

Aula II: Hipóteses fundamentais do modelo cosmológico padrão

Carlos Bengaly



Resumo

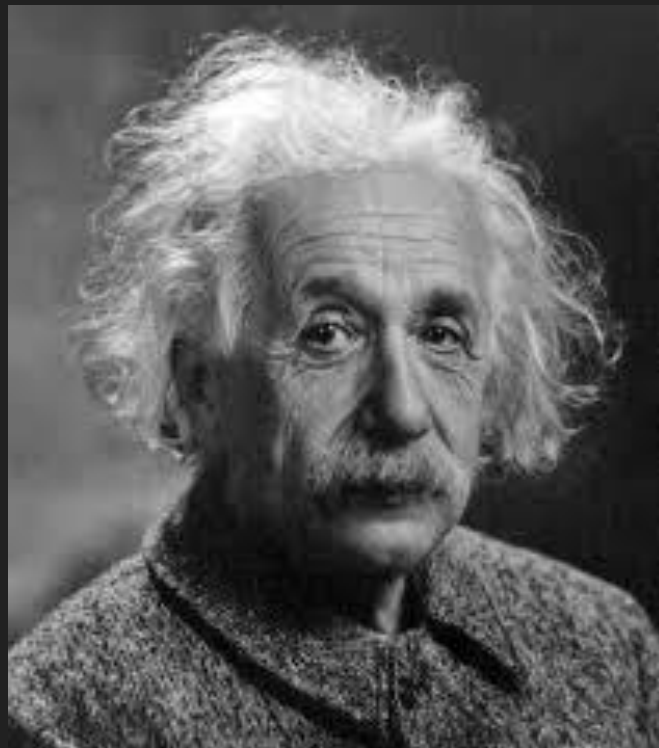
- A teoria da Relatividade Geral (TRG):
 - Teoria da Relatividade especial e geral
 - Testes observacionais da TRG
 - A TRG realmente descreve o Universo em grandes escalas?

Resumo

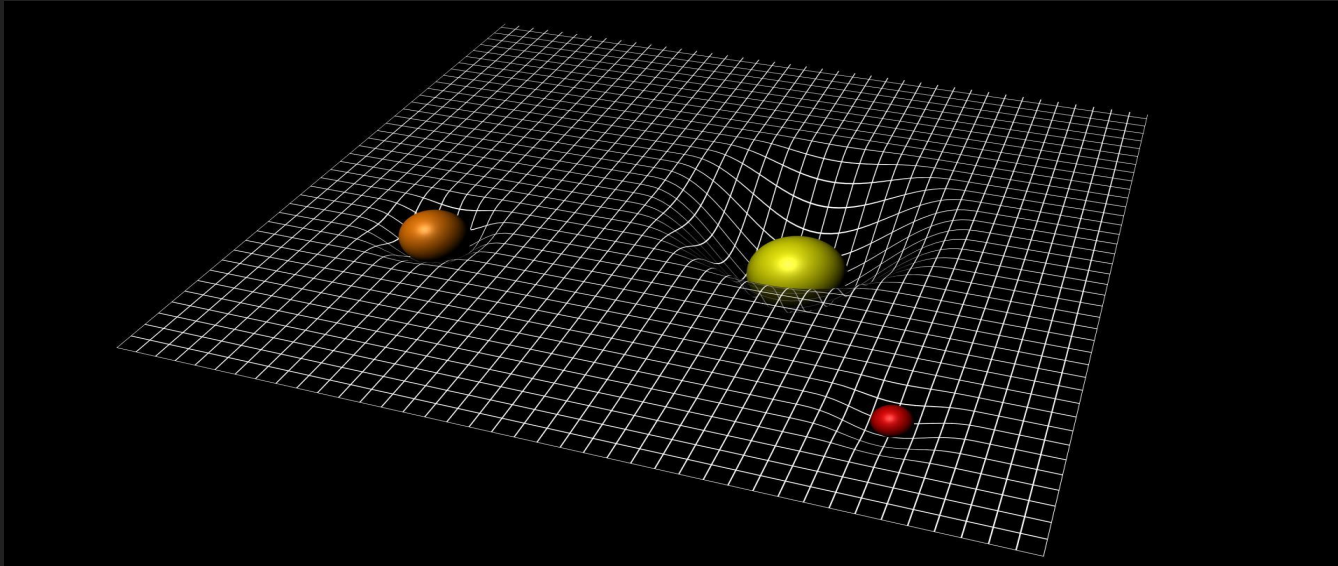
- **A teoria da Relatividade Geral (TRG):**
 - Teoria da Relatividade especial e geral
 - Testes observacionais da TRG
 - A TRG realmente descreve o Universo em grandes escalas?
- **O Princípio Cosmológico (PC)**
 - O PC na história: como diferentes povos “pensavam” no PC
 - Métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW)
 - Calculando distâncias e idades cosmológicas
 - “the fitting problem”

A Teoria da Relatividade Geral (TRG)

A Teoria da Relatividade Geral (TRG)

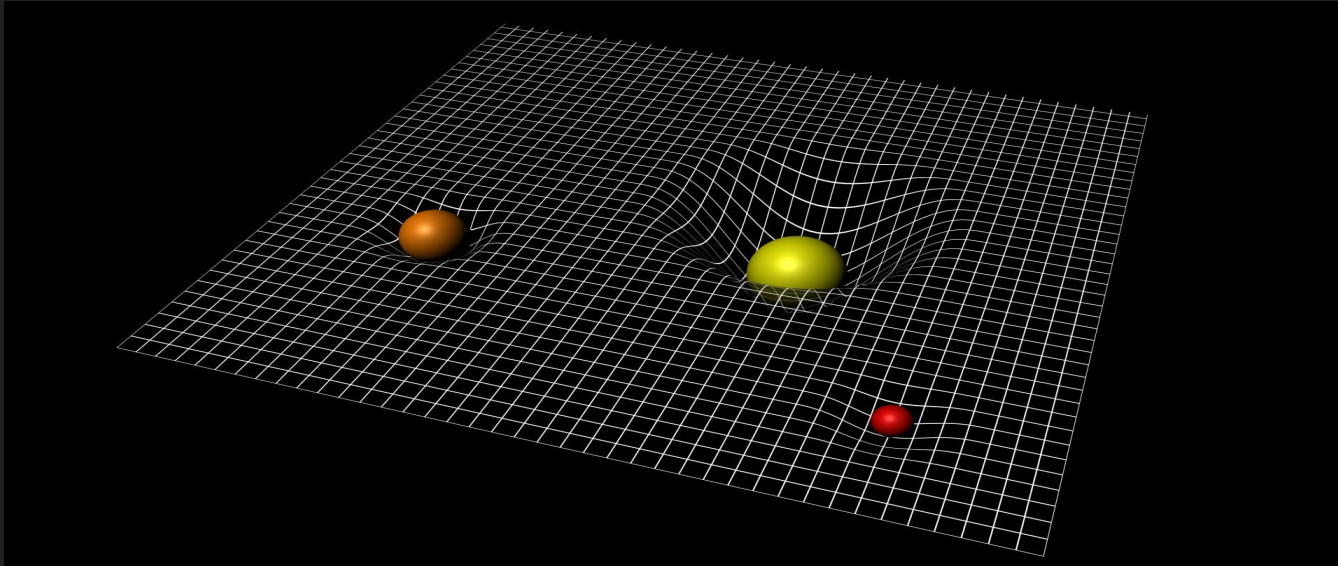


A Teoria da Relatividade Geral (TRG)



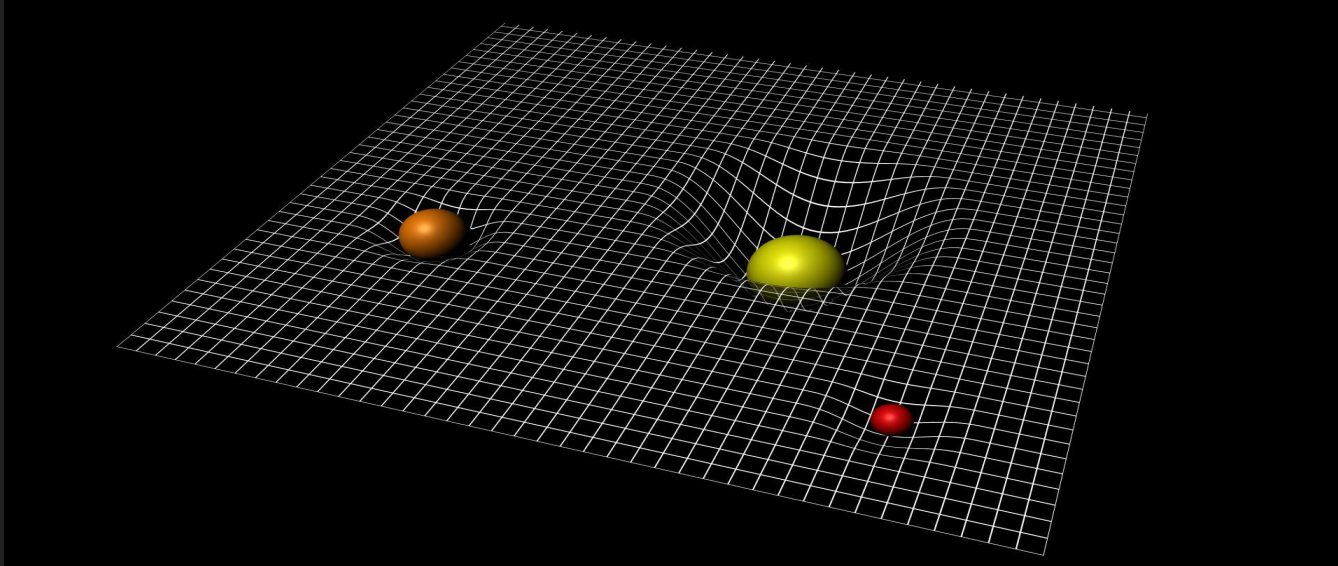
Geometria do espaço-tempo = Distribuição de matéria e energia

A Teoria da Relatividade Geral (TRG)



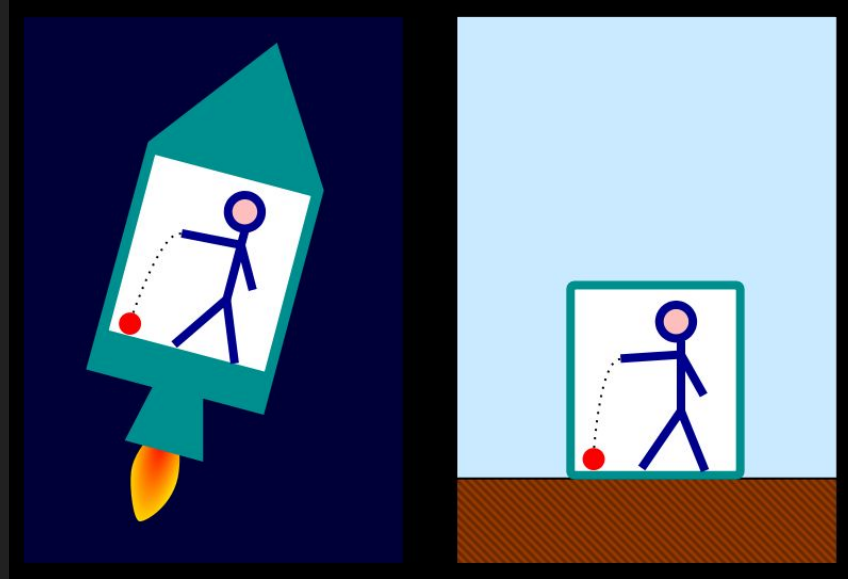
$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - (1/2)Rg_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}$$

