

Dark Energy
Accelerated Expansion

Afterglow Light
Pattern
375,000 yrs.

Dark Ages

Development of
Galaxies, Planets, etc.

Inflation

A expansão observacional das fronteiras do Universo:

Hubble e a expansão do Universo

Quantum
Fluctuations

1st Stars
about 400 million yrs.

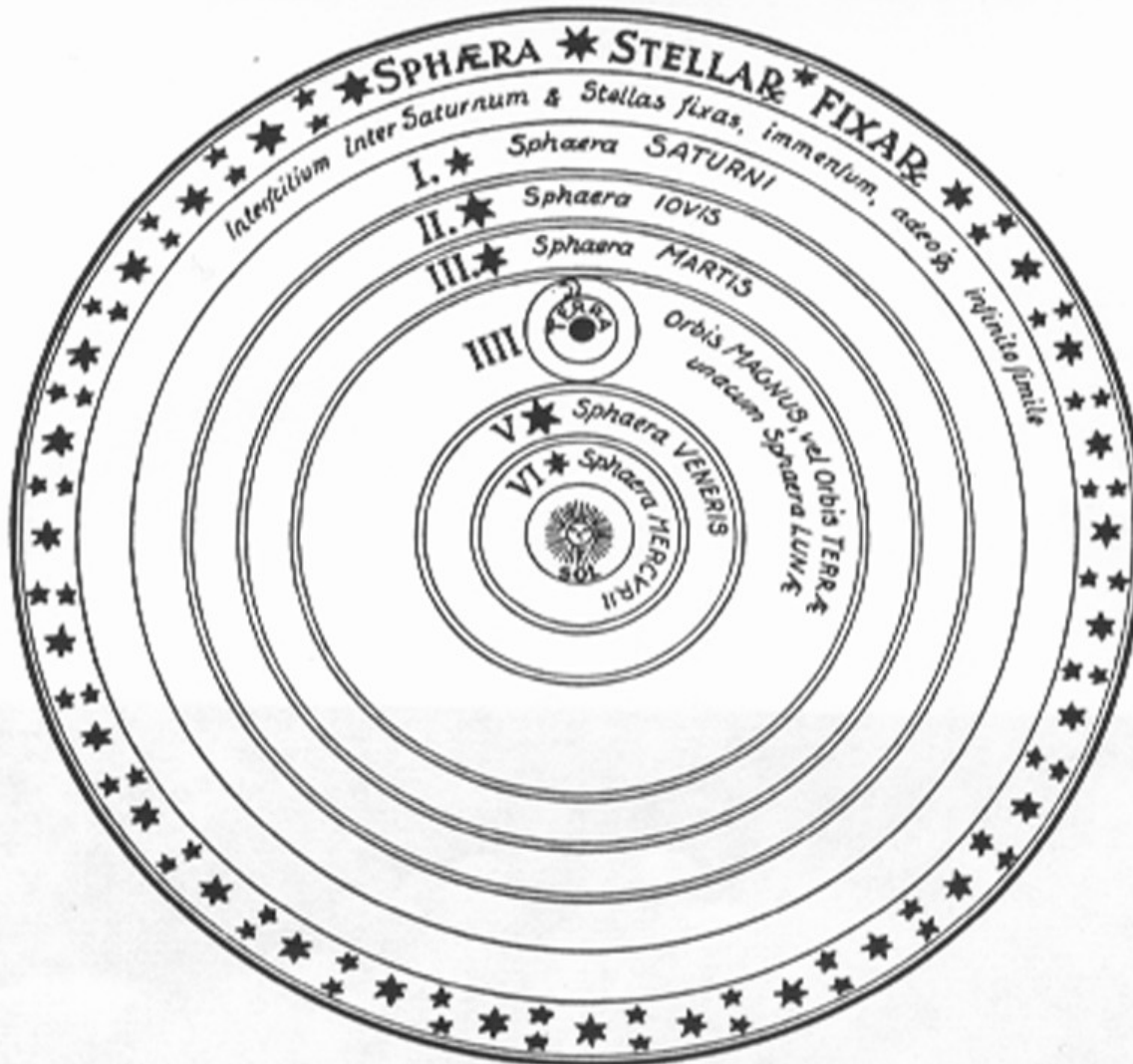
Big Bang Expansion

13.77 billion years



O Universo dos Antigos

The Starry Message

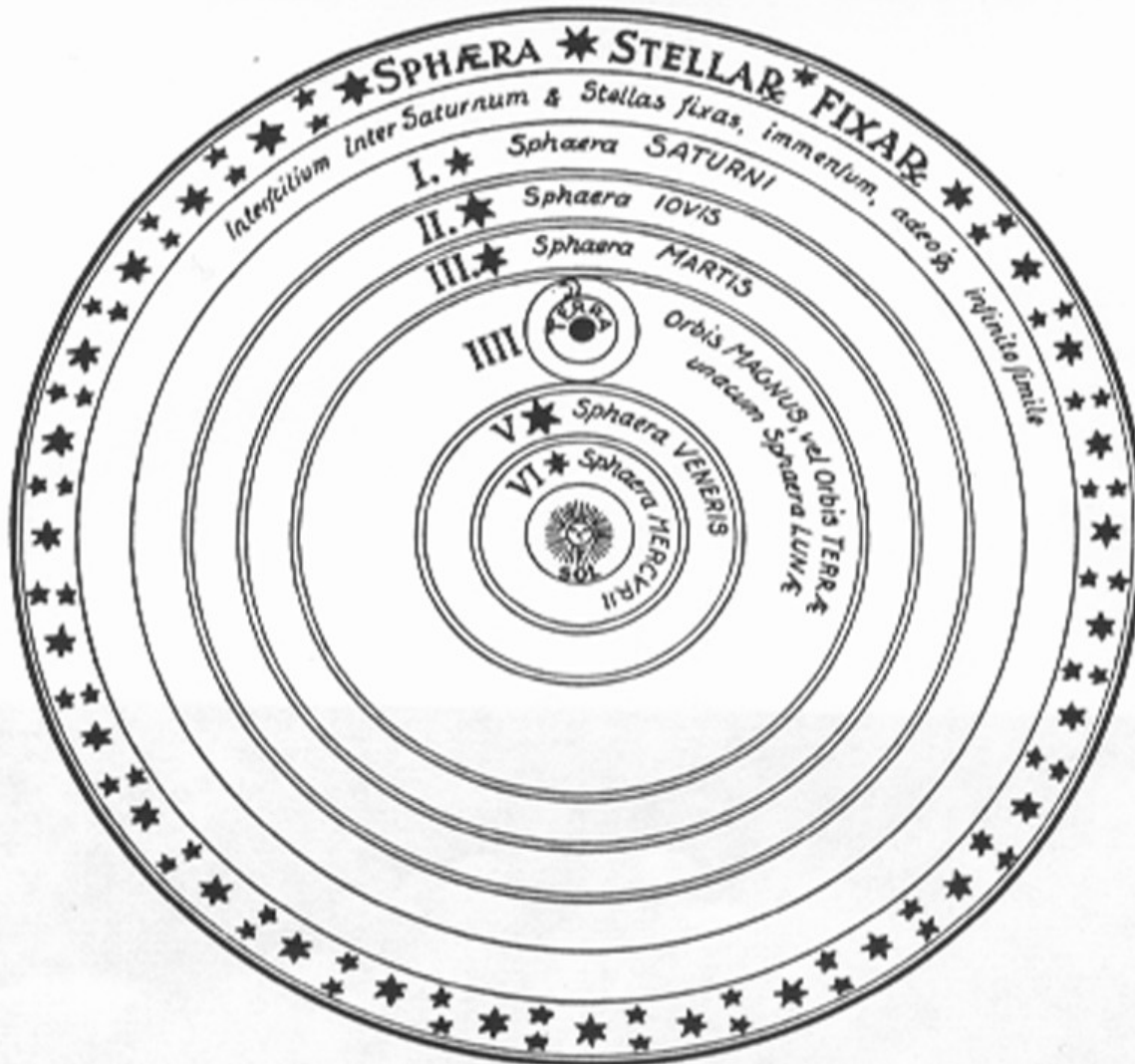


→ Por muito tempo, a humanidade acreditava que todas as estrelas estavam a uma mesma distância, constituindo uma esfera de estrelas fixas.

4.5 Kepler's diagram of a bounded Copernican universe in the *Prodomus to the Mysterious Universe* (1596). In *Epitome of Copernican Astronomy*, his last major work, he maintained his belief in a bounded universe.

O Universo dos Antigos

The Starry Message



4.5 Kepler's diagram of a bounded Copernican universe in the *Prodomus to the Mysterious Universe* (1596). In *Epitome of Copernican Astronomy*, his last major work, he maintained his belief in a bounded universe.

→ Por muito tempo, a humanidade acreditava que todas as estrelas estavam a uma mesma distância, constituindo uma esfera de estrelas fixas.

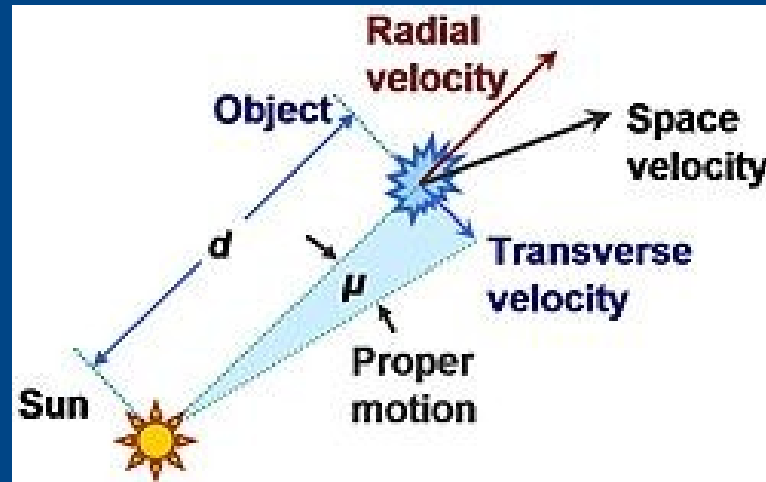
→ A principal razão para isso era a impossibilidade de medir-se paralaxe, o que levava os pensadores a acreditarem que as estrelas estavam todas a uma mesma distância da Terra.

Rompendo a Esfera Celeste

→ Antes da paralaxe, uma descoberta muito importante foi feita e contribuiu para uma mudança da concepção de Universo:

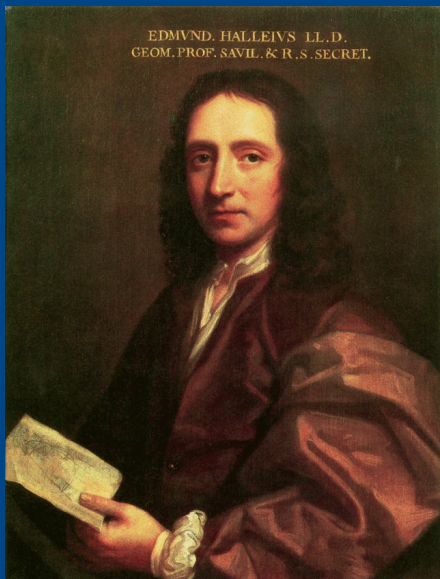
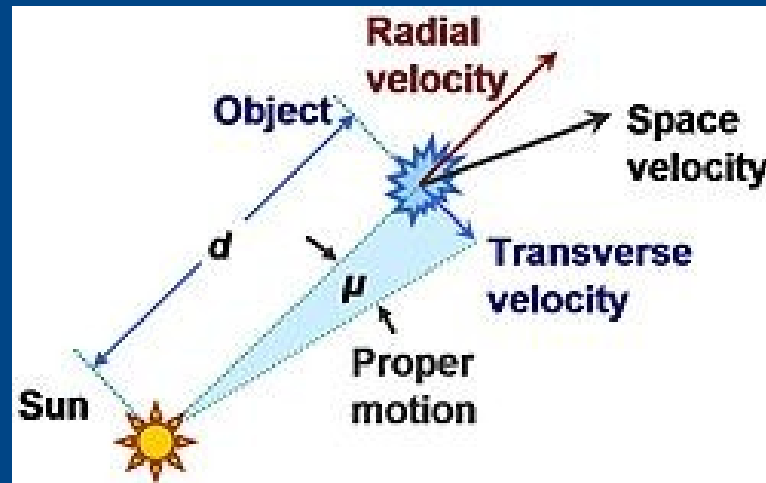
Rompendo a Esfera Celeste

→ Antes da paralaxe, uma descoberta muito importante foi feita e contribuiu para uma mudança da concepção de Universo: o *movimento próprio* das estrelas.



Rompendo a Esfera Celeste

→ Antes da paralaxe, uma descoberta muito importante foi feita e contribuiu para uma mudança da concepção de Universo: o *movimento próprio* das estrelas.



→ Edmond Halley (1656-1742) descobriu, em 1718, o movimento próprio de Sirius, Arcturus e Aldebarão, ao comparar suas medidas astrométricas com as do *Almagesto*, e notar que suas posições haviam mudado.

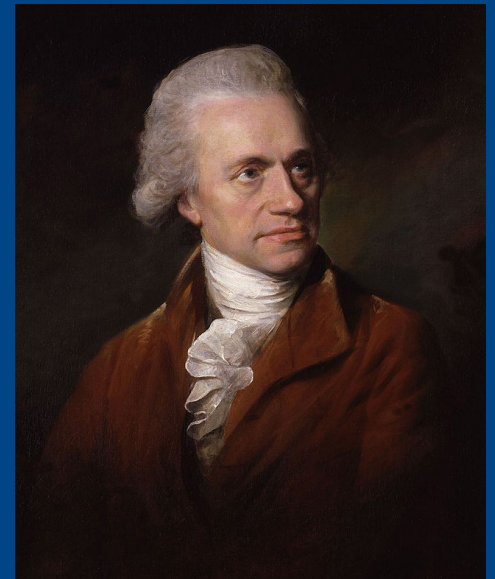
Sirius, por exemplo, movera-se 30' nesses 1800 anos.

