

# O universo em expansão: 100 anos do artigo de Friedmann

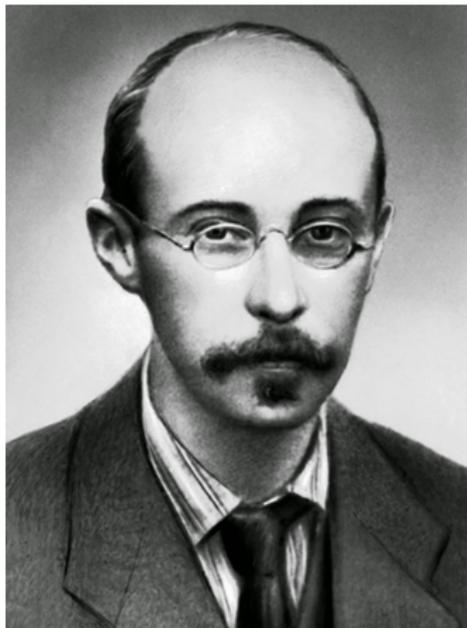
Júlio C. Fabris

Departamento de Física - Universidade Federal do Espírito Santo

COSMO22, Rio de Janeiro, 25 de agosto de 2022

# Alexander Friedmann e o universo em expansão

Alexander Friedmann, Saint-Petersburgo, Rússia (1888-1925)





# Alexander Friedmann e o universo em expansão

## O homem e o legado

- ▶ **E deu movimento ao universo!**

# Alexander Friedmann e o universo em expansão

## A Teoria da Relatividade Geral

- ▶ Em 1915 tinha sido proposta a Teoria da Relatividade Geral.
- ▶ Ela interpretava a gravidade como a geometria (dinâmica) do espaço-tempo a quatro dimensões.
- ▶ Seguia a saga inaugurada quase um século antes pela descoberta das geometrias não-euclidianas.
- ▶ E substituía a teoria da gravitação de Newton.



## Alexander Friedmann e o universo em expansão

O artigo da fundamental da cosmologia moderna

- ▶ Em 1922 Friedmann envia para a revista alemã **Zeitschrift für Physik** o artigo *Über die Krümmung des Raumes*.
- ▶ O artigo foi inicialmente recusado por Einstein que alegou que os resultados estavam errados.
- ▶ Mas, Friedmann enviou os seus cálculos à revista, mostrando que era Einstein que tinha errado nos cálculos.





# Alexander Friedmann e o universo em expansão

## As galáxias

- ▶ É preciso lembrar que apenas em torno de 1920 os astrônomos se deram conta que vivíamos em uma galáxia, e que existiam muitas outras galáxias no universo, bem distantes uma das outras.
- ▶ A controvérsia de um universo constituído de uma única galáxia (a nossa) ou de muitas galáxias, agitou o meio científico e mesmo o grande público no início do século XX.
- ▶ Envolveu dois dos maiores astrônomos da época, Curtis (muitas galáxias) e Shapley (uma única galáxia).
- ▶ Curtis ganhou!

# Alexander Friedmann e o universo em expansão

## Galáxias espirais





# Alexander Friedmann e o universo em expansão

## Galáxias elípticas





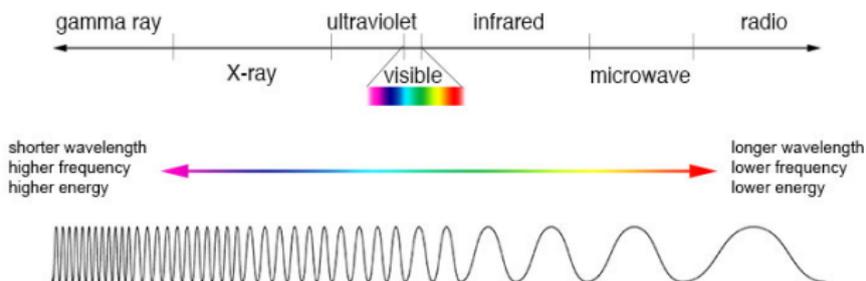
# Alexander Friedmann e o universo em expansão

## A luz

- ▶ Nós observamos o universo através da luz que recebemos dos diversos objetos que o preenchem.

