

# Aula 26: Expansão do Universo

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



Ilustração de como seria o Universo logo após o *Big Bang*, depois que as primeiras estrelas começaram a se formar. Crédito: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC).  
Fonte: <http://news.discovery.com/space/big-bang-probe.html>.

## Introdução

Na aula de hoje iniciamos o último assunto de nossa disciplina: a Cosmologia – o estudo da estrutura em grande escala do Universo e de sua evolução.

Vamos começar explorando o conceito de expansão do Universo, suas evidências e implicações.

Boa aula!



## Objetivos :

- Explicar por que a Lei de Hubble leva à conclusão de que o Universo está em expansão;
- Estabelecer a relação entre a constante de Hubble e a idade do Universo;
- Definir universo observável;
- Explicar o que é o paradoxo de Olbers e qual a sua implicação cosmológica.

## Por que o céu é escuro à noite?

### Lei de Hubble

Na aula 24 aprendemos que Hubble e Humason perceberam que, com exceção de algumas poucas galáxias próximas, a grande maioria das galáxias têm espectros que estão deslocados para maiores comprimentos de onda, ou seja, apresentam *redshifts* ( $z$ ), e que esses *redshifts* são diretamente proporcionais às distâncias ( $d$ ) das galáxias até nós ( $z \propto d$ ).

Interpretando os *redshifts* como devido ao efeito Doppler gerado por um movimento de afastamento das galáxias, Hubble calculou as velocidades de afastamento ( $v = c.z$ ) e estabeleceu a famosa Lei de Hubble:

$$v = H_0 d,$$

onde  $H_0$  é a constante de proporcionalidade entre a velocidade de recessão da galáxia e a sua distância até nós.

### Lei de Hubble:

$$v = H_0 d.$$

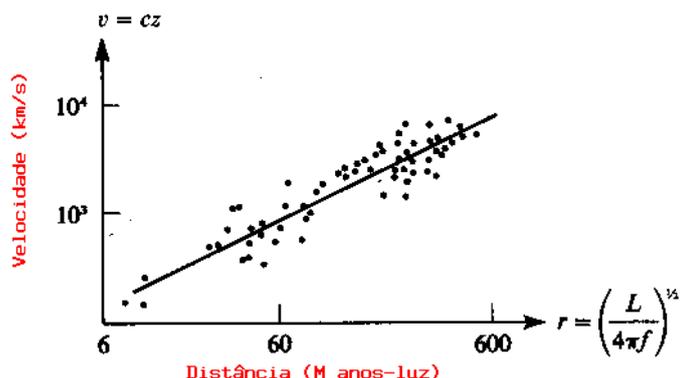


Figura 26.01: Velocidade de recessão das galáxias em função de sua distância à Terra. A linha reta mostra que as velocidades são proporcionais à distância. A declividade da reta dá o valor da constante de proporcionalidade, chamada constante de Hubble ( $H_0$ ).



## Universo em expansão

A Lei de Hubble proporciona uma evidência de que o universo está em expansão. Por quê?

Para entender melhor, vamos usar uma analogia com um bolo de passas que vai ao forno.

### O modelo do bolo de passas

Imaginemos um bolo recheado de passas. Antes de ir ao fogo o bolo tem um tamanho menor e as distâncias entre as passas são menores. Após ir ao forno o bolo dobra de tamanho e as distâncias entre as passas também dobram.

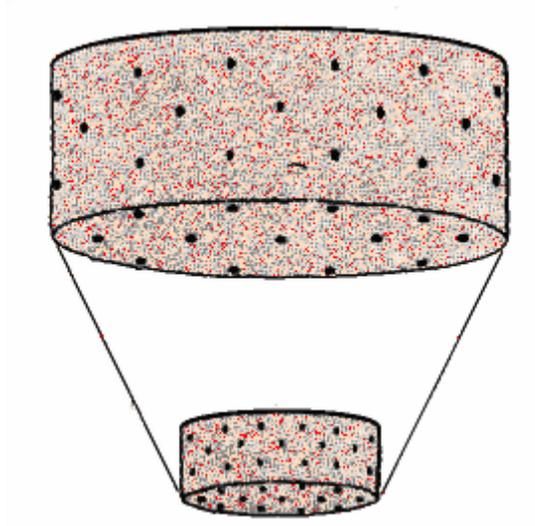


Figura 26.02: Ilustração para o modelo do bolo de passas.