A Teoria da Relatividade Geral (TRG)



$$R_{\mu\nu} - (1/2)Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}$$

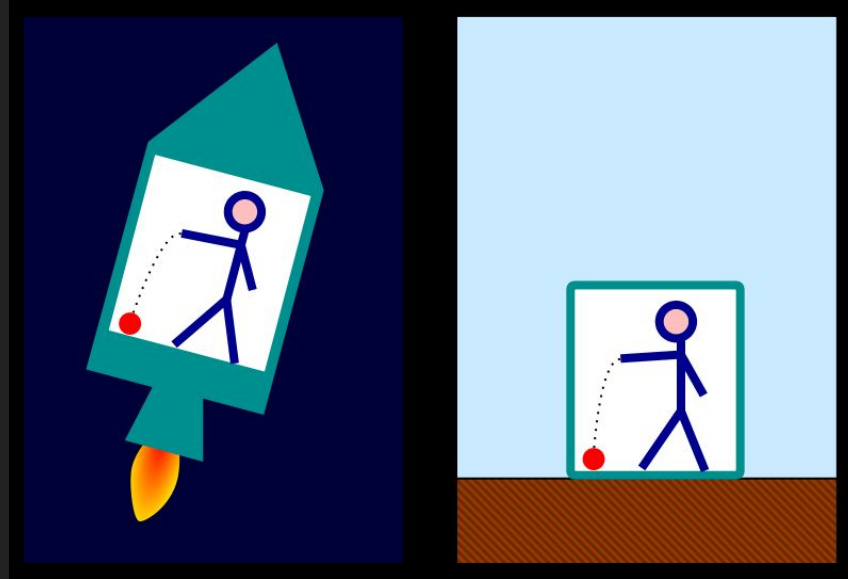
A Teoria da Relatividade Geral (TRG)



Objetos submetidos a um campo gravitacional = objetos submetidos a um campo aceleracional

Princípio da equivalência

A Teoria da Relatividade Geral (TRG)

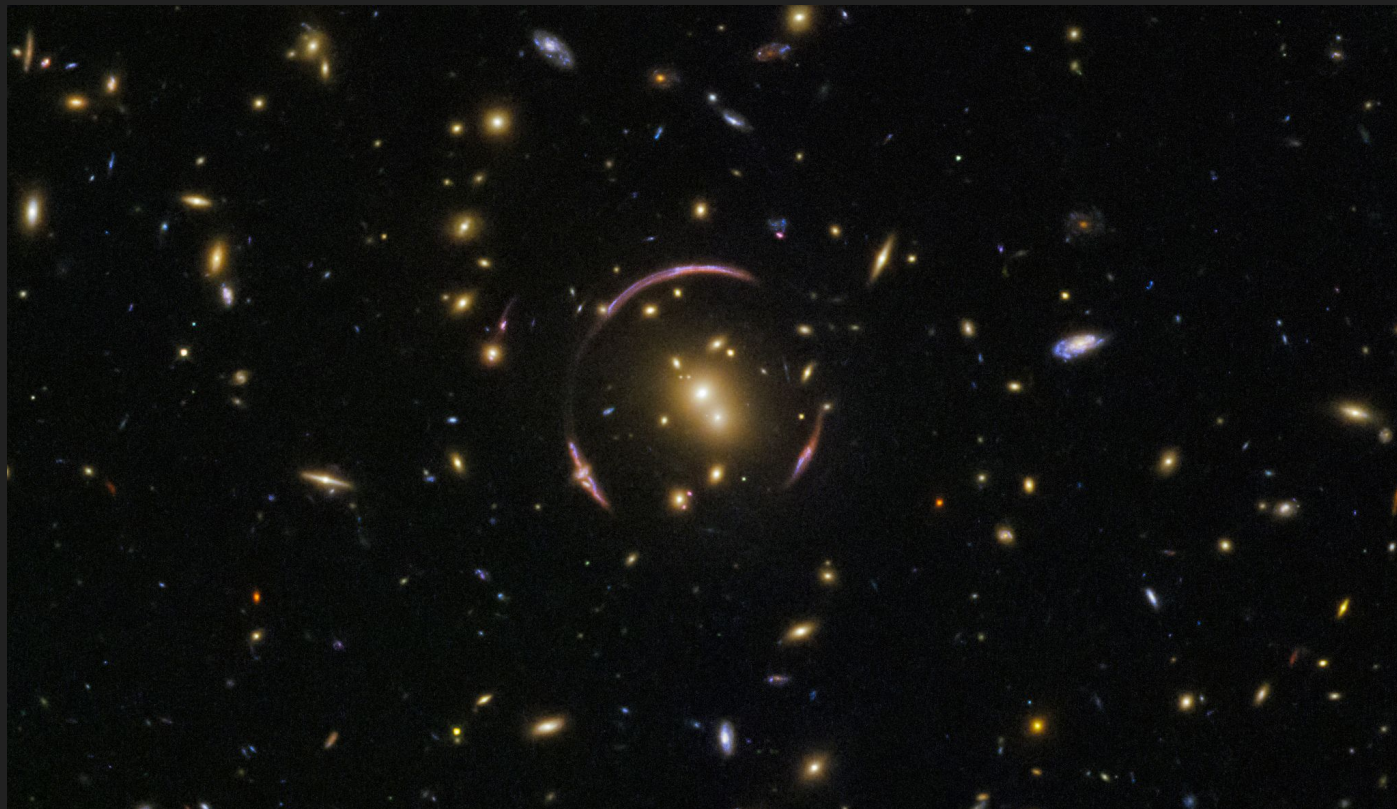


Objetos em movimento livre movem-se em **geodésicas (linhas de Universo)** numa variedade curva

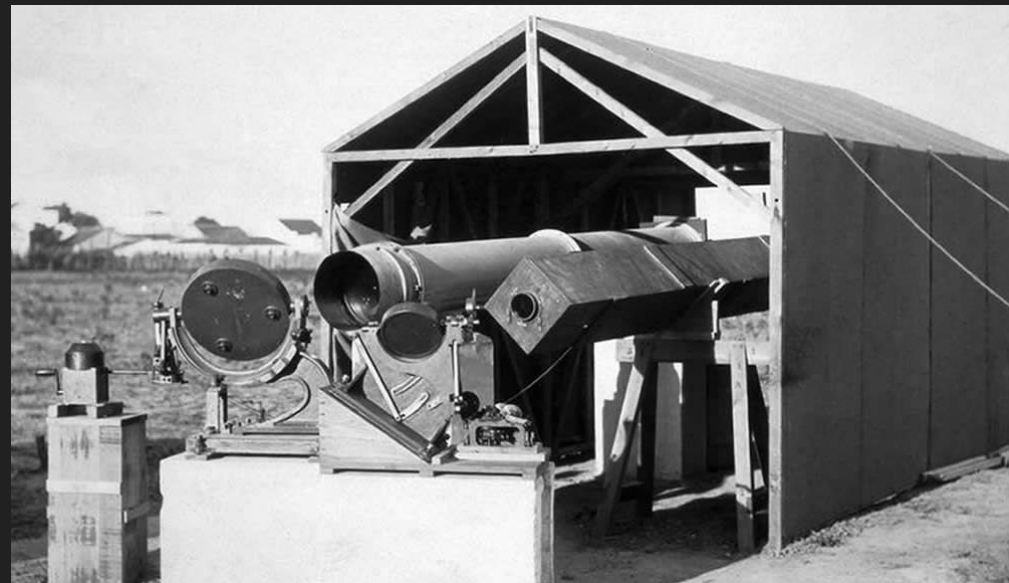
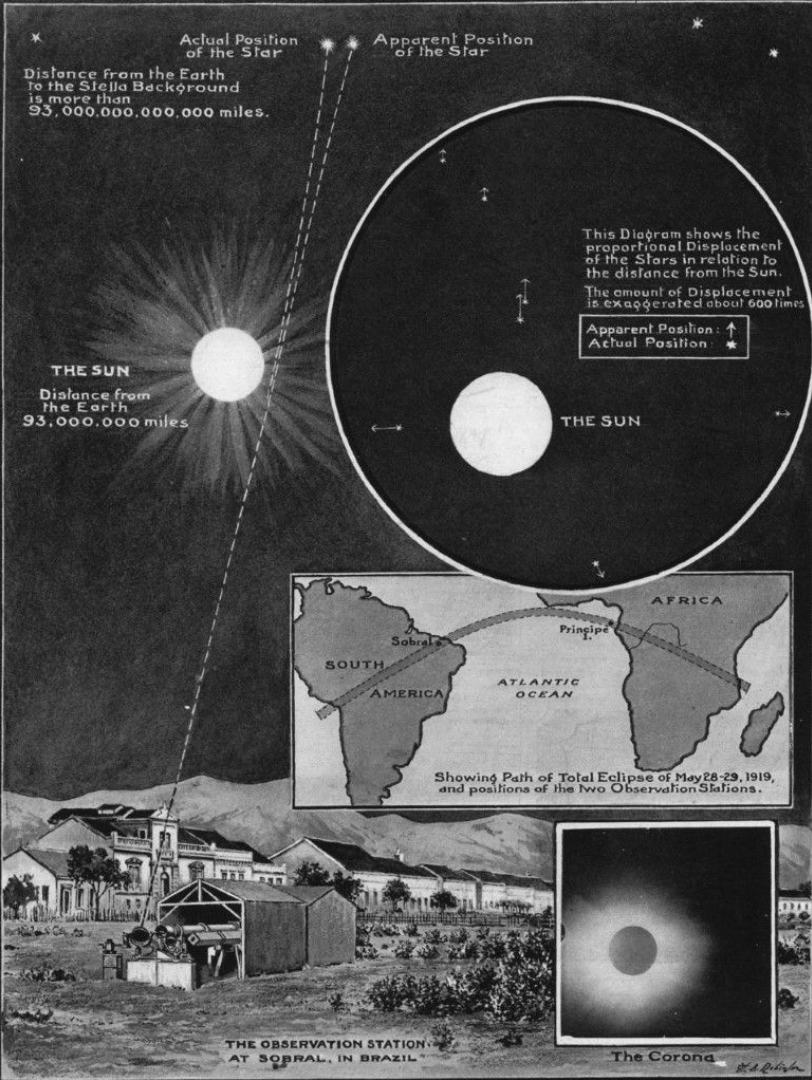
Princípio da equivalência

A Teoria da Relatividade Geral (TRG)

- Aplicações da TRG incluem
 - Soluções de buracos negros (Schwarzschild, Kerr, Reisser-Nordström)
 - Soluções cosmológicas (Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker, de Sitter)
 - Universo de Gödel
- Consequências da TRG:
 - dilatação e atraso do tempo gravitacional
 - redshift gravitacional
 - deflexão da luz (efeito de lentes; experimento de Sobral em 1919)
 - ondas gravitacionais (primeira detecção em 2016!)



Lentes gravitacionais observadas pelo HST do aglomerado SDSS J0146-0929.
Créditos: ESA/Hubble & NASA; Acknowledgment: Judy Schmidt



Eclipse solar de 1919 (esquerda) e o experimento de Sobral, no Ceará (acima: créditos: Royal Observatory, Greenwich)

Será que a TRG realmente descreve o Universo em grandes escalas?

