

Cosmologia

O que estuda?

O Big-Bang

Evidências que se compatibilizam com o Cenário do Big-Bang:

1a - Lei de Hubble e a idade do Universo

2a - Paradoxo de Olbers

3a - Radiação de Fundo

Modelos Cosmológicos

Evolução do Universo – evolução térmica

Eras: Planck, Inflação, Bariogênese, Elementos leves, pesados, etc...

Destino do Universo

Fronteira das Pesquisas

Vimos até aqui **aspectos observacionais** que ajudaram a construir modelos físicos que explicam, total ou parcialmente, as observações em vários temas abordados no curso.

Este foi o “**traçado do curso**” desde o Sistema Solar até Galáxias e Aglomerados de Galáxias.

Nesta aula veremos muito brevemente alguns aspectos relevantes da Cosmologia que invertem em certo sentido a lógica desenvolvida no curso até aqui....Veremos aspectos de uma **teoria** de evolução do Universo que explica boa parte das observações que temos hoje.

Veremos as linhas gerais que envolvem uma **impressionante lógica e síntese de processos físicos** que devem ter ocorrido desde a formação do Universo e que envolvem conceitos de **Relatividade e Física Quântica** – uma “teoria” batizada com o nome de Big - Bang!

A **descoberta da expansão do Universo** deu a **primeira real evidência de que o Universo muda com o tempo.... e que pode ter tido um começo !....Evolui !**

Vamos inicialmente caracterizar qual é o objeto de estudo da Cosmologia...e posteriormente verificar as evidências que indicam que pode ter ocorrido o Big Bang e as previsões de sua evolução...

Cosmologia 1

Estudo em Grande Escala da Estrutura e Evolução do Universo

Cosmogonia é o termo utilizado para o estudo da **formação e evolução** do Universo.

Cosmologia se destina a **descrever o efeito da “expansão” de energia - do nascimento do Universo até como ele é atualmente.**

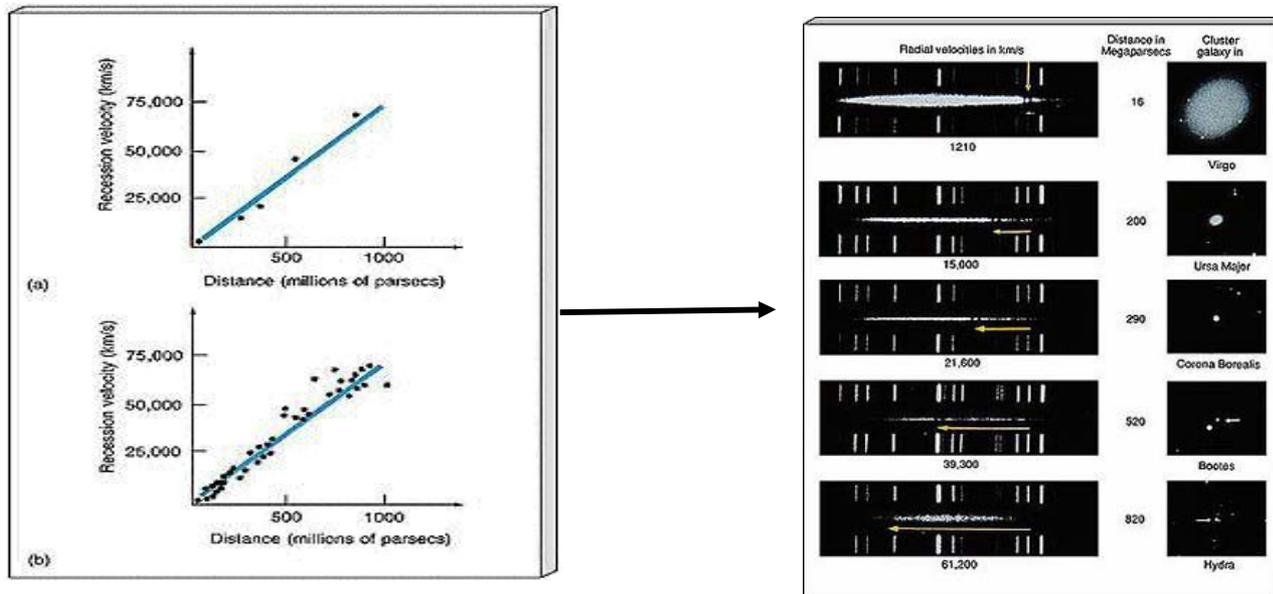
A Cosmologia tem como base teórica a **relatividade geral** e outras leis da natureza que envolvem, por exemplo, a **mecânica quântica**. Parte de um princípio fundamental,...um corolário, de que as **Leis da Física são sempre as mesmas em qualquer parte do Universo.**

Lembrar que... até início do séc. XX, o que existia eram especulações filosóficas (pouca base em modelos matemáticos e evidências observacionais).

1ª evidência observacional

A descoberta da **expansão do Universo** forneceu a 1ª evidência real, observacional, de que o **Universo muda com o tempo e que pode ter havido um começo...**

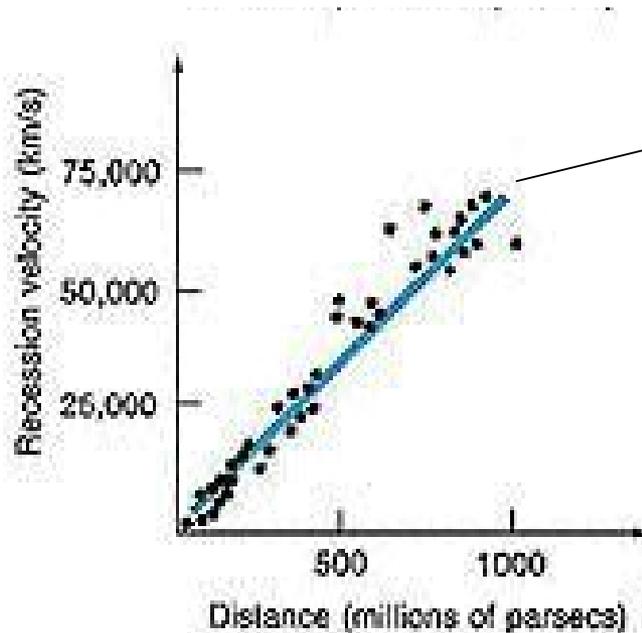
O gráfico abaixo (esq.) mostra que a velocidade com que as galáxias estão se afastando da Via-Láctea é proporcional a sua distância. O desvio espectral observado na comparação dos espectros observado e de laboratório (fig. dir.) é, portanto, consequência da expansão do Universo.



Deslocamento de linhas espectrais e Lei de Hubble

Consequências da Lei de Hubble

Aos pontos que representam as galáxias pode-se ajustar uma reta, uma equação matemática, que expressa o comportamento da velocidade de afastamento das galáxias ser diretamente proporcional a distância (grafico abaixo). Tal expressão analítica é conhecida como Lei de Hubble. Esta Lei representa, portanto, uma medida de como esta expansão ocorre e a inclinação da reta corresponde ao valor de H_0



Lei de Hubble

$$V_r(\text{Km/s}) = H_0 \cdot D (\text{Mpc})$$

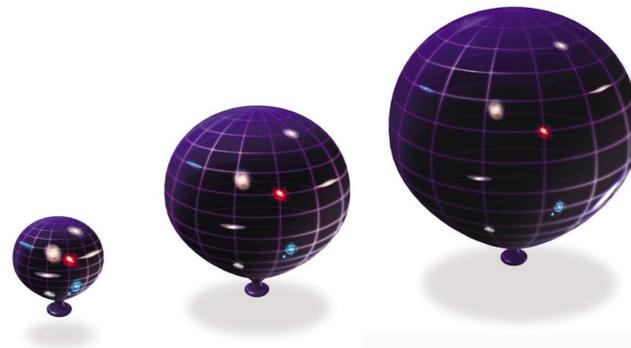
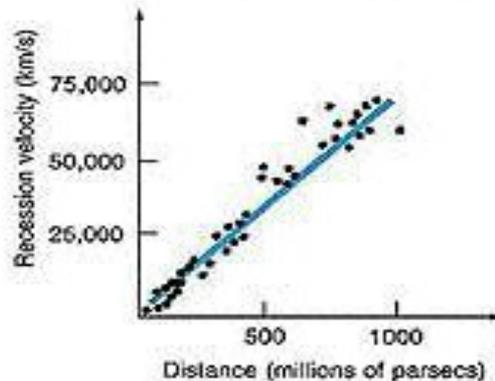
Constante de Hubble (71 km/s/Mpc)

