

# 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  $\sim r^2$

Die Lichtintensität nimmt ab mit  $\sim 1/r^2$

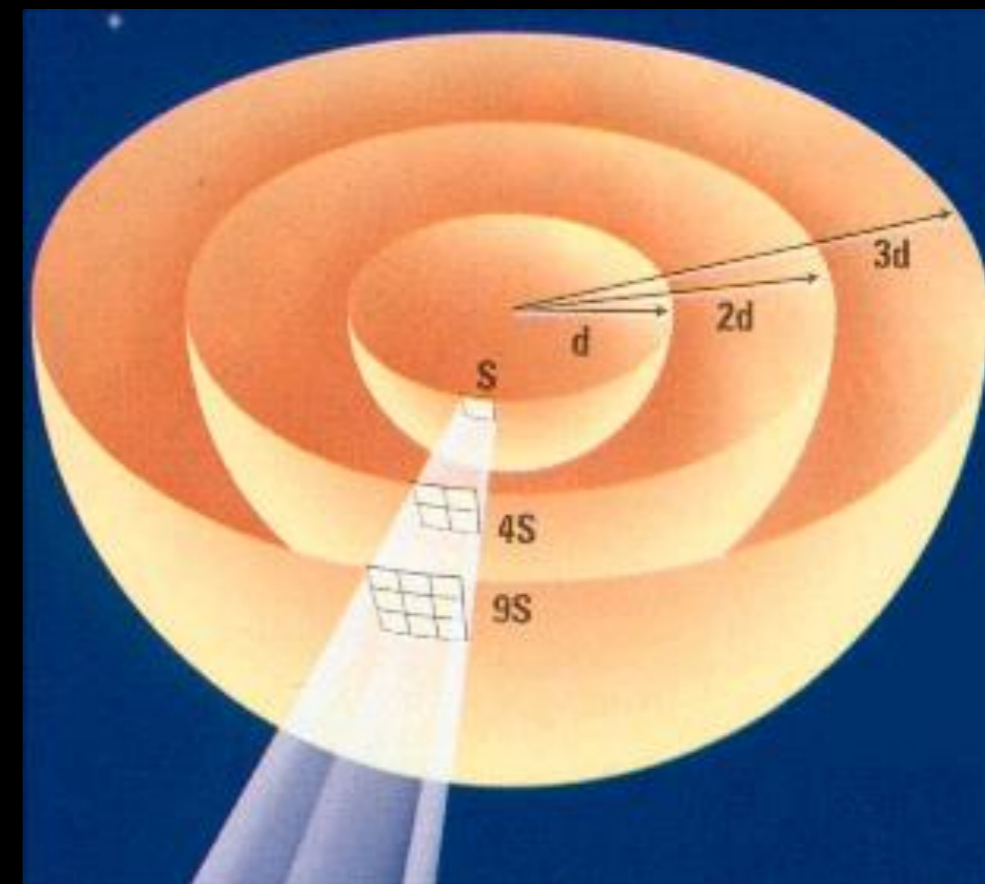
Beitrag jeder Schale zur Gesamtintensität = constant

Konsequenz:

Das Universum ist nicht unendlich alt, oder ...

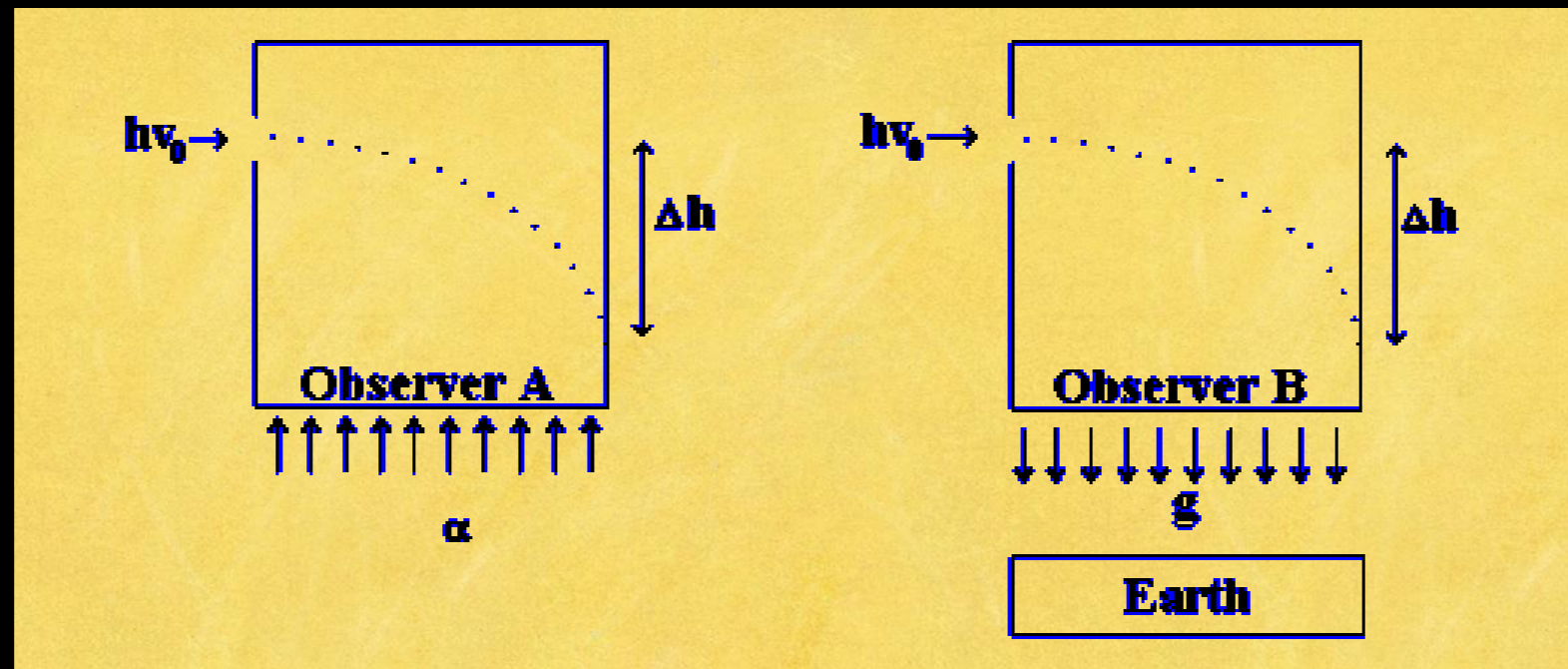
Das Universum ist nicht unendlich gross, oder...

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

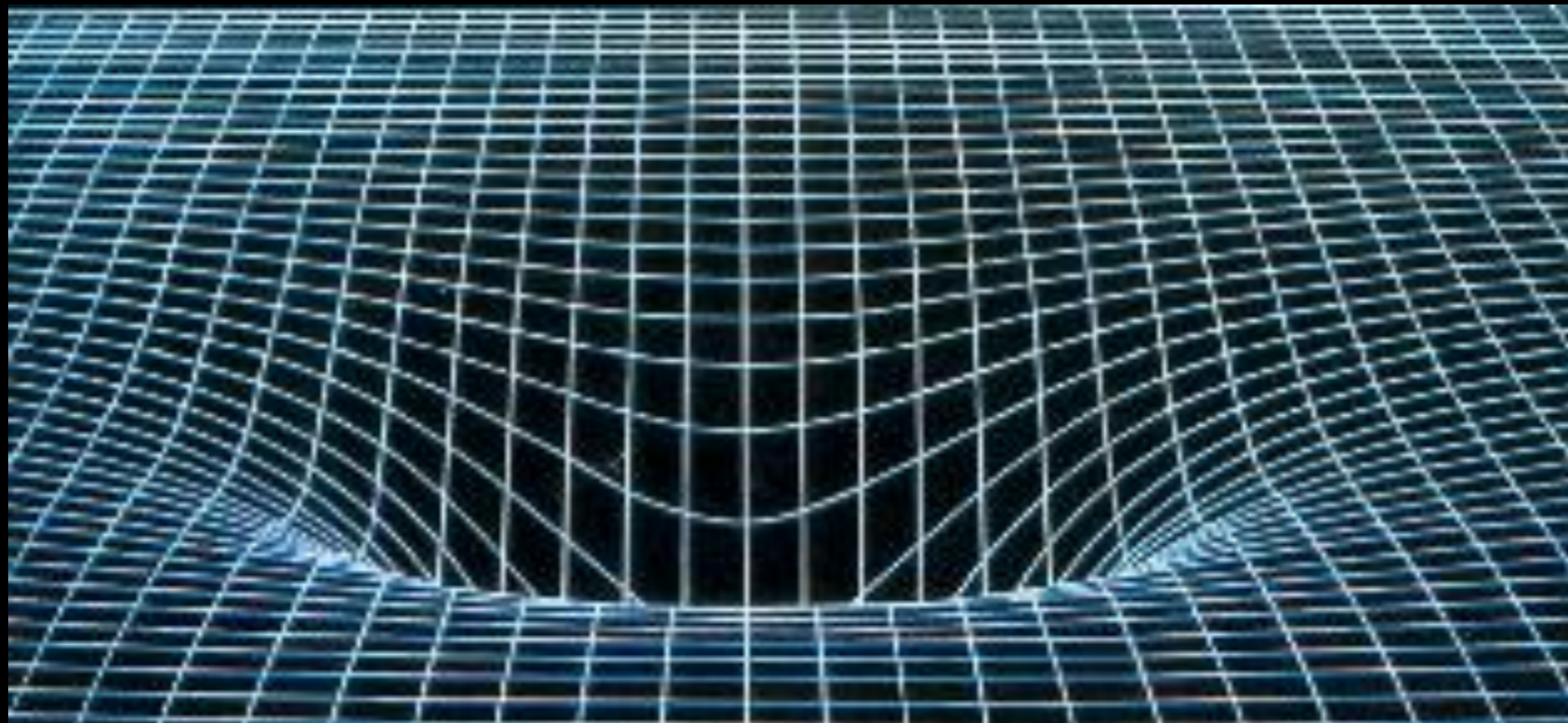
Albert Einstein (1912-15) :  
Allgemeine Relativitätstheorie

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

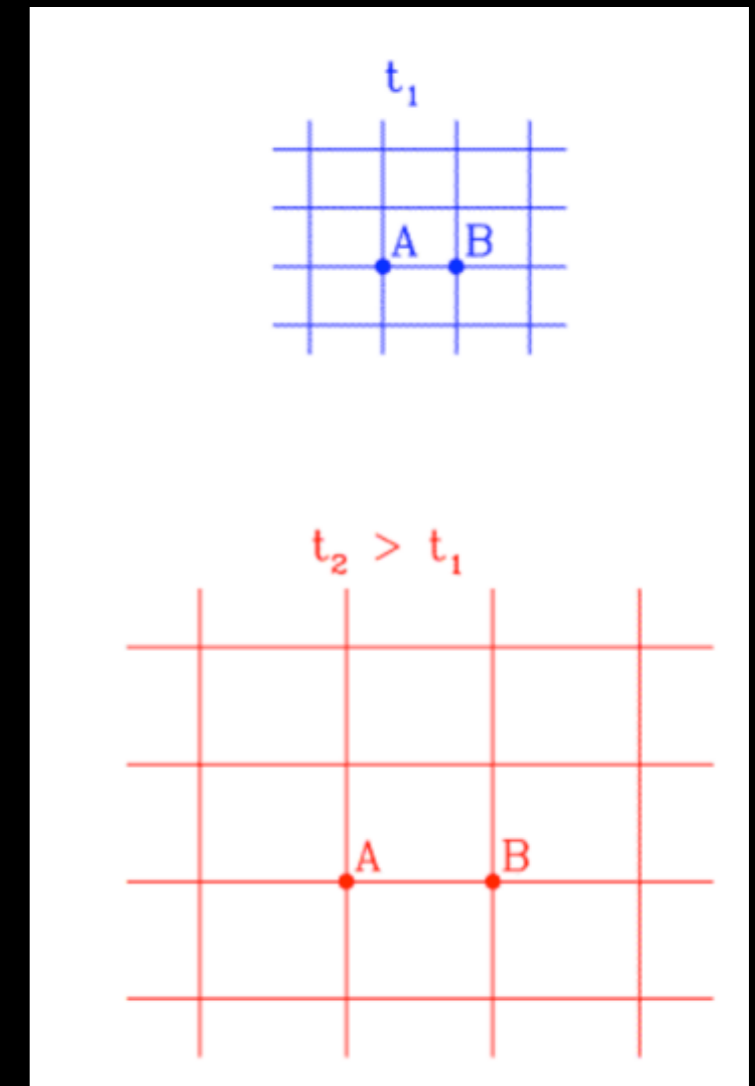
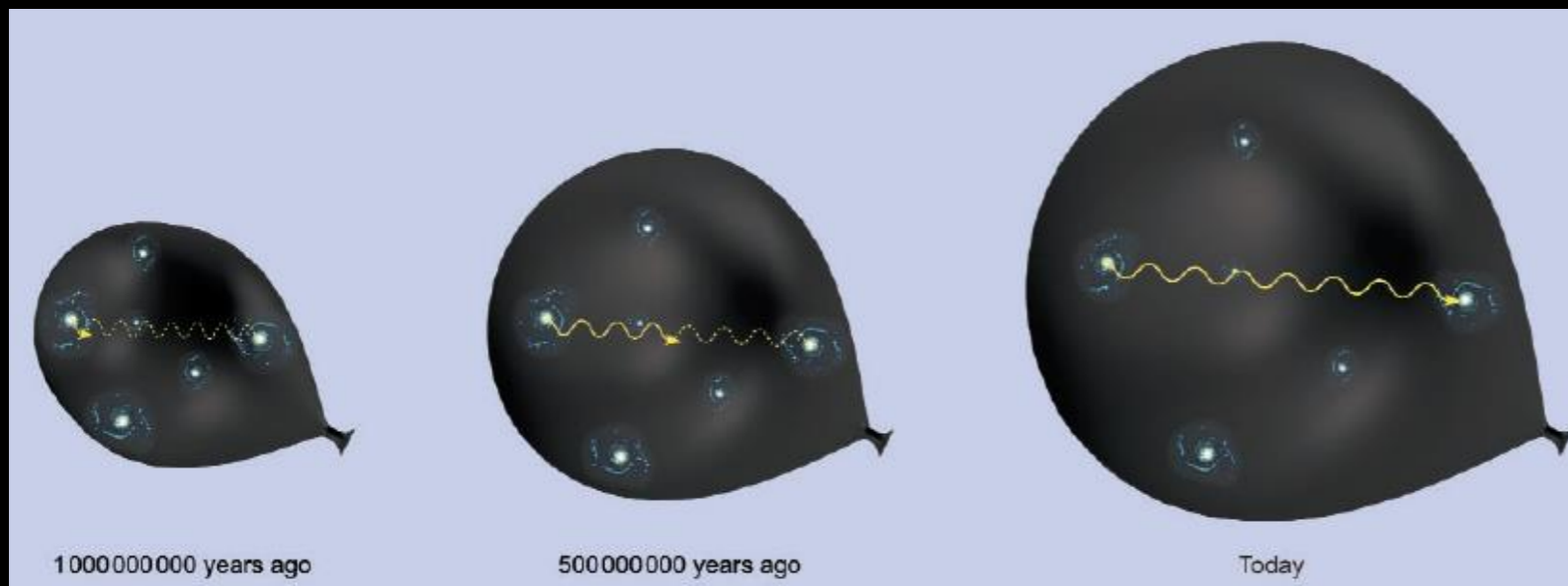
## Friedmann:

Einstein-Gleichungen erlauben nur einen kontrahierenden oder expandierenden Raum

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

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

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



# 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



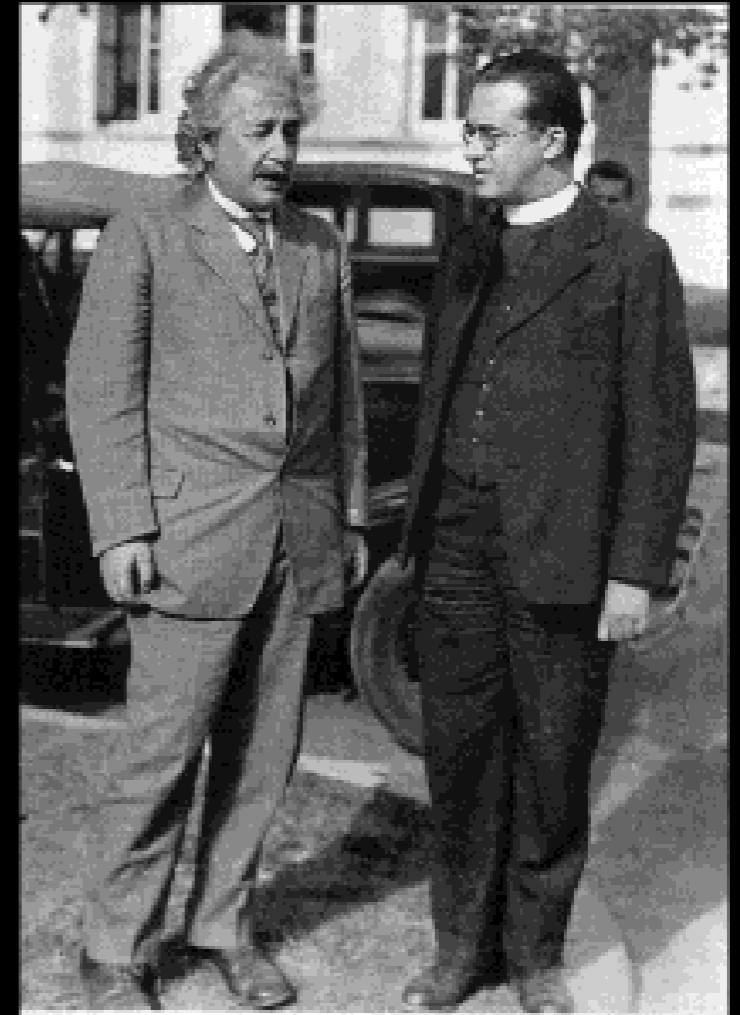
# Hatte das Universum einen Anfang ?

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

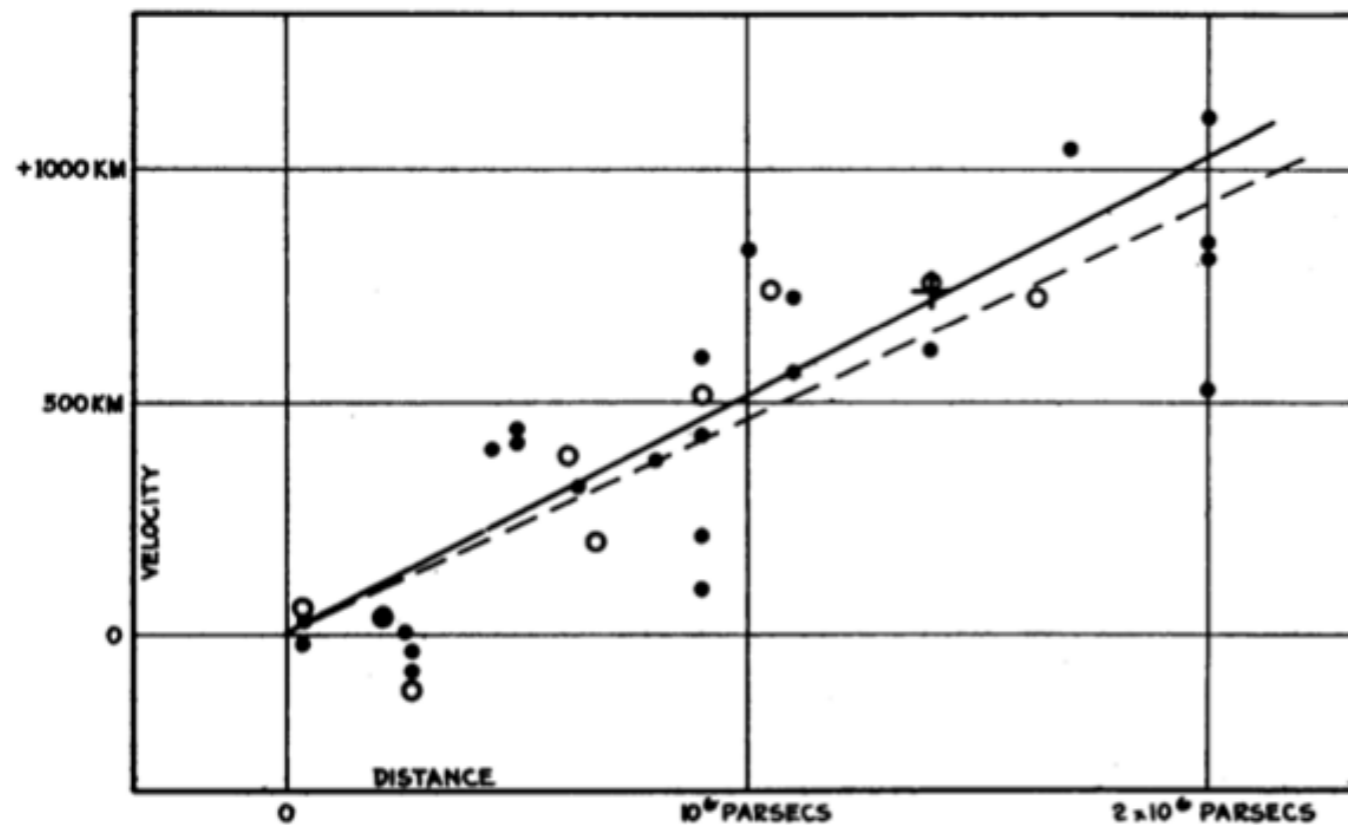
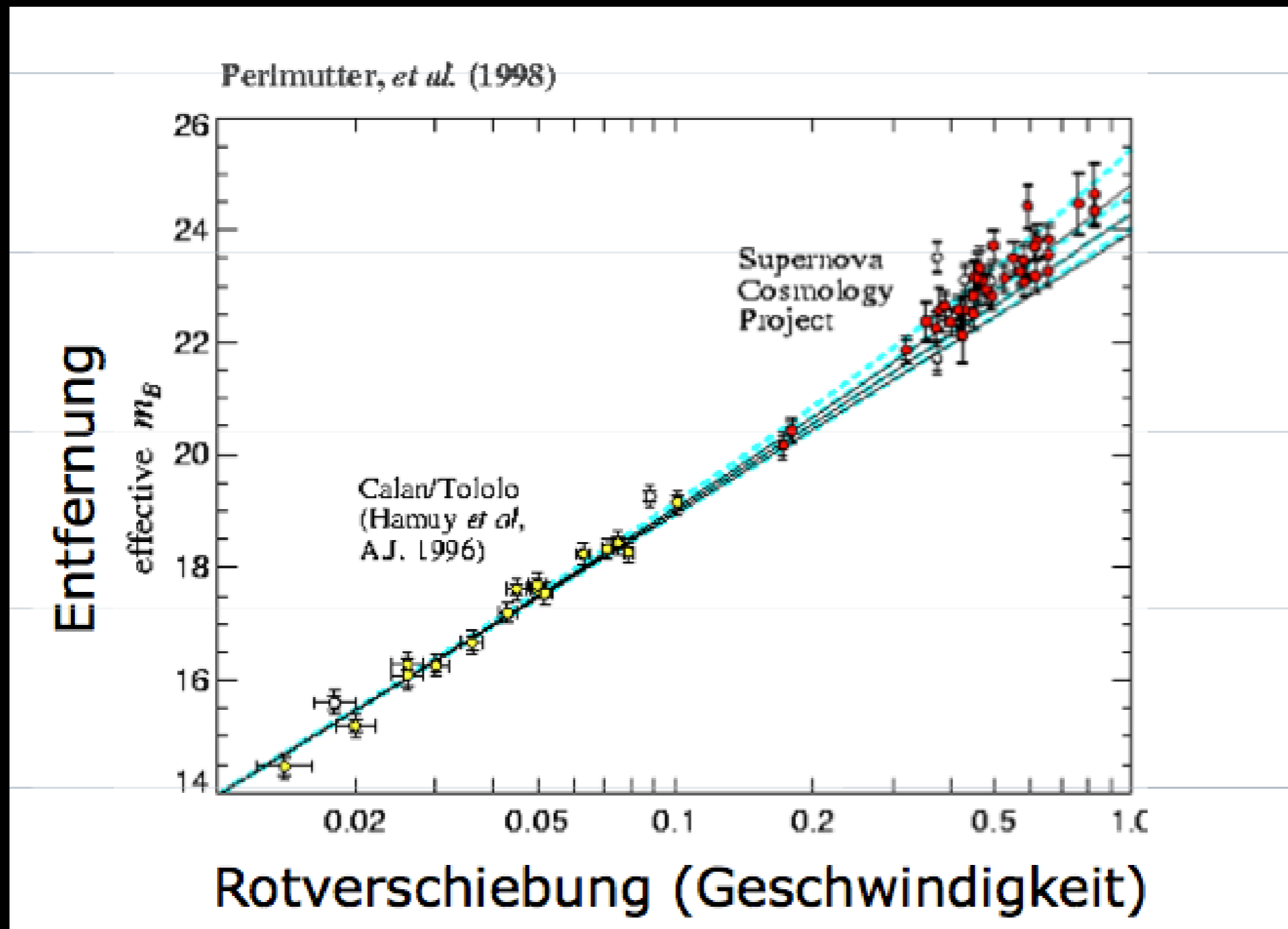


FIGURE 1

Rotverschiebung proportional  
zur Distanz der Galaxien

$H_0 = 530 \text{ km/s / Mpc} !!$  (Alter des Universums:  $\sim 2 \text{ Mia Jahre} ??$ )

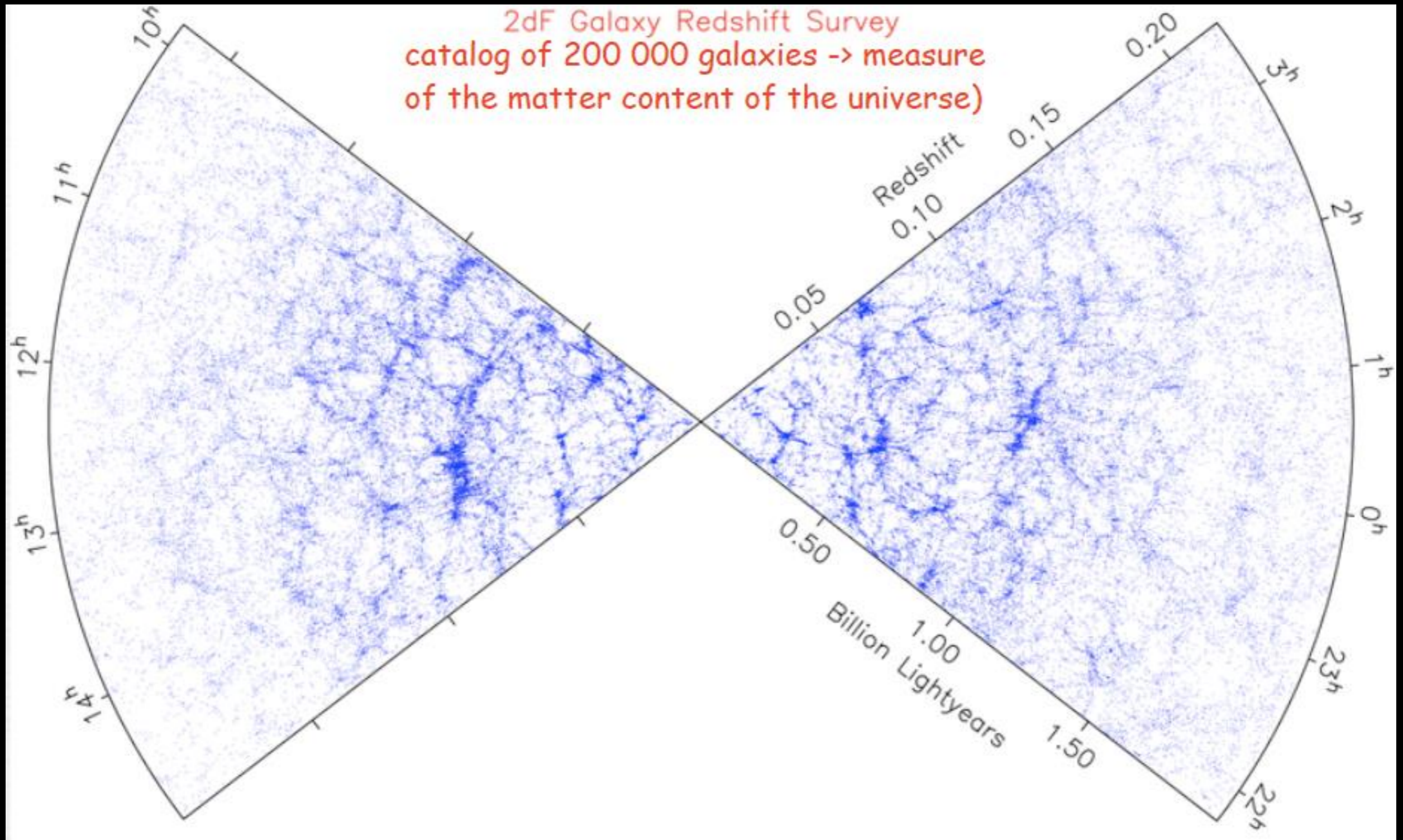
# Der heutige Wert der Hubble-”Konstanten”



