

# Cosmologia Teórica e Observacional

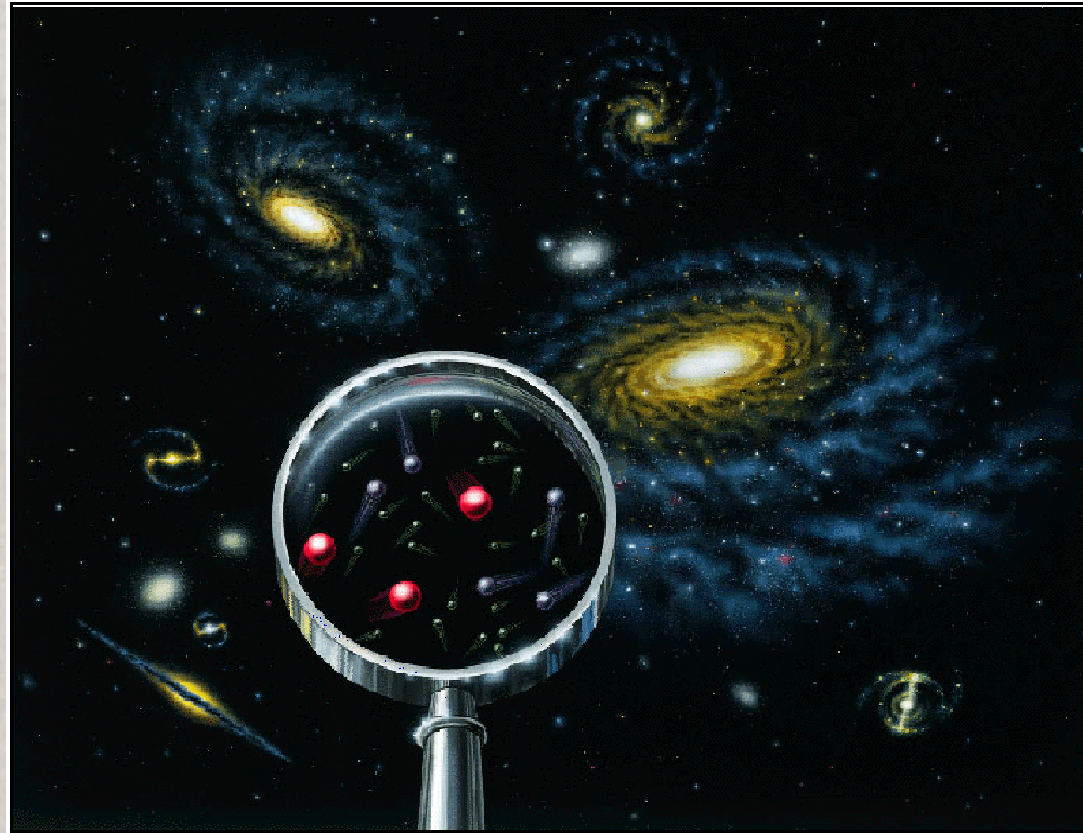


Carlos Herdeiro

Grupo de Geometria e Dinâmica Gravitacional (CIDMA),  
Universidade de Aveiro  
<http://gravitation.web.ua.pt>

11<sup>a</sup> Escola de Gravitação e Astrofísica do Instituto Superior Técnico  
Lisboa, 4 e 5 de Setembro de 2023

# Cosmologia Teórica e Observacional



Carlos Herdeiro

Grupo de Geometria e Dinâmica Gravitacional (CIDMA),  
Universidade de Aveiro  
<http://gravitation.web.ua.pt>

11<sup>a</sup> Escola de Gravitação e Astrofísica do Instituto Superior Técnico  
Lisboa, 4 e 5 de Setembro de 2023

# Cosmologia Teórica e Observacional



## Tópicos:

Aula 1 - Introdução e perspectiva histórica (1915-1998)

Aula 2 - Perspectiva histórica (1998-agora) e o modelo cosmológico padrão ( $\Lambda$ -CDM+inflação)

Aula 3 - Cosmologia em Relatividade Geral

# Cosmologia Teórica e Observacional



## Tópicos:

**Aula 1 - Introdução e perspectiva histórica (1915-1998)**

Aula 2 - Perspectiva histórica (1998-agora) e o modelo cosmológico padrão ( $\Lambda$ -CDM+inflação)

Aula 3 - Cosmologia em Relatividade Geral







O “Ultra Deep Field” do Hubble Space Telescope.

**Quase todos os pontos luminosos desta imagem são uma galáxia inteira!**

Estima-se que esta pequena região do Universo contenha quase 200 mil milhões de galáxias.

Esta região é na constelação Fornax (Fornalha - Hemisfério Sul). Os dados foram obtidos pelo HST entre Sep 3, 2003 - Jan 16, 2004.

Esta região do céu foi escolhida por ter uma densidade baixa de estrelas brilhantes na região “near-field”.

# Cosmologia

tem origem etimológica no grego:

“Cosmos”=ordem + “Logia”=estudo, tratado



# Cosmologia

tem origem etimológica no grego:

“Cosmos”=ordem + “Logia”=estudo, tratado

A palavra **Cosmologia**  
foi usada primeiro pelo filósofo alemão Christian Wolff  
no seu tratado “Cosmologia Generalis” (1730)



Placa no edifício de Wrocław (hoje Polónia)  
onde Wolff nasceu e viveu de 1679-1699

Compreender o que é o Universo, a sua origem e a sua evolução,  
está intimamente ligado a questões sobre  
o lugar do Homem no Universo.

Compreender o que é o Universo, a sua origem e a sua evolução, está intimamente ligado a questões sobre o lugar do Homem no Universo.

É pois natural que a generalidade das civilizações e culturas tenham desenvolvido Cosmologias míticas, com particular ênfase na Cosmogonia (origem) e Escatologia (fim) do Universo.

Compreender o que é o Universo, a sua origem e a sua evolução, está intimamente ligado a questões sobre o lugar do Homem no Universo.

É pois natural que a generalidade das civilizações e culturas tenham desenvolvido Cosmologias míticas, com particular ênfase na Cosmogonia (origem) e Escatologia (fim) do Universo.



Compreender o que é o Universo, a sua origem e a sua evolução, está intimamente ligado a questões sobre o lugar do Homem no Universo.

É pois natural que a generalidade das civilizações e culturas tenham desenvolvido Cosmologias míticas, com particular ênfase na Cosmogonia (origem) e Escatologia (fim) do Universo.



A **Cosmologia científica moderna**  
aborda esta questão usando o método científico,  
baseado na  
linguagem matemática,  
nas leis da física com base empírica  
e em observações astrofísicas/cosmológicas.

A **Cosmologia científica moderna**  
aborda esta questão usando o método científico,  
baseado na  
linguagem matemática,  
nas leis da física com base empírica  
e em observações astrofísicas/cosmológicas.

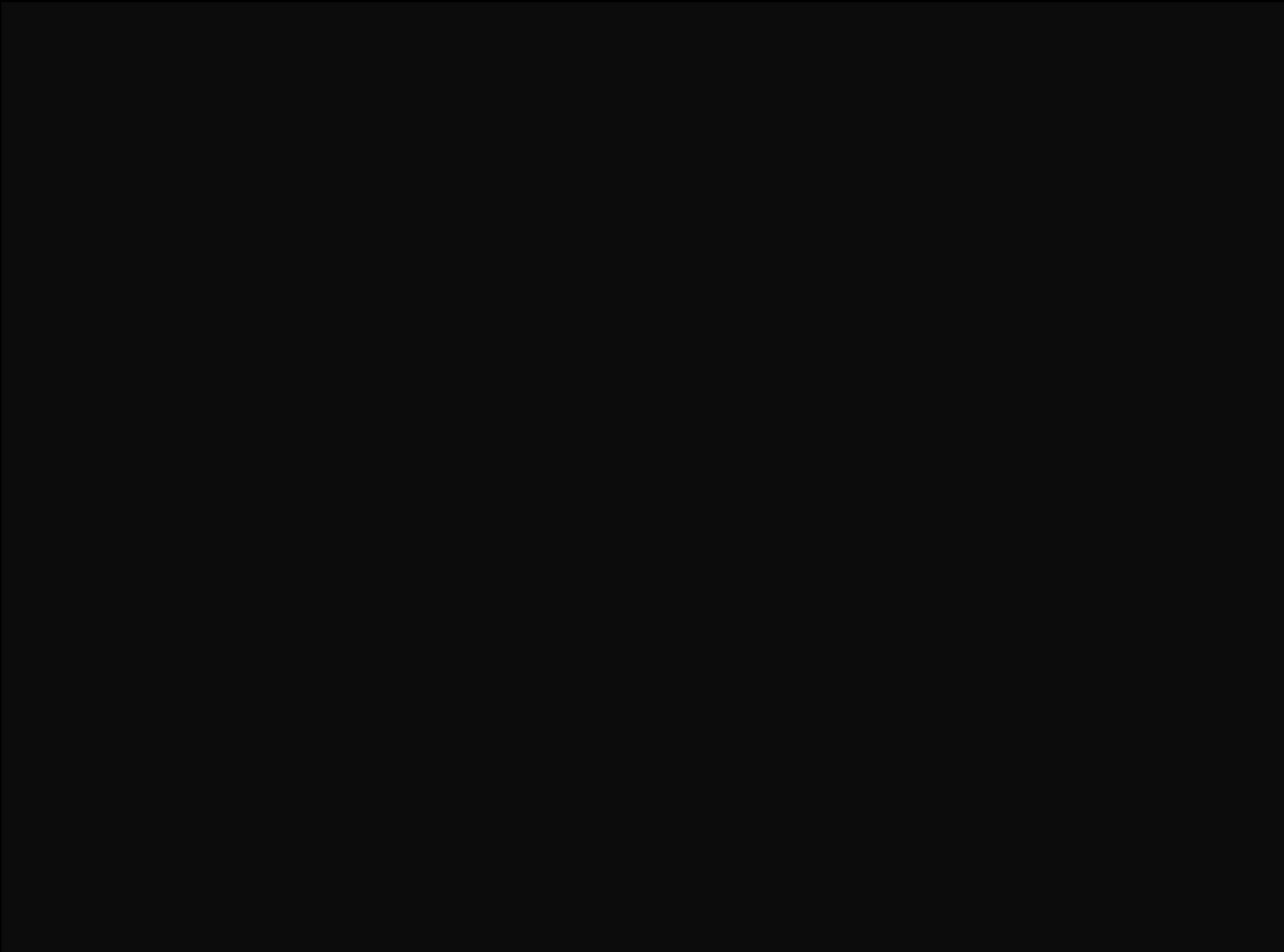
Baseado nestes princípios e métodos  
a cosmologia científica moderna atravessa uma  
**era revolucionária.**

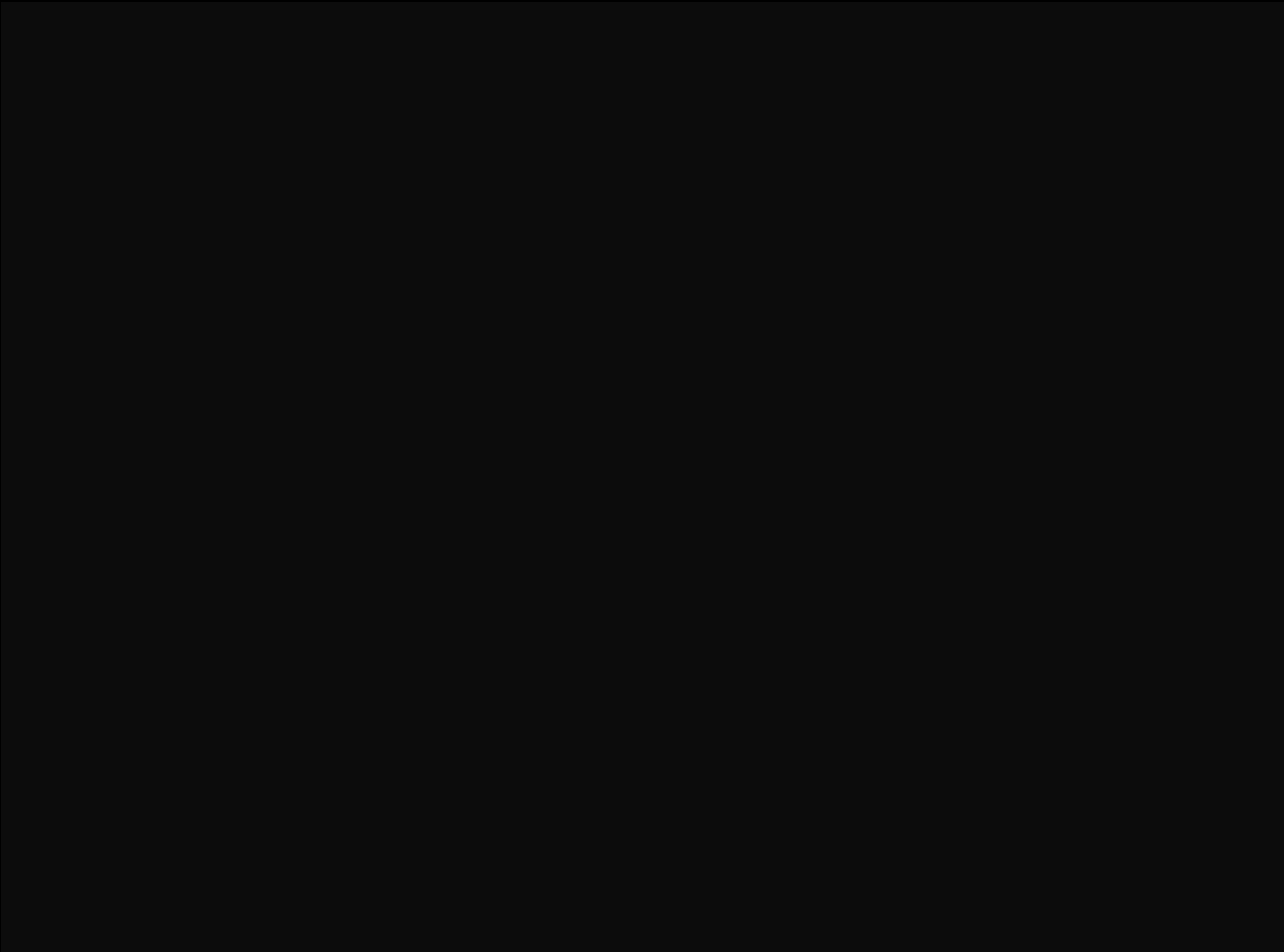
A **Cosmologia científica moderna** aborda esta questão usando o método científico, baseado na linguagem matemática, nas leis da física com base empírica e em observações astrofísicas/cosmológicas.

Baseado nestes princípios e métodos a cosmologia científica moderna atravessa uma **era revolucionária**.

**Observações recentes de alta precisão** restringiram consideravelmente as especulações teóricas originando um extraordinário cenário para o que é o Universo:

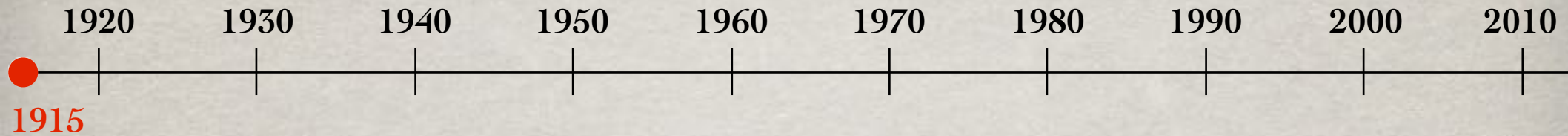






Como construímos um tão extraordinário modelo?

# “Timeline”:



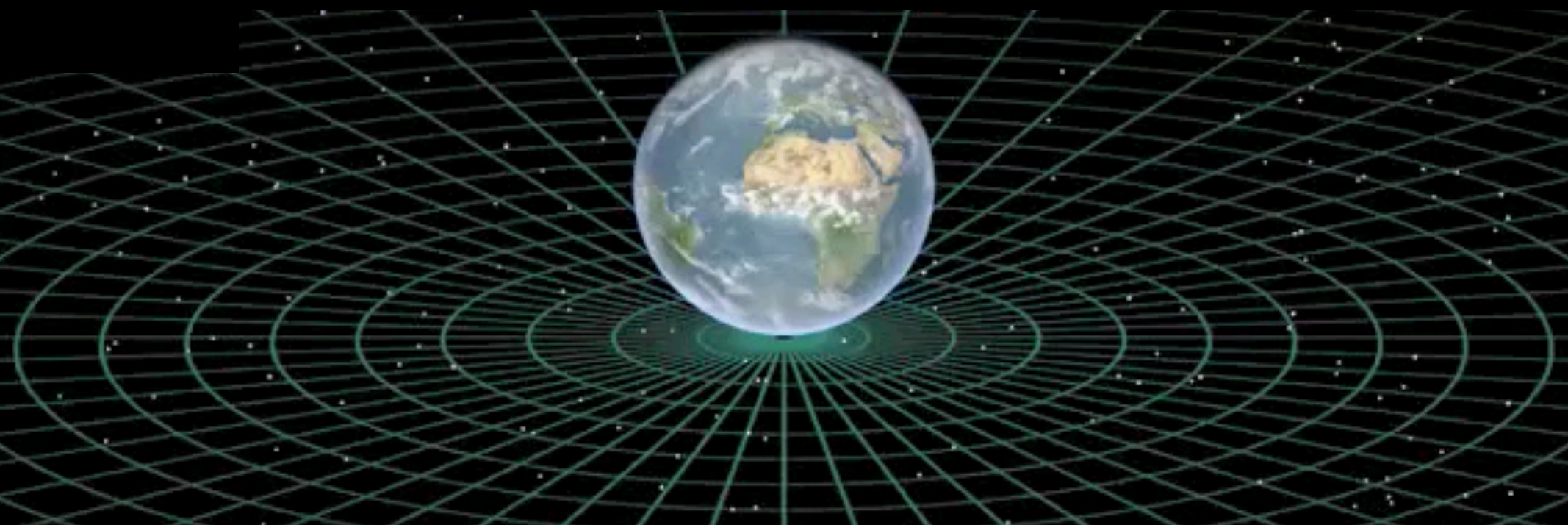
A construção da  
**Relatividade**  
**Geral**  
por A. Einstein

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

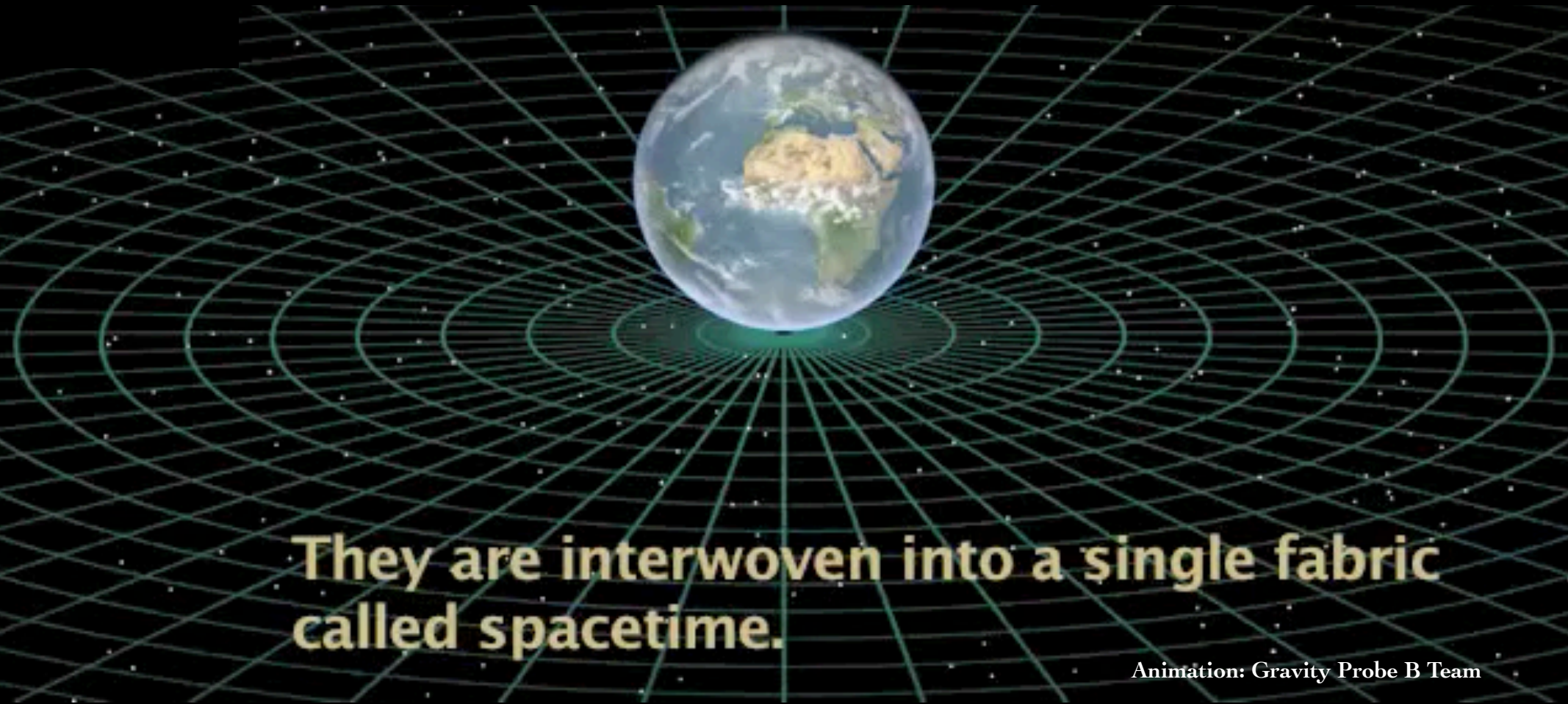


O espaço-tempo  
é dinâmico

Pintura: Peter Wharton



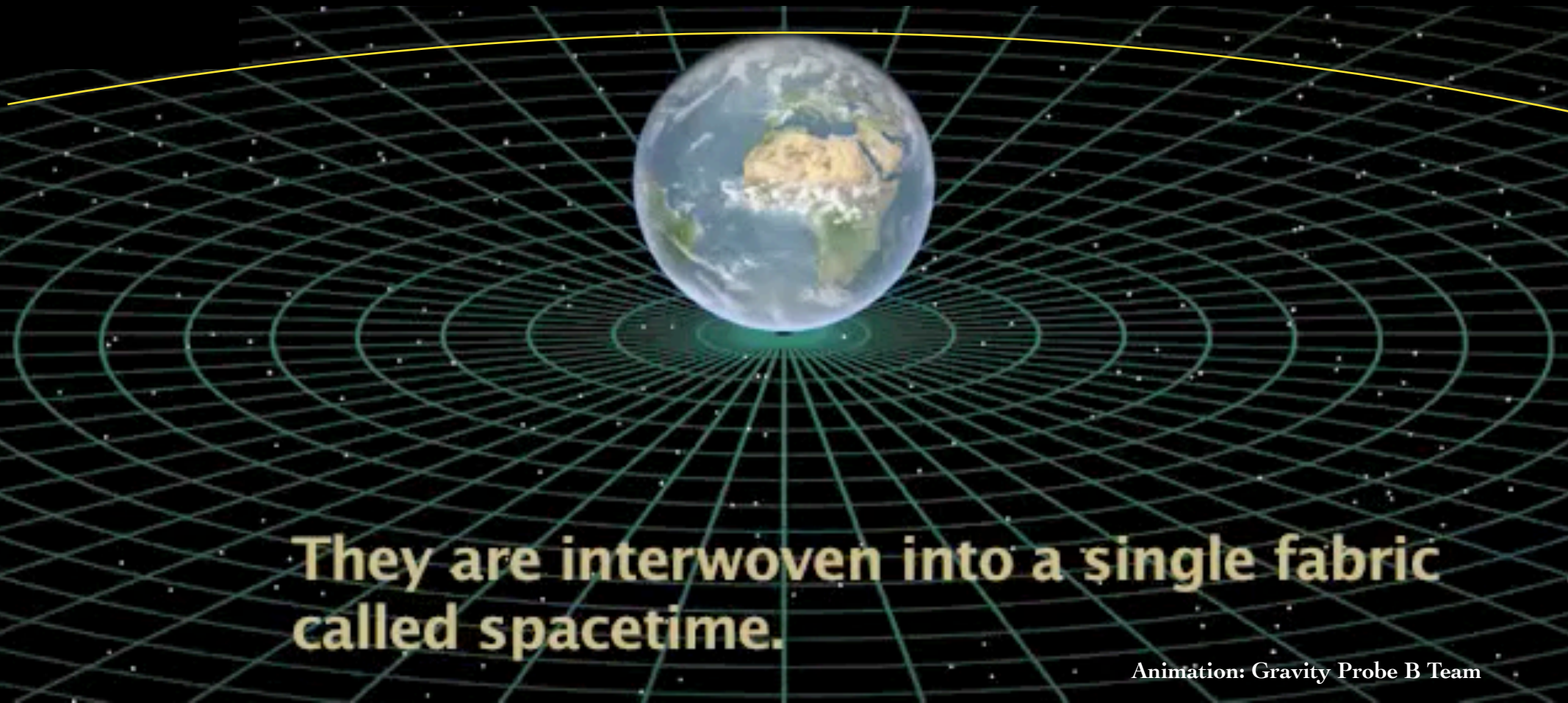
“A matéria diz ao espaço como se curvar”



**They are interwoven into a single fabric called spacetime.**

Animation: Gravity Probe B Team

“Espaço diz à matéria como se mover”



**They are interwoven into a single fabric called spacetime.**

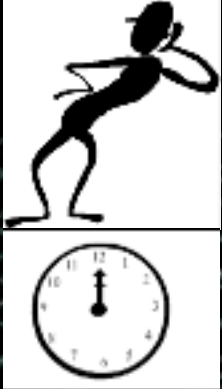
Animation: Gravity Probe B Team



**They are interwoven into a single fabric called spacetime.**

Animation: Gravity Probe B Team





**They are interwoven into a single fabric called spacetime.**

Animation: Gravity Probe B Team



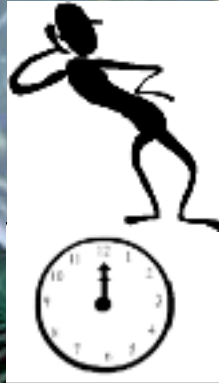
**They are interwoven into a single fabric called spacetime.**

Animation: Gravity Probe B Team



**They are interwoven into a single fabric called spacetime.**

Animation: Gravity Probe B Team



**They are interwoven into a single fabric called spacetime.**

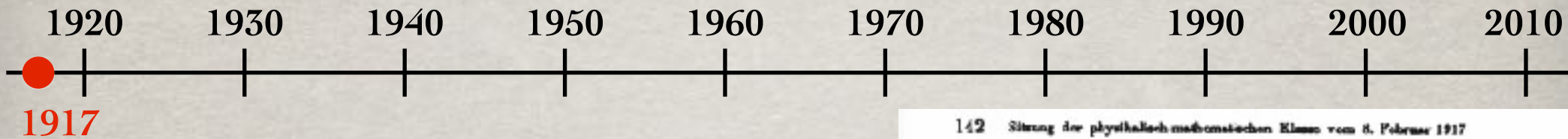
Animation: Gravity Probe B Team



**They are interwoven into a single fabric  
called spacetime.**

Animation: Gravity Probe B Team

# “Timeline”:



Insatisfeito com o facto de as soluções cosmológicas das suas equações terem singularidades, Einstein modifica-as introduzindo a **Constante Cosmológica**

## Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie.

VON A. EINSTEIN.

Es ist wohlbekannt, daß die Poisson'sche Differentialgleichung

$$\Delta\phi = 4\pi K\rho \quad (1)$$

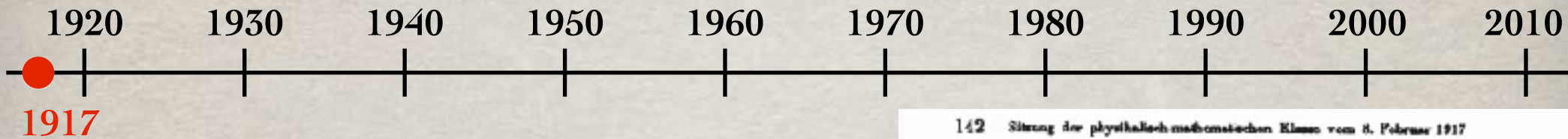
in Verbindung mit der Bewegungsgleichung des materiellen Punktes die Newton'sche Fernwirkungstheorie noch nicht vollständig ersetzt. Es muß noch die Bedingung hinzutreten, daß im räumlich Unendlichen das Potential  $\phi$  einem festen Grenzwerte zustrebt. Analog verhält es sich bei der Gravitationstheorie der allgemeinen Relativität; auch hier müssen zu den Differentialgleichungen Grenzbedingungen hinzutreten für das räumlich Unendliche, falls man die Welt wirklich als räumlich unendlich ausgedehnt anzusehen hat.

Bei der Behandlung des Planetenproblems habe ich diese Grenzbedingungen in Gestalt folgender Annahme gewählt: Es ist möglich, ein Bezugssystem so zu wählen, daß sämtliche Gravitationspotentiale  $g_{\alpha}$  im räumlich Unendlichen konstant werden. Es ist aber a priori durchaus nicht evident, daß man dieselben Grenzbedingungen ansetzen darf, wenn man größere Partien der Körperwelt ins Auge fassen will. Im folgenden sollen die Überlegungen angegeben werden, welche ich bisher über diese prinzipiell wichtige Frage angestellt habe.

### § 1. Die Newton'sche Theorie.

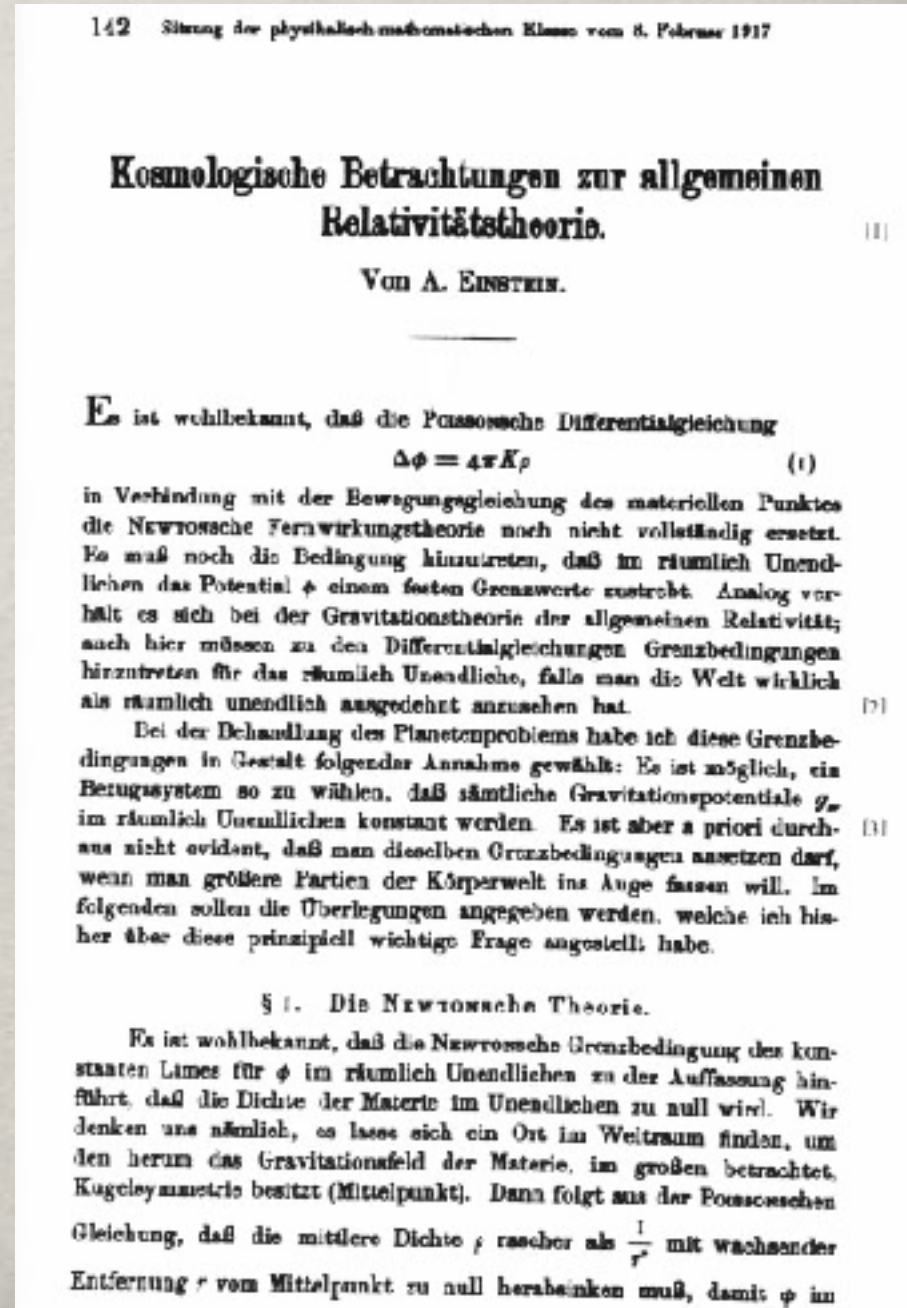
Es ist wohlbekannt, daß die Newton'sche Grenzbedingung des konstanten Limes für  $\phi$  im räumlich Unendlichen zu der Auffassung hinführt, daß die Dichte der Materie im Unendlichen zu null wird. Wir denken uns nämlich, es lasse sich ein Ort im Weltraum finden, um den herum das Gravitationsfeld der Materie, im großen betrachtet, Kugelsymmetrie besitzt (Mittelpunkt). Dann folgt aus der Poisson'schen Gleichung, daß die mittlere Dichte  $\rho$  rascher als  $\frac{1}{r^2}$  mit wachsender Entfernung  $r$  vom Mittelpunkt zu null herabsinken muß, damit  $\phi$  im

# “Timeline”:



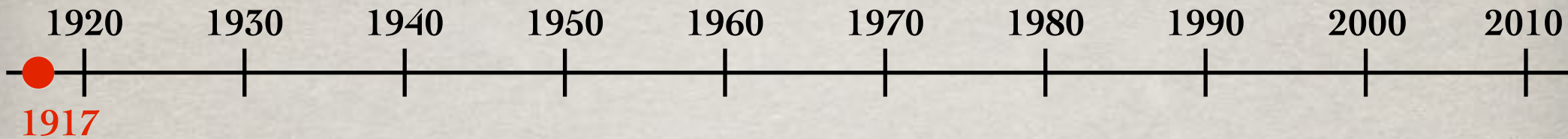
Insatisfeito com o facto de as soluções cosmológicas das suas equações terem singularidades, Einstein modifica-as introduzindo a **Constante Cosmológica**

Com as novas equações, Einstein deduz uma nova solução cosmológica:  
**O Universo Estático de Einstein**



“Cosmological considerations on the General Theory of Relativity”

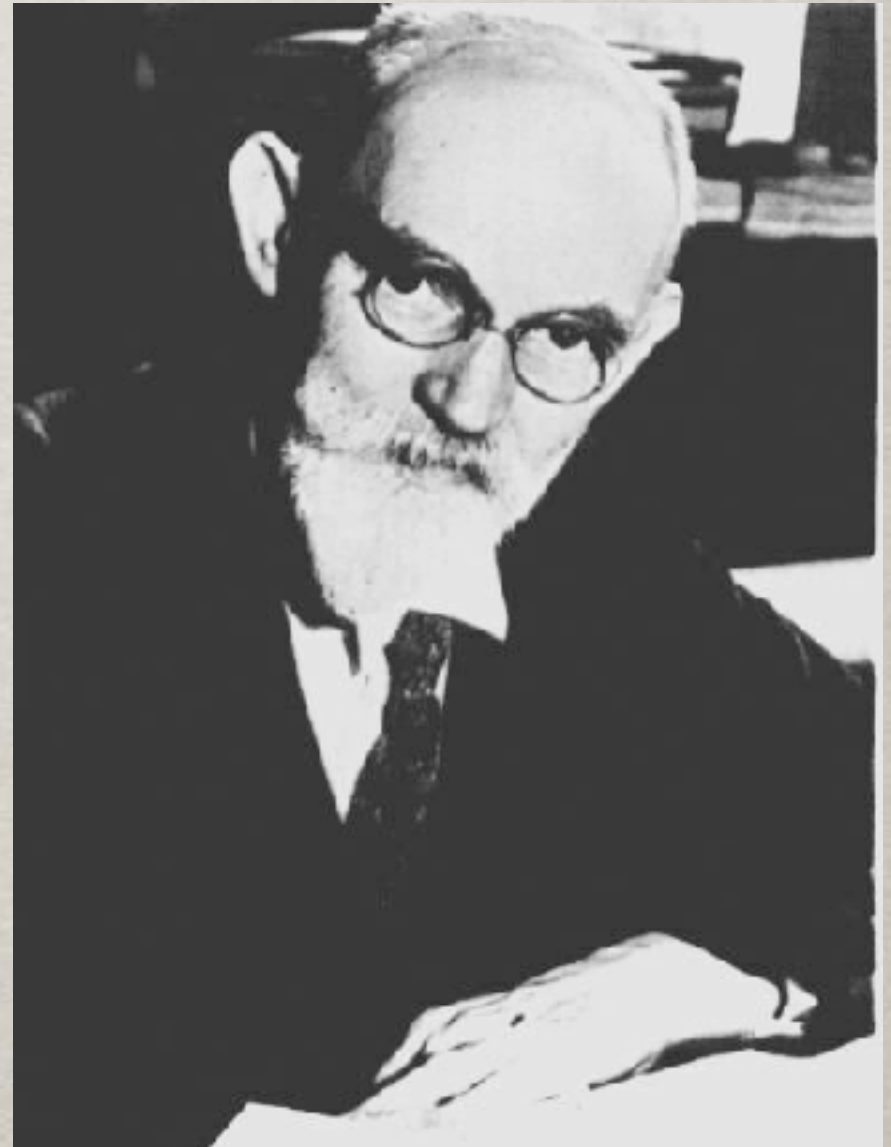
## “Timeline”:



No mesmo ano Willem de Sitter  
descobre a solução para um  
Universo vazio das novas  
equações de Einstein:

**o Universo de de Sitter.**

Este é o primeiro exemplo de um  
Universo inflacionário





## “Timeline”:

1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010

1922-24

Alexander Friedmann considerou modelos cosmológicos em Relatividade Geral com curvatura espacial (constante).

Os modelos cosmológicos homogêneos e isotrópicos são denominados

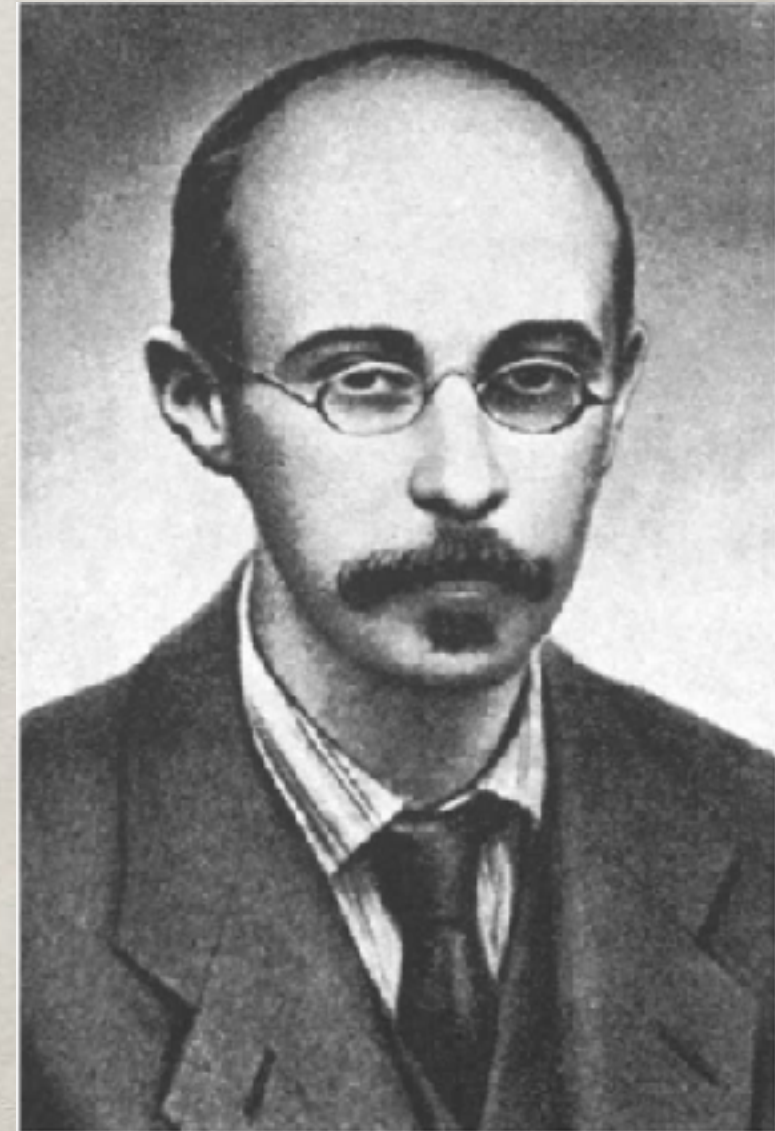
**Universos de FRW ou FLRW**

(Friedmann-

(Lemaître-)Robertson-Walker) e

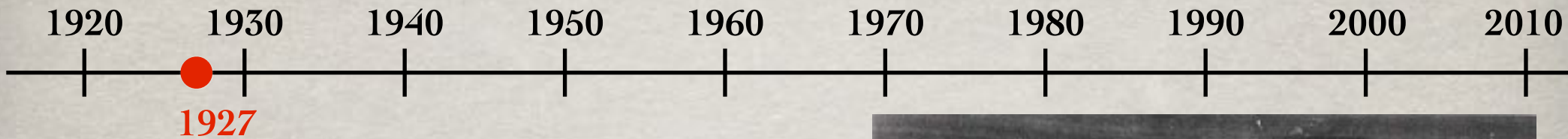
uma ou ambas as equações de Einstein para estes modelos são chamadas

**“equação de Friedmann”.**



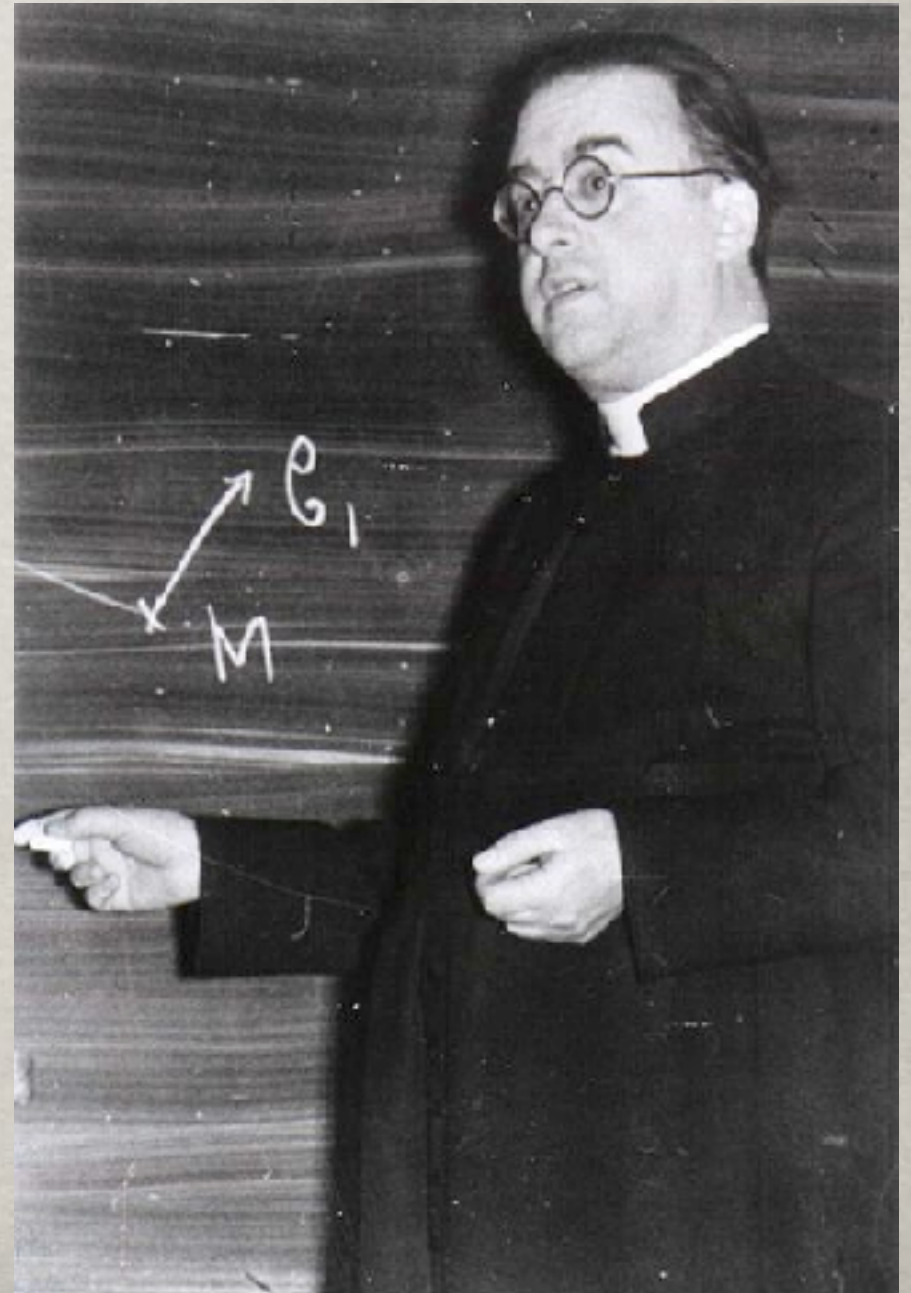
*A. Friedmann*

## “Timeline”:



Georges Lemaître estudou os mesmos modelos e foi o primeiro a:

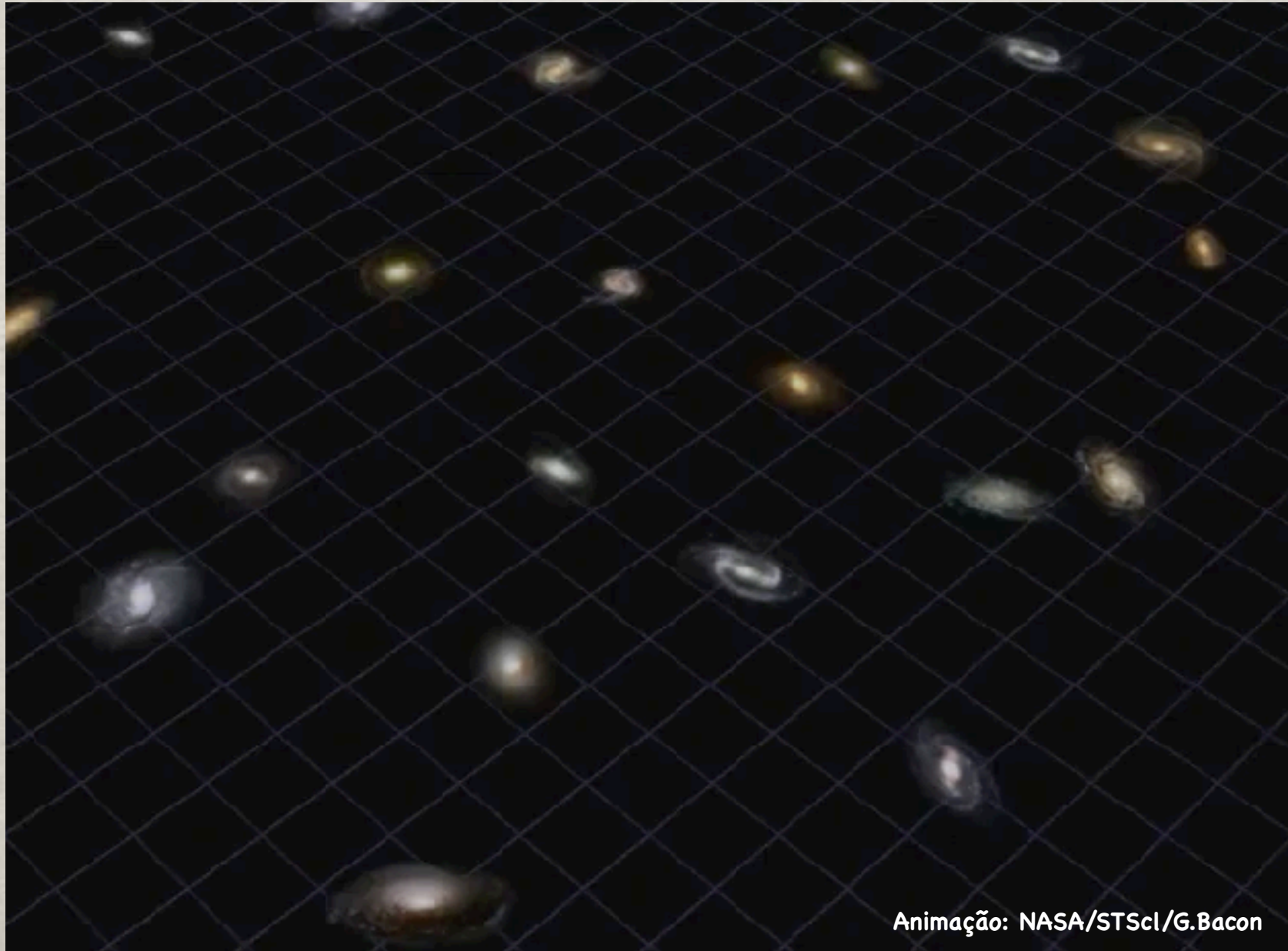
- prever a **expansão do Universo**;
- propor a **“lei de Hubble”**;
- estimar **“o parâmetro de Hubble  $H$  (velocidade/distância)”**;
- propor uma teoria para a origem do Universo do tipo “Big Bang”, a que ele chamou **“átomo primevo”** ou **“ovo cósmico”** (1931)



# “Timeline”:

1920      1930      1940      1950      1960      1970      1980      1990      2000      2010

1927

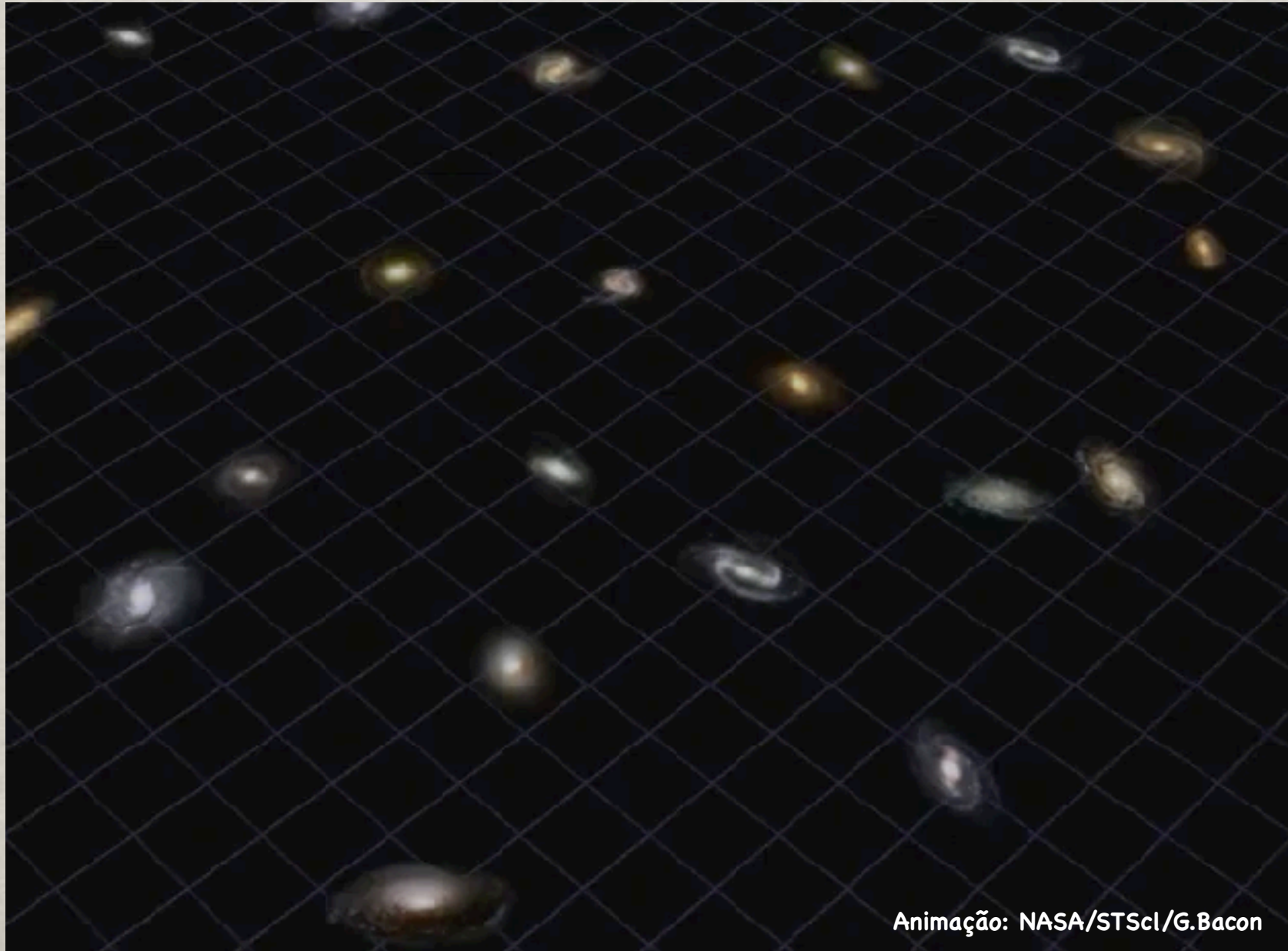


Animação: NASA/STScI/G.Bacon

# “Timeline”:

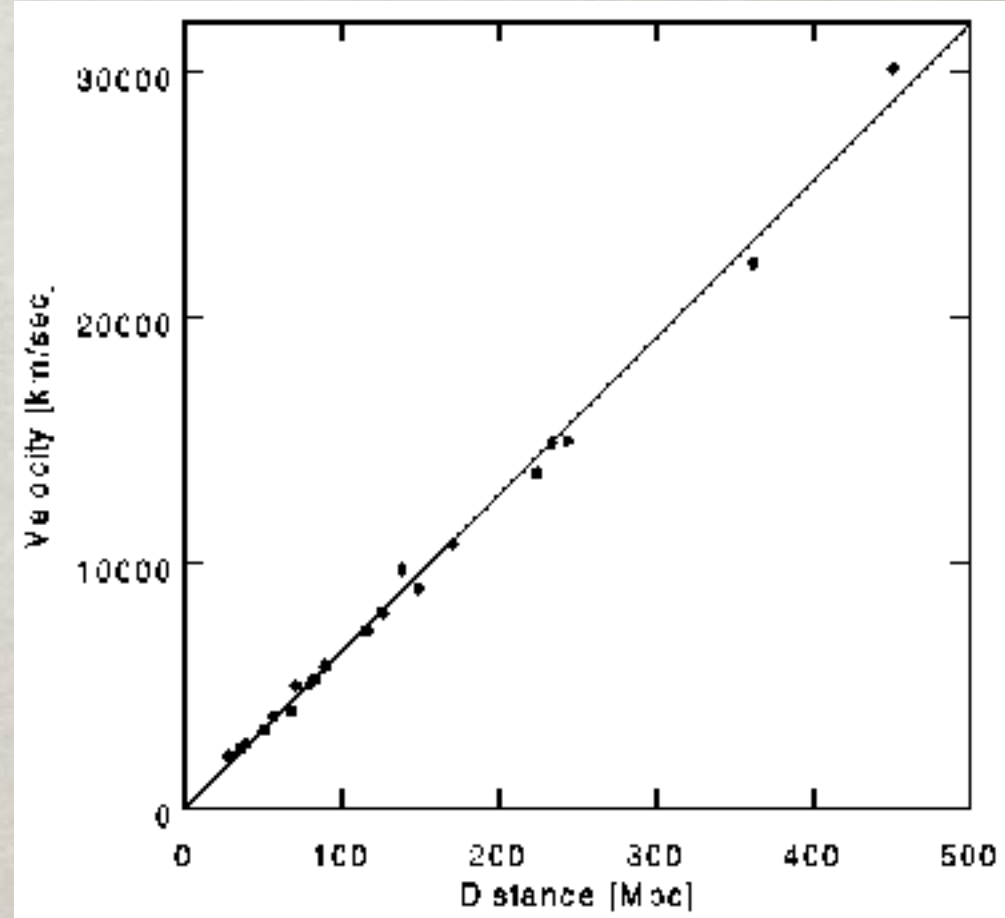
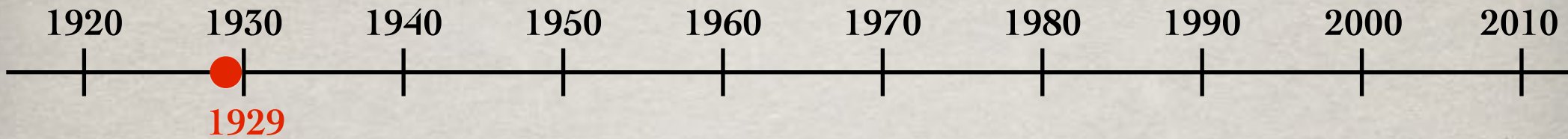
1920      1930      1940      1950      1960      1970      1980      1990      2000      2010

