

A Inflação

Ronaldo E. de Souza
`mailto:ronaldo@astro.iag.usp.br`



28 de maio de 2007

1

Criação de Matéria no Vácuo

- O Universo na Escala das Partículas Elementares
- Princípio da Incerteza de Heisenberg
- Condição Para Criação de Matéria no Big-Bang
- Radiação de Hawking em um Buraco Negro

2

Bariogênese e GUT

- Unidades Naturais
- O Modelo Padrão
- Decaimento do Próton
- Quebra Espontânea de Simetria

3

Universo Inflacionário

- A Proposta de A. Guth
- Duração da Inflação
- Solução do Problema da Planaridade
- O Modelo Slow Roll

4

Perturbações Primordiais

Desafios do Big Bang

- *Problema do horizonte* : por que $\Delta T/T \simeq 10^{-5}$ em escalas angulares da ordem de 2° ?
- *Problema da Planaridade*: Porque estamos tão próximos, mas não exatamente, de $\Omega_0 = 1$?
- *Assimetria matéria-antimatéria*: Porque o nosso Universo é dominado pela matéria?
- *Perturbações primordiais*: Qual é a origem das flutuações que geraram as galáxias?

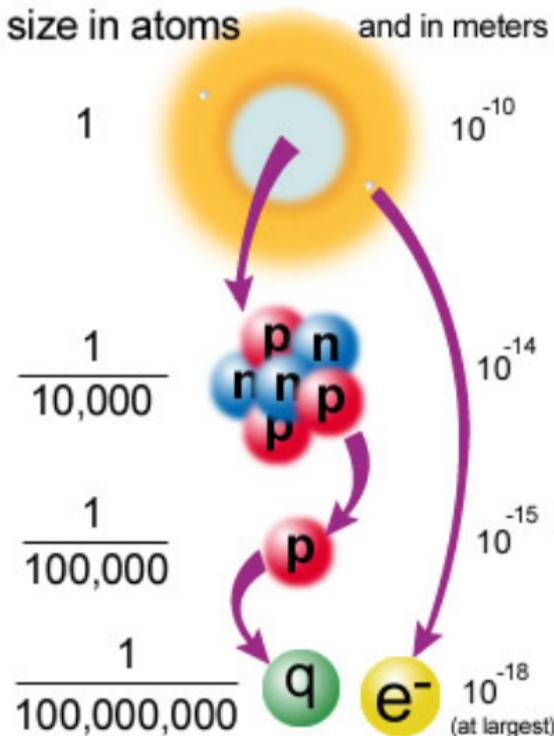
males do Big Bang

Desafios do Big Bang

- *Problema do horizonte* : por que $\Delta T/T \simeq 10^{-5}$ em escalas angulares da ordem de 2° ?
- *Problema da Planaridade*: Porque estamos tão próximos, mas não exatamente, de $\Omega_0 = 1$?
- *Assimetria matéria-antimatéria*: Porque o nosso Universo é dominado pela matéria?
- *Perturbações primordiais*: Qual é a origem das flutuações que geraram as galáxias?

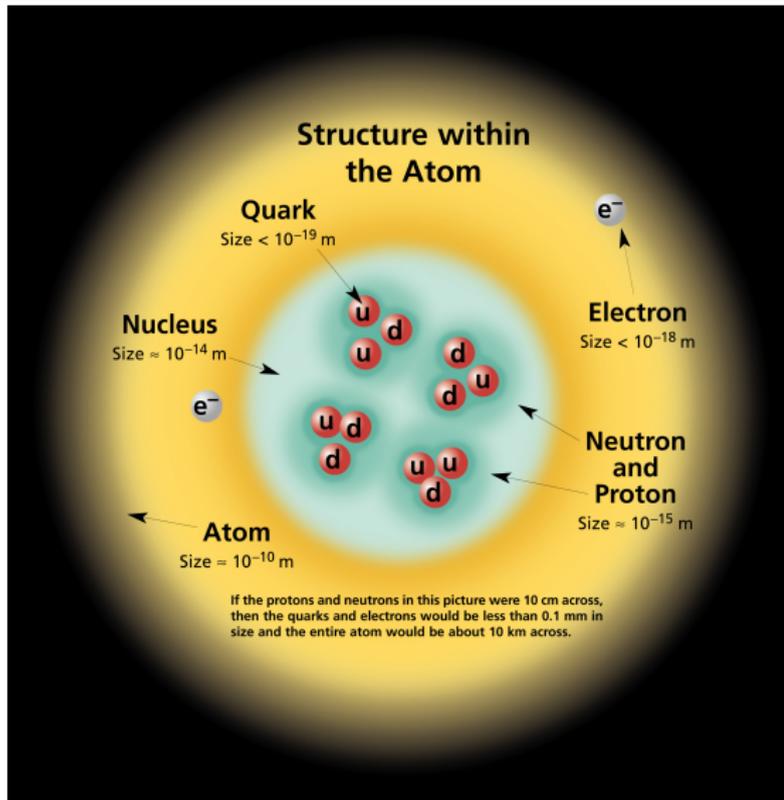
Para os males do Big Bang
inflação é a solução!

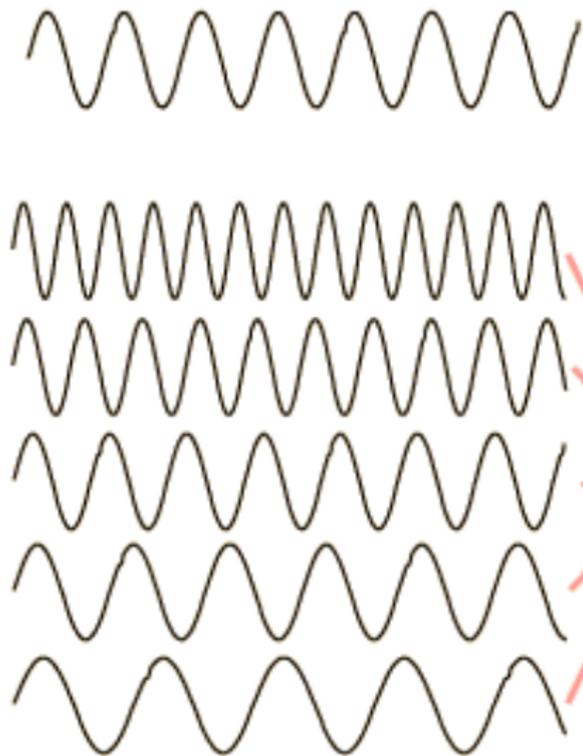




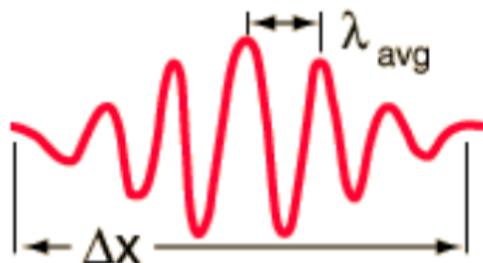
O Comportamento da natureza na escala das partículas elementares é muito distinto daquele observado na escala macroscópica.

