
COSMOLOGIA

Victor O. Rivelles

`rivelles@fma.if.usp.br`

Instituto de Física

Universidade de São Paulo

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

CURSO DE VERÃO DO IFUSP - 2006

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

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

ROTEIRO

- Cosmologia Grega
- Cosmologia Newtoniana
- Cosmologia Moderna
 - Relatividade Geral
 - Big Bang
 - Teoria Inflacionária
 - Problemas em aberto

Mitos de Criação

- Procuram dar uma explicação para a origem do Universo.
- Utilizam uma linguagem metafórica, baseada em símbolos que tem significado dentro da cultura geradora do mito.



Mitos de Criação

- Procuram dar uma explicação para a origem do Universo.
- Utilizam uma linguagem metafórica, baseada em símbolos que tem significado dentro da cultura geradora do mito.
- Na religião Judaico-Cristã o mito de criação está descrito na [Bíblia](#).



Mitos de Criação

- Procuram dar uma explicação para a origem do Universo.
- Utilizam uma linguagem metafórica, baseada em símbolos que tem significado dentro da cultura geradora do mito.
- Na religião Judaico-Cristã o mito de criação está descrito na [Bíblia](#).
- Essa situação perdurou até o nascimento da ...



Filosofia Ocidental

- Nasceu na Grécia ao redor de 600 AC.



Filosofia Ocidental

- Nasceu na Grécia ao redor de 600 AC.
- Buscavam explicar todas as coisas através de um ou poucos **princípios**.
- Compreender a natureza **sem apelar para o misticismo**.



Filosofia Ocidental

- Nasceu na Grécia ao redor de 600 AC.
- Buscavam explicar todas as coisas através de um ou poucos **princípios**.
- Compreender a natureza **sem apelar para o misticismo**.

- Sócrates
- Platão
- Aristóteles



Cosmologia Grega, 350 AC

- **Geocêntrica:** o Sol, a lua e os planetas giram ao redor da Terra enquanto as estrelas formam um fundo fixo.

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum.



Cosmologia Grega, 350 AC

- **Geocêntrica**: o Sol, a lua e os planetas giram ao redor da Terra enquanto as estrelas formam um fundo fixo.
- O Universo é finito e os corpos celestes têm seus movimentos regidos rigorosamente pelas **leis naturais** baseadas na geometria.



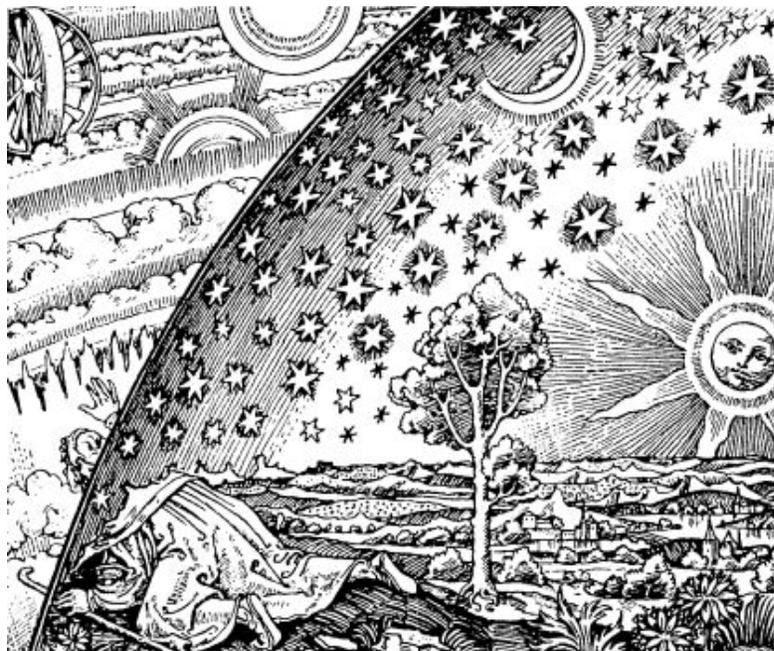
Cosmologia Grega

- Cláudio Ptolomeu considerava a Terra imóvel e rodeada de **esferas transparentes** de cristal que giravam a sua volta, e o Sol, a lua e os planetas fixos nessas esferas.



Cosmologia Grega

- Cláudio Ptolomeu considerava a Terra imóvel e rodeada de **esferas transparentes** de cristal que giravam a sua volta, e o Sol, a lua e os planetas fixos nessas esferas.
- A cosmologia grega perdurou por quase **2000 anos**.



Idade Média

- Problemas com o movimento retrógrado dos planetas foram resolvidos com os epiciclos de Ptolomeu em cerca de 100 AD.



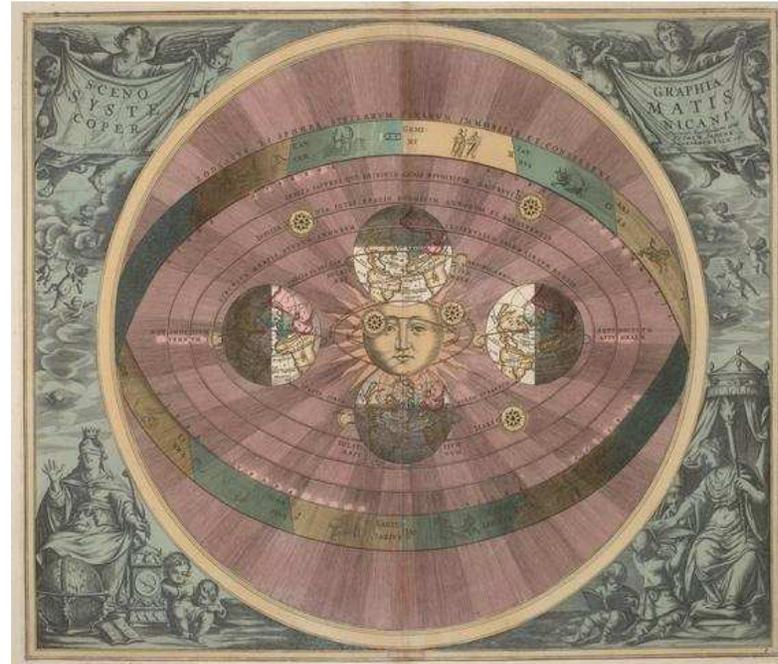
Idade Média

- Problemas com o movimento retrógrado dos planetas foram resolvidos com os epíclis de Ptolomeu em cerca de 100 AD.
- Esta teoria foi adotada por Santo Tomás de Aquino no século XIII, e esta concepção do cosmo foi seguida até o século XVI.



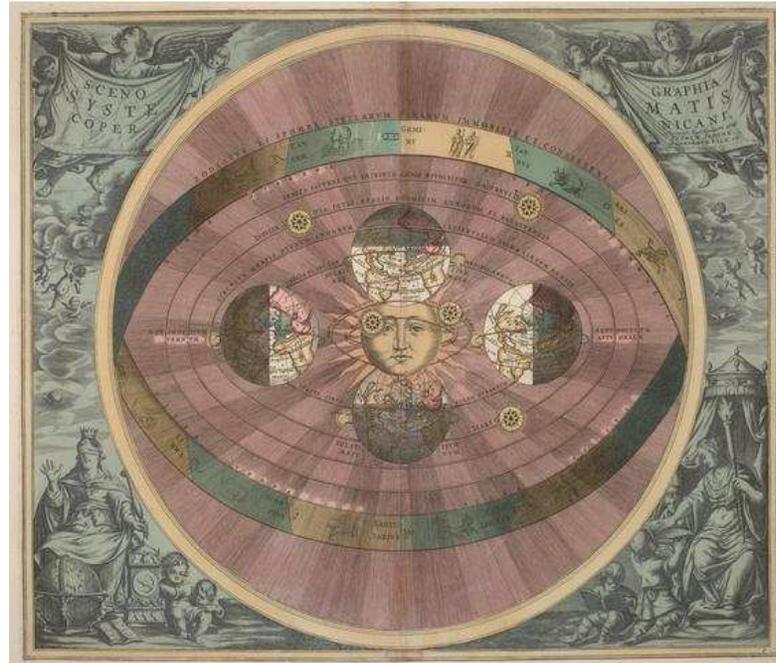
Renascença

- Nicolau Copérnico em 1514 propôs o modelo **heliocêntrico** em que os corpos celestes giravam ao redor do Sol, e não da Terra.



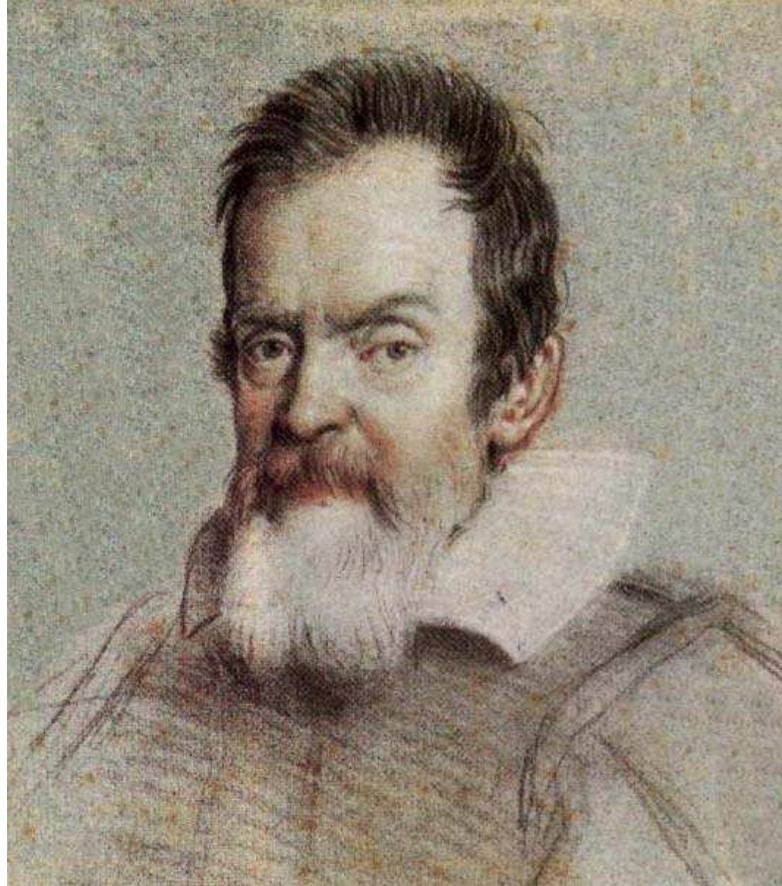
Renascença

- **Nicolau Copérnico** em 1514 propôs o modelo **heliocêntrico** em que os corpos celestes giravam ao redor do Sol, e não da Terra.
- **Johannes Kepler** descobriu que as órbitas dos astros do sistema solar são **elípticas** ao redor de 1590.



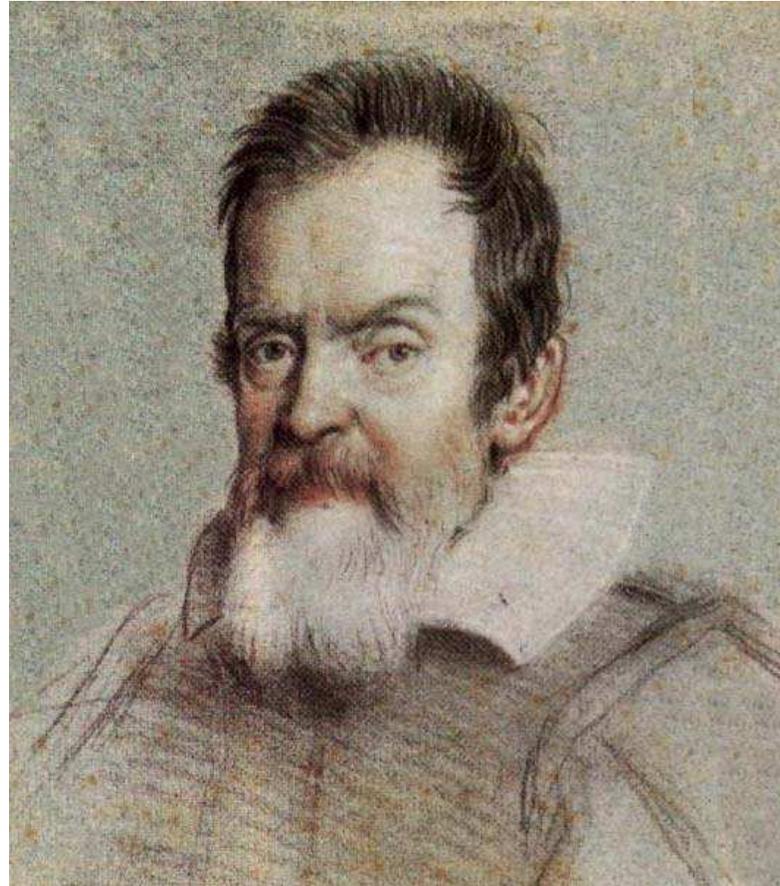
Galileu Galilei

- Na primeira metade do século XVII, reforçou a **teoria heliocêntrica** com o uso do recém-inventado **telescópio**.



Galileu Galilei

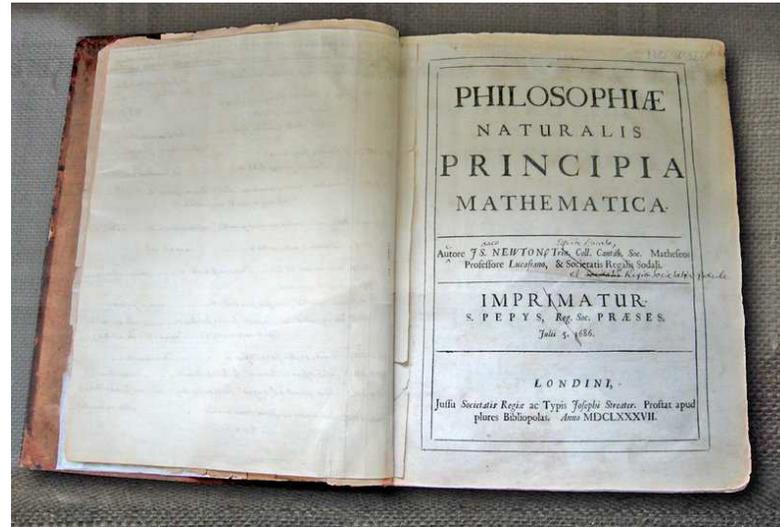
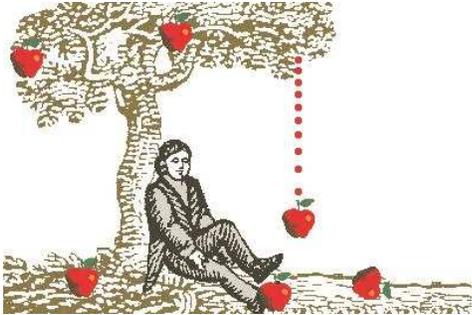
- Na primeira metade do século XVII, reforçou a **teoria heliocêntrica** com o uso do recém-inventado **telescópio**.
- Descobriu que a Via Láctea é formada por uma infinidade de estrelas, a existência de satélites ao redor de Júpiter, além de observar Saturno e seus anéis, e as fases de Vênus.



Isaac Newton, 1687

- Descobriu a lei da gravitação universal

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$



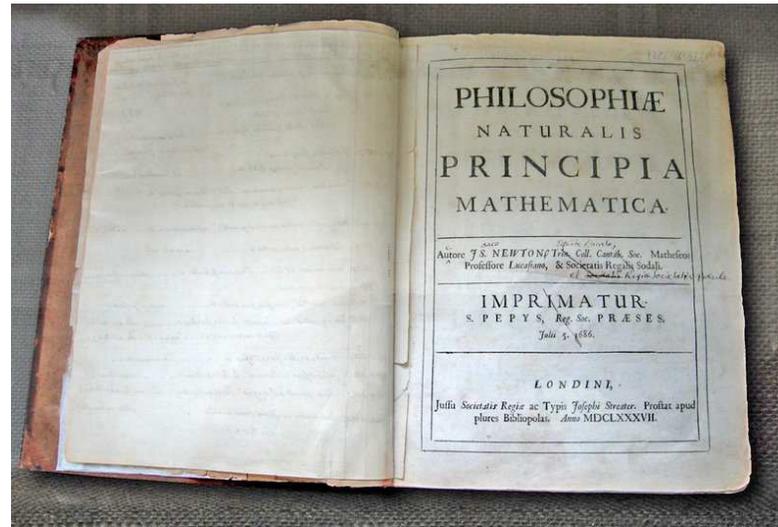
Isaac Newton, 1687

- Descobriu a lei da gravitação universal

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$



- Cosmologia Newtoniana: Universo infinito.