O PRINCÍPIO COSMOLÓGICO (PC)

O PRINCÍPIO COSMOLÓGICO (PC)

“The cosmological principle [means that] the universe looks the same whoever and wherever you are”

Andrew Liddle, [Introduction to Modern Cosmology](#)

O PRINCÍPIO COSMOLÓGICO (PC)

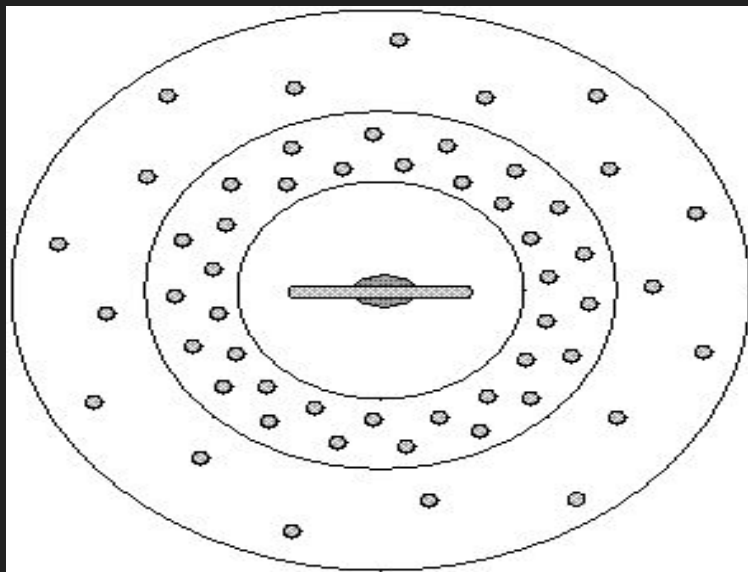
“The cosmological principle [means that] the universe looks the same whoever and wherever you are”

Andrew Liddle, Introduction to Modern Cosmology

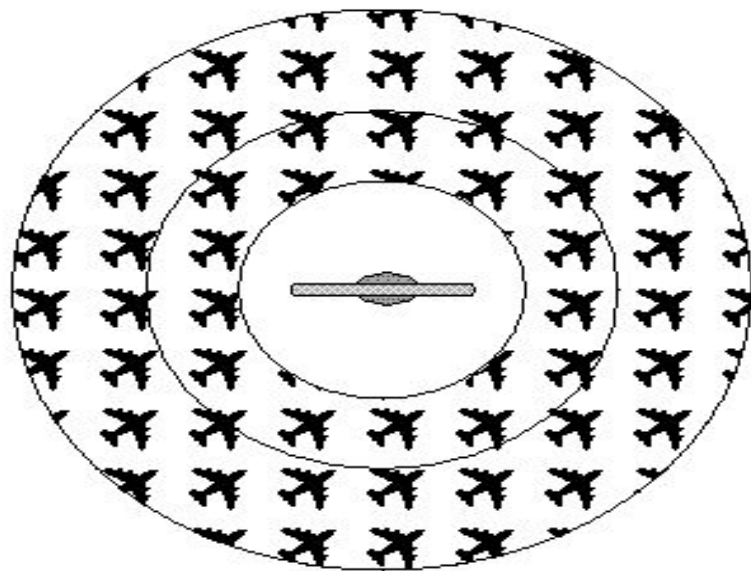
“O princípio cosmológico [diz que] o Universo parece o mesmo quem quer que você seja, e onde você estiver”

(tradução livre)

O PRINCÍPIO COSMOLÓGICO (PC)



Is this *homogeneous* and *isotropic*? Which aspect is it not?



Outside the central sphere, is this universe *homogeneous* and *isotropic*? Which aspect is it not?

Os princípios cosmológicos

- **“PC” dos hindus antigos:** O Universo é infinito no espaço e no tempo, e é indefinidamente heterogêneo
- **“PC” dos gregos antigos:** Nossa Terra é o centro natural do Universo
- **PC Copernicano:** O Universo observado de qualquer planeta parece o mesmo
- **PC generalizado:** O Universo é aproximadamente homogêneo e isotrópico no espaço e tempo
- **PC perfeito:** O Universo é exatamente homogêneo e isotrópico no espaço e tempo

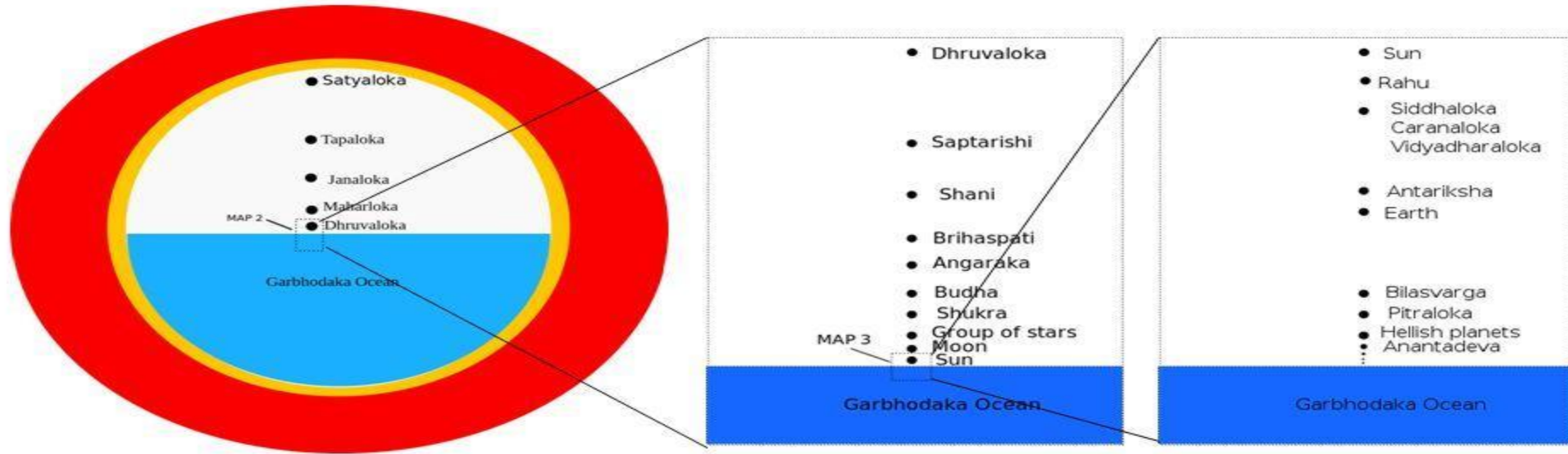
Os princípios cosmológicos

- **“PC” dos hindus antigos:** O Universo é infinito no espaço e no tempo, e é indefinidamente heterogêneo
- **“PC” dos gregos antigos:** Nossa Terra é o centro natural do Universo
- **PC Copernicano:** O Universo observado de qualquer planeta parece o mesmo
- **PC generalizado:** O Universo é aproximadamente homogêneo e isotrópico no espaço e tempo
- **PC perfeito:** O Universo é exatamente homogêneo e isotrópico no espaço e tempo

PC dos hindus antigos

- **Mundo físico percebido como uma ilusão (Véu de Maia?)**
- Universo é concebido através de experiência espiritual e revelação, não por meio de deduções lógicas - conceitos de filosofia e ciência modernas não existiam então
- **Universo é infinitamente heterogêneo, eterno e cíclico**
- **Terra não é um corpo celestial único, e não ocupa uma posição privilegiada no Universo**
- Nenhum modelo matemático hoje pode descrever esse modelo cosmológico hindu, servindo portanto como referência histórica

Hindu Cosmic Structure

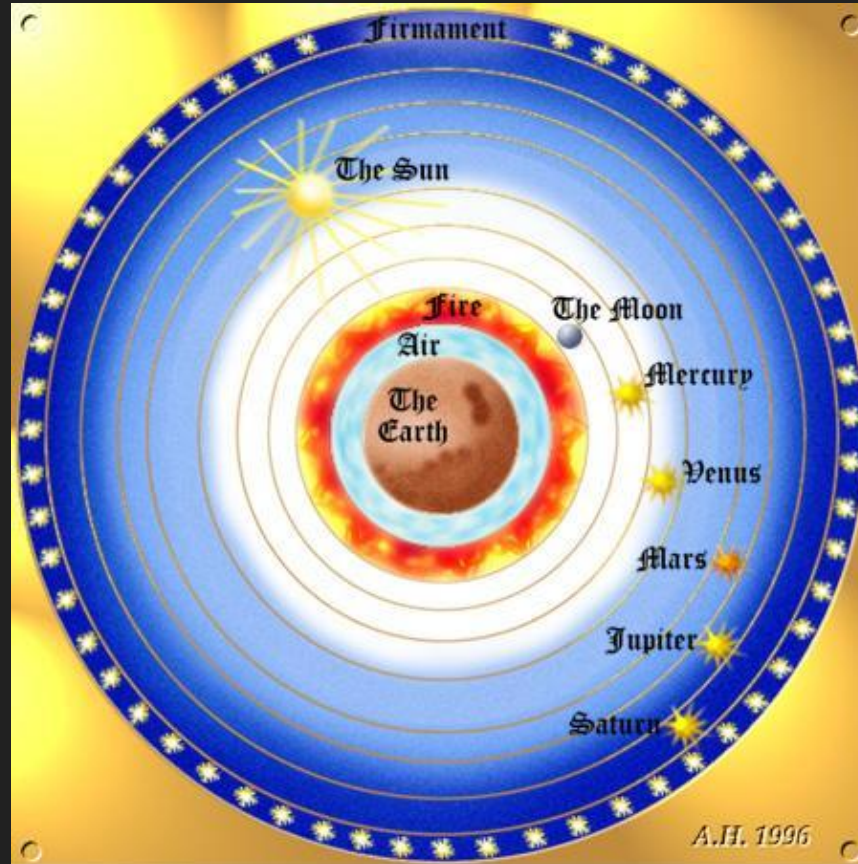


Hindu large scale structure of the Universe

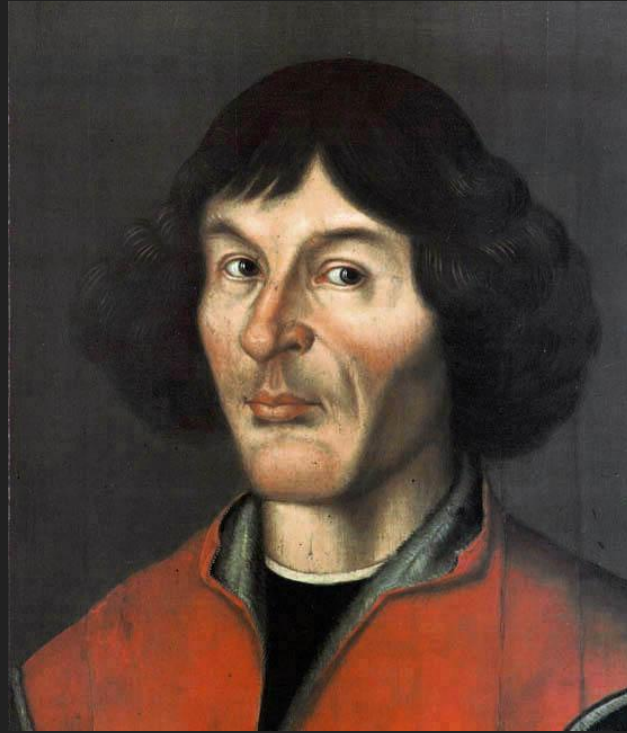
PC dos gregos antigos

- **Objetos físicos são o que são**, ao invés de representações e símbolos de entidades superiores; Corpos celestiais, contudo, **não eram vistos como objetos físicos**
- **A Terra é o centro natural do Universo**, que é infinito mas eternamente estático (**Aristóteles**); note: **Aristarco** defendia a ideia de um **Universo heliocêntrico**
- **Mundo sublunar** (Terra, nuvens - ainda “físico”) and **mundo sobrelunar** (além da Lua - não mais “físico”)
- Objetos seguem uma órbita circular ao redor da Terra, e estavam distribuídos em um sistema de esferas concêntricas (**Anaximandro de Mileto**)

O PC dos gregos antigos



PC Copernicano



PC Copernicano

- O Universo observado de qualquer planeta parece aproximadamente o mesmo -> PC Copernicano Genuíno (ou apenas Princípio Copernicano)
- Corpos celestes = corpos físicos
- Alguns cientistas que seguiam o PC copernicano
 - Kepler: leis fundamentais da mecânica celeste
 - (mais ou menos) Tycho Brahe: a Terra ainda era o centro, mas o Universo deveria parecer semelhante visto de qualquer planeta
 - Galileo Galilei: cinemática, observações astronômicas, modelo heliocêntrico (“Eppur si muove”)
 - Isaac Newton: leis de movimento e gravitação, dinâmica, cálculo infinitesimal, PC copernicano + isotropia do espaço

PC Generalizado

“O Universo observado de qualquer REGIÃO parece aproximadamente o mesmo EM QUALQUER DIREÇÃO”.

