

# Simulações Cosmológicas

Rubens Machado • IAG/USP



1. Galáxias e aglomerados
2. Escalas de distância
3. Distribuição das galáxias
4. Homogeneidade do Universo
5. Matéria escura
6. Simulações numéricas:  $N$ -corpos
7. Simulações numéricas: Tree Code
8. Paralelização
9. Condições iniciais: CMB
10. Simulações cosmológicas

# Galáxias e Aglomerados

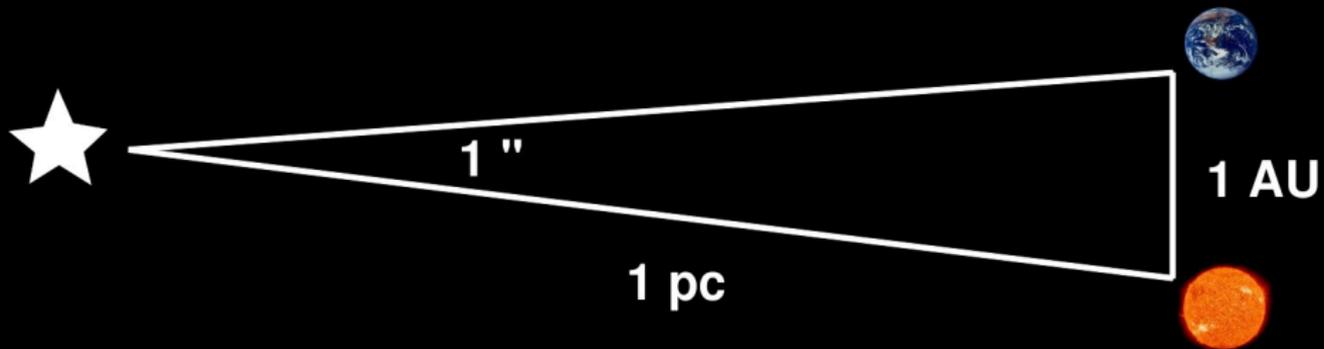


- Em cosmologia estuda-se a evolução do Universo como um todo. Os principais objetos de interesse da cosmologia observacional são as galáxias e suas associações.
- *Aglomerados* de galáxias podem conter centenas ou milhares de galáxias, enquanto *grupos* contêm dezenas. A Via Láctea faz parte do chamado ‘Grupo Local’, do qual também são membros a galáxia de Andrômeda e dezenas de galáxias menores. O Grupo Local, juntamente com outros grupos e outros aglomerados constituem o ‘Superaglomerado Local’.
- Na vizinhança solar, a separação típica entre estrelas é da ordem de alguns parsecs. O Sol se encontra a  $\sim 8$  kiloparsecs do centro da Via Láctea. A dimensão de aglomerados é da ordem de megaparsecs. Galáxias típicas têm algo como  $\sim 10^{11}$  massas solares, e aglomerados  $\sim 10^{14}$  massas solares.