# Alexander Friedmann e o universo em expansão

## Espectro









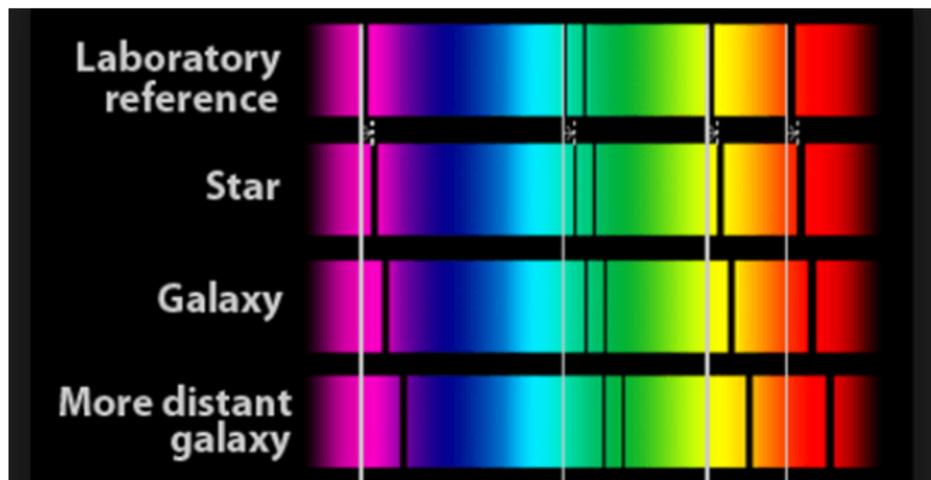
# Alexander Friedmann e o universo em expansão

## A luz

- ▶ A mudança no comprimento de onda da luz devido ao movimento relativo pode alterar o espectro devido a transições atômicas dos átomos de outras galáxias quando medido por nós na Terra.

# Alexander Friedmann e o universo em expansão

## Linhas espectrais



# Alexander Friedmann e o universo em expansão

## Desvio para o vermelho

- ▶ Os astrônomos começaram a observar o espectro das galáxias distantes.
- ▶ Perceberam que todas apresentavam um desvio para o vermelho na linha espectral.

# Alexander Friedmann e o universo em expansão

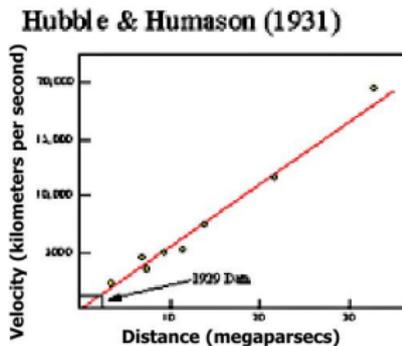
## Desvio para o vermelho

- ▶ Ao mesmo tempo, começaram a medir a distância dessas mesmas galáxias.
- ▶ Notaram que o desvio para o vermelho era maior quanto mais distante a galáxia.

# Alexander Friedmann e o universo em expansão

## As medidas de Hubble

### Hubble's Law

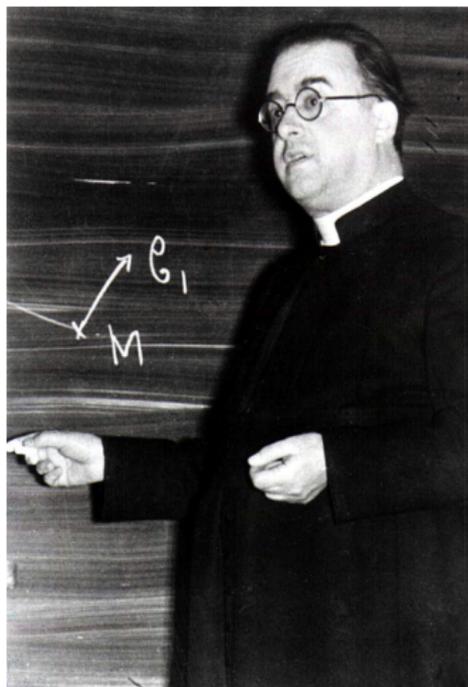


NASA StarChild

<http://starchild.gsfc.nasa.gov/docs/StarChild/questions/redshift.html>

# Alexander Friedmann e o universo em expansão

O universo em expansão - Georges Lemaître



# Alexander Friedmann e o universo em expansão

## Lei de Hubble-Lemaître

- ▶ A lei que codifica esta informação:

$$V = H_0 D. \quad (3)$$

- ▶ Ou,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = H_0 D. \quad (4)$$

# Alexander Friedmann e o universo em expansão

## Lei de Hubble-Lemaître

- ▶ As observações indicam que,

$$H_0 \sim 70 \frac{\text{km}}{\text{Mpc.s}}. \quad (5)$$

- ▶ Isto é condizente com uma idade do universo da ordem de,

$$T_U \sim 13,8 \text{ bilhões de anos}. \quad (6)$$

# O universo em expansão

## A expansão cósmica

- ▶ Observamos todas as galáxias se afastando de nós.
- ▶ Isto indica um universo em expansão?
- ▶ Sim, indica se não ocupamos nenhum lugar privilegiado no universo: o que vemos, um outro observador em uma região distante do universo também veria.
- ▶ Isto caracteriza o **Princípio Cosmológico**.



## O universo em expansão

### A expansão cósmica

- ▶ Se o princípio cosmológico é verdadeiro, no universo todas as galáxias se afastam das demais.
- ▶ Mas, e se *passarmos o filme ao contrário*, invertendo o fluxo temporal? Nesse caso, tudo se aproxima de tudo.
- ▶ Esta aproximação geraria, em um tempo finito, a contração de tudo o que vemos em *um único ponto*.
- ▶ Esta seria a singularidade no início da história do universo, ao qual se deu o nome de *Big Bang*.

# O universo em expansão

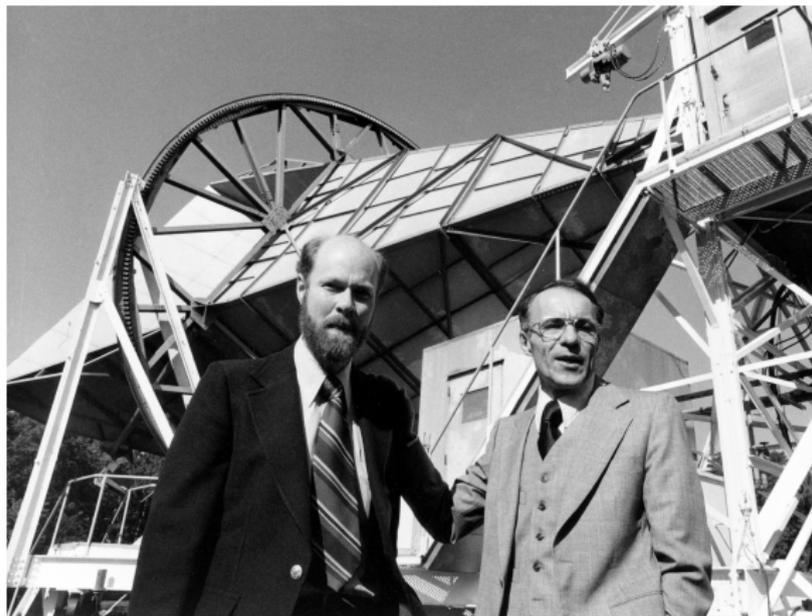
## O Big Bang

- ▶ Podemos ter indícios que esta singularidade ocorreu?
- ▶ Há formas de se ter evidências que o universo já foi muito menor e muito mais quente do que hoje.
- ▶ Mas, a singularidade inicial é um outro problema.



