

# Prva slika črne luknje na skali njenega horizonta

Astronomska slika dneva, 1. maj 2022



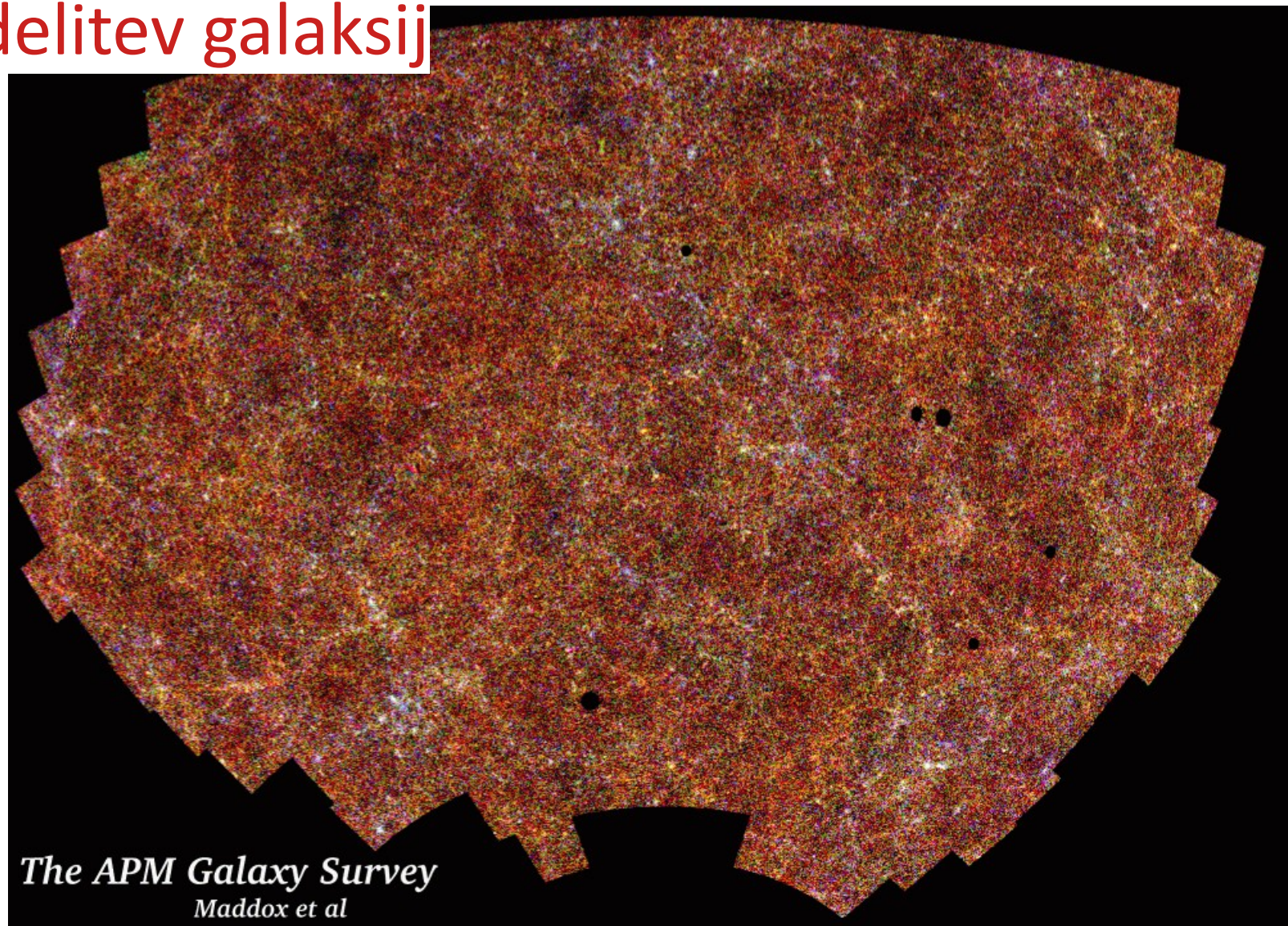
**Pojasnilo:** Kako izgleda črna luknja? Da bi ugotovili, so [radijski teleskopi širom Zemlje](#) koordinirali opazovanja [črnih lukenj](#) z največjimi znanimi [dogodkovnimi obzorji](#) na nebu. Same črne luknje so [črne barve](#), vendar za te orjaške atraktorje vemo, da jih obdaja sijoči plin. Prva objavljena slika [razloči](#) območje okoli [črne luknje](#) v središču [galaksije M87](#), na skali pod pričakovano za njen [dogodkovni horizont](#). Temno osrednje območje [na sliki](#) ni dogodkovno obzorje, ampak bolj verjetno [senca črne luknje](#) -- osrednje območje sevanja plina, potemljenega zaradi gravitacije središčne črne luknje. Velikost in obliko sence določa močno [gravitacijsko lečenje](#) svetlega plina [blizu dogodkovnega obzorja](#) in vrtenje črne luknje. Pri razločevanju [sence te črne luknje](#), je [Event Horizon Telescope \(ETH\)](#) okrepil dokaze, da [Einsteinova gravitacija](#) deluje tudi v [ekstremnih območjih](#) in obenem dal [nedvoumen dokaz](#), da ima [M87](#) središčno vrtečo se črno luknjo s približno 6 milijardami Sončevih mas. Od objave te predstavljene slike leta 2019, se je [ETH](#) razširil na [več teleskopov](#), opazoval [več črnih lukenj](#), sledil [polarizirani svetlobi](#) in si [prizadeva opazovati](#) neposredno bližino [črne luknje](#) v [središču](#) naše [galaksije Rimska cesta](#).

# Od jat galaksij do struktur na velikih skalah

Uvod

# Struktura na velikih skalah

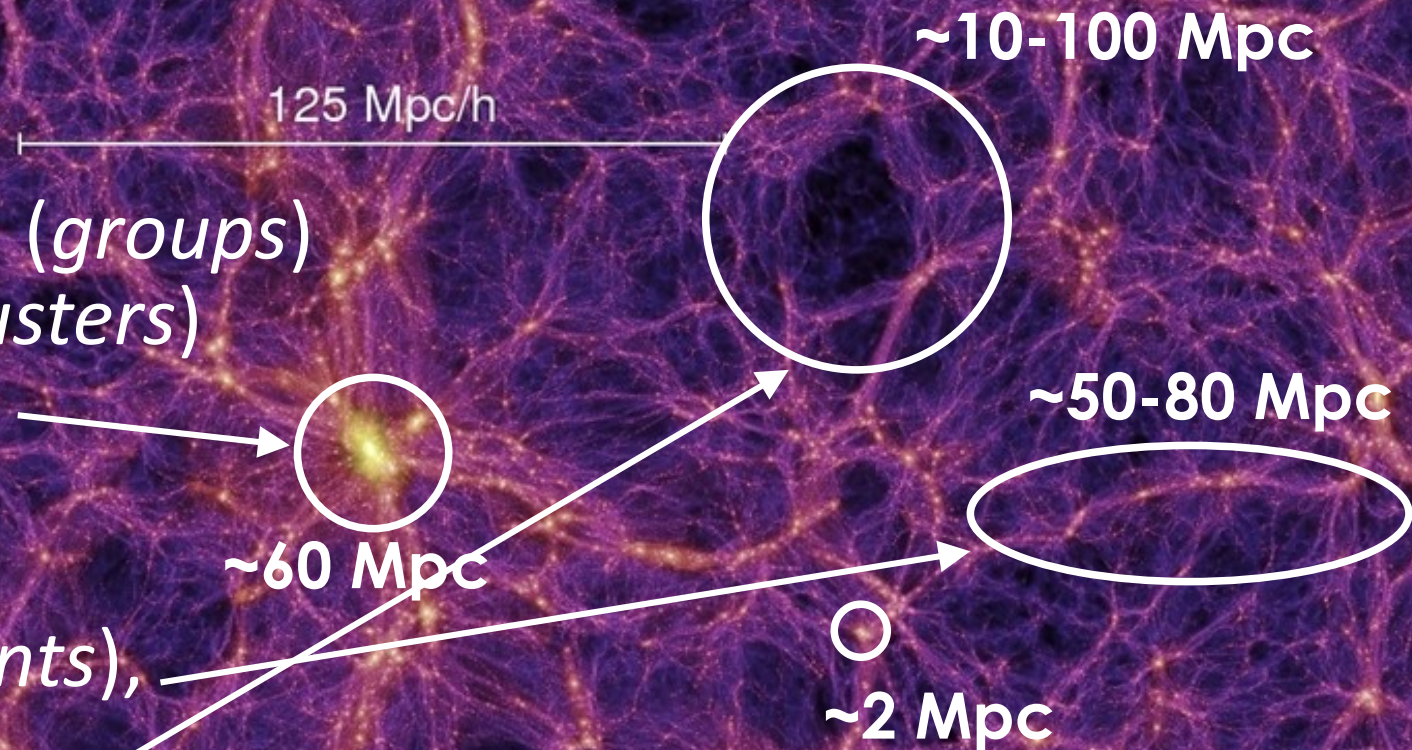
## porazdelitev galaksij



2 milijona galaksij na južnem nebu (pokriva 4000 kvadratnih stopinj)!  
avtorstvo: APM galaxy survey (Maddox et al.)

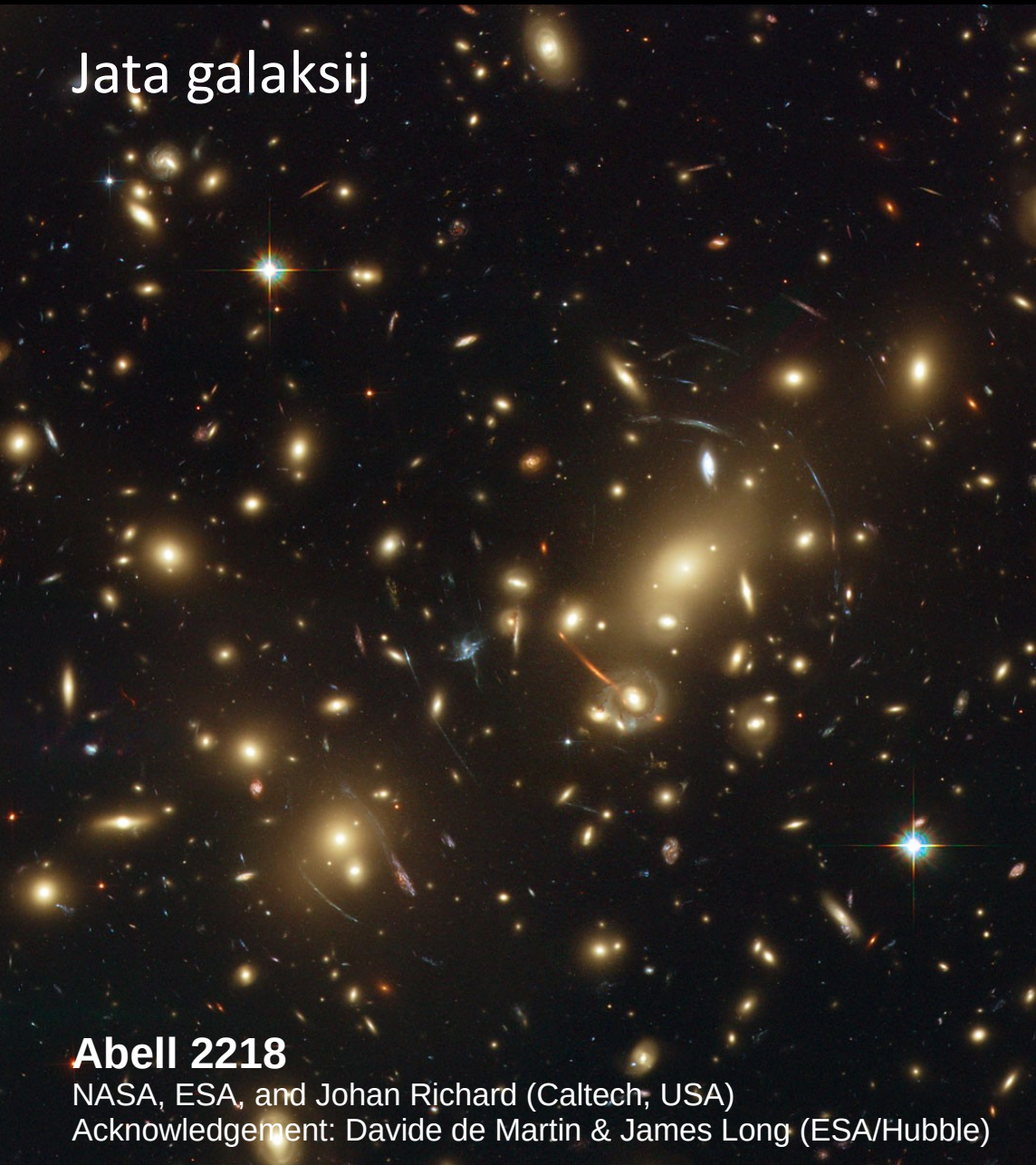
# Od skupin do kozmične mreže

- skupine galaksij (*groups*)
- jate galaksij (*clusters*)
- nadjate galaksij (*superclusters*)
- 3D mreža:  
filamenti (*filaments*),  
rjuhe (*sheets*)  
praznine (*voids*)



