal. Se isto se passa com fotões emitidos segundo direcções que diferem de apenas dois graus, o mesmo se passa com fotões emitidos segundo quaisquer direcções fazendo entre si um ângulo superior. A radiação de fundo de micro-ondas seria assim constituída pela soma, ou sobreposição, de pequenas regiões sem contacto causal e que, por isso mesmo, à partida, poderiam diferir muito. Ora a propriedade mais notável da radiação de fundo é precisamente a sua extraordinária uniformidade, a sua isotropia. Como explicá-la?

O problema torna-se mais grave, se considerarmos épocas ainda mais remotas, onde vamos encontrar que cada uma das regiões atrás referidas resulta, por sua vez, da sobreposição de um número cada vez maior de regiões causalmente desconexas. Mas é a própria intensificação do problema que lança luz sobre uma possível sua resolução.

Suponhamos, então, que no passado mais remoto o universo, em vez de se ter expandido com a velocidade prevista pelas equações que temos estado a usar, se tinha expandido com uma velocidade muito superior. Nestas condições, imediatamente vemos que qualquer região, por exemplo na época da recombinação, teria tido origem numa região, no seu passado, de tamanho muito mais pequeno do que o que teria que ter, se a velocidade fosse igual à definida pelo modelo standard. Se a nova velocidade que estamos a considerar for suficientemente elevada, mostra-se que o volume do universo na época da recombinação, ou em qualquer época passada, poderia perfeitamente ter resultado de uma região suficientemente pequena, para que todos os seus pontos tivessem tido a possibilidade de terem estado em contacto causal entre si. Isto é, estaríamos em condições de poder explicar, a partir de mecanismos físicos, a isotropia e a homogeneidade, não só da radiação de fundo, mas do universo, quando visto a muito larga escala.

Esta solução tem a vantagem de, simultaneamente, resolver o problema da planaridade. Num universo expandindo-se a velocidades enormes, uma região finita qualquer aproxima-se de uma região plana, exactamente como sobre uma superfície esférica, com um raio desmesurado, a geometria local pouco difere da geometria plana. E é isso que acontece, desde que a velocidade de expansão tivesse sido suficientemente elevada; nestas condições, o universo visível, directamente acessível, é apenas uma porção do todo, suficientemente pequena, em relação ao todo, para que possamos considerá-la plana, logo com uma densidade igual à densidade crítica.

A expansão inflacionada teve que ter lugar durante um curto período de tempo e muito antes da época da nucleossíntese, pois sabemos que os cálculos efectuados para a nucleossíntese, utilizando o modelo standard, funcionam na perfeição. Nestes cálculos, como vimos, tem papel relevante, entre outras coisas, a velocidade de expansão, tal como definida pelo modelo standard.

Para se atingirem rapidamente tais velocidades, temos necessidade de acelerações muito elevadas, e estamos caídos num problema semelhante ao que referimos acima, ao falarmos dos resultados das medições da constante de Hubble. Só que, notemos, os dois problemas não são o mesmo. O problema a que nos estamos a referir aparece no universo muito primitivo, o outro problema dizia respeito ao universo actual.

Em suma, começamos a perceber que o universo é muito mais complicado do que suporíamos à partida, mas, por isso mesmo, muito mais interessante.

## 7. O modelo inflacionário

Uma solução para os problemas descritos será admitir no universo primitivo a existência de uma constante cosmológica. A sua presença, ou algo que lhe seja equivalente, originará uma expansão acelerada. Foi esta a solução proposta por Alan Guth em 1981. Com modificações posteriormente introduzidas por Andrei Linde e outros, é ainda a solução preferida pela maioria dos cosmólogos.

Numa versão simples deste tipo de modelos, postula-se a existência de um campo escalar, o inflatão, um campo formado por partículas de massa

diferente de zero e spin nulo. Ao contrário do que se possa supor, esta hipótese não é inteiramente ad hoc e arbitrária, pois sabemos da teoria das supercordas que campos escalares devem ter existido abundantemente em épocas muito primitivas do universo, quando ele era muito mais quente e energético do que actualmente.

Se tivermos um campo escalar, a sua energia terá as usuais componentes de energia cinética e de energia potencial, esta resultante das interações do campo consigo próprio, das partículas umas com as outras. A energia total é a soma destas duas componentes: energia total = energia cinética + energia potencial. Nas equações de Einstein, um campo com estas características comporta-se com se fosse um fluido, com uma determinada pressão que é dada pela diferença entre aquelas duas componentes: pressão = energia cinética - energia potencial. A energia potencial aparece com sinal oposto nas duas expressões.

