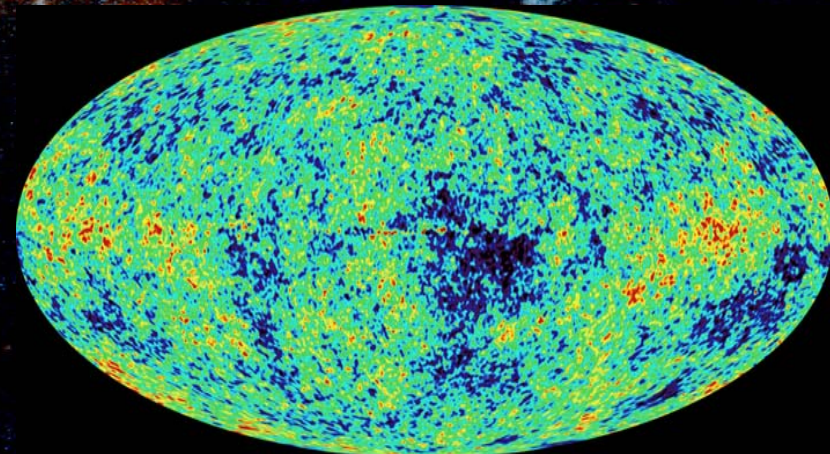


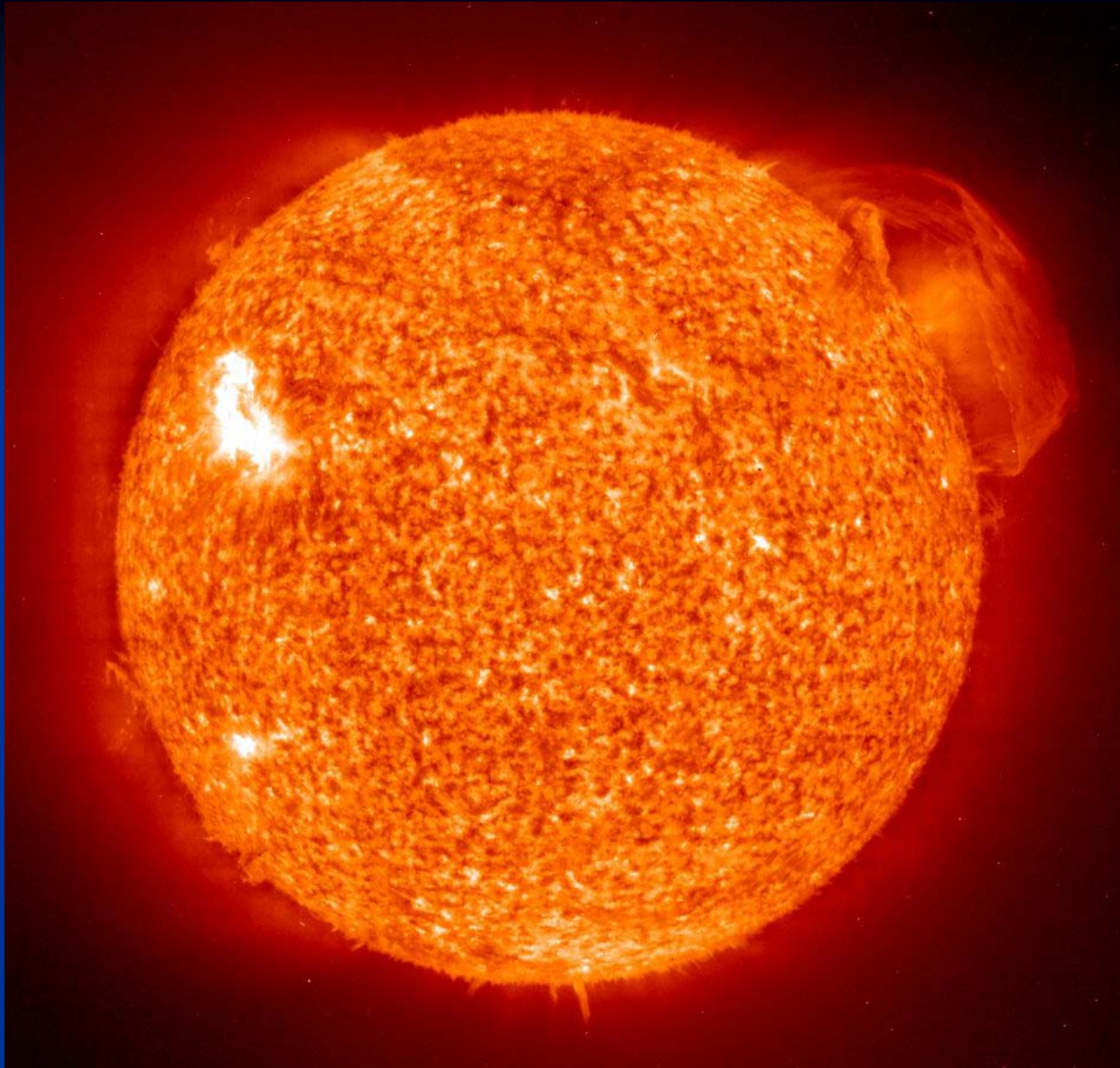
Dunkle Energie – ein kosmisches Rätsel

















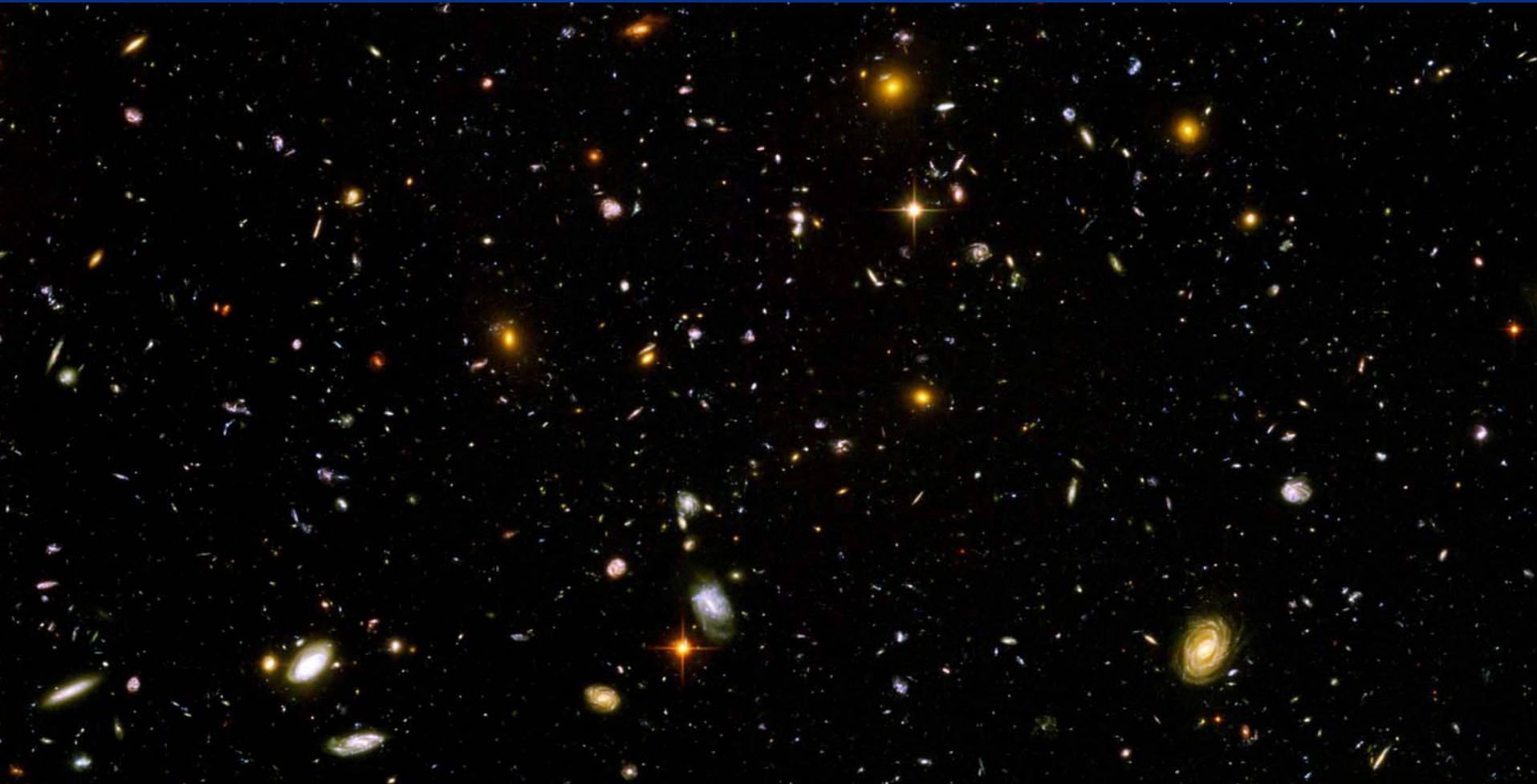


Galaxien

Hubble deep field



Wer weit hinaus schaut ,
schaut weit zurück !



Zeit seit dem Urknall (Jahre)

~ 300 Tausend

~ 500 Millionen

~ 1 Milliarde

~ 9 Milliarden

13.7 Milliarden



← **Urknall**

Universum gefüllt mit ionisiertem Gas

← Universum wird neutral und undurchsichtig

Das "Dunkle Zeitalter" beginnt

Erste Galaxien und Quasare entstehen

Re-Ionisation beginnt

Die kosmische Renaissance: Ende des "Dunklen Zeitalters"

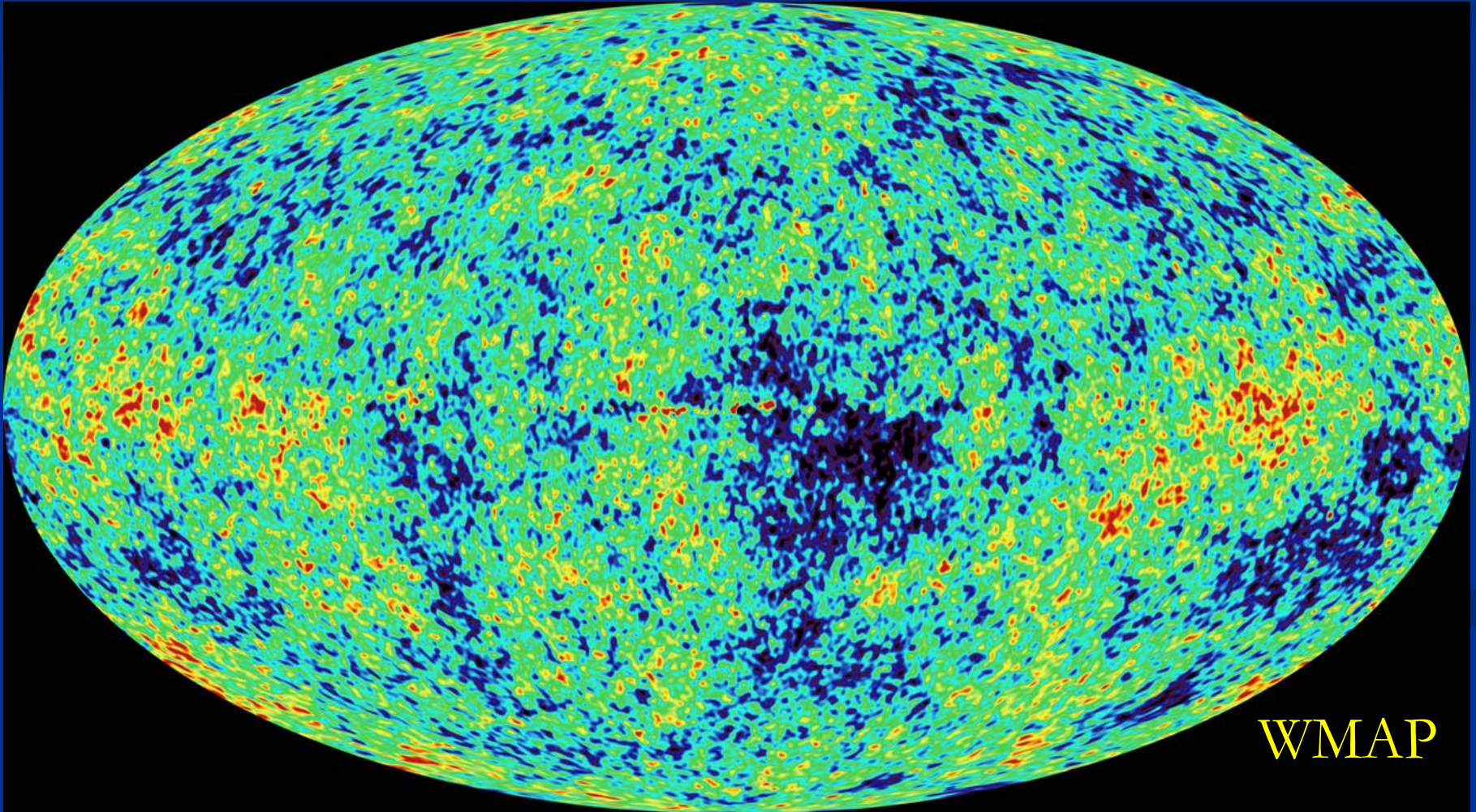
← Reionisation beendet. Das Universum ist transparent.

Galaxien entwickeln sich

Das Sonnensystem entsteht

Heute: Astronomen erklären das Universum

Foto des Urknalls



WMAP

schauen : nicht nur mit Licht !

- Infrarotstrahlung
- Röntgenstrahlung
- hochenergetische Gammastrahlen
- Gravitationslinsen
- Neutrinos (?)
- Gravitationswellen (?)

Farben frei gewählt

Dunkle Materie in Galaxienhaufen (Cluster)



Dunkle Materie in Kollision

bullet cluster

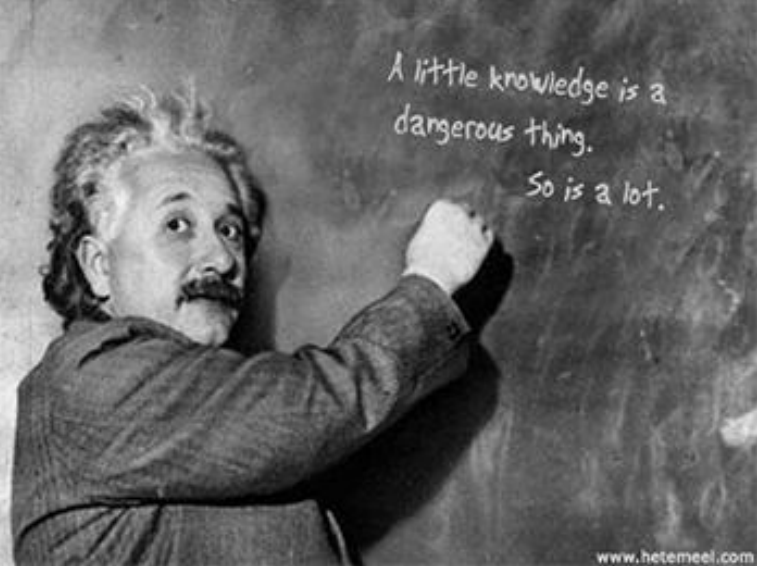


Kosmologie :

**Verständis des
Universums als Ganzem**

Expansion des Universums

- Der Raum zwischen den Galaxienhaufen dehnt sich aus.
- Früher war das Universum dichter, ... und heißer.
- Zurückverfolgung der Einstein'schen kosmologischen Gleichungen :
Urknall, extrem heißer Feuerball !
- Bis ca 400 000 Jahre nach dem Urknall : heißes Plasma aus Protonen, Elektronen und Strahlung



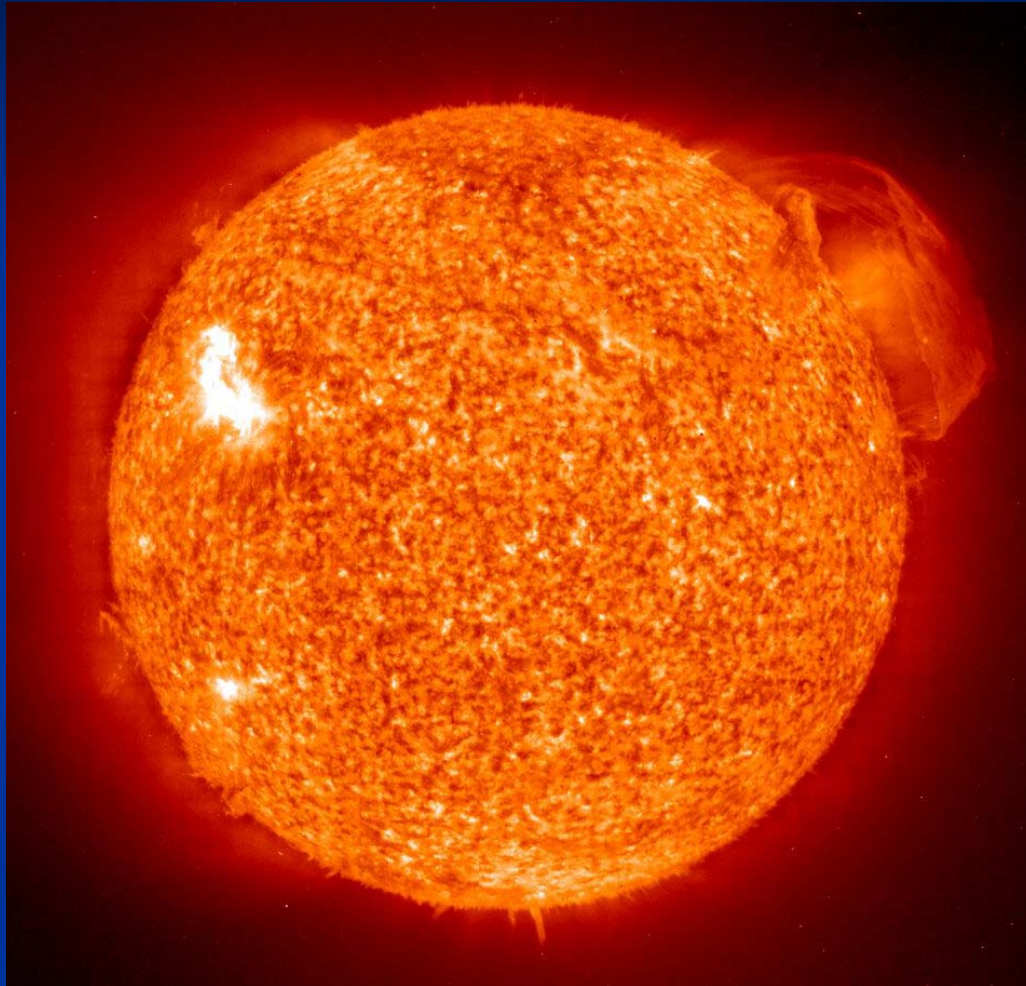
$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$



Feuerball

- heißes Plasma
- Elektronen und Kerne oder Kernbestandteile getrennt
- viel heißer und dichter als die Sonne
- undurchsichtig
- Licht wird fortdauernd gestreut
- Ende nach 400 000 Jahren

Kann man in die Sonne hineinschauen ?



nur Oberfläche der Sonne sichtbar , obwohl viel elektromagnetische Strahlung im Innern !

