

Obrnuti inženjering lokalnog Univerzuma

Edoardo Carlesi



האוניברסיטה העברית בירושלים
The Hebrew University of Jerusalem

Saradnici: Yehuda Hoffman (HU Jerusalem), G. Yepes (UA Madrid), J. Sorce and S. Gottloeber (AIP Potsdam), R.B. Tully (IFA Hawaii), H. Courtois (UCB Lyon)

Motivacija

- ▶ Simulacije N -tela i ograničene simulacije
- ▶ Algoritmi i podaci

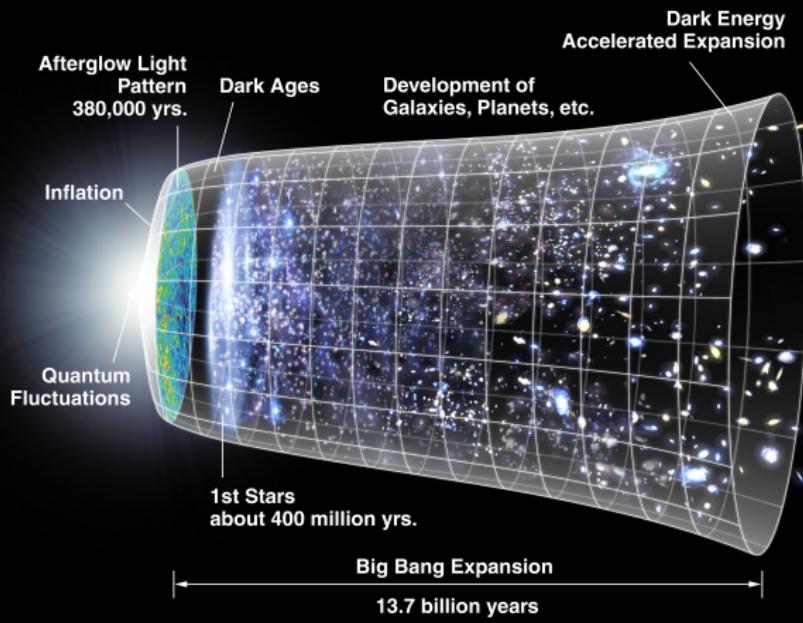
Aplikacija: Strukture u velikim razmerama

- ▶ Gustina tamne materije i superjata
- ▶ Naša *lokalna regija*: Virgo jato, filament i lokalna praznina

Lokalna Grupa

- ▶ Fabrika lokalnih grupa
- ▶ Aplikacija: v_{tan} M31-a
- ▶ Rezime i buduće istraživanje

Motivacija



Zašto izvodimo simulacije N -tela?

- ▶ Istraživanje nelinearni režim kozmoloških modela: formiranje kozmičke mreže i haloa tamne materije, sudari itd. Predviđanje i testiranje raznih teorija.
- ▶ Čestice su diskretni indikatori gustine materije $\rho(r)$ (tamne, barionske itd.), raspodeljene u određenoj kutiji; bez ikakvog specifičnog fizičkog značaja.
- ▶ Širenje pozadine + gravitacija (Λ CDM, ϕ CDM, MOND...). Ako ima barione, hidrodinamika + astrofizički procesi
- ▶ Opšta teorija relativnosti može da se zanemari

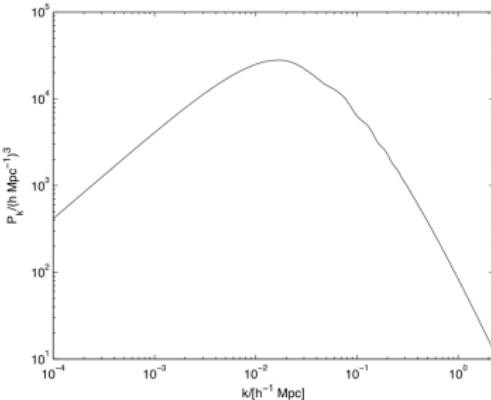
Početni uslovi: kako podeliti čestice u kutiji

