



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatividade Geral e Cosmologia

Carlos Alexandre Wuensche

INPE - Divisão de Astrofísica

Contato: alex@das.inpe.br

Para mais informações (filmes, links):
www.das.inpe.br/~alex/aula_ceu.html

RESUMO

A Teoria da Relatividade Geral foi publicada por Einstein em 1916, dez anos após a publicação da Relatividade Restrita. Nesta teoria Einstein estende a descrição dos fenômenos físicos para sistemas não inerciais (ou seja, acelerados). O Princípio de Equivalência postula que é impossível distinguirmos sistemas uniformemente acelerados de campos gravitacionais. As duas consequências fundamentais deste princípio são o desvio da luz por campos gravitacionais e o deslocamento da frequência (e conseqüentemente mudança da energia) de fótons em campos gravitacionais. Ambas previsões foram confirmadas experimentalmente inúmeras vezes. Outro resultado importante da relatividade geral foi a explicação da precessão do periélio de Mercúrio.

Ao incluir campos gravitacionais, a relatividade geral tornou-se uma teoria de gravitação, aperfeiçoando a gravitação newtoniana que existia há 300 anos. A relatividade geral descreve o movimento de objetos, não em termos da ação de forças, como na mecânica clássica, mas em termos de trajetórias descritas sobre a superfície do espaço-tempo. A geometria do espaço-tempo é determinada pela distribuição de massas no Universo. Ou seja, o espaço e o tempo não são estruturas absolutas e estáticas como na teoria newtoniana, mas objetos físicos em si, gerados pela matéria do Universo.

Acredita-se que o Universo foi criado há cerca de 15 bilhões de anos atrás. Esta explosão, conhecida como o "Big Bang" gerou não só a matéria do Universo, mas também o espaço-tempo. Nos dias de hoje uma das principais evidências de que tal explosão ocorreu é a chamada "radiação cósmica de fundo" do Universo, a radiação que restou do Big Bang. O destino do Universo dependerá da massa total que nele existe. Se esta for grande o suficiente, a atração gravitacional acabará por frear a expansão causada pelo Big Bang, e o Universo iniciará uma contração até o Grande Colapso. Caso contrário, ele expandirá para sempre.



Sumário

⊕ Histórico

⊕ A teoria da relatividade restrita: revisão

⊕ A teoria da relatividade geral

⊕ Princípios, postulados e testes experimentais

⊕ Da relatividade geral à cosmologia

⊕ Modelos cosmológicos



Histórico

Toda grande teoria científica tem um caráter distintivo especial.

Mecânica Newtoniana: todos os movimentos não retilíneos obedecem à lei do inverso do quadrado da distância

Relatividade Especial: a constância da velocidade da luz não privilegia nenhum referencial.

Eletromagnetismo: relação entre eletricidade e magnetismo e a demonstração que a luz é uma onda EM

Termodinâmica: descrição das propriedades da radiação e matéria em termos de quantidades macroscópicas observáveis.

Gravitação: não pode ser anulada em nenhum ponto do Universo que tenha massa e possui uma relação intrínseca com o espaço-tempo

Mecânica Quântica: o princípio da incerteza e a dualidade partícula-onda a distinguem da física macroscópica



Relatividade

Geral

Massas
pequenas

Relatividade

Restrita

Velocidades
pequenas



Dimensões
grandes

Mecânica
Quântica



A Teoria da Relatividade Especial

- ⊕ Originada do estudo da eletrodinâmica dos corpos em movimento.
- ⊕ Percepções básicas de A. Einstein
 - ⊠ Não existe o éter (Michelson & Morley)
 - ⊠ Simetria das eqs. de movimento (transformações de Lorentz)
 - ⊠ Leis físicas devem ser as mesmas para todos os observadores



Postulados da Teoria da Relatividade Especial

- ⊕ A velocidade da luz é constante, vale 3×10^{10} cm/s em qualquer referencial e é independente dos movimentos da fonte e do observador.
- ⊕ As leis da Física são as mesmas para todos os observadores inerciais no Universo (Princípio da Relatividade).



As transformações de Galileu e de Lorentz

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

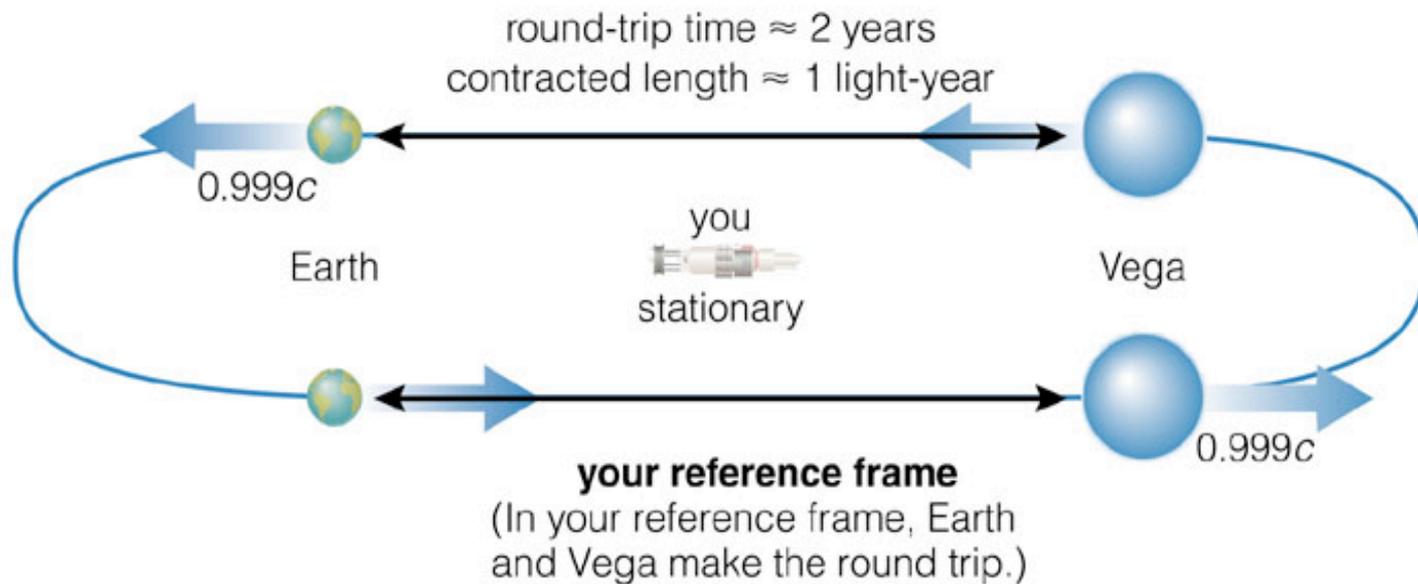
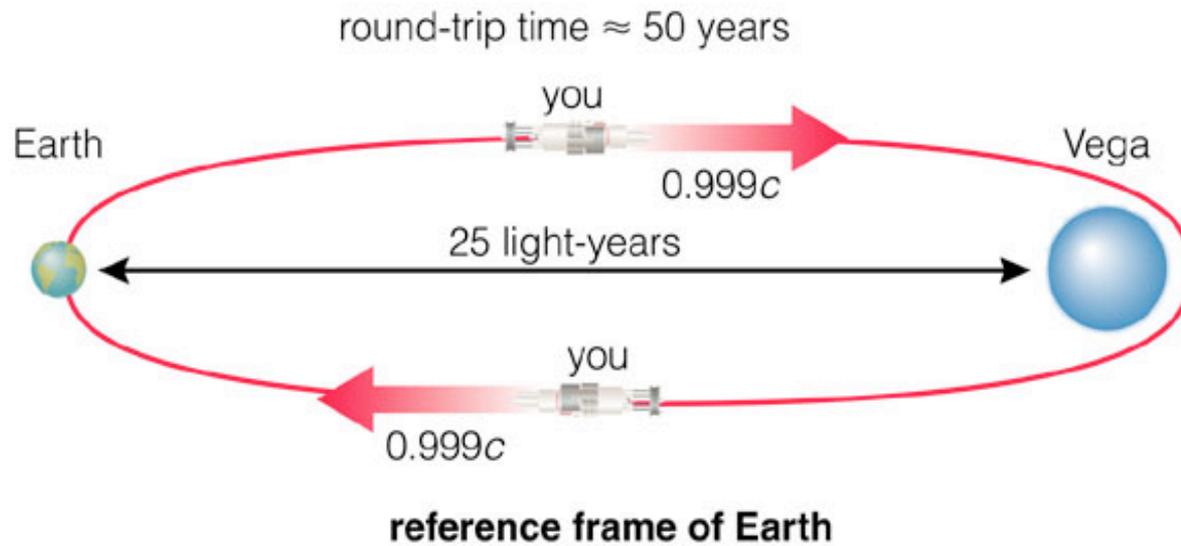
$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



O paradoxo dos gêmeos

- ❖ O movimento relativo dos gêmeos não deveria permitir o envelhecimento de um deles em particular, já que, para cada um, parece que o outro se afasta com velocidade v .
- ❖ A solução: o movimento relativo não é simétrico, uma vez que o gêmeo no foguete sofre acelerações, o que não acontece com o gêmeo "na Terra".





Da TRE à TRG

✚ As idéias fundamentais

- ✚ O princípio da equivalência: o campo gravitacional e o sistema de coordenadas em movimento acelerado estão estritamente relacionados.
- ✚ Geometria: transformações de coordenadas são não-Euclidianas.
- ✚ A TRG é uma teoria relativística de gravitação.



Postulados da Teoria da Relatividade Geral

- ⊕ Princípio da Relatividade: a relatividade especial governa a física local. A estrutura global do espaço-tempo, entretanto, pode ser alterada pela gravitação.
- ⊕ Princípio da equivalência: não existe forma de distinguir, localmente, entre gravidade e aceleração.



Como a gravitação pode ser uma força do tipo “inverso-do-quadrado”, quando a distância entre dois objetos nem podem ser definida na Relatividade Especial de Einstein?

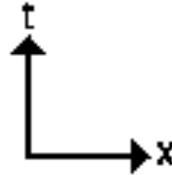
- ❖ A Relatividade Especial foi construída para satisfazer as eqs. de Maxwell, que substituíam a expressão para a força eletrostática ($\propto 1/r^2$) por um conjunto de eqs. que descrevem o campo eletromagnético.
- ❖ Assim, a gravitação ficou sendo a única força do tipo inverso-do-quadrado que se comportava como ação à distância.
- ❖ A gravitação possui uma propriedade única: sua aceleração num determinado lugar e tempo independe da natureza do corpo em que ela atua.



Força
eletromagnética



Força
gravitacional

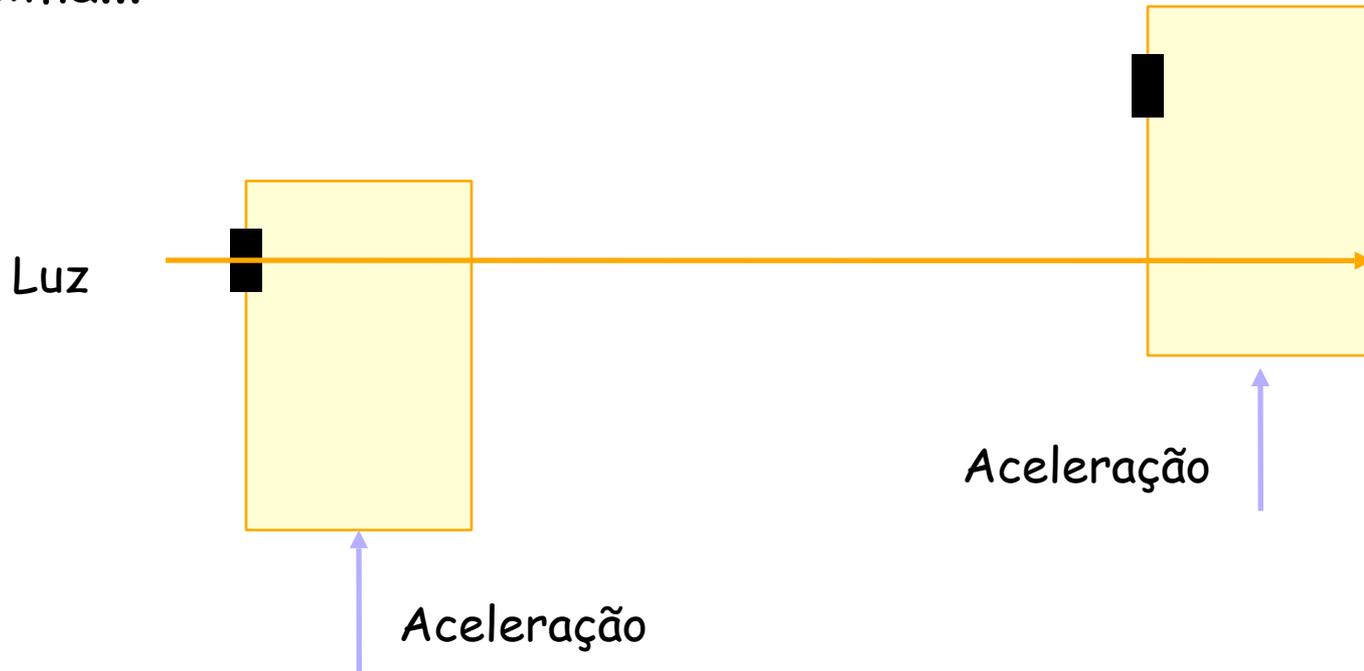


A força gravitacional acelera todos os corpos igualmente.

- Newton - já conhecia esta propriedade
- Eotvos - 1 parte em 100 milhões
- Dicke e Braginsky - 1 parte em um trilhão
- [STEP](#) (missão espacial) - propõe testar a igualdade entre as acelerações em 1 parte por quintilhão.

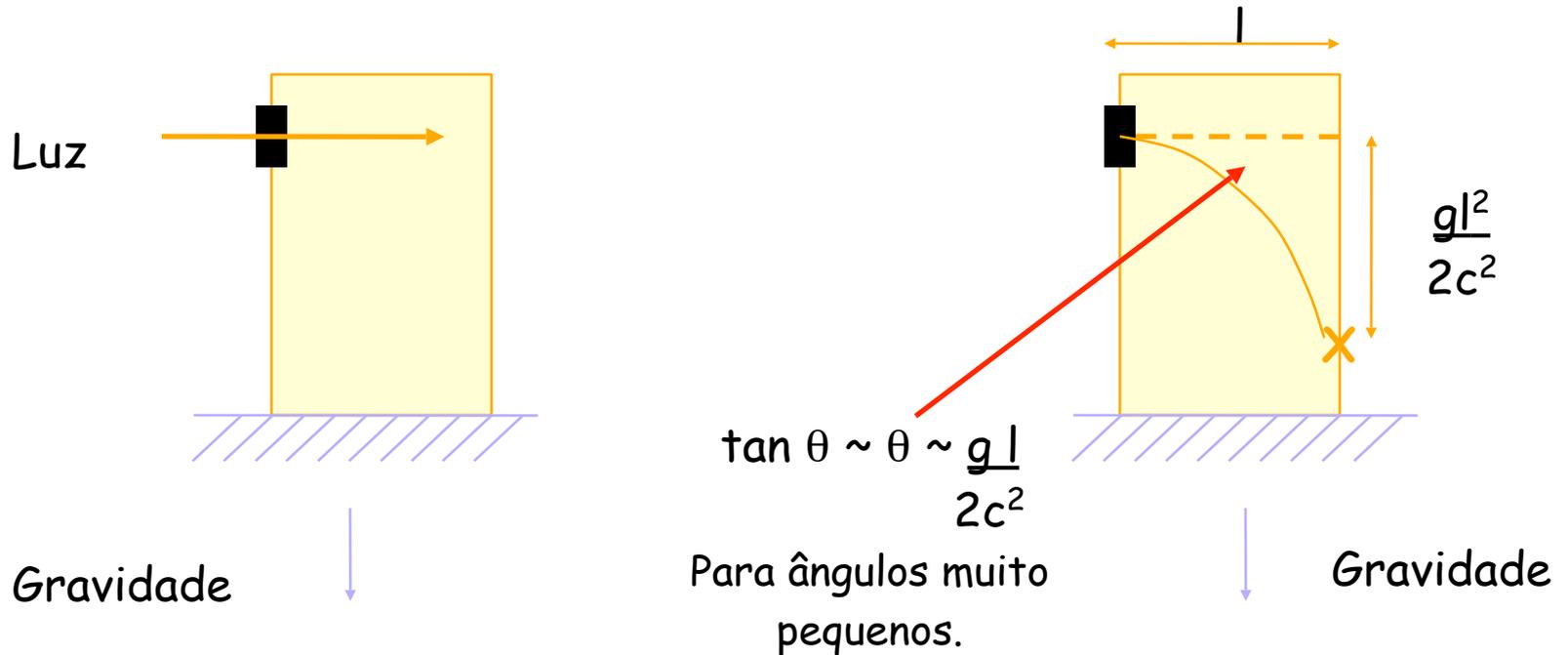
Em conseqüência, para qualquer evento no espaço-tempo, em qualquer direção, haverá somente uma linha de mundo correspondente a um evento causado somente pela força gravitacional.

Suponha que um raio de luz entra por uma janela de um elevador que está se movendo, de maneira acelerada, para cima...



A luz atinge a outra parede, num ponto inferior ao que ela entrou. Se alguém vê a luz dentro do elevador, vai parecer que ela fez uma curva.

Suponha que um raio de luz movendo-se horizontalmente entra por uma janela numa sala sujeita a um forte campo gravitacional....



A luz atinge a outra parede, num ponto inferior ao que ela entrou.



Problemas no conceito de massa?

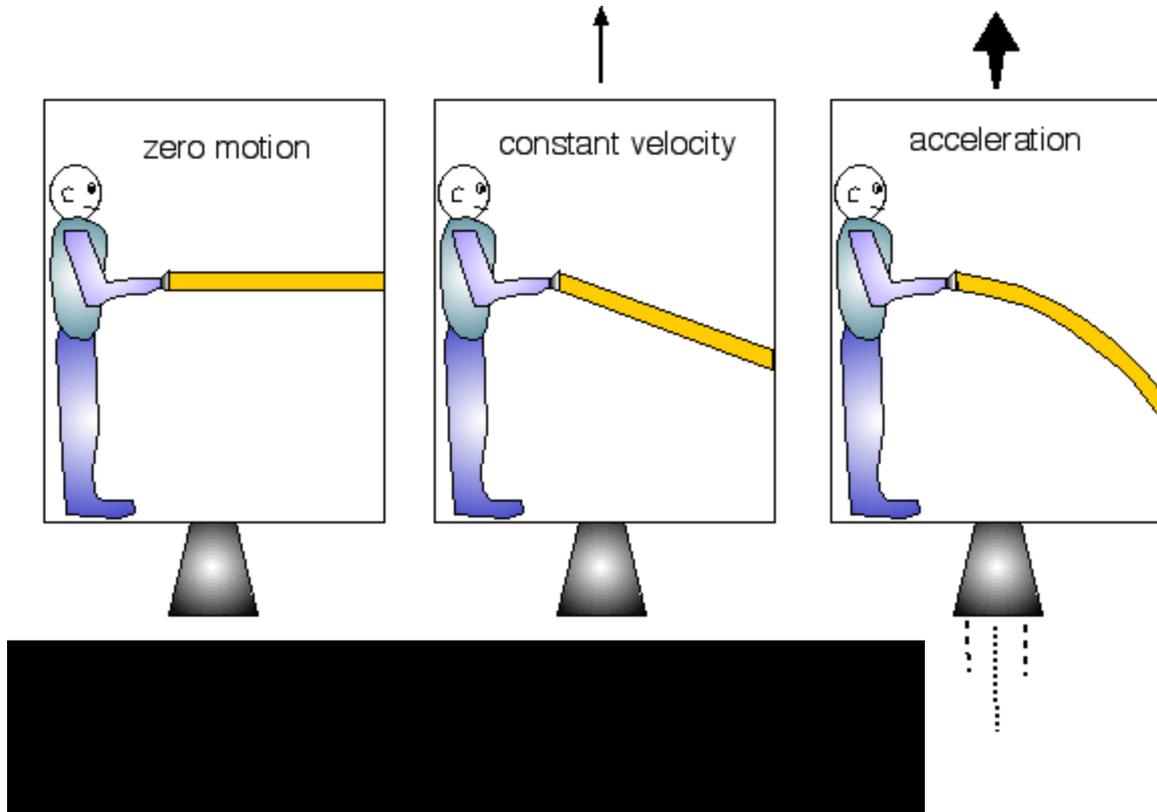
Massa inercial \rightarrow aceleração

X

Massa gravitacional \rightarrow aceleração gravitacional

- ✦ Não há como distinguir entre os efeitos da aceleração e da gravidade.
- ✦ O objetivo da TRG é encontrar transformações entre sistemas de referência acelerados, que levem em conta a influência da distribuição de matéria "gravitacional" no Universo .

