

The background of the entire page is a grayscale map of the Cosmic Microwave Background (CMB) radiation. It shows a complex pattern of dark and light spots, representing temperature fluctuations across the sky. A white rectangular box is superimposed on the upper portion of the map, containing the title text.

Cosmologia
observacional:
a radiação
cós mica de fundo
em microondas

A

o ligarmos um televisor em um canal em que não há transmissão, observamos na tela um ruído sem nenhum padrão. Esse ruído deve-se às ondas de rádio que permeiam nosso planeta, sejam sinais gerados pelo homem ou emissões de objetos astronômicos que chegam à Terra. Parte desse ruído (cerca de 3% da intensidade total) viajou desde os primeiros instantes do universo para chegar até nossos aparelhos. Ele é conhecido como Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCFM). Nosso planeta é banhado por essa radiação que o atinge vindo de todas as direções do céu.

Em 1929, o astrônomo Edwin Hubble fez uma interessante descoberta que mudou radicalmente a forma como entendemos o universo. Seus resultados indicavam que, quanto mais distante estava o objeto observado, maior era sua velocidade de afastamento do observador, sugerindo que o universo estava se expandindo. A interpretação dessa expansão diz que o próprio espaço em que essas galáxias se encontram está aumentando. Isso contrastava com a idéia anterior de um universo estático, proposta por Einstein em seu trabalho sobre uma teoria geral da gravitação. Uma questão que pode ser imediatamente levantada é: se o universo está em expansão, ele deve ter sido menor no passado; então, que conseqüências físicas podemos deduzir desse processo de expansão?

A RCFM é uma das mais importantes ferramentas uti-

**THYRSO VILLELA,
IVAN FERREIRA e
CARLOS ALEXANDRE
WUENSCHÉ**

são pesquisadores da
Divisão de Astrofísica do
Instituto Nacional de
Pesquisas Espaciais do
Ministério da Ciência e
Tecnologia.

lizadas para tentar responder a essa questão. Na verdade, ela pode nos ajudar a conhecer uma série de processos físicos que ainda não podem ser reproduzidos nos laboratórios na Terra, e é uma das quantidades astronômicas observáveis mais importantes no estudo da cosmologia. A sua existência foi prevista por George Gamow, Ralph Alpher e Robert Herman no final da década de 40, quando estudavam a origem dos elementos químicos e o estado da matéria no universo primordial, levando-os a concluir que essa matéria, que estaria ultracomprimida, deveria ter liberado uma radiação (a RCFM) que teria, hoje, uma temperatura entre 5 e 10 K.

A RCFM foi descoberta acidentalmente em 1964 por Arno Penzias e Robert Wilson, embora evidências observacionais anteriores de que o universo estava imerso num banho de radiação em microondas já estivessem presentes no trabalho de A. McKellar e G. Herzberg em 1941. Herzberg descobriu, baseado nas observações de McKellar, que havia uma temperatura que descrevia o grau de excitação observado em moléculas de CN presentes no meio interestelar, como se elas estivessem imersas em um recipiente em equilíbrio a uma temperatura de 2,3 K. Na época, porém, as conseqüências desse resultado não foram exploradas.

Penzias e Wilson trabalhavam no Bell Telephone Laboratories, nos EUA, e estavam preocupados em testar receptores para serem usados em medidas da emissão em microondas da nossa galáxia quando se depararam com um ruído persistente em seus dados que não desaparecia de forma alguma. Independentemente da região do céu para a qual apontavam a antena, do dia e da hora, o “excesso” de sinal que eles mediam era sempre o mesmo. Essas observações foram feitas no comprimento de onda de 7,35 cm e indicavam uma temperatura do céu de aproximadamente 3,5 K. Na mesma época, um grupo de astrofísicos liderados por Robert Dicke, da Universidade de Princeton, também nos EUA, estava construindo um experimento para verificar a previsão de Gamow e colaborado-

res. Quando eles souberam dos resultados de Penzias e Wilson, perceberam que o objetivo do experimento que estavam construindo já havia sido atingido e, tendo já uma idéia clara do que ele significava, concordaram que a publicação dos resultados e a interpretação correspondente fossem feitas simultaneamente: Penzias e Wilson mostrariam as medidas num artigo e Dicke e colaboradores interpretariam a descoberta de Penzias e Wilson como sendo a radiação produzida nos primórdios do universo. Essa descoberta é considerada como uma das mais importantes da história da ciência e, por isso, Penzias e Wilson ganharam o Prêmio Nobel de Física em 1978.