A análise dimensional das unidades desta equação, mostra que H_0^{-1} tem unidade de tempo....e que Mpc pode ser expresso em termos de km, como a seguir

$$H_0 = \frac{\text{km}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{\text{Mpc}} = \frac{1}{\text{Km}} = \frac{1}{T_0} \text{ Tempo de Hubble}$$

$$T_0 = \frac{1}{H_0} = H_0^{-1} = 13,7 \text{ bilhões de anos}$$

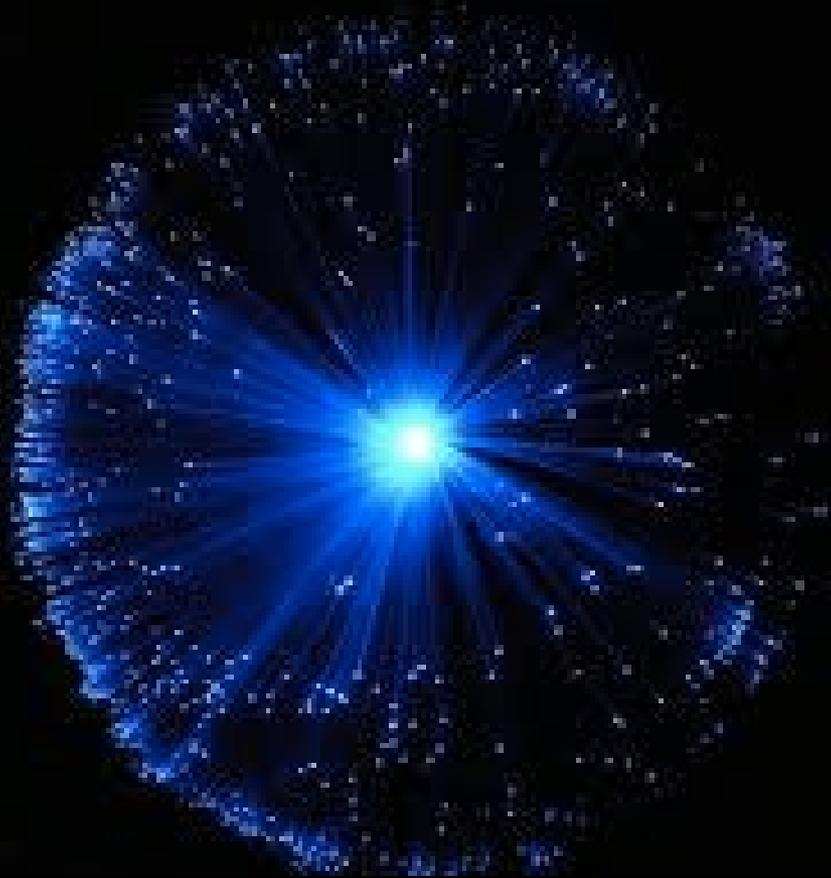
A constatação de desvios espectrais (redshift) em galáxias nos induz a considerar que o **Universo está em expansão**. A interpretação imediata desta constatação é de que o Universo está se modificando e, portanto, **evoluindo**.



Se considerarmos que o movimento de recessão das galáxias esteve constante durante todo o tempo (13,7 bilhões de anos) e que com a expansão a distância entre as galáxias foi gradativamente aumentando, podemos deduzir que houve uma época no passado em que as galáxias estavam cada vez mais próximas, e houve um momento em que elas **estavam todas juntas**.

Este seria então o **momento** onde tudo que existe hoje no Universo estaria concentrado. Um "ponto" que teria densidade e temperatura infinitas, a partir do qual começa a expandir...este evento inicial seria considerado então o Big-Bang e **representaria o início da criação da matéria e energia, da criação e expansão do espaço-tempo, e da criação das 4 forças da natureza (força fraca, forte, eletromagnética e da gravidade)**.

O Big-Bang representaria o início da criação e expansão do espaço-tempo, da criação da matéria e energia, das 4 forças da natureza - força fraca, forte, eletromagnética e gravidade.



...não foi uma explosão...! pois por esta interpretação o espaço já teria que existir para que o evento “explosão” se propagasse.....

2a Evidência: O Paradoxo de Olbers:
Porque o céu é escuro a noite?

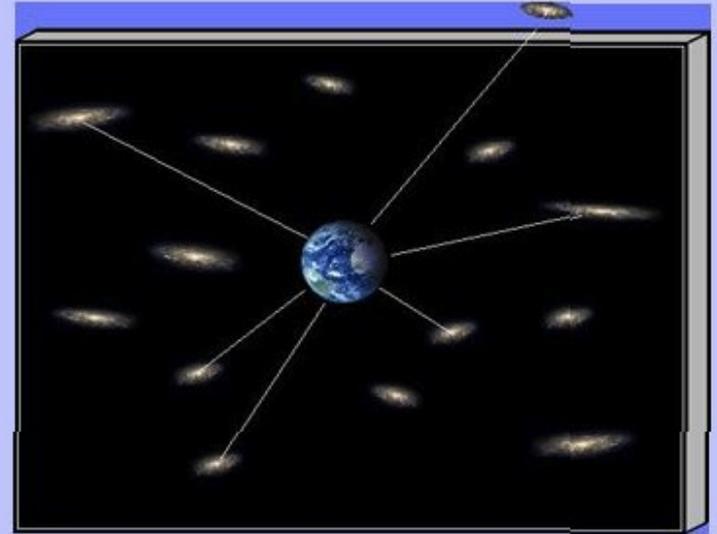
...é um indicativo de que o Universo teve um começo



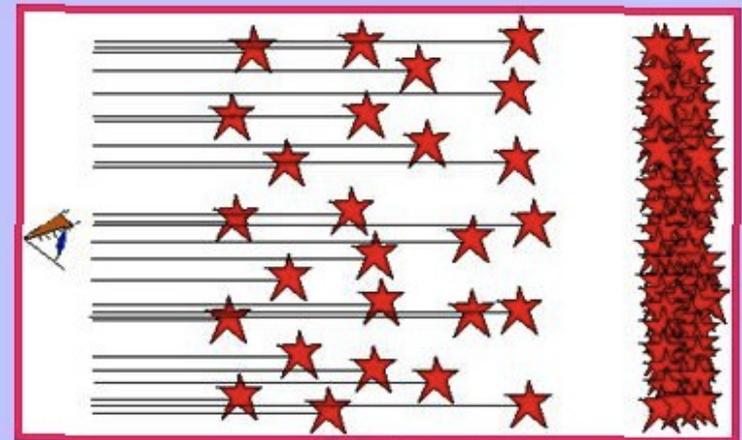
Qual é o paradoxo?

Sendo o Universo homogêneo e isotrópico, infinito em extensão e invariável no tempo, o céu noturno não deveria ser imensamente brilhante?

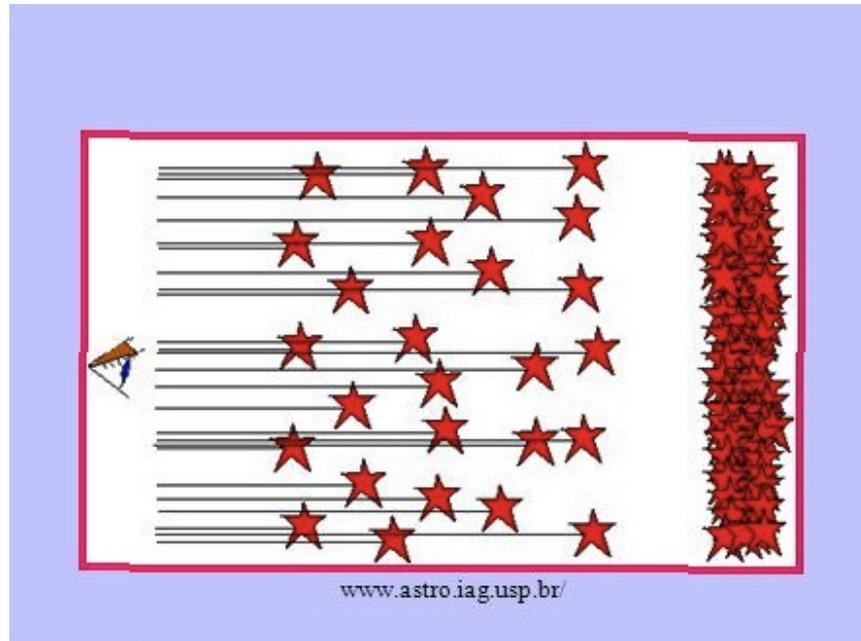
O céu deveria ser tão brilhante quanto a superfície do Sol, pois a linha de visada interceptaria uma estrela em qualquer direção que se olhasse!



physics.uoregon.edu



www.astro.iag.usp.br/



O volume de uma esfera com centro nele aumentara com o quadrado do raio dessa esfera ($V = 4/3 \pi R^3 \rightarrow dV = 4\pi R^2 dr$)

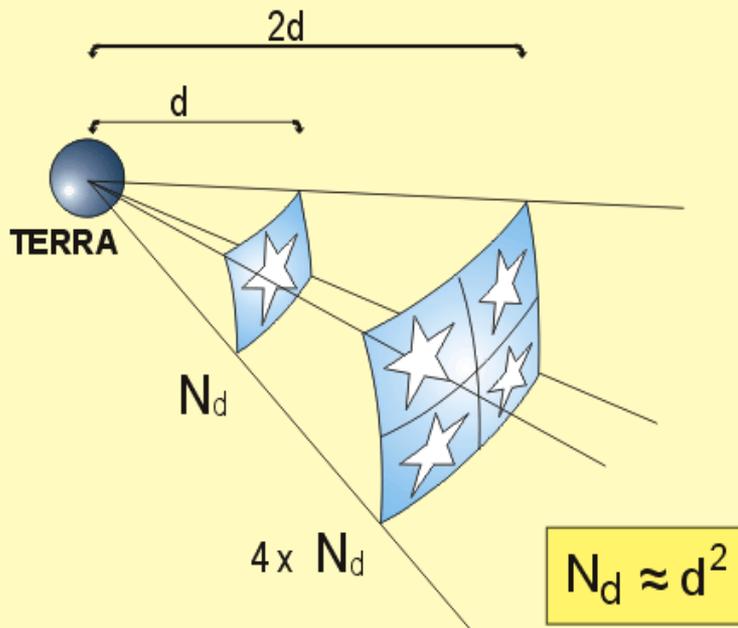
Portanto, a medida que se olha mais longe, se observa um número de estrelas que cresce com o quadrado da distância. Como resultado, sua linha de visada sempre interceptará uma estrela, seja lá qual for a direção em que ele olhe.

Porque ?

Heinrich Wilhelm Olbers (1823)

Se o Universo é infinito e eterno (e com uma densidade de estrelas \pm uniforme),
então todas as linhas de visão deveriam terminar na superfície de uma estrela.

Num Universo homogêneo em larga escala, a quantidade de estrelas (N_d) a uma distância d é proporcional ao quadrado dessa distância.



Formalmente:

Cada camada contribui com n° estrelas $\sim r^2$

A luz diminui de intensidade com $\sim 1/r^2$

Contribuição de luz de cada camada = constante

O Céu deveria ser cheio de luz

Consequência:

Universe não existiu sempre, ou ...

Universe tem um tamanho finito, ou ...

Ambos!

