
INTRODUÇÃO À RELATIVIDADE GERAL - Aula 4

Victor O. Rivelles

Instituto de Física

Universidade de São Paulo

rivelles@fma.if.usp.br

<http://www.fma.if.usp.br/~rivelles/>

XXI Jornada de Física Teórica – 2006

Cosmologia: A História do Universo

Cosmologia é o estudo da origem, estrutura e evolução do Universo

Princípio cosmológico: o universo é homogêneo e isotrópico

Cosmologia: A História do Universo

Cosmologia é o estudo da origem, estrutura e evolução do Universo

Princípio cosmológico: o universo é homogêneo e isotrópico

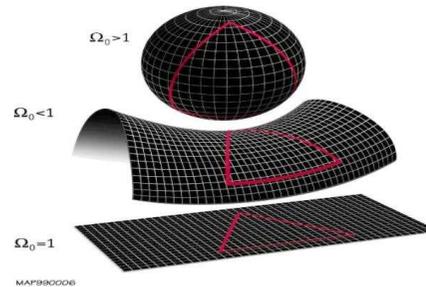
1922 Friedmann encontra soluções cosmológicas da relatividade geral:

$$ds^2 = -dt^2 + R^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right)$$

$k = 1$ universo **fechado**

$k = -1$ universo **aberto**

$k = 0$ universo **plano**



Cosmologia: A História do Universo

Cosmologia é o estudo da origem, estrutura e evolução do Universo

Princípio cosmológico: o universo é homogêneo e isotrópico

1922 Friedmann encontra soluções cosmológicas da relatividade geral:

$$ds^2 = -dt^2 + R^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right)$$

$k = 1$ universo fechado

$k = -1$ universo aberto

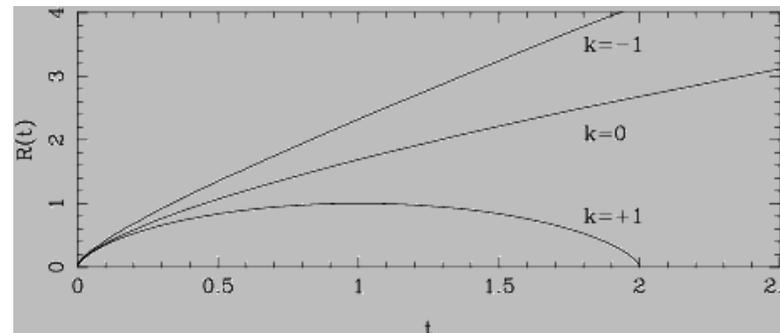
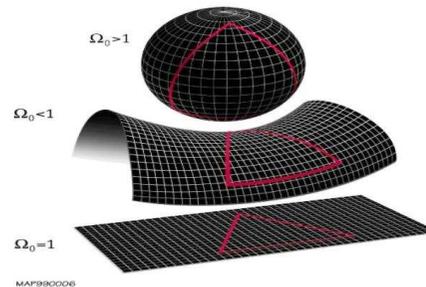
$k = 0$ universo plano

$R(t)$ é o fator de escala do universo

Volume do universo R^3

$$\left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = -\frac{k}{R^2} + \frac{8\pi}{3} \rho$$

O universo está em expansão (ou contração)



Universo em expansão

Na época acreditava-se que o Universo era **estático**!

Universo em expansão

Na época acreditava-se que o Universo era **estático**!

Einstein modifica suas equações para obter um universo estático.

Introduz a **constante cosmológica**!

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

Universo em expansão

Na época acreditava-se que o Universo era **estático**!

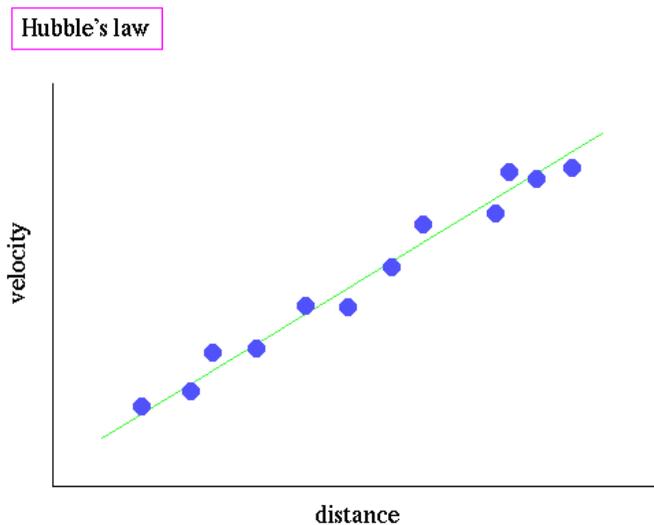
Einstein modifica suas equações para obter um universo estático.

Introduz a **constante cosmológica**!

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

Em 1923 Hubble descobriu que as galáxias estão se afastando de nós e portanto o **Universo está em expansão**!

Einstein afirma que cometeu o maior erro de sua vida!



Universo em expansão

Na época acreditava-se que o Universo era **estático**!

Einstein modifica suas equações para obter um universo estático.

Introduz a **constante cosmológica**!

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

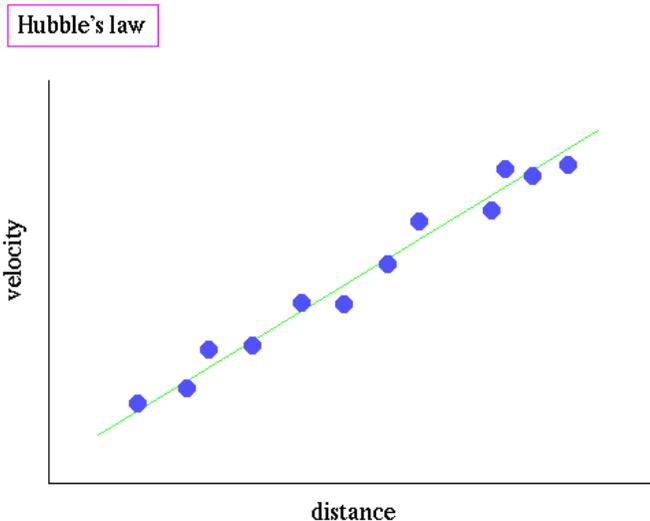
Em 1923 Hubble descobriu que as galáxias estão se afastando de nós e portanto o **Universo está em expansão**!

Einstein afirma que cometeu o maior erro de sua vida!

Lei de Hubble: A velocidade de recessão é proporcional à distância da galáxia

$$\vec{v} = H_0 \vec{r}$$

$$H_0 = \frac{\dot{R}}{R} \text{ hoje}$$



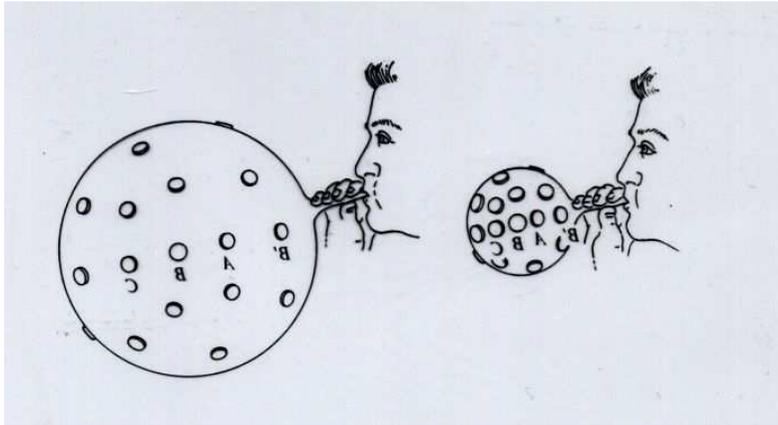
Universo em expansão

Universo em expansão

- Descreve o comportamento médio das galáxias.
- Não está em contradição com o Princípio Cosmológico.

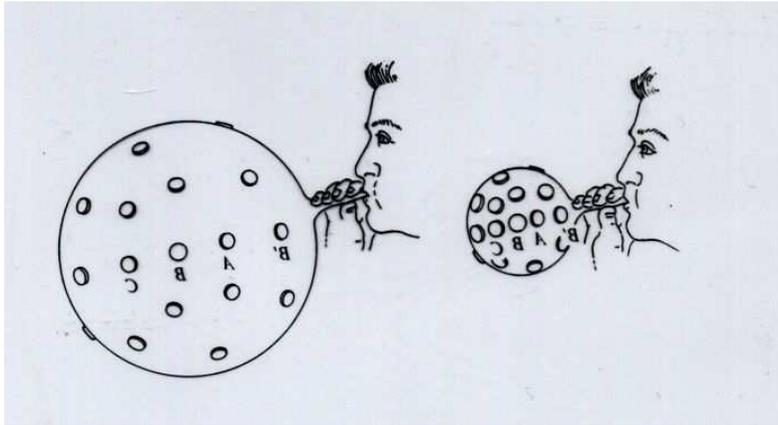
Universo em expansão

- Descreve o comportamento médio das galáxias.
- Não está em contradição com o Princípio Cosmológico.



Universo em expansão

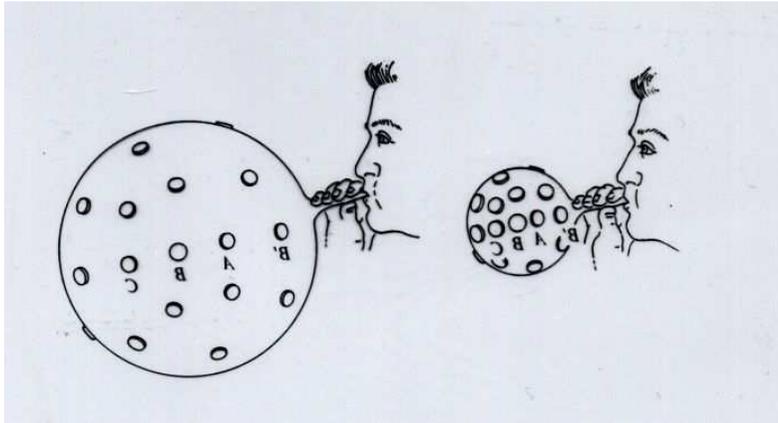
- Descreve o comportamento médio das galáxias.
- Não está em contradição com o Princípio Cosmológico.



