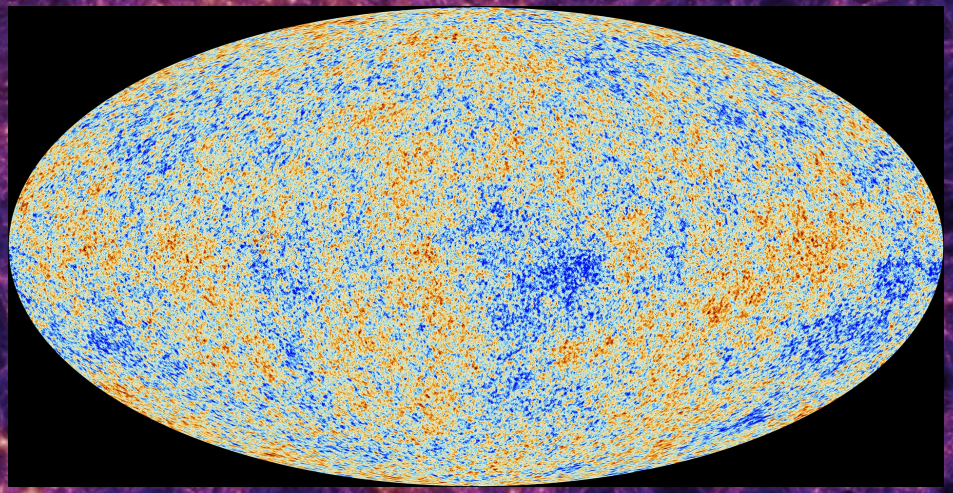
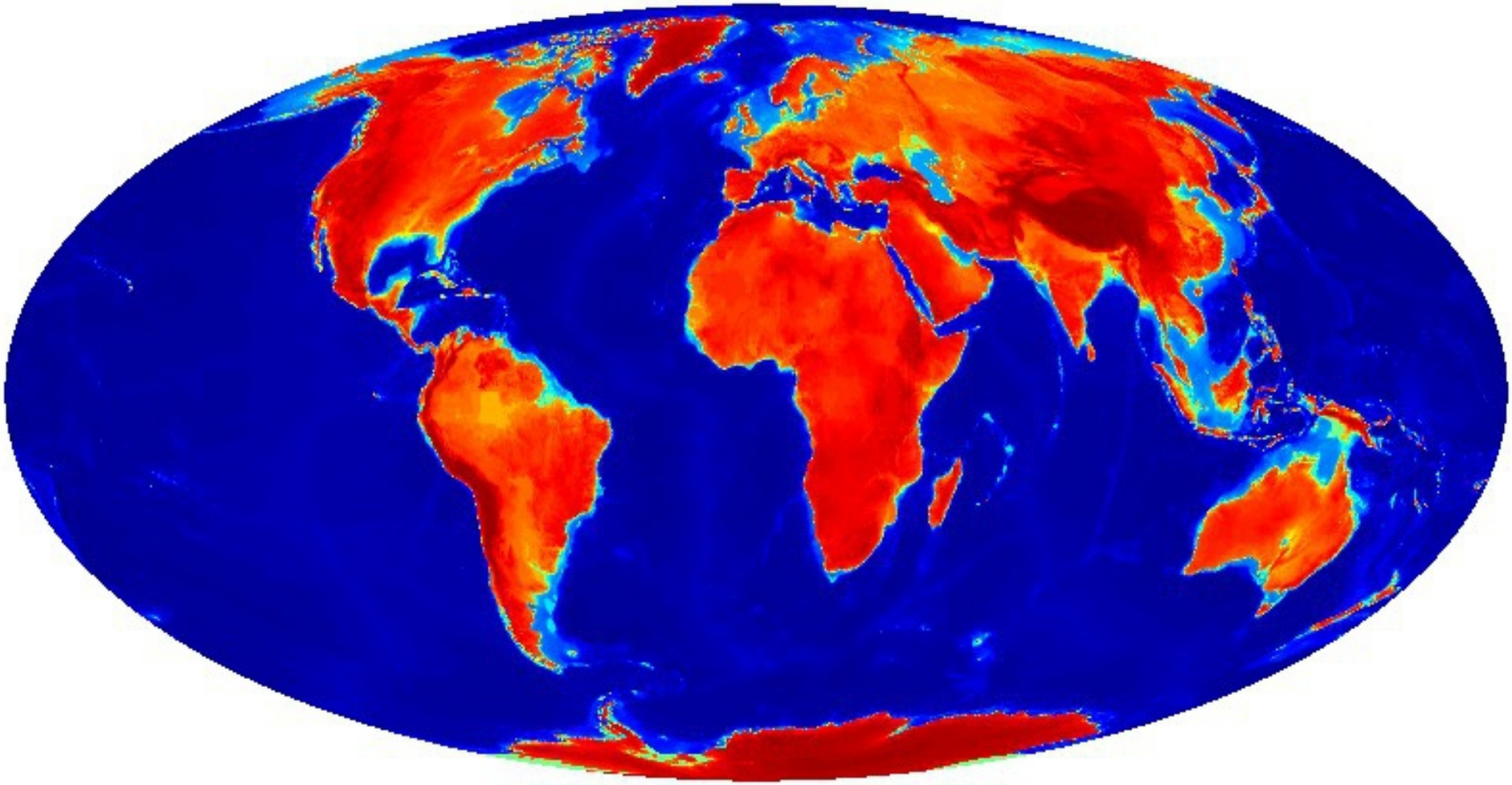


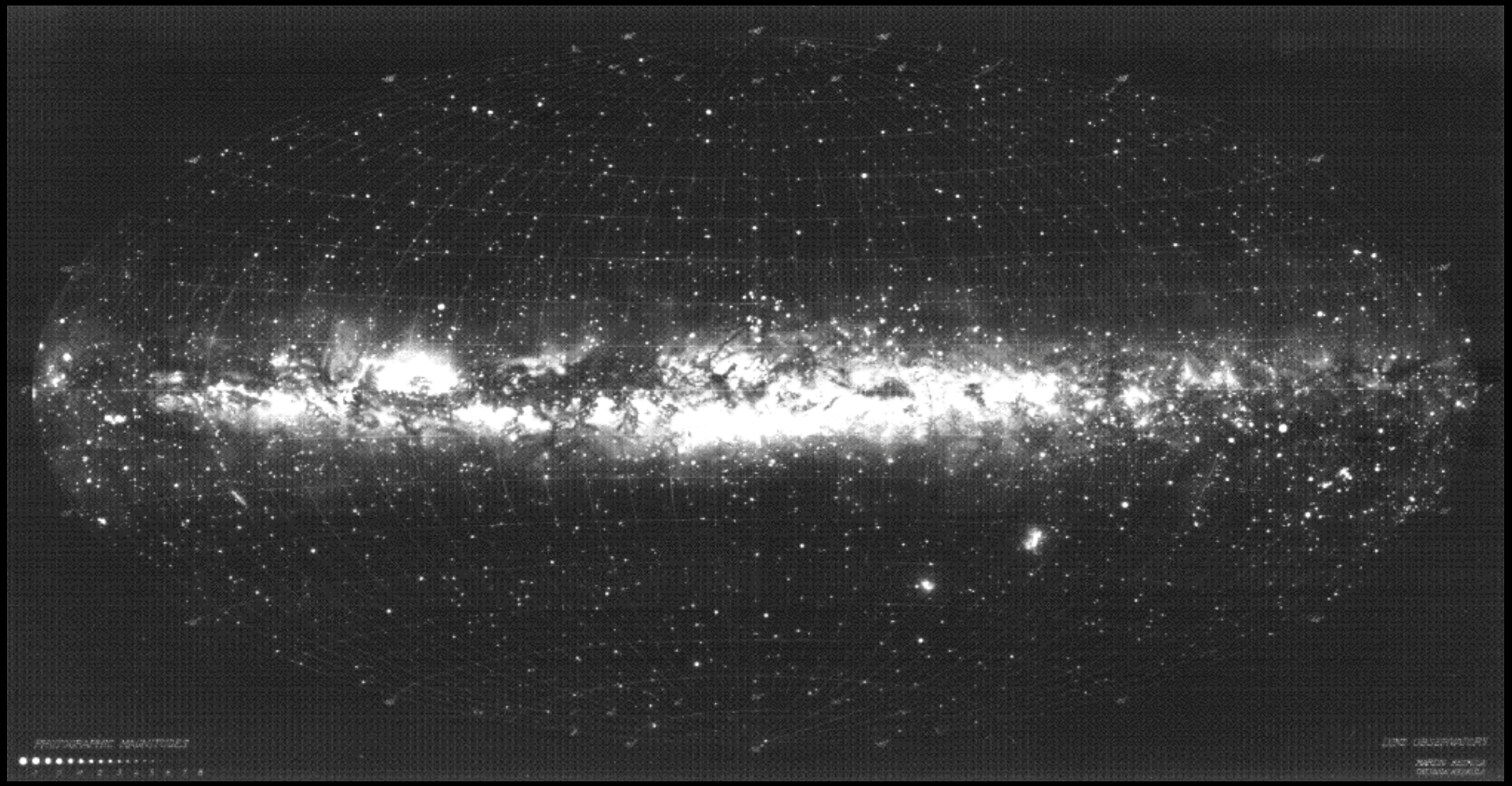
Kosmische Strukturbildung im Grossrechner