PC Generalizado

“O Universo observado de qualquer REGIÃO parece aproximadamente o mesmo EM QUALQUER DIREÇÃO”.

Em outras palavras:

“O Universo é aproximadamente homogêneo e isotrópico”

PC Generalizado

“O Universo observado de qualquer REGIÃO parece aproximadamente o mesmo EM QUALQUER DIREÇÃO”.

Em outras palavras:

“O Universo é aproximadamente homogêneo e isotrópico”

PC GENERALIZADO + TGR =
O MODELO COSMOLÓGICO PADRÃO

PC Generalizado

“O Universo observado de qualquer REGIÃO parece aproximadamente o mesmo EM QUALQUER DIREÇÃO”.

Em outras palavras:

**“O Universo é aproximadamente homogêneo e isotrópico”
ATENÇÃO: APENAS EM GRANDE ESCALAS**

PC Generalizado

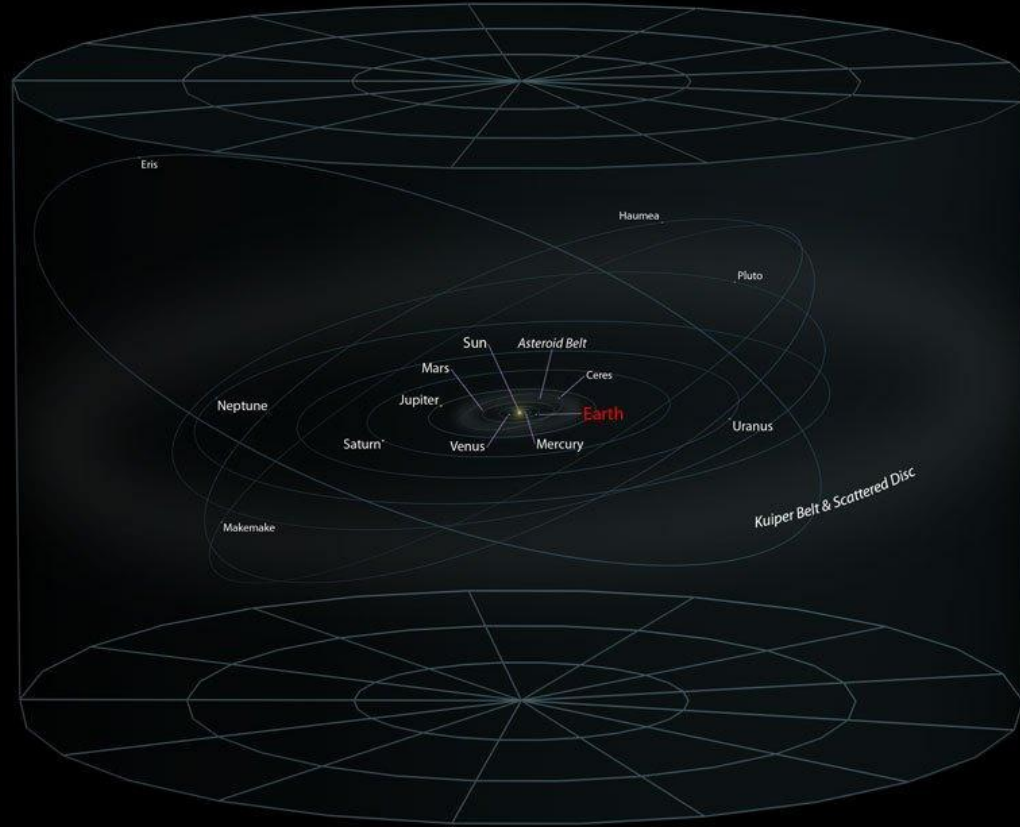
“O Universo observado de qualquer REGIÃO parece aproximadamente o mesmo EM QUALQUER DIREÇÃO”.

Em outras palavras:

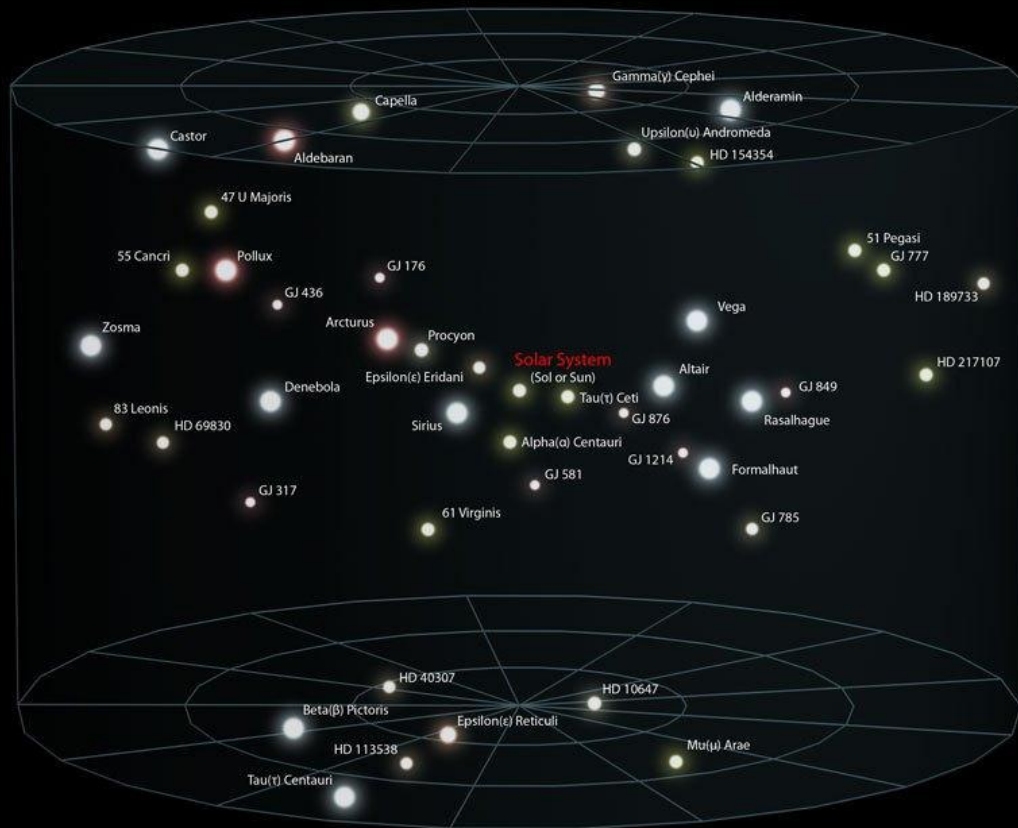
**“O Universo é aproximadamente homogêneo e isotrópico”
ATENÇÃO: APENAS EM GRANDE ESCALAS**

Quão grandes?

