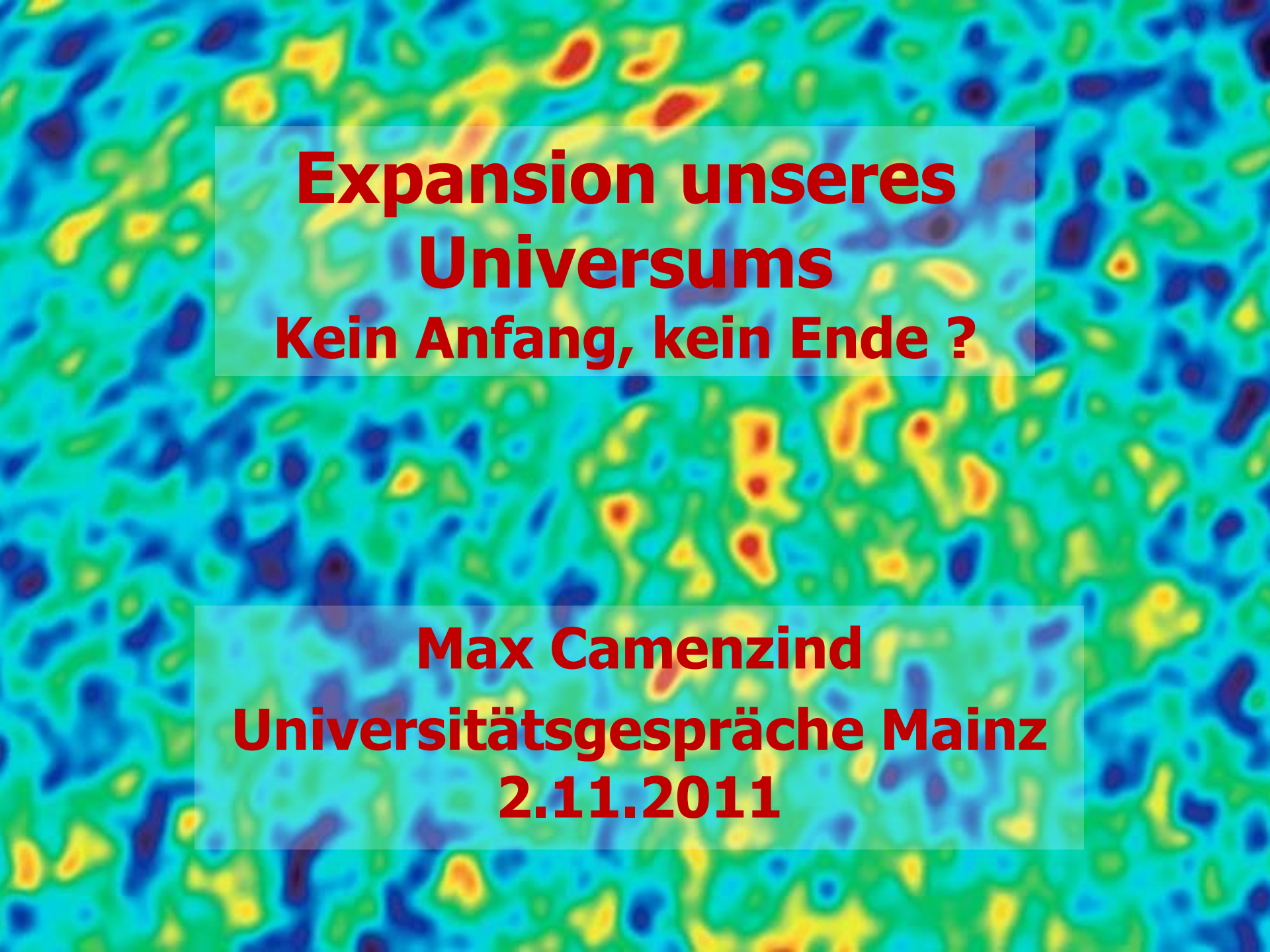
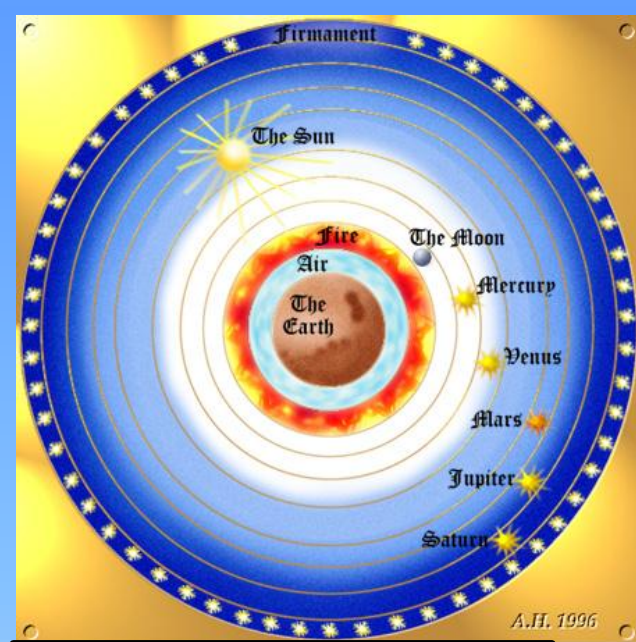


The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map, showing a complex pattern of temperature variations across the universe. The colors range from dark blue (cooler) to yellow and red (warmer), with a prominent horizontal band of higher temperature (yellow/red) in the upper half.

Expansion unseres Universums Kein Anfang, kein Ende ?

**Max Camenzind
Universitätsgespräche Mainz
2.11.2011**

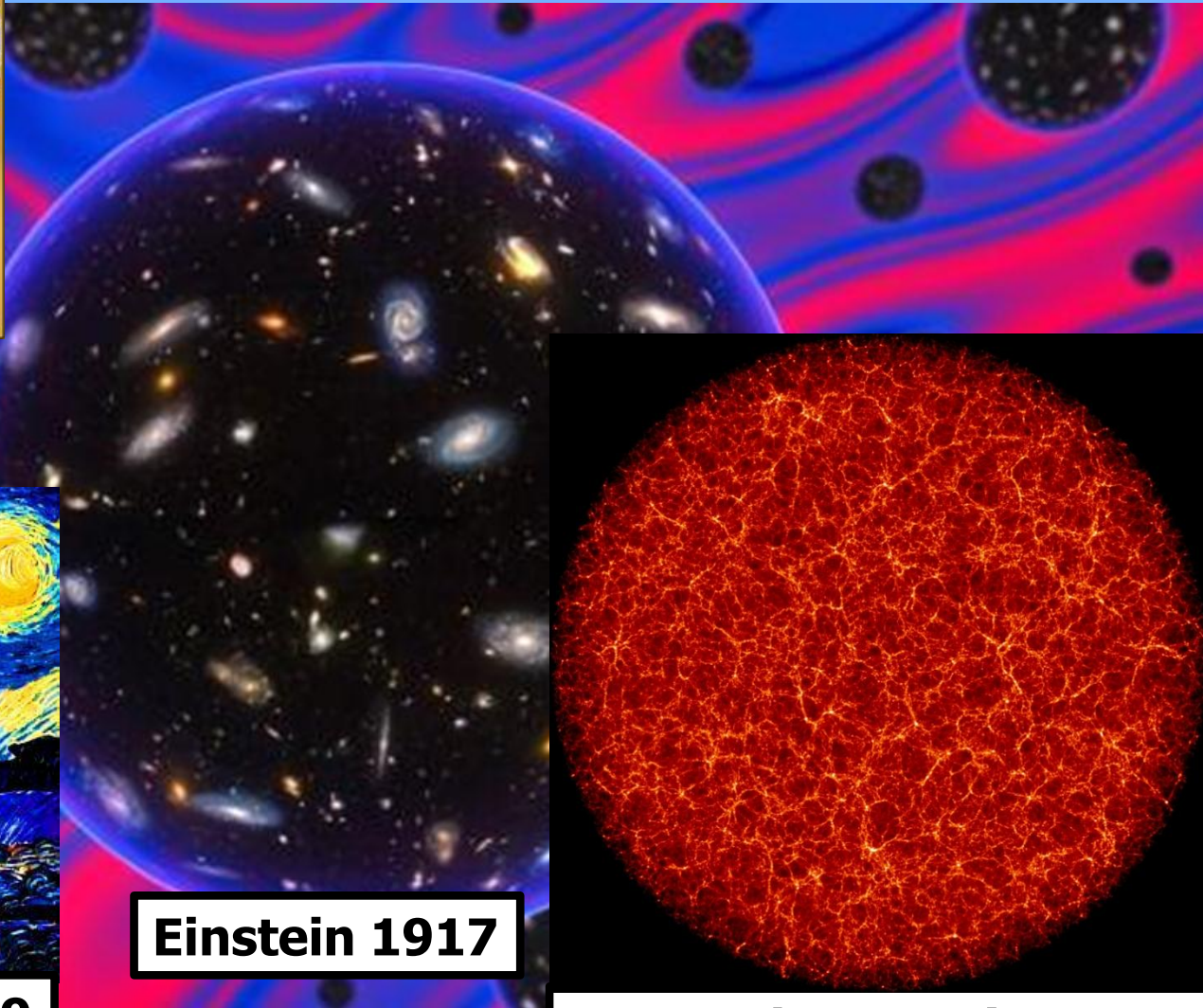
Wie stellen Sie sich unser Universum vor?



Antike Vorstellung



Van Gogh 1889



Einstein 1917

Das Moderne Universum

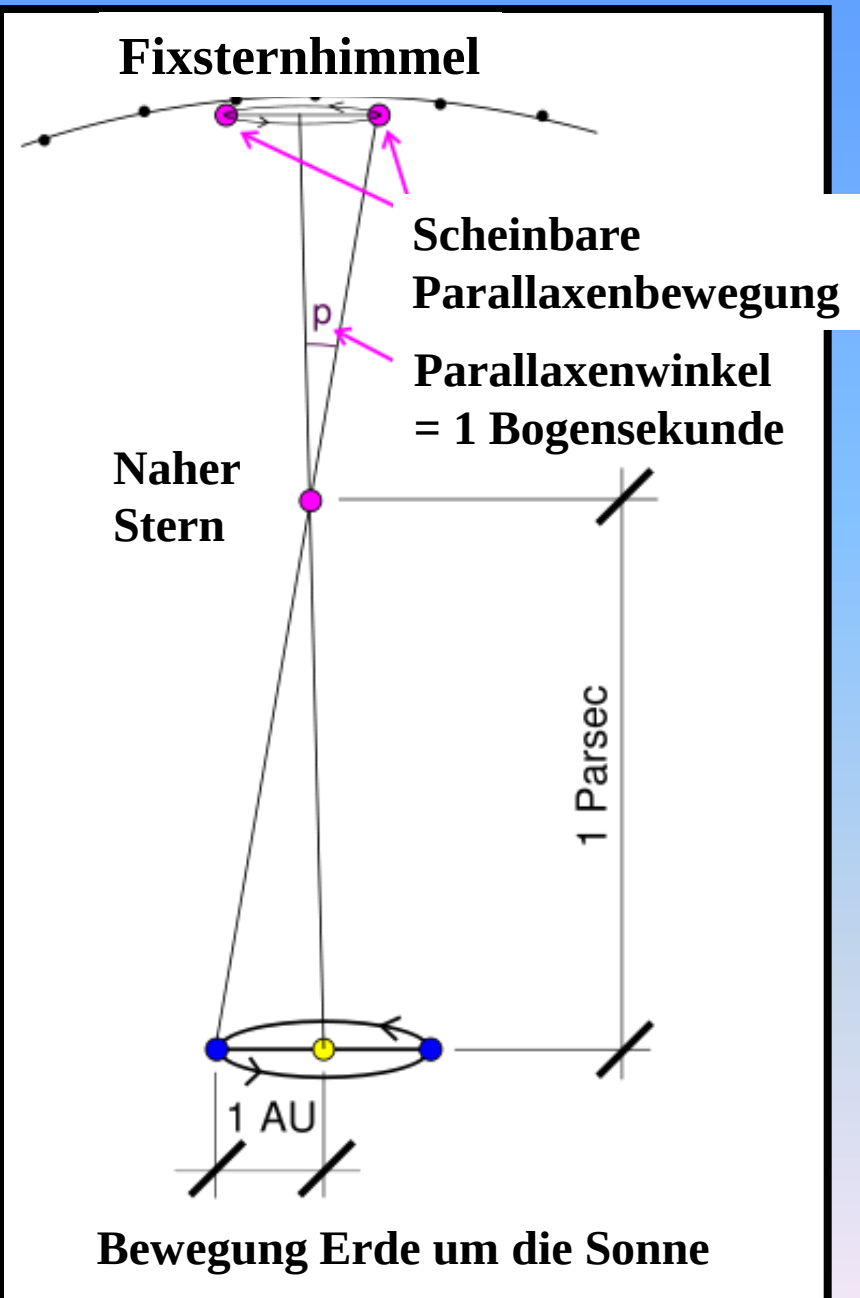
Skalen des Universums

Eine neue Dimension

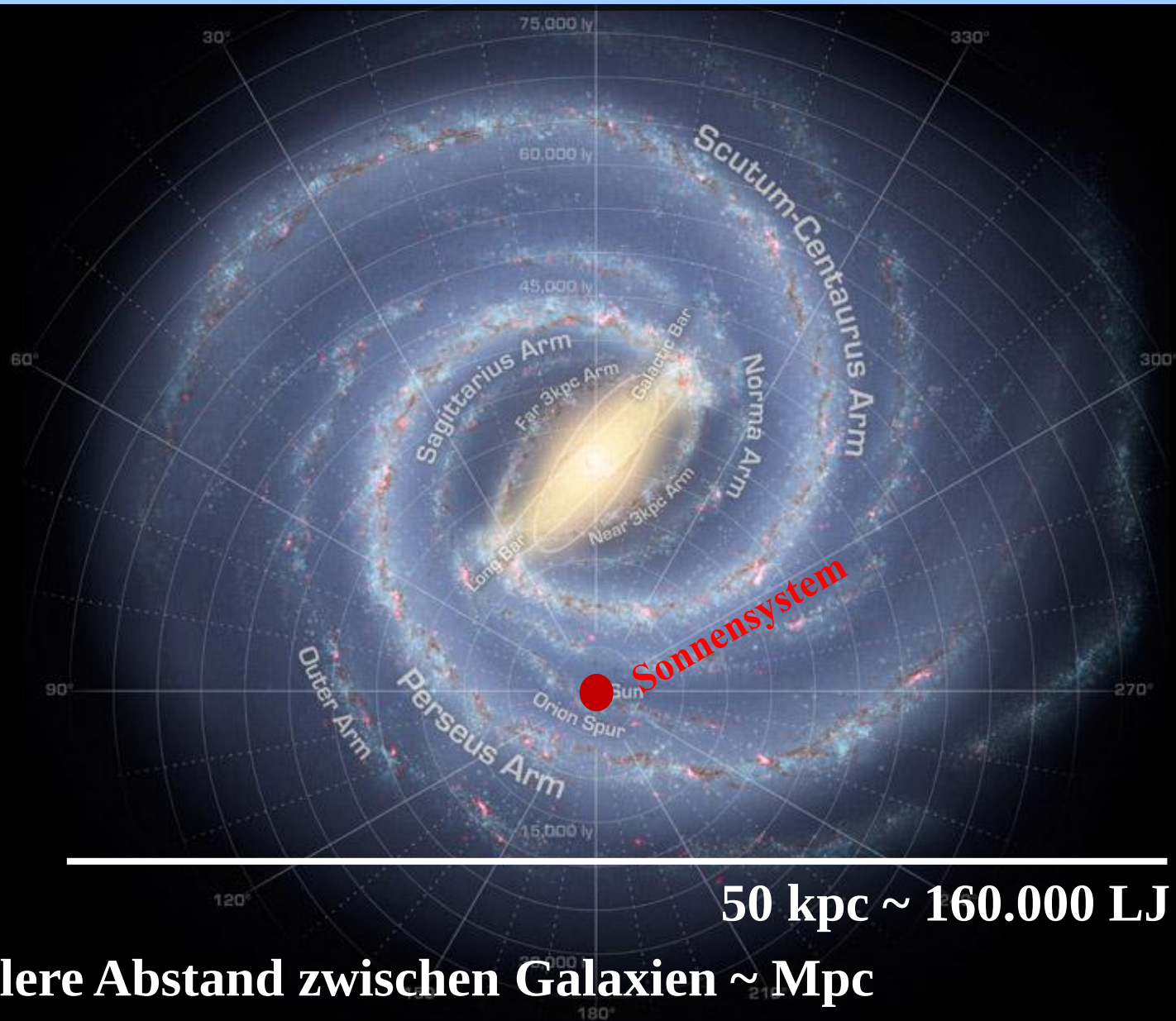
$$1 \text{ Radian} = 180/\pi \times 60 \times 60 \\ = 206.265''$$

$$1 \text{ Parsec} = 206.265 \text{ AE} \\ \sim 3,08 \times 10^{16} \text{ m} \\ \sim 3,26 \text{ Lichtjahre}$$

$$1 \text{ kpc} = 1000 \text{ Parsec} \\ 1 \text{ Mpc} = 1 \text{ Mio. Parsec} \\ 1 \text{ Gpc} = 1 \text{ Mrd. Parsec}$$



Milchstraße – unsere Heimat



Mittlere Abstand zwischen Galaxien ~ Mpc

Unsere Themen

- Der lange Weg zum modernen Weltmodell.
- **1915: Einstein's Revision der Gravitation**
→ **Gravitation ist Raumkrümmung**
- **Struktur des Universums → Kosmische Sphären**
- Das Universum ist **nicht statisch** →
Alexander Friedmann **1922**, Lemaître **1927**.
- Das beschleunigte Universum (>1998):
→ **9 Parameter → Nobelpreis in Physik 2011**
- **[Expansion strukturiert Universum (>1980)**
→ auch Dichtefluktuationen → Inflation erzeugt.]

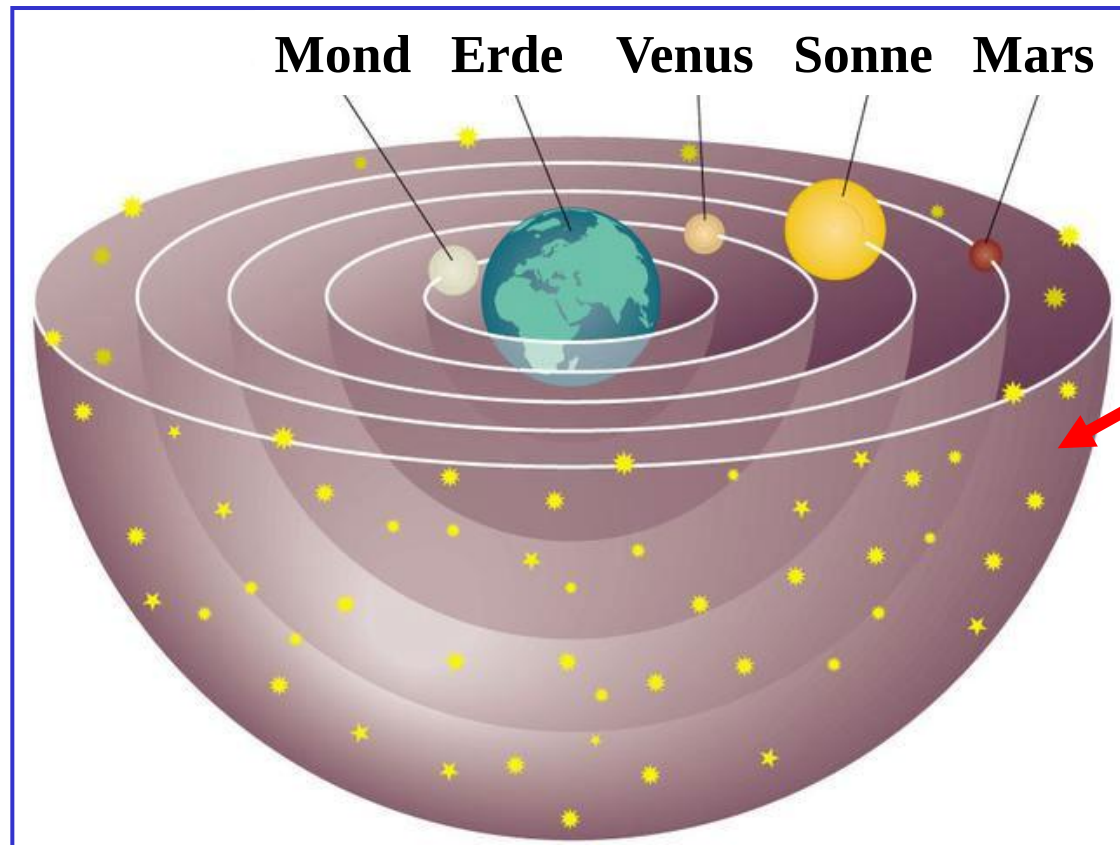
Unser Blick ins Universum

- der lange Weg zum modernen Universum



Geozentrisches Weltbild – Kristallsphären

Claudius Ptolemäus, 100 - 170 AD



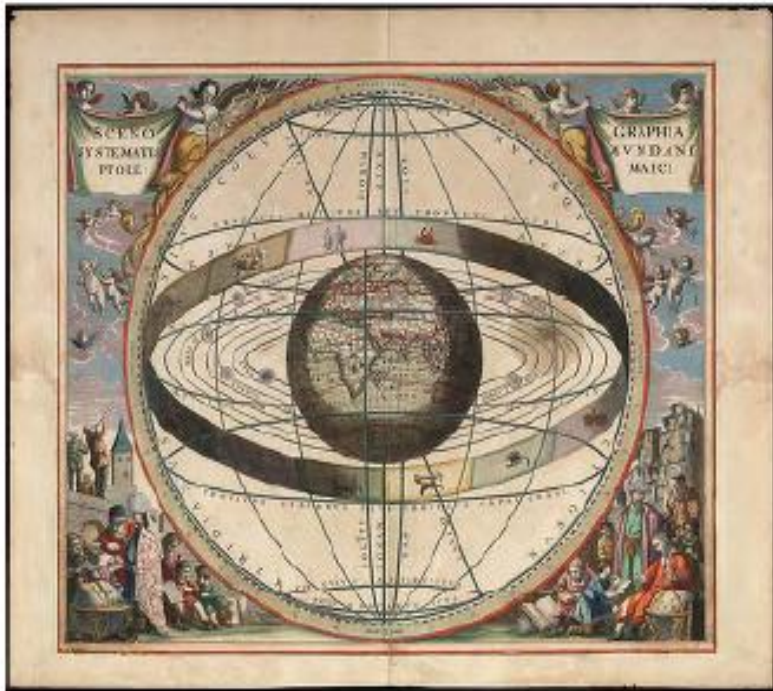
**Fixstern-
Sphäre
ist noch
heute in
Gebrauch**

...“das ist die natürliche Bewegung der Erdeist in Richtung des Zentrums des Universums; deshalb muss die Erde das Zentrum sein.”

Aristoteles, “De Caelo”

Paradigmen-Wechsel ~ 1600

Geozentrisch



Ptolemäus

Heliozentrisch



Aristarch von Samos

(310 – 230 v. Chr.)

Kopernikus (1473 - 1543)

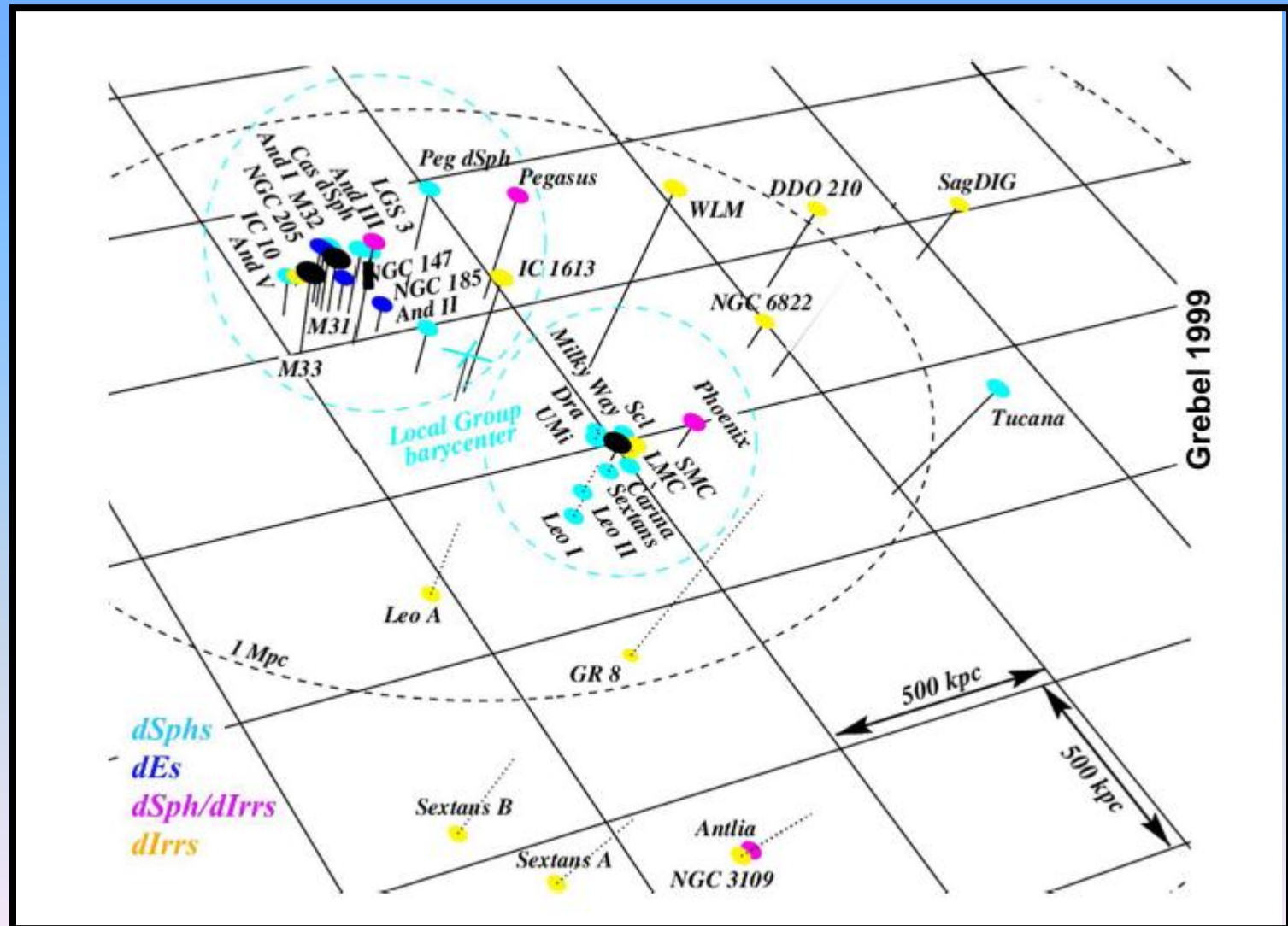
Was ist jenseits der Fixsternsphäre?



