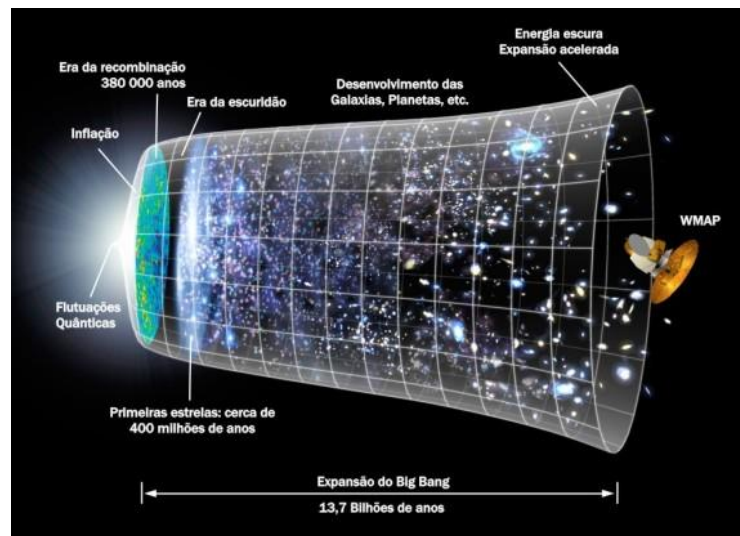


Aula 28: Cosmologia - Evolução e Futuro do Universo.

María de Fátima Oliveira Saraiva, Kepler de Souza Oliveira Filho e Alexei Machado Müller.



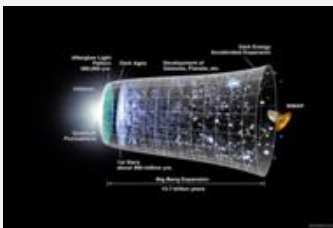
Representação da evolução do Universo desde a época da Inflação até a época atual, com o satélite WMAP mapeando a radiação emitida quando o universo se tornou transparente, à idade de 380 000 anos. Crédito: NASA / WMAP Science Team.

Introdução

Prezados alunos,

Por 14 bilhões de anos o Universo tem expandido e esfriado formando aos poucos as belas estruturas que vemos hoje. Como será a evolução futura do Universo? Do que ela depende? Esse é o assunto que vamos abordar em nossa última aula.

Bom estudo!



Objetivos da aula:

- Entender como a densidade do Universo determina se ele vai se expandir para sempre ou não;
- Escrever os possíveis destinos do Universo, de acordo com a teoria do *Big Bang*, relacionando cada destino com a geometria do Universo e a sua densidade;
- Definir densidade crítica do Universo e demonstrar sua relação com o valor da constante de Hubble;
- Relacionar conceitos como inflação e energia escura com os problemas que os originaram;
- Resumir as características do Universo de acordo com o conhecimento atual em termos de idade, conteúdo, geometria e futuro possível.

Como será o futuro do Universo?

O destino do Universo

O Universo está atualmente se expandindo, mas, essa expansão durará para sempre? Ou parará algum dia e o Universo começará a colapsar? E se vivemos em um universo oscilante, repetidamente se expandindo e colapsando?

Na Aula 27 vimos que Friedmann e Lemaître calcularam as possíveis soluções para as equações da relatividade geral, e viram que não havia necessidade de incluir constante cosmológica se não fosse feita a exigência de um universo estático. Eles encontraram três tipos de soluções, dependendo da densidade do Universo: para uma densidade abaixo de um certo valor, o Universo expandiria para sempre, pois a gravidade nunca seria forte o suficiente para parar a expansão; para uma densidade acima desse valor, o Universo um dia pararia de se expandir e passaria a se contrair; a terceira solução é o caso limite entre expansão eterna e expansão seguida de contração e corresponde ao valor de densidade exato e suficiente para parar a expansão, chamada **densidade crítica**.

