Kosmologie

Eine kurze Einführung

Rolf Landua
CERN

Das Universum

Vor dem 20. Jahrhundert schien das Universum ein ruhiger Platz zu sein.
Es war nicht viel los.

Die meisten Physiker glaubten das Universum sei unendlich in Raum und Zeit.

Aber es gab da eine merkwürdige Beobachtung

Nachts ist es dunkel

Das konnte nicht mit einem unendlichen grossen und alten Universum erklärt werden

Olbers' Paradox

1823

Heinrich Wilhelm Olbers (1823)

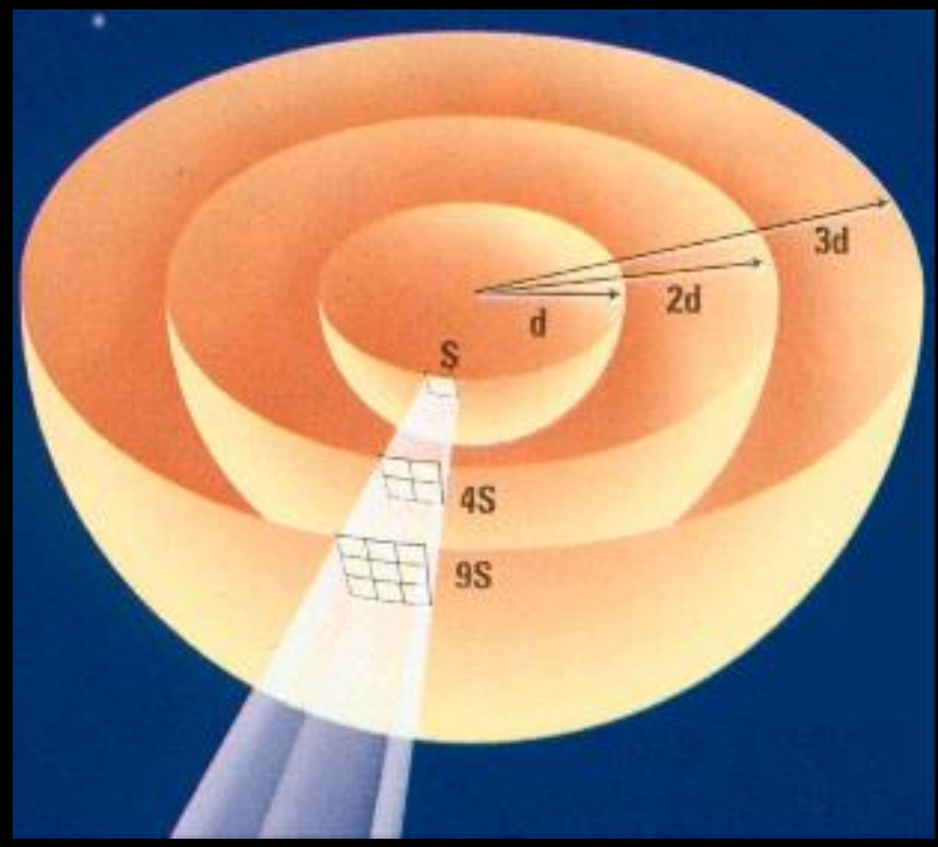
Wenn das Universum unendlich gross und gleichförmig mit leuchtenden Sternen gefüllt ist, dann wird man in jeder möglichen Blickrichtung irgendwo auf die Oberfläche eines Sterns blicken.

Quantitativ:

Jede Schale trägt mit ihrer Oberfläche bei ~ r^2
Die Lichtintensität nimmt ab mit ~$1/r^2$
Beitrag jeder Schale zur Gesamtintensität = constant

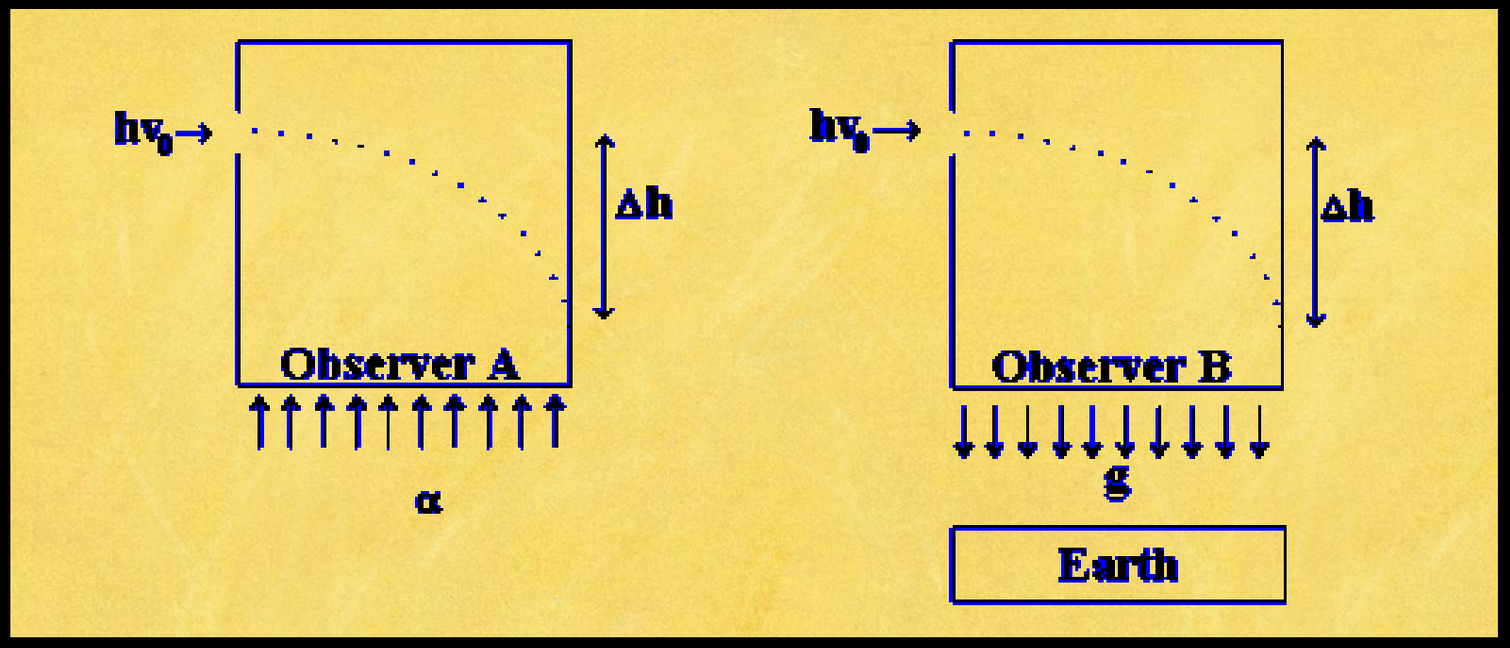
Konsequenz:

Das Universum ist nicht unendlich alt, oder ...
Das Universum ist nicht unendlich gross, oder...
Beides



Äquivalenzprinzip

1907



Beschleunigung (träge Masse) ist ununterscheidbar von Gravitation (schwere Masse)

"Der glücklichste Gedanke meines Lebens" (Albert Einstein)

Aufzugbeispiel: Licht breitet sich auf einer parabolischen Kurve aus.
Äquivalenzprinzip: in einem Gravitationsfeld wird Licht auch abgelenkt.

Da Lichtstrahlen den kürzest-möglichen Weg im Raum definieren -->
Raum (und Zeit) werden durch Gravitationsfelder gekrümmt

Allgemeine Relativitätstheorie

1915

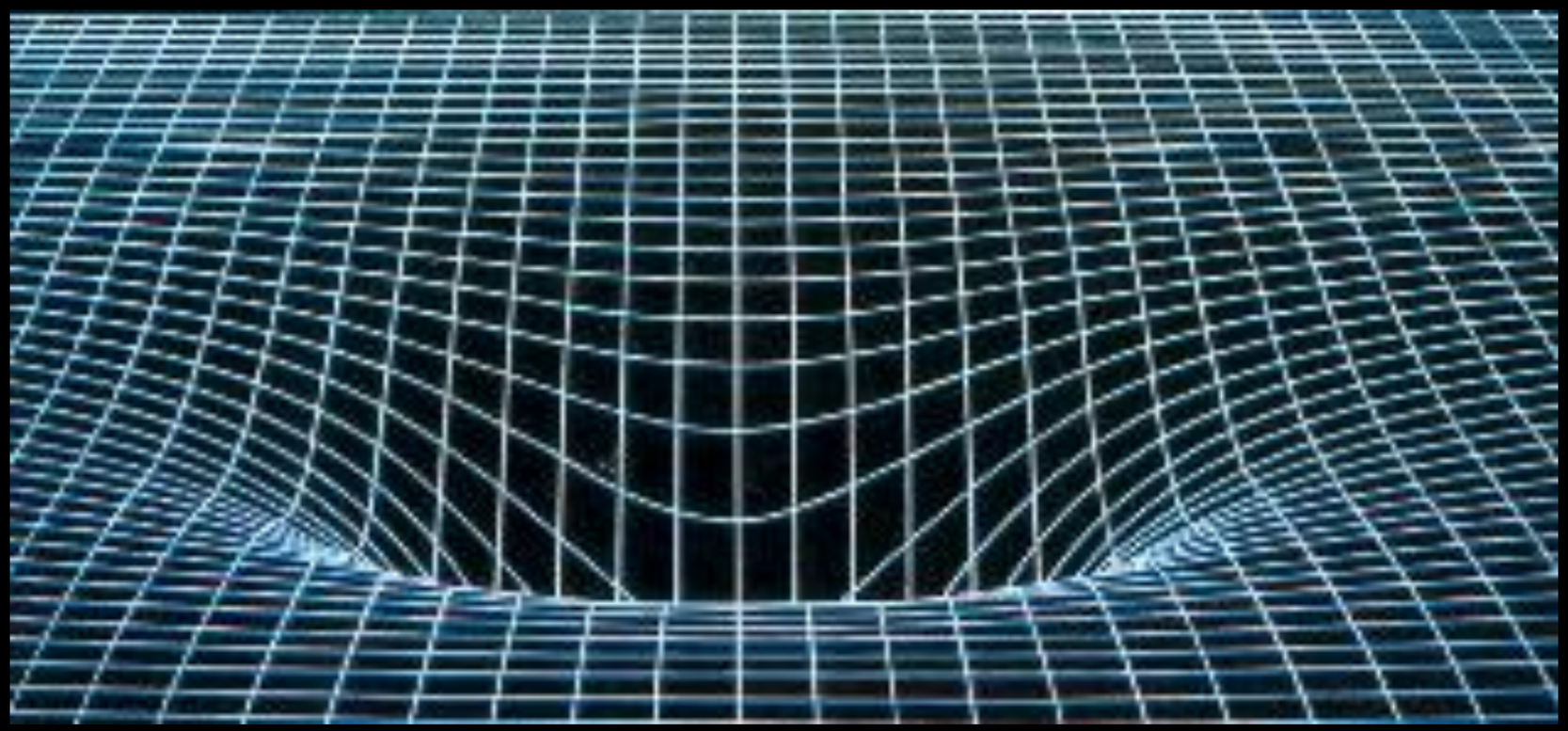
Albert Einstein (1912-15) :
Allgemeine Relativitätstheorie

Die Materie bewirkt die Krümmung des Raums
Der Raum bestimmt die Bewegung der Materie

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Raumgeometrie

Energie-Impuls-Verteilung der Materie



Ein veränderliches Universum ?

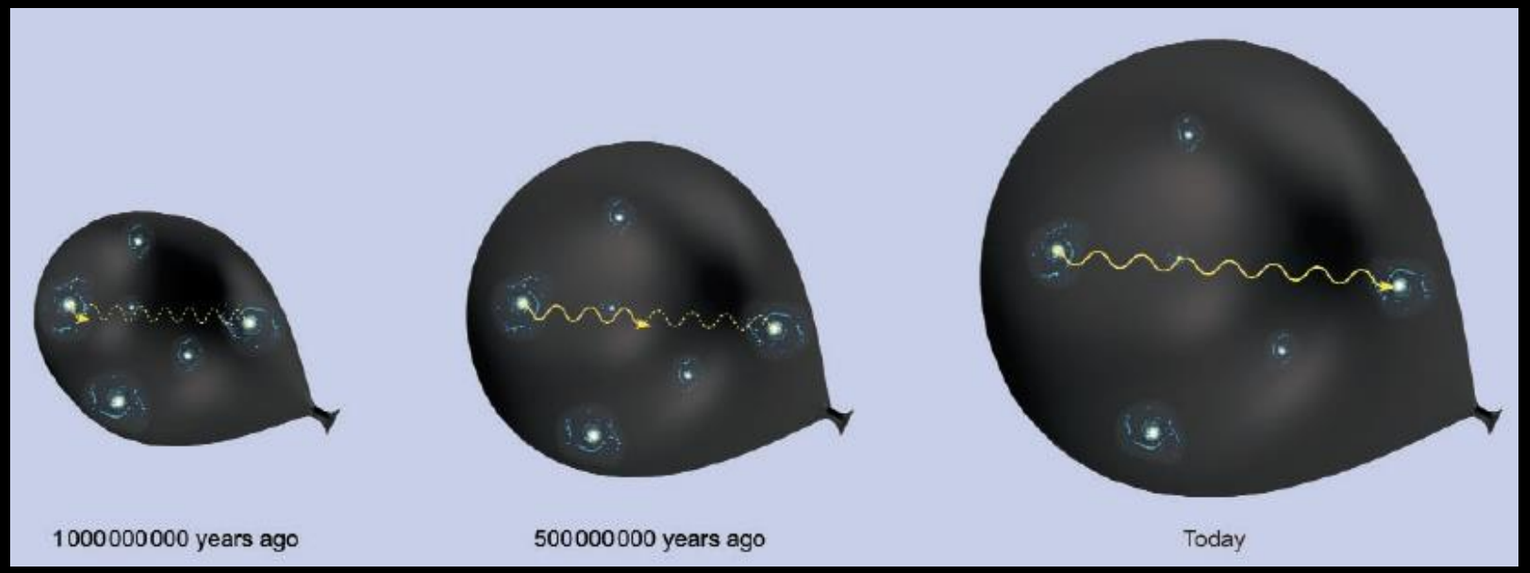
1915

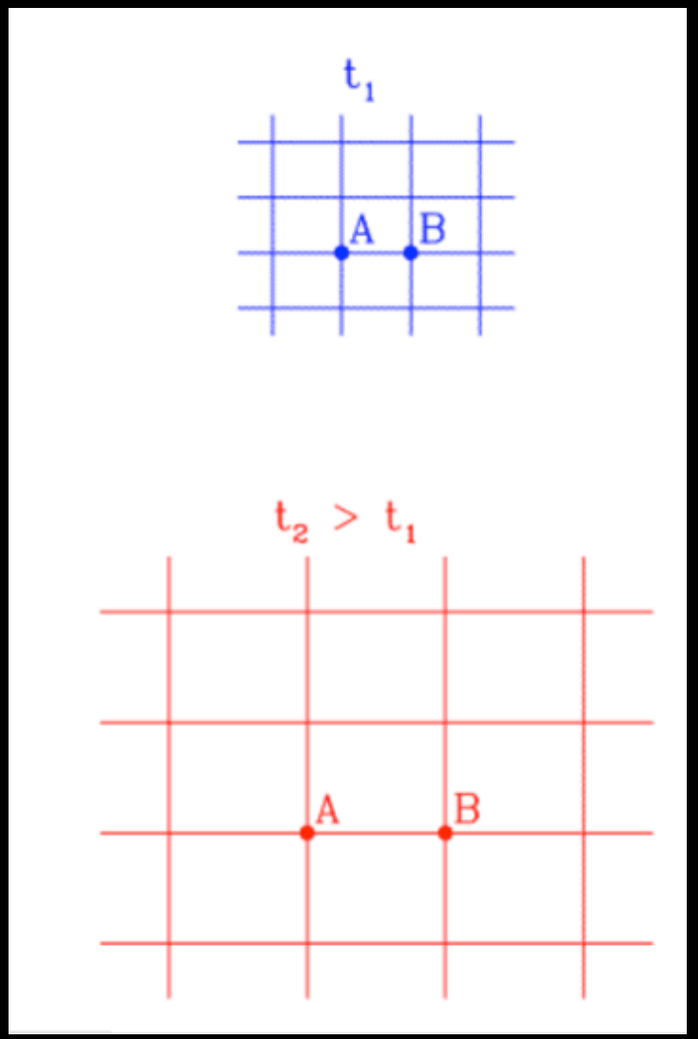
Friedmann:
Einstein-Gleichungen erlauben nur einen kontrahierenden oder expandierenden Raum

