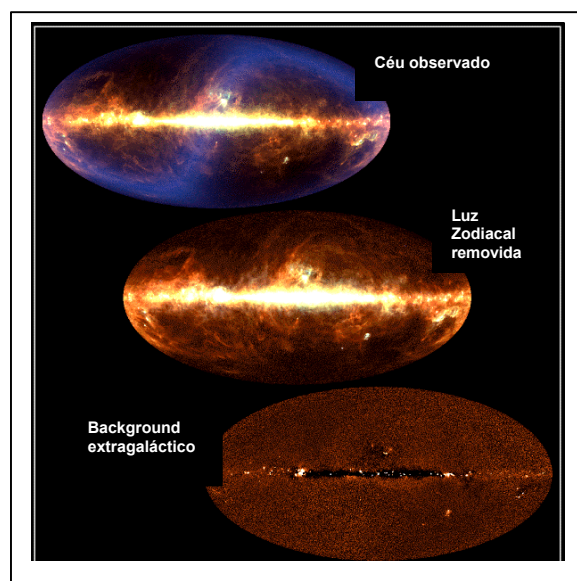


Capítulo 18

COSMOLOGIA

Nós dedicaremos esse capítulo ao estudo das maiores estruturas do Universo, evidências para a expansão cósmica e os modelos que descrevem a origem e a evolução do Universo. Os tópicos abordados serão os seguintes:

- COSMOLOGIA
 - AS MAIORES ESTRUTURAS DO UNIVERSO
 - PRINCÍPIO COSMOLÓGICO
 - EXPANSÃO CÓSMICA
 - O Paradoxo de Olbers
 - A Lei de Hubble e o Big-Bang
- O BIG BANG
 - “Redshifts” Cosmológicos
 - Destino do Universo
 - A Idade do Universo
 - A Geometria do Espaço
 - A Radiação Cósmica de Fundo
 - Matéria mais Radiação
 - A Formação de Núcleos e Átomos
 - Inflação Cósmica
 - O Problema do Horizonte e da Planura
 - A Época da Inflação
 - Implicações para o Universo



BIBLIOGRAFIA

- W. Maciel, 1991 "Astronomia & Astrofísica" – IAG/USP
- Zeilik & Smith, 1987 "Introductory Astronomy & Astrophysics"
- Chaisson & McMillan, 1997 "Astronomy Today"

COSMOLOGIA

AS MAIORES ESTRUTURAS DO UNIVERSO

O Universo apresenta estruturas em todas as escalas: partículas sub-atômicas formam núcleos que formam átomos que formam planetas e estrelas. Estas formam aglomerados de estrelas e galáxias, que por sua vez formam aglomerados de galáxias, super-aglomerados e estruturas ainda maiores, vazios, filamentos e muralhas de galáxias. Dos prótons em um átomo até as galáxias da Grande Muralha podemos traçar uma hierarquia de aglomeração da matéria das escalas menores até as maiores. A pergunta que surge é então: a aglomeração tem um final? Há uma escala a partir da qual o Universo é mais homogêneo e sem estruturas? Apesar do descrito acima a resposta é sim, existe.

Sabemos que amostras grandes de galáxias, para as quais “redshifts” foram determinados, revelaram estruturas de tamanhos até 200 Mpc. Embora estas cubram uma área enorme no céu e um grande volume, estes estudos ainda são relativamente locais, no sentido de que não chegam até grandes distâncias.

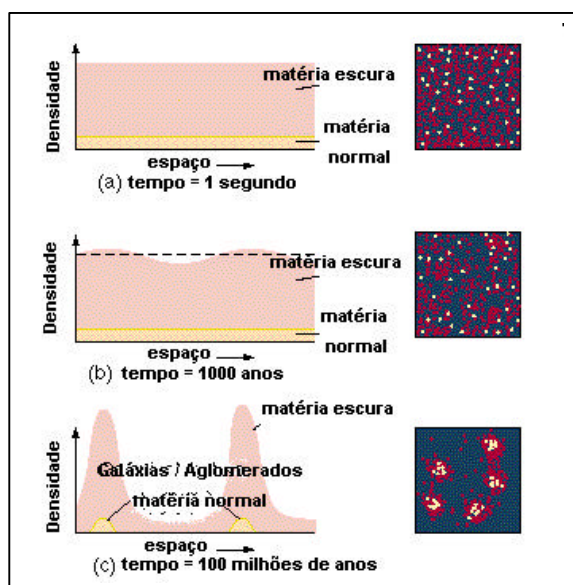


Figura 1 – Formação da estrutura do Universo

Uma outra alternativa é estudar um campo bem pequeno, mas obter “redshifts” de galáxias a distâncias bem maiores. Este tipo de estudo é chamado de "pencil-beam" e se estende até galáxias a grandes distâncias (aproximadamente 2000 Mpc). Este tipo de estudo mostra que as galáxias parecem se distribuir em estruturas que têm no máximo de 100 a 200 Mpc de diâmetro, com “vazios” entre elas. Os dados sugerem que as estruturas

do Universo tem no máximo este tamanho.

Baseados nesta observação os astrônomos então concluíram que o Universo deve ser homogêneo em escalas maiores que 200 Mpc. Isto quer dizer que se tomamos um cubo de 300 Mpc, por exemplo, e o colocamos em um lugar qualquer do Universo, encontraremos cerca de 100000 galáxias (não incluindo as galáxias anãs), um número parecido com o que encontraríamos, se o cubo fosse colocado em qualquer outro lugar do Universo.

PRINCÍPIO COSMOLÓGICO

A homogeneidade do Universo é a primeira das duas grandes suposições que o cosmologista (o astrônomo que estuda o Universo em grande escala e a dinâmica do Universo como um todo) faz quando estuda o Universo em grande escala. Observações sugerem que esta suposição pode ser verdadeira, mas ela não é provada. Outra suposição feita, suportada por evidências observacionais e suporte teórico é que o Universo é isotrópico, ou seja, ele parece igual em qualquer direção que se olhe. Há várias evidências observacionais que provam que a hipótese de isotropia é correta. Fora as regiões obscurecidas da nossa Galáxia, o Universo realmente parece similar em todas as direções, em qualquer comprimento de onda, se olharmos distante o bastante. Em outras palavras, qualquer amostra "pencil-beam" no céu vai revelar aproximadamente o mesmo número de galáxias em qualquer área do céu que olharmos.