⊕ O princípio da equivalência



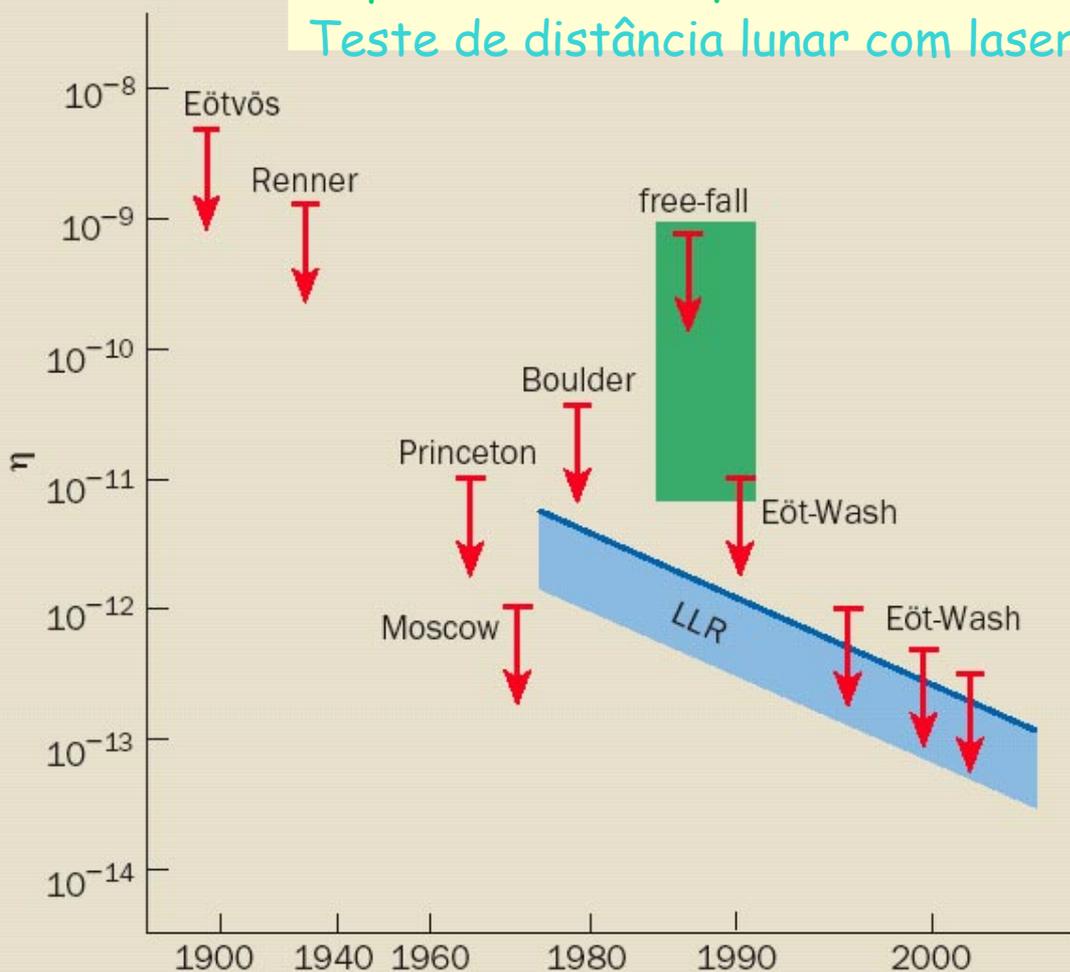


O princípio da equivalência fraco

Balança de torção

Experimentos de queda livre

Teste de distância lunar com laser



Os efeitos da gravitação podem ser representados, localmente e durante pequenos Δt , usando-se sistemas de referência acelerados de forma adequada.

$$\eta = a_1 - a_2 / 2.$$



O princípio da equivalência forte

- ✚ O princípio forte afirma que qualquer interação física (exceto a gravitação, identificada com a geometria) se comporta, num sistema inercial local, como se a gravitação estivesse ausente.

Geometria não-Euclidiana

- De uma forma simplificada, podemos dizer que são geometrias definidas em espaços não planos.
- Invariante geométrico: a distância própria, dada por $ds^2 = dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$. De forma mais geral,

$$ds^2 = \sum_{i,k=0}^3 g_{ik} dx^i dx^k$$

define o que chamamos de espaço-tempo.

- i e k são sobrescritos do vetor x na expressão acima porque, numa análise formal de espaços quadri-dimensionais, devemos fazer a distinção entre quantidades co e contravariantes.



Construindo uma métrica

- ✦ Vamos considerar uma superfície plana, com coordenadas cartesianas x, y . Se consideramos dois pontos $A(x_A, y_A)$ e $B(x_B, y_B)$, a distância s entre A e B é dada por:

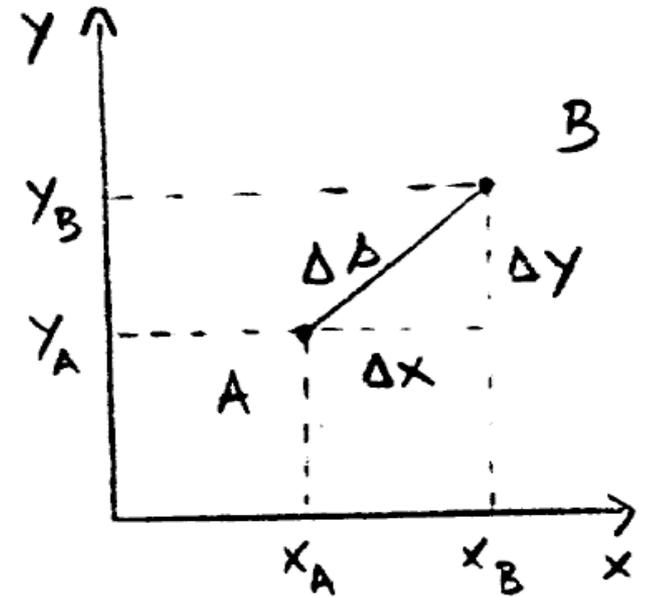
$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$$

- ✦ Δs é um invariante. Se mudarmos o sistema de coordenadas, Δs deve ser o mesmo!
- ✦ Se trocamos o sistema de coordenadas para $x=x(x_1, x_2)$ e $y=y(y_1, y_2)$ e reescrevemos a distância nesse novo sistema, teremos o mesmo

- Se Δx e Δy forem pequenos, podemos escrever:

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial x}{\partial x_2} \Delta x_2$$

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2$$



- E a distância entre A e B, no novo sistema de coordenadas, será:

$$\Delta s^2 = \left[\left(\frac{\partial x}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \right] \Delta x_1^2 + 2 \left[\frac{\partial x}{\partial x_1} \frac{\partial x}{\partial x_2} + \frac{\partial y}{\partial x_1} \frac{\partial y}{\partial x_2} \right] \Delta x_1 \Delta x_2 + \left[\left(\frac{\partial x}{\partial x_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \right] \Delta x_2^2$$

- Em geral, a distância próxima entre dois pontos sobre uma superfície pode ser escrita como:

$$\Delta s^2 = \sum_{\mu=1}^2 \sum_{\nu=1}^2 g_{\mu\nu}(x_\mu, x_\nu) \Delta x_\mu \Delta x_\nu$$



em que

$$g_{\mu\nu} = \frac{\partial x}{\partial x_\mu} \frac{\partial x}{\partial x_\nu} + \frac{\partial y}{\partial x_\mu} \frac{\partial y}{\partial x_\nu}$$

As expressões do tipo

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

são chamadas de métricas e as quantidades $g_{\mu\nu}$ são o tensor métrico.

No caso de coordenadas polares, teríamos, supomos $x_1 = r$ e $x_2 = \phi$

$$x = r \cos \varphi$$

$$\Delta x = \cos \varphi \Delta r - r \text{sen} \varphi \Delta \varphi$$

Sabemos que:

$$y = r \text{sen} \varphi$$

$$\Delta y = \text{sen} \varphi \Delta r + r \cos \varphi \Delta \varphi$$



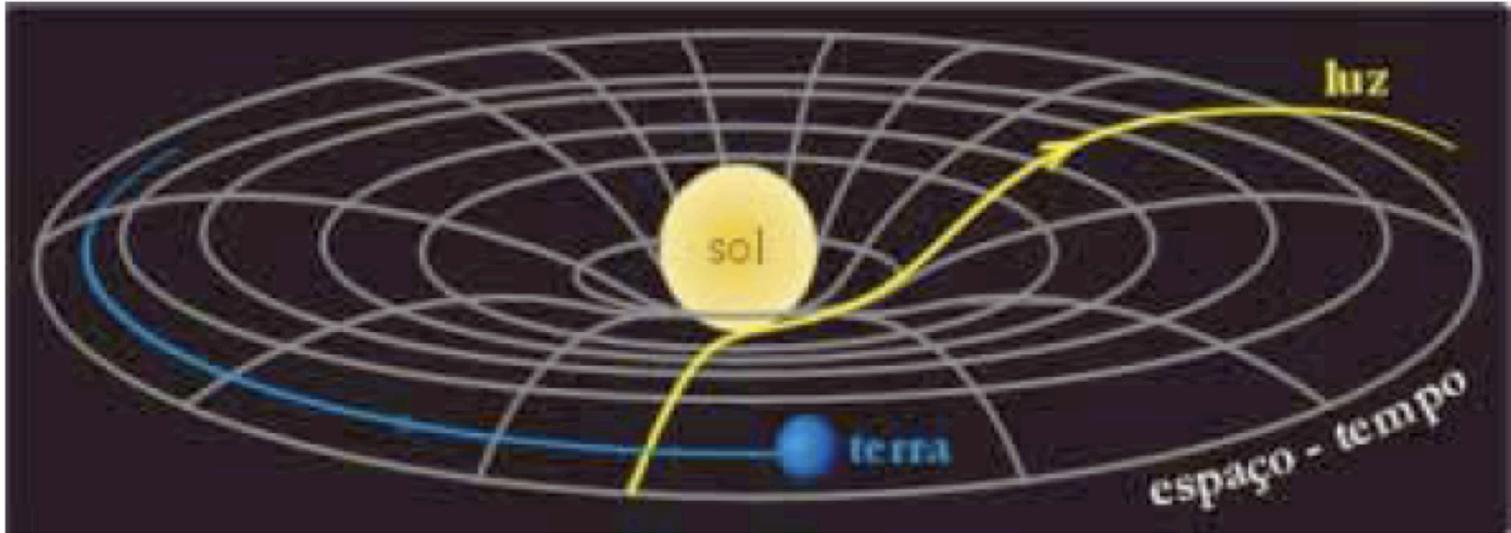
$$\Delta s^2 = \Delta r^2 + r^2 \Delta \varphi^2 = \Delta x_1^2 + x_1^2 \Delta x_2^2$$



Logo,

$$(g_{\mu\nu}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & x_1^2 \end{pmatrix}$$

Espaço-tempo e geometria

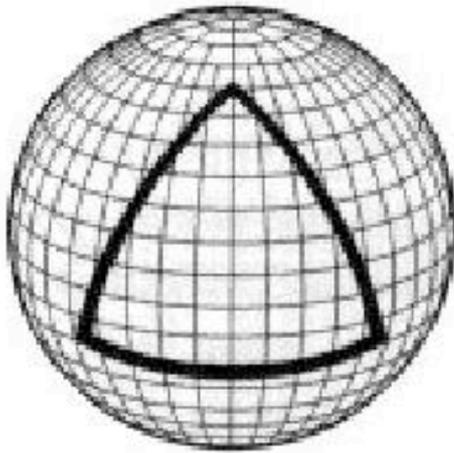


Para a Relatividade Geral, objetos se movem livremente sobre a superfície do espaço-tempo, que tem sua geometria determinada pela massa do Universo.

✚ Métrica de Friedmann-Robertson-Walker.

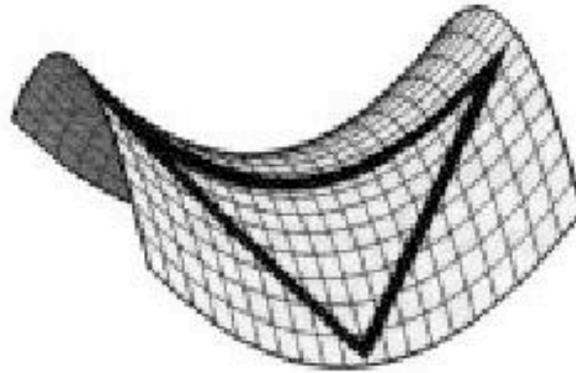
$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - \kappa r^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right]$$

Espaço-tempo e geometria



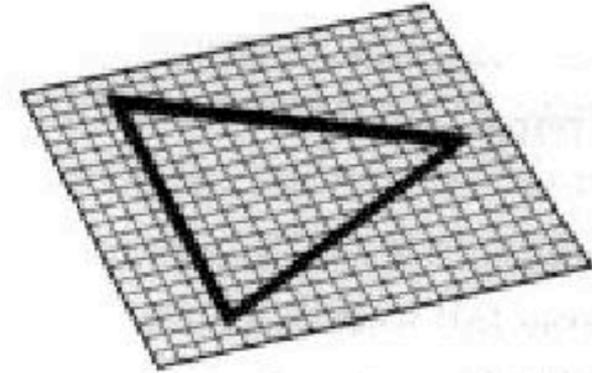
Geometria fechada

Curvatura
espacial
positiva: $k = +1$



Geometria aberta

Curvatura
espacial
negativa $k = -1$



Geometria plana

Curvatura
espacial
nula: $k = 0$

A TRG como teoria de gravitação

- ✪ A idéia básica da TRG é que a presença de matéria encurva o espaço-tempo.

$$G^{\mu\nu} = \text{const.} \times T^{\mu\nu} \quad \text{e} \quad G^{\mu\nu} = R^{\mu\nu} - \frac{1}{2} g^{\mu\nu} R$$

Tensor de Einstein:
descreve a curvatura
do espaço-tempo em
cada ponto do
Universo

Tensor Momento-Energia:
define a composição da
matéria e energia do
Universo causadora da
curvatura do espaço-
tempo.

Tensor de Riemann:
descreve a mudança
de direção de um
vetor que se move ao
longo de uma curva
fechada.



As equações da gravitação

Equações de Einstein-Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{\kappa^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

Termo cinético, em que R é o fator de expansão do Universo equivalente à energia cinética.

ρ - densidade de matéria

κ - curvatura

Λ - "constante cosmológica"

G - constante gravitacional

R - fator de escala

Termo de fontes, descreve os causadores da mudança dinâmica do Universo (equivalente à energia potencial gravitacional).



As equações da gravitação

Equações de Einstein-Friedmann

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda}{3}$$

Termo dinâmico,
envolve uma
aceleração

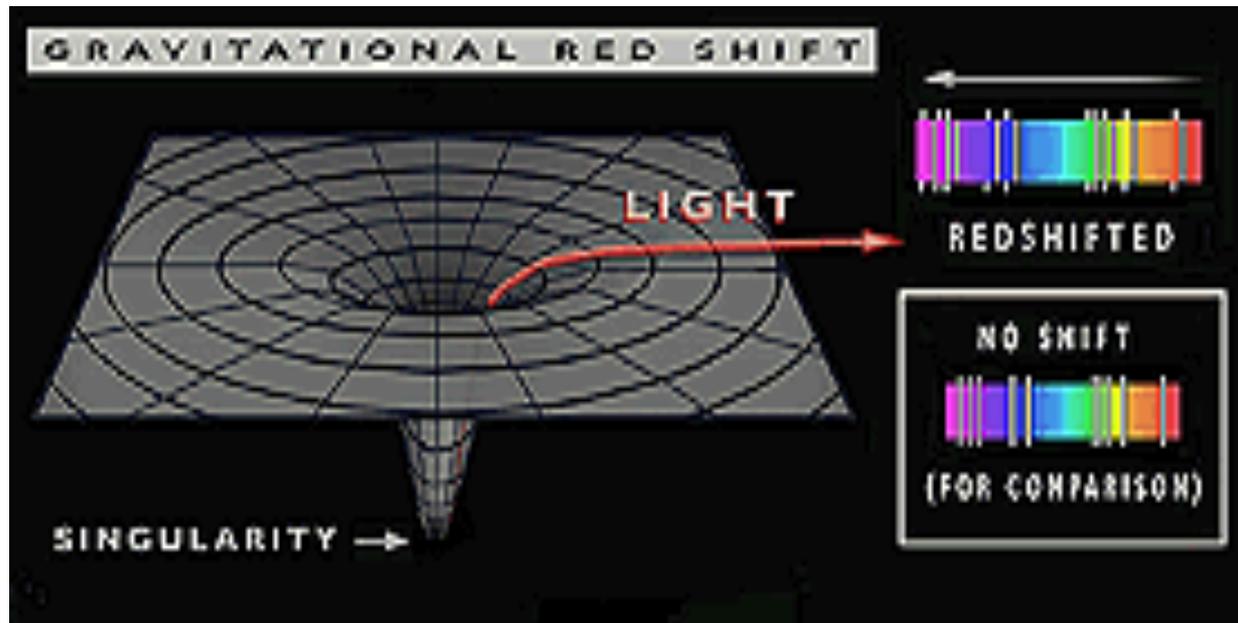
Termo de fontes,
contém implicitamente
a 1a. Lei da
Termodinâmica.



Testes experimentais e observacionais da TRG

- ✦ O redshift gravitacional
- ✦ A precessão do periélio de Mercúrio
- ✦ A curvatura da luz
- ✦ A igualdade das massas inercial e gravitacional
- ✦ A emissão de ondas gravitacionais

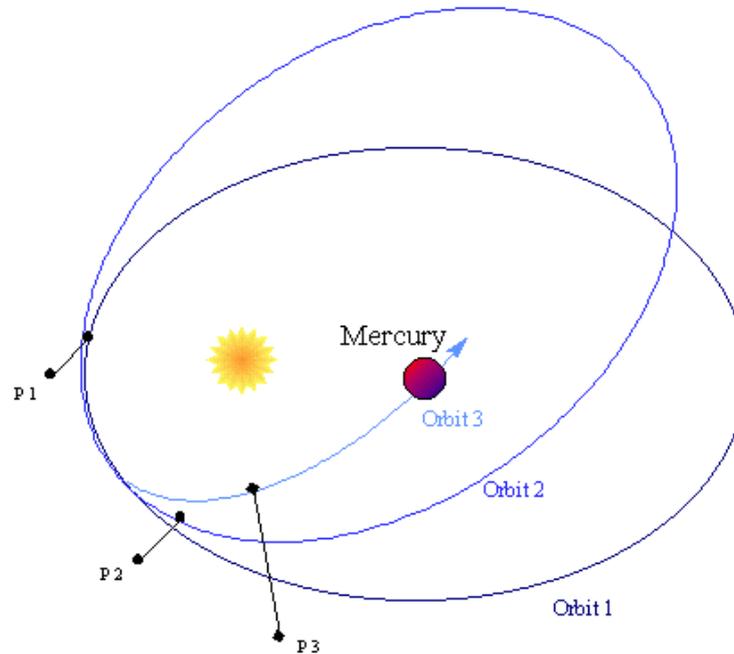
O redshift gravitacional



- ⊕ A presença de um campo gravitacional forte faz com que fótons se movam mais lentamente em sua proximidade.

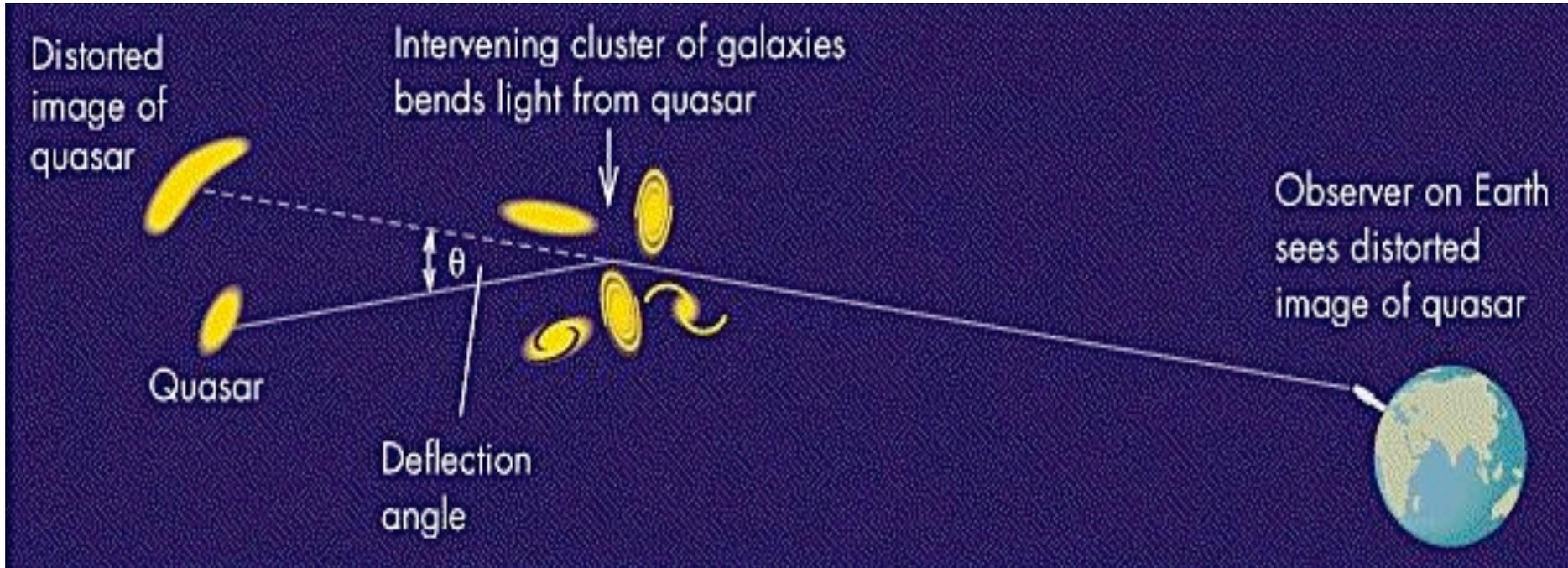
$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta v}{c} = \frac{g\Delta h}{c^2}$$

A precessão do periélio de Mercúrio



Previsão teórica (Le Verrier - 1859): $43''/\text{século}$
Resultado da TRG: $42,98''(\pm 0,001) / \text{século}$

A curvatura da luz



- ⊕ Previsão Newtoniana: $\Delta\theta = 2GM/R_{\text{Sol}}c^2$
- ⊕ Previsão TRG: $\Delta\theta = 4GM/R_{\text{Sol}}c^2$
- ⊕ Verificação (Eddington - 1919): $1,98'' (\pm 0,012)$

A emissão de ondas gravitacionais

 A perda de energia rotacional do pulsar PSR1913+16 somente pode ser explicada através da emissão de ondas gravitacionais

 $-d\Omega/dt \propto \Omega^5$

Relativistic Binary Pulsar B1913+16

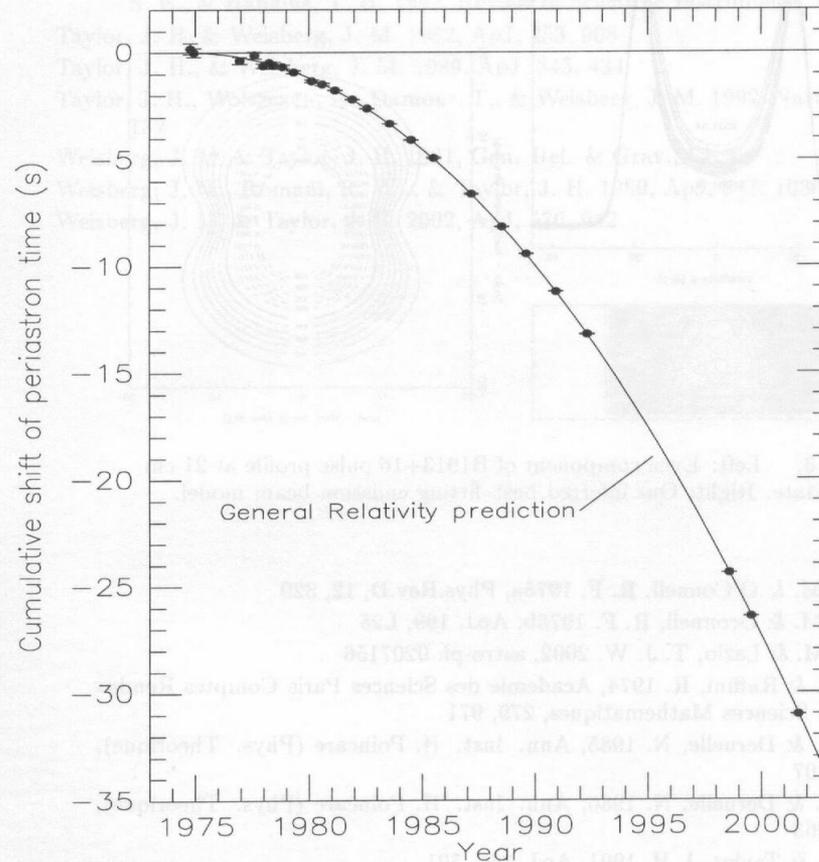


Figure 2. Gravitational radiation damping should cause orbital decay which leads to an accumulating shift in epoch of periastron. The parabola illustrates the general relativistically predicted shift, while the observations are marked by data points. In most cases (particularly in the later data), the measurement uncertainties are smaller than the line widths.



