

Astronomia Pozagalaktyczna: Wielkoskalowa Struktura Wszechświata

Szymon Kozłowski

Uniwersytet Warszawski

2022-2023

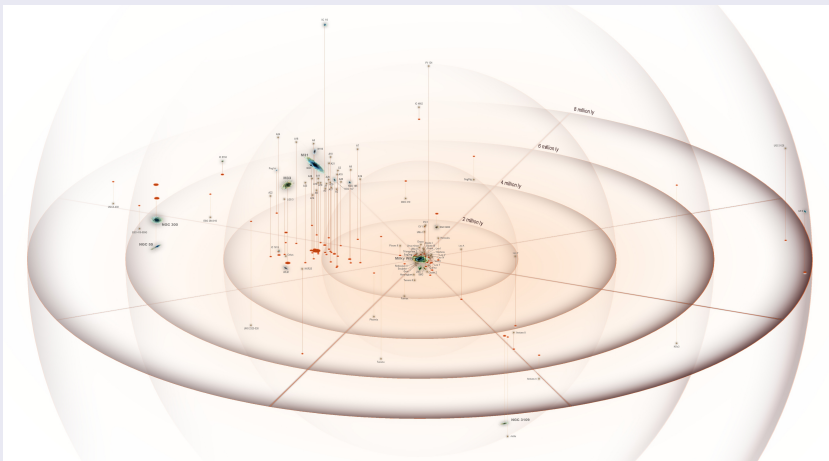


Grupa galaktyk



Grupa galaktyk – kilka/kilkanaście związanych grawitacyjnie galaktyk; $M/L \approx 200$

Grupa Lokalna



Grupa Lokalna - Droga Mleczna



Grupa Lokalna - Obłoki Magellana



LMC $D = 50$ kpc, SMC $D = 60$ kpc

Grupa Lokalna - Galaktyka Andromedy (M31)



M31 $D = 761$ kpc

Grupa Lokalna - Galaktyka Andromedy (M31)



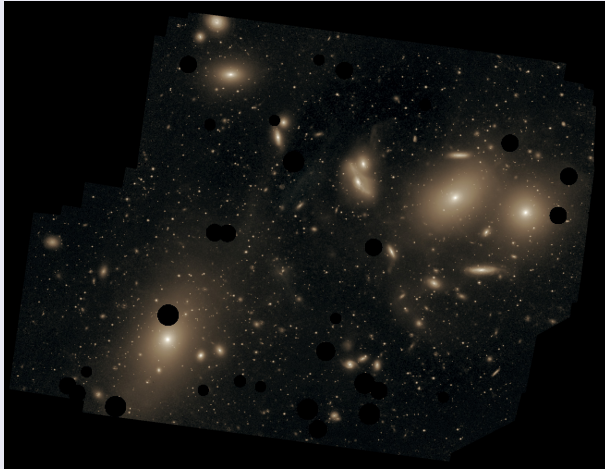
M31 $D = 761$ kpc

Grupa Lokalna - Galaktyka Trójkąta (M33)



M32 $D = 970$ kpc

Gromada Virgo (1300 galaktyk, $d = 54$ Mly)



Gromada Abell 1689 – bardzo masywna gromada ($z = 0.183$, $d = 754$ Mpc)



