

A expansão do Universo

e

suas conseqüências cosmológicas

Ronaldo E. de Souza

Dept. Astronomia IAG/USP

A descoberta do fenômeno da expansão do Universo, ocorrida em meados dos anos de 1920 por Edwin Hubble, rapidamente se constituiu em uma das grandes descobertas científicas do século XX. Juntamente com a teoria da relatividade geral, proposta por Albert Einstein, estas duas descobertas foram fundamentais para o desenvolvimento da moderna cosmologia. Ainda hoje discute-se nos meios especializados qual é o valor exato da taxa de expansão do Universo, já que esta é uma informação crucial para compor um modelo cosmológico que seja o mais apurado possível, mas a descoberta de Hubble mostrou que definitivamente o Universo está evoluindo. Não vivemos em um Universo estático, conforme acreditavam os antigos e a quase totalidade dos cientistas no início de século XX. Atualmente, acredita-se que esta taxa de expansão é conhecida com uma precisão da ordem de 10% e nos próximos anos espera-se que novos experimentos venham a permitir uma determinação ainda mais precisa desta que é considerada uma das grandezas fundamentais do Universo.

Mas porquê é tão fundamental esta descoberta? O que podemos aprender sobre o Universo a partir desta informação?

A escala de distâncias é uma das peças de informação mais fundamentais para compreensão do Universo em que vivemos. As distâncias das estrelas e galáxias são tão grandes, quando comparadas com a nossa experiência cotidiana, que temos dificuldade de compreendê-las e visualizar as suas conseqüências. Na verdade, determinar as distâncias das estrelas foi uma das tarefas mais difíceis para os astrônomos após a descoberta do heliocentrismo, ocorrida no início do século XVII, quando se reconheceu que as estrelas deveriam ser astros semelhantes ao nosso Sol. Somente em meados do século XIX, graças a uma apurada tecnologia óptica para construção de telescópios refratores, é que surgiram as primeiras medidas confiáveis de distâncias astronômicas das estrelas mais próximas. O ponto de partida para compreender esta escala de distâncias consiste em utilizar a distância média Terra-Sol, conhecida como a Unidade Astronômica (UA). As medidas mais recentes indicam que

1 UA = 149 597 800 km.

Quando comparada com os padrões terrestres esta é uma escala gigantesca, mas para os padrões astronômicos trata-se de uma distância ainda muito pequena, comparada com as distâncias cosmológicas. Para compreender as razões disto podemos comparar esta distância com a velocidade da luz no vácuo ($c \cong 300\,000$ km/s). Com esta velocidade a luz emitida no Sol demora cerca de 8,3 minutos para atingir a Terra. Ou seja, o Sol está a cerca de 8 minutos-luz da terra. Dentro do sistema solar o planeta mais distante está a uma distância aproximada de 39,4 unidades astronômicas, ou cerca de 5 horas-luz de distância.

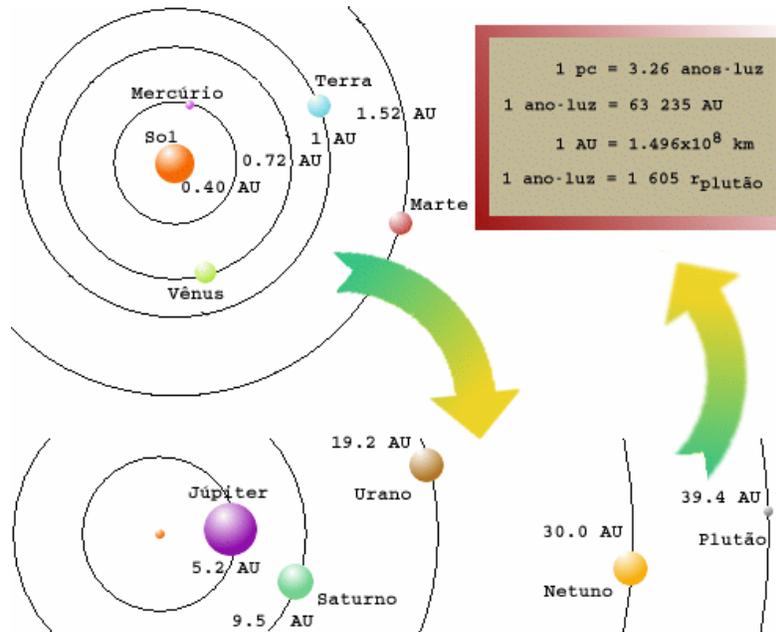


Figura 1: Apesar das enormes distâncias, quando comparadas com os padrões terrestres, o sistema solar tem uma dimensão de aproximadamente 5 horas-luz.