$$r_{AB}(t) = a(t)x_{AB}$$

Seine Gleichung verbindet die durchschnittliche Energiedichte "ρ" und den Krümmungsfaktor K mit der Expansionsrate a(t)

$$(\frac{1}{a}\frac{da}{dt})^2 = \frac{8\pi G}{3}\bar{\rho} - \frac{K}{a^2}$$





Universum

Einstein mochte die Idee eines ‘dynamischen’ Universums überhaupt nicht.

Er glaubte an ein ewiges und statisches Universum.

Aber seine eigenen Gleichungen sagten etwas anderes voraus.

Deshalb entschied er sich, an seiner Gleichung herumzupfuschen, und fügte eine sogenante ‘kosmologische Konstante’ ein.

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho - \frac{1}{3}\Lambda c^2 = -\frac{kc^2}{R^2}$$

“Anti-Gravitation”

Das Universum ist grösser als gedacht !

1924

Edwin Hubble
Mt. Palomar telescope

Cepheid Sterne = ‘Standard-Kerzen’

Existenz von Galaxien ausserhalb der Milchstrasse

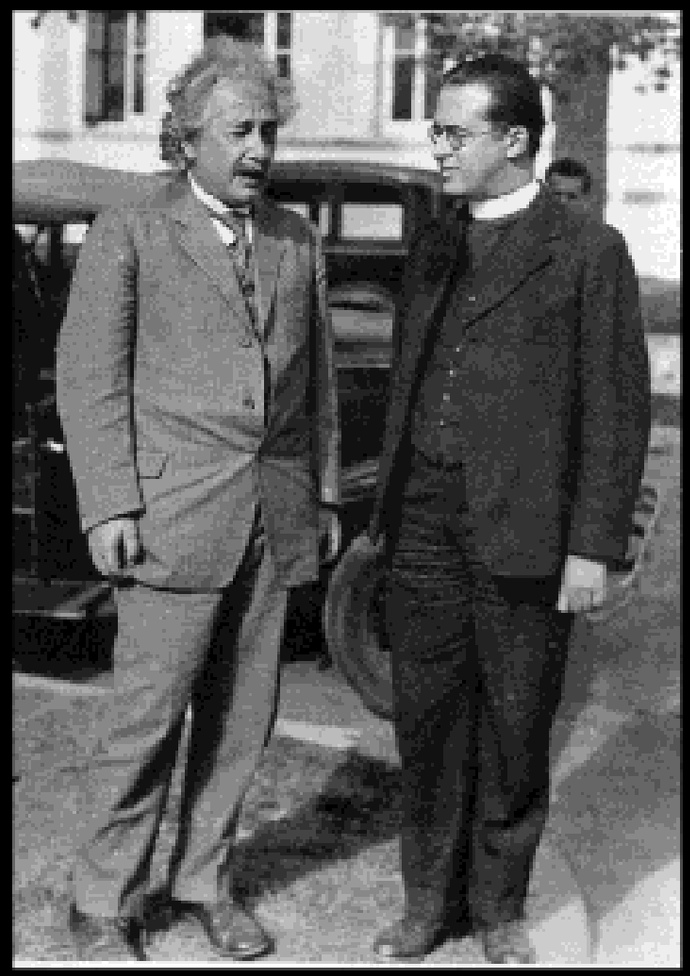
Hatte das Universum einen Anfang ?

Abbé George Lemaitre (1927) :

Annals of the Scientific Society of Brussels

"A homogeneous Universe of constant mass and growing radius accounting for the radial velocity of extragalactic nebulae"

- Expandierendes Universum zur Erklärung der Rotverschiebung von Galaxien
- Abschätzung des (sichtbaren) Radius



George Lemaitre (1927)

Das Universum expandiert !

1929

A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE

By Edwin Hubble

Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington

Communicated January 17, 1929

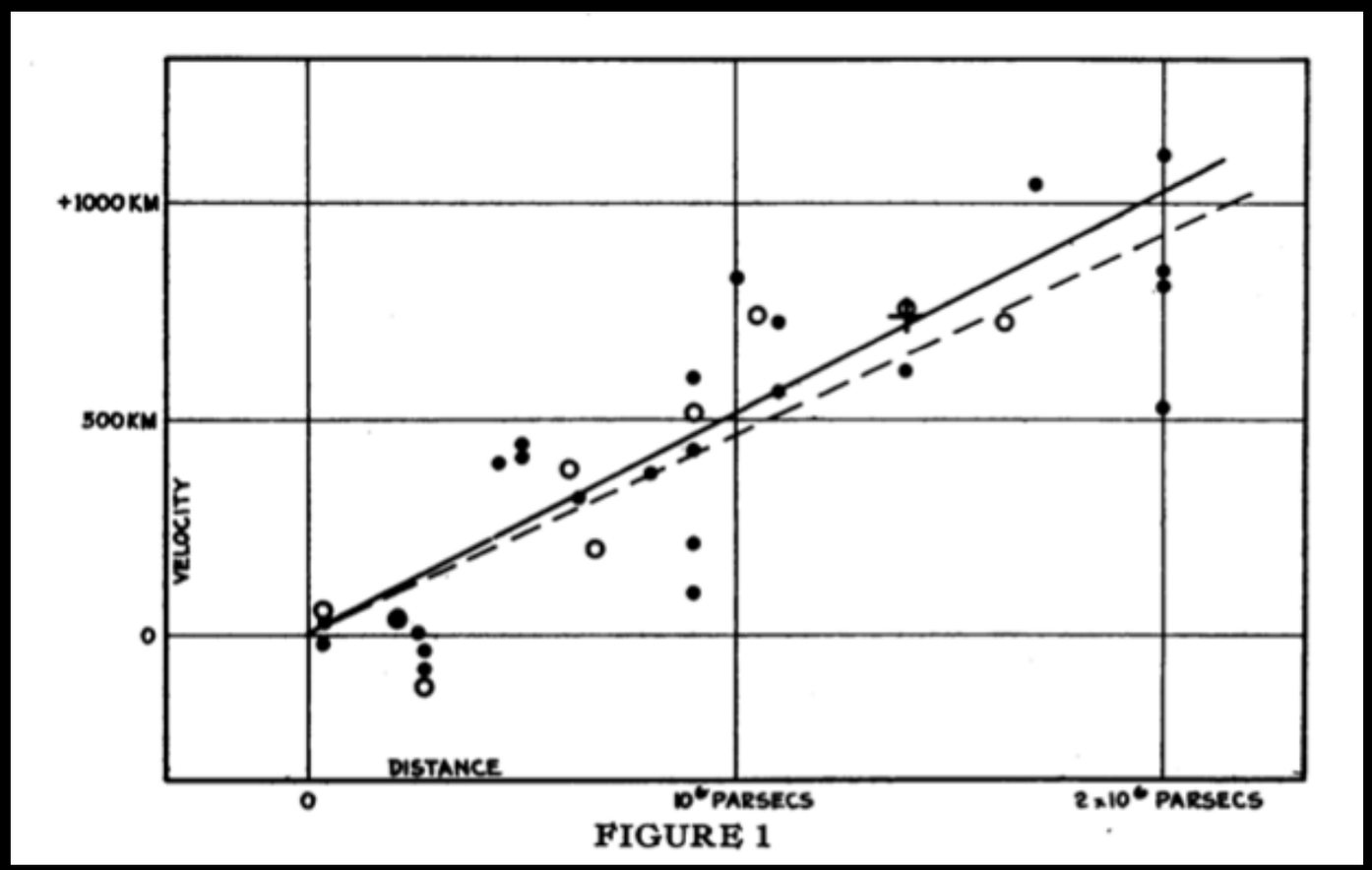
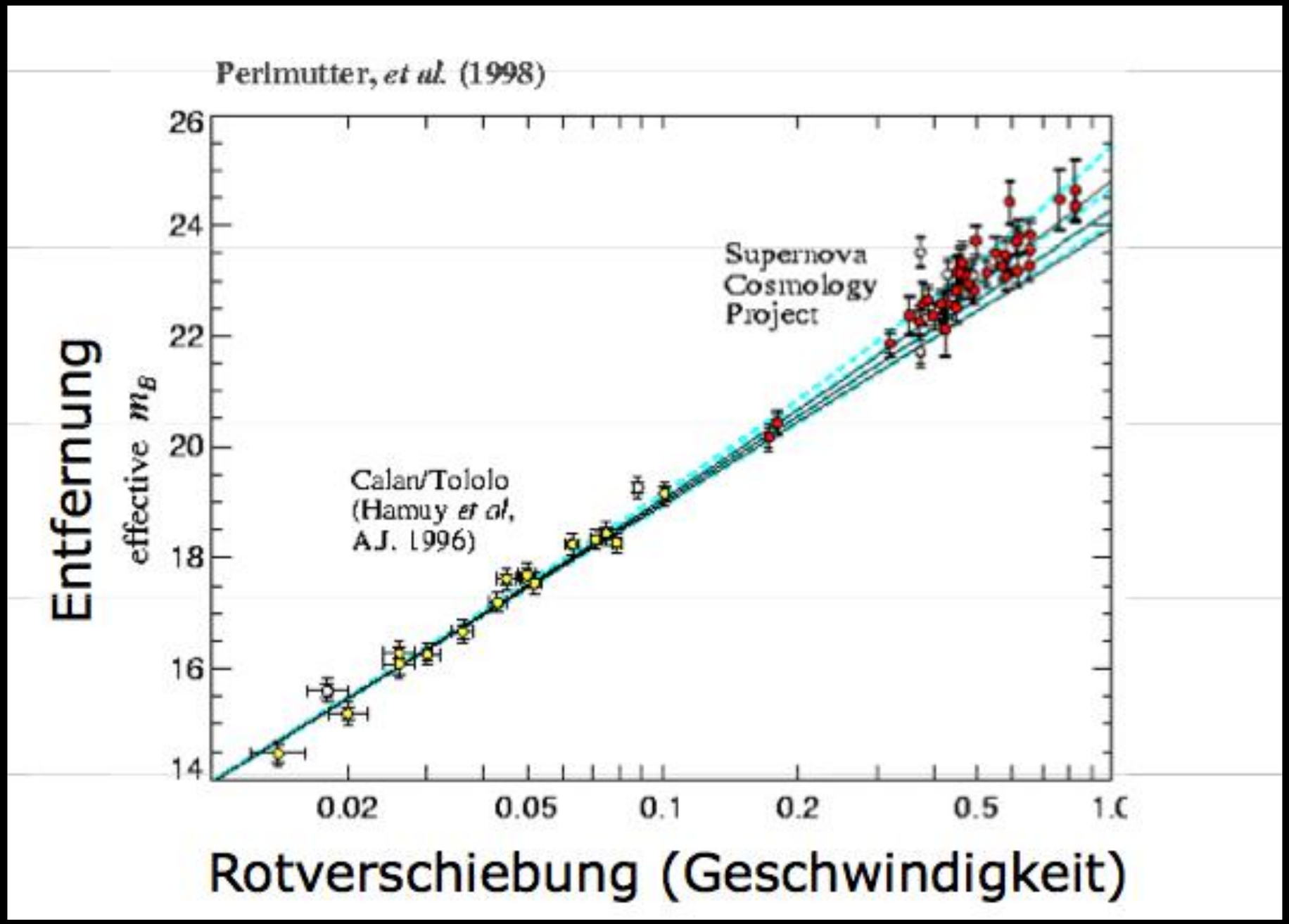


FIGURE 1

Rotverschiebung proportional zur Distanz der Galaxien

H_o = 530 km/s / Mpc !! (Alter des Universums: ~ 2 Mia Jahre ??)