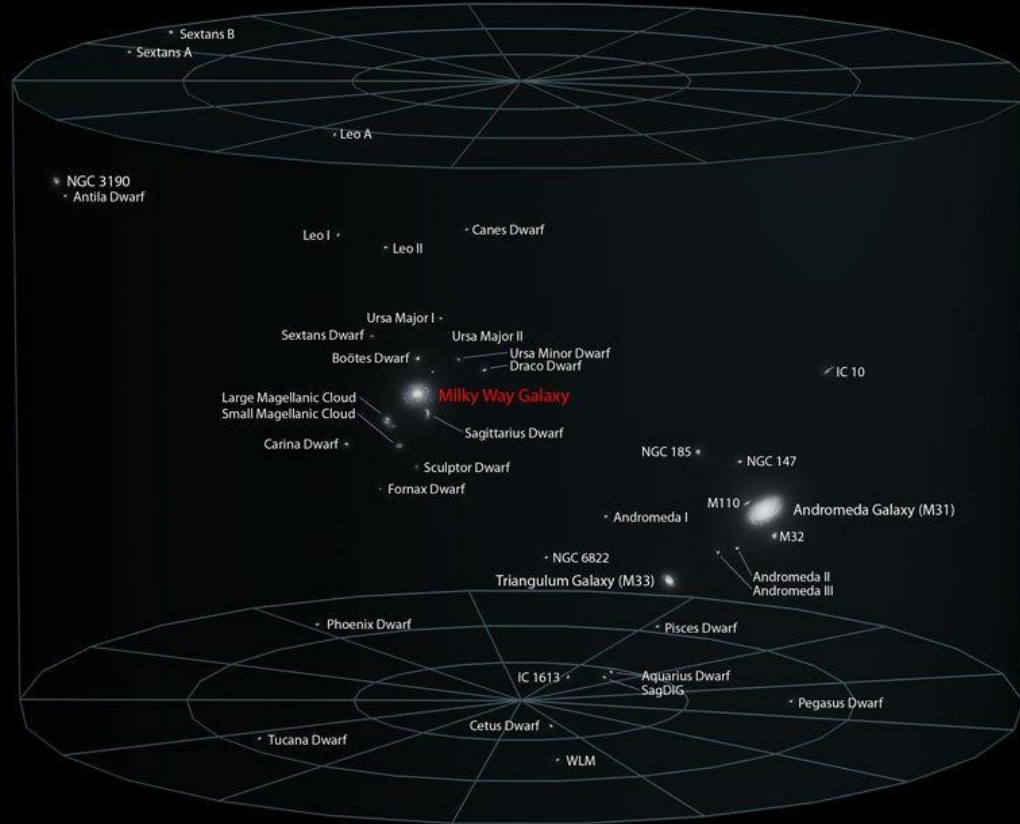
Solar System



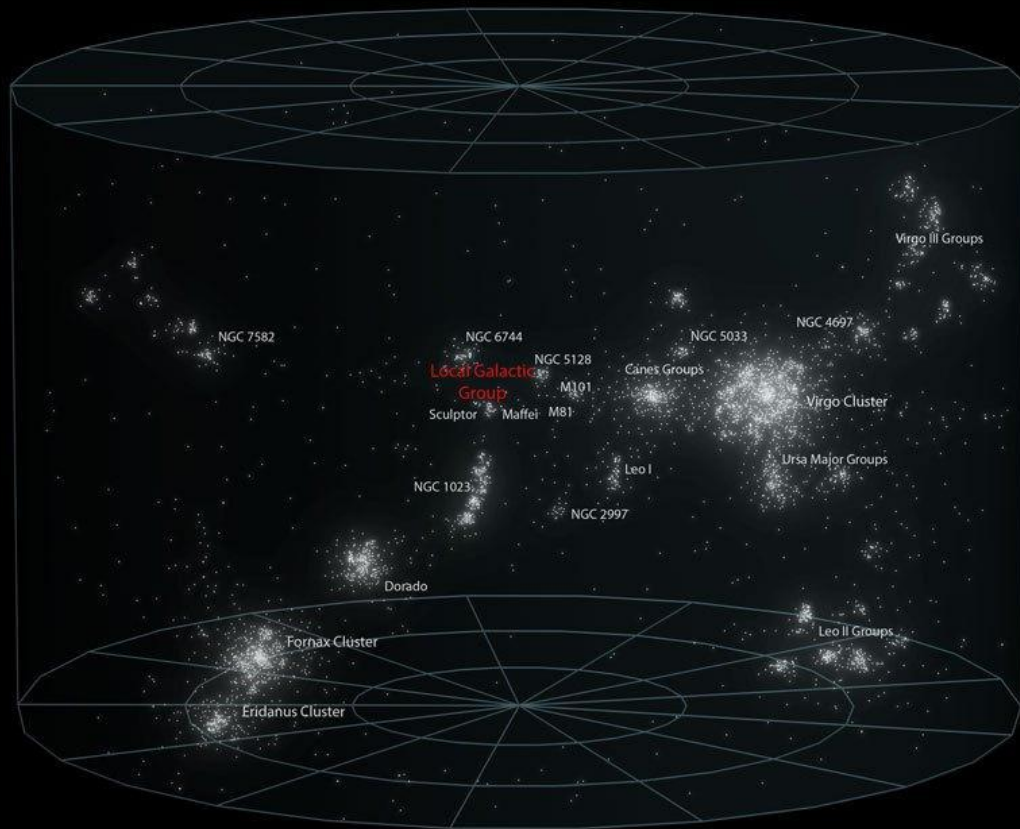
Solar Interstellar Neighborhood



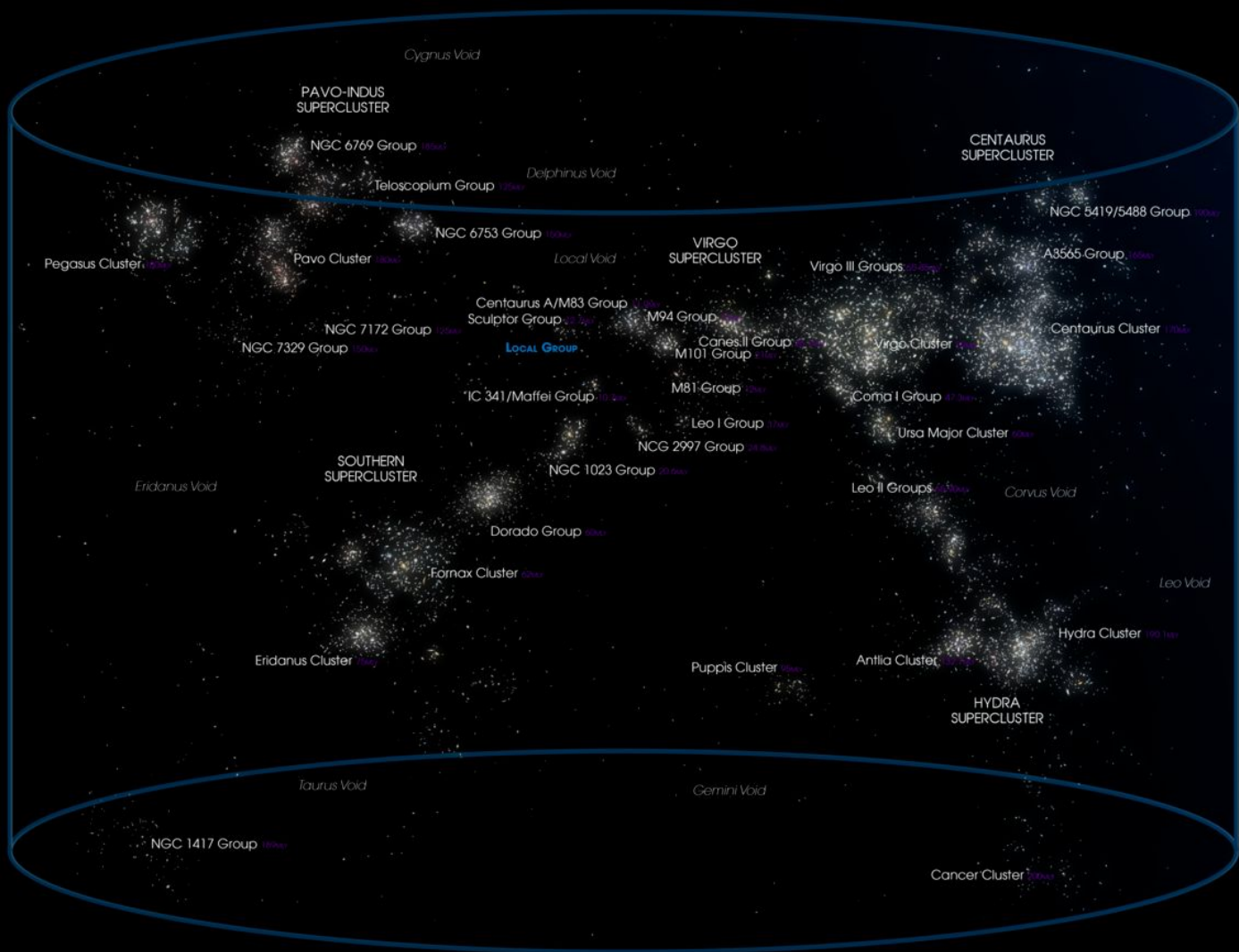
Local Galactic Group



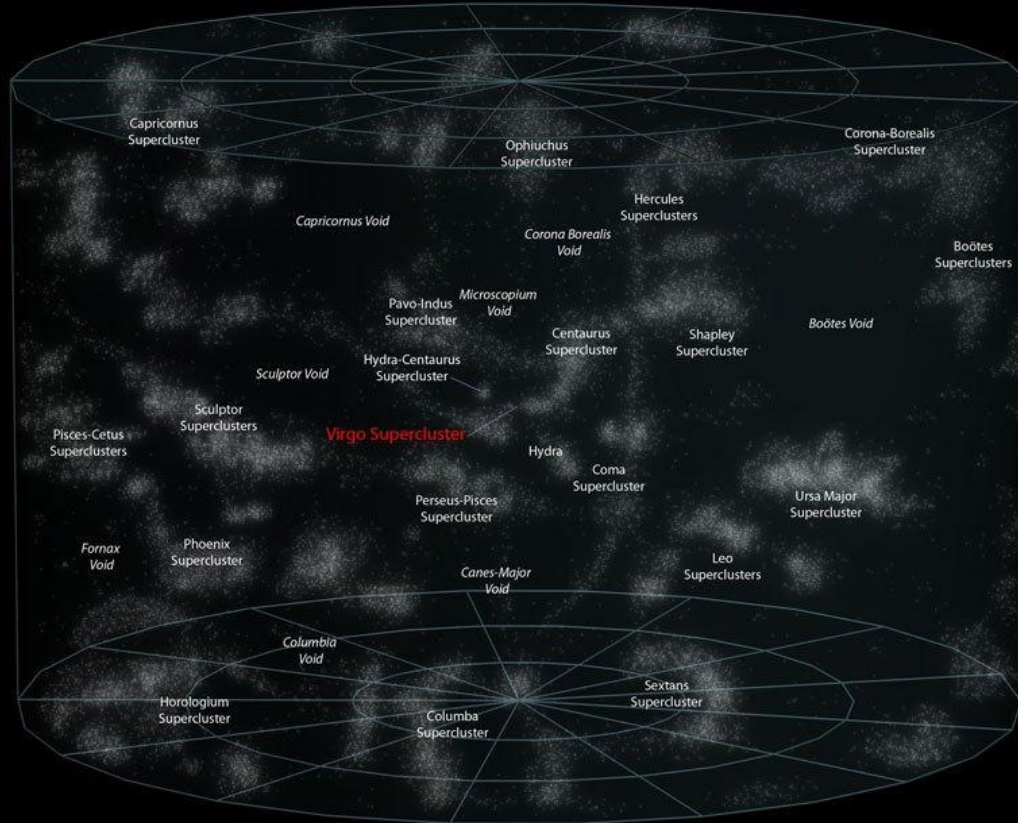
Virgo Supercluster



LANIAKEA



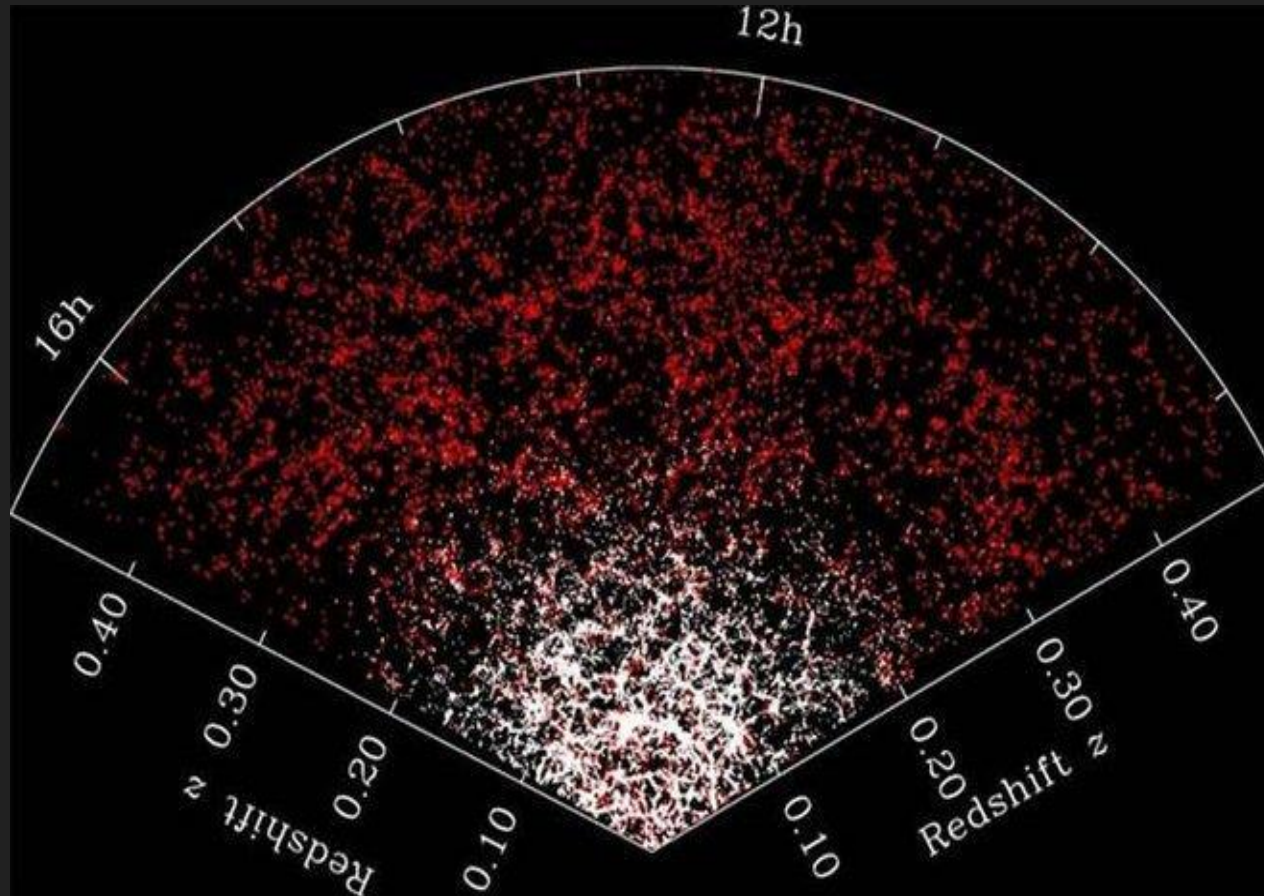
Local Superclusters



Observable Universe

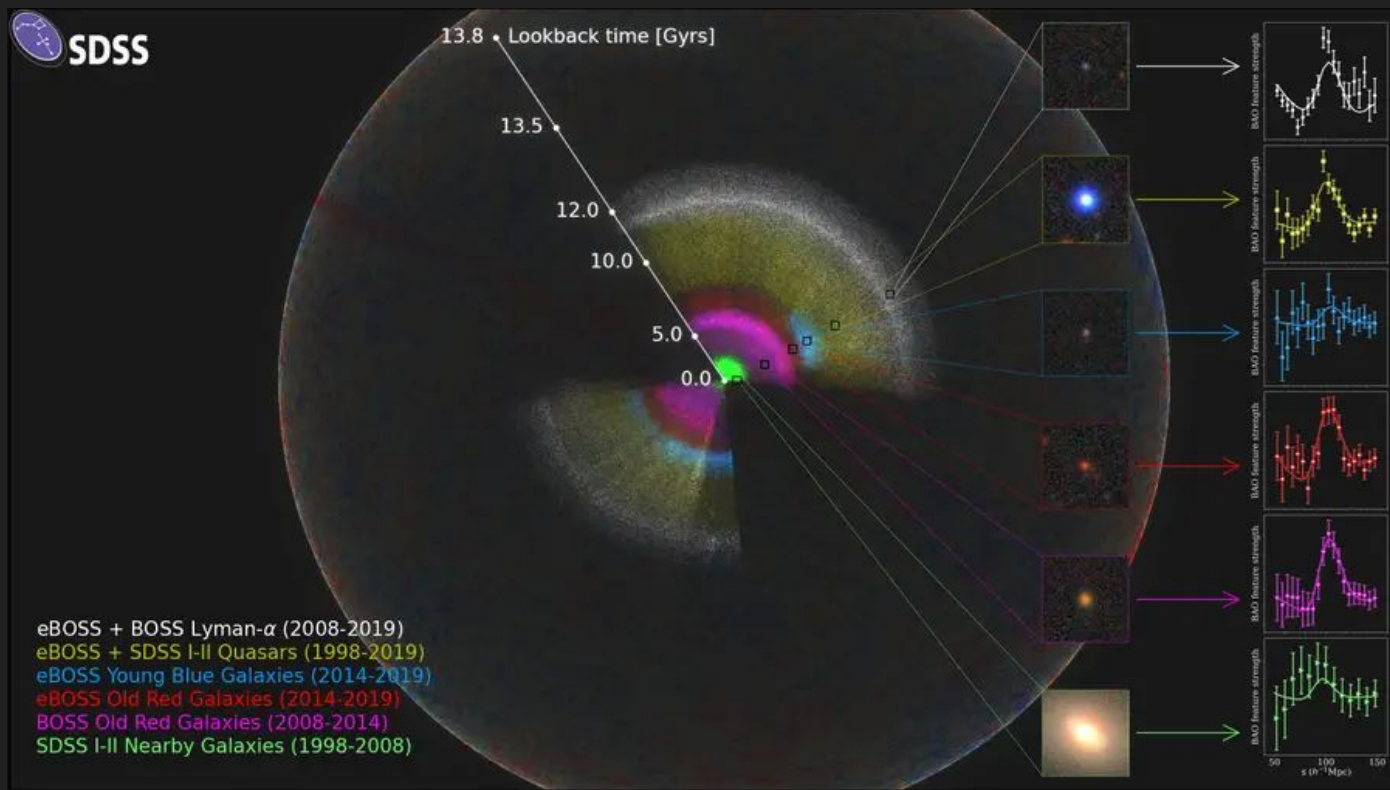


A estrutura em grande escala cosmológica



Créditos: Colaboração
SDSS-III

A estrutura em grande escala cosmológica



Créditos:
Anand
Raichoor/EPFL,
Ashley
Ross/Ohio
State
University, and
the SDSS
Collaboration

A estrutura em grande escala cosmológica

- Nas menores escalas, o mapa parece bem heterogêneo - várias regiões vazias (*voids*), paredes, filamentos e aglomerados

A estrutura em grande escala cosmológica

- Nas menores escalas, o mapa parece bem heterogêneo - várias **regiões vazias (*voids*)**, **paredes**, **filamentos** e **aglomerados**
- Mas a partir de **~ 100 Mpc**, o padrão formado pelos vazios, filamentos e aglomerados torna-se **recorrente** (acontece periodicamente)

A estrutura em grande escala cosmológica

- Nas menores escalas, o mapa parece bem heterogêneo - várias **regiões vazias (*voids*)**, **paredes**, **filamentos** e **aglomerados**
- Mas a partir de **~ 100 Mpc**, o padrão formado pelos vazios, filamentos e aglomerados torna-se **recorrente** (acontece periodicamente)
- Dizemos que é esta a escala que o Universo torna-se **estatisticamente homogêneo**, logo, a **escala de homogeneidade cósmica**

A métrica Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW)

ON THE FOUNDATIONS OF RELATIVISTIC COSMOLOGY

BY H. P. ROBERTSON

DEPARTMENT OF PHYSICS, PRINCETON UNIVERSITY

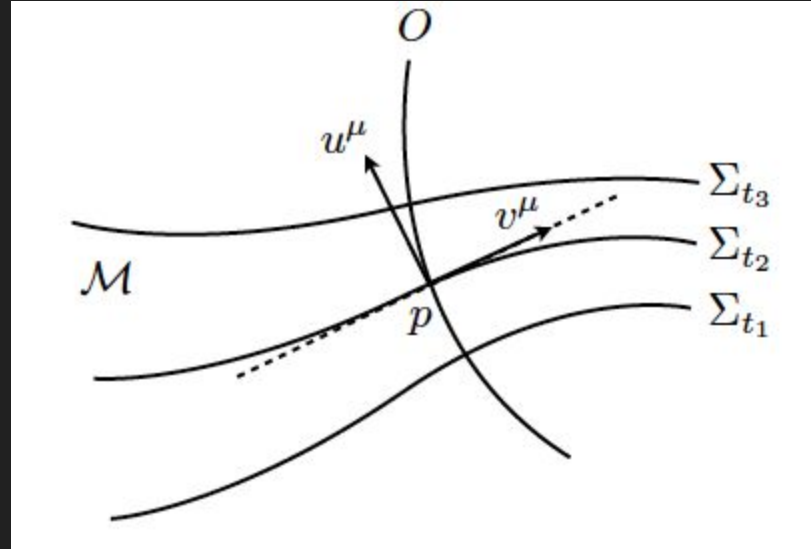
Communicated October 11, 1929

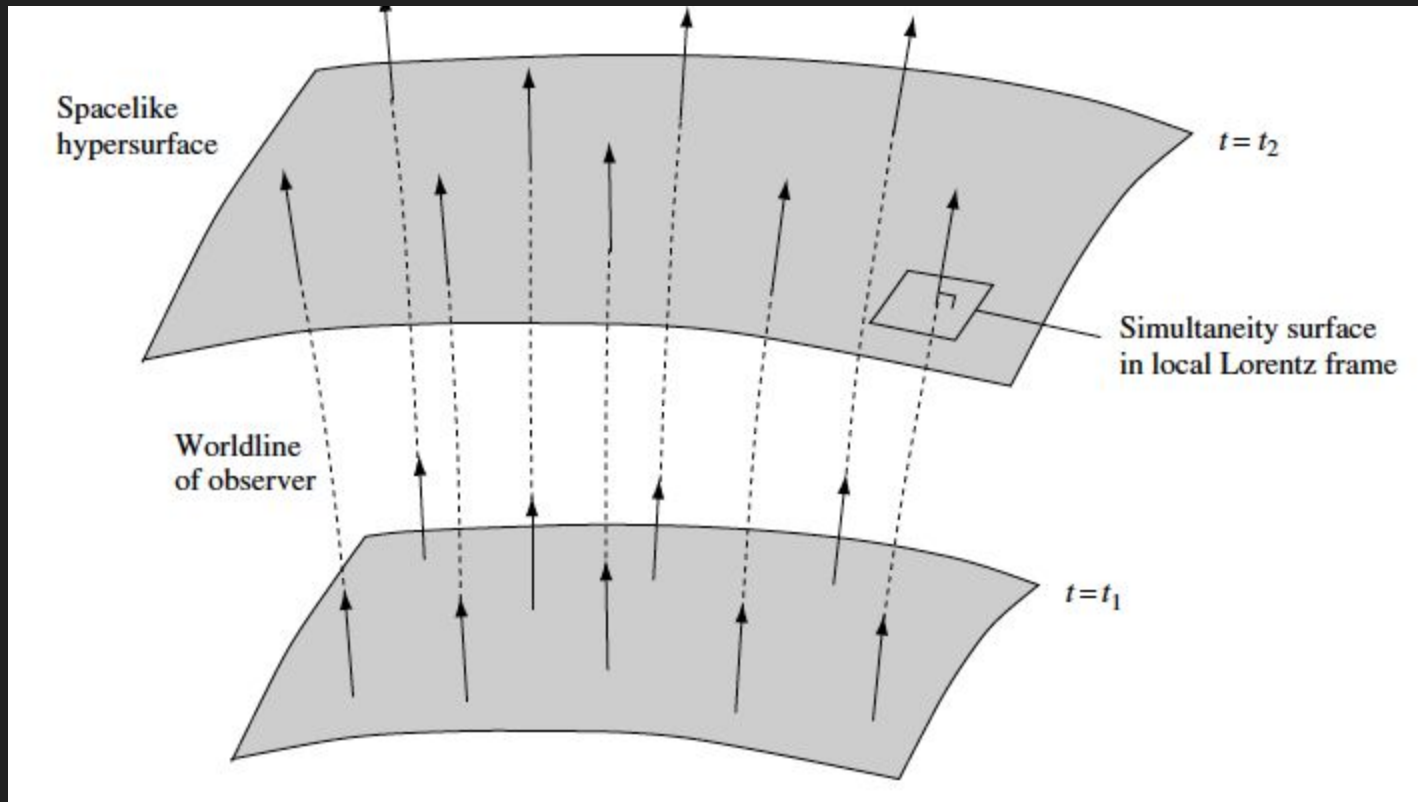
The general theory of relativity attributes the particular metrical properties of the space-time universe, considered as a 4-dimensional Riemannian manifold, directly to the distribution of matter within it, and has naturally led to speculations concerning the structure of the universe as a whole, in which the local irregularities caused by the agglomeration of matter into stars and stellar systems are disregarded. Chief among the resulting relativistic cosmologies are those based on the cylindrical world of Einstein¹ and the spherical world of de Sitter;² the line