

A Radiação Cós mica de Fundo em Microondas e a Formação de Estruturas no Universo: Uma Visão Atual

Carlos Alexandre Wuensche - 1994

e-mail: ca.wuensche@inpe.br

RESUMO

Um dos problemas mais fascinantes da Cosmologia atual diz respeito ao processo de formação de galáxias e aglomerados de galáxias, provavelmente as mais antigas estruturas do Universo. Abordamos o processo de formação de galáxias à luz de seu provável causador: a instabilidade gravitacional causada por flutuações na densidade de matéria no Universo primordial. Essas flutuações de densidade causam flutuações de temperatura na distribuição da radiação cósmica de fundo em microondas, observadas hoje por diversos experimentos a bordo de balões, satélites e no solo. As características dessas flutuações e a discussão do status atual dos modelos que descrevem a formação de estruturas são revistos neste artigo, bem como discutem-se as perspectivas para o futuro da área.

1 - INTRODUÇÃO

A Cosmologia é a ciência que estuda o Universo como um todo, buscando o entendimento de sua estrutura e evolução. Seu objetivo é explicar o Universo em termos de uma teoria simples e esteticamente atraente. Entretanto, de todas as ciências, a Cosmologia é a mais exigente em termos de extrapolação de resultados e conceitos, já que as escalas de tempo e distância envolvidas nos problemas cosmológicos são da mesma ordem de grandeza da idade e tamanho do Universo que queremos observar. Até cerca de 1950, a Cosmologia era uma ciência eminentemente teórica, com pouco suporte observacional e praticamente nenhuma atividade experimental que pudesse apoiar os modelos de Universo então vigentes. Esses modelos possuíam as mais diversas características e praticamente todos evoluíram a partir das soluções das equações que Albert Einstein propôs para descrever o movimento de corpos em referenciais acelerados: a chamada Teoria da Relatividade Geral, ou TRG. Recentemente, alguns fatos experimentais, em conexão com a TRG, criaram um paradigma de modelo cosmológico, conhecido como o modelo cosmológico padrão (doravante MCP). Embora criticado por alguns cientistas, o MCP é o que melhor descreve o Universo que observamos e baseia-se nos seguintes pontos:

- 1 - Não há região ou observador no espaço que ocupe uma posição preferencial em relação a outra qualquer. Essa afirmativa é conhecida como o Princípio Cosmológico;
- 2 - O Universo é homogêneo e isotrópico em escalas suficientemente largas e;
- 3 - A existência da radiação cósmica de fundo em microondas (doravante RCF, descoberta por A. Penzias e R. Wilson, em 1965), a abundância de determinados elementos químicos leves (Hidrogênio, Deutério, Hélio e Lítio, cuja primeira estimativa foi feita por R. A. Alpher e R. Hermann, em fins dos anos 40) e a observação da velocidade relativa de afastamento de galáxias distantes (descoberta por E. Hubble, em 1929), que são fatos observacionais e servem como pedra de base do MCP.

O item 1 foi enunciado por Nicolau Copérnico em fins do século XV e vem sendo utilizado na imensa maioria dos modelos cosmológicos desde então. Como praticamente todos os processos observados na evolução das estrelas e galáxias podem ser descritos em termos da Física conhecida, acredita-se que as leis que descrevem os fenômenos físicos da nossa Galáxia são as mesmas em qualquer parte do Universo. Essa crença vem de podermos observar e descrever fenômenos que

ocorrem em galáxias distantes com exatamente o mesmo formalismo matemático usado para descrever fenômenos locais. O item 2 vem sendo estudado em detalhes nos últimos anos e verificado com base em resultados de diversos levantamentos de distâncias de galáxias (os "redshift surveys", feitos em instituições como o Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics - CfA, por exemplo). A homogeneidade e isotropia do Universo começam a ser verificadas a partir de distâncias da ordem de 100 megaparsecs ($3,08 \times 10^{26}$ cm, que equivalem a 3 bilhões de trilhões de quilômetros). Até distâncias dessa ordem ainda são observados diversos tipos de estrutura, tais como vazios, paredes e estruturas filamentosas. Desse ponto até o ponto onde se formou a RCF (~ 3000 megaparsecs, equivalentes a 100 bilhões de trilhões de quilômetros) existe uma lacuna de informações, mas cálculos teóricos sugerem que esse foi o intervalo de tempo necessário para que perturbações gravitacionais evoluíssem nas primeiras galáxias do Universo. Esquemáticamente, a Figura 1 mostra a evolução do Universo entre a época da formação da RCF e o instante atual. Consideramos o instante atual como o centro da circunferência e a parte externa como a época de formação da RCF. Essa região é conhecida como a Superfície de Último Espalhamento (SUE). O item 3 apresenta as evidências observacionais que sustentam o MCP, sendo que a abundância dos elementos químicos nos traz informações sobre o processo da nucleossíntese primordial, a RCF reflete o estado de equilíbrio termodinâmico no Universo na USE e a velocidade de recessão das galáxias distantes pode esclarecer pontos obscuros sobre diversos parâmetros cosmológicos, tais como a constante de Hubble e o parâmetro de desaceleração. Dos três observáveis, o que nos interessa mais de perto é a RCF, pois as flutuações de temperatura na RCF estão diretamente ligadas às flutuações de densidade primordial que, acredita-se, criaram as instabilidades gravitacionais necessárias para a transformação das nuvens de Hidrogênio primordial em galáxias.