1927



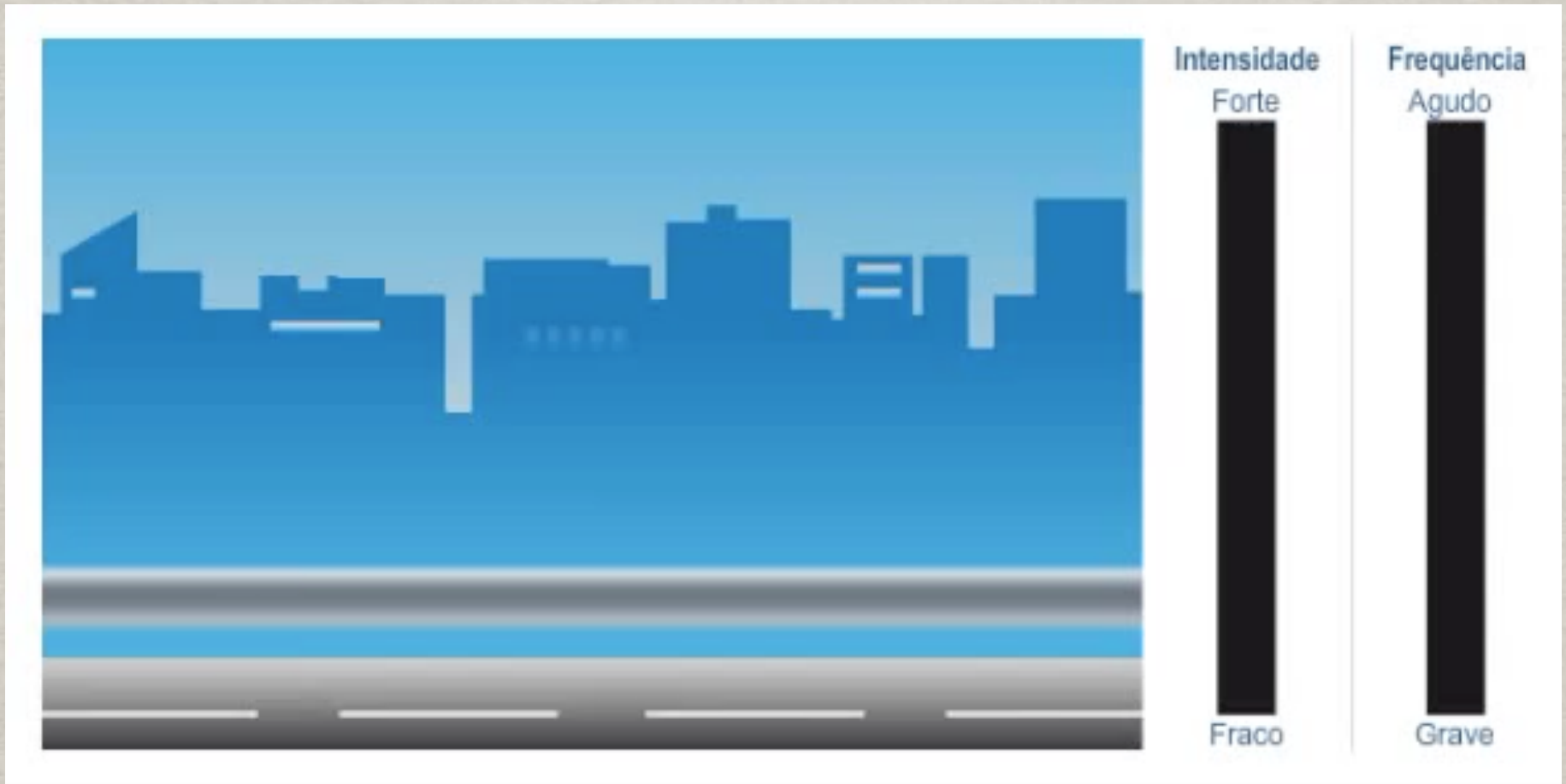
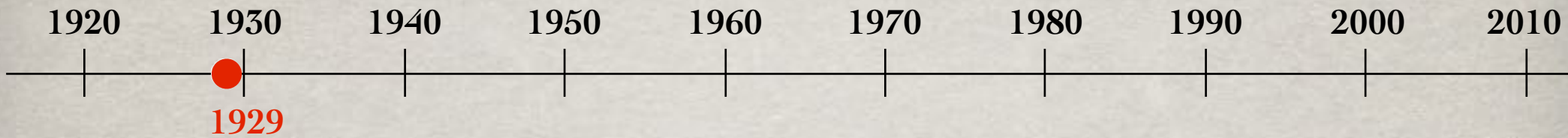
Animação: NASA/STScI/G.Bacon

# “Timeline”:



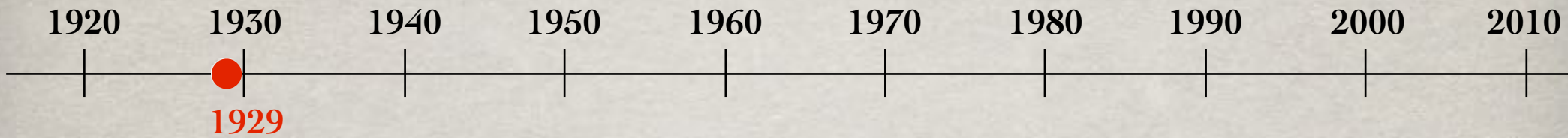
Edwin Hubble descobre a **EXPANSÃO DO UNIVERSO**

# “Timeline”:



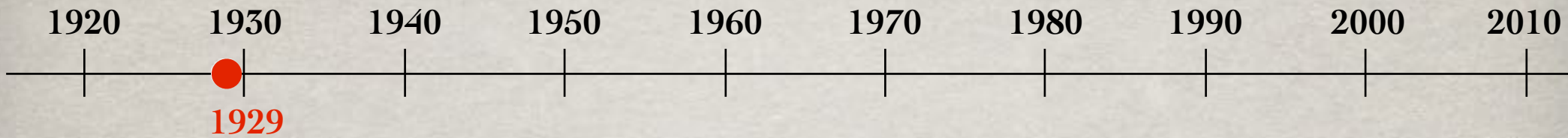
A velocidade das galáxias é determinada usando o **efeito Doppler**

# “Timeline”:



A velocidade das galáxias é determinada usando o **efeito Doppler**

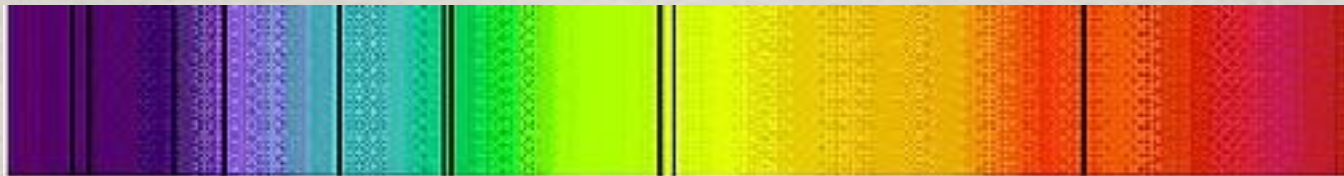
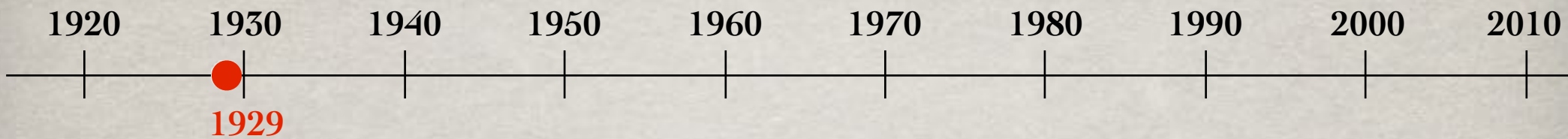
# “Timeline”:



A velocidade das galáxias é determinada usando o **efeito Doppler**



# “Timeline”:



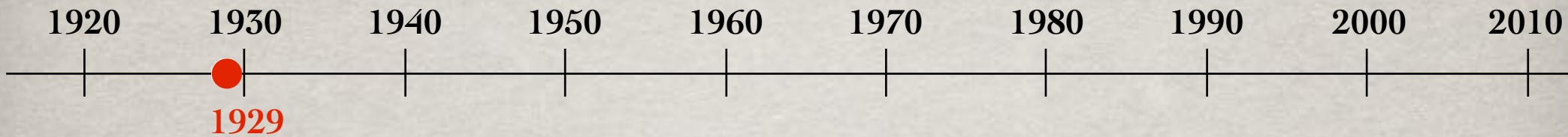
Fonte de luz que se aproxima - blueshift



Fonte de luz em repouso

A velocidade das galáxias é determinada usando o **efeito Doppler**

# “Timeline”:

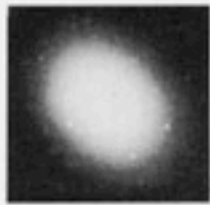


A velocidade das galáxias é determinada usando o **efeito Doppler**

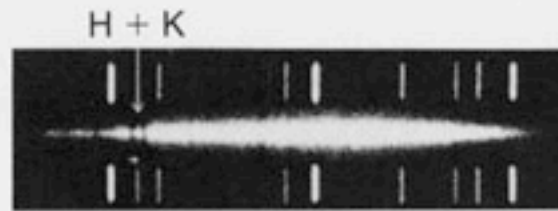
Cluster  
nebula in

Distance in  
light-years

Redshifts



78,000,000

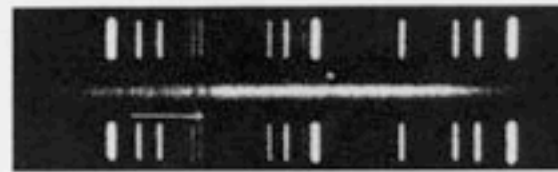


1,200 km s<sup>-1</sup>

Virgo



1,000,000,000

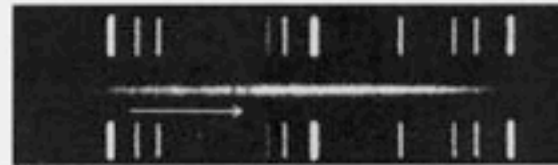


15,000 km s<sup>-1</sup>

Ursa Major



1,400,000,000

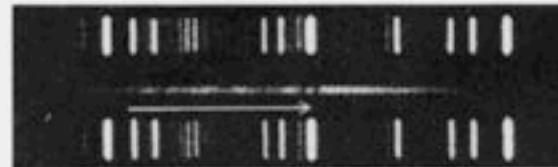


22,000 km s<sup>-1</sup>

Corona  
Borealis



2,500,000,000

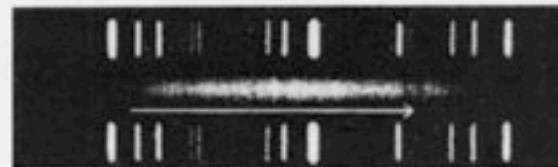


39,000 km s<sup>-1</sup>

Bootes



3,960,000,000



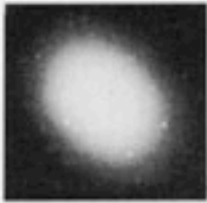
61,000 km s<sup>-1</sup>

Hydra

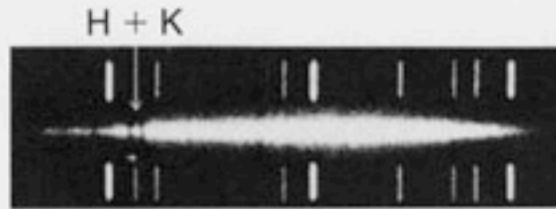
Cluster  
nebula in

Distance in  
light-years

Redshifts



78,000,000

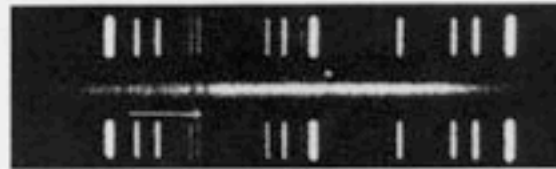


1,200 km s<sup>-1</sup>

Virgo



1,000,000,000

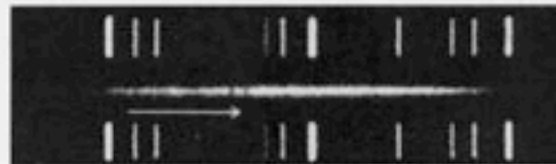


15,000 km s<sup>-1</sup>

Ursa Major



1,400,000,000

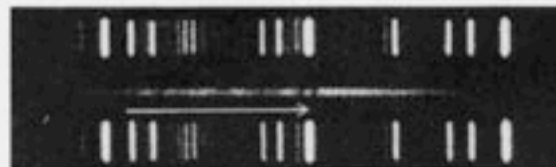


22,000 km s<sup>-1</sup>

Corona  
Borealis



2,500,000,000

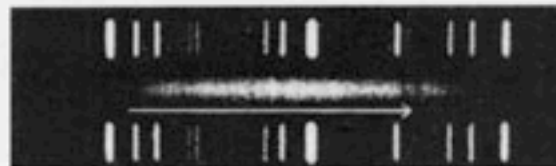


39,000 km s<sup>-1</sup>

Bootes



3,960,000,000



61,000 km s<sup>-1</sup>

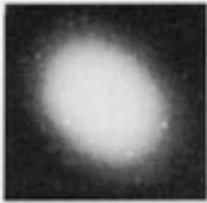
Hydra

$$\frac{\lambda_{\text{observado}}}{\lambda_{\text{fonte}}} = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

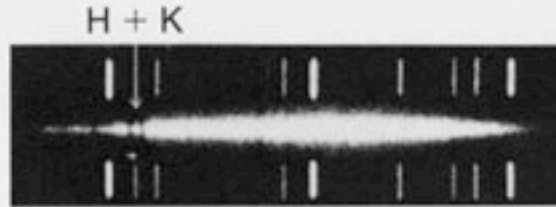
Cluster  
nebula in

Distance in  
light-years

Redshifts



78,000,000

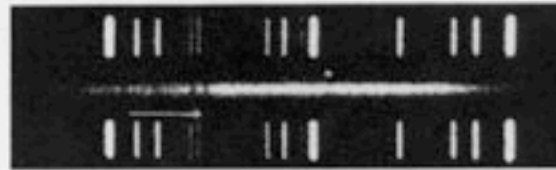


Virgo

1,200 km s<sup>-1</sup>



1,000,000,000

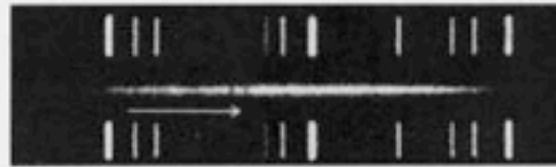


Ursa Major

15,000 km s<sup>-1</sup>



1,400,000,000

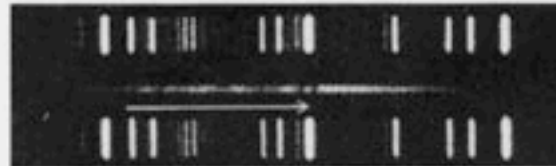


Corona  
Borealis

22,000 km s<sup>-1</sup>



2,500,000,000

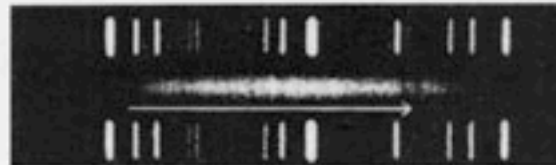


Bootes

39,000 km s<sup>-1</sup>



3,960,000,000



Hydra

61,000 km s<sup>-1</sup>

$$\frac{\lambda_{\text{observado}}}{\lambda_{\text{fonte}}} = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

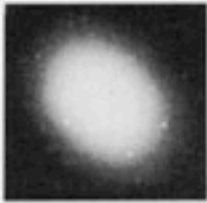
“Redshift”  
cosmológico

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{observado}}}{\lambda_{\text{fonte}}} - 1$$

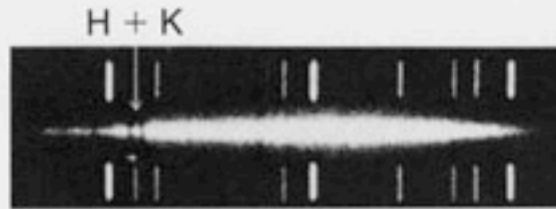
Cluster  
nebula in

Distance in  
light-years

Redshifts



78,000,000

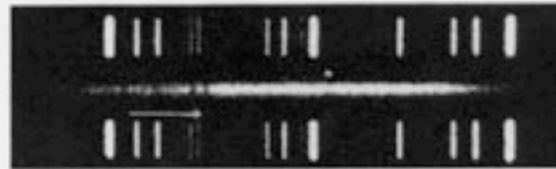


1,200 km s<sup>-1</sup>  $z = 0.004$

Virgo



1,000,000,000

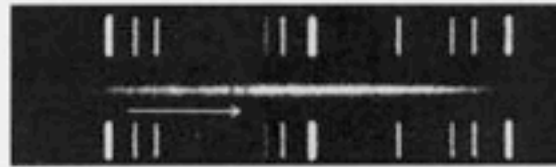


15,000 km s<sup>-1</sup>  $z = 0.05$

Ursa Major



1,400,000,000

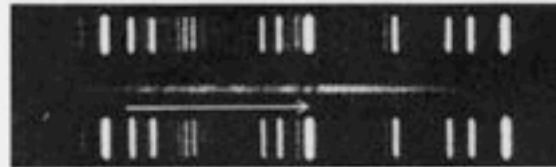


22,000 km s<sup>-1</sup>  $z = 0.08$

Corona  
Borealis



2,500,000,000

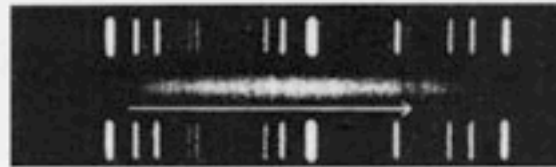


39,000 km s<sup>-1</sup>  $z = 0.14$

Bootes



3,960,000,000



61,000 km s<sup>-1</sup>  $z = 0.22$

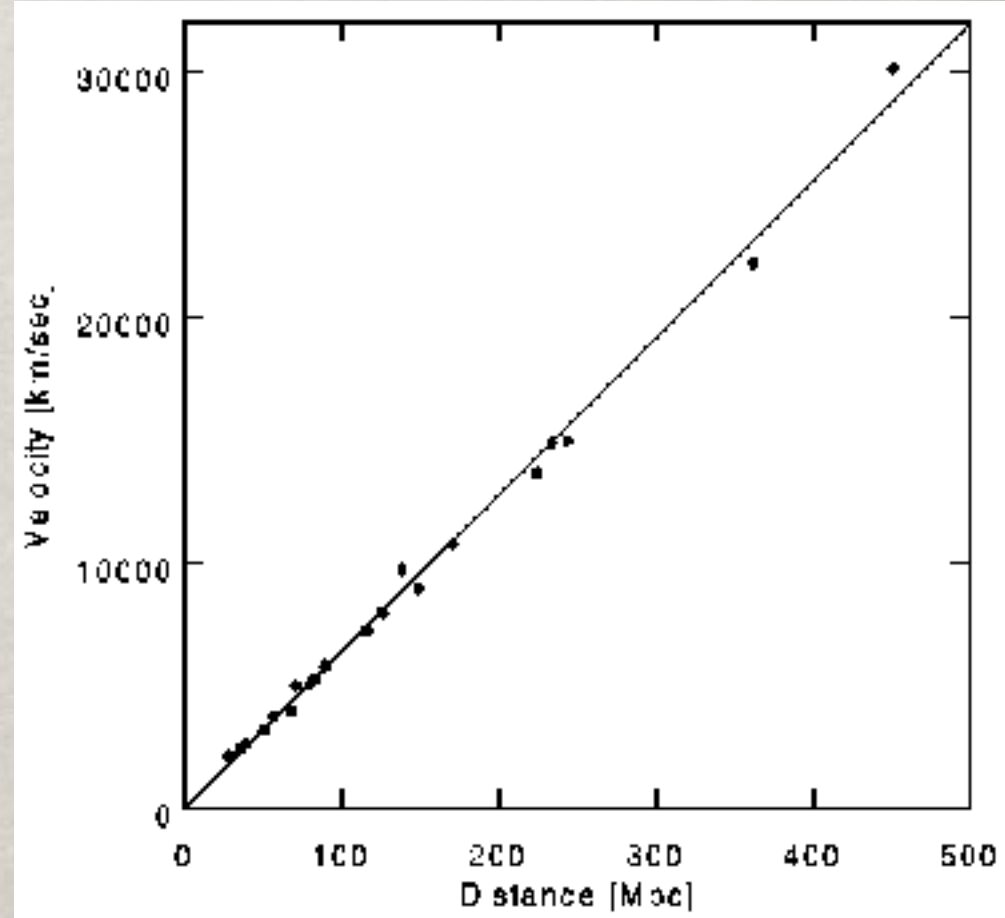
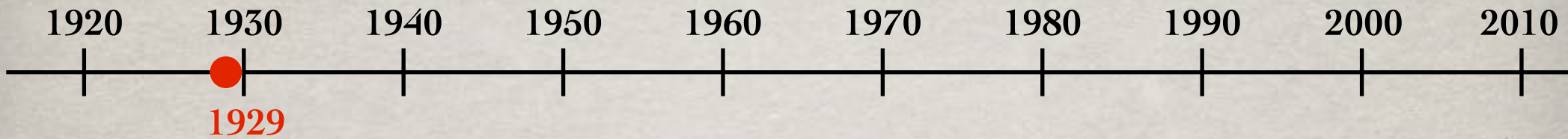
Hydra

$$\frac{\lambda_{\text{observado}}}{\lambda_{\text{fonte}}} = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

“Redshift”  
cosmológico

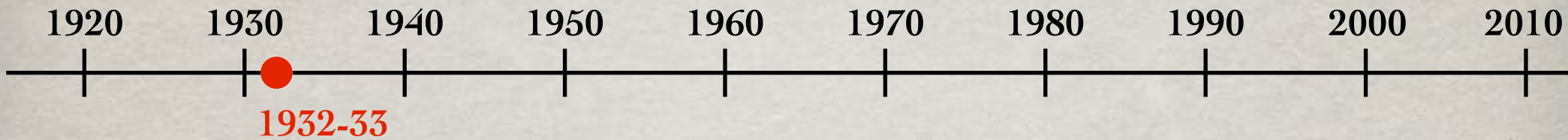
$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{observado}}}{\lambda_{\text{fonte}}} - 1$$

# “Timeline”:

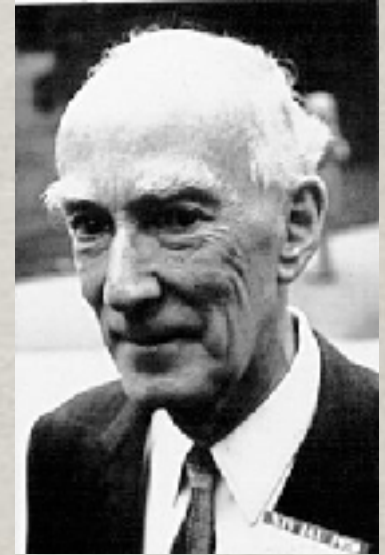


Edwin Hubble descobre a **EXPANSÃO DO UNIVERSO**

## “Timeline”:



Jan Oort e Fritz Zwicky  
observeram que tanto para  
explicar as velocidades orbitais de estrelas  
na Via Láctea como para explicar as  
velocidades de galáxias em aglomerados  
a massa “visível” não é suficiente.  
Foi a primeira evidência da  
**matéria escura.**



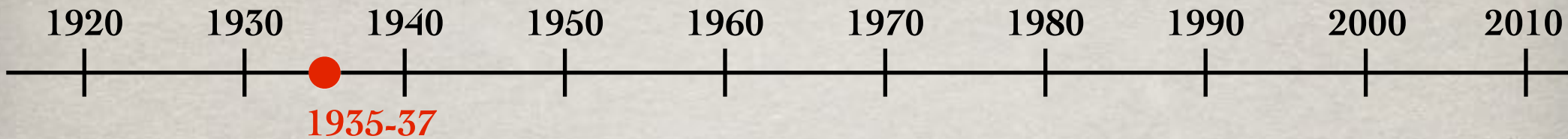
Jan Oort



Fritz Zwicky



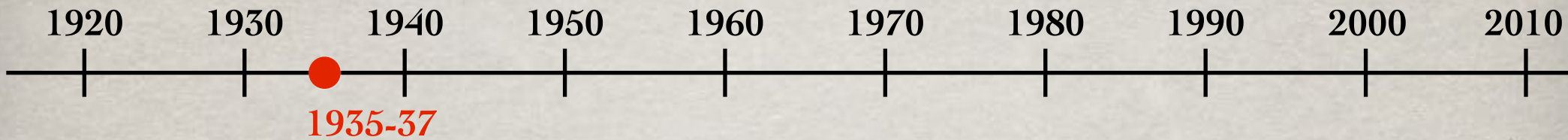
## “Timeline”:



Howard Robertson (americano) e Arthur Walker (inglês) demonstram rigorosamente que a métrica de FLRW é única para Universos cujas secções espaciais sejam **homogéneas e isotrópicas.**

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

## “Timeline”:

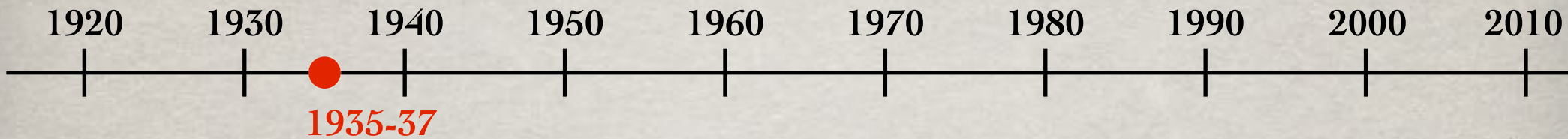


Howard Robertson (americano) e Arthur Walker (inglês) demonstram rigorosamente que a métrica de FLRW é única para Universos cujas secções espaciais sejam **homogéneas e isotrópicas**.

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

Descreve um  
3-plano ( $k=0$ ), uma 3-esfera ( $k=+1$ )  
ou um 3-hiperboloide ( $k=-1$ )

## “Timeline”:



Howard Robertson (americano) e Arthur Walker (inglês) demonstram rigorosamente que a métrica de FLRW é única para Universos cujas secções espaciais sejam **homogéneas e isotrópicas**.

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

Factor de escala:

descreve como as secções espaciais esticam ou contraem com o tempo.

# Cosmologia Teórica e Observacional



## Tópicos:

Aula 1 - Introdução e perspectiva histórica (1915-WWII)

Aula 2 - Perspectiva histórica (WWII-agora) e o modelo cosmológico padrão ( $\Lambda$ -CDM+inflação)

Aula 3 - Cosmologia em Relatividade Geral

# Cosmologia Teórica e Observacional



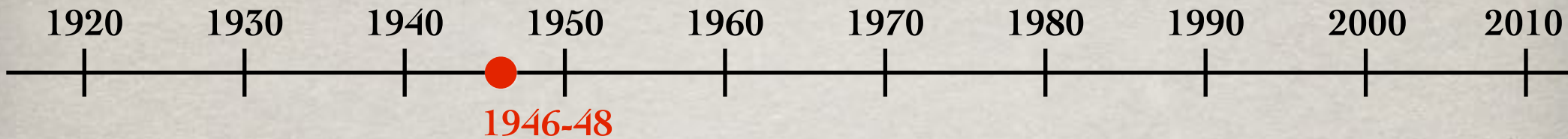
## Tópicos:

Aula 1 - Introdução e perspectiva histórica (1915-WWII)

Aula 2 - Perspectiva histórica (WWII-agora) e o modelo cosmológico padrão ( $\Lambda$ -CDM+inflação)

Aula 3 - Cosmologia em Relatividade Geral

## “Timeline”:

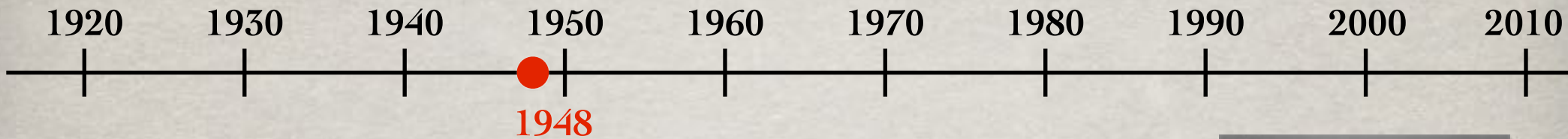


George Gamow desenvolve a teoria do “Big Bang” de Lemaître.

Assumindo que o Universo começa num estado muito denso e quente, Gamow iniciou a ideia de **NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL** e argumentou como as abundâncias de elementos leves como o deutério e Hélio (e erradamente também para elementos mais pesados do que o Hélio) podiam ser explicadas por reacções ocorridas nesta época.



## “Timeline”:



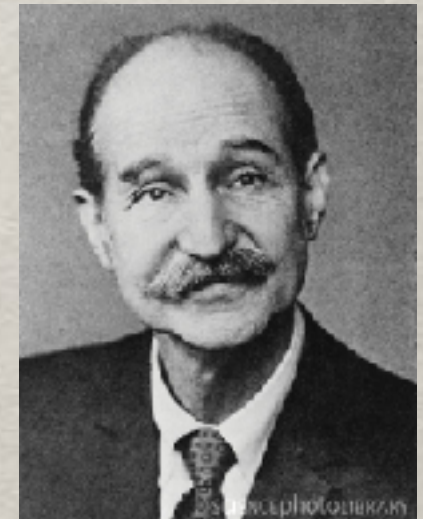
Ralph Alpher e Robert Herman  
prevêm a temperatura da radiação  
residual do hipotético “Big Bang”,  
hoje denominada

**RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO  
(RCF)**

e obtêm um valor de  $5^{\circ}\text{K}$  (dois anos  
depois obtiveram  $28^{\circ}\text{K}$ )

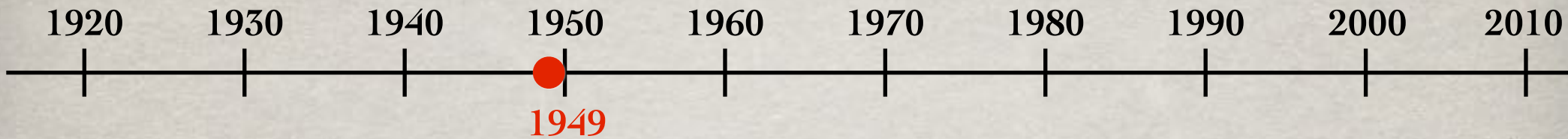


Ralph Alpher



Robert Herman

## “Timeline”:



Fred Hoyle cunhou o termo

“**Big Bang**” para o modelo do átomo  
primevo de Lemaître.

(No programa de rádio da BBC “Third  
Programme” emitido às 18H30 GMT  
de 28 de Março de 1949).

Hoyle aceitava a expansão do Universo  
observada por Hubble e descrita por  
Lemaître mas rejeitava a ideia de que o  
Universo tinha um princípio.

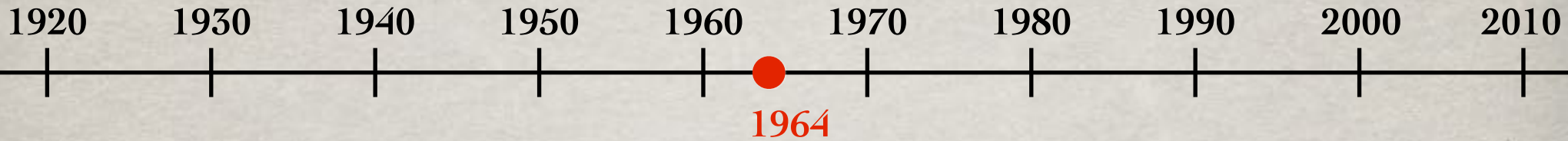


Propôs um modelo alternativo:

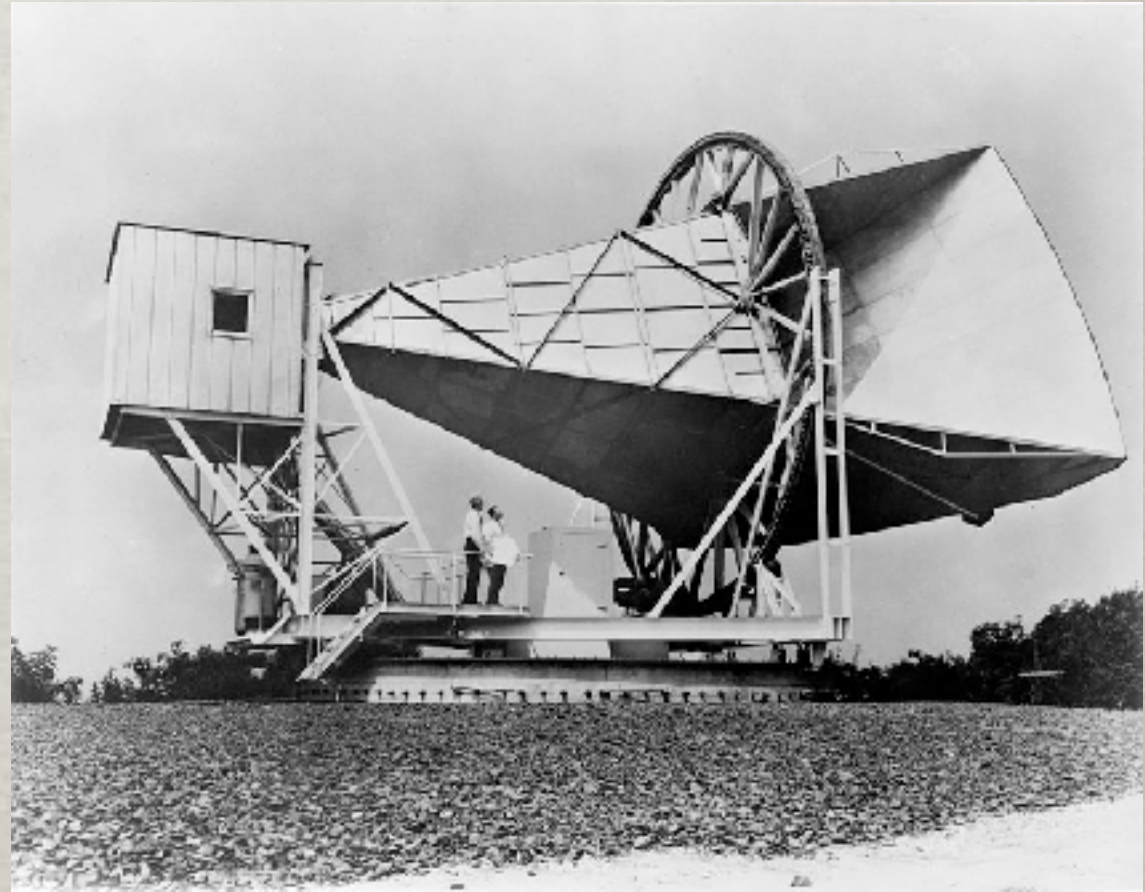
“**Modelo do estado estacionário**”



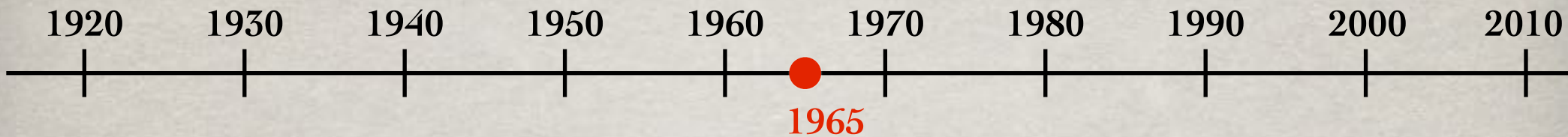
## “Timeline”:



Arno Penzias e Robert Wilson a trabalhar nos laboratórios Bell em Holmdel, New Jersey, com receptores de microndas criogénicos ultra-sensíveis (antena Horn) observaram inesperadamente um ruído rádio isotrópico. Inadvertidamente, tinham descoberto a **radiação cósmica de fundo**, prevista pelo modelo do “Big Bang”



## “Timeline”:



Robert Dicke e Jim Peebles rederivaram (alegadamente independentemente do grupo de Gamow) a radiação cósmica de fundo. Com David Wilkinson e Peter Roll, desenvolveram um detector para procurar a radiação mas foram ultrapassados pela detecção acidental de Penzia e Wilson (a apenas alguns kms de Princeton). O grupo de Dicke fez uma segunda medição da radiação concluindo uma **temperatura de  $3.5^{\circ}\text{K}$**  e interpretaram a observação de Penzias e Wilson.

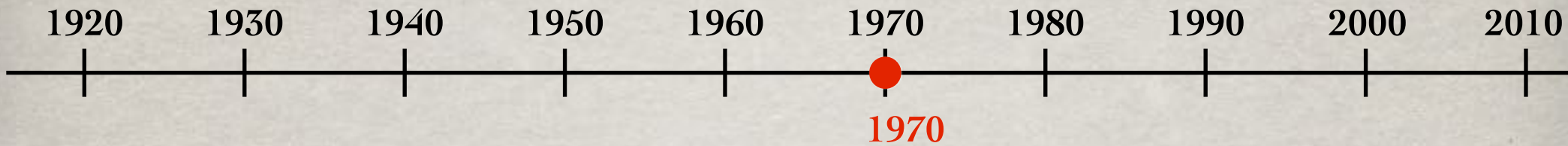
A cosmologia do Universo primordial **passou de especulação a uma ciência empírica.**



... há cerca de 13.8 mil milhões de anos...



## “Timeline”:



Vera Rubin mediu **curvas de rotação galácticas** para galáxias em espiral no plano de observação.



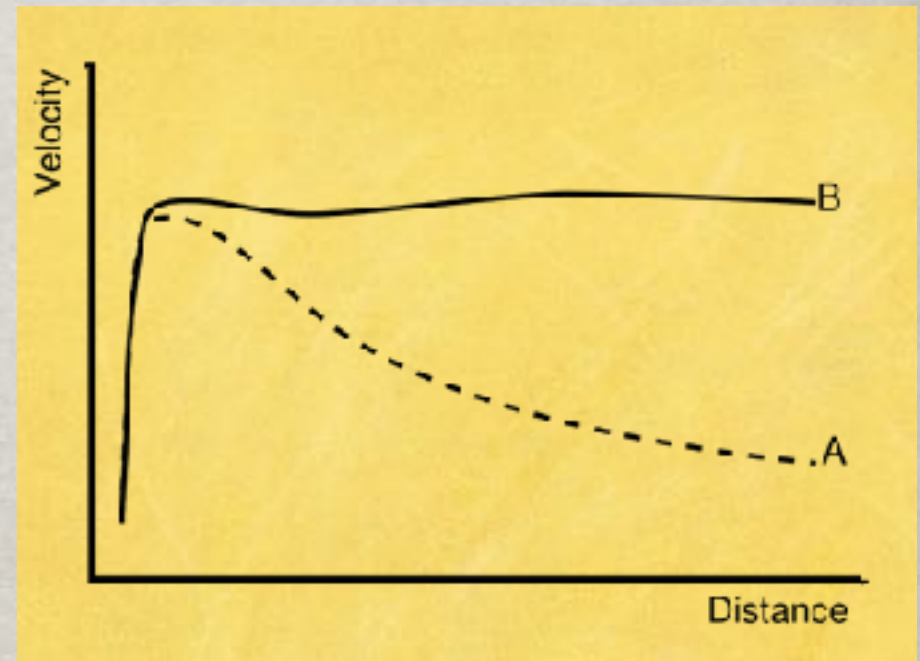
## “Timeline”:

1920      1930      1940      1950      1960      1970      1980      1990      2000      2010

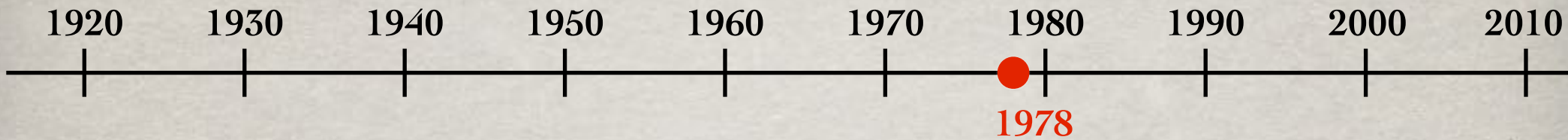
1975

Vera Rubin anunciou num encontro da American Astronomical Society que a maior parte das estrelas em galáxias em espiral **orbitam com a mesma velocidade (angular)**.

Em gravidade Newtoniana isto implica que a densidade das galáxias deve ser aproximadamente constante, em contraste com a localização das estrelas visíveis - maioritariamente no “galactic bulge”.



## “Timeline”:



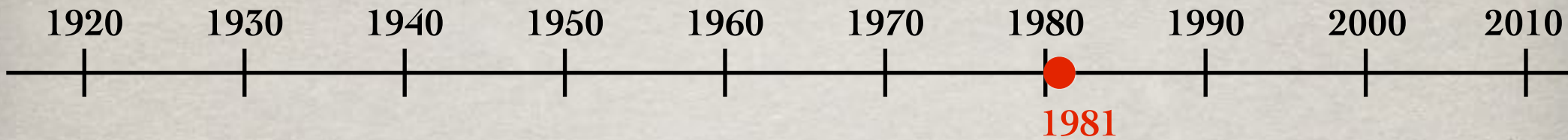
### Prémio Nobel da Física 1978

*“...for their discovery of  
cosmic microwave  
background radiation.”*



**Penzias (left) and Wilson. “A small discrepancy led them to the grandest of all possible answers.”**

## “Timeline”:

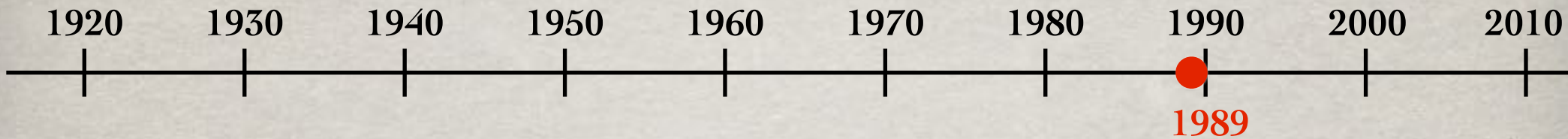


Alan Guth propõe a ideia de **inflação primordial**, uma época de expansão acelerada logo após o Big Bang, para resolver alguns problemas do modelo standard cosmológico (planura, horizonte, monopolos).





# “Timeline”:



## O satélite COBE

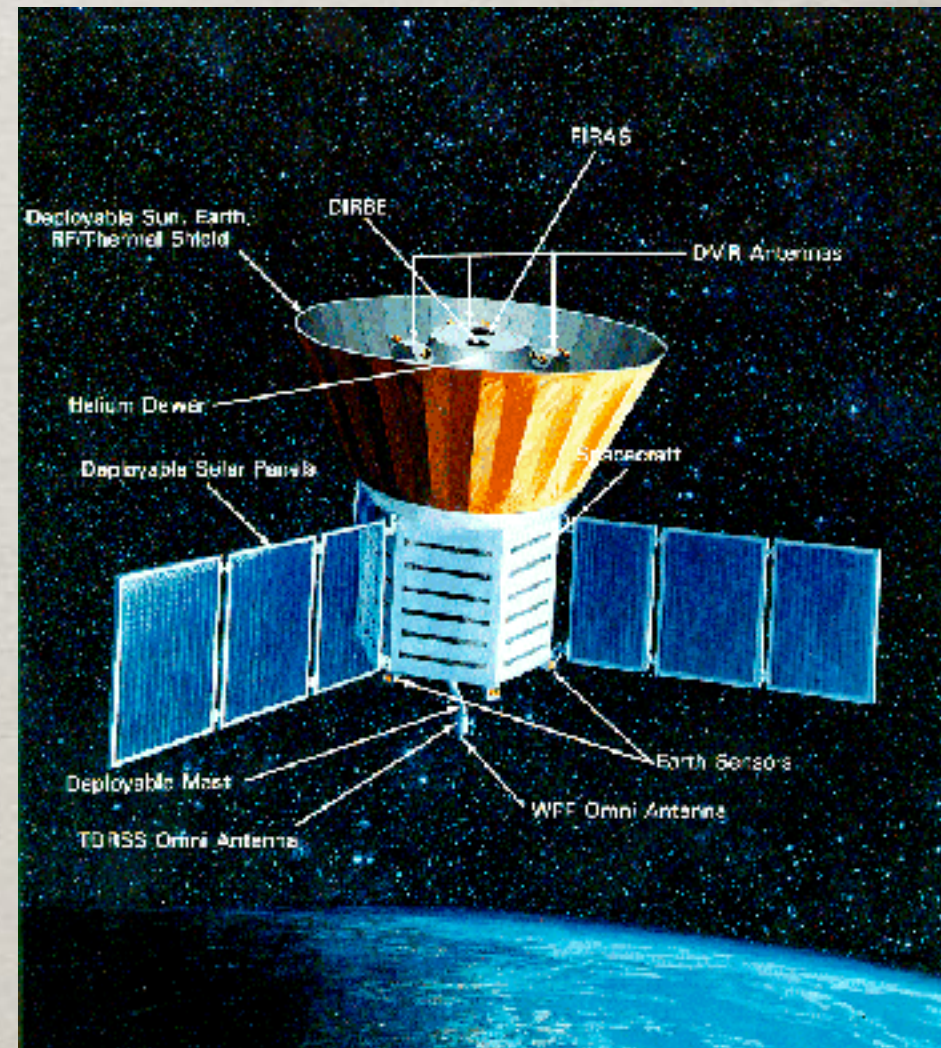
(COsmic Background Explorer)

é lançado com o objectivo de medir as propriedades da radiação cósmica de fundo com grande precisão.

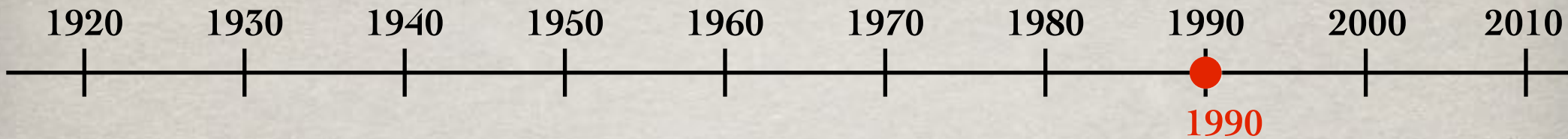
Inicia uma nova era na Cosmologia: **a das experiências de alta precisão.**

Dois instrumentos fundamentais:

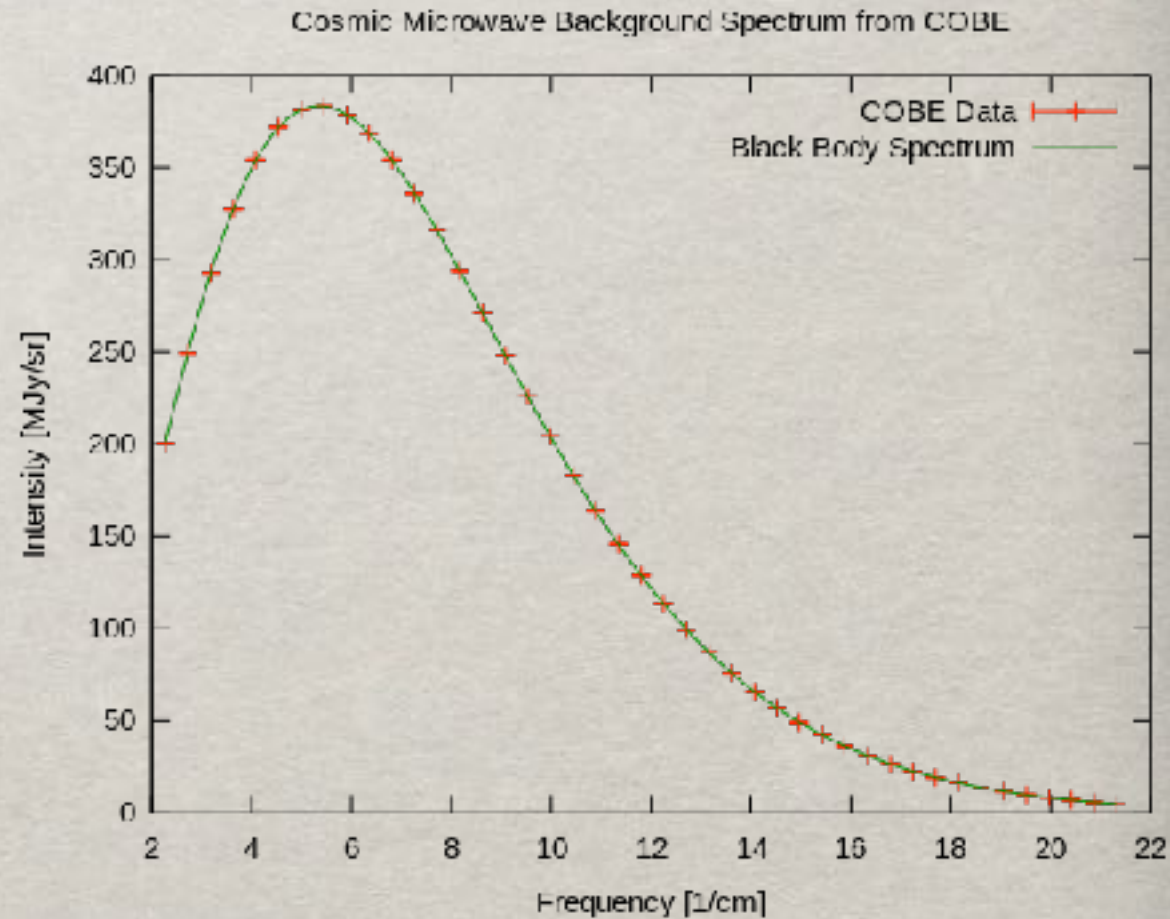
- FIRAS (Far InfraRed Absolute Spectrophotometer) vai medir o espectro da RCF (Mather)
- DMR (Differential Microwave Radiometer) vai mapear as anisotropias da RCF; (Smoot)



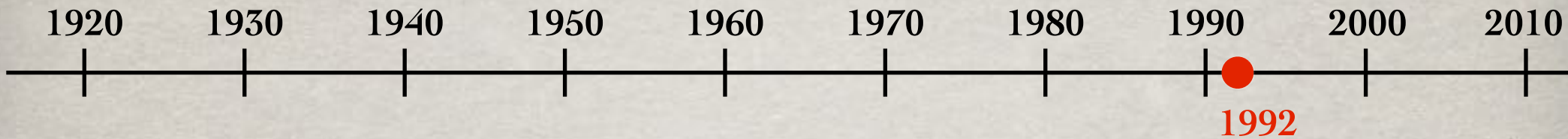
## “Timeline”:



O resultado do FIRAS demonstrou que a RCF tem um espectro praticamente perfeito de radiação de corpo negro com temperatura  $2.73^{\circ}\text{K}$ .

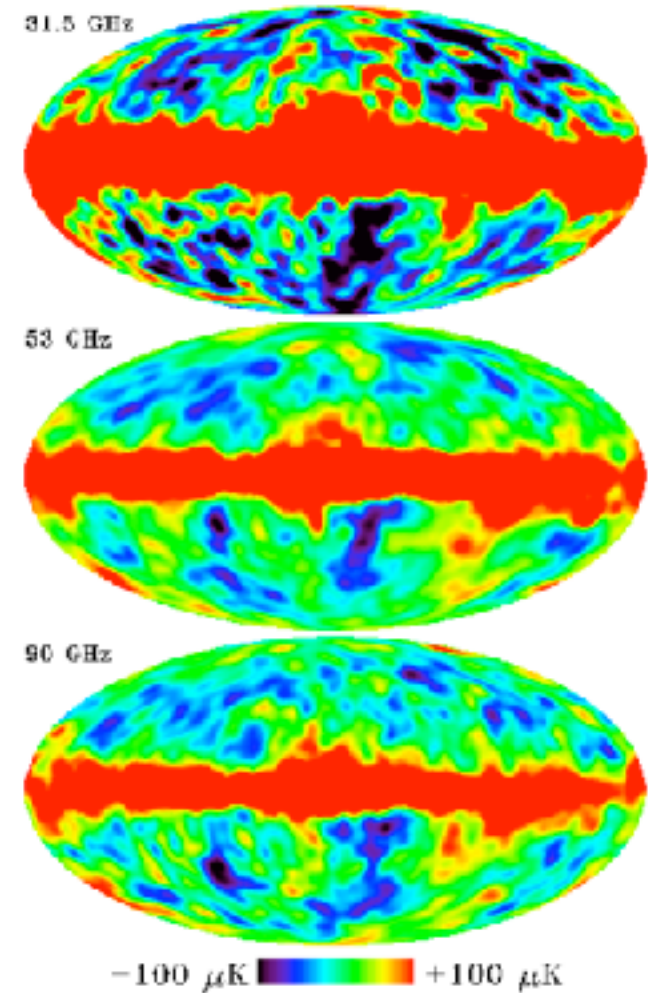


## “Timeline”:

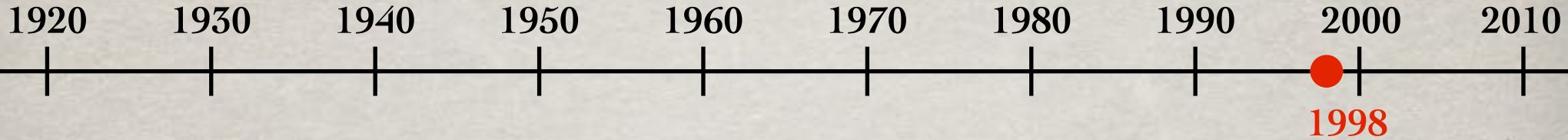


O resultado do DMR exibiu flutuações (**anisotropias**) da RCF de cerca de 1 parte em 100 000 relativamente à temperatura média de  $2.73^{\circ}\text{K}$ .

