



Universidade Federal do ABC

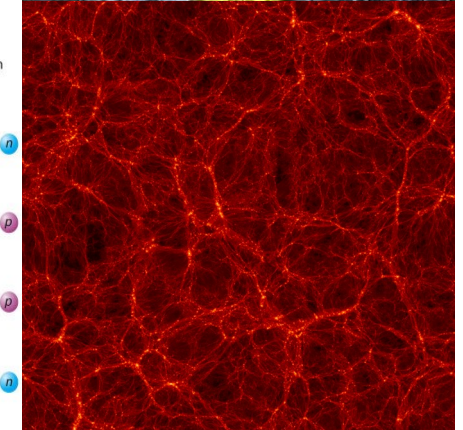
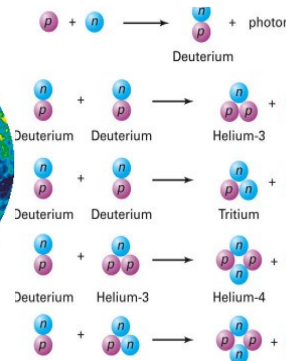
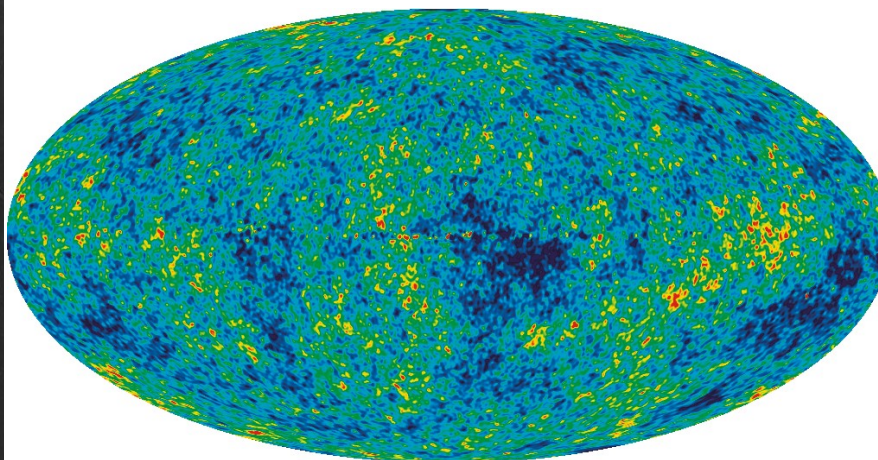
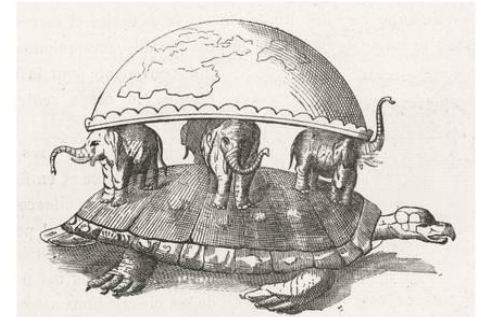
# Introdução à Cosmologia

## 14. Inflação, Energia Escura

Prof. Pieter Westera

[pieter.westera@ufabc.edu.br](mailto:pieter.westera@ufabc.edu.br)

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Cosmo.html>



## Evidências

A primeira parte desta aula é sobre mais uma das mais bizarras previsões do modelo padrão e suas evidências, a

# Inflação Cosmológica

# Teoria do *Big Bang*

$10^{-36}$  s -  $10^{-34}$  s ( $T \sim 10^{28}$  K):

**Inflação:** aumento exponencial do tamanho do Universo por um fator  $\geq 10^{43}$  em  $< 10^{-34}$  s.

A "sopa" primordial continuou, mas parte das **partículas** virtuais (aquelas que estavam se formando e aniquilando) se tornaram **reais**.

Nesta época devem ter sido emitidas intensas **ondas gravitacionais**.

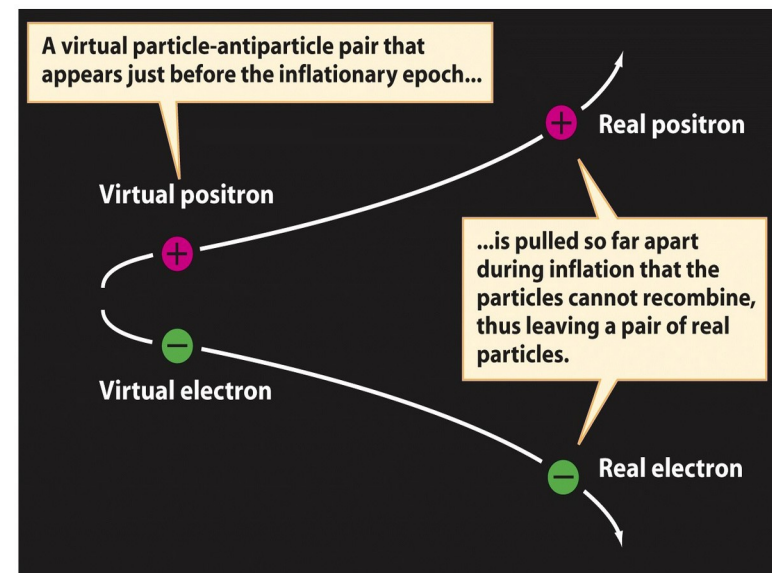
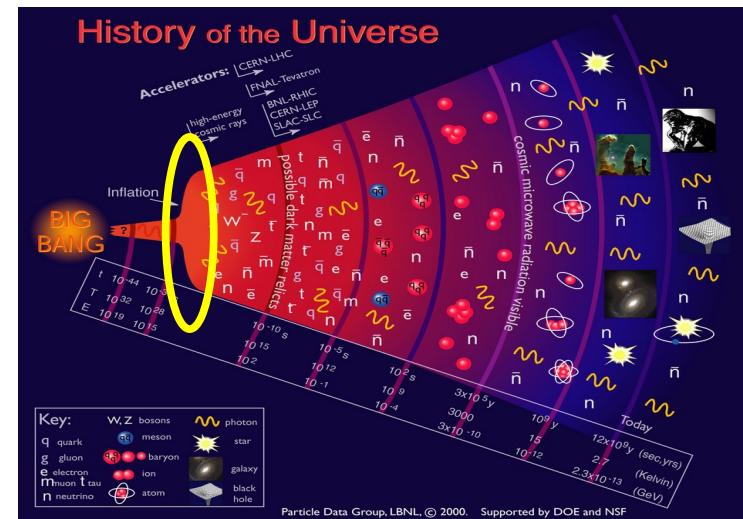


Figure 27-10  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W. H. Freeman and Company

# Evidências para a Inflação

## O problema do Horizonte

Por que a **Radiação Cósmica de Fundo** é tão **homogênea**?

Calculamos a **distância** do **horizonte de partículas**, na época da re-combinação ( $\Rightarrow$  aulas Cosm. Relativística)

$$d_h(t_{\text{desac}}) = R(t) \int_0^{t_{\text{desac}}} c/R(t') dt' = 3ct_{\text{desac}}$$

o que é  $\sqrt{3}$  vezes a distância do horizonte sonoro na época,

$$d_h(t_{\text{desac}}) = \sqrt{3} \cdot d_s(t_{\text{desac}}) \sim 350 \text{ kpc}$$

ou  $\sim 1.8^\circ$  na **Radiação Cósmica de Fundo** no **céu** hoje.

# Evidências para a Inflação

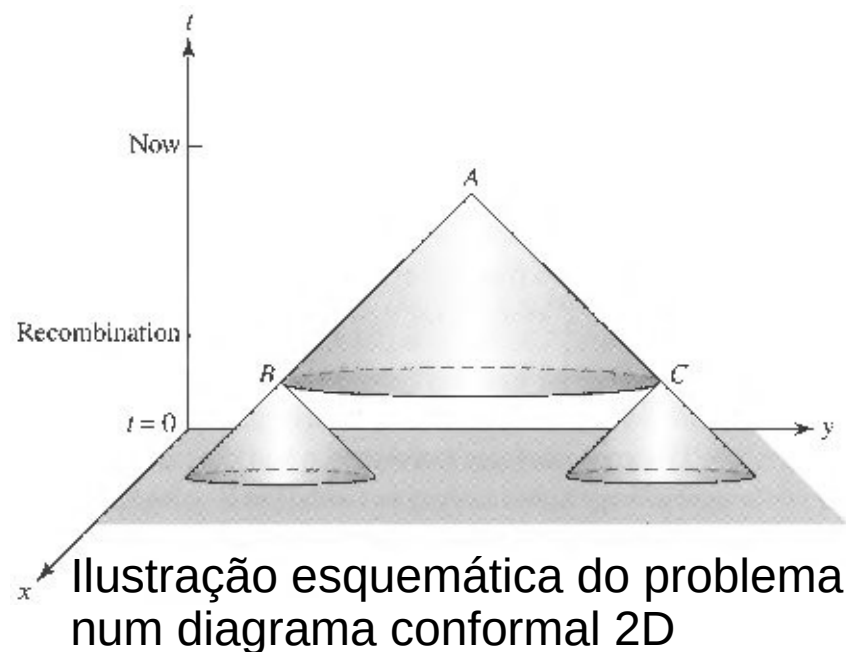
## O problema do Horizonte

Por que a **Radiação Cósmica de Fundo** é tão **homogênea**?

pontos de mais de  $\sim 2^\circ$  de distância na RCF **nunca** podem ter tido **contato causal**, se as informações chegaram neles à velocidade da luz.