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

Hubble age ( $H^{-1}$ )  $\sim 13.4$  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

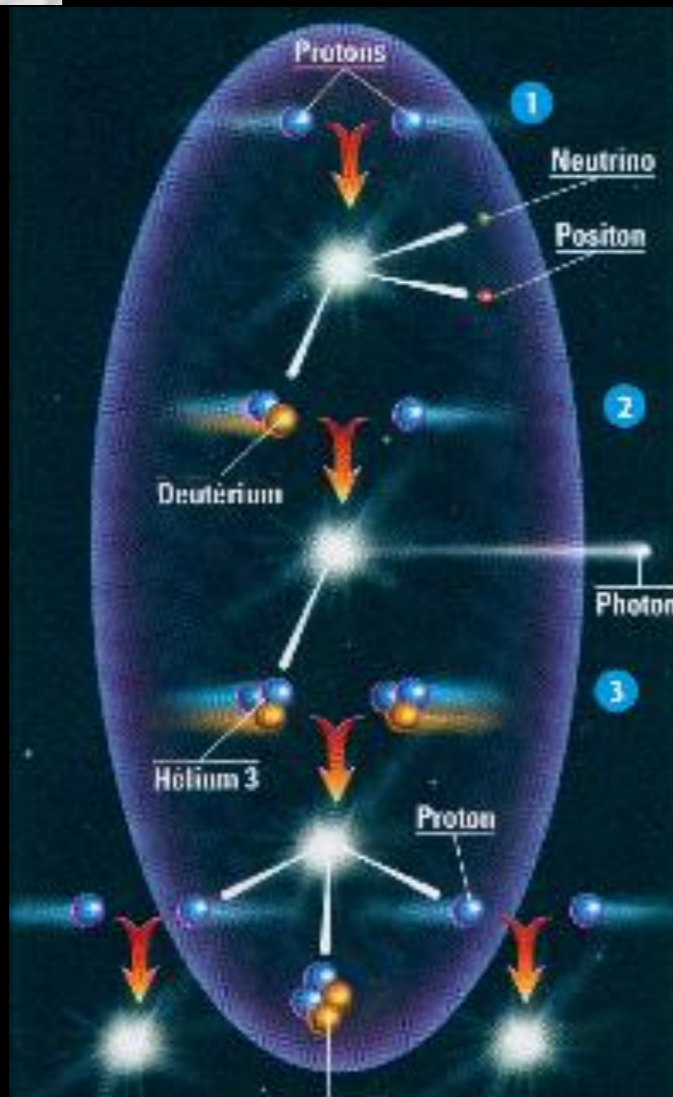
Sonne ~ 4.7 Milliarden Jahre

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



George Gamov

Das Universum entstand 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

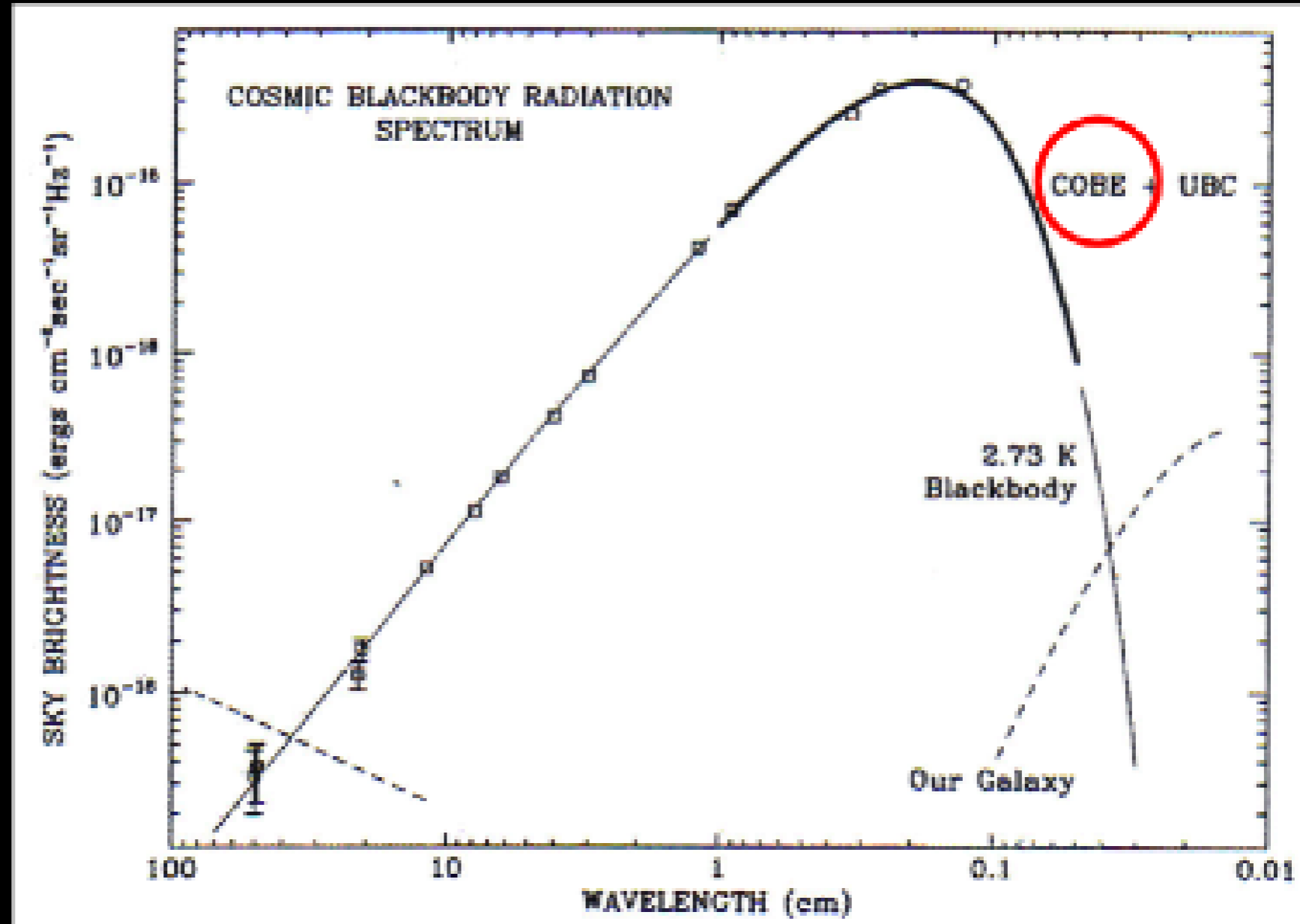
\* 'Big Bang' war ein Begriff von Fred Hoyle um Gamov's Modell lächerlich zu machen.

# Universum

## Die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung (1963)



Penzias and Wilson



The Universe is a perfect 'black body' with  $T = 2.73 \text{ K}$

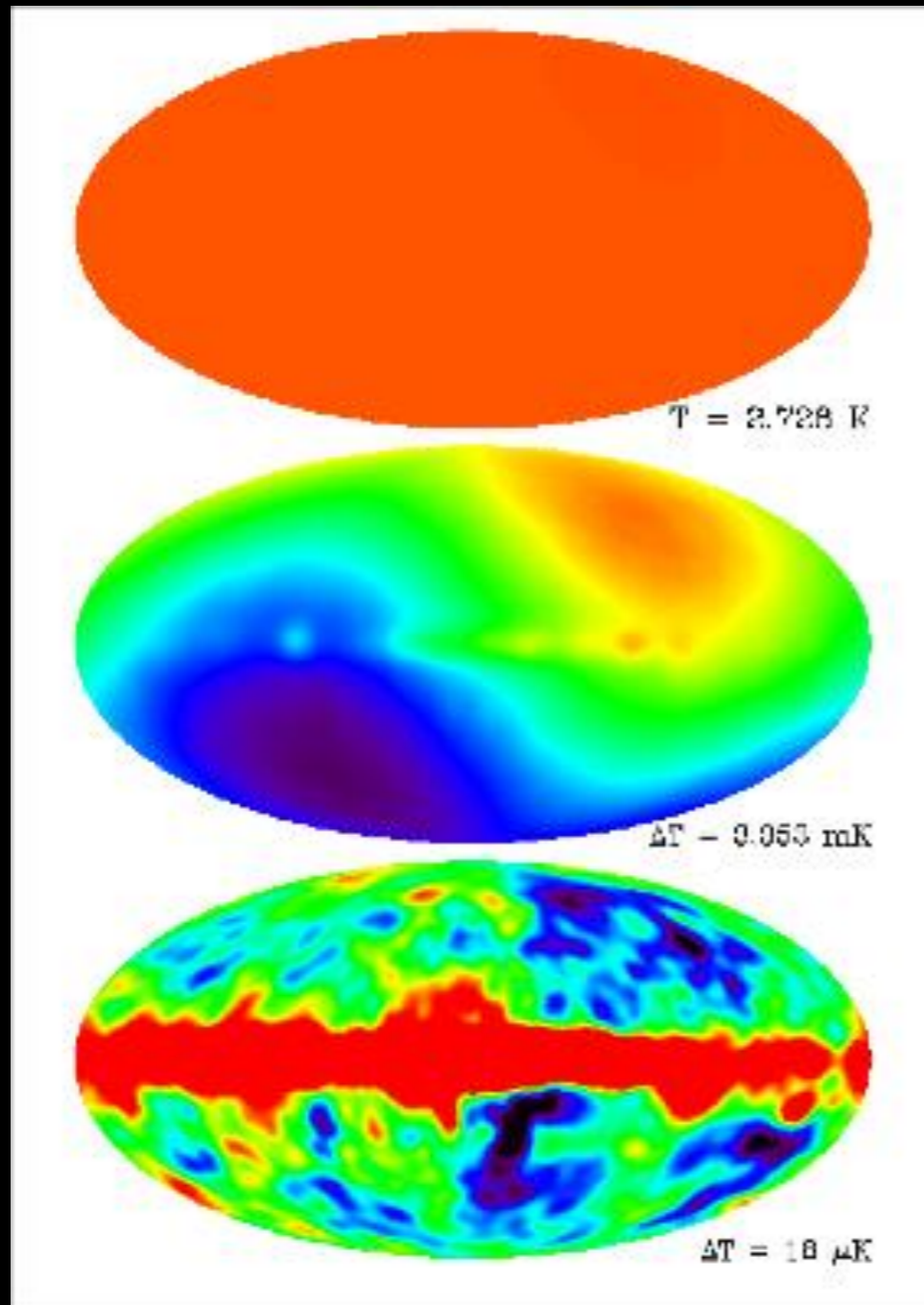
# Die Beobachtung der CMB durch Satelliten (COBE, WMAP, Planck)





# Universe

## Cosmic Microwave Background (COBE) (Nobel prize 2006)



$$T = 2.7 \text{ K}$$

$$\Delta T_{\text{dipole}} = 3.3 \text{ mK}$$

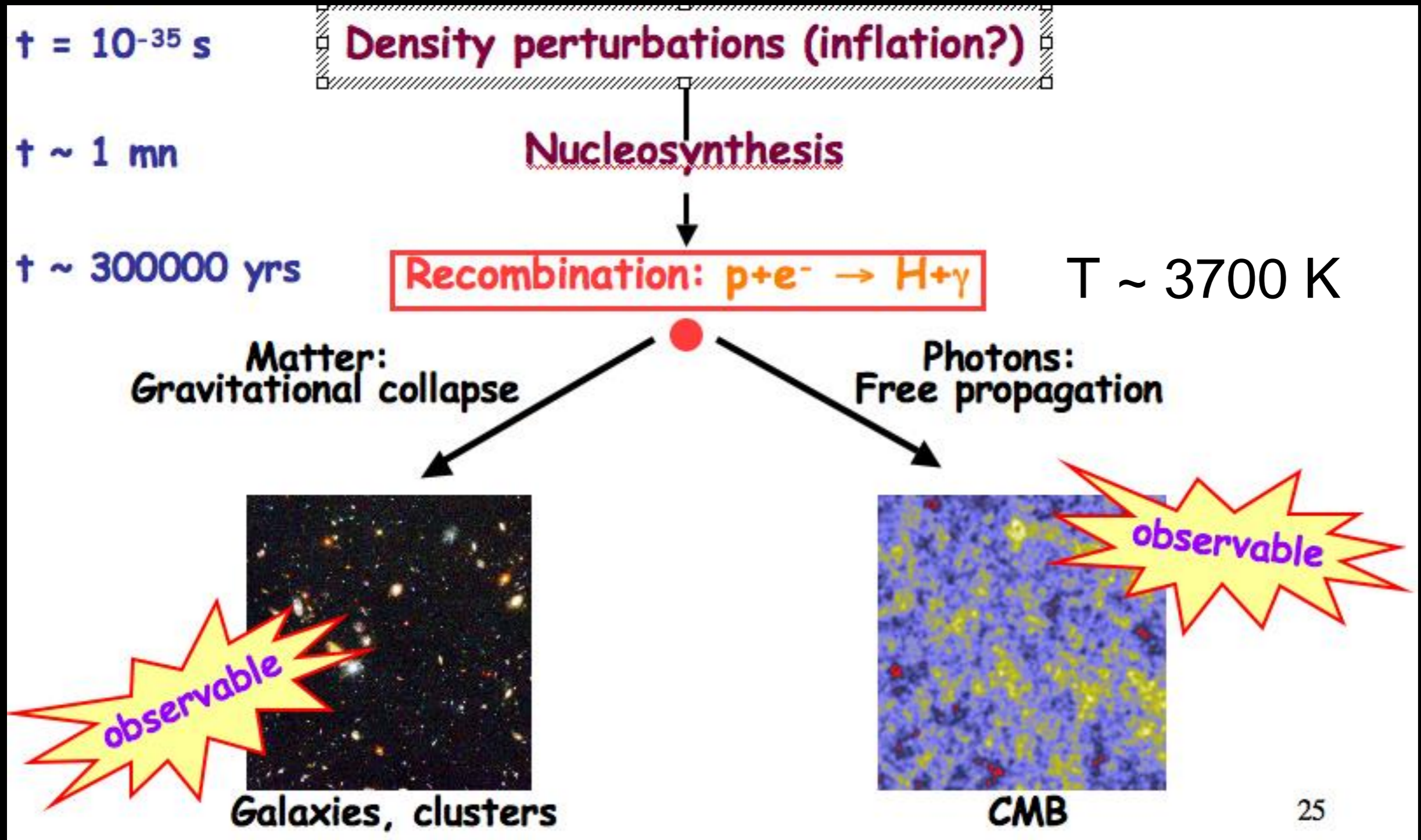
(after subtraction of constant emission)

$$\Delta T_{\text{quadrupole}} = 18 \text{ } \mu\text{K}$$

(after correcting for motion of Earth)