Possíveis explicações para o Paradoxo

1. A poeira interestelar absorve a luz das estrelas;

Foi a solução proposta por Olbers, mas tem um problema... Com o passar do tempo, a medida que fosse absorvendo radiação, a poeira entraria em equilíbrio térmico com as estrelas e passaria a brilhar tanto quanto elas. ...Não ajuda, portanto, 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, pois o desvio é proporcional ao “raio do Universo observável”, mas os cálculos mostram que a degradação da energia pela expansão do Universo não é suficiente para resolver o paradoxo.

3. Estrelas são finitas... mesmo assim existem em número suficiente para fazer todo o céu brilhar

4. O Universo não existiu por todo o sempre. É a hipótese que parece correta!....Pq?

Sabemos que a luz tem uma velocidade finita, o que significa que ela leva um tempo para ir de um lugar a outro, e portanto, quanto maior a distância que olhamos, mais remoto o passado que vemos.

Possíveis explicações para o Paradoxo

Se o Universo tem idade finita, já que não é eterno pois temos evidência de que surgiu a 13,7 bilhões de anos atrás, e além disto a luz tem uma velocidade finita (300.000 km/s), a luz das estrelas mais distantes **ainda não teve tempo de chegar até nós.**

Assim, a idade do Universo limita a distância que podemos ver....e o Universo que enxergamos é limitado no espaço, por ser finito no tempo.

A velocidade finita 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.então....

A escuridão da noite seria um indício de que o Universo teve um início - não é eterno, nem infinito...

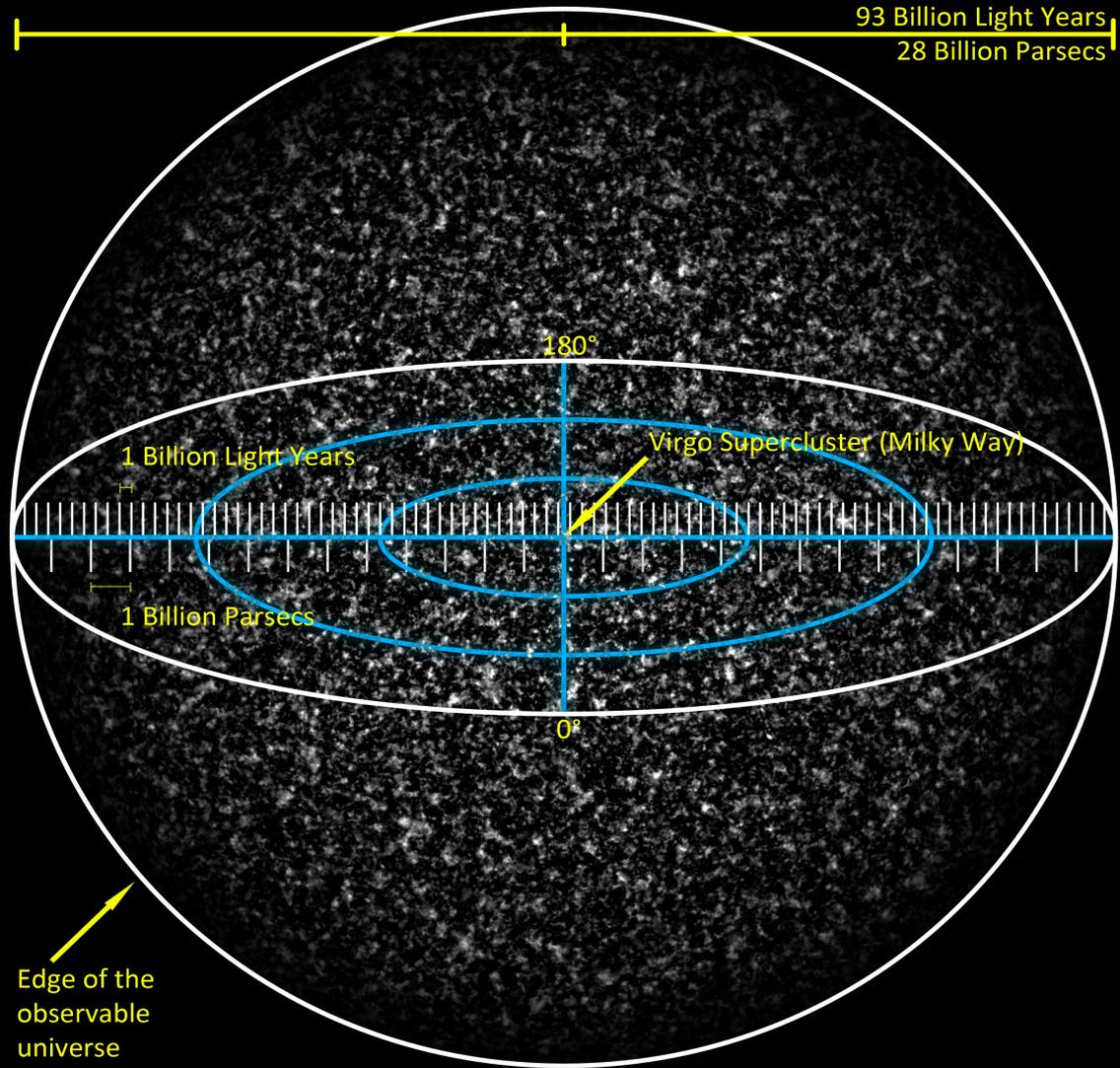
Universo que enxergamos é limitado no espaço.....

Vejam o vídeo onde se mostra claramente:

- 1- O conceito de Universo Observável.....
- 2- Comparação do Universo observável x Universo "total"
- 3- O Universo tem um limite no espaço? No tempo?
- 4- Tem um centro?
- 5- Está ficando maior?
- 6- Como a expansão afeta estas dimensões ?

<https://www.youtube.com/watch?v=x1n00r2X0OQ>

- Extensão – 93 bilhões de a.l
- Idade ~ 13,7 bilhões de anos
- Universo **observável** tem limite
- Universo **não observável** não tem limite



Sobre o Universo

QUESTÃO	UNIVERSO OBSERVÁVEL	UNIVERSO Não Observável
1- Quão grande?	93 bilhões de anos-luz (diâmetro) - ver video!	Infinito (não no sentido geométrico)
2- Limitado?	Sim	Sim ...no tempo; existiu um começo Não ...do ponto de vista espacial
3- Centro ?	Sim...você	Não
4- Está expandindo ?	Sim	Sim

Que tipo de interação física poderia explicar o que podemos observar e deduzir sobre a **expansão e evolução do Universo?** ...somente uma em escala astronômica....a **gravidade!**

Na Teoria da Relatividade Geral de Einstein, a gravidade é interpretada como sendo a modificação das propriedades locais do espaço-tempo devido distribuição de matéria-energia. Esta modificação das propriedades locais pode ser descrita pelas Equação de Campo e utilizada para a construção de **Modelos Cosmológicos.**

Estes **Modelos estabelecem vínculos entre funções que caracterizam o Universo** e apresentam dependências temporais como o caso da **Densidade Média da Matéria e o Fator de Escala,** como veremos mais adiante.

Vamos dar uma olhada nos **Modelos Cosmológicos** do ponto de vista qualitativo, uma vez que o formalismo matemático não caberia no contexto deste curso. As **soluções das Equações de Campo,** é que geram os **diferentes Modelos Cosmológicos.**

Einstein (1910-1955)

Teoria da Relatividade Especial

Em 1905, Albert Einstein (1879-1955) havia proposto a teoria da relatividade especial.

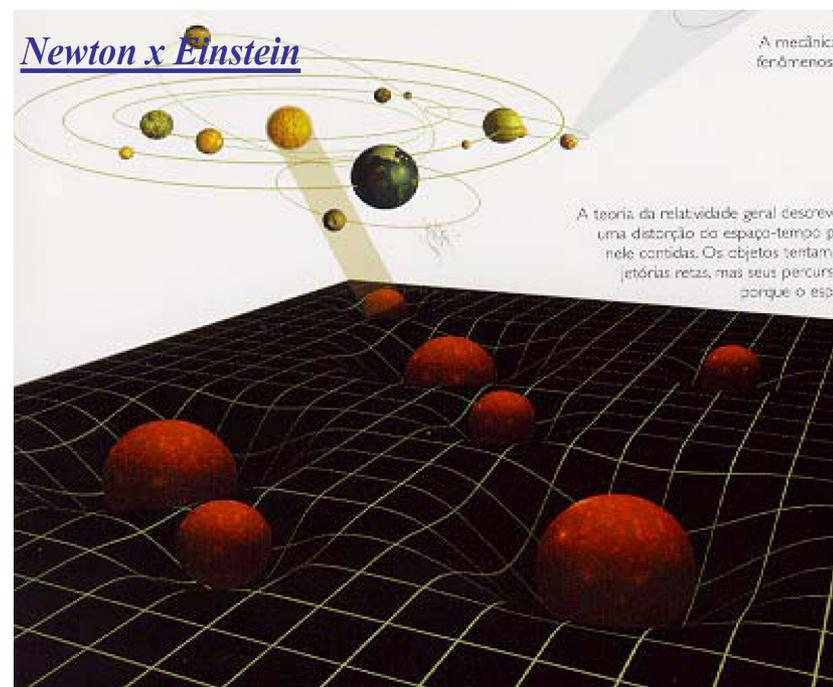
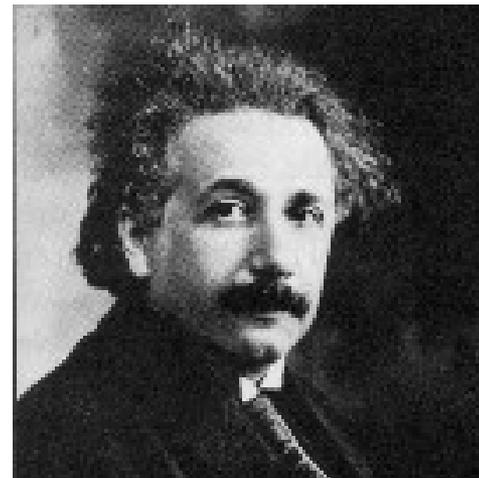
Essa teoria propõe que:

1- Velocidade da luz no vácuo é constante, independente da velocidade da fonte

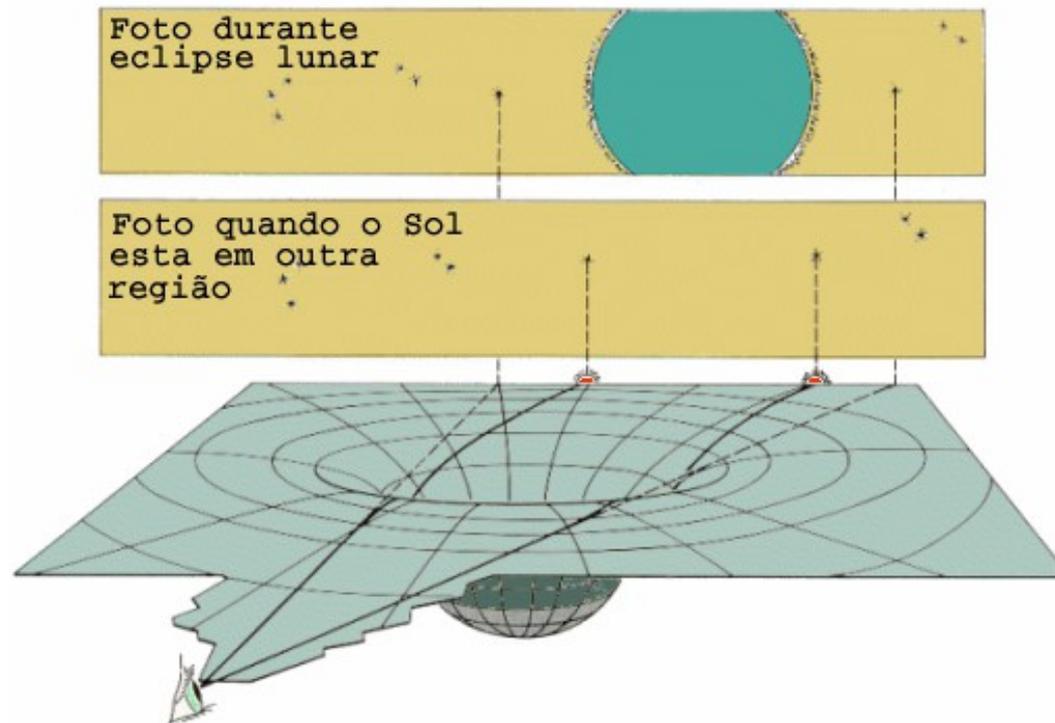
2- Massa depende da velocidade, e que há dilatação do tempo durante movimento em alta velocidade ($V = s/t \rightarrow c = s/t$)

3- Massa e energia são equivalentes $\rightarrow E = mc^2$

4- Nenhuma informação ou matéria pode se mover mais rápido através do espaço-tempo cósmico do que a luz.



Postula que a luz sempre percorrerá o **caminho mais curto** entre 2 pontos e que seguirá a *curvatura do espaço* causada pela presença de um corpo massivo.



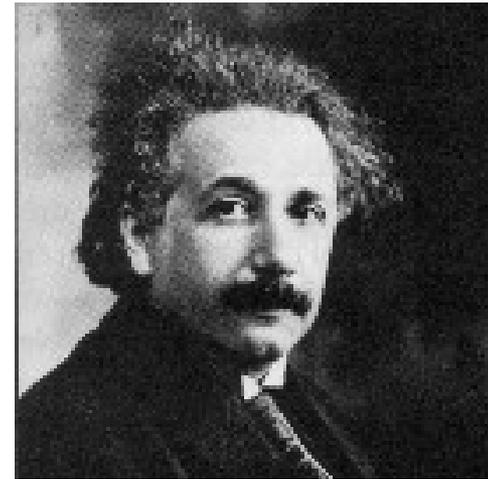
Einstein (1910-1955)

Teoria da Relatividade Geral

Gravidade é vista como um efeito geométrico.

O espaço se curva na presença da massa-energia !

(não existe o conceito de força....!)



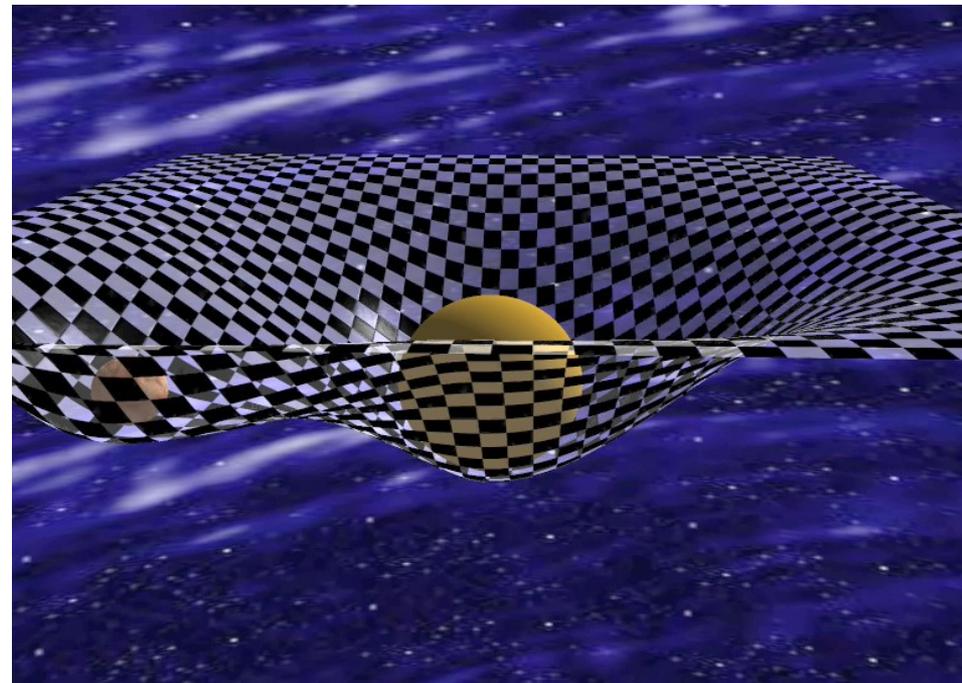
Desenvolve descrição matemática da natureza considerando este efeito.

$$G_{\mu\nu} = \alpha T_{\mu\nu}$$

representa curvatura
do espaço-tempo

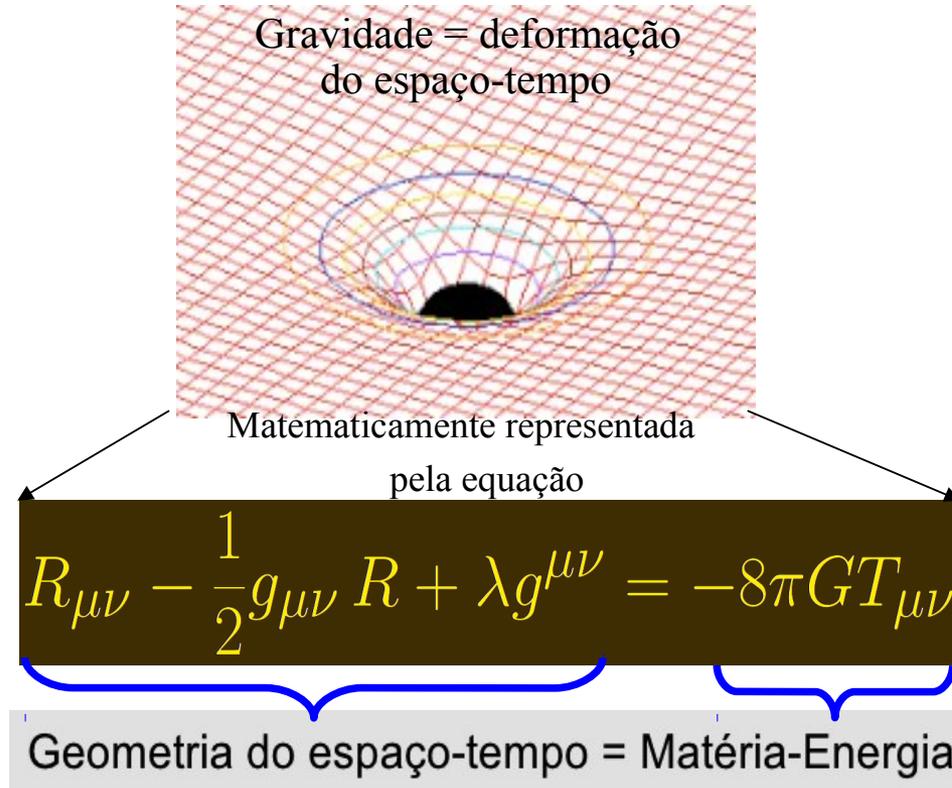
representa a matéria

Usando este formalismo matemático para descrever a gravidade, desenvolve a **Equação de Campo**, que descreve a interação da matéria, energia e gravidade no Universo.



Equação de Campo de Einstein

...são a base da formulação matemática da Relatividade Geral



“ $g_{\mu\nu}$ ” um **tensor** 4x4 que tem 10 componentes independentes. Dada a liberdade de escolha das quatro coordenadas do espaço-tempo, as equações independentes (16) se reduzem, em número, a 6.

Tensores são entidades geométricas introduzidas na matemática e na física para generalizar a noção de escalares, vetores e **matrizes**.

Equações de Campo e Hipóteses para os Modelos

As **diferentes soluções** das equações de campo levam a **diferentes modelos** (descrições) matemáticos da evolução do Universo.