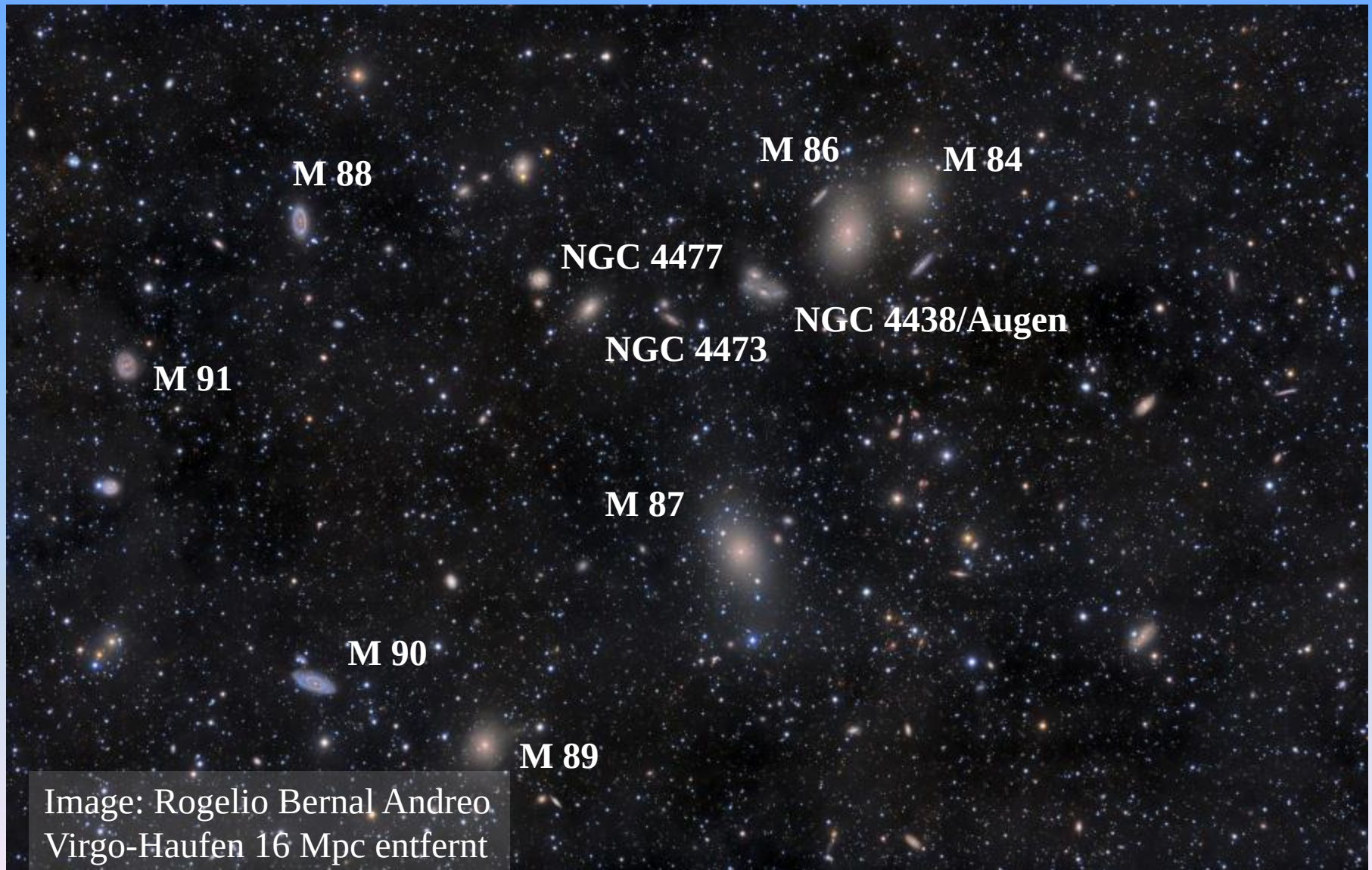
Camille Flammarion, 1888, Holzstich „Wanderer am Weltenrand“

Unsere Kosmischen Nachbarn

1925 Hubble: Andromeda extragalaktisch



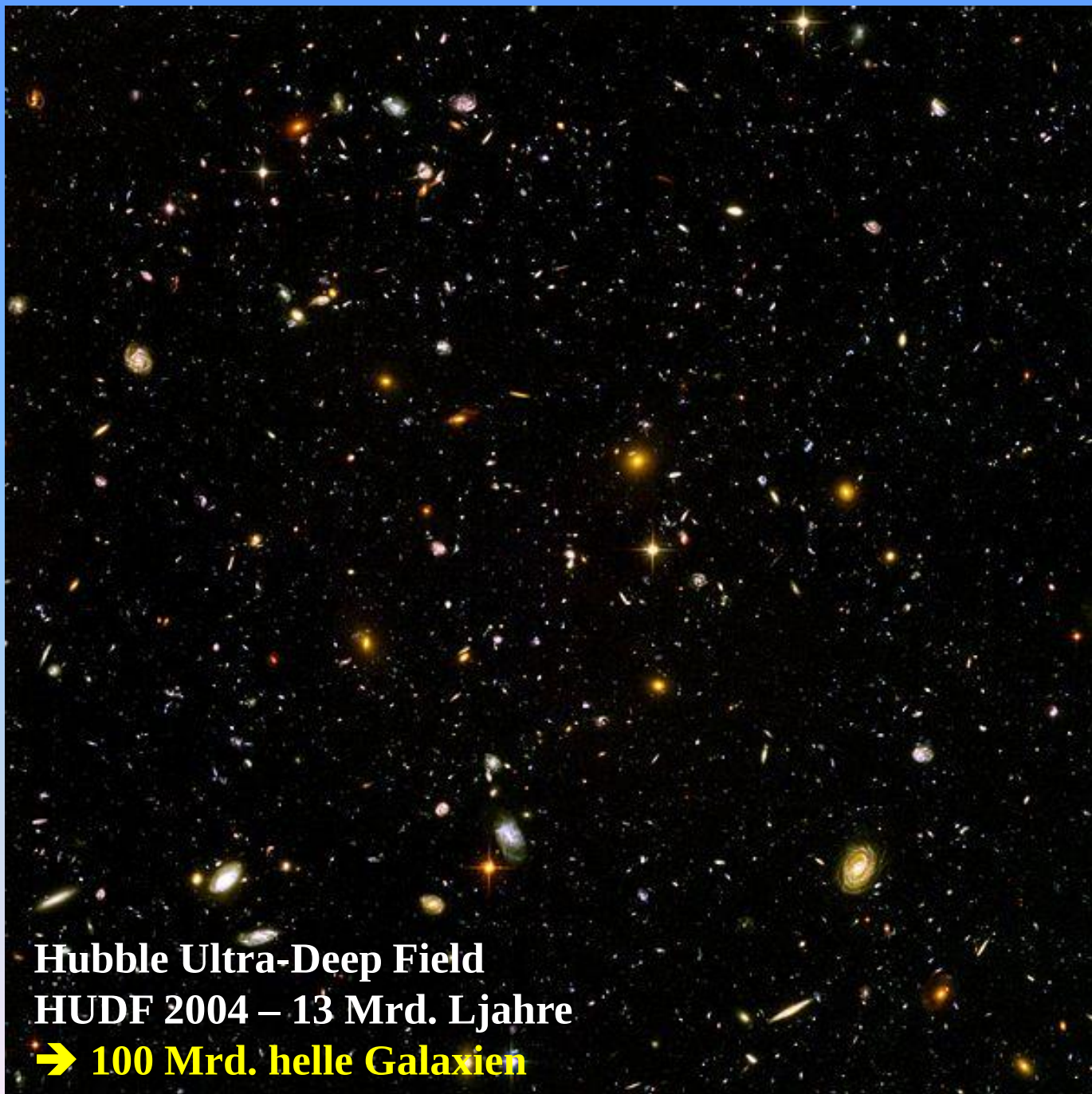
Messier Nebel sind Galaxien



Galaxien sind die Bausteine im Universum

➔ **100 Mrd. Helle Galaxien**

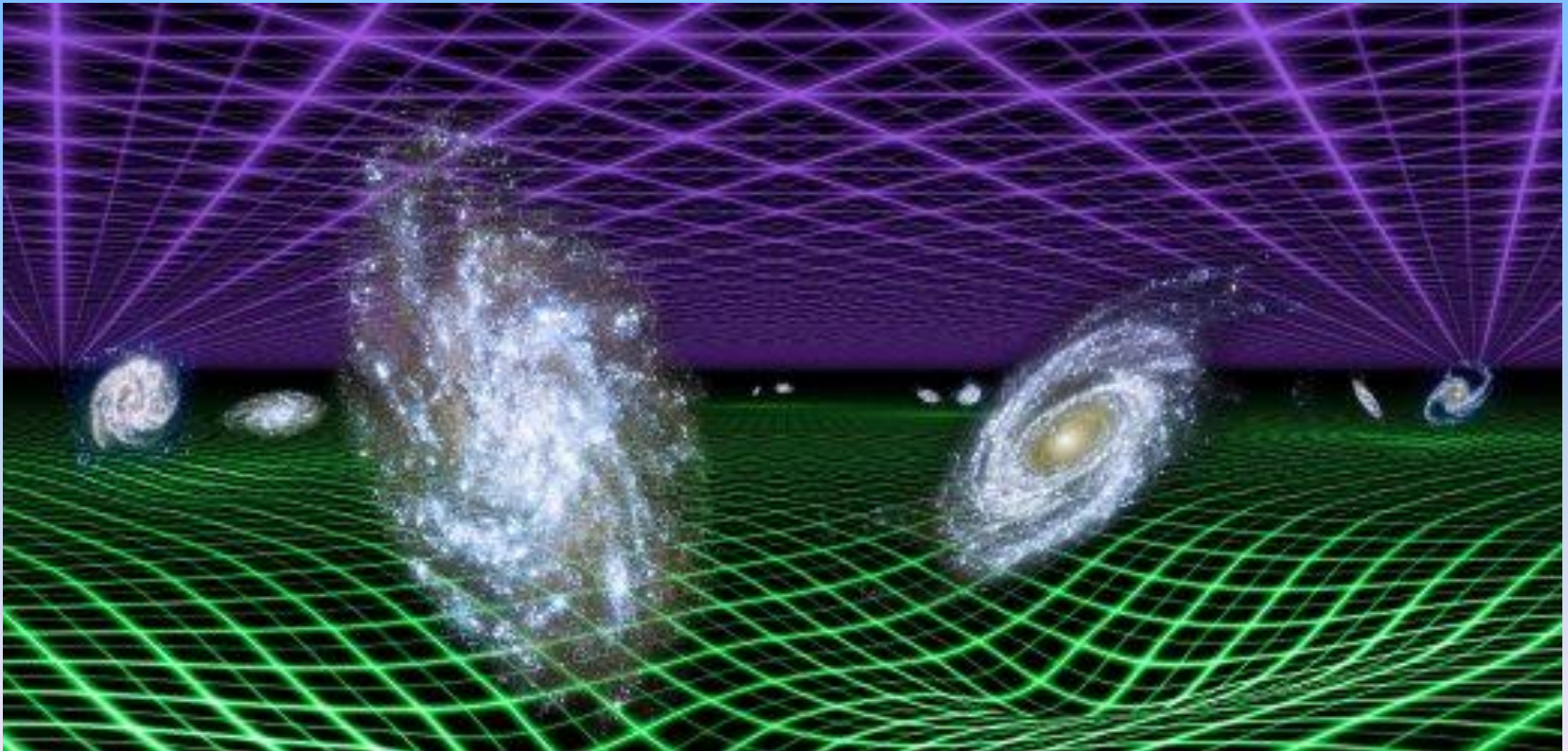
Statisches Universum würde kollabieren



Hubble Ultra-Deep Field
HUDF 2004 – 13 Mrd. Ljahre
➔ **100 Mrd. helle Galaxien**

Gravitation bestimmt Struktur des Universums (Newton 1687)

Alle Körper ziehen sich gegenseitig an
Einstein revidiert 1915 diese Einsicht!



Ohne Gravitation → Welt flach

Einstein 1905, Minkowski 1907

- Raum und Zeit bilden eine Einheit
→ die Raum-Zeit der **Speziellen Relativität**
(t,x,y,z) : Ereignis = (Atomuhr, 3 Maßstäbe)

$$ds^2 = c^2 d\tau^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

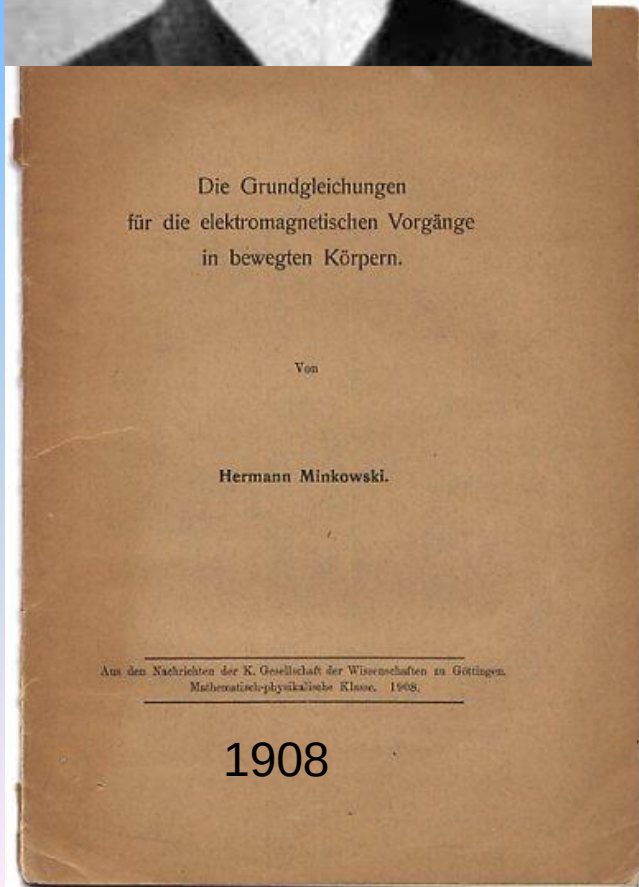
$$ds^2 = c^2 dt^2 - dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2$$

- Spezielle Relativität → 4D Minkowski-Raum.
- **Relativität:** es gibt keine absoluten Beobachter, nur Relativmessungen sind sinnvoll, jedoch $c = c$.



Hermann Minkowski

Mathematiker 1864 – 1909
war Einsteins Lehrer ETH
➔ 1907 nach Göttingen



Zur SR: »Ach, der Einstein?
Der schwänzte doch immer die Vorlesungen
– dem hätte ich das gar nicht zugetraut.«
➔ Einstein: »überflüssige Gelehrsamkeit«

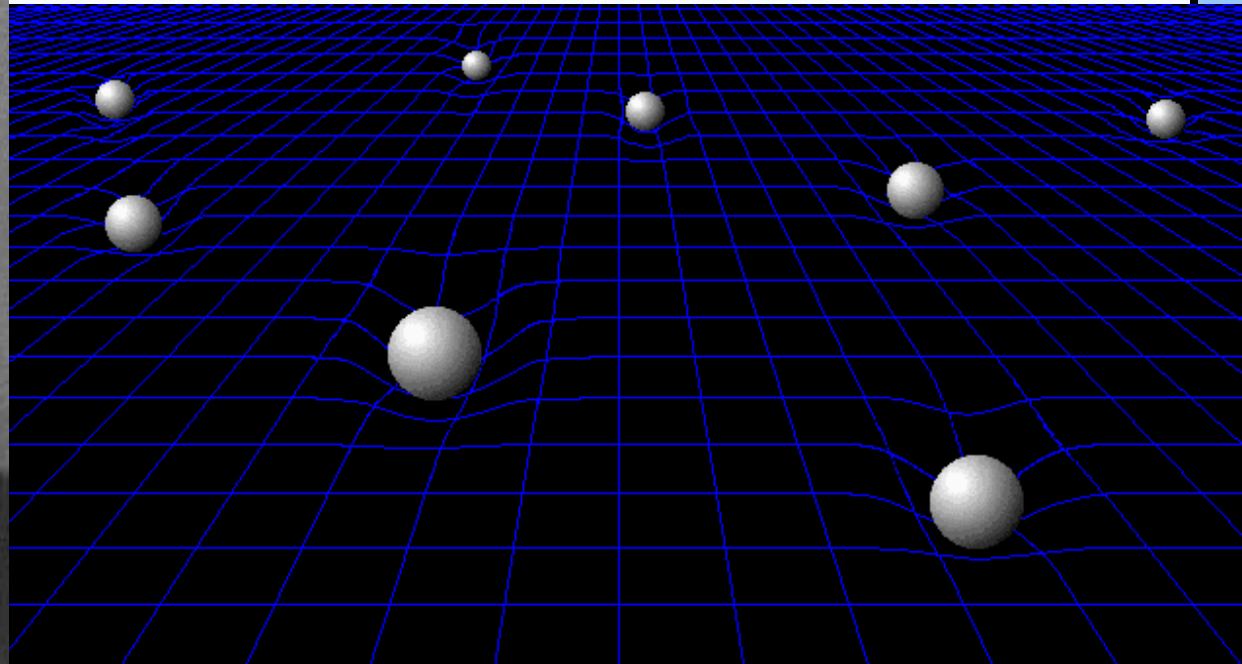
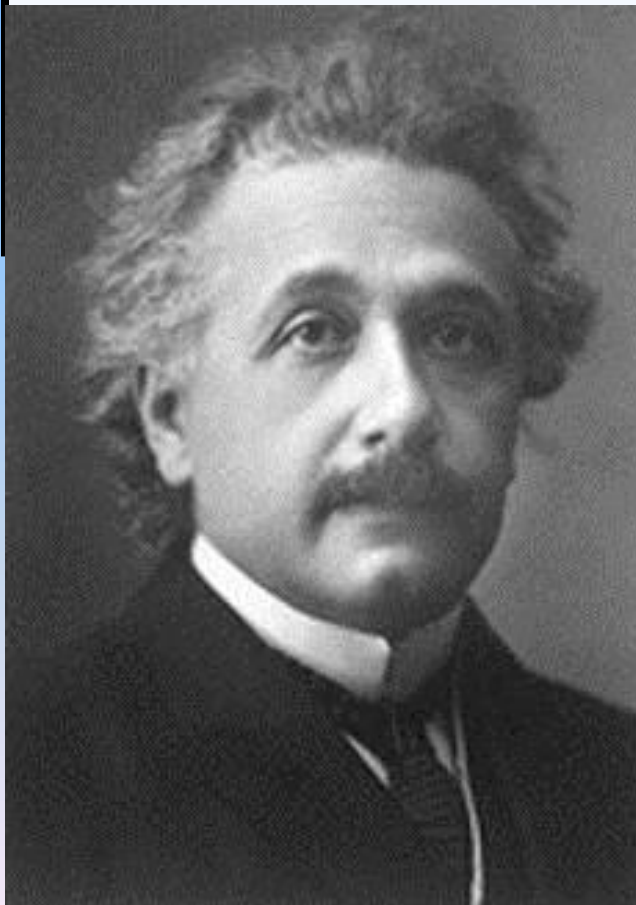
Einstein revolutioniert die Physik

1915 zeigt Albert Einstein → Mit Gravitation wird die Geometrie des Minkowski-Raumes verallgemeinert.

→ Allgemeine Relativitätstheorie

Gravitation ist keine Kraft -

Gravitation ist Raumkrümmung



Gravitation krümmt Raum

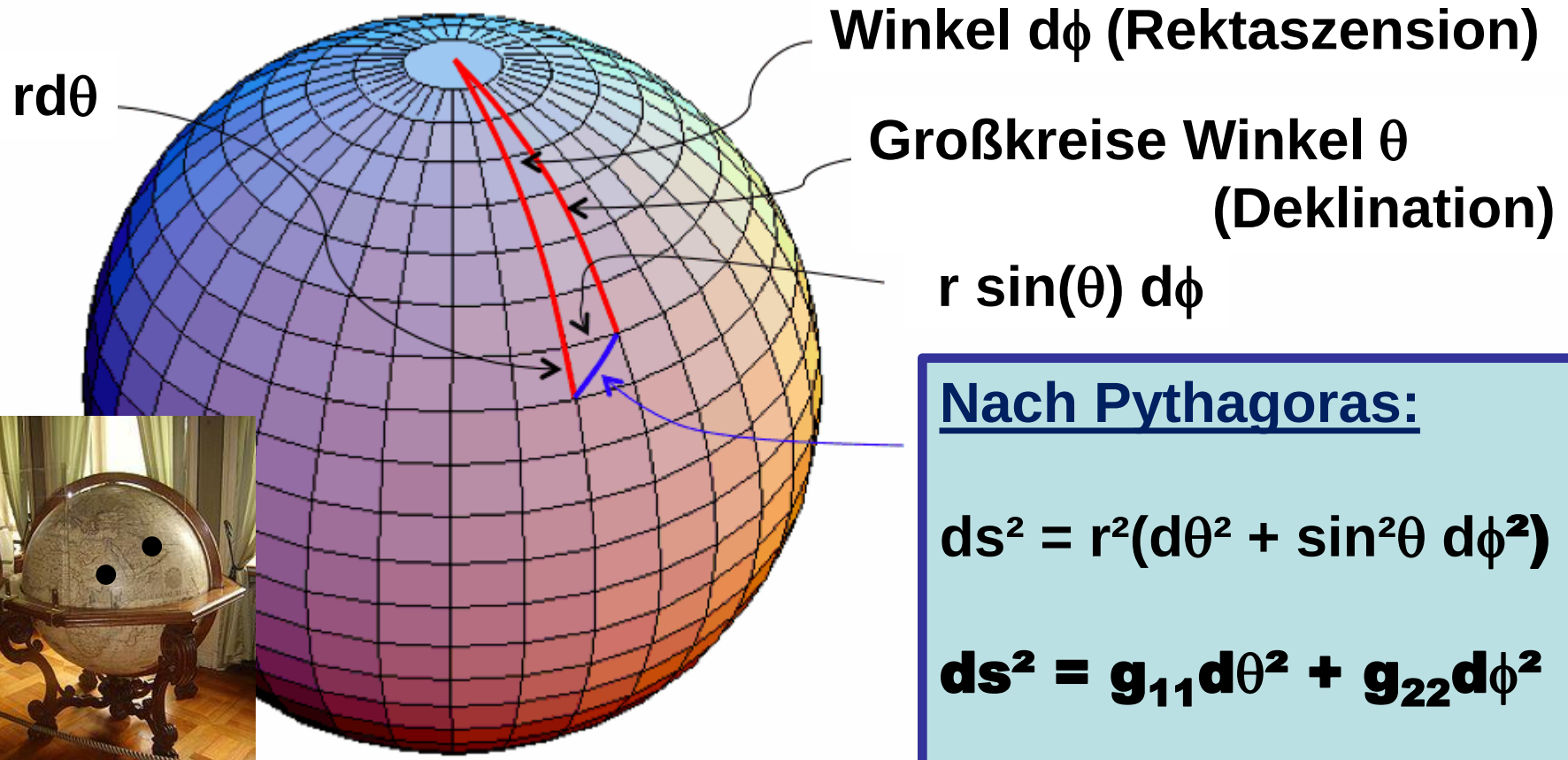
Riemannscher Geometrie

$$ds^2 = \sum_{i,j=0}^n g_{ij} dx^i dx^j$$

- **Ein Riemannscher Raum ist eine Punktmenge, auf der man messen kann. Einstein: ein Punkt $(t,x,y,z) = \text{Ereignis}$, $n=4$.**
- g_{ij} ist der **Metrische Tensor** (symm. Tensor 2. Stufe) : 10 Funktionen für den 4-dimensionalen Raum $\rightarrow n = 4 \rightarrow S^2$
- $\rightarrow$ Vorschrift, den Abstand zwischen zwei Punkten zu berechnen.
- $\rightarrow$ Aus metrischem Tensor folgen **Riemann und Ricci** Tensoren .
Der metrische Tensor bestimmt auch die **Geodäten** (Trajektorien der frei fallenden Körper) mittels Christoffel-Symbole.

Geometrie der Kugelflächen S^2

Sphäre mit Radius r



Nach Pythagoras:

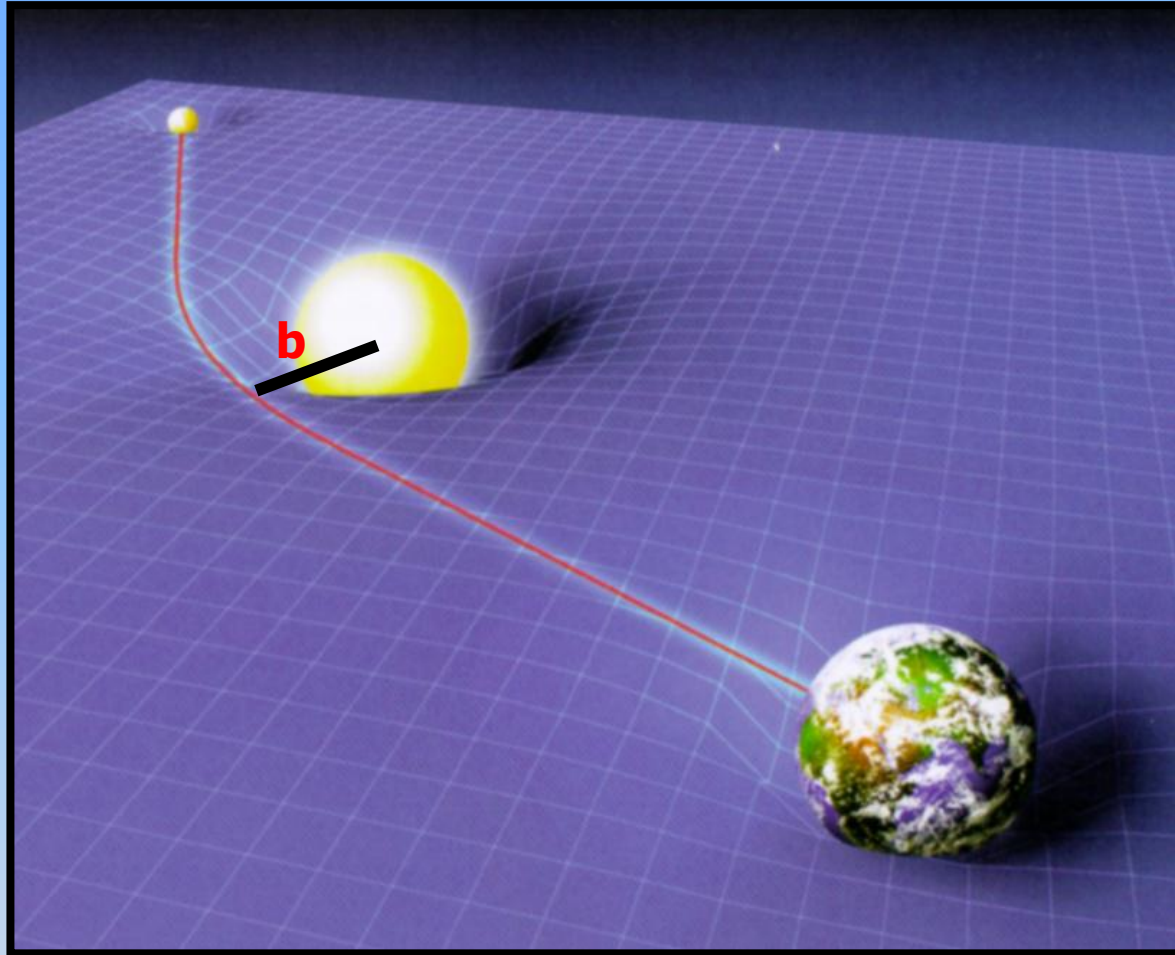
$$ds^2 = r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$

$$ds^2 = g_{11}d\theta^2 + g_{22}d\phi^2$$

$$g_{11} = r^2, g_{22} = r^2\sin^2\theta$$

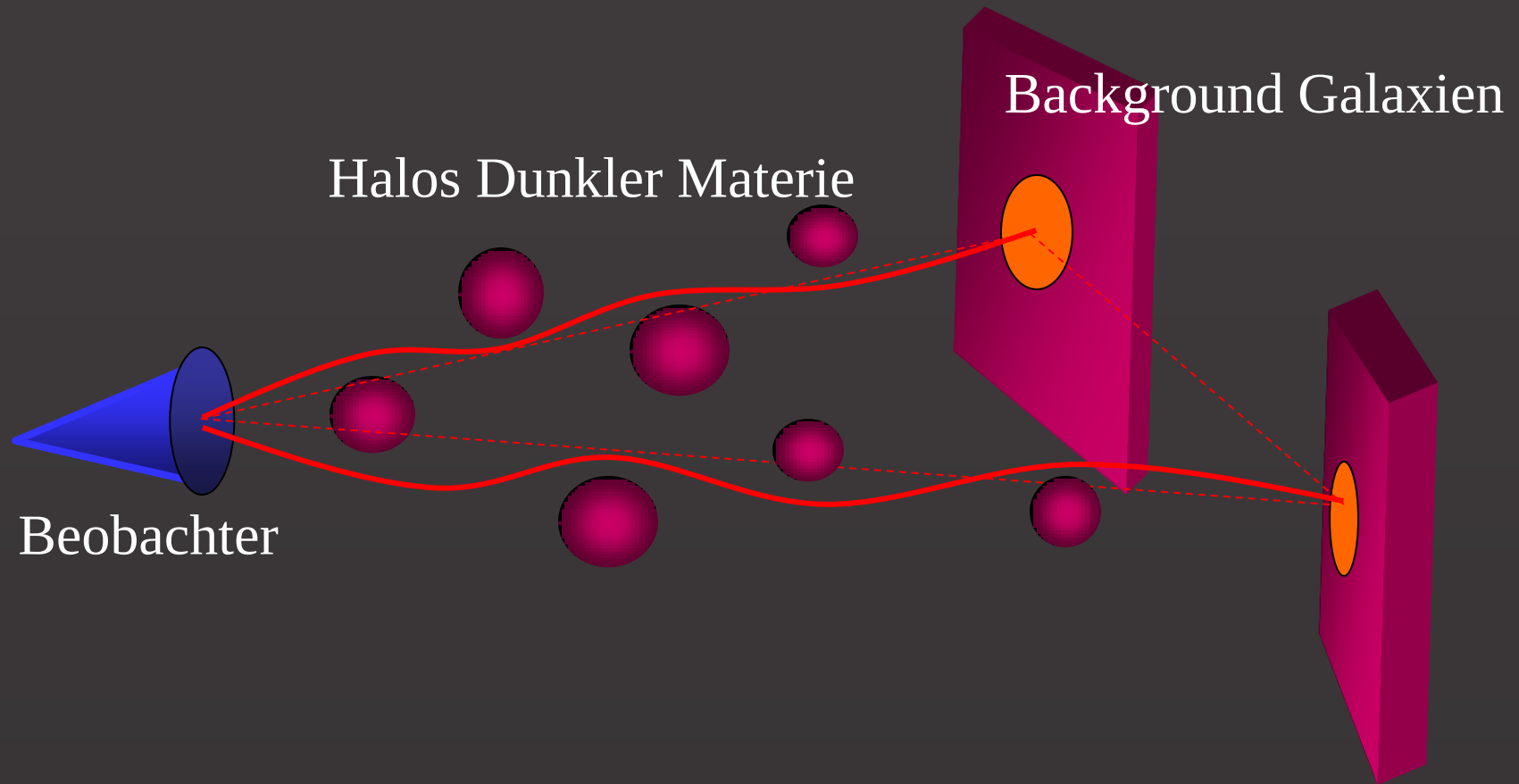
Gravitation krümmt den Raum

→ Lichtablenkung an Sonne und Planeten



$$\alpha = 4GM/c^2 b = 1,7505 \text{ arcsec} (R_{\text{Sonne}} / b)$$

DM Halos → Gravitationslinsen



Lichtablenkung im Universum

Krümmung der RaumZeit 1915

$$R_{ik} - \frac{1}{2} R g_{ik} + \Lambda g_{ik} = (8\pi G / c^4) T_{ik}$$



Krümmung



Kosmol. Konstante



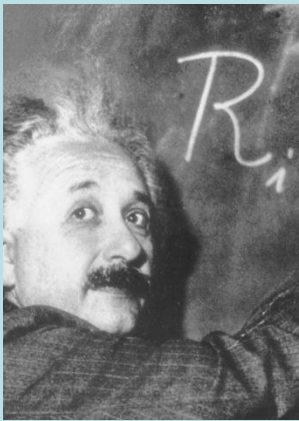
Materie

R_{ik} Ricci Tensor mit Spur $R = R^m_m$:

folgt aus Riemann Tensor

Albert Einstein 1915:

**Jede Form der Materie erzeugt Krümmung R
(auch Photonen, Felder, Vakuum-Energie?)**

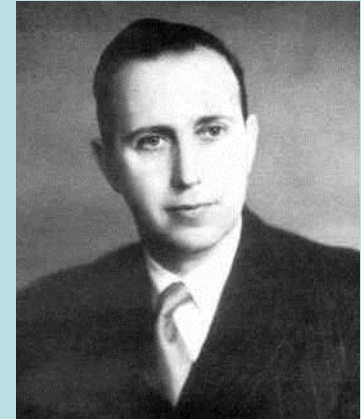


Albert Einstein
Deutsch

Allgemeine
Relativität (1915);
Statisches, geschl.
Universum (1917)

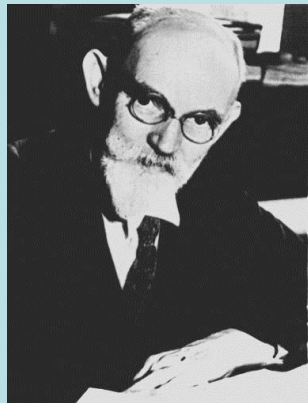


H.P. Robertson
Amerikaner



A.G. Walker
Britisch

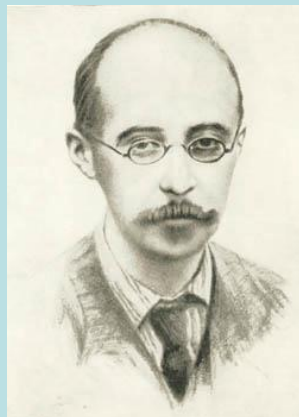
Allgemeine Herleitung der Metrik eines
isotropen und homogenen Universums in
ART "Robertson-Walker Metrik" (1935-6)



W. de Sitter
Holländer

Vakuum-Energie-
gefülltes expand.
Universum
"de Sitter" (1917)

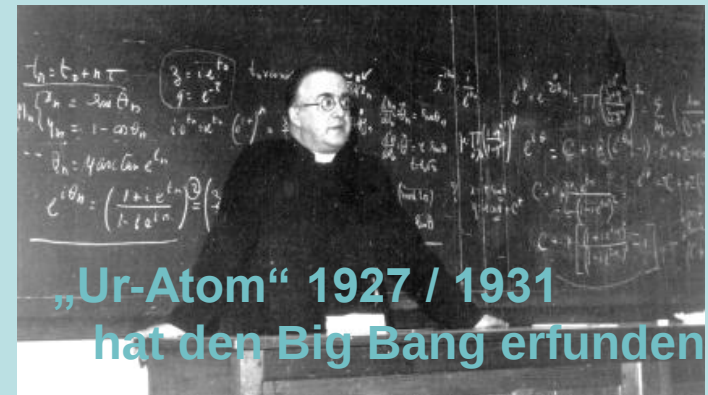
Väter des Modernen Universums



A. Friedmann
Russe

Entwicklung eines homogenen,
expandierenden Universums
"Friedmann Modelle"
(1922/1924)

G. Lemaître
Belgier



„Ur-Atom“ 1927 / 1931
hat den Big Bang erfunden

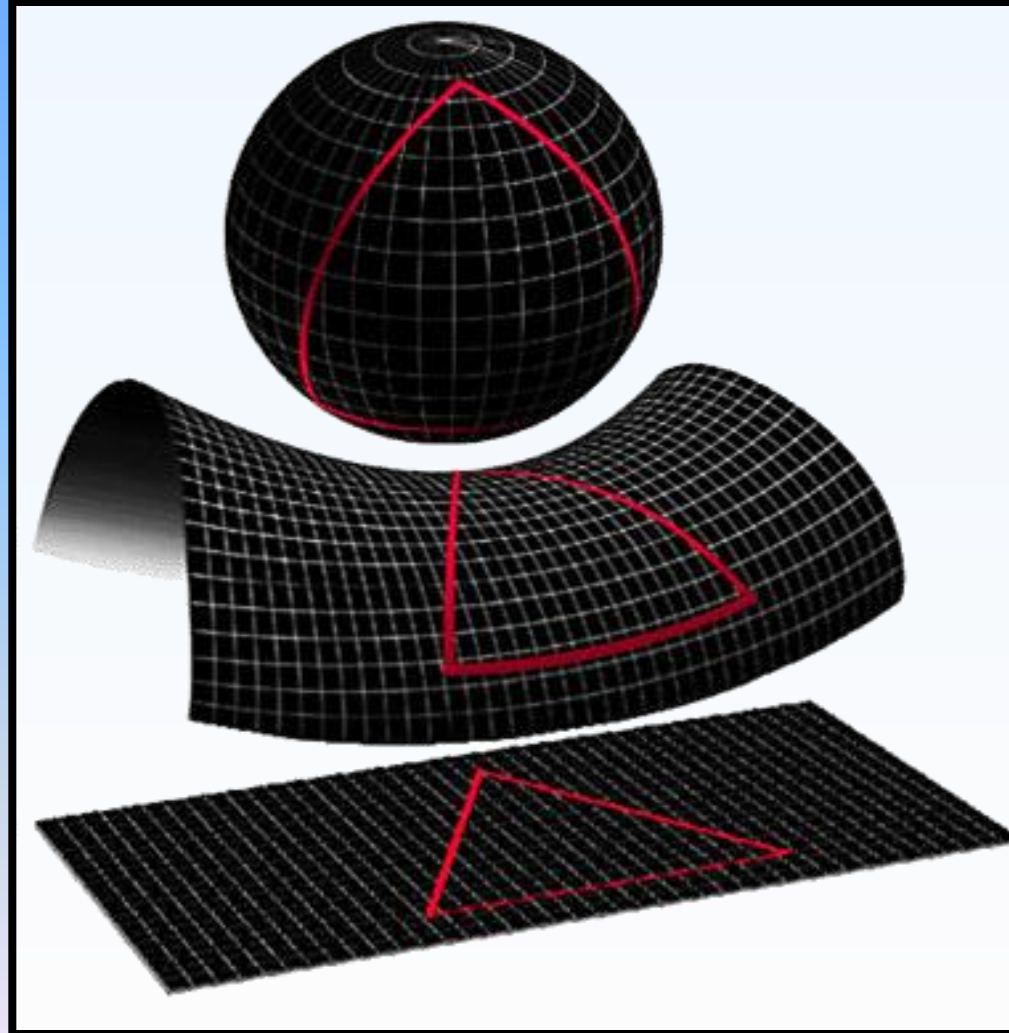
**Weder Erde noch Sonne
im Zentrum des Universums !**

Kosmologisches Prinzip (Milne 1933)

- 1. Wir befinden uns an keiner ausgezeichneten Position des Universums (→ kein Zentrum).**
- 2. Das Universum ist isotrop.
→ Erst in den 90er nachgewiesen!**

Welche Geometrie hat Kosmos?

- Wie sieht der Raum aus $d\sigma^2$?
- Aus Kosmologischen Prinzip
(Isotropie um jeden Punkt)
→ räumliche Krümmung
überall **konstant**.
- → Nur **3 Möglichkeiten**:
 - **3-Sphäre** – positive Krümmung: $K > 0$
 - **3-Sattel** – negative Krümmung: $K < 0$
 - **Flacher E^3** – keine Krümmung: $K = 0$



Kosmische Sphären

Big Bang

Wir sind
scheinbar
im Zentrum
des
Universums

$$r = 0$$

Jede
Kugel-
Schale:
 $r = \text{const}$

Kugel-
schalen
expandieren
mit der Zeit
 $r \rightarrow a(t) r$

Photosphäre

Universum

3000 K

2,725 K

Galaxien-
Sphäre

Expandierendes Universum

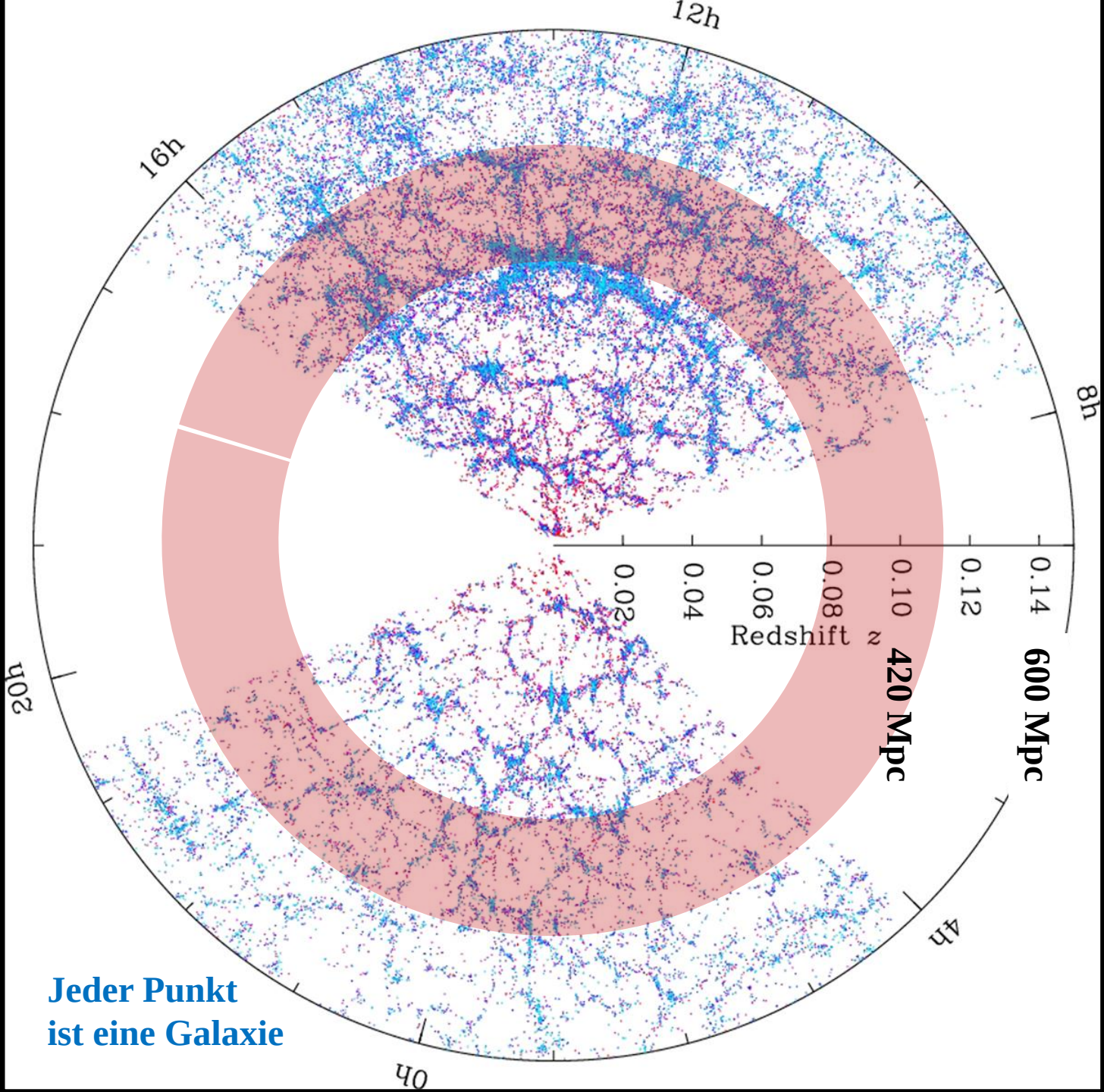
Kugelschalen mit Radius $a(t)r$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left\{ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right\}$$

Räumliche Krümmung $\{+1, 0, -1\}$

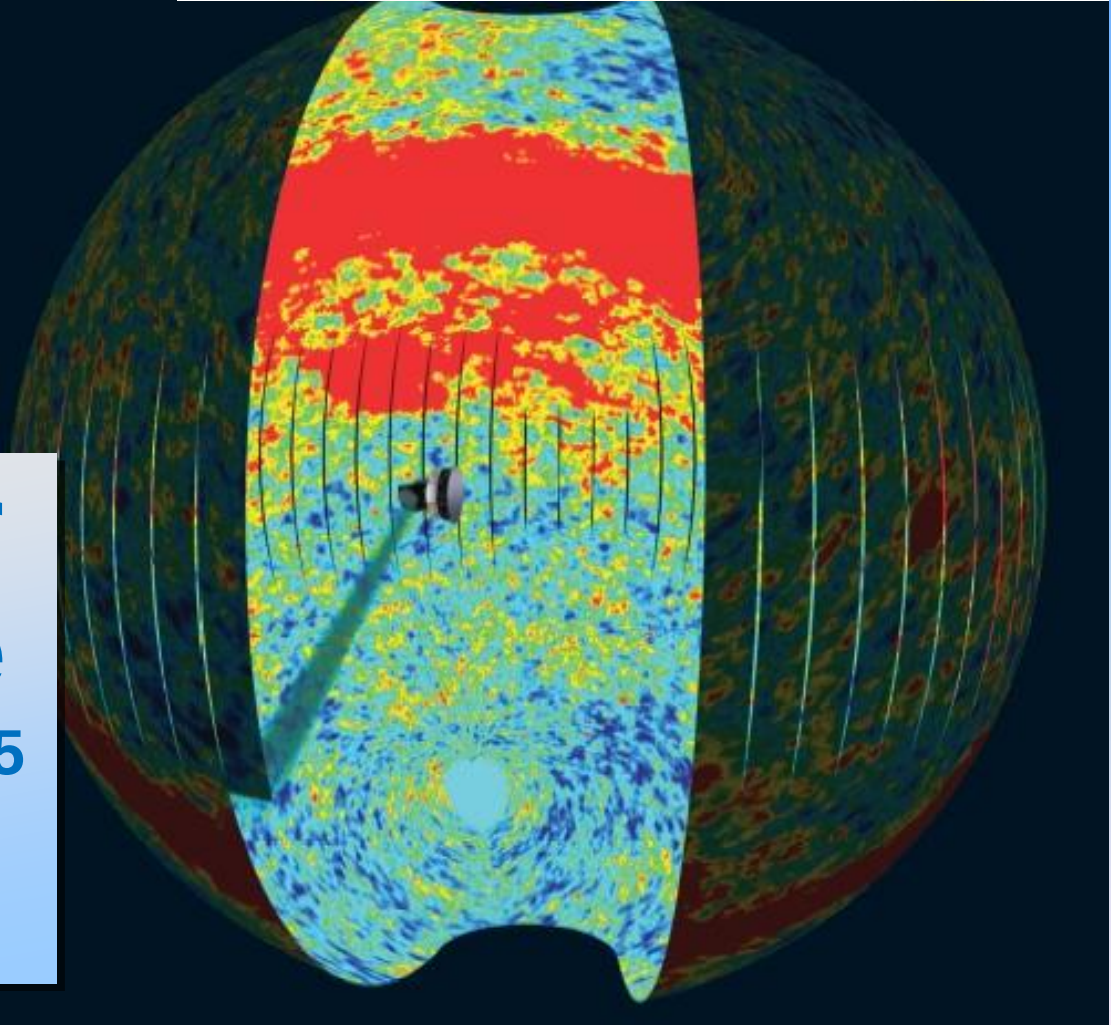
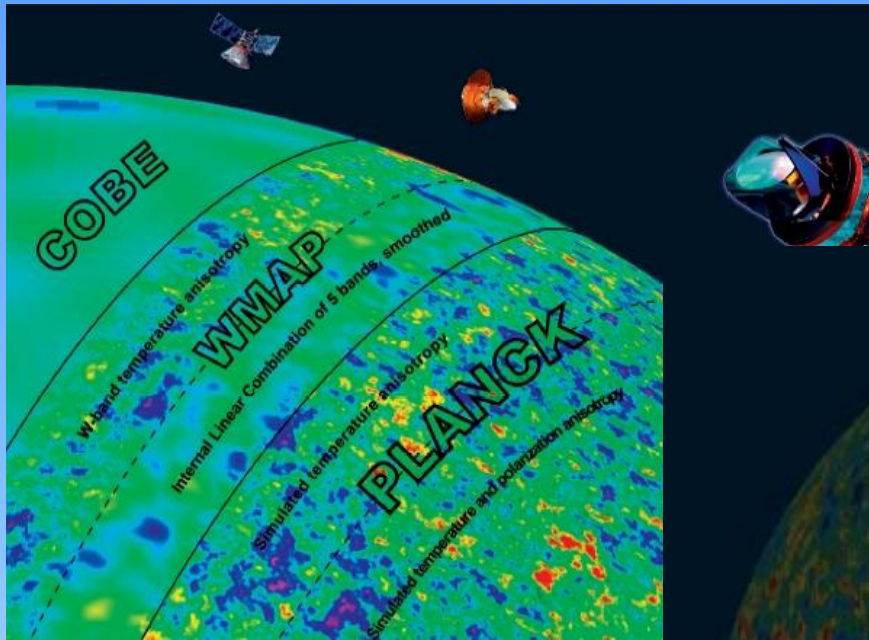
r, θ, ϕ sind co-moving Koordinaten (“Labels” für Galaxien).
t: ausgezeichnete kosmische Zeit (gemessen von Atomuhren im Zentrum von Galaxienhaufen – Virgo, Coma, ...).
 $dx = a(t) dr$: Distanzen gestreckt (isotrope Expansion).
 $a(t)$ ist eine Funktion der Zeit und r bleibt konstant.
 $a(t)$ ist als Skalenfaktor des Universums bekannt und mißt die universelle Expansionsrate des Universums.
 $a(t_0) = 1$ normiert, wobei t_0 die heutige Zeit (Alter d. Univ.).

Isotropie der Galaxien- verteilung auf **Sphären** 2000 – 2008 SDSS DR7



light travel time from Earth: 70 years





Isotropie der Photosphäre

Penzias & Wilson 1965

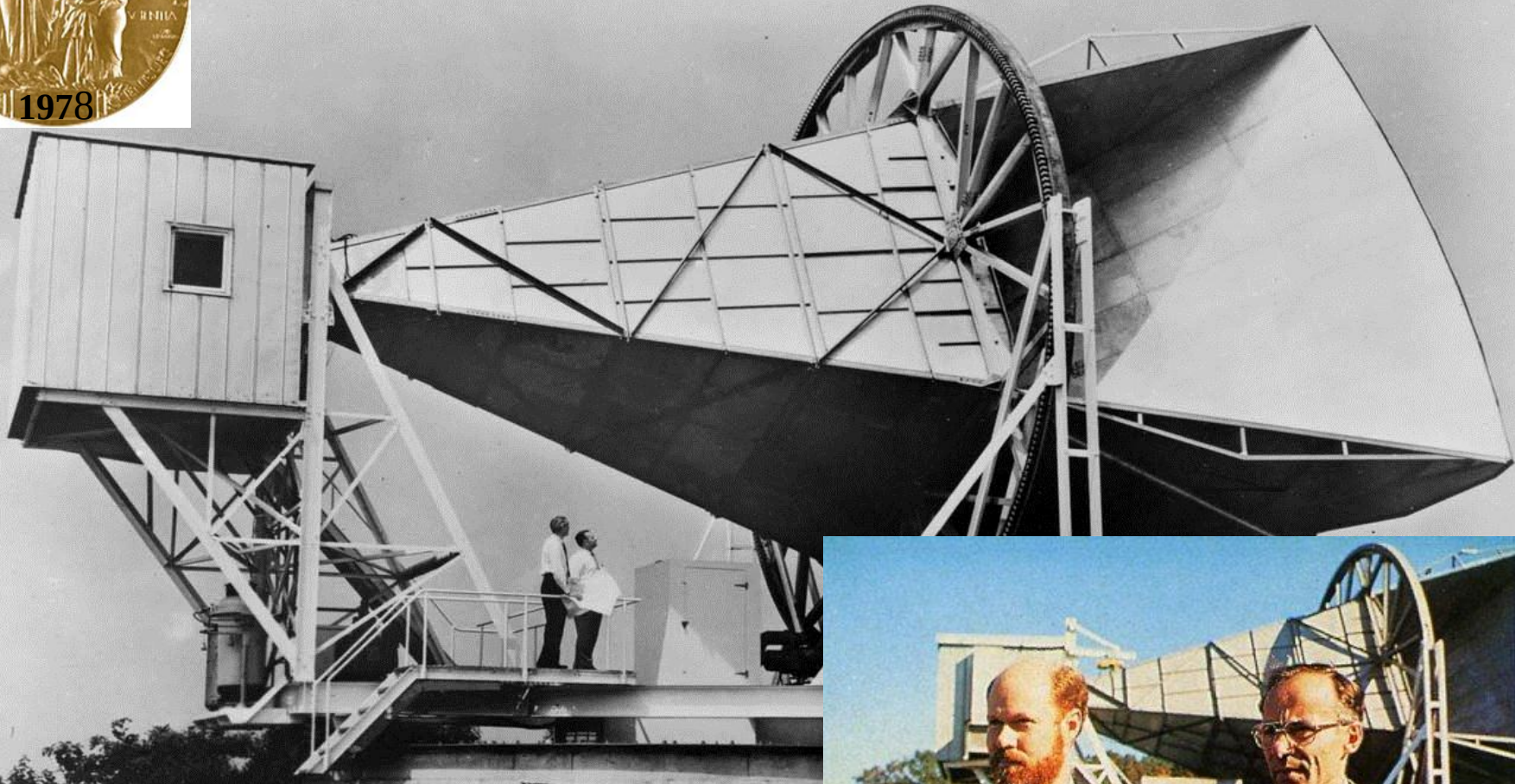
COBE 1989-1993 (NASA)

WMAP 2001-2010 (NASA)

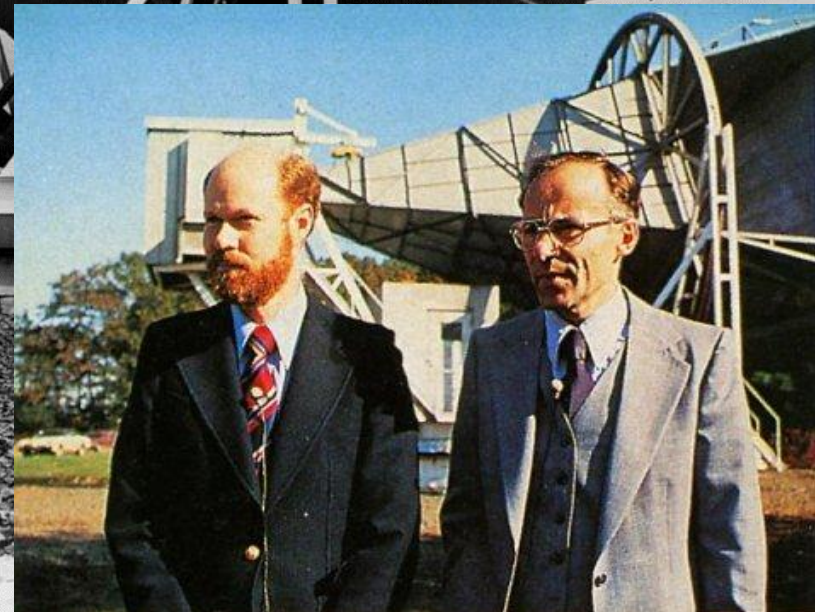
Planck 2009-2012 (ESA)