Gromady galaktyk

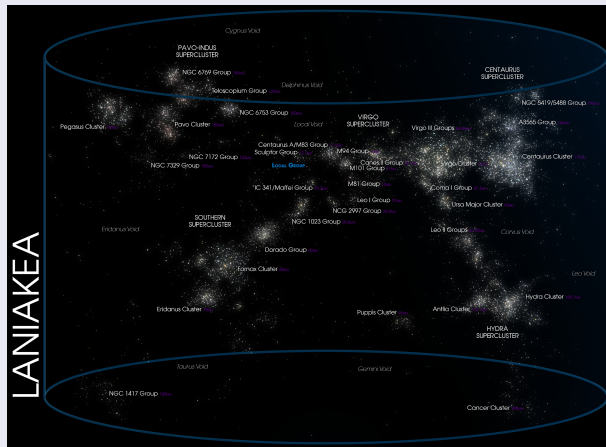
- Dla najbogatszych (skoncentrowanych, regularnych) gromad: $M/L \approx 400$.
- Skoncentrowane gromady mają 70% E+S0 +30% S; w mniej skoncentrowanych odsetek S jest wyższy.
- Gorący gaz ma metaliczność $\sim 1/2$ słonecznej, jest więc produktem ewolucji gwiazd $\rightarrow$ pochodzi z galaktyk.
- Gaz wyrzucony/wyrwany z różnych galaktyk rozgrzewa się wskutek zderzeń pomiędzy obłokami z różnych obiektów.
- Gromady z reguły są źródłami fotonów X. (Łatwiej je zaobserwować na niebie rentgenowskim niż poszukując zagęszczeń galaktyk na niebie optycznym. Tym bardziej przy dużych z). Są najjaśniejszymi stacjonarnymi źródłami fotonów X.

Gromady na falach X-ray (Chandra)

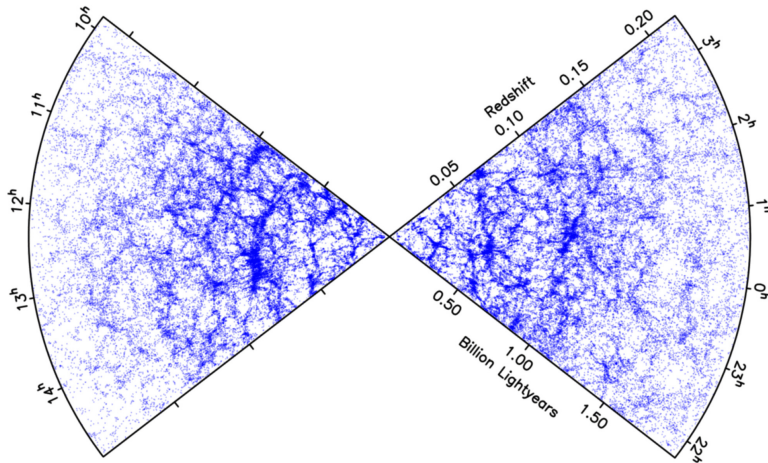


Wielkoskalowa Struktura Wszechświata

Supergromada Laniakea (10^5 galaktyk, $\phi = 500$ Mly)



Large Scale Structure (LSS)



<https://www.roe.ac.uk/~jap/2df>

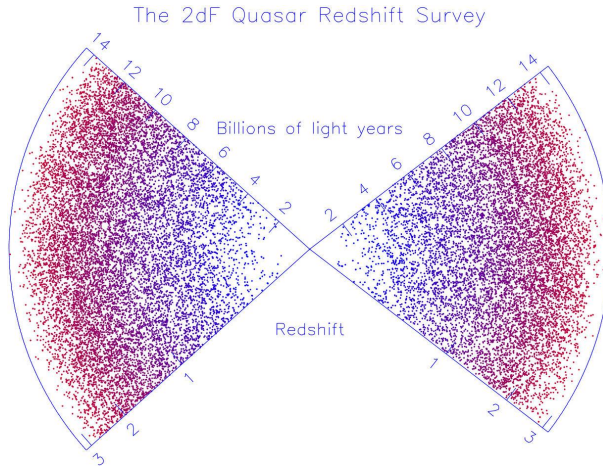
Włókna, “wąsy”, pustki

Rozkład przestrzenny to “stykające” się komórki, na których krawędziach (włóknach) znajdują się grupy galaktyk. Galaktyki nie należące do grup, ale ich bliskie są dołączane do włókien. Ale są też “wąsy” (jak służące roślinom pnącym do umocowania) — liniowe struktury wystające poza włókna oraz galaktyki w pustkach. Galaktyki w wąsach tworzą liniowe struktury, to co poza nimi, to galaktyki w pustkach.

