

DA COSMOLOGIA ÀS PARTÍCULAS ELEMENTARES

PARTÍCULAS ELEMENTARES

COSMOLOGIA

A ORIGEM DA MASSA

Espectro de massas, famílias
Massa dos neutrinos
Massa e simetrias de gauge
Mecanismo de Higgs

A EXPANSÃO DO UNIVERSO

Big-bang
Nucleosíntese primordial
Radiação cósmica de fundo

A UNIFICAÇÃO DAS INTERAÇÕES

Grande unificação
Descolamento do próton
Supersimetria
Gravitação e supercordas

INFLAÇÃO

Homogeneidade
 $\Omega \sim 1$

MATÉRIA ESCURA

BURACOS NEGROS

VIOLAÇÃO DE CP

ASSIMETRIA COSMOLÓGICA MATÉRIA-ANTI-MATÉRIA

ACCELERATOR PHYSICS VS. PARTICLE ASTROPHYSICS ?

A origem da massa

- Porque é que as partículas têm massa?
- Porque é que as partículas têm a massa que têm?
 - Porque três famílias de leptões e quarks

Será possível encontrar uma teoria
com a qual se calcule a massa das partículas?
e as outras constantes fundamentais (\hbar, c, α, \dots)?

Que aspecto tem um Universo constituído
de partículas sem massa?

- todas as partículas se deslocam à velocidade da luz?
- em que referencial?
- como definir o espaço e o tempo?

MASSA E QUEBRA DA SIMETRIA DE GAUGE

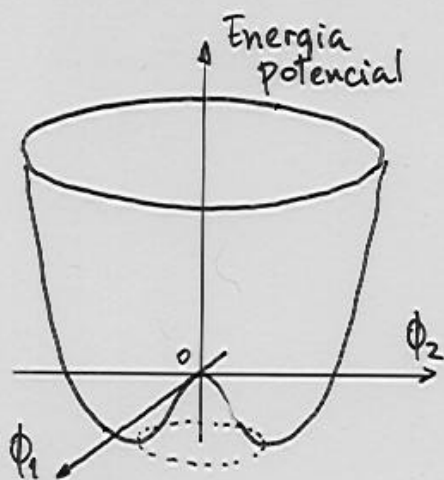
Simetria de gauge \leftrightarrow Interações fundamentais

$U(1)$ — QED

$U(1) \times SU(2)$ — Int. electofraca

$SU(3)_c$ — QCD

CAMPO DE HIGGS \Rightarrow QUEBRA ESPONTÂNEA DE SIMETRIA



- Será este o mecanismo que explica a quebra de simetria?
- Será o Higgs uma partícula (campo) fundamental?

- Qual é a origem deste campo de Higgs que ocupa todo o espaço com valor não nulo?
- Será a massa resultante de uma espécie de atrito das partículas neste campo?
- E qual é a origem da massa do Higgs?

TEREMOS ALGUMAS RESPOSTAS COM O LHC?

MASSA DOS NEUTRINOS

Sabemos que os neutrinos têm massa nula ou uma massa muito pequena

As medidas experimentais da massa dos neutrinos são muito difíceis

Admitindo que $m_\nu \sim 10^{-9} m_p \sim 1 \text{ eV}/c^2$

a massa dos neutrinos contribui significativamente para a densidade de energia do Universo

→ matéria escura?

Se os neutrinos têm massa, pode haver mistura dos estados próprios de massa (neutrino mixing)

e.g.

$$\nu_e = \nu_1 \cos \alpha + \nu_2 \sin \alpha$$

$$\nu_\mu = -\nu_1 \sin \alpha + \nu_2 \cos \alpha$$

feixe inicial: $|\nu_{e,p}\rangle = \cos \alpha |\nu_{1,p}\rangle + \sin \alpha |\nu_{2,p}\rangle$
p - momento

no tempo t: $a_1(t) \cos \alpha |\nu_{1,p}\rangle + a_2(t) \sin \alpha |\nu_{2,p}\rangle$
 $a_i(t) = e^{-iE_i t}$

$$A(t) |\nu_{e,p}\rangle + B(t) |\nu_{\mu,p}\rangle$$

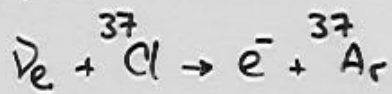
$$A(t) = a_1(t) \cos^2 \alpha + a_2(t) \sin^2 \alpha$$

$$B(t) = \sin \alpha \cos \alpha [a_2(t) - a_1(t)]$$

$$\phi(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = |B(t)|^2 = \sin^2(2\alpha) \sin^2[(E_2 - E_1)t/2]$$

