

# 우주론적 관점에서의 암흑물질

2023 Cosmology Workshop on  
the Crossroad of Astrophysics and Particle physics: dark matter

June 28 ~ July 1, 2023 / Sono Belle Vivaldi Park, Hongcheon

2023. 6. 28 - 7.1

<http://events.kias.re.kr/h/oojucross2023>

박창범(고등과학원)

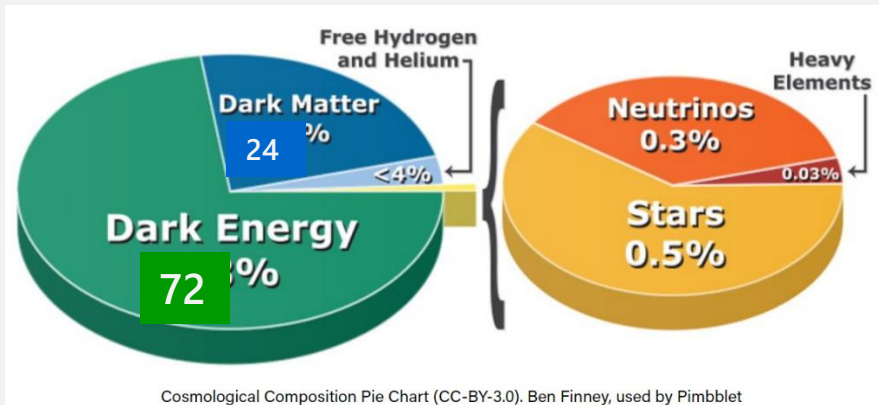
# 표준우주론 - flat Lambda CDM model

우주는 138억년 전에 무한 크기로 태어나 영원히 팽창 중.  $\gamma$ ,  $\nu$ , 중입자, DM, DE 등으로 채워져 있고, 큰 규모에서는 균일평탄하고 작은 규모에서는 초기우주에서 발생한 물질요동이 천체 생성

**시공간**  
 무한 평탄 균일공간  
 유한과거 무한미래

**물질성분**  
 $\gamma, \nu$ , 중입자  
 [쿼크, 경입자,  
 게이지보존, 힉스입자]  
 차가운암흑물질,  
 암흑에너지

**천체**  
 급팽창 요동 기원  
 중력불안정 천체생성



← AP  $\Omega_m = 0.285^{+0.014}_{-0.009}$  [Dong+23]

← BBN  $\Omega_B = 0.041 \pm 0.004$  [Burles+01]  
 →  $\Omega_{\text{nonB DM}} \sim 0.24$

