

CAPÍTULO 10

Cosmologia

Gastão B. Lima Neto

10.1 INTRODUÇÃO

10.2 BREVE HISTÓRICO DE MODELOS COSMOLÓGICOS

10.3 PARADOXO DE OLBERS

10.4 A EXPANSÃO DO UNIVERSO

10.5 A TEORIA DO BIG BANG

10.6 SOLUÇÃO DO PARADOXO DE OLBERS E O TAMANHO DO UNIVERSO

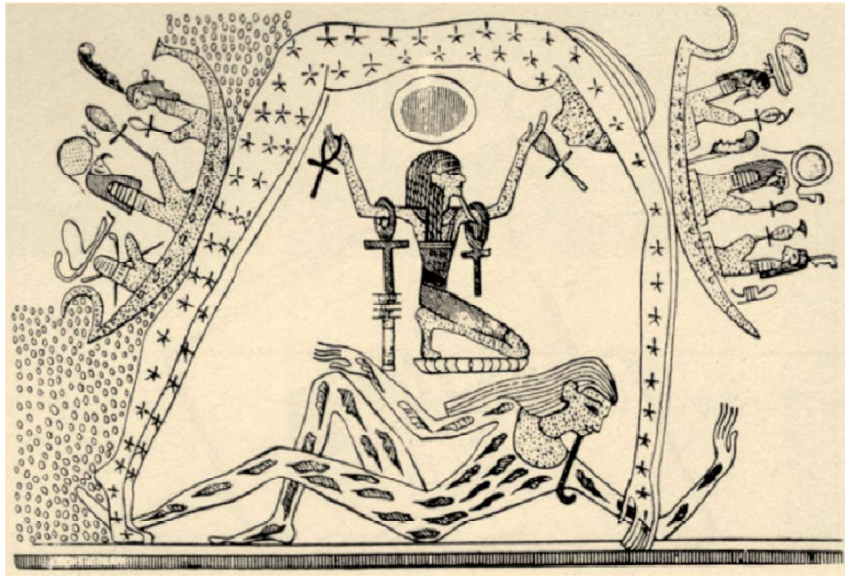
10.7 BASE TEÓRICA DA COSMOLOGIA E O PRINCÍPIO COSMOLÓGICO

10.8 HISTÓRIA DO UNIVERSO

- Aniquilação da antimatéria
- Bariogênese
- Nucleossíntese primordial
- Fim da era da radiação
- Recombinação e radiação cósmica de fundo
- Idade das trevas
- Formação das primeiras estrelas e quasares
- A era da energia escura
- Futuro do Universo

10.9 COMPOSIÇÃO DO UNIVERSO: O LADO ESCURO DO UNIVERSO

10.10 ANTES DO BIG BANG?



1- Representação do universo segundo a mitologia egípcia do 2º milênio a.C., onde o deus Ra (o Sol) navega todos os dias pelo céu de leste a oeste.

10.1 INTRODUÇÃO

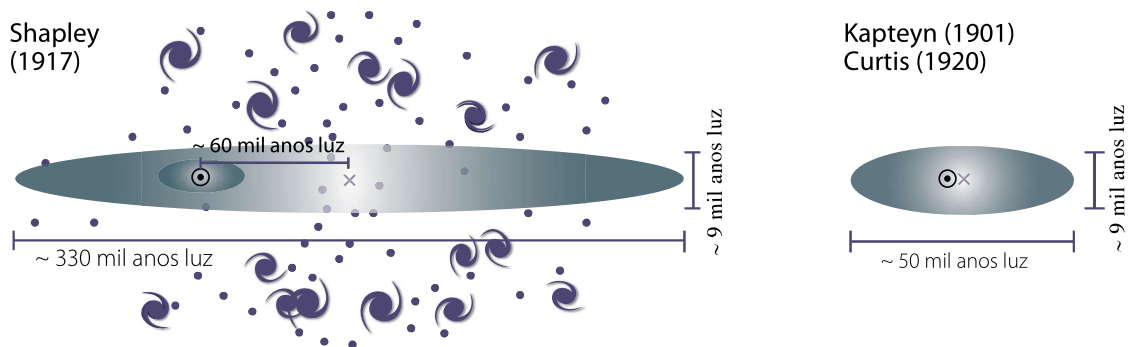
Cosmologia é o estudo da história, estrutura e composição do Universo como um todo. Pela observação e análise científica, procuramos entender como se formaram as galáxias, estrelas e planetas, como esses corpos evoluem com o tempo e como tudo isto se relaciona à origem do Universo. Não podemos observar nosso próprio passado, mas ao apontar os telescópios para as galáxias mais distantes podemos observar cenas remotas no tempo e no espaço. O método científico serve de guia para juntarmos as observações como peças de um quebra-cabeça que, ainda hoje, está longe de estar montado. Com as peças que temos, compomos a teoria mais aceita e de maior sucesso para explicar uma grande quantidade de observações, a teoria do Big Bang (Grande Expansão).

10.2 BREVE HISTÓRICO DE MODELOS COSMOLÓGICOS

Como se distribui a matéria, onde estamos, qual a nossa relação com a origem do universo? Estas questões são tão ou mais antigas que a nossa própria história. Para a maioria dos povos do passado, a percepção do Universo era infinitamente menor que a que temos hoje. A cosmologia se misturava a mitos, crenças e superstições.

As superstições da Antiguidade começam a dar lugar a uma visão racional de mundo há cerca de 2.500 anos na Grécia. Baseando-se em observações sistemáticas feitas durante séculos pelos povos da Mesopotâmia e Egito, filósofos gregos como Tales de Mileto e Pitágoras explicaram a distribuição e movimento dos astros utilizando modelos matemáticos e geométricos. No século 3 a.C., Aristarco de Samos, sugeriu pela primeira vez que o Sol está no centro do Universo. Mas a crença de que a Terra deveria estar no centro do universo prevaleceu e o modelo de mundo que emergiu dessa época e se tornou o paradigma por mais de 1.500 anos foi o Aristotélico geocêntrico, aperfeiçoado nos séculos seguintes por Hiparco de Niceia e Claudio Ptolomeu com o uso epiciclos.

O estudo da estrutura do Universo volta a avançar significativamente com os trabalhos de Nicolau Copérnico, Tycho Brahe e Johannes Kepler nos séculos 15 e 16. A utilização do telescópio para observações, introduzido por Galileu Galilei no início do século 17, revoluciona a astronomia.



2- Modelos de universo de Shapley e colaboradores (esquerda) e de Curtis e colaboradores (direita) debatidos durante as primeiras décadas do século 20. Shapley acertou quando disse que o Sol não estava no centro da Galáxia e Curtis acertou quando disse que as outras nebulosas eram galáxias como a nossa.

Pela primeira vez, Galileu revela a Via Láctea como um enorme conjunto de estrelas e mostra que o universo geocêntrico não é compatível com as fases de Vênus observadas por ele. A visão do Universo vai se tornando mais sofisticada e novos modelos surgem: Thomas Wright, Immanuel Kant e Johann Heinrich Lambert, em meados do século 18, propõem independentemente um modelo de “universos ilhas”, onde a Via Láctea seria uma destas “ilhas” assim como as chamadas nebulosas (objetos de aparência difusa descobertos então recentemente).

Chegamos ao início do século 20 com duas visões conflitantes quanto à estrutura do Universo: para o astrônomo holandês Jacobus Kapteyn (1851-1922) e o norte-americano Heber Curtis (1842-1942), a Via Láctea é pequena, com o Sol no centro – as nebulosas são sistemas distantes, semelhantes à Via Láctea. Mas na concepção do astrônomo norte-americano Harlow Shapley (1885-1972), a Via Láctea é grande, com o Sol na periferia – as nebulosas estão no interior da Via Láctea. Curiosamente, nenhum dos dois modelos era correto. Com os trabalhos dos astrônomos norte-americanos Vesto Slipher (1875-1969), Milton Humason (1891-1972) e, sobretudo, Edwin Hubble (1889-1953), ficou claro que as nebulosas espirais eram galáxias como a nossa e que o Sol está num subúrbio da Via Láctea.

A concepção que agora temos do universo é o resultado de milênios de observações cada vez mais sofisticadas, pesquisa, saltos conceituais e imaginação. Aprendemos que o Universo pode ser caótico, onde a complexidade das interações torna virtualmente alguns fenômenos imprevisíveis (por exemplo, o tempo que fará na semana que vem ou a posição dos planetas daqui a alguns milhões de anos), mas não é arbitrário e obedece às leis da física.

10.3 PARADOXO DE OLBERS

Uma questão aparentemente trivial, mas que tem importante significado para a cosmologia é: “Por que a noite é escura?”. Ingenuamente podemos pensar: “Ora, a noite é escura porque o Sol está iluminando o hemisfério oposto da Terra, onde é dia”. Sim, mas o Sol é uma estrela e existem muitas delas numa noite escura.

Em 1720 o astrônomo inglês Edmond Halley (1656-1742) raciocinou da seguinte forma: o brilho de uma estrela diminui proporcionalmente ao quadrado da distância [porque a energia se distribui na

área de uma esfera, que aumenta com o quadrado do raio]. Se imaginarmos as estrelas distribuídas em cascas esféricas, como uma cebola, o número de estrelas em cada casca aumenta com o quadrado da distância. O aumento do número de estrelas compensa a diminuição do brilho e, se o Universo for infinito, o resultado final é que o brilho do céu deve ser infinito também, com ou sem Sol.

