

우주론 수치모의실험

김용휘

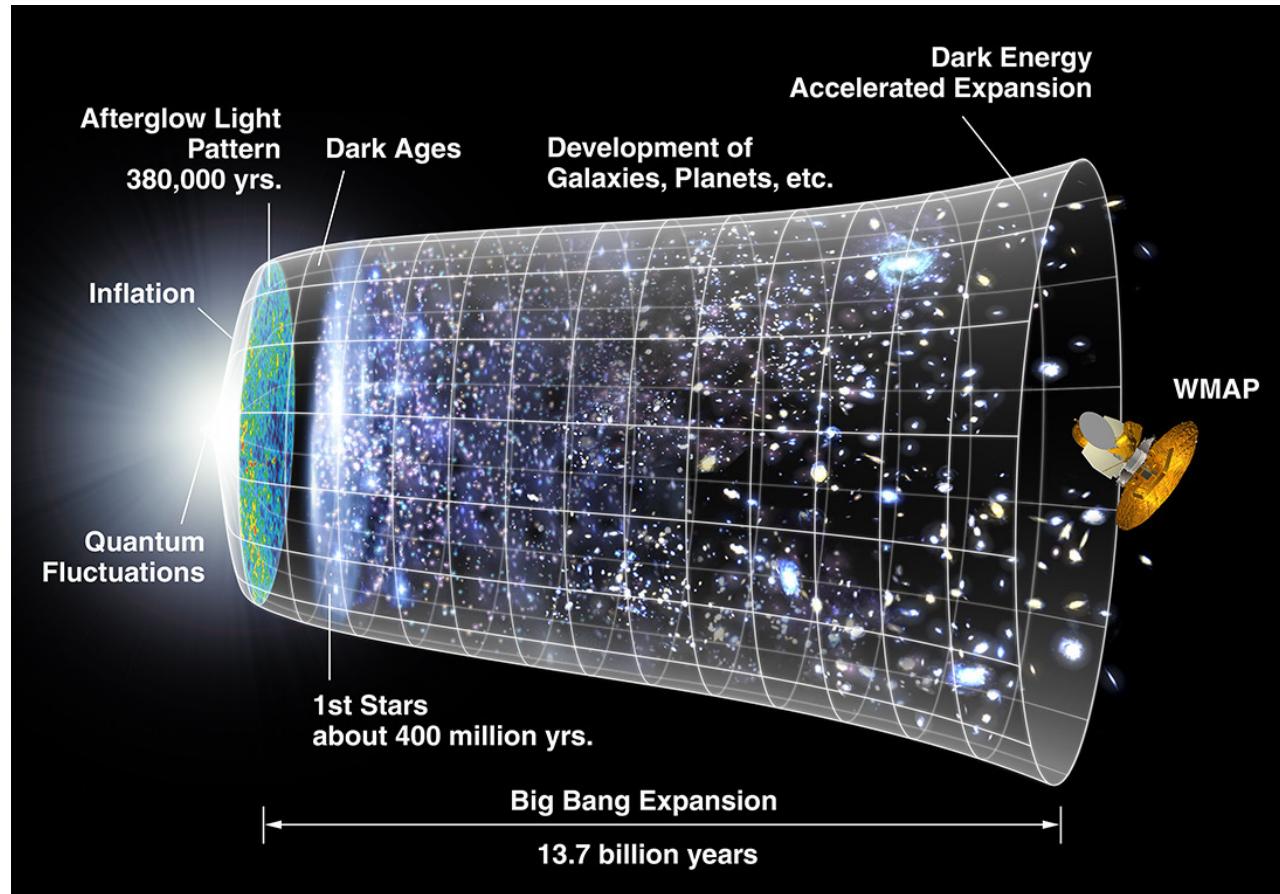
한국과학기술원 부설 고등과학원 (KIAS)

2022 수치상대론 및 중력파 겨울학교 / 계산천체물리 경진대회

2022.01.19(수) 서울가든호텔

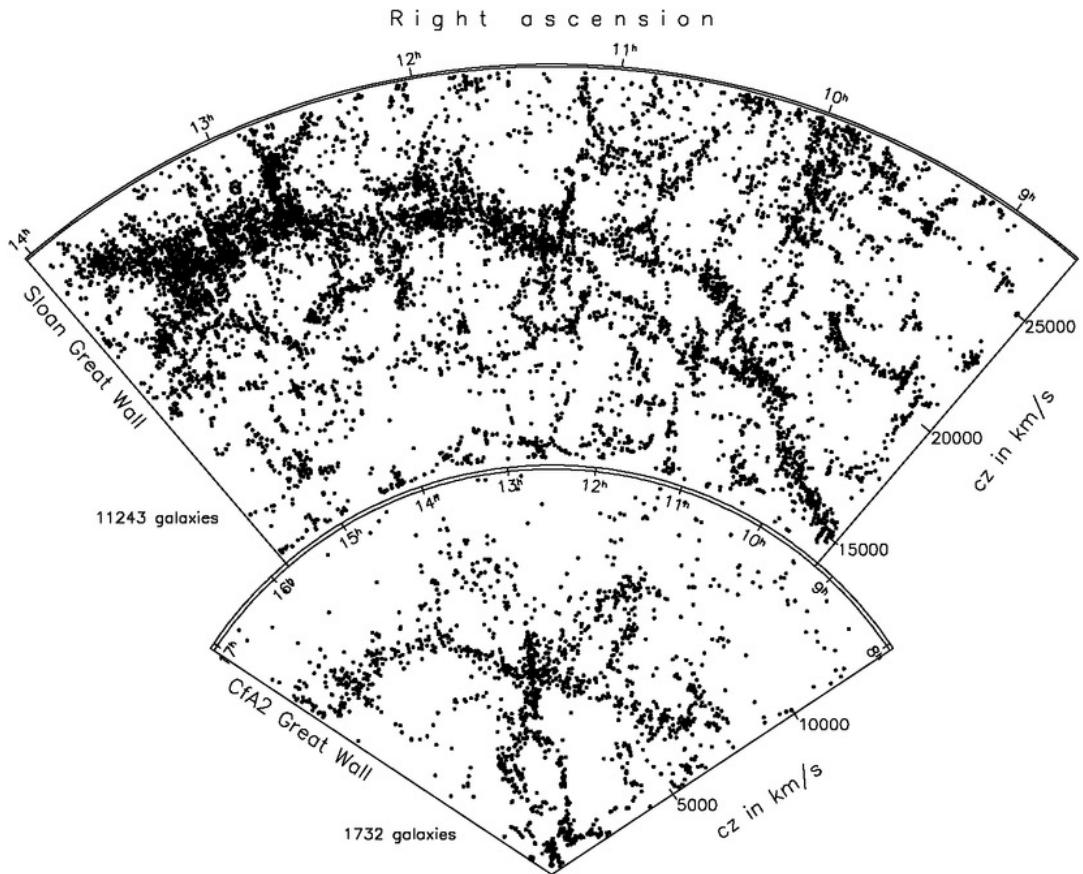
The Beginning of Our Universe

- Big Bang (138억년 이전)
 - 시간과 공간의 시작
 - 양자역학적인 에너지 요동 발생
- Inflation (우주 탄생 후 $10^{-36} \sim 10^{-32}$ 초)
 - 급속한 팽창 : $10^{-28}\text{m} \sim 10\text{cm}$
 - 물질 및 에너지 요동 보존
- 초기 양자 밀도 요동 → 고밀도/저밀도 영역
- 핵융합 : H → He → → Rh
- 최초의 별 탄생 → 은하 탄생 → 은하단 형성 → 우주 거대 구조 형성
- 가속 팽창 시작



→ 초기 미시 양자 요동이 거대 우주 구조를 결정 → “우주론 태동”

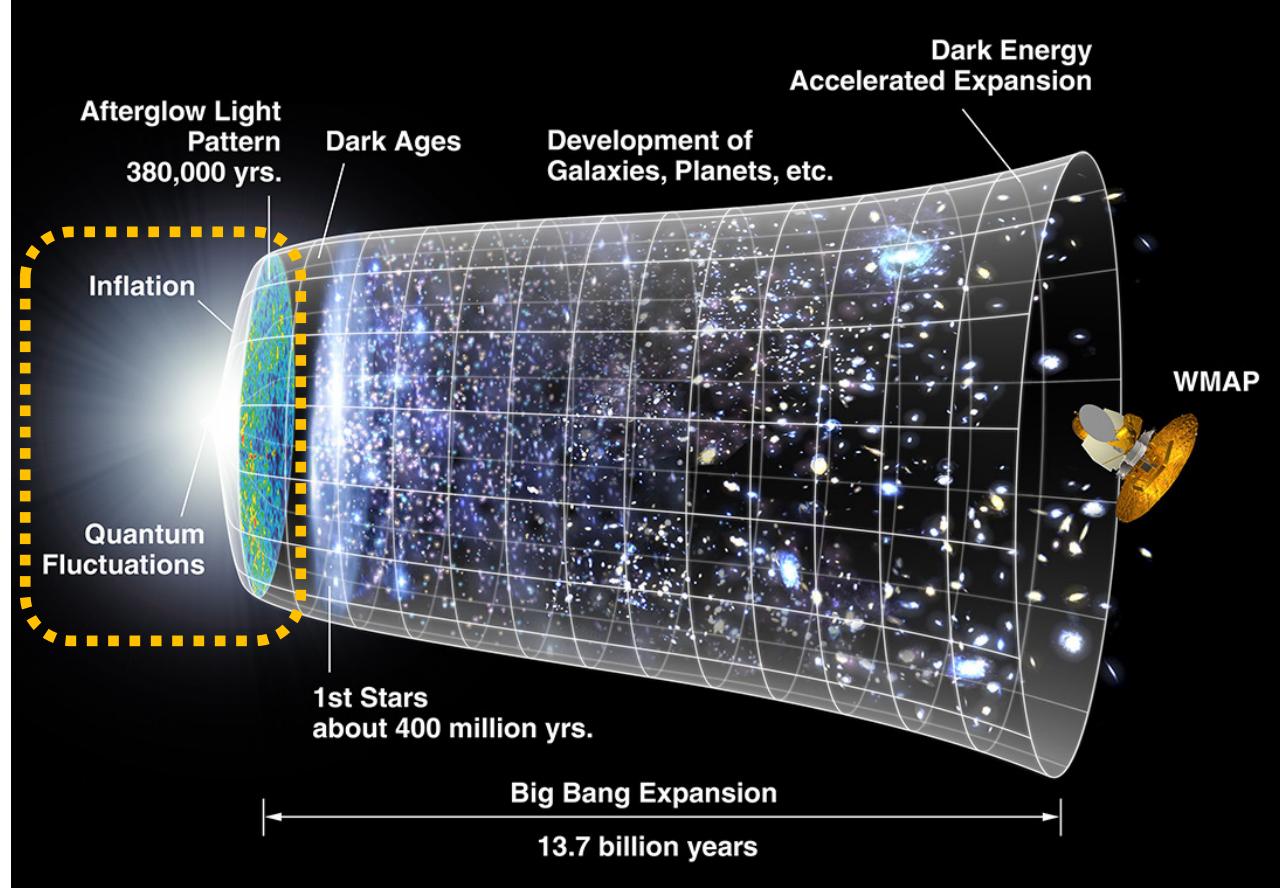
Real Universe vs. Idealized Universe



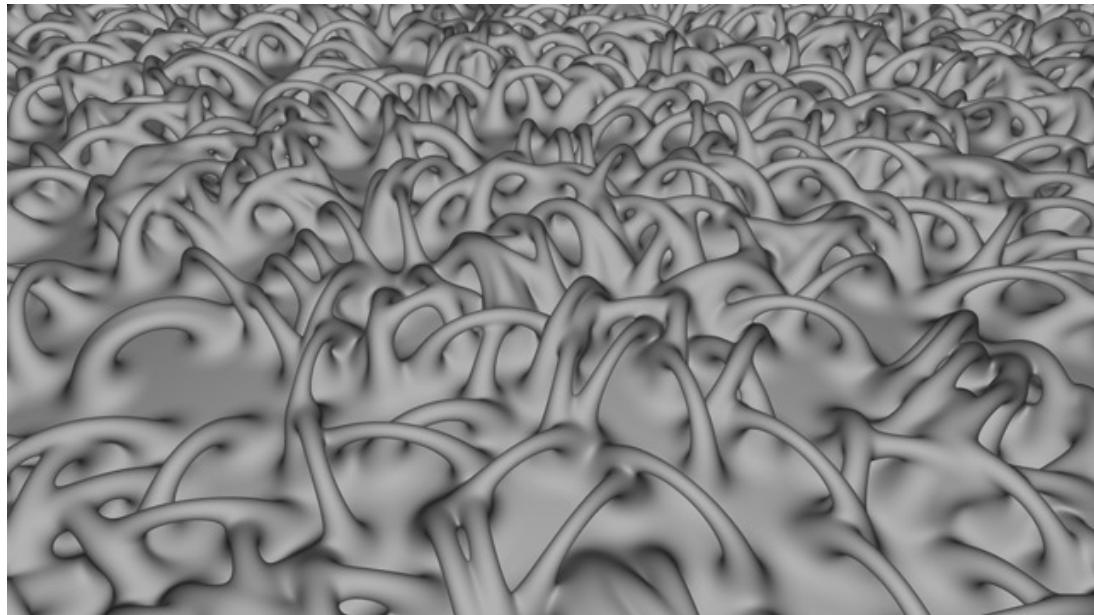
$\Omega_m, \Omega_\Lambda, \Omega_k, H_0$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3} \quad \& \quad \frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3}$$

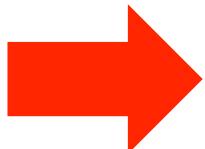
← Friedmann Equations



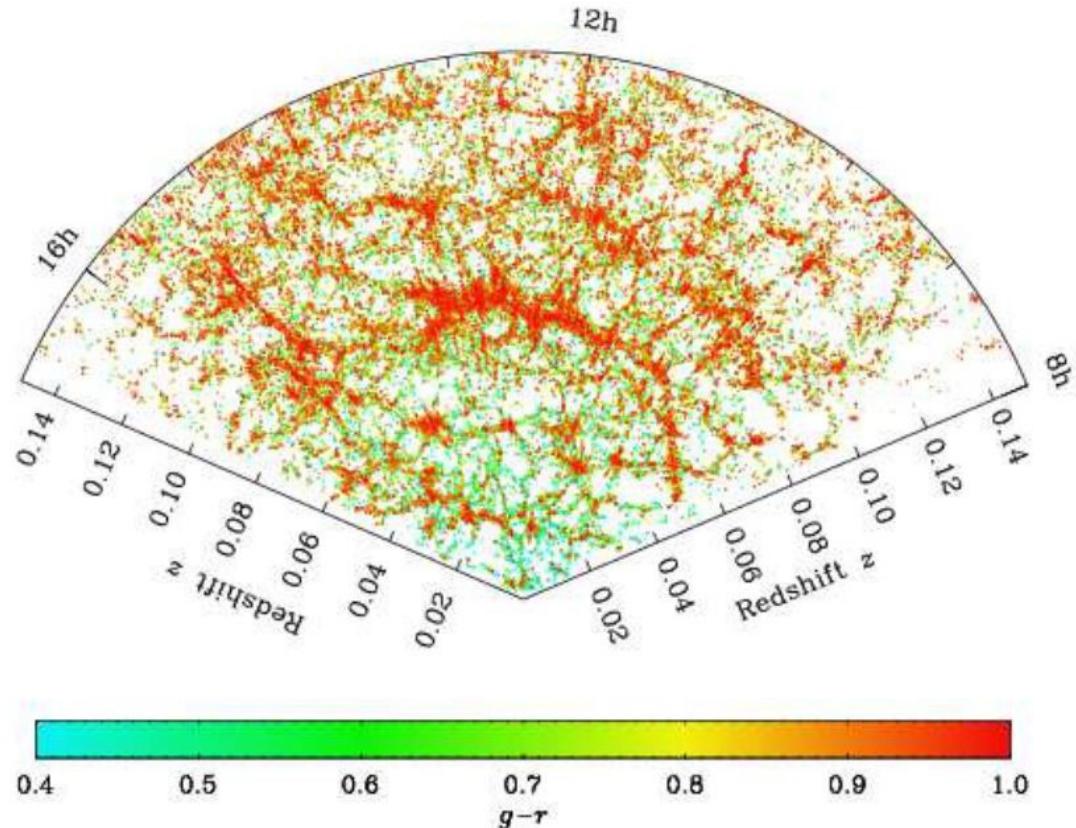
Random Quantum Fluctuations



관계성?