Avanços na Cosmologia

- Ao redor de 1700 [Herschels](#) identificou a estrutura em forma de disco da Via Láctea mas ainda colocava o sistema solar em seu centro.



Avanços na Cosmologia

- Ao redor de 1700 [Herschels](#) identificou a estrutura em forma de disco da Via Láctea mas ainda colocava o sistema solar em seu centro.
- Em 1918 [Shapley](#) descobriu que o sistema solar não estava no centro mas a cerca de $2/3$ do raio da Via Láctea. Mas ainda considerava a Via Láctea no centro do Universo.



Avanços na Cosmologia

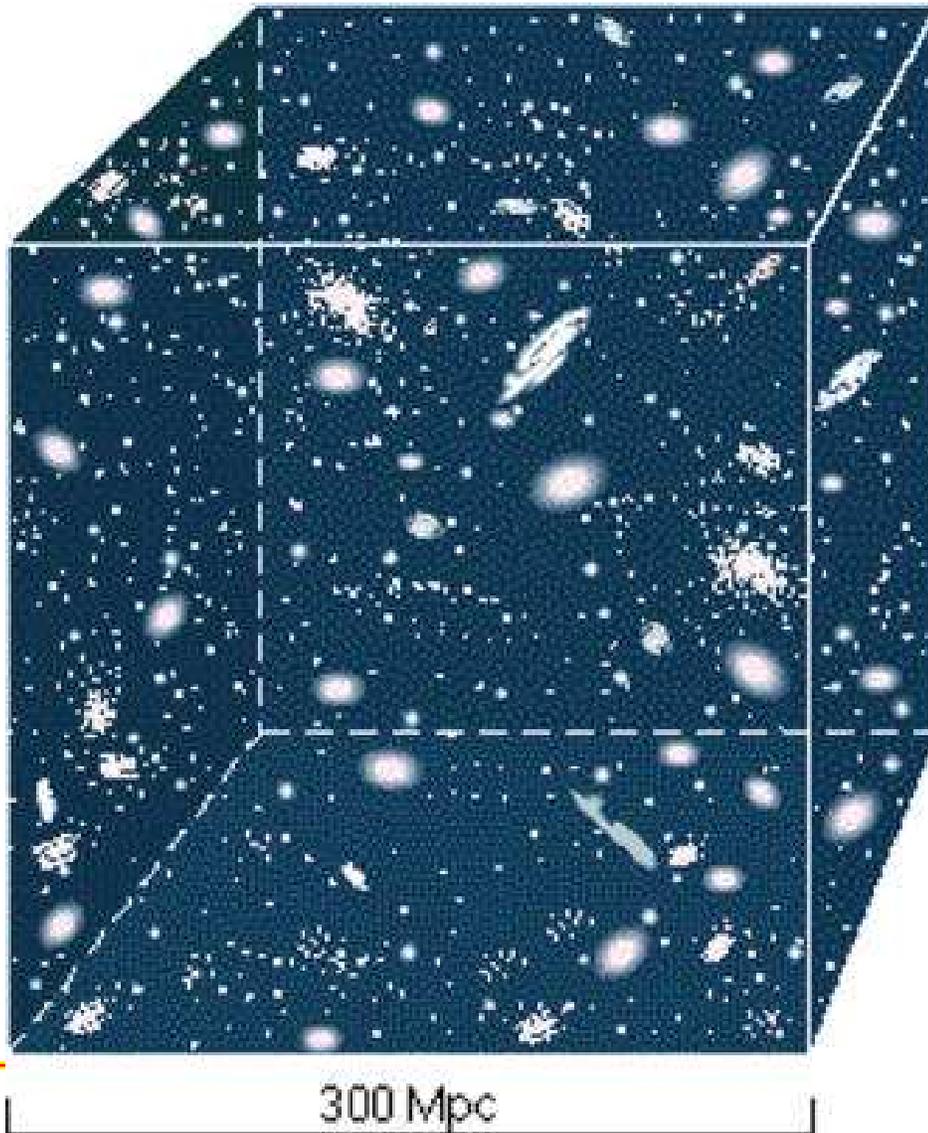
- Ao redor de 1700 **Herschels** identificou a estrutura em forma de disco da Via Láctea mas ainda colocava o sistema solar em seu centro.
- Em 1918 **Shapley** descobriu que o sistema solar não estava no centro mas a cerca de $2/3$ do raio da Via Láctea. Mas ainda considerava a Via Láctea no centro do Universo.



- Em 1923 **Hubble** mostrou que a via Láctea era **uma galáxia ordinária como qualquer outra.**

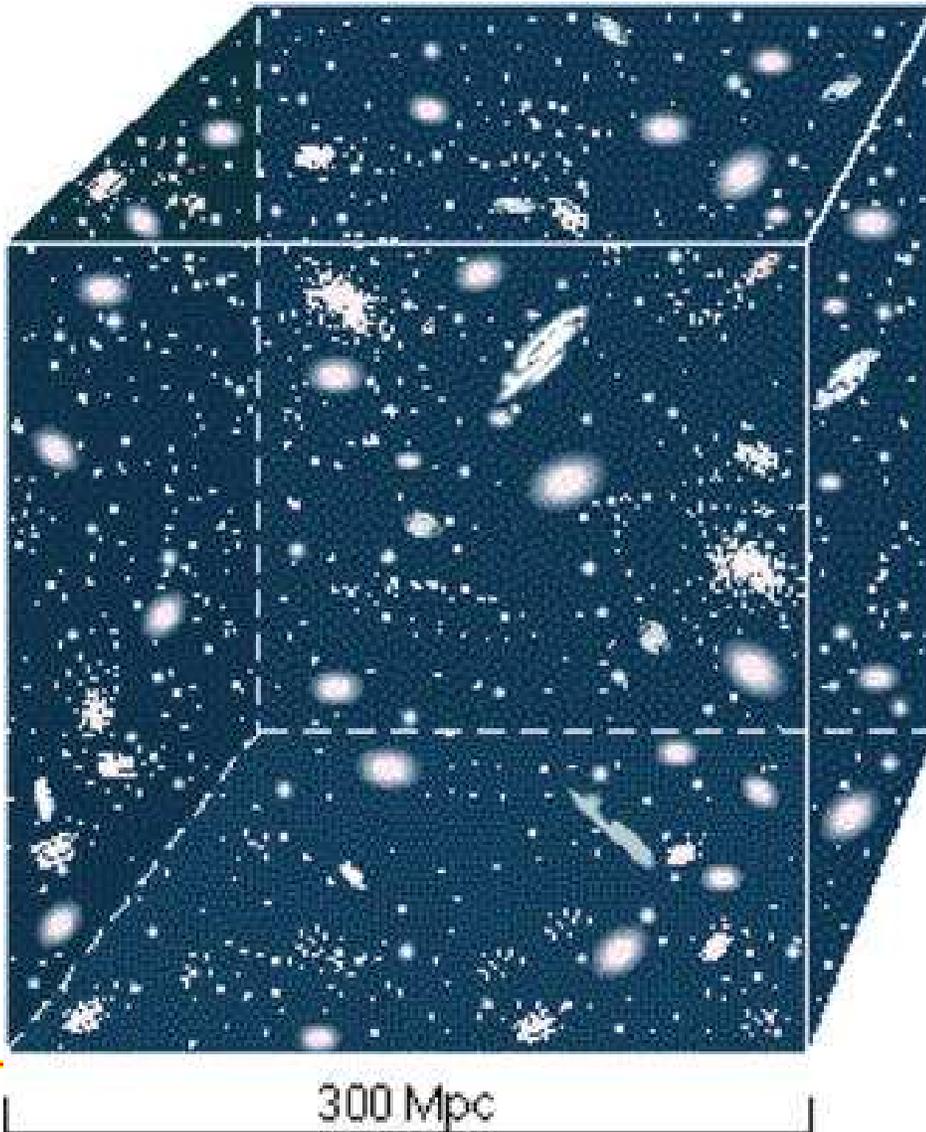
O Princípio Cosmológico

- Nosso lugar no Universo não parece ser especial.



O Princípio Cosmológico

- Nosso lugar no Universo não parece ser especial.

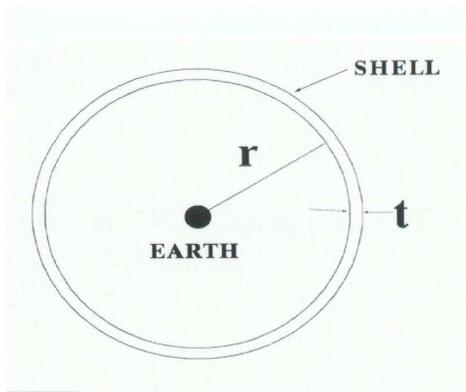


Consequências:

- O Universo é o mesmo em qualquer lugar: **homogeneidade**.
- O Universo parece o mesmo em qualquer direção: **isotropia**.

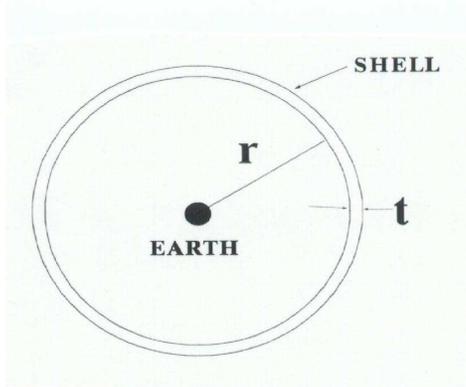
O Paradoxo de Olbers, 1826

- Assuma o seguinte sobre o Universo:
 - sua extensão é **infinita**,
 - sua idade é **infinita**,
 - é **estático**,
 - as estrêlas (ou galáxias) estão distribuídas ao acaso nele.



O Paradoxo de Olbers, 1826

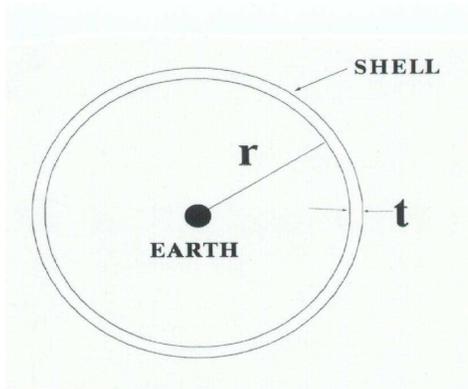
- Assuma o seguinte sobre o Universo:
 - sua extensão é **infinita**,
 - sua idade é **infinita**,
 - é **estático**,
 - as estrelas (ou galáxias) estão distribuídas ao acaso nele.



- Considere uma camada esférica ao redor de um observador.
- Estrelas nessa camada irradiam luz com um **fluxo proporcional à $1/r^2$** .

O Paradoxo de Olbers, 1826

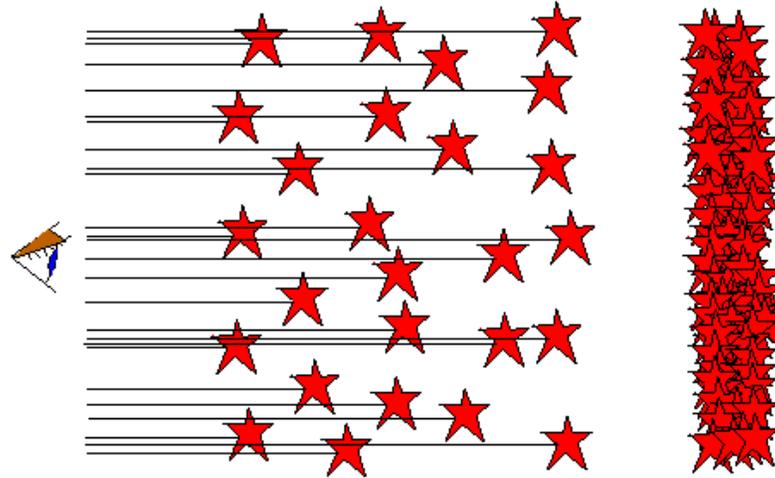
- Assuma o seguinte sobre o Universo:
 - sua extensão é **infinita**,
 - sua idade é **infinita**,
 - é **estático**,
 - as estrelas (ou galáxias) estão distribuídas ao acaso nele.



- Considere uma camada esférica ao redor de um observador.
- Estrelas nessa camada irradiam luz com um **fluxo proporcional à $1/r^2$** .
- O volume da camada é $4\pi r^2 dr$.
- Portanto, o **fluxo total** é proporcional à $4\pi dr$! **Independente da distância.**

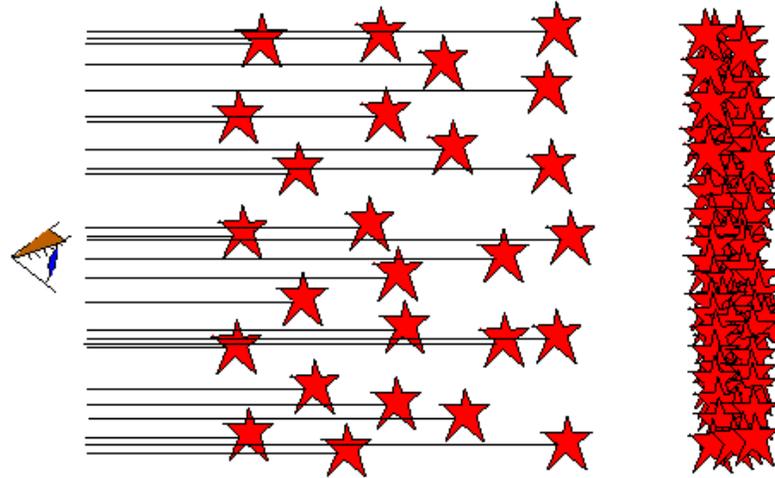
O Paradoxo de Olbers

- A radiação que atinge o observador é a integral em r desse fluxo sobre todo o Universo.



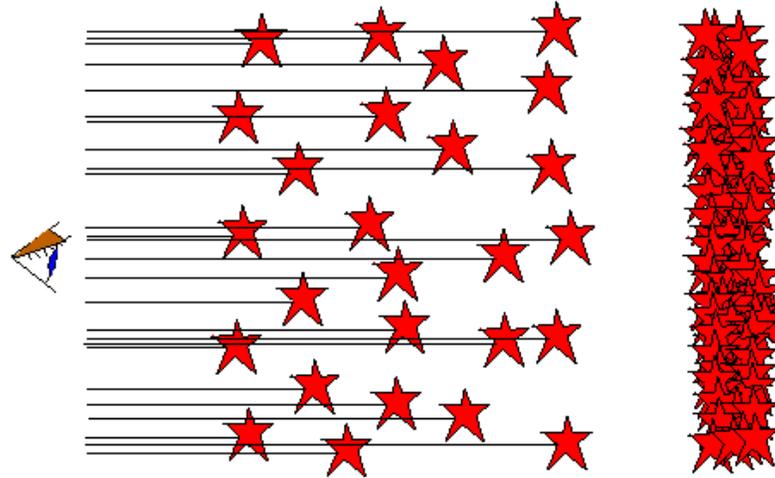
O Paradoxo de Olbers

- A radiação que atinge o observador é a integral em r desse fluxo sobre todo o Universo.
- O resultado é infinito !!!



O Paradoxo de Olbers

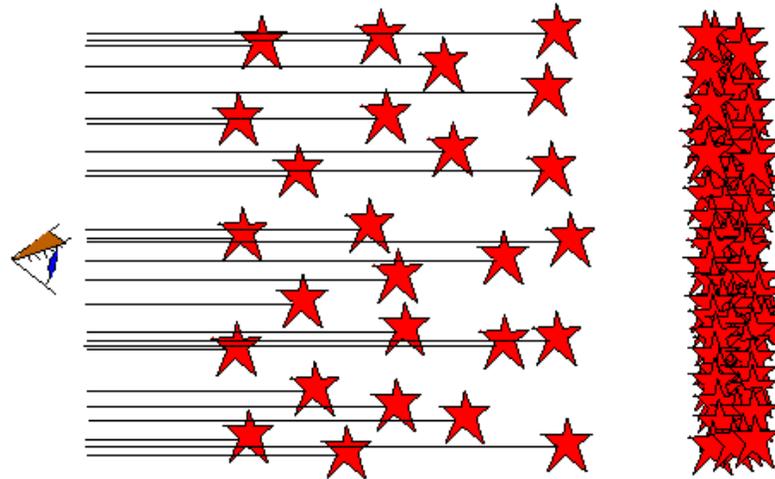
- A radiação que atinge o observador é a integral em r desse fluxo sobre todo o Universo.
- O resultado é infinito !!!