O PROBLEMA DOS NEUTRINOS SOLARES

Deteccção de neutrinos solares:



tanque com C_2Cl_4 (tetracloreto de etileno)

instável (tempo vida 35 dias)

South Dakota

medida de radioactividade

Solar neutrino unit (SNU):

uma captura por segundo por 10^{36} átomos alvo

Resultado experimental: $2.55 \pm 0.17 \pm 0.18$ SNU

Modelo standard do Sol: 7.3 ± 2.3 SNU

Resultados confirmados por outras experiências (eg. Kamiokande)

Cherenkov na água

limite experimental $E_\nu > 1 \text{ MeV} \rightarrow$

\rightarrow neutrinos da reacção ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$ $E_\nu^{\text{max}} = 15 \text{ MeV}$

$\rightarrow 1:10^4$ dos ν 's solares

Fonte principal:

$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$	$E_\nu^{\text{max}} = 0.42 \text{ MeV}$	91%
$e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	$E_\nu^{\text{max}} = 0.86 \text{ MeV}$	7%

SAGE, GALEX: alvos de galio \rightarrow



\rightarrow radioactivo

SAGE: $69 \pm 11 \pm 9$ SNU

GALEX: $79 \pm 10 \pm 6$ SNU

SSM: 132 ± 9 SNU

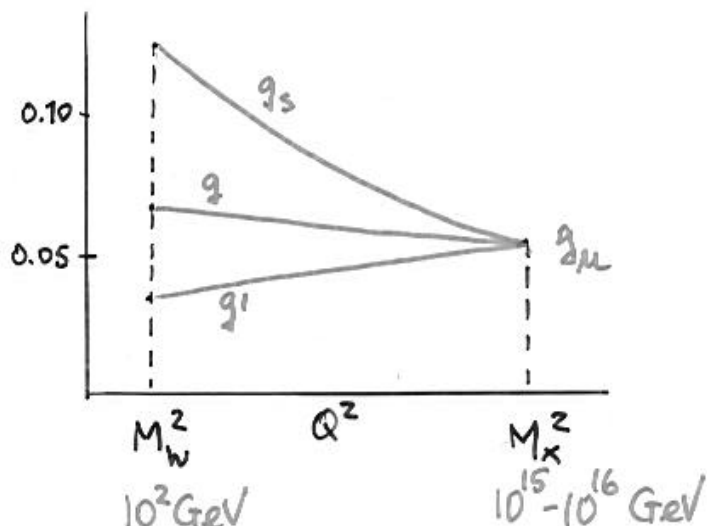
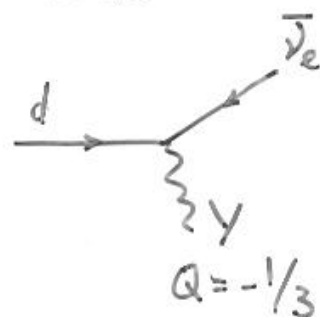
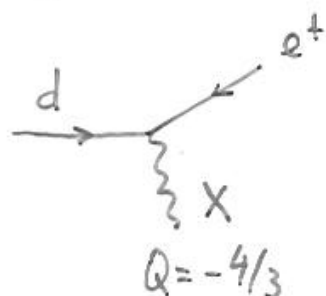
GRANDE UNIFICAÇÃO

Teoria de grande unificação:

forte + electrofraca

e.g. grupo $SU(5)$

$(d_r, d_g, d_b, e^+, \bar{\nu}_e)$



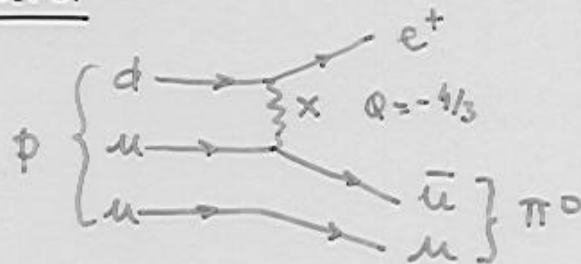
- Explica a igualdade das cargas do electrão e próton
- No modelo $SU(5)$ - Georgi, Glashow - $3Q_d + e = 0$
o factor 3 resulta do número de cores!
- Permite prever a relação entre g e g' : $\sin^2 \theta_w \sim 0.21$

A interacção gravítica continua de fora!

