

Compreendendo o Universo através das galáxias


Marcio A.G. Maia



Observatório
Nacional





DES-Brazil
Dark Energy Survey



61ª Reunião Anual da SBPC
12 a 17 de julho de 2009
Amazônia Ciência e Cultura
Universidade Federal do Amazonas, UFAM | Manaus, AM

REALIZAÇÃO





Capítulo 4

Meio intra-aglomerado.

Lentes gravitacionais.

Estrutura em grande escala.

Linha de tempo do universo.

Observações cosmológicas.

Simulações.

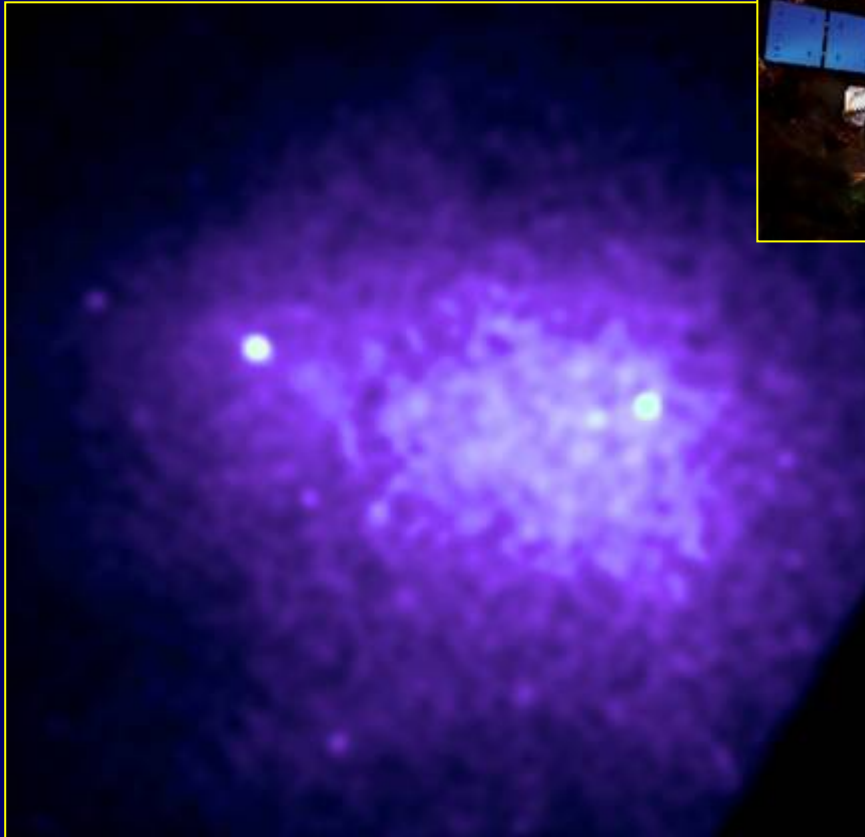
O futuro do universo.

Energia escura.

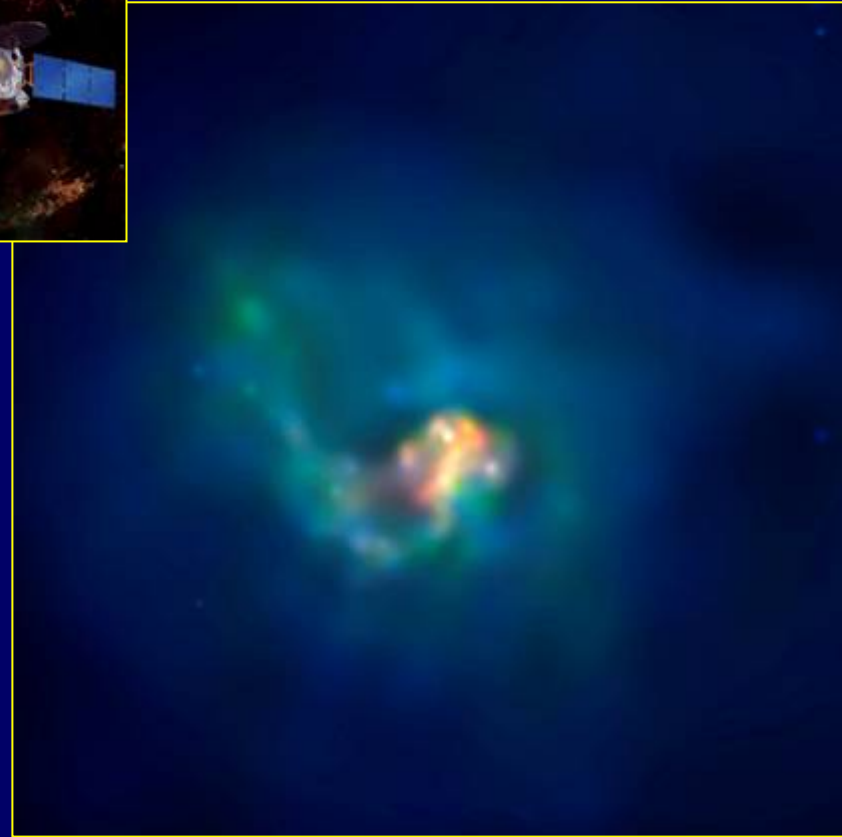
Resumo da ópera.

Meio Intra-aglomerado

Aglomerados possuem um meio gasoso permeando a sua distribuição de galáxias. Normalmente este gás é quente e emite em raios-x, sendo observações nesta faixa, importantes para determinações de sua quantidade, distribuição, temperatura e composição química.



Aglomerado de Coma visto pelo Chandra



Aglomerado de Centaurus visto pelo Chandra

Emissão de Raios-X em Aglomerados

Comparando ...

Variáveis cataclísmicas	$L_x \sim 10^{32}-10^{38}$ ergs/s
Via Láctea, M31	$L_x \sim 10^{39}$ ergs/s
Aglomerados de galáxias	$L_x \sim 10^{43}-10^{45}$ ergs/s
Aglomerados no óptico	$L_{opt} \sim 10^{45}$ ergs/s

Causa ...

Gás quente (10^7-10^8 K) de baixa densidade (10^{-3} cm⁻³), constituído principalmente de hidrogênio e hélio, permeando as galáxias. A estas temperaturas o gás está totalmente ionizado.

ROSAT/HRI and ASCA observations of the most luminous X-ray cluster RX J1347.5-1145

S. Schindler^{1,2,*}, M. Hattori^{1,3}, D.M. Neumann¹, and H. Böhringer¹

Aglomerado mais
luminoso em raios-x

$L_x \sim 2 \times 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$
 $T_x \sim 9.3 \text{ keV} \sim 1.1 \times 10^8 \text{ K}$
 $Z \sim 0.45$
 $M_{\text{aglomerado}} \sim 10^{15} M_{\text{sol}}$

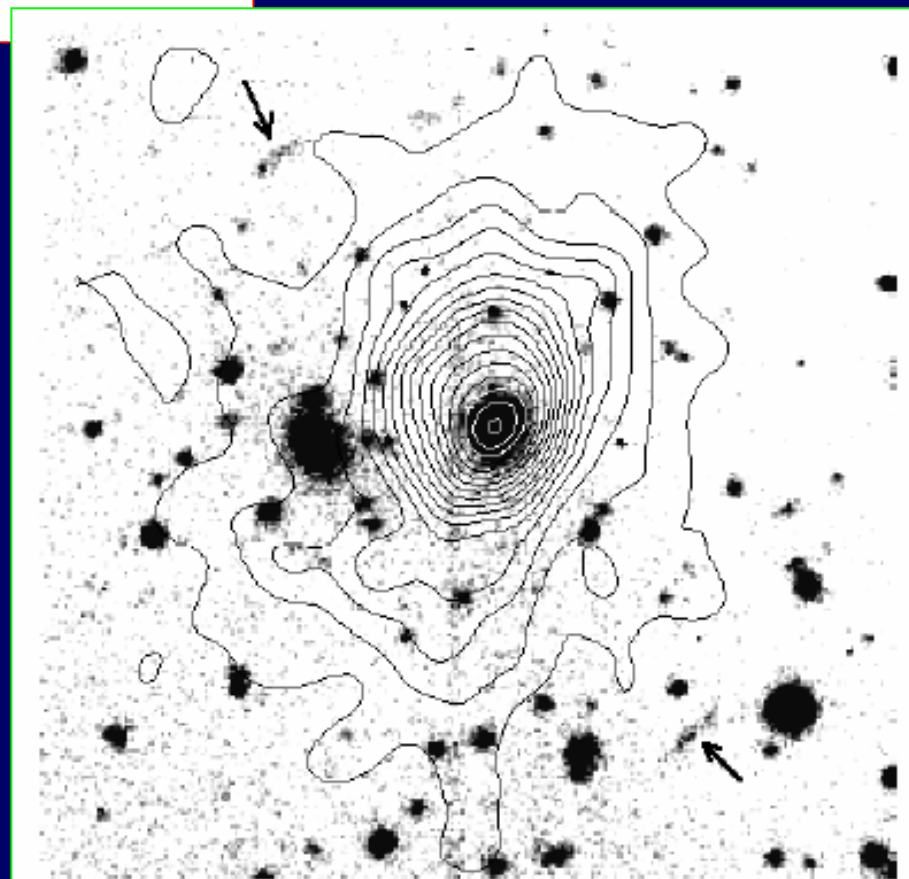
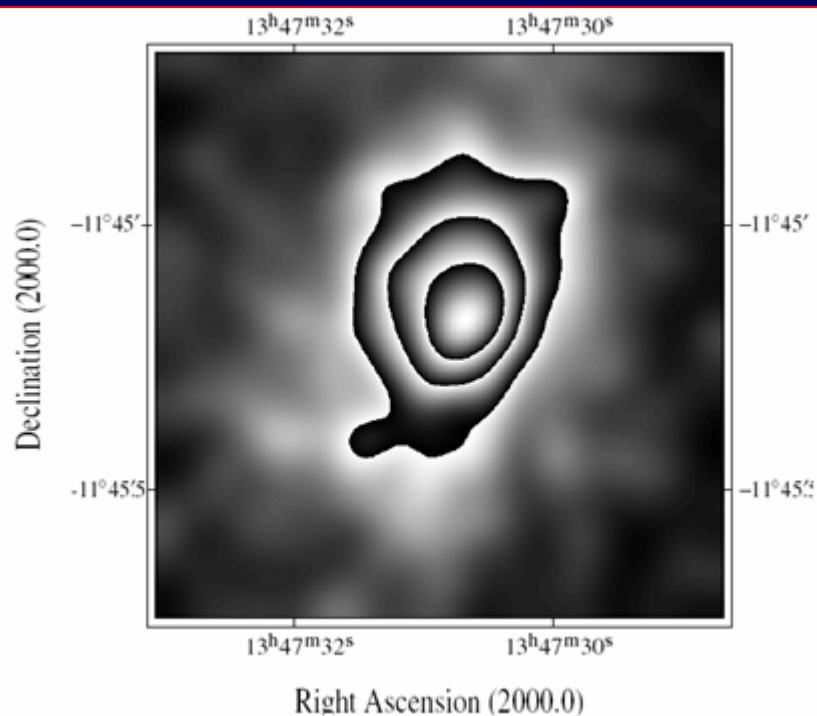
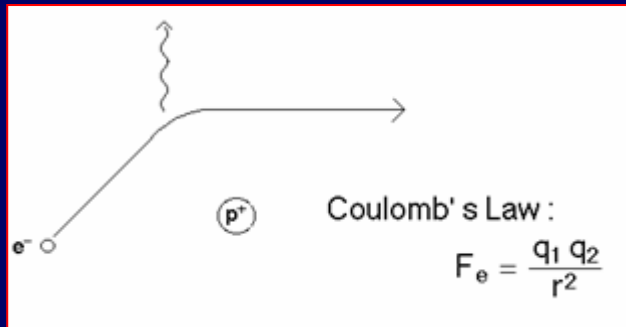


Fig. 2. X-ray contours of the HRI data superposed on an R image. The two images are aligned in such a way that the positions of the X-ray maximum and the central galaxy correspond. The X-ray image is smoothed with a Gaussian filter of $\sigma = 2.5$ arcsec. The contours are linearly spaced with $\Delta\text{count rate} = 0.032 \text{ counts/s/arcmin}^2$ the highest contour line corresponding to $0.54 \text{ counts/s/arcmin}^2$. The positions of the arcs are marked by arrows. The size of the image is $1.4 \times 1.4 \text{ arcmin}^2$ (North is up, East is left).

Meio Intra-aglomerado - Mecanismos de emissão de raios-x

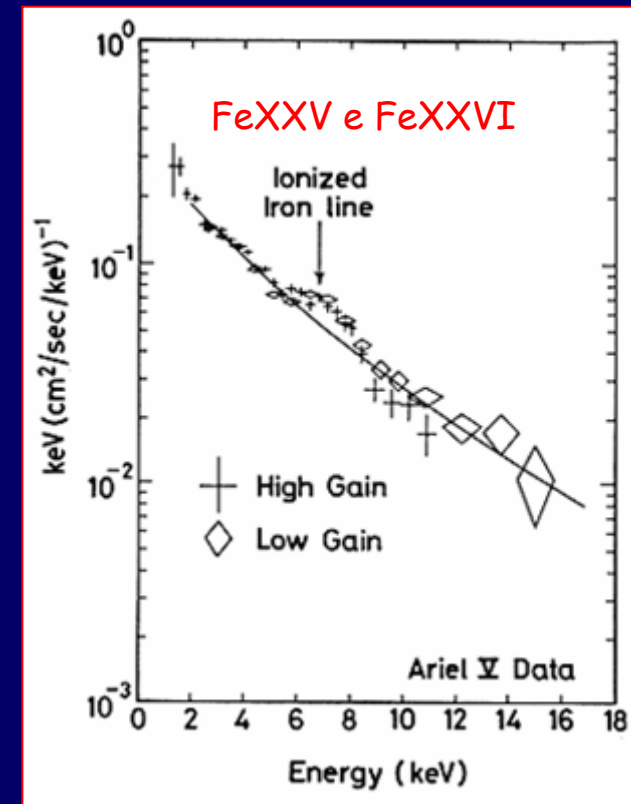
Radiação free-free - (thermal bremsstrahlung) - elétrons rápidos são desacelerados pela força atrativa dos núcleos, produzindo a emissão de um fóton. Este mecanismo é eficiente para produção de raios-x se a temperatura for maior do que 4×10^7 K:



$$L_X \propto n_{\text{elétrons}} n_{\text{íons}} T^{1/2} \propto \rho_{\text{gás}}^2 T^{1/2}$$

Linhas de Recombinação - Proveniente da recombinação de elétrons com íons, sendo importante para temperaturas menores do que 4×10^7 K. A produção de linhas é muito sensível a temperatura dos elétrons.

Veja mais no Apêndice



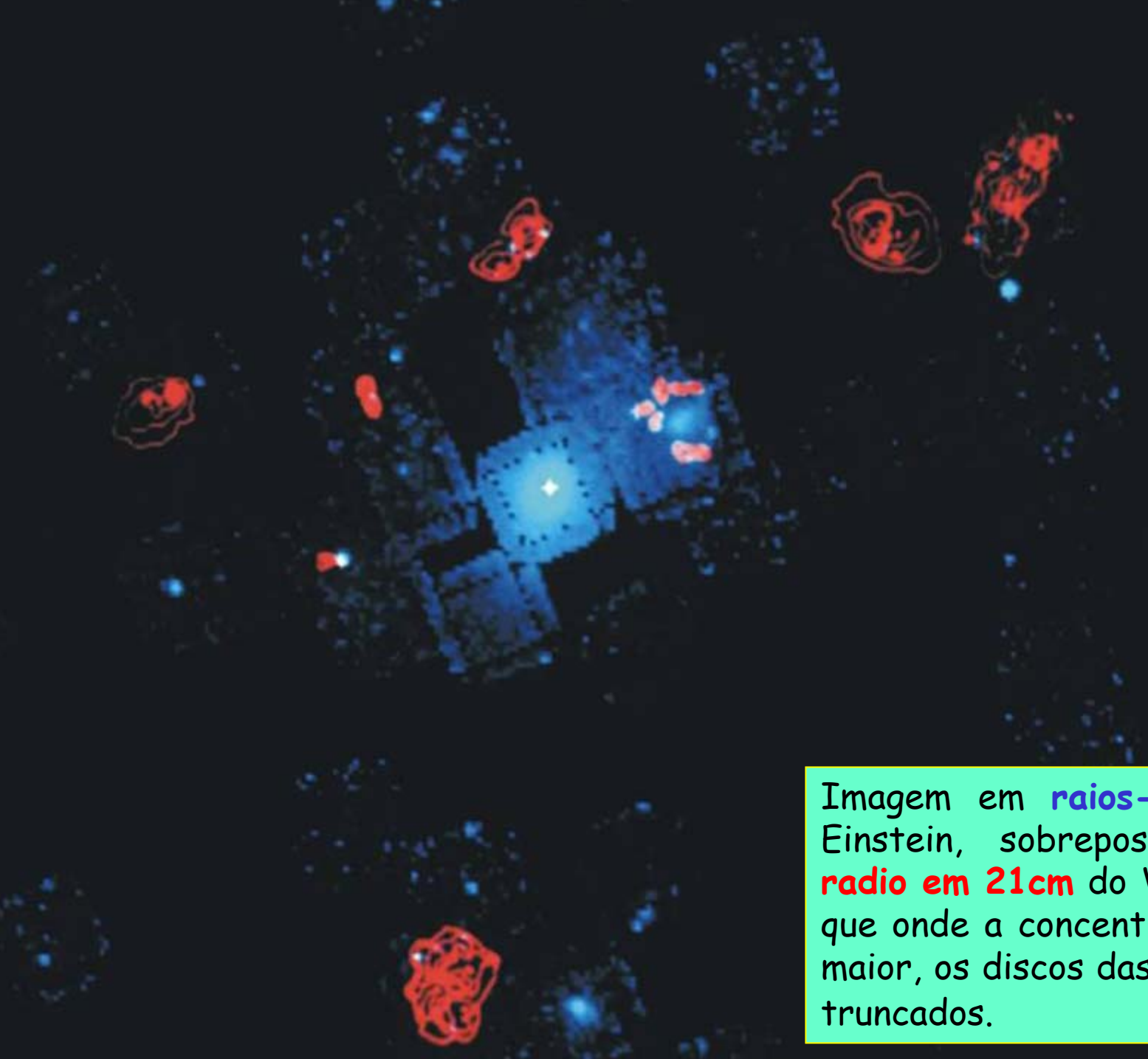
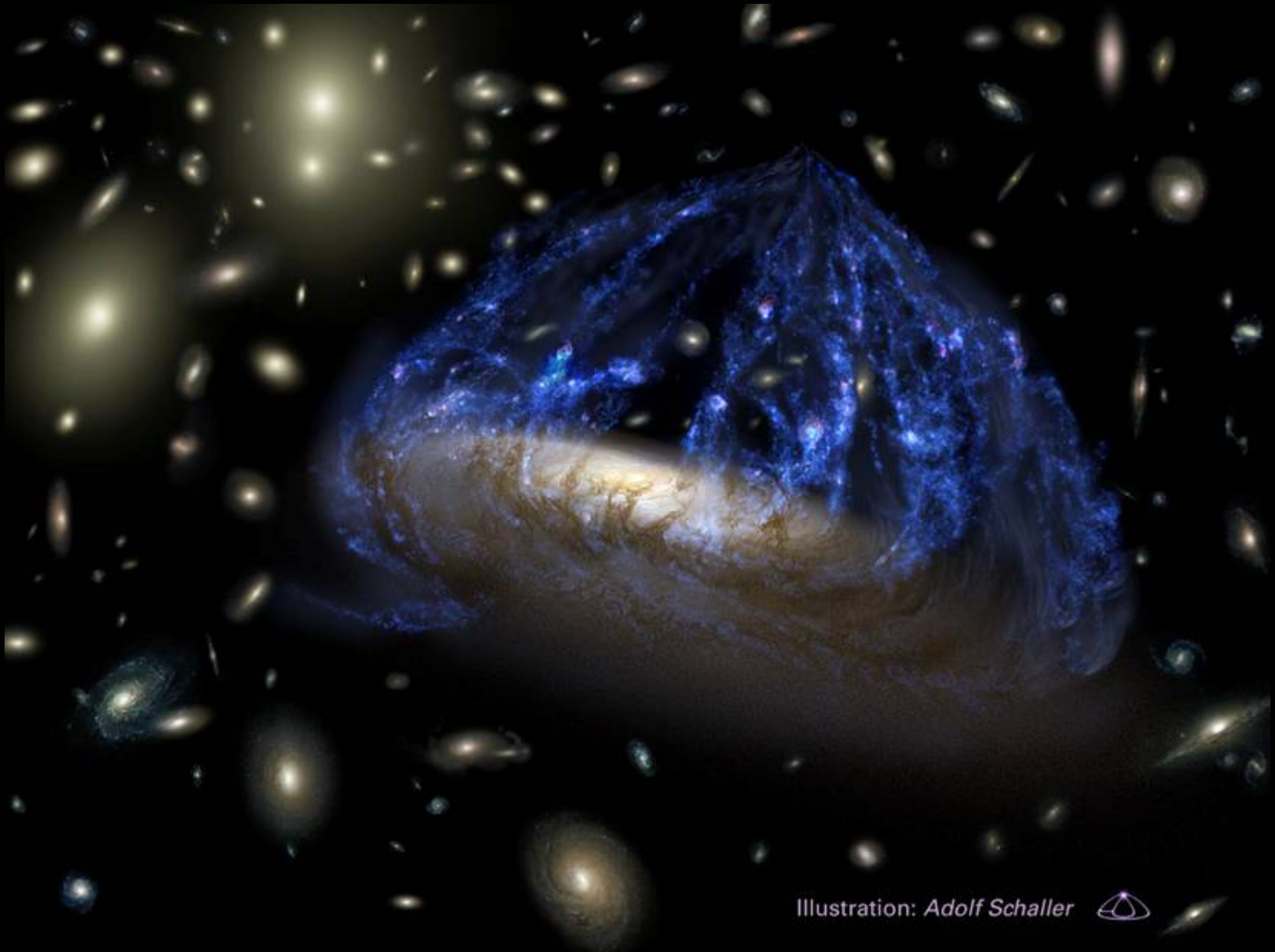
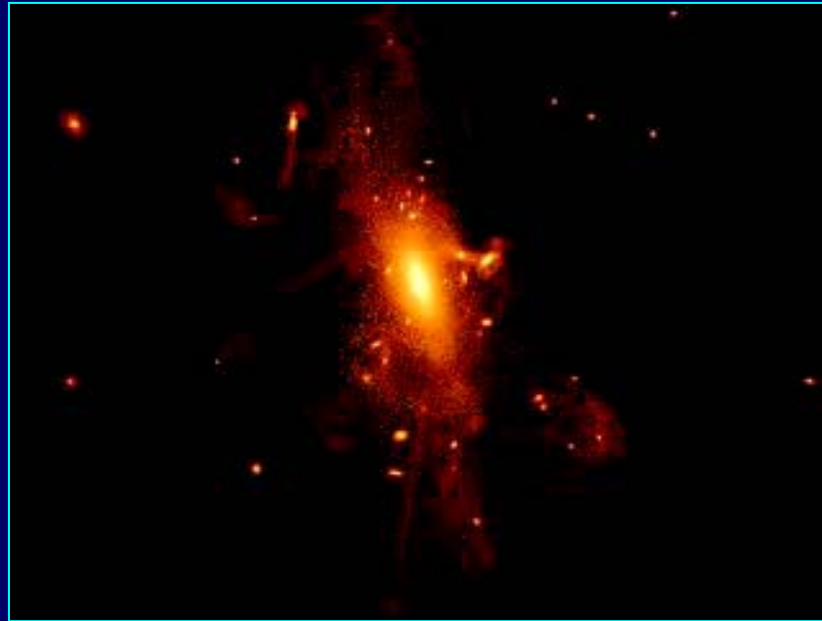


Imagem em **raios-x** do satélite Einstein, sobreposta a imagem **radio em 21cm** do VLA mostrando que onde a concentração de gás é maior, os discos das espirais estão truncados.

Esta ilustração "artística" mostra como o gás no interior de um aglomerado de galáxias removeria parte do material de uma de suas galáxias.



Simulação mostrando aglomerado de galáxias evoluindo no tempo



Meio Intra-aglomerado - Espectros em raios-x

Espectroscopia do gás do meio intracluster permite obter informações sobre sua temperatura e composição. O espectro tem um contínuo que decresce exponencialmente em altas frequências (característico de bremsstrahlung):

$$I_{\nu} \propto \exp(-h\nu / k_B T)$$

Os espectros indicam temperaturas de 10^7 - 10^8 K, e são geralmente expressas em keV. $1 \text{ keV} = 1.16 \times 10^7 \text{ K}$

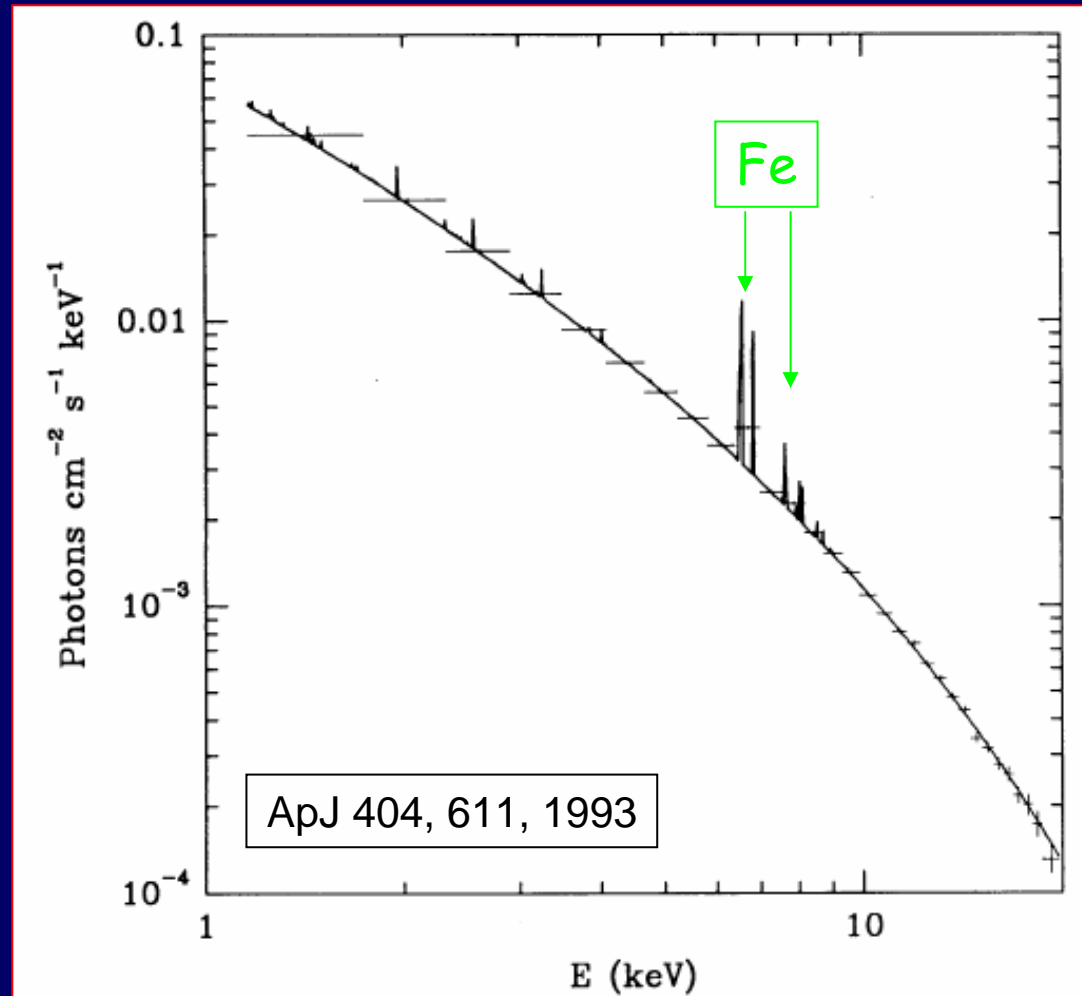
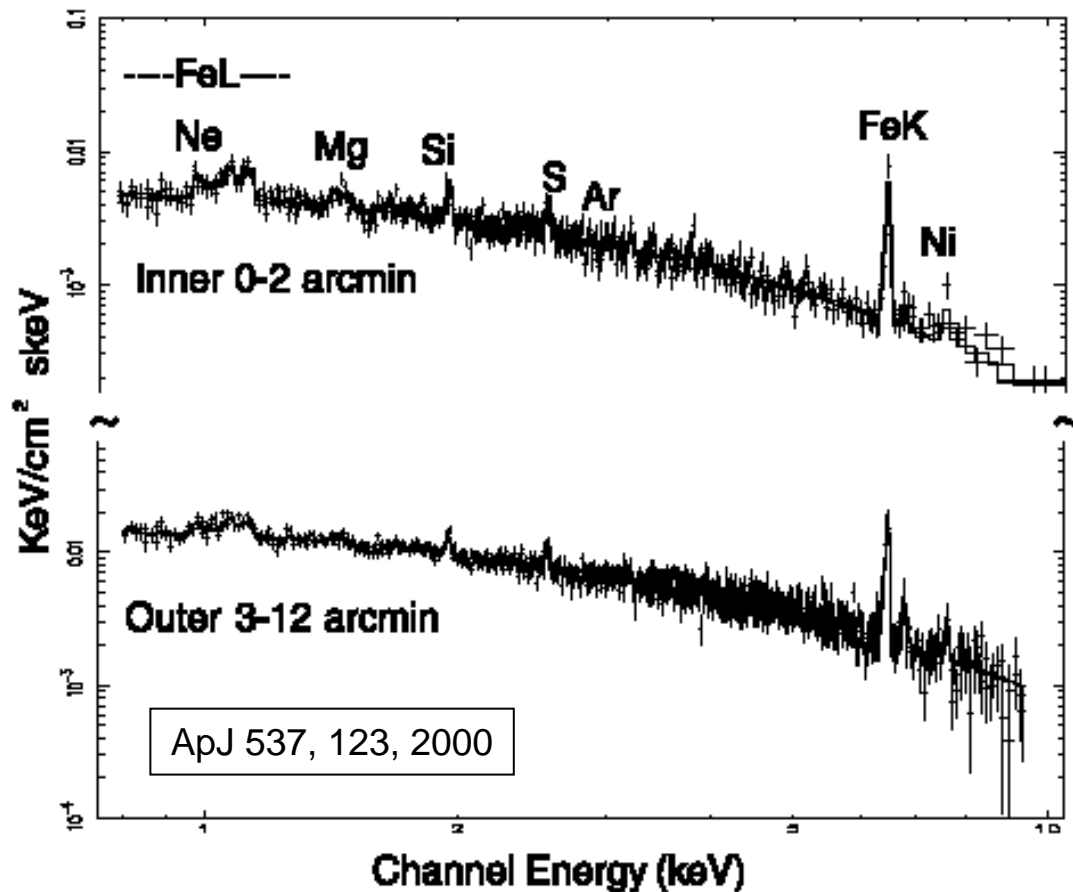


FIG. 2.—Incident photon spectrum of the Coma cluster from the best-fit isothermal RS mode¹.

Meio Intra-aglomerado - Espectros em raios-x - (cont.)

Espectros revelam linhas de emissão de Fe, Ni, Si, e outros elementos pesados, sendo um indício de que muito do meio intracluster foi processado por estrelas. A abundância do meio intracluster pode ser medida por razões entre larguras equivalentes destas linhas. Encontra-se da ordem de 30-40% da abundância solar.



Espectros em raios-x para o aglomerado A496, obtidos com a finalidade de estudo de gradientes de metalicidade do meio intracluster.