As suposições de que o Universo é homogêneo e isotrópico formam a fundação da Cosmologia Moderna, denominadas conjuntamente de "O Princípio Cosmológico". Cosmologia é a parte da Astronomia que estuda as estruturas e evolução do Universo.

Ninguém sabe se o princípio cosmológico é realmente correto. Tudo que podemos dizer é que até agora os astrônomos encontram que ele é consistente com as observações. Nós então suporemos que este princípio é verdadeiro.

O Princípio Cosmológico tem implicações importantes. Por exemplo, ele implica que o Universo não tem uma extremidade, pois isto faria com que a suposição de homogeneidade fosse violada. Também implica que não existe um centro ou a suposição de que o Universo é igual em todas as direções (isotropia) não seria correta. Logo, este simples princípio limita a geometria geral do Universo.

EXPANSÃO CÓSMICA

O Paradoxo de Olbers

Toda vez que olhamos para o céu a noite e verificamos que o céu é escuro, estamos fazendo uma observação cosmológica profunda. Aqui vai a explicação do porquê disto.

De acordo com o Princípio Cosmológico, o Universo é homogêneo e isotrópico. Suponhamos, por um momento, que este seja também infinito em sua extensão espacial e que não se mude com o tempo - exatamente a visão que se tinha do Universo na primeira parte do século 20. Na média, então, o Universo seria uniformemente povoado com galáxias repletas de estrelas. Neste caso, quando olhamos a noite, nossa vista tem que eventualmente encontrar uma estrela. A estrela pode estar a uma distância enorme, em uma galáxia muito distante, mas as leis da probabilidade ditam que, mais cedo ou mais tarde, qualquer linha de visada cruzaria a superfície de uma estrela. Este fato tem uma implicação dramática: não importa onde se olha, o céu deveria parecer tão brilhante como a superfície de uma estrela, o céu deveria ser tão brilhante como o Sol! A diferença óbvia entre esta predição e a realidade é o que foi chamado de Paradoxo de Olbers, em honra ao astrônomo alemão do final do século 19, Heinrich Olbers, que popularizou esta idéia.

Qual a resolução deste paradoxo? Por que o céu é escuro a noite? Tendo aceito o Princípio Cosmológico, nós acreditamos que o Universo seja homogêneo e isotrópico. Nós temos que concluir, então, que uma ou as duas outras suposições sejam errôneas. Ou o Universo é finito, em extensão e/ou evolui com o tempo. A resolução do paradoxo está intimamente ligada com o comportamento do Universo em grandes escalas.

A Lei de Hubble e o Big Bang

Todas as galáxias no Universo estão se afastando de nós em um movimento descrito pela lei de Hubble. Esta relação tem uma importância muito maior que simplesmente a de determinação de distâncias para objetos como galáxias e quasares.

Suponhamos que as velocidades de recessão das galáxias se mantiveram constantes desde o “Big Bang”. Quanto tempo levaria para que qualquer galáxia chegasse à distância onde está hoje? A distância segue a lei de Hubble. O tempo é simplesmente a distância viajada dividida pela velocidade. Podemos dizer que tempo = distância/velocidade = distância/($H_0 \times$ distância), usando a lei de Hubble para a velocidade. Logo o tempo é

simplesmente $1/H_0$. Para um H_0 de 75 km/s/Mpc, este tempo é da ordem de 13 bilhões de anos. O tempo é independente da distância. Galáxias que estão duas vezes mais distantes tem velocidade duas vezes maior e portanto o tempo que elas levaram para chegar até a distância em que estão agora também é o mesmo.

A lei de Hubble então diz que há 13 bilhões de anos atrás todas as galáxias do Universo estavam em um mesmo ponto, juntas. Os astrônomos, na verdade, acreditam que não só as galáxias, mas também toda a radiação e matéria, tudo, estava confinado em um ponto naquele instante. A partir daí o que aconteceu é que este ponto “explodiu”, fazendo a matéria expandir para todos os lados, a grandes velocidades. As posições e velocidades atuais das galáxias são decorrentes daquele primeiro impulso. Esta explosão, que marca o começo do Universo, é chamada de "Big Bang".

Como dito acima, medindo a constante de Hubble, H_0 , podemos então deduzir a idade do Universo. Esta medida é portanto incerta, não só porque H_0 não é conhecido exatamente, como também porque a suposição de que a velocidade de recessão é constante não é correta. Na verdade, acredita-se que as galáxias tinham velocidades mais altas no passado e vêm se desacelerando pelos efeitos da gravidade. Os detalhes deste processo serão refinados mas o importante é entender que o fato crítico é que a idade do Universo é finita.

Esta é a explicação do porque do céu ser escuro a noite. O paradoxo de Olbers pode ser resolvido pela evolução do Universo. Nós vemos uma parte finita do Universo, a região dentro de aproximadamente 13 bilhões de anos de nós. O que está além disto nós não sabemos, esta luz ainda não teve tempo de chegar até nós.

O BIG BANG

Nós sabemos **quando** o Big Bang ocorreu. Mas existe alguma maneira de dizer **onde** este ocorreu? O princípio cosmológico diz que o Universo é o mesmo em todos os lugares. Mas a Lei de Hubble, a expressão para a velocidade de recessão das galáxias, implica que todas as galáxias se criaram de um ponto em um dado momento no passado. Este ponto não era então diferente do resto do Universo, violando a suposição de homogeneidade expressa pelo princípio cosmológico? A resposta é NÃO.

Para entender porque não há um “centro” para a expansão temos que mudar um pouco a nossa percepção do Universo. Se considerarmos que o Big Bang foi simplesmente uma explosão enorme que varreu a matéria para dentro do espaço e formou as galáxias que vemos, neste caso deve existir um centro e uma borda e o

princípio cosmológico não pode ser aplicado. Mas o Big Bang não foi uma explosão em um Universo vazio. A única maneira que podemos ter ao mesmo tempo a Lei de Hubble e o princípio cosmológico respeitados seria se o Big Bang tivesse envolvido o Universo inteiro, e não só a matéria e radiação dentro dele. Em outras palavras, as galáxias não se expandiram dentro do resto do Universo. O Universo em si se expandiu e está se expandindo. Como passas em um bolo dentro de um forno, que se distanciam a medida que o bolo cresce, as galáxias estão simplesmente sendo levadas com o movimento geral do Universo.

