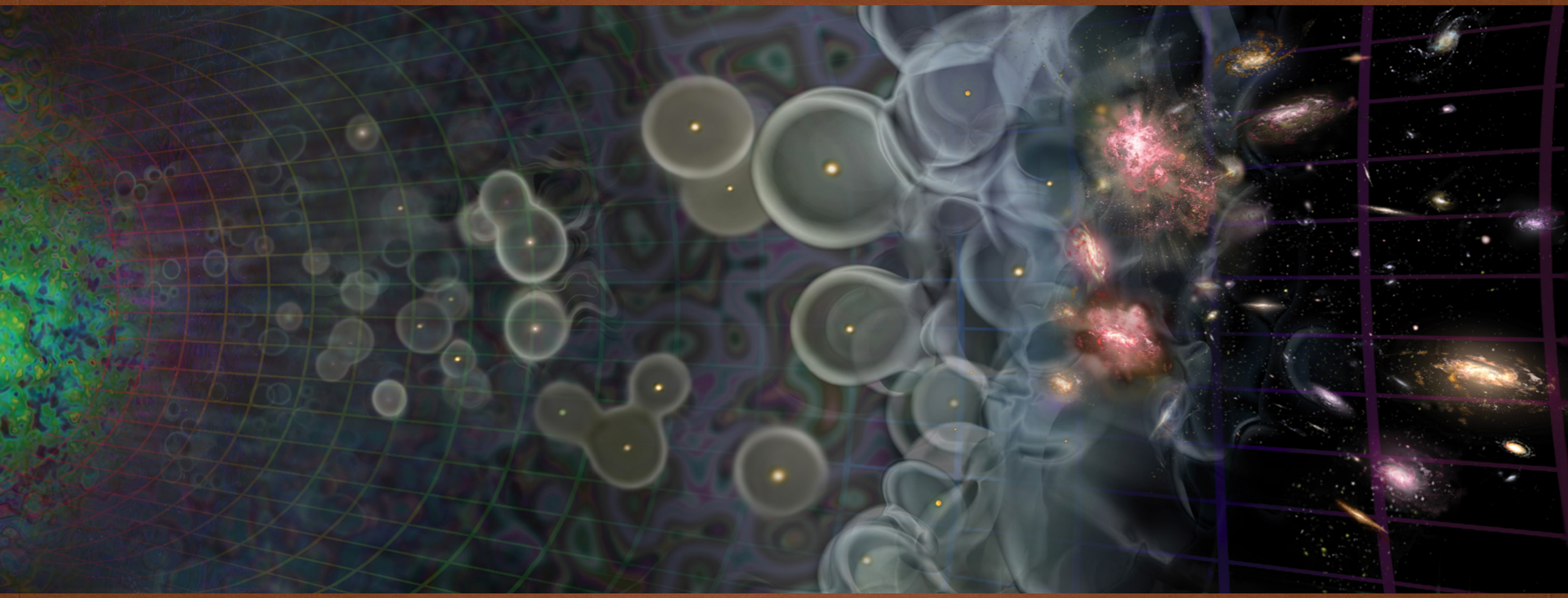
INTRODUÇÃO À



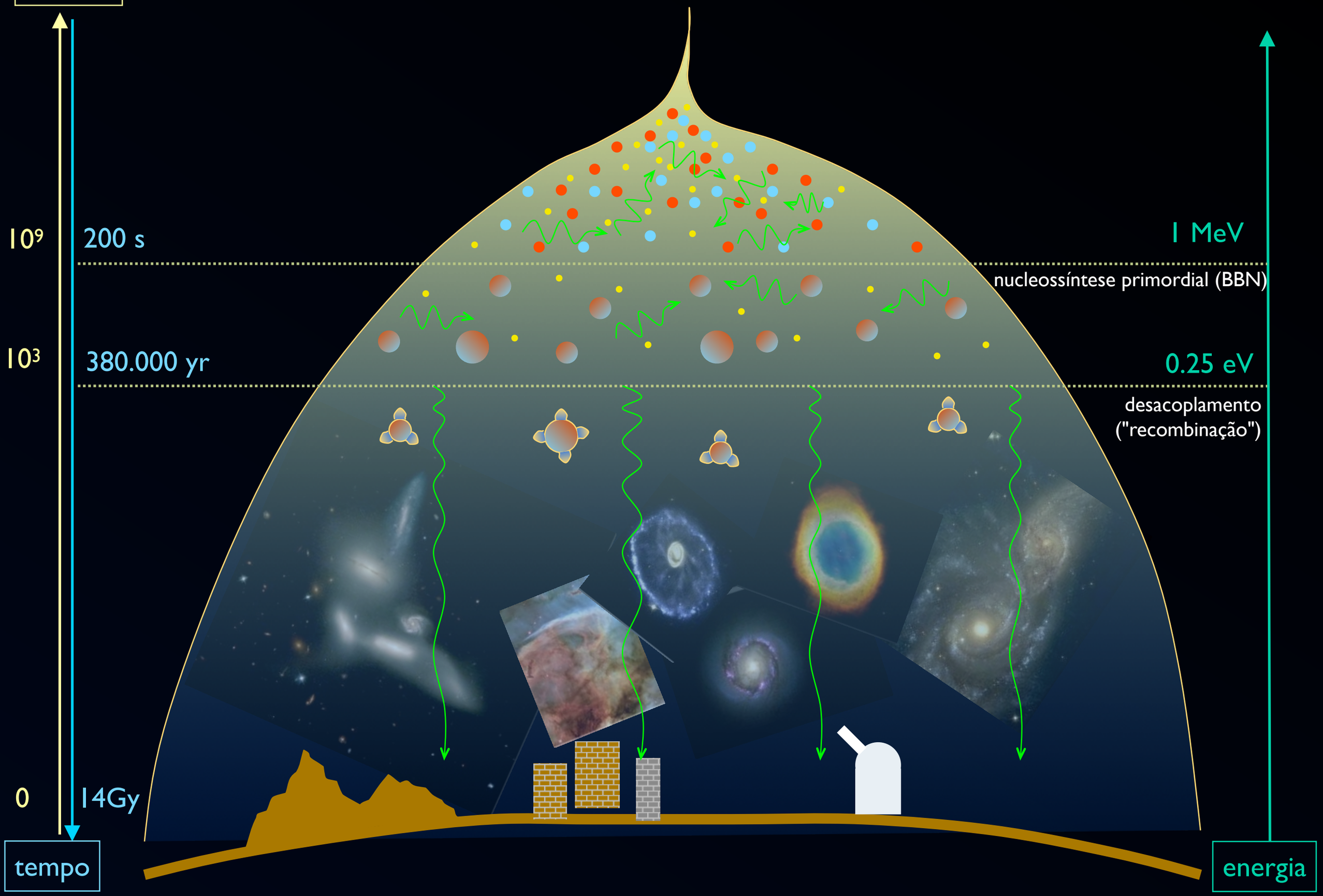
RELATIVIDADE

4300337 – IF/USP – PROF. RAUL ABRAMO

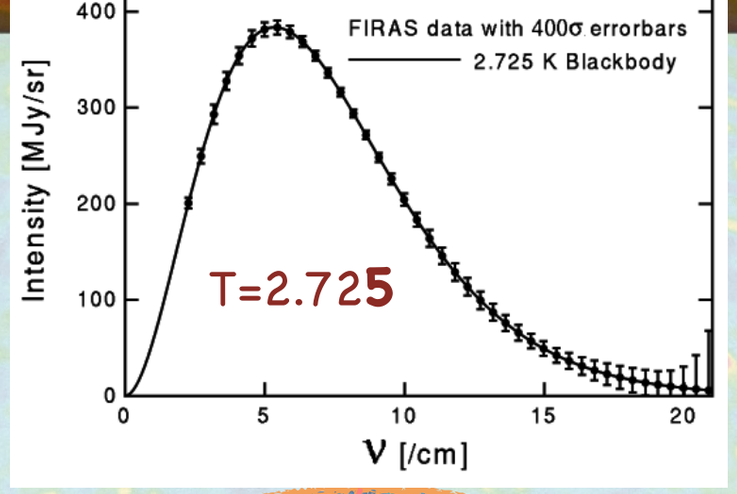
AULA 26 - 17/06/2020 (ÚLTIMA AULA!!!)

- A RCF e a curvatura espacial do universo
- A matéria escura
- Estrutura causal e cones de luz em FLRW
- A inflação do universo
- Formação de estruturas
- **Leitura: Cap. 8 do Carroll (e Cap. 9, se quiserem saber mais sobre a origem quântica das flutuações de densidade durante a inflação)**

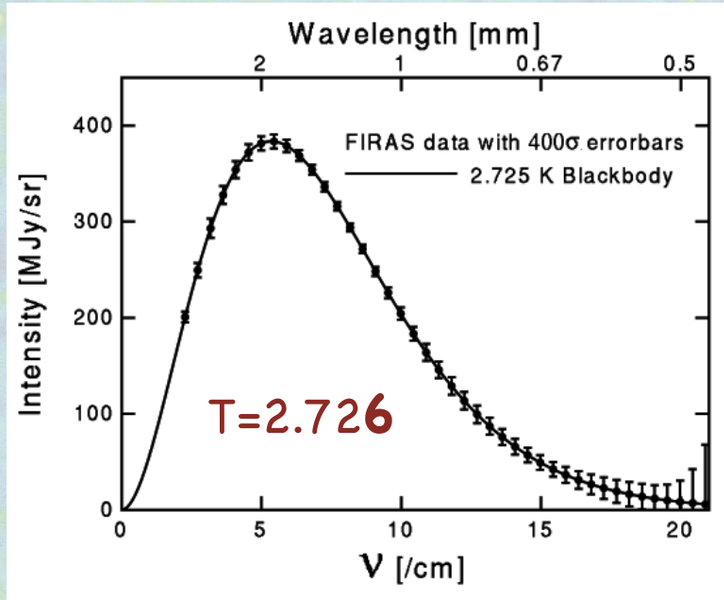
Modelo do Big Bang Quente

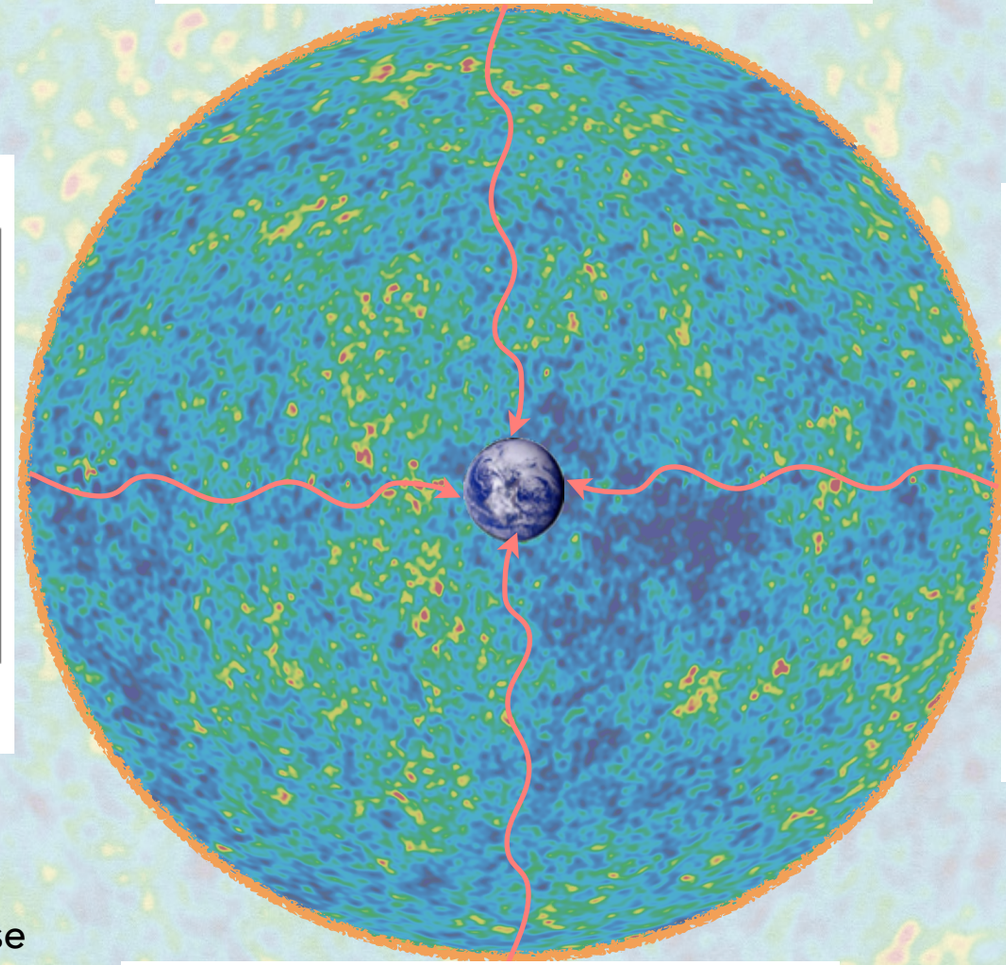


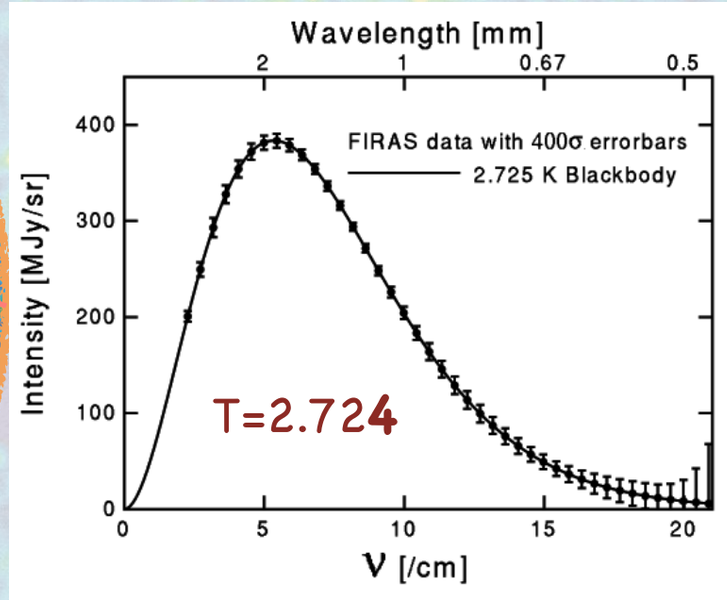
- A luz da RCF desacopla da matéria em $z_{dec} \sim 10^3$ e se propaga quase sem nenhuma interação até ser capturada hoje pelos nossos telescópios



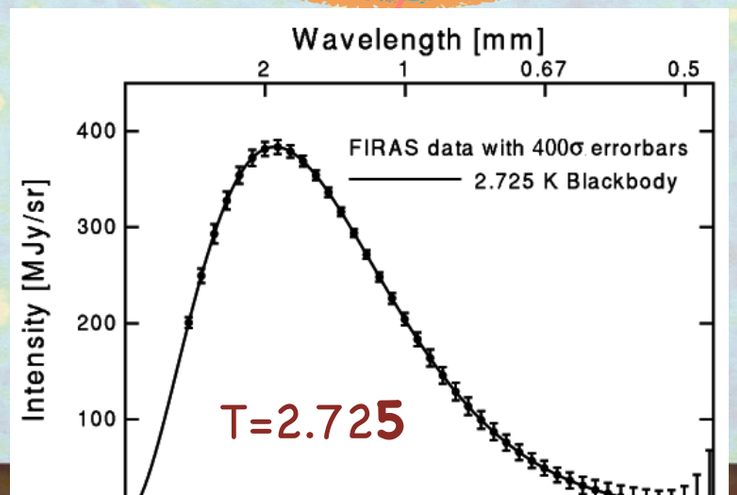
- A temperatura original da RCF era $T(z = 10^3) \sim 3000\,\mathrm{K}$, mas com a expansão ela caiu para $T(z = 0) \sim 3\,\mathrm{K}$, o que significa que a luz fica localizada principalmente na região das microondas ($\lambda \sim \mathrm{cm}$)







- Após o desacoplamento a RCF se propaga em ***todas as direções*** — o que observamos hoje são aqueles fótons que calharam de estar na casca esférica de raio correspondente a $z_{dec} \sim 10^3$, e de estarem "apontando" para nós.



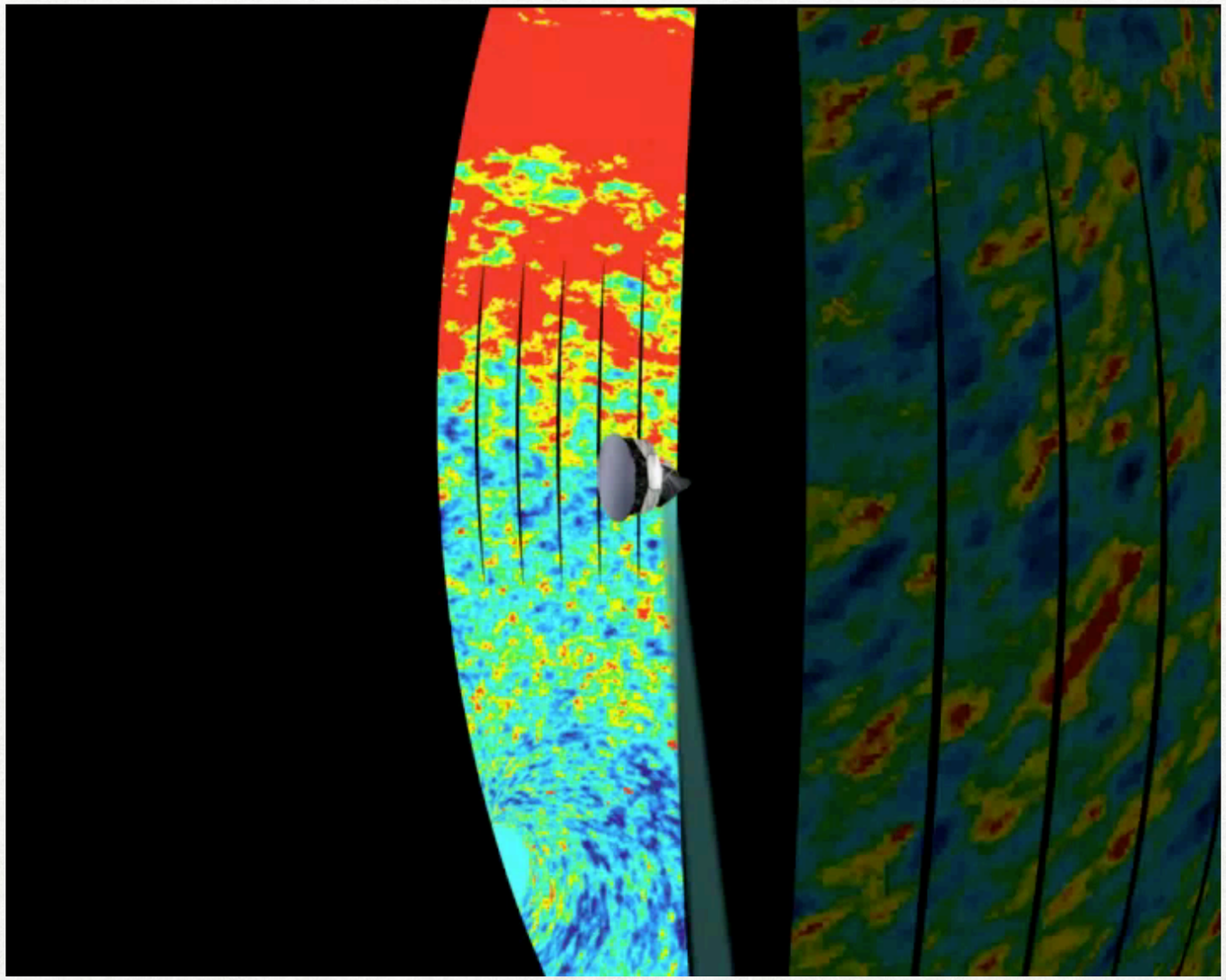
- Os dados da RCF são uma "foto" de uma seção (casca esférica) do nosso cone de luz passado, e representam os padrões típicos de flutuações de temperatura, densidade e pressão que prevaleciam no universo naquele instante ($z_{dec} \sim 10^3$)

A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO: EVIDÊNCIA DIRETA DO UNIVERSO PRIMORDIAL

- As ***flutuações de temperatura*** nos dizem que as ***flutuações de densidade*** no universo primordial eram, nessa época, da ordem de:

$$\delta_\rho = \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$

- RCF: "foto" do universo em $z_{dec} \sim 10^3$, quando ele tinha apenas 400,000 anos de idade!