Na escala atômica e subnuclear a estrutura da matéria depende da ação conjunta das forças eletromagnética, fraca e forte e as partículas são descritas pelas suas funções de onda.



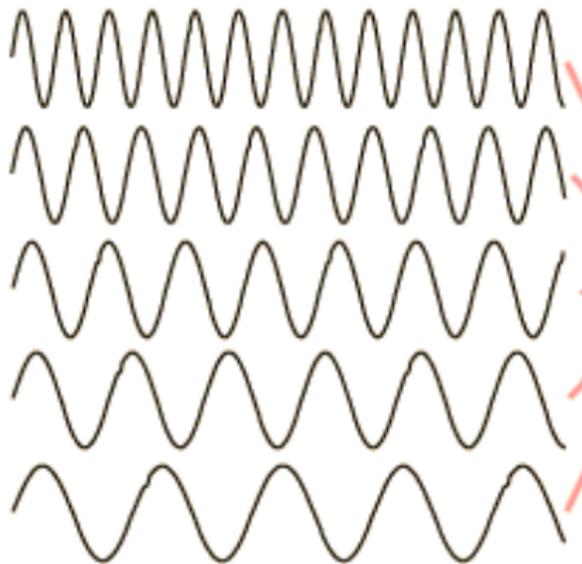


Uma onda senoidal de comprimento de onda λ tem o seu momentum especificado por $p = hc/\lambda$. Em compensação a probabilidade de encontrar a partícula em um dado ponto, $\Psi^* \Psi$, está espalhada por todo o espaço ($\Delta x \rightarrow \infty$).

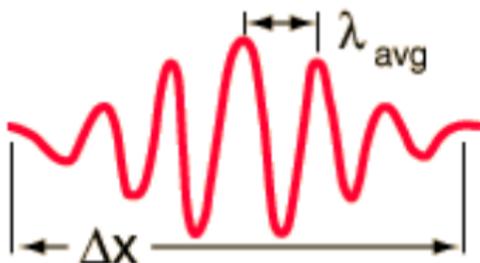




Uma onda senoidal de comprimento de onda λ tem o seu momentum especificado por $p = hc/\lambda$.
Em compensação a probabilidade de encontrar a partícula em um dado ponto, $\Psi^*\Psi$, está espalhada por todo o espaço ($\Delta x \rightarrow \infty$).



Compondo-se um pacote de ondas de diferentes comprimentos de ondas e fases podemos especificar melhor a sua posição reduzindo o valor de Δx .
Em compensação aumenta-se a incerteza no

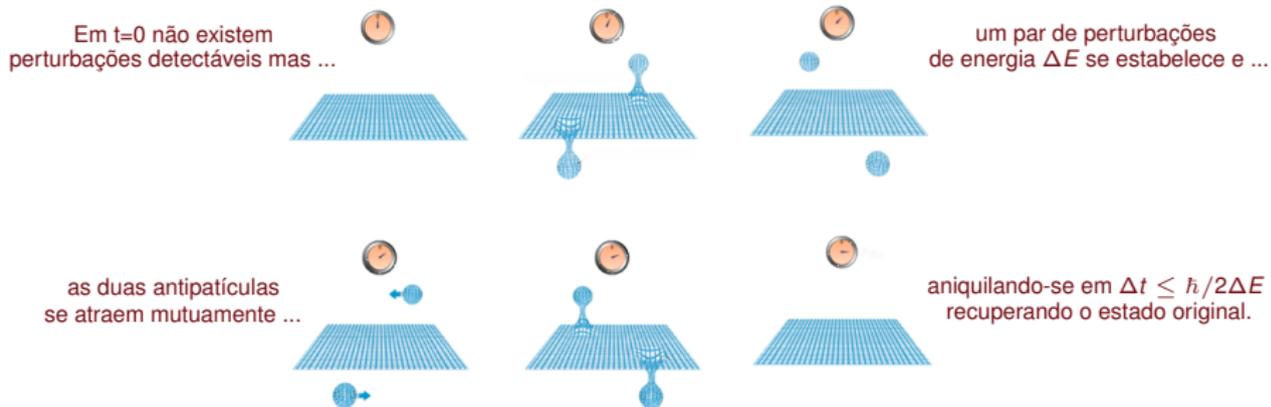


valor do momentum, Δp , tal que

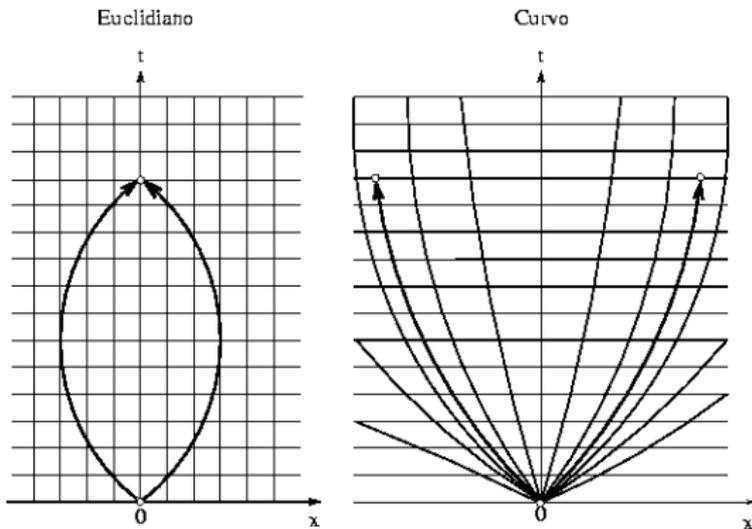
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

No entanto, pelo princípio da incerteza, são permitidas flutuações de energia tais que $\Delta E \cdot \Delta t \leq \hbar/2$, gerando um par partícula-antipartícula, de massa $\Delta E/2c^2$, e nenhuma lei física é violada se estes pares virtuais se aniquilam dentro do intervalo de tempo estabelecido por este princípio.



Numa geometria euclidiana os pares virtuais são criados e em seguida se aniquilam mutuamente. Já num espaço em rápida expansão as partículas se separam rapidamente e podem adquirir existência real durante a evolução do Universo.



$$mc^2 \Delta t \simeq \hbar$$

tendo a separação l resultado de uma aceleração g tal que

$$l \simeq g(\Delta t)^2$$

$$g \simeq \frac{\ddot{R}}{R} l \simeq \frac{l}{t^2}$$

$$l \simeq \frac{l}{t^2} (\Delta t)^2$$

$$\Delta t \simeq t$$

O lapso de tempo deve ser comparável à idade do Universo.