Suponhamos então que, numa determinada região do espaço, a energia cinética era muito pequena comparada com a energia potencial. Nesta região resulta das relações anteriores que a pressão  $\approx$  - energia potencial. Quando isto acontece, as equações mostram que o efeito do campo é em tudo semelhante a um termo repulsivo, uma espécie de constante cosmológica que fará com que o universo se expanda com uma velocidade crescente, logo com uma aceleração positiva. Uma escolha adequada dos parâmetros permitirá a resolução dos dois problemas da planaridade e do horizonte.

Mas as vantagens do modelo inflacionário não se reduzem a resolver estes dois problemas. Na altura em que o modelo apareceu, o próprio Guth mostrou que ele previa a existência de pequeníssimas perturbações na distribuição da densidade de energia, perturbações de origem quântica, que ao longo dos tempos se iriam expandindo e amplificando de tal forma que, na época da recombinação, teriam exactamente as características das flutuações presentes na radiação de fundo de micro-ondas. Foi o primeiro modelo e, até hoje, o único a permitir prever a existência destas flutuações a partir de primeiros princípios. E dizemos prever porque estes resultados foram teoricamente derivados muitos anos antes destas flutuações terem sido encontradas na radiação de fundo. A sua detecção tem sido considerada até à

data, e justamente, como o mais importante teste positivo do modelo inflacionário.

A comparação detalhada que é possível fazer, e tem sido feita, entre a teoria e os resultados observacionais obtidos sobre estas flutuações, mais uma vez nos levam na direção de um universo plano, com uma densidade total de energia igual à densidade crítica.

Várias vezes temos referido os estudos da estrutura em larga escala do universo, estudos que tentam compreender como, a partir daquelas pequenas irregularidades na distribuição da densidade de energia, se formaram as galáxias e os enxames de galáxias. As investigações mais recentes indicam, também elas, como modelo mais provável, um modelo em que a densidade é igual à densidade crítica, mas em que, note-se, parte desta energia é devida a uma constante cosmológica. Lembremos que estas investigações se desenvolveram, em grande parte, de forma independente das ideias relacionadas com o universo inflacionário.

Temos uma série de resultados, vindos de áreas diferentes da cosmologia e da astrofísica, mas todos apontando na mesma direção: um universo, onde a densidade total é aproximadamente igual à densidade crítica.

Uma importante e independente previsão da inflação diz respeito à existência de um fundo de ondas gravitacionais que, em larga medida, teria igualmente tido origem nesta época primitiva do universo. As ondas gravitacionais são pequeníssimas perturbações locais na geometria do universo, propagando-se com uma velocidade exatamente igual à velocidade da luz. Têm origem em acontecimentos cataclísmicos, como as explosões das supernovas, colisões entre estrelas de neutrões, ou de buracos negros, ou ainda em modificações importantes nas condições do universo, como aquelas que estão ligadas ao aparecimento de uma fase inflacionária, ou à passagem de um universo dominado pela radiação a um universo dominado pela matéria.

No caso das ondas gravitacionais de origem cosmológica, a sua importância advém de nos poderem fornecer toda a espécie de informações sobre as fases primordiais do universo. Devido à pequenez da constante da gravitação universal, grande parte destas perturbações chegam até nós com as propriedades que tinham na altura em que foram geradas. Mas é esta mesma

pequenez da constante de Newton que está na origem das dificuldades que se têm encontrado na sua detecção, cuja resolução tem exigido a aplicação da mais moderna tecnologia nos detectores que estão a ser construídos.

Estas ondas, através das pequenas irregularidades na geometria que elas reflectem, contribuem também para as flutuações na radiação de fundo de micro-ondas. Separar estes dois tipos de flutuações, as que provêm das ondas gravitacionais e as que estão directamente ligadas às variações na densidade de energia, não é tarefa fácil. A sua possível presença poderá, eventualmente, vir a ser detectada pelo satélite europeu Planck, que se espera venha a ser lançado em 2007, ou até pelo satélite americano MAP, lançado em Junho de 2001, cujos primeiros resultados se pensa virem a ser conhecidos nos inícios de 2003.

## 8. O futuro

Por mais boa vontade que tenhamos é quase, ou mesmo, impossível fazer futurologia; sempre que somos tentados a fazê-lo o universo surpreende-nos com novos e inesperados desafios. Mas algumas linhas importantes de investigação podemos tentar definir, com base nos problemas que encontrámos ao longo da viagem que fizemos.

Começaremos no início, resumindo o que aprendemos sobre a evolução do universo e definindo os problemas que foram aparecendo.