Mesmo assim, a **Radiação Cósmica de Fundo** é tão **homogênea** no céu, que parece que toda a região deve ter estado em um **equilíbrio antes**.

**Como este equilíbrio se estabeleceu** entre pontos **sem contato causal**?



# Evidências para a Inflação

## O problema da Planura

Por que o **Universo** era tão **plano** ( $\Omega = 1$ ) na época da **re-combinação** (e antes, e depois)?

Aulas Cosmologia Newtoniana e Relativística:

Para um **Universo** só de **Matéria**:

$$\Omega - 1 = Kc^2/H^2 = kc^2/(dR/dt)^2 = (\Omega_0 - 1)/(1 + \Omega_0 z)$$

É melhor escrever  $\Omega - 1 = (\Omega_0 - 1)/(1 + \Omega_{0,m} z)$ ,  
mas isto não muda a conclusão, de que o "parâmetro de  
densidade da **curvatura**"  $1 - \Omega$  **não muda** de **sinal** e  
**aumenta** em módulo, isto é, a **densidade** se **afasta** cada  
vez mais da **densidade crítica** (do estado curvatura  
zero), na era da matéria.

# Evidências para a Inflação

## O problema da Planura

Para a **era da radiação** achamos uma relação similar:

$$\Omega - 1 = (\Omega_0 - 1) / [1 + 2\Omega_0 z + \Omega_0 z^2] \text{ ou } (\Omega_0 - 1) / [1 + 2\Omega_{0,rel} z + \Omega_{0,rel} z^2]$$

que leva às **mesmas conclusões** pra era da radiação:

A **curvatura não muda de sinal** e **aumenta** com o tempo.

Juntando as duas eras:

A curvatura aumentou na era da radiação, do *Big Bang* (?) até  $t \sim 50\,000$  anos, e em seguida, na era da matéria, de  $t \sim 50\,000$  anos a  $t_{desac}$  (e além), aumentou mais.

Para ter sido **plano** na época da **re-combinação** deve ter sido ainda **mais plano** num **passado** mais distante.

# Evidências para a Inflação

## O problema da Planura

Uns exemplos:

Pro parâmetro de densidade atualmente ser compatível com 1 com a precisão medida na RCF (valor baseado nas medidas do satélite Planck:  $\Omega_0 = 1.0023 \pm 0.0055$ ), ele deve ter sido compatível com 1 dentro de:

- $\sim 10^{-5}$  na transição era da radiação  $\Rightarrow$  era da matéria
- $\sim 10^{-15}$  na época da nucleossíntese primordial
- $< 10^{-61}$  no final da era de Planck

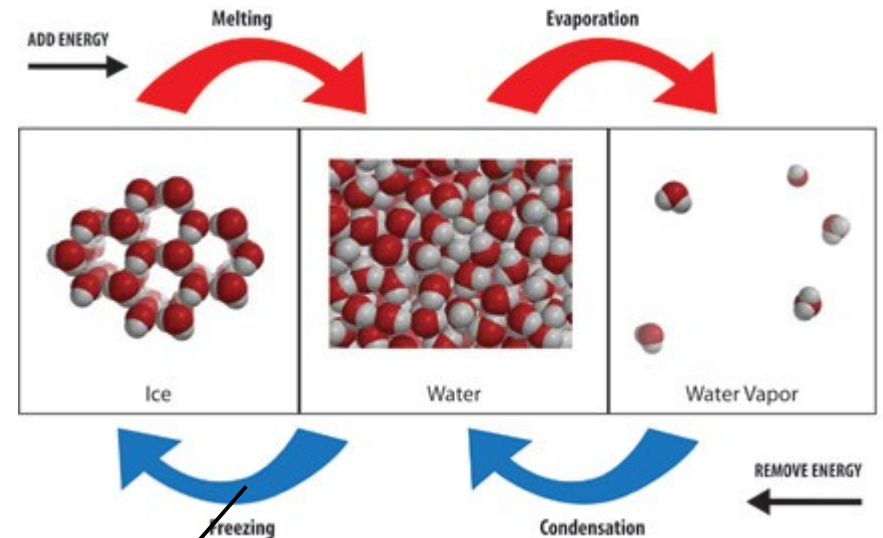
Se  $\Omega$  não tivesse sido tão **perto** de **1** naquelas épocas, o **Universo** já teria se **desfeito** ( $\Omega < 1$ ) ou **recolapsado** ( $\Omega > 1$ ), e nós não existiríamos.

**O que** causou aquele **ajuste fino**?

# Evidências para a Inflação

O problema dos Monópolos Magnéticos faltantes

As **teorias GUT** (*Grand Unified Theory*) prevêm uma **transição de fase**, associada com uma perda, "quebra", de **simetria** na época do **desacoplamento das forças eletrofraca e forte**, uns  $10^{-36}$  s após o *Big Bang*, quando a temperatura caiu a baixo de  $10^{28}$  K similar à transição água  $\rightarrow$  gelo em 273 K.

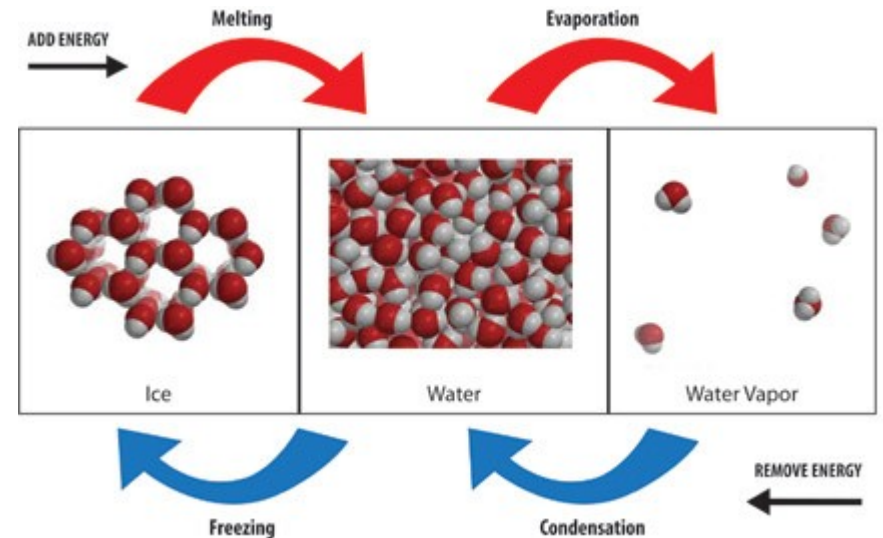


# Evidências para a Inflação

O problema dos Monópolos Magnéticos faltantes

Água: isotrópica, simetrias em todas as direções

Gelo: cristalino, simetrias em relação apenas a determinados eixos



A **simetria quebrada** no final da época *GUT* seria a simetria entre as **forças eletrofraca e forte**.

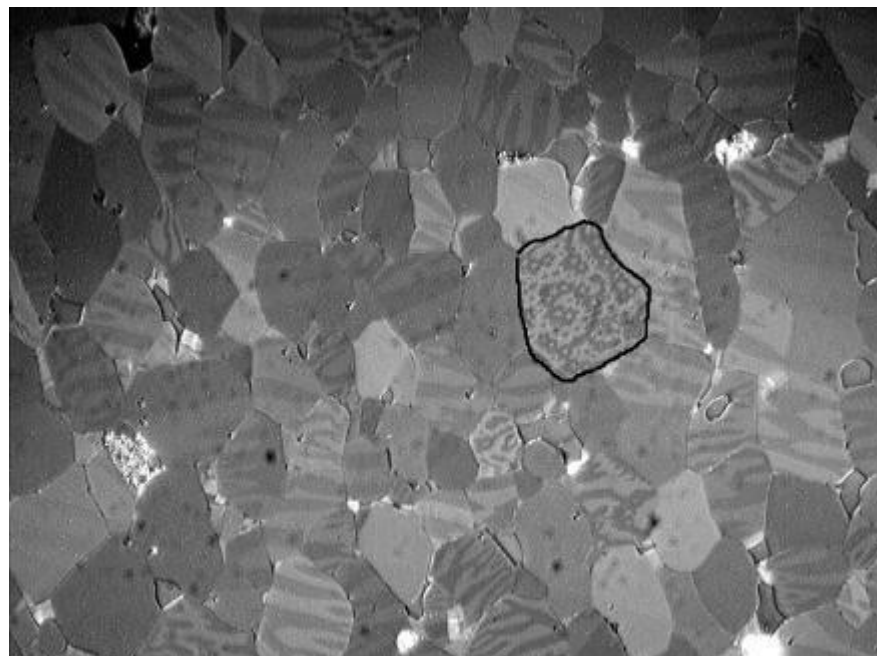
As duas forças começaram a se comportar diferentemente.

# Evidências para a Inflação

## O problema dos Monópolos Magnéticos faltantes

Em geral, estas transições ocorrem em **domínios** (no caso do gelo, pequenos cristais).