Meio Intra-aglomerado - Relação $\sigma \times T^{1/2}$

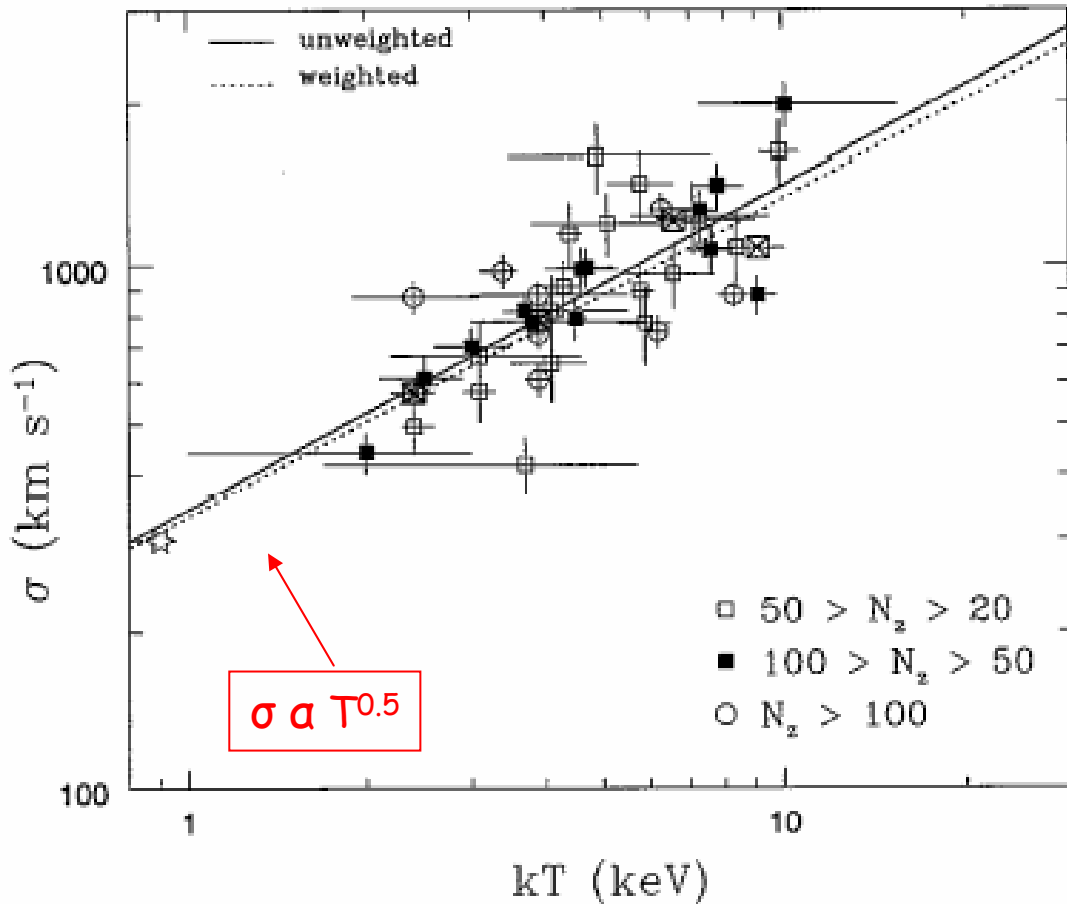


FIG. 1.—Cluster radial velocity dispersion (σ) vs. ICM temperature (kT) for the 41 clusters of our sample. The symbols indicate the number of redshift measurements (N_z) used in determining the velocity dispersions. The unweighted (solid line) and weighted (dotted line) χ^2 fittings are shown (see § 3.1). The median values of the binned data are designated by the large boxed crosses. The recent *ROSAT* observation of the small group NGC 2300 (*star*) is also shown for comparison.

Se as galáxias e o gás estão ambos em equilíbrio térmico no potencial do aglomerado, então:

$$mv_{galáxia}^2 \cong 3k_B T_{gás}$$

$$T_{gás} \propto v_{galáxia}^2$$

Meio Intra-aglomerado - Quantidade de gás

Supondo a distribuição do gás com simetria esférica, temperatura constante, e emissão de raios-x proporcional à $\rho_{\text{gás}}^2$ então a densidade espacial do gás é descrita por:

$$\rho_{\text{gás}}(r) = \rho_0 \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-1}$$
$$\rho_{\text{gás}}(r) \propto r^{-2} \quad (\text{para } r \text{ grande})$$

A uma distância R do centro do aglomerado a massa total de gás é:

$$M_{\text{gás}}(< R) = \int_0^R \rho_{\text{gás}}(r) 4\pi r^2 dr$$

Observações indicam que a massa total do gás em aglomerados é várias vezes maior que a massa total de galáxias.

Estimativa de Massa de aglomerados - Raios-x

Supondo gás em equilíbrio hidrostático com poço de potencial do aglomerado, podemos escrever:

$$\frac{1}{\rho_{\text{gás}}} \frac{dP}{dr} = - \frac{d\Phi}{dr} = - \frac{GM_{\text{agl}}(r)}{r^2}$$

Substituindo P , pela *pressão de um gás ideal* ->

$$P \approx \frac{\rho k_B T}{\mu m_H}$$

e resol-

vendo para $M(R)$, teremos que a massa do aglomerado é:

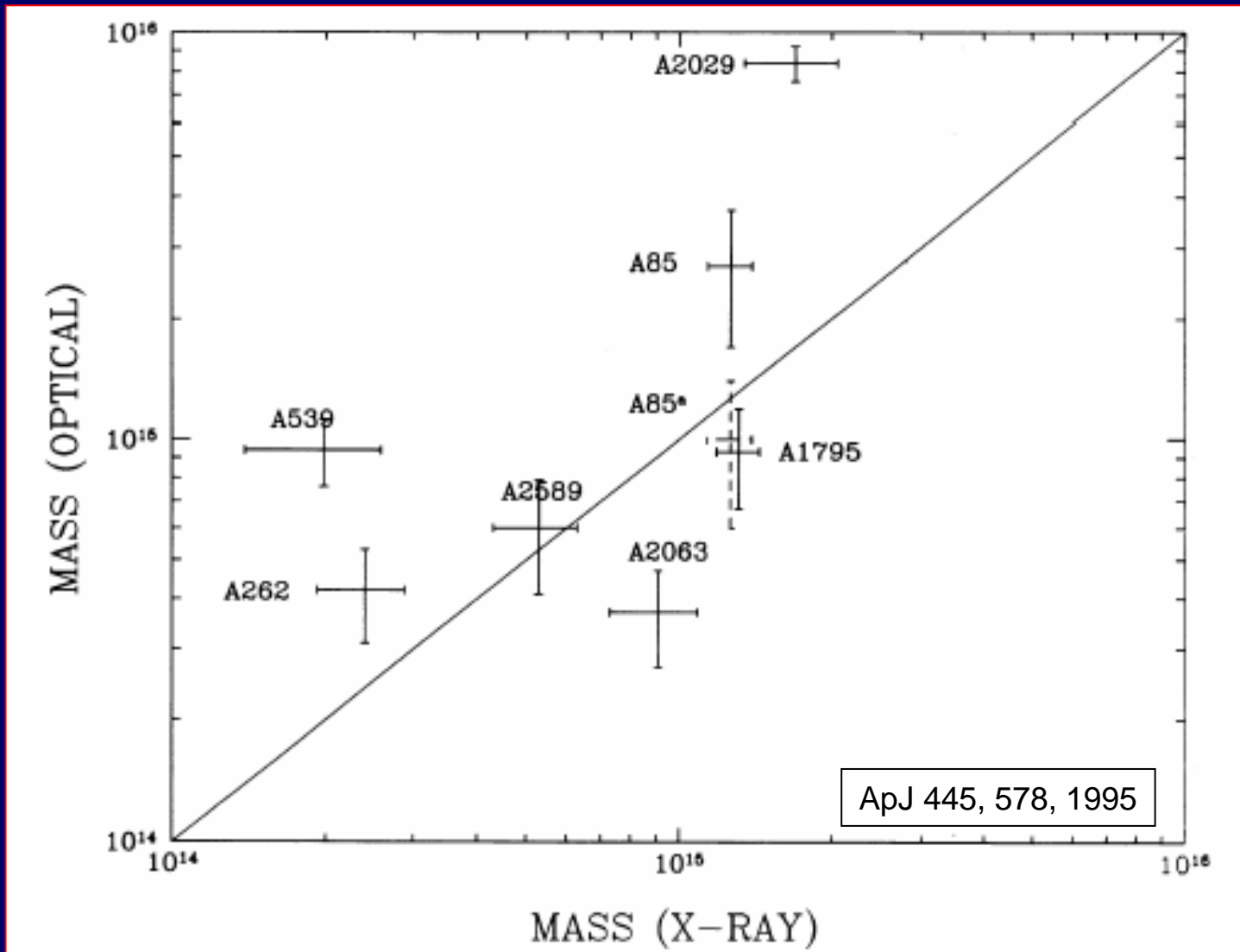
$$M_{\text{aglo}}(< R) = - \frac{k_B T_{\text{gás}}}{\mu m_H G} \left(\frac{\partial \ln \rho_{\text{gás}}}{\partial \ln r} + \frac{\partial \ln T_{\text{gás}}}{\partial \ln r} \right)$$

Igual a zero se gás é considerado isotérmico

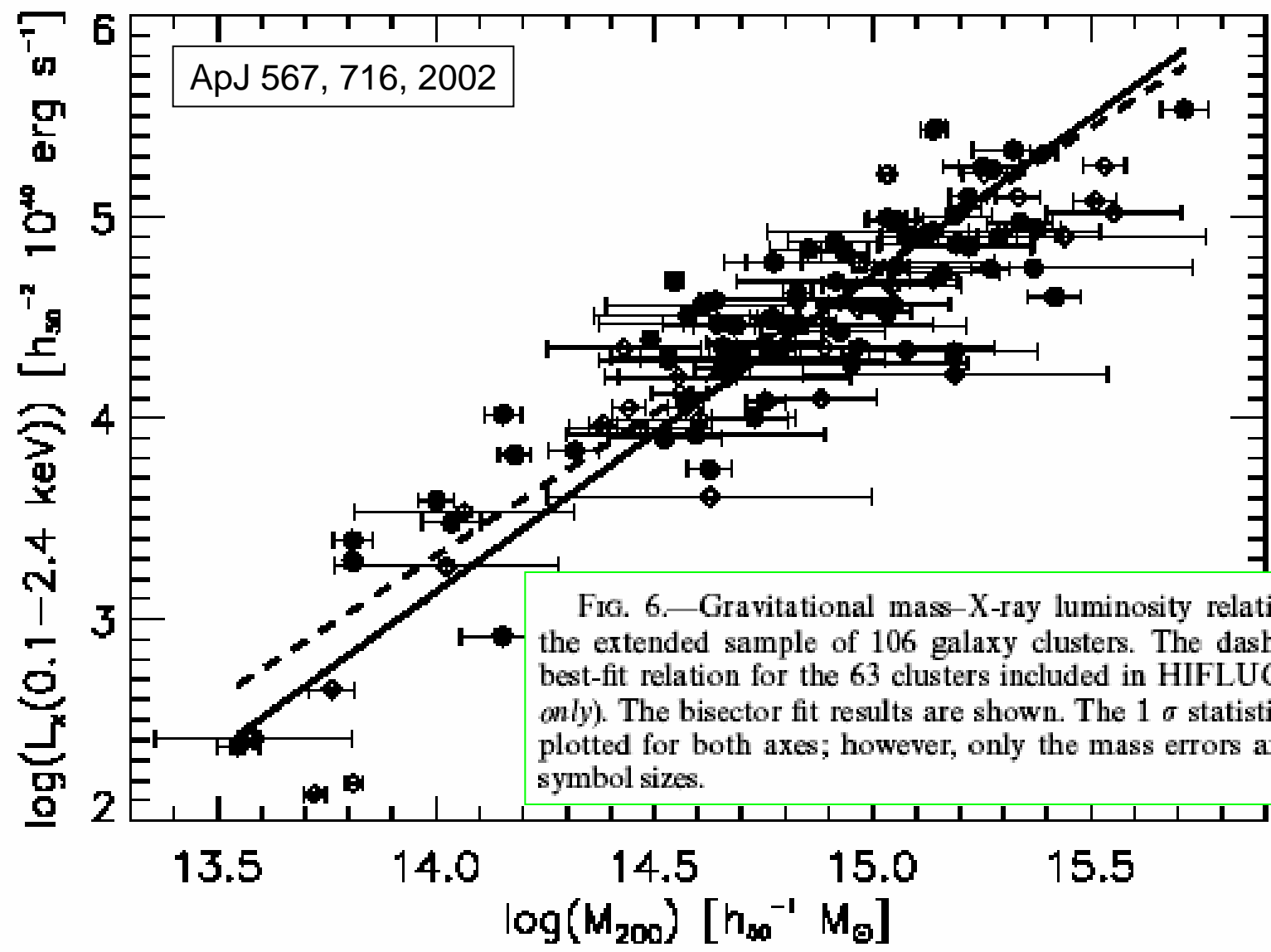
A determinação da massa do aglomerado é mais sensível a sua temperatura do que a sua densidade.

Massa virial x Massa por raios-x

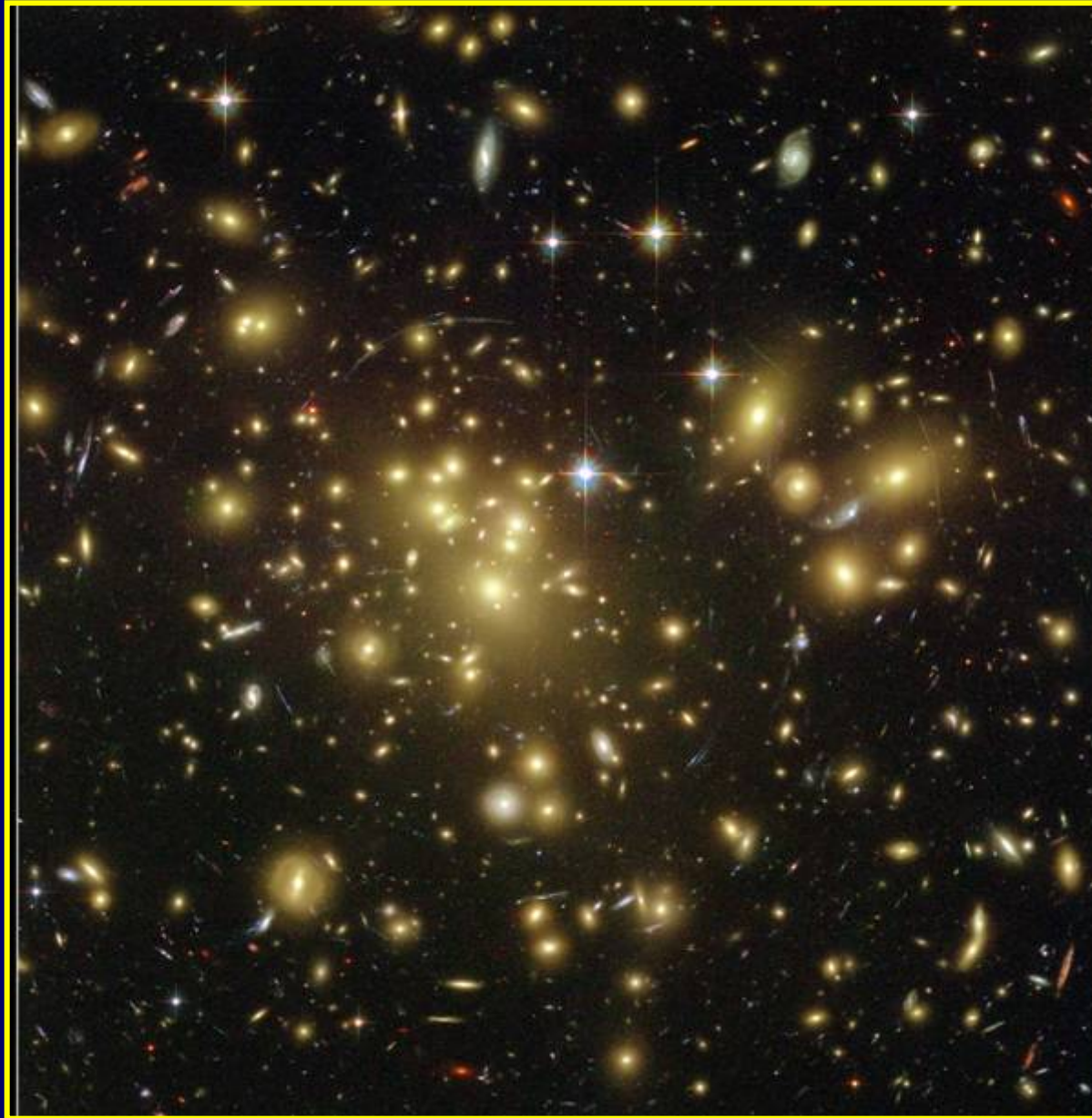
Comparação da massa de aglomerados de galáxias determinadas através de dados ópticos e de raios-x



Massa gravitacional x Luminosidade raios-x

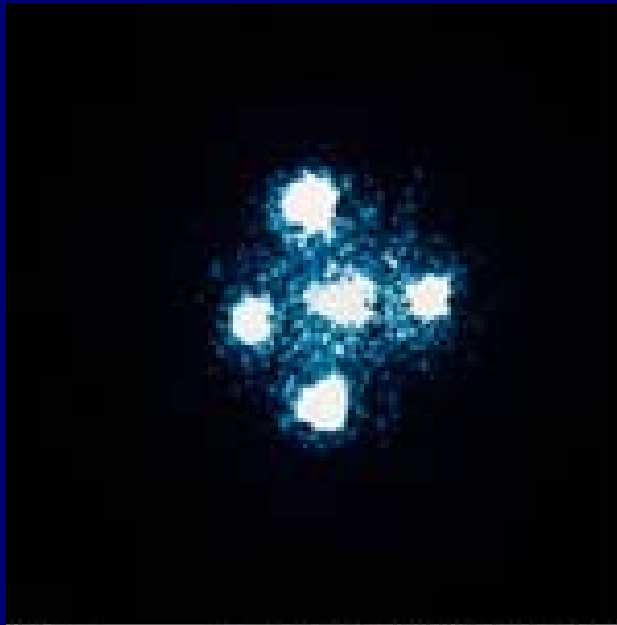


Lentes Gravitacionais



Telescópios naturais = Lentes gravitacionais

A teoria geral da relatividade prediz que a massa pode curvar raios de luz, produzindo imagens múltiplas e imagens amplificadas. Este fenômeno é chamado de lente gravitacional. O estudo de efeitos de lente gravitacional produzido por aglomerados de galáxias nos permite estimar a massa destes aglomerados, além de possibilitar detecção de galáxias distantes. A mais distante galáxia detectada ($z \sim 10$) teve seu redshift medido com auxílio de lente gravitacional produzido por um aglomerado de galáxias.



(a)



(b)

Lentes Gravitacionais - exemplo ilustrativo

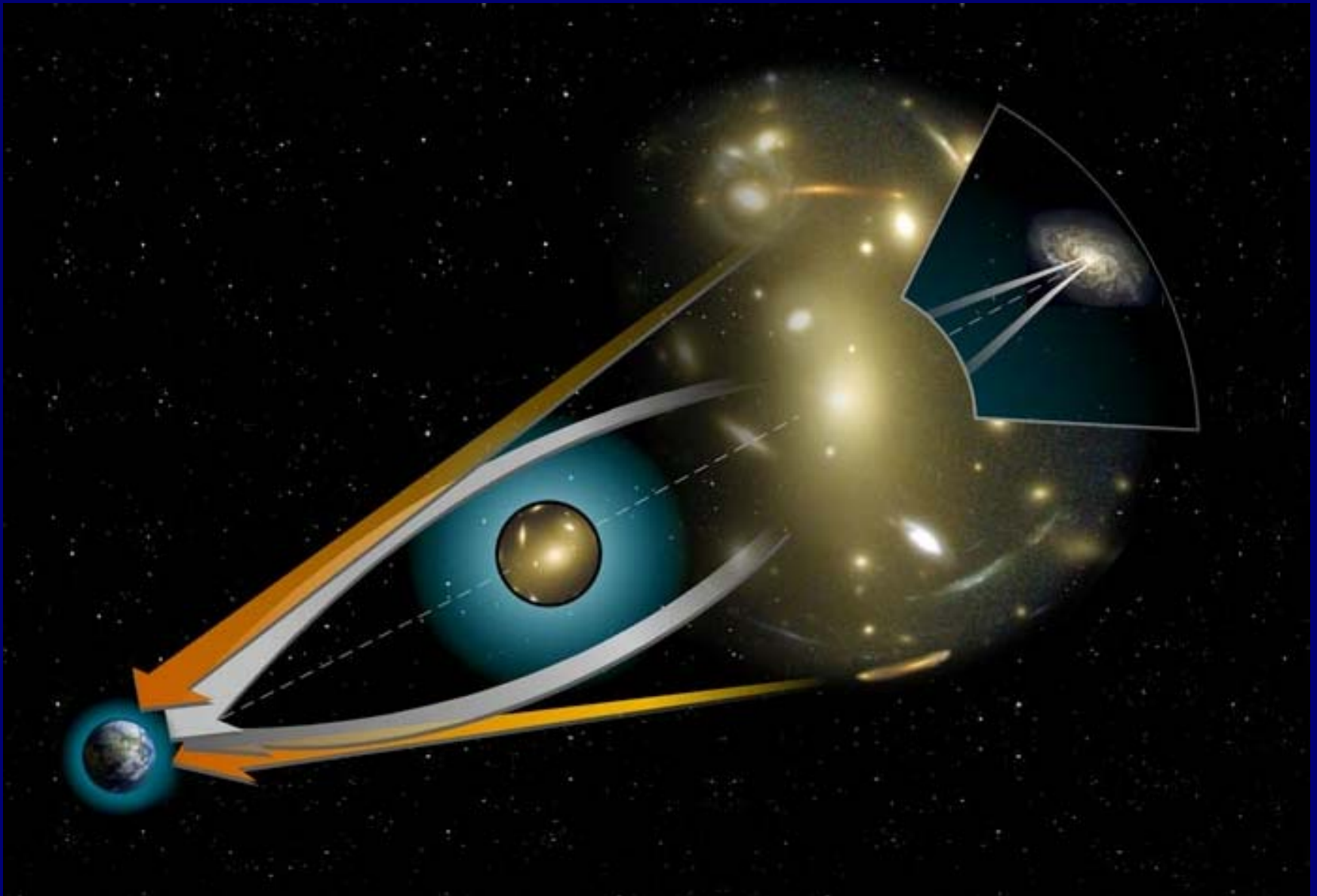
Como enxergaríamos este prédio, se colocássemos em sua frente um BN com a massa de Júpiter ?



Lentes Gravitacionais - exemplo ilustrativo



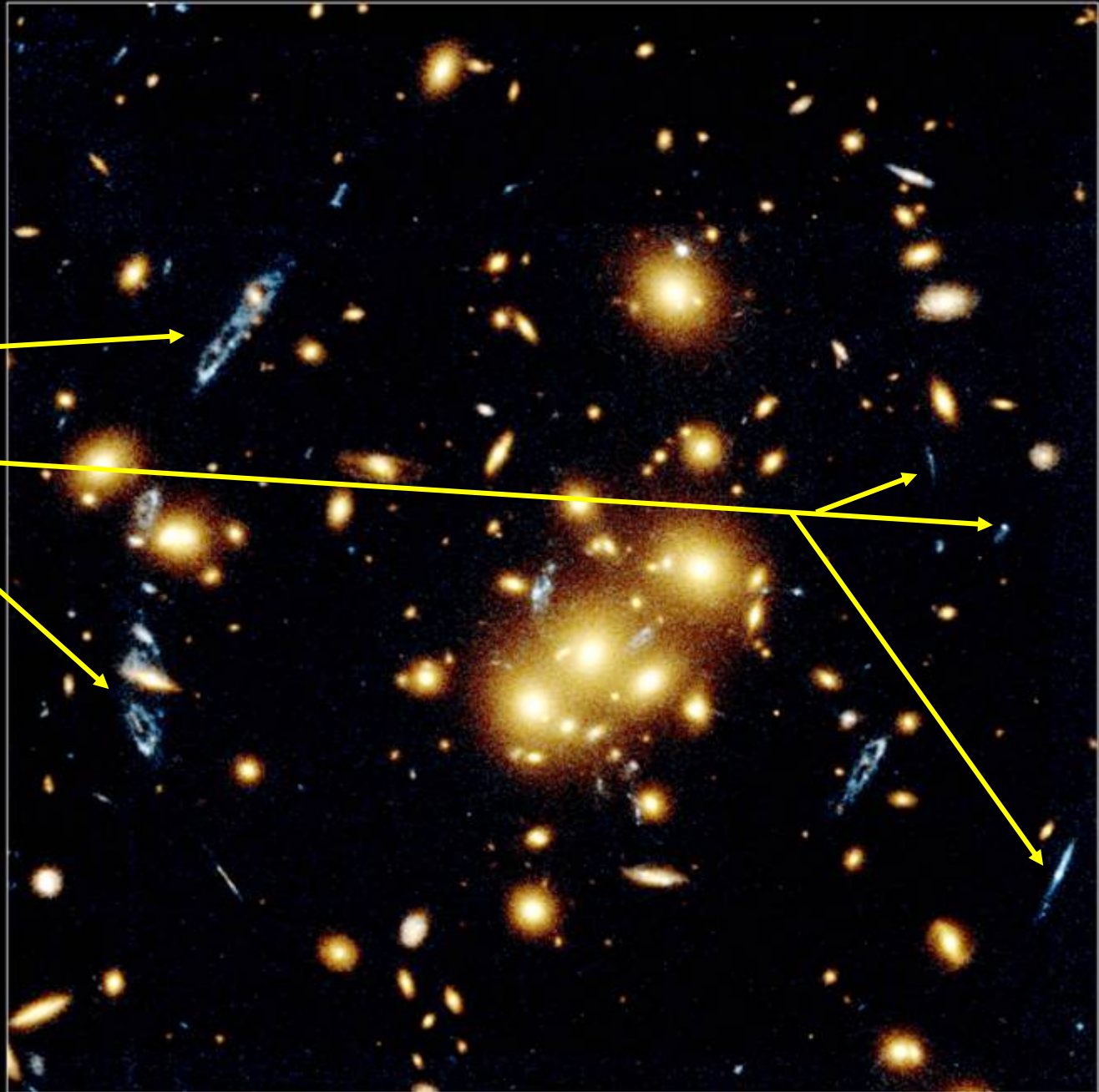
Lentes Gravitacionais - (cont.)



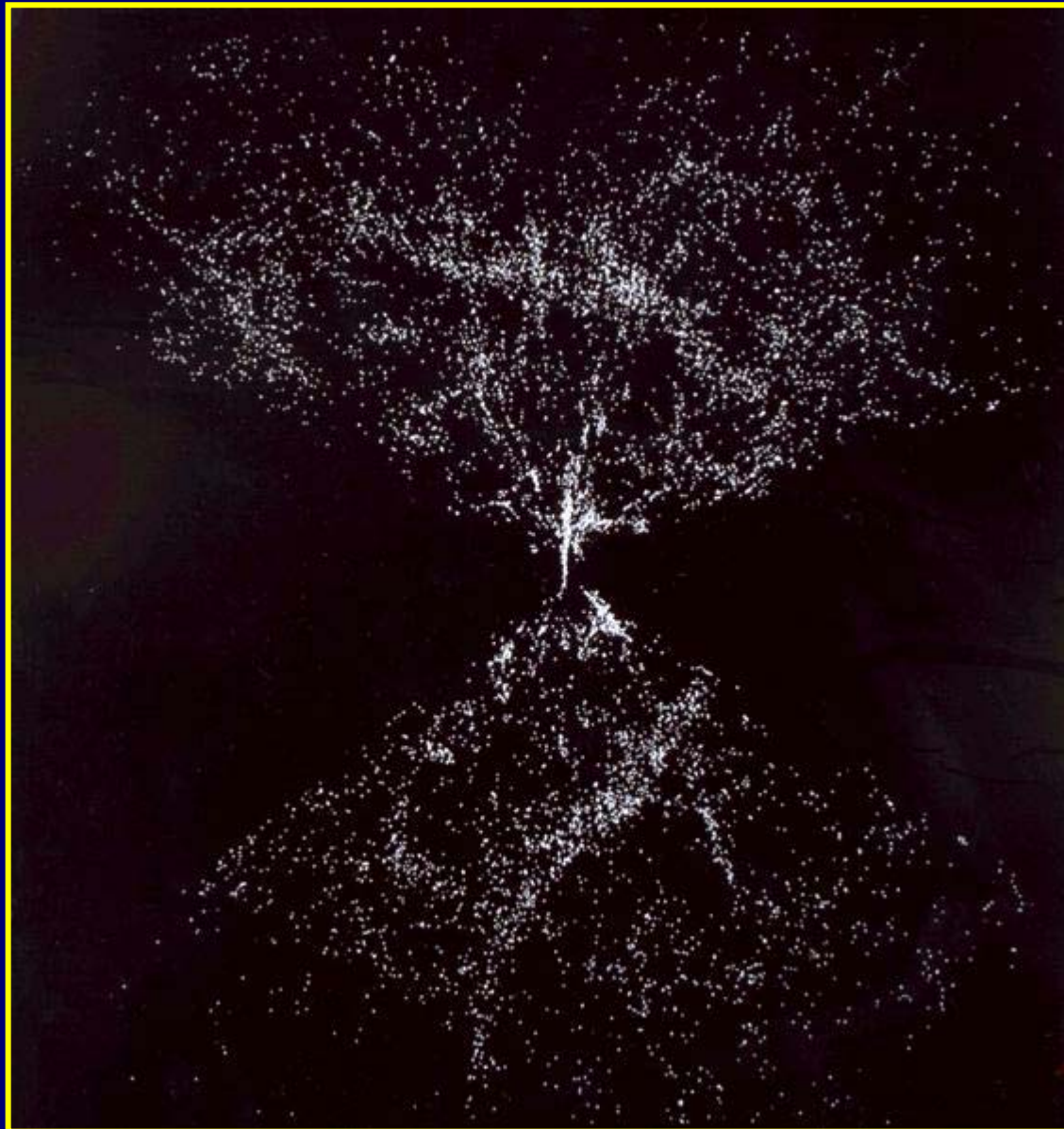
Esquema do efeito de lente produzido por um aglomerado

Lentes Gravitacionais - exemplo

Imagem de galáxias de fundo distorcidas pela lente.



Estrutura em Grande Escala



Estrutura em grande escala do Universo

A distribuição de matéria em grande escala é mapeada pela distribuição das galáxias. Estas podem se apresentar isoladas, em grupos ou aglomerados. Aglomerações de mais alta ordem (aglomerados de aglomerados), denominados **superaglomerados**, formam as maiores estruturas encontradas no Universo. Entre os aglomerados encontramos grandes regiões praticamente despovoadas de galáxias. São os chamados **voids (vazios)**. Os aglomerados podem estar conectados uns aos outros por estruturas filamentosares de galáxias.

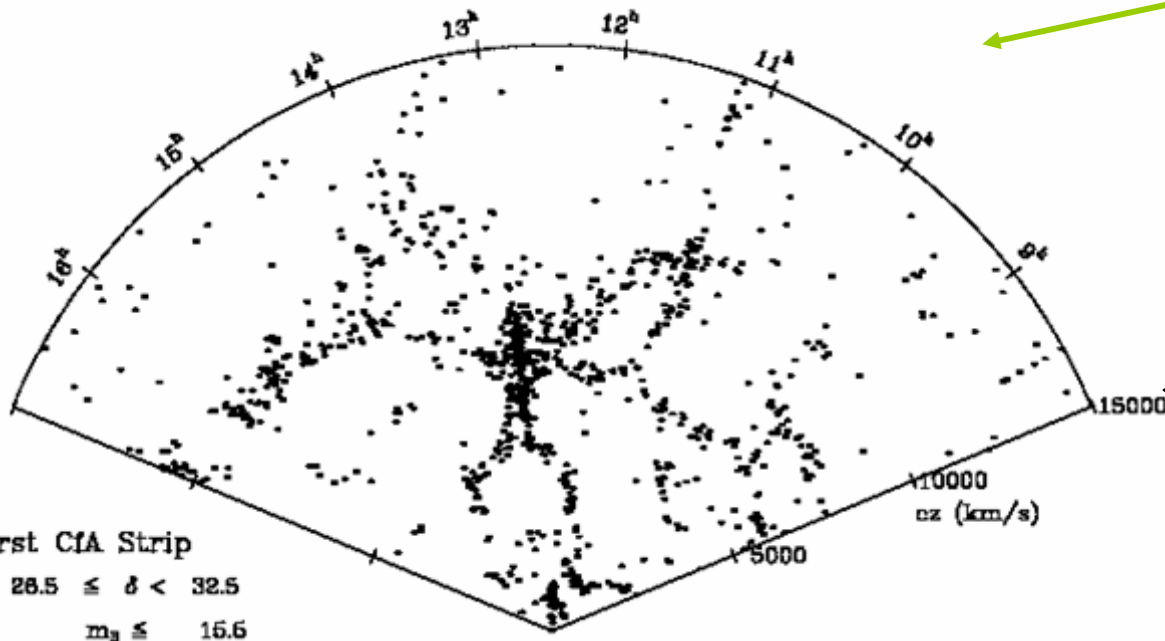


Diagrama em cunha que mostra a distribuição de galáxias em uma fatia estreita do céu, revelando a maneira como elas se distribuem no Universo Local.



Superaglomerados de galáxias

Estas são as maiores estruturas visíveis no Universo, fazendo parte da distribuição de galáxias em grande escala. São constituídos por filamentos, paredes, aglomerados de galáxias, galáxias esparsas. Eles parecem circundar os *voids*, que são regiões de baixa densidade de galáxias, produzindo a característica estrutura "celular" observada.