Agora então entendemos que a lei de Hubble descreve a expansão do Universo como um todo. Temos que então reconhecer também que não existe espaço além das galáxias dentro do qual elas se expandem. No momento do Big Bang, as galáxias não residiam em um ponto localizado em um lugar definido dentro do Universo. O Universo como um todo era um ponto. Este ponto de nenhuma maneira era diferente do resto do Universo. Ele ERA o Universo. Portanto, não havia nenhum ponto onde o Big Bang ocorreu - este ocorreu em todos os lugares de uma vez só.

Para entender melhor estas idéias, imaginem um balão com moedas coladas a sua superfície. As moedas representam galáxias e a superfície bi-dimensional do balão representa uma analogia com o nosso Universo tridimensional. O princípio cosmológico se aplica aqui porque todo ponto do balão parece igual a qualquer outro. Imagine que você reside em uma das galáxias (moedas) deste balão. A medida que o balão é inflado você veria outras galáxias se distanciando de você. As moedas mais distantes da sua, se distanciam mais rapidamente. Note que as moedas não se expandem juntamente com o balão, da mesma maneira que galáxias, estrelas e pessoas também não se expandem com o Universo.

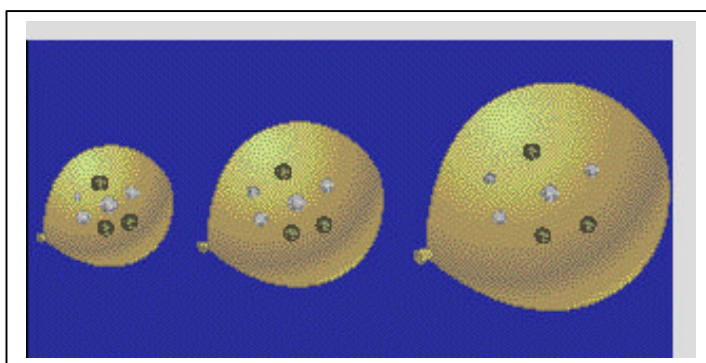


Figura 2- Modelo das contas em um balão para explicação do processo de expansão do Universo.

Não importa em qual galáxia você está, as outras galáxias estarão se afastando do

seu sistema. Isto forma a base do princípio cosmológico: nenhum observador em nenhum lugar tem uma posição privilegiada. Não existe centro da expansão e não há posição que possa ser identificada como aquela onde o Universo começou. Todos vêem uma expansão geral descrita pela lei de Hubble, com a mesma constante de Hubble em todos os casos.

Agora imagine que você deixa o balão esvaziar de uma só vez. Isto se compararia ao nosso Universo voltando a sua forma original, com o tempo voltando ao passado, em direção ao Big Bang. Todas as moedas chegariam no mesmo lugar, ao mesmo tempo, o momento quando o balão atinge um tamanho “zero”. Mas não se poderia encontrar nem um ponto no balão que se pudesse dizer que é o local onde isto ocorre. O balão inteiro evolui de um ponto, da mesma forma que o Big Bang envolveu o Universo todo e evoluiu de um ponto.

“Redshift” Cosmológico

Esta visão do Universo em expansão requer que nós reinterpretemos o conceito de “redshift” cosmológico. Até agora nós temos explicado o “redshift” de galáxias como um desvio de Doppler, como consequência do movimento relativo destas em relação a nós. Mas agora sabemos que o “redshift” cosmológico é na verdade uma consequência da expansão do Universo. O “redshift” de um fóton mede quanto o Universo se expandiu desde o momento que aquele fóton foi emitido.

Destino do Universo

Atualmente o Universo está se expandindo. Esta expansão vai continuar sempre? Se não for, o que acontecerá então? E quando? Estas questões são fundamentais para o entendimento do destino do Universo. Nós podemos tentar responder estas perguntas atacando um problema mais simples e mais familiar que é o seguinte.

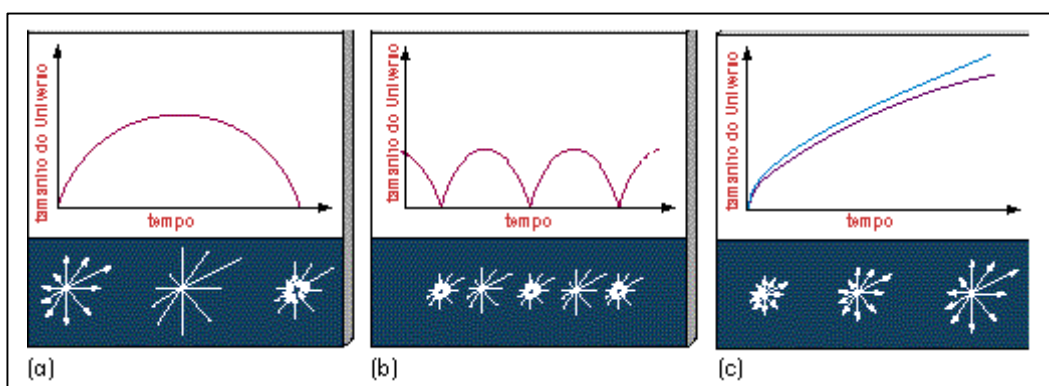


Figura 3 – Tamanho do Universo x tempo (a) Universo fechado, (b) cíclico, período de expansão e contração. (c) aberto, expansão infinita.

Densidade Crítica

Considere um foguete lançado da superfície de um planeta. Como será o movimento deste foguete? Há duas possibilidades, dependendo da velocidade inicial do foguete. Se a velocidade de lançamento é grande o bastante, o foguete excederá a velocidade de escape do planeta e nunca mais voltará a sua superfície. A velocidade diminuirá devido a força gravitacional do planeta (que diminuirá cada vez mais), mas o foguete nunca terá velocidade zero. O foguete terá uma órbita “não ligada”.

Alternativamente, se o foguete tiver uma velocidade de lançamento que é menor que a velocidade de escape, este atingirá um máximo de distância do planeta e depois cairá de volta em sua superfície. O foguete terá então uma órbita “ligada”.