# Jate in skupine galaksij

Jata galaksij

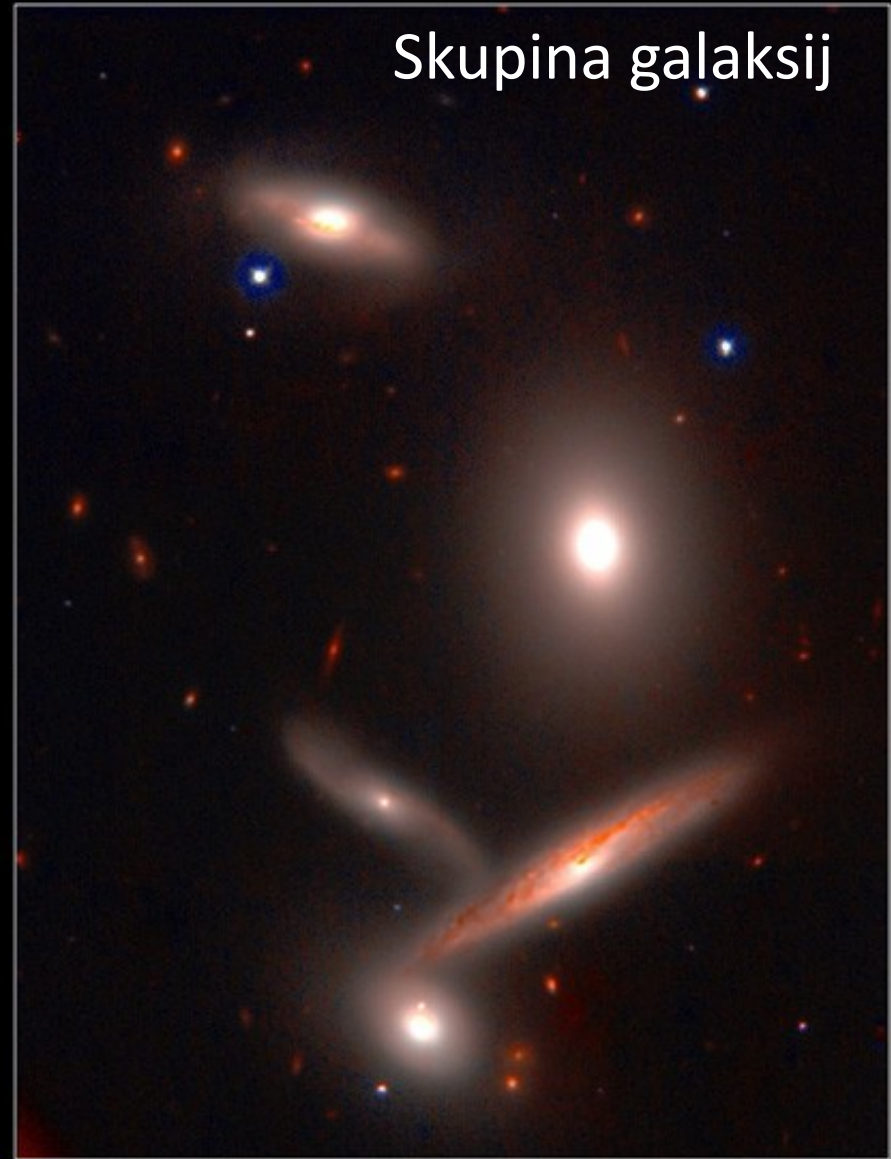


**Abell 2218**

NASA, ESA, and Johan Richard (Caltech, USA)

Acknowledgement: Davide de Martin & James Long (ESA/Hubble)

Skupina galaksij



**Hickson Compact Group 40**

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (J & K')

January 28, 1999

# Jate in skupine galaksij

Jata galaksij

Gravitacijsko vezane strukture

$N \sim 1000$

$R \sim 2 \text{ Mpc}$

$M \sim 10^{14} - 10^{15} \text{ Msun}$

**Abell 2218**

NASA, ESA, and Johan Richard (Caltech, USA)

Acknowledgement: Davide de Martin & James Long (ESA/Hubble)

Skupina galaksij

$N < 50$

$R \leq 2 \text{ Mpc}$

$M \sim 10^{13} \text{ Msun}$

**Hickson Compact Group 40**

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (J & K')

January 28, 1999



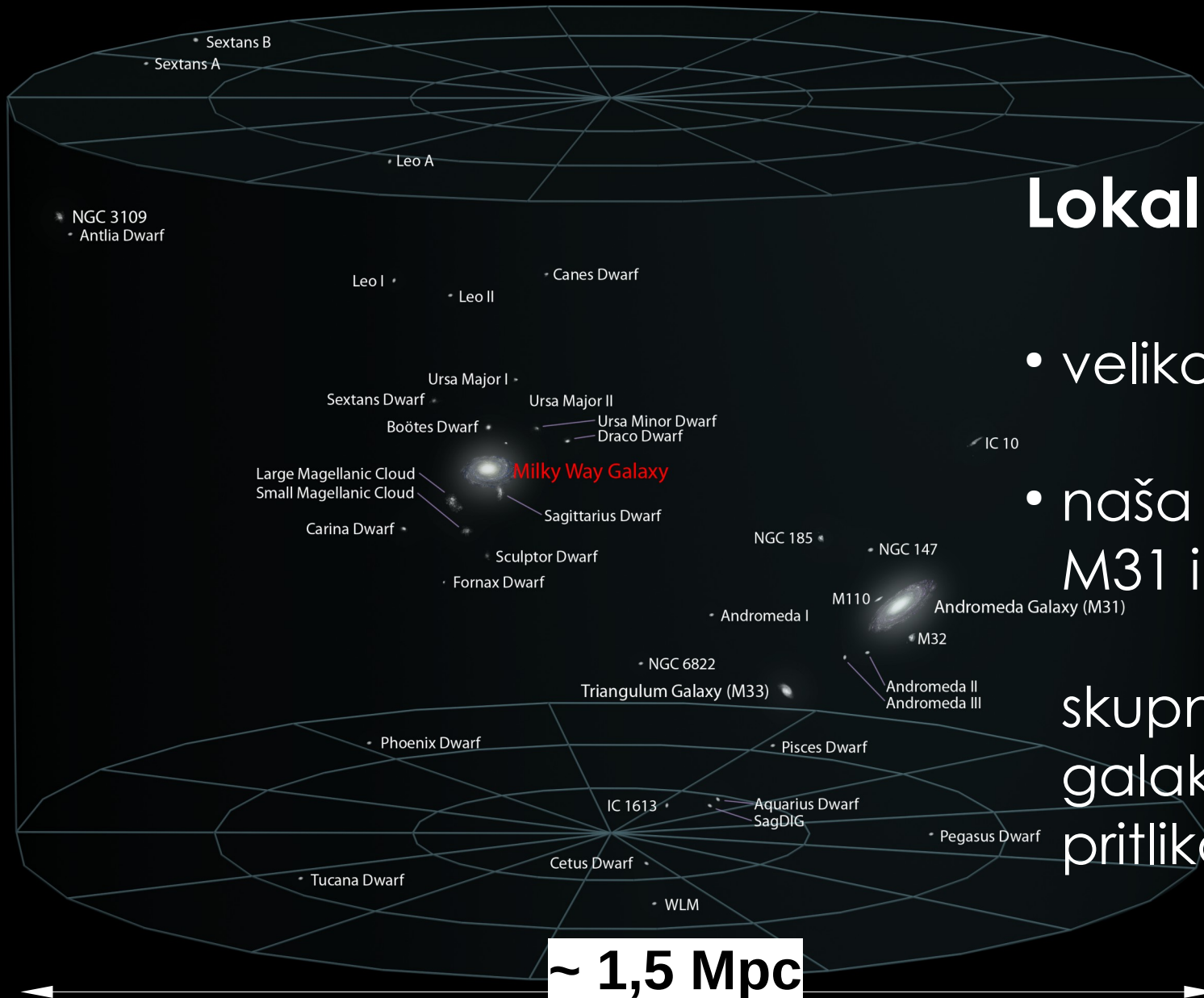
# Jate galaksij

Naše mesto v vesolju



Viri: Jones, Lambourne (Chap. 4), Longair (Chap. 4)

# Razporeditev galaksij v bližnjem vesolju



## Lokalna skupina

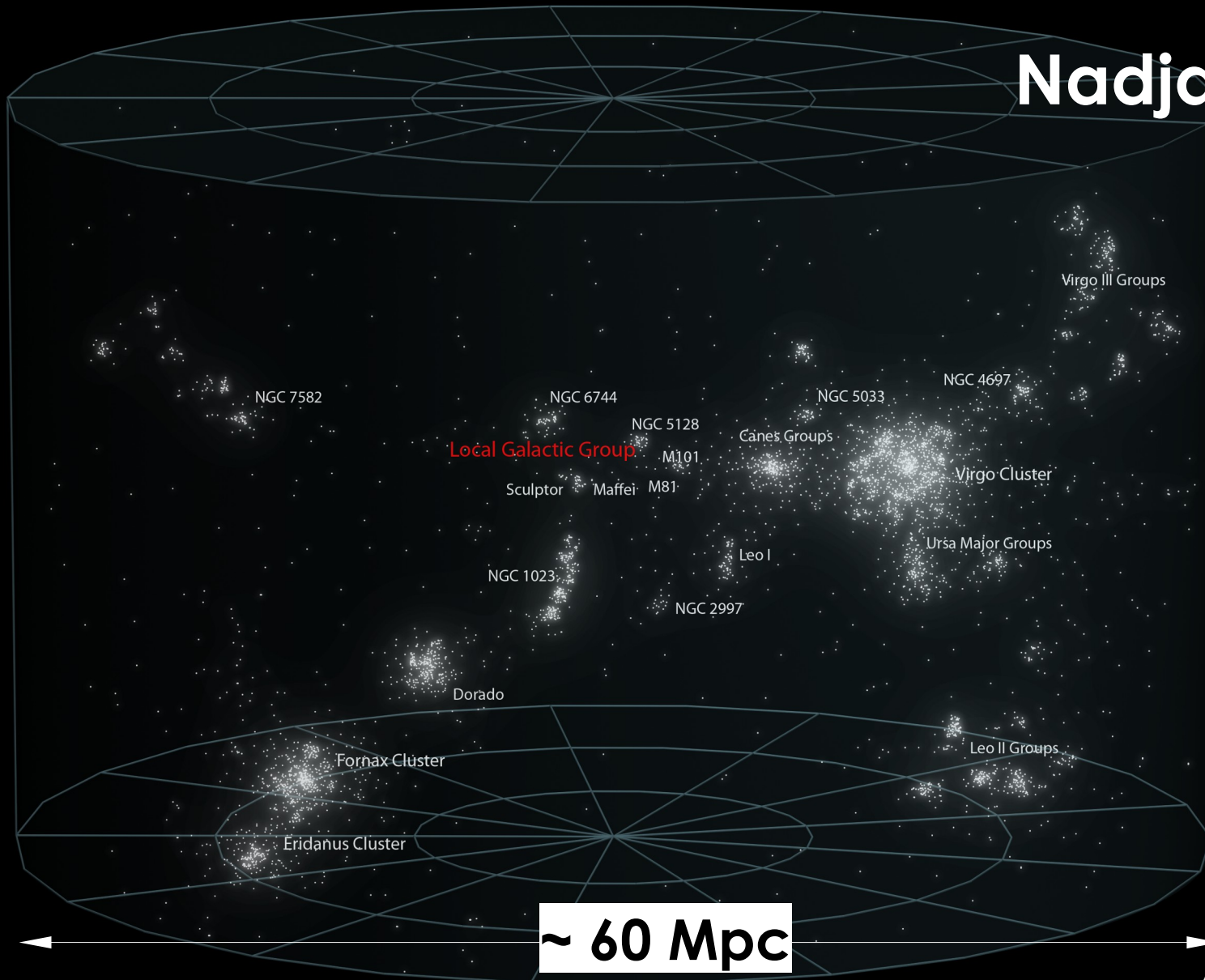
- velikost:  $< 2\text{Mpc}$

- naša Galaksija, M31 in M33

skupno  $>100$   
galaksij (predvsem  
pritlikave E. gal.)

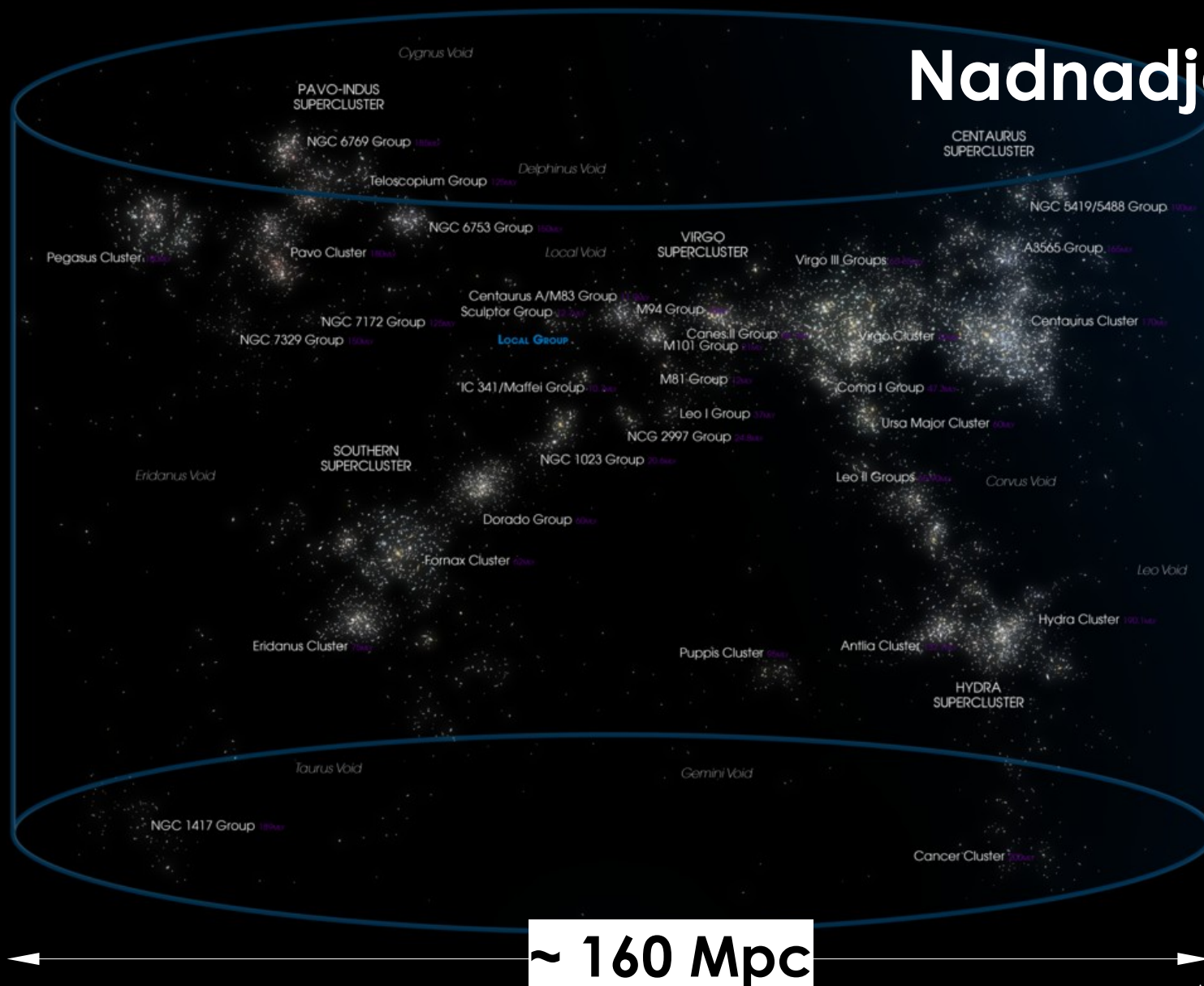
# Razporeditev galaksij v bližnjem vesolju