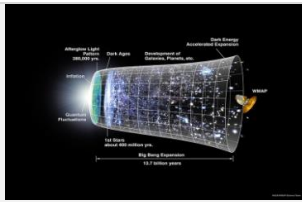
Densidade crítica

Para entender melhor o conceito de densidade crítica, vamos fazer uma analogia com um sistema de dois corpos interagindo gravitacionalmente.

Um universo que se expande para sempre corresponde ao sistema com energia total positiva, no qual a velocidade relativa entre os dois é grande demais para que se mantenham orbitando mutuamente, de tal forma que um passa pelo outro e se afastam para sempre - o sistema é não ligado, ou aberto;

Densidade crítica:

Mínima densidade que o Universo deve ter para, um dia, parar de se expandir. Se a densidade do Universo fosse menor que a crítica, o Universo nunca pararia de expandir. Se a densidade fosse maior que a crítica o Universo se contrairia.



Um universo que para de se expandir e passa a se contrair corresponde ao sistema com energia total negativa, em que os dois corpos ficam orbitando em torno de um centro de massa comum – o sistema é ligado, ou fechado;

O caso limite entre expansão eterna e recolapso corresponde ao sistema que tem a velocidade relativa necessária e suficiente para o sistema deixar de ser fechado e ficar aberto, ou seja, corresponde à velocidade de escape.

Assim, vamos definir a densidade crítica a partir da definição de velocidade de escape:

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Considerando que a velocidade, aqui, é a velocidade de afastamento entre as galáxias, pela Lei de Hubble temos que:

$$v = H_0 r.$$

A massa total do Universo com densidade igual à densidade crítica é:

$$M = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{crítica}}$$

Substituindo as expressões de v e de M na primeira equação, temos:

$$H_0^2 r^2 = \frac{2G \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{crítica}}}{r},$$

OU

$$\rho_{\text{crítica}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}.$$

Vemos assim que a densidade crítica (ρ_c) depende apenas do valor de H_0 , pois G é uma constante (a constante gravitacional). Para $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$,

$$\rho_c = 0,94 \times 10^{-26} \text{ kg/m}^3.$$

Esta densidade crítica corresponde a cinco átomos de hidrogênio por metro cúbico, dez milhões de vezes menor do que o melhor vácuo que pode ser obtido em um laboratório na Terra. Note que a densidade do Universo diminui com a expansão, mas a densidade crítica também diminui, pois H_0 diminui. Em um universo plano $\rho/\rho_{\text{crítica}}$ permanece constante e igual a 1.

Mas, qual é a densidade do Universo?

Densidade de matéria no Universo

A densidade de matéria no Universo não é bem conhecida. Pela contagem de galáxias, os astrônomos acham uma densidade média de matéria luminosa de cerca de $2 \times 10^{-29} \text{ kg/m}^3$. Se o Universo fosse constituído apenas de matéria luminosa (matéria que emite radiação eletromagnética), viveríamos em um universo aberto.

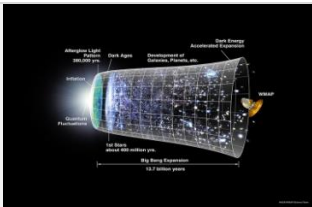
Mas, como já sabemos, a maior parte da massa das galáxias e de aglomerados de galáxias é matéria escura, isto é, matéria que não emite radiação eletromagnética, e que só é detectada pela força gravitacional que exerce

Densidade crítica:

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}.$$

Valor da densidade crítica para $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$:

$$\rho_c = 0,94 \times 10^{-26} \text{ kg/m}^3.$$



Matéria escura:

Matéria que não emite radiação eletromagnética, só é perceptível pela ação gravitacional que exerce sobre matéria luminosa.

Densidade do Universo:

Sem a matéria escura seria $2,0 \times 10^{-29} \text{ kg/m}^3$.

Com a matéria escura poderia chegar a $2,0 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$.

Universo plano:

Curvatura do espaço é nula.