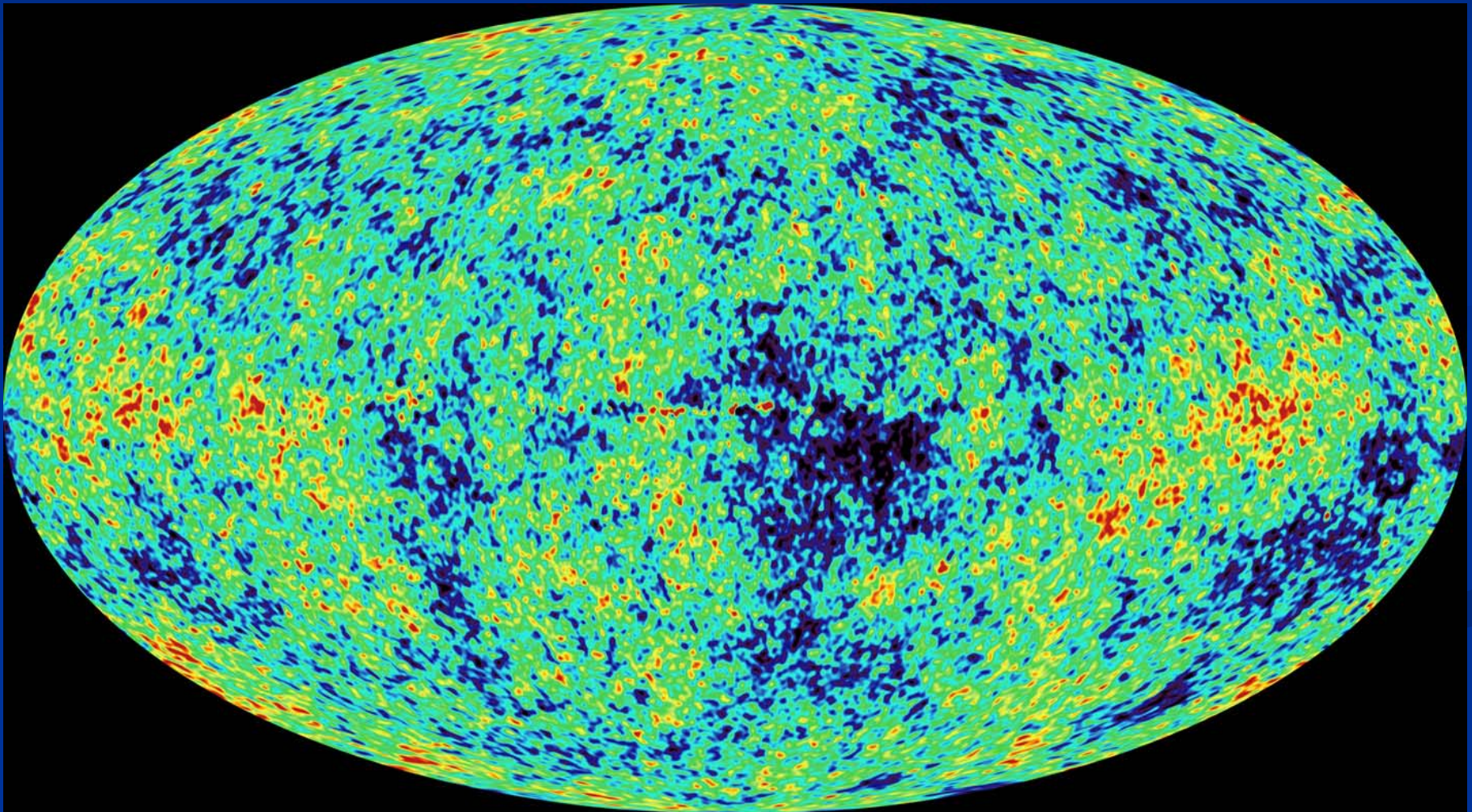
Kosmische Hintergrundstrahlung

- 400 000 Jahre *abb* ist Universum genug abgekühlt, so dass sich neutrale Atome bilden können.
- Universum wird durchsichtig
- Vergleich : Wolke löst sich auf

abb : after big bang
nach dem Urknall

Foto des Urknalls

als sich die Atome bildeten : ca 400 000 Jahre abb



Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

*A partnership between
NASA/GSFC and Princeton*

Science Team:

NASA/GSFC

Chuck Bennett (PI)

Michael Greason

Bob Hill

Gary Hinshaw

Al Kogut

Michele Limon

Nils Odegard

Janet Weiland

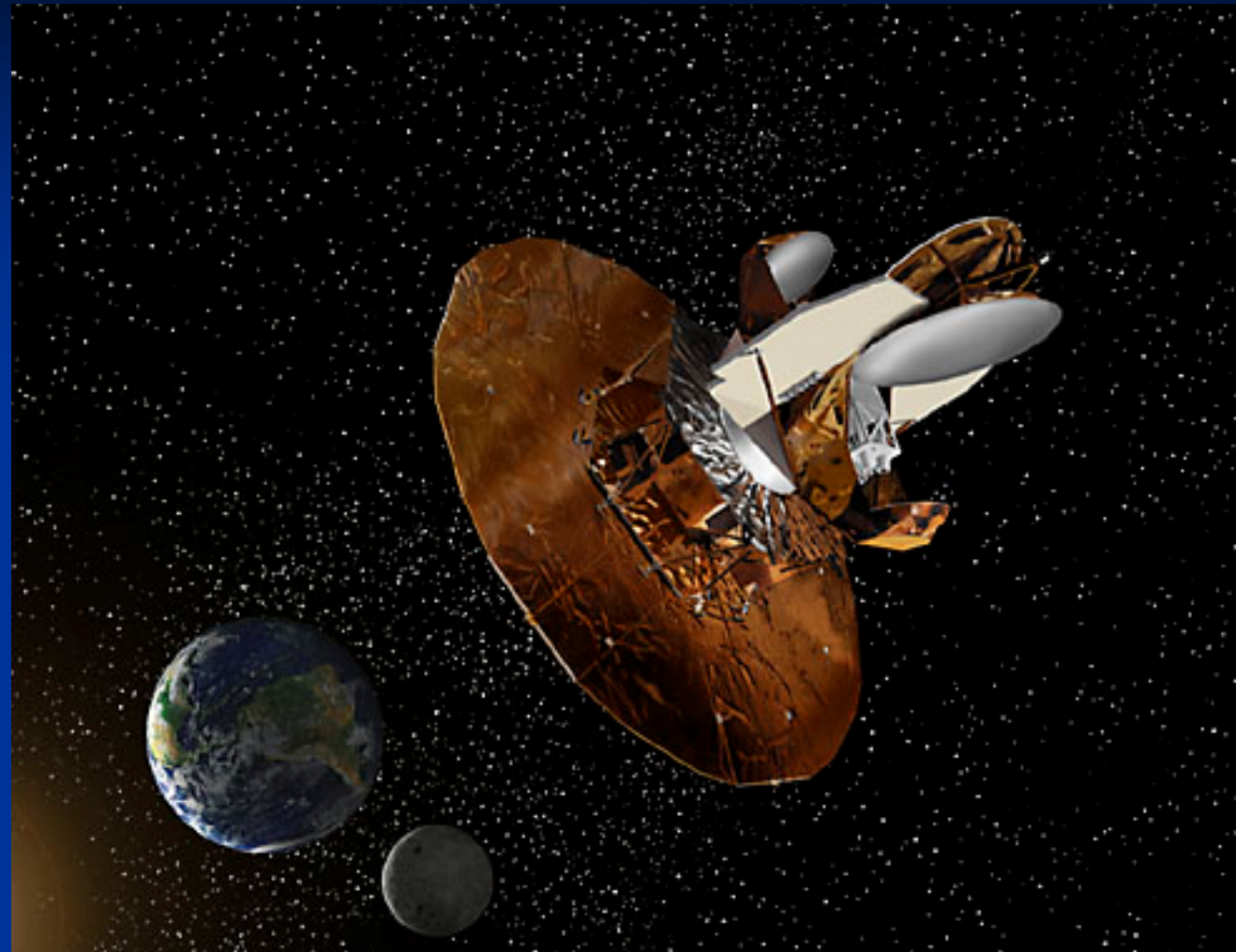
Ed Wollack

Brown

Greg Tucker

UCLA

Ned Wright



UBC

Mark Halpern

Chicago

Stephan Meyer

Princeton

Chris Barnes

Norm Jarosik

Eiichiro Komatsu

Michael Nolte

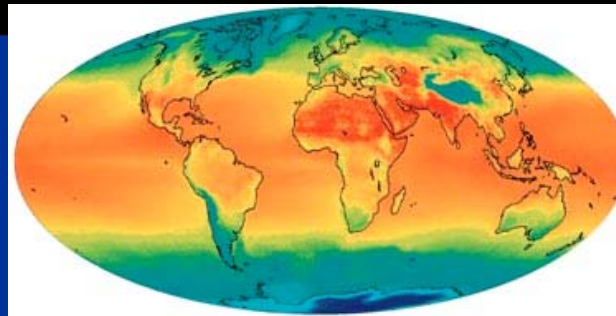
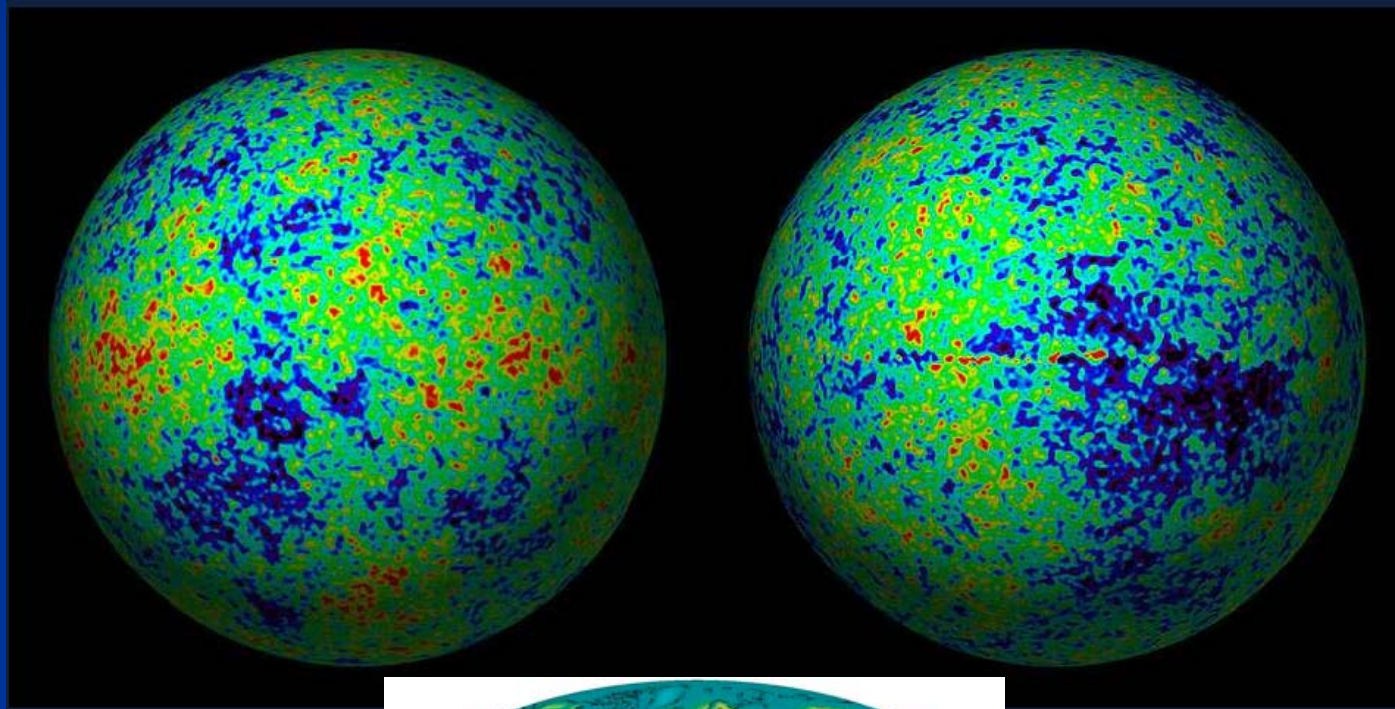
Lyman Page

Hiranya Peiris

David Spergel

Licia Verde

Bild einer Kugeloberfläche von innen winzige Temperatur-schwankungen der Hintergrundstrahlung



Signale des Urknalls

■ Hintergrundstrahlung

Es werde Licht !

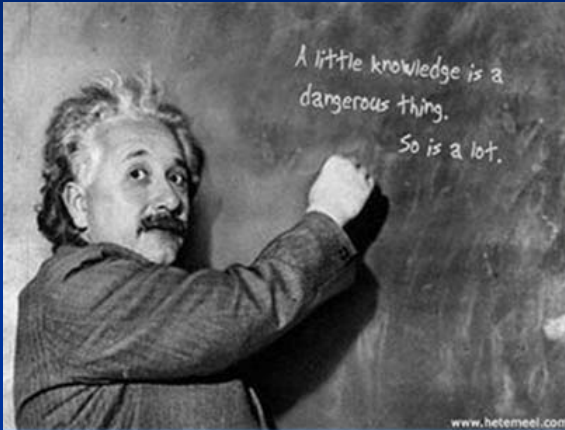
(Fiat lux) (400 000 Jahre nach Urknall)

■ Primordiale Elementsynthese (Nucleosynthese)

Beginn der Chemie (10 Minuten abb)

abb : after big bang

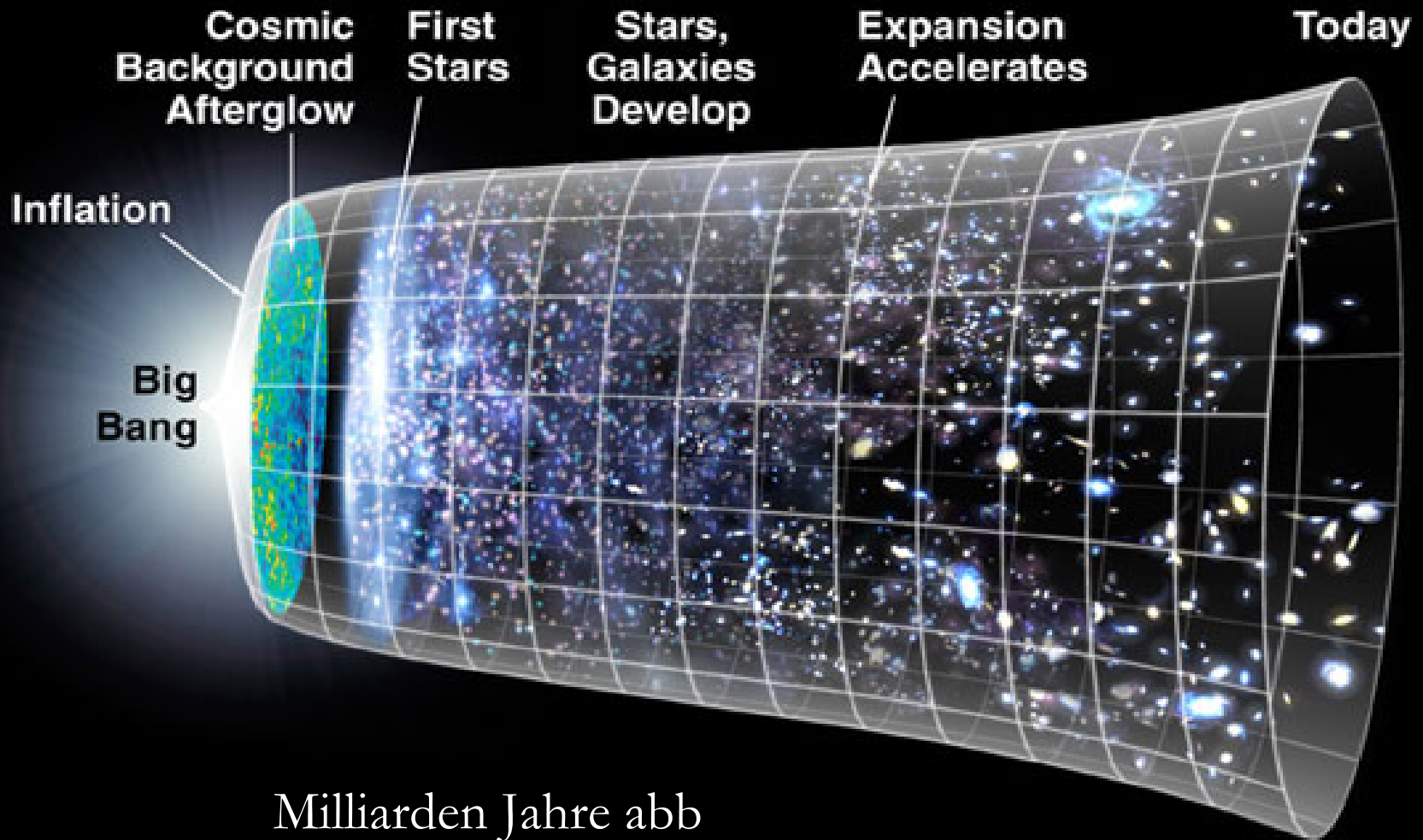
und alles aus wenigen Gleichungen ...



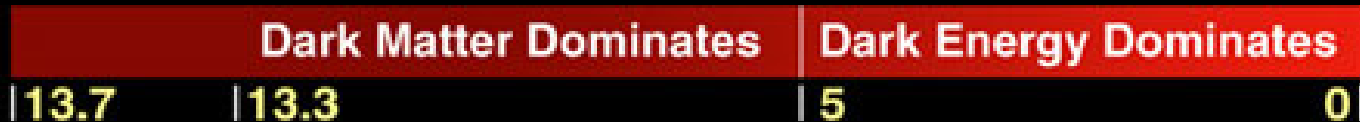
$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$



Entwicklung des Universums



Milliarden Jahre abb



Näher an den Urknall

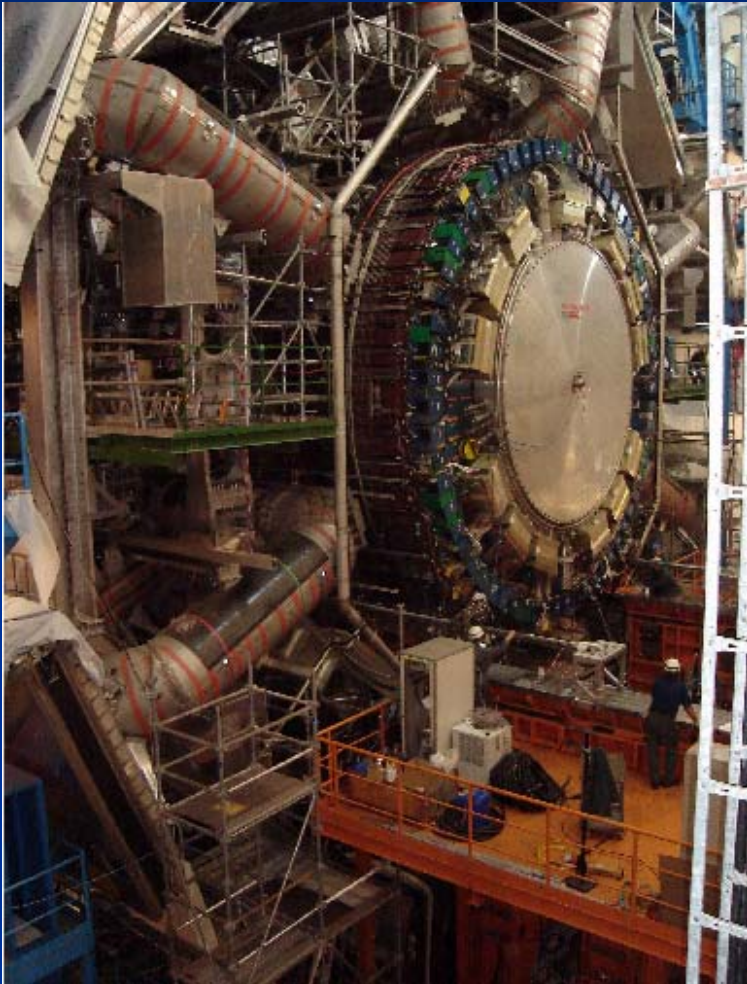
- Je näher an den Urknall, desto höher die Temperatur und Energie der Teilchen
- Physik bei hohen Energien weniger gut bekannt
- Erst ab 10^{-10} Sekunden abb : Im wesentlichen bekannte Physik

Teilchenphysik nähert sich Urknall

- vor Zeiten von 10^{-12} Sekunden ab sind die Teilchen mit Masse $<$ Temperatur nicht experimentell bekannt
- LHC erforscht Physik, die für 10^{-12} Sekunden ab wichtig ist
- spontane Symmetriebrechung, Phasenübergang

Energiegrenze ...