Os superaglomerados - SC são costumeiramente identificados pelos aglomerados ricos que os constituem, como os picos mais altos de uma cadeia de montanhas. Um dos primeiros catálogos de SC usando este critério foi o de Abell 1961, que identificou 17 candidatos.

Evidence Regarding Second-Order Clustering of Galaxies and Interactions between Clusters of Galaxies

THE ASTRONOMICAL JOURNAL

VOLUME 66, NUMBER 10

DECEMBER, 1961

GEORGE O. ABELL

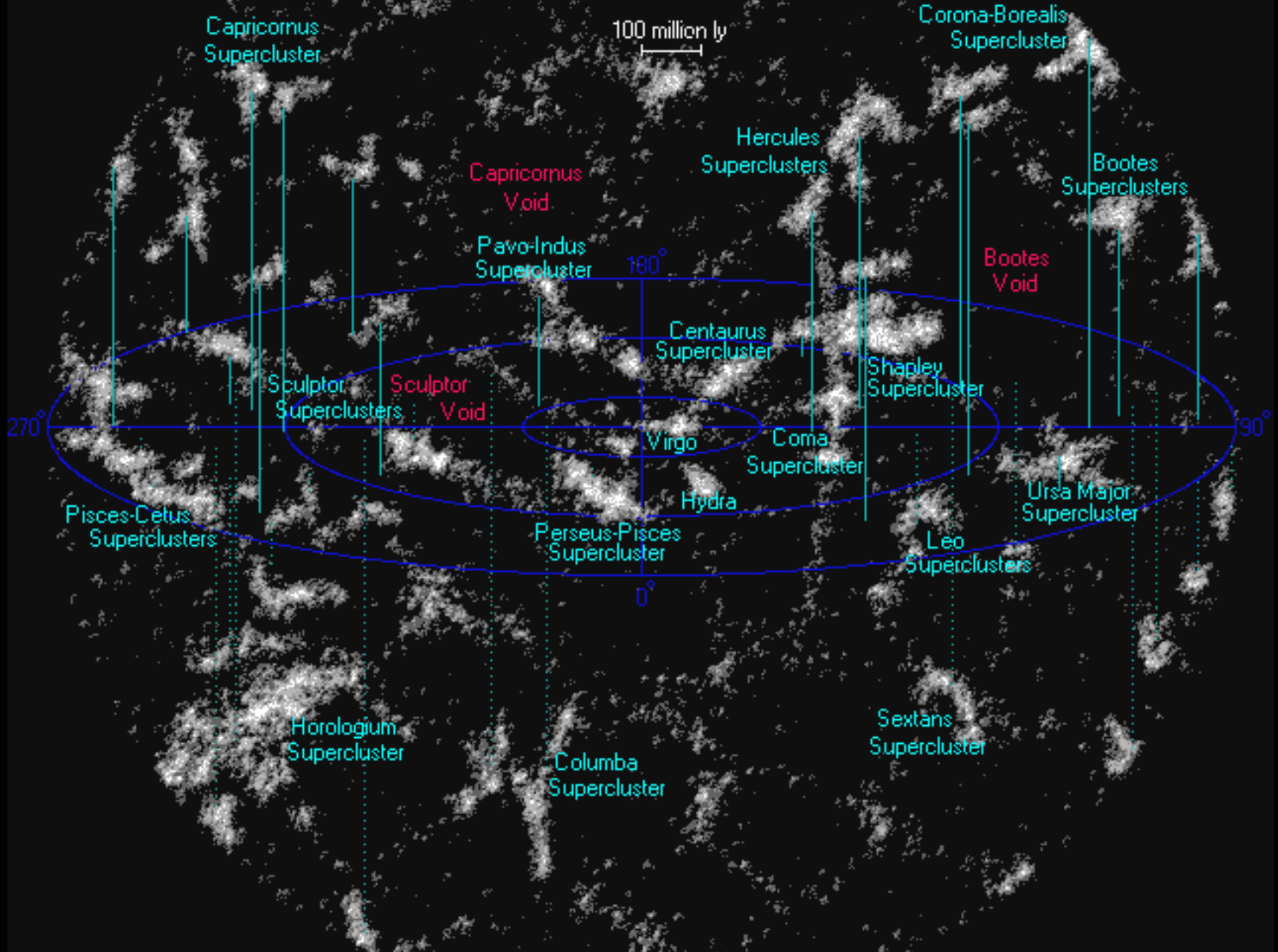
Department of Astronomy, University of California, Los Angeles, California

The evidence for the existence of second-order clusters is reviewed. A statistical analysis of the distribution of the rich clusters identified on the Palomar Sky Survey, the observed extent of 17 typical apparent groupings of galaxies, and de Vaucouleurs' study of the Local Supercluster all indicate a mean linear diameter of the order of 50×10^6 pc for second-order clusters. Typical masses for these systems are estimated at from 10^{16} to 10^{17} solar masses. If the systems are gravitationally stable, they should have internal root-mean-square velocity dispersions in the range $1-3 \times 10^3$ km/sec. The possible influence of second-order clusters upon the observations relevant to the stability of systems of galaxies is discussed.

Global Properties of Bahcall-Soneira Superclusters

Property	$f = 20$ superclusters
Number density of SCs	$\sim 10^{-6} h^3 \text{ Mpc}^{-3}$
Number of clusters per SC	2-15 clusters
Fraction of clusters in SCs	54%
Size of largest SC	$\sim 150 h^{-1} \text{ Mpc}$
SC shape	Flattened
Volume of space occupied by SCs	$\sim 3\%$

Distribuição de superaglomerados no Universo Local



Local Supercluster

THE LOCAL SUPERCLUSTER

R. BRENT TULLY

Institute for Astronomy, University of Hawaii

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 257:389-422, 1982 June 15

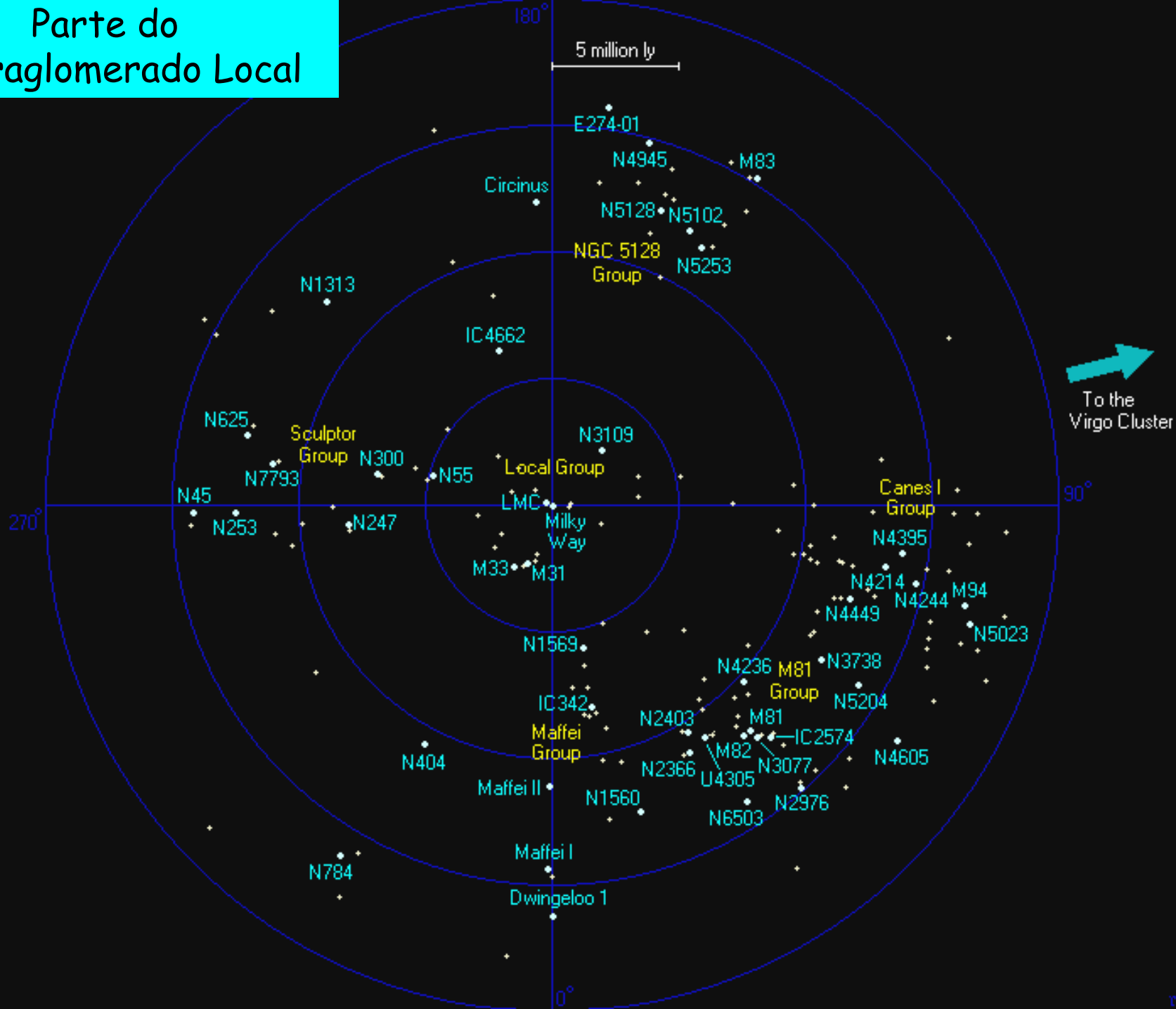
ABSTRACT

An attempt is made to illustrate the three-dimensional distribution of nearby galaxies. There is an evident overdensity of galaxies in the north galactic hemisphere that has been called the Local Supercluster. It is argued that this system comprises two distinct components: a disk component with 60% of the luminous galaxies, and a halo component with 40% of the luminous galaxies. With regard to the halo component, (i) almost all luminous galaxies are associated with only a small number of clouds, (ii) as a consequence, most of the volume off the disk of the Local Supercluster is empty, (iii) the clouds in the halo are sufficiently separated from the disk so that the two-component distinction seems warranted, and (iv) at least the more prominent clouds in the halo seem to be prolate structures with their long axes directed toward the Virgo Cluster. This elongated structure may be attributed to tidal effects that were important at the epoch of the formation of the halo clouds. A tentative limit for the date of that epoch is $z \lesssim 8$.

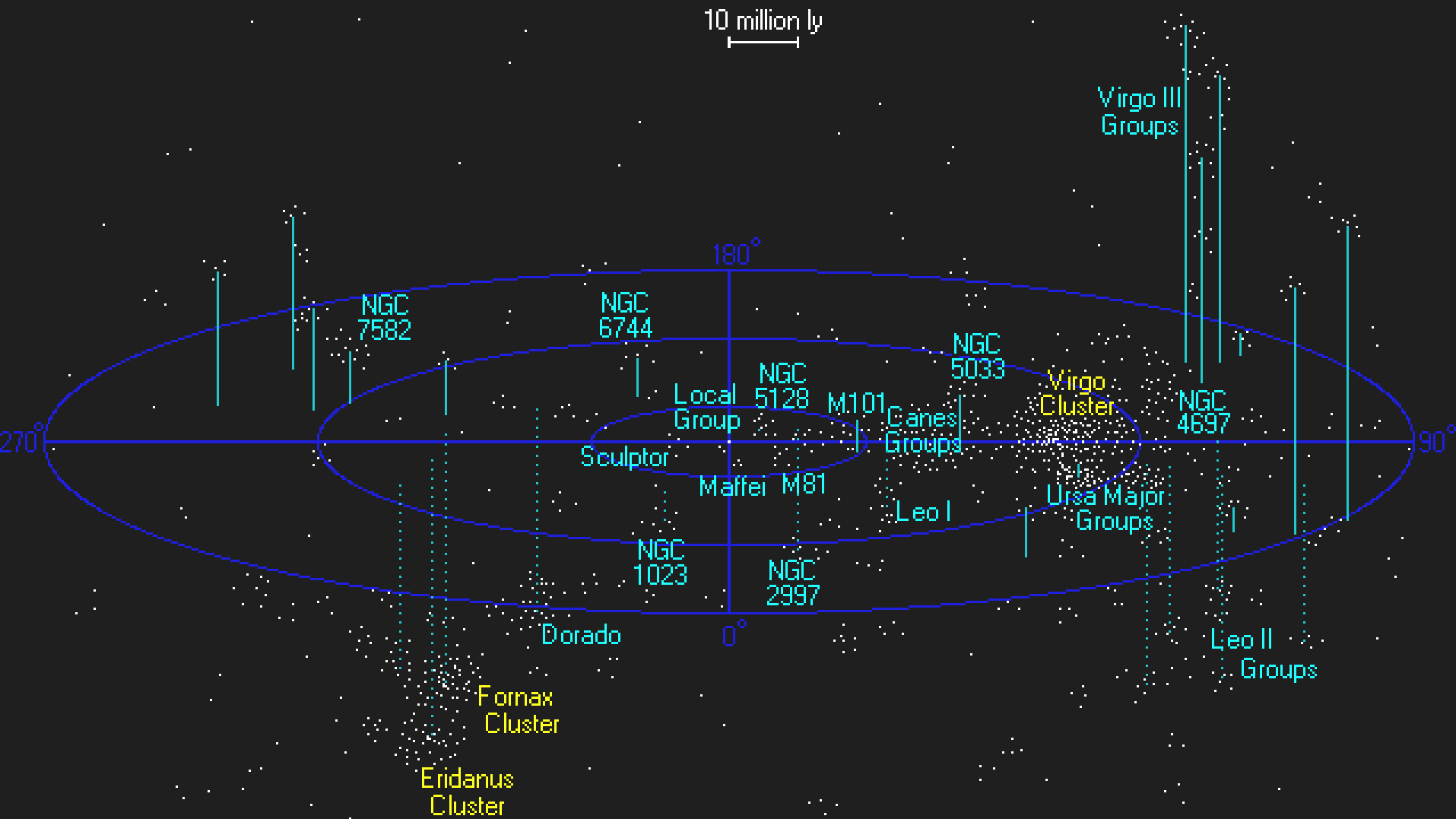
With regard to the disk component, (i) the ratio of the longest to the shortest axis is 6 to 1 (practically independent of velocity effects), and (ii) the absolute rms dimension of the short axis is $\pm 1.1 h^{-1} \text{ Mpc}$ ($h = H_0/100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$). For the disk component to be so thin either (i) we are viewing the disk at the moment of collapse, (ii) there is a great deal of unseen matter in the disk, or (iii) random motions normal to the disk are less than 100 km s^{-1} . If velocities normal to the plane of the Local Supercluster are very low, the implication would be that the disk was formed through dissipative processes.

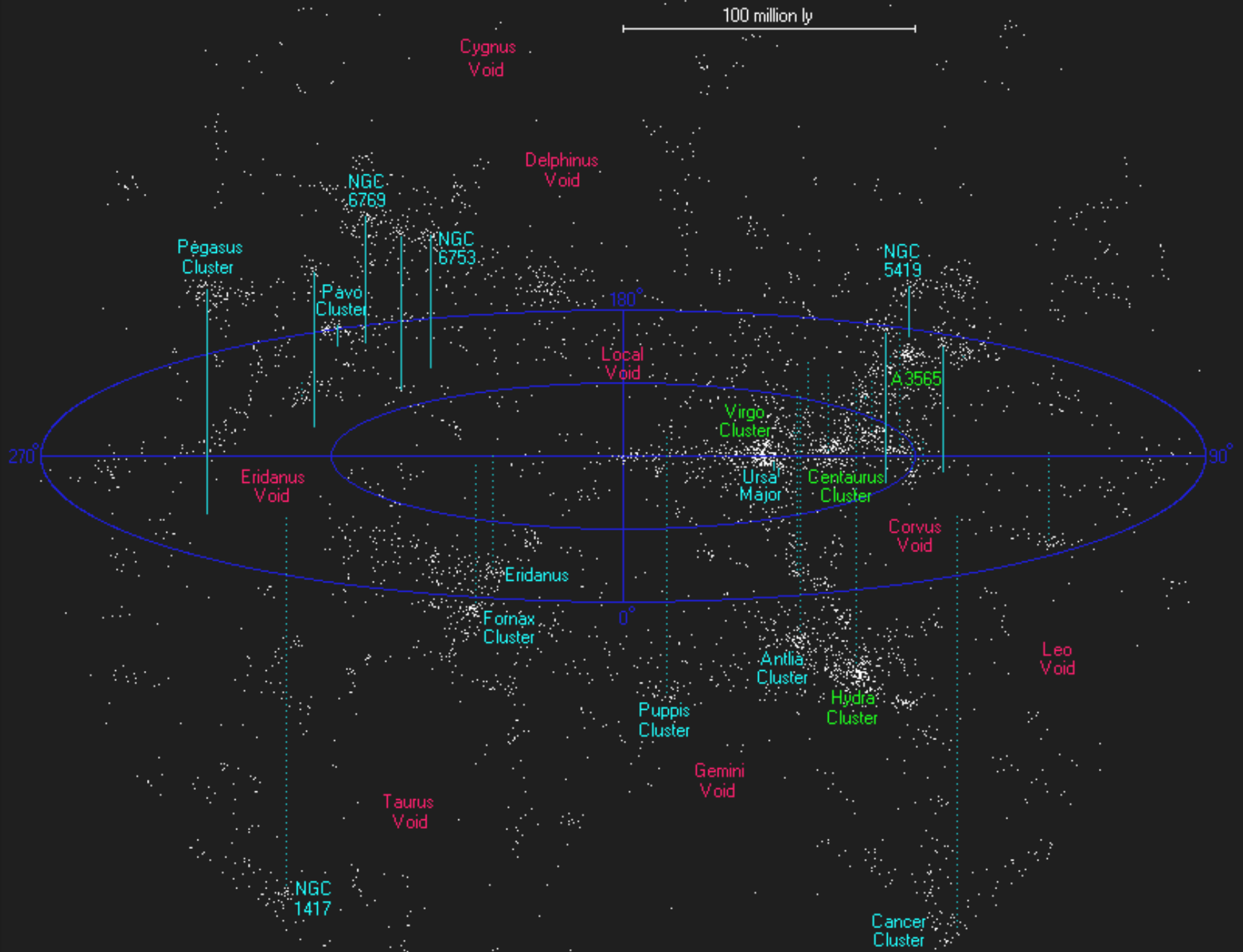
The thinness of the disk of the supercluster, the extreme segregation of galaxies into a small fraction of the volume available, and the low local random motions are all evidence which weigh against gravitational clustering models in which galaxies formed before superclusters and in favor of the viewpoint that galaxies fragmented out of larger scale structure.

Parte do superaglomerado Local



Superaglomerado Local





Identificação de um SC

Com a disponibilidade da informação de velocidade dos aglomerados, podemos utilizar o processo de percolação para identificação de SC. Seja $\langle d \rangle$, a densidade média de objetos da distribuição estudada. Em uma primeira aproximação podemos utilizar um raio de percolação, R_{perc} para conectar os elementos da estrutura. O valor de R_{perc} está relacionado com algum fator de sobredensidade, f da distribuição de objetos.

$$f = d / \langle d \rangle = \frac{N(r \leq R_{perc})}{4/3\pi R_{perc}^3 \langle d \rangle}$$

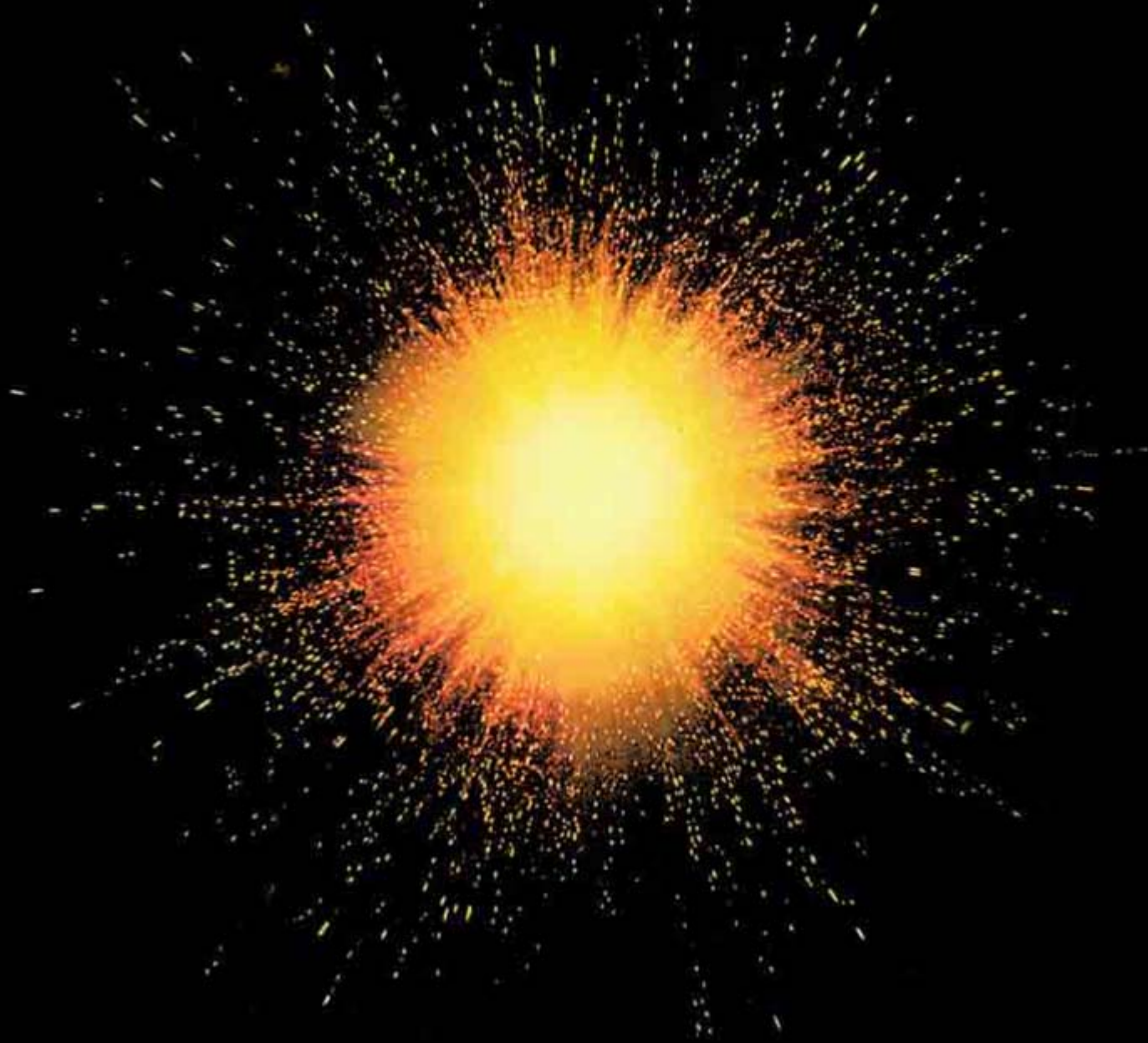
$$R_{perc} = \left(\frac{3}{4\pi f \langle d \rangle} \right)^{1/3}$$

Valores típicos de f estão entre 10-20 e de $R_{perc} \sim 5-10$ Mpc.

Mudando um pouco de assunto ...



De onde veio tudo isso ?



Tudo começou de uma pequena região muito densa, quente, e extremamente homogênea.

Após ~14 bilhões de anos o Universo apresenta uma diversidade enorme de estruturas e sistemas, inclusive vida.

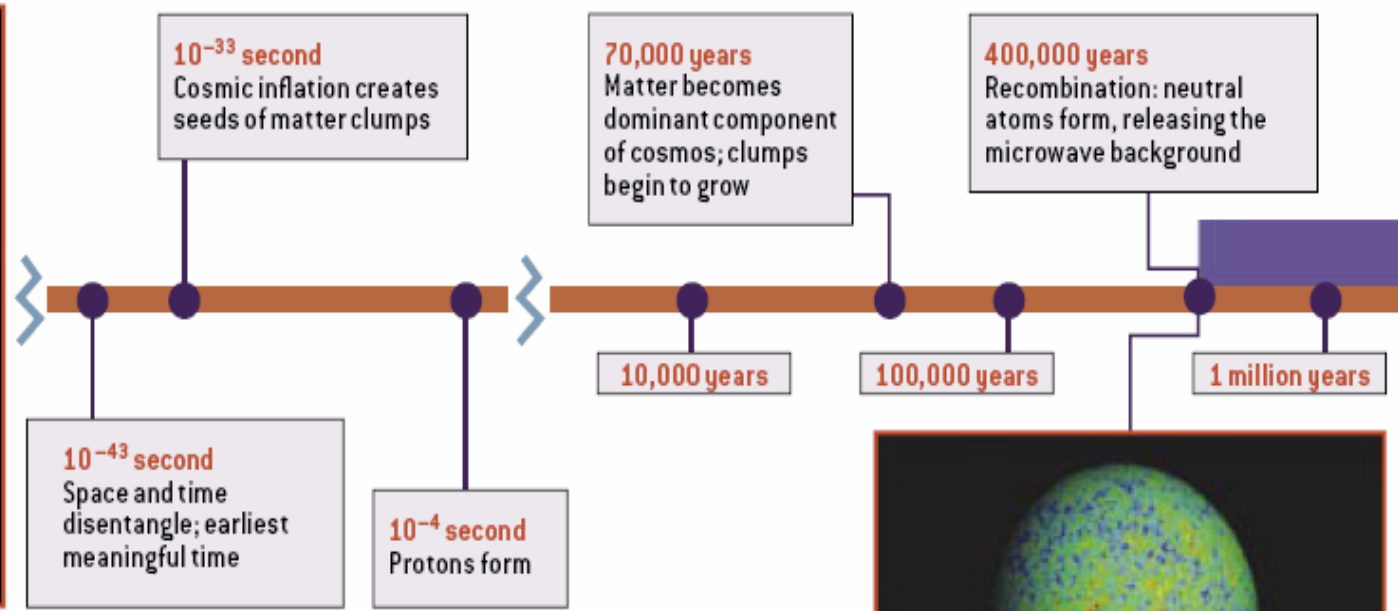
A explicação mais aceita atualmente para descrever esta evolução é descrita pelo modelo do Big Bang.

Vamos seguir um pouco dos eventos desta epopéia cósmica.

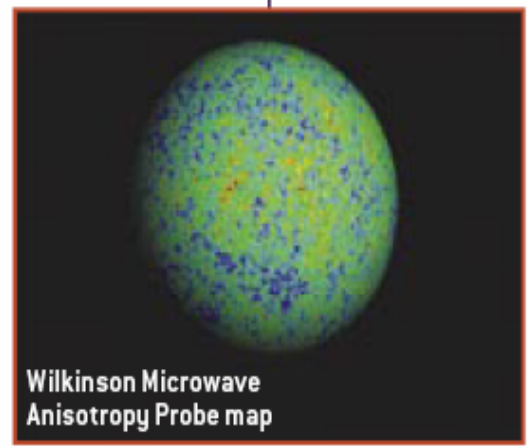
Linha de tempo do Universo



Start of big bang expansion

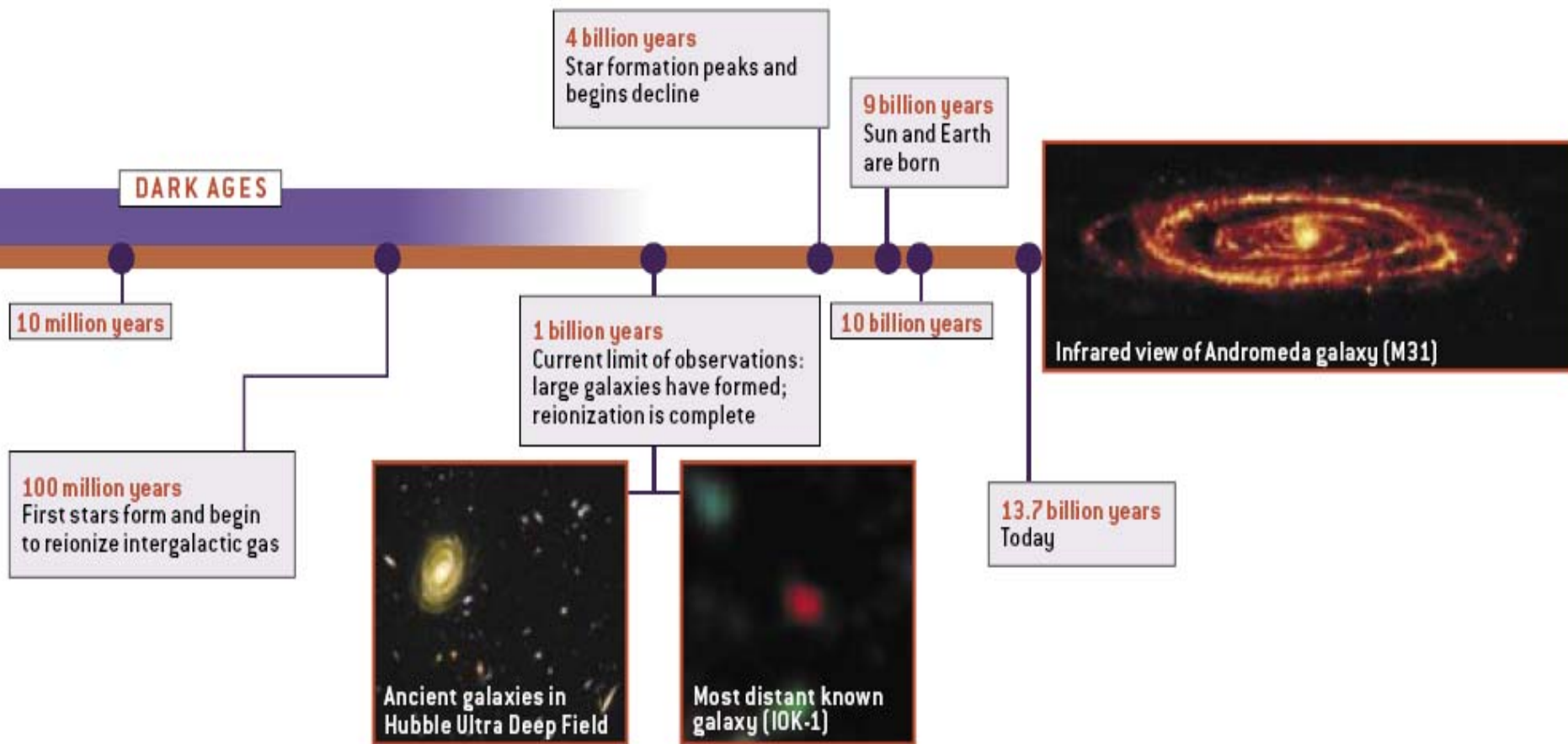


COSMIC TIMELINE shows the Dark Ages sandwiched between the release of the microwave background radiation and the formation of the first galaxies and stars. The period came to a gradual end as starlight streamed out and created the ionized gas that now dominates intergalactic space.



Wilkinson Microwave Anisotropy Probe map

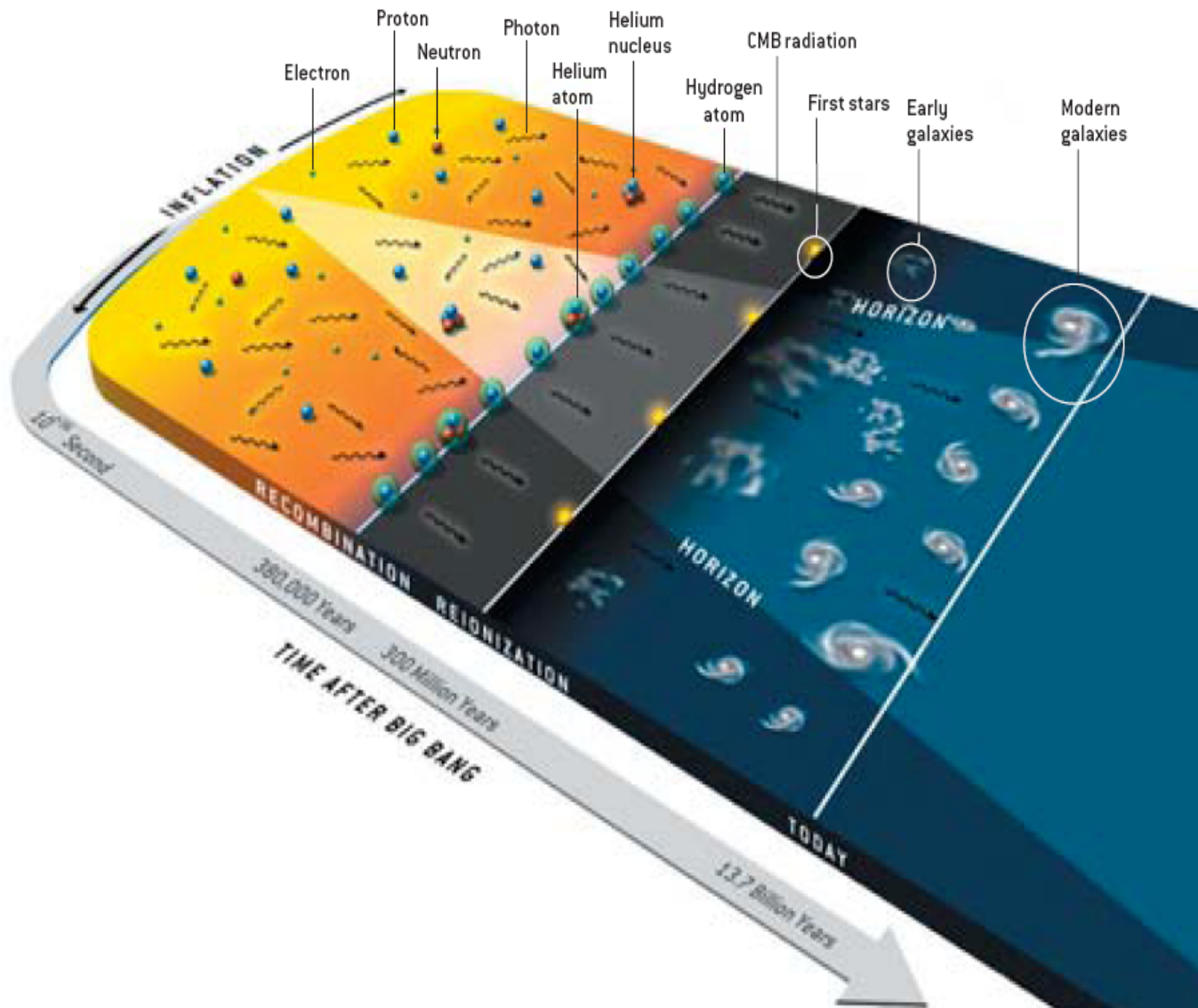
Linha de tempo do Universo (cont.)