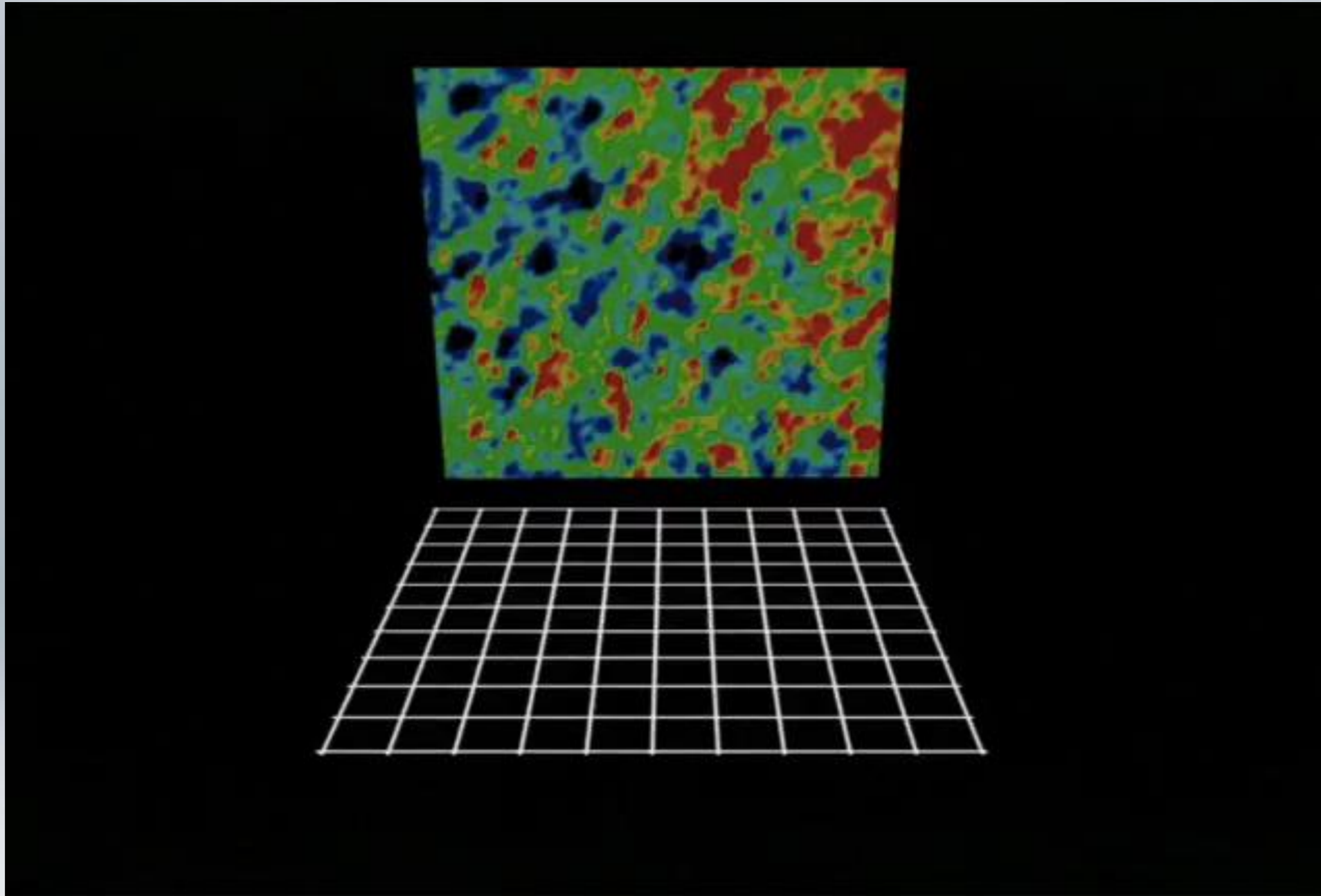
# Universe

## Entstehung der CMB Fluktuationen



# Kosmische Hintergrundstrahlung

---



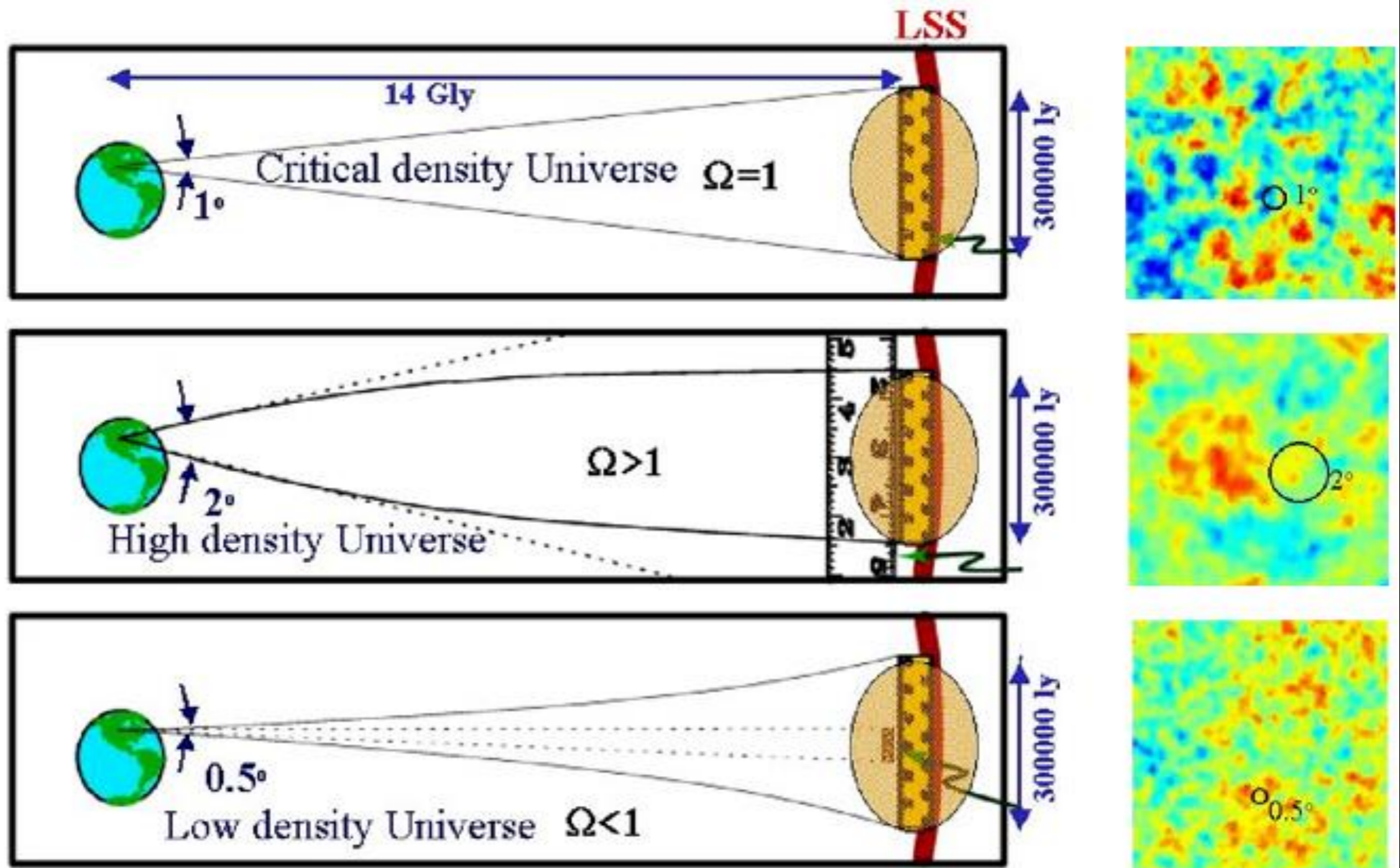
“Fingerabdruck” des Big Bang

Das Licht der ‘Rekombinations-Ära’ war 13.7 Milliarden Jahren unterwegs

Temperaturverteilung: Geschichte und Zusammensetzung des  
Universums

---

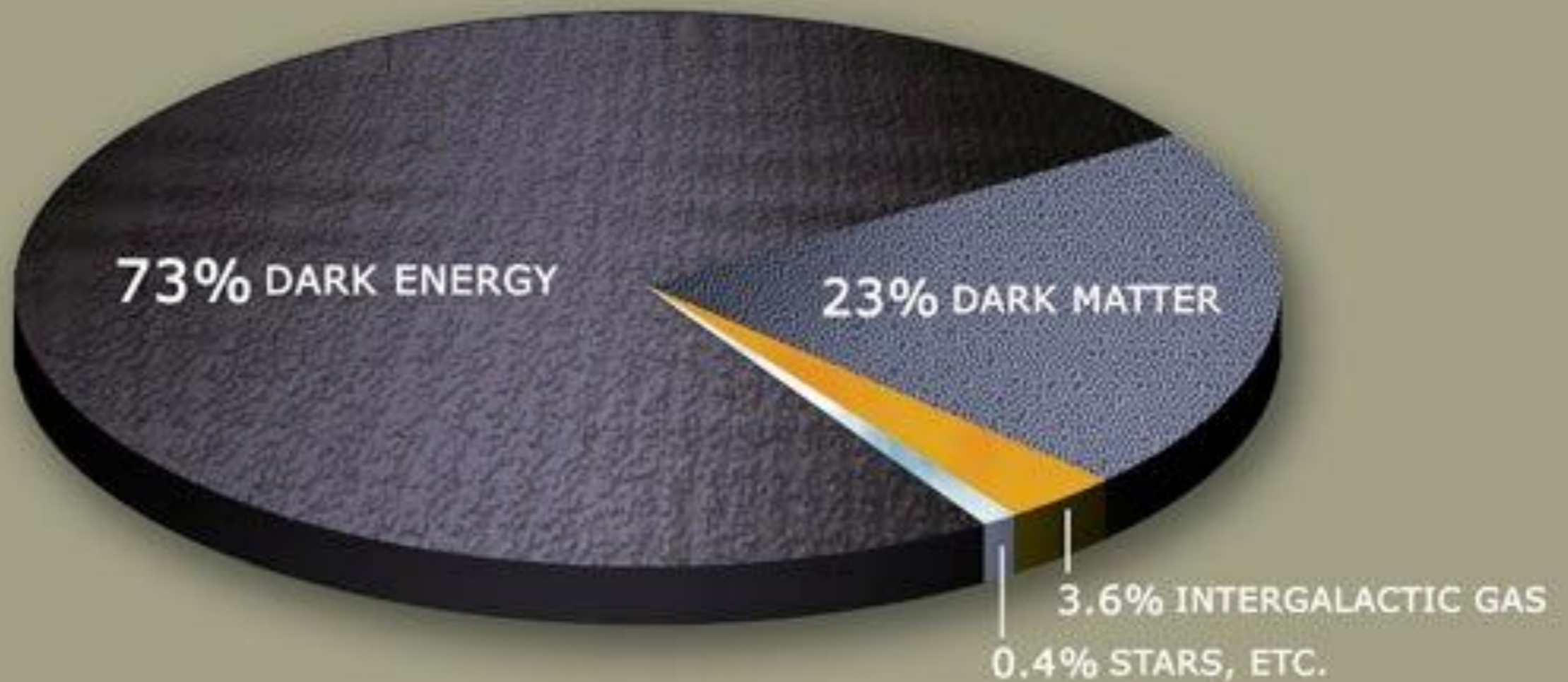
Die Analyse der Inhomogenitäten ergibt die Zusammensetzung des Universums



⇒ Max scale relates to total content of Universe  $\Omega_{tot}$

# Universum

Die merkwürdige Zusammensetzung der Energie des Universums



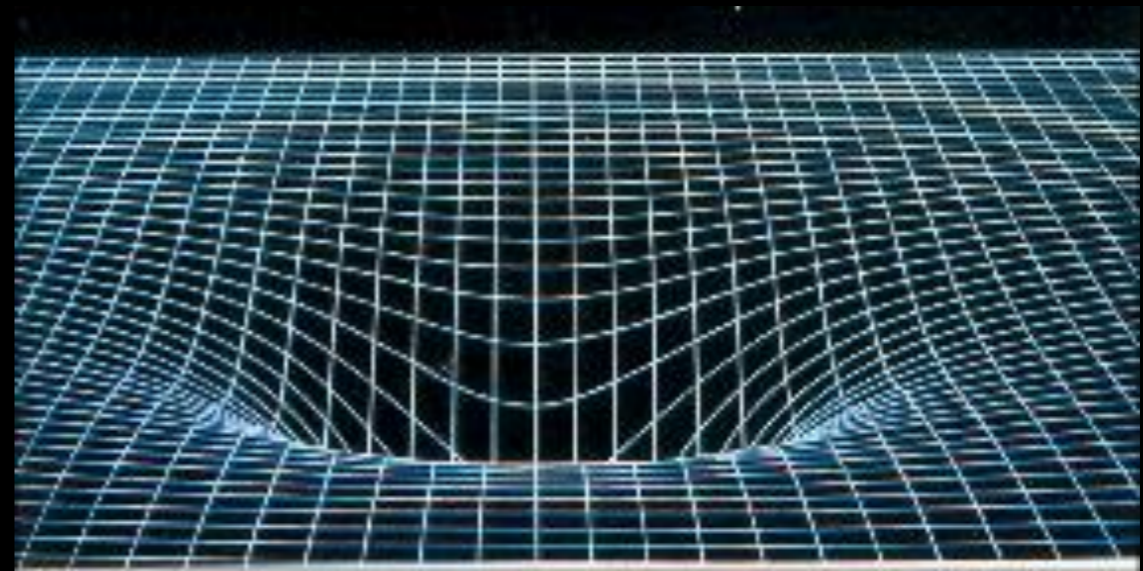
# Heute: Standard-Modell der ...