Em 1744, o astrônomo suíço Jean-Phillipe de Chéseaux (1718-1751) sugeriu a existência de algo que atenua o brilho das estrelas, assim a noite não seria infinitamente brilhante, nem mesmo tão clara quanto o dia. Essa questão passou a ser tratada como um paradoxo quando o médico e astrônomo amador alemão Heinrich W. Olbers (1758-1840) a popularizou em 1823 em seu artigo “Sobre a transparência do universo”. O paradoxo era uma decorrência da visão de universo do século 19, eterno e infinito.

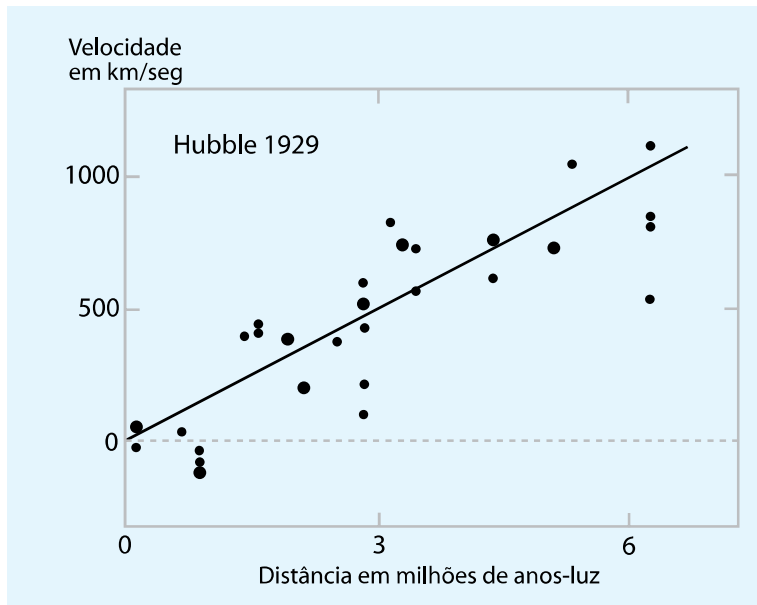
A solução desse paradoxo só seria descoberta no início da década de 1930.

10.4 A EXPANSÃO DO UNIVERSO

No início do século 20, ainda prevalecia a imagem de um universo imutável e infinito. Mas esse cenário começa a mudar quando, em 1908, a astrônoma americana Henrietta Leavitt (1868-1921) descobre a correlação entre o período de pulsação e a luminosidade das estrelas variáveis chamadas Cefeidas. Elas são estrelas evoluídas que já saíram da sequência principal e têm massa algumas vezes maior que a do Sol. A luminosidade dessas estrelas varia com períodos entre alguns dias e poucas semanas.

Alguns anos mais tarde, entre 1913 e 1915, Vesto Slipher obteve o espectro de diversas nebulosas e descobriu que alguns desses objetos estão se movendo à velocidade de várias centenas de quilômetros por segundo e, na maioria dos casos, se afastando de nós (a galáxia de Andrômeda é uma ilustre exceção e se aproxima com velocidade de cerca de 300 km/s em relação ao Sol. Em relação à Via Láctea essa aproximação é de 120 km/s).

Enquanto isso, em 1915, Albert Einstein publica sua teoria da relatividade geral e dois anos mais tarde Willem de Sitter (1872-1934) publica uma série de artigos discutindo as possíveis consequências observacionais da teoria de Einstein como, por exemplo, um cálculo preciso do desvio gravitacional da luz devido a um corpo celeste.



3- Relação entre a distância das galáxias e a velocidade de fuga descoberta por Hubble em 1929. A constante de Hubble obtida desta figura é grande demais, pois Hubble subestimou as distâncias das galáxias.

Não demorou para a teoria da relatividade ser aplicada no estudo da evolução do Universo. Em 1922, o russo Alexander Friedman (1888-1925) mostra que o tamanho do Universo pode mudar com o tempo. Com a morte de Friedman seus resultados são pouco divulgados até que, independentemente, o abade e astrônomo belga George Lemaître (1894-1966) descobre, independentemente, em 1927, a mesma solução de Friedman, isto é, de um universo dinâmico.

O momento da publicação dos resultados de Lemaître não poderia ser mais propício. Próximo de Los Angeles, na Califórnia, no final de 1917, fora inaugurado o Observatório de Monte Wilson, equipado com o telescópio Hooker com um espelho de 2,5 metros de diâmetro, o maior do mundo àquela época. Edwin Hubble usando esse instrumento conseguiu, em 1923, observar estrelas Cefeidas em algumas nebulosas e, usando a relação descoberta por Henrietta Leavitt, mediui pela primeira vez de forma precisa a distância desses objetos. Nos anos seguintes foram publicadas as distâncias, mostrando que essas nebulosas eram, de fato, outras galáxias.

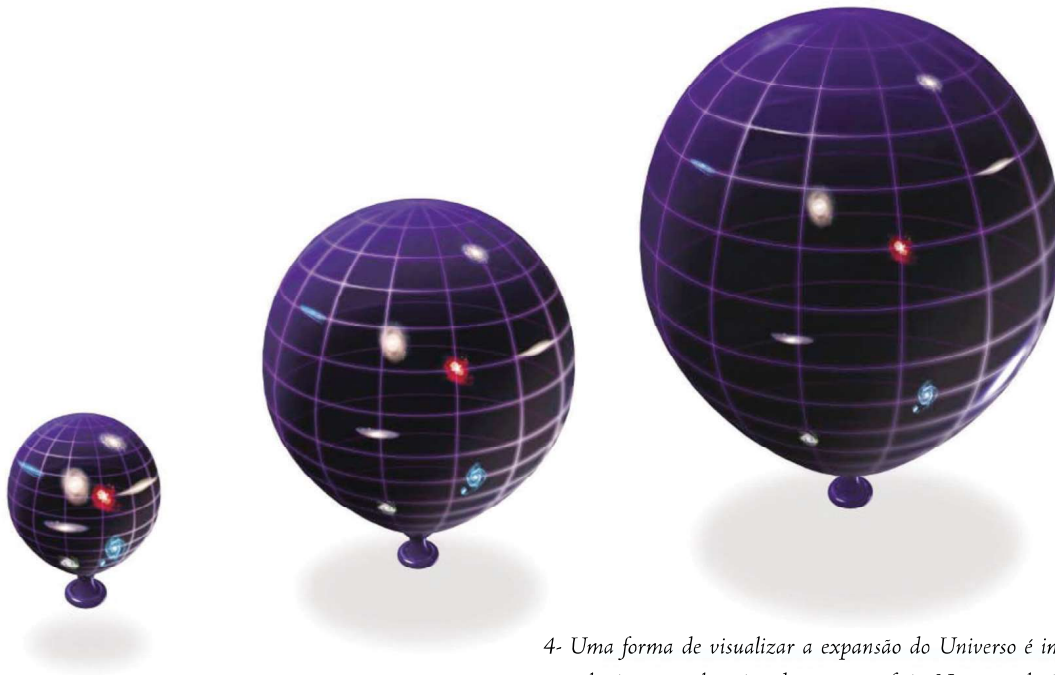
Mas, em 1929, Hubble foi ainda mais longe. Comparando as distâncias medidas com as velocidades das galáxias, ele verificou uma correlação entre elas: quanto mais distante a galáxia, maior a velocidade com que ela se afasta de nós. Essa relação ficou conhecida como Lei de Hubble e expressa pela relação:

$$V = H_0 \times D \quad (1)$$

onde H^0 é a constante de Hubble. Essa constante tem unidade de inverso de tempo [1/tempo], mas os astrônomos preferem utilizar uma unidade mais prática (alguns diriam mais esdrúxula) de [(km/s)/Mpc].

10.5 A TEORIA DO BIG BANG

A lei de Hubble foi rapidamente interpretada como uma observação da expansão do Universo, como previa as soluções de Friedman e Lemaître. Mas, se o Universo aumenta de tamanho com o tempo, isso significa que, no passado, era menor. Se extrapolarmos esse raciocínio em direção ao passado, chegaremos à conclusão de que em algum momento o tamanho do Universo foi nulo.



4- Uma forma de visualizar a expansão do Universo é imaginar um balão, com as galáxias e estrelas pintadas na superfície. Nessa analogia, todo o Universo está contido na superfície do balão. À medida que o balão vai inflando, as galáxias se afastam umas das outras.

A idade do universo pode ser estimada em primeira aproximação usando a relação: tempo = distância/velocidade = distância/($H_0 \times$ distância) = $1/H_0$.