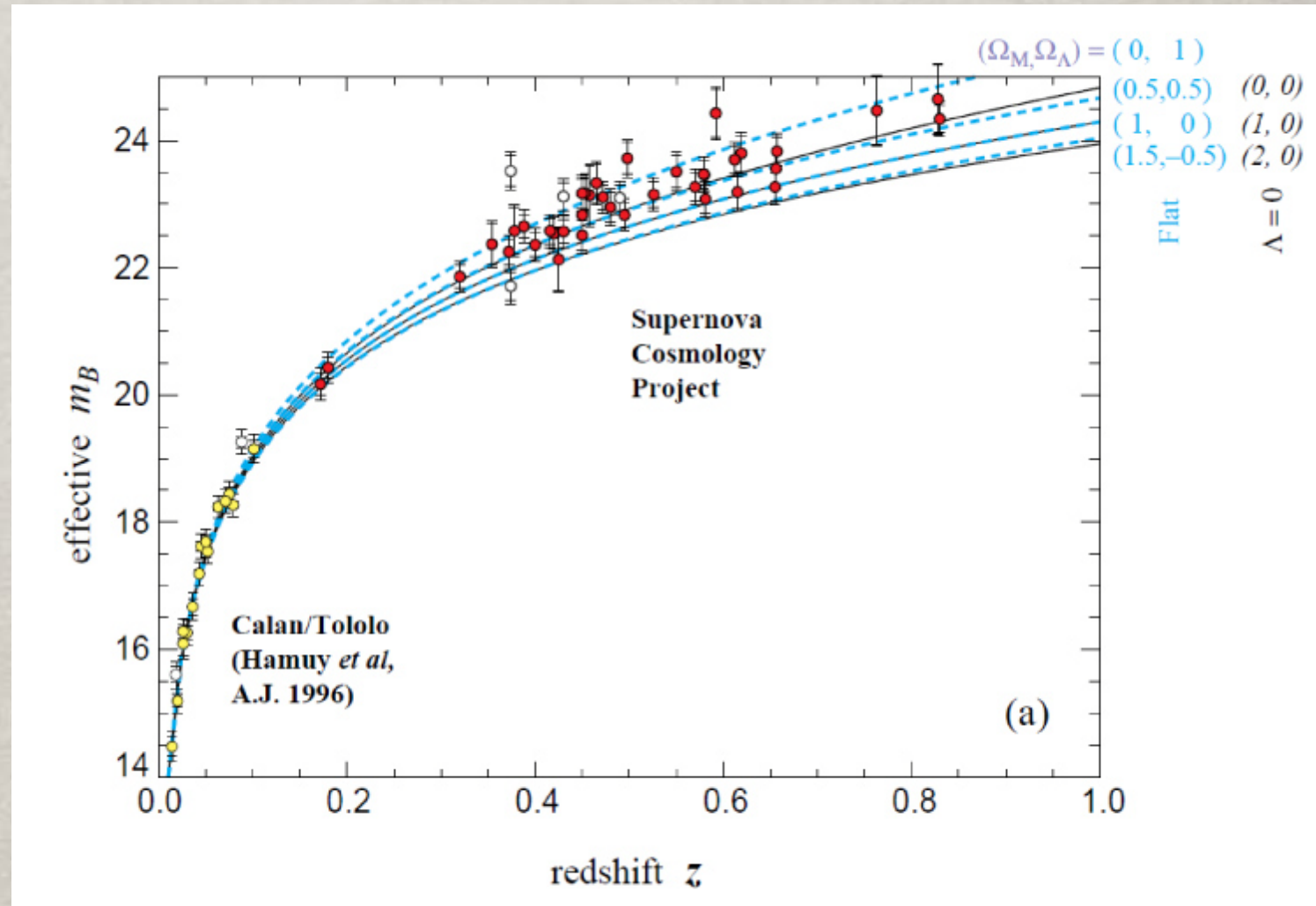
Vê apenas “grandes” escalas angulares (de  $10^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ,  $l=2$ - $20$ )



# “Timeline”:



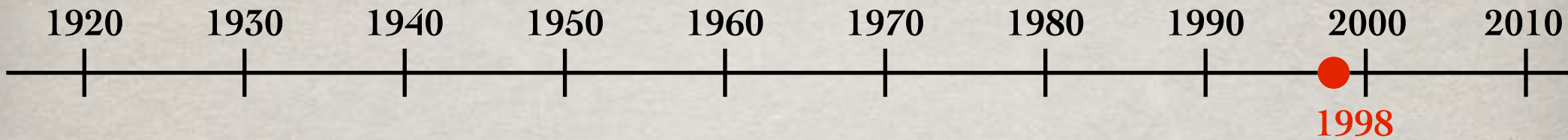
Duas equipas independentes publicam evidência, usando supernovas Ia, que a **expansão do Universo é acelerada.**



Riess, A., et al. (1998) Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant, *Astronomical Journal*, 116, 1009-1038.

Perlmutter, S., et al. (1999) Measurement of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 High-Redshift Supernovae, *Astrophysical Journal*, 517, 565-586.

## “Timeline”:

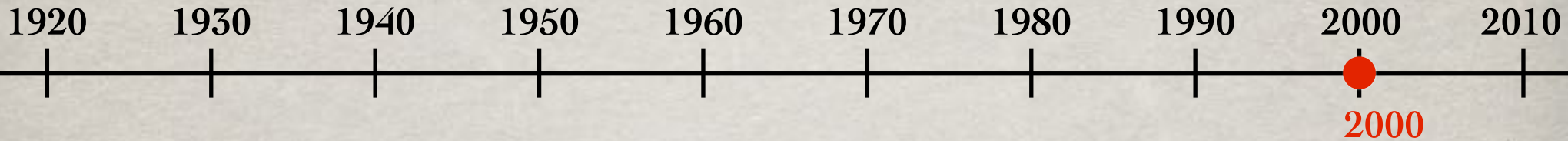


Explosão de uma  
supernova tipo Ia,  
SN1994D, numa  
imagem da galáxia  
NGC 4526, tirada pelo  
Hubble Space  
Telescope

(Crédito: High-Z Supernova Search  
Team, HST, NASA)



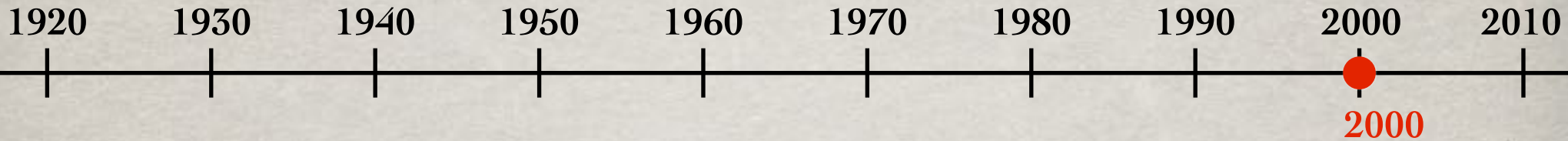
## “Timeline”:



Início da “**Sloane Digital Sky Survey**”, um varrimento do céu com um telescópio óptico dedicado de 2.5 metros, do Observatório Apache Point, Novo México, EUA.



## “Timeline”:



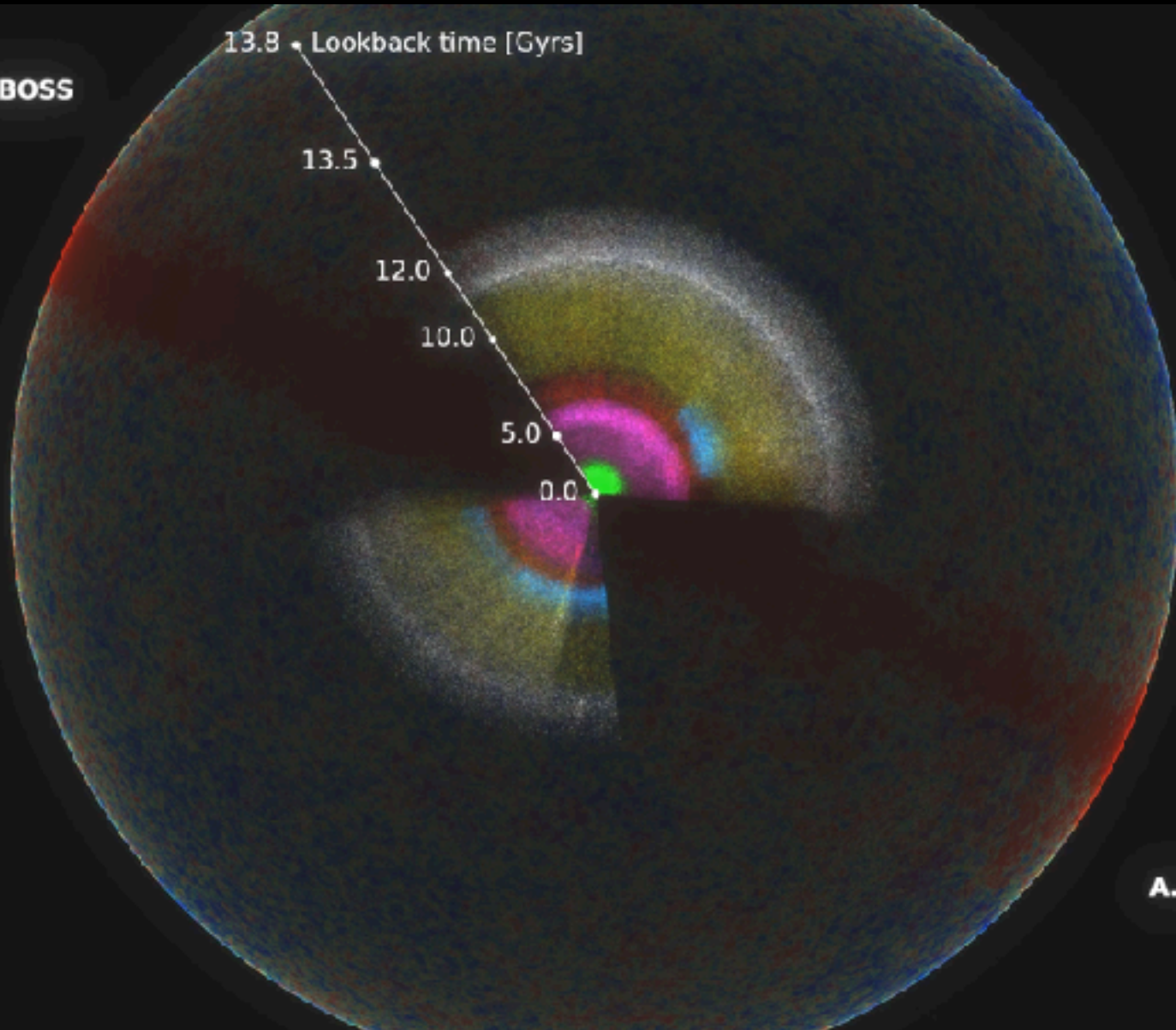
Início da “**Sloane Digital Sky Survey**”, um varrimento do céu com um telescópio óptico dedicado de 2.5 metros, do Observatório Apache Point, Novo México, EUA.

Até 2012, catalogou observações fotométricas de quase 1000 milhões de objectos e espectros de mais de mais de 4 milhão, incluindo quasares com redshift até  $z=5$ .



Este varrimento cobre cerca de 35% do céu e permitiu desenhar o maior mapa 3D do Universo alguma vez feito, que cobre cerca de 11 mil milhões de anos da história do nosso Universo.

**SDSS I-II + BOSS + eBOSS  
(1998-2019)**

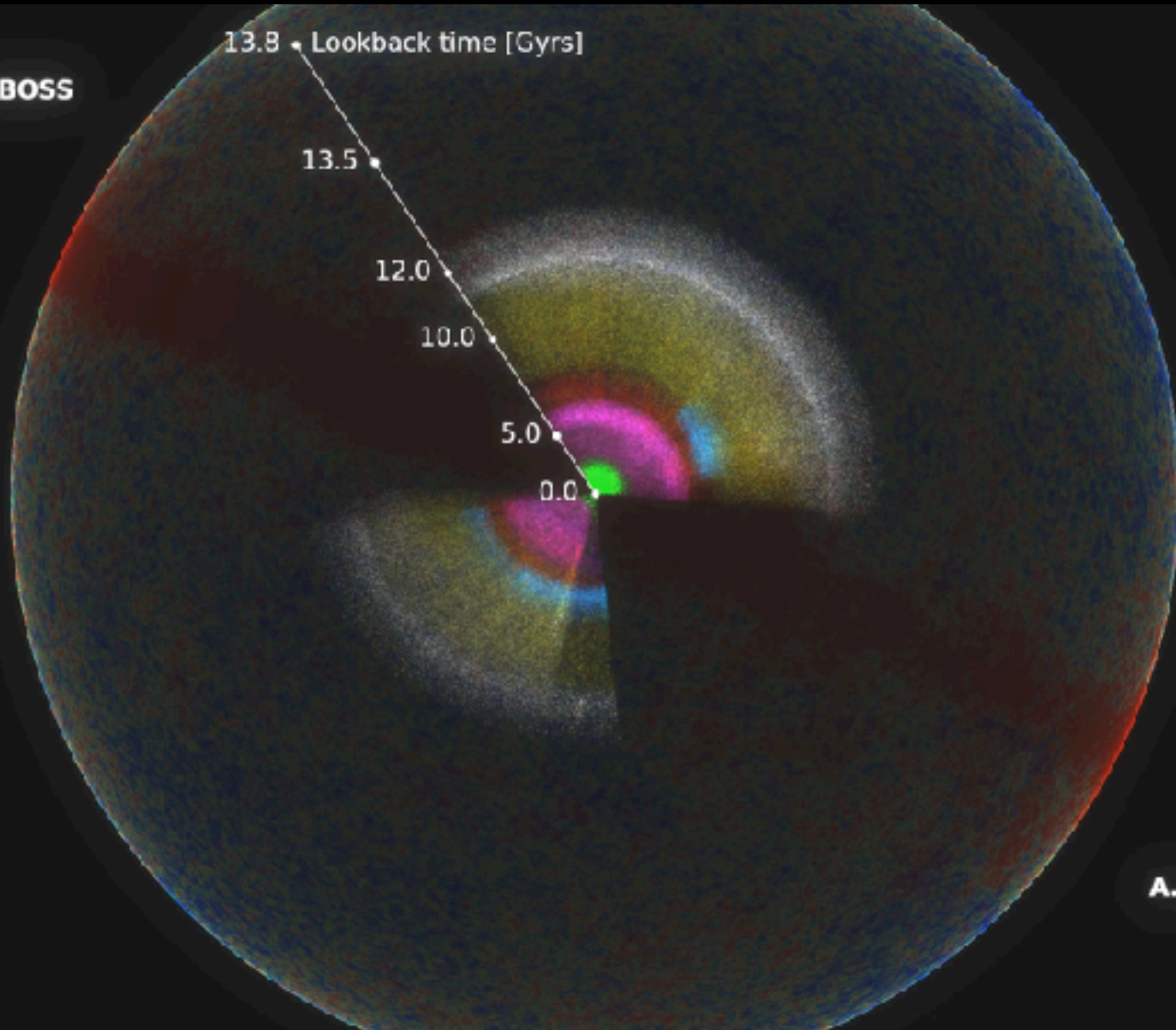


**A. Raichoor (EPFL)**



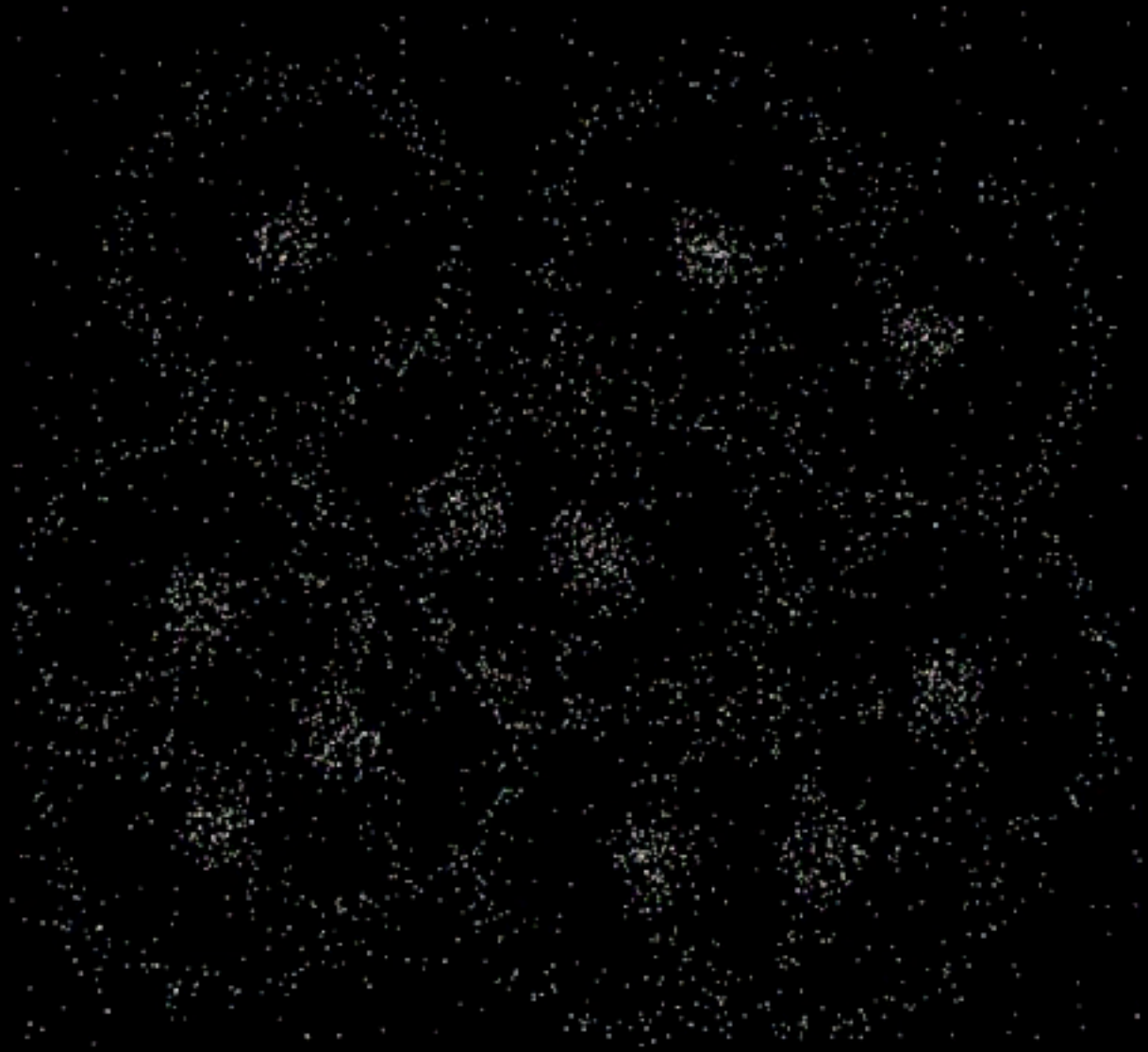
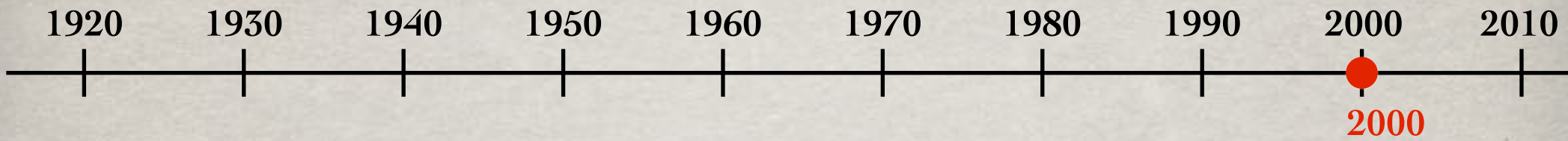
Este varrimento cobre cerca de 35% do céu e permitiu desenhar o maior mapa 3D do Universo alguma vez feito, que cobre cerca de 11 mil milhões de anos da história do nosso Universo.

**SDSS I-II + BOSS + eBOSS  
(1998-2019)**

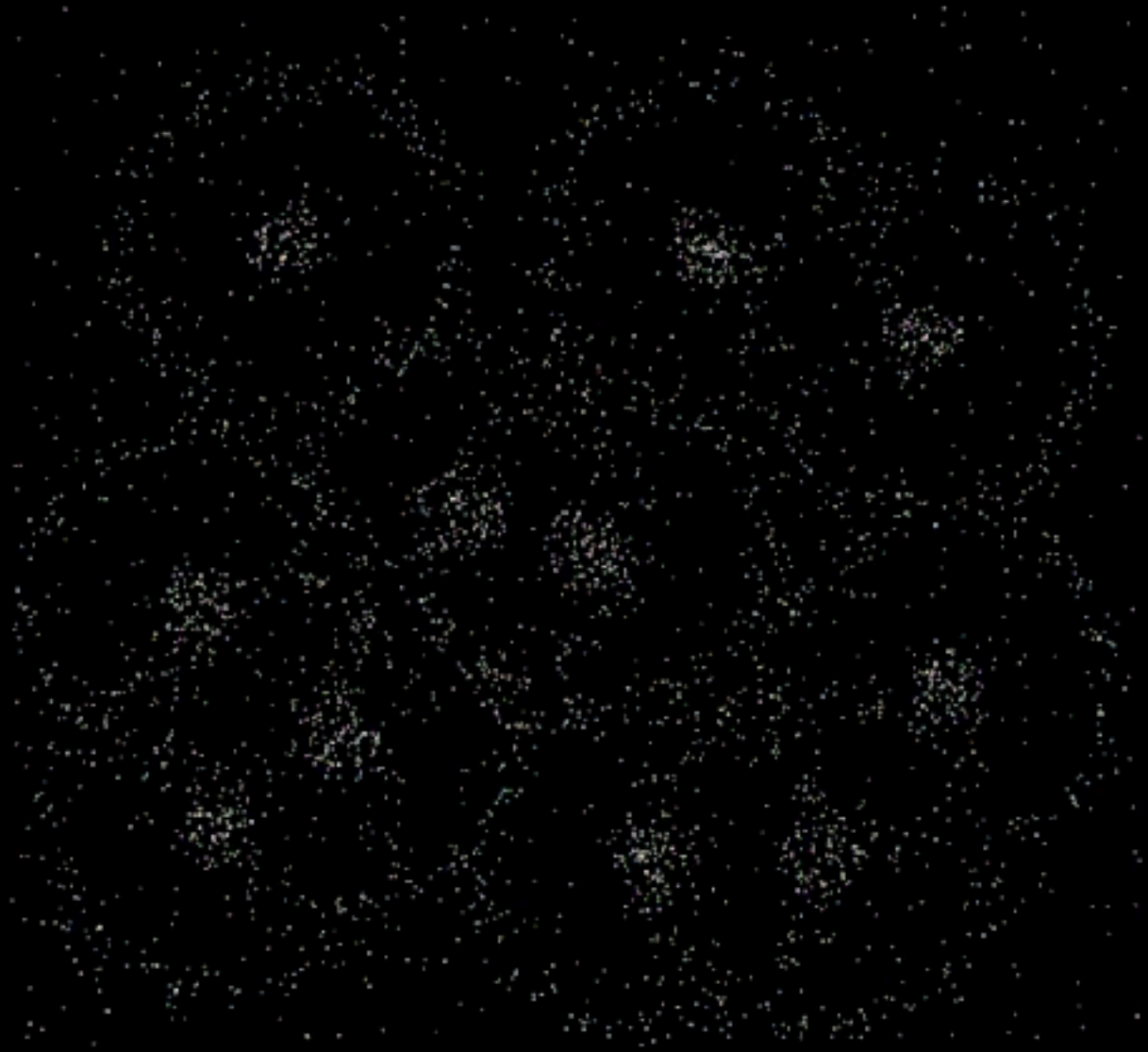
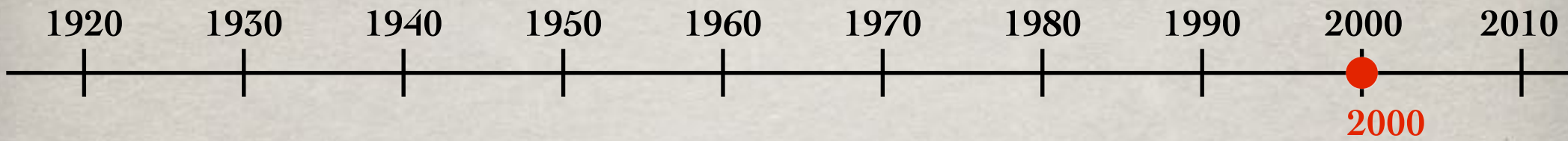


**A. Raichoor (EPFL)**

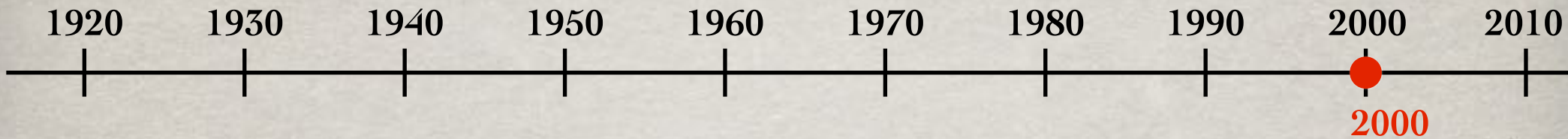
# “Timeline”:



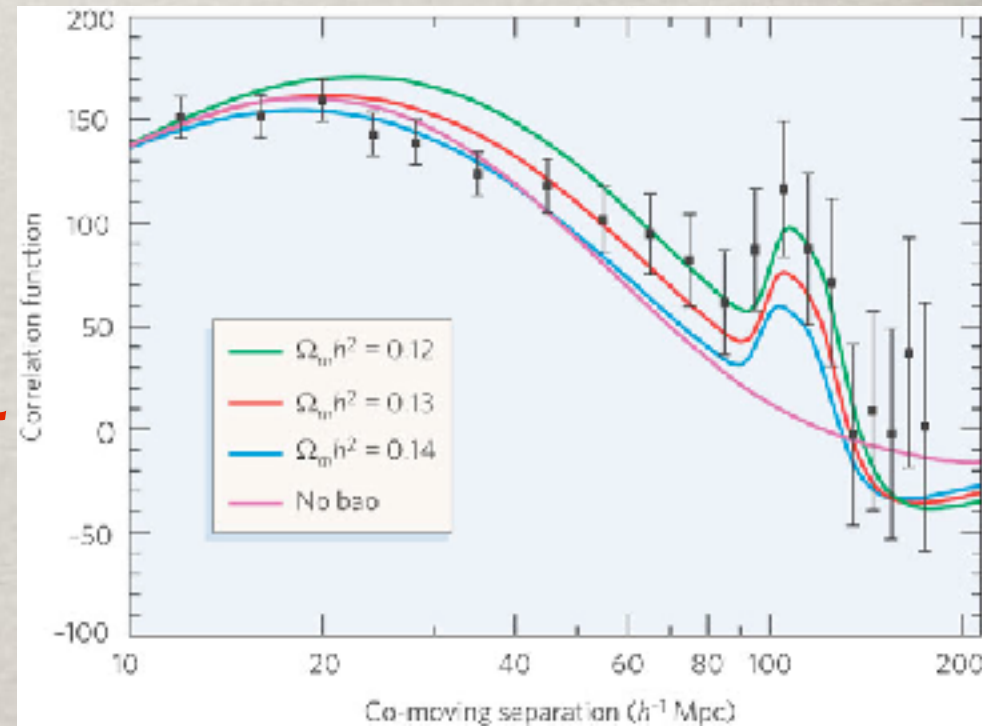
# “Timeline”:



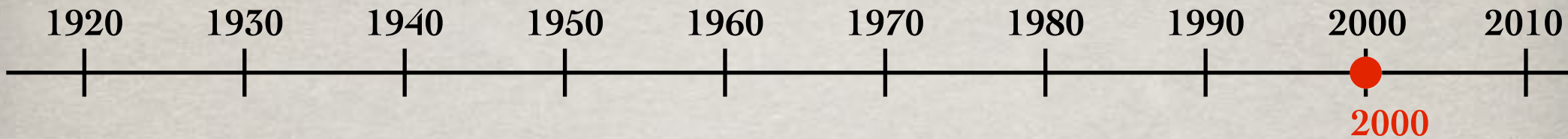
## “Timeline”:



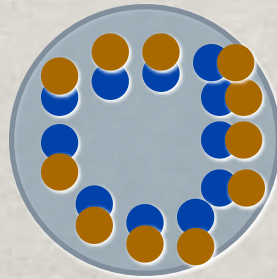
Ao calcular a probabilidade de encontrar uma galáxia a uma dada distância de outra, encontrou um pico que é interpretado como a escala do **horizonte acústico (hoje - 150 Mpc)**. Este horizonte é uma manifestação das **Baryon Acoustic Oscillations (BAO)**.



## “Timeline”:

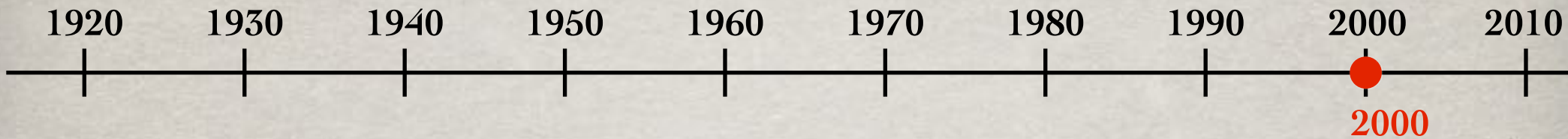


No Universo primordial surgem flutuações de densidade  
(origem quântica)

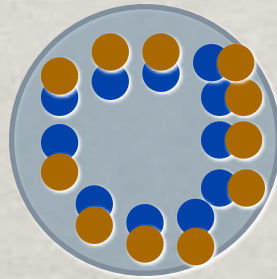


Região de sobre-densidade  
[matéria escura+matéria normal (bariões)+radiação (fotões)]

## “Timeline”:



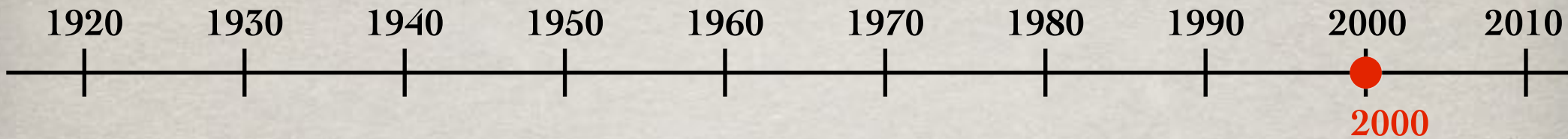
No Universo primordial surgem flutuações de densidade  
(origem quântica)



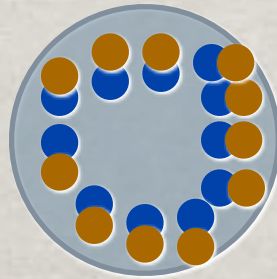
Região de sobre-densidade  
[matéria escura+matéria normal (bariões)+radiação (fotões)]

Antes do desacoplamento matéria-radiação,  
os bariões estão acoplados aos fotões.

## “Timeline”:



No Universo primordial surgem flutuações de densidade  
(origem quântica)

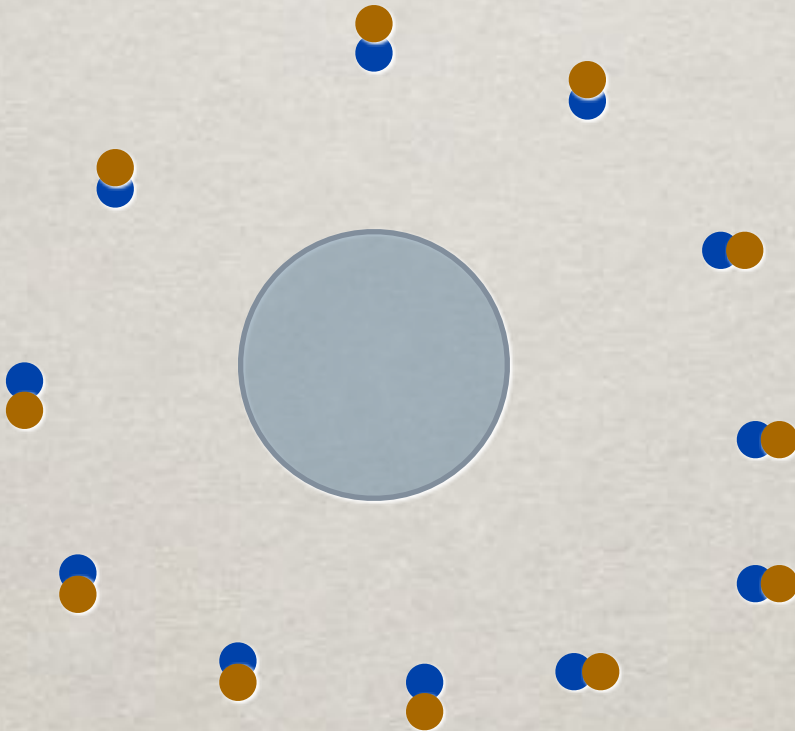
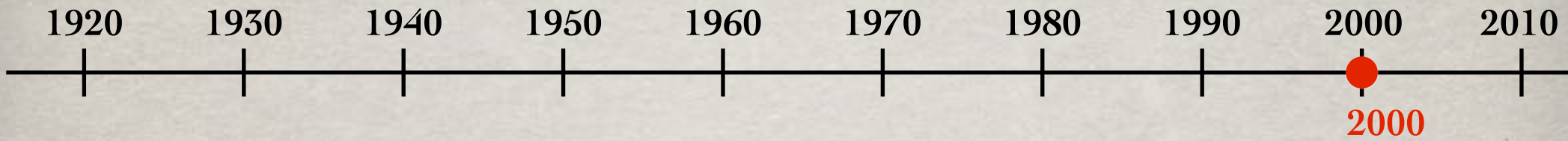


Região de sobre-densidade  
[matéria escura+matéria normal (bariões)+radiação (fotões)]

Antes do desacoplamento matéria-radiação,  
os bariões estão acoplados aos fotões.

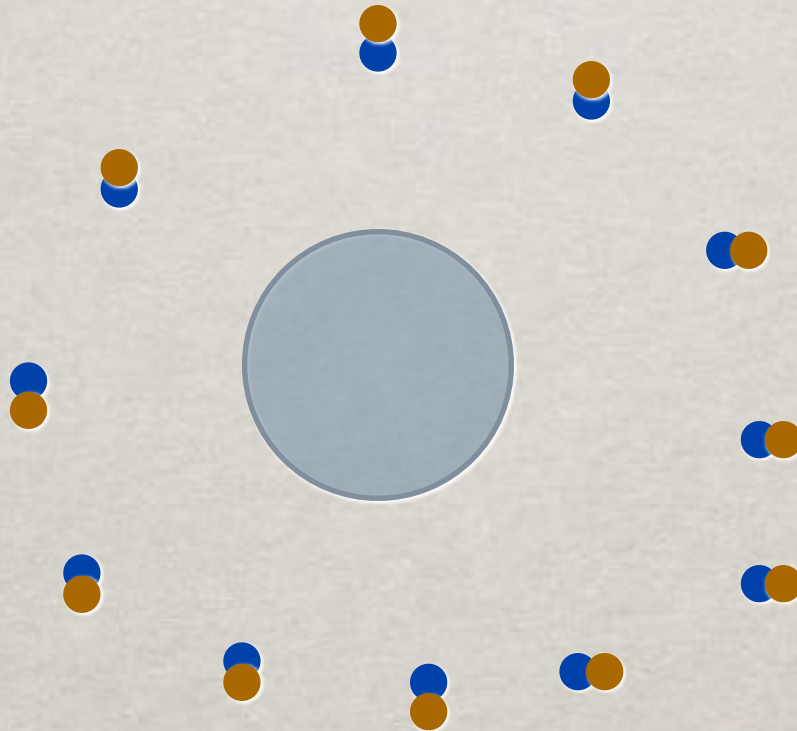
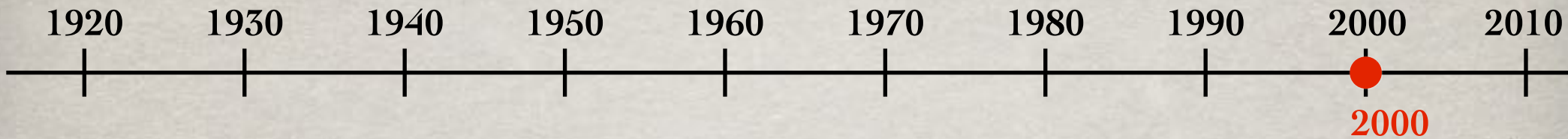
Quando estão muito comprimidos a pressão de radiação  
domina, originando uma expansão dos bariões.

# “Timeline”:



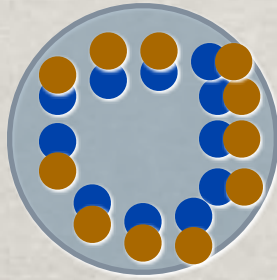
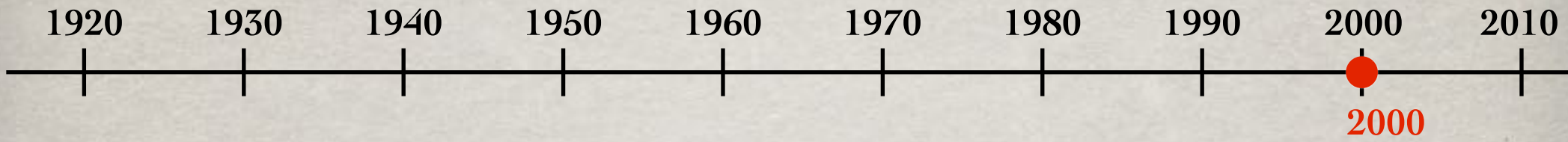


## “Timeline”:

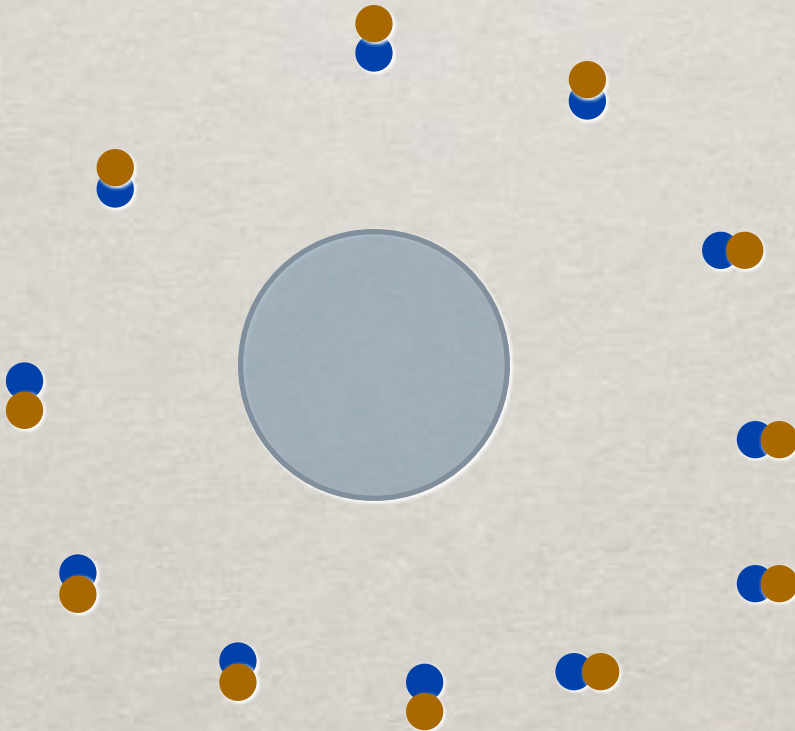
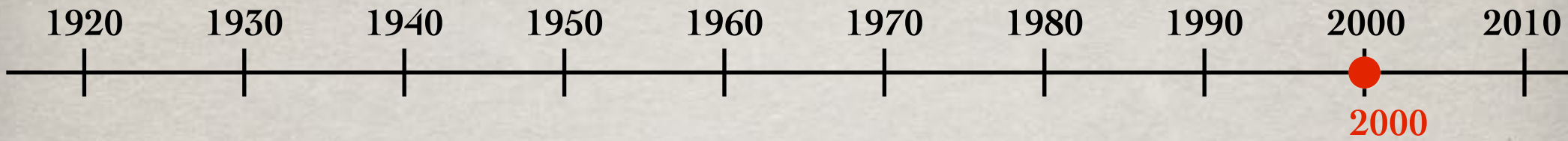


A expansão continua até a pressão da **radiação** se tornar subdominante relativamente à atração gravitacional dos **bariões**. Resulta assim um processo de oscilações acústicas bariónicas (BAO).

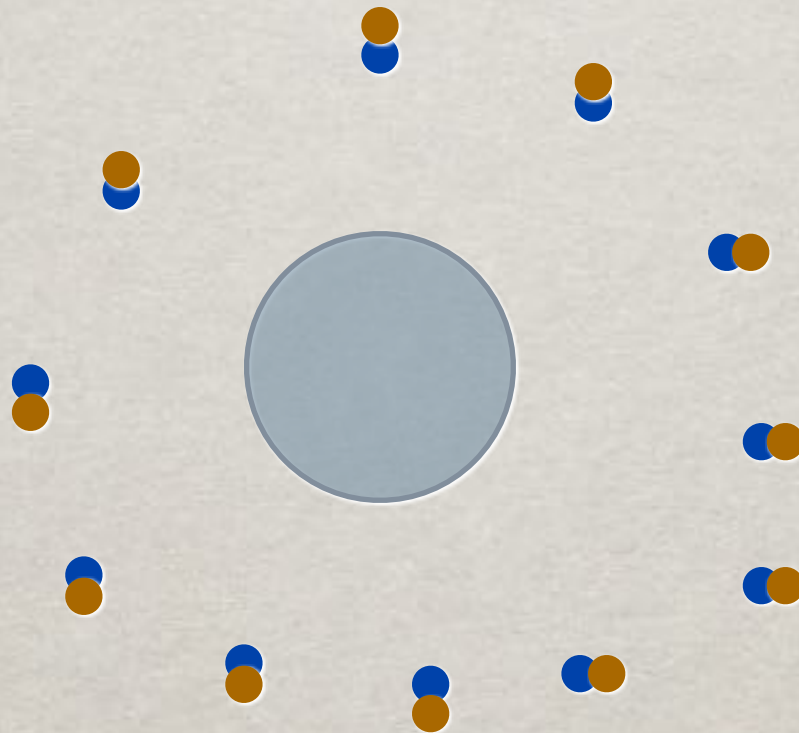
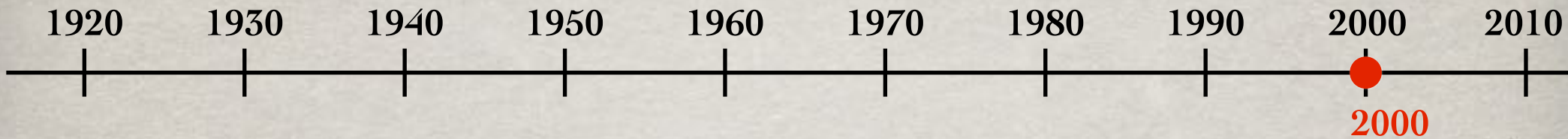
# “Timeline”:



# “Timeline”:

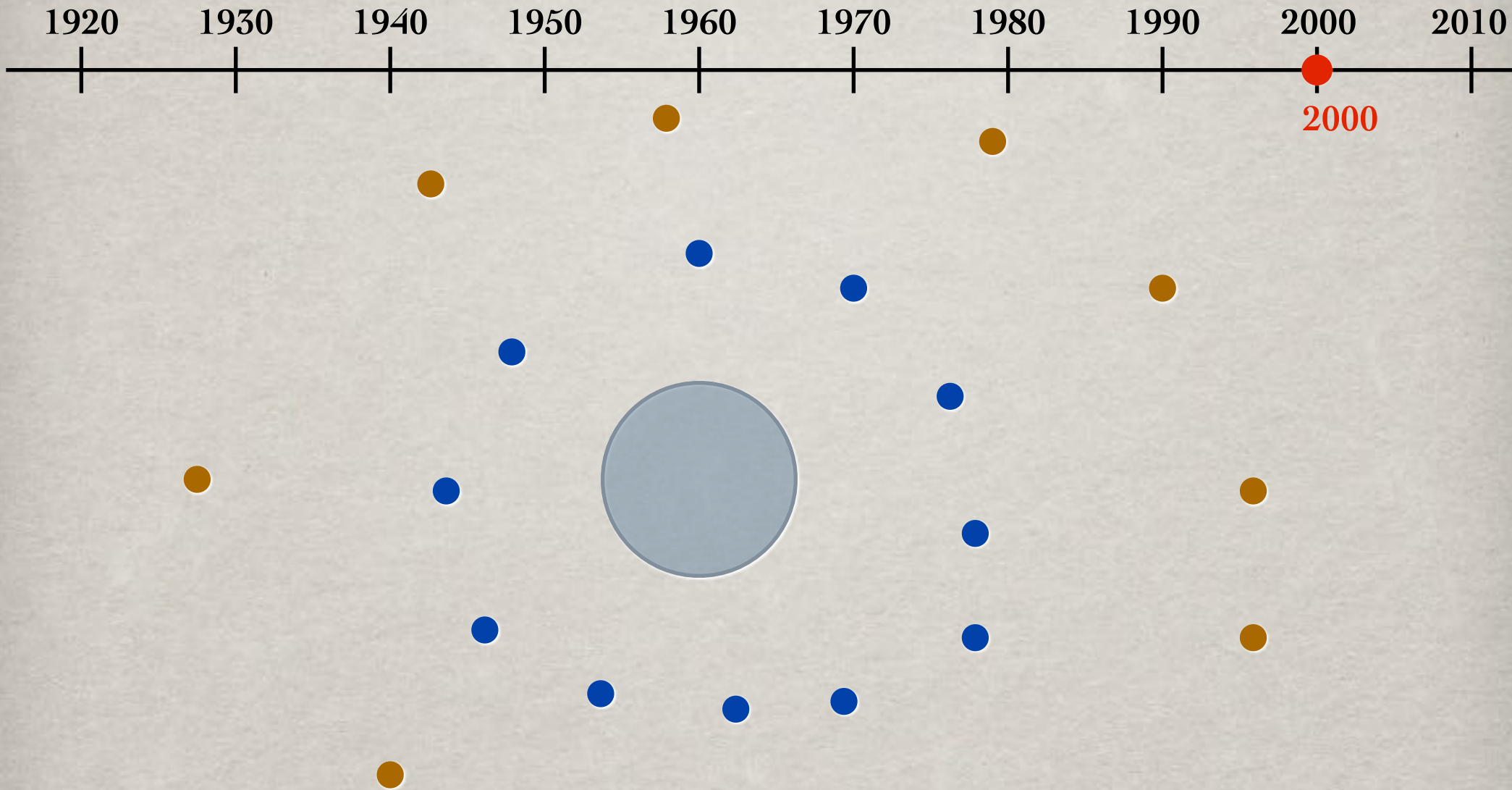


## “Timeline”:



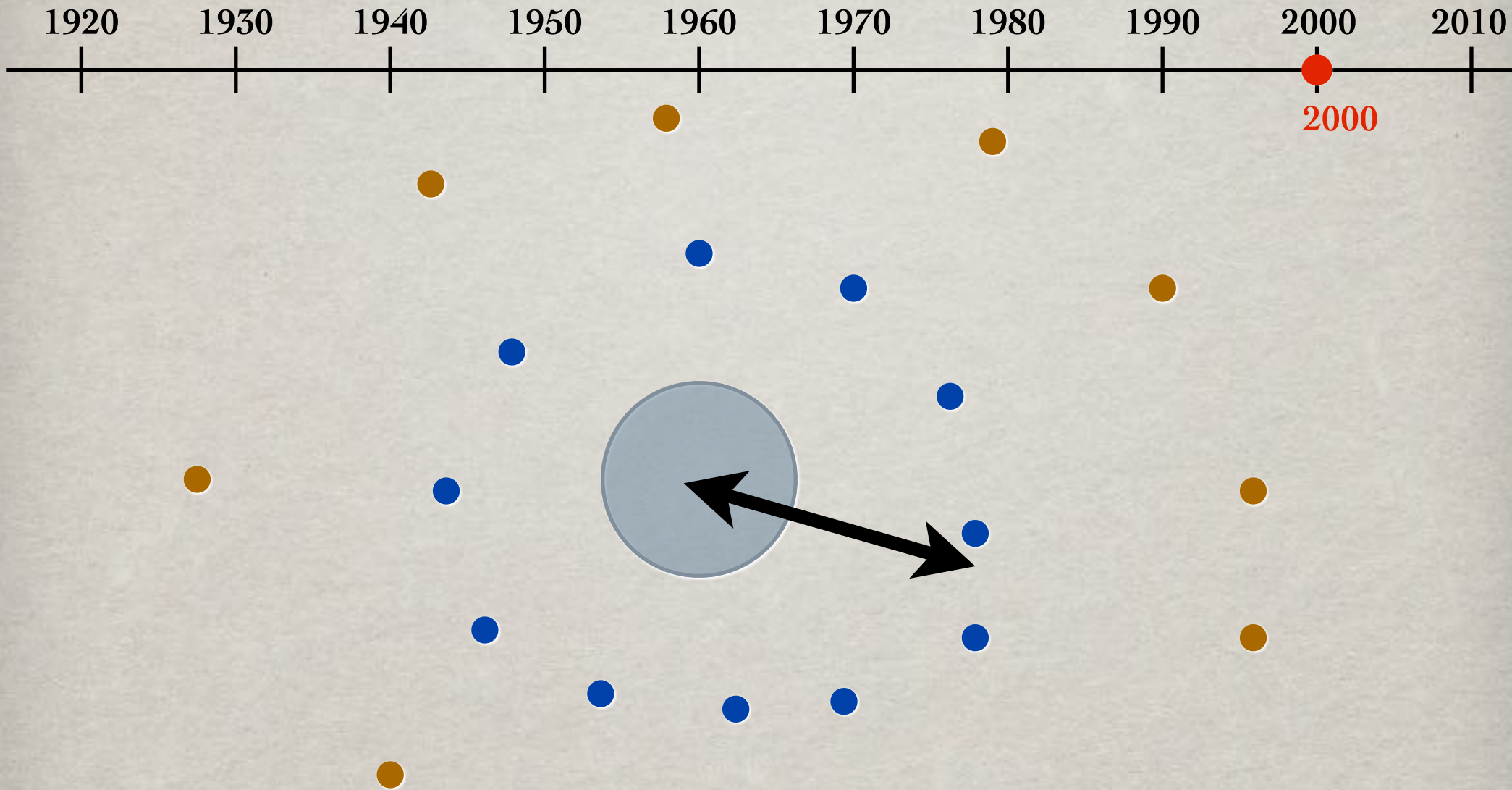
Quando a **radiação** desacopla dos **bariões** (e é emitida a radiação cósmica de fundo, resulta um “snapshot” destas oscilações - que são visíveis na radiação cósmica de fundo.

## “Timeline”:



Quando a **radiação** desacopla dos **bariões** (e é emitida a radiação cósmica de fundo), resulta um “snapshot” destas oscilações - que são visíveis na radiação cósmica de fundo.

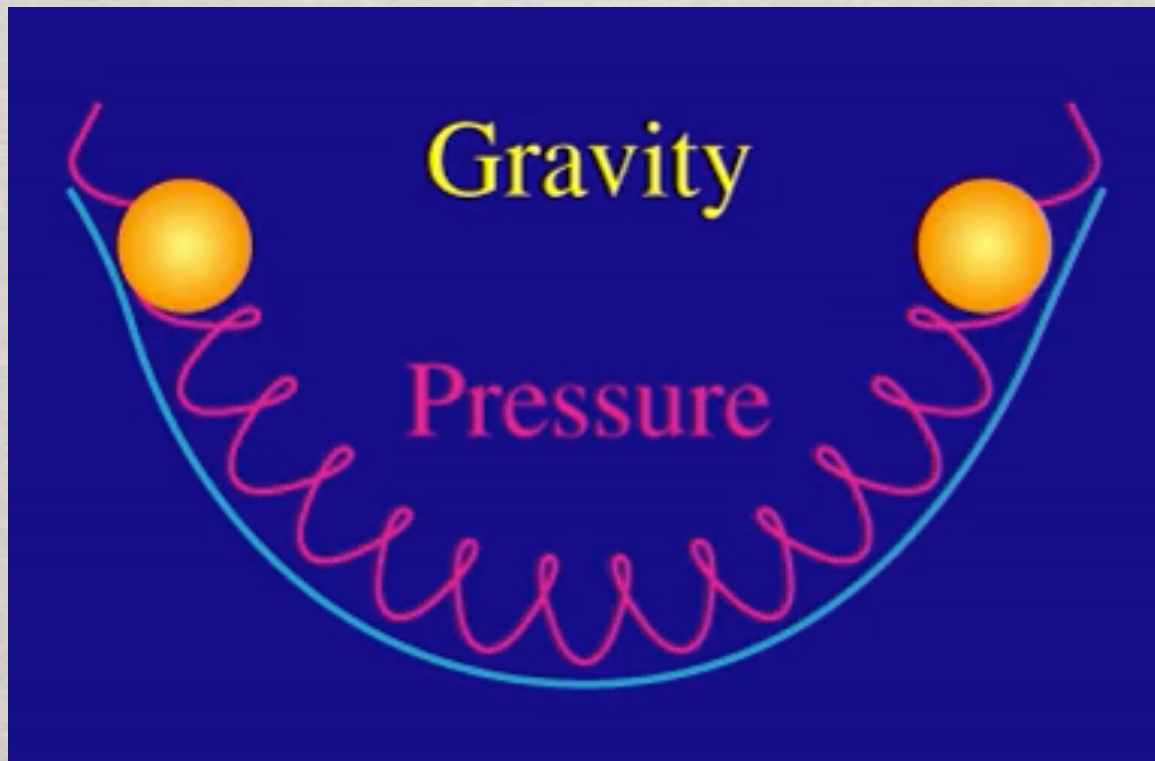
## “Timeline”:



Em particular fica marcada na radiação cósmica de fundo uma escala - a do horizonte acústico na altura do desacoplamento.