Teilchenphysik

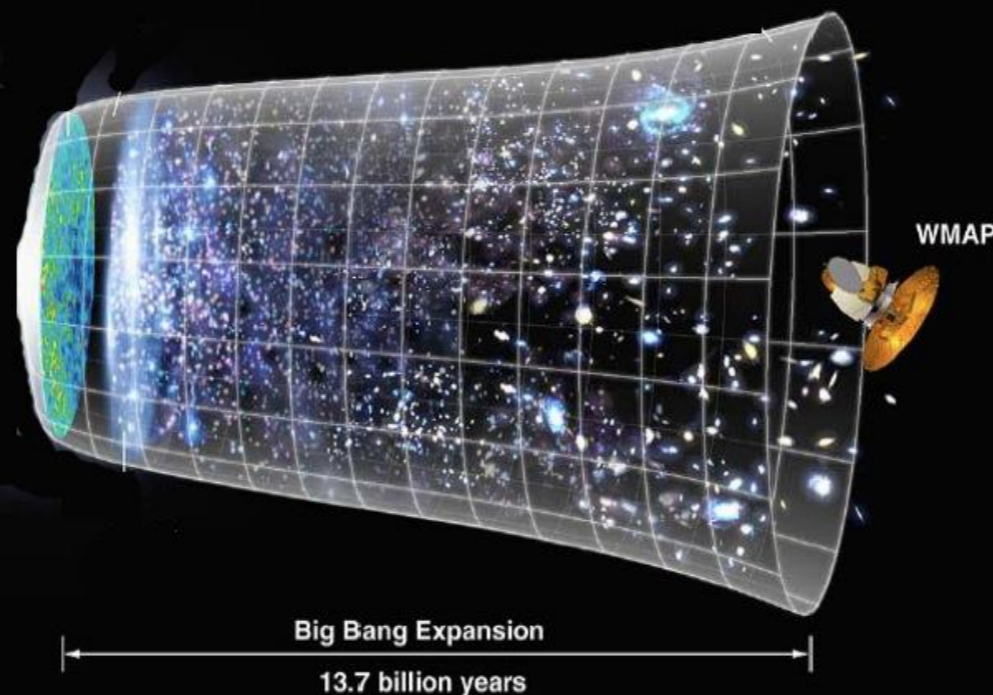
Allgemeine Relativitätstheorie

Fermions			
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau

+



=



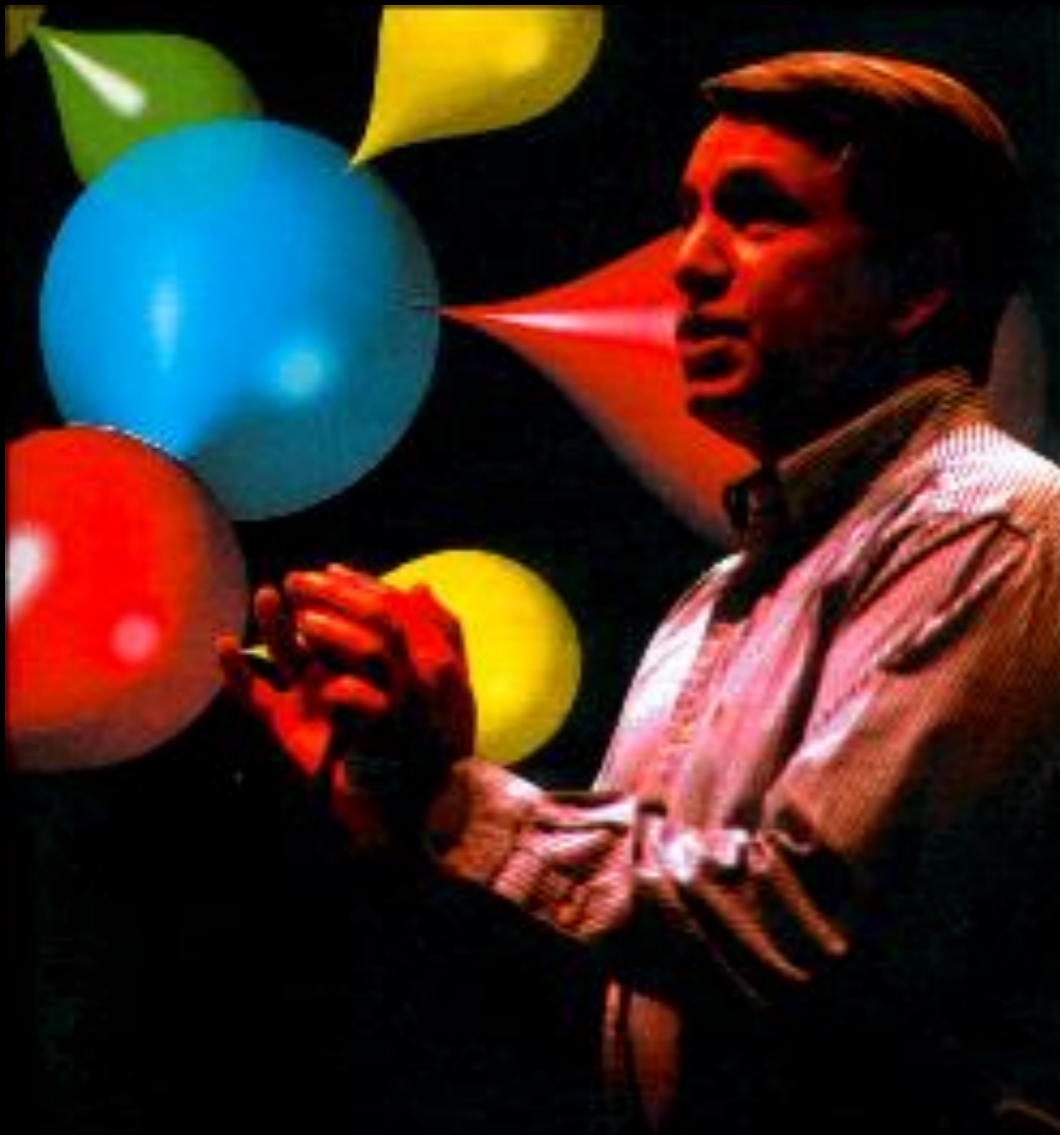
“Standard-Modell  
der  
Kosmologie”



Guth/Linde (1980)

# Universe

Der Beginn des 'Big Bang': die 'Inflation' des Raums



Exponentielle Ausdehnung ('Vakuumenergie = kosmologische Konstante'):

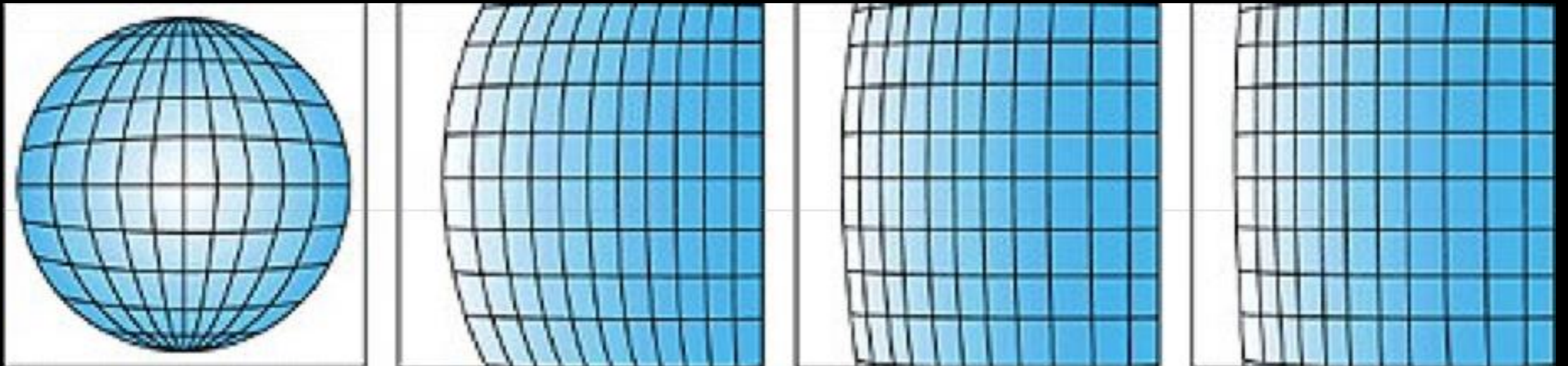
Pro Zeitintervall von  $10^{-35}$  s: Verdopplung des Radius des Universums