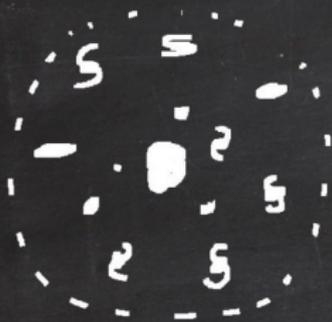


~ 1 parsec



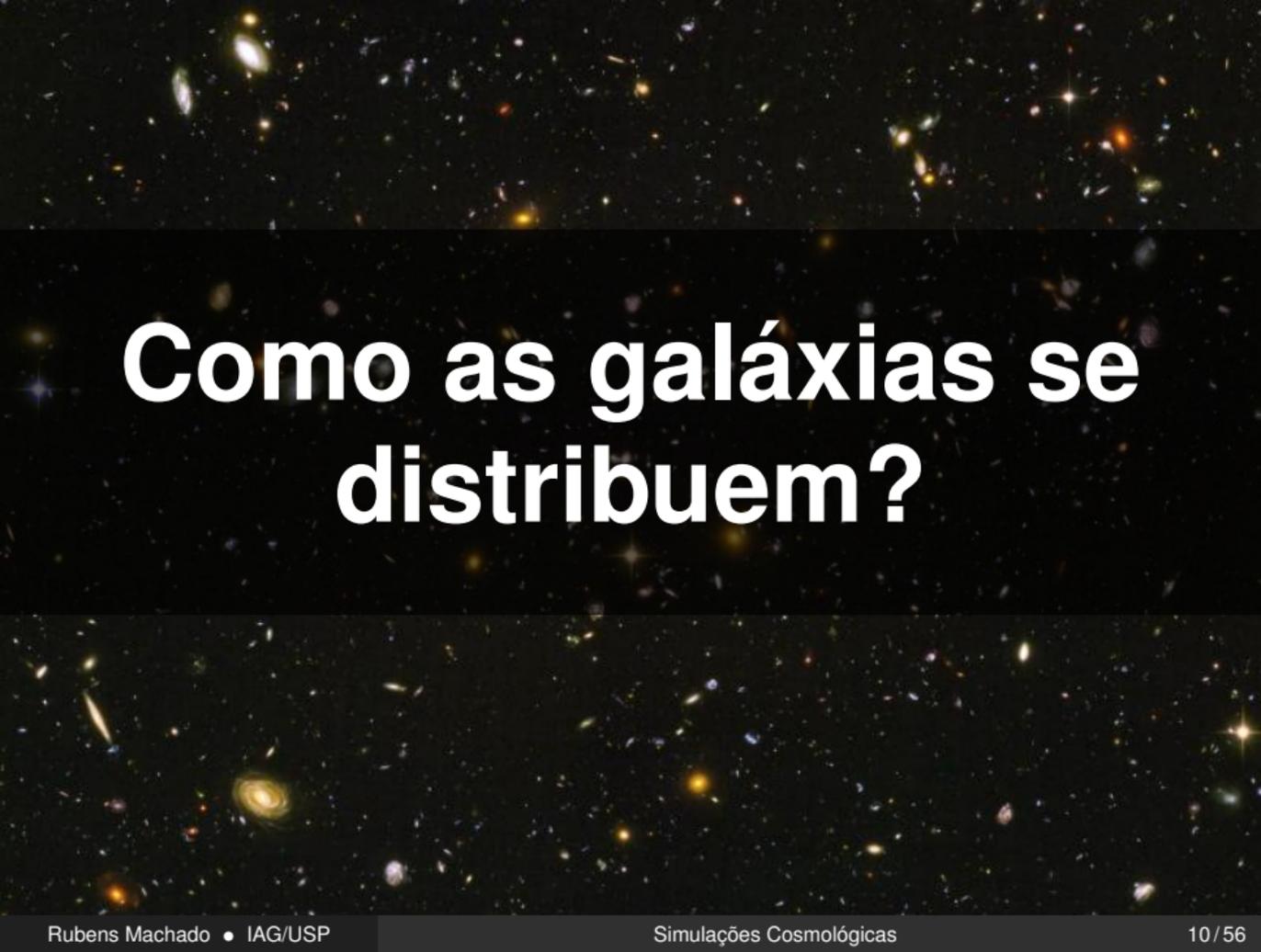
~ 10 kiloparsecs

~  $10^{11} M_{\odot}$

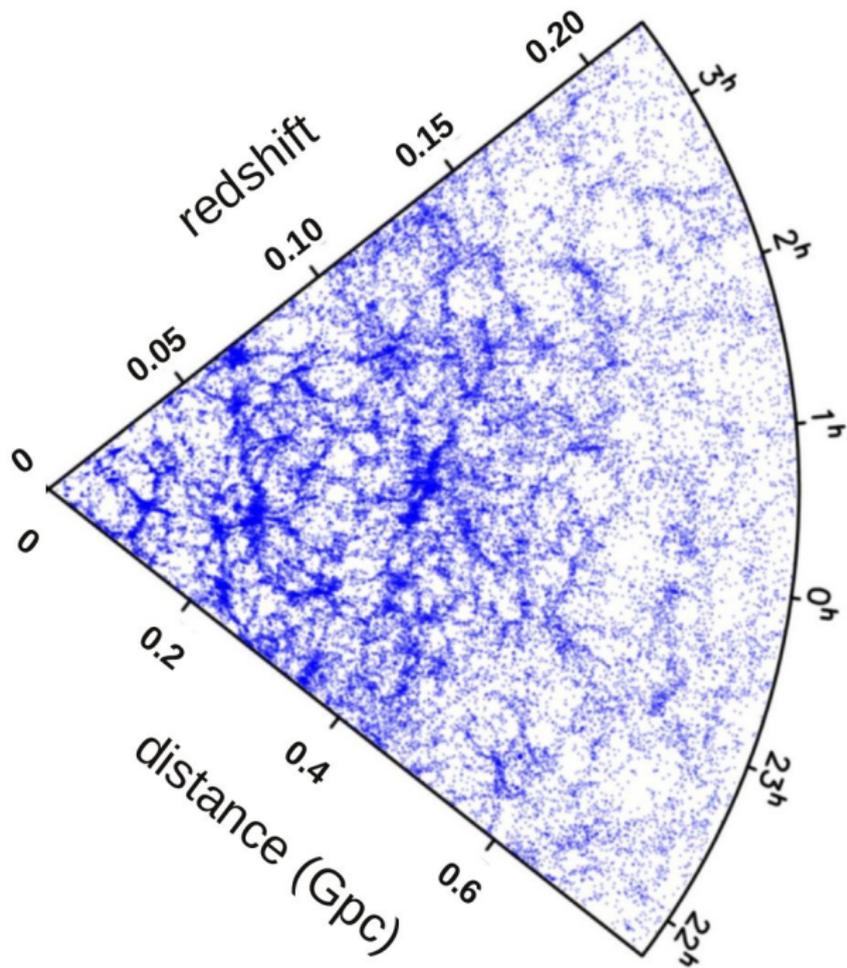


~ 1 Megaparsec

~  $10^{14} M_{\odot}$



# Como as galáxias se distribuem?

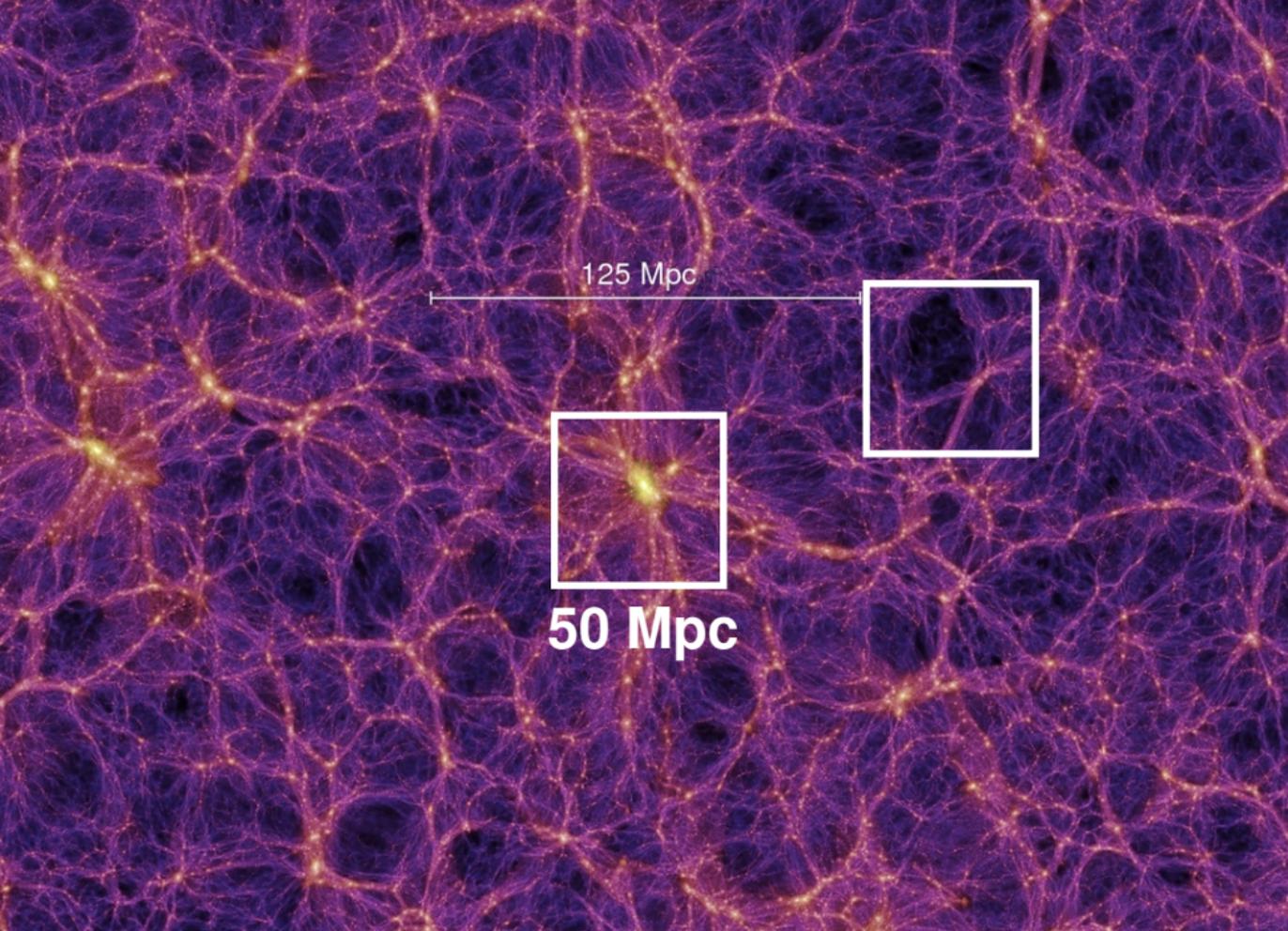


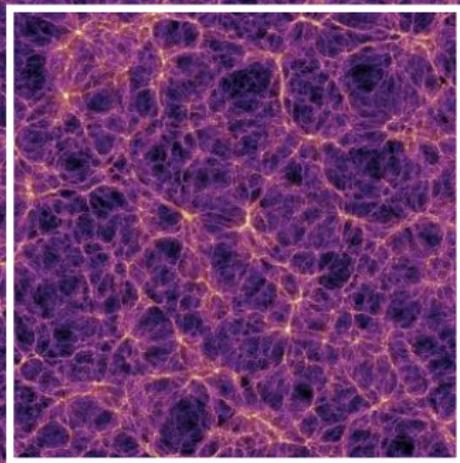
- É possível mapear a distribuição tridimensional de galáxias no Universo local, usando a lei de Hubble, que nos permite estimar as distâncias. Graças a grandes surveys que mapearam as posições de milhões de objetos, sabemos que a distribuição de galáxias tem uma aparência filamentar. Há grandes vazios entre os filamentos e, onde estes se interceptam, a densidade é maior (aglomerados e superaglomerados).
- Graças às simulações cosmológicas, conseguimos entender como esta estrutura filamentar veio a se formar.
- Em escalas abaixo de  $\sim 100$  megaparsecs, o Universo é inhomogêneo. Nas grandes escalas (de centenas de megaparsecs), o Universo é homogêneo. Ou seja, a densidade é essencialmente a mesma em qualquer região.

The background of the slide is a cosmological simulation showing a complex network of filaments and nodes, representing the large-scale structure of the universe. The filaments are colored in shades of purple and blue, while the nodes are bright yellow and orange. A horizontal scale bar is positioned above the main text, with the label "125 Mpc" centered above it.