A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO E A CURVATURA ESPACIAL

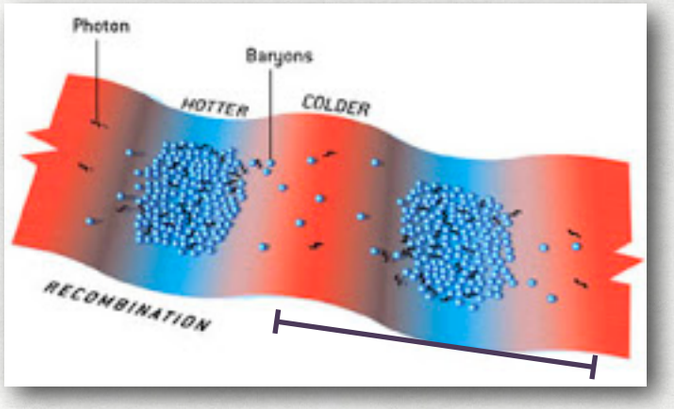
- O padrão de flutuações de temperatura da RCF reflete a dinâmica que se estabelecia até $z_{dec} \sim 10^3$ entre a matéria (que estava ionizada) e a radiação.

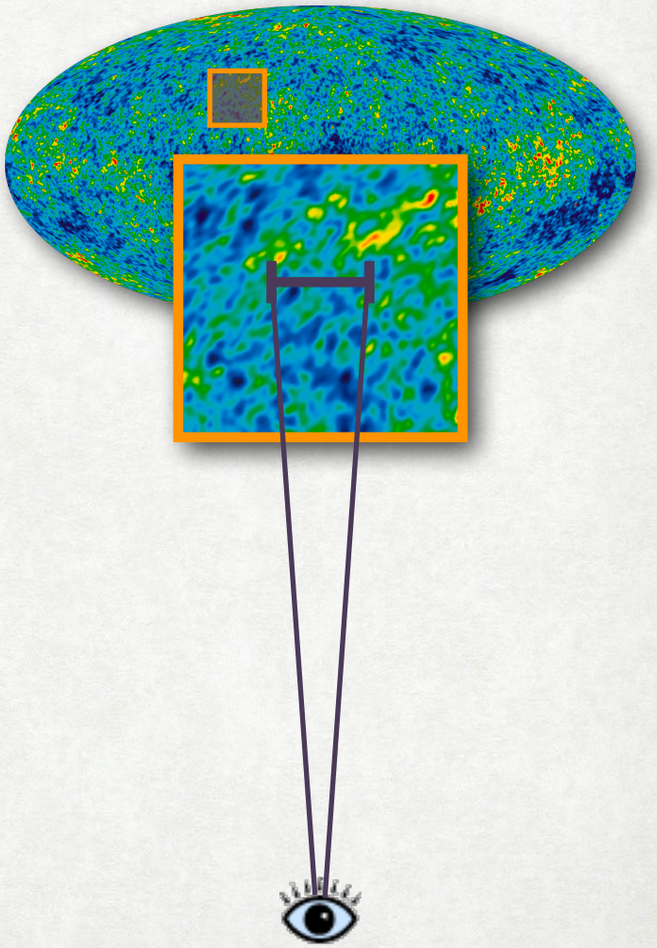
- O acoplamento forte entre a radiação e a matéria (principalmente elétrons) é determinado, por um lado pela ***força gravitacional***, e por outro pela ***pressão da radiação***.

- A competição entre esses dois efeitos gerou ***ondas "acústicas"*** na sopa cósmica, que se propagaram até o instante do desacoplamento.

- Basta saber eletromagnetismo, além de física atômica e molecular, para ***calcular*** com precisão a distância (comprimento de onda) característica dessas ondas acústicas — essa escala se chama "***horizonte acústico***".

- Podemos então ***comparar*** esse ***horizonte acústico*** que calculamos com o ***ângulo*** que medimos na RCF!

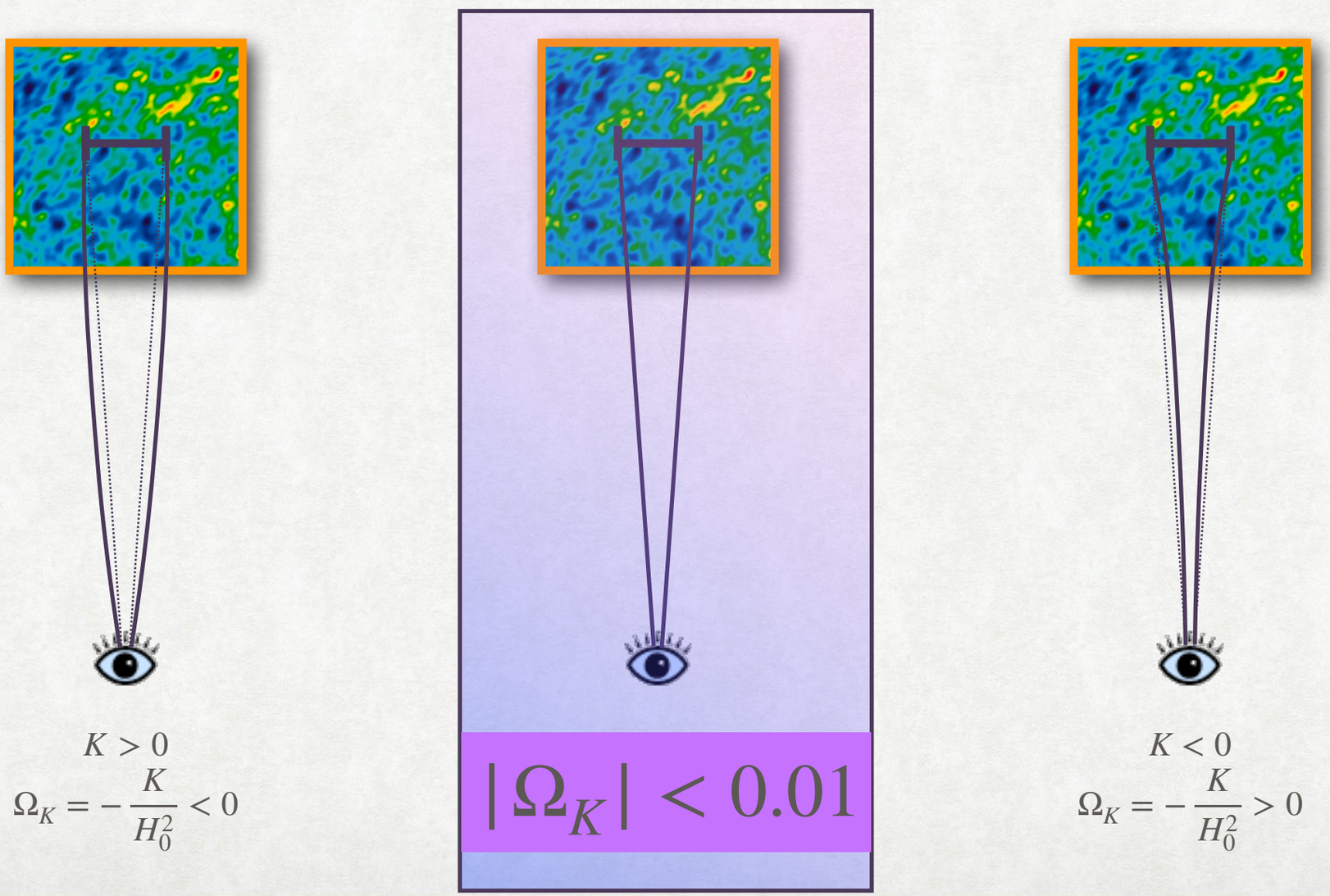




A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO E A CURVATURA ESPACIAL

- Mas a ***razão*** entre o ***"horizonte acústico" (calculado)*** e o ***ângulo (medido)*** é dada justamente pela ***distância de diâmetro angular:***

$$d_A(z_{dec}) = \frac{d_{HA}}{\Delta\theta} = \frac{1}{1+z_{dec}} \frac{1}{\sqrt{K}} \operatorname{sen}\left(\sqrt{K}\,\chi_{dec}\right) \quad , \quad \text{onde} \quad \chi_{dec} = \int_0^{z_{dec}} \frac{dz'}{H(z')}$$



MATÉRIA ESCURA

- A RCF, além de muitos outros dados astronômicos, mostram que o parâmetro de ***densidade da matéria "fria"*** (poeira) deve ser por volta de ***30%***, $\Omega_m \simeq 0.25 - 0.3$.

- Por outro lado, a RCF e a BBN também mostram que a densidade de ***bárions*** é ***bem menor*** do que isso: $\Omega_b \simeq 0.05$.

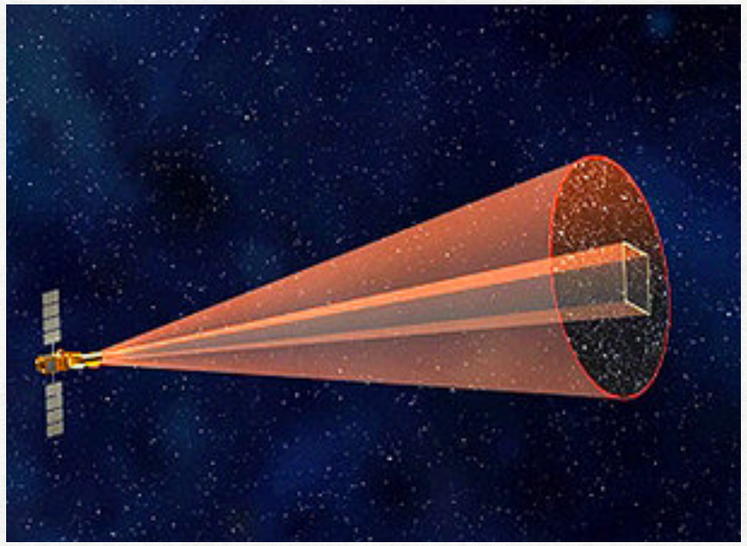
- Mas então que outra matéria é essa, 5-6x mais abundante que a matéria em átomos?

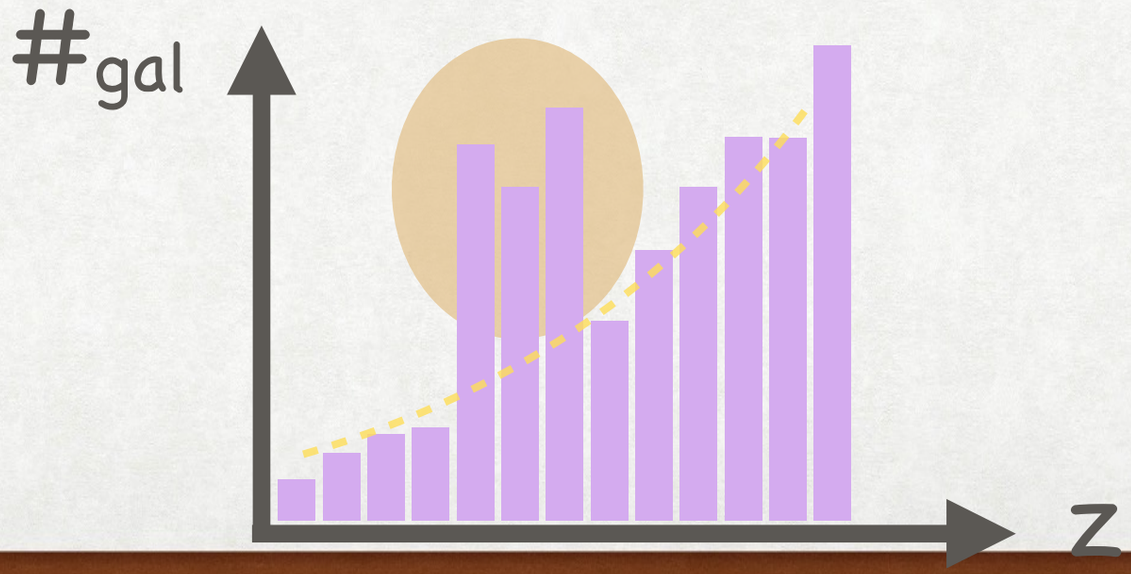
➡ **Matéria Escura**

- Vamos ver que a necessidade da Matéria Escura foi indicada há quase 100 anos atrás, e que sua existência é quase uma certeza.

MATÉRIA ESCURA

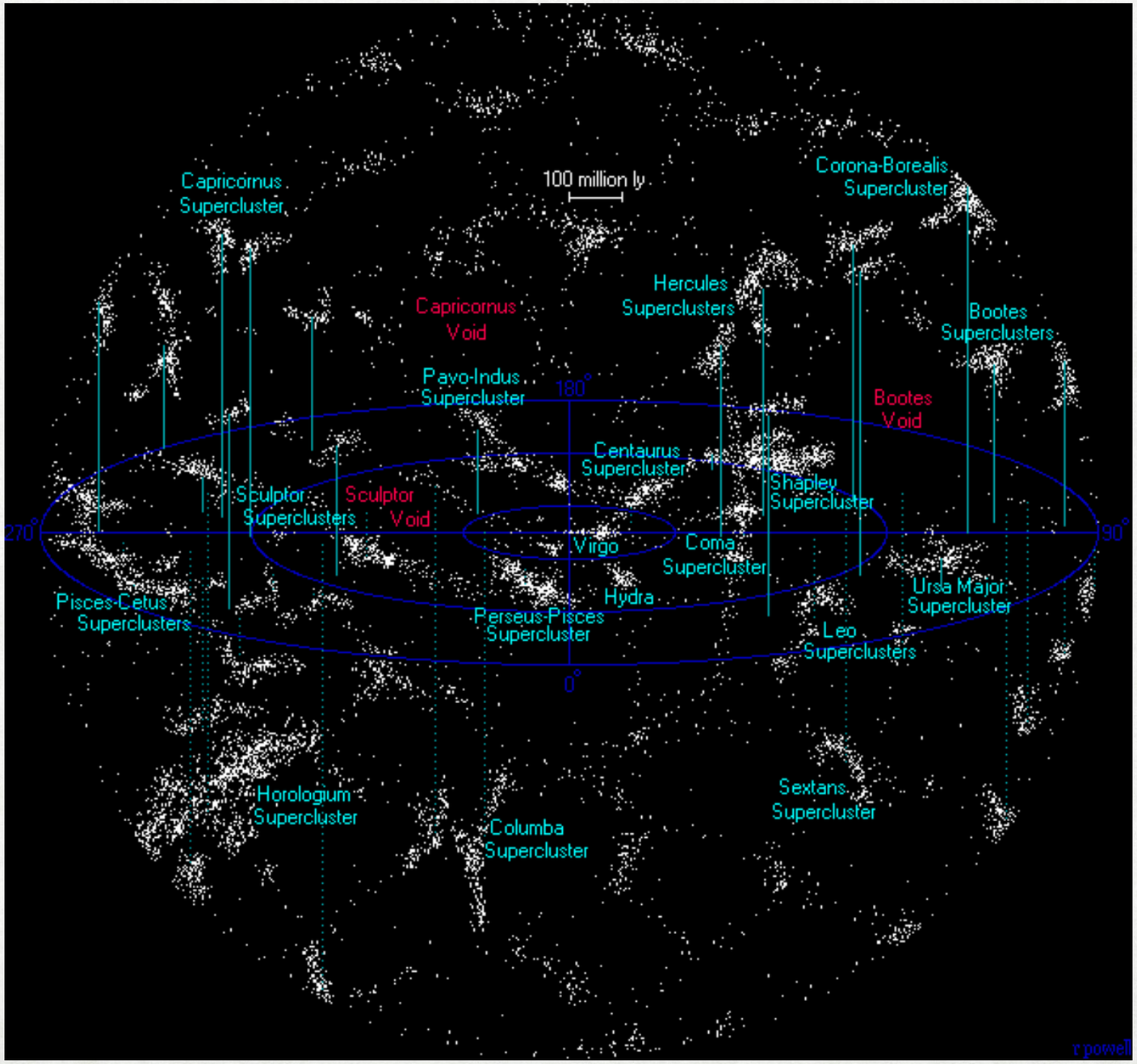
- Por volta de 1930, o astrônomo Fritz Zwicky estava procurando por grupos de aglomerados de galáxias quando notou algo curioso.





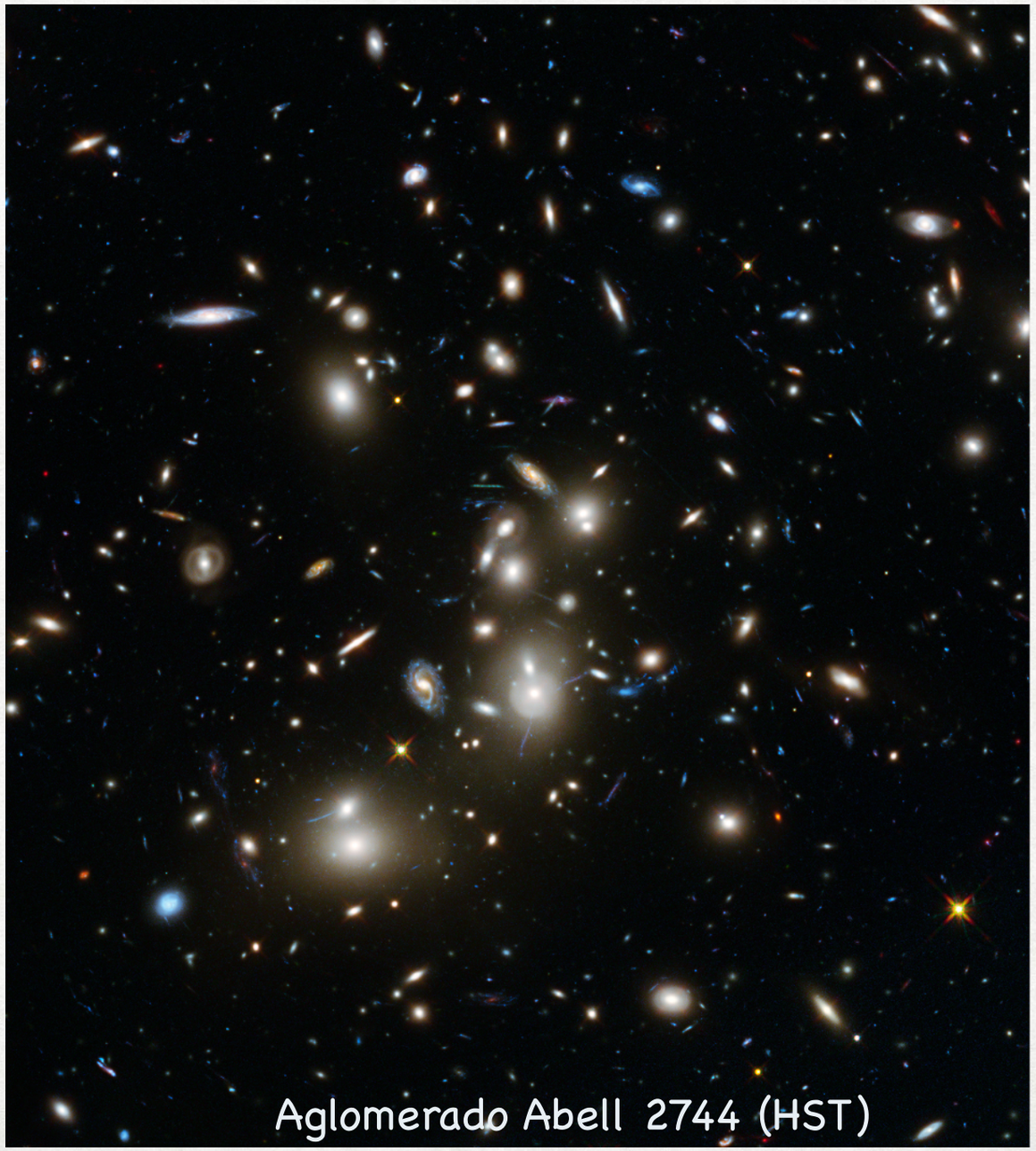
MATÉRIA ESCURA

- Essas grandes “congregações de galáxias” são relativamente comuns..