Penzias & Wilson 1965

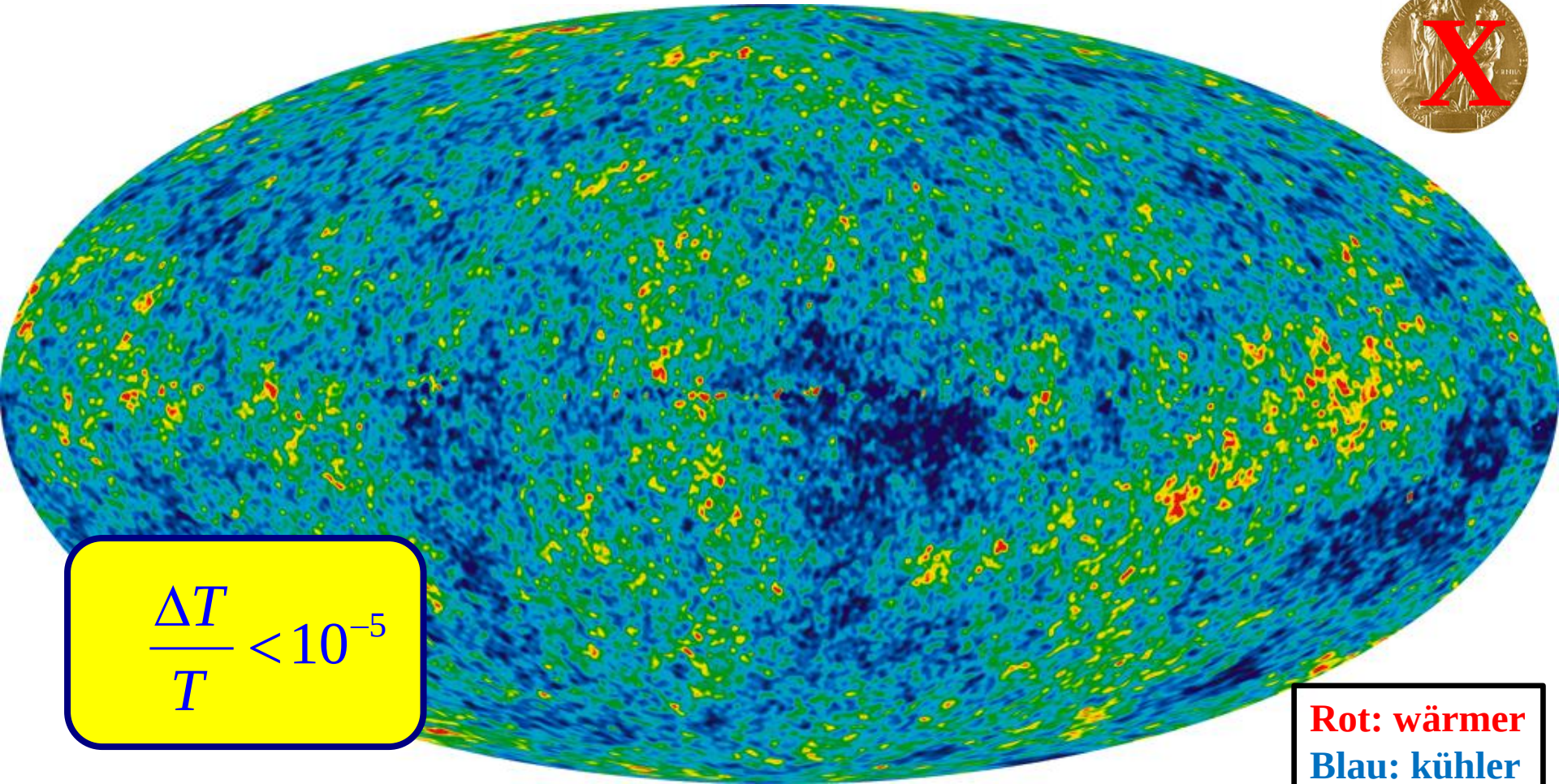


Kosmisches Rauschen
zu Temperatur von 5 K
→ COBE: $T_0 = 2,725 \text{ K}$



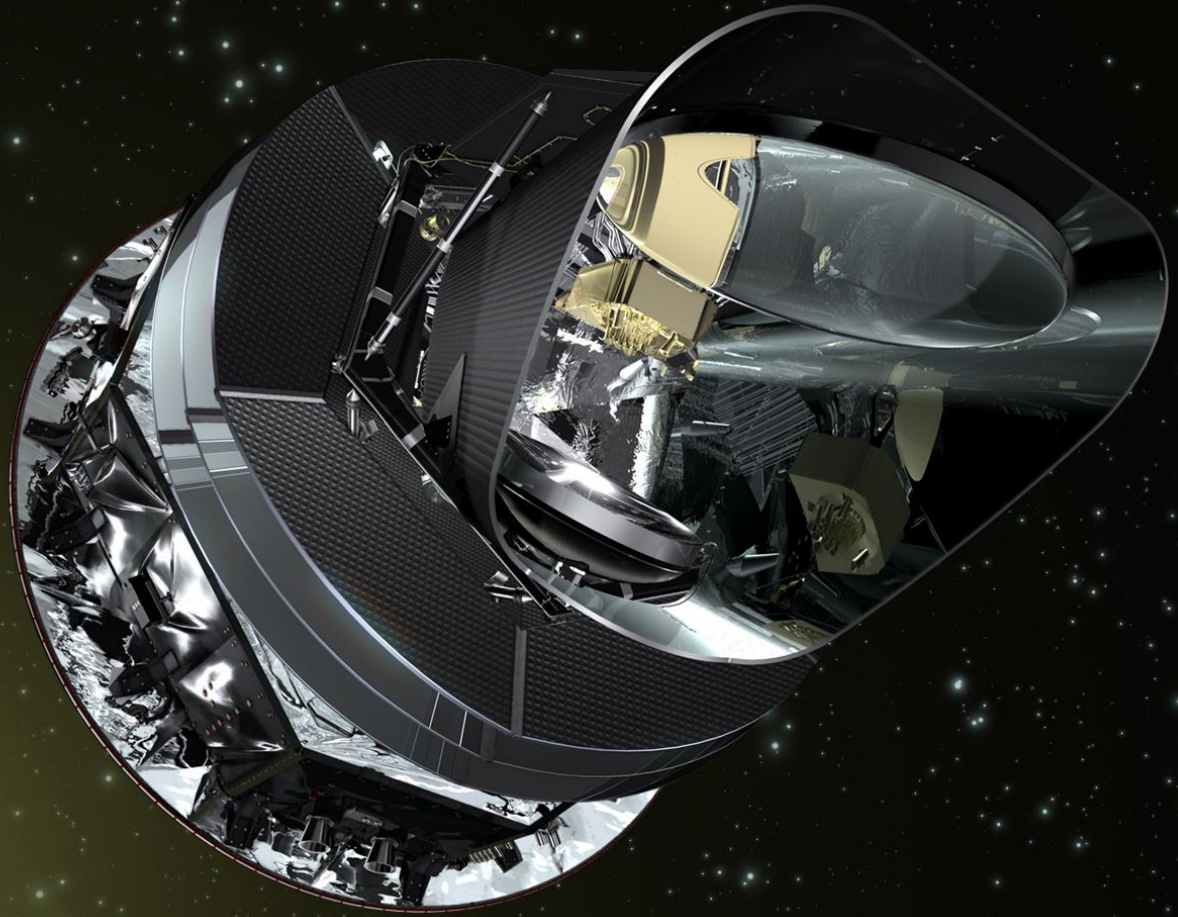
WMAP → Photosphäre isotrop

Auflösung 14′ reicht nicht ; 20′ → 80 Mpc

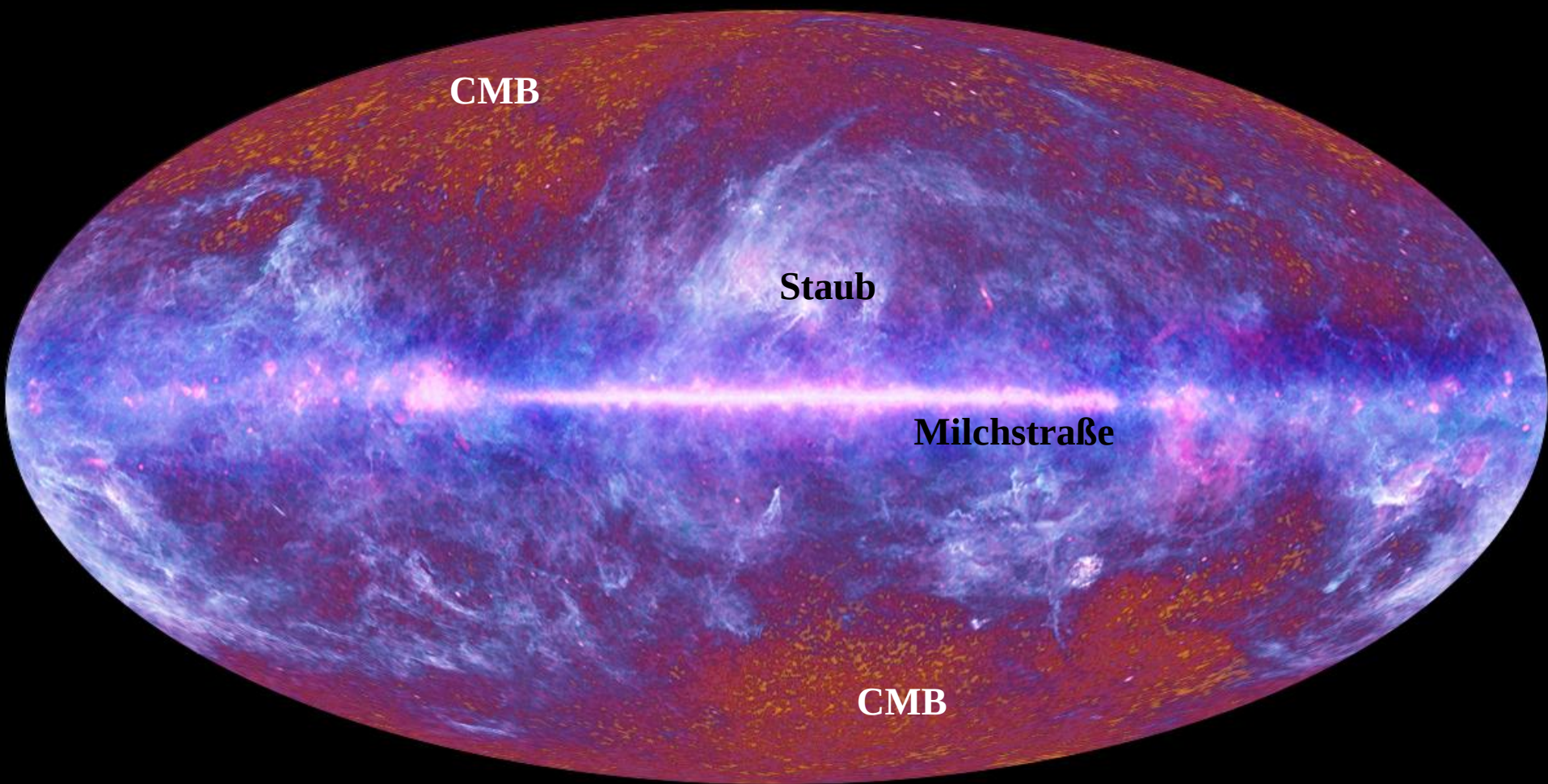


Rot: wärmer
Blau: kühler

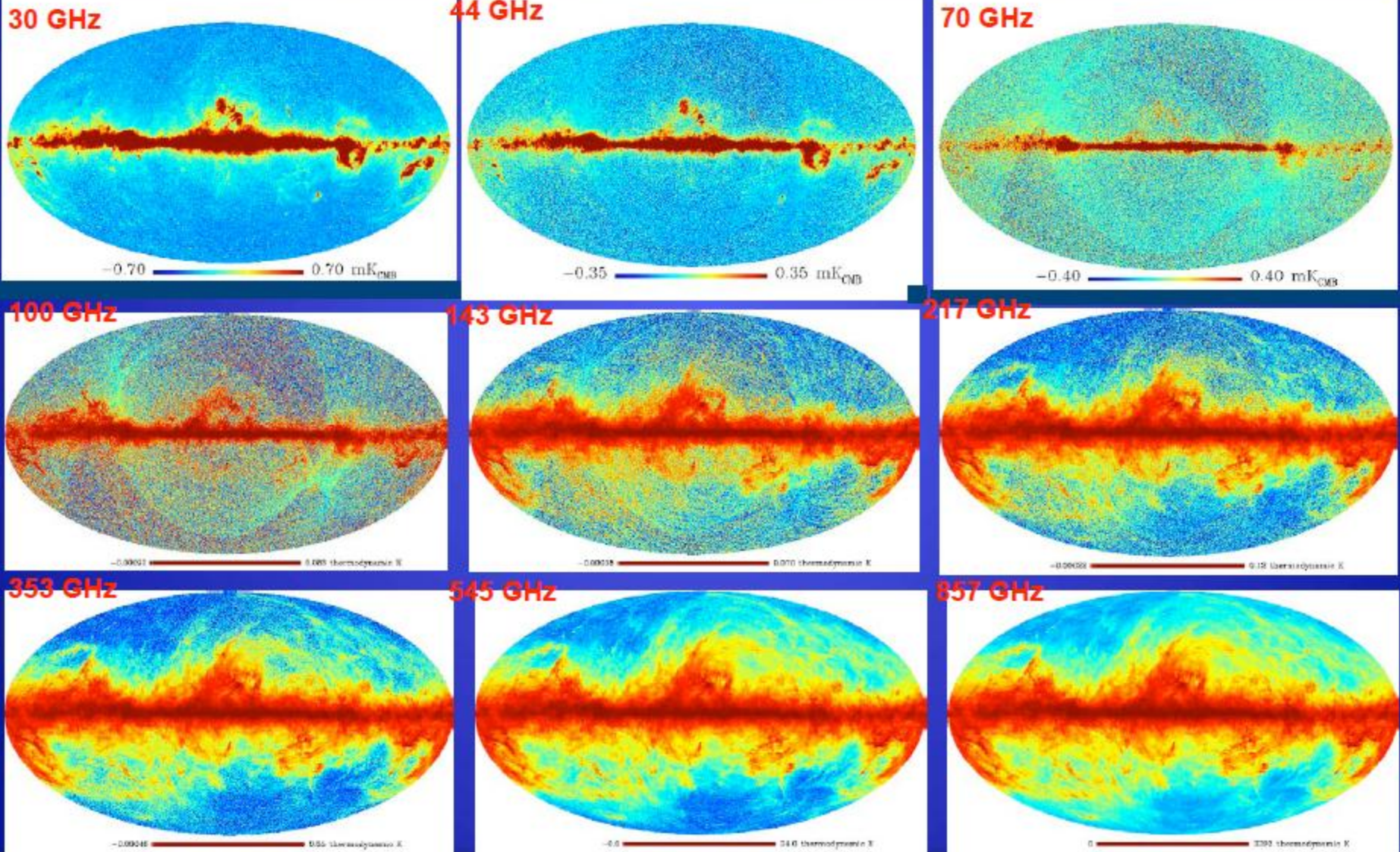
$\Delta T < \pm 100$ micro-Kelvin um $\langle T \rangle = 2,725$ Kelvin

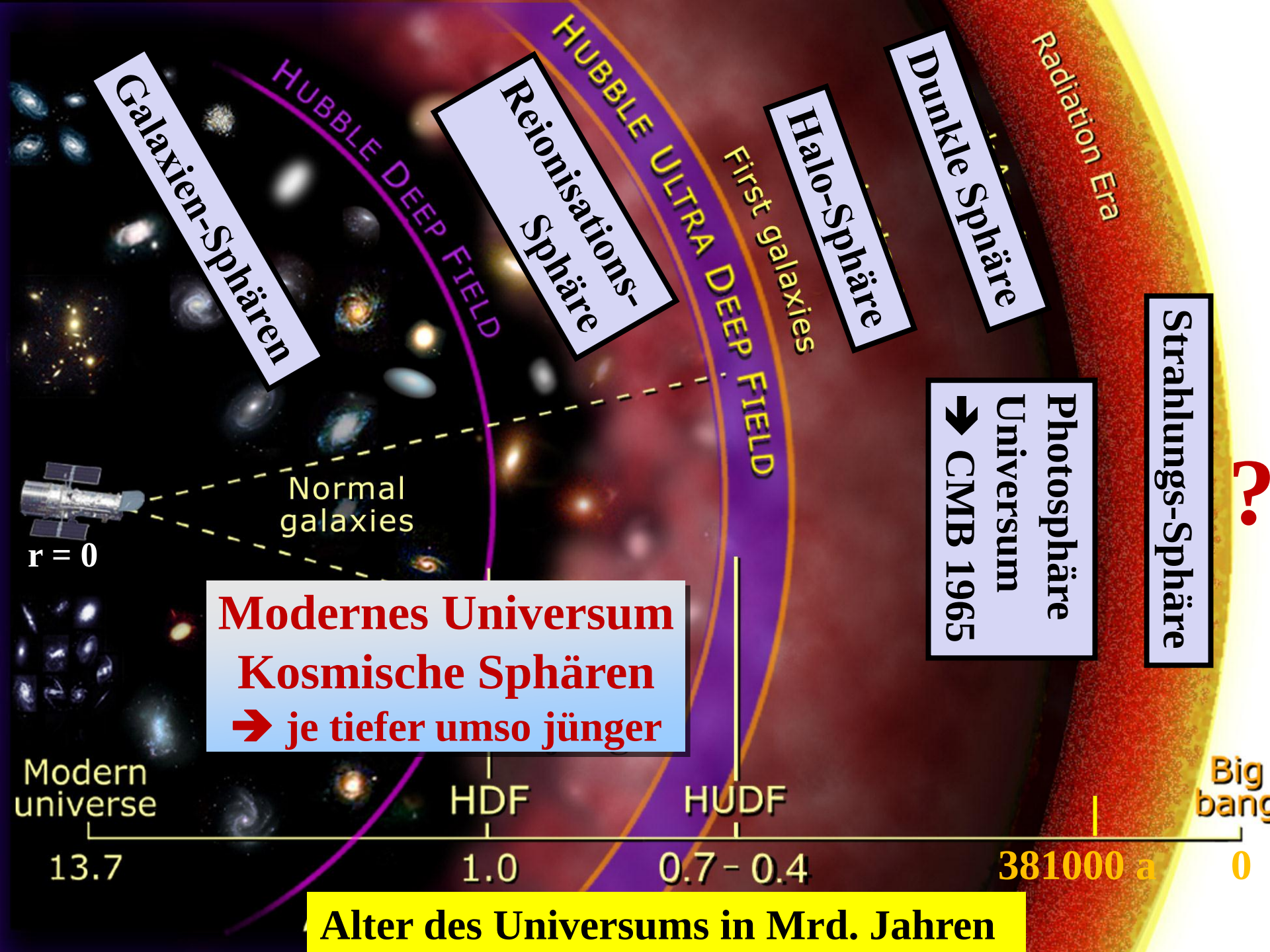


**2009-2012 Planck/ESA
im Lagrangepunkt L2
→ Auflösung = 5 arcmin
entspricht ~ Galaxienhaufen**



CMB Planck 1 Jahr – 9 Bänder





Big Bang

$t = 0$:

Rand des
Universums

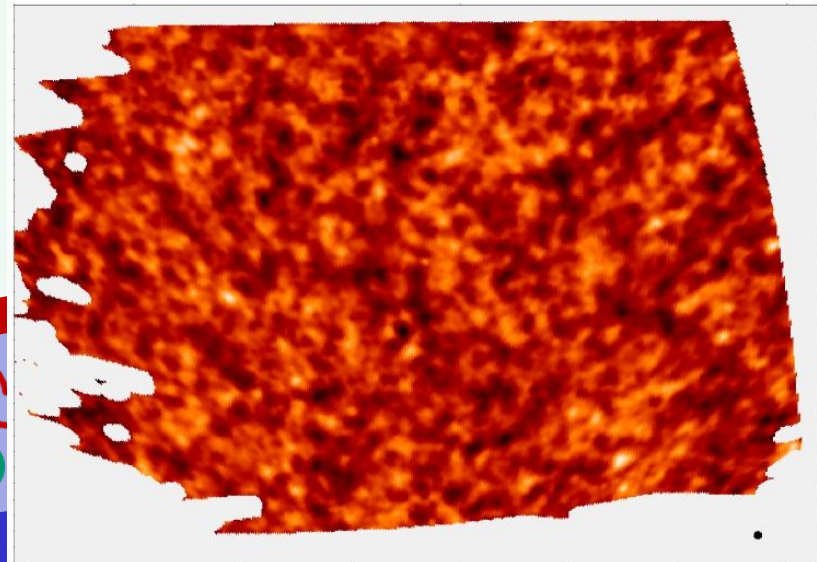
Strahlungssphäre:
Photon-dominiertes
neutrales Plasma
1 e⁻ auf 2 Mrd. Phot

**Photosphäre
Universum**
2,725 K
380.000 LJ

13,7 Mrd. LJ

Temperatur
nimmt zu
 $T \rightarrow 10^{32}$ K

-300 μ K -300 -200 -100 0 100 200 300 μ K



Dynamik der Expansion des Universums und Rotverschiebung



Die kosmologischen Gleichungen mit kosmologischer Konstante

Lemaître 1927

Friedmann
1922 & 1924

$$H(t)^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

1. Hauptsatz der
Thermodynamik

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) = 0$$

Beschleunigung
→ 2 Terme
Materie bremst

$$\frac{1}{a} \frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda}{3}$$

Zustandsgleichung:
ungeändert

$$p = p(\rho)$$

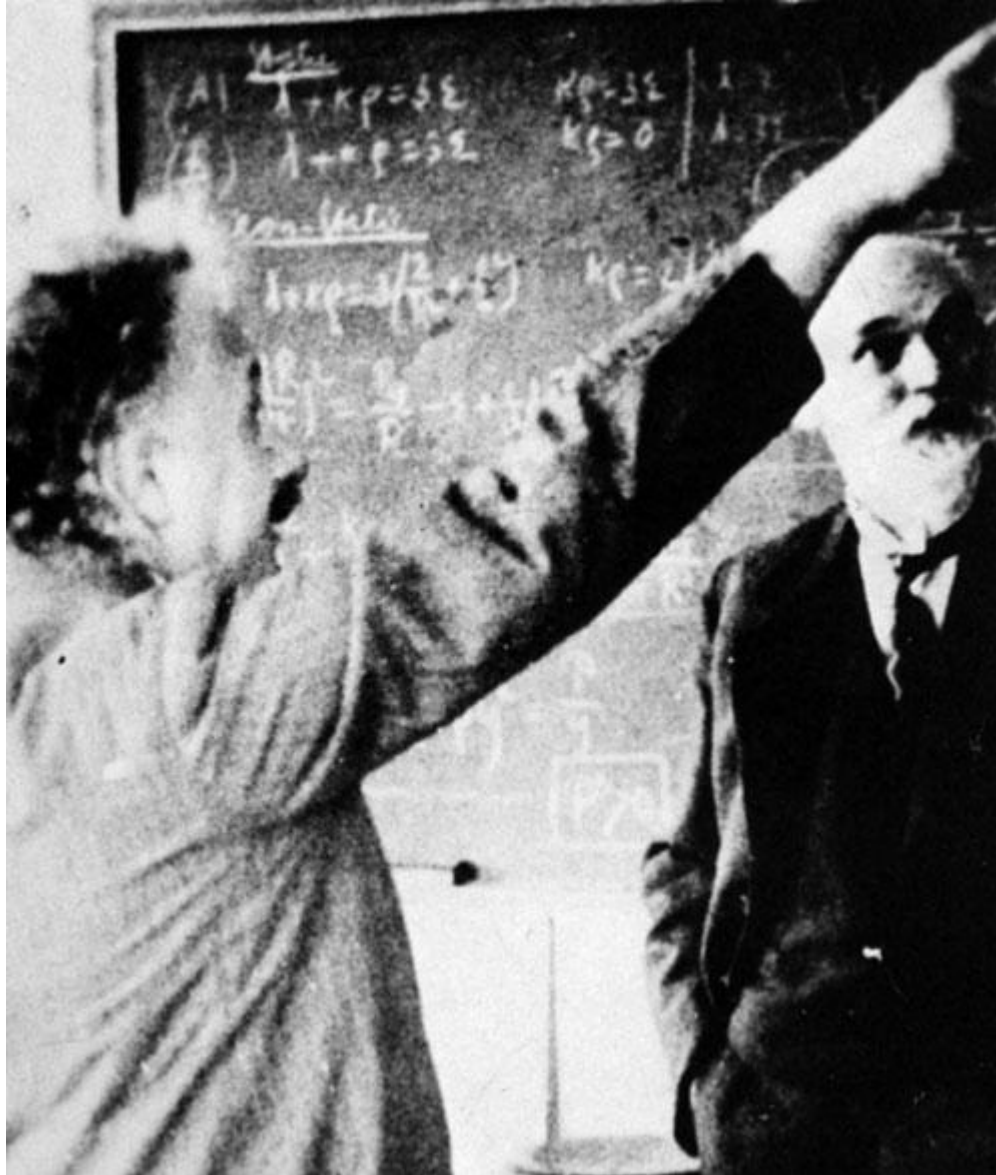
“Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius” → $k=1$

G. Lemaître 1927 / translated by A. Eddington 1931

- „According to the theory of relativity, a **homogeneous universe** may exist, ...;“
- „There is **no centre of gravity**.“
- „Space is elliptic, i.e. of uniform positive curvature $1/R^2$.“ → Metrik Ansatz: $ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) d\sigma^2$ (1)
- „The **volume of space** has a finite value $\pi^2 R^3$.“
- „When a light source is near enough, we have the approximate formula (→ heute: „Hubble-Gesetz“)
(23) $cz = (R'/R) r$ | $z + 1 = dt_0/dt_1 = R_0/R_1$
where r is the distance of the source.“

Obs | Emission

Einstein, de Sitter & Lemaître 1932



... treffen sich in Kalifornien → Lemaître überzeugt Einstein ! → Einstein-de-Sitter

Die moderne Schreibweise

$$(\dot{a}/a)^2 = 8 \pi G \rho(t) / 3 - kc^2/a^2$$

$$\rho(t) = \rho_{\text{crit}} [\Omega_r a^{-4} + \Omega_m a^{-3} + \Omega_{\text{DE}} a^{-3(1+w)}]$$

Dunkle
Energie:
 $w \sim -1$

- Einsetzen in Friedmann-Glg., $H_0 \equiv (\dot{a}/a)_0$:

$$(\dot{a}/a)^2 = H_0^2 (\Omega_r a^{-4} + \Omega_m a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_{\text{DE}} a^{-3(1+w)})$$

$$\rho_{\text{crit}} \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 1,88 \times 10^{-29} h^2 \text{ g cm}^{-3} = 2,8 \times 10^{11} h^2 M_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$$

Omega-Parameter des Universums

$$\Omega_M = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_M$$

$$\Omega_k = -\frac{kc^2}{R^2 H_0^2}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}$$

$$\Omega_M + \Omega_k + \Omega_\Lambda = 1$$

Hubble-Radius

$$R_H = c/H_0 \\ = 4200 \text{ Mpc}$$

Da das Universum flach erscheint:

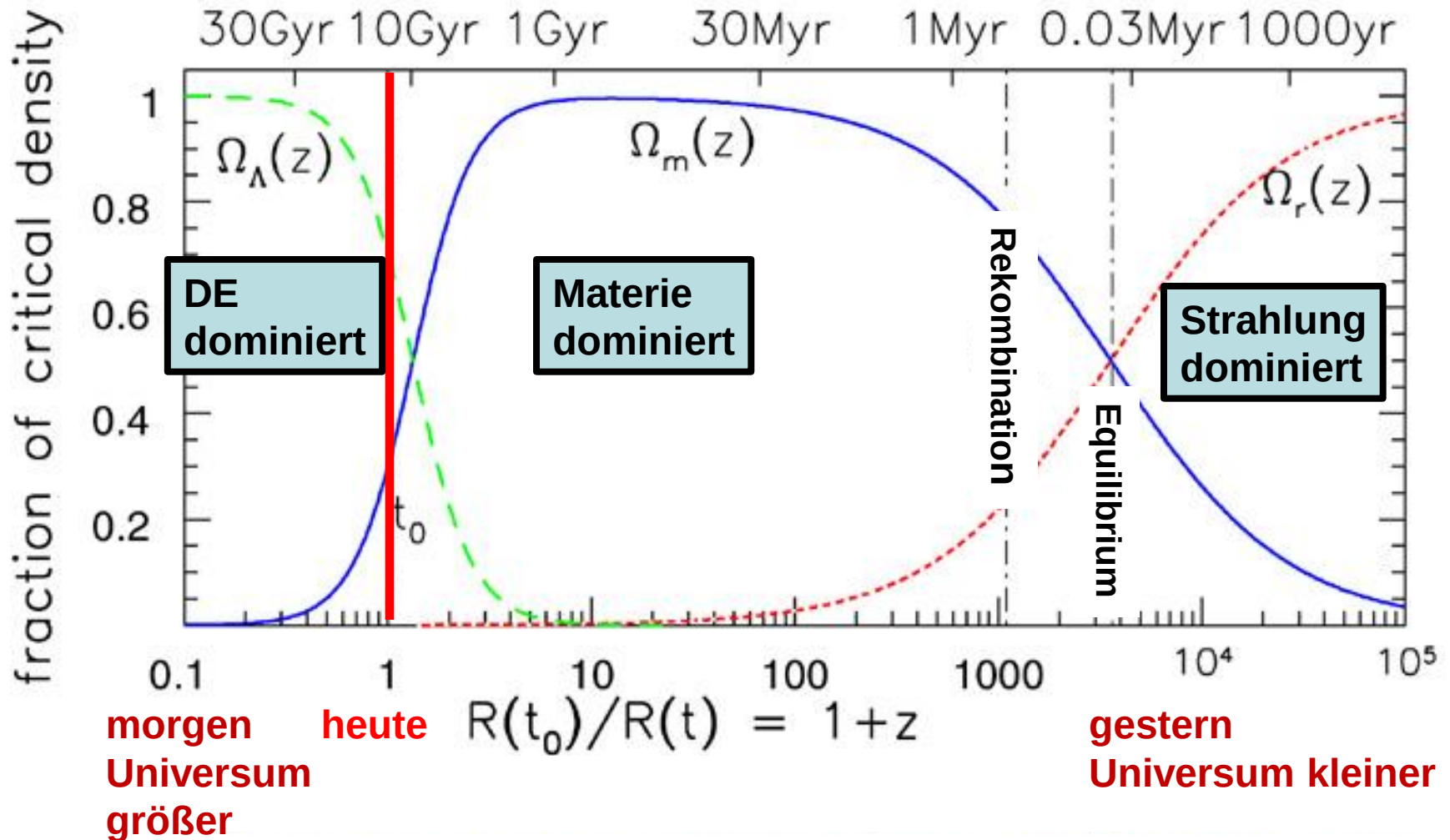
$$\Omega_k = -0,006$$

$$\Rightarrow k = +1$$

$$R_0 > 10 R_H$$

Fundamentalebene der Kosmologie

Dichte-Entwicklung ; $1+z = 1/a$



Konsequenzen aus Expansion

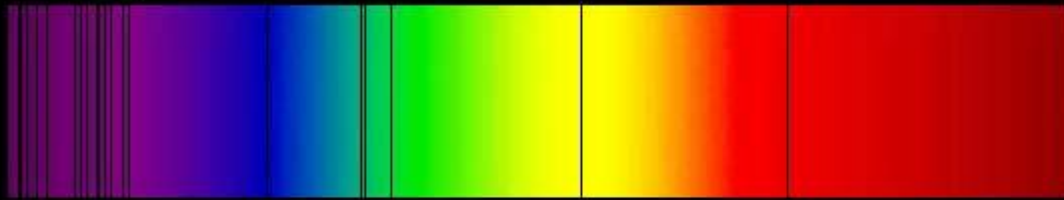
Lemaître 1927, Mattig 1958 → 

- **Kosmische Rotverschiebung der Galaxien**
→ Galaxien und alle Quasare zeigen rotverschobene Spektren: $1+z = 1/a(t)$
→ je größer Rotverschiebung desto kleiner das Universum.
- **Hubble-Gesetz**: lineare Beziehung zwischen Rotverschiebung und Distanz für $z < 0,1$.
- Distanzen sind nicht gleich Distanzen!
(comoving Distanz, Leuchtkraftdistanz, ...)
- **Alter** des Universums als $\text{Func}(z)$.