# O universo em expansão

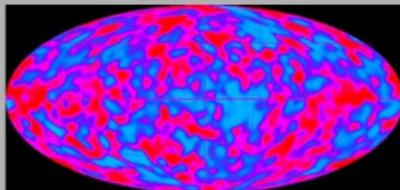
Penzias e Wilson



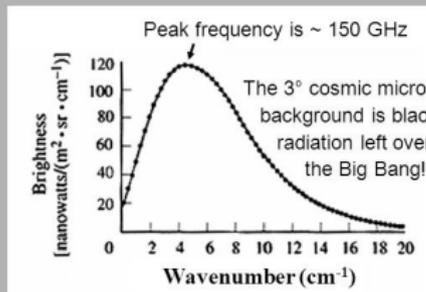
# O universo em expansão

## Espectro do corpo negro do universo

### Cosmic Microwave Background



Microwave background vs. angle. Note the variations.

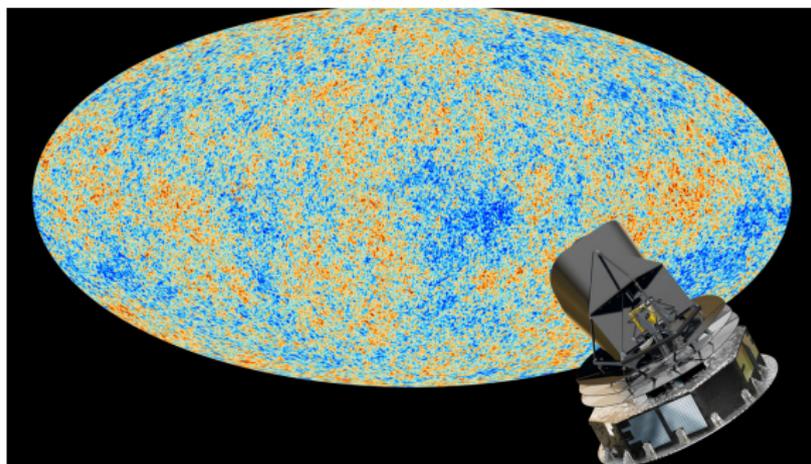


Interestingly, blackbody radiation retains a blackbody spectrum despite the expansion the universe. It does get colder, however.



# O universo em expansão

## Flutuações na temperatura





# O universo em expansão

## O espectro da CMB

- ▶ As flutuações na *radiação cósmica de fundo* (RCF), mesmo que muito pequenas, nos dão muitas informações sobre o conteúdo de matéria e energia do universo e de como as estruturas se formaram.
- ▶ Em particular:
  1. Nos indicam a densidade total de matéria e energia hoje,
  2. A densidade de matéria *ordinária*,
  3. A presença e a densidade de matéria *exótica*,
  4. A idade do universo, etc.



# O universo em expansão

## O espectro da CMB

- ▶ Essas pequenas flutuações nas temperaturas nos indicam como eram as perturbações na densidade,

$$\frac{\delta\rho}{\rho}, \quad (9)$$

e como elas evoluíram com o tempo.

# O universo em expansão

## O espectro da CMB

- ▶ Essas flutuações obedecem a equação,

$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} - 4\pi G\rho\delta = 0, \quad (10)$$

que descreve como as galáxias se formaram.



# O universo em expansão

## Estruturas em largas escalas



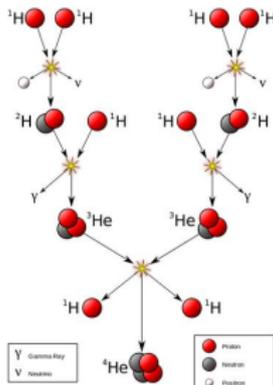


# O universo em expansão

## A nucleossíntese primordial

### PRIMORDIAL (BIG BANG) NUCLEOSYNTHESIS

Resulted in the abundance of H and He we see in the universe today!



# O universo em expansão

## A nucleossíntese primordial

### Cosmic Concordance

● **Primordial nucleosynthesis**

» explains observed, light element abundances if the density of normal matter (baryons) in the universe lies around  $3.5 \times 10^{-31} \text{ g/cm}^3$  or 0.21 hydrogen atoms per cubic meter

● **Precise observational test**

» independent measurements of abundances of four different light elements lead to consistent constraints on the density of normal matter

» provides confidence that primordial or Big Bang nucleosynthesis provides a correct explanation of the formation of the light elements.