Rompendo a Esfera Celeste



Immanuel Kant (1724-1804)

William Herschel (1738-1822)



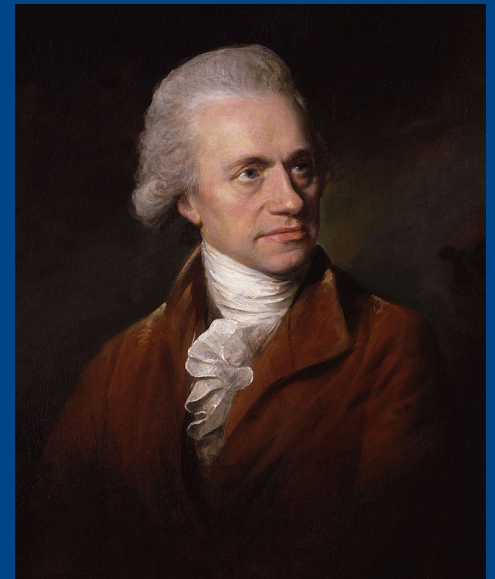
Rompendo a Esfera Celeste



Immanuel Kant (1724-1804)

→ Deduziu que a Via-Láctea era composta por um disco de estrelas mantidas juntas por interação gravitacional, de forma similar ao Sistema Solar, mas em escala muito maior.

William Herschel (1738-1822)



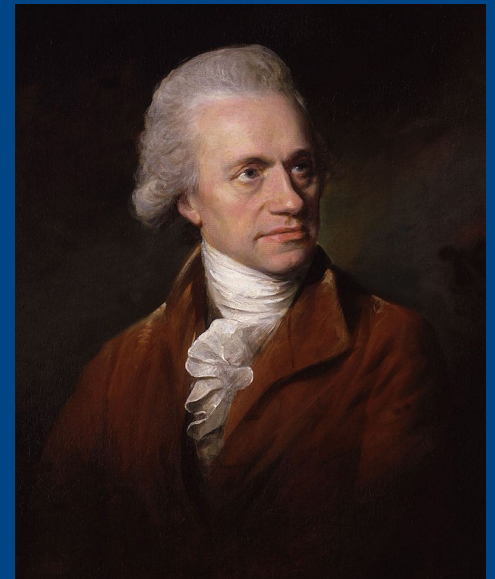
Rompendo a Esfera Celeste



Immanuel Kant (1724-1804)

- Deduziu que a Via-Láctea era composta por um disco de estrelas mantidas juntas por interação gravitacional, de forma similar ao Sistema Solar, mas em escala muito maior.
- Propôs que outras *nebulosas* eram também discos de estrelas, mas distantes.

William Herschel (1738-1822)



Rompendo a Esfera Celeste

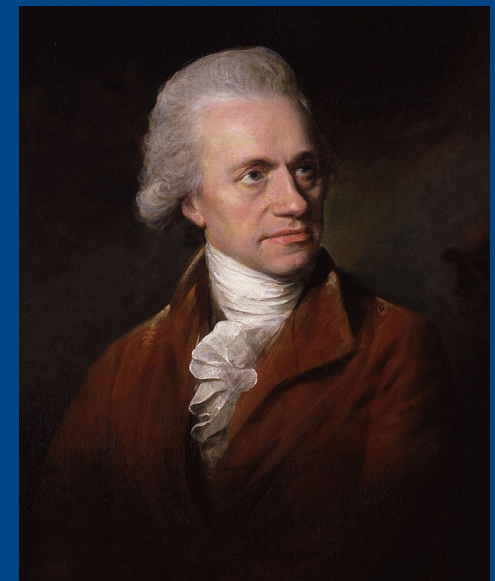


Immanuel Kant (1724-1804)

- Deduziu que a Via-Láctea era composta por um disco de estrelas mantidas juntas por interação gravitacional, de forma similar ao Sistema Solar, mas em escala muito maior.
- Propôs que outras *nebulosas* eram também discos de estrelas, mas distantes.

William Herschel (1738-1822)

- Foi o primeiro a determinar que o Sistema Solar move-se no espaço e determinou a direção aproximada desse movimento.



Rompendo a Esfera Celeste

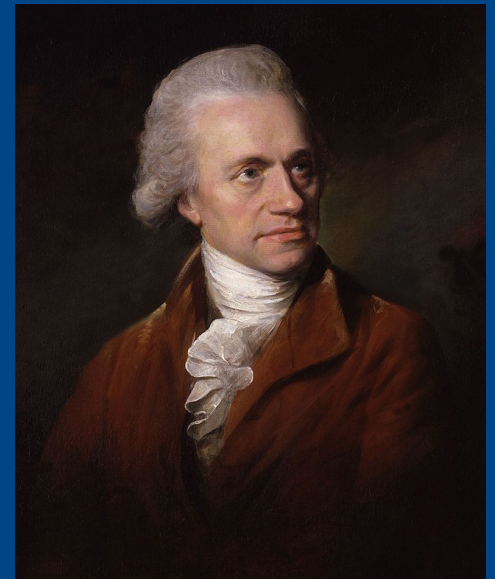


Immanuel Kant (1724-1804)

- Deduziu que a Via-Láctea era composta por um disco de estrelas mantidas juntas por interação gravitacional, de forma similar ao Sistema Solar, mas em escala muito maior.
- Propôs que outras *nebulosas* eram também discos de estrelas, mas distantes.

William Herschel (1738-1822)

- Foi o primeiro a determinar que o Sistema Solar move-se no espaço e determinou a direção aproximada desse movimento.
- Foi o primeiro a determinar um estrutura para a Via-Láctea.



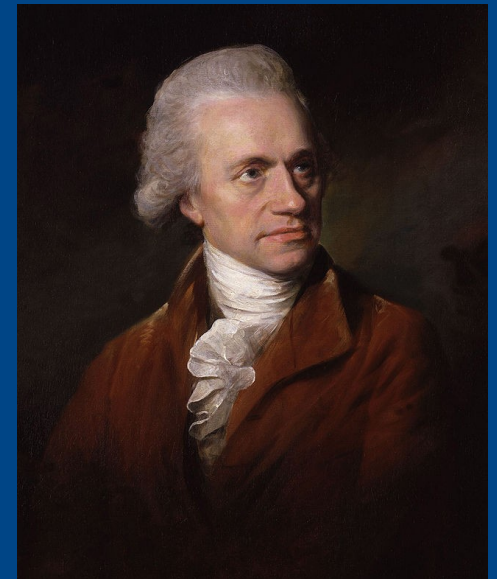
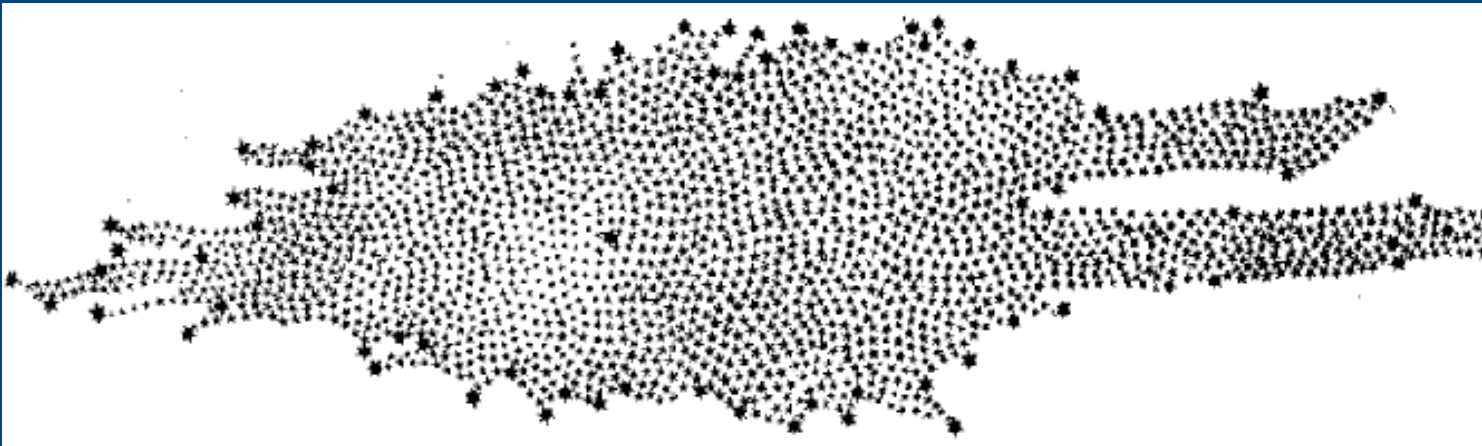
Rompendo a Esfera Celeste



Immanuel Kant (1724-1804)

- Deduziu que a Via-Láctea era composta por um disco de estrelas mantidas juntas por interação gravitacional, de forma similar ao Sistema Solar, mas em escala muito maior.
- Propôs que outras *nebulosas* eram também discos de estrelas, mas distantes.

William Herschel (1738-1822)



Rompendo a Esfera Celeste



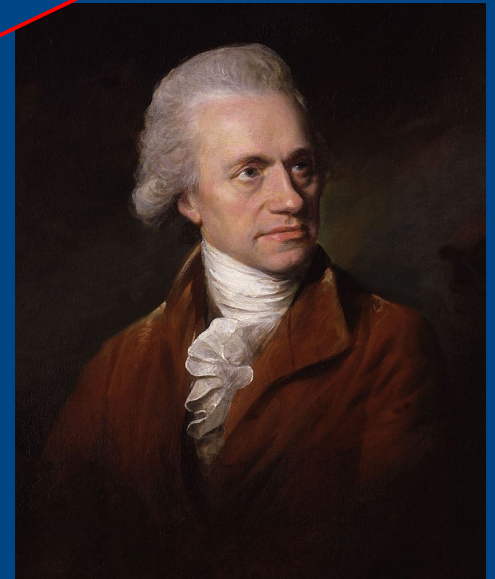
Immanuel Kant (1724-1804)

→ Deduziu que a Via-Láctea era um disco de estrelas mantido unido por uma força gravitacional, de modo semelhante ao que ocorre com as galáxias, mas

→ Foi o primeiro a determinar a direção do movimento dos planetas em torno do Sol.

→ Foi o primeiro a determinar uma estrutura para a Via-Láctea.

A Astronomia foi pela primeira vez estendida para além do Sistema Solar, para os campos de Astronomia Galáctica e Extragaláctica.



O Grande Debate (1920)

Debate Shapley-Curtis

→ Ocorreu entre os astrônomos Harlow Shapley e Heber Curtis no auditório do Museu Nacional de História Natural dos Estados Unidos.



O Grande Debate (1920)

Debate Shapley-Curtis



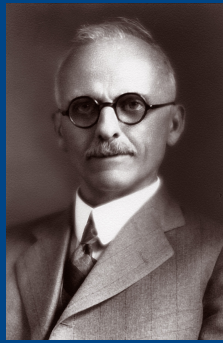
Shapley

Nebulosas são parte da Via-Láctea



Curtis

Nebulosas são outras galáxias



O Grande Debate (1920)

Debate Shapley-Curtis



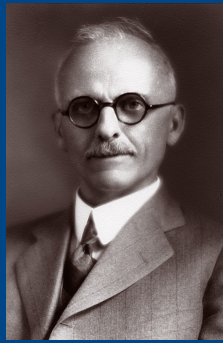
Shapley

Nebulosas são parte da Via-Láctea



Curtis

Nebulosas são outras galáxias



→ Se Andrômeda não fosse parte da Via-Láctea, sua distância deveria ser da ordem de 10^8 anos-luz.

O Grande Debate (1920)

Debate Shapley-Curtis



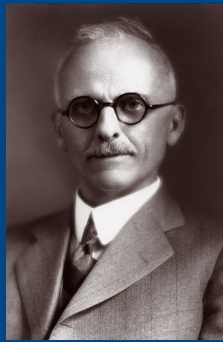
Shapley

Nebulosas são parte da Via-Láctea



Curtis

Nebulosas são outras galáxias



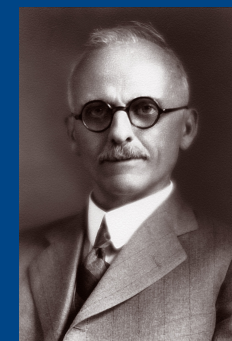
→ Se Andrômeda não fosse parte da Via-Láctea, sua distância deveria ser da ordem de 10^8 anos-luz.

→ Adriaan van Maanen alegava ter observado a rotação da (hoje) galáxia do Cata-vento. Se ela fosse uma galáxia distante, isso implicaria uma velocidade muitíssimo alta.



O Grande Debate (1920)

Debate Shapley-Curtis



Shapley

Nebulosas são parte da Via-Láctea



Curtis

Nebulosas são outras galáxias

→ Se Andrômeda não fosse parte da Via-Láctea, sua distância deveria ser da ordem de 10^8 anos-luz.

→ Adriaan van Maanen alegava ter observado a rotação da (hoje) galáxia do Cata-vento. Se ela fosse uma galáxia distante, isso implicaria uma velocidade muitíssimo alta.

→ A observação de uma nova em Andrômeda ofuscou a nebulosa inteira, o que parecia uma emissão de energia impossível.

O Grande Debate (1920)

Debate Shapley-Curtis



Shapley

Nebulosas são parte da Via-Láctea

→ Se Andrômeda não fosse parte da Via-Láctea, sua distância deveria ser da ordem de 10^8 anos-luz.

→ Adriaan van Maanen alegava ter observado a rotação da (hoje) galáxia do Cata-vento. Se ela fosse uma galáxia distante, isso implicaria uma velocidade muitíssimo alta.

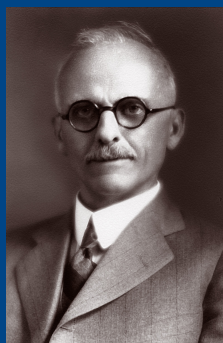
→ A observação de uma nova em Andrômeda ofuscou a nebulosa inteira, o que parecia uma emissão de energia impossível.



Curtis

Nebulosas são outras galáxias

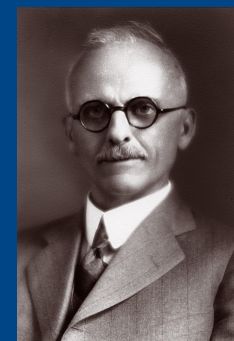
→ Ocorriam mais novas em Andrômeda do que na Via-Láctea. Por que esse evento ocorreria mais em uma pequena porção da galáxia do que em todo o restante?





O Grande Debate (1920)

Debate Shapley-Curtis



Shapley

Nebulosas são parte da Via-Láctea

→ Se Andrômeda não fosse parte da Via-Láctea, sua distância deveria ser da ordem de 10^8 anos-luz.

→ Adriaan van Maanen alegava ter observado a rotação da (hoje) galáxia do Cata-vento. Se ela fosse uma galáxia distante, isso implicaria uma velocidade muitíssimo alta.

→ A observação de uma nova em Andrômeda ofuscou a nebulosa inteira, o que parecia uma emissão de energia impossível.



Curtis

Nebulosas são outras galáxias

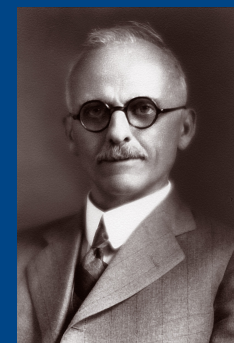
→ Ocorriam mais novas em Andrômeda do que na Via-Láctea. Por que esse evento ocorreria mais em uma pequena porção da galáxia do que em todo o restante?

