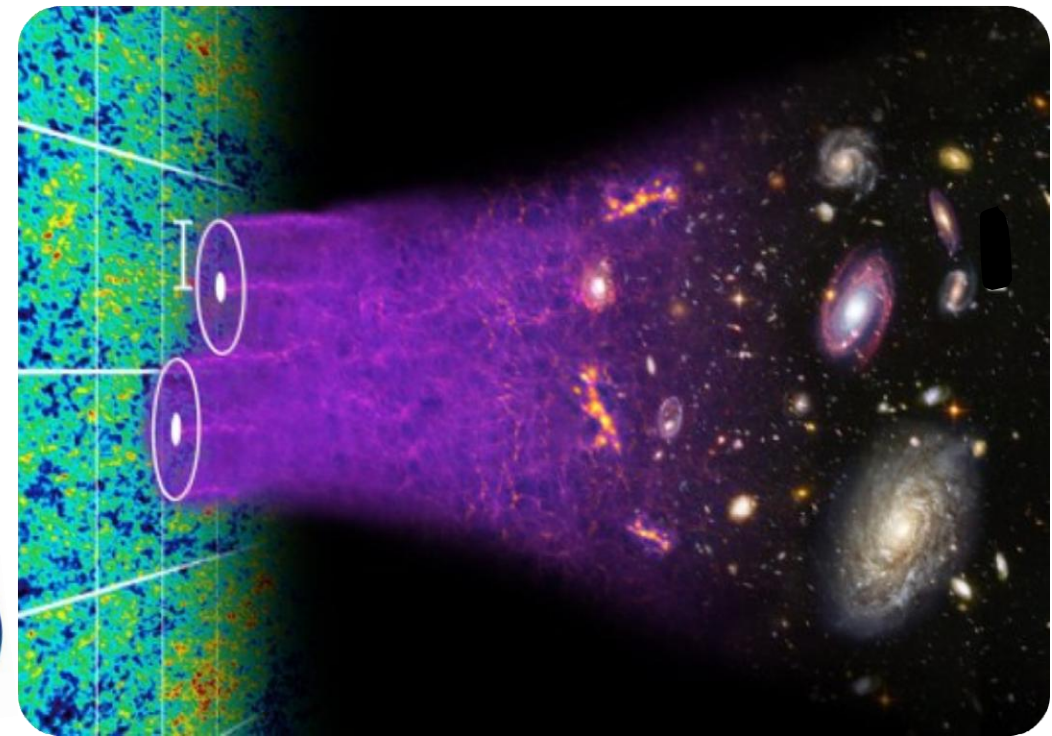


Astroteilchenphysik - I

WS 2012/2013

Vorlesung # 07, 06.12.2012



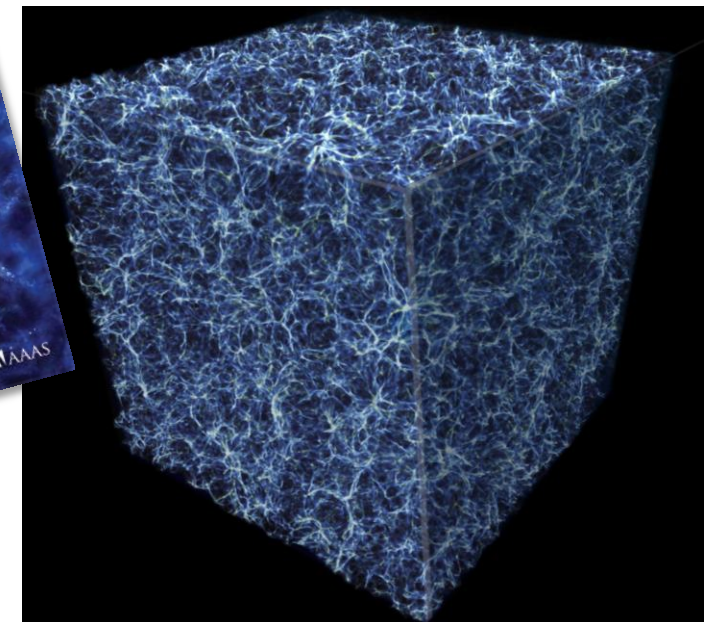
Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

kosmische Hintergrundstrahlung:

- Planck Mission

Strukturentwicklung:

- Galaxiendurchmusterungen:
2dF, Sloan, 6dF
- Entwicklung des Dichtekontrasts
- HDM, WDM, CDM

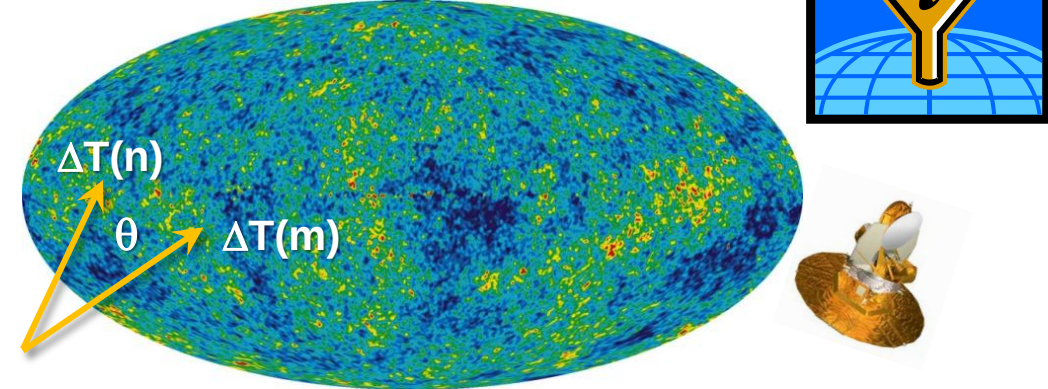


Leistungsspektrum der CMB

■ CMB Leistungsspektrum:

Multipolanalyse der Temperatur-Fluktuationen: $\rightarrow$ Winkelkorrelation

$$(\Delta T)^2 = \ell \cdot (\ell + 1) C_\ell / 2\pi$$

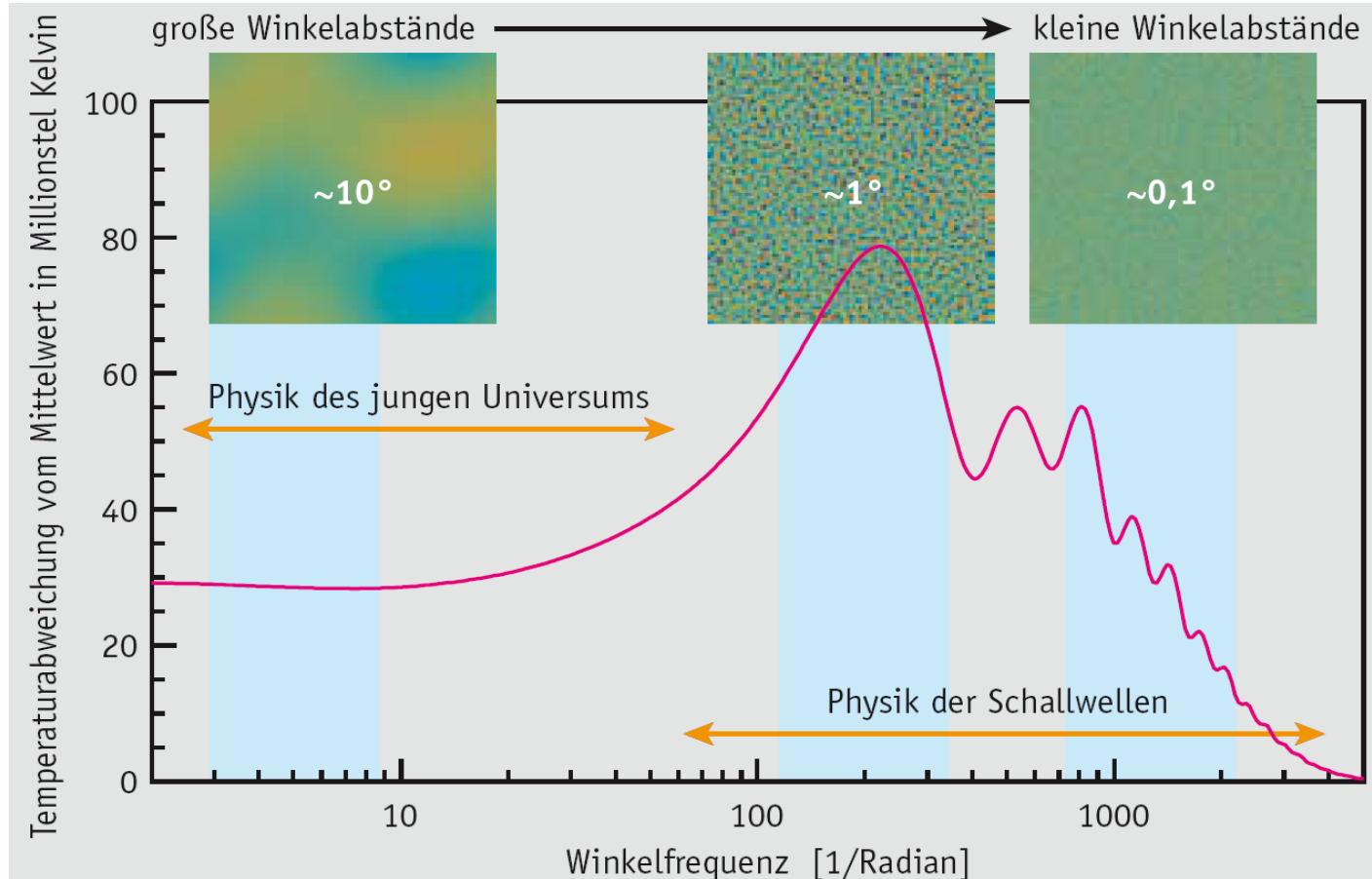


große Winkelskalen

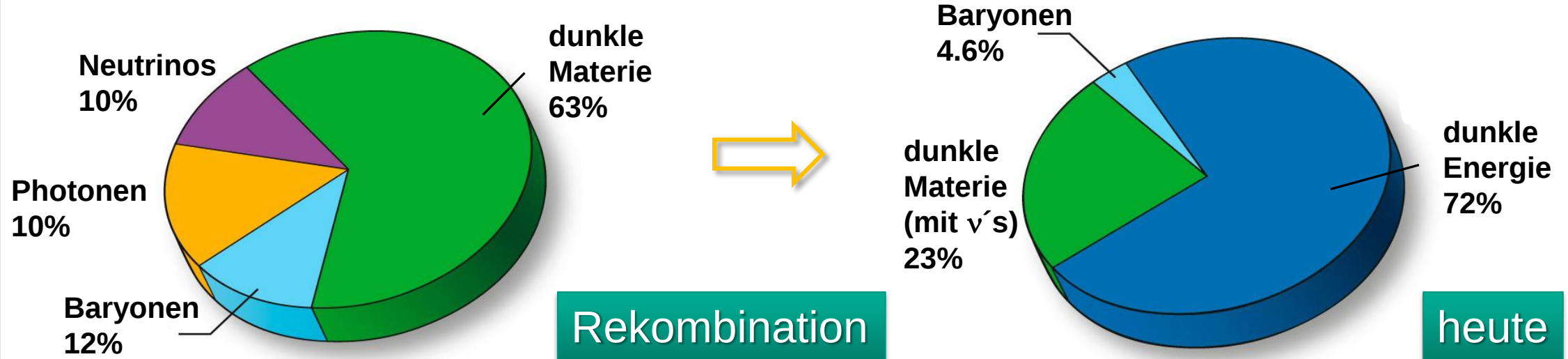
- **Sachs-Wolfe Effekt:**
Skaleninvarianz der Temperaturfluktuationen
- **integrierter SW Effekt:**
Korrelation von ΔT mit Clustern und Voids

kleine Winkelskalen

- Schallwellenpropagation & **akust. Oszillationen**



kosmologische Parameter



Parameter	Symbol	Wert
Alter des Universums	t_0	$(13,73 \pm 0,12)$ Milliarden Jahre
Hubble-Konstante	H_0	$(70,1 \pm 1,3)$ km/(Mpc s)
Dichte der baryonischen Materie	Ω_b	$0,0462 \pm 0,0015$
Dichte der Dunklen Materie	Ω_c	$0,233 \pm 0,013$
Dichte der Dunklen Energie (Vakuumenergiedichte)	Ω_Λ	$0,721 \pm 0,015$
Ära der Entkopplung (Rekombinationszeitpunkt)	t_*	$375\,940 \pm 3150$ Jahre
Rotverschiebung zum Rekombinationszeitpunkt	z_*	$1091,0 \pm 0,7$

■ **kosmologisches Konkordanz-Modell Λ CDM:** globale Analyse der Parameter auf der Basis: WMAP 5 Jahre + weitere kosmolog. Datensätze

Planck Mission der ESA

- **Ziel:** höchstauflösende Messung der CMB am Lagrangepunkt L2 mit Design-Sensitivitäten:

Temperatur: $\Delta T/T \sim 2 \times 10^{-6}$

Winkel: $\Delta\theta \sim 5'$

Frequenzen: 30 – 857 GHz

- 9 Frequenzbereiche: $f = 30 - 857$ GHz

LFI - Low Frequency Instrument

$f = 27 - 77$ GHz $T = 20$ K

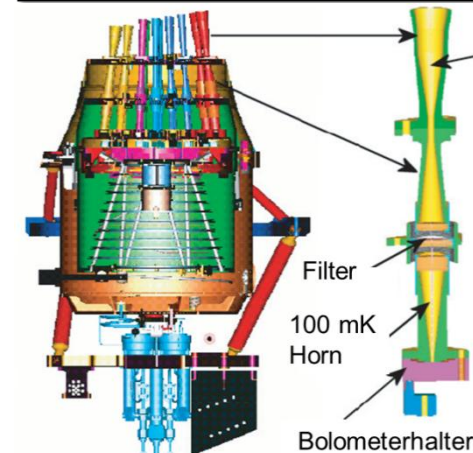
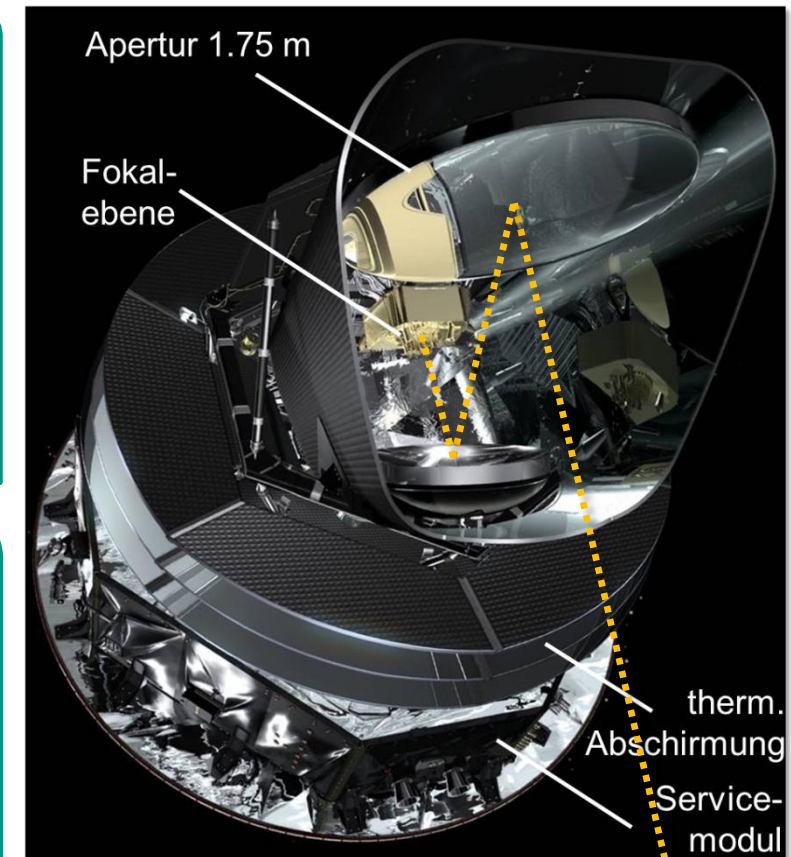
HFI - High Frequency Instrument

$f = 100 - 857$ GHz $T = 0.1$ K

- HFI mit supraleitenden

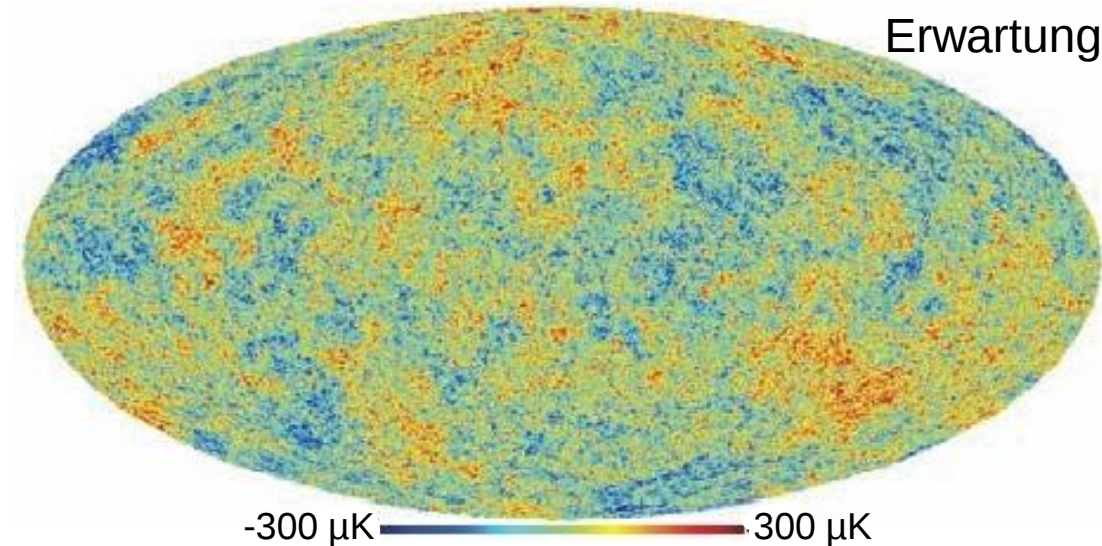
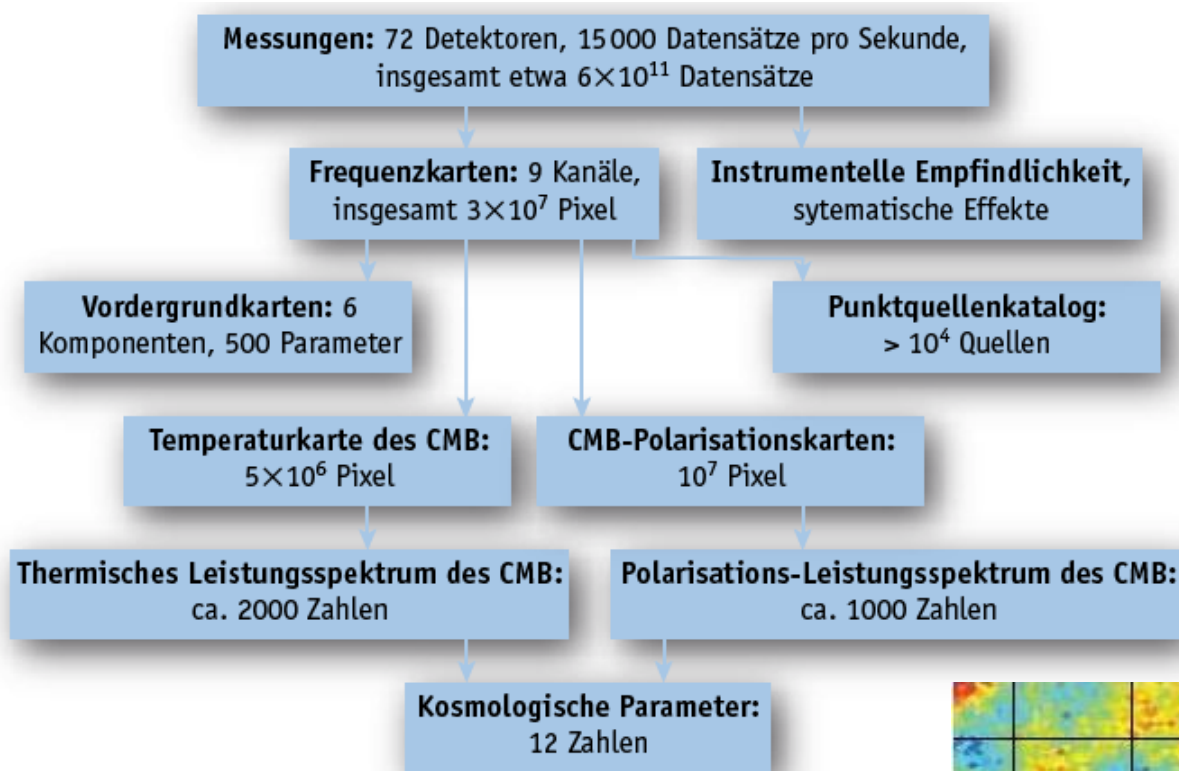
Bolometern:

CMB-Absorption führt zu minimaler Erhöhung der Bolometertemperatur



Von WMAP zu Planck

Planck-
Erwartung



■ Planck-Analyse-Prozeduren:

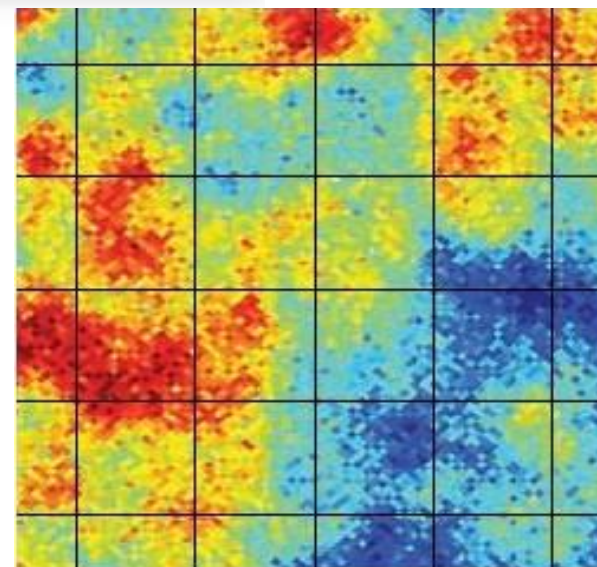
- Temperaturkarte



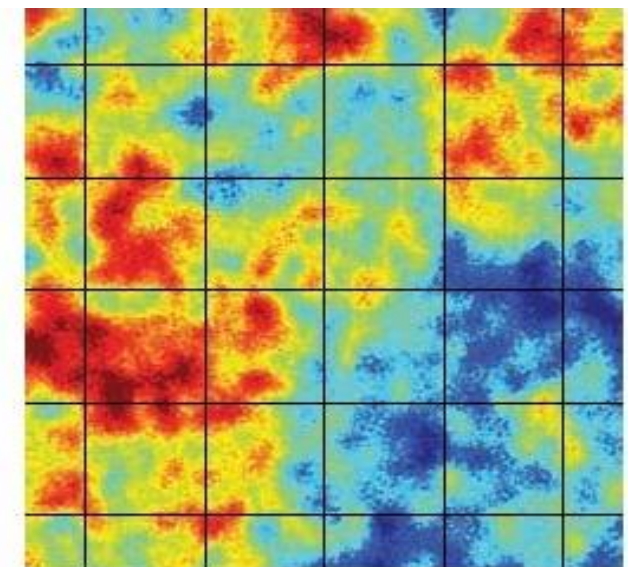
- Leistungsspektren



- kosmologische Parameter

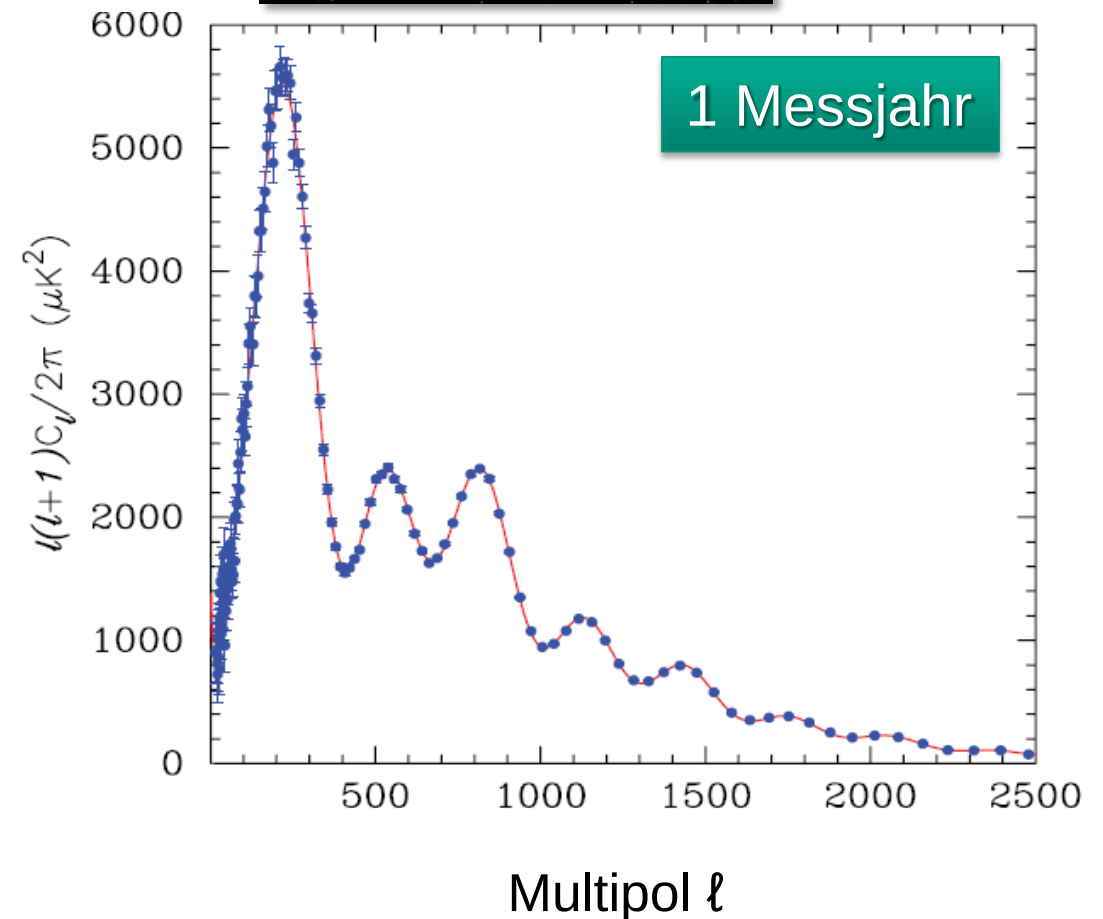
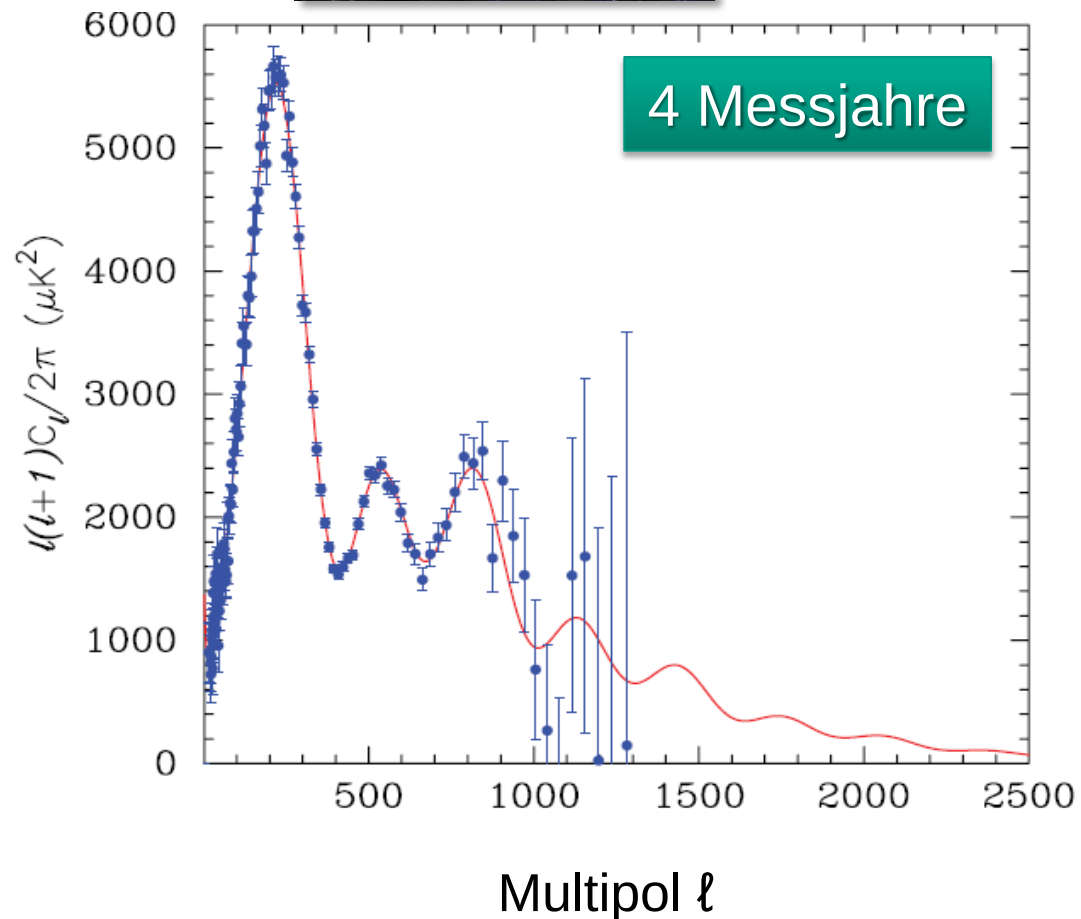
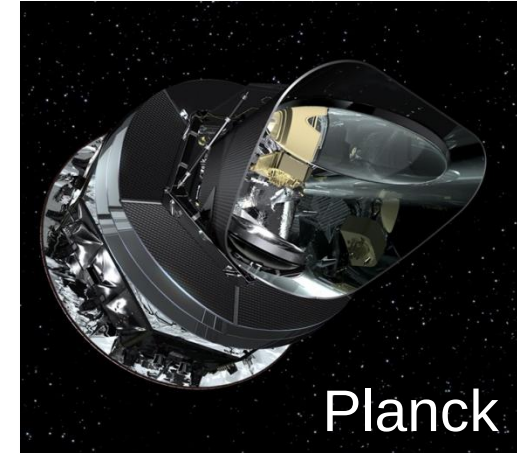
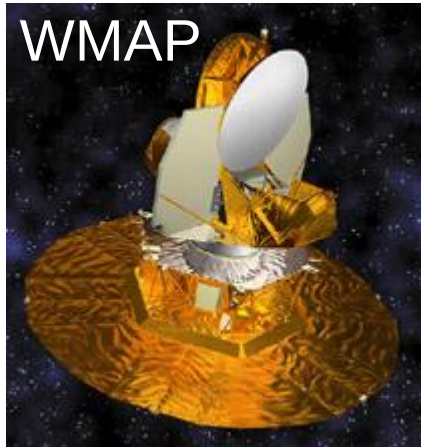


-300 μK 300 μK
WMAP 8 Jahre



-300 μK 300 μK
Planck 1 Jahr

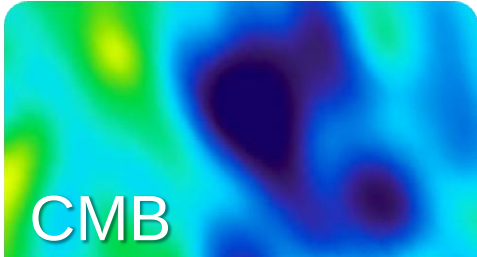
Sensitivitätsvergleich WMAP - Planck



Publikation der Planck-Resultate
für Frühjahr 2013 erwartet

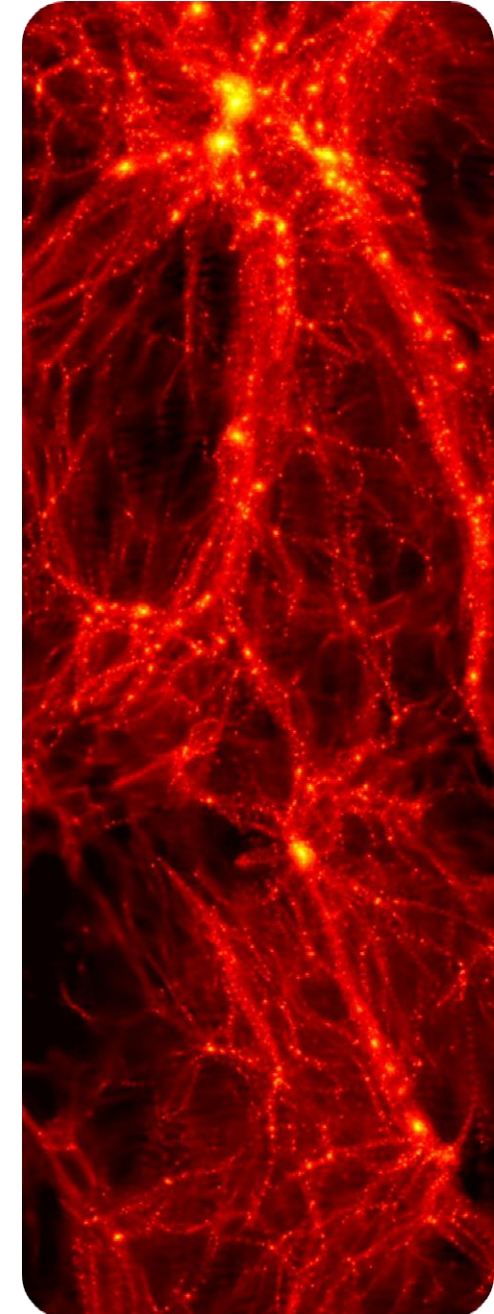
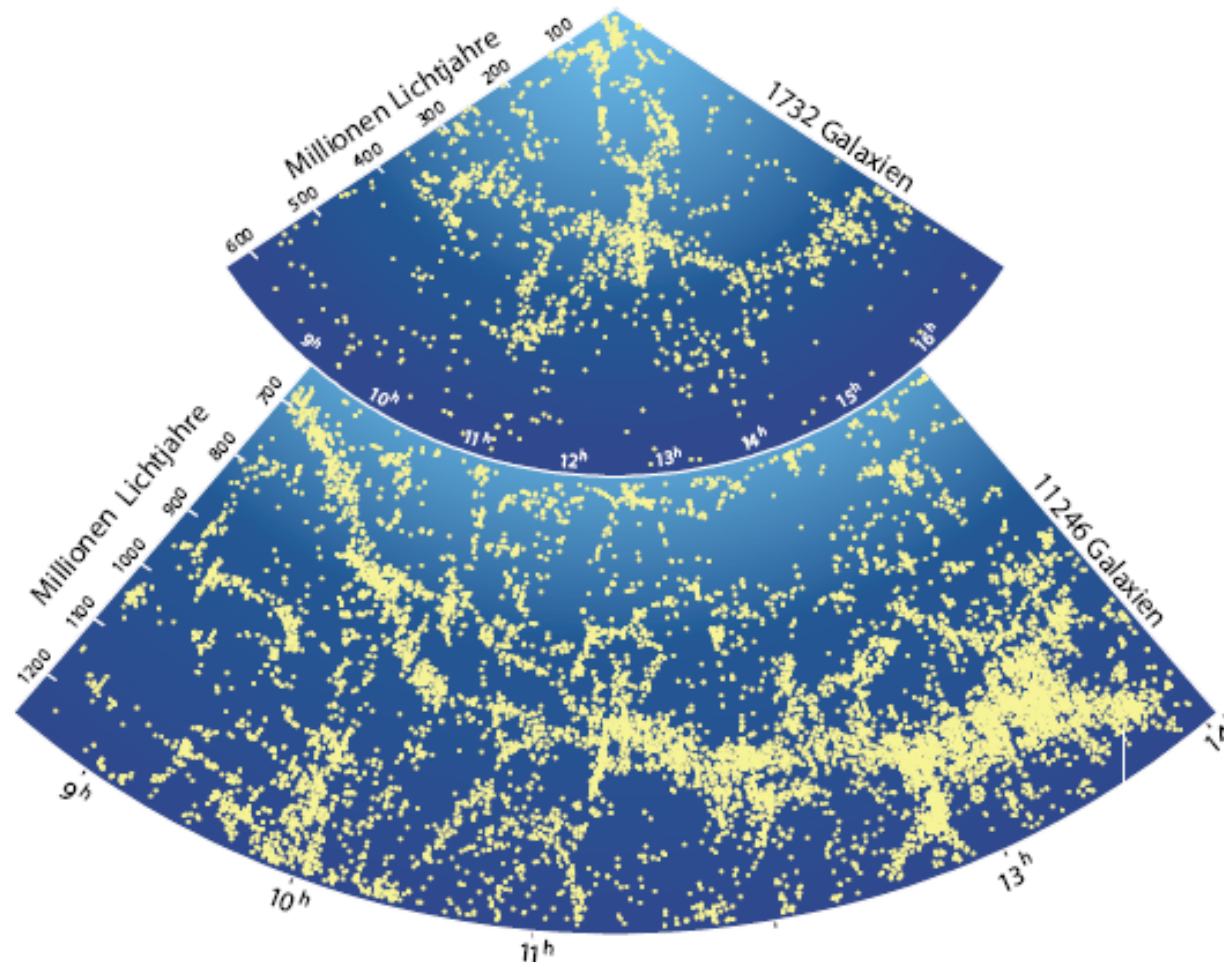