TIMELINE OF THE UNIVERSE

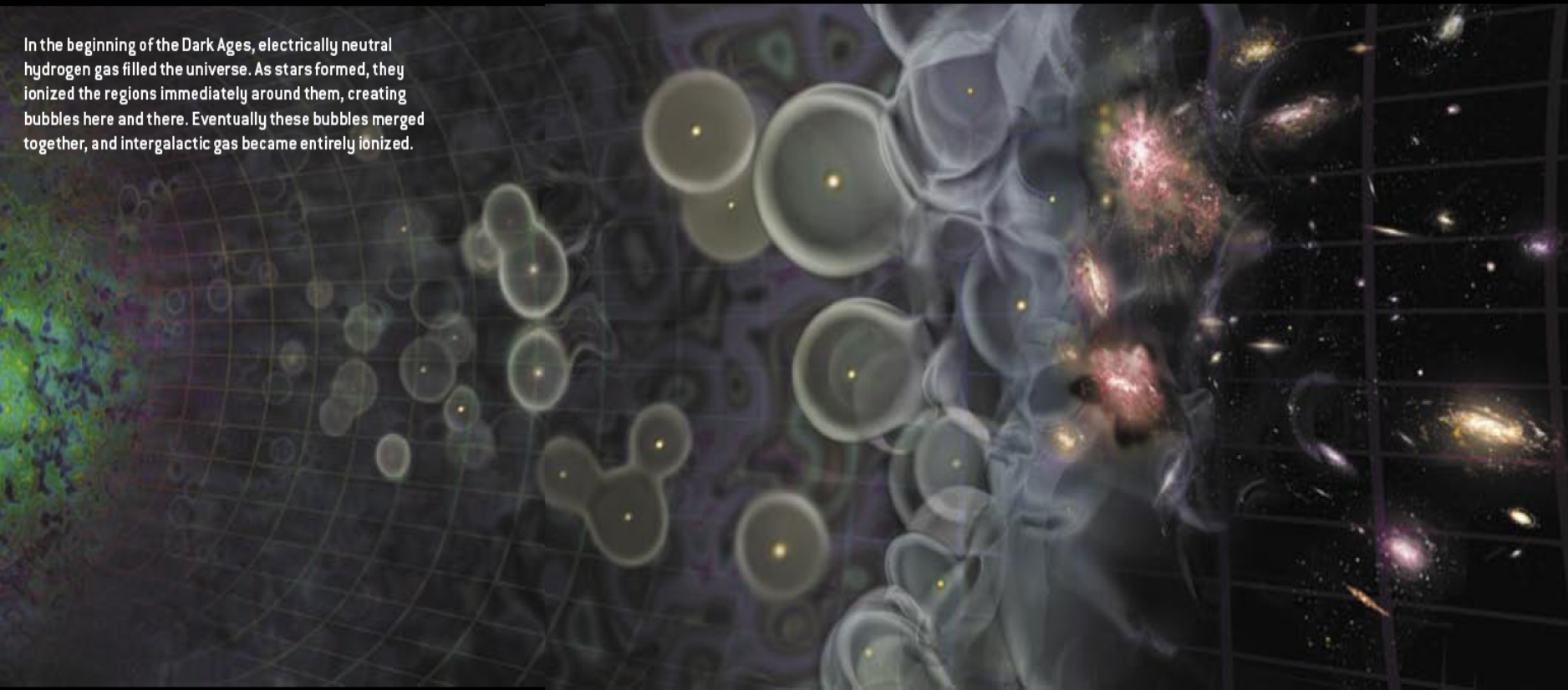
AS INFLATION EXPANDED the universe, the plasma of photons and charged particles grew far beyond the horizon (the edge of the region that a hypothetical viewer after inflation would see as the universe expands). During the recombination period

about 380,000 years later, the first atoms formed and the cosmic microwave background (CMB) radiation was emitted. After another 300 million years, radiation from the first stars reionized most of the hydrogen and helium.



LIGHTING UP THE COSMOS

In the beginning of the Dark Ages, electrically neutral hydrogen gas filled the universe. As stars formed, they ionized the regions immediately around them, creating bubbles here and there. Eventually these bubbles merged together, and intergalactic gas became entirely ionized.



Time:
Width of frame:
Observed wavelength:

210 million years
2.4 million light-years
4.1 meters

290 million years
3.0 million light-years
3.3 meters

370 million years
3.6 million light-years
2.8 meters

460 million years
4.1 million light-years
2.4 meters

540 million years
4.6 million light-years
2.1 meters

620 million years
5.0 million light-years
2.0 meters

710 million years
5.5 million light-years
1.8 meters

All the gas is neutral. The white areas are the densest and will give rise to the first stars and quasars.

Faint red patches show that the stars and quasars have begun to ionize the gas around them.

These bubbles of ionized gas grow.

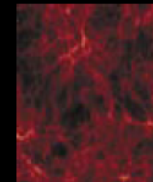
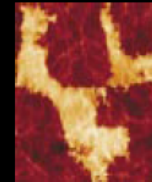
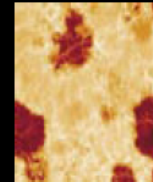
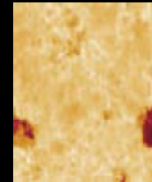
New stars and quasars form and create their own bubbles.

The bubbles are beginning to interconnect.

The bubbles have merged and nearly taken over all of space.

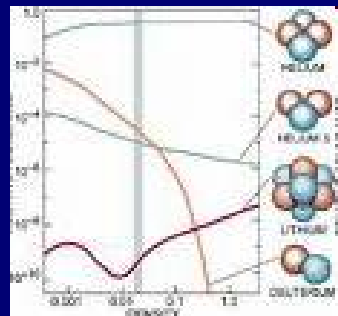
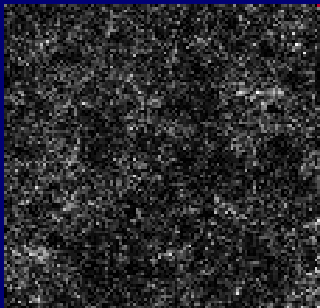
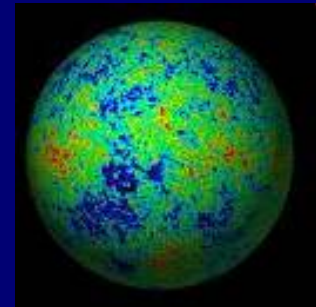
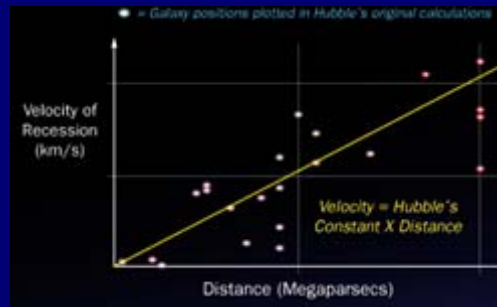
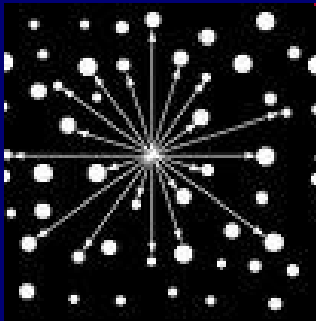
The only remaining neutral hydrogen is concentrated in galaxies.

Simulated images of 21-centimeter radiation show how hydrogen gas turns into a galaxy cluster. The amount of radiation (*white is highest; orange and red are intermediate; black is least*) reflects both the density of the gas and its degree of ionization: dense, electrically neutral gas appears white, dense, ionized gas appears black. The images have been rescaled to remove the effect of cosmic expansion and thus highlight the cluster-forming processes. Because of expansion, the 21-centimeter radiation is actually observed at a longer wavelength; the earlier the image, the longer the wavelength.



Observações Cosmológicas Fundamentais

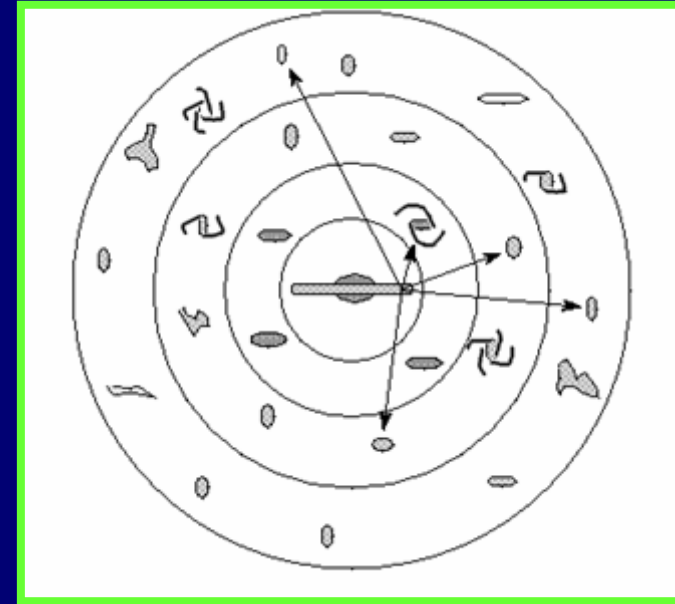
Mencionaremos a seguir, algumas observações importantes para a cosmologia. Usando estes fatos poderemos tirar algumas conclusões, e elaborar ou até refutar modelos cosmológicos.



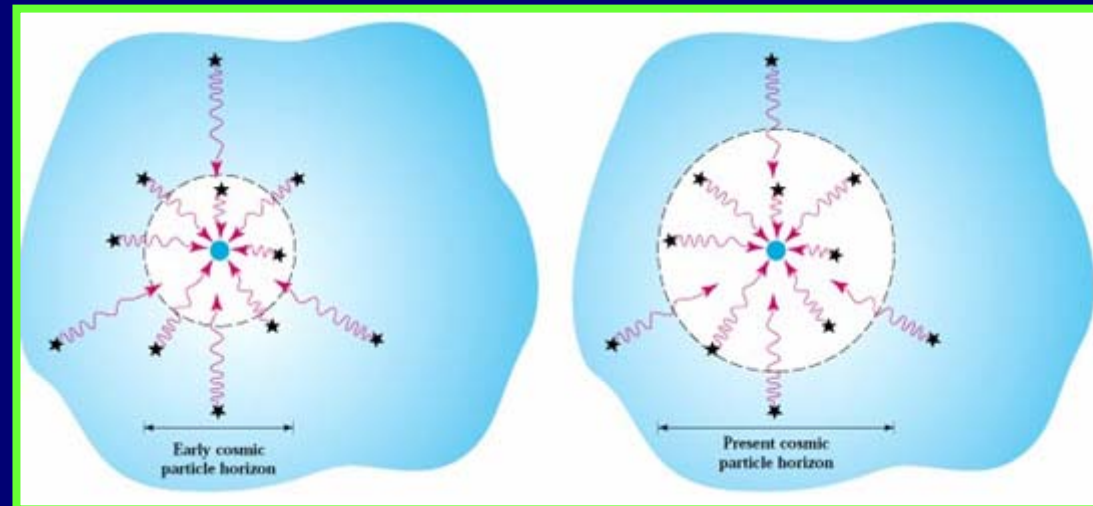
Características do Universo observável

O céu é escuro - Paradoxo de Olbers

Partindo-se da hipótese de um universo estático, infinito e Euclidiano, ao olharmos em qualquer direção deveríamos encontrar um objeto. Isto deveria fazer com que o céu todo fosse brilhante.



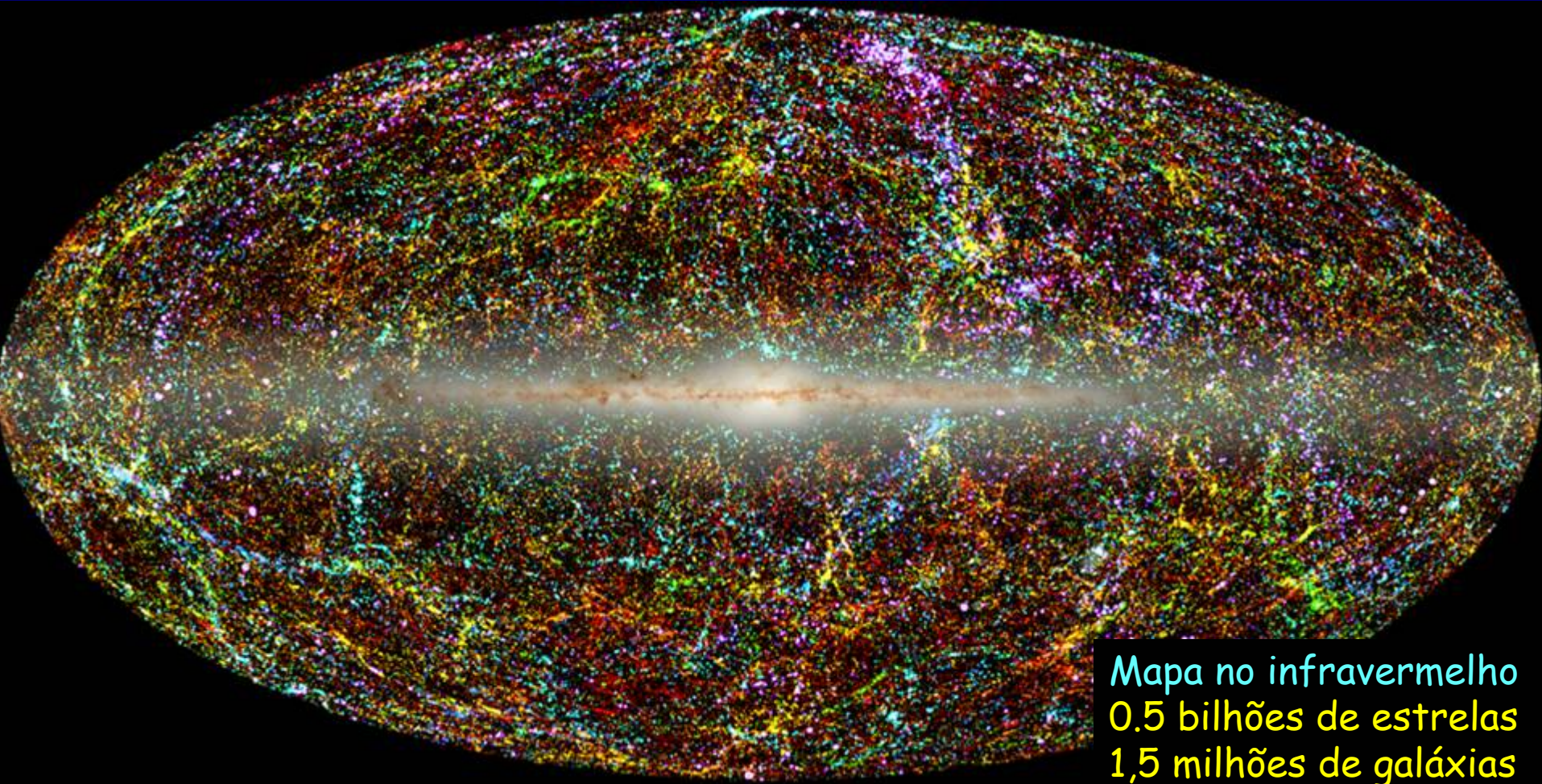
A expansão do universo produz o desvio para o vermelho da luz de suas galáxias. O tamanho da região observável é finito devido a velocidade finita da luz. Estes fatores fazem com que ele seja escuro.



Características do Universo observável

A distribuição homogênea das galáxias

Em uma escala adequada, as galáxias se apresentam distribuídas de maneira uniforme pelo céu.



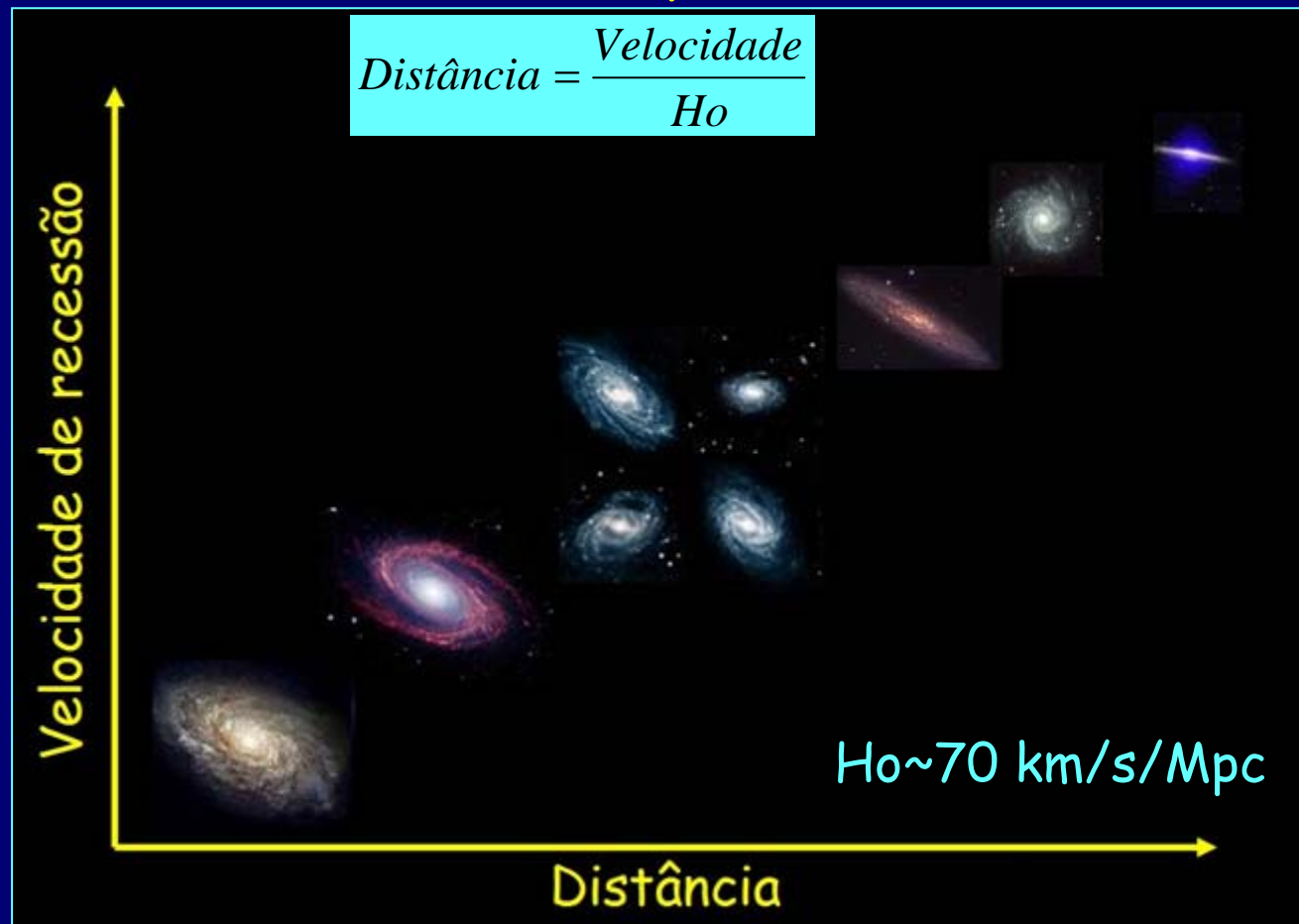
Mapa no infravermelho
0,5 bilhões de estrelas
1,5 milhões de galáxias

Características do Universo observável

Movimento de recessão das galáxias

As galáxias apresentam um movimento de recessão (afastamento de nós). Isto é indicativo de que em algum tempo no passado elas estavam muito próximas umas das outras.

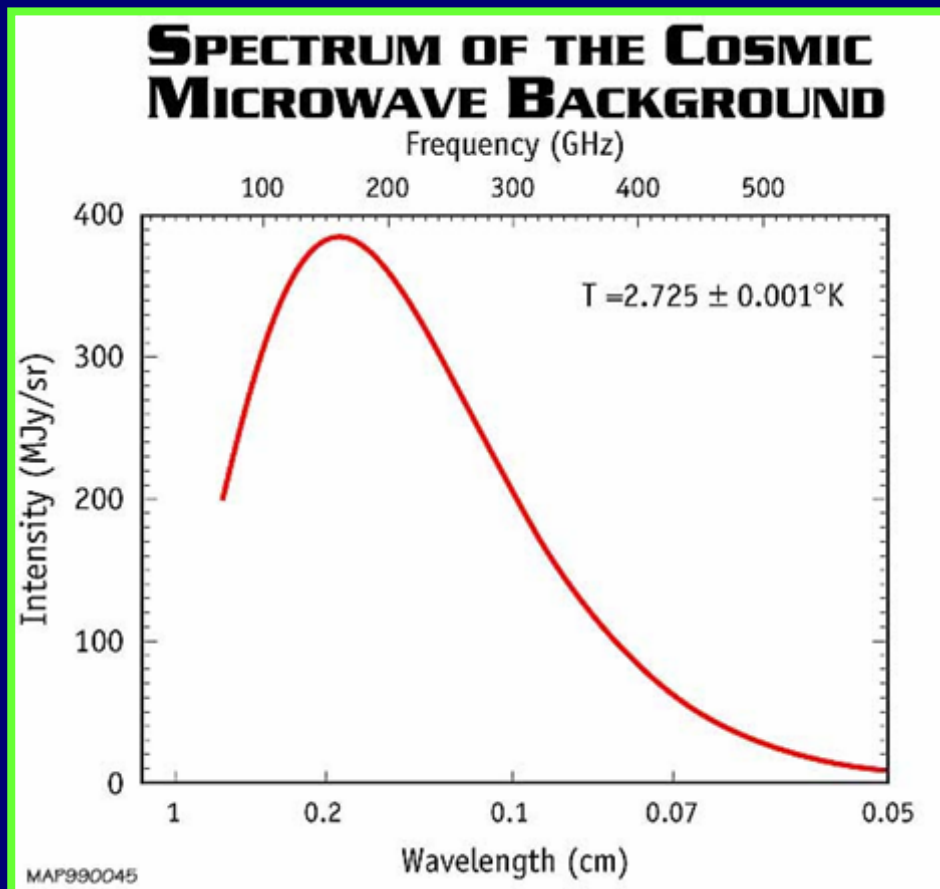
Possivelmente toda a matéria estaria concentrada em uma região muito pequena do espaço.



Características do Universo observável

Espectro da radiação cósmica de fundo

Se o Universo foi uma vez muito quente e denso, devemos encontrar algum remanescente deste "calor". Pelo fato dele ter se expandido, a temperatura deve ter diminuído.



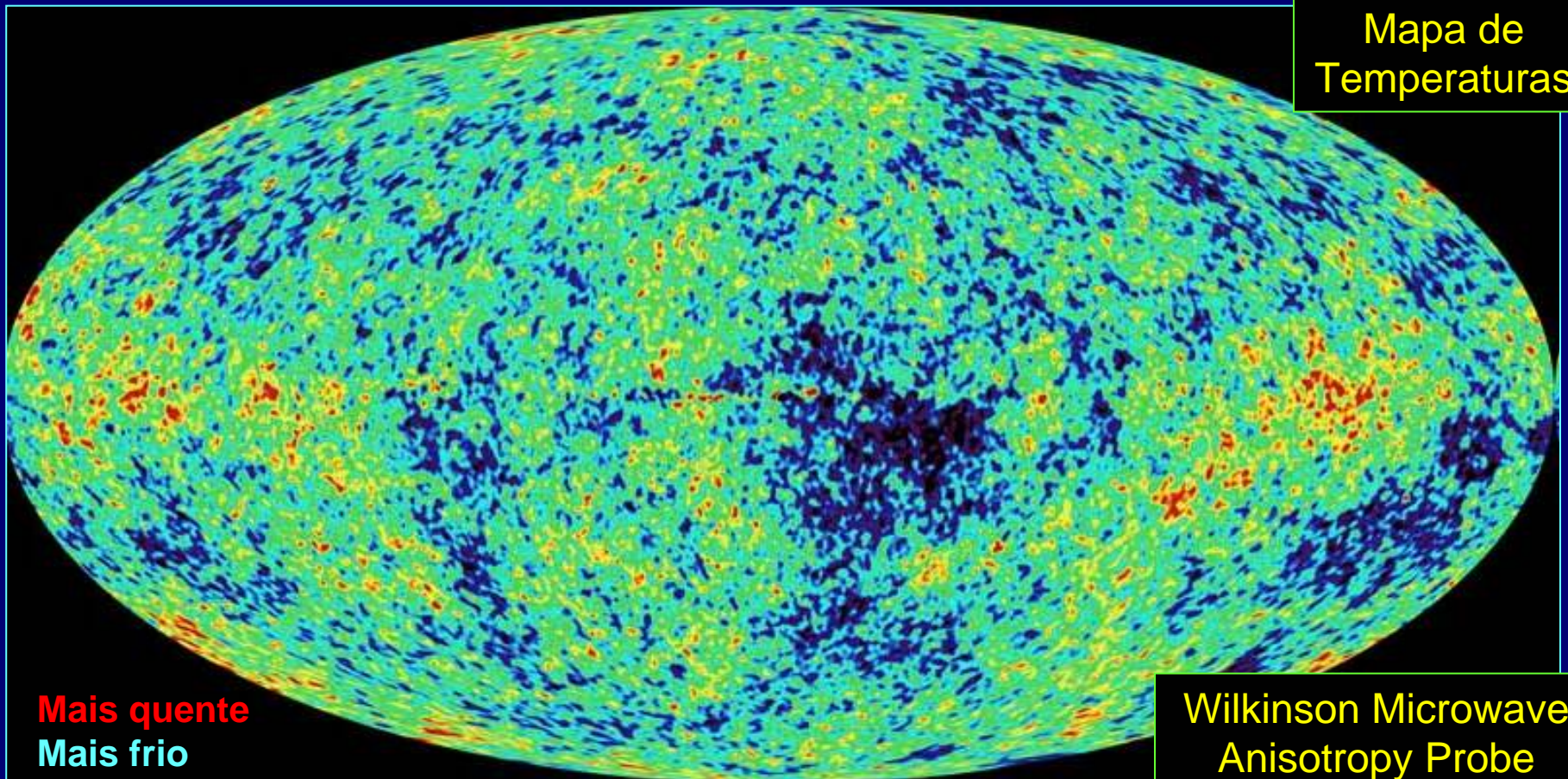
Em 1965 os radioastrônomos Arno Penzias e Robert Wilson descobriram uma radiação permeando o céu, independente de que região observassem.

Esta radiação equivale a um corpo negro de 2.7 K, o que é previsto pela teoria.

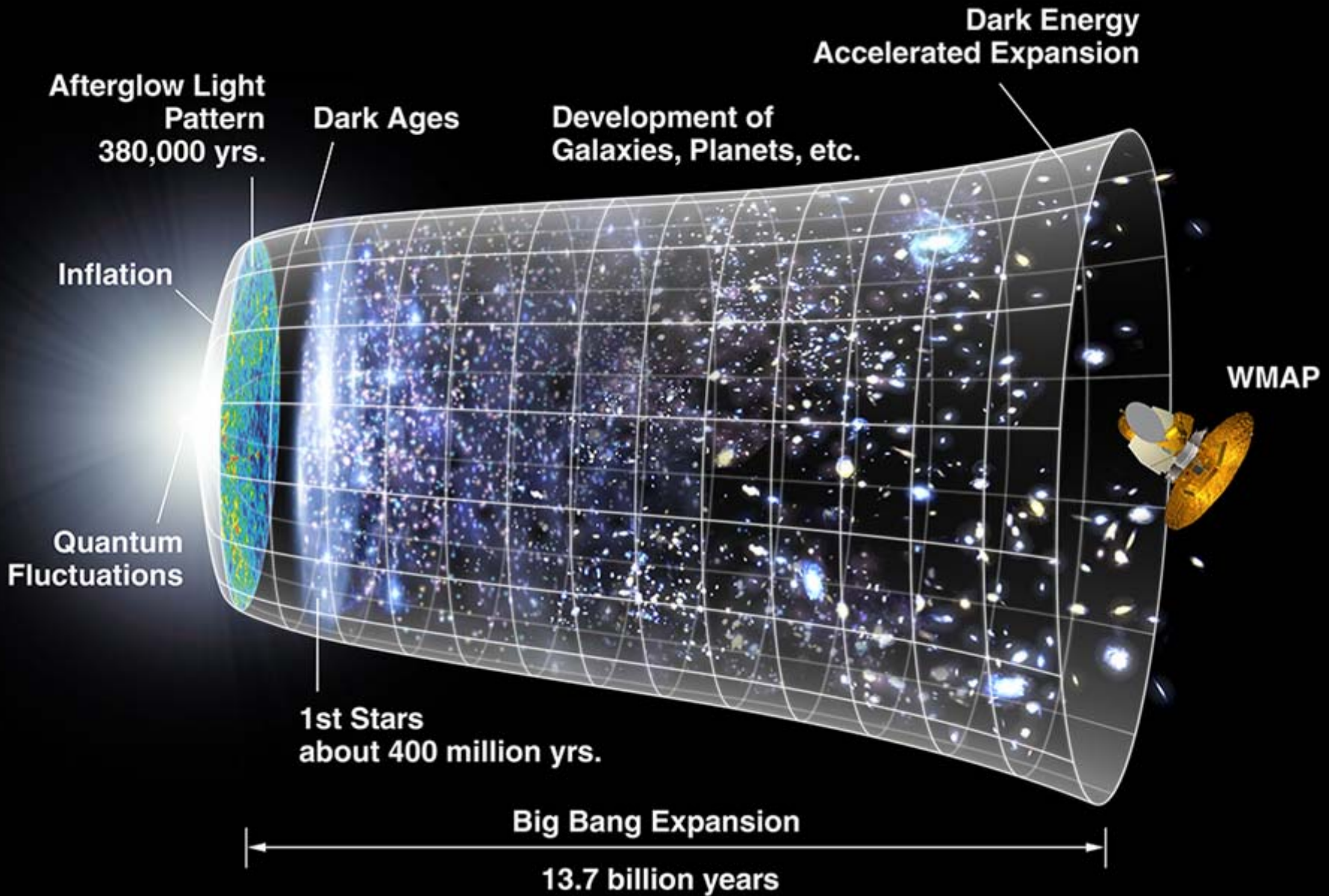
Características do Universo observável

Isotropia da radiação cósmica de fundo

A radiação de fundo em microondas proveniente de todas as direções é isotrópica, exceto por pequenas, mas importantes flutuações com amplitudes relativas da ordem de $\sim 10^{-5}$.