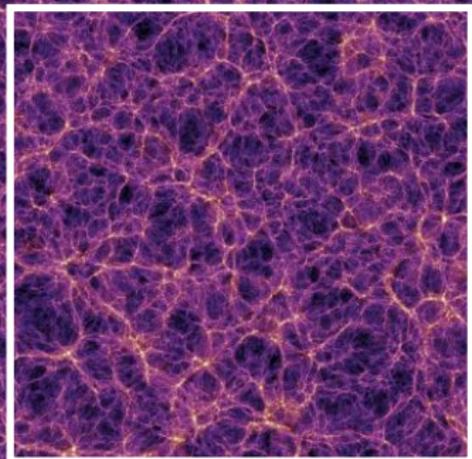
125 Mpc

# O Universo é *homogêneo?*





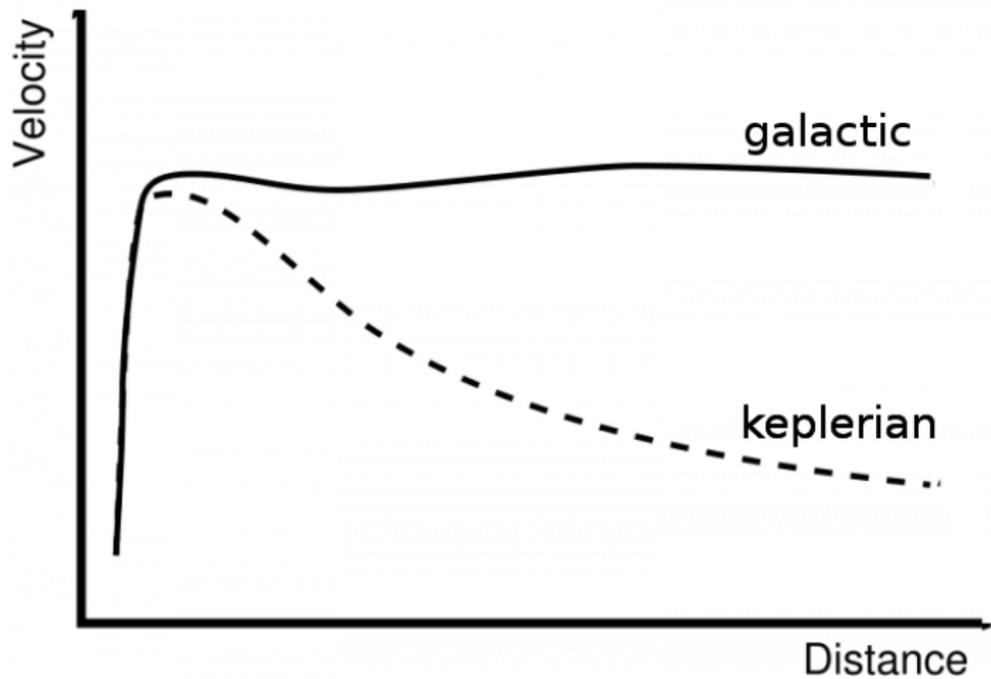
**500 Mpc**



# Matéria Escura



- As galáxias estão imersas em halos aproximadamente esféricos de matéria escura. Estes halos são muito maiores e muito mais massivos que a parte luminosa da galáxia. O halo de matéria escura é mais concentrado na região central.
- Matéria escura corresponde a cerca de 85% da massa total. Os ~15% restantes são a *matéria bariônica* comum (átomos, essencialmente). Não se sabe qual a constituição da matéria escura.
- Matéria escura só interage gravitacionalmente. É incapaz de emitir ou de absorver qualquer radiação eletromagnética.
- Há diversas fontes independentes de evidências que sugerem a existência de matéria escura e apontam para a mesma proporção: curvas de rotação de galáxias, dispersão de velocidade das galáxias em aglomerados, efeito de lentes gravitacionais em aglomerados, radiação cósmica de fundo.



$$V \propto \frac{1}{\sqrt{R}}$$

- Curvas de rotação: Em galáxias espirais, é possível medir a velocidade com a qual estrelas (e o gás) orbitam o centro. Se estas órbitas se comportassem como órbitas keplerianas, seria de se esperar que a curva de rotação tendesse para  $v \propto R^{-1/2}$  conforme nos afastamos do centro. No entanto, observam-se curvas de rotação planas (velocidades circulares muito maiores do que se esperaria). Isto indica que a massa gravitacional total é muito maior ( $\sim 5x$ ) do que apenas a soma das massas das estrelas e do gás.
- Ainda não se pôde detectar diretamente as supostas partículas elementares das quais a matéria escura seria constituída. No entanto, podemos observar os efeitos (estritamente gravitacionais) que a sua presença exerce sobre a dinâmica da massa luminosa.



It surrounds us, and penetrates us.  
It binds the galaxy together.

# Luz



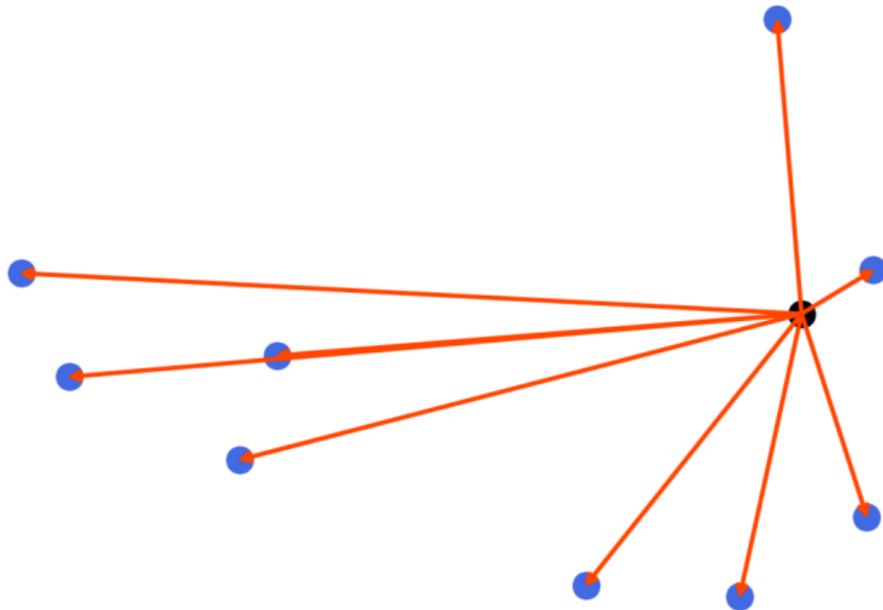
# Massa



- Em simulações cosmológicas, uma primeira aproximação bastante razoável consiste em ignorar os efeitos da matéria bariônica e supor que toda a massa está na forma de matéria escura. Com isso, a física necessária se limita à gravitação. Isto nos permite estudar a formação de estruturas em grande escala, ao longo de bilhões de anos de evolução do Universo. Nestas simulações, formam-se halos de matéria escura (no interior dos quais estariam as galáxias e os aglomerados).

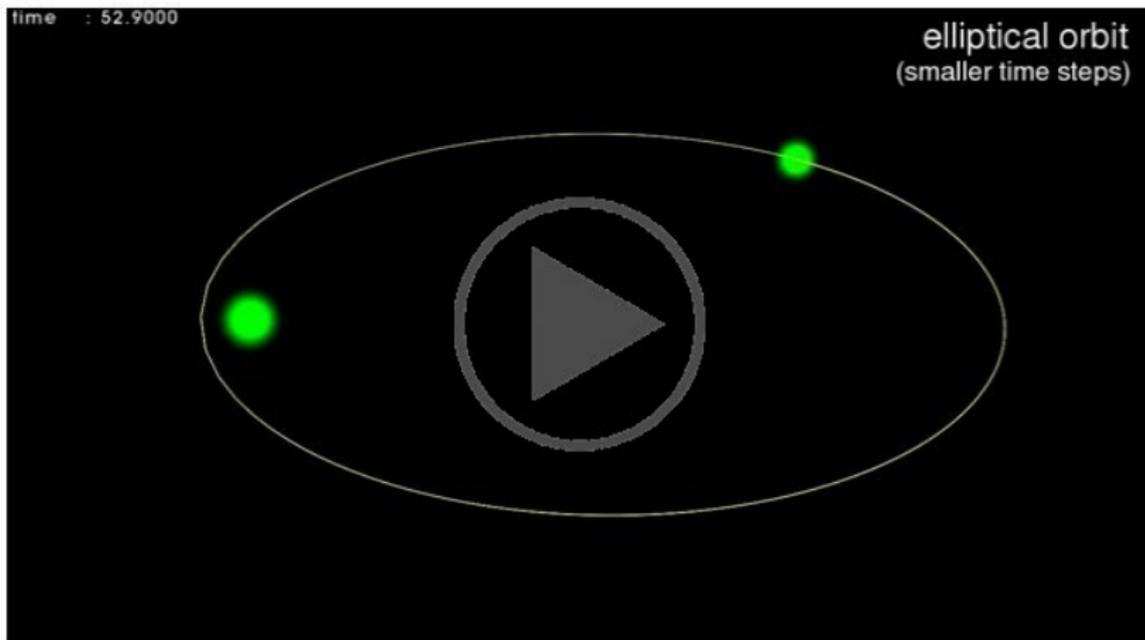
# Simulações Numéricas

# O Problema Gravitacional de $N$ -corpos



<http://www.youtube.com/watch?v=OXMgolMa5xM>

- O problema gravitacional de  $N$ -corpos é insolúvel analiticamente para o caso geral. No entanto, a solução numérica (através de *soma direta*) é conceitualmente e algoritmicamente simples.
- Das condições iniciais, são conhecidas as massas, posições e velocidades de todas as  $N$  partículas. Basta calcular, na posição de cada partícula, a soma das forças gravitacionais exercidas por cada uma das outras  $N-1$  partículas. Com a aceleração em cada partícula, avança-se o sistema no tempo por um pequeno passo  $\Delta t$  e repete-se o procedimento.
- Embora simples, este procedimento é imensamente custoso do ponto de vista computacional. Infelizmente, o tempo de execução cresce conforme  $N^2$ , o que torna o método de soma direta efetivamente impraticável para grandes  $N$ .