Large Scale Structure (LSS)



Large Scale Structure (LSS)



25000+ AGN – <https://www.2dfquasar.org/>

Wielkoskalowa struktura Wszechświata

Wszechświat wokół nas jest izotropowy tylko w bardzo dużych skalach, rzędu setek Mpc. W mniejszych skalach – od galaktyk o gęstości $\sim 10^5$ do 10^6 razy większej niż średnia, po supergromady galaktyk i pustek – Wszechświat wykazuje “strukturę”.

Drobne perturbacje gęstości we wczesnym Wszechświecie rosną, tworząc obserwowaną strukturę o dużej skali.

Large Scale Structure (LSS)



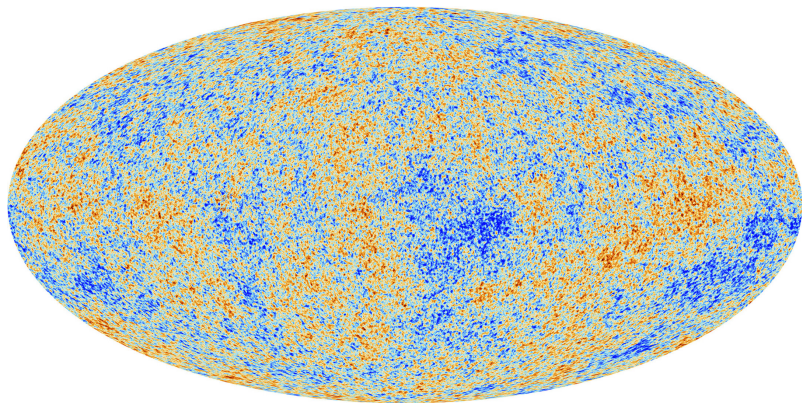
Hubble Ultra-Deep Field 2012 (galaktyki $z < 12$ – naświetlanie 22 dni)

Large Scale Structure (LSS)



Webb Deep Field 2023

Large Scale Structure (LSS)



Obraz Wszechświata dla $z \approx 1090$.

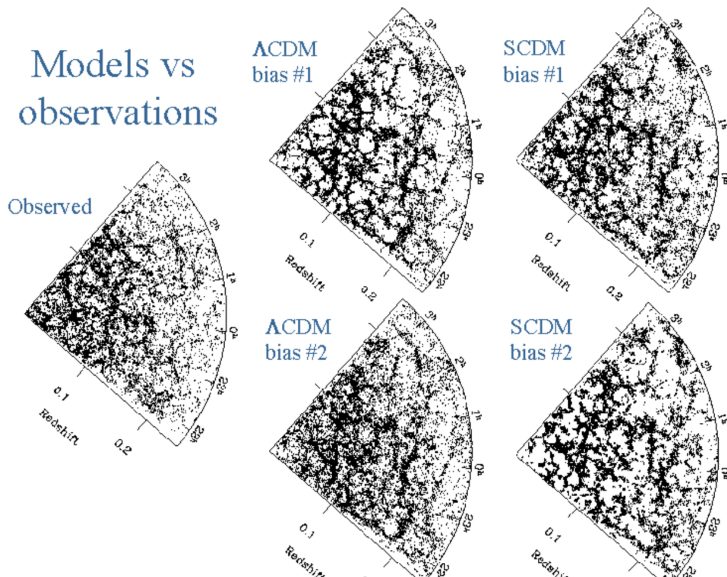
Wielkoskalowa struktura Wszechświata

Istnienie kosmologicznych struktur mówi nam coś ważnego o początkowych warunkach Wielkiego Wybuchu oraz o procesach fizycznych, które miały miejsce później.