No caso do **desacoplamento GUT** => forças eletrofraca e forte, os diâmetros destes domínios eram da ordem da **distância do horizonte de partículas** na época,  $d_h(t_{\text{GUT}}) = 2ct_{\text{GUT}} \sim 6 \cdot 10^{-28} \text{ m}$ .

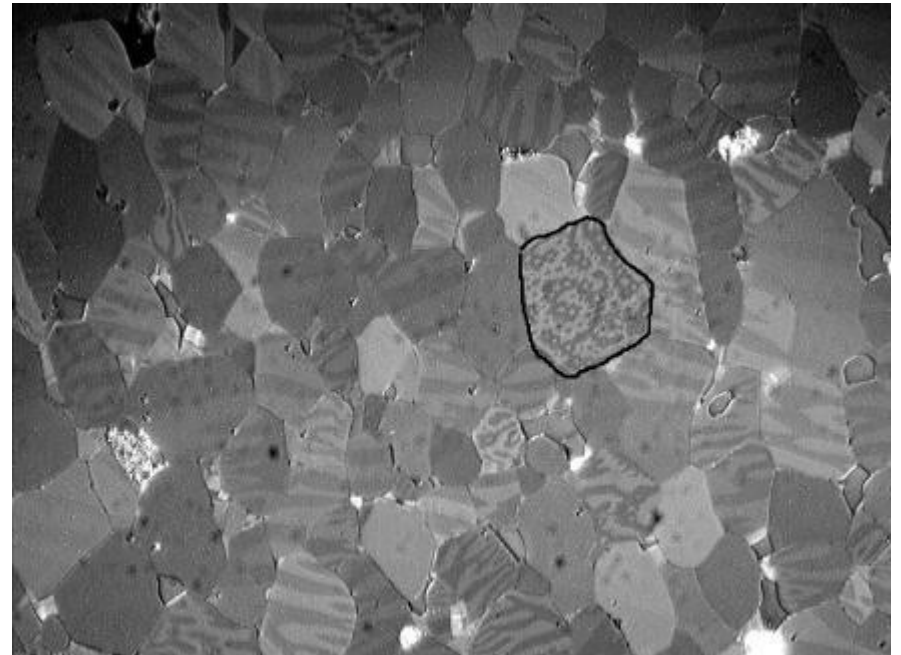


# Evidências para a Inflação

## O problema dos Monópolos Magnéticos faltantes

Nas fronteiras entre os domínios surgem **defeitos topológicos**.

Pro nosso desacoplamento a teoria prevê que os defeitos foram **monópolos magnéticos**, partículas atuando como **polos magnéticos** norte ou sul **isolados** com massas de  $mc^2 \sim 10^{16}$  GeV ( $> 10^{-8}$  g !), **estáveis** (e detectáveis) até hoje, e com uma densidade na época da ordem de  $d_h(t_{\text{GUT}})^{-3} \sim 10^{82} \text{ m}^{-3}$ .



# Evidências para a Inflação

O problema dos Monópolos Magnéticos faltantes

Supondo que, desde então, o Universo **expandiu** seguindo as previsões do modelo  $\Lambda$ CDM, esta **densidade** deveria ainda ser bastante **alta** hoje (dominando a densidade de massa!) e os monópolos deveriam ser facilmente **detectados**.

Porém, até hoje, **nunca** foi detectado nenhum monópolo magnético (tirando uma possível detecção em 1982, não confirmada).

**Para onde** foram os **monópolos magnéticos**?

# Evidências para a Inflação

A **Inflação Cosmológica**, aquele período hipotético no final da Época da Grande Teoria Unificada de **aumento exponencial** do **tamanho** do **Universo** por um fator  $\geq 10^{43}$  em  $< 10^{-34}$  s, sugerido em 1980 por Alan Guth, consegue **explicar** os três fenômenos.



Alan Guth

# A Inflação Cosmológica

O que **Inflação Cosmológica** fez com o fator de escala?

Matematicamente, ela fez a mesma coisa que a constante cosmológica, causar um **crescimento exponencial**,  $R(t)$  prop.  $e^{H_i t}$ , mas com um parâmetro de Hubble  $H_i \approx 1/t_i$  muito maior.

**Antes** e **depois** da inflação, o Universo era dominado pelas **componentes relativísticas**,  $R(t) \propto \sqrt{t}$ , tal que

$$R(t) = \begin{cases} R_i (t/t_i)^{1/2} & t < t_i \\ R_i e^{H_i(t-t_i)} & t_i < t < t_f \\ R_i e^{H_i(t_f-t_i)} (t/t_f)^{1/2} & t < t_f, \end{cases}$$

onde  $t_i$  e  $R_i$  são os valores de  $t$  e  $R$  no início - e  $t_f$ , de  $t$  no final da inflação.

# A Inflação Cosmológica

$$R(t) = \begin{cases} R_i (t/t_i)^{1/2} & t < t_i \\ R_i e^{H_i(t-t_i)} & t_i < t < t_f \\ R_i e^{H_i(t_f-t_i)} (t/t_f)^{1/2} & t < t_f, \end{cases}$$

Definimos  $N \equiv H_i(t_f-t_i)$  como o número de fatores  $e$ , por aquele o fator de escala cresceu durante a inflação,  $R(t_f)/R(t_i) = e^N \sim 10^{43}$  e supondo  $N \gg 1$ , é fácil mostrar (lista), que o horizonte de partículas no final da inflação era

$$d_h(t_f) = e^N c (2t_i + H_i^{-1}) \approx e^N 3ct_i$$

Valores teóricos típicos são  $t_i \approx 10^{-36}$  s, e  $N \approx 100$ .

$$\Rightarrow e^N \sim 10^{43}, t_f-t_i \approx 10^{-34} \text{ s}, d_h(t_i) \approx 6 \cdot 10^{-28} \text{ m}, d_h(t_f) \approx 0.8 \text{ pc!}$$

# Evidências para a Inflação

Como esta teoria absurda **resolve** os **problemas** do **horizonte**, da **planura** e dos **monópolos magnéticos** faltantes?

# Evidências para a Inflação

## O Problema do Horizonte

Com inflação, em  $t = 10^{-34}$  s, uma região causalmente ligada tinha tamanho 0.8 pc, e não  $2c \cdot (10^{-34} \text{ s}) \approx 6 \cdot 10^{-26} \text{ m}$ ,

o que cresceu até  $t_{\text{desac}}$  não para  $\sim 350 \text{ kpc}$ , mas para  $\sim 10^{43} \text{ Mpc}$ , grande o suficiente para conter a inteira superfície do último espalhamento.

# Evidências para a Inflação

OU:

A parte do Universo que se tornou a parte observada na **Radiação de Fundo**, era **muito** ( $10^{43}$  vezes) **menor**,  $\sim 3 \cdot 10^{-44}$  m, do que se não tivesse tido a Inflação, **pequeno** o **suficiente** para ter tido **contato causal** e ter **estabelecido** um **equilíbrio**.

=> **Resolve** o **Problema do Horizonte**.

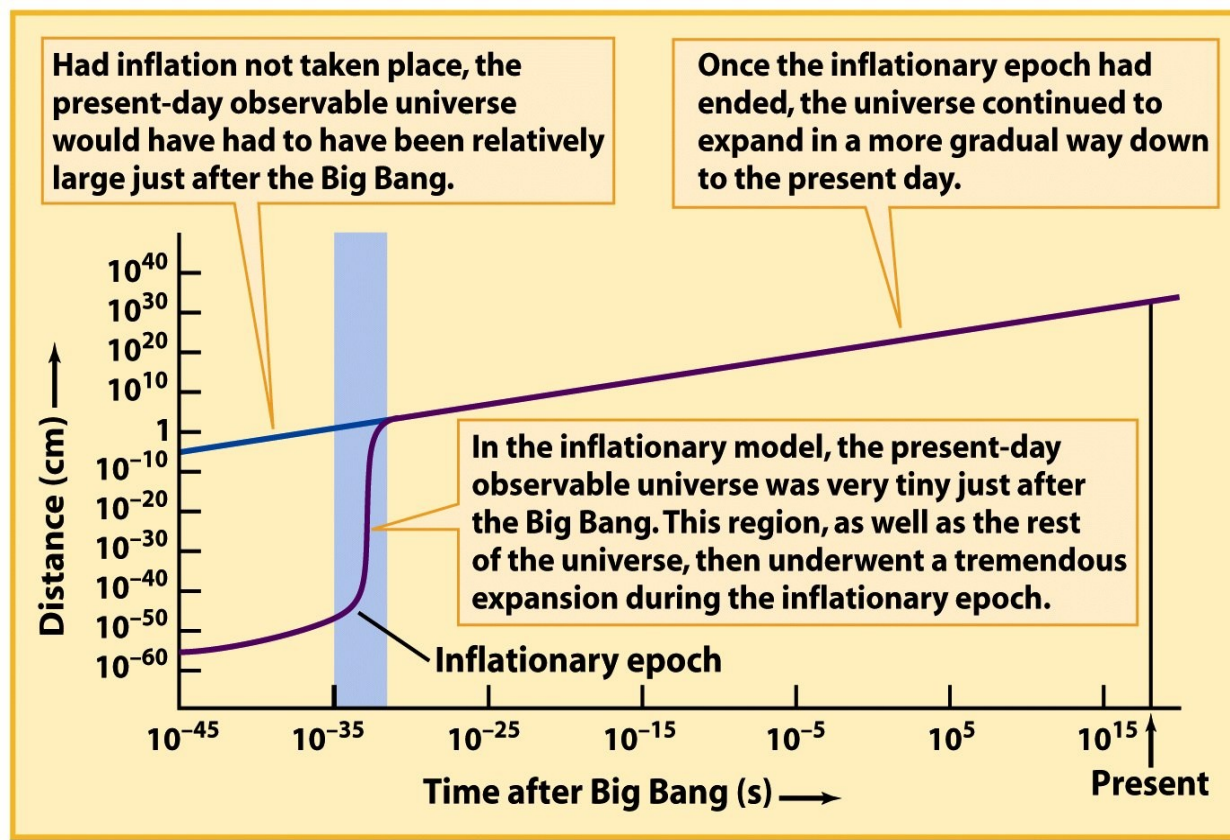


Figure 27-2  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W. H. Freeman and Company