Algumas hipóteses fundamentais consideradas nos modelos:

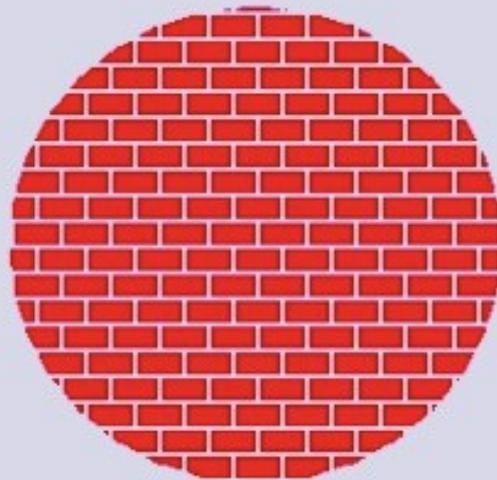
1- **Universo é homogêneo**, ou seja, parece o mesmo para um viajante cósmico (todos os lugares devem ser iguais) e não existe localização privilegiada. Esta hipótese deve ser considerada para escalas suficientemente grandes, ou seja, maiores do que as escalas de dimensão de aglomerados de galáxias.

2 – **Universo é isotrópico**, ou seja, para um observador imóvel, em qualquer direção ele parece o mesmo em todas as direções.

1 + 2 → Estas 2 afirmações são conhecidas como **Princípio Cosmológico**

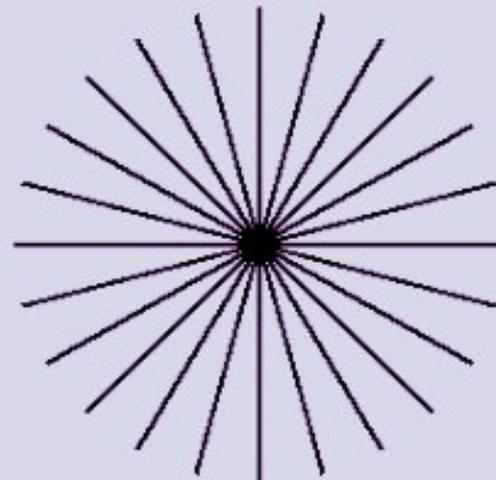
O Princípio Cosmológico

O Universo é *homogêneo* e *isotrópico*



(a)

www.astro.ucla.edu



(b)

(a) *Homogêneo*: todos os pontos têm a mesma composição e propriedades.

(b) *Isotrópico*: todos os observadores têm a mesma impressão do Universo, qualquer que seja a direção na qual eles estão olhando.

1º Modelo Cosmológico Moderno

Cosmologia Relativística

Einstein (1917)

Alemão

...visão anterior a descoberta de Hubble...

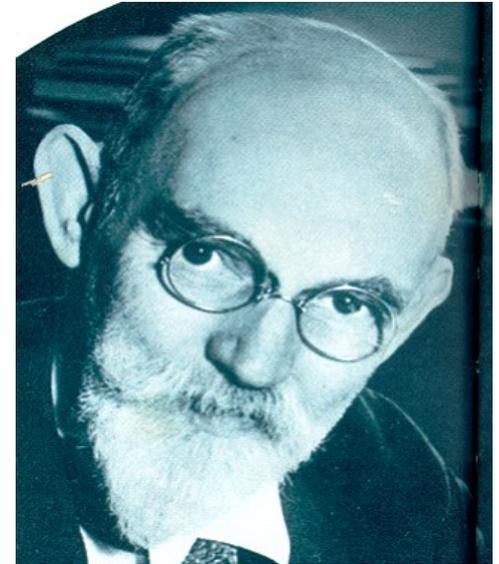
- Universo estacionário, estático, imutável, e sem expansão
- Introduce uma força artificial conhecida como “constante cosmológica” - Λ cujo efeito seria o de contrabalançar a força gravitacional, força esta que teria o efeito de agrupar a matéria e, portanto, contrair/colapsar o Universo
- O Universo seria então finito, fechado e esférico

Universo de de Sitter (1872-1935)

Cosmologia Relativística

de Sitter (1917)

Holandês



Derivado da Teoria da Relatividade, mostra que não existe um único modelo relativístico possível e propõe um universo plano (geometria Euclidiana) e em expansão, porém vazio!

Universos de Friedmann (1888-1925)

modelos-padrão de Universo



Friedmann (1922-1924)

Russo

Descobre que se a Constante Cosmológica (Λ) introduzida por Einstein fosse ignorada, os modelos resultavam em movimento, ou seja, poderiam estar em expansão ou contração

...neste período aparecem as primeiras evidências observacionais da expansão do Universo...(Hubble)

Friedmann entende que a força de gravidade desacelera o Universo, portanto, todos os modelos que propõe são de **expansão desacelerada**

Formula os modelos que hoje são conhecidos como **modelos-padrão do Universo**, pois como dito anteriormente, nesta época descobriu-se que o Universo estava de fato em expansão....

Em todos os modelos de Friedmann a **expansão é desacelerada** com o tempo, ao qual ele **atribui a força de gravidade**. A taxa de desaceleração poderia cessar e o Universo então seguiria um processo de contração.

A **desaceleração** vai depender da **densidade média do Universo**, gerando modelos diferentes para cada situação de geometria e curvaturas....que á luz da Relatividade Geral podem ser de curvatura positiva e negativa....(ver slides)

A geração destes modelos está fundamentada em um raciocínio muito simples, como veremos a seguir....

Universo de Lemaitre (1894-1966)

Padre e Cientista



Lemaitre – 1920
Belga

Desenvolve uma solução para as equações de campo de Einstein/Friedmann, nas quais o **Universo se expande a partir de um estado inicial de alta densidade e temperatura para a matéria: ...e se torna conhecida como sendo a “Teoria do Big-Bang”** (→ átomo primordial -- “fissão”)

Este modelo permite **3 possíveis destinos:**

A expansão pode continuar para sempre, lentamente, e nunca parar = Modelo Aberto

A expansão pode eventualmente parar e reverter, iniciando uma contração = Modelo Fechado.

A expansão pode continuar lentamente a uma taxa que se aproxima infinitamente no tempo de uma parada = Modelo Plano

Outras Contribuições

...que acabaram sendo vencidas...

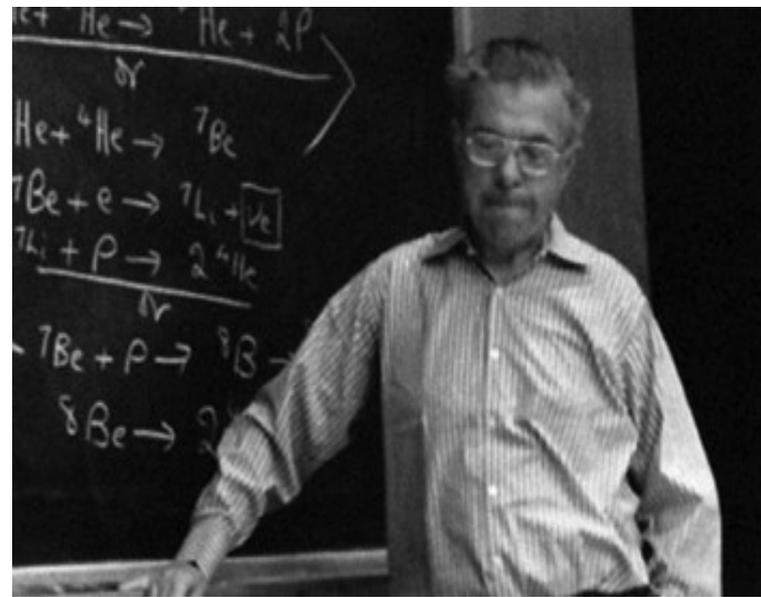


Outros modelos foram formulados, baseados nos modelos de Friedmann-Lemaitre, com exceção daqueles propostos por **Hoyle, Bondi e Gold** que propõe um Universo estacionário, sem Big Bang, e com **matéria sendo continuamente criada para compensar a expansão observada, permanecendo a densidade constante**

Gamov (1904-1968):

Russo naturalizado americano

Prevê a **Radiação Cósmica de Fundo** (1948)



Demonstra que com a expansão, desde sua fase inicial até o volume atual, a **radiação havia** em grande parte se **transformado em matéria** através da famosa equação da relatividade que correlaciona (E) e (m) através de: **$E=mc^2$**

Previu que, **parte da radiação inicial do BBang permaneceria na forma de energia**, permeando todo o Universo. Os calculos levaram em conta que nem toda energia inicial foi transformada em matéria, havendo uma sobra. A famosa radiação de fundo de 3 graus Kelvin

Além disto, leva em conta a **taxa de expansão do Universo**

Letters to the Editor

PUBLICATION of brief reports of important discoveries in physics may be secured by addressing them to this department. The closing date for this department is five weeks prior to the date of issue. No proof will be sent to the authors. The Board of Editors does not hold itself responsible for the opinions expressed by the correspondents. Communications should not exceed 600 words in length.

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*

Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland

AND

H. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.
February 18, 1948

AS pointed out by one of us,¹ various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must imagine the early stage of matter as a highly compressed neutron gas (overheated neutral nuclear fluid) which started decaying into protons and electrons when the gas pressure fell down as the result of universal expansion. The radiative capture of the still remaining neutrons by the newly formed

We may remark at first that the build-up process is apparently completed when the temperature of the gas was still rather high, since the observed abundances would have been strongly affected by nuclear resonances in the region of the slow neutron capture. As pointed out by Hughes,² the neutron capture cross sections for many elements (for neutron energies of about 1 e.v.) increase exponentially with atomic number in a periodic system, remaining approximately constant for elements of low atomic number.

Using these cross sections, one can calculate the abundances from Eqs. (1) as shown in Fig. 1 that the relative abundances of various nuclear species decrease rapidly with increasing atomic number and remain approximately constant for elements heavier than silver. In order to compare the calculated curve with the observed abundances, one must assume the integral of $\rho_n dt$ during the build-up process equal to 5×10^4 g sec./cm³.

