



Universidade Federal do ABC

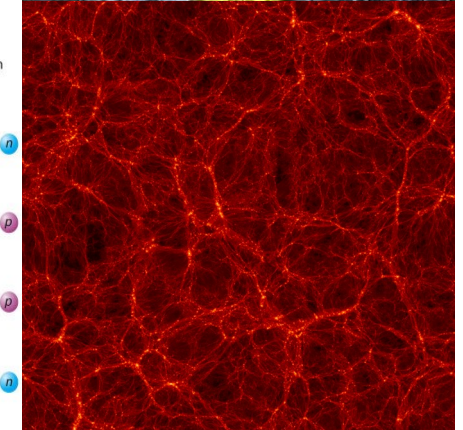
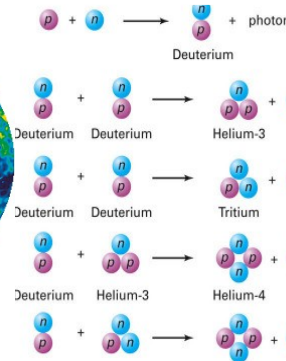
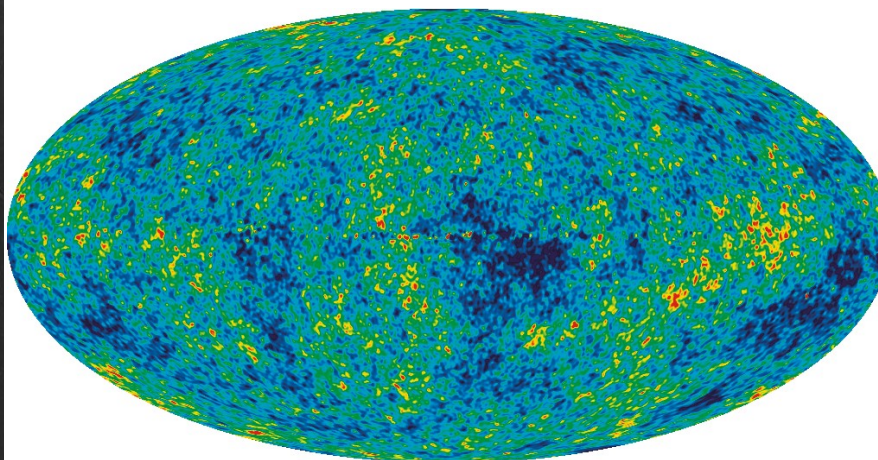
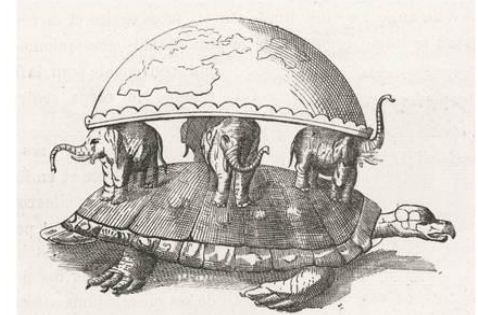
Introdução à Cosmologia

02. História II

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

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

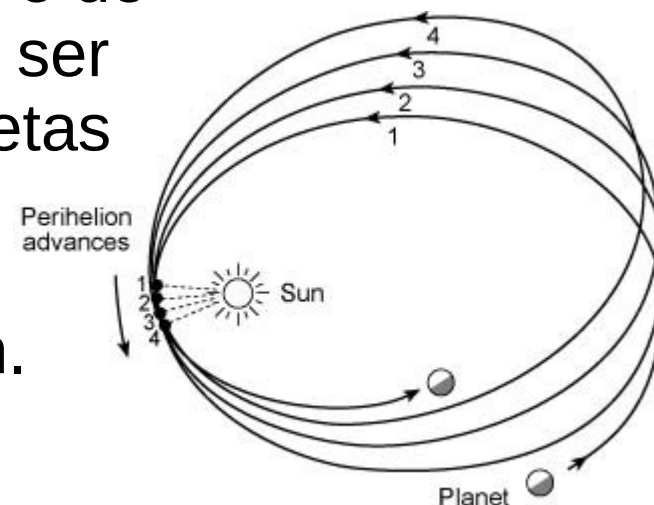
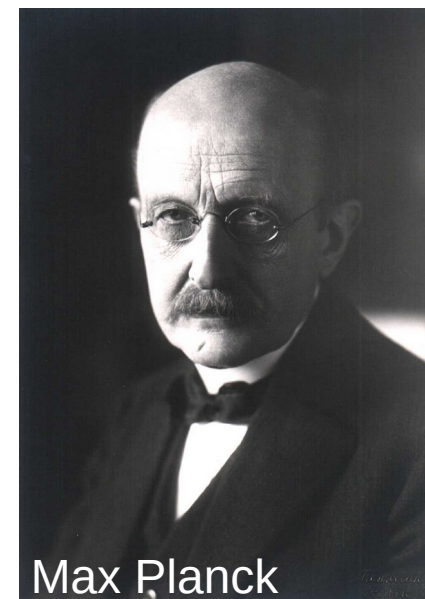


Relatividade

Em 1874, um dos professores de Max Planck, Philip Jolly, desaconselhou o aluno dele de estudar física, por que "não tinha mais nada para ser descoberto".

Só tinha alguns detalhes ainda não explicadas, como a **fonte** de **energia** do **Sol** (\Rightarrow aula Sol), e o excesso da **precessão** do **periélio** da **órbita** de **Mercúrio** ($43''/\text{século}$; a precessão total é de $9'34''/\text{século}$, mas os demais $8'49''$ podiam ser explicados pela influência dos outros planetas e pela forma oblata do Sol), problemas, cuja resolução levou a um novo ramo da física, a **Teoria da Relatividade** de Einstein.

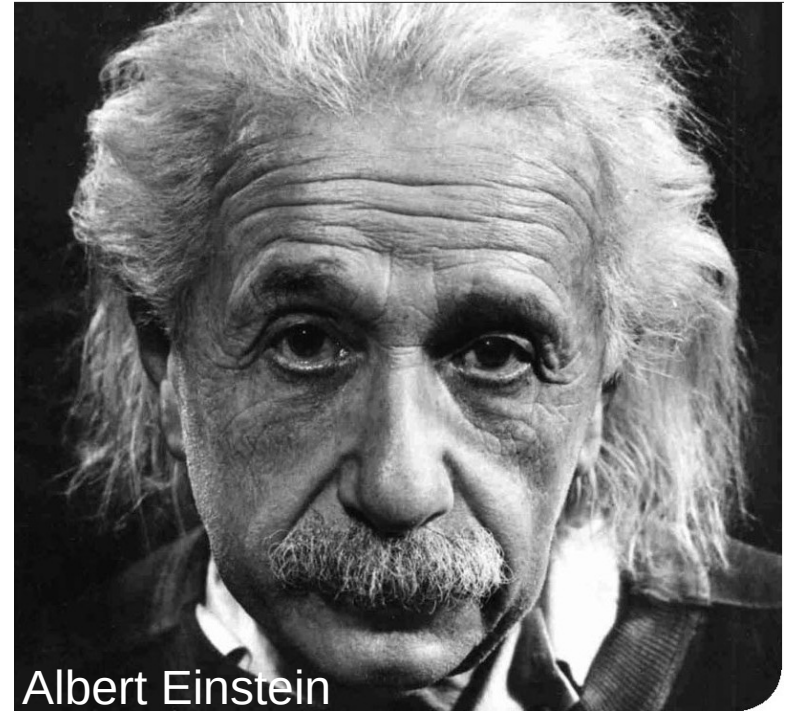
O próprio Max Planck acabou se tornando um dos fundadores da mecânica quântica.



Relatividade

A **Teoria da Relatividade** foi desenvolvida por **Albert Einstein** de 1905 (Relatividade **Restrita**) a 1915 (Relatividade **Geral**).

Ela afirma que as **propriedades** (geometria, eixo do tempo) de **espaço** e **tempo** dependem da situação do **observador**, do seu **estado** de **movimento** (velocidade, aceleração), e a sua **posição** em relação a **massas altas**.



Albert Einstein

Teremos duas aulas sobre Relatividade nesta disciplina.