→ Citou pontos escuros presentes em outras nebulosas, similares às nuvens de poeira na Via-Láctea.



O Grande Debate (1920)

Debate Shapley-Curtis



Shapley

Nebulosas são parte da Via-Láctea

→ Se Andrômeda não fosse parte da Via-Láctea, sua distância deveria ser da ordem de 10^8 anos-luz.

→ Adriaan van Maanen alegava ter observado a rotação da (hoje) galáxia do Cata-vento. Se ela fosse uma galáxia distante, isso implicaria uma velocidade muitíssimo alta.

→ A observação de uma nova em Andrômeda ofuscou a nebulosa inteira, o que parecia uma emissão de energia impossível.



Curtis

Nebulosas são outras galáxias

→ Ocorriam mais novas em Andrômeda do que na Via-Láctea. Por que esse evento ocorreria mais em uma pequena porção da galáxia do que em todo o restante?

→ Citou pontos escuros presentes em outras nebulosas, similares às nuvens de poeira na Via-Láctea.

→ Argumentou que os *redshifts* medidos para as nebulosas eram muito grandes.

O Grande Debate (1920)

Debate Shapley-Curtis



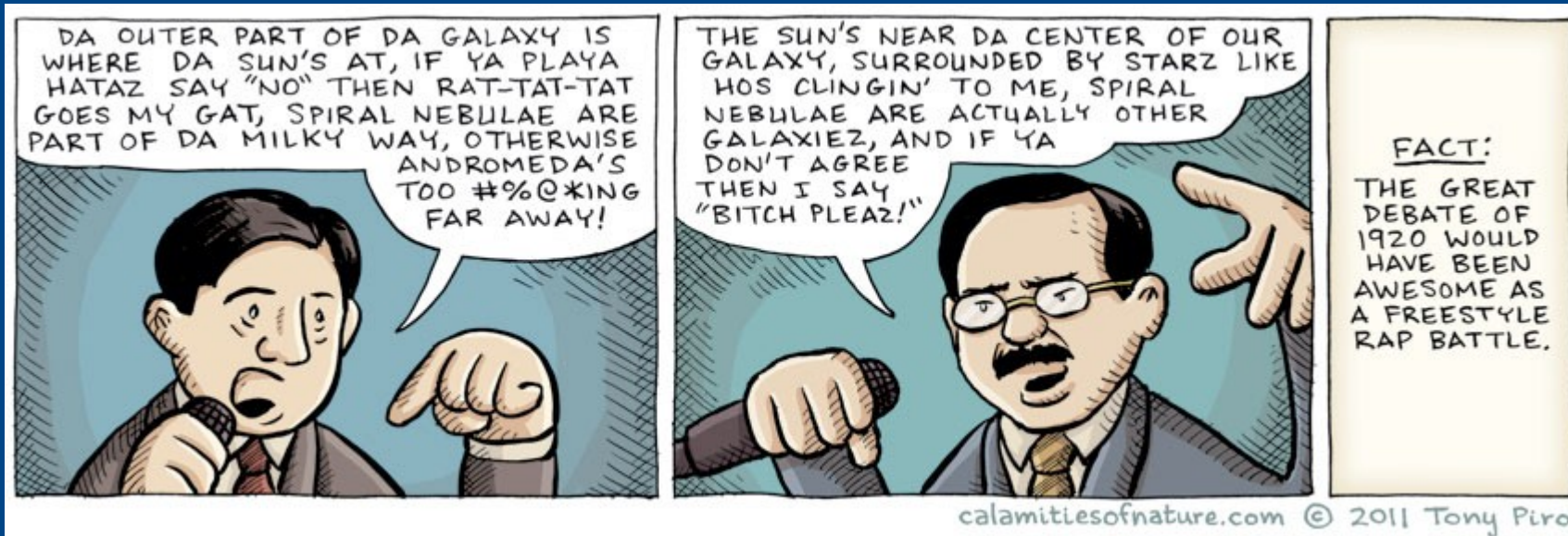
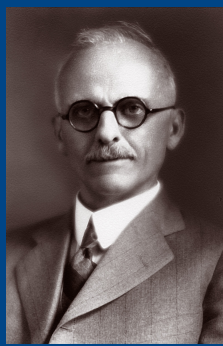
Shapley

Nebulosas são parte da Via-Láctea



Curtis

Nebulosas são outras galáxias



O Grande Debate (1920)

Debate Shapley-Curtis



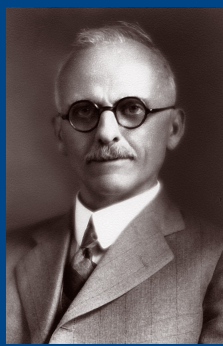
Shapley

Nebulosas são parte da Via-Láctea



Curtis

Nebulosas são outras galáxias



RESULTADO: empate...

Era preciso determinar com precisão as distâncias.

Edwin Hubble (1889-1953)

→ Nasceu em 20/11/1889 em Marschfield,
Missouri (EUA).



Edwin Hubble (1889-1953)



- Nasceu em 20/11/1889 em Marschfield, Missouri (EUA).
- Durante juventude, destacou-se como atleta, tendo jogado beisebol, futebol americano e basquete. Também era corredor, tendo ganhado sete primeiros lugares e um terceiro em único evento de atletismo em 1906.



Edwin Hubble (1889-1953)

- Nasceu em 20/11/1889 em Marschfield, Missouri (EUA).
- Durante juventude, destacou-se como atleta, tendo jogado beisebol, futebol americano e basquete. Também era corredor, tendo ganhado sete primeiros lugares e um terceiro em único evento de atletismo em 1906.
- Obteve o título de bacharel em Ciências pela Universidade de Chicago em 1910. Depois, seguiu para Oxford, onde inicialmente estudou Direito (a pedido de seu pai) e, depois, Literatura e Espanhol.



Edwin Hubble (1889-1953)

- Nasceu em 20/11/1889 em Marschfield, Missouri (EUA).
- Durante juventude, destacou-se como atleta, tendo jogado beisebol, futebol americano e basquete. Também era corredor, tendo ganhado sete primeiros lugares e um terceiro em único evento de atletismo em 1906.
- Obteve o título de bacharel em Ciências pela Universidade de Chicago em 1910. Depois, seguiu para Oxford, onde inicialmente estudou Direito (a pedido de seu pai) e, depois, Literatura e Espanhol.
- Após a morte de seu pai em 1913, retornou aos EUA para cuidar da sua mãe, de suas duas irmãs e de um irmão mais novo.



Edwin Hubble (1889-1953)

- Nasceu em 20/11/1889 em Marschfield, Missouri (EUA).
- Durante juventude, destacou-se como atleta, tendo jogado beisebol, futebol americano e basquete. Também era corredor, tendo ganhado sete primeiros lugares e um terceiro em único evento de atletismo em 1906.
- Obteve o título de bacharel em Ciências pela Universidade de Chicago em 1910. Depois, seguiu para Oxford, onde inicialmente estudou Direito (a pedido de seu pai) e, depois, Literatura e Espanhol.
- Após a morte de seu pai em 1913, retornou aos EUA para cuidar da sua mãe, de suas duas irmãs e de um irmão mais novo.
- Como não se interessava por Direito, trabalhou como professor de Espanhol, Física e Matemática e como técnico do time de basquete em uma escola.

Edwin Hubble (1889-1953)



→ Retomou os estudos em Ciências com 25 anos de idade, quando resolveu tornar-se astrônomo profissional.

Edwin Hubble (1889-1953)



- Retomou os estudos em Ciências com 25 anos de idade, quando resolveu tornar-se astrônomo profissional.
- Começou uma pós-graduação em Astronomia na Universidade de Chicago e defendeu sua tese de doutorado em 1917 (*Photographic Investigations of Faint Nebulae*).

Edwin Hubble (1889-1953)



→ Retomou os estudos em Ciências com 25 anos de idade, quando resolveu tornar-se astrônomo profissional.

→ Começou uma pós-graduação em Astronomia na Universidade de Chicago e defendeu sua tese de doutorado em 1917 (*Photographic Investigations of Faint Nebulae*).

→ Foi voluntário do exército dos EUA na 1ª Guerra Mundial e chegou ao posto de Major, mas seu destacamento nunca se envolveu em combate. Após a guerra, retomou os estudos em Astronomia na Universidade de Cambridge.



Edwin Hubble (1889-1953)

→ Retomou os estudos em Ciências com 25 anos de idade, quando resolveu tornar-se astrônomo profissional.

→ Começou uma pós-graduação em Astronomia na Universidade de Chicago e defendeu sua tese de doutorado em 1917 (*Photographic Investigations of Faint Nebulae*).

→ Foi voluntário do exército dos EUA na 1ª Guerra Mundial e chegou ao posto de Major, mas seu destacamento nunca se envolveu em combate. Após a guerra, retomou os estudos em Astronomia na Universidade de Cambridge.

→ Em 1919, obteve um cargo no Observatório de Monte Wilson, onde trabalhou com os telescópios Hooker (2.5 m) e Hale (5.1m).



Edwin Hubble (1889-1953)

→ Retomou os estudos em Ciências com 25 anos de idade, quando resolveu tornar-se astrônomo profissional.

→ Começou uma pós-graduação em Astronomia na Universidade de Chicago e defendeu sua tese de doutorado em 1917 (*Photographic Investigations of Faint Nebulae*).

→ Foi voluntário do exército dos EUA na 1ª Guerra Mundial e chegou ao posto de Major, mas seu destacamento nunca se envolveu em combate. Após a guerra, retomou os estudos em Astronomia na Universidade de Cambridge.

→ Em 1919, obteve um cargo no Observatório de Monte Wilson, onde trabalhou com os telescópios Hooker (2.5 m) e Hale (5.1m).

→ Morreu de trombose cerebral em 28/09/1953. Sua esposa nunca revelou o local de seu túmulo.

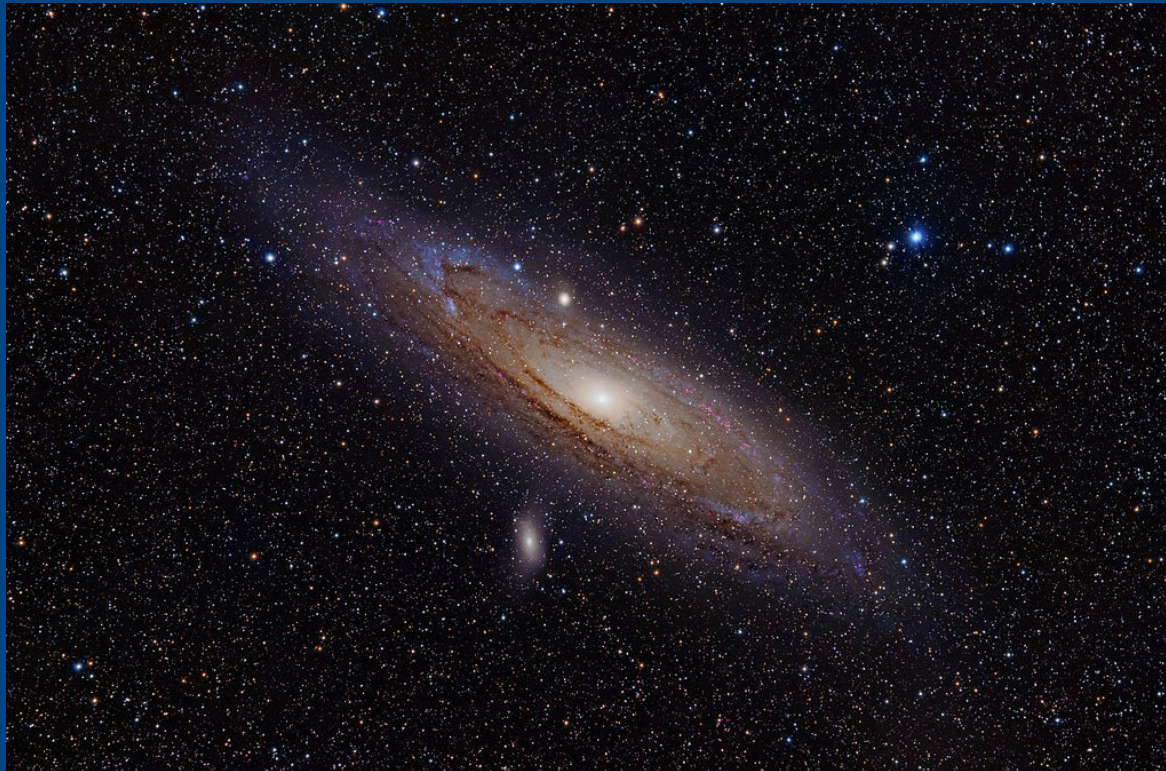
Observações de Hubble

→ Com o recém-instalado *telescópio Hooker*, Hubble identificou variáveis Cefeidas em diversas nebulosas espirais, incluindo Andrômeda e Triângulo.



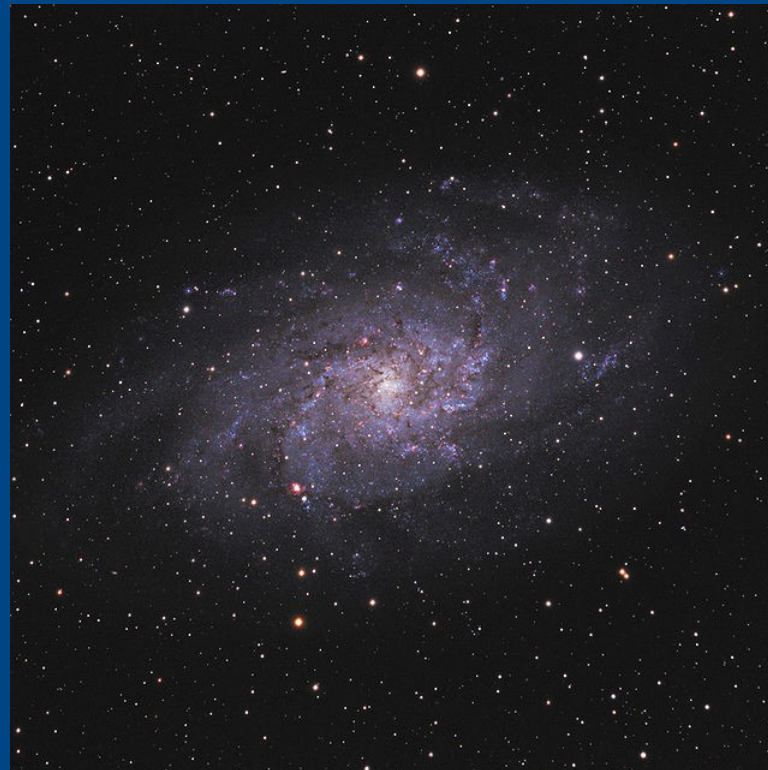
Observações de Hubble

→ Com o recém-instalado telescópio Hooker, Hubble identificou variáveis Cefeidas em diversas nebulosas espirais, incluindo *Andrômeda* e Triângulo.