A RCFM é perfeitamente descrita por uma curva de corpo negro a uma temperatura de $2,726 \pm 0,010$ K (ver “Espectro de Corpo Negro”). Pode-se dizer, então, que a temperatura do universo hoje é de aproximadamente 2,7 K (cerca de -270° C). A curva de corpo negro correspondente a essa temperatura tem intensidade máxima na faixa de microondas do espectro eletromagnético. Essa emissão térmica é resquício de uma época em que o universo ainda era muito jovem. Nessa época, toda matéria formava um plasma, em que prótons, elétrons e fótons se mantinham em constante interação, impedindo a formação de átomos. Toda vez que um próton se juntava a um elétron para formar um átomo de hidrogênio, um fóton (com temperatura igual ou maior que 3.000 K) colidia com o átomo, ionizando-o. Com a expansão do universo, essa temperatura foi diminuindo, possibilitando então a formação de átomos.

A RCFM é uma das fontes mais ricas de informação sobre o universo primordial, já que nenhum outro observável cosmológico revela um passado mais remoto do universo. Nem mesmo as galáxias e os quasares mais distantes conseguem nos revelar como era a fase inicial do universo. A título de comparação: a luz do Sol viaja oito minutos até chegar a nós; a luz da estrela mais próxima da Terra (depois do Sol) viaja cerca de quatro anos e meio até chegar a nós; a luz da galáxia Andrômeda, que é uma das mais

próximas da Terra, leva alguns milhões de anos até chegar aqui. Os fótons da RCFM, por sua vez, levam quase 14 bilhões de anos viajando até serem detectados na Terra.

O universo, a partir de sua origem, supostamente um estado de altíssima densidade e temperatura, evoluiu num processo de expansão contínua. Quando atingiu aproximadamente 370 mil anos de idade, sua temperatura estava em torno de 3.000 K e os fótons e a matéria que formavam o plas-

ma primordial estavam fortemente acoplados, ou seja, o que acontecia com a matéria seria sentido também pela radiação e vice-versa. Nessa época, a energia média dos fótons se tornou menor do que o potencial de ionização do átomo de hidrogênio. Como consequência, os elétrons livres foram capturados pelos prótons, formando átomos de hidrogênio neutro, num processo chamado de recombinação (apesar de ser a primeira vez que as duas partí-

ESPECTRO DE CORPO NEGRO

O nome corpo negro tem sua origem no estudo da termodinâmica e evidencia a principal propriedade desse objeto hipotético: ele absorve toda e qualquer radiação incidente. Você somente vê o papel que agora está nas suas mãos porque ele está refletindo boa parte da radiação que nele incide. Caso ele fosse um corpo negro perfeito, seria impossível ler este texto.

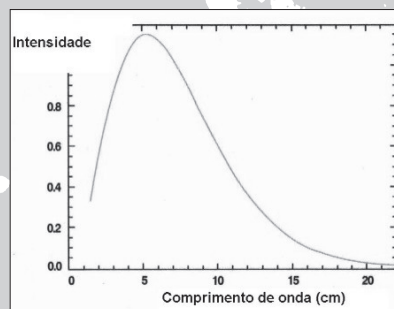
Por outro lado, qualquer corpo emite radiação. Isso se dá simplesmente porque a todo objeto está associada uma certa temperatura, que é reflexo do estado de agitação de suas moléculas. O espectro dessa emissão depende de

diversos fatores mas, no caso ideal, depende apenas da temperatura do objeto, sendo portanto chamado de espectro térmico.

Um corpo negro também emite radiação mas, nesse caso, a emissão é perfeitamente térmica e descrita por uma lei bem conhecida da física: a lei de Planck. Esta lei (uma das motivadoras da mecânica quântica) nos diz como é distribuída a densidade de

energia de um corpo, a uma dada temperatura, em função de um outro parâmetro que pode ser a frequência. Essa distribuição de energia recebe o nome de espectro de corpo negro.

A astrofísica aproveitou esse conhecimento do seguinte modo: os telescópios medem a intensidade da radiação que chega de uma determinada fonte. Conhecendo essa intensidade e supondo que a fonte possa ser comparada a um corpo negro, podemos estimar quanta energia ela emite na frequência na qual estamos observando. Usando então a lei de Planck, determinamos a temperatura da fonte.



culas se combinavam, de forma estável, para formar átomos de hidrogênio). Com a diminuição do número de elétrons livres, a matéria e a radiação deixaram de interagir de forma significativa, iniciando um processo chamado de desacoplamento. Dizemos então que o universo se tornou transparente à radiação e todos os efeitos provocados pelos processos físicos que ocorreram antes do desacoplamento aparecem como uma assinatura do universo jovem na distribuição espacial dessa radiação, que pode ser lida hoje através das observações da RCFM. Chamamos de superfície de último espalhamento à região em que esses processos físicos entre matéria e radiação aconteceram pela última vez, ao final do desacoplamento.