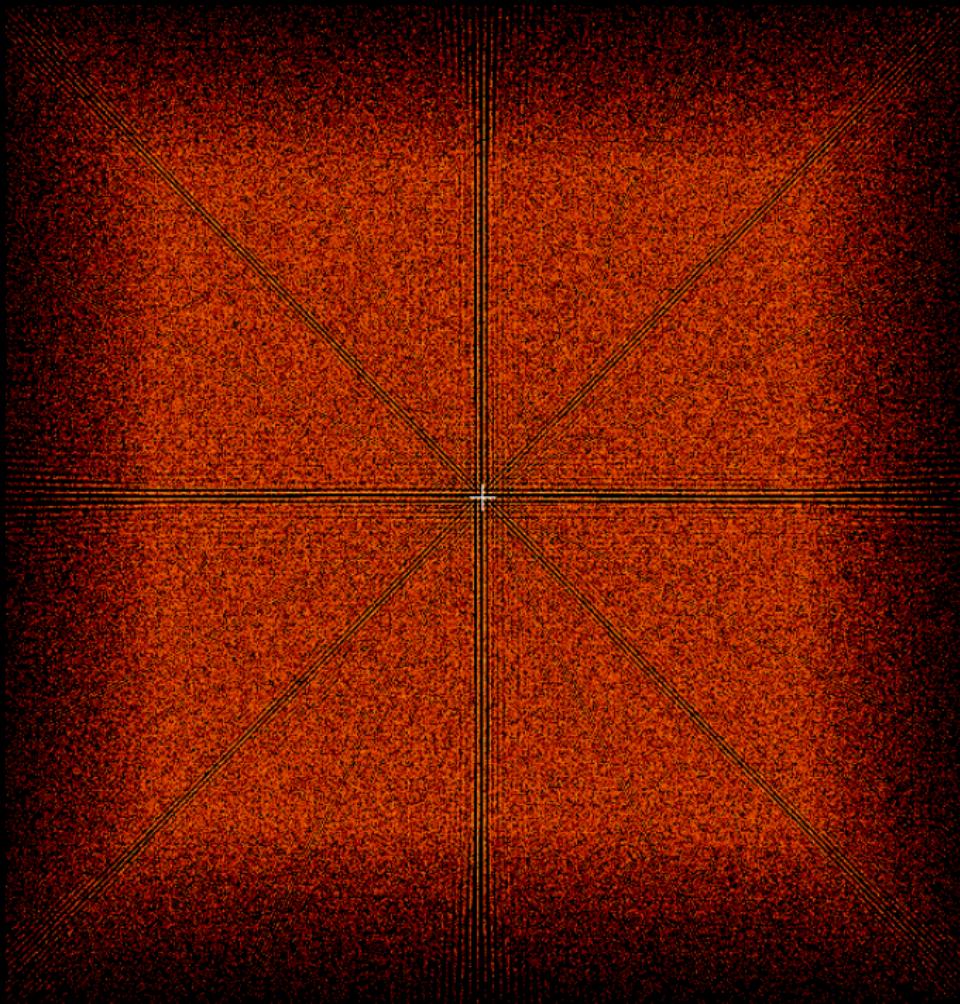
- ▶ Dovoljno veliki početni crveni pomak, dok važi teorija linearnih perturbacija
- ▶ Početna brzina: faktor raste f i $\dot{a}(t)$ (zavisno od izabranog kozmološkog modela)