# Modelo Físico simples:

<http://background.uchicago.edu/~whu/intermediate/intermediate.html>



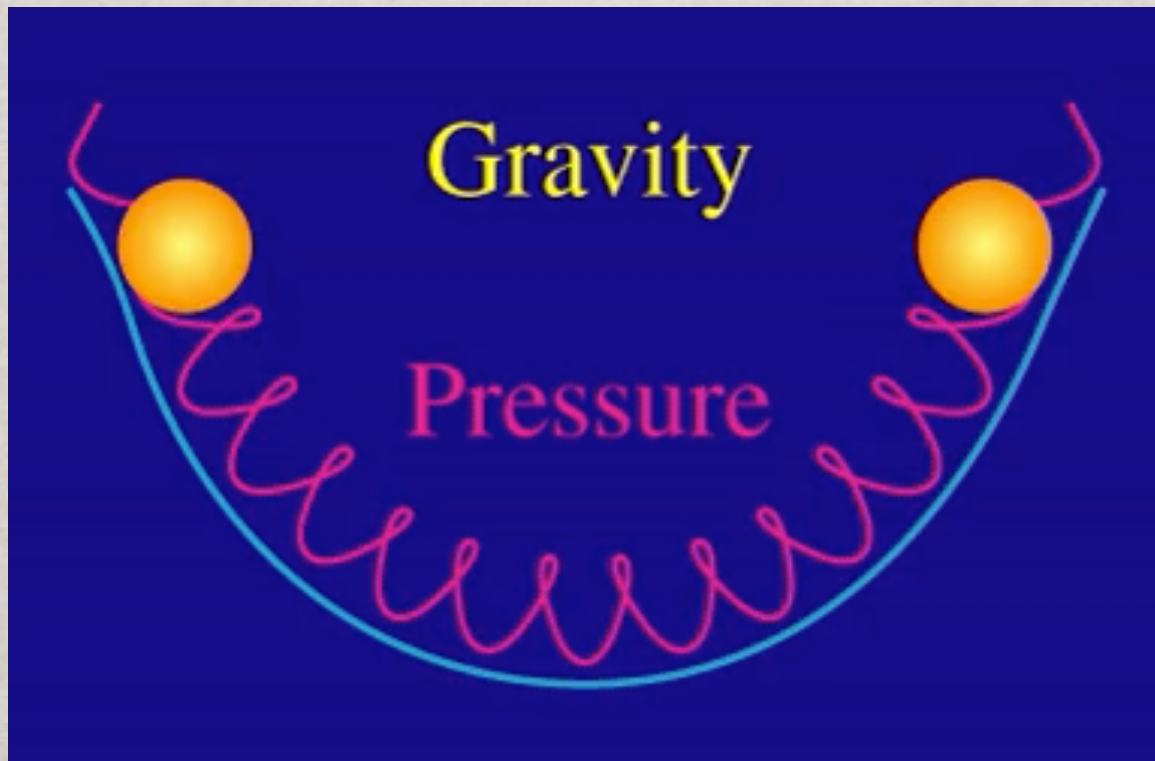
Matéria escura cria poço de potencial;

Matéria bariônica=massas

Fotões=molas

# Modelo Físico simples:

<http://background.uchicago.edu/~whu/intermediate/intermediate.html>



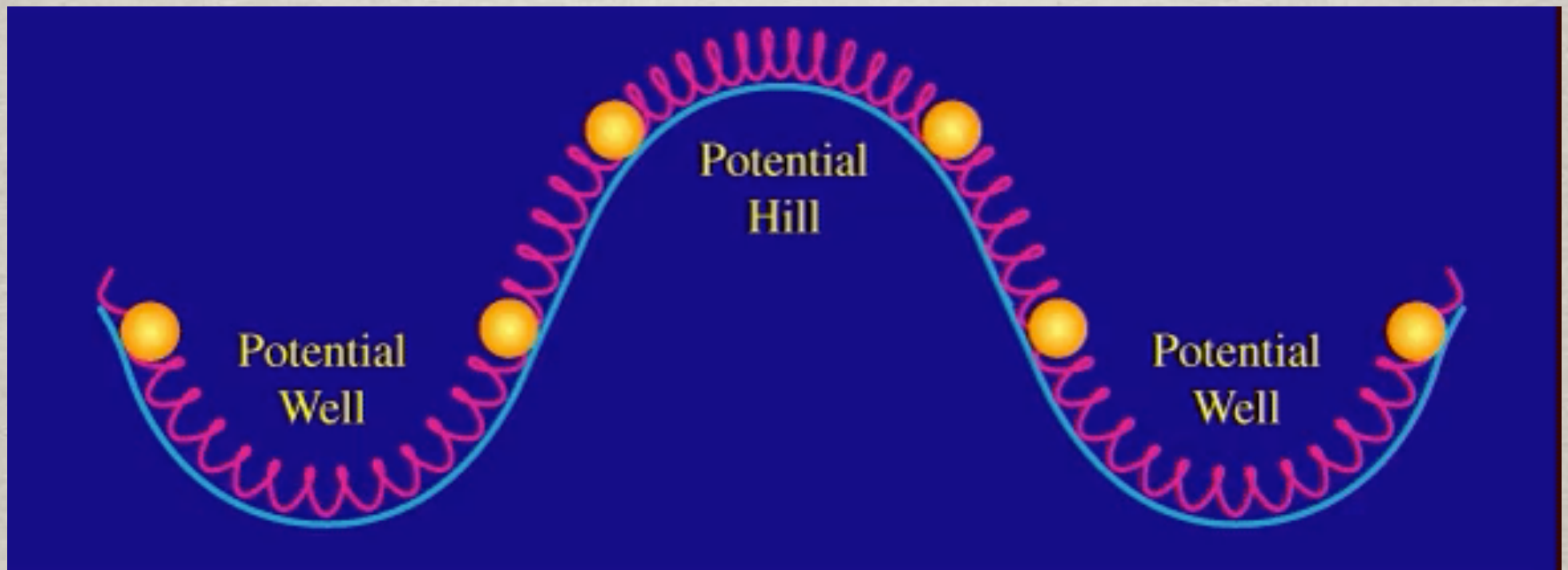
Matéria escura cria poço de potencial;

Matéria bariônica=massas

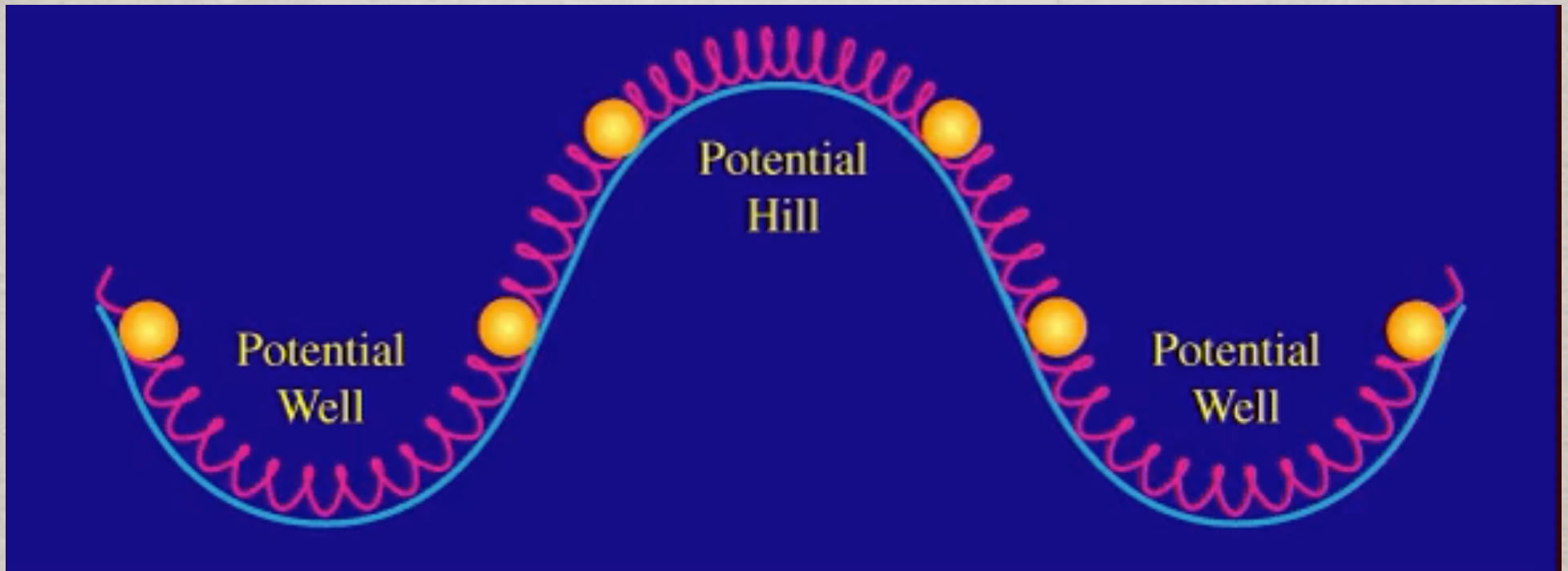
Fotões=molas



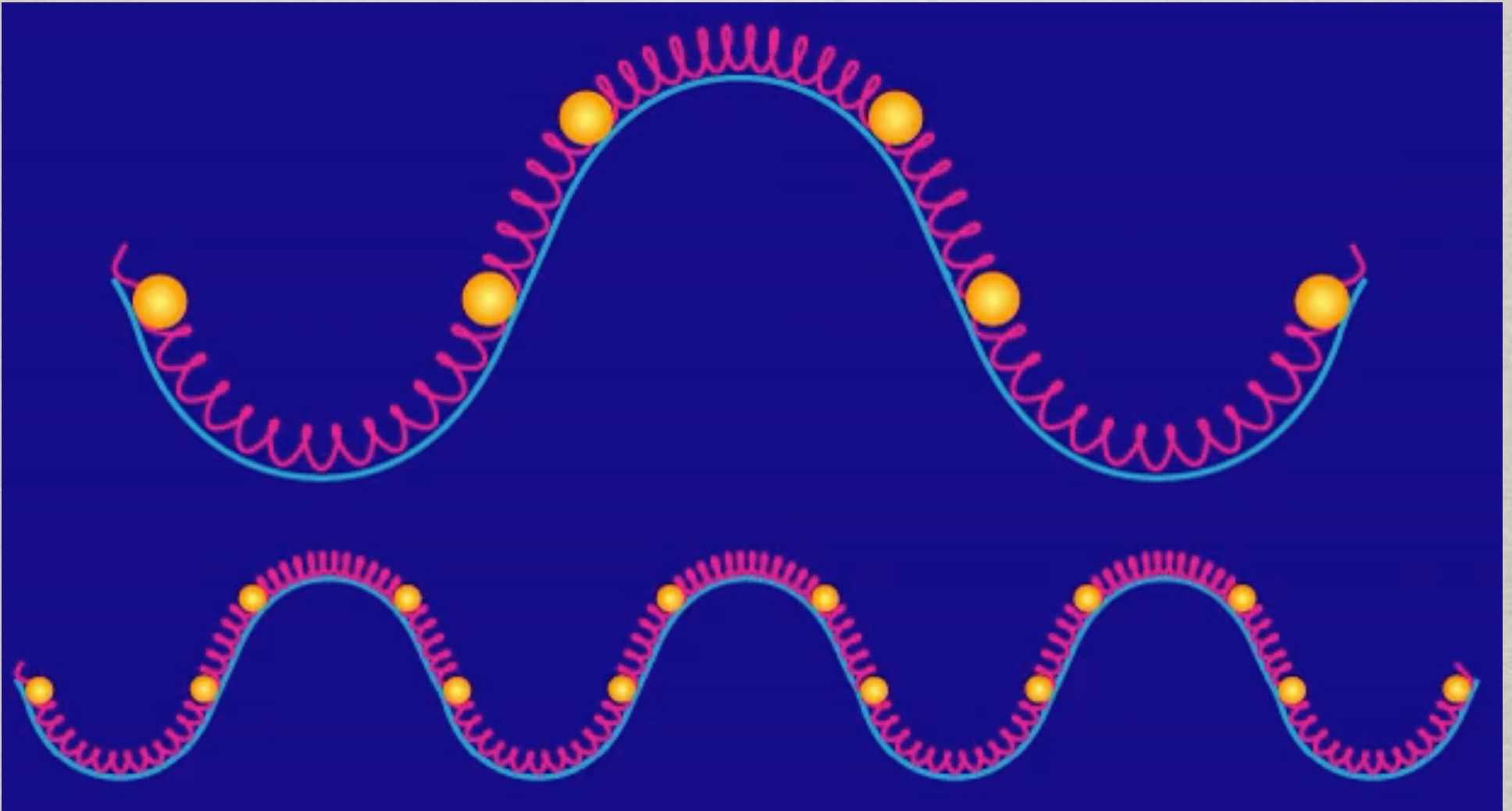
Mas não existe um poço de potencial;  
existe uma estrutura de flutuações de densidade correspondendo  
a poços e barreiras de potencial.



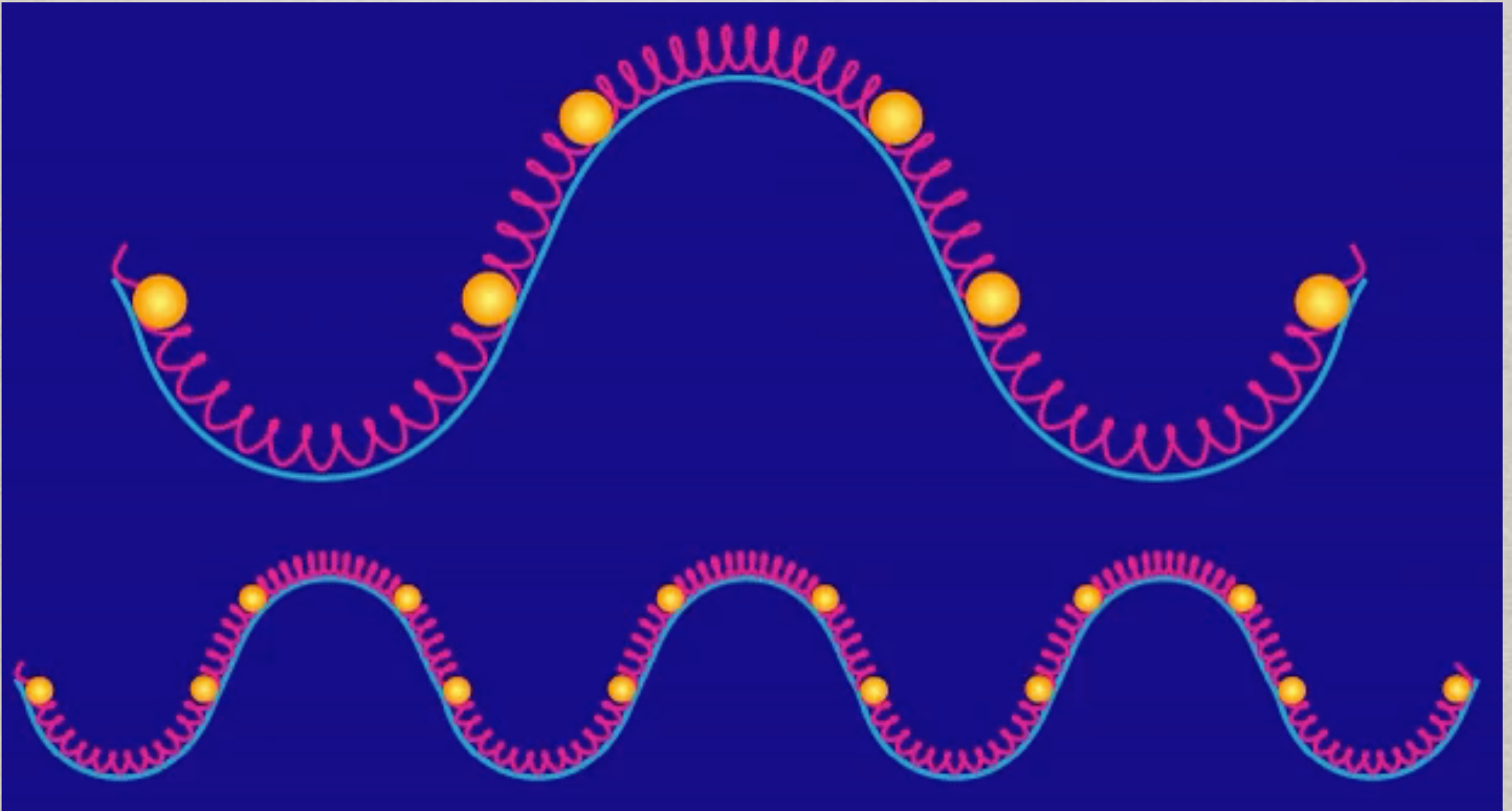
Mas não existe um poço de potencial;  
existe uma estrutura de flutuações de densidade correspondendo  
a poços e barreiras de potencial.



E não existe apenas uma frequência, ou comprimento de onda característico; durante a inflação são criadas flutuações com todos os comprimentos de onda, que oscilam independentemente:

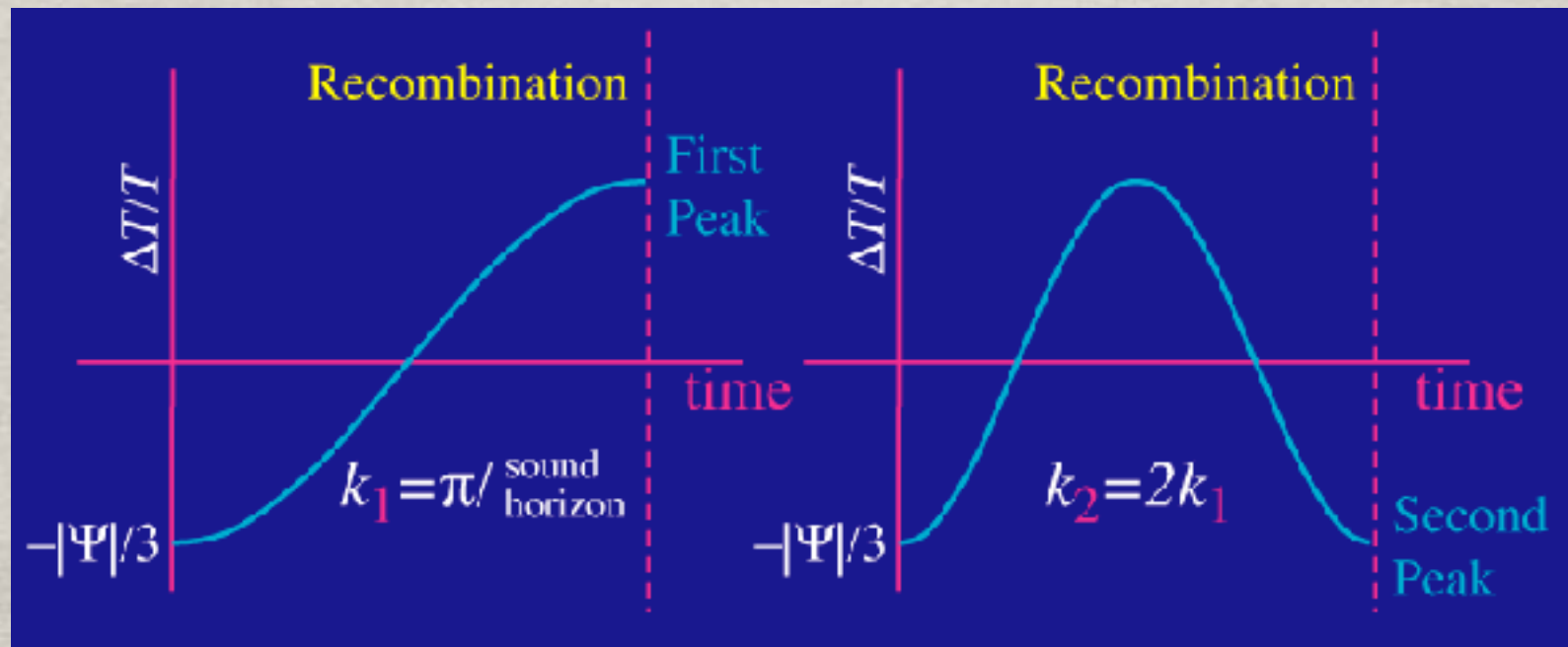


E não existe apenas uma frequência, ou comprimento de onda característico; durante a inflação são criadas flutuações com todos os comprimentos de onda, que oscilam independentemente:



## Factos principais:

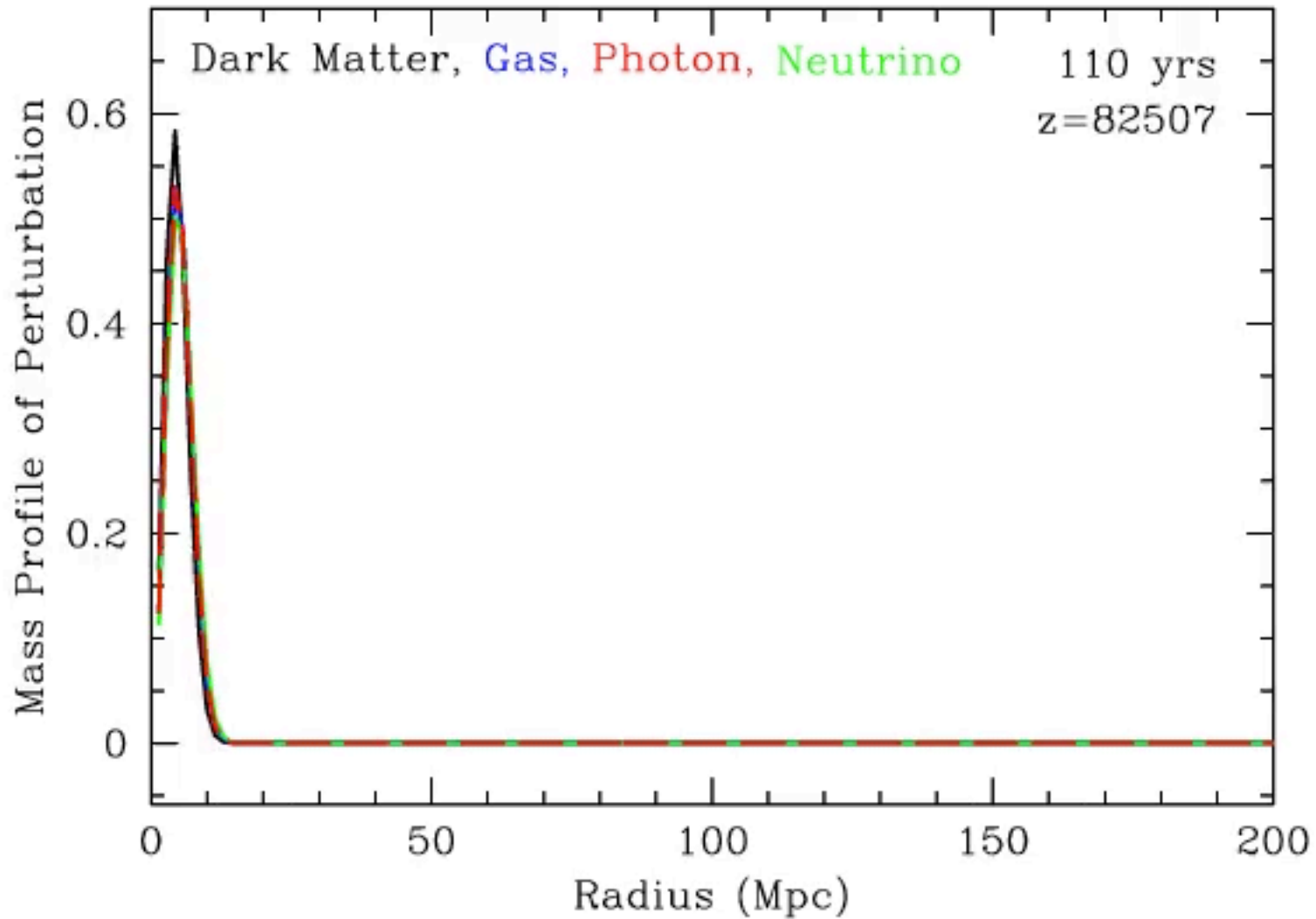
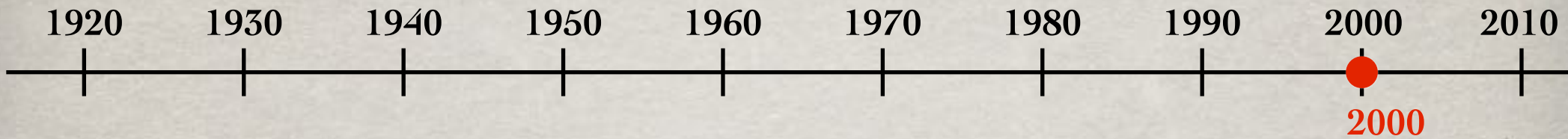
- quando se dá a recombinação as oscilações congelam;
- nesse “instante”, modos que se encontram em extremos das oscilações correspondem aos picos das flutuações de densidade (e temperatura)



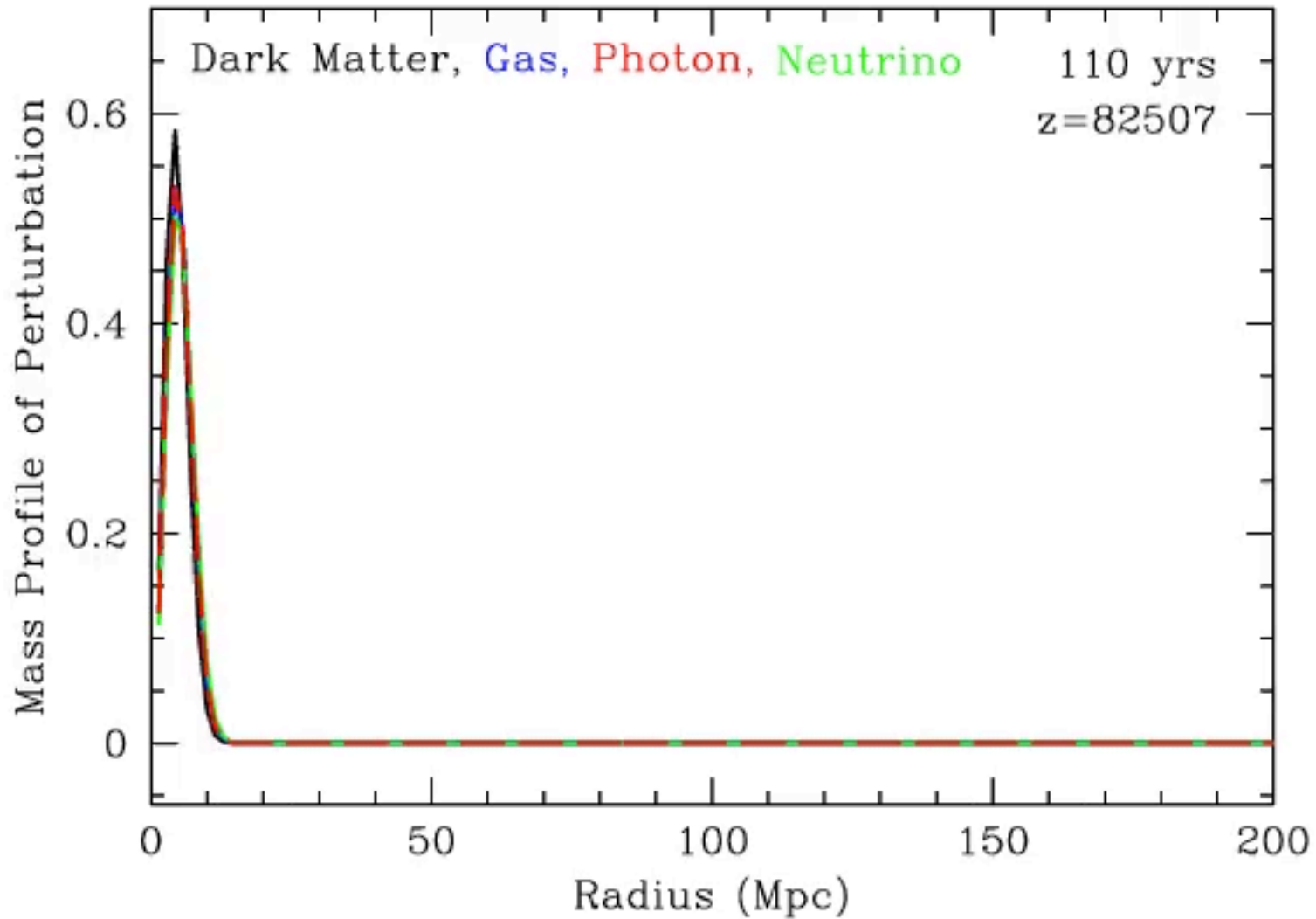
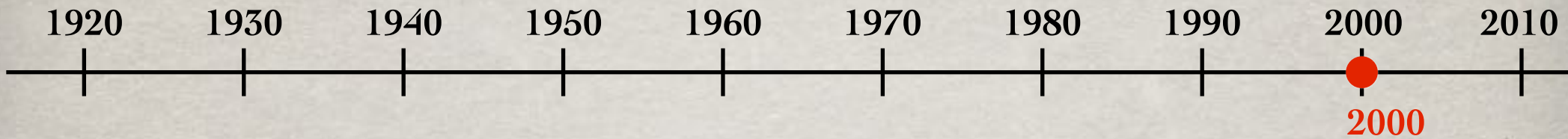
O menor vector de onda destes extremos, correspondendo à maior escala define o “horizonte acústico”.

Os seguintes picos são harmónicos.

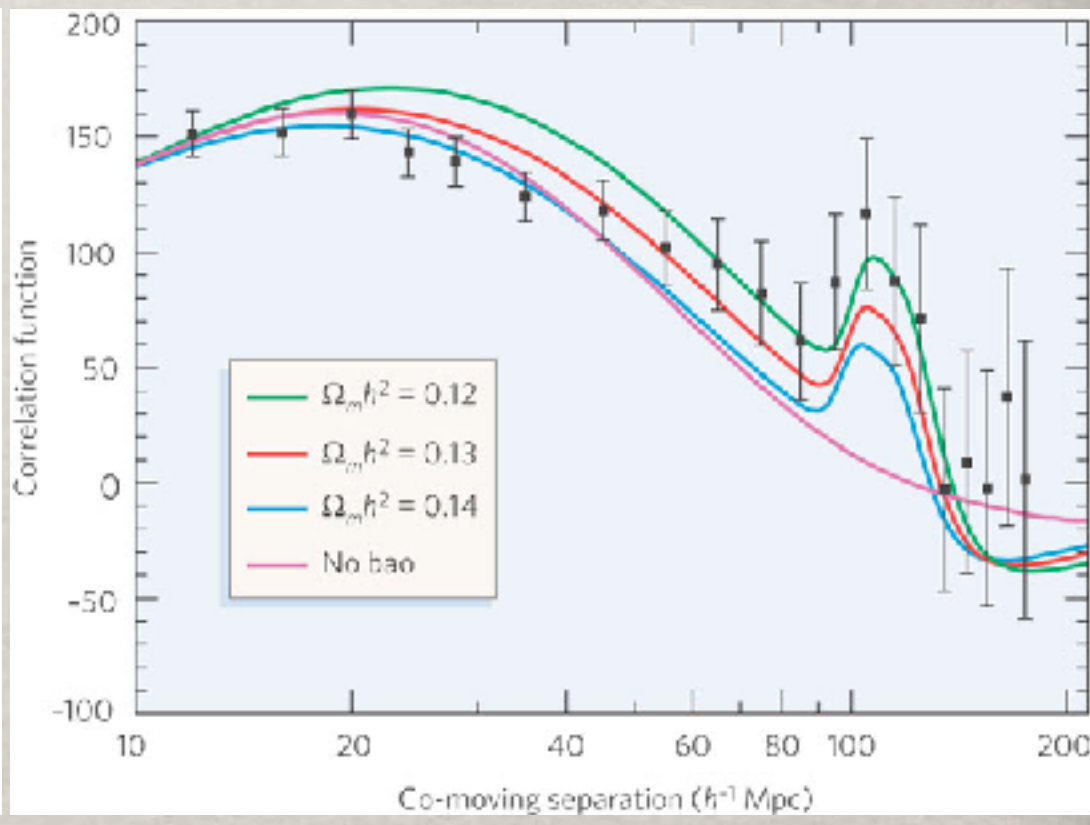
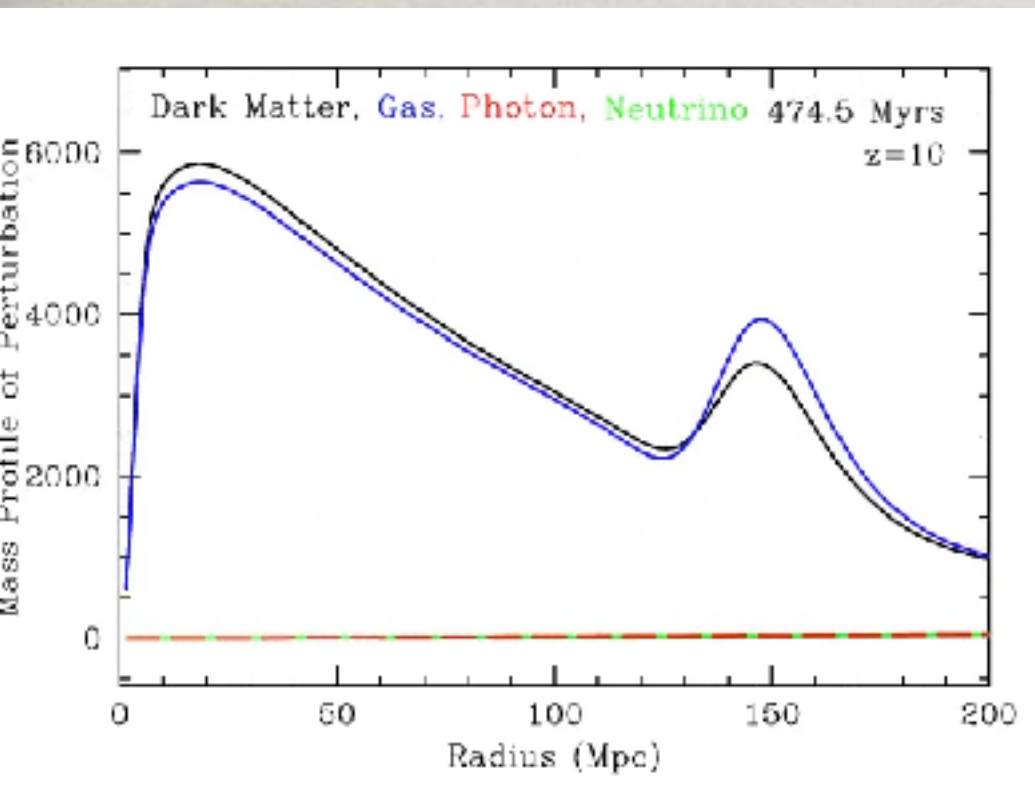
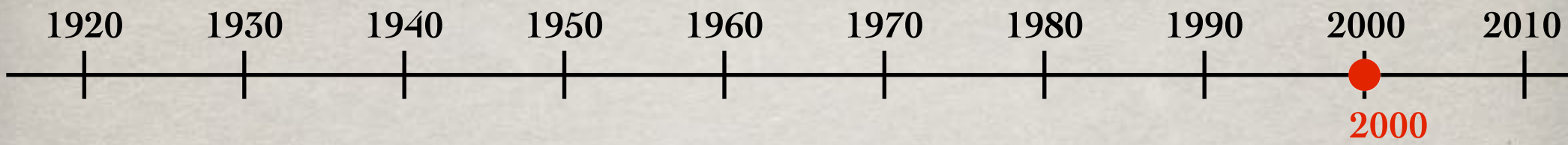
# “Timeline”:



# “Timeline”:

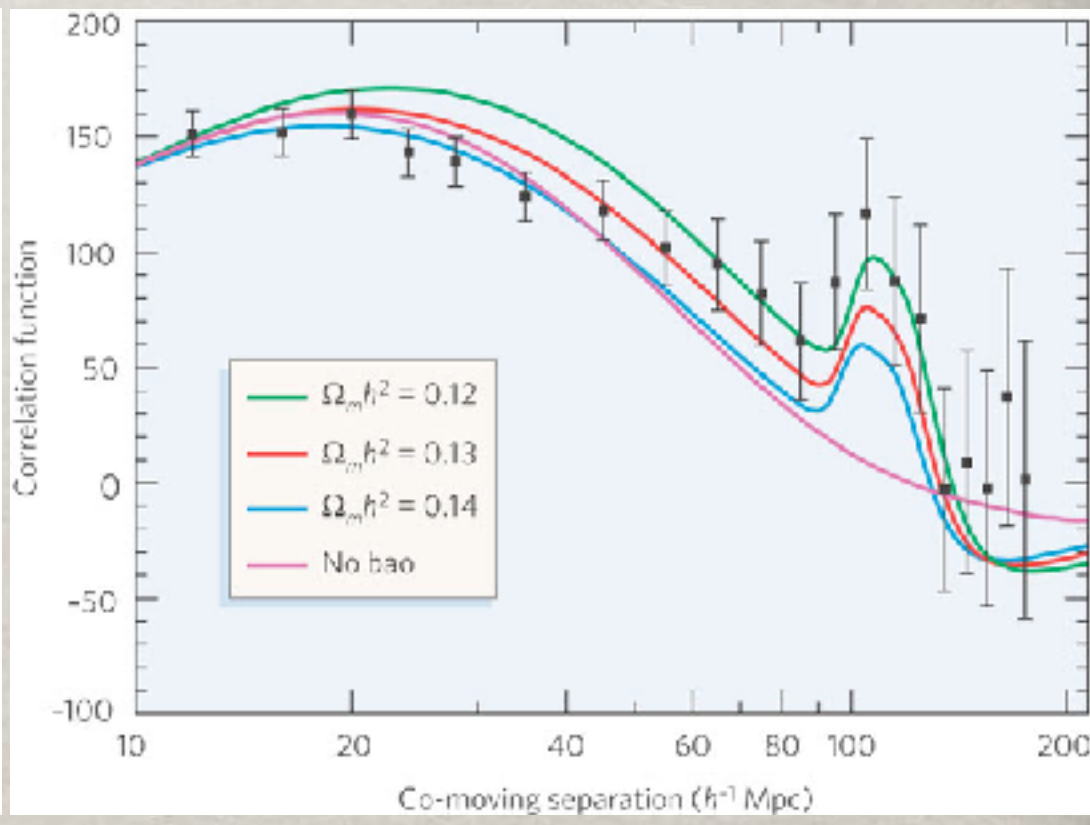
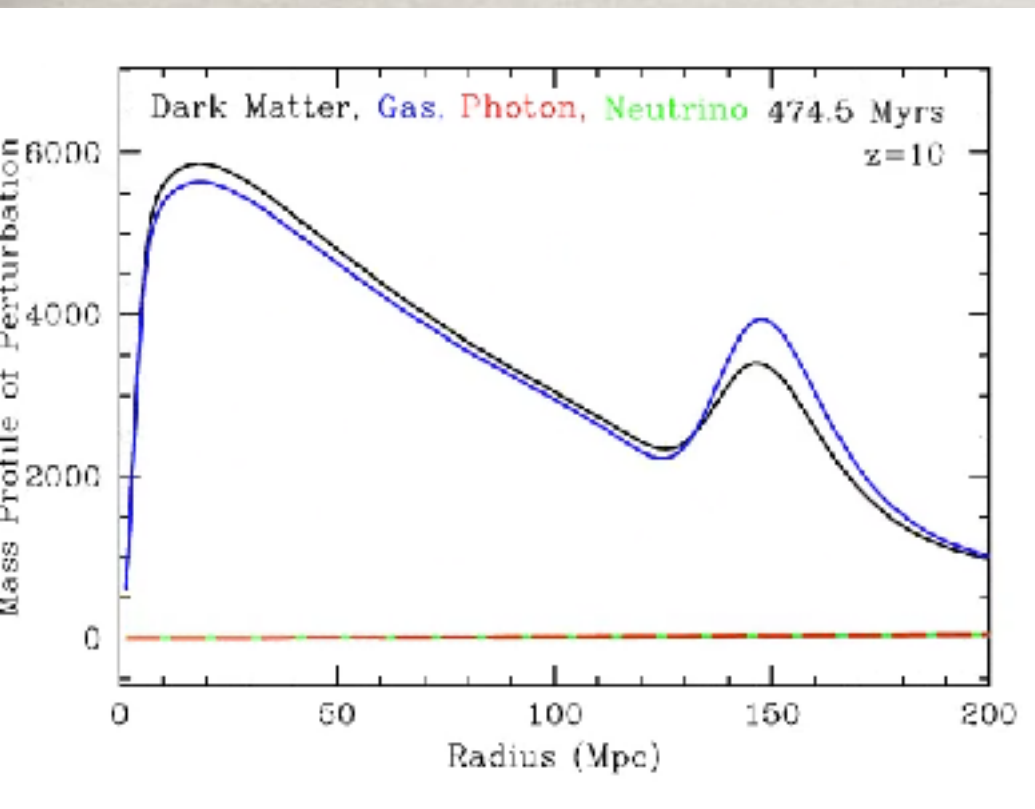
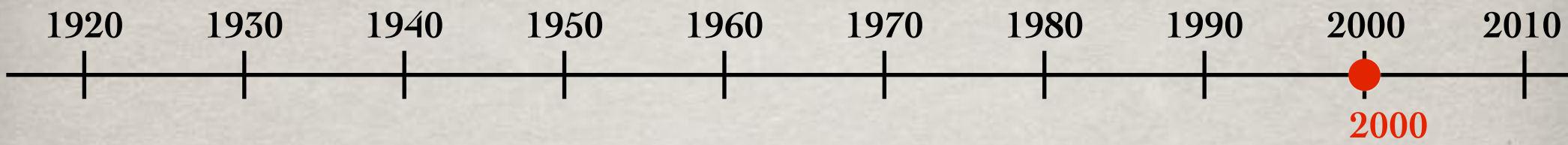


# “Timeline”:

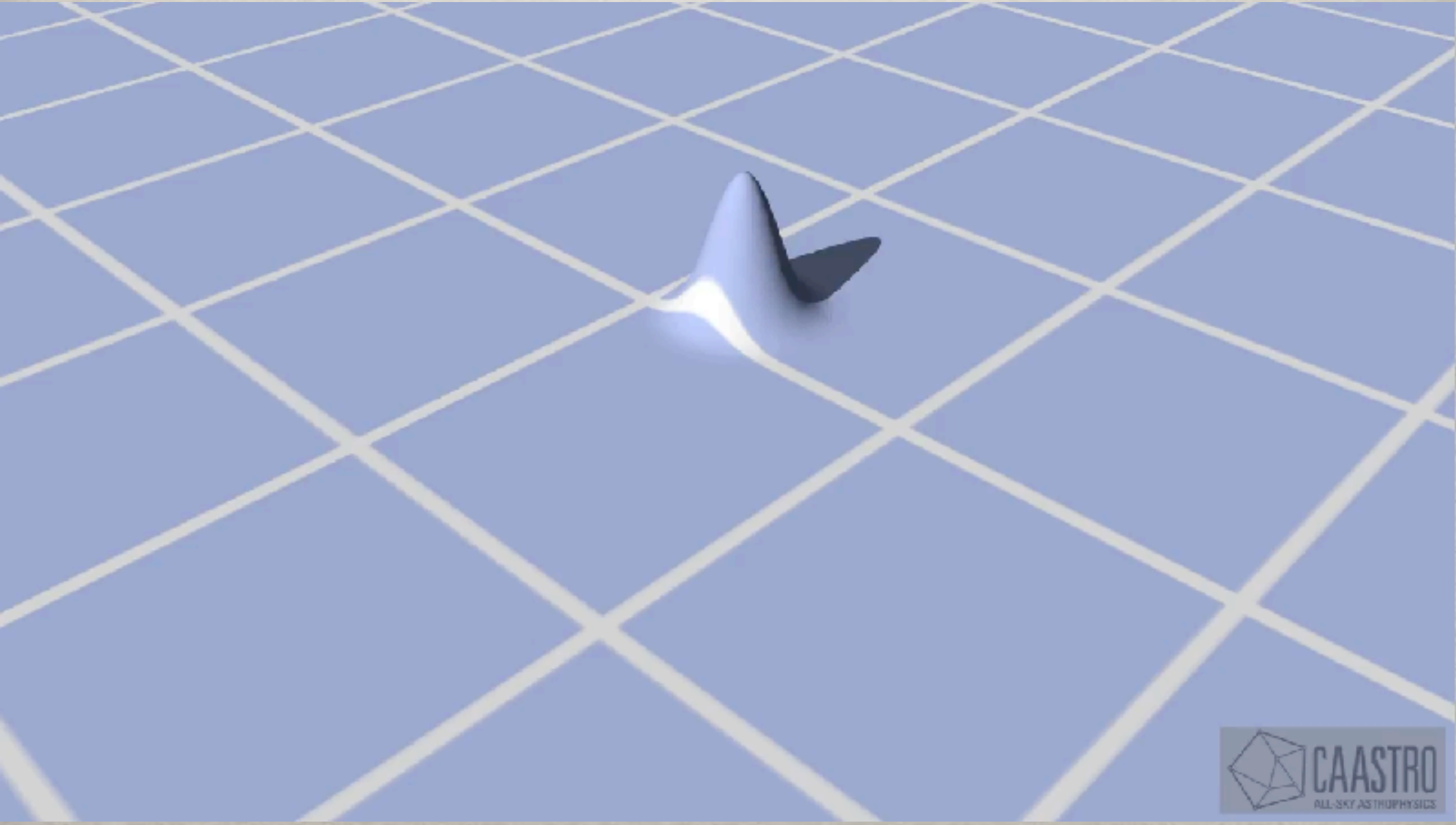
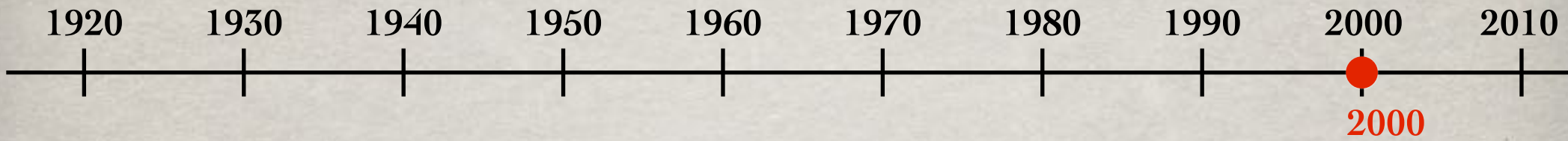




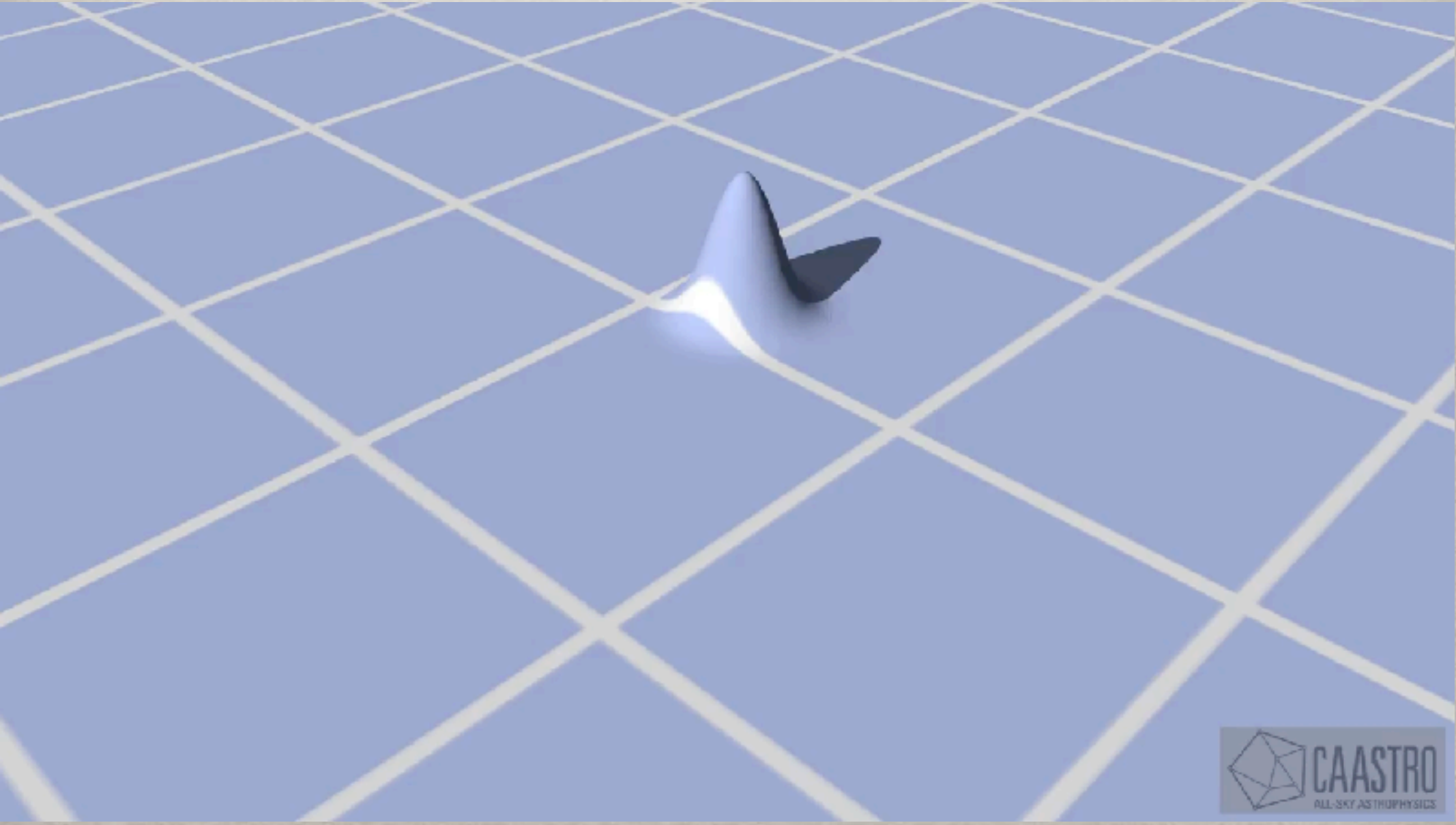
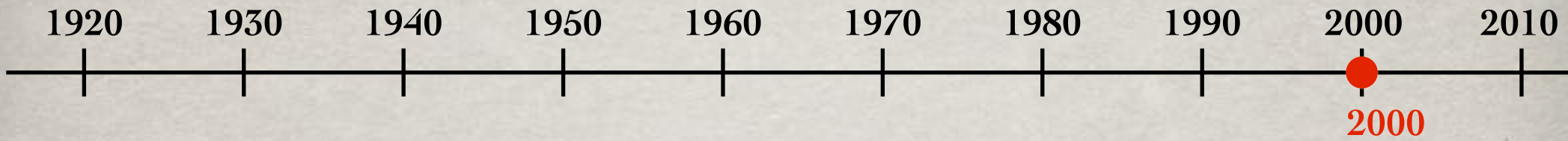
# “Timeline”:



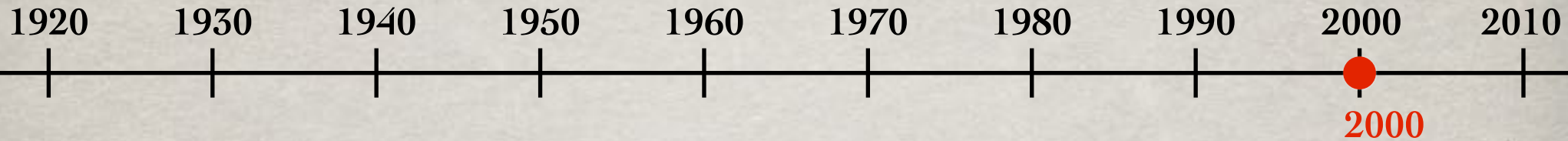
# “Timeline”:



# “Timeline”:



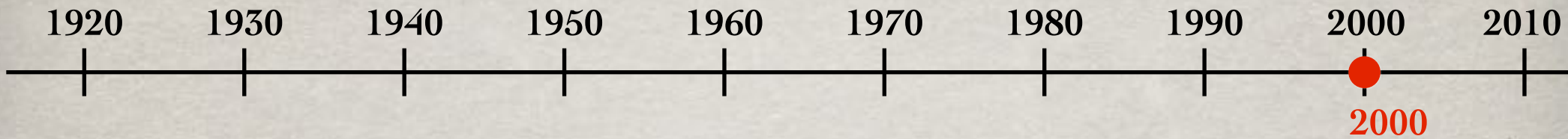
## “Timeline”:



Publicação dos dados da  
experiência  
BOOMERanG  
(Balloon Observations  
of Millimetric  
Extragalactic Radiation  
and Geomagnetism), um  
telescópio de  
microondas, lançado em  
Dezembro de 1998 e  
transportado a uma  
altitude de cerca de 38  
km, sobre a Antártida,  
por um balão.