Mini-teste (5 min. duração)

- ⊕ Quais são os postulados da Teoria da Relatividade Restrita?
- ⊕ Quais são os postulados da Teoria da Relatividade Geral?
- ⊕ Qual a principal diferença entre ambas?



Os modelos de Universo...

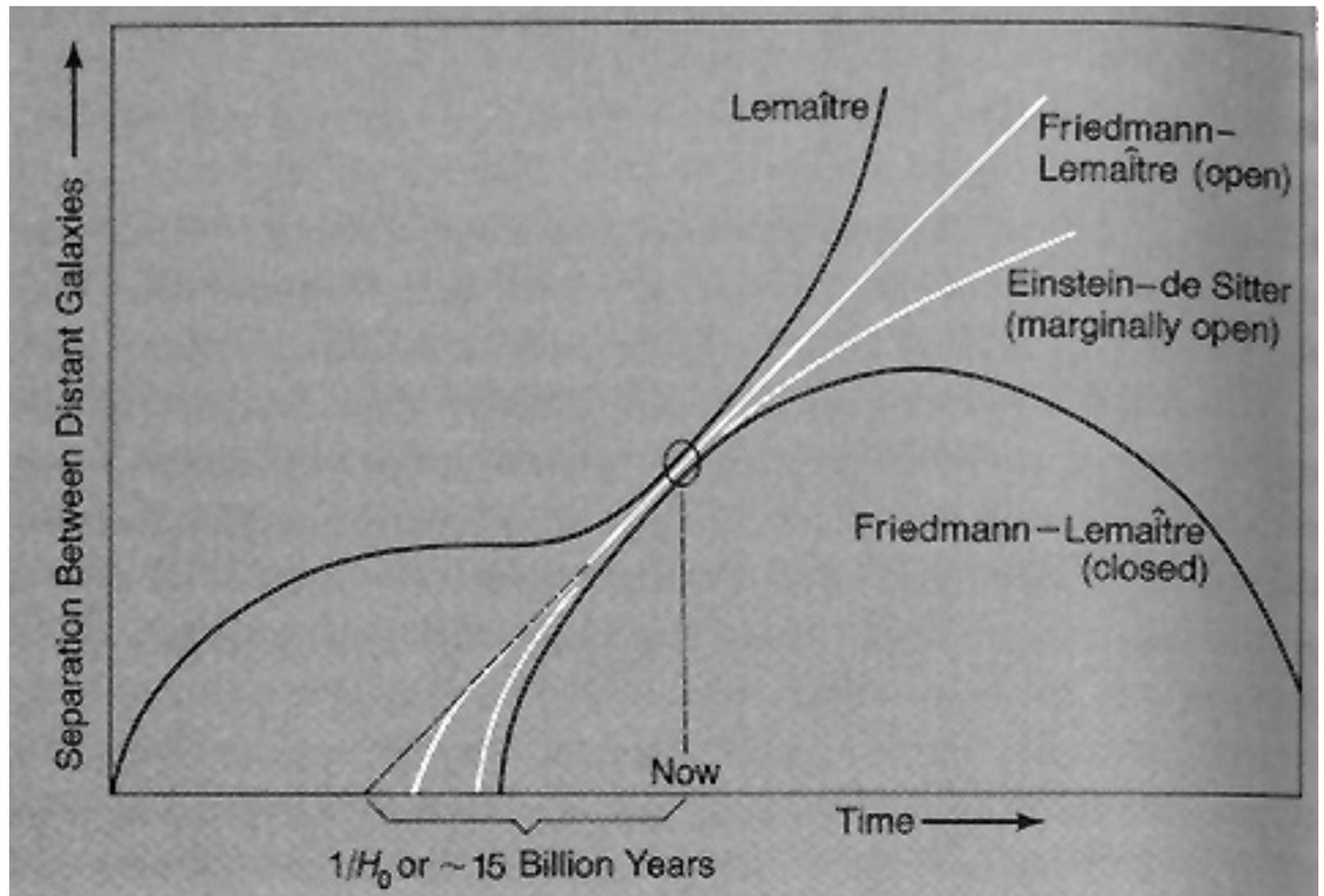
- ✦ Consideração fundamental: isotropia e homogeneidade em grandes distâncias ($> 3 \times 10^9$ a.l.).
 - ▣ Espaço sem matéria: o Universo de Einstein-de Sitter.
 - ▣ Modelos sem constante cosmológica.
 - ▣ Modelos com constante cosmológica (ou equivalente).
- ✦ Arcabouço matemático: eqs. de Einstein-Friedman
- ✦ Distâncias são estimadas via redshift
- ✦ Evolução temporal determinada pelos parâmetros cosmológicos (H_0 , Ω_M , Ω_K , Ω_Λ).

Modelo	Geometria (k)	Λ	q	Destino
De Sitter	Plano (0)	> 0	-1	Sem B.B, expansão exponencial, vazio.
Universo estacionário	Plano (0)	> 0	-1	Sem B.B, expansão uniforme.
Einstein	Esférico (+1)	$= \Lambda_c$	0	Estático, $H = 0$; agora, a gravidade é equilibrada por uma força repulsiva. Pode ser instável.
Lemaitre	Esférico (+1)	$> \Lambda_c$	< 0	Expande, repousa, expande.
Λ Negativo	Qualquer	< 0	> 0	Big Crunch
Fechado	Esférico (+1)	0	$> \frac{1}{2}$	Big Crunch
Einstein-de Sitter	Plano (0)	0	$\frac{1}{2}$	Expande para sempre, densidade possui um valor crítico.
Aberto	Hiperbólico (-1)	0	$0 < q < \frac{1}{2}$	Expande para sempre.



O MODELO COSMOLÓGICO PADRÃO

- ⊕ Geometria (k) = 0
- ⊕ Constante cosmológica (Λ) $\sim -0,73$
- ⊕ Parâmetro de desaceleração (q) = $\frac{1}{2}$
- ⊕ Dinâmica: expansão a partir de um instante inicial denso e quente. No momento a expansão é acelerada e causada pela constante cosmológica
- ⊕ Composição "química" estimada:
 - ⊕ Energia escura (Λ) $\sim 73\%$
 - ⊕ Matéria escura (?) $\sim 24\%$
 - ⊕ Matéria bariônica (prótons e nêutrons) $\sim 3\%$



Fonte: J. Silk, The Big Bang, 2nd Ed., © 1989. W.H. Freeman Co., New York



Da relatividade geral à cosmologia

- ✪ Einstein percebeu que as soluções de suas equações da TRG permitiam a construção de modelos de Universo auto-consistentes. Os modelos padrão continham três ingredientes:
 - ❑ O princípio cosmológico
 - ❑ A estrutura da TRG
 - ❑ A existência de uma única linha de mundo passando por cada ponto do espaço-tempo (postulado de Weyl).



Fundamentos de relatividade essenciais para a Cosmologia

- ⊕ A velocidade da luz é uma constante, independente da velocidade da fonte emissora ou do observador.
- ⊕ Eventos simultâneos para um observador provavelmente não o serão para outro, de modo que não existe tempo absoluto.
- ⊕ Cada observador define o seu "tempo próprio" - o tempo medido por um relógio que se move ao longo de sua linha do tempo.



Fundamentos de relatividade essenciais para a Cosmologia

- ✦ Cada observador verá seu relógio funcionar mais rápido que outros relógios que se movem em relação a ele, consistente com as propriedades das observações com radar.
- ✦ Como resultado, a linha de mundo não acelerada entre dois eventos terá o tempo próprio mais longo entre todas as linhas de tempo conectando estes eventos.
- ✦ Na presença da gravidade, as linhas de mundo de objetos acelerados somente pela gravidade terão os tempos próprios mais longos.
- ✦ **A gravitação requer que o espaço-tempo tenha uma geometria não-Euclidiana e essa curvatura deve ser criada pela matéria.**



O que é Cosmologia?

- ✿ Cosmologia é a ciência que estuda a origem, estrutura e evolução do Universo
- ✿ Seu objetivo é entender como o Universo se formou, por que ele tem a forma que hoje vemos e qual será o seu destino no futuro.
- ✿ Principais ferramentas utilizadas: Física, Astronomia, Matemática, Química, Filosofia.
- ✿ Problemas... é a mais exigente em termos de extrapolação de resultados e conceitos.



Preliminares

A distribuição de objetos no Universo obedece a uma hierarquia, que vai do menor para o maior de acordo com as imagens a seguir...



Estrelas

0

5



Galáxias

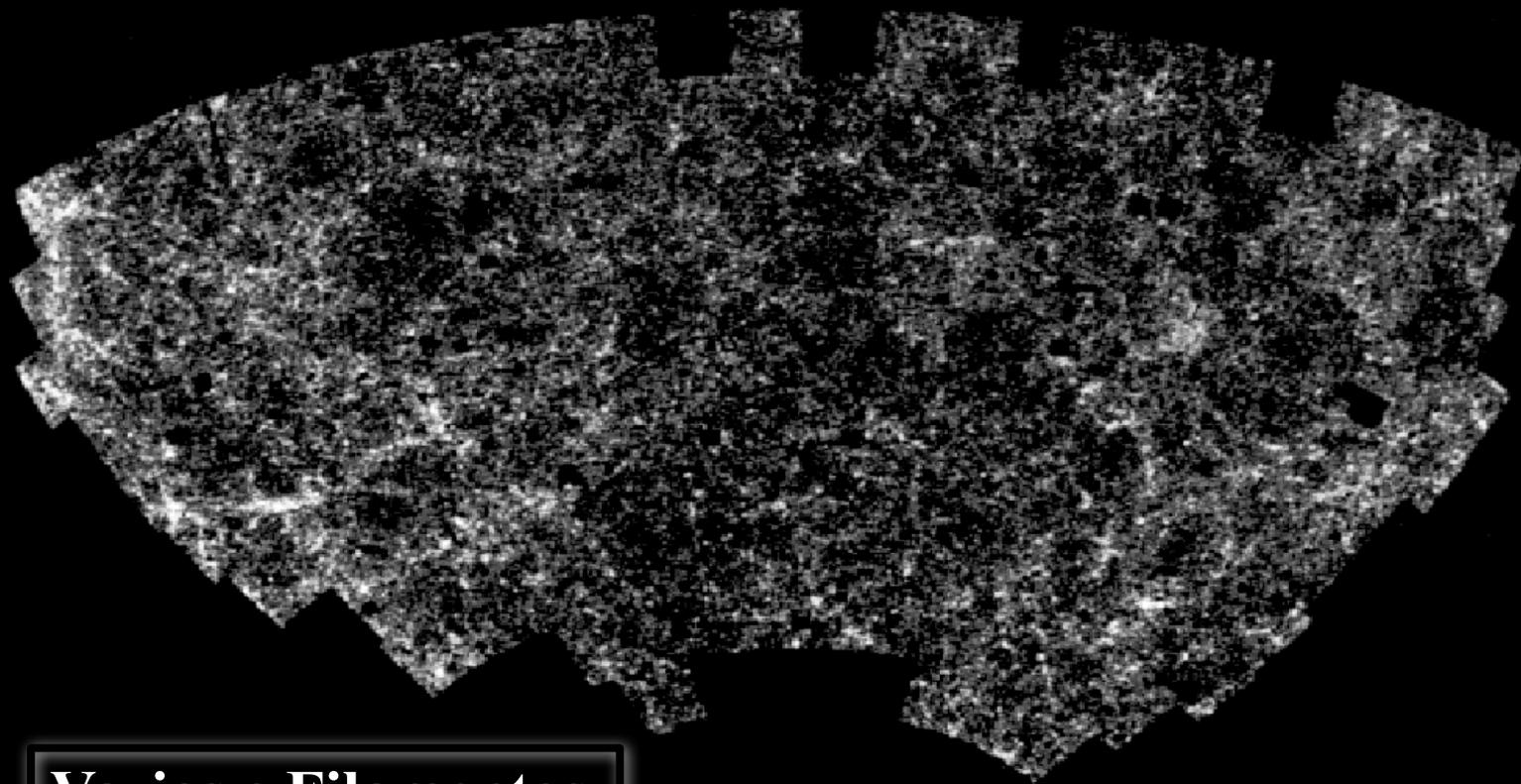
M 63 (NGC 5055)

Suprime-Cam (B, V, H α)





Aglomerados de galáxias
Gravitational Lens
Galaxy Cluster 0024+1654
Hubble Space Telescope • WFPC2



Vazios e Filamentos



Preliminares

Grandes Números

- Nossa galáxia possui 100 bilhões (10^{11}) de estrelas.
- No Universo observável há 100 bilhões (10^{11}) de galáxias.
- No Universo observável há portanto 10^{22} estrelas
- Um balde cheio de areia possui 1 bilhão de grãos de areia.
- Cem baldes cheios de areia terão 100 bilhões (10^{11}) de grãos de areia que é igual o número de estrelas na galáxia.
- Em todas as praias do mundo há em torno de 10^{23} grãos de areia.

- Número de células no corpo humano - 10^{14}
- Número de átomos em um grama - 6×10^{23}
- Número de átomos no corpo humano - $6 \times 10^{23} \times (60 \times 10^3 \text{ g}) = 4 \times 10^{28}$
- Número de prótons no Universo observável - 10^{78}

BIG BANG

What Powered the Big Bang?

Gravitational Waves can Escape from
Earliest Moments of the Big Bang

Big Bang plus
 10^{-43} Seconds

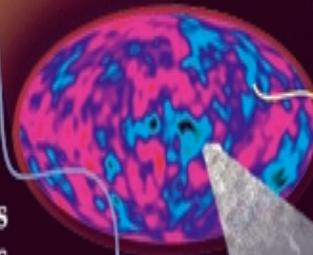


Inflation

(Big Bang plus 10^{-35} seconds?)



Big Bang plus
300,000 Years

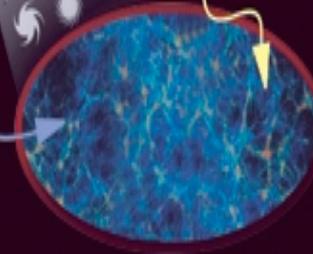


Cosmic microwave background,
distorted by seeds of structure
and gravitational waves