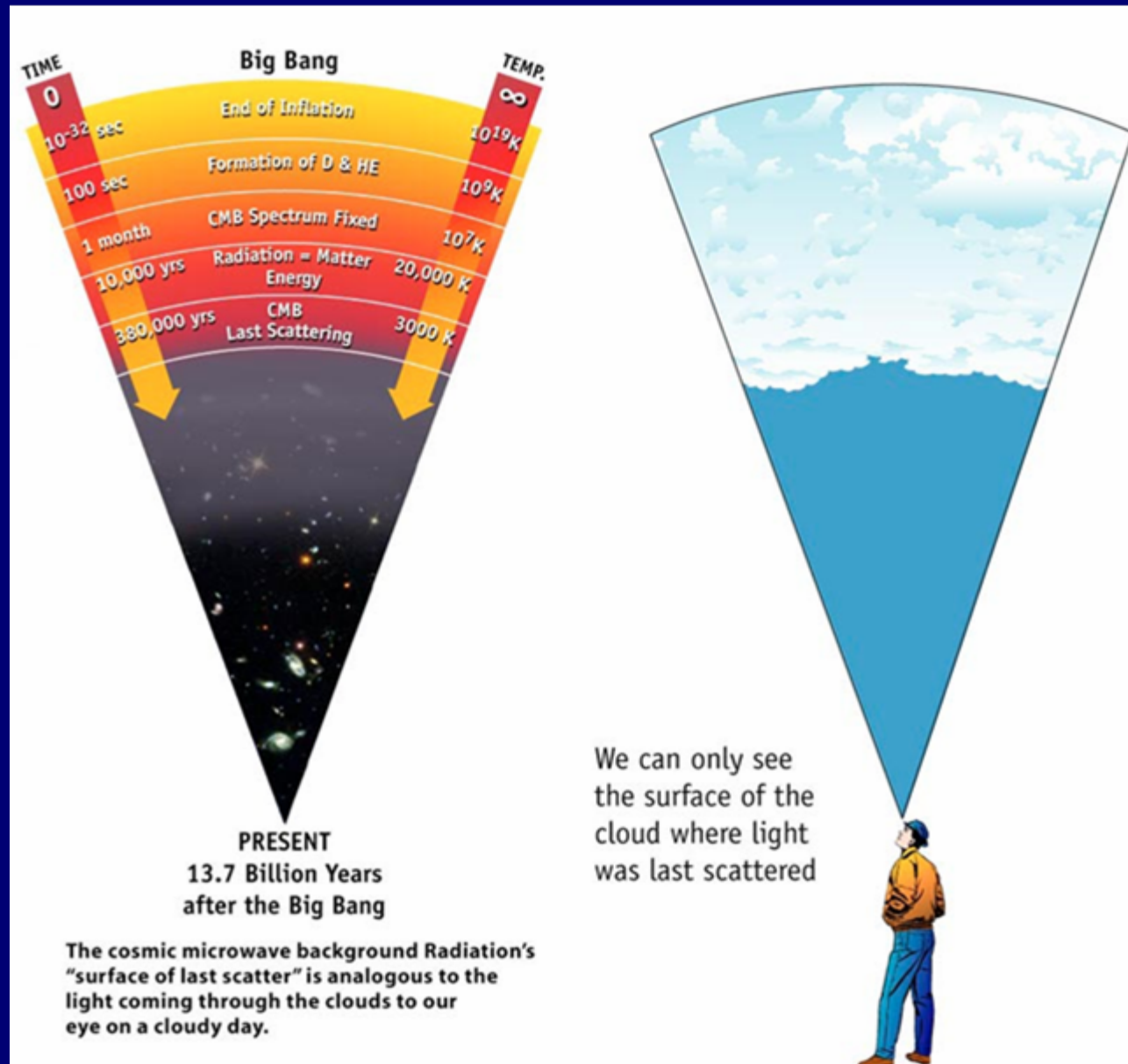


O que está sendo observado pelo WMAP



Superfície do último espalhamento

A superfície do último espalhamento da RCF é análoga a da luz vindo de nuvens em um dia nublado.



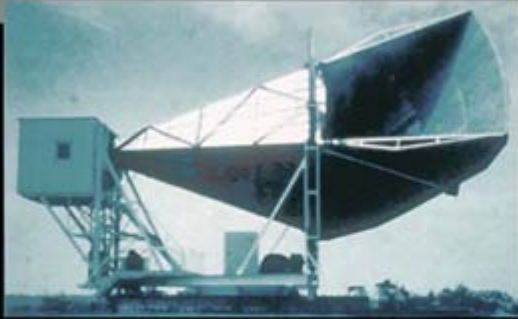
Como são feitos estes mapas da RCF ?

Da Terra vemos todo o céu ao nosso redor projetado em uma esfera. Depois abrimos a esfera celeste e projetamos no formato oval para uma melhor visualização.

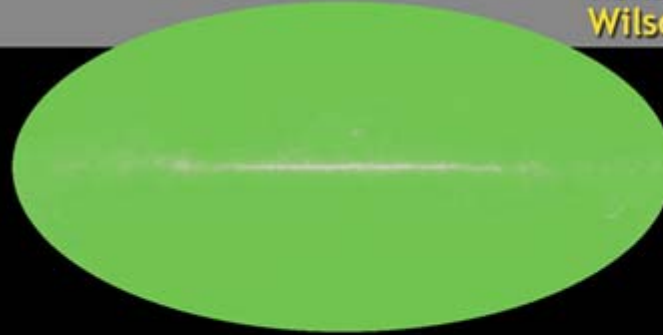


Evolução das medidas da RCF

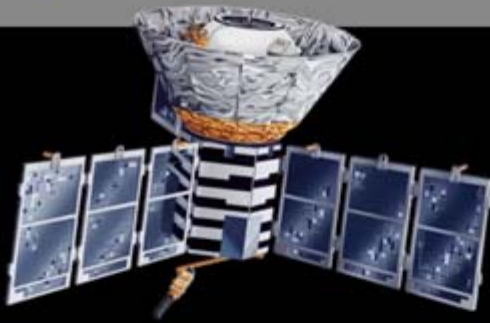
1965



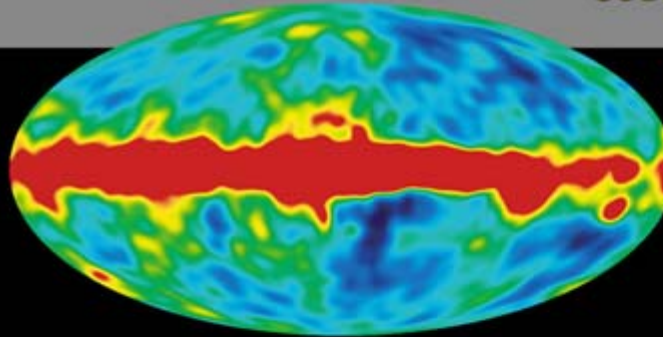
Penzias and
Wilson



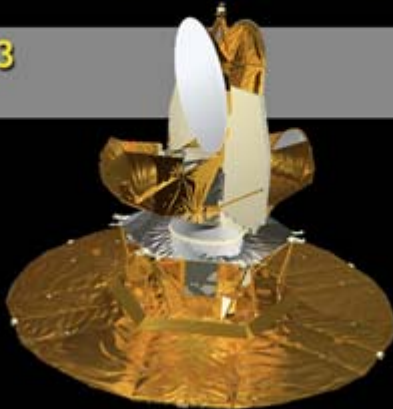
1992



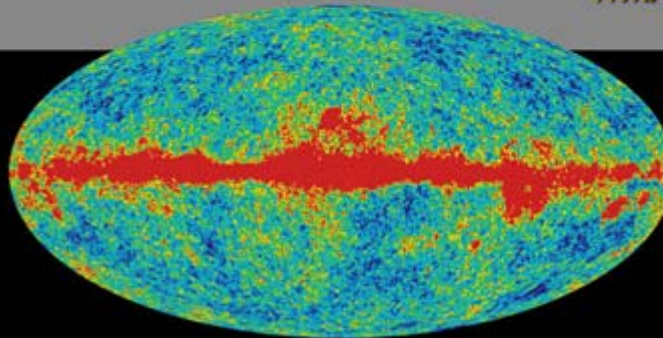
COBE



2003



WMAP



Perturbações cósmicas

As perturbações no fundo de microondas podem ser comparadas às perturbações em um fluido. O gás do universo primordial possuía propriedades únicas definidas pela sua composição.

A composição e o comportamento do evento de inflação (expansão violenta sofrida pelo universo) gerou um determinado padrão destas perturbações.

Este padrão é detectável nas imagens que vemos na radiação cósmica de fundo.

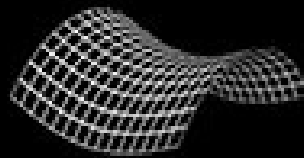
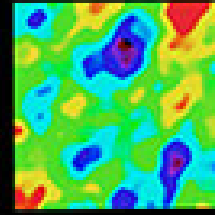
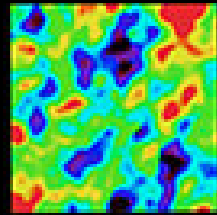
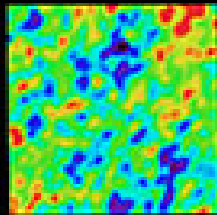


Evolução do Universo

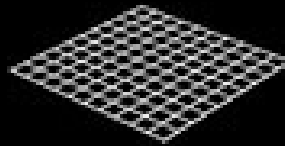
Mostra-se nesta animação a evolução das estruturas do universo desde sua infância (imagem do WMAP), passagem pelas primeiras aglomerações, ignição da matéria (re-ionização) até as estruturas visíveis no presente.



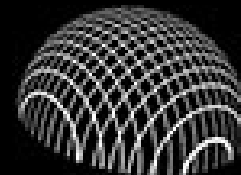
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



OPEN



FLAT



CLOSED

Jornada ao Big Bang

Partindo de nossa galáxia, mostramos nesta animação de onde é proveniente a radiação cósmica de fundo. Viajamos de volta ao passado, encontrando galáxias distantes, quasares, e finalmente o hidrogênio ionizado. A energia liberada pelas perturbações geradas por condensações e rarefações sônicas é a base para os dados coletados pelo WMAP.

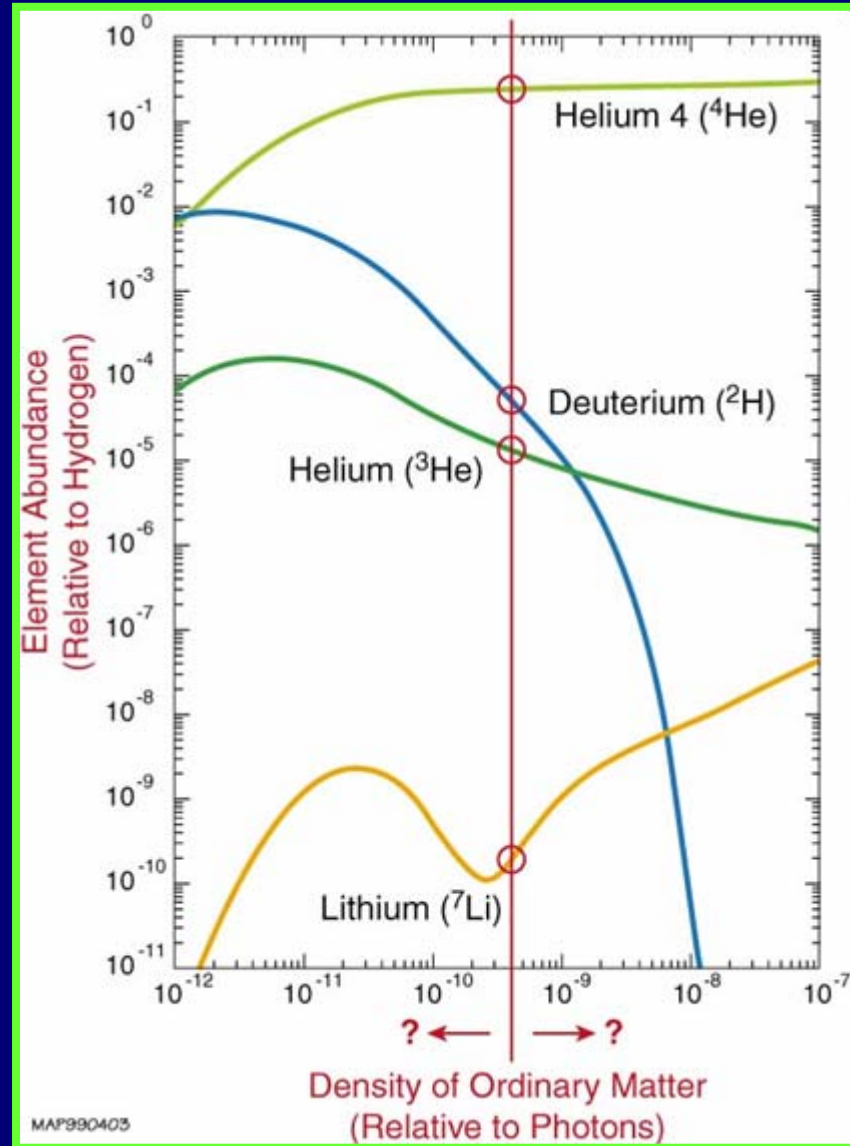


Características do Universo observável

Abundância de Elementos Leves

Existem previsões sobre a abundância de elementos leves (H, He, Li) formados durante os primeiros minutos do universo (nucleossíntese primordial) quando a temperatura era da ordem de 10 bilhões de graus.

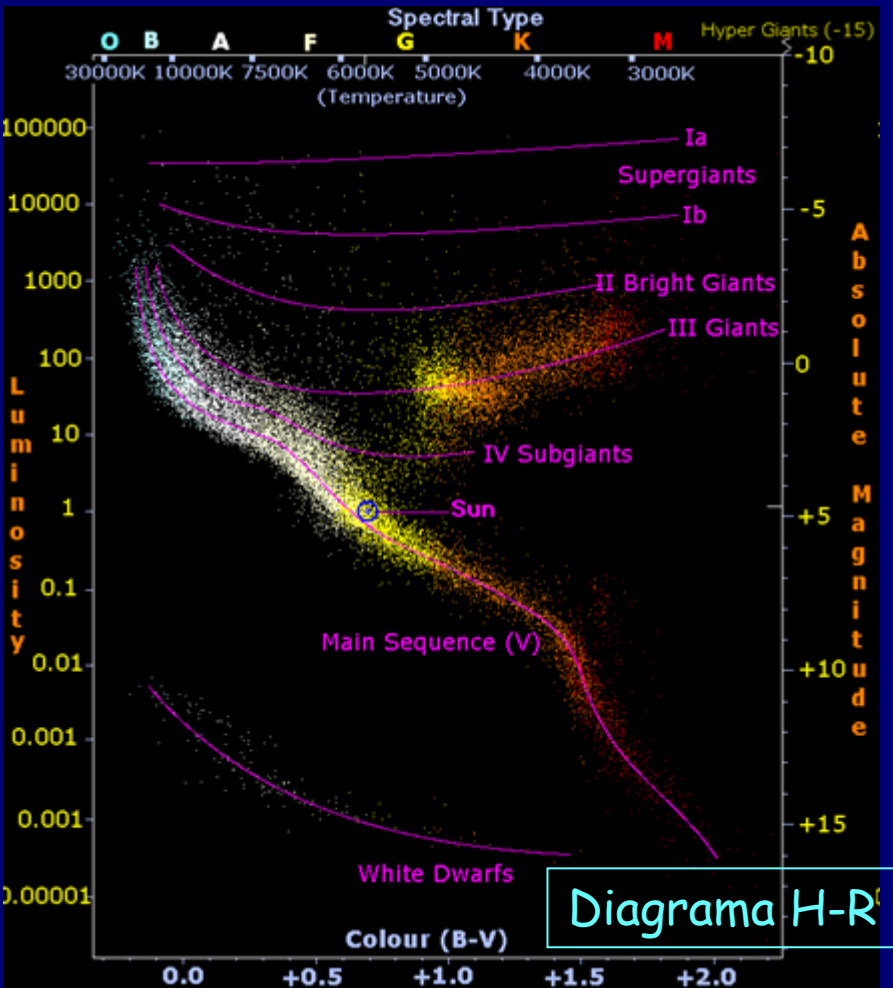
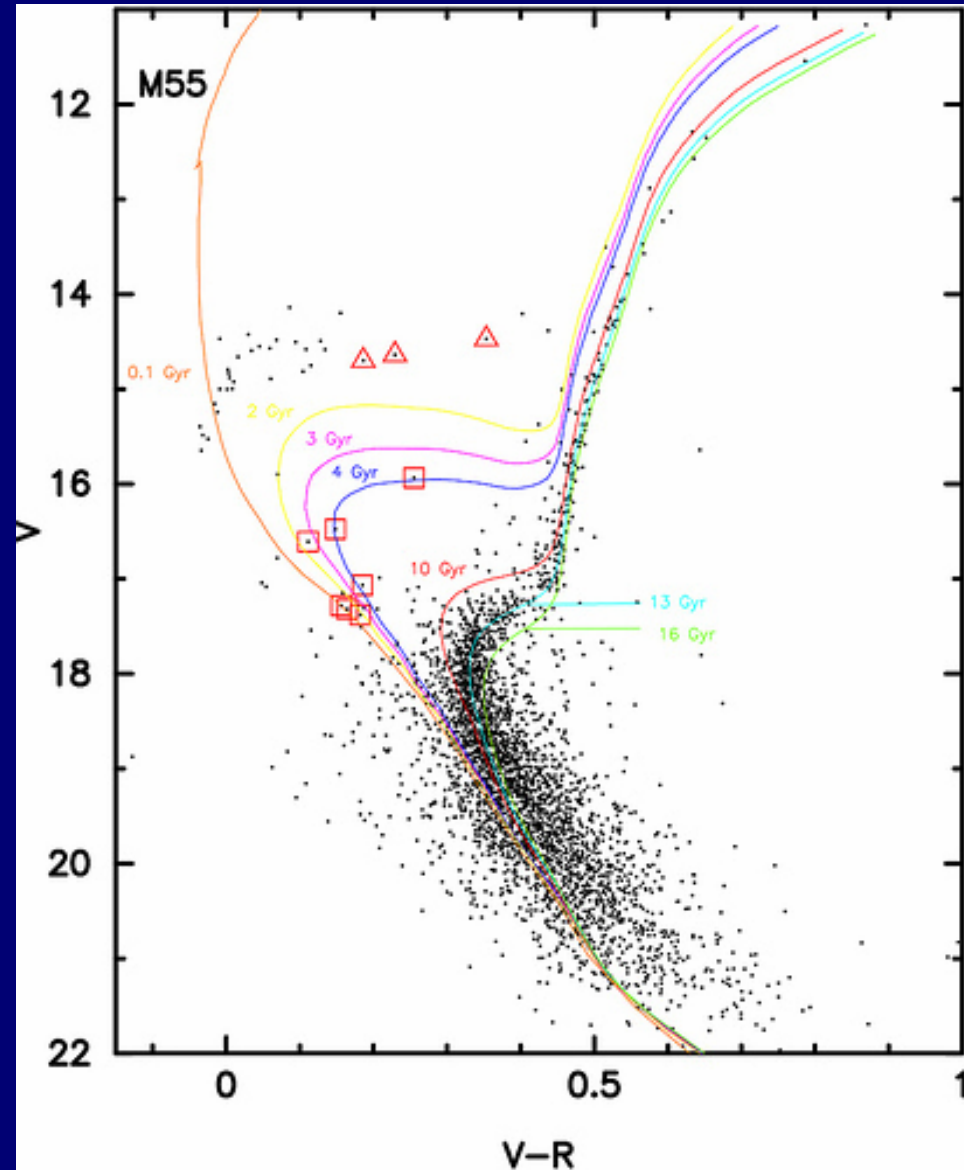
A abundância dos elementos leves é dependente da densidade de matéria ordinária naquela época. Observa-se 24% da matéria na forma de He produzido na nucleossíntese primordial confirmando, desta forma, as previsões e validando o Big Bang.



Características do Universo observável

Idade de aglomerados globulares da Via Láctea

Os aglomerados globulares mais antigos da Via Láctea têm idades de ~13 bilhões de anos.

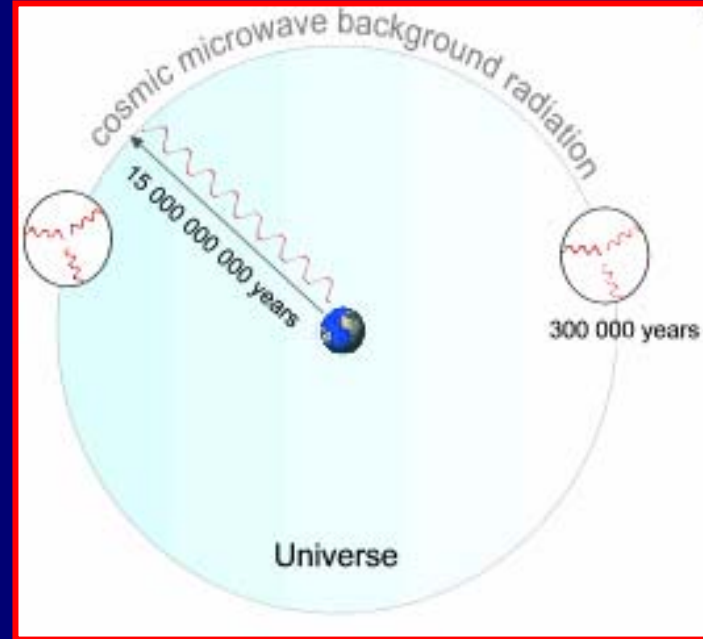


Mas nem tudo são flores ...

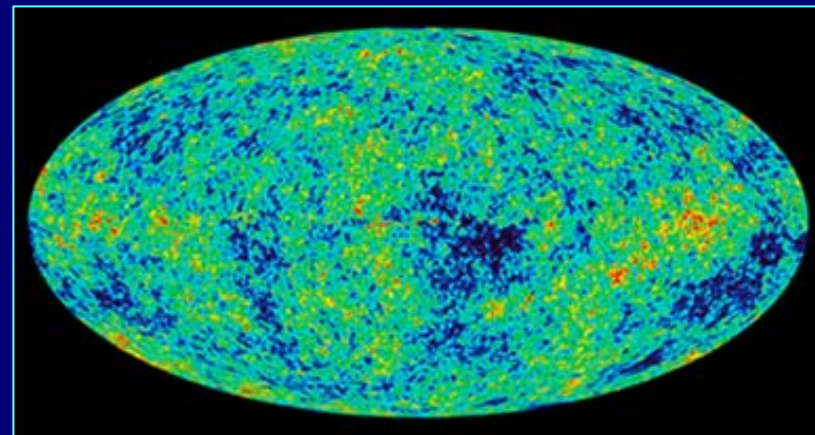
Alguns problemas a serem esclarecidos

O problema do horizonte

Uma vez que nenhum sinal pode viajar mais rápido que a luz, isto implica que os sinais de RCF provenientes de direções opostas são de regiões que não tiveram contato causal antes da recombinação. Logo, estas regiões não trocaram informação (ex.: suas temperaturas).



No entanto, suas temperaturas são praticamente iguais como mostrada pela alto grau de isotropia da RCF.



O problema do Achatamento

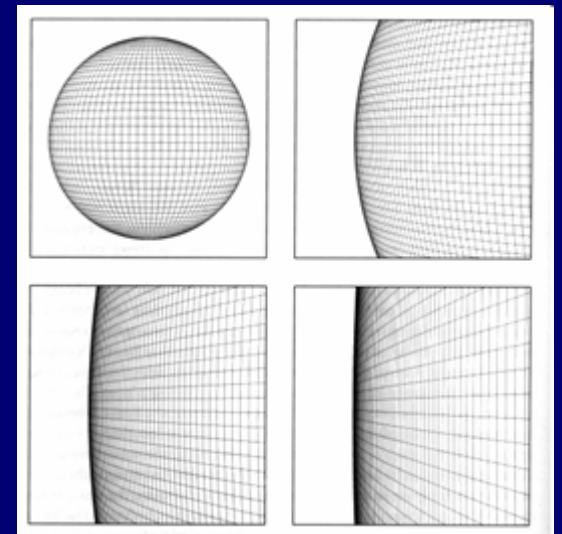
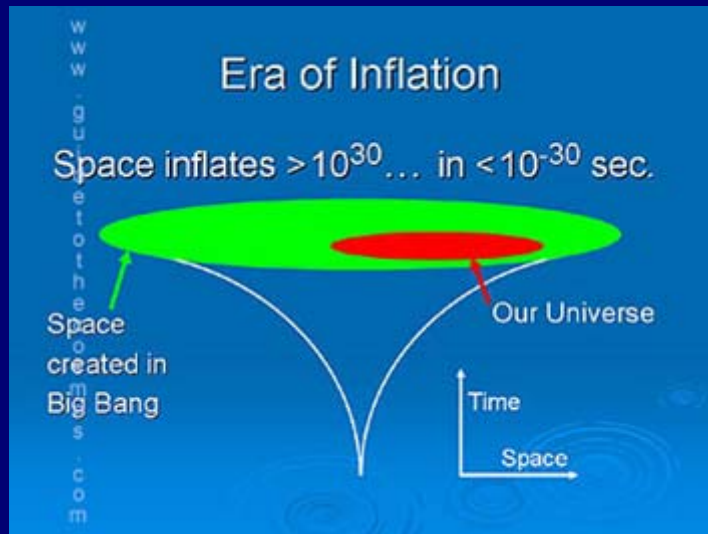
O fato do valor para o parâmetro total de densidade (Ω) ser da ordem de 1 hoje em dia, requer que ele deveria ser extremamente próximo de 1 nos estágios primordiais do universo. Isto implica que um "ajuste preciso" deste parâmetro foi necessário.

Isto tem implicações importantes para a nossa existência, pois valores diferentes de 1, apresentariam dificuldades para formação de estruturas (galáxias, planetas,..) ou o universo colapsaria rapidamente não dando tempo da vida se desenvolver.

Inflação

Este modelo resolve os problemas de horizonte e achatamento. No cenário inflacionário é suposto que nos primórdios do universo a densidade de energia do vácuo era muito mais alta do que hoje. O resultado disso é que por algum tempo o universo experimentou um crescimento exponencial de seu tamanho empurrado pela pressão negativa da energia do vácuo.

A inflação iniciou quando o universo era pequeno e causalmente conectado, diminuindo alguma curvatura existente.



Explorando posibilidades

Criando universos

Uma das formas de testarmos as teorias disponíveis é através da simulação em computadores, incluindo os elementos físicos e os conhecimentos do comportamento do universo observado.

Algumas hipóteses podem ser testadas possibilitando a comparação de propriedades do universo evoluído no computador com a do observado.

Ferramentas matemáticas permitem realizar testes comparativos e objetivos apontando as deficiências e virtudes dos modelos considerados.

Simulação do Milênio

Entre os vários trabalhos de simulações existentes, mencionamos este por ser um dos que envolveu maior esforço computacional na época que foi realizado.

Foram usados 10 bilhões de partículas para traçar a evolução da matéria dentro de um cubo de 2 bilhões de anos-luz de aresta. Um supercomputador trabalhou por 1 mês, gerando 25 TB de dados.

Foi possível acompanhar a história evolutiva de ~20 milhões de galáxias, e de buracos negros supermassivos habitando alguns quasares.

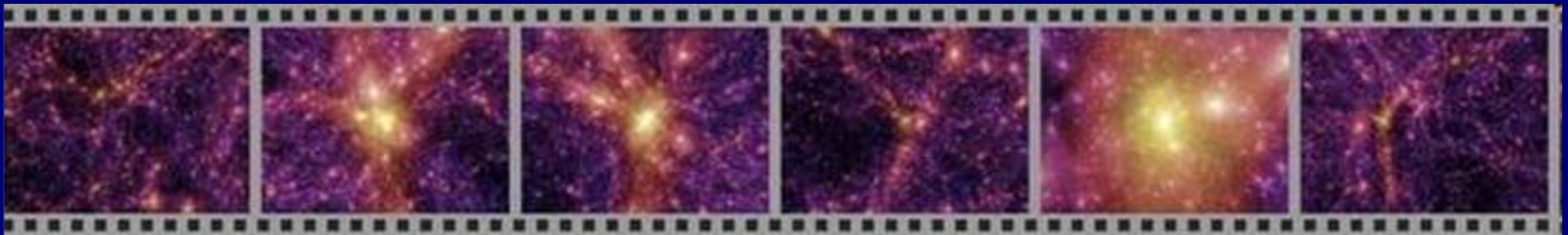
Mais detalhes podem ser obtidos no portal abaixo:

www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/index.shtml

Simulação do Milênio

Animação 3-D mostrando a jornada pelo universo simulado. Durante o "passeio", contornaremos um aglomerado de galáxias.

O tempo necessário para a luz percorrer todo o trajeto seria de 2,4 bilhões de anos.

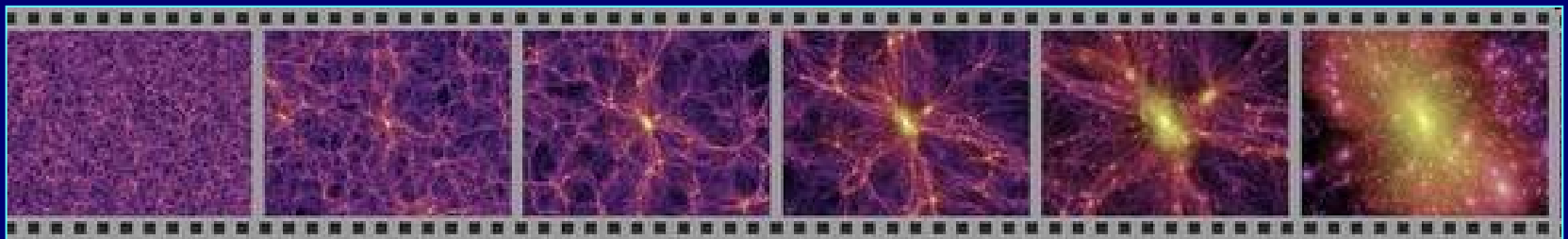


Simulação do Milênio

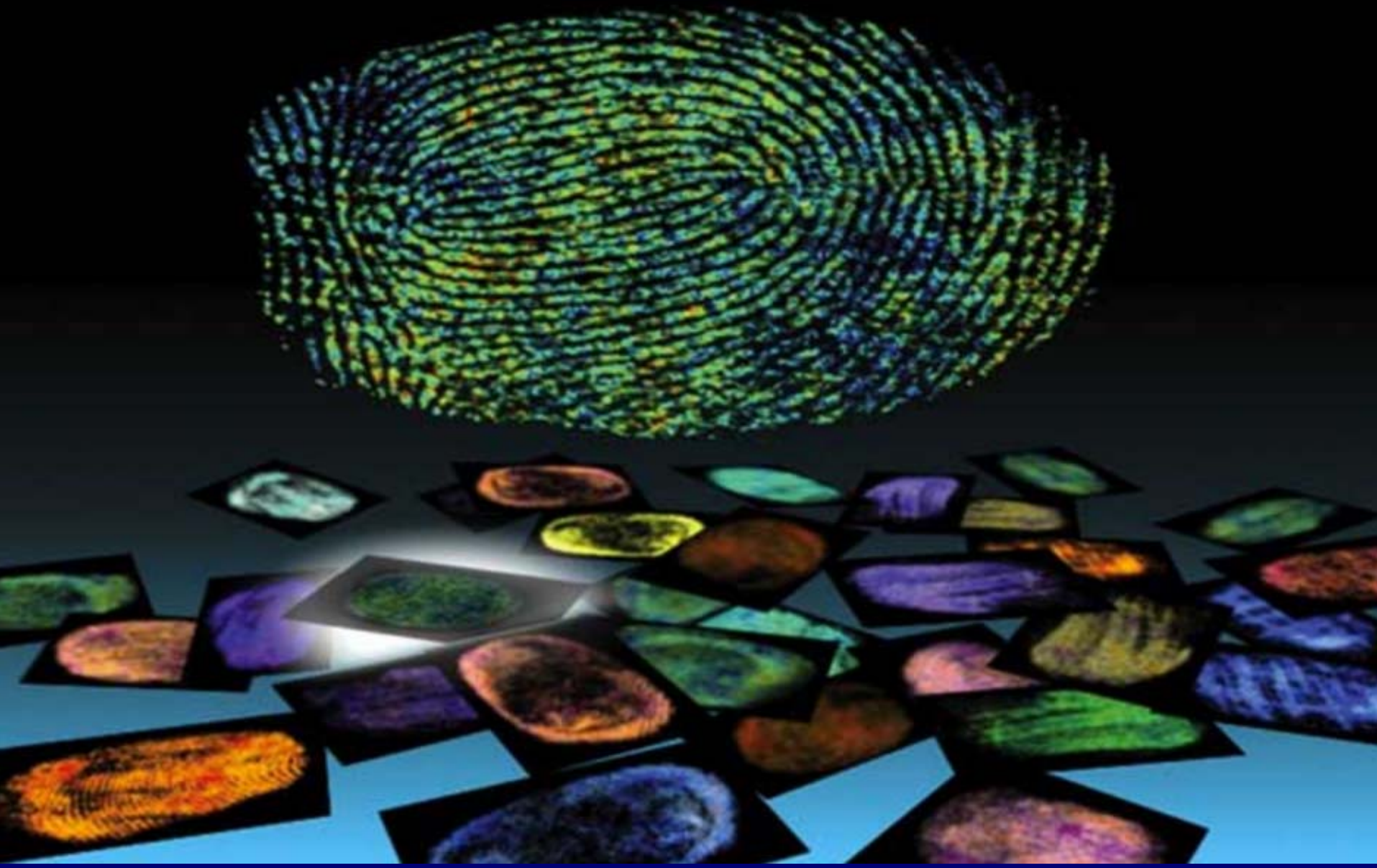
Nesta animação mostra-se a distribuição de matéria escura no tempo presente.