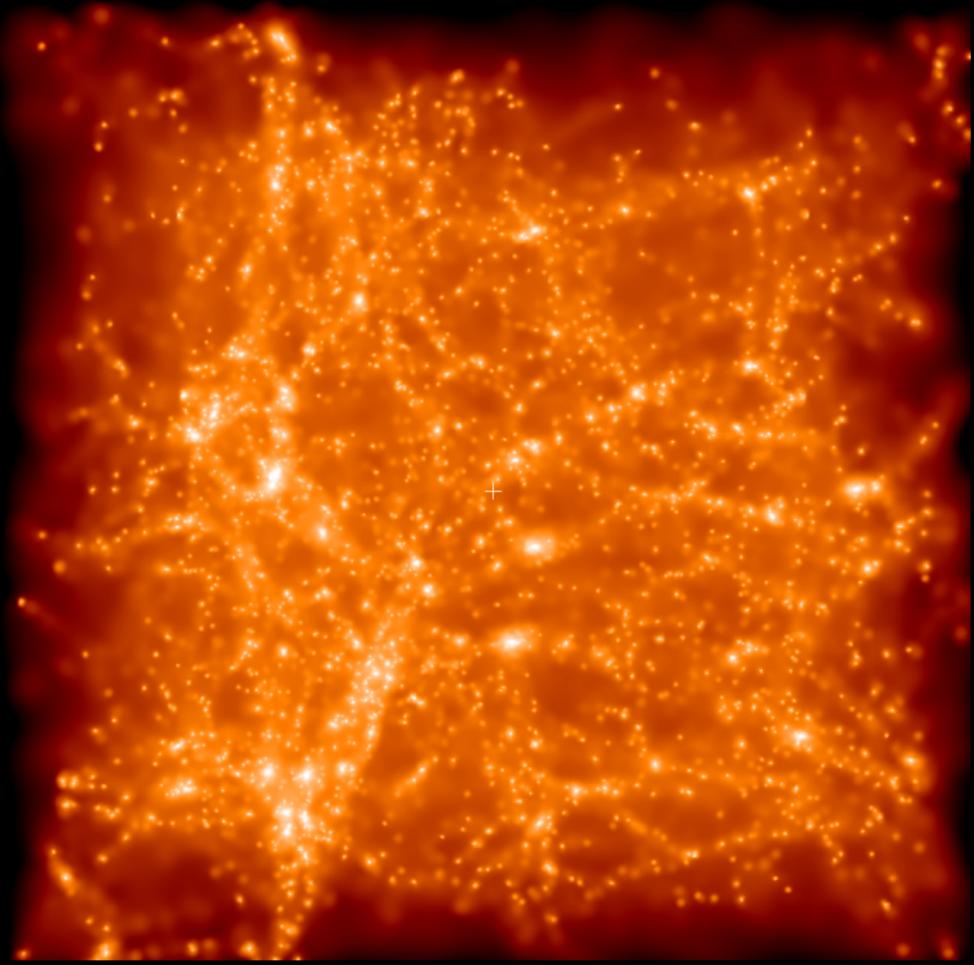
Perturbacije gustine i spektar snage:

$$\delta(x) = \frac{\rho(x) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}; \quad \delta(k) = A_k e^{i\theta_k}$$

$$P(k) \propto <\delta(k)>^2$$







CLUES: Constrained Local UniversE Simulations

- ▶ Generisanje početnih uslova, tako da $z = 0$ liči na naš lokalni Univerzum
- ▶ Lokalni Univerzum: najprecizniji posmatrački podaci, najbolje informacije o našim modelima
- ▶ Rekonstrukcija istorije lokalnog Univerzuma
- ▶ Uticaj različitih kosmoloških parametara i modela na bliske objekte
- ▶ Starije Ograničene Simulacije već u 2003, 2010
(Klypin et al. 2003; Gottlöber, Hoffman, Yepes 2010)

Novi CLUES: Podaci i metodi

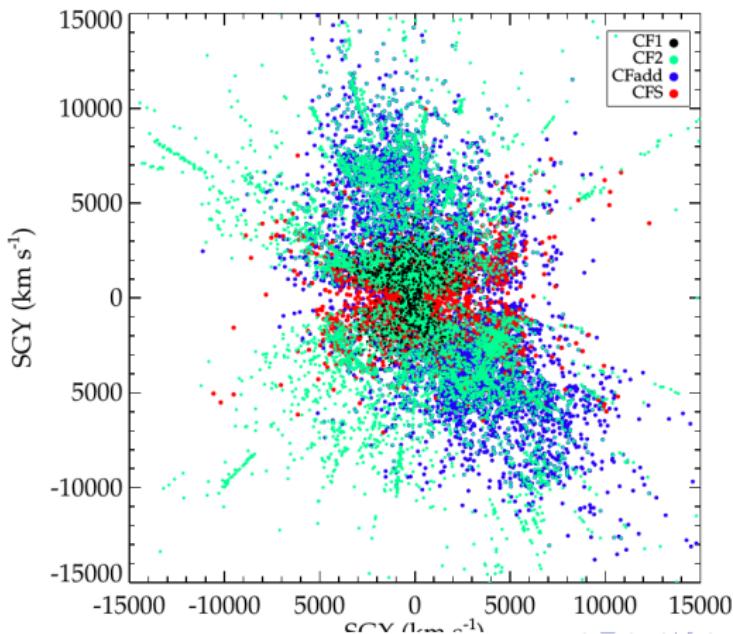
- ▶ Potrebno je koristiti linearne vrednosti da bi se pouzdano rekonstruisao trenutak iz prošlosti. Npr. uprkos obilnim podacima (galaksija, gaz itd.) $\delta(x)$ je problematična zbog bias-a i nelinearnosti.
- ▶ Pekuliarne brzine: manje podataka ali nema bias-a, linearne sve do ≈ 4 megaparsec-a.