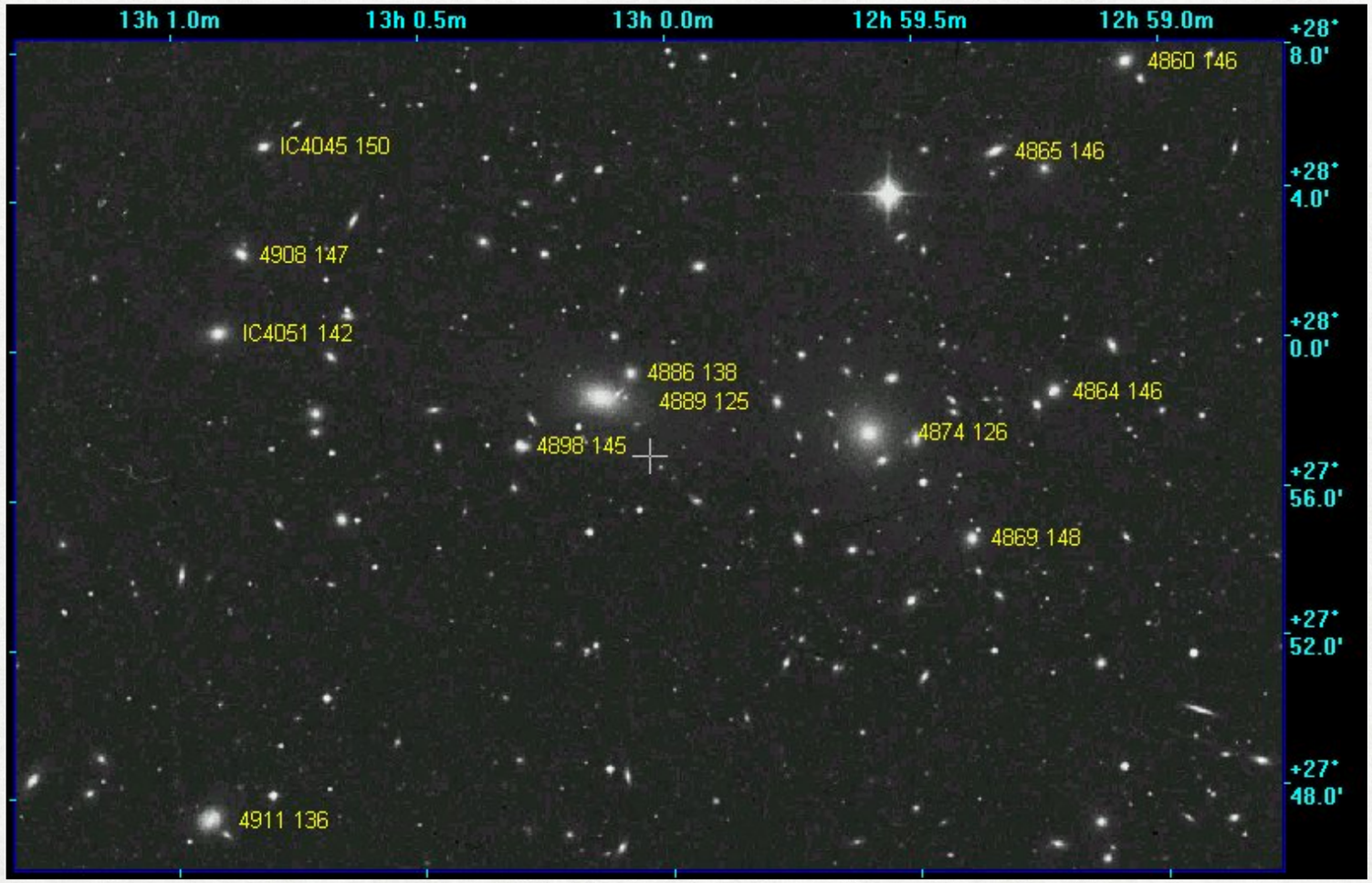
MATÉRIA ESCURA

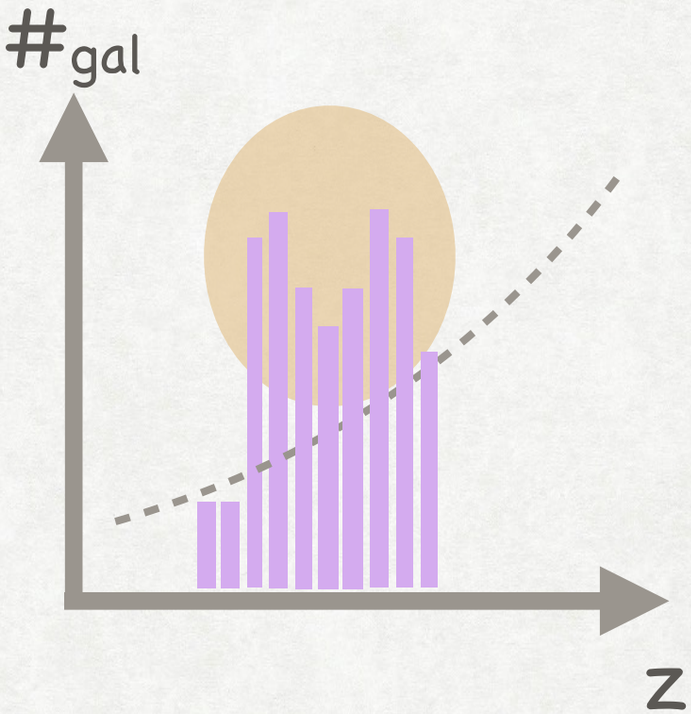
- ... e podem ter dezenas, às vezes centenas de membros.



MATÉRIA ESCURA

- Um dos sistemas que Zwicky mais observou era o ***Aglomerado de Coma***.
- Ele mediu cuidadosamente as ***posições*** e as ***velocidades*** de todas as galáxias desse aglomerado, e notou que ***as velocidades eram muito altas***!

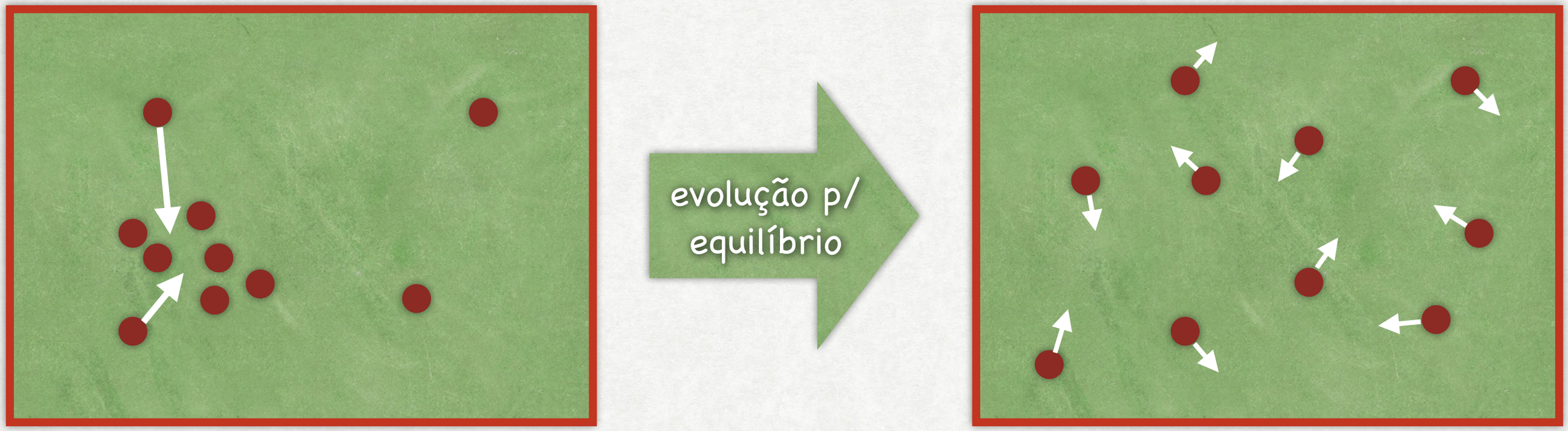




MATÉRIA ESCURA

- Mas como assim "muito altas"? Altas com relação a quê?

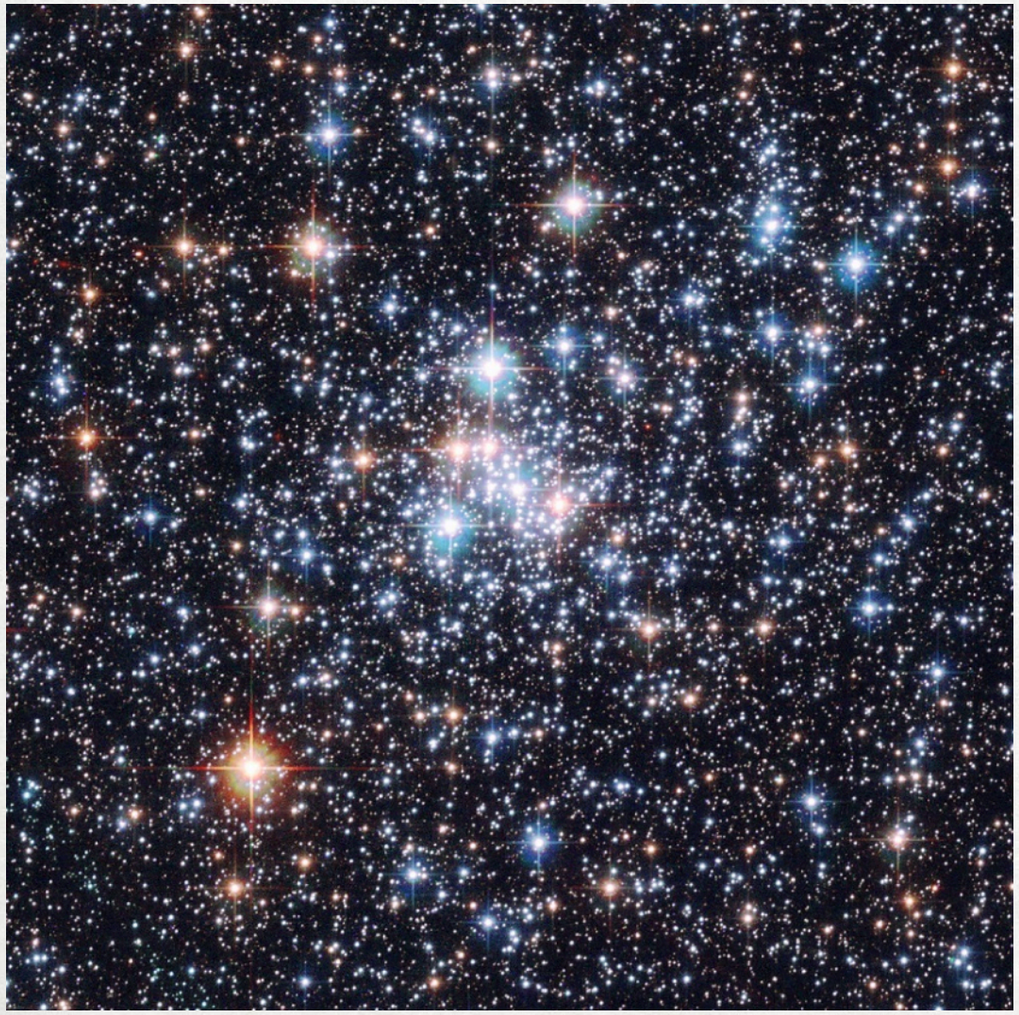
➡ ***Teorema do Virial***: em equilíbrio, $K_{Tot} \simeq -\frac{1}{2}U_{Tot}$



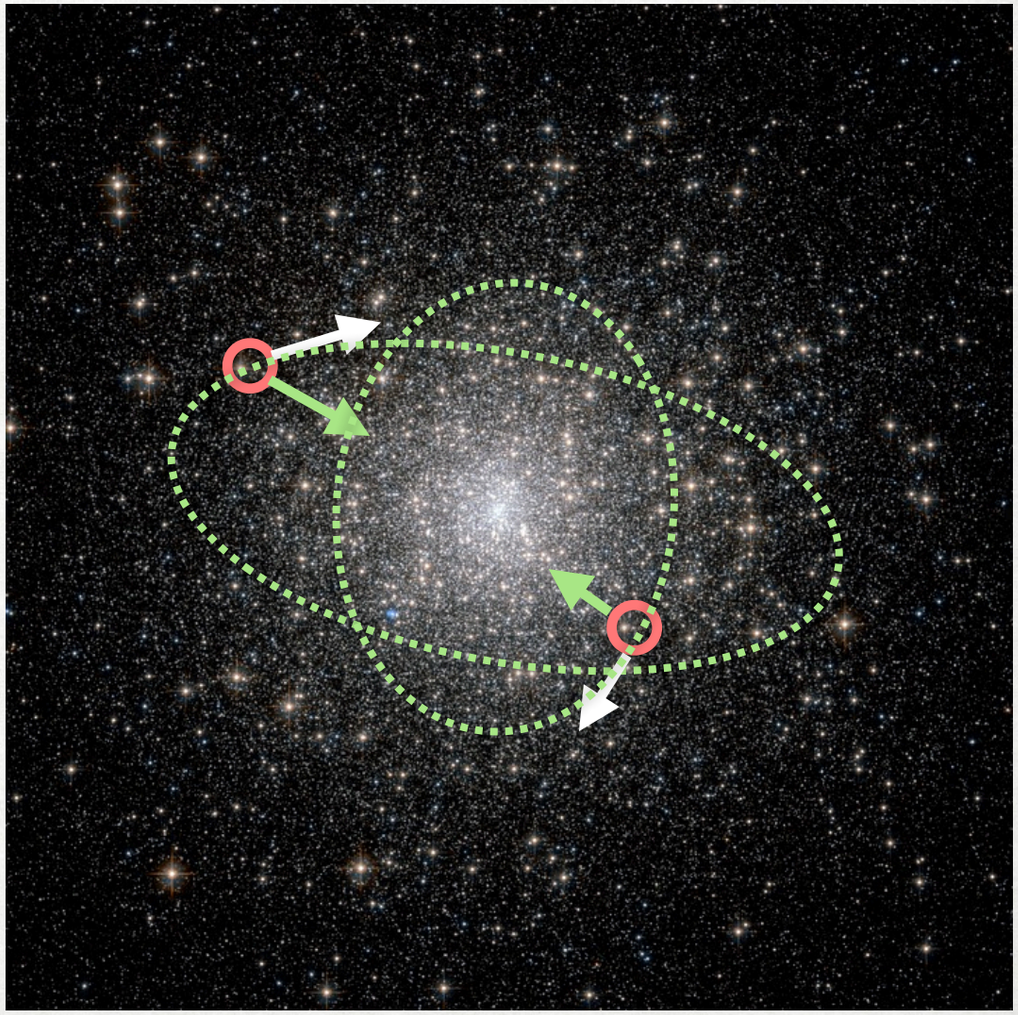
MATÉRIA ESCURA

- Mas como assim "muito altas"? Altas com relação a quê?

➡ ***Teorema do Virial***: em equilíbrio, $K_{Tot} \simeq -\frac{1}{2}U_{Tot}$

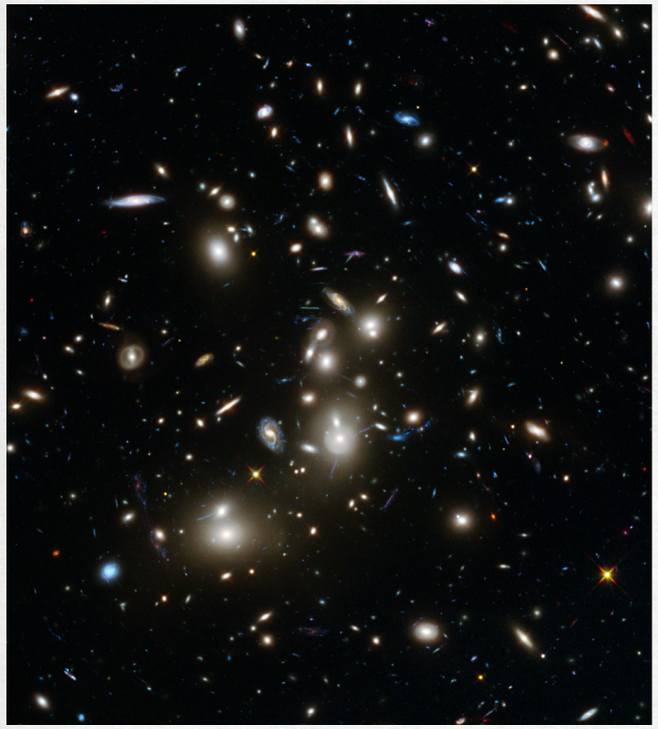


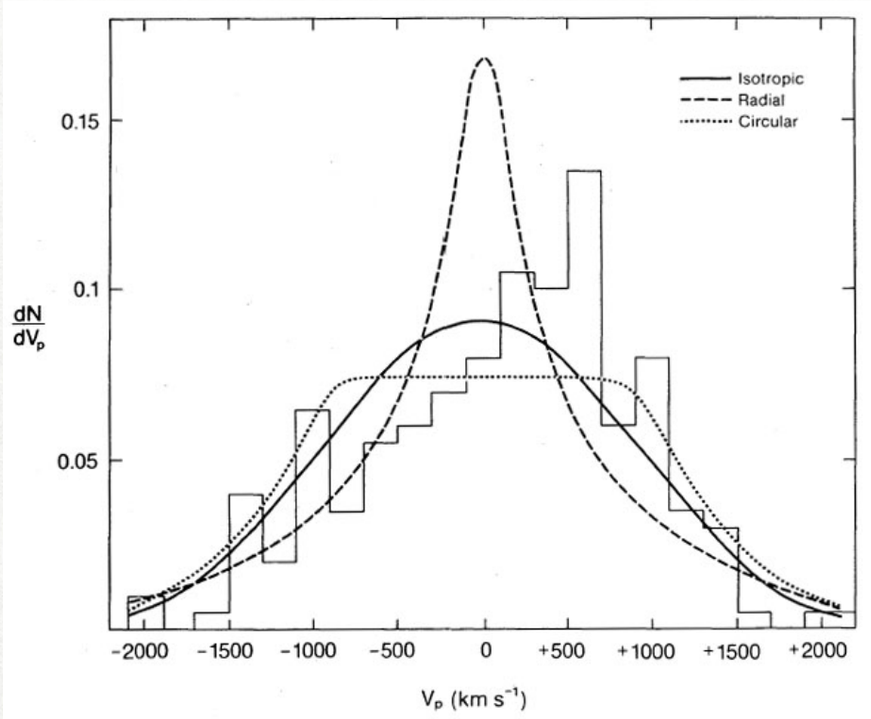
evolução p/
equilíbrio

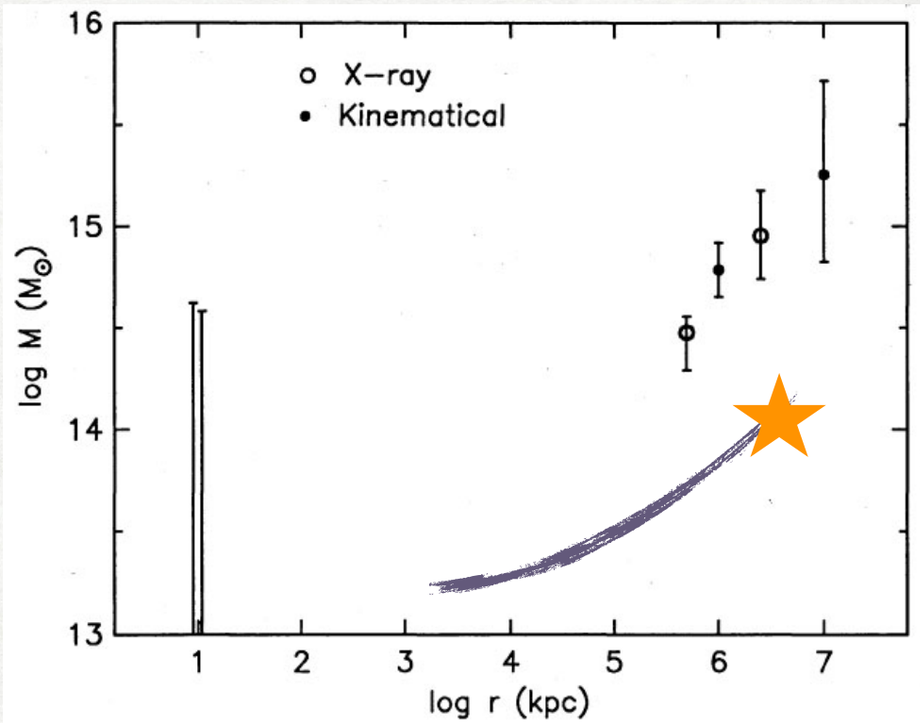


MATÉRIA ESCURA

- Através das ***velocidades*** medimos a ***energia cinética***; pela ***distribuição espacial***, estimamos a ***energia potencial gravitacional*** .





