

Ronaldo Vieira Lobato

## **Tópicos de Cosmologia**

Brasil

2016

Content is available under [CC BY-NC-SA 3.0](#) unless otherwise noted.

Copyright ©2016–2016 Ronaldo Vieira Lobato.

Permission is granted to copy and distribute this entire document in any medium, provided this notice is preserved.

É permitida a cópia e distribuição de todo este documento em qualquer meio, desde que esta nota seja preservada.



# Sumário

<b>1</b>	<b>PLANO DE AULA</b>	<b>5</b>
<b>1.1</b>	<b>Método de Avaliação</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Linha do tempo do Universo</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>Composição do Universo</b>	<b>9</b>
<b>2.3</b>	<b>Observações fundamentais:</b>	<b>9</b>
<b>2.4</b>	<b>Observações fundamentais</b>	<b>9</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Uma abordagem matemática da expansão homogênea e isotrópica do Universo</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>NEWTON EINSTEIN</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>QCD: QUARKS, GLÚONS</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>MODELOS DE QUARKS</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>PLASMAS DE QUARKS E GLÚONS</b>	<b>19</b>
<b>6.1</b>	<b>Transição de fase hádron-quark</b>	<b>19</b>



# 1 Plano de aula

Primeira parte: 9 aulas:

Introdução

Observações Fundamentais

Newton  $\times$  Einstein

Dinâmica Cósmica

Universos com um componente (radiação, matéria bariônica, matéria escura,...)

Universos com mais de um componente.

## 1.1 Método de Avaliação

3 listas, 1 a cada 2 capítulos, 1 ponto para cada lista (NL)

1 seminário (matéria+curvatura, matéria+ $\Lambda$ , matéria+curvatura+ $\Lambda$ , radiação+matéria),

7 pontos, (NS)

$NL+NS=A1$

1 prova (26/09)=A2

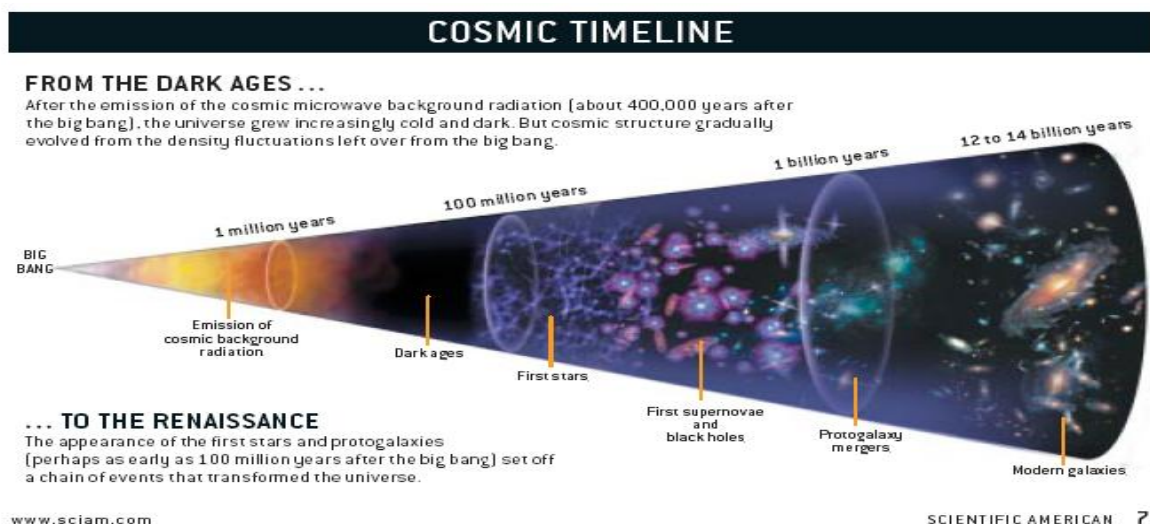
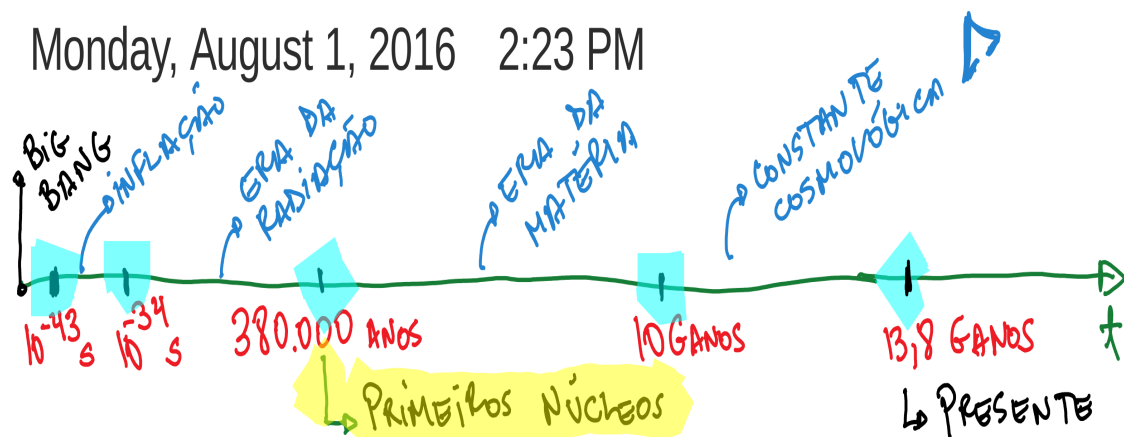
$NB=(A1+A2)/2$