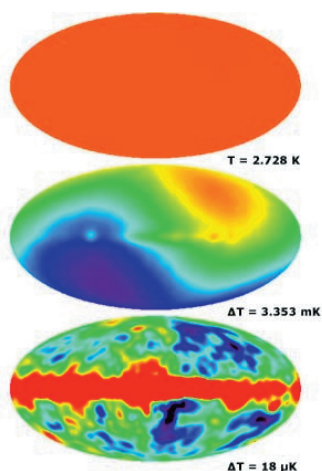
Essa radiação nos fornece, portanto, informações sobre uma época em que o universo tinha cerca de 370 mil anos de idade e pode ser estudada a partir de medidas de seu espectro, polarização e distribuição espacial no céu. Essas medidas são feitas por experimentos que observam o céu em microondas. Esses instrumentos,

dependendo da frequência, podem operar no solo (em geral em locais de grandes altitudes) ou no espaço, a bordo de satélites, foguetes e balões estratosféricos. Para medir as flutuações de temperatura, os receptores são sintonizados numa certa frequência e apontados para diferentes regiões do céu. Dessa forma, medindo intensidades diferentes do sinal da RCFM numa dada frequência, podemos associar diferentes temperaturas ao corpo negro que emitiu esse sinal, no caso o universo primordial. Podemos fazer um mapa da distribuição do fluido primordial que existia no universo partindo das medidas das variações de intensidade da RCFM por todo o céu. Com esse mapa, é possível inferir os parâmetros que descrevem o universo. O estudo da distribuição espacial da RCFM no céu é importante para que se possa escolher o melhor modelo cosmológico que explique como surgiram as estruturas de matéria que observamos hoje no universo, como planetas, estrelas, galáxias, aglomerados de galáxias e, em última instância, até mesmo a vida.

O instrumento Firas (Far Infrared Absolute Spectrophotometer), que era um dos experimentos que compunham o satélite Cobe (Cosmic Background Explorer), confirmou de forma espetacular, em 1990, que a RCFM possui um espectro de corpo negro quase perfeito. Essas medidas são impressionantes do ponto de vista observacional, já que os erros envolvidos são extremamente pequenos. Esse resultado se tornou uma das mais fortes evidências a favor do modelo conhecido por “hot big-bang” (ou modelo cosmológico padrão) e mostra que a matéria e a radiação no universo à época do desacoplamento estavam em um estado de equilíbrio termodinâmico quase perfeito, ou seja, tinham a mesma temperatura. A determinação precisa do espectro de corpo negro da RCFM foi uma das mais importantes contribuições ao estudo da cosmologia, uma vez que ficou estabelecida de forma inequívoca a origem térmica dessa radiação.

A Figura 1 apresenta os dados obtidos pelo experimento DMR (Differential

Figura 1



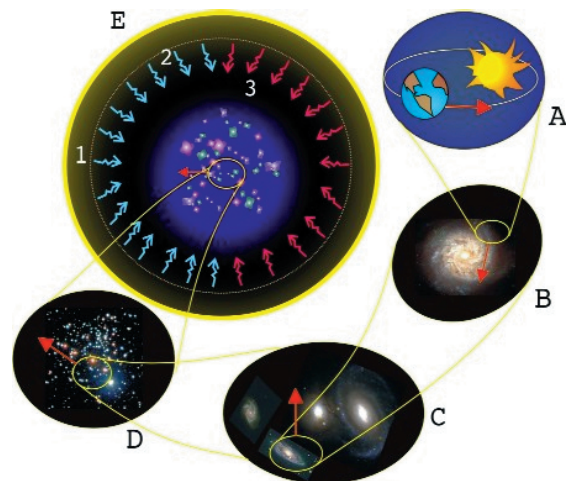
Mapas da RCFM. A figura no topo representa a temperatura absoluta do universo. A figura do meio mostra o efeito de dipolo, quando subtraímos a temperatura de 2,7 K da figura de cima. A figura de baixo mostra as anisotropias da RCFM, quando subtraímos o dipolo da figura do meio.