3. Strukturentwicklung



3.1 heiße, warme und kalte dunkle Materie

3.2 heutige Strukturen: astronomische
Evidenzen für DM



3.1 heiße, warme und kalte dunkle Materie

- Entstehung & Entwicklung von großräumigen Strukturen: CMB $\Rightarrow$ heute

LSS

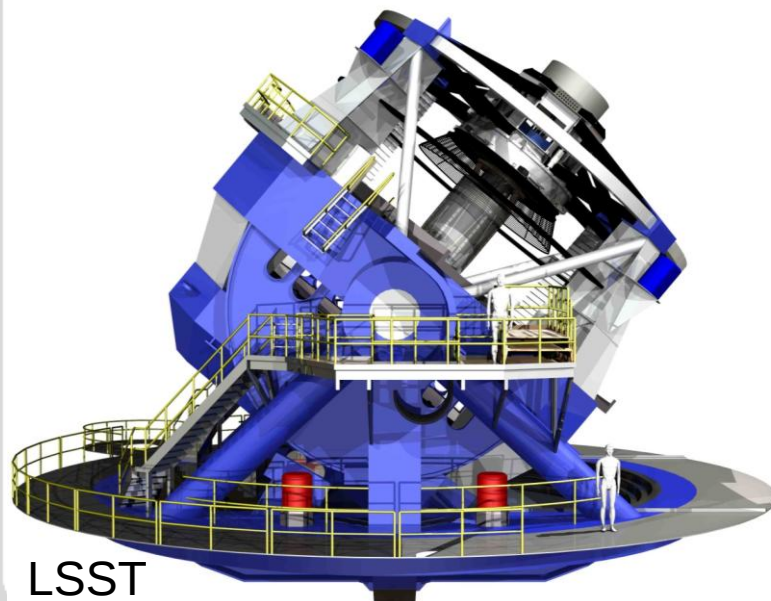
Large **S**cale **S**tructures

- 2 experim. Stützpfeiler:

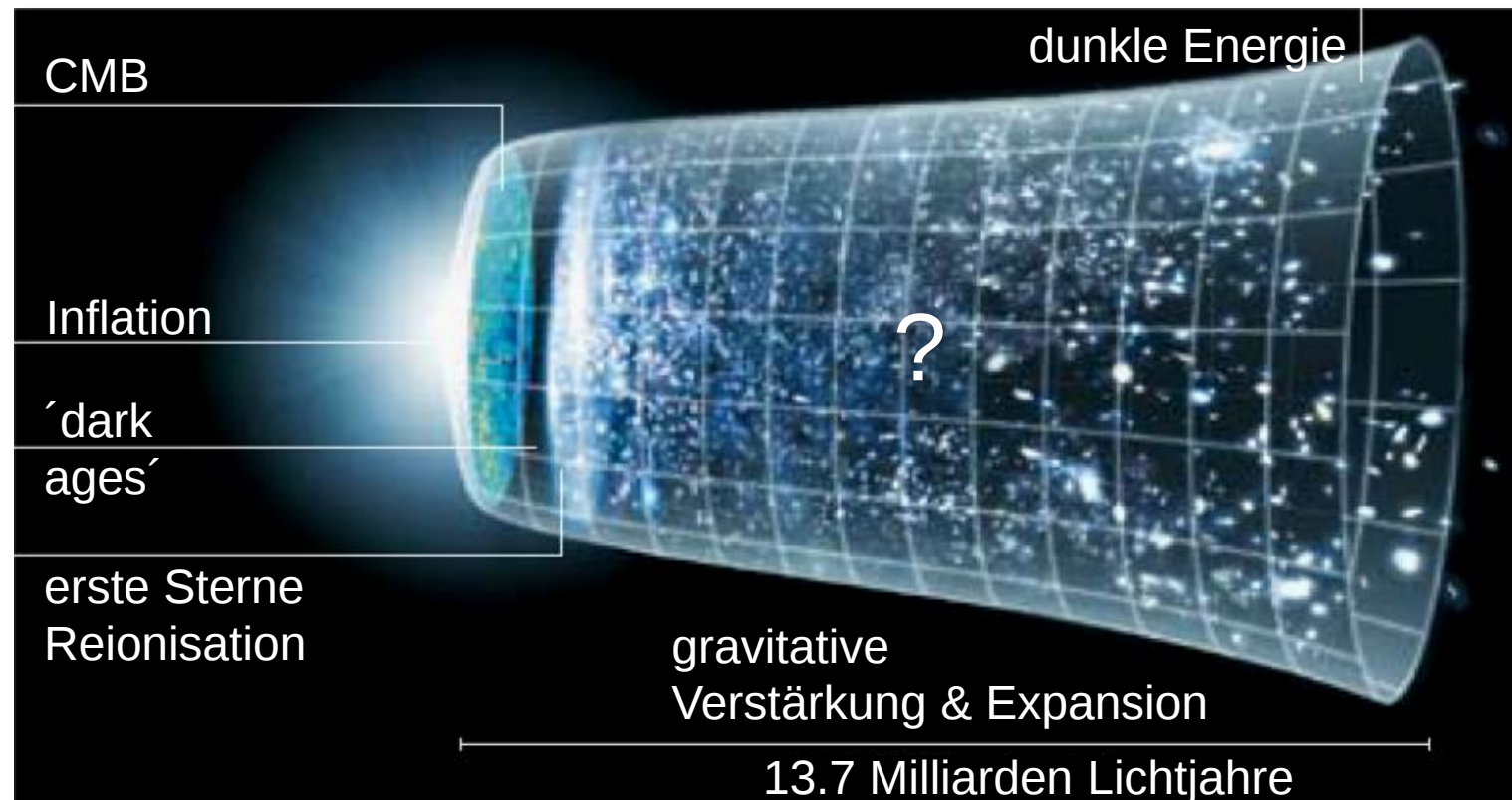
CMB (WMAP, Planck)

Galaxiensurveys

(2dFGRS, SDSS, ...)

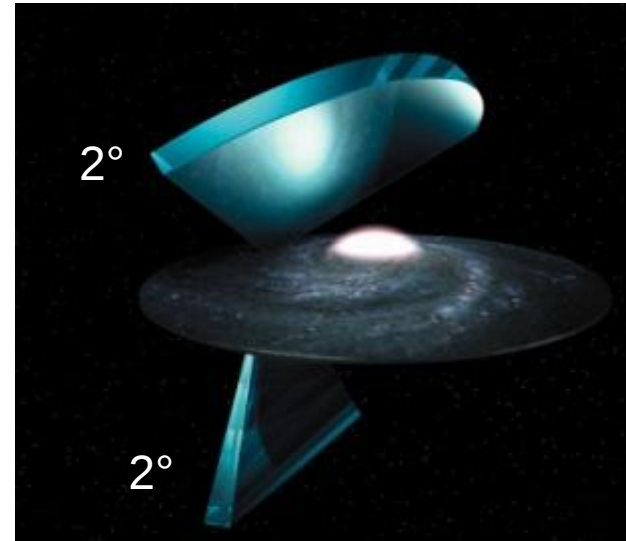
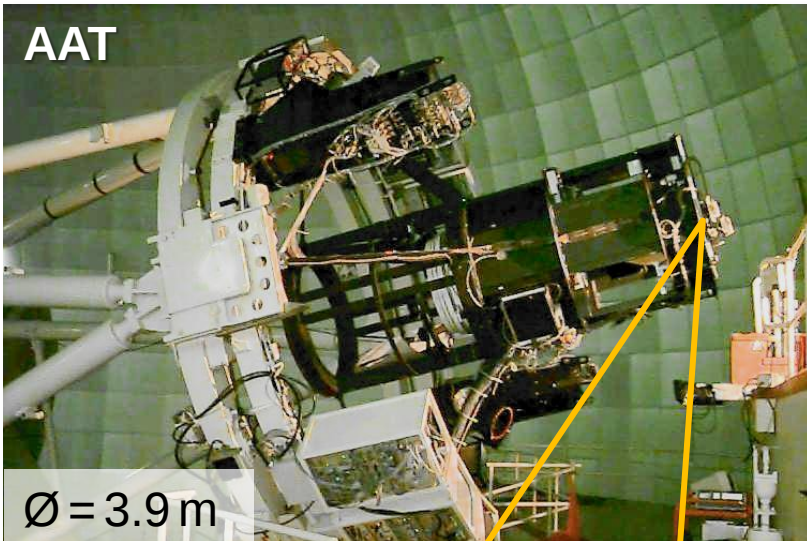


LSST



2dF Galaxiendurchmusterung

- **Messung der Rotverschiebung** (Spektroskopie) von 220.000 Galaxien mit $\langle z \rangle = 0.11$ ($z = 0 - 0.2$) am Anglo-Australian Telescope (AAT)



Fläche: 1.500 Quadrat-Grad
Objekte: bis 19.5^{mag}
Gesichtsfeld: 2°

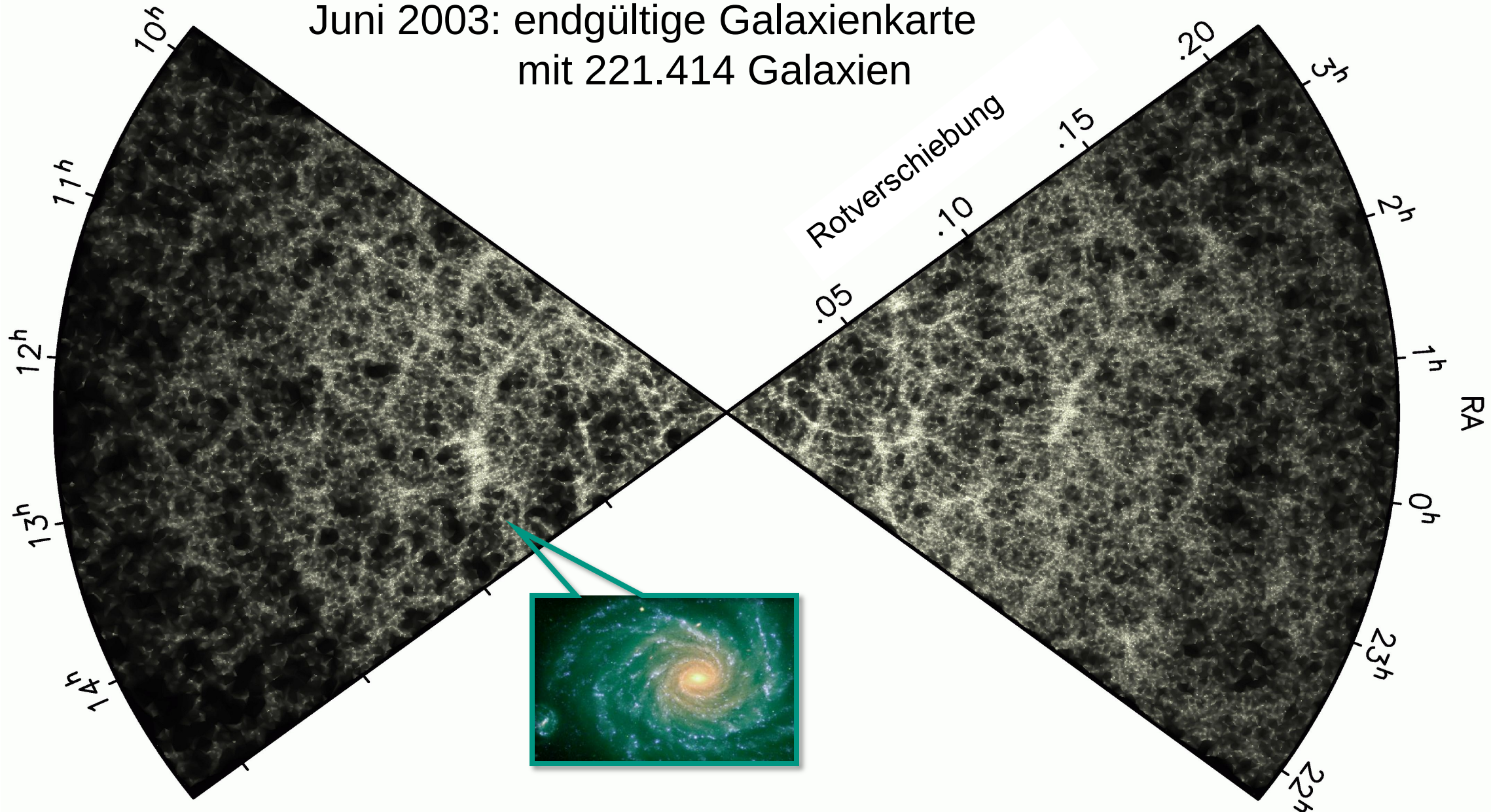


■ Fokalebene:

- Rotverschiebungsmessung durch 392 Fibern, Licht geht zu einem Spektrograph
- Auflösung $\lambda/\Delta\lambda > 1000$
- optische Fiber wird automatisch an den Ort der zu messenden Galaxis positioniert

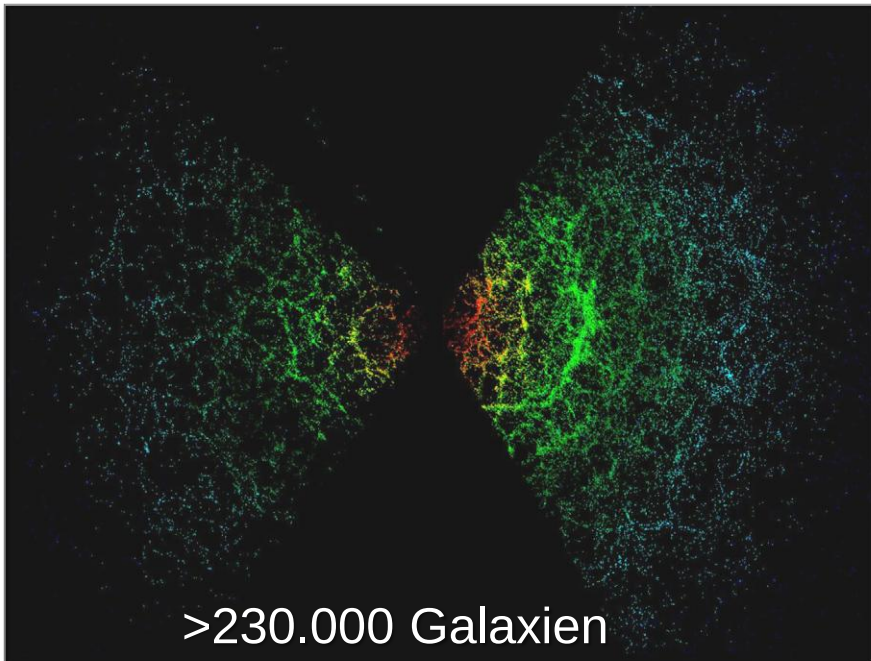
2dF Galaxiendurchmusterung

Juni 2003: endgültige Galaxienkarte
mit 221.414 Galaxien



SDSS – Sloan Digital Sky Survey

Apache Point Observatory, NM



- **SDSS** (seit 1998):
 - umfangreicher **redshift-Survey**
 - 14555 Quadrat-Grad gemessen (~35% des gesamten Himmels)
 - lichtschwache Objekte bis 22^{mag}



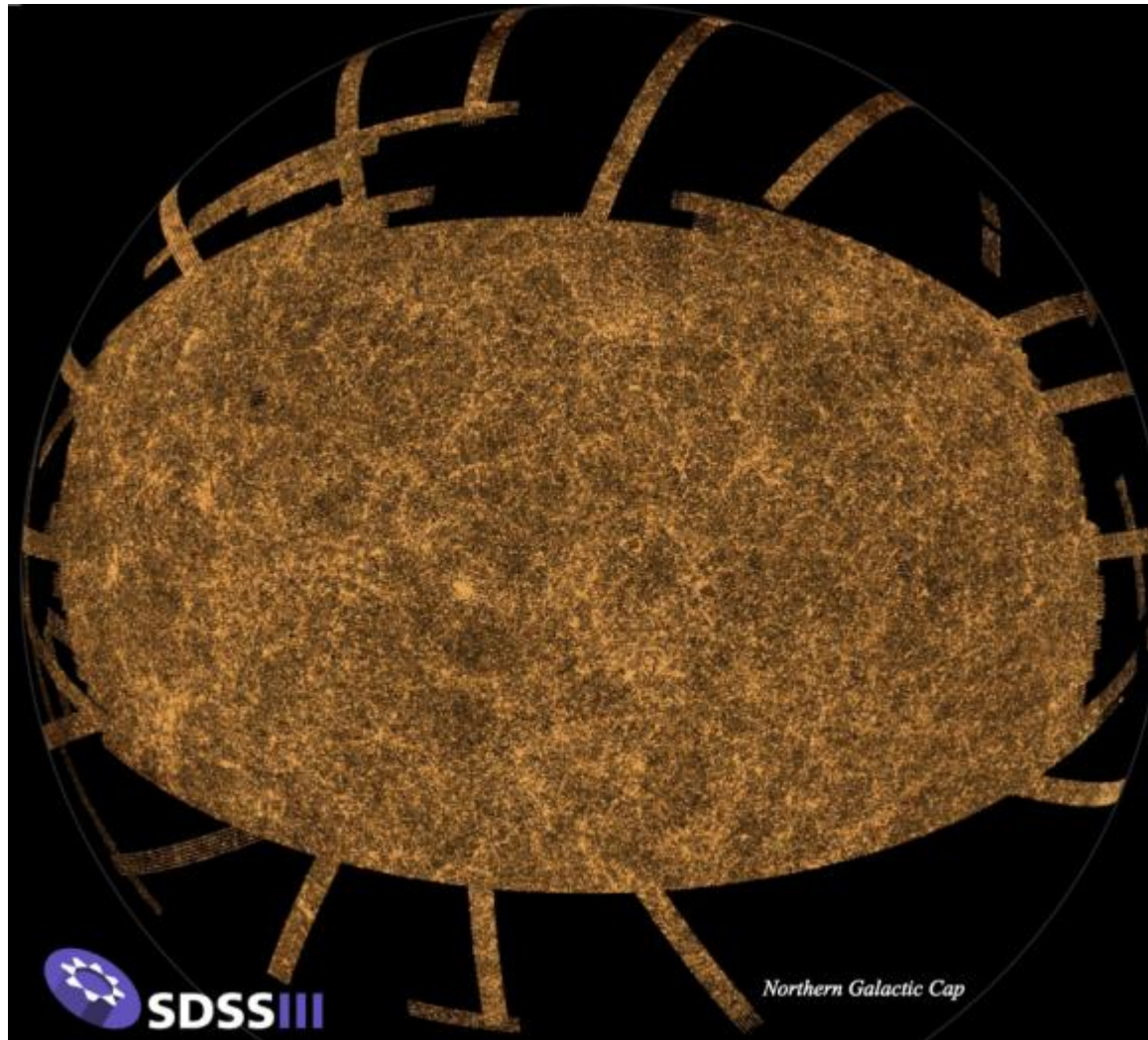
- **Ziele:**
 - Position & z von **>10⁶ Galaxien/Quasare**
 - ↪ Galaxienverteilung im Universum
 - ↪ Materiedichteverteilung $\rho(r)$
 - ↪ kosmologische Parameter