Livros Base, Introduction to Cosmology, Barbara Ryder; capítulo 1 do livro Modern Cosmology, Scott Dodelson.



## 2 Introdução

### 2.1 Linha do tempo do Universo



Por Marcelo Gleiser

“Para teorias da cosmologia moderna, há vários “universos” e uma distinção entre eles é essencial.

Vejam só como uma questão de ortografia esconde muito mais do que apenas escolhas estilísticas. Basta pegar alguns livros de divulgação científica, ou reportagens aqui mesmo na “Folha”, e o leitor se depara com a palavra “universo” ora com letra minúscula,

ora com maiúscula. Existe algo nada sutil aqui, e que diz muito sobre como pensamos sobre o Cosmo.

A posição mais comum, e que considero a pior, é simplesmente adotar “universo” indiscriminadamente. Mas que Universo é esse? Segundo teorias da cosmologia moderna, temos de tomar cuidado com referências ao Cosmo. Há vários “universos” e uma distinção é essencial.

Ancorando a discussão no que temos de mais sólido, nossas observações, sabemos que podemos apenas “enxergar” -isso é, obter informação- de uma parte limitada do Cosmo. Isso, por dois motivos. Primeiro, nada viaja mais rápido do que a luz, o que significa que a informação demora para vir de longe até nós. Segundo, porque o Cosmo tem uma existência finita, começando 13,7 bilhões de anos atrás.

Juntando as duas coisas, vemos que, no máximo, podemos saber sobre objetos que nos enviaram informação (através de luz e outros tipos de radiação eletromagnética) há 13,7 bilhões de anos. E, como estrelas e galáxias só surgiram uns 200 milhões de anos após o “bang” inicial, o limite que temos é em torno de 13,5 bilhões de anos. O que existe além dessa fronteira -chamada de horizonte- nos é inacessível. Falamos, então, do “universo observável”, aquele que podemos medir. Este, prefiro chamar de Universo, já que temos confiança na sua existência e somos parte dela. Ele é tudo o que há no nosso horizonte e, considerando o fato de o Cosmo estar em expansão, está a 42 bilhões de anos-luz de distância. É a fronteira do conhecimento astronômico.