- Como as galáxias estão se afastando uma das outras elas deveriam estar **mais próximas no passado**.

Universo em expansão

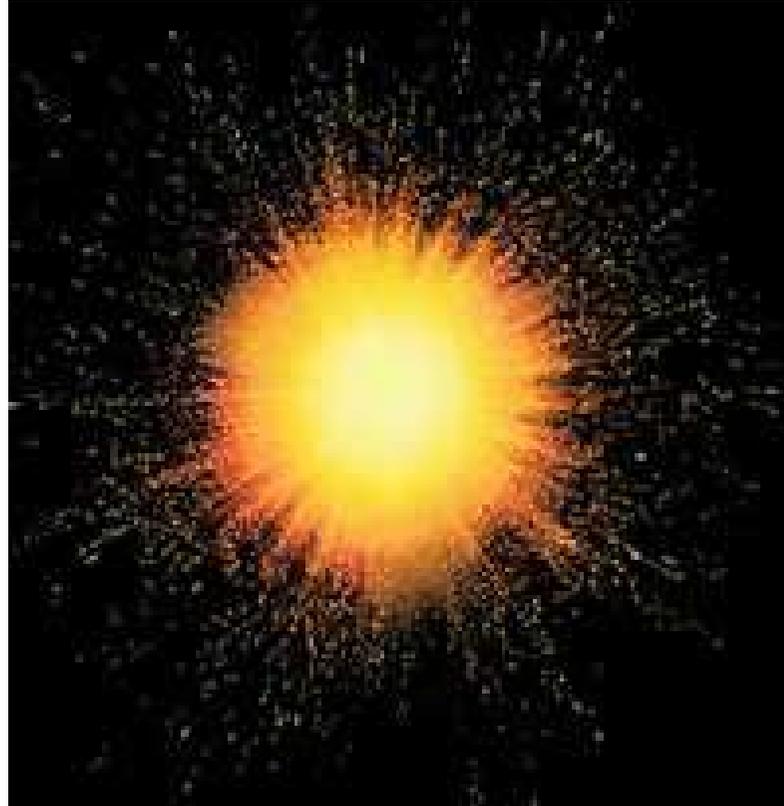
- Descreve o comportamento médio das galáxias.
- Não está em contradição com o Princípio Cosmológico.



- Como as galáxias estão se afastando uma das outras elas deveriam estar **mais próximas no passado**.
- Portanto, no passado, aconteceu o ...

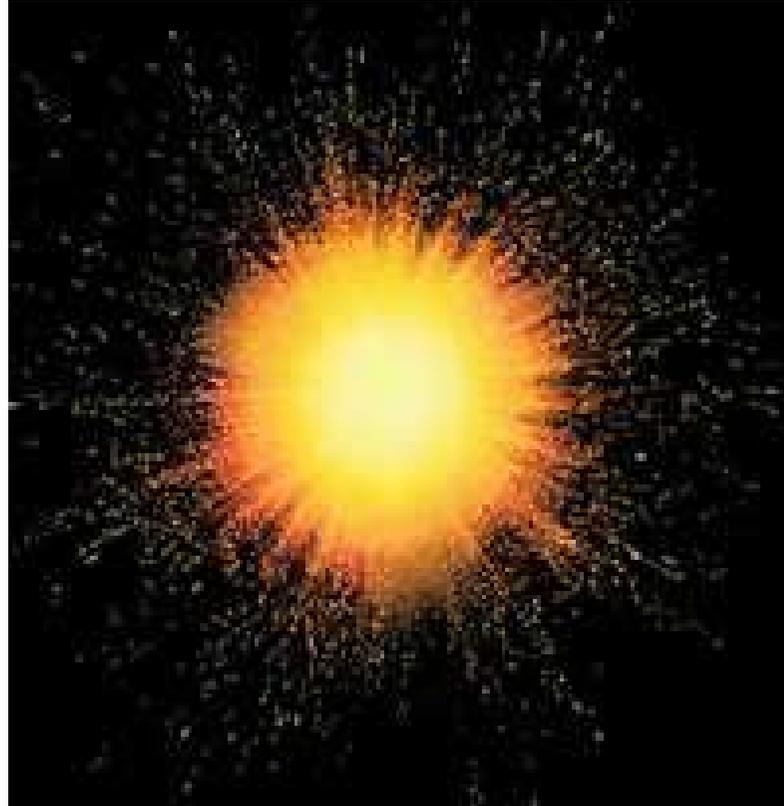
Big Bang

- A explosão inicial, há cerca de 13.7 bilhões de anos atrás.



Big Bang

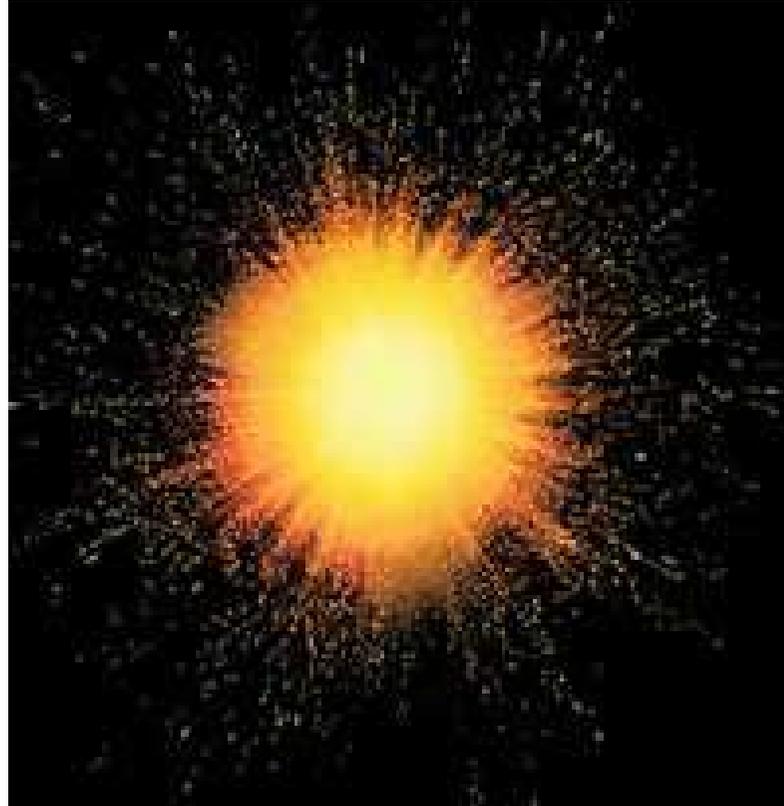
- A explosão inicial, há cerca de 13.7 bilhões de anos atrás.



- Cosmologia do Big Bang.

Big Bang

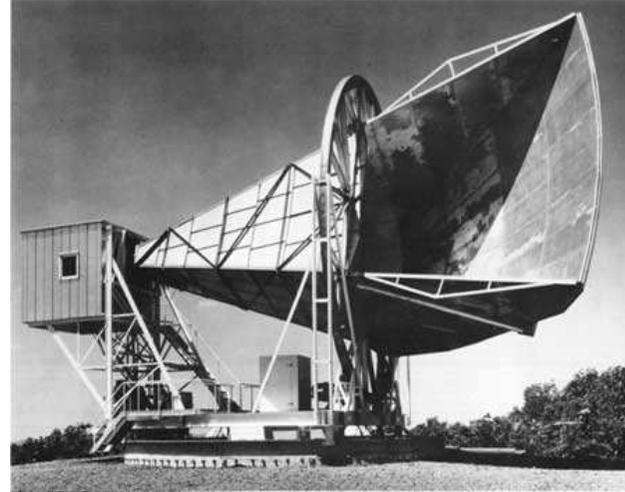
- A explosão inicial, há cerca de 13.7 bilhões de anos atrás.



- Cosmologia do Big Bang.
- Em 1949 Gamow prevê a existência da **radiação cósmica de fundo** deixada pelo Big Bang.

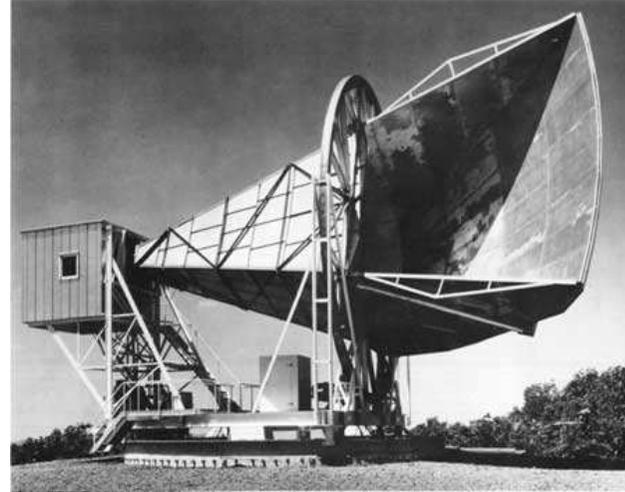
A Radiação C3smica de Fundo

- Em 1965 a radia33o c3smica de fundo 3 descoberta por Penzias e Wilson.