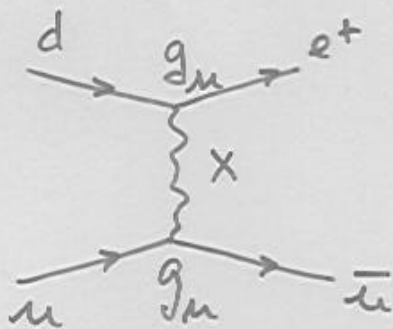
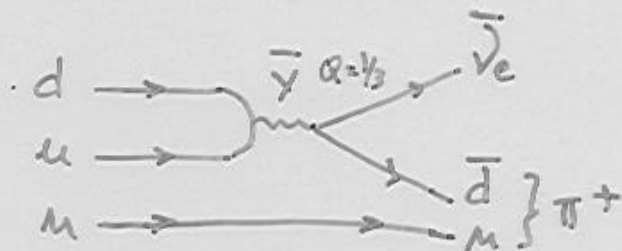
DECAÍMENTO DO PROTÃO

No quadro dos modelos de grande unificação
o protão é instável

$$p \rightarrow \pi^0 + e^+$$



$$p \rightarrow \pi^+ + \bar{\nu}_e$$



Constante de acoplamento de Fermi:

$$\frac{G}{\sqrt{2}} \approx \frac{g_M^2}{M_X^2} = \frac{4\pi\alpha_M}{M_X^2} \quad \alpha_M \approx \frac{1}{42}$$

tempo de vida $\tau = \Gamma^{-1}$ $\Gamma = G^2 E^5 \approx \frac{g_M^4 E^5}{M_X^4}$

$$E \sim m_p, M_X = 10^{15} \text{ GeV} \Rightarrow \tau = 10^{29} - 10^{30} \text{ anos}$$

Experiências:

$$\tau = 10^{32} \text{ anos} \rightarrow 1 \text{ decaimento/ano em } 300 \text{ t. ferro}$$

$$\rightarrow \tau_p / B(p \rightarrow \pi^0 e^+) > 5 \cdot 10^{32} \text{ anos}$$

SUPER SIMETRIA

leptões spin $1/2 \rightarrow$ spin 0 'super partners'
 bósons spin 1 \rightarrow spin $1/2$ "

Partícula		Spin	Superpartícula		Spin
Quark	q	$1/2$	Squark	\tilde{q}	0
Electrão	e	$1/2$	Selectrão	\tilde{e}	0
Muão	μ	$1/2$	Smuão	$\tilde{\mu}$	0
Tau	τ	$1/2$	Stau	$\tilde{\tau}$	0
W		1	Wino	\tilde{W}	$1/2$
Z		1	Zino	\tilde{Z}	$1/2$
Fotão	γ	1	Fotino	$\tilde{\gamma}$	$1/2$
Gluão	g	1	Gwino	\tilde{g}	$1/2$
Higgs	H	0	Higgsino	\tilde{H}	$1/2$

- A escala da grande unificação aumenta:

$$M_x \sim 10^{16} \text{ GeV}/c^2 \rightarrow \tau_p \sim 10^{32-33} \text{ anos}$$

- Previsão para $\sin^2 \theta_w$ em melhor acordo e/ experiência

\rightarrow Paridade-R : as partículas supersimétricas são produzidas aos pares

\rightarrow a superpartícula mais leve é estável

$\tilde{\chi}_0$ neutralino (mistura de $\tilde{\gamma}, \tilde{Z}, \tilde{H}$)

e.g. $e^+e^- \rightarrow \tilde{e}^+\tilde{e}^- \rightarrow e^+e^- \tilde{\chi}_0\tilde{\chi}_0$

SUPERCORDAS

A escala de Planck a interacção gravitacional tem uma intensidade equivalente às outras interações