As Equações de Friedmann (1922, 1924)

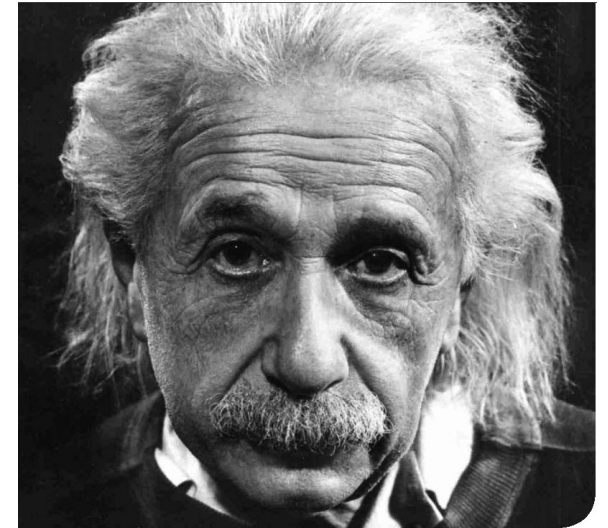
Baseado na Relatividade Geral, **Alexander Friedmann** desenvolveu a **equação** que descreve **geometria** e **evolução** do **Universo** em **grande escala**, sob a hipótese (razoável) que este é isotrópico e homogêneo em grande escala (princípio cosmológico).

Segundo esta equação, o Universo poderia estar em **contração** ou **expansão**. A **matéria** no Universo **aceleraria** a **contração** ou **freitaria** (e talvez pararia e invertaria) a **expansão**.



A Constante Cosmológica

A dedução da Equação de Friedmann permite introduzir mais um termo, contendo uma constante chamada **constante cosmológica** Λ , que pode ser associada a uma componente adicional (além da matéria) que chamaremos, por enquanto, de **Energia Escura**.



Se $\Lambda > 0$, esta componente causaria uma **força repulsiva**.

Inicialmente, **Einstein**, acreditando num Universo **estacionário**, tinha introduzido a **constante cosmológica** para **contrabalancear** os componentes **atrativos**.

A Expansão do Universo

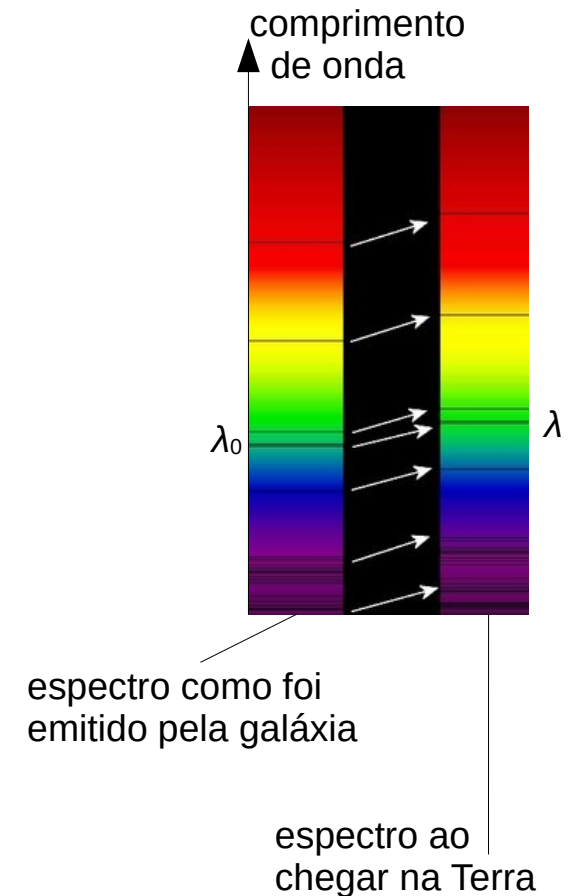
O *Redshift*

Em 1914, V. M. **Slipher** descobriu, que os **espectros** da maioria das **galáxias** são **deslocados** para **comprimentos de onda maiores** que os de repouso.

Eles sofrem um ***redshift*** ("deslocamento para o vermelho").

Interpretando este ***redshift*** como um **efeito Doppler**, isto significaria, que estas galáxias estariam se **afastando** de nós.

Uma exceção notável é a galáxia de Andrômeda, cujo espectro sofre um ***blueshift***, e que está se aproximando.



A Expansão do Universo

O Redshift

Na verdade, **não** é exatamente um **efeito Doppler**. É a **expansão do Universo**, que "**estica**" os **comprimentos de onda** da luz que o permeia.

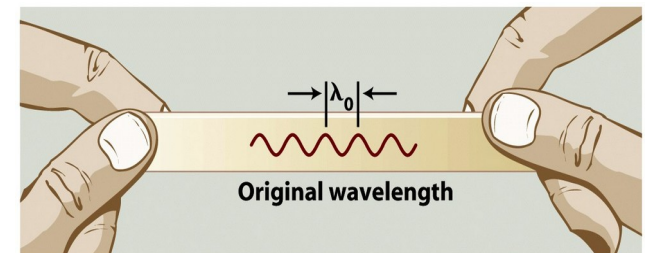
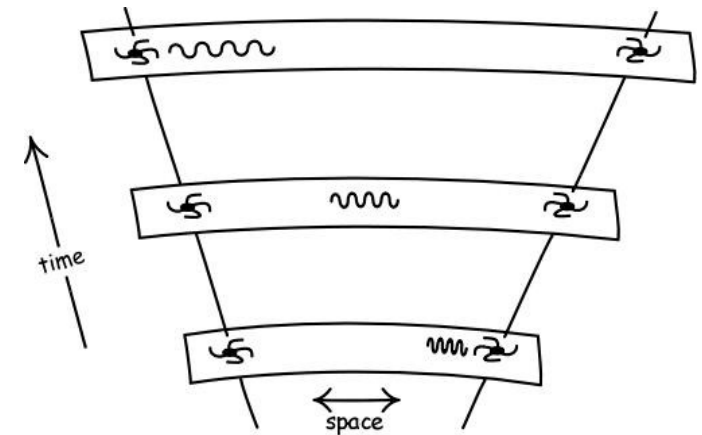
Os comprimentos de onda são esticados por um fator $1+z$, onde z é chamado de **redshift (cosmológico)**:

$$\lambda = (1+z) \cdot \lambda_0$$

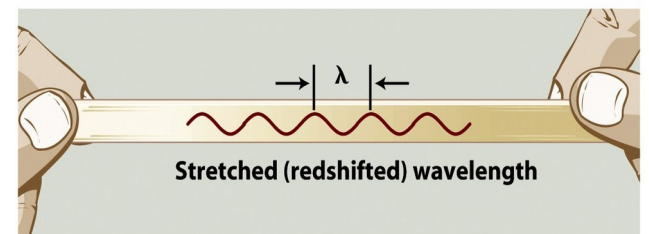
Para z pequenos ($\ll 1$), uma galáxia com redshift z está se **afastando** com velocidade

$$v = c \cdot z$$

! As próprias **galáxias não** estão **expandindo**. Elas são **gravitacionalmente ligadas**. É o **espaço entre as galáxias** que está **expandindo**.



(a) A wave drawn on a rubber band ...



(b) ... increases in wavelength as the rubber band is stretched.

A Expansão do Universo

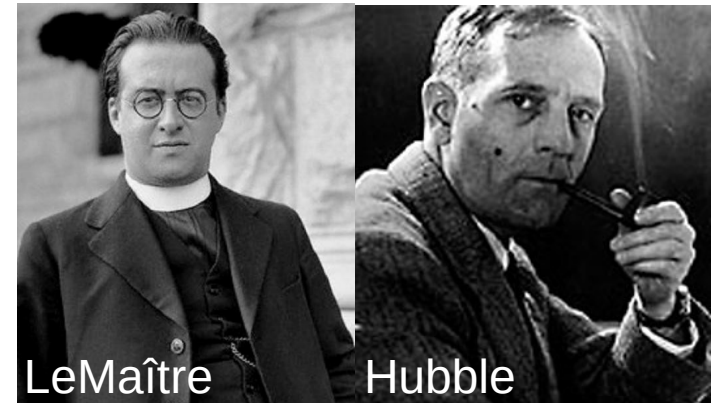
Lei de Hubble-leMaître (1929, até 2018 Lei de Hubble):

Edwin Hubble (e independentemente, Georges leMaître em 1927) descobriu, que estas **velocidades** de **recessão** das **galáxias** distantes são **proporcionais** às **distâncias** até elas (medidas usando cefeidas):

$$v = H_0 \cdot d$$

H_0 : **constante de Hubble**.