Faz-se um zoom dentro de um aglomerado massivo de galáxias, mostrando a morfologia das estruturas em diversas escalas.

A viagem parte de escalas de alguns Gpc e vai até estruturas pequenas resolvidas de $\sim 10\text{kpc}$.



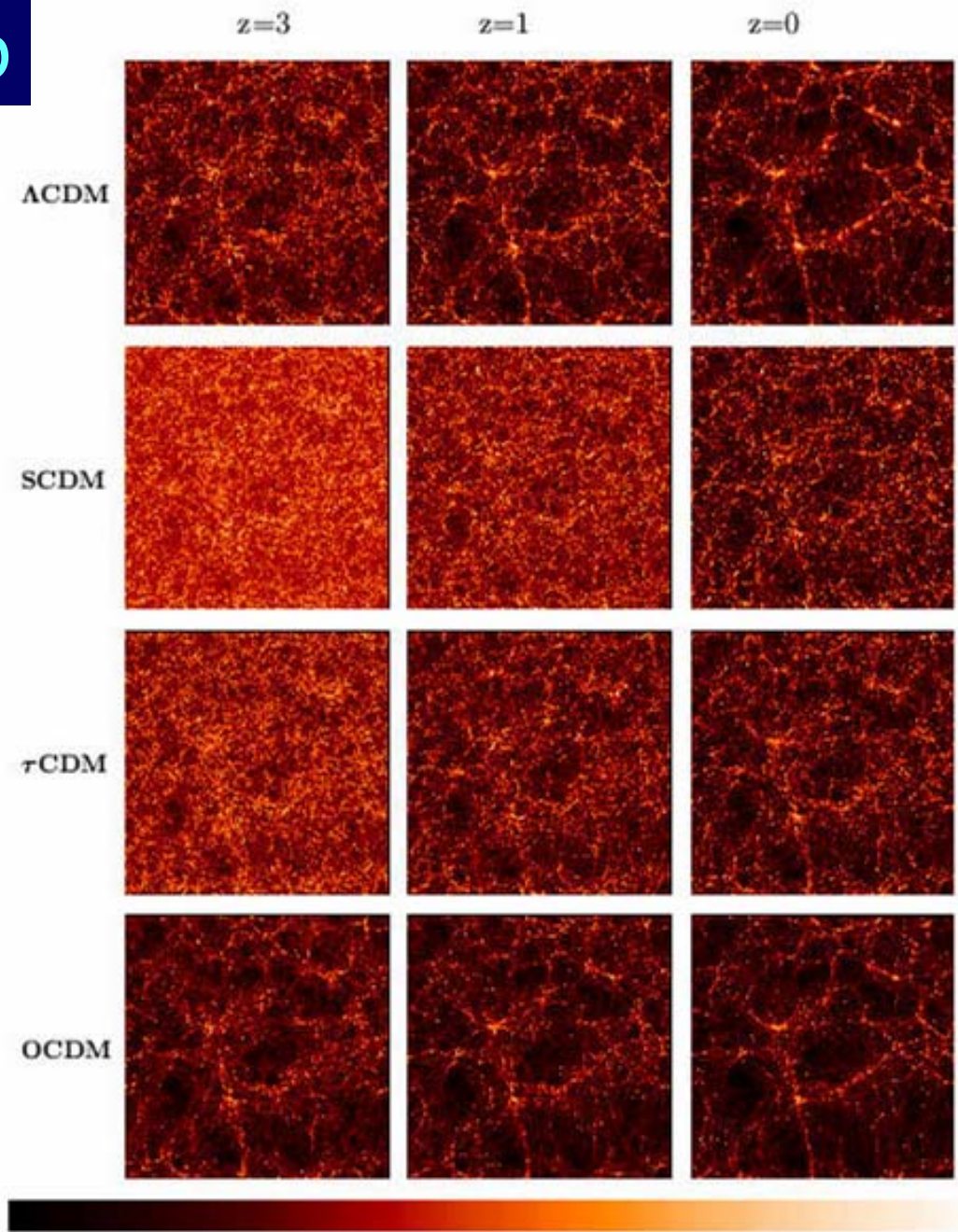
Diferentes universos deixam distintas
"impressões digitais"



Simulação do Milênio

Simulações com diferentes condições iniciais levam a formação de estruturas com distintas características.

A comparação com dados observacionais e uso de ferramentas matemáticas ajuda a escolher os melhores modelos.



Simulação do Milênio

Distribuição de galáxias



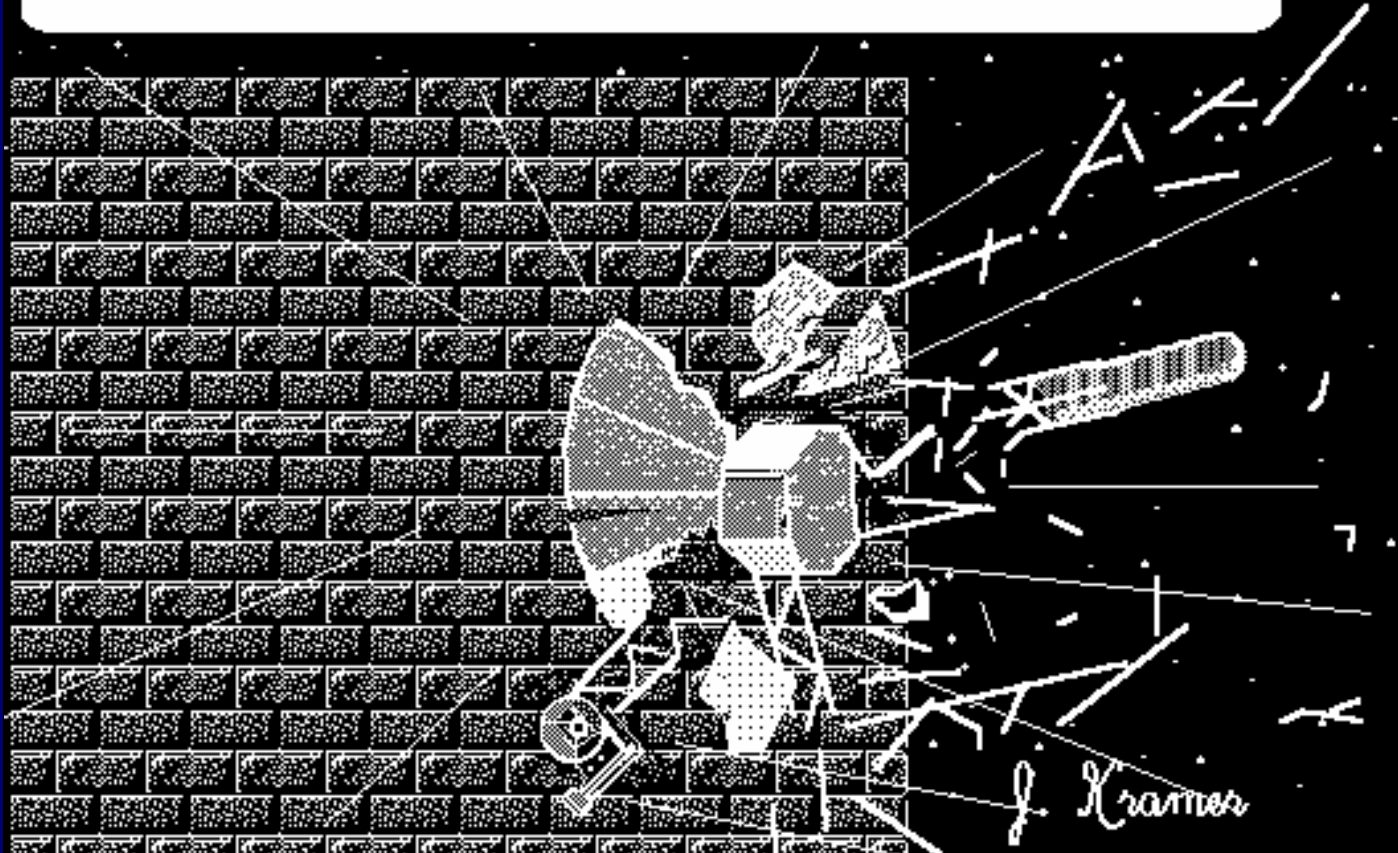
Distribuição de matéria escura



Matéria comum e escura se distribuem de formas similares pelo universo!

Universo Abissal

Voyager encounters the edge of the universe



Hubble Ultra Deep Field

O telescópio espacial Hubble observou uma mesma região do céu durante o tempo equivalente de 11,2 dias, fazendo 800 exposições, combinadas posteriormente.

A região do céu observada equivale a uma vista por um canudinho de refrigerante de 2,5 metros.

Na imagem mais profunda dos cosmos feita até hoje, são identificadas mais de 10 mil galáxias, sendo 100 delas de uma época que o universo tinha 800 milhões de anos.

São visíveis galáxias em diferentes estágios de evolução.



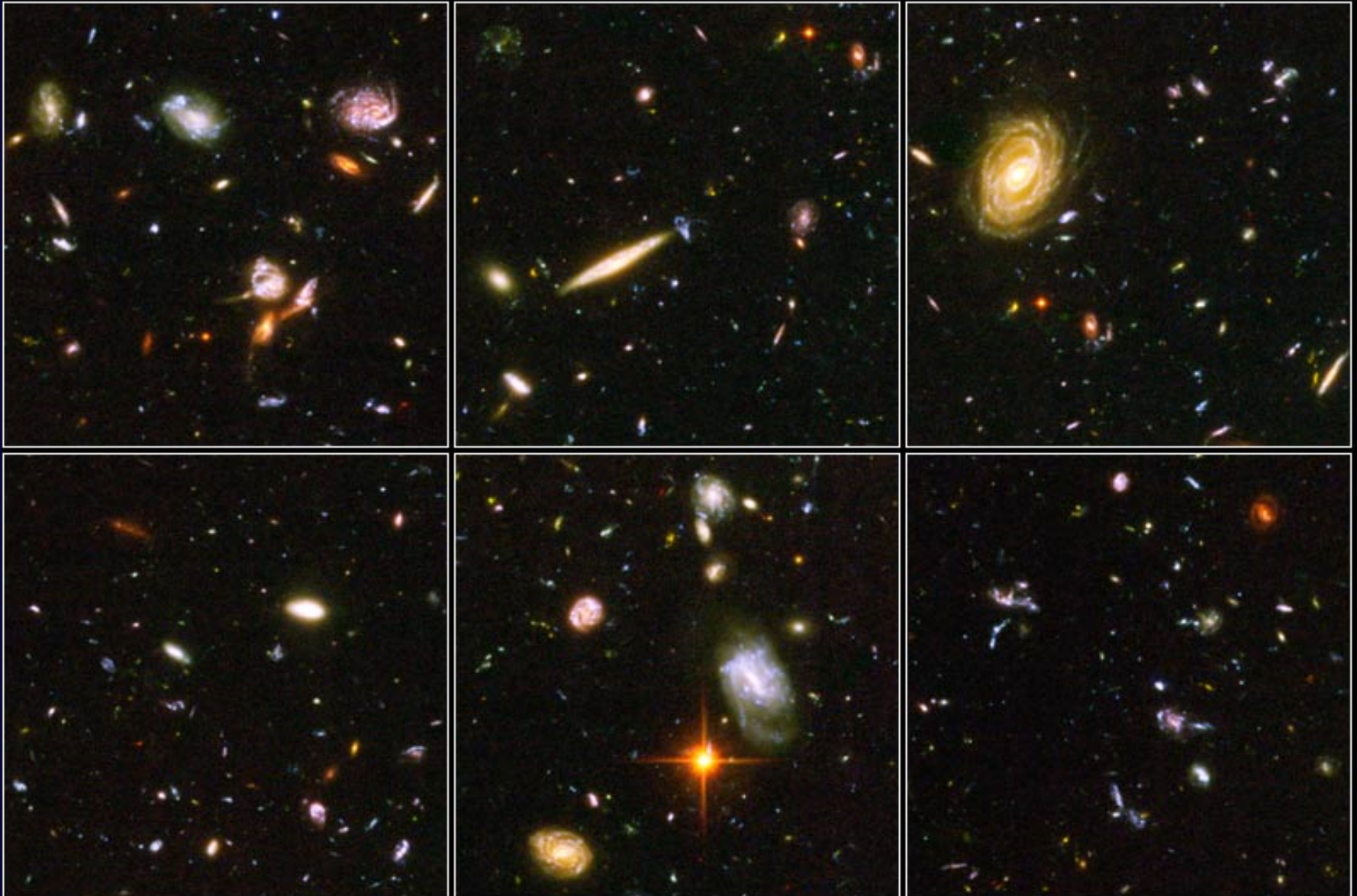
Hubble Ultra Deep Field



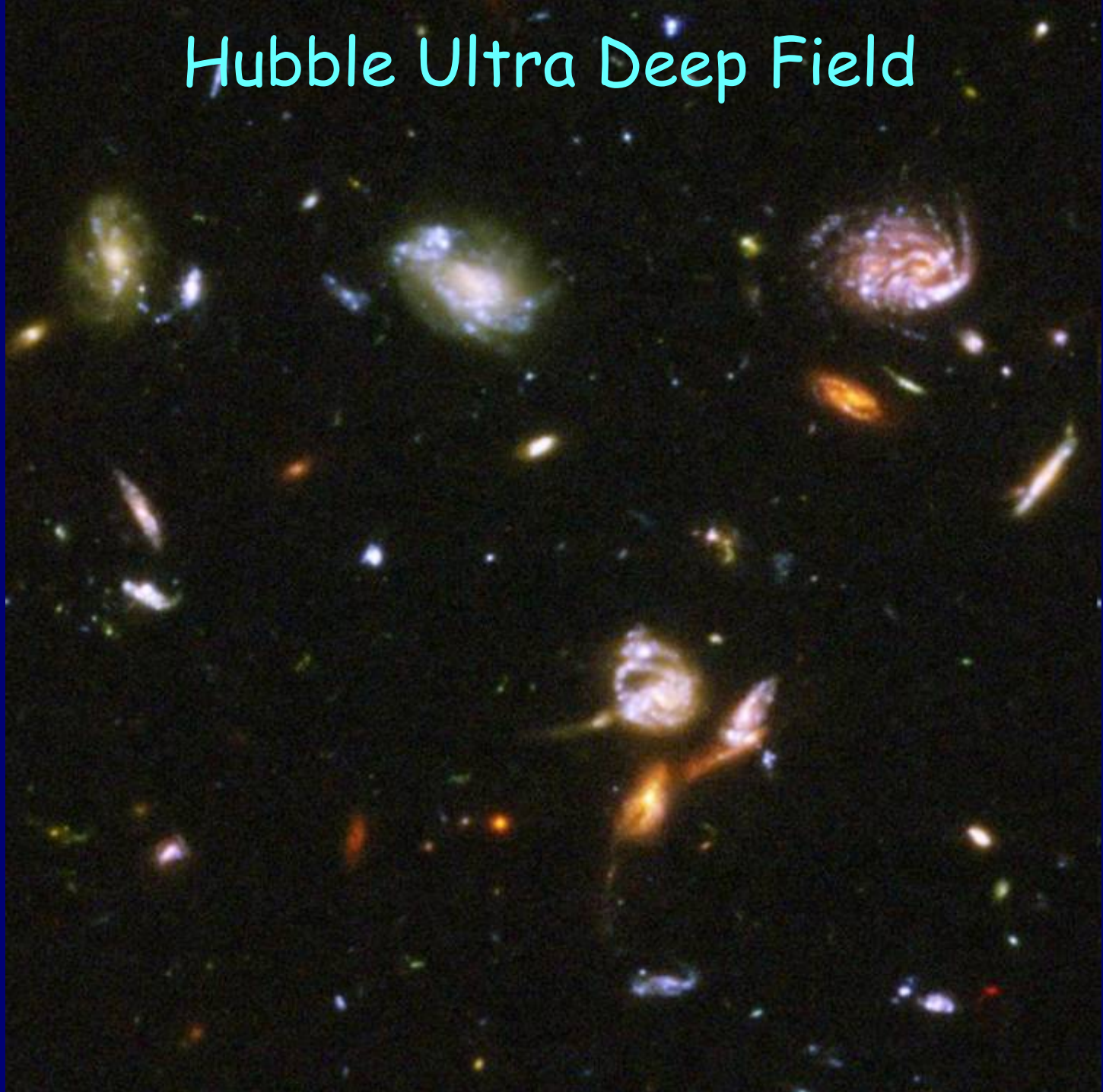
Hubble Ultra Deep Field

Hubble Ultra Deep Field Details

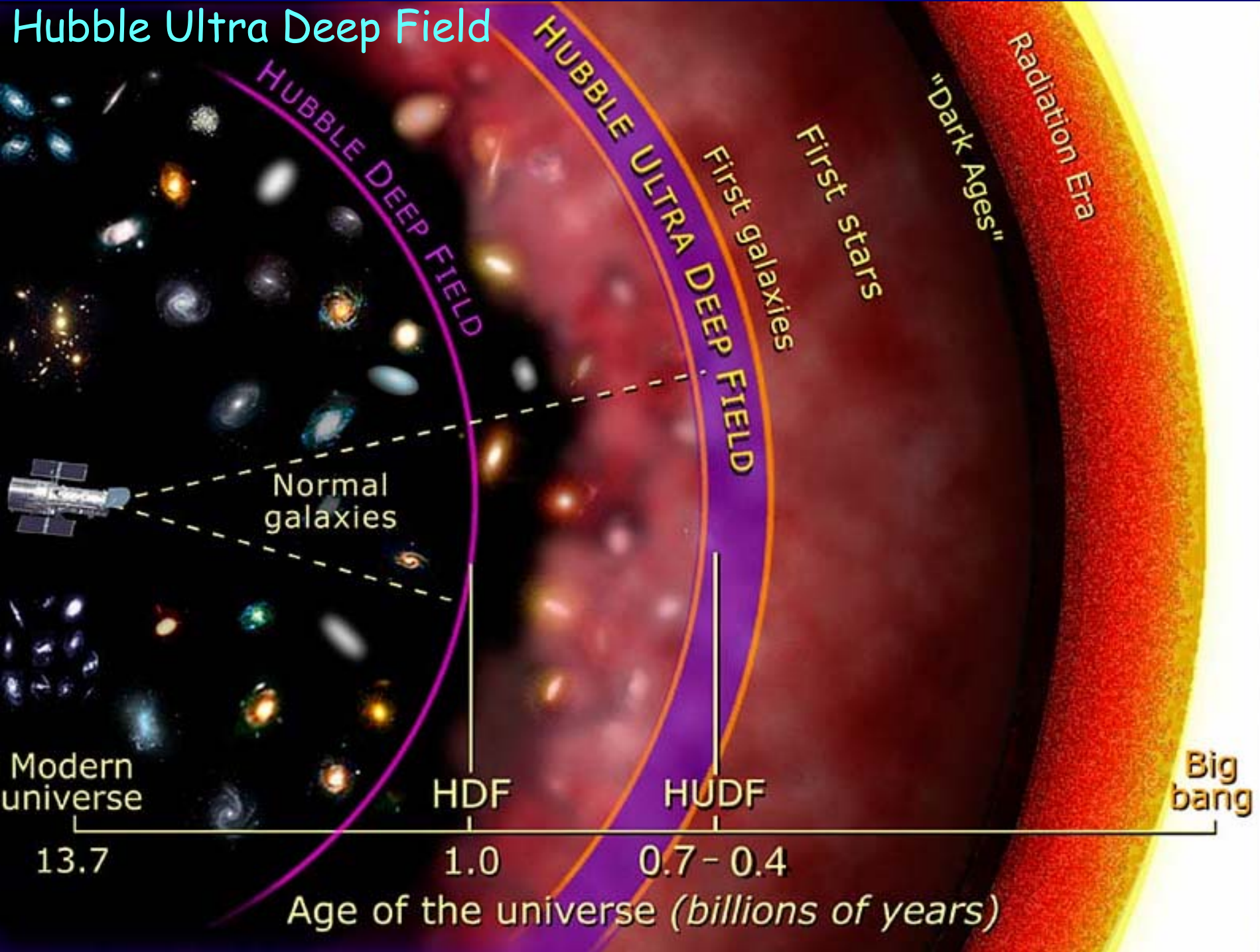
HST ■ ACS



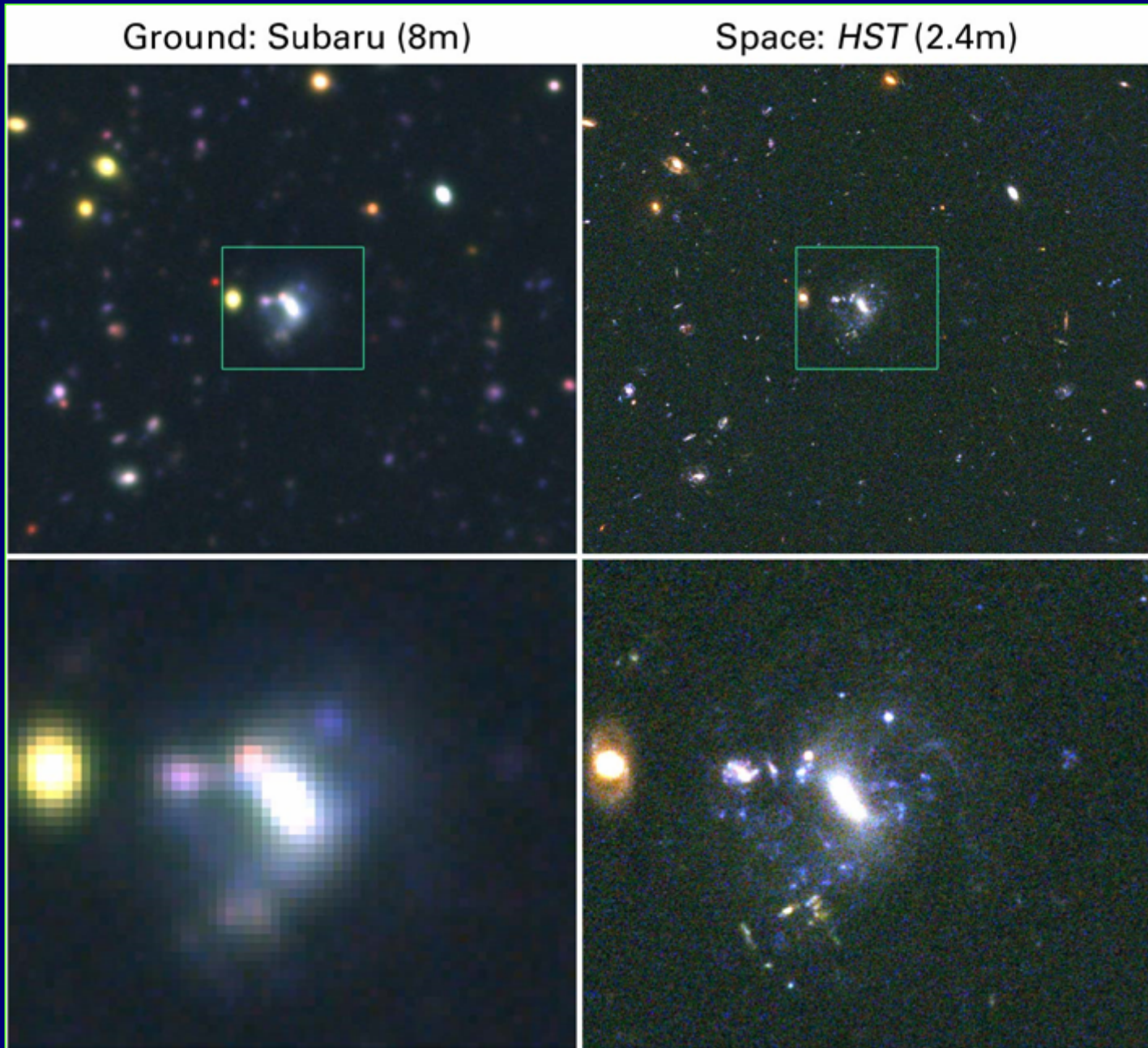
Hubble Ultra Deep Field



Hubble Ultra Deep Field



Comparação da qualidade de imagem entre HST e SUBARU

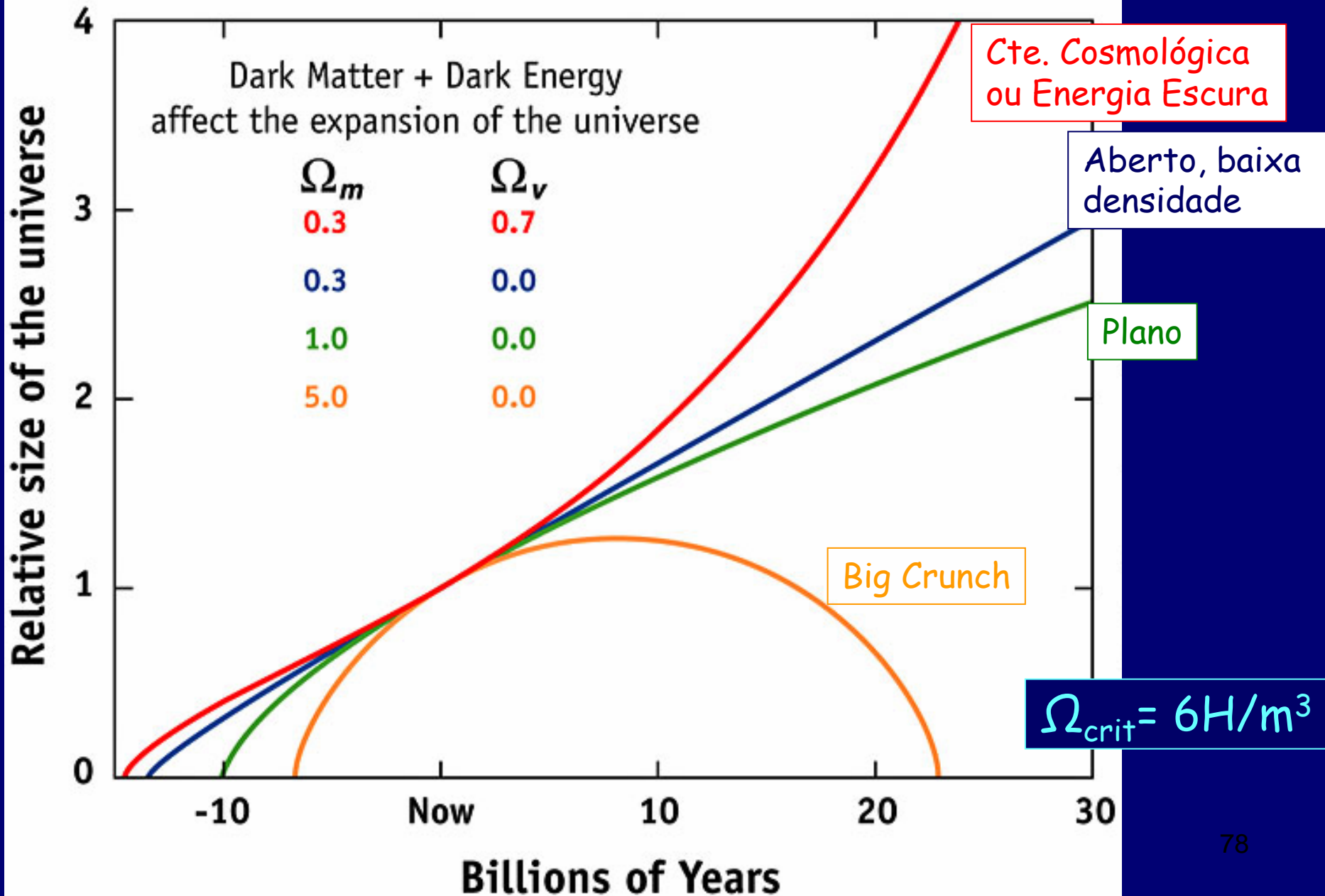


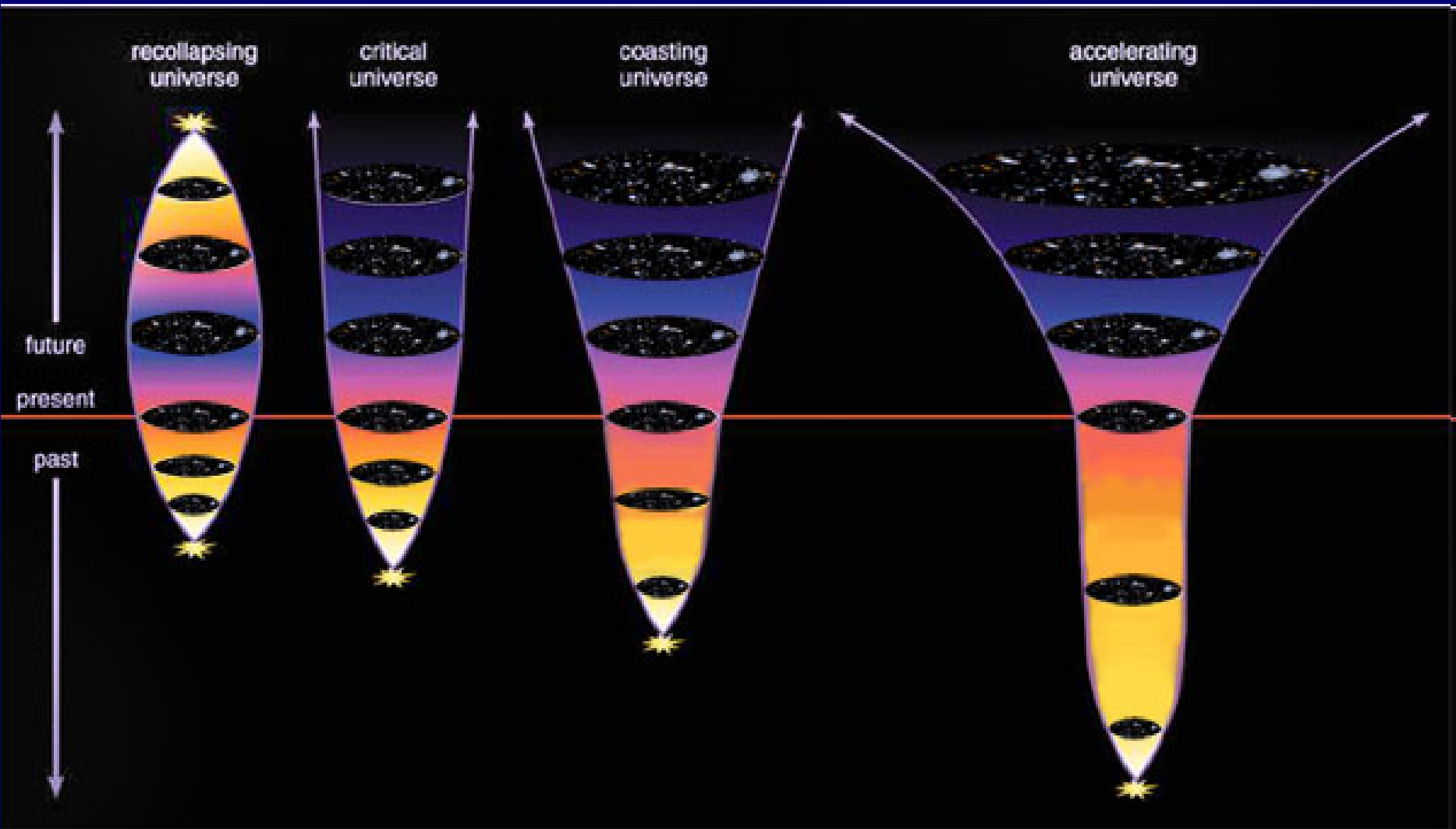


Para onde vai tudo isso ?

"Some Say the World Will End in Fire, Others Say in Ice"

EXPANSION OF THE UNIVERSE





Energia Escura e o Destino do Universo

A natureza da Energia Escura determina a evolução futura do Universo.

Aceleração continuada: o Universo além do Grupo Local de galáxias desaparecerá além do horizonte em ~100 bilhões de anos.

“Energia Escura Fantasma”: em algumas teorias, a densidade de energia escura *crece* com o tempo, levando a uma sempre crescente taxa de expansão. Eventualmente galáxias, estrelas, átomos serão desmembrados.