Photometrie: 5 Farbbänder mit 30 CCDs
354 / 476 / 628 / 769 / 925 nm

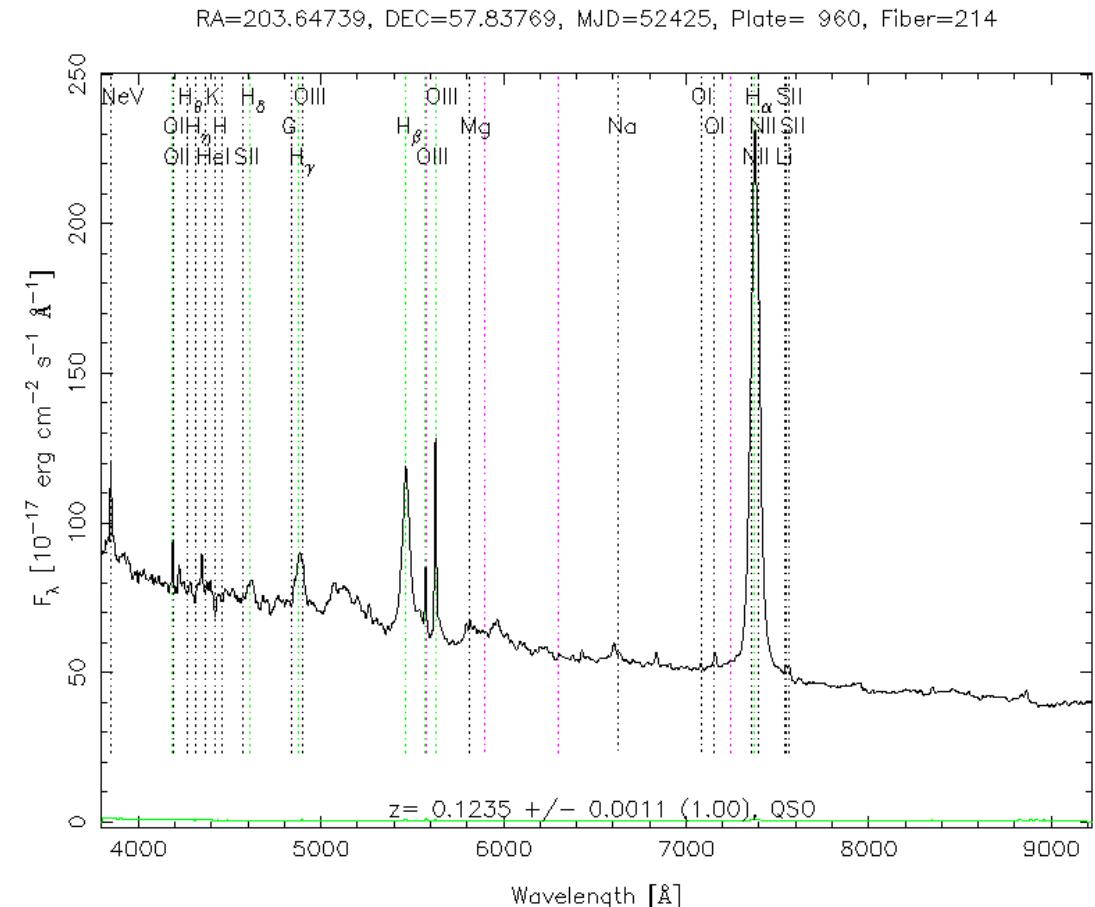
Spektroskopie: 640 opt. Fibern in $\emptyset = 3^\circ$
(für ausgewählte Objekte)

SDSS – Sloan Digital Sky Survey

- neueste Datenveröffentlichung: Data release 8 (DR8)
aktuell - **SDSS III: 2008-14**



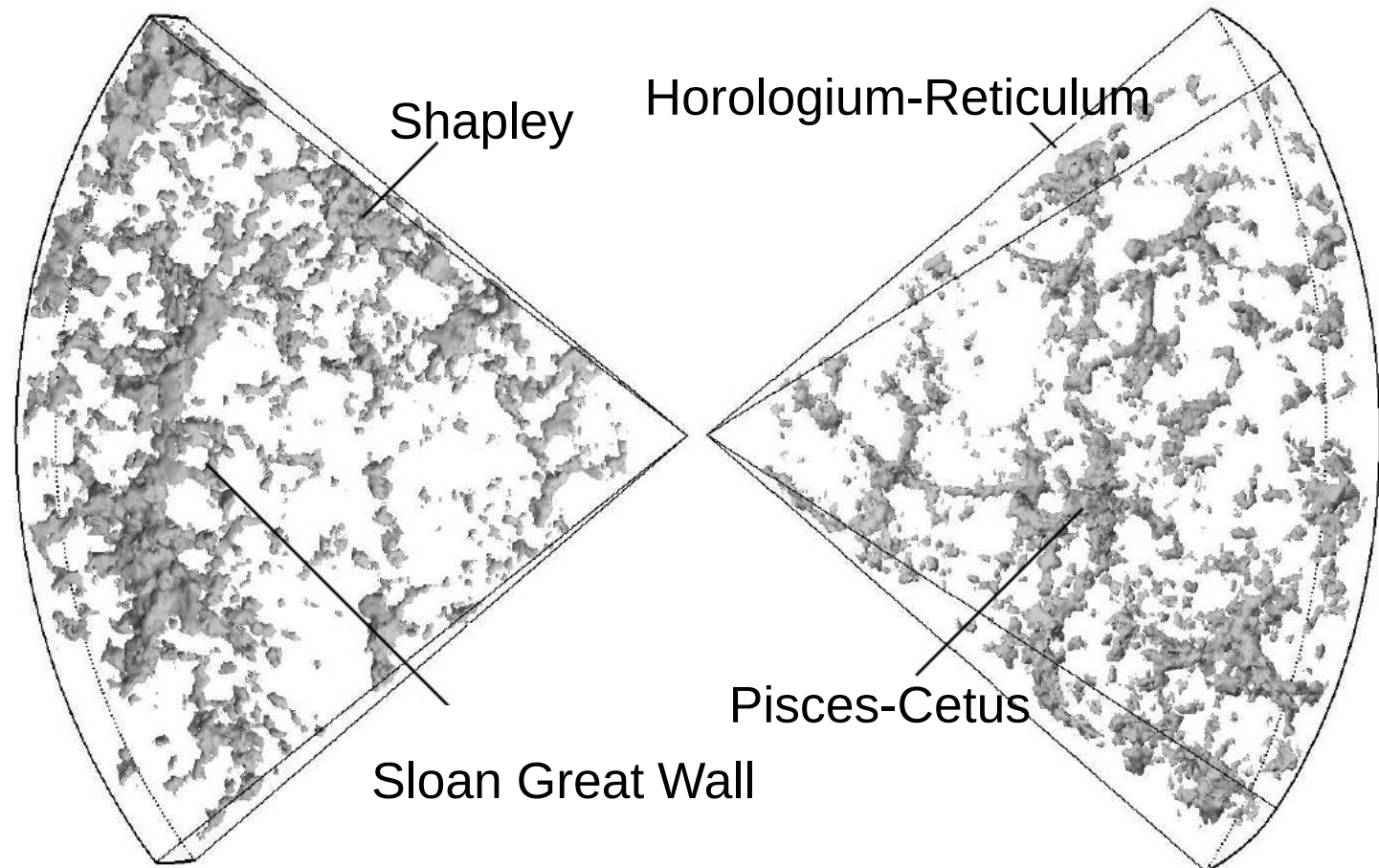
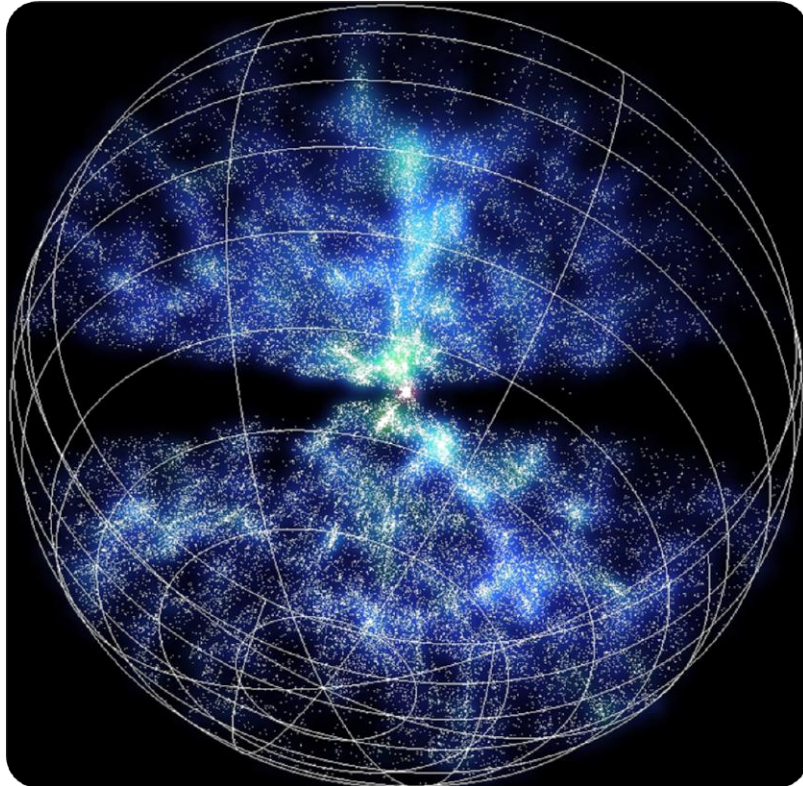
■ Beispiel: Spektrum einer Galaxie



Großräumige Strukturen

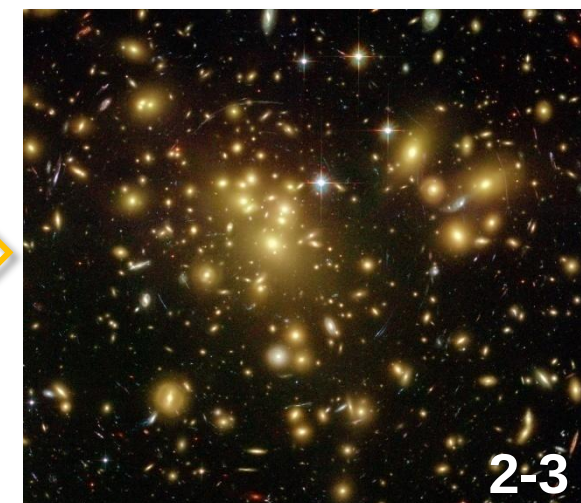
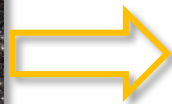
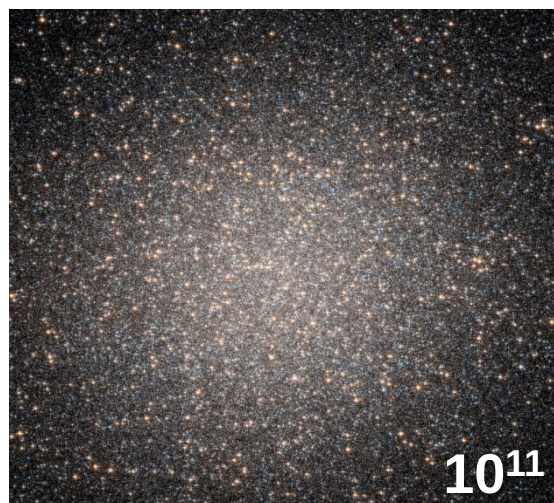
- Beobachtung: **filamentartige Strukturen** aus Superclustern und Clustern
große sphärische **Leerräume** (Voids)
- Modellierung: Nachbildung durch **N-Teilchen Simulationen**
Galaxienverteilung als guter Indikator von $\rho_{\text{tot}}(r)$

6dF



■ heutiges Universum wird durch **lokale Inhomogenitäten** charakterisiert

Objekt	$\rho / \langle \rho \rangle$	Dichte	Dimension λ	Masse [$M_{\odot}$]
Kugelsternhaufen	10^{11}	10^2 - 10^3 / pc ³	10 – 100 pc	10^5 - 10^6
offene Sternhaufen	10^9	10 / pc ³	2 – 20 pc	10^2 - 10^3
Galaxie	10^6	$0.02 h^3$ / Mpc ³	30 kpc	10^{11}
Galaxiencluster	10^3	$10^{-5} h$ / Mpc ³	1 – 10 Mpc	10^{13}
Supercluster	2 – 3	$10^{-6} h$ / Mpc ³	30 – 100 Mpc	10^{17}
Voids	~ 0.2		< 100 Mpc	

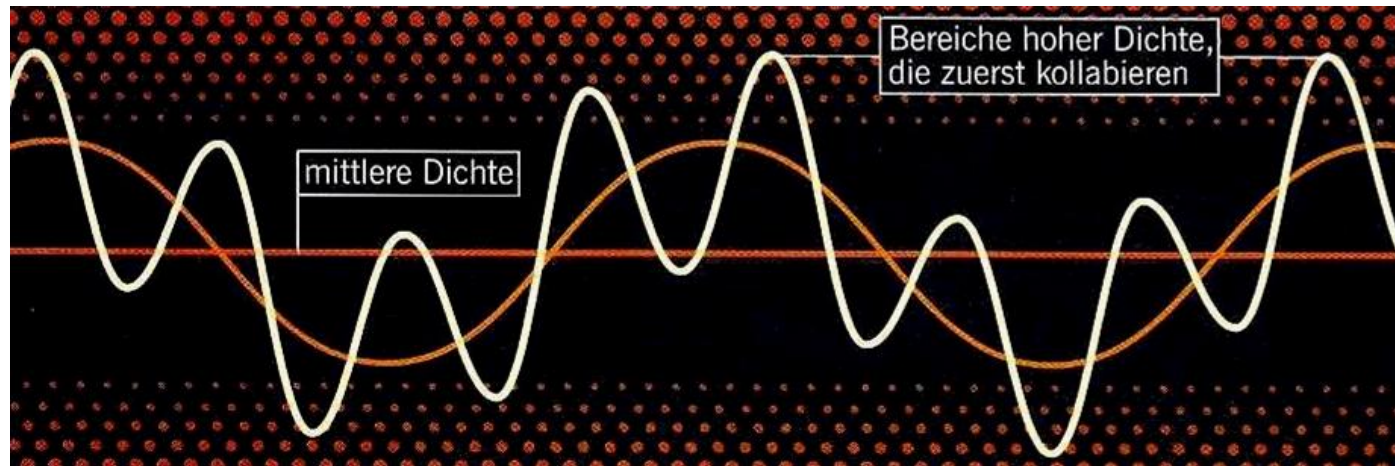


Dichtekontrast δ

■ relativer Dichtekontrast $\delta(\vec{r}, t)$: wichtig für Strukturbildung

- Definition:
$$\delta(\vec{r}, t) = \frac{\rho(\vec{r}, t) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \quad \vec{r}(t) = a(t) \cdot \vec{x}$$

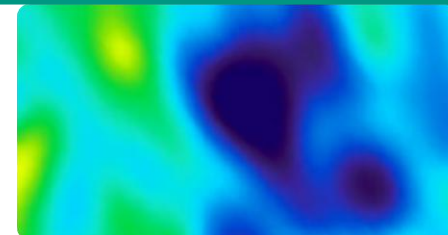
dimensionlose
Größe δ



$\bar{\rho}$

- frühes Universum:

$$\delta(z = 1100) \sim 10^{-5}$$



- heutiges Universum:

$$\delta(z = 0) \sim 2-3$$

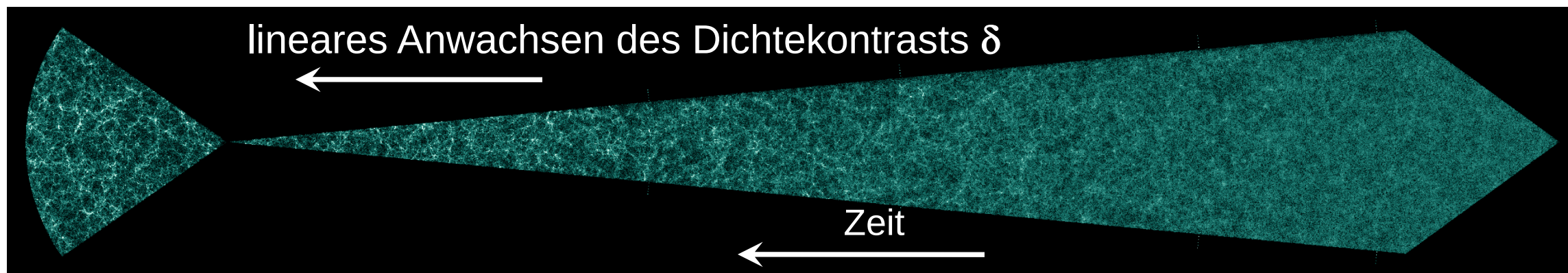


■ Entwicklung des Dichtekontrasts:

- schwache Gravitationsfelder: Newton'sche Gravitation, Störungstheorie
- generisches Bild: **Zunahme der Inhomogenität** im Vergleich zum kosmischen Mittel
 - überdichter Bereich** ($\delta\rho > 0$): expandiert langsamer
 - unterdichter Bereich** ($\delta\rho < 0$): expandiert schneller

■ Dichtekontrast $\delta(r) \sim$ Skalenfaktor $a(t)$

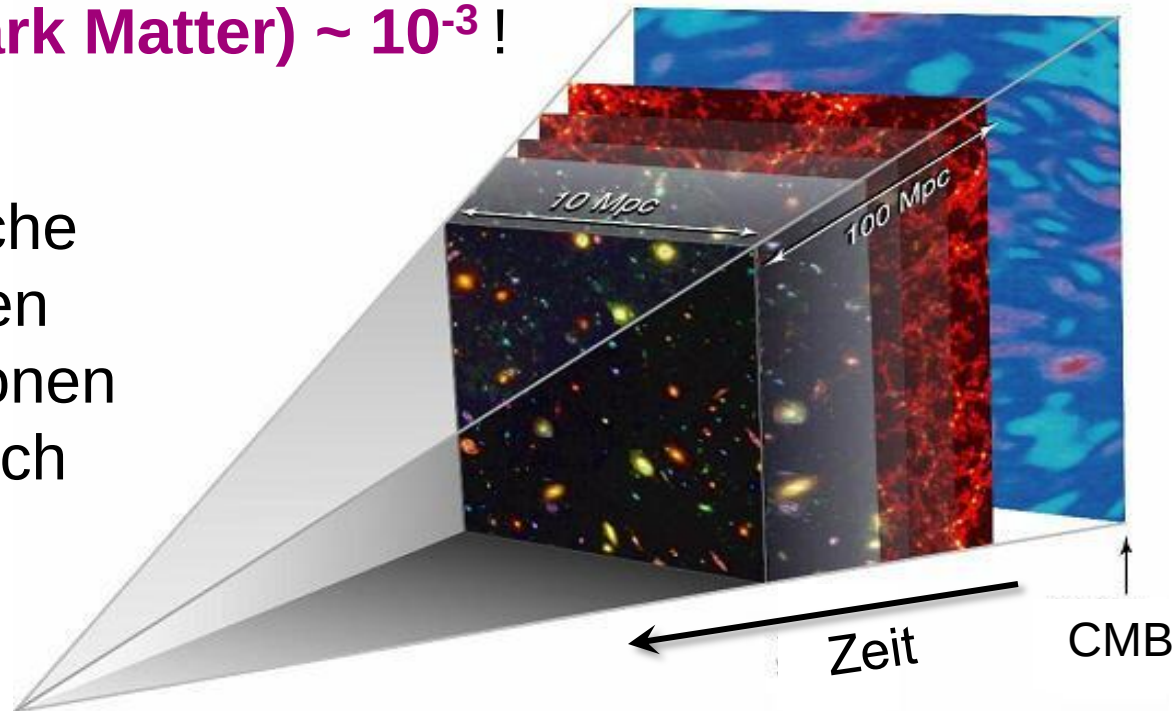
- **quasi-lineares Verhalten**
- bei größerem Dichtekontrast ($\delta > 1$) wird die Entwicklung nichtlinear



- **Dunkle Materie (DM) & Strukturbildung:** DM ist entscheidend, da diese ohne Beeinflussung durch die CMB bis $t = t_{\text{rekomb.}}$ anwachsen kann:

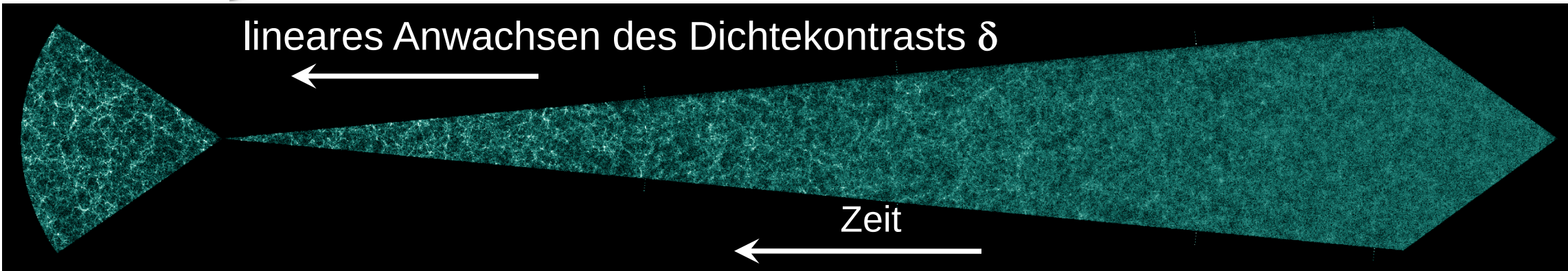
$$\Delta\rho/\rho \text{ (Dark Matter)} \sim 10^{-3} !$$

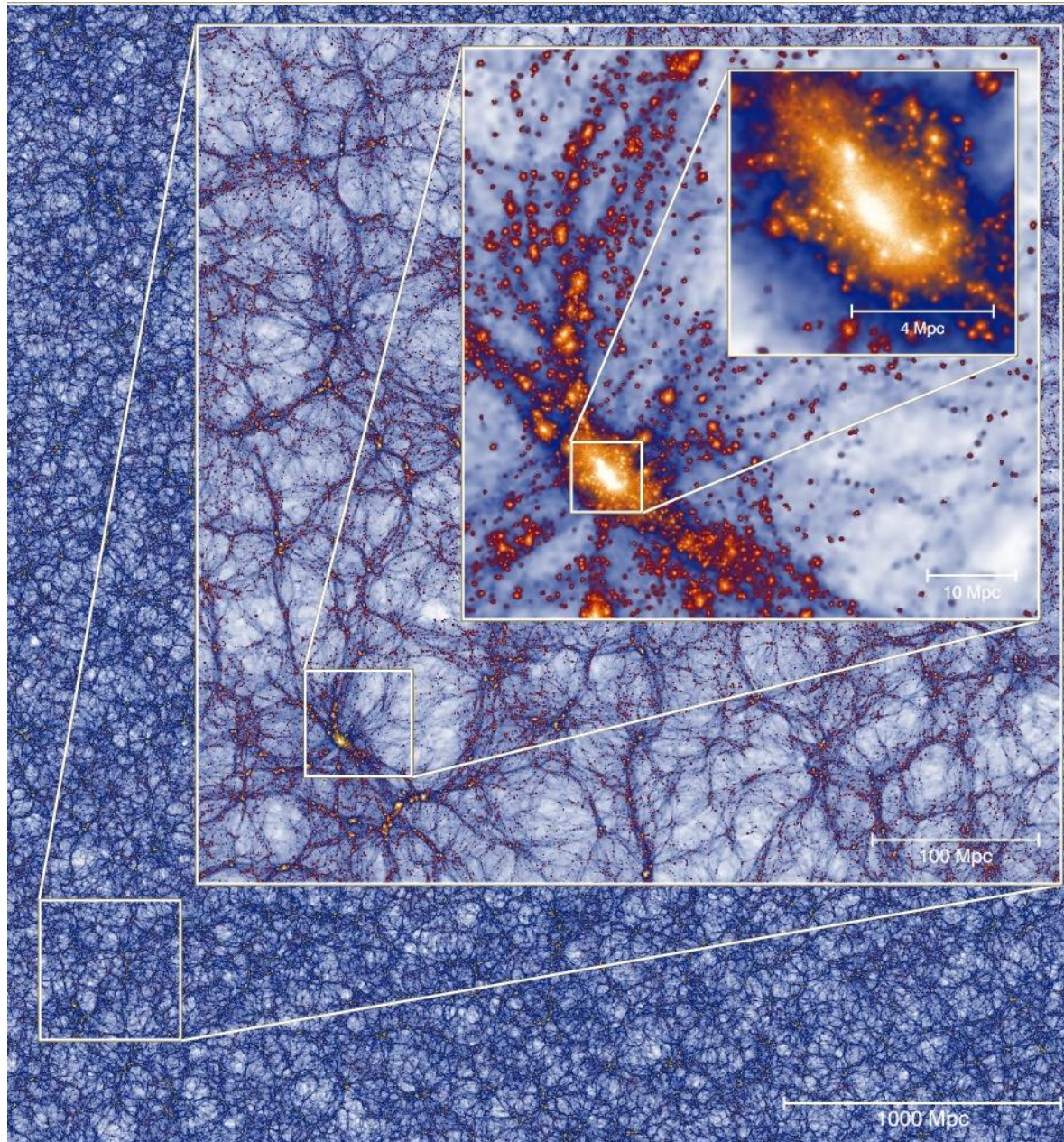
numerische
N-Teilchen
Simulationen
erforderlich



baryonische Materie
fällt in die Gravitations-
potenziale der dunklen
Materie

lineares Anwachsen des Dichtekontrasts δ

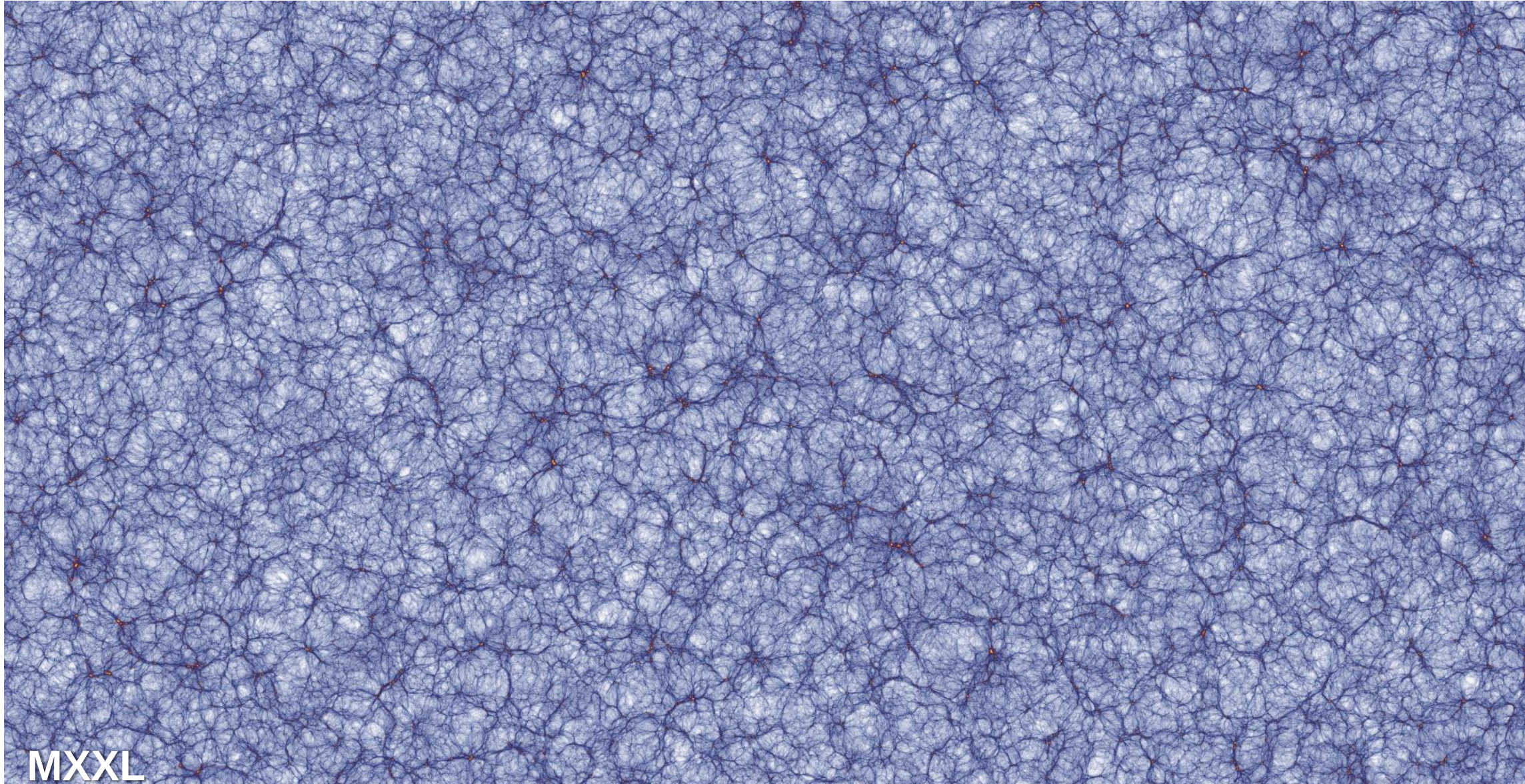




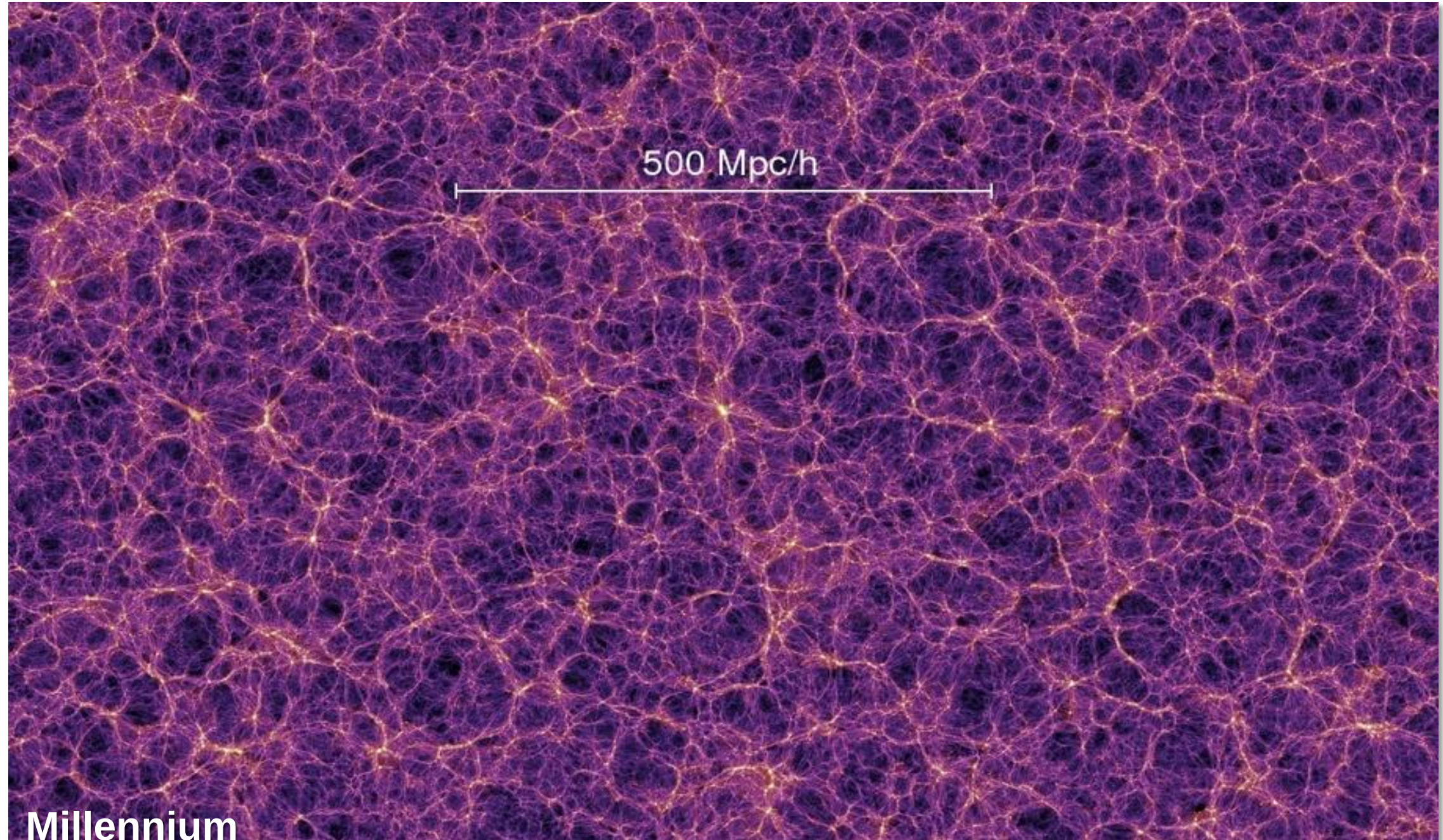
■ VIRGO – Konsortium: Millennium-XXL Simulation (2011)

- numerische N-Teilchen Simulation
 $N = 3 \cdot 10^{11}$ Teilchen (6720^3)
 $M(\text{Teilchen}) = 5 \cdot 10^9 M_{\odot}$
nur **Dunkle Materie** (Gravitation)
Würfel mit Kantenlänge 4.1 Gpc
- Verteilung der **dunklen Materie**
dann Modellierung der Baryonen
- Modellierung der Bildung & Entwicklung von 700 Mio. Galaxien
- 300 CPU-Jahre $\equiv$ 10 Tage auf
12.228 Computer Cores, dabei
30 TB RAM Speicher

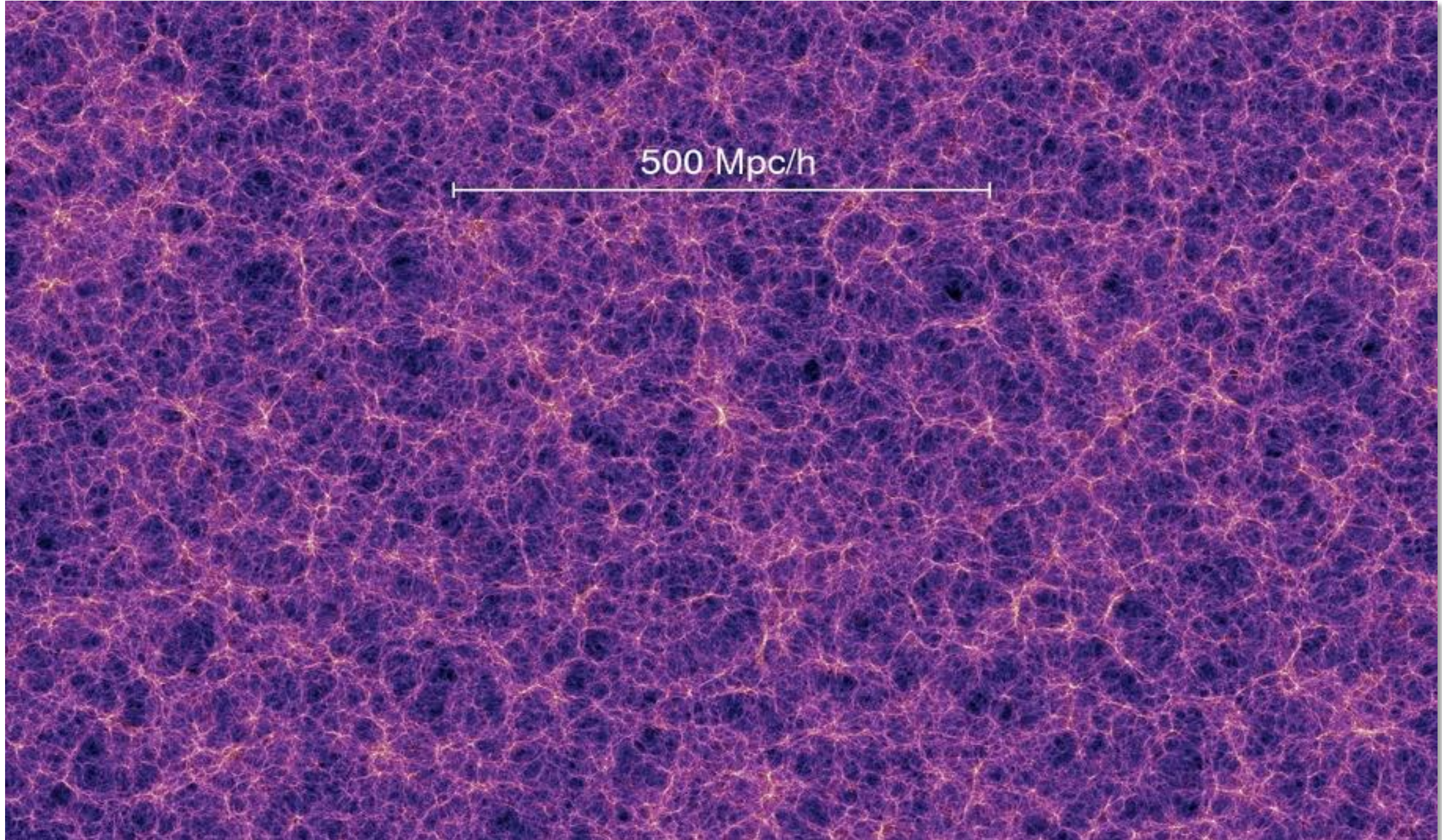
- erste Ergebnisse von MXXL verbessern früheren Millennium-Run (2005)



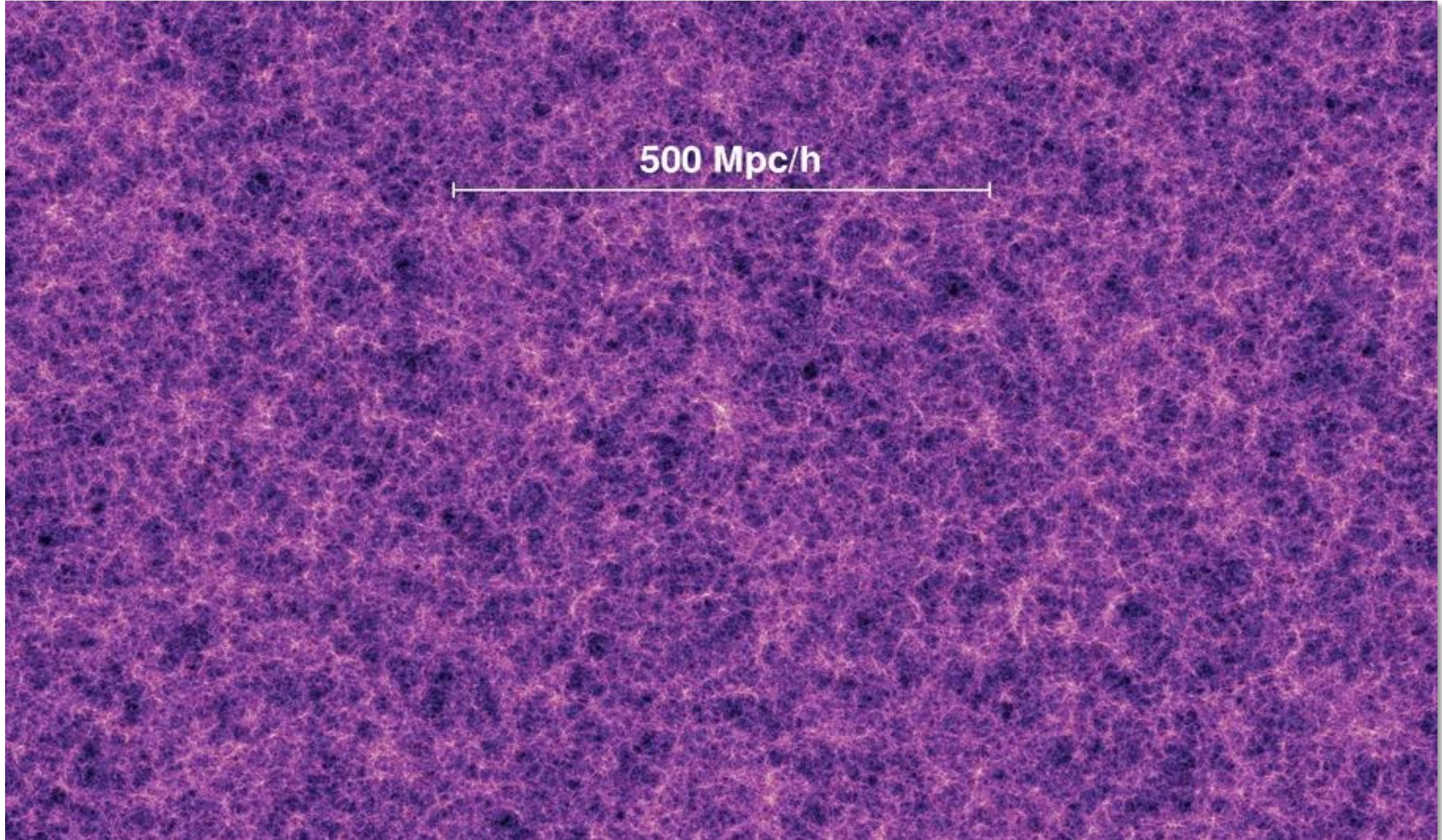
Millennium Simulation: $z=0.0$, $T=13.7$ Mrd J