Energiegrenze



LHC , CERN , Genf

Modell des Universums

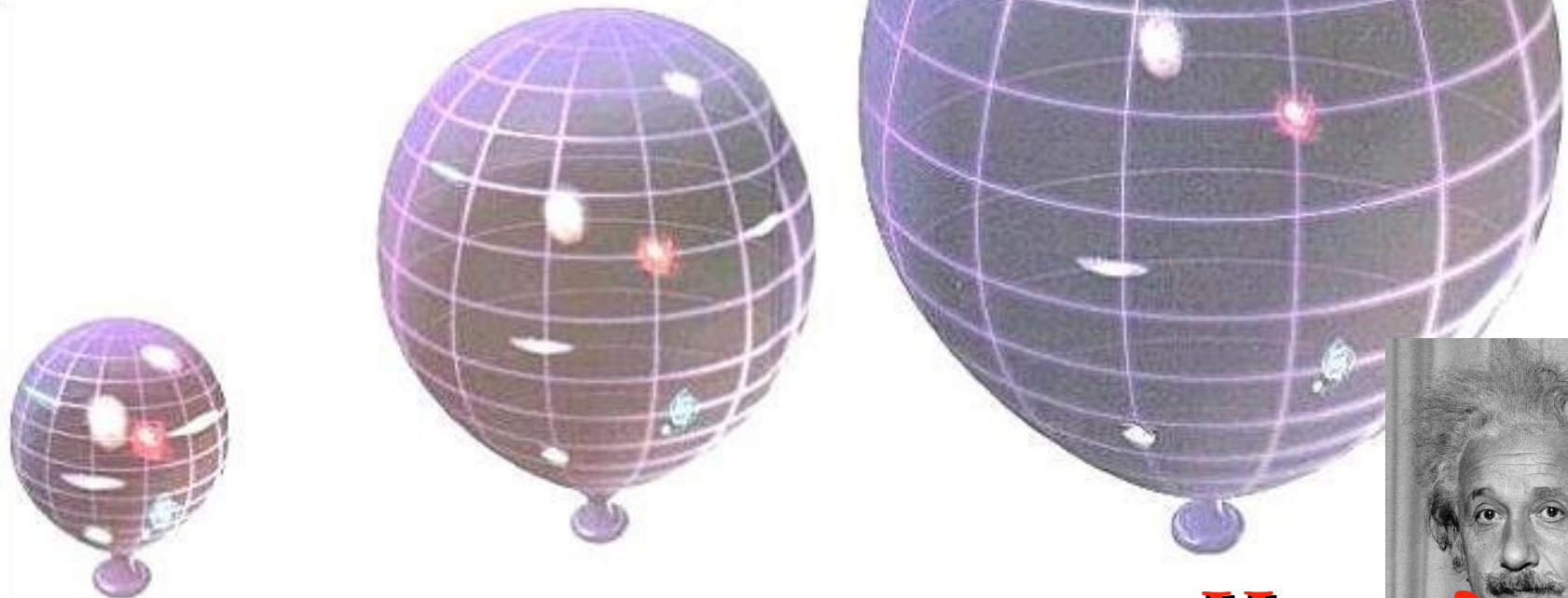
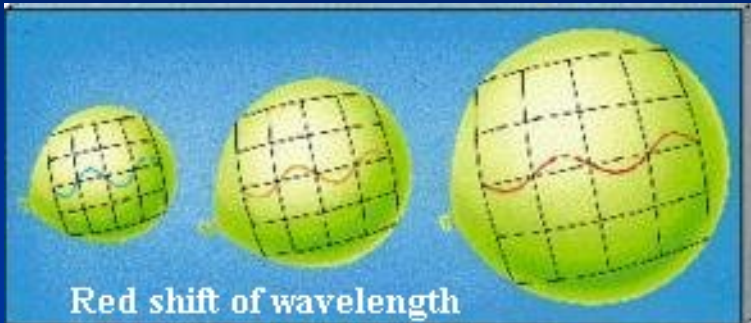
großes Ziel!

Quantitatives Verständnis und Vorhersagen
von 10^{-12} Sekunden ab bis weit in die Zukunft

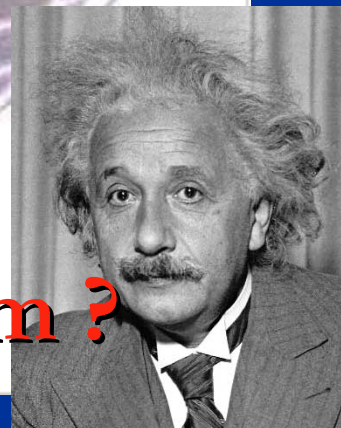
Modell des Universums

- haben wir das Universum wirklich verstanden ?
- die letzten paar Milliarden Jahre ?

Expansion des Universums



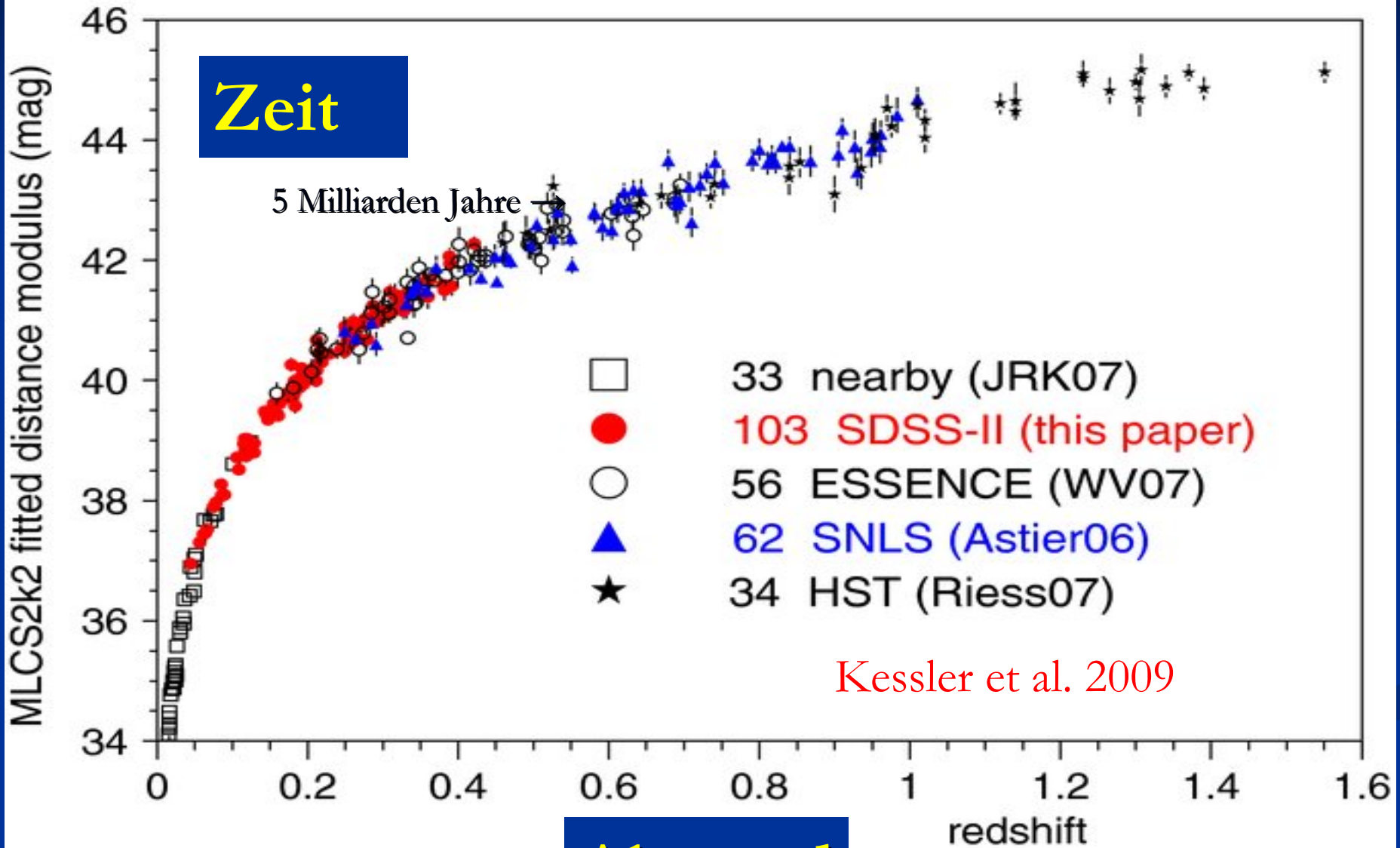
Hmm?



Supernovae als Standardkerzen

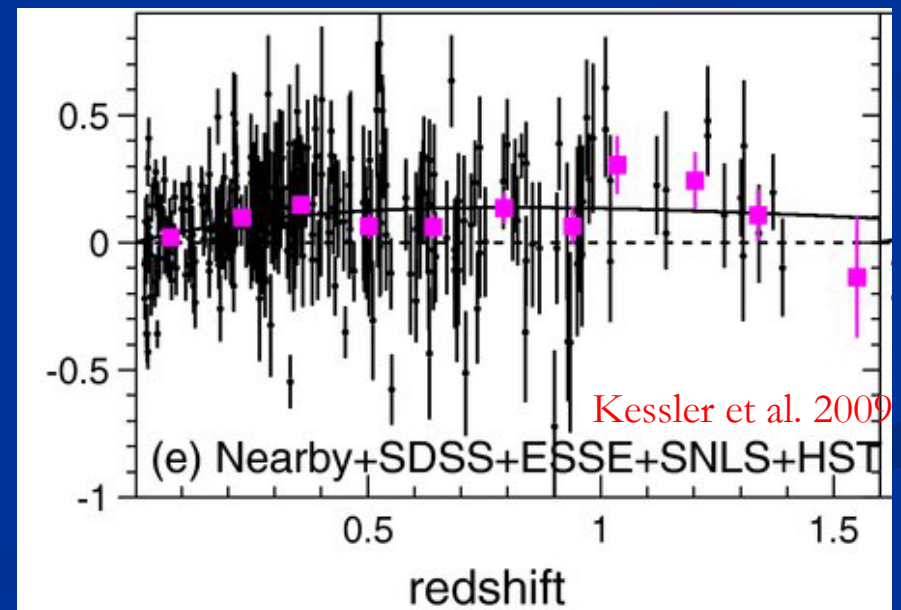
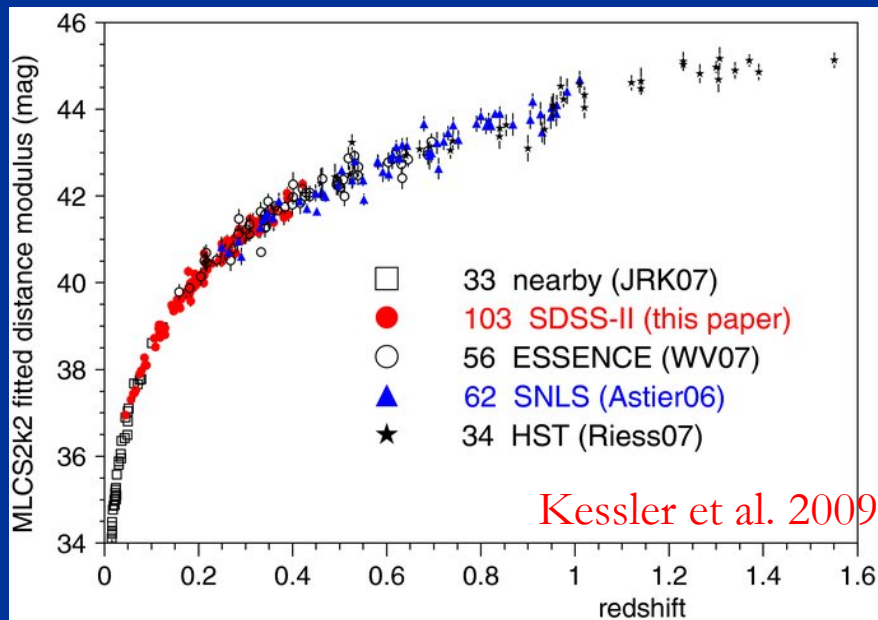


Beschleunigte Expansion

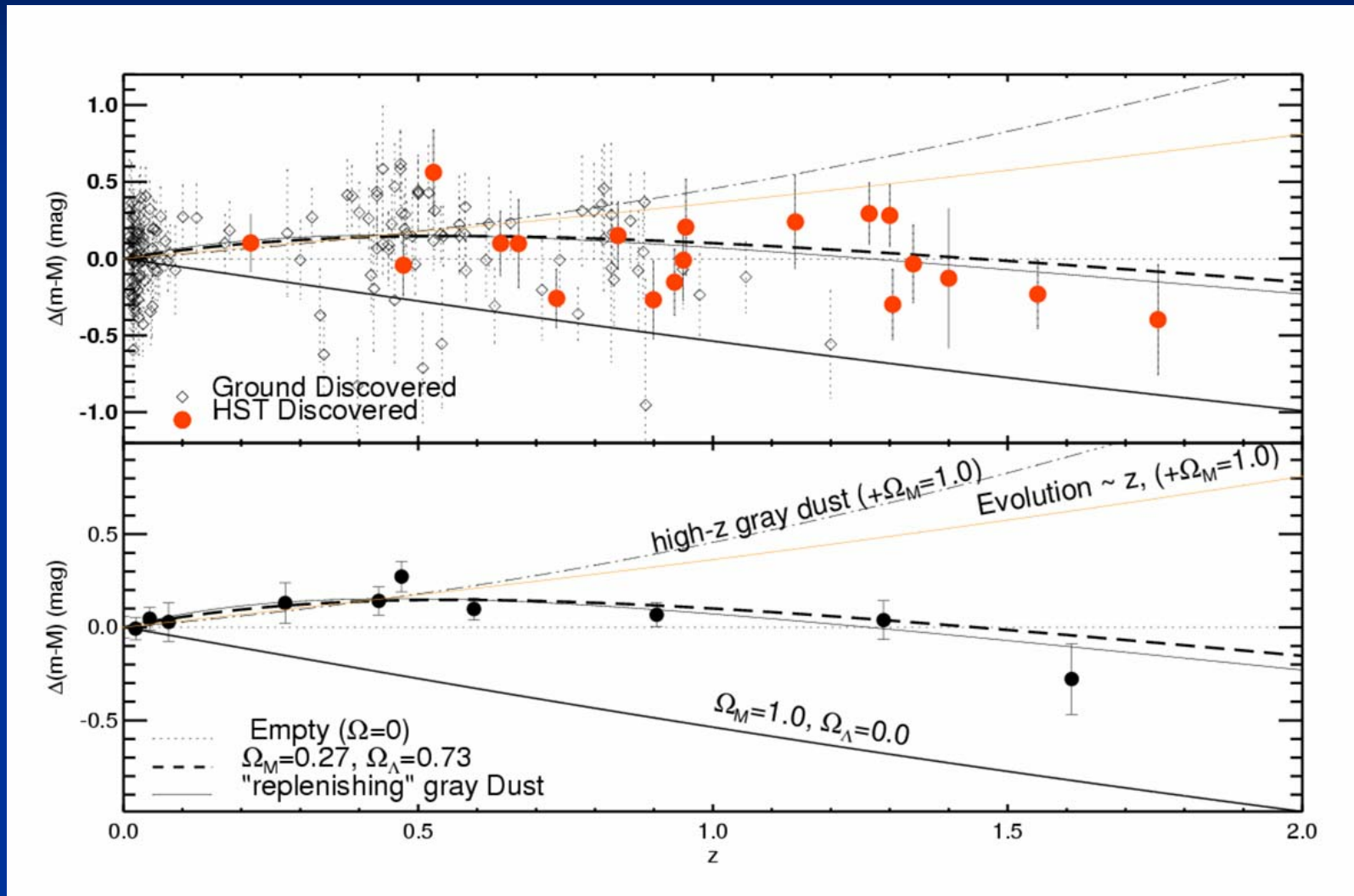


Abstand

die Daten zu verstehen , ist gar nicht so einfach ...



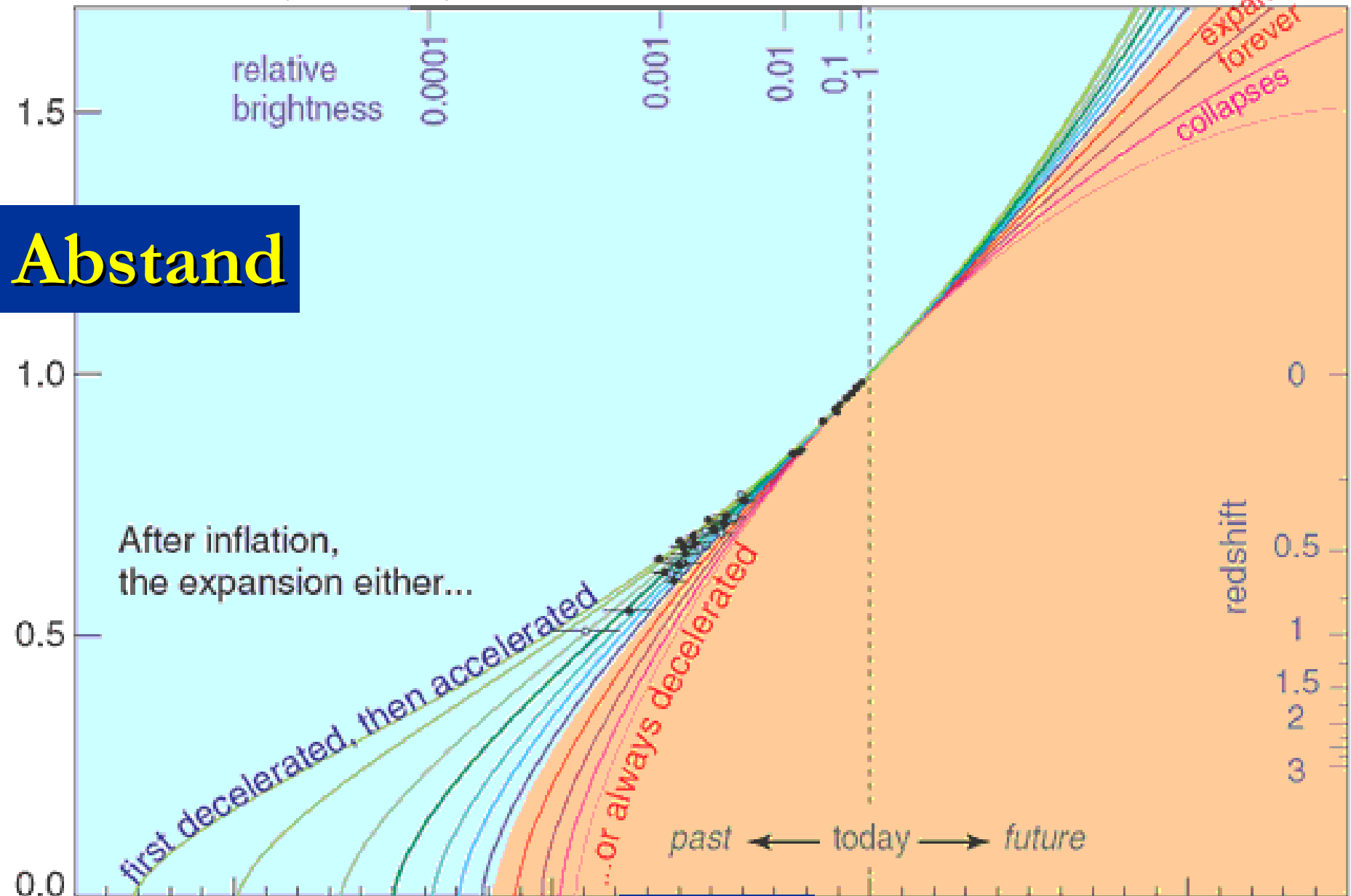
Supernova Ia Hubble-Diagramm



Rotverschiebung z

Riess et al. 2004

Abstand



Zeit

Milliarden Jahre

Woraus besteht unser Universum ?



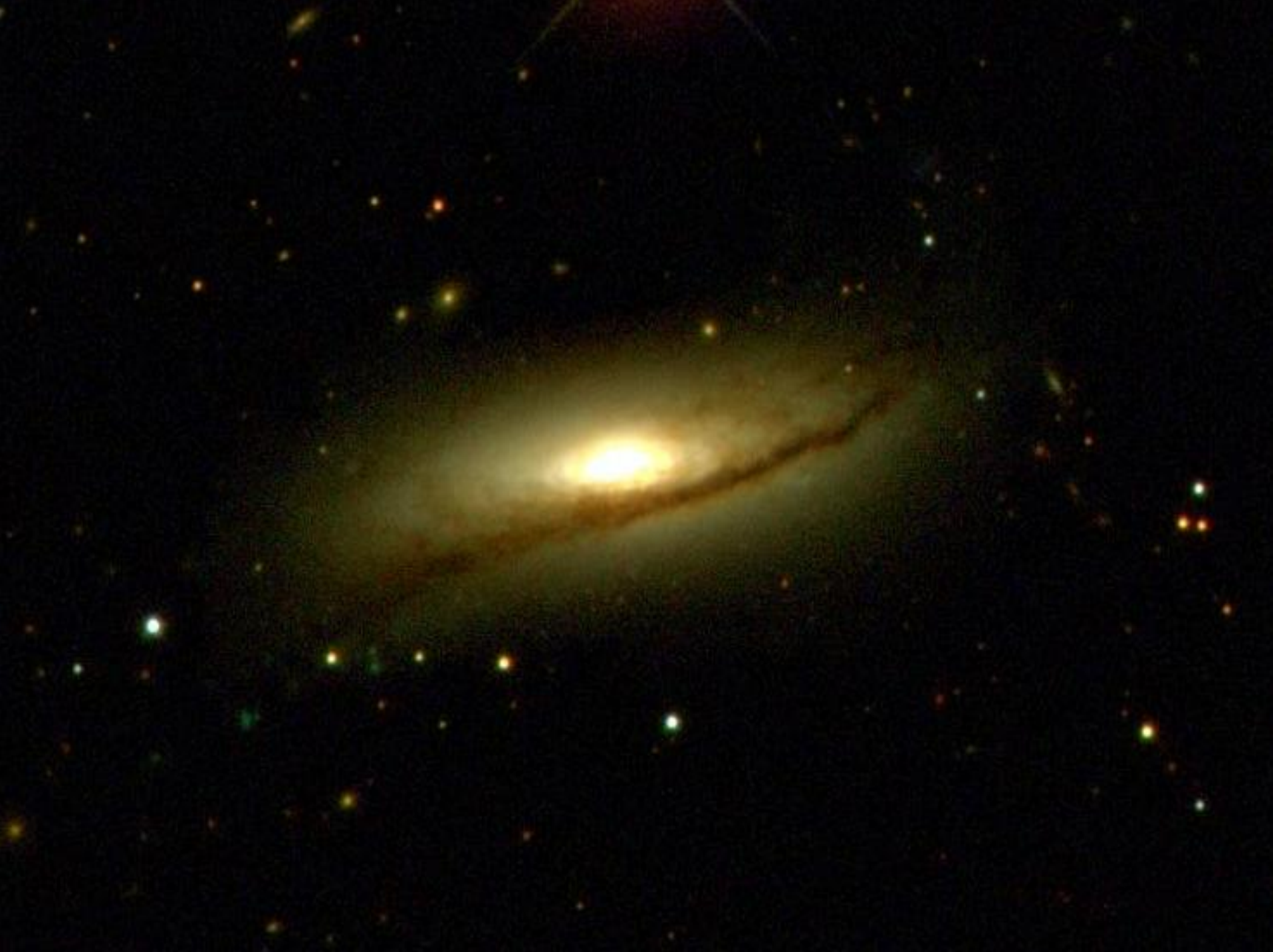
Quintessenz !