Simon White
Max Planck Institut für Astrophysik

Die Erdoberfläche, unsere komplexe Heimat

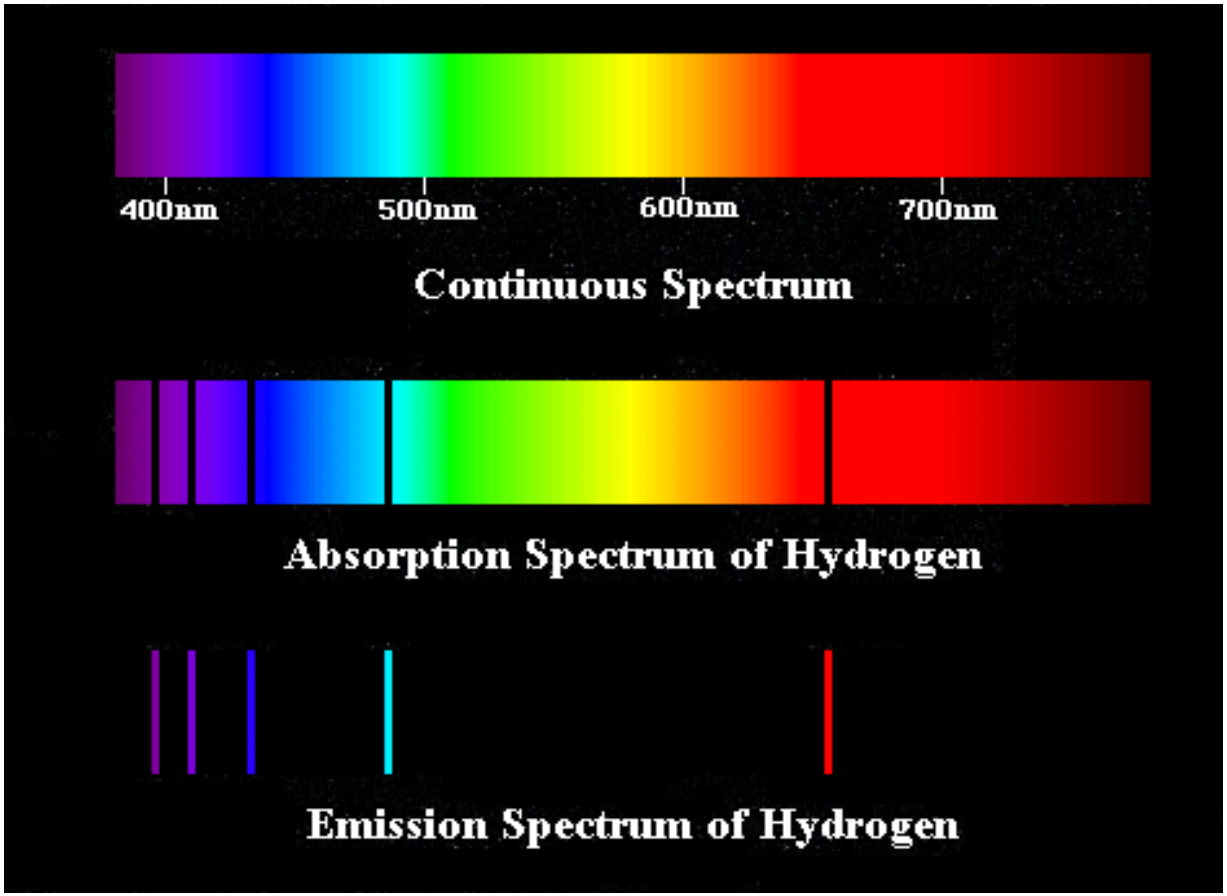


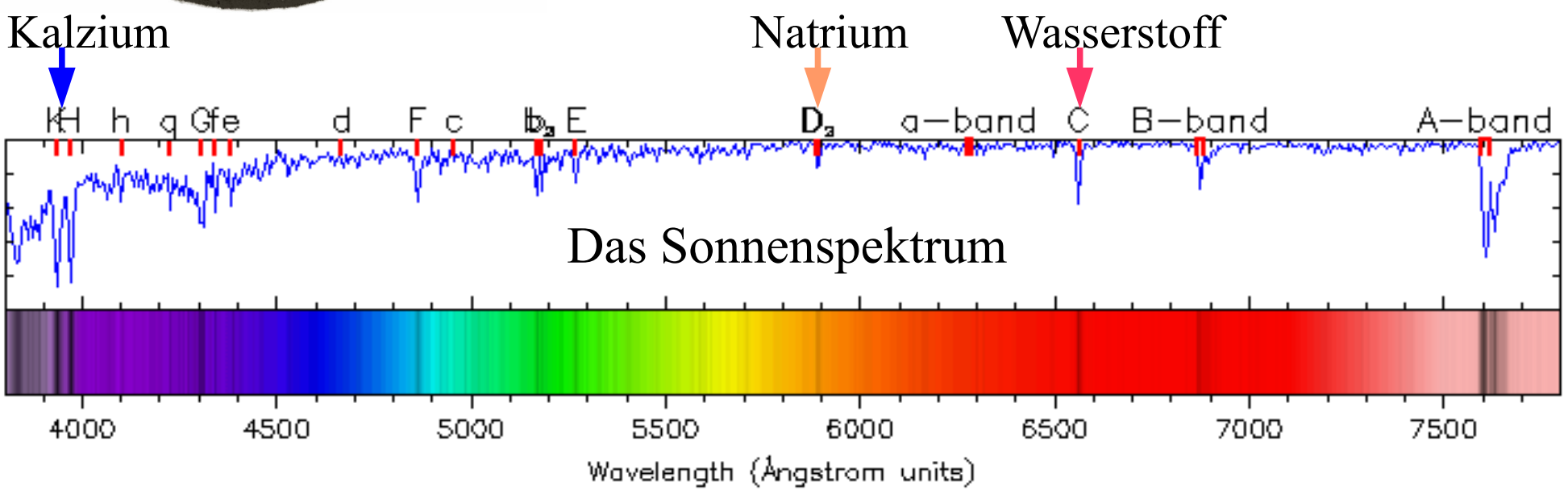
Sternkarte des ganzen Himmels



Wie erkennen wir das Unberührbare?

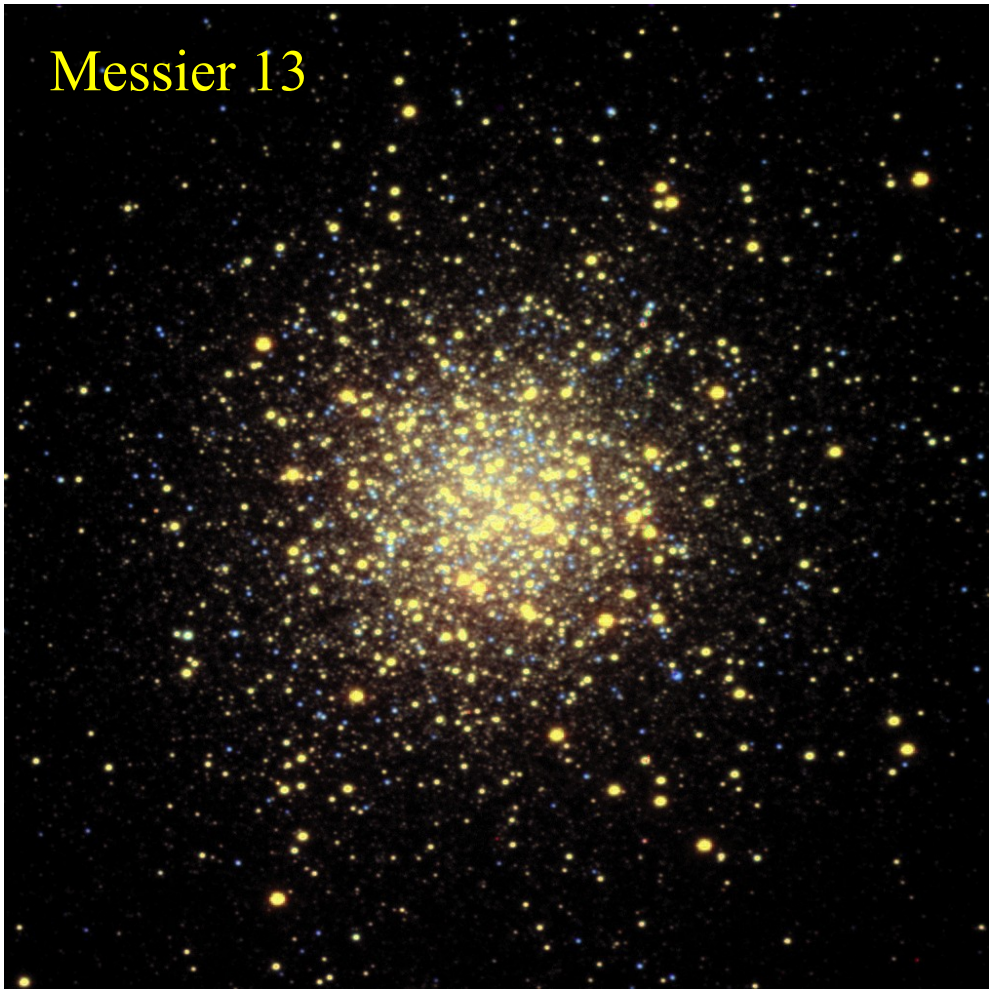
Joseph
von Fraunhofer


400nm
500nm
600nm
700nm
Continuous Spectrum
Absorption Spectrum of Hydrogen
Emission Spectrum of Hydrogen


Kalzium
Natrium
Wasserstoff
K H h g G fe d F c b₄ E D₂ a—band C B—band A—band
Das Sonnenspektrum
4000
4500
5000
5500
6000
6500
7000
7500
Wavelength (Ångstrom units)

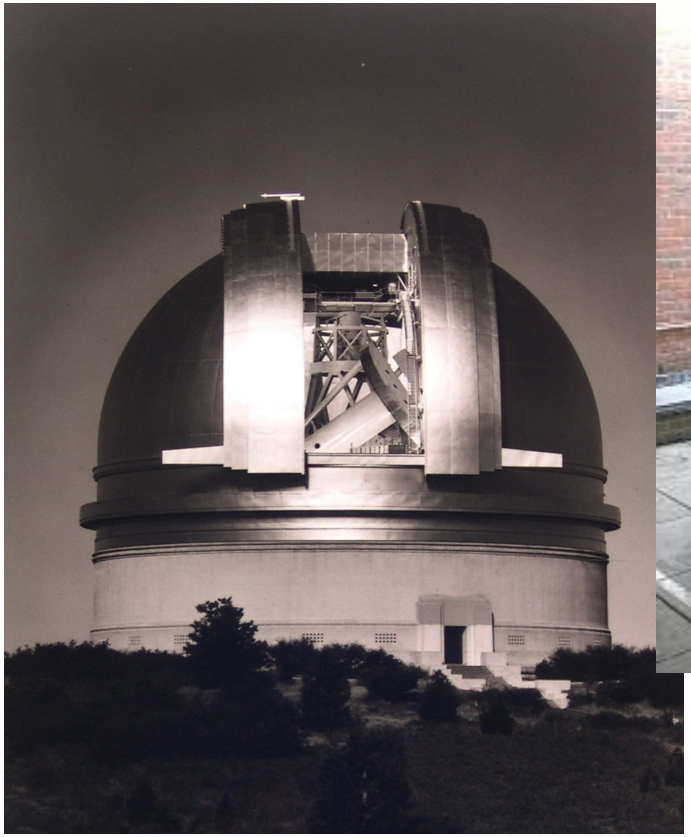
Wie erkennen wir das, was längst aus unsere spürbare Welt verschwunden hat?

Archäologe werden!



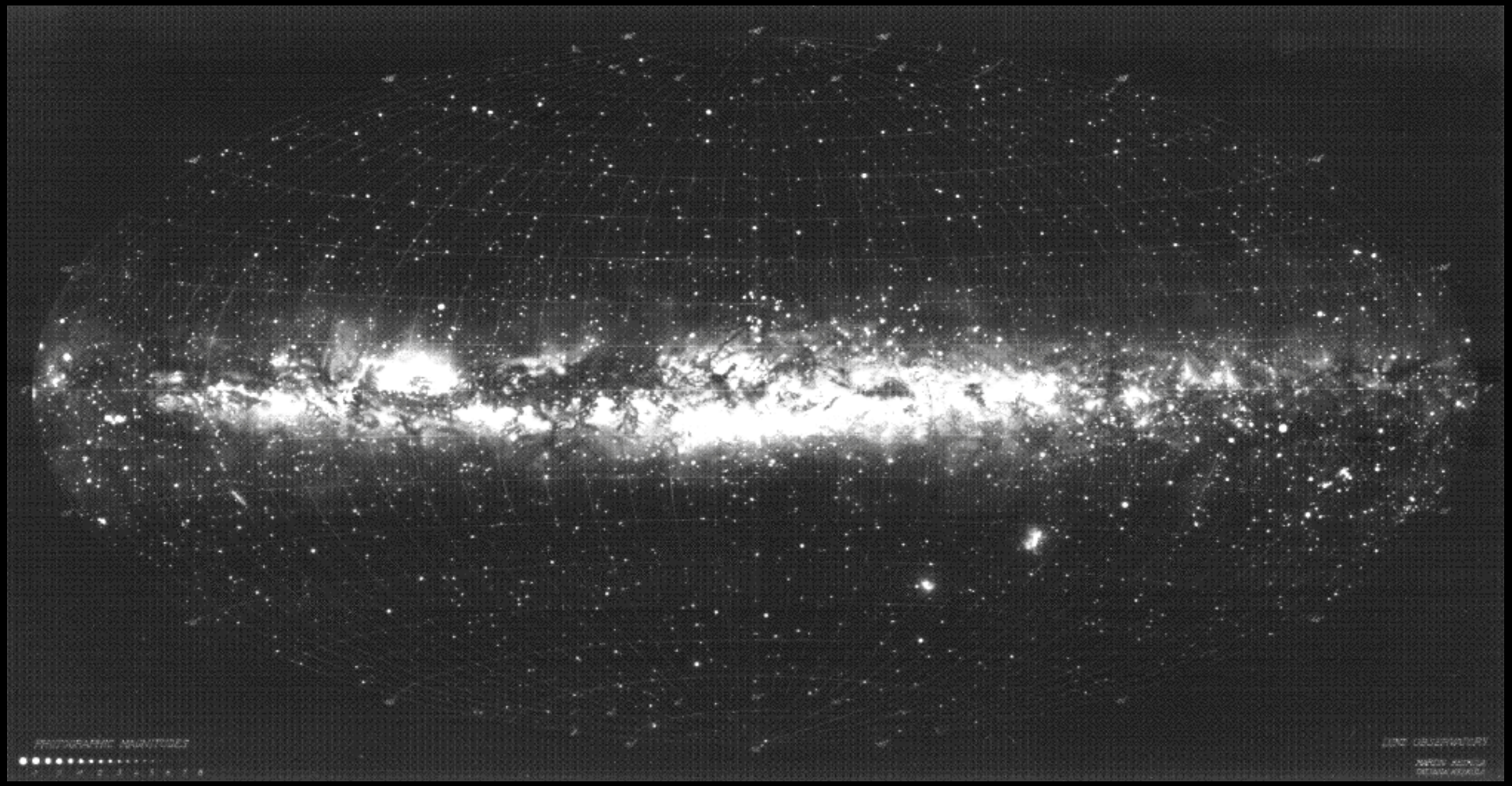
Alte Objekte zeigen uns, wie das Universum war, als es jung war

Fernrohre sind Zeitmaschinen – sie blicken direkt in die Vergangenheit



Wir sehen Objekte nicht, wie sie heute sind, sondern wie sie waren, als das Licht sie verlassen hat