Para medir as distâncias das estrelas mais próximas devemos utilizar o método da paralaxe que consiste em avaliar as variações angulares na posição destes objetos, em relação ao fundo de objetos mais distantes, enquanto a Terra percorre a sua órbita anual. Trata-se do mesmo efeito que percebemos quando viajamos por uma estrada e examinamos o movimento aparente dos objetos próximos em relação aos acidentes geográficos mais distantes. No caso astronômico as estrelas próximas parecem se mover em relação ao fundo das estrelas mais distantes enquanto a Terra se movimenta em torno do Sol. Trata-se de um efeito muito diminuto e por este motivo a sua detecção experimental só ocorreu em meados do século XIX, apesar de astrônomos como Tycho Brahe terem previsto a sua existência no final do século XVI. A variação angular na posição das estrelas mais próximas é da ordem de 1 segundo de arco, ângulo 3600 vezes menor do que 1 grau. Para se ter uma idéia da dificuldade de observar este efeito podemos considerar que este é aproximadamente o ângulo sob o qual vemos a largura de um dedo indicador humano situado a uma distância de dois quilômetros! Claramente precisamos de instrumentos ópticos de boa qualidade para perceber este efeito. No caso astronômico, como a linha de base é igual à distância Terra-Sol, uma estrela que apresenta uma paralaxe de 1 segundo de arco deve estar a uma distância aproximada de $3,086 \times 10^{18}$ cm, conhecida em astronomia como o parsec, ou pc, termo derivado do inglês PARalaxe SECond. Em termos da velocidade da luz temos que

1 parsec \sim 3,26 anos-luz,

indicando que a luz das estrelas mais próximas demora cerca de 3 anos para atingir a Terra. Apesar de gigantesca, quando comparada aos nossos padrões diários, esta ainda é uma distância muito modesta para os padrões cosmológicos.

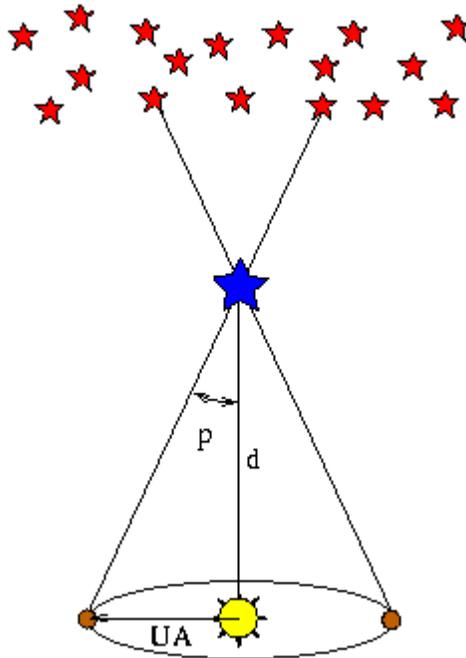


Figura 2: Podemos medir as distâncias das estrelas próximas o seu movimento aparente em relação às estrelas de fundo, enquanto a Terra se movimenta em torno do Sol.

As estrelas mais afastadas da nossa Galáxia estão muito distantes para que possamos aplicar o método da paralaxe. Para medir estas distâncias precisamos utilizar a propriedade de que o fluxo da radiação recebido por nós, originado destas estrelas, é tanto menor quanto maiores forem as distâncias que nos separam destes mesmos objetos. É basicamente o mesmo fenômeno que observamos ao examinar as lâmpadas dos postes mais distantes que iluminam uma rodovia. Como a luz se difunde por todo o espaço, se diluindo em superfícies esféricas cada vez maiores, e cuja área é proporcional ao quadrado do raio, resulta que a iluminação que recebemos decai com o inverso do quadrado da distância. Se indicarmos pelo símbolo F o fluxo que recebemos estando a 1 metro de distância, então uma lâmpada que está a 5 metros deve nos iluminar com um fluxo 25 vezes menor. Ou, inversamente, se recebemos um fluxo 25 vezes menor podemos concluir que estamos a uma distância de 5 metros daquela lâmpada. Este mesmo efeito pode ser observado quando comparamos o fluxo das estrelas próximas, cuja distância pode ser aferida pela paralaxe, com as estrelas de mesmo tipo, mas localizadas a distâncias muito maiores.