- O céu não deveria ser **negro** mas deveria **brilhar** com intensidade infinita!

O Paradoxo de Olbers

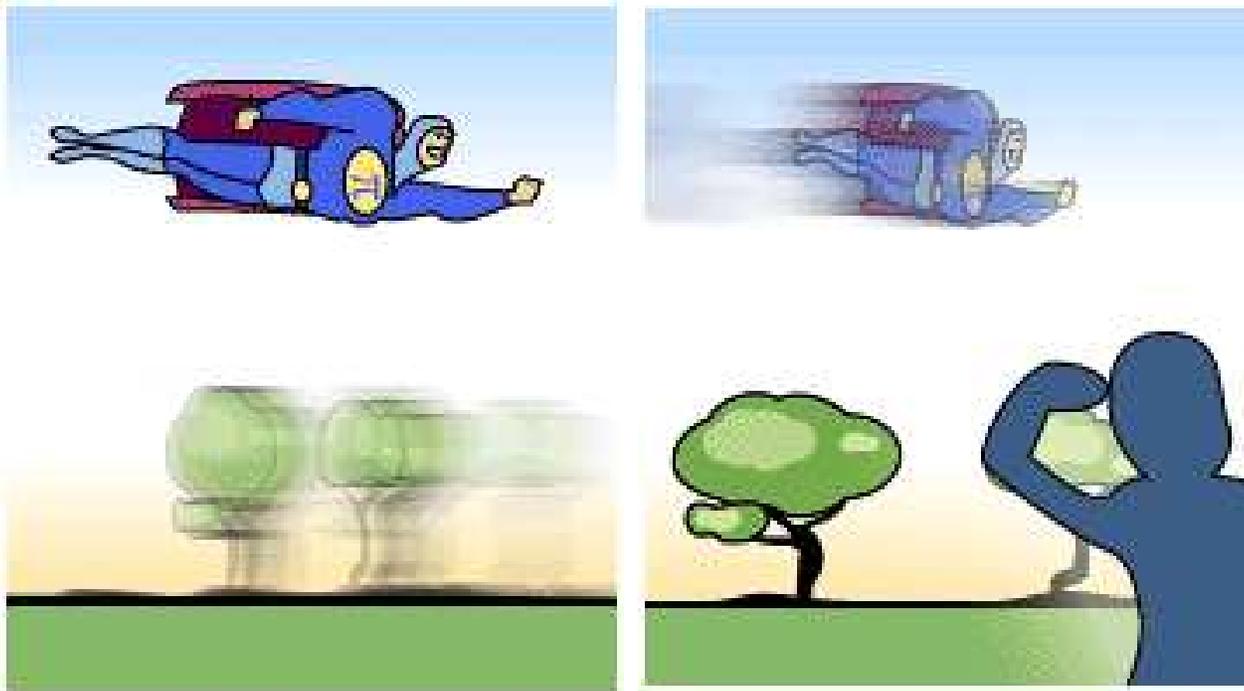
- A radiação que atinge o observador é a integral em r desse fluxo sobre todo o Universo.
- O resultado é infinito !!!



- O céu não deveria ser **negro** mas deveria **brilhar** com intensidade infinita!
 - **Objecção**: poeira poderia absorver parte da radiação.
 - Mas a poeira deve esquentar e depois reemitir a radiação.
-

Relatividade Restrita

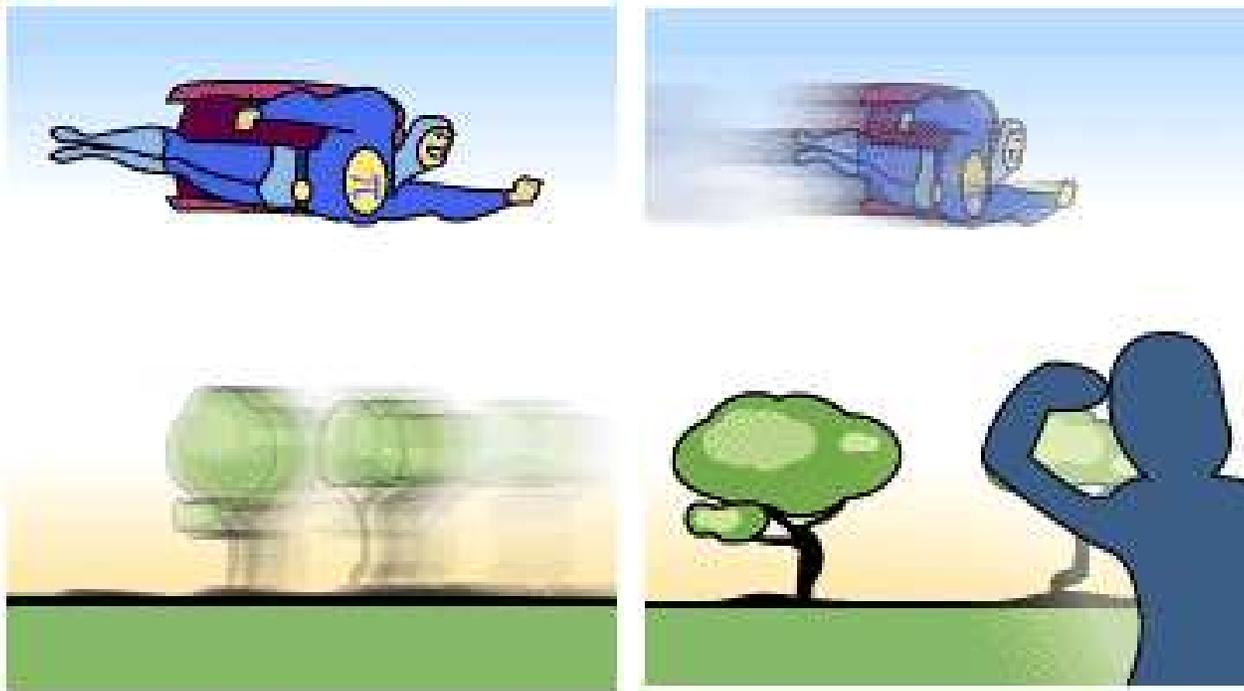
- Formulada por Einstein em 1905.
- A **velocidade da luz** é a mesma em qualquer referencial inercial.



Relatividade Restrita

- Formulada por Einstein em 1905.
- A **velocidade da luz** é a mesma em qualquer referencial inercial.
- **Contração de Lorentz**: comprimentos dependem do observador.

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$



Relatividade Restrita

- **Dilatação temporal:** intervalos de tempo dependem do observador.

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Relatividade Restrita

- **Dilatação temporal:** intervalos de tempo dependem do observador.

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

- A relatividade restrita **muda a geometria:** geometria de Minkowski.

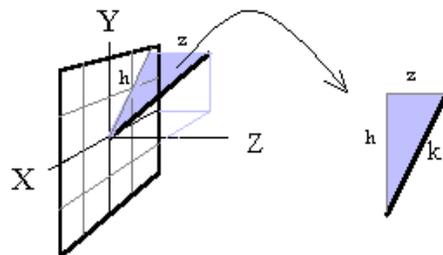
Relatividade Restrita

- **Dilatação temporal:** intervalos de tempo dependem do observador.

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

- A relatividade restrita **muda a geometria:** geometria de Minkowski.
- **Na geometria Euclidiana:** comprimentos são constantes.

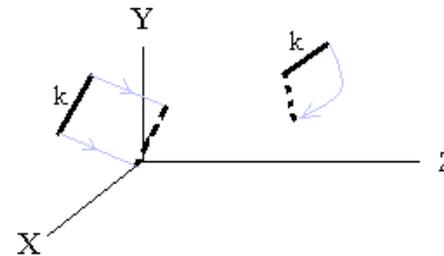
Figure 2: Invariance in a 3D Euclidean space.



The length of an object in a three dimensional coordinate system is given by the 3D version of Pythagoras' theorem:

$$k^2 = h^2 + z^2 \quad \text{but} \quad h^2 = x^2 + y^2$$

$$k^2 = x^2 + y^2 + z^2$$



In a three dimensional coordinate system it seems that the real length of a thing stays the same (is INVARIANT) during translations and rotations. It appears to be always given by:

$$k^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

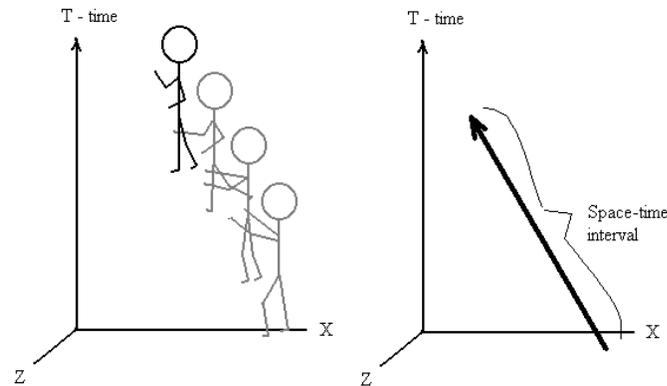
Relatividade Restrita

- Na relatividade restrita: comprimentos e intervalos de tempo dependem do observador.

Relatividade Restrita

- Na **relatividade restrita**: comprimentos e intervalos de tempo dependem do observador.
- Há alguma quantidade é contante e **não depende do observador**?

Figure 3: The invariant space-time interval.



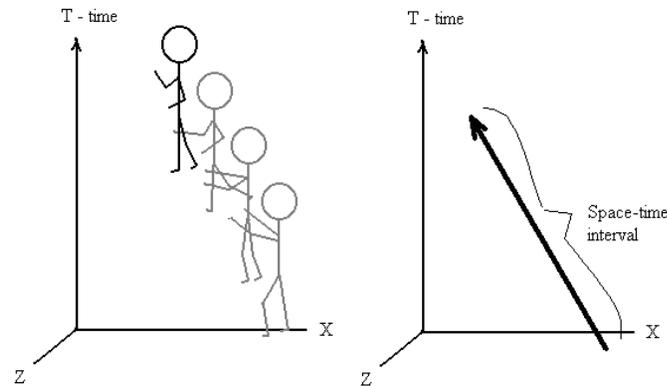
Motions can be represented as lengths spanning both space and time in a coordinate system. These lengths are called **SPACE-TIME INTERVALS**. Time can be considered to be yet another direction for arranging things. This suggests that the universe could be four dimensional. If the universe is truly four dimensional then space-time intervals would be invariant when things move.

- Intervalo $\Delta s^2 = \Delta \vec{x}^2 - \Delta t^2$

Relatividade Restrita

- Na **relatividade restrita**: comprimentos e intervalos de tempo dependem do observador.
- Há alguma quantidade é contante e **não depende do observador**?

Figure 3: The invariant space-time interval.



Motions can be represented as lengths spanning both space and time in a coordinate system. These lengths are called SPACE-TIME INTERVALS. Time can be considered to be yet another direction for arranging things. This suggests that the universe could be four dimensional. If the universe is truly four dimensional then space-time intervals would be invariant when things move.

- Intervalo $\Delta s^2 = \Delta \vec{x}^2 - \Delta t^2$
- Espaço e tempo formam o espaço-tempo quadridimensional com geometria de Minkowski.

Gravitação na Relatividade Restrita

- A força gravitacional Newtoniana propaga-se **instantaneamente**.



Gravitação na Relatividade Restrita

- A força gravitacional Newtoniana propaga-se **instantaneamente**.



- É necessário **conciliar** a relatividade restrita com a gravitação.
- Einstein demorou 10 anos para compatibilizar a relatividade restrita com a gravitação.

Gravitação na Relatividade Restrita

- A força gravitacional Newtoniana propaga-se **instantaneamente**.



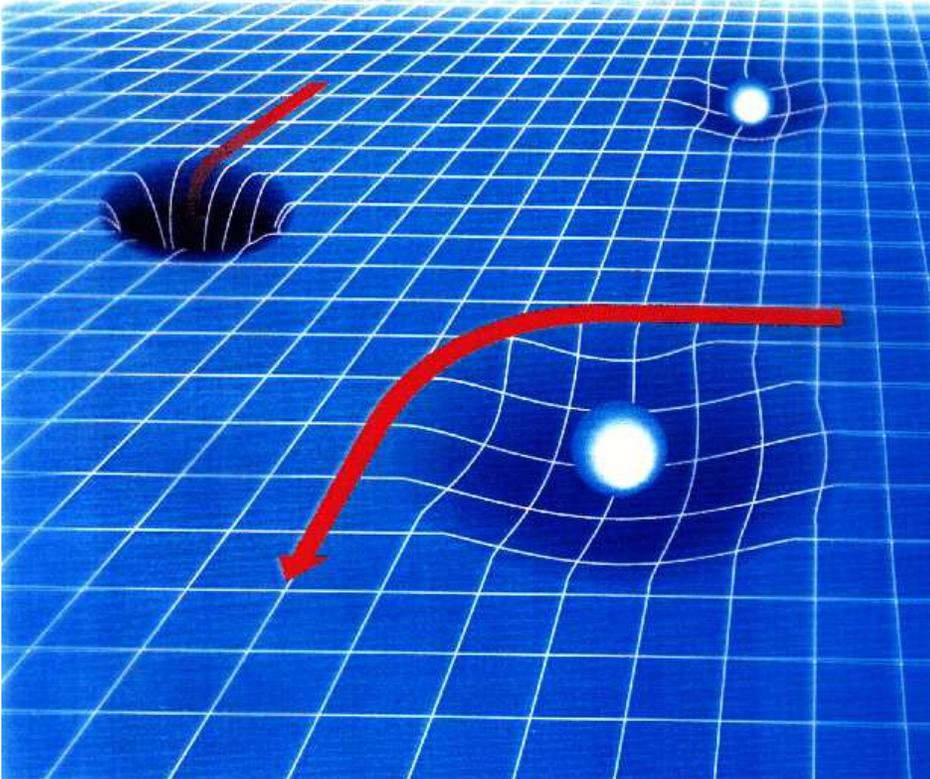
- É necessário **conciliar** a relatividade restrita com a gravitação.
- Einstein demorou 10 anos para compatibilizar a relatividade restrita com a gravitação.
- E o resultado é:

Relatividade Geral, 1915

Relatividade geral = teoria da gravitação relativística

Relatividade Geral, 1915

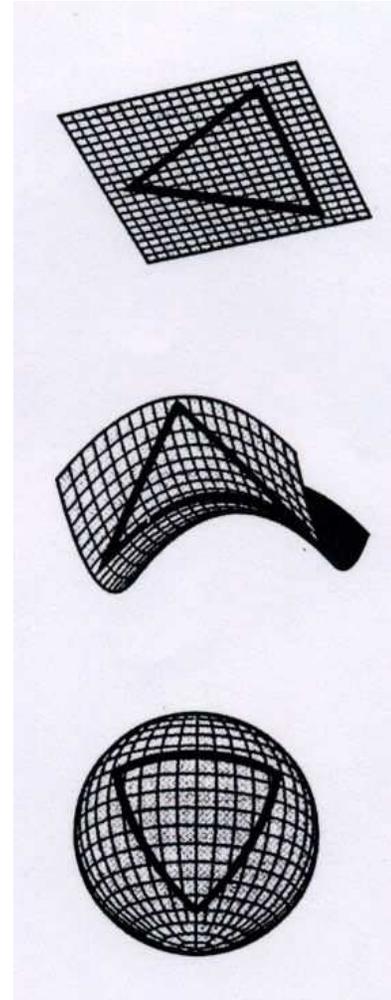
Relatividade geral = teoria da gravitação relativística



- Não há força gravitacional.
- A gravitação devido à curvatura do espaço.
- Matéria causa a curvatura do espaço.
- A curvatura determina o movimento da matéria.
- Objeto fundamental: *métrica* $g_{\mu\nu}$
- Determina todas as propriedades locais do espaço curvo.

Espaços Curvos

- O que é um espaço curvo?



Espaços Curvos

- O que é um espaço curvo?
- Geometria Euclidiana: soma dos ângulos internos de um triângulo é 180 graus.
- Geometria Riemanniana: a soma pode ser diferente!