# Evidências para a Inflação

## O Problema da Planura

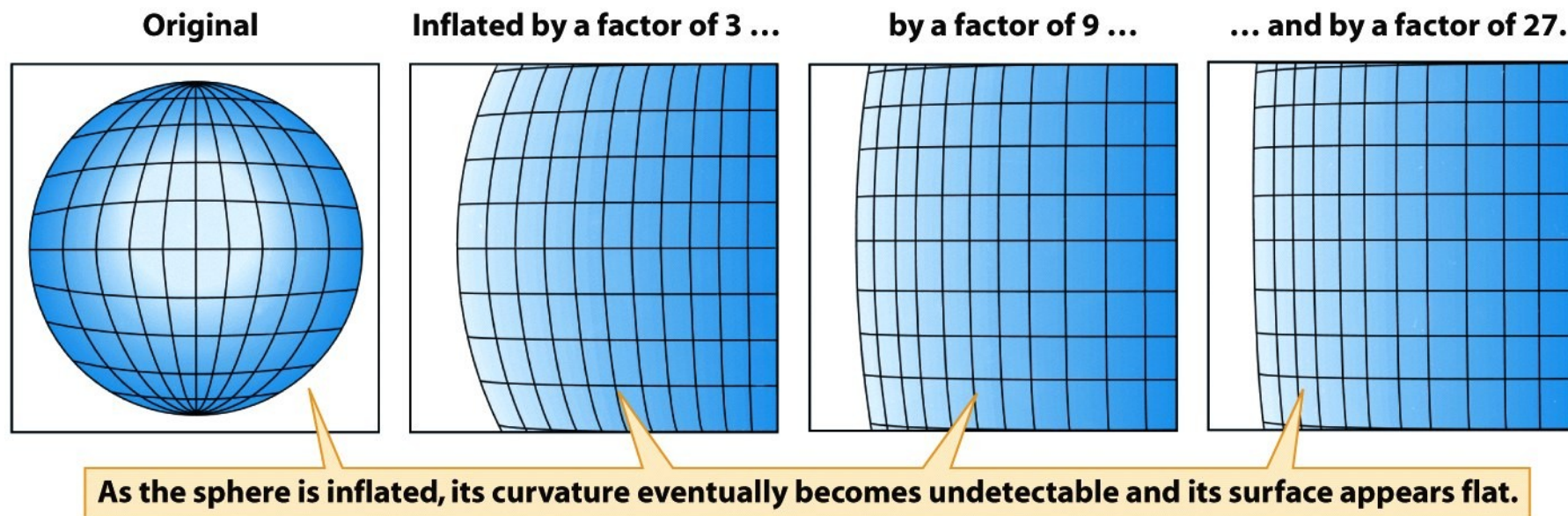


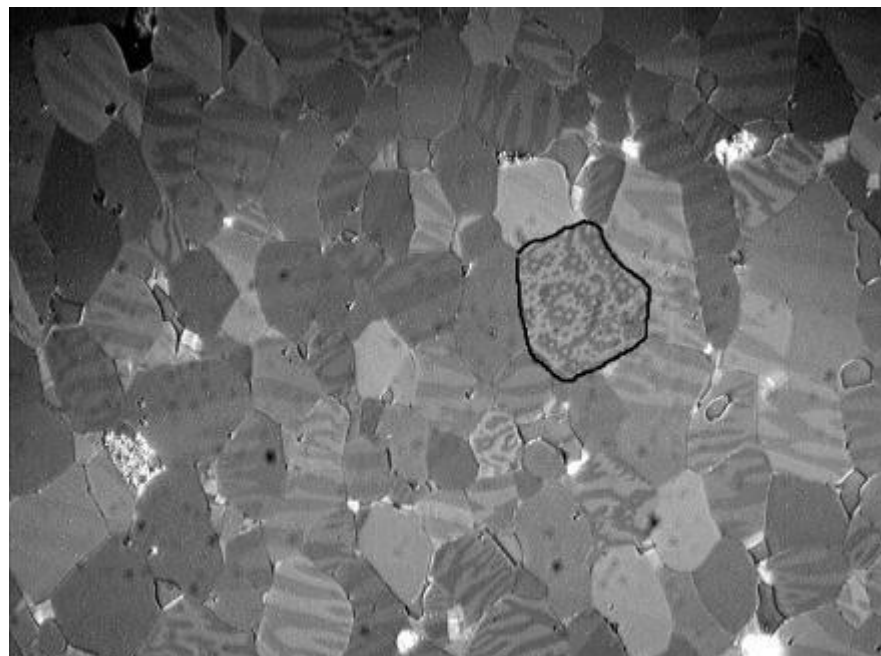
Figure 27-3  
*Universe, Eighth Edition*  
© 2008 W. H. Freeman and Company

A **Inflação** também **resolve** o **Problema da Planura**:  
Na inflação temos  $\Omega - 1 = kc^2/(dR/dt)^2 = kc^2/H_i^2 R^2$ ,  
diminuindo  $\Omega - 1$  por um fator  $R^2$ , pelo menos  $10^{86}$ .  
=> Qualquer **curvatura** ou **irregularidade** teria se **aplainado** na **expansão** até  $t_f$ .

# Evidências para a Inflação

E o Problema dos Monópolos Magnéticos faltantes?

Um **domínio homogêneo** na transição entre as épocas *GUT* e eletrofraca, na época  $\sim 6 \cdot 10^{-28}$  m, **cresceu**, graças à inflação até  $> 10^{20}$  Mpc até hoje, **maior** que o **inteiro Universo visível**,



ou:

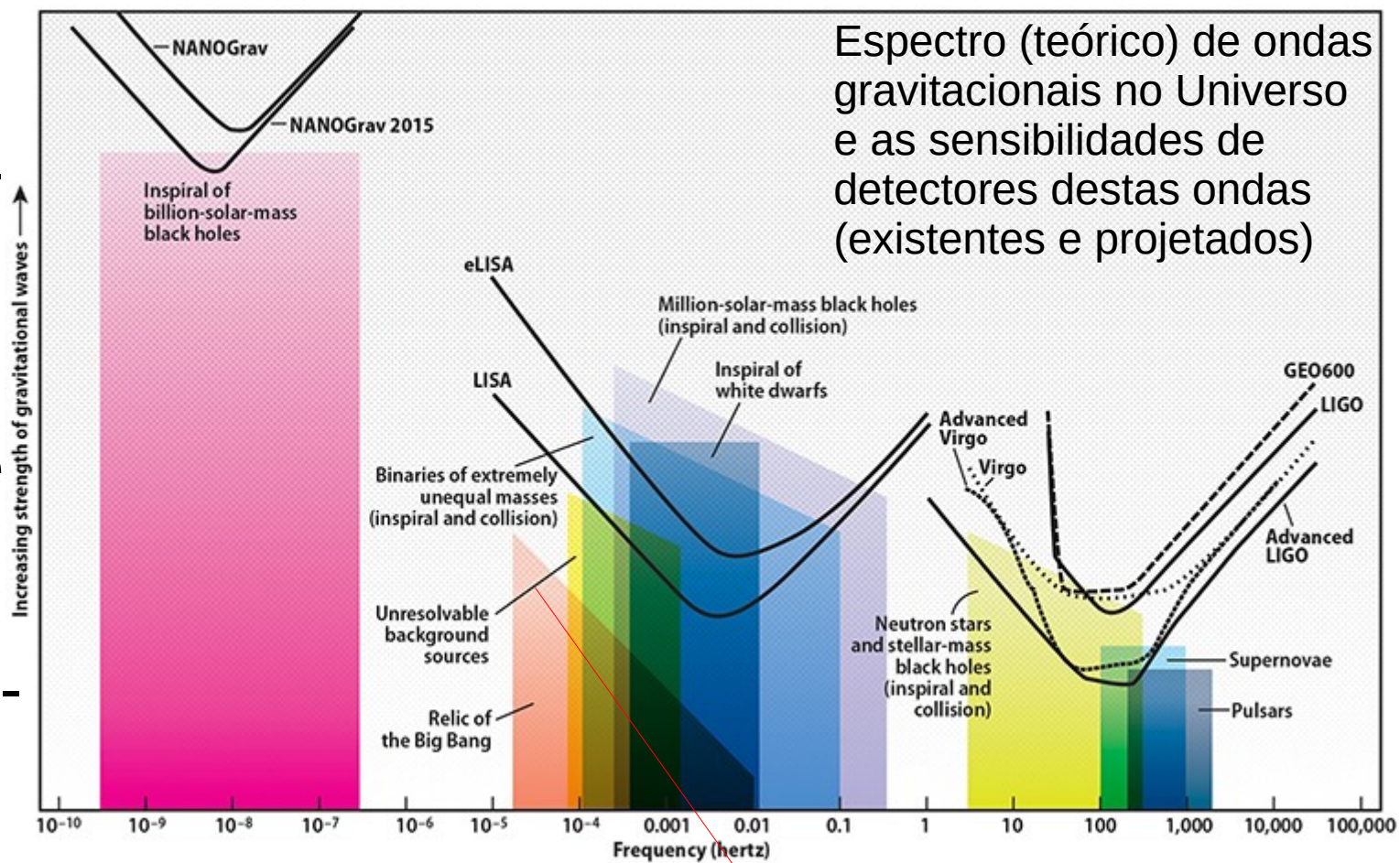
A **densidade** de **monópolos caiu** para  $\sim 10^{-61}$  Mpc $^{-3}$ .