O valor da constante de Hubble, nas unidades utilizadas pelos astrônomos, é de 72 ± 5 km/s/Mpc, ou seja, a cada megaparsec (cerca de 3 milhões de anos-luz) o universo expande 72 km/s mais rapidamente. Como o inverso de H_0 tem unidade de tempo, o valor acima significa que a idade do universo:

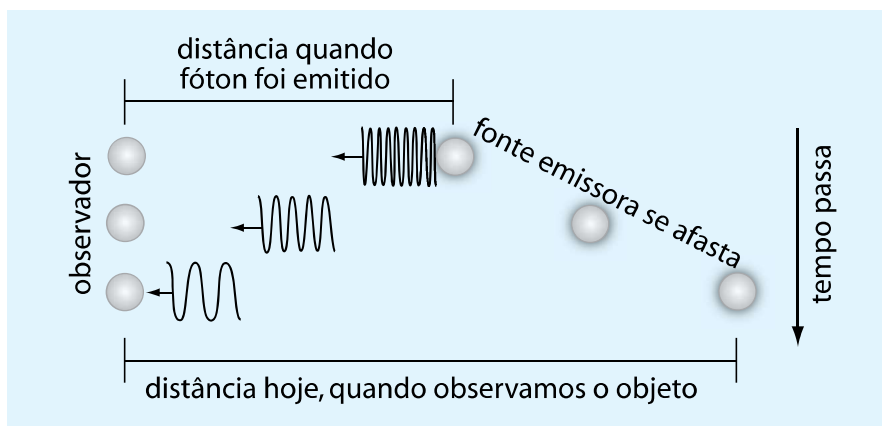
$$\frac{1}{H_0} = \frac{1}{\frac{72 \text{ km/s}}{1 \text{ Mpc}}} = \frac{1 \text{ Mpc}}{72 \text{ km}} s = \frac{3,086 \times 10^{19} \text{ km}}{72 \text{ km}} s = 4,286 \times 10^{17} s = 13,6 \text{ bilhões de anos} \quad (2)$$

Um cálculo mais preciso leva a esse mesmo número. O raciocínio de que todo o Universo esteve concentrado em um ponto de tamanho nulo no passado acabou conhecido como Big Bang, a grande "explosão". O nome Big Bang foi usado pela primeira vez pelo astrofísico inglês Fred Hoyle (1915-2001) de forma pejorativa, pois Hoyle e seus colaboradores defendiam um modelo de universo chamado de Estado Estacionário. Nesse cenário o Universo sempre existiu e sempre existirá, ou seja, não tem início nem fim. Essa teoria não é confirmada pelas observações, em particular, pela observação da radiação cósmica de fundo.

Pela teoria do Big Bang, o Universo não tem centro e não existe um ponto hoje em algum lugar de onde se originou a expansão. A "grande explosão" é um conceito muito diferente da explosão de uma granada, de onde saem estilhaços para todas as direções a partir de um centro (a própria granada). É mais adequado chamar o Big Bang de Grande Expansão. No Big Bang a expansão do Universo não se refere apenas à matéria, mas a tudo que existe, inclusive o espaço e o tempo. Antes do Big Bang não havia espaço, logo não pode haver um centro.

10.6 SOLUÇÃO DO PARADOXO DE OLBERS E O TAMANHO DO UNIVERSO

A solução do paradoxo de Olbers, discutida anteriormente, está na teoria do Big Bang. O céu noturno não é brilhante como o diurno porque vivemos em um universo relativamente jovem. Isso significa que somente podemos observar a luz (de forma geral a radiação eletromagnética) que teve



5- A distância de uma fonte observada hoje é muito maior do que a distância dessa mesma fonte quando ela emitiu a radiação observada por nós.

tempo para chegar até nós. Não podemos observar a luz de objetos além de certa distância e, muito menos, uma quantidade infinita de estrelas e galáxias.

Isso nos leva à questão do tamanho do Universo. Pode ser que o Universo seja infinito, então não teria sentido falarmos em tamanho. Uma forma mais conveniente de se expressar, neste caso, é referir-se ao tamanho do universo observável. Poderíamos imaginar que essa distância é o produto da velocidade da luz pela idade do Universo. Para uma fonte mais distante, não haveria tempo suficiente para a luz chegar até nós. Como o universo tem 14 bilhões de anos, então esta distância seria de 14 bilhões de anos-luz.

Mas o Universo está em expansão e as fontes de luz distantes estão se afastando uma das outras. Levando em conta essa expansão, o universo observável tem hoje um diâmetro de cerca de 92 bilhões de anos-luz.

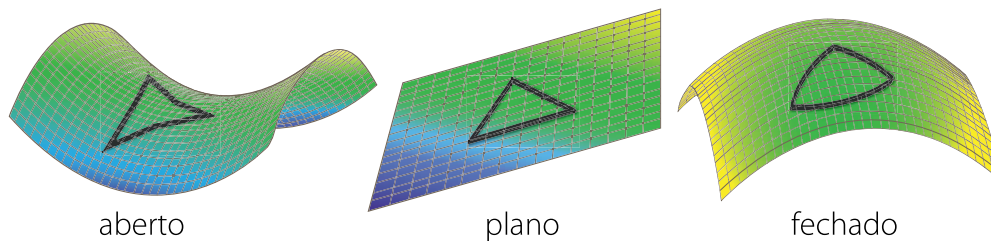
Assim, graças à expansão, podemos observar um volume muito maior do Universo do que poderíamos se o universo fosse estático.

10.7 BASE TEÓRICA DA COSMOLOGIA E O PRINCÍPIO COSMOLÓGICO

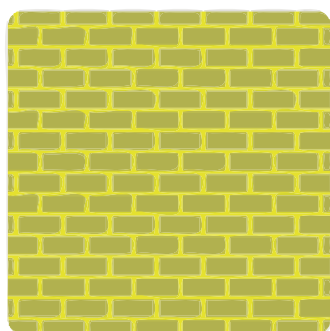
Do ponto de vista teórico, a cosmologia é baseada na teoria de gravitação de Einstein, conhecida como Teoria da Relatividade Geral. Essa teoria relaciona o conteúdo do Universo, matéria e energia com sua geometria.

A quantidade de matéria e energia determina a geometria do Universo, que pode ser plana, aberta ou fechada. O parâmetro que as distingue é a densidade de matéria e energia. Se a densidade for igual à densidade crítica, então o Universo tem geometria plana. Mas se for menor, então o Universo tem geometria aberta, como a curvatura de uma sela de cavalo. Nestes dois casos, o universo é infinito. Se, no entanto, a densidade for maior que a densidade crítica, o Universo é finito com geometria fechada, semelhante a uma esfera. A densidade crítica do valor medido para a constante de Hubble é estimada em 10^{-29} gramas/cm³, algo como um átomo de hidrogênio para 170 litros.

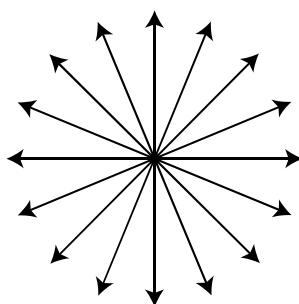
A densidade dos diferentes componentes do Universo (matéria, energia escura, radiação, estrelas, neutrinos etc.) é dada em termos do parâmetro de densidade, definido como: $\Omega = \rho/\rho_c$ onde



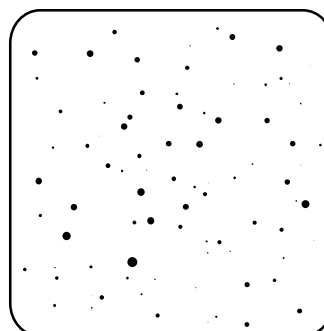
6- As três geometrias possíveis do Universo. No caso plano, também dito Euclidiano, a soma dos ângulos internos de um triângulo formado, por exemplo, por quasares distantes, é sempre 180° . No caso aberto, essa soma é sempre menor que 180° e no caso fechado é sempre maior que 180° .



Homogêneo, mas não isotrópico



Isotrópico (no centro), mas não homogêneo



Homogêneo e isotrópico (em grande escala)

7- Diferença entre homogeneidade e isotropia. A cosmologia é baseada no Princípio Cosmológico, em que o Universo é homogêneo e isotrópico em grandes escalas.

ρ e ρ_c são, respectivamente, densidade estimada por observação e densidade crítica. Por exemplo, o parâmetro de densidade de matéria é dado por Ω_M , atualmente estimado em aproximadamente 0,3.

Um universo plano é aquele em que $\Omega = 1$, sendo Ω a soma de todas as componentes do Universo. Esse é o valor favorecido pelas observações recentes.

Além disto, é necessário um princípio básico para que a teoria da relatividade seja aplicada na sua forma mais simples. É o chamado Princípio Cosmológico, que admite: “O Universo é homogêneo (idêntico no seu todo) e isotrópico (mesma constituição em todas as direções)”.

O princípio cosmológico só é válido em grandes escalas. Na Terra, ao nosso redor não é nem homogêneo, nem isotrópico. Se passarmos para a escala do Sistema Solar, ainda assim observamos uma forte anisotropia. Os planetas, por exemplo, estão confinados em um plano fino que contém o Sol. Mesmo na escala da Galáxia ou do Grupo Local, o Universo não é homogêneo e isotrópico. Apenas em escalas superiores a cerca de 300 milhões de anos-luz constatamos a homogeneidade e isotropia cósmica, validando assim a adoção do princípio cosmológico.

O Princípio Cosmológico implica ainda que o Universo tenha a mesma aparência para qualquer observador em qualquer parte. Além disto, o Universo tem a mesma aparência qualquer que seja a direção observada.

Outra consequência do Princípio Cosmológico, é que o Universo não pode ter uma borda ou um limite. Se for infinito, então é natural que não haja uma fronteira, mas mesmo se for espacialmente finito, não haverá um fim ou uma borda em algum lugar como, por exemplo, a superfície de uma esfera. Se o Universo for de fato finito (isso está dentro das possibilidades corroboradas pelas observações), então um viajante hipotético, que se mova sempre para frente, posteriormente retornará ao ponto de partida, como um viajante que faz uma volta pelo equador da Terra.



8- Representação do espaço-tempo instantes após o Big Bang extremamente caótico. Os conceitos de direção e mesmo causa e efeito perdem sentido nesse caos espaço-temporal.