Mas o Universo não termina necessariamente no limite do que podemos ver. Muito provavelmente, se estende além da fronteira do mensurável. Meio como o mar, que se estende além do horizonte que vemos da praia: sabemos que existe mais mar além da linha do horizonte, mesmo se não podemos enxergá-lo da nossa posição. A essa continuação do Cosmo além do visível e que, em princípio, não é tão diferente do que podemos ver dentro do nosso horizonte, chamo de universo. Não merece o “U” pois não sabemos ao certo se está lá e o que existe por lá. Podemos especular que as coisas além do horizonte não são muito diferentes daqui, mais galáxias e estrelas, mas não podemos ter certeza disso. Daí o “u”. Porém, o universo contém o Universo. Temos que continuar. Afinal, hoje se especula que o Universo não é único, mas parte de algo mais vasto, uma entidade que pode conter muitos universos chamada de “multiverso”. Claro, não sabemos se o multiverso existe. Pior, parece ser impossível confirmar sua existência, visto que sua extensão está além do nosso Universo. No máximo, como calcularam alguns colegas, podemos ter informação de colisões de nosso Universo com universos vizinhos, caso tenham ocorrido no passado. (Até agora, nada de muito conclusivo.) Mas saber de um vizinho ou dois não é o mesmo do que saber de um país inteiro. De concreto, temos apenas o nosso Universo, já repleto de mistérios.”

FONTE: escrito por Marcelo Gleiser, professor de física teórica no Dartmouth



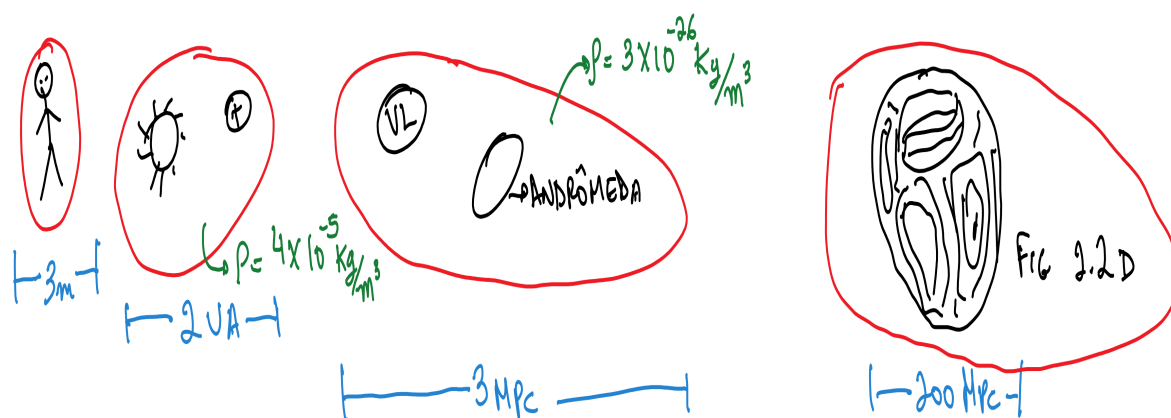
College, em Hanover (EUA), e autor de “Criação Imperfeita”. Artigo publicado na “Folha de São Paulo” (<http://www1.folha.uol.com.br/fsp/cienciasaude/94168-universo-ou-universo.shtml>)

## 2.2 Composição do Universo

## 2.3 Observações fundamentais:

Em grandes escalas o Universo é homogêneo e isotrópico, dizer que o Universo é isotrópico significa dizer que não há direções preferenciais no universo; ele parece o mesmo não importando direção em que se aponta o telescópio. Dizer que o Universo é homogêneo, significa dizer que não há localização preferenciais no Universo; ele parece o mesmo não importando onde está o telescópio. Note que é importante salientar que o Universo é homogêneo e isotrópico em grandes escalas ( $\geq 100$  Mpc) (princípio cosmológico)(1 Mpc=3.26 anos-luz= $3.086 \times 10^{16}$  metros).