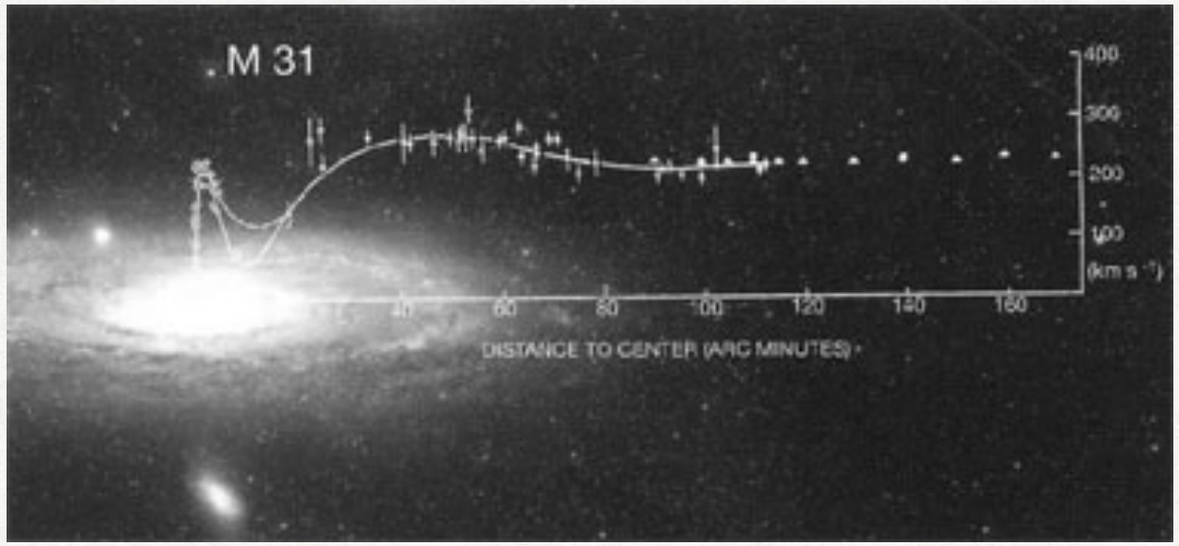


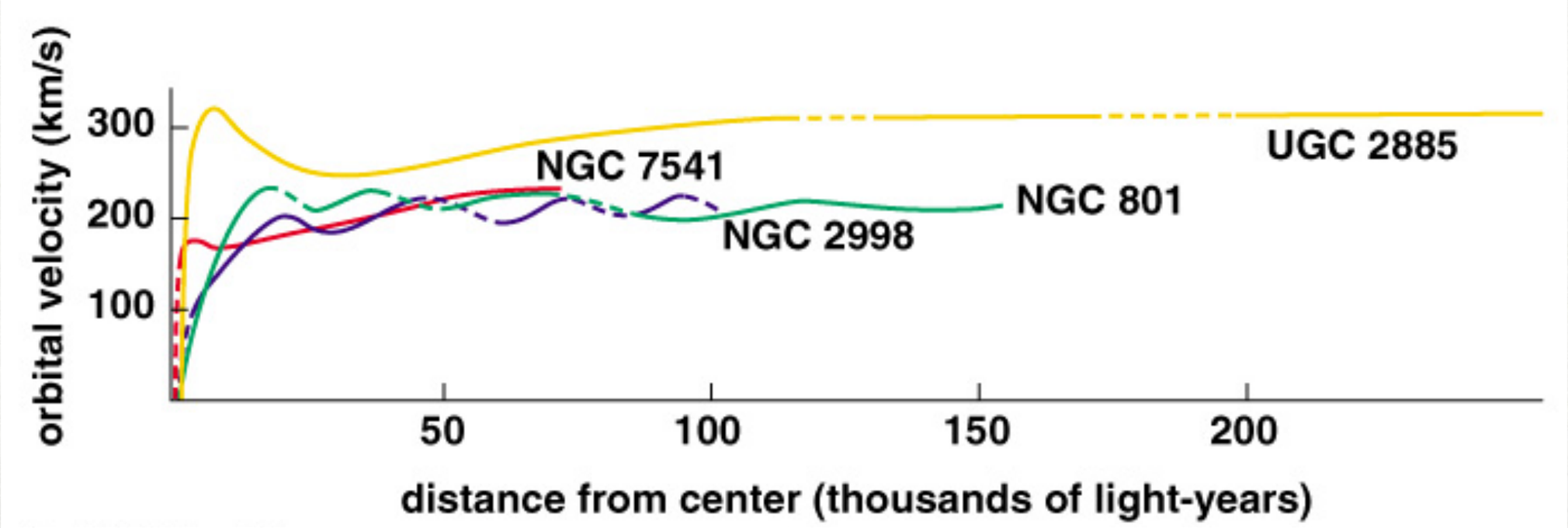
Aglomerado de Coma [Merritt, Ap. J. 313, 121 (1987)]

- Porém, medimos a massa em estrelas e gás de Coma como sendo $\sim 2. \times 10^{14}\, M_\odot$, enquanto a massa total e estimada em $\sim 10^{15}\, M_\odot$!

MATÉRIA ESCURA

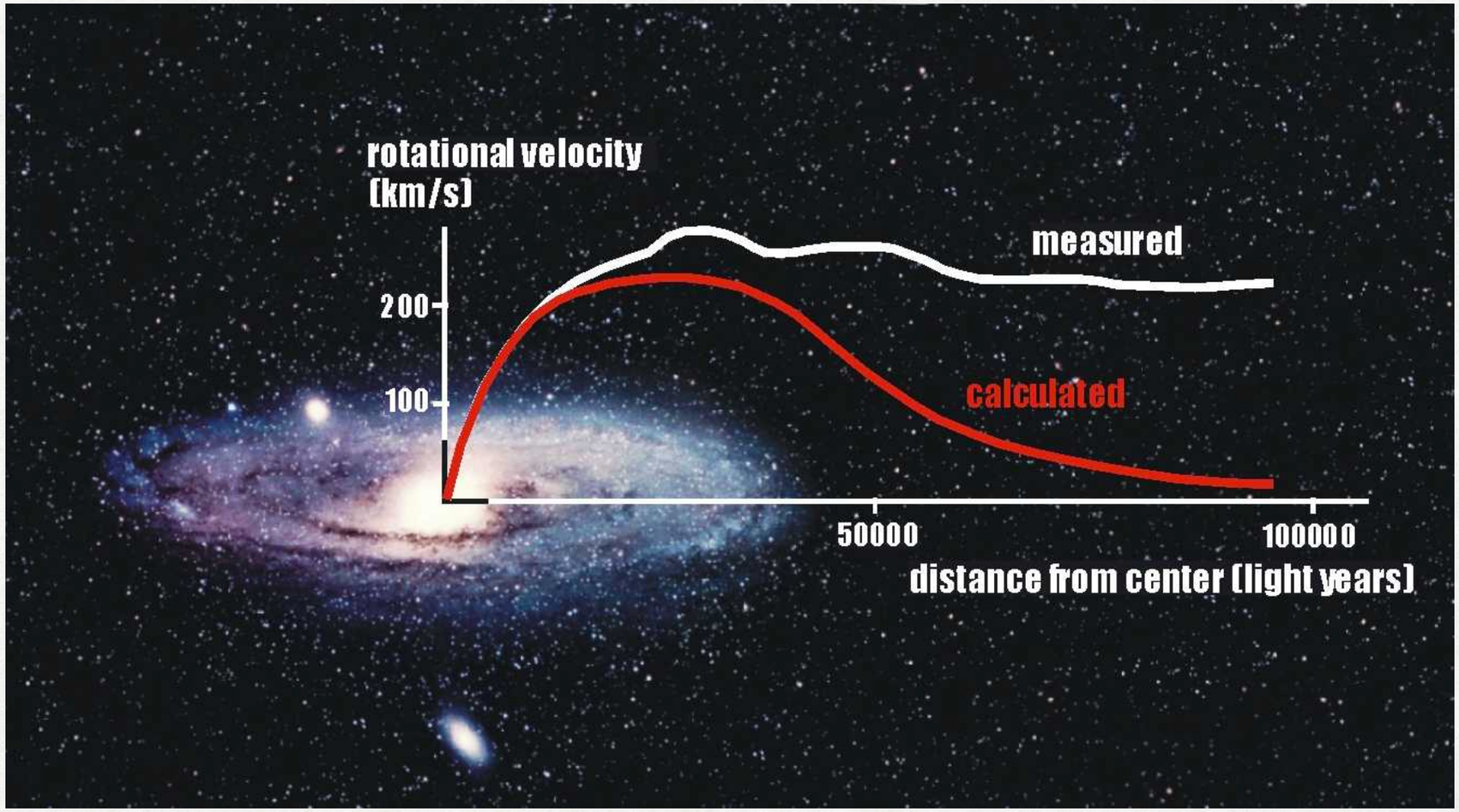
- Durante os anos 1960-1970 a astrônoma Vera Rubin observou centenas de galáxias espirais e mediu como elas rodam





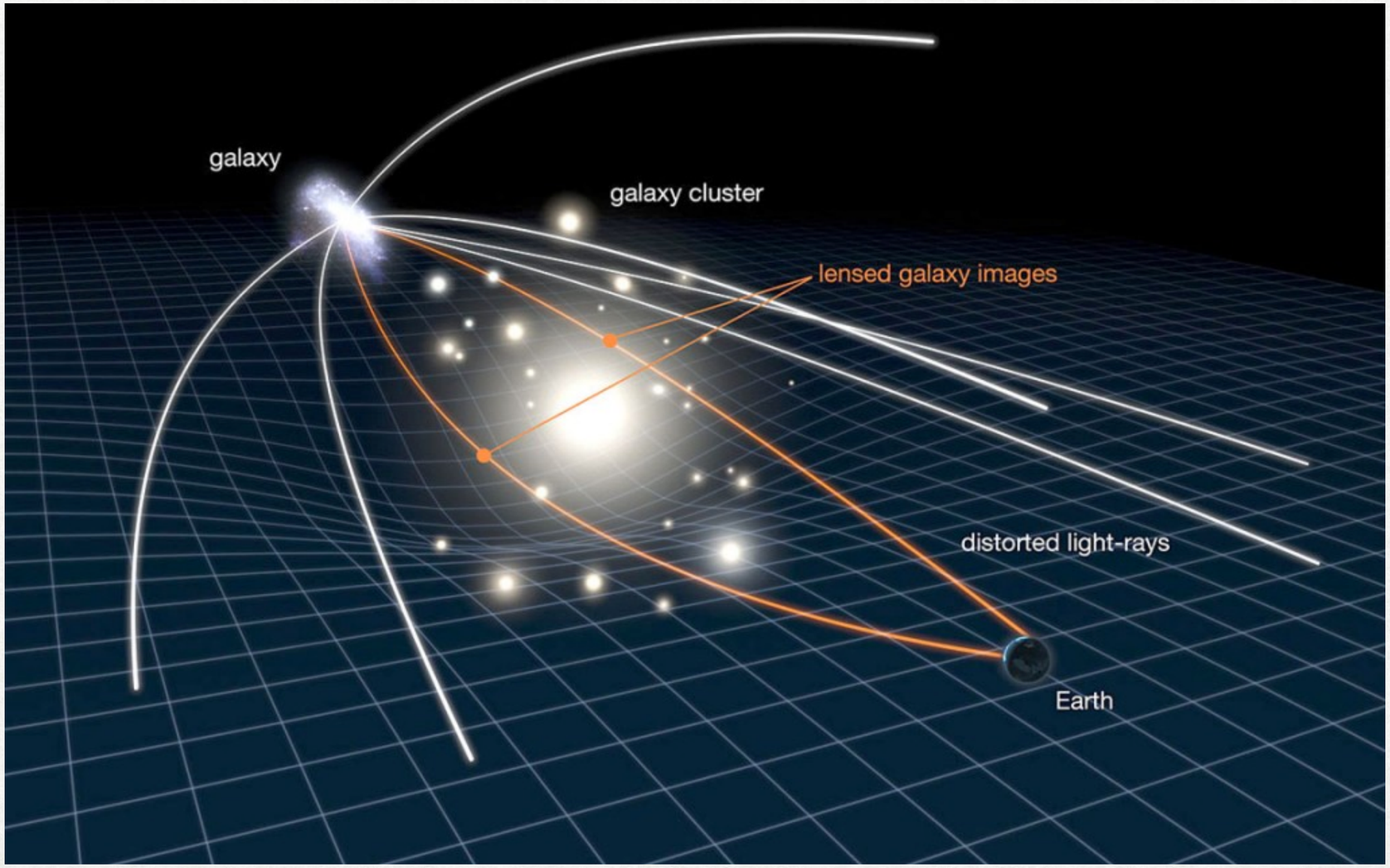
MATÉRIA ESCURA

- Em todos os casos, ela verificou que estrelas e gás giravam mais rápido, e até distâncias maiores do que seria permitido por órbitas Keplerianas com uma massa dada pela massa em estrelas e gás!



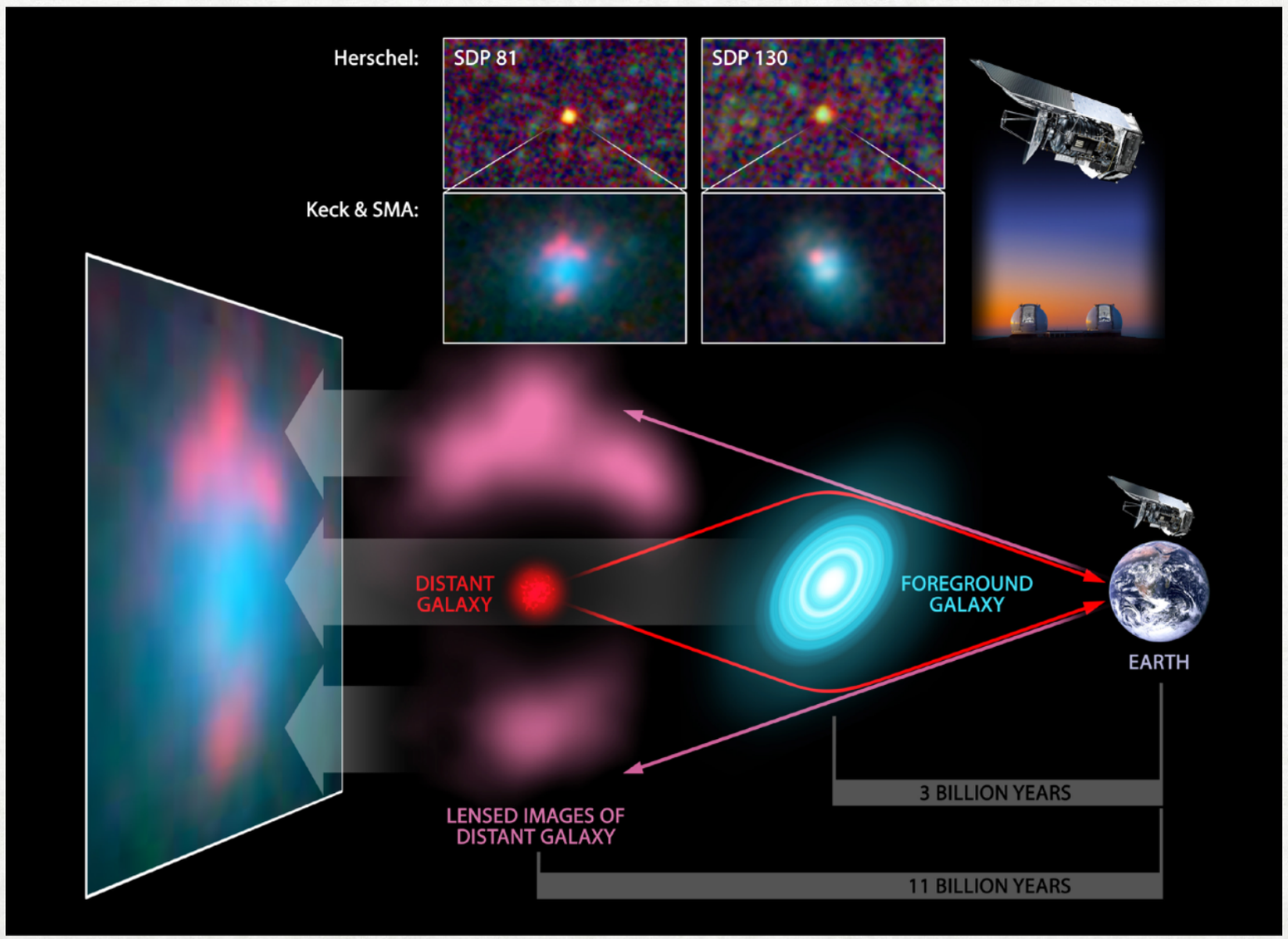
MATÉRIA ESCURA

- Nos últimos anos, com telescópios maiores, melhores e no espaço, pudemos também medir como a gravidade de galáxias e aglomerados desviam a luz que passa perto desses sistemas — as ***lentes gravitacionais***



MATÉRIA ESCURA

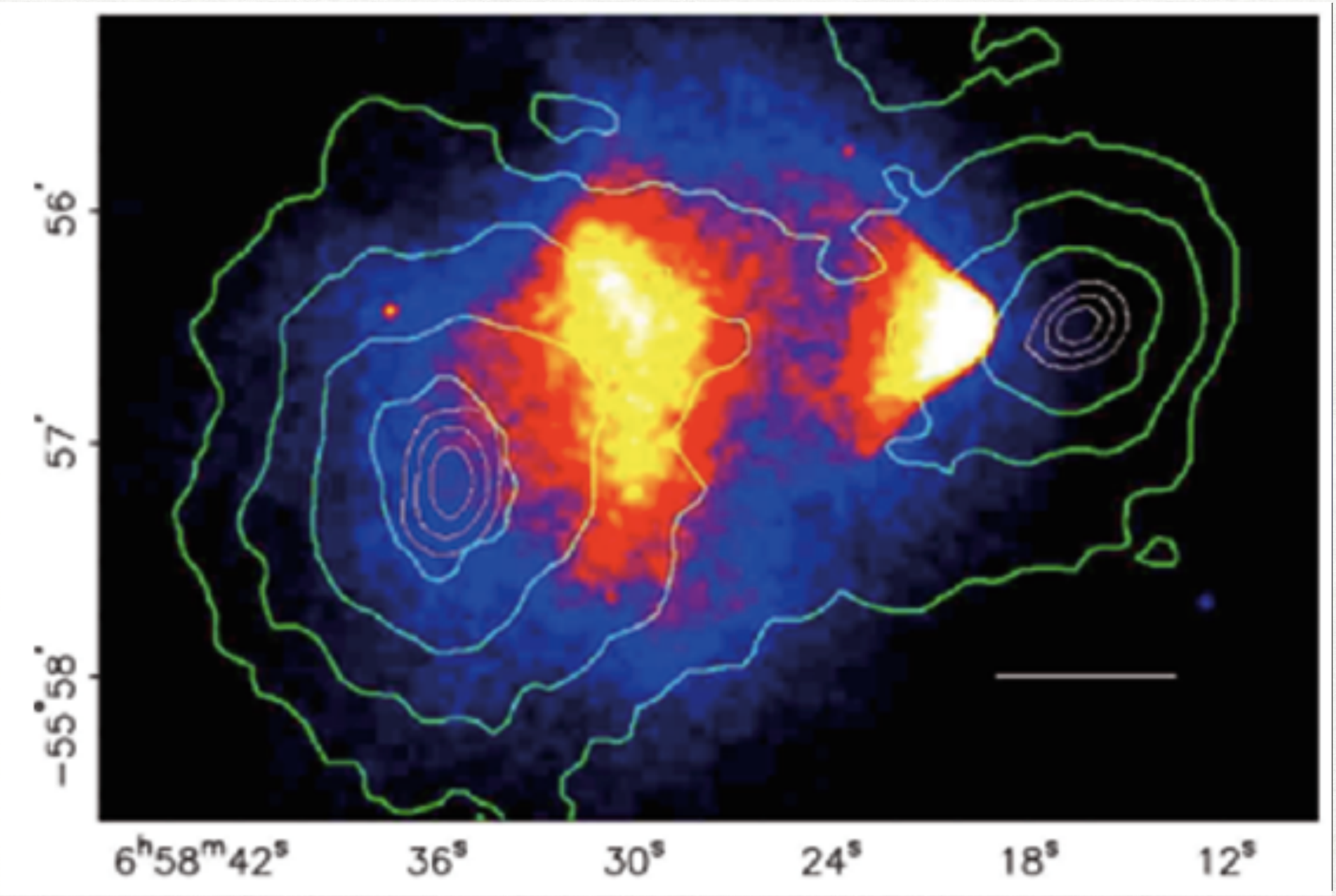
- Nos últimos anos, com telescópios maiores, melhores e no espaço, pudemos também medir como a gravidade de galáxias e aglomerados desviam a luz que passa perto desses sistemas — as ***lentes gravitacionais***



Em todos os casos analisados, novamente se observou que era necessário supor que havia matéria escura nesses sistemas, numa abundância 5-6x maior que a matéria bariônica!