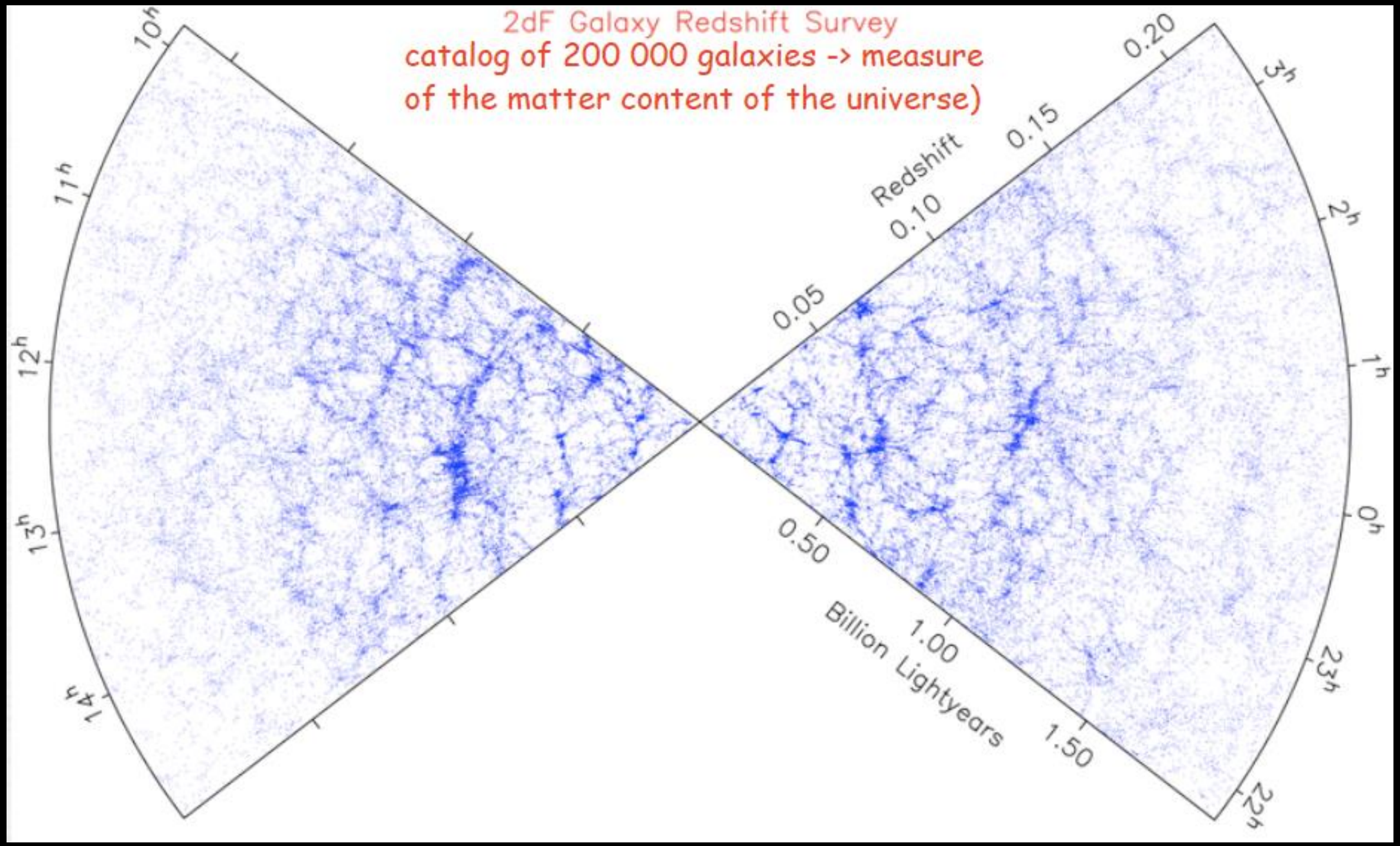
Der heutige Wert der Hubble-”Konstanten”



Today: $H = 70 \pm 3$ km s^{-1} Mpc^{-1}

Hubble age (H^{-1}) ~ 13.4 billion years

In der Vergangenheit war das Universum viel homogener als heute:



Basis des ‘Big Bang’ Modells

Hubble Expansion des Raums

Kosmisches Phänomen - alle Galaxien gehorchen dem gleichen Abstandsgesetz

Universelles Verhältnis H:He ~ 3:1

Hydrogen ~ 75 %
Helium-4 ~ 25 %
He-3 ~ 0.003 %
Deuterium ~ 0.003 %
Li-7 ~ 0.00000002 %

Alter kosmischer Objekte

< 12-13 Milliarden Jahre

Sonne ~ 4.7 Milliarden Jahre

Universe

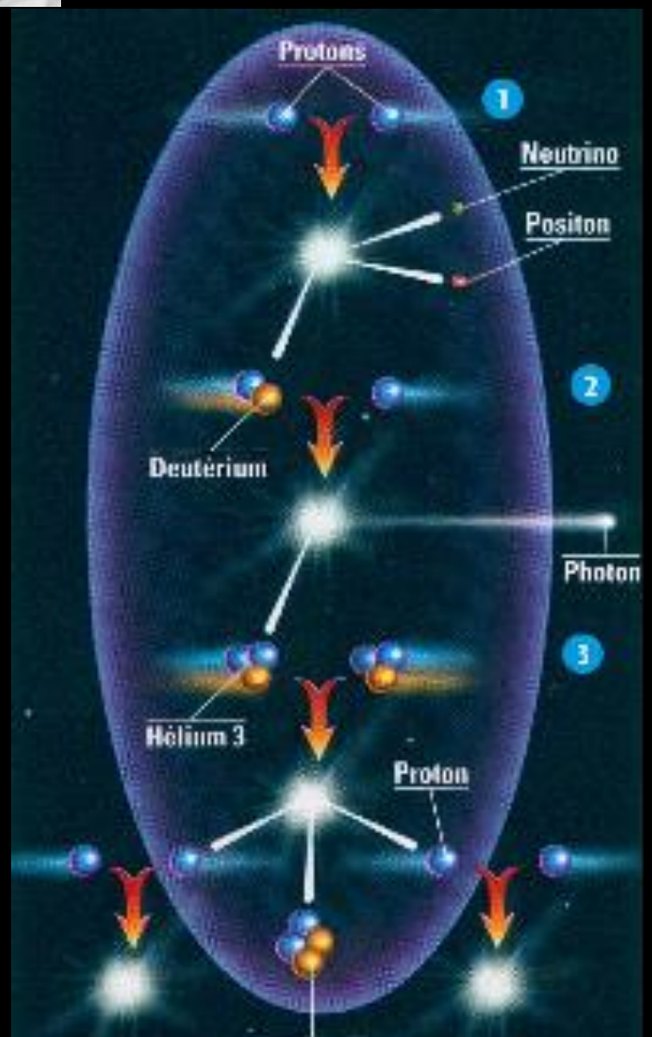
1948

1948: Das 'Big Bang' Modell* vom Anfang des Universums

George Gamov

Das Universum enstand aus einem extrem heissen Anfangszustand

Es dehnte sich dann schnell aus, wobei es abkühlte



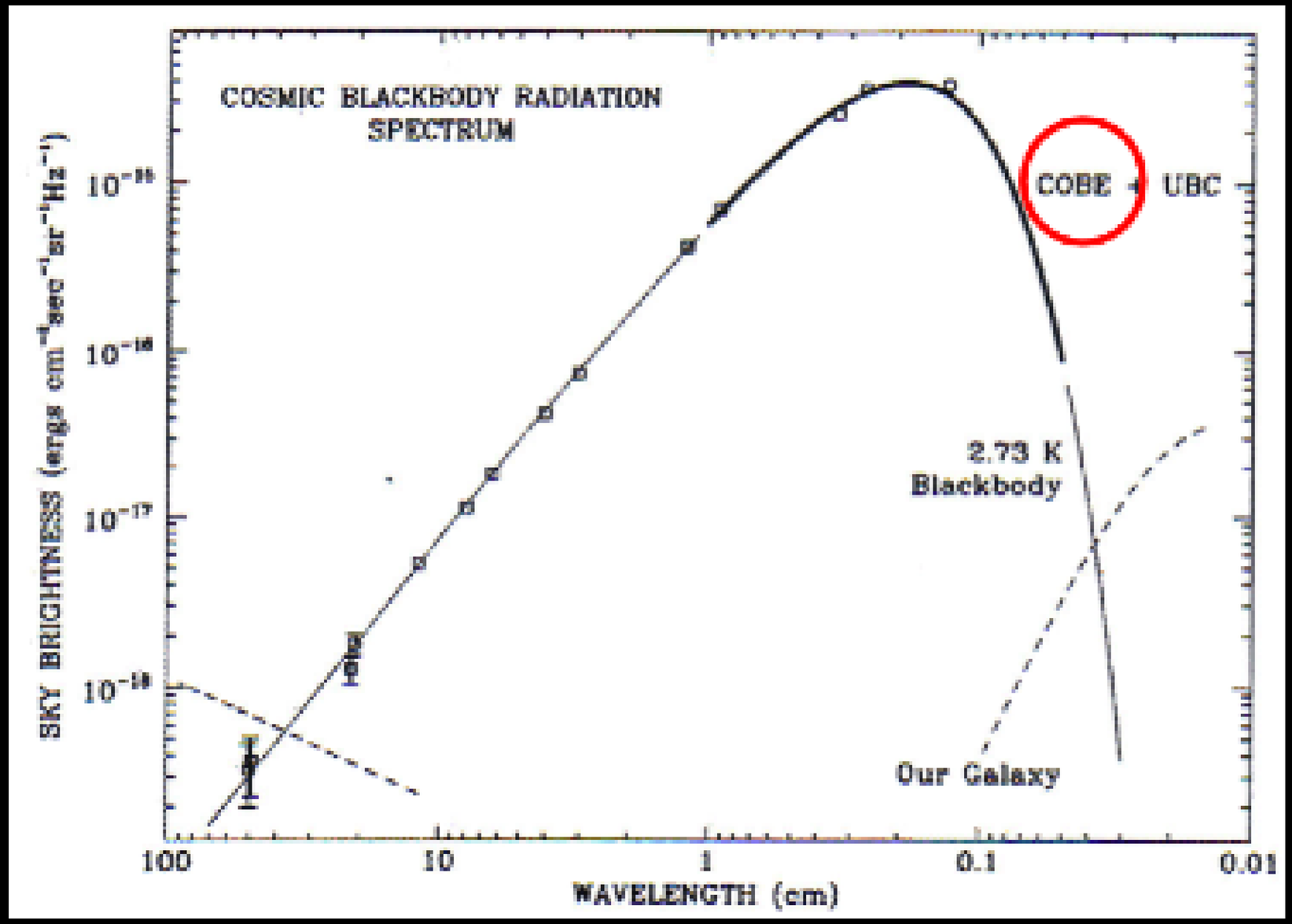
- In den ersten drei Minuten war nur Zeit für die Fusion der leichtesten Atomkerne
- Es sollte ein ‘Echo’ des Urknalls geben: eine homogene Hohlraumstrahlung mit einer Temperatur von ca. 5 K

* 'Big Bang' war ein Begriff von Fred Hoyle um Gamov's Modell lächerlich zu machen.

Universum

Die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung (1963)

Penzias and Wilson

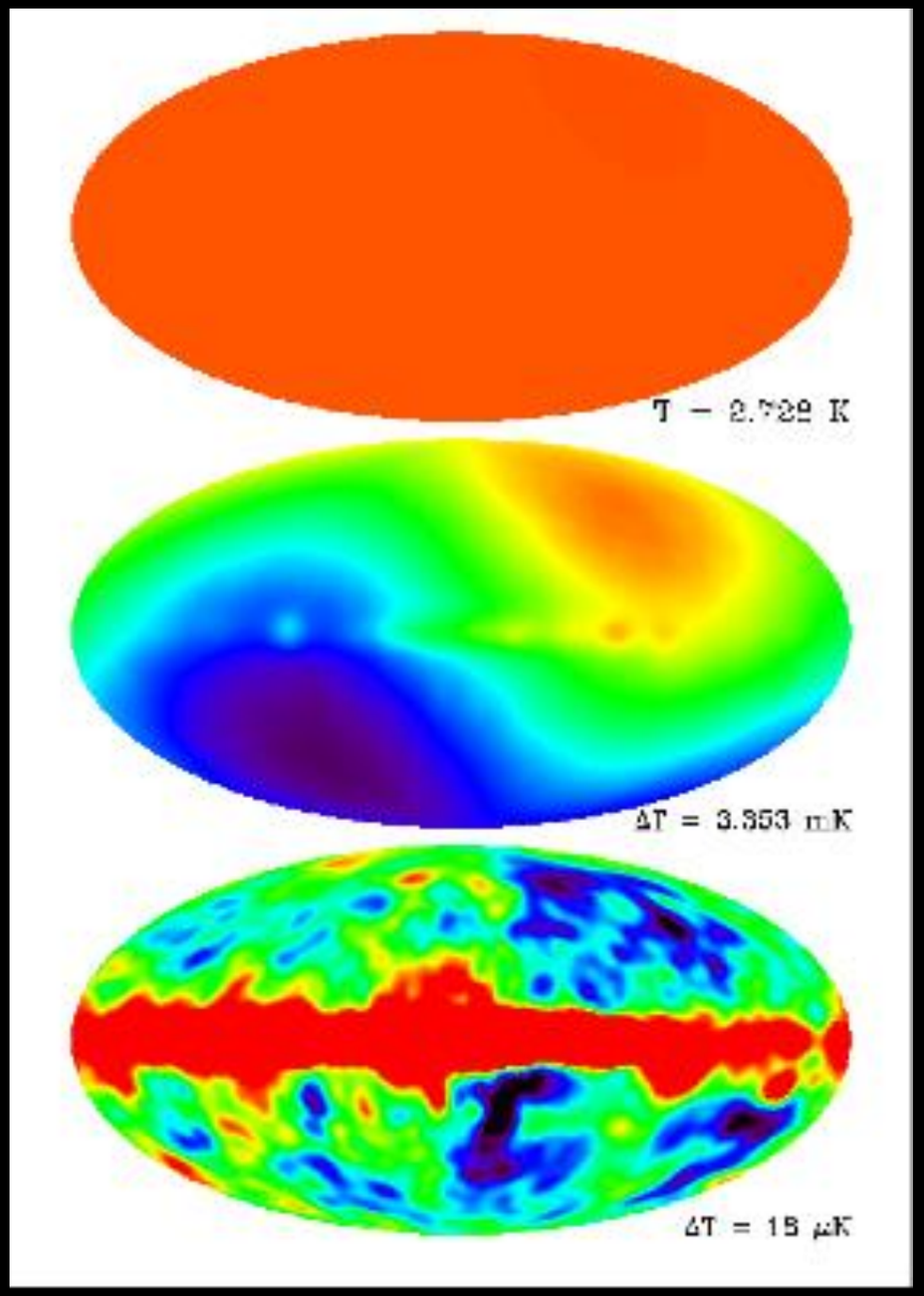


The Universe is a perfect ‘black body’ with T = 2.73 K

Die Beobachtung der CMB durch Satelliten (COBE, WMAP, Planck)

Universe

Cosmic Microwave Background (COBE)
(Nobel prize 2006)