A isotropia do Universo não é óbvia. De fato, em pequenas escalas o Universo é altamente anisotrópico. Exemplos:

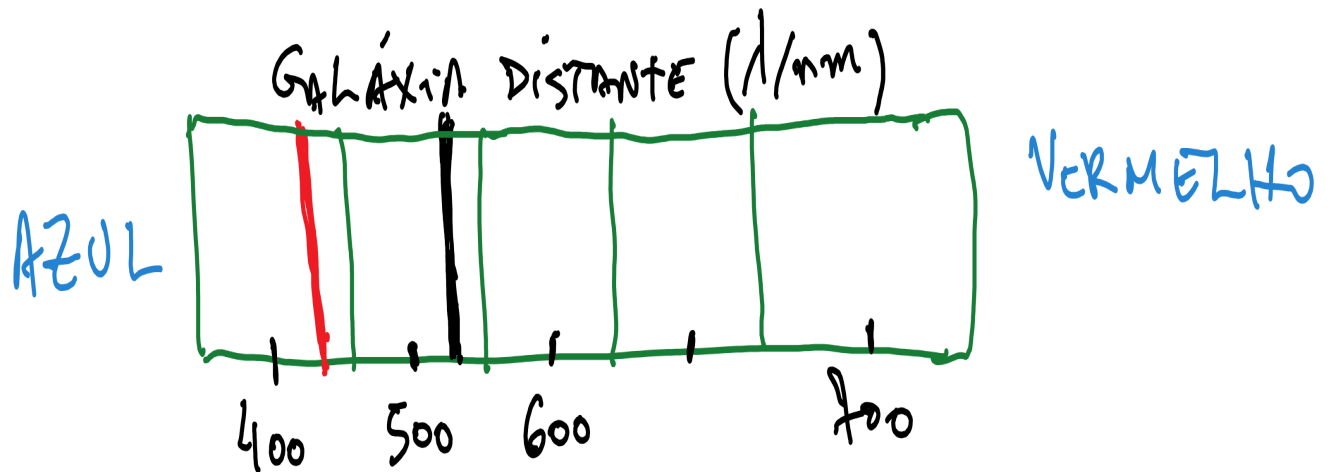


UA → Unidade astronômica = 150 milhões de quilômetros, ou 93 milhas.

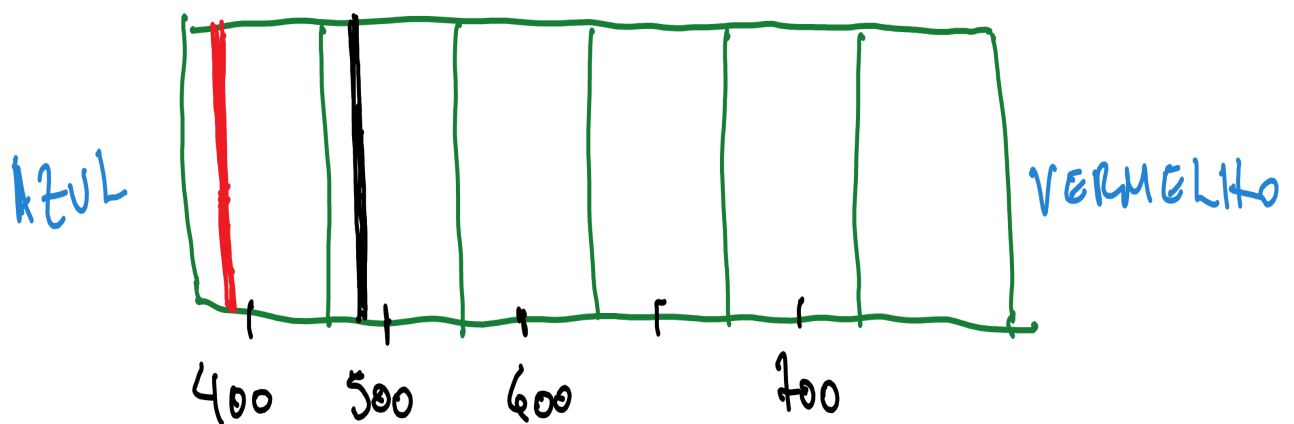
A densidade média do Universo  $\rho = 3 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$