=> A **probabilidade** de **achar** sequer um único **monópolo magnético** no inteiro **Universo observável** é **desprezível**.

# Evidências para a Inflação

## Observação direta das Ondas Gravitacionais da Inflação

A detecção recente de ondas gravitacionais por LIGO (=> aulas Relatividade Geral) abriu uma nova janela observacional na astronomia, mas ainda estamos **longe** de detectar aquelas emitidas na inflação.

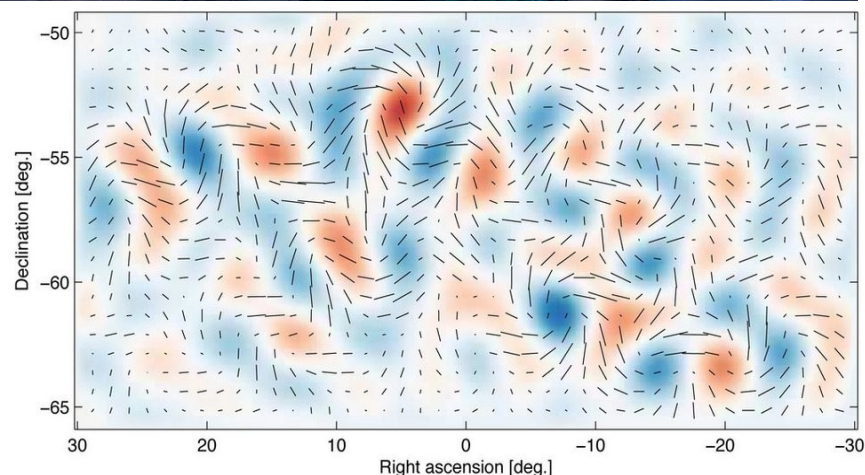


# Evidências para a Inflação

## Polarização da Radiação Cósmico de Fundo

Em março 2014 foi anunciada a possível descoberta da assinatura das ondas gravitacionais emitidas na época da Inflação num mapa de polarização da Radiação Cósmica de Fundo pelo telescópio Bicep2 no polo Sul.

Porém, esta polarização é provavelmente devida a poeira cósmica ou lentes gravitacionais (e **não** à Inflação).



# A Inflação Cosmológica

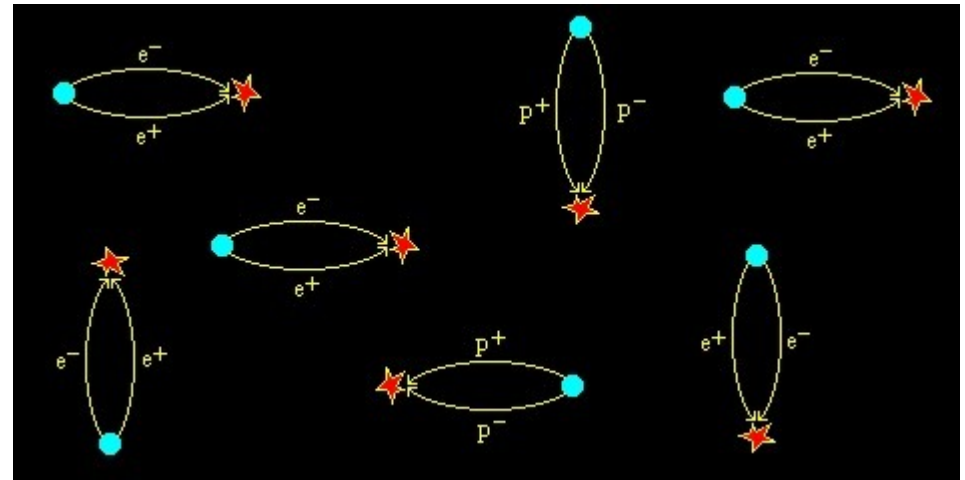
## O que causou a Inflação?

- Existem **muitas variantes** de teorias de Inflação.
- Várias se baseam em ideias na fronteira da **física** das **partículas**.
- São parcialmente teorias similares às aquelas que preveram a partícula de Higgs.
- Algumas se usam de partículas hipotéticas chamadas inflatons.
- Uma das mais citadas é a teoria do **Falso Vácuo**.

# A Inflação Cosmológica

## A Teoria do Falso Vácuo

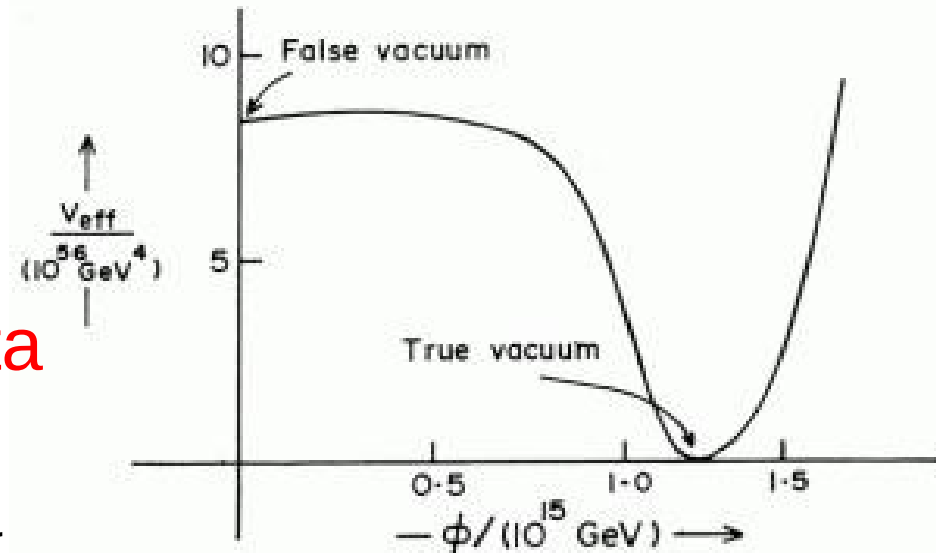
- Lembrem da **energia** do **vácuo**, ou do **estado fundamental** do **espaço**?
- Lembrete: É um **candidato** para ser a **Energia Escura**, só que a sua densidade calculada a partir da teoria é um fator  $10^{120}$  a mais, que a da Energia Escura.
- No "vácuo", **partículas** e suas **anti-partículas** são **criados** e **aniquilados** constantemente.



# A Inflação Cosmológica

## A Teoria do Falso Vácuo

- No **final** da época da **GUT** ( $10^{-36}$  s,  $10^{28}$  K), o Universo entrou num estado chamado **Falso Vácuo**, isto é, um **estado** de **energia mais alta** que no estado fundamental, permanecendo **sem quebrar** a **simetria** força forte  $\Leftrightarrow$  eletrofraca, similar a água super-resfriada.



