Das galáxias à teia cósmica

Gastão B. Lima Neto IAG/USP

Astronomia ao meio dia, 06/06/2019

SDSS + Millennium

Motivação

- A estrutura do Universo trata da distribuição de matéria no Universo como um todo.
- Estamos interessados em escalas maiores do que galáxias individuais.
- A estrutura do Universo se relaciona com a cosmologia:
 Como estas estruturas se desenvolvem?
- A estrutura do Universo afeta a forma como as galáxias evoluem.

Estrutura em grande escala no Universo

- Distribuição de massa no Universo.
- Medidas de distância extragalácticas.
- Grupos de galáxias e o Grupo Local.
- Aglomerados de galáxias.
- Superaglomerados, "muros" e vazios.
- Formação das grandes estruturas.



Distribuição de radiogaláxias na esfera celeste

Retrato do Universo com 400.000 anos

azul: + frio laranja:+quente

Flutuações de

densidade

Imagem do satélite Planck/ESA

- Mapa do céu, mostrando variações de temperatura.
- Estas variações de temperatura estão ligadas a variações de densidade.
- 400 mil anos após o Big Bang:

 $\Delta T/T \sim 10^{-5} \approx (\Delta \rho / \rho)$

Distribuição de galáxia brilhantes: Universo hoje

- Planisfério com a posição de galáxias próximas
- Cada ponto representa uma galáxia

Albe Pland - 90° G: veroi-Pinten Superminister - 90° G: veroi-Pinten Superminister - 90° G: veroi-Pinten - 90°

 Shapey Concentration/ Web - Contactus Augerstants
 "Great Attractur"/Abell 243
 "Loss Web"
 Enderse Portes Couters
 Free Polish Separation

imagem: 2MASS









Medindo distâncias extragalácticas



Universo de galáxias

Galáxias estão distribuídas por todo o Universo.

Hoje podemos detectar galáxias até redshift ~8
 ~9 Gpc, luz emitida há 12,8 bilhões de anos.

• Devido a atração gravitacional, galáxias tendem a se agrupar.

• Devido a expansão do universo, as galáxias tendem a se afastar uma das outras.

→ gravitação "vence" em escalas menores que ~ 10–20 Mpc.

Grupos de galáxias

- A maior parte das galáxias estão em grupos.
- Grupos têm entre 10^{12} M_{\odot} (poucas galáxias) e 10^{14} M_{\odot} (muitas dezenas de galáxias).









Aglomerados de Galáxias

- Massa entre $10^{14} M_{\odot}$ e ~ $10^{15} M_{\odot}$.
- Diâmetro de 10 até 16 milhões de anos-luz.
- Contêm entre centenas a milhares de galáxias.
 - Mas apenas cerca de 7% das galáxias do
 - universo estão em aglomerados.

Abell 3376, z = 0.0456; "true-color" grz DECam/Blanco/CTIO image obtida em 2014

260 kpc/h₇₀



Distribuição de massa

Composição em massa

~ 2% de estrelas (nas galáxias e no meio intra-aglomerado [luz difusa]);

- ~ 13% de plasma quente (gás intra-aglomerado);
- ~ 85% de matéria escura.

Esta receita depende da massa do aglomerado: em grupos de galáxias diminui a proporção de gás e aumenta a proporção de estrelas.

Abell 520 (*Train Wreck Cluster*): NASA, ESA, CFHT, CXO, Jee M.J. & Mahdavi A.

Matéria visível em aglomerados de galáxias

• Matéria "bariônica": a maior parte da massa está em prótons e nêutrons, que são bárions (partículas feitas de 3 quarks).



Super-aglomerados de galáxias



O Grupo Local sente sua atração gravitacional.

Laniakea: super-aglomerado local (céu imenso em havaiano)

- Detectado através do movimento das galáxias no universo local em 2014.
- As linhas correspondem ao caminho que a matéria tende a fluir, convergindo no Grande Atrator (aglomerado de Norma).



Distribuição de galáxias



- Galáxias mais brilhantes que m = 15.5, catálogo RC3, de Vaucouleurs 1991.
- Volume "observado" $\approx 150h^{-1}$ Mpc (i.e., $M^* \approx -20.5$ observado até z = 0.035).
- Dificuldade: projeção no plano do céu. Note várias concentrações de galáxias.

3^a dimensão



- Só a partir de 1985 para cada "distância" é preciso um espectro.
- Descoberta de muros (*walls*) e vazios (*voids*).
- Aglomerados aparecem com *fingers-of-god* (estruturas colapsadas e relaxadas).



3^a dimensão

- polo norte Esfera de ~ 1Gpc. celeste • Survey de Las Campanas, ~ 25.000 galáxias (1996) 2dFGRS, 221.414 galáxias com boa qualidade (06/2003)Equador celeste 180 mil galáxias dados: SDSS-DR12
 - Sloan Digital Sky Survey (SDSS): ✓ 07/2017:
 - Data Release 15, segunda etapa do SDSS-IV.
 - 1,23 bilhões de objetos, 208,5 milhões de galáxias (2.541.424 galáxias com espectro medido).