Para ter existência real a energia cedida pela expansão deve ser comparável com a energia própria das partículas

$$mgl \simeq 2mc^2$$

$$m \frac{l}{t^2} l \simeq 2mc^2 \rightarrow l \simeq ct$$

sendo o comprimento de onda de Compton, $l_c \simeq \hbar/mc$ temos que

$$mc^2 \Delta t \simeq \hbar \rightarrow l \simeq \frac{\hbar}{mc} \simeq l_c$$

e o resultado final é que a idade do Universo deve ser comparável com a própria escala de tempo de Compton das partículas que estão sendo criadas,

$$t_c \simeq \frac{\hbar}{mc^2}$$

e a densidade final de massa das partículas criadas será

$$\rho \simeq \frac{m}{\beta} \simeq \frac{m^4 c^3}{\hbar^3}$$

sendo a idade do Universo

$$t \simeq \frac{\hbar}{mc^2}$$

Por exemplo, a criação do méson π , que media a força nuclear forte, exigiria a existência de densidades subnucleares $\rho_\pi \simeq 10^{12} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ em uma escala de tempo $t_\pi \simeq 10^{-23} \text{ s}$ que é muito superior à idade de Planck, e portanto compatível com a hipótese inicial de validade da relatividade geral.

Para que isso ocorra devemos ter:

$$c\Delta t \simeq 2\pi \frac{2GM}{c^2}$$

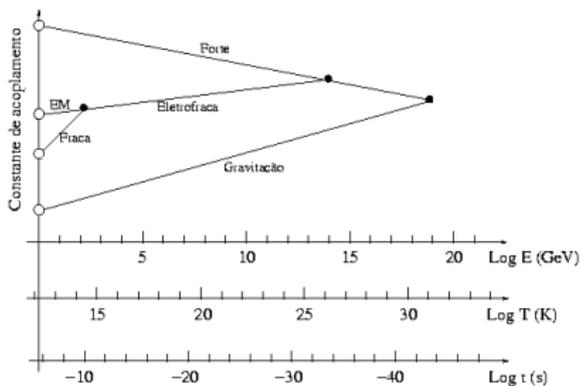
O processo de aniquilação resultará em uma radiação térmica tal que $\Delta E \simeq kT_H$ e portanto

$$T_H = \frac{hc}{8\pi kR_S} = \frac{hc^3}{16\pi^2 kGM}$$

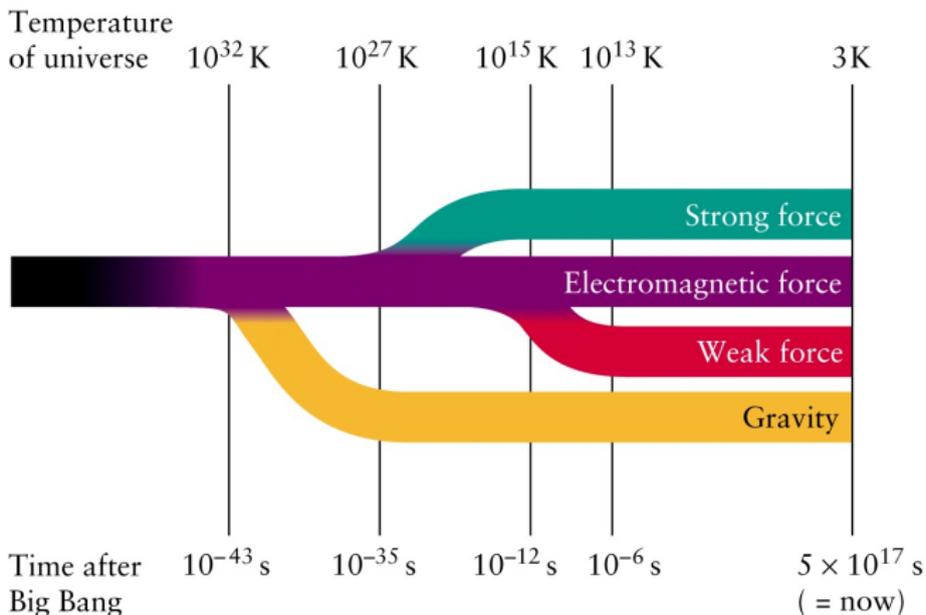
Como este processo de emissão é mais eficiente para os buracos negros pouco massivos, temos que apenas aqueles com massa superior a cerca de $10^{-19} M_\odot$ teriam condições de ter sobrevivido à idade de Hubble.

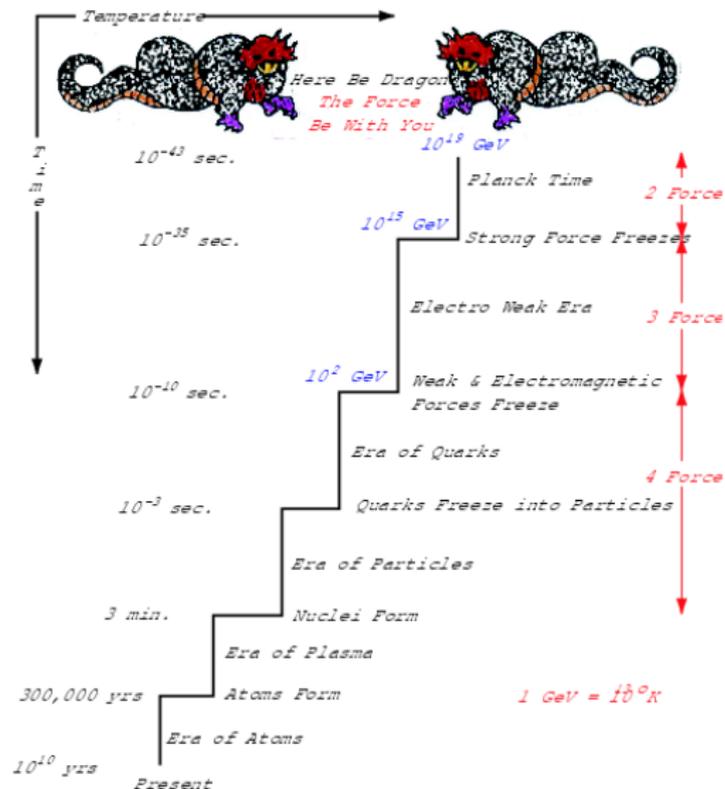
Na discussão da física das partículas elementares, é comum utilizar o chamado *sistema de unidades naturais*, no qual a velocidade da luz é tomada como sendo igual à unidade ($c = 1$). Isto corresponde na prática a redefinir a relação entre as unidades de tempo e comprimento de tal forma que $[L]/[t] = c = 1$, ou seja $[L] = [t]$. A adoção desta concepção, tendo em vista que $E = mc^2$, implica que $[m] = [E] = \text{GeV}$. A outra simplificação consiste em adotar a constante de Planck como sendo também igual à unidade ($\hbar = 1$). Esta convenção importa em dizer que $\text{GeV}[t] = 1$ ou seja $[t] = [L] = \text{GeV}^{-1}$.