A Busca pela Energia Escura

A Energia Escura

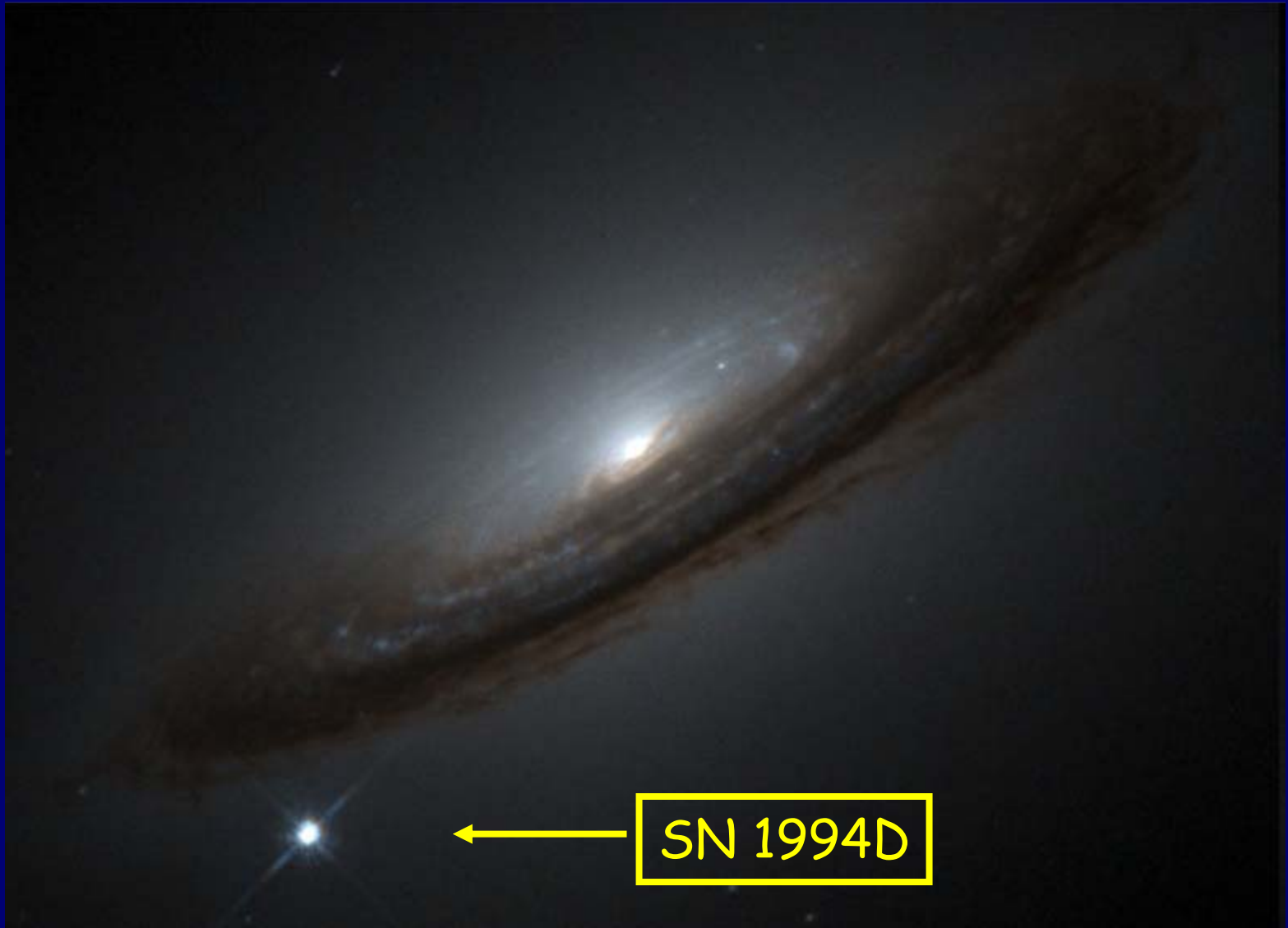
A energia escura é uma força misteriosa acelerando a expansão do universo. Foi descoberta através de observações de supernovas distantes.

Esta expansão diminuiu a aglomeração de matéria escura, um dos maiores constituintes do universo.

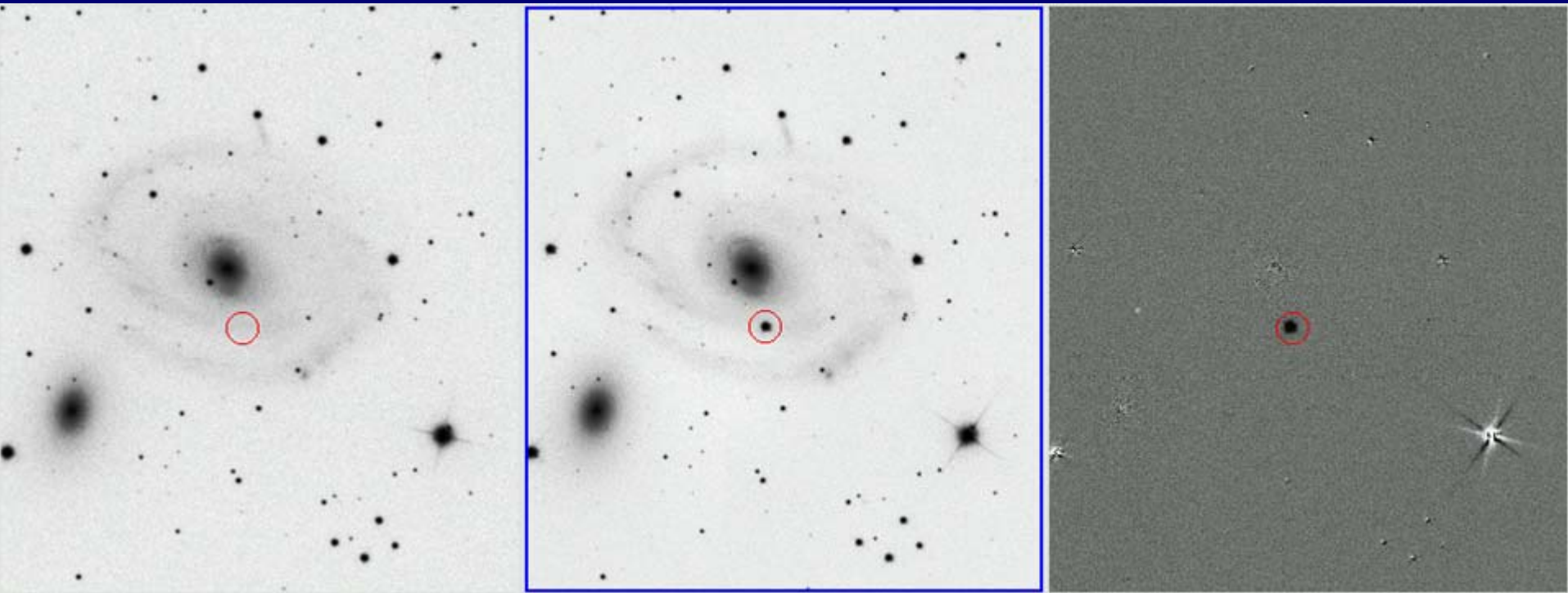
Se conseguirmos medir com precisão a expansão de Hubble, e entendermos o crescimento das estruturas, podemos testar teorias sobre a física da energia escura, pois distintas teorias prevêm diferentes cenários.



A Energia Escura



Encontrando Supernovas: Subtração de Imagem



Antes

Depois

Diferença

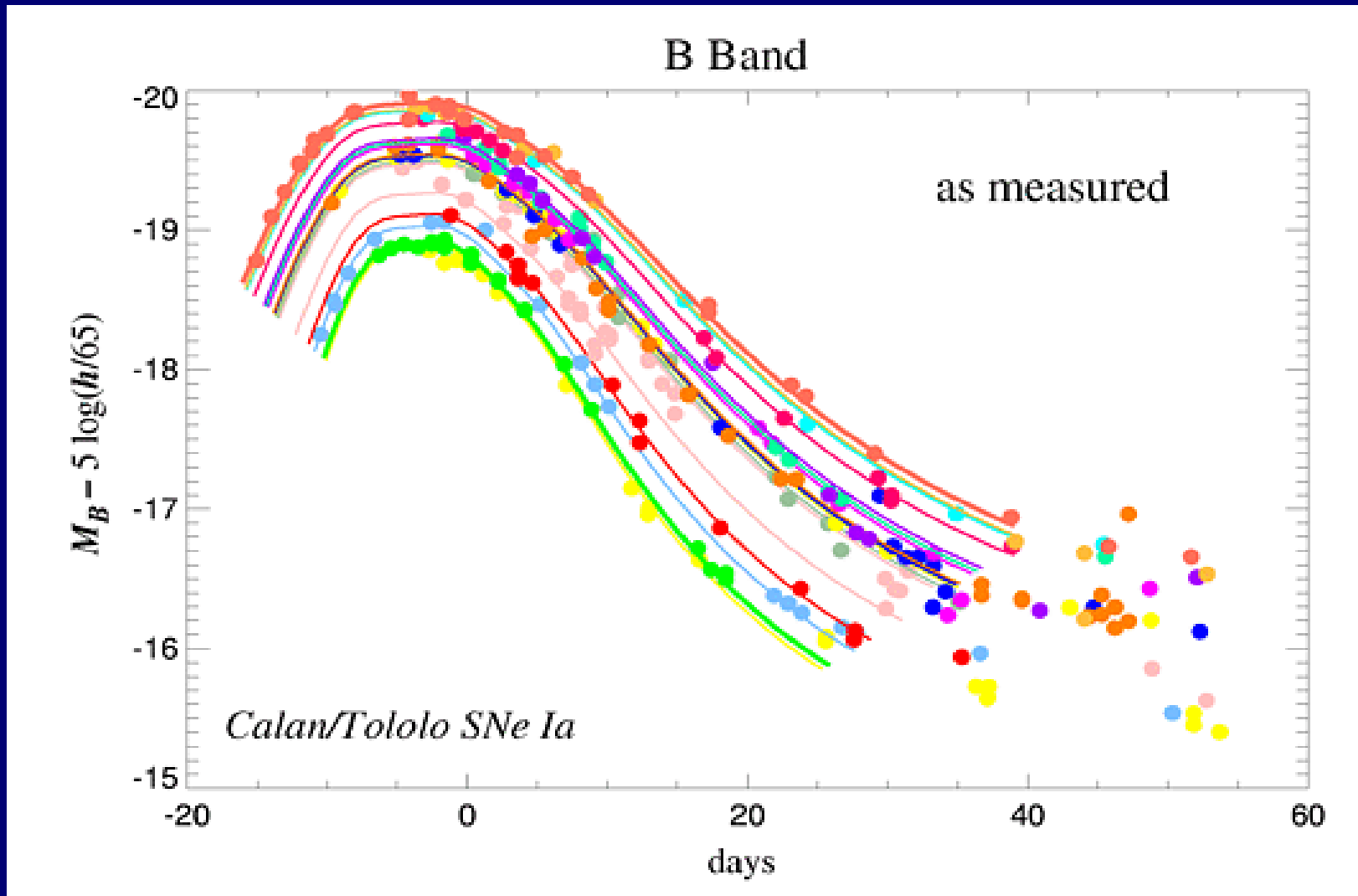
SN 2002ha (Ia) $z = 0.014$

Curvas de Luz + Redshift



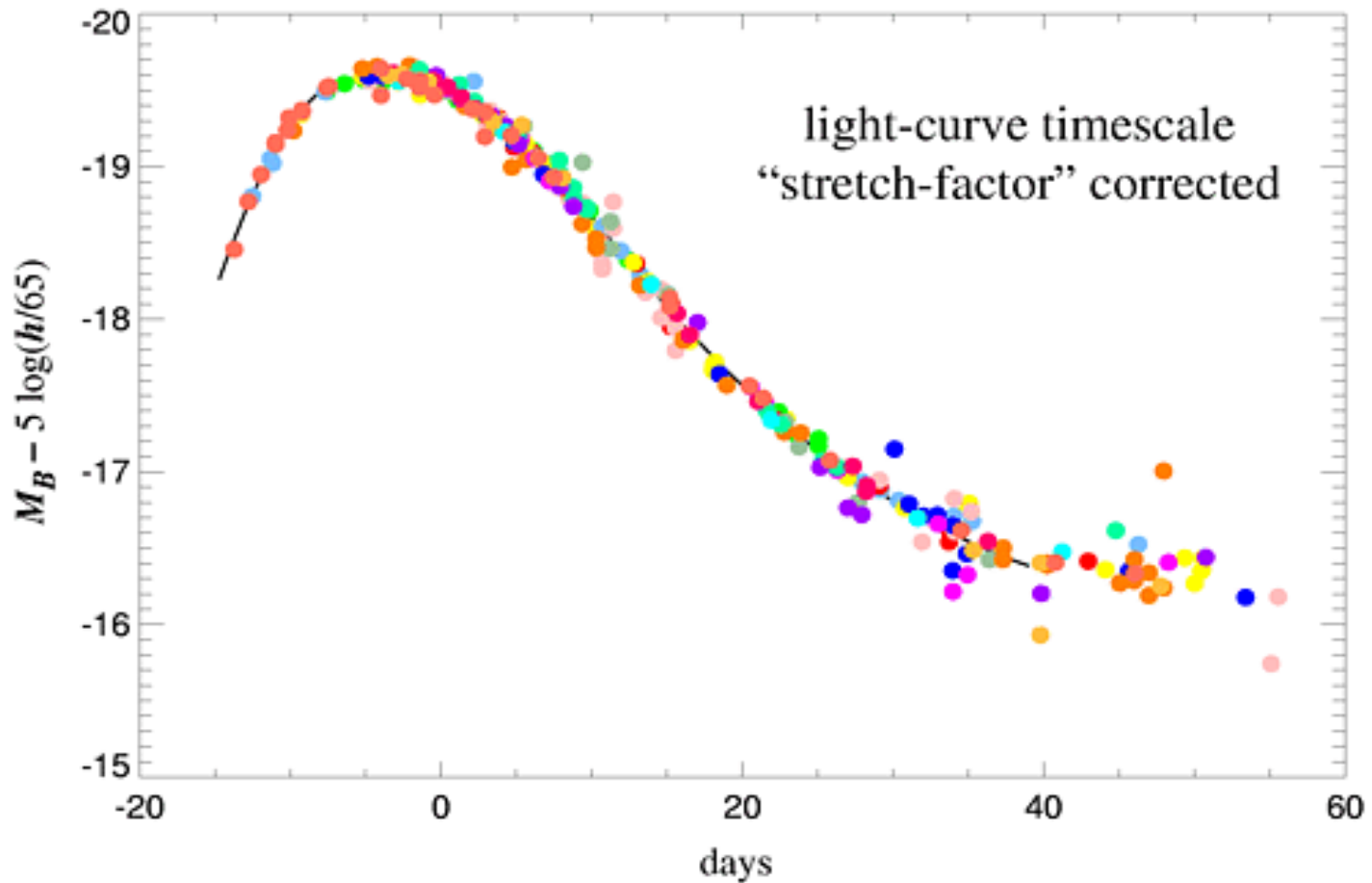
A relação entre distância e redshift é diferente em um universo acelerado.

Curvas de luz de SN Ia



O máximo de brilho e a forma da curva diferem umas das outras, mas o brilho máximo pode ser usado como uma "vela padrão".

Curvas de luz de SN Ia



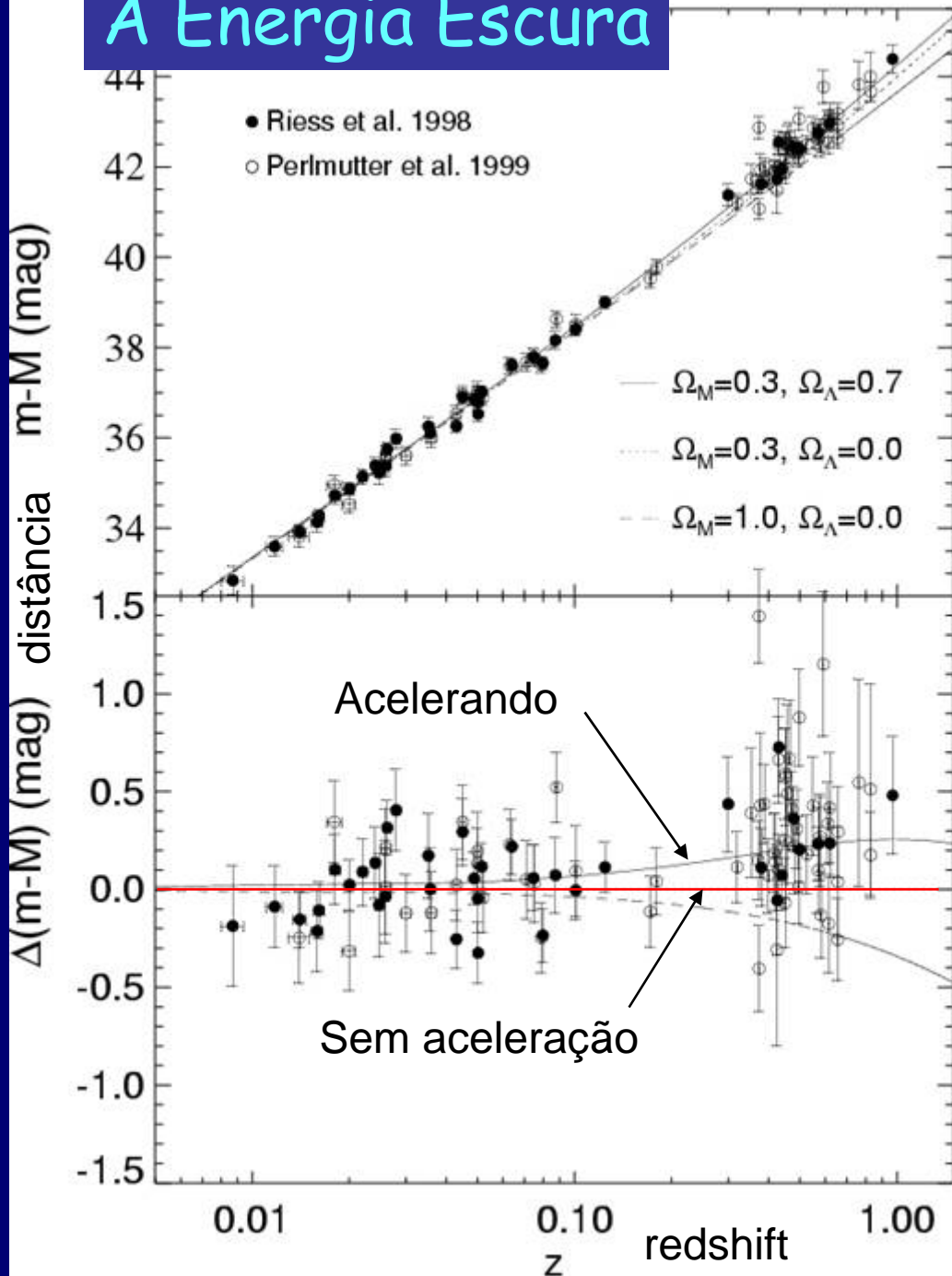
Após correção as diversas curvas de luz são tornadas congruentes, podendo ser usadas para medir distâncias de supernovas distantes com uma precisão de 7%.

A Energia Escura

Descoberta da
Aceleração
Cósmica com
Supernovas
distantes (alto z).

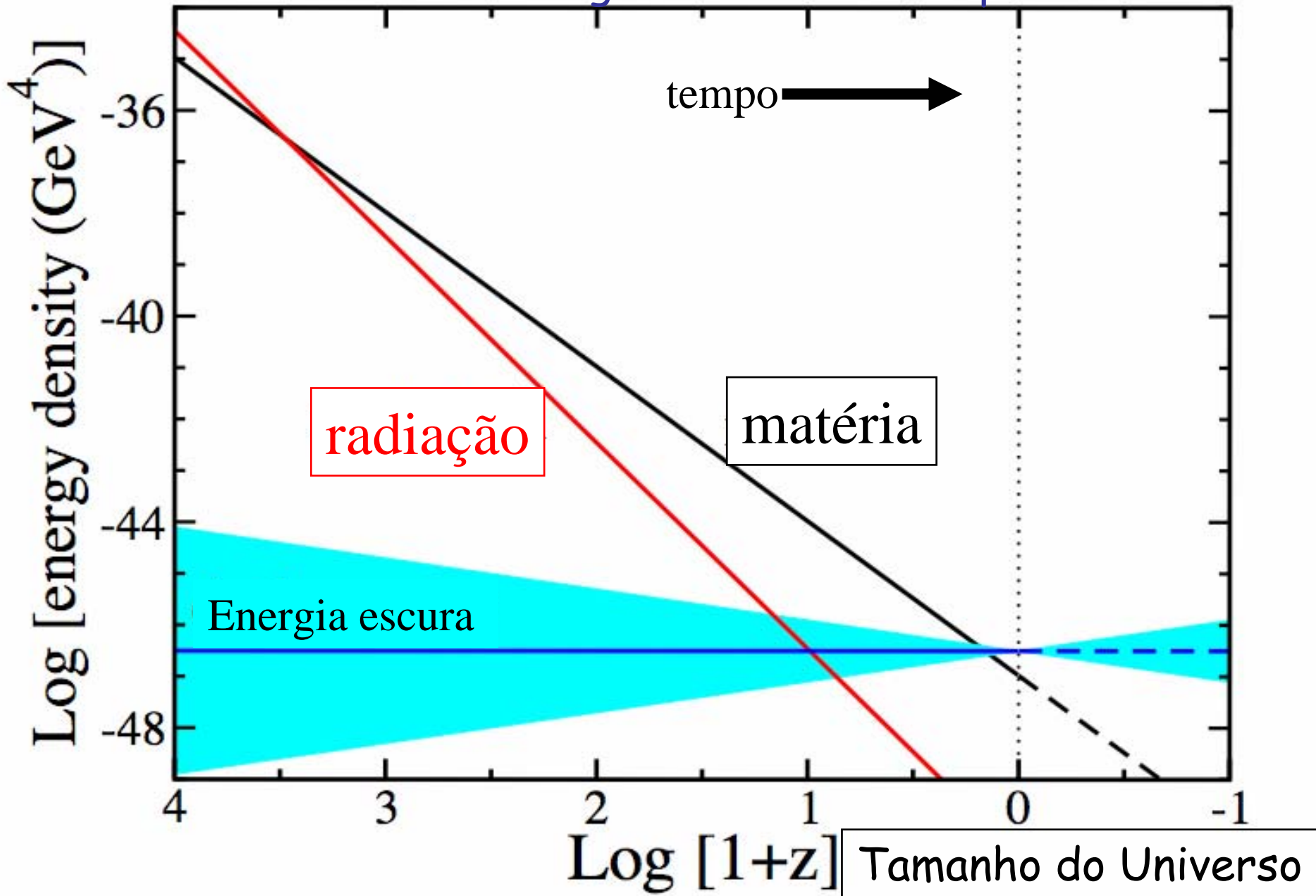
Aplica-se a *mesma*
Relação Brilho-
Declínio da Luz
em altos z .

SNe que
explodiram quando
o Universo tinha
2/3 de seu
tamanho atual são
~25% mais fracas
que o esperado.



$$\Omega_\Lambda = 0.7$$
$$\Omega_\Lambda = 0.$$
$$\Omega_m = 1.$$

Porque vivemos numa época "especial" quando matéria e energia escura são comparáveis?



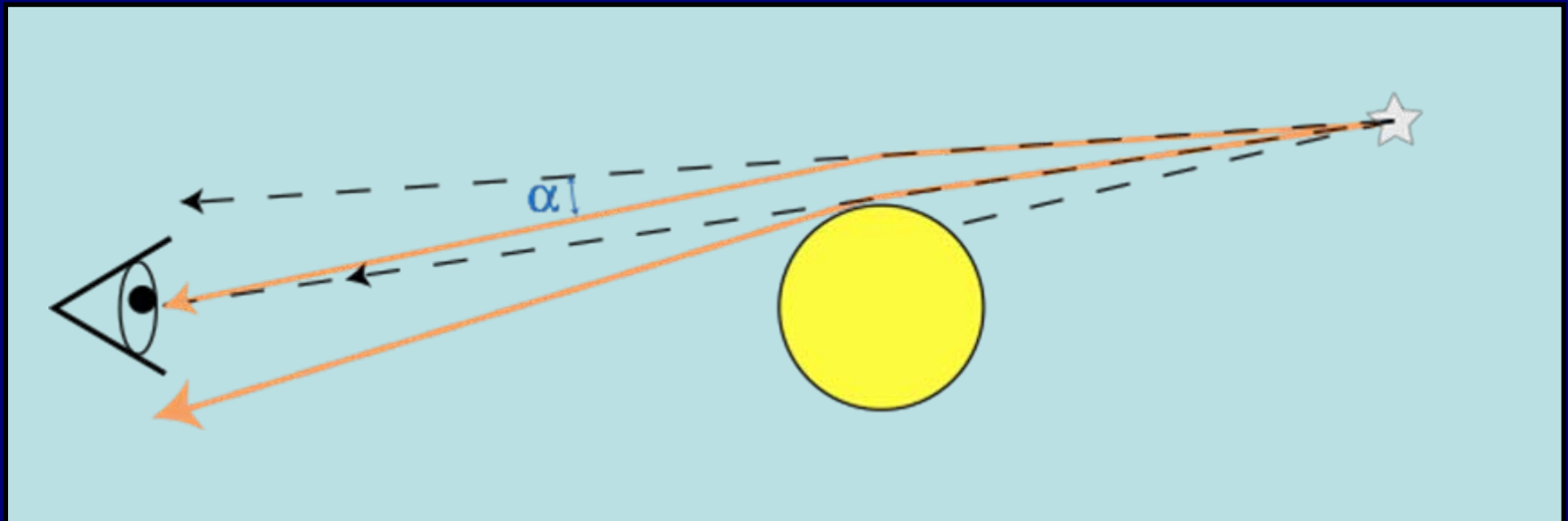
O Universo é escuro



Outras formas de estudar a Energia Escura

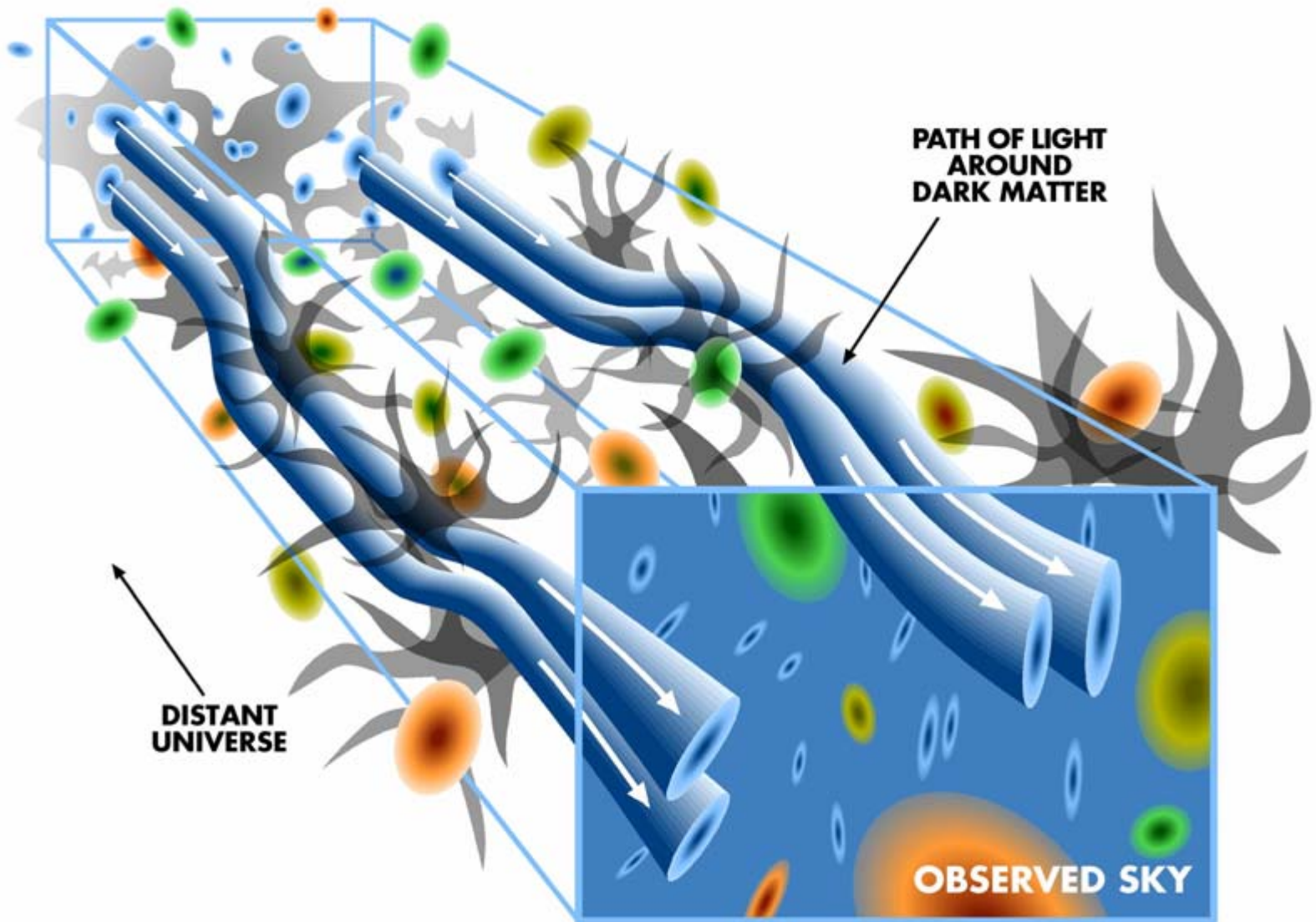
Lentes Gravitacionais (miragens cósmicas)

A matéria tem a propriedade de curvar o espaço, e conseqüentemente a trajetória de um raio luminoso. Este efeito pode ser usado para estudar a distribuição de matéria pelo universo.