Sternkarte des ganzen Himmels



bis 10,000 Lichtjahre

Der Andromeda-Nebel: unser grösster Nachbar

bis 2,000,000 Lichtjahre

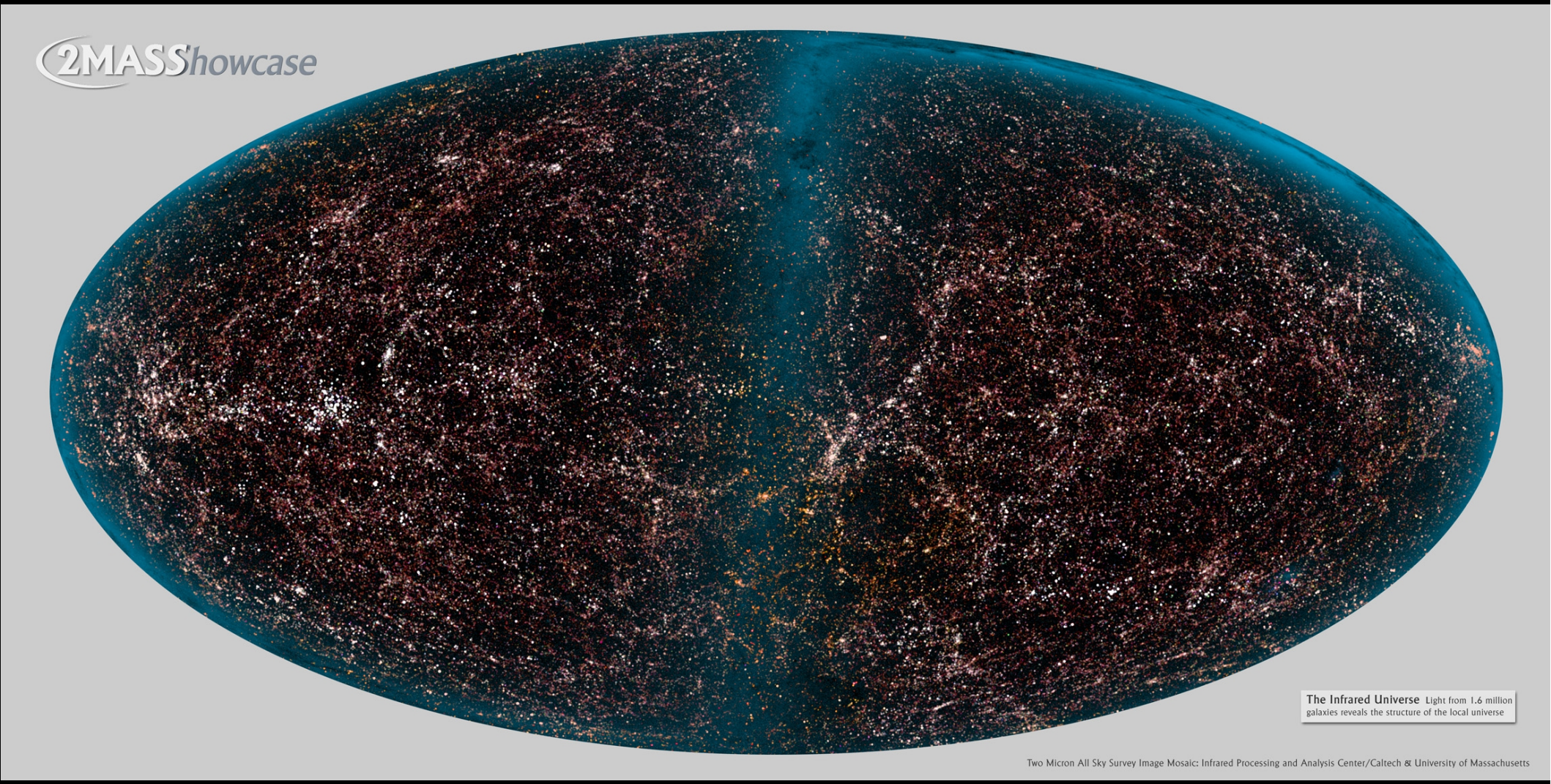
Andere Spiralgalaxien

NGC 4414

NGC 5907

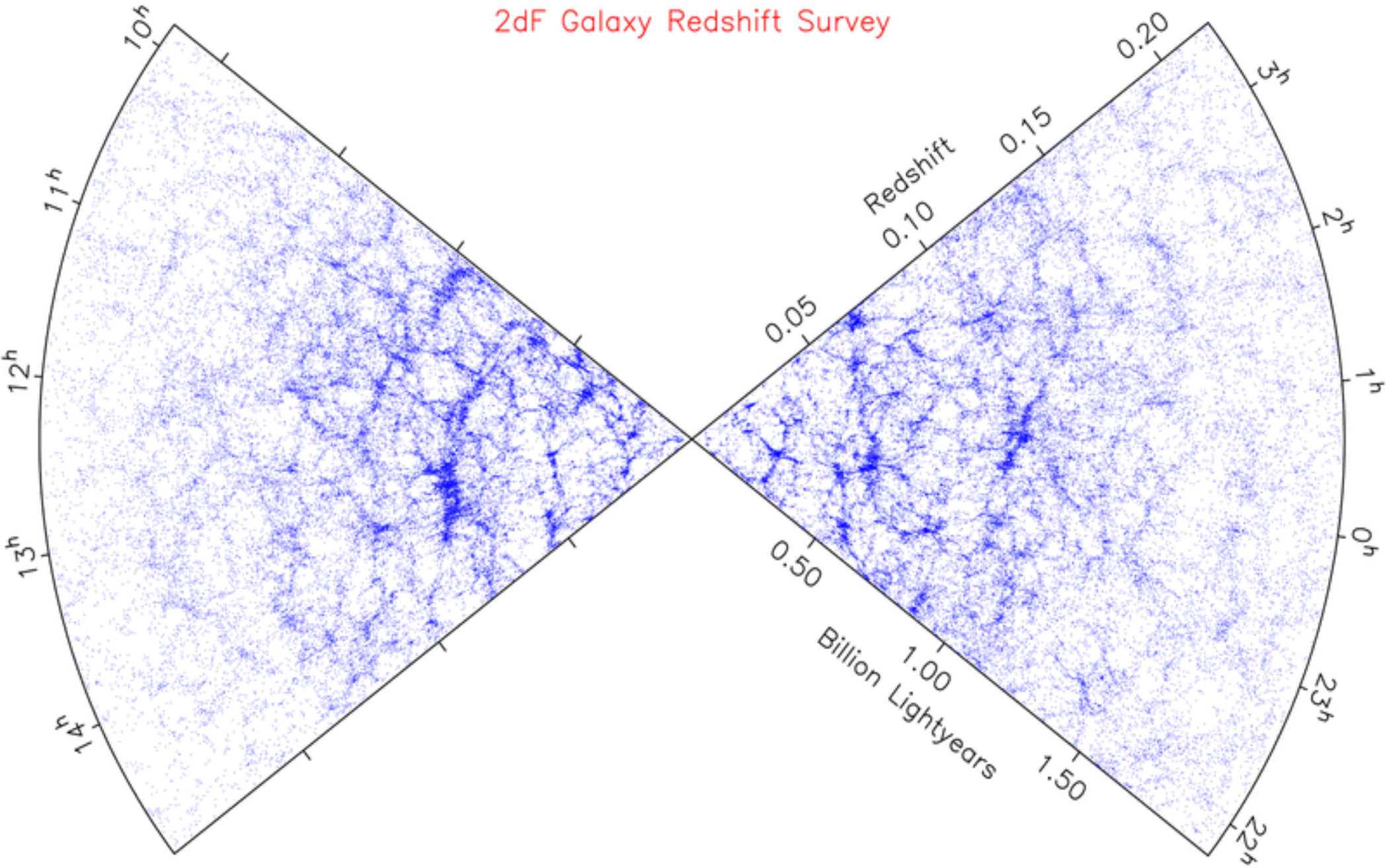
Der Coma-Galaxienhaufen – elliptische Galaxien

Galaxienkarte des ganzen Himmels

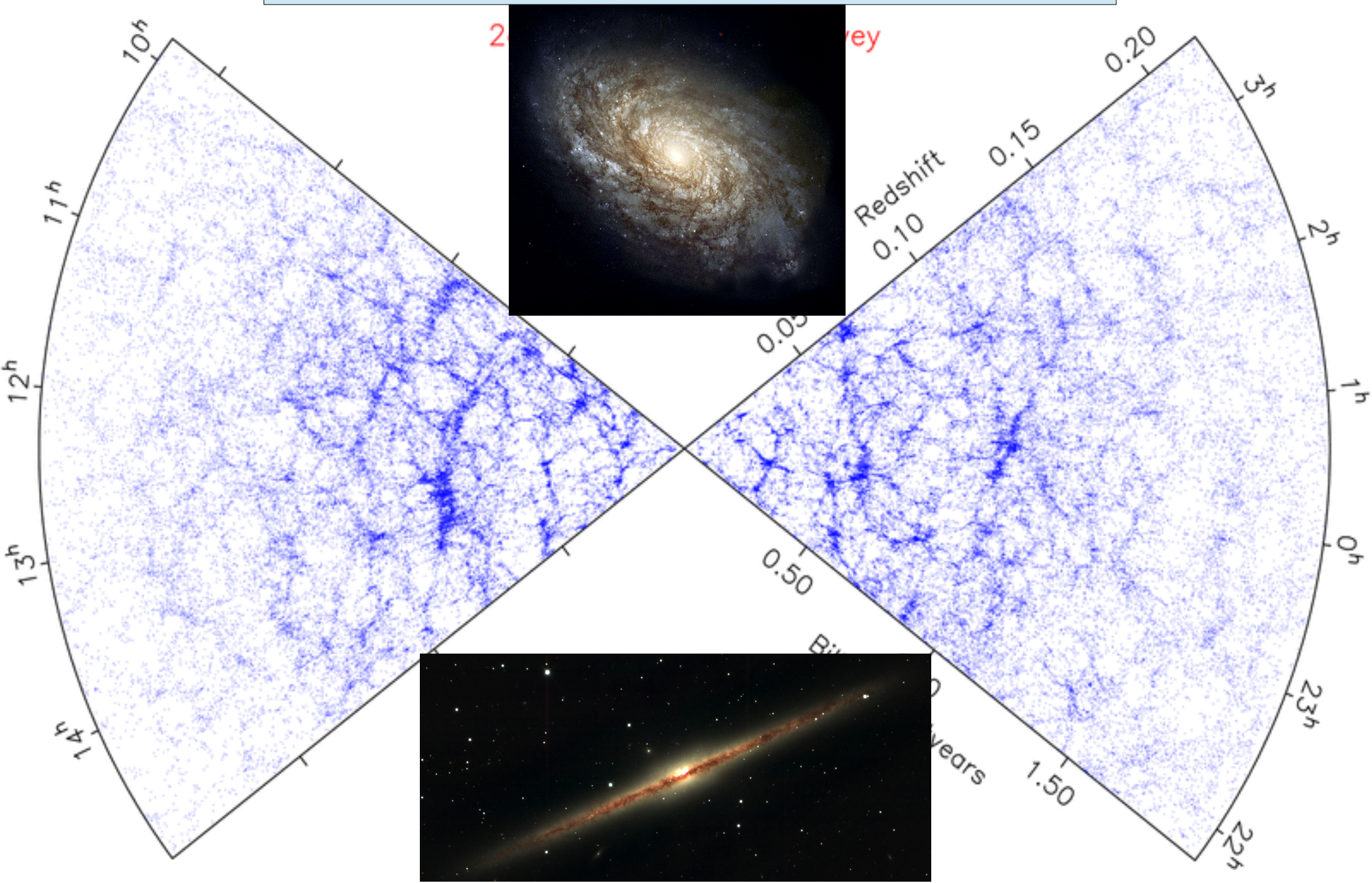


bis 1,000,000,000 Lichtjahre

Grossräumige Strukturen im “nahen” Universum



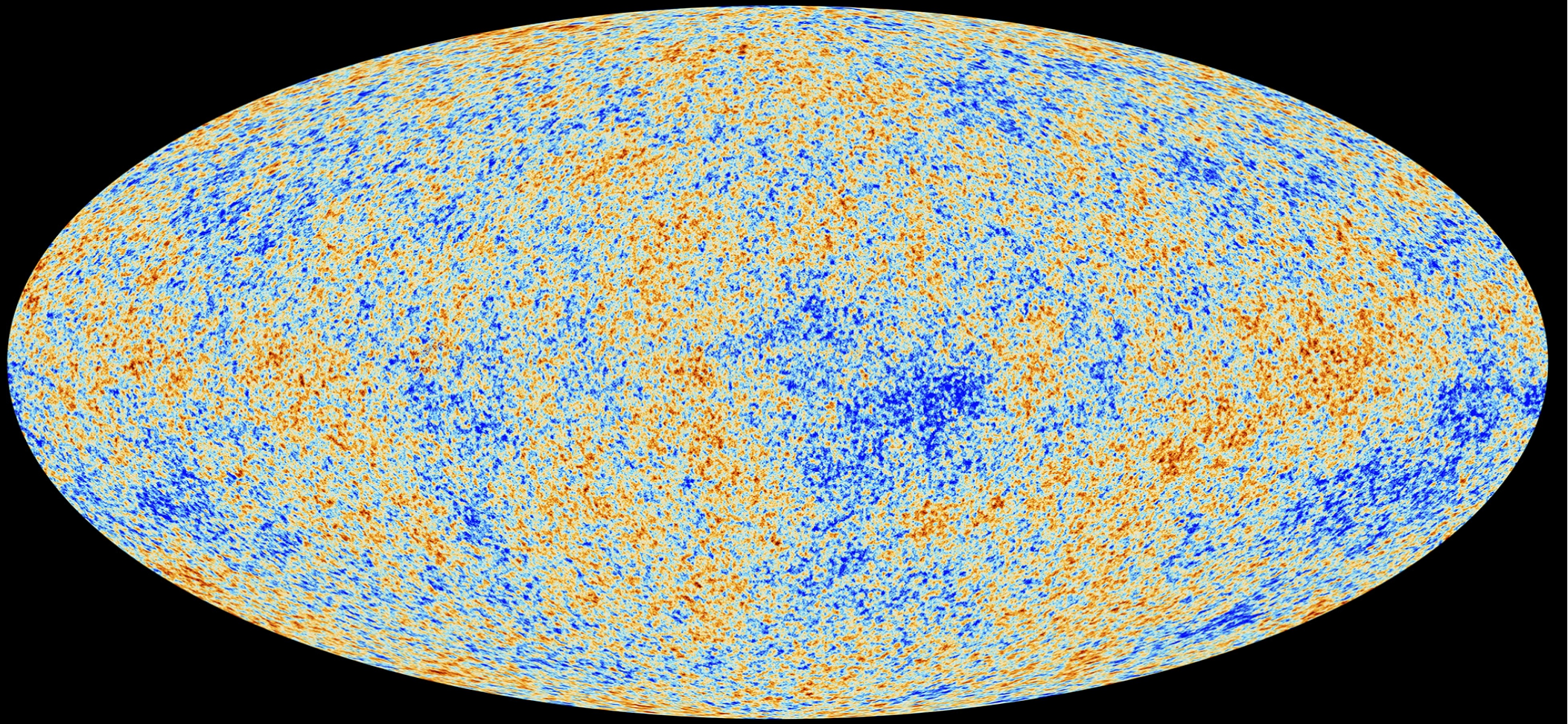
Grossräumige Strukturen im “nahen” Universum