As **distâncias** ele tinha determinado usando **estrelas variáveis** chamadas **cefeidas** como **Velas Padrão** (=> aula que vem).

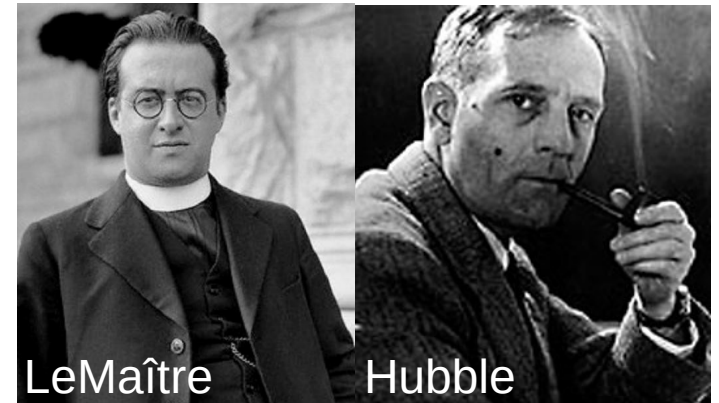


A Expansão do Universo

Lei de Hubble-leMaître (1929, até 2018 Lei de Hubble):

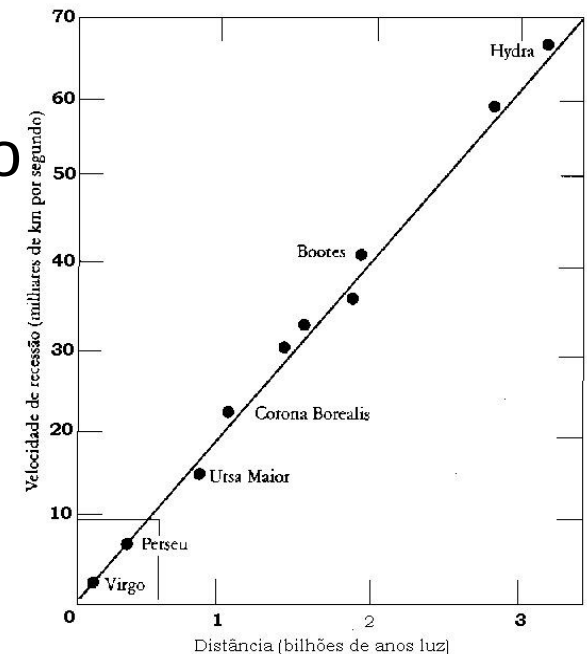
Diagrama de Hubble:
velocidade vs. distância.

A **constante de Hubble**
(inclinação da reta no gráfico) é uma
medida para a **taxa da expansão**.



Probleminha: Usando o valor determinado por Hubble e extrapolando a expansão de volta pro passado, se chega numa idade do Universo menor que a da Terra.

Isto, por que Hubble não sabia que existem dois tipos de cefeidas com relações período-luminosidade diferentes, e ele usou a errada (resolvido nas próximas décadas).



A Expansão do Universo

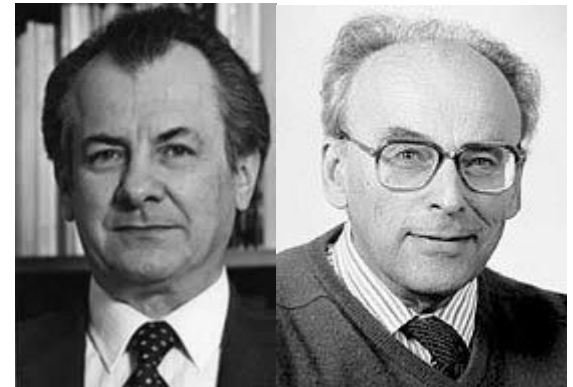
Lei de Hubble-leMaître

O valor da constante de Hubble foi um assunto controverso por décadas. Houve até um debate moderado.

Com o tempo, as opiniões convergiram para um valor perto de $70 \text{ km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$, solomonicamente entre as duas faixas.

Hoje, o valor é controverso de novo (tensão de Hubble), mas em uma escala bem menor (\Rightarrow aula RCF II).

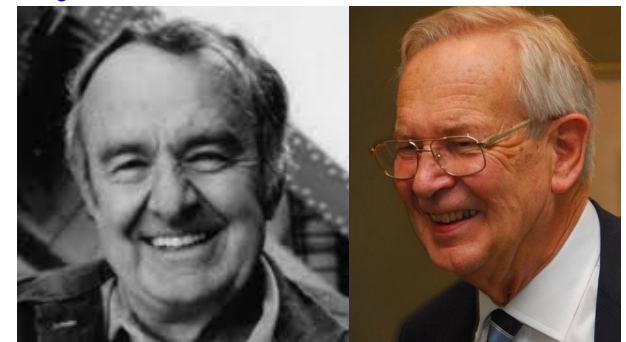
H_0 entre 80 e 100 $\text{km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$



Gérard de
Vaucouleurs
(1918-1995)

Sidney van
den Bergh
(*1929)

H_0 entre 50 e 60 $\text{km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$



Allan
Sandage
(1926-2010)

Gustav A.
Tammann
(1932-2019)

A Expansão do Universo

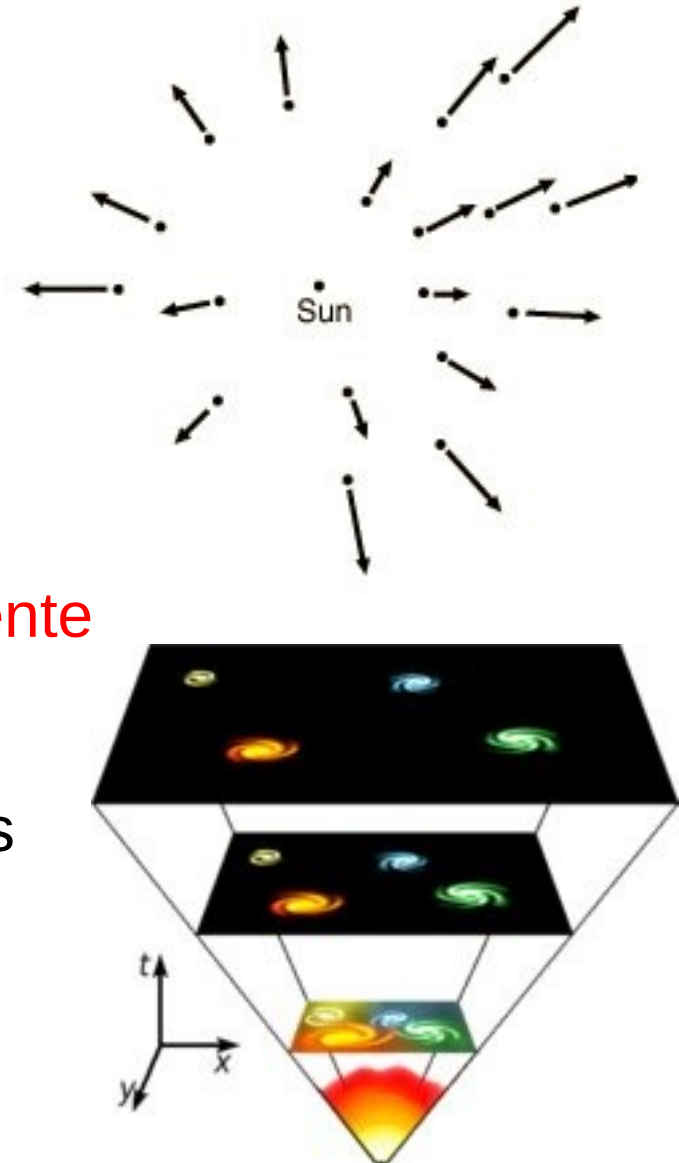
Lei de Hubble-leMaître

Se as velocidades de recessão das galáxias são proporcionais às suas distâncias até nós, então estamos no **centro** da **expansão**?