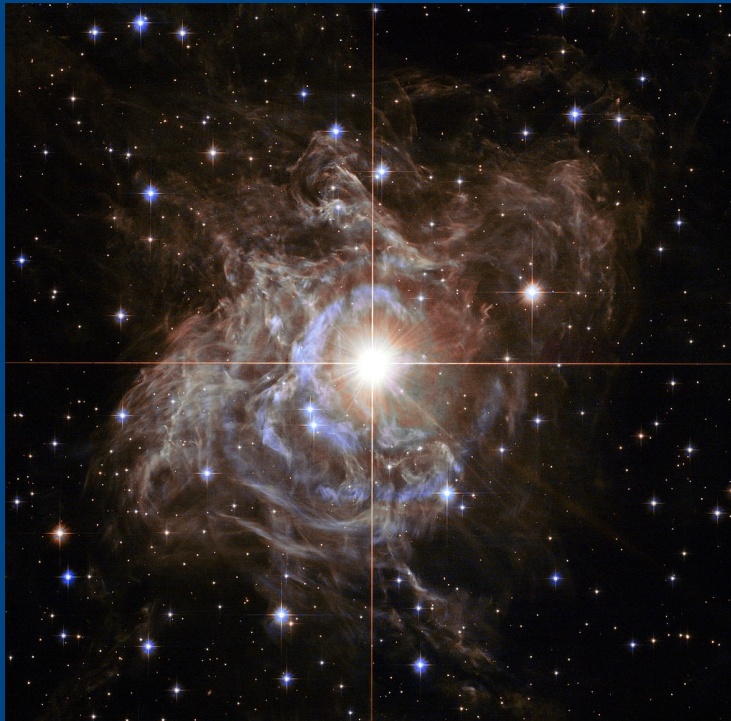
Observações de Hubble

→ Com o recém-instalado telescópio Hooker, Hubble identificou variáveis Cefeidas em diversas nebulosas espirais, incluindo Andrômeda e *Triângulo*.



Observações de Hubble Cefeidas

→ Estrelas variáveis que apresentam pulsações radiais, em que tanto seu diâmetro quanto sua temperatura variam, com período e amplitude bem definidos.

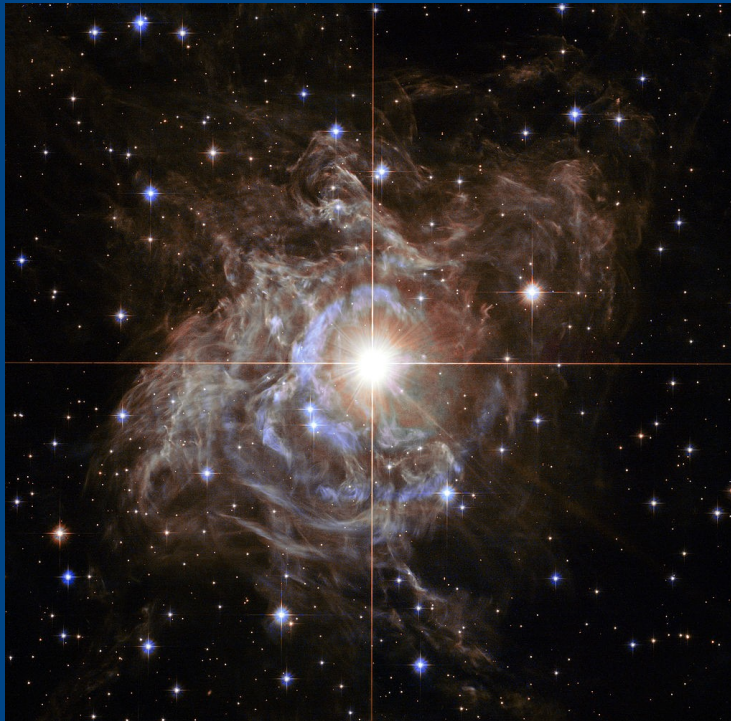


RS Puppis Imageada
pelo *Hubble Space*
Telescope (HST)

Observações de Hubble

Cefeidas

- Estrelas variáveis que apresentam pulsações radiais, em que tanto seu diâmetro quanto sua temperatura variam, com período e amplitude bem definidos.
- Existe uma relação direta entre o período dessas pulsações (que pode ser medido) e a luminosidade da estrela. Comparando essa luminosidade com o fluxo medido, podemos determinar a distância da estrela.



RS Puppis Imageada
pelo *Hubble Space*
Telescope (HST)

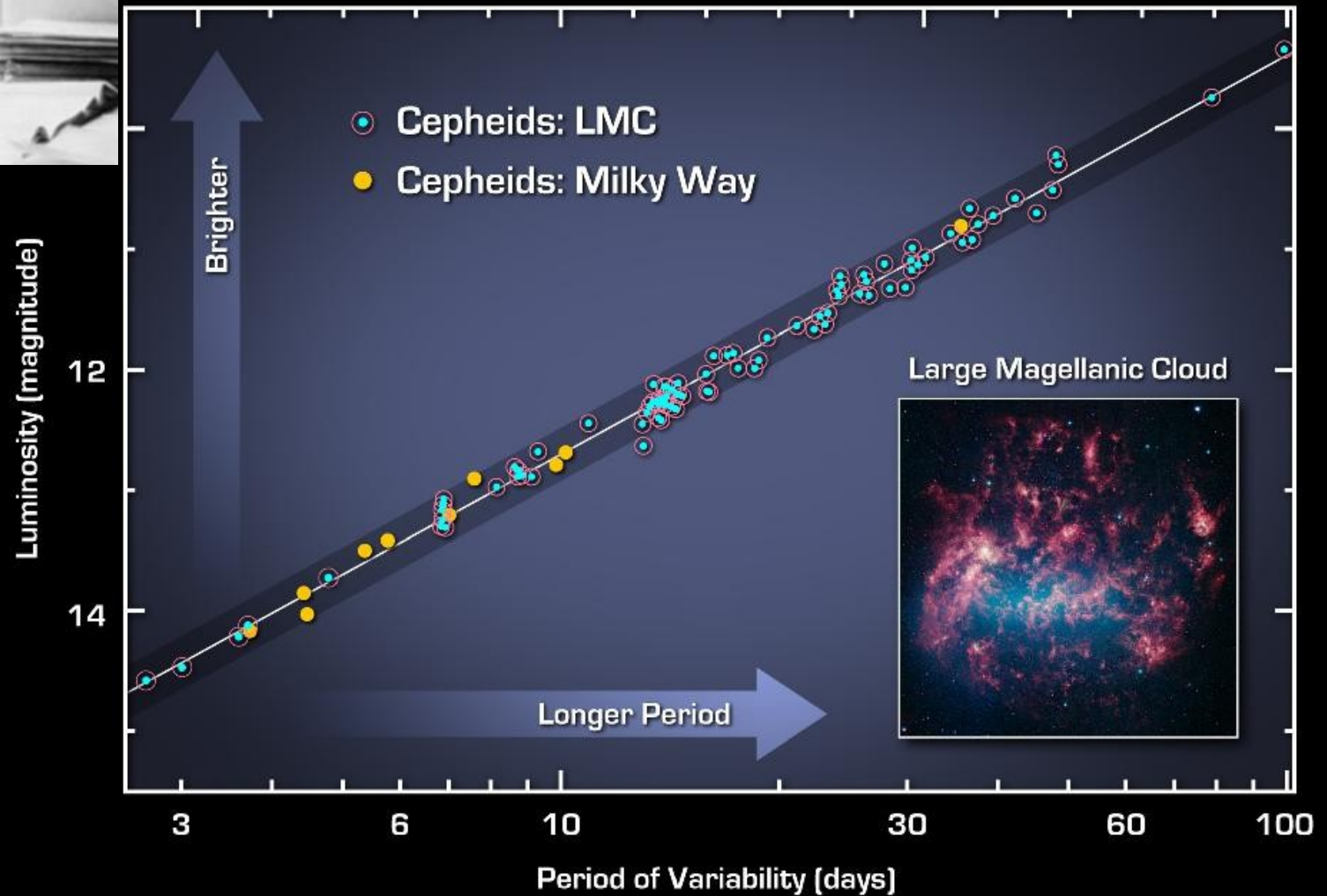
Observações de Hubble Cefeidas

→ Essa relação foi obtida por Henrietta Swan Leavitt estudando as estrelas variáveis nas Nuvens de Magalhães: ela notou que as mais brilhantes tinham períodos mais longos, o que implicava (considerando que todas estavam a aproximadamente a mesma distância) que o período estava relacionado à luminosidade.



Observações de Hubble

Cefeidas



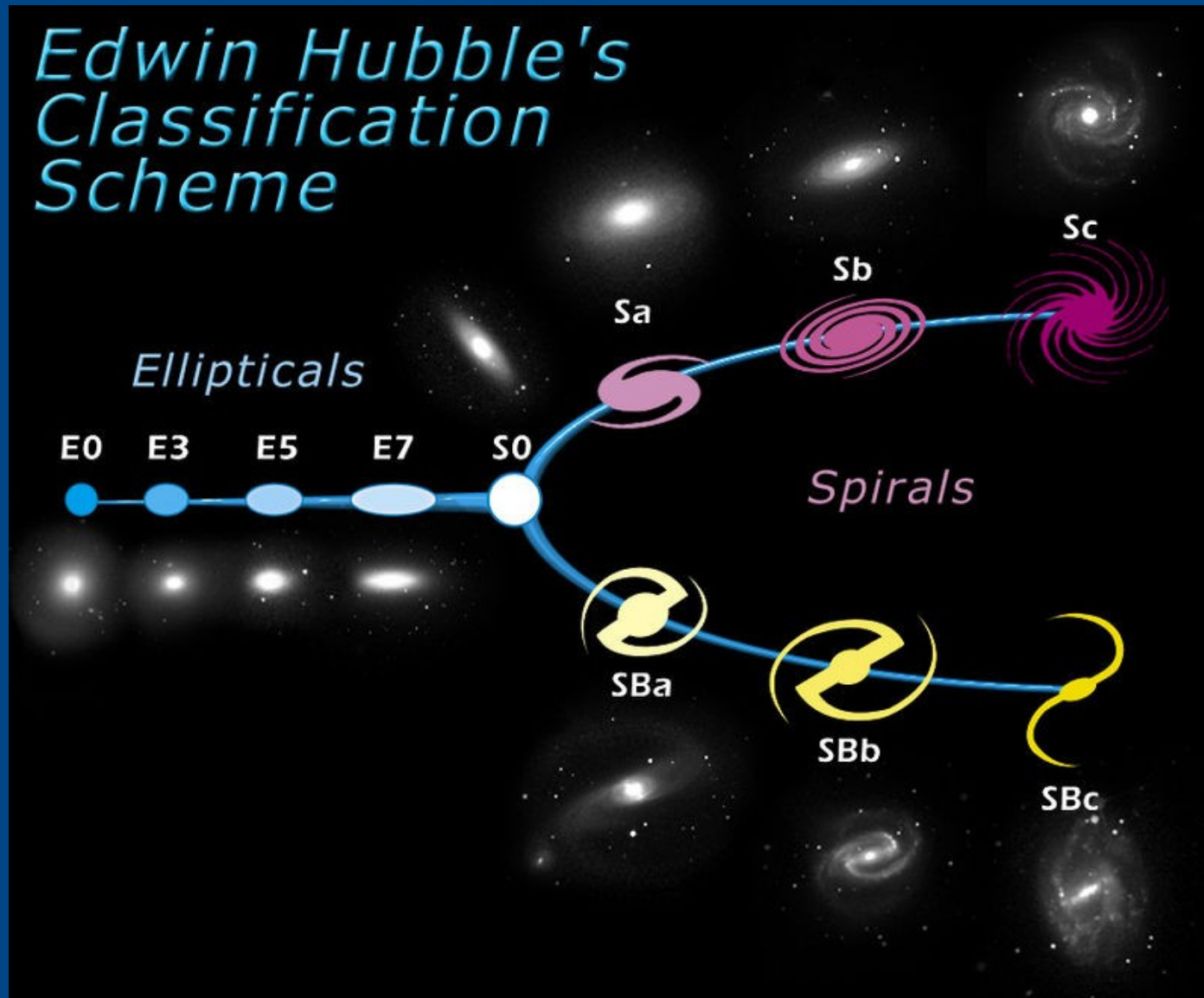
Observações de Hubble

→ Com essa relação, Hubble pôde calcular as distâncias das Cefeidas que observara entre 1922 e 1923 e provou conclusivamente que as ditas *nebulosas* estavam muito distantes para que pertencessem à Via-Láctea sendo, de fato, outras galáxias.

Observações de Hubble

- Com essa relação, Hubble pôde calcular as distâncias das Cefeidas que observara entre 1922 e 1923 e provou conclusivamente que as ditas *nebulosas* estavam muito distantes para que pertencessem à Via-Láctea sendo, de fato, outras galáxias.
- A descoberta foi primeiro publicada no jornal *The New York Times* em 23 de novembro de 1924 e depois em um artigo em 1º de janeiro de 1925.

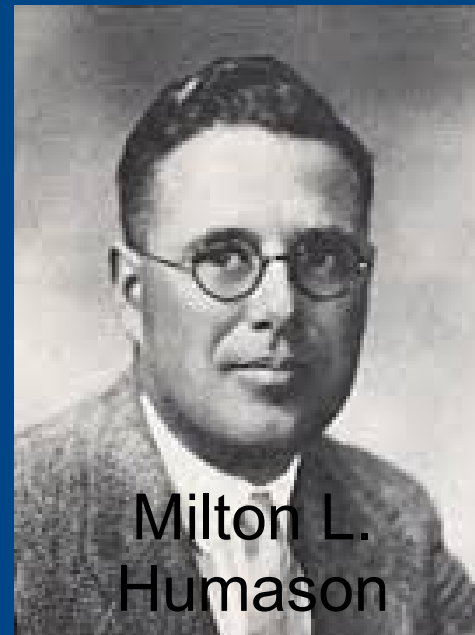
Sistema de Classificação de Hubble



→ Hubble também desenvolveu um esquema para classificação de galáxias segundo sua morfologia que é conhecido como sequência de Hubble.