Die tiefste Aufnahme, die je gemacht wurde

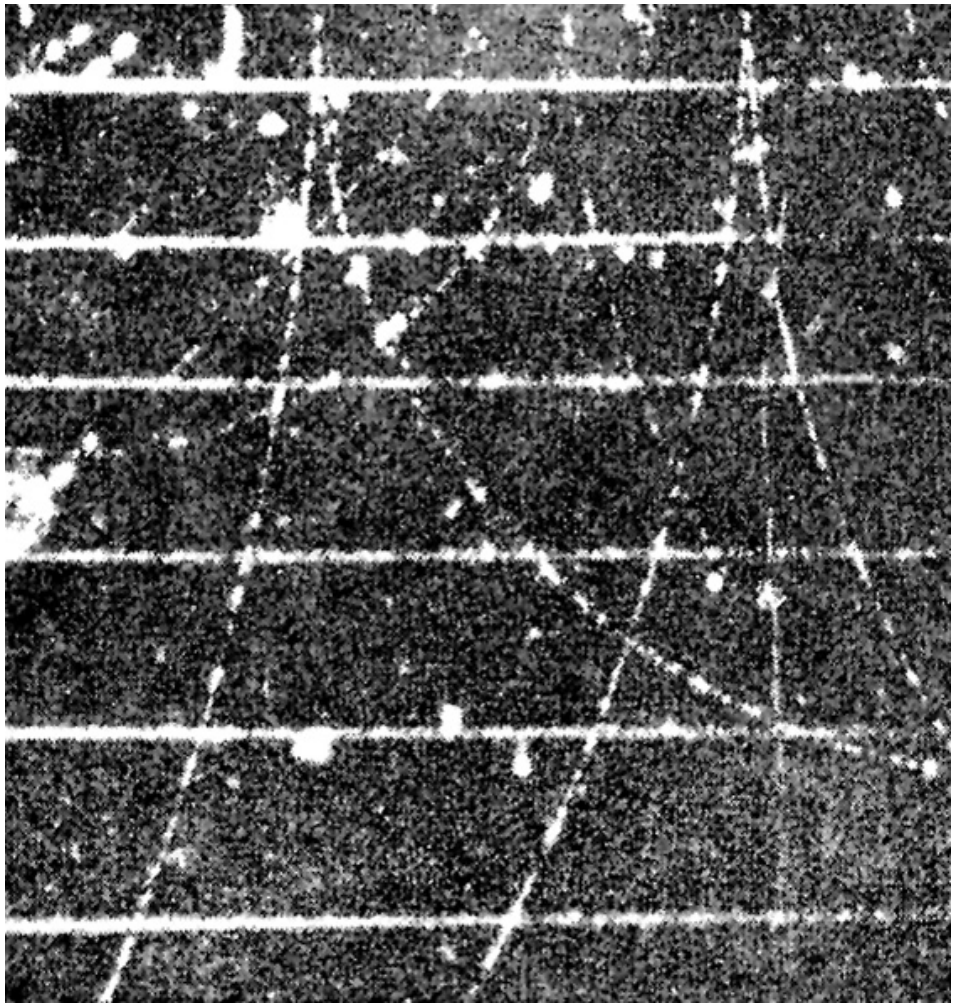
300 Stunden mit dem Hubble Raumteleskop

Karte des kosmischen Mikrowellenhintergrundes
Ein <u>einfaches</u> frühes Universum



bis 40 Milliarden Lichtjahre, 400,000 Jahre nach dem Urknall

Wie erkennen wir das Unsichtbare?



e^-

e^-

e^-

e^+

Gibt's dann was wichtiges, das wir nicht sehen können?

Der Coma-Galaxienhaufen

Zwicky's Rechnung der Masse von Coma
(modernisiert)

Entfernung (von der Rotverschiebung): 300,000,000 licht-Jahre

Grösse: 1° auf dem Himmel → 50,000,000 licht-Jahre

Galaxiengeschwindigkeiten (von Dopplereffekten): 1000 km/s

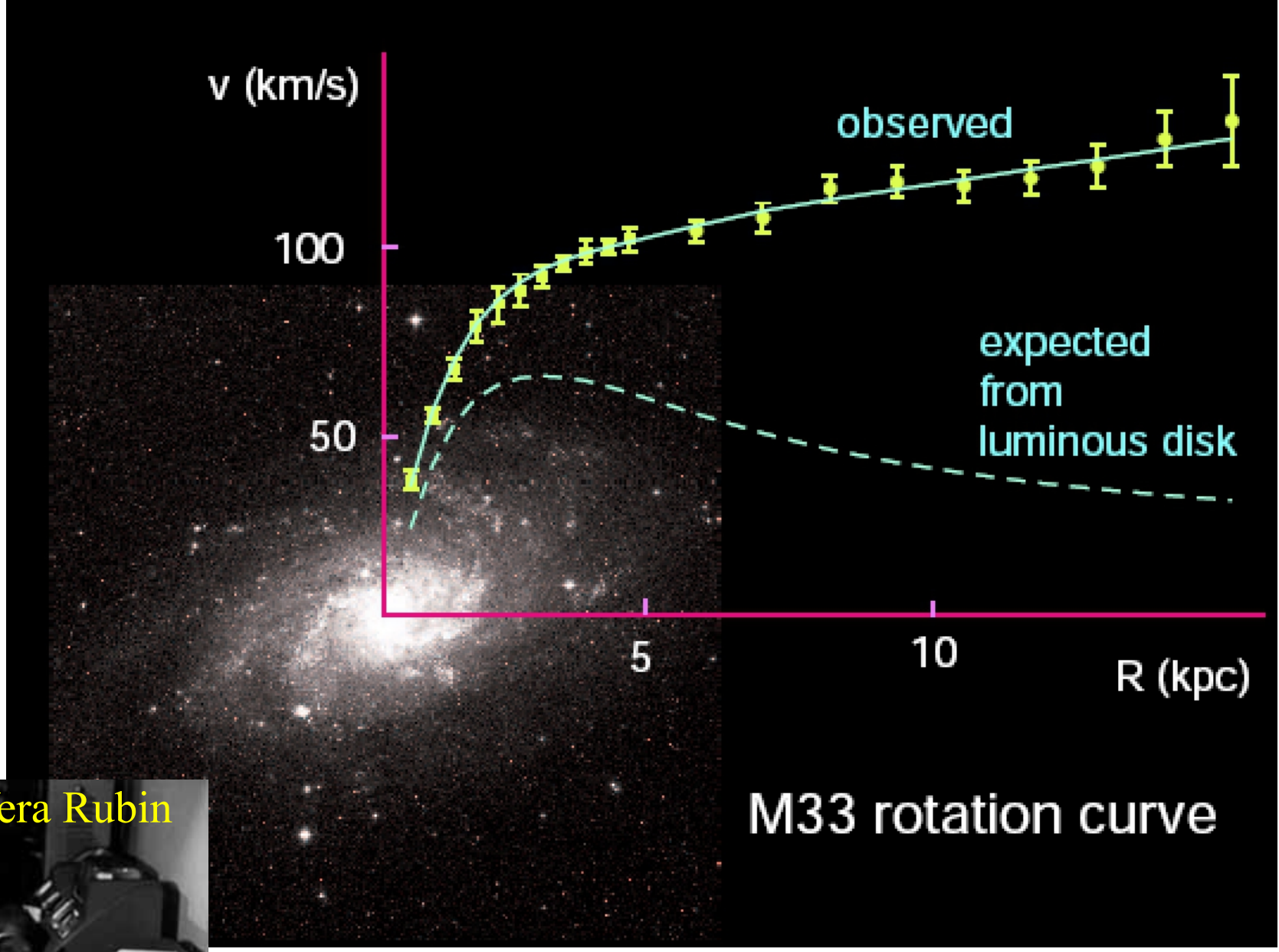
Analog zum Erde-Sonne-System

$$\text{Fliehkraft} = \text{gravitative Anziehung}$$
$$V^2 / R = G M / R^2$$
$$\rightarrow M = R V^2 / G$$

→ Masse von Coma: 10^{15} Sonnenmassen

<u>Aber</u> die Licht von Coma entspricht nur 10^{13} Sonnen!

Der Triangulum-Nebel (M33)


v (km/s)
100
50
observed
expected
from
luminous disk
5
10
R (kpc)
M33 rotation curve

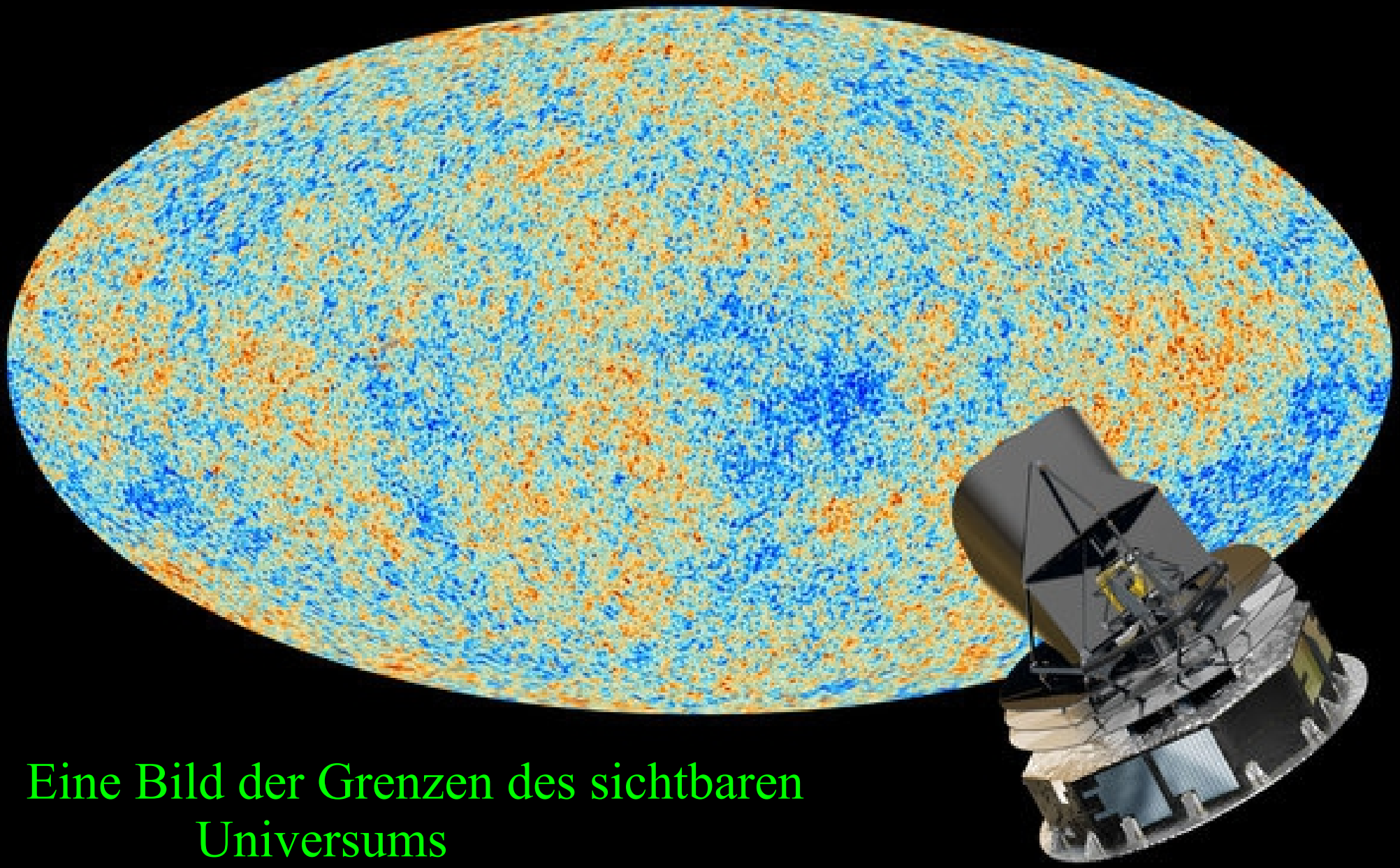
Vera Rubin

Der Galaxienhaufen, Abell 2218

Galaxienhaufen als gravitative Fernrohre

Die Stärke der Linseneffekte misst die Gesamtmasse des Haufens

Planck'sche Karte der Mikrowellenhintergrund



Eine Bild der Grenzen des sichtbaren Universums

Struktur im Mikrowellenhintergrund

Die Struktur liegt in den kosmischen “Wolken”, die sich 13.7 Milliarden Jahre in unserer Vergangenheit befinden

Das Universum war dann nur 400 000 Jahre alt, fast uniform und 1 000mal kleiner und 1 000mal heisser als heute