Galaxies & Galaxy Clusters



138억년의 물질 분포 진화 과정에 영향을 미치는 요인

→ 우주팽창역사, 중력적 진화, 유체역학 등

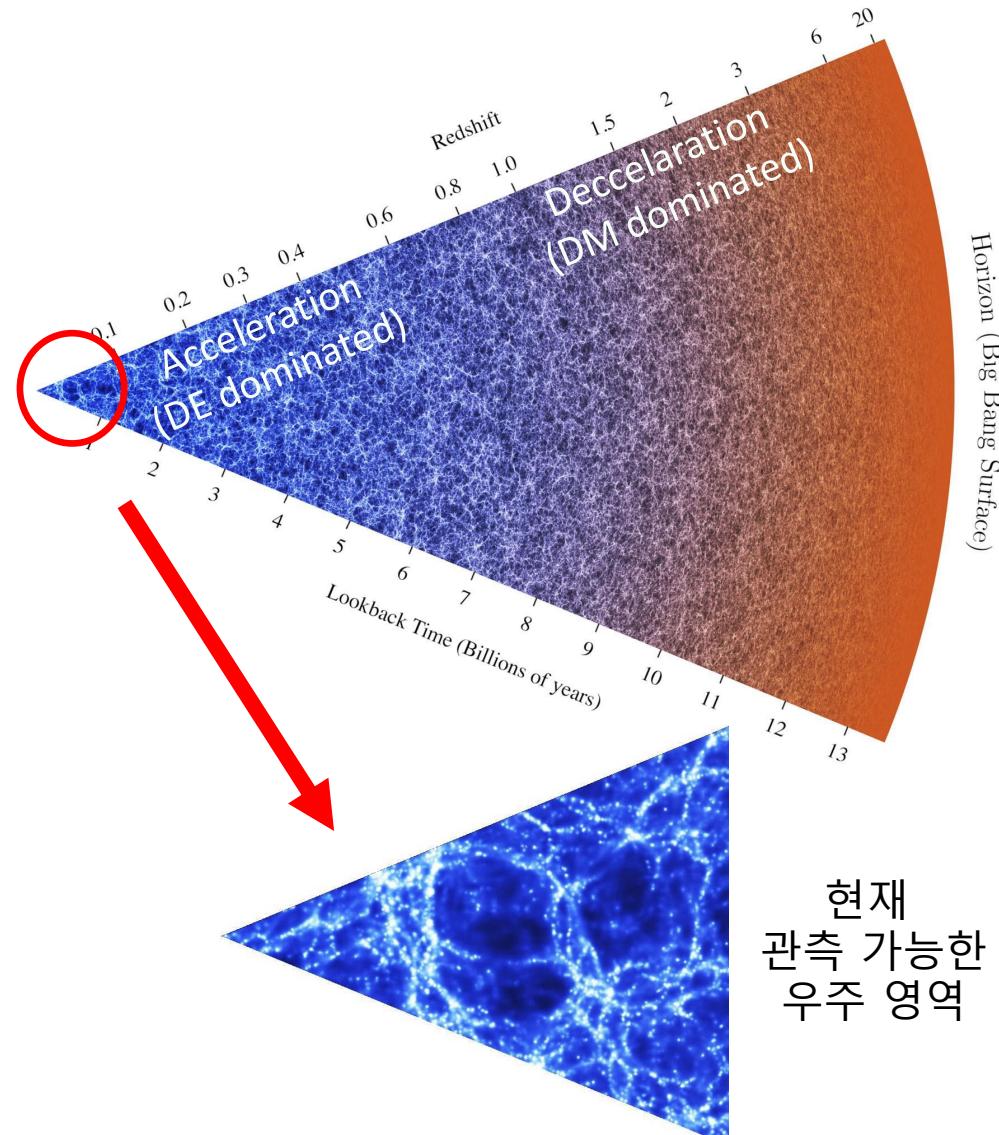
- 수치모의실험
 - 우리가 알고 있는 경험과 물리 법칙으로 근본적인 현상을 모방하는 것
 - 대상 : (과학적으로 설명 가능한) 모든 자연 현상과 생명 현상
 - 모형 : 현상, 개념 등에 관한 수학적인 표현들을 이용하여 제작
- 우주론 수치모의실험
 - 팽창하는 공간에서 우주 구조의 형성 및 진화를 살펴보는 것
 - 표준우주모형 : Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker(FLRW) 우주 팽창 모형 + 암흑물질 + 암흑에너지
 - 초기 조건
 - 양자 요동 + 인플레이션 + 우주 팽창 + CDM/WDM + 우주 나이 (허블상수)
 - 선형적 밀도 분포 (Gaussian distribution)
 - 1차/2차 선형 섭동 이론(LPT, Linear Perturbation Theory)
 - 하드웨어 자원
 - 과거 : 일반 데스크탑 CPU / 수 MB 메모리 / 수백 MB 저장공간
 - 현재 : 수십만 개 CPU 또는 GPU / 수백 TB 메모리 / 수 PB 저장공간

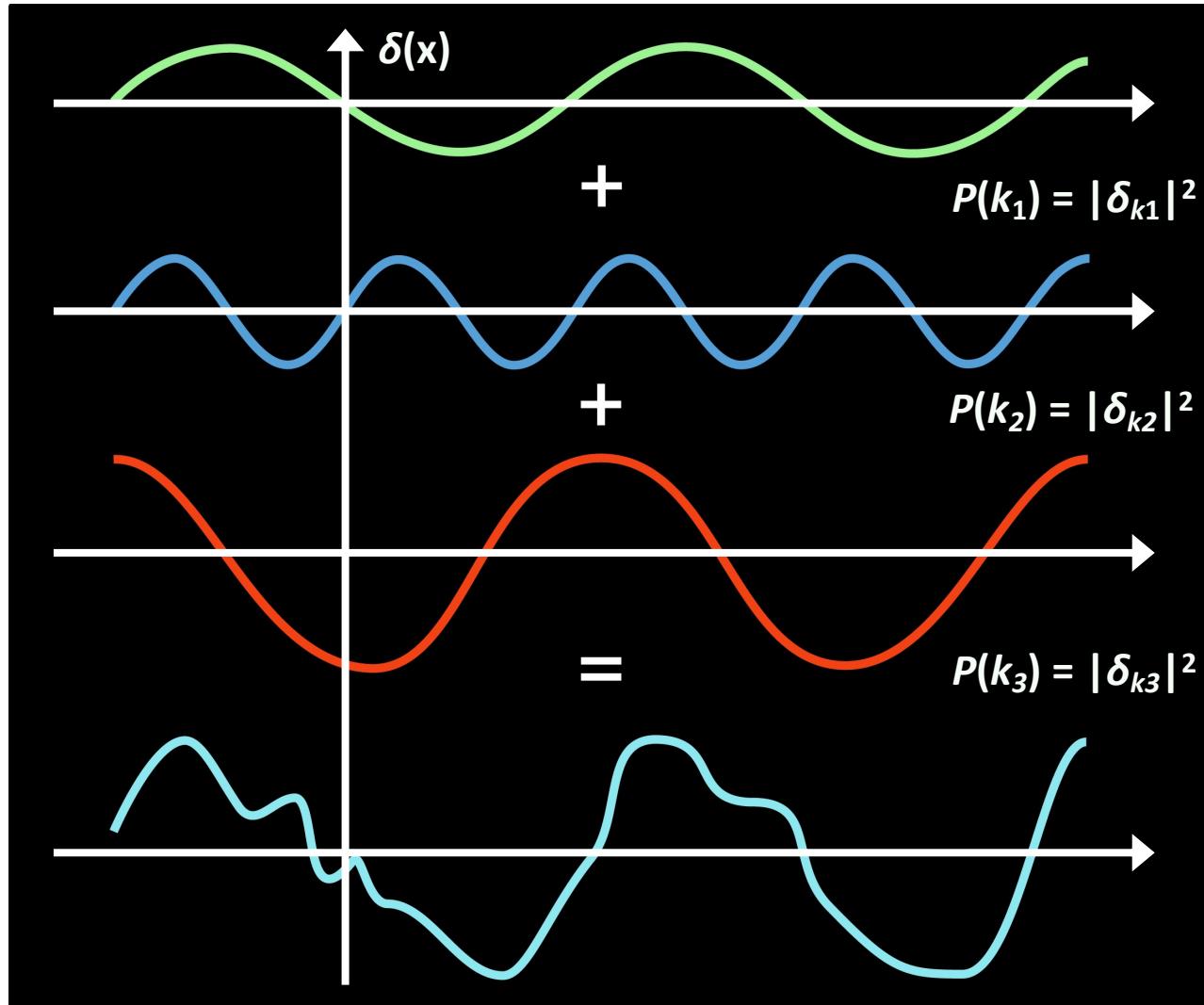
* FLRW metric : an exact solution of Einstein's field equations of general relativity

→ 현재 관측 가능 영역의 관측 자료를 비교 및 예측

- 바리온 음파 진동 (Baryonic Acoustic Oscillation)
 - 우주론적 표준 잣대 (Standard ruler)
 - 우주 상태를 결정하는 물리 변수들의 함수로 이루어짐.
- 은하 및 은하단 개수 분포와 상관관계함수
- 적색이동 공간 상의 왜곡
 - 은하의 특이 속도와 우주 모형과의 관계성
- 약한 중력렌즈 현상 : 암흑물질 분포와의 관계성
- 은하 및 은하단의 위성은하 분포

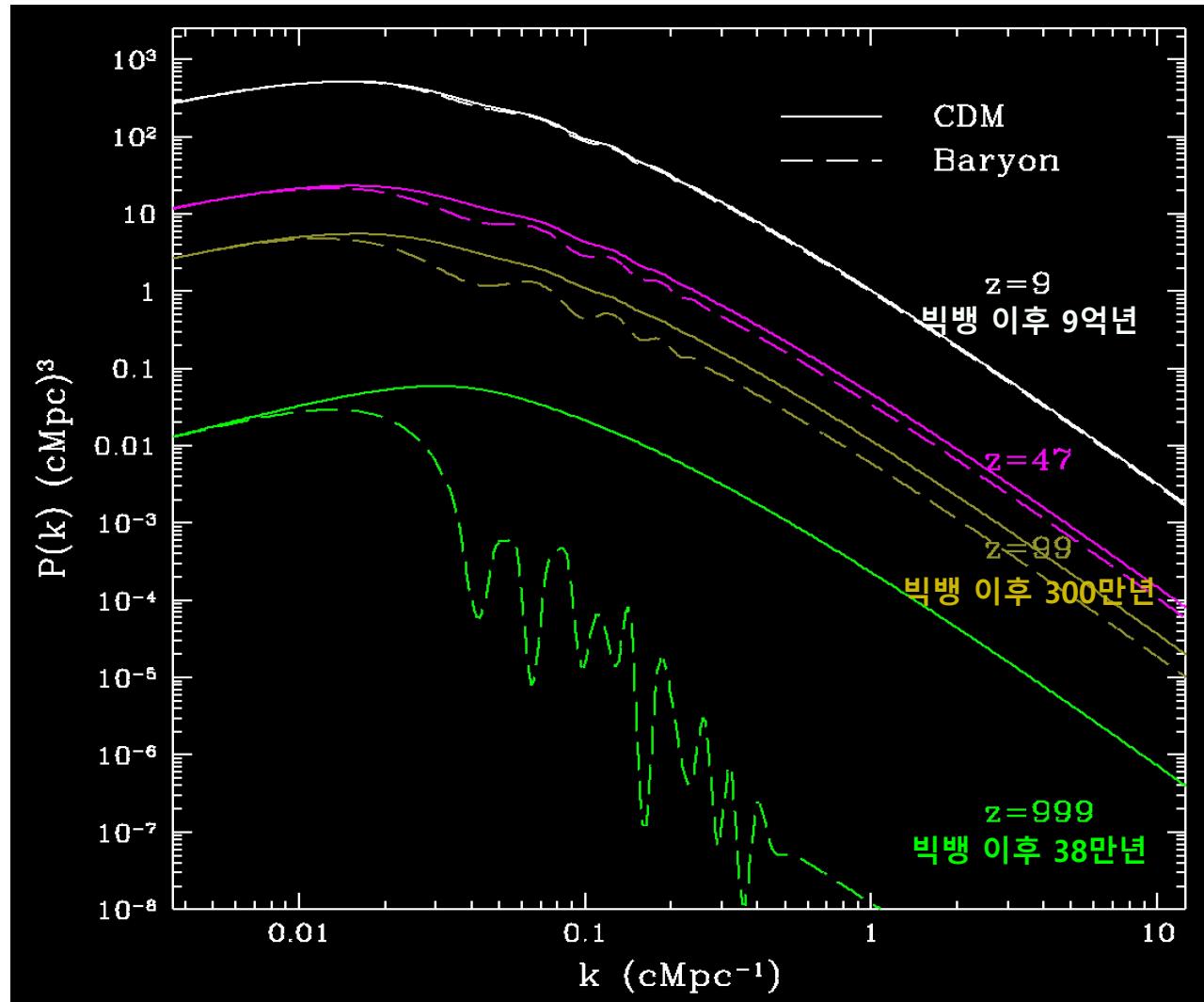
→ 표준우주모형의 정당성 및 구성 물리 변수의 정확성 확보 (Ω_m , Ω_Λ , Ω_k , H_0 등)





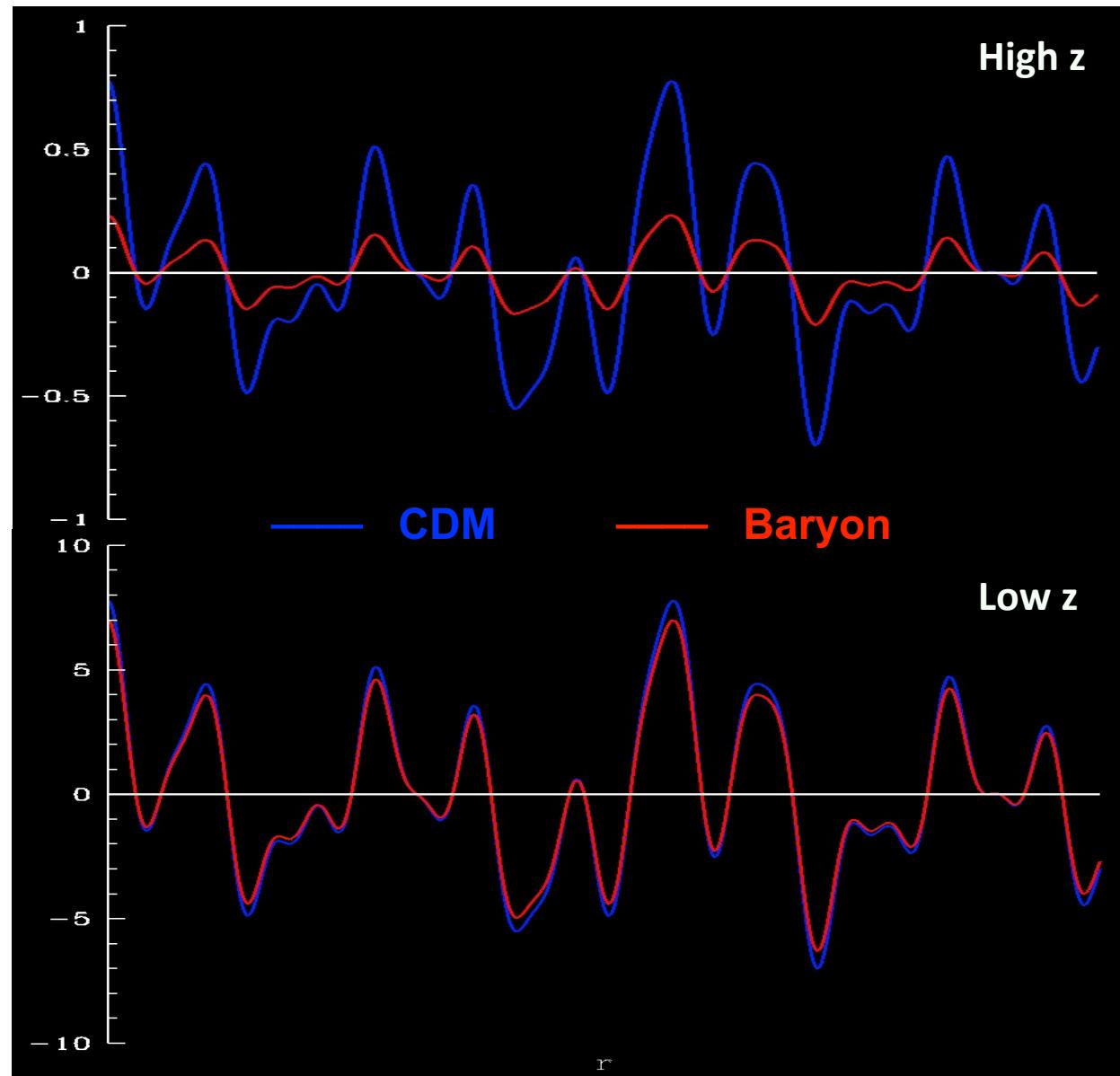
$$\delta \equiv \frac{\rho - \langle \rho \rangle}{\langle \rho \rangle} \rightarrow \delta_k ; \quad k_i \equiv \frac{2\pi}{\lambda_i}$$

- Power Spectrum, $P(k)$
 - 밀도 요동의 정도를 규모 별로 나타냄
→ Fourier mode, k , δ_k

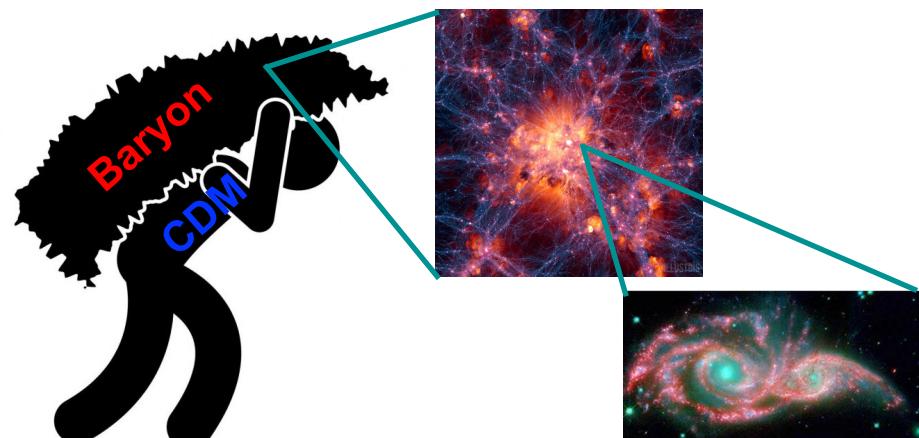


$$\delta \equiv \frac{\rho - \langle \rho \rangle}{\langle \rho \rangle} \rightarrow \delta_k ; \quad k_i \equiv \frac{2\pi}{\lambda_i}$$