**Nadjata Devica**



# Razporeditev galaksij v bližnjem vesolju

## Nadnadjata Laniakea



# Jate galaksij

Osnovne lastnosti jat

# Začetek raziskovanja - katalogi

## katalog Shapley-Ames (1932)

- 1250 galaksij
- porazdelitev galaksij ni naključna



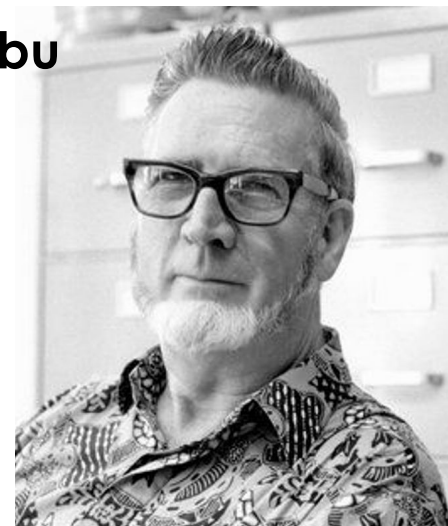
Harlow Shapley  
(1885 - 1972)

Adelaide Ames  
(1900 - 1932)



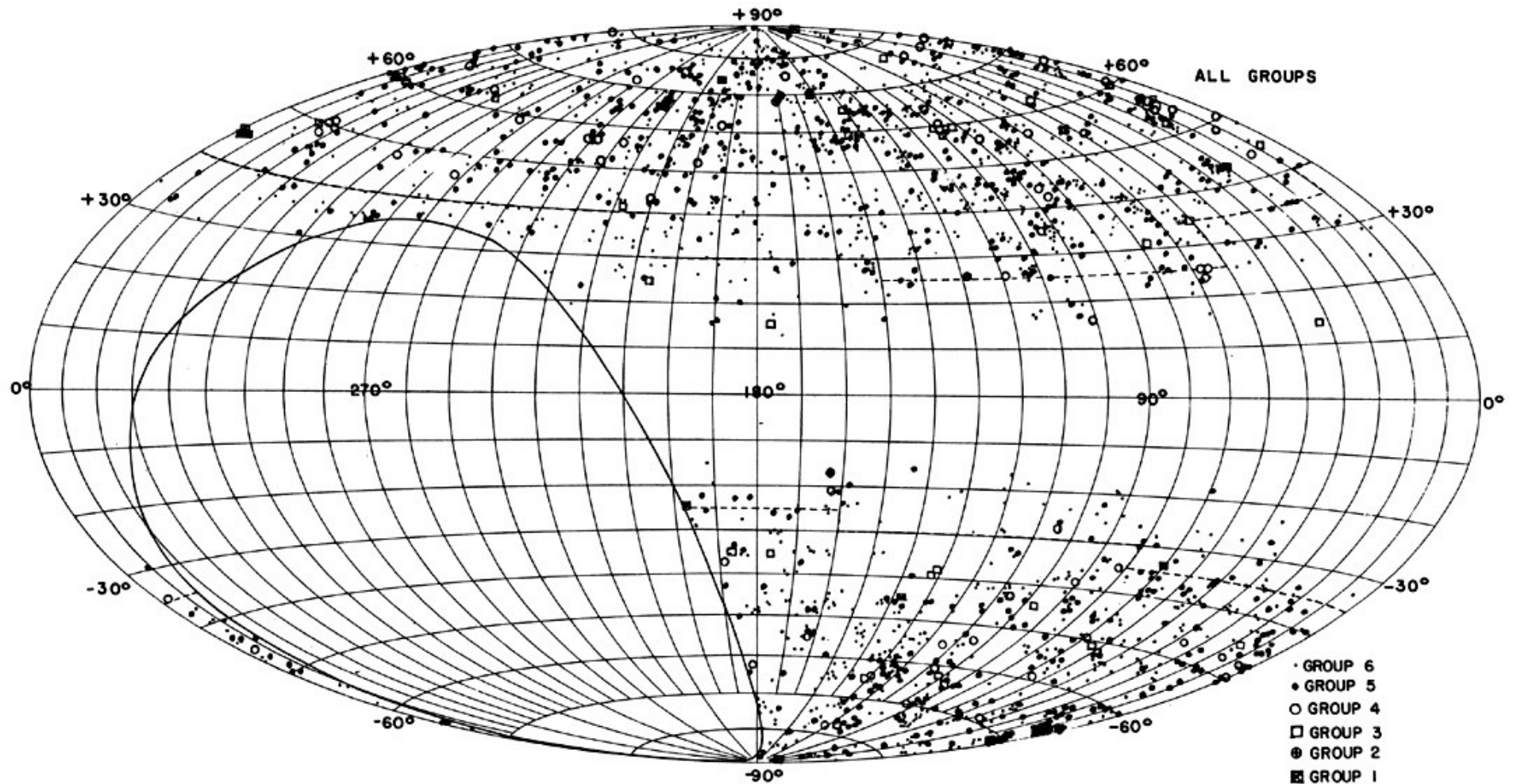
## Abellov katalog (1958)

- Mount Palomar Observatory
- fotografske plošče  $6^\circ \times 6^\circ$
- katalog 2712 jat:
  - **velik nabor**
  - **porazdelitev po nebu in po prostoru**
- osnovne lastnosti:
  - bogatost
  - oddaljenost
  - **Abellov radij  $R_A$**   
2 Mpc oz. 6.5 Mlyr
  - pravilne (sferna simetrija)/nepravilne



George Ogden Abell  
(1927 - 1983)

# Abellov katalog (1958)



Slika: zemljevid homogenega statističnega nabora jat (skupaj 1682 od 2712);  
klasifikacija po številkah od 1 do 6 glede na oddaljenost ( $z = 0,02 - 0,2$ );  
katalog pokriva 75% neba

# Osnovne lastnosti jat galaksij

- kako star je tak sistem?

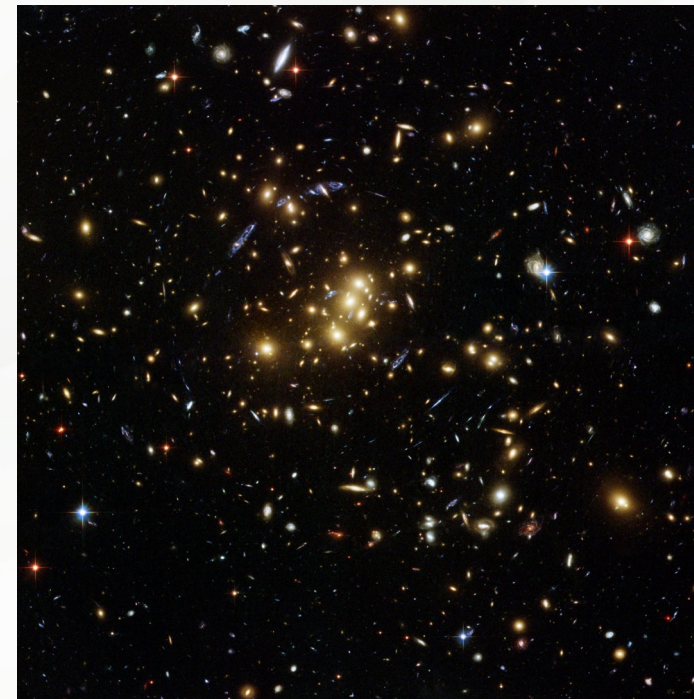
- hitrost (Doppler):  $\sigma \sim 1000 \text{ km/s}$
- čas prehoda ( $\sim 2 \cdot 10^9$  let) primerljiv s starostjo vesolja ( $t = 13,8 \cdot 10^9$  let)
- eliptične galaksije  $\rightarrow$  stara populacija zvezd

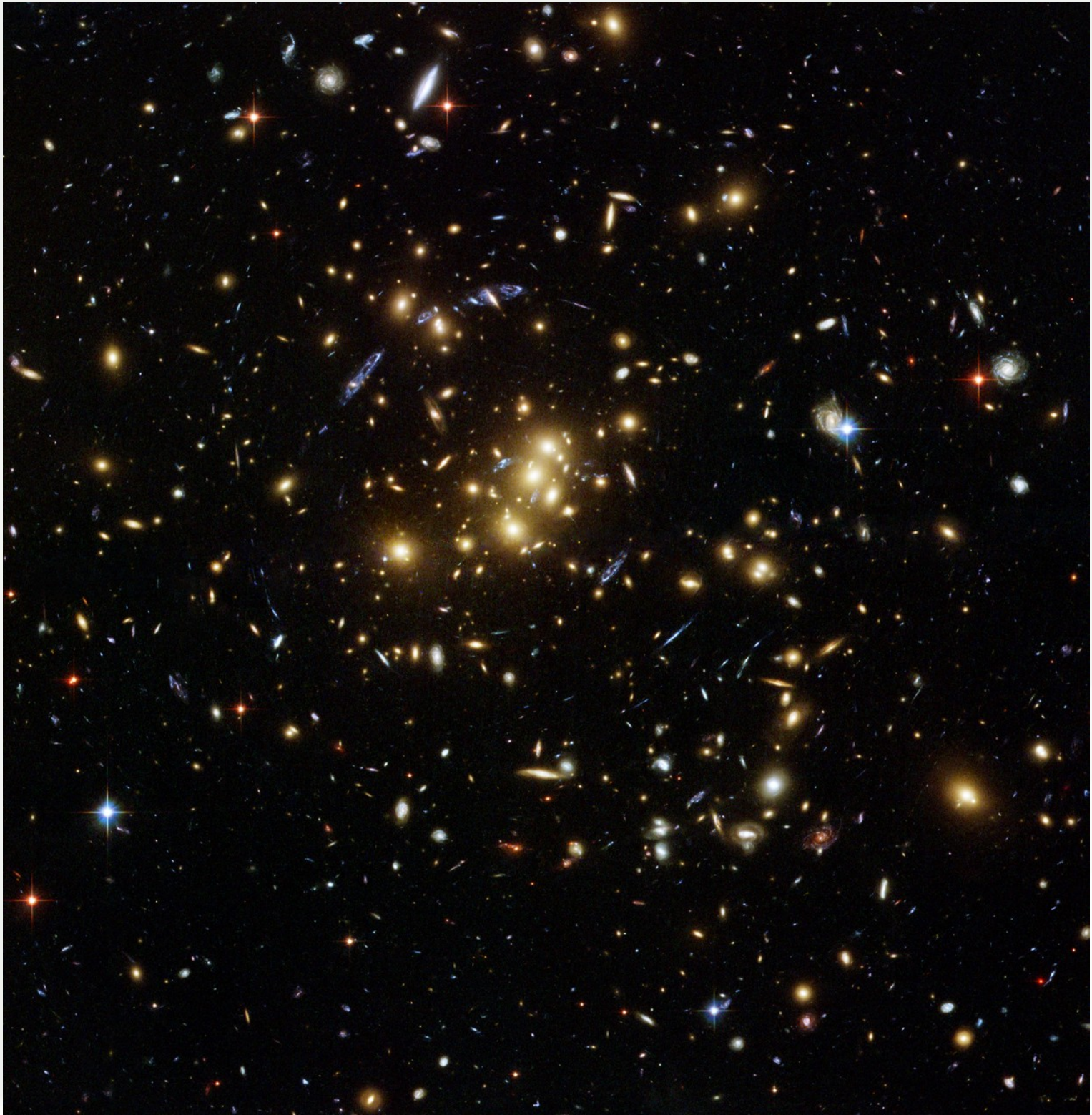
$\rightarrow$  sistem je star

- je taka struktura obstojna?