[http://www.youtube.com/watch?v=\\_3uQqrrBcrQ](http://www.youtube.com/watch?v=_3uQqrrBcrQ)

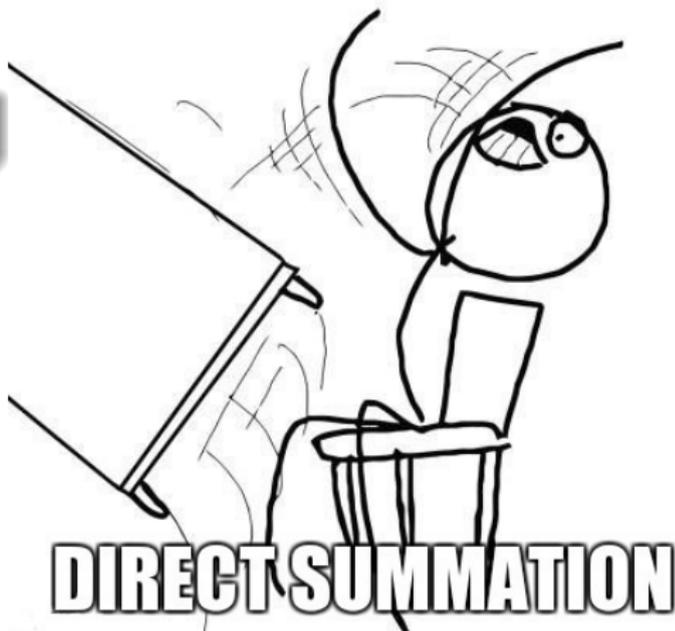
tempo de cálculo  $\propto N^2$

$N = 10^3$       1 min

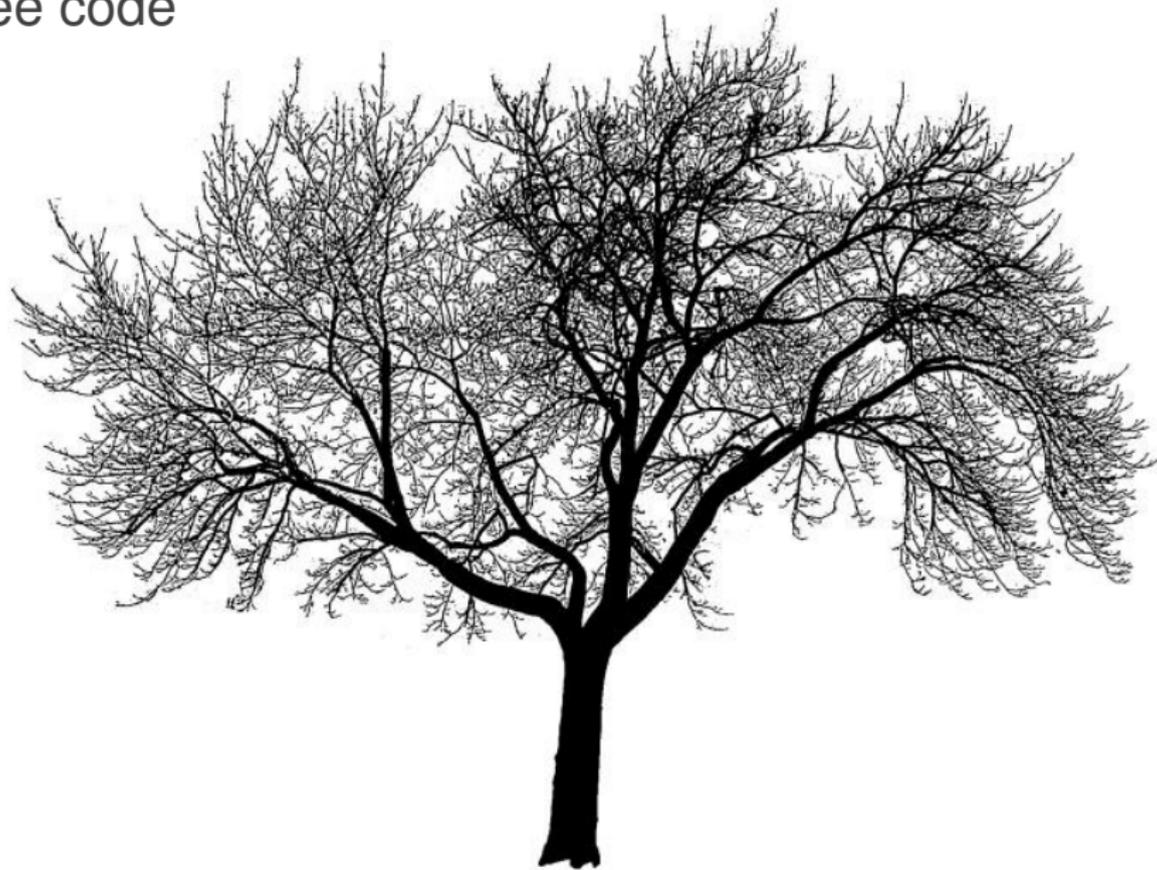
$N = 10^4$       100 min

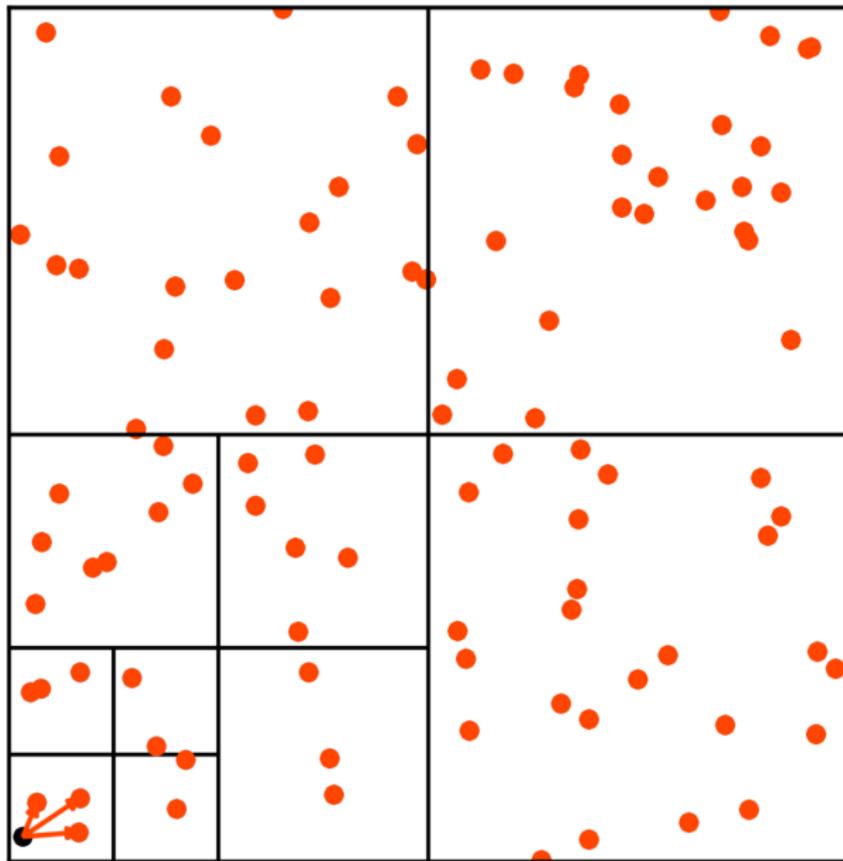
...