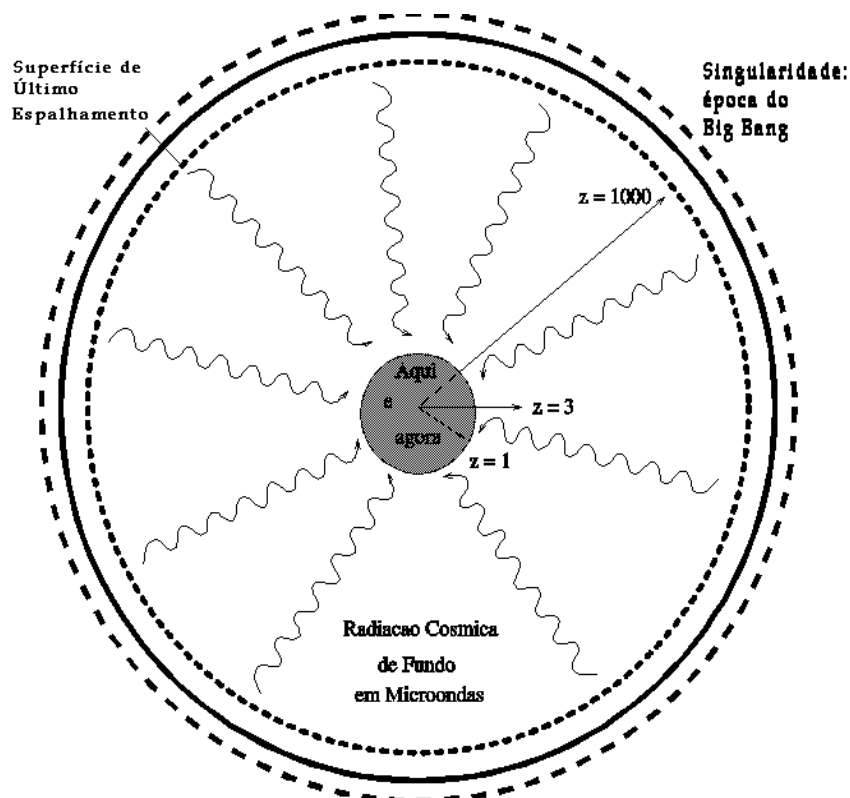


Figura 1 - Esfera imaginária representando a última Superfície de Espalhamento e nossa posição no centro da mesma. As flechas retorcidas representam os fótons da RCF, e as flechas retas indicam a posição (fora de escala) de processos como a formação de quasares distantes e galáxias em $z=3$.

O cenário previsto pelo MCP, baseado nos pontos acima, sugere que o Universo explodiu há cerca de 10-20 bilhões de anos, a partir de um estado de densidade, temperatura e pressão infinitas. Essa explosão é conhecida como Big Bang (Grande Explosão), e, a partir do instante zero, o Universo

começou a expandir-se e resfriar-se. Todas as referências a intervalos de tempo a partir de agora serão feitas supondo que o instante inicial foi o Big Bang ($t = 0$). Até cerca de 0,01 segundos, a temperatura era muito alta e havia formação e aniquilação incessante de pares de partículas elementares. Após a temperatura cair para valores abaixo de 1 bilhão de K, a produção e aniquilação de pares e as reações nucleares cessaram, deixando como resultado elétrons, prótons e nêutrons (nossos conhecidos, que formam a matéria comum que constitui a Terra e as moléculas orgânicas a partir das quais nosso organismo é formado). Também restaram neutrinos (partículas de massa praticamente nula e carga elétrica igual a zero, difícilíssima de ser detectada) e fótons.

A combinação de prótons e nêutrons deu origem aos primeiros elementos químicos formados no Universo: Hidrogênio (H), Deutério (D), Hélio (He) e Lítio (Li). Com o Universo em expansão e conseqüente resfriamento, a temperatura atingiu o valor de 3000 K, 300 mil anos após a explosão. Nesse momento, prótons e elétrons - que encontravam-se livres até então - começaram a combinar-se para formar átomos de Hidrogênio e o plasma de matéria e radiação deixou de existir. Com a combinação, o processo de interação entre fótons e elétrons, conhecido como espalhamento Thomson, tornou-se insignificante e o Universo tornou-se transparente à radiação (Figura 2). A trajetória de um fóton, antes limitada devido às colisões sucessivas com os elétrons livres, passou a ser da mesma ordem de grandeza do Universo. Devido ao processo de expansão, a temperatura dos fótons da RCF vem decrescendo proporcionalmente à taxa de expansão, mas mantendo exatamente as mesmas características. Hoje observa-se essa radiação, que permeia todo o Universo, a uma temperatura de 2,726 K.

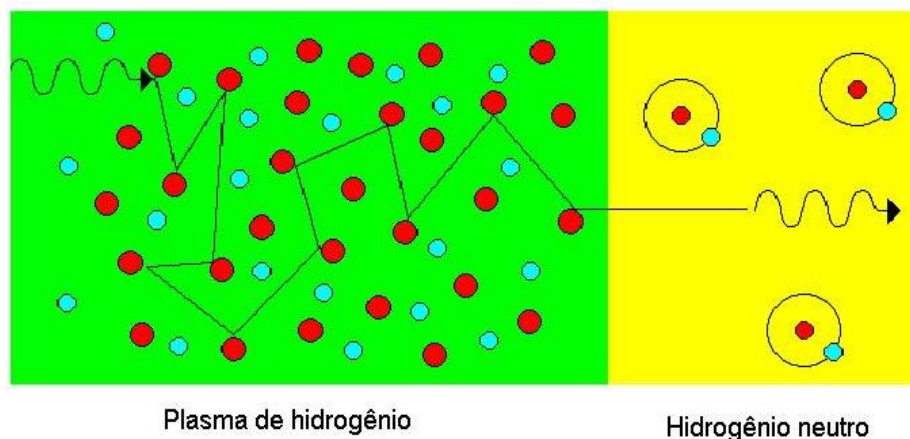


Figura 2 - Desacoplamento da matéria e radiação, quando a temperatura do Universo caiu para valores abaixo de 3000 K, cerca de 100.000 anos após a Grande Explosão. Após o desacoplamento, fótons (representados como setas onduladas) podem se propagar livres, já que elétrons e prótons se combinaram para formar átomos de Hidrogênio.

