

O universo em expansão: 100 anos do artigo de Friedmann

Júlio C. Fabris

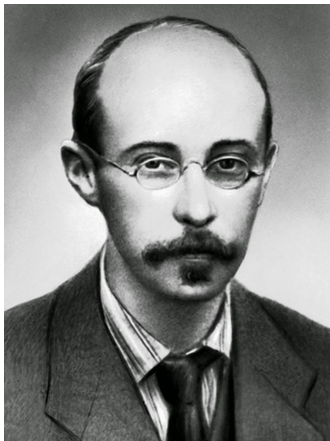
Departamento de Física - Universidade Federal do Espírito Santo

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

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

O artigo fundamental da cosmologia moderna

377

Über die Krümmung des Raumes.

Von A. Friedmann in Petersburg.

Mit einer Abhandlung. (Eingegangen am 26. Juni 1922.)

§ 1. In ihren bekannten Arbeiten über allgemeine kosmologische Fragen (kommen Einstein¹⁾ und de Sitter²⁾ zu zwei möglichen Typen des Weltalls; Einstein erklärt die sogenannte Zylinderwelt, in der der Raum³⁾ konstante, von der Zeit unabhängige Krümmung besitzt, wobei der Krümmungsradius verbunden ist mit der Gesamtmasse der im Raume vorhandenen Materie; de Sitter erhält eine Kugelwelt, in welcher nicht nur der Raum, sondern auch die Welt in gewissem Sinne als Welt konstanter Krümmung angesehen werden kann⁴⁾. Dabei werden wie von Einstein so auch von de Sitter gewisse Voraussetzungen über den Materiezustand gemacht, die der Inkohärenz der Materie und ihrer relativen Ruhe entsprechen, d. h. die Geschwindigkeit der Materie wird als genügend klein vorausgesetzt im Vergleich zu der Grundgeschwindigkeit⁵⁾ — der Lichtgeschwindigkeit.

Das Ziel dieser Note ist, erstens die Ableitung der Zylinder- und Kugelwelt (als spezielle Fälle) aus einigen allgemeinen Annahmen, und zweitens der Beweis der Möglichkeit einer Welt, deren Raumkrümmung konstant ist in Bezug auf drei Koordinaten, die als Raumkoordinaten gelten, und abhängig von der Zeit, d. h. von der vierten — der Zeitkoordinate; dieser neue Typus ist, was seine übrigen Eigenschaften anbetrifft, ein Analogon der Einsteinschen Zylinderwelt.

2. Die Annahmen, die wir unseren Betrachtungen zugrunde legen, zerfallen in zwei Klassen. Zu der ersten Klasse gehören Annahmen, welche mit den Annahmen Einsteins und de Sitters zusammen-

¹⁾ Einstein, Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie, Sitzungsberichte Berl. Akad. 1917.

²⁾ de Sitter, On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences, Monthly Notices of the R. Astronom. Soc. 1918—1917.

³⁾ Unter „Raum“ verstehen wir hier einen Raum, der durch eine Mannigfaltigkeit von drei Dimensionen beschreiben wird; der „Welt“ entspricht eine Mannigfaltigkeit von vier Dimensionen.

⁴⁾ Kriegl, Über die Integritäten der Relativitätstheorie und die Theorie der räumlich gleichmassigen Welt, Sitzung Math. 1918.

⁵⁾ Hubs diese Masse bei Edington in seinem Buche: Space, Time et Gravitation, 2 Parts, R. 10. Paris 1921.

Alexander Friedmann e o universo em expansão

O artigo da fundamental da cosmologia moderna

- ▶ Até Friedmann, todos os modelos cosmológicos propostos indicavam um universo estático.
- ▶ Pela primeira vez na história da humanidade foi evocada a possibilidade de se ter um universo dinâmico, que muda com o tempo.