elements on which these interpretations are based have not, however, been derived from the intrinsic properties of homogeneity and isotropy attributable *a priori* to such an idealized universe, but rather are presented as defining manifolds which do possess the desired uniformity. It is the purpose of the present note to formulate explicitly an assumption embodying the uniformity demanded by such a cosmology and to deduce all line elements satisfying it.³ We shall find that the only possible *stationary* cosmologies—i.e., the intrinsic properties of which are independent of time—are in fact those of Einstein and de Sitter, and that they arise from particular cases of a class of solutions whose general member defines a non-stationary cosmology.

The two basic principles in this work are the *cosmological principle*, as formulated precisely by Milne, and the *principle of symmetry*. Sections 3–7 are devoted to the discussion of a material system satisfying the cosmological principle, after which the restrictions implied by the principle of symmetry are introduced. The light paths are then found by adopting Fermat's principle. At this stage, the general solution involves two arbitrary functions, but it is shown how these functions are restricted in form as a consequence of Milne's dimensional hypothesis (§ 17).

Métrica FLRW

- **Observadores fundamentais (OFs)**: observadores que não apresentam movimento relativo ao fluido cósmico constituído por galáxias e seus movimentos peculiares - queda livre, movendo-se em geodésicas
- Podemos então fatiar o espaço-tempo em **hipersuperfícies tipo espaço (ou seja, tempo constante)** a cada instante de tempo t – **postulado de Weyl**
- **Postulado de Weyl + Princípio Cosmológico** = Universo parece **invariante de translações e rotações** para cada OF!





Métrica FLRW

- 3 graus de liberdade rotacionais + 3 graus de liberdade translacionais = 6 vetores de killing que garantem a métrica constante a cada transformação de coordenadas espaciais.

Métrica FLRW

- 3 graus de liberdade rotacionais + 3 graus de liberdade translacionais = 6 vetores de killing que garantem a métrica constante a cada transformação de coordenadas espaciais.
- Como $N(N+1)/2 = 6$ para $N = 3$, sendo N = número de dimensões espaciais, temos então que uma métrica homogênea e isotrópica no espaço-tempo cosmológico, tal como descrevemos agora, é maximamente simétrica!