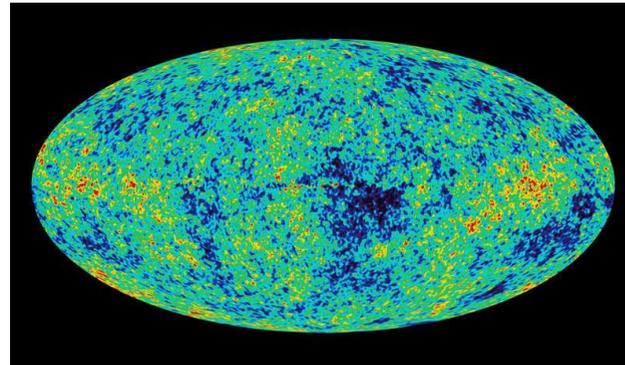
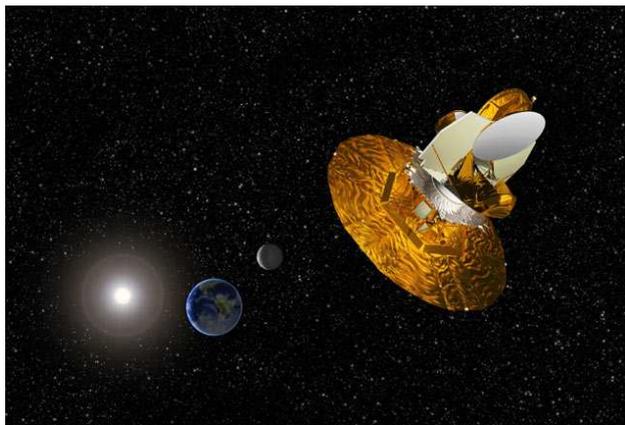
A Radiação C3smica de Fundo

- Em 1965 a radia33o c3smica de fundo 3 descoberta por Penzias e Wilson.



Hoje em dia utilizam-se sat33lites: **WMAP**

Detecta a radia33o de fundo 3 2.7K e diferen33as de temperatura de **micro-Kelvin**.



Problemas na Cosmologia

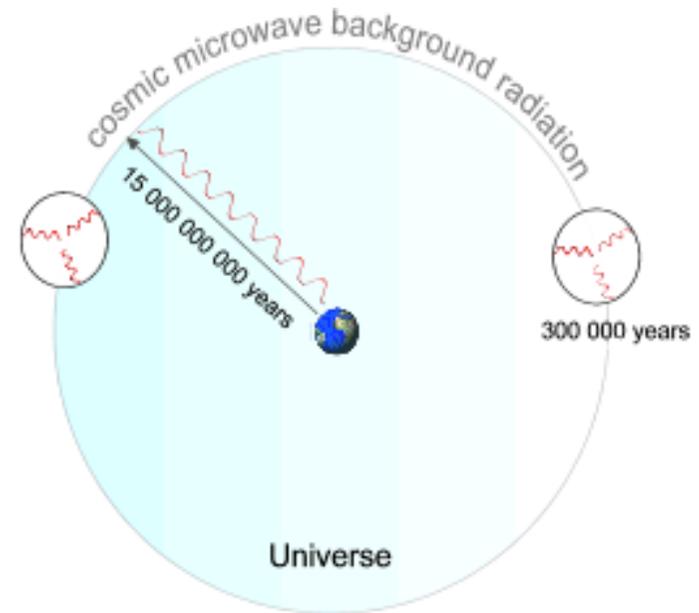
- Em 1966 Peebles mostra que o Big Bang prevê a abundância de Hélio correta.

Problemas na Cosmologia

- Em 1966 Peebles mostra que o Big Bang prevê a abundância de Hélio correta.
- Apesar dos muitos sucessos do Big Bang, **problemas** começam a aparecer.

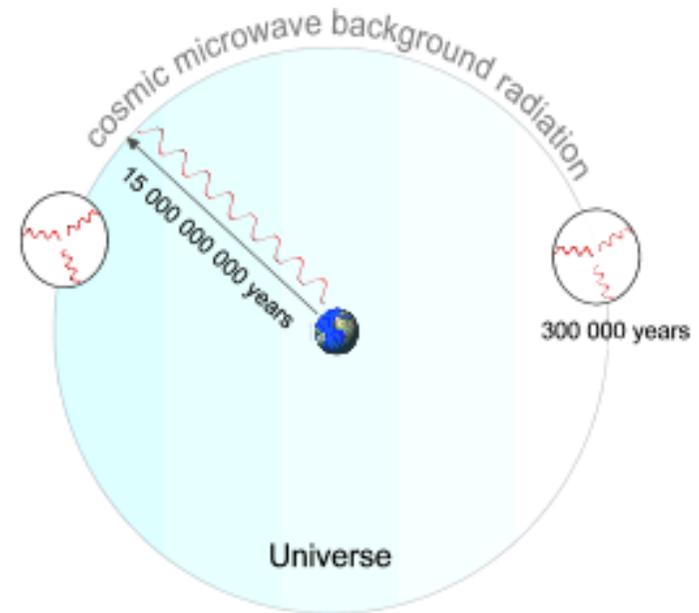
Problemas na Cosmologia

- Em 1966 Peebles mostra que o Big Bang prevê a abundância de Hélio correta.
- Apesar dos muitos sucessos do Big Bang, **problemas** começam a aparecer.
- Problema do horizonte.



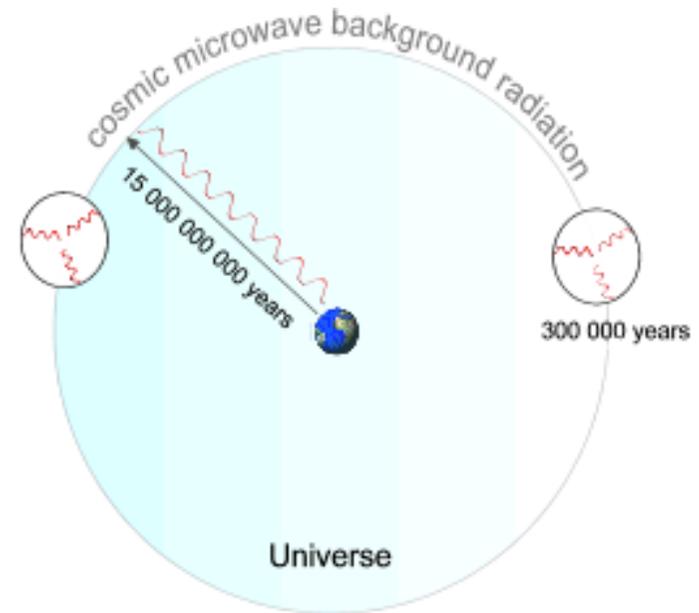
Problemas na Cosmologia

- Em 1966 Peebles mostra que o Big Bang prevê a abundância de Hélio correta.
- Apesar dos muitos sucessos do Big Bang, **problemas** começam a aparecer.
- Problema do horizonte.
- A luz da RCF percorreu 13.7 bilhões de anos desde o início do universo



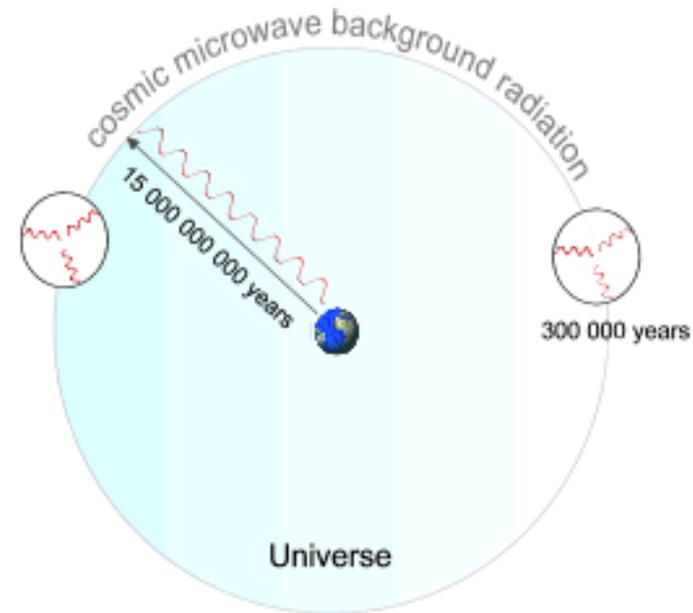
Problemas na Cosmologia

- Em 1966 Peebles mostra que o Big Bang prevê a abundância de Hélio correta.
- Apesar dos muitos sucessos do Big Bang, **problemas** começam a aparecer.
- Problema do horizonte.
- A luz da RCF percorreu 13.7 bilhões de anos desde o início do universo
- Foi emitida quando o Universo era muito mais jovem, cerca de 300 mil anos.



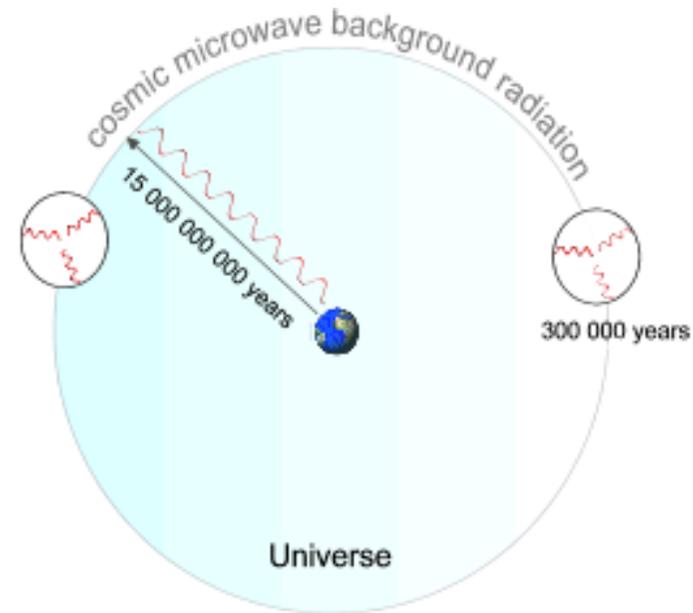
Problemas na Cosmologia

- Em 1966 Peebles mostra que o Big Bang prevê a abundância de Hélio correta.
- Apesar dos muitos sucessos do Big Bang, **problemas** começam a aparecer.
- Problema do horizonte.
- A luz da RCF percorreu 13.7 bilhões de anos desde o início do universo
- Foi emitida quando o Universo era muito mais jovem, cerca de 300 mil anos.
- Naquela época a luz atingiria os pequenos círculos.
- Os dois pontos no círculo não tiveram tempo de entrar em contacto entre si.