- večina galaksij je opravila nekaj orbit znotraj območja jate

$\rightarrow$  gravitacijsko vezan sistem





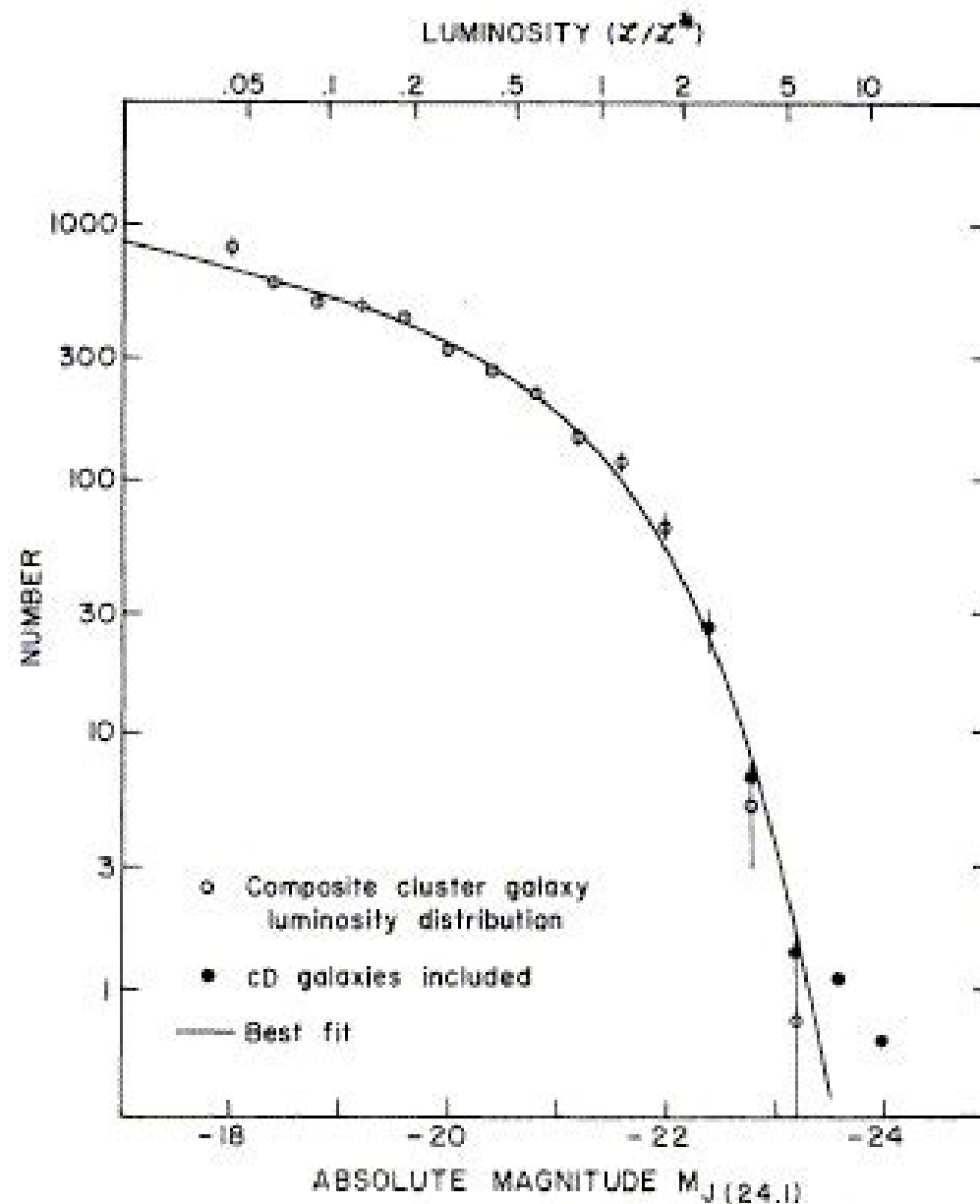
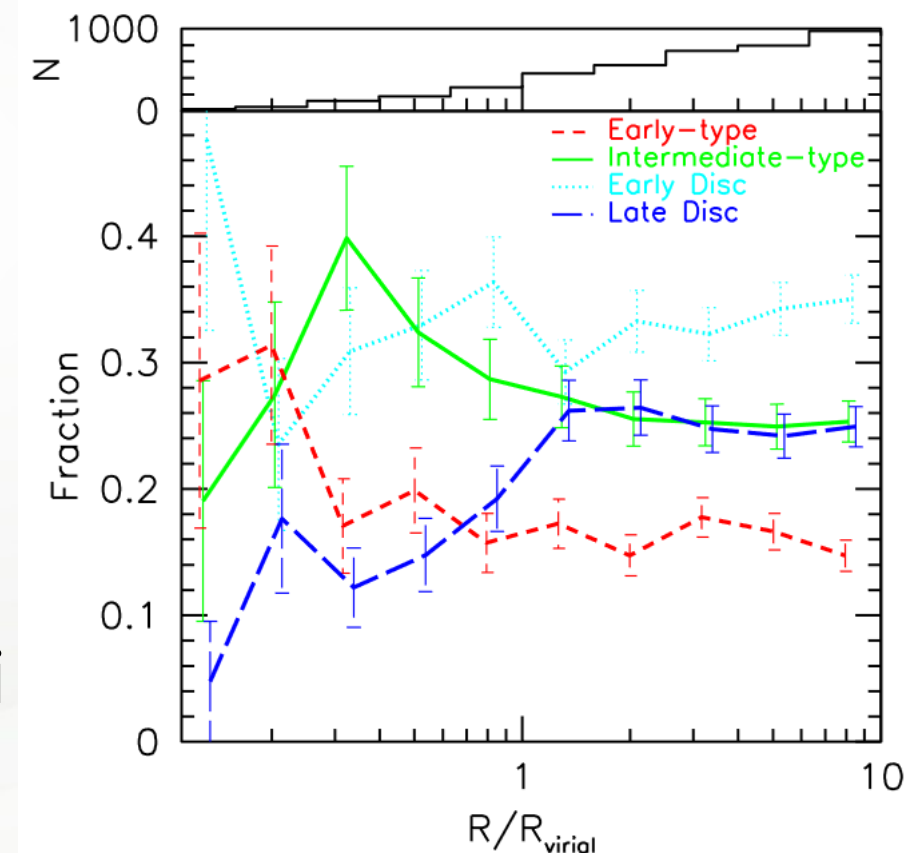


FIG. 2.—Best fit of analytic expression to observed composite cluster galaxy luminosity distribution. Filled circles show the effect of including cD galaxies in composite.

# Osnovne lastnosti jat galaksij

- **gostota galaksij**
  - v središčih večja verjetnost trčenja med galaksijami  
→ velike eliptične galaksije
- **masa jate**
  - določanje mase z raznolikimi opazovalnimi tehnikami
  - pomembna za določanje kozmoloških parametrov
  - jate kot gravitacijski teleskopi za pogled v zgodnje vesolje



# Jate galaksij

Določanje mase jat galaksij

**Viri:** Jones, Lambourne (Chap. 4), Longair (Chap. 4)

# Dinamična masa

- gravitacijsko vezan sistem  
+ sferna simetrija sistema  
+ dinamično ravnovesje

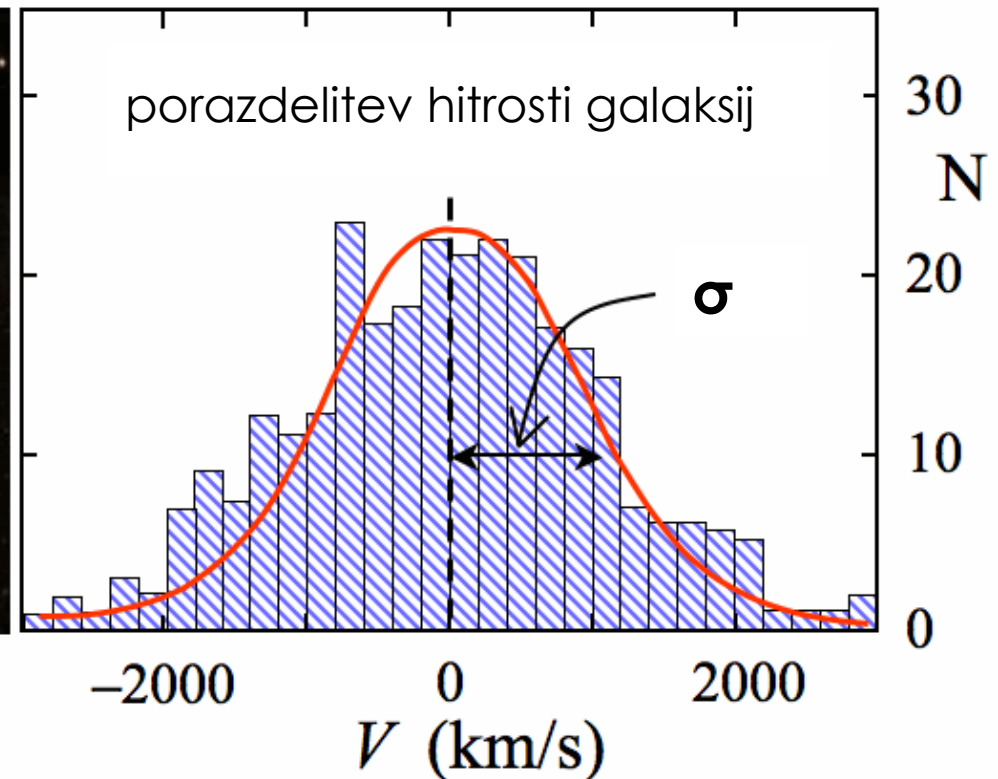
→ **VIRIALNI TEOREM**

- meritev:

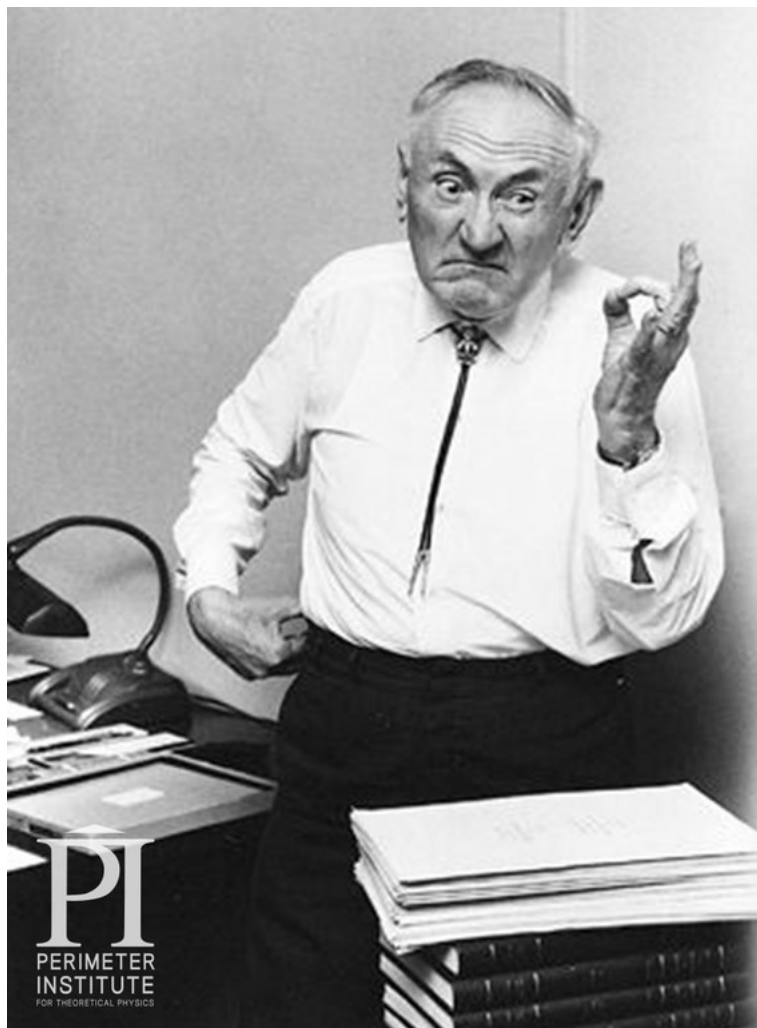
rdeči premik galaksij → disperzija hitrosti  $\sigma \sim 1000$  km/s



jata galaksij Berenikini kodri  
(osrednji del)



NB: v astronomiji imenujemo standardno deviacijo porazdelitve hitrosti kar *disperzija hitrosti*



## Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln

von F. Zwicky.

(16. II. 33.)

*Inhaltsangabe.* Diese Arbeit gibt eine Darstellung der wesentlichsten Merkmale extragalaktischer Nebel, sowie der Methoden, welche zur Erforschung derselben gedient haben. Insbesondere wird die sog. Rotverschiebung extragalaktischer Nebel eingehend diskutiert. Verschiedene Theorien, welche zur Erklärung dieses wichtigen Phänomens aufgestellt worden sind, werden kurz besprochen. Schliesslich wird angedeutet, inwiefern die Rotverschiebung für das Studium der durchdringenden Strahlung von Wichtigkeit zu werden verspricht.

### § 1. Einleitung.

Es ist schon seit langer Zeit bekannt, dass es im Weltraum gewisse Objekte gibt, welche, wenn mit kleinen Teleskopen beob-

Članek iz leta 1933 objavljen v reviji  
Helvetica Physica Acta

Rotverschiebung extragalaktischer Nebel.

125

$$M_{\text{jate}} \sim 2,2 \cdot 10^{15} M_s$$

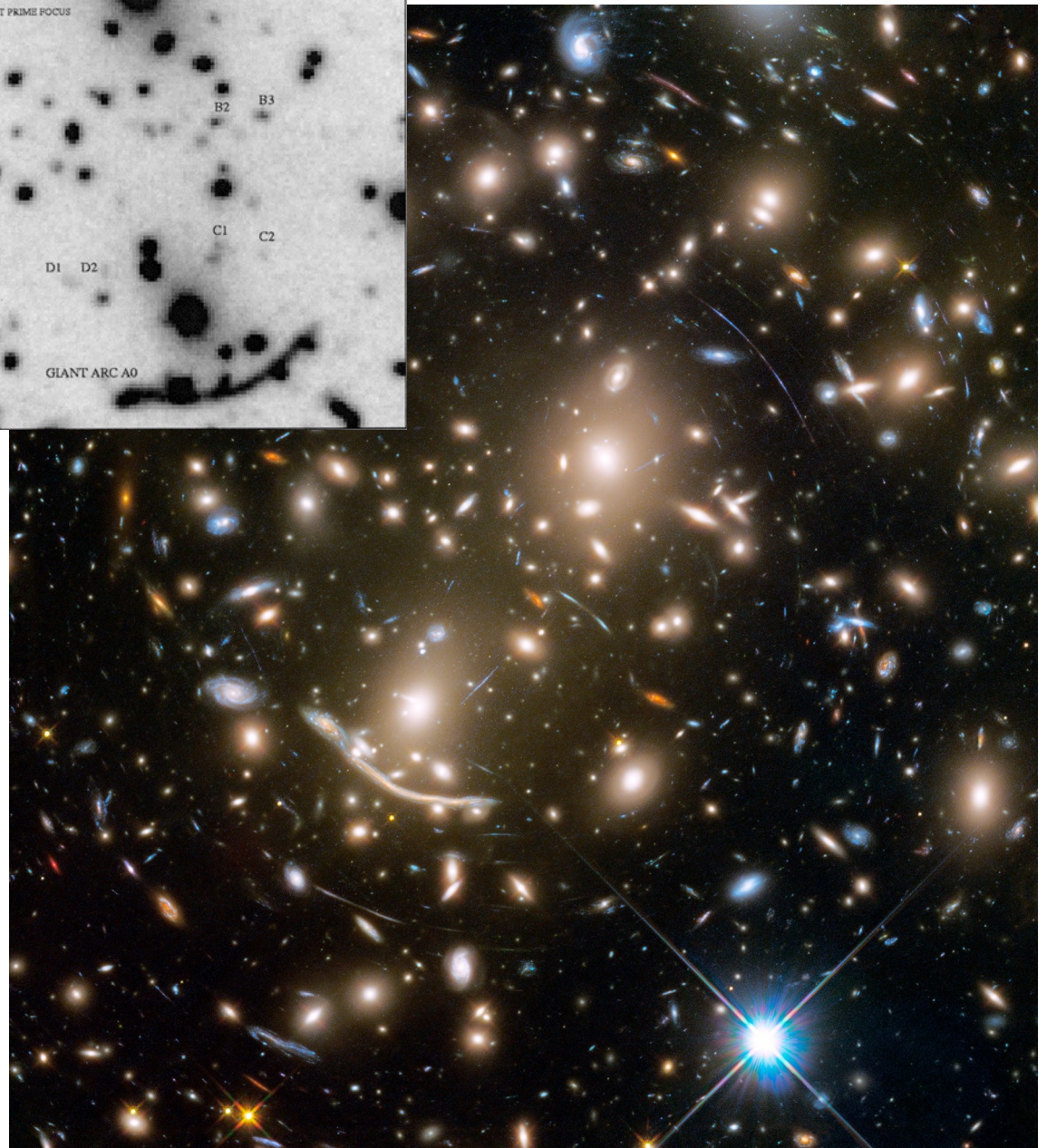
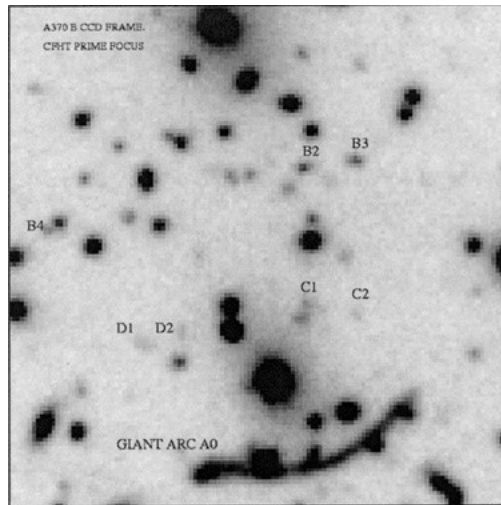
$$L_{\text{jate}} \sim 5 \cdot 10^{12} L_s$$