Ogólnie rzecz biorąc, struktura będzie rozwijać się inaczej w różnych modelach kosmologicznych. Zatem ze statystycznego opisu wielkoskalowej struktury Wszechświata możemy wydedukować najlepsze wartości niektórych parametrów kosmologicznych (głównie Ω_M , Ω_b , H_0).

Large Scale Structure (LSS)

Models vs observations



Zmienność gęstości opisana może być kontrastem gęstości

$$\delta = \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}, \quad (1)$$

gdzie ρ jest gęstością w badanym obszarze, a $\bar{\rho}$ jest średnią gęstością materii.

Obszary z $\delta > 0$ są nadmiernie zagęszczone i mają tendencję do zapadania się.

Regiony z $\delta < 0$ są słabo zagęszczone i mają tendencję do mniejszego wzrostu.

Large Scale Structure (LSS)

Wczesny Wszechświat był gładki z drobnymi perturbacjami gęstości po Wielkim Wybuchu.

W nierozszerzającym się Wszechświecie obszary o nadmiernej gęstości zapadają się wykładniczo.

W rozszerzającym się Wszechświecie zapadanie się musi konkurować z ekspansją – regiony gęstsze niż wartość krytyczna zapadną się.

Large Scale Structure (LSS)

Początkowe obszary podwyższonej gęstości “wzmacniane są” przez grawitację.

Gromady galaktyk tworzą się w wyniku serii połączeń mniejszych systemów – wzrost hierarchiczny. Są największymi obiektami związanymi grawitacyjnie we Wszechświecie.

Gromady galaktyk są wrażliwe na parametry kosmologiczne i dostarczają silnych ograniczeń na testy modeli kosmologicznych.

Kiedy “obłok” się zapada?

Niestabilność, długość i masa Jeansa

Równowaga hydrostatyczna:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{G\rho M(< r)}{r^2} \quad (2)$$

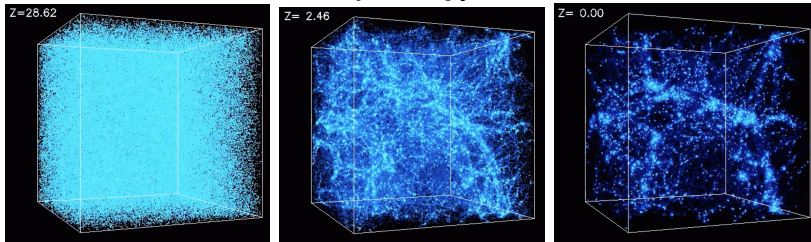
Gradient ciśnienia musi być równoważony przez siłę grawitacji, w przeciwnym razie obłok staje się niestabilny.

$$R_J = \frac{c_s}{(G\rho)^{\frac{1}{2}}} \quad M_J = \frac{\pi}{6} \frac{c_s^3}{G^{\frac{3}{2}} \rho^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

c_s - prędkość dźwięku. Jeśli rozmiar $R > R_J$ lub alternatywnie masa $M > M_J$ to obłok będzie się zapadał.

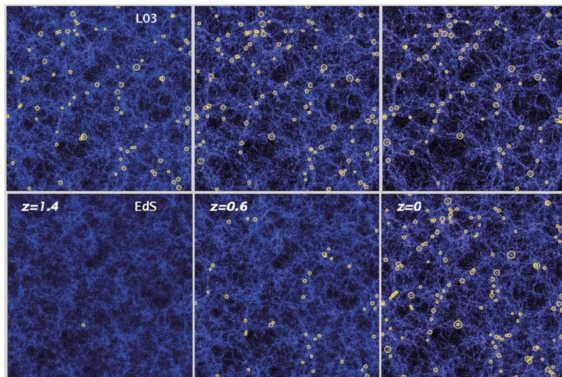
Large Scale Structure (LSS)

Można zrobić symulację Wszechświata.