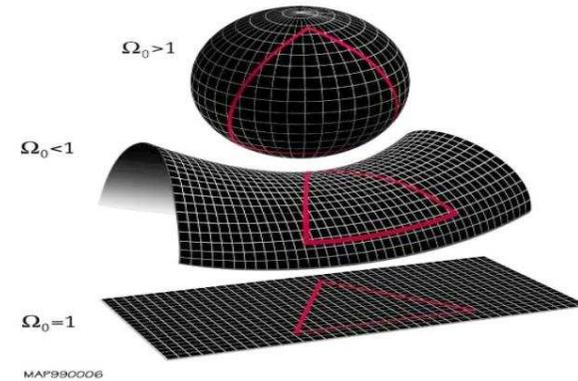
Problemas na Cosmologia

- Em 1966 Peebles mostra que o Big Bang prevê a abundância de Hélio correta.
- Apesar dos muitos sucessos do Big Bang, **problemas** começam a aparecer.
- Problema do horizonte.
- A luz da RCF percorreu 13.7 bilhões de anos desde o início do universo
- Foi emitida quando o Universo era muito mais jovem, cerca de 300 mil anos.
- Naquela época a luz atingiria os pequenos círculos.
- Os dois pontos no círculo não tiveram tempo de entrar em contacto entre si.
- Como podem estar a **mesma temperatura?**



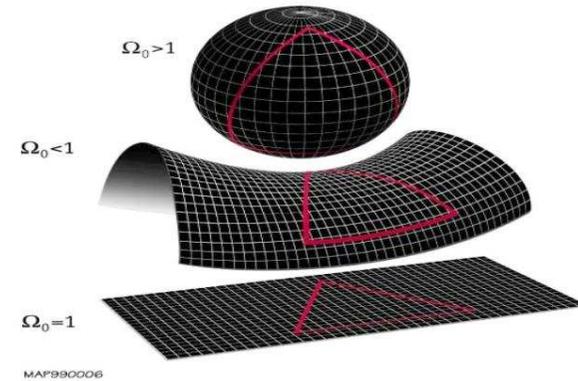
Universo Plano

- Topologia do Universo.
- Depende da **densidade do Universo**. Na densidade crítica: Universo plano; acima: Universo fechado; abaixo: Universo aberto.



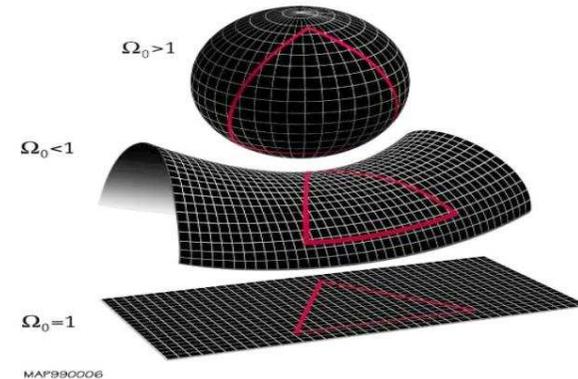
Universo Plano

- Topologia do Universo.
- Depende da **densidade do Universo**. Na densidade crítica: Universo plano; acima: Universo fechado; abaixo: Universo aberto.
- Hoje o Universo é quase plano.



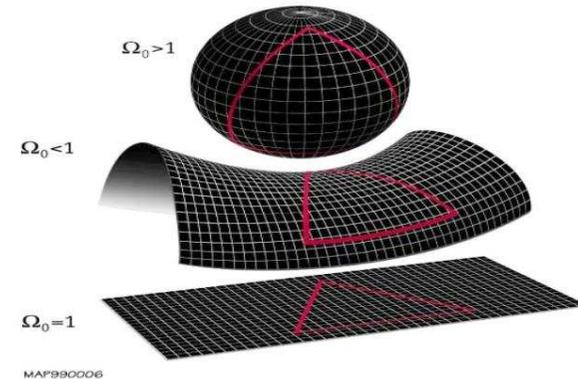
Universo Plano

- Topologia do Universo.
- Depende da **densidade do Universo**. Na densidade crítica: Universo plano; acima: Universo fechado; abaixo: Universo aberto.
- Hoje o Universo é quase plano.
- Se no Big Bang a densidade fosse um pouco diferente da densidade crítica **não seria plano hoje**.
- Como isso é possível?



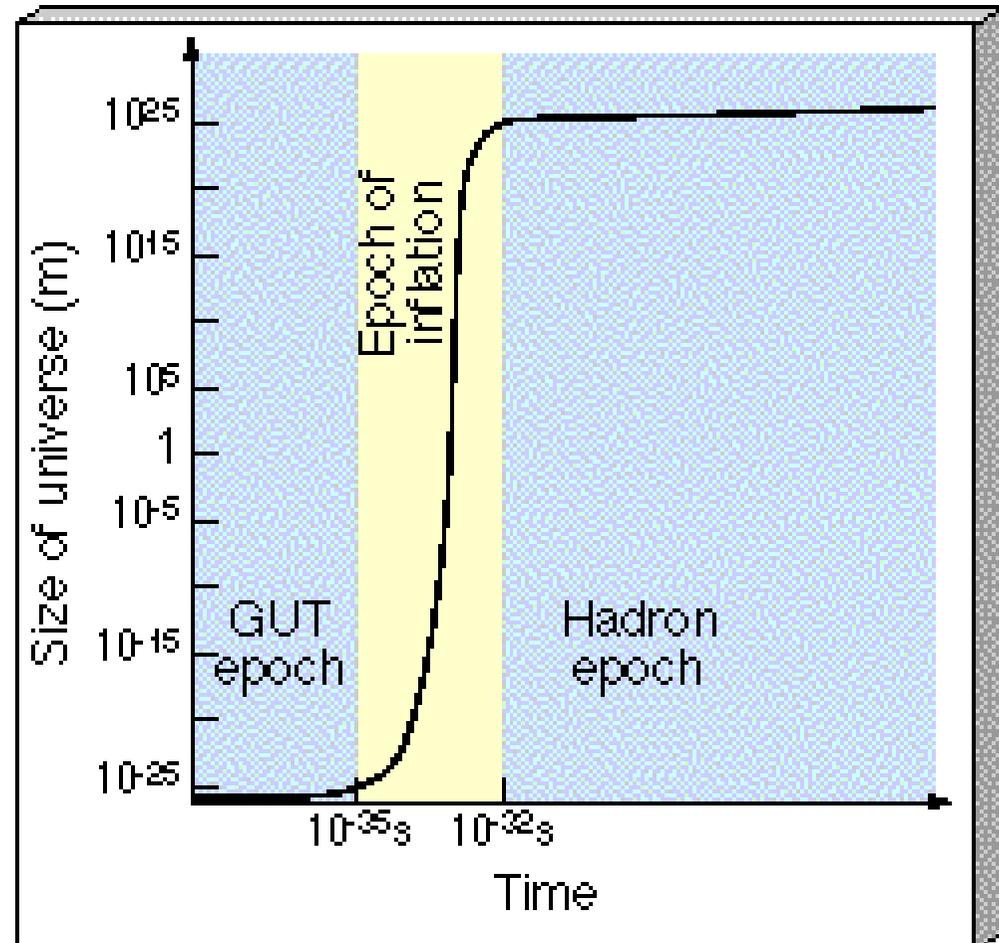
Universo Plano

- Topologia do Universo.
- Depende da **densidade do Universo**. Na densidade crítica: Universo plano; acima: Universo fechado; abaixo: Universo aberto.
- Hoje o Universo é quase plano.
- Se no Big Bang a densidade fosse um pouco diferente da densidade crítica **não seria plano hoje**.
- Como isso é possível?
- Solução dos problemas ...



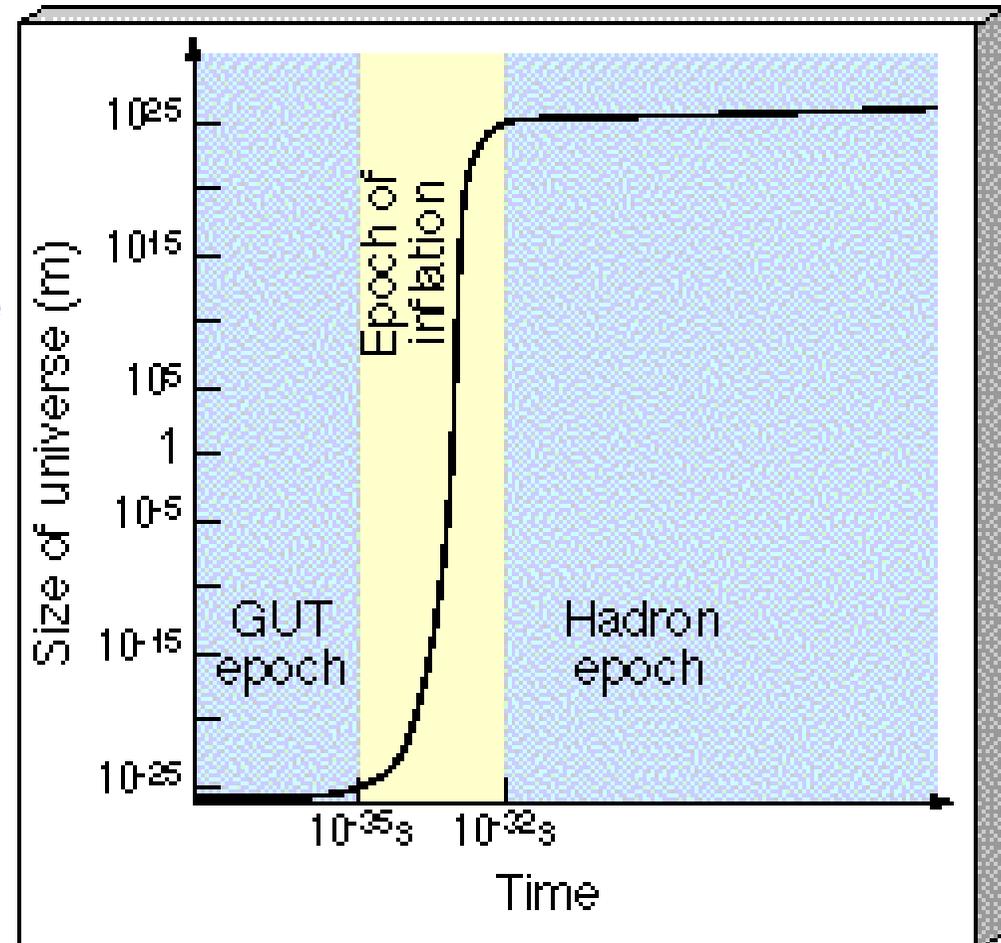
Teoria Inflacionária, 1981

- O Universo passou por uma fase de expansão exponencial.