On the other hand, according to the picture of the expanding universe⁴ the density decreases as given by $\rho \cong 10^6/\beta^2$. Since the integral of $\rho_n dt$ diverges at $t=0$, it is necessary to assume that the build-up process began at a certain time t_0 after the expansion relation:

$$\int_{t_0}^{\infty} (10^6/\beta^2) dt \cong 5 \times 10^4$$

which gives us $t_0 \cong 20$ sec. and $\rho_0 \cong 2.5 \times 10^3$ g sec./cm³. This result may have two meanings: (a) for the build-up process existing prior to that time the temperature of the gas was so high that no aggregation was possible and the density of the universe never exceeded 2.5×10^3 g sec./cm³ which can possibly be

Alpher–Bethe–Gamow paper, or $\alpha\beta\gamma$ paper

- “The Origin of Chemical Elements”
Physical Review, vol. 73, Issue 7, pp. 803-804 **Publication Date:** 04/1948
- Big Bang nucleosynthesis
- predicts elemental abundances that agree with measurement for H, D= ^2H , ^3He , ^4He , ^6Li , ^7Li , and ^9Be

3a evidência: Radiação Cósmica de Fundo

Na década de 1960, um outro grupo de pesquisa independente liderado por Dicke, previu, que o Universo deveria ter sido preenchido com radiação remanescente oriundo dos estágios iniciais do Big Bang e inicia a **construção de instrumentos** capazes de detetar a radiação

Porém, em 1965 os radioastrónomos Penzias e Wilson ao testarem desempenho de antenas de comunicação para monitorar satélites artificiais detectam um fundo de radiação uniforme em todas as direções sugerindo origem externa ao local do experimento....

Não foi difícil perceber que na verdade Penzias e Wilson encontraram, por acaso, a **radiação de fundo** que estava sendo procurada pelo grupo de pesquisa de Dicke e esta passa a ser então a **3a evidência de que o Universo teve um início e que se expandiu...**

Cosmic Microwave Background Radiation (CMB)

- The existence of the CMB radiation was first predicted by George Gamow in 1948, and by Ralph Alpher and Robert Herman in 1950.

DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND

Microwave Receiver

MAF900048 Robert Wilson

Arno Penzias

The slide features a dark background with a starry sky. At the top, a blue banner contains the title 'Cosmic Microwave Background Radiation (CMB)'. Below this, a red rectangular box contains a bullet point stating that the CMB radiation was first predicted by George Gamow in 1948, and by Ralph Alpher and Robert Herman in 1950. To the right of the text box is a collage of images. At the top of the collage is a photograph of a large satellite dish antenna labeled 'Microwave Receiver'. Below the dish are two smaller portrait photographs: one of Robert Wilson and one of Arno Penzias. The collage is titled 'DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND' at the top. A small identification number 'MAF900048' is visible in the bottom left corner of the collage area.

Os modelos propostos por Friedmann e Lemaitre **podem ser testados** a partir dos **parâmetros cosmológicos observáveis** abaixo

Constante de Hubble (H_0): introduzida por Hubble para reproduzir o fato observacional de que galáxias próximas se afastam com velocidades crescentes com a distancia que nos separam delas. Valores atuais indicam que esta constante seja da ordem de (73 Km.s-1.Mpc-1)

Desvio Espectral ($\Delta\lambda$) : mede a expansão do Universo e é obtida via velocidade de recessão das galáxias (V_{rec})

Parâmetro de Densidade (Ω): Razão entre a densidade de matéria-energia do Universo e o valor necessário para que se tenha curvatura nula (densidade crítica - ρ_c), correspondendo ao modelo plano.

Parâmetro de “Desaceleração” (q): parâmetro cosmológico que mede a taxa de desaceleração do Universo. Um modelo apenas contendo matéria, seja escura ou bariônica, a radiação sempre resulta em um parâmetro de desaceleração positivo.

Pesquisas atuais mostram que é negativo, o que implica em um Universo acelerado, necessitando a inclusão de uma componente extra – a energia escura

Vamos entender melhor o papel destes parâmetros observáveis e a relação entre eles já que são fundamentais para o destino do Universo.

O papel da gravidade na Cosmologia Newtoniana

A gravitação tem enorme influência na desaceleração da expansão cosmológica do Universo. A compreensão deste fenômeno é difícil de ser abordada na teoria newtoniana, já que nesta teoria o Princípio Cosmológico, em um Universo finito e newtoniano, seria rompido devido a presença de observadores nos limites da distribuição de massa.

Entretanto, é usual fazer uso de uma analogia que veremos a seguir e que pode nos ajudar na compreensão de algumas consequências deste fenômeno.

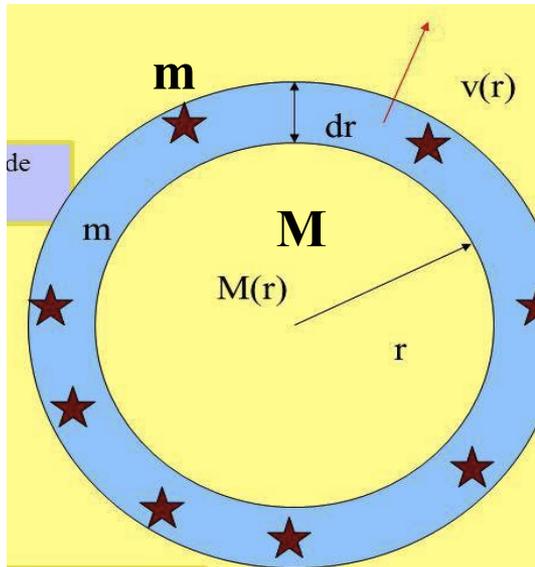
O processo de expansão pode ser determinado pela energia total (E) do sistema, na ausência de criação de massa, e é dado pela soma da energia cinética com a energia potencial gravitacional

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = C^{te}$$

conservação d
energia

Se considerarmos uma galáxia de massa m a uma distância r do centro, qualquer que seja ele, esta será atraída pela massa interior M ao volume considerado,

$$M = \frac{4\pi}{3} \rho_0 r^3, \text{ onde } \rho_0 \text{ é a densidade de massa atual}$$



O processo de expansão é então determinado unicamente pela **energia total, E**,

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = C^{te}$$

conservação de energia $\frac{GMm}{r} = \frac{1}{2}mv^2$

Energia cinética = Energia potencial

Onde v seria a velocidade de expansão do volume, que é dada pela Lei de Hubble, $v = H_0 \times d$

Dependendo do valor de energia, teremos um Universo fechado ($E < 0$), aberto ($E > 0$), ou crítico $E = 0$. Vamos analisar o que acontece nestas 3 situações,

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{E} \rightarrow > 0 \rightarrow \frac{1}{2}mv^2 > \frac{GMm}{r} \rightarrow \text{Universo aberto} \\
 \mathbf{E} \rightarrow = 0 \rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r} \rightarrow \text{Universo crítico} \\
 \mathbf{E} \rightarrow < 0 \rightarrow \frac{1}{2}mv^2 < \frac{GMm}{r} \rightarrow \text{Universo fechado}
 \end{array}$$

No Universo aberto a expansão se processa indefinidamente e a velocidade terminal **tende a um valor não nulo** quando o raio tende a infinito.

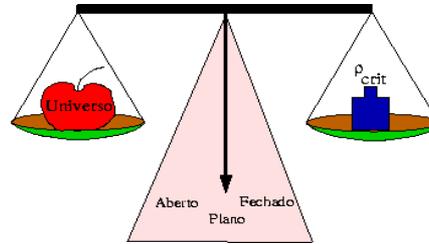
No Universo crítico a expansão ocorre indefinidamente mas a velocidade terminal é nula.

No caso de Universo fechado a expansão prossegue até um certo ponto e depois temos um colapso gravitacional do sistema.

Os termos “aberto” e “fechado” são usados para caracterizar a densidade **de energia ou o parâmetro de densidade total do Universo**.

Parâmetro de Densidade ($\Omega = dm/dc$)

... decisivo para o destino da evolução do Universo



As relações obtidas anteriormente podem ser **testadas** a partir de **medidas da densidade de massa atual e a constante de Hubble**.

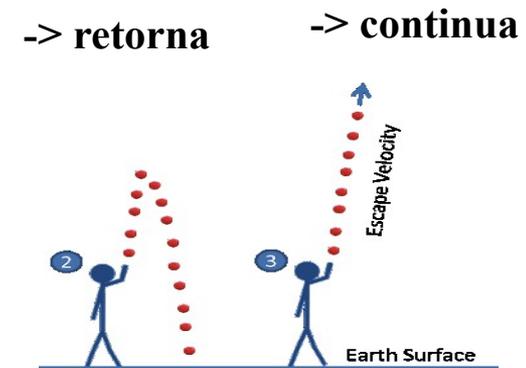
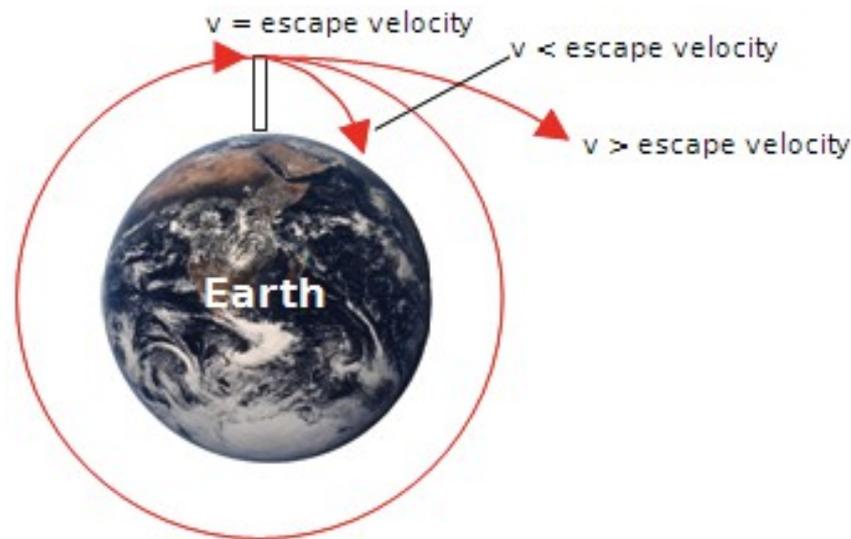
O parâmetro de densidade Ω é definido como sendo a razão entre a **densidade de massa média atual (dm)** do Universo em relação **densidade crítica (dc – densidade de massa necessária para tornar nulo o termo de curvatura na equação de Friedmann)**.
($\Omega = dm/dc$)

$$\text{Mas, } dc = 3H_0 / 8\pi G: \rightarrow dc = 1,8788 \times 10^{-29} \text{ h}^2 \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-3} (\approx 11 \text{ atms /cm}^3)$$

Se $dm = dc$; $\Omega = 1$ **modelo plano** \rightarrow se expande indefinidamente, com v_{terminal} **nula**
Se $dm < dc$; $\Omega < 1$ **modelo aberto** \rightarrow atração gravitacional é pna para impedir expansão
Se $dm > dc$; $\Omega > 1$ **modelo fechado** \rightarrow atração gde e impede a expansão

Uma analogia do dia-a-dia que pode ser utilizada para entender melhor este fenômeno, dentro da perspectiva Newtoniana, se encontra a seguir.