gravitational waves

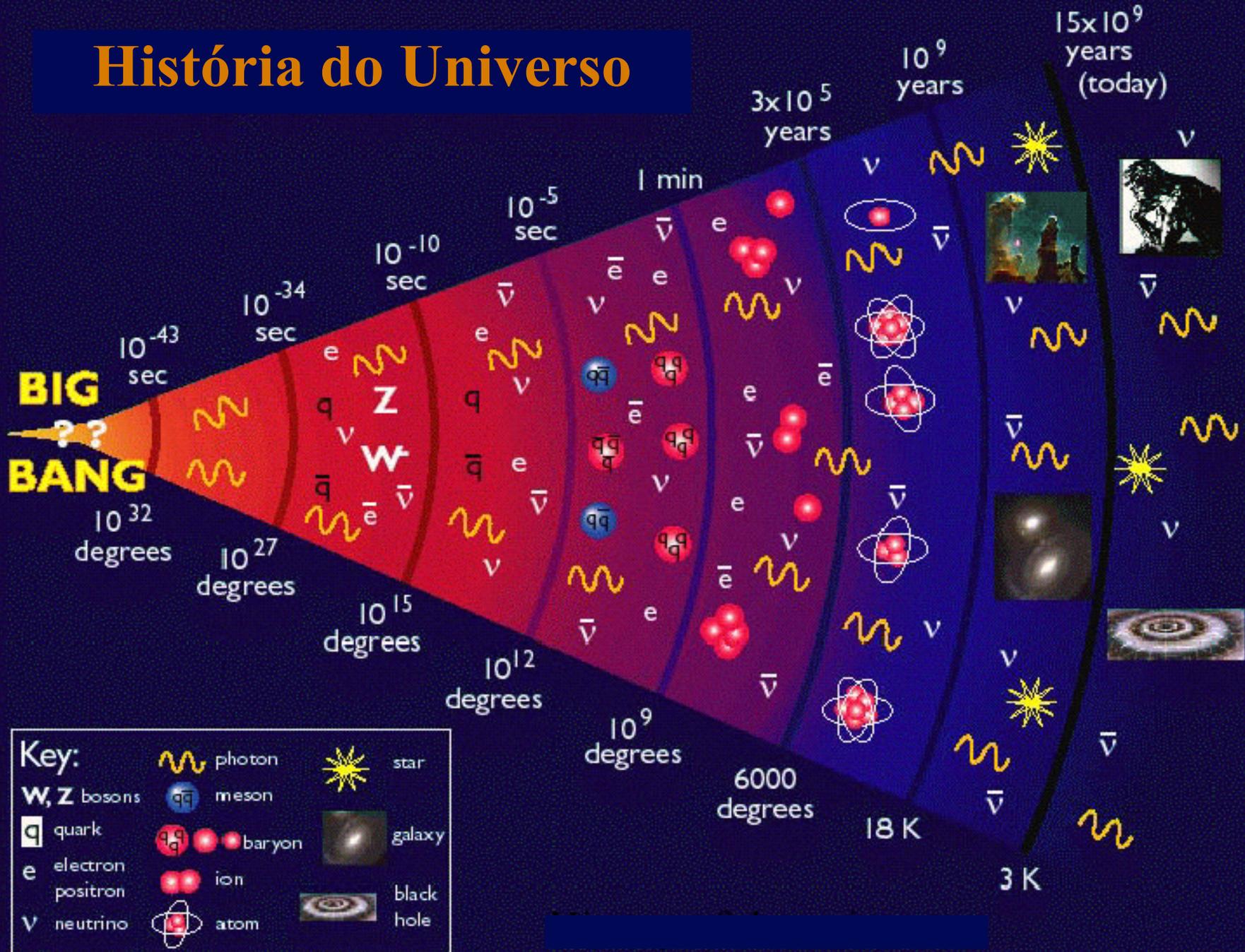
light

Big Bang plus
15 Billion Years

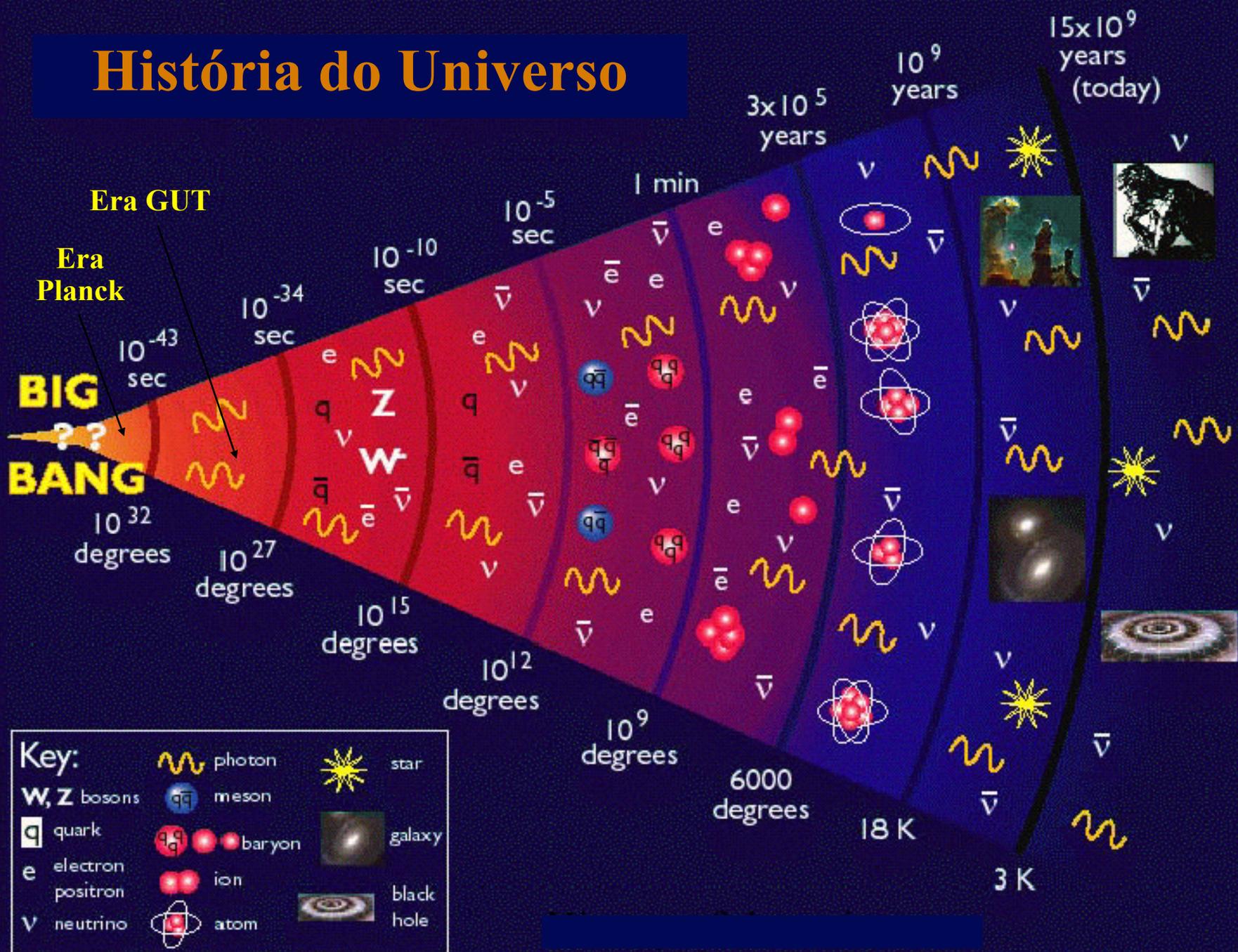


Now

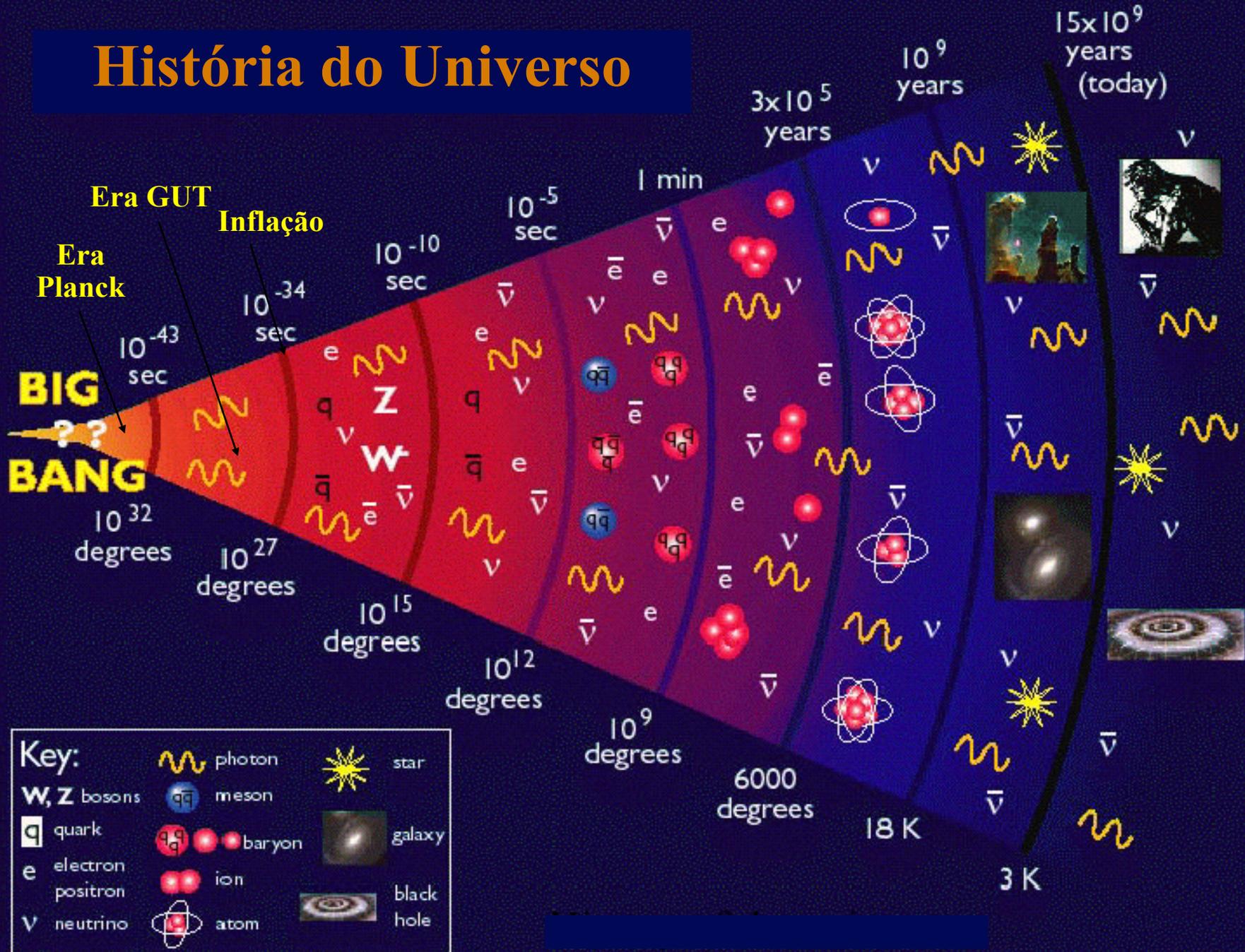
História do Universo



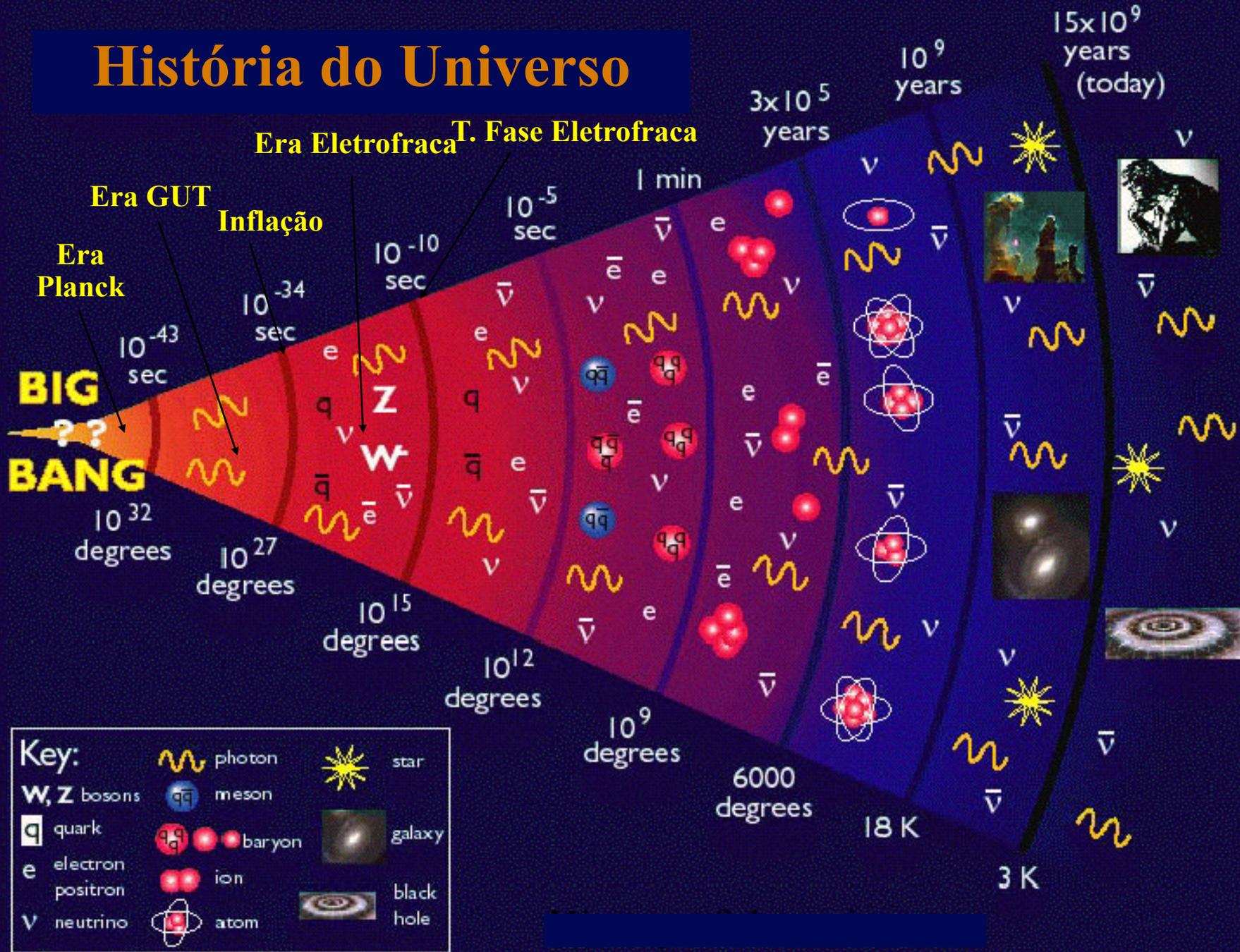
História do Universo



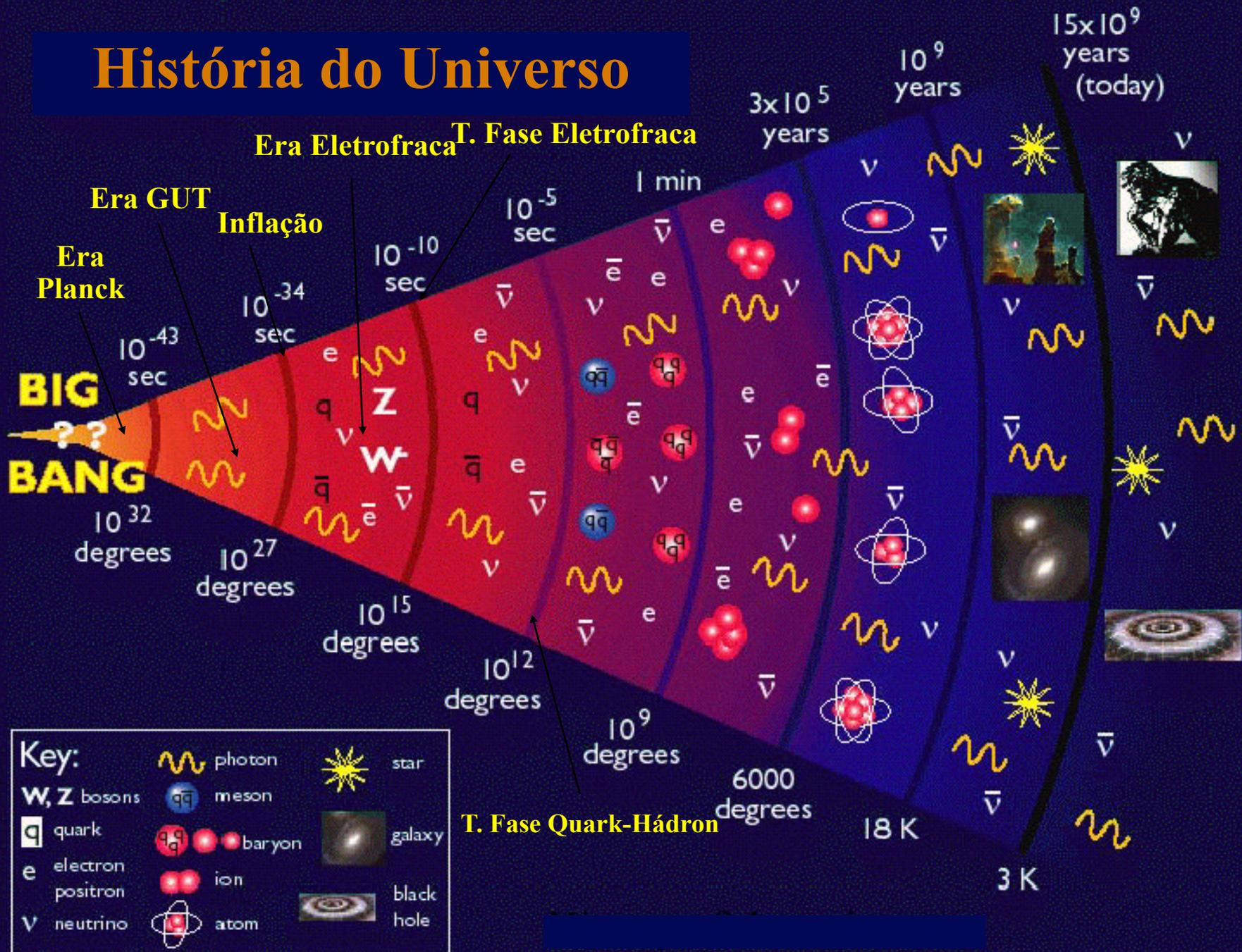
História do Universo



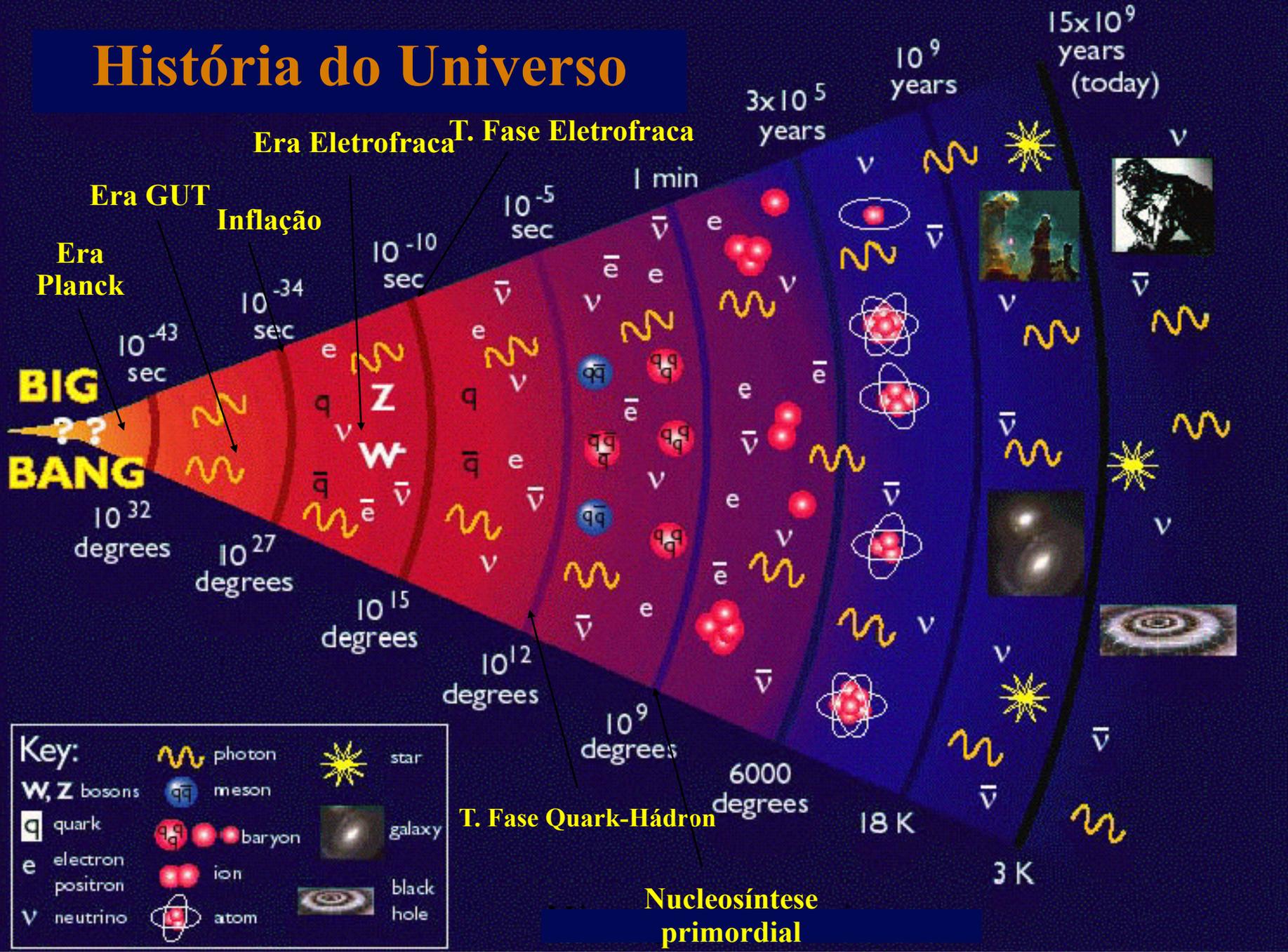
História do Universo



História do Universo



História do Universo



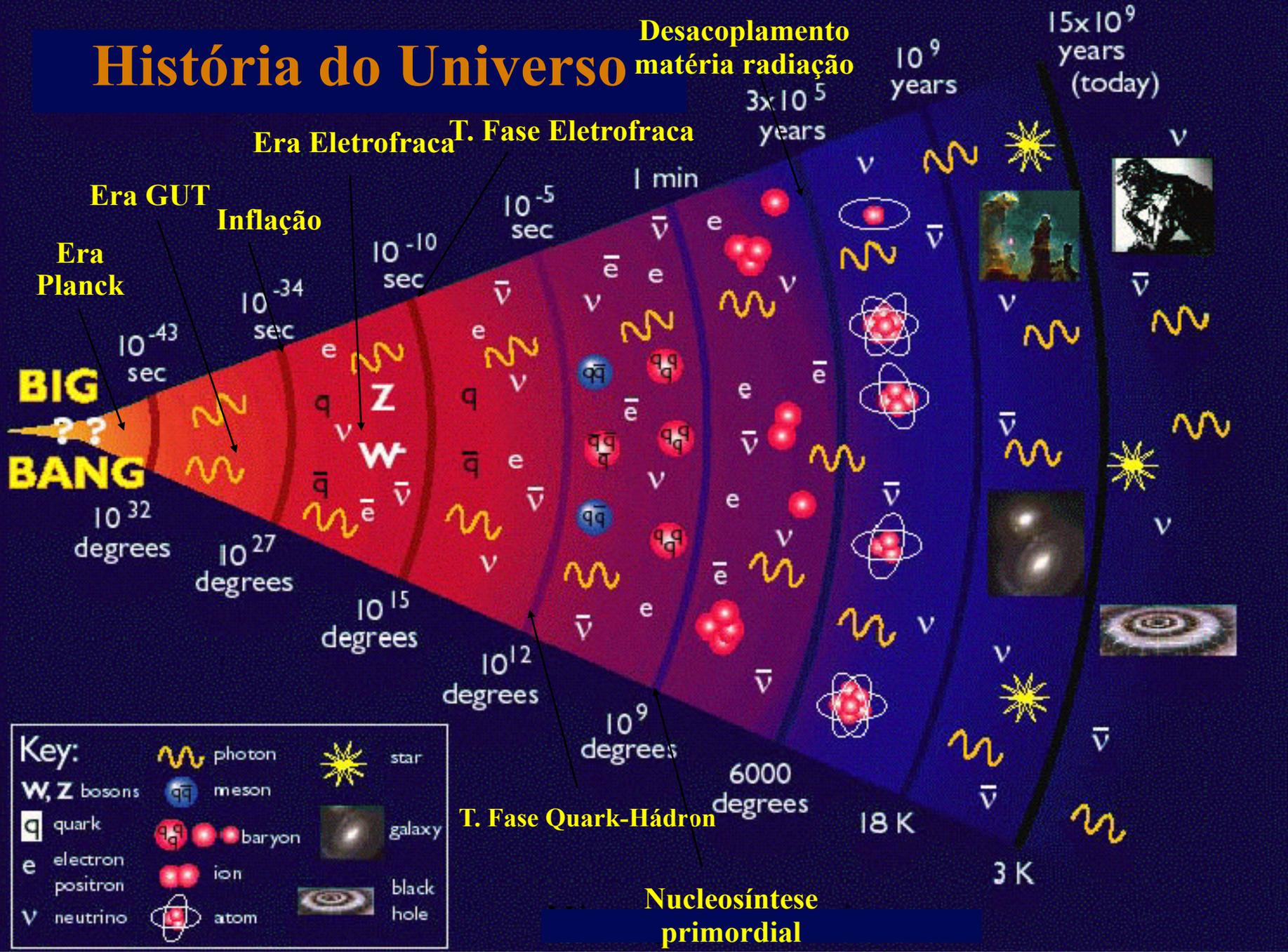
Key:

	photon		star
W, Z	bosons		meson
	quark		baryon
e	electron		ion
ē	positron		atom
ν	neutrino		galaxy
			black hole

Nucleosíntese primordial

História do Universo

Desacoplamento
matéria radiação



Era GUT

Era Planck

Inflação

Era Eletrofraca T. Fase Eletrofraca

BIG BANG
??

10^{32}
degrees

10^{27}
degrees

10^{15}
degrees

10^{12}
degrees

10^9
degrees

6000
degrees

18 K

3 K

Key:

- photon
- star
- W, Z** bosons
- meson
- quark
- baryon
- e** electron
- ion
- positron
- atom
- v** neutrino
- galaxy
- black hole

T. Fase Quark-Hádron

Nucleosíntese
primordial

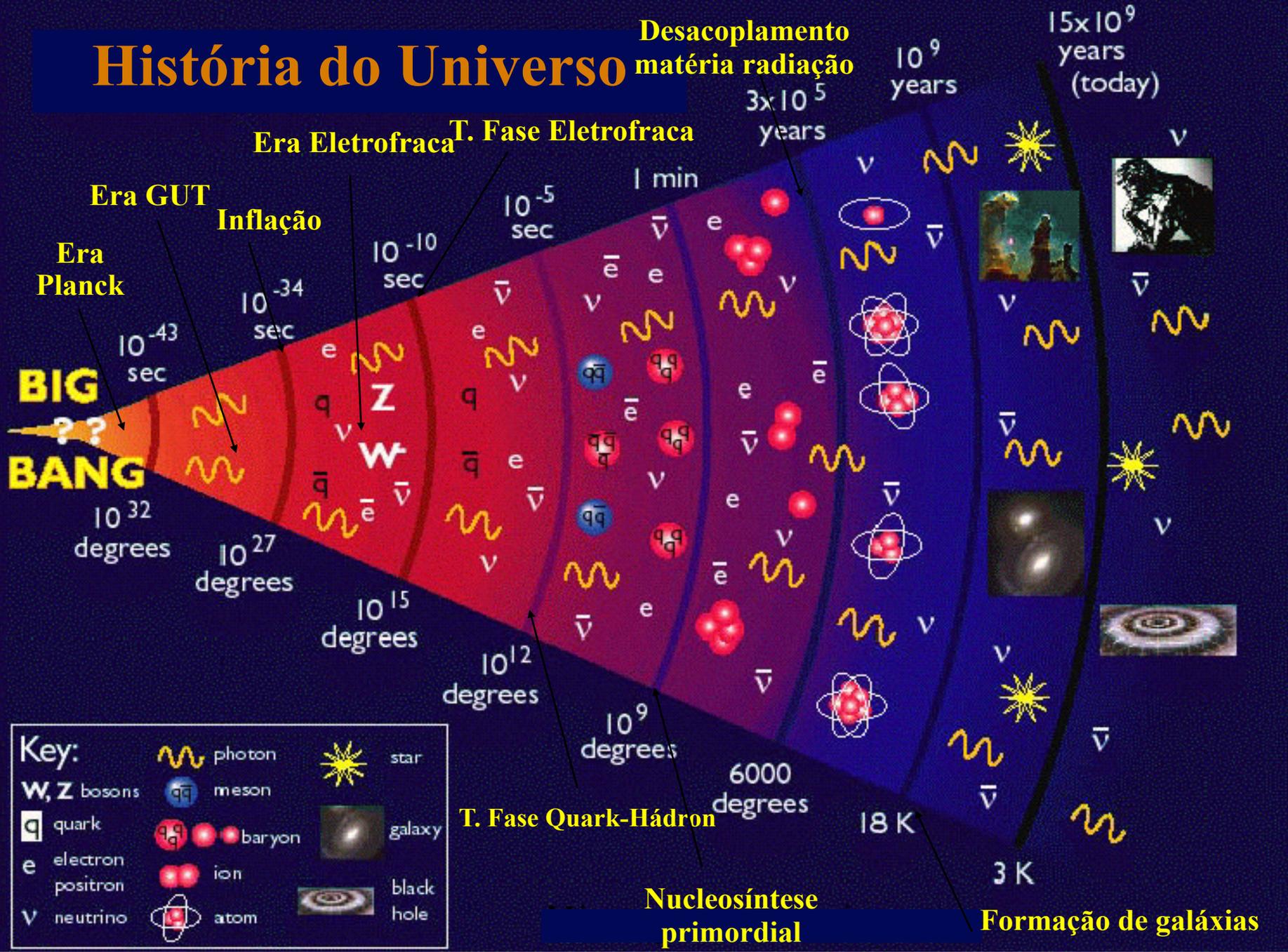
3×10^5
years

10^9
years

15×10^9
years
(today)

1 min

História do Universo





O modelo cosmológico padrão

- ✿ A cosmologia moderna parte de algumas hipóteses de trabalho.
 - ✿ As leis da física válidas no sistema solar valem também no resto do Universo.
 - ✿ As leis da física podem também ser extrapoladas para o passado.
 - ✿ **Princípio de Copérnico**: não ocupamos um lugar privilegiado no Universo.
 - ✿ **Princípio Cosmológico**: o Universo é espacialmente homogêneo e isotrópico.
 - ✿ Isotropia local + homogeneidade = isotropia global
 - ✿ **Gravitação é dominante em grandes escalas.**
- Alcance das interações fraca e forte $\sim 10^{-13}$ cm. Embora $e^2/GM_p^2 \gg 1$, os grandes agregados são eletricamente neutros.