10.8 HISTÓRIA DO UNIVERSO

O momento do Big Bang ainda não pode ser descrito pelas leis da física que conhecemos. Neste instante o Universo é, segundo a teoria da relatividade geral, uma singularidade, algo fora do alcance das leis da física onde as propriedades como densidade e temperatura são infinitas. Isso indica que a teoria ainda está incompleta e muita pesquisa é realizada para complementar nossas teorias da física. Em uma teoria ainda mais completa e geral da física é possível que o Big Bang não seja uma singularidade, mas uma transição entre dois estados diferentes do Universo.

Assim, só podemos começar a descrever a história cósmica após um intervalo de tempo chamado tempo de Planck, por volta de 10^{-43} segundos. Esse é um intervalo de tempo muito curto, muitas e muitas ordens de grandeza menor que o menor intervalo de tempo que se pode medir em laboratório.

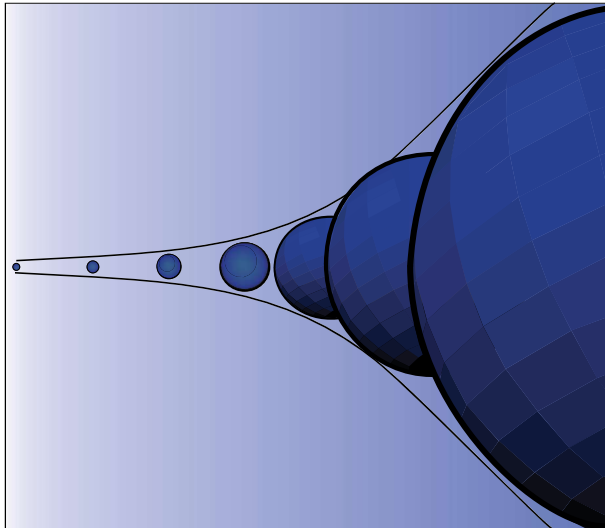
Nessa época de Planck, o Universo estava incrivelmente quente e denso. O próprio espaço-tempo era extremamente deformado por perturbações aleatórias. Toda a massa e energia cósmicas observável hoje concentrava-se em um volume pouco maior que um elétron.

Esse primeiro período da história cósmica também é chamado de Época da Grande Unificação, pois três das quatro forças da Natureza¹ (força eletromagnética, força fraca e força forte) se comportavam da mesma forma.

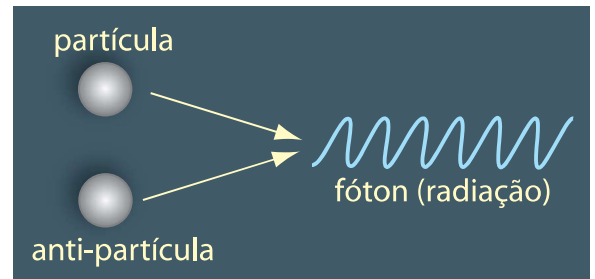
Após o Big Bang, quando o Universo tinha idade de 10^{-33} segundos, ocorreu um fenômeno chamado de inflação. A ideia desse período do Universo foi proposta pelo físico norte-americano Alan Guth, na década de 1980, para resolver alguns problemas teóricos do então cenário padrão do Big Bang.

Quando se resfria abaixo de 0°C a água se congela; esse fenômeno é conhecido como mudança de fase, no caso, de líquido para sólido. Na transição de fase há liberação de energia. Da mesma forma, ao expandir, o Universo esfria, passa por uma transição de fase e libera grande quantidade de energia. Possivelmente, a inflação ocorreu durante esta transição.

1. Força gravitacional é a quarta força fundamental. Força (nuclear) fraca é a que cinde as partículas, comumente vista no decaimento beta (decaimento radiativo). Força (nuclear) forte é a de interação entre quarks e glúons e que estabiliza o núcleo atômico.



9- Representação do aumento exponencial do tamanho do Universo durante a fase de inflação. Durante esta fase de expansão o Universo tem geometria cada vez mais plana.



10- Representação da reação de matéria e antimatéria produzindo radiação (fótons). Quando a energia é muito alta, época em que o Universo era muito quente e denso, os fótons podiam produzir um par de partículas de matéria e de antimatéria.

Chamamos esse período de inflação porque ao longo dela o Universo expandiu exponencialmente. Isso teve uma consequência importante para o tecido do espaço-tempo: apagou o caos inicial deixando o espaço-tempo homogêneo como é hoje. É como se pegássemos um tecido muito enrugado, esticando-o em todas as direções, deixando-o completamente liso.

Outro resultado importante da inflação é tornar o universo plano, como mostrado na figura 9. A curvatura do Universo pode ser medida, por exemplo, pela análise das flutuações de temperatura da radiação cósmica de fundo; sabemos que o Universo é praticamente (quem sabe exatamente) plano. Sem a inflação, a teoria do Big Bang não consegue explicar satisfatoriamente este nivelamento do universo.

Finalmente, a inflação explica outro aspecto, a uniformidade observada em todas as direções. Não importa para onde olharmos, observamos propriedades que implicam que o Universo deve ter expandido muito, muito mais que o previsto na teoria original do Big Bang, sem o período de inflação.

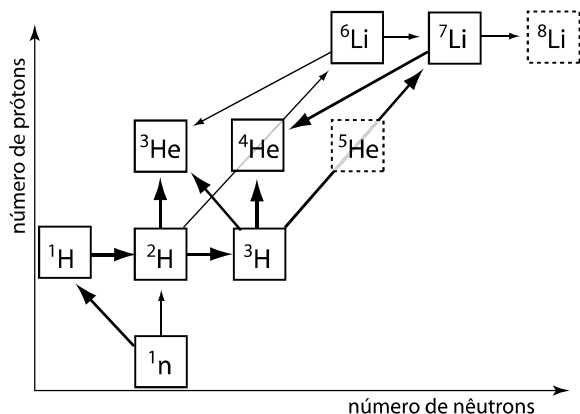
• Aniquilação da antimatéria

Após a fase de inflação, o Universo continuou a expandir e a resfriar, mas agora em um ritmo mais lento. Quando a idade cósmica atingiu um bilionésimo de segundo aconteceu outro evento histórico. Até então, o Universo era quente e denso o suficiente para manter em equilíbrio a matéria e a antimatéria. Mas quando esfriou, esse equilíbrio se perdeu e matéria e antimatéria começaram a se aniquilar, convertendo toda a massa das partículas em energia.

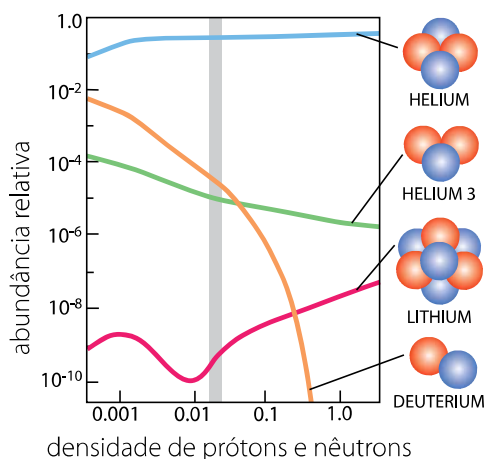
Para cada um bilhão de partículas de antimatéria existe em média um bilhão e uma partícula de matéria. O resultado dessa assimetria é que a antimatéria é virtualmente erradicada sobrando apenas a matéria de que nós e os astros somos feitos. A antimatéria continua sendo produzida no Universo em vários eventos (fusão nuclear no interior de estrelas, explosões de supernovas, interação de raios cósmicos na atmosfera da Terra etc.), mas a quantidade de antimatéria no Universo é irrisória.

• Bariogênese

Quando o Universo atingiu 0,00001 segundo de existência sua temperatura decaiu para 1 trilhão K. O Universo era composto por uma sopa de quarks. Quarks são partículas fundamentais da Natureza e formam todos os hádrons (partículas compostas por quarks). Em temperaturas inferiores a 1 trilhão K, os quarks se juntam definitivamente. Grupos de dois



11- Esquema de reações nucleares que ocorreram nos primeiros minutos do Universo, culminando com a formação de hélio.



12- Abundância de elementos formados nos primeiros minutos em função da densidade de prótons e nêutrons. A faixa vertical cinza indica o intervalo de abundâncias observado para estes elementos.

quarks formam mésons, partículas instáveis. Grupos de três quarks formam bárions; os dois bárions mais conhecidos são os prótons e os nêutrons. Por isto, essa época cósmica é chamada de bariogênese (formação de bárions).

• *Nucleossíntese primordial*

Nucleossíntese significa produção de núcleos atômicos a partir da fusão termonuclear de núcleos mais leves. Quando o Universo atingiu a idade de um segundo, já era formado de plasma² com densidade aproximadamente igual a da água e temperatura de 1 bilhão K. Os prótons e nêutrons que haviam se formado durante a bariogênese se envolveram em reações de fusão nuclear, formando principalmente o deutério (um isótopo do hidrogênio com um próton e um nêutron no núcleo).

O deutério é um elemento relativamente frágil e, até um segundo de idade do Universo, os fótons eram suficientemente energéticos para destruir esses núcleos. Passado o primeiro segundo, a temperatura e a densidade diminuíram a ponto de o deutério sobreviver o suficiente para continuar a cadeia de reações nucleares. Assim, foi possível formar o elemento hélio, principalmente o ⁴He (com dois prótons e dois nêutrons no núcleo).

Esse processo de nucleossíntese primordial prosseguiu durante alguns poucos minutos formando ainda outros elementos, o lítio (Li), berílio (Be) e boro (B).