Feuer , Luft,
Wasser,
Erde !

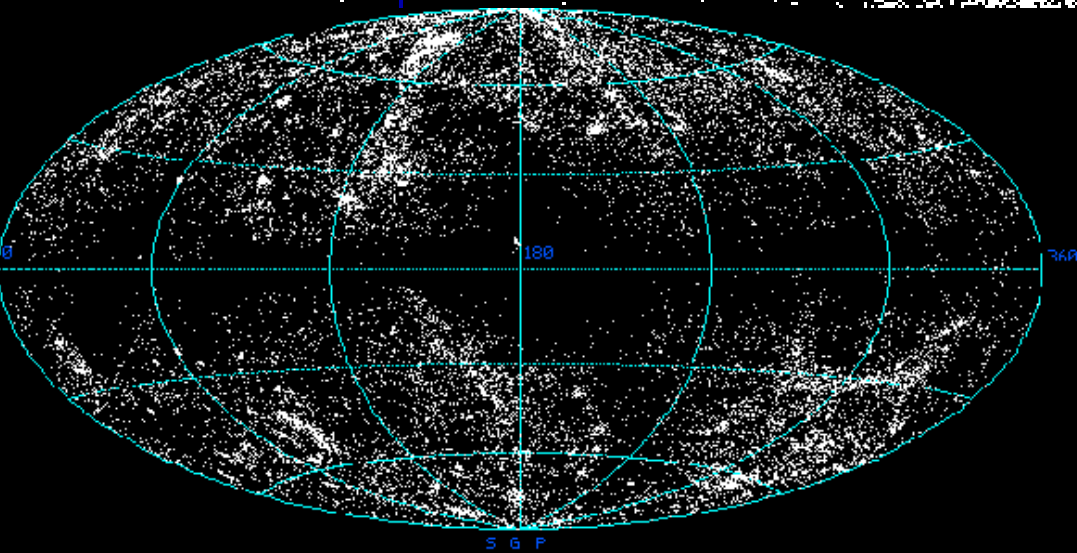
Atome – der Staub des Universums

The background of the slide is a deep space image showing a vast field of stars and galaxies. The stars vary in color, including bright white and yellow ones, as well as several prominent blue stars. Some galaxies are visible as faint, elongated shapes. The overall scene is a rich, multi-colored stellar population.

Abell 2255 Cluster
~300 Mpc



Atome – der Staub des Universums



CfA Galaxy Catalog Galactic Map (30926 Gal.)

**nur 4,5 % des Universums
bestehen aus Atomen :**

bekannt von

Hintergrundstrahlung ,

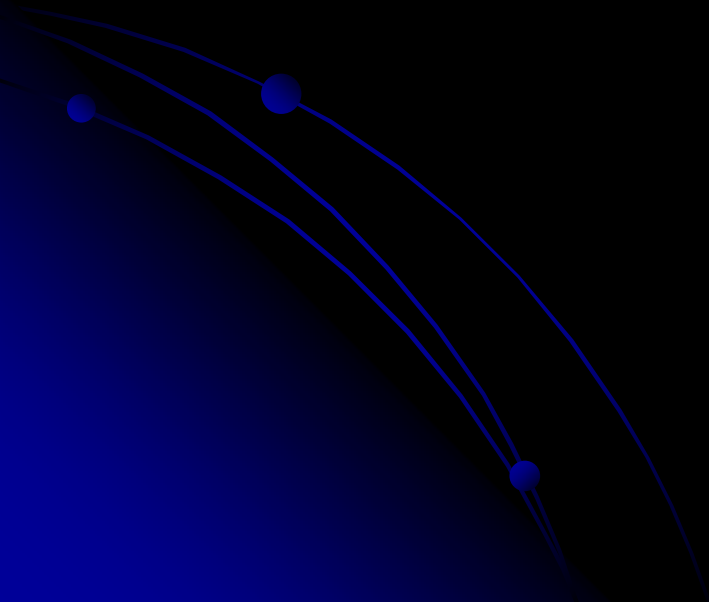
Nucleosynthese

400 000 Jahre abb
Atomphysik

Minute abb
Kernphysik



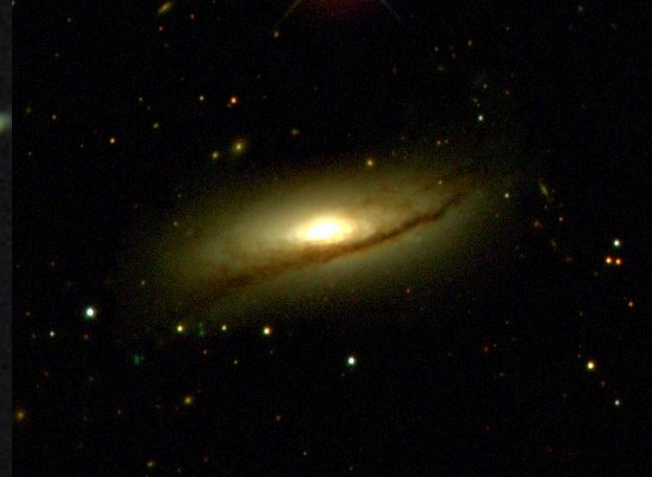
95% des Universums sind dunkel –
Dunkle Energie und Dunkle Materie




oder genauer : durchsichtig

Materie :

Alles , was klumpt



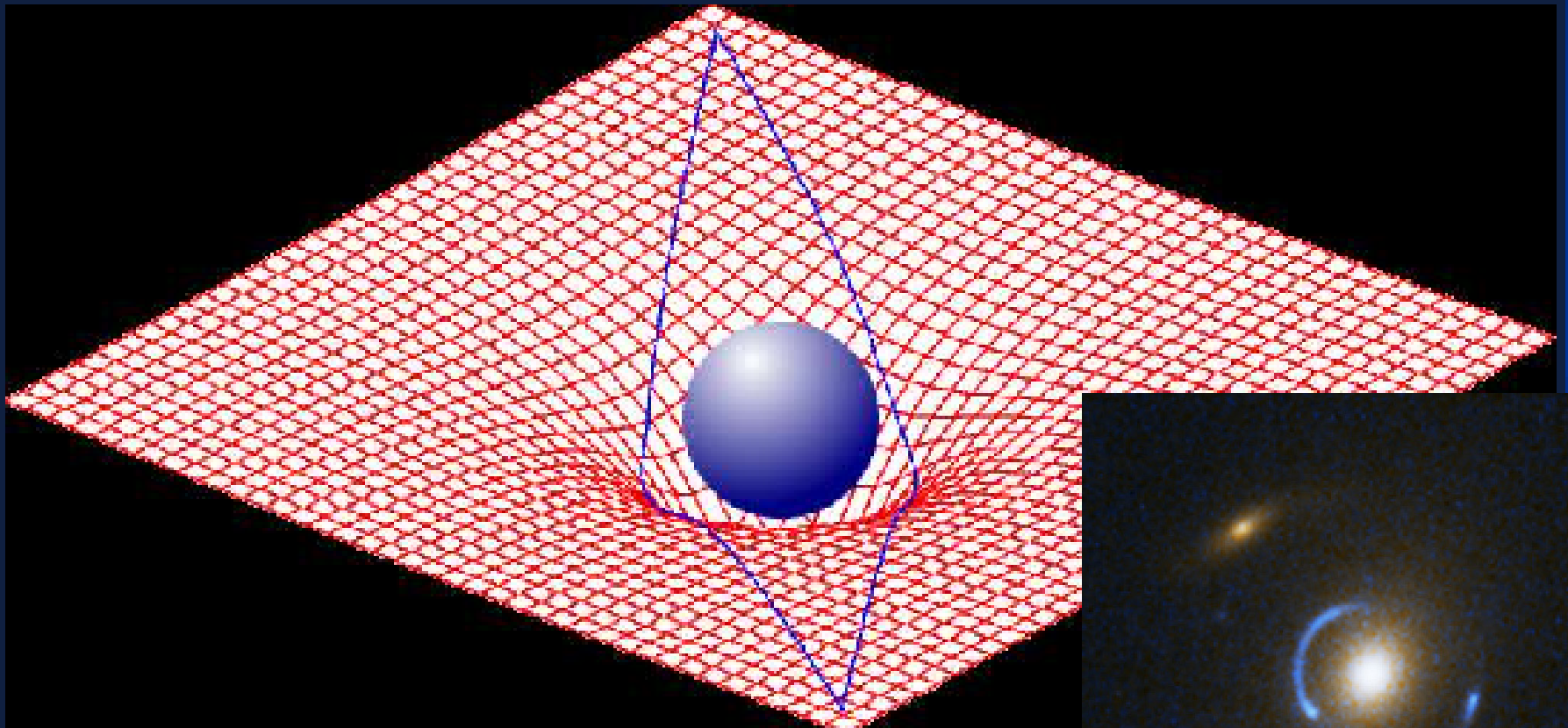
Dunkle Materie

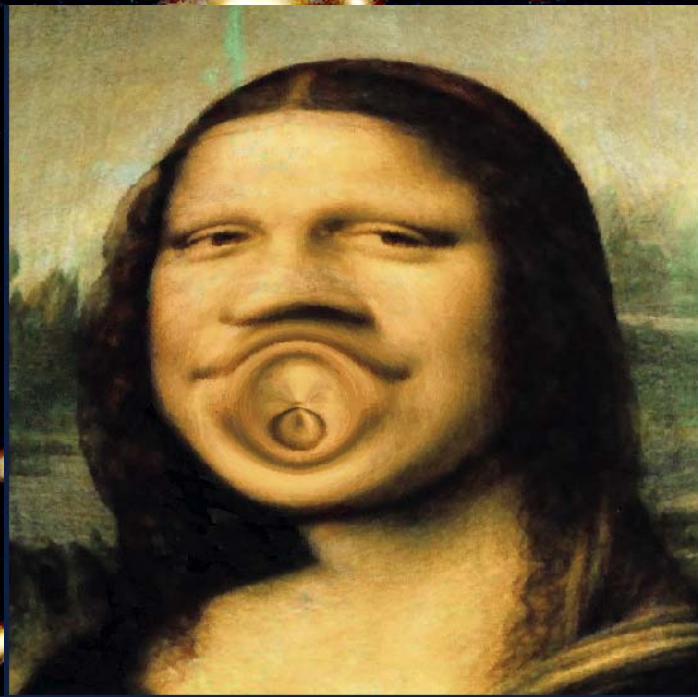
- Anteil der “Materie” insgesamt : 25 %
- Die meiste Materie ist dunkel !
- Bisher nur durch Gravitation spürbar
- Alles was klumpt!  Gravitationspotential



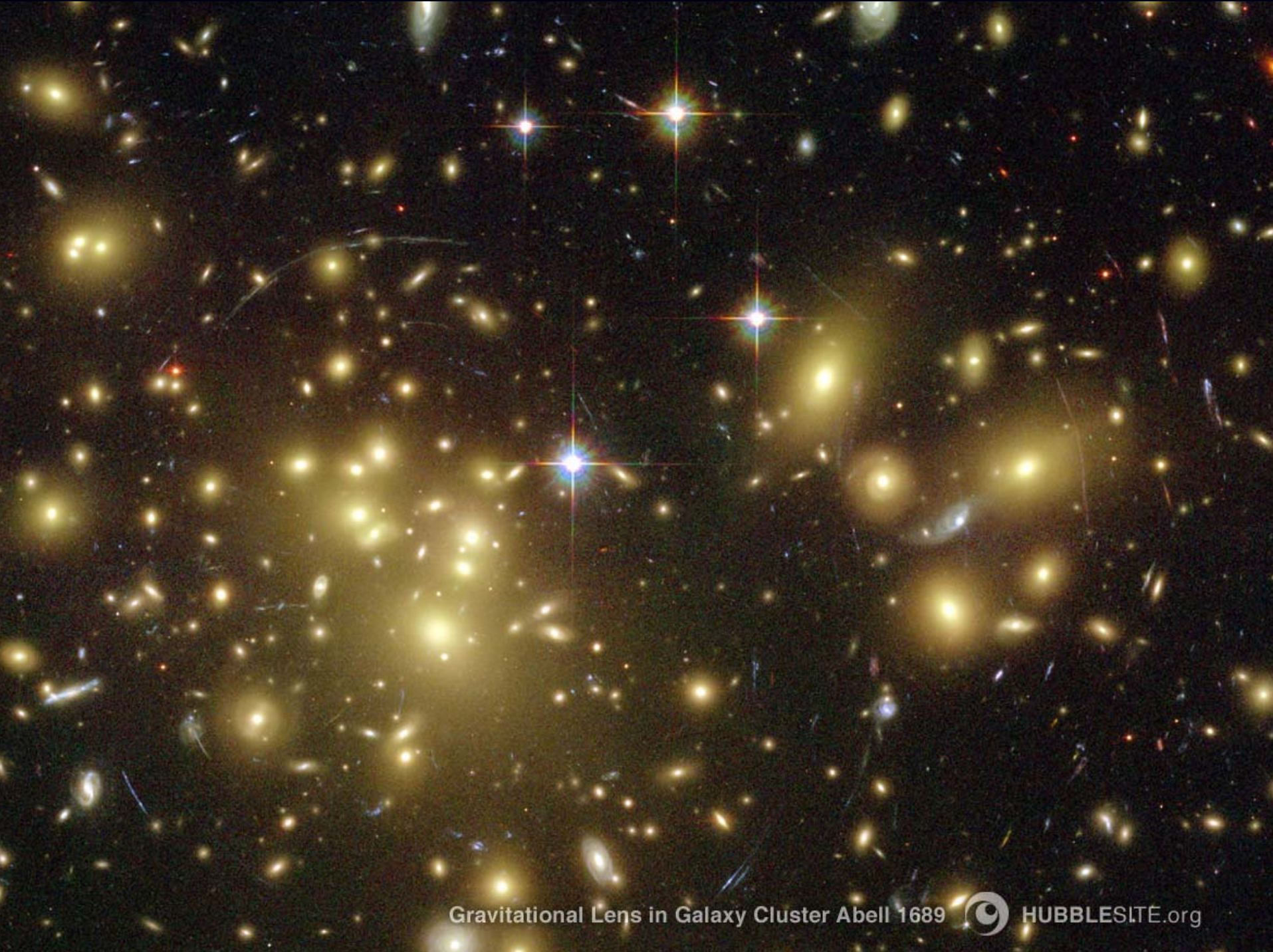
Gravitationslinse, HST

Lichtstrahlen werden durch Massen abgelenkt





Gravitationslinse, HST



Dunkle Materie + Atome :

Alles was klumpt !

25 %

Simulationen im Computer

$t = 13.6$ Milliarden Jahre ($z=0$)

500 Mpc/h



Verteilung der Dunklen Materie im Universum

Millenium simulation , VIRGO project

$t = 13.6$ Milliarden Jahre ($z=0$)

500 Mpc/h

A visualization of the cosmic web at $t = 13.6$ billion years ($z=0$). The image shows a complex, interconnected network of dark purple and blue filaments, with bright yellow and orange spots representing galaxy clusters and individual galaxies. A horizontal white scale bar is positioned in the upper-middle part of the image, with the text "500 Mpc/h" centered above it. The background is a deep purple, indicating the vastness of the universe.

$t = 1$ Milliarde Jahre ($z = 5.7$)

500 Mpc/h

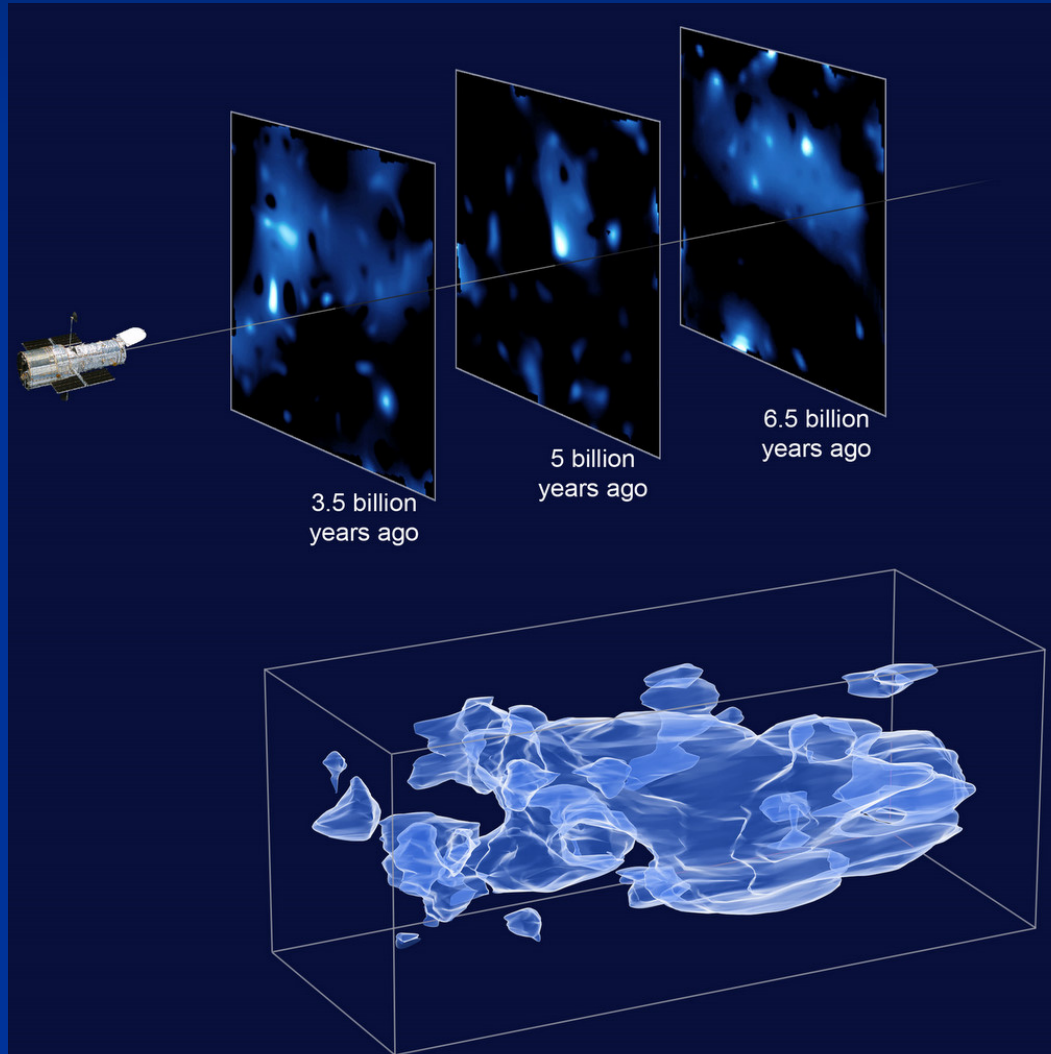


$t = 13.6$ Milliarden Jahre ($z=0$)

500 Mpc/h

A visualization of the cosmic web at $t = 13.6$ billion years ($z=0$). The image shows a dense network of filaments and nodes, with a scale bar indicating 500 Mpc/h. The filaments are colored in shades of purple and blue, with nodes appearing as bright yellow and orange points. The overall structure is a complex, interconnected web of matter.

und Vergleich mit Beobachtung : Verteilung der Dunklen Materie



$t = 13.6$ Milliarden Jahre ($z=0$)

500 Mpc/h



Zoom auf Galaxienhaufen

$t = 13.6$ Milliarden Jahre ($z=0$)

125 Mpc/h

A visualization of the cosmic web at $t = 13.6$ billion years ($z=0$). The image displays a dense network of purple filaments and nodes, representing the large-scale structure of the universe. A central bright yellow node is prominent. A scale bar indicates a distance of 125 Mpc/h.