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 barradas



Alexander Friedmann e o universo em expansão

Galáxias elípticas



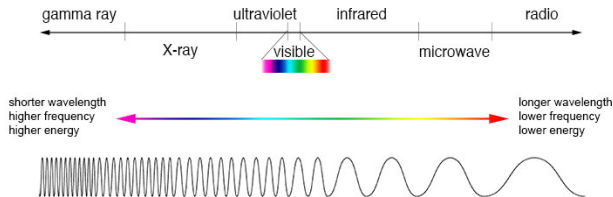
Alexander Friedmann e o universo em expansão

As galáxias

- ▶ As galáxias foram fundamentais para testar a hipótese de um universo dinâmico.
- ▶ Elas são grandes, muito luminosas, e podem ser vistas mesmo se muito longe.
- ▶ Muito longe também significa que elas trazem sinais do passado.

Alexander Friedmann e o universo em expansão

Espectro



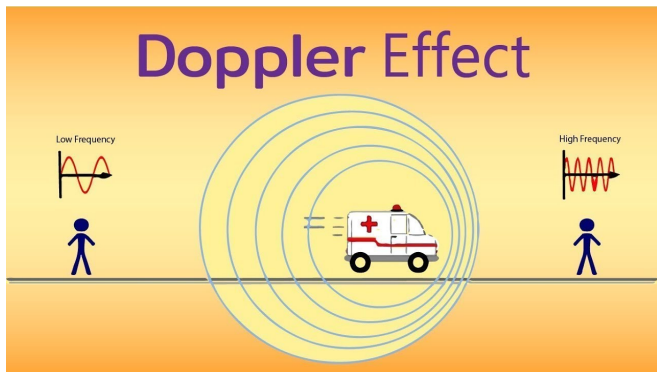
Alexander Friedmann e o universo em expansão

A luz

- ▶ A luz é uma onda, onda eletromagnética.
- ▶ Em alguns aspectos semelhante ao som (também uma onda) mas em muitos outros aspectos a luz é distinta do som.

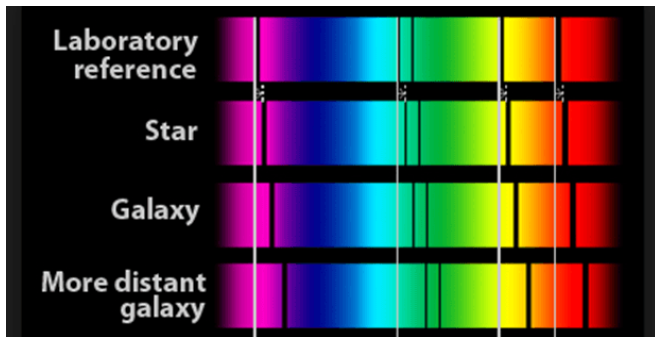
Alexander Friedmann e o universo em expansão

Espectro



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

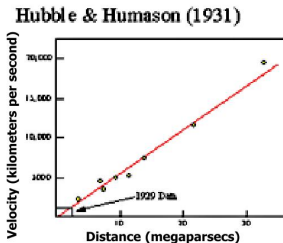
Desvio para o vermelho

- ▶ 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

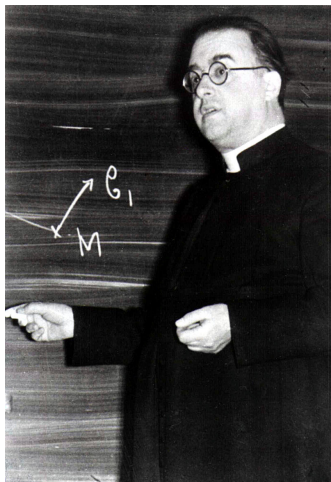


NASA StarChild

<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

- ▶ 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

A temperatura do universo

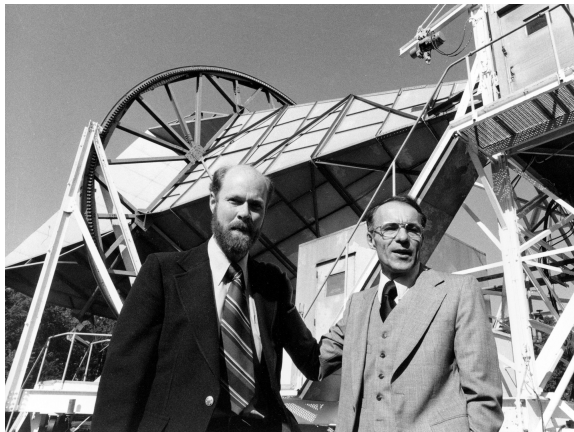
- ▶ O universo hoje tem uma temperatura:

$$T_0 = 2,7\text{K}(\approx -270\text{C}). \quad (7)$$

- ▶ A *temperatura* do universo foi medida em 1964.