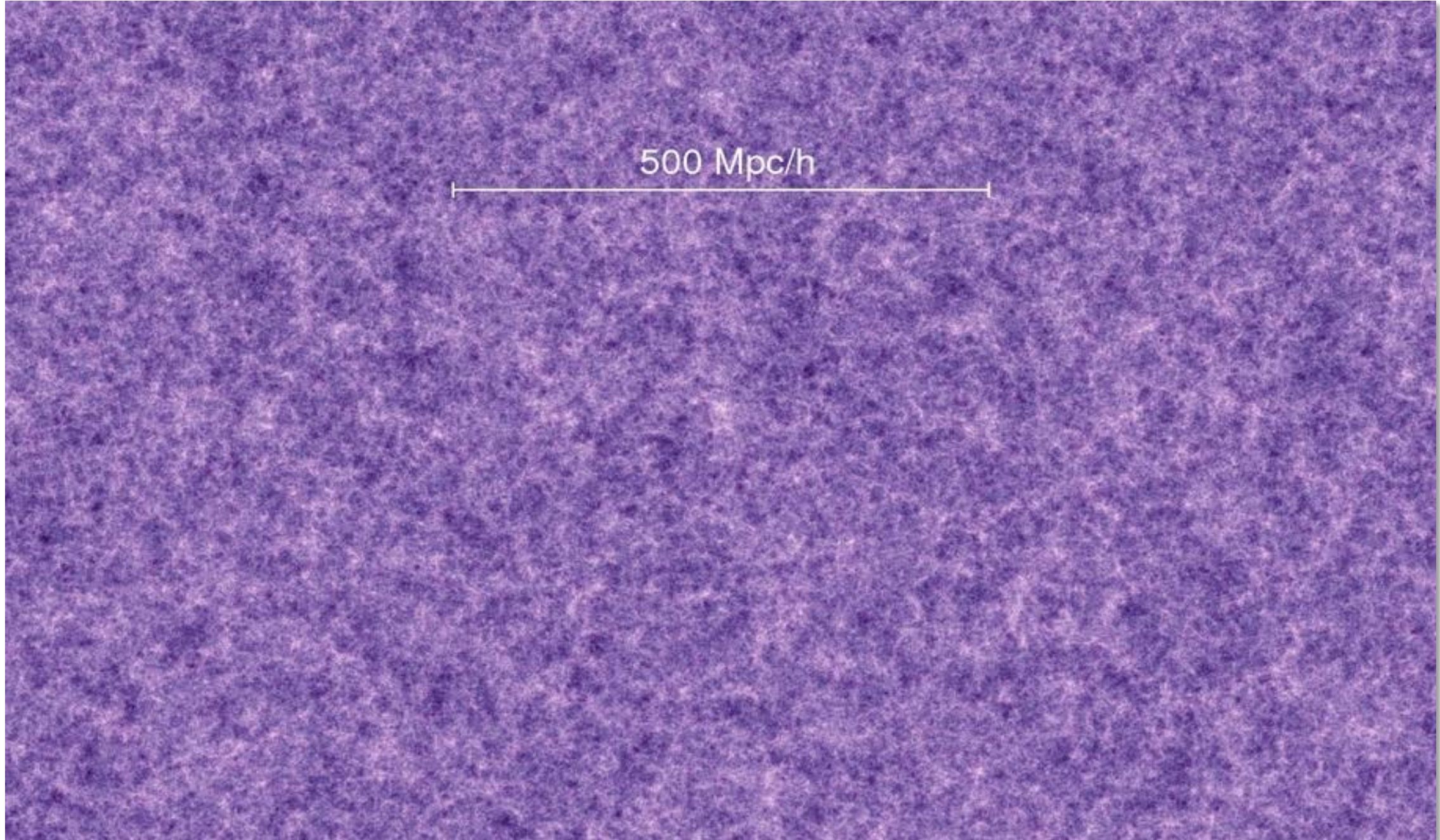
Millennium Simulation: $z=1.4$, $T=4.7$ Mrd J



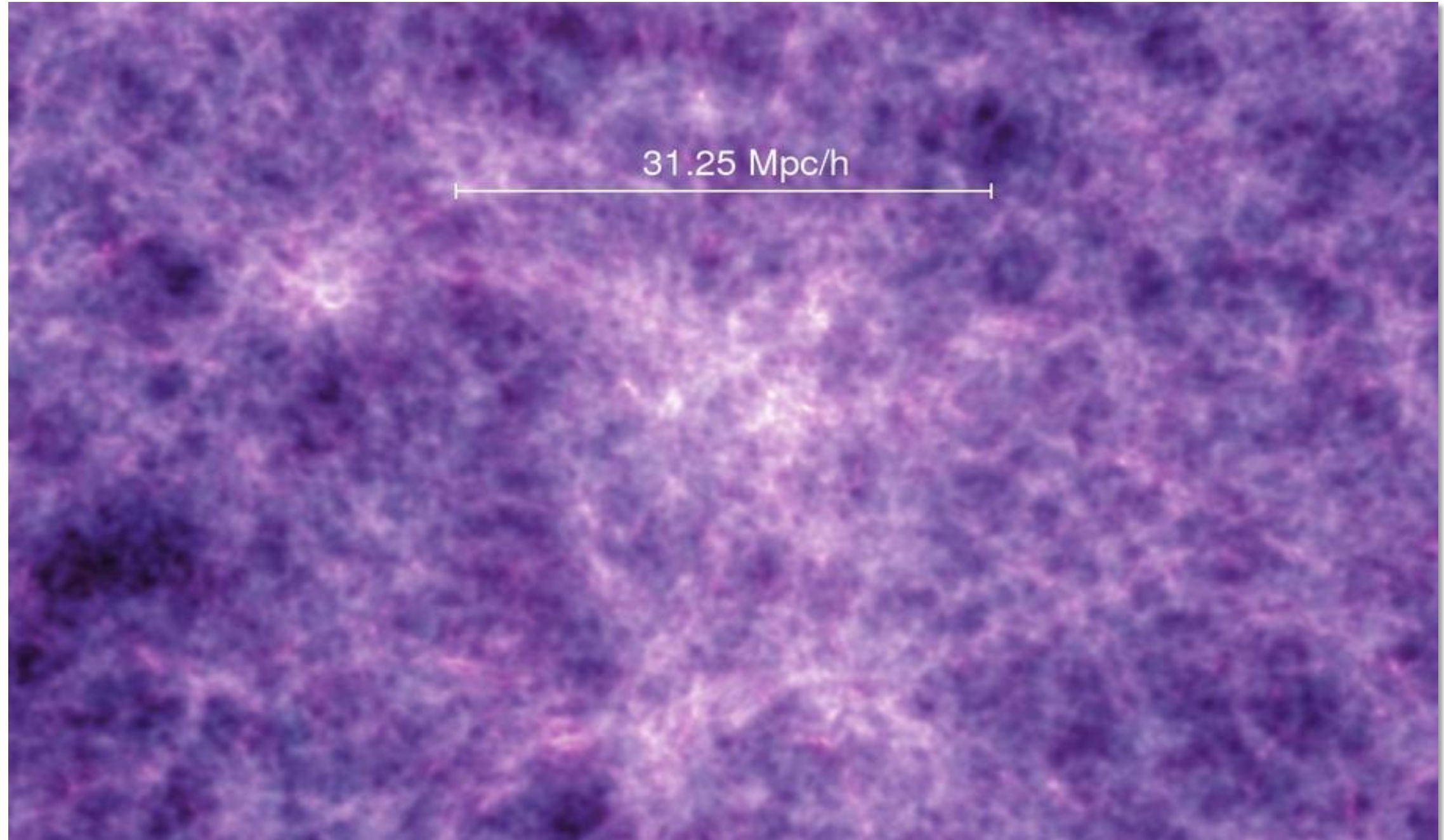
Millennium Simulation: $z=5.7$, $T=1.0$ Mrd J



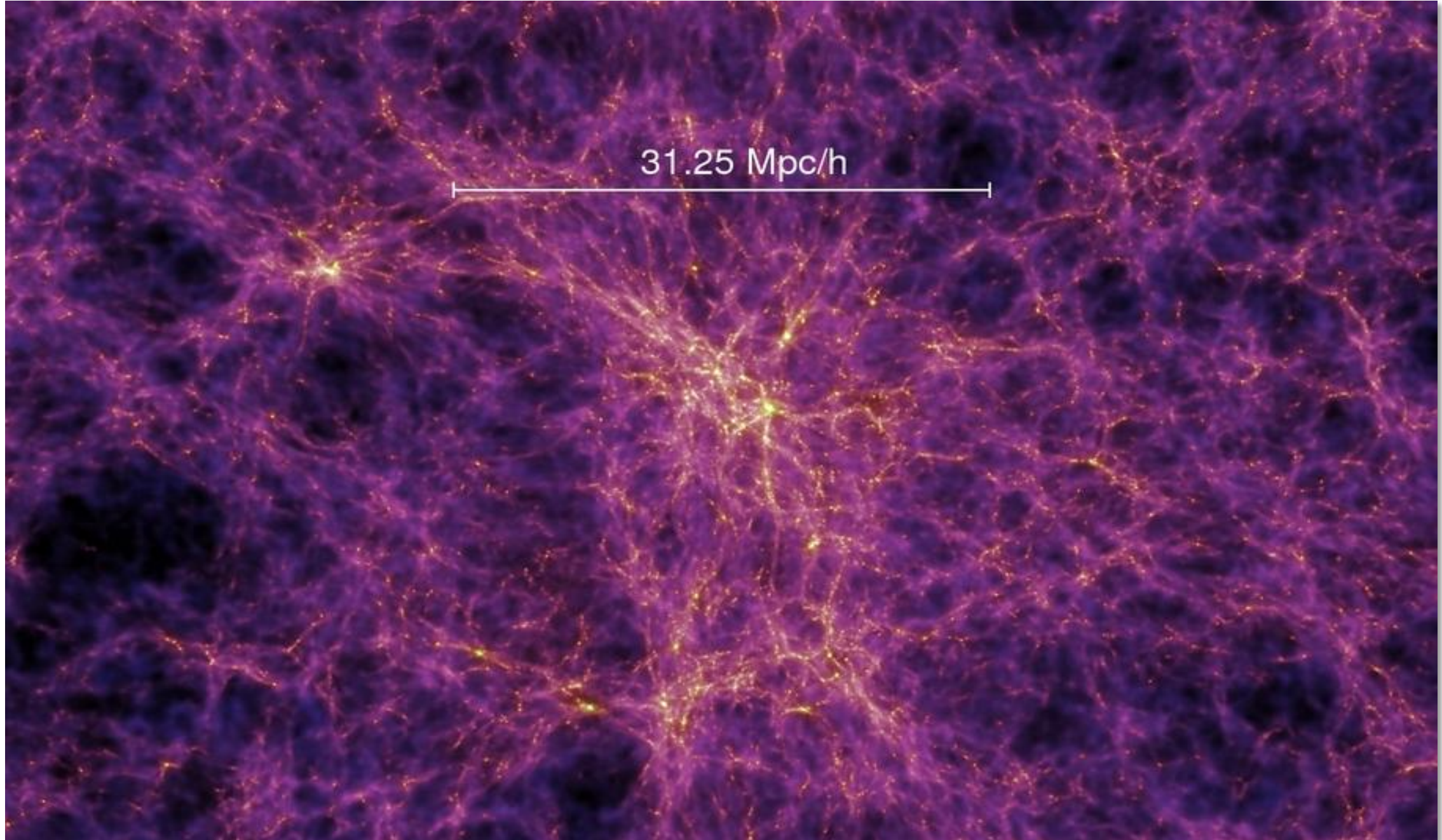
Millennium Simulation: $z=18.3$, $T=0.21$ Mrd J



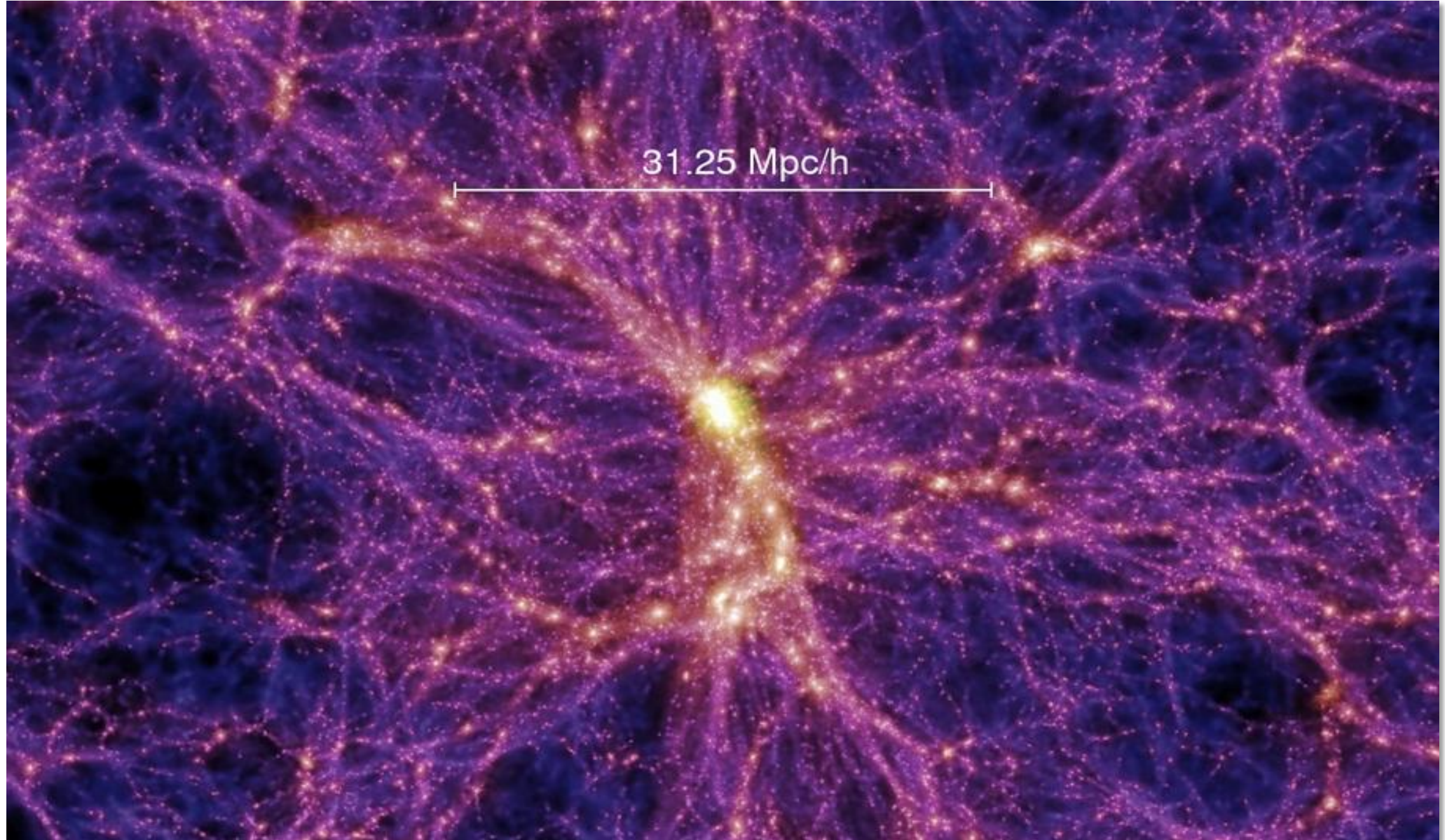
Millennium Simulation: $z=18.3$, $T=0.21$ Mrd J



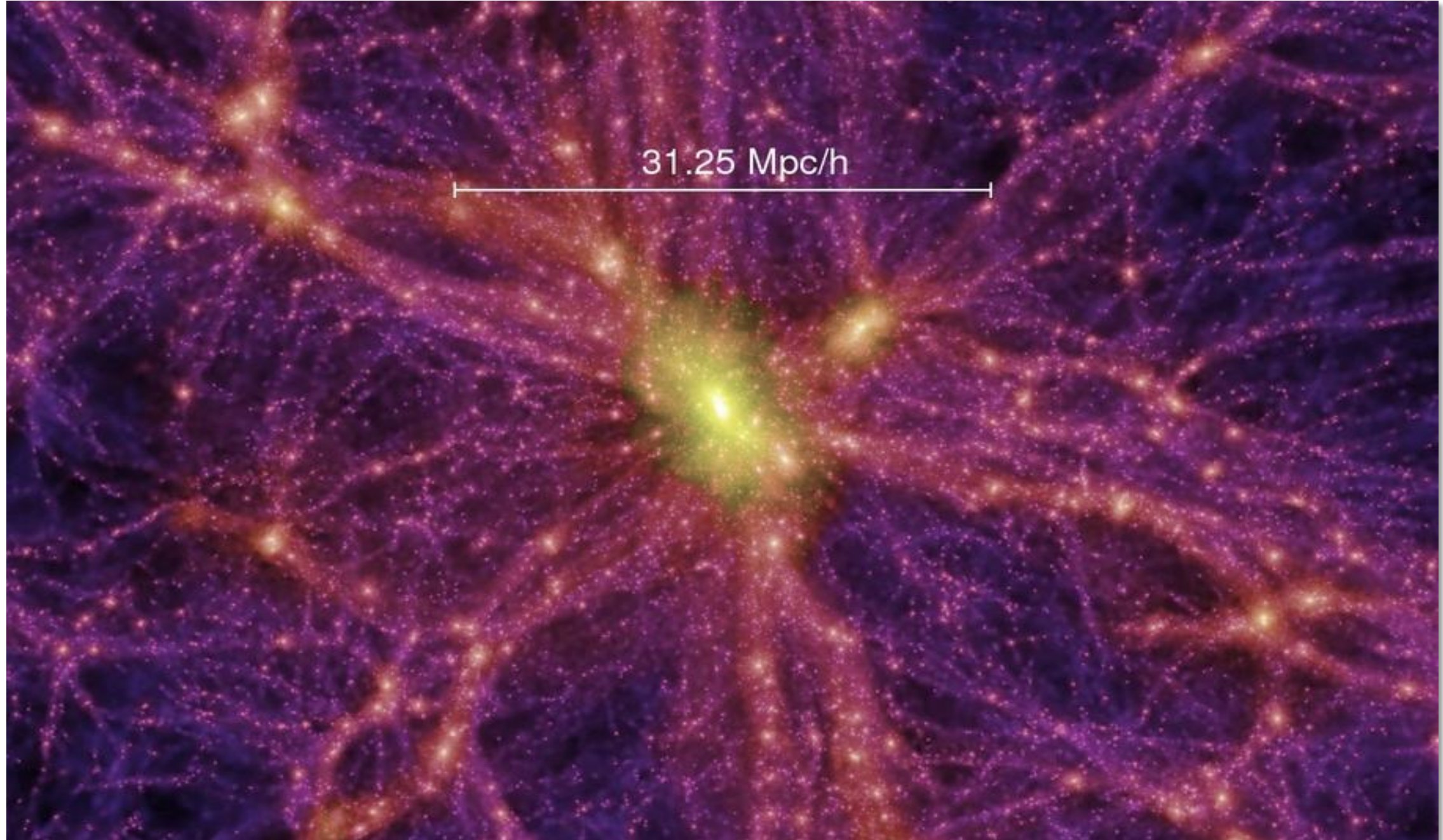
Millennium Simulation: $z=5.7$, $T=1.0$ Mrd J