$t = 13.6$ Milliarden Jahre ($z=0$)

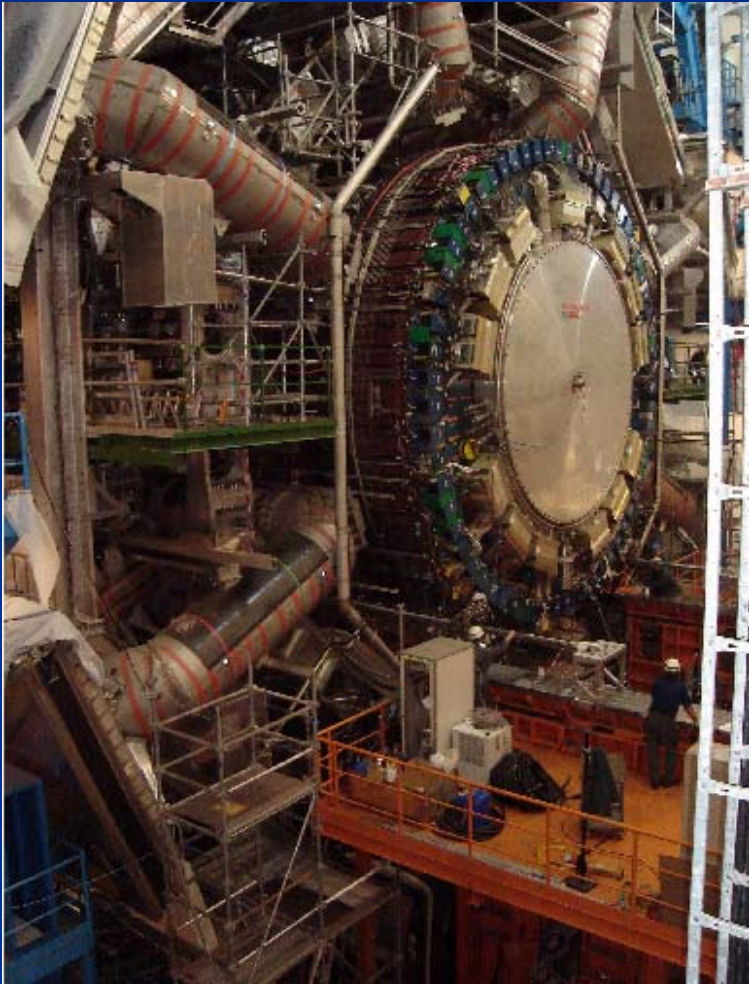
31.25 Mpc/h

A visualization of the cosmic web at $t = 13.6$ billion years ($z=0$). The image shows a complex network of filaments and clusters of particles, with a central bright yellow-green region. A scale bar indicates 31.25 Mpc/h.

Vergleich mit Beobachtung

Woraus besteht Dunkle Materie ?

Dunkle Materie könnte aus noch unbekannten Elementarteilchen bestehen



LHC , CERN , Genf

Dunkle Materie + Atome :

Alles was klumpt !

25 %

25 % von was ?

Kritische Dichte

- $\rho_c = 3 H^2 M^2$

Kritische Energiedichte des Universums

(M : reduzierte Planck-Masse , $M^{-2} = 8 \pi G$;

H : Hubble Parameter $H = \dot{a}/a$)

- $\Omega_b = \rho_b / \rho_c$

Anteil der Atome (Baryonen) an der (kritischen) Energiedichte

Materie

Atome : $\Omega_b = 0.05$

Dunkle Materie : $\Omega_{dm} = 0.2$

Kritische Dichte

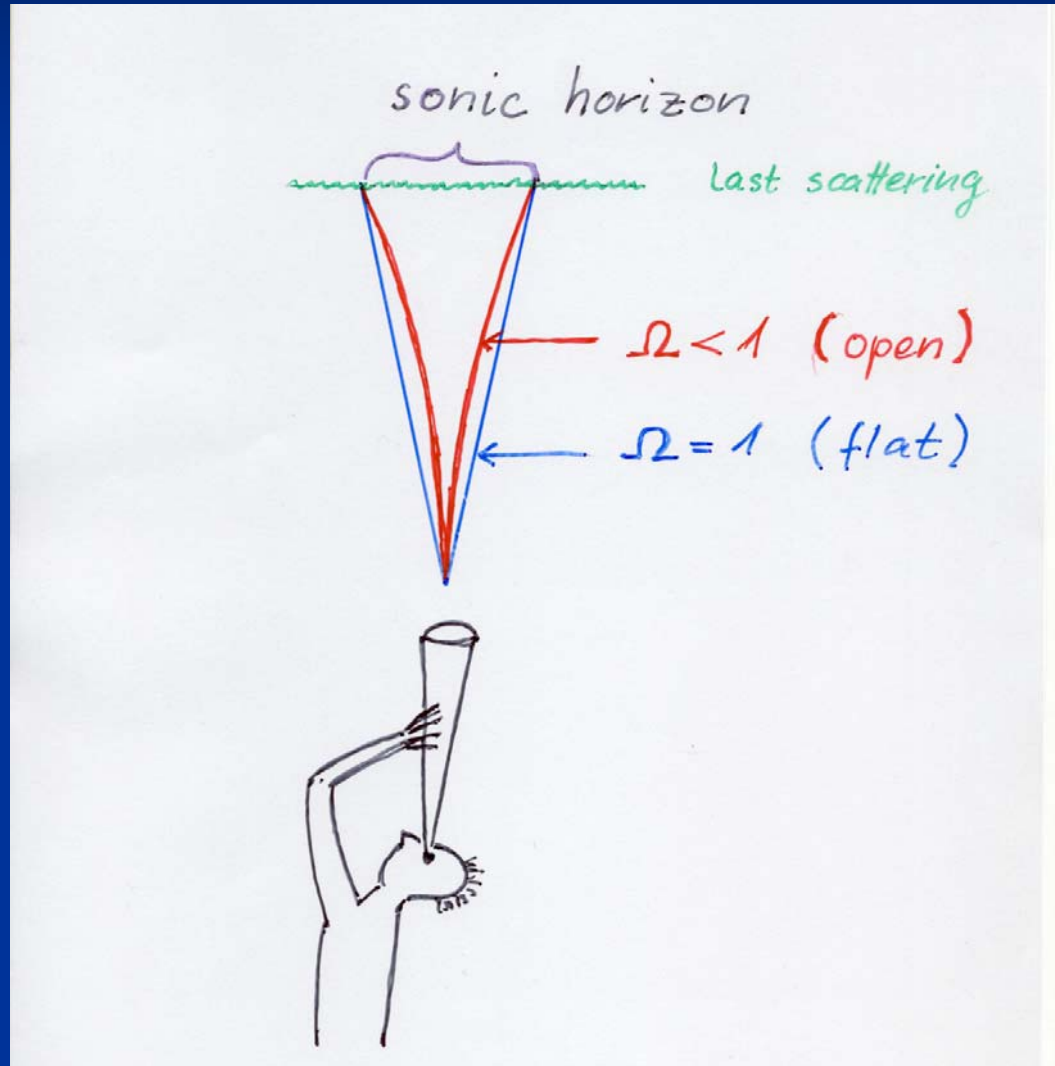
Ω_{tot} bestimmt die Geometrie des Universums : kann vermessen werden

$\Omega_{\text{tot}} = 1$ flaches Universum

$\Omega_{\text{tot}} > 1$ Geometrie wie Kugeloberfläche

$\Omega_{\text{tot}} < 1$ hyperbolische Geometrie

gekrümmte Bahnen der Lichtstrahlen



Räumlich flaches Universum

$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$

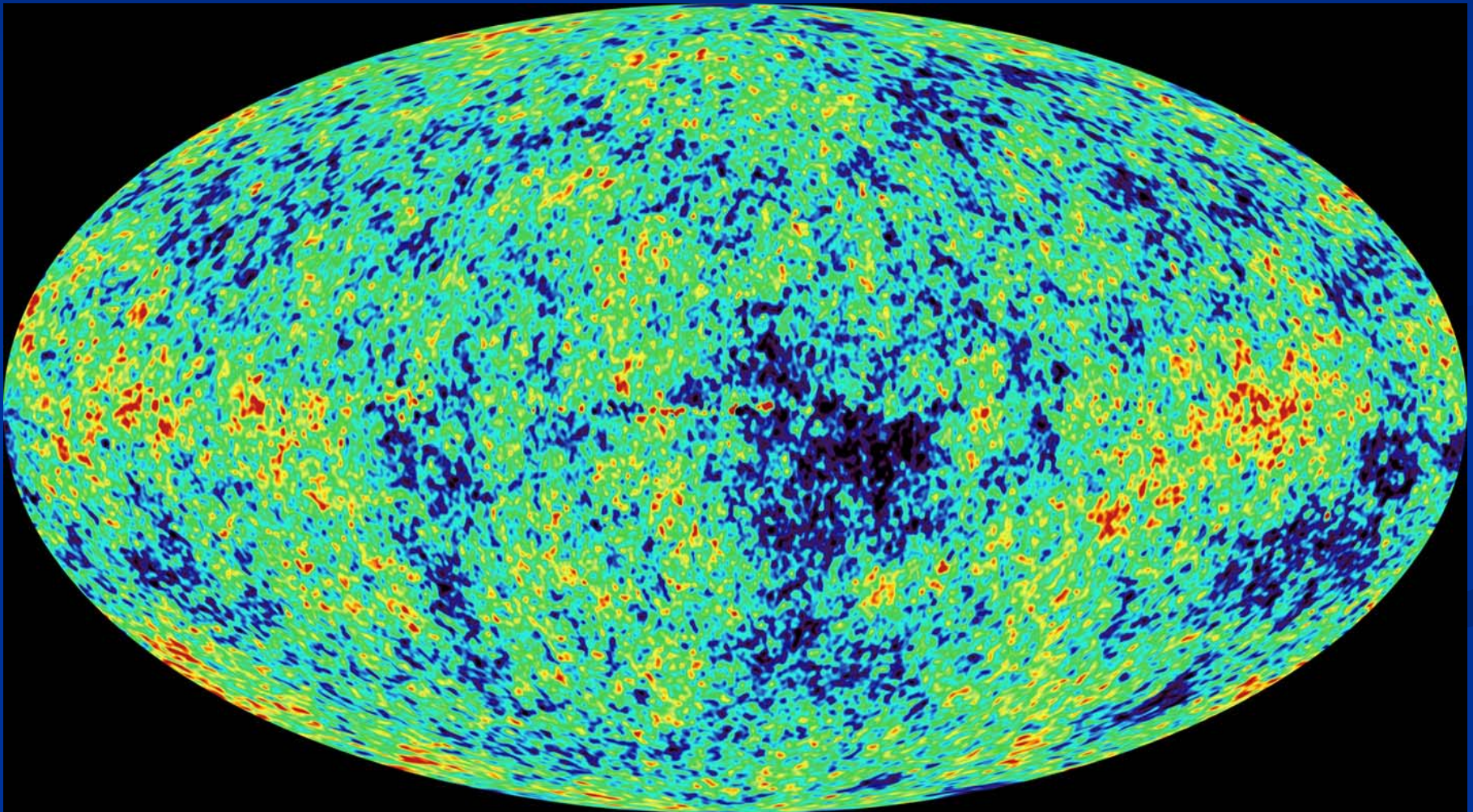
- Theorie (Inflationäres Universum)

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.0000\dots\dots\dots x$$

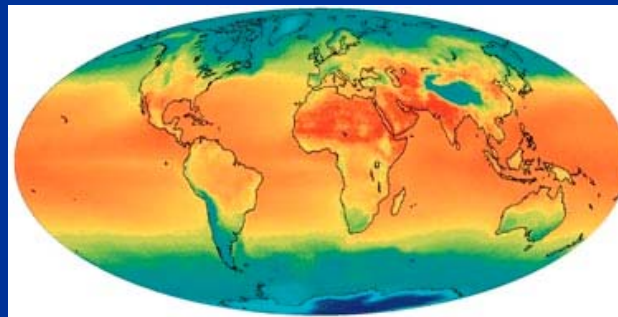
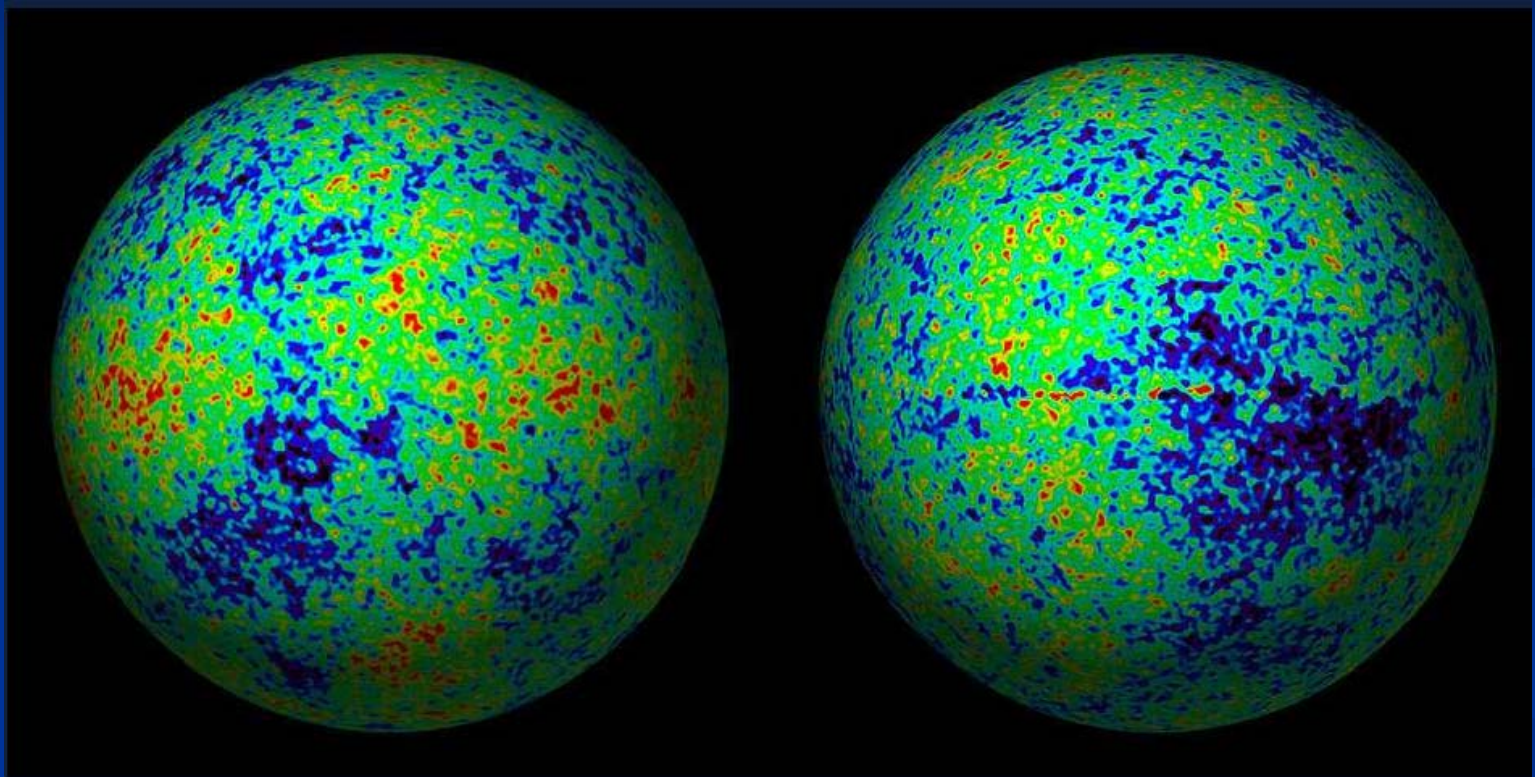
- Beobachtung (WMAP)

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.02 (\pm 0.02)$$

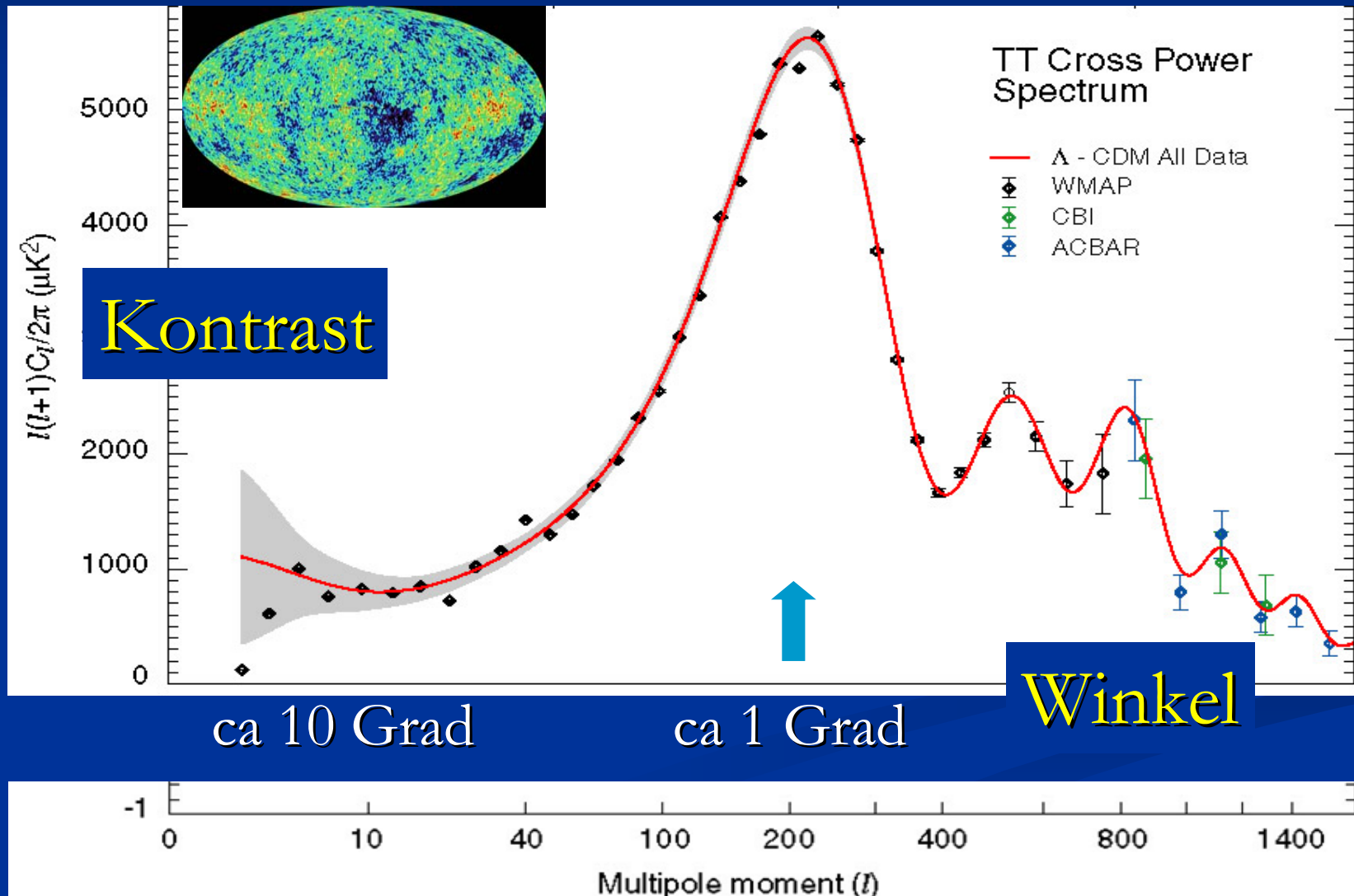
Bestimmung durch “Foto des Urknalls”



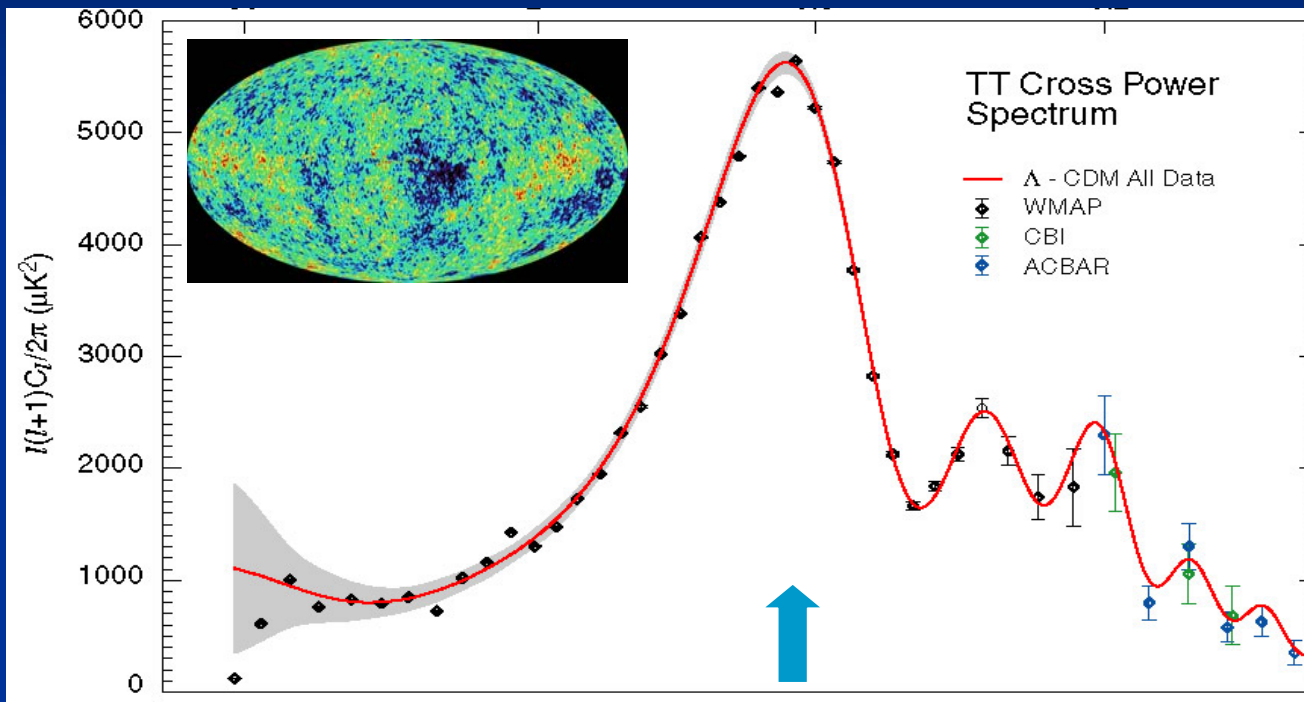
Anisotropie der Hintergrundstrahlung : Fleckengröße