O mesmo tipo de argumento pode ser usado para a expansão do Universo. Imagine duas galáxias de distância (entre elas) conhecida. Suas velocidades de recessão são dadas pela Lei de Hubble. As mesmas duas possibilidades existem para estas galáxias, como para o foguete. Ou a distância entre as galáxias pode crescer indefinidamente, ou a distância pode crescer até um certo ponto e depois diminuir. O que o princípio cosmológico diz é que o mesmo que se aplica às duas galáxias se aplicará a todo o Universo.

Existe ainda uma terceira alternativa que seria uma situação intermediária entre a órbita “ligada” e “não-ligada”: uma “quase ligada”. Neste caso o Universo se expandiria indefinidamente, mas com uma velocidade cada vez menor, análogo ao caso do foguete que deixa o planeta com exatamente a velocidade de escape. Estas três possibilidades apresentam possíveis cenários para a evolução do Universo, como o vemos hoje.

O que determina qual destas três possibilidades é a correta para o Universo? Em todos os casos a gravidade desacelerará a expansão do Universo com o tempo. Quanto mais matéria existir no Universo maior será a força contra a expansão, ou seja, maior será a força que evita que o foguete escape. Em um Universo de densidade alta, há massa suficiente para a expansão do Universo causar um recolapso. Neste caso o Universo é ligado. No outro extremo temos o caso do Universo que pode expandir indefinidamente, que é o Universo “não ligado”. A linha divisória entre estes dois casos é aquela onde a densidade corresponde exatamente a densidade crítica, ou seja, análogo ao caso “quase ligado”. Para H_0 de 75 km/s/Mpc, a densidade crítica atual é de 10^{-26} kg/m³. Esta é uma densidade extremamente baixa, de apenas seis átomos de hidrogênio por metro cúbico.

Dois Futuros

Se o Universo começou, durante o Big Bang, com uma densidade acima da

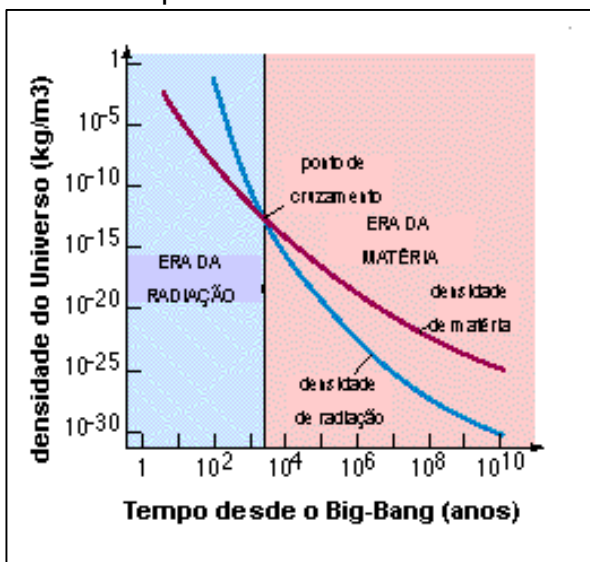
densidade crítica, então este contém bastante matéria para sua expansão. A expansão das galáxias vai eventualmente terminar e o Universo começará a se contrair. O Universo, ao se contrair ficará cada vez mais denso e quente, a medida que for chegando de volta a sua condição inicial de um único ponto. Dizemos que este Universo terá uma "morte quente".

Se o Universo começou, durante o Big Bang, com uma densidade abaixo da densidade crítica, o seu destino é bem diferente do descrito acima. Neste caso, a sua densidade sempre foi e sempre será inferior ao necessário para fazer com que o Universo um dia se contraia e o que deve acontecer é que o Universo se expandirá indefinidamente. Neste cenário as galáxias continuarão a se afastar umas das outras, suas radiações ficarão cada vez mais fracas com as grandes distâncias. Em um dado momento um observador na Terra, mesmo com os telescópios mais sensíveis, não mais verão galáxias além do Grupo Local. O Universo aparecerá escuro, as galáxias distantes serão muito fracas para se detectar. Eventualmente a Via Láctea e o Grupo Local ficarão sem energia também. Dizemos que este Universo terá uma "morte fria". Toda a radiação, matéria e a vida estão destinadas a se congelar.

No caso intermediário de um Universo com a densidade crítica, este contém exatamente a matéria necessária para eventualmente parar a expansão do Universo, mas somente após um tempo infinito. Este Universo expandirá indefinidamente também.

O Universo Expandirá Indefinidamente?

Há alguma maneira que nos permita determinar qual dos modelos de Universo realmente descreve o que acontecerá? A maneira mais direta de se tentar responder esta pergunta é estimando a densidade do Universo, porque densidade é a propriedade principal que distingue um modelo de Universo do outro. Como já dito acima, para $H_0 = 75$ km/s/Mpc, a densidade crítica que separa os dois "futuros" é de 10^{-26} kg/m³. Cosmologistas convencionalmente chamam a razão da densidade real para a densidade crítica de "parâmetro de densidade cósmica" e denotam este valor pelo símbolo Ω_0 (se diz



"omega not"). Expresso nestes termos, se $\Omega_0 = 1$, o Universo tem a densidade crítica. Se este é menor que 1 o Universo expandirá indefinidamente e se for maior que 1 este terá um novo colapso.

Figura 4 – Densidade do Universo em função do tempo, e as eras cosmológicas.

Como podemos determinar a densidade média do Universo? Uma maneira simples seria simplesmente 1) medir a massa média das galáxias que residem em um dado espaço, 2) calcular o volume deste e 3) determinar a densidade de massa deste espaço. Quando os astrônomos fazem este cálculo encontram uma densidade que é um pouco menor que 10^{-28} kg/m³ na forma de matéria luminosa. Este resultado depende pouco do que contém o espaço escolhido, se aglomerados ricos, vazios, etc.

O resultado para a densidade é sempre o mesmo, dentro de um fator 2 ou 3. Contagens de galáxias dão então um valor de Ω_0 de 0.01. Se esta medida está correta o Universo expandirá para sempre.

Mas há ainda uma outra consideração importante. Nós já vimos em capítulos anteriores, que a maior parte da matéria do Universo é escura. No momento, não sabemos exatamente os constituintes da matéria escura mas sabemos que ela está presente, devido aos efeitos que ela tem sobre os corpos. Galáxias podem conter 10 vezes mais matéria escura do que matéria luminosa e aglomerados podem conter ainda mais. Cerca de 95% da massa de um aglomerado pode ser de matéria escura. Mesmo que não possamos vê-la, a matéria escura contribui para a densidade total do Universo. Se incluímos a matéria escura na determinação do valor de Ω_0 chegamos a um valor de 0.2 ou 0.3, ainda bem menor que o valor 1, implicando que o Universo deve se expandir indefinidamente.