Corresponde ao Universo com densidade igual à densidade crítica.

O seu futuro é parar a expansão num tempo infinito (limite entre expansão eterna e recolapso), sua forma é representada por uma superfície plana.

Universo fechado:

Curvatura do espaço positiva, com formato esférico.

Corresponde ao Universo com densidade maior do que a densidade crítica.

O seu futuro é o recolapso.

Universo aberto:

Curvatura do espaço negativa.

Corresponde ao Universo com densidade menor do que a densidade crítica.

O seu futuro é a expansão eterna, e sua forma é representada pela superfície de uma sela.

Lembre-se:

Somente no fechado a expansão pararia num tempo finito.

na matéria luminosa. Não se sabe o que é essa matéria escura. Ela poderia se constituir de partículas normais (bárions), prótons e nêutrons, compondo buracos negros, anãs marrons e planetas, mas os estudos feitos procurando esses objetos demonstram que menos de 2% da matéria de nossa Galáxia está em objetos compactos, isto é, a matéria escura também não está na forma de buracos negros ou estrelas compactas. Mais provavelmente ela está na forma de partículas exóticas ainda não detectadas na Terra.

Levando em conta a matéria escura, a densidade total de matéria no Universo (ρ_m), é no mínimo 100 vezes maior do que a densidade de matéria luminosa, ou seja, $\rho_m \approx 2 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$. Ainda assim, a densidade de matéria é menor do que a densidade crítica, indicando uma expansão eterna.

Atualmente sabemos que, além de matéria escura, o Universo contém uma componente chamada "energia escura", que contribui para a densidade total do Universo. Falaremos mais sobre isso no final dessa aula.

Os três tipos de Universo

As equações da relatividade geral, sem constante cosmológica, permitem três tipos de universos classificados de acordo com a sua densidade em relação à densidade crítica.

Definindo um parâmetro de densidade Ω_0 como a razão entre a densidade de matéria no Universo (ρ_m) e a densidade crítica (ρ_c), temos:

$$\Omega_0 = \rho_m / \rho_c.$$

Onde:

$0 < \Omega_0 < 1$ corresponde a um universo **aberto**

$\Omega_0 > 1$ corresponde a um universo **fechado**.

$\Omega_0 = 1$ corresponde a um universo **plano (marginalmente fechado)**.

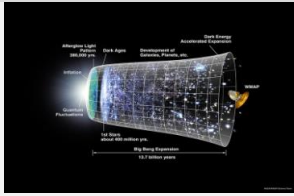
Nesses três tipos de universo a expansão desacelera com o tempo, devido à gravidade, mas apenas no segundo caso (fechado) a expansão vai parar num tempo finito.

Cada tipo de universo obedece a uma geometria, determinada pela curvatura do espaço. O espaço é tridimensional, e para nós é muito difícil (ou impossível) imaginar um espaço tridimensional curvo. Mas podemos perfeitamente imaginar uma superfície curva, pois usamos a 3ª dimensão para curvar as outras duas. Então vamos usar uma analogia em duas dimensões para representar a forma de cada tipo de universo.

Um universo plano tem curvatura do espaço nula, sendo representado por uma superfície plana na analogia bidimensional. Ele obedece à geometria euclidiana, segundo a qual, duas retas paralelas nunca se encontram, e os ângulos internos dos triângulos somam 180° . É o espaço com que estamos acostumados.

Um universo fechado tem curvatura do espaço positiva; na analogia bidimensional, o espaço tem a forma de uma superfície esférica. Na geometria esférica, duas retas paralelas convergem, e os ângulos internos de um triângulo medem mais de 180° .

Em um universo aberto, a curvatura do espaço é



negativa; na analogia bidimensional, o espaço tem a forma de uma superfície em forma de sela. A geometria é hiperbólica, o que significa que duas retas paralelas divergem, e os ângulos internos de um triângulo medem menos de 180° .