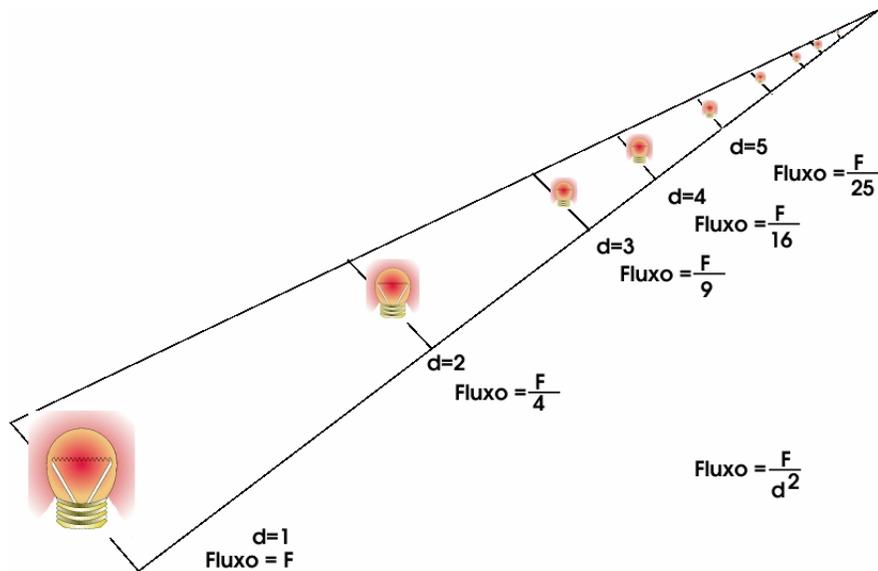


Figura 3: Para medir as distâncias das estrelas da Galáxia podemos utilizar o fato de que o fluxo observado decai com o inverso do quadrado da distância.

Este método pode ser utilizado para examinar a estrutura da nossa Galáxia e desta forma concluímos que a sua dimensão é da ordem de 50 000 parsecs, ou 50 kpc. Para cruzar a Via Láctea a luz deve demorar cerca de 163 000 anos, ou seja a nossa galáxia tem cerca de 163 000 anos-luz de diâmetro. Portanto a luz que recebemos hoje das estrelas mais distantes da nossa galáxia foi emitida quando a humanidade ainda se encontrava na idade da pedra.

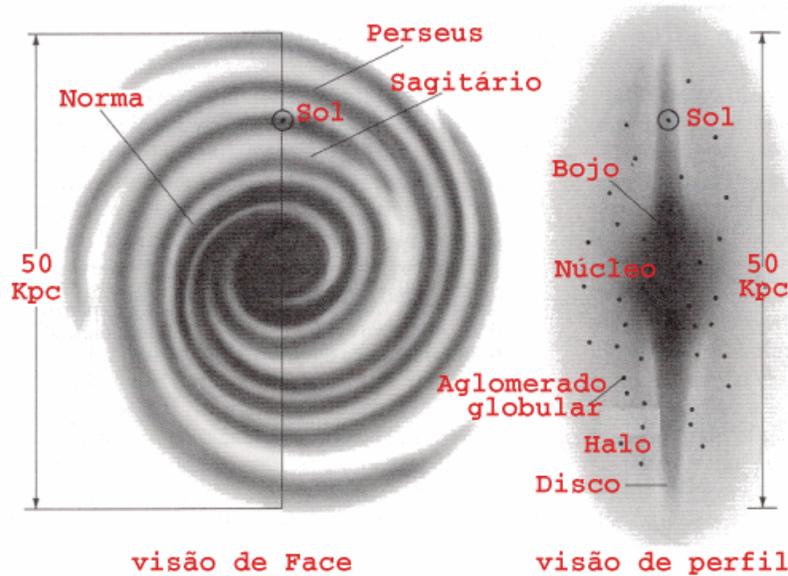


Figura 4. Estrutura da nossa galáxia, a Via Láctea, semelhante a tantas outras galáxias próximas.