Afinal, a Terra é o **centro** do **Universo**?

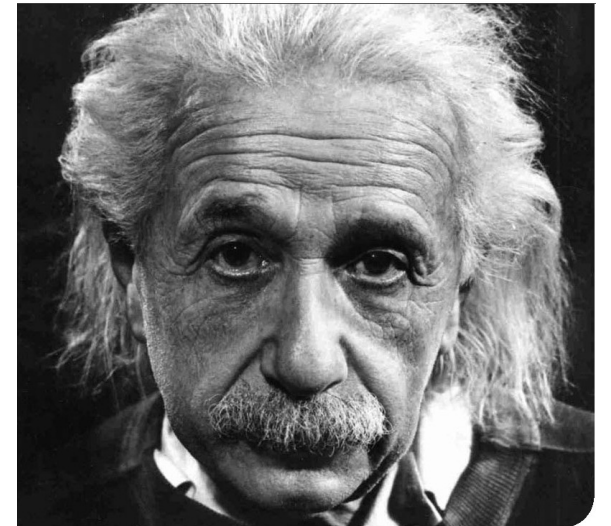
Não, num Universo **expandindo uniformemente** (homogenea- e isotropicamente), **qualquer ponto** "vê" os outros pontos se afastando com velocidades proporcionais às suas distâncias.

=> **Qualquer ponto** se "sente" o **centro** do **Universo**.



A Constante Cosmológica

Depois desta descoberta da **expansão** do **Universo**, a **constante cosmológica** **não** era mais **necessária** (o Universo não era/é estacionário) e Einstein a **retirou**, chamando a o "maior erro da vida" dele.



A Singularidade Inicial

Uma **consequência** da **expansão** do Universo é que, no passado, ele deve ter sido menor e extrapolando ainda mais pro **passado**, deve ter tido um momento, naquele



o **Universo** estava **concentrado** em um **ponto**, uma **singularidade inicial**, um estado de **densidade infinita**, sugerido pela primeira vez em 1927 por **leMaître**, que chamou esta concentração de "átomo primordial" ou "ovo cósmico".

Uma proposta bastante ousada para um padre católico. Felizmente, a igreja católica tinha evoluído desde os dias de Bruno Giordano e Galileu.

Nucleossíntese Primordial: História

Em 1948, **Fred Hoyle**, Thomas Gold e Hermann Bondi desenvolveram a Teoria do **Estado Estacionário**, segundo aquela o Universo está no mesmo estado "desde sempre".

A expansão é compensada por **criação** de **matéria** no **espaço intergaláctico** (da ordem de alguns átomos/cm³ a cada 10¹⁰ anos).

E as leis de conservação, como é que ficam?



Hoyle



Bondi



Gold

Nucleossíntese Primordial: História

Hoyle ridicularizou a proposta de Lemaître, de um começo como singularidade criando o termo *Big Bang*.



Hoje, a Teoria do Estado Estacionário **não** tem mais muitos seguidores, ao **contrário** da teoria propondo a **singularidade inicial**.

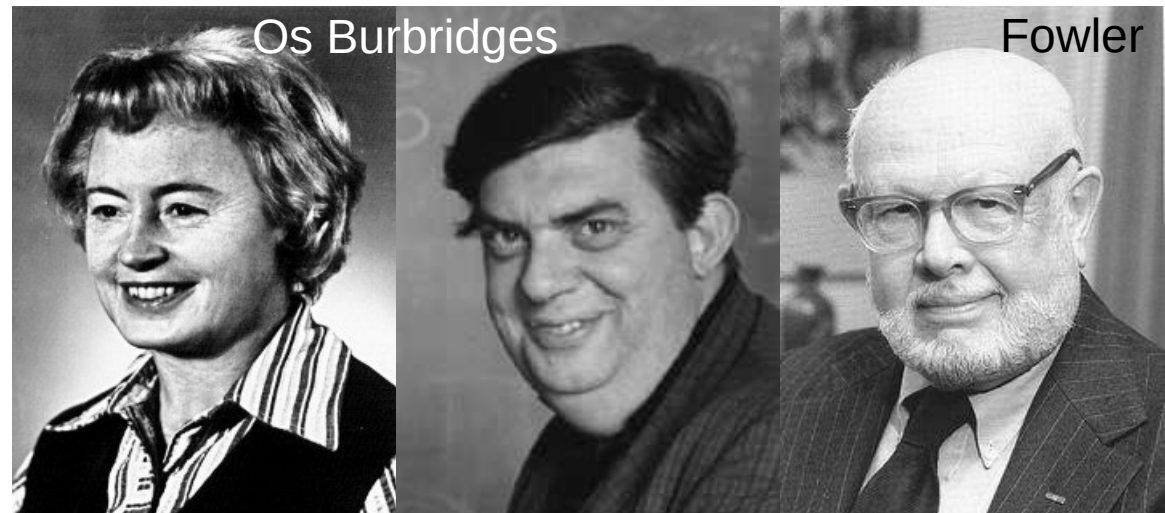


O nome *Big Bang*, criado para zoar esta teoria é usado até hoje.

Nucleossíntese Primordial: História

Mas nem tudo que o Fred Hoyle falou caiu em descrença.

Em 1957, ele, William Alfred Fowler, Margaret Burbidge e Geoffrey Burbidge publicaram o famoso artigo B²HF, sobre a **Nucleossíntese Estelar**.

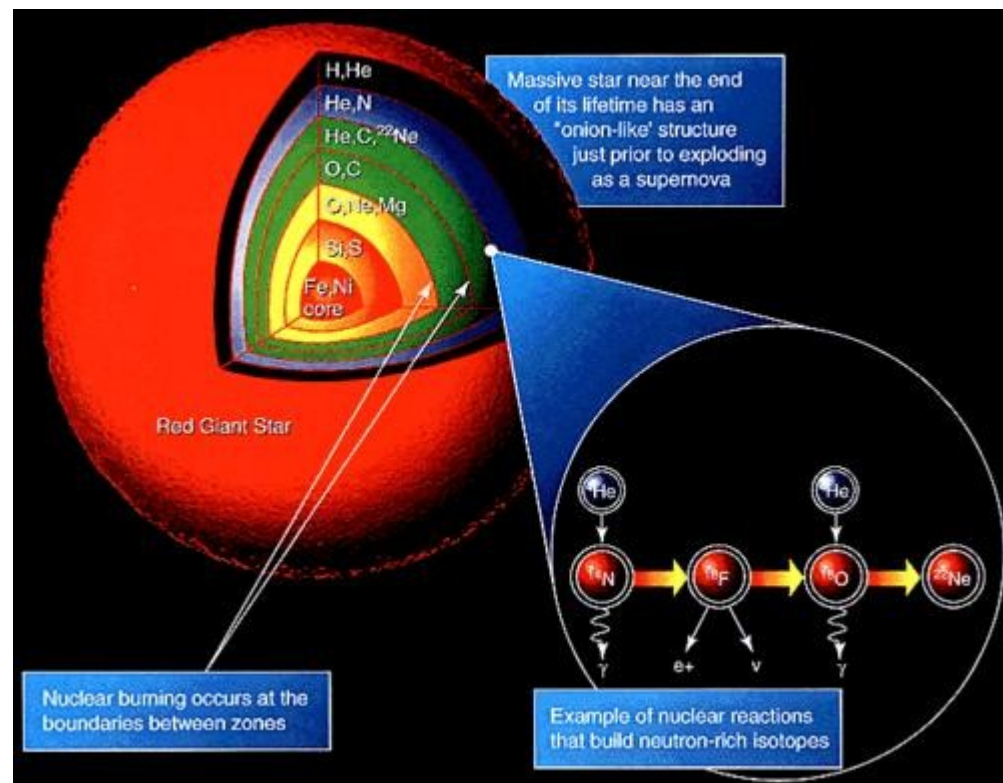


Nucleossíntese Primordial: História


O artigo B²HF afirma, que a **maioria** dos (núcleos atômicos dos) **elementos** é formada nos **interiores** das **estrelas** e/ou em **supernovas** (tirando hidrogênio, que, consistindo de apenas um próton, não precisa ser formado), deu origem a

termos como processos *r* e *s*, e **prevê** muito bem as **abundâncias** destes **elementos** no Universo.