O suporte observacional do modelo cosmológico padrão...



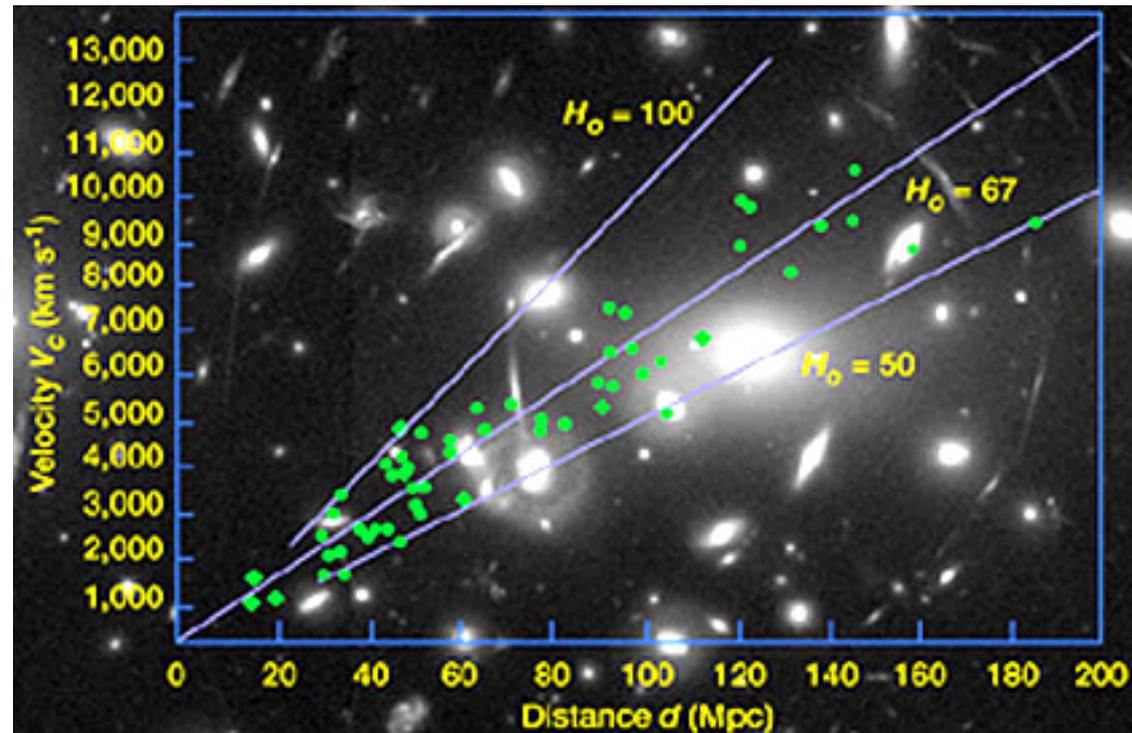
Qualquer modelo realista do Universo deve ser capaz de explicar:

- A expansão do Universo, dada pela velocidade de recessão das galáxias distantes.
- A nucleossíntese primordial.
- A radiação cósmica de fundo em microondas (RCFM).
 - A expansão acelerada, dada pelas medidas de Supernovas tipo I.

A expansão do Universo



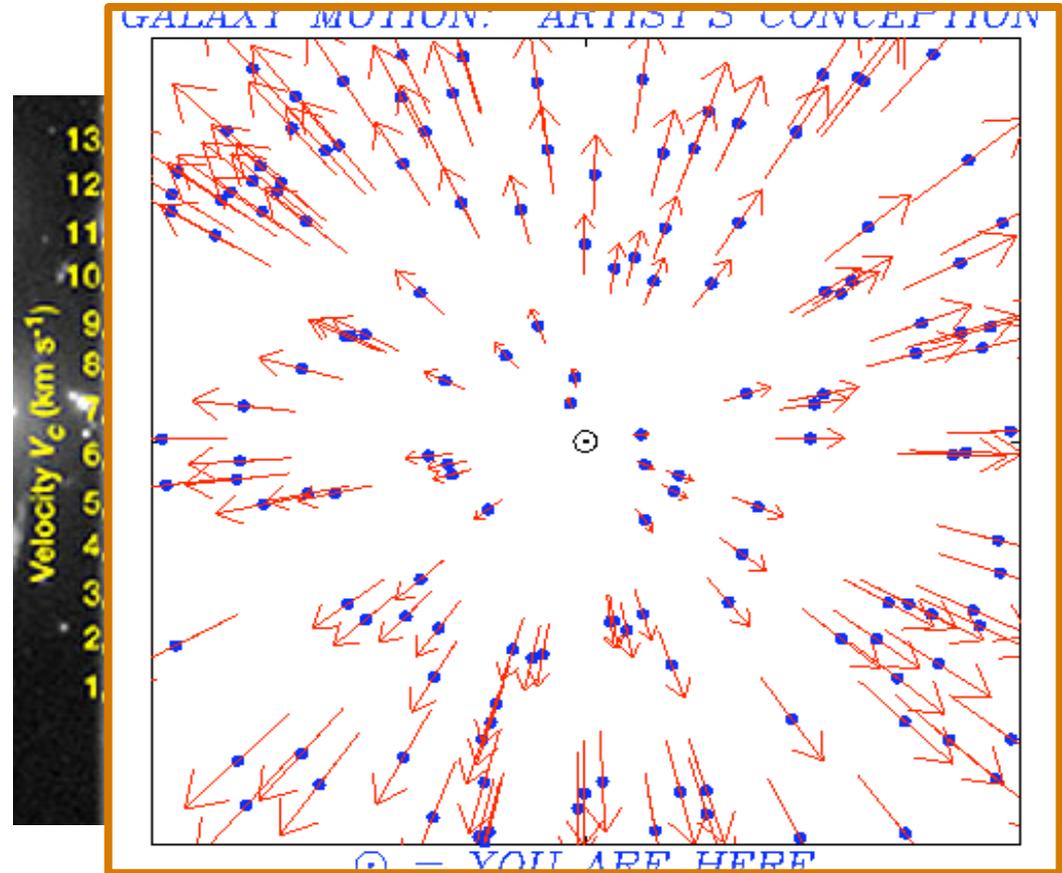
Hubble



A expansão do Universo



Hubble



A lei de Hubble



Não há centro do Universo

Para onde estão as galáxias se expandindo?

Não

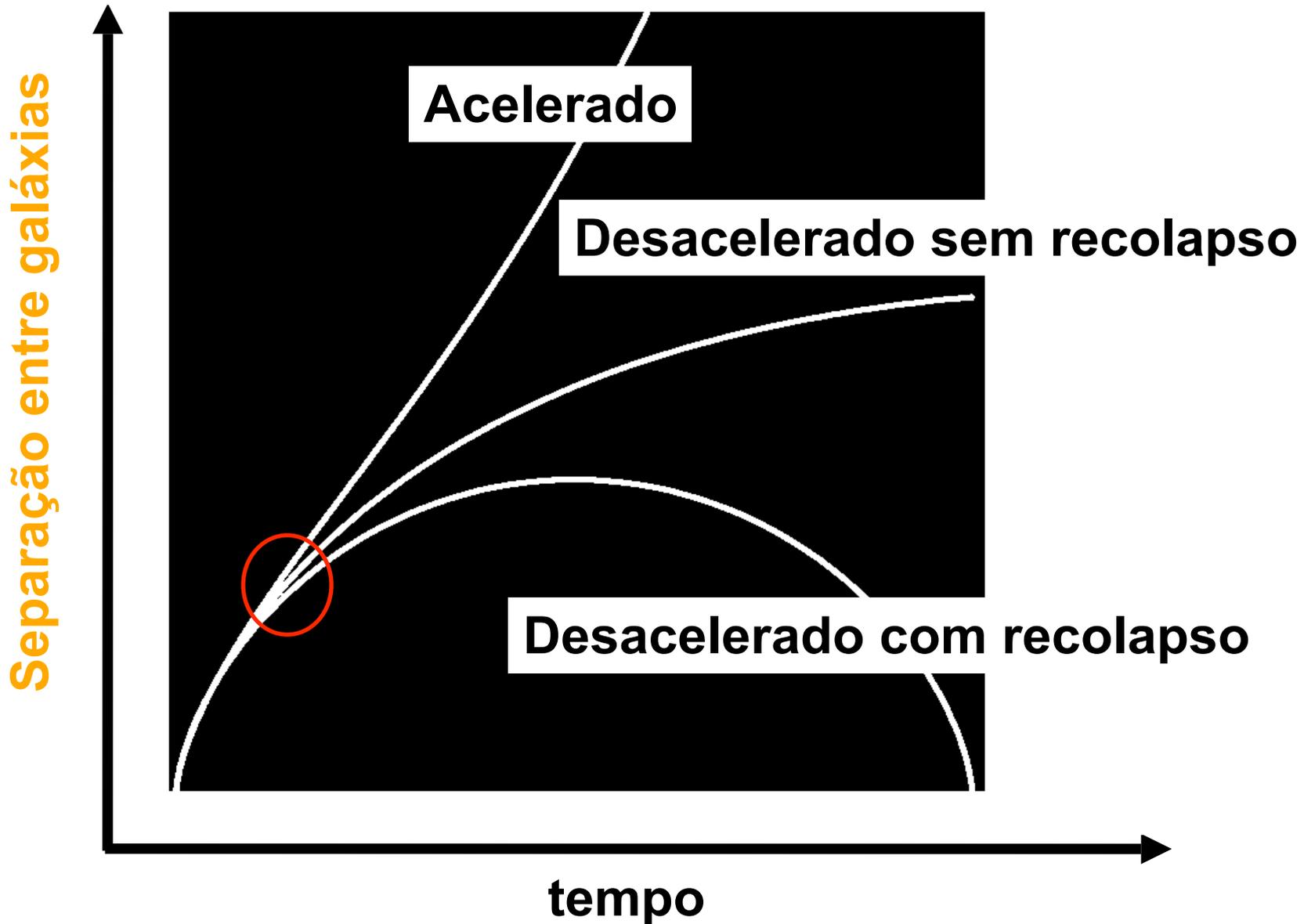


Sim





A expansão do Universo



A formação de elementos leves



Alpher

Bethe

Gamov

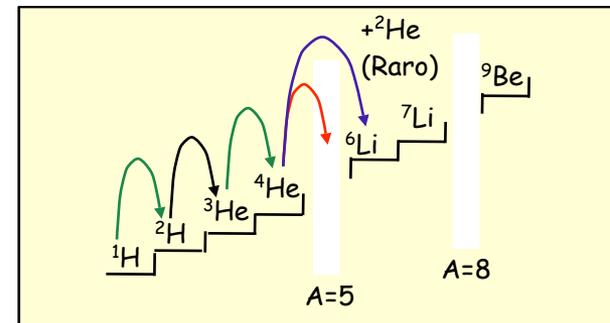
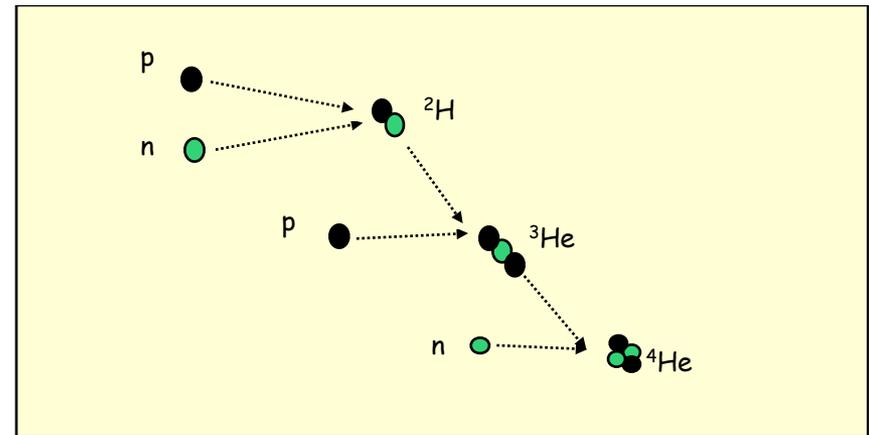
Em 1946, Alpher, Bethe e Gamov sugeriram a possibilidade de que todos os elementos químicos teriam sido gerados através de uma longa cadeia de captura de nucleons em 1 Universo primordial em expansão e que estaria esfriando-se. O esquema falha pois não há elementos leves estáveis com número de massa 5 e 8.

A formação de elementos leves

Nucleossíntese Primordial

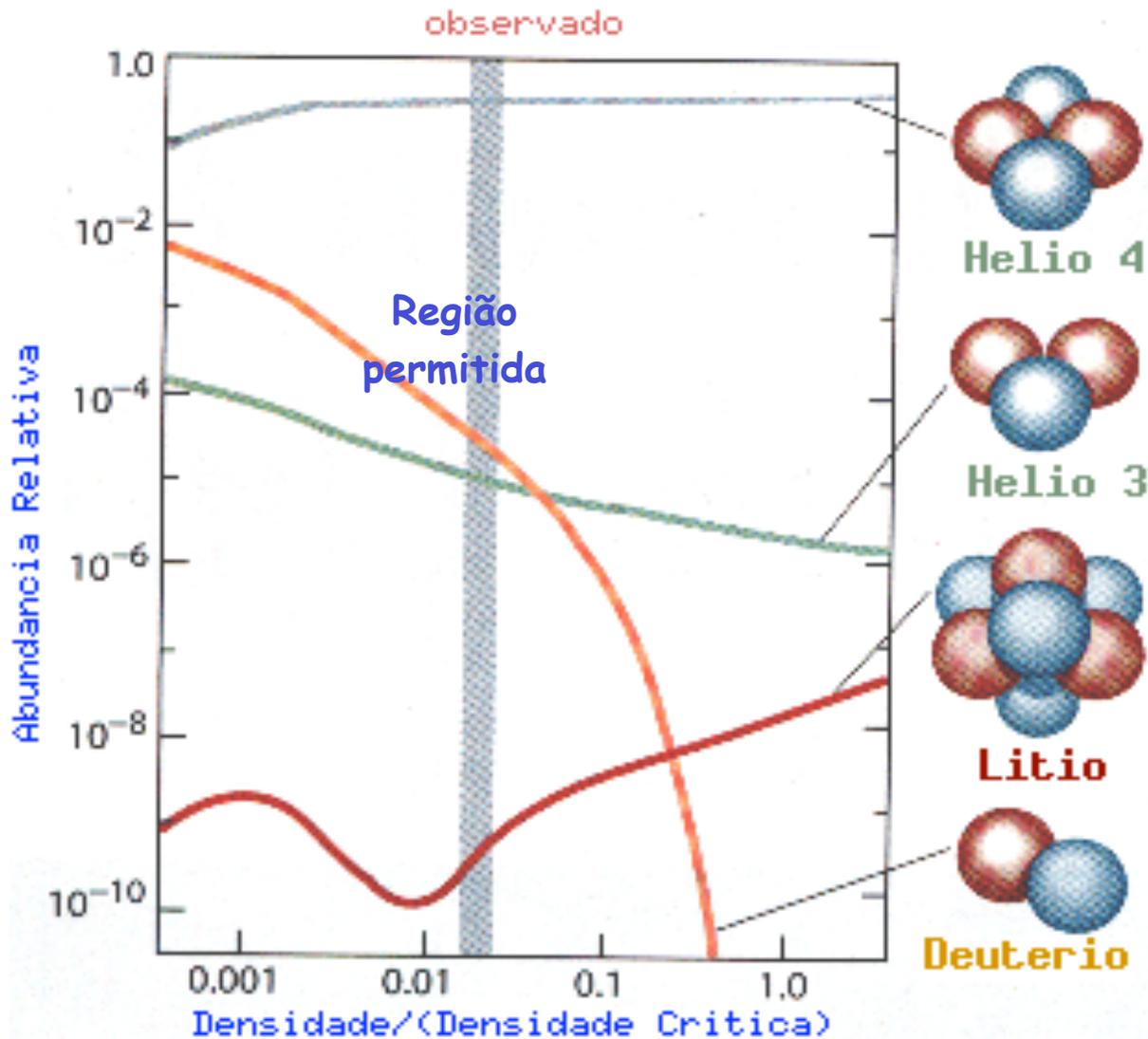
Previsões da teoria:

- Forma, essencialmente, Hidrogênio & $^4\text{Hélio}$
- Forma, em muito menor quantidade, ^2H , ^3He , Li.
- Depende da razão entre prótons e neutrons na época e da taxa de decaimento do neutron.
 - Razão (p:n) = 7:1
- Abundância (por massa) de hélio = 25% do total.



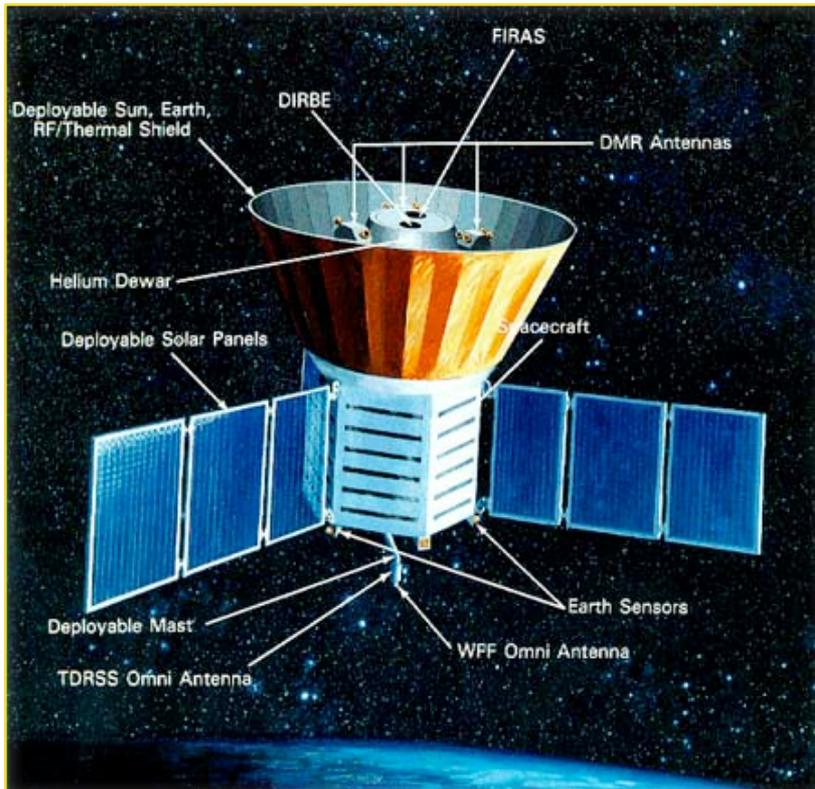
Previsões baseadas em física bem conhecida

A formação de elementos leves



As observações estão em excelente acordo com as previsões teóricas, dando o apoio necessário ao Modelo Cosmológico Padrão

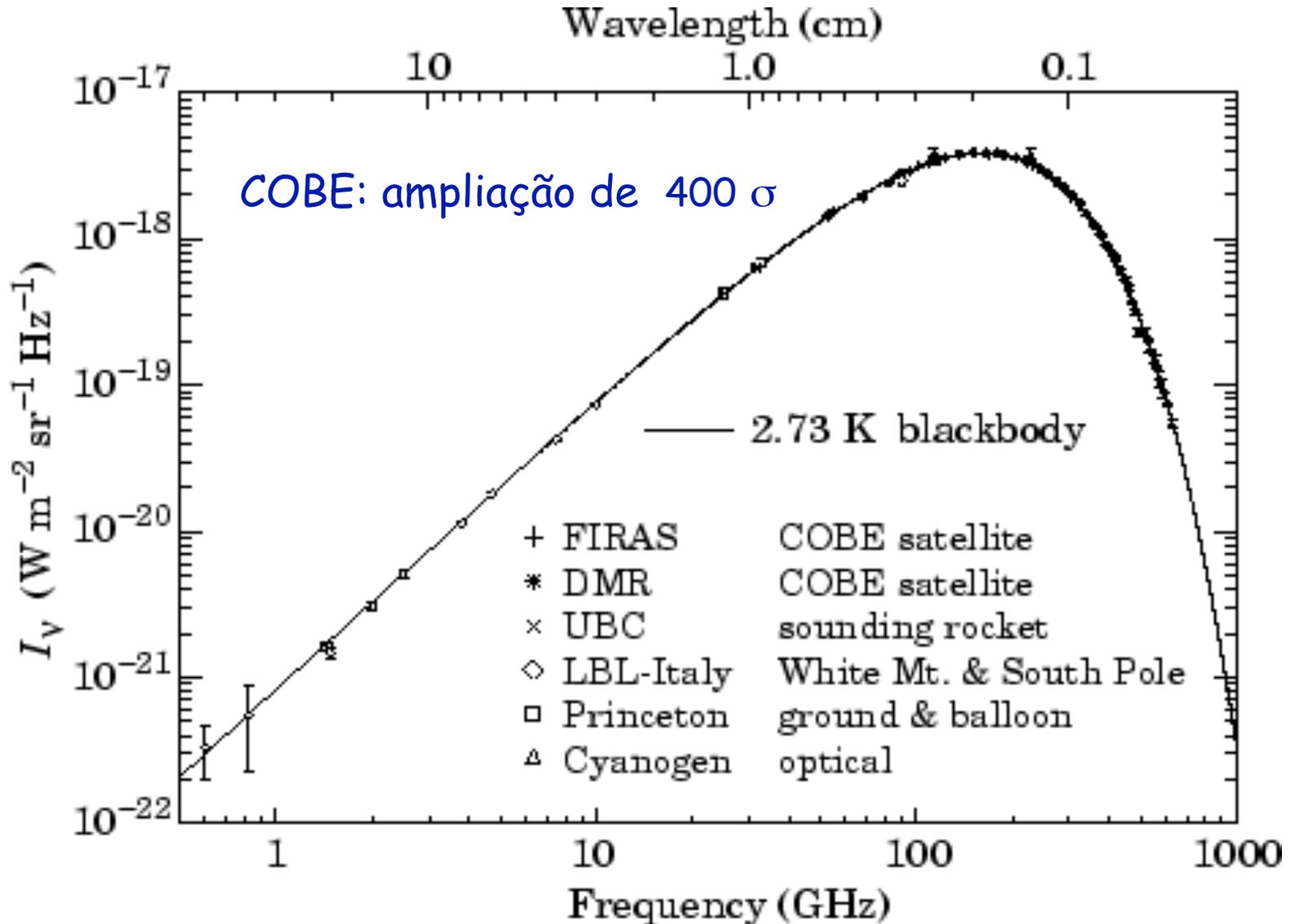
A Radiação C3smica de Fundo em Microondas (RCFM)