As dimensões da nossa Galáxia delimitam o tamanho do nosso ambiente cosmológico local. Para atingir as menores distâncias de interesse cosmológico devemos examinar as galáxias mais próximas de nós. Como exemplo temos a

galáxia de Andromeda, companheira de dimensões comparáveis à Via Láctea e que está a cerca de 600 kpc de distância ou cerca de 2 milhões de anos-luz. Esta é apenas uma das inúmeras galáxias do nosso grupo local de galáxias. Para além do grupo local temos o aglomerado da Virgem, que é o aglomerado mais próximo de nós contendo cerca de 1 000 galáxias semelhantes à nossa. Este aglomerado está a uma distância aproximada de 17 milhões de parsecs, ou 17 mega-parsecs ou ainda 17 mpc. Para percorrer esta distância a luz demora cerca de 55 milhões de anos indicando que Virgo está a uma distância aproximada de 55 milhões de anos-luz. A luz que detectamos hoje, vinda das galáxias de Virgo, foi emitida quando ocorria na Terra o evento de extinção dos dinossauros. Atualmente, podemos medir as distâncias de galáxias que estão a distâncias dezenas de vezes maiores que a distância de Virgo. Estas são as distâncias em que começamos a perceber os efeitos cosmológicos mais importantes. Portanto, não é de se surpreender que durante praticamente toda a sua história a humanidade acreditou estar vivendo em um Universo estático imutável. Esta percepção de imutabilidade cósmica decorre da impossibilidade de atestarmos visualmente qualquer variação significativa dos astros mais distantes do nosso Universo. Estes estão tão distantes que mesmo que se movimentem nós não temos condições de perceber, durante o nosso breve período de vida

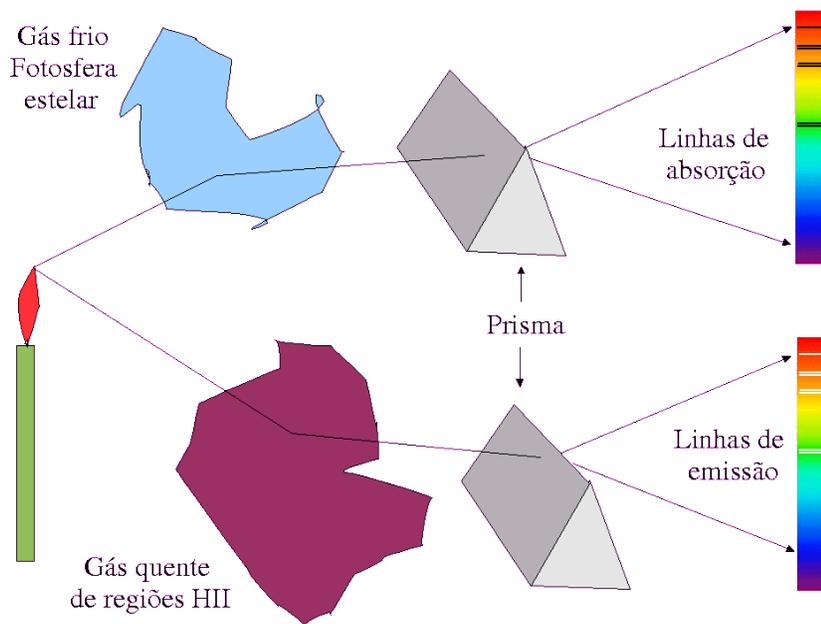


Figura 5. Princípio de funcionamento do espectrógrafo, utilizado para decompor a luz dos objetos astronômicos.

Além da distância uma outra propriedade muito importante que podemos medir é o espectro da luz emitida pelas galáxias. Esta radiação foi emitida tanto pelas suas estrelas como pelos gases aquecidos espalhados entre as estrelas, denominado de meio interestelar. A luz que recebemos, dado que é uma onda eletromagnética, pode ser decomposta, em seus diversos comprimentos de onda, por instrumentos instalados nos telescópios e denominados de espectrógrafos. O seu princípio de funcionamento é o mesmo de um prisma capaz de decompor a luz solar