Figura 28.01: As três possíveis geometrias do Universo com as superfícies que apresentariam.

Qual destes modelos representa o Universo real?

Bem, essa pergunta continua sendo um dos cerne da Cosmologia moderna. Mas, a tendência atual é pensar que há indicações de que vivemos em um Universo plano. Analisando as flutuações existentes no mapa da radiação cósmica de fundo, comparando os tamanhos das flutuações observadas com tamanhos esperados de acordo com diferentes geometrias do Universo, (ver as figuras 28.02 e 28.03), resulta que o Universo é plano.

Universo plano:

Há grandes indícios de que o Universo é plano.

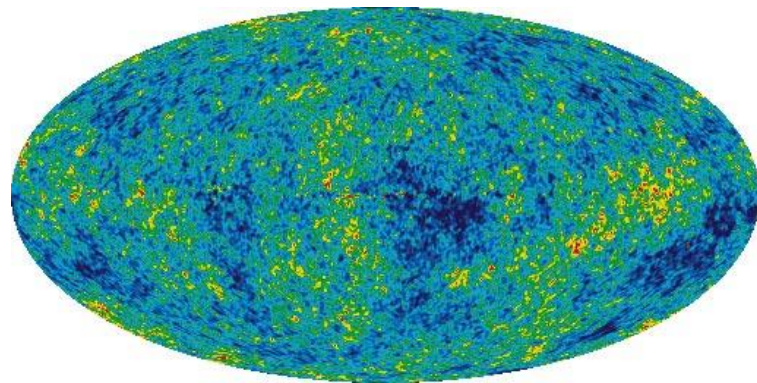


Figura 28.02: [Mapa](#) do céu obtido pelo satélite [Wilkinson Microwave Anisotropy Probe \(WMAP\)](#) da NASA, lançado em 2001, com resolução angular de $0,21^\circ$ em 93 GHz. As regiões vermelhas são mais quentes ($200 \mu\text{K}$) do que a média e as azuis mais frias ($-200 \mu\text{K}$).

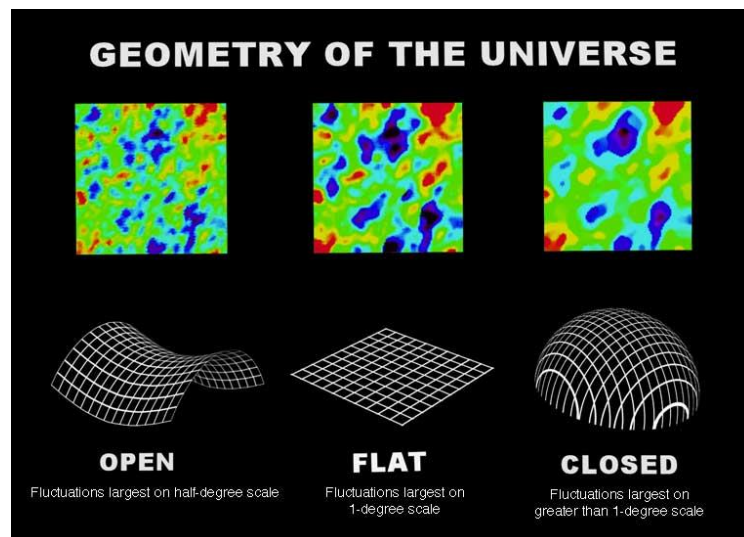
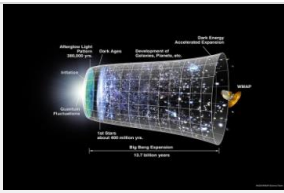


Figura 28.03: Num universo aberto, devido à curvatura negativa, os raios de luz chegam a nós de direções que parecem mais próximas do que são, e as



Inflação:

Fase que o Universo passou por uma expansão mais rápida que a velocidade da luz.