Galaxienspektren rotverschoben

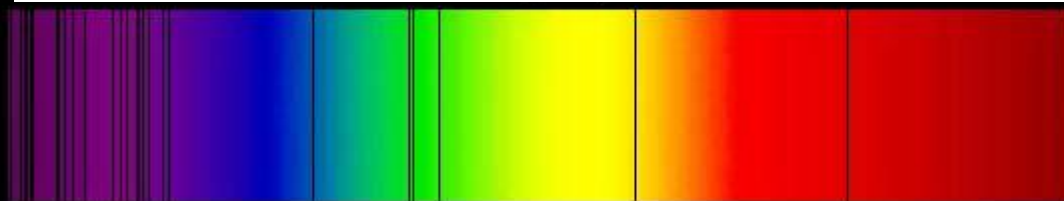
Slipher > 1912, Wirtz 1924, Hubble > 1925

Absorptionslinien der Sonne



Absorptionslinien von Galaxien

$z = 0,07 \rightarrow$ Distanz ~ 1 Mrd. Lichtjahre

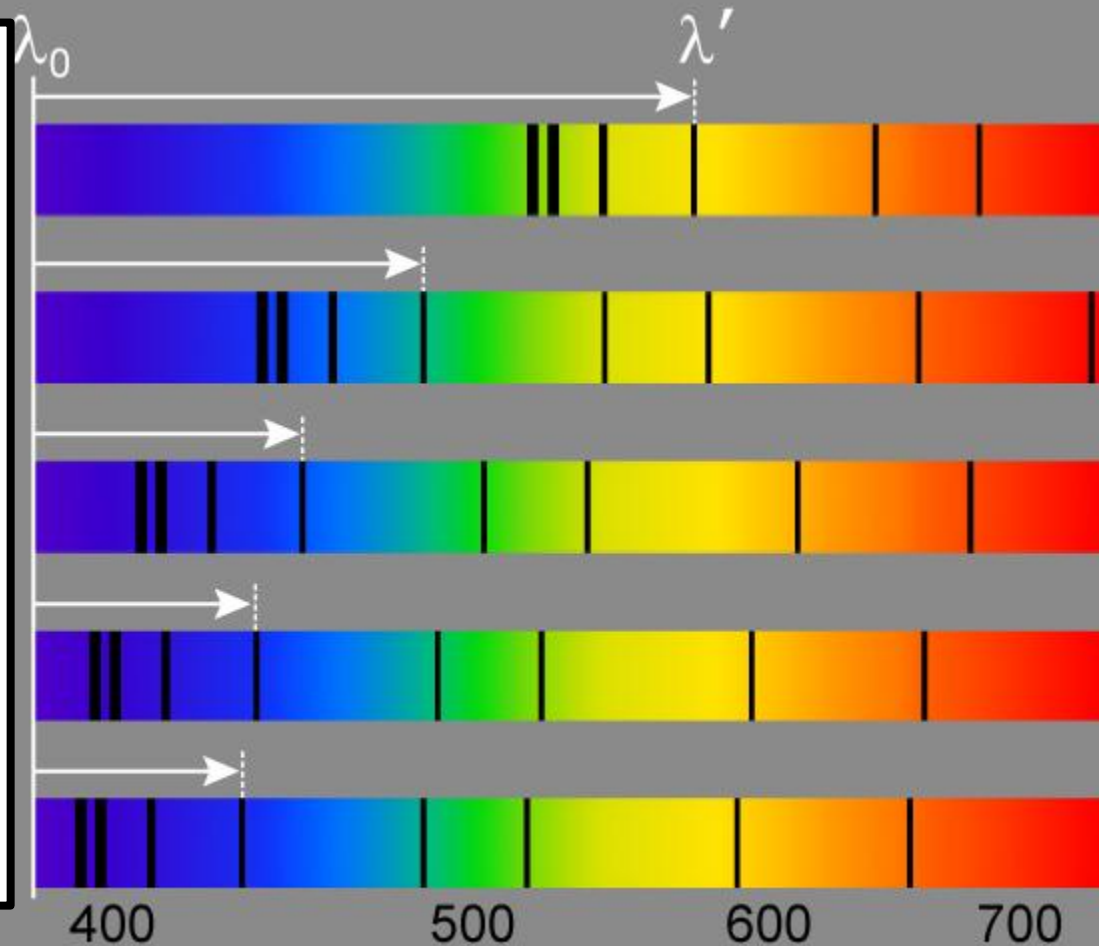


11

Wirtz 1924, ..., Hubble 1929

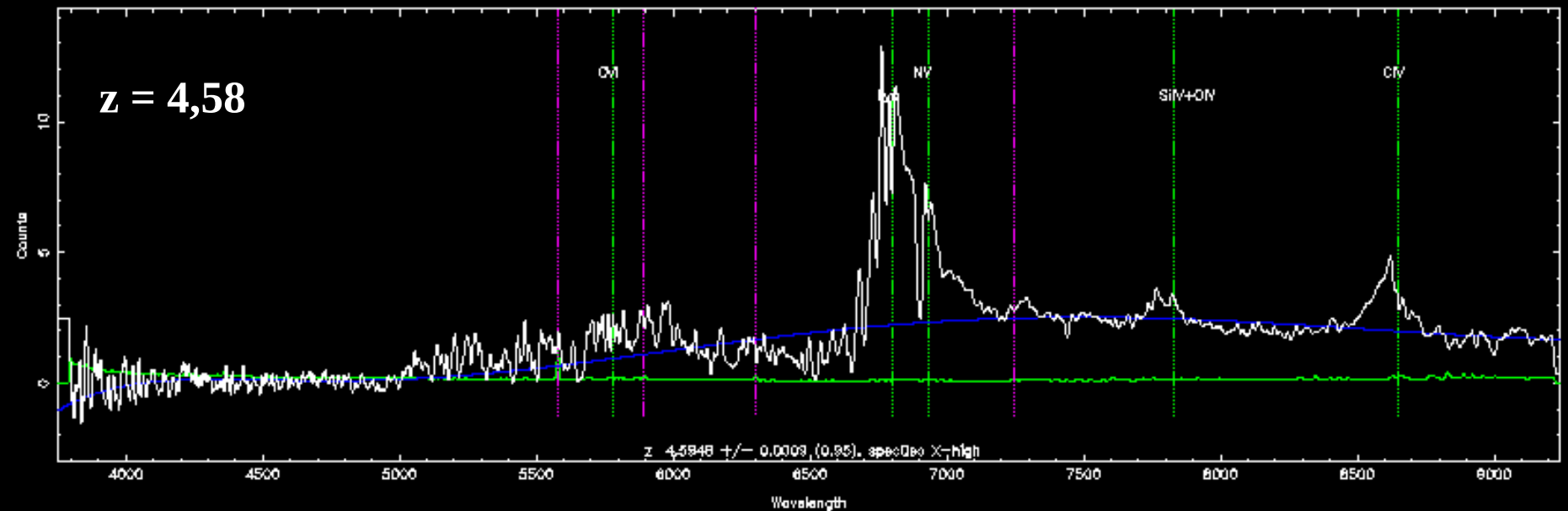
je weiter entfernt um so stärker

- Weit entfernte Galaxie
- Entfernte Galaxie
- Nachbar-Galaxie
- Stern
- Labor



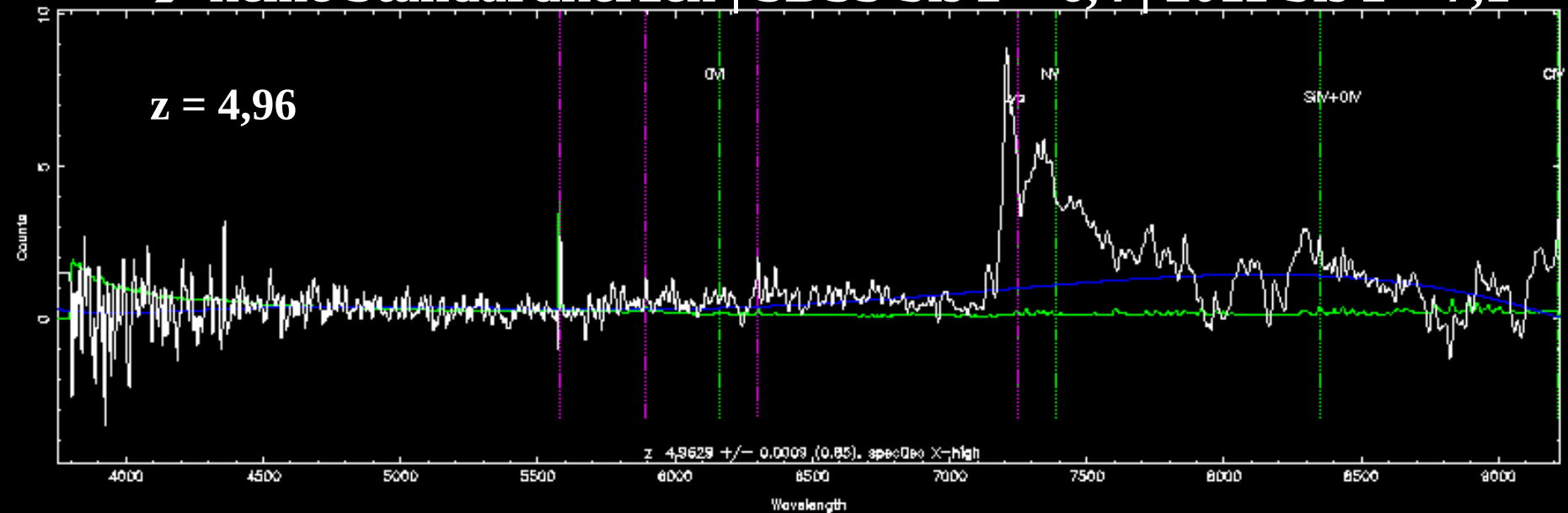
$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$

$$\text{Astronom: } v = c z$$

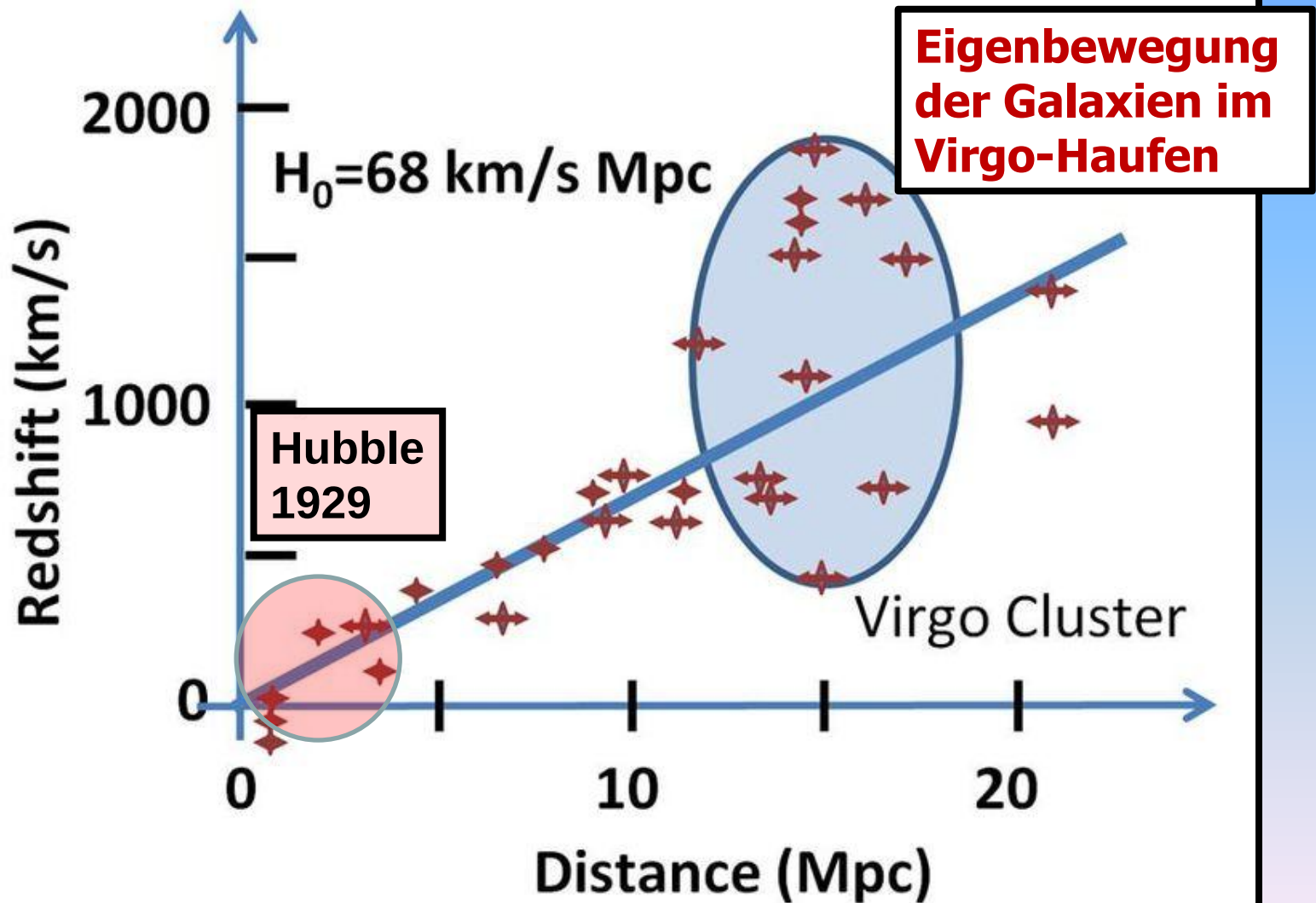


Seit 1963: Quasare haben charakteristische Emissions-Spektren

➔ keine Standardkerzen | SDSS bis $z = 6,4$ | 2011 bis $z = 7,1$



Hubble 1929 $\rightarrow cz = H_0 D$

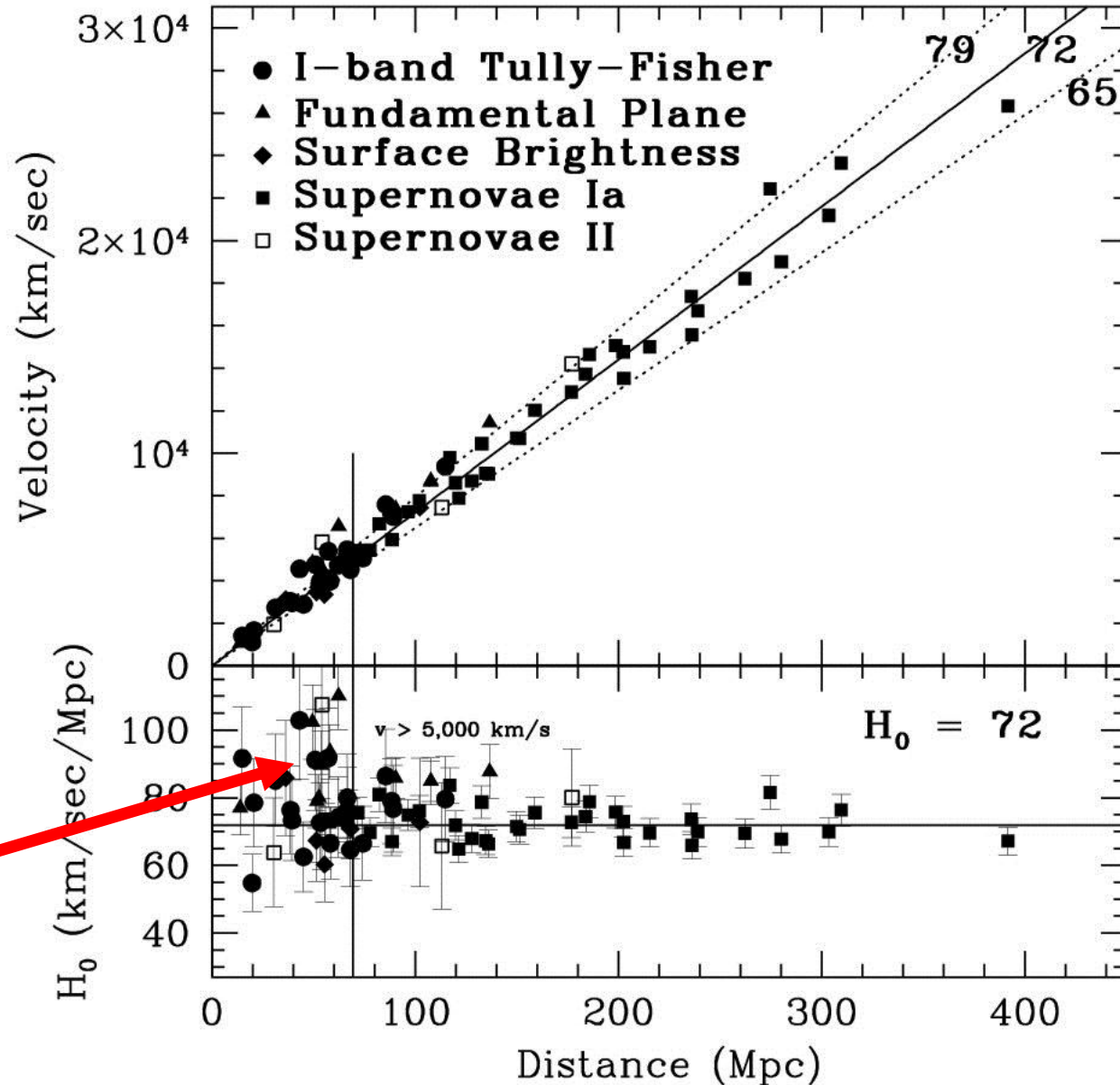


Lösung

**Hubble
Key-
Project
2003**

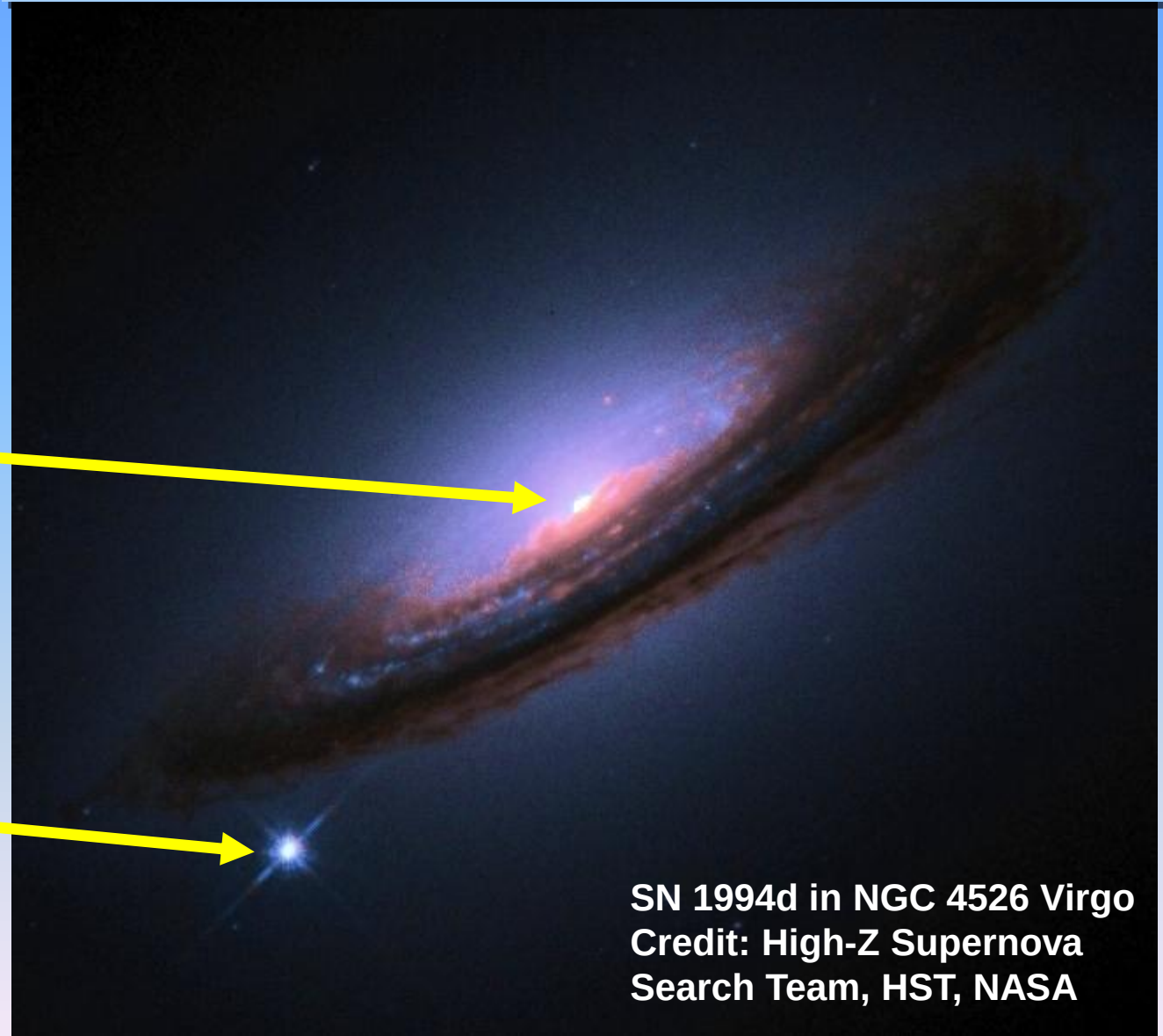
**Alle
Daten**

**Erst
jenseits
Coma-
Haufen**



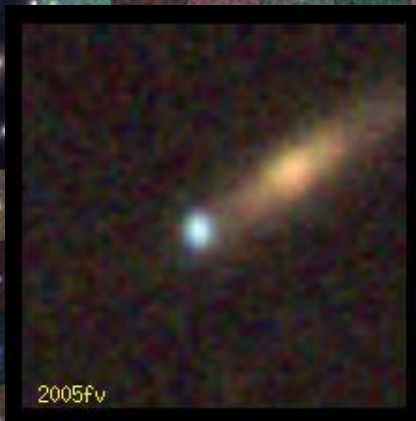
Standardkerzen 21. Jh.

**Supernovae Ia
werden so hell wie
Galaxienzentren**



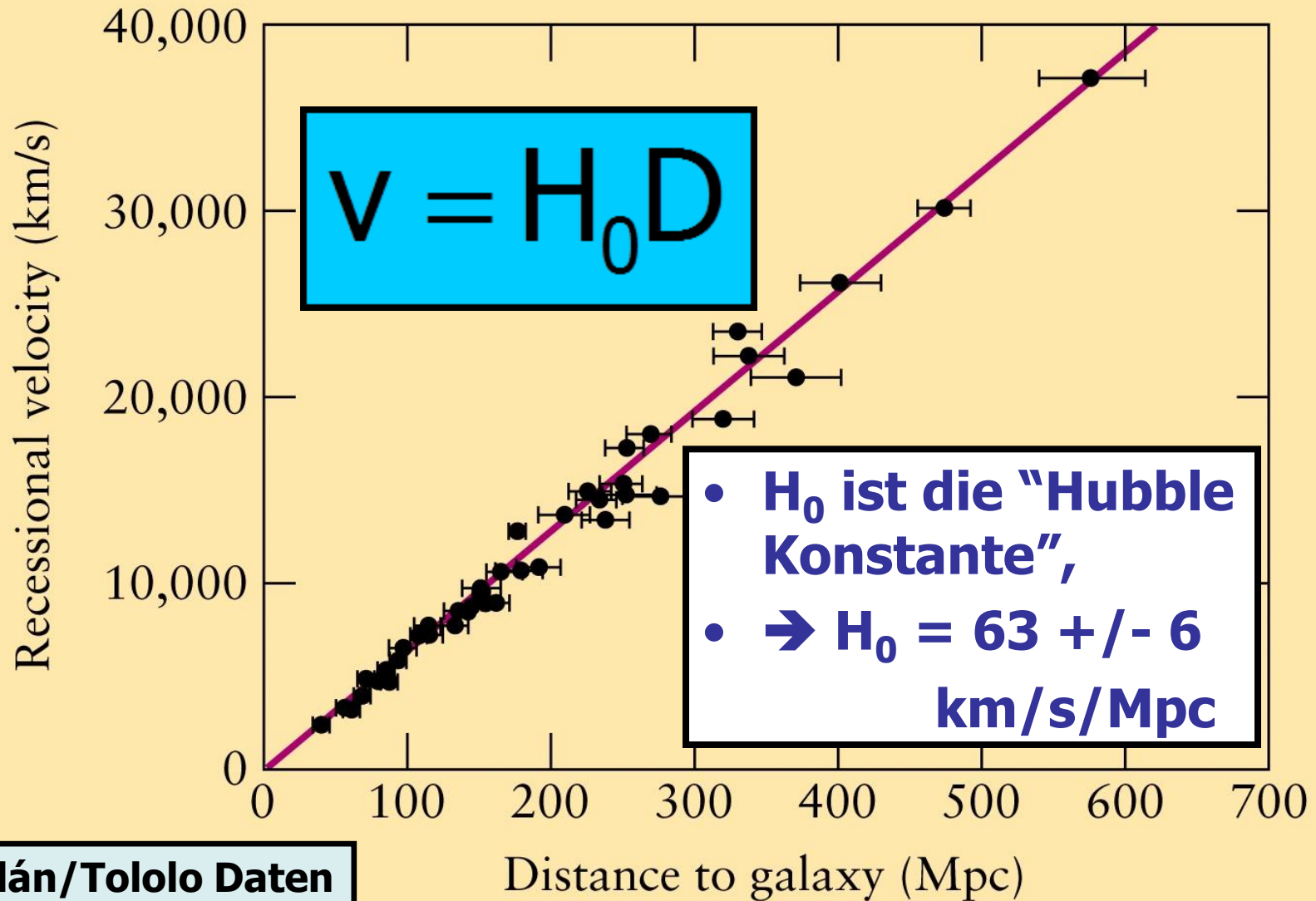
SN 1994d in NGC 4526 Virgo
Credit: High-Z Supernova
Search Team, HST, NASA