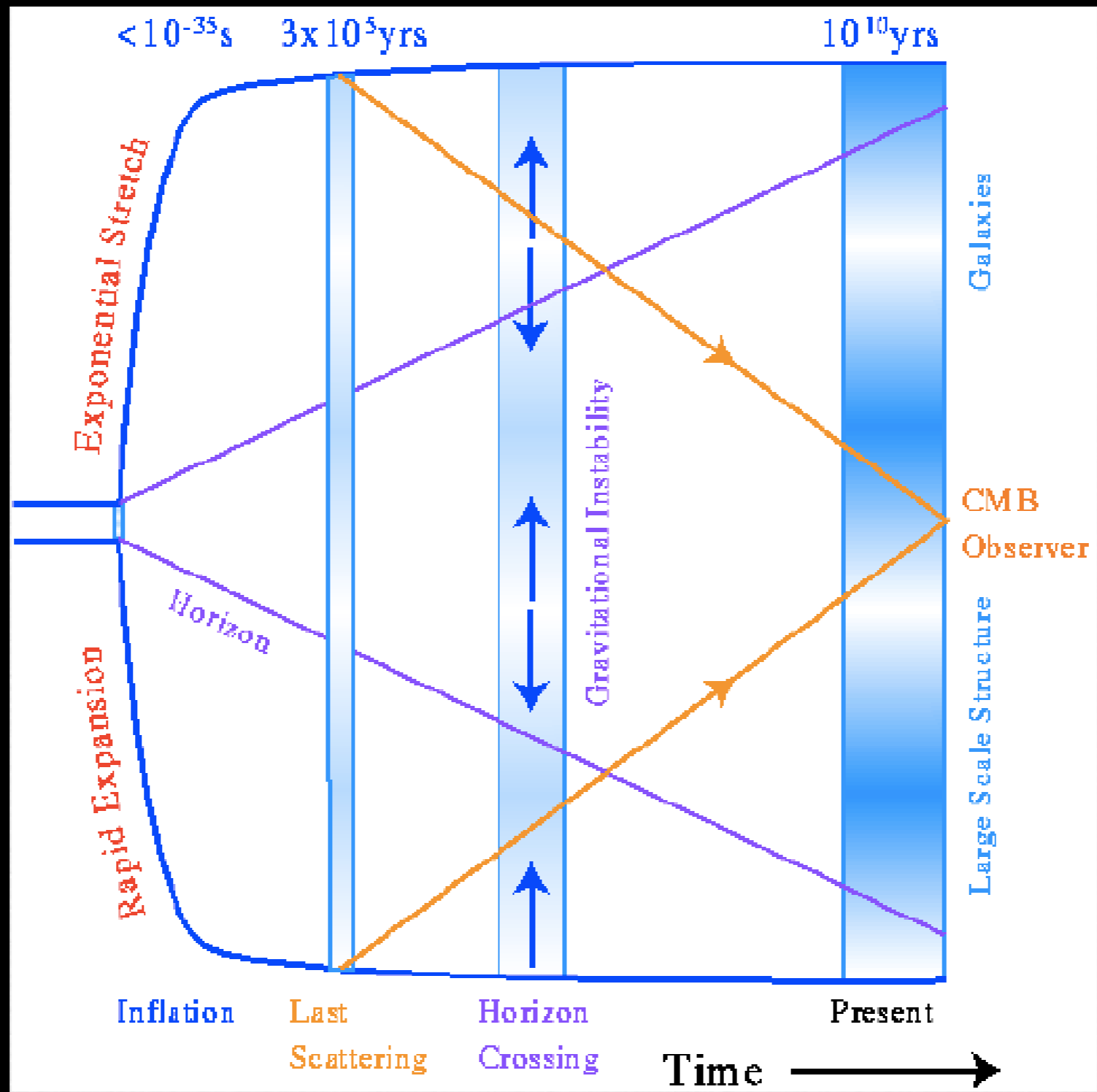
# INFLATION

Alter:  $10^{-26}$  sec,  $T = 10^{10}$  GeV

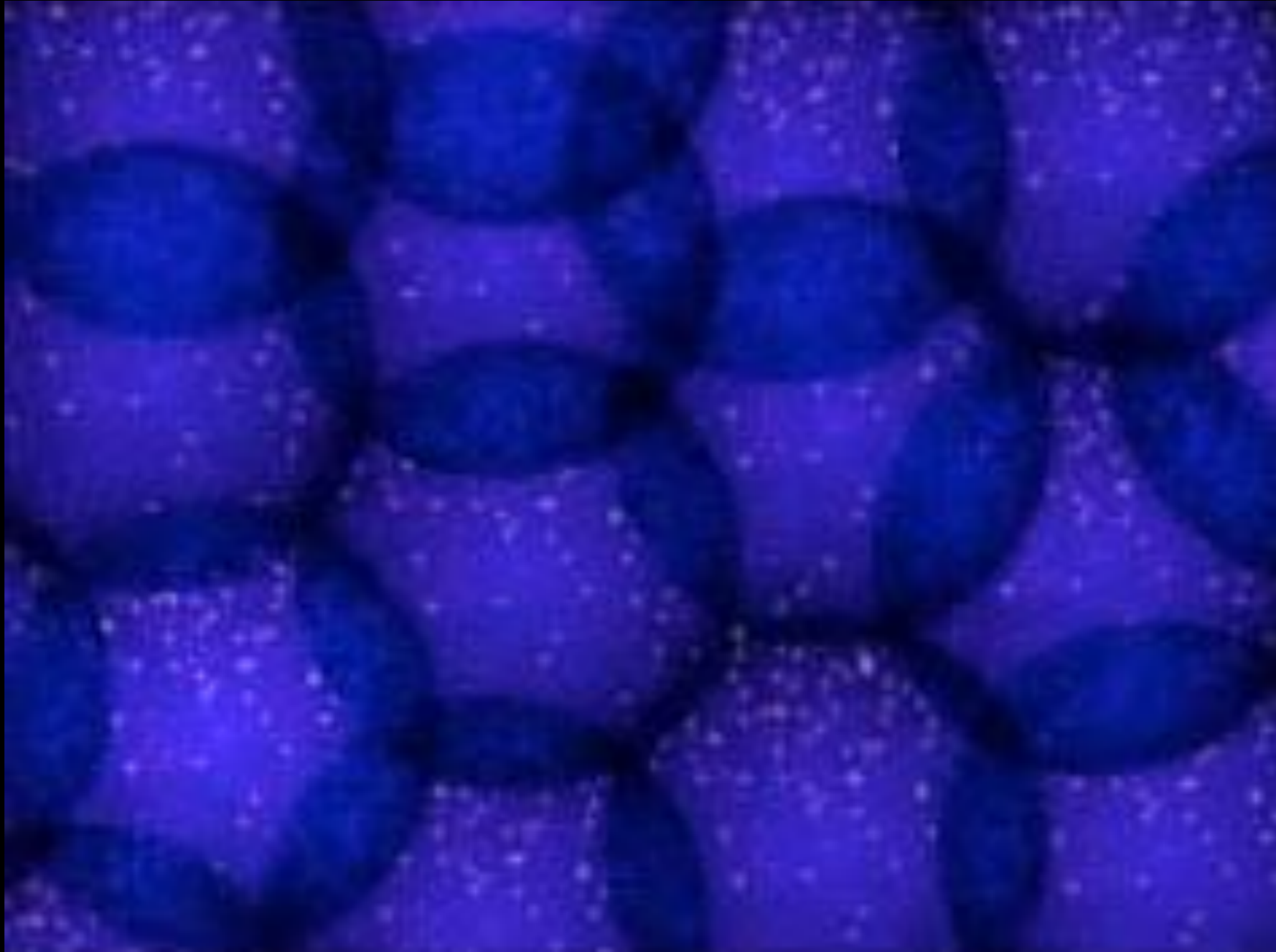
Ultraschnelle Expansion um einen Faktor  $10^{20} - 10^{30}$