T= 2.7 K

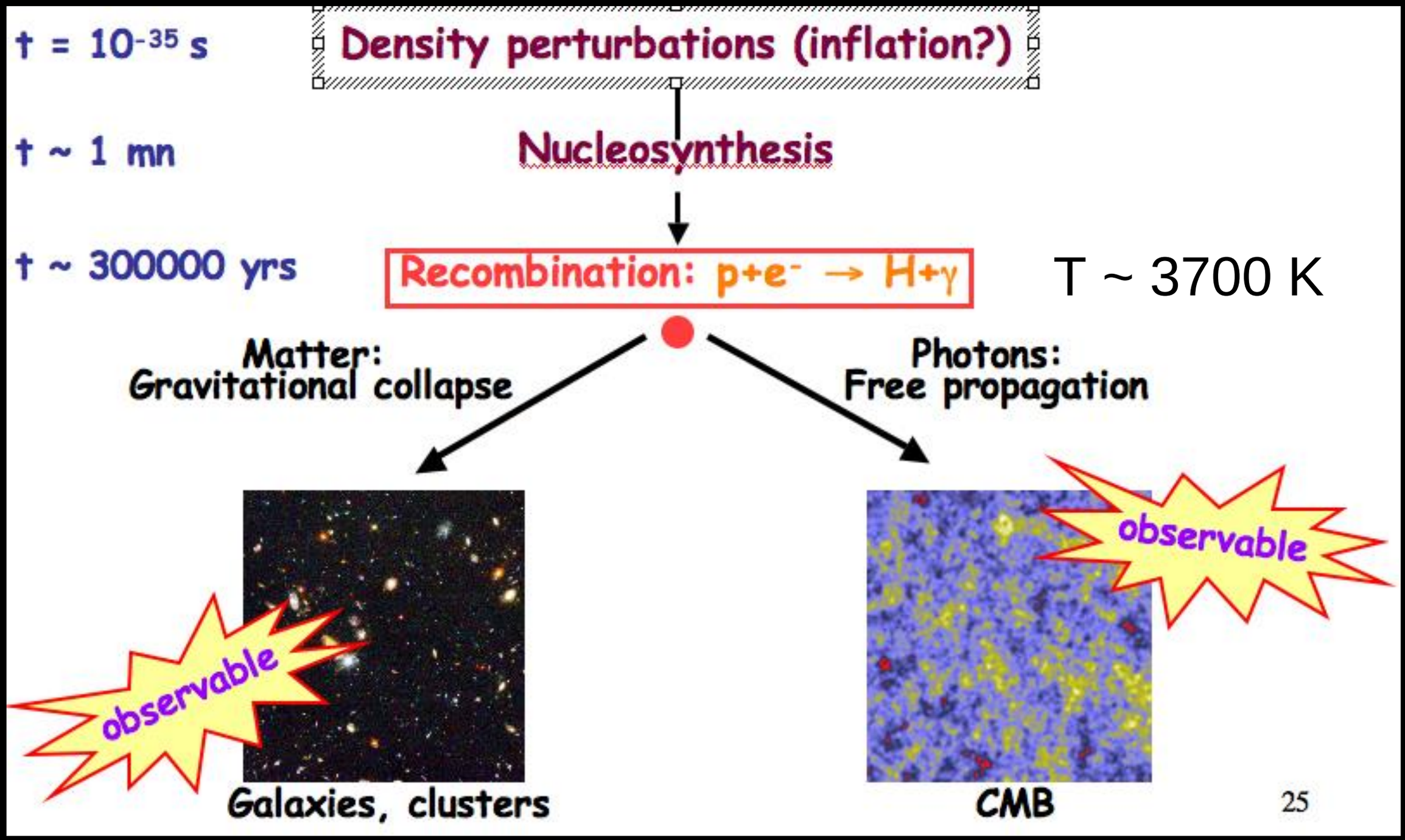
Δελτα–T= 3.3 mK

(after subtraction of constant emission)

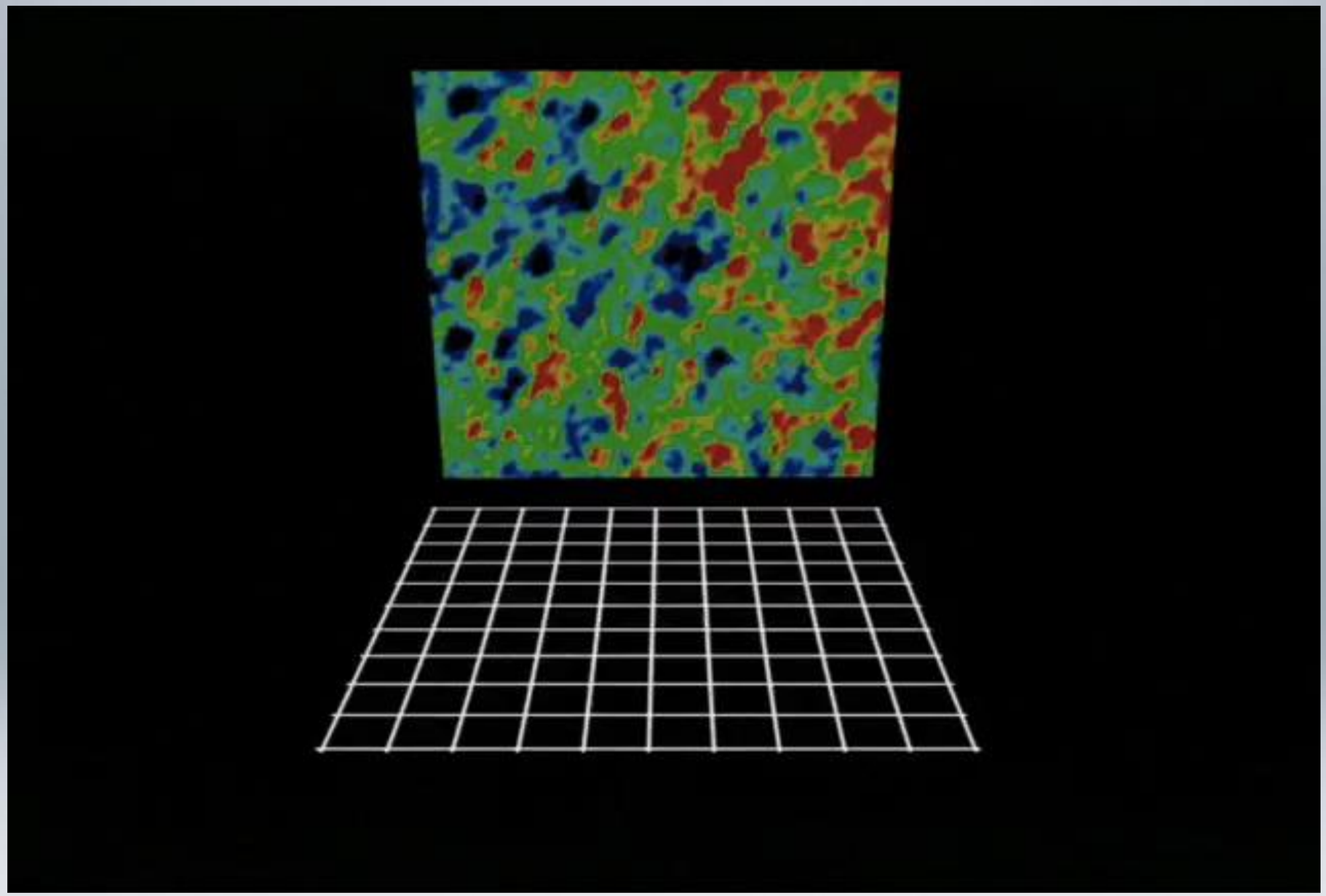
Δελτα–T= 18 μK

(after correcting for motion of Earth)

Entstehung der CMB Fluktuationen

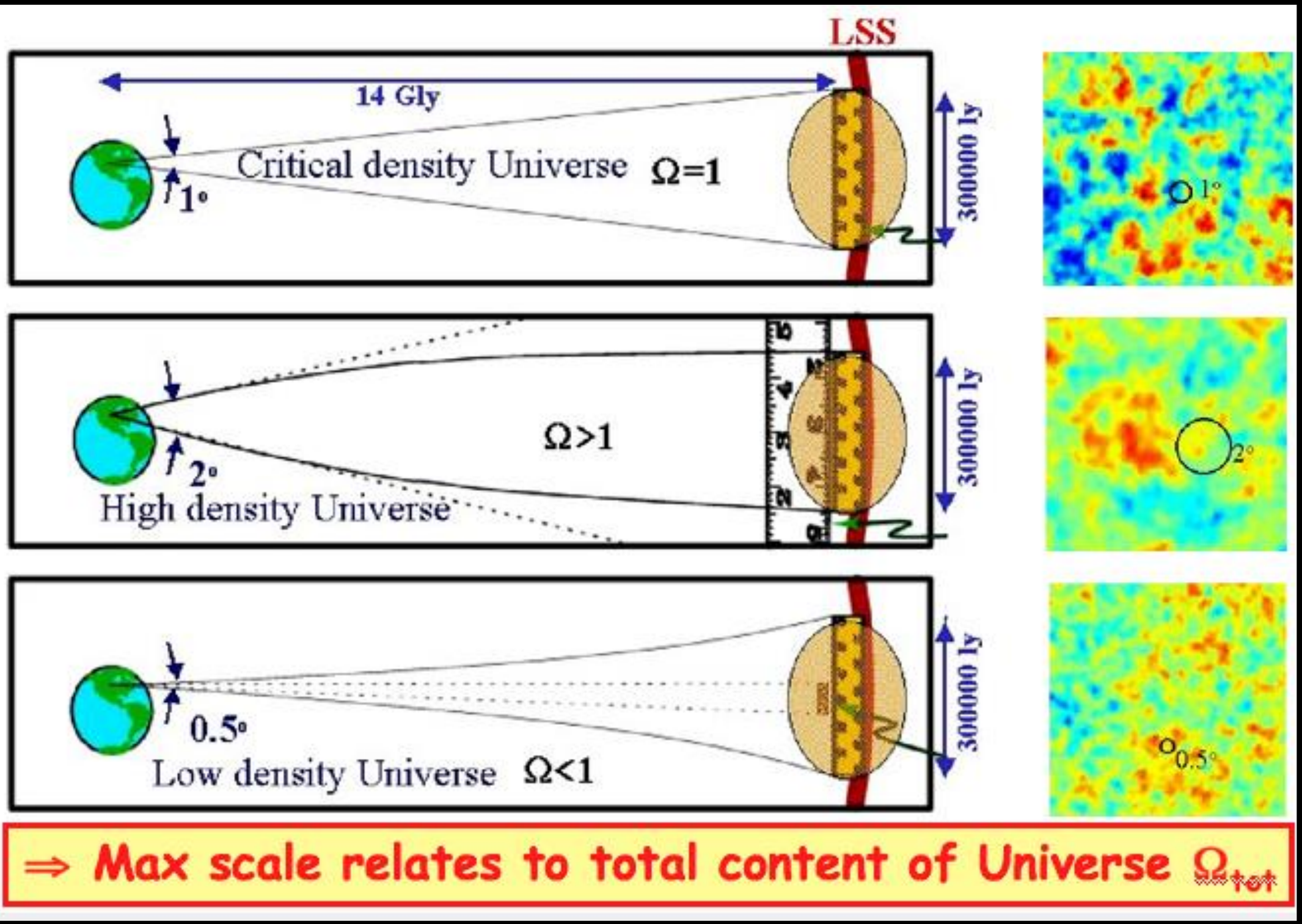


Kosmische Hintergrundstrahlung



“Fingerabdruck” des Big Bang
Das Licht der ‘Rekombinations-Ära” war 13.7 Milliarden Jahren unterwegs
Temperaturverteilung: Geschichte und Zusammensetzung des Universums

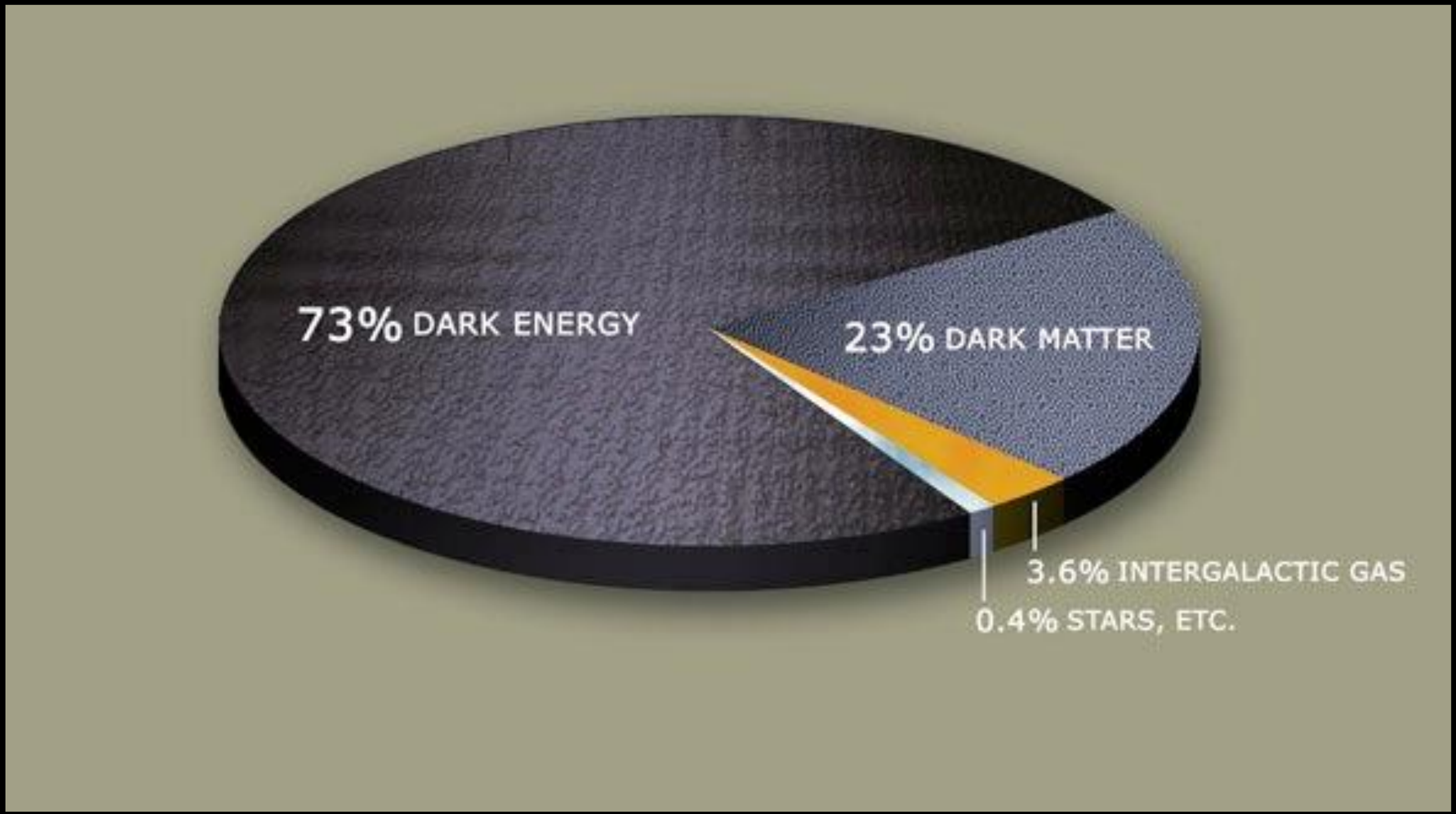
Die Analyse der Inhomogenitäten ergibt die Zusammensetzung des Universums