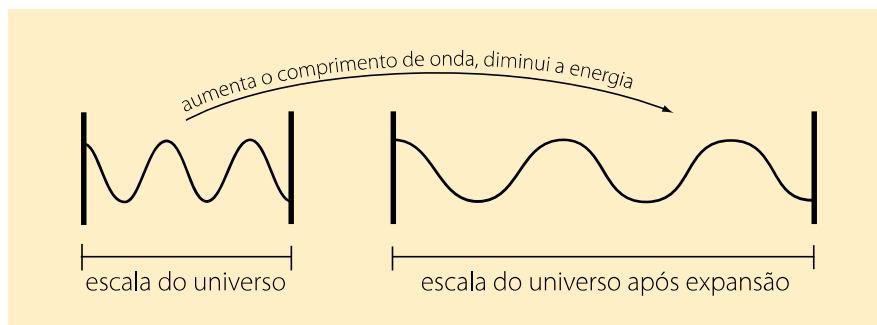
Aos cinco minutos de idade, a temperatura e densidade cósmica já estavam baixas demais para provocar reações nucleares e a nucleossíntese terminou.

Elementos mais pesados da tabela periódica não foram formados devido à grande instabilidade dos núcleos que tinham cinco ou oito partículas (por exemplo, dois prótons e três nêutrons, quatro prótons e quatro nêutrons etc.).

A física nuclear é relativamente bem conhecida e podemos prever a abundância relativa de elementos formados em função da quantidade de prótons e nêutrons no Universo.

A quantidade de deutério, hélio e lítio podem ser determinadas a partir de observações. Todas as

2. Gás ionizado constituído de elétrons livres, íons e átomos neutros, em proporções variadas e que apresenta um comportamento coletivo.



13- O comprimento de onda da radiação eletromagnética aumenta proporcionalmente à expansão do Universo. Este fenômeno dá origem ao desvio para o vermelho (em inglês *redshift*) cosmológico.

medidas apontam para a mesma quantidade de bárions no Universo. O valor mais aceito é que 4% do Universo é composto de bárions.

Cerca de 24% da massa dos bárions está na forma de hélio. Lembrando que o hélio é um produto da nucleossíntese estelar, o processo que gera a energia nas estrelas, poderíamos imaginar que o todo o hélio foi produzido em estrelas. Esse foi um dos argumentos utilizados por astrônomos contrários à teoria do Big Bang. Mas, fazendo a soma de todo o hélio produzido em estrela, chegamos a uma conclusão interessante: seriam necessárias dezenas de bilhões de anos para se conseguir todo o hélio observado. A única forma de se produzir tanto hélio é pela nucleossíntese primordial, durante os primeiros minutos de um universo quente e denso.

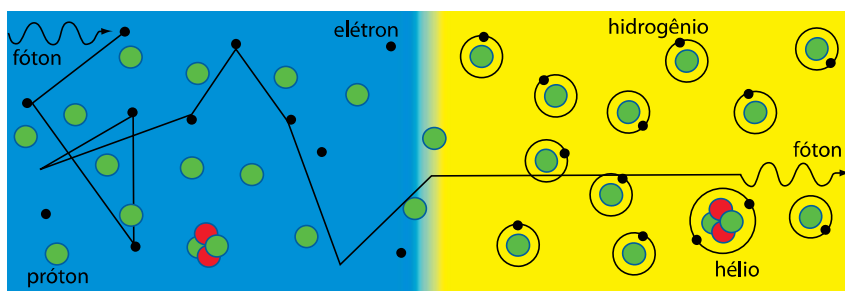
• Fim da era da radiação

À medida que o Universo expande, a densidade de matéria diminui proporcionalmente ao aumento do volume. Dobrando o volume do Universo, a densidade cai pela metade, e assim por diante. Se associarmos uma escala ao Universo (imagine uma régua que expande junto com o Universo) podemos escrever que a densidade de matéria é inversamente proporcional a esta escala elevada ao cubo: densidade da matéria = $1/(\text{escala do universo})^3$.

Já a radiação tem comportamento diferente. Além de a diminuição da densidade de energia da radiação ser inversamente proporcional ao volume (como no caso da matéria), ainda há o efeito da própria expansão na radiação, como havia sido previsto em 1917 por William de Sitter. Considere a radiação como uma onda ligada em dois pontos. Se separarmos esses pontos (devido à expansão), o comprimento de onda aumenta. Logo, a frequência da onda diminui e sua energia também.

Dessa forma, a densidade de energia da radiação diminui proporcionalmente ao inverso da quarta potência da escala cósmica: densidade da matéria = $1/(\text{escala do universo})^4$.

Isso significa que a densidade de energia de radiação diminui mais rapidamente que a densidade de matéria. No início, a temperatura era tão alta e o volume tão pequeno, que a densidade de energia da radiação era maior que a densidade de matéria. Mas com o passar do tempo, chegou um momento em que essas duas densidades, da matéria e radiação, se equipararam. Chamamos esse momento de “equipartição entre matéria e energia”, que marca o fim da era da radiação e o início da era da matéria. Isso ocorreu quando o Universo tinha 60 mil anos e estava à temperatura de 9.200 K.



14- Antes da recombinação, os fótons não podiam mover-se livremente pelo Universo, por isso mudavam de direção a cada encontro com um elétron. Após a recombinação os elétrons eram capturados e os fótons moviam-se livremente pelo espaço.

Esse é um momento importante, pois enquanto a radiação dominava não havia formação de estrutura; as galáxias e as estrelas não podiam se condensar. Quando a matéria passou a dominar a densidade, as estruturas começaram a aparecer.

• *Recombinação e radiação cósmica de fundo*

Finda a nucleossíntese, o Universo continuava expandindo e esfriando. Excluindo as componentes mais exóticas, como matéria e energia escura, o Cosmo ainda tinha a composição química primordial de 76% de hidrogênio e 24% de hélio. Todos esses átomos estavam completamente ionizados e os elétrons soltos.

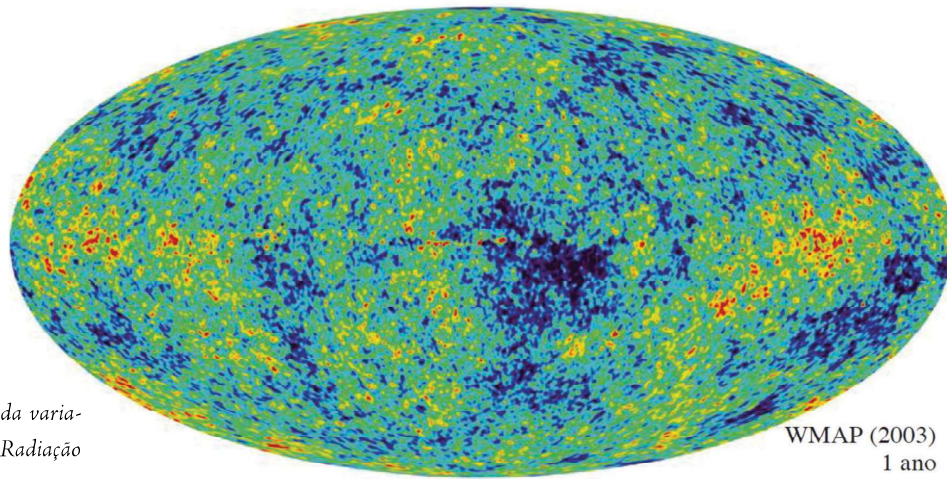
Isso ocorreu devido à grande afinidade entre a radiação e os elétrons. Os fótons que estavam vagando eram ainda muito energéticos e quando colidiam com um elétron transferiam parte de sua energia. Os elétrons se tornavam tão energéticos que os núcleos atômicos não podiam retê-los. Outra consequência disso é que o universo era opaco para a radiação; em média, os fótons percorriam um caminho curto antes de interagir com um elétron e mudar de energia e de direção.

Quando a idade cósmica chegou a 400 mil anos e sua temperatura atingia 3.000 K, não havia mais fótons energéticos o suficiente para manter a matéria ionizada. Os núcleos começaram a capturar e reter elétrons. Os átomos se tornaram neutros e o universo ficou transparente para a radiação. Chamamos este momento de Recombinação. Nessa situação, a maioria dos fótons podia mover-se durante bilhões de anos sem interagir com a matéria.

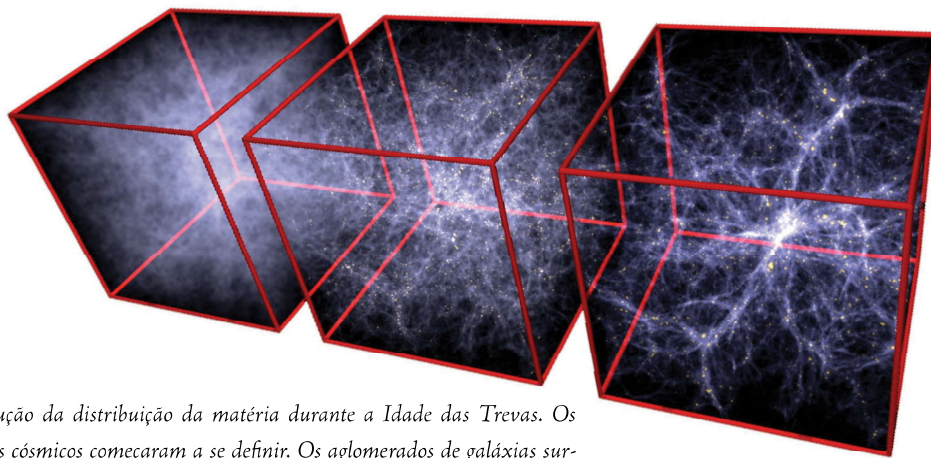
Os fótons que interagiram com os elétrons pela última vez durante a recombinação são observados na Terra em todas as direções. Como esses fótons têm hoje uma frequência de radiação de micro-ondas, nós os chamamos de Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas (RCFM).