$N = 10^7$       200 anos



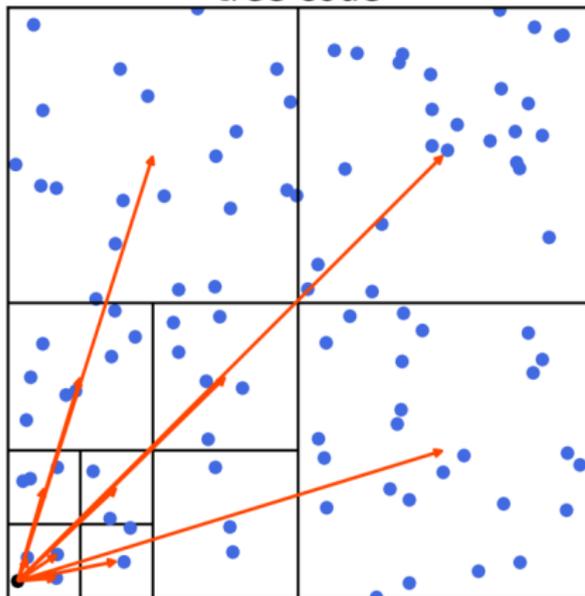
# Tree code



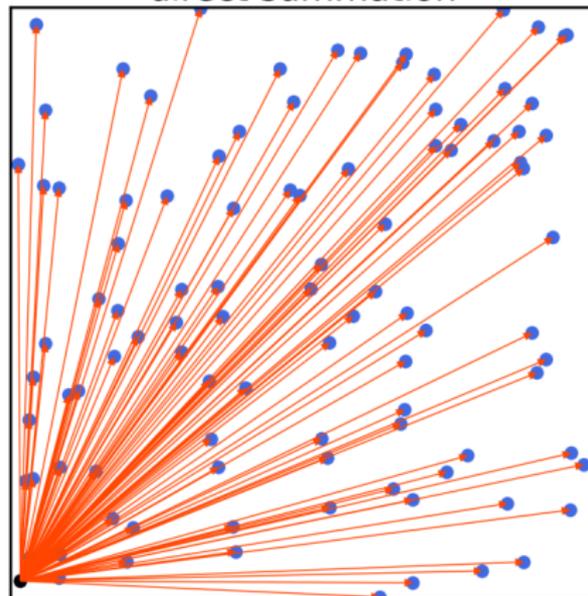


<http://www.youtube.com/watch?v=Ud12IT1G07E>

tree code



direct summation



- Há diversos métodos para contornar a inviabilidade da soma direta. Um método bastante empregado, pela sua eficiência, é o algoritmo conhecido como *tree code* (Barnes & Hut 1986).
- A idéia básica consiste em dividir o espaço em células que são recursivamente sub-divididas conforme a necessidade. No caso das células muito afastadas, substitui-se o cálculo de forças em partículas individuais pelo centro de massa da célula. As partículas próximas são tratadas individualmente. Este procedimento reduz drasticamente o número de operações necessárias, e o tempo de cálculo resulta ser proporcional a  $N \log N$ , que é um ganho notável com relação à soma direta.



# Paralelização

- Na prática, as simulações são geralmente executadas em supercomputadores (*clusters*) com muitos núcleos de processamento.
- Felizmente, o problema gravitacional de  $N$ -corpos se presta bem à paralelização, pois o cálculo das forças em uma dada partícula (ou em um conjunto delas) é independente do cálculo das forças em outras partículas (para cada dado instante de tempo). Portanto são tarefas que podem ser feitas simultaneamente, em paralelo.
- Graças à paralelização, é viável empregar grandes números de partículas, que de outra forma seriam proibitivos.
- No Departamento de Astronomia do IAG/USP está instalado o *Alphacrucis*, um cluster com 2304 processadores.



# Laboratório de Astroinformática

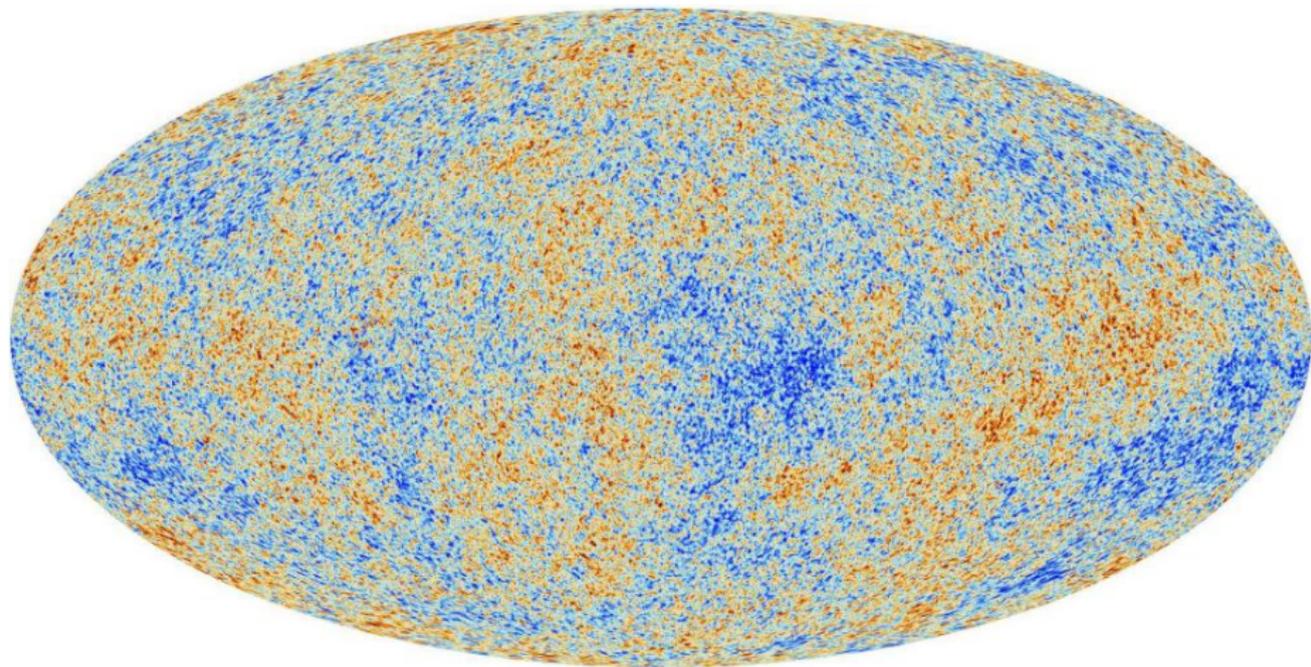


The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map, showing a complex pattern of blue and orange/red spots against a dark background, representing temperature variations in the early universe.

**De onde vêm as  
*condições iniciais?***

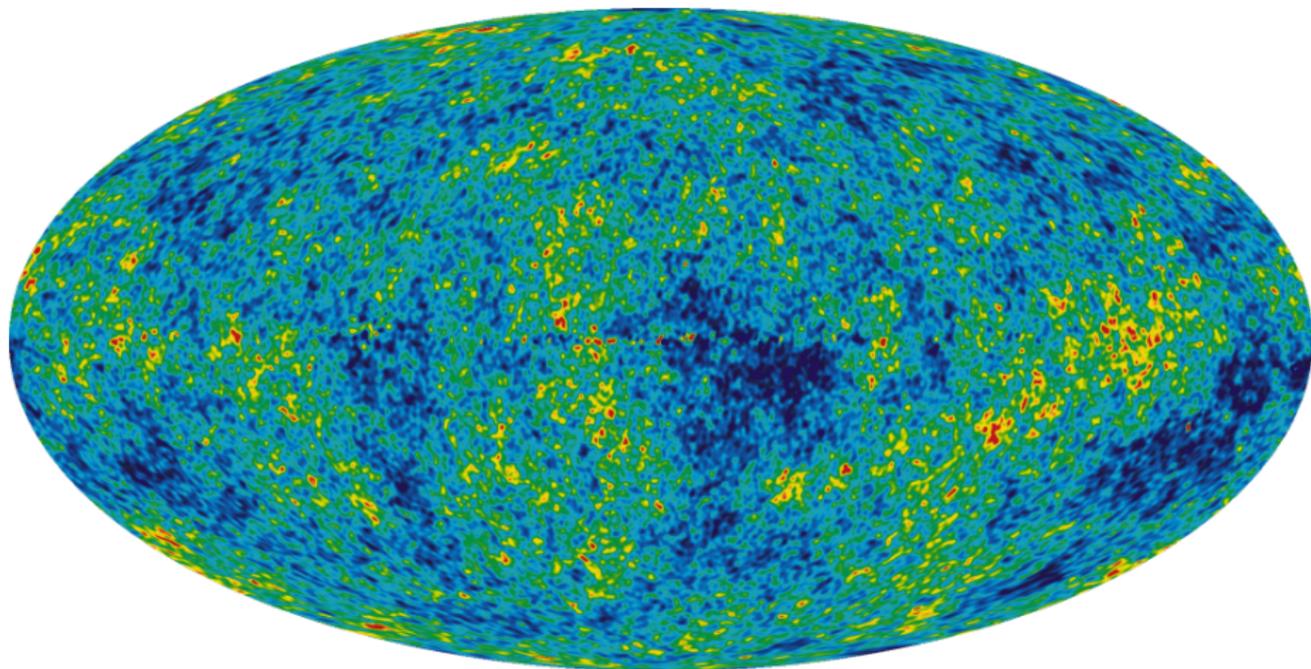
- O Universo primordial era muito homogêneo, com pequenas flutuações de densidade. Estas sobredensidades cresceram, por razões gravitacionais, e vieram a dar origem a toda a estrutura complexa do Universo atual.
- A chamada *radiação cósmica de fundo* é uma importante fonte de informação sobre o Universo quando ele tinha apenas  $\sim 300$  mil anos (a idade atual é  $\sim 13.7$  bilhões de anos). Esta radiação pode ser medida em microondas em todas as direções do céu e corresponde a um espectro de corpo negro com temperatura de  $\sim 2.7$  K.
- O mapa da CMB é um mapa do céu e tem formato de um planisfério (planificação da esfera celeste). As cores representam a temperatura da CMB, ao redor da média  $\sim 2.7$  K. Estas flutuações (anisotropias) são muito pequenas, da ordem de  $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ .
- A análise detalhada da distribuição das amplitudes destas flutuações fornece diversos e importantes parâmetros cosmológicos.