## 2.4 Observações fundamentais

Galáxias mostram um redshift proporcional a sua distância. Suponha que consideremos uma linha de absorção particular cujo comprimento de onda medido num laboratório na terra é  $\lambda_e$ . O comprimento de onda que mediremos para a mesma linha de absorção no espectro de uma galáxia distante,  $\lambda_o$ , não será, geralmente, o mesmo. As linhas no espectro de emissão correspondem a elementos específicos. Uma vez que temos esses elementos na



Terra, podemos comparar seu espectro de emissão quando em repouso. Dizemos que a



galáxia tem um redshift dado por

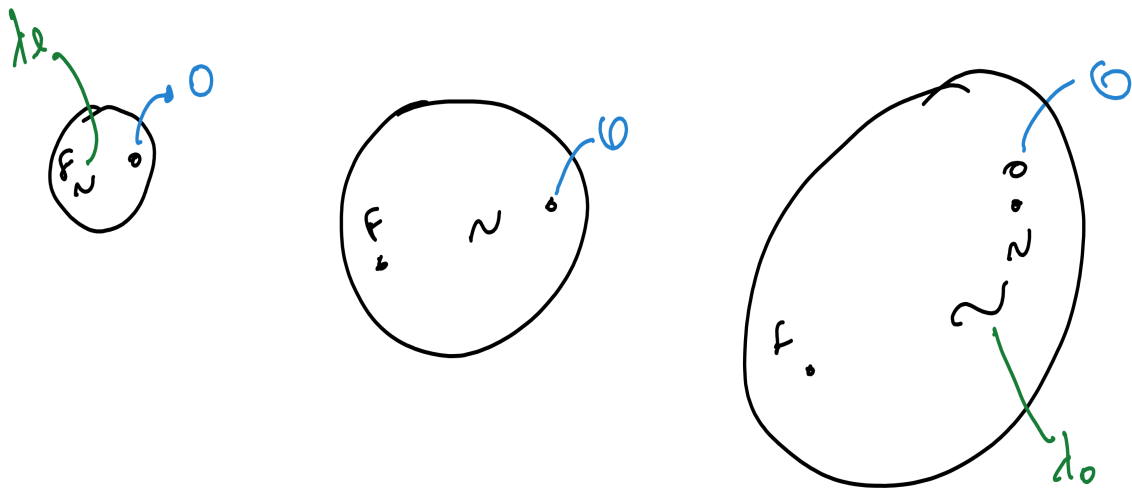
$$z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e}; \quad (2.1)$$

quando  $z < 0$ , esta quantidade é chamada de blueshift. No entanto, para a vasta maioria das galáxias,  $z > 0$ . Abaixo uma ilustração conceitual da grandeza redshift. A partir de um gráfico do redshift  $\times$  distância ( $r$ ) de galáxias, Hubble encontrou a famosa relação hoje conhecida como lei de Hubble,

$$z_0 = \frac{H_0 r}{c}, \quad (2.2)$$

sendo  $H_0$  uma constante hoje conhecida como constante de Hubble.

Hubble interpretou o redshift observado das galáxias, como sendo o efeito doppler devido à sua velocidade de recessão. Uma vez que os valores de  $z$  eram pequenos em sua análise



( $z < 0.004$ ), Hubble pôde usar a relação clássica não-relativística do efeito Doppler  $z \sim v/c$ , sendo  $v$  a velocidade de recessão da fonte. Com isso,

$$v = H_0 r, \quad (2.3)$$

sendo  $H_0 \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$ .