Infelizmente, a distribuição de matéria escura em escalas ainda maiores que aglomerados não é conhecida. Nós podemos detectar sua influência em galáxias e aglomerados de galáxias mas não sabemos de seus efeitos em superaglomerados, vazios e em outras grandes estruturas. Entretanto, temos algumas evidências de que o efeito da matéria escura nestas grandes estruturas é ainda maior que em aglomerados de galáxias. Por exemplo, observações dos movimentos de galáxias no superaglomerado local sugerem a presença de uma acumulação enorme de massa chamada de "O Grande Atrator", com massa total de cerca de 10^{17} massas solares e um tamanho de 100 a 150 Mpc. Se estas estimativas do tamanho e massa deste objeto enorme estão corretos, então a densidade média do Universo pode ser próxima a densidade crítica.

Podemos dizer então que é possível que a matéria invisível do Universo possa chegar a cerca de 99% da massa total. Neste caso os "vazios" não são vazios reais mas estão cheios com uma matéria que não pode ser vista nem detectada. As galáxias seriam então apenas insignificantes ilhas brilhantes dentro da matéria escura. Se a quantidade de matéria escura nos superaglomerados e grandes estruturas for um fator de 100 vezes ou mais a contribuição das galáxias, então Ω_0 poderá ser também maior que 1 e o Universo deve ter um recolapso. Este é o motivo pelo qual é tão importante procurar

evidências de matéria escura em escalas cada vez maiores. Nos últimos 20 anos o valor de Ω_0 tem aumentado cada vez mais, a medida que tem sido possível usar amostras cobrindo volumes cada vez maiores.

Qual a conclusão afinal? Que destino terá o nosso Universo? A resposta não é conhecida com certeza ainda, mas podemos dizer que, embora o valor de Ω_0 não seja muito preciso, a maioria dos astrônomos acredita que seu valor está entre 0.1 e 1. Logo, a opinião da maioria é que o Universo deverá se expandir para sempre.

A Idade do Universo

Fizemos anteriormente uma determinação da idade do Universo fazendo uma suposição de que a expansão do Universo teve velocidade constante do passado até o Universo atual. Só que agora sabemos que isto não é verdade. Os efeitos da gravidade desaceleram a expansão. Não importa qual modelo de Universo escolhemos, é sempre correto dizer que o Universo se expandia mais rapidamente no passado do que agora. A suposição de que o Universo se expandiu com velocidade constante deve nos ter levado a uma estimativa de idade do Universo que é maior do que a idade real. O Universo deve ser mais jovem que 13 bilhões de anos (o valor determinado anteriormente). Quão mais jovem depende de quanta desaceleração ocorreu.

A Geometria do Espaço

A idéia de ter o Universo como um todo expandindo a partir de um único ponto, com nada, nem mesmo espaço e tempo fora deste, não é fácil de se aceitar. Este é, entretanto, um dos fundamentos da cosmologia moderna e a grande maioria dos astrônomos não tem dúvida disto. A descrição do Universo como uma estrutura em evolução dinâmica não pode ser feita com a mecânica newtoniana somente.

Necessitamos das técnicas introduzidas pela relatividade geral de Einstein, e suas noções de curvatura do espaço e dinâmica do tempo e espaço.

A teoria da relatividade geral diz que a massa "curva" o espaço em sua vizinhança. Quanto maior a massa, maior a densidade, e maior a curvatura. Mais do que isto, a curvatura tem que ser a mesma em todos os lugares (devido ao princípio cosmológico). Há portanto, somente três possibilidades para a geometria do Universo. Elas correspondem aos três tipos de Universo que discutimos anteriormente.

Se a densidade média do Universo está acima da densidade crítica, o Universo tem uma curvatura tão acentuada que ele se curva sobre si mesmo, tendo um tamanho

finito. Este Universo é chamado de Universo fechado. É impossível visualizar uma figura em três dimensões que tenha estas características mas em duas dimensões ela é simplesmente uma esfera, o balão que já discutimos anteriormente. Como a superfície de uma esfera, o Universo não tem bordas. No entanto ele é finito em extensão.

A esfera tem uma curvatura positiva. Se o Universo, no entanto, tem uma densidade menor do que a densidade crítica, a forma do Universo será bem diferente do análogo de uma esfera em três dimensões. O análogo da forma deste Universo em duas dimensões seria uma forma com curvatura negativa. Este Universo é chamado de Universo aberto. Este Universo é infinito. O caso intermediário, quando a densidade é exatamente igual à densidade crítica, é o mais fácil de se visualizar. O Universo crítico não tem curvatura. Dizemos que é um Universo plano e é infinito em extensão. Neste caso, e somente neste caso, a geometria do espaço é precisamente a geometria euclidiana, com a qual estamos acostumados.

A geometria Euclidiana, a geometria do espaço plano, é familiar para nós porque é uma boa descrição do espaço na vizinhança da Terra. É a geometria da experiência do dia a dia. Isto quer dizer que o Universo também é plano? A resposta é não. Da mesma maneira que um mapa plano de ruas é uma boa representação de uma cidade, embora a Terra seja redonda, a geometria de Euclides é uma boa descrição do espaço dentro do sistema solar ou mesmo dentro da Galáxia, porque a curvatura do Universo é desprezível em escalas menores que 1000 Mpc. Somente em escalas muito maiores os efeitos da geometria são detectados.

Nós iremos agora dos estudos sobre os possíveis cenários de evolução do Universo para os estudos de seu passado distante. Tentaremos estudar o Universo antes da idade dos quasares, tentando chegar ao limite do tempo, à origem do Universo.

Será que há alguma maneira de estudar o Universo em suas primeiras fases de formação?