$$-\nabla \cdot \vec{\Psi}(x) = \delta(x), \quad \vec{V}(x) = \dot{a}f\vec{\Psi}(x)$$

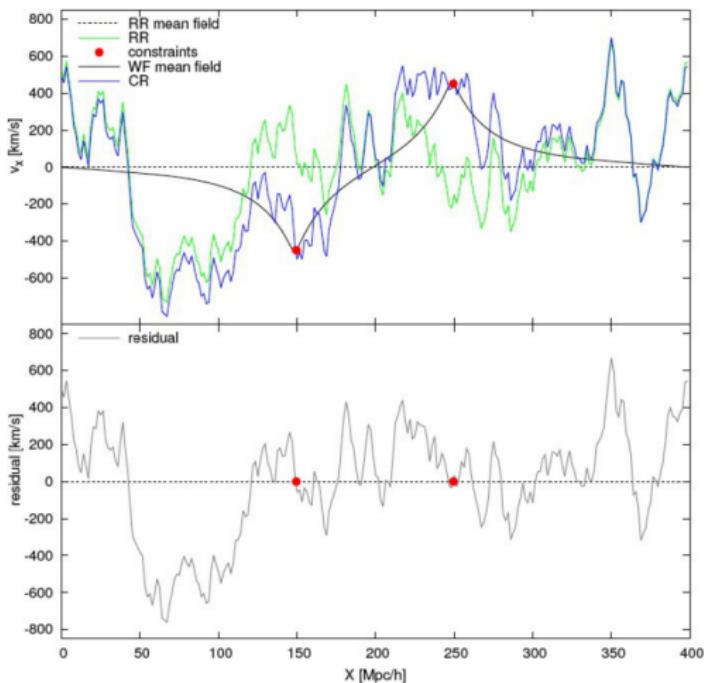
- ▶ $\vec{V}(x)$ je neprekidna funkcija koja se može rekonstruisati uz pomoć tehnike Wiener Filter-a
- ▶ Početni položaj ograničenja je izведен primenjujući Obrnutu Zeldovičevu Aproksimaciju (RZA, Reverse Zeldovich Approximation) na današnjim podacima

Podaci: Cosmic Flows 2

- ▶ ≈ 8000 pekulijarnih brzina grupa i jata
(CF2, Tully et al. 2013)
- ▶ Prosečno rastojanje $\approx 50\text{Mpc-a}$, maksimalno rastojanje
 $\approx 150\text{Mpc-a}$



Ograničena realizacija gausovog polja



(Hoffman & Ribak 1992)

Ograničene Simulacije *in a nutshell*

Uzmemо posmatračke podatke pekuliarnih brzina



Generišemo ograničene početne uslove



Izvodimo simulacije N -tela



Uporedimo s realnim Univerzumom



Ako Bog da, naučićemo nešto novo o Vasioni i objavićemo
uspešne radove

Aplikacija: Strukture u Velikim Razmerama

Strukture u velikim razmerama

Definicija:

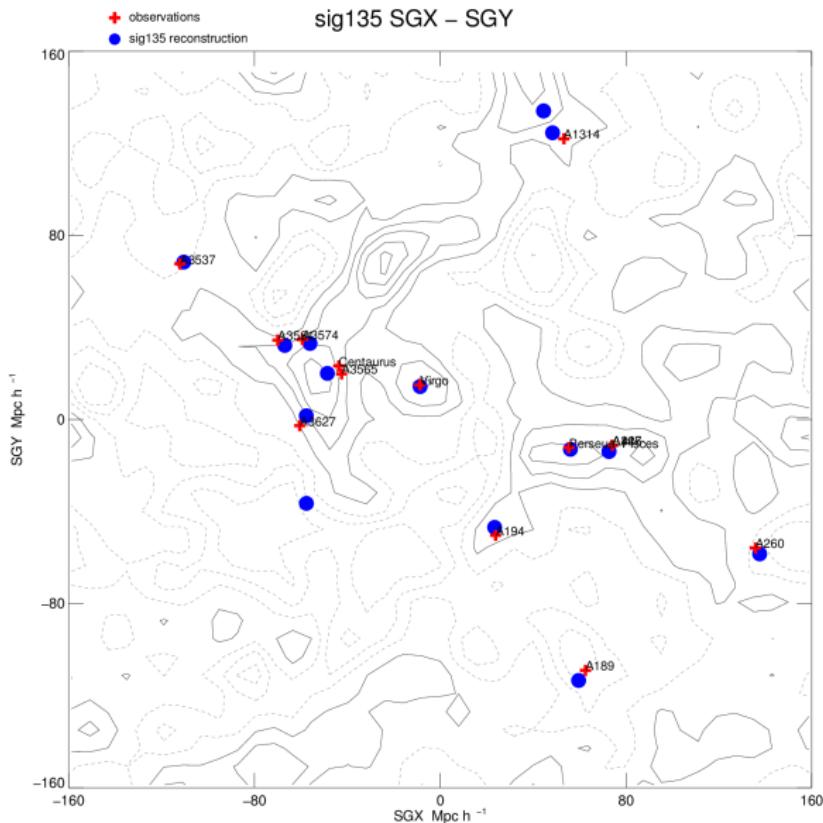
- ▶ Veličine nekoliko Mpc-a
- ▶ Praznine, filamenti, jata i super jata galaksija
- ▶ Rastojanje do ≈ 150 Mpc od nas