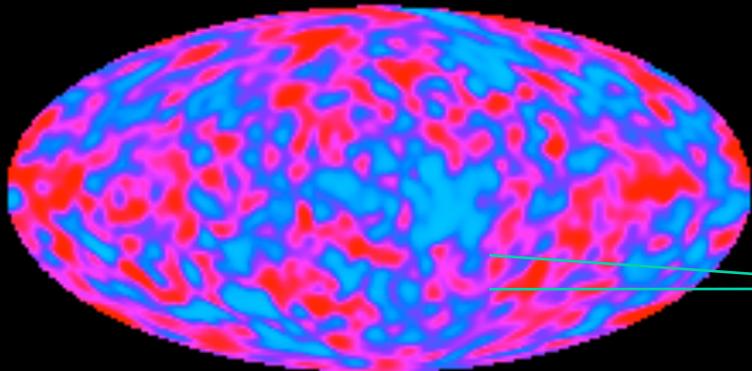
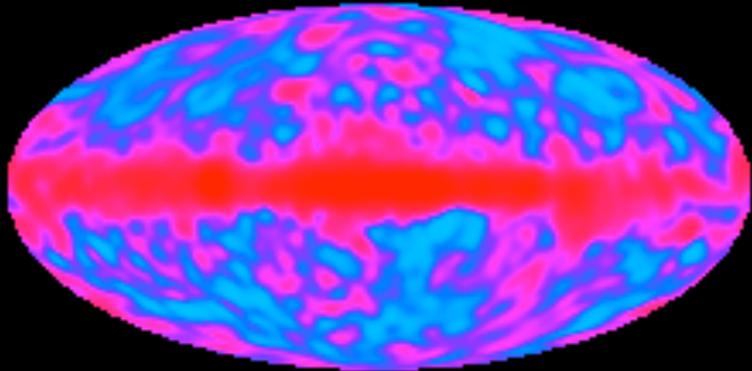
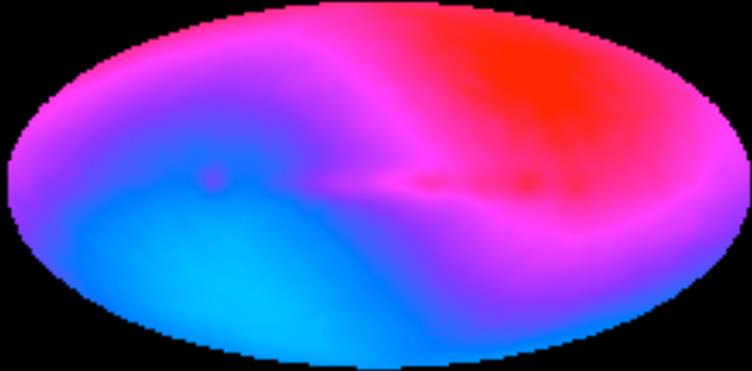
COBE (1989-1994)

- ✦ Características principais:
 - ✦ É uma radiação de corpo negro em microondas ($T = 2,726 \text{ K}$).
 - ✦ A radiação é altamente isotr3pica: $\Delta T/T \sim 1.2 \times 10^{-5}$.
 - ✦ Contudo ela possui uma variaç3o $\Delta T/T \sim 1.2 \times 10^{-3}$, com caracter3sticas de um dipolo, causada pela nossa velocidade em relaç3o ao referencial da RCFM ($v \sim 360 \text{ km/s}$)
- ✦ Estudamos a RCFM atrav3s de seu:
 - ✦ Espectro
 - ✦ distribuiç3o angular
 - ✦ polarizaç3o

O espectro de corpo negro



A distribuição angular da RCF



Mapa 1

dipolo + galáxias +
flutuações

Mapa 2

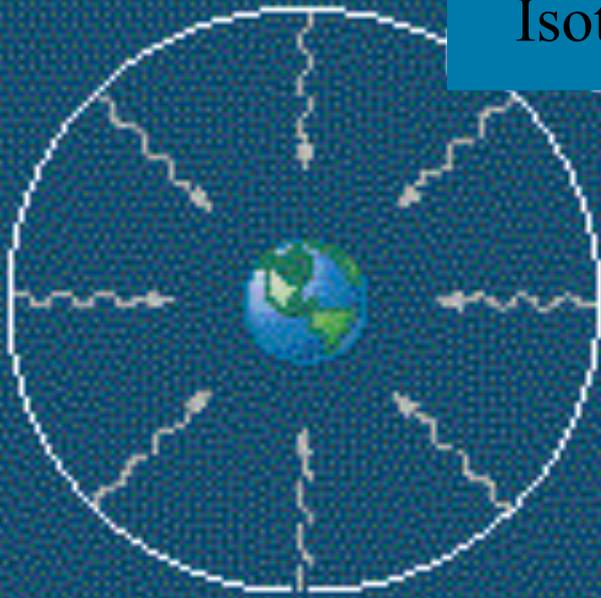
galáxia + flutuações

Mapa 3

flutuações de
temperatura de 1 parte
em $100 \frac{\dot{T}}{T} \approx 10^{-5}$

Escala angular: 7°

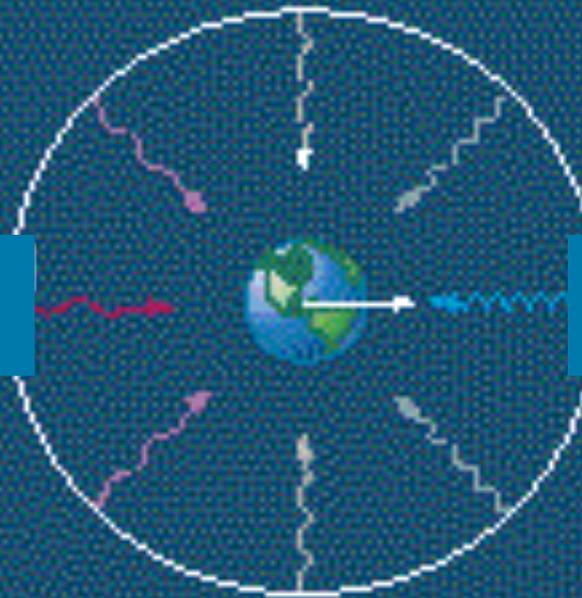
Radiação Isotrópica



(a)

Desvio para o vermelho

Sem desvio



Sem desvio

Desvio para o azul

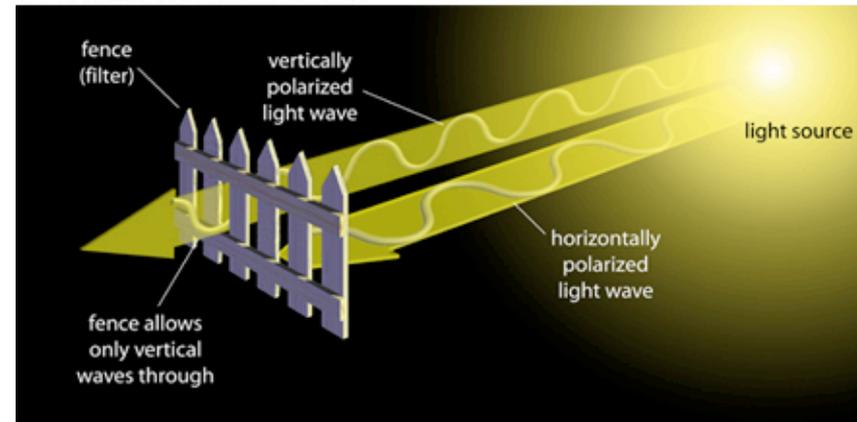
(b)



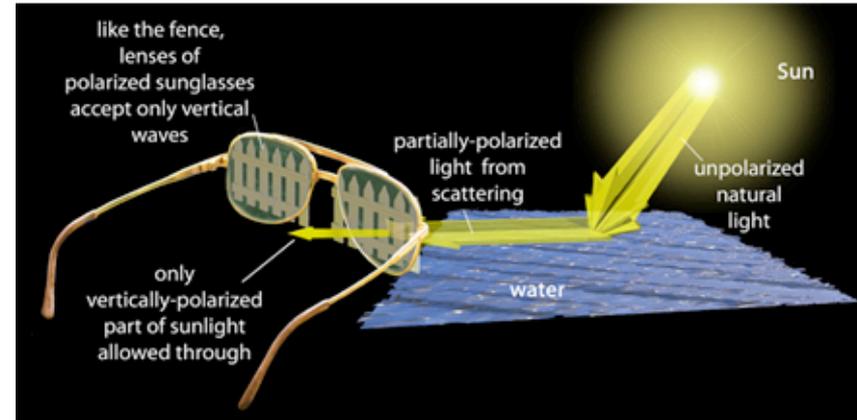
Polarização da RCFM

- Medida importante para definir a época de formação das primeiras estrelas
- Um dos tipos de polarização (tensorial) pode trazer informações sobre as ondas gravitacionais primordiais

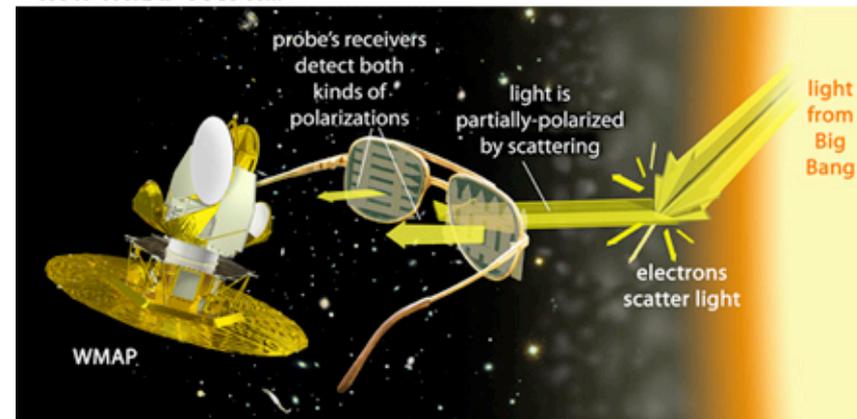
Polarization: How It Works



how we see it...

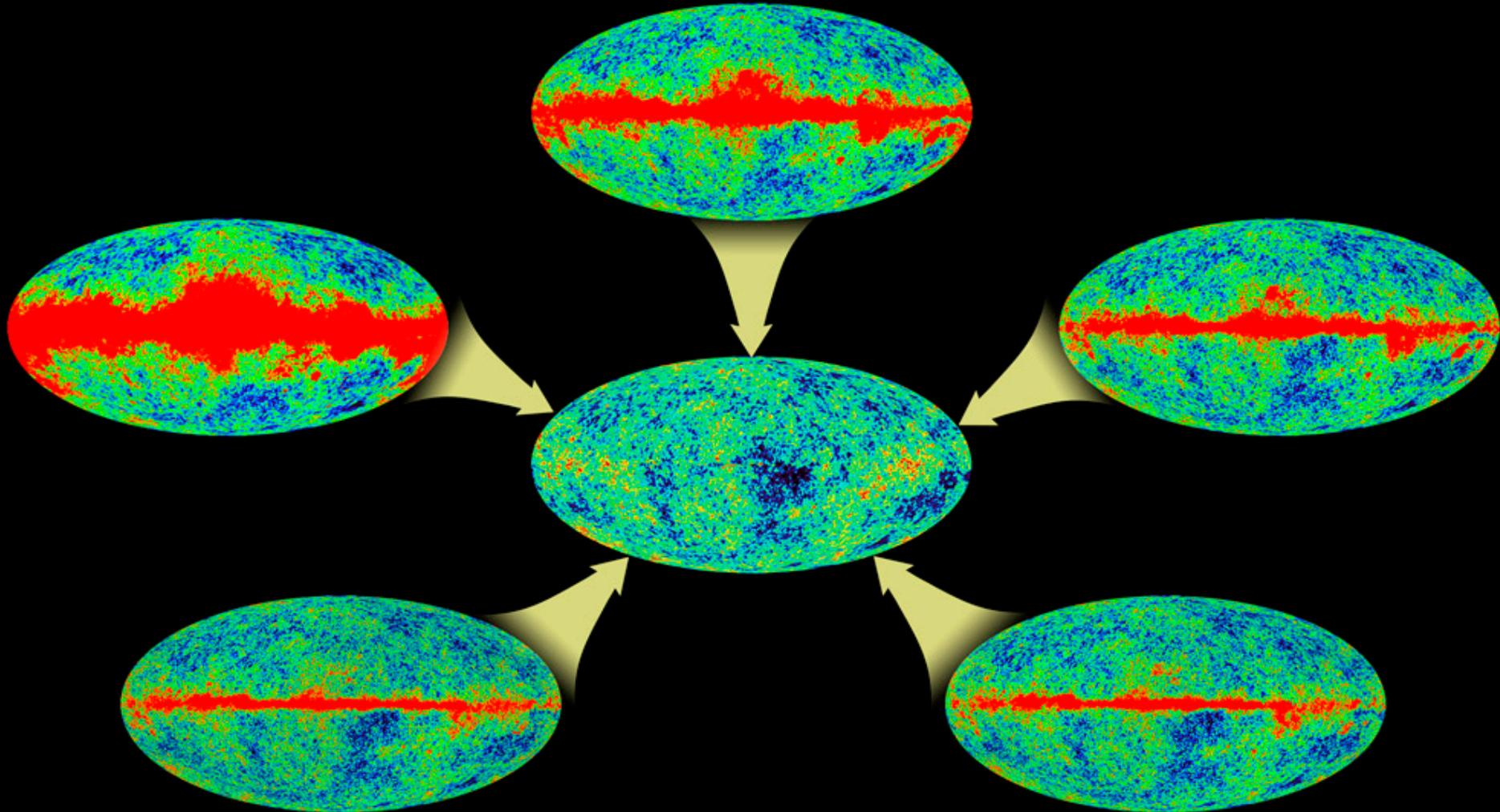


how WMAP sees it...

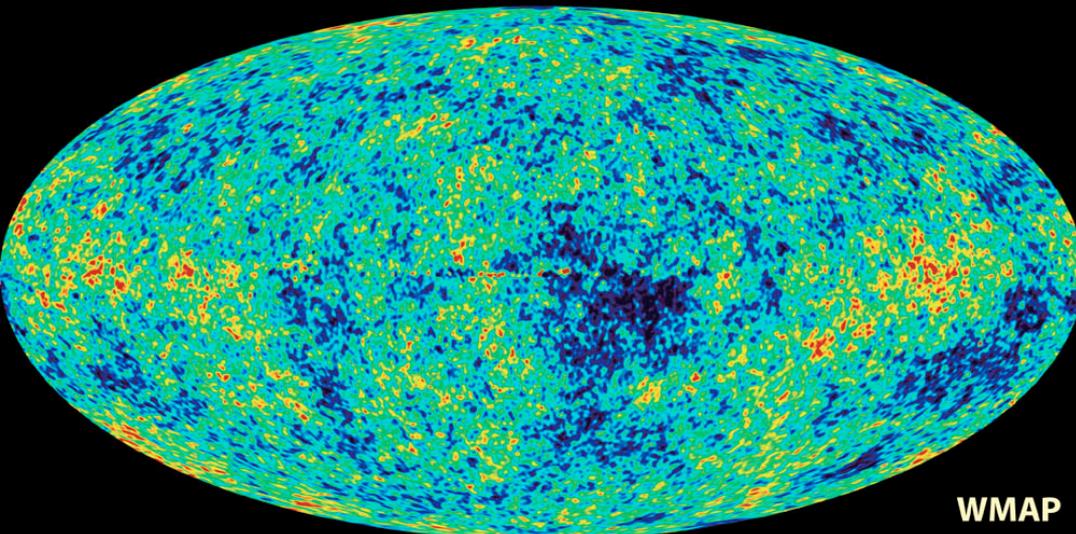
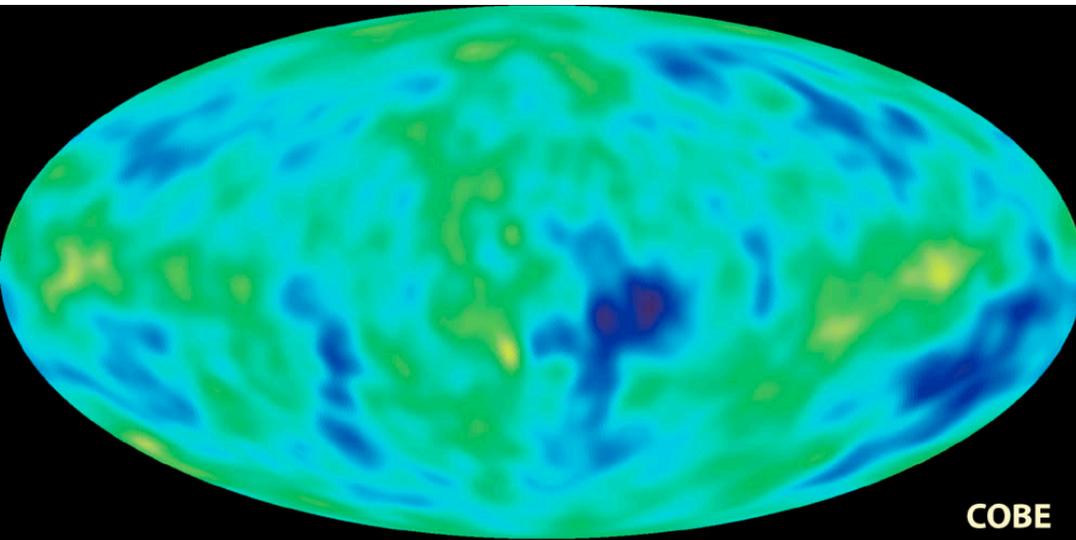


Resultados WMAP

Mapa central: combinação linear das cinco frequências

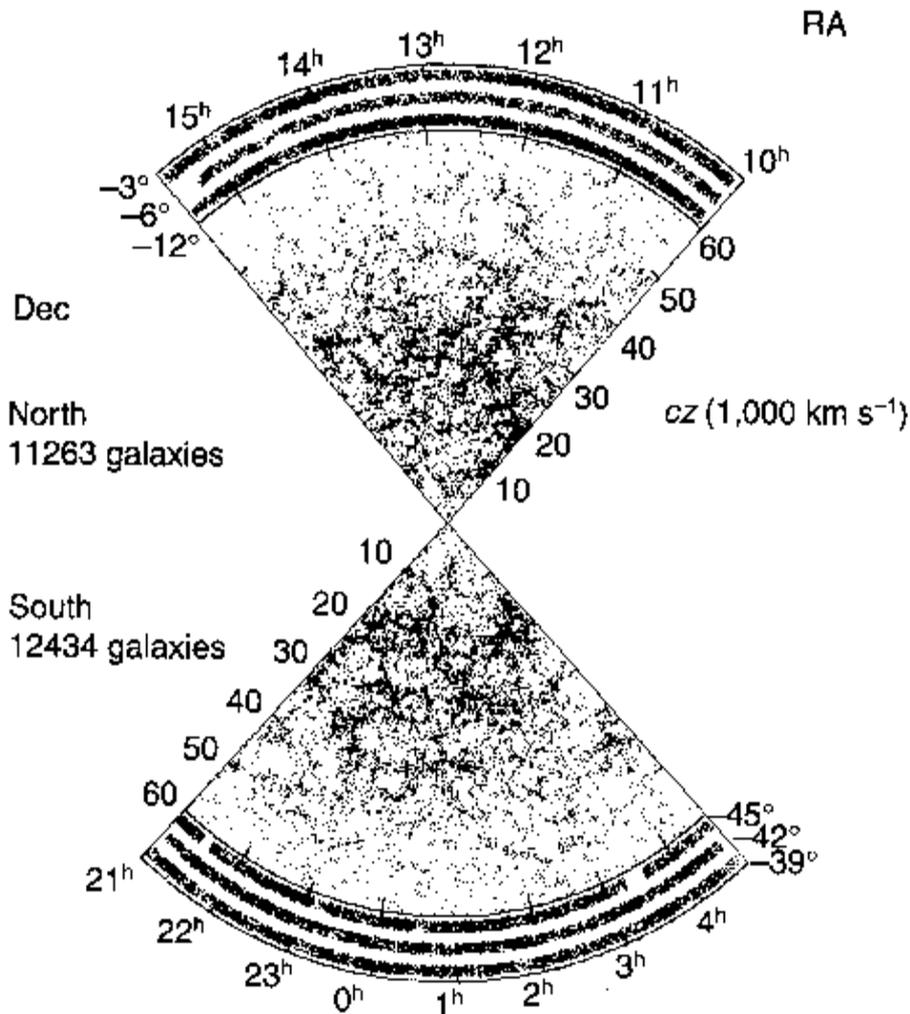


Resultados WMAP



- ❖ Resolução angular pelo menos 7 vezes melhor que o COBE (7° versus $0,93^\circ$)
- ❖ 5 frequências de observação (22, 30, 40, 60, 90 GHz), versus 3 do COBE (31, 53 e 90 GHz)
- ❖ Órbita mais distante.

A distribuição de matéria



Distribuição de matéria atual:

$$\frac{\ddot{A}\tilde{n}}{\tilde{n}} \gg 10^5$$

em galáxias

$$\frac{\ddot{A}\tilde{n}}{\tilde{n}} \gg 10^2 - 10^3$$

em aglomerados

São observadas estruturas complexas: filamentos, paredes e bolhas.

Como mapea-las?

- ✦ A partir do estudo dos redshifts e dos campos de velocidades das galáxias
- ✦ Contraste entre estimativa da quantidade de matéria por medida de luz e por efeitos dinâmicos
- ✦ Distribuição de radio fontes pontuais (em geral núcleos de galáxias distantes)

Mas existe algo errado!!!!