## 암흑물질이 제기된 이유

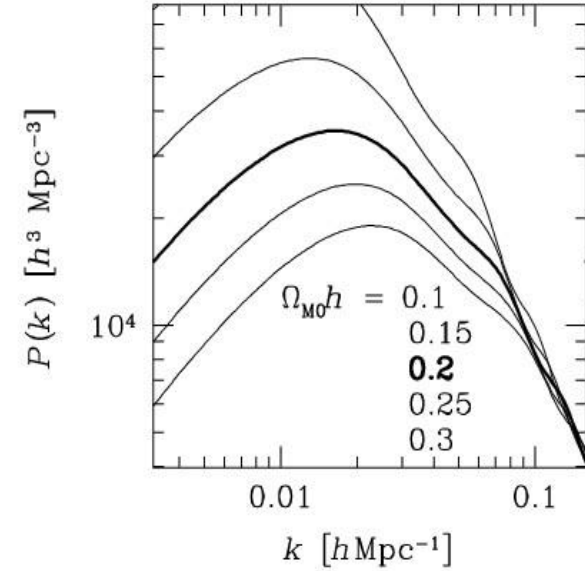
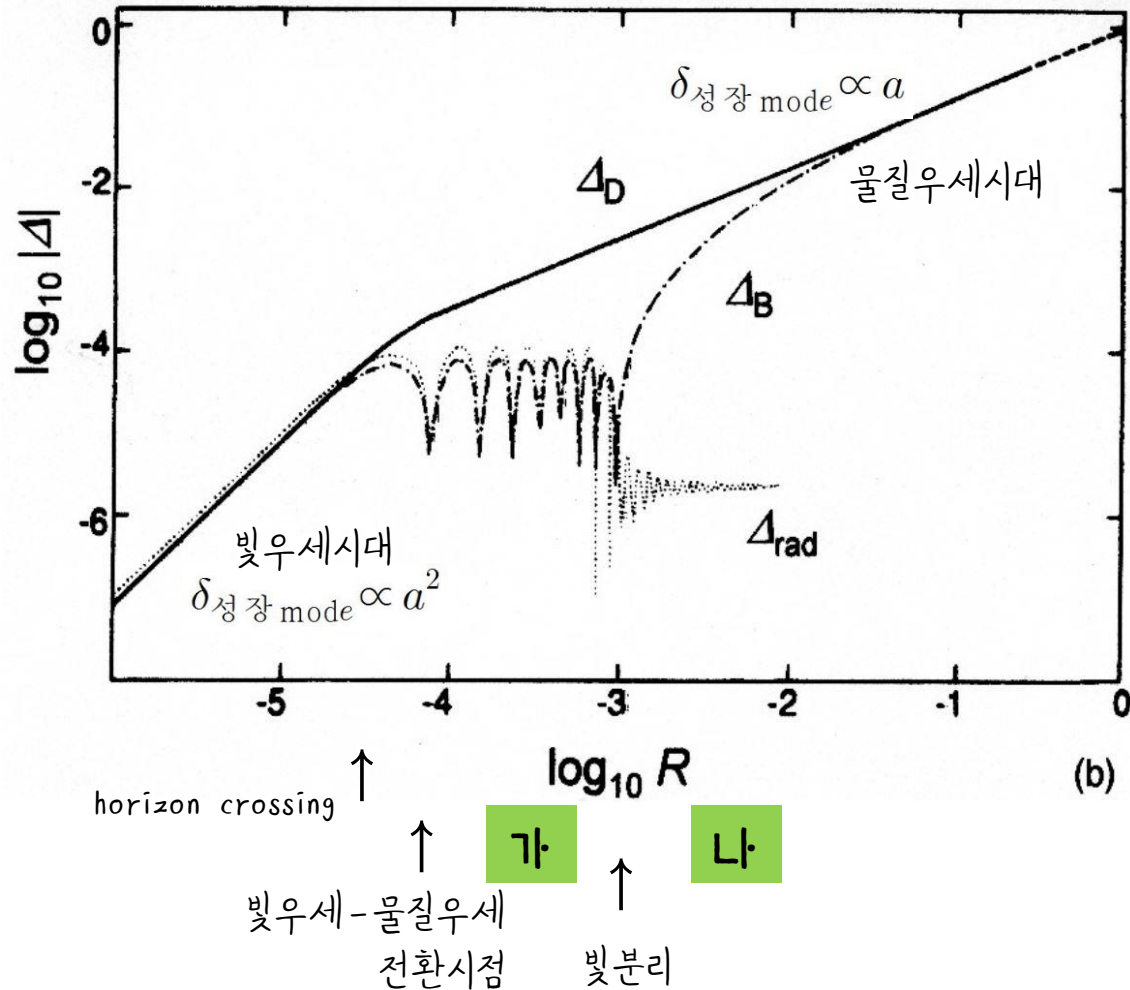
1. 은하단 속도분산
2. 나선은하의 회전곡선

## 암흑물질이 받아들여진 이유

1. 우주배경복사 온도요동
2. 천체의 생성
3. 우주거대구조 모양
4. 은하단 X선 측정
5. 중력렌즈 현상

# 암흑물질 도입의 성공 사례 1- 요동의 빠른 성장 & 이른 천체 생성

## The Evolution of Fluctuations



가: 물질우세시기가 도래하면 모든 규모에서 암흑물질 요동이 성장 ( $\delta_{\text{성장 mode}} \propto a$ )

바리온 물질요동은 빛과의 상호작용 때문에 여전히 성장 못함

나: 전자가 원자핵과 결합해서 빛과 전자의 상호작용이 안 일어나면 바리온은 암흑물질 요동에 끌려 빠르게 붕괴하고, 천체가 빨리 성장한다.