Em baixas energias as quatro forças da natureza se encontravam desacopladas. Acima de 10^{19} GeV, na era de Planck, estas estavam unificadas em uma única interação. A unificação envolvendo as forças forte, fraca e o eletromagnetismo, denominada de grande unificação, ou GUT, *Grand Unification Theory*, deve ter ocorrido por volta de 10^{14} GeV, em uma idade cosmológica da ordem de 10^{-32} s.



A história do universo primordial foi determinada pela unificação e posterior desacoplamento das forças da natureza.



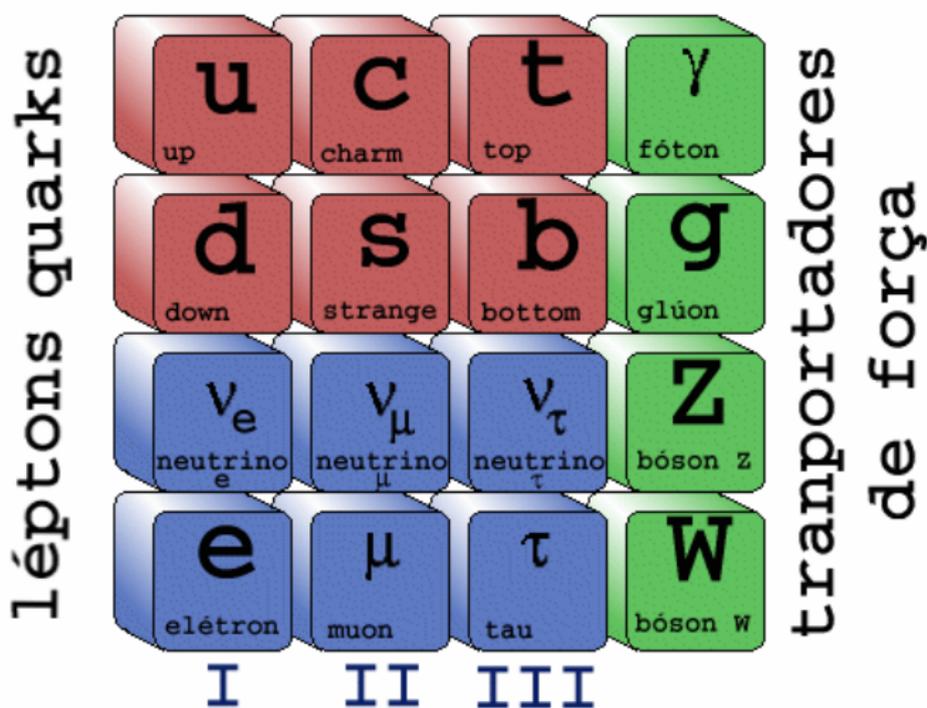




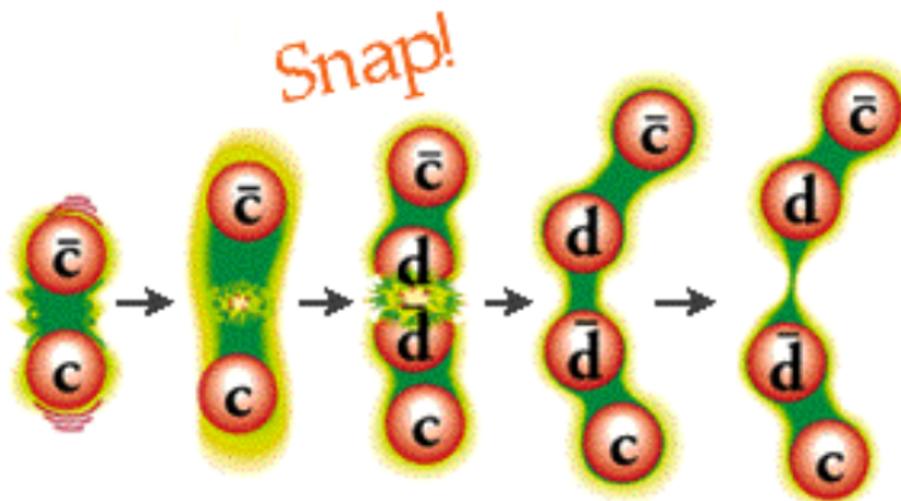
	Famílias									
	1			2			3			
	id	q	m MeV	id	q	m GeV	id	q	m Gev	
<i>Quarks</i>	<i>u</i>	+2/3	6	<i>c</i>	+2/3	1,20	<i>t</i>	+2/3	180	
	<i>d</i>	-1/3	10	<i>s</i>	-1/3	0,25	<i>b</i>	-1/3	4,3	
<i>Léptons</i>	<i>e⁻</i>	-1	0,511	<i>μ⁻</i>	-1	0,106	<i>τ</i>	-1	1,78	
	<i>ν_e</i>	0	< 10 ⁻⁵	<i>ν_μ</i>	0	< 10 ⁻⁴	<i>ν_τ</i>	0	< 10 ⁻²	
<i>Trans- missores</i>	id							q	m Gev	
	Força fraca:							<i>W⁺</i>	+1	80,3
								<i>W⁻</i>	-1	80,3
								<i>Z⁰</i>	0	80,3
	Eletromagnetismo:							fóton	0	0
Força forte:							glúons	0	0	
Bóson de Higgs								0	< 10 ³	

Esquema de classificação das partículas elementares no modelo padrão. Exceto pelo ν_τ , os glúons e o bóson de Higgs, todas as outras partículas já foram detectadas em laboratório.

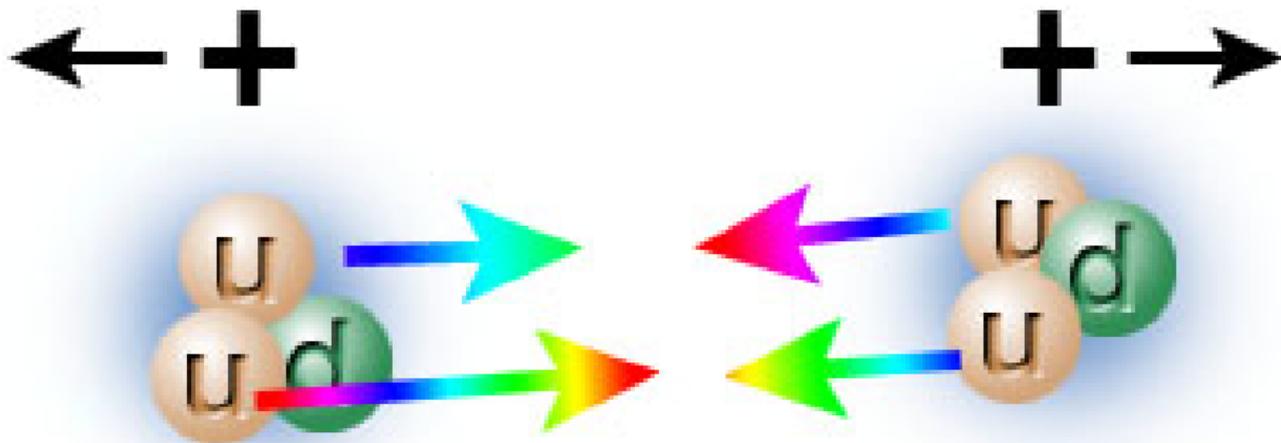
os blocos básicos



Os quarks não podem existir isolados na natureza porque a força que os une aumenta com distância.