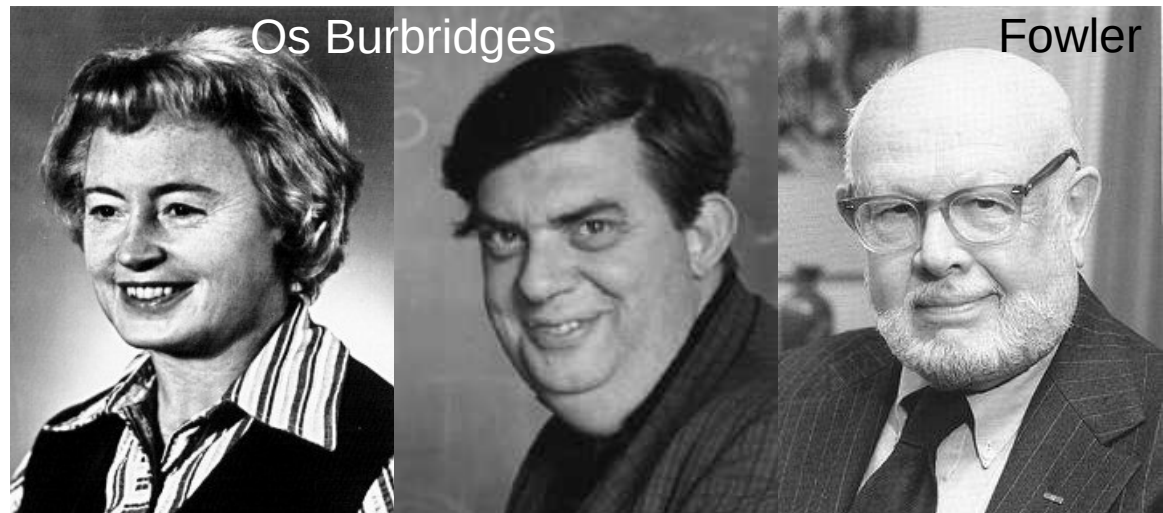
É um dos papers astronômicos mais influencias do vigésimo século.



Nucleossíntese Primordial: História

 Fowler foi laureado com o Nobel de Física em 1983 por causa deste trabalho, mas os outros três, não.

No caso do Hoyle, suspeita-se que não ganhou o prêmio por causa da sua personalidade controversa, incl. ele já tinha arrumado confusão com o comitê do prêmio em outra ocasião.



Nucleossíntese Primordial: História

Tem apenas um **probleminha**:

A Teoria da Nucleossíntese Estelar **não** consegue explicar a abundância de **hélio** no Universo.

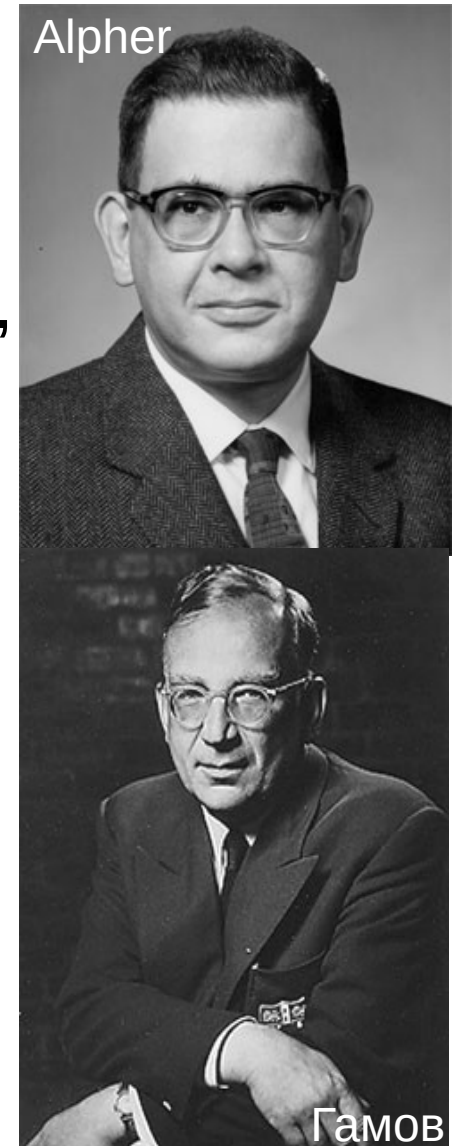
No **espaço inter-galáctico**, há **nuvens** de **gás** tênue, que pouco mudaram desde a sua formação.

Isto é, elas **não** contêm **estrelas** que poderiam ter formado os **elementos** mais **pesados** que hidrogênio.

Nestas nuvens, e no resto do Universo, **23 a 24 %** (em massa) dos átomos são de **hélio**, **muito mais** que previsto pelo teoria da **nucleossíntese estelar**.

Nucleossíntese Primordial: História

Em 1948, **Ralph Alpher** e o orientador dele, **George Gamov**, acharam uma **explicação** pra **abundância primordial** de **hélio** (e de alguns outros dos núcleos mais leves), publicada no também famoso $\alpha\beta\gamma$ paper (Alpher, Bethe e Gamov, 1948; Hans Bethe, um amigo de Gamov foi incluído para completar o siglo $\alpha\beta\gamma$, piadinho do russo).



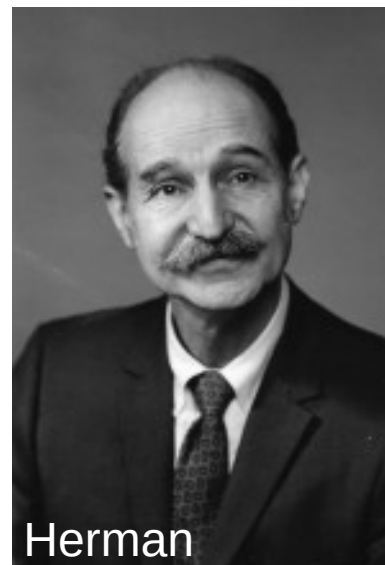
Nucleossíntese Primordial: História

Este paper mostra, que esta abundância pode ser explicada no quadro da teoria do *Big Bang*, por **fusão nuclear** nas condições extremas durante os **primeiros poucos minutos** da existência do **Universo** , num processo chamado **Nucleossíntese Primordial** ou **Nucleossíntese do *Big Bang*** (\Rightarrow aula Nucleossíntese Primordial)



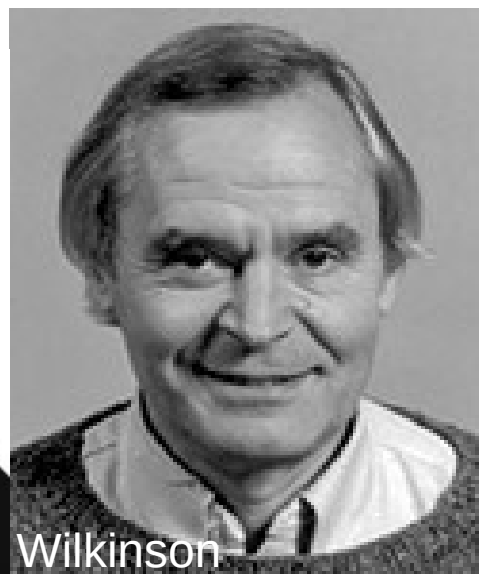
Radiação Cósmica de Fundo: História

Também no quadro da teoria do *Big Bang* e no mesmo ano, eles, juntos com o Robert Herman, preveram a existência de uma **radiação** refletindo o **estado denso** e **quente** no **início** do Universo, que ainda hoje deveria estar **permeando** o **espaço**, e ter uma temperatura da ordem de 5 K, na faixa das microondas, a **Radiação Cósmica de Fundo** (RCF, ou CMB do inglês *Cosmic Microwave Background*)



Radiação Cósmica de Fundo: História

Nos anos 60, alguns grupos de pesquisa tentaram **detectar** a RCF, incluindo um de **Robert Dicke** (com David Todd Wilkinson, o "W" no nome do satélite WMAP e Peter G. Roll), que tinha desenvolvido um tipo de detector chamado **radiômetro Dicke**, com aquele a detecção deveria ser possível.