⇒ Max scale relates to total content of Universe Ω_{tot}

Universum

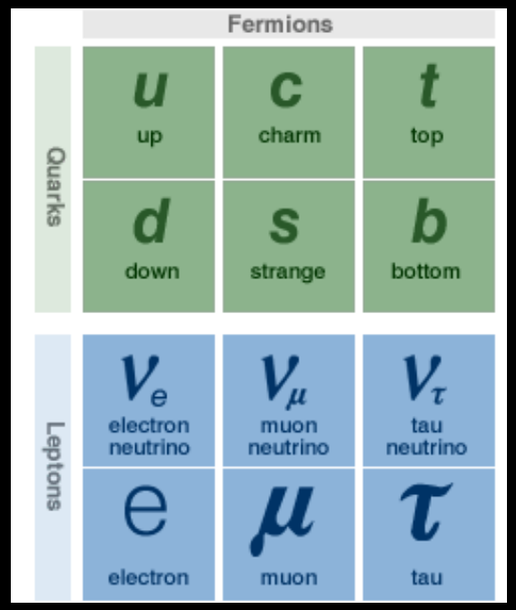
Die merkwürdige Zusammensetzung der Energie des Universums



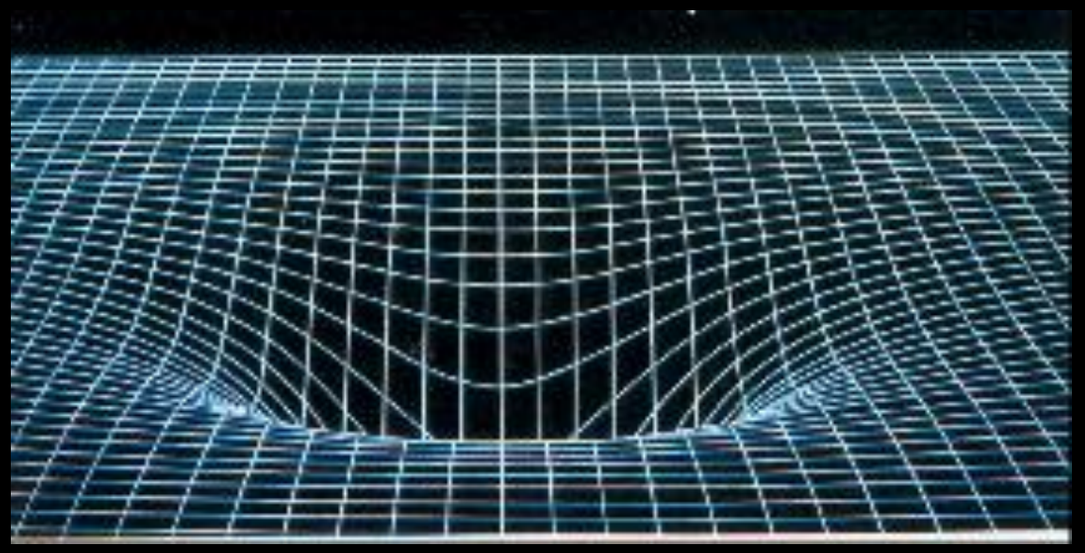
Heute: Standard-Modell der ...

Teilchenphysik

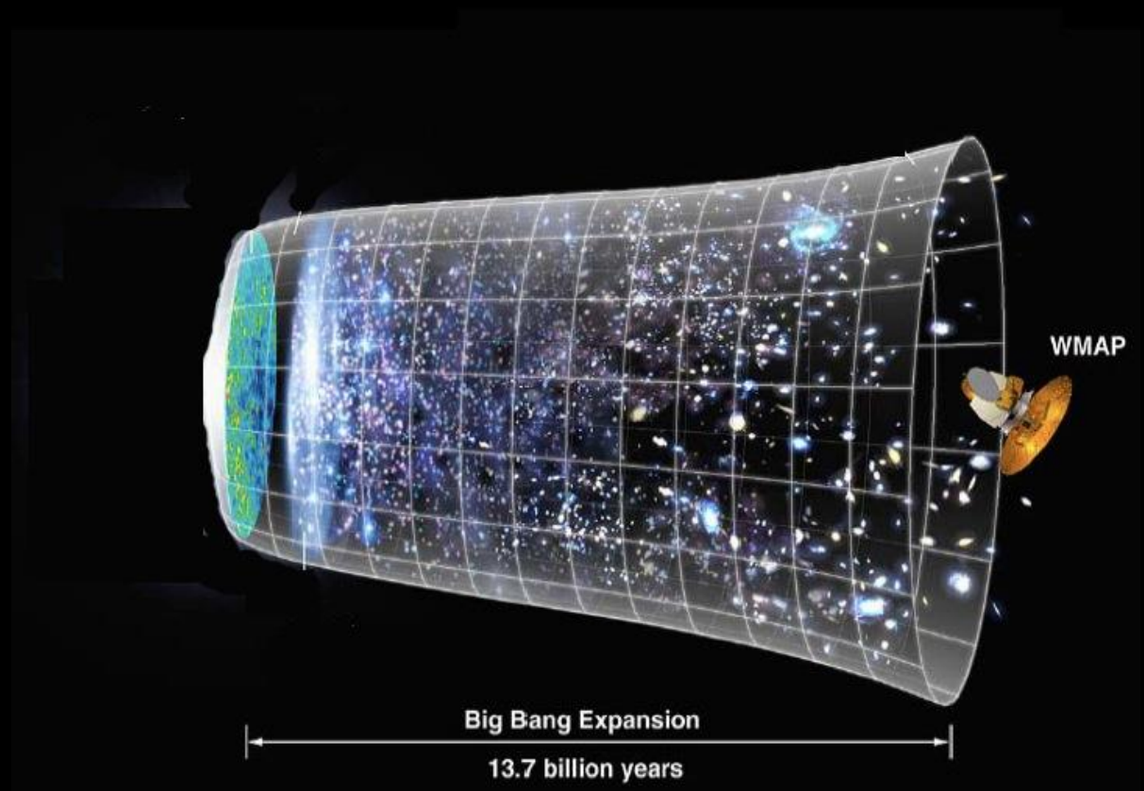
Allgemeine Relativitätstheorie



+



=

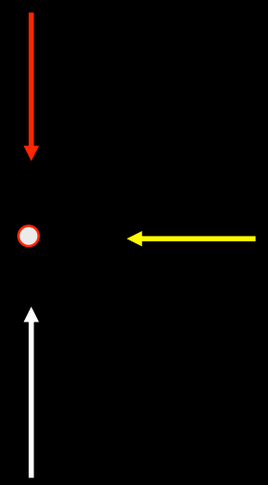


‘Standard-Modell der Kosmologie”

Universe

Der Anfang

Energie > 10^{72} J



Was sind hier die Naturgesetze ?

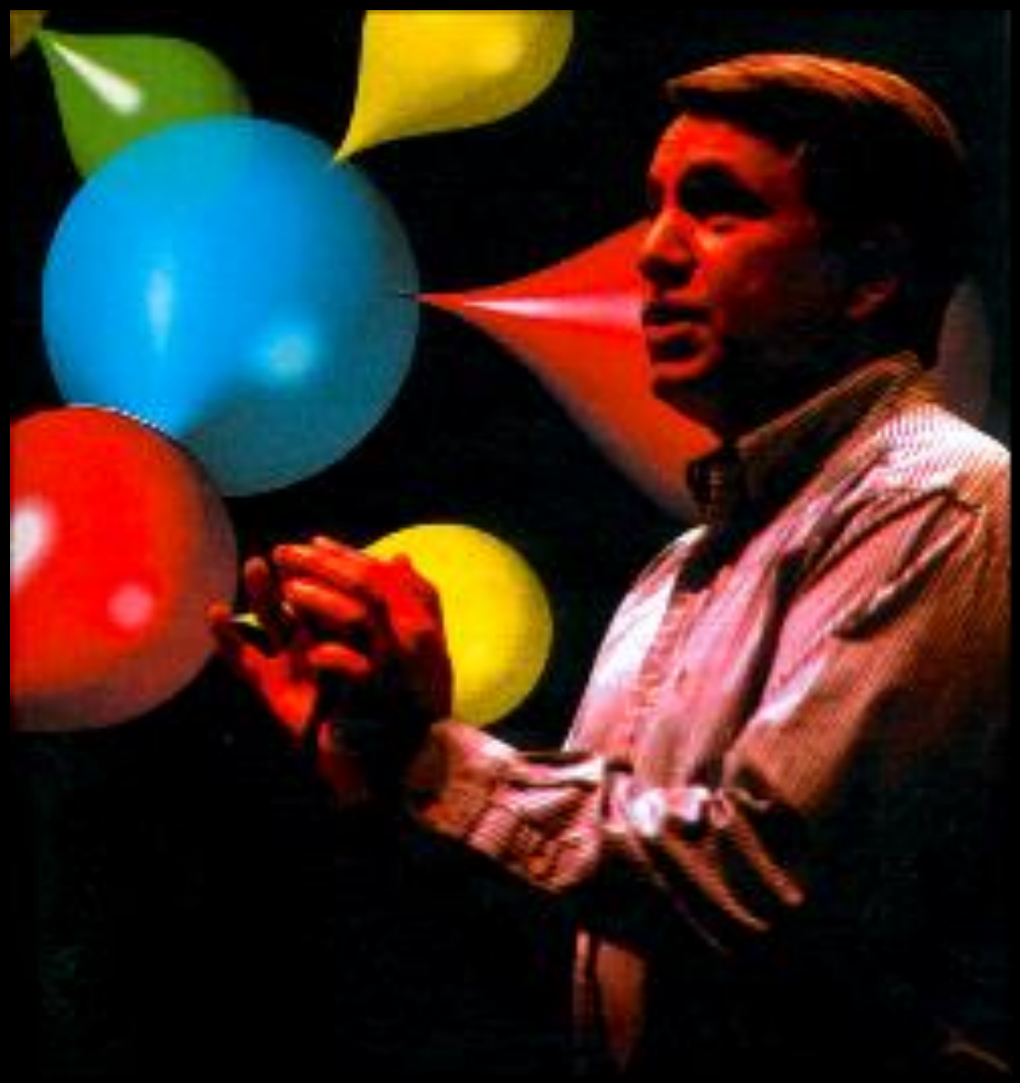
Grösse des heute sichtbaren Universums x 100

At t = 1/1,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 s

Universe

Guth/Linde (1980)

Der Beginn des ‘Big Bang’: die ‘Inflation’ des Raums

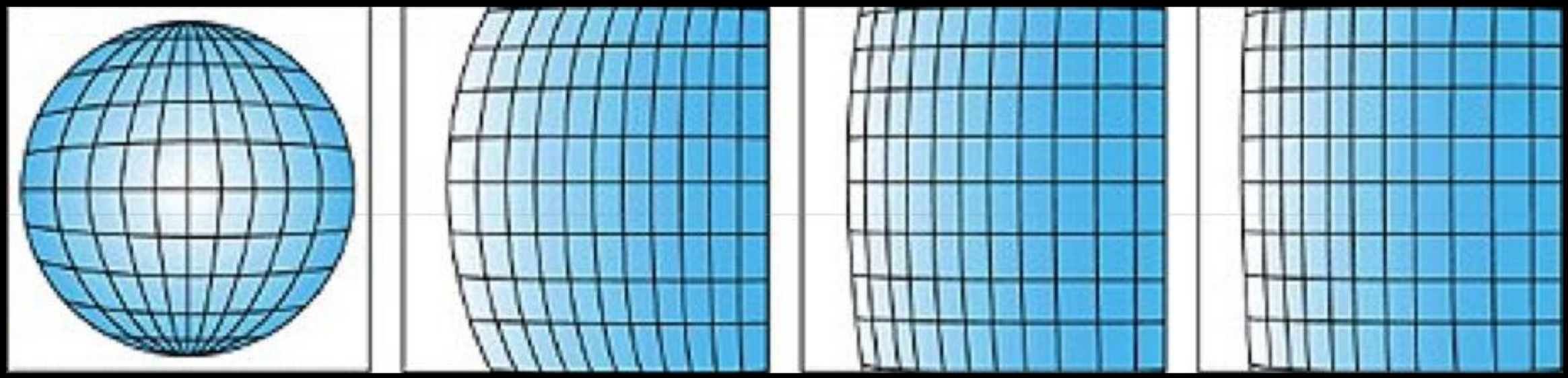


Exponentielle Ausdehnung (‘Vakuumenergie = kosmologische Konstante”):
Pro Zeitintervall von 10^{-35} s: Verdopplung des Radius des Universums