# “Timeline”:



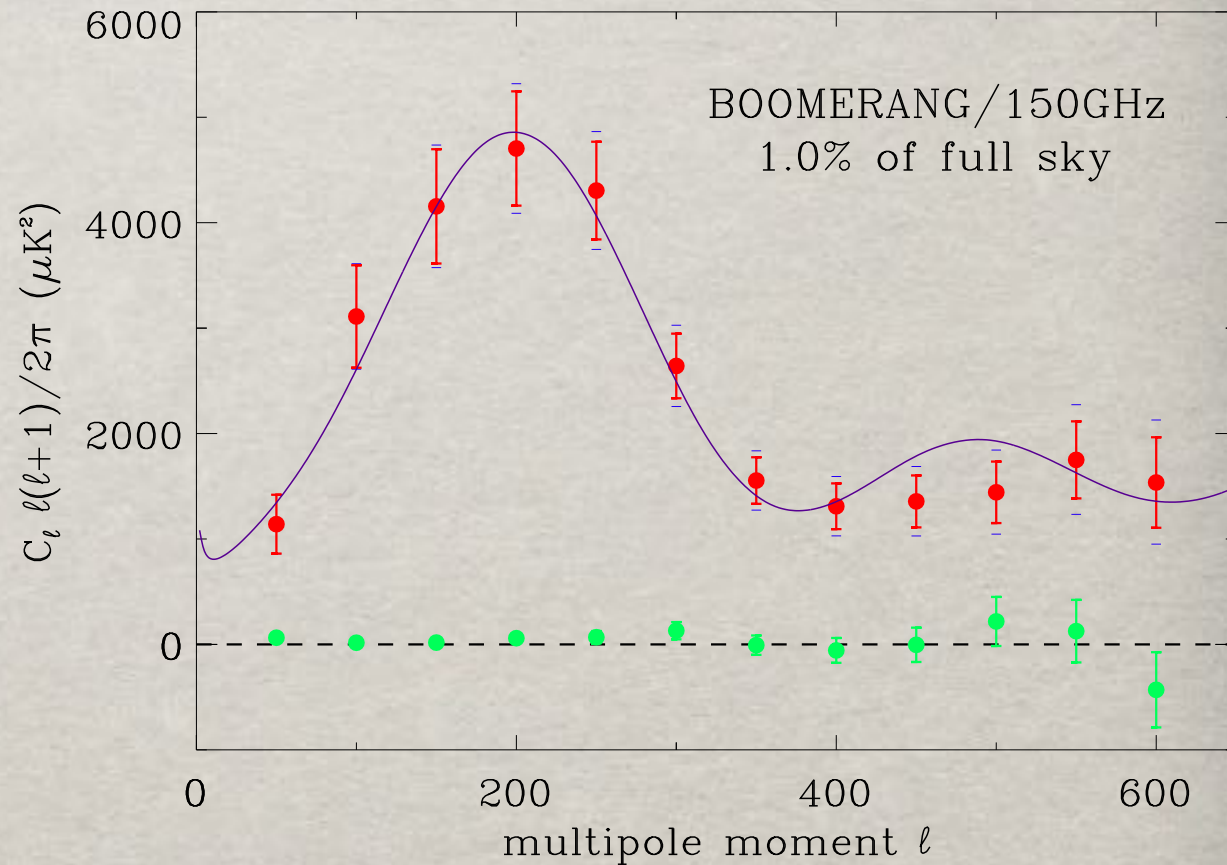
Analizando as flutuações de temperatura em pares (correlador de dois pontos) e expressando-a numa expansão multipolar

$$\langle \delta T(\hat{n}) \delta T(\hat{n}') \rangle = \sum_{\ell} \frac{(2\ell + 1)}{4\pi} C_{\ell} P_{\ell}(\cos \theta)$$

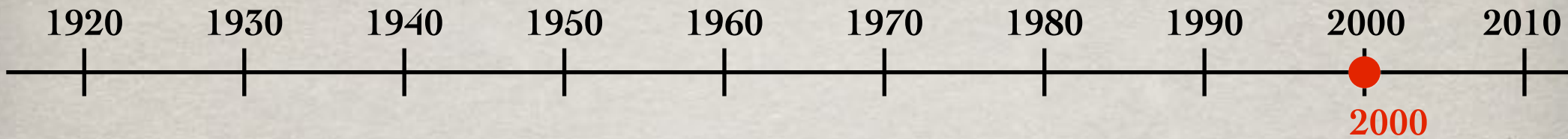
o espectro angular de potências revela um pico

com

$$\ell_{pico} = 197 \pm 6$$



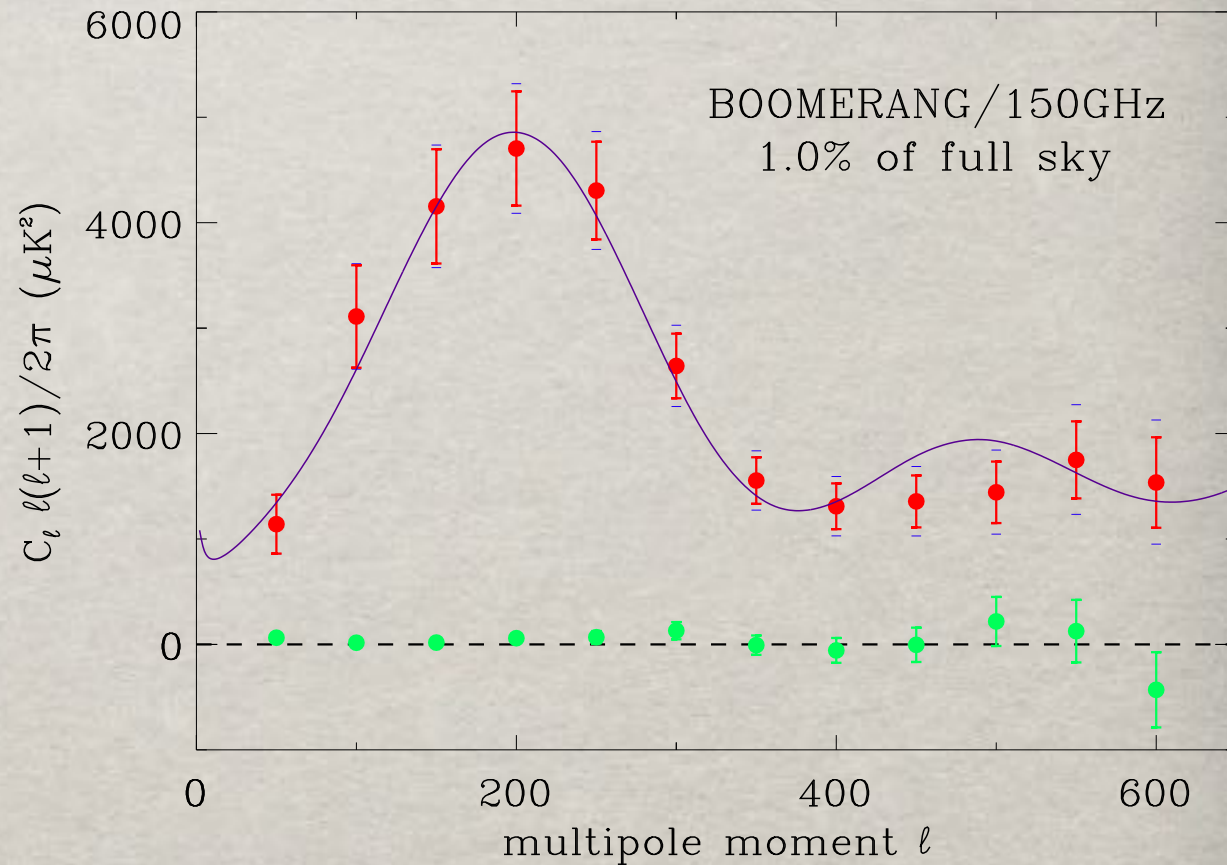
# “Timeline”:



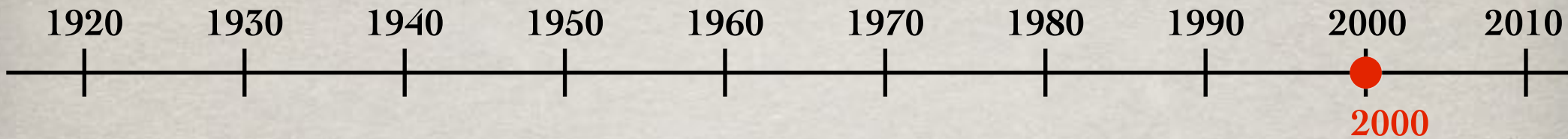
- Apoia modelos de matéria escura;

- Restringe parâmetros cosmológicos, dado que esta escala aparente no céu depende da escala física original mais a evolução do Universo (“distância” até nós)

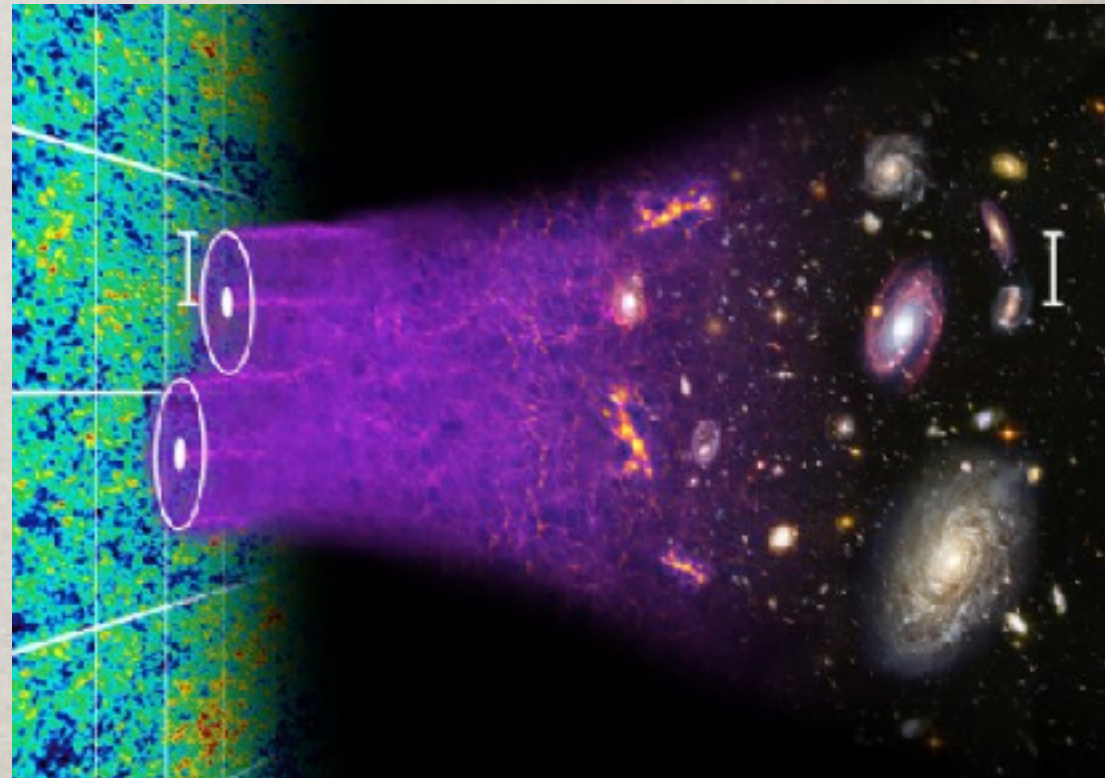
$$\ell \propto 1/\theta \quad \theta_{HA} = \frac{r_{HA}}{d_{SLS}}$$



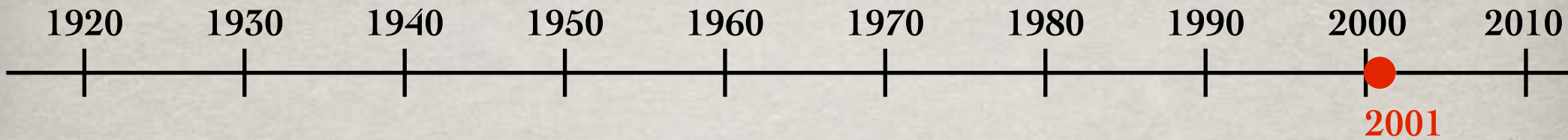
## “Timeline”:



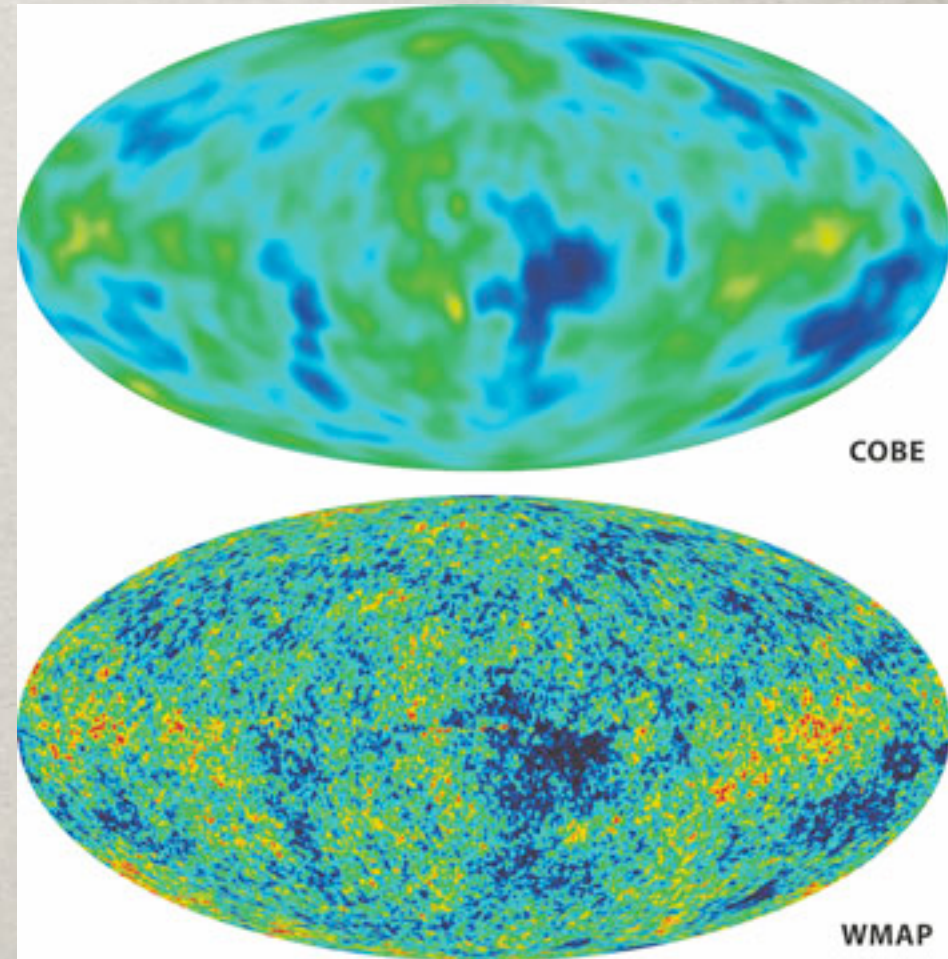
Comparando a escala do horizonte acústico na recombinação - através do sinal presente na RCF -, com a escala do horizonte acústico na distribuição de galáxias obtém-se uma restrição para a evolução do Universo independente das supernovas.



## “Timeline”:

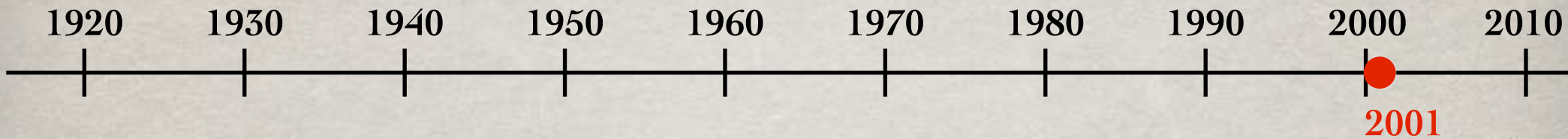


Foi lançado o satélite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) para medir as anisotropias da RCF com 45 vezes a sensibilidade e 33 vezes a resolução angular do COBE.



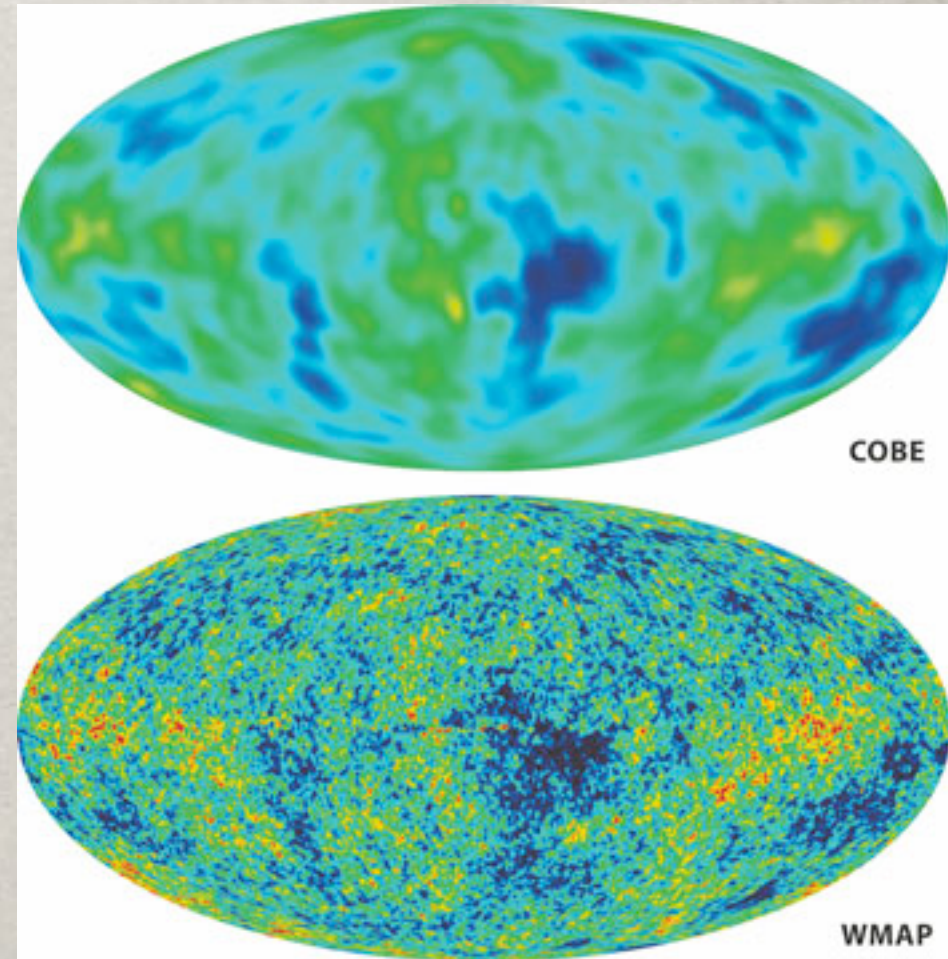


## “Timeline”:

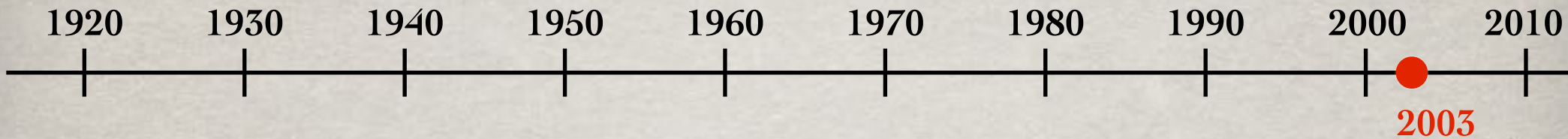


Foi lançado o satélite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) para medir as anisotropias da RCF com 45 vezes a sensibilidade e 33 vezes a resolução angular do COBE.

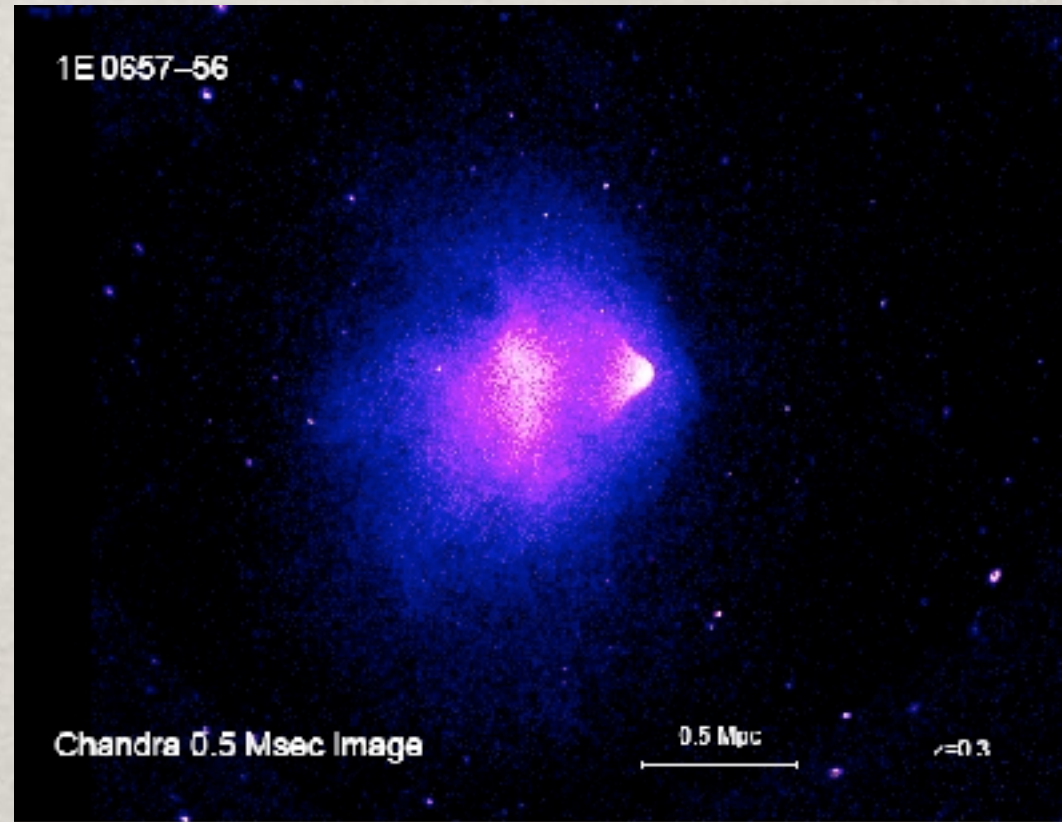
Durante os anos seguintes foram lançados dados com 1,3,5 e 7 anos que foram centrais em estabelecer o **modelo Lambda-CDM** para o Universo.



## “Timeline”:



Evidência observacional do “Bullet Cluster” fornece a mais forte evidência para a matéria escura:



Fotografia (em raios X) do “Bullet Cluster” (1E0657-56) obtida pelo [Chandra X-ray Observatory](#). A exposição foi de aproximadamente 140 horas e a escala mostrada é em megaparsecs. O redshift é  $z = 0.3$ , o que significa que a luz tem comprimentos de onda esticados por um factor de 1.3. De acordo com os modelos de hoje o cluster está a 4 mil milhões de anos luz de distância.

M. Markevitch, A. H. Gonzalez, D. Clowe, A. Vikhlinin, L. David, W. Forman, C. Jones, S. Murray, and W. Tucker (2003). "Direct constraints on the dark matter self-interaction cross-section from the merging galaxy cluster 1E0657-56". *Astrophys.J.* **606** (2): 819–824

# Galáxias e Enxames de Galáxias são lentes gravitacionais:



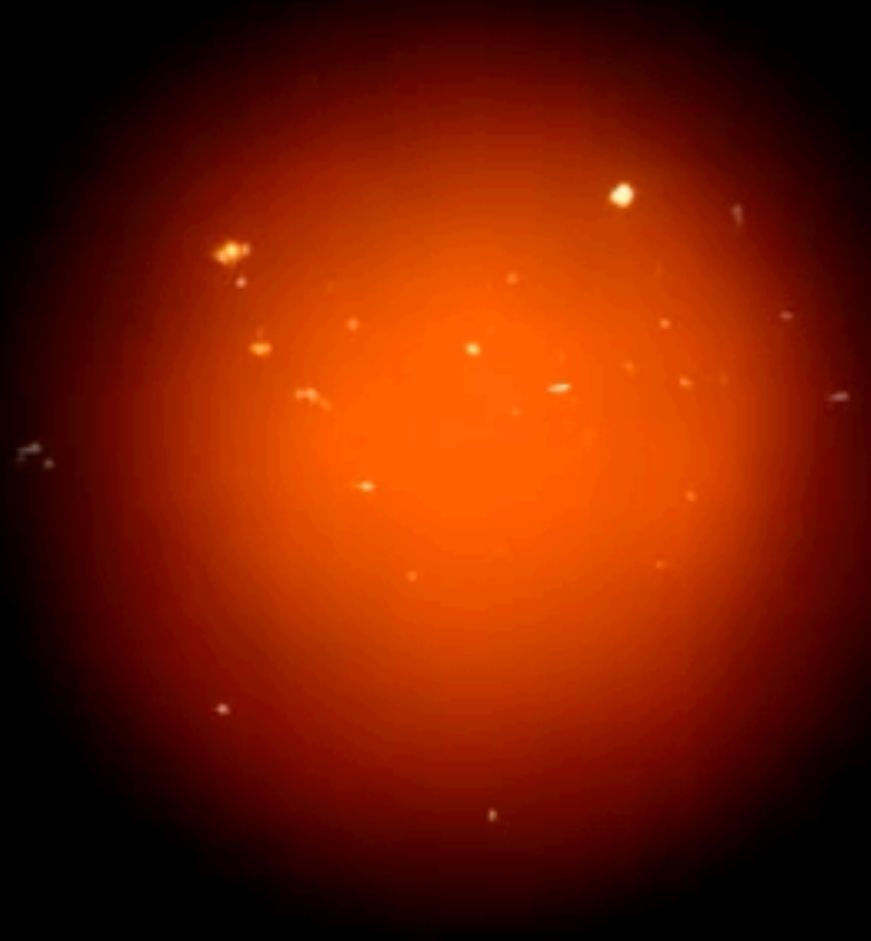
Credit: [ESA/Hubble](#) (M. Kornmesser & L. L. Christensen)

# Galáxias e Enxames de Galáxias são lentes gravitacionais:

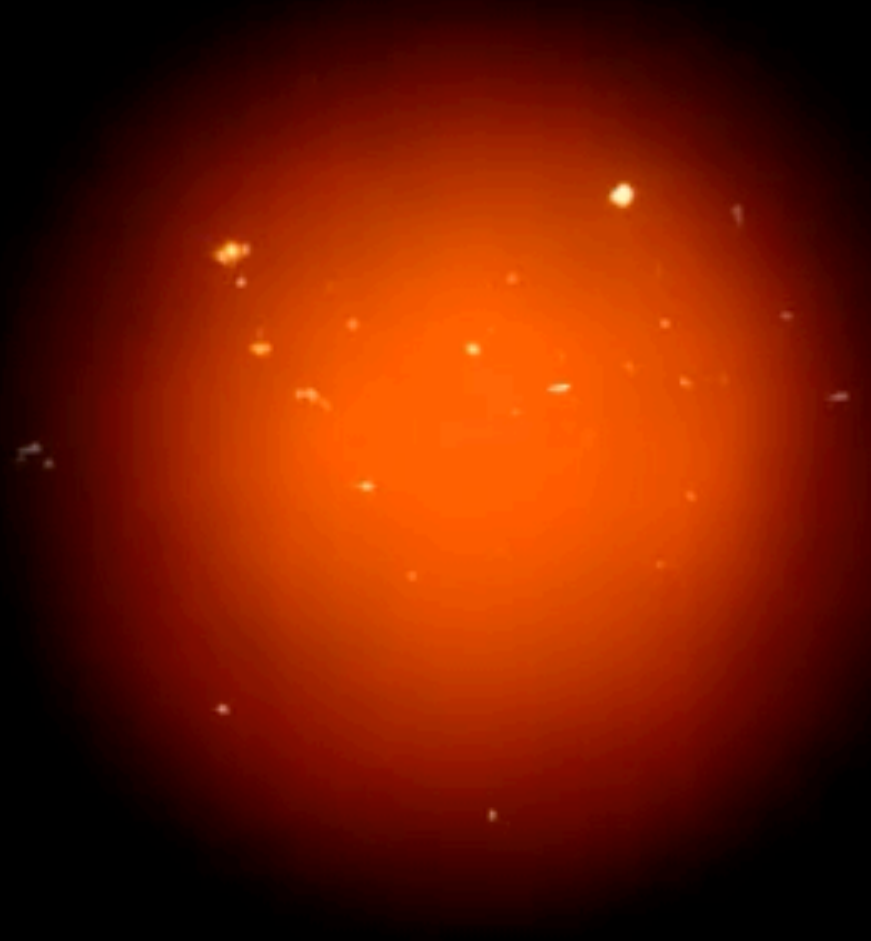


Credit: [ESA/Hubble](#) (M. Kornmesser & L. L. Christensen)

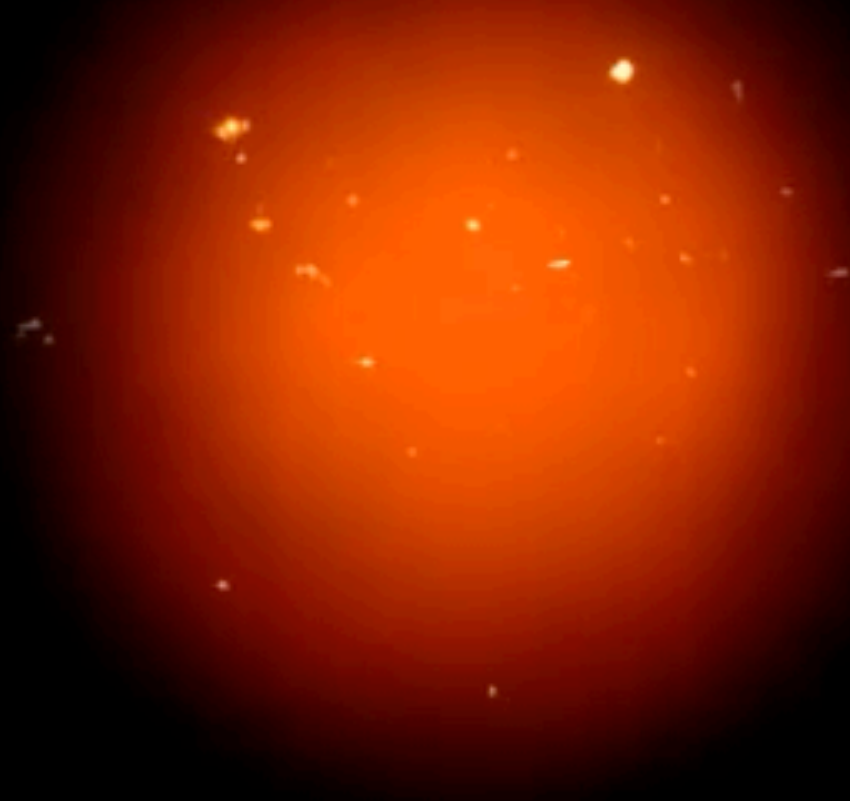
Um aglomerado galáctico "galaxy cluster":



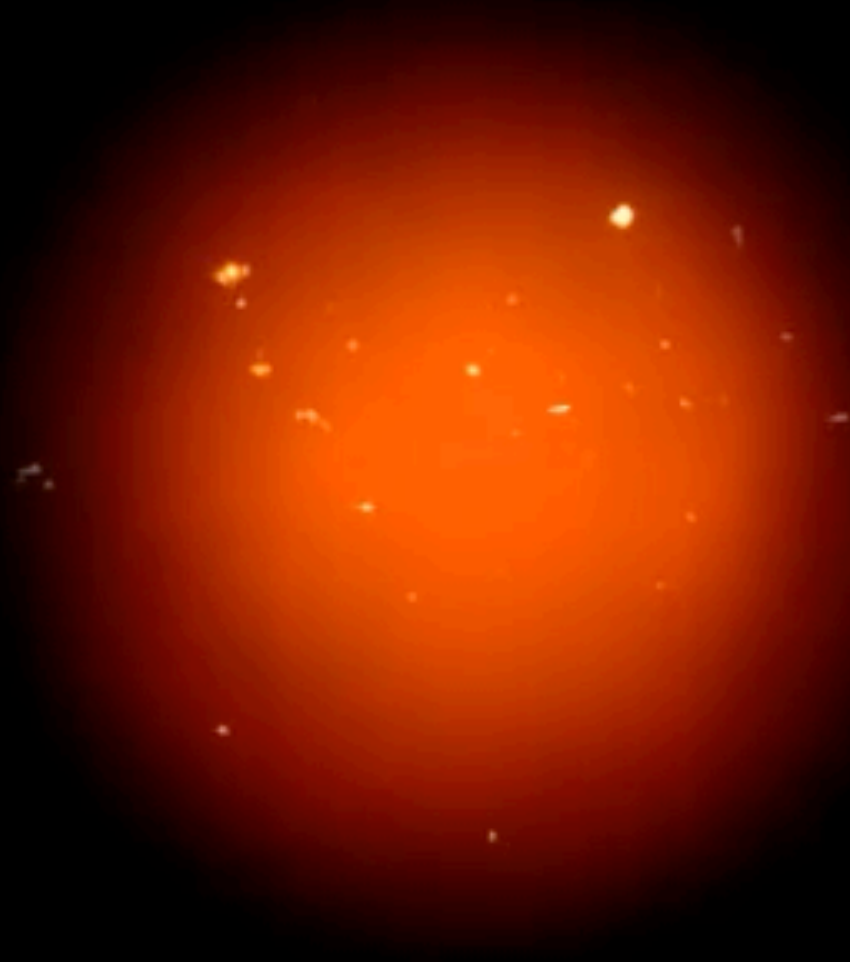
Um aglomerado galáctico "galaxy cluster":



O gás, quente, enche o espaço entre as galáxias e à volta delas;  
contém mais massa visível do que todas as galáxias.



O gás tem uma temperatura de  
10-100 milhões de graus Kelvin e emite raios X.

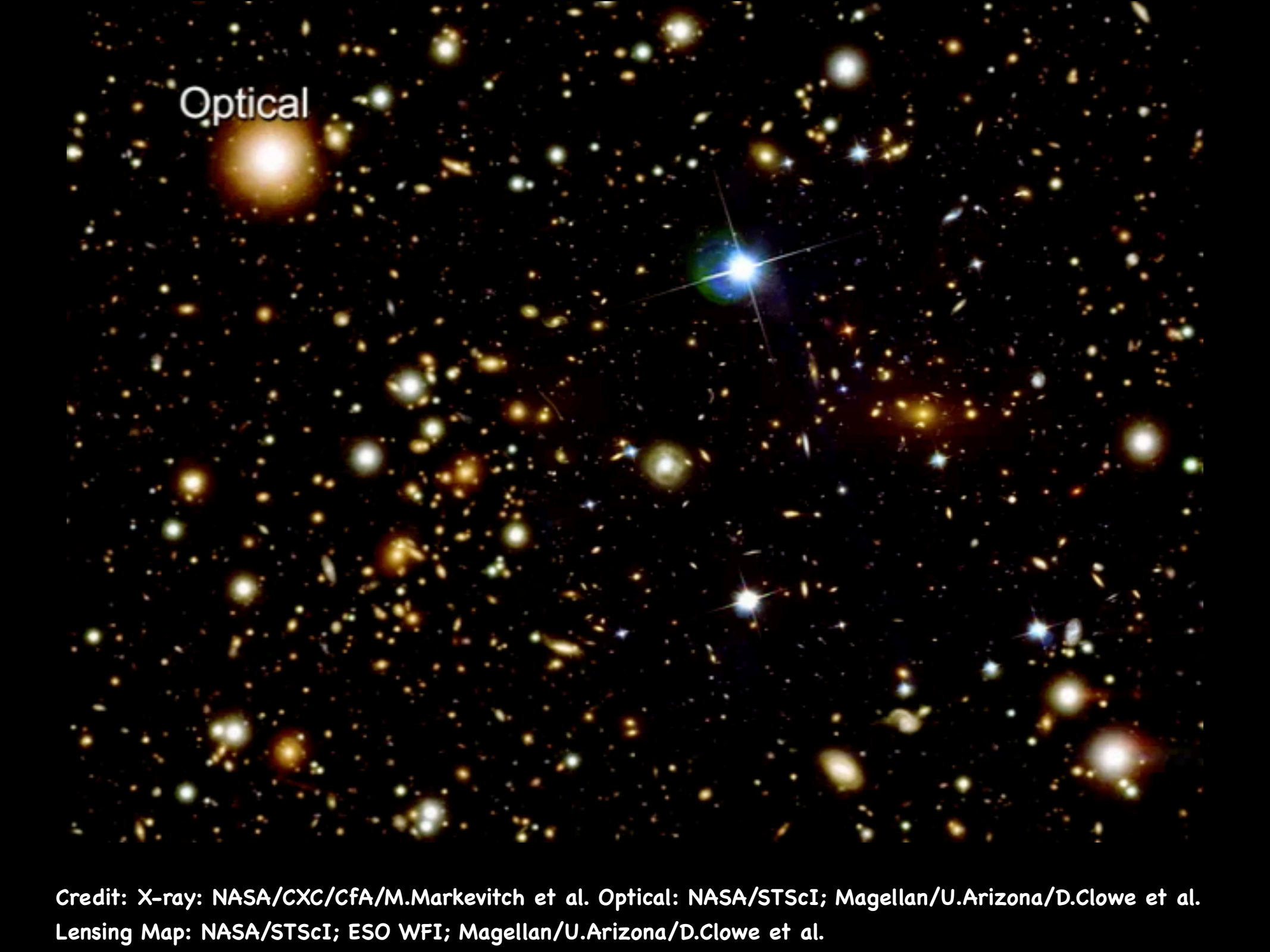




Embora as galáxias e a nuvem de gás sejam muito massivas, estima-se que seja necessária dez vezes mais massa para manter o sistema ligado gravitacionalmente.

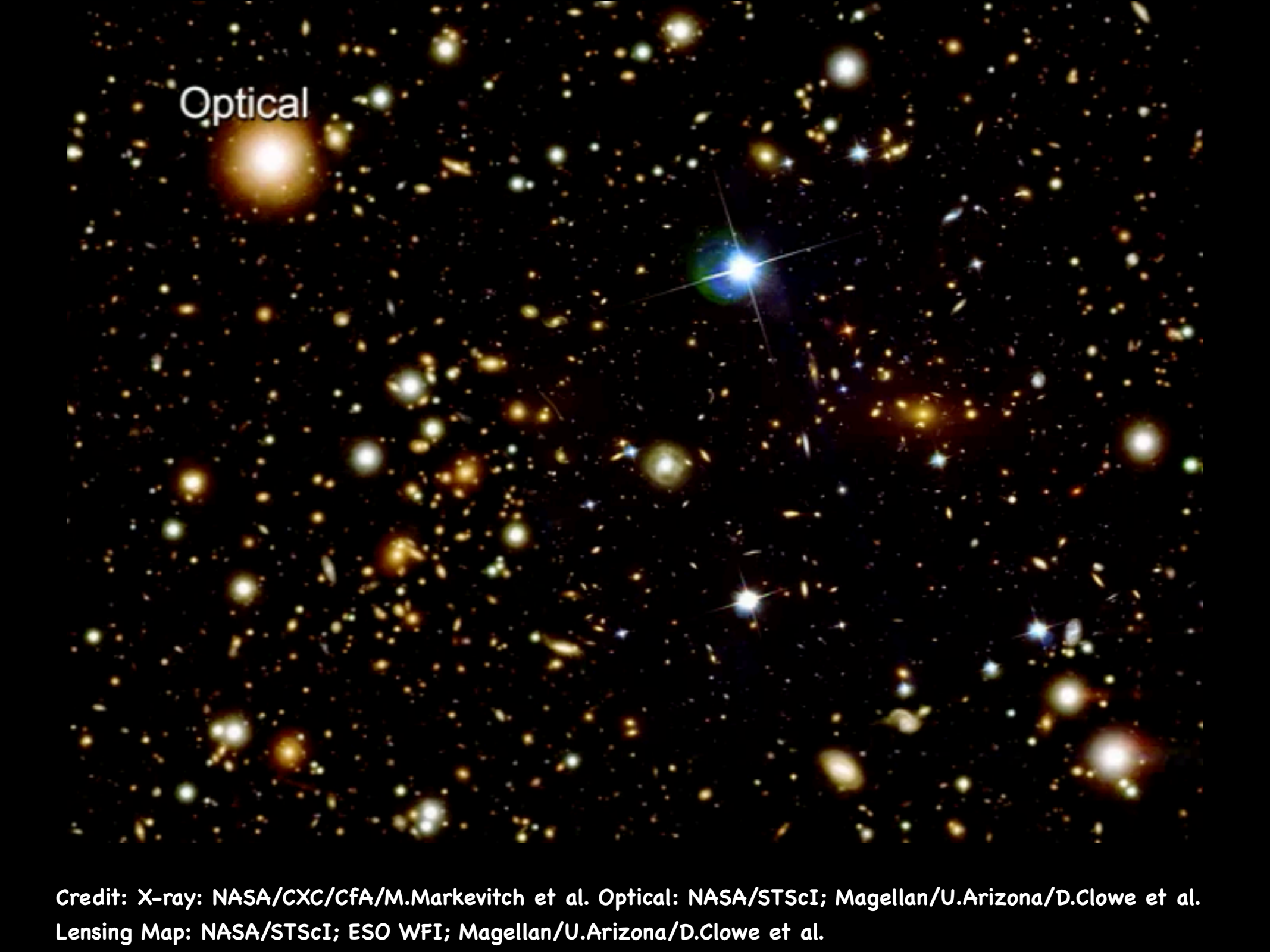


Optical



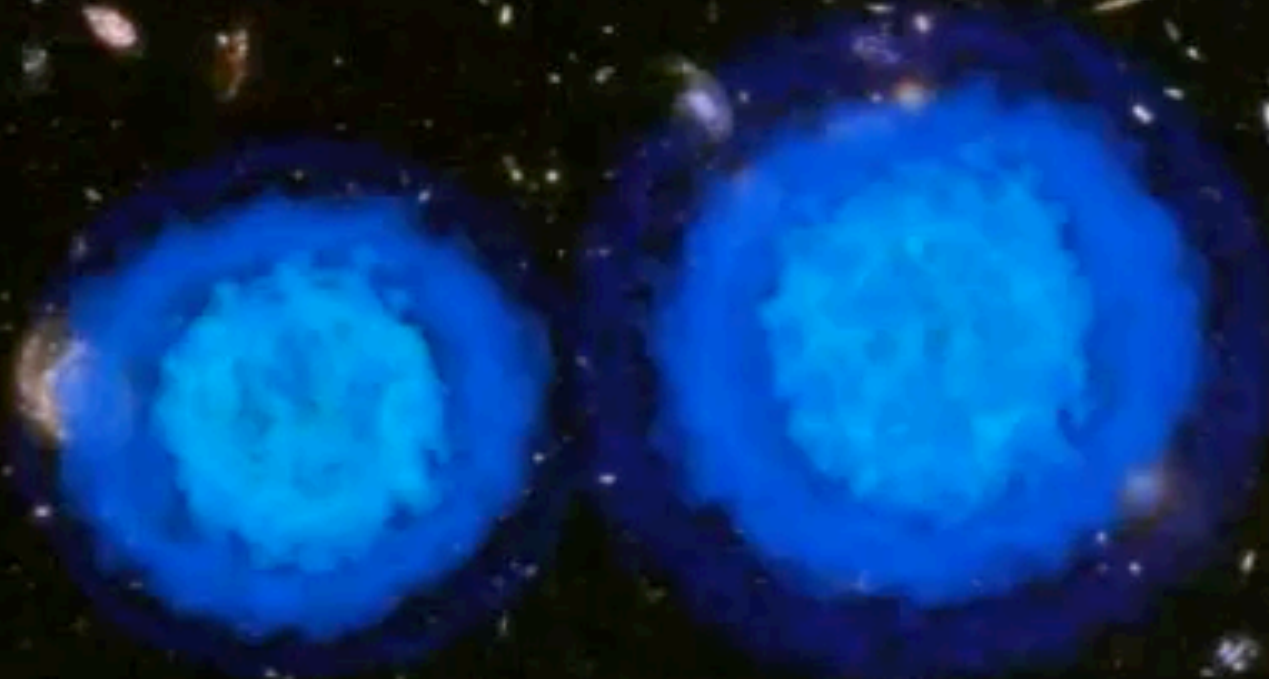
Credit: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al. Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.  
Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

Optical

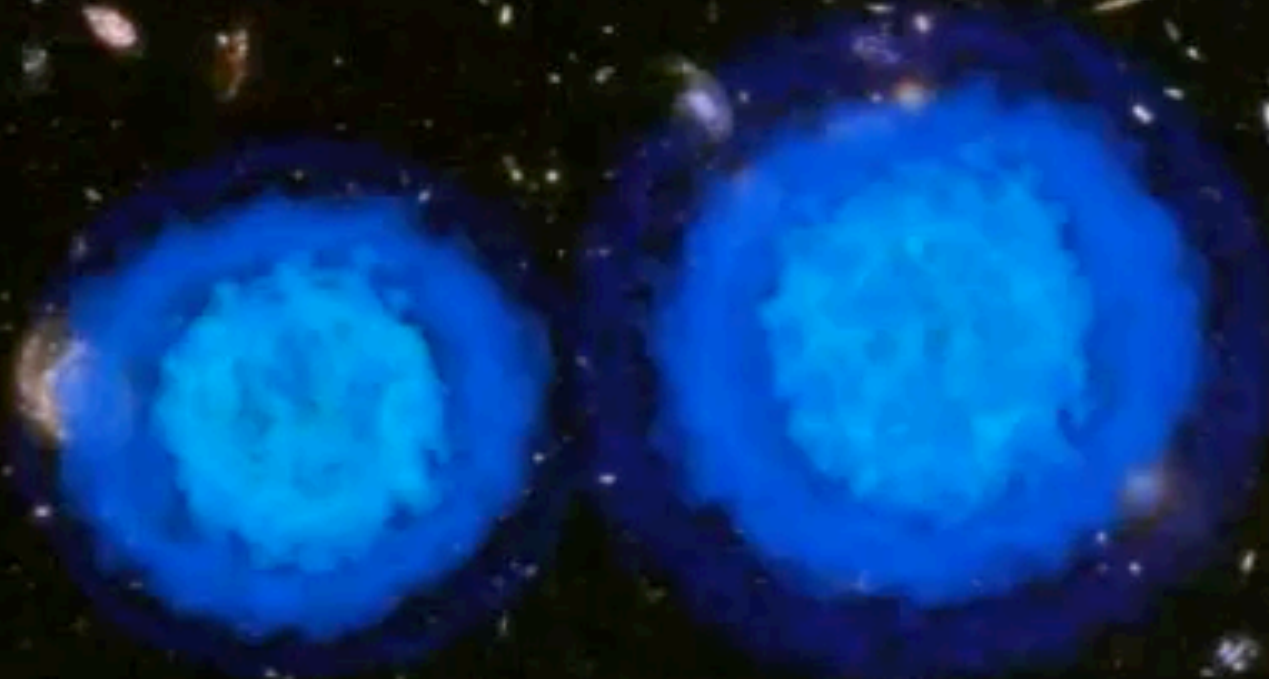


Credit: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al. Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.  
Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

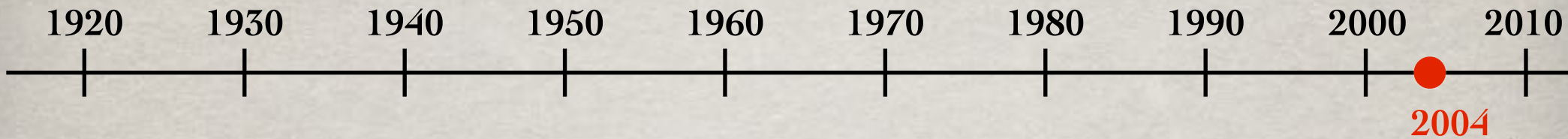
# Formação do "bullet cluster":



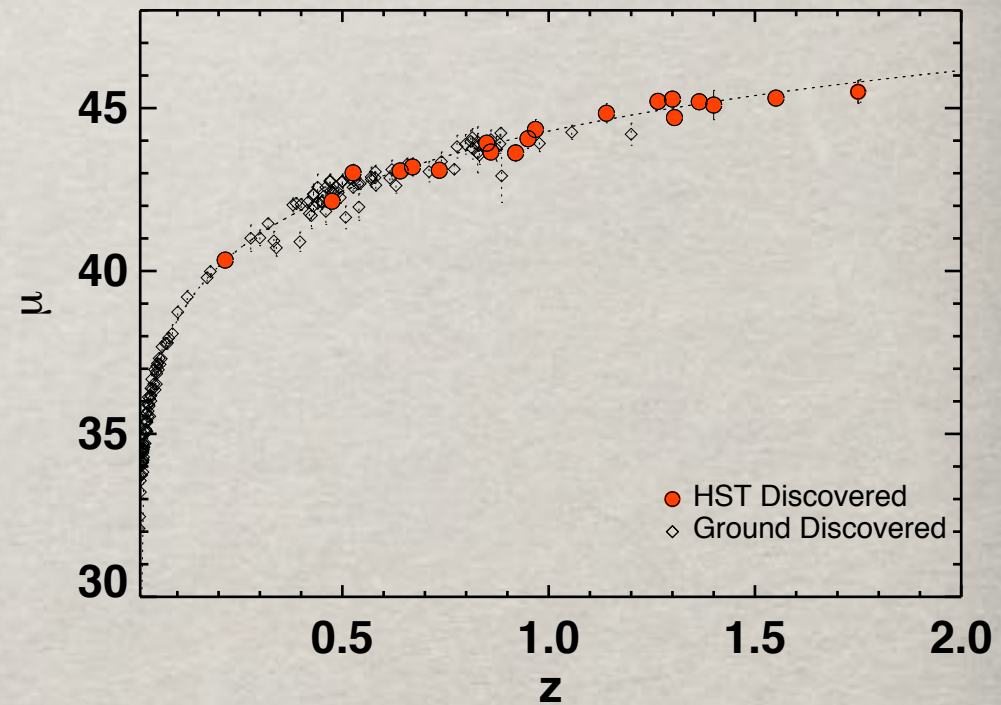
# Formação do "bullet cluster":



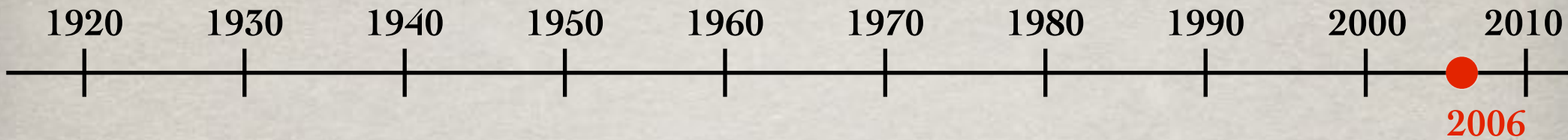
## “Timeline”:



Um estudo pelo “Supernova Cosmology Project”, usando o Hubble Space Telescope, encontra evidência para uma **fase de desaceleração** do Universo para  $z > 1$ .