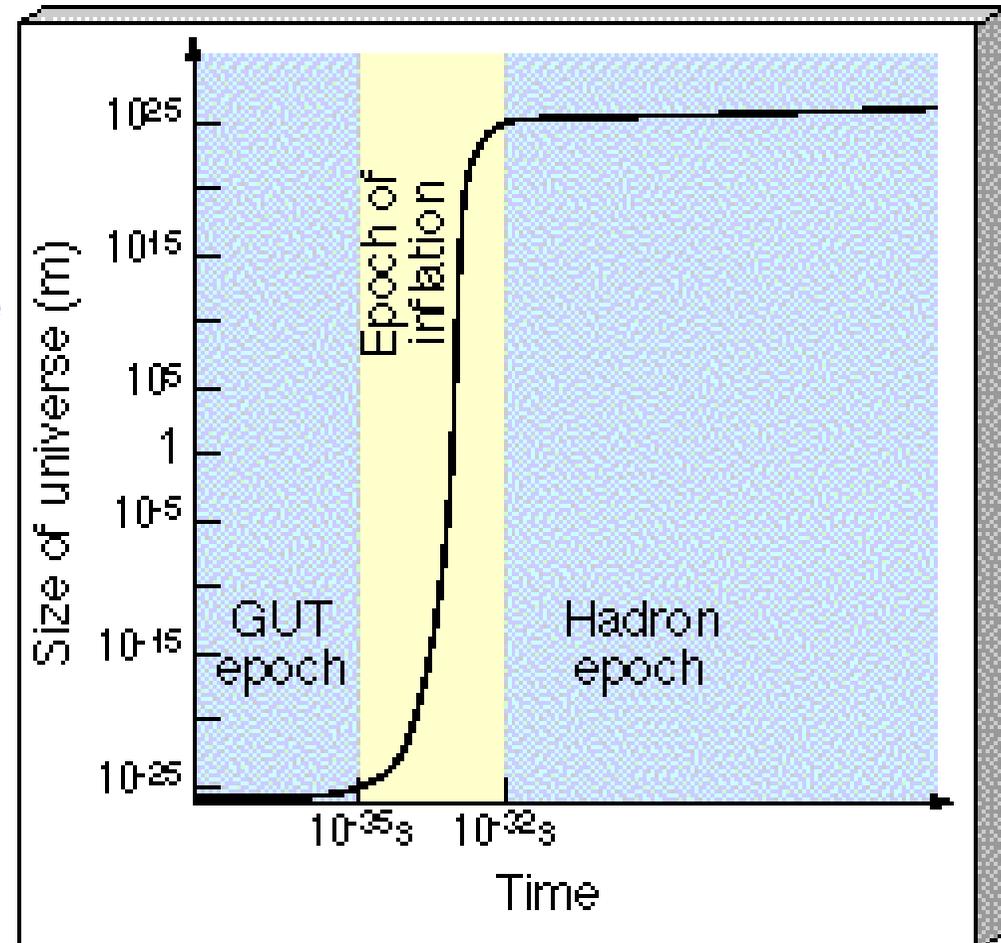
Teoria Inflacionária, 1981

- O Universo passou por uma fase de expansão exponencial.
- Dobrava de tamanho a cada 10^{-34} s.!!!



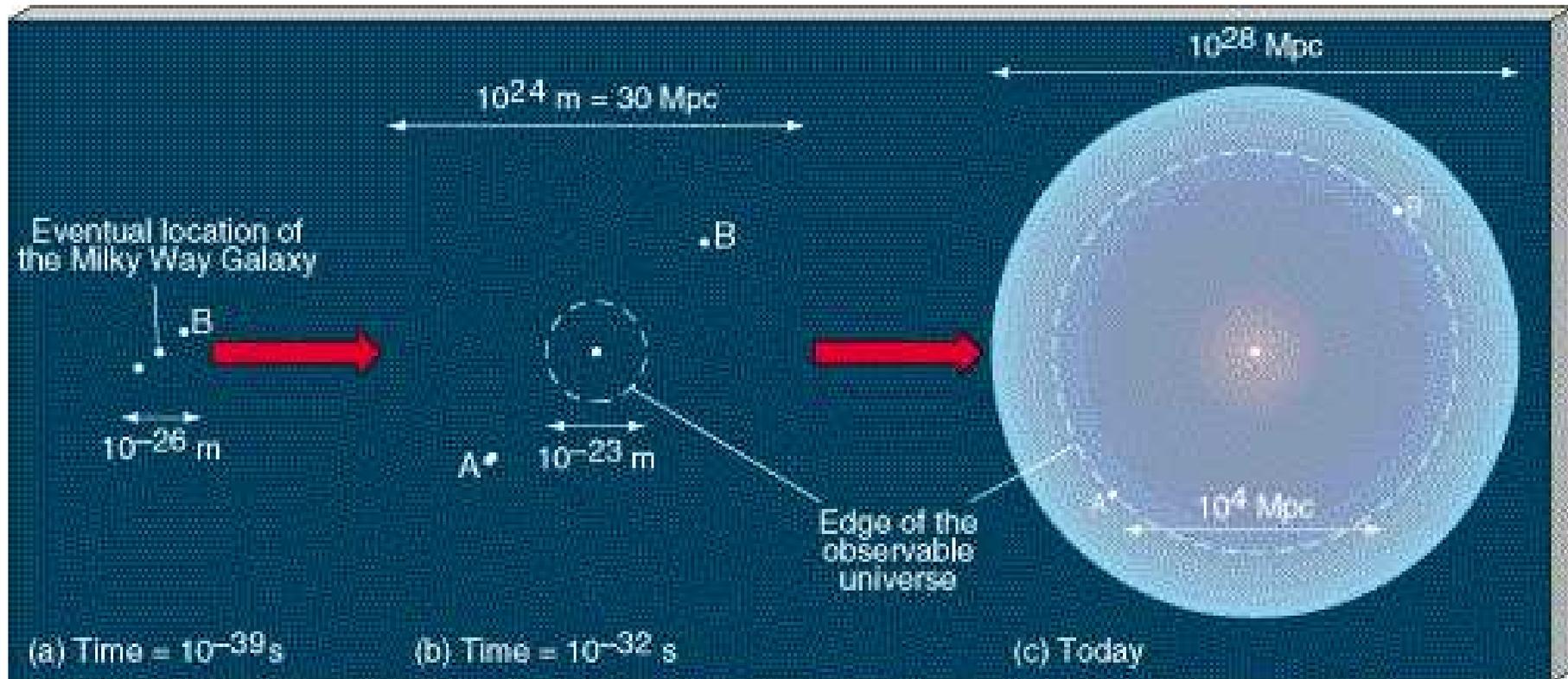
Teoria Inflacionária, 1981

- O Universo passou por uma fase de expansão exponencial.
- Dobrava de tamanho a cada 10^{-34} s.!!!
- A inflação foi gerada pelo inflaton.



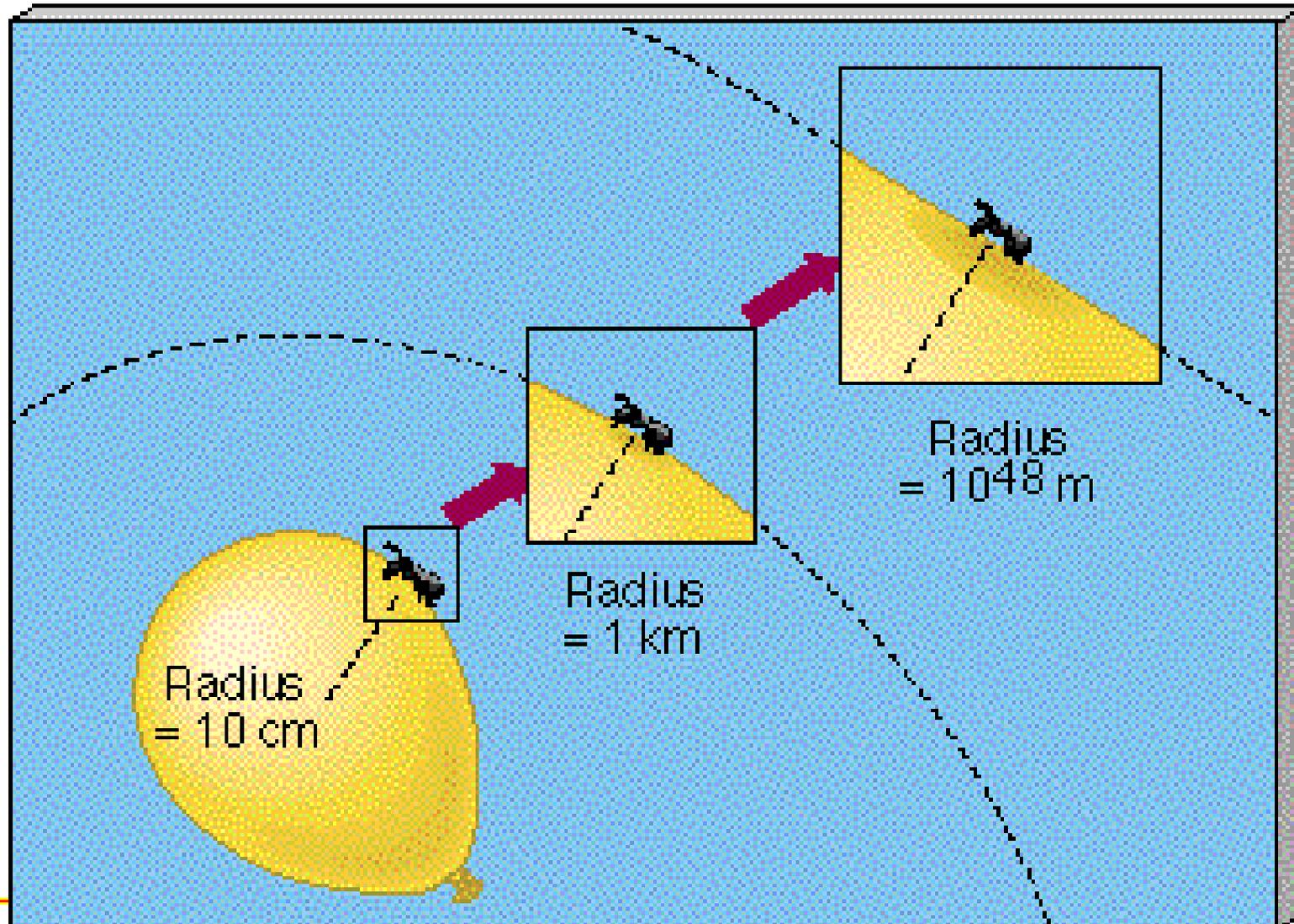
Teoria Inflacionária

- Resolve o problema do horizonte.