Ciljevi:

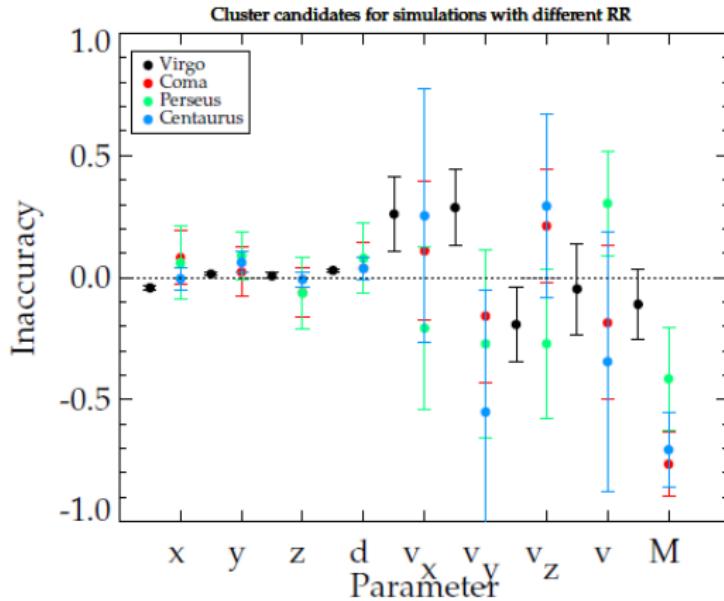
- ▶ Rekonstrukcija mase, brzine i položaja jata i superjata
- ▶ Rekonstrukcija raspodele tamne materije u prostoru
- ▶ Razvoj i rast raznih struktura

(Sorce et al. MNRAS 2015)

Rekonstrukcija mape gustine tamne materije i jata



Poređenje osobina jata



Greške su izračunate korišćenjem različitih *random seeds*

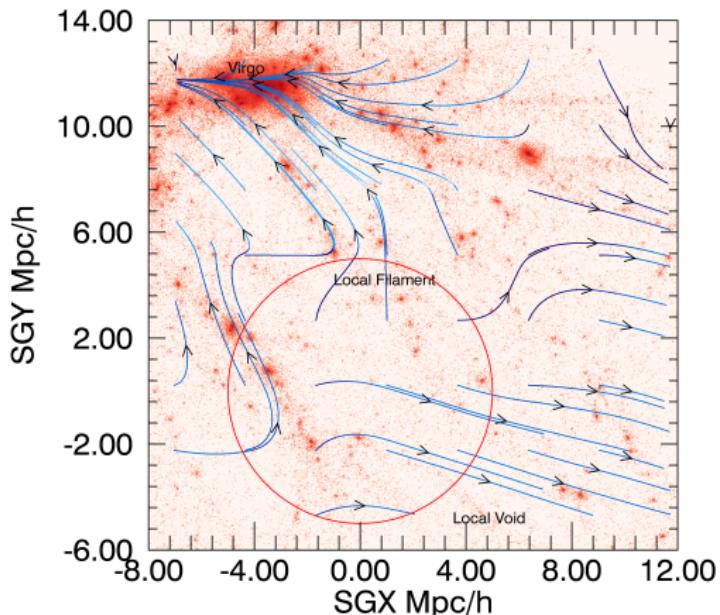
Naša lokalna regija

Najveće strukture u okolini lokalne Grupe (≈ 20 Mpc)

- ▶ Virgo Superjato
- ▶ Lokalni filament, koji povezuje Virgo i Fornax jata
- ▶ Lokalna praznina