Segundo a teoria da inflação, o Universo iniciou muito menor do que na teoria original, mas uma hiperexpansão o teria deixado subitamente enorme, desconectando regiões distintas e achatando a sua curvatura.

flutuações ficam com tamanho menor. Num Universo fechado, os raios de luz chegam de direções que parecem mais afastadas do que são, e as flutuações ficam com tamanho maior. No Universo plano, os raios de luz chegam das direções reais, e os tamanhos ficam reais.

Inflação

Por volta de 1980, o físico Alan Guth propôs o modelo do universo inflacionário, segundo o qual o universo primordial passou por uma fase de expansão extremamente rápida, chamada **inflação**. Essa fase não fazia parte do modelo padrão do *Big Bang*, e foi sugerida para tentar explicar algumas questões importantes que não tinham resposta no modelo então vigente, como o Problema da Planicidade (ou Planaridade) e o Problema do Horizonte.

Problema da Planicidade:

Por que a densidade do Universo é tão próxima da densidade crítica?

A densidade de matéria no Universo é de 20 a 100% da densidade crítica. Por que não é 1.000 % ou 0,001%? O fato de a densidade do Universo ser hoje tão próxima da crítica, significa que no início essa densidade era diferente da densidade crítica por **menos de uma parte em 10^{15}** , pois qualquer diferença maior do que isso no início implicaria numa diferença muito gritante hoje. Em termos de curvatura do espaço, isso significa que se o Universo não fosse exatamente plano no início, ele não poderia ser quase plano como é hoje.

Problema do Horizonte:

Por que o Universo em larga escala é tão homogêneo e isotrópico?

A radiação cósmica de fundo apresenta uma grande isotropia: duas regiões opostas no céu têm a mesma aparência. Isso leva a crer que essas regiões opostas estiveram conectadas em algum momento, de forma a transmitir energia uma para a outra. Mas, pelo modelo do *Big Bang*, quando essas regiões emitiram a radiação que agora está chegando a nós provinda delas, elas já se encontravam separadas por uma distância maior do que a luz poderia percorrer no tempo de existência que o Universo tinha então. Ou seja, essas regiões estavam fora do "horizonte" uma da outra. Então, a menos que o Universo tivesse iniciado perfeitamente homogêneo (mas nesse caso as galáxias nunca teria se formado), não existe explicação para que ele seja tão homogêneo hoje.

Basicamente, a teoria da inflação diz que, no início do Universo, quando a força forte se separou da força eletrofraca, houve uma transição de fase que liberou enorme quantidade de energia latente (energia do vácuo) que fez o Universo se expandir por um fator de 10^{50} em menos de 10^{-36} s. Essa superexpansão é chamada Inflação. A inflação teria tornado "desconectadas" duas regiões que eram anteriormente conectadas, respondendo assim ao "problema do horizonte", e resolvendo também o problema da planicidade, pois qualquer curvatura que o Universo tivesse tido anteriormente ao período da inflação teria "desaparecido" com a superexpansão.

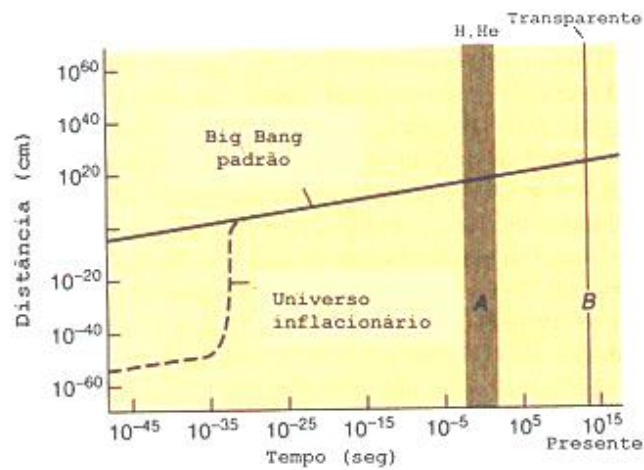
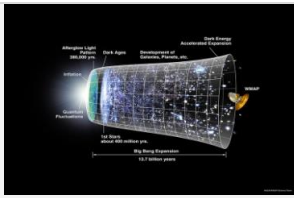


Figura 28.04: Tamanho do Universo em função do tempo. A linha pontilhada representa a enorme e rápida expansão sofrida pelo Universo aos 10^{-35} segundos de vida, quando passou do tamanho de 10^{-60} para 10^{-10} cm, segundo o modelo inflacionário. São indicadas também as épocas em que foram formados o hidrogênio e hélio, e a época em que ficou transparente.