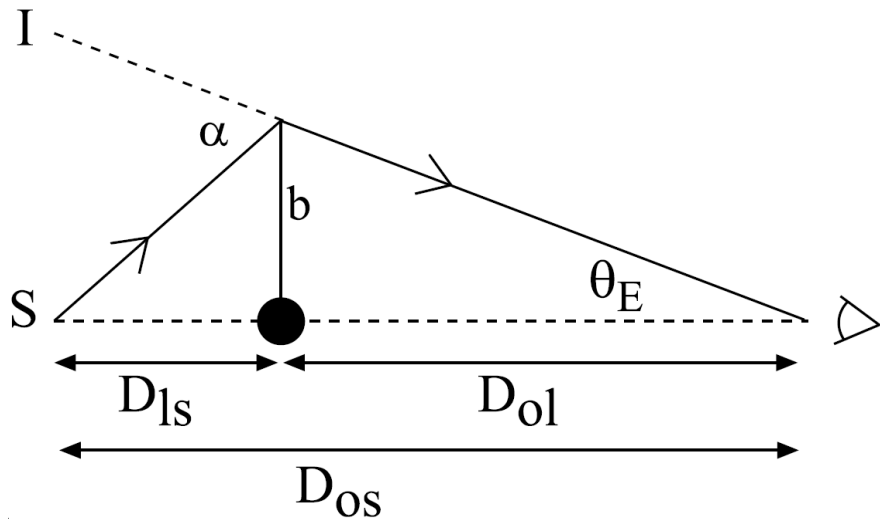
$$M/L \sim 400 - 500 M_s/L_s$$

Um, wie beobachtet, einen mittleren Dopplereffekt von 1000 km/sek oder mehr zu erhalten, müsste also die mittlere Dichte im Comasystem mindestens 400 mal grösser sein als die auf Grund von Beobachtungen an leuchtender Materie abgeleitet<sup>1)</sup>. Falls sich dies bewahrheiten sollte, würde sich also das überraschende Resultat ergeben, dass dunkle Materie in sehr viel grösserer Dichte vorhanden ist als leuchtende Materie.

# Masa jate - gravitacijsko lečenje

- struktura podobna loku v jati A370
- Paczynsky (1987):  
lokacija,  
geometrija,  
barve, nizka  
površinska svetlost  
→ *gravitacijsko lečenje*





- razsežen lok → Einsteinov obroč
- masna distribucija  
→ enačba leče za točkasto maso

$$\theta_E = \left( \frac{4GM}{c^2} \frac{D_{ls}}{D_{ol}D_{os}} \right)^{1/2}$$

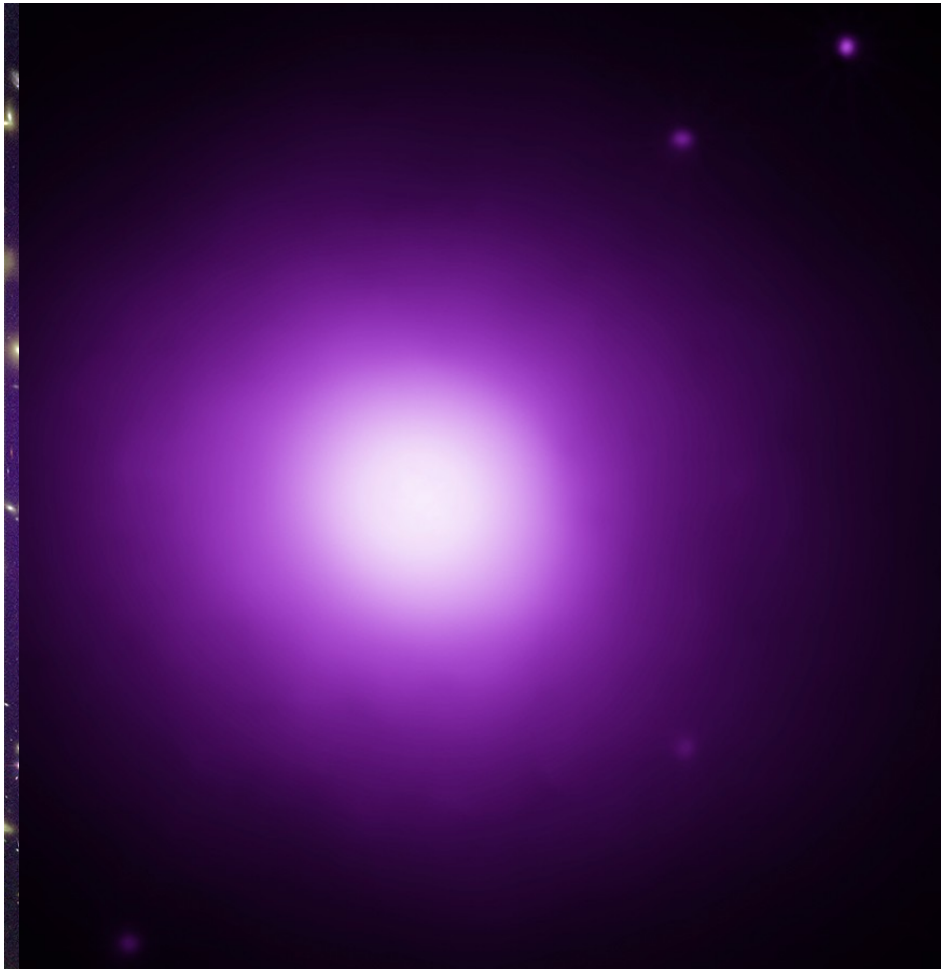
$$M_{\text{jate}} \sim 6 \cdot 10^{14} M_s$$



**Abell 2218**

NASA, ESA, and Johan Richard (Caltech, USA)  
Davide de Martin & James Long (ESA/Hubble)

# Jatni plin in masa jate



**Abell 1689**

X-ray: NASA/CXC/MIT/E.-H Peng et al; Optical: NASA/STScI

- jatni plin (*IntraCluster Medium - ICM*):

- $T = (2-10) \cdot 10^7 \text{ K}$

- $E_v = 1-10 \text{ keV}$

- $L_x \sim \rho_g^2 T^{1/2}$

- zavorno sevanje

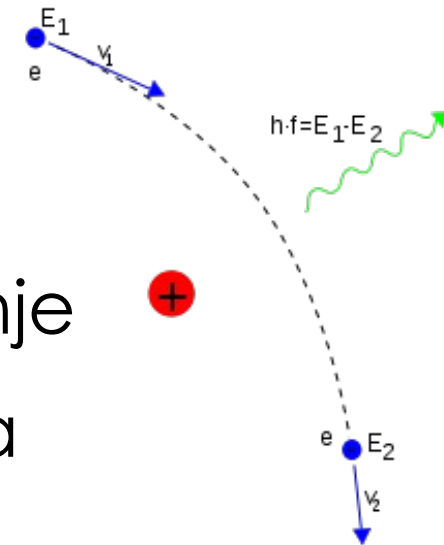
- sferna simetrija

+ idealni plin

+ hidrostatsično ravnovesie

$$M_{HE}(< r) = -\frac{rk_B T(r)}{G\mu m_p} \left[ \frac{d \ln \rho_g(r)}{d \ln r} + \frac{d \ln T(r)}{d \ln r} \right]$$

$$M_{\text{jate}} \sim 7 \cdot 10^{14} M_s$$



# Osnovne lastnosti jat galaksij

- **Masa:** 3 metode meritve

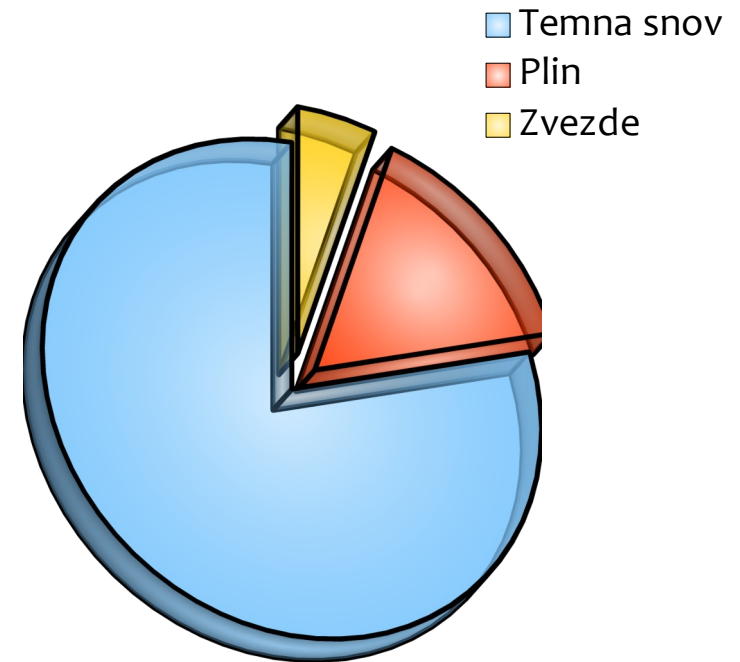
→ konsistentni rezultati

- $10^{14}$ - $10^{15} M_{\text{Sonca}}$

– galaksije: <10%

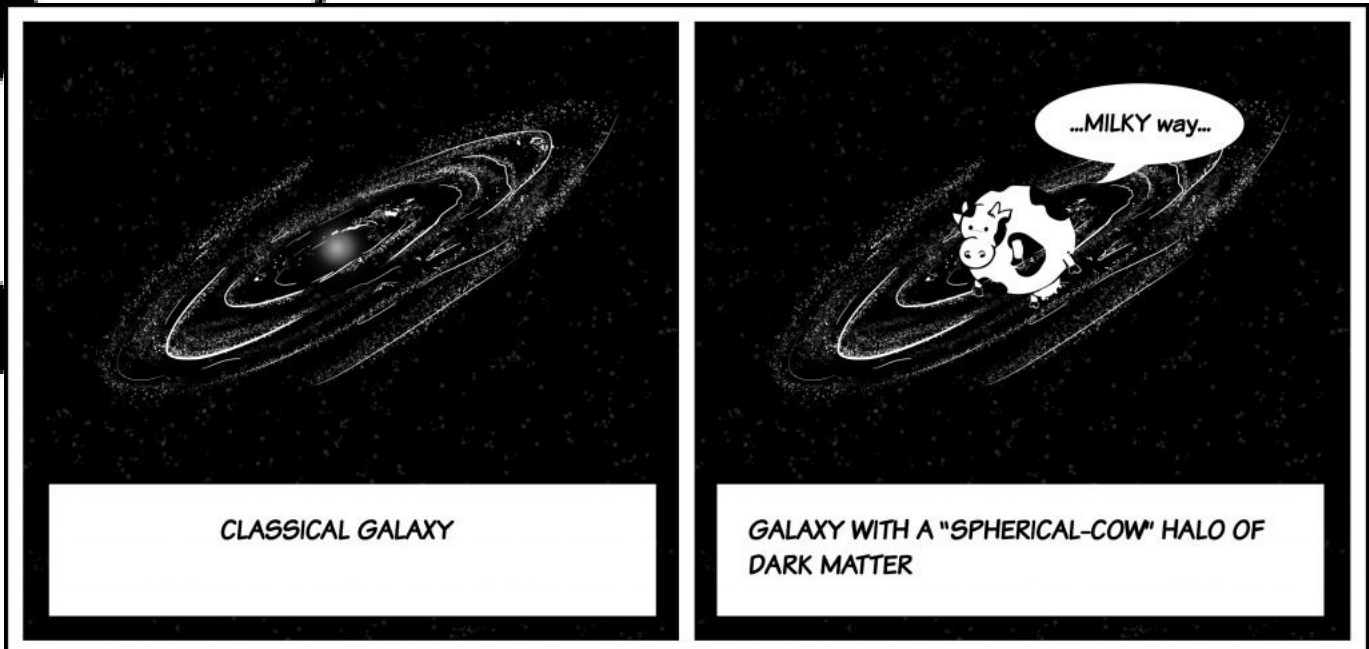
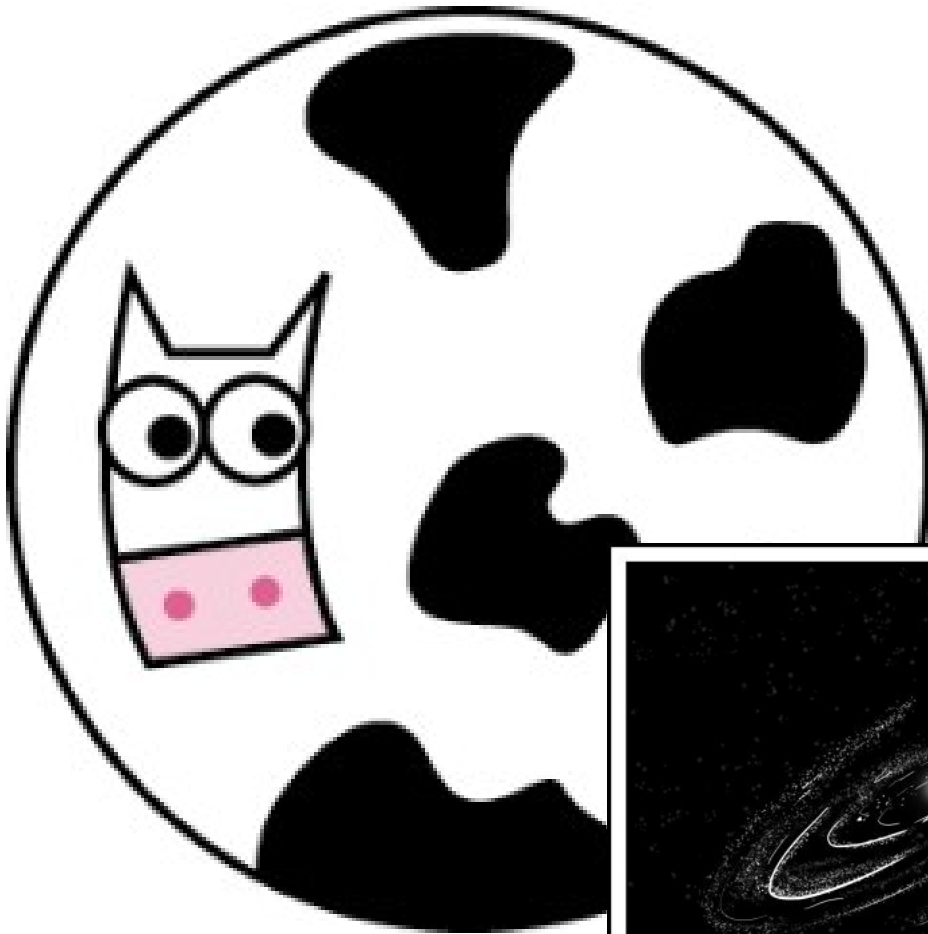
– plin: 10-25%