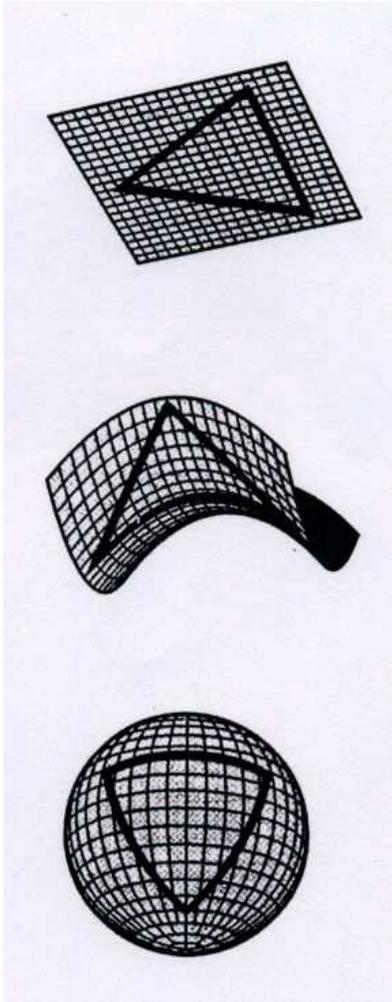


Espaços Curvos

- O que é um espaço curvo?
- Geometria Euclidiana: soma dos ângulos internos de um triângulo é 180 graus.
- Geometria Riemanniana: a soma pode ser diferente!
- Sem curvatura: igual à 180 graus.
- Curvatura positiva: maior que 180 graus.
- Curvatura negativa: menor que 180 graus.



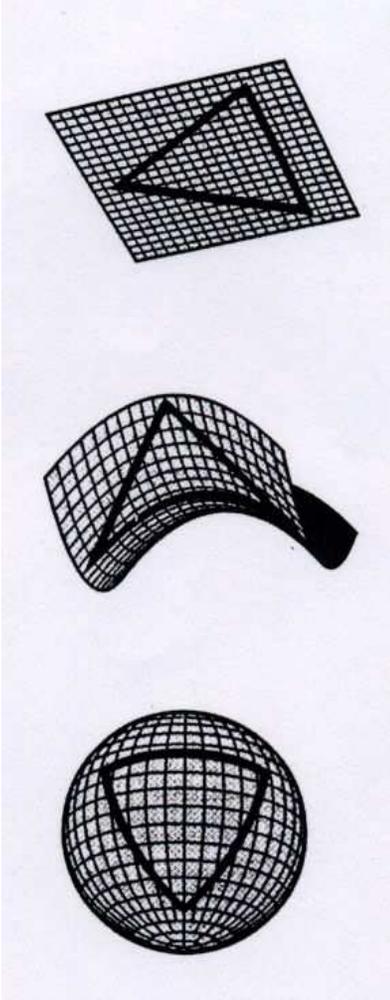
Espaços Curvos



Espaços Curvos

- Plano: comprimento infinitesimal

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$



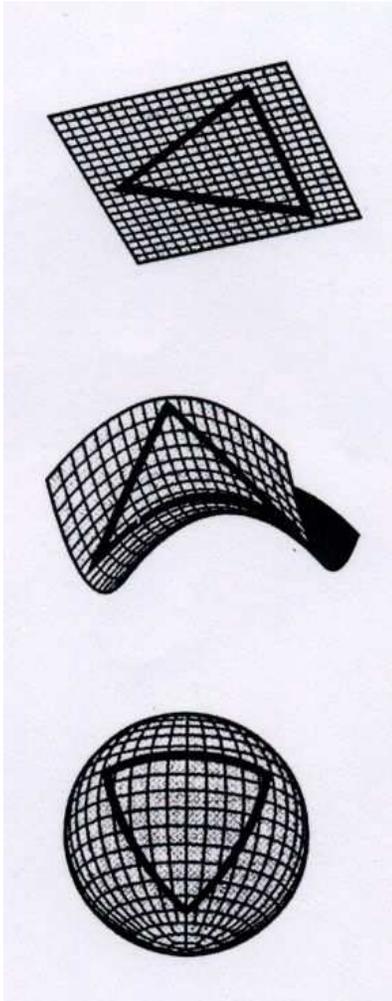
Espaços Curvos

- Plano: comprimento infinitesimal

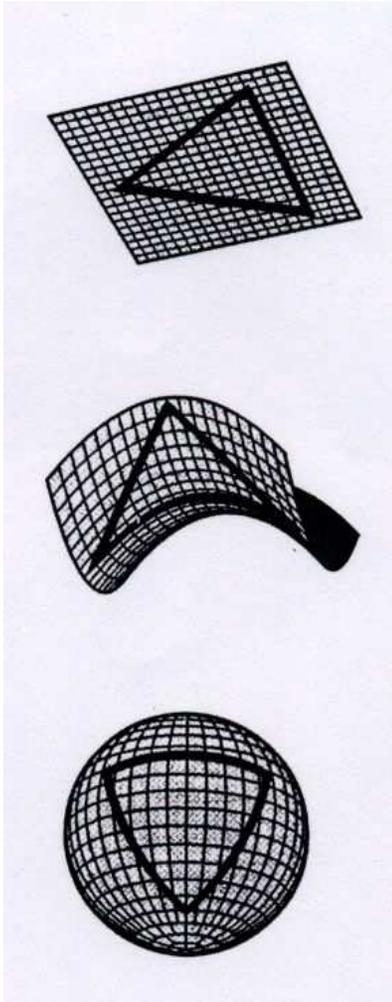
$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

- Esfera: comprimento infinitesimal

$$ds^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2$$



Espaços Curvos



- Plano: comprimento infinitesimal

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

- Esfera: comprimento infinitesimal

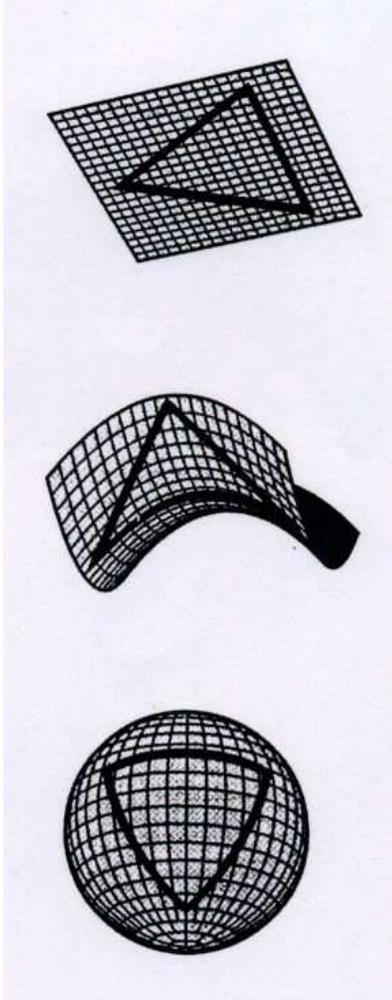
$$ds^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2$$

- Superfície curva geral:

$$ds^2 = \sum_{i,j=1}^2 g_{ij} dx^i dx^j$$

- g_{ij} é a métrica do espaço curvo

Espaços Curvos



- Plano: comprimento infinitesimal

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

- Esfera: comprimento infinitesimal

$$ds^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2$$

- Superfície curva geral:

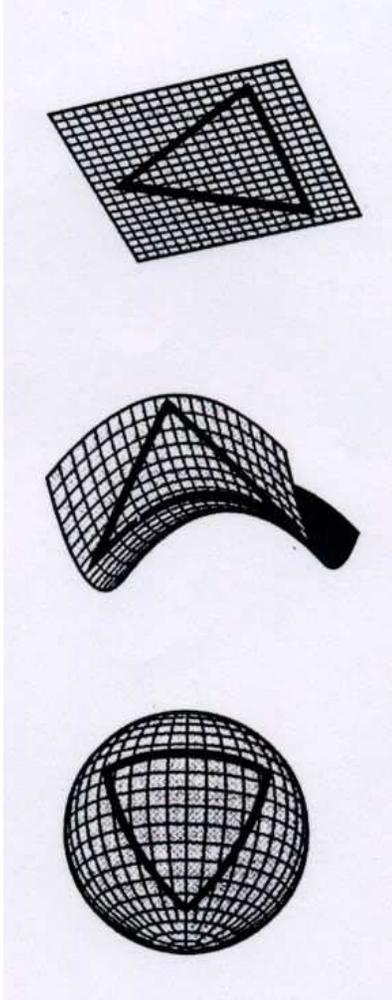
$$ds^2 = \sum_{i,j=1}^2 g_{ij} dx^i dx^j$$

- g_{ij} é a métrica do espaço curvo

- Relatividade restrita:

$$ds^2 = -(dx^0)^2 + (dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2$$

Espaços Curvos



- Plano: comprimento infinitesimal

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

- Esfera: comprimento infinitesimal

$$ds^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2$$

- Superfície curva geral:

$$ds^2 = \sum_{i,j=1}^2 g_{ij} dx^i dx^j$$

- g_{ij} é a métrica do espaço curvo

- Relatividade restrita:

$$ds^2 = -(dx^0)^2 + (dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2$$

- Relatividade geral:

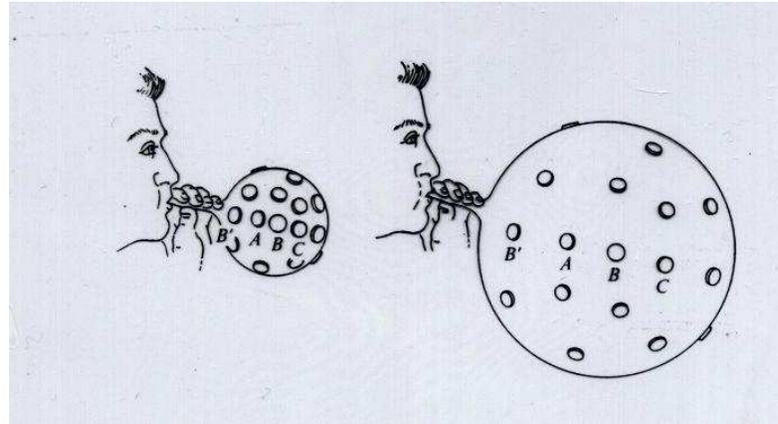
$$ds^2 = \sum_{\mu,\nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

- $g_{\mu\nu}$ é a métrica do **ESPAÇO-TEMPO**

- Eqs. de Einstein: $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = T_{\mu\nu}$

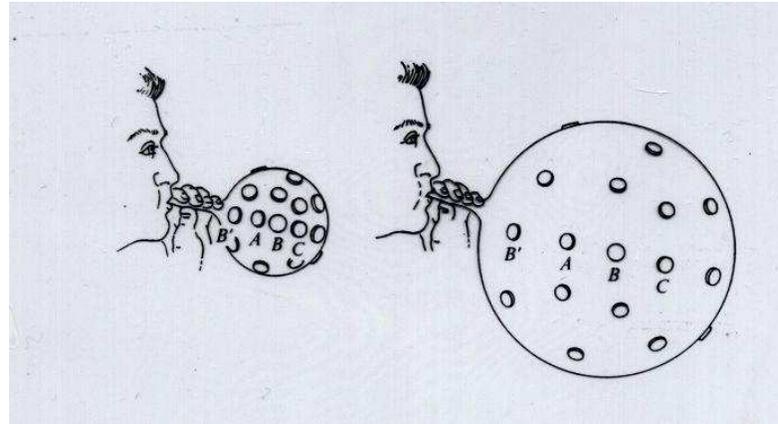
Cosmologia Relativística

- Friedmann encontra soluções da relatividade geral que mostram um universo em expansão em 1922.



Cosmologia Relativística

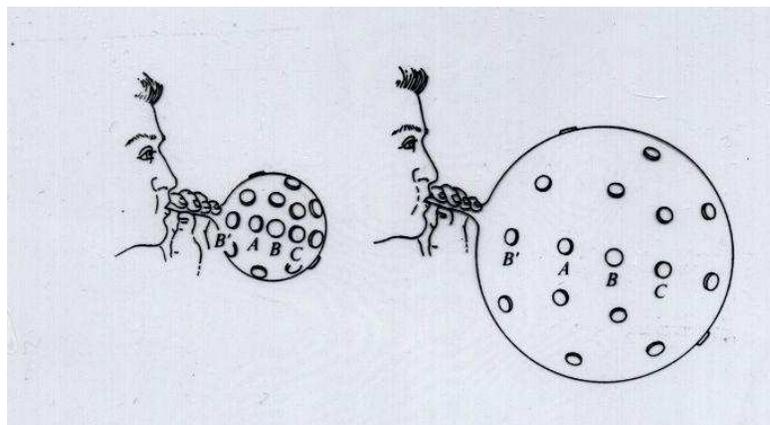
- Friedmann encontra soluções da relatividade geral que mostram um **universo em expansão** em 1922.



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

Cosmologia Relativística

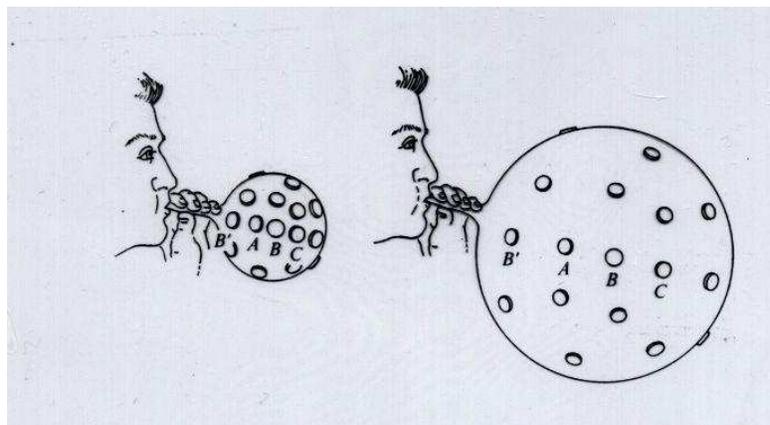
- Friedmann encontra soluções da relatividade geral que mostram um universo em expansão em 1922.



- Na época acreditava-se que o Universo era estático!
- Einstein modifica suas equações para obter um universo estático.
- Introduz a constante cosmológica! $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$

Cosmologia Relativística

- Friedmann encontra soluções da relatividade geral que mostram um universo em expansão em 1922.

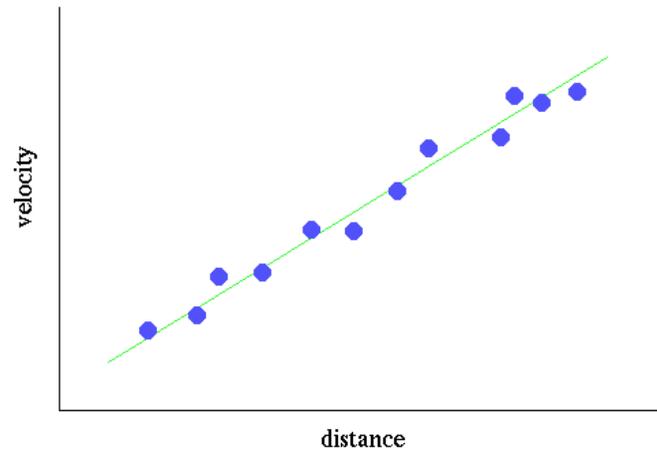


- Na época acreditava-se que o Universo era estático!
- Einstein modifica suas equações para obter um universo estático.
- Introduz a constante cosmológica! $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$
- Em 1923 Hubble descobriu que as galáxias estão se afastando de nós e portanto o Universo está em expansão!
- Einstein afirma que cometeu o maior erro de sua vida!

Lei de Hubble

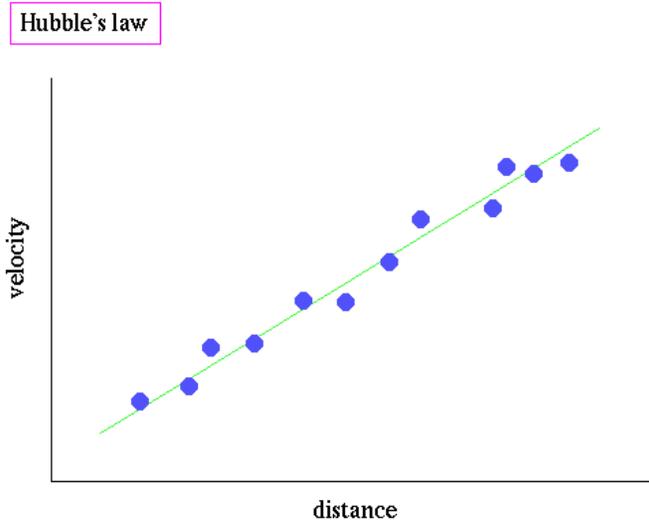
- A velocidade de recessão é proporcional à distância da galáxia $\vec{v} = H_0 \vec{r}$.