Microwave Radiometer), também a bordo do satélite Cobe, e mostra como é o céu em microondas. Os mapas são construídos em cores falsas para permitir que nossos olhos percebam as pequenas diferenças de temperaturas em microondas. A primeira imagem de cima para baixo mostra o céu com uma temperatura totalmente uniforme, sem nenhuma estrutura aparente. Quando melhoramos a qualidade da medida por um fator mil, ele se apresenta como na figura do meio, com duas regiões claramente diferentes e separadas por 180 graus (com as temperaturas representadas pelas cores laranja e azul).

Esse efeito se deve ao nosso movimento em relação à RCFM e provoca uma diferença de temperatura da ordem de três milésimos de graus Celsius no céu: numa região a temperatura é maior, representada pela cor laranja, e na outra a temperatura é menor, representada pela cor azul (ver segundo mapa da Figura 1). A diferença entre as cores é semelhante ao que acontece quando ouvimos o barulho de um carro que se aproxima de nós e depois se afasta. Nesse caso, ao invés de um aumento de temperatura do carro, percebemos um aumento da frequência do barulho do seu motor (som mais agudo) quando ele se aproxima de nós e uma diminuição dessa frequência (som mais grave) quando ele se afasta. Esse efeito, conhecido como efeito Doppler, acontece sempre quando há movimento relativo entre um observador e uma fonte de sinal. A variação de temperatura observada no segundo mapa da Figura 1 é uma consequência do efeito Doppler resultante do nosso movimento em relação à RCFM.

As primeiras indicações da existência desse fenômeno na distribuição angular da RCFM, conhecido como efeito de dipolo, vieram de experimentos realizados em 1969 e no início da década de 70. A confirmação desse efeito veio com medidas realizadas em meados da década de 70, com um experimento embarcado num avião espião U-2 para realizar as observações a 20 km de altitude. Em meados da década de 80, esse efeito já era muito bem conhecido graças a experimentos realizados a bordo de balões estratosféricos, inclusive no Brasil, com a participação do Inpe (ver Figura 3) e confirmados posteriormente pelo satélite Cobe. O responsável por um dos experimentos conduzidos no Brasil foi David Wilkinson, colaborador de Robert Dicke no artigo que explicava o resultado de Penzias e Wilson, e um dos mentores e líderes do projeto do satélite WMAP, sobre o qual falaremos mais à frente. Wilkinson faleceu meses antes da divulgação dos primeiros resulta-

Figura 2



Representação do dipolo da RCFM e dos movimentos relativos do Sistema Solar, Galáxia e Grupo Local em relação ao referencial da RCFM. No painel A, temos o Sistema Solar, em B a Via Láctea, em C o Grupo Local, em D o aglomerado de Hidra-Centauro e em E temos uma representação de todo o universo. O painel E mostra o plasma primordial (1), a superfície de último espalhamento (2), a partir da qual se vêem os fótons livres (em azul e vermelho representando o efeito de dipolo) e a região escura que precede a formação dos primeiros objetos (3).

dos do WMAP (originalmente MAP – Microwave Anisotropy Probe) e a equipe resolveu homenageá-lo, passando a chamar o satélite de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP).

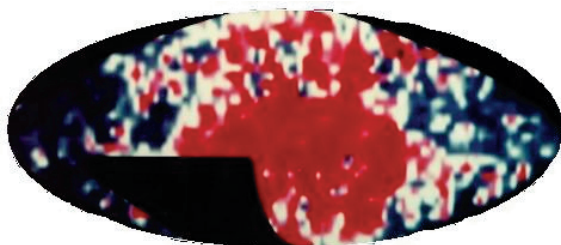
O efeito de dipolo é o resultado do movimento da Via Láctea em relação ao sistema de coordenadas definido pela RCFM, que é de aproximadamente 600 km/s na direção da constelação do Leão. Ele equivale a uma diferença de temperatura de 0,1% entre duas regiões do céu separadas por 180 graus. Os números envolvidos no efeito de dipolo são impressionantes do ponto de vista das velocidades a que estamos acostumados aqui na Terra, mas corriqueiros no universo. Nosso movimento na direção da constelação do Leão é a resultante dos movimentos relativos de vários sistemas dos quais fazemos parte: o movimento de rotação da Terra ao redor do Sol, da ordem de 30 km/s (Figura 2A), o movimento de rotação do Sistema Solar em relação ao centro da Via Láctea, da ordem de 230 km/s (Figura 2B), o movimento da Via Láctea em relação ao Grupo Local de galáxias, da ordem de 40 km/s (Figura 2C), e o movimento do Grupo Local na direção do superaglomerado de Hidra-Centauro, da

ordem de 310 km/s (Figura 2D).