Escala de massa, comprimento e tempo da gravitação quântica:

constantes fundamentais

G	gravitação
\hbar	mecânica quântica
c	relatividade

$$M = \left(\frac{\hbar c}{G} \right)^{1/2}$$

$$\sim 10^{19} \text{ GeV}$$

$$L = \left(\frac{G \hbar}{c^3} \right)^{1/2}$$

$$\sim 10^{-33} \text{ cm}$$

$$T = \left(\frac{G \hbar}{c^5} \right)^{1/2}$$

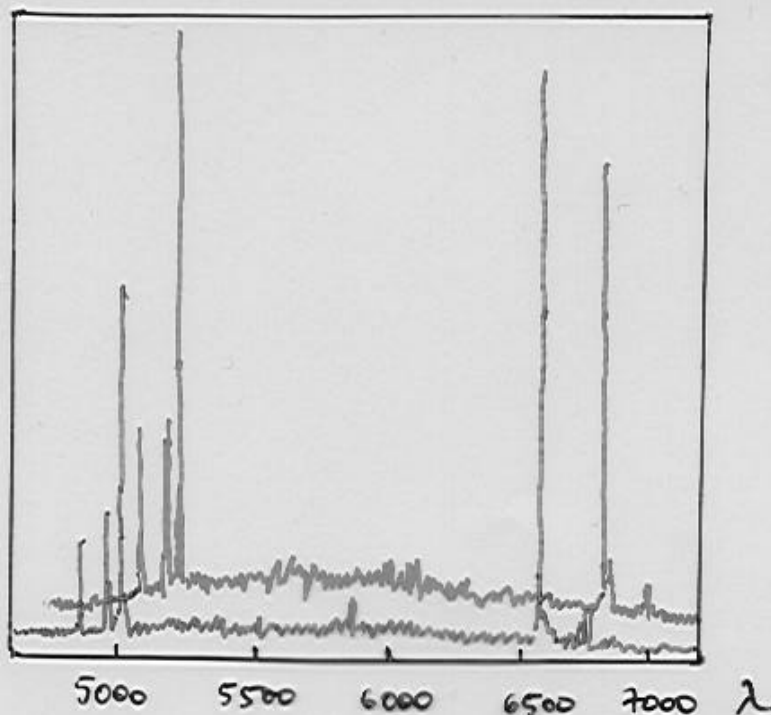
$$\sim 10^{-42} \text{ s}$$

- A teoria das supercordas descreve objectos a duas dimensões (cordas) de dimensão 10^{20} vezes mais pequenas do que o próton
- Espaço-tempo com 10 dimensões \rightarrow
6 dimensões compactadas
- Modos de oscilação das cordas \rightarrow massa das partículas
- Estados das supercordas nas dimensões compactadas descrevem as propriedades internas das partículas.
- A teoria das supercordas integra a supersimetria e a relatividade de Einstein

QUAIS AS PREVISÕES VERIFICÁVEIS EXPERIMENTALMENTE?

O UNIVERSO EM EXPANSÃO

- Via Láctea : 100 mil milhões de estrelas equivalentes ao Sol
diâmetro 80 mil anos-luz
disco
- Andrómeda : galáxia espiral a 2 milhões anos-luz
- As galáxias organizam-se em cluster e superclusters
- Há galáxias a distâncias superiores a mil milhões anos-luz
- Medidas de distâncias :
 - ângulo de paralaxe (até 300 anos-luz)
 - Cefeidas : oscilação proporcional à luminosidade absoluta (até 40 milhões anos-luz)
 - Luminosidade de galáxias, Supernovas, ...
- E. Hubble (1929): as galáxias afastam-se umas das outras com velocidades proporcionais à distância



Medidas de velocidades:

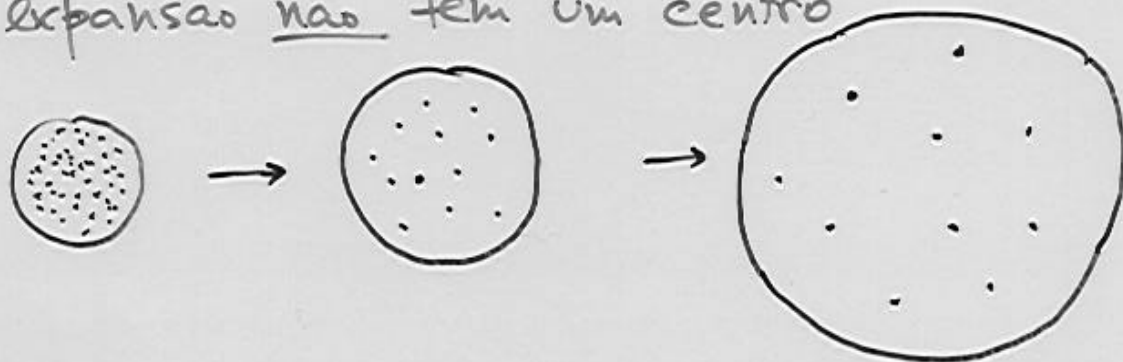
deslocamento p/ o
vermelho dos
espectros