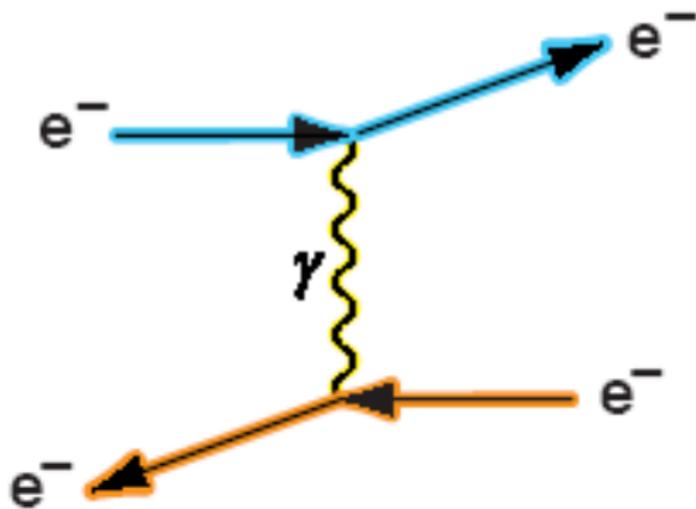
A Força forte mantém a identidade das partículas compostas quando estas colidem entre si interagindo através da força eletromagnética.



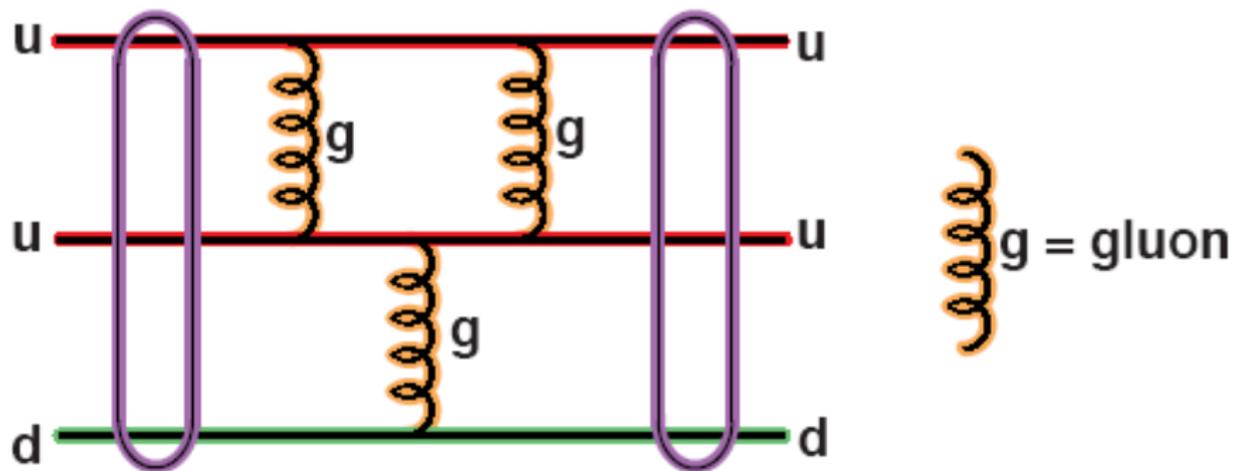


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and $W^+ W^-$	Quarks and Gluons

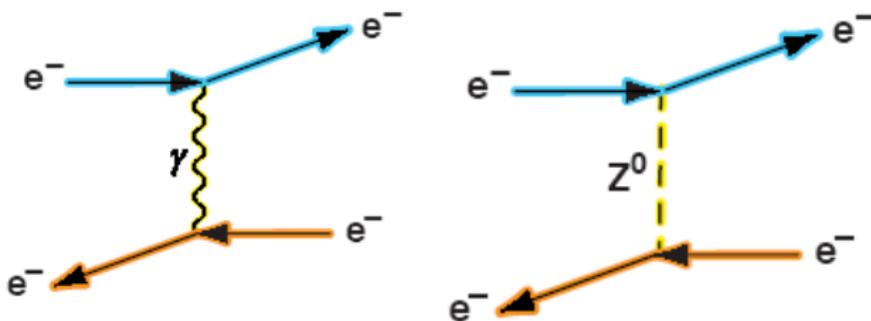
A força Eletromagnética resulta da troca de fótons entre as partículas.



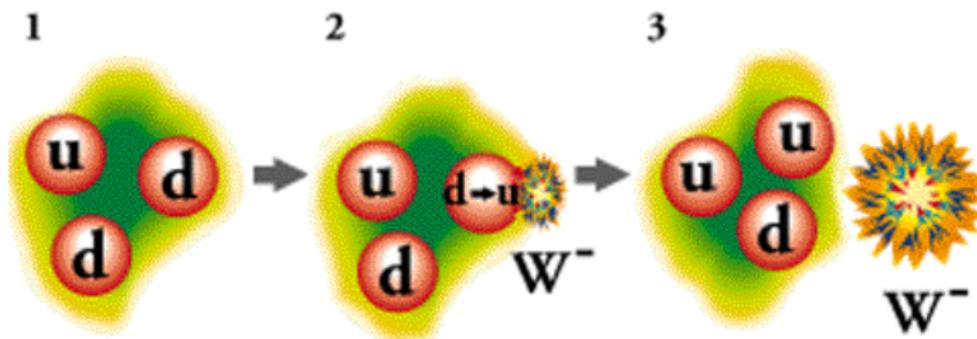
A força forte e a força fraca resultam da troca de glúons.