Die Struktur besteht aus schwachen “Schallwellen”, $A \sim 10^{-4}$.
Alle andere Strukturen sind nur <u>später</u> entstanden

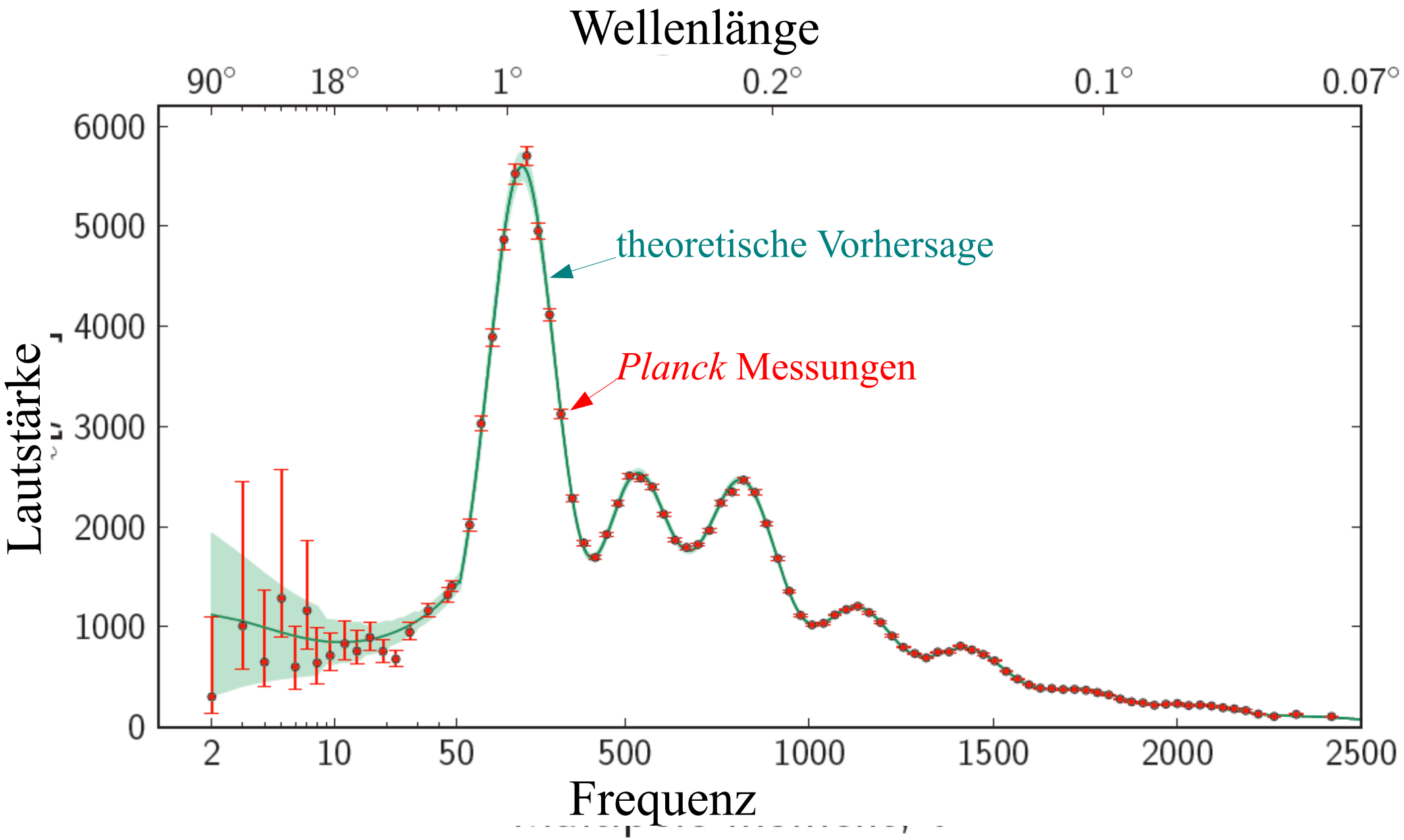
Das *Muster* der Struktur reflektiert

A: Die Geometrie und die Topologie des Universums

B: Den Inhalt und die thermische Entwicklung des Universums

C: Den Prozess, der die Struktur erzeugt hat

Klanginhalt der kosmischen Wolken laut *Planck*



Was haben wir von *Planck* gelernt?

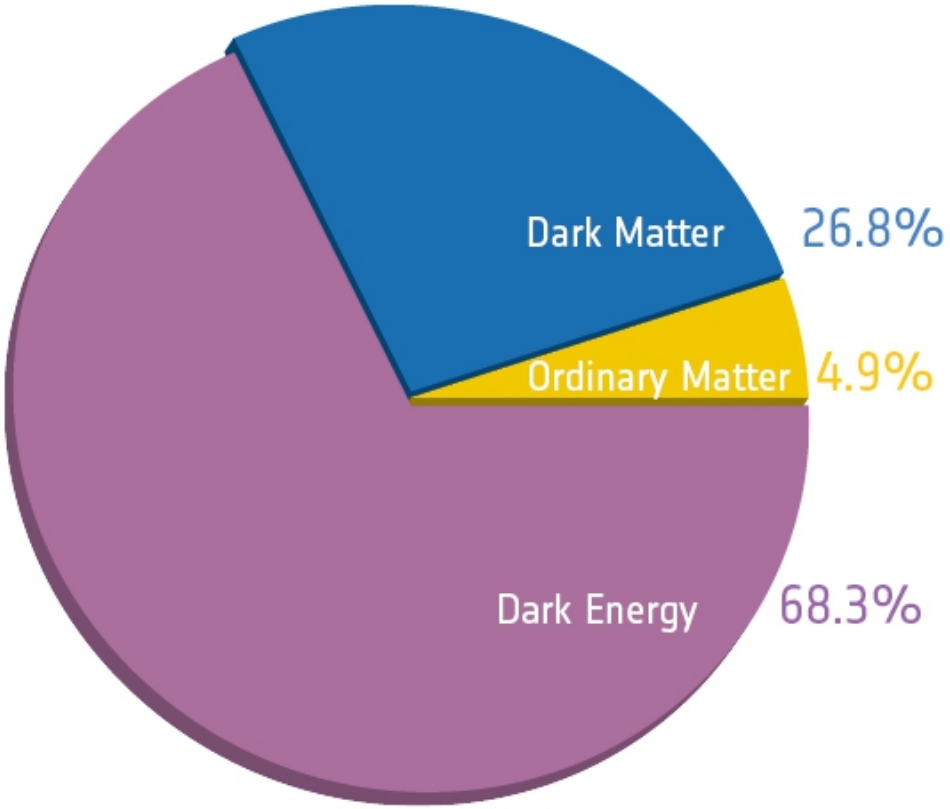
Unser Universum ist flach -- seine Geometrie is die von Euclid

Nur ein kleine Anteil besteht aus normaler Materie – heute ungefähr 5%

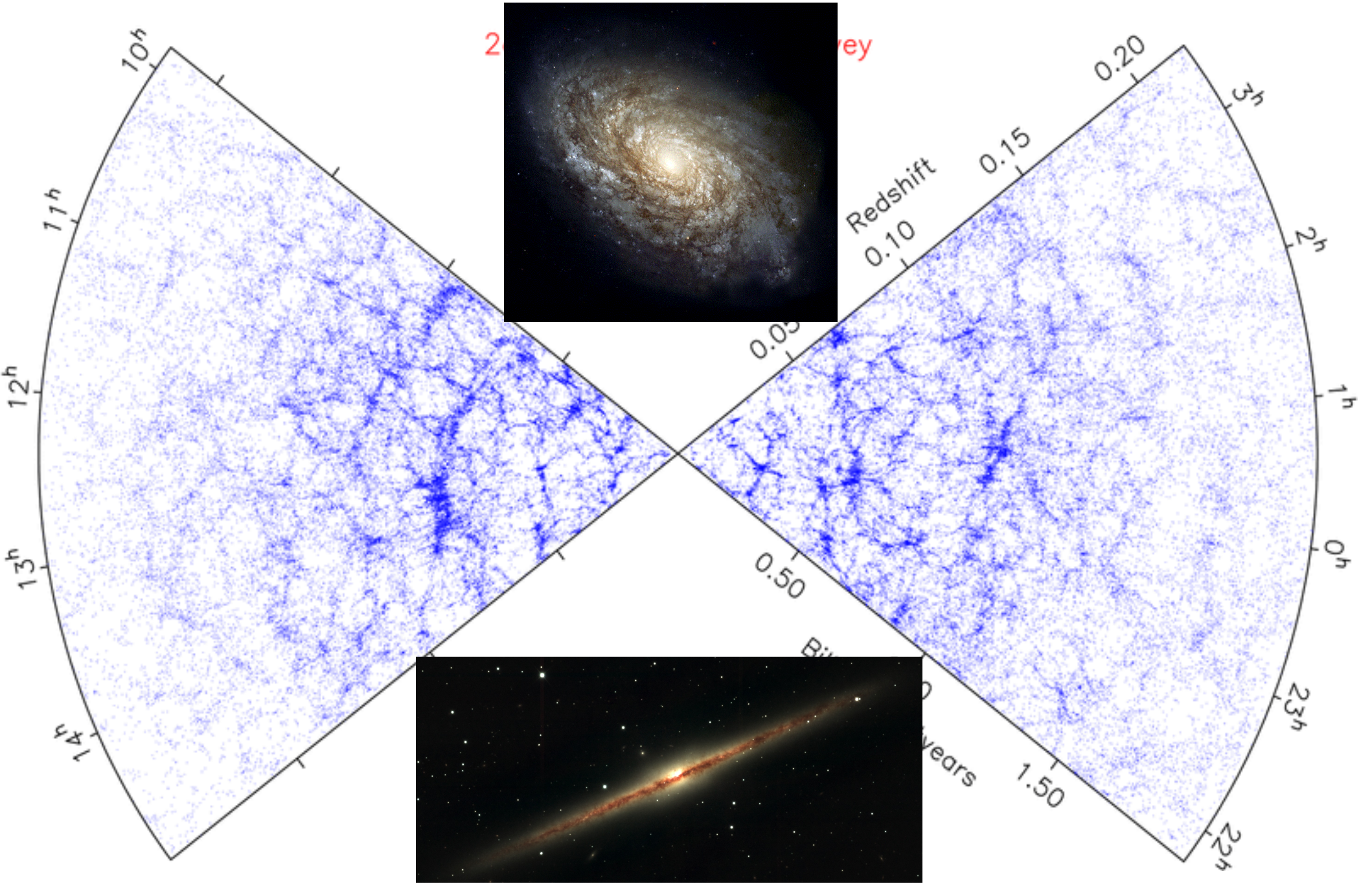
~27% des heutigen Universums besteht aus <u>nicht-baryonischer</u> dunkler Materie

~68% besteht aus dunkler Energie

Alle Struktur wurde durch Quanten-fluktuationen des V<u>akuums</u> im sehr frühen Universum erzeugt

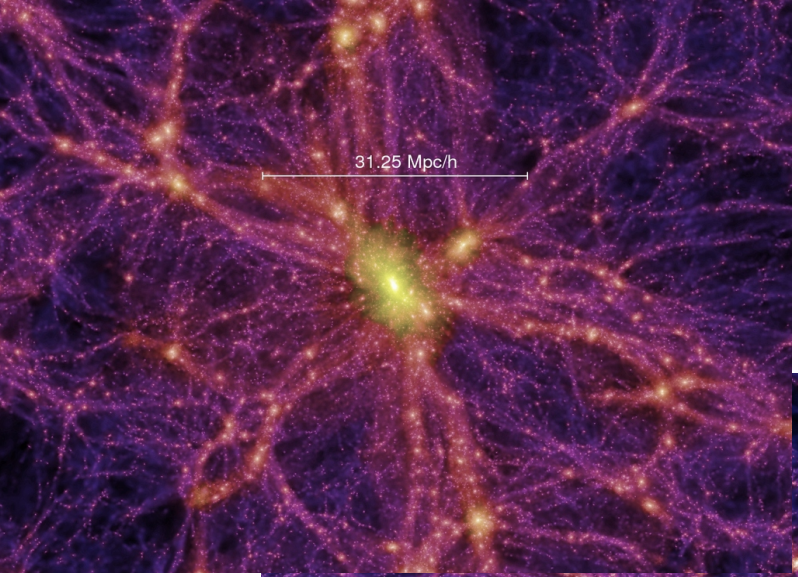


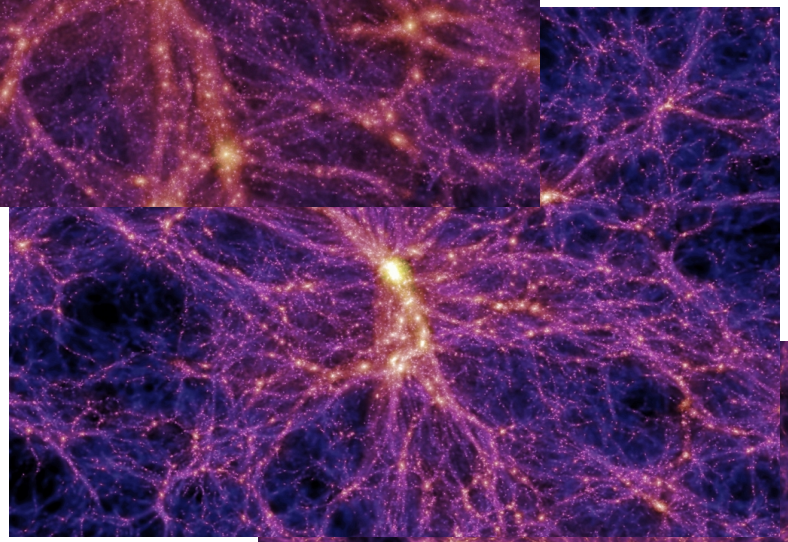
Wie sind Galaxien und grossräumige Strukturen entstanden?