Efeito de Doppler

MODELO DO BIG BANG

- Universo uniforme e homogêneo (à escala de 200 milhões ano.luz)

- A expansão não tem um centro



- A dilatação do espaço origina o afastamento progressivo das galáxias

- A distância média entre galáxias aumenta

- CONSTANTE DE HUBLE C_H :

$$v = C_H \cdot d$$

↳ velocidade de expansão

↳ distância

- IDADE DO UNIVERSO: $T = \frac{d}{v} = \frac{1}{C_H} \rightarrow T = 20 \cdot 10^9 \text{ anos}$

atração gravítica \rightarrow diminuição de velocidade \rightarrow

$$\rightarrow T \approx 10 - 15 \cdot 10^9 \text{ anos}$$

NUCLEOSÍNTESE PRIMORDIAL

Modelo termodinâmico do Universo:

$$t = \frac{2}{n} \sqrt{\frac{3}{8\pi G \rho(t)}} \quad \begin{array}{l} n=4 \text{ dominação da radiação} \\ n=3 \text{ " " " matéria} \end{array}$$

$$H(t) = \sqrt{8\pi G \rho(t) / 3}$$

$$T \propto 1/R(t) \quad \rho(t) \propto (1/R(t))^n \quad \begin{array}{l} \rho \propto T^4 \text{ rad.} \\ \rho \propto T^3 \text{ mat.} \end{array}$$

$$t = 0.01 \text{ s}$$

$$T = 10^{11} \text{ } ^\circ\text{K}$$

Energia média das partículas 10 MeV

(> energia ligação dos núcleões no núcleo)

Universo composto de $e^\pm, \gamma, \nu's$:

1 nucleão para $10^9 \gamma's$

Reacções de criação e de aniquilação mantêm-se em equilíbrio

$$t = 14 \text{ s}$$

$$T = 3 \cdot 10^9 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Energia média $< m_e$ (0.5 MeV)

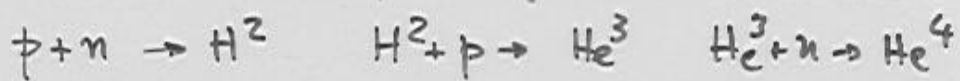
$e^+ + e^- \rightarrow \gamma\gamma, \nu\bar{\nu}$, sobra um excesso de electrões

\rightarrow violação de CP

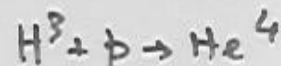
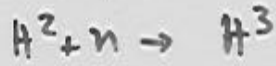
$$t = 3 \text{ mn}$$

$$T = 10^9 \text{ °K}$$

Protões e neutrões podem formar núcleos :

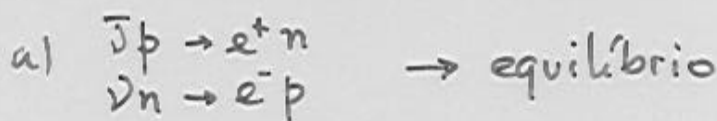


↓
fraca energia
de ligação



↓
estável

Relação entre neutrões e protões :



decaimento do neutrão

⇒ Neutrões 13% , Protões 87%

Após nucleossíntese :

H : 74%
He⁴ : 26% (fracções de massa)

resíduos de d, t, He³, Li⁷

A radiação de γ 's, ν 's impede a formação de núcleos mais pesados

Estimativa da fracção de He⁴ no Sol : 20-30%
baseada em observações experimentais

RADIAÇÃO CÔSMICA DE FUNDO

$$t = 3 \text{ mn}$$

Núcleos de H e He⁴, electrões e positrões

Radiação e matéria em equilíbrio $\rightarrow T$

Corpo negro

$$t = 700 \text{ mil anos}$$

$$T = 3000 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$E_{\gamma} \sim 0.26 \text{ eV}$$

\rightarrow a formação de átomos torna-se possível

O universo torna-se transparente à radiação

\rightarrow a formação de galáxias é possível

Expansão posterior: factor 1000

$\lambda \propto R$ o comprimento de onda dos fotões
'dilata-se' com a expansão

$T \propto 1/R \rightarrow$ Temperatura da radiação hoje:

$$\underline{T = 3^\circ\text{K}}$$

Observação experimental:

1964 A. Penzias, R. Wilson

$$n_{\gamma} = 20T^3 = 550 \text{ fotões/cm}^3$$

$$n_N \sim 3 \cdot 10^{-7} \text{ nucleões/cm}^3$$

$$= \underline{10^9 \text{ f' por nucleã}}$$

COBE (Cosmic Background
Explorer)

MATÉRIA ESCURA

Serão as forças gravitacionais suficientes para pararem a expansão?