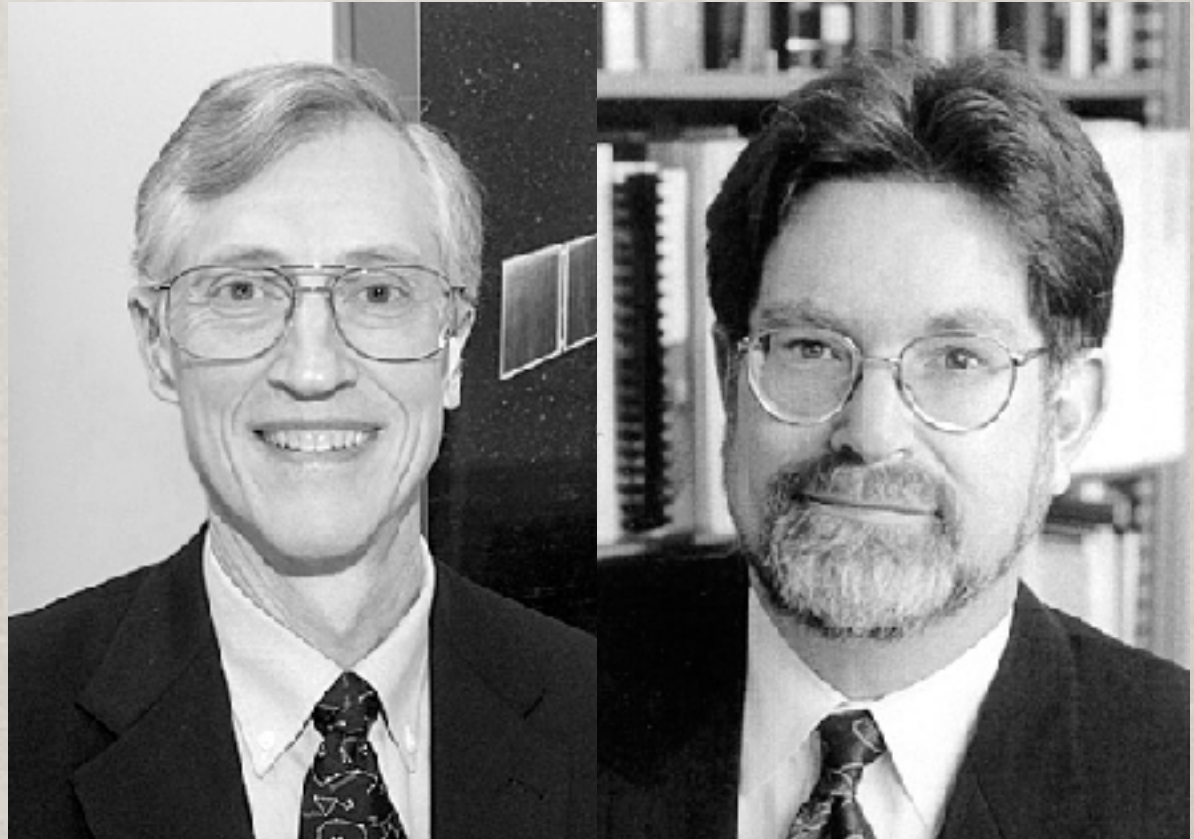


# “Timeline”:



## Prémio Nobel da Física 2006

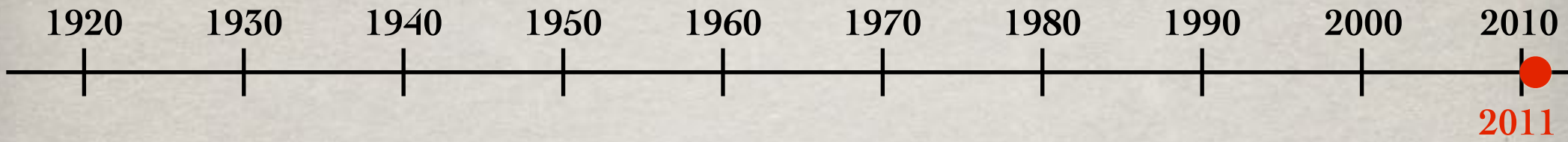
*“...for their discovery of  
the blackbody form and  
anisotropy of the cosmic  
microwave background  
radiation.”*



John C. Mather

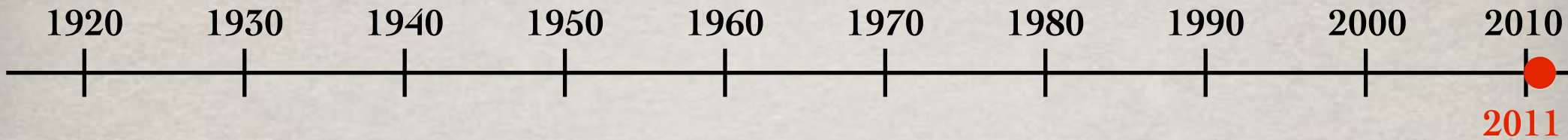
George F. Smoot

# “Timeline”:





# “Timeline”:



## Prémio Nobel da Física 2011

*“...for the discovery of the  
accelerated expansion of  
the Universe through  
observations of distant  
supernovae...”*



Photo: Roy Kaltschmidt. Courtesy:  
Lawrence Berkeley National Laboratory

**Saul Perlmutter**



Photo: Belinda Pratten, Australian  
National University

**Brian P. Schmidt**



Photo: Homewood Photography

**Adam G. Riess**

# “Timeline”:

1930

1940

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

2020

2019



© Nobel Media. Photo: A. Mahmoud

**James Peebles**

Prize share: 1/2



© Nobel Media. Photo: A. Mahmoud

**Michel Mayor**

Prize share: 1/4



© Nobel Media. Photo: A. Mahmoud

**Didier Queloz**

Prize share: 1/4

# “Timeline”:

1930

1940

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

2020

2019

## Prémio Nobel da Física 2019

*“...pelas suas  
descobertas teóricas na  
cosmologia física...”*



© Nobel Media. Photo: A. Mahmoud

**James Peebles**

Prize share: 1/2



© Nobel Media. Photo: A. Mahmoud

**Michel Mayor**

Prize share: 1/4



© Nobel Media. Photo: A. Mahmoud

**Didier Queloz**

Prize share: 1/4

# “Timeline”:

1930

1940

1950

1960

1970

1980

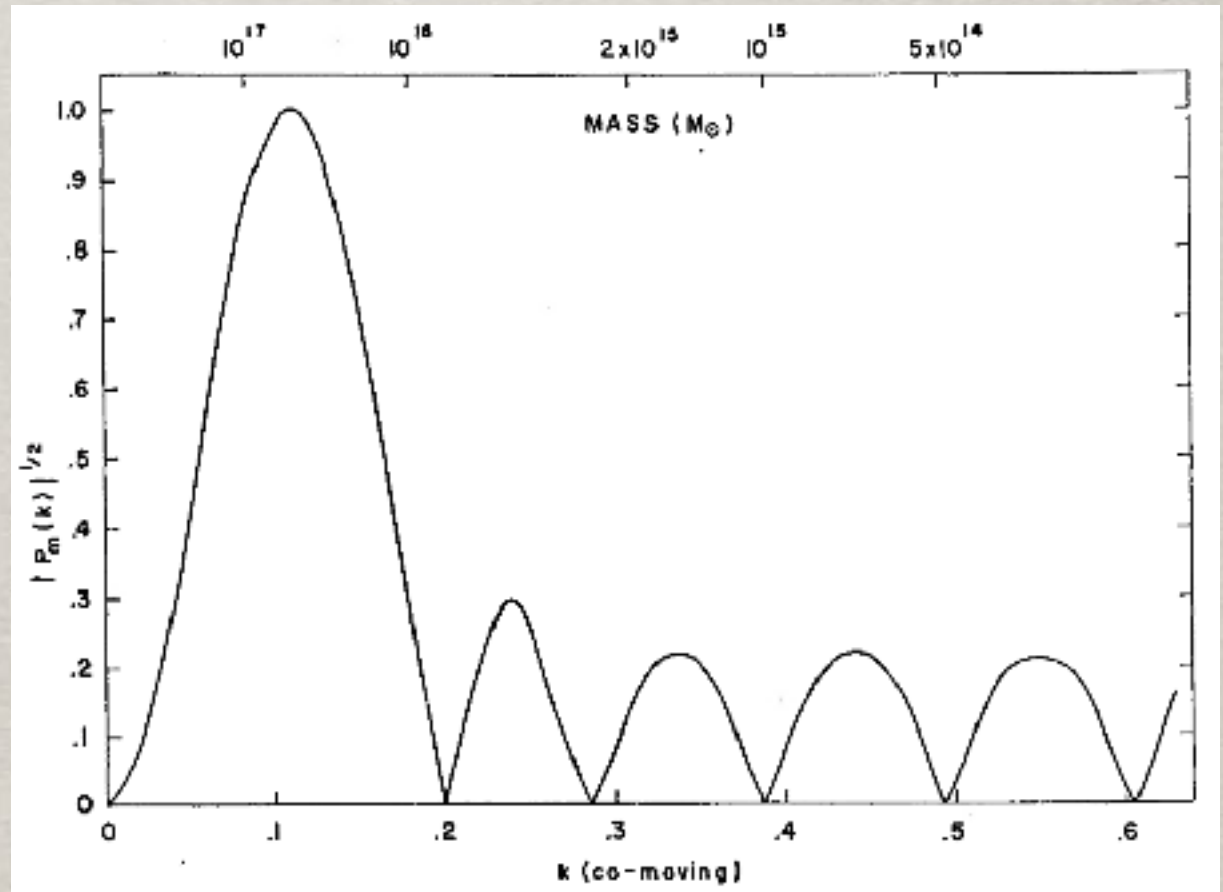
1990

2000

2010

2020

2019



# “Timeline”:

1930

1940

1950

1960

1970

1980

1990

2000

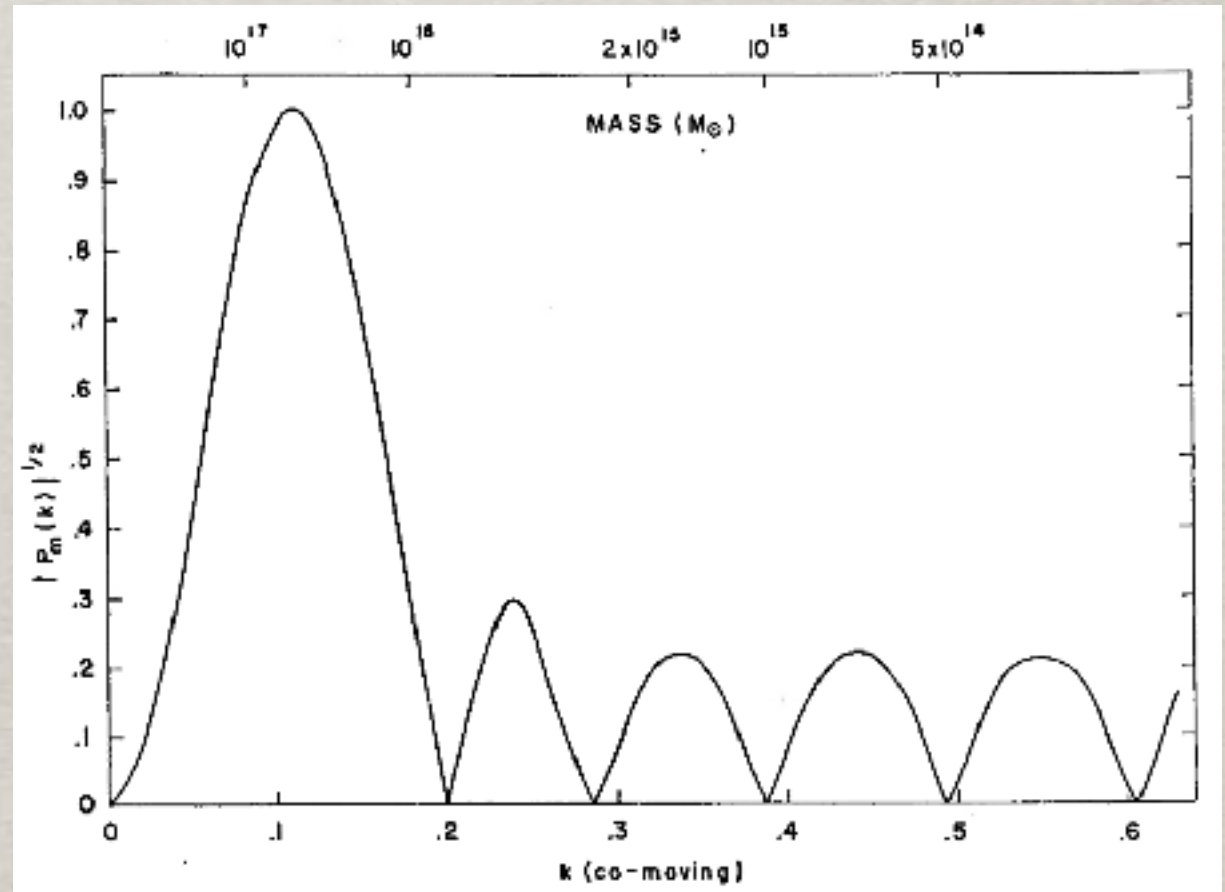
2010

2020

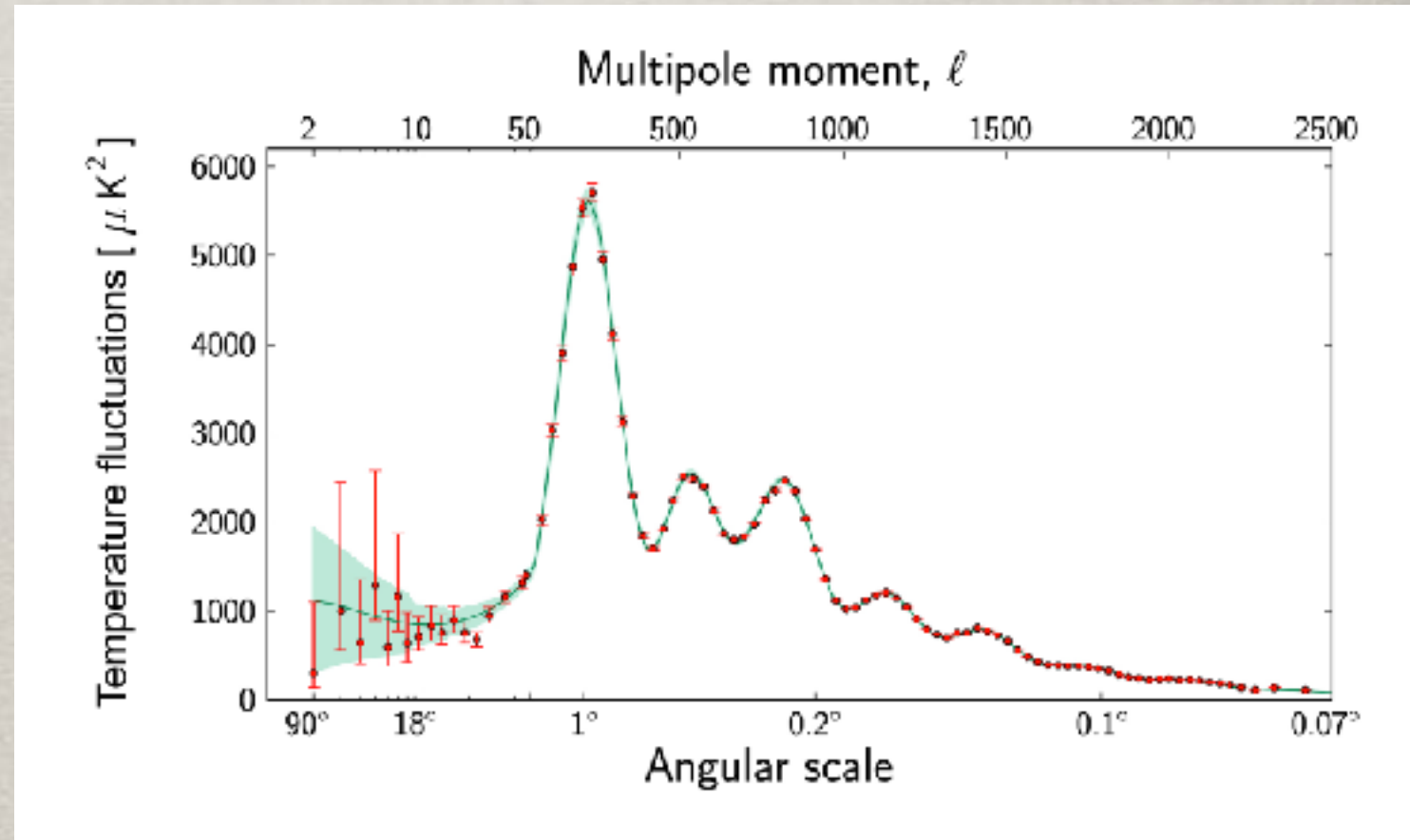
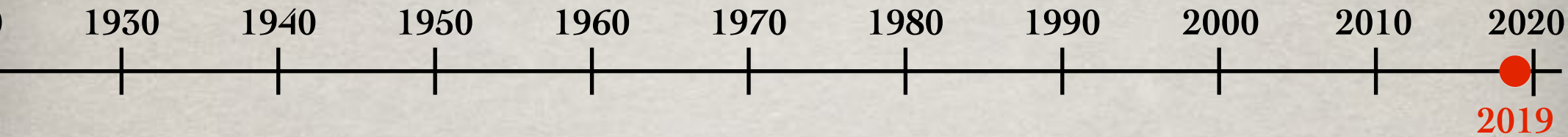
2019

## Prémio Nobel da Física 2019

“...pelas suas  
descobertas teóricas na  
cosmologia física...”



# “Timeline”:



Planck Collaboration, *Planck 2018 results, I. Overview and the cosmological legacy of Planck*, arxiv:1807.06205  
<https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/advanced-physicsprize2019-3.pdf>

C. Herdeiro, *Um prémio Nobel para a Universalidade da Física*, *Gazeta de Física da Sociedade Portuguesa de Física*, 42 (Fascículo 4/5) (2019) pp. 8-11.

# “Timeline”:

1930

1940

1950

1960

1970

1980

1990

2000

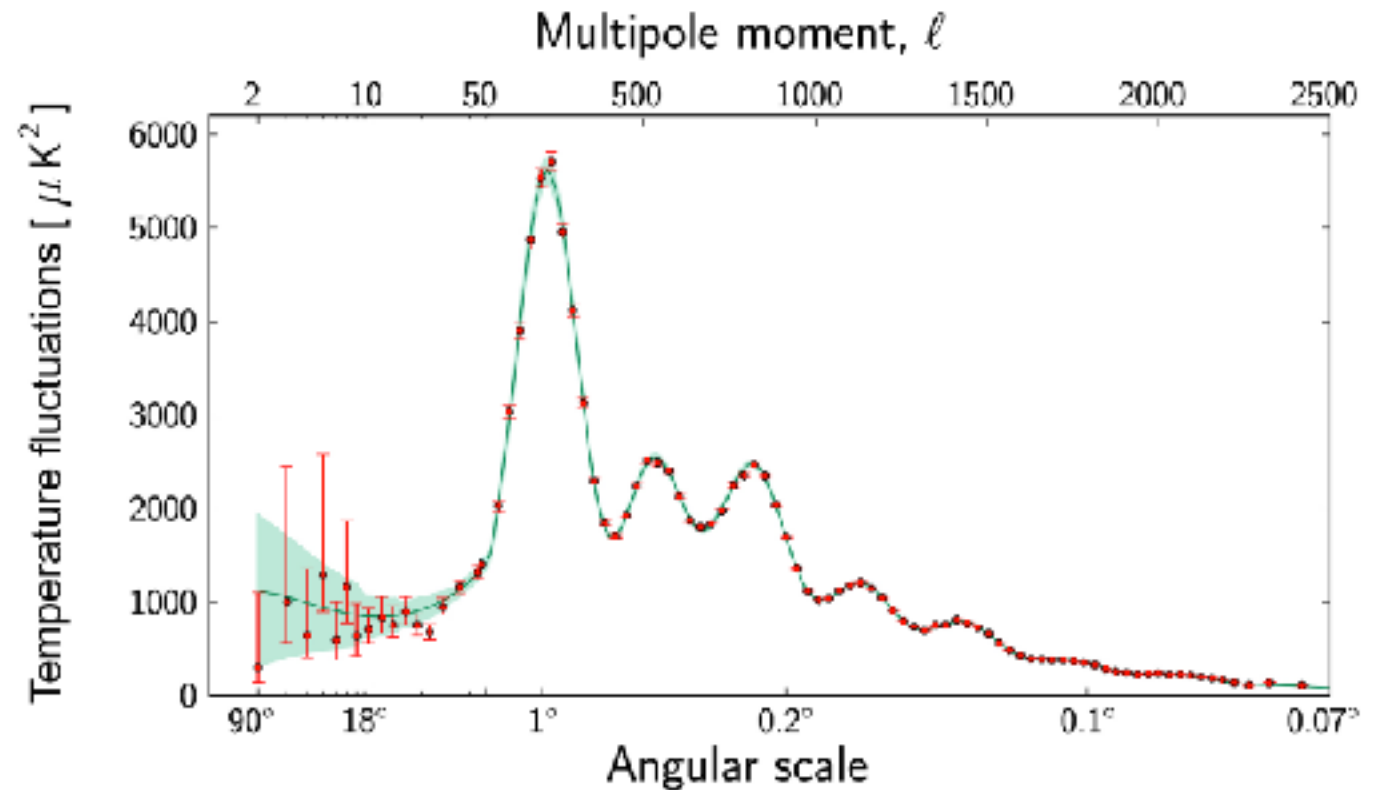
2010

2020

2019

## Prémio Nobel da Física 2019

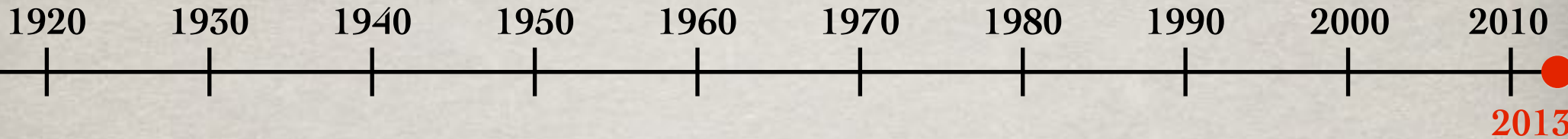
*“...pelas suas  
descobertas teóricas na  
cosmologia física...”*



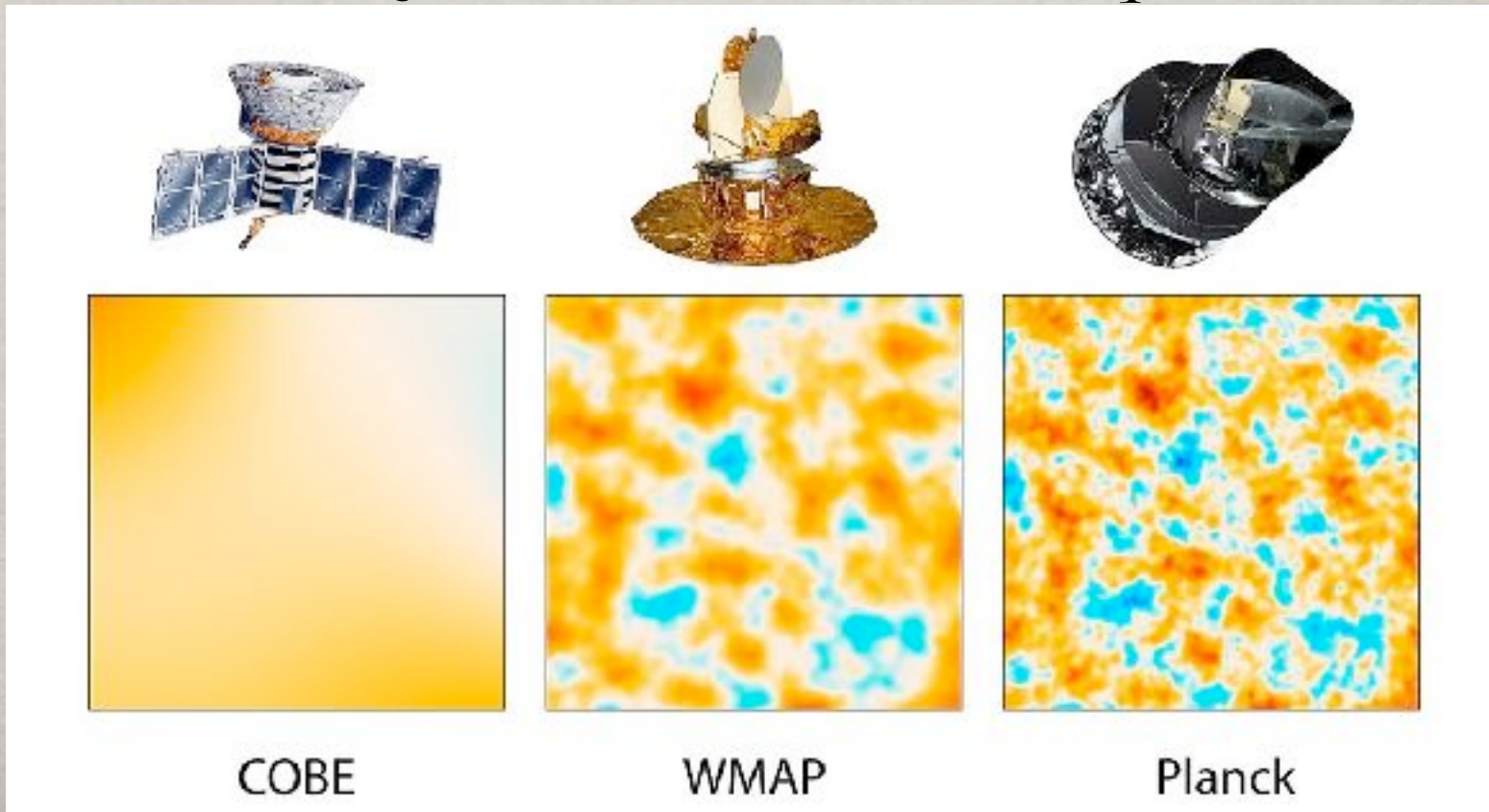
Planck Collaboration, *Planck 2018 results, I. Overview and the cosmological legacy of Planck*, arxiv:1807.06205  
<https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/advanced-physicsprize2019-3.pdf>

C. Herdeiro, *Um prémio Nobel para a Universalidade da Física*, *Gazeta de Física da Sociedade Portuguesa de Física*, 42 (Fascículo 4/5) (2019) pp. 8-11.

## “Timeline”:

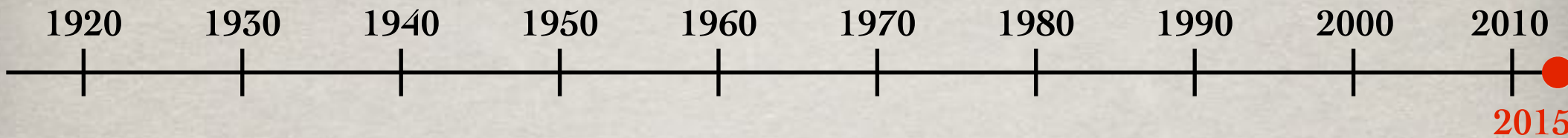


Primeiro anúncio dos resultados cosmológicos do **satélite Planck**, lançado em Maio de 2009. O Planck teve como missão detectar com alta resolução tanto a **intensidade** como a **polarização** das anisotropias primordiais da RCF, com 10 vezes a sensibilidade e 3 vezes a resolução em escalas menores que o WMAP.





## “Timeline”:



Modelo resultante da combinação das observações:

- expansão do Universo (especialmente Supernovas);
- RCF (dados do WMAP e Planck)
- Estrutura de larga escala (Sloane digital Survey)

### Modelo Lambda-CDM

(antes do Planck)

Universo Plano

Idade do Universo:

$13.75 \pm 0.11$  Giga anos

Parâmetro de Hubble:

$70.5 \pm 1.3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

### Modelo Lambda-CDM

(depois do Planck)

Universo Plano

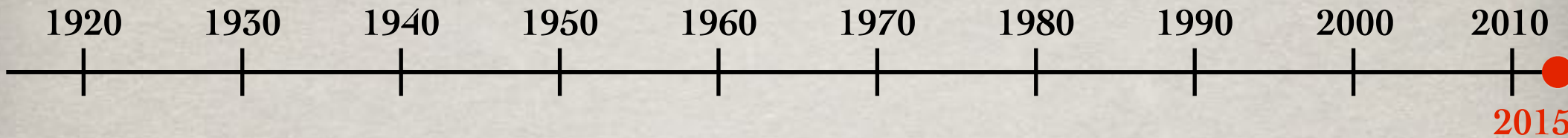
Idade do Universo:

$13.798 \pm 0.037$  Giga anos

Parâmetro de Hubble:

$67.80 \pm 0.77 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

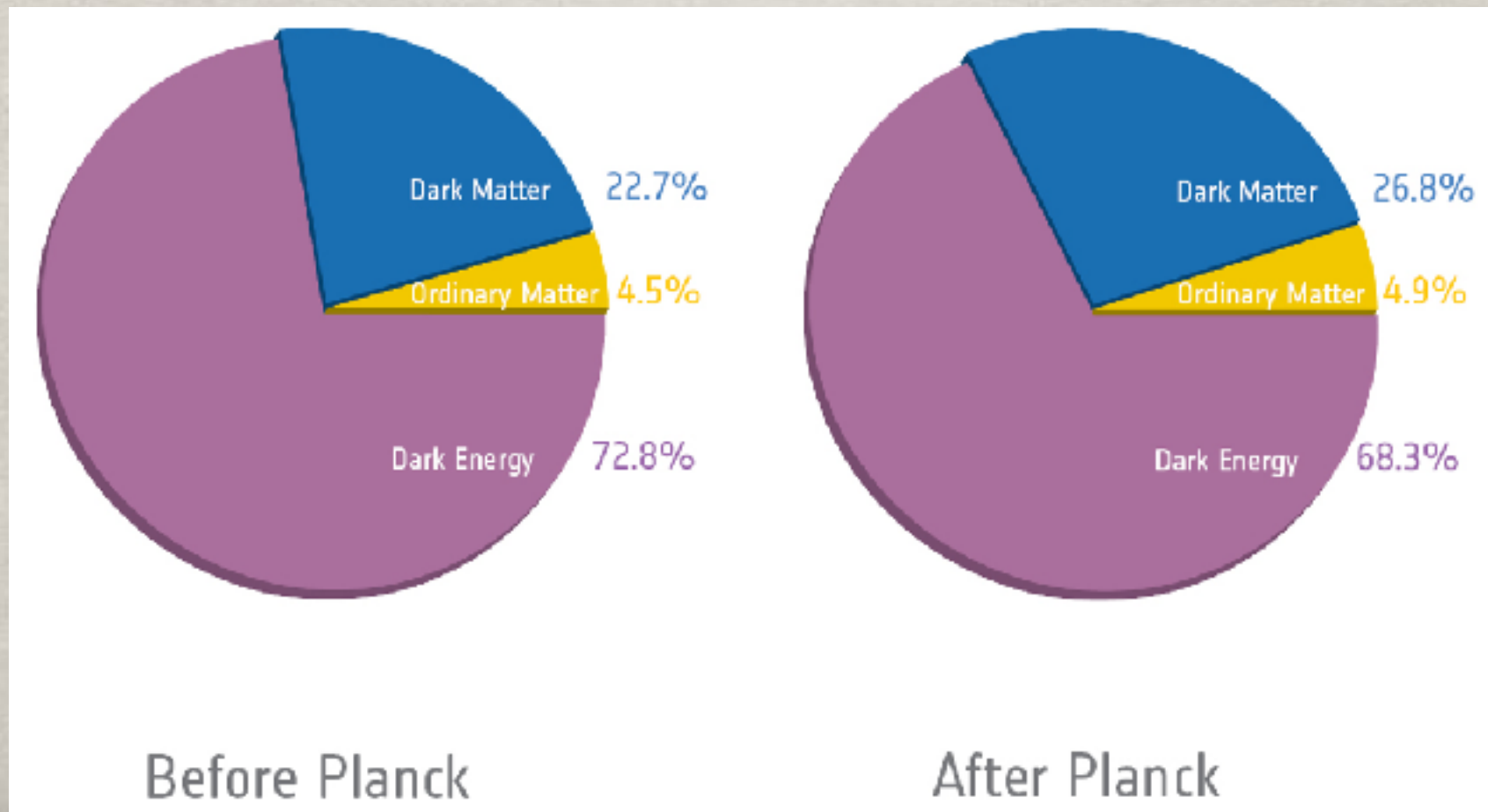
# “Timeline”:



Modelo resultante da combinação das observações:

- expansão do Universo (especialmente Supernovas);
- RCF (dados do WMAP e Planck)
- Estrutura de larga escala (Sloane digital Survey)

Conteúdo do Universo:



# Cosmologia Teórica e Observacional



## Tópicos:

Aula 1 - Introdução e perspectiva histórica (1915-1998)

Aula 2 - Perspectiva histórica (1998-agora) e o modelo cosmológico padrão ( $\Lambda$ -CDM+inflação)

Aula 3 - Cosmologia em Relatividade Geral

# Cosmologia Teórica e Observacional



## Tópicos:

Aula 1 - Introdução e perspectiva histórica (1915-1998)

Aula 2 - Perspectiva histórica (1998-agora) e o modelo cosmológico padrão ( $\Lambda$ -CDM+inflação)

Aula 3 - Cosmologia em Relatividade Geral

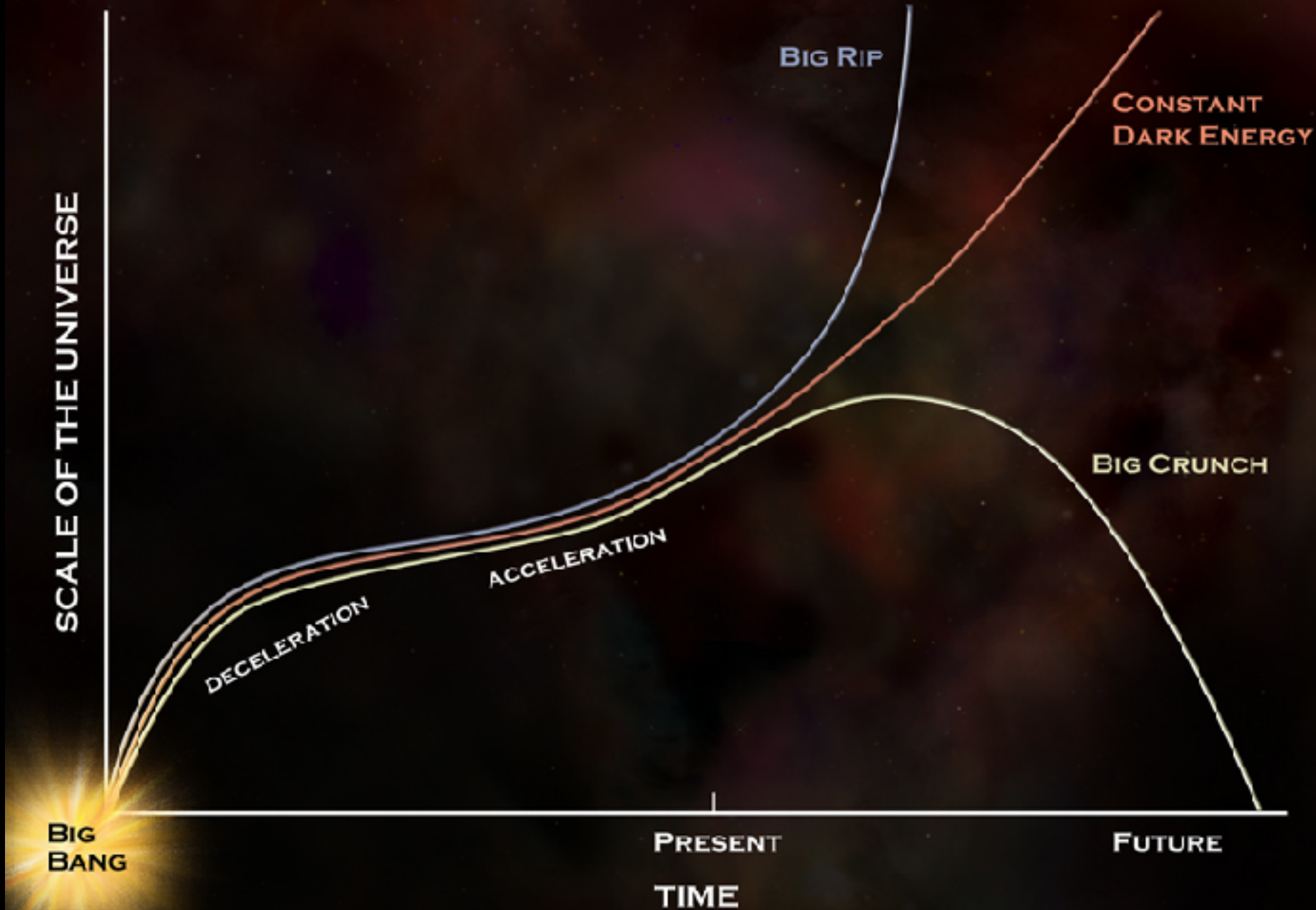
# Aula 3

## Cosmologia em Relatividade Geral

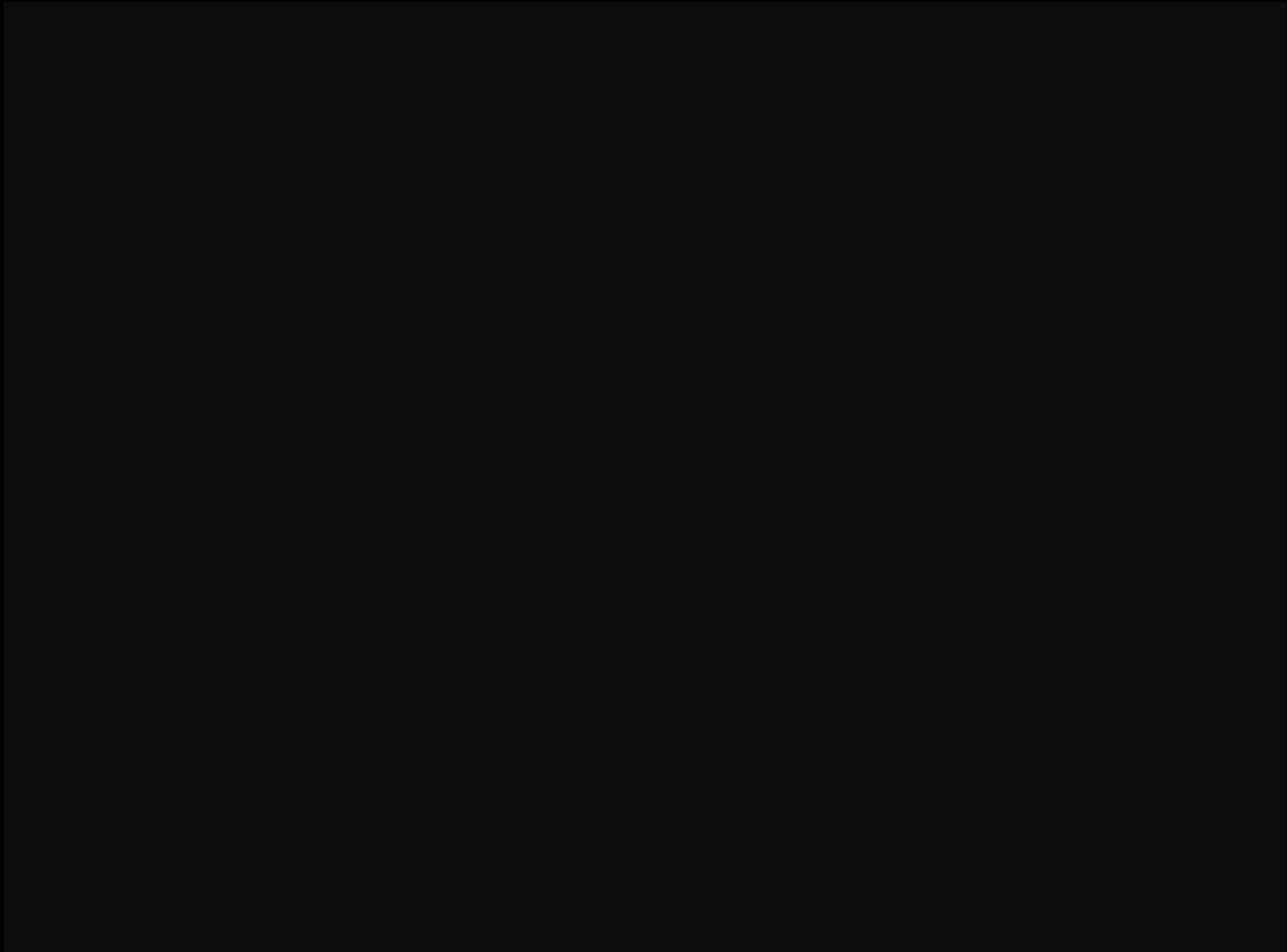
COSMOLOGY MARCHES ON



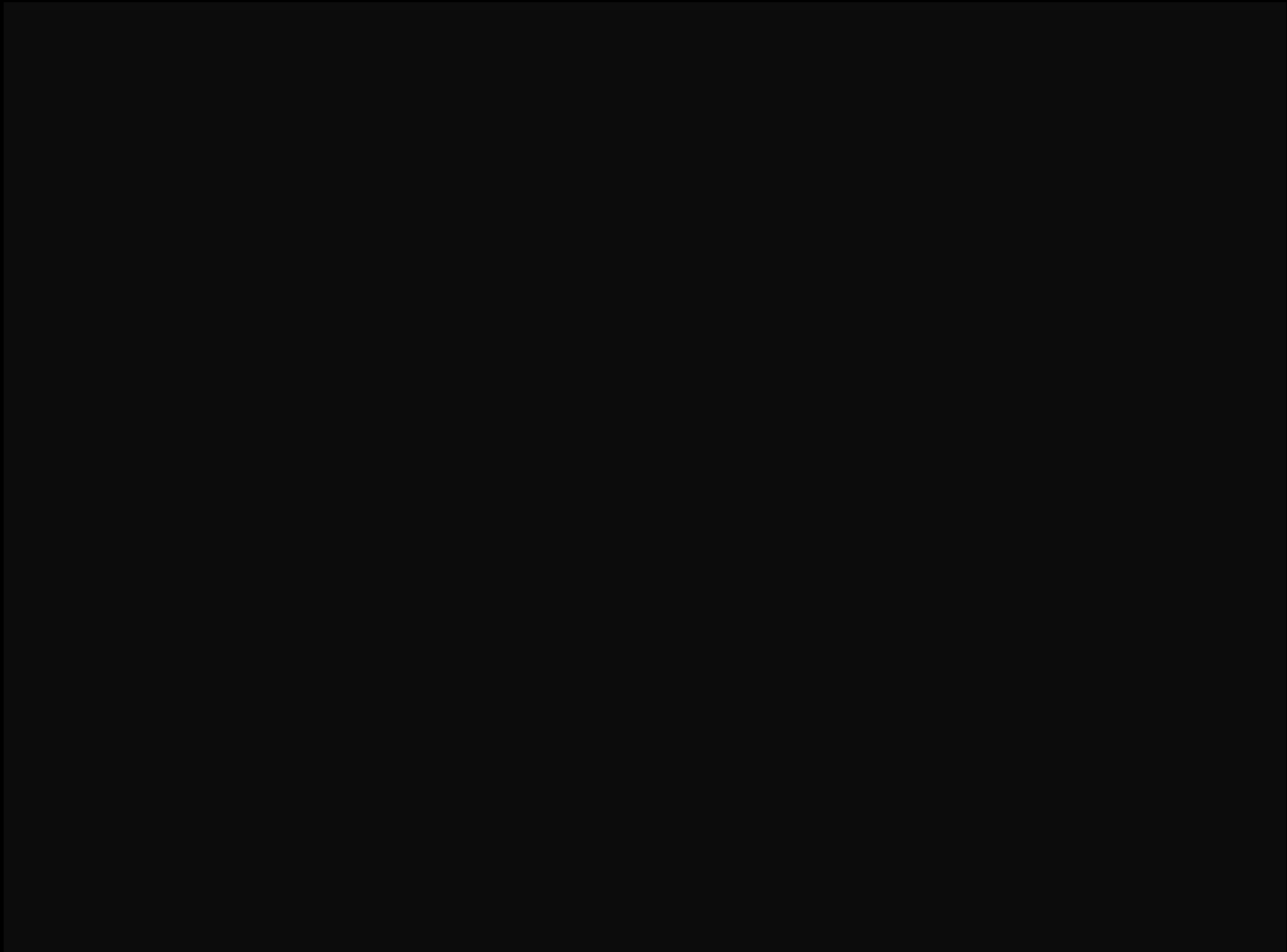
# A evolução do Universo:



O modelo até ao presente:

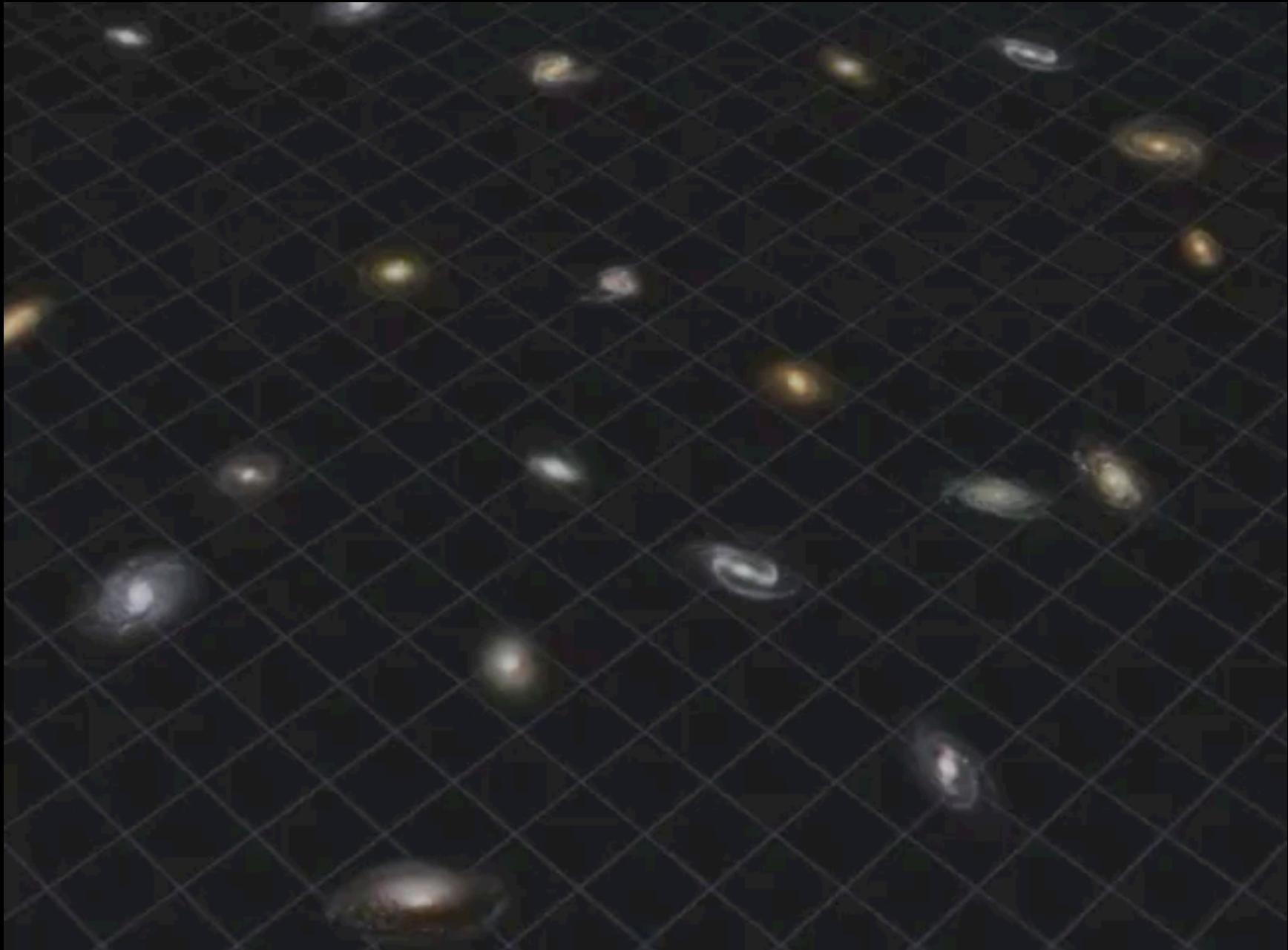


O modelo até ao presente:

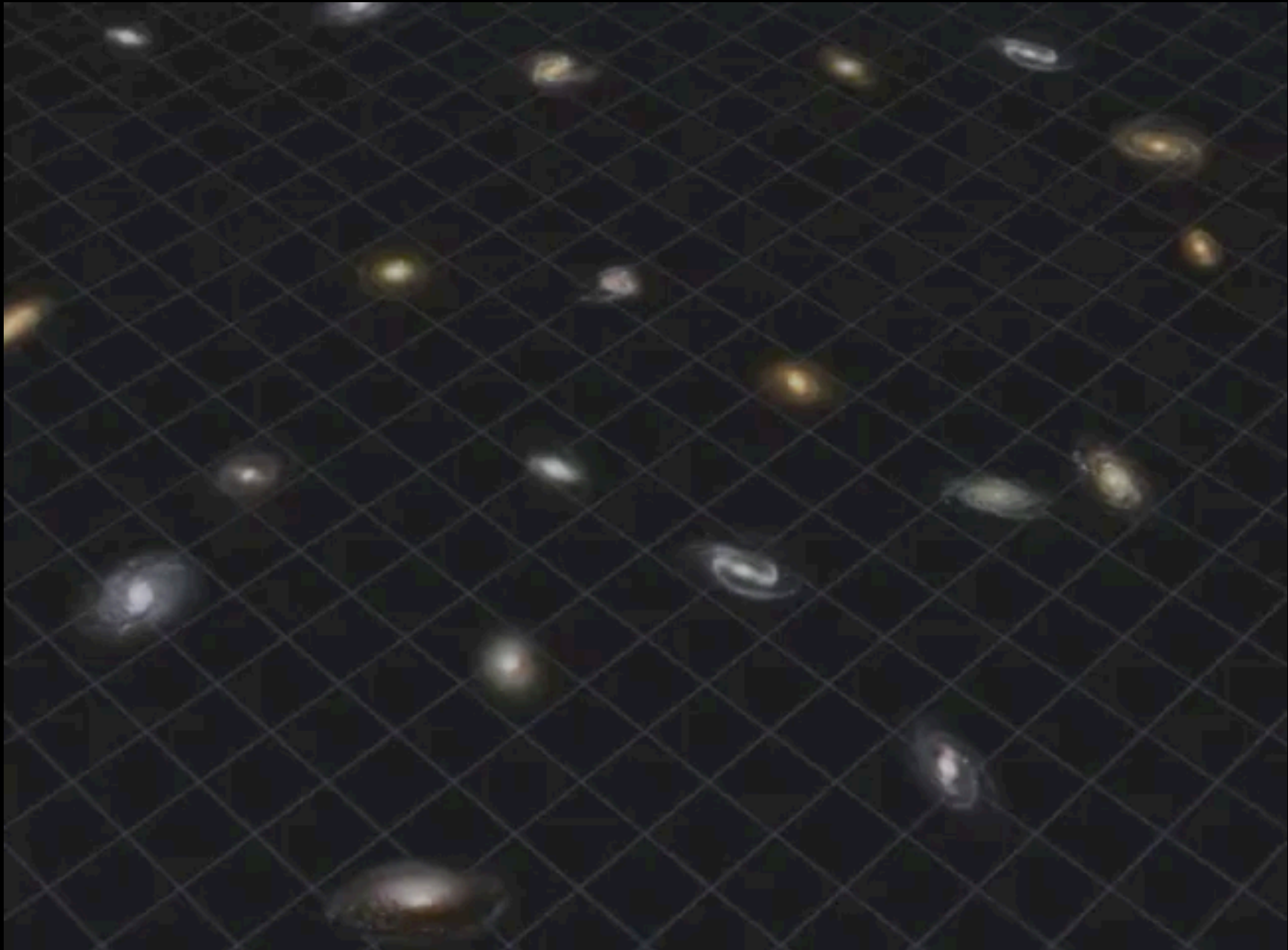




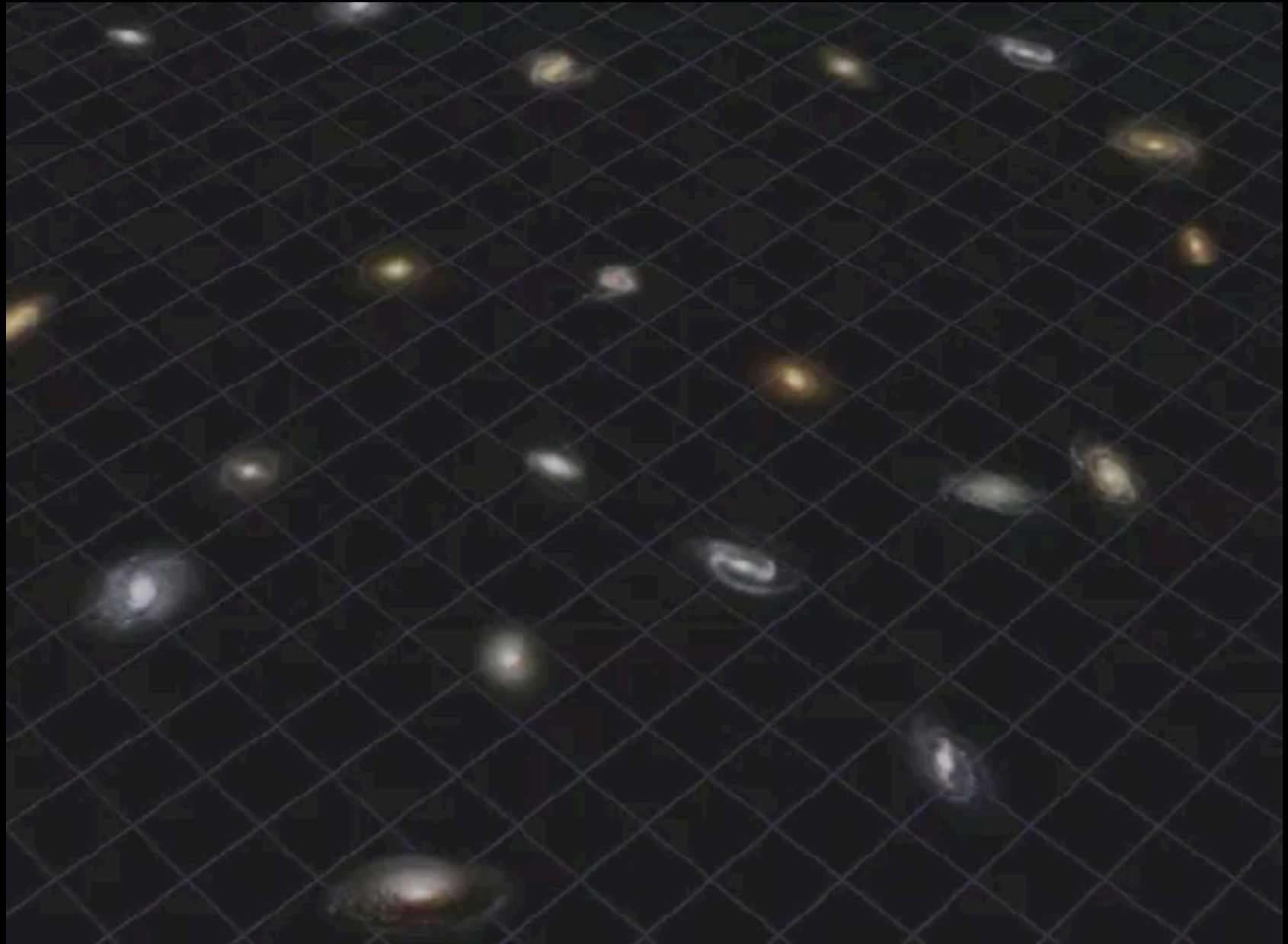
# A expansão super-acelerada e o "Big Rip":



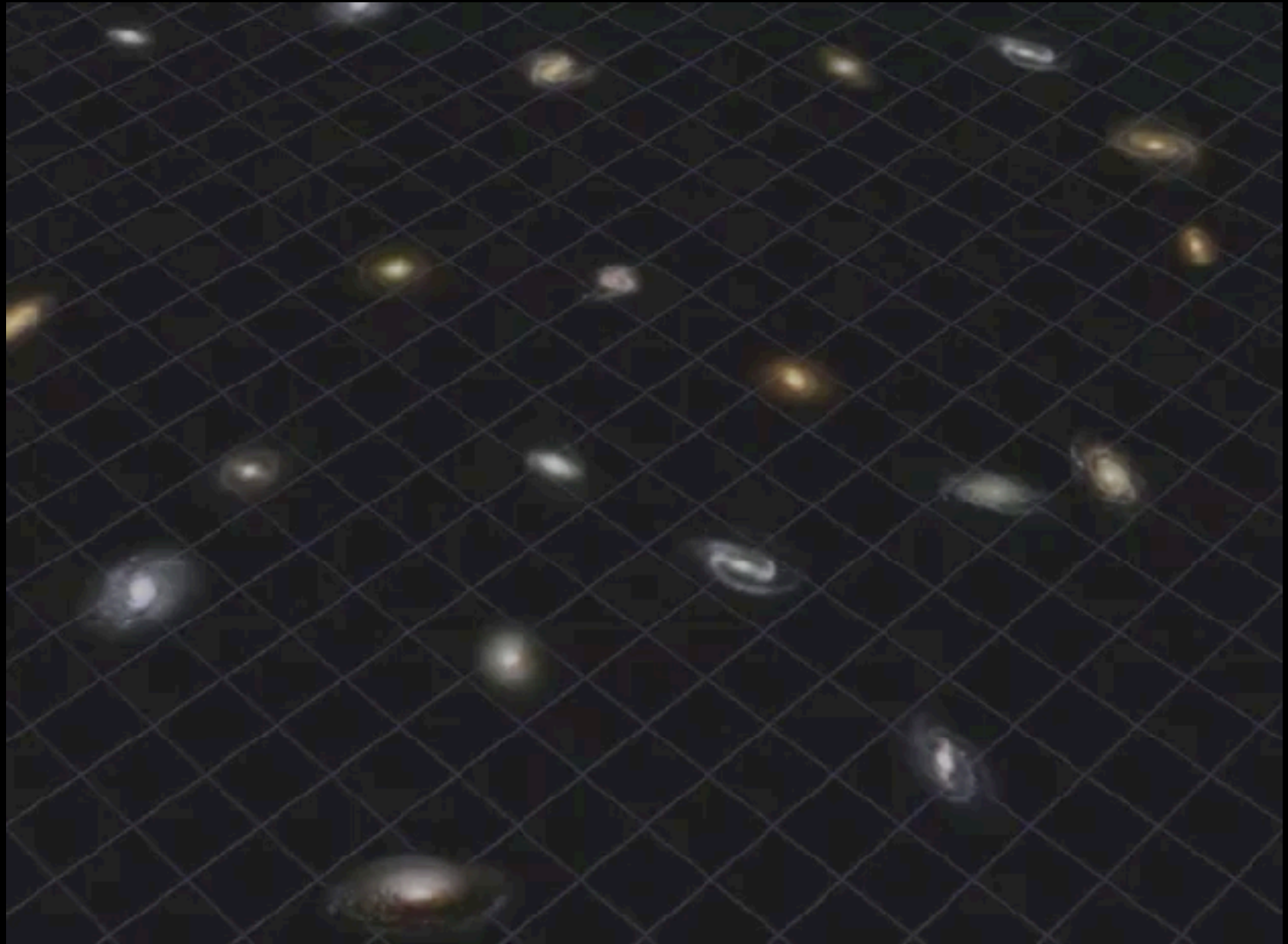
# A expansão super-acelerada e o "Big Rip":



# A desaceleração e o "Big Crunch":



# A desaceleração e o "Big Crunch":



# Formalismo Matemático

O formalismo natural para estudar Cosmologia é a Relatividade Geral, baseada nas equações de Einstein:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

# Formalismo Matemático

O formalismo natural para estudar Cosmologia é a Relatividade Geral, baseada nas equações de Einstein:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

LHS:  $G_{\mu\nu}$  é o tensor de Einstein, construído da métrica  $g_{\mu\nu}$  e suas primeiras e segundas derivadas de um modo não linear;

# Formalismo Matemático

O formalismo natural para estudar Cosmologia é a Relatividade Geral, baseada nas equações de Einstein:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

LHS:  $G_{\mu\nu}$  é o tensor de Einstein, construído da métrica  $g_{\mu\nu}$  e suas primeiras e segundas derivadas de um modo não linear;

$$G_{\mu\nu} \equiv R^{\alpha}_{\mu\alpha\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R^{\alpha}_{\sigma\alpha\tau} g^{\sigma\tau}$$

# Formalismo Matemático

O formalismo natural para estudar Cosmologia é a Relatividade Geral, baseada nas equações de Einstein:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

LHS:  $G_{\mu\nu}$  é o tensor de Einstein, construído da métrica  $g_{\mu\nu}$  e suas primeiras e segundas derivadas de um modo não linear;

$$G_{\mu\nu} \equiv R^{\alpha}_{\mu\alpha\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R^{\alpha}_{\sigma\alpha\tau} g^{\sigma\tau}$$

$R^{\alpha}_{\mu\beta\nu}$  = tensor de Riemann



# Formalismo Matemático

O formalismo natural para estudar Cosmologia é a Relatividade Geral, baseada nas equações de Einstein:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

LHS:  $G_{\mu\nu}$  é o tensor de Einstein, construído da métrica  $g_{\mu\nu}$  e suas primeiras e segundas derivadas de um modo não linear;

$$G_{\mu\nu} \equiv R^{\alpha}_{\mu\alpha\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R^{\alpha}_{\sigma\alpha\tau} g^{\sigma\tau}$$

$R^{\alpha}_{\mu\beta\nu}$  = tensor de Riemann

$R^{\alpha}_{\mu\alpha\nu} \equiv R_{\mu\nu}$  = tensor de Ricci

# Formalismo Matemático

O formalismo natural para estudar Cosmologia é a Relatividade Geral, baseada nas equações de Einstein:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

LHS:  $G_{\mu\nu}$  é o tensor de Einstein, construído da métrica  $g_{\mu\nu}$  e suas primeiras e segundas derivadas de um modo não linear;

$$G_{\mu\nu} \equiv R^{\alpha}_{\mu\alpha\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R^{\alpha}_{\sigma\alpha\tau} g^{\sigma\tau}$$

$R^{\alpha}_{\mu\beta\nu}$  = tensor de Riemann

$R^{\alpha}_{\mu\alpha\nu} \equiv R_{\mu\nu}$  = tensor de Ricci

$R^{\alpha}_{\mu\alpha\nu} g^{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} g^{\mu\nu} \equiv R$  = escalar de Ricci

Riemann apresentou a sua teoria geométrica de espaços no ano seguinte, 1854, na cidade alemã de Gotinga (*Göttingen*), com o título “*Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*”, (“Sobre as hipóteses que fundamentam a geometria”).