# A Inflação Cosmológica

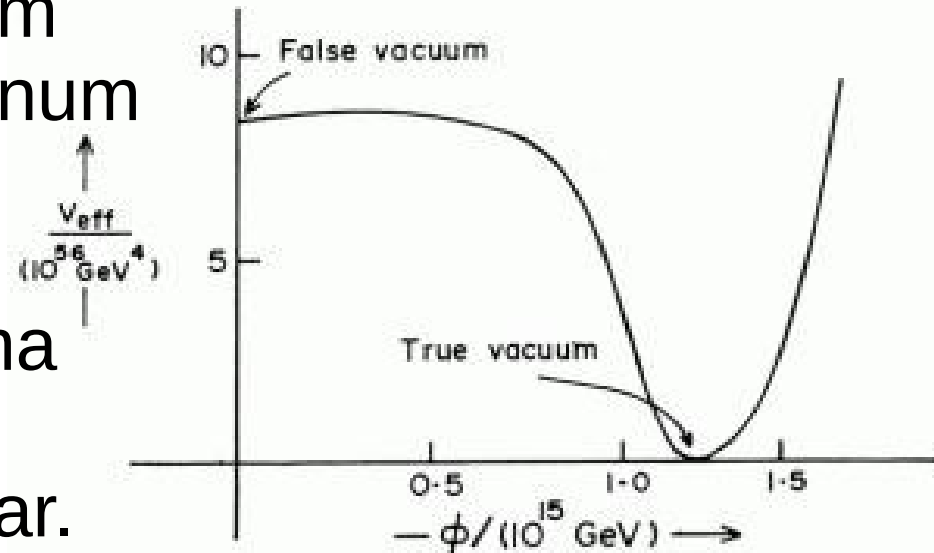
## A Teoria do Falso Vácuo

- A **densidade de energia** prevista para o falso vácuo é  $u_{fv} = \rho_{fv}c^2 \approx 1.6 \cdot 10^{98} \text{ J m}^{-3}$   
(pra comparação: a prevista pro vácuo é  $\sim 10^{111} \text{ J m}^{-3}$ ,  
pro vácuo "corrigido",  $6.6 \cdot 10^{-10} \text{ J m}^{-3}$ ,  
e a da Energia Escura,  $5.4 \cdot 10^{-10} \text{ J m}^{-3}$ ),
  - e a sua **pressão**,  $P_{fv} = -u_{fv}$   
( $w_{fv} = -1$ , igual como a Energia Escura)
- => Matematicamente, o falso vácuo deveria se comportar como Energia Escura  
(mas com densidade muita mais alta).

# A Inflação Cosmológica

## A Teoria do Falso Vácuo

- **Flutuações quânticas** causaram **regiões pequenas** a entrarem num estado de **vácuo verdadeiro**, com **pressão ~zero**, similar à maneira, como alguma perturbação pode causar água super-resfriada a congelar.

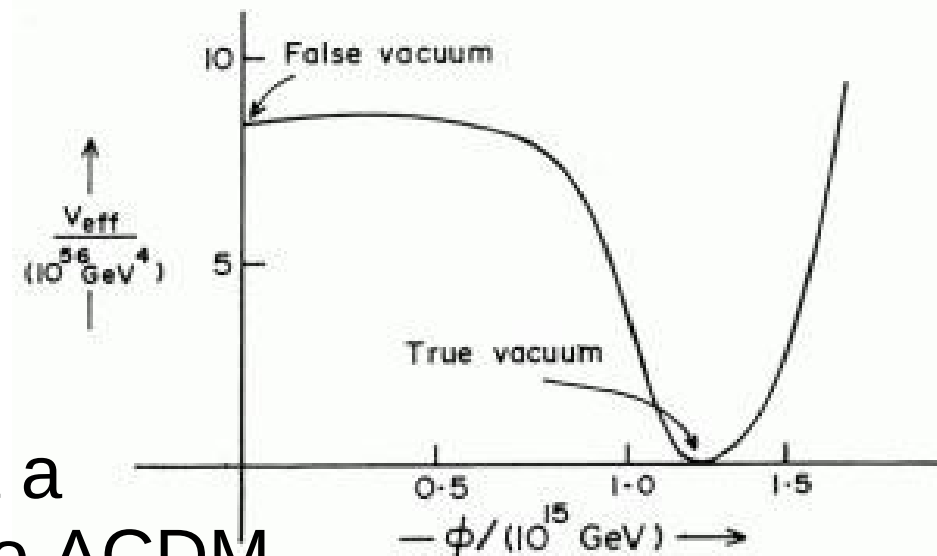


- Já que a pressão do lado de fora era  $-1.6 \cdot 10^{98} \text{ J m}^{-3}$ , as "bolhas" de vácuo verdadeiro estavam com **sobrepressão enorme**, e **inflaram**. O inteiro **Universo** observável fez parte de uma destas bolhas, ou seja, surgiu de uma **flutuação quântica**!

# A Inflação Cosmológica

## A Teoria do Falso Vácuo

- A Inflação **acabou**, quando o **resto** do **Universo** também "quebrou a simetria", i. e., fez a **transição** *GUT* => eletrofraco.
- A partir de lá, o Universo volta a poder ser descrito pelo modelo  $\Lambda$ CDM. Às vezes, o modelo completo é chamado  **$\Lambda$ CDM-Inflação**.
- Ainda há muitos pontos em aberto



# Energia Escura

A segunda parte desta aula também é sobre um ingrediente que causa **expansão exponencialmente acelerada**, suas **evidências** e uma hipótese sobre sua **natureza**, a

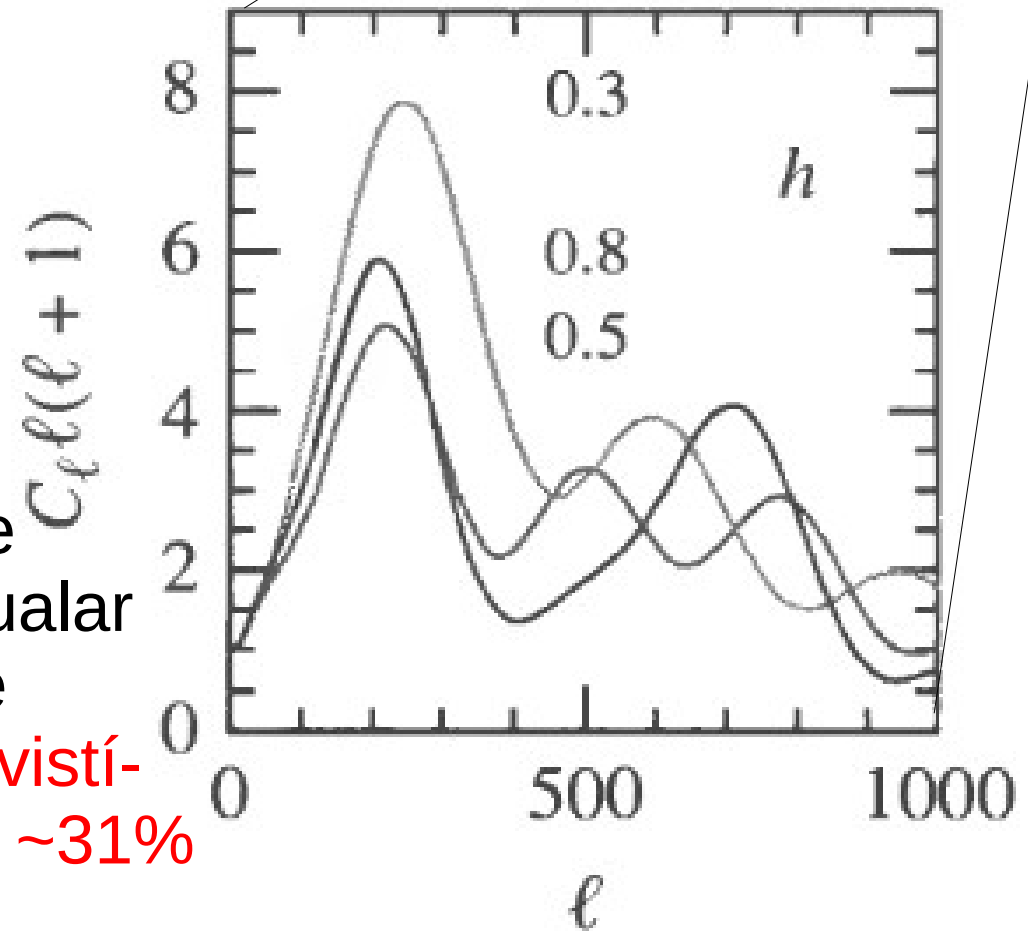
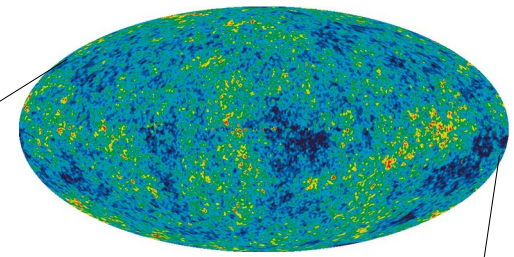
# Energia Escura

# Energia Escura

Uma evidência pela sua existência, a gente viu na aula anterior (RCF II). Pelo ajuste do **espectro angular da radiação cósmica de fundo**.

Basicamente: A **densidade** de "tudo" no Universo parece igualar a **densidade crítica**, mas a de **matéria e componentes relativísticos** juntos equivale a **apenas ~31%** desta, então o **resto**, ~69%, da ordem de  $5.96 \cdot 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$ , deve ser **Energia Escura**. Uma evidência bastante **indireta** e não muito satisfatória.

Será que tem outra(s)?