Radiação Cósmica de Fundo: História

Mas foram os físicos

Arno Penzias

e **Robert Woodrow Wilson**,

testando um radiômetro Dicke(!)

para uma empresa de telecomunicações, que

descobriram a RCF **por acaso**

em 1964.

Teve um **ruído** vindo de todas as


direções no sinal que eles detectaram, que eles não conseguiram eliminar de jeito nenhum.




Radiação Cósmica de Fundo: História

Eles entraram em contato com o Dicke, que segundo a lenda reagiu com as palavras "Boys, we've been scooped."

Sobrou para ele e seus colegas Bernard Burke e Jim Peebles fornecer a **explicação** para este ruído misterioso.

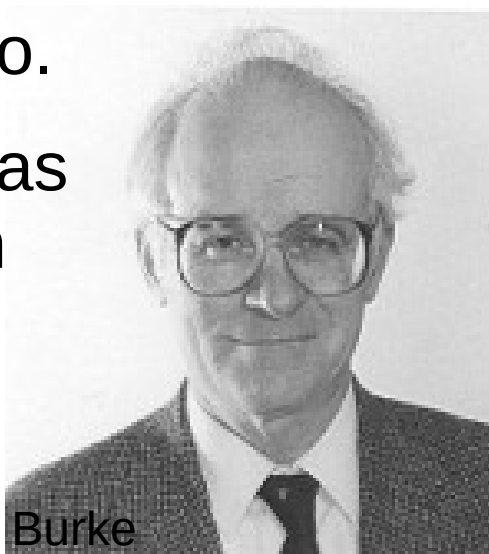
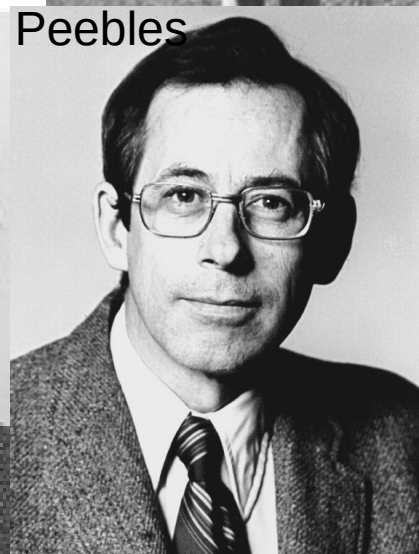
 Em 1978, Penzias e Wilson receberam o prêmio Nobel pela descoberta.

 E em 2019, Peebles o recebeu por contribuições na cosmologia teórica

Penzias e Wilson



Peebles



Burke



Dicke

Radiação Cósmica de Fundo: História

Em 1966, internado em um hospital na Bélgica, leMaître recebeu com alegria a notícia, de que sua teoria do Átomo Primordial tinha sido confirmada pela descoberta de Penzias e Wilson e era tida como a teoria padrão pela comunidade científica.



leMaître

Gamov, ao contrário, achou que a previsão dele não tinha recebido o reconhecimento que merecia. Ele morreu em 1968 por falha de fígado.



Гамов

Hoyle nunca aceitou a teoria do *Big Bang* e tentou salvar a teoria do estado estacionário fazendo modificações nela, resultando na teoria do estado quase-estacionário que nunca ganhou muita aceitação.

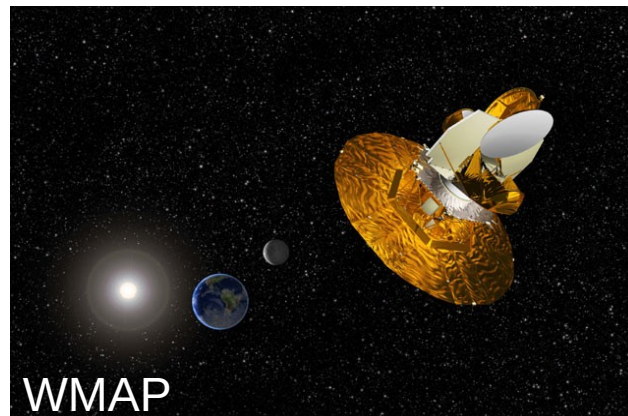
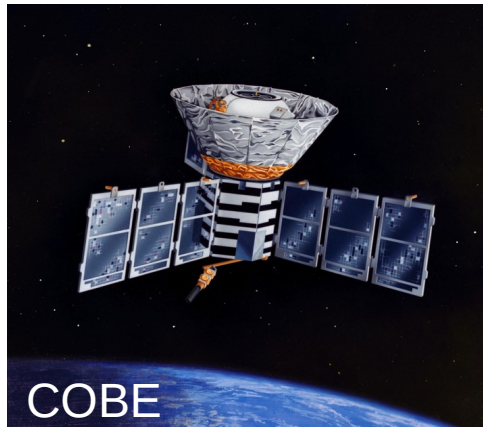


Hoyle

Radiação Cósmica de Fundo: História

Desde então, a RCF foi **estudada** usando balões na altura e pelos **satélites**

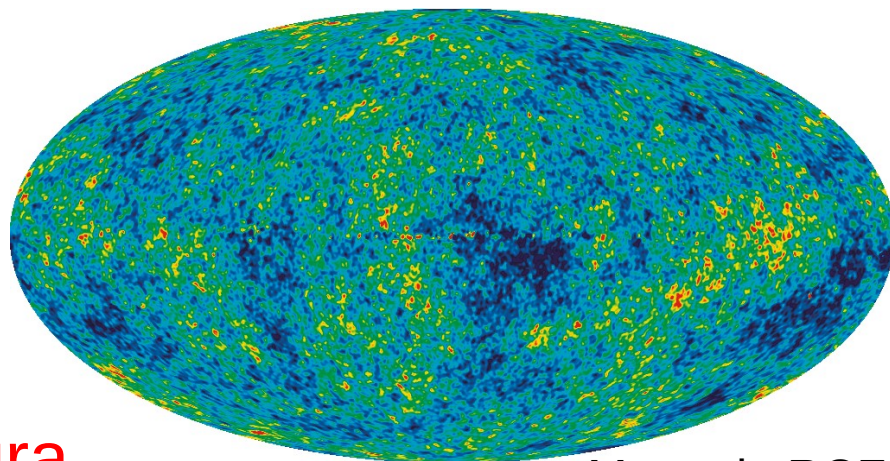
- **COBE**: lançado em 1989, resultados 1992
- **WMAP**: lançado em 2001, resultados 2003/2006
- **Planck**: lançado em 2009, mediu até 10/2013, mediu polarização também




Radiação Cósmica de Fundo: História

A RCF forneceu um tesouro de informação:

- Há **matéria além** da "comum" ou **bariônica**, que chamaremos de **Matéria Escura** (não-bariônica)
- A **geometria** do Universo é **euclidiana** em **grande escala** e há mais um componente, que poderia ser identificado com a **Energia Escura**, o "maior erro da vida" de Einstein (=> aulas RCF I e II).



Mapa da RCF

 Gerou o prêmio Nobel de física aos responsáveis pelo projeto COBE, John C. Mather e George F. Smoot



Radiação Cósmica de Fundo: História

E **Matéria** e **Energia Escuras** não são apenas "um pouquinho", contribuindo **muito mais** que a **matéria "comum"**!

O **modelo cosmológico** que contém todos estes ingredientes se chama **Λ CDM**

(do inglês " *Λ Cold Dark Matter*", o "Cold" (frio) explicaremos em outra aula), ou **modelo padrão da cosmologia**.