#### 2.4.1 Uma abordagem matemática da expansão homogênea e isotrópica do Universo

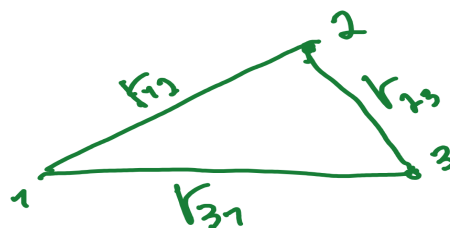
Para entender-se num nível matemático o que significa a expansão homogênea e isotrópica do Universo, considere três galáxia na posição  $\vec{r}_1$ ,  $\vec{r}_2$  e  $\vec{r}_3$ , tal que:

$$r_{12} = |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|, \quad (2.4)$$

$$r_{23} = |\vec{r}_2 - \vec{r}_3|, \quad (2.5)$$

$$r_{31} = |\vec{r}_3 - \vec{r}_1|, \quad (2.6)$$

Em um Universo homogêneo e isotrópico, a forma do triângulo deve ser preservada



conforme o Universo expande e as galáxias se afastarem uma das outras. Isso requer uma

lei de expansão da forma:

$$r_{12}(t) = a(t)r_{12}(t_0), \quad (2.7)$$

$$r_{23}(t) = a(t)r_{23}(t_0), \quad (2.8)$$

$$r_{31}(t) = a(t)r_{31}(t_0). \quad (2.9)$$

Sendo  $a(t)$  um fator de escala, igual a 1 no presente  $t = t_0$  e totalmente independente de localização ou direção.  $a(t)$  nos diz como a expansão do Universo depende do tempo.

Em qualquer tempo  $t$ , um observador na galáxia 1 verá as outras galáxias se afastando com velocidades,

$$v_{12}(t) = \frac{dr_{12}(t)}{dt} = \dot{a}(t)r_{12}(t_0) = \frac{\dot{a}}{a}r_{12}(t), \quad (2.10)$$

$$v_{23}(t) = \frac{dr_{23}(t)}{dt} = \dot{a}(t)r_{23}(t_0) = \frac{\dot{a}}{a}r_{23}(t), \quad (2.11)$$

$$v_{31}(t) = \frac{dr_{31}(t)}{dt} = \dot{a}(t)r_{31}(t_0) = \frac{\dot{a}}{a}r_{31}(t). \quad (2.12)$$

Pode-se verificar que um observador na galáxia 2 ou 3 encontrará a mesma relação linear entre velocidade de recessão e distância das outras respectivas galáxias, com  $\dot{a}/a$  fazendo o papel da constante (ou parâmetro) de Hubble. Uma vez que esse argumento pode ser aplicado a qualquer trio de galáxias, o Universo como um todo obedece à relação  $v = (\dot{a}/a)r = Hr$ .

Se as galáxias estão atualmente se afastando umas das outras, elas estavam mais perto no passado.

Considere um par de galáxias atualmente separados por uma distância  $r$ , com velocidade  $v = H_0 r$ , uma com relação à outra. Se não há forças agindo para acelerar ou desacelerar seu movimento relativo, então  $v = \text{cte}$  e o tempo passado desde que as galáxias estiveram em contato é  $t_0 = \frac{r}{v} = r/H_0 r = H_0^{-1}$ , referido como tempo de Hubble, sendo que para  $H_0 \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$ , o tempo de Hubble é,

$$H_0^{-1} = t_H \approx 14 \text{ Gyr} \quad (2.13)$$

## 3 Newton Einstein

Quando nos referimos à gravidade como uma força, estamos implicitamente adotando um ponto de vista newtoniano. Na prática, as duas formas usuais de se olhar para a gravidade, são o ponto de vista newtoniano ou clássico e o ponto de vista einsteiniano ou relativístico. Na visão de Newton, a gravidade é uma força que causa a aceleração de corpos massivos. Em contraste, na visão de Einstein a gravidade é uma manifestação da curvatura do espaço-tempo



## 4 QCD: quarks, glúons





## 5 Modelos de quarks



## 6 Plasmas de quarks e glúons

### 6.1 Transição de fase hádron-quark