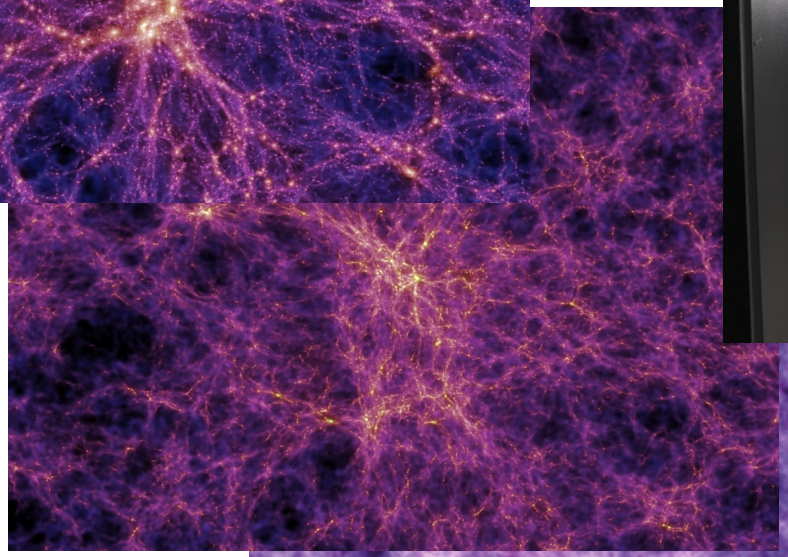


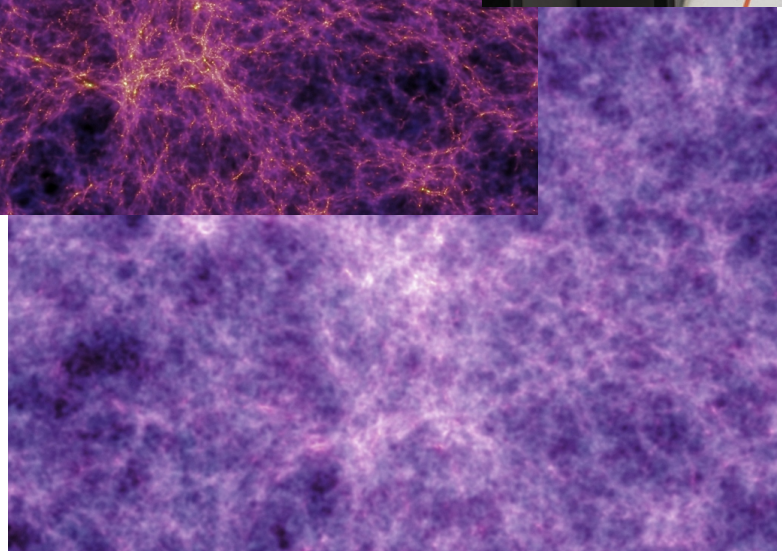
Wie erforschen wir Milliarden Jahre dauernde Prozesse, wenn wir nur einige Jahrzehnte lang leben?

Virtuelle Universen entwickeln sich schneller als das echte



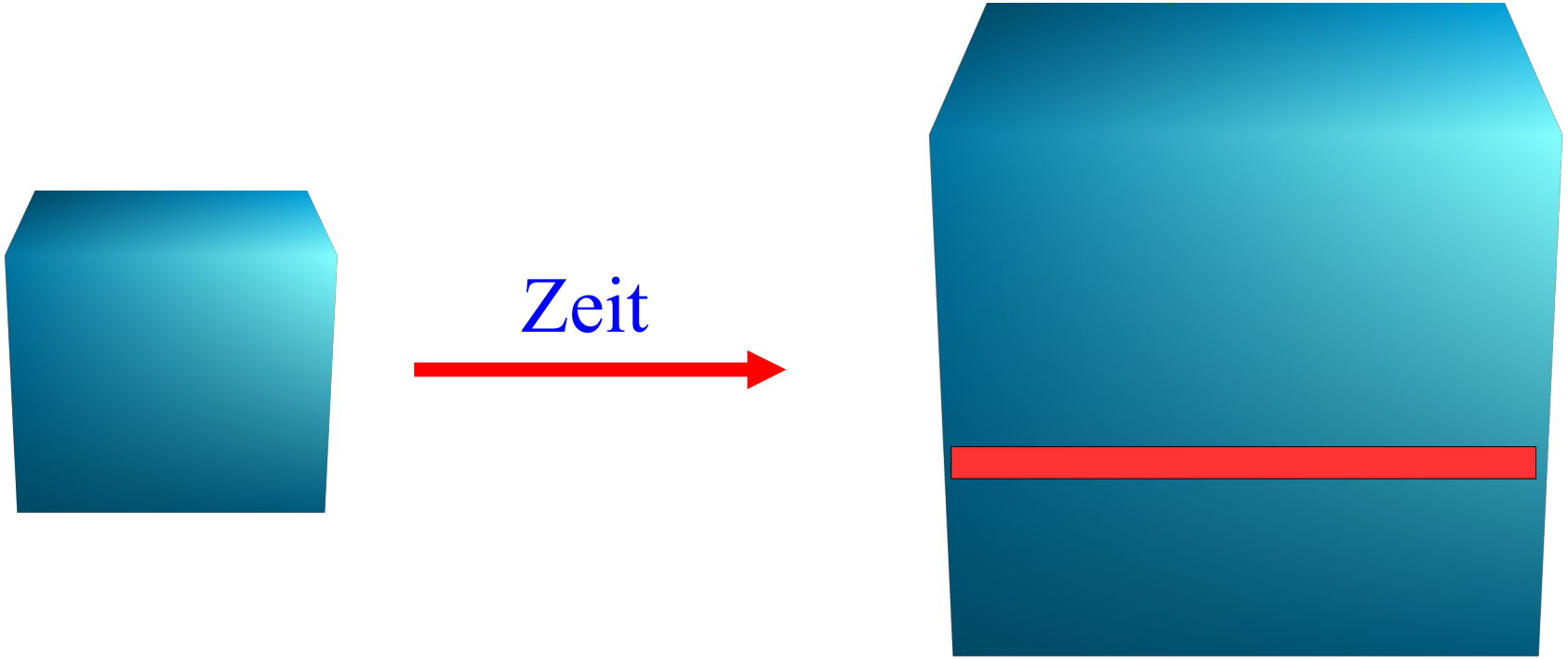






(Rechner) Zeit

Wie man die Entwicklung des Universums auf einem Grossrechner verfolgt



Die Materie in einem mit dem Universum ausdehnenden Würfel verfolgen

400 000 Jahre nach dem Urknall beginnen

Anfangsbedingungen an die Hintergrundstrahlung anpassen

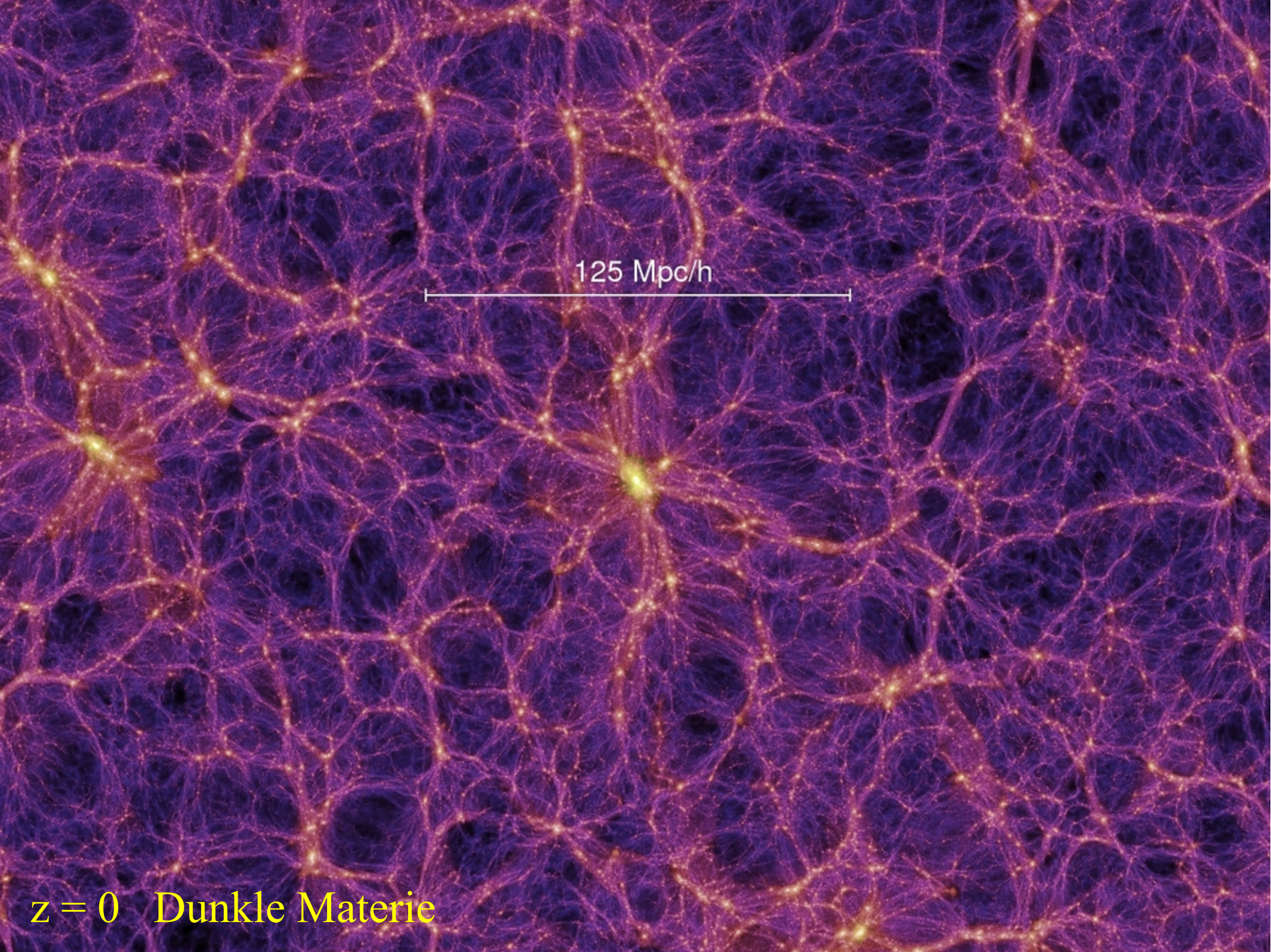
Entwicklung vorwärts bis in die Gegenwart ausrechnen

Blicke auf die dunkle Materie in einem virtuellen Universum

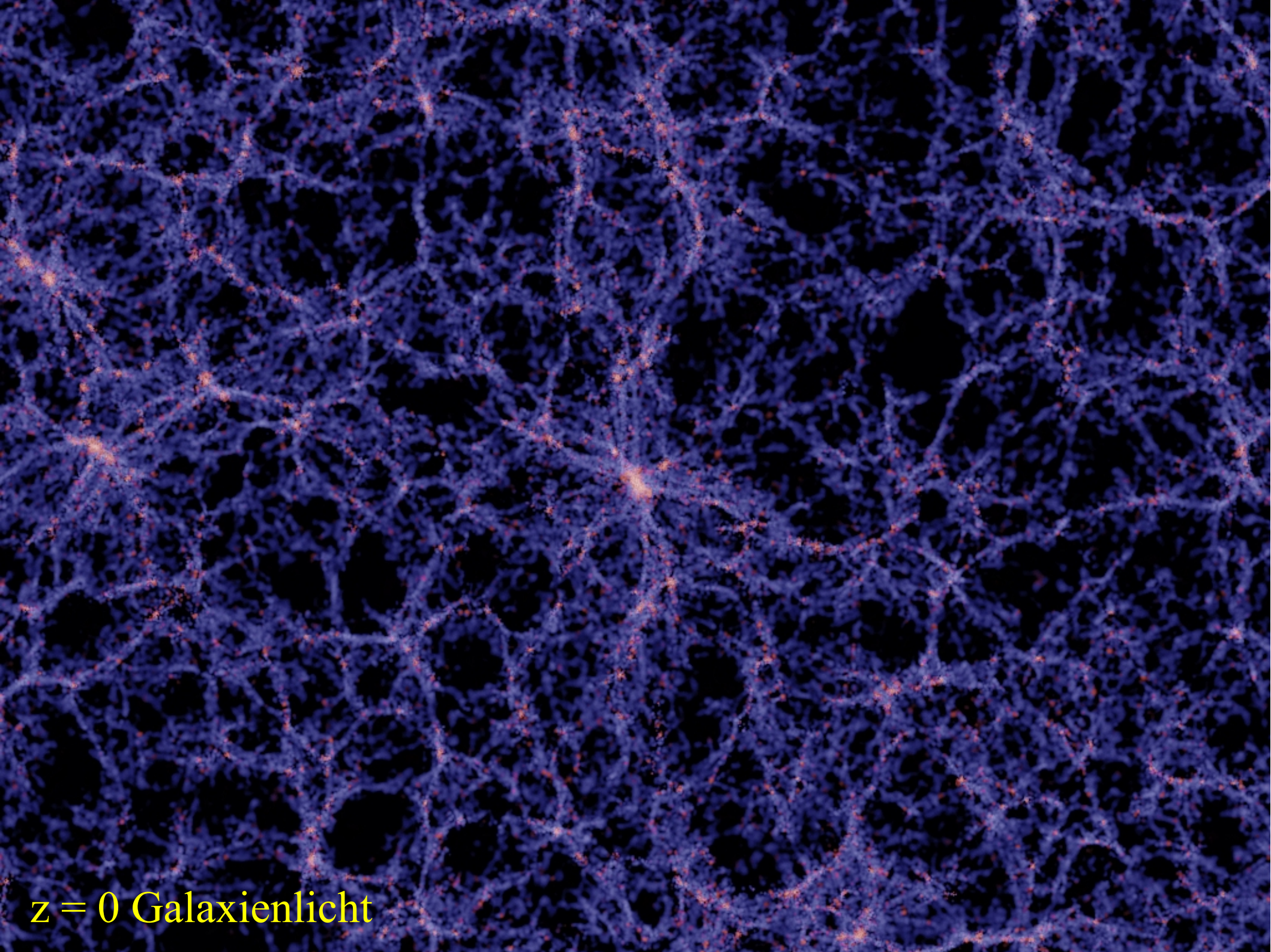
Entwicklung dunkler Strukturen in einem dünnen Querschnitt