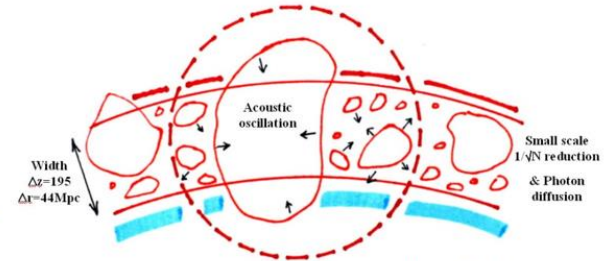
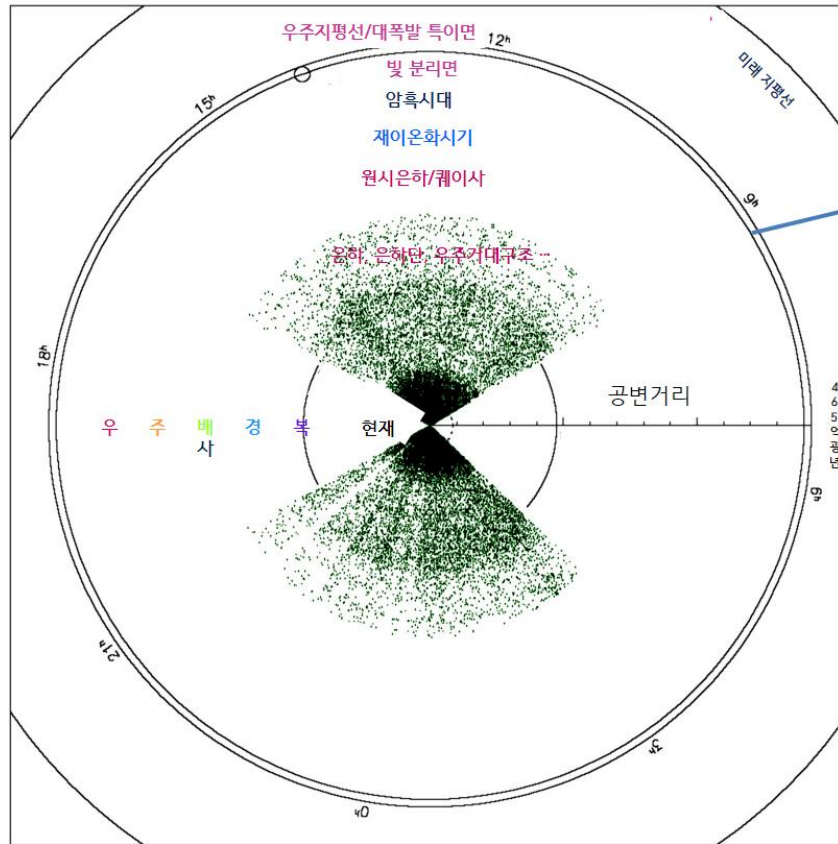
# 암흑물질 도입의 성공 사례 1' - 우주배경복사 온도 요동

초은하단 규모에서 우주배경복사 온도요동 RMS  
반면에 현재 초은하단 규모에서 물질요동  $\delta \sim 1$

$$\frac{\Delta T}{\langle T \rangle}(n) \equiv \frac{T(n) - \langle T \rangle}{\langle T \rangle} \sim 10^{-5}$$