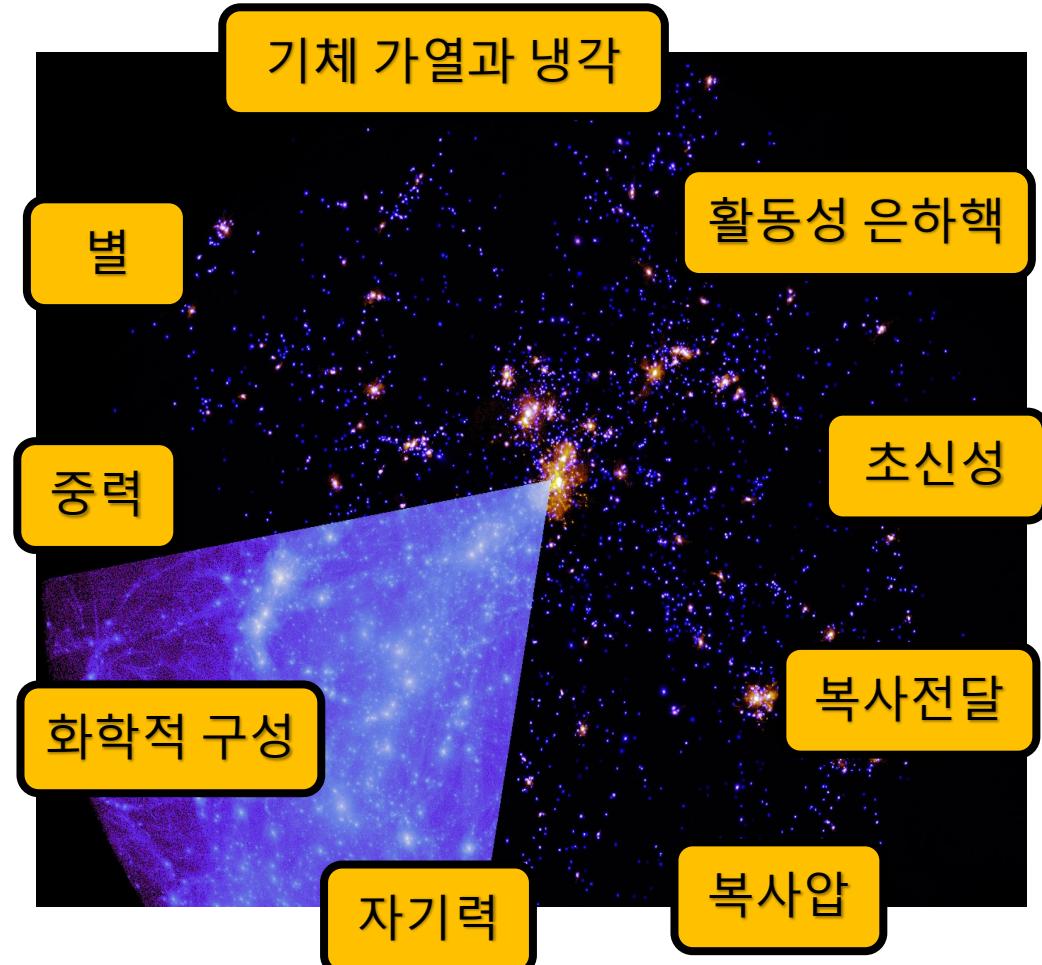
- Power Spectrum, $P(k)$
 - 밀도 요동의 정도를 규모 별로 나타냄
→ Fourier mode, k , δ_k
- 암흑물질과 바리온(Baryon)의 진화 양상
 - 우주 초기에는 바리온의 요동이 암흑물질의 요동보다 작다.
 - 우주배경복사(CMB) 온도 요동 ($z_{CMB} \sim 10^3$)
 $: \Delta T/T \sim 10^{-5}$
- 암흑물질의 요동이 급격히 증폭
 - $z=1000$ 에서 0까지 진화할 동안 바리온의 요동은 10^{-5} 에서 1까지 자라난다.
※ 팽창하는 우주에서 요동의 크기는 $1/(1+z)$ 에 비례.



- 고 적색이동에서는 바리온과 암흑물질의 요동 크기 차이가 크다.
 - 저 적색이동에서는 둘 사이의 요동 크기가 비슷하다.
- 암흑물질은 우주 초기에서부터 현재까지 바리온 물질의 중력 진화를 이끈다.
- 별이나 은하가 없는 암흑물질 헤일로는 있어도 헤일로 없는 별이나 은하는 거의 없다. (예외, 은하단 중심부의 위성은하)



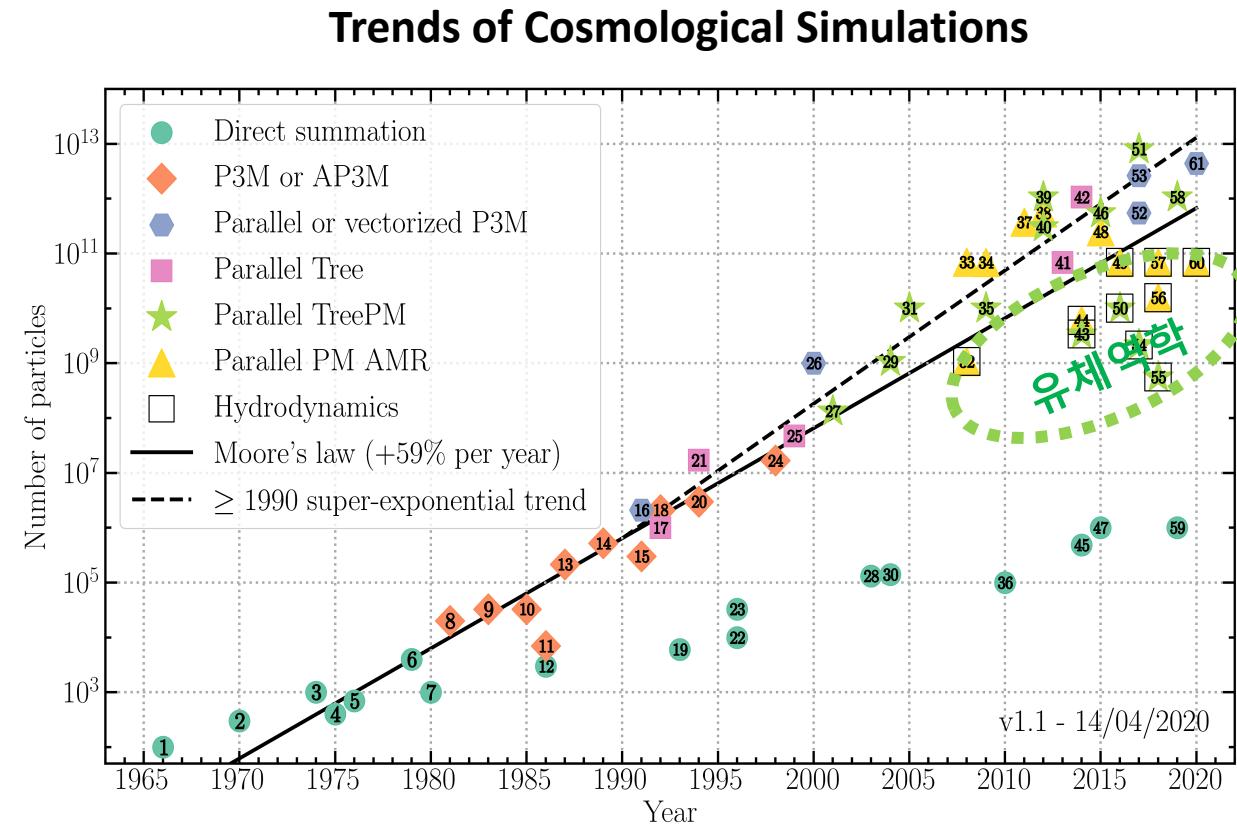
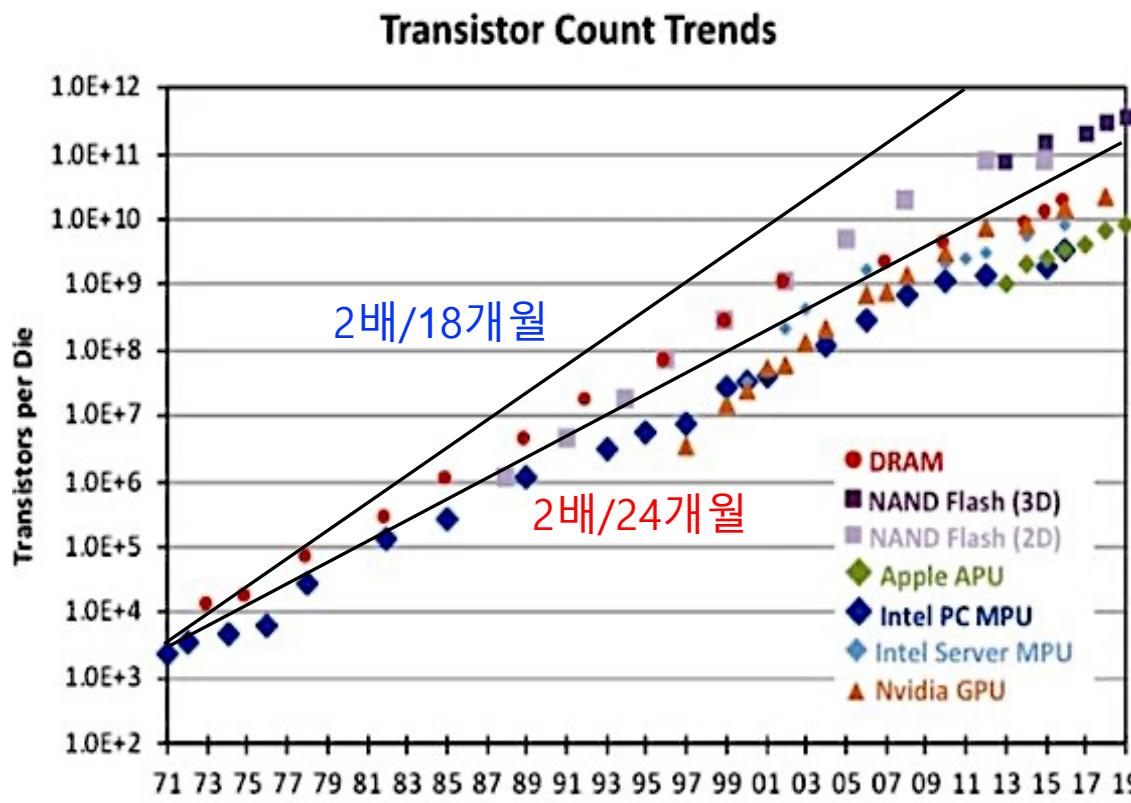
- 은하 규모(<10kpc)에서는 기체의 힘이 중력보다 크다.
- 천문학의 주된 관측 대상이 바리온이고, 유체역학은 이러한 바리온의 변화를 기술한다.
 - 온도 저하에 따른 기체 응축 → 별 탄생
 - 원반은하 형성이나 은하간 병합에 의한 폭발적인 별 형성
 - 초신성 폭발 및 초거대질량 블랙홀 피드백 현상
 - 은하의 공간 분포와 주변 물질 분포 간 통계적 편중 현상
 - 우주론적 초기 조건(양자요동, 암흑물질, 암흑에너지, 상대론적 중력)으로부터 관측된 현상들을 설명하기 위한 물리기작
- 우주론적 환경의 종속변수로써 은하
 - 은하의 계층적 진화 : 작은 은하 → 큰 은하로 진화
 - 우주 공동(void), 필라멘트 구조, 은하단 등의 환경에 존재하는 은하의 진화 양상이 서로 다르다.



- 은하단
 - 질량 $M > 10^{14} \sim 4.0 \times 10^{15} M_{\odot}$
 - 은하단 간 평균 거리 $d_0 = 30 \sim 50 \text{Mpc}/h$
- 은하
 - 질량 $M^* \sim 10^{12} M_{\odot}$
 - 은하 간 평균 거리 $d_0 = 5 \text{Mpc}/h$
- 통계적으로 의미가 있는 수치모의실험 : 목표로 하는 대상의 평균 거리의 최소 5배 이상($L_{\text{box}} \geq 5d_0$)
 - 은하단 : $L_{\text{box}} \geq 150 \sim 250 \text{Mpc}/h$
 - 은하 : $L_{\text{box}} \geq 25 \text{Mpc}/h$
- 고려하는 초기조건에 따른 우주론적 수치모의실험의 방법론 차이
 - 은하 규모($\sim 10 \text{kpc}$) 이상 : 중력이 우월 \rightarrow 중력만 고려한 '다체(N-body) 수치모의실험'
 - 은하 규모 이하 : 기체의 힘이 우월 \rightarrow 바리온의 물리 기작을 고려한 '유체역학(HD, MHD) 수치모의실험'

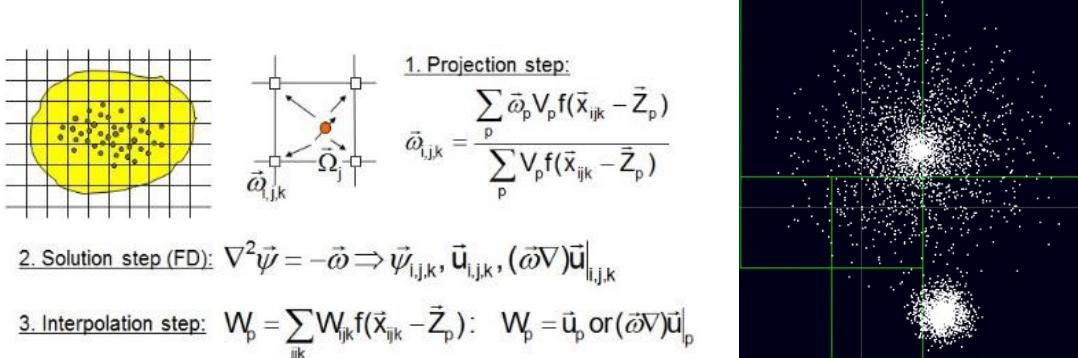
History of N-body Simulations

- 무어의 법칙 : 매 24개월(18개월)마다 트랜지스터 개수가 2배 늘어난다.
- 우주론 다체 수치모의실험 크기의 법칙 : 매 16.5개월마다 입자의 개수가 2배 늘어난다.
 - 1970년 300개 (Peebles 70) vs. 2020년 2-4조개 (Heitman+20; Zhang+20)
 - 반세기 동안 10^{10} 배 증가

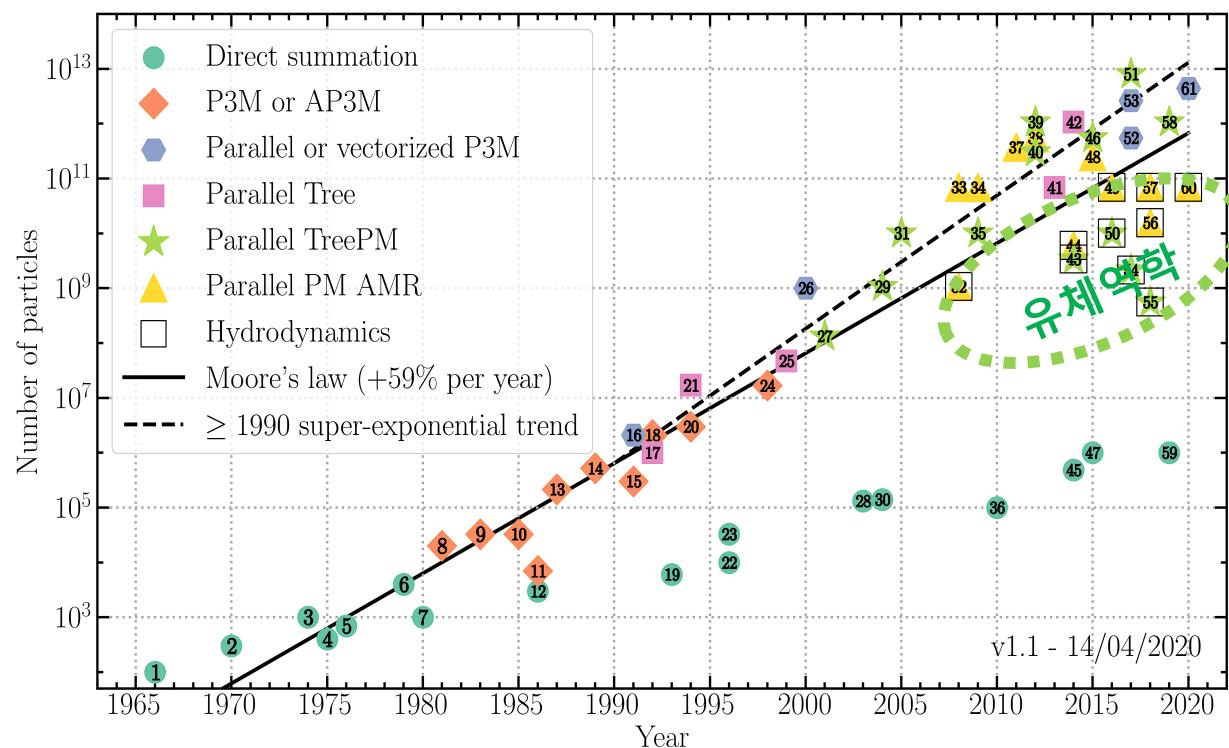


History of N-body Simulations

- 무어의 법칙 : 매 24개월(18개월)마다 트랜지스터 개수가 2배 늘어난다.
- 우주론 다체 수치모의실험 크기의 법칙 : 매 16.5개월마다 입자의 개수가 2배 늘어난다.
 - 1970년 300개 (Peebles 70) vs. 2020년 2-4조개 (Heitman+20; Zhang+20)
 - 반세기 동안 10^{10} 배 증가
- 다체 수치모의실험 방법론
 - Direct N-body (particle-particle, PP) : N^2
 - Particle-Mesh (PM) : Real \leftrightarrow Fourier Space, Φ_g
 - Tree Force Approximation
: 입자들을 monopole, dipole, quadrupole, ...
로 근사