separando-a segundo os diversos comprimentos de onda desta radiação. Normalmente, no regime óptico, observa-se desde o extremo ultravioleta, cerca de 3000 \AA ($1 \text{ Angström} = 1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$) até o vermelho, cerca de 8000 \AA . Tanto no caso do Sol, como também de outras estrelas semelhantes, podemos perceber no seu espectro a presença de linhas escuras, denominadas linhas de absorção, e que indicam a presença de elementos químicos presentes na sua fotosfera. Estas linhas funcionam como uma impressão digital revelando a presença daqueles elementos. Analogamente, os gases quentes do meio interestelar também emitem uma radiação, que pode ser decomposta espectralmente, e que mostra a presença de linhas de emissão. Estas linhas ocorrem pela emissão de gases muito quentes, com temperaturas da ordem de alguns milhares de graus, e muito diluídos no espaço. As linhas de emissão, bem como as linhas de absorção, contém uma informação muito importante sobre a presença de elementos químicos nas estrelas e galáxias. A luz emitida por estes elementos químicos, sabemos por experiências em laboratórios, ocorre em comprimentos de onda muito bem determinados. Dependendo da sua constituição eletrônica os átomos emitem em padrões fixos conhecidos como séries espectroscópicas quando os seus elétrons mudam de nível de energia. Por exemplo, nas transições que atingem o segundo nível de energia temos a série de Balmer do átomo de Hidrogênio que ocorre nas linhas H_α (6563 \AA), H_β (4861 \AA), H_γ (4340 \AA), H_δ (4100 \AA), etc.. A identificação desta seqüência de linhas marca inequivocamente a presença do Hidrogênio nestes objetos.

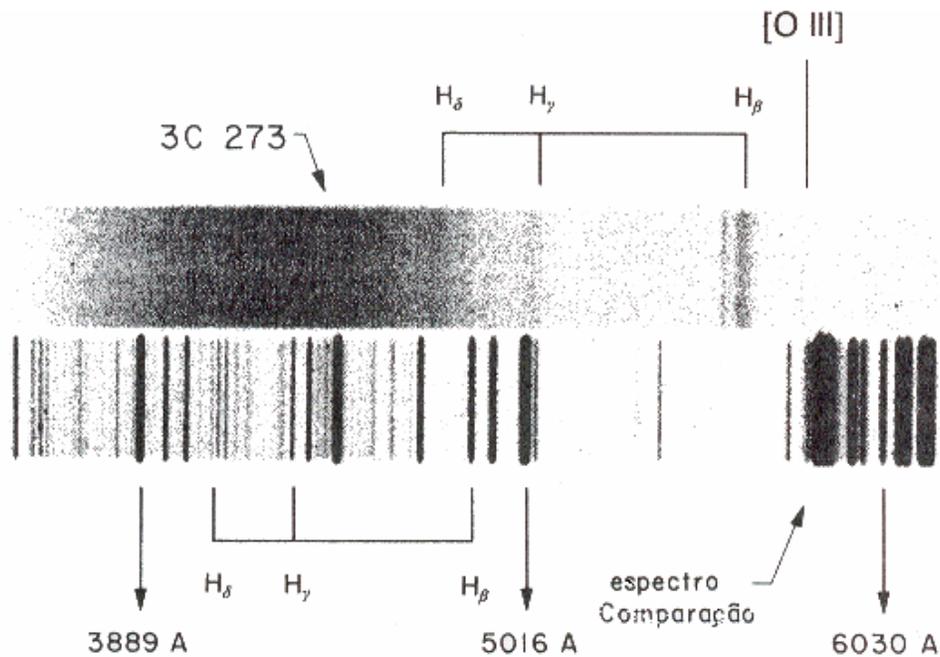


Figura 6. O espectro da galáxias distantes mostra que a emissão dos mesmos elementos químicos presentes na Terra está sistematicamente deslocada para o vermelho. Este é o fenômeno conhecido como redshift e que é devido à expansão do Universo.

Os mesmos elementos químicos presentes na Terra, e nas estrelas próximas, também podem ser identificados nas galáxias mais distantes. Mas, ao contrário do que ocorre nos laboratórios na Terra o comprimento de onda da luz que recebemos das galáxias se encontra deslocada para o vermelho. Todas as linhas se

encontram deslocadas sistematicamente da mesma quantidade, conhecida como o redshift (z). Inicialmente os astrônomos imaginaram que isto fôsse devido a uma velocidade de afastamento das galáxias segundo a relação do efeito Doppler, $V=cz$. Hoje sabemos, graças à teoria da relatividade geral, que este deslocamento se deve de fato à expansão do Universo e quanto mais distante a galáxia observada tanto maior será a velocidade de expansão que medimos.