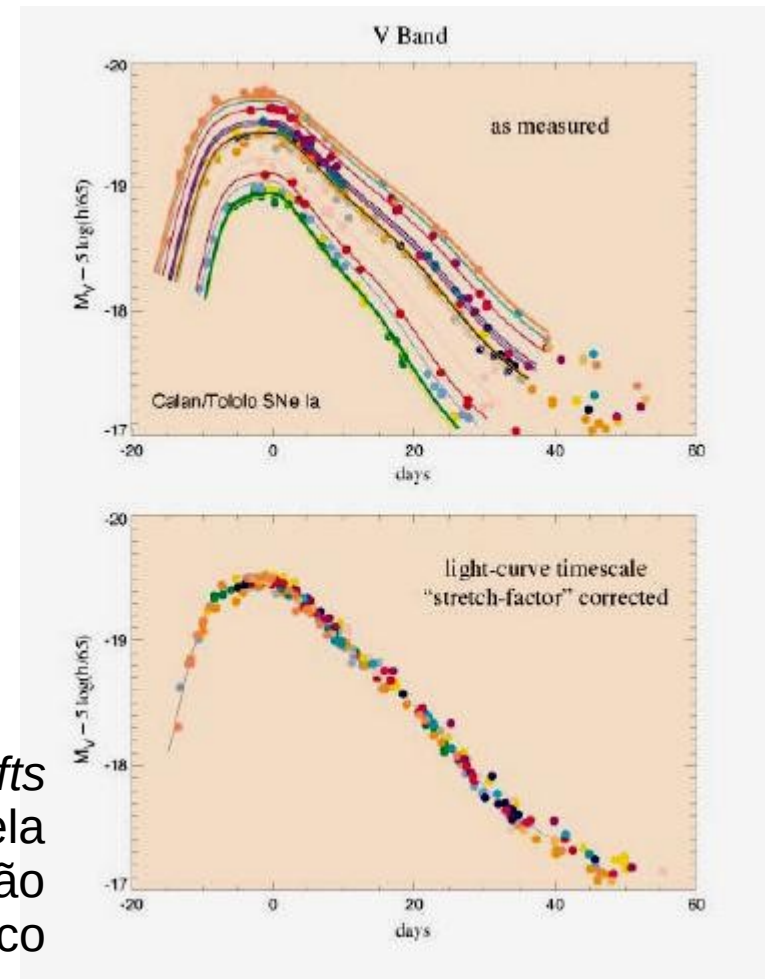
# Outras Evidências para a Energia Escura

## Luminosidades de Supernovas Ia

Supernovas (SNs) são **explosões** de **estrelas** no final das suas "vidas".

Para um certo tipo, as Supernovas Ia (resultado de Anãs Brancas ultrapassando sua massa limite de estabilidade), estas explosões **sempre** ocorrem com a **mesma luminosidade**, que conseguimos determinar através de SNs Ia que ocorreram "perto daqui", ou seja, SNs Ia são **velas padrão**.

Curvas de luz de SN Ia observados em *redshifts* diferentes, antes e depois de corrigidas pela perda de energia dos fótons e pela dilatação do tempo cosmológico



# Outras Evidências para a Energia Escura

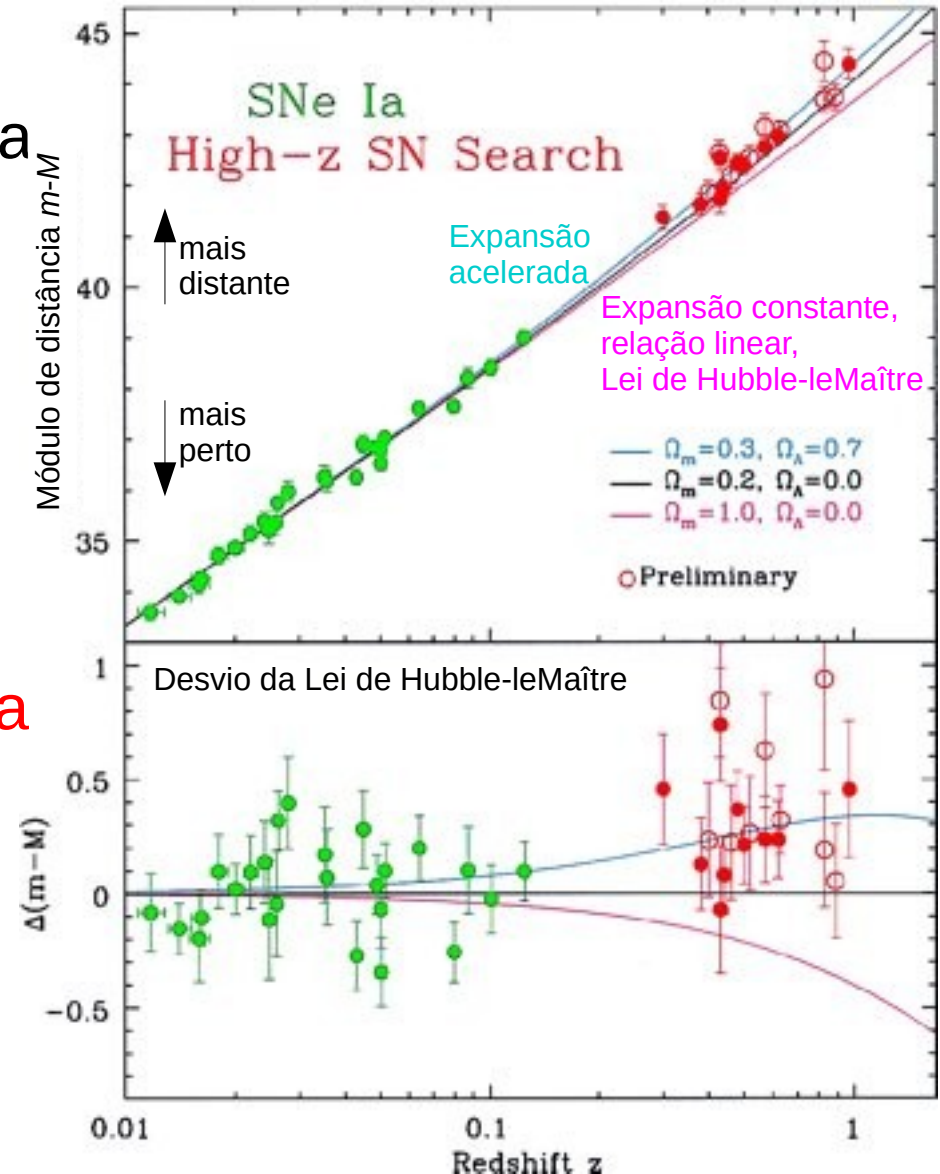
## Luminosidades de Supernovas Ia

Em 1998, dois grupos de pesquisa descobriram que em **redshifts altos**, ou seja, no **passado distante**, as **luminosidades aparentes** das **SN Ia** são **menores**, i. e. suas **distâncias** (de luminosidade) são **maiores** que previsto pela Lei de Hubble-leMaître, que se baseia numa **taxa constante** de expansão do Universo.

=> A expansão era mais lenta

=> A **expansão do Universo** é **acelerada**.

=> **Evidência pra Energia Escura.**

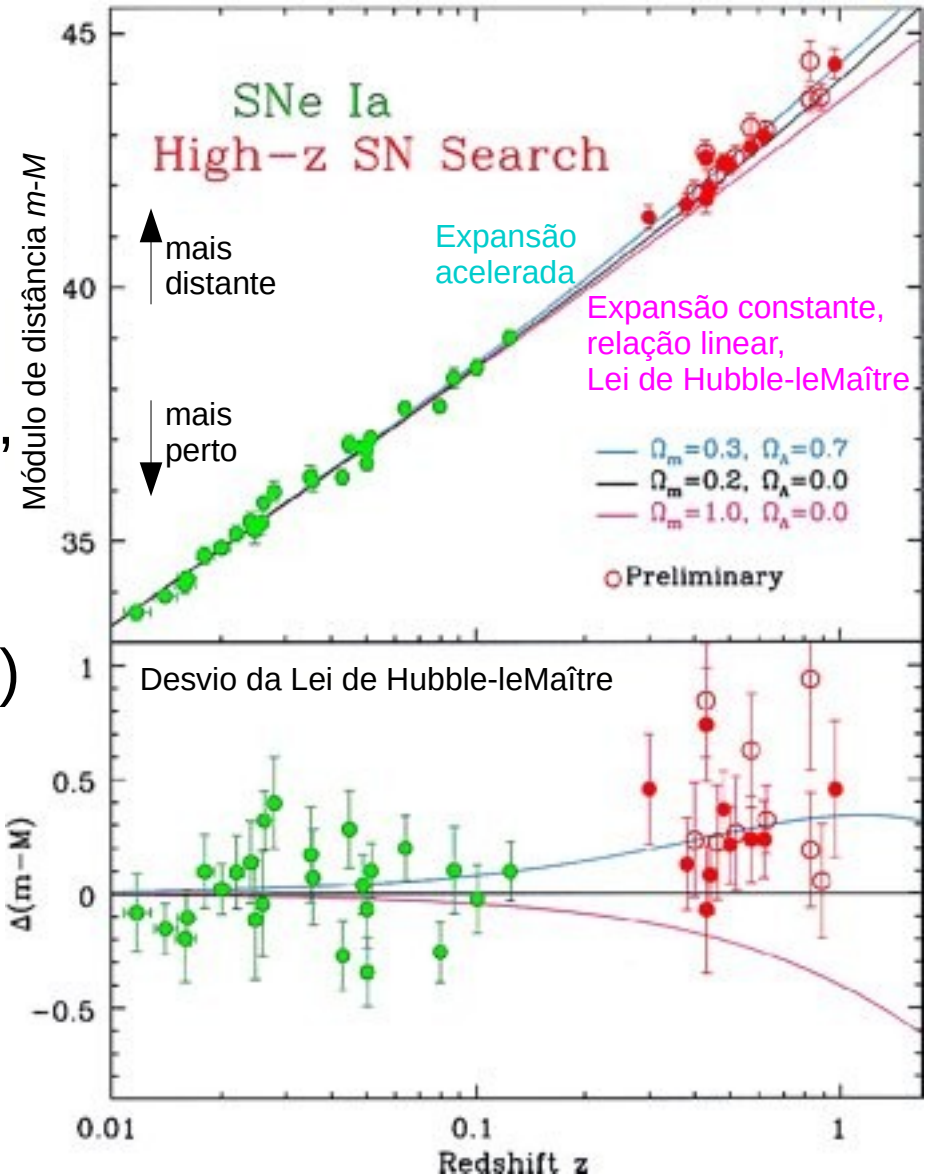
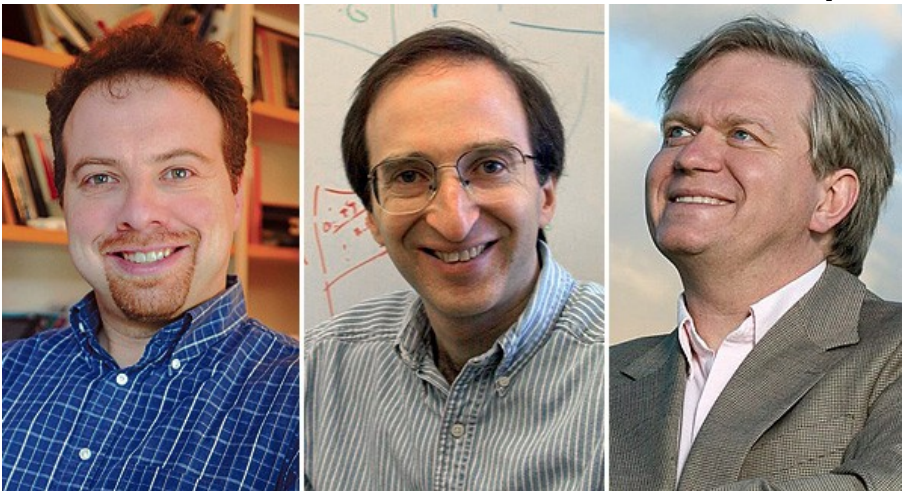