Hubble's law



Lei de Hubble

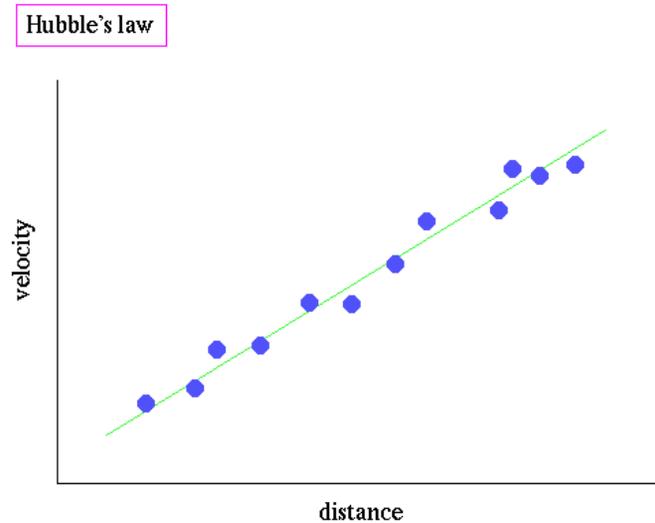
- A velocidade de recessão é proporcional à distância da galáxia $\vec{v} = H_0 \vec{r}$.



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

Lei de Hubble

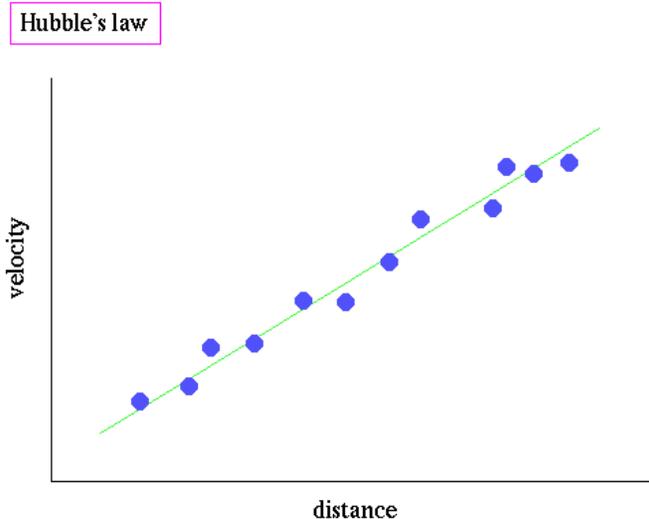
- A velocidade de recessão é proporcional à distância da galáxia $\vec{v} = H_0 \vec{r}$.



- 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**.

Lei de Hubble

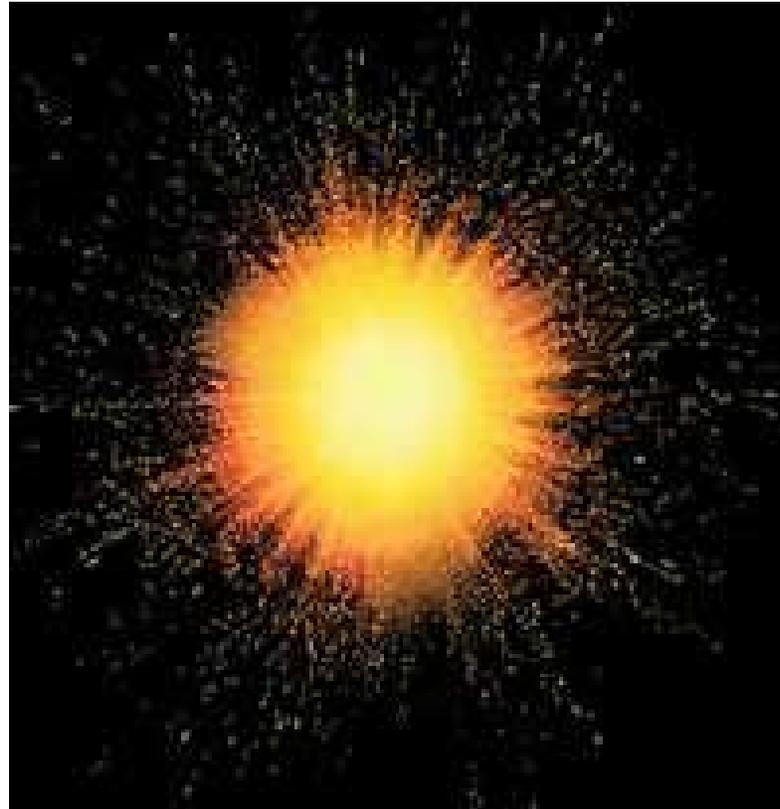
- A velocidade de recessão é proporcional à distância da galáxia $\vec{v} = H_0 \vec{r}$.



- 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

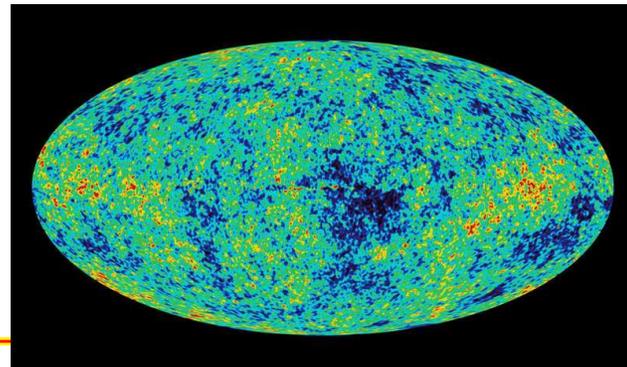
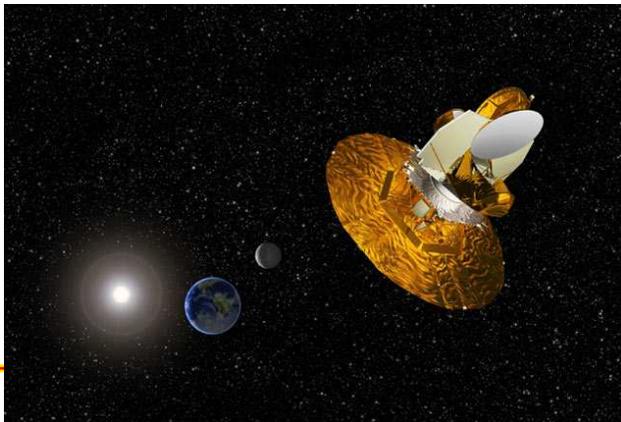
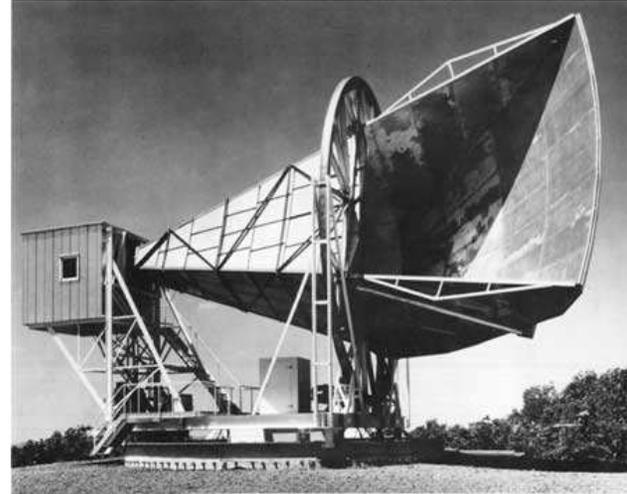
- A explosão inicial, há cerca de 13.7 bilhões de anos atrás.



- Cosmologia do Big Bang.
- Em 1949 Gamow prevê a existência da [radiação cósmica de fundo](#) deixada pelo Big Bang.

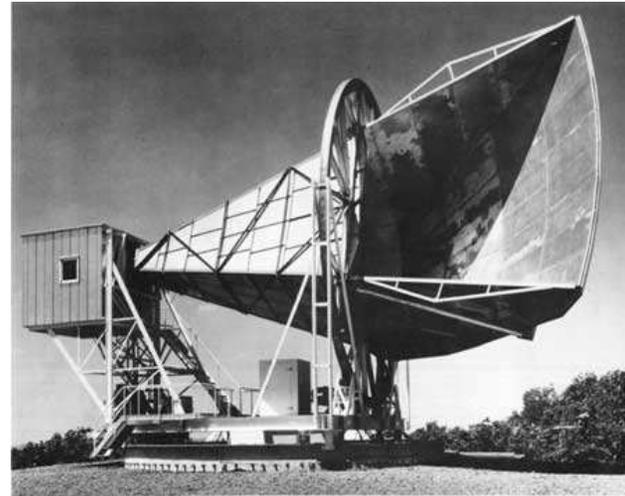
A Radiação Cós mica de Fundo

- Em 1965 a radiação cósmica de fundo é **descoberta** por Penzias e Wilson.

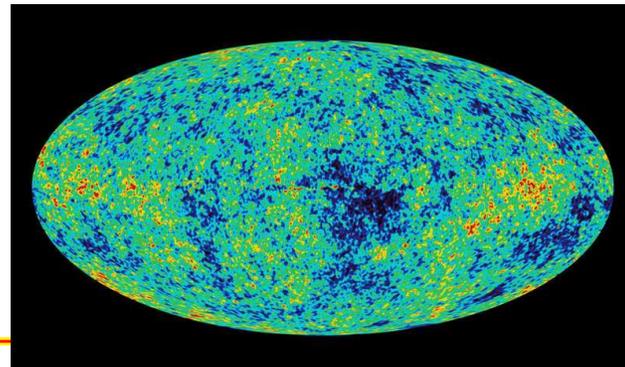
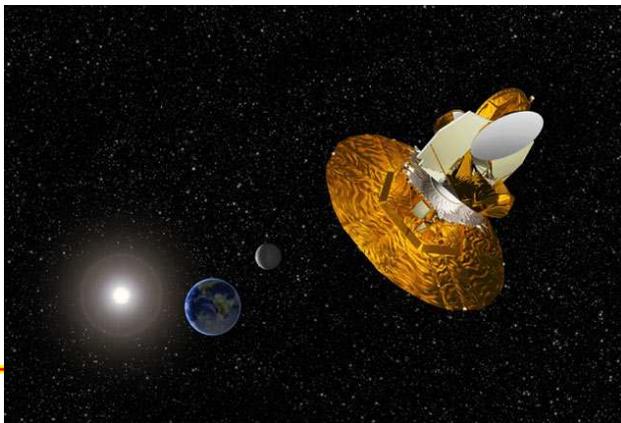


A Radiação Cós mica de Fundo

- Em 1965 a radiação cós mica de fundo é **descoberta** por Penzias e Wilson.

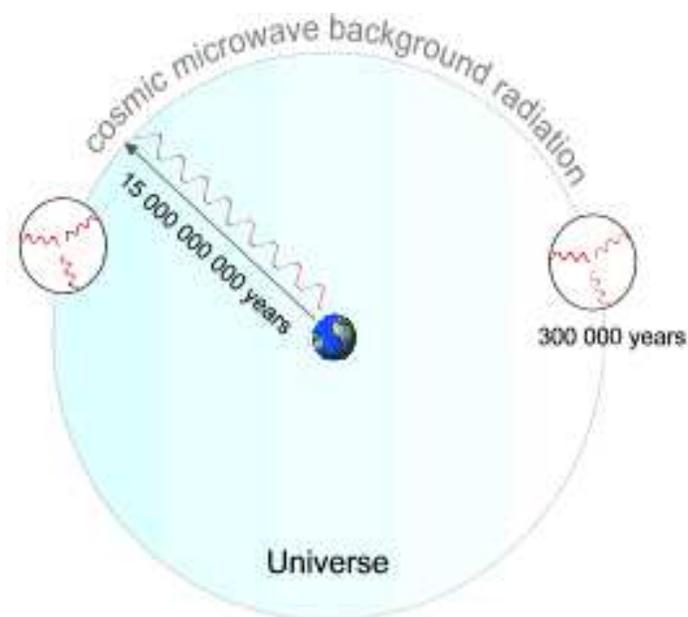


- Hoje em dia utilizam-se satélites: **WMAP**
- Detecta a radiação de fundo à 2.7K e diferenças de temperatura de **micro-Kelvin**.



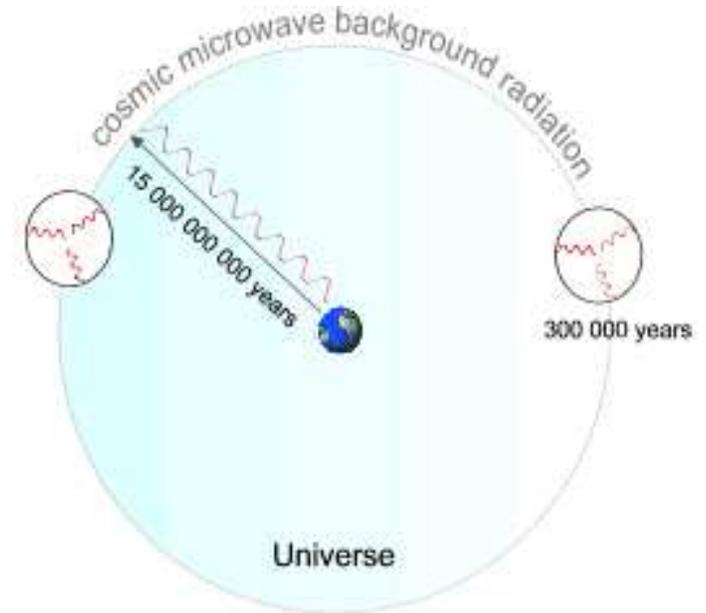
Problemas ...

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



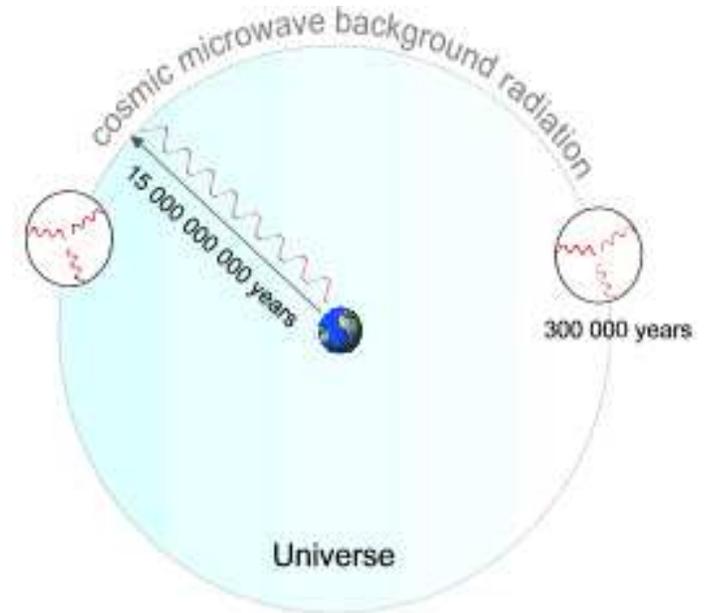
Problemas ...

- 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.



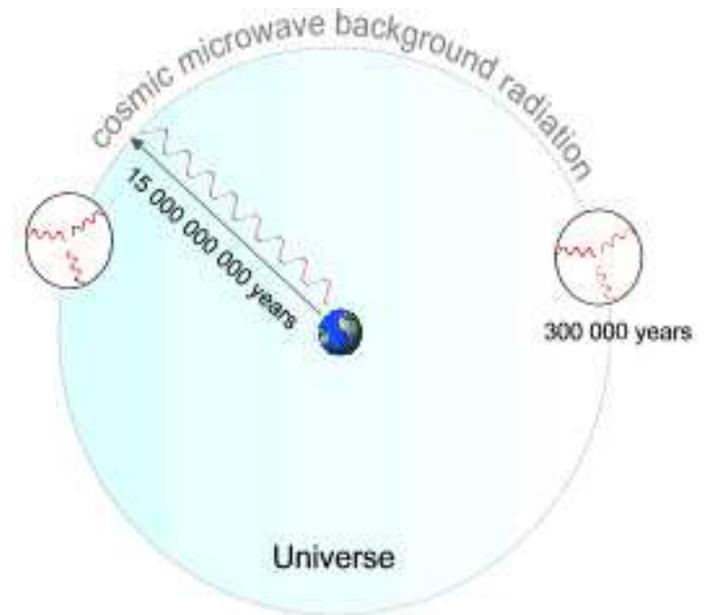
Problemas ...

- 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.