MATÉRIA ESCURA

- E agora... todo mundo junto: o “Bullet Cluster”

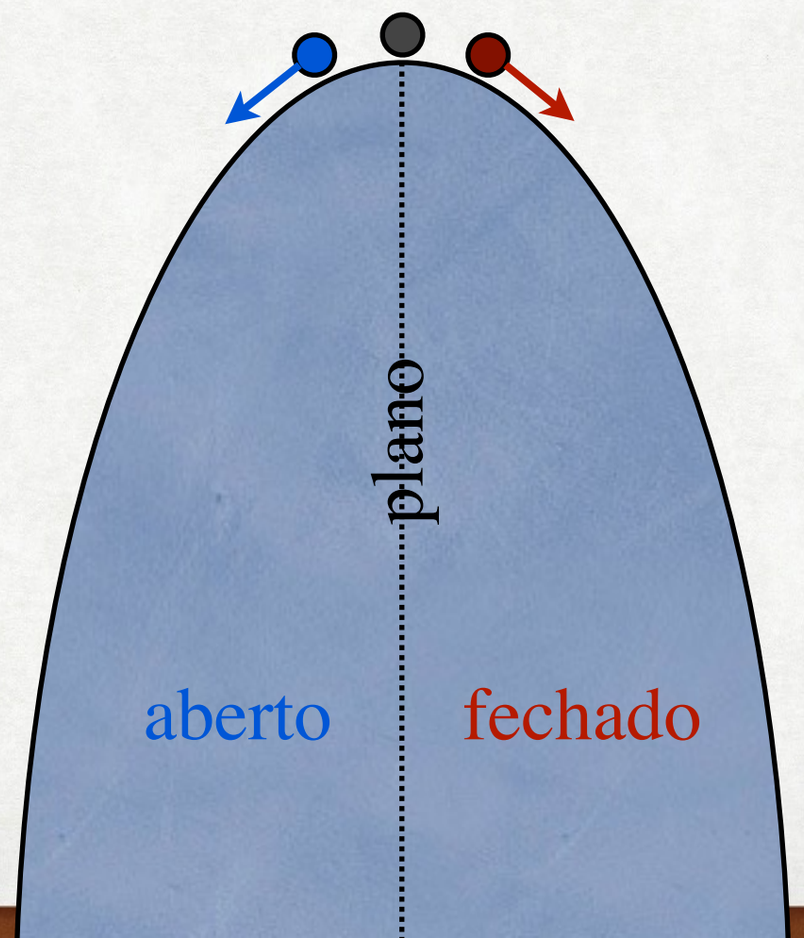


PROBLEMAS DO MODELO DO BIG BANG: ESTRUTURA CAUSAL E CONES DE LUZ EM FLRW

- O modelo de um universo em expansão, com matéria fria, radiação e curvatura espacial, tem alguns problemas:

(1) Por que a curvatura espacial é tão pequena?

$$\frac{d\ln\Omega_K}{d\ln a} = 8\pi G\frac{\rho+3p}{H^2} \sim -\frac{\ddot{a}}{a}\frac{1}{H^2}$$

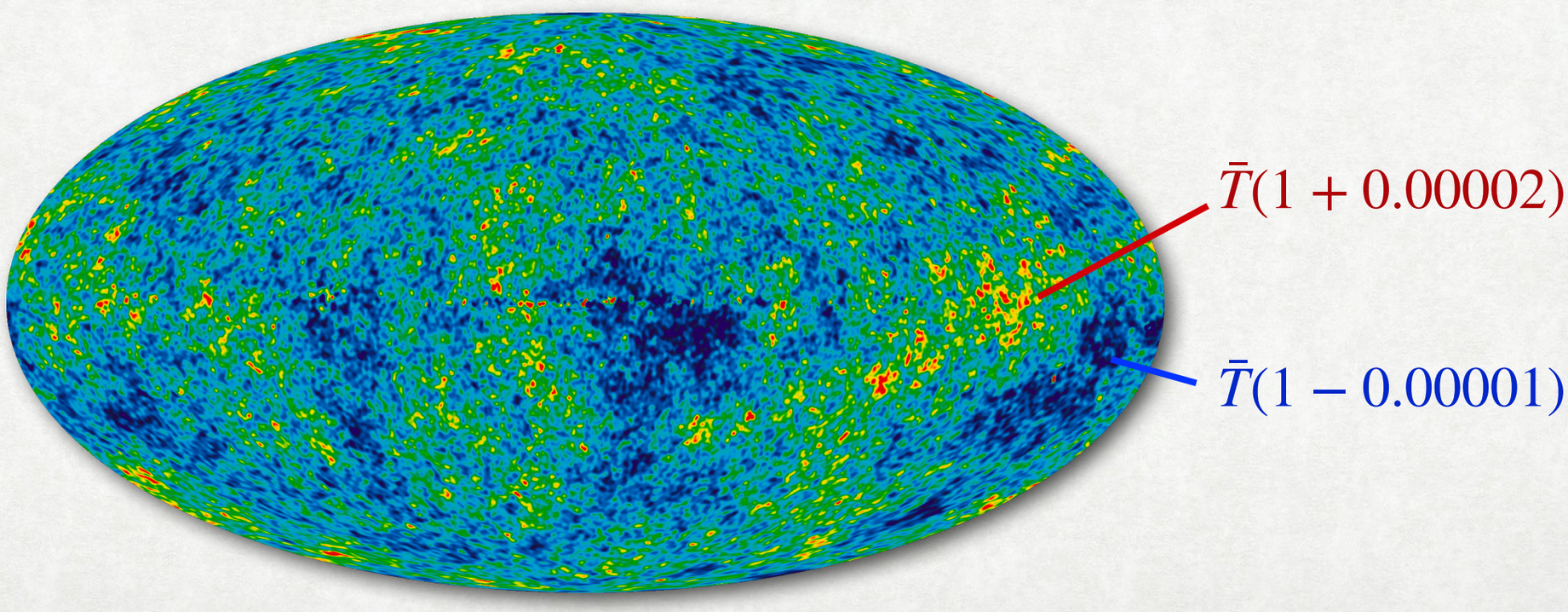


PROBLEMAS DO MODELO DO BIG BANG: ESTRUTURA CAUSAL E CONES DE LUZ EM FLRW

- O modelo de um universo em expansão, com matéria fria, radiação e curvatura espacial, tem alguns problemas:

  (2) De onde vieram as flutuações de temperatura, densidade e pressão?

$$\delta_\rho(\vec{x}) = \frac{\rho(\vec{x}) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$

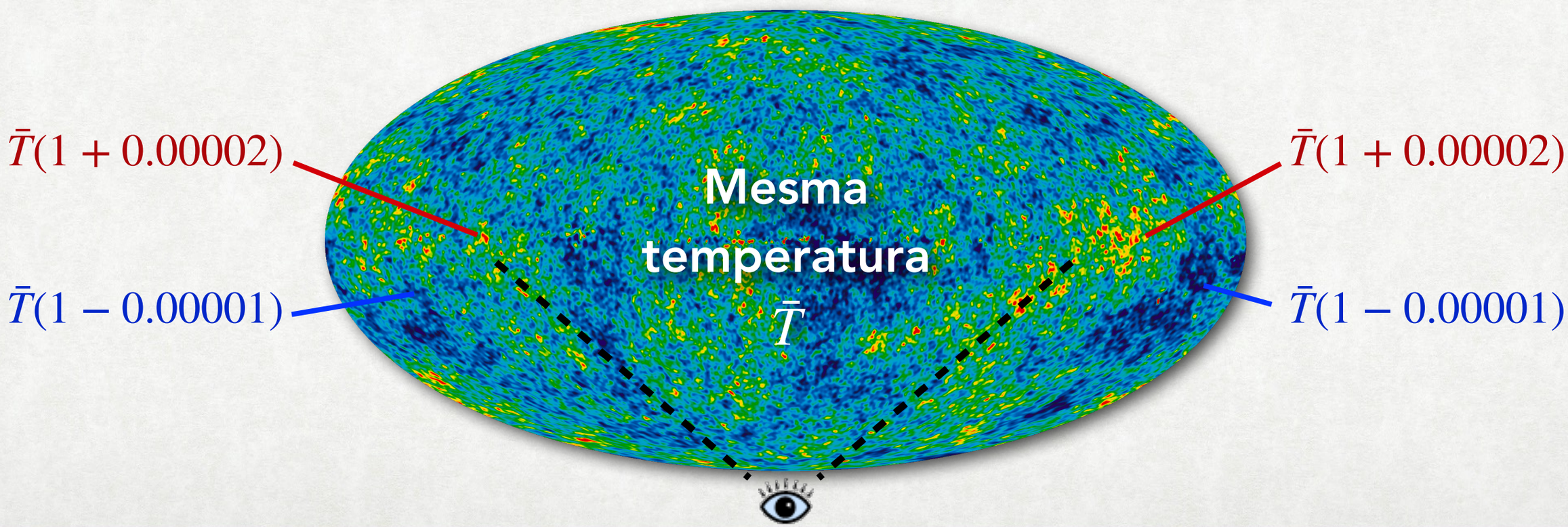


PROBLEMAS DO MODELO DO BIG BANG: ESTRUTURA CAUSAL E CONES DE LUZ EM FLRW

- O modelo de um universo em expansão, com matéria fria, radiação e curvatura espacial, tem alguns problemas:

  (3) Por que razão essa temperatura era a mesma em todos esses lugares?

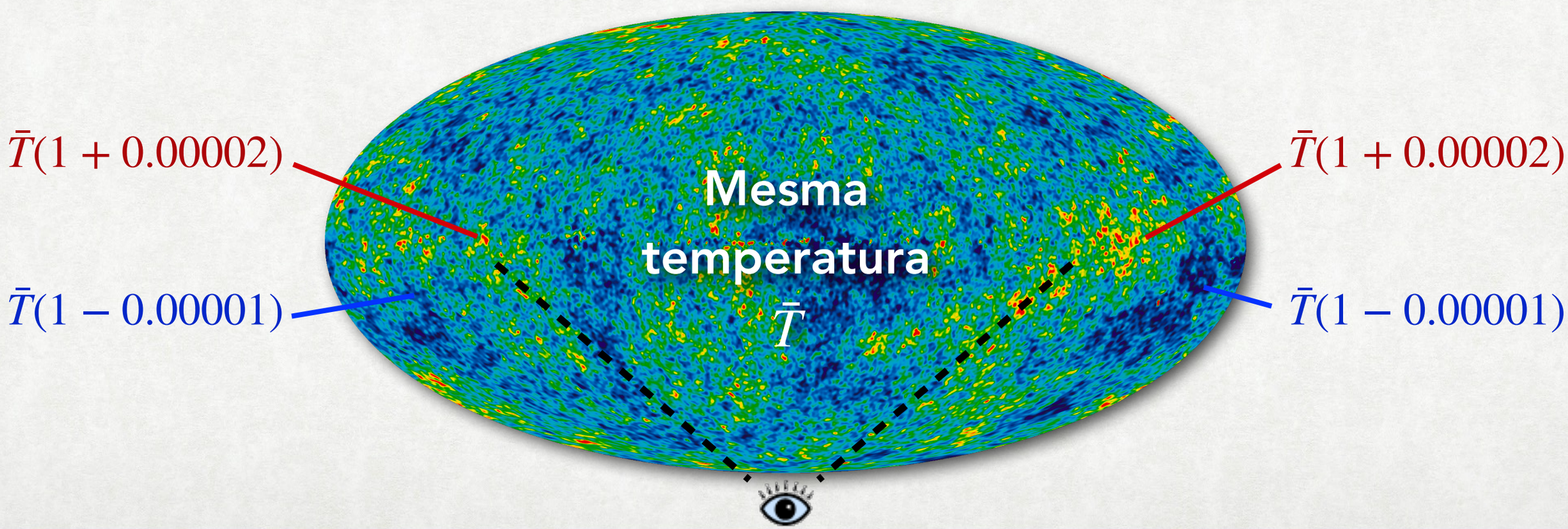
$$\delta_\rho(\vec{x}) = \frac{\rho(\vec{x}) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$



PROBLEMAS DO MODELO DO BIG BANG: ESTRUTURA CAUSAL E CONES DE LUZ EM FLRW

- A pergunta é: regiões super distantes do cosmos têm ***propriedades quase idênticas*** (ou seja, o universo inteiro parece ser muito homogêneo!)

- Mas será que desde o Big Bang até a época da formação da RCF essas regiões tiveram chance de interagir? Ou seja, quais são os ***cones de luz***?



PROBLEMAS DO MODELO DO BIG BANG: ESTRUTURA CAUSAL E CONES DE LUZ EM FLRW

- Para estudar os cones de luz, vamos retornar à nossa métrica fundamental, FLRW:

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)\, dl^2 \quad .$$

- Vamos considerar, por simplicidade, a seguinte situação:

  (i) o fator de ***escala é uma lei de potência***, $a(t) \sim t^\alpha$

  (ii) a ***curvatura espacial é desprezível***, $K \to 0$

  (iii) a luz se propaga na ***direção radial***, logo $dl^2 = d\chi^2$

- Para esse raio de luz, portanto, temos que a distância radial que esse raio percorre entre dois instantes t_1 e t_2 é dada por:

$$\chi_2 - \chi_1 = \pm \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{a(t)}$$

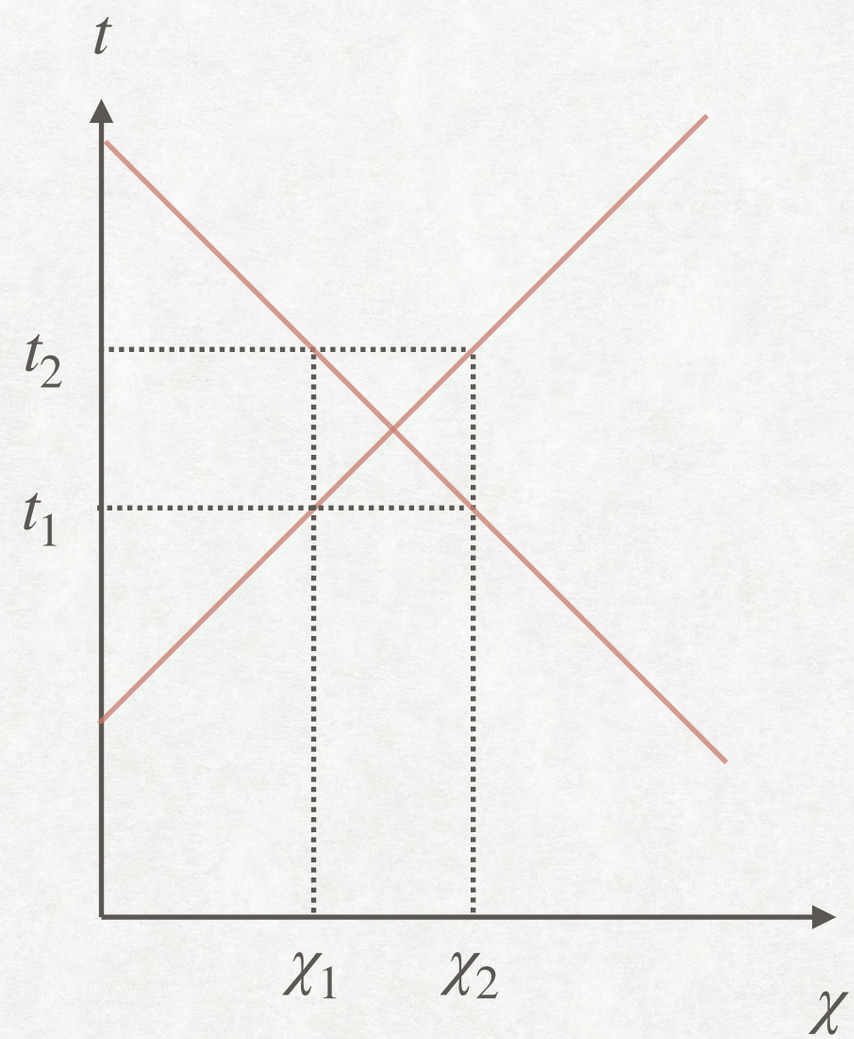
- Essa relação, portanto, define o ***cone de luz*** a partir de qualquer ponto, entre instantes t_1 e t_2 arbitrários — o sinal **+** dá os raios de luz caminhando na direção $+\chi$ (para fora), e o sinal $-$ dá os raios de luz caminhando da direção $-\chi$.

PROBLEMAS DO MODELO DO BIG BANG: ESTRUTURA CAUSAL E CONES DE LUZ EM FLRW

- Vamos começar com um caso simples: suponha que o universo é estático, ou seja $\alpha = 0$ ($a \sim t^{\alpha} \sim$ constante). Nesse caso encontramos:

$$\chi_2 - \chi_1 = \pm \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{a(t)} = \pm \int_{t_1}^{t_2} dt = \pm (t_2 - t_1)$$

- Isso é justamente o cone de luz do espaço de Minkowski em torno do ponto na intersecção dessas linhas!

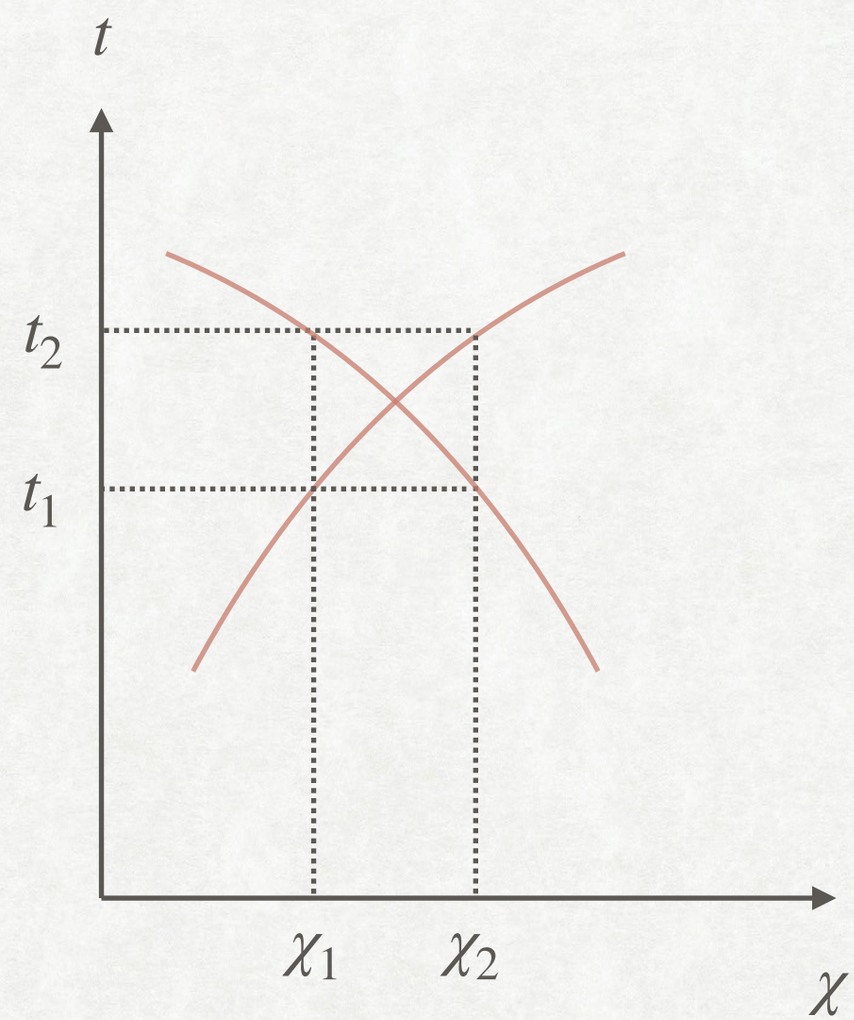


PROBLEMAS DO MODELO DO BIG BANG: ESTRUTURA CAUSAL E CONES DE LUZ EM FLRW

- Vamos agora tomar o caso de um universo com poeira, ou seja 2/3. Nesse caso temos $a = (t/t_0)^{2/3}$ e assim:

$$\chi_2 - \chi_1 = \pm \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{a(t)} = \pm\, t_0 \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{t_0} \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-2/3}$$

$$= \pm\, t_0\, 3 \left[\left(\frac{t_2}{t_0}\right)^{1/3} - \left(\frac{t_1}{t_0}\right)^{1/3} \right]$$



- Agora vemos que os cones ficam dobrados "para baixo"!

- Tomando t_0 no ponto médio entre t_1 e t_2, vemos que, em torno daquele ponto, o cone de luz tem 45° ($d\chi \simeq \pm\, dt$) , mas à medida que vamos nos distanciando, o cone de luz fica cada vez mais curvo!