ρ_c densidade de massa e energia crítica

se $\rho < \rho_c$ a expansão continua

se $\rho > \rho_c$ a expansão para

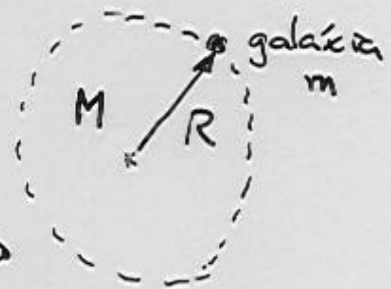
Estimativa de ρ_c :

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$$

massa contida na esfera

$$v = H R$$

velocidade de expansão da galáxia



$$T = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m H^2 R^2 \quad \text{energia cinética}$$

$$U = -m M G / R \quad \text{energia potencial}$$

$$E = m R^2 \left[\frac{1}{2} H^2 - \frac{4}{3} \pi \rho G \right] \quad \text{energia total}$$

A energia cinética e potencial equilibram-se para:

$$\rho_c = \frac{3 H^2}{8 \pi G} \quad \left(\text{hoje } \rho_c \approx 3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{nucleões}}{\text{cm}^3} \right)$$

Matéria visível (estrelas e galáxias) $\sim 3 \cdot 10^{-8} \text{ nucleões/cm}^3$

Densidade de energia dos fótons $\left(E_\gamma \sim 2.6 \cdot 10^{-4} \text{ eV} \cdot 10^{9-10} \right)$
é desprezível $\rightarrow \sim 1 \text{ MeV por nucleão}$
 940 MeV

Neutrinos? se $m_\nu = 1 \text{ eV} \rightarrow E_\nu$ por nucleão $\sim 1 \text{ GeV}$

hot dark matter

WIMPS

cold dark matter

Argumentos que suportam a existência de matéria escura:

- medida da abundância de deutério

a fração de deutério depende criticamente da relação fóton/núcleão

$$\rightarrow \Omega = \rho/\rho_c \sim 10-20\%$$

- movimentos de rotação das galáxias e clusters de galáxias

$$v = M/R$$

a distribuição de velocidades em função de R implica

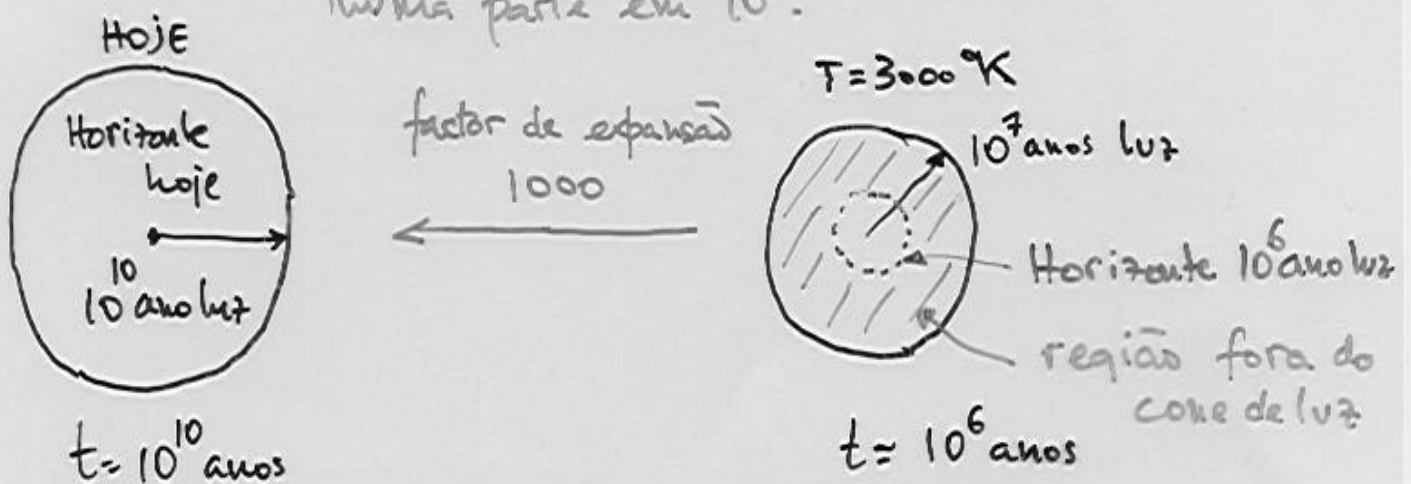
$$\Omega \sim 0.2-0.3$$

INFLAÇÃO

Dificuldades do modelo Big Bang:

Homogeneidade do Universo

- a distribuição de matéria é homogênea a escalas superiores a 200 milhões anos luz
- a radiação de fundo é homogênea numa parte em 10^5 .



Densidade de energia $\Omega \sim 1$

O ponto $\Omega = 1$ é instável:

$$\text{se } \Omega_i \text{ ligeiramente } < 1 \rightarrow \Omega \rightarrow 0$$

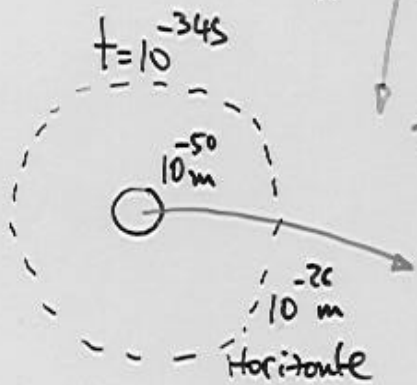
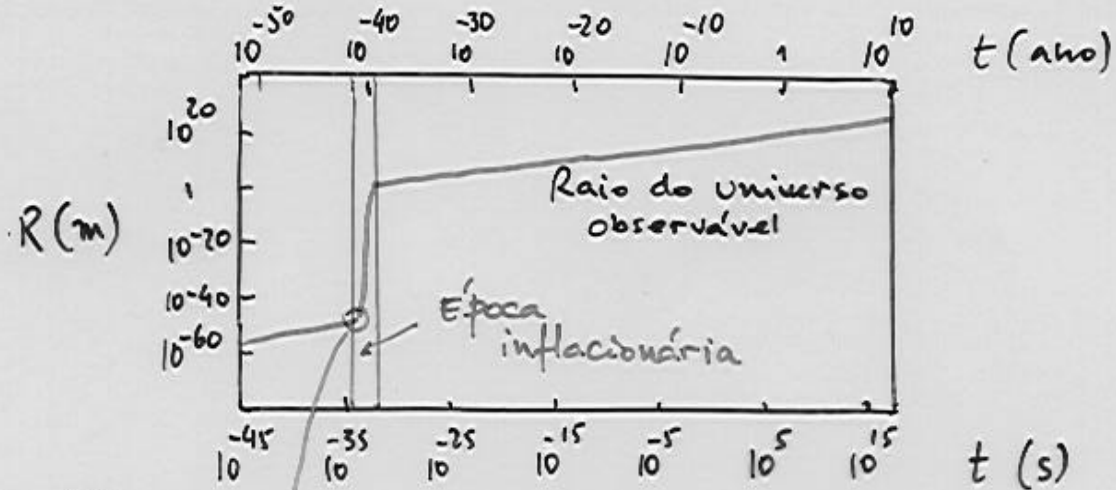
$$\text{se } \Omega_i \text{ " } > 1 \rightarrow \Omega \rightarrow \infty$$

$$\text{Se hoje } \Omega \sim 1 \rightarrow |\Omega_i - 1| \sim 10^{-15} !$$

Modelo do Universo inflacionário

Expansão exponencial entre $t=10^{-34}$ s e $t=10^{-32}$ s

factor de expansão $\sim 10^{50}$



$t = 10^{-34}$ s \rightarrow Horizonte = 10^{-26} m
Univ. observável = 10^{-50} m

Região em equilíbrio térmico

$t = 10^{-34}$ s curvatura do espaço $\sim 10^{-26}$ m

Esfera $R = 10^{-26}$ m $\xrightarrow{\text{expansão inflacionária}}$ $R = 10^{26}$ anos-luz $\gg 10^{10}$ a.l.

A curvatura observável (mesmo que exista) é desprezível!

No interior do horizonte (10^{10} a.l.) $\Omega \approx 1$