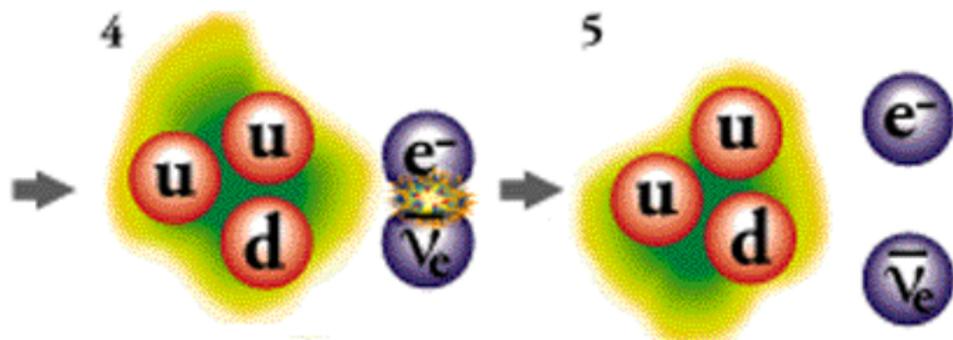
Dependendo da energia da interação pode ocorrer a unificação de duas ou mais forças. Por exemplo acima de 100 GeV tanto os fótons quanto os bósons Z^0 podem ser igualmente criados resultando na unificação eletrofraca.



O decaimento do nêutron em um próton se inicia quando um dos seus quarks d se transforma em um quark u emitindo um bóson W^- .



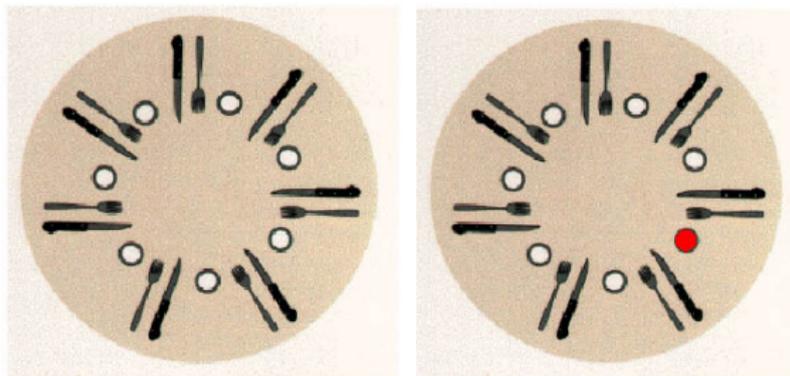
Posteriormente um elétron e um antineutrino emergem do bóson-W.



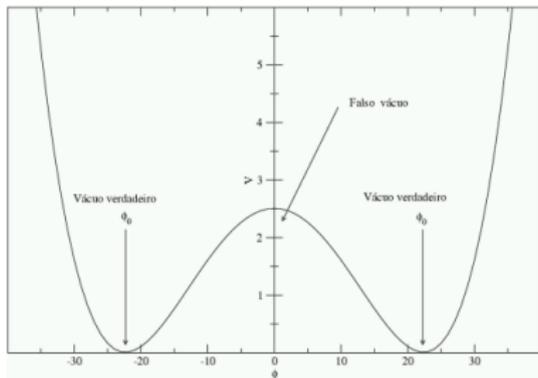
O decaimento do próton abriria a possibilidade de não conservação do número bariônico. Segundo Shkarov a assimetria matéria-antimatéria poderia ser resolvida caso houvessem 3 condições: (1) não conservação do número bariônico; (2) Não conservação das simetrias C e CP; (3) não equilíbrio termodinâmico durante a transição. As aniquilações gerariam os atuais fótons e portanto no universo primordial deve ter sido obedecida a condição abaixo, compatível com os atuais limites observacionais da razão n_B/n_γ .

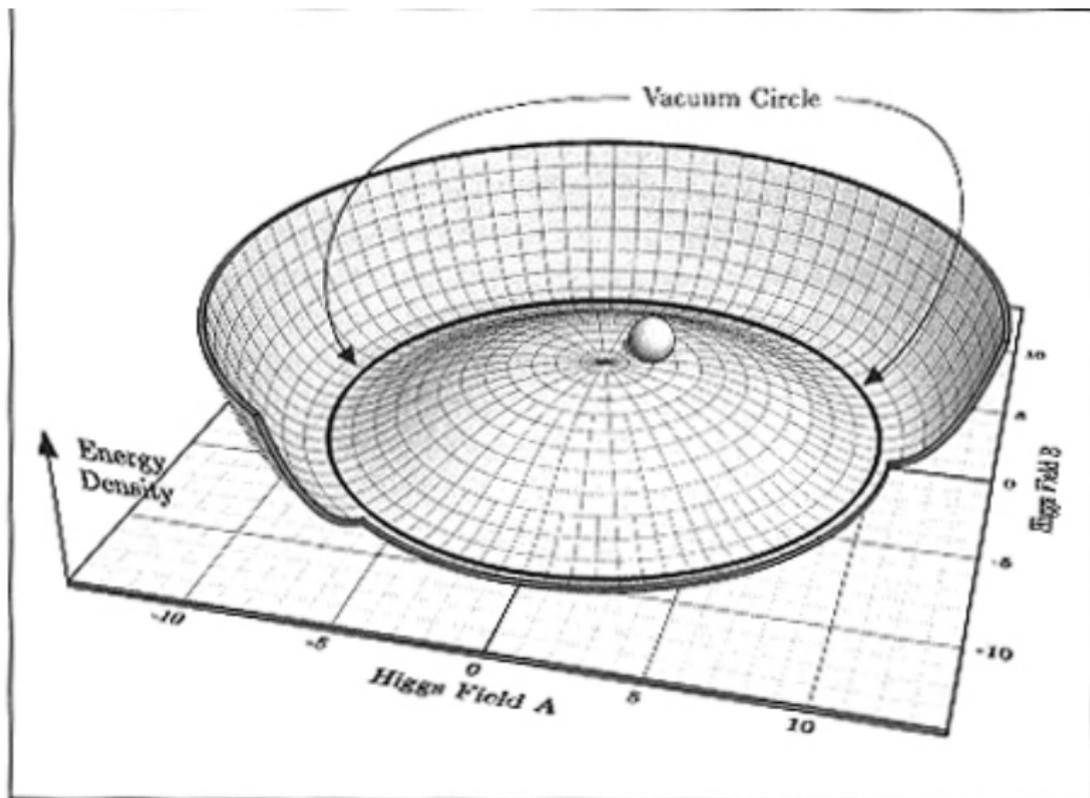
$$\frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_B + n_{\bar{B}}} \sim 10^{-8}$$

A transição de fase do universo primordial para o atual em que as forças estão desacopladas se deu através do mecanismo de Quebra Espontânea da Simetria. Uma analogia deste processo é a transição entre uma mesa posta mas não ocupada e outra em que os lugares foram ocupados. Não é claro qual copo vai para um dado ocupante até que o primeiro copo tenha sido escolhido.