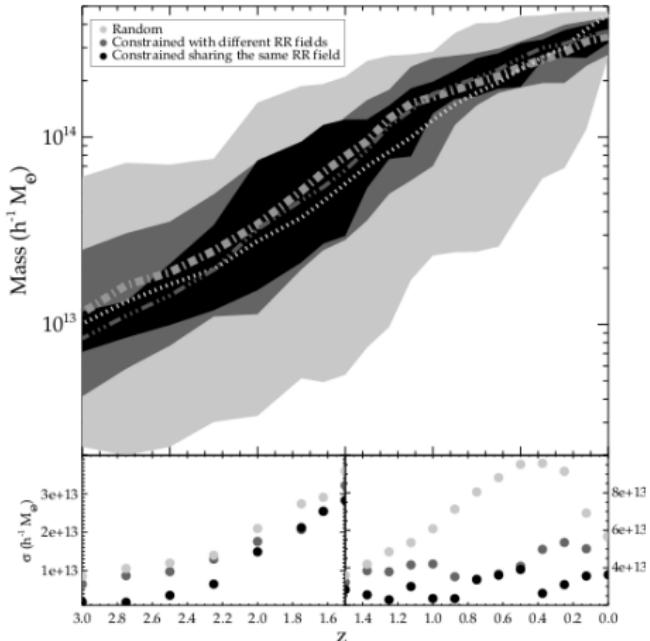
Potrebno je koristiti kutije manje veličine

Simulacije lokalne regije



Tok brzina pokazan iz našeg referentnog sistema

Virgo: istorijat uvećanja mase



- ▶ Poređenje s običnim neograničenim simulacijama pokazuje da je promena istorije uvećanja mase strogo smanjena
- ▶ Bolje ograničiti mogući trenutak poslednjeg velikog sudara

(Sorce et al. in prep.)

Aplikacija: Lokalna Grupa

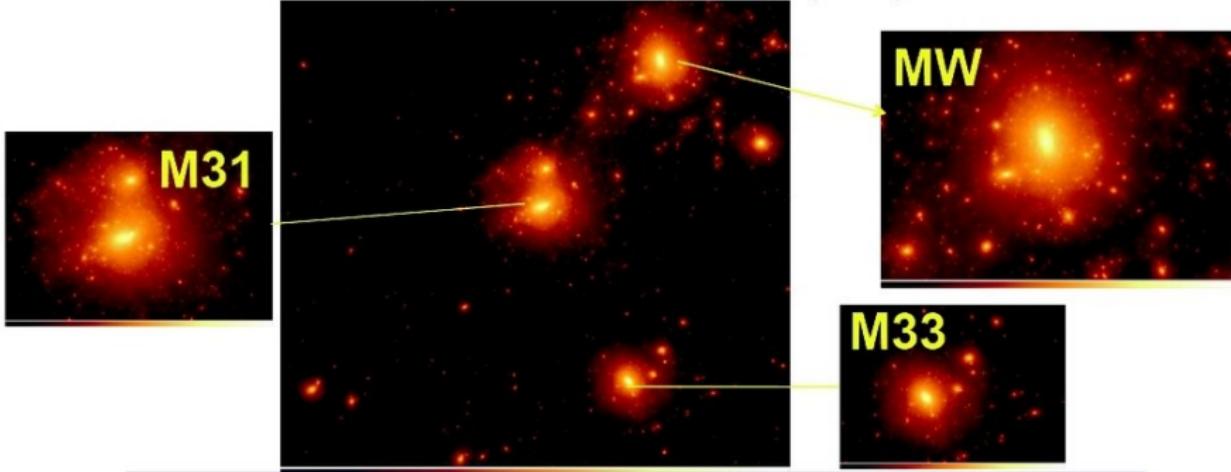
Simulacije lokalne Grupe

- ▶ Definicija LG-e: 2 izolovana haloa, mase $\approx 10^{12} h^{-1} M_{\odot}$, u lokalnoj regiji. Ostali manji haloi su zanemareni
- ▶ Obim traženja takvih objekata: sfera poluprečnika $5h^{-1} \text{Mpc}$ oko centra kutije
- ▶ Random talasi spektra snage dominiraju ispod $\approx 4 \text{ Mpc}$ -a
- ▶ Potrebno izvršiti $\mathcal{O}(10^2)$ simulacija