A Radiação Cósmica de Fundo

Uma maneira de responder a esta pergunta foi descoberta em 1964, em uma experiência que era destinada a melhorar o sistema de telefonia americana. Dois cientistas da companhia de telefones Bell chamados A. Penzias e R. Wilson estavam estudando a emissão da Via Láctea no comprimento de onda milimétrico (radio) quando eles notaram uma emissão que vinha de todas as direções. A qualquer hora do dia ou da noite, ou qualquer direção que eles olhavam, encontravam a mesma emissão, que parecia preencher todo o espaço. Foi então descoberto que este sinal era nada mais

nada menos que a prova da origem do Universo. Este sinal que eles descobriram é chamado de radiação cósmica de fundo. Esta descoberta deu a Penzias e Wilson o Prêmio Nobel em 1978.

Vários astrônomos já tinham previsto a existência da radiação de fundo muito antes desta ser descoberta. Já em 1940 os físicos sabiam que o Universo próximo a época do Big Bang era preenchido com radiação termal de alta energia, raios gama a comprimentos de onda muito curtos. Pesquisadores em Princeton estenderam estas idéias, e predisseram que a radiação primordial deveria ter sido deslocada do comprimento de onda de raios gamma para raios X e depois para ultra-violeta, etc, e eventualmente para rádio, a medida que o Universo se resfriava. No momento presente, disseram os pesquisadores, esta radiação vinda do Big Bang não poderia ter uma temperatura de mais do que alguns kelvins, apresentando então um pico na região das ondas milimétricas. O grupo de Princeton estava construindo uma antena para medir esta radiação quando Penzias e Wilson fizeram a descoberta.

Os pesquisadores de Princeton confirmaram a existência da radiação de fundo e estimaram sua temperatura em 3 K. No entanto, esta parte do espectro eletromagnético é difícil de se observar da Terra e não foi até 25 anos depois que os astrônomos puderam demonstrar que a radiação descreve uma curva de corpo negro. Em 1989 o satélite COBE (Cosmic Background Explorer Satellite) mediu a intensidade da radiação de fundo de 0,5 mm até 10 cm. Os resultados mostram a correspondência com uma curva de corpo negro com um pico a temperatura de aproximadamente 2,7 K.

Um aspecto surpreendente na radiação de fundo é seu grau de isotropia. Quando corrigimos para o movimento da Terra no espaço (porque este movimento causa que a radiação de fundo pareça um pouco mais quente que a média em frente de nós e mais fria atrás de nós), a intensidade da radiação é essencialmente contante de uma parte do céu para outra (1 parte em 10^5). Esta isotropia nos dá uma forte evidência de que o princípio cosmológico é correto.

É importante notar que a radiação de fundo contém mais energia que a soma de todas as galáxias e estrelas que jamais existiram. A razão é simples. Galáxias e estrelas são mais brilhantes mas ocupam um volume muito menor. Quando somamos a energia da radiação do fundo em toda a sua extensão, ela excede a energia dos outros corpos por um fator de pelo menos 10. A radiação de fundo é então a forma de radiação mais significativa do Universo.

Matéria e Radiação

A densidade global da matéria no universo não é sabida ao certo, mas pensamos que é provavelmente próxima ou menor que a densidade crítica de 10^{-26} kg/m³. O Universo é aparentemente aberto, ou próximo a isto. Acabamos de ver que a maior parte da radiação do Universo está em forma de radiação de fundo. Sabemos que matéria e energia são equivalentes. Como então se comparam estas duas formas de energia? É a matéria ou a radiação que é o principal constituinte do Universo em largas escalas?

Para responder esta pergunta temos que converter matéria e radiação em um "elemento comum", ou em massa ou em energia. Comparemos suas massas. Nós podemos expressar a energia da radiação de fundo como uma densidade equivalente primeiro calculando o número de fótons em um metro cúbico de espaço e depois transformando esta energia total dos fótons em massa usando a relação $E=mc^2$. Quando fazemos isto, chegamos a uma densidade da radiação de fundo de aproximadamente 5×10^{-30} kg/m³. Concluimos, então, que no momento a densidade da matéria do Universo excede em várias ordens de magnitude a densidade da radiação. Dizemos que estamos vivendo em um Universo que é dominado pela massa (ao invés de dominado pela radiação).

Será que o Universo foi sempre dominado pela massa? Para responder esta pergunta temos que estudar o comportamento da massa e radiação durante a evolução do Universo. Todos dois diminuem, a medida que o Universo expande e dilui o número de fótons e de átomos. A radiação também é diminuída em energia devido ao "redshift" cosmológico. Logo, sua densidade equivalente cai mais rapidamente que a densidade da matéria, a medida que o Universo expande.

Se pudéssemos olhar para "trás" no tempo, para próximo do Big Bang, veríamos que a densidade de radiação aumentava muito mais rapidamente que a densidade de matéria. Embora hoje em dia a densidade de radiação seja bem menor que a densidade de matéria, deve ter existido um momento no passado quando estas duas eram comparáveis. Antes daquele momento, a radiação era a constituinte principal do Universo. Dizemos que aquele Universo era dominado pela radiação.

Durante todo este curso nos preocupamos com a história do Universo dominado por matéria. Agora consideraremos alguns eventos importantes do Universo primordial, muito antes de estrelas ou galáxias existirem.

A Formação de Núcleos e Átomos

No momento do Big Bang, o Universo era muito quente e denso. Este tem se expandido e se resfriado desde então. Nos primeiros momentos do Universo só existia radiação. Durante os primeiros minutos de existência, as temperaturas eram tão altas que os fótons tinham energia suficiente para transformar-se em matéria, na forma de partículas elementares. Neste período os primeiros prótons, neutrons, elétrons e matéria escura foram criados. Desde então a matéria evoluiu, se aglomerando e formando núcleos, átomos, planetas, estrelas, galáxias e estruturas em grandes escalas. Mas não há nenhuma matéria nova criada. Tudo que vemos ao redor de nós, foi criado da radiação a medida que o Universo primordial foi se expandindo e se esfriando.

Formação de Hélio

Atualmente sabemos que existe muito mais hélio no Universo do que pode ser explicado por formação dentro de estrelas por fusão nuclear. Existe um valor mínimo de hélio que é observado em todas as estrelas que é 25% por massa. A explicação é que este hélio deve ser primordial, ou seja, criado antes das estrelas terem sido formadas. A produção de elementos mais pesados que o hidrogênio por fusão nuclear, logo depois do Big Bang é chamada de nucleosíntese primordial.