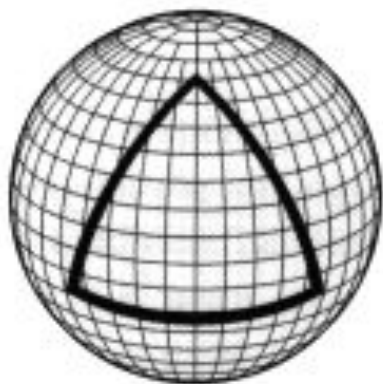
Métrica FLRW

- 3 graus de liberdade rotacionais + 3 graus de liberdade translacionais = 6 vetores de killing que garantem a métrica constante a cada transformação de coordenadas espaciais.
- Como $N(N+1)/2 = 6$ para $N = 3$, sendo N = número de dimensões espaciais, temos então que uma métrica homogênea e isotrópica no espaço-tempo cosmológico, tal como descrevemos agora, é maximamente simétrica!
- Sendo assim, a métrica que descreve este espaço-tempo é dada por

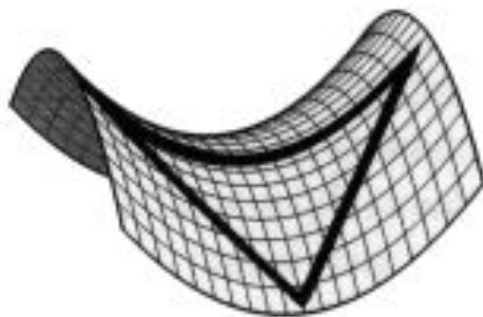
$$ds^2 = -c^2 dt^2 + [(1 - kr^2)^{-1} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)]$$

Métrica FLRW

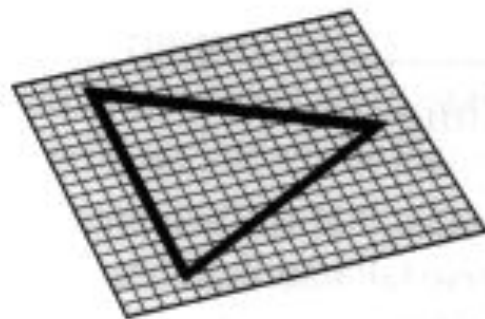
- 3 graus de liberdade rotacionais + 3 graus de liberdade translacionais = 6 vetores de killing que garantem a métrica constante a cada transformação de coordenadas espaciais.
- Como $N(N+1)/2 = 6$ para $N = 3$, sendo N = número de dimensões espaciais, temos então que uma métrica homogênea e isotrópica no espaço-tempo cosmológico, tal como descrevemos agora, é maximamente simétrica!
- Sendo assim, a métrica que descreve este espaço-tempo é dada por
$$-c^2 d\tau^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 d\Sigma^2, \quad d\Sigma^2 = \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2, \quad \text{where } d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2.$$
- (r, θ, ϕ) são coordenadas radiais comóveis, $a(t)$ fator de escala (adimensional), $k > 0, = 0 < 0$ para curvatura aberta, plana e fechada respectivamente (dedução completa: Hobson, Efstathiou, Lasenby: General Relativity, 2006)



Positive Curvature



Negative Curvature



Flat Curvature

Métrica FLRW

- 3 graus de liberdade rotacionais + 3 graus de liberdade translacionais = 6 vetores de killing que garantem a métrica constante a cada transformação de coordenadas espaciais.
- Como $N(N+1)/2 = 6$ para $N = 3$, sendo N = número de dimensões espaciais, temos então que uma métrica homogênea e isotrópica no espaço-tempo cosmológico, tal como descrevemos agora, é maximamente simétrica!
- Sendo assim, a métrica que descreve este espaço-tempo é dada por

$$d\Sigma^2 = dr^2 + S_k(r)^2 d\Omega^2$$

$$S_k(r) = \begin{cases} \sqrt{k}^{-1} \sin(r\sqrt{k}), & k > 0 \\ r, & k = 0 \\ \sqrt{|k|}^{-1} \sinh(r\sqrt{|k|}), & k < 0. \end{cases}$$

(dedução completa: livro do Hobson, Efstathiou, Lasenby: General Relativity)

Métrica FLRW

Por meio do elemento de linha da métrica FLRW, podemos calcular distâncias cosmológicas. Podemos definir a distância própria como a distância no momento que os eventos ocorrem

Métrica FLRW

Por meio do elemento de linha da métrica FLRW, podemos calcular distâncias cosmológicas. Podemos definir a distância própria como a distância no momento que os eventos ocorrem

Sendo $ds=0$, bem como $dt=0$, $d\Omega=0$, temos portanto

$$s(t) = \int_0^s ds(t)' = a(t) \int_0^r dr' (1 - kr'^2)^{-1/2}$$

Métrica FLRW

Por meio do **elemento de linha da métrica FLRW**, podemos calcular **distâncias cosmológicas**. Podemos definir a **distância própria** como a distância no momento que os eventos ocorrem

Sendo $ds=0$, bem como $d\Omega=0$, temos portanto

$$s(t) = \int_0^s ds(t)' = a(t) \int_0^r dr' (1 - kr'^2)^{-1/2}$$

Logo:

$$D_P \equiv s(t) = a(t) / (\sqrt{|k|}) S(r\sqrt{|k|})$$

Métrica FLRW

Por meio do **elemento de linha da métrica FLRW**, podemos calcular **distâncias cosmológicas**. Podemos definir a **distância própria** como a distância no momento que os eventos ocorrem

Sendo $ds=0$, bem como $dt=0$, $d\Omega=0$, temos portanto

$$s(t) = \int_0^s ds(t)' = a(t) \int_0^r dr' (1 - kr'^2)^{-1/2}$$

Logo:

$$D_P \equiv s(t) = [a(t) / \sqrt{|k|}] S(r\sqrt{|k|})$$

Note que χ definido anteriormente corresponde à **coordenada radial comóvel**, dada por

$$\chi \equiv \int_0^r dr' (1 - kr'^2)^{-1/2} = \int_{t_e}^{t_o} dt / a(t)$$

Métrica FLRW

Podemos então escrever as distâncias de diâmetro angular e de luminosidade como

$$D_A = \left[(1+z)^{-1} / \sqrt{|\Omega_k|} \right] S \left(\sqrt{|\Omega_k|} \chi \right)$$

$$D_L = \left[(1+z) / \sqrt{|\Omega_k|} \right] S \left(\sqrt{|\Omega_k|} \chi \right)$$

Métrica FLRW

Podemos então escrever as **distâncias de diâmetro angular** e de **luminosidade** como

$$D_A = \left[(1+z)^{-1} / \sqrt{|\Omega_k|} \right] S \left(\sqrt{|\Omega_k|} \chi \right)$$

$$D_L = \left[(1+z) / \sqrt{|\Omega_k|} \right] S \left(\sqrt{|\Omega_k|} \chi \right)$$

Notem também a relação

$$D_L = D_A (1+z)^2$$

Relação de dualidade de distâncias cósmicas!

(ver também **Relação de Etherington**)

Métrica FLRW

Podemos também calcular idades cosmológicas da seguinte maneira

$$a = a_0 / (1 + z) \Rightarrow da = -(a_0 dz) / (1 + z)^2$$

Métrica FLRW

Podemos também calcular idades cosmológicas da seguinte maneira

$$a = a_0 / (1 + z) \Rightarrow da = -(a_0 dz) / (1 + z)^2$$

$$H(z) = \dot{a}/a = [(da/dz)(dz/dt)(1 + z)]/a_0$$

Métrica FLRW

Podemos também calcular idades cosmológicas da seguinte maneira

$$a = a_0 / (1 + z) \Rightarrow da = -(a_0 dz) / (1 + z)^2$$

$$H(z) = \dot{a}/a = [(da/dz)(dz/dt)(1 + z)]/a_0$$

$$H(z) = -(dz/dt)/(1 + z)$$

Métrica FLRW

Podemos também calcular idades cosmológicas da seguinte maneira

$$a = a_0 / (1 + z) \Rightarrow da = -(a_0 dz) / (1 + z)^2$$

$$H(z) = \dot{a}/a = [(da/dz)(dz/dt)(1 + z)]/a_0$$

$$H(z) = -(dz/dt)/(1 + z)$$

Portanto: $t(z) = - \int_0^z dz / [(1 + z)H(z)]$

Métrica FLRW

Podemos também calcular idades cosmológicas da seguinte maneira

$$a(t) = a_0 / (1 + z) \Rightarrow da = -(a_0 dt) / (1 + z)^2$$

$$H(z) = \dot{a}/a = [(da/dz)(dz/dt)(1 + z)]/a_0$$

$$H(z) = -(dz/dt)/(1 + z)$$

Portanto: $t(z) = - \int_0^z dz / [(1 + z)H(z)]$

Notem ainda que podemos definir o *lookback time*, i.e., $t_L(z) = t_0 - t(z)$

Métrica FLRW

Podemos também calcular idades cosmológicas da seguinte maneira

$$a = a_0 / (1 + z) \Rightarrow da = -(a_0 dz) / (1 + z)^2$$

$$H(z) = \dot{a}/a = [(da/dz)(dz/dt)(1 + z)]/a_0$$

$$H(z) = -(dz/dt)/(1 + z)$$

Portanto: $t(z) = - \int_0^z dz / [(1 + z)H(z)]$

Notem ainda que podemos definir o *lookback time*, i.e., $t_L(z) = t_0 - t(z)$

Notem também que

$$\chi = D_C(z) = \int_0^t dt' / a(t') = \int_0^z dz' / H(z')$$

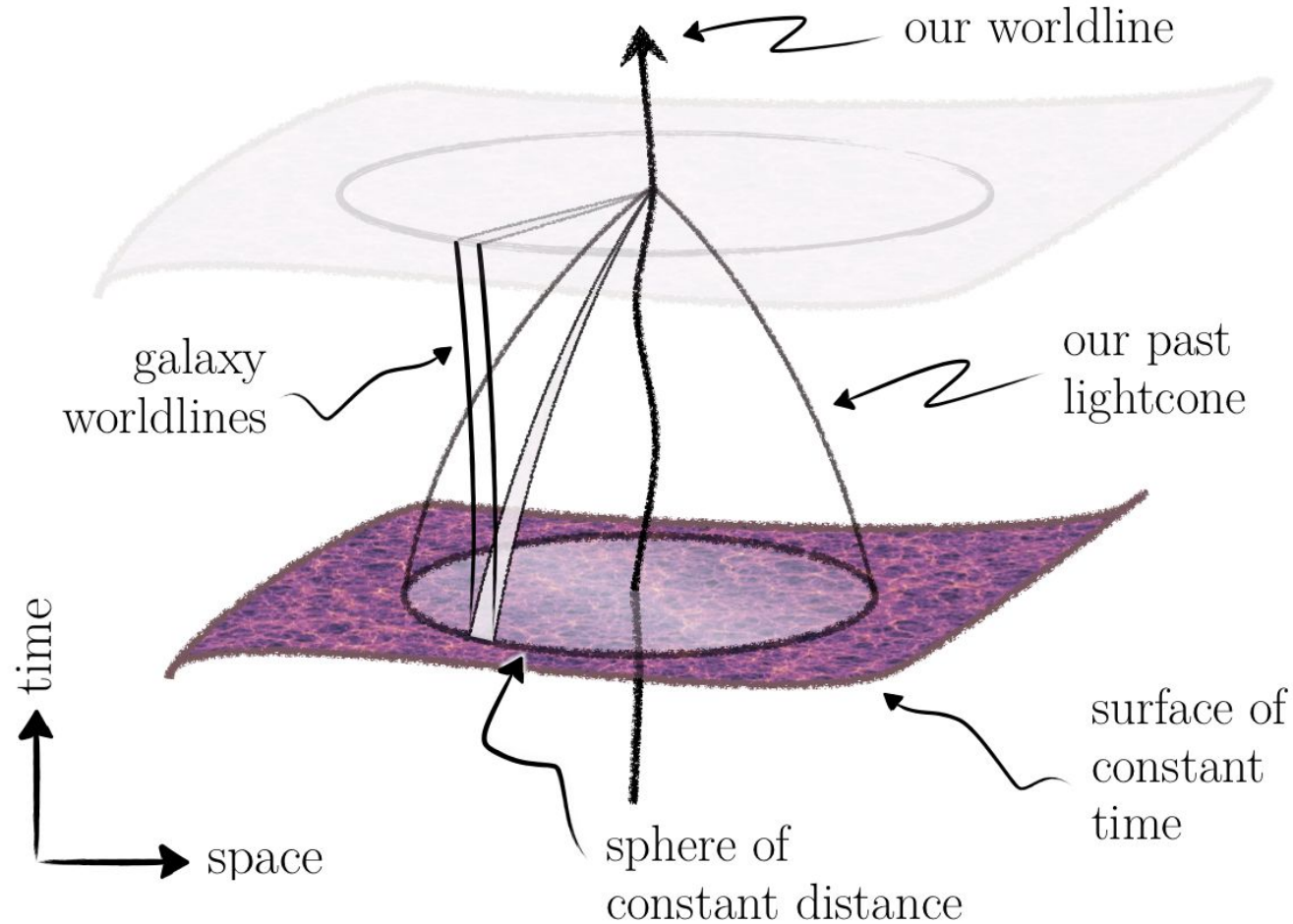
(como) podemos testar o PC?