Lokalna grupa u starom CLUES-u

- ▶ Vrsta kosmologije: WMAP3 - WMAP5
- ▶ Bez RZA-a (Reverse Zeldovich Approximation), CF2-a (Cosmic Flows 2)
- ▶ 200 različitih random seedova, 3 kandidata za LG

The Simulated Local Group (DM)



- **The simulated Local Group in numbers:**

$$\sigma_H = 97.1 \text{ km/s} \quad (\text{within } 2 \text{ h}^{-1}\text{Mpc})$$

$$d_{\text{M31-MW}} = 0.91 \text{ h}^{-1}\text{Mpc}$$

$$V_{\text{M31-MW}} = -192.6 \text{ km/s}$$

$$d_{\text{M33-MW}} = 1.00 \text{ h}^{-1}\text{Mpc}$$

$$V_{\text{M33-MW}} = -185.1 \text{ km/s}$$

$$d_{\text{M31-M33}} = 0.56 \text{ h}^{-1}\text{Mpc}$$

$$V_{\text{M31-M33}} = -62.6 \text{ km/s}$$

distance to Virgo: $9.7 \text{ h}^{-1} \text{Mpc}$ Virgocentric flow $\sim 450 \text{ Km/s}$

$M_{\text{vir}}(M_\odot)$	$R_{\text{vir}}(\text{kpc})$	$V_{\text{max}}(\text{km/s})$
---------------------------	------------------------------	-------------------------------

M31	7.80×10^{11}	237.6	127.9
-----	-----------------------	-------	-------

Milky Way	6.30×10^{11}	221.9	130.6
-----------	-----------------------	-------	-------

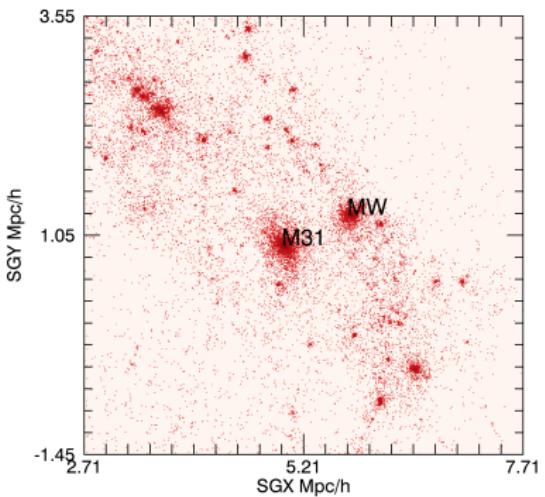
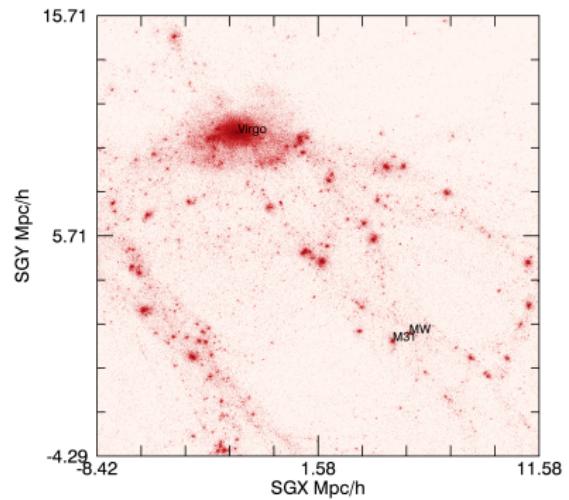
M33	3.30×10^{11}	174.2	111.8
-----	-----------------------	-------	-------

Novi CLUES: Fabrika lokalnih grupa

- ▶ Vrsta kozmologije: Planck-I
- ▶ Osobine LG-e: celokupna masa $1 - 5 \times 10^{12} h^{-1} M_{\odot}$, rastojanje $0.5 - 1.5 h^{-1} \text{Mpc}$, nalazi se na filamentu $\approx 10 h^{-1} \text{Mpc}$ od Virgo jata
- ▶ U 700 simulacija, pronađeno je 344 kandidata za LG-u
- ▶ Stopa uspeha zavisi od različitih mogućih definicija LG-e

(Carlesi et al. MNRAS 2016a)