Um outro resultado importante obtido pelo Cobe foi a descoberta de pequenas flutuações na distribuição angular de temperatura da RCFM no céu, que, de acordo com os modelos teóricos, estão ligadas à formação das estruturas hoje observadas no universo. Essas flutuações são conhecidas como anisotropias, já que o que se observa é uma dependência da temperatura do céu com a direção de observação, ou seja, não há isotropia na distribuição angular de temperatura. O terceiro mapa da Figura 1 mostra essas anisotropias, juntamente com a emissão de microondas proveniente do plano da nossa galáxia, vista como a faixa vermelha no centro da imagem. Entretanto, o valor dessas anisotropias é extremamente baixo, da ordem de 10-5 K, o que dificulta sobremaneira a tentativa de observá-las, uma vez que esse valor é 100.000 vezes menor do que a temperatura da RCFM, que é 2,7 K acima do zero absoluto. Na realidade, medir um sinal com intensidade tão baixa foi um dos maiores desafios astronômicos de todos os tempos. Essa descoberta teve um profundo impacto na cosmologia, pois pela primeira vez foi detectada uma anisotropia intrínseca à RCFM, isto é, uma anisotropia que não estava ligada a nenhum efeito que fosse devido ao próprio observador ou a algum fenômeno que tenha ocorrido no universo recentemente: ela revelava como era o universo há mais de 13 bilhões de anos! As medidas de temperatura da RCFM são consideradas umas das mais importantes descobertas científicas do século passado.

Embora notáveis, os resultados do DMR apresentam duas limitações importantes: os dados que mostram anisotropia na distribuição angular da RCFM não permitem que sejam obtidas informações a respeito do processo de formação de galáxias, uma vez que a distância angular que compreende os tamanhos envolvidos nas nuvens protogalácticas (1,5 grau) é menor que a distância angular que o Cobe é capaz de resolver (7 graus). Para perceber essa diferença basta olhar os dois mapas da Figura 6. A segunda limitação decorre do fato de

Figura 3



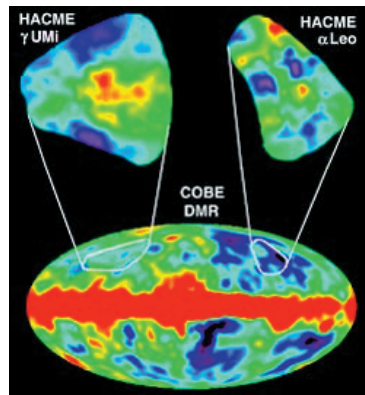
Mapa da RCFM em 90 GHz, feito a partir de dados de vôos no Hemisfério Norte e Hemisfério Sul (Brasil), produzido em 1985. Ele mostra o efeito de dipolo com a intensidade máxima representada pela mancha vermelha no centro da figura e que corresponde à mancha laranja da imagem central da Figura 1.

essas flutuações terem sido detectadas no limite de sensibilidade do DMR, uma vez que o sinal das anisotropias era extremamente fraco. Buscando suprir essa limitação do Cobe, vários outros experimentos, no solo e a bordo de balões, começaram a medir flutuações de temperatura na distribuição angular da RCFM numa grande faixa de frequências, em diversas escalas angulares e com grande sensibilidade, na tentativa de obter mais detalhes sobre a distribuição de temperatura no céu. Esses experimentos proporcionaram um grande avanço na determinação dos parâmetros que nos ajudam a entender como é o universo, de que componentes ele é constituído, qual é a sua idade, composição, geometria, etc., e também na compreensão de um dos mais sérios contaminantes dessas medidas, a nossa própria galáxia.

Um experimento conhecido como HACME, parte de uma colaboração nas quais participavam, dentre outras instituições, o Inpe, a Universidade Federal de Itajubá, em Minas Gerais, e a Universidade da Califórnia, em Santa Bárbara, detectou flutuações de temperatura na RCFM com uma precisão maior do que a do Cobe. Esses resultados são mostrados na Figura 4.