# Cosmic Microwave Background (CMB) Radiation



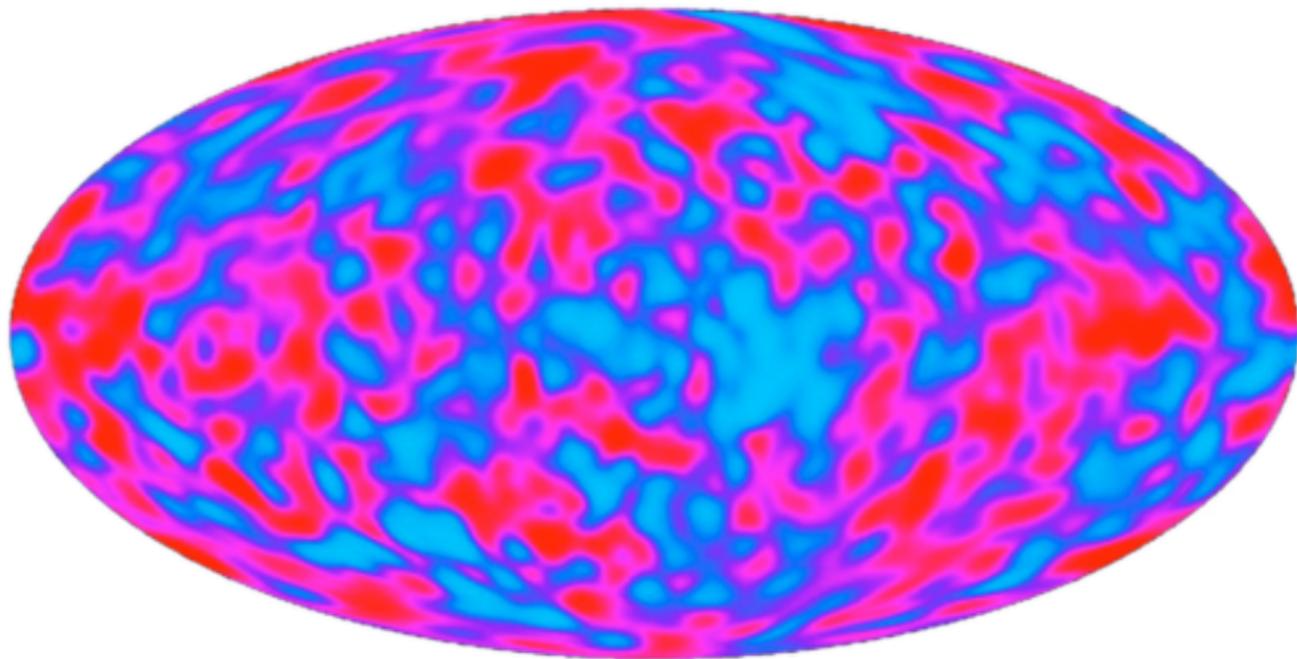
Planck (2013)

# Cosmic Microwave Background (CMB) Radiation



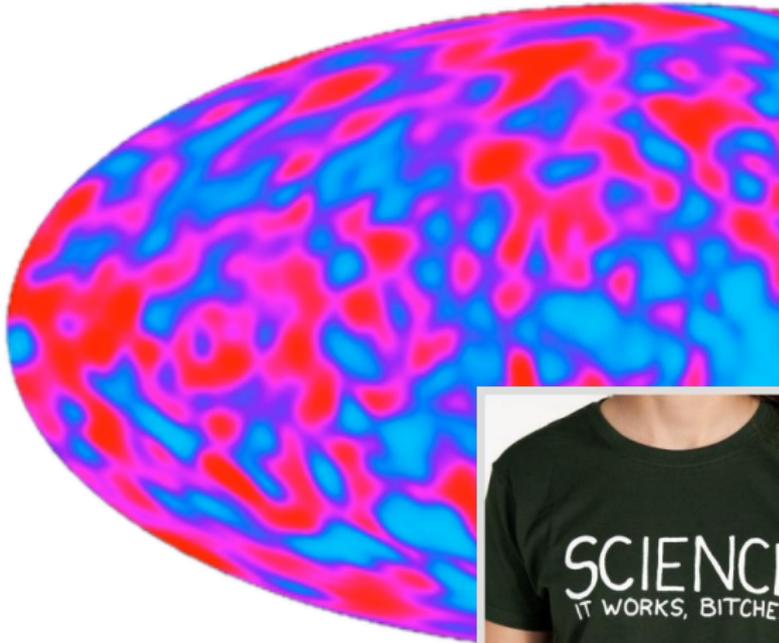
WMAP (2003)

# Cosmic Microwave Background (CMB) Radiation



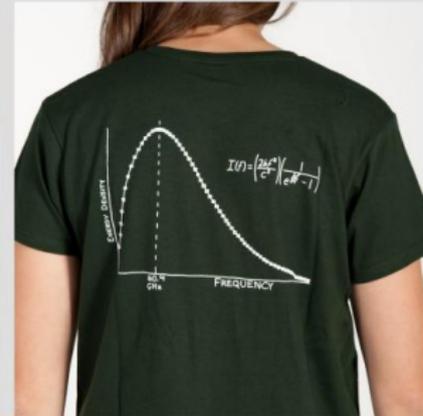
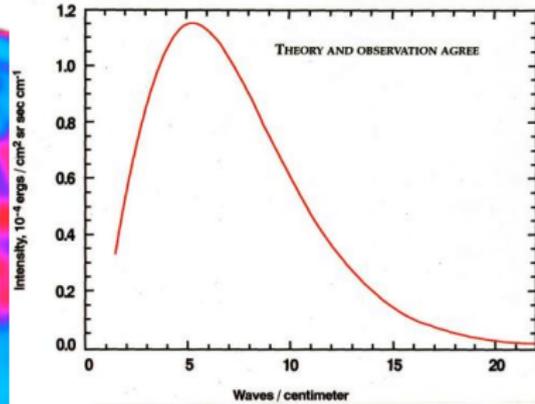
COBE (1992)

# Cosmic Microwave Background (CMB) Radiation



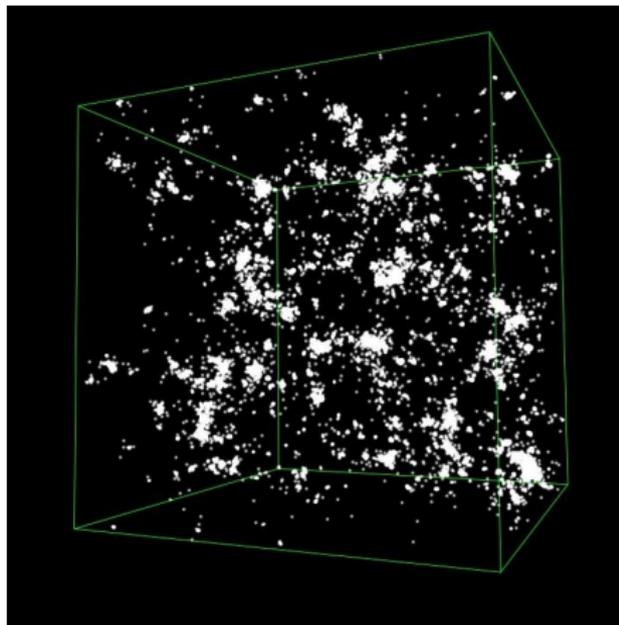
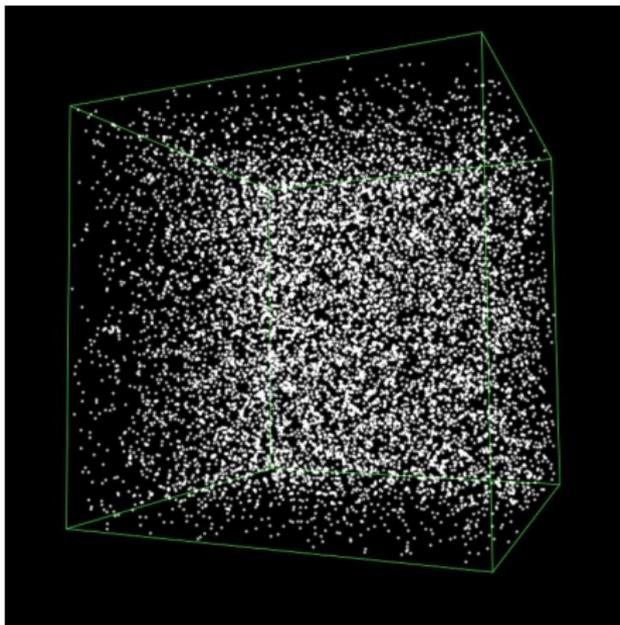
COBE (1992)