## 우주 조망도

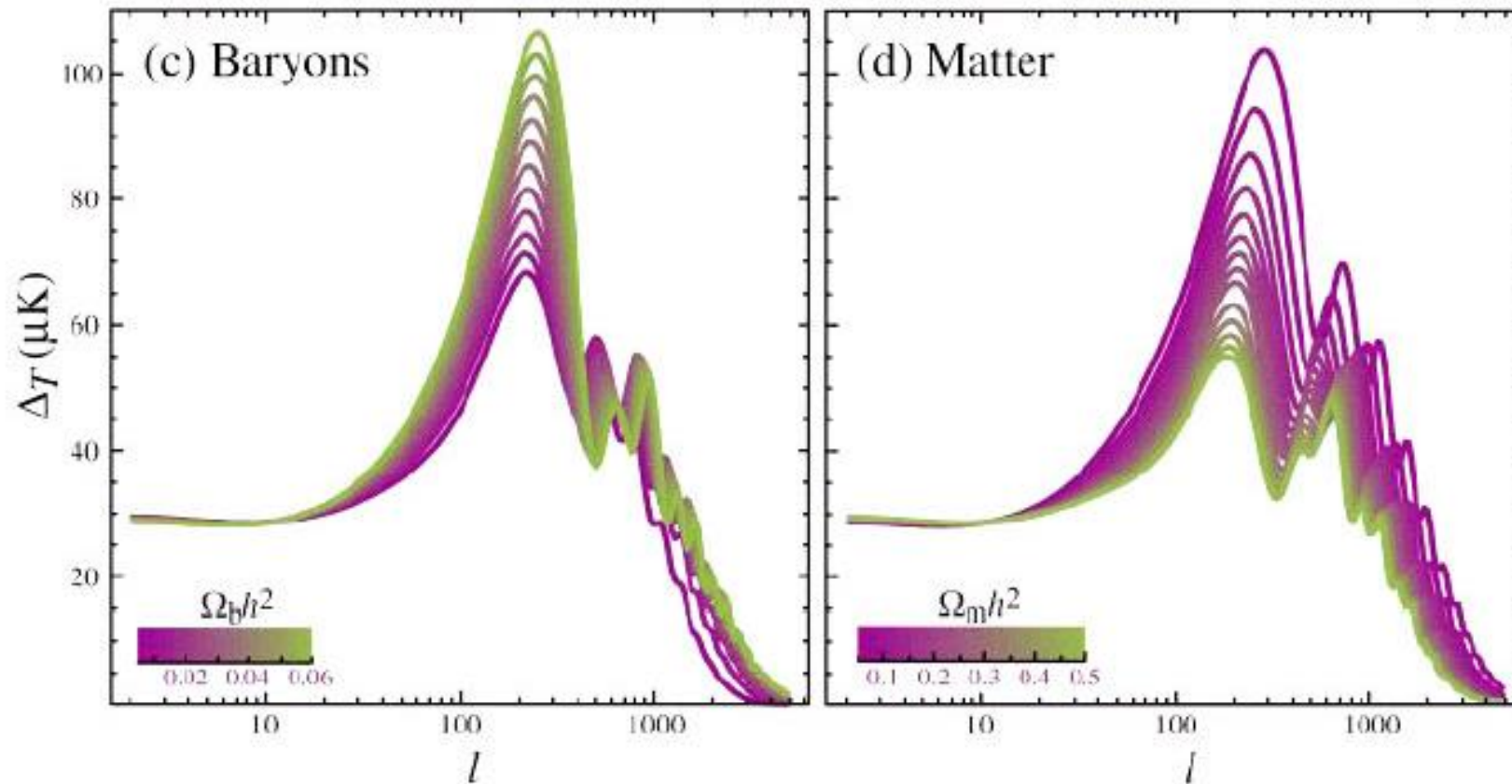
쏘 우주 vs  
관측 가능한 시공간



빛 분리 완료  
바리온 붕괴 시작

빛의 분리 @z~1100  
(t<sub>age</sub> ~ 378,000년)