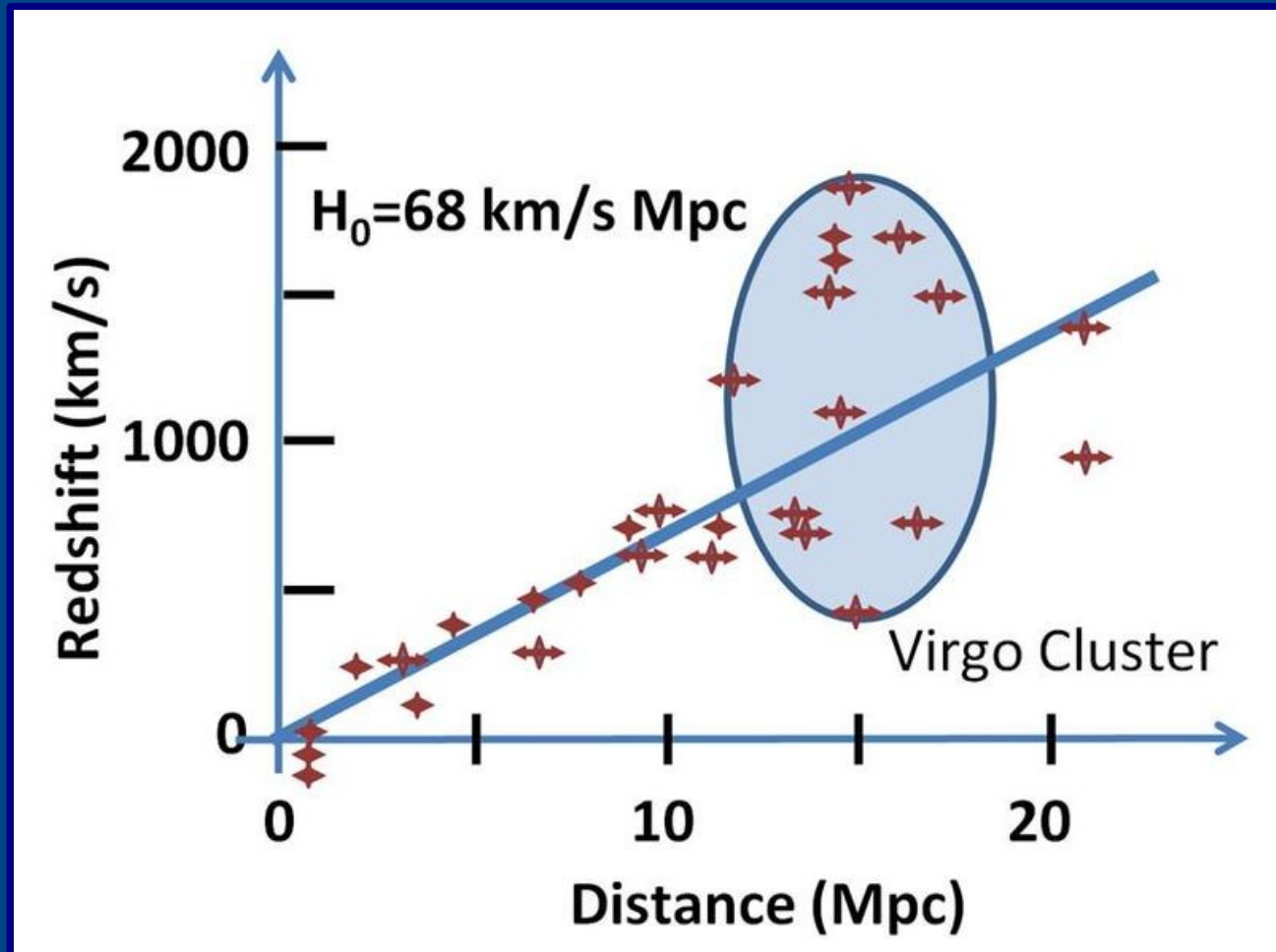
A Lei de Hubble

→ Em 1929, Hubble combinou suas medidas de distância com medidas de *redshift* dos astrônomos Vesto Slipher e Milton L. Humason e encontrou uma proporcionalidade entre as duas grandezas.

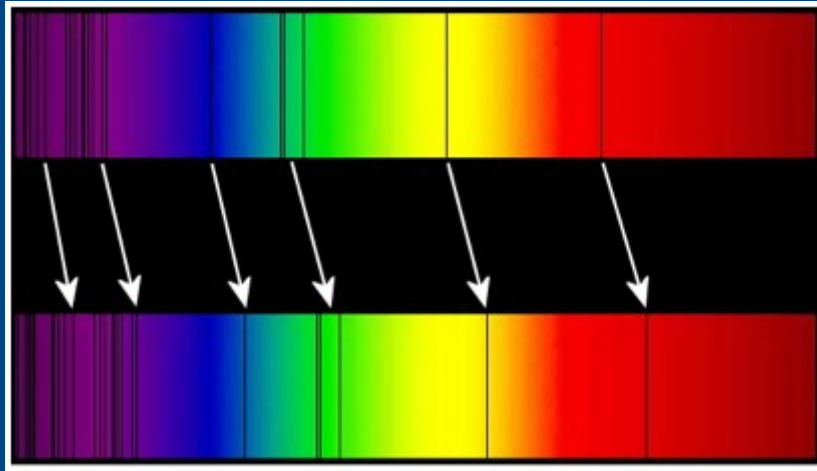


A Lei de Hubble

→ Em 1929, Hubble combinou suas medidas de distância com medidas de *redshift* dos astrônomos Vesto Slipher e Milton L. Humason e encontrou uma proporcionalidade entre as duas grandezas.



A Lei de Hubble



$$v = H_0 D$$

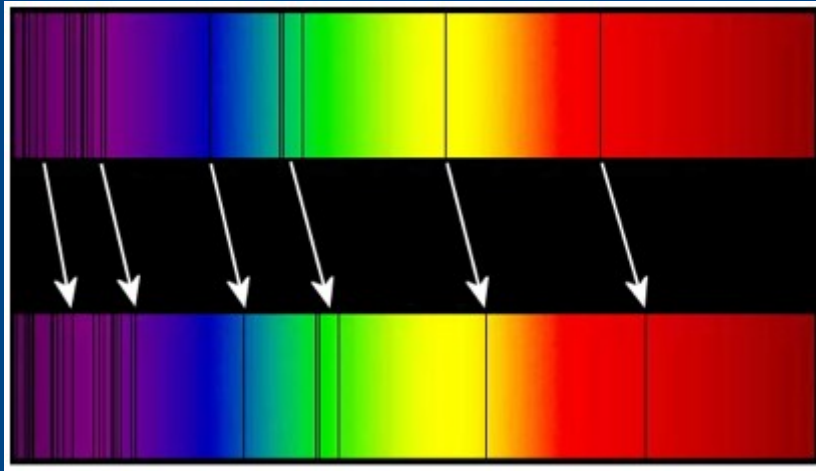
V = velocidade de recessão (km/s);

H_0 = constante de Hubble (km/s/Mpc);

D = distância própria (Mpc).

Valor atual da constante de Hubble: **67.80 ± 0.77** km/s/Mpc,
obtido pela missão *Planck*.

A Lei de Hubble



$$v = H_0 D$$

V = velocidade de recessão (km/s);

H_0 = constante de Hubble (km/s/Mpc);

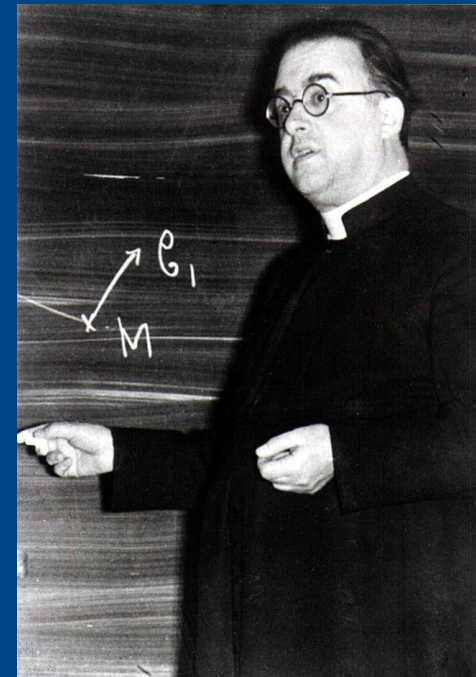
D = distância própria (Mpc).

Valor atual da constante de Hubble: 67.80 ± 0.77 km/s/Mpc,
obtido pela missão *Planck*.

→ Mas razão para a existência de *redshift* e sua relação com a distância de um objeto não eram compreendidas ainda.

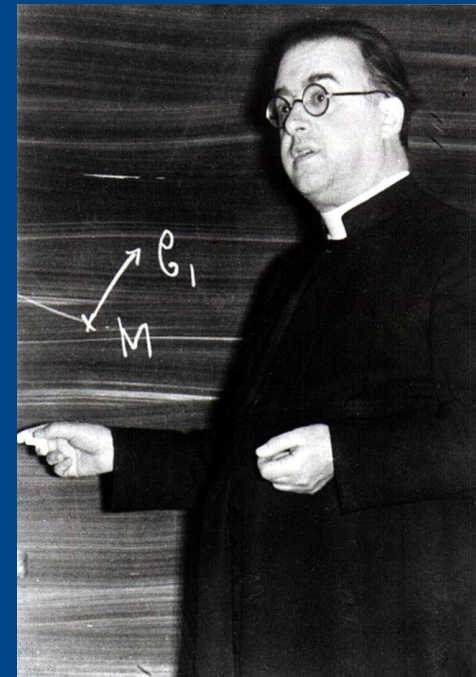
A Expansão do Universo

→ Foi George Lemâitre que primeiro derivou a Lei de Hubble (em 1927) e estimou um valor para a constante, mas seus dados não permitiam provar a existência de uma relação linear, como fez Hubble dois anos depois.



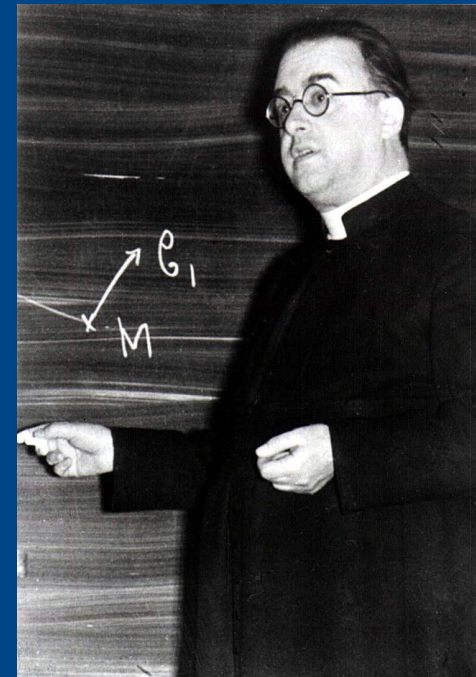
A Expansão do Universo

- Foi George Lemâitre que primeiro derivou a Lei de Hubble (em 1927) e estimou um valor para a constante, mas seus dados não permitiam provar a existência de uma relação linear, como fez Hubble dois anos depois.
- Ele foi pioneiro em aplicar a Teoria da Relatividade Geral à Cosmologia e propôs, em 1922, a teoria de expansão do Universo.



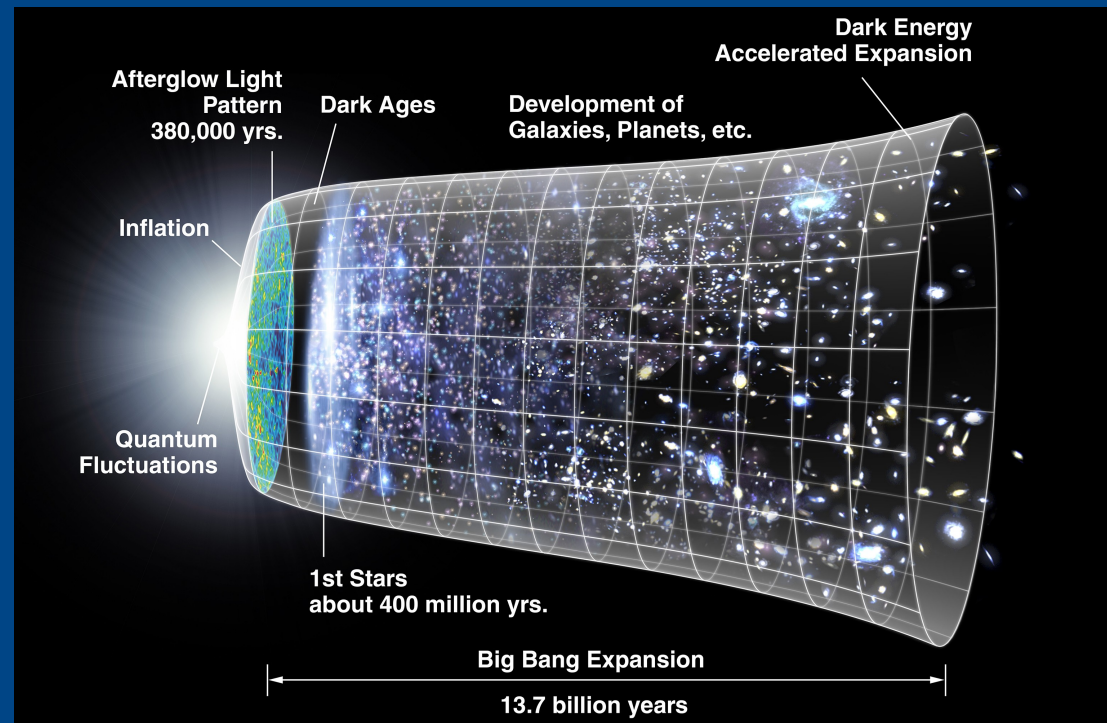
A Expansão do Universo

- Foi George Lemâitre que primeiro derivou a Lei de Hubble (em 1927) e estimou um valor para a constante, mas seus dados não permitiam provar a existência de uma relação linear, como fez Hubble dois anos depois.
- Ele foi pioneiro em aplicar a Teoria da Relatividade Geral à Cosmologia e propôs, em 1922, a teoria de expansão do Universo.
- Em 1931, propôs a Teoria do Big Bang para origem do Universo e sugeriu que sua expansão era acelerada.