COSMIC MICROWAVE BACKGROUND SPECTRUM FROM COBE



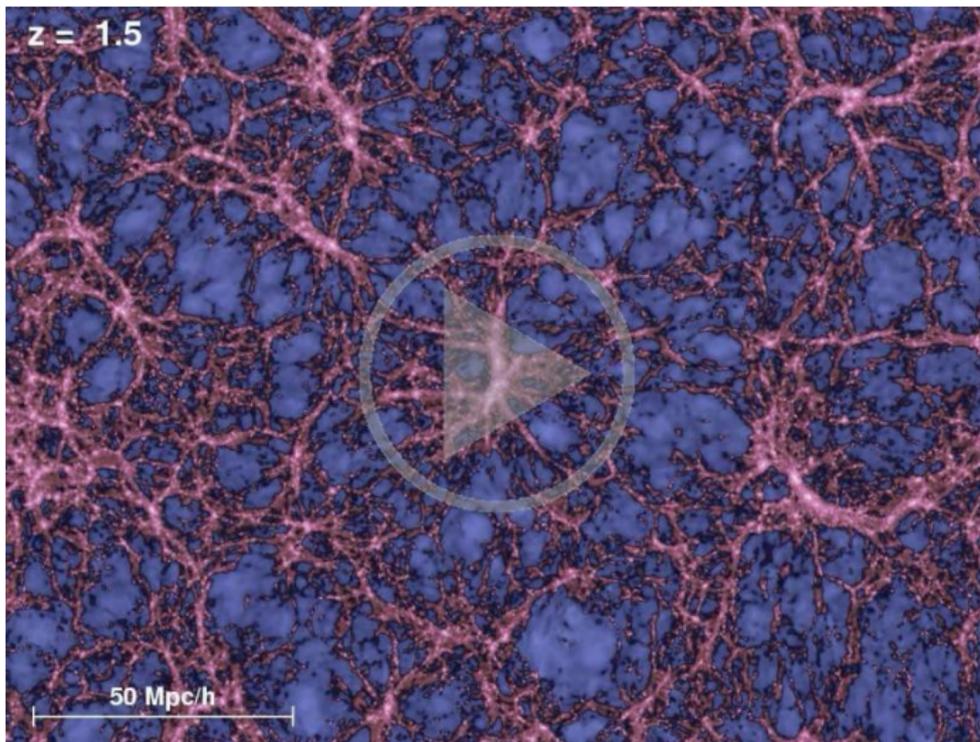
- Em simulações, ‘partículas’ dizem respeito a massas puntiformes para fins computacionais; são uma discretização da massa do sistema. Não têm relação alguma com as *partículas elementares* da física. Dependendo do tipo de simulação, cada partícula pode ter uma massa de milhões de massas solares, ou mais.
- As maiores simulações cosmológicas já realizadas têm volumes da ordem de alguns gigaparsecs<sup>3</sup>, empregaram  $N \sim 10^9 - 10^{11}$  partículas, e foram executadas em clusters com milhares ou dezenas de milhares de processadores. Ainda assim, o cálculo dura alguns meses e gera dezenas ou centenas de Terabytes de resultados.
- As condições de contorno são periódicas.
- O Universo está em expansão e isto é levado em conta nas simulações. Entretanto, as *visualizações* são geralmente feitas em *coordenadas comóveis*, de modo que não se vê a expansão cosmológica do espaço nestas animações.

13.7 bilhões de anos

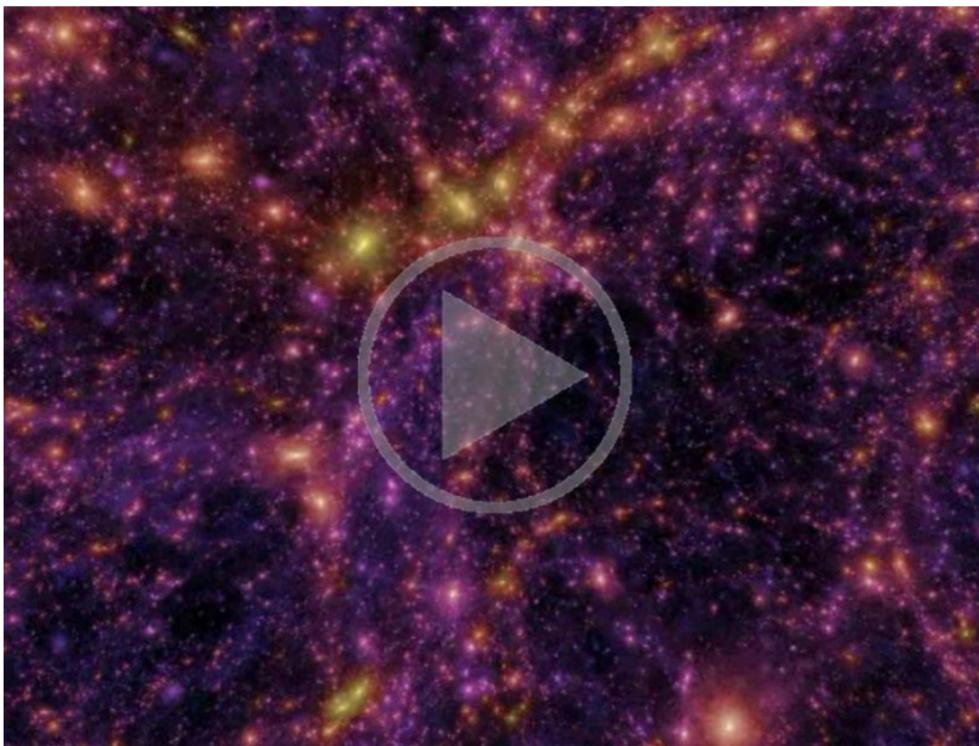


- A evolução gravitacional das perturbações só pode ser estudada com formalismos analíticos até um certo ponto. Quando o contraste de densidade se torna suficientemente alto, o problema é não-linear e precisa ser abordado numericamente.
- As simulações cosmológicas (mesmo as de matéria escura sem bárions) tiveram enorme sucesso em reproduzir a distribuição filamentar de massa em grande escala. Estas simulações nos permitem comparar resultados para Universos com diferentes parâmetros cosmológicos, por exemplo. Por isso, tiveram (e têm) um papel crucial no estabelecimento do cenário atualmente aceito em cosmologia.
- Com os resultados das simulações, podemos estudar a época de formação dos halos de matéria escura, sua abundância (em função da massa, em função do tempo), as taxas de fusão, etc. Sabemos que a formação de estruturas se dá *bottom-up*: halos menores se formam mais cedo e se fundem para dar origem a halos progressivamente mais massivos.

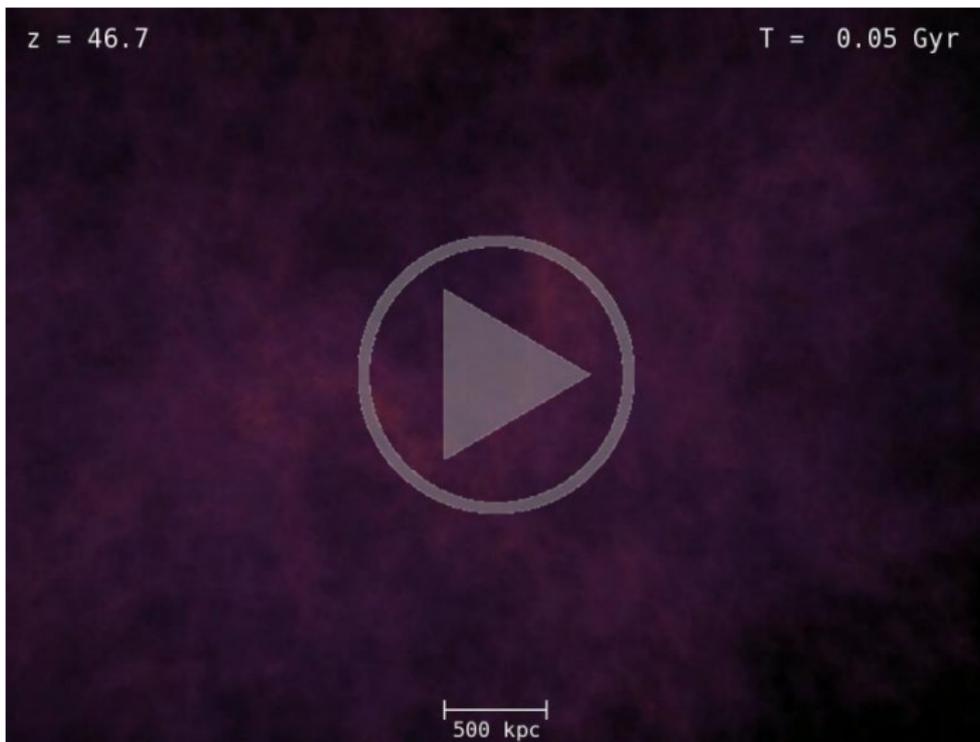
- Os halos de matéria escura das simulações são auto-similares, ou seja, apresentam o mesmo formato do perfil de densidade, para qualquer massa (conhecido como perfil de Navarro-Frenk-White, NFW).
- Uma das dificuldades ainda não resolvidas é o problema *cusp vs. core*: os halos das simulações têm perfis de densidade com inclinação excessiva no centro, enquanto que os perfis de densidade estimados pelas observações têm densidades centrais menos acentuadas.
- Outro problema em aberto é a abundância de sub-halos. As simulações prevêem uma enorme quantidade de halos de baixa massa ao redor de halos do porte do da Via Láctea, por exemplo. Entretanto, o número de galáxias-satélite observadas ao redor da nossa é bem menor.