– temna snov: 70-90%



# Bolj zapletena slika...

- dinamika, neravnovesje, triaksialnost...
- učinek različnih astrofizikalnih procesov



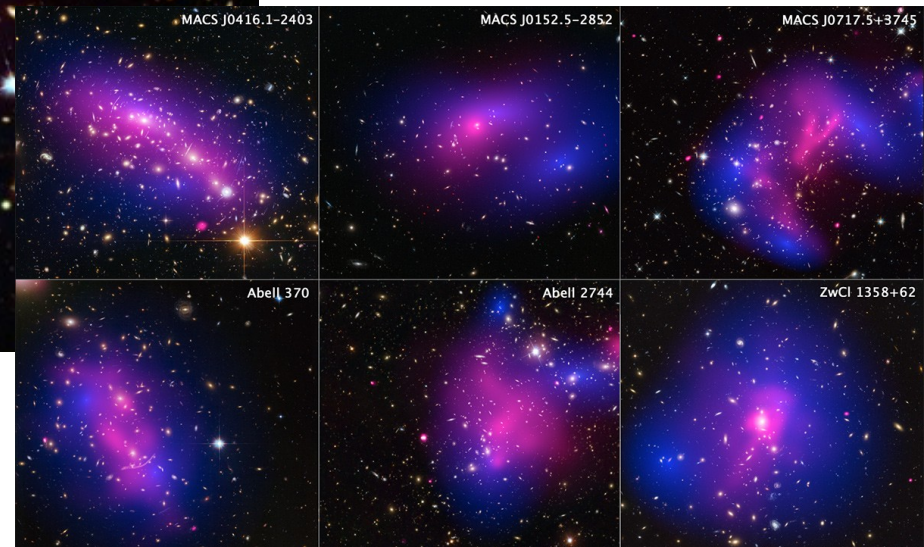
# Primer 1: trki med jatami

jata Metek (*Bullet cluster*)  
1E 0657-558



- dokaz prisotnosti temne snovi (šibko gravitacijsko lečenje)
- več trkov na visokih rdečih premikih

X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.



NASA, ESA, STScI, and CXC;

# Primer 2: astrofizikalni procesi

rentgenska površinska svetlost  
jate Perzej

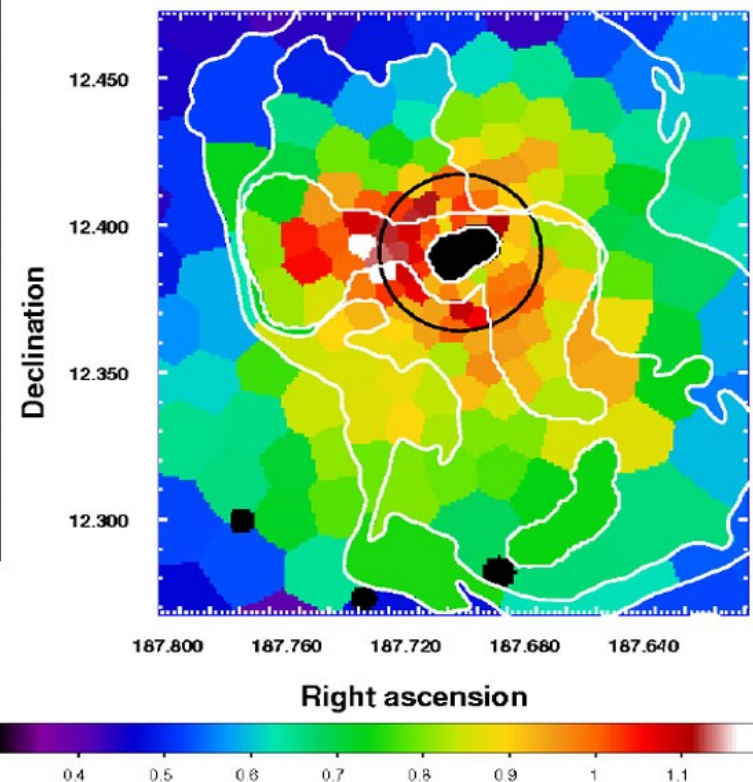
Shock AGN  
Bubbles

jata galaksij MS 0735.6+7421  
(vidna/rentgenska/radio)  
velikost: 4,5', oddaljenost 2,6 milijard sv. let  
*NASA/CXC/Stanford/Zhuravleva et al.*  
20 arcmin across (cca 1.5 million light years)

Zemljevid porazdelitve kemijskih  
elementov ter konture radijske  
emisije iz jate Devica

aktivna galaktična  
jedra v središčnih  
galaksijah

→ povratni učinek



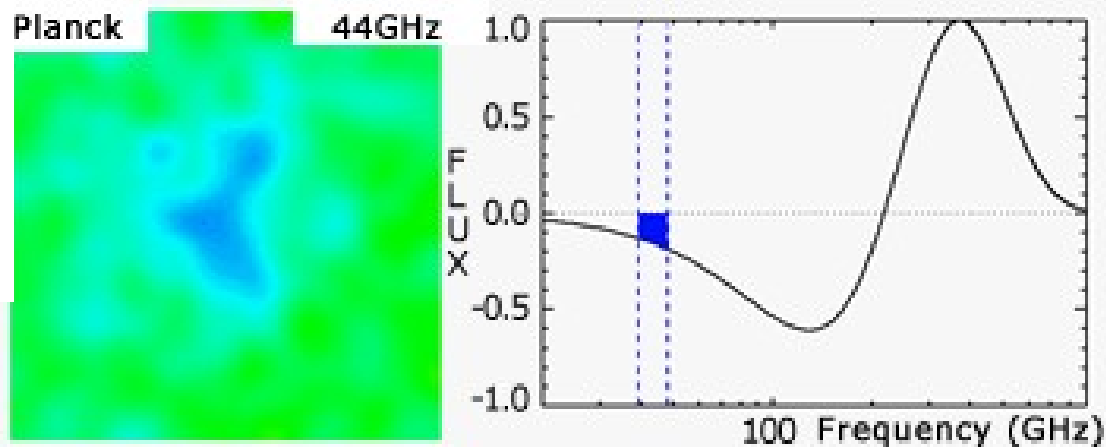
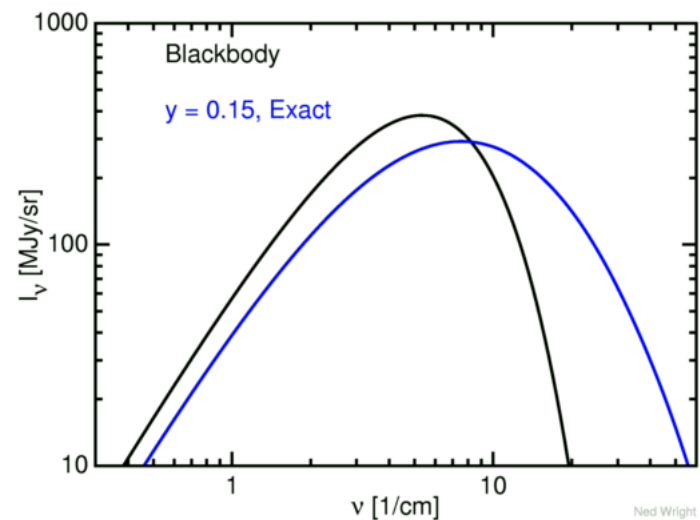
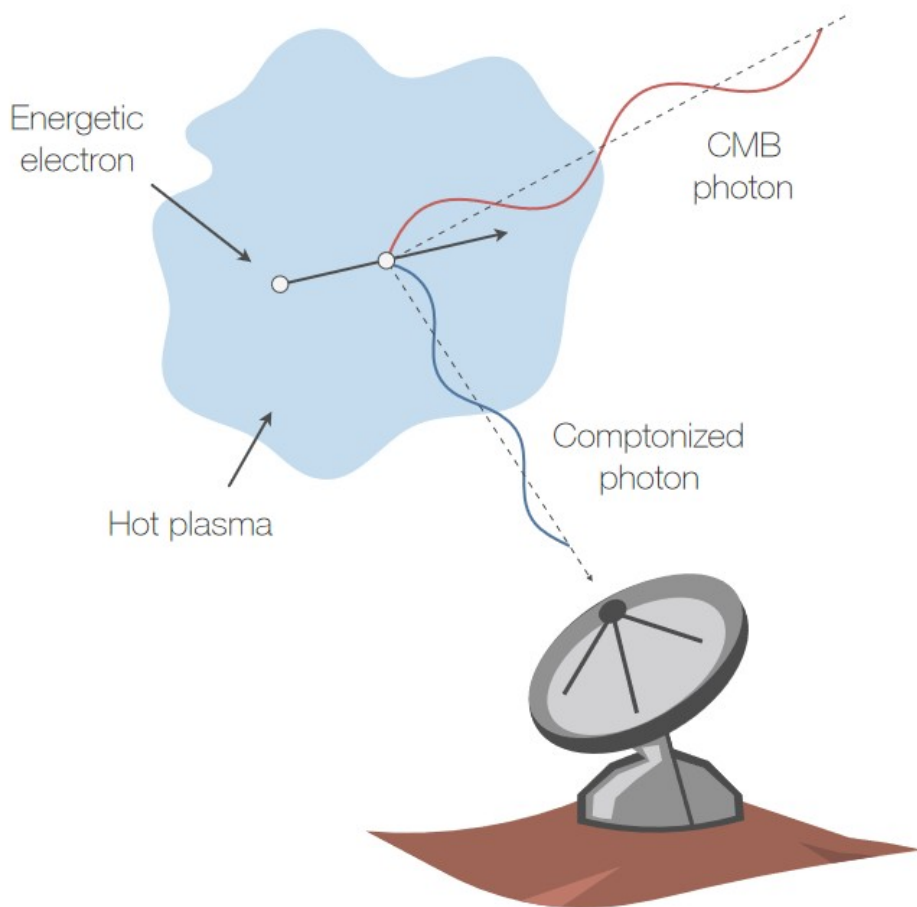
*Simionescu et al. 2009*

# Primer 3: jatni plin in prasevanje

## Sunjajev-Zeldovičev učinek

obratno Comptonovo sipanje fotonov  
prasevanja na elektronih visokih energij

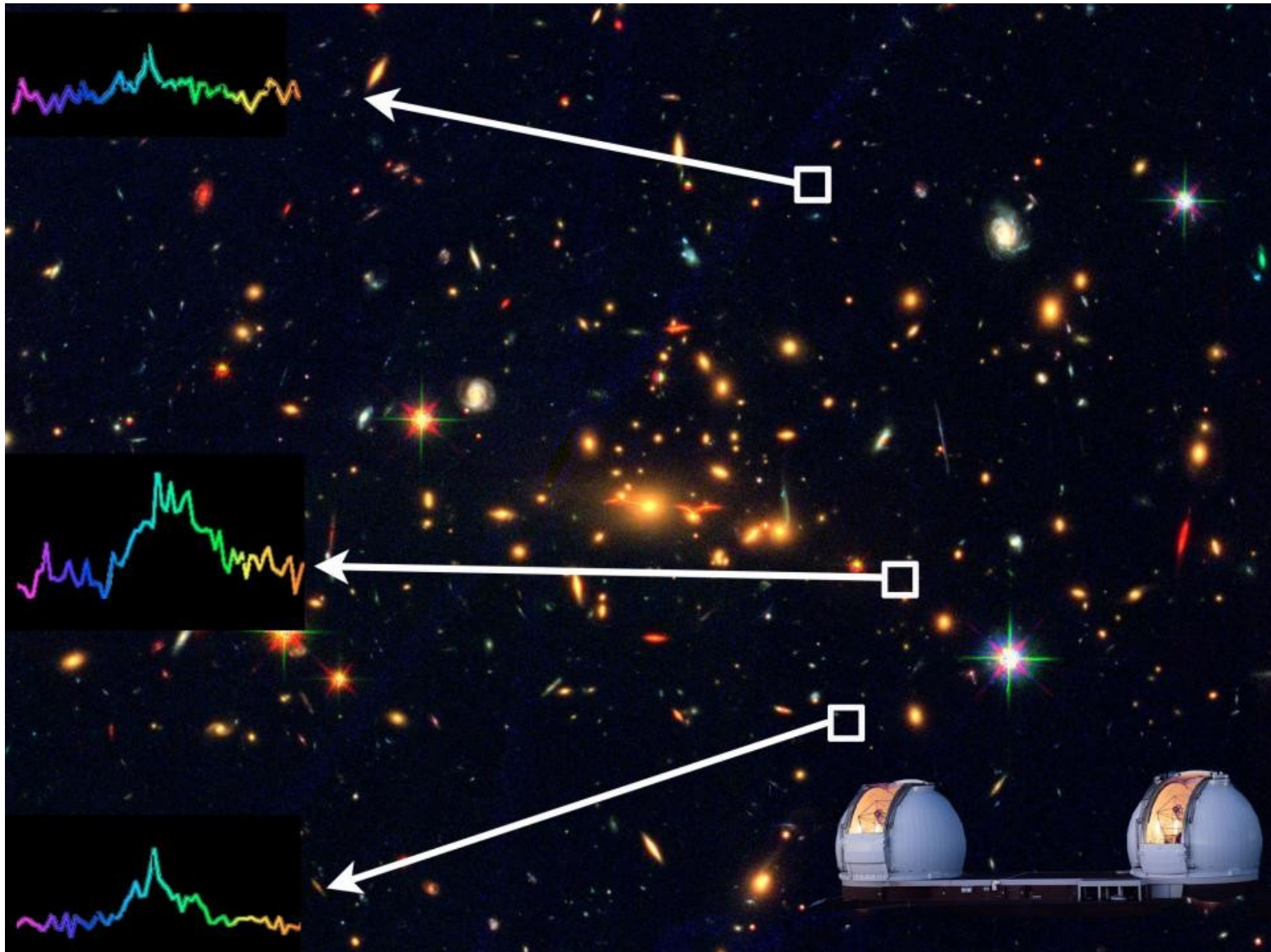
> povzroči premik spektra prasevanja



Adapted from L. Van Speybroeck  
(see Mroczkowski et al. 2018)