# Outras Evidências para a Energia Escura

## Luminosidades de Supernovas Ia

O valor da **densidade** da **Energia Escura** determinado através das distâncias das SN Ia bate bem com o valor determinado pela Radiação Cósmica de Fundo, **69% da densidade crítica**.

=>  Prêmio Nobel para Perlmutter, Schmidt e Riess (2011)



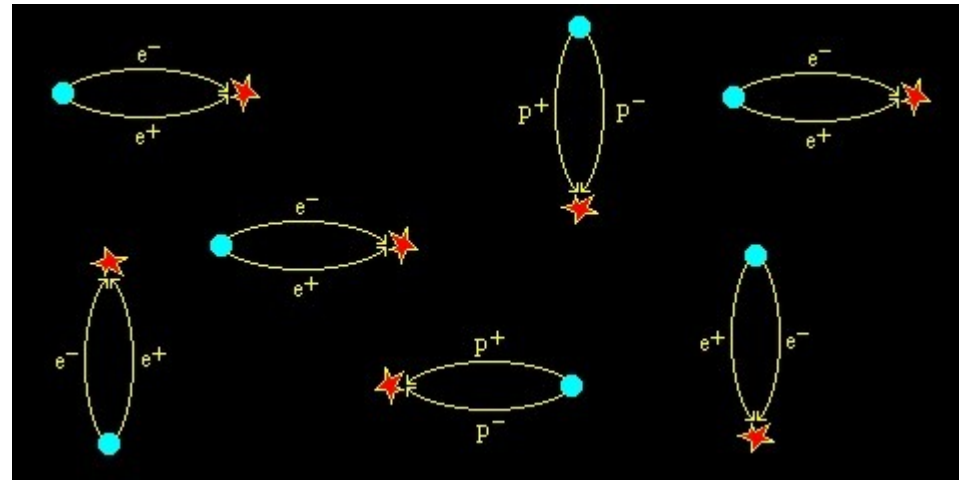
# Do que consiste a Energia Escura?

Ninguém sabe!

Uma hipótese identifica ela com a "**energia do vácuo**", prevista pela teoria.

Um nome melhor seria energia do **estado fundamental do espaço**.

Segundo a teoria, o espaço "vazio" não é nada vazio: Consiste de **partículas** e **anti-partículas** (para aquelas todos os números quânticos são conservados) sendo **criadas** e **aniquilando**-se constantemente.



# Do que consiste a Energia Escura?

## Estimativa da Densidade da Energia do Vácuo

Pelo **princípio de incerteza**, uma **partícula virtual** pode existir por um **tempo**

$$\Delta t \approx \hbar/\Delta E = \hbar/mc^2,$$

onde  $m$  é a **massa** da partícula.

Sua **velocidade** é aproximadamente

$$v \approx \Delta p/m \approx \hbar/m\Delta x \approx \hbar/mL,$$

onde  $L = v\Delta t$  é a **distância**, que a partícula pode **percorrer** em  $\Delta t$ .

$$\Rightarrow L = v\Delta t \approx \hbar/mL \cdot \hbar/mc^2 \Rightarrow L \approx \hbar/mc$$

A **densidade da energia do vácuo** deve ser capaz de **produzir um par de partículas** na caixa, isto é

$$u_{\text{vac}} \approx 2mc^2/L^3 \approx 2m^4c^5/\hbar^3$$

# Do que consiste a Energia Escura?

## Estimativa da Densidade da Energia do Vácuo

$$u_{\text{vac}} \approx 2m^4c^5/\hbar^3$$

Tomando como **massa máxima** pras partículas criados a **massa de Planck**,  $m_{\text{P}} \equiv \sqrt{\hbar c/G}$  (uma partícula com massa maior teria um raio de Schwarzschild maior que sua incerteza na posição, tornando-o um Buraco Negro), Obtemos

$$u_{\text{vac}} \approx 2m_{\text{P}}^4c^5/\hbar^3 \approx 2c^7/\hbar G^2 \approx 10^{114} \text{ J/m}^3$$

Cálculos mais sofisticados levam a  $u_{\text{vac}} \approx 10^{111} \text{ J/m}^3$

# Do que consiste a Energia Escura?

Será que a Energia Escura é a Energia do Vácuo?

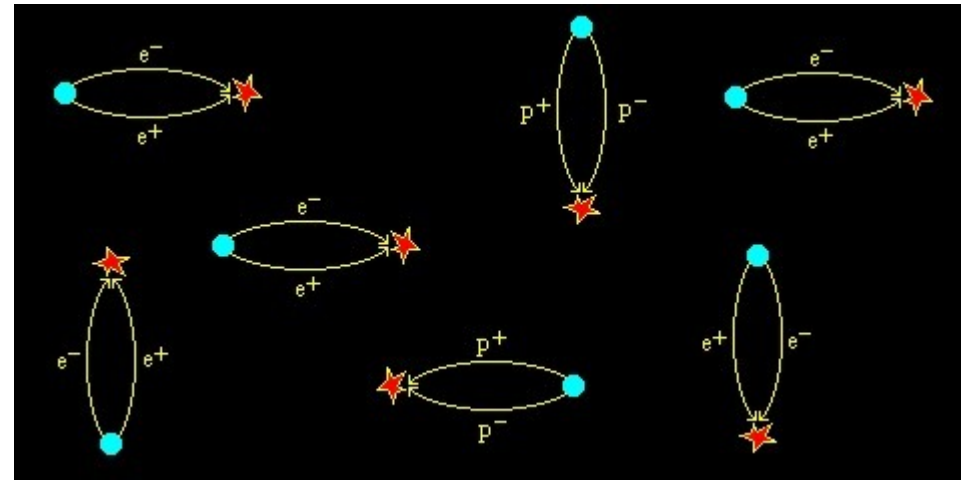
$$U_{\text{vac}} \approx 10^{111} \text{ J/m}^3$$

=> A **densidade** de **energia** calculada para a **energia do vácuo** é um fator  $10^{120}$  **maior**, que a densidade da **Energia Escura**,

$$\sim 5.4 \cdot 10^{-10} \text{ J/m}^3,$$

talvez o maior erro já alcançado por uma teoria!

Há **tentativas** de **remediar** isto, supondo que diferentes tipos de partículas (bósons e férmions) contribuem com sinal oposto, assim quase se cancelando (menos uma parte em  $10^{120}$ ).



# Do que consiste a Energia Escura?

Ninguém sabe!

Outras **tentativas** de explicar a **expansão acelerada** incluem componentes **mais exóticos** ainda, do que Energia Escura, como

- **Quintessência**,
- **K-essência** (K de cinético): energia cinética negativa,
- Aceleração causada por energia potencial de um campo dinâmico que pode variar no tempo e no espaço,
- ou com **equação de estado variável**,
- **Energia "phantom"** (fantasma)
- e outras (alguns destas veremos na última aula, sobre alternativas ao modelo  $\Lambda$ CDM).

Porém as **evidências** para estes componentes são mais **fracas** ainda, do que as pra Energia Escura.



Universidade Federal do ABC

# Introdução à Cosmologia

## FIM PRA HOJE