Large Scale Structure (LSS)

Flat Universe
 $\Lambda=0.7$



Flat Universe
 $\Lambda=0$

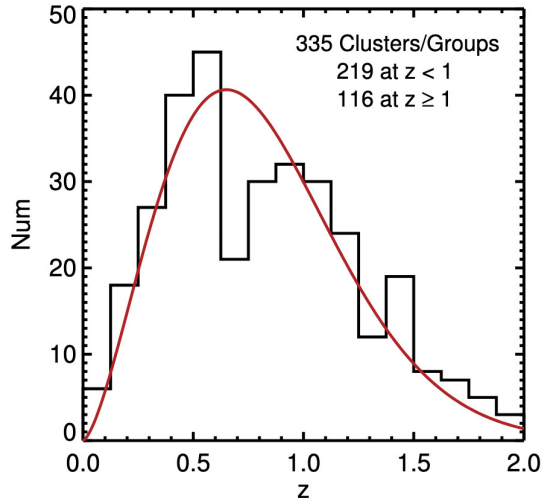
kółka – gromady (najdalsza znana gromada $z = 2.51$)

Large Scale Structure (LSS)



CL J1001+0220 – najdalsza znana gromada ($z = 2.51$)

Large Scale Structure (LSS)



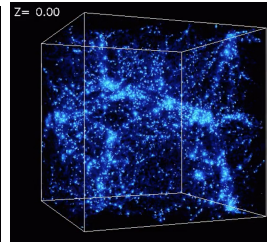
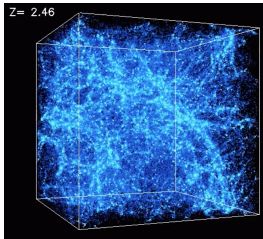
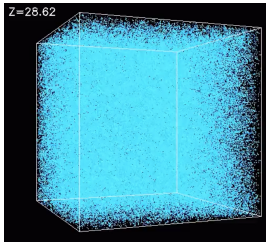
Bootes Field

The Millennium Simulation

W programie Millennium wykorzystano ponad 10 miliardów cząstek, aby prześledzić ewolucję rozkładu materii w sześciennym obszarze Wszechświata o rozmiarze boku ponad 2 miliardów lat świetlnych.

Dzięki zastosowaniu wyrafinowanych technik do 25 TB zapisanych wyników, naukowcy byli w stanie odtworzyć historię ewolucji zarówno dla około 20 milionów galaktyk, które wypełniają ten ogromny obszar, jak i dla supermasywnych czarnych dziur, które czasami zasilają kwazary. Porównując takie symulowane dane z dużymi przeglądami obserwacyjnymi, można wyjaśnić procesy fizyczne leżące u podstaw gromadzenia się prawdziwych galaktyk i czarnych dziur.

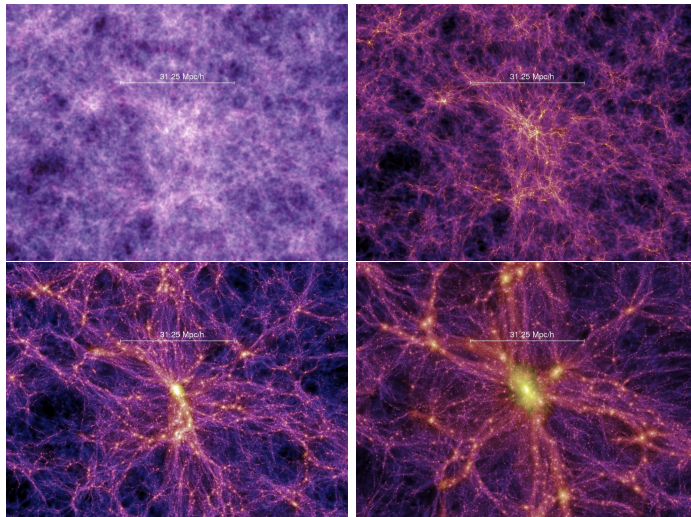
The Millennium Simulation



LINK: The Millenium Simulation on Youtube

Kosmologowie wykorzystują symulację do badania rozmieszczenia galaktyk i halo ciemnej materii w bardzo dużych skalach oraz w jaki sposób powstały najrzadsze i najbardziej masywne struktury we Wszechświecie.