Aproximadamente 100 s depois do Big Bang a temperatura havia baixado para 1 bilhão de kelvins e, fora as partículas "exóticas", massa no Universo consistia de elétrons, prótons e neutrons. A quantidade de prótons era maior que a de neutrons por um fator 5. Reações de fusão entre prótons e neutrons para formar deutério (uma forma pesada de hidrogênio - o núcleo do deutério contém um próton e um neutron) eram muito freqüentes. Entretanto, a matéria era envolvida em um "mar" de radiação e os núcleos de deutério eram destruídos por raios gamma de alta energia com a mesma rapidez que eram formados. Somente quando a temperatura do Universo caiu abaixo de 900 milhões de kelvin, aproximadamente 2 minutos depois do Big Bang, foi que o deutério pode se formar sem ser destruído. Uma vez que isto ocorreu muitas outras fusões ocorreram e transformaram o deutério em elementos mais pesados, especialmente em Hélio 4. Em apenas alguns minutos a maioria dos neutrons foram consumidos, deixando o Universo com um conteúdo que era em sua maioria hidrogênio e hélio.

Enquanto a maioria do deutério se transformou em hélio nesta época, uma pequena fração continuou a existir como deutério e é observado ainda hoje. Esta observação é muito importante, pois diferente do hélio e outros elementos, deutério não é formado em estrelas e portanto sabemos que todo deutério detectado deve ser

primordial.

Poderíamos supor que a fusão no Universo primordial continuaria para elementos mais pesados, como acontece no centro das estrelas, mas na verdade este não foi o caso. O motivo é que enquanto no núcleo das estrelas a temperatura vai aumentando possibilitando a queima de elementos mais pesados, no Universo exatamente o contrário acontece, a temperatura diminui cada vez mais, a medida que o Universo se expande. Aproximadamente 15 minutos depois do Big Bang o Universo tinha sua abundância cósmica de 75% hidrogênio e 25% de hélio. Só bilhões de anos depois é que estes valores começaram a se mudar, após o começo da formação das estrelas.

A Formação dos Átomos

Quando o Universo tinha alguns mil anos, a matéria começou a dominar sobre a radiação. O período durante o qual núcleos e elétrons se combinaram para formarem átomos é freqüentemente chamado de época de “desacoplamento”, pois foi durante este período que a radiação e a matéria se desacoplaram. Em períodos anteriores, quando toda a matéria era ionizada, o Universo era cheio de elétrons livres, que freqüentemente interagiam com a radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda. Como resultado, um fóton não podia viajar distâncias grandes pois encontrava logo um elétron e era espalhado. Por isso o Universo era opaco à radiação (como as partes interiores de uma estrela como o Sol). Dizemos que nesta época a matéria e a radiação eram fortemente “acopladas” uma a outra, devido a estas interações. Quando os elétrons se combinaram com os núcleos para formar os átomos de hidrogênio e hélio, no entanto, só alguns comprimentos de onda podiam interagir com a matéria. Radiação em outros comprimentos de onda puderam viajar essencialmente para todas as direções sem ser absorvida. O Universo se tornou quase transparente. Deste momento em diante os fótons passaram a circular livremente no espaço. A medida que o Universo expandiu, simplesmente se esfriou e eventualmente a radiação atingiu seu pico no comprimento de onda milimétrico que medimos hoje.

Os fótons da radiação milimétrica que detectamos na Terra hoje estão viajando pelo Universo desde que a matéria e a radiação se desacoplaram. A última interação destes fótons com a matéria (na época do desacoplamento) ocorreu quando o Universo tinha aproximadamente alguns 100 mil anos e era aproximadamente 1500 vezes menor (e mais quente) que é hoje - isto aconteceu no redshift ~ 1500 .

Inflação Cósmica

O problema do horizonte e da planura

No final dos anos 70 os cosmologistas, tentando descrever a evolução do Universo em um cenário consistente, foram confrontados com dois problemas que não eram fáceis de explicar tendo em vista o modelo do Big Bang. O primeiro é conhecido como o problema do horizonte. Imagine-se fazendo uma observação da radiação cósmica de fundo vinda de duas regiões opostas do Universo atual. Estas regiões que você está observando estão distantes uma da outra mas mesmo assim a radiação é exatamente a mesma nos dois pontos (porque a radiação é isotrópica). Como isto poderia acontecer se estes pontos não tiveram contato um com o outro? Como pode ser que a informação de um chegou até o outro, sem estes nunca terem tido interação? Como um ponto sabe da existência do outro e parece exatamente igual? Não houve tempo da informação ser transferida de um ponto a outro porque esta não pode ser transmitida com uma velocidade maior que a da luz. Este paradoxo chamou-se de “problema do horizonte”.

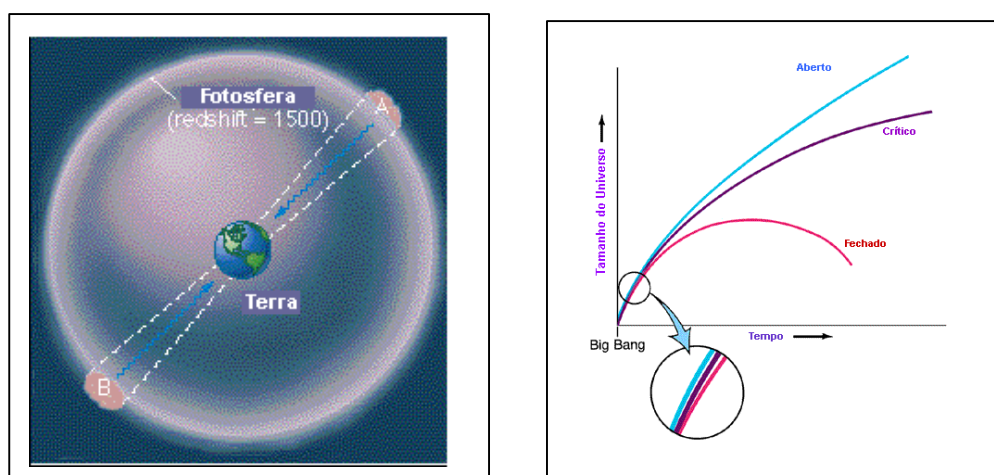


Figura 5 – O problema do horizonte e da planura.