position and amplitude of the first peak  $\rightarrow \Omega_m \sim 0.3$

If no DM, too large CMB anisotropy needed to form galaxies

# 암흑물질 도입의 성공 사례 2

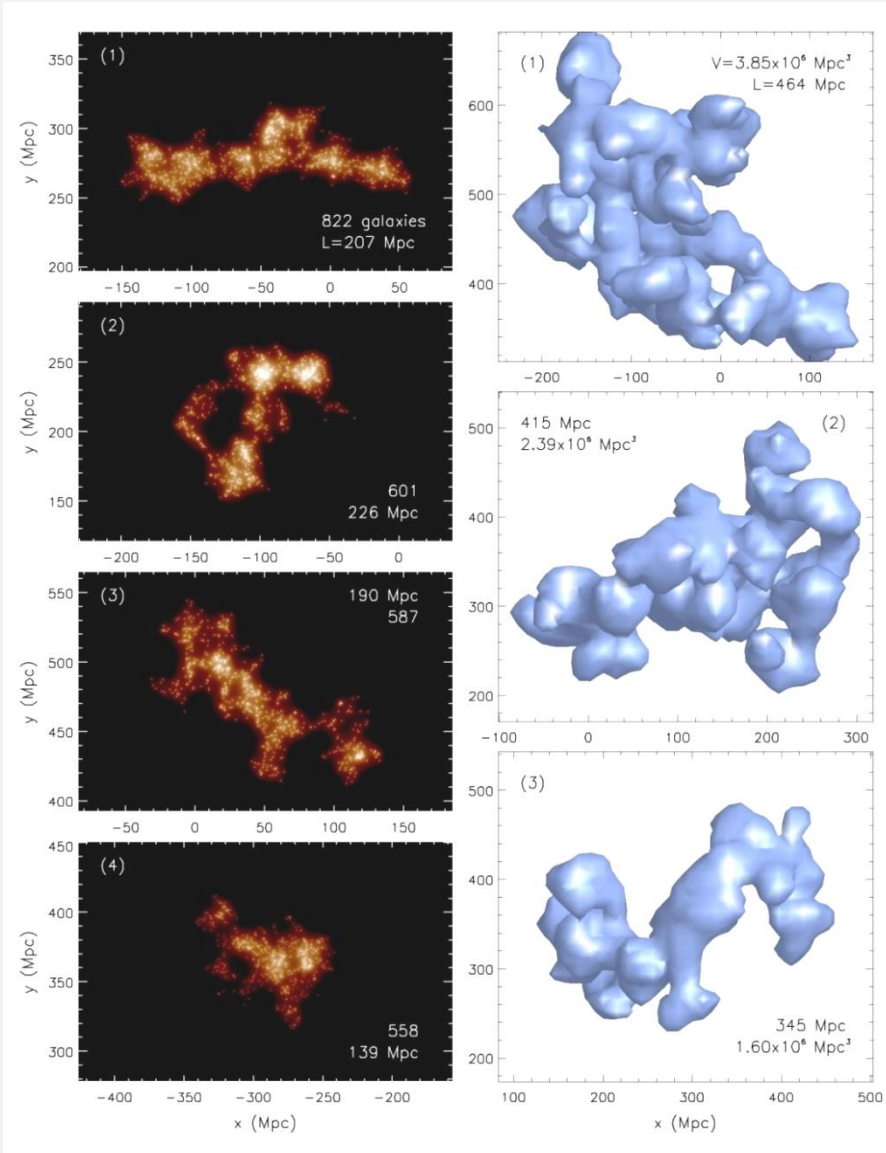
## - LSS & 천체생성 각본

우주에 차가운 암흑물질이 채워져 있는 경우  
 i. 우주거대구조 모양,  
 ii. 천체생성역사 - 최초 천체의 생성 시기와 질량 & 천체생성 진행과정 iii. 현재 천체들의 질량분포 등을 성공적으로 설명

➔ Cold & Collisionless

$d_c = 0.62 d_{bar} = 5.6 h^{-1} Mpc$   
 $\delta_{th} = n_{th}/n_{bar} - 1 = 3.2$

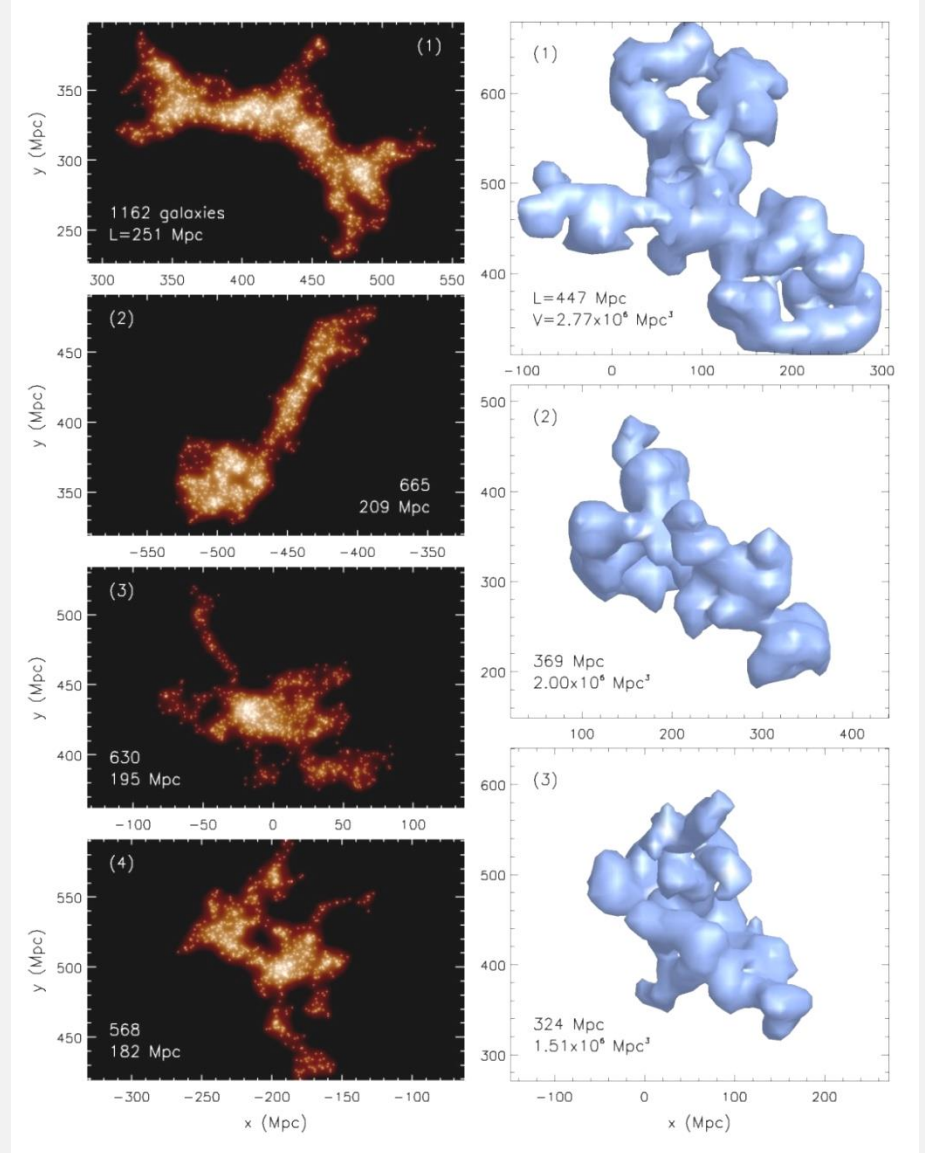
$r_{ball} = 1.45 d_{bar} = 13.1 h^{-1} Mpc$