Supernovae Ia sind hell ! Moderne Standardkerzen



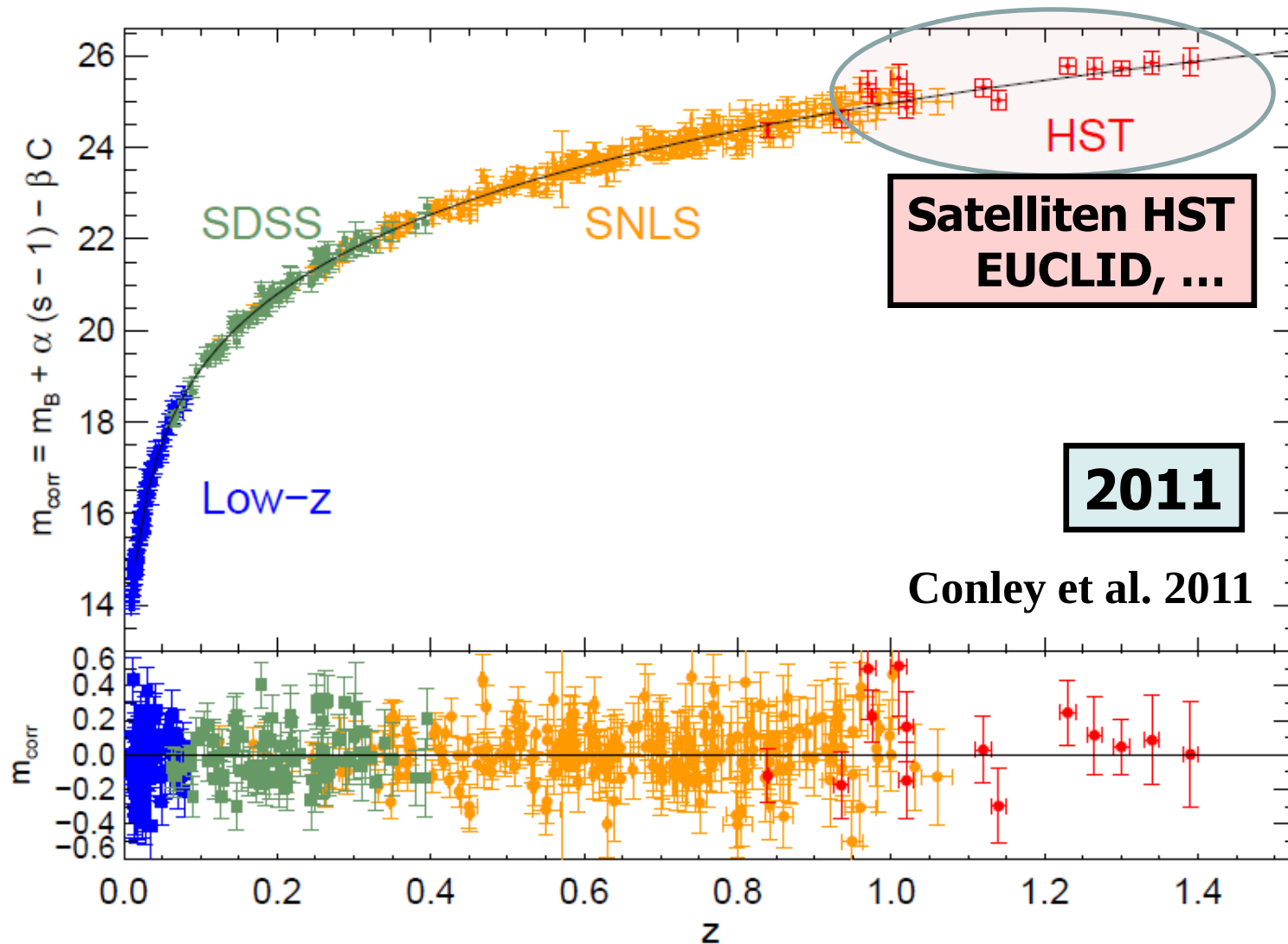
500 spektroskopisch bestätigte SNe Ia von SDSSII

Hubble-Gesetz mit Supernovae



**Calán/Tololo Daten
1989 - 1995**

Typ Ia SNe gute Standardkerzen

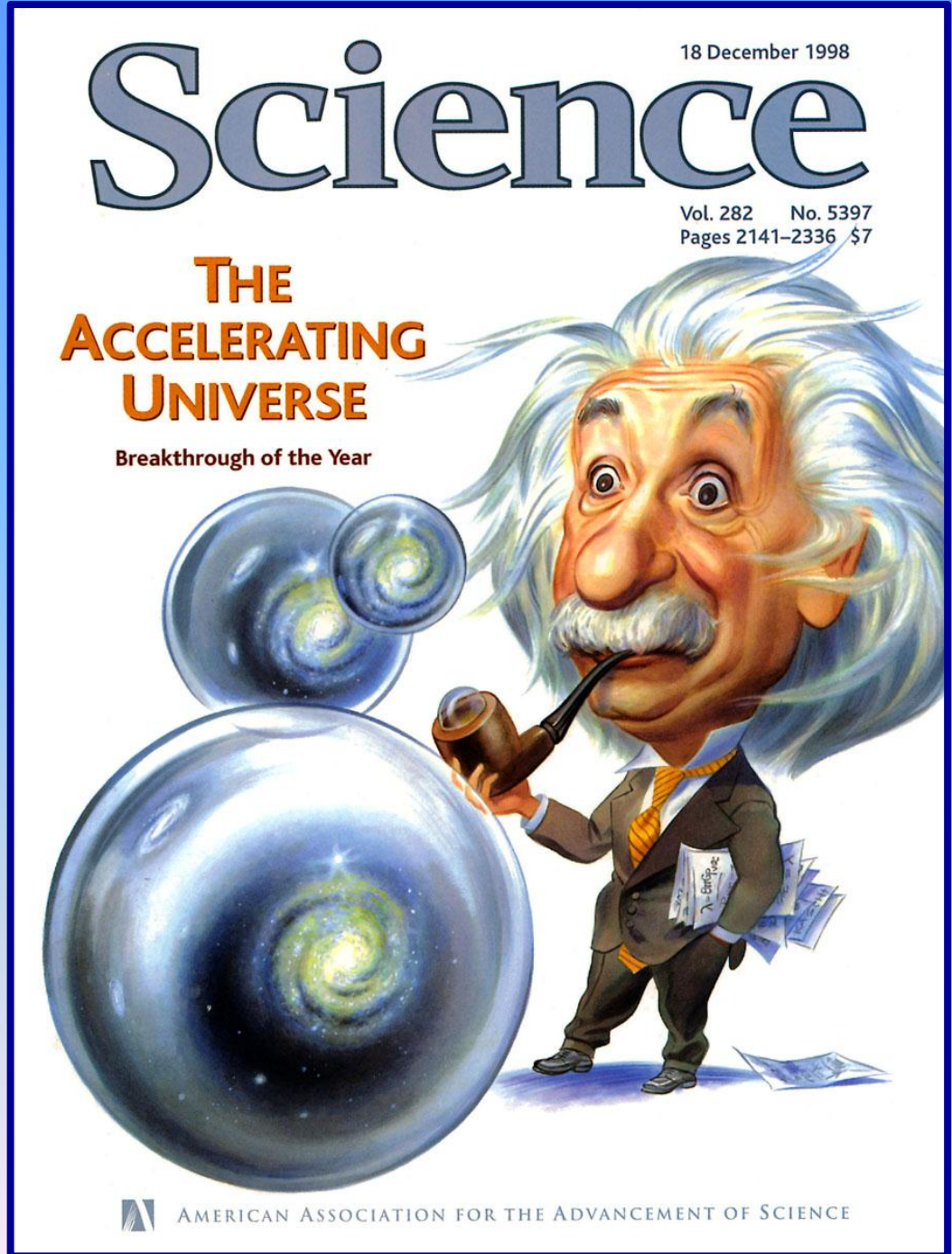


2. Revolution

1998 (SCP & Hz):

Entfernte
Supernovae sind
weiter entfernt als
in einem frei
expandierenden,
ungebremsten
Universum. Dies
kann nur durch
eine **abstossende**
Komponente erzeugt
werden

➔ **Dunkle Energie**



Entdeckung – 1998 !

Hat Europa geschlafen ?

➔ **Nobelpreis in Physik 2011 !**



Hi z Supernova Team



Supernova Cosmology Project

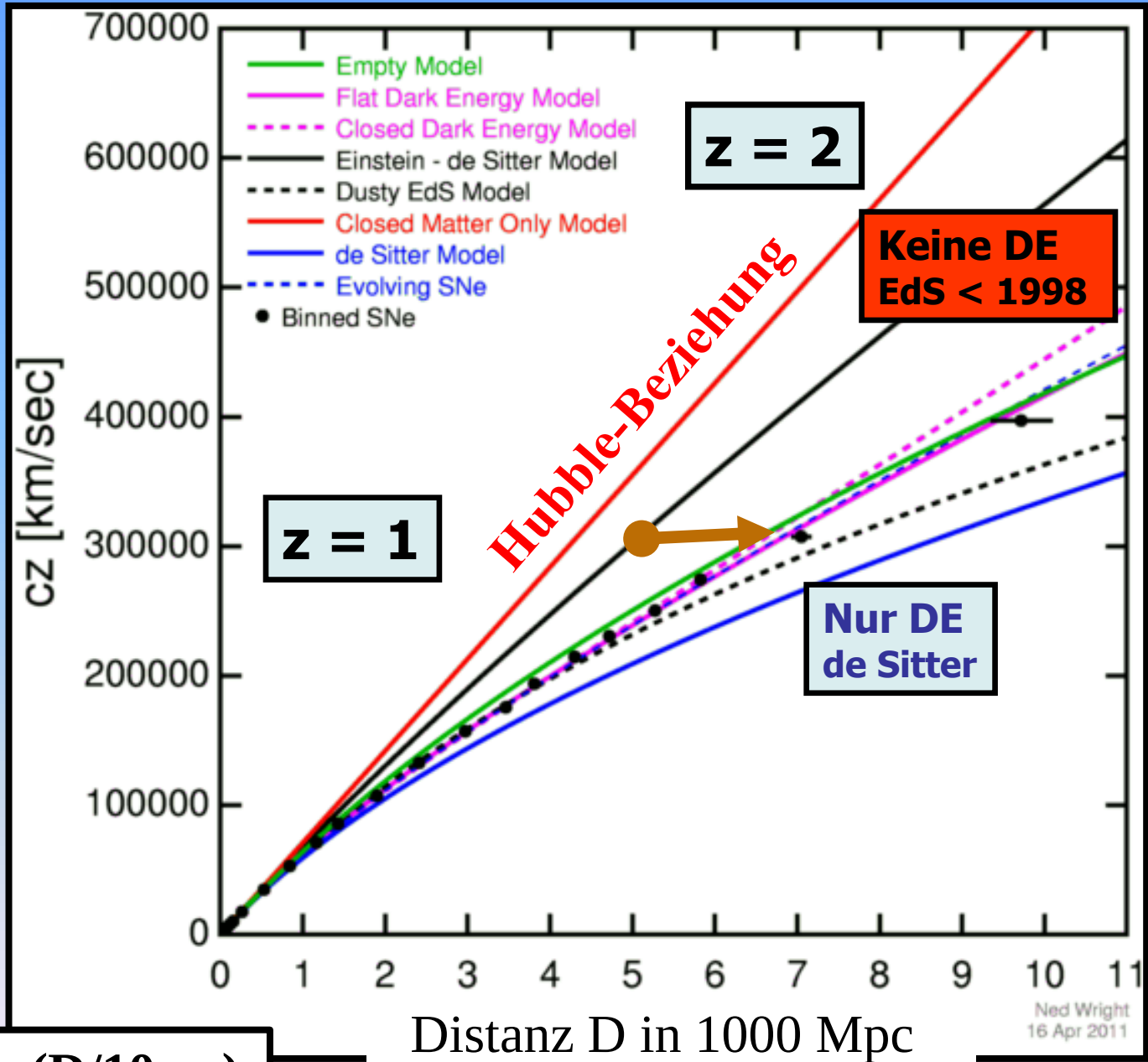


Nobelpreisträger 2011

Mark Philips

Abweichungen vom Hubble-Gesetz → kosmolog. Modell

$$\mu = m - M = 5 \log(D/10 \text{ pc})$$



DE Spekulationen

Einstein's Kosmologische Konstante

Unwahrscheinlich! Da keine natürliche Größe ! $\rightarrow w_{DE} = -1, w' = 0$

Relikt aus Inflation $\rightarrow$ Dilaton Feld

Skaleninvarianz der Gravitation gebrochen

$\rightarrow$ Higgs-Dilaton Feld $\rightarrow 0 < 1 + w_{DE} < 0,02$

Anzeichen einer höheren Dimension ?

3+1 Gravitation kann eingebettet werden in einer Theorie mit mehr als vier Dimensionen

Vakuum Energie (QCD Confinement)

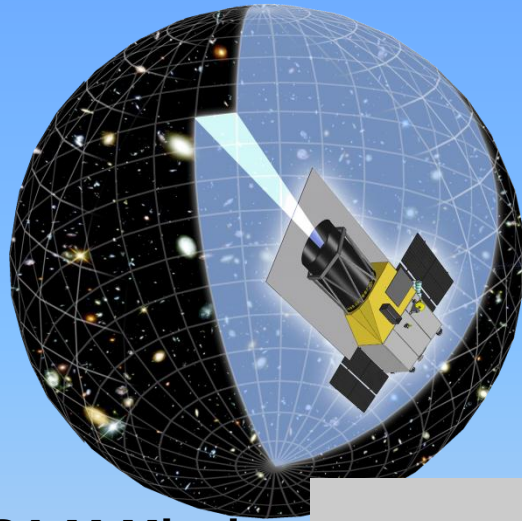
$\rho_{\Lambda} \sim E_H/\Lambda^3_C \sim m_{\pi}/\Lambda^2_C R_H \sim 10^{-29} \text{ g/cm}^3, mc^2 = 150 \text{ MeV (QCD)}, R_H = c/H_0$ Hubble-Radius

SOLVING THE
COSMIC ACCELERATION
RIDDLE WILL REQUIRE
A CRAZY, NEW IDEA!

NB: NOT EVERY CRAZY IDEA IS A
SOLUTION TO A PROFOUND
PROBLEM!

Mike Turner

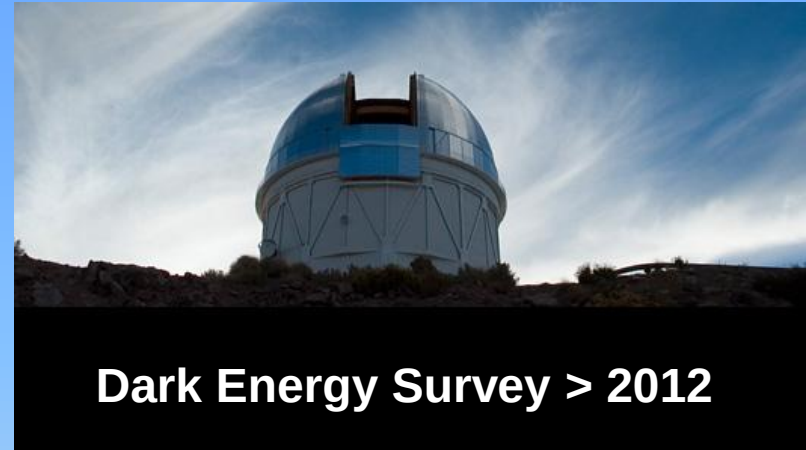
Supernovae & Dunkle Energie



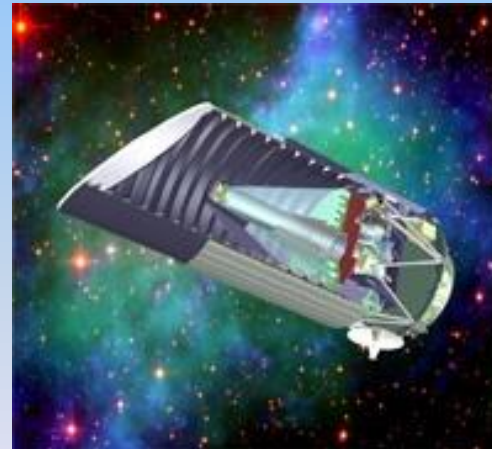
ESA M-Mission
Start 2019

MPIA HD, Bonn, MPleX M

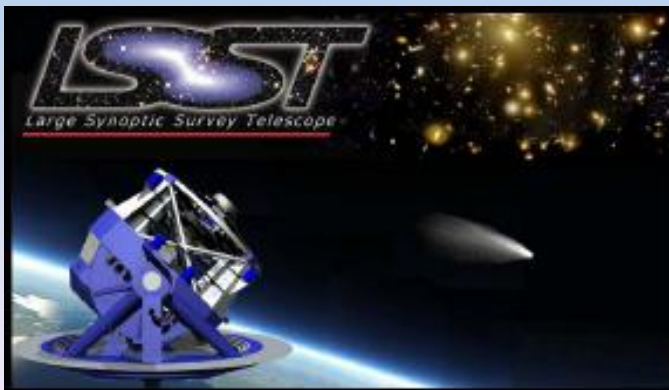
EUCLID



Dark Energy Survey > 2012



WFIRST / NASA
Finanzierung ?



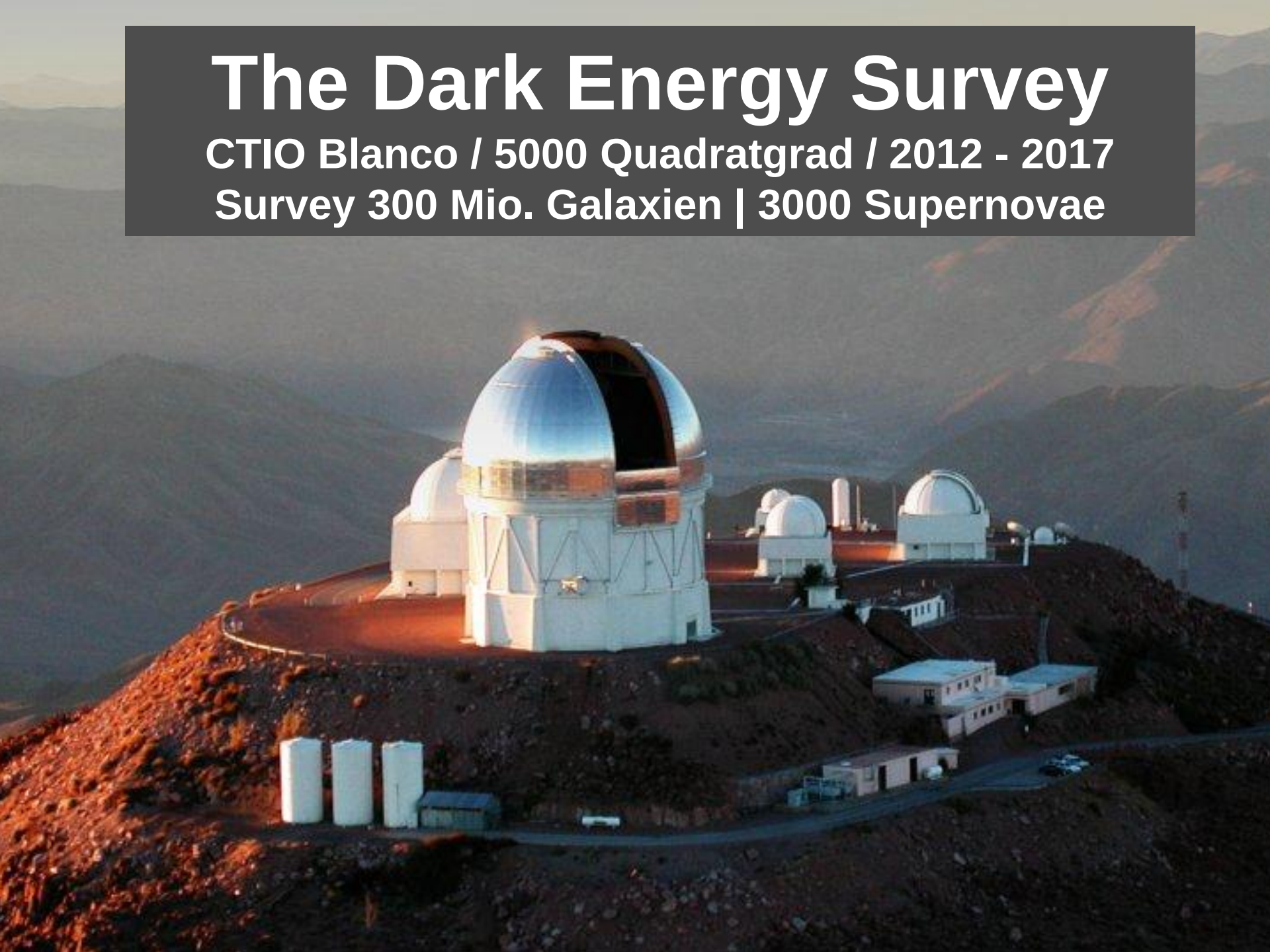
LSST / 8-m Survey Chile
250.000 SNe Ia/Jahr
Überwachung SHimmel 5 d



The Dark Energy Survey

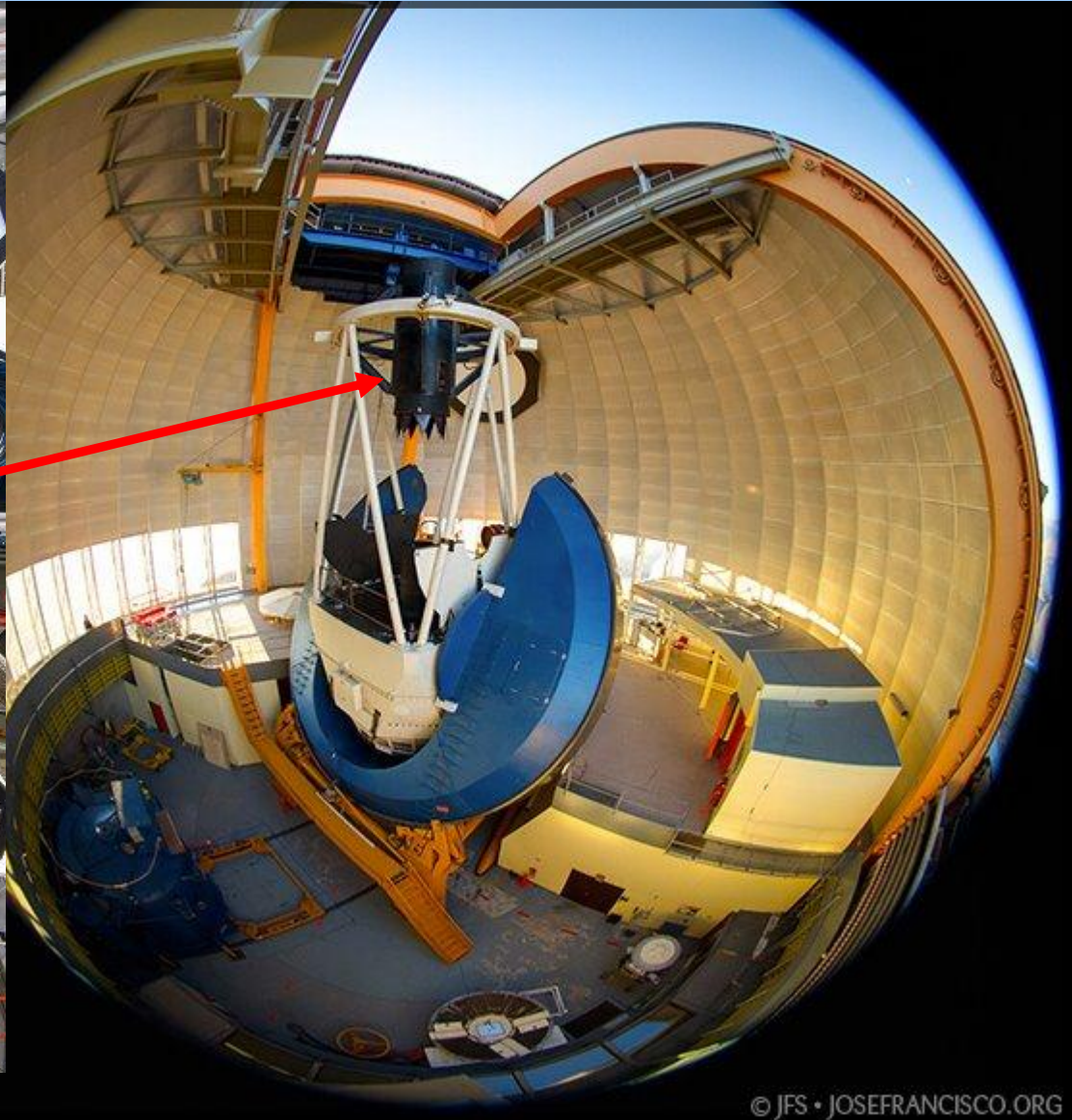
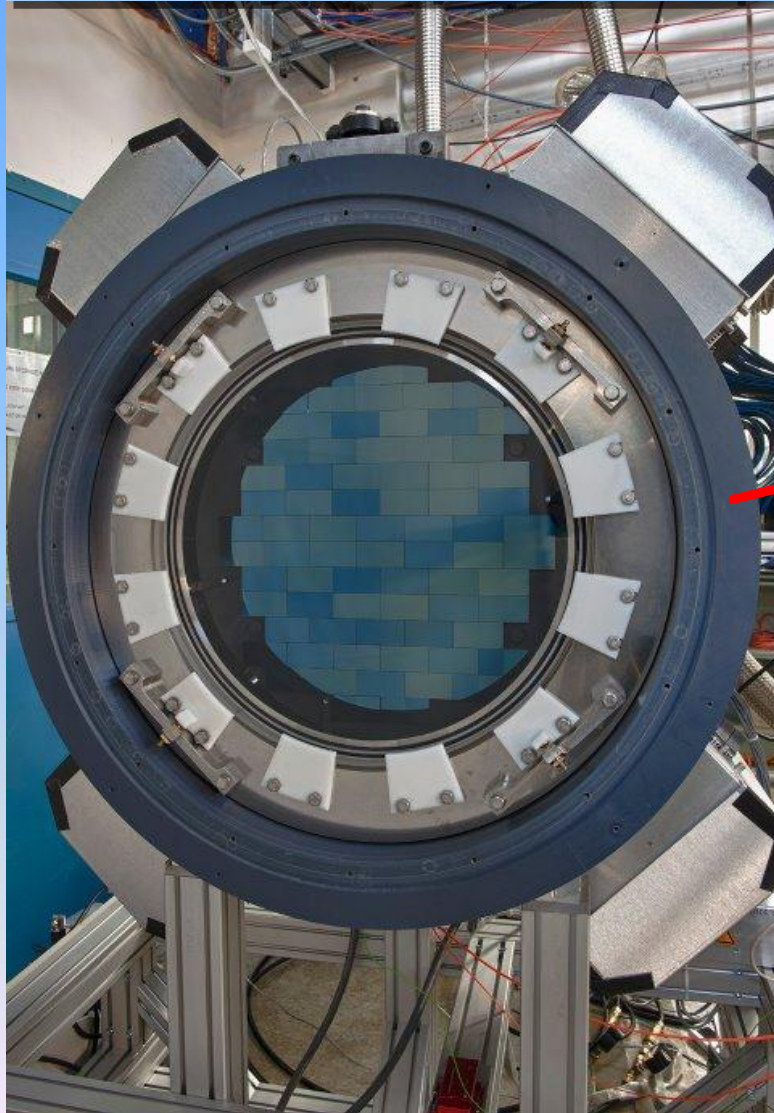
CTIO Blanco / 5000 Quadratgrad / 2012 - 2017

Survey 300 Mio. Galaxien | 3000 Supernovae

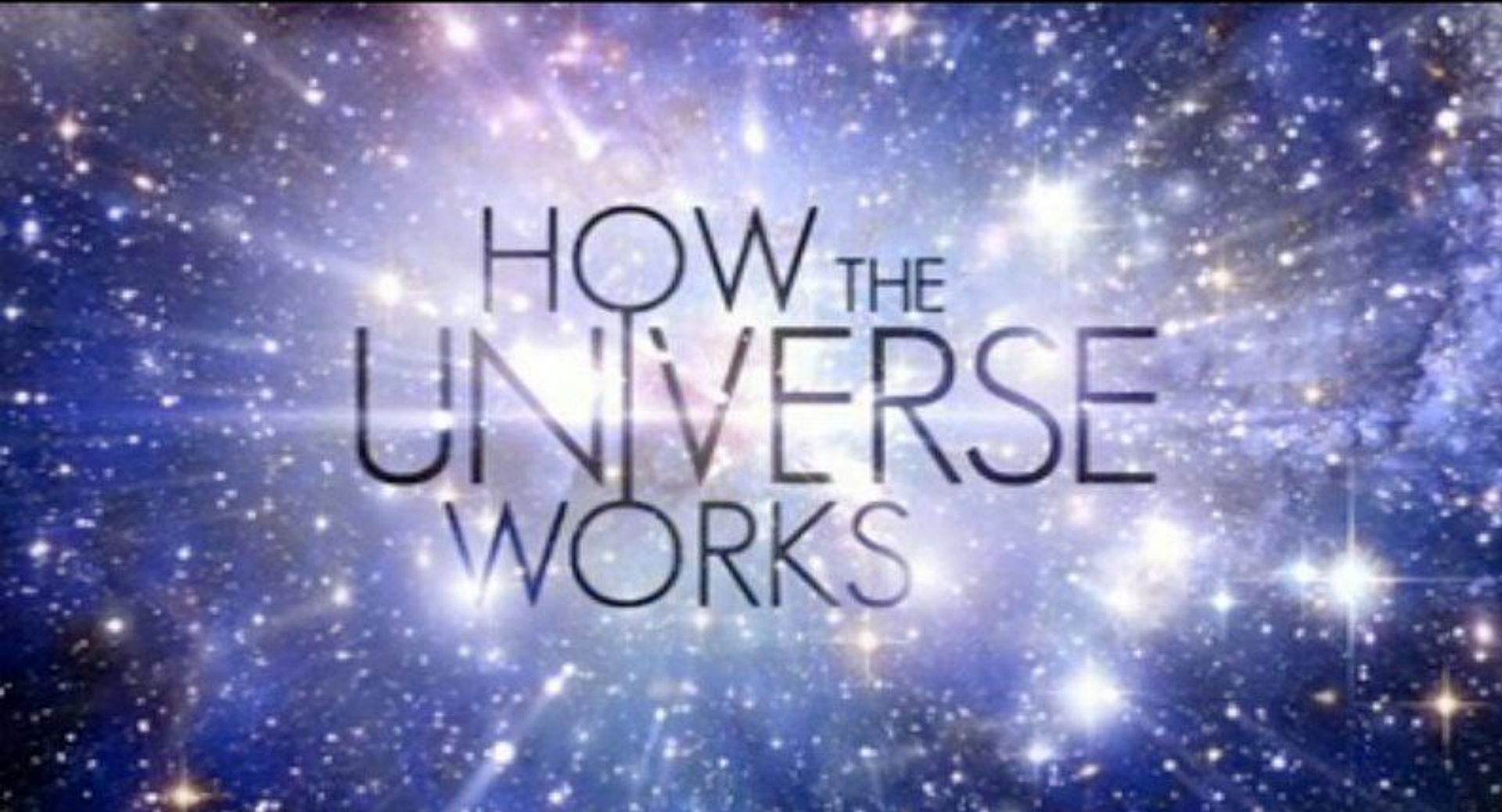


Dark Energy Survey | 570 MPixel

GBytes pro Bild | 400 Bilder pro Nacht → TBs



Beschleunigte Expansion (>1998)

A deep space photograph showing a vast field of stars and distant galaxies. The colors range from deep blue to purple, with bright white and yellow stars scattered throughout. The text 'HOW THE UNIVERSE WORKS' is centered over the image in a white, serif font. 'HOW' is on the top line, 'THE' is a smaller word to the right of 'HOW'. 'UNIVERSE' is the largest word on the second line, and 'WORKS' is on the third line.