Como a variação de temperatura é inversamente proporcional à taxa de expansão, podemos estimar o aumento relativo do tamanho do Universo nesse período. Se a temperatura na época do desacoplamento era cerca de 3000 K, e a temperatura atual é da ordem de 3 K (a temperatura equivalente de um objeto imerso em Hélio líquido), o fator de decréscimo foi 1000 ($3000/3$) - conseqüentemente, o Universo hoje é mil vezes maior que na época da recombinação. Por outro lado, a partir dessa época a matéria estava livre para condensar-se em estruturas que evoluíram nas galáxias que hoje observamos, já que a pressão exercida pela interação dos fótons não mais está presente para impedir que átomos se combinem, aumentando a atração gravitacional e o conseqüente colapso de nuvens de gás em galáxias ou grandes aglomerados, dependendo do modelo escolhido para descrever a formação.

2 - O PANORAMA ATUAL

Existem diversas questões em aberto na Cosmologia deste final de milênio e todas elas apontam para o desconhecimento dos detalhes sobre os processos físicos que ocorreram nos primeiros instantes do nascimento do Universo. A questão da formação de estruturas (galáxias, aglomerados e superaglomerados) está diretamente ligada ao nosso entendimento dos processos que ocorreram nos primeiros instantes do Universo primordial. Em outras palavras, ele está sujeito ao nosso conhecimento das condições iniciais do Universo - temos um problema de condições de contorno iniciais desconhecidas. Devido ao estado de equilíbrio termodinâmico em que se encontravam matéria e radiação nesse período, e à uniformidade da RCF (verificada por medições feitas com diversos experimentos) sabemos que a matéria, até separar-se do campo de radiação, deveria estar uniformemente distribuída, do mesmo modo que a radiação. Como essa distribuição uniforme de matéria evoluiu para formar estruturas cuja densidade é milhares ou mesmo milhões de vezes maior que a densidade média do Universo? Um metro cúbico de matéria tem cerca de 1030 (1.000.000.000.000.000.000.000.000) partículas, enquanto que, se distribuirmos uniformemente toda a matéria existente no Universo, cada metro cúbico espaço deve conter cerca de uma partícula! Cientistas se referem a essa diferença na distribuição de matéria dizendo então que a densidade média de partículas na Terra é "30 ordens de magnitude" maior que a densidade média do Universo. Se há regiões com densidade tão diferentes, partindo das mesmas condições iniciais uniformes, surge a questão: qual foi o processo físico que causou essa aglutinação? A principal fonte de informações sobre os instantes em que a matéria se separou do campo de radiação é a RCF, mencionada na seção anterior. As flutuações na distribuição de matéria evoluíram para formar as galáxias e aglomerados hoje vistos no céu, e a "impressão digital", por assim dizer, das flutuações de matéria foram impressas na RCF, dando origem às flutuações de temperatura estudadas pelos cosmólogos atualmente.

Até abril de 1992, vinha-se discutindo como o Universo evoluiu de um estado de extrema uniformidade e homogeneidade para outro onde existem "caroços" (galáxias) e vazios até os confins do Universo observado pelos radiotelescópios e telescópios ópticos criados pelo homem. A partir de abril, com a detecção de flutuações na RCF da ordem de 13 partes por milhão, o quadro mudou radicalmente - aparecera, enfim, uma justificativa (vide artigo de T. Villela nesta edição)! Sabia-se que a única distorção na RCF era uma variação dipolar, observada ao se medir a temperatura do céu em dois pontos diametralmente opostos. Desde meados da década de 70 o fato que a temperatura da RCF é 0,1% mais quente que o valor médio na direção do aglomerado de galáxias conhecido como Aglomerado de Virgem é conhecido da comunidade astronômica. Essa distorção (chamada pelos cientistas de "momento de dipolo da RCF") foi medida de forma mais precisa no início da década de 80 por grupos da Universidade de Princeton e Universidade da Califórnia em Berkeley. O COBE (sigla para COsmic Background Explorer, satélite lançado pela NASA em 1989, exclusivamente para estudar a RCF) determinou o melhor valor da temperatura do dipolo até o momento: 3,34 mK (milésimos de Kelvin). A explicação para a distorção de dipolo é simples e não está relacionada a nenhuma causa cosmológica; ela deve-se à atração gravitacional causada pelo aglomerado de Virgem, para onde nossa Galáxia está sendo arrastada. Esse movimento por entre os fótons da RCF faz com que observemos os fótons entre nós e Virgem a uma temperatura ligeiramente maior que os que estão atrás de nós. Esse efeito é conhecido como "efeito Doppler", sendo facilmente observado quando vemos um carro com sirene passando pela nossa janela. A intensidade do som aumenta (com relação à mesma quando parada) à medida que o carro se aproxima de nós (correspondendo ao valor mais alto da temperatura) e diminui a partir do instante em que o carro começa a se afastar (correspondendo ao decréscimo de temperatura dos fótons que se encontram "atrás" de nós).

Descontado esse efeito, resultados publicados pelo COBE (1992), por grupos da Universidade de Califórnia em Berkeley e Santa Barbara e pela Universidade de Princeton (1993) afirmam que as variações de temperatura na RCF não ultrapassam algumas partes em 100.000. Uma analogia útil

no entendimento da dimensão dessas flutuações é pensar em dobras de 1 mm de altura em um lençol de 100 m x 100 m de dimensão. Essas variações são muito menores que as imperfeições na superfície de uma bola de bilhar, por exemplo.