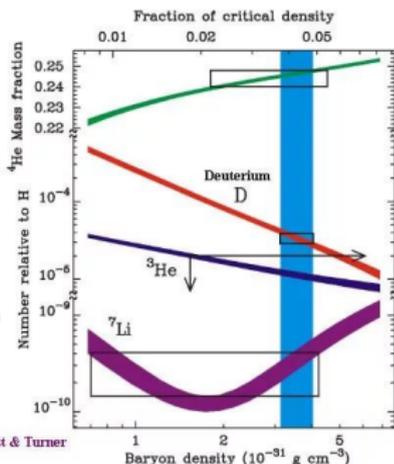


Figure taken from APS poster by Burles, Nollett & Turner

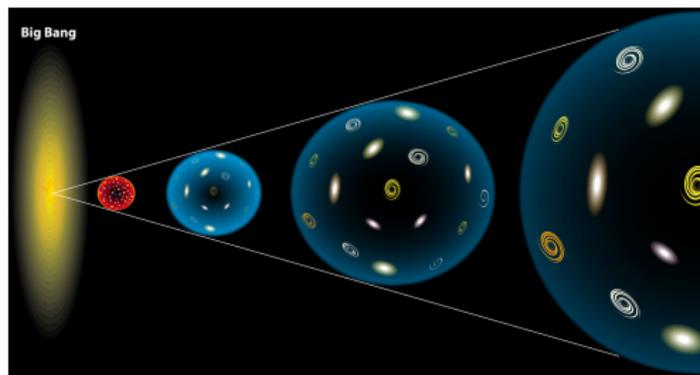
# O universo em expansão

## A nucleossíntese primordial

- ▶ Supondo um universo dominado, no seu início, pela radiação, com altíssimas temperaturas, e uma densidade compatível com a medida hoje por outros métodos, entendemos a distribuição dos elementos químicos leves:
  - ▶ Hidrogênio, compõe aproximadamente 75% da matéria observada;
  - ▶ Hélio compõe aproximadamente 25% da matéria observada.
- ▶ O modelo de um universo em expansão, inicialmente quente e que se esfria à medida que se expande, parece funcionar.

# O universo em expansão

## O universo em expansão



# O universo em expansão

Está tudo bem?

- ▶ **Estamos no melhor dos mundos possíveis?**

# O universo em expansão

Está tudo bem?

- ▶ Mais ou menos...
- ▶ **Nuvens pairam sobre este cenário idílico.**

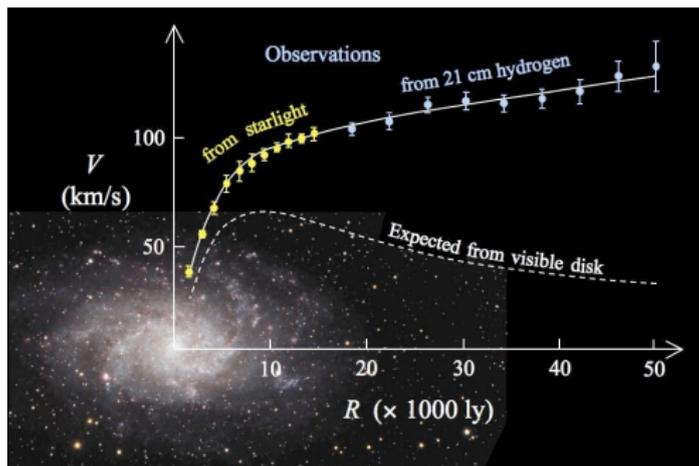
# O universo em expansão

## Matéria escura

- ▶ Para que as estruturas se formem conforme as observações indicam, deve haver uma nova component de matéria, de natureza ainda desconhecida, denominada *matéria escura*.
- ▶ Ela deve ser quatro vezes mais abundante que a matéria ordinária.
- ▶ Ela é também necessária para explicar a curva de rotação das galáxias.