Teoria do Big Bang

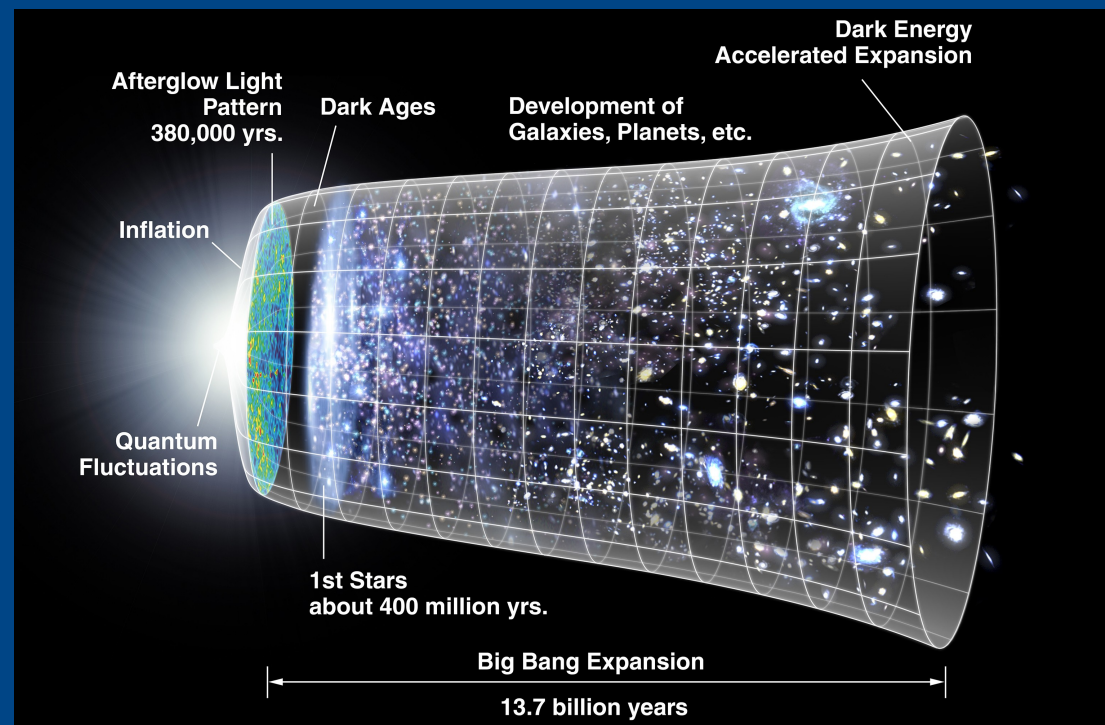
→ Apesar dessa descoberta da expansão do Universo, muitos cientistas ainda acreditavam na Teoria do Estado Estacionário, segundo a qual o Universo seria similar em todas as direções e *imutável no tempo*, com produção contínua de matéria para contrabalançar a expansão observada e manter a densidade média constante.



Teoria do Big Bang

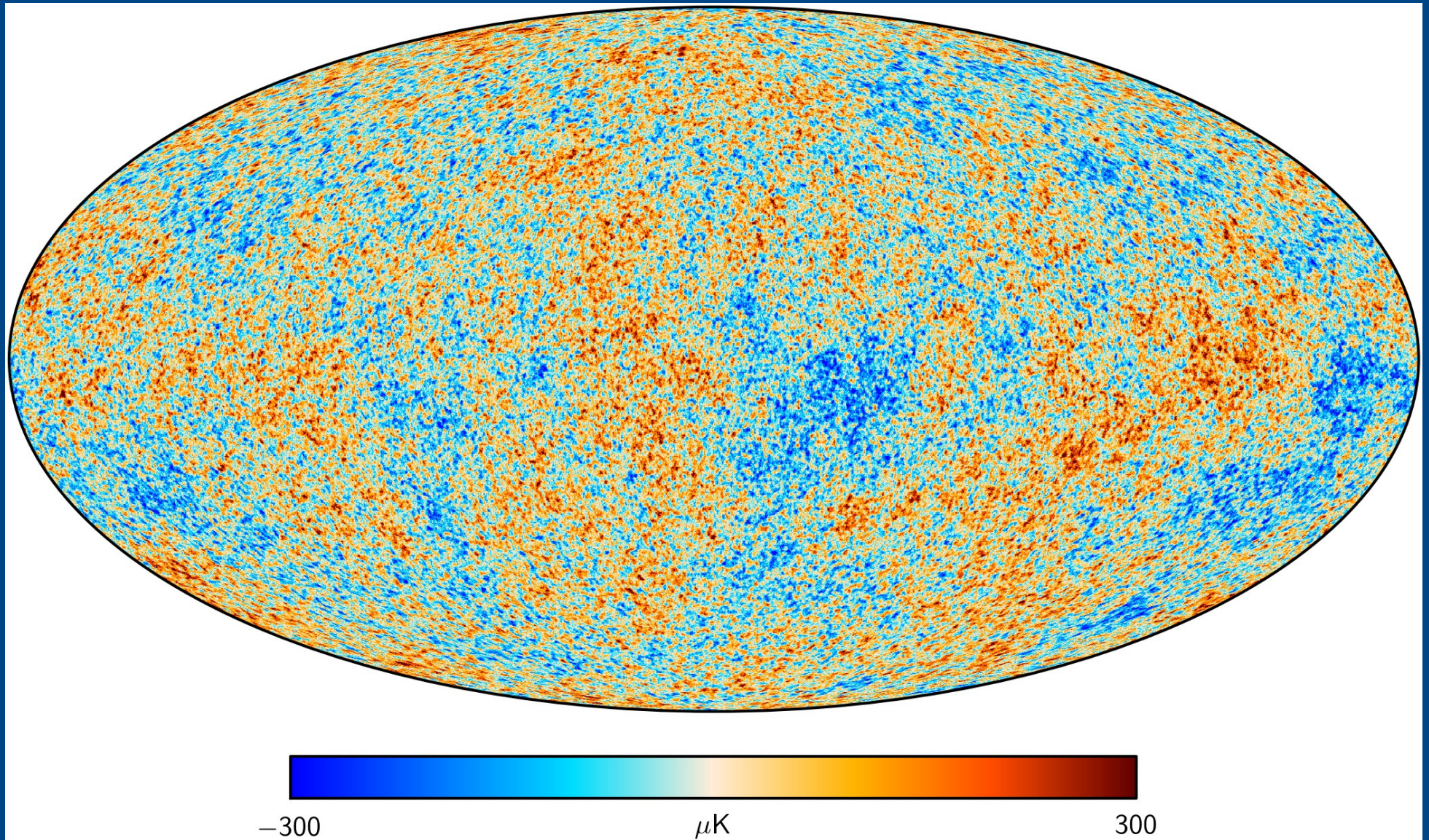
→ Apesar dessa descoberta da expansão do Universo, muitos cientistas ainda acreditavam na Teoria do Estado Estacionário, segundo a qual o Universo seria similar em todas as direções e *imutável no tempo*, com produção contínua de matéria para contrabalançar a expansão observada e manter a densidade média constante.

Hoje ela é obsoleta, sendo rejeitada pela maioria dos cosmólogos, astrofísicos e astrônomos em favor da Teoria do Big Bang, em que o Universo tem uma idade finita.



Teoria do Big Bang

→ A descoberta da radiação cósmica de fundo em micro-ondas foi o que deu suporte à Teoria do Big Bang.



Teoria do Big Bang

→ A descoberta da radiação cósmica de fundo em micro-ondas foi o que deu suporte à Teoria do Big Bang.

→ A radiação foi descoberta *acidentalmente* pelos astrônomos Arno Penzias e Robert Wilson, enquanto utilizavam um amplificador maser de baixíssimo ruído recém desenvolvido no Bell Laboratories para uso em radio-astronomia e experimentos em comunicação por satélite.



Wilson e Penzias,
ganhadores do Nobel
em 1978.

Teoria do Big Bang

→ A descoberta da radiação cósmica de fundo em micro-ondas foi o que deu suporte à Teoria do Big Bang.

→ A radiação foi descoberta *acidentalmente* pelos astrônomos Arno Penzias e Robert Wilson, enquanto utilizavam um amplificador maser de baixíssimo ruído recém desenvolvido no Bell Laboratories para uso em radio-astronomia e experimentos em comunicação por satélite.

→ Eles notaram um excesso de emissão que vinha de todas as direções. Essa radiação foi interpretada como remanescente do Big Bang por Robert Dicke, Philip Peebles, Peter Roll e David Wilkinson, que estavam construindo uma antena para procurar por ela.

Teoria do Big Bang

- A descoberta da radiação cósmica de fundo em micro-ondas foi o que deu suporte à Teoria do Big Bang.
- A radiação foi descoberta *acidentalmente* pelos astrônomos Arno Penzias e Robert Wilson, enquanto utilizavam um amplificador maser de baixíssimo ruído recém desenvolvido no Bell Laboratories para uso em radio-astronomia e experimentos em comunicação por satélite.
 - Eles notaram um excesso de emissão que vinha de todas as direções. Essa radiação foi interpretada como remanescente do Big Bang por Robert Dicke, Philip Peebles, Peter Roll e David Wilkinson, que estavam construindo uma antena para procurar por ela.
- Tal radiação já havia sido prevista em 1948 por Ralph Asher Alpher e Robert Herman como a radiação remanescente do estado quente em que o Universo encontrava-se quando se formou, emitida quando ele tornou-se transparente (380 mil anos depois do Big Bang).

Teoria do Big Bang

→ Segundo a teoria, se as galáxias estão afastando-se, então no passado elas deveriam estar mais próximas. Em um passado remoto, há cerca de 13.78 bilhões de anos, elas deveriam estar todas no mesmo ponto, muito quente – uma singularidade.

Teoria do Big Bang

- Segundo a teoria, se as galáxias estão afastando-se, então no passado elas deveriam estar mais próximas. Em um passado remoto, há cerca de 13.78 bilhões de anos, elas deveriam estar todas no mesmo ponto, muito quente – uma singularidade.
- O Big Bang criou não apenas matéria e radiação, mas *também o próprio espaço-tempo*. Este é o início do Universo que podemos conhecer.

Teoria do Big Bang

→ Já para o destino do Universo, as possibilidades são:

1. Universo se expande para sempre (*Big Rip*);
2. expansão para e ocorre novo colapso para o estado denso (*Big Crunch*).



Somente se a atração gravitacional (de matéria e energia) for grande o suficiente para parar a expansão.

Teoria do Big Bang

→ A densidade crítica, aquela que seria suficiente para interromper a expansão, é de:

$$\rho_{\text{crítica}} = 10^{-26} \text{ kg/m}^3$$

Teoria do Big Bang

→ A densidade crítica, aquela que seria suficiente para interromper a expansão, é de:

$$\rho_{\text{crítica}} = 10^{-26} \text{ kg/m}^3$$

→ A comparação entre a densidade crítica e a densidade observada definem o parâmetro de densidade Ω :

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{\text{crítico}}}$$

Teoria do Big Bang

→ Existem então três classes de soluções (para o caso de constante cosmológica nula):

Teoria do Big Bang

→ Existem então três classes de soluções (para o caso de constante cosmológica nula):

1. Se a densidade de matéria for alta suficiente para reverter a expansão, o Universo é fechado, como a superfície de uma esfera mas em três dimensões, de modo que, se uma nave viajasse por um tempo extremamente longo em linha reta, voltaria ao mesmo ponto.

Teoria do Big Bang

→ Existem então três classes de soluções (para o caso de constante cosmológica nula):

1. Se a densidade de matéria for alta suficiente para reverter a expansão, o Universo é fechado, como a superfície de uma esfera mas em três dimensões, de modo que, se uma nave viajasse por um tempo extremamente longo em linha reta, voltaria ao mesmo ponto.

2. Se a densidade for muito baixa, o Universo é aberto e continuará se expandindo para sempre.

Teoria do Big Bang

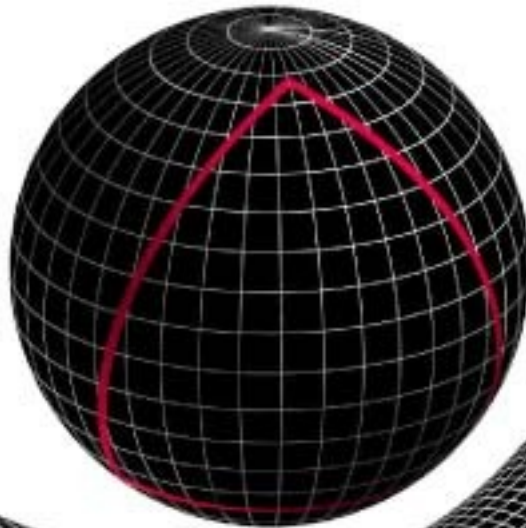
→ Existem então três classes de soluções (para o caso de constante cosmológica nula):

1. Se a densidade de matéria for alta suficiente para reverter a expansão, o Universo é fechado, como a superfície de uma esfera mas em três dimensões, de modo que, se uma nave viajasse por um tempo extremamente longo em linha reta, voltaria ao mesmo ponto.

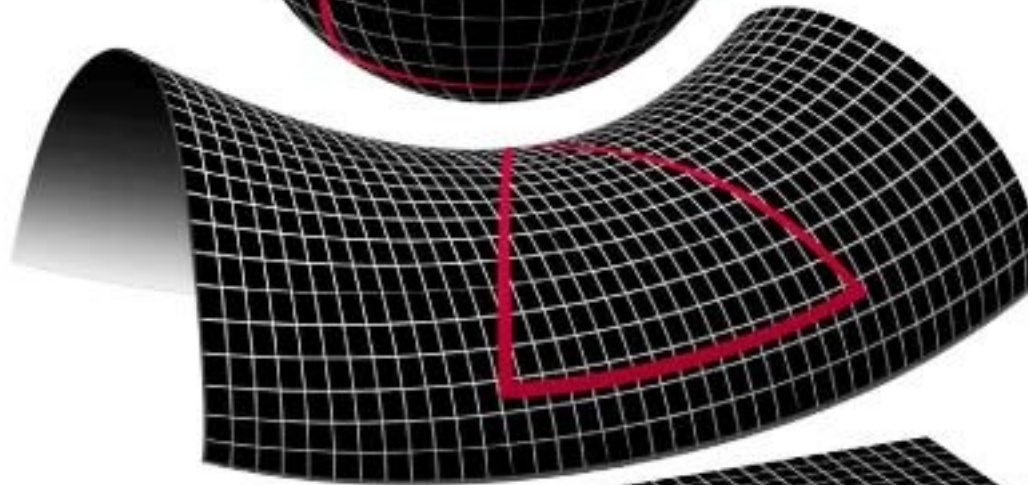
2. Se a densidade for muito baixa, o Universo é aberto e continuará se expandindo para sempre.

3. A densidade está no limiar entre os limites aberto e fechado. O Universo neste caso se expande para sempre, mas a velocidade das galáxias seria cada vez menor, chegando a zero no infinito.