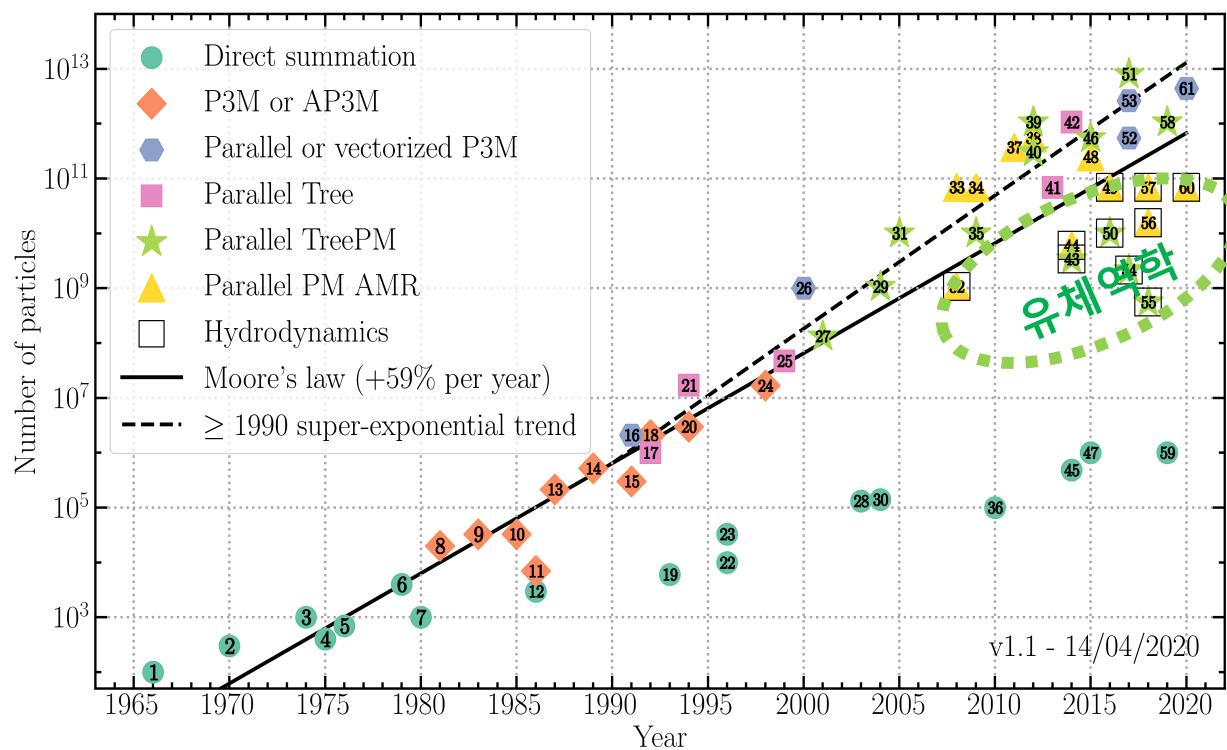


Trends of Cosmological Simulations

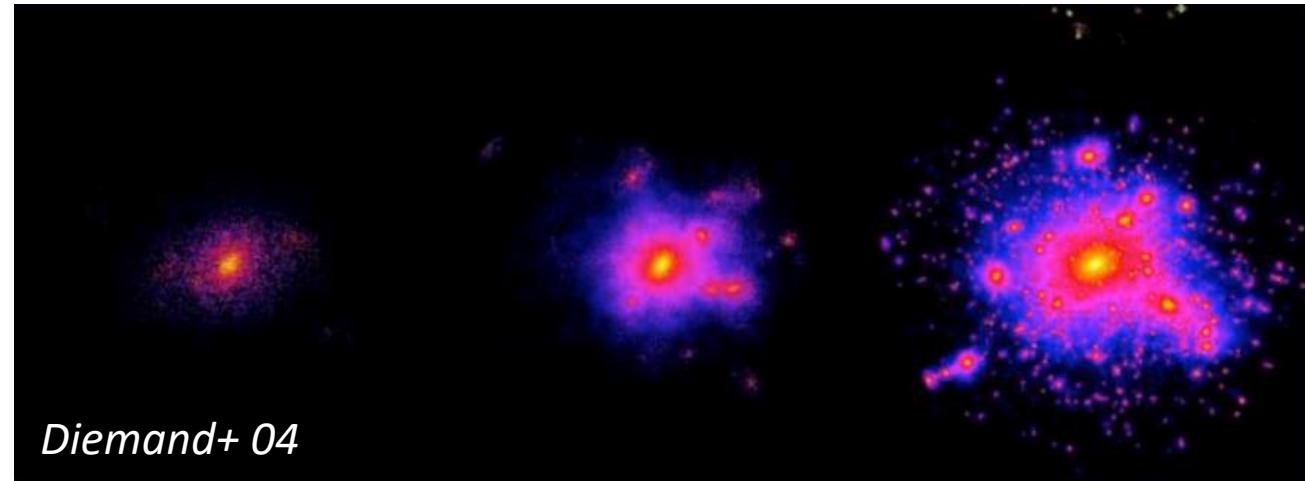
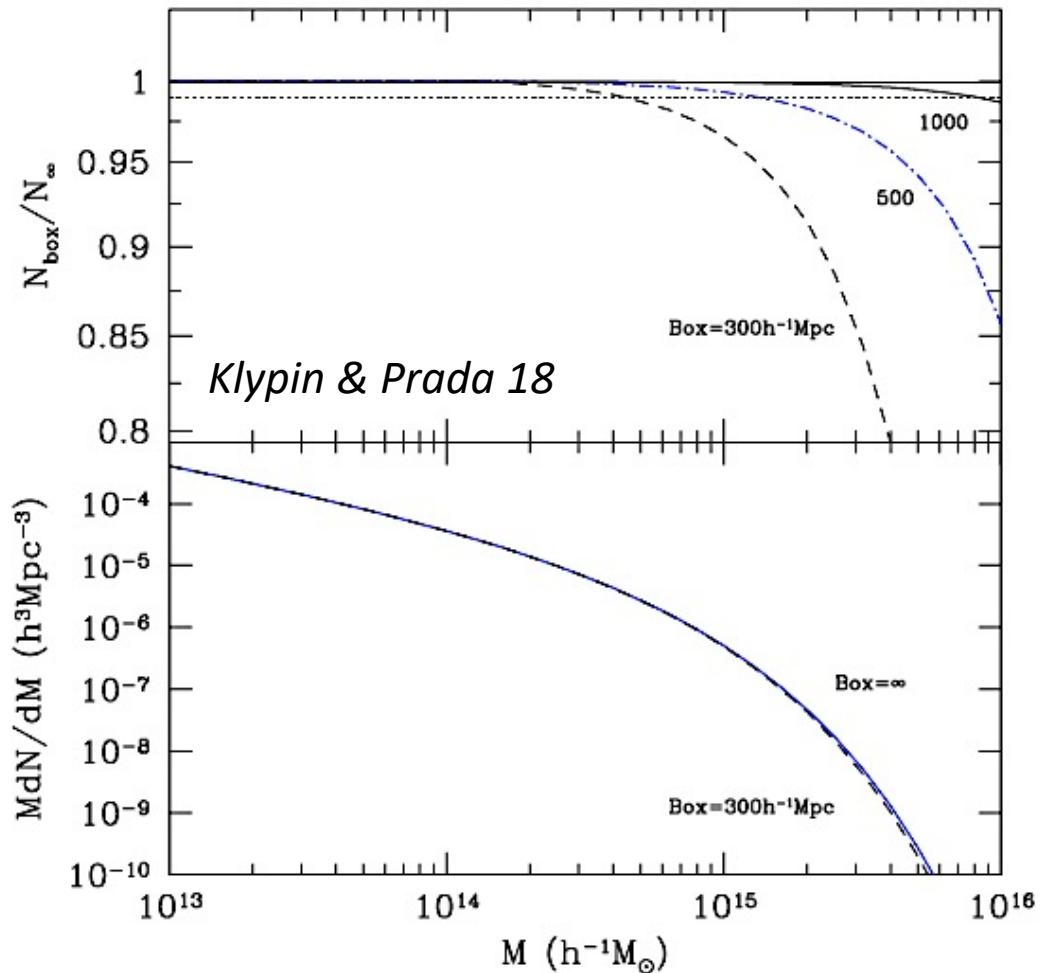


- 무어의 법칙 : 매 24개월(18개월)마다 트랜지스터 개수가 2배 늘어난다.
- 우주론 다체 수치모의실험 크기의 법칙 : 매 16.5개월마다 입자의 개수가 2배 늘어난다.
 - 1970년 300개 (Peebles 70) vs. 2020년 2-4조개 (Heitman+20; Zhang+20)
 - 반세기 동안 10^{10} 배 증가
- 우주론 수치모의실험은 크기뿐만 아니라 분해능도 중요
 - 질량 분해능 = 수치실험 상자크기(L_{box}) × 물질밀도(Ω_m) / 입자수(N_p)
 - 공간 분해능 = 중력 분해능 × 평균 입자 거리 / 수치실험 상자크기
- 다체 수치모의실험에서 분해능의 중요성
 - 구조물의 역학적 범위 : 은하(<100kpc) ~ 은하단(>Gpc)
 - 은하의 우주 환경에 따른 분포에 대한 통계적 분석

Trends of Cosmological Simulations



Significance of L_{box} , Δm & Δx

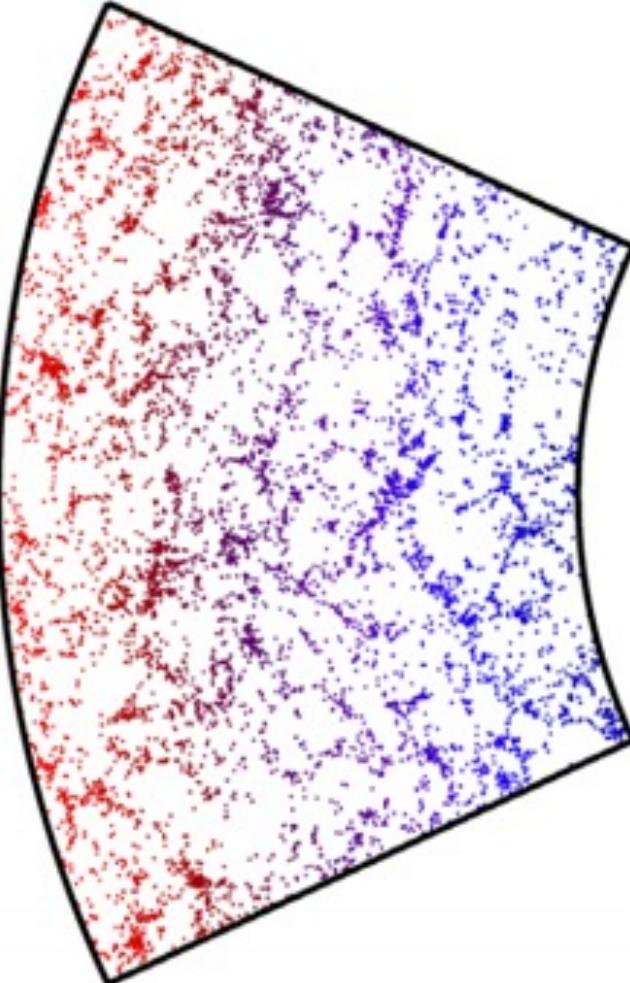


질량 및 공간 분해능 증가 방향

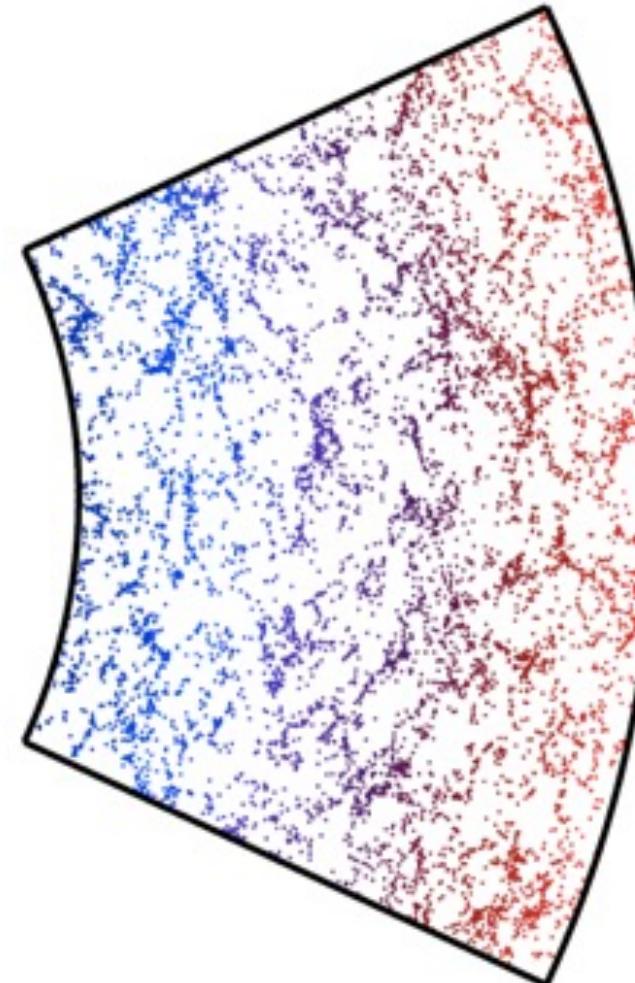
← CfA, SDSS에서 확인한 거대 구조의 크기와 탐사 공간 간의 상관성

- 수치모의실험 상자가 클수록 더 큰 우주 구조물이 나온다.
- 수치모의실험의 분해능이 클수록 보다 많은 세부 구조를 확인할 수 있다.

Example : HectoMAP Survey vs. Horizon Run 4 N-body Simulation



H
E
C
T
O
R
I
Z
O
N
R
U
N
M
A
P

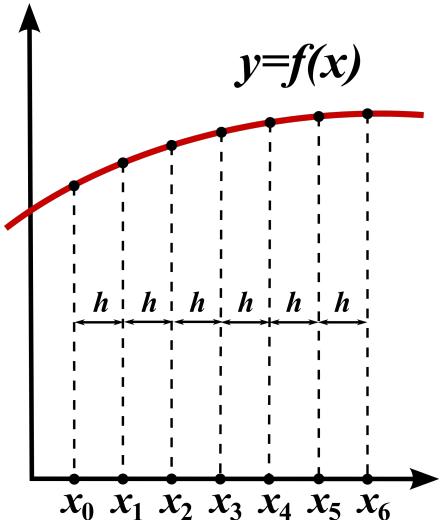


Hwang+16

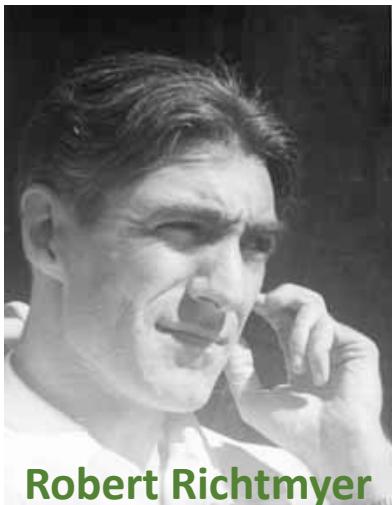


History of (Magneto-) Hydrodynamic Simulation

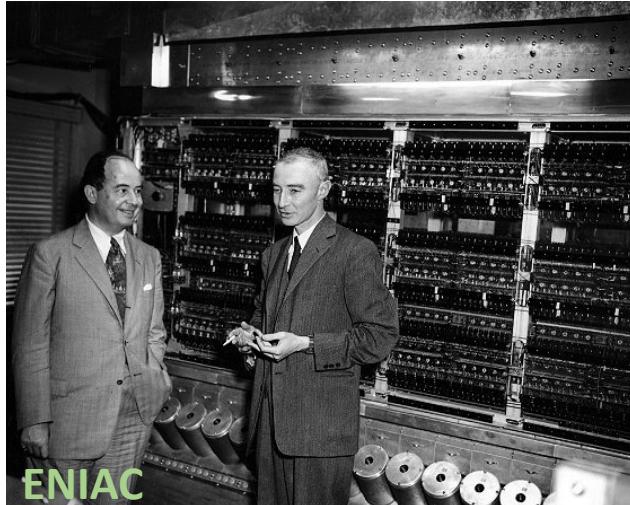
- Hans Bethe & Richard Feynman (1944)
 - 최초의 유체역학 실험 수행 (Los Alamos)
 - 핵무기용 내폭 연구 (A-bomb)
- 최초의 유체역학 코드
 - 1차원 Lagrangian 방법론 적용 및 비점성(no viscosity) 유체를 이용
 - 1945년 유한 차분법(finite difference method, FDM)을 이용하여 시도 → 실패
 - von Neumann & Robert Richtmyer
 - 1948년 인위적 점성(artificial viscosity)을 고려한 유체역학 코드 개발
 - ENIAC과 IBM SSEC를 이용하여 연구