Essas variações de temperatura são, provavelmente, reflexo das flutuações de densidade, consideradas as sementes geradoras das estruturas que hoje observamos. A idéia básica é que variações na densidade local de matéria, causadas por diferenças nos potenciais gravitacionais locais, foram crescendo devido à atração gravitacional entre as partículas daquela região e, finalmente, formaram as galáxias e aglomerados hoje observados. Flutuações vêm sendo estudadas em diversas escalas angulares, mas os resultados anunciados até o momento somente indicam a detecção de flutuações em média e larga escalas angulares, enquanto que os resultados apresentados de medidas em pequenas escalas somente sugerem a existência de limites para as flutuações, ao invés de detecções efetivas. O que chamamos de escala angular é a projeção, na esfera celeste, da abertura da antena usada por um certo experimento. Assim, um experimento que usa uma antena em forma de corneta cujo ângulo de abertura é de 1° será sensível a flutuações na escala angular de 1° .

Como estruturas são observadas em diferentes escalas angulares, ou de distância, caso pensemos no arco de circunferência definido pelo ângulo em questão (galáxias, aglomerados e superaglomerados), é de se esperar que essas flutuações tenham sido mais ou menos as mesmas. E. Harrison e Y. Zel'dovich propuseram que as flutuações deveriam ser as mesmas para todas as escalas angulares. O espectro que descreve as flutuações neste caso é chamado "invariante em escala" ou "espectro de Harrison-Zel'dovich". Nesse caso, seria de se esperar que as variações de temperatura observadas na RCF deveriam ser as mesmas em todas as separações angulares desde alguns minutos de arco até 90° . Conseqüentemente, os limites (ou detecções) em uma escala angular deveriam ser confirmados em todas as outras. Isso vem acontecendo, de certo modo, nos resultados publicados pelo COBE, pela Universidade de Princeton, Universidade da Califórnia em Berkeley e Universidade da Califórnia em Santa Barbara. Todos esses grupos publicaram resultados onde foram medidas variações de temperatura da ordem de algumas partes em 100.000. as em escalas angulares menores que 1 minuto de arco, objetivando testar a previsão de Harrison e Zel'dovich da forma mais ampla possível. De qualquer modo, a distribuição praticamente uniforme da RCF indica que a matéria, acoplada a RCF devido ao estado de equilíbrio termodinâmico no Universo primordial, também estava distribuída uniformemente. Essa é a suposição básica de uma corrente que defende flutuações adiabáticas como causadoras das distorções que geraram as estruturas. As flutuações adiabáticas são flutuações na densidade de radiação e matéria, onde perturbações em uma implica em perturbações na outra. É possível mostrar que o número de partículas se conserva nesse tipo de flutuação, daí o nome adiabática. Já flutuações isotérmicas - preferidas pela outra corrente - sugerem que possa ter havido aglutinação de matéria enquanto a radiação permanecia uniforme. Elas correspondem a variações na equação de estado local (relação entre a pressão, temperatura e composição química locais). Entretanto, é difícil explicar como variações na densidade de matéria poderiam ter ocorrido sem haver perturbado o campo de radiação, devido ao forte acoplamento entre ambos.

Supondo que o Universo tenha sido criado com pequenas "dobras" no campo uniforme de radiação, como essas dobras evoluíram, tornando-se objetos da escala das galáxias e aglomerados hoje observados? Essa é uma questão interessante e crucial para o entendimento da física do Universo primordial.

Existem dois períodos distintos de evolução, dois regimes qualitativamente diferentes: um período inicial, lento, de crescimento linear das instabilidades, e outro, rápido, de crescimento não-linear. No período lento, a atração gravitacional mantém uma nuvem de gás (a "candidata" a galáxia) fracamente ligada, e a taxa de expansão das partículas dessa nuvem é menor que a taxa de expansão do Universo ao seu redor. A atração gravitacional da matéria ao redor da "candidata", tentando

despedaçá-la, contribui para que o estado de ligação seja bastante delicado. Sua densidade é incrementada em passos muito pequenos, pois a densidade na ilha de matéria é apenas ligeiramente superior à densidade média local.

Esse delicado estado de equilíbrio é mantido durante bilhões de anos até que a densidade em volta da "ilha" atinge cerca da metade da densidade nesta. Nesse ponto a atração gravitacional interna da própria nuvem faz com que ela comece a se contrair; é o início do processo rápido. A atração gravitacional da vizinhança já foi enfraquecida pela expansão universal durante esse período, fazendo com que a distância média entre as partículas da "ilha" não tenha aumentado tanto quanto entre as partículas da "ilha" e das vizinhanças, ou somente entre as partículas da vizinhança. A partir daí o processo é iterativo, já que mais matéria faz com que a atração gravitacional aumente, o que, por sua vez, atrai mais matéria, proporcionando um aumento rápido de massa. Essa "ilha", ou protogaláxia, evoluirá para formar uma galáxia normal.

A teoria de formação de estruturas cósmicas, sejam elas superaglomerados ou pequenas estrelas, pode se resumir aos detalhes de uma longa batalha entre a força gravitacional e outras forças que tentam, sem sucesso, contrabalançá-la. No caso da formação de estrelas, a gravidade é balanceada pela pressão exercida pelos fótons de dentro para fora da protoestrela. As protogaláxias são palco do combate entre a gravidade e as velocidades locais e de expansão do Universo. O resultado final, no entanto, é sempre a vitória da gravidade, já que estrelas e galáxias existem!