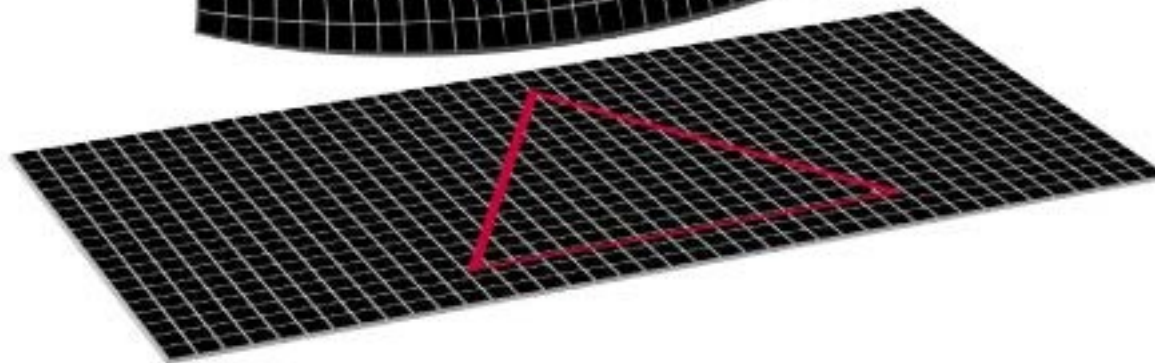
$\Omega_0 > 1$



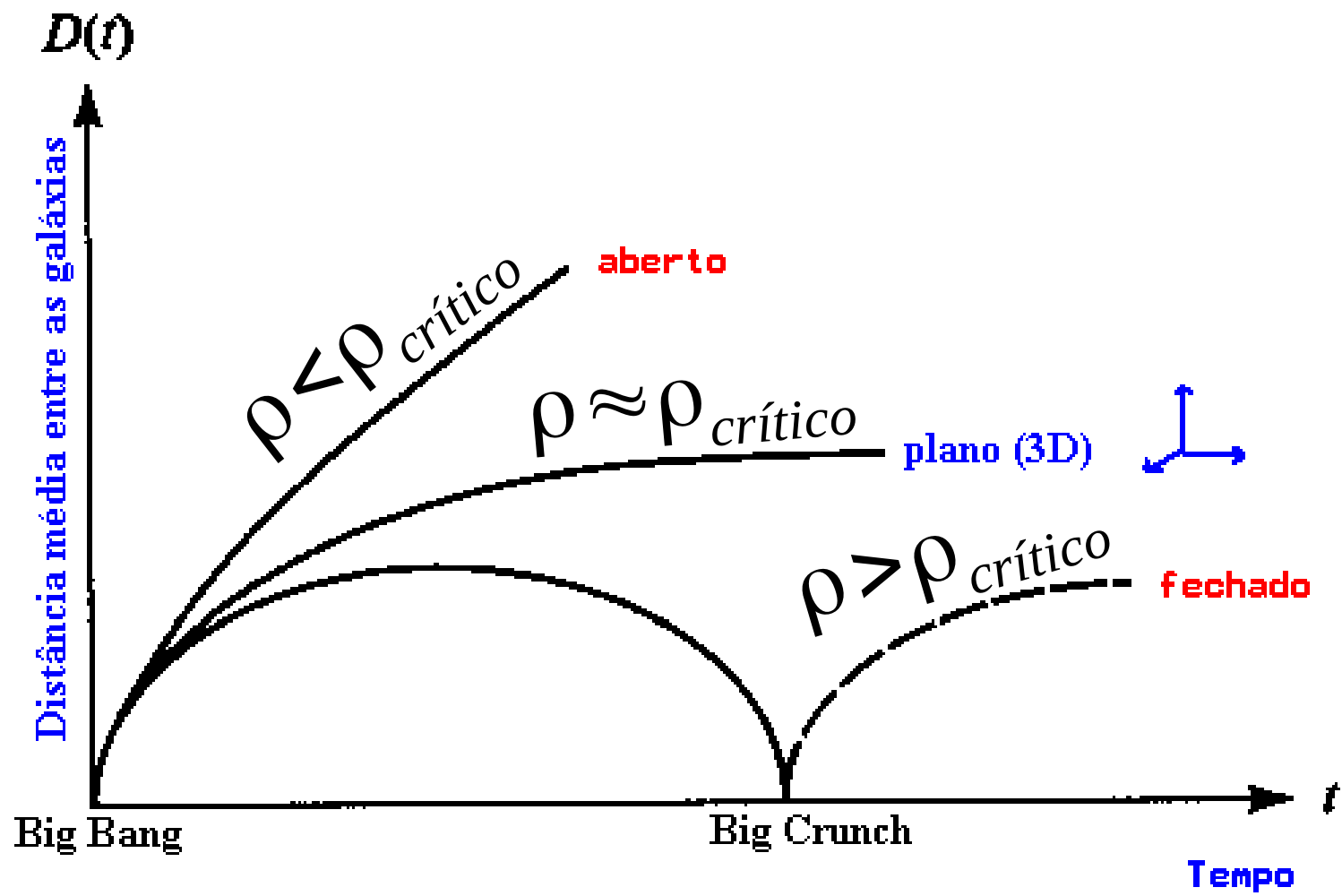
$\Omega_0 < 1$



$\Omega_0 = 1$

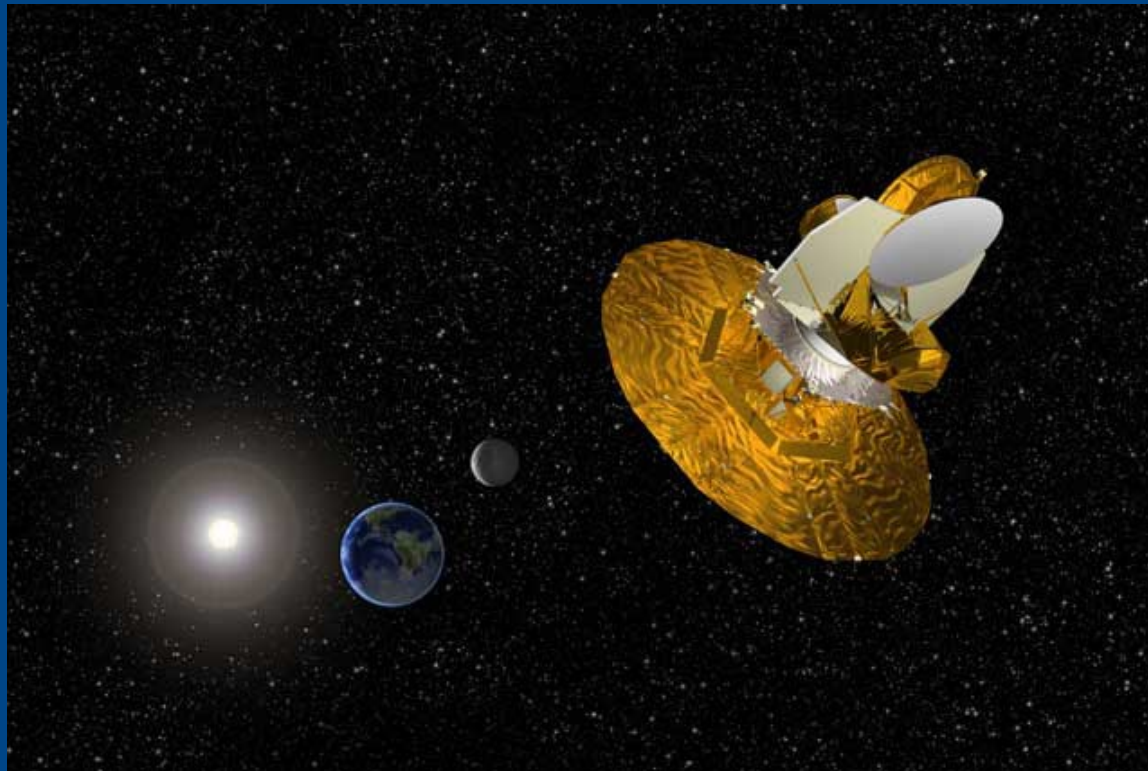


MAP990006



Teoria do Big Bang

→ Pelo que sugerem as observações, como as do satélite Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) da NASA, lançado em 2001, o Universo é *plano*.



Teoria do Big Bang

→ Pelo que sugerem as observações, como as do satélite Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) da NASA, lançado em 2001, o Universo é *plano*.



Teoria do Big Bang

→ Pelo que sugerem as observações, como as do satélite Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) da NASA, lançado em 2001, o Universo é *plano*.

Tipo	Porcentagem de Ω
Energia escura	72.2%
Matéria escura	23.2%
Matéria normal	4.6%
Radiação	0.005%

Teoria do Big Bang

→ Pelo que sugerem as observações, como as do satélite Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) da NASA, lançado em 2001, o Universo é *plano*.

Tipo	Porcentagem de Ω
Energia escura	72.2%
Matéria escura	23.2%
Matéria normal	4.6%
Radiação	0.005%

→ Observações de supernovas distantes também indicam que a constante cosmológica não é nula, mas causa uma *aceleração* da expansão do Universo.

A Cronologia do Universo

1. Era de Planck – 0 a 10^{-43} s

→ Temperatura altíssima;

→ Forças unificadas;

→ Como a escala do Universo era extremamente pequena, efeitos quânticos de gravidade dominavam as interações físicas.

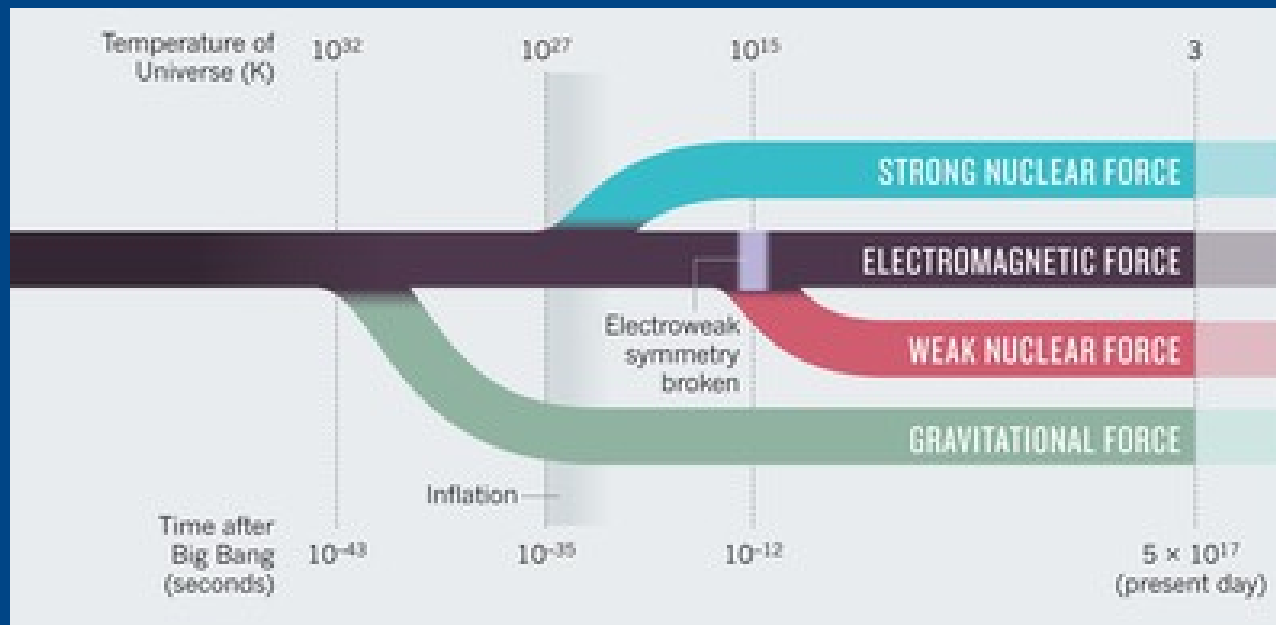
A Cronologia do Universo

1. Era de Planck – 0 a 10^{-43} s

- Temperatura altíssima;
- Forças unificadas;
- Como a escala do Universo era extremamente pequena, efeitos quânticos de gravidade dominavam as interações físicas.

2. Era da Grande Unificação – 10^{-43} a 10^{-36} s

- Universo começa a esfriar e passa por uma transição de fase em que a gravidade se separa das demais forças.
- Outra transição de fase separa as forças eletrofraca e forte.



A Cronologia do Universo

3. Era Eletrofraca – 10^{-36} a 10^{-32} s

→ Temperatura baixa o suficiente ($\sim 10^{28}$ K) para que a força forte se separasse da eletrofraca.

A Cronologia do Universo

3. Era Eletrofraca – 10^{-36} a 10^{-32} s

→ Temperatura baixa o suficiente ($\sim 10^{28}$ K) para que a força forte se separasse da eletrofraca.

4. Era Inflacionária – ???

→ Ocorreu expansão acelerada produzida por um campo hipotético chamado *ínflaton*, com propriedades semelhantes à energia escura e ao campo de Higgs.

A Cronologia do Universo

3. Era Eletrofraca – 10^{-36} a 10^{-32} s

→ Temperatura baixa o suficiente ($\sim 10^{28}$ K) para que a força forte se separasse da eletrofraca.

4. Era Inflacionária – ???

→ Ocorreu expansão acelerada produzida por um campo hipotético chamado *ínflaton*, com propriedades semelhantes à energia escura e ao campo de Higgs.

→ Essa expansão rápida faria o Universo mais homogêneo, o que explicaria o que é observado hoje no Universo em grande escala, mesmo que o Universo fosse altamente desordenado antes da inflação.

A Cronologia do Universo

3. Era Eletrofraca – 10^{-36} a 10^{-32} s

→ Temperatura baixa o suficiente ($\sim 10^{28}$ K) para que a força forte se separasse da eletrofraca.

4. Era Inflacionária – ???

→ Ocorreu expansão acelerada produzida por um campo hipotético chamado *ínflaton*, com propriedades semelhantes à energia escura e ao campo de Higgs.

→ Essa expansão rápida faria o Universo mais homogêneo, o que explicaria o que é observado hoje no Universo em grande escala, mesmo que o Universo fosse altamente desordenado antes da inflação.

→ O período encerrou-se quando o campo ínflaton decaiu em partículas comuns em um processo chamado *reaquecimento*. A partir daí, o Universo continuou se expandindo de forma normal.

A Cronologia do Universo

5. Bariogênese

→ Período em que a assimetria matéria/anti-matéria se estabeleceu. A explicação para isso ainda é incerta. Algumas das simetrias fundamentais da Física de Partículas devem ter sido violadas em grande escala (condições de *Sarkharov*).