von Neumann



Robert Richtmyer

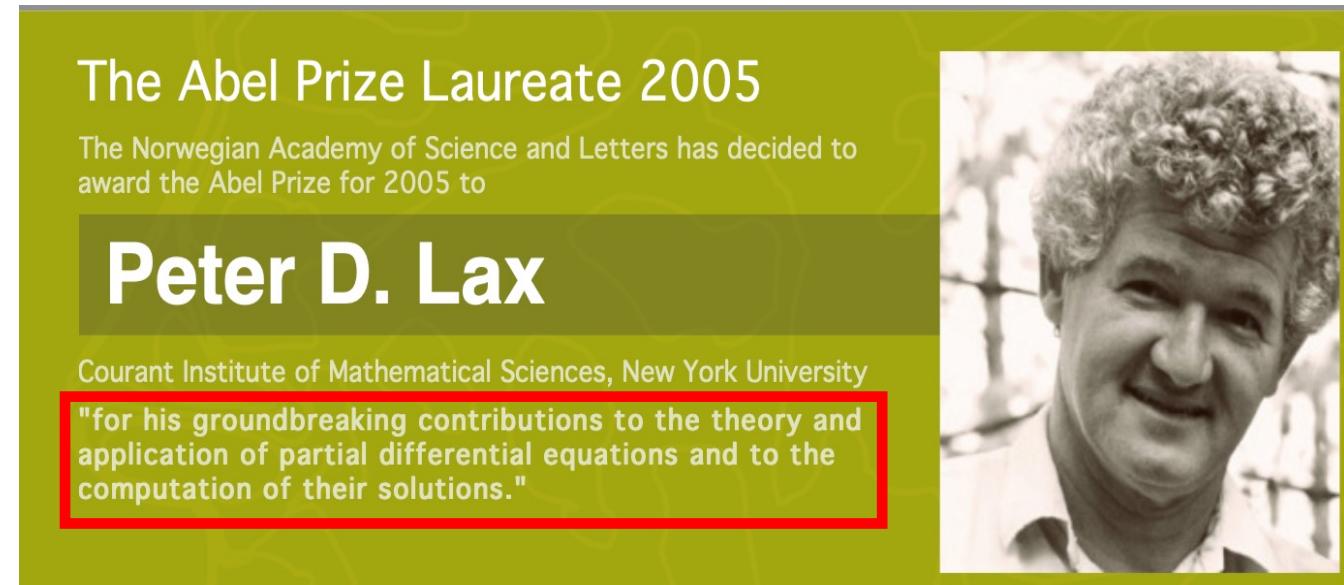


ENIAC

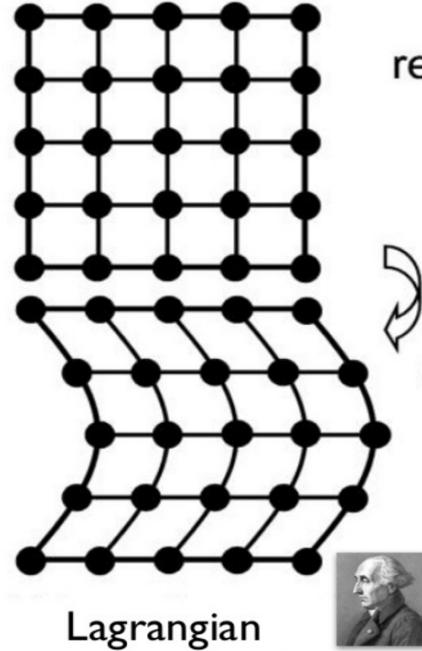


IBM SSEC

- Peter David Lax (1926-)
 - 현대 전산 유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)의 창시자
 - 1950년대부터 현재까지 적분가능계와 유체역학 부분에 지대한 공헌
 - 1987년 울프상 수학 부분 수상, 2005년 아벨상 수상
 - 현재 Courant Institute of Mathematical Sciences (NYU)에서 교수로 재직
- 1960-70년 유체역학 코드에 Eulerian 및 Lagrangian 기술법 적극 적용
- 1970년 Lucy와 Gingold, Monagan이 SPH(smoothed particle hydrodynamics) 방법론 개발 시작
- 1980년 Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL)와 Los Alamos National Laboratory(LANL)에서 완성
- 현재, 다체 수치모의실험 방법론과의 융합을 통해 지속적인 발전 진행중



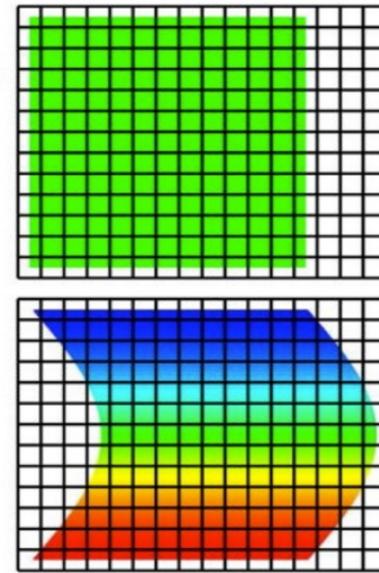
Methodology : Lagrangian vs. Eulerian



Joseph-Louis Lagrange (1736-1813)

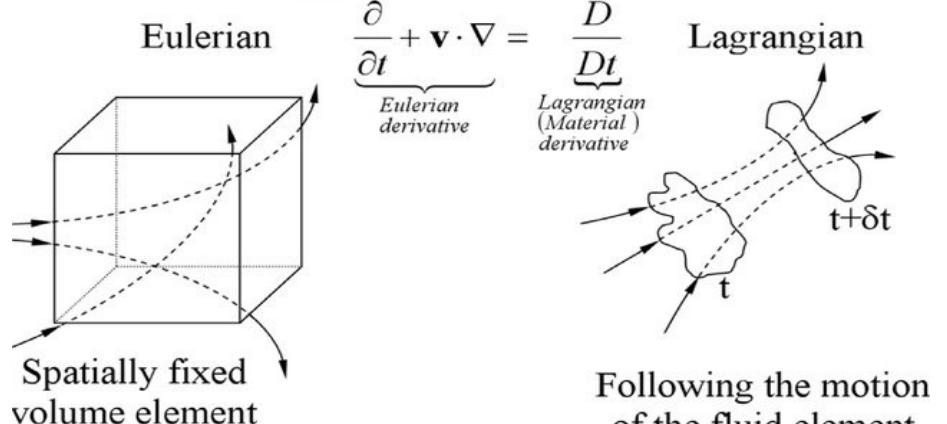
reference

current



Leonhard Euler (1707-1783)

Eulerian



Following the motion
of the fluid element

Vogelsberger+20

Modeling cosmic gas

Eulerian formulation:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} + P \mathbb{1}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e + P) \mathbf{v} = 0$$

Lagrangian formulation:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v}$$

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P$$

$$\frac{De}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot P \mathbf{v}$$

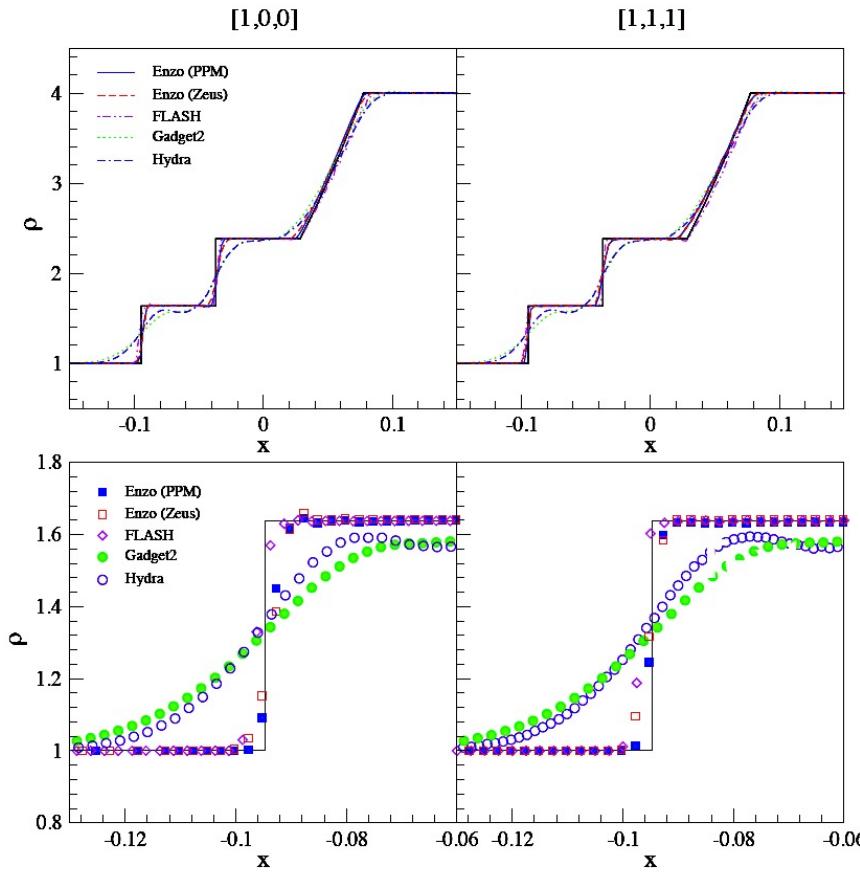
- Lagrangian : 공간 상에 움직이는 입자 혹은 격자를 고려하여 시간에 따른 변화 계산
- Eulerian : 공간 상에 고정된 격자를 고려하여 시간에 따른 변화 계산
- 두 방법 모두 시간에 따라 보존되는 양을 기준으로 계산 – 질량, (각)운동량, 에너지, 엔트로피

- Lagrangian 기술법 (SPH)
 - 장점
 - 자유로운 경계 조건
 - 체적 운동(bulk motion)의 무분별한 발산(diffusion)이 적음.
 - 복잡한 형태의 공간에 적응성 높음
 - 밀도가 현저히 낮은 지점을 계산하기 위해 낭비되는 계산 자원 없음.
 - 단점
 - 충격파에 대한 분해능 낮음.
 - 유한 차분법 차수에 따른 낮은 정확도
 - 초기 조건 설정의 어려움
 - 3차원에서 입자로부터 격자를 만들어내기 어려움 → 격자간 접촉면 설정 한계 존재
- Eulerian 기술법
 - 장점
 - 실험 공간 규모가 커짐에 따른 확장성
 - 기체를 기술하는 가장 자연스러운 접근법
 - 엔트로피 형성으로부터 야기되는 의도치 않은 잡음 제거 용이
 - 단점
 - 메모리 요구량 높음
 - Lagrangian 기술법 대비 긴 계산 시간
 - 실험적인 부분이 여전히 많이 남아있음.

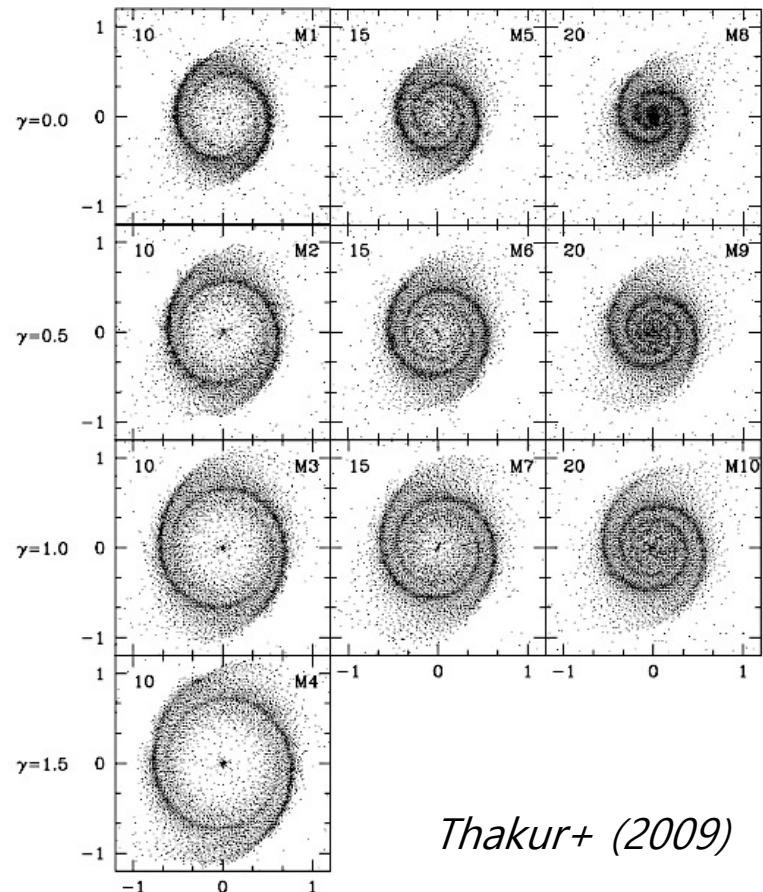
➤ **Lagrangian 기반 코드** : 중력이 지배적인 환경에서 유체역학 고려할 경우에 적합

➤ **Eulerian 기반 코드** : 대부분의 유체역학을 고려하는 경우에 일반적으로 사용

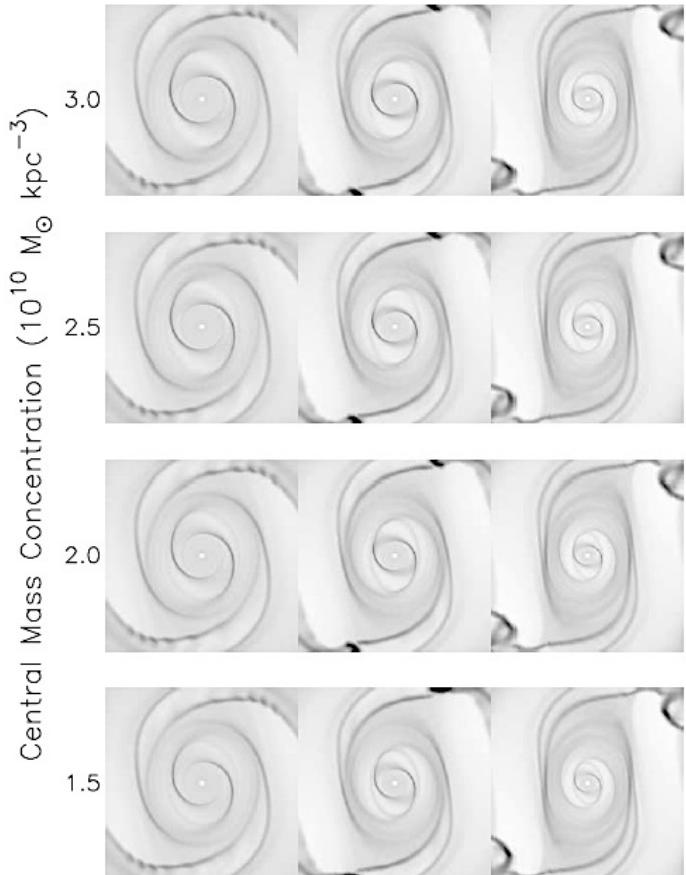
Examples : Lagrangian vs. Eulerian



Sod Shock Tube Test



Thakur+ (2009)



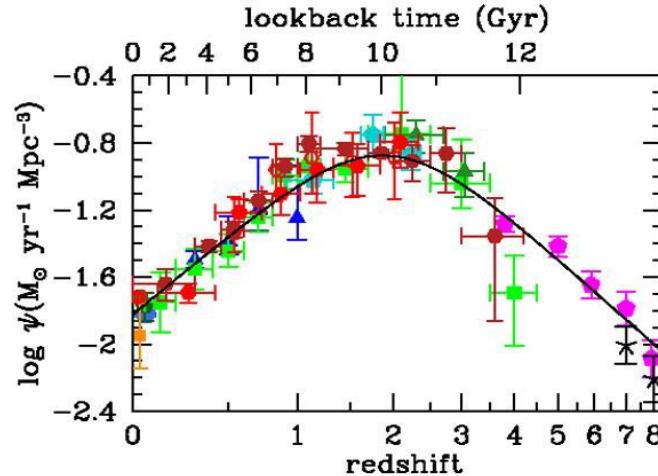
Regan & Teuben (2003)

- Gadget-I,II,III
 - I : Tree+Ewald
 - II,III : PM+Tree+SPH
 - Millennium/M-XXL
 - GOTPM
 - PM+Tree
 - Horizon Run 1/2/3/4
 - CUBEP3M
 - PM+PP
 - TianNu (neutrino physics)
 - GASOLINE
 - Fast Multipole Method(FMM)+Ewald+SPH
 - GEAR
 - Tree+SPH
 - Ramses
 - PM+AMR (Multigrid gravity solver)
 - DEUS, Horizon, Horizon-AGN
 - Ramses-OMP : Horizon Run 5
 - ENZO
 - PM+AMR
 - ART
 - PM+AMR
 - AREPO
 - PM+Tree+Voronoi mesh
 - Illustris, IllustrisTNG
 - GIZMO
 - PM+Tree+Godunov
- N-body
- Lagrangian
- Eulerian
- L+E (ALE)

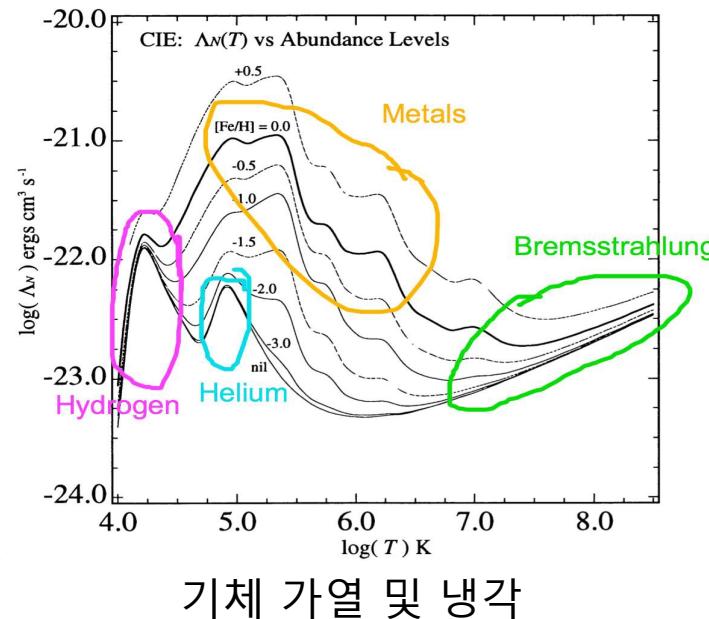
- 암흑에너지와 암흑물질로 구성된 우주에서 은하 및 은하단 형성에 영향을 미치는 요인은 **중력** 뿐만 아니라 **기체 냉각, 별 형성, 초신성(SN) 및 활동성 은하핵(AGN)의 피드백, 항성 내부 진화, 복사전달, 자기장** 등 다양한 물리 기작들이 있다.
- 우주론 수치모의실험은 이런 우주 구조의 형성과 진화에 관한 상세한 연구를 가능하게 하며, 우주 배경 복사 등의 관측을 통해 초기 양자 요동에서 시작하여 형성된 **비선형적 은하 집단의 진화**에 대한 **우리 우주의 역사를 예측할 수 있게 한다.**
- **암흑물질**은 일반적으로 다체 접근법을 통해 모형화할 수 있으며, 암흑물질의 위상 공간 분포는 위상 공간 지점 간의 상관관계에 따라 Monte Carlo 방식으로 **비충돌 Boltzmann 방정식**이 지배하는 역학적 원리를 잘 따른다.
- 반면, **바리온 내 기체**는 가장 간단한 형태로 Eulerian 방정식을 통해 설명할 수 있으며, **Eulerian 또는 Lagrangian** 기술법을 이용하여 기술할 수 있다.
- 수치실험 결과는 다양한 관측 자료와 비교하여 우주 구조의 형성과 관련한 여러 이론적 예측을 테스트하고 알맞은 조건을 제한하기 위해 이용되며, 새롭게 수정된 이론 혹은 방법론에 따라 현대 우주론의 기본이 되는 암흑물질과 암흑에너지, 중력을 대체할 수 있는 또 다른 이론적 기반을 제시할 수 있다.