Essa passa a ser, então, a grande interrogação no cenário que descreve a formação de estruturas primordiais: dada a uniformidade da RCF, o intervalo de tempo decorrido desde a Grande Explosão e os valores extremamente pequenos medidos das flutuações na RCF, como é que o processo de aglutinação foi bem sucedido? Partindo dessas condições, formar estruturas é um processo ainda bastante improvável. Vejamos, a seguir, o que os cosmólogos propõem atualmente para resolver o problema.

3 - DISCUSSÃO

Várias soluções são atualmente aceitas como possíveis, seguindo todas ao longo de duas linhas principais. Uma das alternativas é a existência de algum tipo de matéria, não detectada de nenhuma forma pelos meios atualmente disponíveis, que viabilize uma interação gravitacional muito mais forte do que a estimada hoje, de modo que os colapsos possam acontecer no intervalo de tempo entre o final do desacoplamento e os dias de hoje. A outra é a existência de algum processo, muito anterior à criação da RCF, que tenha criado condições para que as flutuações tenham começado a crescer logo após a transição do período dominado pela radiação para o período dominado pela matéria.

Essa matéria não detectada é conhecida entre os cientistas como matéria escura (do inglês dark matter), e é assim chamada por não emitir nenhum tipo de radiação detectável diretamente e praticamente não interagem entre si ou com outras partículas. A matéria escura poderia desacoplar-se da "sopa" de matéria comum ou bariônica (composta basicamente de prótons e nêutrons, já que elétrons são 1840 vezes mais leves que os dois anteriores, e praticamente não contribuem para o colapso gravitacional) e começar a aglutinar-se muito antes do período necessário para o desacoplamento entre matéria comum e radiação (cerca de 300.000 anos). Seus constituintes poderiam ser as sementes procuradas, atingindo a densidade de matéria necessária na época do desacoplamento, e não apresentariam o inconveniente grave de criar "dobras" grandes na distribuição de matéria. A matéria bariônica agregar-se-ia às sementes, posteriormente, como limalha de ferro atraída por um ímã distante quando o campo magnético é forte o suficiente.

Entretanto, isso implica na existência de uma quantidade de matéria dez a cem vezes superior á que

se observa atualmente com telescópios ópticos, por duas razões: a quantidade de matéria bariônica existente no Universo está limitada pela nucleossíntese primordial e mesmo que houvesse matéria bariônica suficiente, ela não poderia ser responsável, por só começar a aglutinar-se após o desacoplamento. Existem diversos candidatos a matéria escura e a grande maioria deles são partículas previstas no modelo padrão de física de partículas. Esses candidatos estão agrupados sob o pseudônimo de WIMPs (do inglês Weak Interactive Massive Particles, que significa Partículas Massivas que Interação Fracamente), englobando desde os neutrinos com massa da ordem de um centésimo de milésimo da massa do elétron até monopolos magnéticos - equivalentes magnéticos da carga elétrica - passando por partículas estranhas, resultantes de variantes do modelo padrão da física de partículas, como os áxions. A característica básica dessas partículas é a diminuta capacidade de interação. Com exceção dos neutrinos, todas as outras partículas possuem velocidades muito menores que a velocidade da luz e usamos essa particularidade para classificar a matéria escura em quente (basicamente os neutrinos, que se movem com velocidades muito próximas à da luz) e fria (partículas muito lentas, se comparadas com a velocidade dos neutrinos).

O tipo de matéria escura pode determinar a maneira como as estruturas se formam, algo como um organograma da formação. A matéria escura quente, por exemplo, após atrair a matéria bariônica que constitui a nuvem de gás candidata a protogaláxia, inicia o estágio de colapso não linear, formando uma nuvem em duas dimensões, semelhante a uma panqueca. As galáxias, que são formadas por partículas que constituem a panqueca, aparecem ao final de um estágio conhecido como estágio de colisão dissipativa, onde a energia cinética é dissipada em colisões entre as partículas, e a atração gravitacional segura as partículas, mais lentas, próximas umas das outras. Como essa hierarquia começa com a nuvem grande fragmentando-se em estruturas menores, ou, em outras palavras, com superaglomerados fragmentando-se em aglomerados e estes em galáxias, ela é chamada de top-down (cuja tradução livre quer dizer de cima para baixo). Uma representação esquemática do processo top-down pode ser vista na Figura 3.

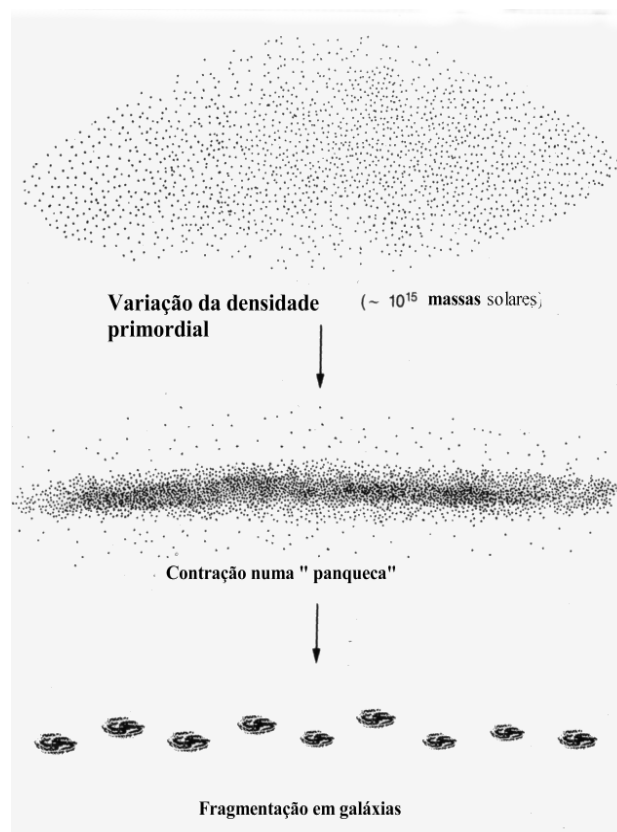


Figura 3 - Estruturas "top-down" formadas com matéria escura quente. Uma nuvem de gás primordial de $10^{15} M_{\odot}$ colapsa formando uma "panqueca", que se quebra em aglomerados e estes em galáxias.