*Die 'Falten' des Raums werden glatt gebügelt*

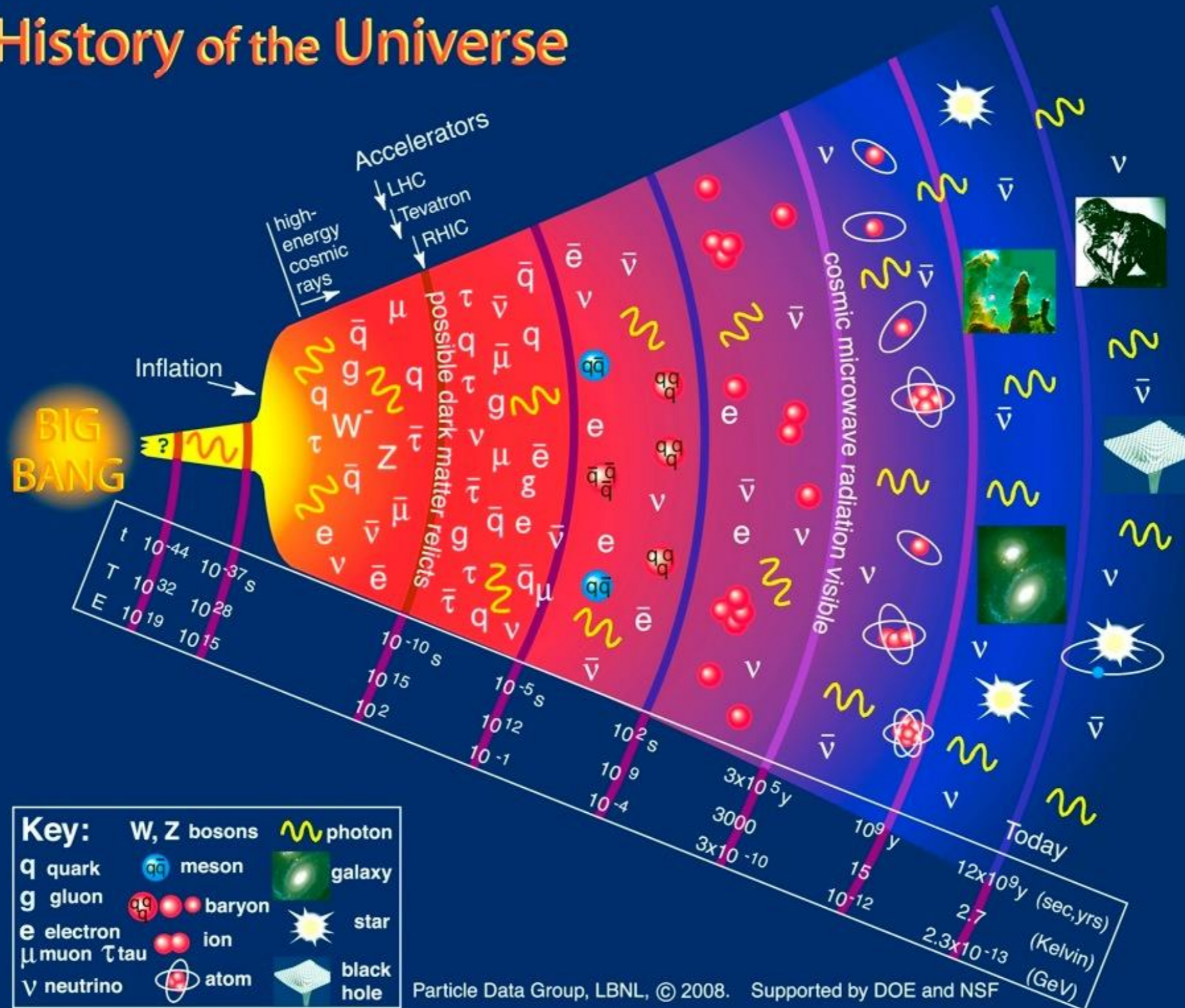


# Multiversum ?



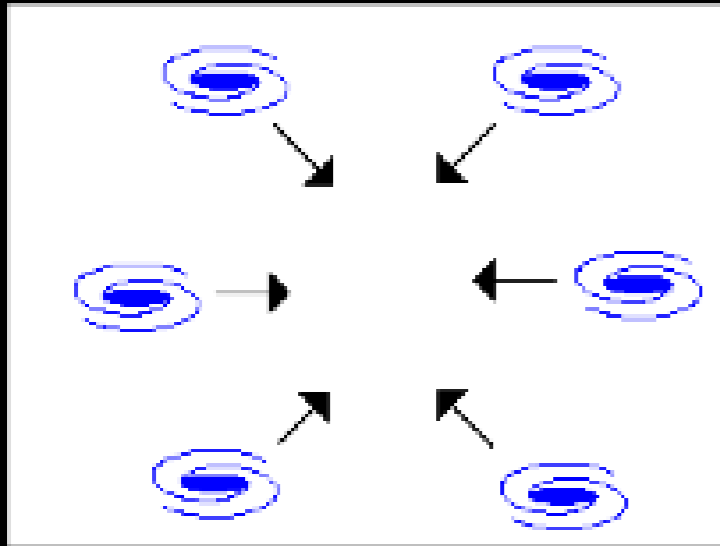
# Geschichte des Universums

## History of the Universe

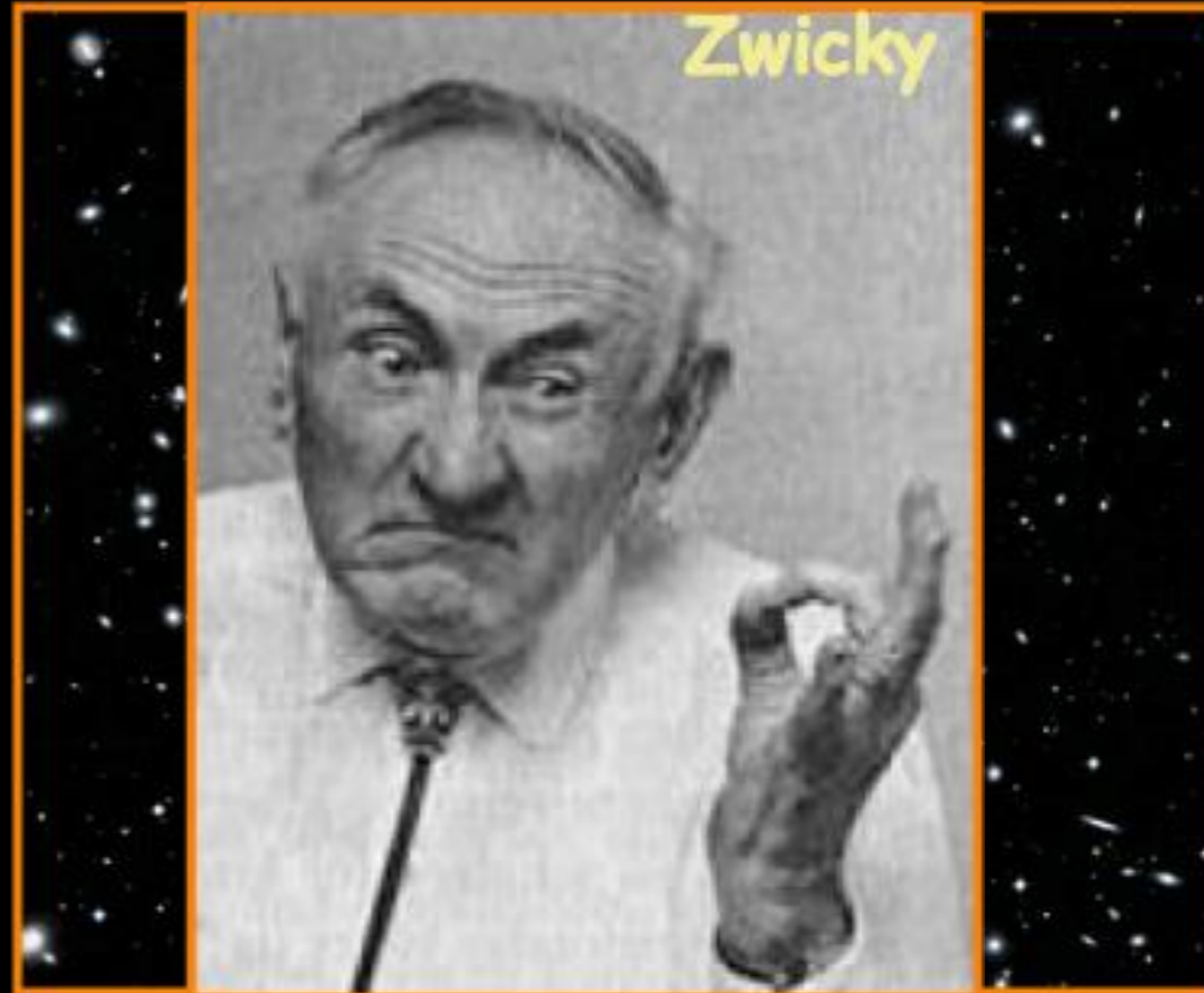


# Dunkle Materie

## Bewegung von Galaxienhaufen (1933)



Mass of luminous matter  
=  
10%  
Gravitational mass

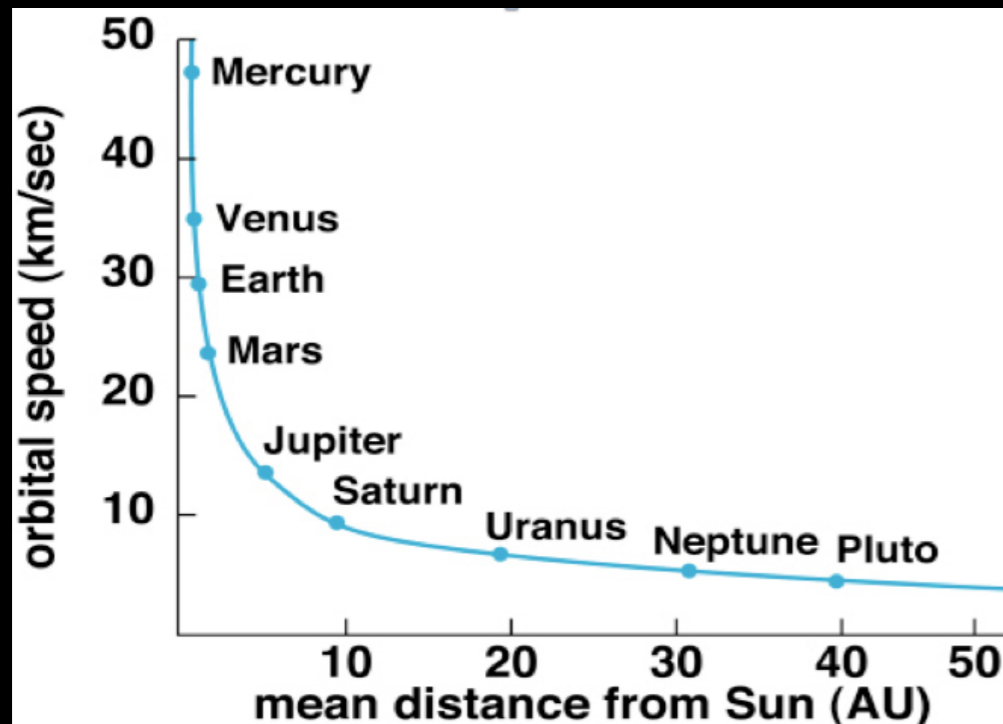


# Dunkle Materie

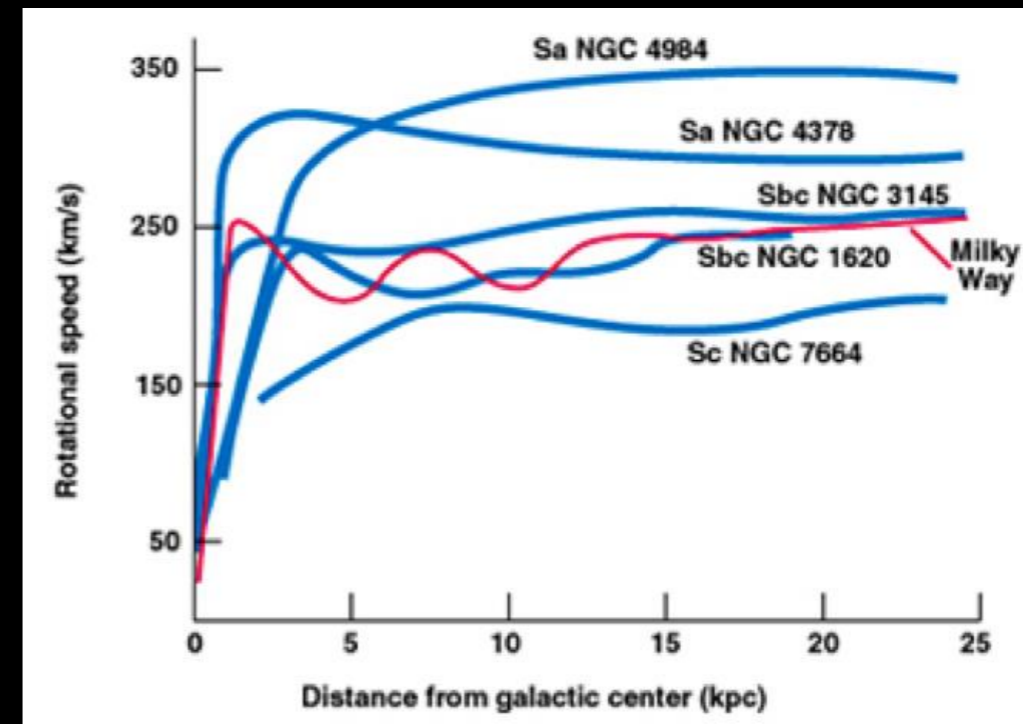
## Rotationskurven von Galaxien



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



Zentralmasse (Sonne)



Galaxien

# Dunkle Materie

## Gravitationslinsen



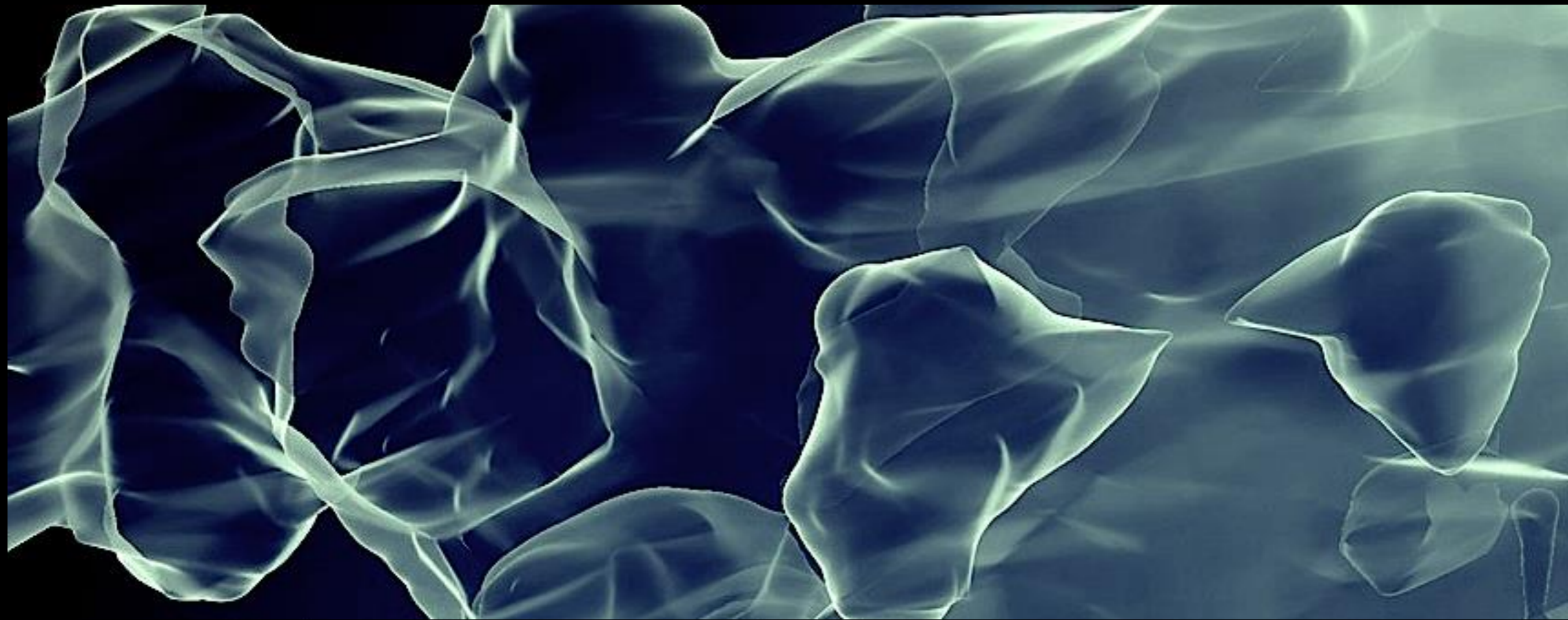
**Gravitational Lens in Abell 2218**

HST - WFPC2

PF95-14 - ST ScI OPO - April 5, 1995 - W. Couch (UNSW), NASA

# Dunkle Materie

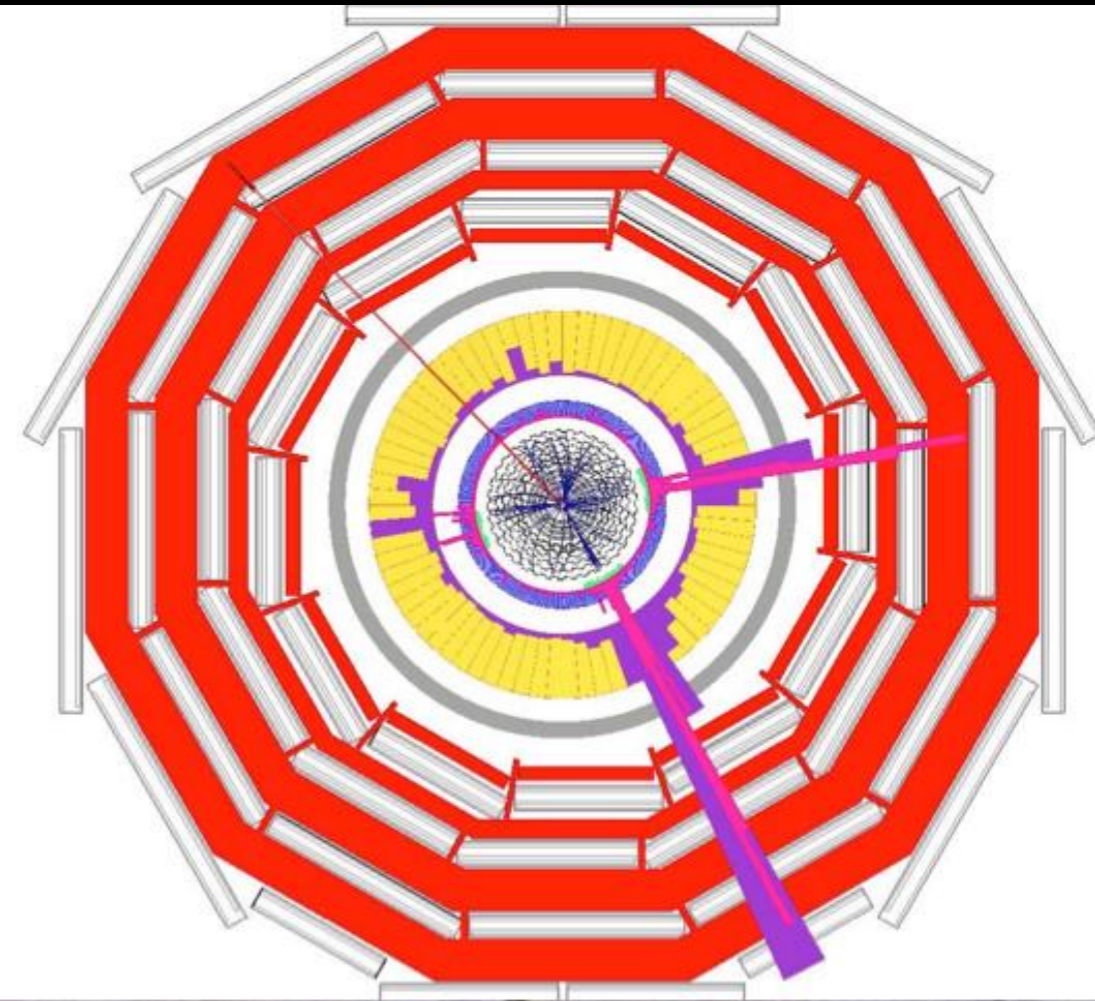
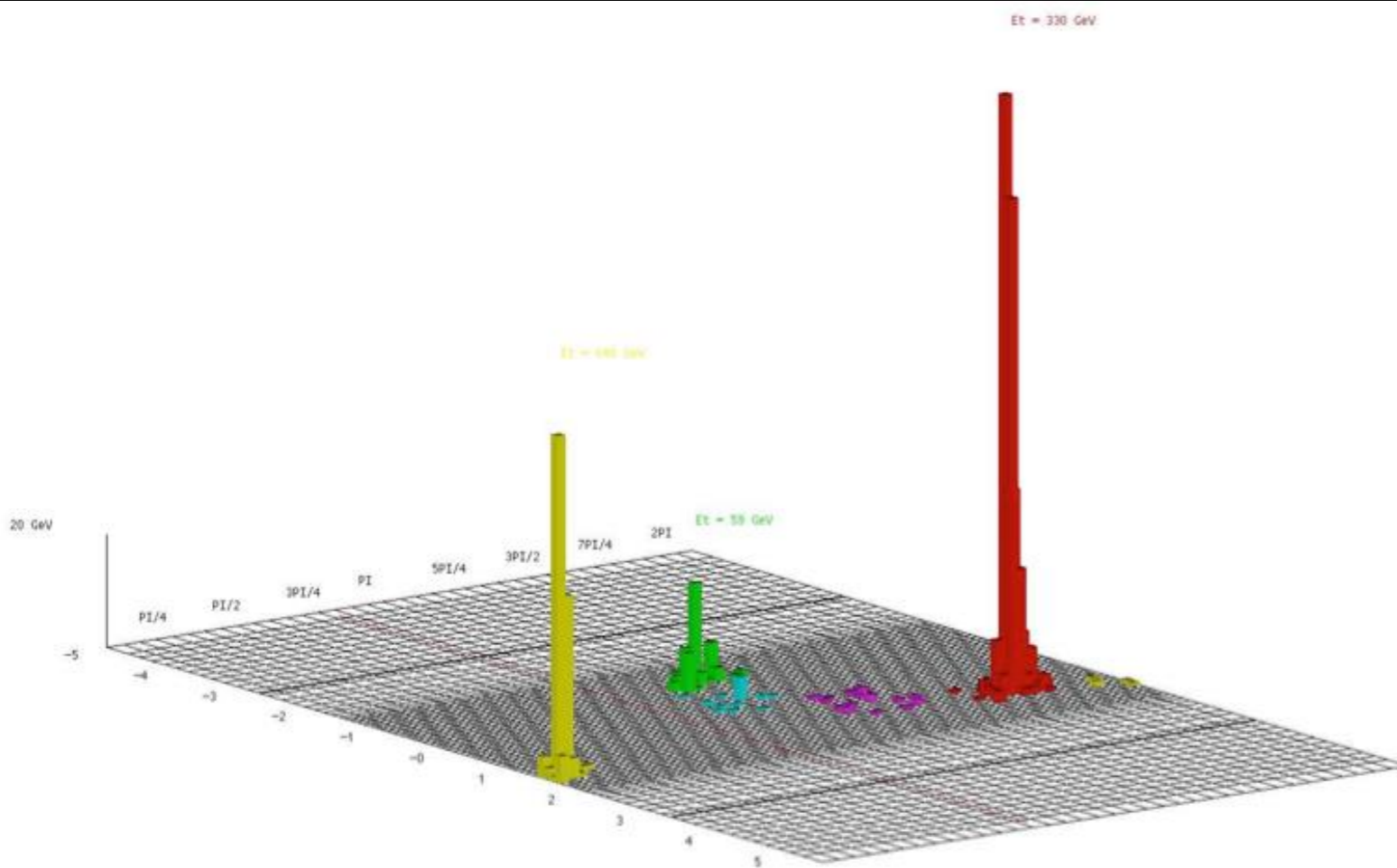
Verteilung der dunklen Materie im Universum