A existência desse fundo cósmico de radiação foi prevista no final dos anos 1940 pelo físico russo naturalizado norte-americano George Gamow (1904-1968). Mas o tema caiu em certo esquecimento até que alguns astrofísicos voltaram a se interessar por ele, em particular um grupo da Universidade de Princeton nos Estados Unidos, no início da década de 1960.

Por coincidência, em 1964, dois físicos da companhia telefônica Bell, Arno Penzias e Robert Wilson, estavam trabalhando nessa época em uma nova antena para uso em radioastronomia. Nos testes desse instrumento, notaram a presença de um ruído persistente em todas as direções em que a antena



15- Mapa de todo o céu da variação da temperatura da Radiação Cósmica de Fundo.



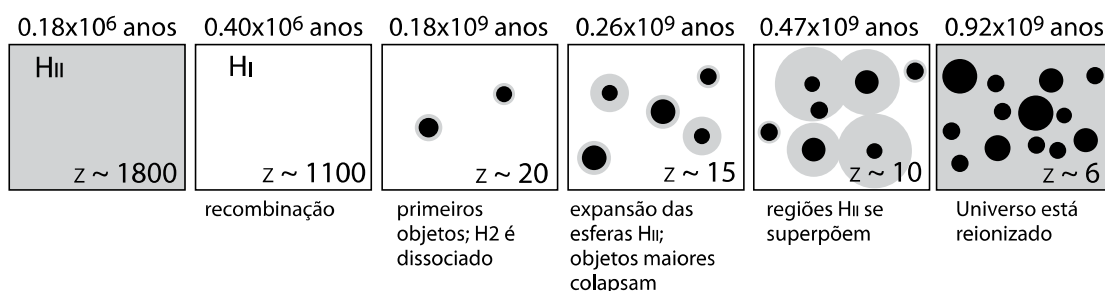
16- Evolução da distribuição da matéria durante a Idade das Trevas. Os filamentos cósmicos começaram a se definir. Os aglomerados de galáxias surgiram na intersecção dos filamentos da teia cósmica. As regiões de maior densidade que se desenvolveram nos filamentos são chamadas Halos.

era apontada. Após várias verificações do sistema, inclusive da suspeita de que o ruído viria de material orgânico produzido por pombos instalados na antena do instrumento, Penzias e Wilson concluíram que o ruído era um sinal real vindo de qualquer direção do céu.

Uma segunda coincidência fez com que tivessem contato com uma equipe da Universidade de Princeton, que buscavam justamente um sinal como o que estavam recebendo e encontraram a solução: o que Penzias e Wilson estavam registrando era a Radiação Cósmica de Fundo. Penzias e Wilson receberam o Prêmio Nobel por esta descoberta em 1978. A radiação cósmica de fundo tem temperatura muito bem determinada de $2,725^{\circ}\text{K}$, valor que coincide com o valor esperado pela teoria do Big Bang.

A Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas é extremamente rica em informações sobre o universo jovem. É uma impressão digital do Universo, mostrando que, há 14 bilhões de anos, a densidade era uniforme, mas não perfeitamente. As observações mostram pequenas flutuações na RCFM, interpretadas com indício de que havia flutuações de densidade, isto é, regiões mais ou menos densas que a média. Essas flutuações de densidade, no entanto, eram muito pequenas, algo como uma parte em cem mil. Imagine uma bola perfeitamente lisa, com um metro de diâmetro. Se ela tiver imperfeições na mesma escala que a RCFM, sua superfície terá pequenas elevações ou depressões com cerca de 0,01 milímetro.

A Radiação Cósmica de Fundo é uma das melhores evidências a favor da teoria do Big Bang, dificilmente explicada por algum outro modelo cosmológico.



17- História do Universo entre a época de recombinação e o fim da reionização. Regiões HII, composta de gás ionizado, semelhante às regiões observadas na Via Láctea e outras espirais e galáxias irregulares onde há formação estelar. Acima dos quadros está a idade do Universo e o símbolo z indica o redshift correspondente. Os círculos escuros são regiões de alta densidade que podem se manter neutras, correspondendo ao interior das galáxias.

• *Idade das trevas*

Passada a época da recombinação, o Universo entrou em uma fase em que não havia qualquer fonte de luz, a chamada Idade das Trevas. Durante esse período, que durou cerca de 450 milhões de anos, a matéria foi se organizando e regiões com maior densidade de matéria passaram a colapsar.

Foi nessa época que se formou a teia cósmica traçada pela matéria escura. As regiões de maior densidade atraíam a matéria, aumentando com isso a densidade local, que implicava na atração de mais matéria. Em contrapartida, as regiões de baixa densidade iam gradativamente se esvaziando. Esse processo não tem simetria esférica, a matéria em queda não vem de todas as direções. A distribuição de matéria no jovem universo era sempre um pouco achatada, com uma forma grosseiramente semelhante à de um charuto amassado. A matéria cai nessas “sementes” de estrutura seguindo uma direção privilegiada (na analogia do charuto, essa direção é o eixo maior), e assim forma uma estrutura de filamentos.

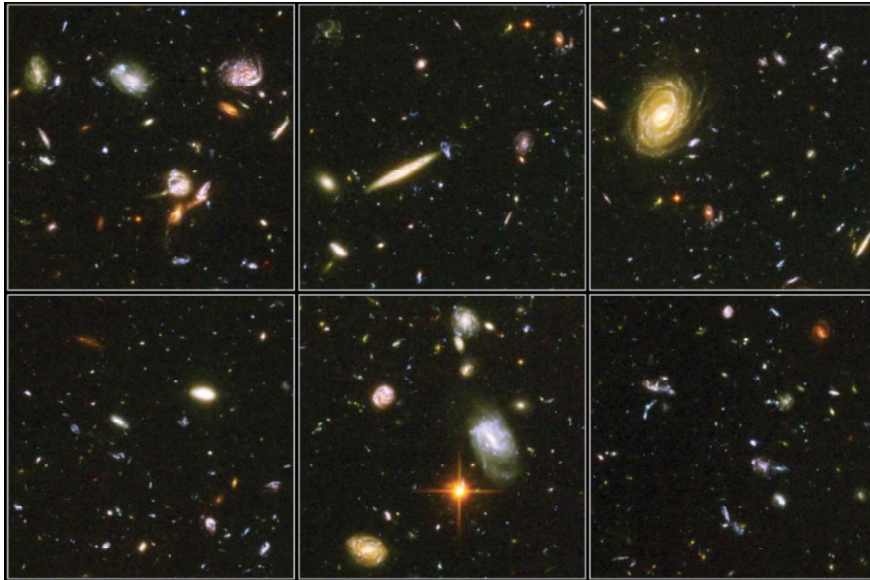
Os Halos de matéria, regiões aproximadamente esféricas e em equilíbrio, que se formaram nesse período, são as sementes das futuras galáxias e grupos de galáxias que irão se formar após a Idade das Trevas.

A Idade das Trevas termina quando as primeiras estrelas e/ou os primeiros núcleos galáctico se formam. Não sabemos ainda os detalhes do final desse período, mas os telescópios, terrestres e espaciais, ainda desta década de 2010 devem revelar essa história.

• *Formação das primeiras estrelas e quasares*

A formação de estruturas no Universo depende principalmente da matéria escura. A matéria “convencional” bariônica (que compõe os elementos encontrados na Terra, nas estrelas e no meio interestelar) acompanha a matéria escura nesse processo de formação. Inicialmente, a matéria bariônica apenas colapsava gravitacionalmente nos halos de matéria escura, mas à medida que a densidade aumentava a matéria bariônica passava por fenômenos não gravitacionais. Esses fenômenos envolvem ganho e perda de energia pela absorção ou emissão de radiação. A matéria bariônica emite espontaneamente, por exemplo, radiação (portanto perde energia) quando está aquecida acima de 10 mil graus.

Não sabemos exatamente o que se formou primeiro, mas os primeiros objetos colapsados eram muito energéticos. Quando o Universo atingiu entre 400 e 500 milhões de anos surgiram as primeiras fontes de radiação, que pareceram poderosos faróis.



18- Detalhes do campo ultraprofundo feito pelo telescópio espacial Hubble. As galáxias maiores e mais brilhantes estão relativamente próximas, a 6 bilhões de anos-luz. As mais fracas e menores estão a mais de 20 bilhões de anos-luz (imagem produzida por S. Beckwith do STScI).

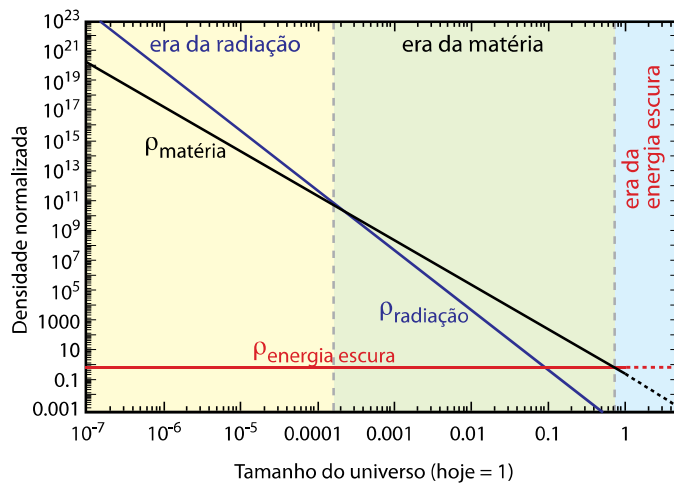
Um dos primeiros objetos a se formar foram as estrelas. Mas, diferentemente das estrelas atuais, essas pioneiras não tinham metais, sua composição química era primordial, com 76% de hidrogênio e 24% de hélio. A formação destas estrelas é um pouco diferente da formação das estrelas atuais. Sem metais, o resfriamento do gás é mais lento e as estrelas que se formam naquela época são em geral muito mais massivas que as estrelas que observamos hoje.