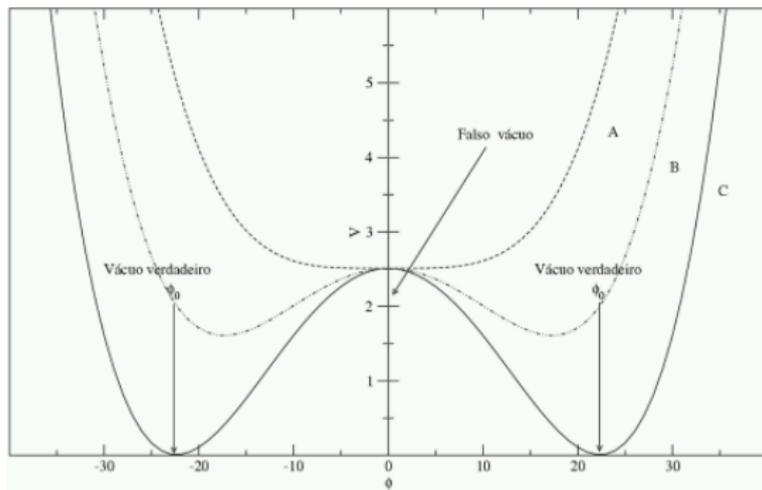


o mecanismo de quebra espontânea de simetria de Higgs consiste na adição de um campo escalar na lagrangiana da interação fraca que restaura a simetria perdida com a presença dos bósons massivos que mediam a interação. É necessária a inclusão de quatro componentes neste campo escalar para justificar a presença dos três bósons massivos que mediam a interação.

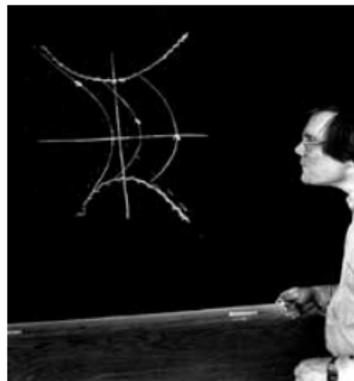




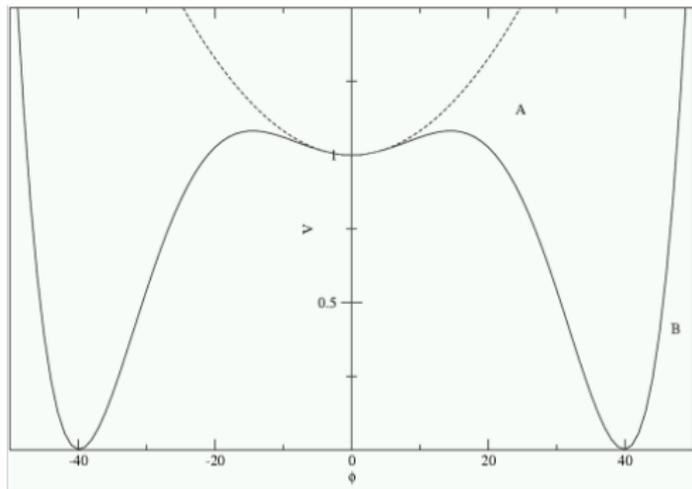
Antes da transição GUT, os campos escalares, representados aqui pelo eixo ϕ , responsáveis pela transição de fase têm um potencial, V , simétrico (curva A). Após a transição o valor mínimo do estado fundamental do vácuo é deslocado para ϕ_0 (curva C) o que viabiliza a quebra espontânea de simetria.



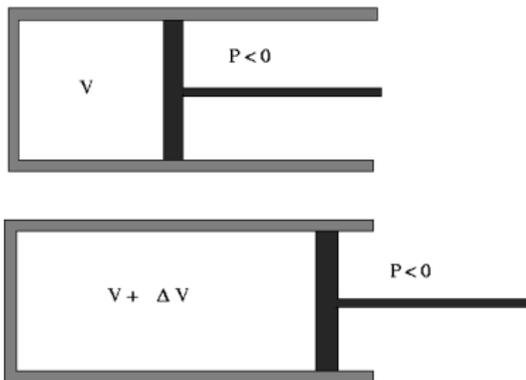
Porém, se a Grande Unificação ocorresse em um grupo simples de transformação qualquer processo de quebra de simetria para gerar o modelo padrão deveria gerar também um número absurdo de monopolos magnéticos. A densidade esperada de monopolos seria tal que $\Omega_{0,mono} = 10^{11} (T_{GUT}/10^{14} \text{ GeV})^3 (m_{mono}/10^{16} \text{ GeV})$ muito superior aos limites observacionais.



Se existir um mínimo central os campos escalares adquirem temporariamente uma energia maior que a energia do vácuo verdadeiro. Gradualmente, devido ao efeito de tunelamento, o sistema vai migrando para o vácuo verdadeiro, o que impede a disseminação dos monopolos magnéticos.



Durante a transição a densidade de energia do falso vácuo se mantém constante, em um nível determinado pela GUT, estimado em $\varepsilon_{fv} \simeq 10^{95} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-3}$. De onde vem esta densidade de energia tão elevada? Utilizando as unidades naturais podemos verificar que a escala de densidade de energia das GUTs é da ordem de $[10^{14-15} \text{ GeV}]^4$ o que corresponde em unidades cgs a $10^{94-98} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-3}$.



durante o processo de inflação

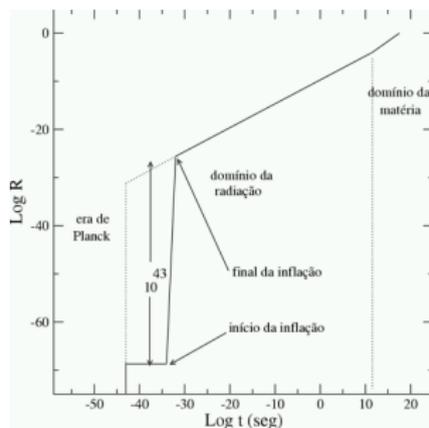
$$dE + pdV = 0$$

como $dE = \varepsilon_{fv} dV$ a pressão do falso vácuo deve ser negativa, $p = -\varepsilon_{fv}$. Como a pressão e a densidade de energia são fontes de inércia a densidade total que devemos considerar é $(\varepsilon + 3p)/c^2$ e pela equação de Friedmann,

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi}{3} G \frac{\varepsilon_{fv} + 3p_{fv}}{c^2} R = \frac{8\pi G \varepsilon_{fv}}{3c^2} R$$

$$\tau_i = H_i^{-1} = \sqrt{\frac{3c^2}{8\pi G \varepsilon_{fv}}} \simeq 10^{-34} \text{ s}$$

Portanto a fase inflacionária durou cerca de 10^{-32} s, e resultou em uma expansão do parâmetro de escala por um fator de aproximadamente $e^{100} \simeq 3 \times 10^{43}$. Com a inflação o parâmetro de escala na era de Planck seria 2×10^{-69} e o Universo conhecido hoje teria uma dimensão de $3,3 \times 10^{-41}$ cm, muito menor que o horizonte causal na era de Planck.