Já a matéria escura fria, constituída de partículas com velocidades baixas, se comparadas com a velocidade da luz, só admite variações de densidade em pequenas escalas na nuvem, já que partículas não possuem velocidade suficiente para atravessá-la numa escala de tempo adequada. Com isso, as pequenas flutuações evoluem em objetos subgalácticos e entram em equilíbrio após um período de relaxação. A distribuição de velocidades é tal que a densidade torna-se proporcional ao quadrado do raio dessa nuvem, isto é, quanto mais distante do centro, menos partículas serão encontradas. Ocorre então a formação de halos galácticos e, como WIMPs e bárions colapsam em tempos diferentes, a galáxia formada a partir de matéria escura fria possui um halo constituído basicamente de um ou mais tipos de WIMPs (já que eles interagem muito menos e não colapsam para formar o núcleo que tornar-se-á a galáxia), e um disco, constituído de bárions. As estruturas maiores formam-se por efeitos de maré e fusão de pequenas estruturas, ou seja, interação de galáxias para formar aglomerados. Nesse caso, a hierarquia vem de baixo para cima, sendo chamada de bottom-up (Figura 4).

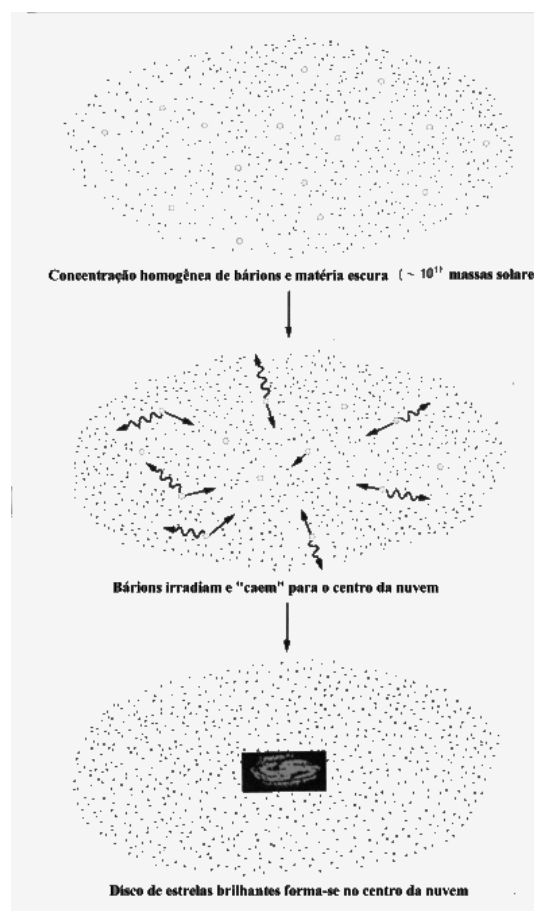


Figura 4 - Formação de galáxias espirais a partir de matéria escura fria. A nuvem de gás primordial, constituída de WIMPs e bárions, irradia energia e os bárions caem para o centro, formando uma galáxia espiral. A nuvem de matéria escura permanece envolvendo a galáxia recém formada.

Um outro tipo de semente passível de causar o colapso gravitacional são os chamados defeitos topológicos, criados durante o resfriamento do Universo. Diversas etapas, conhecidas como transições de fase - onde o Universo "muda de estado", com simetrias entre as forças fundamentais sendo quebradas em cada uma dessas etapas - criam defeitos na estrutura do espaço e tempo que é o Universo. Esses defeitos são análogos aos observados durante o processo de congelamento da água, por exemplo.

Cristais de gelo possuem um determinado plano de simetria, crescendo preferencialmente numa certa direção. Por vezes, um plano de crescimento intercepta o outro, criando uma linha no lugar onde essa interrupção acontece. Essa linha é um defeito topológico, sendo análogo aos que aparecem nas transições de fase do Universo. Os defeitos podem ser sem dimensão (pontuais), unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais. Os defeitos pontuais constituem os chamados monopolos magnéticos e, teoricamente, praticamente não existem no Universo atual. A detecção de um monopolo magnético foi anunciada pelo físico B. Cabrera, da Universidade de Stanford, em 1982, mas, mesmo melhorando em várias ordens de magnitude a sensibilidade dos detetores utilizados, nenhum outro foi observado pelo mesmo grupo. Vários outros experimentos foram feitos em seguida, buscando verificar esse resultado - que seria de crucial importância para uma idéia que estava sendo lançada na época: o Universo Inflacionário - mas os esforços foram em vão, de modo que não se acredita naquela detecção.

Defeitos uni- e bidimensionais são chamados, respectivamente, de cordas cósmicas e paredes. Cordas cósmicas são filamentos extremamente massivos, infinitos, e não interagem com a matéria ou radiação, exceto pela força da gravidade. Elas seriam a analogia cósmica das linhas formadas durante o congelamento da água, observadas numa forma de gelo, por exemplo. A densidade de massa de uma corda cósmica é algo extraordinário, e uma polegada de corda deve pesar cerca de 1.000.000.000.000.000 (um milhão de bilhão) de toneladas, tornando-se uma candidata atraente e efetiva para serem sementes no processo de formação de estruturas, devido à enorme quantidade de matéria que poderiam atrair. As paredes são "folhas", análogas aos filamentos, só que em duas dimensões. Os defeitos tridimensionais, também chamados de texturas, são uma espécie de caroço, também criado durante uma transição de fase. Todos esses defeitos possuem a característica comum de serem extremamente massivos, e servirem, alternativamente às flutuações de densidade aleatórias, como sementes no processo de formação de estruturas.