<http://www.youtube.com/watch?v=DeLixtpPjuk>



<http://www.youtube.com/watch?v=JNIXAKkuShQ>



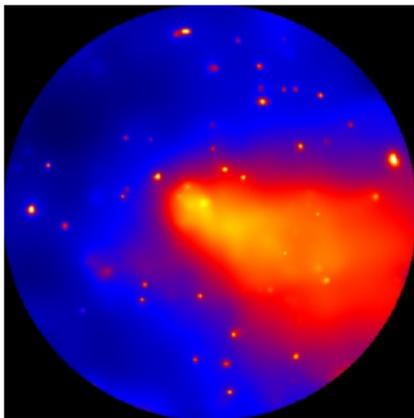
<http://www.youtube.com/watch?v=HbFhB5T6hiE>

- Em simulações que contêm bárions, é necessária a inclusão de outras interações físicas além da gravitação.
- É possível tratar numericamente do gás implementando as equações da hidrodinâmica. Há duas abordagens numéricas principais: Uma delas consiste em discretizar a massa, representando elementos de volume do fluido sob a forma de 'partículas' (a principal técnica se chama *smoothed particle hydrodynamics*, SPH). Outra abordagem é discretizar o espaço (dividindo-o em uma rede regular, por exemplo) e calcular as variações das grandezas hidrodinâmicas em pequenas células. Cada abordagem tem suas vantagens dependendo da circunstância do problema, mas o aspecto algorítmico da hidrodinâmica ainda não é tão robusto quanto a solução numérica do problema meramente gravitacional.

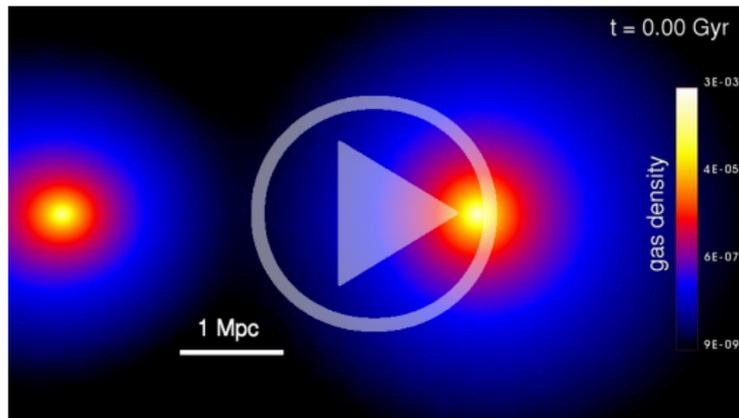
- Há fenômenos astrofísicos que não se pode simular diretamente, pois são excessivamente complexos e/ou estão abaixo da resolução numérica disponível. Estes fenômenos, que não podem ser abordados a partir de princípios primeiros, precisam ser introduzidos artificialmente através de prescrições fenomenológicas. Por exemplo: formação estelar, enriquecimento químico, feedback de supernovas, etc.
- Apesar das dificuldades, simulações cosmológicas incluindo matéria escura, hidrodinâmica e prescrições astrofísicas têm feito notáveis progressos no entendimento da formação de galáxias. São simulações em que o gás colapsa no interior de halos de matéria escura, formando estrelas e dando origem a galáxias com morfologias realistas. Estes são desenvolvimentos bastante recentes.

# Colisão de aglomerados de galáxias

observação (raios-X)



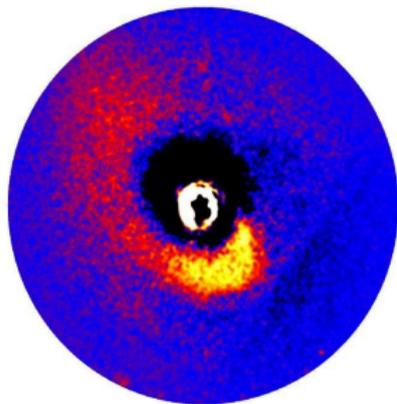
simulação



<http://www.youtube.com/watch?v=XYyYIOwdVcw>

# Colisão de aglomerados de galáxias

observação (raios-X)



simulação



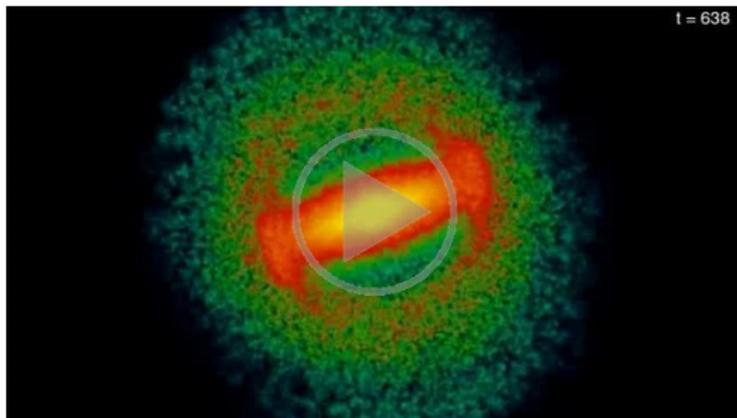
- Em aglomerados, o espaço entre as galáxias não é vazio. Este espaço (o meio intra-aglomerado) é preenchido por um gás muito rarefeito e muito quente (essencialmente hidrogênio e hélio ionizados). A massa desse gás é bem maior que a massa das galáxias. Os elétrons espalhados pelos núcleos atômicos emitem radiação de Bremsstrahlung em raios-X.
- Colisões de aglomerados geram choques supersônicos no gás.

# Dinâmica de galáxias barradas

observação



simulação



<http://www.youtube.com/watch?v=Cg8z1MxJXww>

---

<http://www.astro.iag.usp.br/~rgmachado/>

---

● **Simulations:**

Millennium Simulation <http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/index.shtml>

Millennium-XXL Simulation [http://www.mpa-garching.mpg.de/mpa/research/current\\_research/h12011-9/h12011-9-en.html](http://www.mpa-garching.mpg.de/mpa/research/current_research/h12011-9/h12011-9-en.html)

Aquarius Simulation <http://www.mpa-garching.mpg.de/aquarius/>

DEUS Simulation <http://www.deus-consortium.org/>

Bolshoi Simulation <http://hipacc.ucsc.edu/Bolshoi/>

● **Codes:**

Gadget code <http://www.mpa-garching.mpg.de/gadget/>

Arepo code <http://www.mpa-garching.mpg.de/~volker/arepo/>

Ramses code

<http://www.itp.uzh.ch/~teyssier/ramses/RAMSES.html>

Flash code <http://flash.uchicago.edu/site/flashcode/>

- **N-bodies:**

N-body simulations [http://www.scholarpedia.org/article/N-body\\_simulations\\_\(gravitational\)](http://www.scholarpedia.org/article/N-body_simulations_(gravitational))

The N-body problem <http://sverre.com/>

The Art of Computational Science <http://www.artcompsci.org/>

- **Galaxies and Cosmology:**

Dodelson, S., 2003, *Modern Cosmology*

Lima Neto, G. B., 2012, *Astronomia Extragaláctica*

<http://www.astro.iag.usp.br/~gastao/Extragal.html>

Peebles, P. J. E., 1993, *Principles of Physical Cosmology*

Schneider, P., 2006, *Extragalactic Astronomy and Cosmology*

“Computers only give you numbers, not insight”