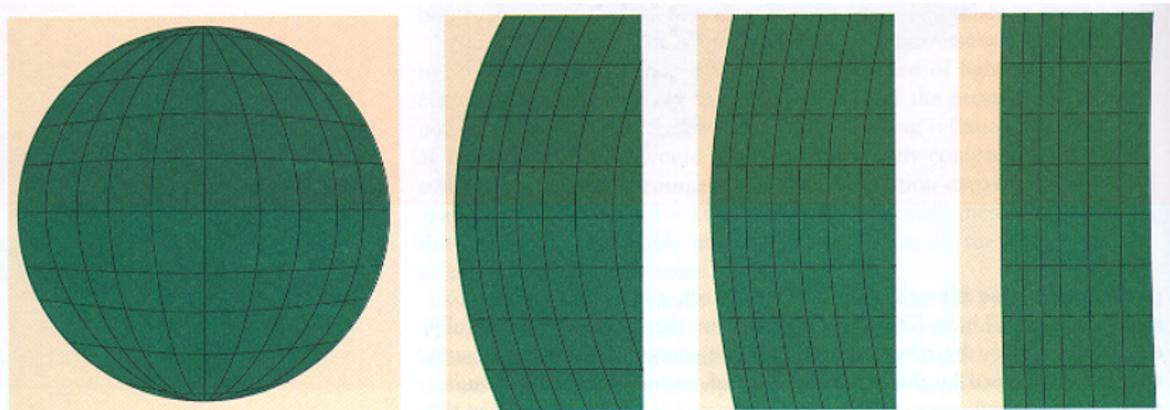
O problema da planaridade também é resolvido já que no final da inflação a taxa de variação do parâmetro de escala era

$$\dot{R}_f = R_f / \tau_i \simeq 1,8 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ e}$$

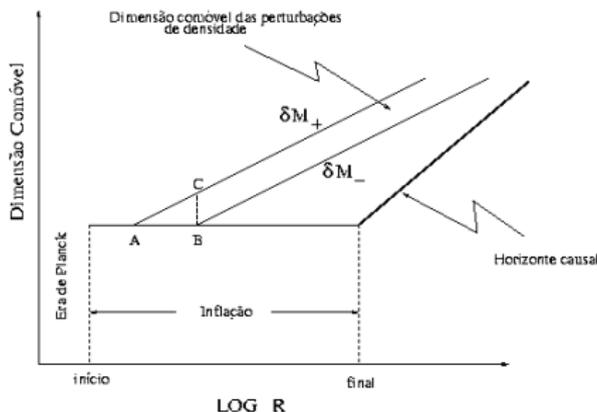
$$\Omega(t_f) = 1 + \frac{H_0^2 (\Omega_0 - 1)}{\dot{R}_f^2} \simeq 1 \pm 1,2 \times 10^{-52}$$

implicando que vivemos em um Universo praticamente plano.

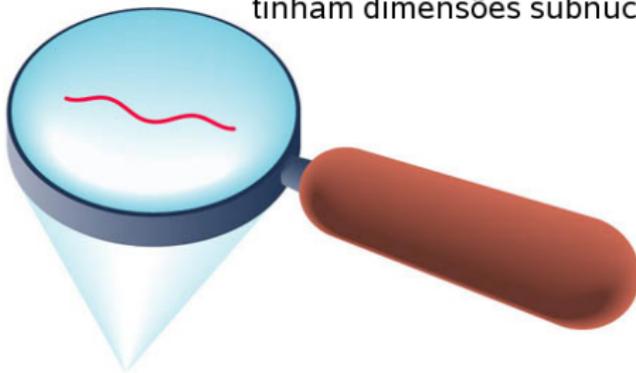
O Universo parece plano porque a inflação aumentou o raio de curvatura de muitas ordens de magnitude.



As flutuações em escalas de massas mais elevadas (δM_+) se libertam antes da fase inflacionária (A). Quando as flutuações de massas menores (δM_-) terminam o processo (B), as flutuações maiores se expandiram (C). O resultado é que o potencial gravitacional de ambas é aproximadamente constante ($\delta\Phi = G\delta M_+/r_+ \simeq G\delta M_-/r_-$).

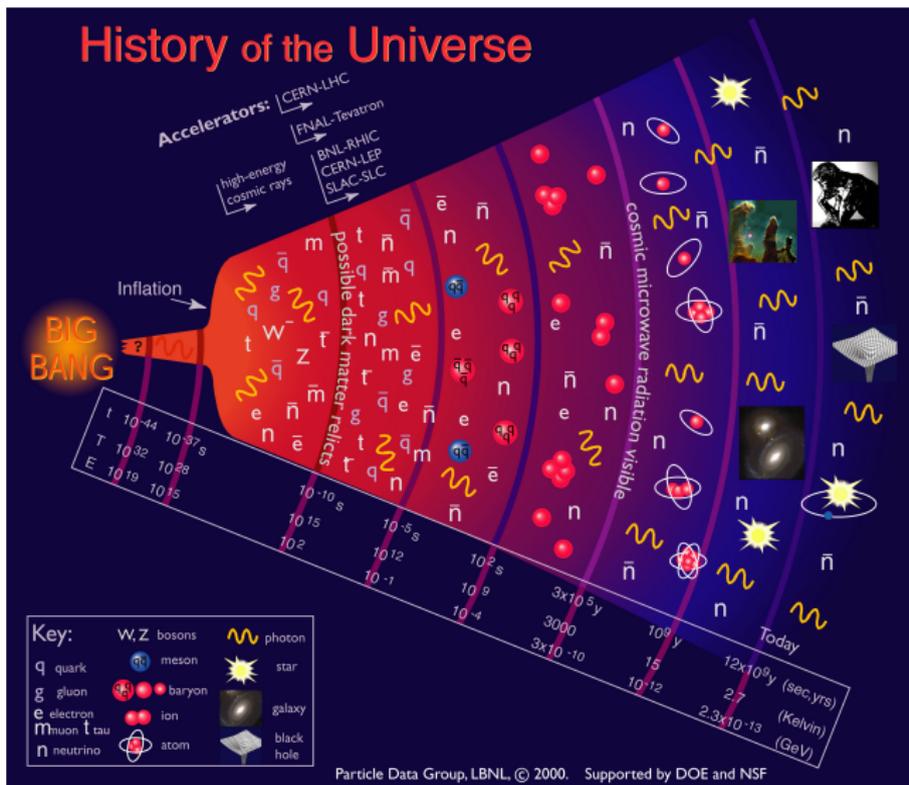


Antes da inflação as perturbações
tinham dimensões subnucleares



as quais foram amplificadas devido
ao enorme fator de expansão





FIM