The Millennium Simulation



$z = 18.3$, $z = 5.7$, $z = 1.4$ i $z = 0$

The Millennium Simulation

W 2010 roku przeprowadzono symulację „Millennium XXL” (MXXL), przy użyciu znacznie większego sześcianu (bok ma ponad 13 miliardów lat świetlnych) i 67203 cząstek, z których każda reprezentuje 7 miliardów mas Słońca. MXXL obejmuje przestrzeń kosmologiczną 216 razy większą niż sześcian symulacyjny Millennium. Symulacja została przeprowadzona na jednym z 15 najlepszych superkomputerów na świecie w 2010 roku. Wykorzystała ona ponad 12 000 rdzeni przez równowartość 300 lat czasu procesora, 30 terabajtów pamięci RAM i wygenerowała ponad 100 terabajtów danych.

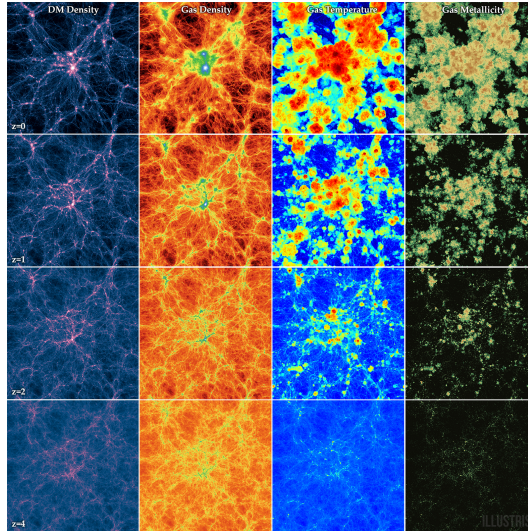
Do tej pory około 1000 opublikowanych artykułów wykorzystało dane z Millennium Run, co czyni go, przynajmniej pod tym względem, najbardziej wpływową symulacją astrofizyczną wszechczasów.

The Illustris project

Projekt Illustris obejmował wielkoskalowe kosmologiczne symulacje ewolucji wszechświata, obejmujące początkowe warunki Wielkiego Wybuchu, aż do dnia dzisiejszego, 13,8 miliarda lat później. Modelowanie, oparte na najdokładniejszych dostępnych danych i obliczeniach, porównuje się z faktycznymi odkryciami obserwowalnego Wszechświata, aby lepiej zrozumieć naturę Wszechświata, w tym formowanie się galaktyk, ciemną materię i ciemną energię.

Symulacja obejmowała wiele procesów fizycznych, które uważa się za krytyczne dla formowania się galaktyk. Obejmują one powstawanie gwiazd i późniejszy feedback w wyniku wybuchów supernowych, a także powstawanie supermasywnych czarnych dziur, zużywanie przez nie pobliskiego gazu i ich liczne tryby energetycznego feedbacku.

The Illustris project



The Illustris project



HST HUDF vs. The Illustris simulation

Problem brakujących satelitów.

Z symulacji numerycznych, które dają zgodne wyniki z różnymi obserwacjami Wszechświa, wiemy że otoczenie Drogi Mlecznej powinno posiadać około 500 małych galaktyk. Natomiast znamy ich 11. Czyli mamy “problem brakujących satelitów”.

Istnieją dwa pomysły, które mogą rozwiązać problem galaktyk karłowatych: skupiska ciemnej materii o mniejszych rozmiarach mogą nie być w stanie zgromadzić lub zatrzymać materii barionowej potrzebnej do formowania się gwiazd lub po utworzeniu galaktyki karłowate mogą zostać szybko “zjedzone” przez większe galaktyki, wokół których krążą.

Rozwiązanie: dodać bariony w symulacjach! (Brooks et al. 2013)

Problem brakujących satelitów