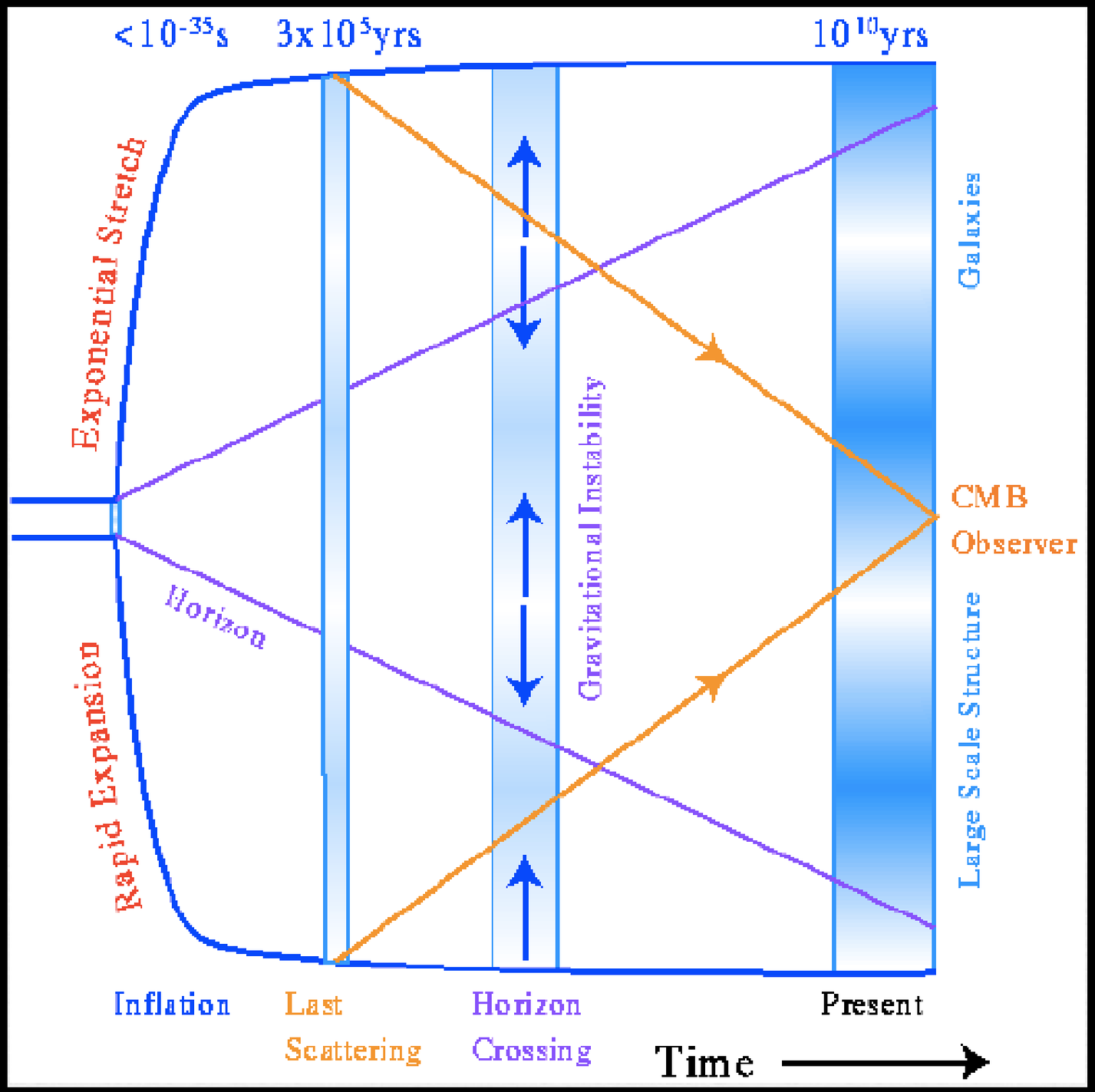
INFLATION

Alter: 10^{-32} sec, T= 10^{10} GeV

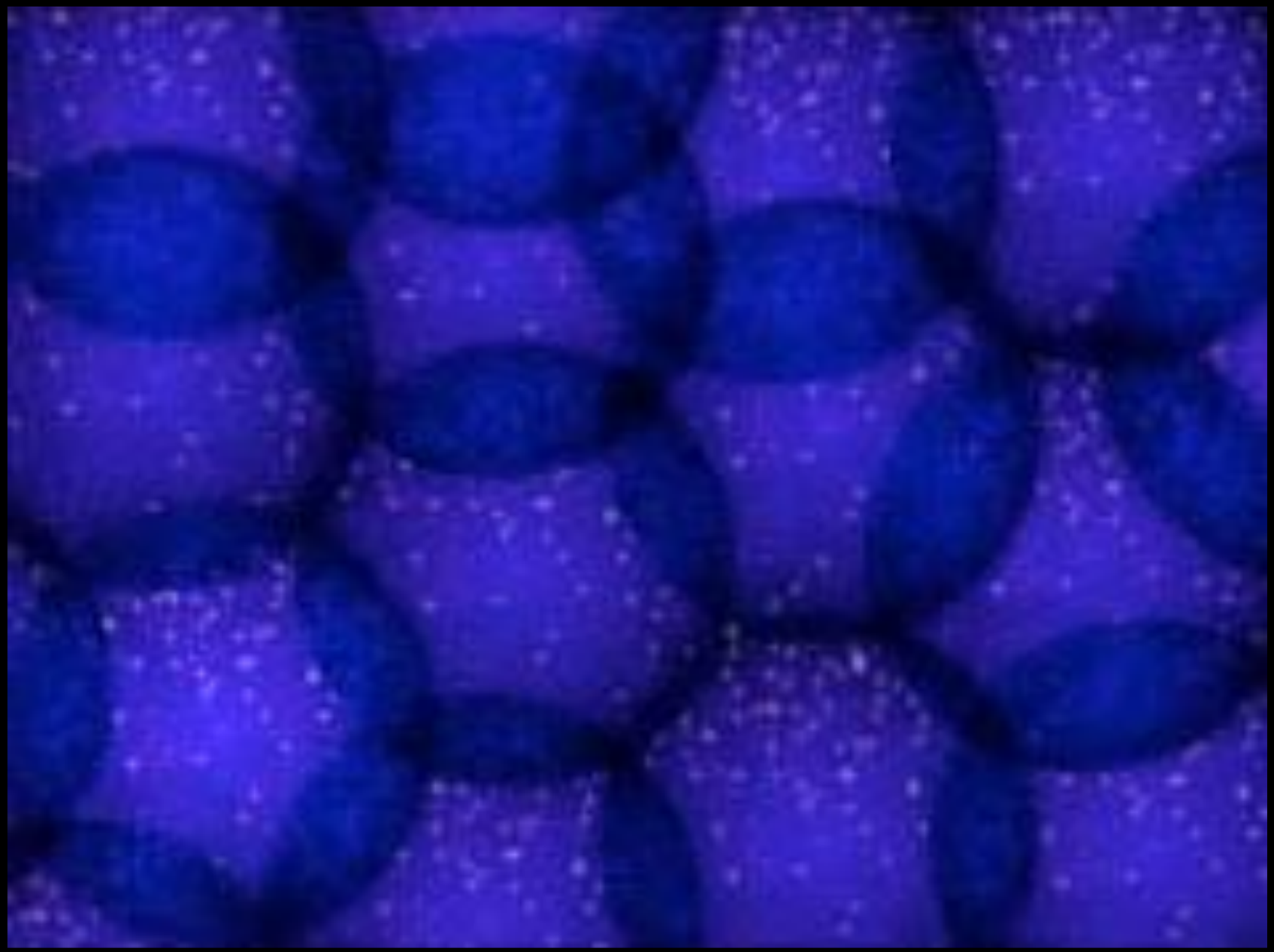
Ultraschnelle Expansion um einen Faktor 10^{20} - 10^{30}



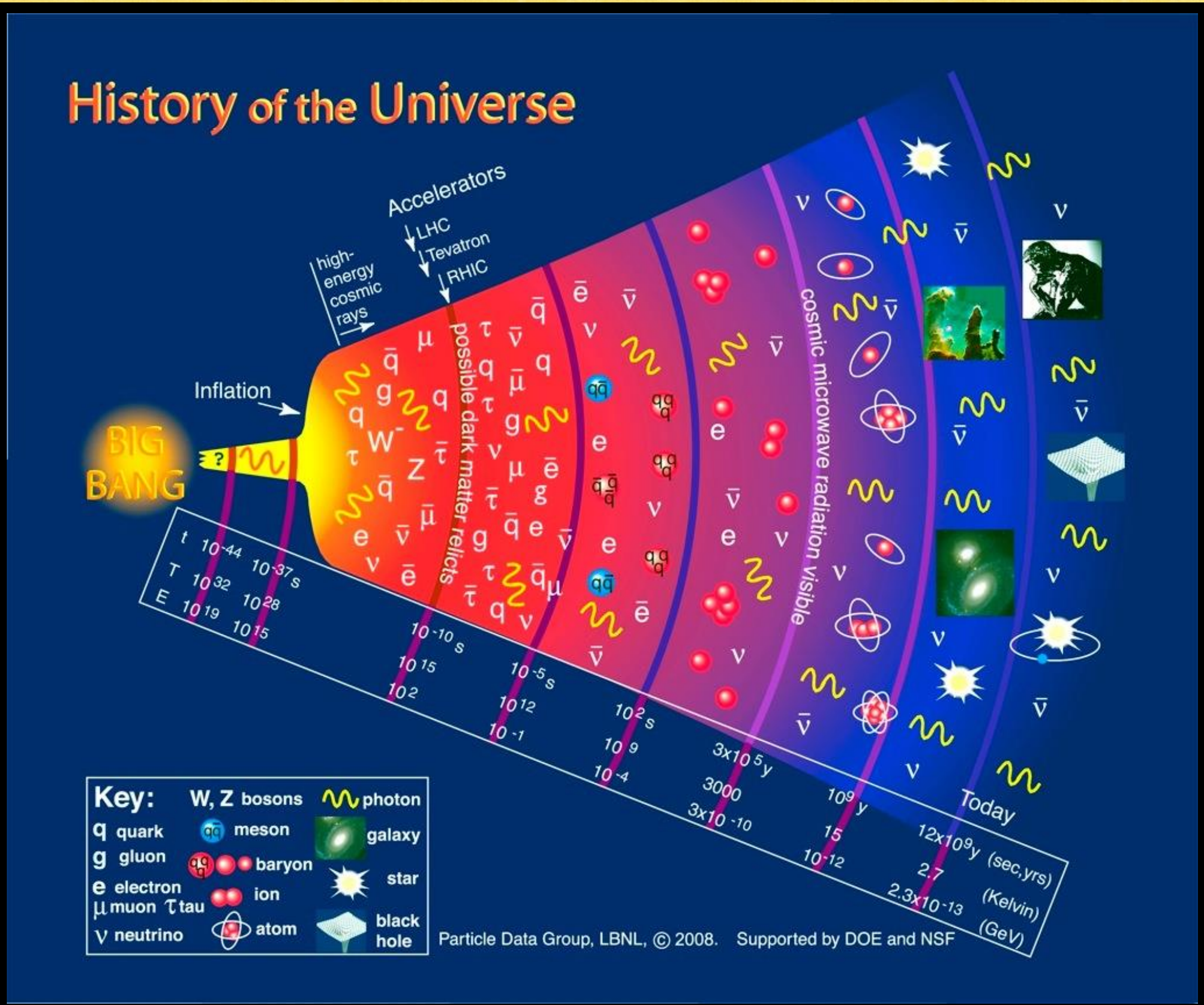
Die ‘Falten’ des Raums werden glatt gebügelt


<10-35s
3x105yrs
1010yrs
Exponential Stretch
Rapid Expansion
Horizon
Gravitational Instability
Galaxies
CMB
Observer
Large Scale Structure
Inflation
Last
Scattering
Horizon
Crossing
Present
Time

Multiversum ?

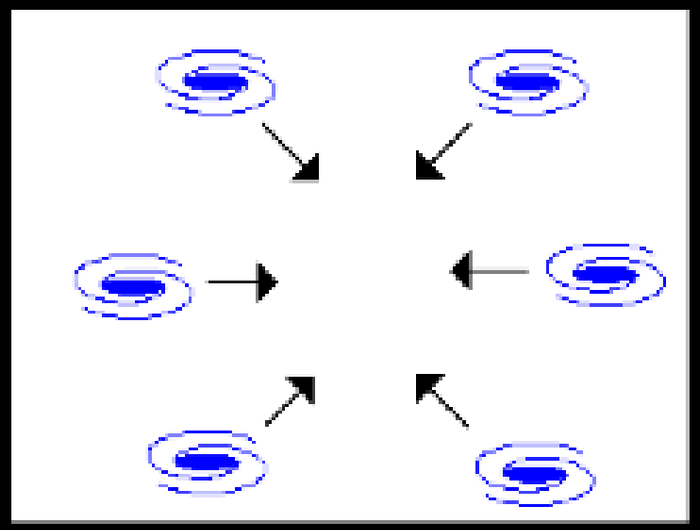


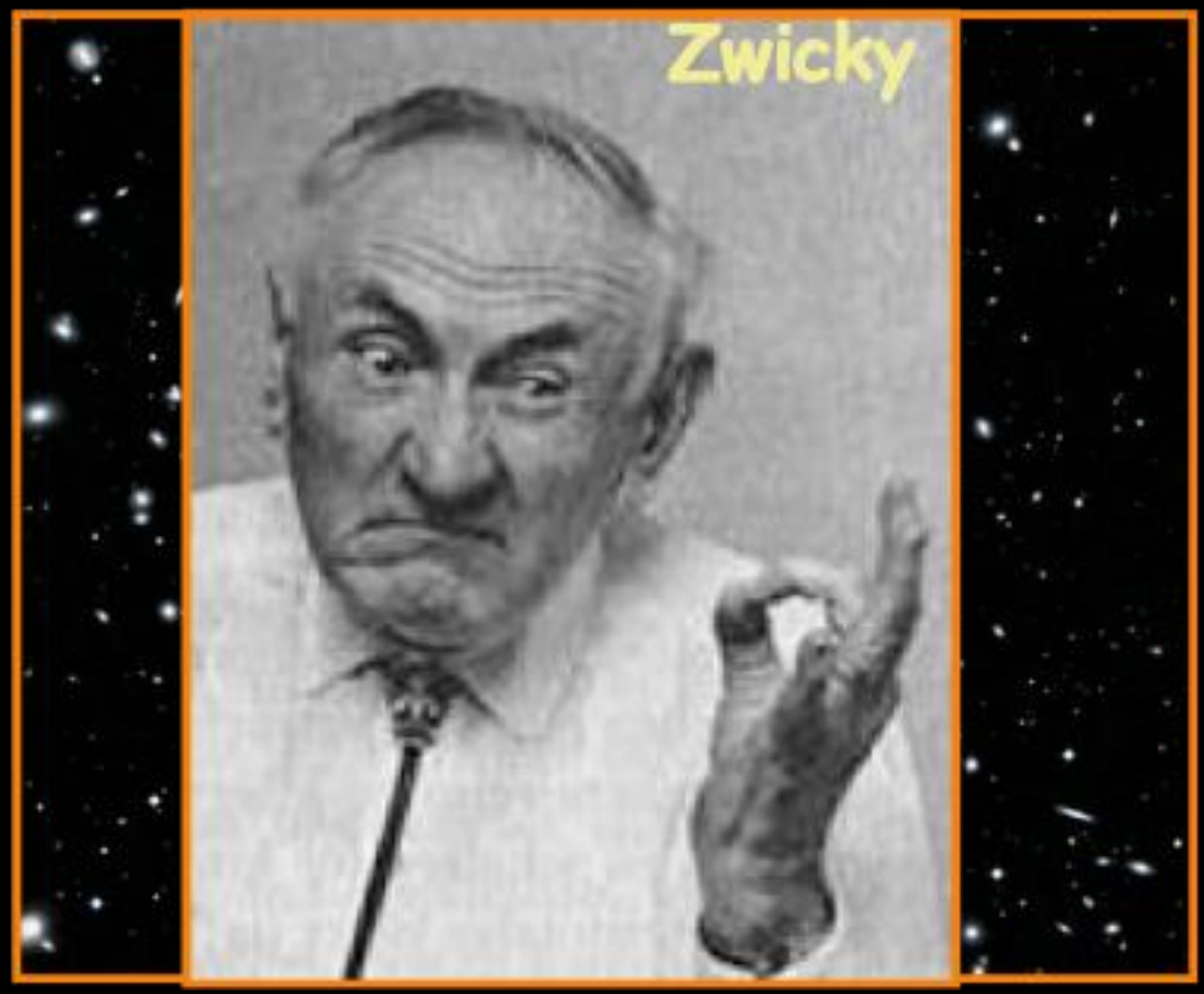
Geschichte des Universums



Dunkle Materie

Bewegung von Galaxienhaufen (1933)