Millennium Simulation: $z=1.4$, $T=4.7$ Mrd J

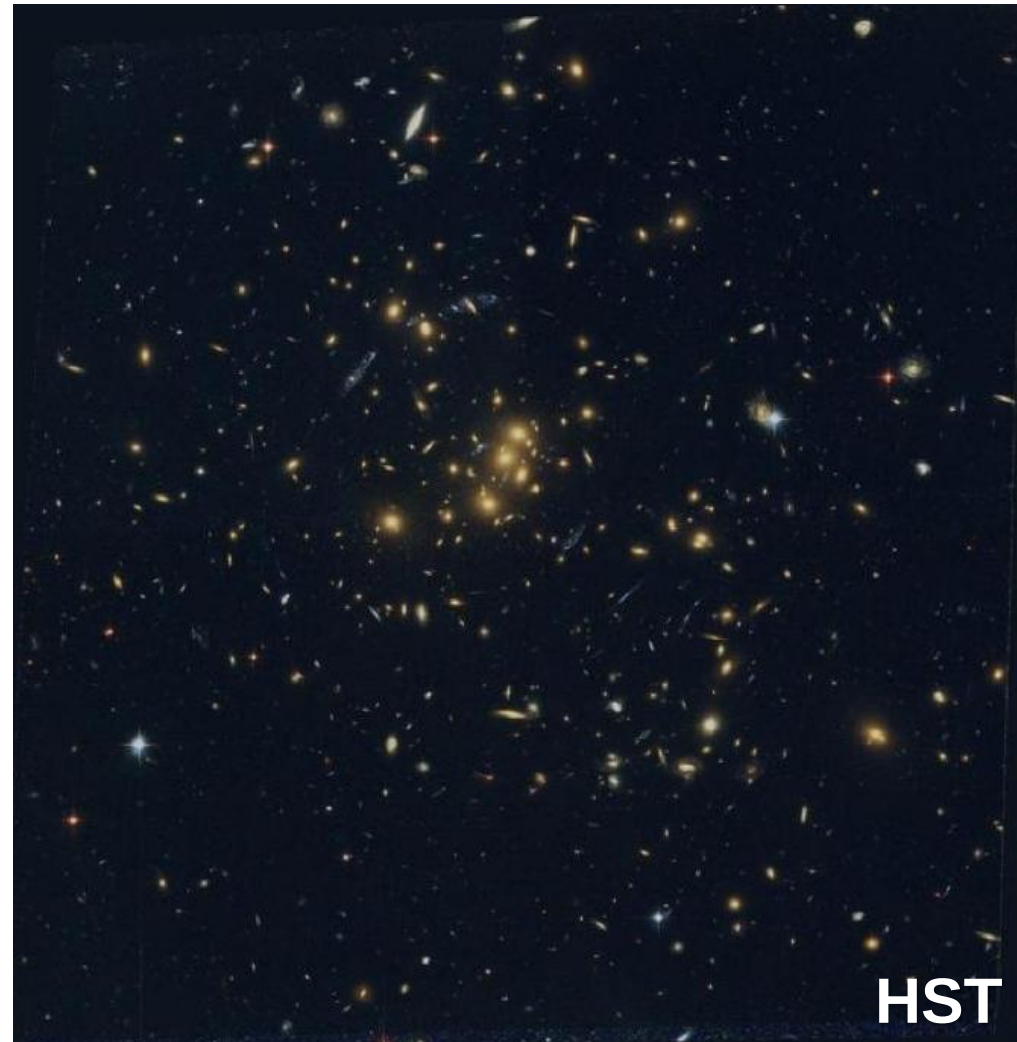
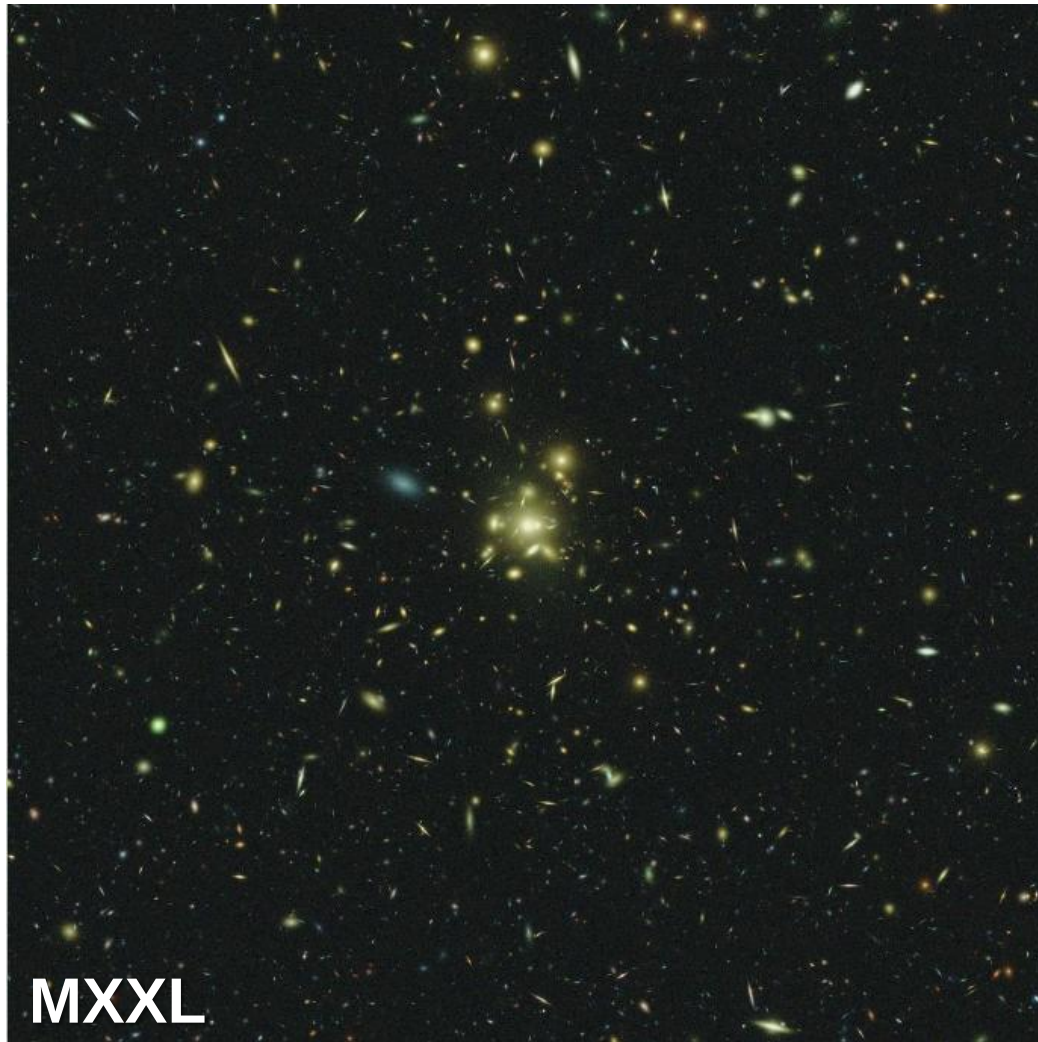


Millennium Simulation: $z=0.0$, $T=13.7$ Mrd J

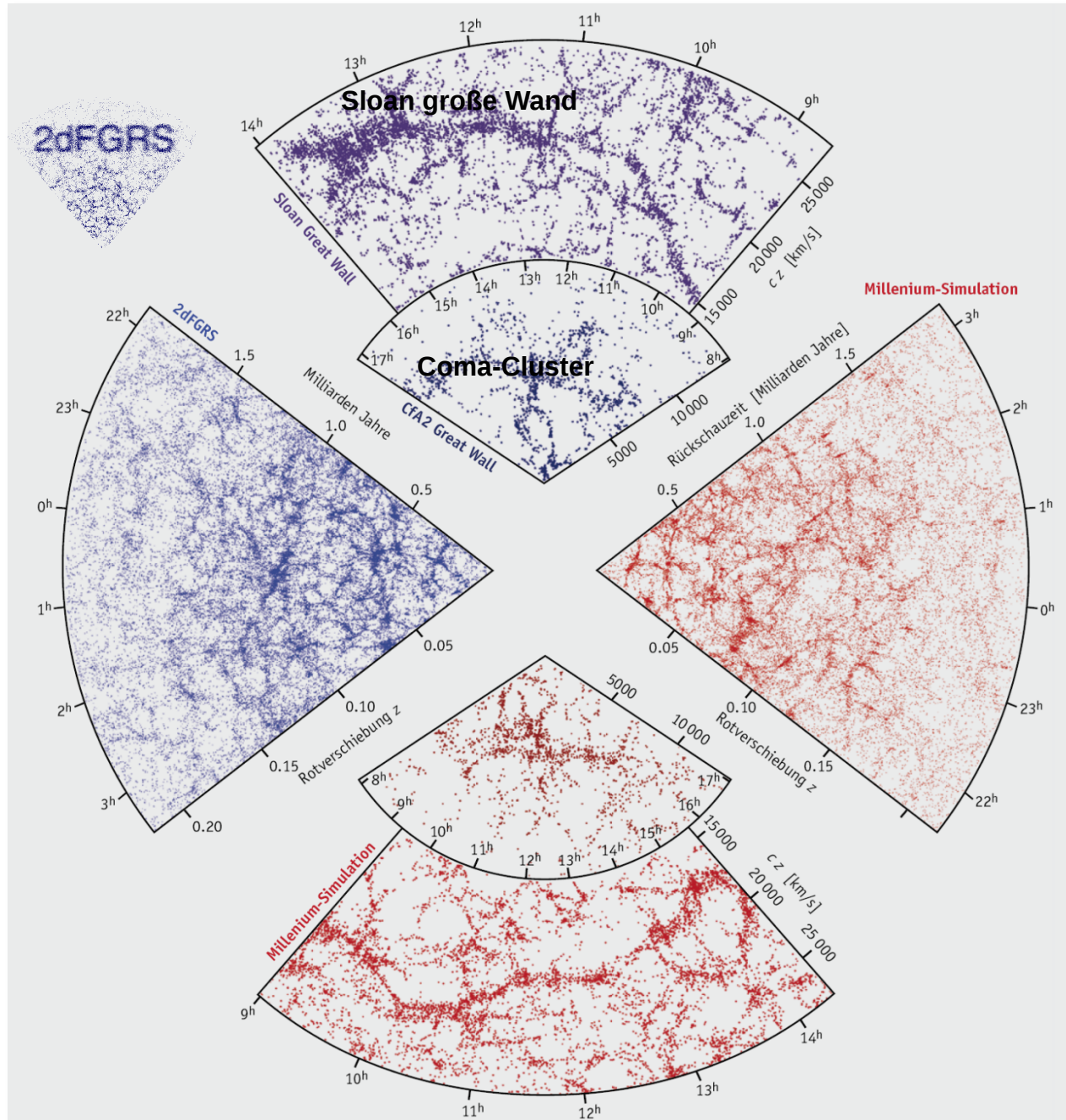


Vergleich Simulation-Beobachtung

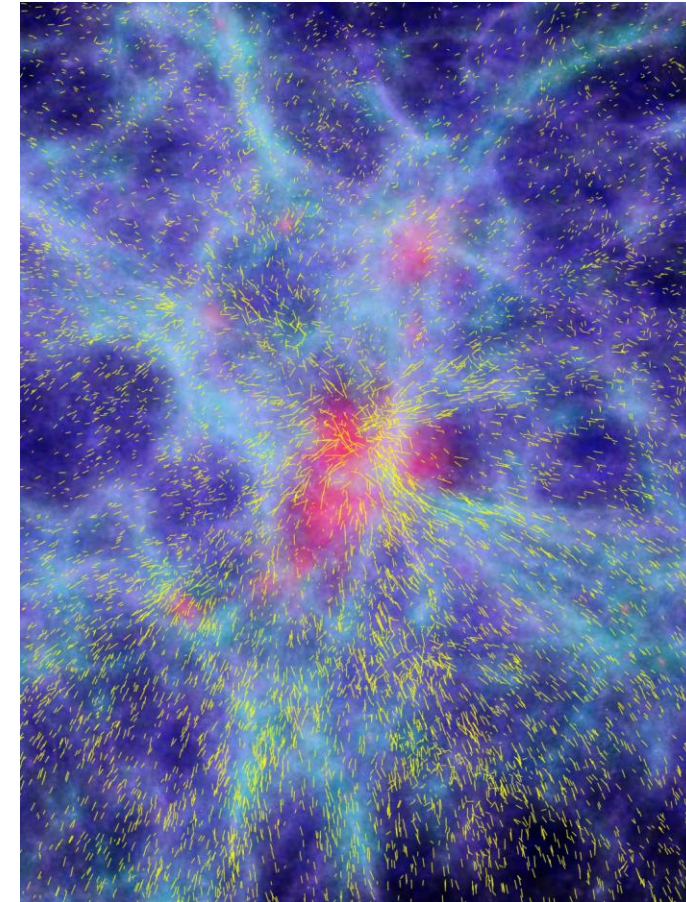
- MXXL-Daten können benutzt werden um Bilder zu generieren
hier: Cluster in $z = 0.4$ (HST oder MXXL?), Test der Analysealgorithmen
von Galaxiensurveys



Vergleich Simulation-Galaxiensurveys



■ LSS - gute Übereinstimmung von Galaxiensurveys & MC-Daten



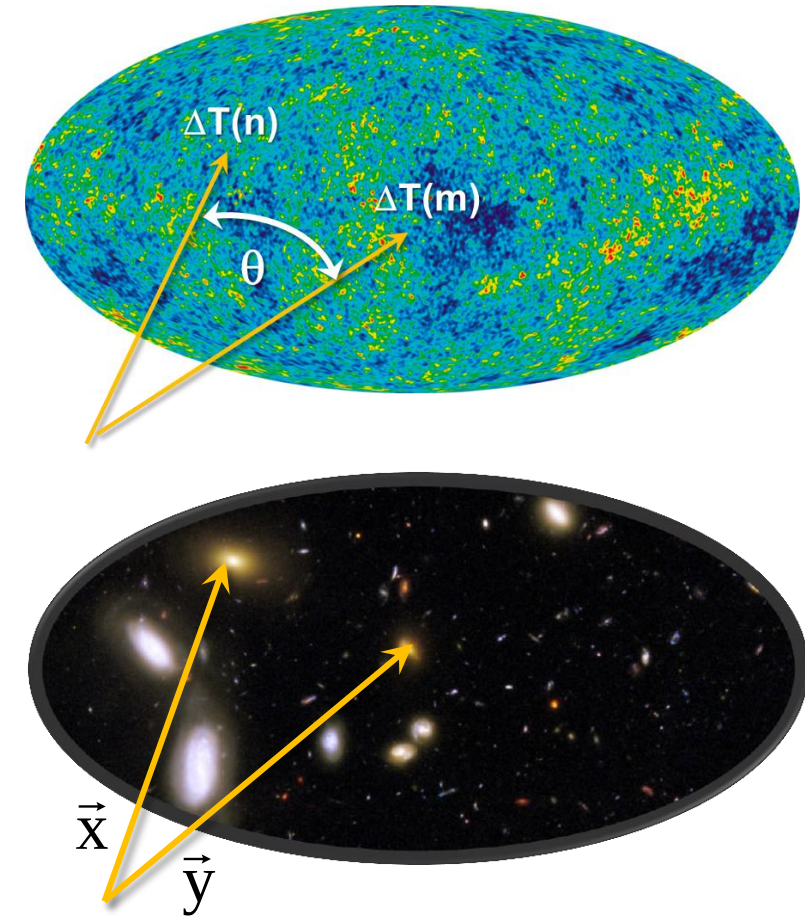
■ LSS – Struktur & Dynamik der Filamente: Cluster-Einfall

Galaxienkorrelationen

- Galaxien nicht zufällig im Raum verteilt:
Korrelationsfunktion (vgl. CMB-Analyse)
homogenes & isotropes Universum
Korrelation nur abhängig vom Abstand $r = |\vec{x} - \vec{y}|$