Vamos analisar como variam as distâncias das passas em relação a uma passa de referência durante o aumento do bolo. Consideremos uma passa qualquer como sendo a passa de referência, e outras três passas, que vamos chamar de A, B, e C. Vamos ainda supor que, no instante inicial ( $t_i = 0$ ) essas passas estejam às seguintes distâncias da passa de referência:

- passa A:  $d_i = 1$  cm
- passa B:  $d_i = 3$  cm
- passa C:  $d_i = 4$  cm

Após 1 hora ( $t_f = 1$ h), o bolo dobra de tamanho, e as distâncias entre as passas serão:

- passa A:  $d_f = 2$  cm
- passa B:  $d_f = 6$  cm
- passa C:  $d_f = 8$  cm

Portanto, do "ponto de vista" da passa de referência, as passas A, B e C, se afastaram com velocidades  $v = (d_f - d_i) / (t_f - t_i)$ , que resultam em:

- passa A:  $v(t_f) = 1$  cm/h
- passa B:  $v(t_f) = 3$  cm/h
- passa C:  $v(t_f) = 4$  cm/h

#### Modelo do bolo de passas:

Em um bolo de passas em crescimento, cada passa "vê" as outras se afastarem com velocidades proporcionais às suas distâncias. O aumento da velocidade proporcionalmente à distância é uma característica do fenômeno de expansão.



### Universo em expansão:

As distâncias entre as galáxias estão aumentando com o passar do tempo.

A expansão acontece em todo o lugar, não tem um centro. Qualquer observador, em qualquer lugar do Universo, vê o mesmo efeito da expansão que nós vemos.

### Redshift cosmológico:

O redshift das galáxias é causado pelo aumento do espaço entre as galáxias e não pela velocidade das galáxias no espaço.

Se nesse momento fizermos um gráfico da velocidade de afastamento das outras passas em função de suas distâncias, veremos que as velocidades são diretamente proporcionais à distância, acharemos uma reta com equação  $v = \text{constante} \cdot d$ , onde a constante é a **declividade** da reta, que vale:

declividade =  $(1\text{cm/h})/2\text{cm} = (3\text{cm/h})/6\text{cm} = (4\text{cm/h})/8\text{cm} = 0,5(\text{cm/h})/\text{cm} = 0,5/\text{h}$ , que é a "constante de afastamento" das passas.

Ou seja, o modelo nos mostra, numa expansão, que a variação da velocidade de afastamento é proporcional à distância. Logo, se vemos as galáxias se afastando de nós com velocidades proporcionais à sua distância, a explicação mais simples para isso é que o Universo está em expansão.

É importante notar que, no nosso modelo, a passa de referência pode ser qualquer uma; todas as passas "vêm" as outras se afastando com velocidades proporcionais às suas distâncias.

Da mesma forma, o afastamento das galáxias que observamos é percebido da mesma maneira de quaisquer outras galáxias. Nós não estamos em uma posição privilegiada. O Universo não tem uma posição privilegiada, **não tem um centro, e não tem bordas**. Qualquer observador em qualquer posição no Universo observa o mesmo efeito da expansão.

Outra coisa que podemos notar no bolo de passas, é que, durante seu crescimento, as passas não se movem dentro do bolo, o meio entre elas que aumenta de tamanho. Da mesma maneira, o afastamento das galáxias não se deve a um movimento delas próprias, mas sim se deve à expansão do espaço entre elas. A **expansão do Universo é uma expansão do próprio espaço**, que carrega as galáxias com ele (veja [aqui](#) uma animação sobre a expansão).

A expansão do espaço não afeta o tamanho dos objetos que estão nele: galáxias, estrelas, planetas, etc, mantêm o seu tamanho inalterado, porque a gravidade que os mantém é muito mais forte do que a expansão. No entanto, a expansão afeta a luz que viaja imensas distâncias através do espaço. Quando uma onda de luz viaja no espaço, a **expansão estica a onda**, aumentando seu comprimento de onda e causando, assim, o **redshift** observado. Esse redshift não é, realmente, causado por efeito Doppler, pois o efeito Doppler, por definição, aparece quando existe movimento relativo entre fonte e observador, e as galáxias não estão, na realidade, se movendo umas em relação às outras. Por isso uma maneira mais apropriada de chamar o redshift causado pela expansão do universo é de **redshift cosmológico**. Mas a equação de efeito Doppler se aplica mesmo assim, de forma que, na prática, tratamos o redshift cosmológico como efeito Doppler.