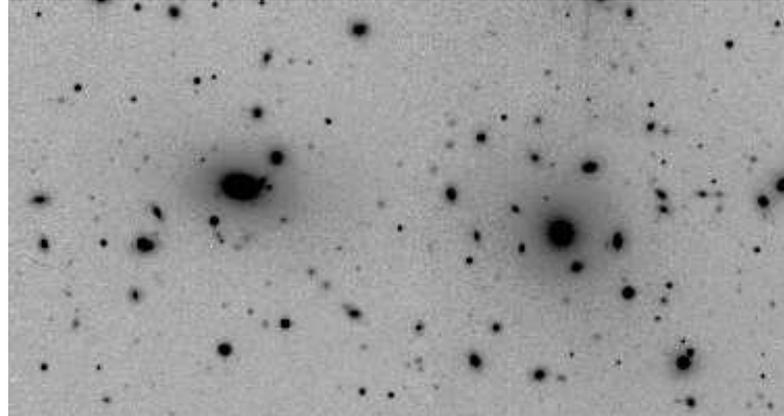
Teoria Inflacionária

- Resolve o problema do Universo plano.



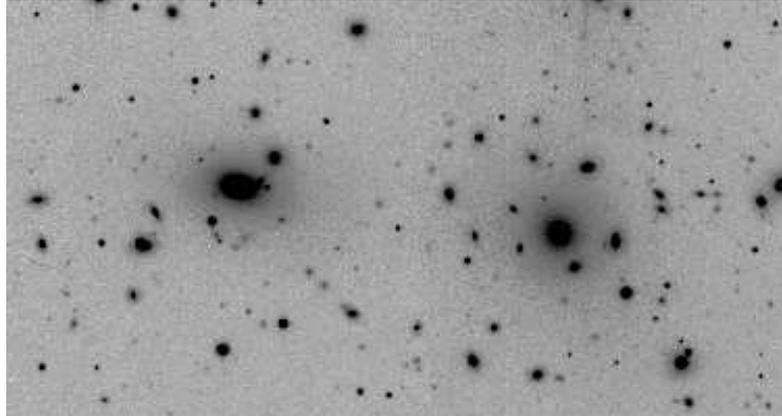
Outro problema: curvas de rotação

- Em 1933 o aglomerado de galáxias de Coma é estudado.
- O movimento das galáxias **não pode ser explicado** pela atração gravitacional.



Outro problema: curvas de rotação

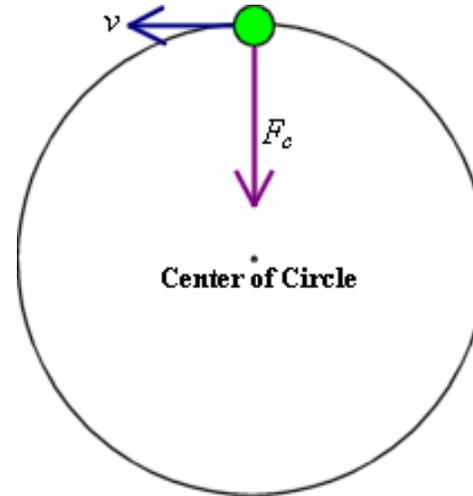
- Em 1933 o aglomerado de galáxias de Coma é estudado.
- O movimento das galáxias **não pode ser explicado** pela atração gravitacional.
- O mesmo acontece com **estrelas na borda das galáxias**.



Curvas de rotação

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r}$$
$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

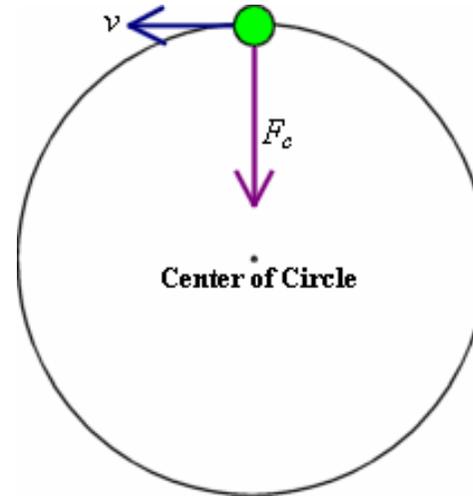
Como a massa da galáxia $M \sim 1/r^p$
então a **velocidade diminui** com r .



Curvas de rotação

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r}$$
$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

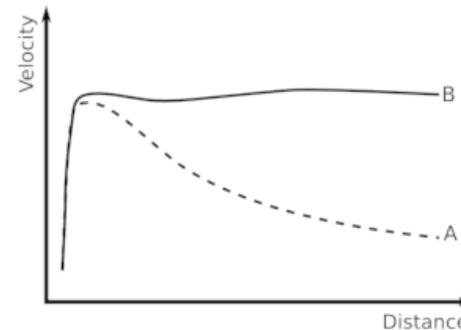
Como a massa da galáxia $M \sim 1/r^p$
então a **velocidade diminui** com r .



Velocidade orbital como função da distância ao centro da galáxia.

A - prevista

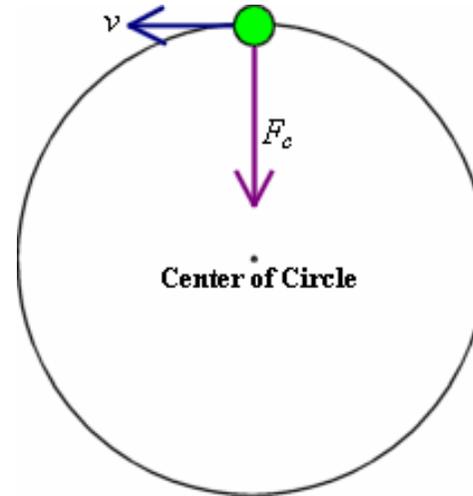
B - observada



Curvas de rotação

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r}$$
$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

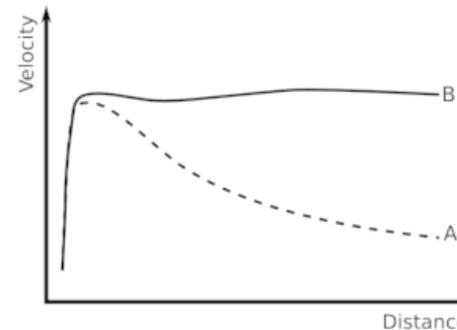
Como a massa da galáxia $M \sim 1/r^p$
então a **velocidade diminui** com r .



Velocidade orbital como função da distância ao centro da galáxia.

A - prevista

B - observada

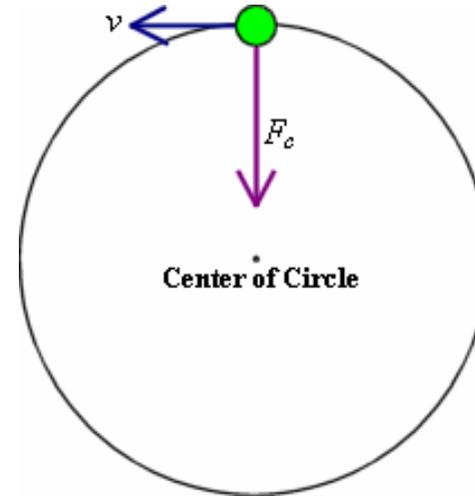


Parece que há **mais massa** no aglomerado do aquela vista pelos telescópicos.

Curvas de rotação

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r}$$
$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

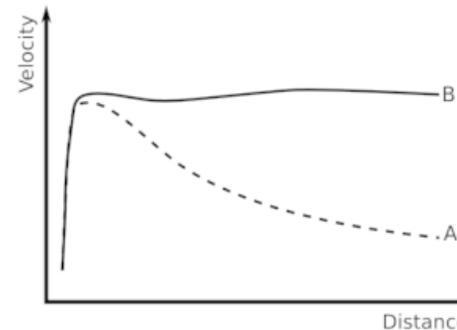
Como a massa da galáxia $M \sim 1/r^p$
então a **velocidade diminui** com r .



Velocidade orbital como função da distância ao centro da galáxia.

A - prevista

B - observada



Parece que há **mais massa** no aglomerado do aquela vista pelos telescópicos.

É então postulado a existência da ...

Matéria Escura

- É um novo tipo de matéria que praticamente não emite nem reflete luz.



Matéria Escura

- É um novo tipo de matéria que praticamente não emite nem reflete luz.
- Sua natureza é desconhecida.



Matéria Escura

- É um novo tipo de matéria que praticamente não emite nem reflete luz.
- Sua natureza é desconhecida.
- Propostas que provém do modelo de partículas elementares: axions, WIMPs, neutralino, outras partículas supersimétricas.