Os experimentos elaborados na década de 80 e início dos anos 90 vinham abaixando sistematicamente os limites impostos às flutuações de temperatura na RCF, e ameaçando o "reinado" das teorias de formação de galáxias que foram propostas até a metade da década de 80. Sua queda dar-se-ia caso, num nível de sensibilidade de 1 parte em 1.000.000, não se observasse sinal de flutuações de temperatura. Isso praticamente assinaria o atestado de óbito de belas teorias que previam a associação de flutuações de temperatura a flutuações de densidade, estas responsáveis pelo colapso gravitacional. Caso variações na temperatura da RCF não fossem observadas numa escala de, aproximadamente, 1 parte em 100.000, isso significaria uma total reformulação dos conceitos vigentes, ou mesmo que seria necessário procurar um novo processo físico (ou uma nova física?) que pudesse explicar a existência de galáxias e aglomerados, formados no intervalo de tempo disponível, isto é, os 10 ou 20 bilhões de anos que correspondem à idade do nosso Universo.

Felizmente, para físicos, astrônomos e cosmólogos, em abril de 1992 a equipe que gerenciava o satélite COBE anunciou que haviam sido medidas flutuações de temperatura da ordem de 13 partes em 1.000.000 na RCF! Em 1993, diversos outros experimentos, realizados a bordo de balões estratosféricos, no Polo Sul e utilizando radiotelescópios, detectaram variações ou estimaram limites da mesma ordem de grandeza, em escalas angulares da ordem de 1° (vide, novamente, o artigo "Medindo a Temperatura do Universo", de T. Villela, nesta edição). Esses grupos vêm trabalhando em conjunto desde meados da década de 80 e, recentemente, o grupo da Universidade da Califórnia, nos campus de Berkeley e Santa Barbara (UCB e UCSB, respectivamente), realizaram a 4a. versão de um experimento que vem sendo lançado desde 1988, MAX (Millimetre Anisotropy EXperiment ou Experimento de Anisotropia em ondas Milimétricas). O MAX publicou resultados de detecção de flutuações de temperatura na RCF em 1993 e 1994, usando um sistema de espelhos especiais para observar na faixa de microondas. Esse conjunto foi montado sobre uma gôndola - na verdade, uma espécie de gaiola sem paredes - totalmente controlada por controle

remoto e estabilizada, de modo que o detetor podia ser apontado para onde se desejasse. Essa mesma gôndola foi utilizada pelo grupo da UCSB, com um sistema de espelhos ligeiramente diferente e um outro tipo de detetor, para realizar missões mais longas de observação no Pólo Sul. Durante três verões antárticos (88/89, 90/91 e 93/94) pesquisadores passaram cerca de três meses na Antártica "pilotando" o ACME (Advanced Cosmic Microwave Explorer - Explorador Cósmico Avançado em Microondas). Os objetivos científicos foram os mesmos do MAX - observar flutuações de temperatura na RCF - mas realizados numa faixa de frequência diferente deste. Flutuações na RCF da ordem de algumas partes em 100.000 são os resultados das medidas do MAX e limites superiores, os resultados do ACME. Ambos são todas compatíveis com um Universo onde galáxias nasceram do colapso gravitacional decorrente de flutuações aleatórias e invariantes em escala, conforme mencionado na seção anterior.

Vários outros experimentos estão sendo realizados por grupos em diversas universidades nos EUA e por um grupo italiano, na Universidade de Roma, e muitos dentre estes mantêm uma colaboração ativa. O estágio atual do conhecimento busca discriminar, entre as teorias de formação de galáxias, qual a que melhor incorpora os resultados recentemente obtidos. O modelo em voga atualmente favorece o que se convencionou chamar de matéria escura misturada (Mixed Dark Matter), constituído de uma combinação de matéria escura quente (cerca de 30%) e matéria escura fria (cerca de 65%). Ele, em princípio, é capaz de resolver os problemas que os outros dois modelos que o compõem 'e cedo para afirmar que ele será a resposta do problema de formação de estruturas. A forma de testar essas teorias é, usando os resultados obtidos pelos experimentalistas como condições iniciais, verificar o comportamento da versão computacional das teorias: os modelos. E o que estes modelos fazem? Basicamente, eles usam uma série de parâmetros, tais como composição química inicial do Universo, amplitude das flutuações da RCF na época do desacoplamento, densidade de matéria e energia do Universo como valores iniciais para resolver as equações de transporte radiativo que descrevem o comportamento da matéria e da radiação em função do tempo. Esse processo é chamado de simulação, porque o computador simula a evolução temporal do Universo, dando como resultado um mapa com pontos que representam a distribuição de matéria numa certa região do espaço. A análise destes mapas, baseada, entre outras coisas, no fator de aglutinação entre os pontos (que representariam as estruturas formadas no intervalo de tempo para o qual o modelo foi ajustado), é que faz a distinção entre os modelos.