Stärke der Temperaturschwankung in Abhängigkeit von Fleckengröße (im Winkel)

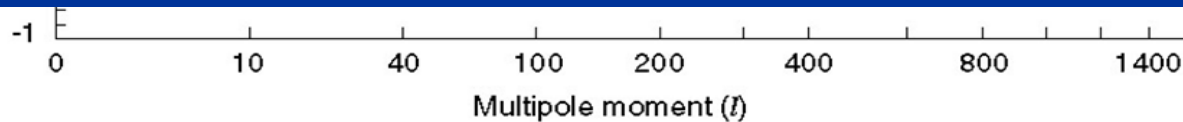


Akustische Schwingungen im Plasma



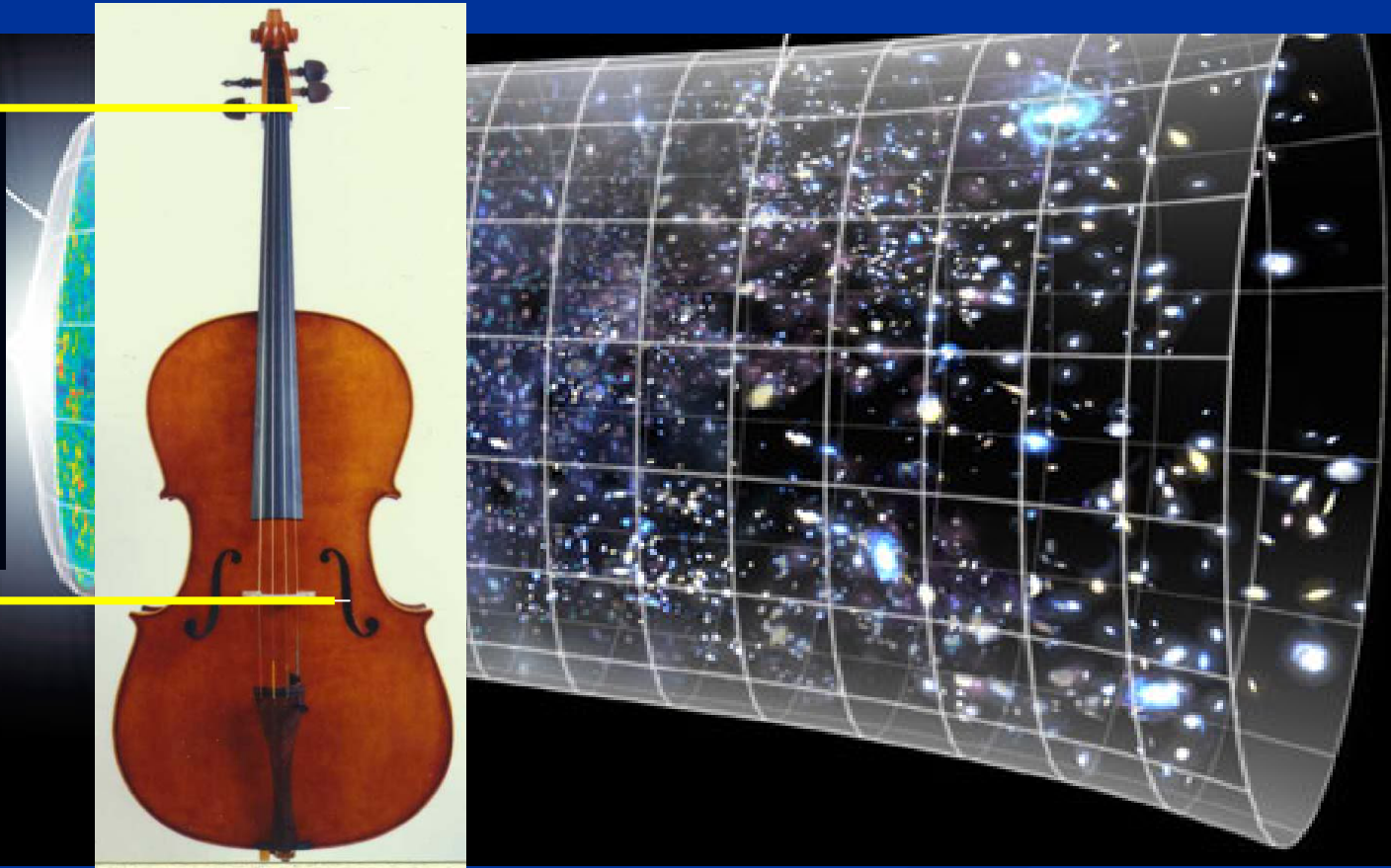
ca 10 Grad

ca 1 Grad



Schallwellen im frühen Universum

Länge
berechen-
bar



$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$



last scattering

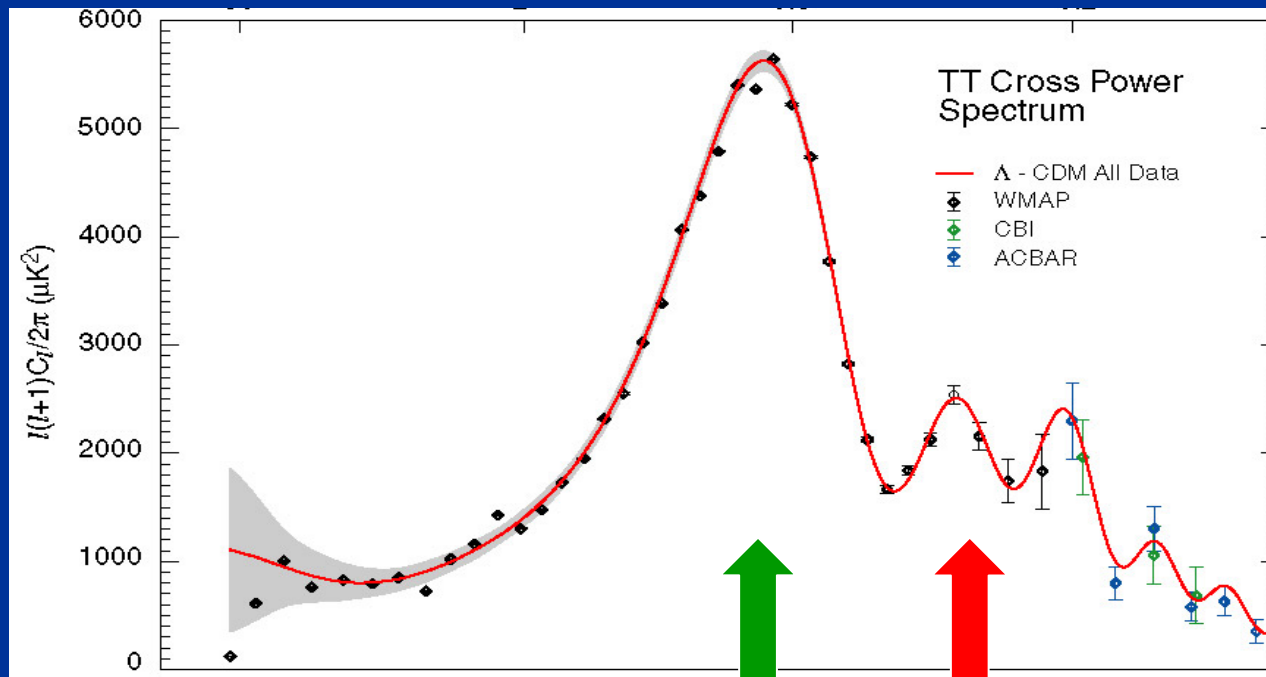
$\Omega < 1$ (open)

$\Omega = 1$ (flat)



Räumlich flaches Universum

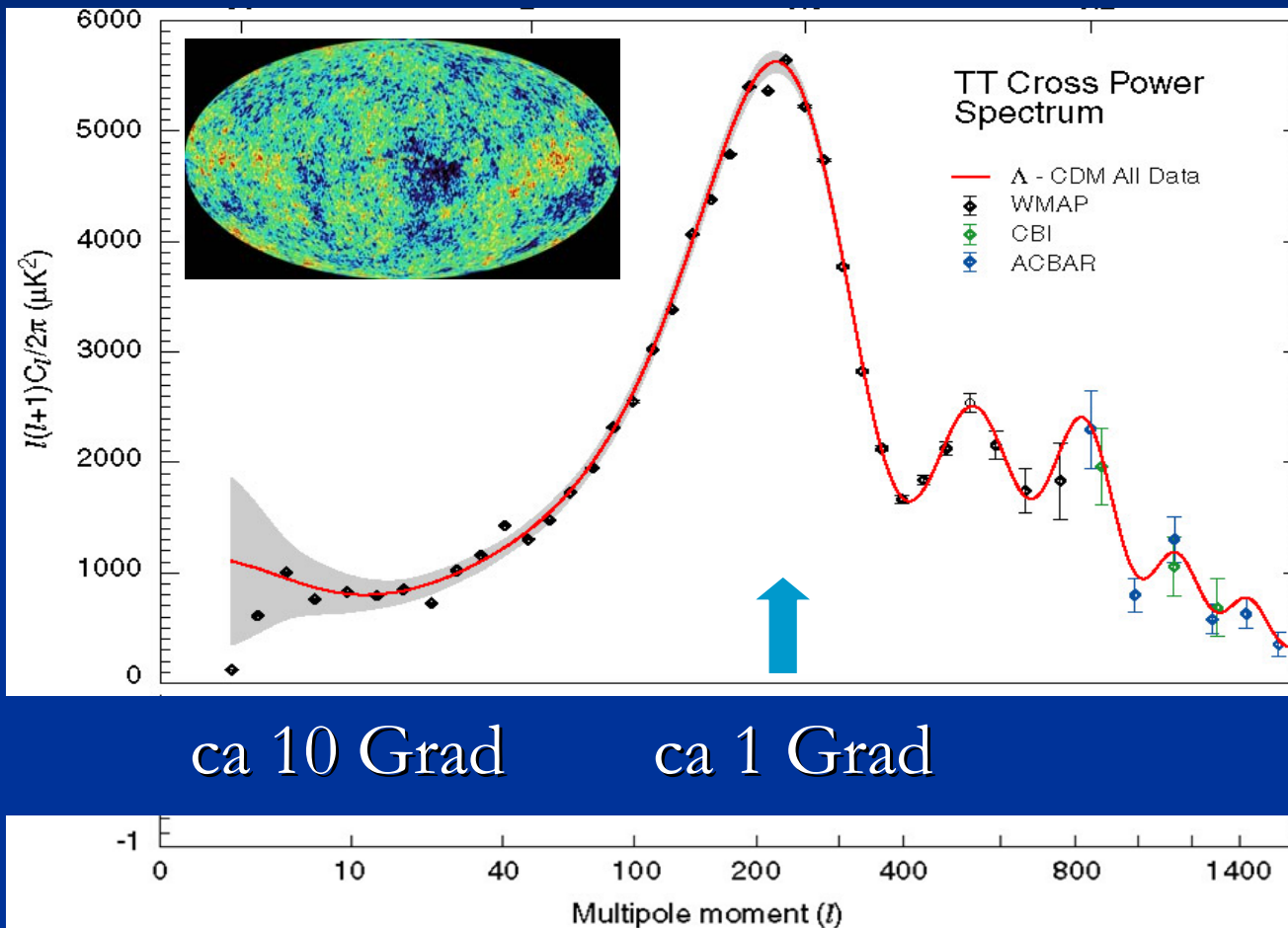
$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$



$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$

$$\Omega_{\text{tot}} = 0.25$$

Bestimmung kosmologischer Parameter



Mittelwerte
WMAP 2003

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.02$$

$$\Omega_{\text{m}} = 0.27$$

$$\Omega_{\text{b}} = 0.045$$

$$\Omega_{\text{dm}} = 0.225$$

Räumlich flaches Universum

$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$

Dunkle Energie

$$\Omega_m + X = 1$$

$$\Omega_m : 25\%$$

$$\Omega_h : 75\%$$

Dunkle Energie

h : homogen , oft auch Ω_Λ statt Ω_h

Dunkle Energie dominiert das Universum

Energie - Dichte im Universum

=

Materie + Dunkle Energie

25 % + 75 %

Zusammensetzung des Universums

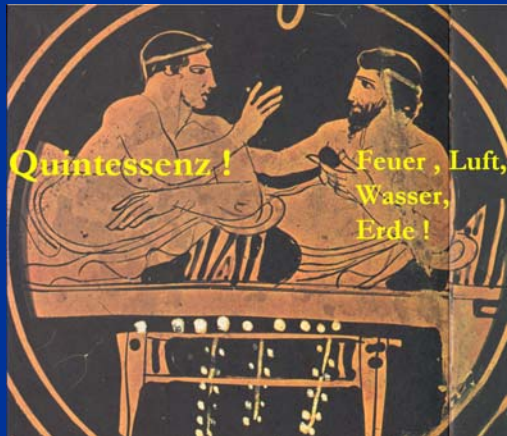
Atome : $\Omega_b = 0.05$

Dunkle Materie : $\Omega_{dm} = 0.2$

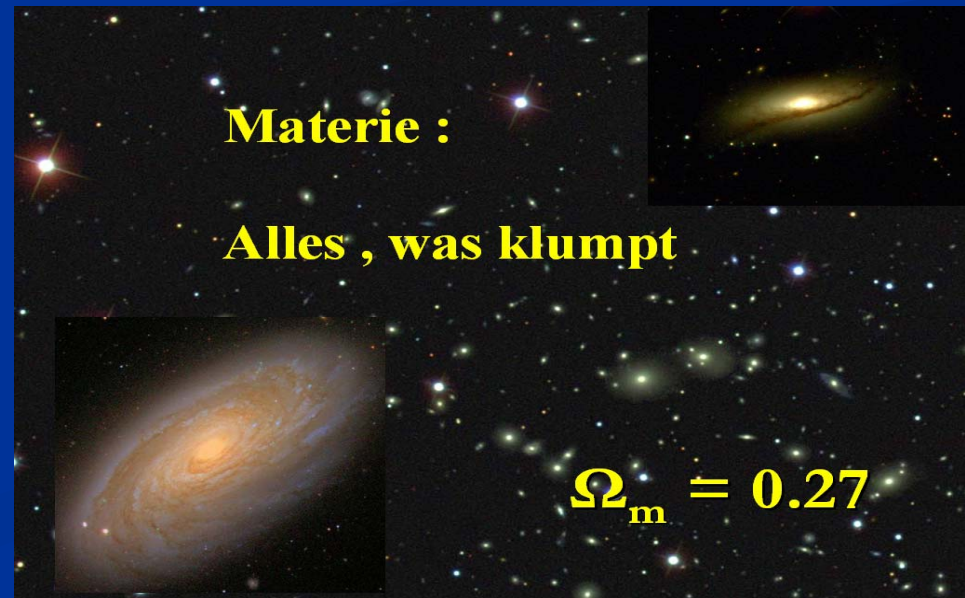
Dunkle Energie : $\Omega_h = 0.75$

Dunkle Energie

- nur ein Viertel der Energiedichte des Universums besteht aus Materie
- drei Viertel sind völlig gleichmäßig verteilte Dunkle Energie



Woraus besteht das
Universum ?



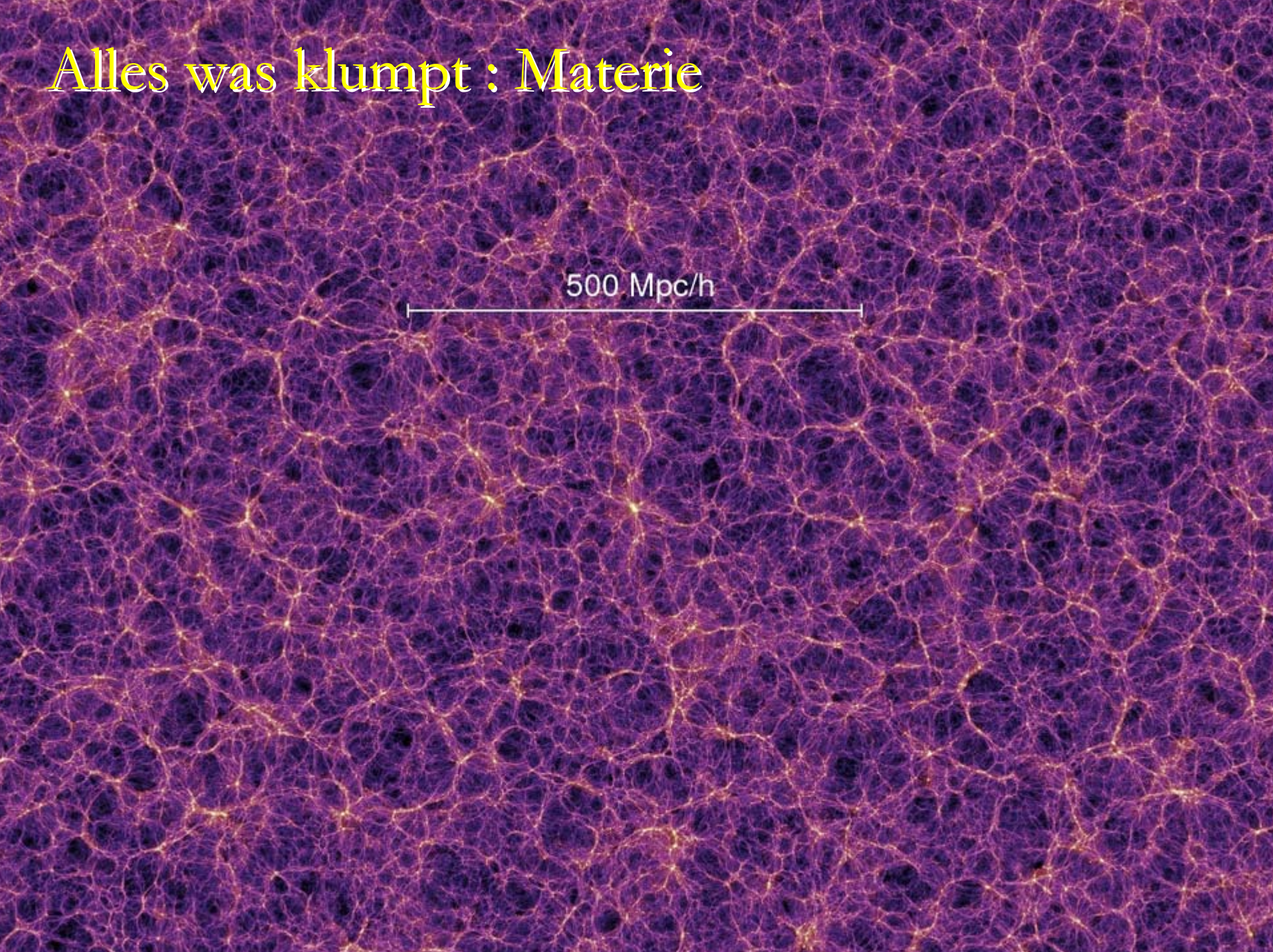
Was ist Dunkle Energie ?