Por serem de grande massa as primeiras estrelas, chamadas de População III, eram muito luminosas, particularmente na faixa do ultravioleta. Mas, estrelas de grande massa vivem comparativamente muito pouco, apenas alguns milhões de anos, e morrem em uma poderosa explosão sob a forma de supernova. Estrelas de População III de baixa massa provavelmente não se formaram, por isso não encontramos nenhuma delas até agora; provavelmente elas nem existem mais em nossa galáxia.

Nessa mesma época, buracos negros supermassivos, com milhões de vezes a massa do Sol, começaram a ser alimentados pelo gás concentrado na região que será mais posteriormente o núcleo das galáxias. Esse é o processo que gera energia em quasares; além de muito eficiente, ele é também muito energético. A emissão de radiação ultravioleta desses novos quasares, junto com a radiação das primeiras estrelas, começava a ionizar o Universo novamente. Os átomos de hidrogênio e hélio nas vizinhanças dessas fontes foram os primeiros a perder seus elétrons. O Universo, que era neutro desde a época da recombinação, voltava gradualmente a se tornar um plasma ionizado. Esse processo se completou quando o Universo chegou a pouco menos de 1 bilhão de anos.

O final da reionização do Universo foi detectado no início do século 21 pela observação de espectros de quasares muito distantes. O início da reionização foi deduzido a partir das observações da Radiação Cósmica de Fundo do satélite WMAP.

Entre setembro de 2003 e janeiro de 2004, o telescópio espacial Hubble observou uma pequena fração do céu totalizando um tempo de exposição equivalente a 271,2 horas (11,3 dias). Essa observação, a mais profunda até então, permitiu a identificação de objetos tão débeis quanto magnitude 30, a distâncias entre 20 e 25 bilhões de anos-luz. Levando em conta o tempo necessário para a luz chegar até a Terra, isso significa que o telescópio espacial registrou o Universo como era quando tinha entre 1 a 2 bilhões de anos. O sucessor do telescópio Hubble, o telescópio espacial James Webb, recuará ainda mais no passado, possibilitando, talvez, observar as primeiras galáxias.



19- Evolução da densidade (ρ) das três principais componentes do Universo: energia escura, matéria (escura e bariônica), e radiação. As eras são definidas pela intersecção da reta representando a densidade de matéria com a densidade de radiação e a densidade de energia escura.

• A era da energia escura

Como vimos, a densidade de matéria decaiu com o inverso do fator de escala do Universo elevado ao cubo (isto é, diminui proporcionalmente ao aumento do volume), enquanto a densidade de energia da radiação reduziu-se proporcionalmente ao inverso da escala do Universo à quarta potência. Ao entrar na era da matéria, a densidade de radiação cósmica se tornava desprezível frente à densidade de matéria existente à época.

Quando o Universo chegou à idade de dez bilhões de anos outra componente passou a dominar o balanço energético do universo: a energia escura.

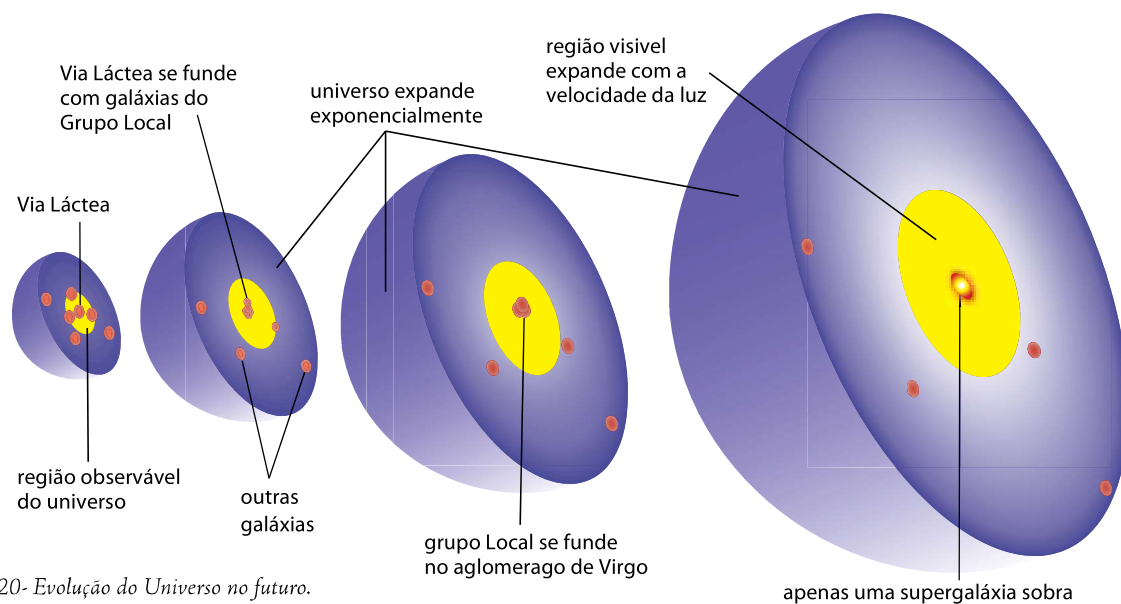
Ainda não sabemos o que é a energia escura, mas temos evidências de sua presença devido a um conjunto de observações. Admitindo o modelo mais simples de energia escura, preferido para interpretar as observações feitas, a densidade de energia escura é constante, independente da expansão cósmica.

A energia escura tem uma propriedade muito peculiar, sua pressão é negativa, proporcional à sua densidade no caso mais simples. Essa pressão negativa age de forma a acelerar a expansão do Universo cada vez mais rapidamente. Antes de o Universo chegar aos dez bilhões de anos a densidade de energia escura era menor que a densidade de matéria e radiação, fazendo com que a pressão negativa não fosse significativa. Isso é muito importante para a formação de galáxias e grupos de galáxias, pois a pressão negativa da energia escura dificulta a formação de estruturas. Se a densidade de energia escura fosse maior no nosso universo, nossa galáxia poderia não ter se formado, o que impediria a formação do Sol e do Sistema Solar.

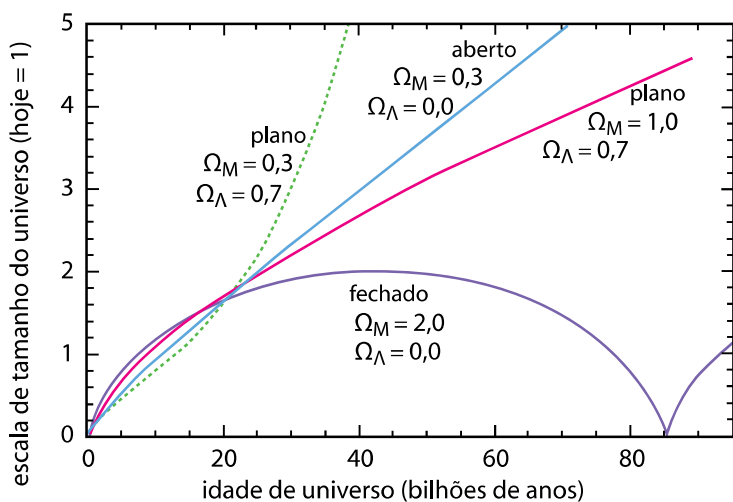
Nos últimos quatro bilhões de anos, o Universo está em fase de expansão acelerada devido à energia escura. Atualmente, o Universo está se expandindo cada vez mais rapidamente. Em mais alguns bilhões de anos, a expansão será exponencialmente rápida e a formação de estruturas cósmicas cessará completamente. O maiores objetos que poderão colapsar no Universo serão os superaglomerados com até cerca de 10^{17} massas solares.

• Futuro do Universo

O destino do Universo depende da quantidade de matéria e energia. A evolução futura do Universo pode ser determinada conhecendo sua composição, mas também precisamos saber como a energia



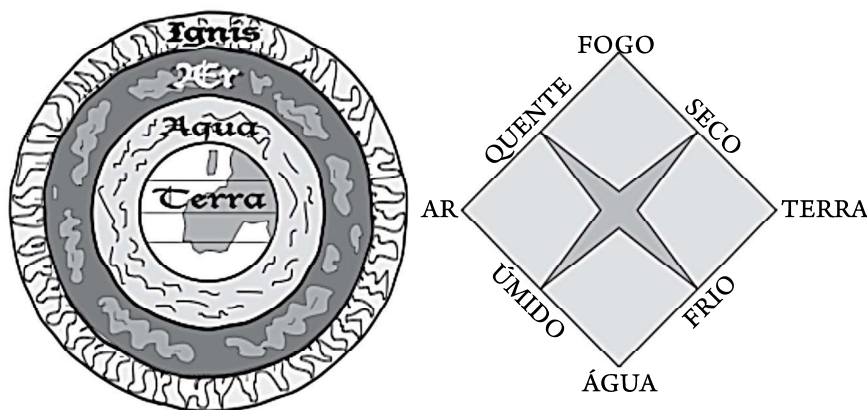
20- Evolução do Universo no futuro.