Uma consequência deste balanço dos componentes é, que o **Universo continuará expandindo**, e a **expansão está acelerando!**

Composição do Universo



Matéria Escura: História

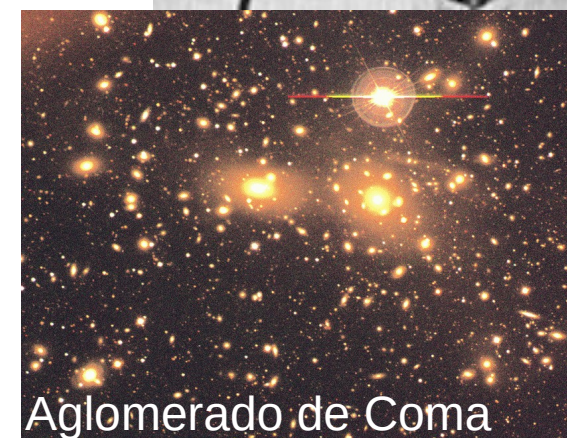
Já tinha tido **outras dicas** pra existência da **Matéria Escura**:

Em 1933, o astrônomo suíço **Fritz Zwicky** deduziu pelas **velocidades** das **galáxias** no **Aglomerado** de Coma, que este tem **mais massa** que a **visível** (bariônica), e postulou uma **matéria "faltante"**.

Fenômeno confirmado desde então para outros aglomerados de galáxias



Fritz Zwicky



Aglomerado de Coma

Galáxias Espirais e Irregulares

De maneira similar, em 1970, as **velocidades** das **estrelas** na **galáxia** de **Andrômeda** levaram **Vera Rubin** a suspeitar mais matéria que a visível na vizinha da nossa galáxia.



Mais tarde, detectou-se a mesma coisa em outras galáxias, incl. na Via Láctea.

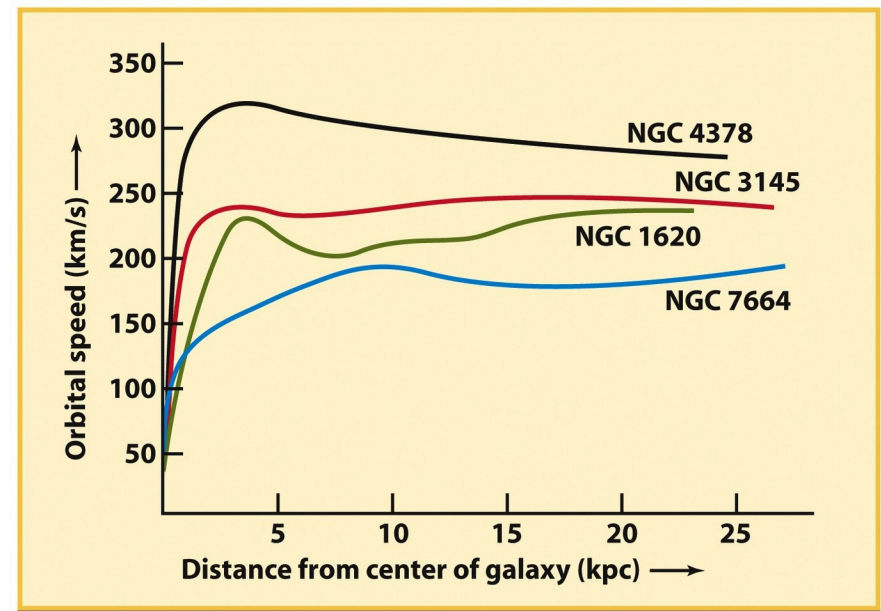
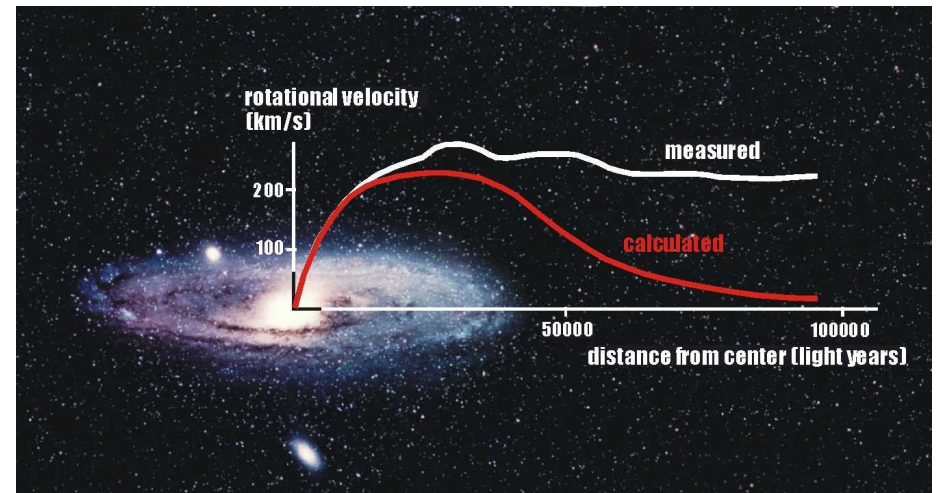


Figure 24-29
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company

Do que consiste a Matéria Escura?

O Projeto MACHO

A observação de **12 mi. estrelas** na Grande Nuvem de Magalhães (galáxia satélite da Via Láctea) **de 1992 a 1998** com um telescópio no observatório Mt. Stromlo na Austrália conseguiu descartar a hipótese, de que a Matéria Escura seria **MACHOs** (corpos compactos com Anãs Marrons, "Júpiteres" e outros), deixando sobrar a possibilidade de que ela consiste de **partículas elementares**.



Do que consiste a Matéria Escura?

Sobre a **natureza** destas partículas elementares surgiram **duas hipóteses**:

- Ela poderia consistir de partículas de **velocidades muito altas**, isto é, ser "quente",
- Ou de velocidades **menos altas**, ser "fria".

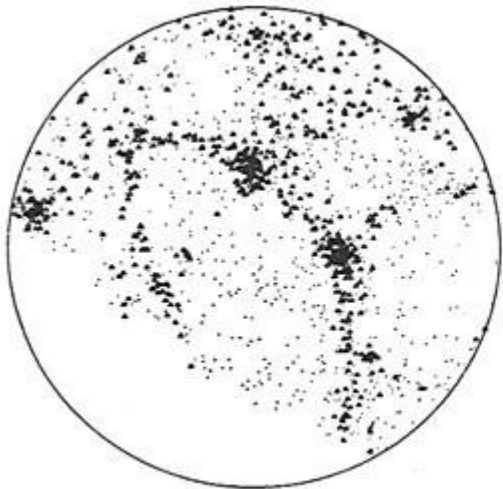
Mais detalhes sobre estas duas possibilidades aprenderemos em uma aula mais pra frente.

Do que consiste a Matéria Escura?

Simulações da evolução das grandes estruturas no Universo

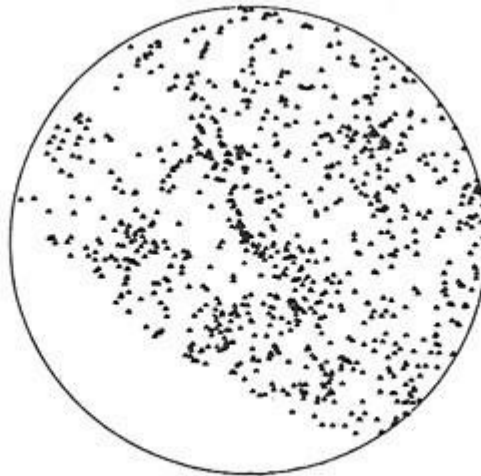
Cada ponto é uma galáxia.