Dunkle Energie :

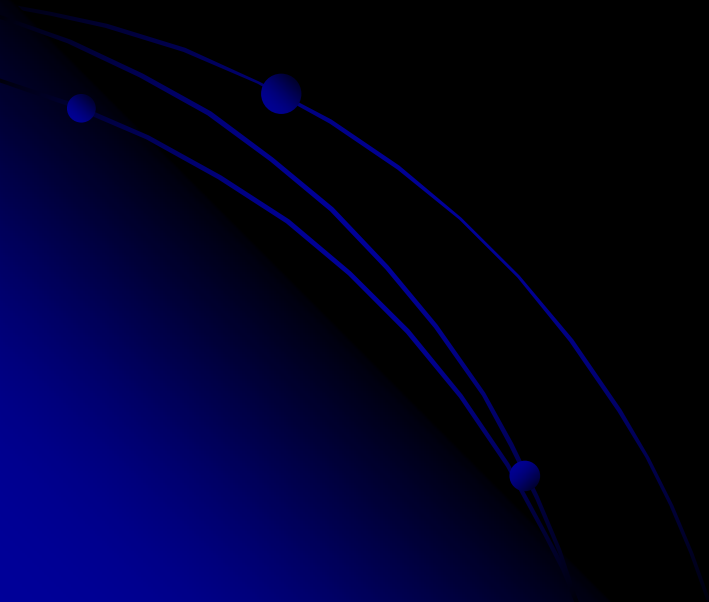
homogen verteilt

Alles was klumpt : Materie



500 Mpc/h

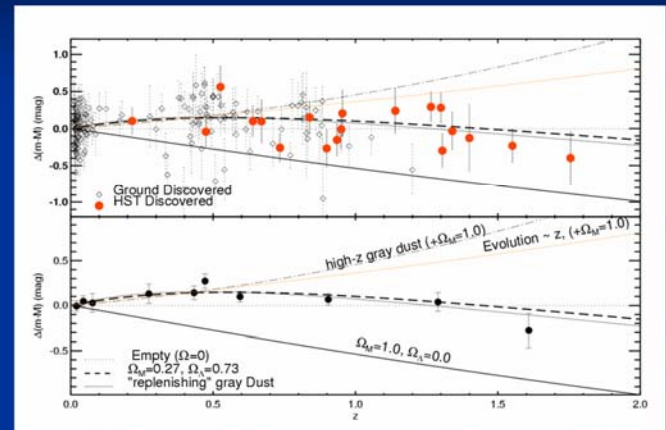
Dunkle Energie : kosmologische Effekte



Vorhersagen für Kosmologie mit Dunkler Energie

*Die Expansion des Universums
beschleunigt sich heute !*

Supernova Ia Hubble-Diagramm



Rotverschiebung z

Riess et al. 2004

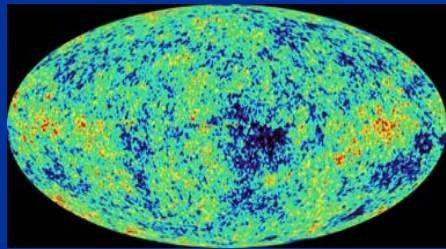
**Dunkle Energie und Dunkle Materie
sind (heute) Gegenspieler :**

Dunkle Materie verlangsamt Expansion

Dunkle Energie beschleunigt Expansion

Strukturbildung

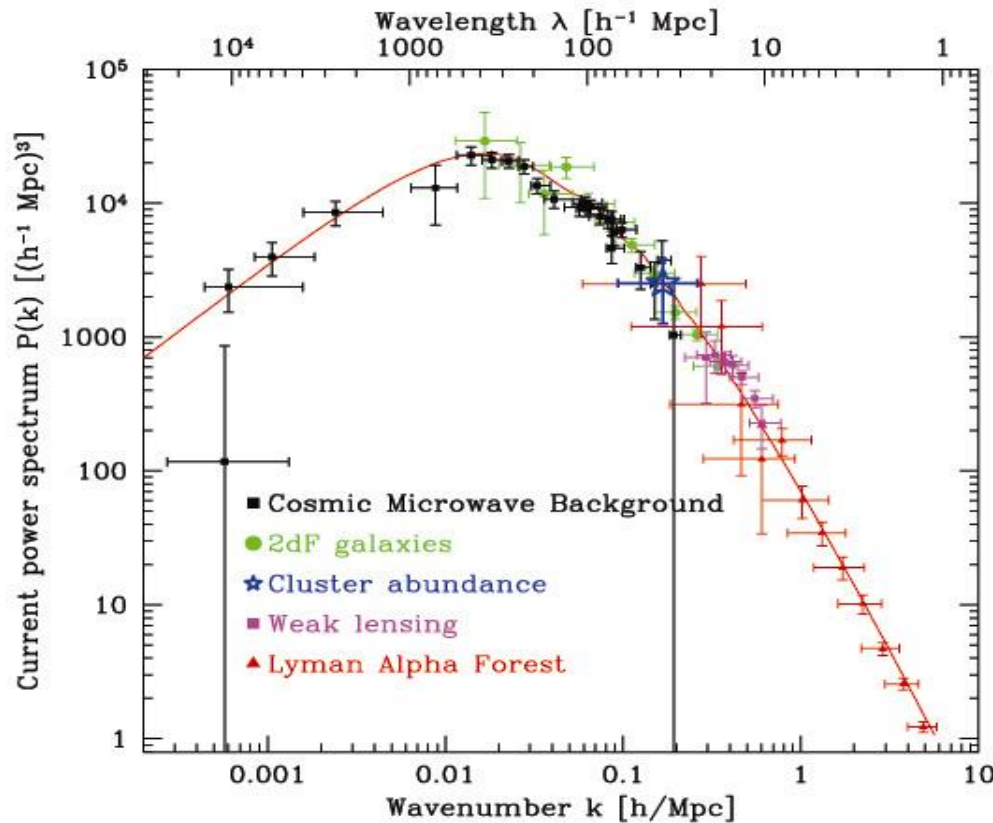
Aus winzigen Anisotropien wachsen die
Strukturen des Universums



Sterne , Galaxien, Galaxienhaufen

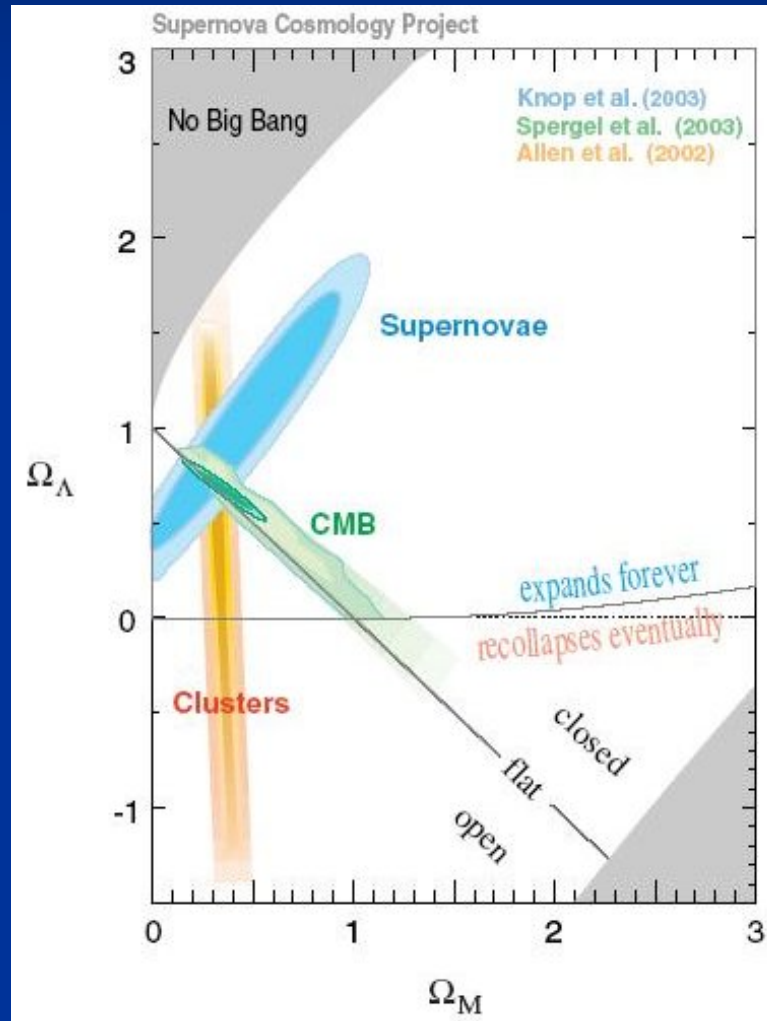
Ein primordiales Fluktuationsspektrum beschreibt
alle Korrelationsfunktionen !

Strukturbildung : Ein primordiales Fluktuationsspektrum



CMB passt mit
Galaxienverteilung
Lyman - α
und
Gravitationslinsen-
Effekt !

Dunkle Energie : die Beobachtungen passen zusammen !



Konsistentes kosmologisches Modell !

Zusammensetzung des Universums

$\Omega_b = 0.05$ sichtbar klumpt

$\Omega_{dm} = 0.2$ unsichtbar klumpt

$\Omega_h = 0.75$ unsichtbar homogen

Was ist die Dunkle Energie ?

Kosmologische Konstante

oder

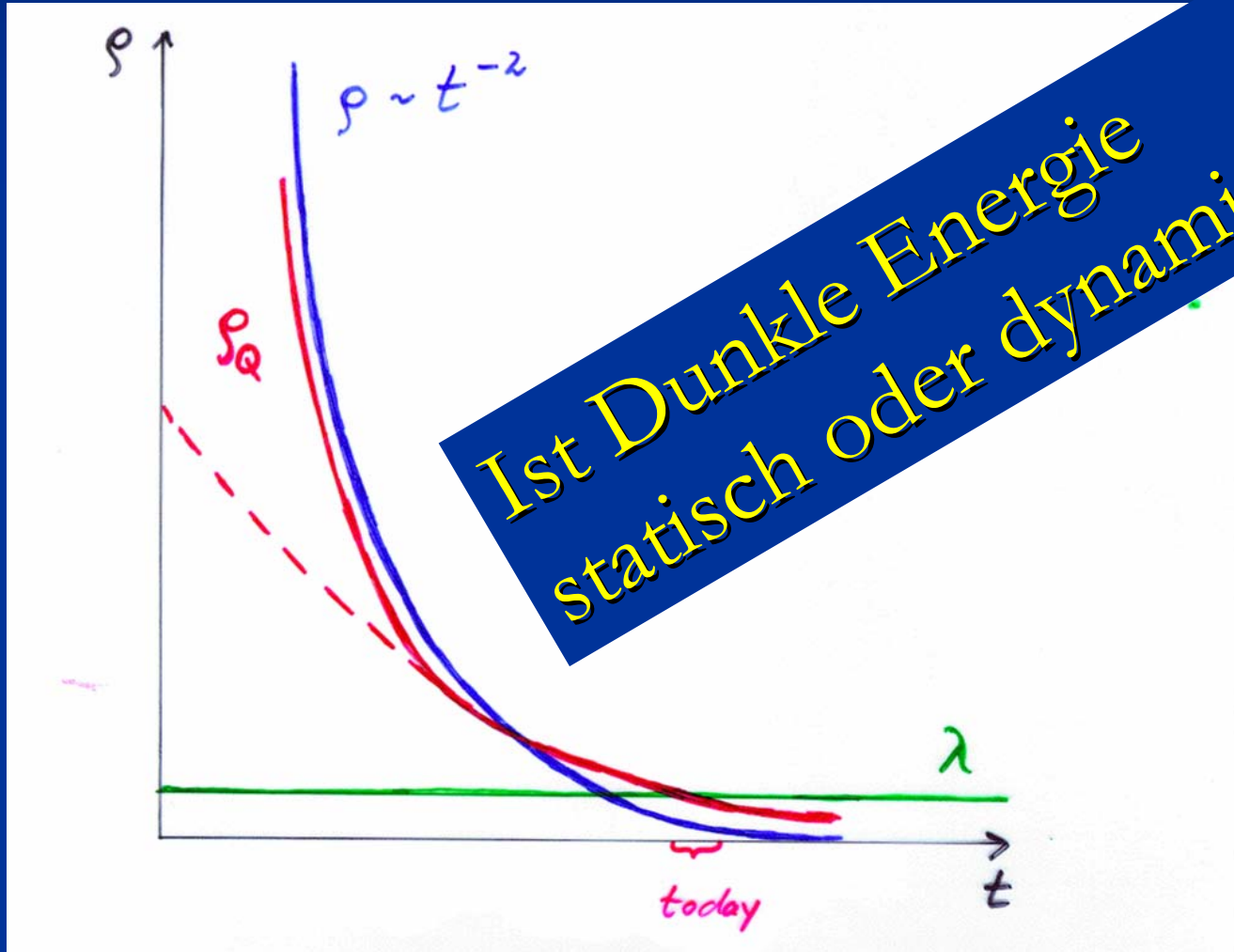
Quintessenz

oder

Modifikation der Gravitation ?

Kosm. Konst.
statisch

Quintessenz
dynamisch

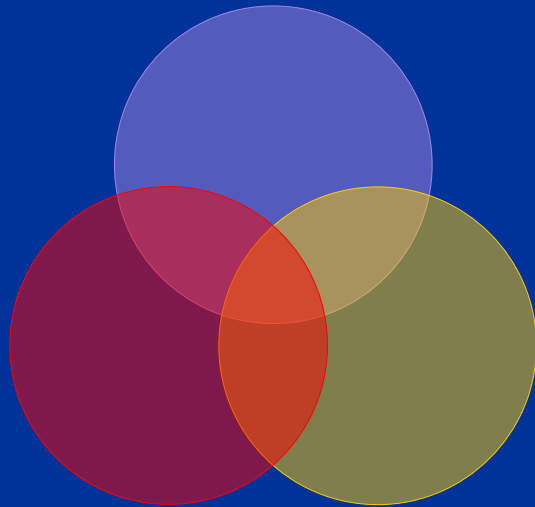


Eigenschaften der Dunklen Energie bestimmen die Zukunft des Universums

Vorhersagbarkeit für die nächsten
100 Milliarden Jahre...

Quintessenz : neue fundamentale Wechselwirkung

Starke, elektromagnetische, schwache Wechselwirkung



Gravitation

Kosmodynamik

Auf astronomischen Skalen:

Graviton

+

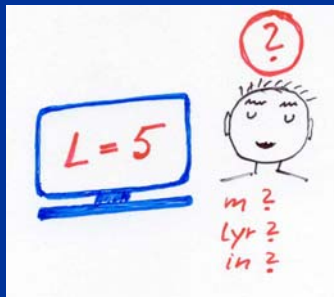
Kosmon

Vereinheitlichung
aller Wechselwirkungen

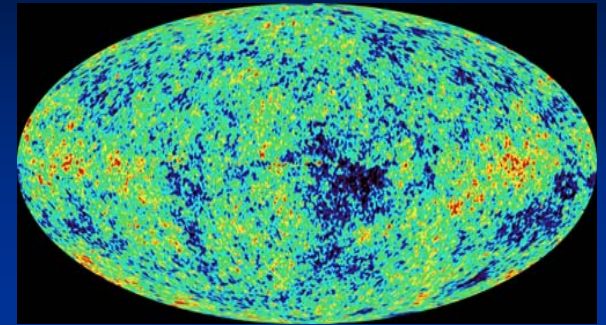
Superstrings

Zusätzliche
Dimensionen

Fundamentaler
Ursprung der
Massenskalen



$$\Omega_m + X = 1$$



$$\Omega_m : 25\%$$



$$\Omega_h : 75\%$$

Dunkle Energie



Zusammenfassung

- Physik des Universums in wesentlichen Zügen bekannt von 10^{-10} Sekunden ab bis 3 Milliarden Jahre ab.
- Vorhersagen über Zukunft benötigen quantitatives Verständnis der Dunklen Energie
- Wir wissen noch nicht, was Dunkle Materie und Dunkle Energie ist

Kosmologische Konstante

- Konstante λ verträglich mit allen Symmetrien
- Zeitlich konstanter Beitrag zur Energiedichte
- Warum so klein? $\lambda/M^4 = 10^{-120}$
- Warum gerade heute wichtig?

Kosmologische Massenskalen

- Energie - Dichte

$$\rho \sim (2.4 \times 10^{-3} \text{ eV})^{-4}$$

- Reduzierte Planck Masse

$$M = 2.44 \times 10^{18} \text{ GeV}$$

- Newton's Konstante

$$G_N = (8\pi M^2)$$

Nur Verhältnisse von Massenskalen sind beobachtbar !

homogene dunkle Energie: $\rho_h/M^4 = 6.5 \cdot 10^{-121}$

Materie: $\rho_m/M^4 = 3.5 \cdot 10^{-121}$

Zeitentwicklung

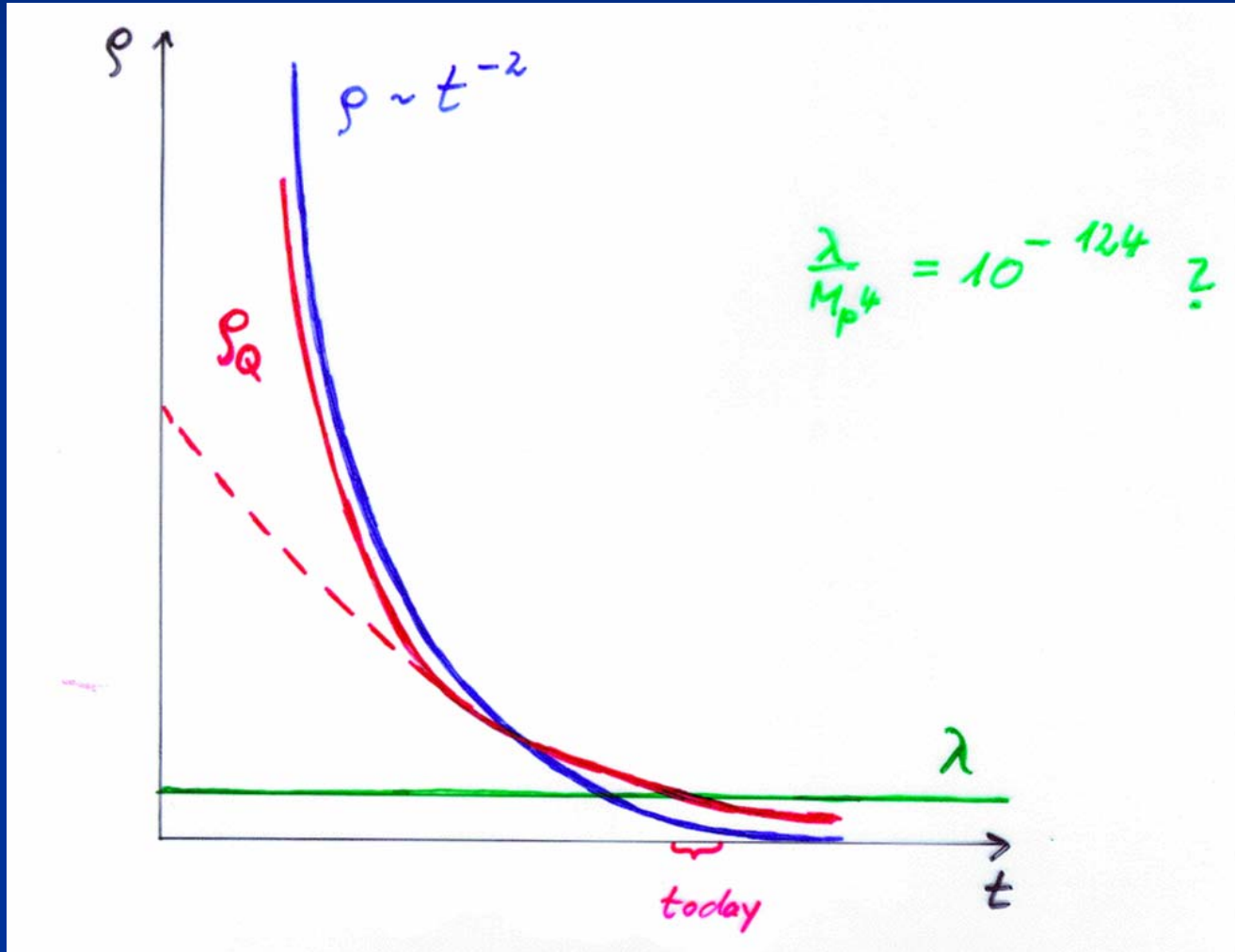
- $\rho_m/M^4 \sim a^{-3} \sim t^{-2}$ Materie dominiertes Universum
- $\rho_r/M^4 \sim a^{-4} \sim t^{-3/2}$ Strahlungsdominiertes Universum
- $\rho_r/M^4 \sim a^{-4} \sim t^{-2}$ Strahlungsdominiertes Universum

Grosses Alter \rightarrow kleine Grössen

Gleiche Erklärung für dunkle Energie ?

Kosm. Konst.
statisch

Quintessenz
dynamisch



Quintessenz

Dynamische dunkle Energie ,
vermittelt durch Skalarfeld
(Kosmon)

Vorhersage : Ein Teil der Energiedichte des heutigen Universums liegt als homogen verteilte (dunkle) Energie vor.