# O universo em expansão

## Matéria escura



## O universo em expansão

### Energia escura

- ▶ Observações usando supernovas tipo Ia indicam que o universo está hoje em expansão acelerada.
- ▶ Para que isto ocorra é necessário que exista uma outra componente no universo, de natureza ainda desconhecida, com efeitos gravitacionais repulsivos.
- ▶ Esta componente é denominada *energia escura*.



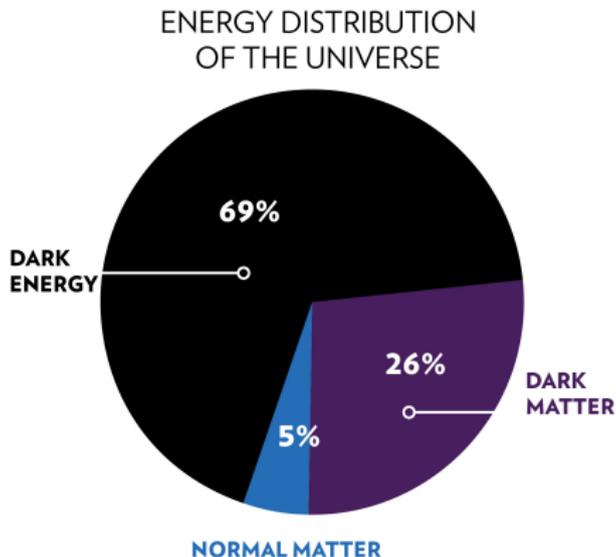
# O universo em expansão

## Energia escura

- ▶ O que é esta energia escura?
- ▶ Constante cosmológica? Um campo escalar com auto-interação?
- ▶ Ou será que a verdadeira teoria gravitacional é outra, diferente da Relatividade Geral?

# O universo em expansão

## Energia e matéria no universo



# O universo em expansão

## O setor escuro do universo

- ▶ 95% do conteúdo de matéria e energia no universo é de natureza desconhecida.
- ▶ Isto se quisermos explicar as observações usando a teoria da Relatividade Geral (que funciona muito bem em escalas locais).

## O universo em expansão

### A tensão do $H_0$

- ▶ Medidas locais indicam  $H_0 \sim 74\text{Km/Mpc.s}$ .
- ▶ Medidas cosmológicas indicam  $H_0 \sim 68\text{Km/Mpc.s}$ .
- ▶ O problema é que as medidas são muito precisas!
- ▶ Como entender esta discrepância?

# O universo em expansão

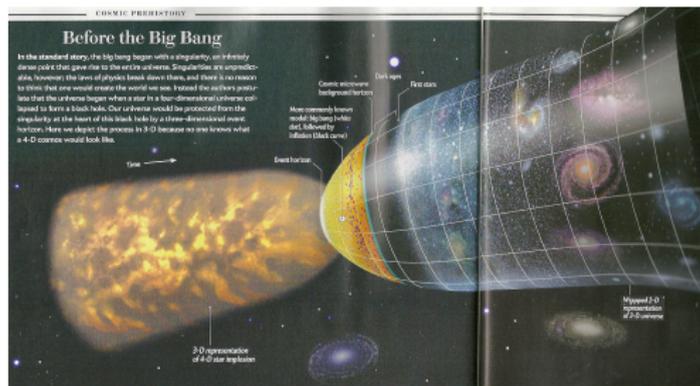
## Singularidade inicial

- ▶ Ainda há o problema da singularidade inicial!
- ▶ No momento em que se inicia a história cósmica, segundo o modelo do Big Bang, temperatura, densidade, etc., são infinitas!
- ▶ Nenhuma física é possível neste caso.



# O universo em expansão

## O início



## Conclusão

- ▶ Está tudo bem com o *modelo cosmológico padrão* ou não?
- ▶ Controvérsia! Temos que pensar e trabalhar mais para entender o universo.
- ▶ Esta parece ser a conclusão mais sensata.
- ▶ Mas, há um fato: a hipótese de Friedmann que o universo não é estático, mas dinâmico, nos levou muito longe na compreensão do cosmo.

# Conclusão

O livro de Amoroso Costa: 1922-2022



Amoroso Costa, §13/01/1885 †03/12/1928