Com Matéria Escura
Quente



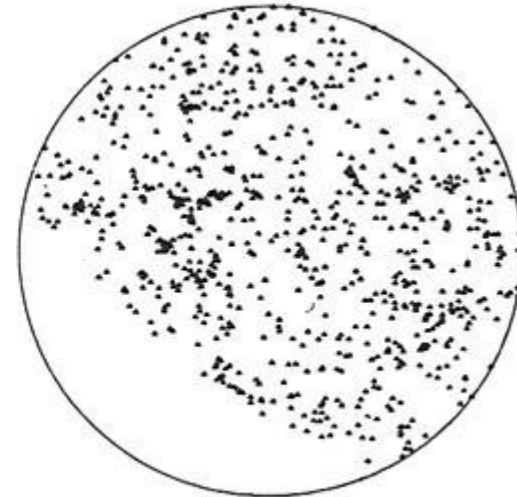
HDM

Distribuição
Observada



Observed Galaxy Distribution

Com Matéria Escura
Fria

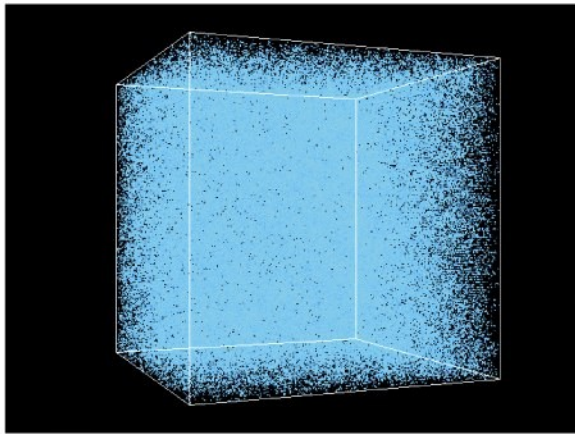


CDM

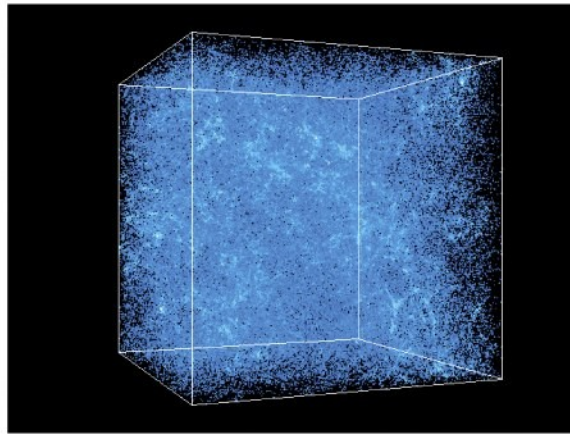
=> A simulação com **Matéria Escura Fria** reproduz a distribuição observada melhor (=> aula Matéria Escura)

Do que consiste a Matéria Escura?

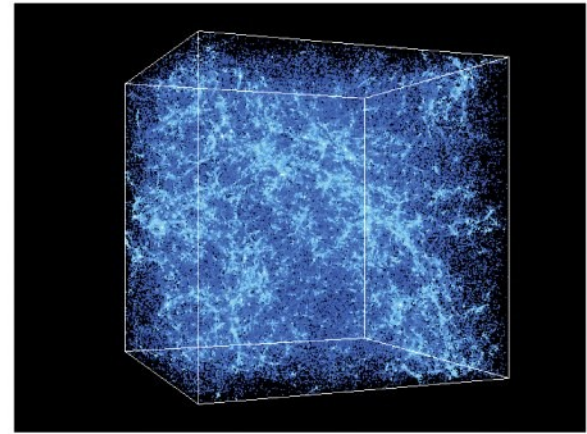
Evolução de um Cubo de Universo segundo a Simulação



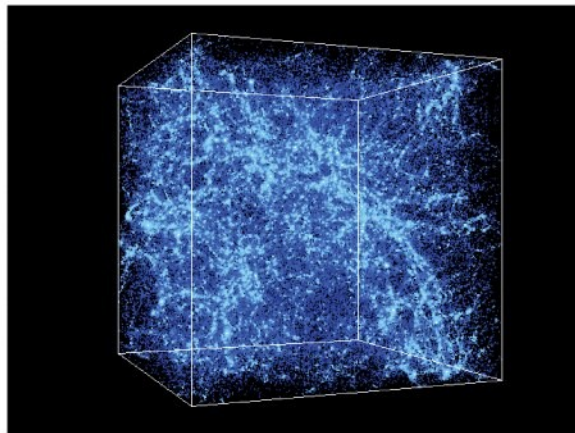
$z = 27.36$ Universe 120 million years old



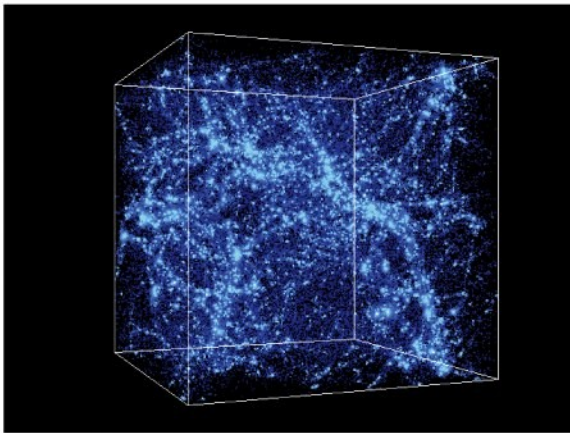
$z = 9.83$ Universe 490 million years old



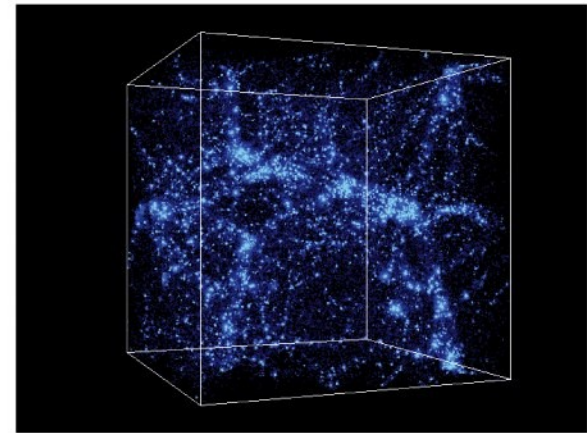
$z = 4.97$ Universe 1.2 billion years old



$z = 2.97$ Universe 2.2 billion years old



$z = 0.99$ Universe 6.0 billion years old



$z = 0.00$ Universe 13.7 billion years old

Figure 27-15

Universe, Eighth Edition

© 2008 W. H. Freeman and Company

A Inflação Cosmológica (1980)

Algumas propriedades improváveis do nosso Universo levaram **Alan Guth** a propor um período de **aumento exponencial** do **tamanho** do **Universo** nos primeiros instantes da sua existência, chamado **Inflação Cosmológica**, que consegue **explicar** estas propriedades de maneira mais natural
(=> aula Inflação).



Alan Guth

Outras Evidências para a Energia Escura

(além da muito indireta da RCF)

Luminosidades de Supernovas Ia

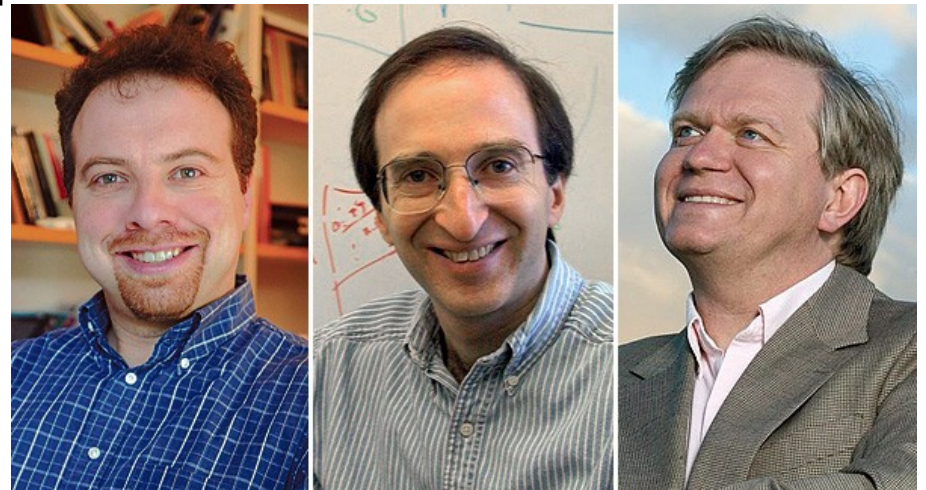
Em 1998, astrônomos descobriram que no **passado distante**, as **distâncias** das **SN Ia** são **maiores** que previsto pela Lei de Hubble-leMaître, que se baseia numa **taxa constante** de expansão.

=> A expansão era mais lenta no passado

=> A **expansão do Universo** é **acelerada**, coisa que só a Energia Escura (a constante cosmológica) consegue causar.

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

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





Universidade Federal do ABC

Introdução à Cosmologia

FIM PRA HOJE