Top 4 high-density and top 3 low-density LSSs from SDSS DR7 Main galaxies ( $d_{bar} = 9 h^{-1} Mpc$ )

$d_{c,max} = 0.616 \pm 0.014 d_{bar}$  for 200 mock surveys

$r_{ball} = 1.45 d_{bar} = 13.1 h^{-1} Mpc$



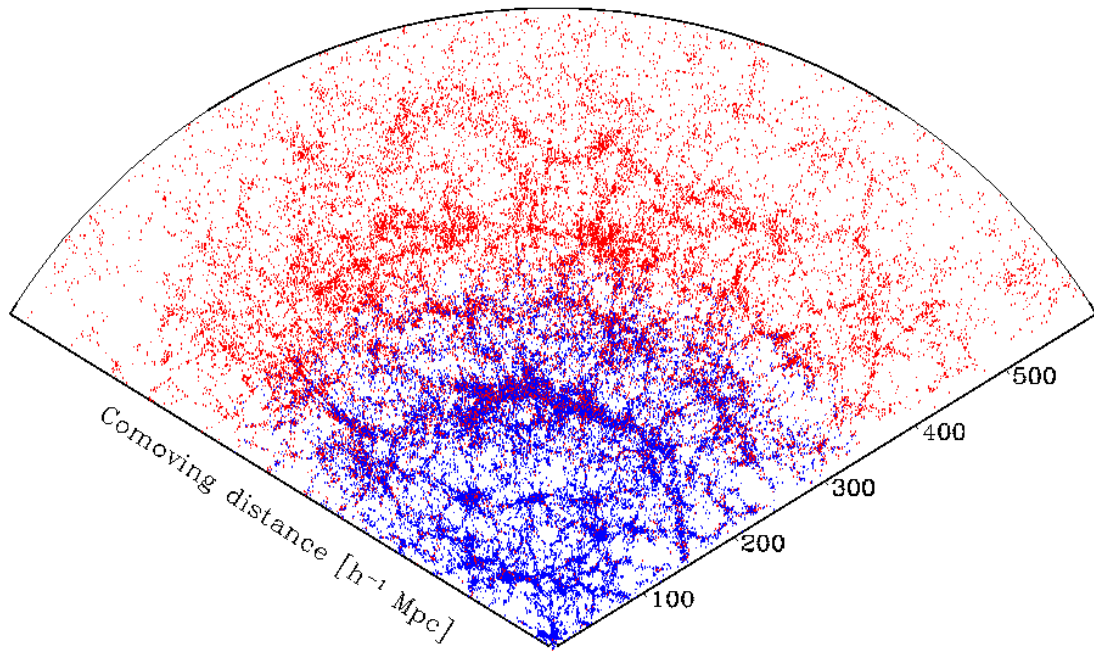
Top 4 high-density and top 3 low-density LSSs from mock DR7 surveys ( $d_{bar} = 9 h^{-1} Mpc$ ) in HR2

# 뜨거운 암흑물질과 중성미자

ex. 중성미자 질량 = 0.01 ~ 0.1 eV, 총 개수밀도  $\sim 10^3 / \text{cm}^3 \rightarrow$  요구되는 암흑물질 양의 <1%

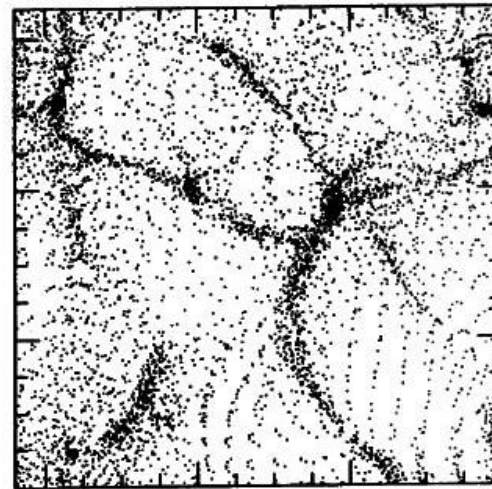
HDM: top-down 천체생성 각본. 초은하단 규모 천체가 먼저 생기고 분열과정으로 은하 생성  
우주거대구조의 모양이 거대하고 ( $\gg \sim 10\text{Mpc}$ ) 부드러운 filament와 wall, void 들로 구성

CDM: bottom-up 천체생성 각본. 아은하천체의 군집으로 은하가 생기고, 은하단, 초은하단 등이 생성  
우주거대구조의 filament와 wall에 상당량의 작은 규모의 요동들 존재