Atualmente, o mesmo grupo que construiu o HACME participa do experimento BEAST – Background Emission Anisotropy Scanning Telescope (Figura 5A). Ele pode operar tanto no solo quanto suspenso por um balão estratosférico a 40 km de altitude e emprega uma tecnologia muito mais moderna do que a do Cobe, superando-o, por exemplo, em resolução angular: 7 graus no Cobe contra aproximadamente 0,3 grau no BEAST. O projeto óptico desse telescópio, uma das partes cruciais do experimento, foi inteiramente desenvolvido no Brasil. O BEAST vem realizando observações da RCFM a 3.800 m de altitude numa estação de pesquisa da Universidade da Califórnia, chamada White Mountain Research Station, nos EUA. O resultado dessas observações é mostrado na Figura 5B, na qual aparece a área do céu observada pelo BEAST (comparada com o mapa completo do céu feito pelo WMAP)

Figura 4

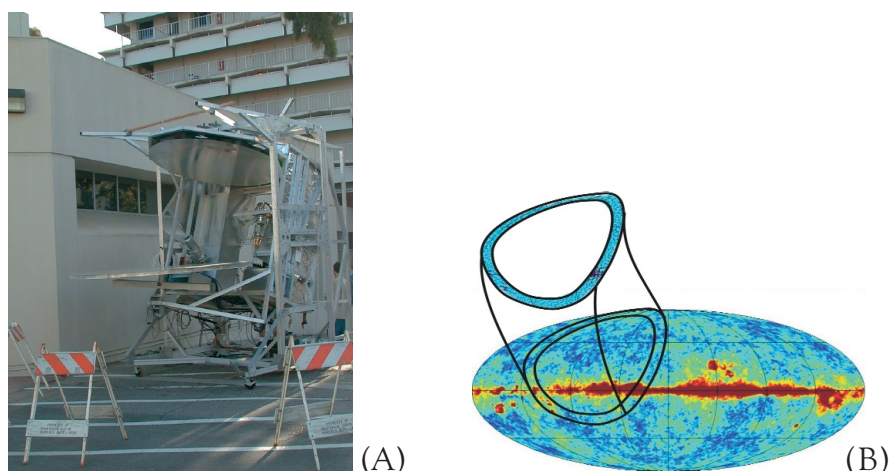


*Resultado do experimento HACME que mostra flutuações de temperatura da ordem de alguns microkelvins em duas regiões do céu próximas das estrelas γ UMi e α Leo. Esse experimento foi realizado a bordo de balão estratosférico. A figura mostra uma comparação entre essas duas regiões vistas pelo satélite Cobe e pelo HACME (Fonte: Tegmark et al., *The Astrophysical Journal*, 2000).*

e as flutuações de temperatura que ele mediu, da ordem de 30 microkelvins. O BEAST concorre com outros experimentos tais como Archeops, Boomerang, CAT, CBI, Dasi, Maxima e VSA, e é o protótipo do experimento LFI que irá a bordo do satélite Planck, da Agência Espacial Europeia (ESA), planejado para ser colocado em órbita em 2007.

Lançado em 30 de junho de 2001, numa órbita localizada a um milhão e meio de quilômetros de distância da Terra, com uma massa de 830 kg e uma altura de 3,6 m, o satélite WMAP representa mais um esforço dos astrofísicos para entender a origem do universo. Um dos seus objetivos é produzir mapas com sensibilidade 45 vezes maior que os feitos pelo Cobe e revelar detalhes que o Cobe não conseguiu em função de sua resolução angular, 33 vezes menor que a do WMAP. Além disso, o WMAP também será capaz de medir a polarização da RCFM e de melho-

Figura 5



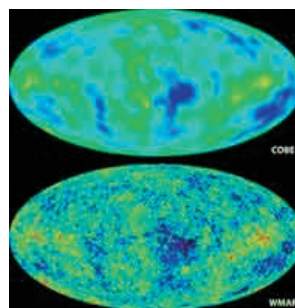
rar a estimativa atual dos parâmetros cosmológicos.

Recentemente, foram divulgados os primeiros resultados do WMAP, mostrando flutuações de temperatura da ordem de alguns microkelvins na RCFM. A Figura 6 mostra uma comparação desses resultados com os do Cobe, obtidos cerca de dez anos antes.

Estando o espectro e a distribuição angular de flutuações de temperatura da RCFM bem determinados, a caracterização da terceira propriedade dessa radiação, a polarização, só começou a ser feita efetivamente nos últimos dois anos, apesar de as primeiras tentativas para detectá-la terem começado na década de 70. Uma onda eletromagnética é dita linearmente polarizada quando o seu campo elétrico se encontra oscilando sempre numa mesma direção. Caso a direção varie com o tempo, a onda será circularmente polarizada. Em geral, um campo de radiação qualquer, que é a superposição de ondas eletromagnéticas polarizadas em todas as direções, apresenta apenas uma porcentagem de sua intensidade total com uma polarização bem definida, gerando um padrão que pode ser mapeado. Para a RCFM, essa fração polarizada corresponde de 0,1% a 1% da amplitude das flutuações de temperatura, depen-

Representação da região observada pelo BEAST superposta ao mapa do WMAP (A) e foto do BEAST no pátio da Universidade da Califórnia, em Santa Bárbara (B).