Matéria Escura

- É um **novo tipo de matéria** que praticamente não emite nem reflete luz.
- Sua **natureza é desconhecida**.
- Propostas que provém do modelo de partículas elementares: axions, WIMPs, neutralino, outras partículas supersimétricas.
- Há vários experimentos tentando detectar tais partículas.



Matéria Escura

- É um **novo tipo de matéria** que praticamente não emite nem reflete luz.
- Sua **natureza é desconhecida**.
- Propostas que provém do modelo de partículas elementares: axions, WIMPs, neutralino, outras partículas supersimétricas.
- Há vários experimentos tentando detectar tais partículas.
- Matéria escura constitui [23% do conteúdo do Universo](#).



Matéria Escura

- É um **novo tipo de matéria** que praticamente não emite nem reflete luz.
- Sua **natureza é desconhecida**.
- Propostas que provém do modelo de partículas elementares: axions, WIMPs, neutralino, outras partículas supersimétricas.
- Há vários experimentos tentando detectar tais partículas.
- Matéria escura constitui 23% do conteúdo do Universo.
- Matéria comum constitui apenas 4% do Universo.



Matéria Escura

- É um **novο tipo de matéria** que praticamente não emite nem reflete luz.
- Sua **natureza é desconhecida**.
- Propostas que provém do modelo de partículas elementares: axions, WIMPs, neutralino, outras partículas supersimétricas.

- Há vários experimentos tentando detectar tais partículas.
- Matéria escura constitui 23% do conteúdo do Universo.
- Matéria comum constitui apenas 4% do Universo.
- Ainda faltam 73% !!!



Expansão Acelerada

- Em 1998 é descoberta através da observação de supernovas do tipo IA que a [expansão do Universo é acelerada](#).

Expansão Acelerada

- Em 1998 é descoberta através da observação de supernovas do tipo IA que a **expansão do Universo é acelerada**.
- Para explica-la é necessário postular a existência de uma energia que produza pressão negativa: **a energia escura**.

Expansão Acelerada

- Em 1998 é descoberta através da observação de supernovas do tipo IA que a **expansão do Universo é acelerada**.
- Para explica-la é necessário postular a existência de uma energia que produza pressão negativa: **a energia escura**.
- Na relatividade geral o efeito de uma pressão negativa é gerar uma força que se opõem à força gravitacional.

Expansão Acelerada

- Em 1998 é descoberta através da observação de supernovas do tipo IA que a **expansão do Universo é acelerada**.
- Para explica-la é necessário postular a existência de uma energia que produza pressão negativa: **a energia escura**.
- Na relatividade geral o efeito de uma pressão negativa é gerar uma força que se opõem à força gravitacional.
- A energia escura pode estar na forma da **constante cosmológica**.

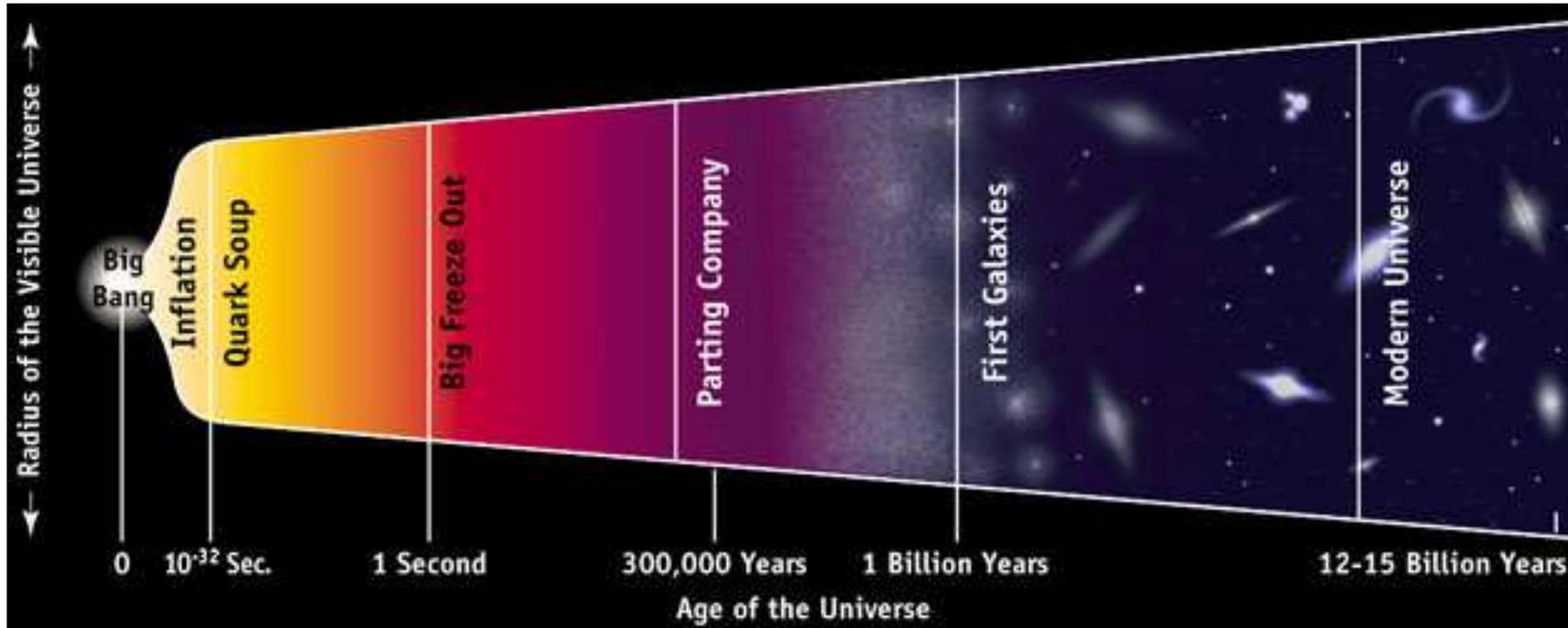
Expansão Acelerada

- Em 1998 é descoberta através da observação de supernovas do tipo IA que a **expansão do Universo é acelerada**.
- Para explicá-la é necessário postular a existência de uma energia que produza pressão negativa: **a energia escura**.
- Na relatividade geral o efeito de uma pressão negativa é gerar uma força que se opõem à força gravitacional.
- A energia escura pode estar na forma da **constante cosmológica**.
- Outras alternativas mais exóticas existem: quintessência, cosmologia de branas, etc.

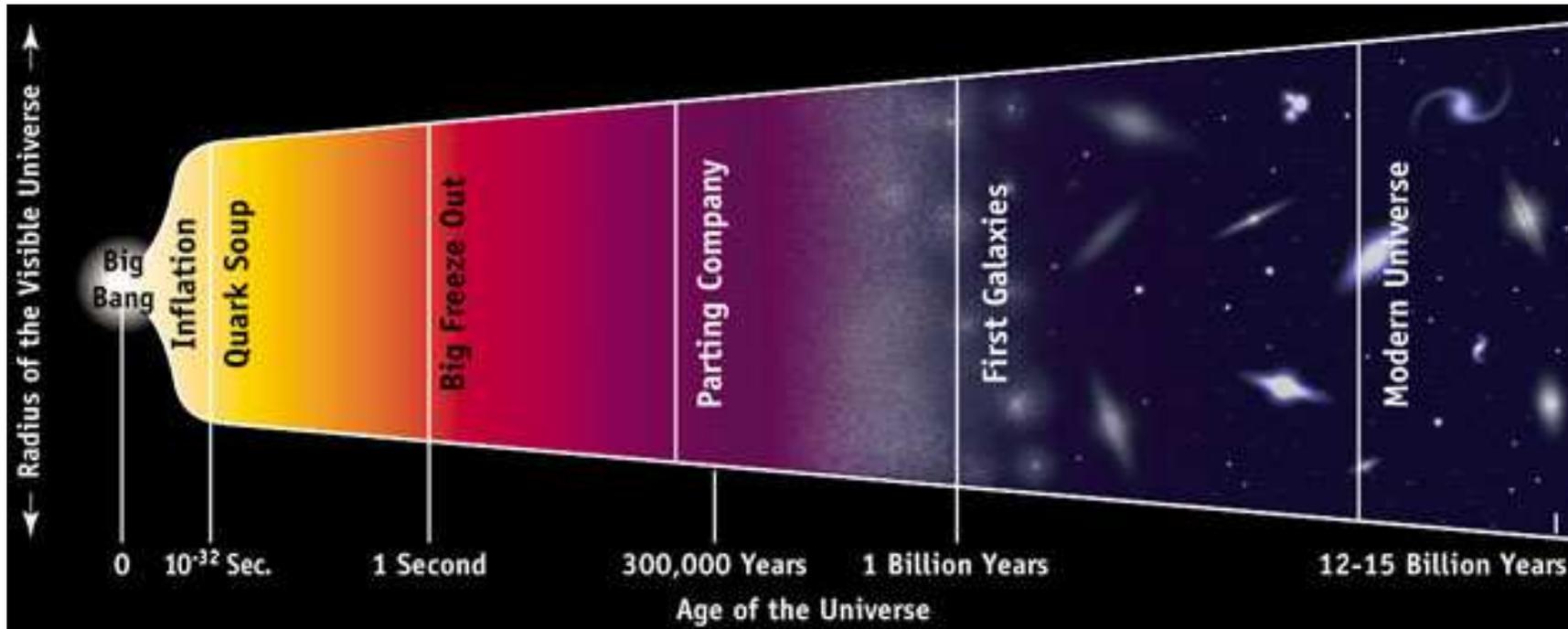
Expansão Acelerada

- Em 1998 é descoberta através da observação de supernovas do tipo IA que a [expansão do Universo é acelerada](#).
- Para explicá-la é necessário postular a existência de uma energia que produza pressão negativa: [a energia escura](#).
- Na relatividade geral o efeito de uma pressão negativa é gerar uma força que se opõem à força gravitacional.
- A energia escura pode estar na forma da [constante cosmológica](#).
- Outras alternativas mais exóticas existem: quintessência, cosmologia de branas, etc.
- A energia escura constitui [73% do conteúdo do Universo](#).