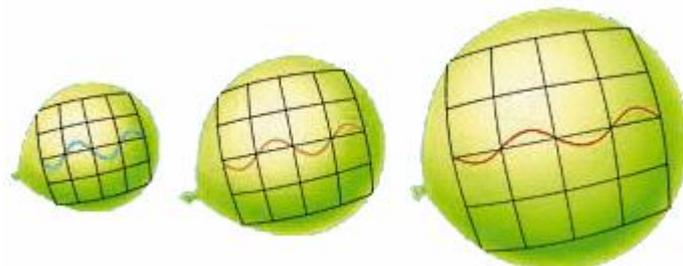


Figura 26.03: A expansão do espaço aumenta o comprimento de onda da luz que se propaga nele. Fonte:

<http://www.astro.iag.usp.br/~ronaldo/intrcosm/Glossario/Redshift.html>.



## A idade do Universo

Se o Universo está expandindo, então ele era menor no passado. Se pudéssemos voltar atrás no tempo, veríamos as galáxias cada vez mais próximas umas das outras à medida que fossemos retrocedendo no tempo, e podemos imaginar que chegaríamos a um instante em que tudo o que compõe nosso Universo hoje estaria reunido em um ponto infinitamente denso e infinitamente quente, que começou a expandir.

Nós chamamos de *Big Bang* ao evento inicial que deu origem ao Universo, iniciando sua expansão. Esse nome foi proposto em 1950 por Fred Hoyle, que era adepto do modelo estacionário para o universo, e pretendia com esse nome desmoralizar o modelo evolucionário. No entanto, o nome pegou, e atualmente é o nome usado tanto popular quanto tecnicamente para designar as teorias que tratam da origem e evolução do Universo.

Se o Universo teve um início, podemos calcular sua idade. Supondo que a velocidade da expansão foi constante desde o *Big Bang* até hoje, podemos estimar a idade do Universo, calculando o tempo que as galáxias distantes, movendo-se à mesma velocidade de hoje, levaram para chegar aonde estão. Vamos chamar esse tempo de  $t_0$ .

Para uma galáxia cuja velocidade é  $v$ , e cuja distância é  $d$ , pela definição de velocidade, o tempo  $t_0$  será

$$t_0 = d/v.$$

Por outro lado, a lei de Hubble relaciona a distância com a velocidade pela equação:

$$v = H_0 d.$$

Logo, podemos escrever:

$$t_0 = d/(H_0 d),$$

ou

$$t_0 = 1/H_0.$$

Vemos assim que a constante  $H_0$  é igual ao inverso da idade do Universo para velocidade de expansão constante.

O tempo  $t_0$  é também chamado de tempo de Hubble.

Para uma constante de Hubble com valor  $H_0 = 71$  km/s/Mpc ( $71 \text{ km/s} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ), a idade correspondente para o Universo é:

$$t_0 = 1/(71 \text{ km/s} \cdot \text{Mpc}^{-1}).$$

Como  $1 \text{ Mpc} = 3,09 \cdot 10^{19} \text{ km}$  e  $1 \text{ ano} = 3,15 \cdot 10^7 \text{ s}$ ,

logo

$$\begin{aligned} t_0 &= 1/H_0 = 1/(71 \text{ km/s} \cdot \text{Mpc}^{-1}) = \\ &= (1 \text{ s} \times 3,09 \cdot 10^{19} \text{ km}) / (71 \text{ km} \times 3,15 \cdot 10^7 \text{ s/ano}) = \\ &= (1 \text{ ano} \times 3,09 \cdot 10^{19}) / (71 \text{ km} \times 3,15 \cdot 10^7) = 1,38 \cdot 10^{12} \text{ anos.} \end{aligned}$$

Temos, portanto  $t_0 = 1/H_0 = 13,8$  bilhões de anos.

### Big Bang:

O início do Universo que conhecemos é o início da expansão. Esse evento é chamado Big bang.

### Tempo de Hubble

É a idade do Universo correspondente a uma expansão com velocidade constante, sendo igual ao inverso da constante de Hubble.

$$t_0 = 1/H_0.$$

Para  $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$ , a idade do Universo é 13,8 bilhões de anos.



#### Universo observável:

A idade do Universo, aliada à velocidade da luz, limitam a porção do Universo que podemos ver.

O raio do Universo observável é igual à distância que a luz percorre em um intervalo de tempo idêntico à idade do Universo.

Levando-se em conta uma possível desaceleração causada pela atração gravitacional, a idade seria um pouco menor do que esse valor, pois se a expansão foi mais rápida no início, o Universo teria chegado ao estado atual em menos tempo. Se, pelo contrário, o Universo estiver acelerando, ele estava se expandindo mais lentamente no passado e, portanto, levou mais tempo para chegar ao estado atual. Nesse caso sua idade é maior do que  $H_0^{-1}$ .