Figura 6



Comparação entre os mapas de anisotropias do Cobe e do WMAP. Note a diferença nos detalhes do mapa de baixo em relação às mesmas regiões apresentadas no mapa de cima.

dendo do processo físico que deu origem à polarização, sendo, entretanto, sempre linearmente polarizada, visto que resulta de um espalhamento.

Quando as primeiras estrelas de grande massa surgiram (cerca de 200 milhões de anos após o big-bang), a luz que elas emitiram foi capaz de ionizar as moléculas de hidrogênio que permeavam o universo, num processo conhecido como reionização. Os elétrons liberados durante a reionização puderam interagir com os fótons presentes no meio, inclusive aqueles da RCFM, deixando-a com um pequeno grau de polarização, da ordem de 1% para grandes escalas angulares.

Por outro lado, fenômenos presentes no momento da recombinação também produziram polarização. O espalhamento dos fótons pelos elétrons do fluido primordial (espalhamento Thomson), que apresentavam um movimento ordenado seguindo as ondas acústicas que se propagavam no plasma, produziu polarização com uma intensidade da ordem de 1%. Além dessa perturbação escalar (ondas acústicas), o plasma também sofre a ação de perturbações tensoriais: o espaço-tempo oscila, alongando, comprimindo e torcendo o plasma. O termo tensorial, ao contrário de escalar, indica que a perturbação requer uma orientação definida. Essas oscilações são decorrentes da passagem de ondas gravitacionais produzidas durante a inflação. O espalhamento dos fótons pelos elétrons durante esse processo de torção do plasma também polariza a radiação, por uma fração menor que 0,1%, devido à pequena amplitude das ondas gravitacionais. Polarização gerada dessa maneira tem características distintas, permitindo uma completa caracterização das ondas gravitacionais que a produziram.

Dada a pequena intensidade da componente polarizada da RCFM, sempre duas ordens de grandeza abaixo da intensidade das anisotropias, até o ano 2002 nenhuma detecção tinha sido realizada, visto que nenhum instrumento tinha sensibilidade para tal. Foi então que o instrumento Dasi, desenvolvido por um consórcio liderado pela Universidade de Chicago, atingiu a

sensibilidade necessária, unindo tecnologia de ponta e um dos melhores sítios de observação na superfície terrestre: o continente antártico. Ele foi capaz de mapear o padrão de polarização em torno do Pólo Sul celeste, indicando que este tinha sido gerado por perturbações escalares. Em 2003 o instrumento WMAP confirmou essa medida, porém com um mapeamento do céu inteiro. Resultados preliminares indicam as assinaturas da reionização e das perturbações escalares.

As flutuações de temperatura da RCFM são extremamente pequenas, o que dificulta sobremaneira a realização de experimentos para medi-las. É necessário empregar, entre outros recursos, os melhores receptores de microondas que existem e as melhores técnicas de criogenia para que os experimentos possam efetivamente medir algum sinal de origem cosmológica. É um desafio tecnológico, além de científico. Vários fatores complicam a realização desses experimentos: a nossa atmosfera, que emite microondas e também absorve uma parte das que vêm do céu, as radiofontes cósmicas, a nossa própria galáxia, que ocupa uma grande área do céu e, obviamente, atrapalha a observação direta das microondas cosmológicas, entre outros. O advento da era espacial foi crucial para que o progresso nessa área fosse enorme, já que um dos maiores fatores de interferência pode ser contornado: a nossa atmosfera.

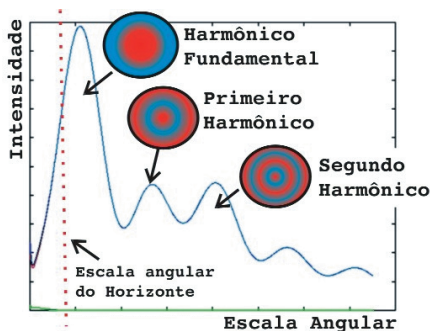
Para podermos extrair informações dos mapas da RCFM, precisamos nos valer de algumas ferramentas estatísticas. Uma dessas ferramentas nos possibilita compor um espectro como o da Figura 7, o qual representa a amplitude das flutuações em função da escala angular. Os picos são reflexos das oscilações acústicas no plasma. Podemos associá-los com os modos harmônicos dessa oscilação. O primeiro pico representa o harmônico fundamental – a maior onda que poderia aparecer no meio. Sendo assim, ela define o tamanho do universo observável, ou escala angular do horizonte. Os outros picos estão ligados aos outros harmônicos. A consequência dessa

associação é que podemos determinar algumas das quantidades fundamentais do universo (idade, composição, geometria) com base no número, largura, altura e posição dos picos.