(como) podemos testar o PC?

- Testar isotropia é direto; precisamos apenas de um observador fundamental, como nós, e analisar dados através do céu inteiro

(como) podemos testar o PC?

- Testar isotropia **é direto**; precisamos apenas de um observador **fundamental**, como nós, e analisar dados através do céu inteiro
- Testar homogeneidade, contudo, **não é direto**. Nós realizamos **observações no cone de luz passado**, e não sobre as **hipersuperfícies constantes no tempo**



Créditos:
Clarkson 2012
[arxiv:1204.5505](#)

Ver também
Clarkson &
Maartens 2010;
[arxiv:1005.2165](#)

(como) podemos testar o PC?

- Testar isotropia é direto; precisamos apenas de um observador fundamental, como nós, e analisar dados através do céu inteiro
- Testar homogeneidade, contudo, não é direto. Nós realizamos observações no cone de luz passado, e não sobre as hipersuperfícies constantes no tempo
- Isotropia da distribuição de matéria (lentes, distâncias de diâmetro angular, velocidades peculiares e number counts) + isotropia da RCF para um único OF = isotropia cósmica! (Clarkson & Maartens 2010)
Isotropia provada para todos os OFs = PC é uma hipótese válida!

(como) podemos testar o PC?

- Testar isotropia é direto; precisamos apenas de um observador fundamental, como nós, e analisar dados através do céu inteiro
- Testar homogeneidade, contudo, não é direto. Nós realizamos observações no cone de luz passado, e não sobre as hipersuperfícies constantes no tempo
- Isotropia da distribuição de matéria (lentes, distâncias de diâmetro angular, velocidades peculiares e number counts) + isotropia da RCF para um único OF = isotropia cósmica! (Clarkson & Maartens 2010)
Isotropia provada para todos os OFs = PC é uma hipótese válida!

Nota: testes indiretos da homogeneidade são possíveis - aula 3

(como) podemos testar o PC?

É possível ainda realizar alguns testes indiretos da hipótese da homogeneidade estatística, por ex:

- Teste de consistência da métrica FLRW (Clarkson, Lu, Bassett 2008)

$$\Omega_k(z) = \frac{[H(z)D'(z)]^2 - 1}{[H_0 D(z)]^2}$$

Se $\Omega_k(z) = \text{cte}$, ou $d\Omega_k(z)/dz = 0 \rightarrow$ Universo FLRW

- Contagem de galáxias $N(r)$ em esferas de raio r usando dimensão fractal:

$D_2 = \frac{d \ln N(<r)}{dr} \rightarrow 3$ quando a distribuição espacial de galáxias for estatisticamente homogênea $\rightarrow$ Universo FLRW

**Será que a métrica FLRW pode descrever o
Universo em qualquer escala?**

“The fitting problem”

“The fitting problem”

- Ellis & Stoeger 1987: existe um “coarse graining” no pressuposto da métrica FLRW para escalas menores ($r > 100$ Mpc), onde o Universo é bastante inhomogêneo

“The fitting problem”

- Ellis & Stoeger 1987: existe um “coarse graining” no pressuposto da métrica FLRW para escalas menores ($r > 100$ Mpc), onde o Universo é bastante inhomogêneo
- Como descrever o Universo nestas escalas, então?

“The fitting problem”

- Ellis & Stoeger 1987: existe um “coarse graining” no pressuposto da métrica FLRW para escalas menores ($r > 100$ Mpc), onde o Universo é bastante inhomogêneo
- Como descrever o Universo nestas escalas, então?
- Modelos de Backreaction (Thomas Buchert e colaboradores)

“The fitting problem”

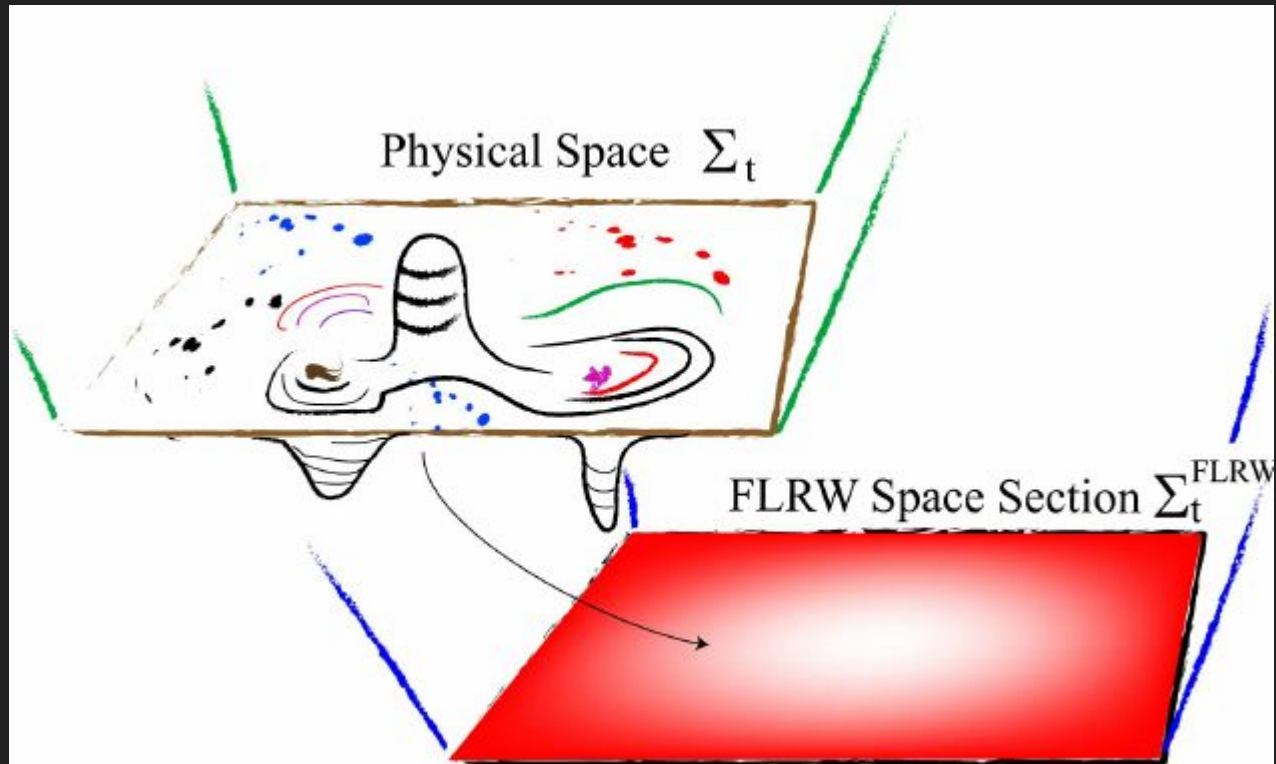
- Ellis & Stoeger 1987: existe um “coarse graining” no pressuposto da métrica FLRW para escalas menores ($r > 100$ Mpc), onde o Universo é bastante inhomogêneo
- Como descrever o Universo nestas escalas, então?
- Modelos de Backreaction (Thomas Buchert e colaboradores)
- Será que backreaction devido a esse coarse graining poderia explicar a aceleração cósmica?

“The fitting problem”

- Ellis & Stoeger 1987: existe um “coarse graining” no pressuposto da métrica FLRW para escalas menores ($r > 100$ Mpc), onde o Universo é bastante inhomogêneo
- Como descrever o Universo nestas escalas, então?
- Modelos de Backreaction (Thomas Buchert e colaboradores)
- Será que backreaction devido a esse coarse graining poderia explicar a aceleração cósmica? Tudo indica que não...

“The fitting problem”

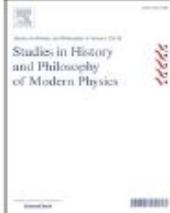
- Ellis & Stoeger 1987: existe um “coarse graining” no pressuposto da métrica FLRW para escalas menores ($r > 100$ Mpc), onde o Universo é bastante inhomogêneo
- Como descrever o Universo nestas escalas, então?
- Modelos de Backreaction (Thomas Buchert e colaboradores)
- Será que backreaction devido a esse coarse graining poderia explicar a aceleração cósmica? Tudo indica que não...
- Nota: um trabalho recente (Colin+ 2019) aponta que a aceleração cósmica atual poderia ser explicada pelo fluxo em massa do nosso grupo local



Créditos: Buchert & Canfora 2008



ELSEVIER



Some reflections on the structure of cosmological knowledge

Chris Smeenk

Department of Philosophy and Rotman Institute of Philosophy, University of Western Ontario, London, ON, N6A 5B7, Canada

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 October 2019

Received in revised form

9 May 2020

Accepted 28 May 2020

Available online xxx

ABSTRACT

Stein has characterized one of the central problems in accounting for our knowledge in physics as that of getting the laboratory, or observatory, inside the theory — that is, of understanding how the mathematical structures of fundamental physical theories have empirical content. He has argued that physicists respond to this problem by giving schematic representations of observers and experiments. In addition, Stein emphasizes the importance of regarding knowledge as an enterprise, with current theories providing guidance for future inquiry. I will explore some ramifications of this way of thinking about the structure of scientific theories for contemporary cosmology. One goal of observational cosmology is to measure the six basic parameters appearing in the standard model of cosmology. These parameters are well-defined if the universe is suitably approximated at some scale by a perturbed FLRW model. The enormous extrapolations involved in the standard model are often justified by the consistent determination of these parameters via a variety of methods. Here I will consider two recent debates regarding this approach to cosmology, inspired by Stein's work. The first debate regards the impact of different ways of characterizing the propagation of light through a cosmological spacetime on the determination of cosmological parameters (such as H_0). The second regards how the highly symmetric FLRW models relate to describing the real universe, at small scales where it is very lumpy.

Resumo

Resumo

- Modelo cosmológico padrão é baseado em dois pressupostos fundamentais:
 - Teoria da Relatividade Geral (testada com alta precisão, mas será que ela realmente vale nas maiores escalas cosmológicas?)
 - Princípio Cosmológico (ainda a ser testado com precisão)
- Importante testar se estas hipóteses são pressupostos físicos válidos, ou se tratam-se apenas de simplificações matemáticas que não descrevem com precisão o Universo observável
- Caso encontremos desvios significativos desses pressupostos, o MCP terá que ser completamente reformulado!

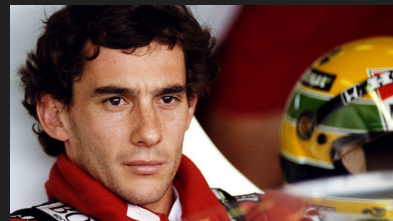


Cenas dos próximos capítulos





Cenas dos próximos capítulos



- **Aula 3: Testes observacionais do Princípio Cosmológico (e do modelo padrão)**
 - como testar a isotropia cosmológica na prática?
 - como “testar” também a hipótese da homogeneidade cósmica?