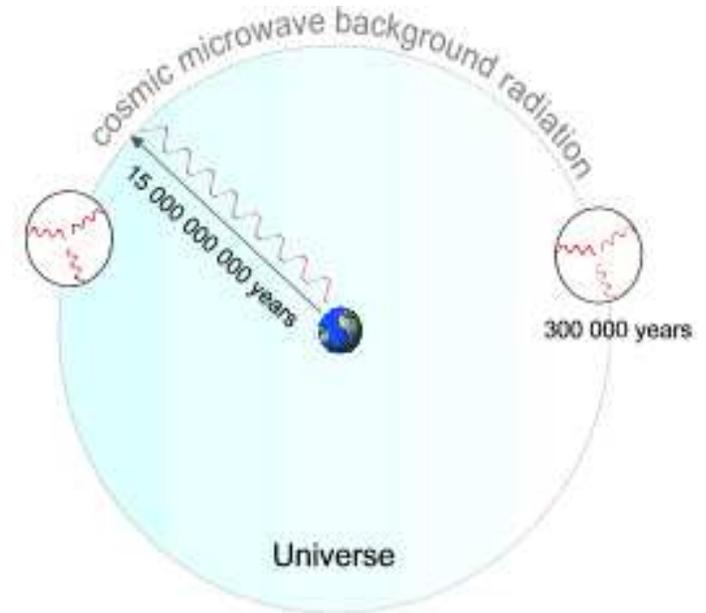
Problemas ...

- 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 14 bilhões de anos.



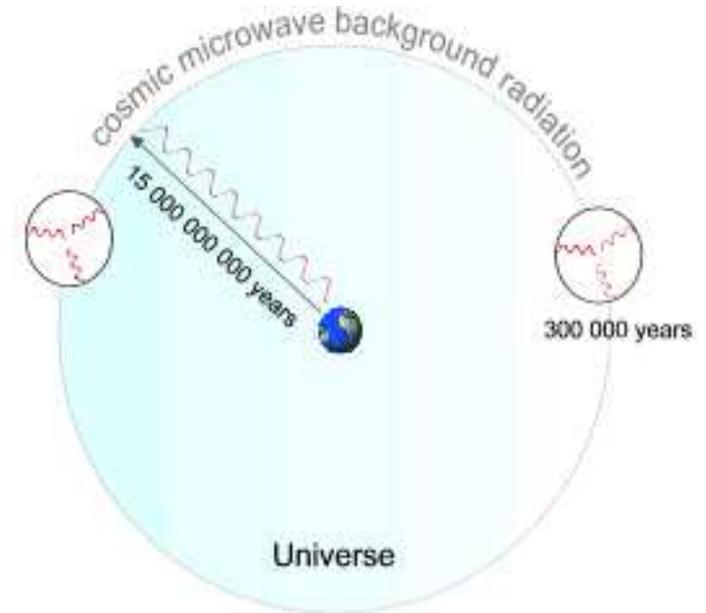
Problemas ...

- 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 14 bilhões de anos.
- Foi emitida quando o Universo era muito mais jovem, cerca de 300 mil anos.



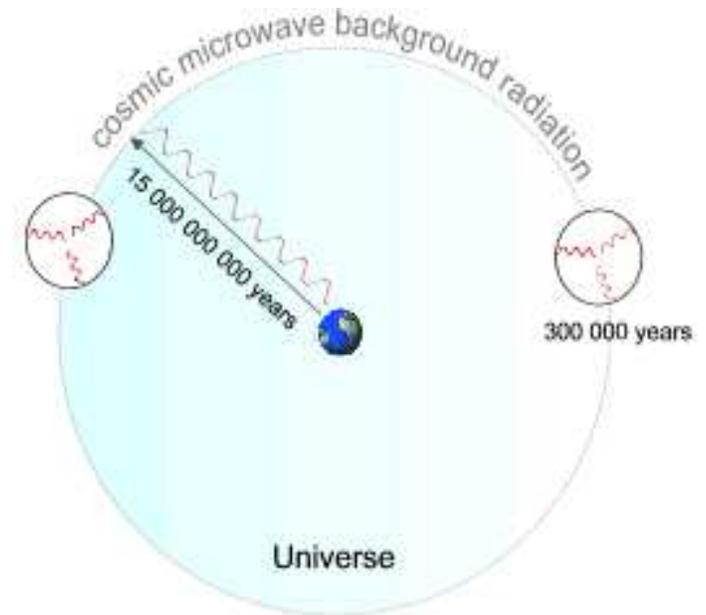
Problemas ...

- 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 14 bilhões de anos.
- 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.



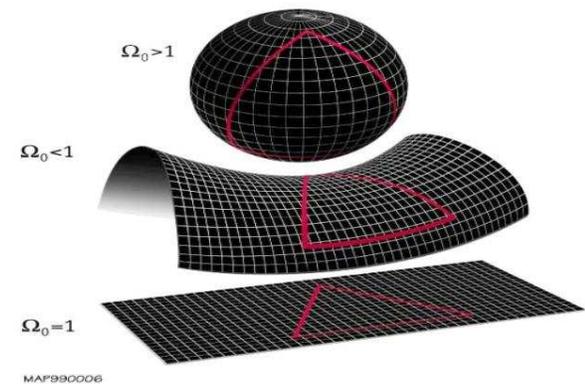
Problemas ...

- 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 14 bilhões de anos.
- 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?**



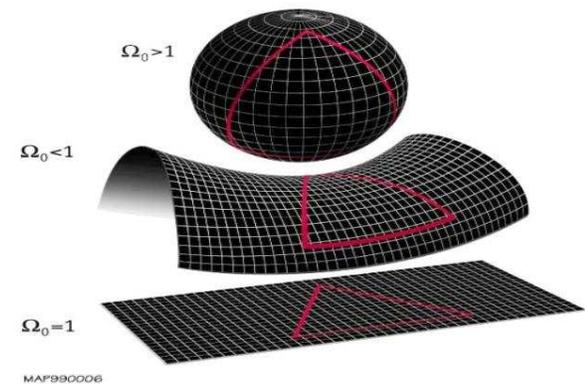
Universo Plano

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



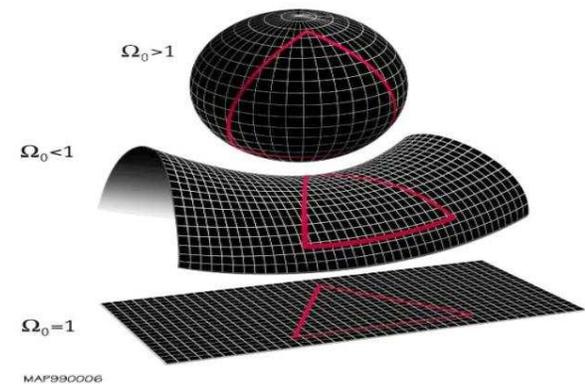
Universo Plano

- 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.



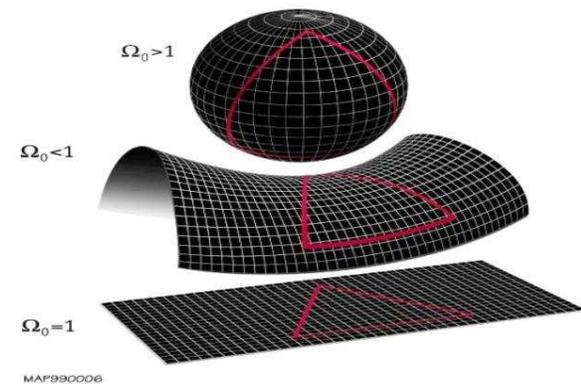
Universo Plano

- 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?



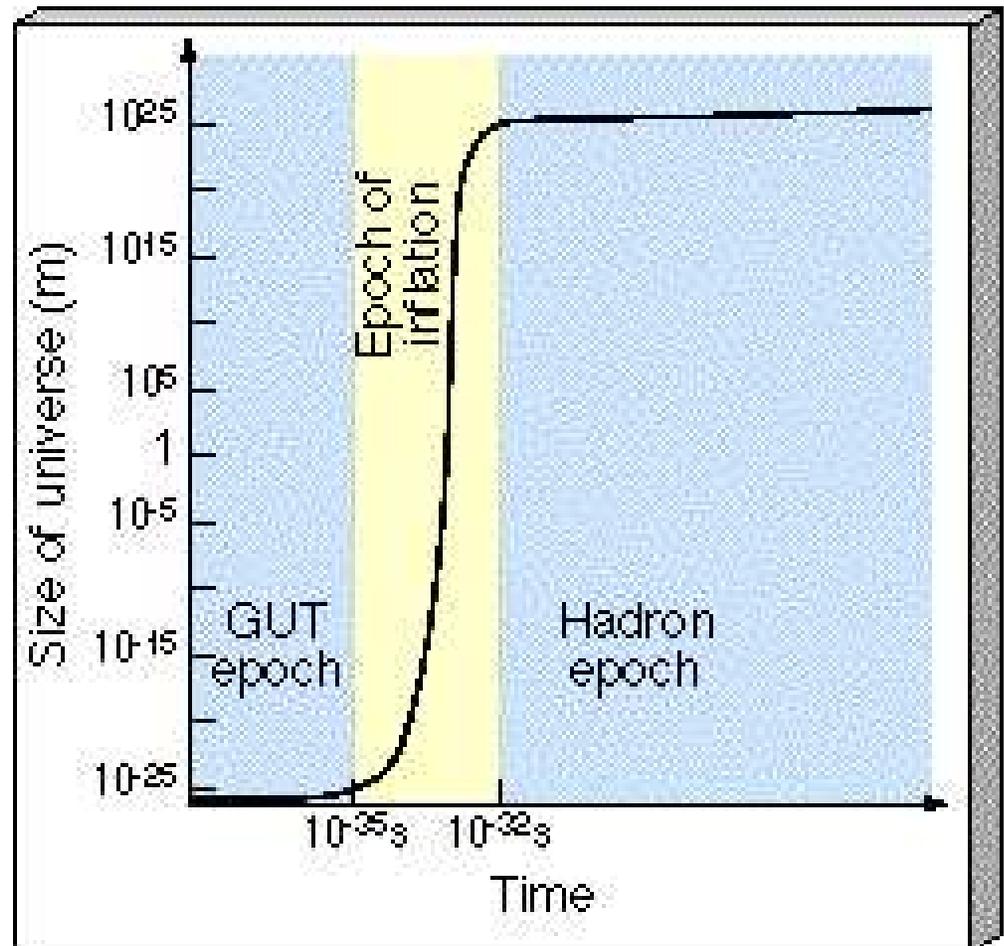
Universo Plano

- 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 ...



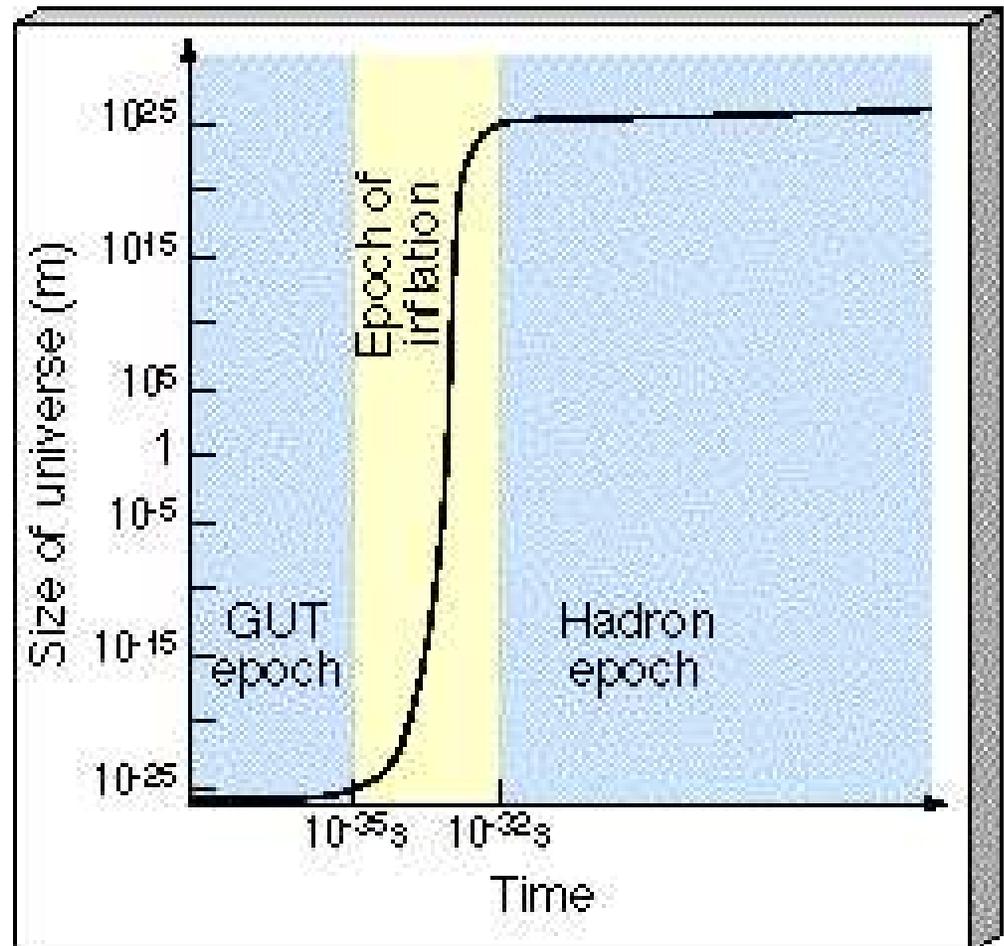
Teoria Inflacionária, 1981

- O Universo passou por uma fase de expansão exponencial.