Observações da RCFM vêm fornecendo uma vasta gama de informações sobre o universo. O espectro da RCFM é gerado a partir de dados que revelam como era o universo quando ele tinha pouco mais de um mês de idade. As anisotropias na distribuição angular dessa radiação são o retrato do universo na época da recombinação, mas sua forma geral foi estabelecida cerca de um picossegundo (10^{-12} segundos) após o big-bang. Já a componente tensorial da polarização da RCFM está ligada à deformação do espaço-tempo causada pelas ondas gravitacionais primordiais geradas ao final da era de Planck, cerca de 10^{-43} s após o big-bang.

Podemos ver, portanto, que o estudo da RCFM nos fornece informações extremamente interessantes sobre a evolução do universo em seus primeiros instantes. A nossa compreensão do universo mudou radicalmente nos últimos quinze anos e, a julgar pelos problemas ainda não resolvidos referentes à polarização da RCFM e outros aspectos relacionados ao processo de formação de estruturas, ainda existe um vasto campo de estudos em que a RCFM deve continuar desempenhando um papel de grande destaque na cosmologia.

Figura 7



Espectro de potência das flutuações de temperatura da RCFM.

A RADIAÇÃO DE 2,7 K TEM MESMO ORIGEM CÓSMICA?

São muitos os indícios que dão base ao argumento a favor da origem cosmológica dessa radiação em microondas que nos banha. O primeiro, em si simples, provém da uniformidade em grande escala dessa radiação. Não obstante a direção para a qual se aponta o detector, ter-se-á medida de um mesmo fluxo, não se podendo, por conseguinte, indicar uma fonte em particular que seja responsável por essa emissão: todo o universo brilha em microondas.

Outro indício vem da presença de um dipolo, o qual indica que fazemos parte de um grupo de objetos que se move em relação ao referencial em que a radiação de 2,7 K é perfeitamente isotrópica. Esse efeito apresenta a mesma configuração que outros dipolos encontrados em observáveis independentes, como em contagens de radiogaláxias e quasares ou

em mapeamentos da emissão difusa em raios-X. A forma como a matéria está distribuída na Via Láctea não poderia gerar uma emissão com esse padrão de dipolo.

O espectro da RCFM, caracterizando um corpo negro de 2,7 K, é o melhor argumento de que o universo apresentou um estágio de equilíbrio térmico entre a matéria e a radiação, num estado conhecido como plasma primordial. Devido à expansão do universo, como conseqüente resfriamento do plasma, houve o desacoplamento entre a radiação e a matéria, tão logo a temperatura atingiu 3.000 K. O universo continuou se expandindo e assim a radiação foi resfriando até atingir a temperatura atualmente medida. Caso este cenário seja o correto, deveria ser possível medir o efeito de uma radiação de fundo "mais quente" observando-se objetos distantes. Isso de fato ocorre, mostrando-se a mais conclusiva prova da natureza cosmológica da RCFM.

Dados sobre diversas nuvens moleculares — compostas por moléculas de hidrogênio, CN, etc. — mostram que

elas estão envoltas por um fluxo de fótons uniforme e constante, que impede que as moléculas se mantenham em seus níveis mais baixos de energia. A energia necessária para se manter este mínimo de excitação é exatamente aquela fornecida pelos fótons da RCFM. Por exemplo, o espectro de uma nuvem molecular a 20 milhões de anos-luz de distância mostra que ela está sendo bombardeada por uma radiação cuja temperatura está entre 6 e 14 K, sendo que a previsão teórica é de 9,1 K, isto é, estão em perfeito acordo como esperado.

Podemos ainda falar da distribuição angular das flutuações de temperatura que, segundo medidas recentes e bastante precisas, concordam exatamente com a previsão do modelo inflacionário, isto é, essas flutuações são resultados de perturbações de densidade produzidas nos primeiros instantes do universo. Assim, teorias alternativas que tratavam a RCFM como resultado da emissão de uma distribuição difusa de grãos de poeira no espaço interestelar encontram-se fadadas ao esquecimento.