ex) Topology; 2pcf and power spectrum of galaxies; BAO peak; peculiar velocity of galaxies, # of galaxy clusters over time

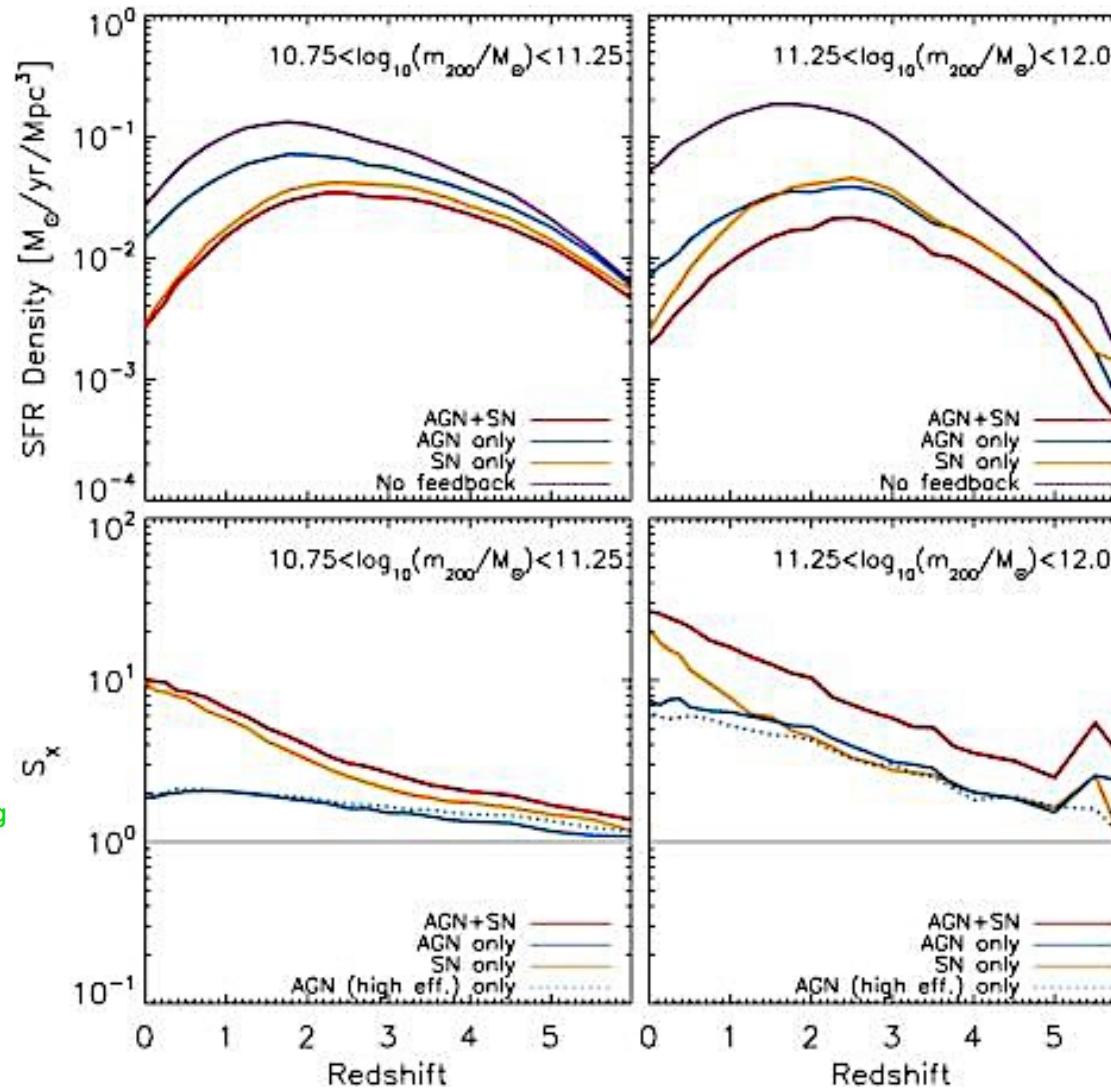
Physics in Cosmological Hydrodynamic Simulations



별 탄생의 역사 (Madau+14)



기체 가열 및 냉각



질량에 따른 SN/AGN 피드백 효과의 차이

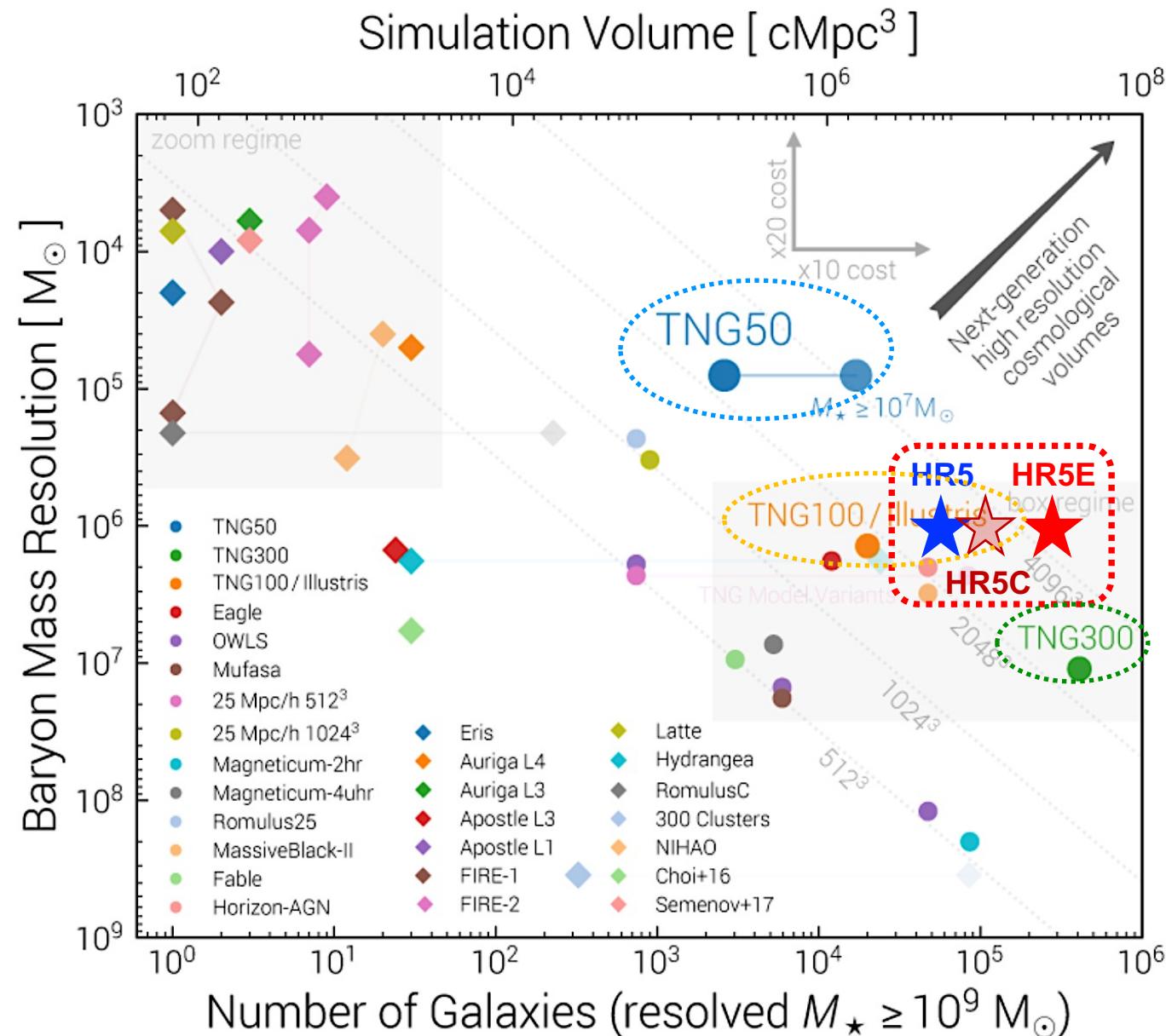


별 형성을 억제하는 부수적 요인



별 형성을 억제하는 주된 요인

Current Large-scale Cosmological Hydrodynamic Simulations



다체 수치모의실험

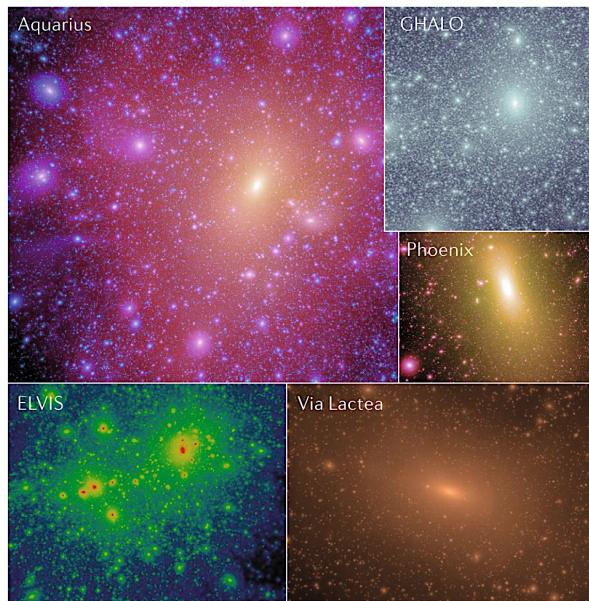
유체역학 수치모의실험

Dark matter only (N-body)

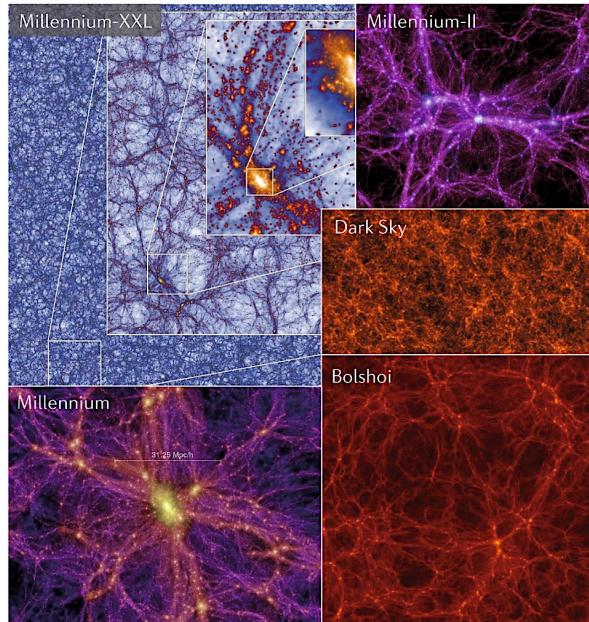
Dark matter + baryons (hydrodynamical)

우주거대구조 수치모의실험
국부 확대 수치모의실험

Zoom (details)



Large volume (statistics)



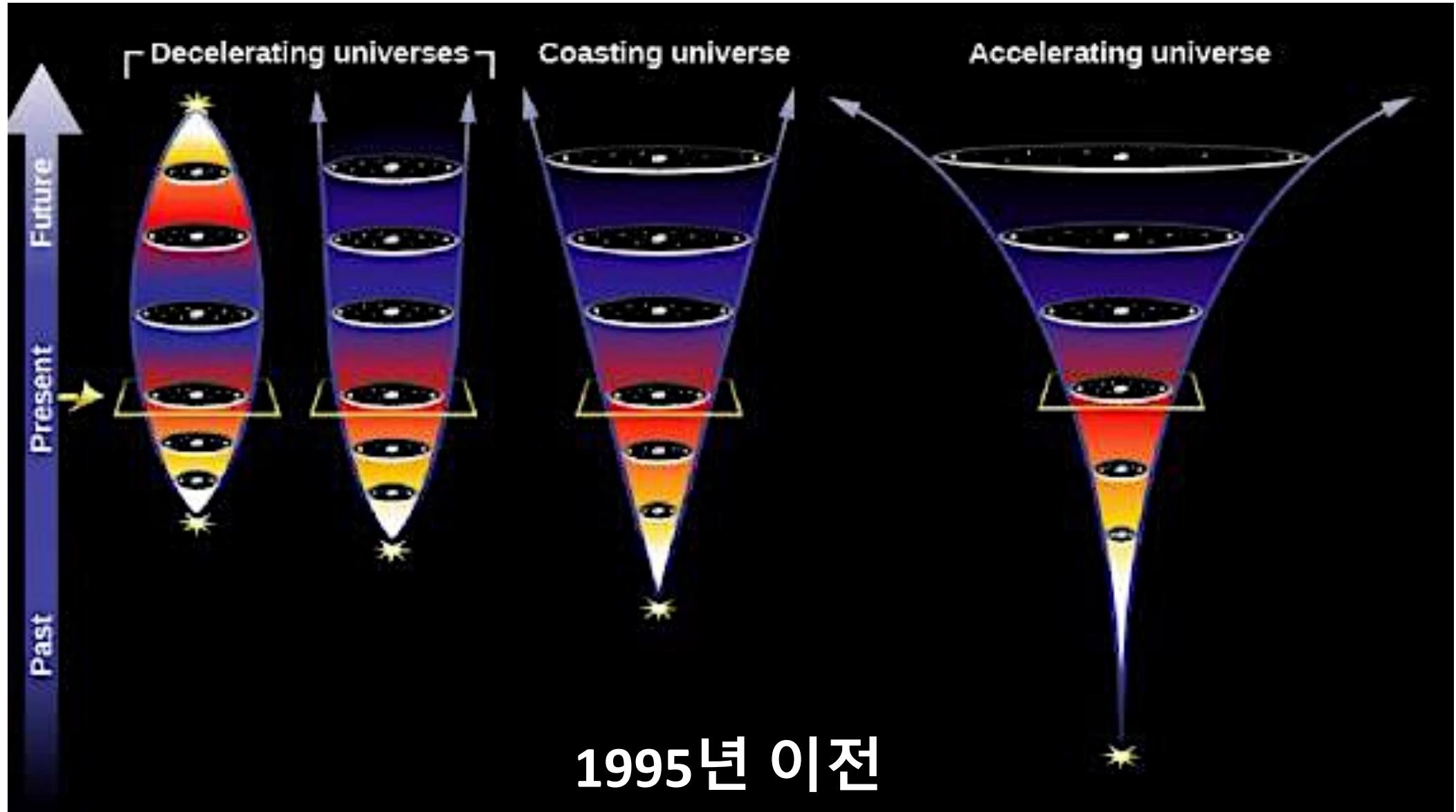
Vogelsberger+20

- 표준우주모형 하에서

- Too Big To Fail problem : 만기형 무거운 왜소은하들이 수치실험의 예측한 것보다 관측에서 중심부의 질량이 작게 측정되는 문제 (중심부 암흑물질 분포 문제; Boylan-Kolchin+11, Papastergis+15)
- Missing Satellite problem : 관측된 위성은하보다 수치실험결과에서 보다 많이 생성되는 현상 (Moor+99, Klypin+99, Klypin+15)
- Cusp Core problem : 수치시험에서 예측된 어두운 왜소은하들의 중심 밀도가 관측보다 크게 나오는 문제 (Walker+11)
- Diversity problem : 왜소은하의 회전 곡선이 수치실험 결과에 비해 지나치게 다양한 문제 (Oman+15)
- 상기 문제는 주로 다체 실험에서 제기되는 것으로 기체역학을 고려하여 해결하려고 노력중 (초신성 폭발 및 활동성 은하핵의 피드백, 복사압 또는 자기압 등; Navarro+96, Governato+12, Chan+15)