Riemann apresentou a sua teoria geométrica de espaços no ano seguinte, 1854, na cidade alemã de Gotinga (*Göttingen*), com o título “*Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*”, (“Sobre as hipóteses que fundamentam a geometria”).

O objeto fundamental é chamado de tensor de curvatura de Riemann.

$$R(X, Y, Z) = \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z$$

Riemann apresentou a sua teoria geométrica de espaços no ano seguinte, 1854, na cidade alemã de Gotinga (*Göttingen*), com o título “*Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*”, (“Sobre as hipóteses que fundamentam a geometria”).

O objeto fundamental é chamado de tensor de curvatura de Riemann.

$$R(X, Y, Z) = \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z$$

Ideia intuitiva.

Riemann apresentou a sua teoria geométrica de espaços no ano seguinte, 1854, na cidade alemã de Gotinga (*Göttingen*), com o título “*Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*”, (“Sobre as hipóteses que fundamentam a geometria”).

O objeto fundamental é chamado de tensor de curvatura de Riemann.

$$R(X, Y, Z) = \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z$$

Ideia intuitiva.

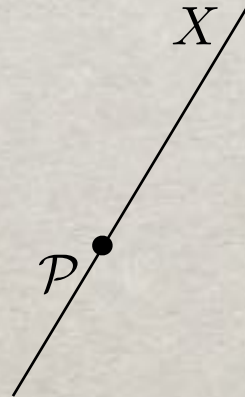
$\mathcal{P}^\bullet$

Riemann apresentou a sua teoria geométrica de espaços no ano seguinte, 1854, na cidade alemã de Gotinga (*Göttingen*), com o título “*Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*”, (“Sobre as hipóteses que fundamentam a geometria”).

O objeto fundamental é chamado de tensor de curvatura de Riemann.

$$R(X, Y, Z) = \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z$$

Ideia intuitiva.

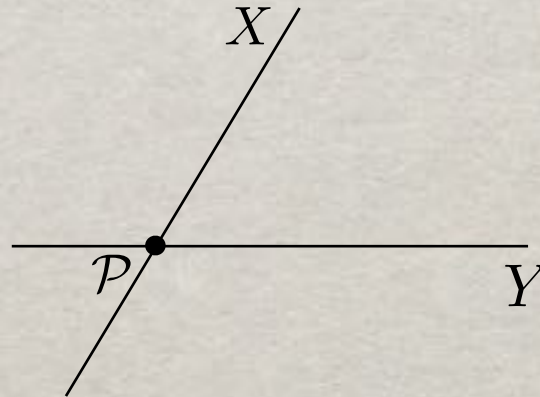


Riemann apresentou a sua teoria geométrica de espaços no ano seguinte, 1854, na cidade alemã de Gotinga (*Göttingen*), com o título “*Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*”, (“Sobre as hipóteses que fundamentam a geometria”).

O objeto fundamental é chamado de tensor de curvatura de Riemann.

$$R(X, Y, Z) = \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z$$

Ideia intuitiva.



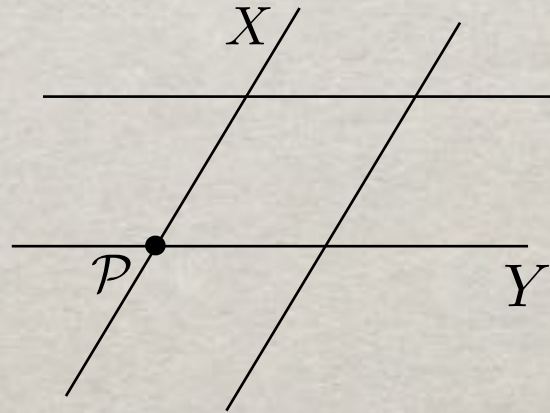


Riemann apresentou a sua teoria geométrica de espaços no ano seguinte, 1854, na cidade alemã de Gotinga (*Göttingen*), com o título “*Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*”, (“Sobre as hipóteses que fundamentam a geometria”).

O objeto fundamental é chamado de tensor de curvatura de Riemann.

$$R(X, Y, Z) = \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z$$

Ideia intuitiva.

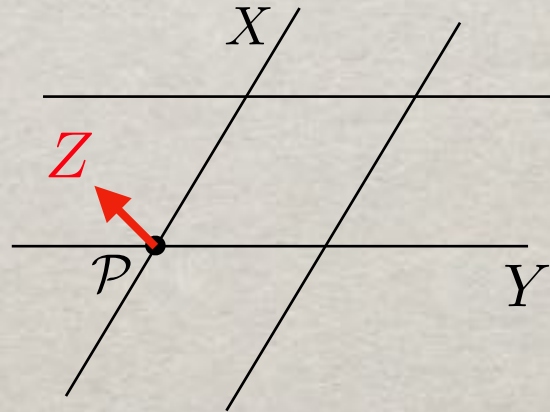


Riemann apresentou a sua teoria geométrica de espaços no ano seguinte, 1854, na cidade alemã de Gotinga (*Göttingen*), com o título “*Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*”, (“Sobre as hipóteses que fundamentam a geometria”).

O objeto fundamental é chamado de tensor de curvatura de Riemann.

$$R(X, Y, Z) = \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z$$

Ideia intuitiva.

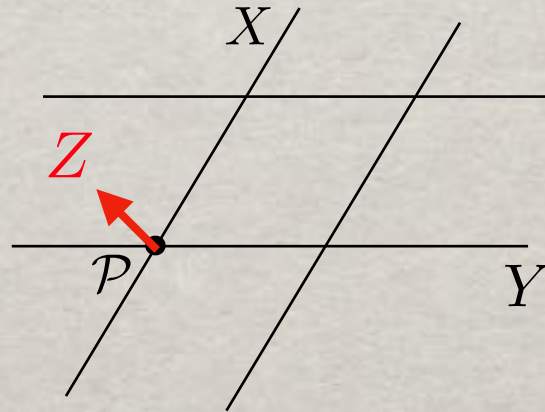


Riemann apresentou a sua teoria geométrica de espaços no ano seguinte, 1854, na cidade alemã de Gotinga (*Göttingen*), com o título “*Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*”, (“Sobre as hipóteses que fundamentam a geometria”).

O objeto fundamental é chamado de tensor de curvatura de Riemann.

$$R(X, Y, Z) = \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z$$

Ideia intuitiva.



Riemann apresentou a sua teoria geométrica de espaços no ano seguinte, 1854, na cidade alemã de Gotinga (*Göttingen*), com o título “*Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*”, (“Sobre as hipóteses que fundamentam a geometria”).

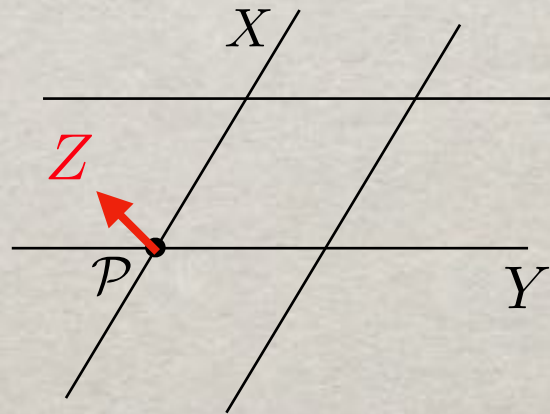
O objeto fundamental é chamado de tensor de curvatura de Riemann.

$$R(X, Y, Z) = \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z$$

Ideia intuitiva.

No espaço Euclideano:

$$Z(\text{final}) = Z(\text{inicial})$$

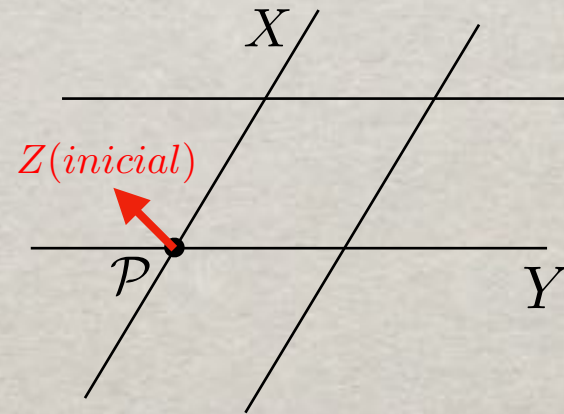


Riemann apresentou a sua teoria geométrica de espaços no ano seguinte, 1854, na cidade alemã de Gotinga (*Göttingen*), com o título “*Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*”, (“Sobre as hipóteses que fundamentam a geometria”).

O objeto fundamental é chamado de tensor de curvatura de Riemann.

$$R(X, Y, Z) = \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z$$

Ideia intuitiva.



No espaço **não**-Euclideano:

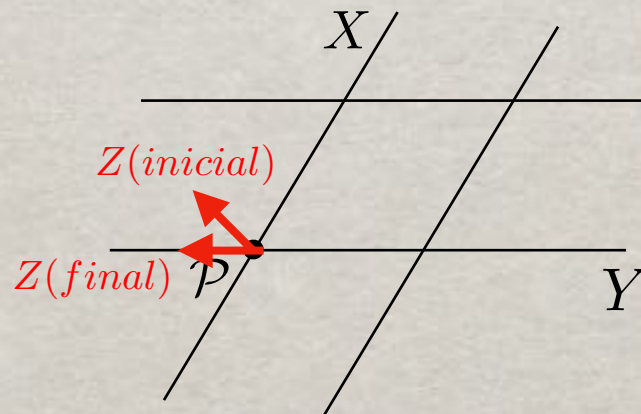
$$Z(\text{final}) \neq Z(\text{inicial})$$

Riemann apresentou a sua teoria geométrica de espaços no ano seguinte, 1854, na cidade alemã de Gotinga (*Göttingen*), com o título “*Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*”, (“Sobre as hipóteses que fundamentam a geometria”).

O objeto fundamental é chamado de tensor de curvatura de Riemann.

$$R(X, Y, Z) = \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z$$

Ideia intuitiva.



No espaço **não**-Euclideano:

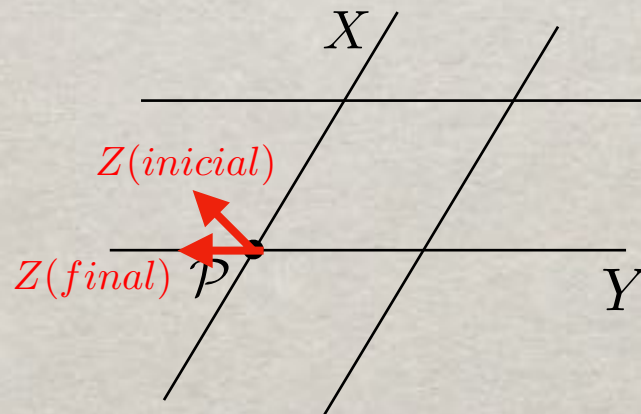
$$Z(\text{final}) \neq Z(\text{inicial})$$

Riemann apresentou a sua teoria geométrica de espaços no ano seguinte, 1854, na cidade alemã de Gotinga (*Göttingen*), com o título “*Ueber die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen*”, (“Sobre as hipóteses que fundamentam a geometria”).

O objeto fundamental é chamado de tensor de curvatura de Riemann.

$$R(X, Y, Z) = \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z$$

Ideia intuitiva.



No espaço **não**-Euclideano:

$$Z(\text{final}) \neq Z(\text{inicial})$$

O tensor de Riemann mede esta diferença, de facto a não-integrabilidade do transporte paralelo.

# A curvatura de Riemann e o desvio geodésico





# A curvatura de Riemann e o desvio geodésico

Espaço Euclidiano:



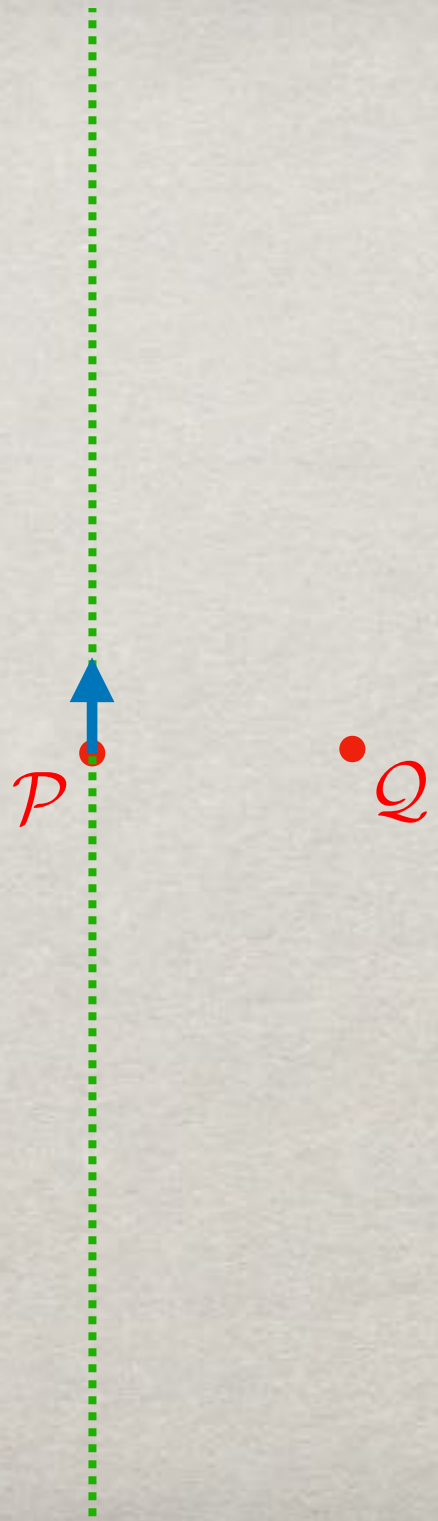
# A curvatura de Riemann e o desvio geodésico

Espaço Euclidiano:



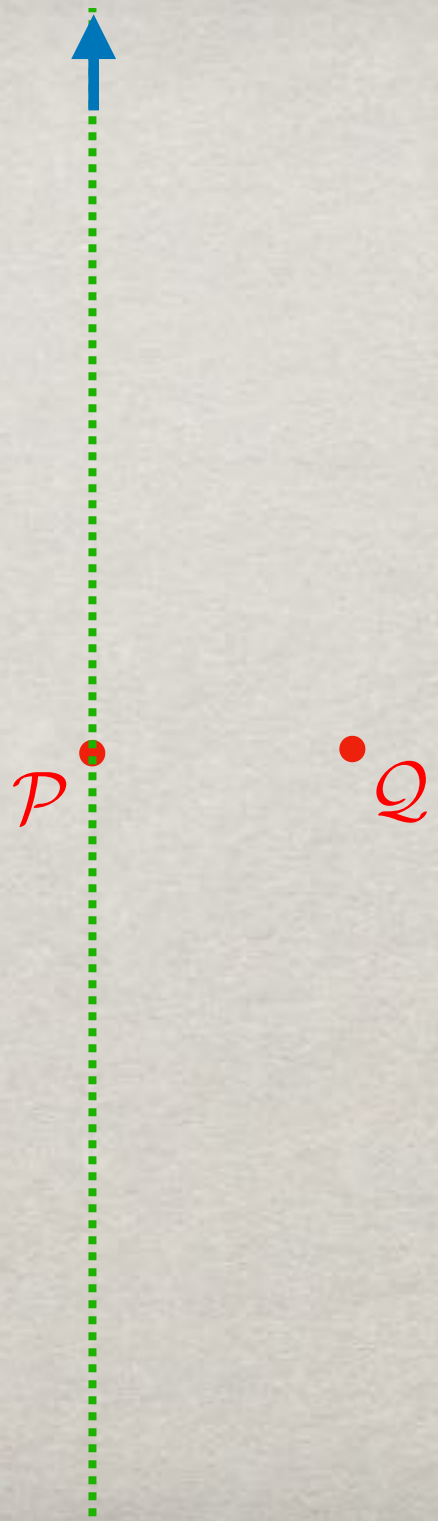
# A curvatura de Riemann e o desvio geodésico

Espaço Euclidiano:



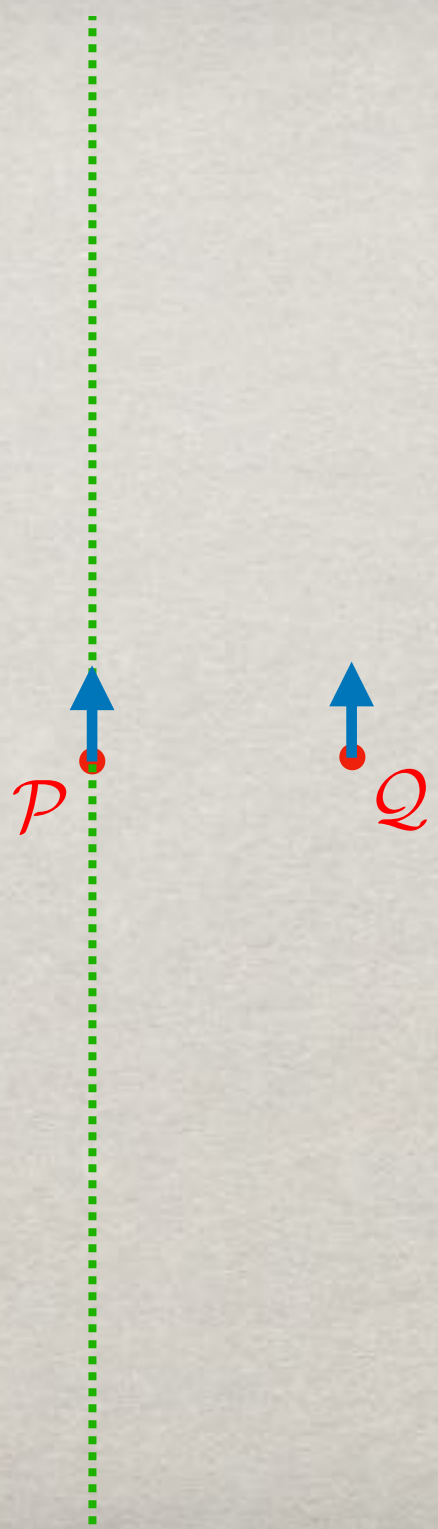
# A curvatura de Riemann e o desvio geodésico

Espaço Euclidiano:



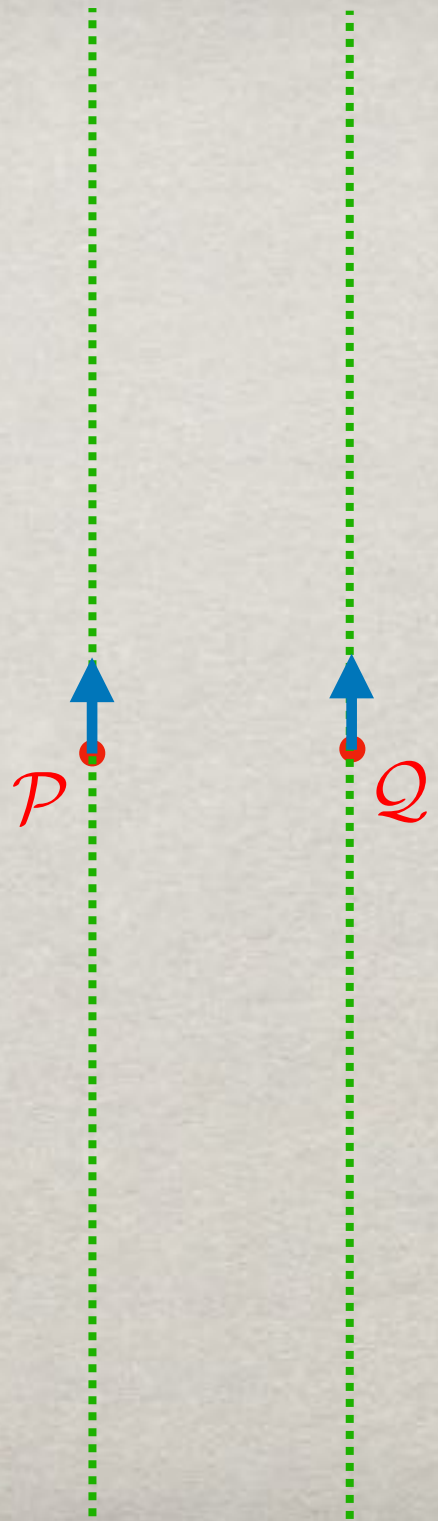
# A curvatura de Riemann e o desvio geodésico

Espaço Euclidiano:



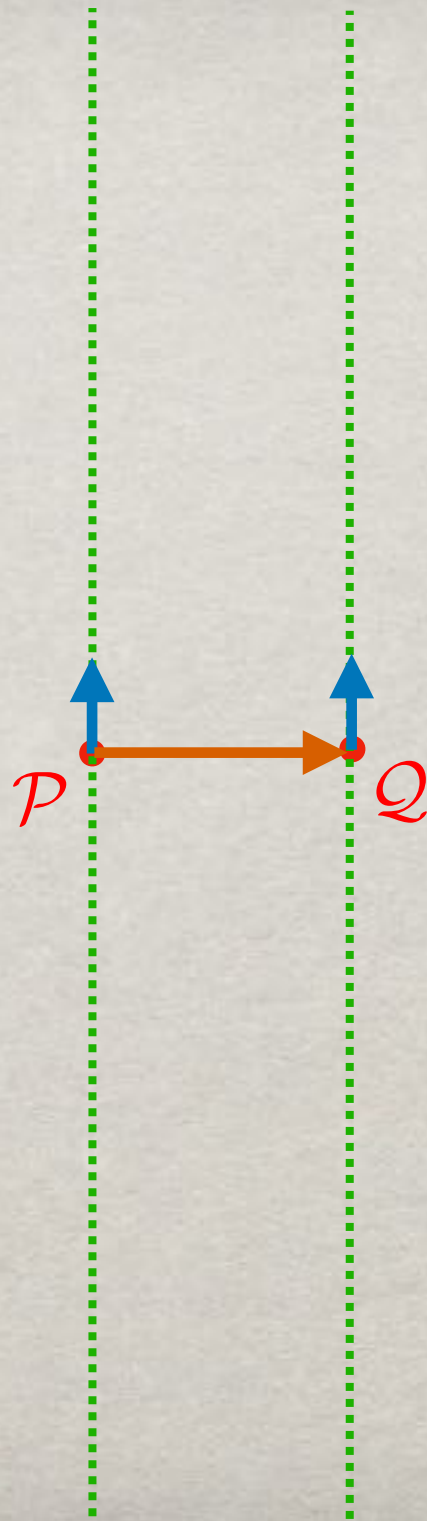
# A curvatura de Riemann e o desvio geodésico

Espaço Euclidiano:



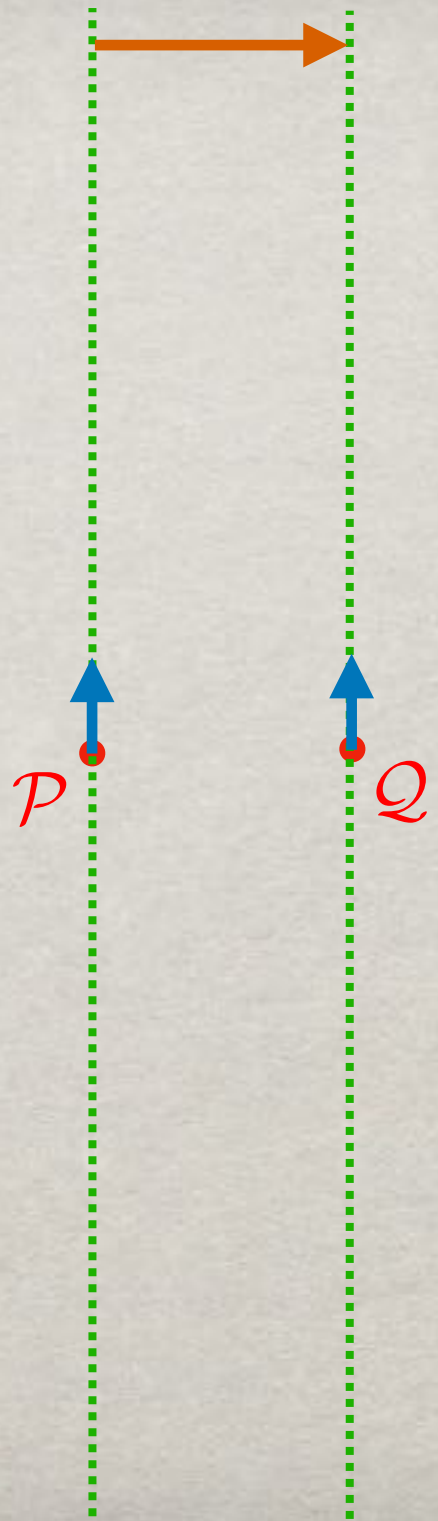
# A curvatura de Riemann e o desvio geodésico

Espaço Euclidiano:



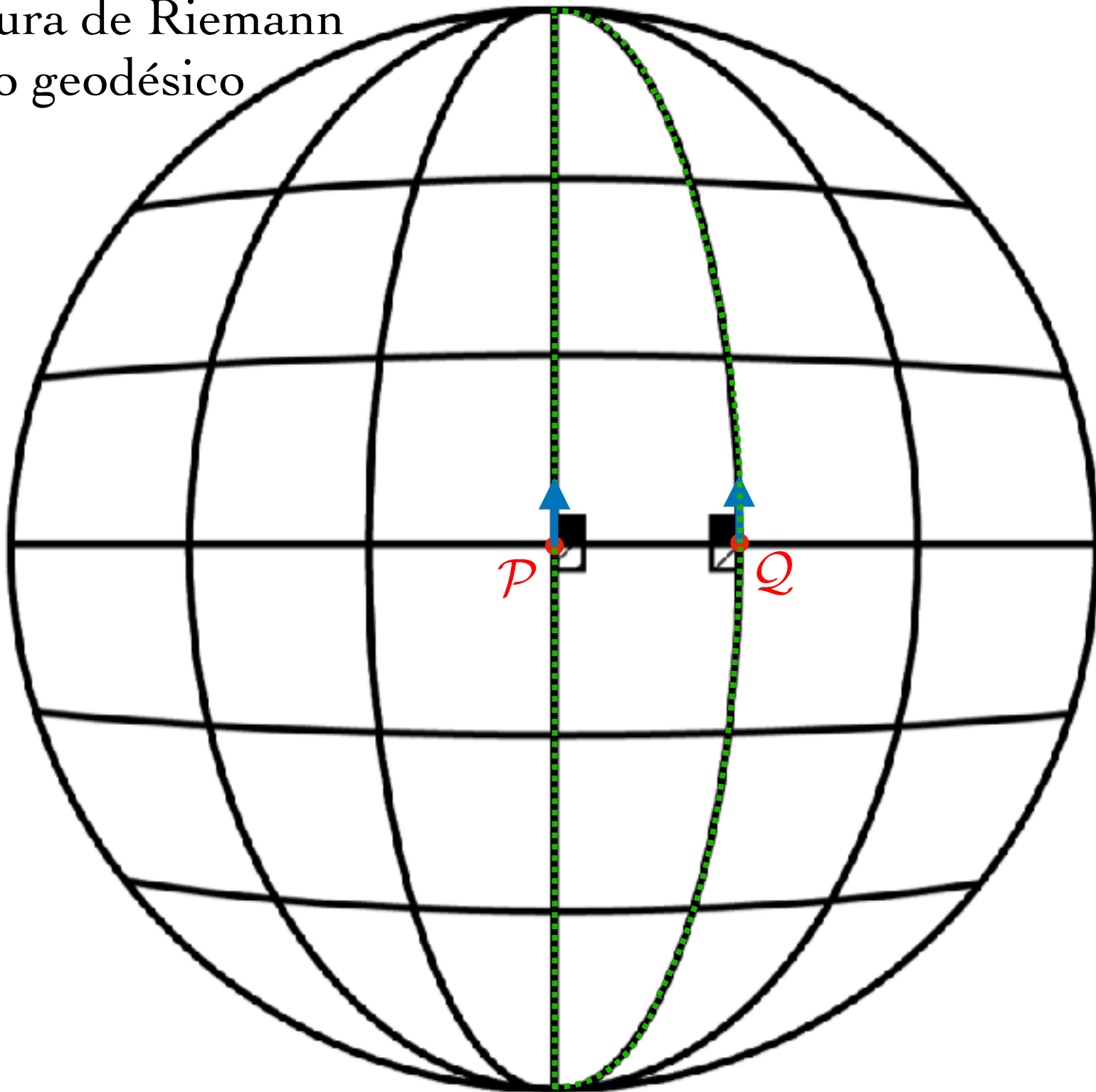
# A curvatura de Riemann e o desvio geodésico

Espaço Euclidiano:

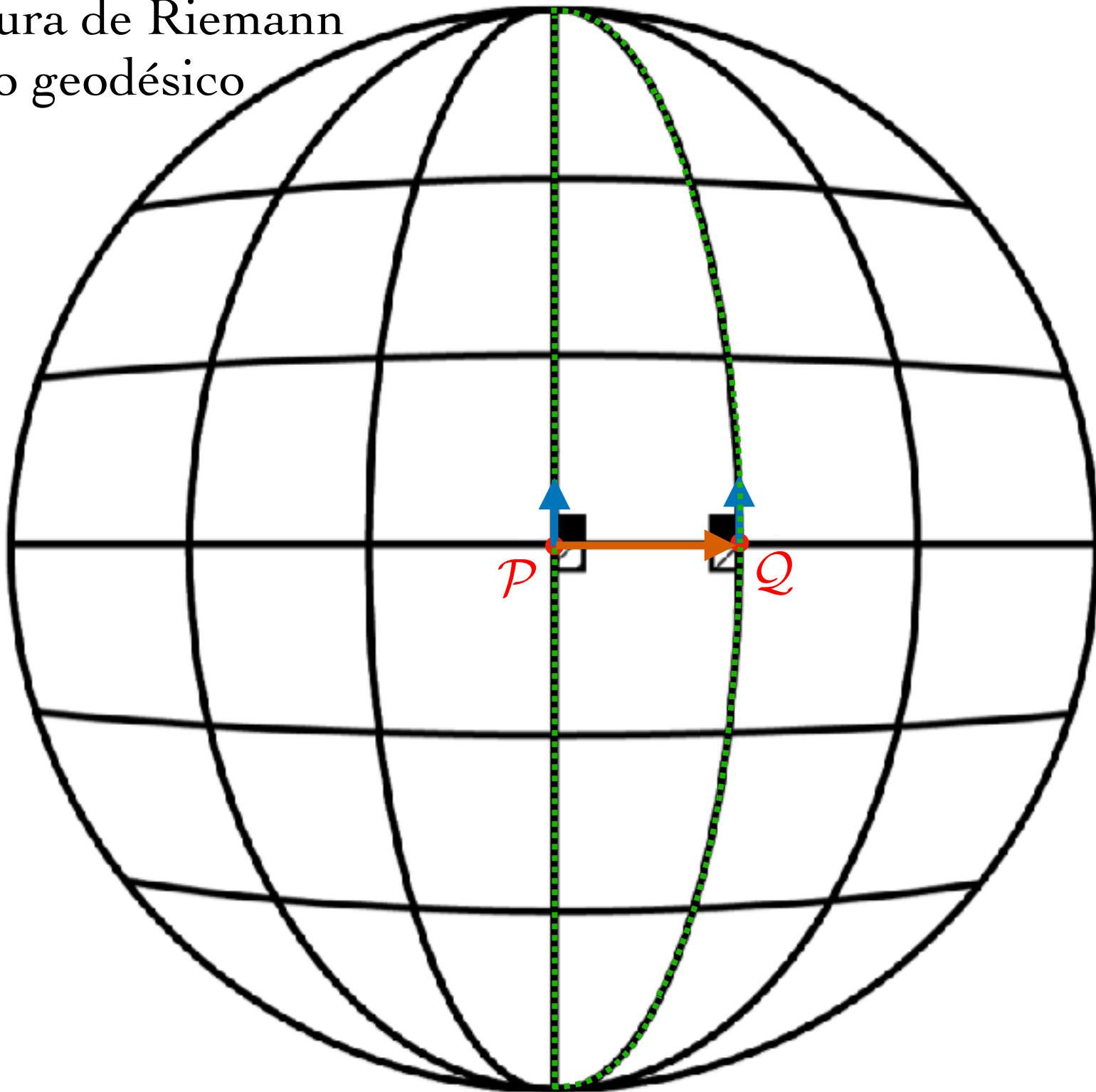




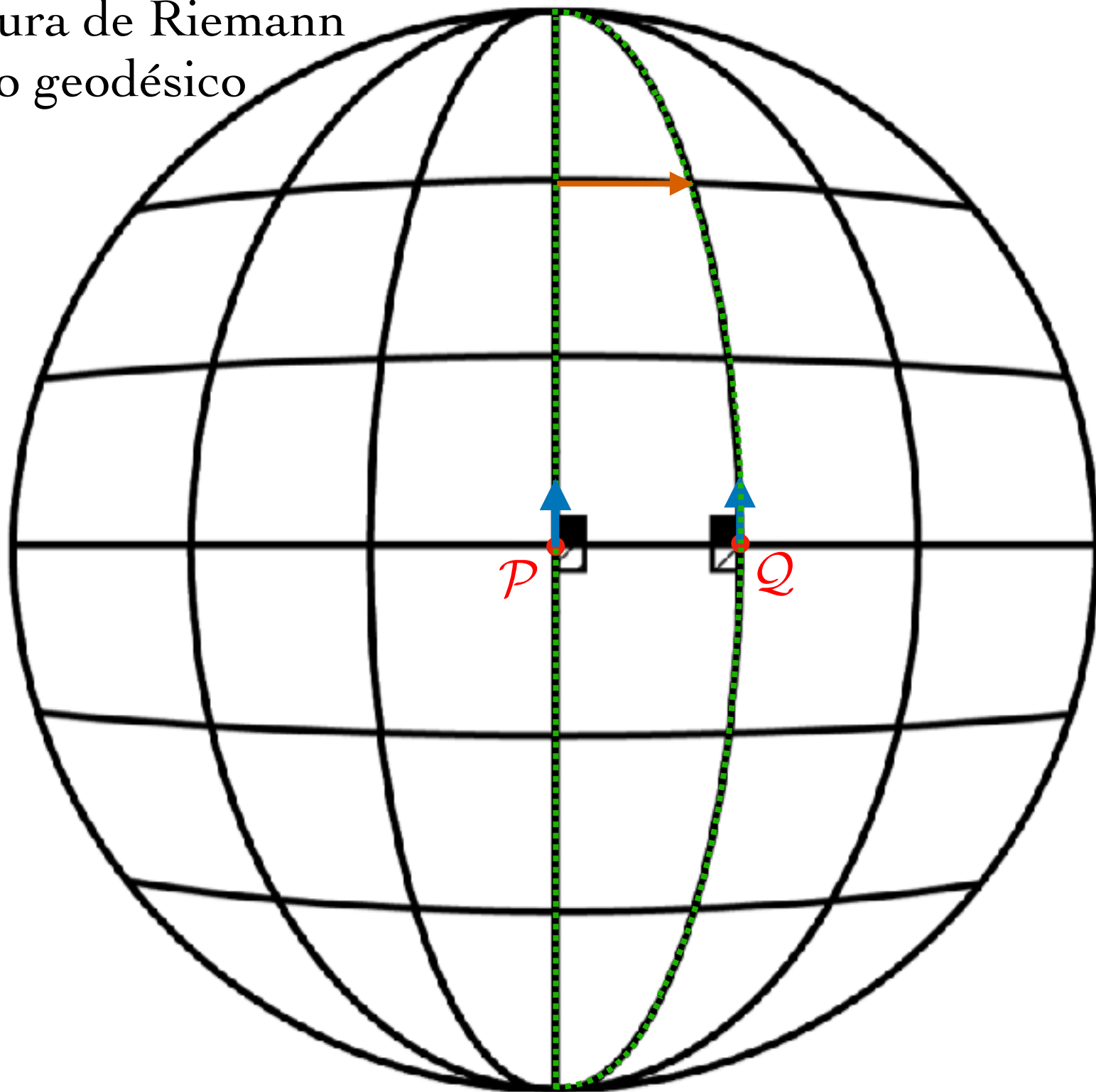
A curvatura de Riemann  
e o desvio geodésico



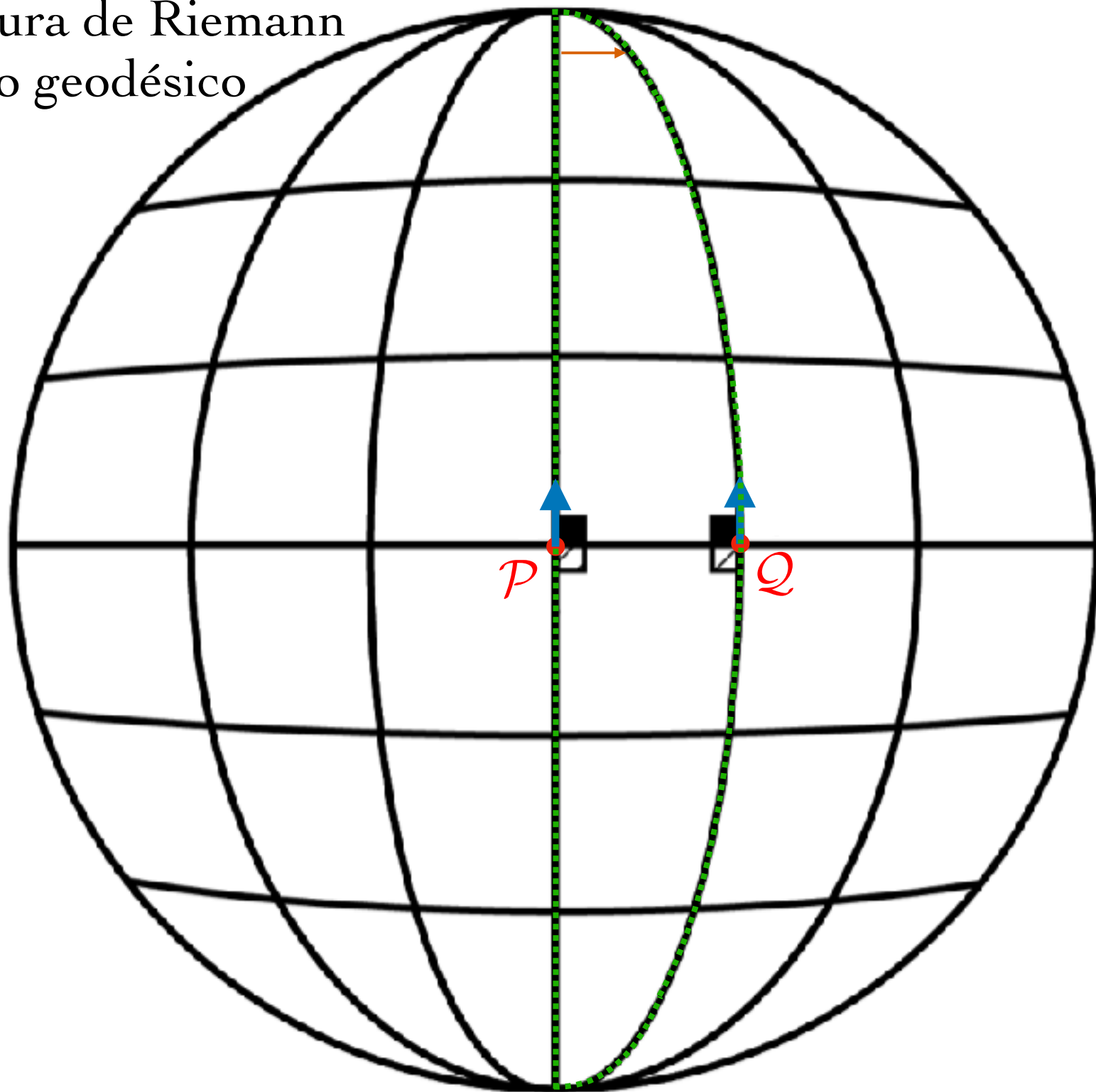
A curvatura de Riemann  
e o desvio geodésico



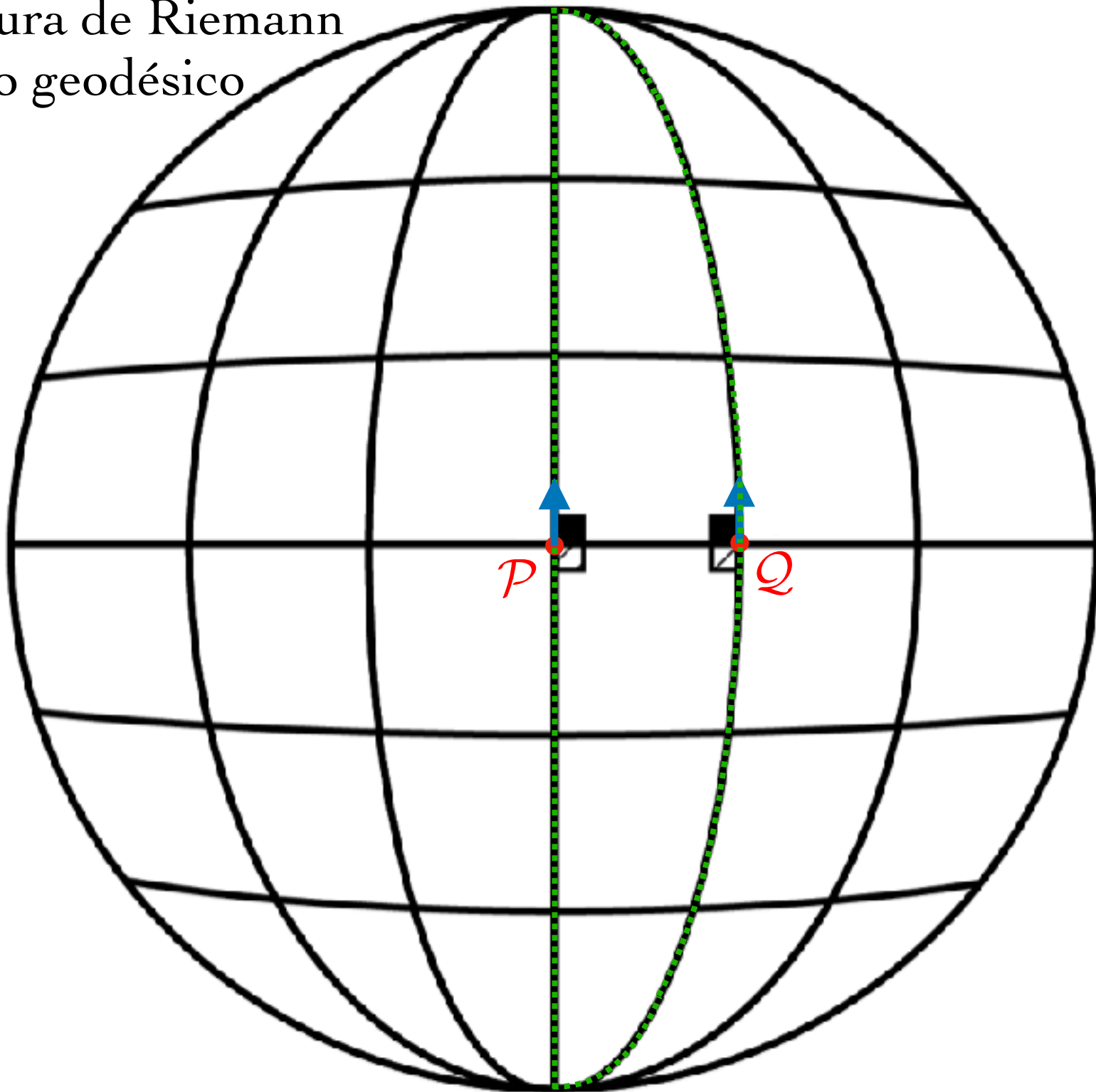
A curvatura de Riemann  
e o desvio geodésico



A curvatura de Riemann  
e o desvio geodésico



A curvatura de Riemann  
e o desvio geodésico



# Curvatura definida da métrica

Consideramos um espaço, por exemplo:  $\mathbb{R}^3$

# Curvatura definida da métrica

Consideramos um espaço, por exemplo:  $\mathbb{R}^3$

Atribuimos ao espaço uma métrica:

# Curvatura definida da métrica

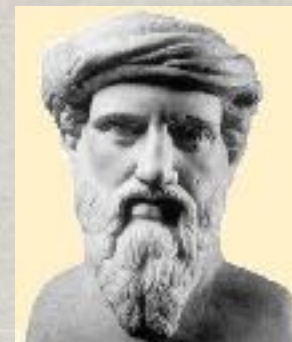
Consideramos um espaço, por exemplo:  $\mathbb{R}^3$

Atribuimos ao espaço uma métrica:  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$



# Curvatura definida da métrica

Basicamente o  
teorema de Pitágoras!

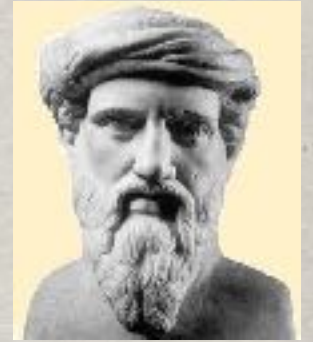


Consideramos um espaço, por exemplo:  $\mathbb{R}^3$

Atribuímos ao espaço uma métrica:  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$

# Curvatura definida da métrica

Basicamente o  
teorema de Pitágoras!



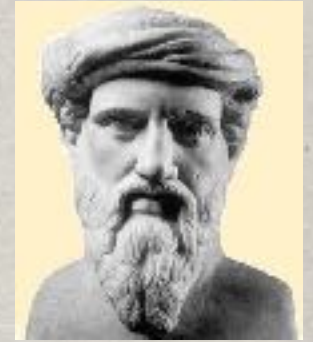
Consideramos um espaço, por exemplo:  $\mathbb{R}^3$

Atribuimos ao espaço uma métrica:  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$

$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2$$

# Curvatura definida da métrica

Basicamente o  
teorema de Pitágoras!



Consideramos um espaço, por exemplo:  $\mathbb{R}^3$

Atribuimos ao espaço uma métrica:  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$

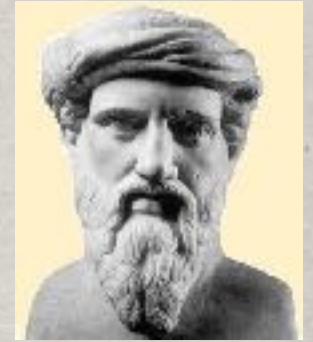
$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2$$

Usando uma definição apropriada de transporte paralelo, podemos calcular o tensor de Riemann:

$$R^a{}_{bcd}$$

# Curvatura definida da métrica

Basicamente o  
teorema de Pitágoras!



Consideramos um espaço, por exemplo:  $\mathbb{R}^3$

Atribuimos ao espaço uma métrica:  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$

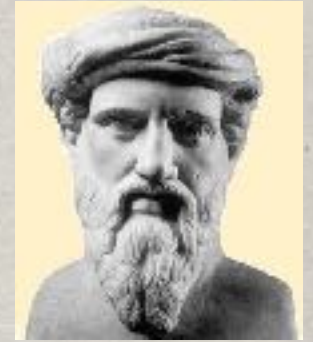
$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2$$

Usando uma definição apropriada de transporte paralelo, podemos calcular o tensor de Riemann:

$$R^a{}_{bcd} \stackrel{\mathbb{R}^3}{=} 0$$

# Curvatura definida da métrica

Basicamente o teorema de Pitágoras!



Consideramos um espaço, por exemplo:  $\mathbb{R}^3$

Atribuimos ao espaço uma métrica:  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$

$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2$$

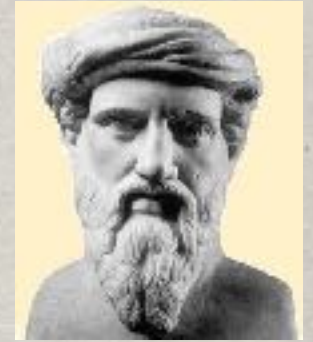
Usando uma definição apropriada de transporte paralelo, podemos calcular o tensor de Riemann:

$$R^a{}_{bcd} \stackrel{\mathbb{R}^3}{=} 0$$

Fornece um diagnóstico da planura do espaço.

# Curvatura definida da métrica

Basicamente o teorema de Pitágoras!



Consideramos um espaço, por exemplo:  $\mathbb{R}^3$

Atribuimos ao espaço uma métrica:  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$

$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2$$

Usando uma definição apropriada de transporte paralelo, podemos calcular o tensor de Riemann:

$$R^a{}_{bcd} \stackrel{\mathbb{R}^3}{=} 0$$

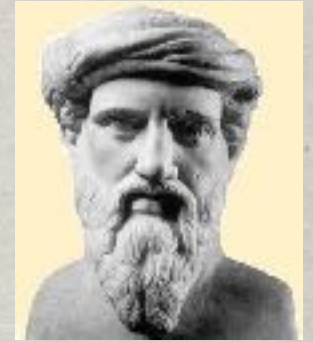
Fornece um diagnóstico da planura do espaço.

O espaço Euclidiano (n-dimensional) é não curvo, ou plano. Mas se considerarmos um espaço com uma métrica geral:

$$ds^2 = \sum_{a,b=1}^3 g_{ab}(x^1, x^2, x^3) dx^a dx^b$$

# Curvatura definida da métrica

Basicamente o teorema de Pitágoras!



Consideramos um espaço, por exemplo:  $\mathbb{R}^3$

Atribuimos ao espaço uma métrica:  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$

$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2$$

Usando uma definição apropriada de transporte paralelo, podemos calcular o tensor de Riemann:

$$R^a{}_{bcd} \stackrel{\mathbb{R}^3}{=} 0$$

Fornece um diagnóstico da planura do espaço.

O espaço Euclidiano (n-dimensional) é não curvo, ou plano. Mas se considerarmos um espaço com uma métrica geral:

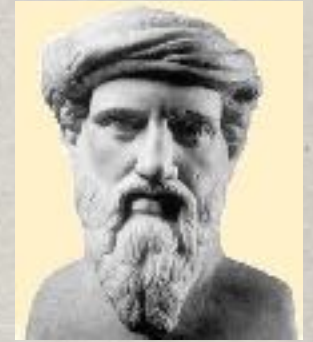
$$ds^2 = \sum_{a,b=1}^3 g_{ab}(x^1, x^2, x^3) dx^a dx^b$$

Em geral teremos um espaço não-Euclidiano com:

$$R^a{}_{bcd} \neq 0$$

# Curvatura definida da métrica

Basicamente o teorema de Pitágoras!



Consideramos um espaço, por exemplo:  $\mathbb{R}^3$

Atribuimos ao espaço uma métrica:  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$

$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2$$

Usando uma definição apropriada de transporte paralelo, podemos calcular o tensor de Riemann:

$$R^a{}_{bcd} \stackrel{\mathbb{R}^3}{=} 0$$

Fornece um diagnóstico da planura do espaço.

O espaço Euclidiano (n-dimensional) é não curvo, ou plano. Mas se considerarmos um espaço com uma métrica geral:

$$ds^2 = \sum_{a,b=1}^3 g_{ab}(x^1, x^2, x^3) dx^a dx^b$$

Facilmente extensível para n-dimensões.

Em geral teremos um espaço não-Euclidiano com:

$$R^a{}_{bcd} \neq 0$$

Componentes independentes do tensor de Riemann:

n=2, 1 componente  
n=3, 6 componentes  
n=4, 20 componentes

....



# Formalismo Matemático

O formalismo natural para estudar Cosmologia é a Relatividade Geral, baseada nas equações de Einstein:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

LHS:  $G_{\mu\nu}$  é o tensor de Einstein, construído da métrica  $g_{\mu\nu}$  e suas primeiras e segundas derivadas de um modo não linear;

# Formalismo Matemático

O formalismo natural para estudar Cosmologia é a Relatividade Geral, baseada nas equações de Einstein:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

LHS:  $G_{\mu\nu}$  é o tensor de Einstein, construído da métrica  $g_{\mu\nu}$  e suas primeiras e segundas derivadas de um modo não linear;

RHS:  $T_{\mu\nu}$  é o tensor de impulsão energia que especifica o conteúdo material do sistema considerado - o Universo.

# Formalismo Matemático

O formalismo natural para estudar Cosmologia é a Relatividade Geral, baseada nas equações de Einstein:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

LHS:  $G_{\mu\nu}$  é o tensor de Einstein, construído da métrica  $g_{\mu\nu}$  e suas primeiras e segundas derivadas de um modo não linear;

RHS:  $T_{\mu\nu}$  é o tensor de impulsão energia que especifica o conteúdo material do sistema considerado - o Universo.

As equações de Einstein são equações diferenciais de segunda ordem a derivadas parciais. Pretendemos encontrar soluções não triviais.