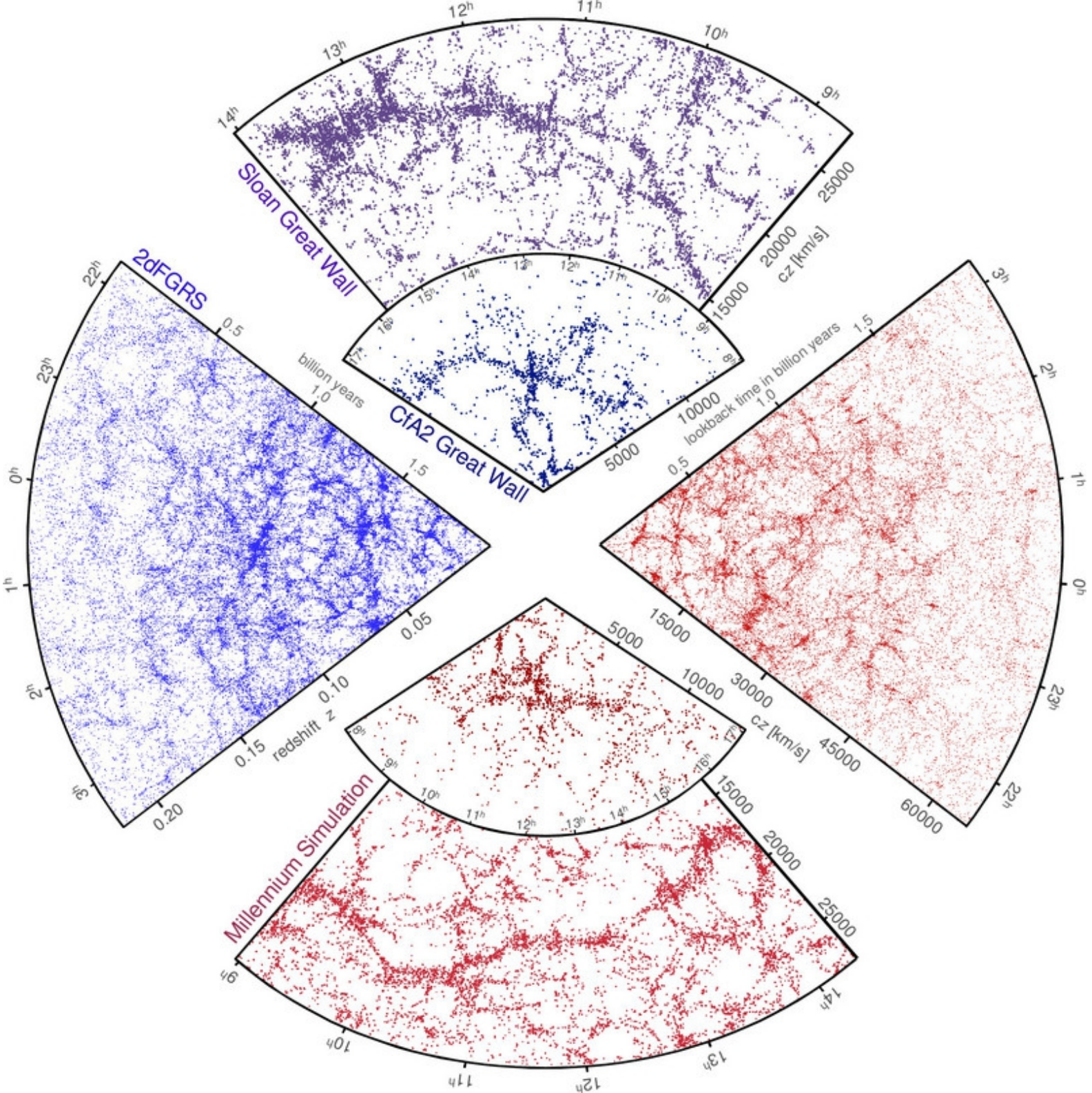
Ein Zoom vom ganzen sichtbaren Universum bis in einen Galaxienhaufen