Muito esforço, de momento puramente teórico, continuará a ser investido na procura de uma teoria quântica dos fenómenos gravitacionais, esforço que desde há décadas vem desafiando a capacidade dos físicos e para o qual, apesar dos progressos feitos mais recentemente, nomeadamente nas supercordas, se não vislumbra a solução final. Qualquer que seja a solução que venha a ser encontrada, ela terá um grande impacto na formulação mesma e na investigação do fenómeno cosmológico em geral e, em particular, grande será o seu impacto na definição do modelo inflacionário.

Logo a seguir à época inflacionária, algo de muito importante se teria passado no universo, o desaparecimento da anti-matéria, a chamada bariogénese. Campo aberto, onde está quase tudo por fazer.

Para que atinjamos uma época no universo primitivo que possamos considerar como razoavelmente bem conhecida, temos que esperar pela época



da nucleossíntese primordial. Daqui até próximo da época de recombinação, nada de particularmente espectacular se teria passado. No entanto, se aceitarmos a existência da matéria escura, é muito provável que a lenta formação das estruturas cósmicas tenha começado antes da época de recombinação, embora tenha sido necessário esperar por esta época para que o fenómeno se começasse a desenvolver plenamente.

O domínio definido pelo estudo da formação da estrutura em larga escala é um dos que mais se têm expandido nos últimos anos, e dele se esperam importantes desafios ao quadro geral definido pelo modelo do Big-Bang. Em particular, ter-se-à que encontrar resposta para o problema da aceleração presente do universo. Está de facto lá, esta aceleração? E a energia escura? Qual a sua explicação e razão última? No universo nada acontece por acaso! E a matéria escura, de que é feita?

Também tudo o que diga respeito ao estudo da radiação de fundo de micro-ondas vai continuar na ordem do dia, sendo esperados com ansiedade os primeiros resultados do satélite MAP. Com igual ansiedade se espera o lançamento do satélite europeu PLANCK, para 2007. Com estes satélites, com a qualidade das suas medições e da dos novos telescópios, podemos dizer que a cosmologia entrou numa fase de observações precisas, como até aqui ainda não tinha conhecido.

E por fim temos as ondas gravitacionais, que continuarão a ser activamente procuradas e investigadas. São um telescópio único, não só em cosmologia, mas igualmente em astrofísica. A partir delas poderemos vir a ter informações directas sobre o nosso passado mais remoto e sobre o que se passa no mais profundo das estrelas, sobre esses cataclismos que são as supernovas, ou o colapso de estrelas de neutrões e de buracos negros.

Todos estes avanços têm sido possíveis pela conjugação de duas coisas. Por um lado, um extraordinário desenvolvimento nos instrumentos teóricos e nos conceitos à nossa disposição, e por outro, o desenvolvimento igualmente enorme na parte tecnológica, com impacto na construção de poderosos telescópios, pondo em jogo novos conceitos, como os de óptica adaptativa, associados, por sua vez, a detectores extremamente sofisticados, que têm ajudado a criar uma imagem completamente nova do universo.

A mensagem que gostaria de deixar, e que espero tenha sido passada, é que a cosmologia moderna é um domínio científico aberto, cheio de problemas e desafios, que entra no terceiro milénio cheia de actividade, numa fase de grande expansão, onde são e serão cada vez mais necessárias novas ideias - e que assim irá continuar, pois a mediocridade, a baixeza e a total falta de imaginação das "visões" financeiras, materialistas e contabilísticas, poderá continuar, mas não conseguirá descobrir défice nem secar um dos nossos mais preciosos bens, a curiosidade humana.

NOTA: Este documento baseia-se nas aulas dadas na Escola de Astrofísica e Gravitação, regularmente organizada no IST, Departamento de Física, pelo CENTRA.

## Bibliografia

É muito grande, hoje em dia, a bibliografia de divulgação numa área como a da cosmologia. Indicarei apenas alguns livros que, pela sua qualidade, poderão ser úteis a quem deseje saber mais sobre este tema.

- The Big-Bang, Joseph Silk, Freeman and Company, New York
- The First Three Minutes, Steven Weinberg, Bantam Age Books, USA
- A Criação do Universo, Fang Li Zhi e Li Shu Xian, Gradiva
- Cosmology and Controversy, Helge Kragh, Princeton, New Jersey
- Bubbles, voids and bumps in time: the new cosmology, edited by James Cornell, Cambridge University Press, Cambridge
- Ripples in the Cosmos, Michael Rowan-Robinson, Freeman/Spektrum, Oxford
- The Inflationary Universe, Alan H. Guth, Vintage, U.K.
- The Fontana History of Astronomy and Cosmology, John North, Fontana Press, Londres

Novembro de 2002