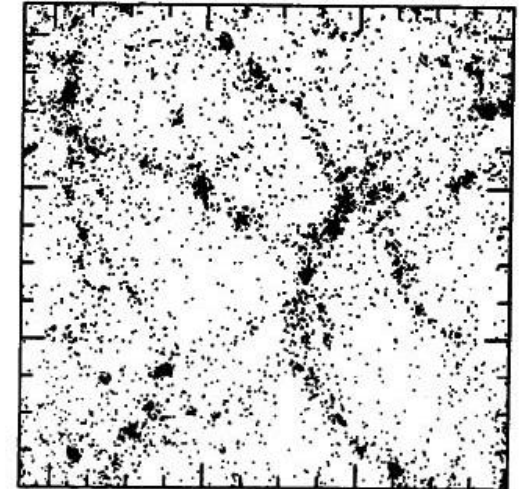


SDSS (최윤영, 박창범+ 2005)

뜨거운 암흑물질



차가운 암흑물질 scdm



Weinberg & Gunn (1990)



# 암흑물질의 분류 - 우주론/천체생성 관점에서

**뜨거운 암흑물질(HDM)** - 천체 생성시기에  $\text{free-streaming scale} \gg \text{structure scale}$ 인 물질  
free-streaming scale보다 작은 규모의 요동 지워짐  
top-down 천체생성 시나리오

**차가운 암흑물질(CDM)** - 천체 생성시기에  $\text{free-streaming scale} \ll \text{structure scale}$ 인 물질  
bottom-up 천체생성 시나리오

**미지근한 암흑물질(WDM)** - 속도분산이 HDM과 CDM의 중간적 성질  
free-streaming scale을 경계로 작은 규모에서 top-down, 큰 규모에서 bottom-up 생성  
missing satellite & cuspy halo problems relieved

\* Scales of interest: 100pc (MC) - 10 kpc (galaxies)

# 암흑물질이 존재한다는 관측적 증거

## 1. 은하단 속도분산 (Zwicky 1933)

머리털자리 은하단의 ~1000 은하들의 속도분산 → 역학적 질량 ~ 빛을 내는 질량의 160배

COMA - DM : hot ICM : stars = 85:14:1

Local Group: M31 and MW dynamical mass  $\sim 3.5 \times 10^{12} M_{\odot}$   $\sim 20x$  total visible mass

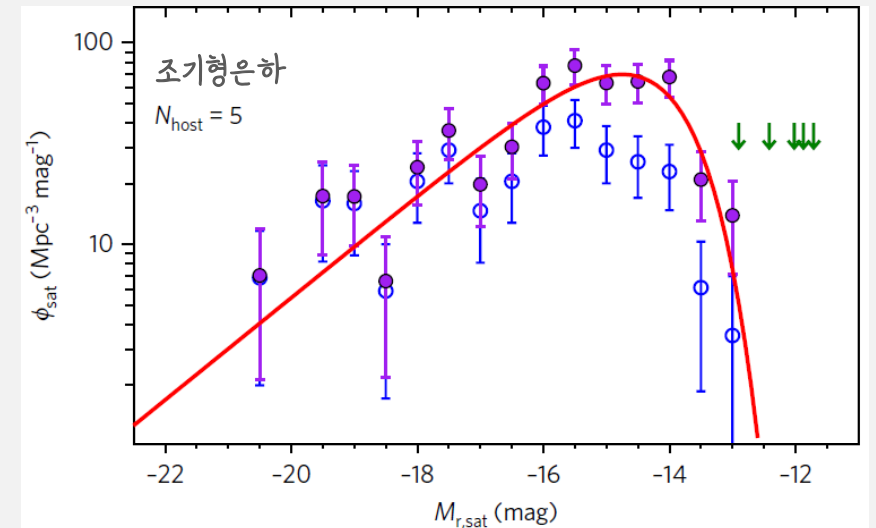
## 2. 나선은하의 회전곡선 (Rubin & Ford 1970)

방출선(HI, CO, H $\alpha$ )의 Doppler shift → 은하 회전곡선

## 3. 딸린은하 부재 문제? missing satellite problem

우주론적 수치모의 실험 vs 은하관측

[박창범, 황호성+ 2019]