### O Universo observável

A idade do Universo limita a distância que podemos ver. Como a luz tem uma velocidade finita, o que significa que ela leva um tempo para ir de um lugar a outro, vemos tudo no passado, e **quanto maior a distância a que olhamos, mais remoto o passado que vemos**. Se olharmos uma galáxia que está a 10 milhões de anos-luz de distância, nós a vemos como era há 10 milhões de anos. Se observamos um aglomerado de galáxias distante 1 bilhão de anos-luz, nós o vemos como era 1 bilhão de anos atrás.

A velocidade da luz, aliada à idade finita do Universo, limita a porção do Universo que podemos ver, pois nós não podemos ver mais longe do que a distância que a luz pode percorrer no tempo igual à idade do universo. Se o Universo tem 13,7 bilhões de anos de idade, então a luz de galáxias mais distantes do que 13,7 bilhões de anos-luz não teve tempo de nos alcançar. Nós podemos dizer que **o Universo observável** se estende por um raio de 13,7 bilhões de anos-luz da Terra.

### O enigma da escuridão da noite como evidência do Big Bang

O *Big Bang* terá realmente acontecido? O universo não poderia ser estático e infinito, invariável no espaço quanto no tempo?

**Johannes Kepler** (1571-1630) foi, talvez, a primeira pessoa a perceber que, se o Universo fosse infinito e invariável, não poderia ser escuro à noite. O problema da escuridão da noite ficou conhecido como *Paradoxo de Olbers*, por ter ficado mais conhecido ao ser divulgado pelo médico e astrônomo Heinrich Olbers, em 1826.

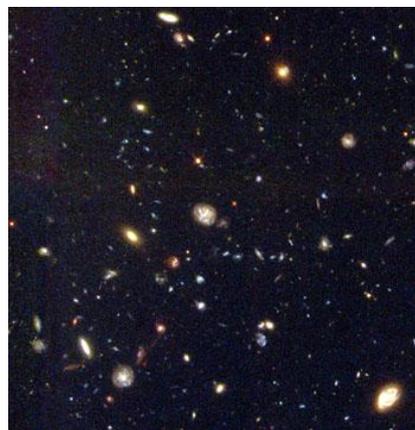


Figura 26.04: Imagem obtida pelo Telescópio Espacial Hubble mantendo a câmara aberta por 10 dias em uma região aparentemente sem estrelas do céu.



O paradoxo é o seguinte: suponha que as estrelas estejam distribuídas de maneira uniforme em um espaço infinito, como visto na figura 26.05. Para um observador em qualquer lugar, o volume de uma esfera com centro nele aumentará com o quadrado do raio dessa esfera, e como as estrelas estão distribuídas uniformemente no espaço, o número de estrelas que ele vê cresce com o quadrado da distância. Como resultado, sua linha de visada sempre interceptará uma estrela seja lá qual for a direção que ele olhe.

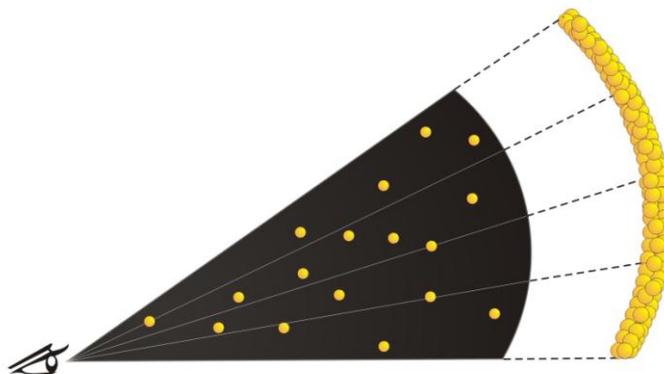


Figura 26.05: Em um universo infinito e com uma distribuição homogênea de estrelas, para qualquer direção que se olhe, a linha de visada acabará interceptando uma estrela, e o céu parecerá totalmente coberto delas.

Uma analogia simples de fazer é com uma floresta de árvores. Se um observador, que está no meio da floresta, vê, ao seu redor, árvores bem espaçadas entre si, mas quanto mais longe ele olha, mais diminui o espaçamento entre as árvores de forma que no limite de sua linha de visada as árvores estão todas juntas e o mesmo não consegue ver nada além delas, como pode ser visto na figura 06.26.