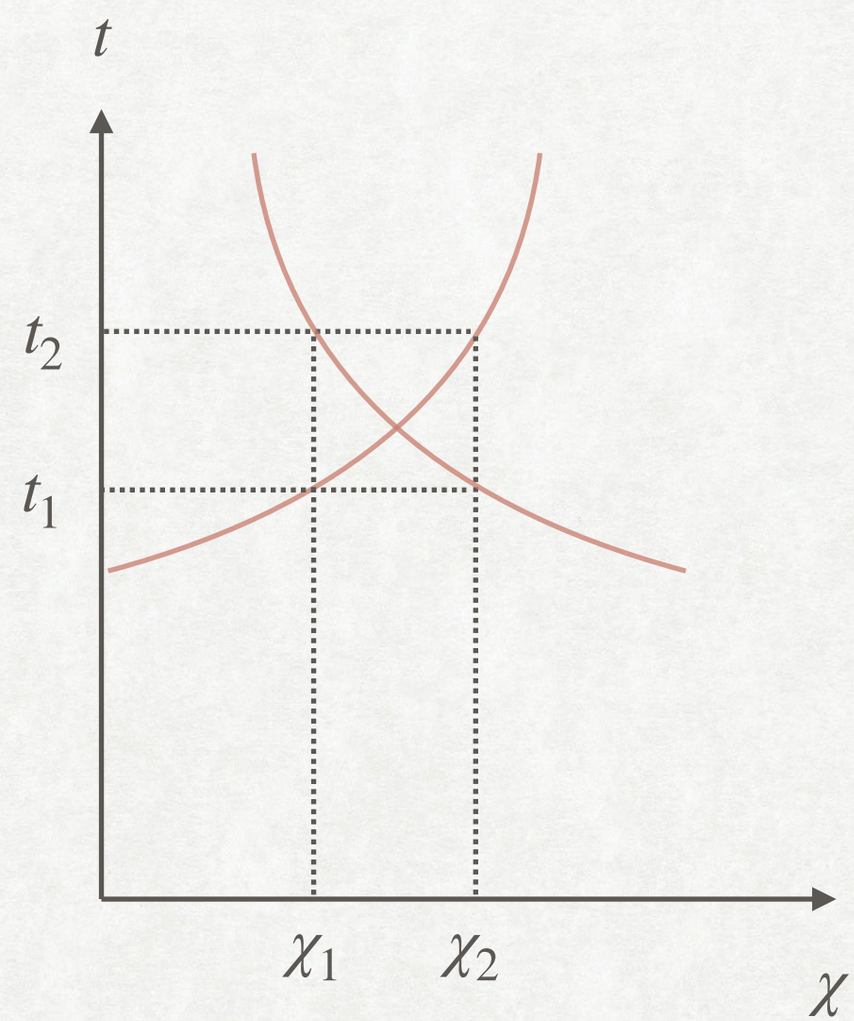
PROBLEMAS DO MODELO DO BIG BANG: ESTRUTURA CAUSAL E CONES DE LUZ EM FLRW

- Vamos agora tomar um caso um pouco mais exótico, com uma lei de potência tal que $\alpha = 2$, ou seja, $a = (t/t_0)^2$ e assim:

$$\chi_2 - \chi_1 = \pm \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{a(t)} = \pm\, t_0 \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{t_0} \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-2}$$

$$= \pm\, t_0 (-1) \left[\left(\frac{t_2}{t_0}\right)^{-1} - \left(\frac{t_1}{t_0}\right)^{-1} \right]$$

$$= \pm\, t_0 \left[\frac{t_0}{t_1} - \frac{t_0}{t_2} \right]$$



- Ou seja, agora os cones ficam dobrados "para cima"

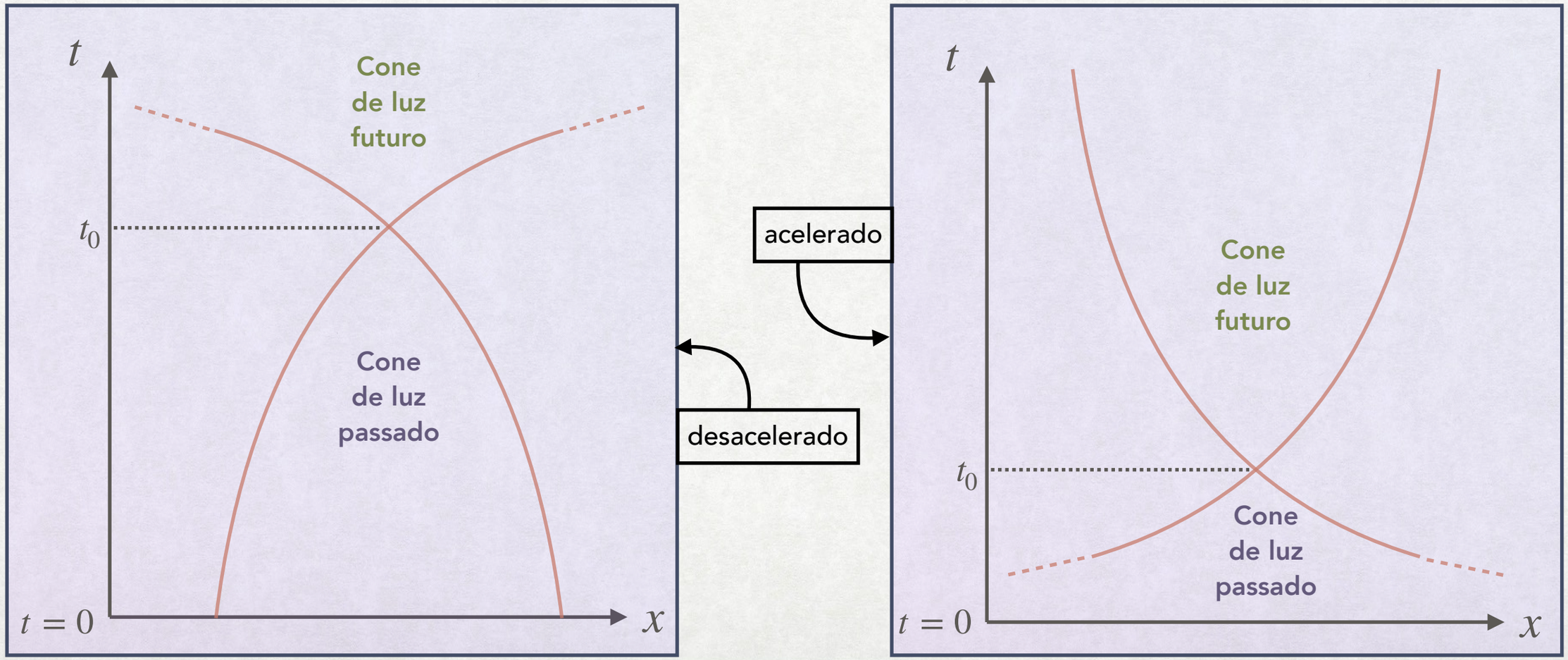
- No caso limite, em que $\alpha \to \infty$ temos a expansão exponencial, $a \sim e^{H_\Lambda t}$, e a situação fica muito parecida com o exemplo acima.

PROBLEMAS DO MODELO DO BIG BANG: ESTRUTURA CAUSAL E CONES DE LUZ EM FLRW

- Para uma ***lei de potência geral*** temos que $a = (t/t_0)^\alpha$ e assim:

$$\chi_2 - \chi_1 = \pm\, t_0 \frac{1}{1-\alpha}\left[\left(\frac{t_2}{t_0}\right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t_1}{t_0}\right)^{1-\alpha}\right]$$

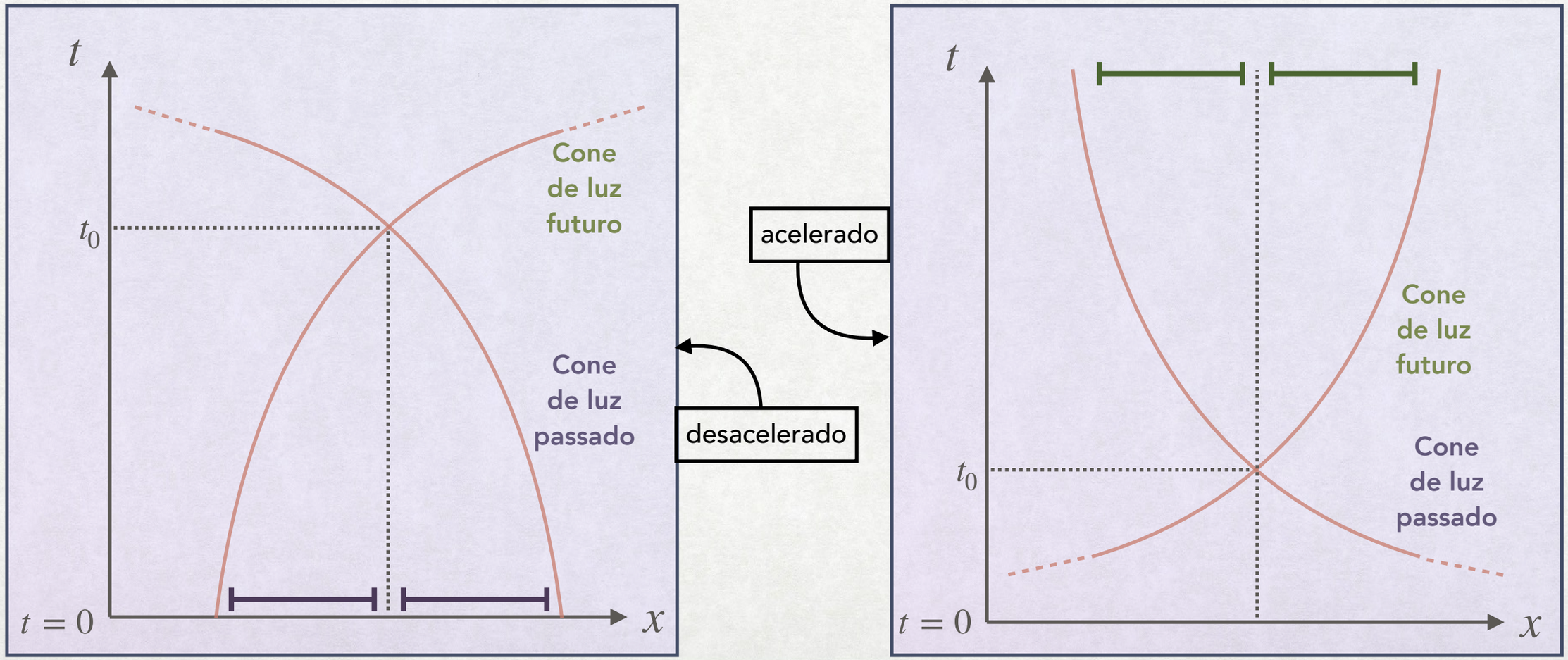
- As expansões são do tipo ***desacelerada***, $\alpha < 1$, $\ddot{a} < 0$, e ***acelerada***, $\alpha > 1$, $\ddot{a} > 0$. Se continuarmos os cones de luz nesses dois casos arbitrariamente no ***passado*** e no ***futuro*** teremos a seguinte situação:



PROBLEMAS DO MODELO DO BIG BANG: ESTRUTURA CAUSAL E CONES DE LUZ EM FLRW

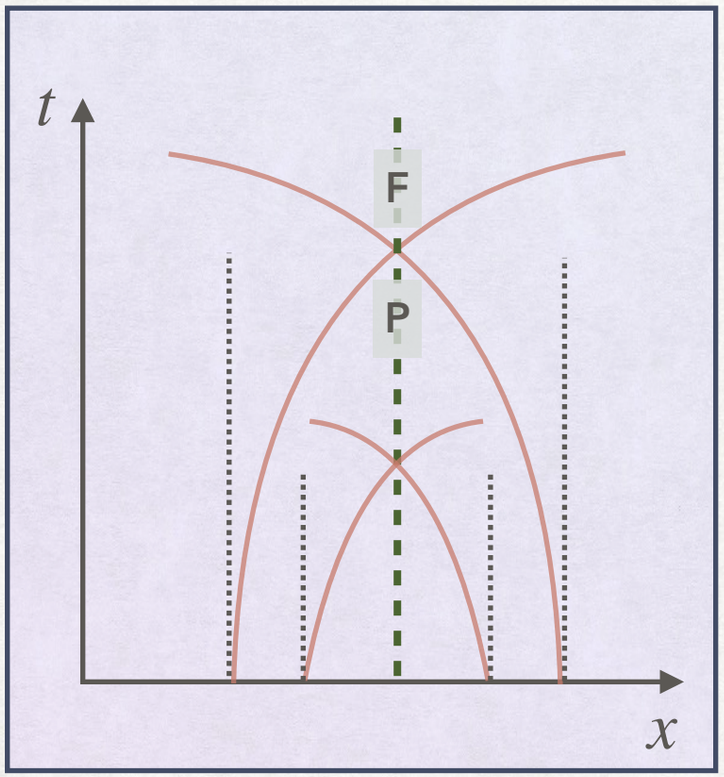
- Assim, vemos que no caso de um universo ***desacelerado*** existe uma ***distância máxima*** que o ***cone de luz passado*** alcança. Ou seja, o passado de qualquer observador é ***limitado*** por um "horizonte" — chamado de ***horizonte tipo-passado***, ou "***horizonte de partículas***".

- Já no caso ***acelerado*** ocorre o inverso: no passado o cone de luz alcança qualquer distância, por maior que seja; mas agora é o ***futuro que fica limitado por um horizonte*** — o ***horizonte do tipo-futuro***, ou "***horizonte de eventos***".



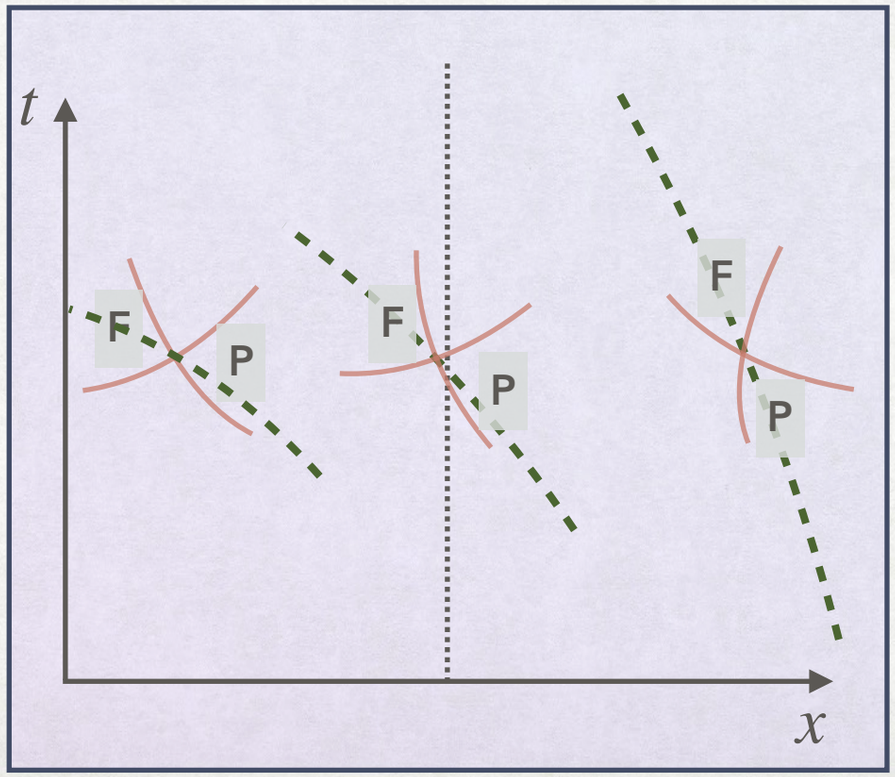
PROBLEMAS DO MODELO DO BIG BANG: ESTRUTURA CAUSAL E CONES DE LUZ EM FLRW

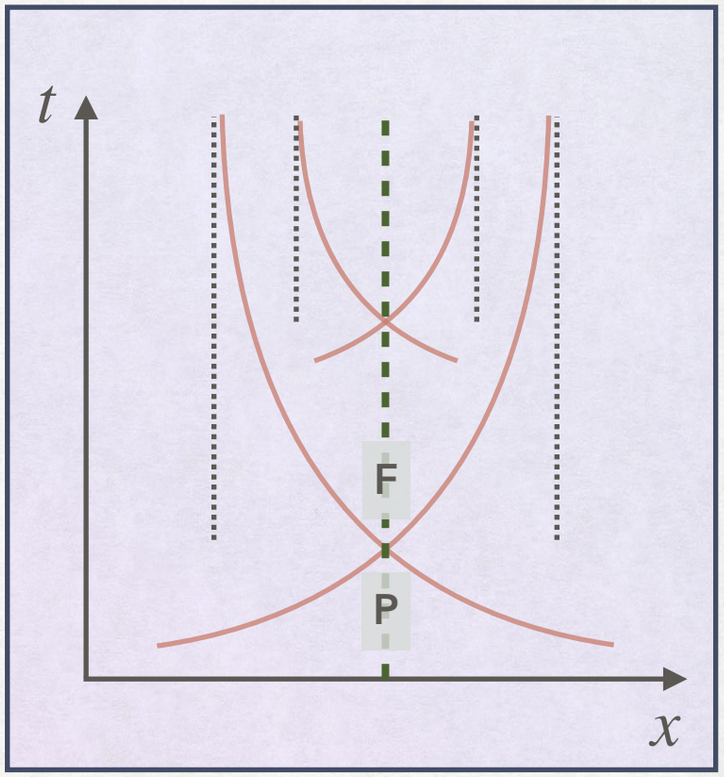
- Note as similaridades entre os diversos horizontes que encontramos até agora:



Universo desacelerado:
horizonte de ***partículas***
horizonte tipo-tempo
(CL ***passado*** limitado)

Schwarzschild:
horizonte de ***eventos***
horizonte tipo-espaço
(CL futuro limitado)





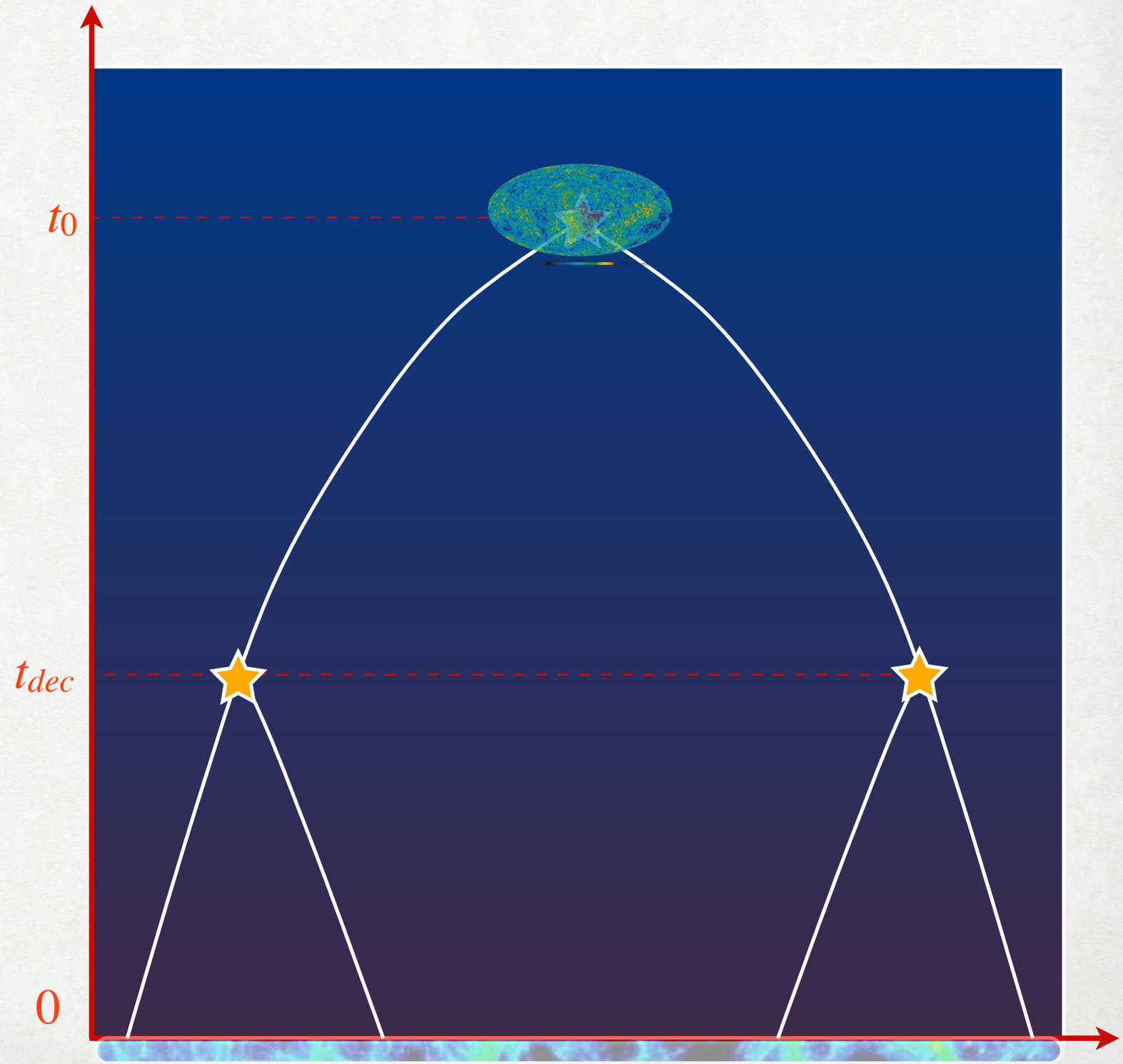
Universo acelerado:
horizonte de ***eventos***
horizonte tipo-tempo
(CL ***futuro*** limitado)

PROBLEMAS DO MODELO DO BIG BANG: ESTRUTURA CAUSAL E CONES DE LUZ EM FLRW

- Vamos agora considerar o que acontece num universo apenas com matéria “normal" — matéria “fria" e matéria relativística, que portanto esteve desde o início desacelerando.

- Vamos considerar o cone de luz passado num tal universo, e prolongar esse cone de luz o máximo possível, indo desde o Big Bang até a formação da RCF, e daí até hoje.