C.Wetterich,Nucl.Phys.B302(1988)668

24.9.87

B.Ratra,P.J.E.Peebles,ApJ.Lett.325(1988)L17,

20.10.87

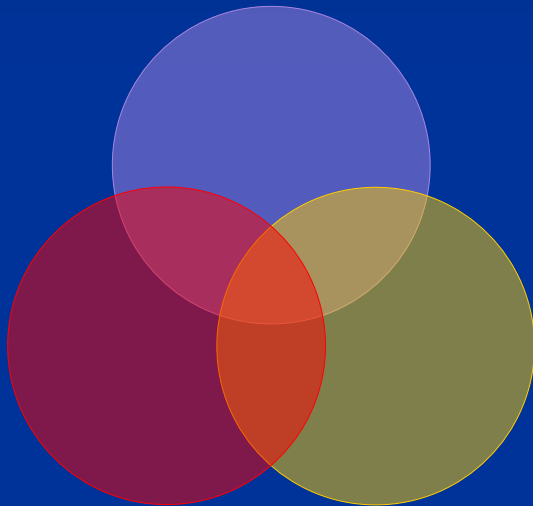
Skalarfeld

$$\Phi(x, y, z, t)$$

- Ähnlich wie elektrisches Feld
- Aber : keine Richtung ist ausgezeichnet
(kein Vektor)

“Fundamentale” Wechselwirkungen

Starke, elektromagnetische, schwache
Wechselwirkung



Gravitation

Kosmodynamik

Auf
astronomischen
Skalen:

Graviton

+

Kosmon

Mögliche indirekte Beobachtung der fünften Wechselwirkung

- winzige zeitliche Änderung der fundamentalen Natur – “Konstanten”
- winzige scheinbare Verletzung des schwachen Äquivalenzprinzips (Körper mit gleicher Masse fallen gleich schnell , unabhängig von ihrer stofflichen Zusammensetzung)

Zusammenfassung (2)

Verständnis der Dunklen Energie kann zu ganz neuen Einsichten über die fundamentalen Gesetze der Physik führen

Die großen Fragen

- Woraus besteht das Universum ?
- Wie sah das Universum am Anfang aus ?
- Wie haben sich Strukturen entwickelt ?
- Gibt es Leben und Intelligenz in anderen Regionen des Universums ?
- Woher kommen Materie und Strahlung ?
- Was war vor dem Urknall ?
- Was wird aus unserem Universum in der Zukunft ?
- Was liegt außerhalb unseres Horizonts ?

Naturkonstanten

- Masse des Elektrons
- Feinstrukturkonstante α
- über 20 weitere

“richtige” Werte sind Bedingung für Menschen
und Intelligenz

Nicht ein für alle Mal gegeben !

*Hatten Kopplungskonstanten im
frühen Universum
andere Werte ?*

Ja !

*Der Wert von Massenverhältnissen und
Kopplungskonstanten hängt vom Zustand ab !*

Nicht ein für alle mal gegeben !

Kann man Änderung heute beobachten ?

Quintessenz und Zeitabhängigkeit fundamentaler Konstanten

C.Wetterich , Nucl.Phys.B302,645(1988)

Sind fundamentale “Konstanten” zeitabhängig ?

Feinstrukturkonstante α (elektrische Ladung)

Verhältnis Neutron-Masse zu Proton-Masse

Verhältnis Nukleon-Masse zu Planck-Masse

Quintessenz und Zeitabhängigkeit der “fundamentalen Konstanten”

- Feinstrukturkonstante hängt vom Wert des Kosmon Felds ab: $\alpha(\varphi)$

ähnlich Higgsfeld in schwacher Wechselwirkung

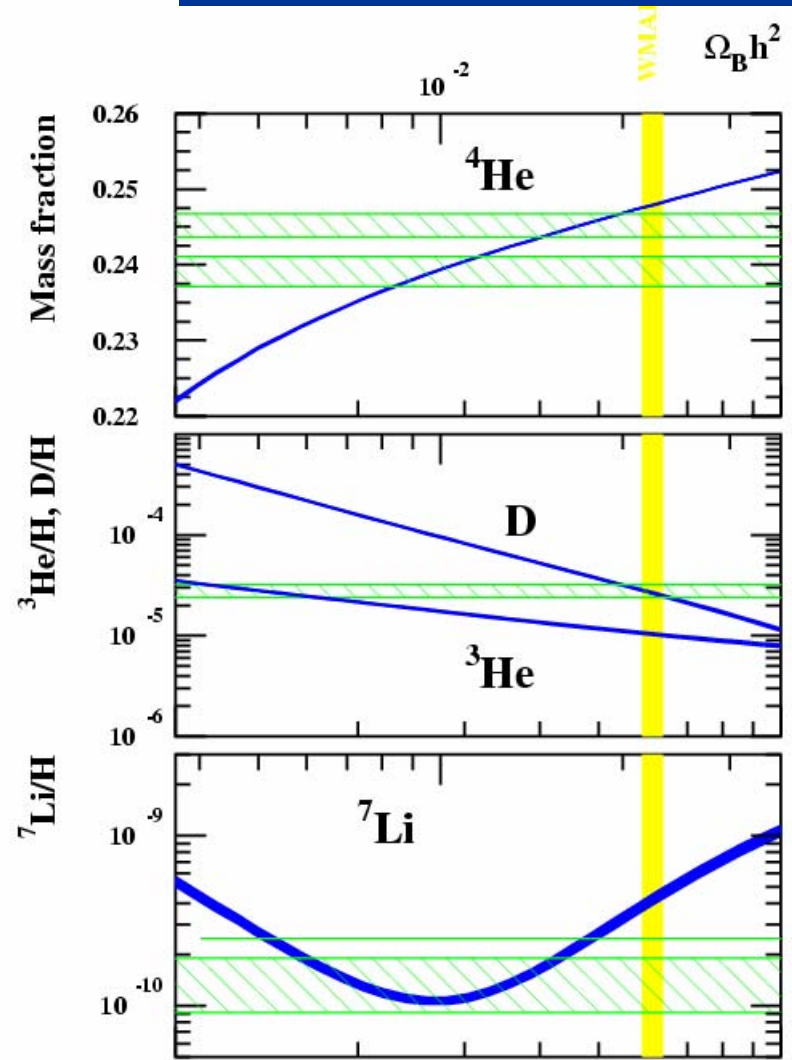
- Zeitentwicklung von φ \rightarrow
Zeitentwicklung von α

Jordan

Anteil der Atome im Universum

Primordiale Häufigkeiten der leichten Elemente aus der Nukleosynthese

verglichen mit kosmischer Hintergrundstrahlung und Beobachtung



Elementhäufigkeiten

WMAP

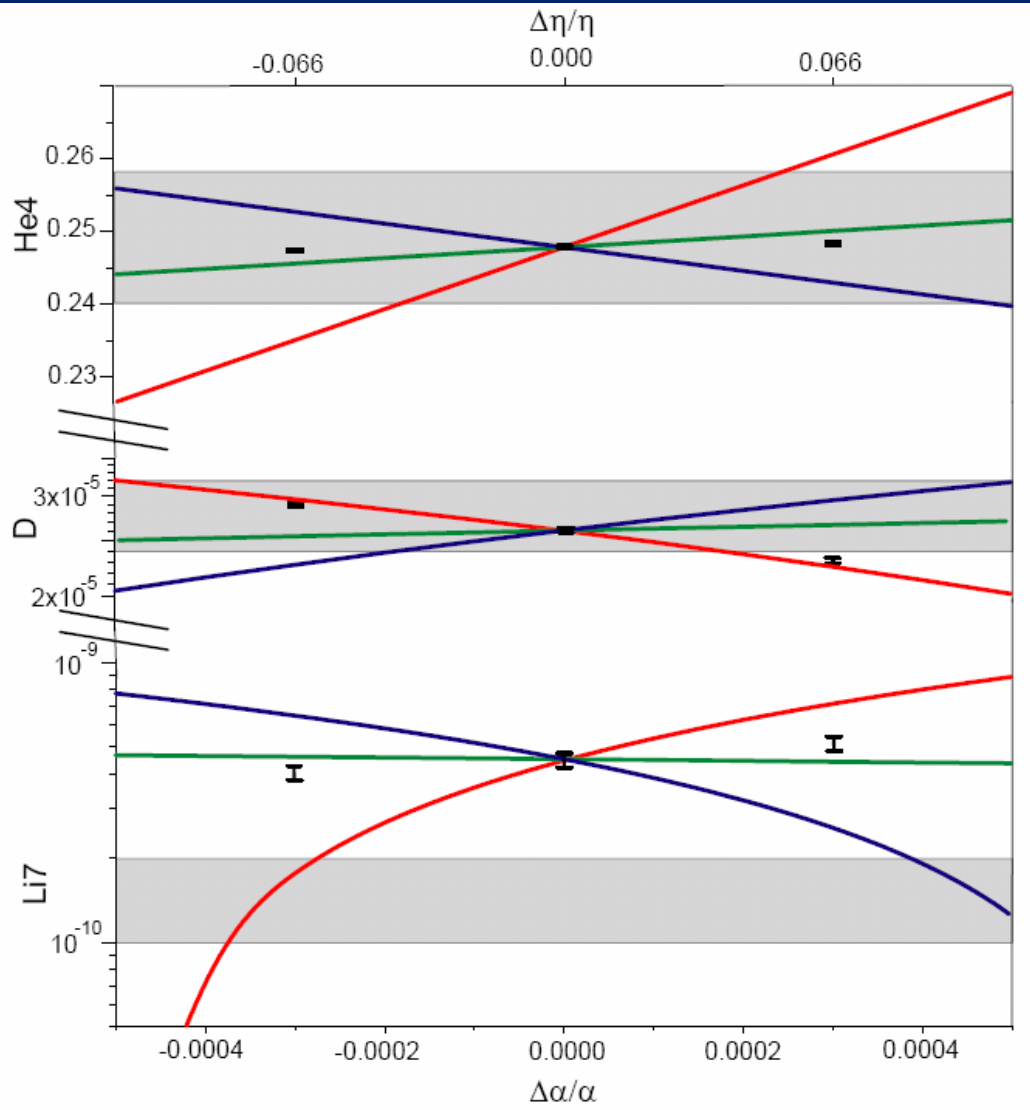
A.Coc

Präzise Bestätigung unseres Verständnisses der Physik und Kosmologie

Beispiel : auch vor 13.7 Milliarden Jahren
hatten die Konstanten der Physik die
(fast) gleichen Werte

Variation der Li- Häufigkeit

He



D

Li

gegenwärtige
Beobachtungen:
 1σ

T.Dent,
S.Stern,...

typische mögliche Werte der
Variation der Feinstrukturkonstanten:

$$\Delta\alpha/\alpha (z=10^{10}) = -1.0 \cdot 10^{-3} \quad \text{GUT 1}$$

$$\Delta\alpha/\alpha (z=10^{10}) = -2.7 \cdot 10^{-4} \quad \text{GUT 2}$$

C.Mueller , G.Schaefer,...

winzig ! kleiner als ein Tausendstel !

Verletzung des Äquivalenzprinzips

Verschiedene Kopplung
des Kosmons an
Proton und Neutron

Differentielle
Beschleunigung

Scheinbare Verletzung
des Äquivalenzprinzips



Differentielle Beschleunigung η

Für vereinheitlichte Theorien (GUT) :

$$\eta = -1.75 \cdot 10^{-2} \Delta R_z \left(\frac{\partial \ln \alpha}{\partial z} \right)^2 \frac{1 + \tilde{Q}}{\Omega_h (1 + w_h)}$$

$$\Delta R_z = \frac{\Delta Z}{Z + N} \approx 0.1$$

Q : Zeitabhängigkeit anderer Parameter

Verknüpfung zwischen Zeitabhängigkeit von α

und Verletzung des Äquivalenzprinzips

differentielle Beschleunigung η

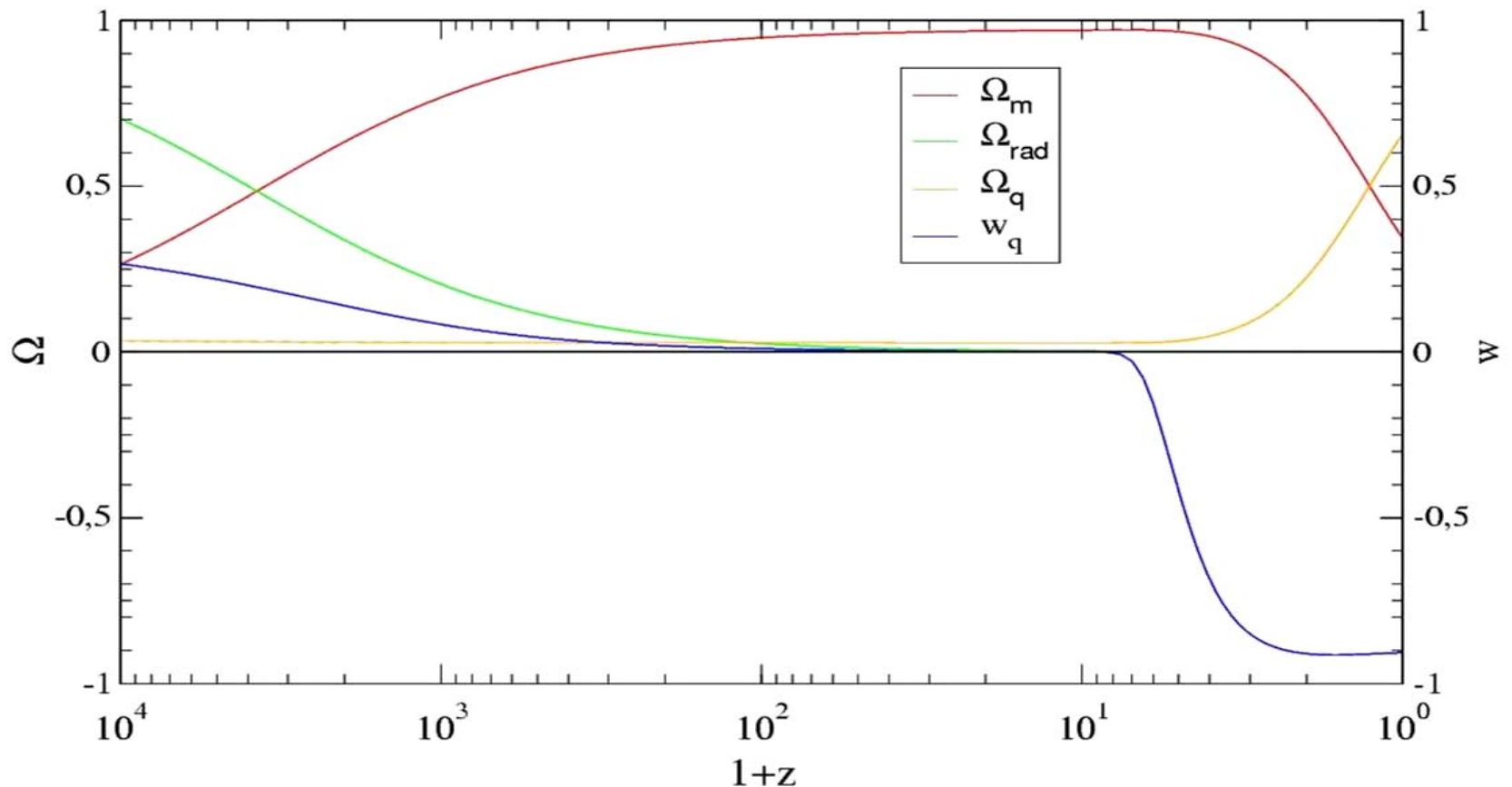
typisch : $\eta = 10^{-14}$

MICROSCOPE – Satelliten-Mission



Quintessenz wird heute wichtig

Crossover Quintessence Evolution



Zusammenhang zwischen jetziger Dunkler Energie - Dichte und anwachsende Neutrino - Masse

$$[\rho_h(t_0)]^{\frac{1}{4}} = 1.27$$

$$\left(\frac{\gamma m_\nu(t_0)}{eV} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$10^{-3} eV$$

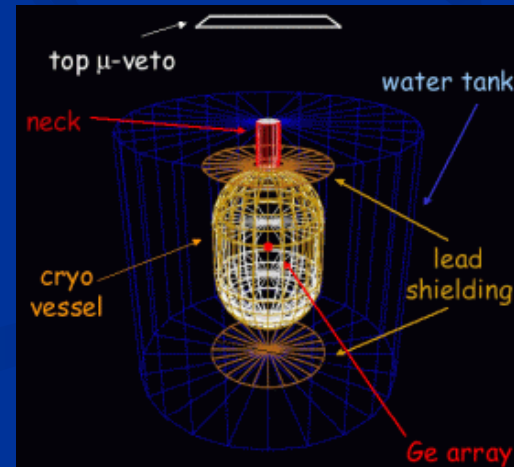
Dunkle Energiedichte : $\rho^{1/4} \sim 2.4 \times 10^{-3} eV$

jetzige Zustandsgleichung ist
gegeben durch Neutrino - Masse !

$$w_0 \approx -1 + \frac{m_\nu(t_0)}{12eV}$$

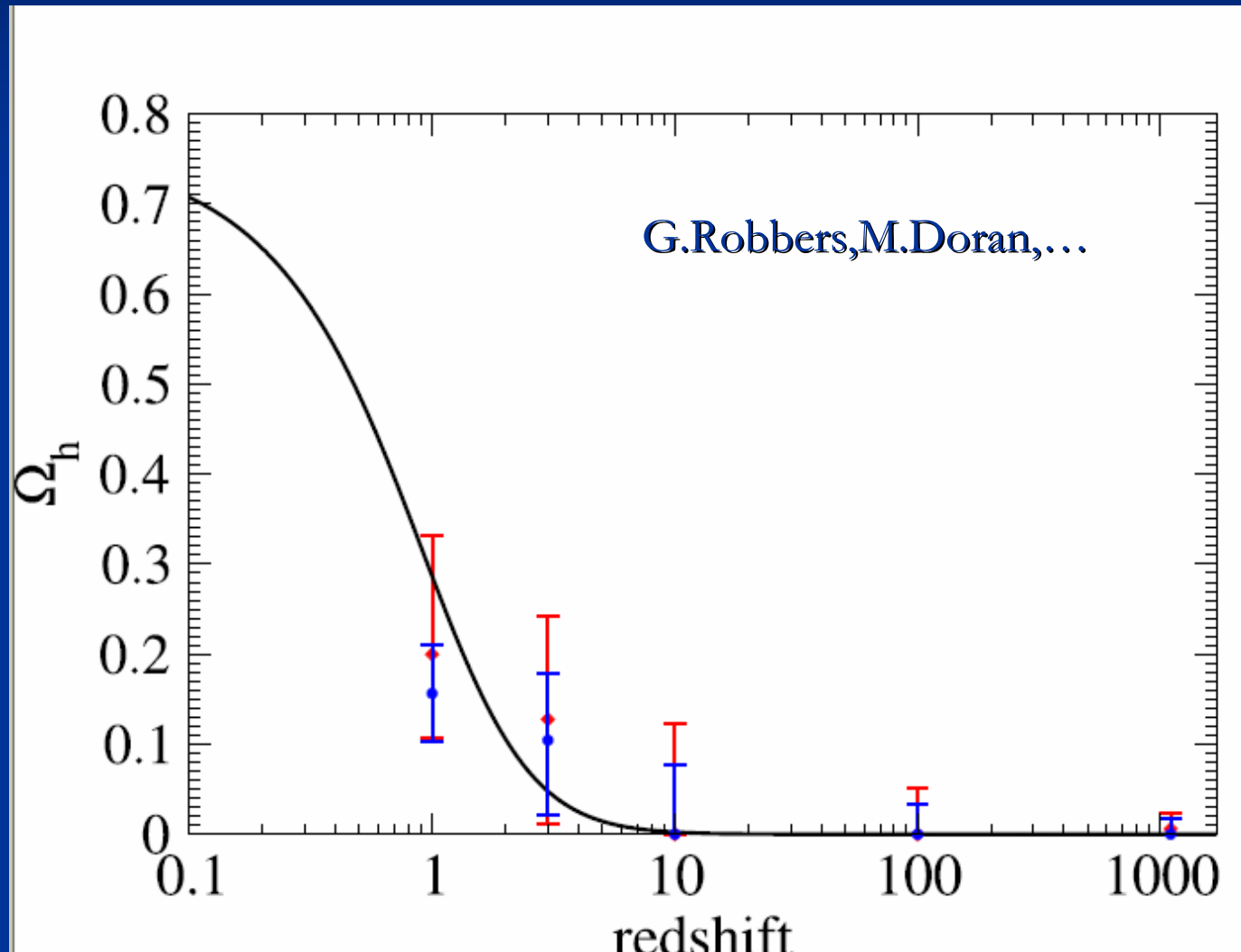
Ist Zeitentwicklung der Neutrino - Masse beobachtbar ?

- Obere Grenze aus Kosmologie für frühe Zeit
- Heutiger Beobachtungswert kann darüber liegen
(KATRIN, neutrino-loser doppelter Betazerfall)



GERDA

Wieviel dunkle Energie gab es im frühen Universum ?



Kosmologische Gleichungen

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -dV/d\phi$$

$$3M^2H^2 = V + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + \rho$$