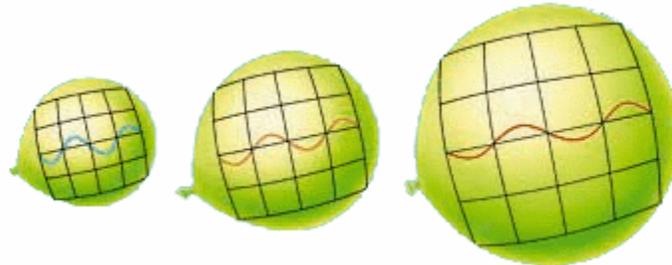


Figura 7. O motivo deste deslocamento para o vermelho se deve à expansão do Universo que modifica sistematicamente o comprimento de onda da radiação enquanto esta se movimenta pelo espaço.

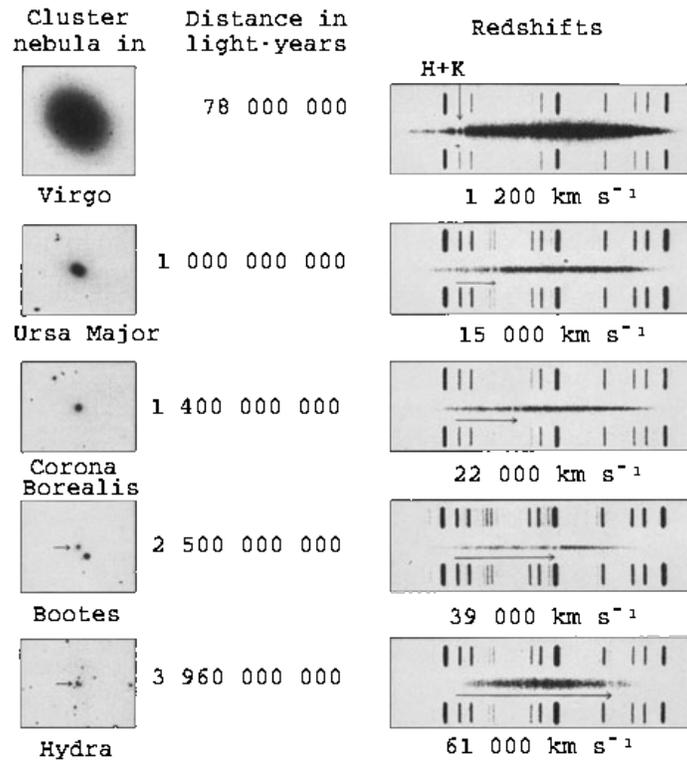


Figura 8. A lei de Hubble indica que a velocidade de afastamento das galáxias aumenta proporcionalmente às suas distâncias.

Este é exatamente o fenômeno de expansão do Universo que foi descoberto em meados dos anos de 1920 por Edwin Hubble. Devido a esta expansão do Universo as galáxias mais distantes parecem se movimentar com velocidades crescentes com a distância que nos separam delas. Podemos exprimir este fato através da lei de Hubble,

$$\text{Velocidade} = H_0 \times \text{distância.}$$

Como a velocidade é expressa em km/s e as distâncias em mpc resulta que a constante de Hubble (H_0) é dada em km/s/mpc.

Uma consequência muito importante desta expansão cosmológica é que o Universo está evoluindo e deve ter se expandido subitamente no passado distante. Esta expansão inicial é conhecida como o Big-Bang. No passado distante as galáxias estavam muito mais próximas entre si do que hoje.

Quando ocorreu esta expansão inicial?

Podemos inferir esta informação a partir de uma experiência bastante simples e corriqueira. Imagine a situação de um trem que parte da cidade de São Paulo em direção à cidade do Rio de Janeiro a uma distância $d = 400$ km. Supondo que a velocidade do trem, $V = 80$ km/h, se mantém constante podemos concluir que o tempo de viagem deve ser igual a cerca de 5 h. Basicamente o mesmo fenômeno ocorre com as galáxias que acompanham a expansão do Universo. Se considerarmos uma galáxia a uma distância de 10 mpc podemos constatar, segundo a lei de Hubble, que a sua velocidade de afastamento é cerca de 7 000 km/s. Portanto, tal qual ocorre com a experiência do trem, podemos concluir que a expansão inicial ocorreu a cerca de 10 bilhões no passado.