HOW^{THE}
UNIVERSE
WORKS

Hubble-Konstante $H_0 = 74,2 \pm 3,6$

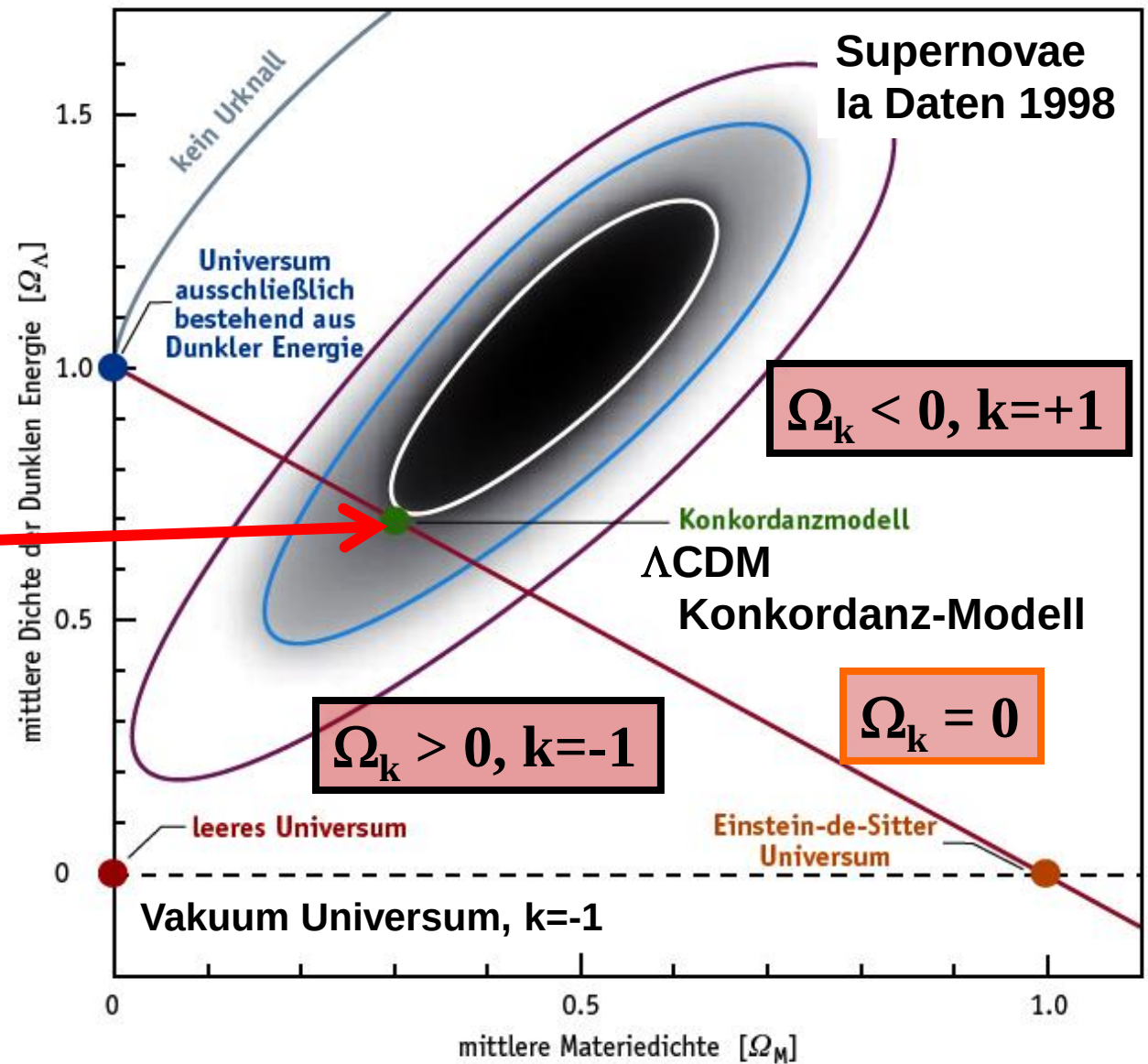
Riess et al. 2010 (Cepheiden & SNe)

- 1. H_0 bestimmt die Skala des Universums:
 - $R_H = c/H_0 = 4200 \text{ Mpc}$: Hubble-Radius
 - beobachtbares Universum wird damit eingeschränkt.
- 2. H_0 bestimmt das Alter des Universums:
 - $t_H = 1/H_0 = 14 \text{ Mrd. Jahre}$: Hubble-Alter, effektives Alter hängt von Dichte ab.
- Sie definiert eine typische Dichte

$$\rho_{\text{crit}} \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 1,88 \times 10^{-29} h^2 \text{ g cm}^{-3} = 2,8 \times 10^{11} h^2 M_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$$

Fundamental-Ebenen der Kosmologie

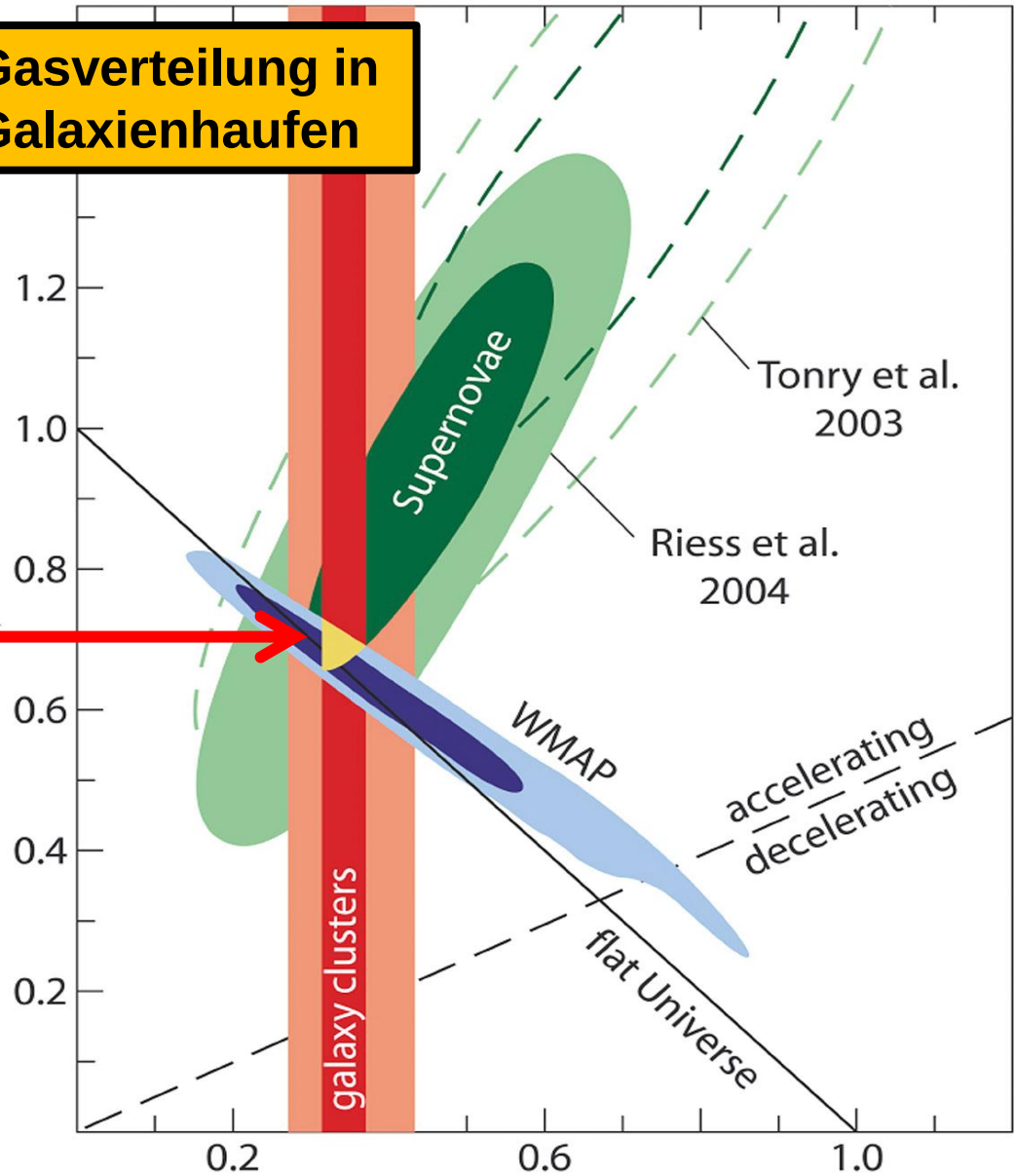
Jeder Punkt ein Universum



Drei Beobachtungen → FP Kosmologie fest

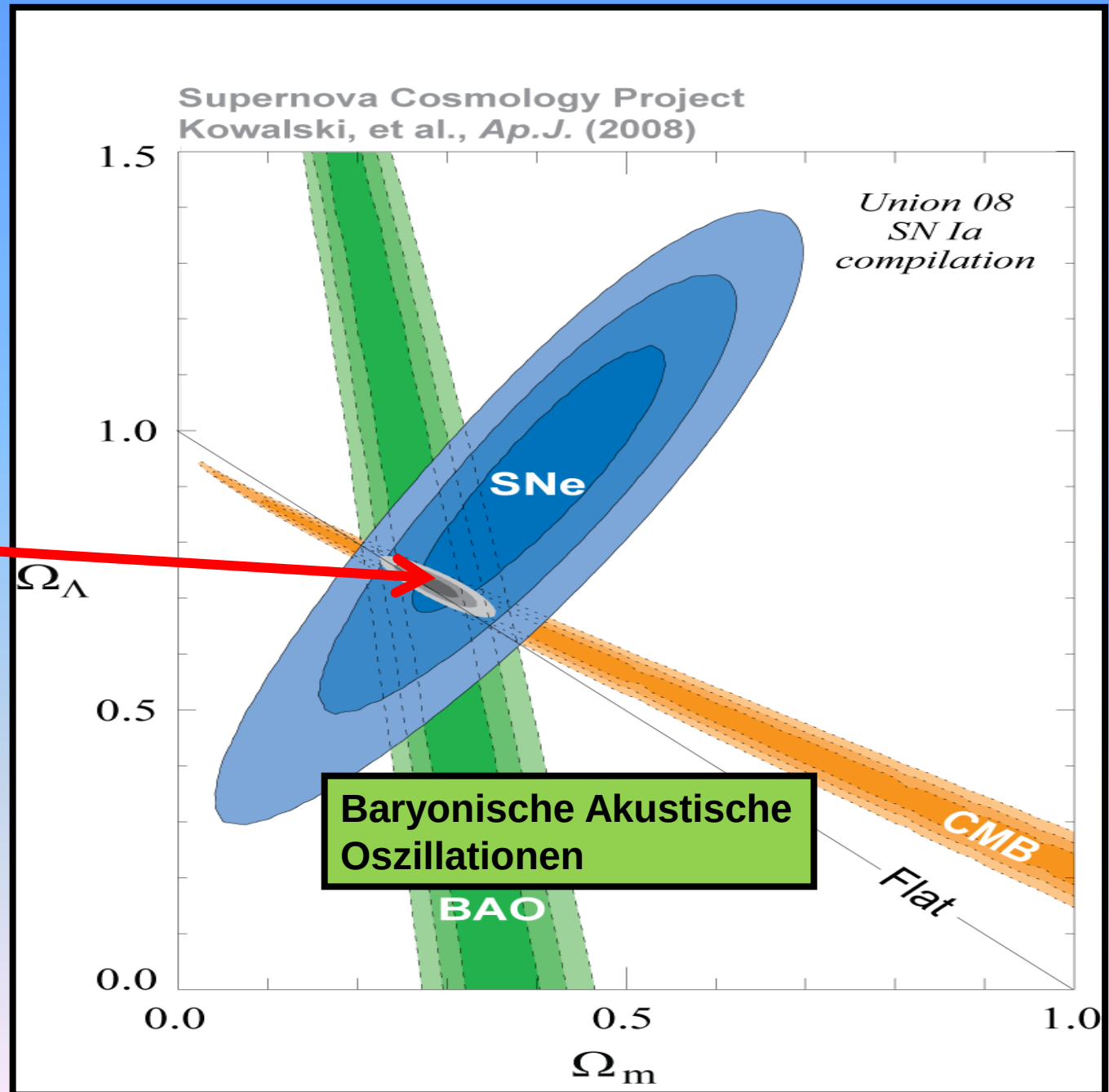
Gasverteilung in
Galaxienhaufen

Ω_Λ



Schücker et al. 2003

Fundamental Ebene der Kosmologie - WMAP



Was ist Dunkle Energie ?

WMAP7

DE

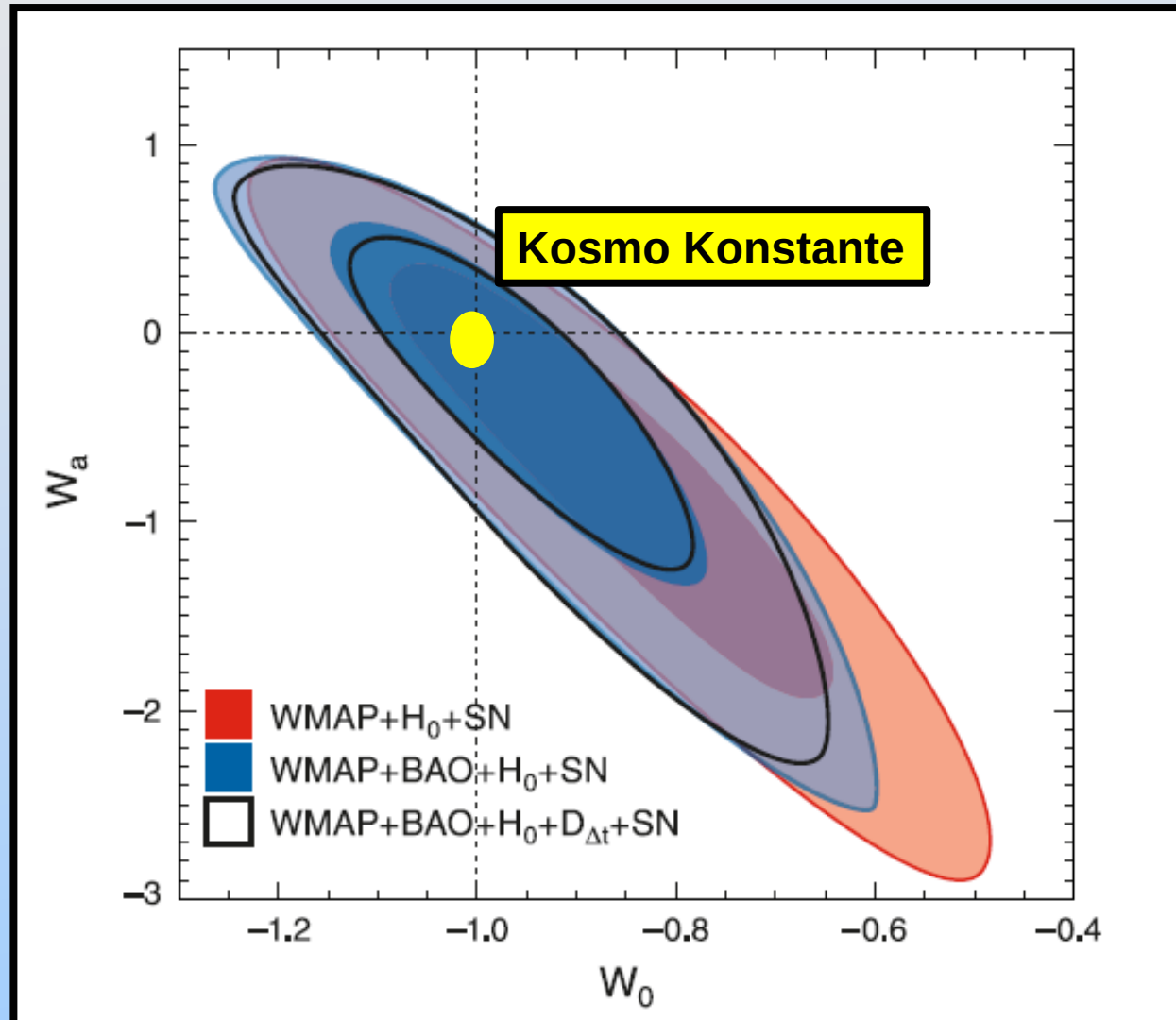
$w = -1$?

$w' = 0$?

Vakuum EoS

$$P_{\text{DE}} = w(z) \rho_{\text{DE}}$$

$$w = w_0 + w_a z / (1+z)$$

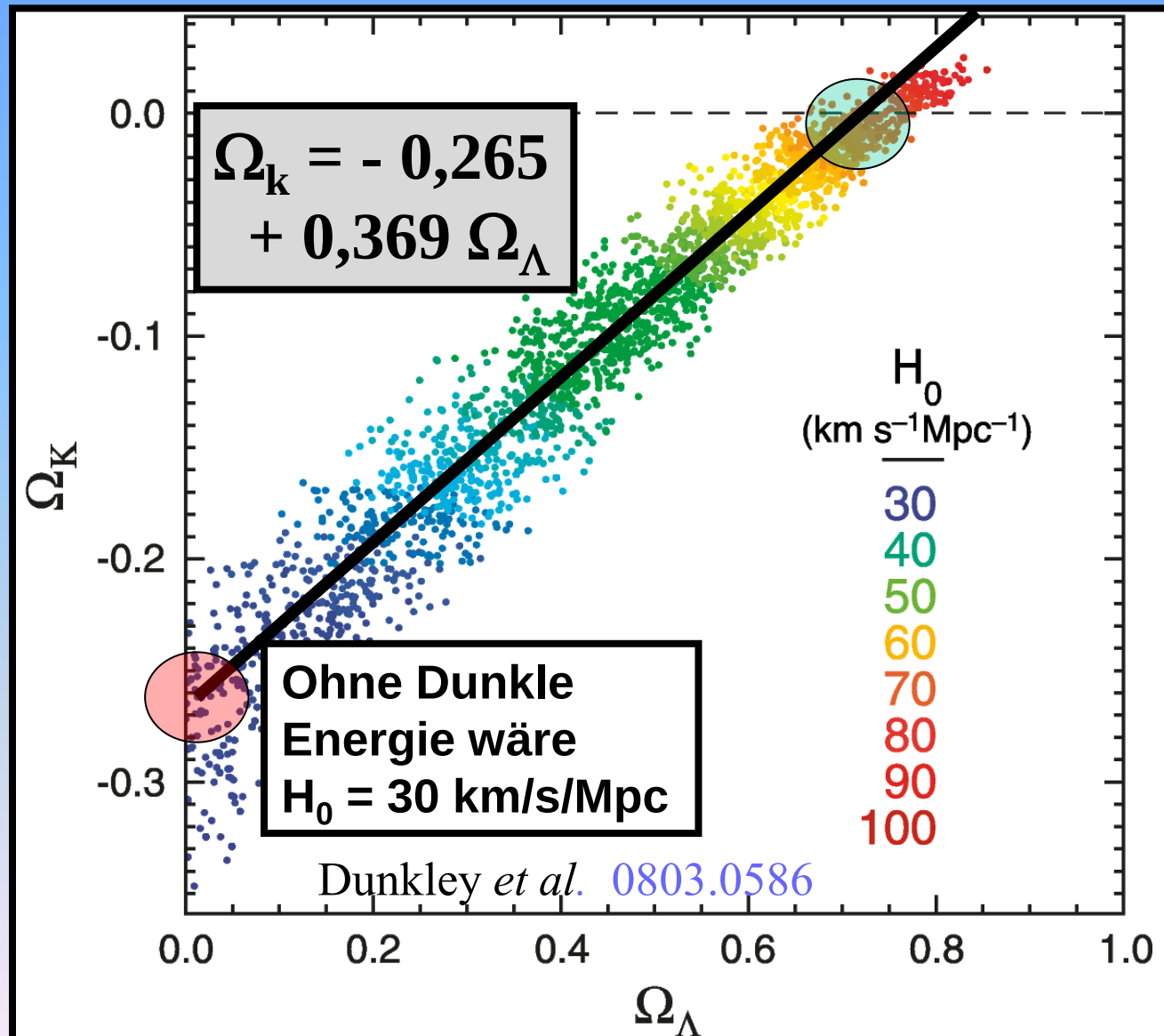


Komatsu et al. 2011

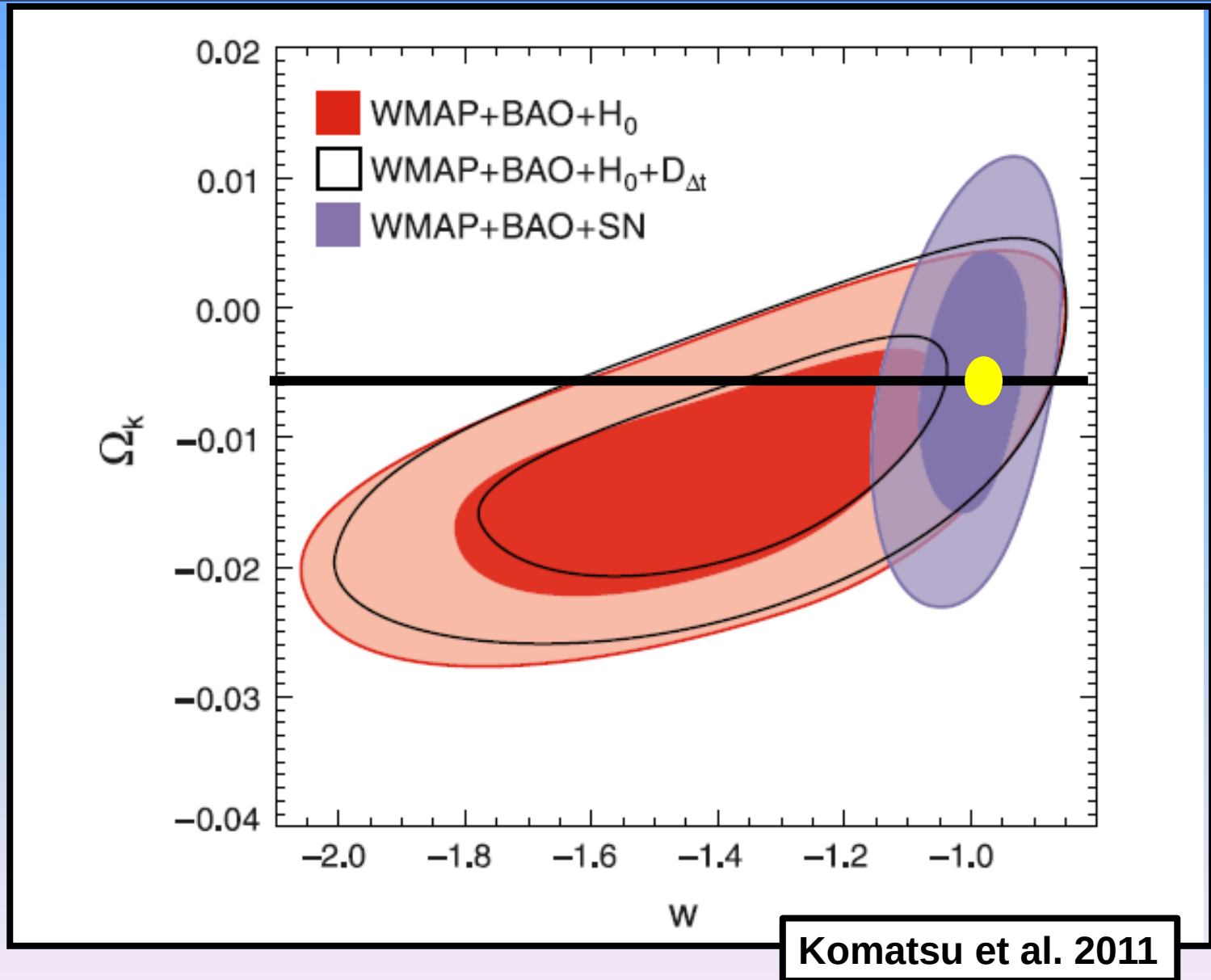
Ohne Dunkle Energie $\rightarrow H_0$ viel zu klein !

Zusätzliche
Daten sind
nötig, um die
CMB
Entartung
aufzuheben.

$\rightarrow$ Hubble
Konstante
würde die
Krümmung
festlegen.



Universum ist eine 3-Sphäre !