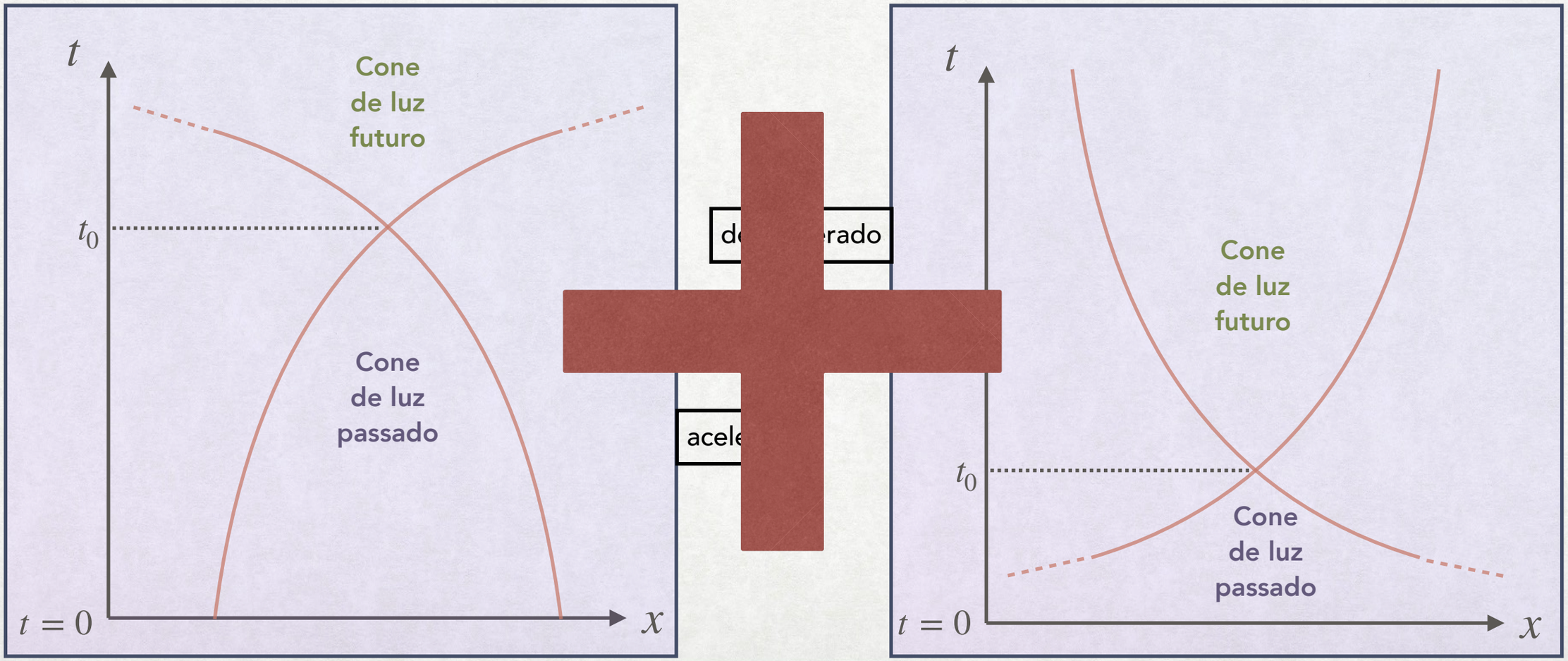
- Como explicar, então, que as propriedades do universo que nos chegam de lugares tão longínquos entre si, que nunca “souberam" uns dos outros, são tão parecidas??



A INFLAÇÃO DO UNIVERSO

- Nos anos ~1980 estava claro que o modelo "clássico" do ***Big Bang tinha diversos problemas***:
  - Por quê uma curvatura espacial tão pequena?
  - Por quê tão homogêneo?
  - Como surgiram aquelas pequenas flutuações de densidade/temperatura?

- Por volta de 1979-1981 várias pessoas (mas principalmente Alex Starobinski, Alan Guth, Viatcheslav Mukhanov e Andrei Linde) juntaram o que havia de melhor nos modelos desacelerados e acelerados, e criaram o ***modelo da inflação***.

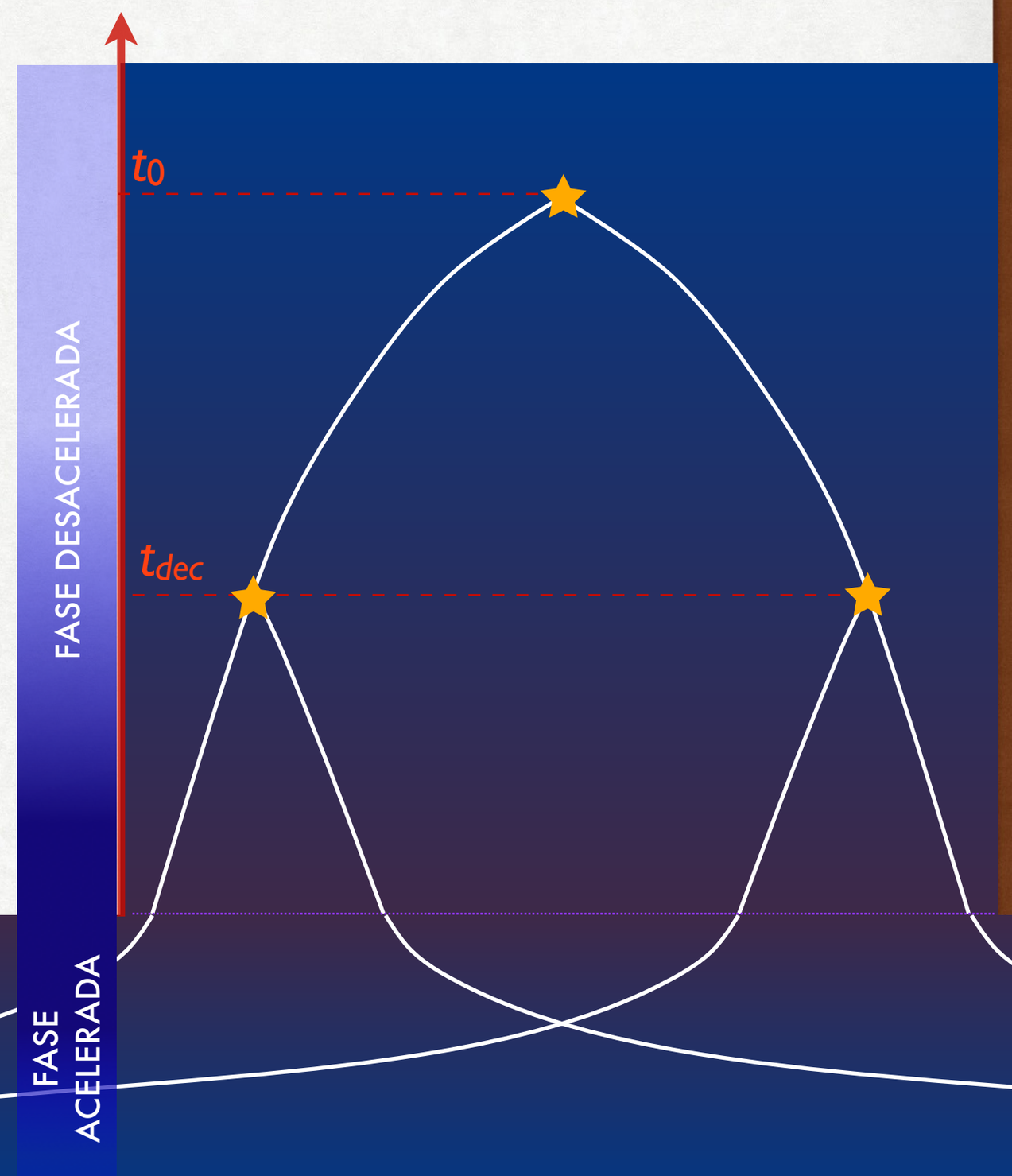


A INFLAÇÃO DO UNIVERSO

- A idéia básica é realmente muito simples — embora a implementação possa ser meio complexa.

- Vamos supor que no passado — beeeem no passado, muito antes até da BBN — o universo era dominado por alguma forma de matéria/ energia que causou a expansão acelerada do universo. Nesse caso o cone de luz teria a seguinte forma ⟶

- Durante a fase acelerada o cone de luz passado se abre arbitrariamente — podemos dizer que, porque a expansão desacelerada começa mais devagar, o universo fica menor por mais tempo, permitindo que todos os pontos se conectem.

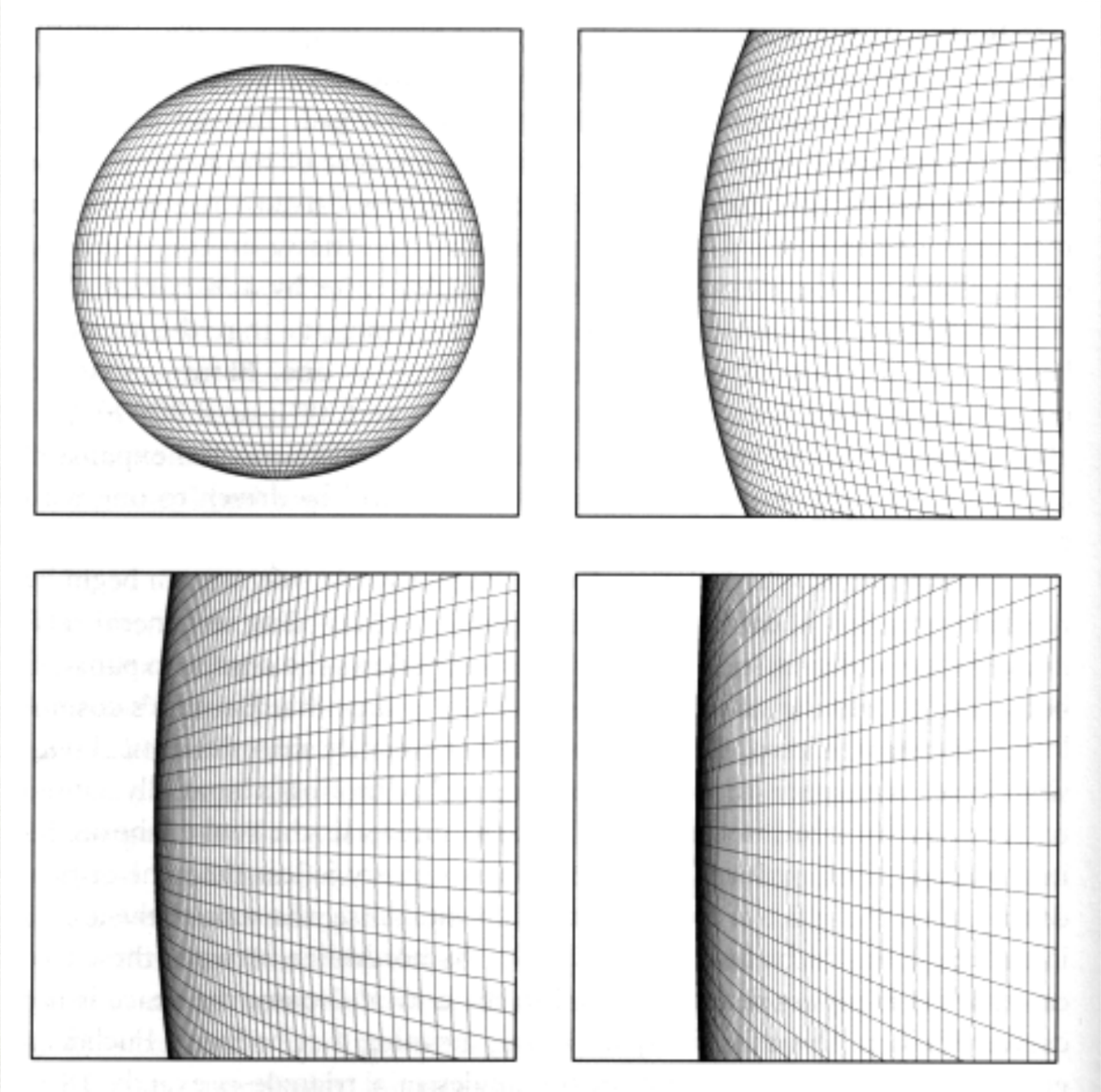


A INFLAÇÃO DO UNIVERSO

- Além disso, um outro efeito da inflação é que ela “planifica" o universo.

- Por ser uma expansão acelerada, a contribuição relativa do termo K/a^2 decai (exponencialmente, no caso da inflação com algo que se comporta como uma energia de vácuo).

- Ao final da fase inflacionária o universo aumentou tão dramaticamente de tamanho (tipicamente por fatores > e^{70}!) que a curvatura espacial é totalmente desprezível — e permanece desprezível até hoje.



A INFLAÇÃO DO UNIVERSO

- Mas a característica principal da inflação é que ela dá um mecanismo para gerar as flutuações primordiais de densidade.

- Esse ingrediente fundamental desse mecanismo é a ***Mecânica Quântica***

MECÂNICA QUÂNTICA:

$$\Delta E \, \Delta t > \frac{1}{2}\hbar$$

O vácuo é repleto de **pares virtuais** de partículas, que vivem durante breves momentos até serem aniquiladas de volta ao vácuo

A INFLAÇÃO DO UNIVERSO

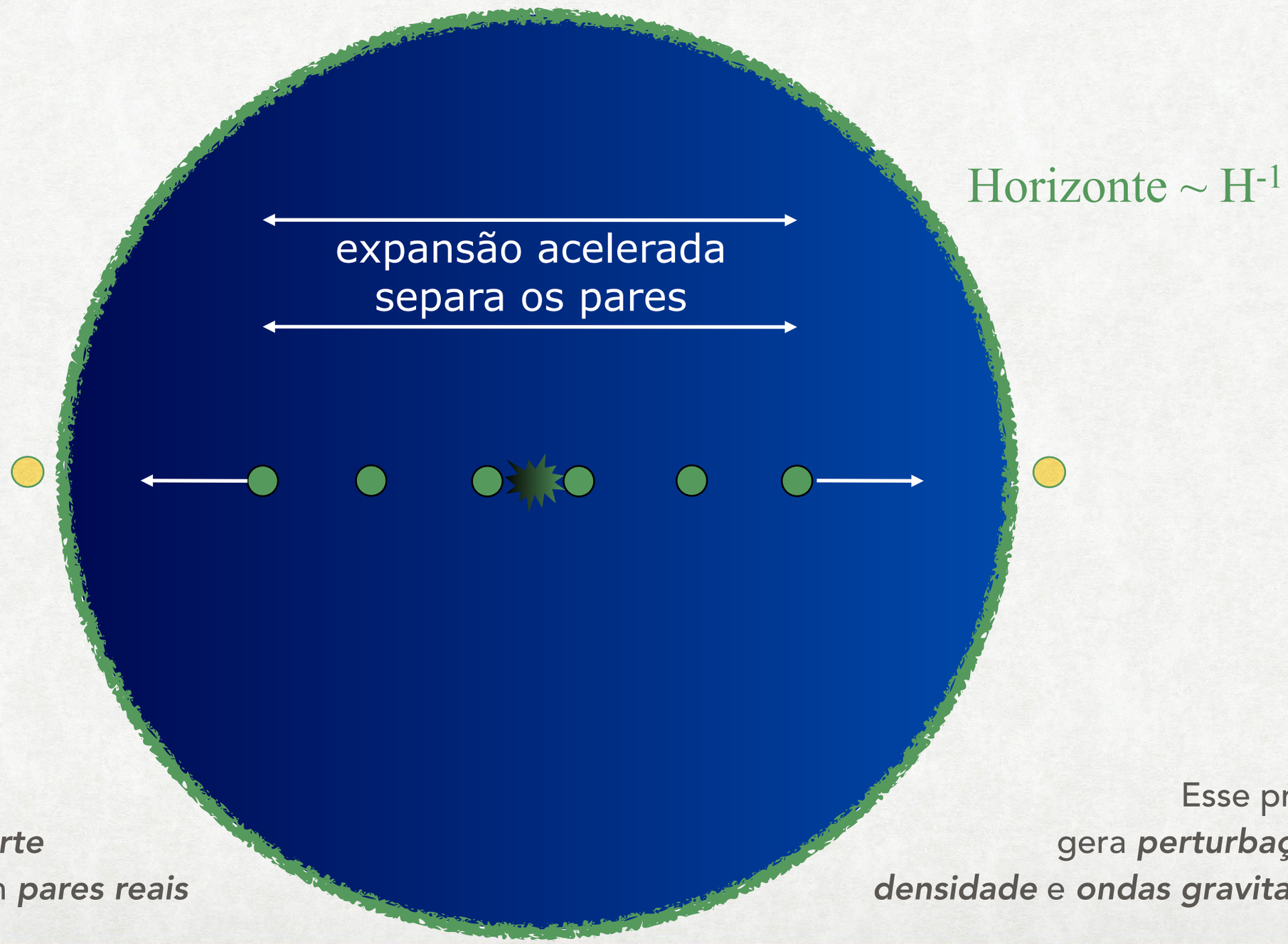
- A Mecânica Quântica nos diz que, devido às flutuações quânticas, até mesmo o ***vácuo*** é repleto de ***pares virtuais*** de partículas, que emergem do vácuo e se aniquilam continuamente:

$$\Delta E \, \Delta t > \frac{1}{2}\hbar$$

$$\Delta E \, \Delta t > \frac{1}{2}\hbar$$

A INFLAÇÃO DO UNIVERSO

- Vamos agora considerar essa criação/destruição de pares virtuais acontecendo num universo em ***expansão acelerada***

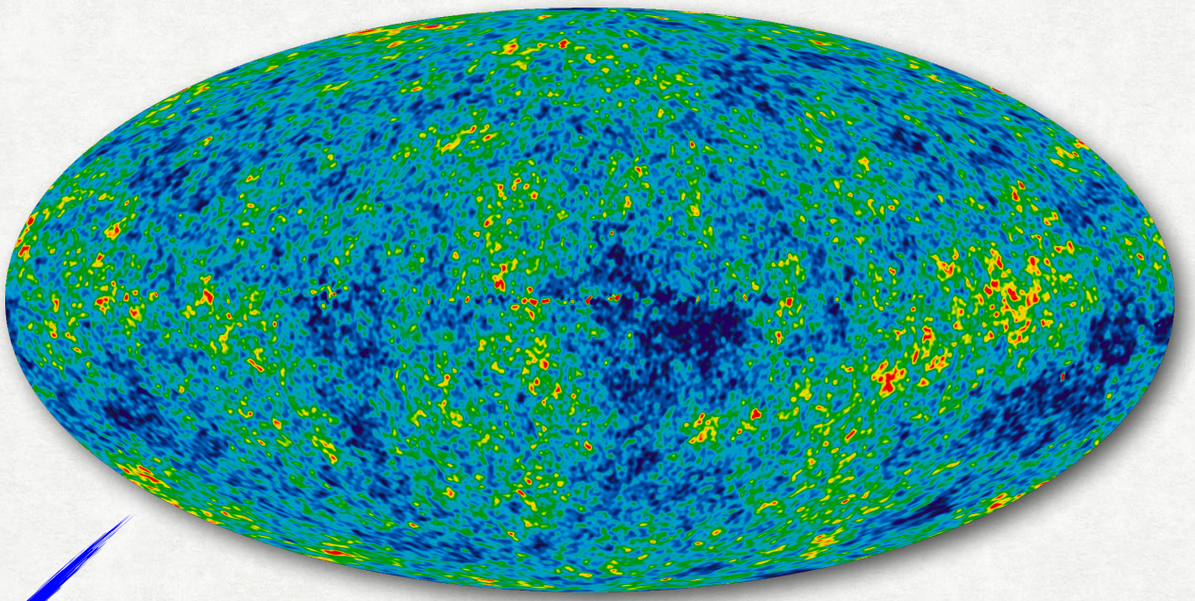


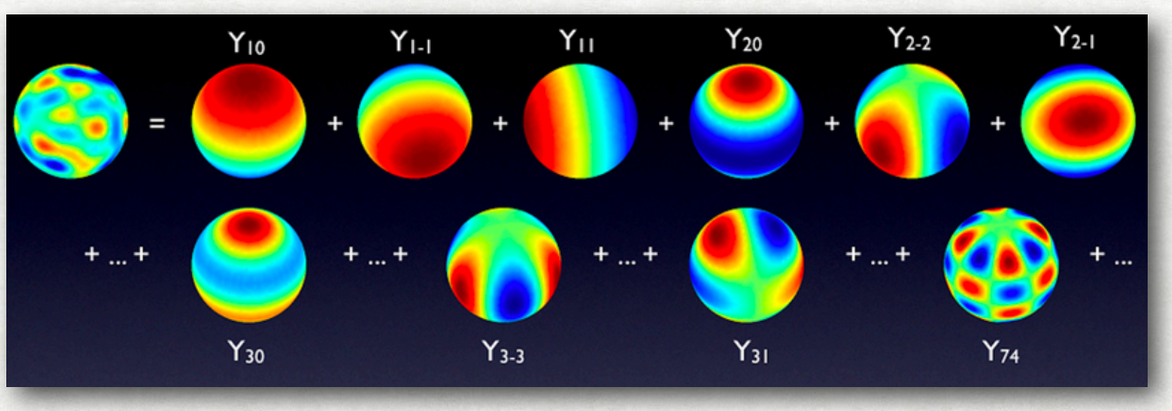
A expansão acelerada ***converte*** pares virtuais em ***pares reais***

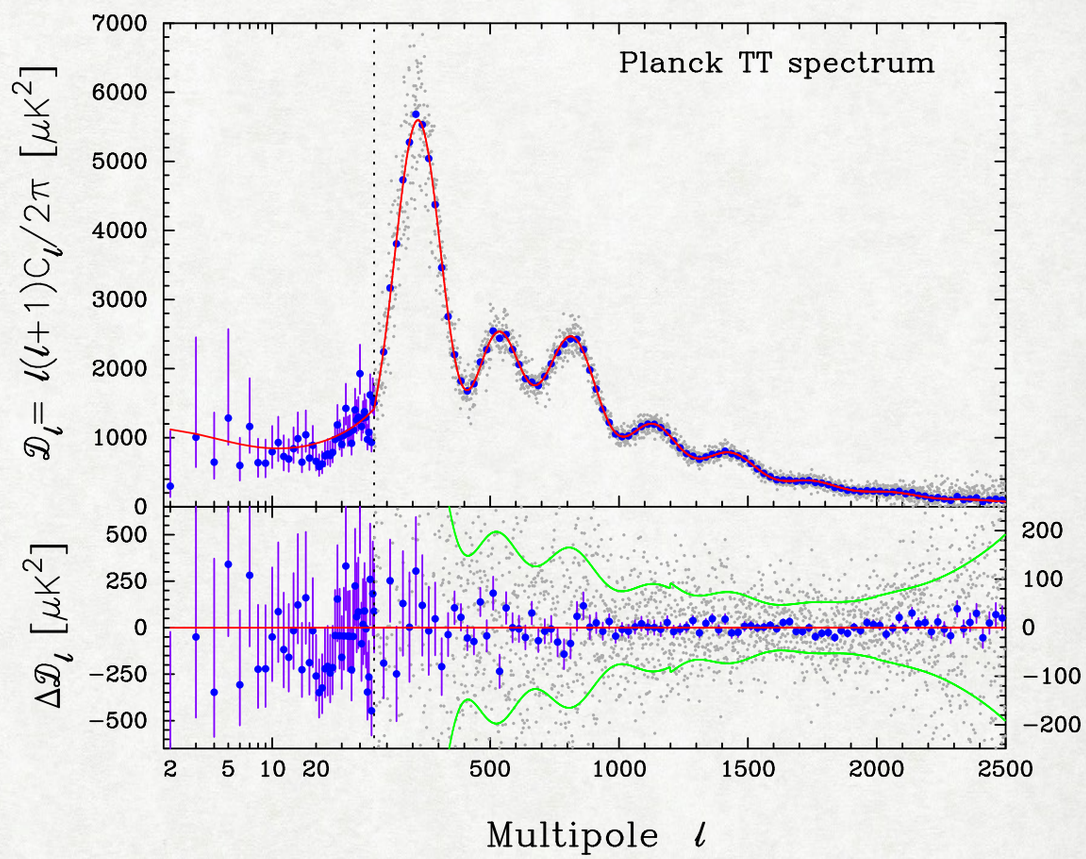
Esse processo gera ***perturbações de densidade*** e ***ondas gravitacionais***

A INFLAÇÃO DO UNIVERSO

- O padrão de flutuações de temperatura da ***RCF*** é consistente com as ***previsões da inflação***!