Figura 26.06: Visão de um observador, ao seu redor as árvores estão bem espaçadas, mas ao longe as árvores estão próximas umas das outras.



### Escuridão do céu noturno:

A questão de por que o céu é escuro à noite é conhecida como o paradoxo de Olbers, e se refere ao fato de que, em um Universo estático, infinito no espaço e no tempo, veríamos o céu tão brilhante quanto à superfície de uma estrela. A escuridão do céu é uma prova de que o Universo teve uma origem.

Como o brilho das estrelas cai com o quadrado da distância enquanto o número de estrelas aumenta com o quadrado da distância, o céu em média deveria ser tão brilhante quanto a superfície de uma estrela média, pois estaria completamente coberto delas. Mas obviamente não é isso que vemos. Portanto, o raciocínio está errado. Por quê?

Algumas propostas de solução:

1. A poeira interestelar absorve a luz das estrelas.

Foi a solução proposta por Olbers, mas tem um problema. Com o passar do tempo, à medida que fosse absorvendo radiação, a poeira entraria em equilíbrio térmico com as estrelas, e passaria a brilhar tanto quanto elas. Não ajuda na solução.

2. A expansão do Universo degrada a energia, de forma que a luz de objetos muito distantes chega muito desviada para o vermelho e, portanto muito fraca.

O desvio para o vermelho ajuda na solução, mas os cálculos mostram que a degradação da energia pela expansão do universo não é suficiente para resolver o paradoxo.

3. O Universo não existiu por todo o sempre.

Essa é a solução atualmente aceita para o paradoxo. Como o Universo tem uma idade finita e a luz tem uma velocidade finita, a luz das estrelas mais distantes ainda não teve tempo de chegar até nós. Portanto, o universo que enxergamos é limitado no espaço, por ser finito no tempo. A escuridão da noite é uma prova de que o Universo teve um início.

## Resumo

Observações telescópicas das galáxias distantes indicam que o Universo está em expansão, isto é, as distâncias entre as galáxias estão aumentando com o passar do tempo.

A observação de que as galáxias têm velocidades de recessão proporcionais à sua distância Lei de Hubble - é uma evidência de que o Universo está em expansão. Essa expansão é do próprio espaço, e não tem nenhum centro.

Se o Universo está se expandindo ele era menor no passado e deve ter tido uma origem a partir de um estado infinitamente quente e denso. O evento que deu origem ao Universo é chamado *Big Bang*.

Extrapolando o movimento de recessão retroativamente no tempo, pode-se estimar a idade do Universo. Para uma velocidade de expansão constante, a idade do Universo é chamada tempo de Hubble, e definida como  $t_0 = 1/H_0$ ,  $H_0$  a constante de Hubble, que mede a taxa atual de expansão do Universo. Para  $H_0 = 71$  km/s/Mpc a idade do Universo é de 13,7 bilhões de anos.

A idade do Universo, aliada à velocidade da luz, limitam a porção do Universo que podemos ver. O raio do Universo observável é igual à distância que a luz percorre em um tempo igual à idade do Universo.

A questão de porque o céu é escuro à noite é conhecida como paradoxo de Olbers, e se refere ao fato de que em um Universo estático, infinito no espaço e no tempo, veríamos o céu tão brilhante quanto à superfície de uma estrela. A escuridão do céu noturno é uma prova de que o Universo teve uma origem.



## Questões de fixação

Após a leitura e compreensão dos assuntos tratados nessa aula responda as questões de fixação a seguir, discuta suas respostas com seus colegas no fórum de discussões.

Bom trabalho!

1. Como se sabe que o Universo está expandindo?
2. Se todas as galáxias estão se afastando de nós, significa que estamos no centro do Universo?
3. Se o Universo está em expansão, isso significa que o tamanho da Via Láctea está aumentando?
4. O que é o *Big Bang*?
5. Qual a relação entre a constante de Hubble e a idade do Universo?
6. O que é o Universo observável e qual o seu tamanho?
7. O que é o paradoxo de Olbers?
8. Os astrônomos não conseguem medir com precisão o valor da constante de Hubble. Suponha que novas medidas indiquem que o valor de  $H_0$  seja 80 km/s/Mpc em vez de 71 km/s/Mpc.
  - a) Esse valor maior para  $H_0$  implica um valor maior ou menor para a idade do Universo?
  - b) Calcule a idade do Universo correspondente, em anos.
  - c) Qual seria, então, o tamanho do Universo observável, em anos-luz?

Até a próxima aula!