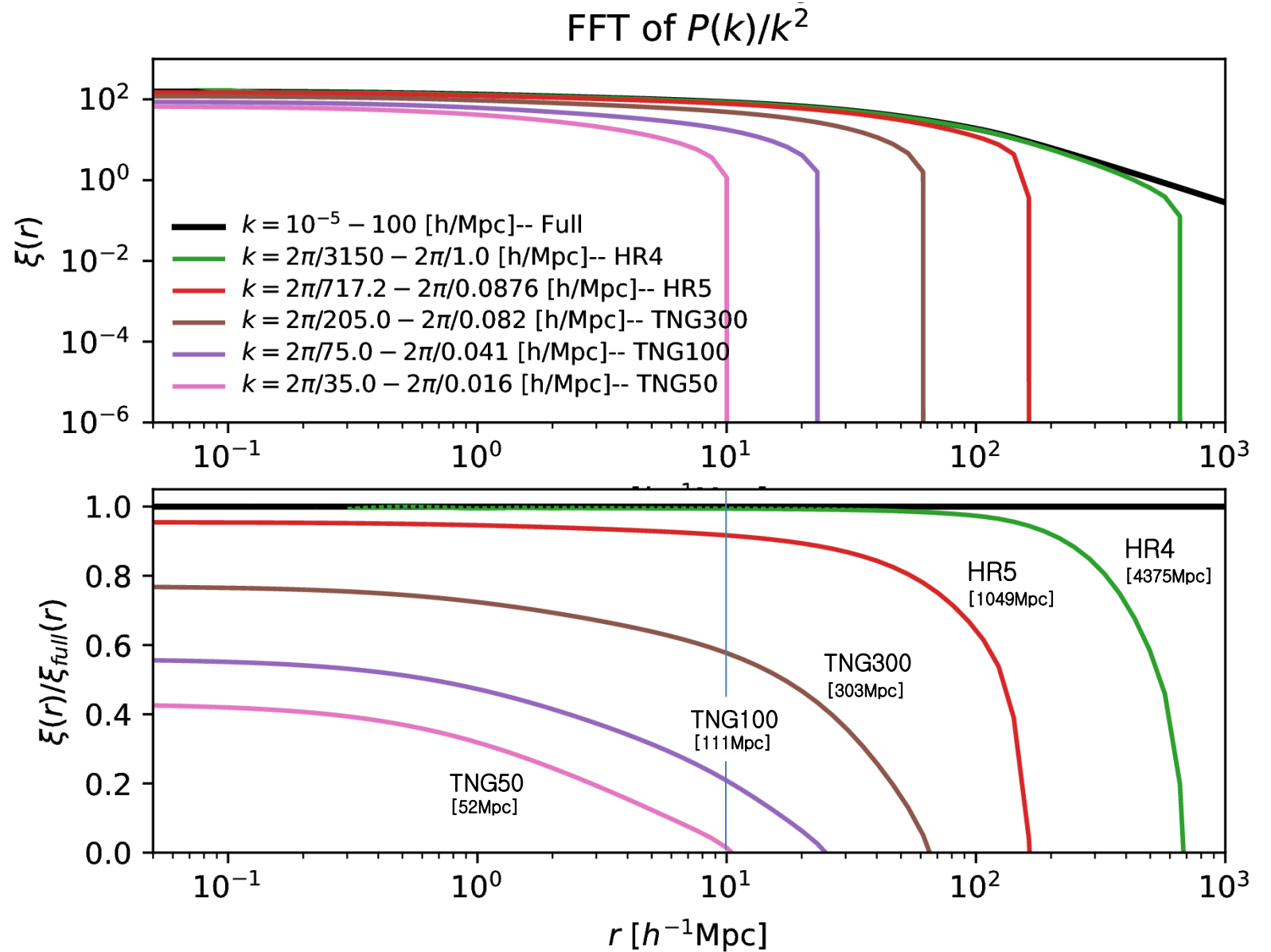


**Core-Cusp problem?**

**Environmental effects**  
**Shallow potential well**

**Mass resolution in sims**  
**Missing small objects**

**Underestimation of**  
**velocity correlation in**  
**sims**  
**Small Sim box size**



## Impact of dark matter on structure formation/cosmology

- Amount of DM: Epoch of matter-radiation equality
  - > shape & amplitude of density fluctuation PS
  - > growth of density perturbations & texture/connectivity of LSS
- Relativistic components in rde
  - i. change of expansion rate -> Epoch of matter-radiation equality ["]
  - ii. Free-streaming of massless particles -> shape & amplitude of density fluctuation PS
    - > growth of density perturbations & texture/connectivity of LSS



COMMENT

## Mixed Dark Matter

We know two DM components

non-B Dark Matter seems ~collisionless. ~Noninteracting directly, interacting through gravity.

non-relativistic today

~many components

: fractions? properties (Fermions, Bosons, relativistic/non-rel at decoupling, equilibrium/non-equil at decoupling, distribution func.)

- CDM dominant: .
- HDM exists: new forms of relativistic components? Should not affect structure formation much.
- WDM or SIDM may help: measure the cut-off wavelength. But motivation is quite dubious.

→ **wCBHWDM model?**