Vamos apresentar um exemplo (adaptado do livro "The Cosmos", de Jay M. Pasachoff e Alex Filippenko) para esclarecer o conceito de inflação:

Considere que no instante $t = 10^{-37}$ s, o raio do Universo fosse 0,01 m, e que no instante $t = 10^{-35}$ s fosse 0,1m.

Qualquer um desses raios é maior do que a distância que a luz poderia ter percorrido no tempo de vida do Universo correspondente, pois essa distância é:

$$c \cdot t = (3 \times 10^8 \text{ m/s}) \cdot (10^{-37} \text{ s}) = 3 \times 10^{-29} \text{ m (comparado com 0,01 m) , ou:}$$

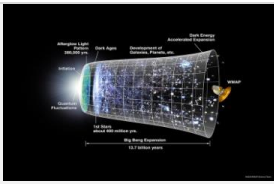
$$c \cdot t = (3 \times 10^8 \text{ m/s}) \cdot (10^{-35} \text{ s}) = 3 \times 10^{-27} \text{ m (comparado com 0,1 m).}$$

Portanto, dois pontos nas extremidades do Universo já estariam desconectados desde $t = 10^{-37}$ s, e não poderiam estar em equilíbrio térmico. Mas, se considerarmos que o raio do Universo em $t = 10^{-37}$ s fosse de 10^{-51} m, então ele seria suficientemente pequeno para que a informação fosse transmitida de um ponto a outro, e ele poderia então estar em equilíbrio. Se o Universo tivesse então, subitamente, inflado por um fator de 10^{50} em $t = 10^{-37}$ s, o novo raio, seria $10^{-51} \text{ m} \times 10^{50} = 0,1 \text{ m}$, compatível com o *Big Bang* padrão.

O fator pelo qual o Universo inflou depende do modelo inflacionário, o que importa é que ele faz o Universo crescer enormemente. O fato da velocidade da expansão durante a inflação ser maior do que a velocidade da luz não fere as leis da Física, pois o que é proibido é a propagação da informação no espaço ultrapasse a velocidade da luz, mas aqui é o próprio espaço-tempo que está se expandindo, e a Física não estabelece limites para a velocidade com que isso pode acontecer.

Energia escura

Até o final do século passado os astrônomos pensavam que a expansão do Universo devia estar ocorrendo de forma desacelerada, devido à força gravitacional da matéria que o constitui.



Energia escura:

Nome genérico dado para a componente do Universo que causa a expansão acelerada. Ela provoca a repulsão sobre a matéria.

Em 1998, dois times de astrônomos estudando supernovas em galáxias distantes, observaram que essas galáxias estão se movendo **mais lentamente** do que seria esperado para uma expansão constante, o que indica que a taxa de expansão está se acelerando! Quanto mais o tempo passa, mais rápido as galáxias se afastam umas das outras!

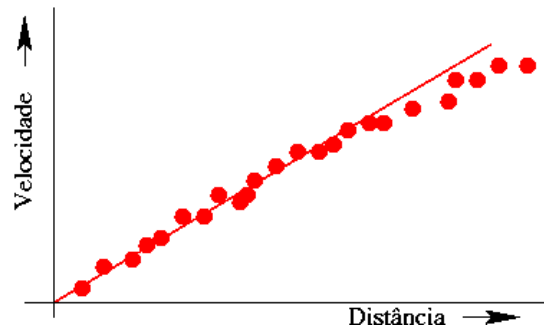


Figura 28.05: Velocidade de recessão em função da distância mostra que galáxias muito distantes têm velocidades de recessão menores do que deveriam ter se o universo tivesse se expandido a uma taxa constante.