O universo em expansão

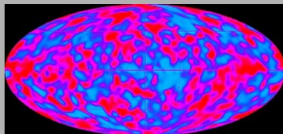
Penzias e Wilson



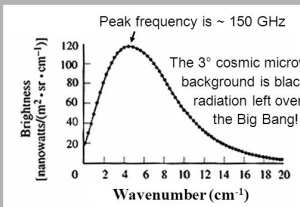
O universo em expansão

Espectro do corpo negro do universo

Cosmic Microwave Background



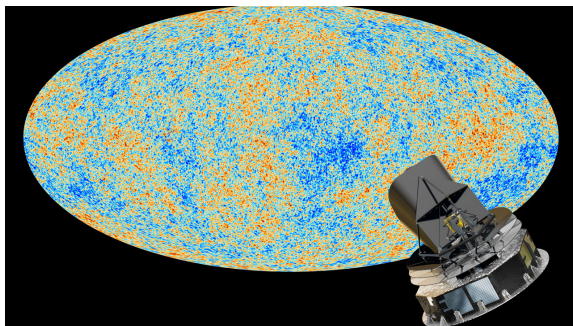
Microwave background vs. angle. Note the variations.



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

Estruturas em largas escalas



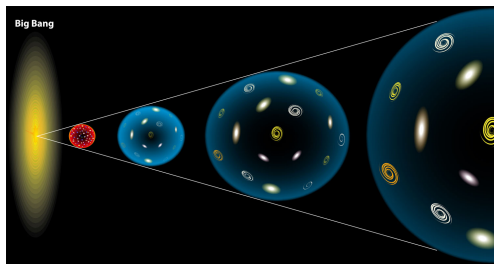
O universo em expansão

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.**

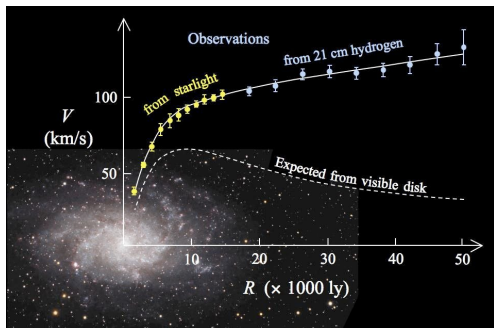
O universo em expansão

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



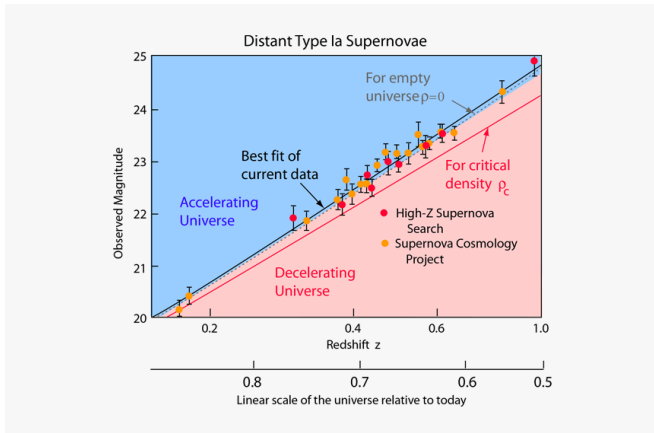
O universo em expansão

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

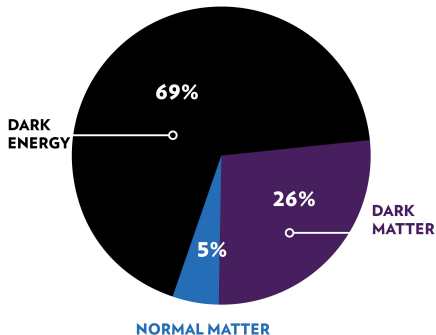
Energia escura



O universo em expansão

Energia e matéria no universo

ENERGY DISTRIBUTION OF THE UNIVERSE



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

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