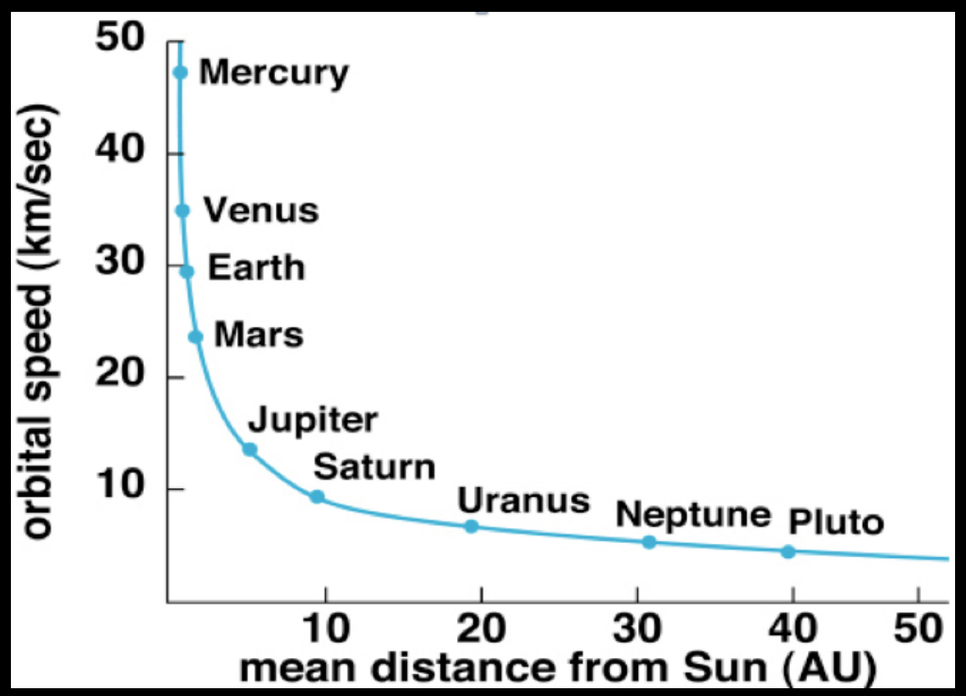


Mass of luminous matter
=
10%
Gravitational mass

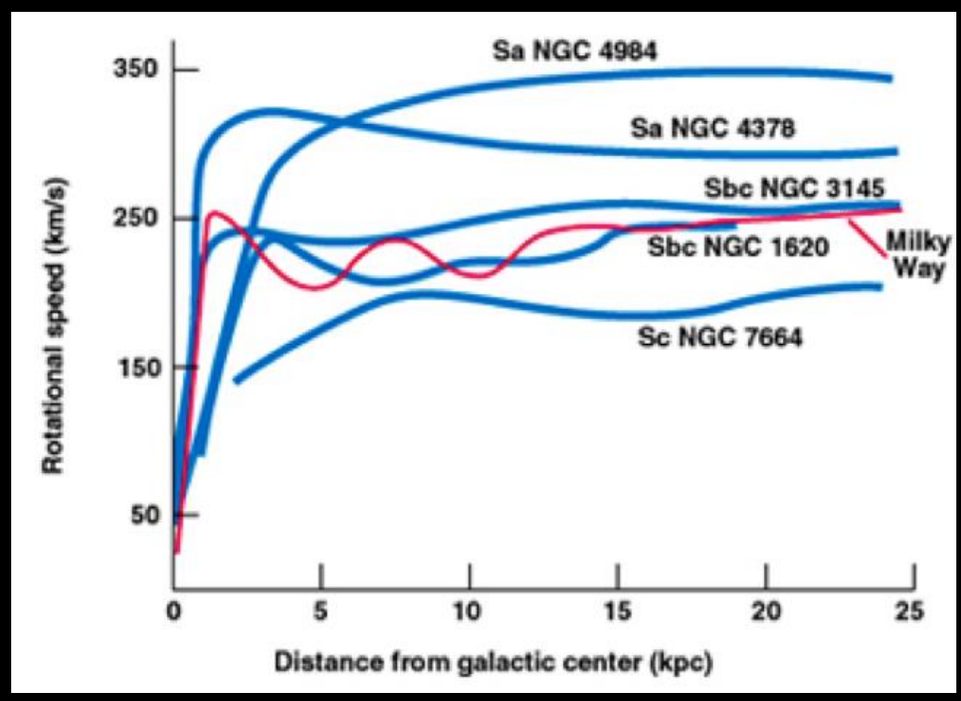
Dunkle Materie

Rotationskurven von Galaxien

Orbital speed vs Distance from center
(Kepler - expect $r^{-1/2}$ dependence)



Zentralmasse (Sonne)



Galaxien

Dunkle Materie

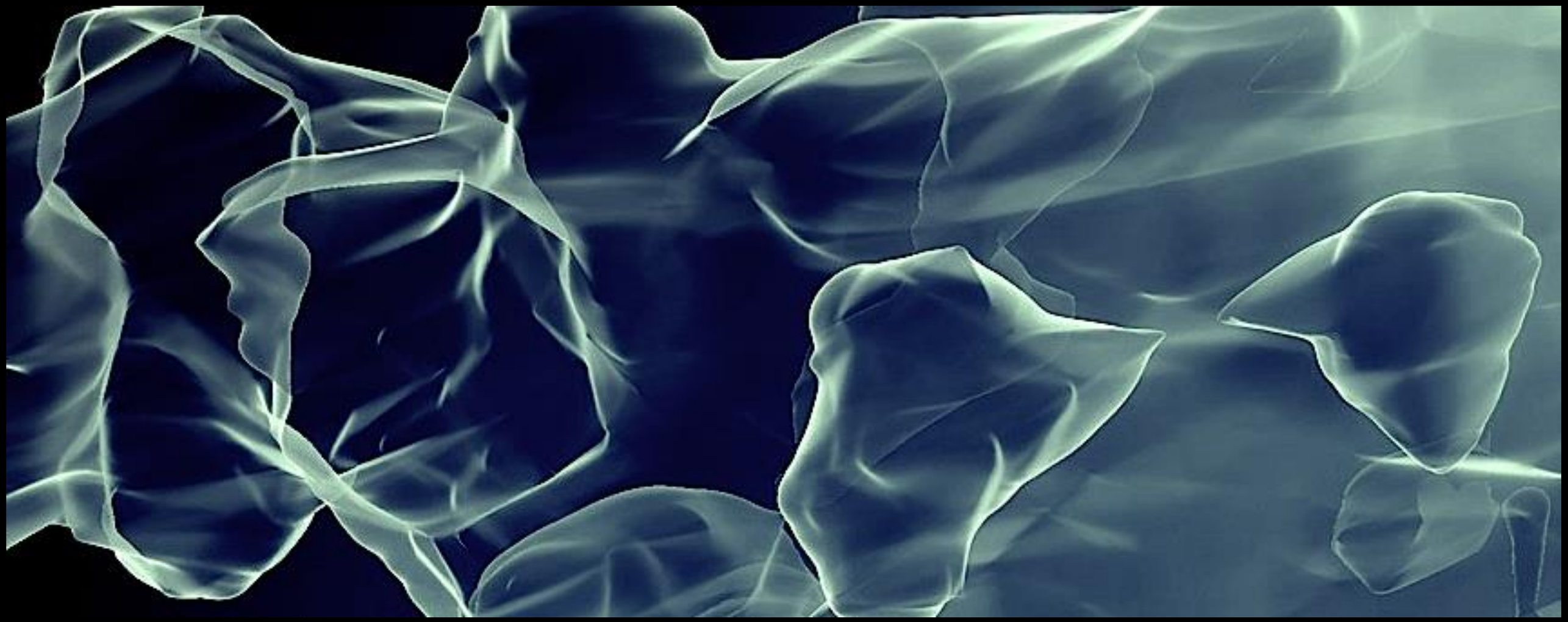
Gravitationslinsen

Gravitational Lens in Abell 2218 HST • WFPC2

PR95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

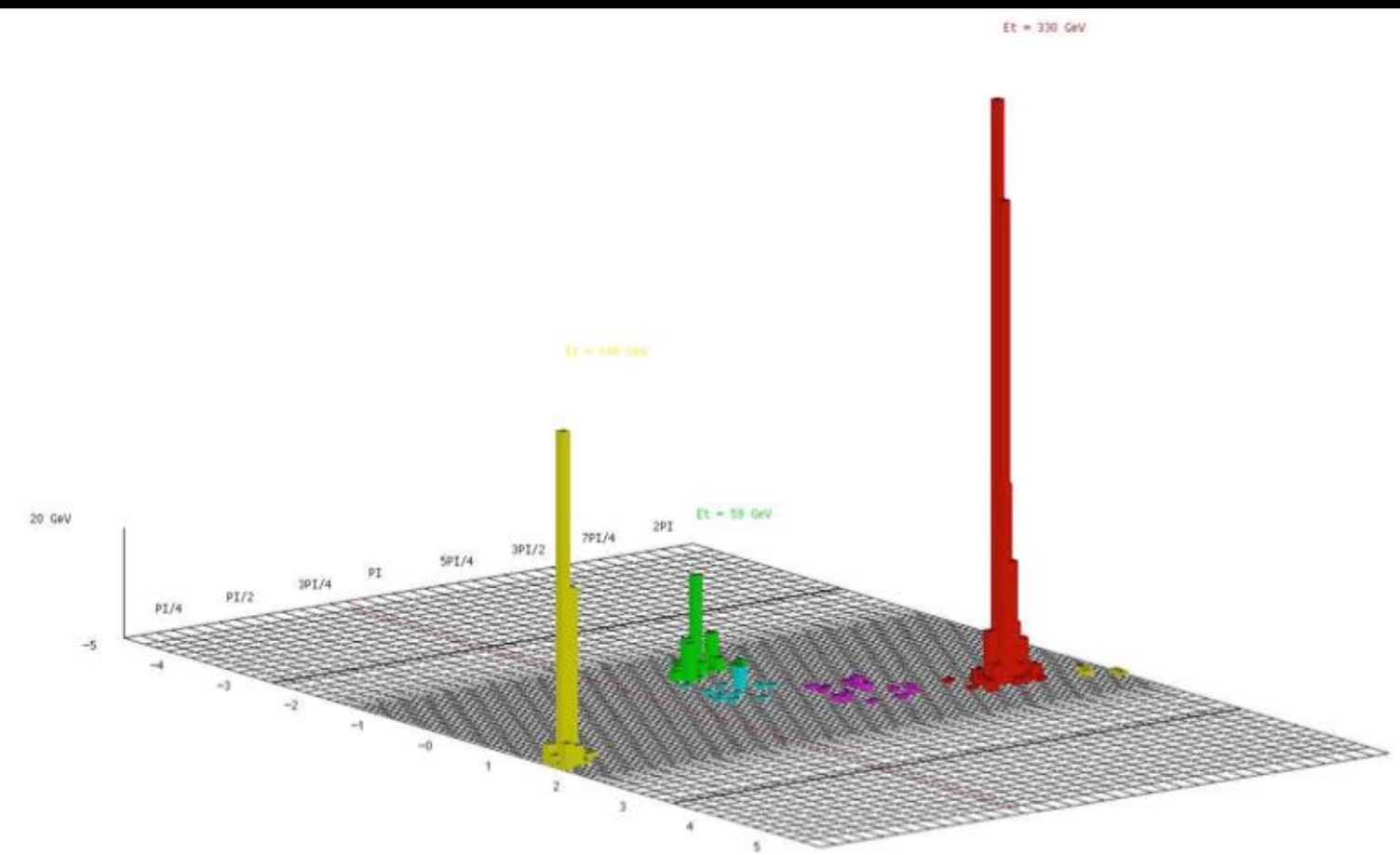
Dunkle Materie

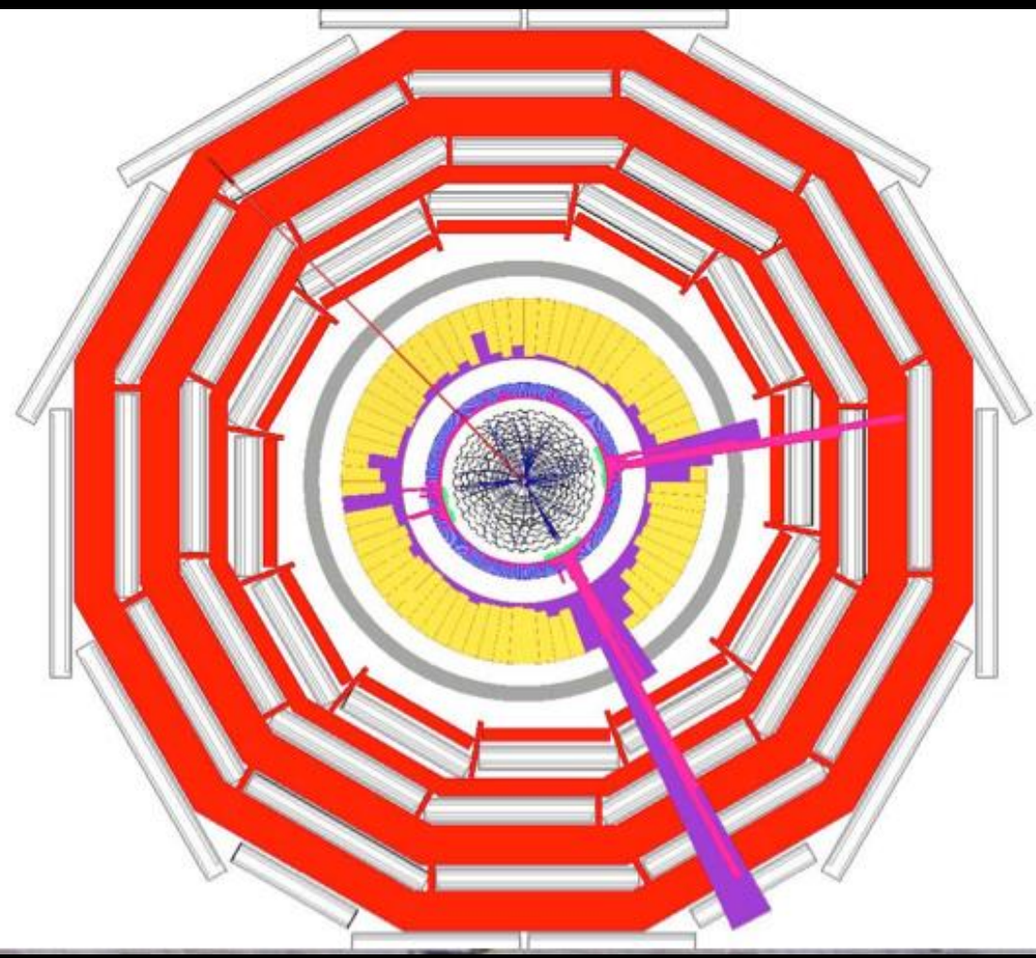
Verteilung der dunklen Materie im Universum