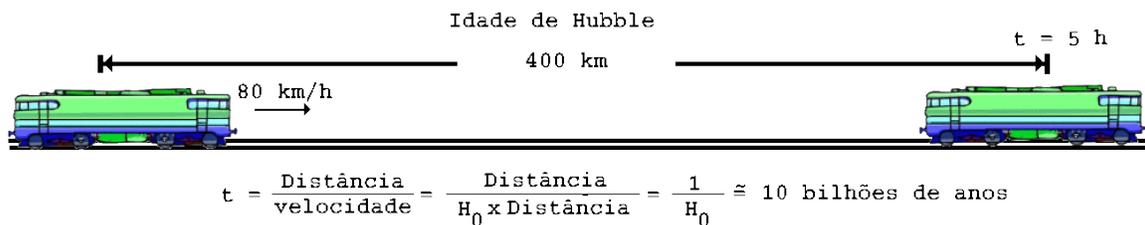


Figura 9. O Big-Bang ocorreu a cerca de 10 bilhões de anos e desde então o Universo se encontra em expansão.

Segundo a teoria da relatividade geral a distribuição de massa, ou mais genericamente de matéria e energia, é capaz de distorcer as propriedades do espaço. Este é exatamente o efeito que ocorre no Sol quando observamos uma estrela cuja imagem passa próxima à borda do disco solar. Este efeito foi previsto por Einstein em 1911 e constatado através de observações diretas em 1919. A explicação é que a massa do Sol perturba a geometria do espaço nas suas proximidades. Longe do Sol a geometria do espaço é euclidiana e a luz percorre uma linha reta, no sentido em que compreendemos esta expressão na nossa experiência diária. Próximo ao Sol a geometria do espaço se modifica e deixamos de ter um espaço euclidiano. Nesta situação a luz percorre o menor caminho entre dois pontos, conhecido como uma geodésia. Mas, ao contrário do que ocorre em um espaço euclidiano, esta geodésia não é uma reta no sentido euclidiano e a luz se curva ao passar próxima ao Sol modificando ligeiramente a posição aparente das estrelas de fundo.

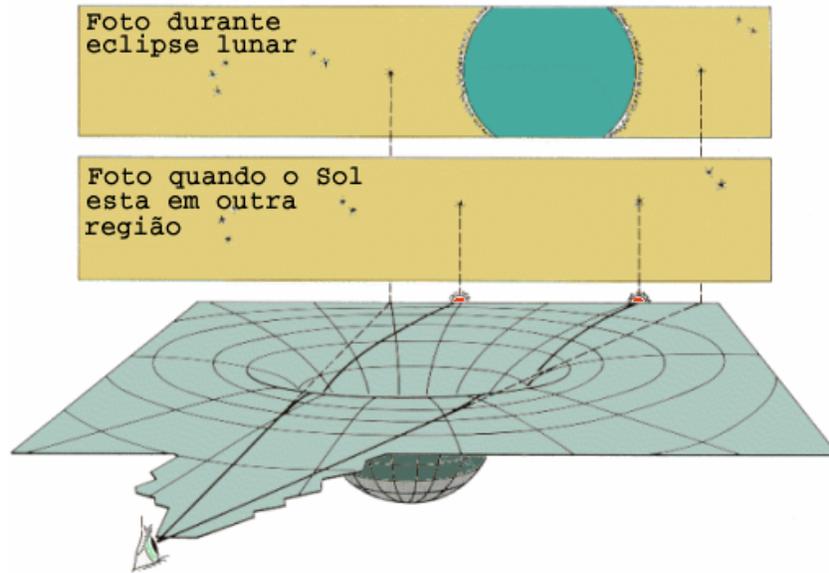


Figura 10: A teoria da relatividade geral prevê que a distribuição de massa é capaz de provocar um efeito de curvatura do espaço. Este efeito é observado no caso do Sol e também deve ocorrer no Universo em escalas cosmológicas.