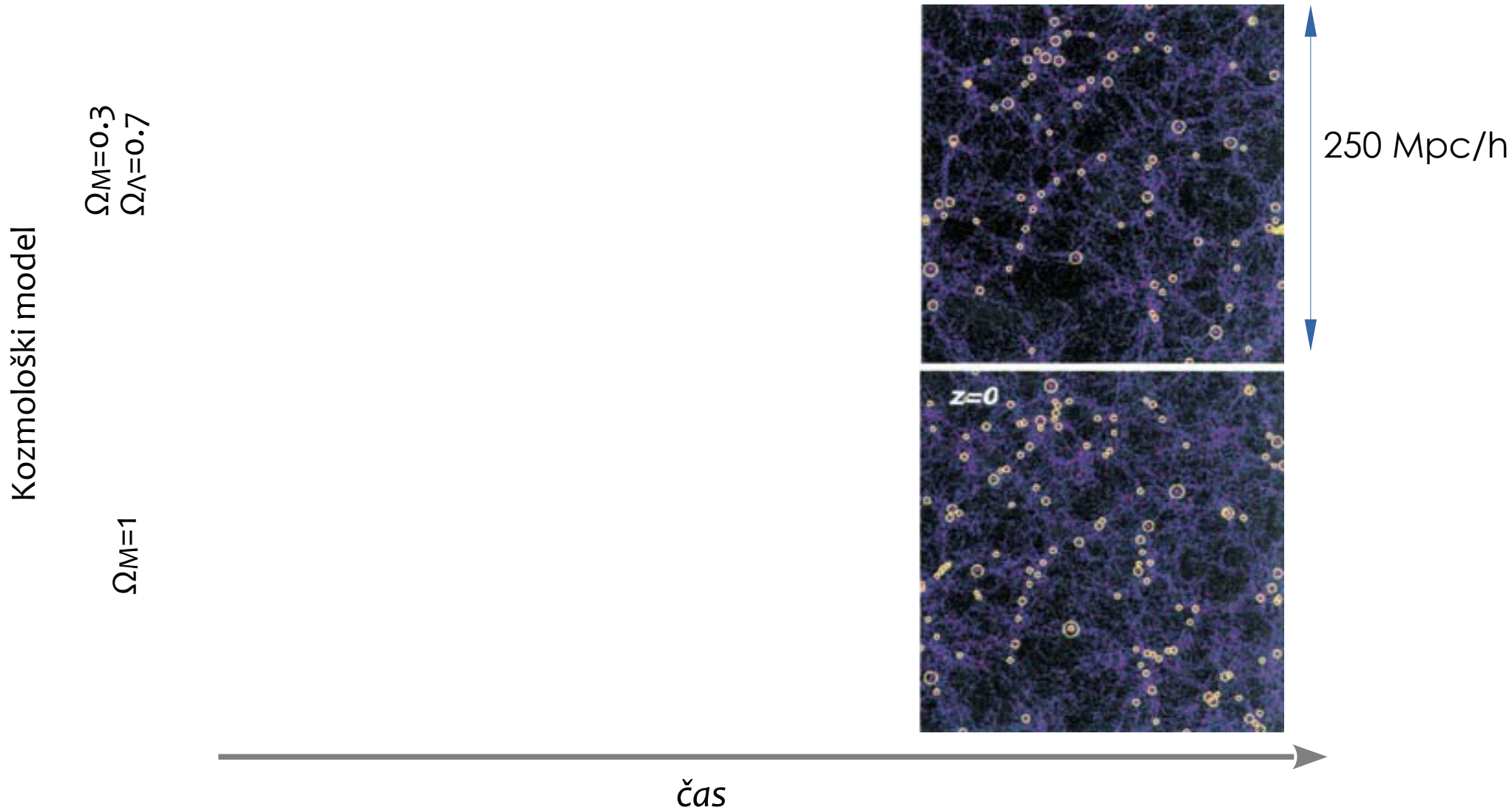
ESA/Planck Collaboration

# Primer 4: jate kot gravitacijski teleskopi



Trojno lečena oddaljena galaksija (13 mld let!), ki jo je lečila jata v ospredju. Opazovanja pokažejo podobnost med spektri treh slik, kar potrjuje, da je izvor isti. [Maruša Bradač/HST/W. M. Keck Observatory]

# Uporabnost mase jat - kozmologija

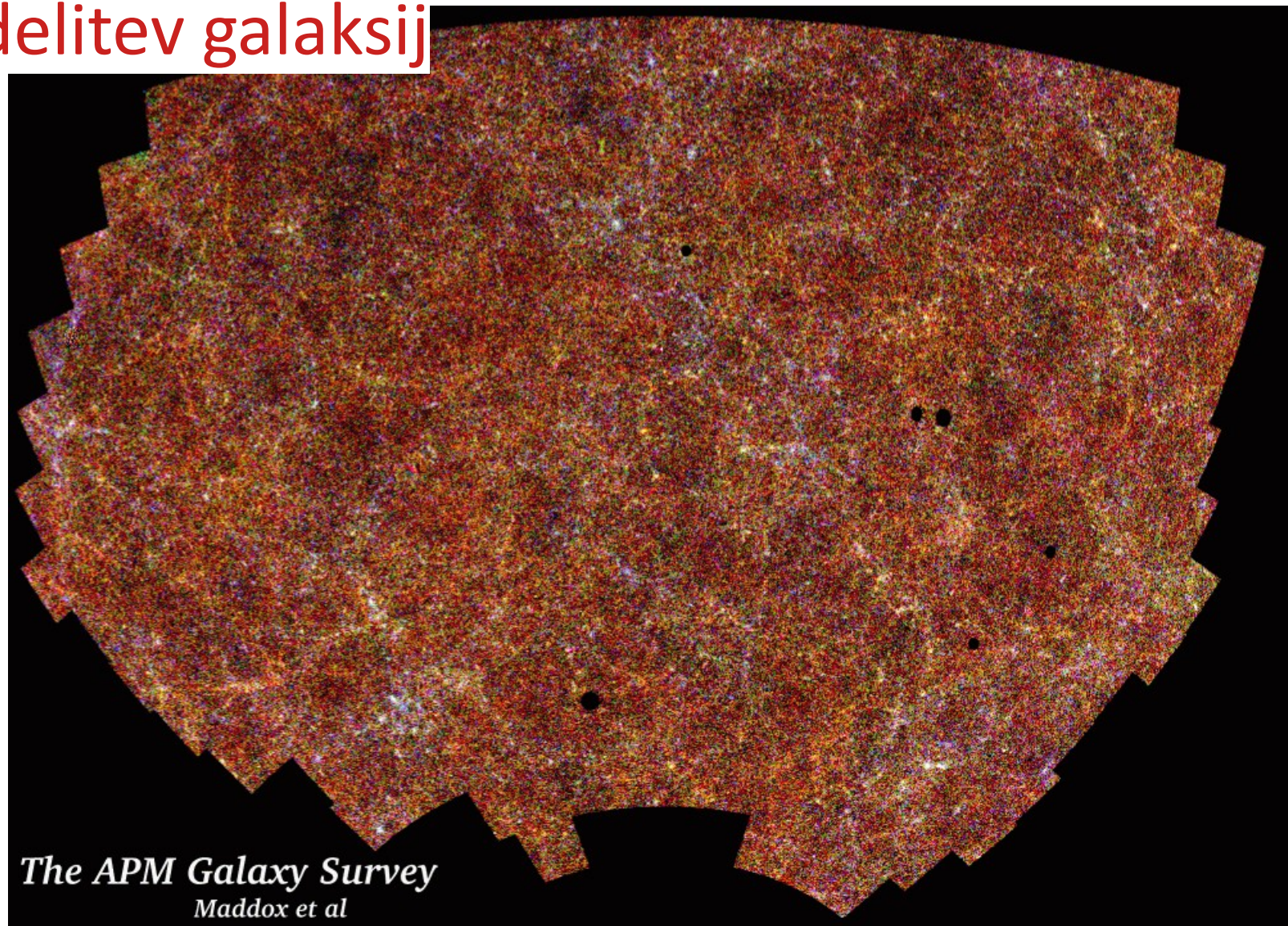


# Jate galaksij so...

- najmasivnejši gravitacijsko vezani sistemi
- ocena (skupne) mase (na vsaj 3 različne načine):  $10^{14}$ - $10^{15} M_s$
- sestava: galaksije: <10%, plin: 10-25%,  
temna snov: 70-90%
- uporabnost:
  - spremljanje nastajanja struktur na velikih skalah
  - astrofizikalni procesi v notranjosti jat

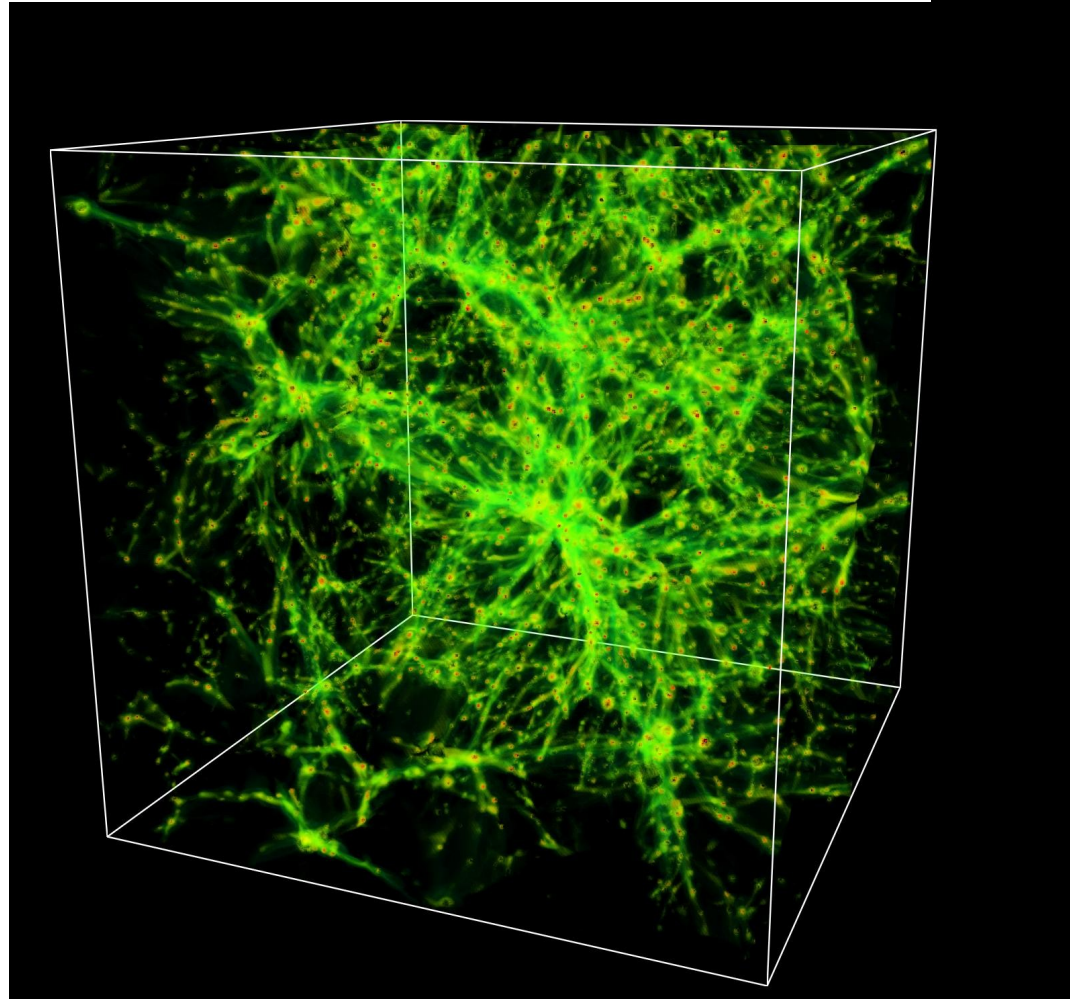
# Struktura na velikih skalah

## porazdelitev galaksij



2 milijona galaksij na južnem nebu (pokriva 4000 kvadratnih stopinj)!  
avtorstvo: APM galaxy survey (Maddox et al.)