Formação de Estruturas

- Em redshift z = 1100 (recombinação e formação da radiação cósmica de fundo; t = 400 mil anos), δρ/ρ ~ 10⁻⁵.
- Em $z \sim 0$ (hoje, t = 13,7 bilhões de anos), $\delta \rho / \rho < 1$ em regiões maiores do que ~ 15 Mpc.
- Estruturas bariônicas não se formam antes da recombinação.
- Formação de estruturas

 → δρ/ρ ≫ 1, mas podemos
 tratar as pequenas
 perturbações de forma
 analítica.
- Formação de estruturas depende da composição do Universo.



Composição do Universo



- Formação de estrutura dominada pela **matéria escura**.
- Matéria escura interage apenas gravitacionalmente.
- Estrutura formada → halo de matéria escura colapsado.

Matéria escura quente

- A história de formação de estruturas depende da natureza da matéria escura.
- Dispersão de velocidade relativística quando há o desacoplamento ==> Matéria Escura "Quente".
- Melhor candidato para Matéria Escura Quente: Neutrino
 - ✓ desacopla quando universo tem 1 seg.
 - ✓ é relativístico neste momento devido a baixa massa
- Matéria escura quente implica em formação de estrutura top-down: Modelo de "panqueca" proposto por Zel'dovich (1970)
- Estruturas de grande massa (~10¹⁴--10¹⁵M_☉) colapsam primeiro
 ✓ colapso não esférico ==> panqueca
- Galáxias só se formariam por fragmentação em *z* < 5.
 ✓ Em 1970, maior *z* era ~ 3,0; em 1983, *z*_{MAX} = 3,61

Matéria escura fria (CDM)

- Partículas com baixa velocidade (<< *c*) no desacoplamento.
 - ✓ Alta massa, se estiverem em equilíbrio.
 - $\checkmark \ \Omega_{\rm M} = 1 \implies m_{\rm p} \sim 20 \ {\rm GeV} \ (massa \ do \ pr \acute{o}ton = 0,94 \ GeV).$
- **Particulas supersimétricas**, SUSY (*supersymetry*).
 - ✓ candidato preferido, neutralino, $20 < M_p < 300$ GeV.
 - partícula supersimétrica de menor massa => estável.
- Grande **esforço observacional** para se observar diretamente.
 - ✓ Detectores terrestres: Gran Sasso (Ítalia)
 - Decaimento em raios-γ (observações com EGRET, *Fermi*).
- Várias evidências astrofísicas independentes:
 - Curva de rotação de espirais, dinâmica estelar em galáxias anãs, gás intra-aglomerado, lentes gravitacionais, formação de estruturas.



"**merging tree**" cenário de formação previsto no cenário CDM (Lacey & Cole 1993).

Simulações numéricas: Origem da grandes estruturas do Universo

- **Simulação** → Solução numérica de um sistema de equações que descrevem um fenômeno físico.
- **Simulações cosmológicas**: simular um volume significativo um cubo com centenas de Mpc de lado com a melhor resolução (espacial e massa) possível.
- Representação do sistema:
 - ✓ Dividi-se o espaço em células (regulares ou não), cada célula associada a algumas propriedades físicas (densidade, potencial gravitacional, etc...).

ou

✓ O sistema é "discretizado", representado por um conjunto de *N* partículas.

"Gastrofísica": Astrofísica do gás no Universo

- Além da hidrodinâmica, os bárions tem interações complexas nos meios intra e extra-galácticos:
 - ✓ Formação e evolução estelar.
 - ✓ Estrelas massivas ou em duplas cerradas terminam a vida em eventos de supernovas → energia e "metais" voltam a componente de gás difuso.
 - Acréscimo de gás em buracos negros supermassivos e "feedback" de AGNs (jatos de partículas relativísticas).
 - Íons e elétrons interagem com campo magnético (não é modelado em SPH).
 - ✓ Física de turbulência e choque nem sempre bem reproduzida em SPH.









- Modelo: Big-bang, com matéria (30%) e energia escura (70%)
- Visualização da evolução de um pedaço do universo (B. Moore, 2001).
- Coordenadas físicas (aqui vemos a expansão do universo).
- Simula apenas matéria não colisional (matéria escura)





Illustris Simulation (www.illustris-project.org/media/). Springel +2014 O gás também é simulado.

Simulações cosmológicas



Bom acordo com as grandes estruturas observadas

Springel et al. 2006, 2014 Nature



Simulação IllustrisTNG

- Além da gravitação,
 cosmologia e
 hidrodinâmica:
 formação e feedback
 estelar, feedback de
 AGN e interação com
 campo magnético.
- Resolve galáxias com massa superior a $\sim 10^{10} M_{\odot}$.
- Galáxias e filamentos cósmicos realistas.

Pillepich A. et al. (2017, 2018) MNRAS [código AREPO] Construção de redes de galáxias (com redshift espectroscópico) usando diferentes métodos (Friend-of-friends e nearest neighbor)





- Bom acordo entre modelo e observações na distribuição de matéria em grande escala.
- Alguns problemas em escalas galácticas (satélites da do Grupo Local, distribuição radial de matéria escura).
- Natureza da matéria escura? Provavelmente não-bariônica, interação muito fraca.
- Natureza da energia escura???
- Física de bárions, o que falta?