Basicamente o mesmo efeito ocorre no Universo em virtude da distribuição de matéria-energia em escalas cosmológicas. Medir precisamente este efeito de curvatura do espaço é um dos grandes objetivos da cosmologia atual. Nos próximos anos, existem vários experimentos a bordo de satélites que almejam dar uma resposta definitiva sobre as propriedades da geometria do Universo em grandes escalas.

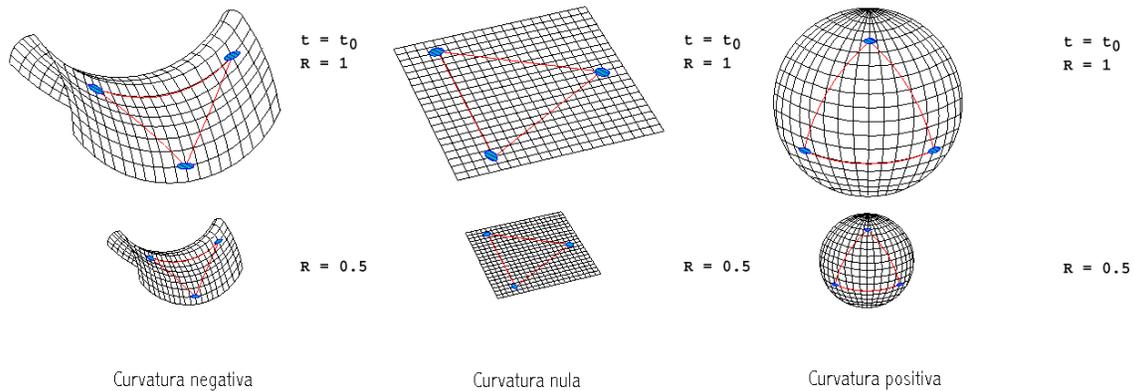


Figura 11: Pela teoria da relatividade geral existem três possíveis modelos para descrever o nosso Universo, todos eles em expansão.

Pela teoria da relatividade geral existem três possíveis modelos para descrever o Universo: o modelo aberto, ou de curvatura negativa, o modelo plano, ou de curvatura nula, e o modelo fechado, ou de curvatura positiva. As conseqüências previstas para estes três modelos são distintas e espera-se que nos próximos anos venhamos a saber com segurança qual destes modelos é o mais adequado.

Em qualquer dos casos é fora de dúvida que o modelo que melhor descreve o Universo deve ser um modelo em expansão. O raio de curvatura do Universo pode ser utilizado para descrever o seu fator de expansão (R). Por convenção o valor atual do fator de escala é $R=1$. Mas, no passado este fator de escala era bem diferente. Imagine uma época em que este fator de escala era $R=0,5$. Nesta fase as distâncias entre os objetos era duas vezes menor do que hoje e as densidades eram 8 vezes maiores. Se imaginarmos uma viagem retrocedendo cada vez mais no tempo as separações, densidades e temperaturas eram muito superiores ao que observamos atualmente. O Universo passou por diferentes fases evolutivas desde o evento do Big-Bang. Se imaginarmos que as galáxias estão fixas em um sistema de coordenadas cosmológico a alteração do fator de escala modifica gradualmente as distâncias desta grade de coordenadas. Portanto a expansão do espaço modifica as separações nesta grade coordenada e altera as distâncias das galáxias. Esta é a interpretação da expansão de Hubble segundo a teoria da relatividade geral. Portanto, as velocidades de expansão detectadas na lei de Hubble são um reflexo da expansão do espaço prevista pela teoria da relatividade geral. As galáxias permanecem fixas em seus pontos na grade coordenada, mas o espaçamento da grade se modifica com as variações do parâmetro de escala.

Leitura adicional:

- Introdução à Cosmologia, 2004, Ronaldo E. de Souza, (Ed.: EDUSP). Curso de introdução à Cosmologia para os estudantes de graduação das áreas de Física e Ciências Exatas.
- Descobrimos o Universo, 2004, Sueli M. Viegas & Fabíola de Oliveira, (Ed.: Edusp). Livro de divulgação contendo artigos de vários autores sobre a área de Astronomia e Cosmologia.
- <http://www.astro.iag.usp.br/~ronaldo/intrcosm> Site contendo material de apoio, textos, uma visão histórica da Cosmologia, glossário dos termos astronômicos mais importantes e links para outros sites de interesse da área.