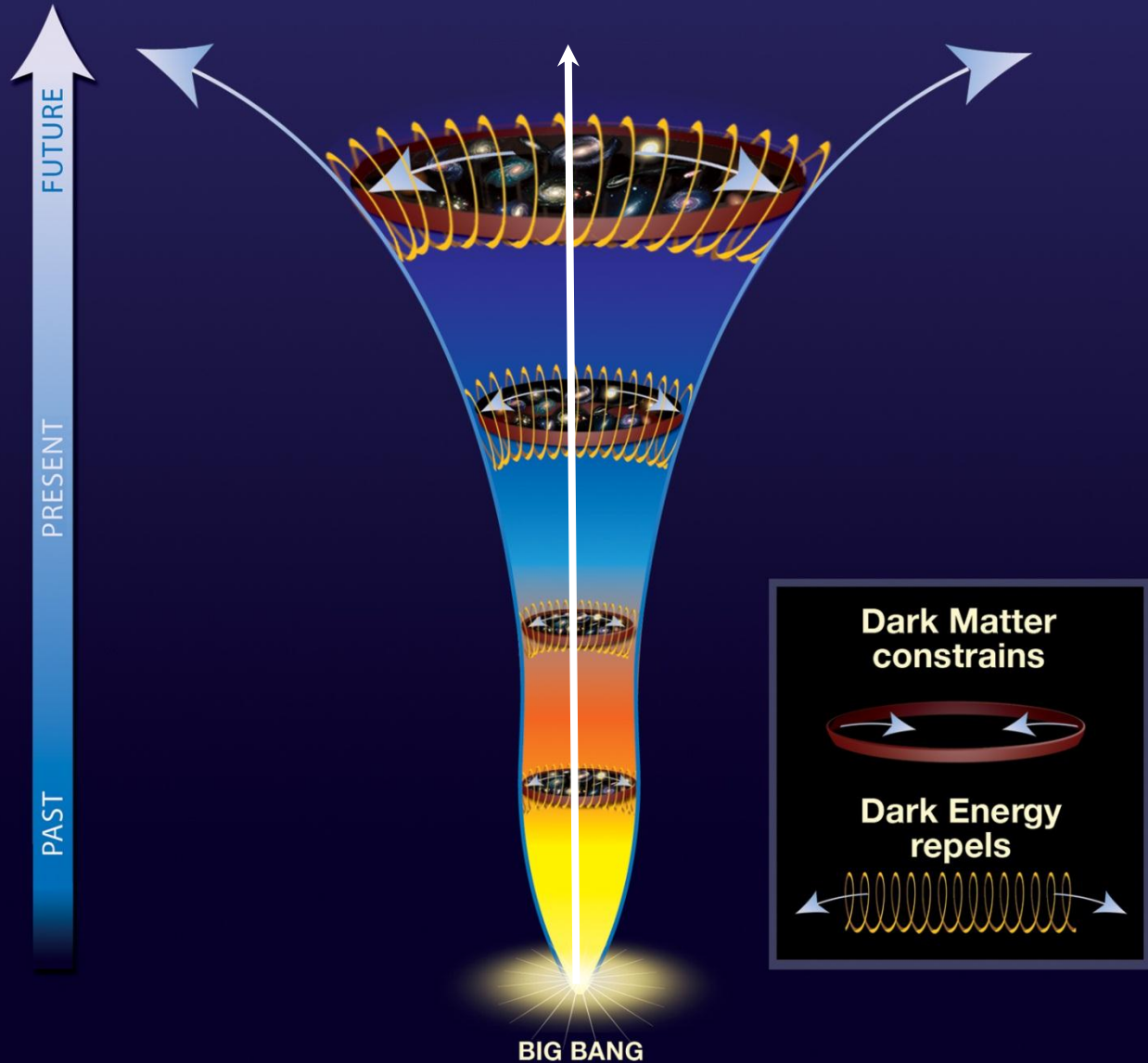
FLRW Universum Parameter 2010

9 globale FLRW Parameter:

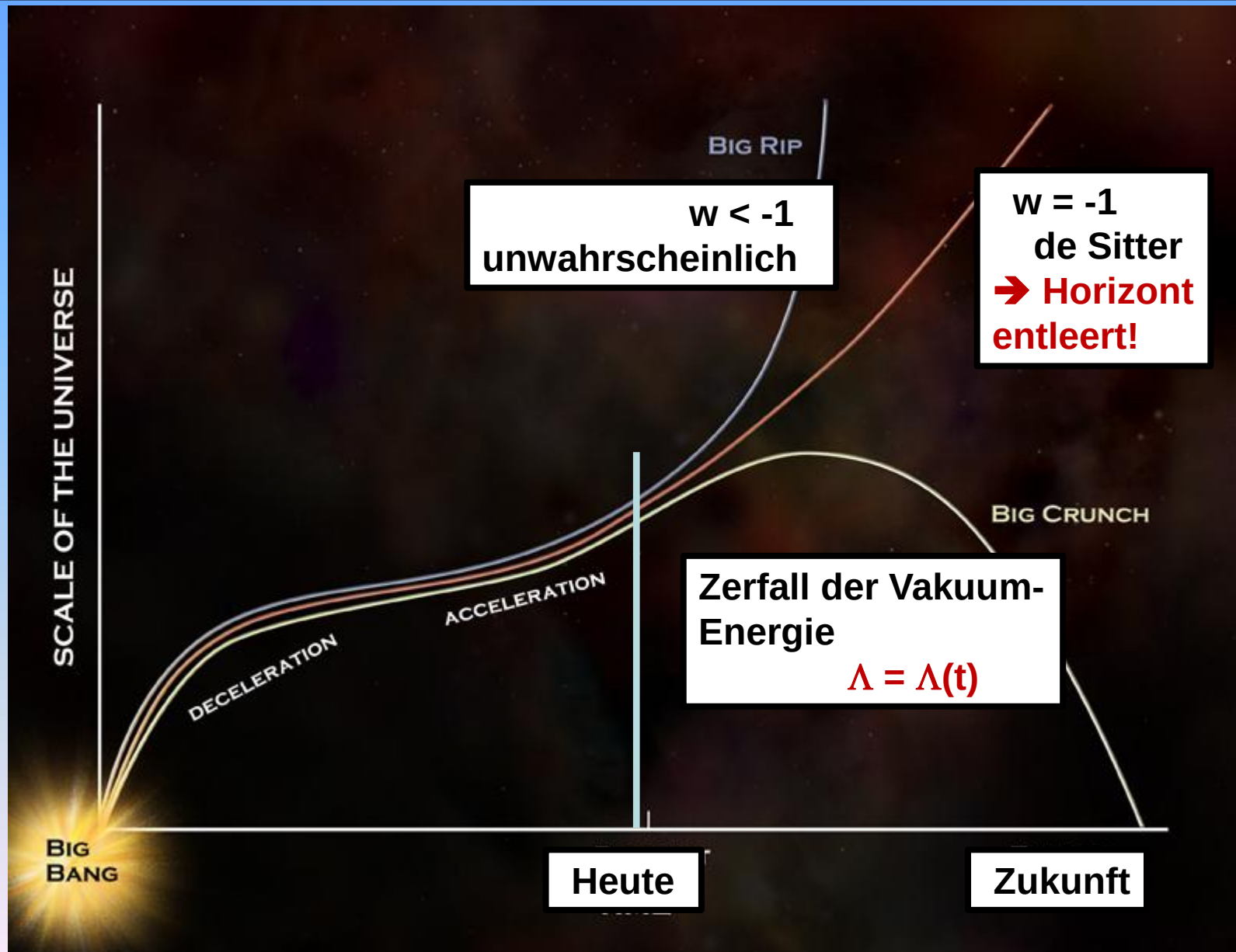
H_0	72+/- 2,6 km/s/Mpc	Expansionsrate Univ.
q_0	-0,67 +/- 0,15	→ Beschleunigung !
t_0	13,75 +/- 0,13 Ga	Alter des Universums
T_0	2,725 +/- 0,001 K	CMB Temperatur
Ω_k	-0,006 +/- 0,005	Universum S^3 , $k=+1$
Ω_B	0,0455 +/- 0,0016	Baryonenanteil
Ω_{DM}	0,229 +/- 0,015	Dunkle Materie
Ω_ν	0,002 – 0,01 ?	Dichte der Neutrinos
Ω_{DE}	0,728 +/- 0,016	Dunkle Energie

WMAP7 + SNIa + BAO 2011

Kosmischer Wettstreit zwischen Dunkler Materie & DE



Die Zukunft des Universums



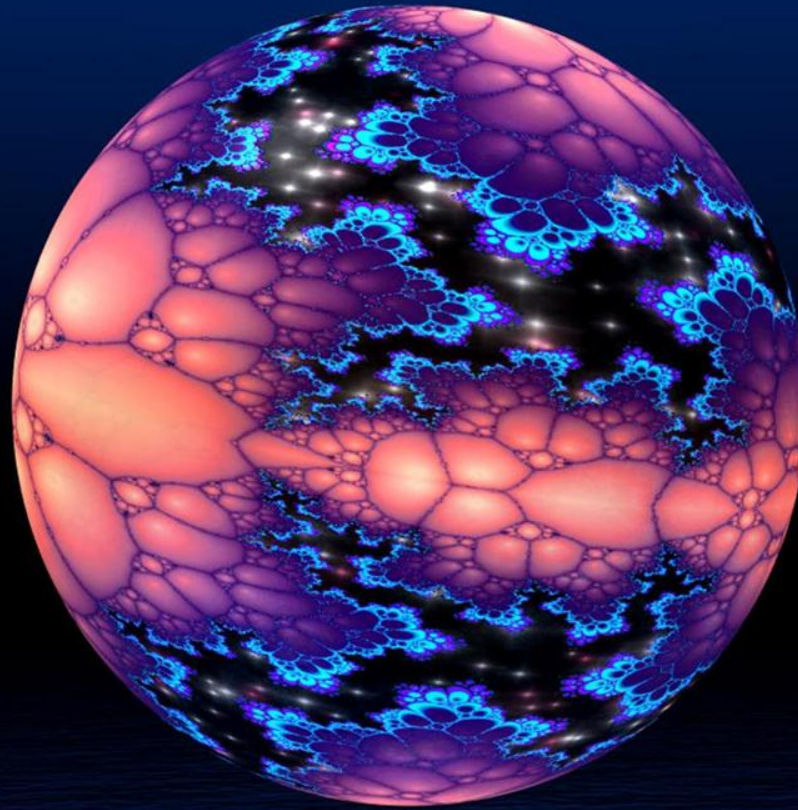
Das Universum entsteht im Urknall

G. Lemaître 1931



Georges Lemaître, May 1931

- *„If the world has begun with a **single quantum**, the notions of space and time would altogether fail to have any meaning at the beginning; they would only begin to have a sensible meaning when the **original quantum had been divided into a sufficient number of quanta**. If this suggestion is correct, the beginning of the world happened a little before the beginning of space and time.“ – erstaunlich für 1931!*



Was ist der Big Bang – „Single Quantum“?
3-dimensionale Kugelfläche S^3 mit Radius $\sim$
einige Planck-Radien ($\sim 10^{-34}$ m)
→ wächst exponentiell (Inflation);
→ Quantenfluktuationen „gefrieren“ aus.

Big Bang = Quanten-Brücke

Genesis des 21. Jh.: am Anfang war nur Gravitation, daraus materialisierten die Quarks, Photonen, Gluonen und Leptonen

Big-Bang
Quantenbrücke

Frühere Welt

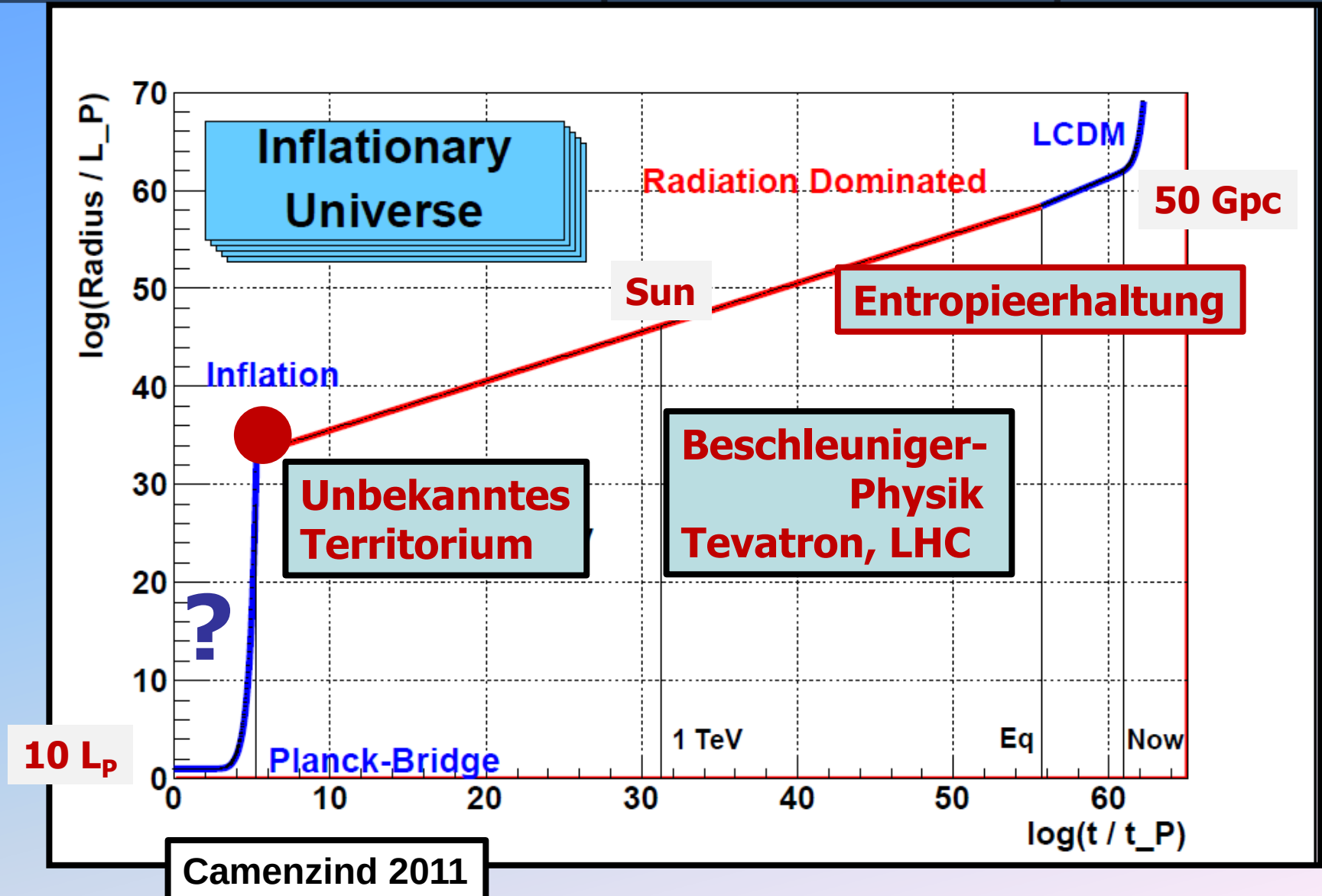
Unsere Welt

Zeit



Expansion des Universums

Planck-Einheiten: $t_P = 10^{-43}$ sec , $L_P = 10^{-35}$ m



Wir halten fest ...

- Das Universum entwickelt sich unaufhaltsam - geboren im Big Bang → heute **13,7 Mrd.** Jahre alt.
- 1687: **Isaac Newton** findet die Gravitationskraft → sein Universum sollte **statisch** sein.
- 1915: **Einstein** revidiert Newton → Gravitation ist keine Kraft, sondern Eigenschaft der Raum-Zeit.
- **Die Expansion des Universums** wurde nicht von Hubble entdeckt, sondern von **Friedmann & Lemaître** (1922/1927) → mit Big Bang als Anfang (1931) → 1998: Riess & Perlmutter erweitern auf **Λ CDM** → **Zukunft des Universums ist ungewiss !**
- Das **heutige Universum** ist **Kugelfläche S^3** mit **$\sim 50 - 80$ Gpc Radius** → erscheint dadurch lokal flach → im Big Bang aus **$\sim 10^{-34}$ m** entstanden ???

Das Moderne Universum



... ruht auf drei Säulen
Jede bedeutet neue Physik!

Was Sie nie vergessen sollten ...

**Die Rotverschiebung
der Galaxien und Quasare
ist kein Dopplereffekt,**

sondern Expansion des Raumes

Georges Lemaître 1927

Fluktuationsgenerator

Anhang: Expansion
erzeugt Strukturen

Fluktuationsverstärker

INFLATION

CMB
last scattering

Bruchteil
Sekunde

first
stars

present
day

381.00
Jahre

400 Mio
Jahre

13,7 Mrd
Jahre

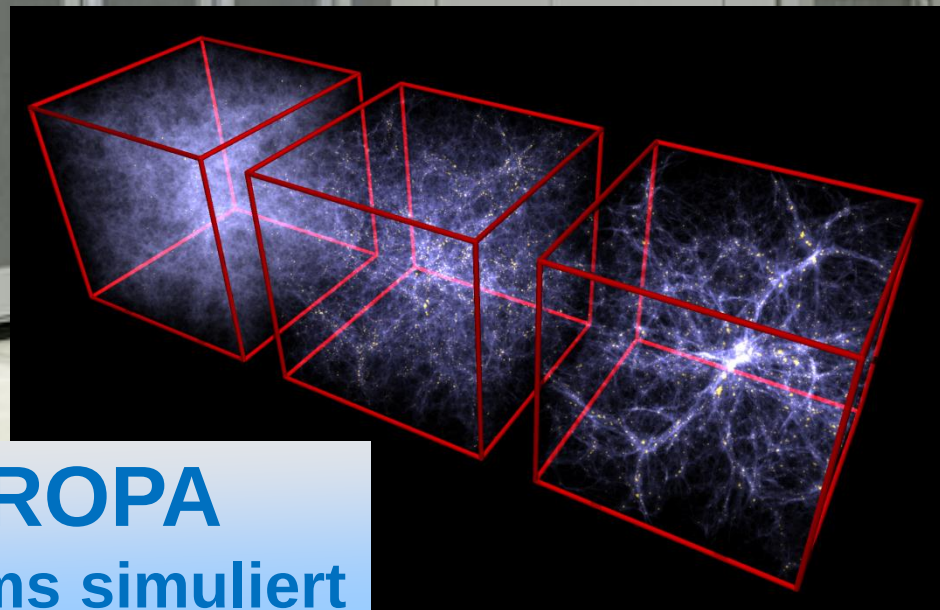
Hot
Dense
Smooth

$H(z)$

Cool
Rarefied
Clumpy

(Graphics from Gary Hinshaw/WMAP team)

Expansion strukturiert Universum



Supercomputer JUROPA

→ Teilbereiche des Universums simuliert

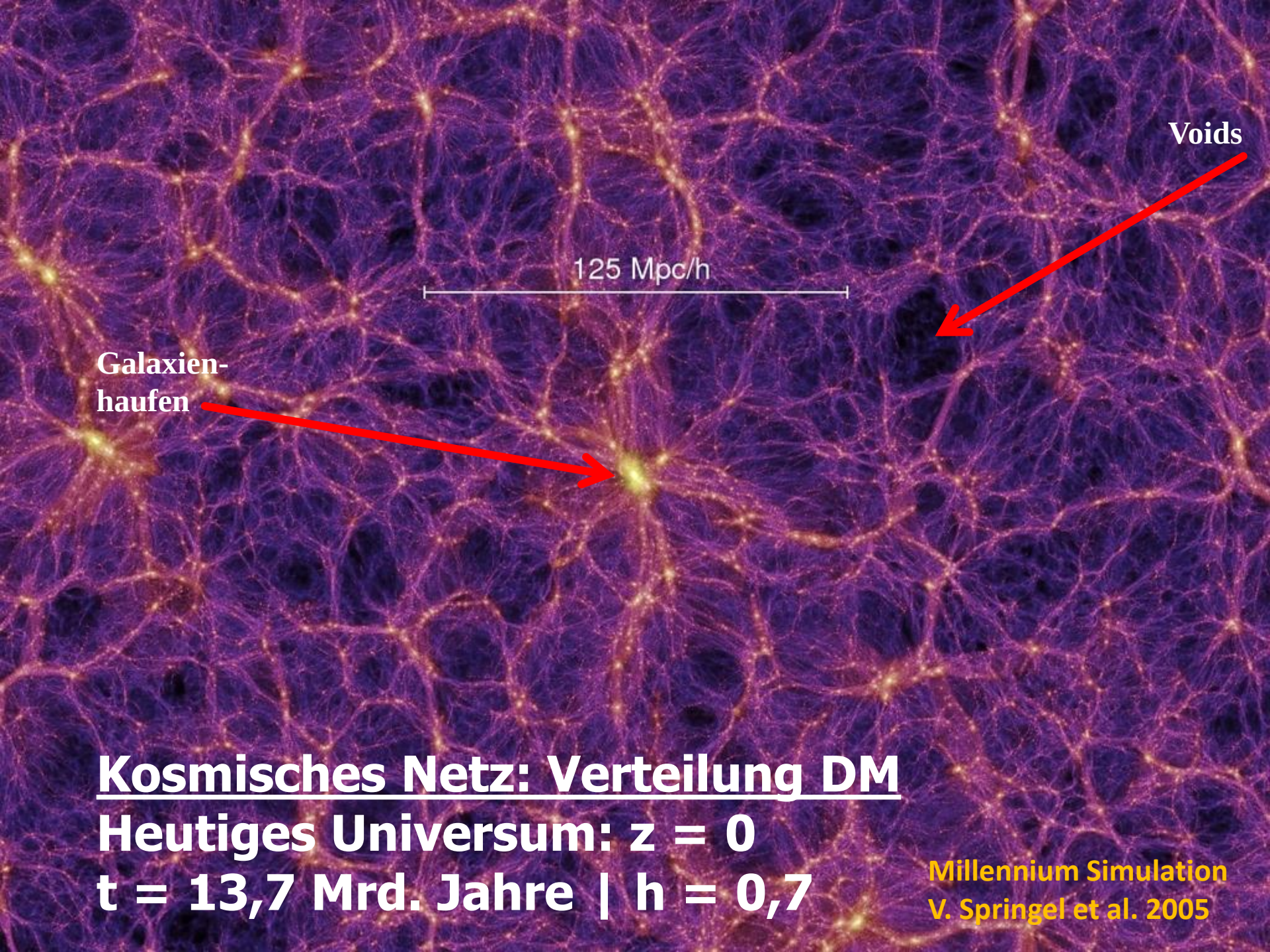
Kurz nach CMB: $z = 100$

Fluktuationen in DM-Dichteverteilung

→ wachsen durch Eigengravitation

unterdichte Gebiete entleert → Voids





Galaxien-
haufen

Voids

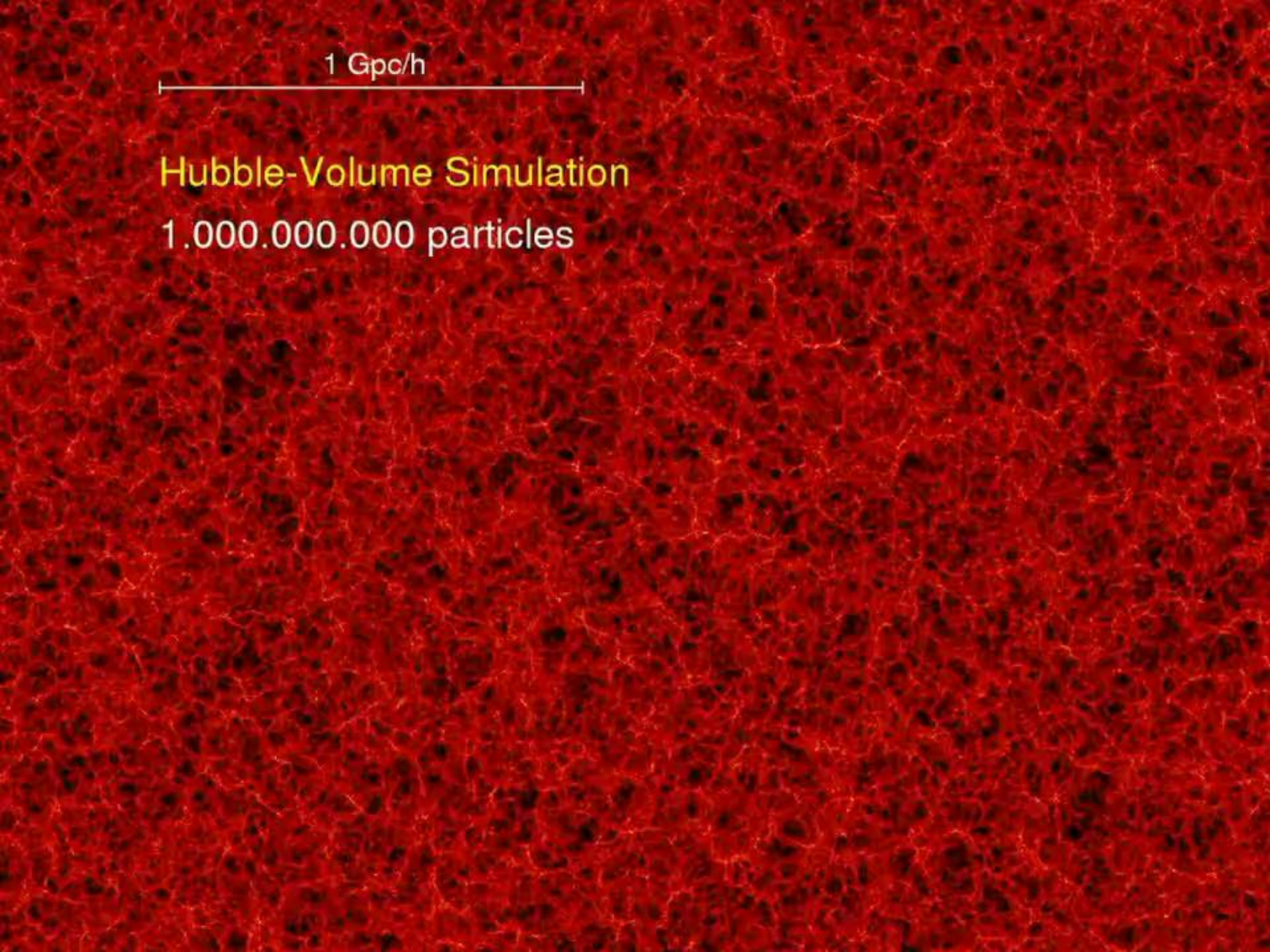
125 Mpc/h

Kosmisches Netz: Verteilung DM

Heutiges Universum: $z = 0$

$t = 13,7$ Mrd. Jahre | $h = 0,7$

Millennium Simulation
V. Springel et al. 2005

A visualization of a cosmic web simulation, showing a dense network of red filaments and nodes against a black background. The filaments represent the large-scale structure of the universe, with nodes indicating regions of high density. A horizontal scale bar is located at the top left.

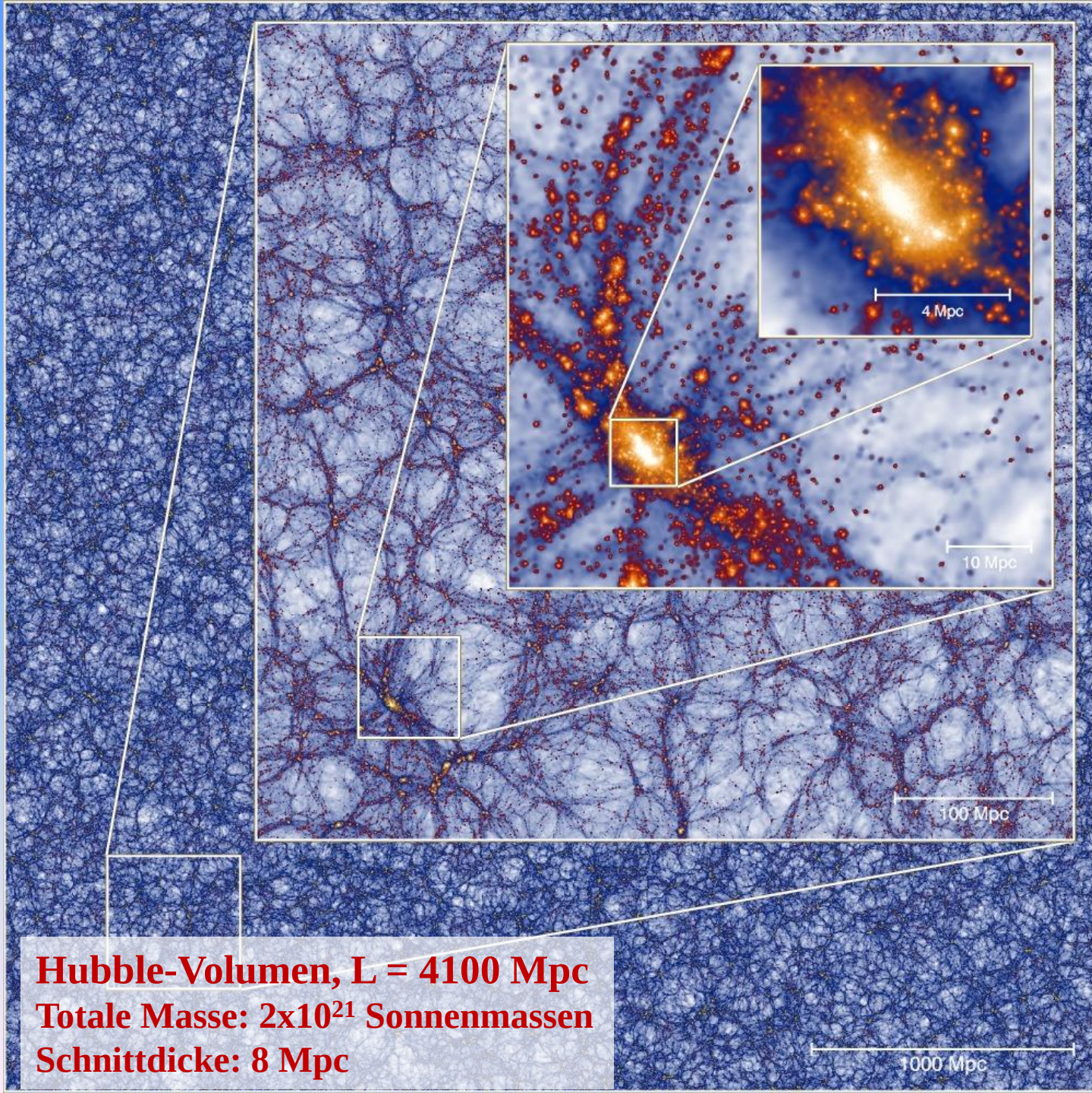
1 Gpc/h

Hubble-Volume Simulation

1.000.000.000 particles

Millennium-XXL Simulation

300 Mrd Teilchen, $M = 6$ Mrd Sonnen
Zoom Faktor = 8 / Virgo-Consortium 2011



Sphärisches Universum

Kosmisches Netzwerk DM

10^{25} Sonnenmassen / nicht beobachtbar !