A Cronologia do Universo

5. Bariogênese

→ Período em que a assimetria matéria/anti-matéria se estabeleceu. A explicação para isso ainda é incerta. Algumas das simetrias fundamentais da Física de Partículas devem ter sido violadas em grande escala (condições de *Sarkharov*).

6. Quebra de Simetria Eletrofraca e a Era dos Quarks – 10^{-12} a 10^{-6} s

→ Com a queda de temperatura, o campo de Higgs levou espontaneamente à quebra da simetria de calibre eletrofraca, o que teve duas consequências:

a) as forças fraca e eletromagnética se separaram, com respectivos bósons (W, Z e fótons) que se manifestam de formas diferentes no presente Universo.

b) Pelo *mecanismo de Higgs*, todas as partículas elementares adquiriram massas. A níveis mais altos de energia, elas eram não massivas.

Fermions

matter particles

Quarks



Leptons



Gauge bosons

force carriers



photon



gluon



Z boson



W boson

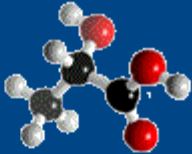
Higgs boson

origin of mass

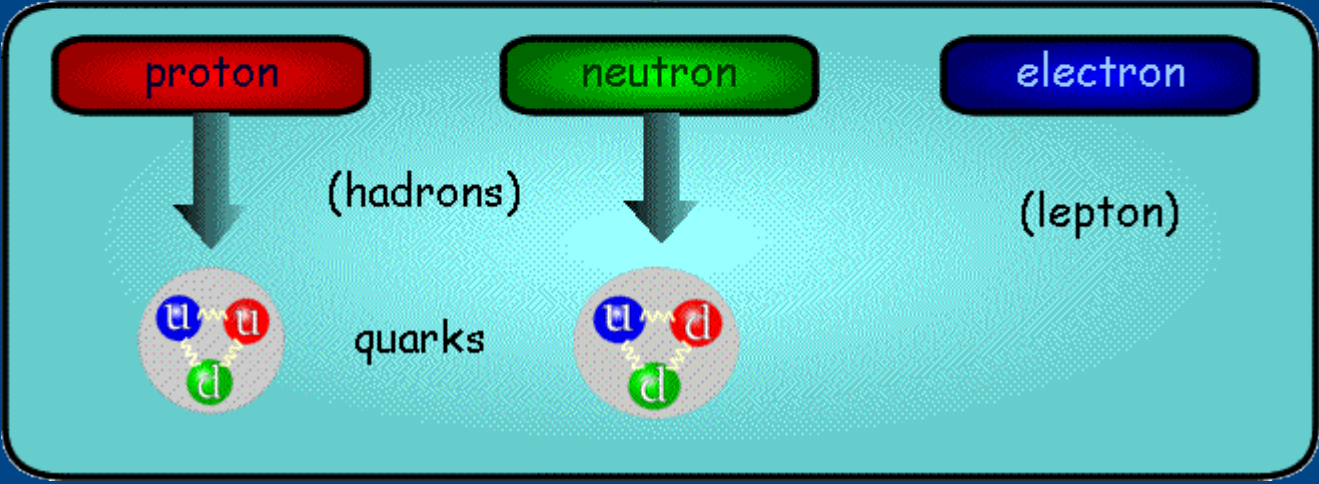




molecules



atoms



A Cronologia do Universo

7. Era dos Hádrons – 10^{-6} a 1 s

- O plasma de quarks e glúons que compõe o Universo se esfria até que hádrons se formem.
- Os neutrinos se desacoplam e passam a viajar livremente.

A Cronologia do Universo

7. Era dos Hádrons – 10^{-6} a 1 s

→ O plasma de quarks e glúons que compõe o Universo se esfria até que hádrons se formem.

→ Os neutrinos se desacoplam e passam a viajar livremente.

8. Era dos Léptons – 1 a 10 s

→ A maioria dos hádrons e anti-hádrons aniquilou-se no fim da era dos hádrons, então léptons e anti-léptons dominaram a massa do Universo.

→ Depois, a temperatura do Universo caiu tanto que novos pares lépton/anti-lépton deixaram de ser criados, e a maioria dos pares existentes se aniquilou, deixando apenas uma quantidade residual de léptons.

A Cronologia do Universo

7. Era dos Hádrons – 10^{-6} a 1 s

→ O plasma de quarks e glúons que compõe o Universo se esfria até que hádrons se formem.

→ Os neutrinos se desacoplam e passam a viajar livremente.

8. Era dos Léptons – 1 a 10 s

→ A maioria dos hádrons e anti-hádrons aniquilou-se no fim da era dos hádrons, então léptons e anti-léptons dominaram a massa do Universo.

→ Depois, a temperatura do Universo caiu tanto que novos pares lépton/anti-lépton deixaram de ser criados, e a maioria dos pares existentes se aniquilou, deixando apenas uma quantidade residual de léptons.

9. Era dos Fótons – 10 s a 380 000 anos

→ Com todas as aniquilações, a energia do Universo passa a ser dominada por fótons.

A Cronologia do Universo

* Nucleossíntese primordial – 3 a 20 min

→ Durante a era dos fótons, a temperatura do Universo caiu o suficiente para que núcleos atômicos se formassem.

→ Prótons e nêutrons combinaram-se em núcleos atômicos por processo de fusão nuclear.

→ O saldo final é uma quantidade três vezes maior (em massa) de hidrogênio do que de hélio e apenas traços de outros átomos leves (Li, Be).

A Cronologia do Universo

* Nucleossíntese primordial – 3 a 20 min

→ Durante a era dos fótons, a temperatura do Universo caiu o suficiente para que núcleos atômicos se formassem.

→ Prótons e nêutrons combinaram-se em núcleos atômicos por processo de fusão nuclear.

→ O saldo final é uma quantidade três vezes maior (em massa) de hidrogênio do que de hélio e apenas traços de outros átomos leves (Li, Be).

10. Prevalência de Matéria – 70 000 anos

→ O *comprimento de Jeans*, que determina o tamanho mínimo de uma estrutura que pode colapsar por efeito gravitacional, diminui e perturbações podem crescer em amplitude.

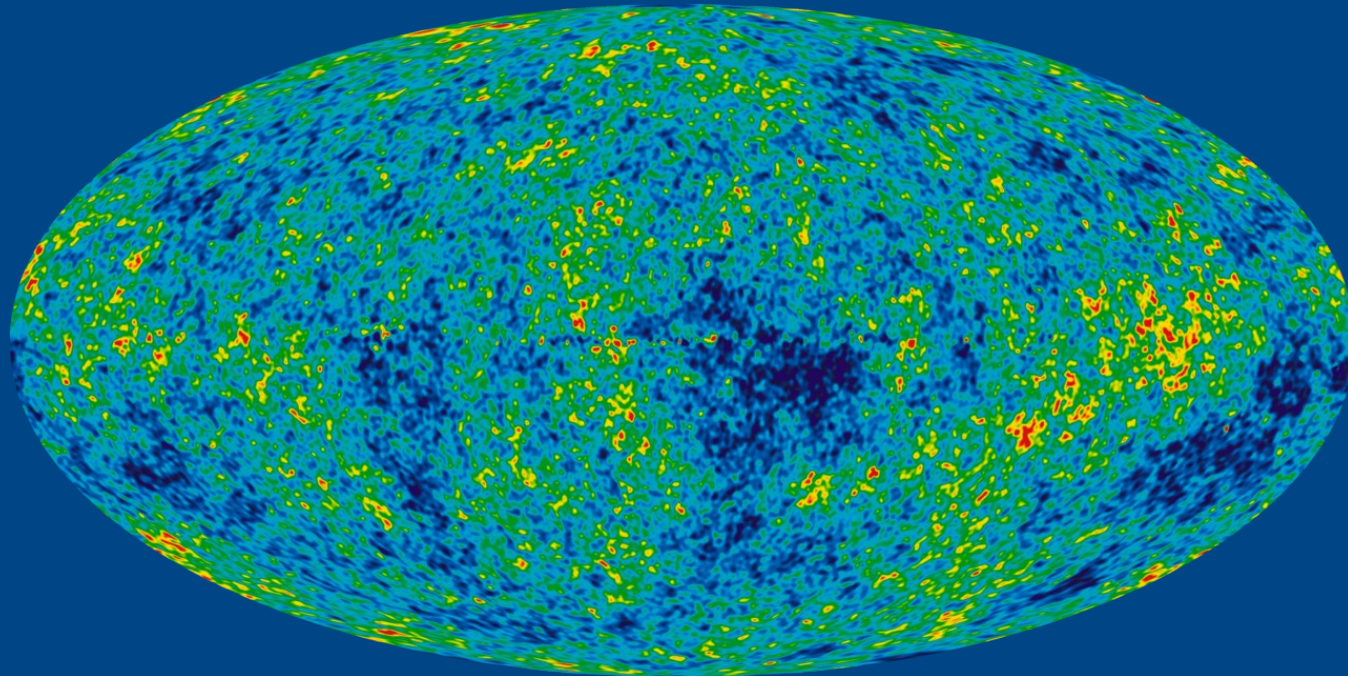
→ Matéria escura fria domina neste estágio, permitindo que o colapso gravitacional amplifique as inhomogeneidades que permaneceram após o período de inflação.

A Cronologia do Universo

11. Recombinação – 377 000 anos

→ Os primeiros núcleos formados, de hidrogênio e hélio, estavam ionizados. Conforme o Universo esfriava, elétrons foram capturados por esses íons, formando átomos neutros.

→ Os fótons presentes nessa época são os mesmo que vemos na radiação cósmica de fundo em micro-ondas, que é então um registro do Universo em tal época, incluindo as pequenas flutuações geradas durante a inflação.



A Cronologia do Universo

12. Formação de Estruturas

→ Segundo o modelo do Big Bang, estruturas formaram-se de maneira hierárquica, com estruturas menores formando-se antes das maiores.

A Cronologia do Universo

12. Formação de Estruturas

→ Segundo o modelo do Big Bang, estruturas formaram-se de maneira hierárquica, com estruturas menores formando-se antes das maiores.

→ Primeiras estruturas: quasares e estrelas de população III.

A Cronologia do Universo

12. Formação de Estruturas

→ Segundo o modelo do Big Bang, estruturas formaram-se de maneira hierárquica, com estruturas menores formando-se antes das maiores.

→ Primeiras estruturas: quasares e estrelas de população III.

→ As estrelas de população III começam o processo de transformar os elementos leves que se formaram no Big Bang em elementos pesados.

A Cronologia do Universo

12. Formação de Estruturas

→ Segundo o modelo do Big Bang, estruturas formaram-se de maneira hierárquica, com estruturas menores formando-se antes das maiores.

→ Primeiras estruturas: quasares e estrelas de população III.

→ As estrelas de população III começam o processo de transformar os elementos leves que se formaram no Big Bang em elementos pesados.

→ Estima-se que essas estrelas formaram-se 560 milhões de anos após o Big Bang.

A Cronologia do Universo

12. Formação de Estruturas

→ Segundo o modelo do Big Bang, estruturas formaram-se de maneira hierárquica, com estruturas menores formando-se antes das maiores.

→ Primeiras estruturas: quasares e estrelas de população III.

→ As estrelas de população III começam o processo de transformar os elementos leves que se formaram no Big Bang em elementos pesados.

→ Estima-se que essas estrelas formaram-se 560 milhões de anos após o Big Bang.

→ Grandes volumes de matéria colapsaram para formar galáxias. Estrelas de população II formaram-se durante este processo, e estrelas de população I formaram-se depois.

A Cronologia do Universo

12. Formação de Estruturas

→ Segundo o modelo do Big Bang, estruturas formaram-se de maneira hierárquica, com estruturas menores formando-se antes das maiores.

→ Primeiras estruturas: quasares e estrelas de população III.

→ As estrelas de população III começam o processo de transformar os elementos leves que se formaram no Big Bang em elementos pesados.

→ Estima-se que essas estrelas formaram-se 560 milhões de anos após o Big Bang.

→ Grandes volumes de matéria colapsaram para formar galáxias. Estrelas de população II formaram-se durante este processo, e estrelas de população I formaram-se depois.

→ Interação gravitacional faz com que galáxias aproximem-se e formem grupos, aglomerados e super-aglomerados.

Modelo Lambda-CDM

→ É o nosso modelo cosmológico padrão.

Contém uma constante cosmológica (denotada por Λ), associada com a energia escura, e matéria escura fria (*cold dark matter*).

Modelo Lambda-CDM

→ É o nosso modelo cosmológico padrão.

Contém uma constante cosmológica (denotada por Λ), associada com a energia escura, e matéria escura fria (*cold dark matter*).

→ Fornece uma explicação razoavelmente boa para:

1. a existência e a estrutura da radiação cósmica de fundo em micro-ondas.

Modelo Lambda-CDM

→ É o nosso modelo cosmológico padrão.

Contém uma constante cosmológica (denotada por Λ), associada com a energia escura, e matéria escura fria (*cold dark matter*).

→ Fornece uma explicação razoavelmente boa para:

1. a existência e a estrutura da radiação cósmica de fundo em micro-ondas.
2. as estruturas em larga-escala na distribuição de galáxias.

Modelo Lambda-CDM

→ É o nosso modelo cosmológico padrão.

Contém uma constante cosmológica (denotada por Λ), associada com a energia escura, e matéria escura fria (*cold dark matter*).

→ Fornece uma explicação razoavelmente boa para:

1. a existência e a estrutura da radiação cósmica de fundo em micro-ondas.
2. as estruturas em larga-escala na distribuição de galáxias.
3. as abundâncias de hidrogênio, hélio e lítio.

Modelo Lambda-CDM

→ É o nosso modelo cosmológico padrão.

Contém uma constante cosmológica (denotada por Λ), associada com a energia escura, e matéria escura fria (*cold dark matter*).

→ Fornece uma explicação razoavelmente boa para:

1. a existência e a estrutura da radiação cósmica de fundo em micro-ondas.
2. as estruturas em larga-escala na distribuição de galáxias.
3. as abundâncias de hidrogênio, hélio e lítio.
4. a expansão acelerada observada na luz de galáxias distantes e supernovas.

Modelo Lambda-CDM

Não explica, contudo:

→ a origem física fundamental da matéria escura;

→ o mecanismo por trás da energia escura.

Questionário

(para 16/06/2015)

1. O que foi discutido no *Grande Debate*? Cite argumentos para as duas posições e explique por que o debate terminou empatado.

2. Como se obteve a resposta para a pergunta levantada no *Grande Debate*? Comente a contribuição de pelo menos dois cientistas.

3. Explique, de uma maneira resumida tal que um aluno de 1º ano do *Ensino Médio entenderia**, o nosso modelo cosmológico padrão.

* Meu irmão, que está no 1º ano do EM, vai me ajudar a verificar o sucesso de vocês.