Simulirana lokalna grupa



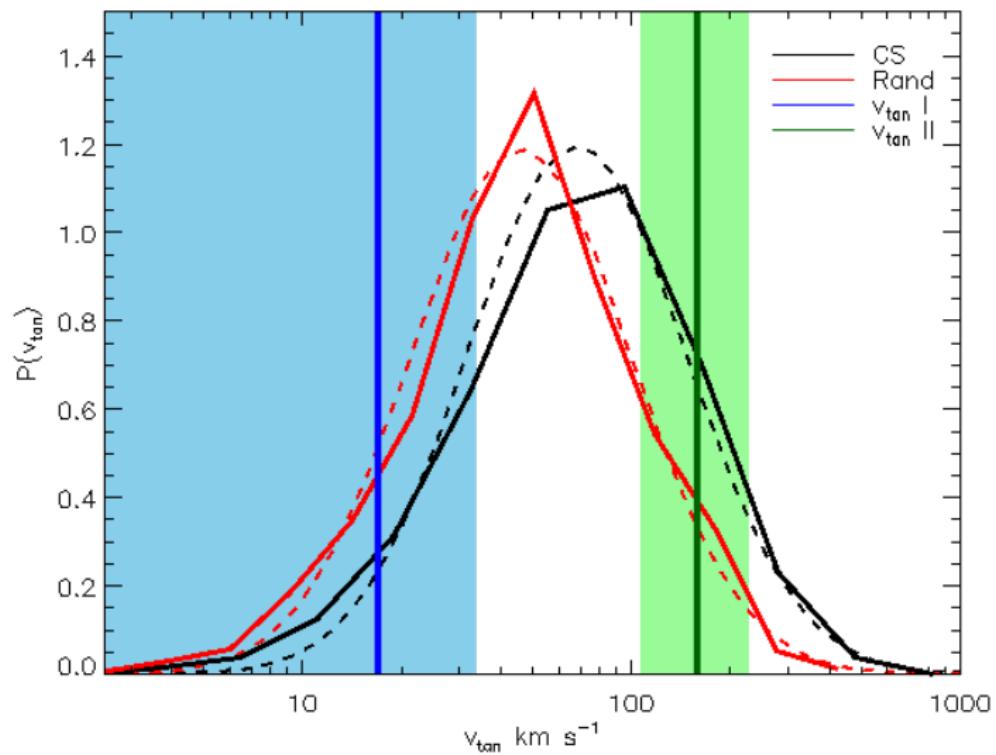
Aplikacija: v_{\tan} M31

Do danas nema jedinstvene mere Andromedine tangencijalne brzine, nego dve različite vrednosti dobijene koristeći dva različita metoda:

- ▶ $v_{\tan}^{(I)} = 17 \pm 17 \text{ km s}^{-1}$
- ▶ $v_{\tan}^{(II)} = 168 \pm 61 \text{ km s}^{-1}$

Bayes-ov pristup: koristimo mere drugih osobina (r i v_{rad}) kao priors u izgradnji grupa kandidata LG-e, dakle posmatramo posledice u *posterior*-distribuciji v_{\tan} -a za Λ CDM i Λ CDM + CF2.

Funkcija raspodele verovatnoće za v_{\tan}



Predviđanja za v_{\tan}

Svaki halo uzorak dovodi do različitih vrednosti v_{\tan} -a:

	v	$v + \sigma_v$	$v - \sigma_v$
v_{\tan}^{CS}	78	168	36
v_{\tan}^{Rand}	51	109	24

Verovatnoće $v_{\tan}^{(I)}$ -a i $v_{\tan}^{(II)}$ -a:

- ▶ CS: $P(v_{\tan}^{(I)}) = 0.14$, $P(v_{\tan}^{(II)}) = 0.29$
- ▶ Rand: $P(v_{\tan}^{(I)}) = 0.27$, $P(v_{\tan}^{(II)}) = 0.16$

- ▶ Ograničene simulacije predstavljaju moćnu metodu za reprodukciju raznih tipova posmatranih objekata
- ▶ Velike razmere: mape gustine tamne materije i superjata
- ▶ Lokalna regija: filament, praznina i Virgo
- ▶ Lokalna Grupa: predviđanja za v_{tan}

Sledeći koraci

- ▶ Istorijat povećanja mase i formiranja LG-e
- ▶ Osobine patuljastih galaksija i anizotropije u LG-i
- ▶ Crne rupe u lokalnoj grupi (sa M. Mićić i M. Smole)
- ▶ Uticaj magnetnog polja na prostiranje kosmičkog zračenja (sa N. Globus i T. Piran)
- ▶ Zavisnost $M - \sigma$ relacije od različitih tipova sredine (sa C. Lani i H. Netzer)

Hvala vam puno, ovo je kraj!