# Dunkle Materie

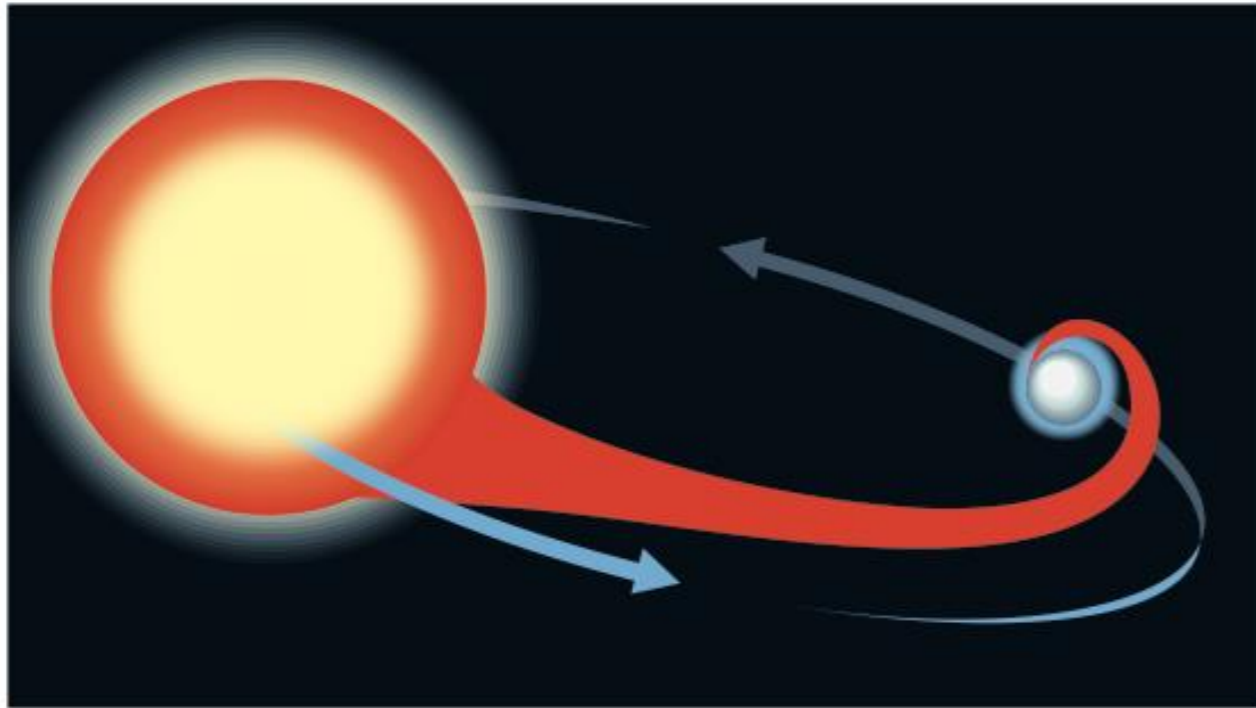
## Signatur dunkler Materie in LHC Experimenten



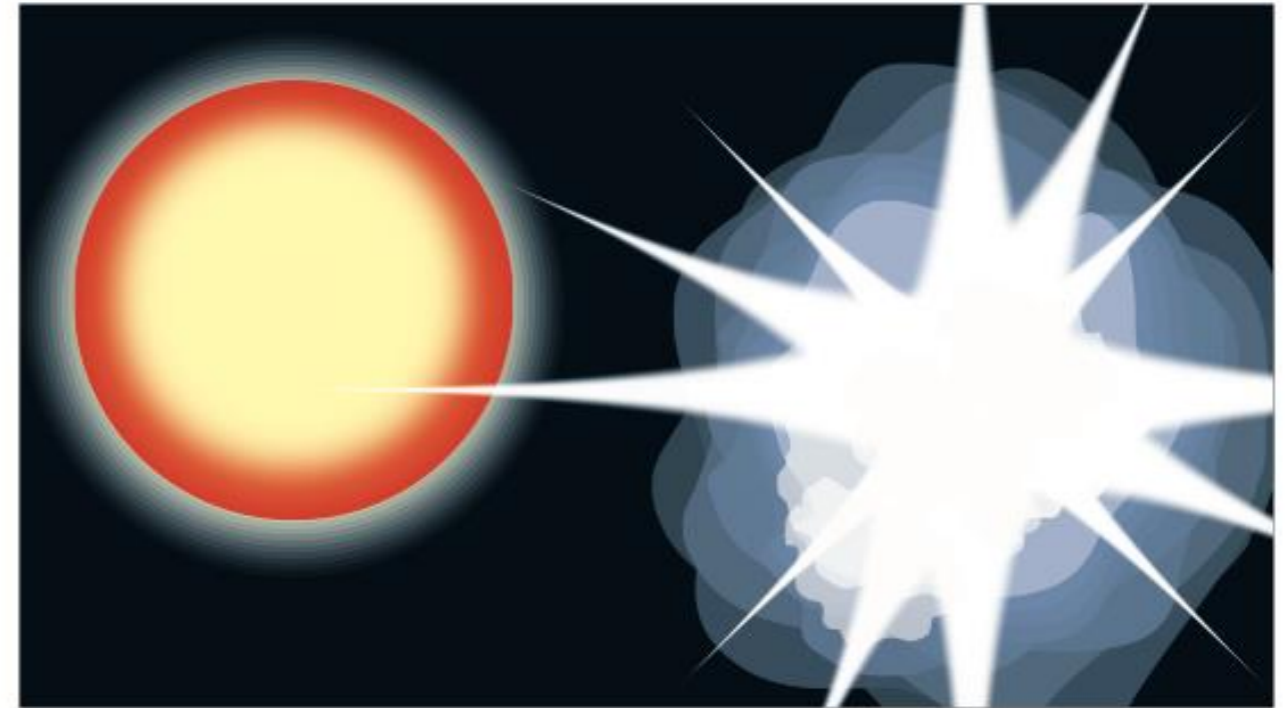
Energie - Impuls - Asymmetrie

# Dunkle Energie

## Supernova vom Typ Ia



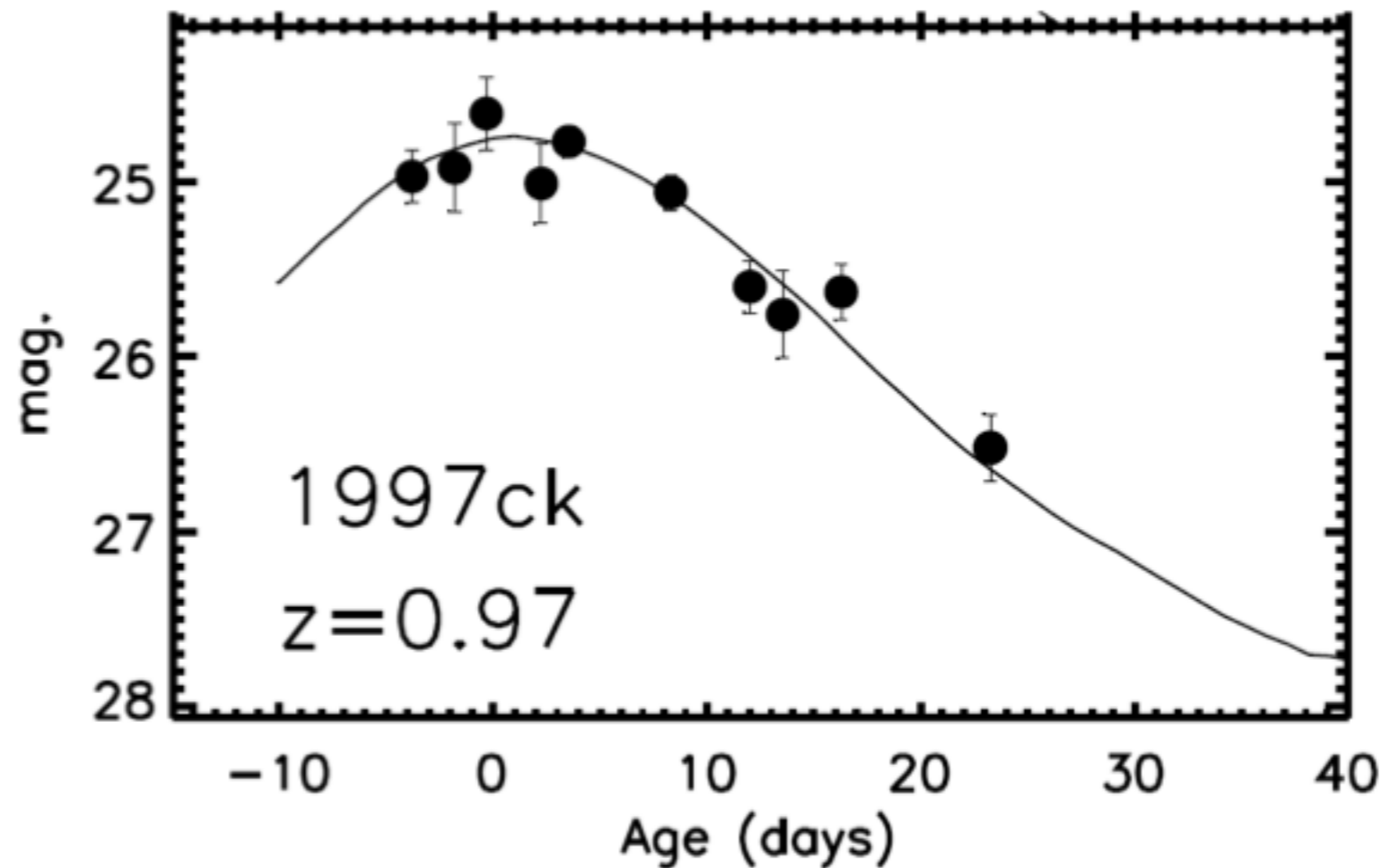
**Figure 3. Supernova explosion.** A white dwarf steals gas from its neighbour using its gravity.



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

# Dunkle Energie

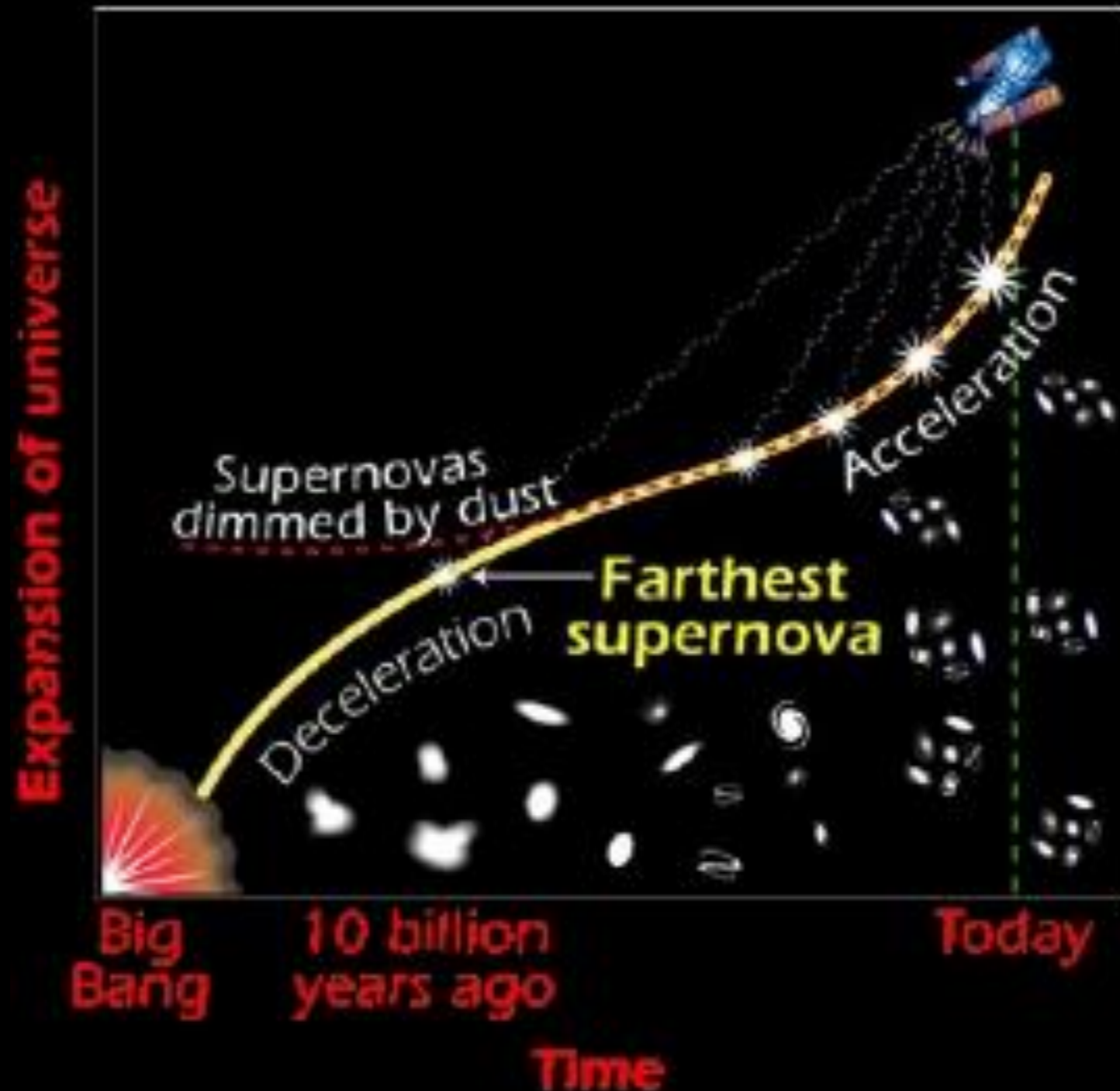
SN 1a: sehr gut definierte Luminosität  
“Standard-Kerzen” im Universum



*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?