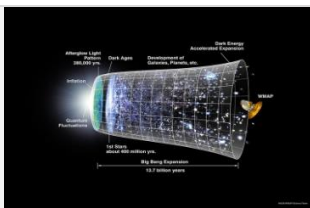
Isso levou os cientistas a pensarem que o Universo pode estar dominado por uma componente com efeito de repulsão que atua no sentido contrário ao da gravidade, uma espécie de antigravidade que causa a aceleração da expansão.

Assim, 70 anos depois de Einstein ter retirado a constante cosmológica de suas equações, ela voltou a ser pensada como uma possível explicação para a expansão acelerada observada.

A constante cosmológica é também chamada energia do vácuo, por ser supostamente gerada por flutuações quânticas no vácuo - pares virtuais de matéria e antimatéria virtuais, constantemente sendo criadas e destruídas em um tempo muito pequeno de forma a não ferir a lei macroscópica de conservação da matéria.

O nome genérico dado para a componente do Universo que causa a expansão acelerada, incluindo a constante cosmológica, é "energia escura". [A energia escura não deve ser confundida com matéria escura. A matéria escura, da mesma forma que a matéria normal (formada de prótons, nêutrons e elétrons), possui gravidade, exercendo força de atração sobre a matéria. Ela é chamada escura porque não emite radiação eletromagnética e, portanto, não pode ser detectada em nenhuma faixa do espectro eletromagnético. Já a energia escura provoca repulsão sobre a matéria.]

Existem diferentes modelos de energia escura, sendo a constante cosmológica um deles. Outro modelo é o da quintessência. Esse nome (quinta essência) faz alusão a Aristóteles, que considerava que o Universo era composto de quatro elementos principais - terra, água, ar e fogo-, mais um quinto elemento, uma substância etérea que permeava tudo e impedia os corpos celestes de caírem sobre a Terra. No contexto da energia escura, ele é usado para designar um campo dinâmico quântico que é gravitacionalmente repulsivo.



Resultados de observação da radiação de fundo

- Constituição do Universo;
4% matéria normal;
23% matéria escura e
73% de energia escura.

Como só conhecemos a matéria normal, conhecemos apenas 4% do Universo.

- A densidade do Universo é praticamente igual a crítica, indicando que o Universo é plano.

- Idade do Universo 13,7 bilhões de anos.

- a matéria normal constitui apenas 5% do Universo, 25% do Universo é constituído de matéria escura e 70% é constituído de energia escura. Como só conhecemos a matéria normal, 95% do Universo é desconhecido para nós.
- a densidade de matéria-energia do Universo (incluindo matéria normal, matéria escura e energia escura) é praticamente igual à densidade crítica, indicando que o Universo é plano.
- a idade do Universo é de 13,7 bilhões de anos.

Tabela 28.01: Percentual da composição do Universo.

	Tipo	Porcentagem do Universo
	Energia escura	73%
	Matéria escura	23%
	Matéria normal	4%
	Radiação	0,005%

Resumo

O destino do Universo é determinado pela sua densidade. Se a densidade for baixa, a expansão vai continuar para sempre; se a densidade for alta, a expansão vai parar um dia e o Universo começará a contrair. O valor da densidade que estabelece o limite entre expansão eterna e recolapso é chamado de densidade crítica.