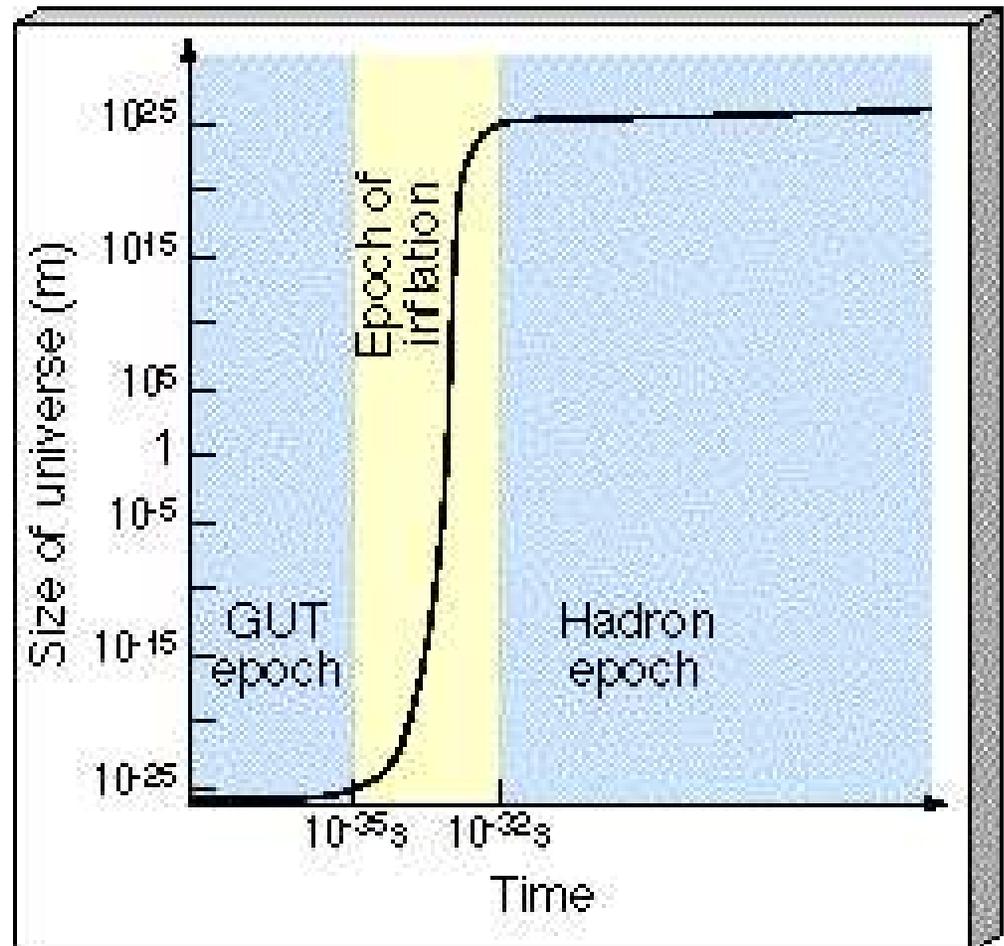
Teoria Inflacionária, 1981

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



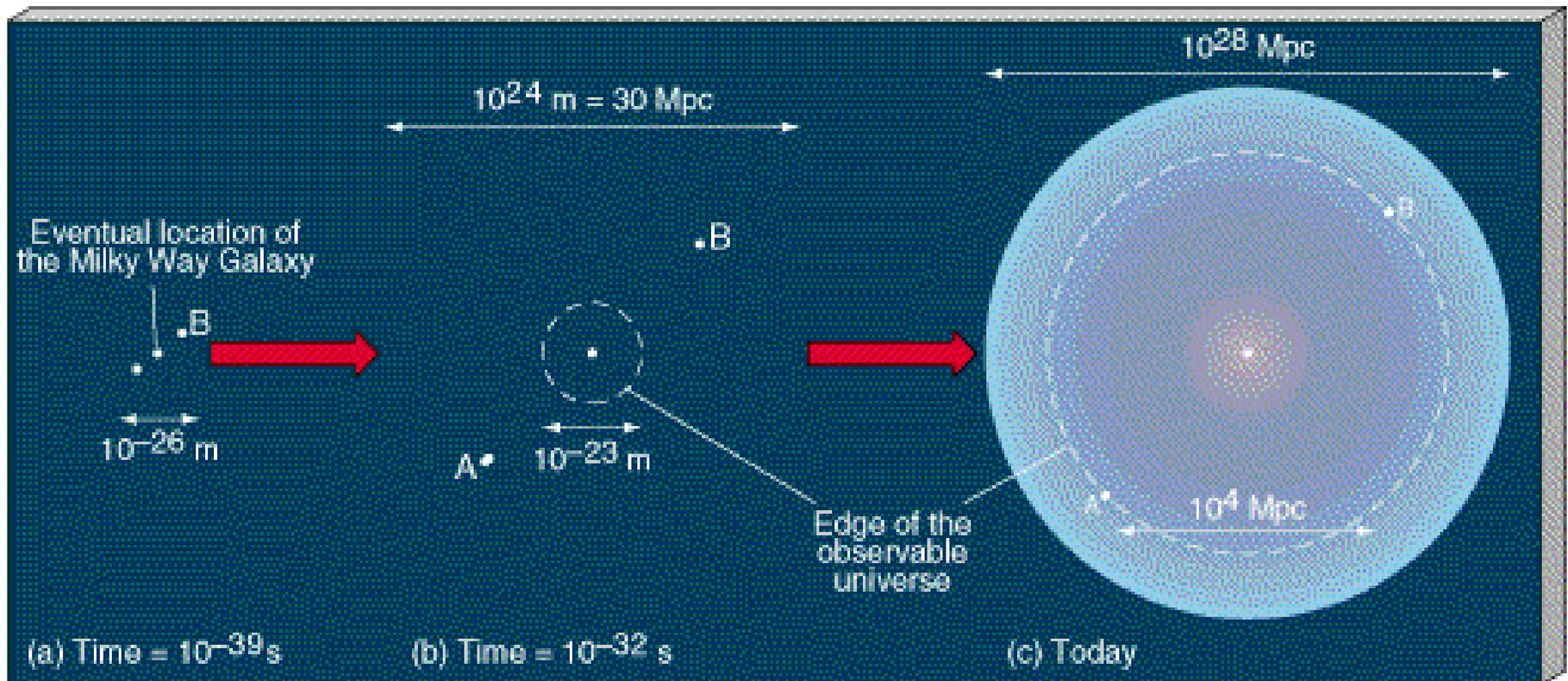
Teoria Inflacionária, 1981

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



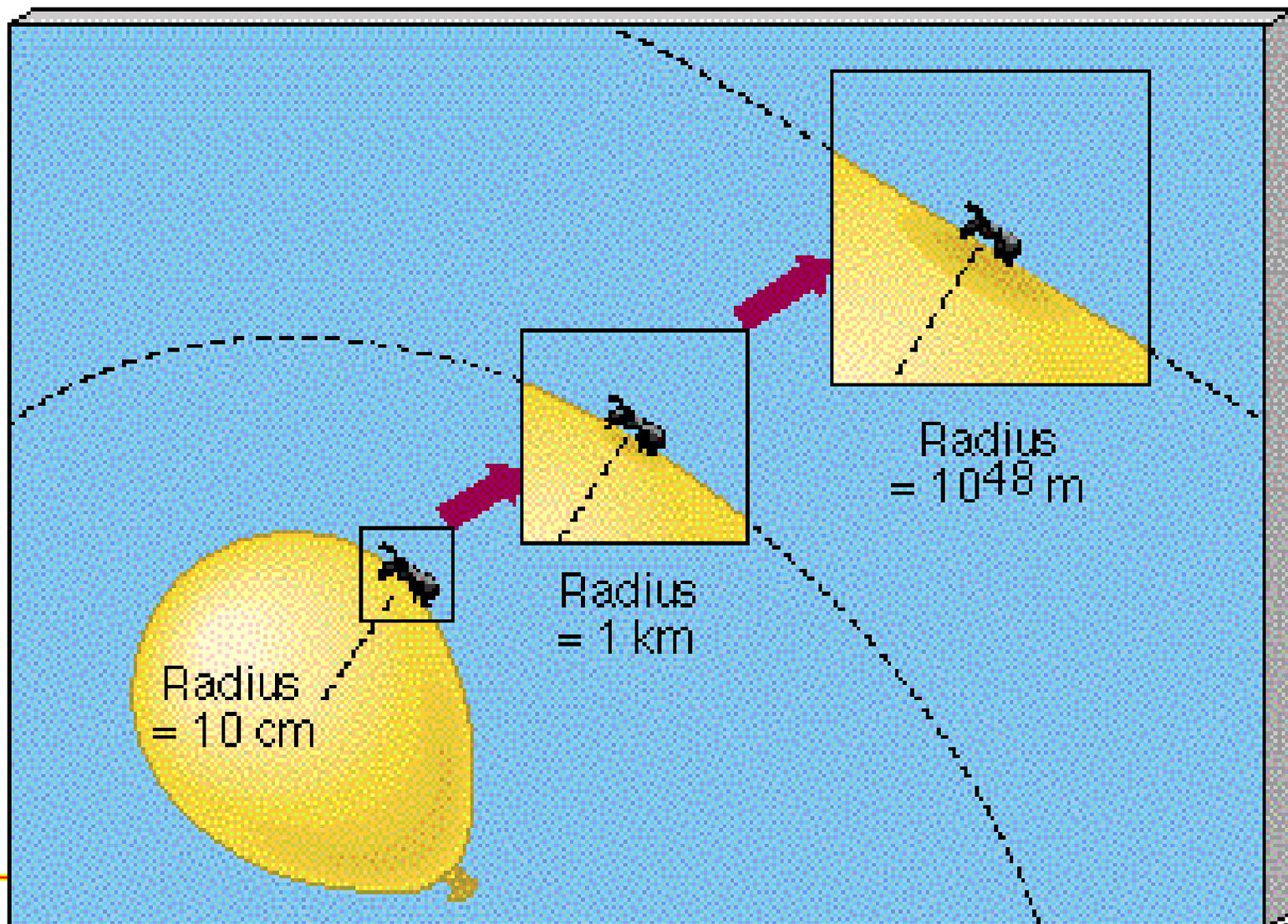
Teoria Inflacionária

- Resolve o problema do horizonte.



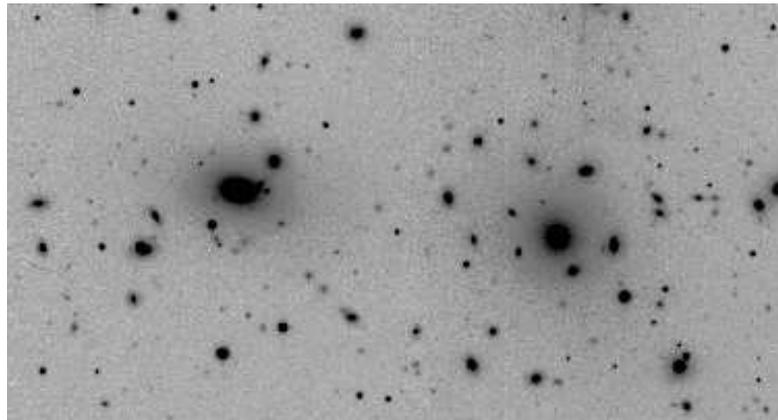
Teoria Inflacionária

- Resolve o problema do Universo plano.



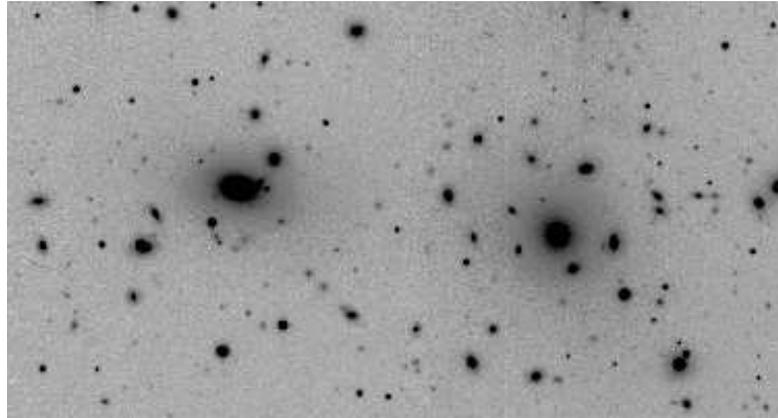
Outro problema: curvas de rotação

- 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

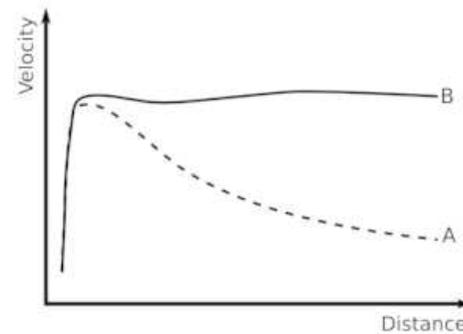
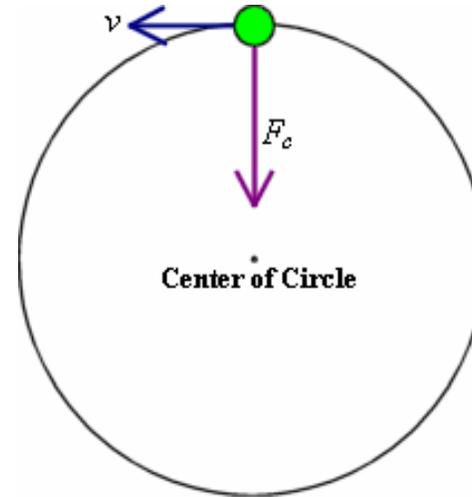
- Em 1933 o aglomerado de galáxias de Coma é estudado.
- O movimento das galáxias **não pode ser explicado** pela atração gravitacional.
- O mesmo acontece com **estrelas na borda das galáxias**.



Curvas de rotação

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

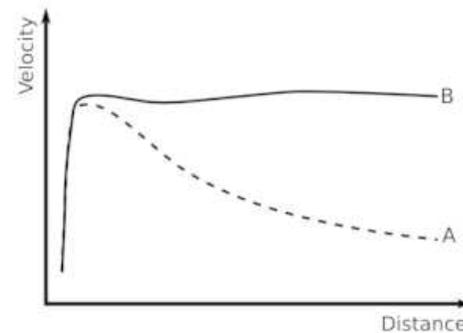
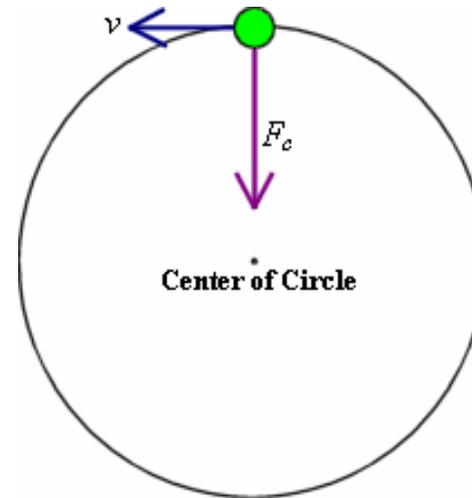


Curvas de rotação

- $\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r}$

- $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$

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



Curvas de rotação

- $\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r}$

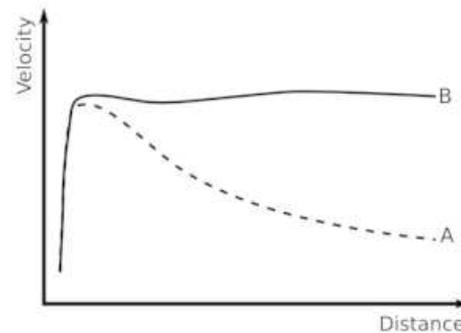
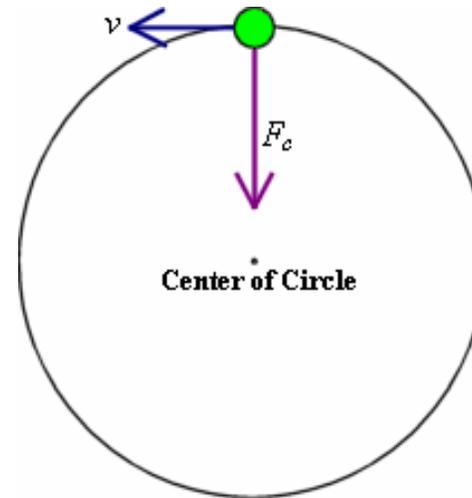
- $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$

- 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

- $\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r}$

- $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$

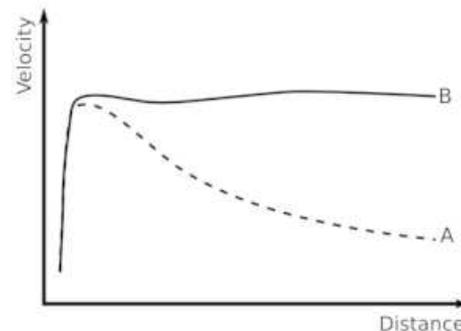
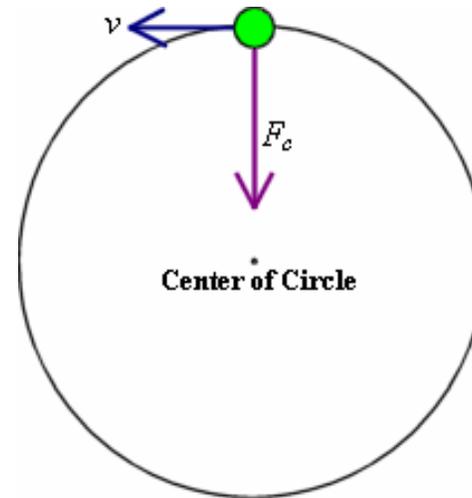
- Como a massa da galáxia $M \sim 1/r^p$ então a velocidade diminui com r .

- 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 .

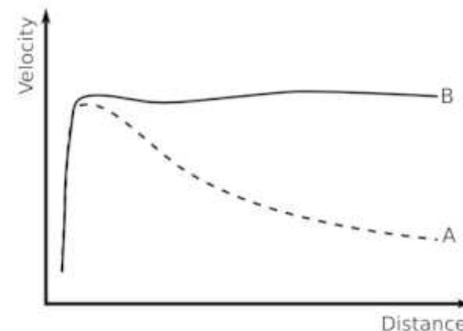
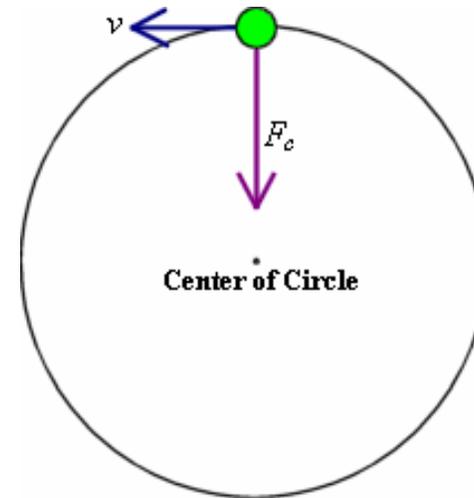
- Velocidade orbital como função da distância ao centro da galáxia.

- 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 **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.
- 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 explicá-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 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.

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**.