Ao lançarmos uma pedra da Terra para o espaço, a **energia (E_c)** que ela deve ter para escapar do campo de gravidade da Terra deve ser maior do que a **energia da atração gravitacional (E_p)** exercida sobre este objeto, sem ajuda de um empuxo, ou sofrendo a resistência da fricção, ou seja, **$E_c > E_p$** . A pedra deve, portanto, atingir uma velocidade que é definida como sendo a velocidade de escape. Veja fig. Abaixo e a interpretação....



Se a velocidade de lançamento (E_c) for menor do que a velocidade de escape (E_p), a pedra retorna a Terra. Se a velocidade de lançamento (E_c) for maior ou igual a de escape (E_p), a pedra sairá da atuação do campo gravitacional da Terra e irá continuar seu movimento no espaço.

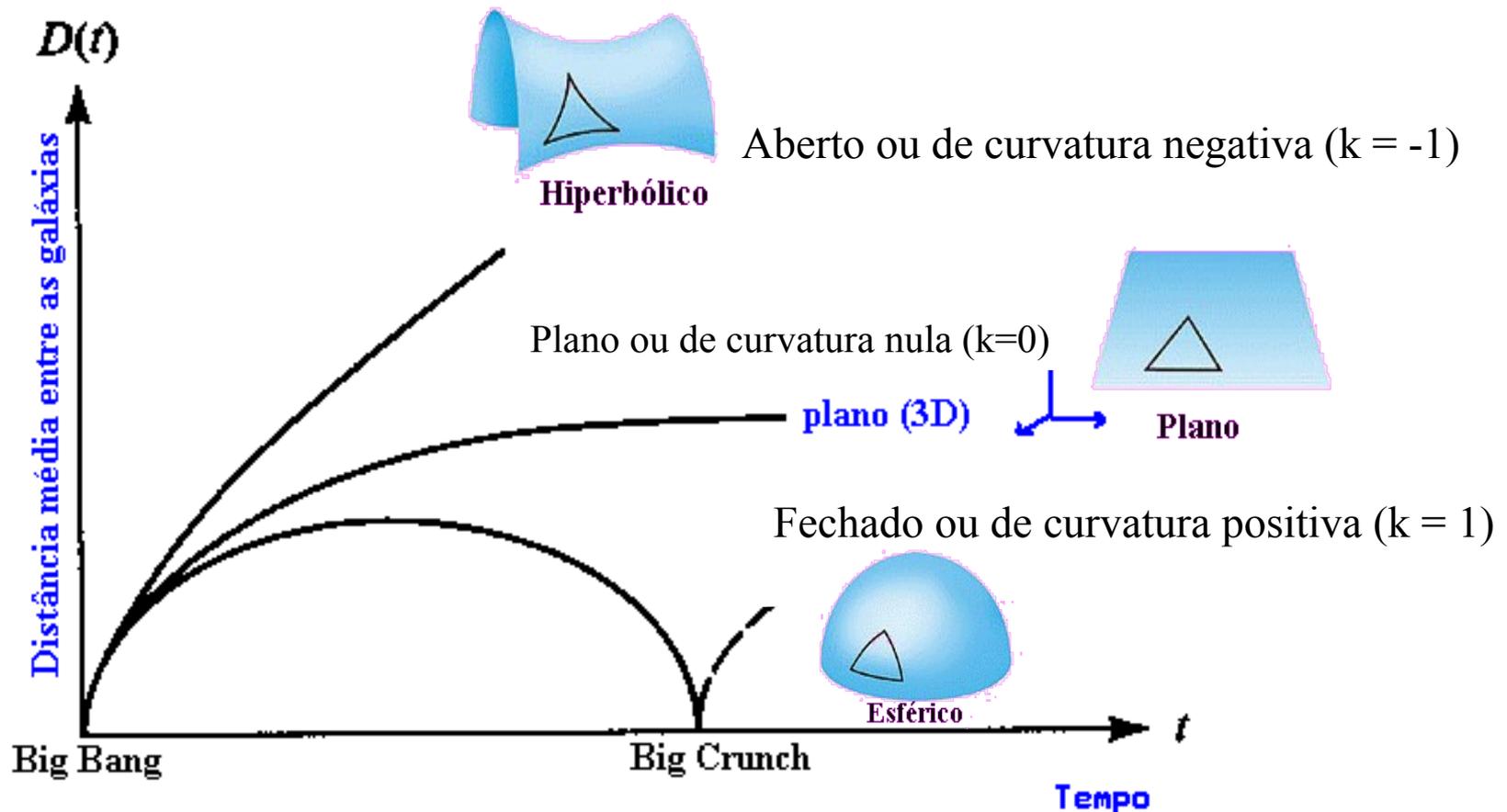
Podemos usar esta analogia no caso da expansão do Universo. Se a **energia potencial (E_p)**, representada pela densidade de massa-energia contida no Universo, for maior do que a energia cinética da expansão do Universo , este então colapsaria e seria fechado e **$E_p > E_c$**

Caso contrário, se for menor ou igual, continuaria se expandindo indefinidamente e o Universo seria aberto ou plano, então, **$E_p \leq E_c$** . Neste caso a velocidade terminal de expansão tenderia a zero ($E_p = E_c$), ou a velocidade terminal de expansão ($E_p < E_c$) seria diferente de zero...

Um cuidado que se deve ter nesta comparação é que os termos “aberto, fechado e plano” são usados para caracterizar a densidade de energia do Universo (ou o parâmetro de densidade) e não uma interpretação topológica, como muitas vezes difundido!

Para detalhes sobre este tema, recomendo livro “ Introdução a Cosmologia “, Ronaldo E. De Souza - Cap. 2, ed. Edusp

Podemos então agora apreciar graficamente o comportamento da **evolução dos Modelos de Friedmann** considerando somente a expansão

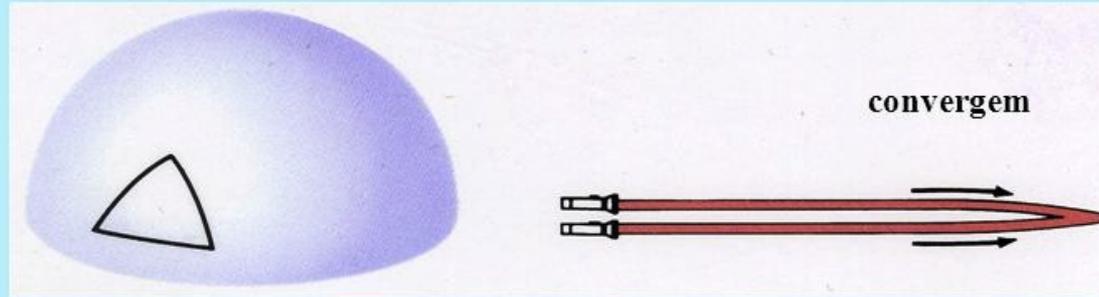


k indica a curvatura do Universo.

Se:

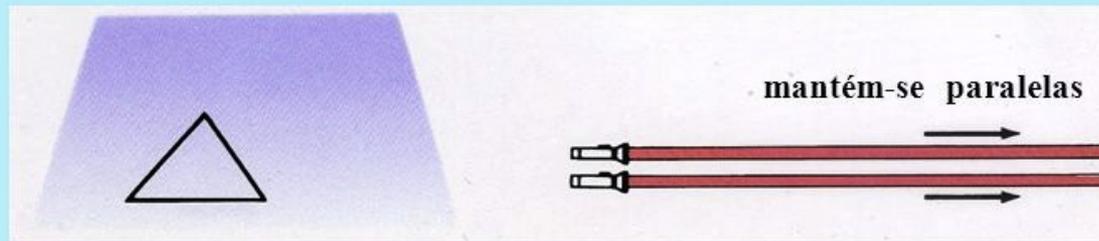
$k=1$

Fechado



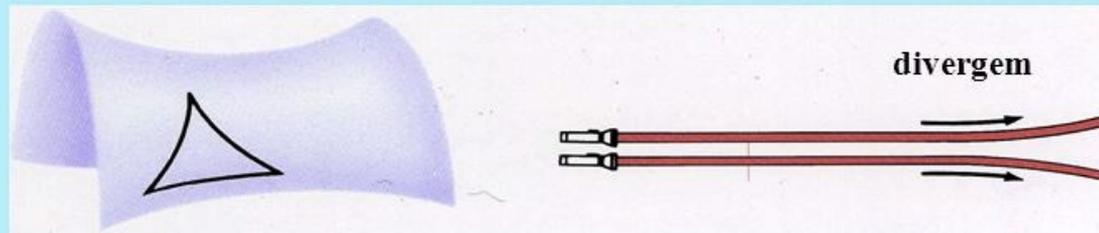
$k=0$

Plano

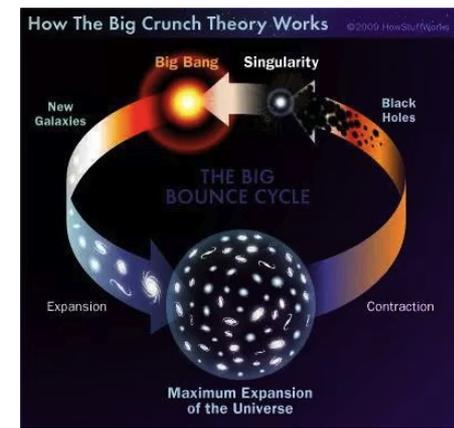
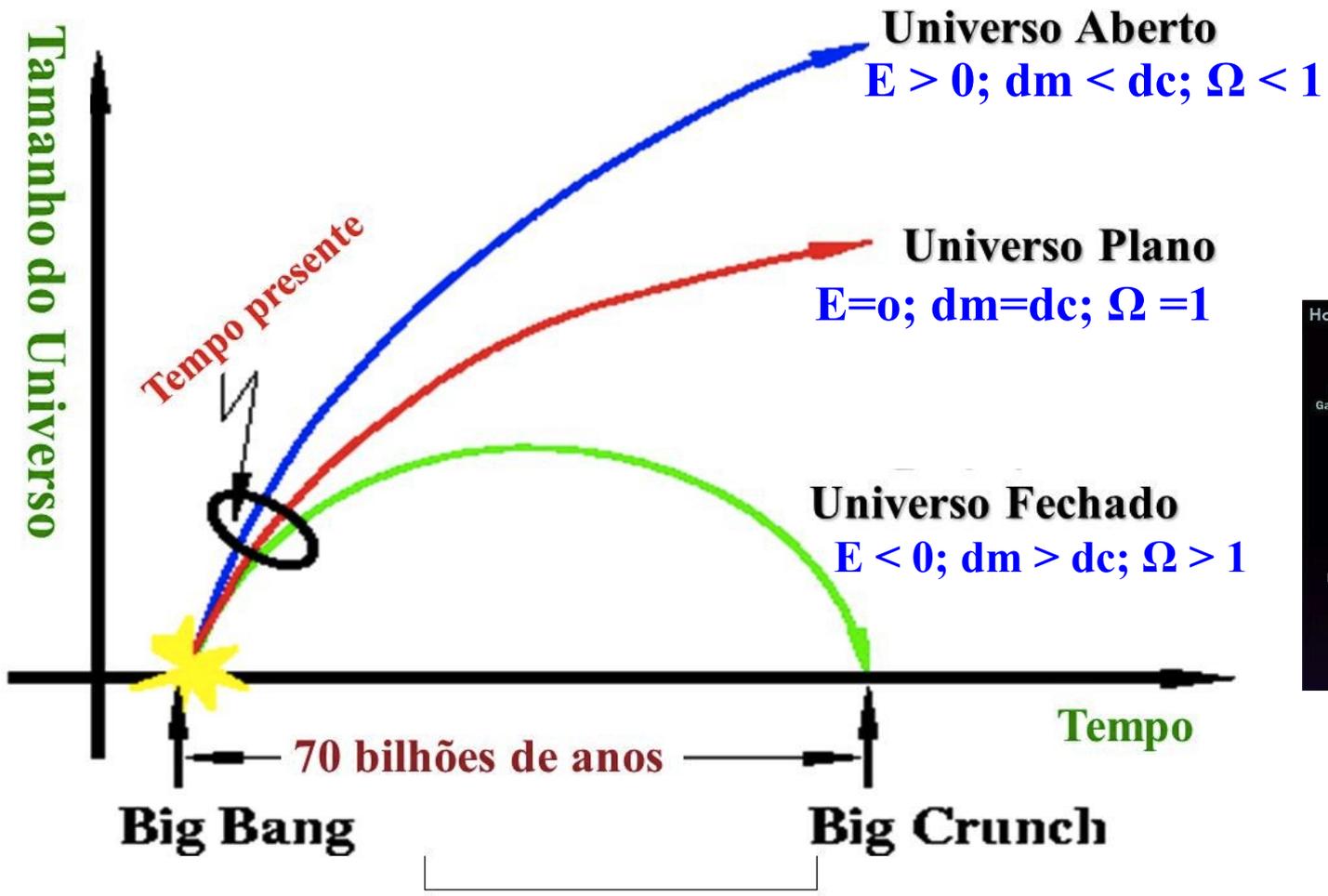


$k=-1$

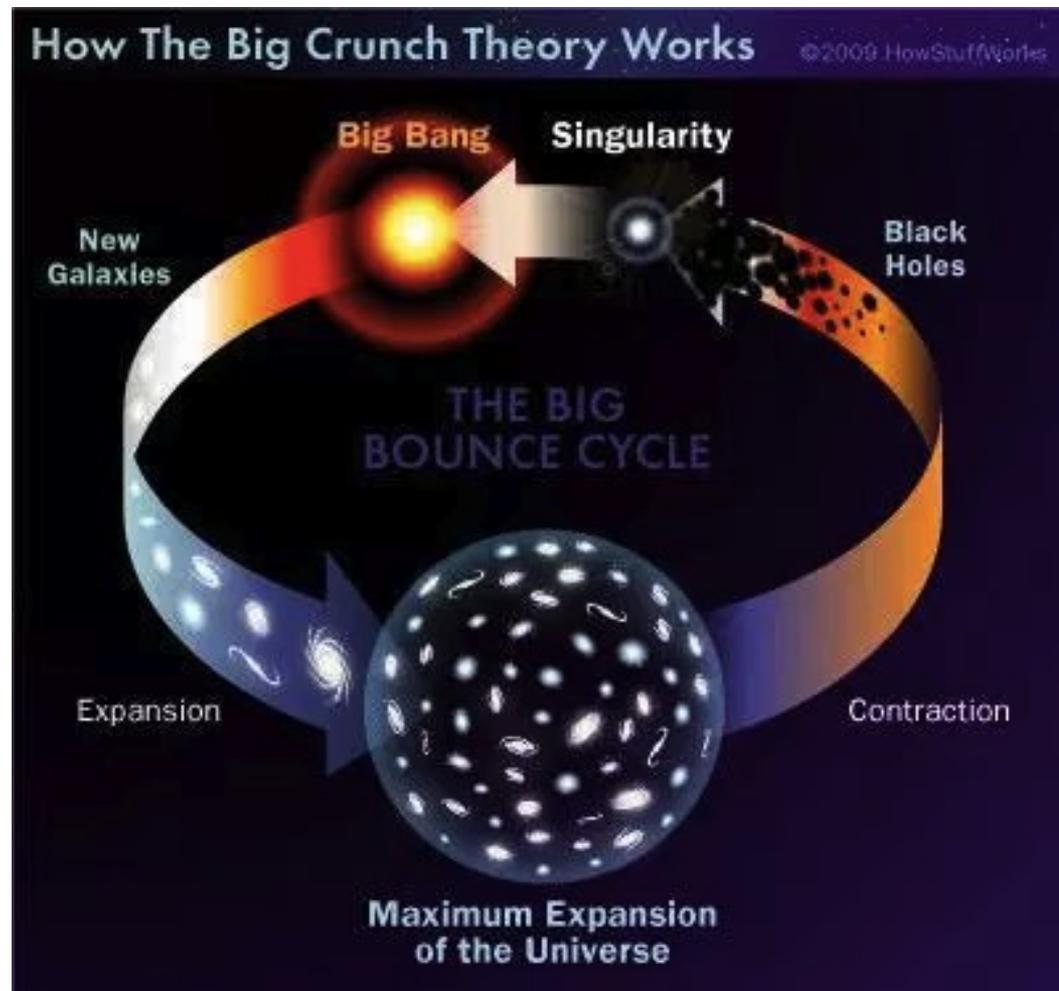
Aberto



K é uma variável que entra nas equações dos Modelos e está vinculada ao Parâmetro de Densidade ($\Omega = dm/dc$)



O Modelo Fechado: onde a densidade média de massa observada hoje supera a densidade crítica, a expansão é interrompida, ocorre o colapso, um novo Big Bang ocorre e assim por diante...



Síntese

A Cosmologia Moderna se dedica a determinar qual destes modelos é o mais realista

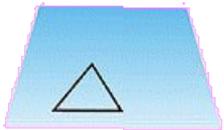
1- **Modelo Plano** → Se expande indefinidamente com v_{terminal} tendendo a um valor

$$\mathbf{E=0; dm=dc; \Omega =1}$$

nulo, ... pois é como se ocorresse um equilíbrio entre a $E_p = E_c$

Não tem curvatura. (análogo a plano)

Este modelo parece ser o mais realista ! Veremos a seguir..



Plano

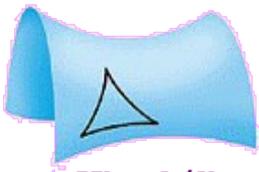
2- **Modelo Aberto** → Atração gravitacional é pequena para impedir a expansão.

$$\mathbf{E > 0; dm < dc; \Omega < 1}$$

... pois é como se a $E_p < E_c$

Então, a expansão continua indefinidamente, com v_{terminal} tendendo a um valor não nulo. A curvatura é negativa.

(análogo a uma sela de cavalo)



Hiperbólico

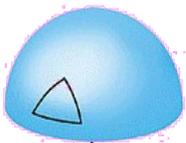
3- **Modelo Fechado** → Atração gravitacional é grande e impede a expansão .

$$\mathbf{E < 0; dm > dc; \Omega > 1}$$

... pois é como se a $E_p > E_c$

Ocorre então uma contração, e reinicia-se a uma nova expansão.

A expansão é finita e com curvatura positiva. (análogo a uma esfera)



Esférico

Na próxima aula veremos como a história térmica do Universo caracteriza diferentes fases ou Eras em sua Evolução