A densidade crítica está relacionada ao valor da taxa de expansão do Universo pela expressão:

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

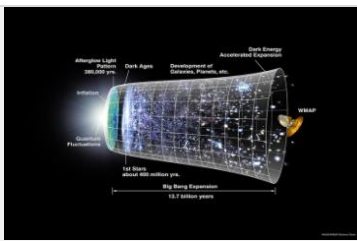
Dependendo da razão entre a densidade de matéria e a densidade crítica há três tipos de universo:

- o plano, em que a curvatura do espaço é nula. Corresponde ao Universo com densidade igual à densidade crítica. O seu futuro é parar a expansão num tempo infinito (limite entre expansão eterna e recolapso) sua forma é representada por uma superfície plana;

- o fechado, com formato esférico, apresenta curvatura positiva, seu futuro é o recolapso. Corresponde ao Universo com densidade maior do que a densidade crítica;

- o aberto, com formato hiperbólico, apresenta curvatura negativa. Seu futuro é a expansão eterna, e sua geometria é representada pela superfície de uma sela. Corresponde ao Universo com densidade menor do que a densidade crítica.

Dos três modelos, somente no fechado a expansão pararia num tempo finito.



Para $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$, a densidade crítica vale:

$$\rho_c = 0,94 \times 10^{-26} \text{ kg/m}^3 ,$$

sendo a densidade do Universo menor que a densidade crítica o mesmo nunca pararia de se expandir. Se ela fosse maior que a crítica o Universo se contrairia.

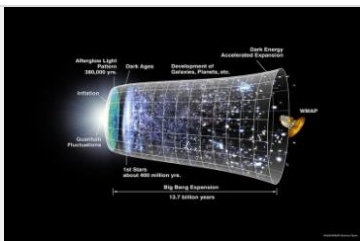
O modelo original do Big Bang não explica alguns aspectos observados do universo, como sua uniformidade (problema do horizonte) e sua geometria plana (problema da planicidade). A teoria inflacionária, proposta na década de 1980, resolve essas questões propondo que o universo iniciou de um tamanho muito menor do que pensado no modelo original, mas teria sofrido uma expansão extraordinariamente rápida por um brevíssimo momento. Essa inflação teria desconectado regiões anteriormente conectadas (por isso é uniforme) e feito desaparecer qualquer curvatura que ele tivesse antes.

No final do século passado um time de astrofísicos descobriu que o Universo está se expandindo a uma taxa acelerada, e não retardada como se pensava. Para explicar essa aceleração foi proposto que o universo, além da matéria normal e da matéria escura, tem uma terceira componente, chamada energia escura, a qual tem um efeito de repulsão sobre a matéria. Se a força repulsiva da energia escura continuar dominando sobre a força gravitacional o Universo se expandirá cada vez mais rapidamente, acabando num final catastrófico, chamado grande estilhaçamento.

Os resultados atuais das observações da radiação de fundo do Universo indicam que o Universo é constituído apenas de 5% de matéria normal, a que é conhecida; 25% de sua constituição é de matéria escura, que não conhecemos e 70% de energia escura. Logo conhecemos apenas 4% do Universo. A densidade do Universo (incluindo matéria normal, matéria escura e energia escura) é quase igual à densidade crítica, sugerindo que o Universo é plano. A idade do Universo é de 13,7 bilhões de anos.

Questões de Fixação:

1. De que maneira o destino do Universo, sua forma e sua densidade média estão relacionados?
2. O que é o parâmetro de densidade do Universo?
3. Sobre a densidade crítica:
 - a) Deduza a sua expressão matemática.
 - b) Qual a sua relação com a constante de Hubble?
 - c) Determine seu valor para $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$.



4. À medida que o Universo envelhece, devido à expansão, sua densidade média diminui. Supondo que a expansão seja desacelerada:

a) O que acontece com o valor de H_0 quando o Universo fica mais velho?

b) O que acontece com o valor da densidade crítica?

c) O que acontece com o parâmetro de densidade?

5. Por que a inflação foi introduzida na teoria do *Big Bang*?

6. Sobre a energia escura:

a) O que é?

b) Por que os astrônomos pensam que ela existe?

7. É comum ouvir os cientistas dizerem que vivemos em um universo do qual só conhecemos 5%. A que eles estão se referindo quando dizem isso?