Podemos resumir o estado do conhecimento atual sobre os mecanismos de formação de galáxias da seguinte forma: para haver formação de galáxias são necessárias matéria e sementes. A matéria necessária existe na forma de matéria escura, fria, quente ou, mais provavelmente, uma mistura de ambas. As sementes podem ser flutuações aleatórias na densidade inicial de matéria ou defeitos topológicos no espaço em si. A tendência atual, embora não aceita por unanimidade, aponta para o modelo de matéria escura misturada, onde o colapso gravitacional é causado por flutuações aleatórias de densidade com amplitudes de algumas partes em 100.000. Por outro lado, defeitos topológicos não estão totalmente descartados, muito pelo contrário. Entretanto, existem, hoje em dia, poucos testes estatísticos capazes de distinguir entre os efeitos de cordas cósmicas ou paredes, por exemplo, e flutuações aleatórias. A solução, acreditamos, virá junto com a nova geração de experimentos para medir a RCF, já que medições em escalas angulares da ordem de 1° em um pedaço razoável do céu (um corte de $20^\circ \times 20^\circ$, por exemplo) podem criar detalhes novos nos quadros atuais. Isso permitirá que os físicos teóricos reavaliem seus modelos e possam selecionar o mais adequado. De qualquer modo, a versão final, após as detecções de flutuações anunciadas nos últimos dois anos, não deve estar longe. O problema de adequar as medidas da RCF e as medidas de velocidades peculiares de aglomerados de galáxias a um determinado modelo de formação de estruturas possivelmente será resolvido combinando-se as novas medidas de flutuações na RCF com os levantamentos de estruturas em larga escala que vêm sendo feitos por diversos centros de pesquisa no mundo. Somos bastante otimistas e estamos convencidos de que um quadro satisfatório emergirá nos próximos anos.

4 - CONCLUSÃO

A questão da formação de estruturas é um dos mais intrigantes e excitantes problemas da cosmologia atual e, certamente, esconde ainda muitas surpresas que devem vir à tona nos próximos anos. Qualquer que seja o modelo adotado atualmente, ele não responde a todas as nossas perguntas. Ainda existe um grande mistério - um paradoxo, poderíamos afirmar - na convivência entre a uniformidade observada na RCF e a existência de um Universo "encarado" como este em que vivemos. O Universo é suficientemente complexo para permitir a formação de estruturas em estado de sofisticado e delicado equilíbrio, tais como o nosso Sistema Solar, a partir de uma "sopa" de matéria e radiação muito mais uniforme do que jamais poderíamos supor ao olhar para o céu.

Os candidatos a semente e matéria escura são diversos e exóticos. Entretanto, como vimos nesse artigo, muitas coisas mudaram nos últimos 15 anos, e a lealdade de muitos físicos a seus modelos vem sendo constante e, muitas vezes, duramente abalada por um resultado experimental totalmente inesperado. Muitas surpresas aconteceram neste curto espaço de tempo, e seria, para os cientistas envolvidos na solução deste paradoxo, no mínimo ingênuo descartar qualquer das hipóteses existentes hoje antes de realizar uma investigação muito cuidadosa. Hipóteses improváveis hoje podem voltar à tona amanhã, caso o modelo de matéria escura misturada não seja perfeito o suficiente para explicar os magníficos objetos existentes no céu, e dos quais ainda não se conhece a origem. Ainda existem muitos segredos a serem descobertos sobre a formação de estruturas no Universo - quer sejam eles ligados a uma nova física ou simplesmente uma nova maneira de pensarmos e entendermos os processos físicos que se nos apresentam. A cosmologia encontra-se num tal estado de evolução e descobertas nos dias de hoje que, com certeza, novas, bizarras e interessantes teorias estão esperando atrás das portas do edifício da Ciência. Cabe a nós, cientistas, decidir quais perguntas devem ser formuladas para que essas portas se abram e aceitar as respostas que a Natureza nos apresentará.

Gostaria de agradecer a Philip Lubin, Peter Meinhold, Todd Gaier, Josh Gundersen, Mike Seiffert, Mark Lim, Tim Koch, John Staren e Jatila van der Veen pelas intermináveis discussões, regadas a café e "cookies", no laboratório do grupo de Cosmologia Experimental da Universidade da Califórnia, Santa Barbara, que amadureceram as idéias que resultaram neste artigo. A Thyrso Villela, meus agradecimentos pelas críticas e sugestões durante a preparação do manuscrito.

As referências aqui citadas devem ser consideradas apenas como sugestão para leitura complementar, e foram escolhidas com base pura e simplesmente no meu gosto, estando ordenadas por ordem crescente de dificuldade.

BIBLIOGRAFIA

- Riordan, Michael e Schramm, David "Shadows of Creation: Dark Matter and the Structure of the Universe". W. H. Freeman and Co., New York, 1991. Texto de divulgação científica, escrito com o objetivo de passar ao leitor os conceitos básicos do processo de formação de estruturas e da existência de matéria escura no Universo.
- Weinberg, Steven "Os Três Primeiros Minutos". Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980. Escrito por um físico de partículas que se aventurou no terreno da Cosmologia, esse texto apresenta, numa linguagem clara e simples, um resumo do Universo primordial. Um dos primeiros textos de divulgação escrito sobre Cosmologia (1977), possui um apêndice matemático para aqueles que desejarem se aventurar...
- Silk, Joseph "O Big Bang". Editora UnB, 2a. ed., 1989. Escrito por um dos físicos de maior destaque na área, esse livro apresenta o modelo do Big Bang de forma simples, e introduz alguns conceitos matemáticos (também concentrados em um apêndice) um pouco mais complexos que os apresentados no livro de Weinberg.
- Kolb, Edward e Turner, Michael "The Early Universe", cap. 9. Series: Frontiers in Physics,

Addison-Wesley, 1990. Considerado atualmente uma das "bíblías" da Cosmologia, é destinado a alunos do último ano do curso de Física, ou a estudantes de pós-graduação na área.