Dunkle Materie

Signatur dunkler Materie in LHC Experimenten





Energie - Impuls - Asymmetrie

Dunkle Energie

Supernova vom Typ Ia

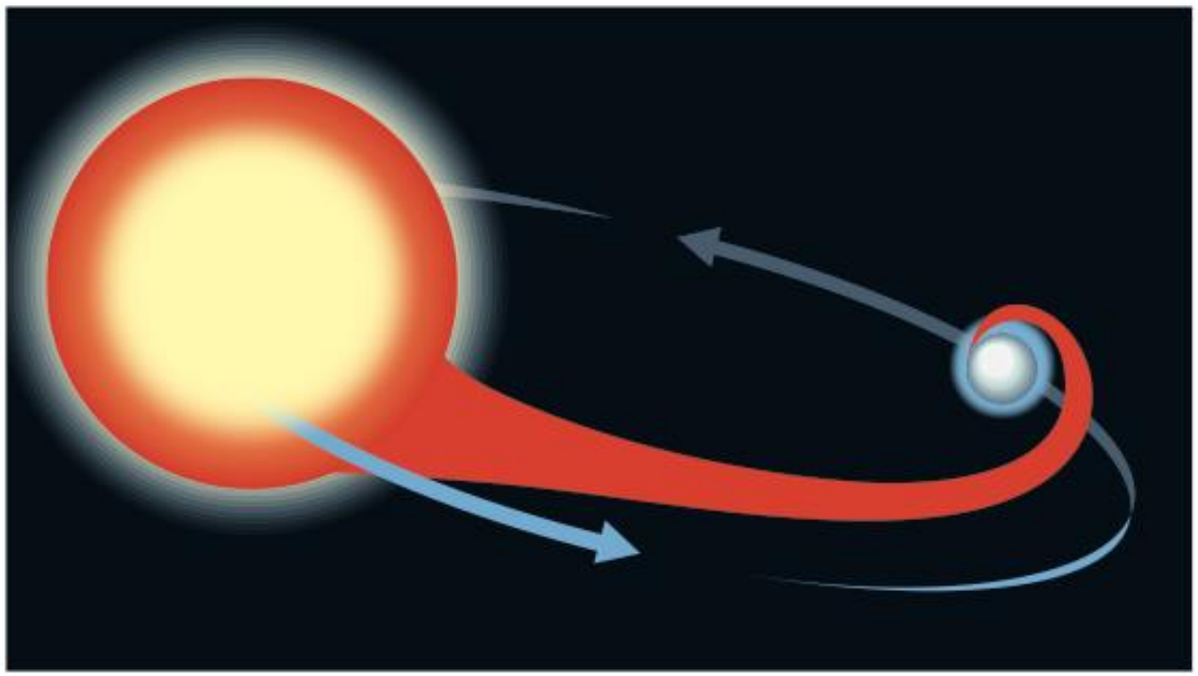
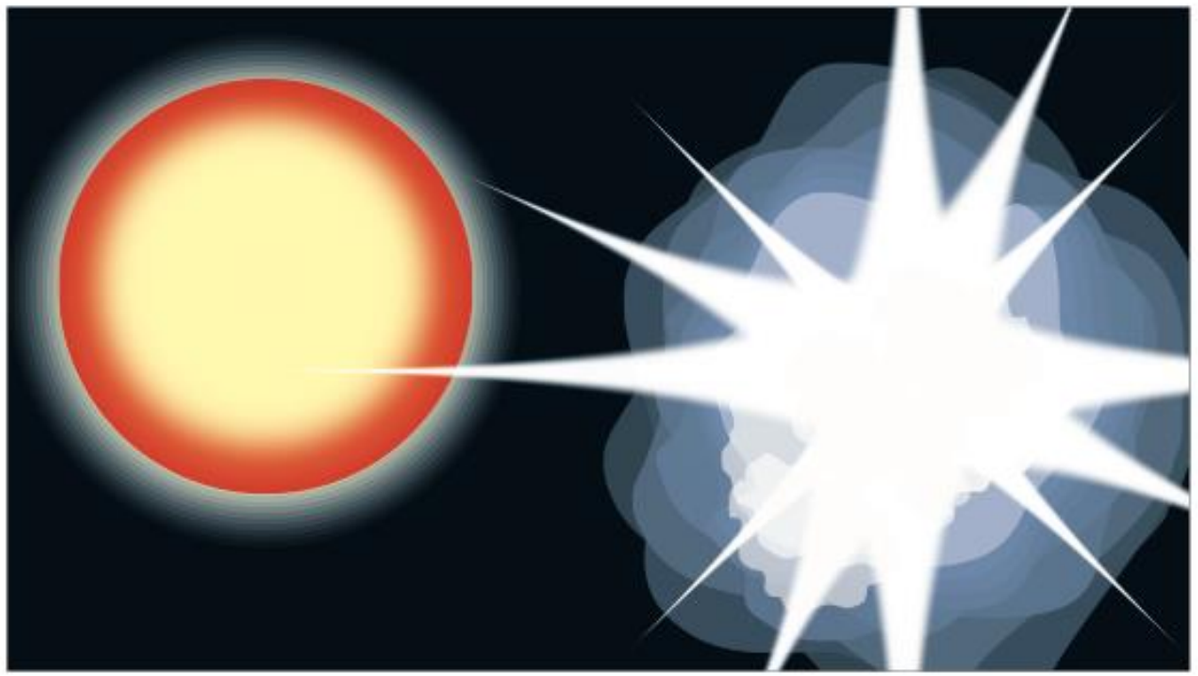


Figure 3. Supernova explosion. A white dwarf steals gas from its neighbour using its gravity.



When the white dwarf has grown to 1.4 solar masses, it explodes as a type Ia supernova.

Dunkle Energie

SN 1a: sehr gut definierte Luminosität "Standard-Kerzen" im Universum

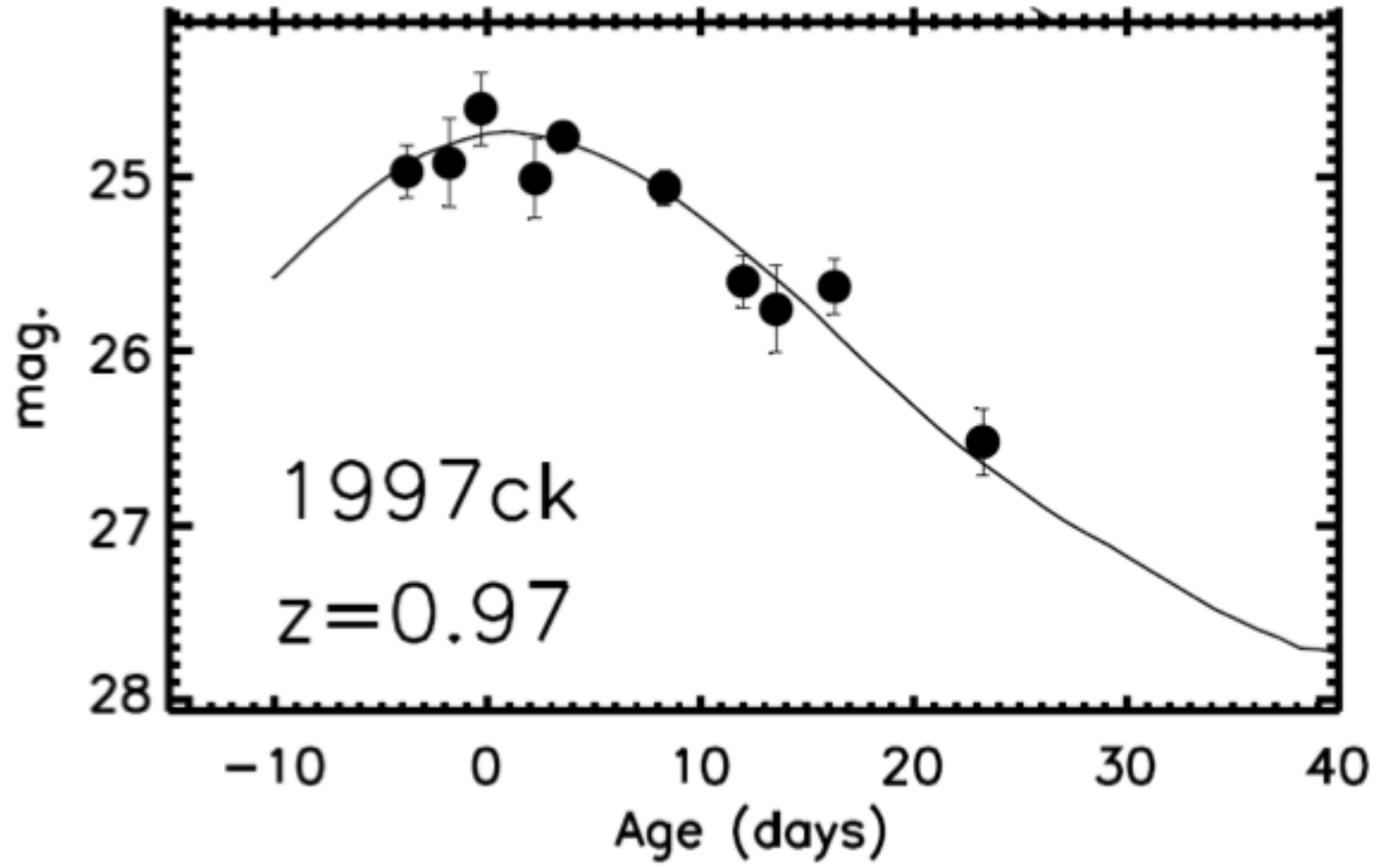
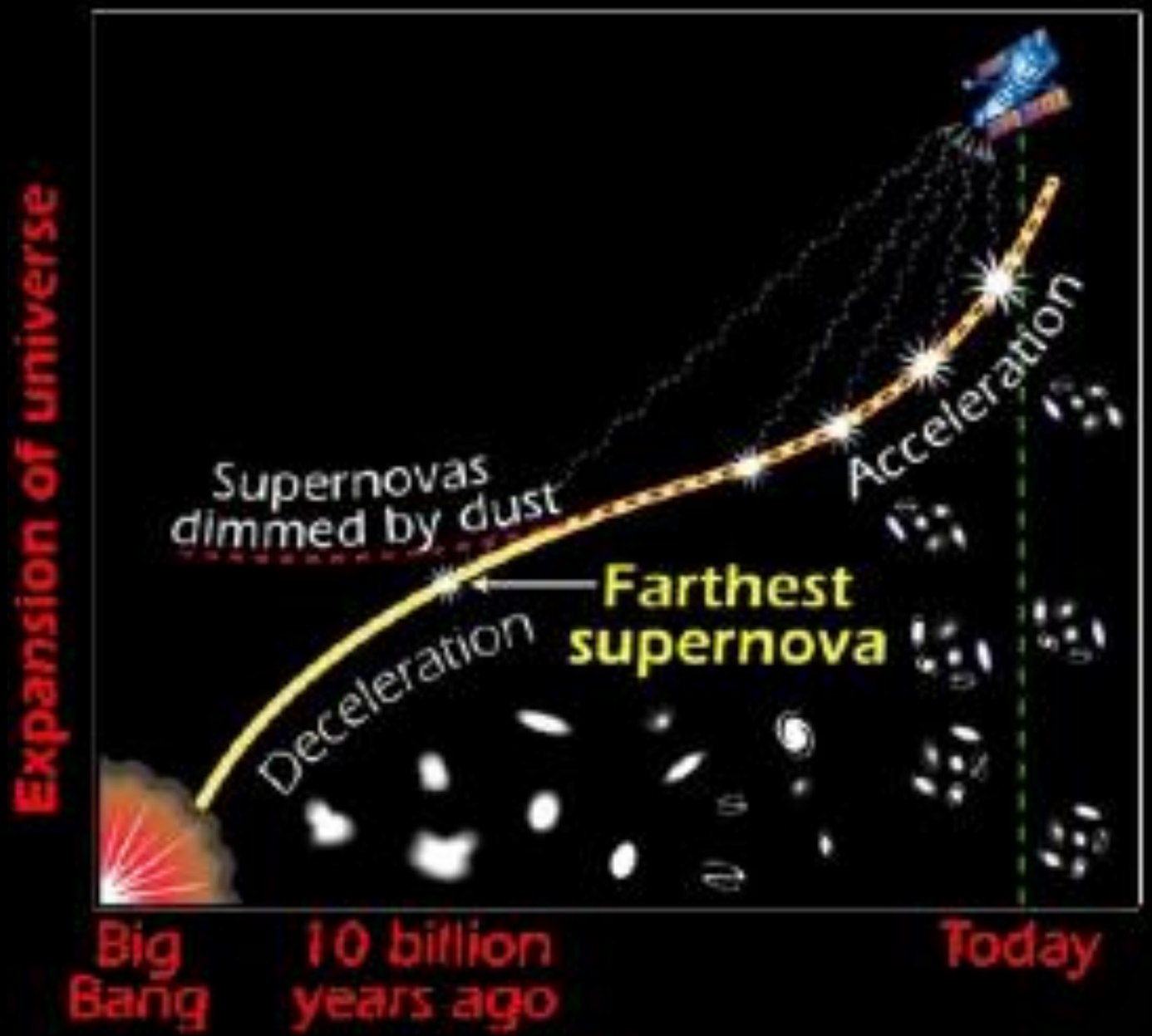


Figure 1. One of the high redshift supernovae of type Ia for which the HZT collaboration [27] could measure the magnitude, i.e., the luminosity, both before and after the peak luminosity.

Dunkle Energie

Ergebnis: das Universum beschleunigt seine Expansion



Kosmologie des 21. Jahrhunderts

Was ist dunkle Materie?

- ‘Weakly Interacting Massive Particles’ (WIMPs) ?
- Strukturbildung !
- Galaxien, Galaxienhaufen, Gravitationslinsen?

Was ist dunkle Energie?

- Verbindung mit Vakuumenergie (Higgs?)
- Expansion des Universums?
- Kosmologische Konstante?