# Lado esquerdo das equações de Einstein:

Hipótese: **princípio cosmológico**:

o Universo é homogéneo e isotrópico

# Lado esquerdo das equações de Einstein:

Hipótese: **princípio cosmológico**:  
o Universo é homogéneo e isotrópico

Métrica que descreve o Universo tem a seguinte forma:

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 ds_3^2$$

onde a métrica espacial pode representar:

- uma esfera (modelo  $k=+1$ );
- um plano (modelo  $k=0$ );
- um hiperboloide (modelo  $k=-1$ );

# Lado esquerdo das equações de Einstein:

Hipótese: **princípio cosmológico**:  
o Universo é homogéneo e isotrópico

Métrica que descreve o Universo tem a seguinte forma:

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 ds_3^2$$

onde a métrica espacial pode representar:

- uma esfera (modelo  $k=+1$ );
- um plano (modelo  $k=0$ );
- um hiperboloide (modelo  $k=-1$ );

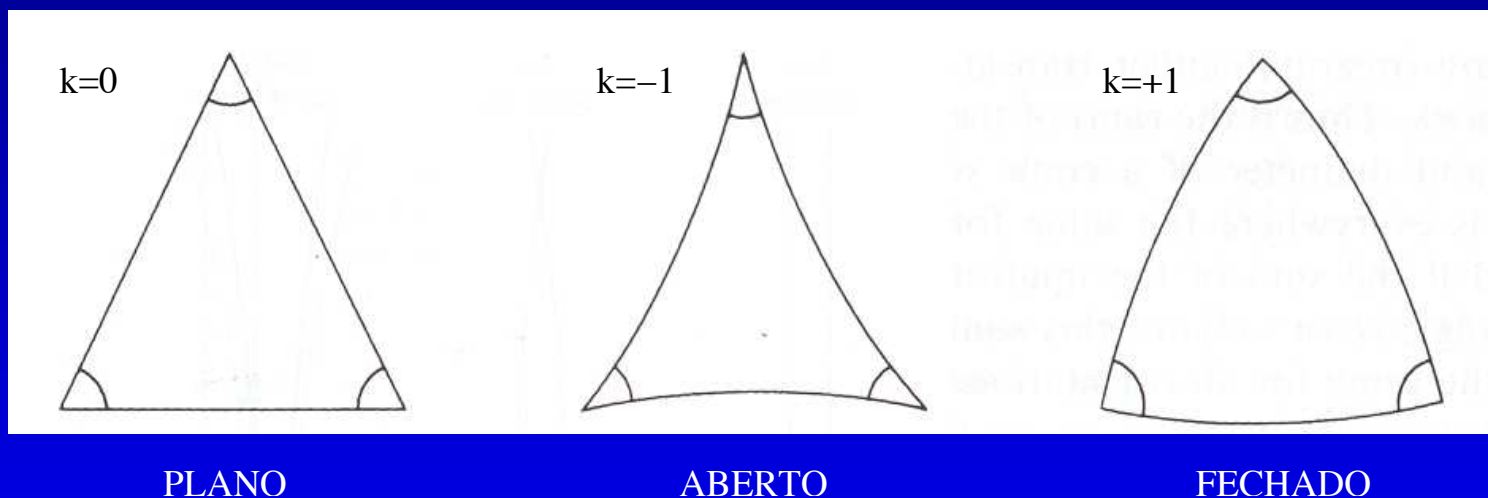
Estes são os modelos de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW); a dinâmica do Universo é totalmente descrita pela função  $a(t)$ , denominada factor de escala.

## Espaços maximalmente simétricos:

- Em  $n$  dimensões têm  $n(n + 1)/2$  campos de vetores de Killing independentes. Em  $n = 3$  temos 6 isometrias.
- São espaços de curvatura constante. Logo

$$R_{\mu\nu} = k(n - 1)g_{\mu\nu}$$

- Marcando 3 pontos e as geodésicas entre eles obtemos triângulos com soma dos ângulos  $=, <$  ou  $>$  que  $\pi$ :



# Lado direito das equações de Einstein:

Hipótese: conteúdo material do Universo pode ser representado por um **fluido perfeito**.



# Lado direito das equações de Einstein:

Hipótese: conteúdo material do Universo pode ser representado por um **fluido perfeito**.

Tensor de impulsão-energia é:

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_{\mu}u_{\nu} + pg_{\mu\nu}$$

consideram-se diferentes fluidos, considerando diferentes equações de estado, isto é, relações entre densidade e pressão.

# Lado direito das equações de Einstein:

Hipótese: conteúdo material do Universo pode ser representado por um **fluido perfeito**.

Tensor de impulsão-energia é:

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_{\mu}u_{\nu} + pg_{\mu\nu}$$

consideram-se diferentes fluidos, considerando diferentes equações de estado, isto é, relações entre densidade e pressão.

No modelo Lambda-CDM consideram-se 3 tipos de fluido:

- matéria:  $\rho > 0, p = 0$ ;
- radiação:  $p = \rho/3, \rho > 0$
- constante cosmológica:  $p = -\rho$

# Dinâmica do Universo

Com os pressupostos anteriores, as equações de Einstein juntamente com a conservação de energia reduzem-se a:

- Equação de Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho ,$$

- equação de conservação de energia

$$\frac{d}{dt} (a^3(p + \rho)) = \dot{p}a^3 ,$$

- que implicam a equação de Raychaudhuri

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{8\pi G}{6}(\rho + 3p) .$$

# Dinâmica do Universo

Com os pressupostos anteriores, as equações de Einstein juntamente com a conservação de energia reduzem-se a:

- Equação de Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho ,$$

- equação de conservação de energia

$$\frac{d}{dt} (a^3(p + \rho)) = \dot{p}a^3 , \quad \stackrel{p=0}{\Rightarrow} \rho = \frac{\text{const.}}{a^3}$$

- que implicam a equação de Raychaudhuri

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{8\pi G}{6}(\rho + 3p) .$$

# A equação de Raychaudhuri

A equação

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{8\pi G}{6}(\rho + 3p) .$$

diz-nos que

$$\rho + 3p > 0 \Leftrightarrow \ddot{a} < 0 .$$

ou ainda

Condição de energia forte  $\Leftrightarrow$  Expansão desacelerada

Esta condição é obedecida para matéria e radiação.

# A equação de Raychaudhuri

A equação

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{8\pi G}{6}(\rho + 3p) .$$

diz-nos que

$$\rho + 3p > 0 \Leftrightarrow \ddot{a} < 0 .$$

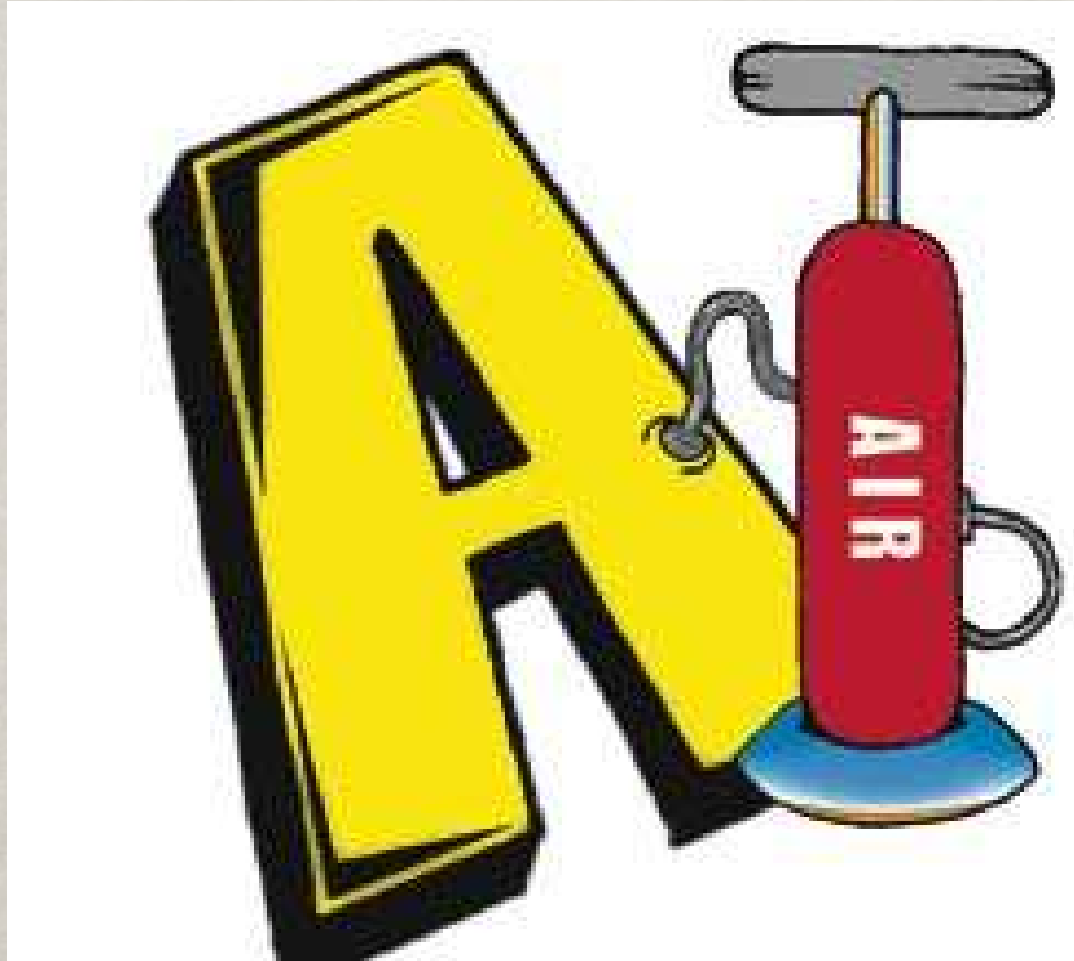
ou ainda

Condição de energia forte  $\Leftrightarrow$  Expansão desacelerada

Esta condição é obedecida para matéria e radiação.

Matéria  $a(t) \sim t^{2/3}$ ; Radiação  $a(t) \sim t^{1/2}$ .

Épocas inflacionárias são épocas que esta condição é violada:



Há um crescimento **acelerado** do factor de escala.

# Sobre a constante cosmológica

- Podemos pensar na constante cosmológica como um caso especial de fluido perfeito. De facto

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_\mu u_\nu + pg_{\mu\nu} \quad \overset{p=-\rho=-\Lambda}{\Rightarrow} \quad T_{\mu\nu} = -\Lambda g_{\mu\nu} ;$$

- Para  $\Lambda > 0$ , a condição de energia forte não é obedecida

$$\rho + 3p > 0 \quad \overset{p=-\rho}{\Leftrightarrow} \quad -2\rho > 0 \quad (\text{falso}).$$

- Da equação de conservação de energia vemos que a constante cosmológica é um conteúdo material especial

$$\frac{d}{dt} (a^3 (p + \rho)) = \dot{p}a^3 \Rightarrow \begin{cases} \text{Mat.} & \frac{d}{dt} (a^3 \rho) = 0 \Rightarrow \rho \sim 1/a^3 \\ \text{Rad.} & \frac{d}{dt} (a^4 \rho) = 0 \Rightarrow \rho \sim 1/a^4 \\ \Lambda & \frac{d}{dt} (\rho) = 0 \Rightarrow \rho \sim \text{const.} \end{cases}$$

A constante cosmológica não se dilui com a expansão.



# Inflação Cosmológica

Inflação é uma época em que  $\ddot{a} > 0$ . Requer um tipo exótico de matéria que produza gravidade repulsiva.

Os modelos típicos de inflação consideram um campo escalar  $\Phi$ , com um potencial  $V(\Phi)$  acoplado à gravidade. Estes modelos são descritos pela acção

$$\mathcal{S} = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} \left[ R - \frac{1}{2} \partial_\mu \Phi \partial^\mu \Phi - V(\Phi) \right] .$$

Ou seja, o conteúdo material - campo escalar - tem o tensor de impulsão energia

$$T_{\mu\nu} = \partial_\mu \Phi \partial_\nu \Phi - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \partial_\alpha \Phi \partial^\alpha \Phi - g_{\mu\nu} V(\Phi) .$$

# Dinâmica do Universo

As equações de movimento da acção anterior, com a hipótese  $\Phi = \Phi(t)$  reduzem-se a:

- Equação de Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{1}{6} \left[ \frac{\dot{\Phi}^2}{2} + V(\Phi) \right],$$

- equação do campo escalar

$$\ddot{\Phi} + 3\frac{\dot{a}}{a}\dot{\Phi} + \frac{dV}{d\Phi} = 0,$$

- que implicam a equação de Raychaudhuri

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{1}{6} \left( -\dot{\Phi}^2 + V(\Phi) \right).$$

# A equação de Raychaudhuri

A equação

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{1}{6} \left( -\dot{\Phi}^2 + V(\Phi) \right) .$$

diz-nos que

$$-\dot{\Phi}^2 + V(\Phi) > 0 \Leftrightarrow \ddot{a} > 0 .$$

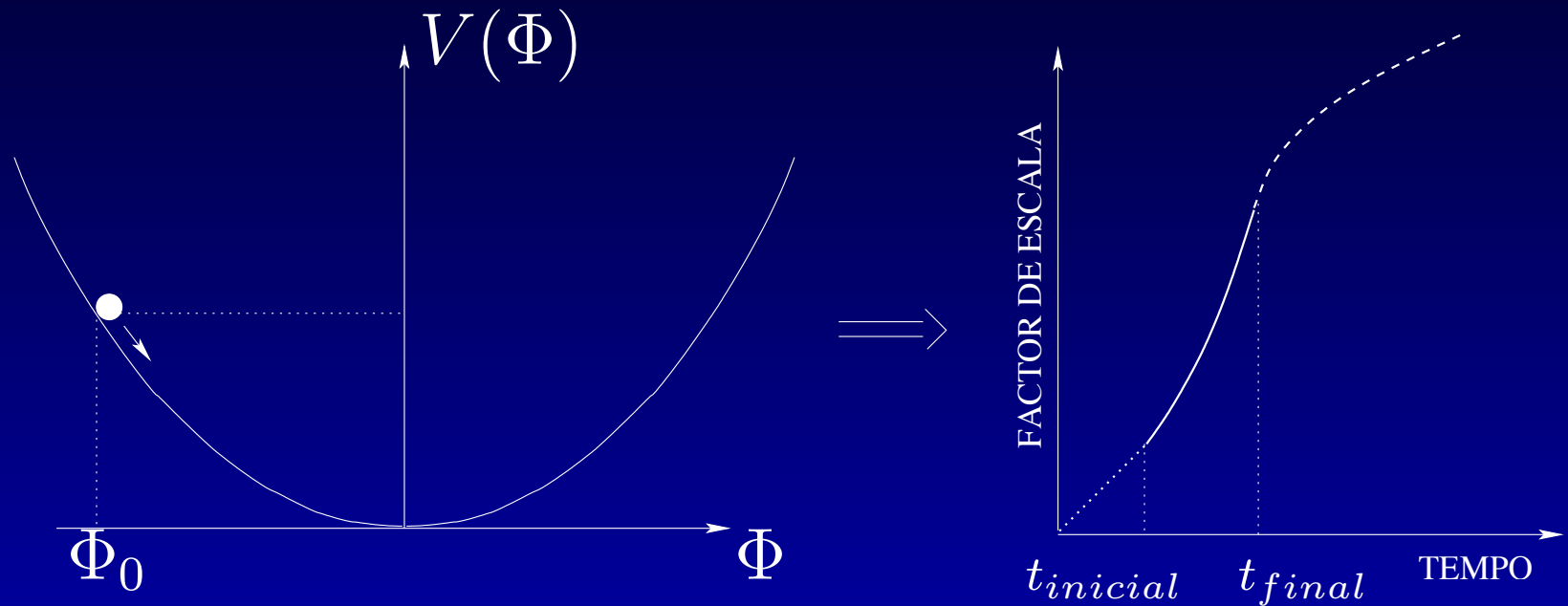
ou seja

$$V(\Phi) > \dot{\Phi}^2 \Leftrightarrow \text{Expansão acelerada}$$

Se o inflatão ( $\Phi$ ) rolar lentamente ao longo de um potencial positivo, a gravidade torna-se repulsiva.

# Dinâmica do Universo

Qualitativamente:



Onde

$$\left(\frac{d\Phi}{dt}\right)(t_{inicial}) = 0, \quad \Phi(t_{inicial}) = \Phi_0, \quad V(\Phi_0) > 0.$$

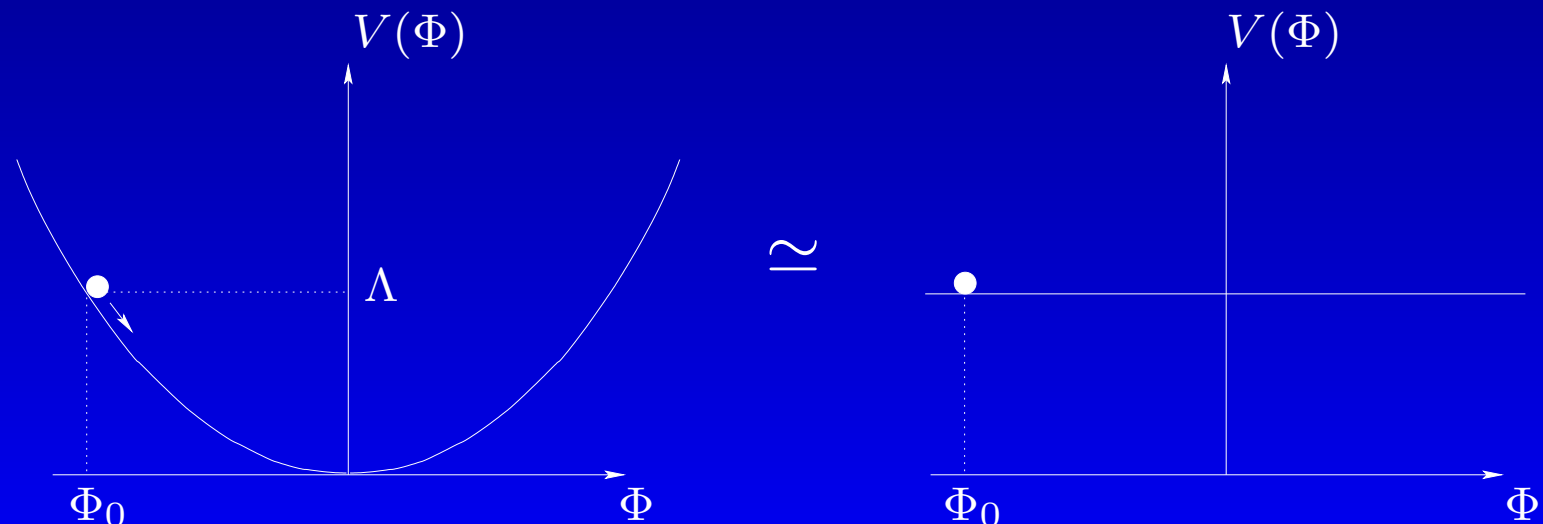
# A constante cosmológica

Se a dinâmica do campo escalar é dominada pela energia potencial de um potencial constante, então

$$\begin{aligned} T_{\mu\nu} &= \partial_\mu\Phi\partial_\nu\Phi - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}\partial_\alpha\Phi\partial^\alpha\Phi - g_{\mu\nu}V(\Phi) \\ &\simeq -V(\Phi)g_{\mu\nu} = -\Lambda g_{\mu\nu}, \end{aligned}$$

onde  $\Lambda > 0$  é denominada *constante cosmológica*.

Ou seja,



# O Universo de de Sitter

Se o tensor de impulsão energia for exactamente o de uma constante cosmológica positiva

$$T_{\mu\nu} = -\Lambda g_{\mu\nu} ,$$

a solução exacta das equações de Einstein é denominada o universo de de Sitter.

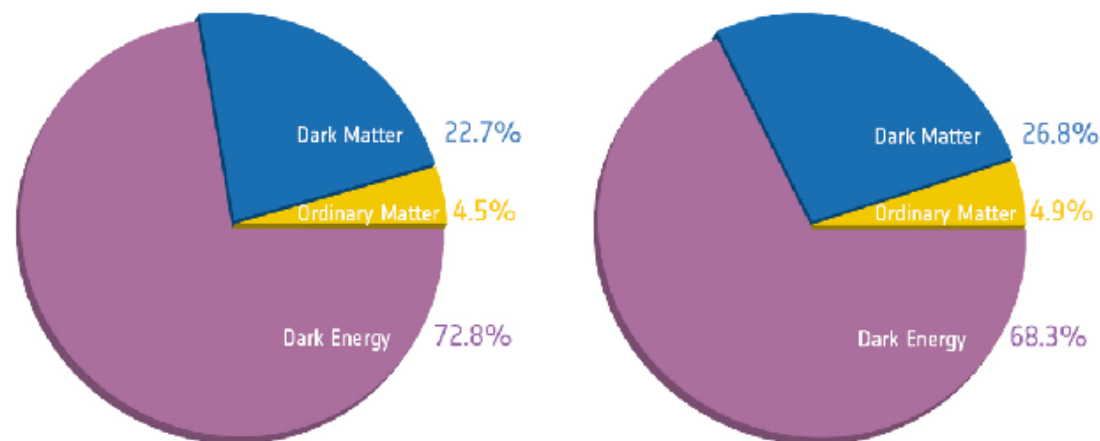
$$ds^2 = -dt^2 + e^{\pm\sqrt{\Lambda}t} ds^2(\mathbb{R}^3) .$$

Corresponde a um universo que inflaciona eternamente.

# Porque queremos inflação?

Nos modelos actuais consideram-se duas épocas inflacionárias:

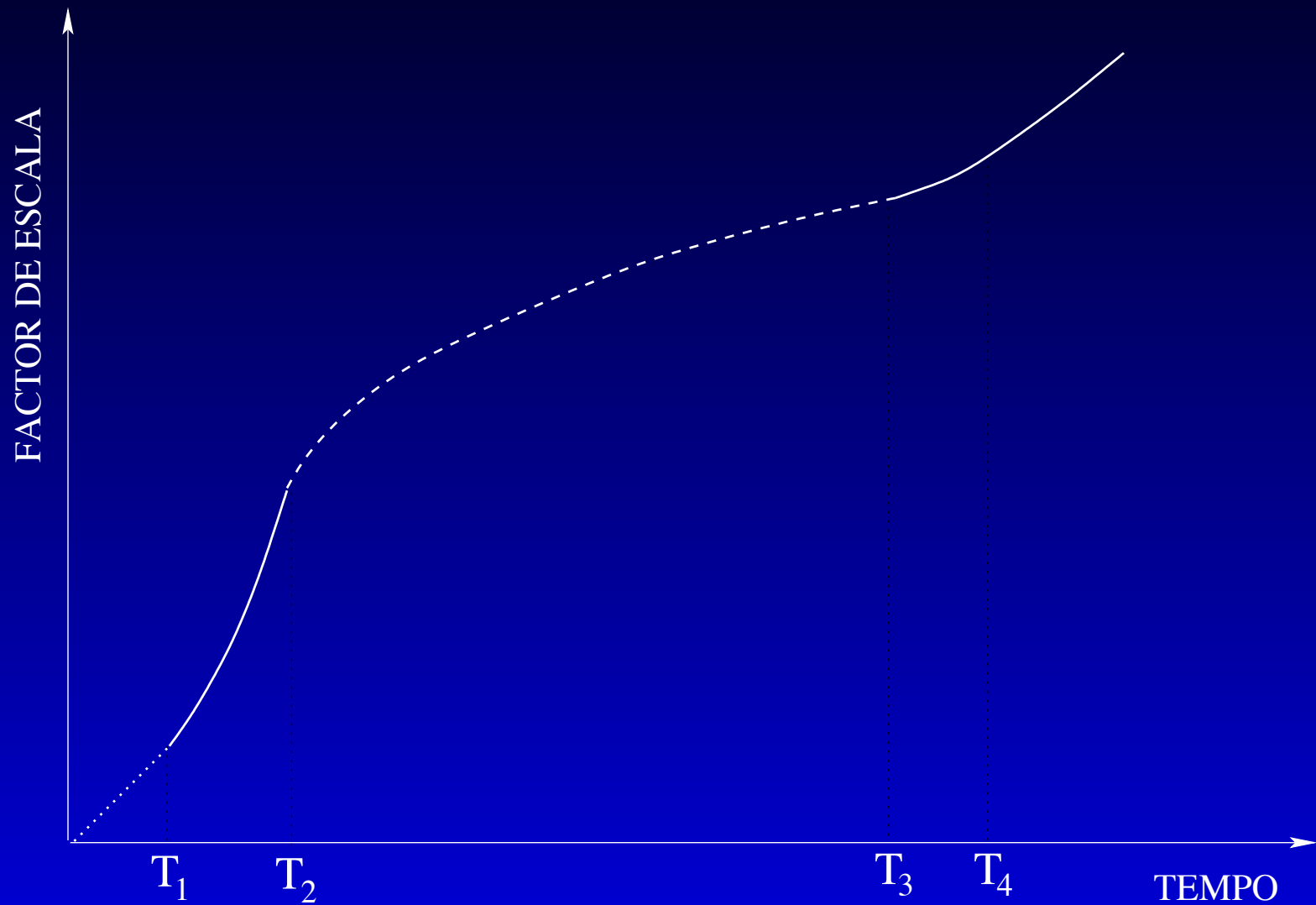
- Inflação primordial: terá acontecido pouco depois da época de Planck (entre  $\simeq 10^{-37}$  até  $\simeq 10^{-35}$  segundos). É importante para resolver alguns problemas teóricos do modelo padrão;
- Inflação actual: acontece agora. É importante porque é observada! (Riess et al. 1998)



Before Planck

After Planck

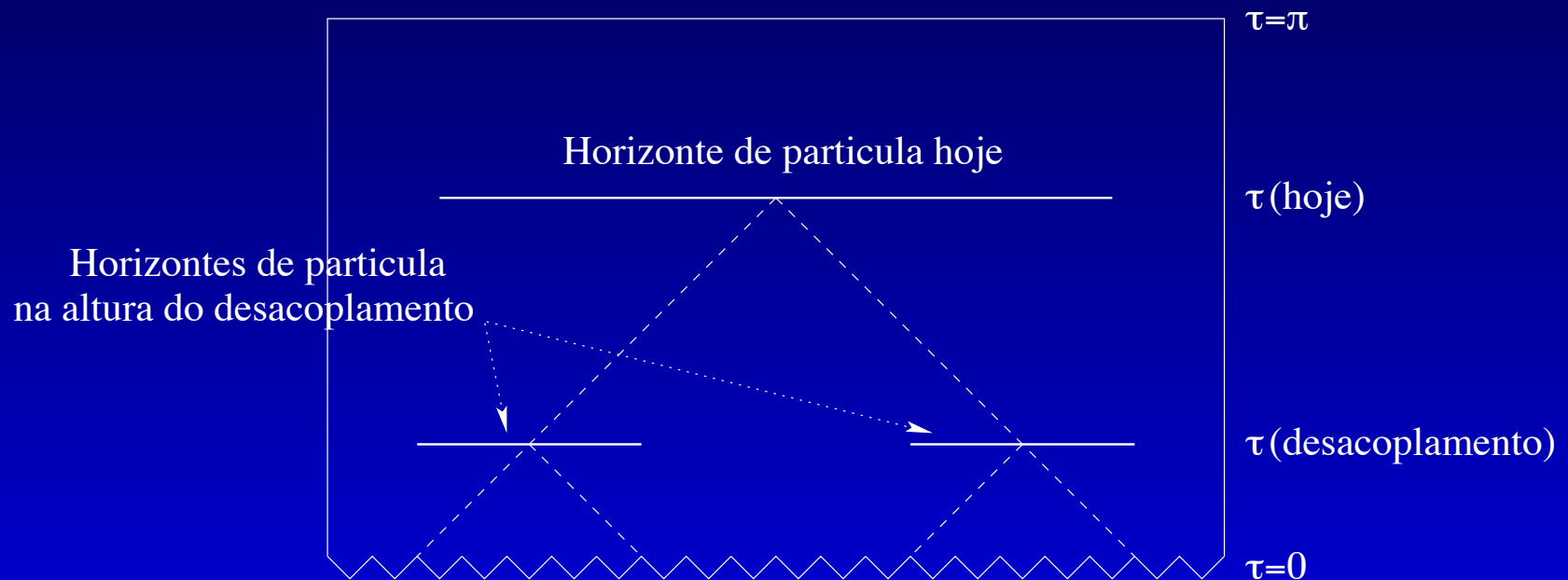
# Factor de Escala com Inflações:





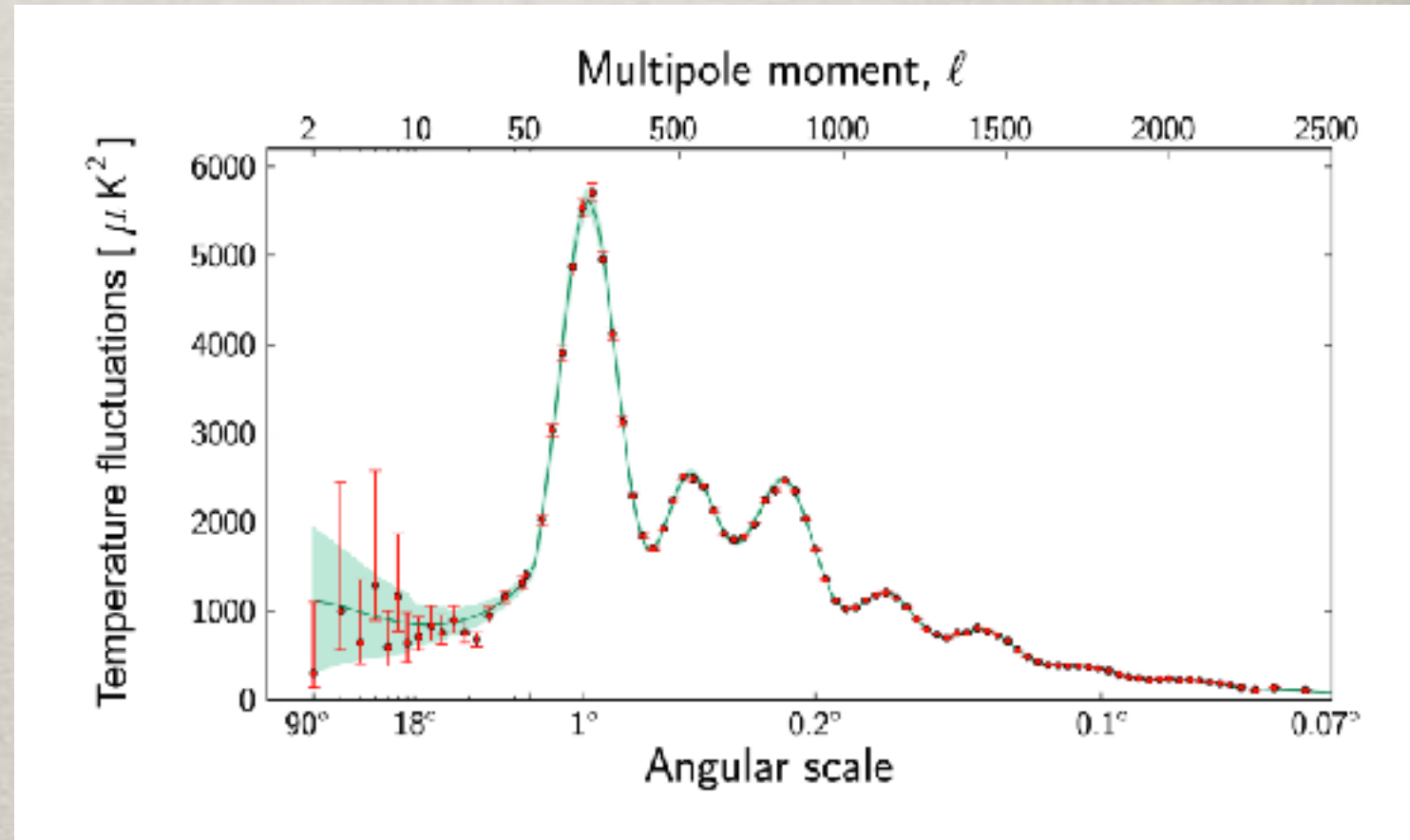
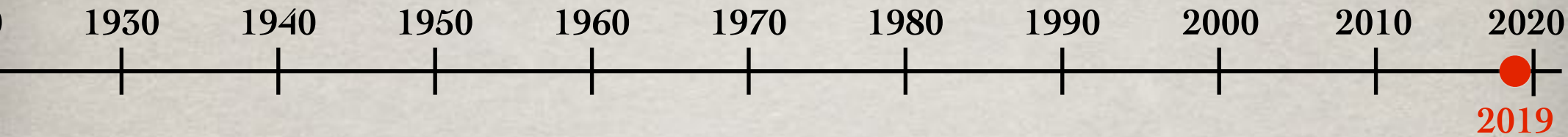
# O problema do horizonte

A radiação cósmica de fundo é extremamente isotrópica tendo um espectro de corpo negro. Termalização implica que todos os pontos de onde recebemos radiação tenham estado em contacto térmico. Contudo



O horizonte de partícula na altura do desacoplamento corresponde hoje a um ângulo de cerca de  $2^\circ$  do céu!

# “Timeline”:



Planck Collaboration, *Planck 2018 results, I. Overview and the cosmological legacy of Planck*, arxiv:1807.06205  
<https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/advanced-physicsprize2019-3.pdf>

C. Herdeiro, *Um prémio Nobel para a Universalidade da Física*, *Gazeta de Física da Sociedade Portuguesa de Física*, 42 (Fascículo 4/5) (2019) pp. 8-11.

# “Timeline”:

1930

1940

1950

1960

1970

1980

1990

2000

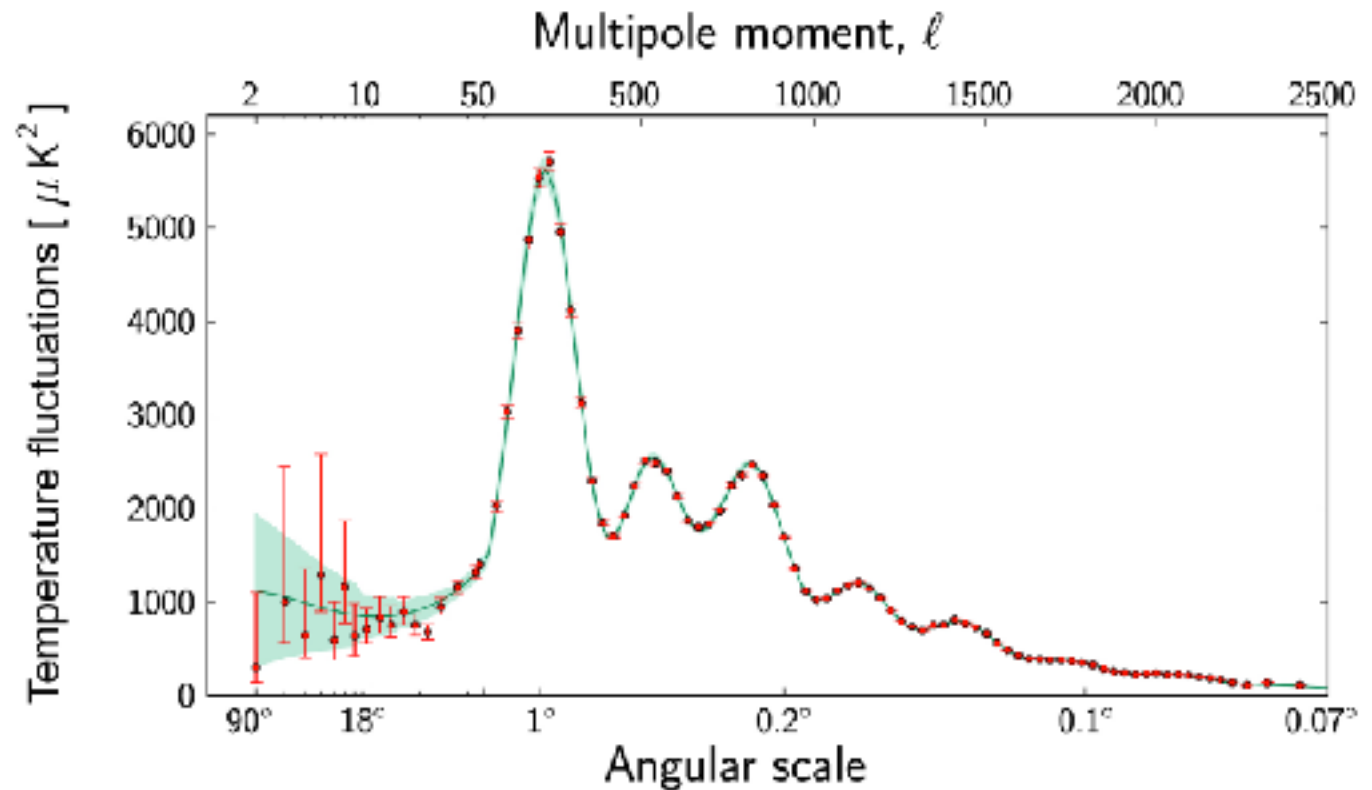
2010

2020

2019

## Prémio Nobel da Física 2019

*“...pelas suas  
descobertas teóricas na  
cosmologia física...”*



Planck Collaboration, *Planck 2018 results, I. Overview and the cosmological legacy of Planck*, arxiv:1807.06205  
<https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/advanced-physicsprize2019-3.pdf>

C. Herdeiro, *Um prémio Nobel para a Universalidade da Física*, *Gazeta de Física da Sociedade Portuguesa de Física*, 42 (Fascículo 4/5) (2019) pp. 8-11.

Crescimento da esfera de  
Hubble num  
**Universo estático**



Crescimento da esfera de  
Hubble num  
**Universo estático**



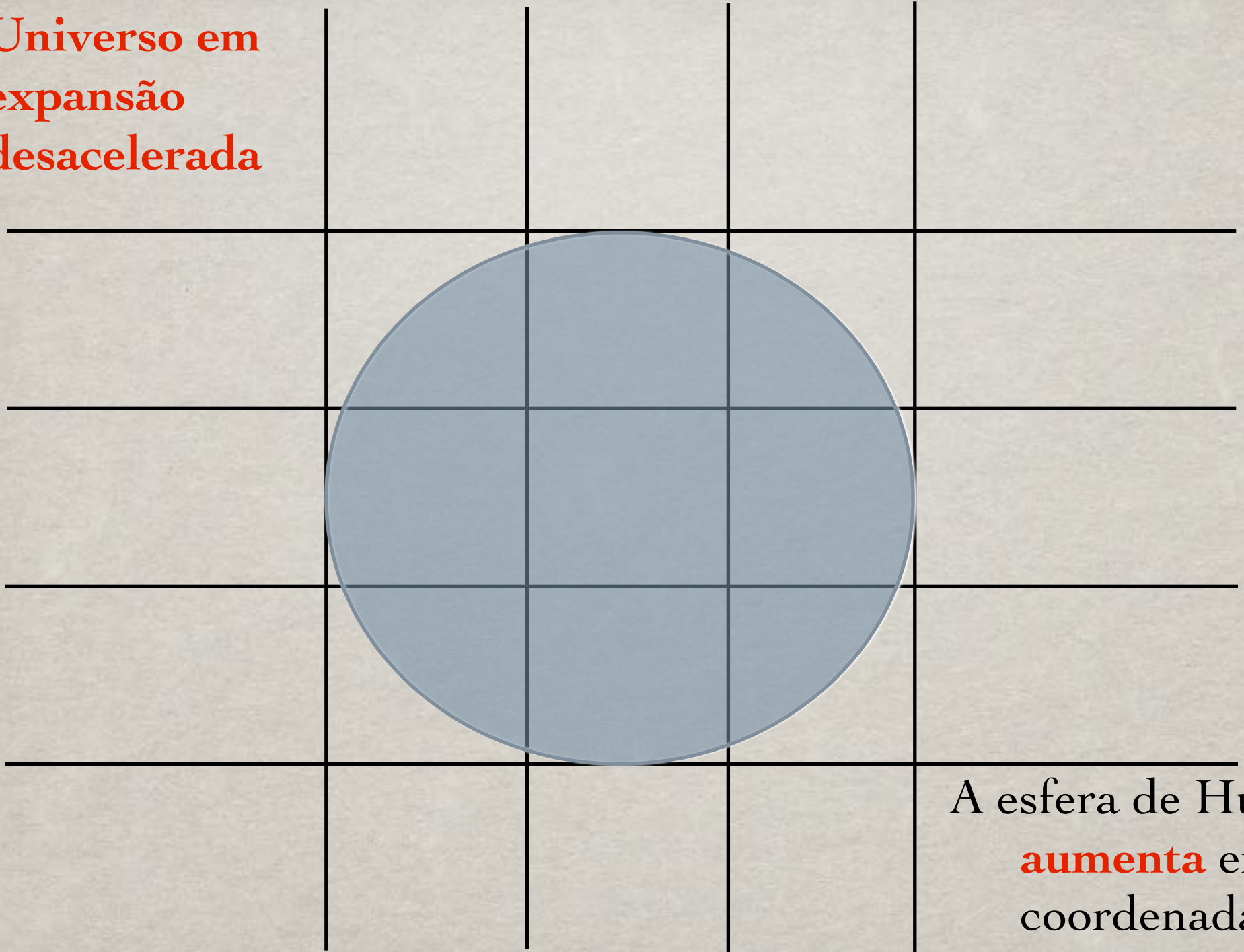
Crescimento da esfera de Hubble num

**Universo em  
expansão  
desacelerada**



Crescimento da esfera de Hubble num

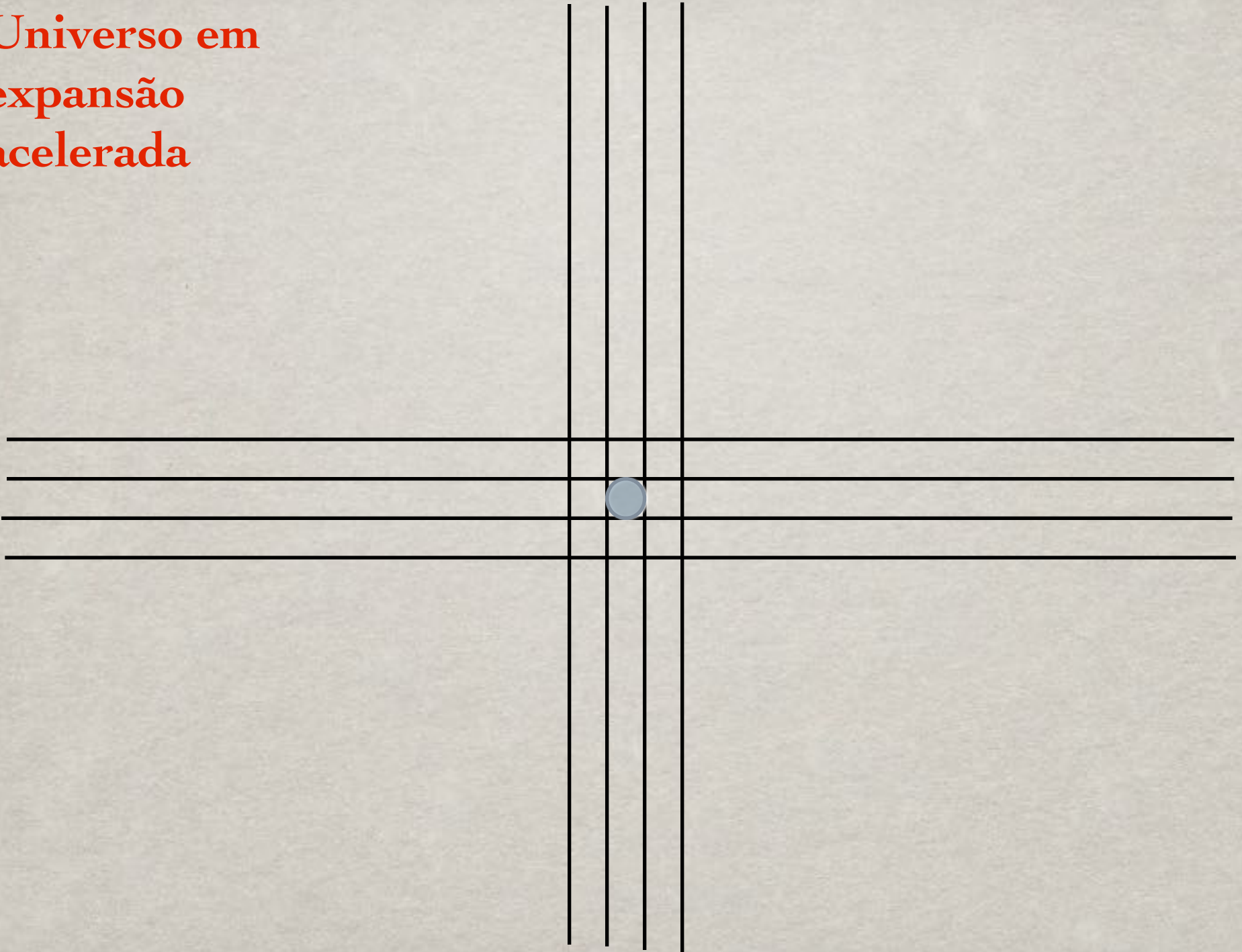
**Universo em  
expansão  
desacelerada**



A esfera de Hubble  
**aumenta** em  
coordenadas  
có-moveis

Crescimento da esfera de Hubble num

**Universo em  
expansão  
acelerada**





# Crescimento da esfera de Hubble num

**Universo em  
expansão  
acelerada**

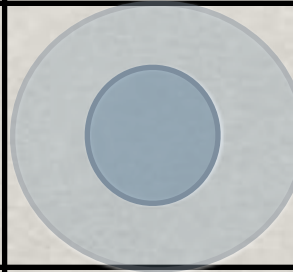


A esfera de Hubble  
**diminui** em  
coordenadas  
có-moveis

# Crescimento da esfera de Hubble num

**Universo em  
expansão  
acelerada**

A região que já esteve  
causalmente ligada é  
maior do que a esfera  
de Hubble.



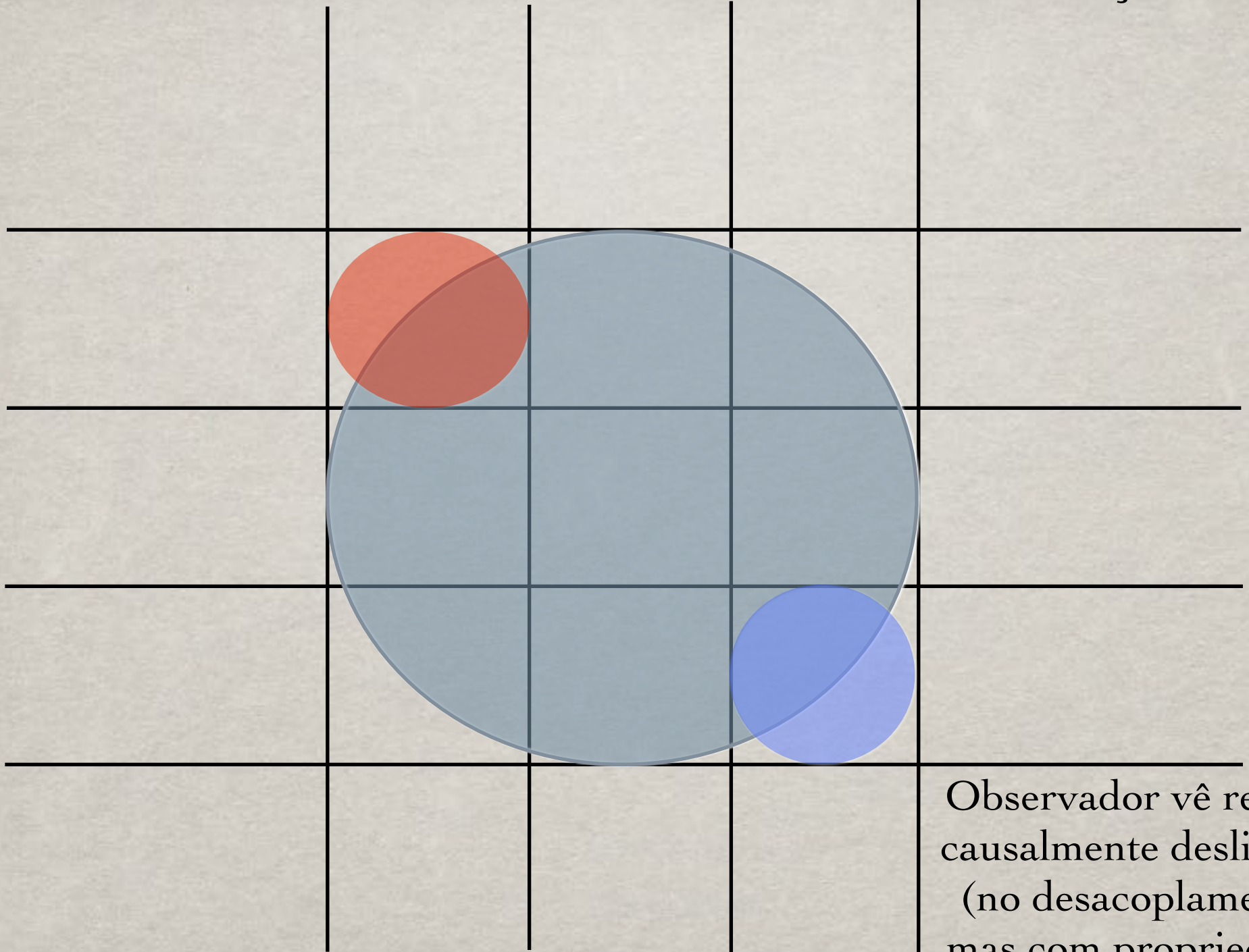
A esfera de Hubble  
**diminui** em  
coordenadas  
có-moveis

# Problema do Horizonte nos modelos de FLRW sem inflação



**No desacoplamento:** regiões disjuntas de contacto causal (vermelho e azul) e esfera de Hubble de um observador (cinzento).

# Problema do Horizonte nos models de FLRW sem inflação



Observador vê regiões causalmente desligadas (no desacoplamento) mas com propriedades semelhantes.

# Resolução do problema do Horizonte pela inflação



**No desacoplamento:** esferas de Hubble de dois pontos (vermelho e azul) e de um observador (cinzento).

# Resolução do problema do Horizonte pela inflação

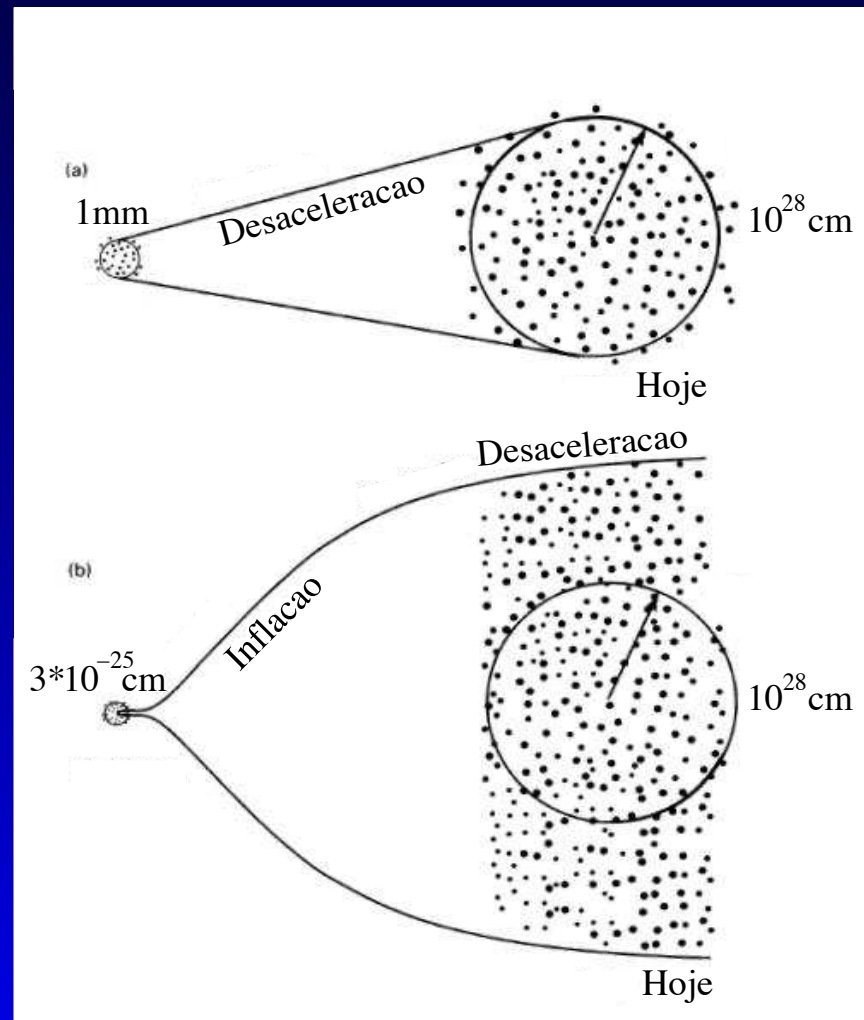
A região que já esteve causalmente ligada engloba regiões a vermelho e azul.



**No desacoplamento:** esferas de Hubble de dois pontos (vermelho e azul) e de um observador (cinzento).

# A solução da inflação

‘Inflacionando’ as escalas colocamos o horizonte actual dentro do horizonte causal antes de começar o período inflacionário.



# Sobre o Big Bang

O ponto onde o factor de escala se torna zero é, em geral, uma singularidade de curvatura. Por exemplo, o escalar de Ricci diverge

$$R = 6 \frac{(\dot{a}^2 + a\ddot{a} + k)}{a^2} .$$

Isto significa que a teoria de Einstein deixa de ser aplicável perto de  $a = 0$ .

Este ponto é sempre atingido algures no passado na cosmologia padrão. Genericamente, se a condição de energia forte é obedecida, em conjunto com certas hipóteses sobre causalidade, a singularidade do Big Bang é sempre atingida (Teoremas de Singularidades, Penrose e Hawking 1970).

*Exceção:* Para  $t$  pequeno  $a(t) \sim t$ ,  $k = -1$ ,  $\Rightarrow R = 0$ .



# Epílogo

Para além da Relatividade Geral

Para além da Relatividade Geral clássica  
consiste em considerar:

- modelos inspirados em descrições fundamentais;
  - modelos semi-clássicos;
  - modelos clássicos fenomenológicos;

**Relembrar a História:**

## Relembrar a História:

Anomalia de Úrano (1781)

## Relembrar a História:

Anomalia de Úrano (1781)



Sugeriu-se um  
“planeta escuro”  
(Neptuno encontrado em 1846)

## Relembrar a História:

Anomalia de Úrano (1781)



Anomalia de Mercúrio (1859)

Sugeriu-se um  
“planeta escuro”  
(Neptuno encontrado em 1846)

## Relembrar a História:

Anomalia de Úrano (1781)



Sugeriu-se um  
“planeta escuro”  
(Neptuno encontrado em 1846)

Anomalia de Mercúrio (1859)



Sugeriu-se um  
“planeta escuro”  
(nenhum encontrado)

## Relembrar a História:

Anomalia de Úrano (1781)



Sugeriu-se um  
“planeta escuro”  
(Neptuno encontrado em 1846)

Anomalia de Mercúrio (1859)



Sugeriu-se um  
“planeta escuro”  
(nenhum encontrado)



Várias modificações da gravidade;  
as simples falham;  
RG (1915) resultou - mas é revolucionária!



# Cosmologia Teórica e Observacional



Carlos Herdeiro ([herdeiro@ua.pt](mailto:herdeiro@ua.pt))

Grupo de Geometria e Dinâmica Gravitacional (CIDMA),  
Universidade de Aveiro  
<http://gravitation.web.ua.pt>

11<sup>a</sup> Escola de Gravitação e Astrofísica do Instituto Superior Técnico  
Lisboa, 4 e 5 de Setembro de 2023

# Bibliografia

(de introdução aos tópicos do curso):

## **Livros não técnicos, escritos por especialistas, focando conceitos:**

- E.Harrison, “Cosmology: the science of the Universe”, Cambridge University Press, 2000, 2nd Edition
- B. Schutz, “Gravity: from the ground up”, Cambridge University Press, 2003

## **Livros técnicos (clássicos):**

- S. Weinberg, “Gravitation and Cosmology”, John Wiley & Sons, 1972
- P. J. E. Peebles, “Principles of Physical Cosmology”, Princeton University Press, 1993