Resumo

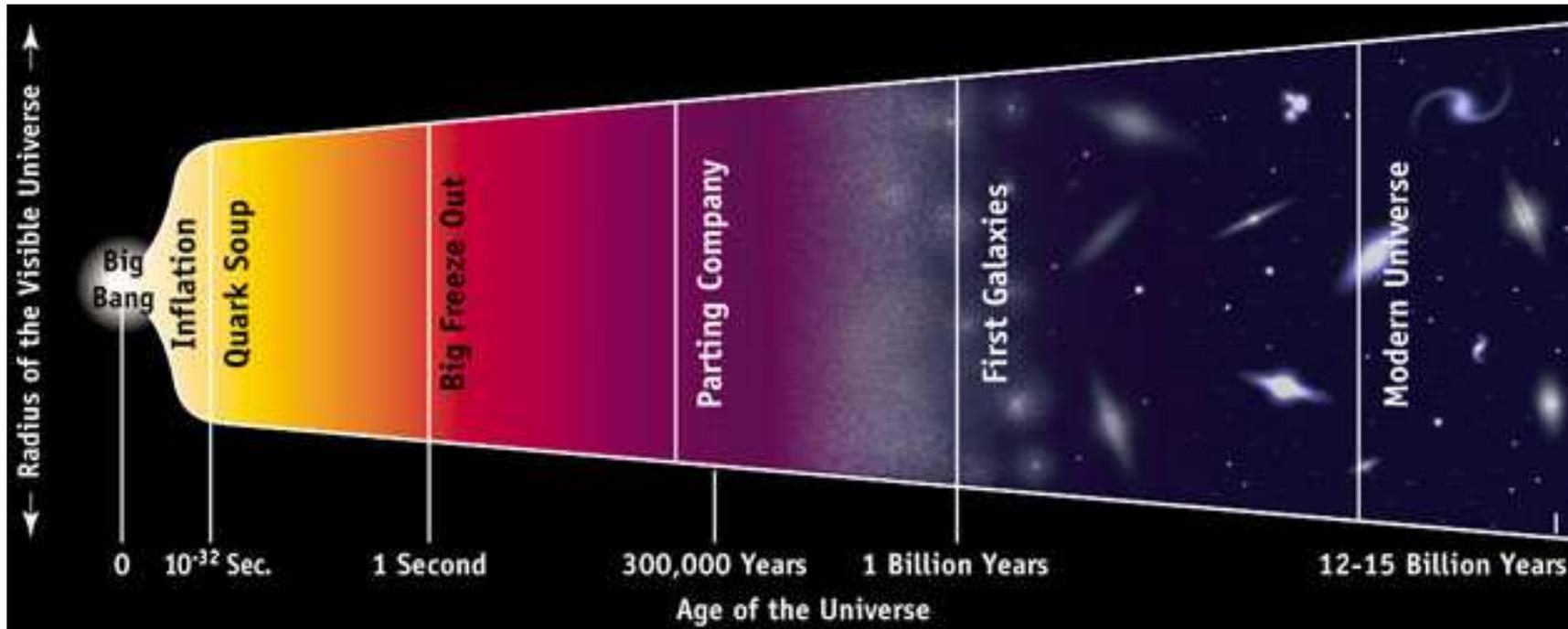


Resumo



[Assista ao Big Bang](#)

Resumo

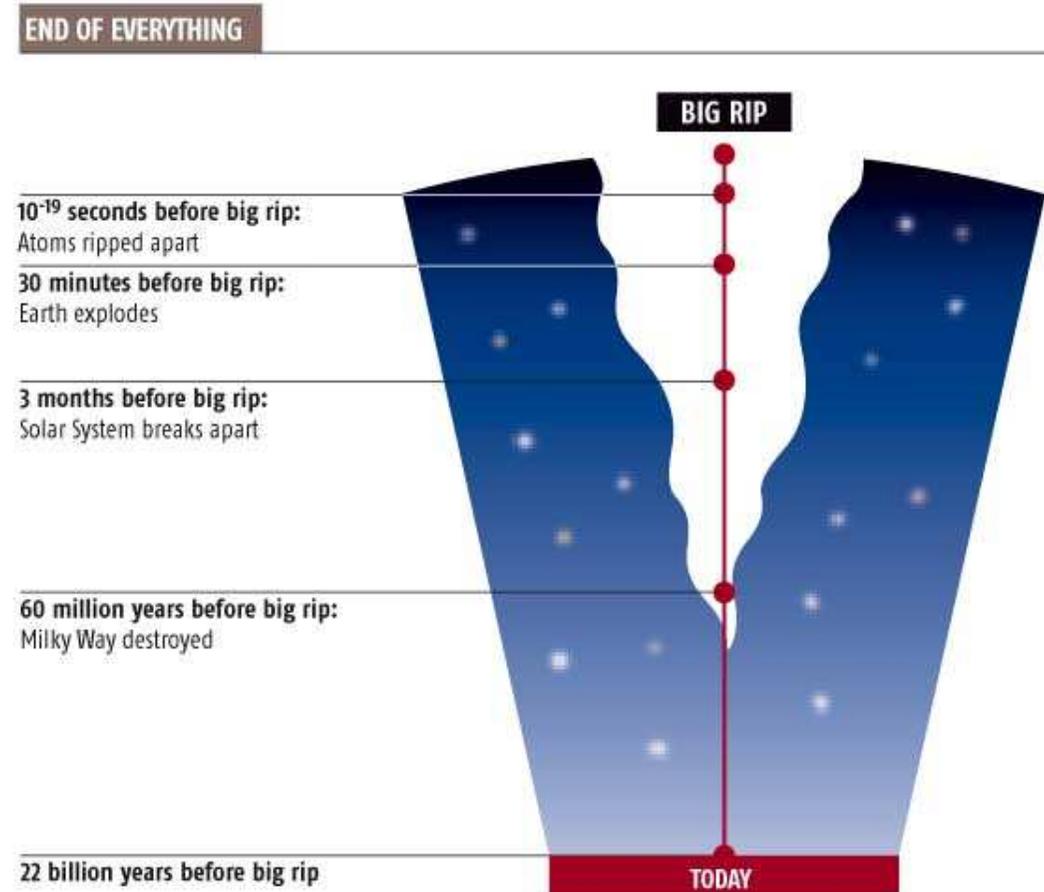


[Assista ao Big Bang](#)

Qual é o **destino** do universo?

Big Rip

- A gravitação será tão fraca que não manterá unida a Via Láctea. e outras galáxias.
- Depois o sistema solar não estará mais ligado pela gravitação.
- Estrelas e planetas serão ...
- E finalmente os átomos serão destruídos.



Gravitação Quântica

Não é possível quantizar a relatividade geral (não é renormalizável)

Gravitação Quântica

Não é possível quantizar a relatividade geral (não é renormalizável)

O modelo padrão das partículas elementares precisa ser ampliado

Gravitação Quântica

Não é possível quantizar a relatividade geral (não é renormalizável)

O modelo padrão das partículas elementares precisa ser ampliado

A relatividade geral também

Gravitação Quântica

Não é possível quantizar a relatividade geral (não é renormalizável)

O modelo padrão das partículas elementares precisa ser ampliado

A relatividade geral também

A proposta mais viável é a teoria de cordas

Gravitação Quântica

Não é possível quantizar a relatividade geral (não é renormalizável)

O modelo padrão das partículas elementares precisa ser ampliado

A relatividade geral também

A proposta mais viável é a teoria de cordas

Fornece uma teoria quântica para a gravitação perturbativamente

Gravitação Quântica

Não é possível quantizar a relatividade geral (não é renormalizável)

O modelo padrão das partículas elementares precisa ser ampliado

A relatividade geral também

A proposta mais viável é a teoria de cordas

Fornece uma teoria quântica para a gravitação perturbativamente

Explica a entropia de certos buracos negros

Gravitação Quântica

Não é possível quantizar a relatividade geral (não é renormalizável)

O modelo padrão das partículas elementares precisa ser ampliado

A relatividade geral também

A proposta mais viável é a teoria de cordas

Fornece uma teoria quântica para a gravitação perturbativamente

Explica a entropia de certos buracos negros

Requer dimensões extras e objetos extensos: branas

Gravitação Quântica

Não é possível quantizar a relatividade geral (não é renormalizável)

O modelo padrão das partículas elementares precisa ser ampliado

A relatividade geral também

A proposta mais viável é a teoria de cordas

Fornece uma teoria quântica para a gravitação perturbativamente

Explica a entropia de certos buracos negros

Requer dimensões extras e objetos extensos: branas

Branas dão origem à outros modelos cosmológicos

Gravitação Quântica

Não é possível quantizar a relatividade geral (não é renormalizável)

O modelo padrão das partículas elementares precisa ser ampliado

A relatividade geral também

A proposta mais viável é a teoria de cordas

Fornece uma teoria quântica para a gravitação perturbativamente

Explica a entropia de certos buracos negros

Requer dimensões extras e objetos extensos: branas

Branas dão origem à outros modelos cosmológicos

Mas a teoria de cordas ainda não está completa!!!

Referências

- M. Gleiser, A Dança do Universo (Cia. das Letras, 1997)
- S. Hawking, O Universo Numa Casca de Noz (Mandarim, 2001)
- S. Weinberg, Os Três Primeiros Minutos (Guanabara Dois, 1980)
- A. Guth, O Universo Inflacionário (Campus, 1997)
- B. Greene, O Universo Elegante (Cia. das Letras, 2001)
- S. Weinberg, Gravitation and Cosmology (Wiley, 1972)
- B. F. Schutz, A First Course in General Relativity (Cambridge, 1985)
- J. Foster and J. D. Nightingale, A Short Course in General Relativity (Springer, 1995)
- L. D. Landau and E. M. Lifshitz, The Classical Theory of Fields (Pergamon Press, 1975)
- C. W. Misner, K. S. Thorne and J. A. Wheeler, Gravitation (Freeman, 1973)
- B. Zwiebach, A First Course in String Theory (Cambridge, 2004)
- <http://www.fma.if.usp.br/~rivelles/>
- <http://rivelles.blogspot.com>