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{crit}} = \frac{8\pi G\rho}{3H^2}$$

- ⊕ Densidade crítica do Universo é dada por $\rho_c = 10^{-29} \text{ g.cm}^{-3}$.
- ⊕ Valores típicos para $\rho_{Lum} \sim 0,01\rho_c$.
- ⊕ Parâmetro de densidade: $\Omega = \rho/\rho_{crit}$, descreve as contribuições das diversas componentes que contribuem para a dinâmica do Universo.

- ✦ Valores típicos para as densidades de matéria "ordinária" conhecidas no Universo são:

$$\Omega_b = 0,01, \quad \Omega_{lum} = 0,004, \quad \Omega_M = 0,4$$

- ✦ Essa diferença entre Ω_M e Ω_b , não explicada pelas observações, deu origem à hipótese da matéria escura...



O que é a Matéria Escura?

- ☉ Só pode ser percebida através de efeitos da gravidade; não emite radiação eletromagnética.
 - ☒ ME bariônica (prótons e nêutrons):
protoestrelas, anãs marrons e buracos negros.
 - ☒ ME não-bariônica: diversos candidatos, entre eles o neutrino.
- ☉ Responsável por algo entre 25% e 40% de toda a matéria existente no Universo. Logo, praticamente desconhecemos de que tipo de matéria o Universo é feito.

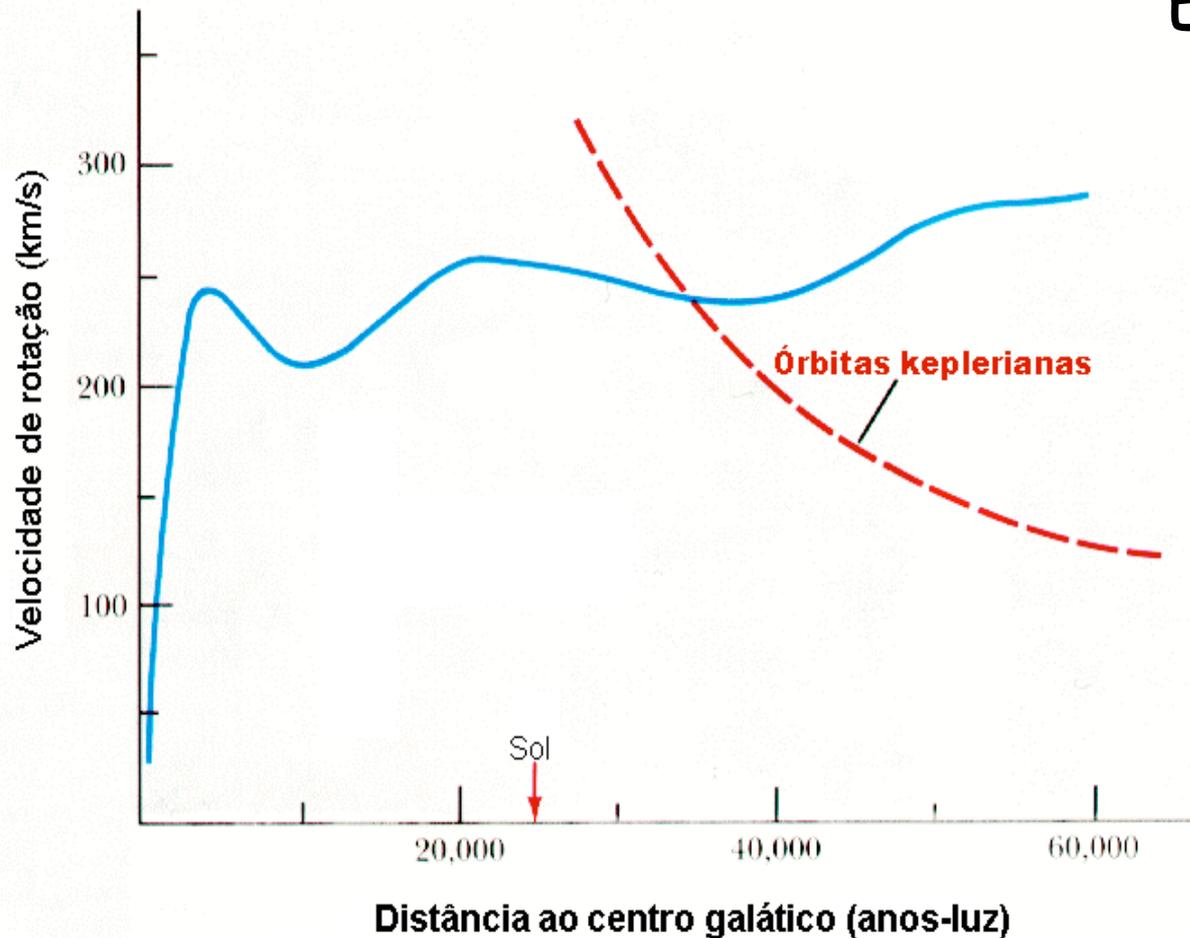


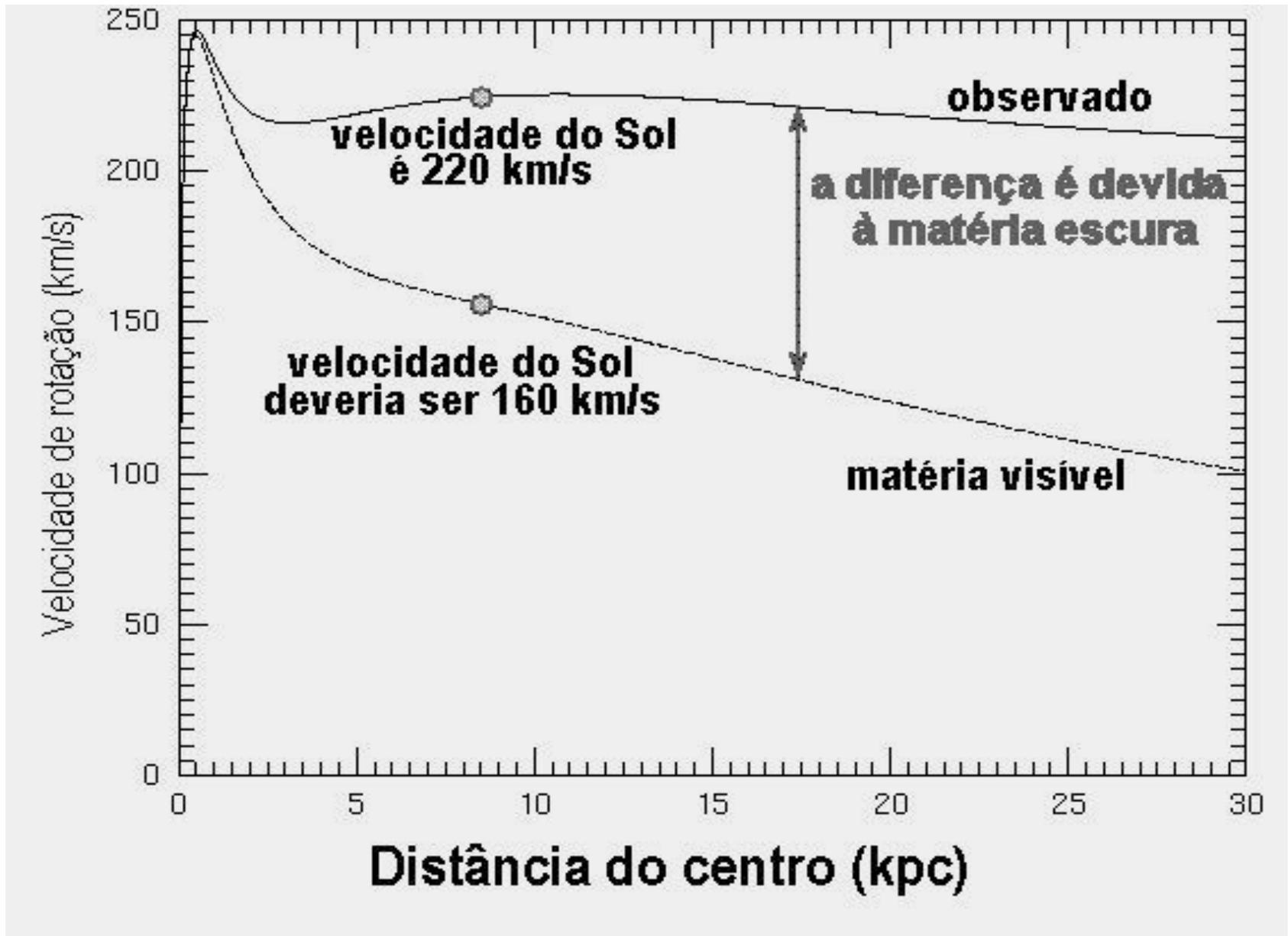
De onde veio essa idéia estranha?

Da forma das curvas de rotação de galáxias!!!

Estimativa simples:

$$G \frac{mM}{r^2} = m \frac{V^2}{r}$$
$$M = \frac{V^2 R}{G}$$







Matéria escura no Universo

Movimentos de galáxias em aglomerados (Virial):

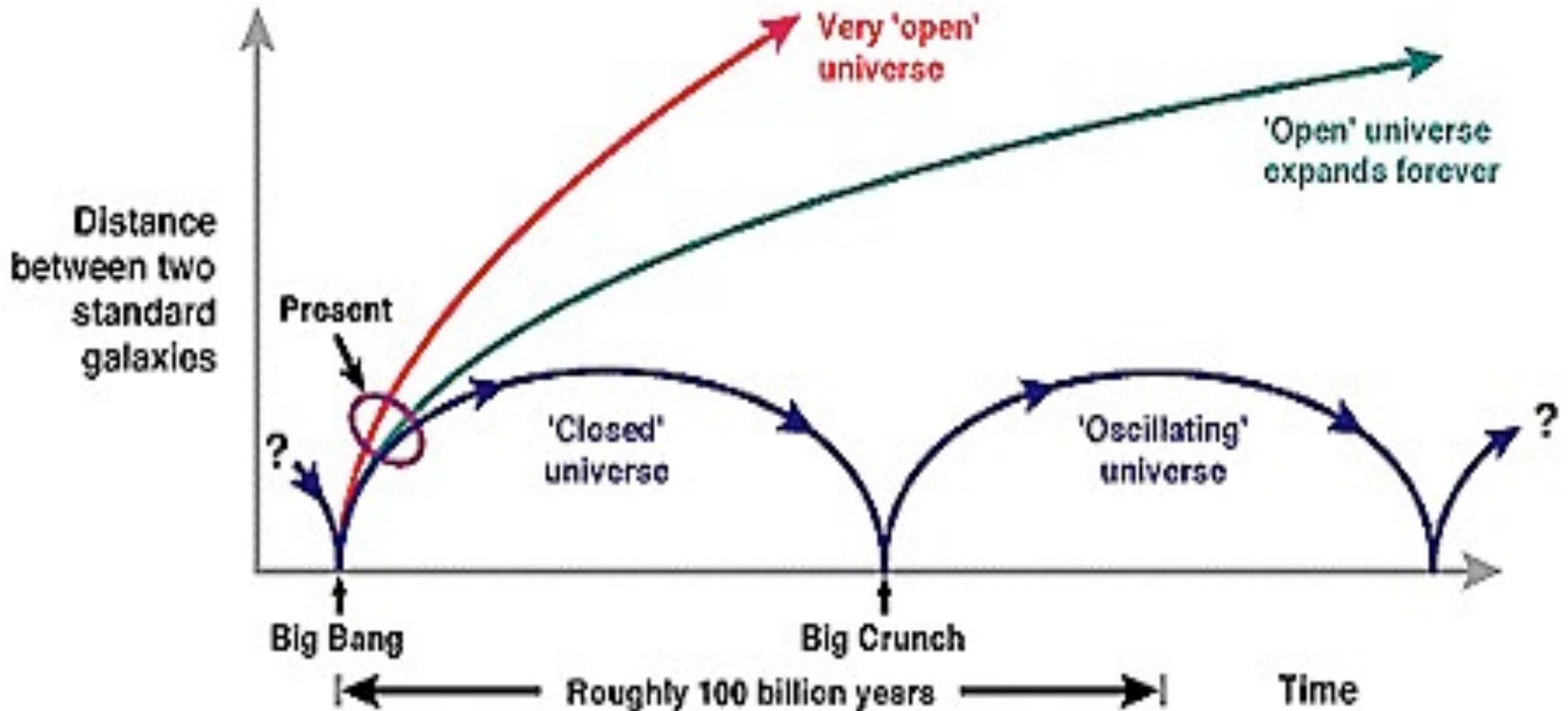
$$\Omega_{Matéria} \gg 0,04$$

Nucleossíntese primordial:

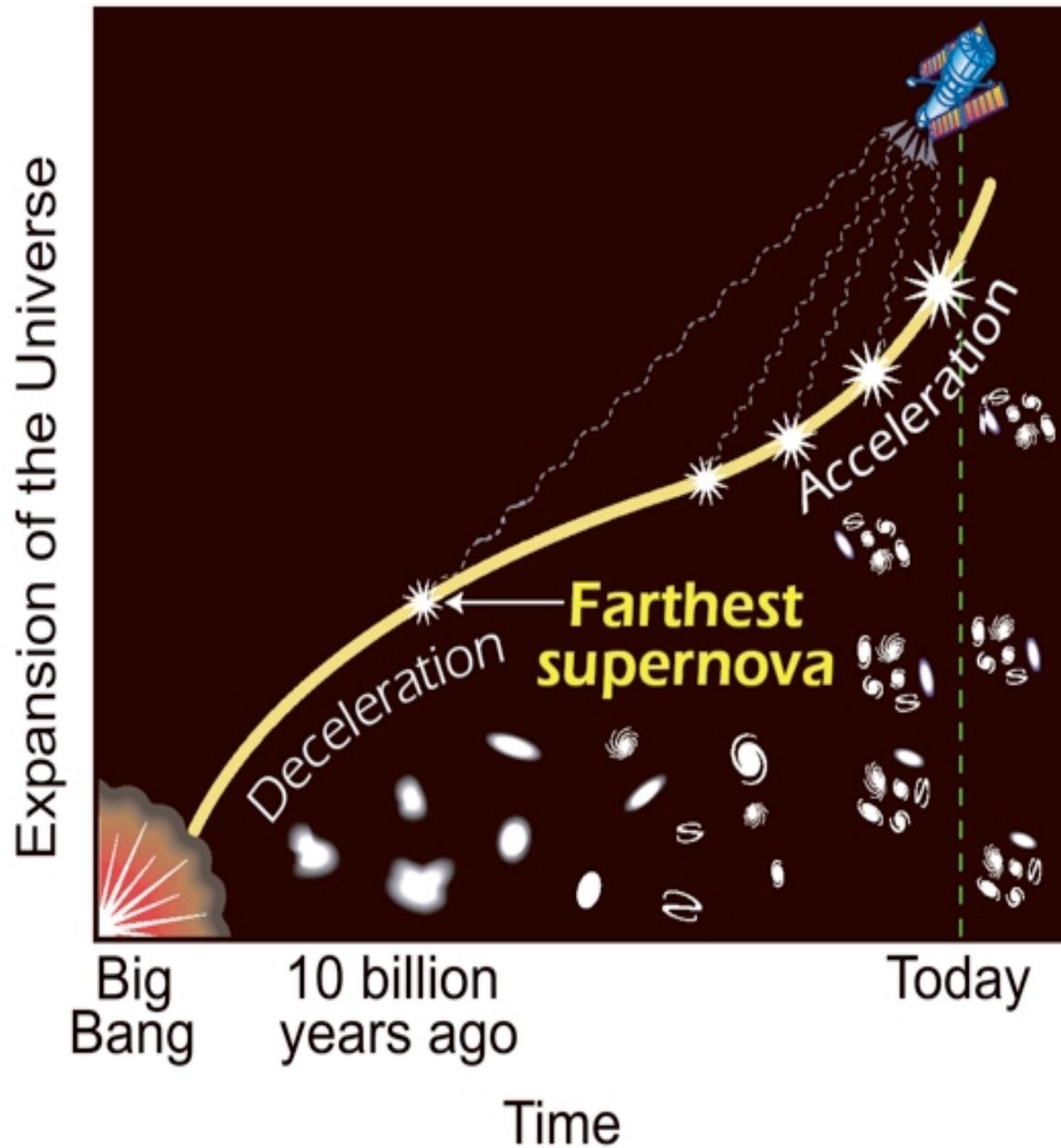
$$\Omega_{Barions} \gg 0,05$$

A maior parte da matéria escura é não bariônica e é a componente dominante da matéria do Universo.

Evolução do Universo



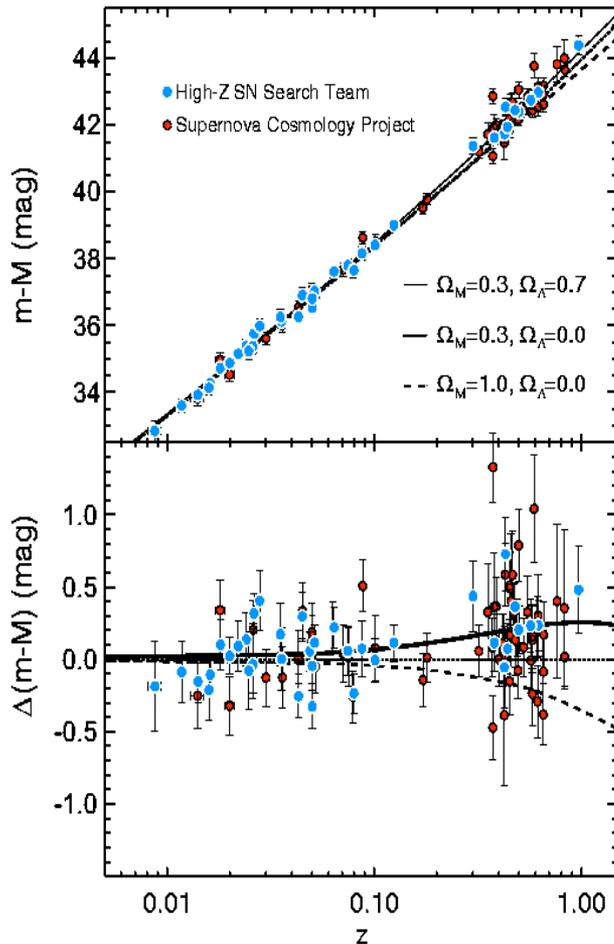
MAS...



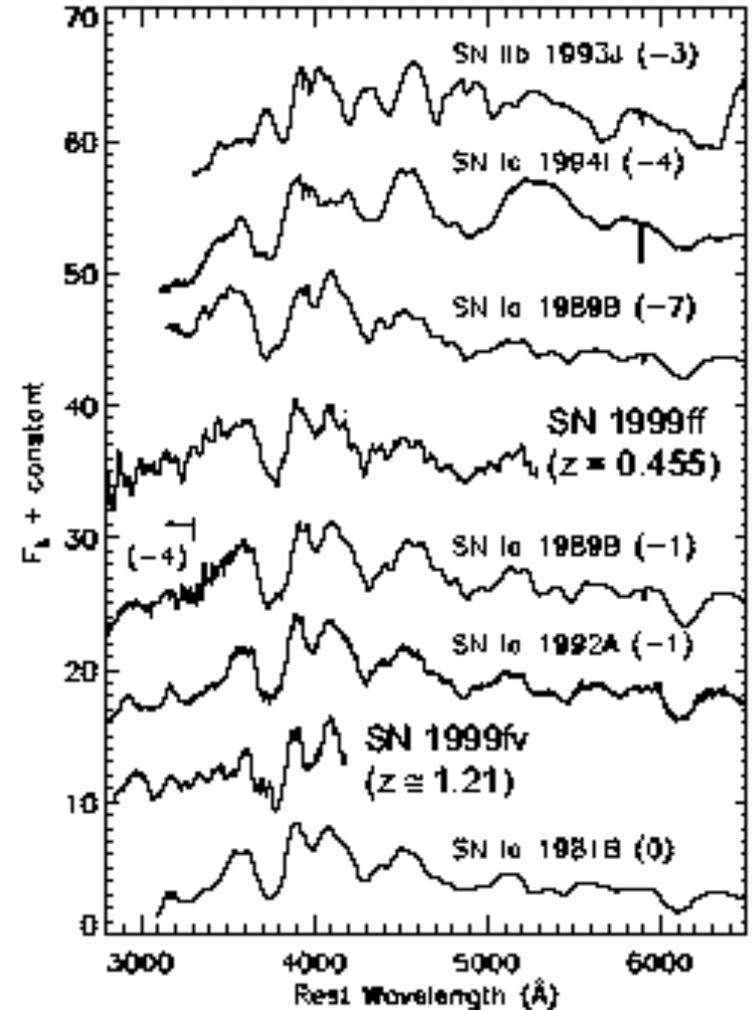
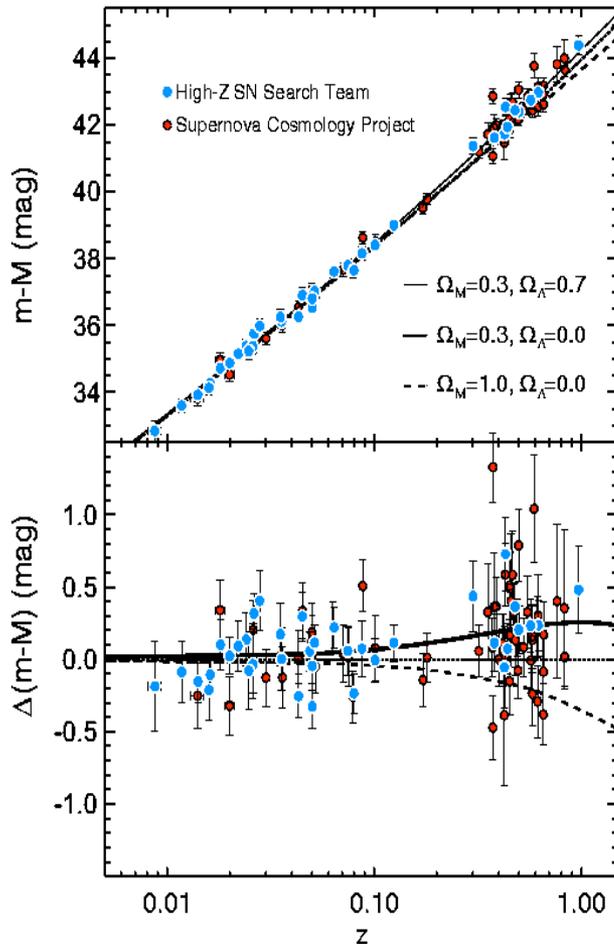


Como percebemos isso? Através da observação de um dos indicadores de distância conhecidos: as supernovas tipo I.