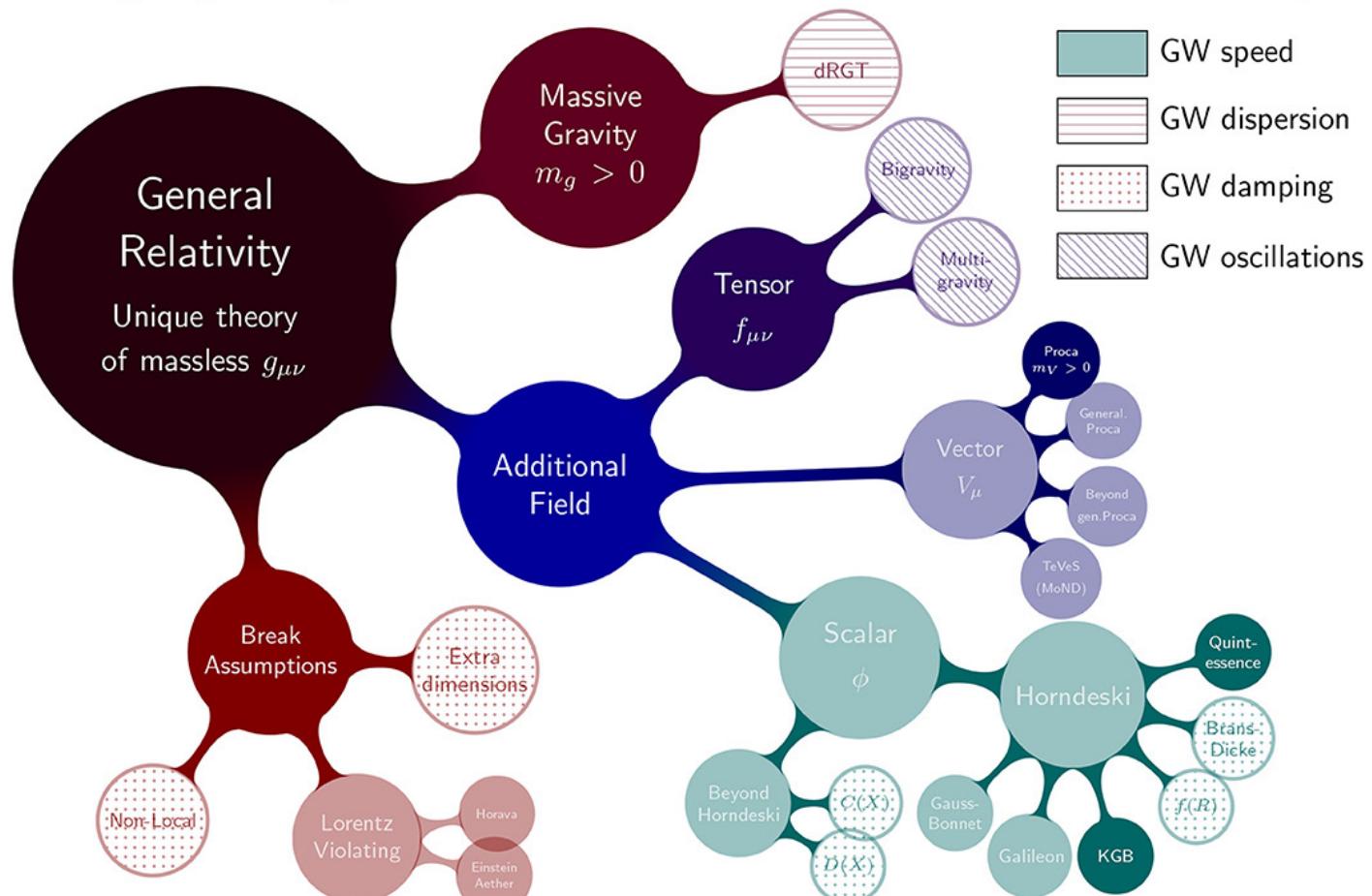
- 비표준우주모형 하에서

- 위에서 기술한 작은 규모의 불일치 현상들을 설명하기 위한 비표준이론의 정당성 규명
- 비표준 암흑물질: Warm DM, self-interacting DM, fuzzy DM (Bose-Einstein condensation with $\lambda \sim 1\text{kpc}$)
- 우주상수가 아닌 비표준 암흑에너지 또는 비표준 상대성 이론 : Dynamical DE, Coupled DM
- 수정 중력 이론 (암흑물질 및 암흑에너지를 대체하는 우주모형)
- 향후 20년 이내 : 수치모의실험 입자 수 $10^{10} \rightarrow 10^{15}$ 개

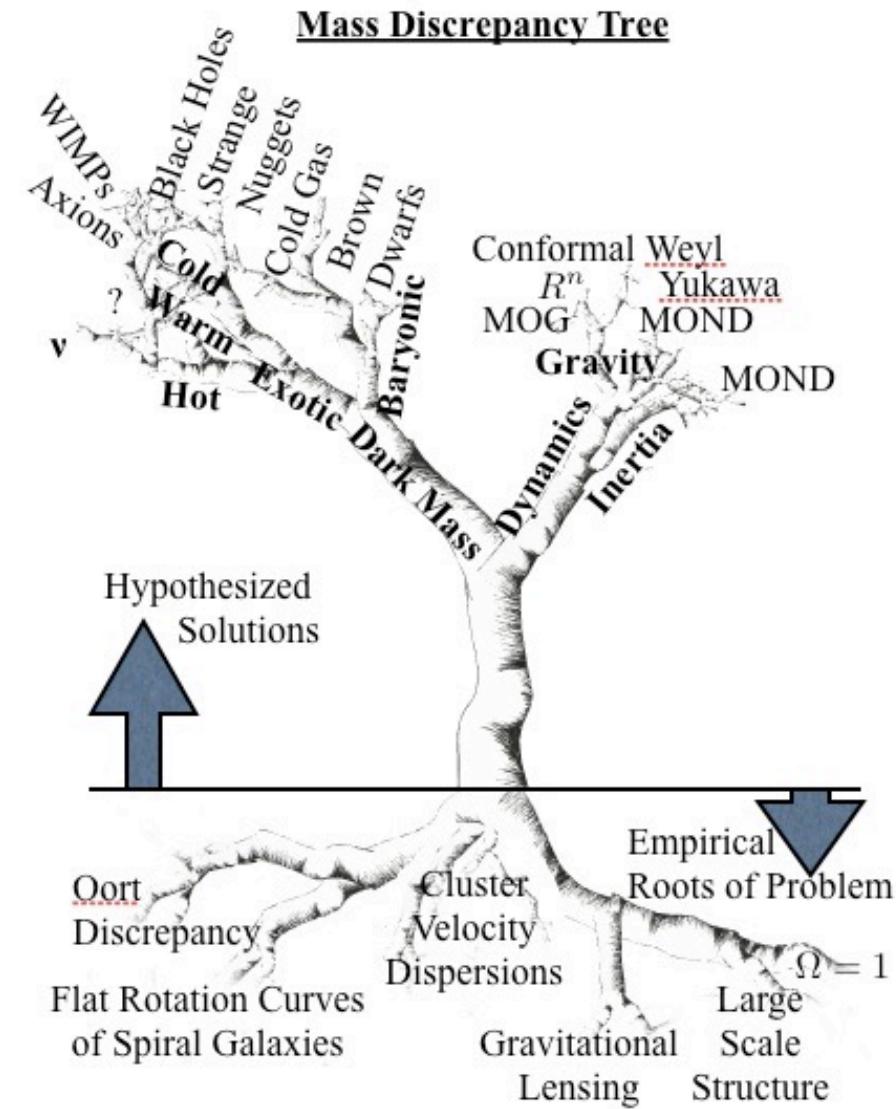


Cosmological Models for Our Universe

Modified gravity roadmap



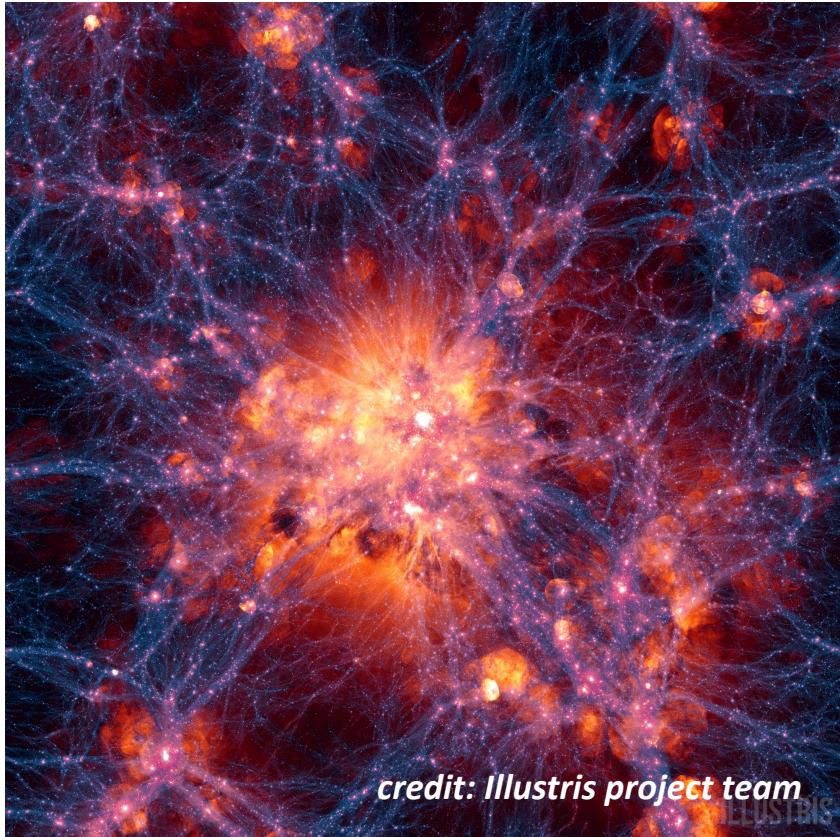
현재





Large-scale Cosmological Hydrodynamic Simulations in Korea

Recent Cosmological Hydrodynamic Simulations



credit: Illustris project team

Simulation project <i>(Dobois+2014)</i>	Code	Boxsize [Mpc]	$M_{\text{gas}} [M_{\odot}]$	$\Delta x [\text{kpc}]$
Horizon-AGN <i>(Dobois+2014)</i>	RAMSES	100/h	1.6×10^7	1
Illustris <i>(Vogelsberger+2014)</i>	AREPO	110.7	6.3×10^6	0.74
Eagle <i>(Schaye+2015)</i>	Gadget3 +ANARCHY	100	1.81×10^6	0.70
MassiveBlack-II <i>(Khandai+2015)</i>	P-Gadget3	100/h	$2.2 \times 10^6/h$	1.85/h
TNG Illustris <i>(Pillepich +2017)</i>	AREPO	110.7	6.3×10^6	0.74
		302.6	5.9×10^7	1.48

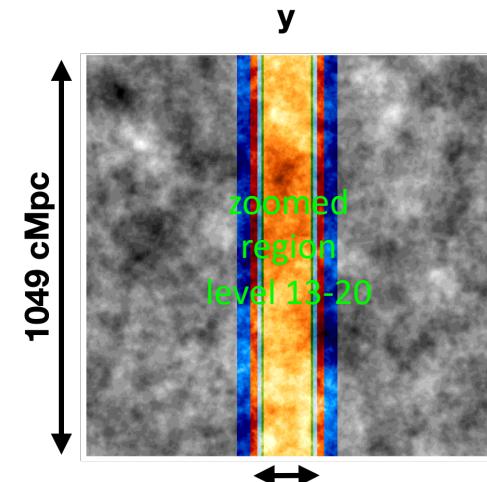
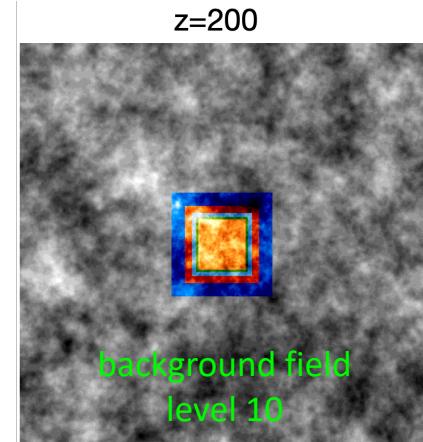
- Lack of large-scale perturbation ($>> 100 \text{ Mpc}/h$)
 - Unable to see the large cosmic structures (clusters, big voids, etc.)
 - Unable to properly see the large-scale environmental effects on galaxies
 - Subject to the cosmic variance (wrong statistics)

→ Horizon Run Series

- Horizon Run 5 (HR5)

- First hydrodynamical cosmological simulation of the HR series devised to cover a cubic volume of 1cGpc^3 with a spatial resolution up to **1kpc**
- Simulation box of **L=1cGpc** is necessary to examine the BAO features and the enough number of clusters
- Zoomed technique is adopted to compromise between volume and resolution

	HR1	HR2	HR3	HR4	HR5
Box size (L)	9417 cMpc	10285 cMpc	15450 cMpc	4436 cMpc	1049 cMpc
# of particles	4120^3	6000^3	7200^3	6300^3	gas cells+particles
Reference	Kim et al. (2008)	Kim et al. (2011)	Kim et al. (2011)	Kim et al. (2015)	Lee et al. (2021)
Code	GOTPM (Dubinski, Kim, Park 2004)	GOTPM	GOTPM	GOTPM	RAMSES (Teyssier 2002)



- The points to be considered in HR5

- Relatively smaller box size compared with previous HR series → 1st spin-off run: **HR5E**
- Long cuboid geometry for constructing light cone space data → 2nd spin-off run: **HR5C**

→ **HR5+, LASOR & LAERS**

Collaborators

HR5

KIAS, KASI, KISTI, SNU, Yonsei
Hull, IAP, PSL, Oxford

Professor Brad Gibson
Professor of Astrophysics/ Director, E.A Milne Centre for Astrophysics. Head of Physics
Faculty of Science and Engineering
School of Mathematics and Physical Sciences
brad.gibson@hull.ac.uk
01482 465105

Kim, Yongwhi
Research Fellow
Theoretical Astronomy, Numerical Astrophysics
Office : 7405
Tel : 2516 | Fax :
[E-mail](#)
[Publications](#)

Kim, Juhan
Research Professor
Cosmology and Galaxy Formation

Park, Changbom
Professor
Astrophysics/Cosmology

Pichon, Christophe
KIAS Scholar
Astrophysics

Lee, Jae Hyun
Research Fellow
Modeling galaxy formation and evolution
Office : 1514
Tel : 3740 | Fax :
[E-mail](#)
[Publications](#)

Snaith, Owain Nicholas
Research Fellow
Astrophysics
Office : 1425
Tel : 3864 | Fax : 3870
[E-mail](#)
[Publications](#)

Jihye Shin

송현미
KDES연구원
Office : 1317
[E-mail](#)
Tel : 2553 | Fax : 3870

Dr Gareth Fev
Research Fellow
Faculty of Science and Engineering
School of Mathematics and Physical Sciences
c.few@hull.ac.uk
01482 463360

Hwang, Ho Seong
QUC Research Professor
Astrophysics
Office:1431 / Tel:2515

L'HUILLIER, Benjamin

박인규
• 연구분야 : 입자실험 및 전산물리
• 연구실 : 과학기술관 2층 219호
• 전화번호 : 02-6490-2652
• E-mail : icpark@uos.ac.kr
• Homepage : (대학원 연구실/과학기술관228호/02-6490-5770)

Core member

Y. Dubois

Smith, Rory

Kim, Jae-Woo (김재우)

홍성욱
KDES연구원
Office : 1412
[E-mail](#)
Tel : 3763

Lyman
Alpha
Simulation and
Observation
Research collaboration

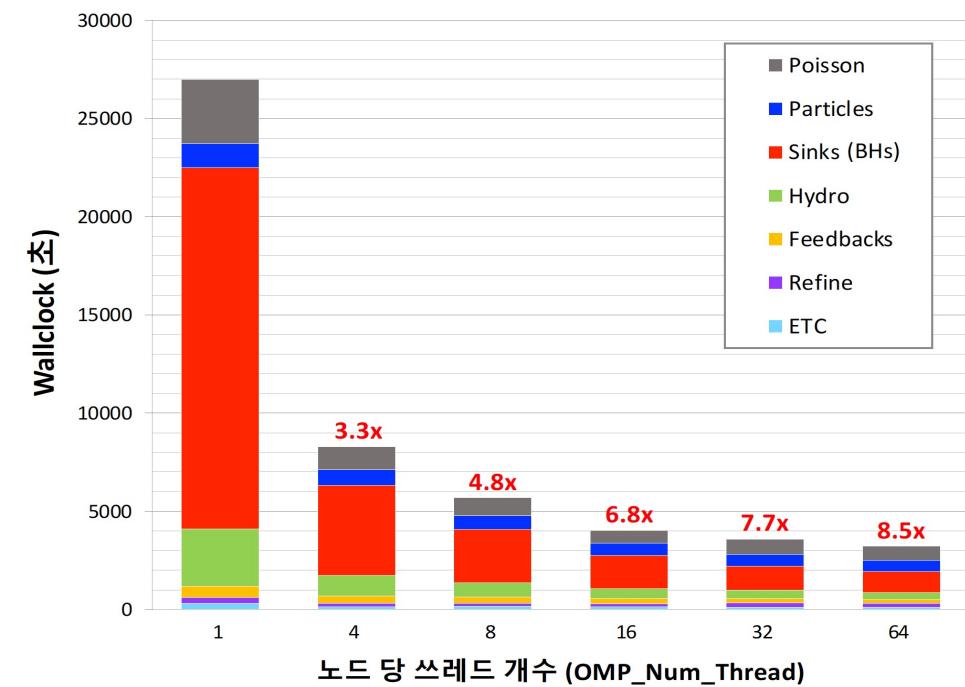
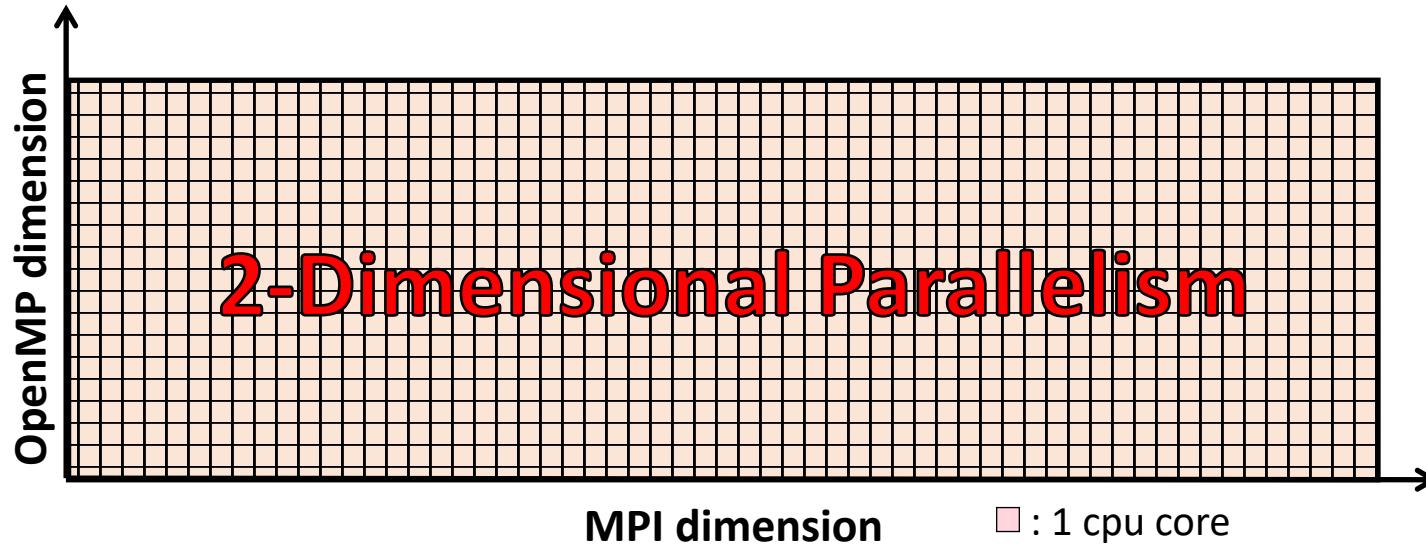
ODIN Project