O segundo problema com o modelo de Big Bang é o problema da planura. Os astrônomos acham que o valor de Ω_0 é aproximadamente 1, ou seja, a densidade do Universo é próxima à densidade crítica. Mas por que esta coincidência? Por que Ω_0 não é um milhão de vezes maior ou menor que este valor? O problema fica ainda maior quando notamos que se o Universo tem uma densidade próxima a crítica hoje, ele deve ter tido uma densidade ainda mais próxima à crítica no passado. Um Universo que tivesse começado com um valor de densidade diferente da crítica teria desviado deste valor muito rapidamente. Mas este não foi o caso. Se medimos hoje em dia um Ω_0 de 0.1, por exemplo, na época da nucleossíntese este valor teria sido 1.0, com um erro de 1 parte em 10^{15} . Este problema constitui o problema da planura. Por que esta coincidência, que

Ω_0 é próximo a 1?

Estes dois problemas podem ser resolvidos com a Teoria da Inflação.

A Época da Inflação

Nos anos 70 e 80 os físicos teóricos tentaram unificar as três forças não-gravitacionais do Universo, o eletromagnetismo, a força "forte" (a força que une prótons e neutrons dentro de um núcleo) e a força "fraca" (aquela que tem um papel importante nos decaimentos radioativos), em uma superforça generalizada. Uma previsão geral das teorias de unificação que descrevem as superforças é que as três forças são unificadas e não distinguíveis em regimes de energias altíssimas, correspondendo a temperaturas maiores que 10^{28} K. A temperaturas baixas a superforça se divide em três, revelando o caráter de força eletromagnética, forte ou fraca.

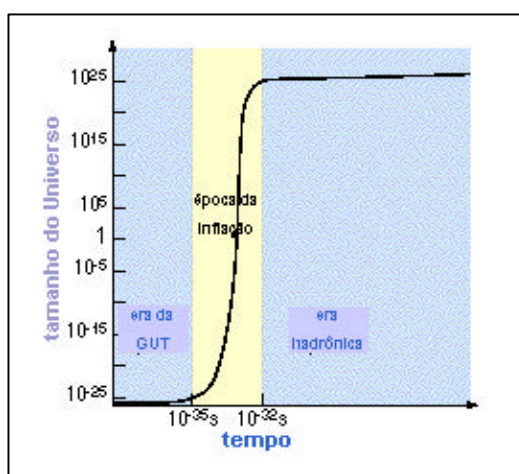


Figura 6 – Inflação Cósmica.

No começo dos anos 80 os cosmologistas descobriram que as teorias de unificação tinham uma implicação extraordinária se aplicada ao começo do Universo. Aproximadamente 10^{-34} s após o Big Bang, as temperaturas caem abaixo de 10^{28} K e as forças básicas da natureza se reorganizam (assim como gás que se liquidifica quando a temperatura abaixa): o Universo, por um período de tempo muito curto, entra em um estado instável, de alta energia, que os físicos chamam de "falso vácuo". Na verdade, o que aconteceu, foi que o Universo continuou na condição "unificada" por um período longo demais, como água que não se torna ainda congelada mesmo quando é colocada a temperaturas abaixo de zero grau. Isto teve consequências dramáticas para o Universo. Por um tempo curtíssimo, o espaço vazio adquiriu uma pressão enorme, que temporariamente foi maior que a gravidade e acelerou a expansão do Universo a uma taxa altíssima. A pressão continuou constante à medida que o cosmos expandiu, e a aceleração aumentou mais e mais com o tempo. O tamanho do Universo dobrou a cada

10^{-34} segundos mais ou menos. Este período de grande expansão cósmica foi conhecido como a época da inflação.

Eventualmente, o Universo retornou para o estado de "vácuo verdadeiro". Regiões de espaço normal começaram a aparecer dentro do "vácuo falso" e rapidamente estas regiões foram espalhadas por todo os cosmos. Com a volta do "vácuo verdadeiro" a inflação parou. O episódio inteiro durou somente 10^{-32} s, mas durante este tempo o Universo aumentou em tamanho por um fator de 10^{50} . Com o vácuo normal, o Universo retomou sua expansão relativamente lenta, como anteriormente a fase de inflação, tendo seu movimento desacelerado pela gravidade. No entanto, algumas mudanças importantes tinham ocorrido durante esta fase curta da inflação.

Implicações para o Universo

A época da inflação oferece uma solução natural para os problemas de horizonte e de planura. O problema de horizonte é resolvido porque a inflação trouxe regiões que já tinham tido tempo de se comunicar para posições bem distantes umas das outras, fora de comunicação. O Universo durante a época da inflação expandiu muito mais rapidamente do que a velocidade da luz. Logo, regiões que antes da inflação poderiam ter estado muito próximas, foram levadas para pontos afastados (a relatividade restringe a velocidade da matéria e energia como sendo sempre menor que a da luz mas não restringe a velocidade do Universo como um todo). As propriedades de duas regiões opostas no Universo atual podem então ser as mesmas porque estas regiões estavam em contato antes da inflação.

A solução para o problema da planura é dado da seguinte maneira. A época da inflação "esticou" o Universo tanto e tanto que o Universo é na verdade plano, com grande grau de acurácia. Qualquer curvatura que o Universo pode ter tido antes da inflação foi completamente destruída pela enorme expansão, fazendo com que o Universo ficasse perfeitamente plano. Devido a este fato, Ω_0 então tem que ser 1. Mas isto quer dizer que a grande maioria da massa do Universo está em forma invisível (matéria escura). Como já vimos anteriormente, isto não foi ainda provado observacionalmente.

Quando a idéia da inflação surgiu pela primeira vez, muitos astrônomos não acreditaram nela (alguns ainda não acreditam hoje). O problema é que não há nenhuma evidência observacional direta para uma densidade cósmica que seja tão alta quanto a densidade crítica. No entanto, nós vimos anteriormente, que há muitas evidências que mostram que a matéria escura pode equivaler a pelo menos 20 a 30 por cento da

densidade crítica e estimativas de Ω_0 parecem que aumentam quando as escalas que são consideradas aumentam. Outro ponto é que a inflação é uma previsão clara da teoria de grupo (de unificação) que está se tornando cada vez mais bem estabelecida como instrumento para descrição de matéria a altas energias. Se estas teorias estão realmente corretas, então a inflação tem que ter ocorrido. Finalmente, a inflação dá uma solução para dois problemas que não eram fáceis de resolver em um modelo de Big Bang não inflacionário, o problema do horizonte e da planura.