Ein Flug durch das dunkle Universum

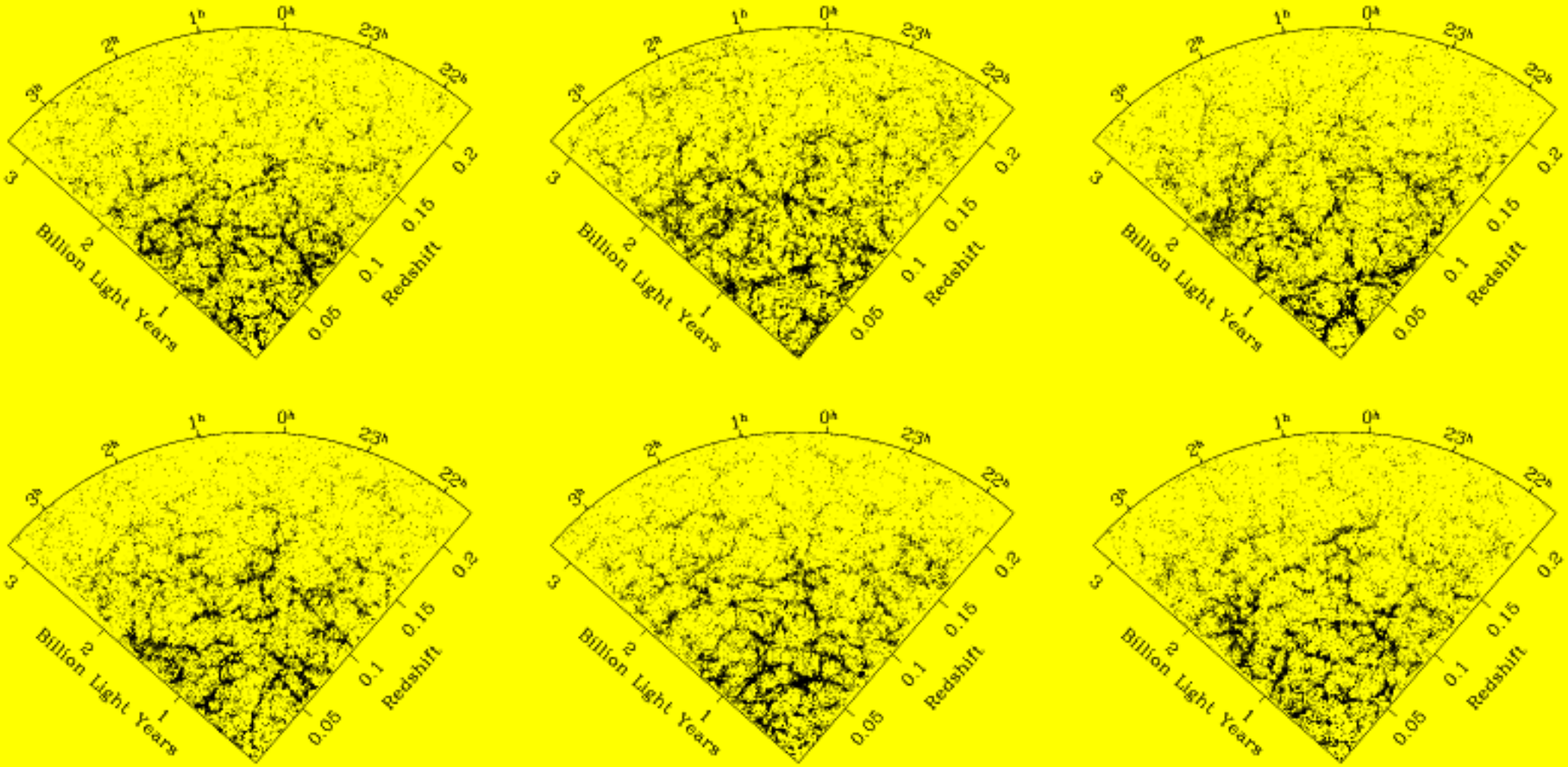


z = 0 Dunkle Materie

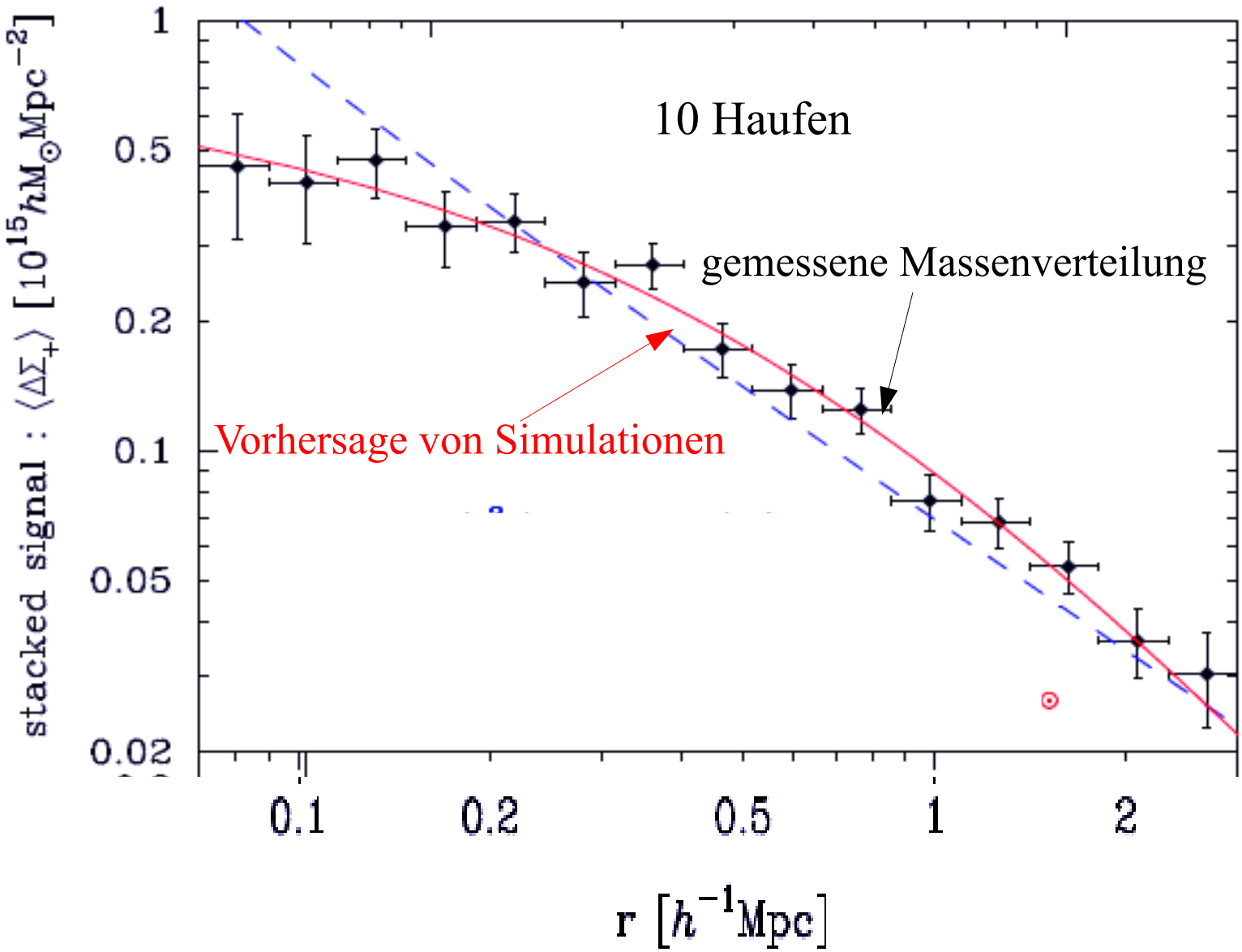

z = 0 Galaxienlicht

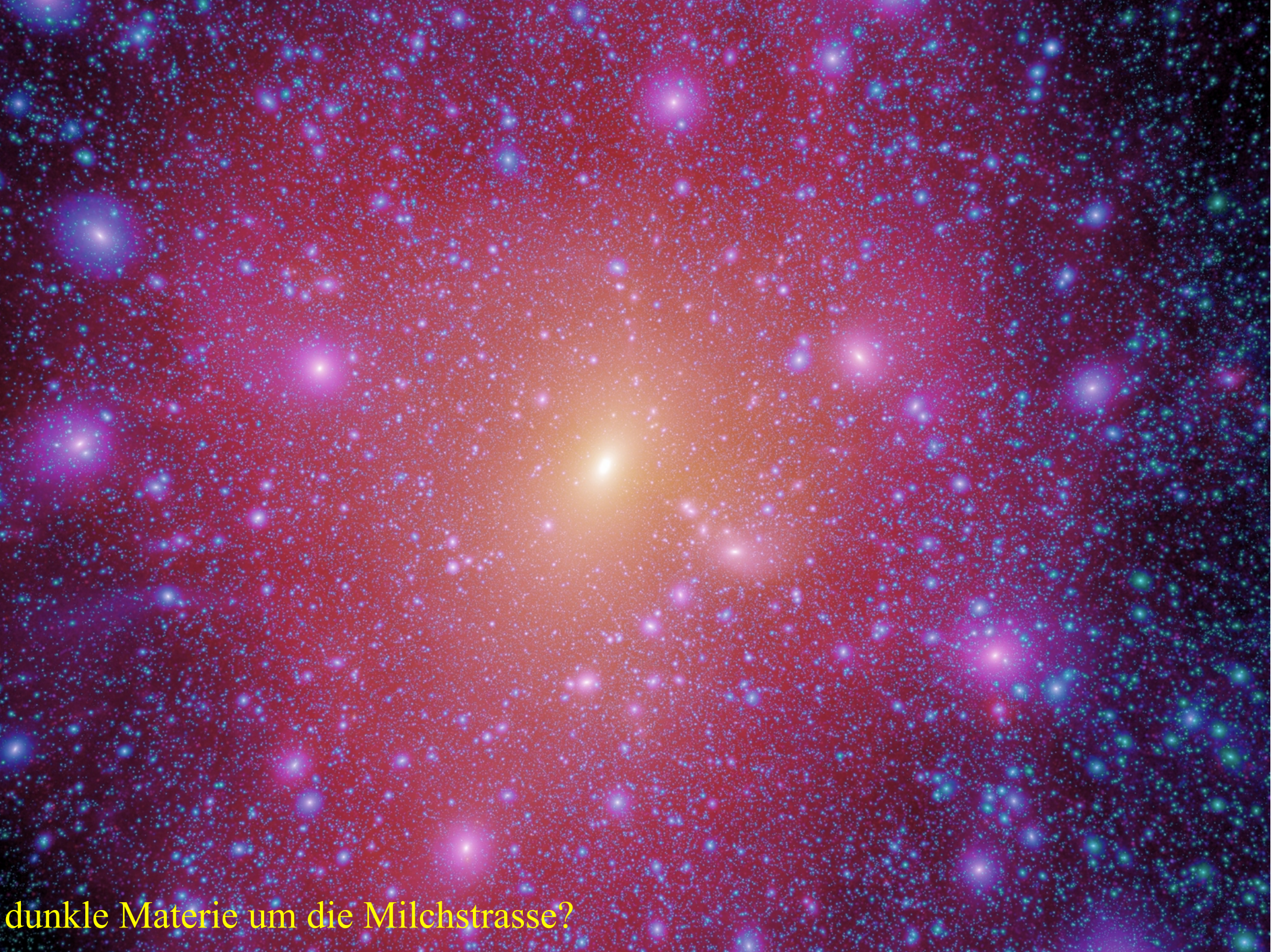

Sloan Great Wall
2dFGRS
CfA2 Great Wall
Millennium Simulation
billion years
lookback time in billion years
redshift z
cz [km/s]
cz [km/s]
0.20
0.15
0.10
0.05
0.5
1.0
1.5
0.5
1.0
1.5
15000
20000
25000
5000
10000
15000
5000
10000
30000
45000
60000

VIRTUAL vs REAL UNIVERSES !



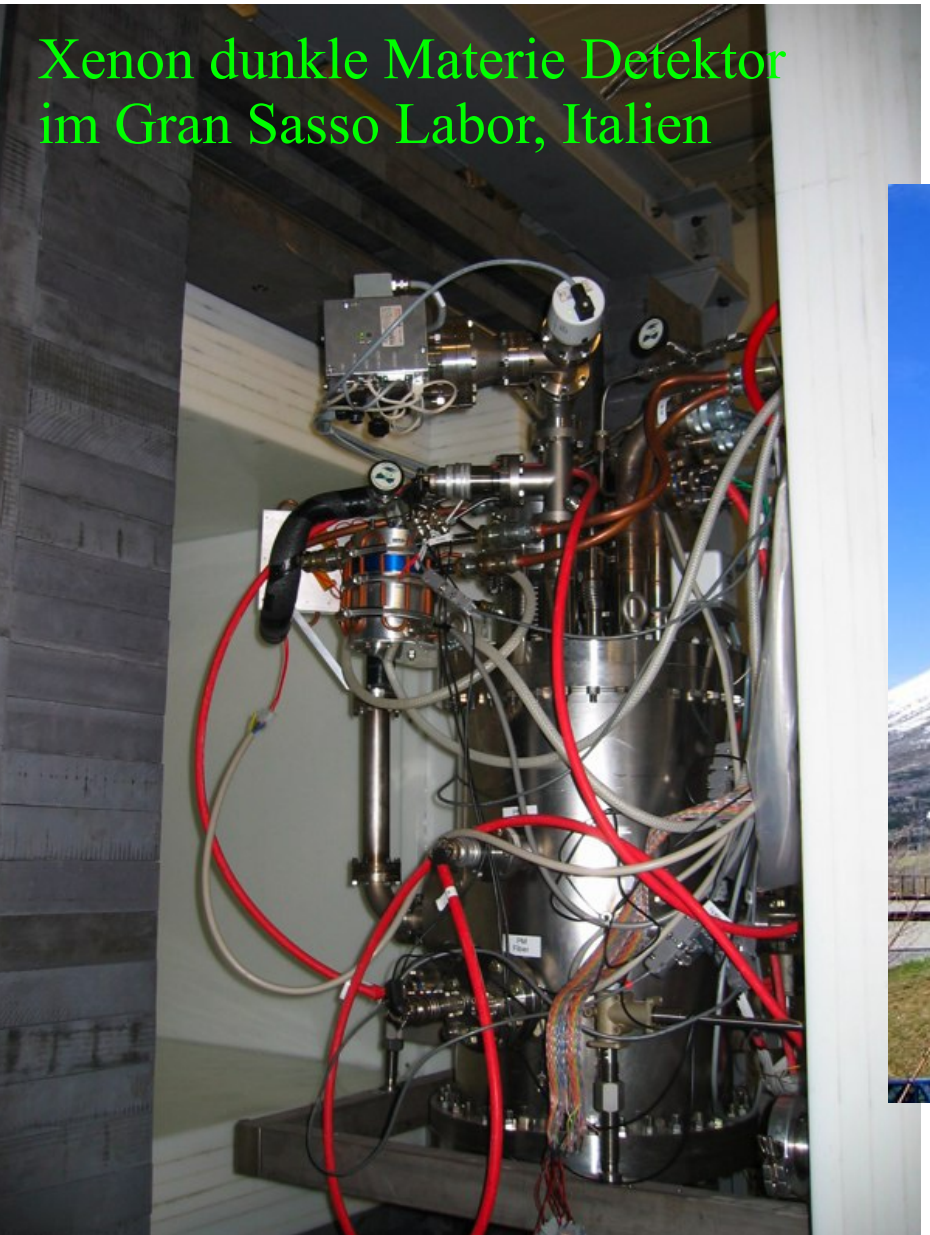
Vergleich der von Linseneffekten gemessene Massenverteilung um echte Galaxienhaufen mit der Vorhersage von Simulationen der Strukturentstehung

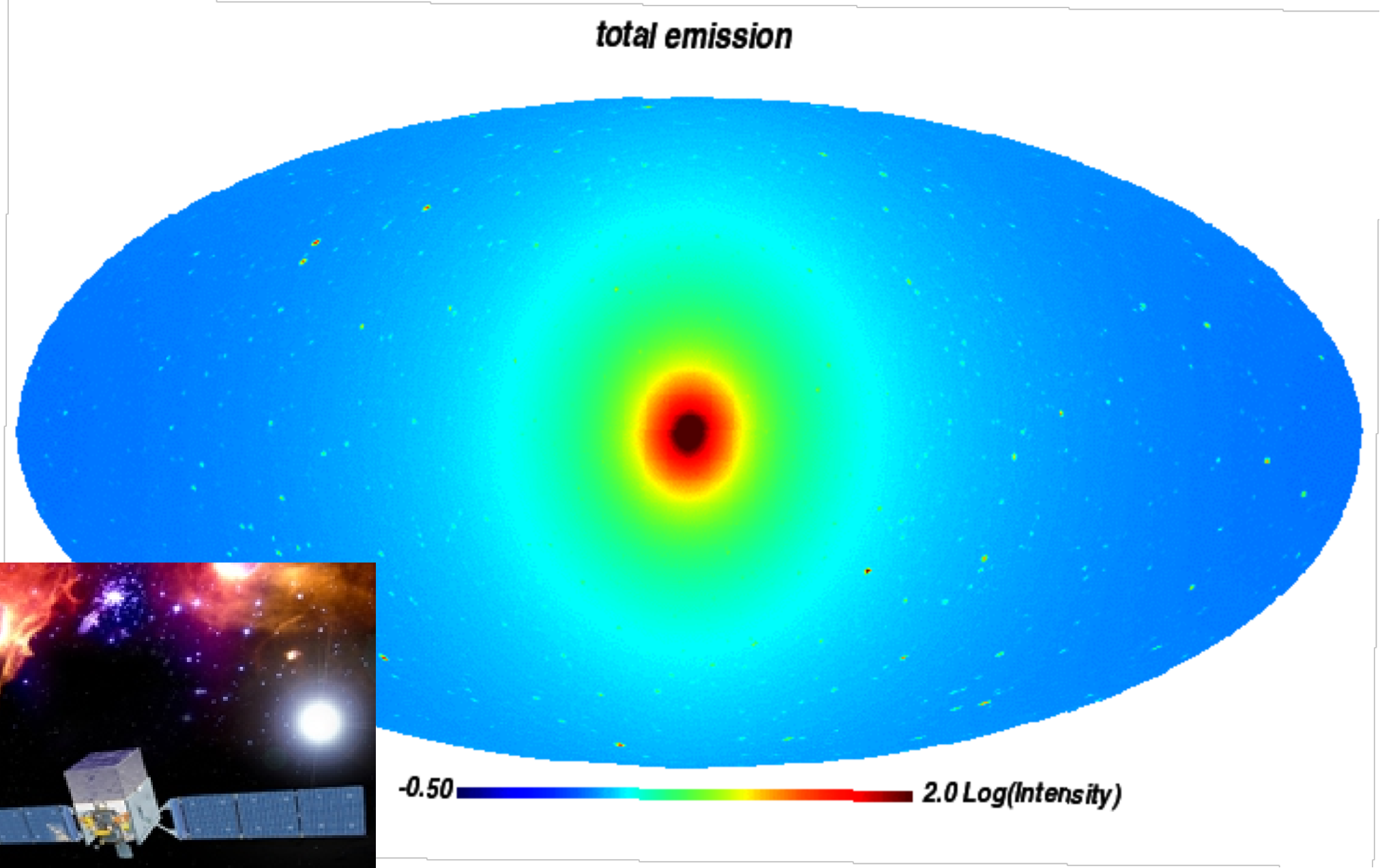




dunkle Materie um die Milchstrasse?

Wird dunkle Materie im Labor entdeckt werden?





Wird die Vernichtung der dunkle Materie vom Fermisatellit gesehen?

Wie bilden sich die sichtbaren Glaxien?

Mehr als 80% aller Materie in und um Galaxien/ Galaxienhaufen besteht aus dunkler Materie

Nur mit Hilfe dunkler Materie kann man erklären, wie die heutige kosmische Struktur aus der in der Hintergrund-strahlung gesehenen Struktur entstanden ist

DM besteht <u>nicht</u> aus “normaler” baryonischer Materie

Bis jetzt ist sie nur durch ihren gravitativen Effekte spürbar

Es wird vielleicht möglich, ihre Vernichtungsstrahlung zu beobachten, oder sie in einem irdischen Labor zu entdecken

Die Galaxien bilden sich durch die Kühlung und Verdichtung Gases in die Kerne von Klumpen dunkler Materie

Nur dunkle Energie kann die beschleunigte Ausdehnung des heutigen Universums erklären

Die beobachte Struktur der Hintergrundstrahlung zeigt, dass unser Universum flach ist, aber nur 30% der benötigte Masse-Energie aus Baryonen und dunkle Materie besteht.
70% muss aus dunkle Energie bestehen

Dunkle Energie ist gleichmässig verteilt und <u>nur</u> durch ihre Einfluss auf die kosmische Ausdehnung spurbar

Wir haben keine Ahnung der Verbindung zwischen dunkle Energie und der Rest der Physik