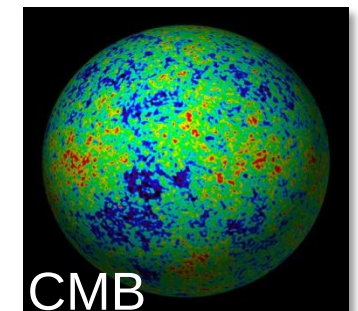
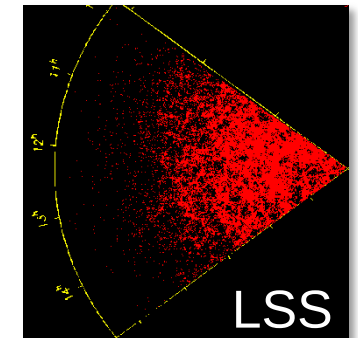
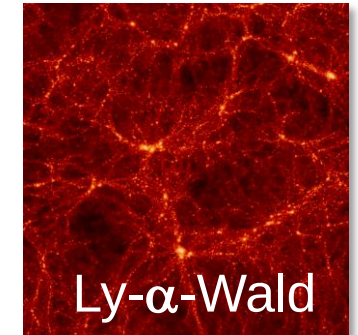
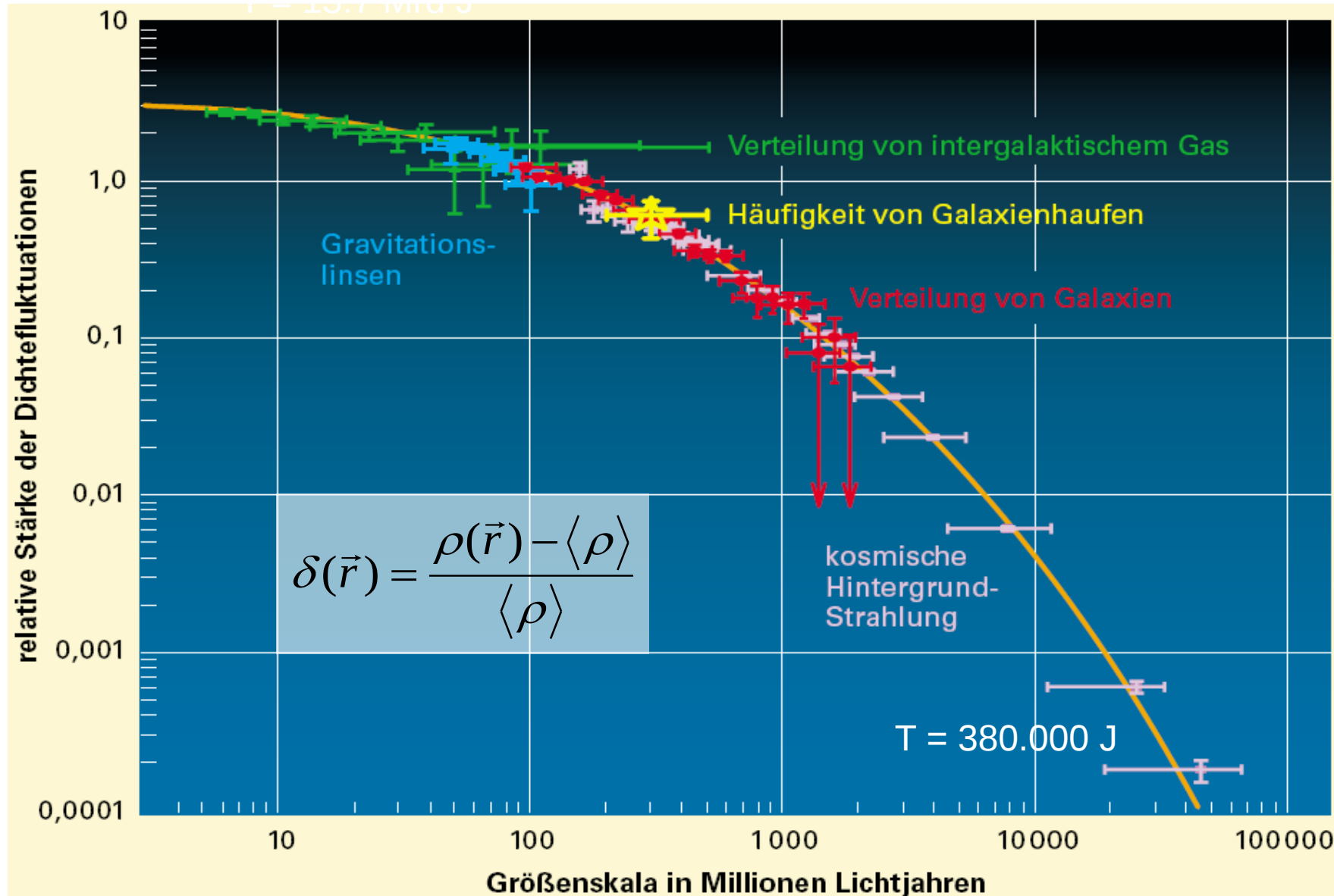
$$\xi(r) \sim \left(\frac{r}{5 h^{-1} \text{ Mpc}} \right)^{-1.8}$$

- Korrelationsfunktion $\xi(r)$:**
definiert Verteilung der Materie im Universum
aber: zeigen die Galaxien (Ω_b) die „wahre“
Materieverteilung (**biasing**) ?



Dichtefluktuationen im Universum

- Entwicklung der Fluktuationen von der CMB bis zum heutigen Zeitpunkt



LSS - Entwicklungsszenarien

■ 2 grundlegende LSS- Szenarien: 'top-down' & 'bottom-up'

'top-down' : **HDM** (eV-Neutrinos)

heiße dunkle Materie

- relativistische ν 's mit großer Reichweite (ν -free streaming) auf Skala $\lambda \sim 1 \text{ Gpc}$
- ↳ unterdrückt Bildung kleiner Strukturen
- ↳ zuerst große Strukturen ($10^{15} M_{\odot}$)

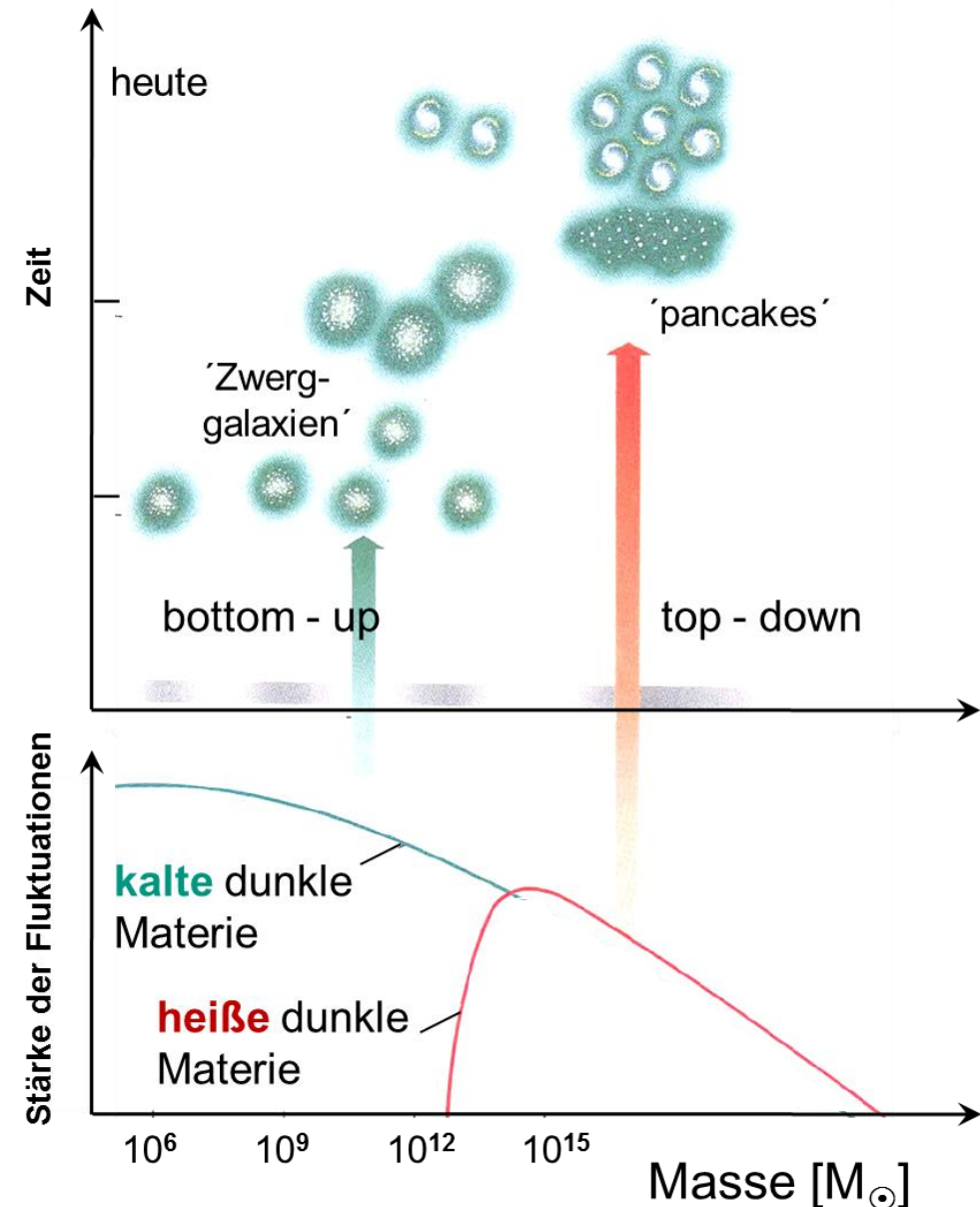
Supercluster $\rightarrow$ Cluster $\rightarrow$ Galaxien

'bottom-up' : **CDM** (GeV-Neutrinos)

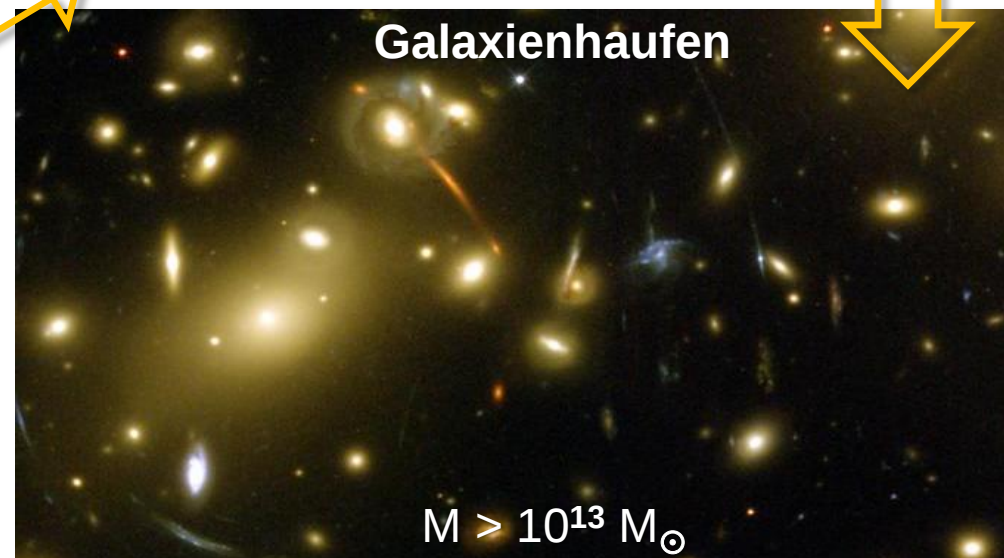
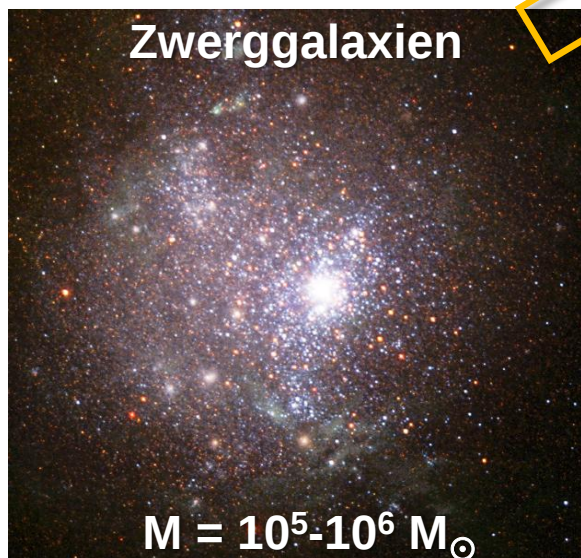
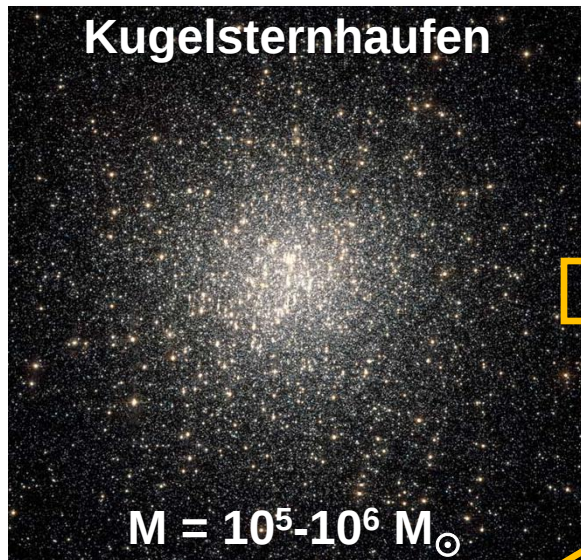
kalte dunkle Materie

- nichtrelativistische WIMPs mit Masse 10-1000 GeV mit Skala $\lambda \sim 0.1 \text{ pc}$
- ↳ zuerst kleine Strukturen ($10^5 M_{\odot}$)

Galaxien $\rightarrow$ Cluster $\rightarrow$ Supercluster



■ **bottom-up**: Strukturen mit $10^5 - 10^6 M_{\odot}$ wachsen $\rightarrow$ Protogalaxien



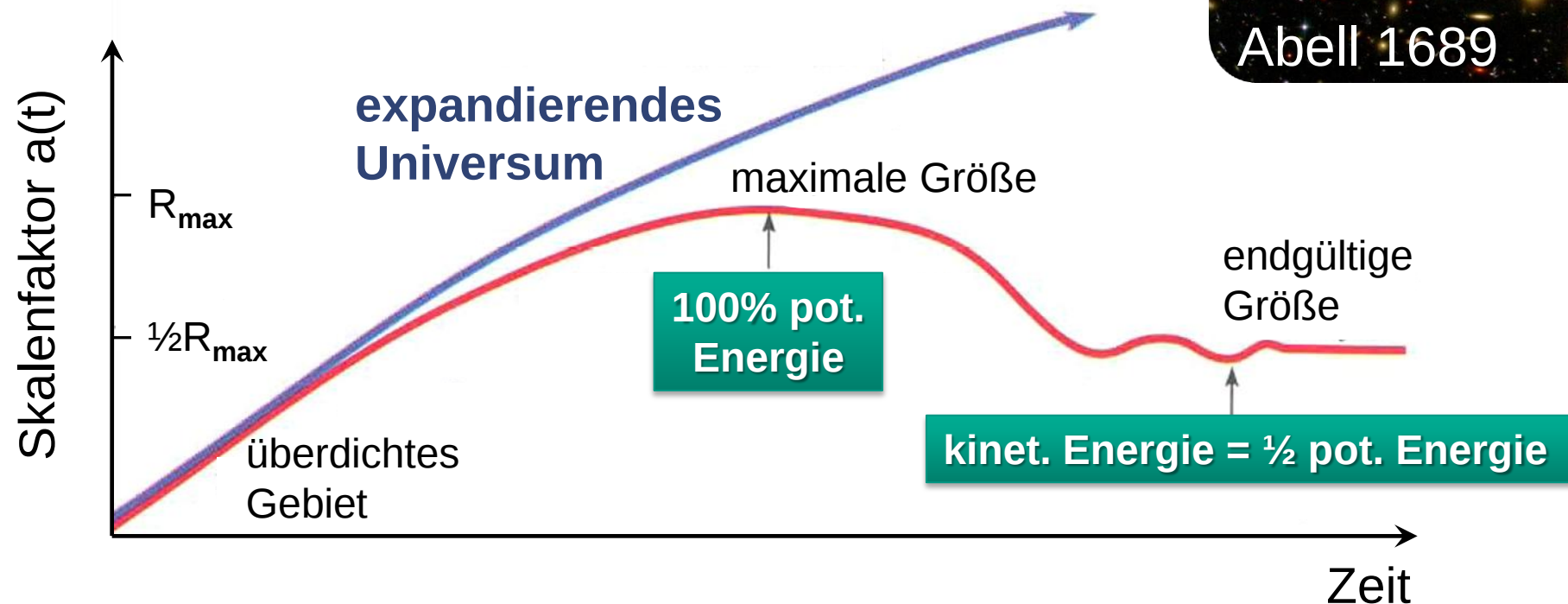
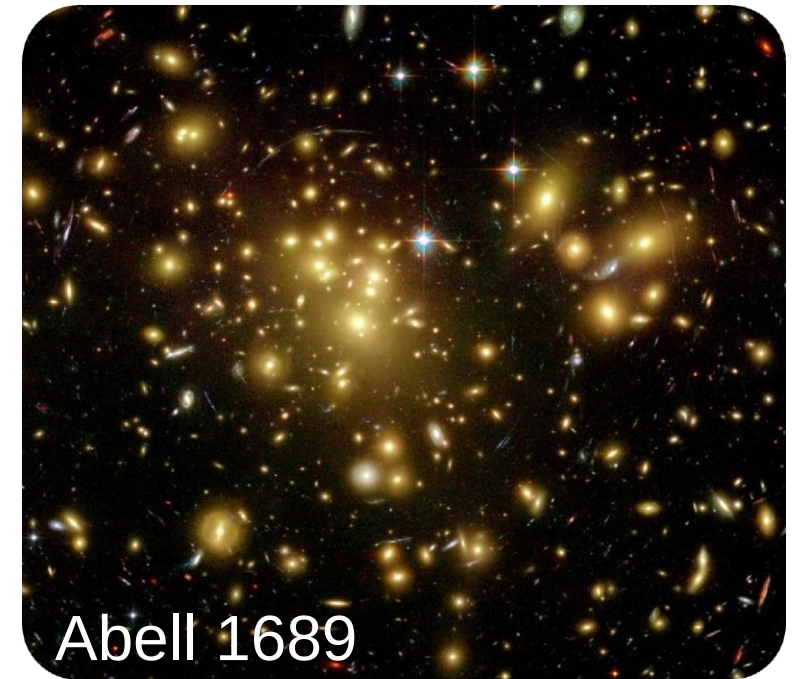
weiteres Wachstum
bottom-up:
die Protogalaxien
verschmelzen zu
großen Galaxien

später:
Galaxienhaufen
beginnen zu
‘virialisieren’

Virialisierung von Galaxienhaufen

■ Entwicklung von großräumigen Strukturen:

- zuerst Teilnahme an der Hubble-Expansion
- Struktur erreicht maximale Größe
- gravitative Entkopplung von der Expansion
- **Virialisierung** mit $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} E_{\text{pot}}$
- Struktur behält ihre endgültige Größe bei



Dunkle Materie: heiß, warm oder kalt?

- Vergleich von **DM-Modellen** mit Beobachtungen ($\langle \rho_{\text{DM}} \rangle \sim 1 \text{ keV/cm}^3$):
Auswaschen auf unterschiedlichen Längenskalen ($\lambda_{\text{free-streaming}}$)

Heiße Dunkle Materie

Teilchen:

aktive Neutrinos $\nu_{e,\mu,\tau}$
 $m \sim 0.05 - 2 \text{ eV}$

Anzahl:

$N(\text{aktiv}): 339/\text{cm}^3$

Entkopplung:

$T = 2 - 3 \text{ MeV}$

$T/m \sim 10^6 - 10^7$

Wirkung:

Auswaschen von
Skalen $\lambda < 1 \text{ Gpc}$

Warme Dunkle Materie

Teilchen:

sterile Neutrinos ν_s
 $m \sim 1 - 20 \text{ keV}$

Anzahl:

$N(\text{steril}): \sim 0.1 - 1/\text{cm}^3$

Entkopplung:

keine, entstehen durch
 ν -Oszillationen

Wirkung:

Auswaschen von
Skalen $\lambda < 100 \text{ kpc}$

Kalte Dunkle Materie

Teilchen:

SUSY-Neutralinos χ^0
 $m \sim 10 - 1000 \text{ GeV}$

Anzahl:

$N(\chi^0): 10^{-7} - 10^{-9}/\text{cm}^3$

Entkopplung:

$T = 0.5 - 50 \text{ GeV}$

$T/m \sim 1/20$

Wirkung:

Auswaschen von
Skalen $\lambda < 0.1 \text{ pc}$