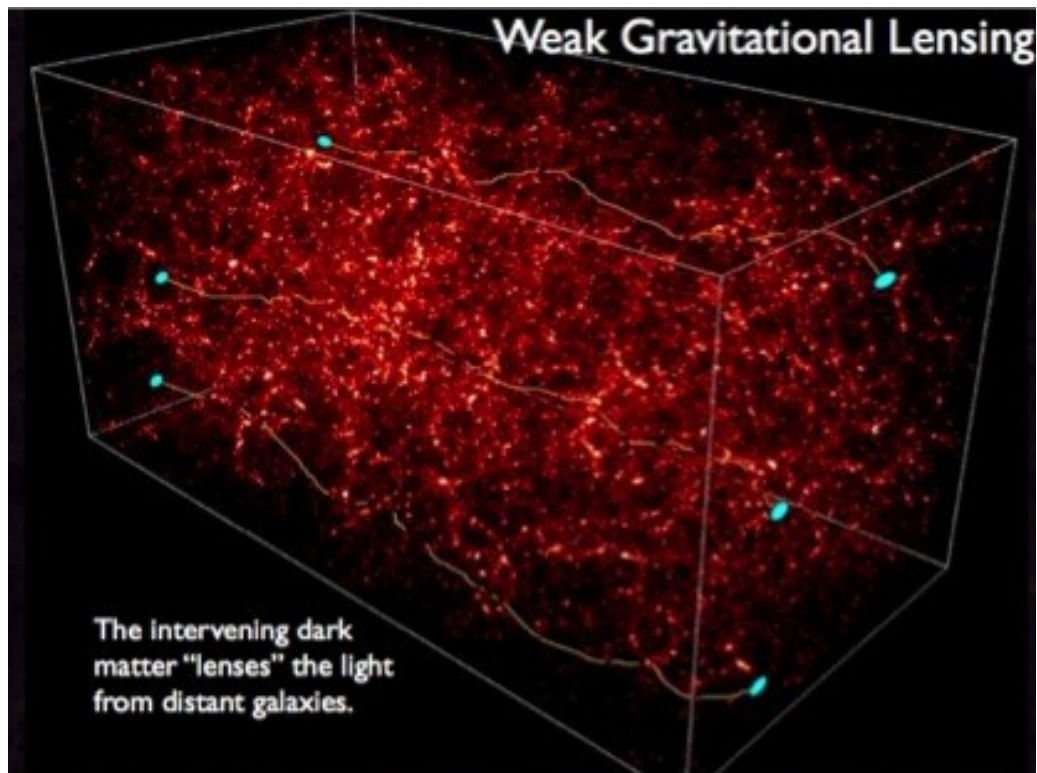
# Struktura na velikih skalah porazdelitev medgalaktičnega plina



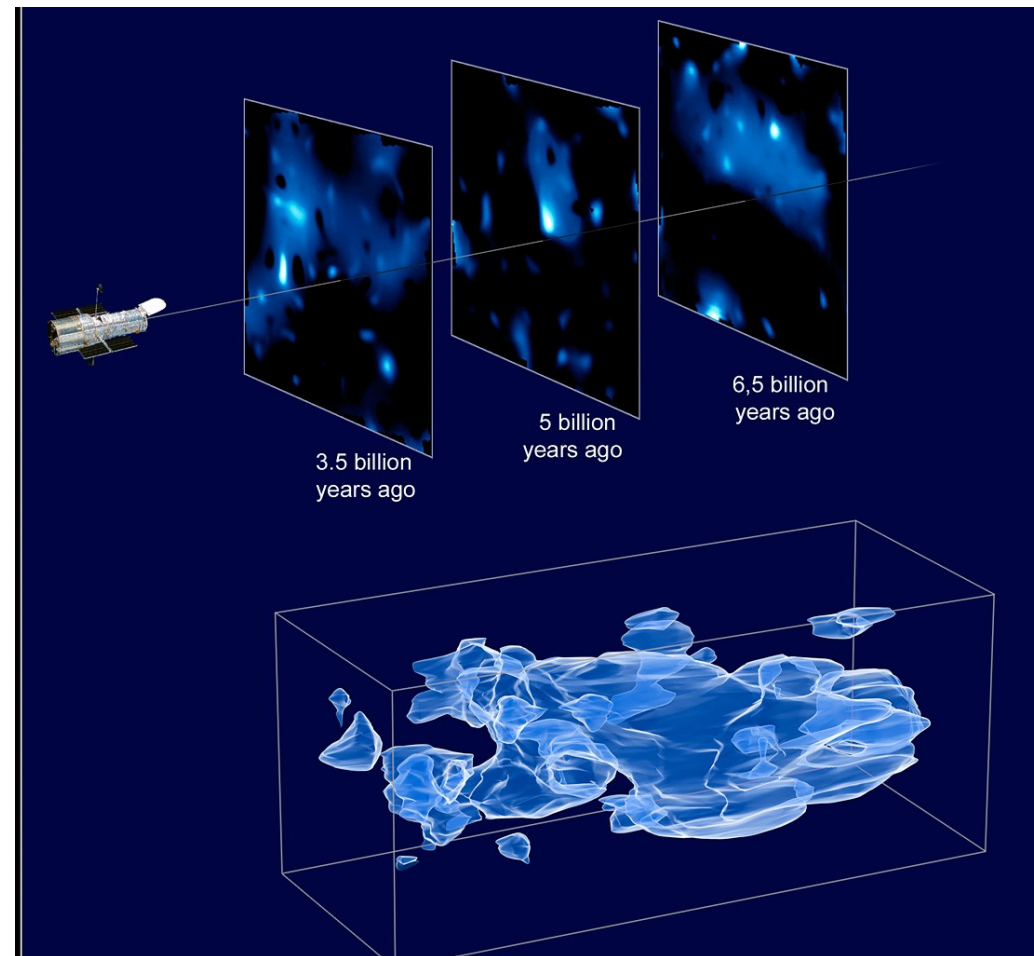
primer simulacije porazdelitve (toplega) medgalaktičnega plina  
avtorstvo: Renyue Cen

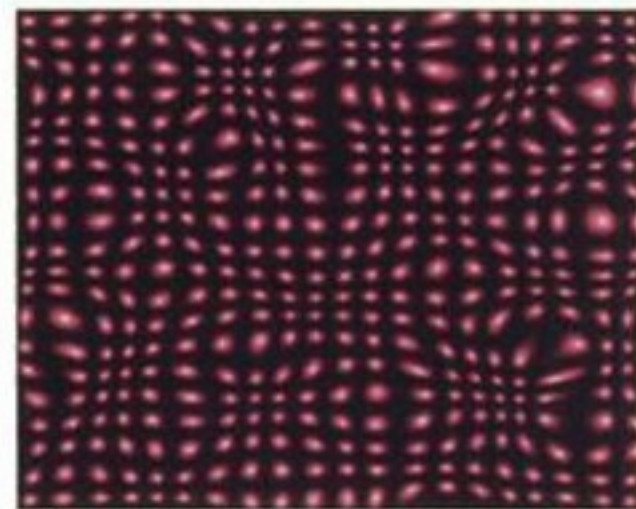
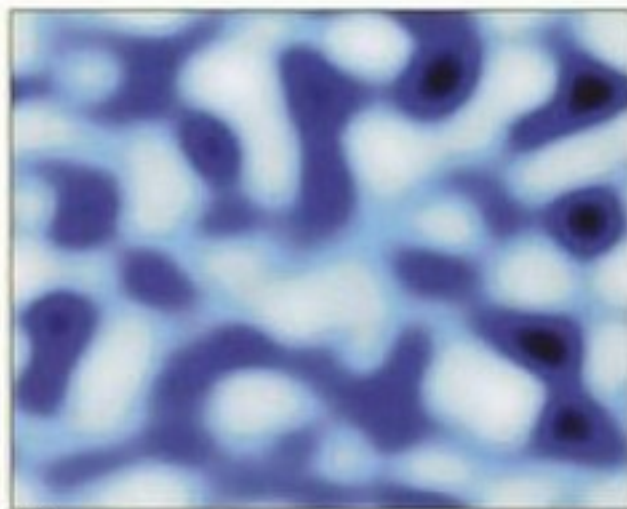
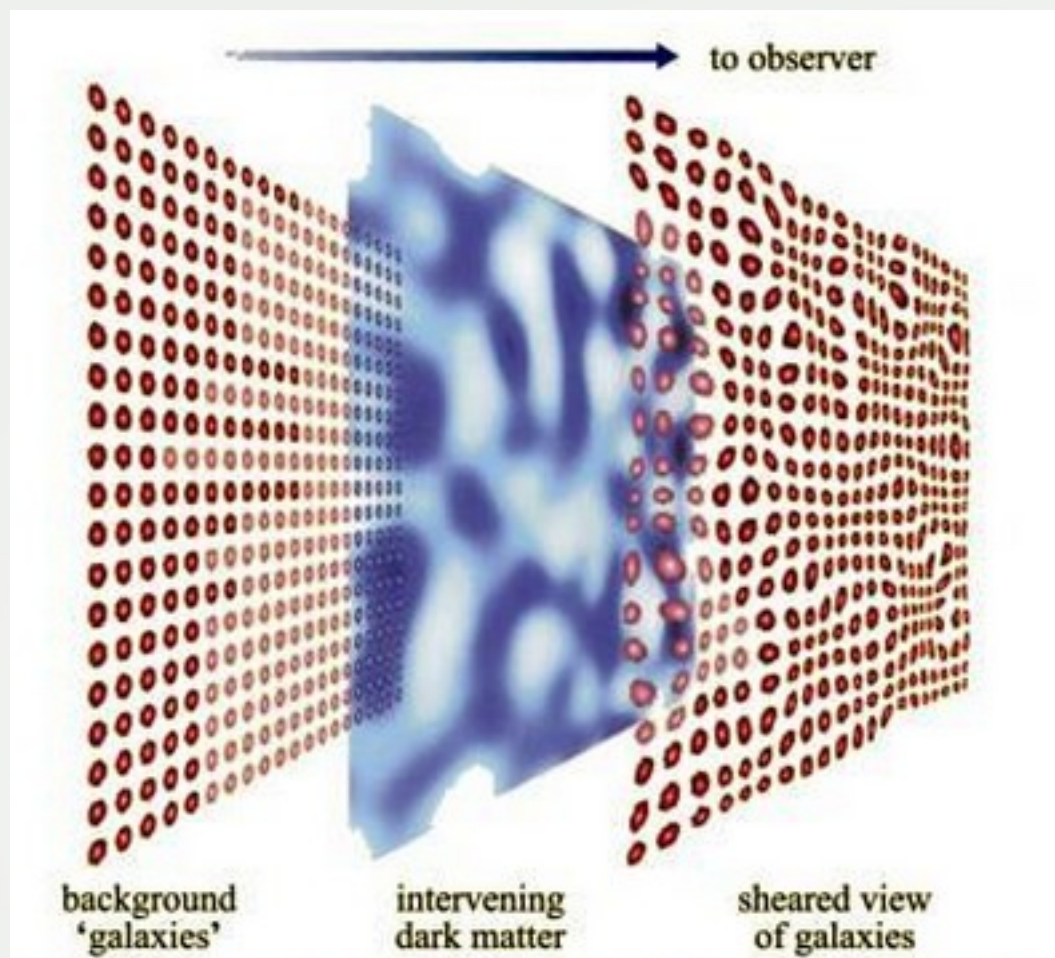
# Struktura na velikih skalah

## porazdelitev temne snovi

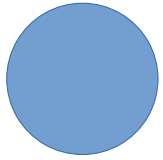


porazdelitev temne snovi  
v vesolju spremljamo s pomočjo šibkega  
gravitacijskega lečenja oddaljenih  
objektov (v prihodnosti bo to počel  
vesoljski teleskop Euclid)

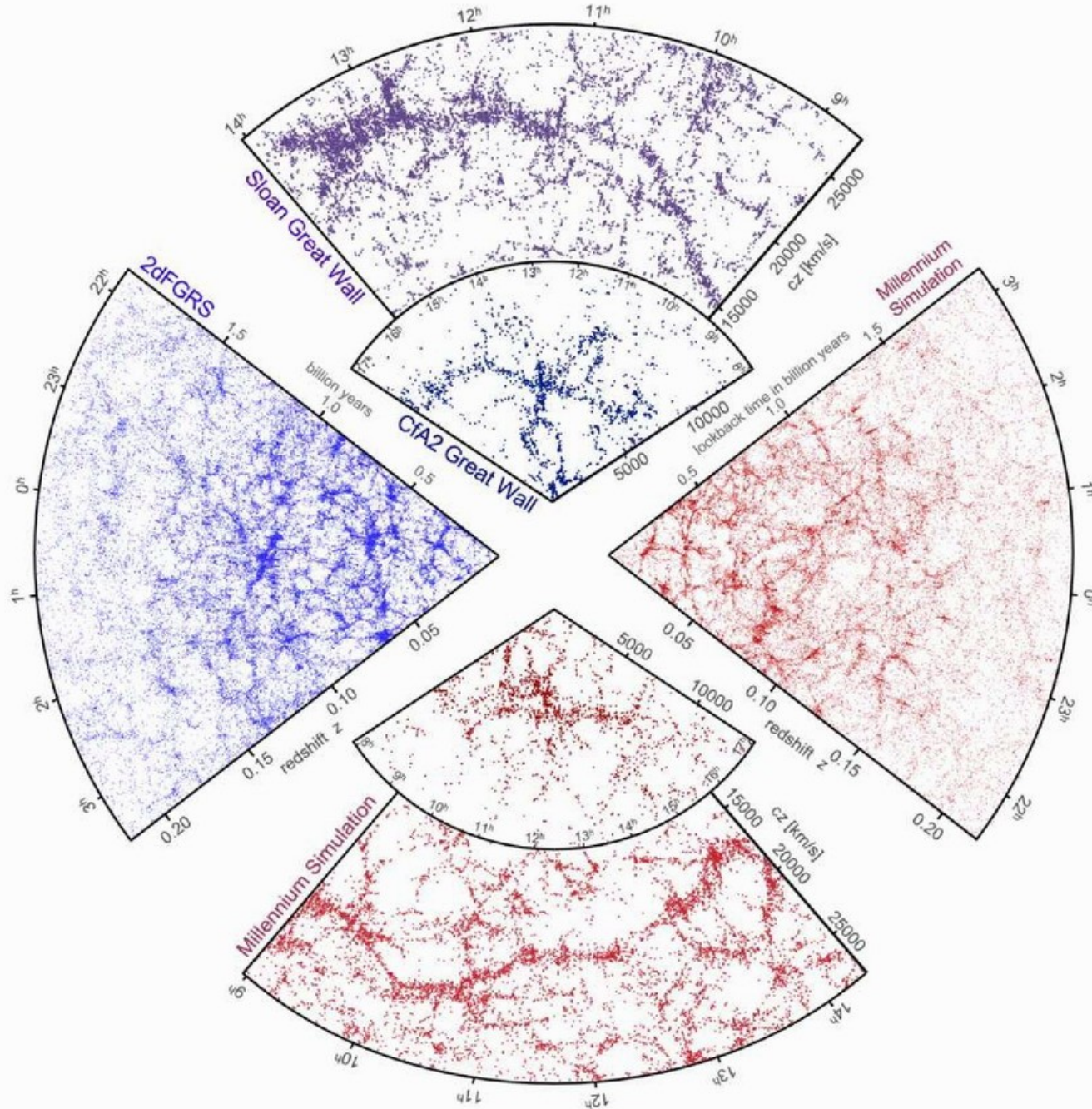




# Struktura na velikih skalah



~200 Mpc  
homogeno  
vesolje



Avtorstvo:  
Sloan Digital Sky Survey, 2dF Galaxy Redshift Survey, Millenium Simulation

# Hubble tension

XKCD - <https://xkcd.com/2516/>

THERE ARE THREE  
MAIN ESTIMATES  
OF THE UNIVERSE'S  
EXPANSION RATE AND  
THEY ALL DISAGREE.



MEASUREMENTS OF STAR  
DISTANCES SUGGEST THE  
UNIVERSE IS EXPANDING  
AT 73 KM/S/MEGAPARSEC.



MEASUREMENTS OF THE  
COSMIC MICROWAVE  
BACKGROUND SUGGEST  
IT'S EXPANDING AT 68  
KM/S/MEGAPARSEC.



AND DAVE, WHO HAS A  
RADAR GUN, SAYS IT'S  
EXPANDING AT 85 MPH  
IN ALL DIRECTIONS.

THOSE GALAXIES ARE  
REALLY BOOKING IT!  
THANKS, DAVE.



*Oh, wait, I might've had set it to kph instead of mph. But that would make the discrepancy even wider!*