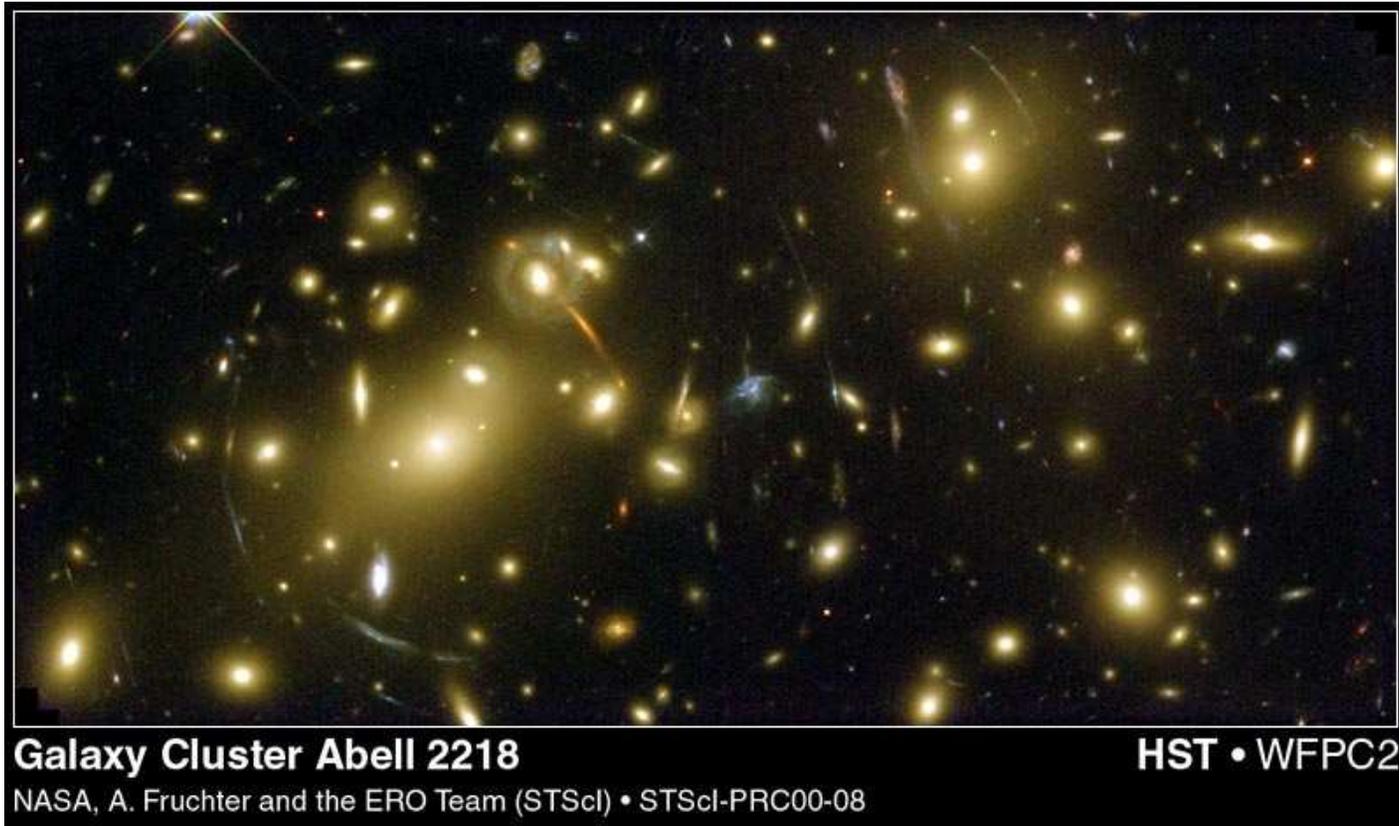
Expansão Acelerada

- Em 1998 é descoberta através da observação de supernovas do tipo IA que a **expansão do Universo é acelerada**.
- Para 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**.
- Outras alternativas mais exóticas existem: quintessência, cosmologia de branas, etc.

Expansão Acelerada

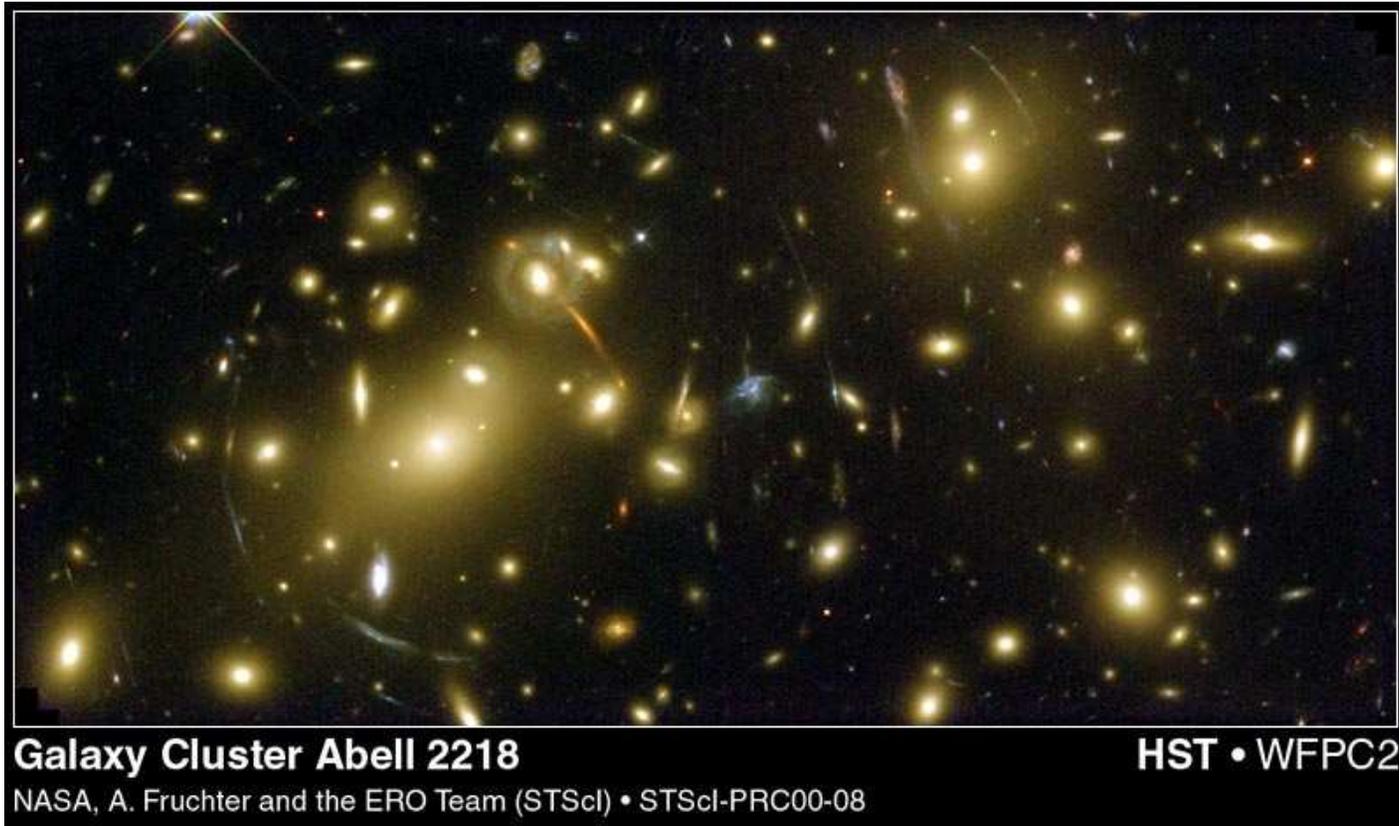
- Em 1998 é descoberta através da observação de supernovas do tipo IA que a **expansão do Universo é acelerada**.
- Para explica-la é necessário postular a existência de uma energia que produza pressão negativa: **a energia escura**.
- Na relatividade geral o efeito de uma pressão negativa é gerar uma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

Lente Gravitacional



- **Efeito lente** no aglomerado de Abell.
- A luz das galáxias é defletida pela gravitação.

Lente Gravitacional



- **Efeito lente** no aglomerado de Abell.
 - A luz das galáxias é defletida pela gravitação.
 - O Dark Energy Survey usará lentes gravitacionais para medir os **efeitos da energia escura** do aglomerado.
-

Big Bang – The Movie

Assista ao Big Bang

Big Rip

- Qual será o destino do Universo?

END OF EVERYTHING

BIG RIP

10⁻¹⁹ seconds before big rip:

Atoms ripped apart

30 minutes before big rip:

Earth explodes

3 months before big rip:

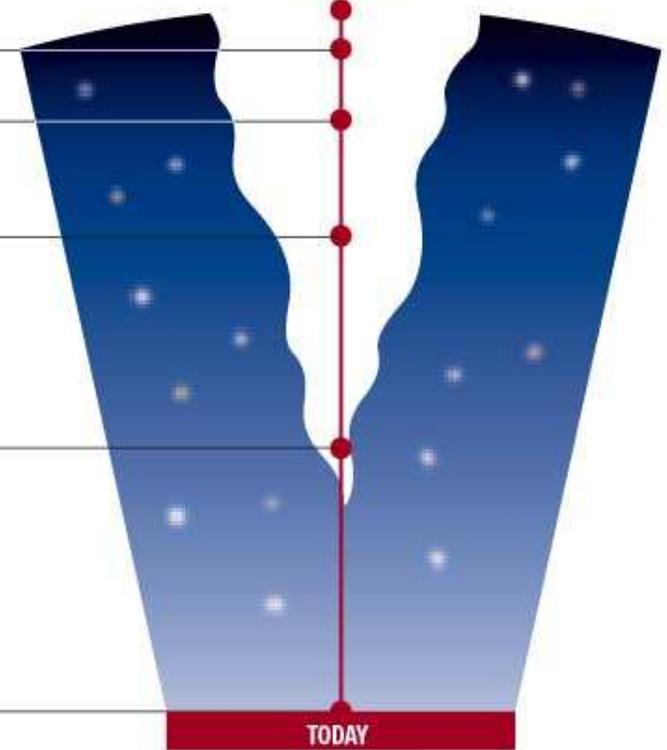
Solar System breaks apart

60 million years before big rip:

Milky Way destroyed

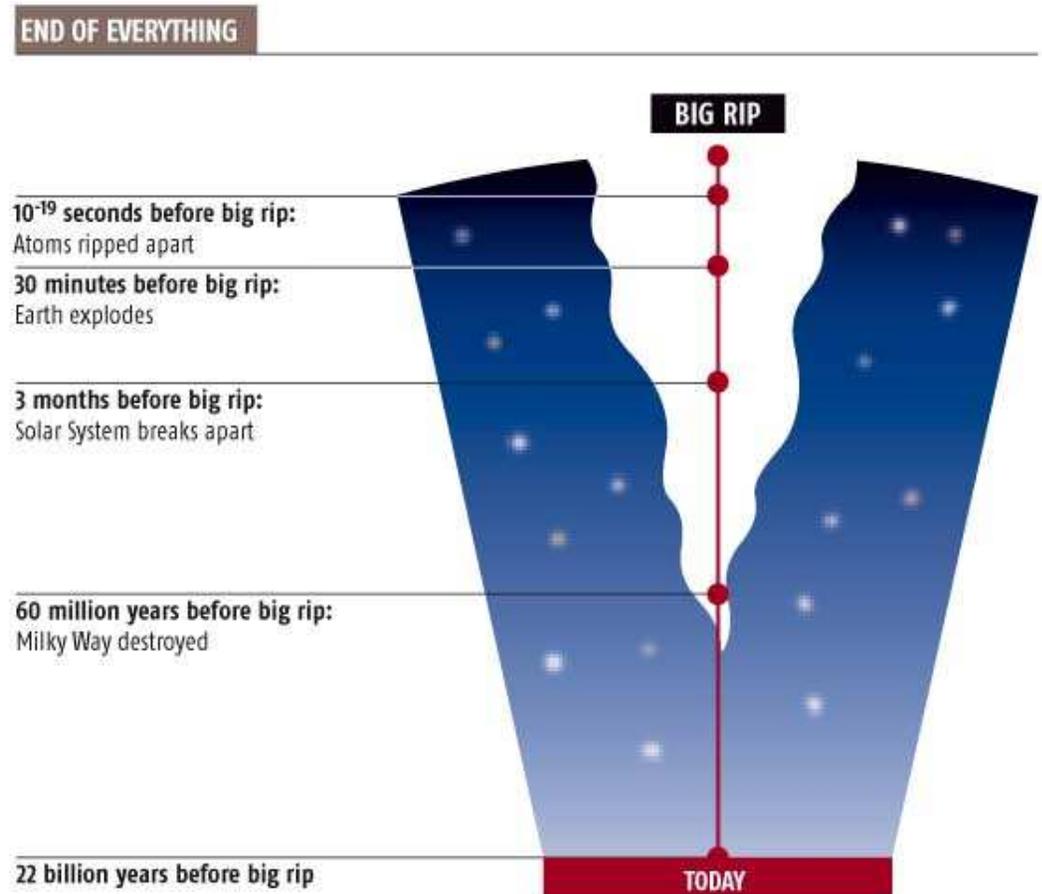
22 billion years before big rip

TODAY

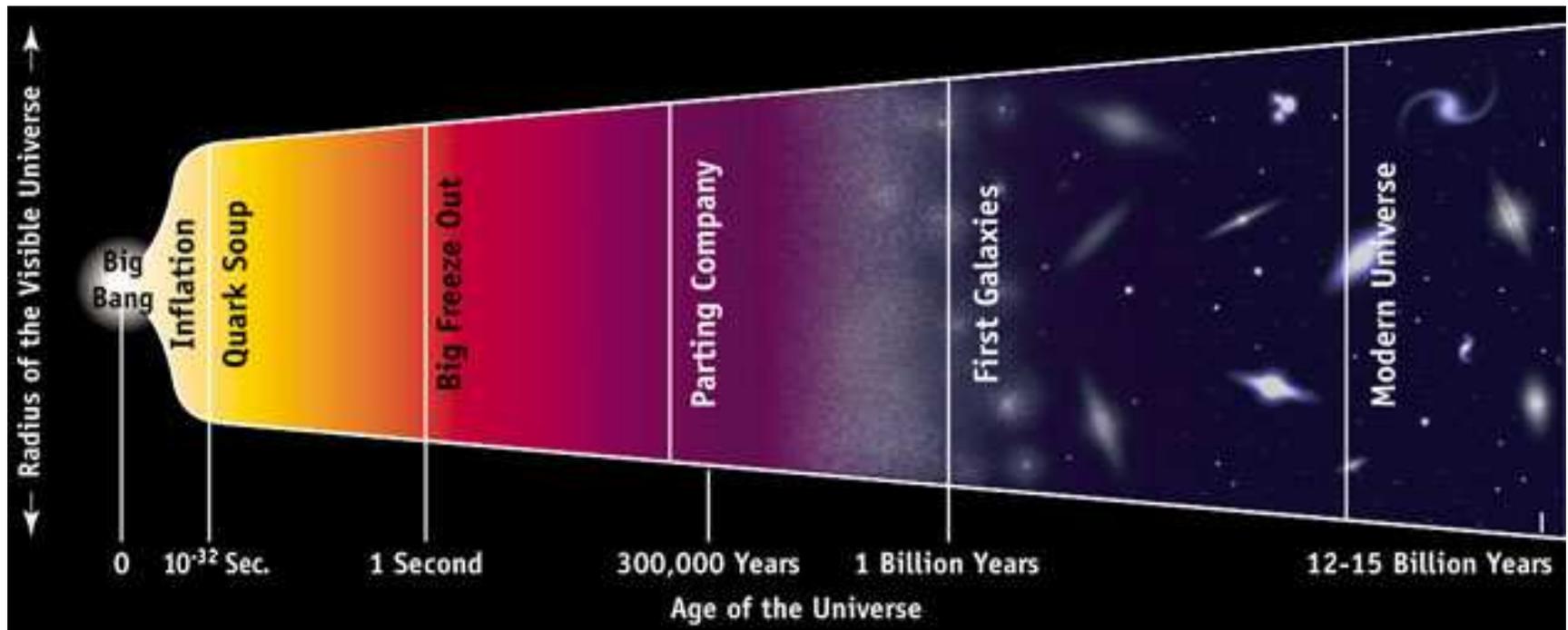


Big Rip

- Qual será o **destino** do Universo?
- 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.



Cosmologia



Para saber mais ...

- M. Gleiser, A Dança do Universo (Cia. das Letras, 1997)
- S. Hawking, O Universo Numa Casca de Noz (Mandarim, 2001)
- J. Barrow, A Origem do Universo (Rocco, 1995)
- J. Silk, O Big Bang (UnB, 1998)
- S. Weinberg, Os Três Primeiros Minutos (Guanabara Dois, 1980)
- A. Guth, O Universo Inflacionário (Campus, 1997)
- I. Assimov, O Universo (Bloch, 1972)
- <http://www.fma.if.usp.br/~rivelles/>
- <http://rivelles.blogspot.com>

Bibliografia

- S. Weinberg, Gravitation and Cosmology (Wiley, 1974)
- B. F. Schutz, A First Course in General Relativity (Cambridge, 1985)
- P. A. M. Dirac, General Theory of Relativity (Wiley, 1975)
- R. Adler, M. Bazin, M. Schifer, Introduction to General Relativity (McGraw-Hill, 1975)
- I. R. Kenyon, General Relativity (Oxford, 1994)