Como percebemos isso? Através da observação de um dos indicadores de distância conhecidos: as supernovas tipo I.



Como percebemos isso? Através da observação de um dos indicadores de distância conhecidos: as supernovas tipo I.



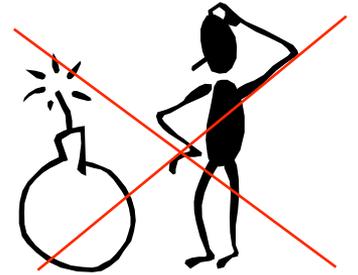


O que essas observações podem significar?



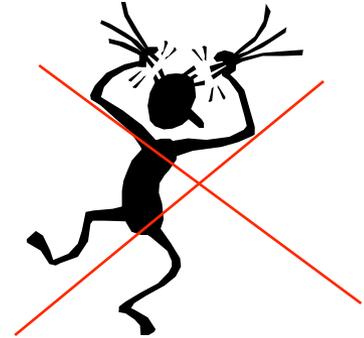
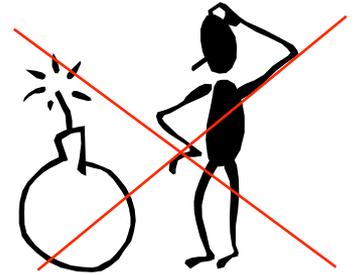
O que essas observações podem significar?

✦ A Teoria da Relatividade Geral está errada.



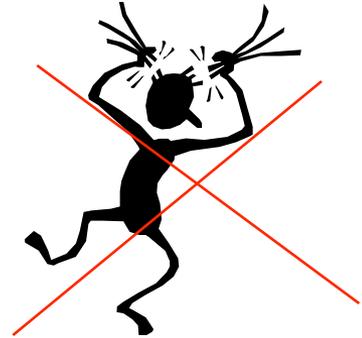
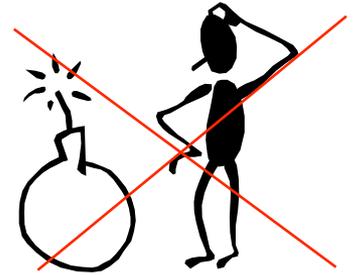
O que essas observações podem significar?

- ❖ A Teoria da Relatividade Geral está errada.
- ❖ As observações estão erradas, aparentando serem mais fracas no passado.



O que essas observações podem significar?

- ❖ A Teoria da Relatividade Geral está errada.
- ❖ As observações estão erradas, aparentando serem mais fracas no passado.
- ❖ Universo está acelerando \Rightarrow proposta Energia Escura!





E o que é a energia escura?



E o que é a energia escura?

- ✦ Forma **hipotética** de energia, que permeia todo o Universo e que possui **pressão negativa**, ou seja, que repele os componentes do Universo em grande escala, contrabalançando a força gravitacional.



E o que é a energia escura?

- ✦ Forma **hipotética** de energia, que permeia todo o Universo e que possui **pressão negativa**, ou seja, que repele os componentes do Universo em grande escala, contrabalançando a força gravitacional.
- ✦ Duas possibilidades: constante cosmológica (estático) e quintessência (dinâmico).



E o que é a energia escura?

- ✦ Forma **hipotética** de energia, que permeia todo o Universo e que possui **pressão negativa**, ou seja, que repele os componentes do Universo em grande escala, contrabalançando a força gravitacional.
- ✦ Duas possibilidades: constante cosmológica (estático) e quintessência (dinâmico).
- ✦ Características: muito homogênea e pouco densa



E o que é a energia escura?

- ✦ Forma **hipotética** de energia, que permeia todo o Universo e que possui **pressão negativa**, ou seja, que repele os componentes do Universo em grande escala, contrabalançando a força gravitacional.
- ✦ Duas possibilidades: constante cosmológica (estático) e quintessência (dinâmico).
- ✦ Características: muito homogênea e pouco densa
- ✦ Evidências complementares da existência de algo parecido foram obtidas com medidas da:
 - ✦ RCFM
 - ✦ Lentes gravitacionais
 - ✦ Nucleossíntese primordial
 - ✦ Estruturas em grande escala

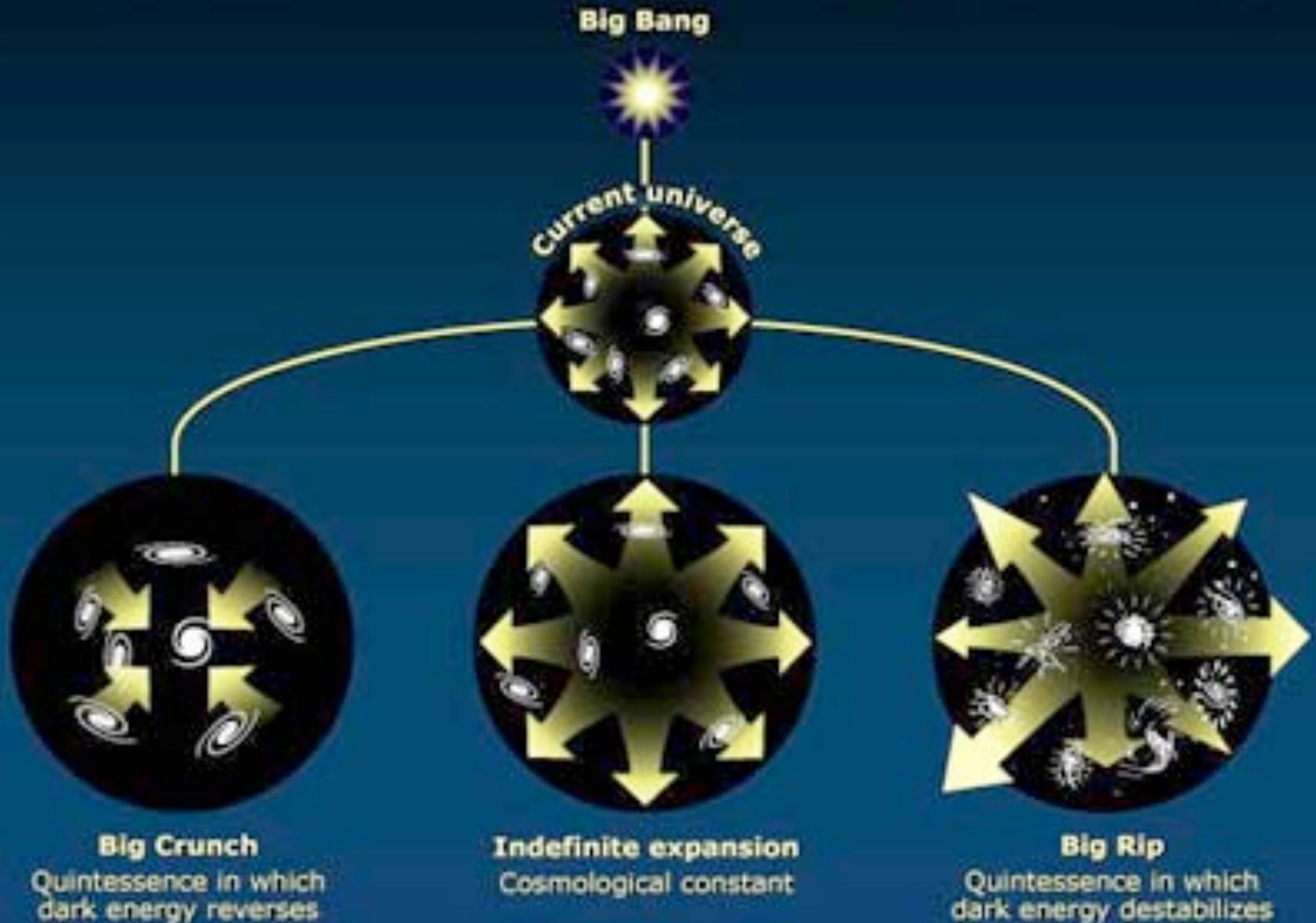




O destino do Universo

- ⊕ Densidade de matéria/energia \Rightarrow geometria + expansão \Rightarrow destino do Universo.
- ⊕ Expansão eterna ou nova contração? Depende da quantidade e natureza da matéria/energia escura que existe no Universo.
- ⊕ A combinação da matéria comum, matéria escura e energia escura indica que:
 - ⊕ o Universo está em expansão acelerada.
 - ⊕ sua curvatura espacial é nula.

Future fates of the dark-energy universe





Os parâmetros cosmológicos

✦ A análise de todas as observações anteriores permite estimar uma série de parâmetros que são usados para determinar a maneira como as equações de Einstein evoluem.

✦ Constante de Hubble: $H_0 = \frac{\dot{R}}{R}$

✦ Quant. total de matéria: $\Omega_0 = \Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_K (=1!)$

✦ Fração de matéria: $\Omega_M = \rho_M / \rho_0$

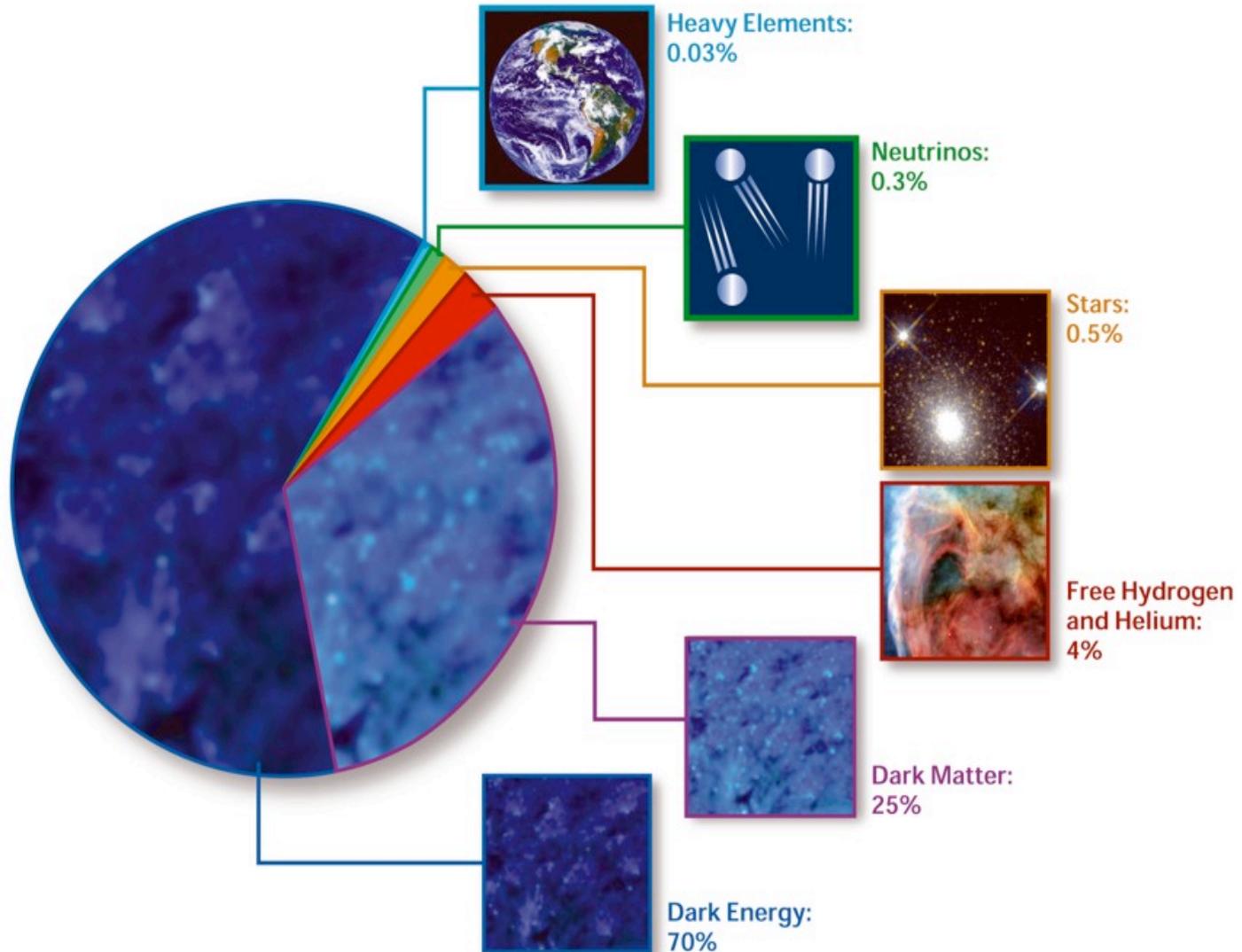
✦ Fração de const. cosmológica: $\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda / \rho_0$

✦ Fração de curvatura: $\Omega_K = \rho_K / \rho_0$

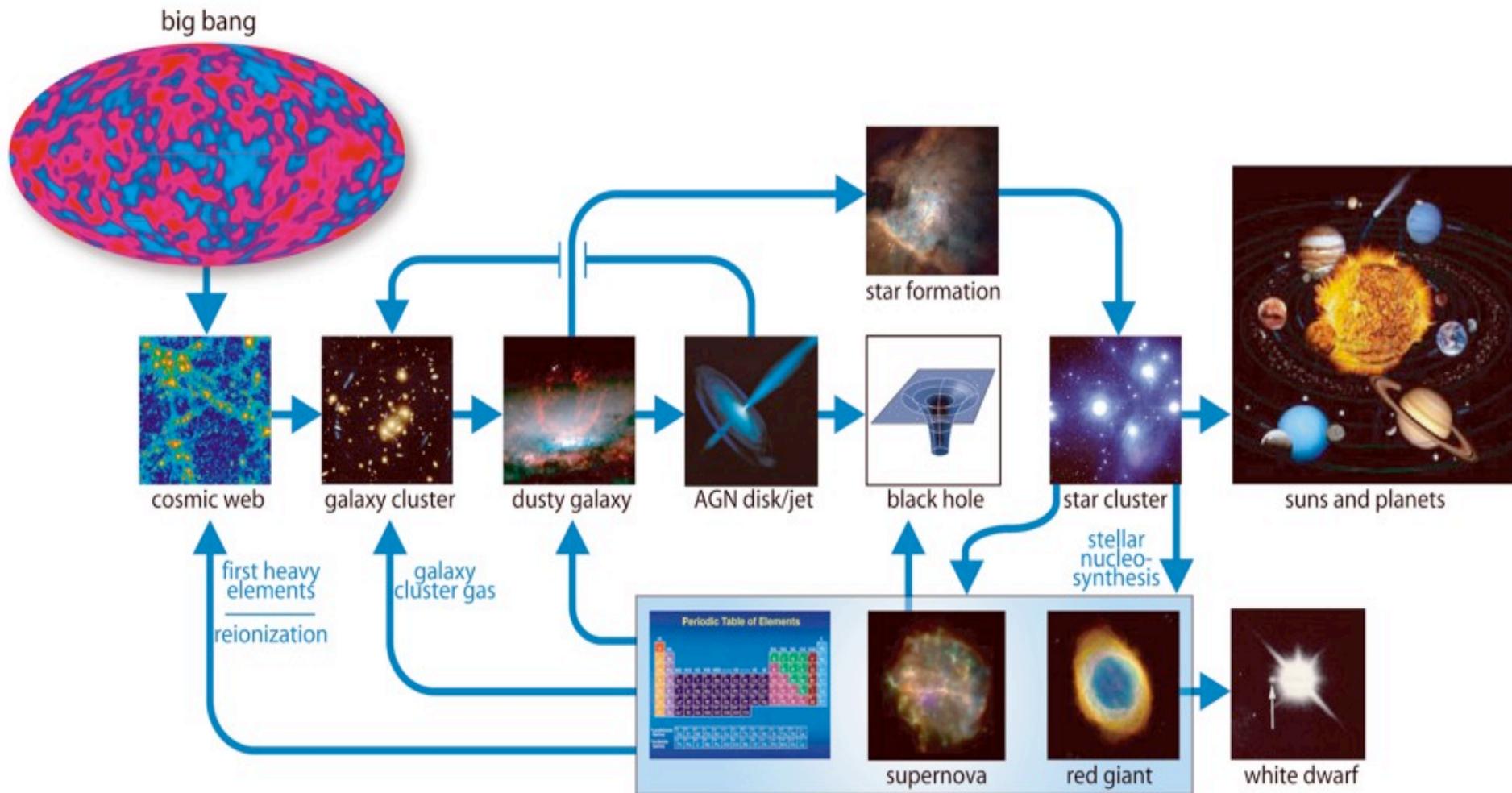


E a composição química do Universo?

COMPOSITION OF THE COSMOS



SEU CYCLES OF MATTER AND ENERGY





Questões (5 min.)

- ✦ Quais são as observações que dão suporte ao modelo cosmológico padrão?
- ✦ Qual é a composição química estimada do Universo?
- ✦ Que tipo de observação sugeriu a formulação da hipótese de matéria escura? E a de energia escura?
- ✦ Qual a importância da TRG na cosmologia?



O que sabemos em 2005?

- ❖ Que o Universo está em expansão acelerada...
- ❖ Que existe uma quantidade de matéria e energia escura várias vezes superior à matéria normal...
- ❖ Que existem alguns sérios candidatos a representar o papel de matéria escura...
- ❖ Que a RCF, a síntese de elementos leves e a expansão das galáxias são uma tremenda evidência de que o Universo começou num "BIG BANG" ...
- ❖ Que flutuações de densidade são o melhor e mais simples caminho para explicar as estruturas observadas no céu...



O que **AINDA NÃO** sabemos?

- ✦ Qual a natureza exata da matéria e da energia escuras...
- ✦ Supondo uma expansão eterna, qual será o aspecto do Universo daqui a, digamos, 10^{100} anos...
- ✦ Quanto tempo depois do **BIG BANG** a matéria levou para se aglutinar em galáxias...
- ✦ Quais são os detalhes dos processos de formação das primeiras estruturas e da evolução subsequente do Universo...



Conclusão

- ✚ Os problemas principais cosmológicos que devemos resolver são bem formulados, mas muitas das soluções tem permanecido obscuras por décadas.
- ✚ Solução das questões atuais é fortemente dependente do avanço teórico, tecnológico e computacional. Talvez no final dessa década tenhamos muito mais respostas...



Bibliografia

- ⊕ Resnick, R. "Introdução à relatividade especial". Ed. USP, 1971.
- ⊕ Osada, J. "Evolução das idéias da Física". Ed. Edgard Blücher, 1972.
- ⊕ Einstein, A. "The meaning of relativity", Ed. Princeton, 4a. Edição, 1974.
- ⊕ Hawking, S. "Uma breve história do tempo - ilustrada", Ed. Albert Einstein, 1997.
- ⊕ Souza, R. E. "Introdução à Cosmologia", Ed. USP, 2004.
- ⊕ Shu, F. "The Physical Universe", Princeton, 1990.
- ⊕ Narlikar, J. "Introduction to Cosmology", Ed. Princeton, 1997.
- ⊕ Hartle, J. "An introduction to general relativity", notas de aula, UCSB, 1992.
- ⊕ Longair, M. S. "Theoretical concepts in physics", caps. 14 e 15, Ed. Cambridge, 1994.



Bibliografia

- ✚ Sodré, L. "Introdução à cosmologia". Comunicação pessoal.
- ✚ Bergström, L., Goobar, A. "Cosmology and astroparticle physics". Ed. Springer, 2004.
- ✚ Longair, M. "Formation of galaxies". Ed. Springer, 1998.
- ✚ Rich, J. "Fundamentals of Cosmology". Ed. Springer, 2003



Contatos

✦ Email:

alex@das.inpe.br

✦ Home page:

<http://www.das.inpe.br/~alex>



Agradecimentos...

✦ Várias das figuras foram tiradas dos sites

- ✦ <http://universe.gsfc.nasa.gov/>
- ✦ <http://lambda.gsfc.nasa.gov>
- ✦ <http://antwrp.gsfc.nasa.gov>
- ✦ <http://astro.if.ufrgs.br>



Um pouco de matemática...

- ✦ As propriedades do espaço-tempo dependem da função g_{ik} , mas precisamos entender como essas propriedades elas nos mostram a presença da gravitação.
- ✦ Como podemos interpretar fenômenos manifestamente gravitacionais como efeitos geométricos?



Vetores covariantes

- Definem uma tangente à uma curva em uma dada superfície e obedecem à transformação

$$x^i = x^i \quad A^i = \frac{dx^i}{d\tau} \quad A'^i = \frac{dx'^i}{d\tau}$$

$$A'^k = \frac{\partial x'^k}{\partial x^i} \frac{dx^i}{d\tau} = \frac{\partial x'^k}{\partial x^i} A^i$$

- Note que a função x^i é um vetor.
- A direção da tangente a uma curva é um invariante, isto é, uma mudança de coordenadas não deve alterar seu valor.
- A transformação contravariante é linear.



Vetores contravariantes

- Definem vetores normais a uma dada superfície e obedecem à transformação

$$\phi(x^i) = \text{constante} \in \mathbb{R} \quad B_i = \frac{\partial \phi}{\partial x^i} \in \mathbb{R} \quad B'_i = \frac{\partial \phi}{\partial x'^i}$$

$$B'_k = \frac{\partial x^i}{\partial x'^k} B_i$$

- Note que a função $\phi(x^k)$ é um escalar.
- A normal a uma hipersuperfície é, também, um invariante.
- A transformação covariante é linear.

Tensoros

- De maneira análoga aos vetores, eles obedecem a transformações do tipo (nesse caso, para um tensor de 2a. ordem - que pode ser representado por uma matriz)

$$T'^{ik} = \frac{\partial x'^i}{\partial x^m} \frac{\partial x'^k}{\partial x^n} T^{mn} \quad (\text{CV}) \quad T'_{ik} = \frac{\partial x^m}{\partial x'^i} \frac{\partial x^n}{\partial x'^k} T^{mn} \quad (\text{CNV})$$

- Propriedades típicas:

- Simetria/antissimetria

- Contração

- O produto de 2 tensores é um tensor

- Regra de operação: introduzir um elemento de transformação $\partial x'^i / \partial x^m$ para cada índice contravariante e outro elemento, $\partial x^n / \partial x'^k$, para cada índice covariante.



Diferenciação covariante

- Definem o vetor normal a uma dada superfície e obedecem à transformação

$$B_{i;k} \equiv \frac{\partial B_i}{\partial x^k} - \tilde{A}^l_{ik} B_l B_{i,k} - \tilde{A}^l_{ik} B_l$$

- A derivada covariante é denotada pelo $;$ ($B_{i;k}$)
- A derivada normal é representada pela $,$ ($B_{i,k}$)
- A diferenciação covariante permite calcular as mudanças nas componentes do vetor diferenciado e também no deslocamento entre os pontos da derivada.
- \tilde{A}^l_{ik} é conhecido como **símbolo de Christoffel** e é uma função do espaço e do tempo usada no cálculo da mudança ocorrida no deslocamento.