21- Evolução do universo para diferentes modelos cosmológicos. Para cada modelo são indicadas a geometria do universo e as componentes dominantes – Ω_M é o parâmetro de densidade de matéria e Ω_Λ é o parâmetro de densidade da energia escura. Os valores mais aceitos atualmente para o universo hoje são $\Omega_M = 0,3$ e $\Omega_\Lambda = 0,7$. Ω é definido na equação 3.

escura, a principal componente no universo atual, realmente se comporta, ou seja, se é uma constante ou se é um elemento com propriedades que se alteram com o tempo. Ainda não conhecemos a natureza da energia escura, mas podemos fazer previsões baseadas em propriedades possíveis de serem observadas e passíveis às leis da física ao nosso alcance atualmente.

Se a energia escura for uma constante da Natureza, no caso a Constante Cosmológica, introduzida por Einstein, então o Universo irá se expandir para sempre. Como a expansão é acelerada, tudo o que não estiver fortemente ligado pela gravidade na nossa região no Universo será arrastado para longe pela expansão e, em cerca de cem bilhões de anos não será mais vista nenhuma outra galáxia no céu.

Em contraposição, se a densidade da energia escura diminuir e desaparecer e, ao mesmo tempo, a densidade de matéria for um pouco superior a 10^{-29} g/cm³, então a expansão cósmica cessará no futuro e a gravidade fará com que o Universo se contraia indefinidamente até que toda a matéria e a radiação voltem a se concentrar em uma singularidade. O que pode acontecer depois disto é uma incógnita. A história, ao menos de uma etapa do Universo, pode terminar num Big Crunch (o inverso do Big Bang, que poderíamos traduzir livremente como a Grande Compressão). Ou então o universo poderia ricochetear em um novo Big Bang, ou seja, num renascimento.



22- Os quatro elementos básicos do Universo de várias culturas da Antiguidade. Um quinto elemento era acrescentado, representando o material celeste.

Um cenário mais exótico, e não completamente descartado pelas observações, seria o caso da energia escura ter uma pressão maior que a prevista para a Constante Cosmológica. Nesse caso, teríamos em alguns bilhões de anos uma expansão superexponencial. O espaço expandiria tão rapidamente que, posteriormente, nenhuma força da Natureza poderia impedi-lo. A princípio, as galáxias começariam a perder suas estrelas, depois as estrelas perderiam seus planetas e mais tarde os próprios planetas seriam esquarterjados. Depois, os átomos seriam arrancados das moléculas, os elétrons dos átomos e os prótons e nêutrons dos núcleos. Finalmente, os quarks se separariam e o Universo terminaria em uma sopa de partículas elementares. Esse cenário é conhecido como Big Rip (Grande Rasgão).

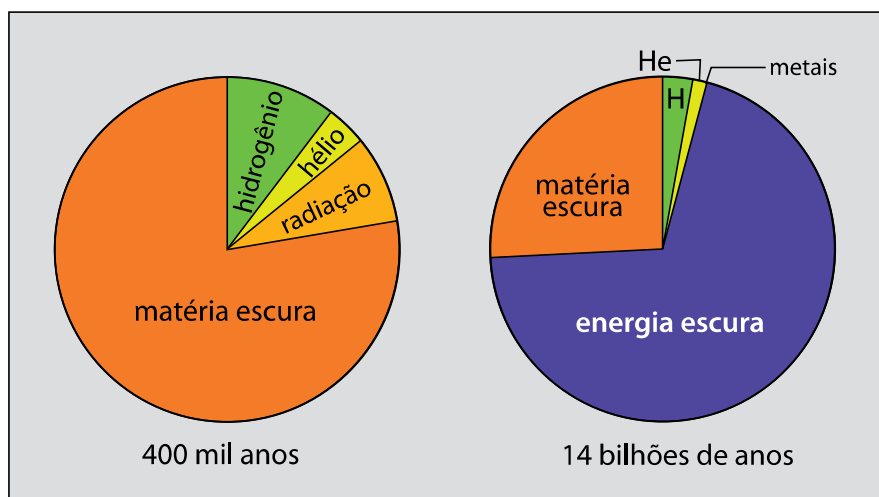
10.9 COMPOSIÇÃO DO UNIVERSO: O LADO ESCURO DO UNIVERSO

A composição do Universo em elementos básicos sempre foi um assunto debatido em diversas culturas. Na Antiguidade, um mundo composto de quatro elementos era uma visão comum. Na Grécia Clássica, os filósofos pensavam que os elementos básicos da Natureza era terra, água, ar e fogo. Para descrever todo o Universo, era acrescentado um quinto elemento, ou Quintessência, às vezes chamado de Éter.

Essas ideias evoluíram durante os séculos, com os conceitos atomistas, que também surgiram na Grécia clássica, e o desenvolvimento da química e da física. No início do século 20, já era aceita a noção de que a matéria no Universo e na Terra é composta dos mesmos átomos, embasado pela recém criada física quântica e pelas observações de espectros de objetos celestes.

Em 1933 surge a primeira evidência de que falta algo na receita do Universo. Observa-se que existe uma grande quantidade de massa nos aglomerados de galáxias que não podemos detectar diretamente, mas se que revela pela análise do movimento das galáxias. Esse assunto, contudo não atrai muitos pesquisadores e, até a década de 1970, a ideia reinante era de um universo composto de átomos e moléculas, isto é, matéria bariônica. A única dificuldade seria que nem toda a matéria bariônica pode ser observada por razões técnicas.

Mas no final da década de 1970, foi descoberta uma grande quantidade de matéria distribuída ao redor das galáxias espirais, formando um halo de matéria invisível ou escura. A partir daí iniciou-se uma



23- Distribuição das componentes do universo atual (a direita) segundo os últimos modelos cosmológicos: 70% está na forma de energia escura, 26% na forma de matéria escura, 3% na forma de hidrogênio, 1% na forma dos outros elementos da tabela periódica. A radiação contribui apenas com 0,005% para a massa/energicósmica. À esquerda, a composição do Universo na época da recombinação.

investigação por um número crescente de astrônomos e físicos e, durante a década de 1980, ficou claro que a matéria escura não pode ser toda bariônica. O principal vínculo é a quantidade de matéria bariônica deduzida a partir da observação da abundância de elementos leves produzidos durante a nucleossíntese primordial. O modelo preferido de Universo é constituído então de uma grande quantidade de matéria escura de algum tipo desconhecido e uma pequena fração de matéria bariônica.

No ano de 1998, nossa visão de Universo foi revolucionada. As observações de supernovas distantes mostraram que esses objetos parecem menos brilhantes que o esperado, caso o Universo tivesse apenas matéria. Várias hipóteses foram descartadas e o melhor cenário para explicar o baixo brilho aparente das supernovas é a expansão acelerada do Universo, provocada por uma componente de pressão negativa chamada energia escura.

Neste mesmo ano de 1998, outra observação mostrou a presença de outra componente além da matéria. A análise das variações de temperatura da Radiação Cósmica de Fundo sugeriu que o Universo deve ter uma geometria plana, ou praticamente plana. Para isto, a soma das densidades de todas as componentes deve totalizar o valor da densidade crítica. Medidas independentes da densidade de matéria resultam em um valor de cerca de 30% da densidade crítica. Se o universo é plano, então 70% de seu conteúdo devem ser de outra natureza.

Para as próximas décadas, grandes esforços nas áreas experimental e teórica serão investidos na pesquisa da natureza da matéria e energia escura.

10.10 ANTES DO BIG BANG?

Na teoria padrão do Big Bang, baseada na física que conhecemos e testamos, e baseada nos chamados três pilares observacionais (o afastamento das galáxias, a abundância dos elementos leves e a radiação cósmica de fundo), não tem sentido falar de um momento anterior ao Big Bang. Tudo tem origem na Grande "Explosão", inclusive o espaço e o tempo.

Devemos ir além da física relativística e quântica se quisermos que a questão sobre o que ocorreu antes do Big Bang tenha, pelo menos, algum sentido. Na década de 1990 amadureceram novas ideias sobre a natureza cósmica e uma que tem mobilizado um grande número de pesquisadores é a Teoria

das Cordas. Por essa teoria o Universo tem três dimensões espaciais grandes (ou mesmo infinitas) e outras sete espaciais pequenas, e as partículas fundamentais são cordas unidimensionais que vibram. Diferentes modos de vibração produzem características às cordas e conjuntos de cordas formam as partículas que conhecemos, como quarks, elétrons, neutrinos etc.

Em alguns modelos cosmológicos baseado na Teoria das Cordas, o Big Bang seria apenas uma transição de duas fases do Universo. O Big Bang não seria uma singularidade mas apenas uma estrutura muito pequena, menor do que a escala de Planck, que corresponde à menor escala em que podemos aplicar as leis da física atual, equivalente à aproximadamente $1,6 \times 10^{-43}$ centímetro (cerca de vinte ordens de grandeza menor que o porte de um elétron!).

Também existem os cenários baseados nas branas (jargão inventado pelos físicos, que significa diminutivo de membrana). Por essa concepção nosso universo estaria contido em uma dessas branas que evoluiria em um meio de dimensão superior. Em uma das teorias de branas equipirótica (em grego significa deflagração), o Big Bang seria o resultado de uma colisão de branas e, além disto, essas colisões seriam recorrentes.

Mas aqui é preciso considerar que a Teoria de Cordas é ainda extremamente especulativa e não foi testada experimentalmente, e dificilmente isso ocorrerá em um futuro próximo.