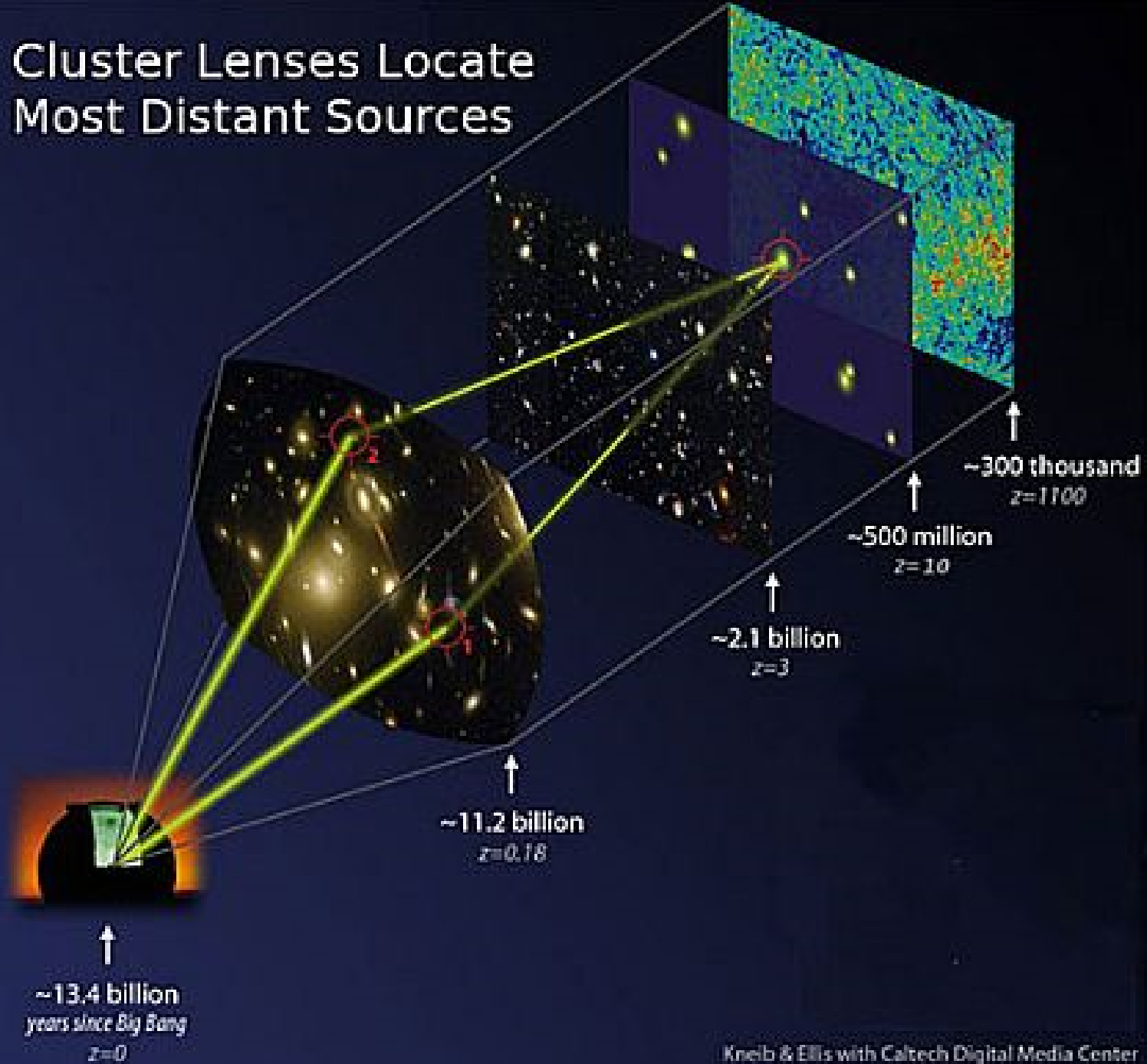


Outras formas de estudar a Energia Escura

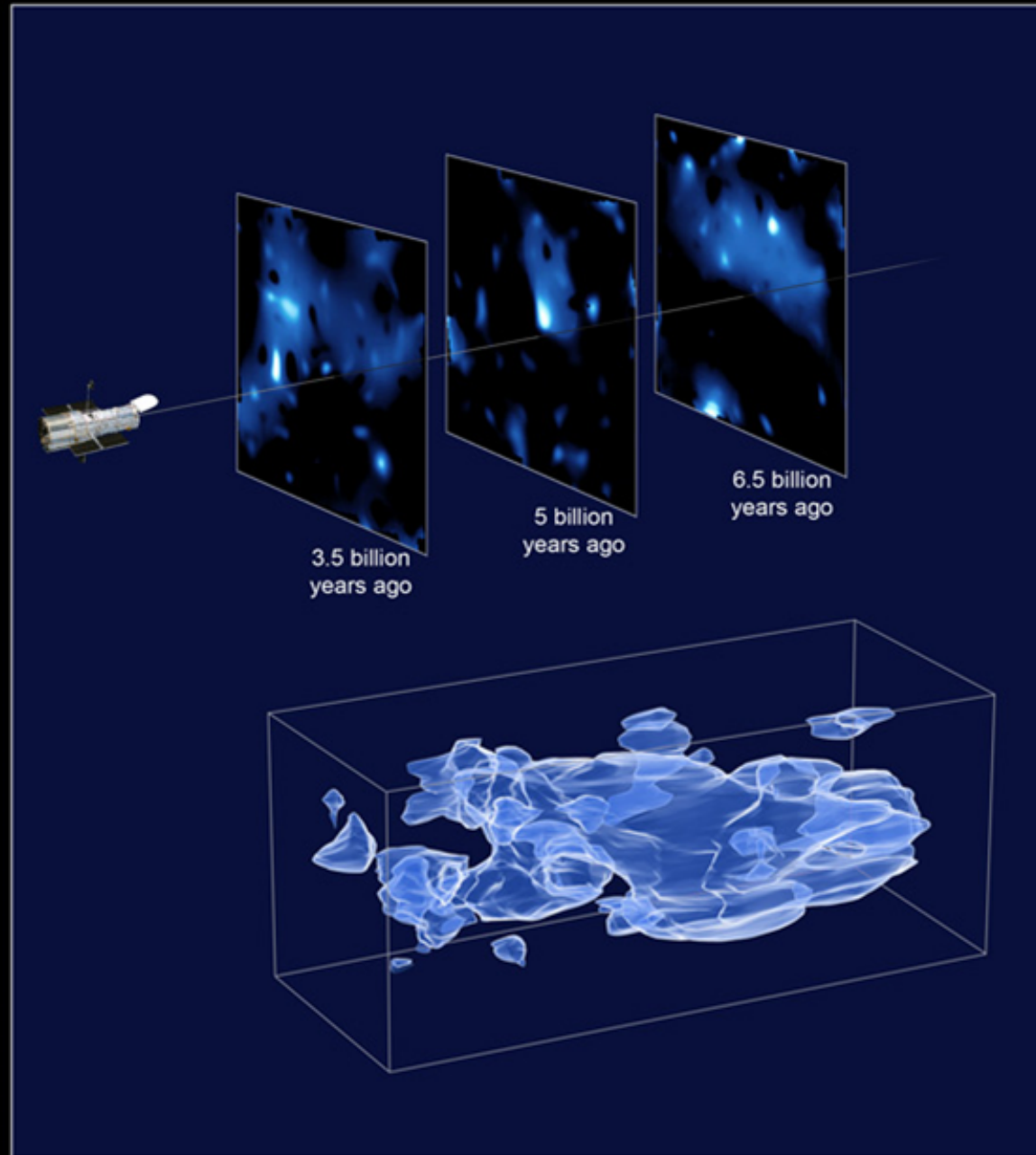
Lentes Gravitacionais



Cluster Lenses Locate Most Distant Sources



Mapa da distribuição de matéria escura feito pela medida da forma de milhões de galáxias. A luz destas ao passar pela matéria escura sofre distorções, que são usadas para gerar um mapa da distribuição de massa.



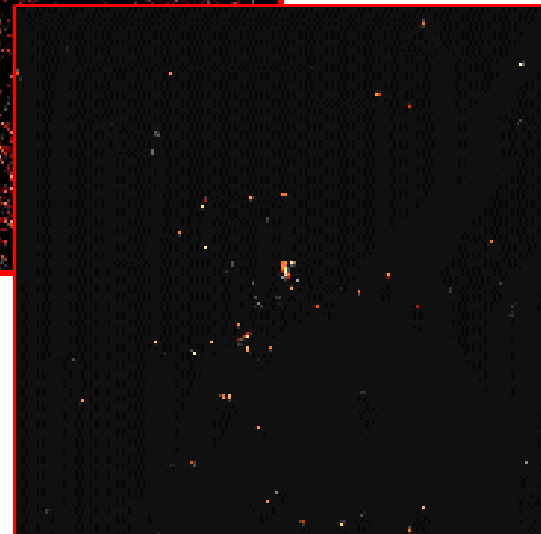
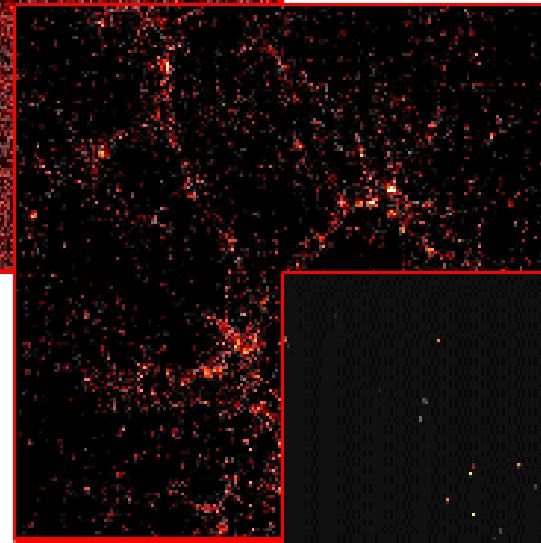
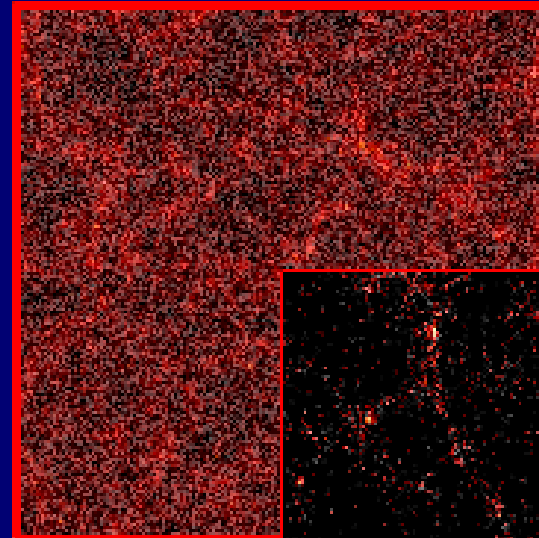
Outras formas de estudar a Energia Escura

Aglomerados de Galáxias

Expansão começa com inflação, produzindo as primeiras perturbações.

Perturbações locais na curvatura crescem, primeiramente devido a matéria escura.

Se esta expansão continua, ou se acelera, a formação de estruturas pode cessar, os halos tornam-se isolados, universos-ilhas estáveis.



Como estes objetos crescem com o tempo?

Outras formas de estudar a Energia Escura

Aglomerados de Galáxias

Nestas imagens pode-se ver como a cor, magnitude, e tamanho dos aglomerados variam com o redshift. Seus tamanhos são influenciados pela sua massa e pela energia escura.

$Z=0.138$

A field of galaxies at redshift Z=0.138, showing a dense distribution of stars and galaxies. The image is framed in yellow.

Run 2566 Col 4 Field 251

$Z=0.041$

A field of galaxies at redshift Z=0.041, showing a dense distribution of stars and galaxies. The image is framed in red.

$Z=0.277$

A field of galaxies at redshift Z=0.277, showing a dense distribution of stars and galaxies. The image is framed in green.

$Z=0.377$

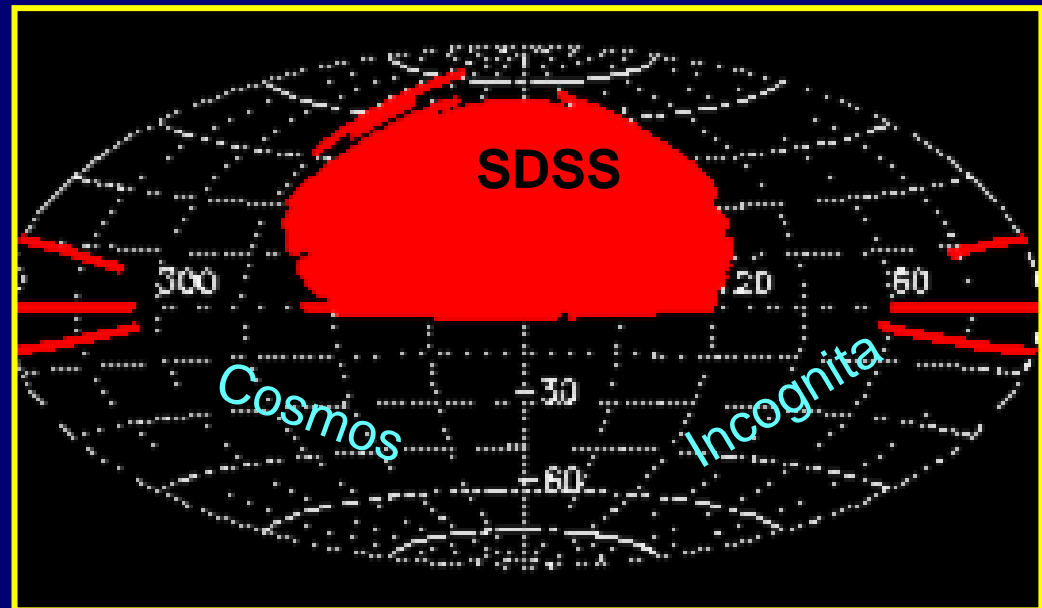
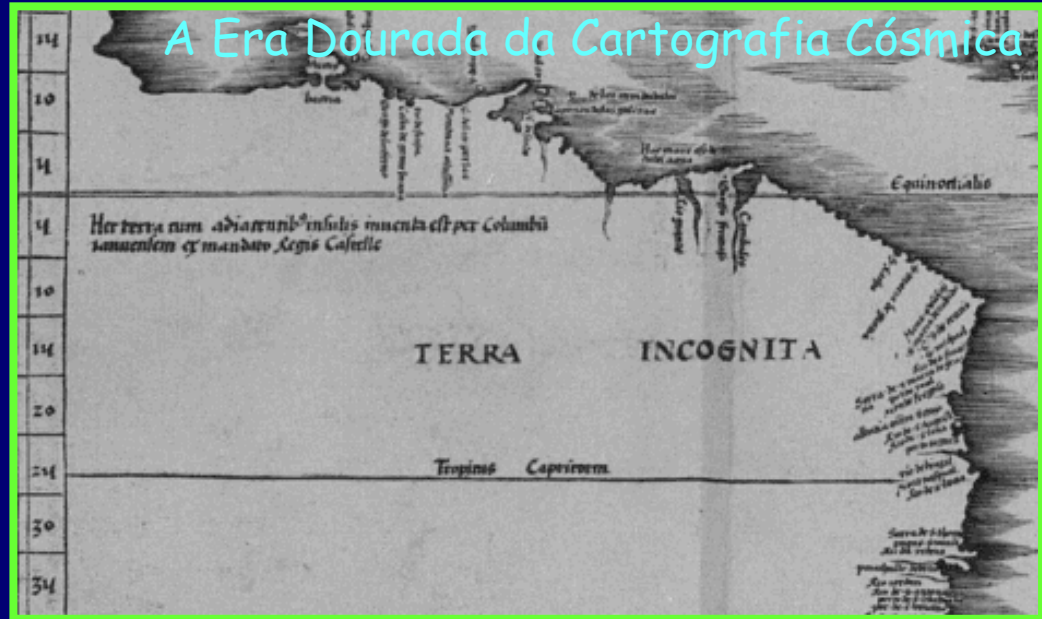
A field of galaxies at redshift Z=0.377, showing a dense distribution of stars and galaxies. The image is framed in orange.

Outras formas de estudar a Energia Escura

Distribuição de Galáxias em Grande Escala

Projetos cosmográficos em curso durante nossas vidas expandiram enormemente o volume do Universo "conhecido".

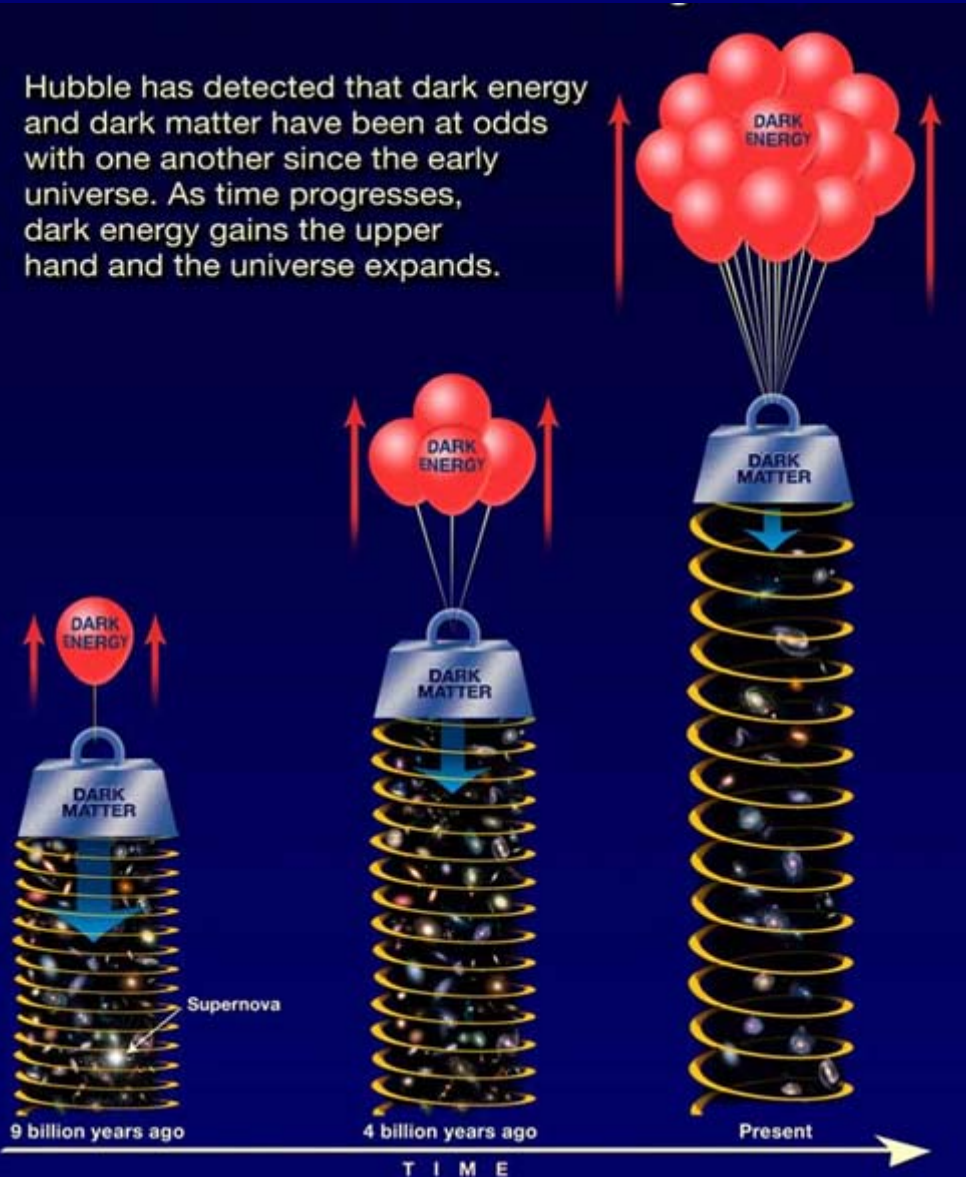
Devemos esperar uma era na qual o Universo visível não tenha um "cosmos incognita".



Outras formas de estudar a Energia Escura

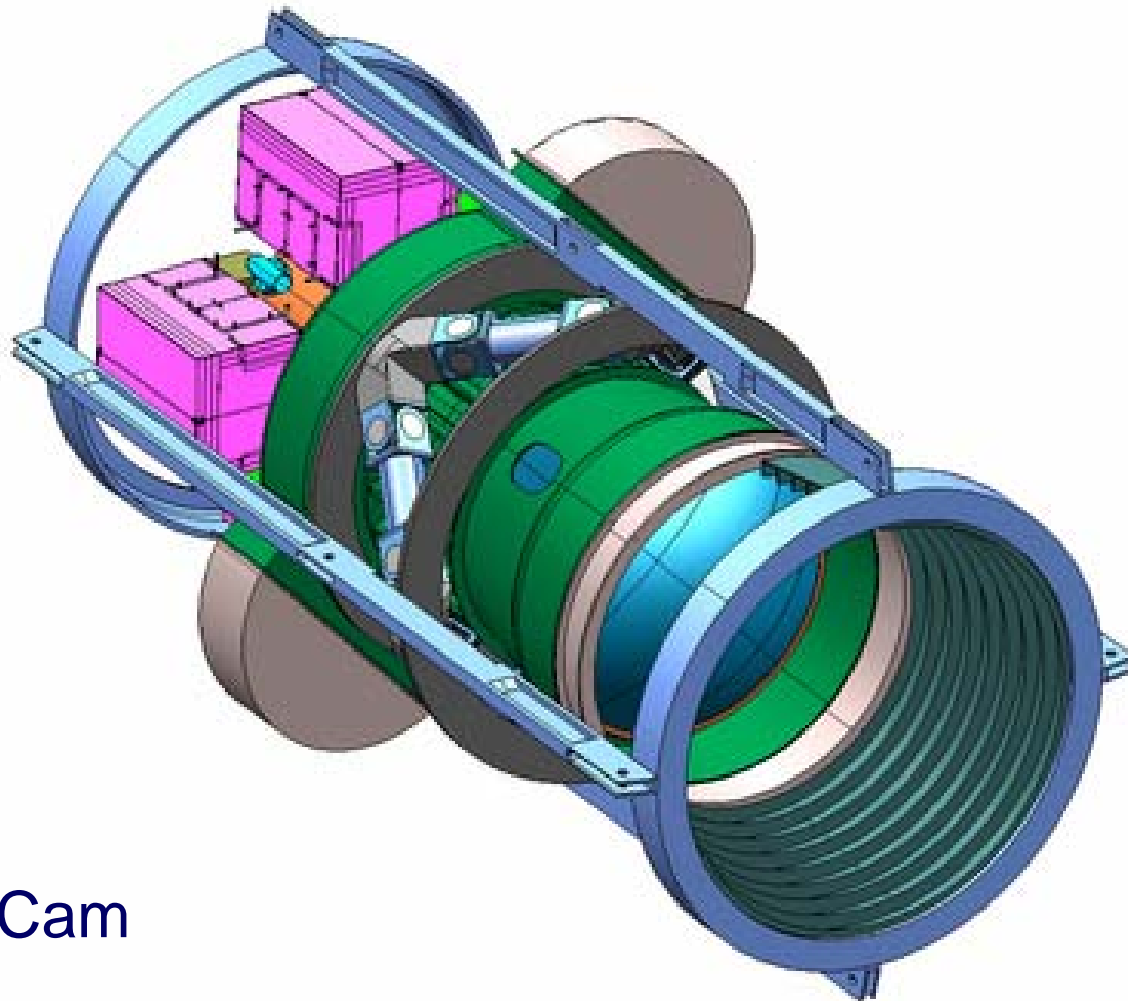
Distribuição de Galáxias em Grande Escala

Hubble has detected that dark energy and dark matter have been at odds with one another since the early universe. As time progresses, dark energy gains the upper hand and the universe expands.



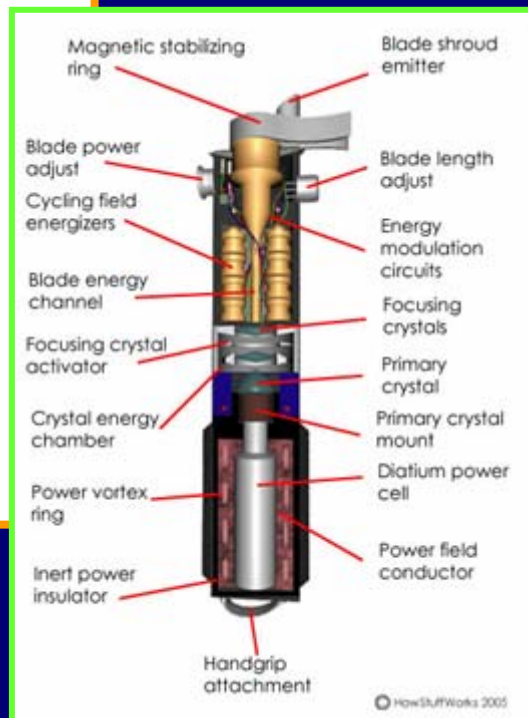
Através da distribuição de galáxias no cosmos ao longo do tempo (redshift) podemos inferir o grau de aglomeração dos objetos e entender como a energia escura afeta a evolução do universo.

O "sabre de luz" do astrônomo



DECcam

Jedi lightsaber

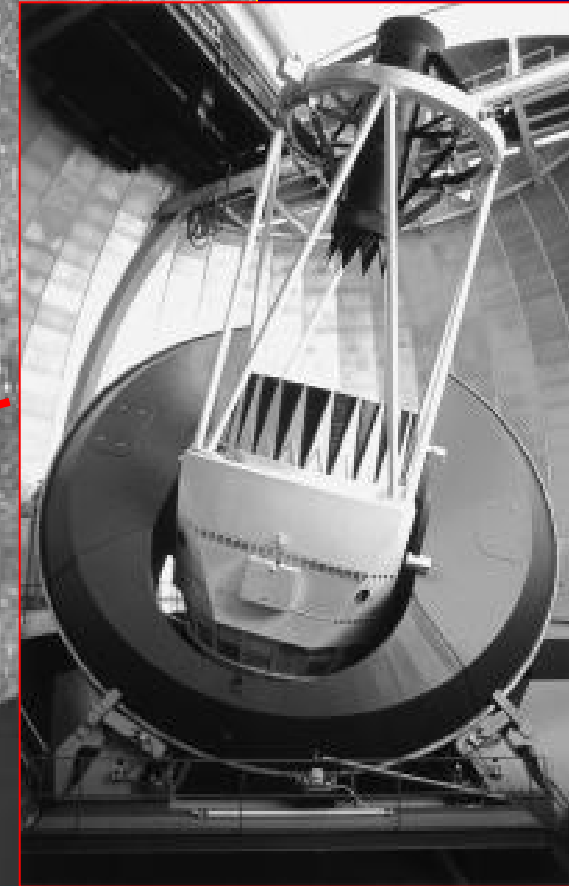


The Dark Energy Survey

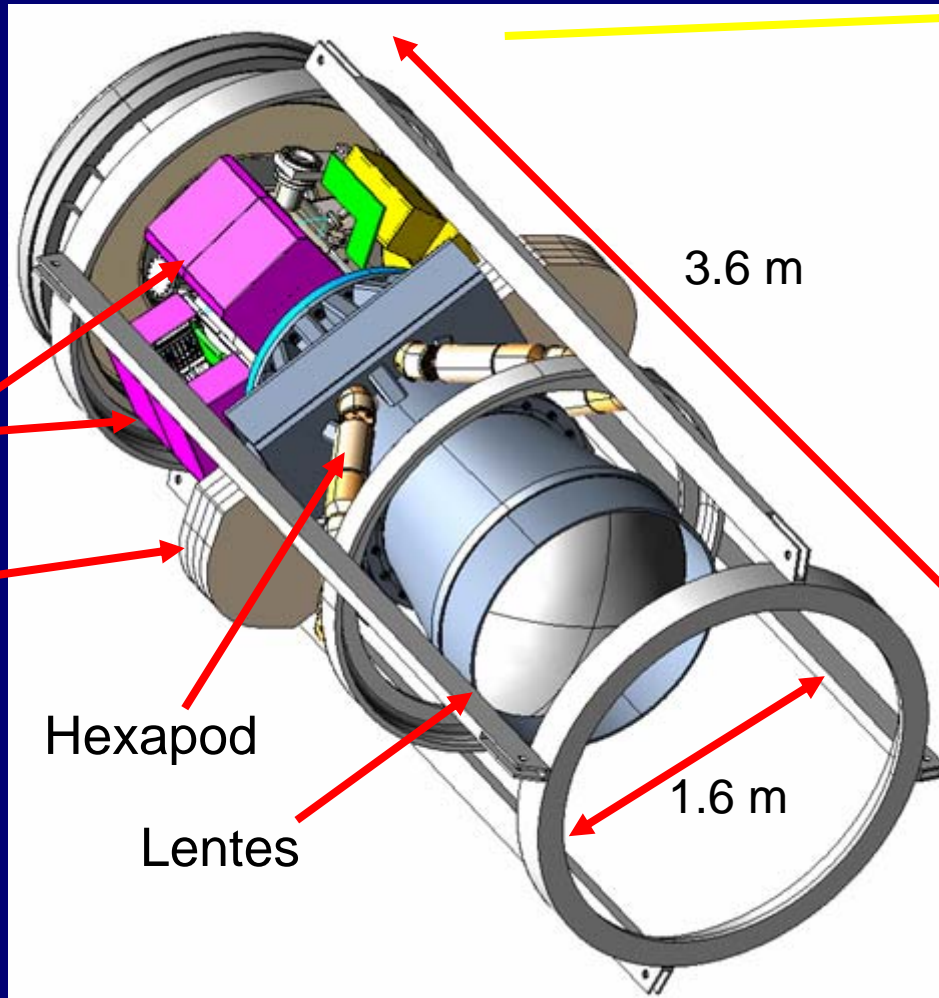
2011-2016



Telescópio Branco de 4-metros no Chile



The Dark Energy Survey DECam



Leitura para
> 70 CCDs

Controles
de filtros

Hexapod

Lentes

3.6 m

1.6 m

O projeto inclui gerenciamento de grande quantidade de dados e prevê melhorias no telescópio. 101

The Dark Energy Survey - A Colaboração



Fermilab

University of Illinois at Urbana-Champaign

University of Chicago

Lawrence Berkeley National Lab

NOAO/CTIO

DES Spain Consortium

DES United Kingdom Consortium

University of Michigan

Ohio State University

University of Pennsylvania

DES Brazil Consortium

Argonne National Laboratory

UC Santa Cruz/Stanford/SLAC



Reflexões

Somos seres feitos de cinzas de estrelas, moramos na periferia de uma galáxia situada nos arrabaldes de um superaglomerado, que por sua vez encontra-se em um canto qualquer do Universo, o qual é feito na sua maior parte, sabe-se lá do que !!!

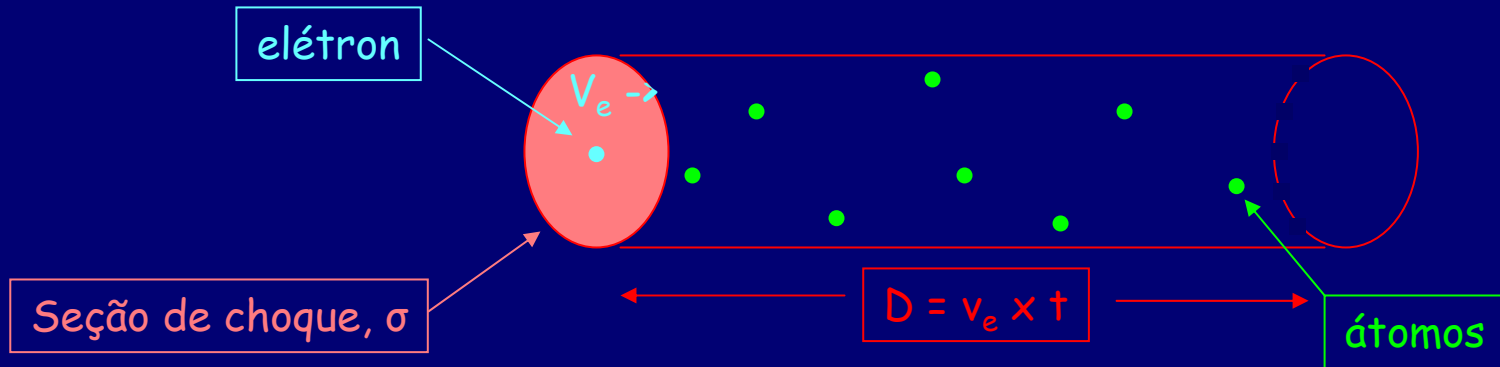
<http://staff.on.br/maia>

maia@on.br

Apêndice

Dinâmica do gás intracluster

O gás intracluster pode ser tratado como um fluido ideal, em equilíbrio hidrostático com temperatura uniforme.



O livre caminho médio de um elétron para colidir com um íon é:

$$\lambda_e = \frac{\text{dist. viajada}}{\# \text{ de colisões}} \cong \frac{v_e t}{n \sigma v_e t} \approx \frac{1}{n \sigma}$$

onde v_e = velocidade do elétron
 n = densidade numérica de íons
 t = intervalo de tempo
 σ = seção de choque colisional

Colisões fortes ocorrerão quando energia cinética do elétron é comparável à energia potencial do encontro mais próximo, b :

$$\frac{1}{2} m_e v_e^2 \approx \frac{qe}{4\pi\epsilon_0 b}$$

e = carga do elétron
 q = carga do íon
 ϵ_0 = permissividade

A seção de choque para colisões fortes pode ser escrita como:

$$\sigma \equiv \pi b^2 \approx \frac{q^2 e^2}{4\pi\epsilon_0^2 m_e^2 v_e^4}$$

A maneira mais realista para a estimativa da seção de choque, deve levar em conta tanto colisões próximas como distantes o que deve aumentá-la de um fator $\ln \Delta = b_{max} / b_{min}$.

Se o gás alcançou equilíbrio térmico temos que:

$$m_e v_e^2 \approx m_{íon} v_{íon}^2 \approx 3k_B T$$

Constante de Boltzmann

Temperatura do gás

A emissão de raios-x pelo gás intracluster esfria o mesmo em uma escala de tempo dada por:

$$t_{\text{esfriamento}} \approx 8 \times 10^{10} \left(\frac{T}{10^8 \text{ K}} \right)^{1/2} \left(\frac{n}{10^{-3} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \text{ (anos)}$$

Uma vez que o tempo para atingir o equilíbrio térmico é muito menor que o tempo de resfriamento do gás, este pode ser caracterizado por uma única temperatura tanto para elétrons como íons.

O gás intracluster responde à mudanças com uma taxa que depende da velocidade do som no meio. A velocidade do som em um gás ideal monoatômico é:

$$v_{\text{som}} \approx \sqrt{\frac{5k_B T}{3\mu m_H}}$$

μ = peso molecular médio
 m_H = massa do próton

O tempo para uma onda sonora atravessar um aglomerado de diâmetro d , é dado por:

$$t_{\text{som}} \cong \frac{d}{v_{\text{som}}} \approx 7 \times 10^8 \left(\frac{T}{10^8 \text{ K}} \right)^{-1/2} \left(\frac{d}{1 \text{ Mpc}} \right) \text{ (anos)}$$

Pelo motivo de que o $t_{\text{som}} \ll t_{\text{esfriamento}}$ o gás estará em equilíbrio hidrostático (pressão do gás = força da gravidade). Para uma distribuição de massa esférica:

$$\frac{1}{\rho_{\text{gás}}} \frac{dP}{dr} = - \frac{d\Phi}{dr} = - \frac{GM_{\text{agl}}(r)}{r^2}$$

Pelo fato do gás estar em equilíbrio hidrostático no poço de potencial do aglomerado, a sua distribuição mapeia a distribuição de massa do aglomerado. Em muitos aglomerados a distribuição tanto do gás como a das galáxias é a mesma.

$$\Sigma_{\text{gás}}(r) \propto \Sigma_{\text{gal}}(r) \propto \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-3/2} \quad (\text{projetada})$$

$$\rho_{\text{gás}}(r) \propto \rho_{\text{gal}}(r) \propto \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-1} \quad (\text{espacial})$$

com raio de caroço, $r_c \sim 100\text{-}300 \text{ kpc}$.

Fim