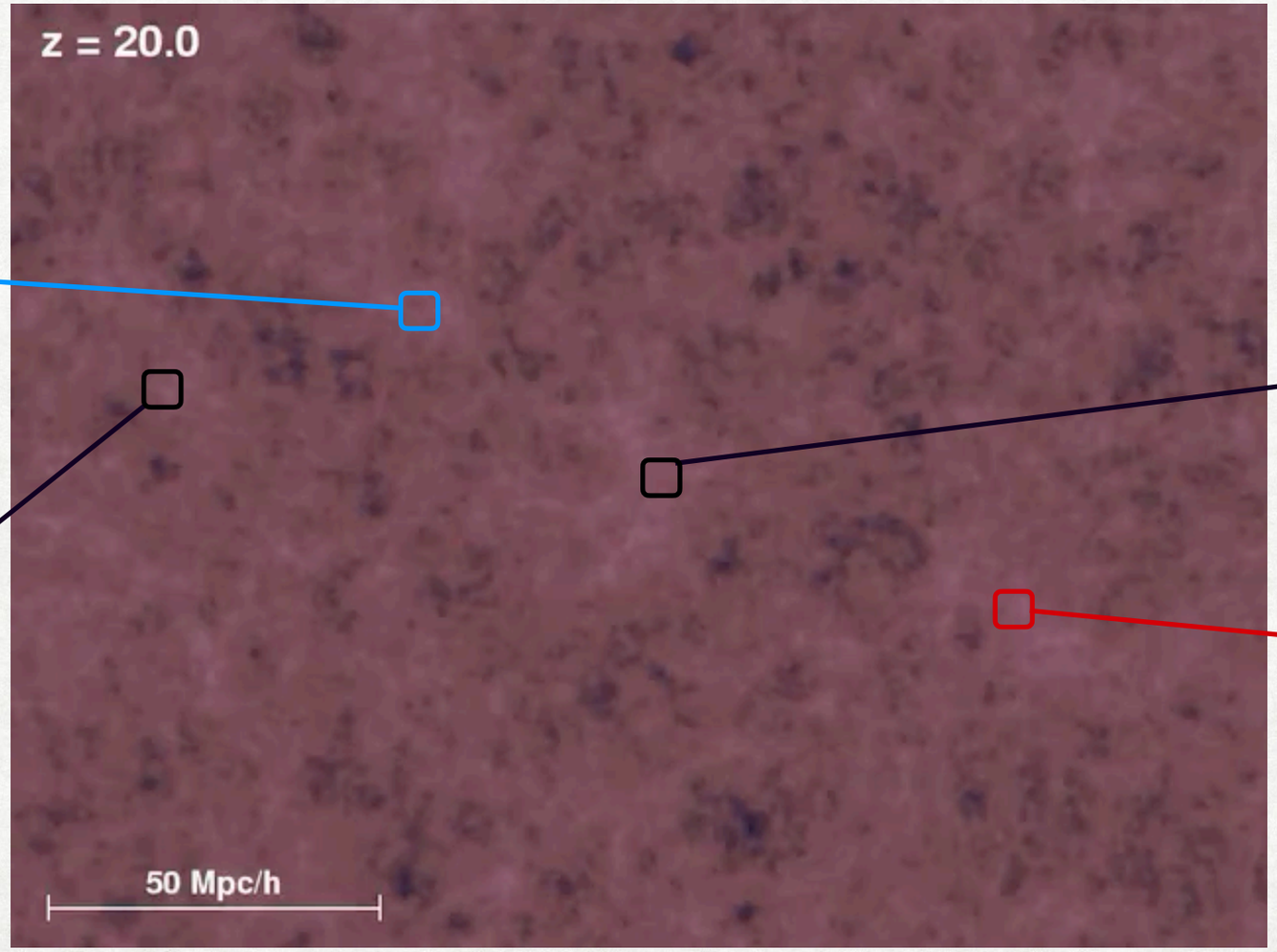


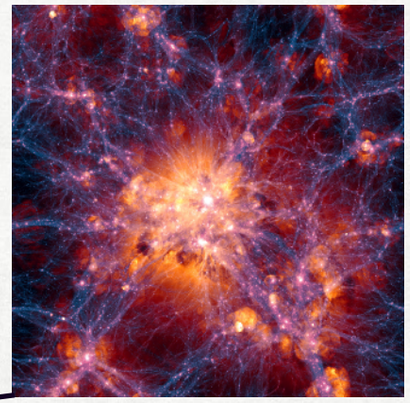


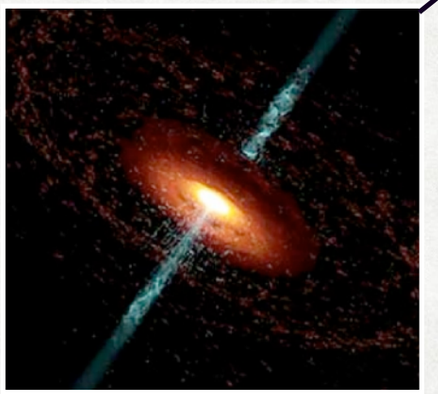


FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS NO UNIVERSO

- O universo começou extremamente homogêneo, mas com o tempo a força da gravidade foi atraindo matéria para onde a densidade inicialmente era um pouco maior. E depois de bilhões de anos...







FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS NO UNIVERSO

- Para entender de que modo esse processo ocorre vamos estudar como as ***perturbações de um fluido*** se comportam num universo em expansão.

- Digamos que o fluido é descrito por uma densidade, uma pressão e uma velocidade tais que, usando distâncias e velocidades ***físicas*** temos:

$$\rho(\overrightarrow{x}, t) = \bar{\rho}(t) + \delta\rho(\overrightarrow{x}, t)$$

$$p(\overrightarrow{x}, t) = \bar{p}(t) + \delta p(\overrightarrow{x}, t)$$

$$\overrightarrow{v}(\overrightarrow{x}, t) = H(t)\overrightarrow{x} + \delta\overrightarrow{v}(\overrightarrow{x}, t) \quad ,$$

onde o termo $H(t)\overrightarrow{x}$ expressa o “fluxo de Hubble” — a expansão cósmica.

FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS NO UNIVERSO

- As equações para fluidos vocês talvez já tenham visto em outras circunstâncias:

Equação da continuidade — conservação de energia $\dot{\rho} + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$

Equação de Euler — conservação de momento $\dot{\vec{v}} + \frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{\nabla} \Phi = 0$

Equação de Poisson — força gravitacional $\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$

- As equações para o fundo (*background*), $\bar{\rho}(t)$ e $\bar{p}(t)$, dão simplesmente as ***Equações de Friedmann*** para o caso da matéria não-relativística.

- Para calcular a ***dinâmica das perturbações*** é útil escrever essas equações em termos das coordenadas e velocidades ***comóveis***:

$$\vec{x} = a(t)\, \vec{r}$$

$$\delta \vec{v} = a(t)\, \vec{u}$$

FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS NO UNIVERSO

- Abrindo essas equações nós chegamos a:

$$\delta\dot{\rho} + \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \qquad \text{(Eq. da continuidade)}$$

$$\dot{\vec{u}} + 2H\vec{u} = -\vec{\nabla}\Phi - \frac{1}{a}\frac{\vec{\nabla}\delta p}{\bar{\rho}} \qquad \text{(Eq. de Euler)}$$

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G\,\delta\rho \qquad \text{(Eq. de Poisson)}$$

- Agora podemos simplificar isso assumindo que estamos num universo dominado pela matéria fria (poeira), que tem $\bar{p} \to 0$, $\delta p \to 0$. Nesse caso podemos combinar as três equações acima e obter uma equação apenas para o chamado ***contraste de densidade***:

$$\delta_\rho = \frac{\rho(\vec{x}, t) - \bar{\rho}(t)}{\bar{\rho}(t)} = \frac{\delta\rho(\vec{x}, t)}{\bar{\rho}(t)}$$

- A equação que o contraste de densidade $\delta_\rho(\vec{x}, t)$ obedece ***não contém derivadas espaciais***:

$$\ddot{\delta}_\rho + 2H\dot{\delta}_\rho = 4\pi G\bar{\rho}\,\delta_\rho = \frac{3H^2}{2}\delta_\rho$$

FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS NO UNIVERSO

- Vamos apreciar novamente essa equação, porque ela é de fato muito simples, apesar da dependência espacial e temporal de $\delta_\rho(\vec{x}, t)$:

$$\ddot{\delta}_\rho + 2H\dot{\delta}_\rho - \frac{3H^2}{2}\delta_\rho = 0$$

- Lembre-se agora que num universo dominado por poeira $a(t) \sim t^{2/3}$, e $H = \dot{a}/a = 2/(3t)$. Ficamos então com a equação:

$$\ddot{\delta}_\rho + \frac{4}{3\,t}\dot{\delta}_\rho - \frac{2}{3\,t^2}\delta_\rho = 0$$

- Podemos tentar soluções do tipo lei de potência, com $\delta_\rho(\vec{x}, t) = \delta_\rho(\vec{x}, t_0) \times (t/t_0)^\beta$. Com esse ansatz obtemos:

$$\beta(\beta - 1) + \frac{4}{3}\beta - \frac{2}{3} = 0$$

- Da equação acima tiramos que as duas soluções linearmente independentes são: $\beta_+ = 2/3$ e $\beta_- = -1$. Ou seja:

$$\delta_\rho(\vec{x}, t) = \delta_\rho(\vec{x}, t_0) \times \left[c_+(t/t_0)^{2/3} + c_-(t/t_0)^{-1}\right]$$

- Claramente a solução com $\beta_- = -1$ decai com o tempo, e a solução que domina é portanto:

$$\delta_\rho(\vec{x}, t) \to \delta_\rho(\vec{x}, t_0) \times (t/t_0)^{2/3} = a(t)\,\delta_\rho(\vec{x}, t_0)$$

FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS NO UNIVERSO

- Concluímos, portanto, que pelo menos inicialmente (quando as perturbações eram pequenas), as **flutuações de densidade crescem com o fator de escala**:

$$\delta_\rho(\overrightarrow{x}, t) = \frac{a(t)}{a(t_i)}\,\delta_\rho(\overrightarrow{x}, t_i)$$

- Ou, de modo equivalente, o contraste de densidade cresce com o redshift:

$$\delta_\rho(\overrightarrow{x}, z) = \frac{1+z_i}{1+z}\,\delta_\rho(\overrightarrow{x}, t_i)$$

- Vamos tomar o redshift inicial como sendo o da geração da RCF, $z_i \sim 10^3$, quando tínhamos que o contraste de densidade era da ordem de $|\delta_\rho(z_i)|_{rms} \sim \sqrt{\langle \delta_\rho^2(z_i)\rangle} \sim 10^{-4}$. Então temos que:

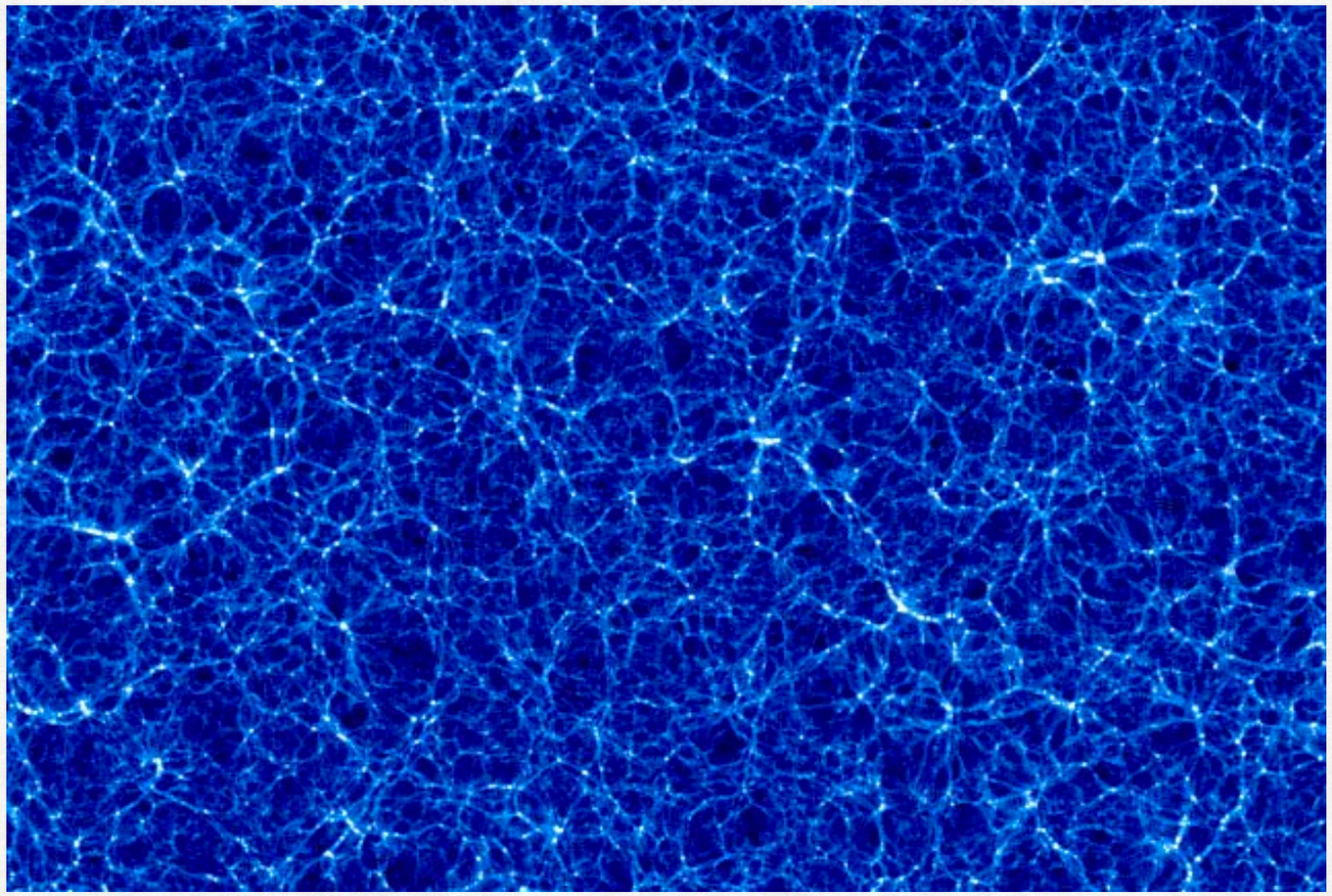
$$|\delta_\rho(z)|_{rms} = \frac{10^3}{1+z}\,|\delta_\rho(z_i)|_{rms} \sim \frac{10^3}{1+z}\,10^{-4} = 0.1\,(1+z)^{-1}$$

- Agora fica claro o que está acontecendo: precisamos aguardar desde $z_i \sim 10^3$ (quando o universo tinha menos de um milhão de anos) até um redshift $z \sim 0$ (ou seja, vários bilhões de anos) para que o contraste de densidade pudesse crescer o suficiente, se tornar da ordem de 1.

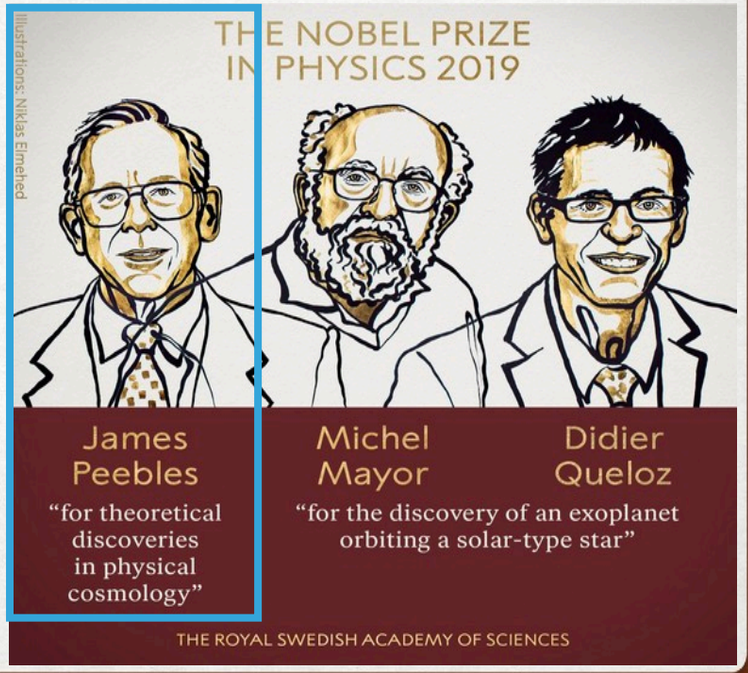
- Só depois que o contraste cresce é que podemos formar… estrelas, planetas, galáxias, etc. e tal.

FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS NO UNIVERSO

- Um dos principais cientistas a fazer essa ligação entre o universo primordial e a era da formação de estruturas foi Jim Peebles.



A partir das condições iniciais observadas na RCF, usamos cálculos matemáticos e simulações numéricas que nos permitem **prever** como o universo deveria se parecer após bilhões de anos de evolução: como uma **teia de estruturas** tais como **planos**, **filamentos**, **nós**, **halos** etc.



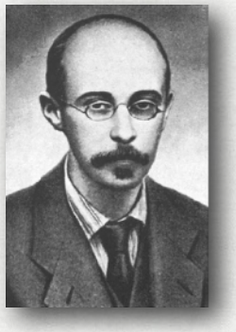
FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS NO UNIVERSO

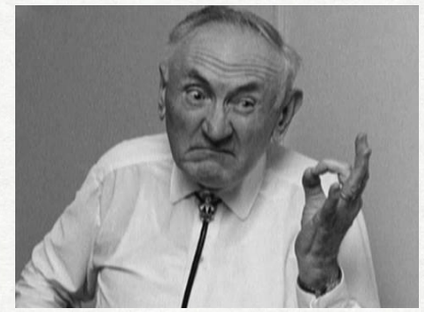
- Um dos principais cientistas a fazer essa ligação entre o universo primordial e a era da formação de estruturas foi Jim Peebles.

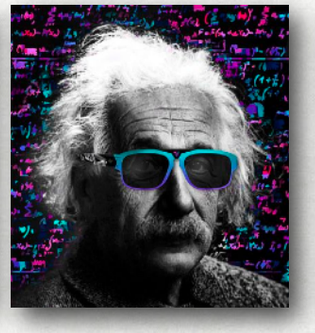
Jim Peebles

AULA 26 - 17/06/2020

O FIM DA HISTÓRIA: O UNIVERSO COMO ELE É







FIM!

OBRIGADO A TODOS!!

E **PARABÉNS** POR TEREM APRENDIDO
RELATIVIDADE GERAL
– UMA DAS “JOIAS" DA FÍSICA MODERNA !!!