KIAS, KASI, Rutgers, Purdue
SNU, CNU, Gemini, LOIRLab

HR5+
KIAS, KASI

LAERS
KIAS, KASI, SNU, CNU, APCTP

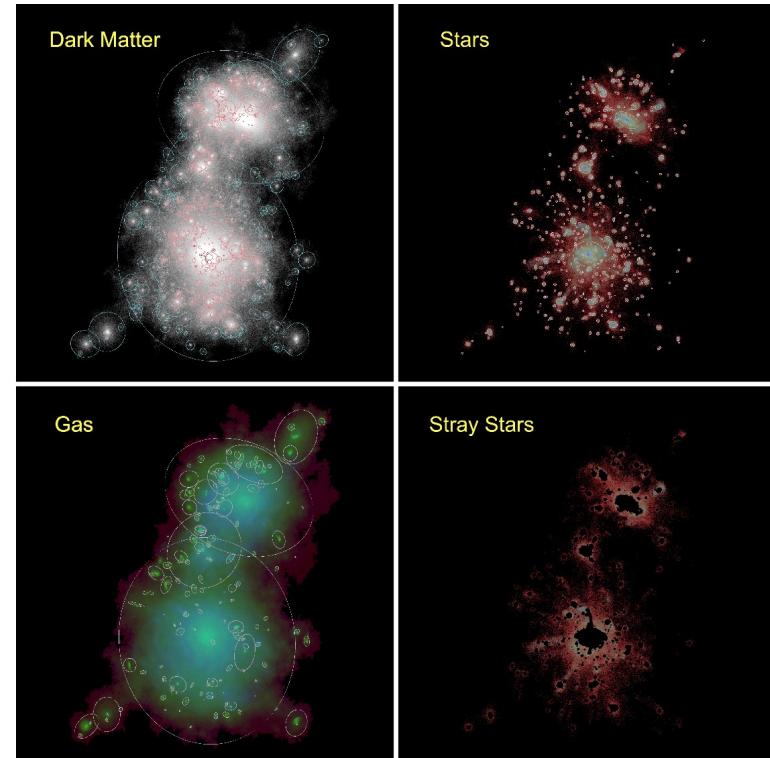
- Linear power spectrum & Initial-condition generator
 - CAMB package (Lewin+00) & MUSIC (Hahn+11)
- **RAMSES-OMP** : Intensive implementation of OpenMP to RAMSES (AMR code, Teyssier02)
 - Adopting better algorithms for Sink merge and other bottleneck parts
 - Well designed for “N-core” systems like the **NURION KISTI** supercomputer (Knights Landing : 64 cores/node)
 - Well designed for **massive (data-parallel) simulations**, which benefits from the **massively parallel threads**.
 - Several bug corrections to solve the Y2K-like issue in RAMSES



- **PGalF** (Physically Self-Bound (PSB) based Galaxy Finder, *Kim+21 in prep*)
 - Uses stellar mass density map with tidal radius & total energy criteria
 - Tidal radius: boundary of each galaxy
 - Total energy: determination of member particles
 - Extracting all components of a galaxy (DM/star/BH/gas) at the same time
 - Optimized for parallel computing
- Concordance LCDM cosmology : Planck 1yr

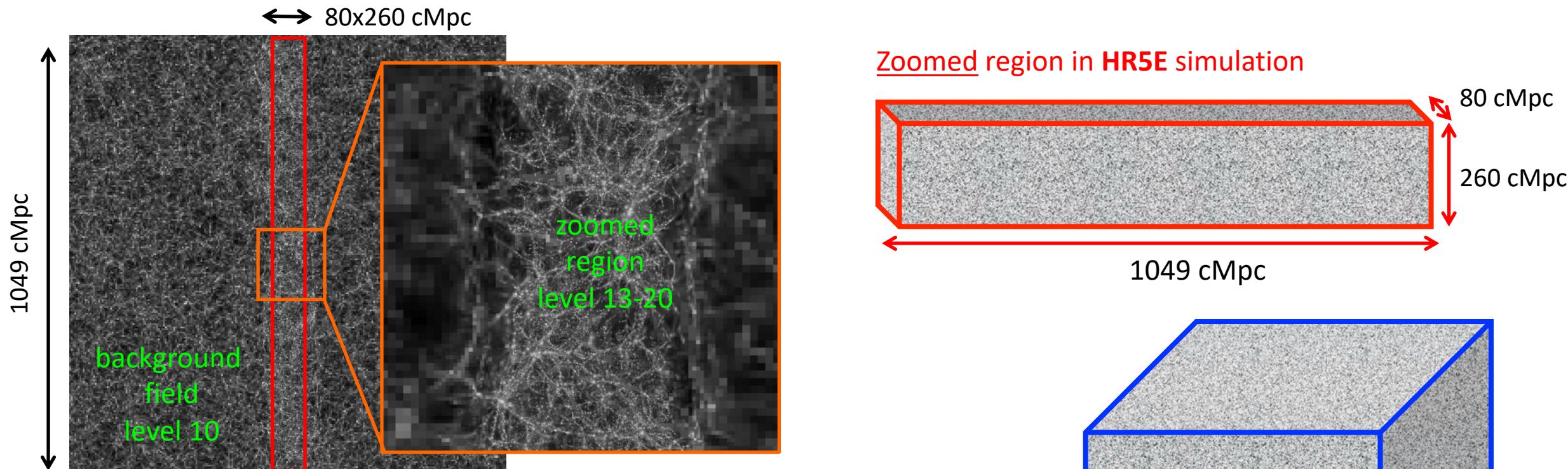
Ω_m	Ω_Λ	Ω_b	H_0	σ_8	n_{spec}
0.30	0.70	0.046	68.4	0.816	0.967

- Baryonic physics
 - Gas cooling & heating : down to $T \sim 750\text{K}$ (multiphase)
 - Reionization at $z=10$ under the assumption of a uniform UV background
 - Star formation: Type Ia & II SNe enrich metallicity, SN feedbacks with both mechanically and radiatively
 - Massive BH formation and evolution with a spin
 - AGN mechanical, thermal and radiative feedbacks (quasar/radio modes)



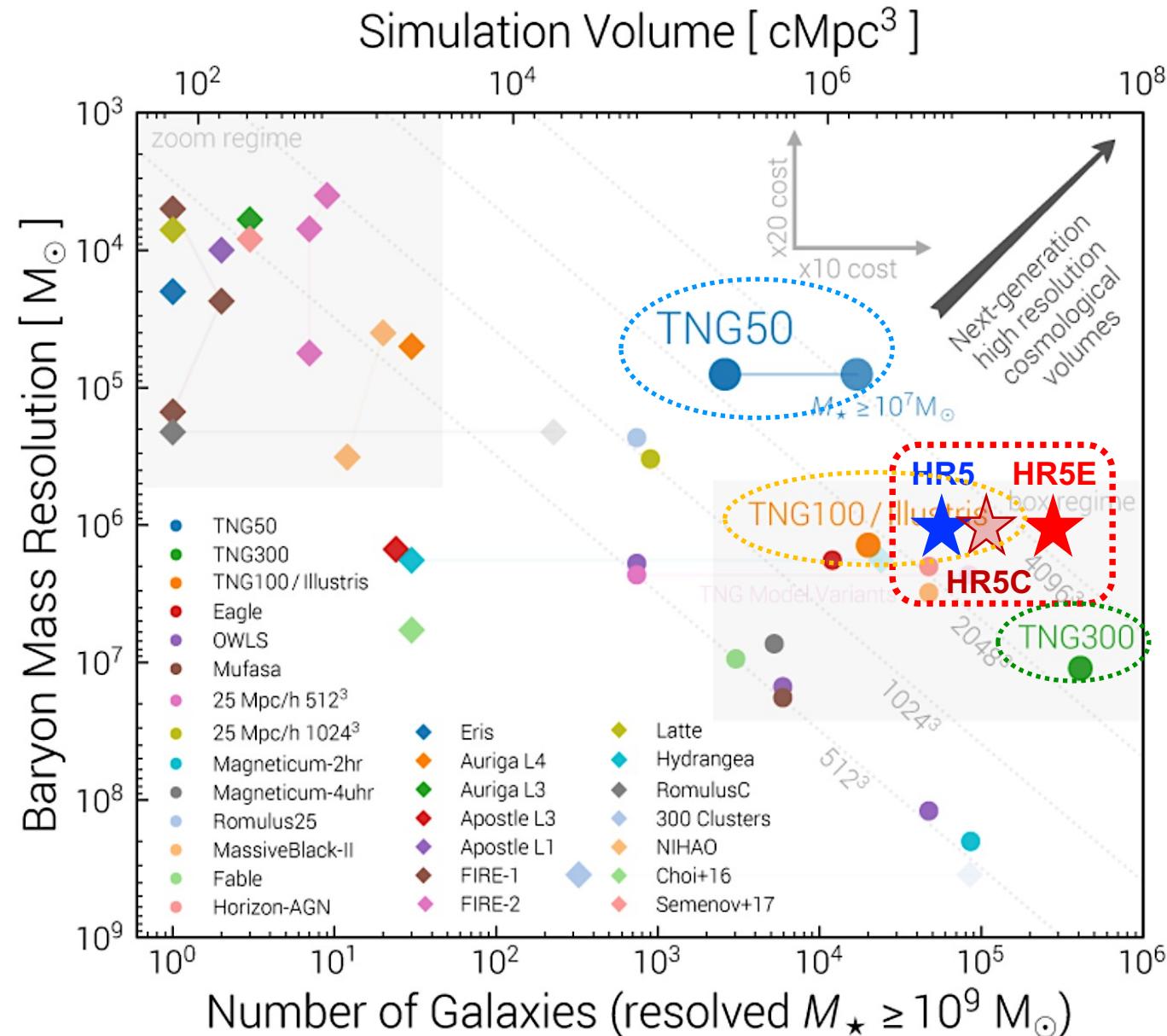
A massive cluster sample in HR5
($M_{\text{tot}} = 5 \times 10^{14} M_\odot$)

Simulation Outline : Initial Setup for HR5+ (HR5E & HR5C)



	HR5	HR5E	HR5C
Box size (cMpc)	1049x119x127	1049x82x262	262^3
Resolution (level)	< 1kpc (13-20) background 8	< 1kpc (13-20) background 10	< 1kpc (11-18)
Simulated time	$z=200 - 0.625$	$z=200 - 2.45$	$z=200 - 2.4$

Current Large-scale Cosmological Simulations



Outputs

- Simulation time

- HR5 : 10.8 M node (691 M cpu) hours used to down to $z=0.625$ (2018.12 – 2020.1 on Nurion system, KISTI)
- HR5E : 2.1 M node (134 M cpu) hours used to down to $z=2.45$ (2021.05 – 2021.08 on Nurion system, KISTI)
- HR5C : 1.2 M node (76 M cpu) hours used to down to $z=2.4$ (2021.05 – 2021.08 on Nurion system, KISTI)

Horizon-AGN	Eagle	Illustris	TNG	HR5	HR5+
4 M cpu hrs	4.5 M cpu hrs	19 M cpu hrs	55 M cpu hrs	691 M CPU hrs	210 M CPU hrs

- Memory requirements

- (11 variables for each particles) x (double precision, 8 bytes) $\approx 820 \text{ Gb}$
- (13 variables for each grids) x 9 (x, y, z center & edges) x 8 bytes $\approx 30 - 100 \text{ Tb}$

→ Well designed for N-core system
(Xeon Phi KNight landing, KNL)

- Snapshots

- HR5 : 2.1 – 10 TB of single snapshots, and total of 1.5PB (147 snapshots)
- HR5E : 3.5 – 12 TB of single snapshots, and total of 800TB (97 snapshots)
- HR5C : 2.3 – 8 TB of single snapshots, and total of 500TB (98 snapshots)

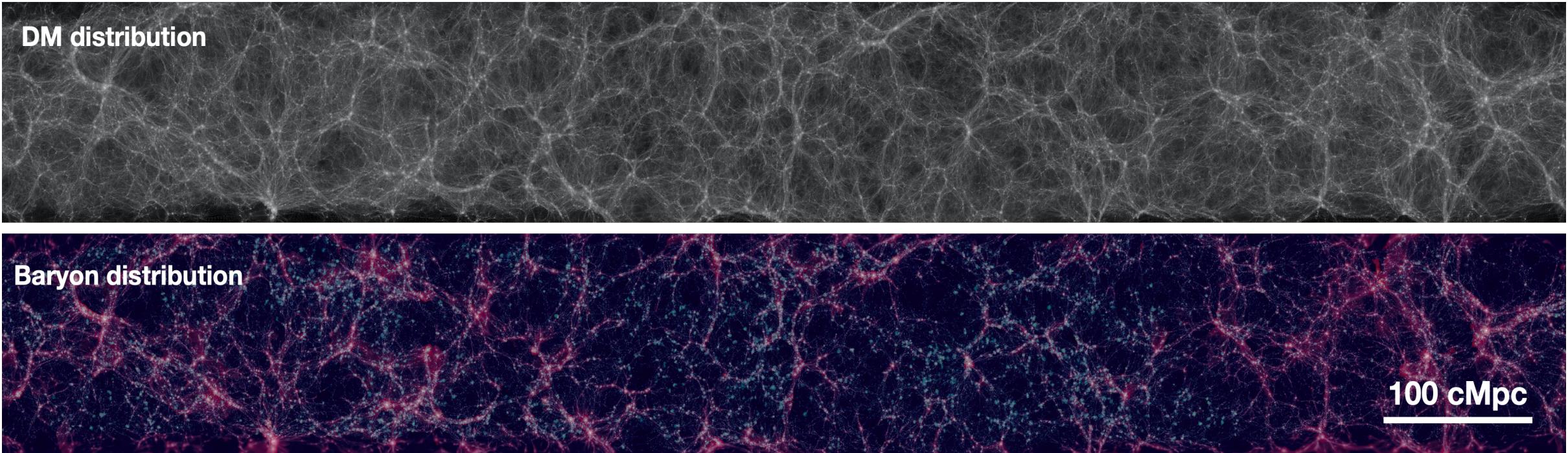
- Halo & galaxy finding

- PGalf : PSB-based Galaxy Finder + FoF Halo/substructure finding data



Nurion system, KISTI 38

$z \sim 0.625$



A slice of the zoomed region
(thickness ~ 20 cMpc)

Red: temperature
Blue: gas density
Green: metallicity

- A New Galaxy Finder for AMR Simulations
 - Horizon Run 5: a virtual observatory
 - Low-z environment
 - Formation history of S0 galaxies
 - The impact of mergers on galaxy shape alignments
 - Investigation of the connection between star-formation status and large-scale structure of galaxy clusters at redshift $z=0.85$
 - High-z environment
 - The formation and morphology evolution of the first galaxies
 - The formation and properties of Proto-clusters
 - High-redshift Intracluster Light Study with HR5
 - Shock Waves around High-z Massive Merging Clusters
 - Modelling Lyman alpha emitters and their properties at high redshifts
 - Quantifying the contamination of the SZ decrement by star formation at z greater than 2
 - BH & AGN physics
 - Black holes as gravitational-wave sources using HR5 data
 - Galaxy Environment of Simulated Supermassive Black Holes at $1 < z < 3$
 - Evolution of AGN at intermediate redshifts
 - Impact of AGN emission on estimated star formation rate using infrared (IR) luminosity of galaxies in HR5 simulation
 - Large-scale Features
 - The properties of galaxies within cosmic voids
 - The Topology of the Universe via Percolation Analysis
 - Painting Baryonic Features to Dark Matter Halos with Machine Learning
- <https://astro.kias.re.kr/Horizon-Run5>

- 프로그래밍 언어 : C/C++, Fortran90
- Linux 운영체제에 대한 적응
- 병렬 컴퓨팅 환경 : MPI, OpenMP, Parallel Job Queuing, GPU Parallelization
- 제한된 하드웨어 자원에 대한 각 프로그램의 최적화 능력
- AI 및 머신 러닝에 대한 이해도 요구
- 가시화 프로그램 : IDL, python, VisiT, yt 등
- 이론 및 관측 우주론에 대한 포괄적 이해

Thank You for Your Attention.