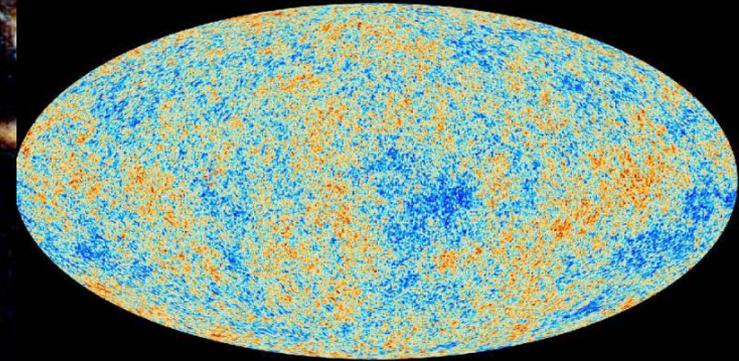
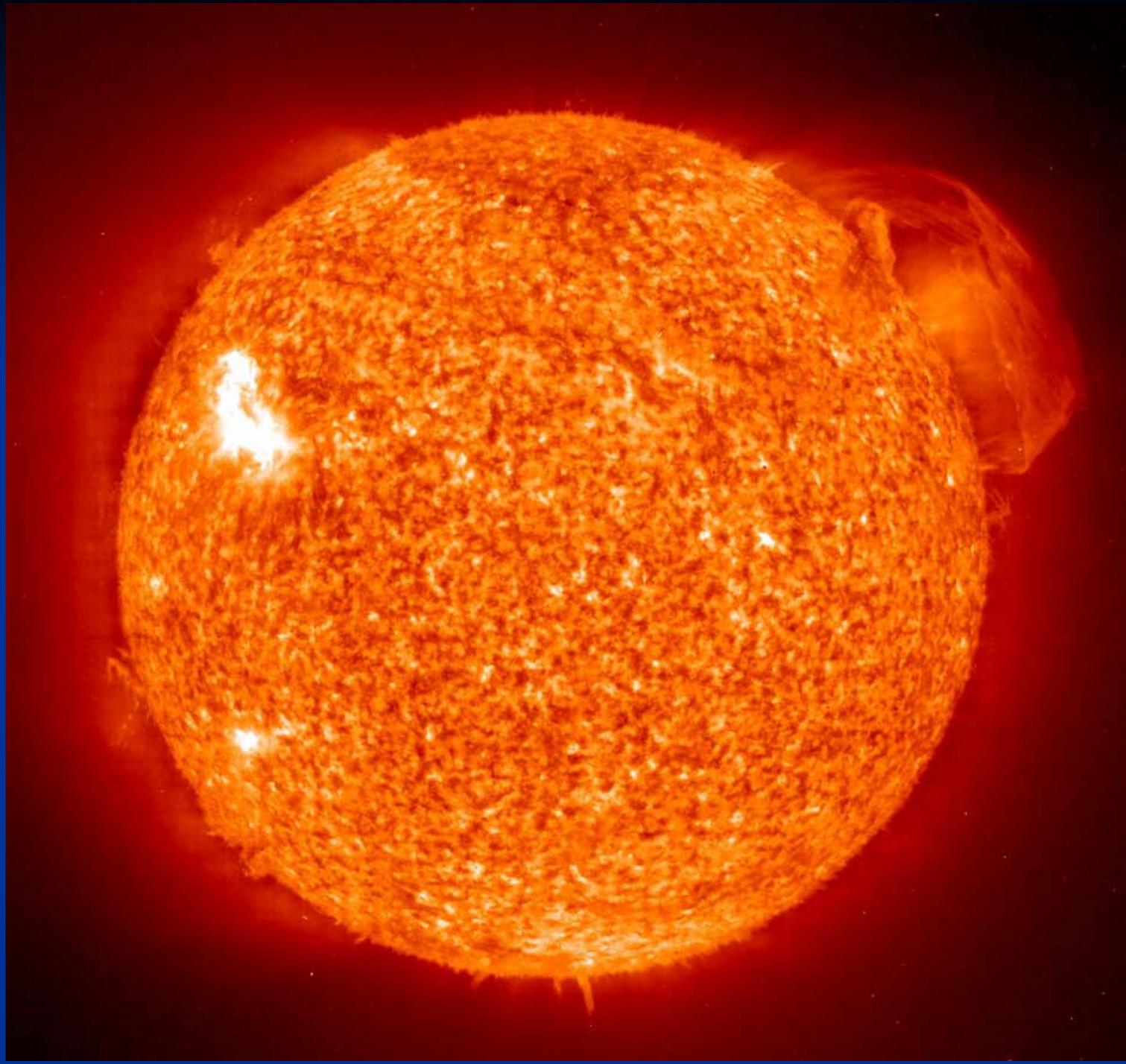


Dunkle Energie – ein kosmisches Rätsel











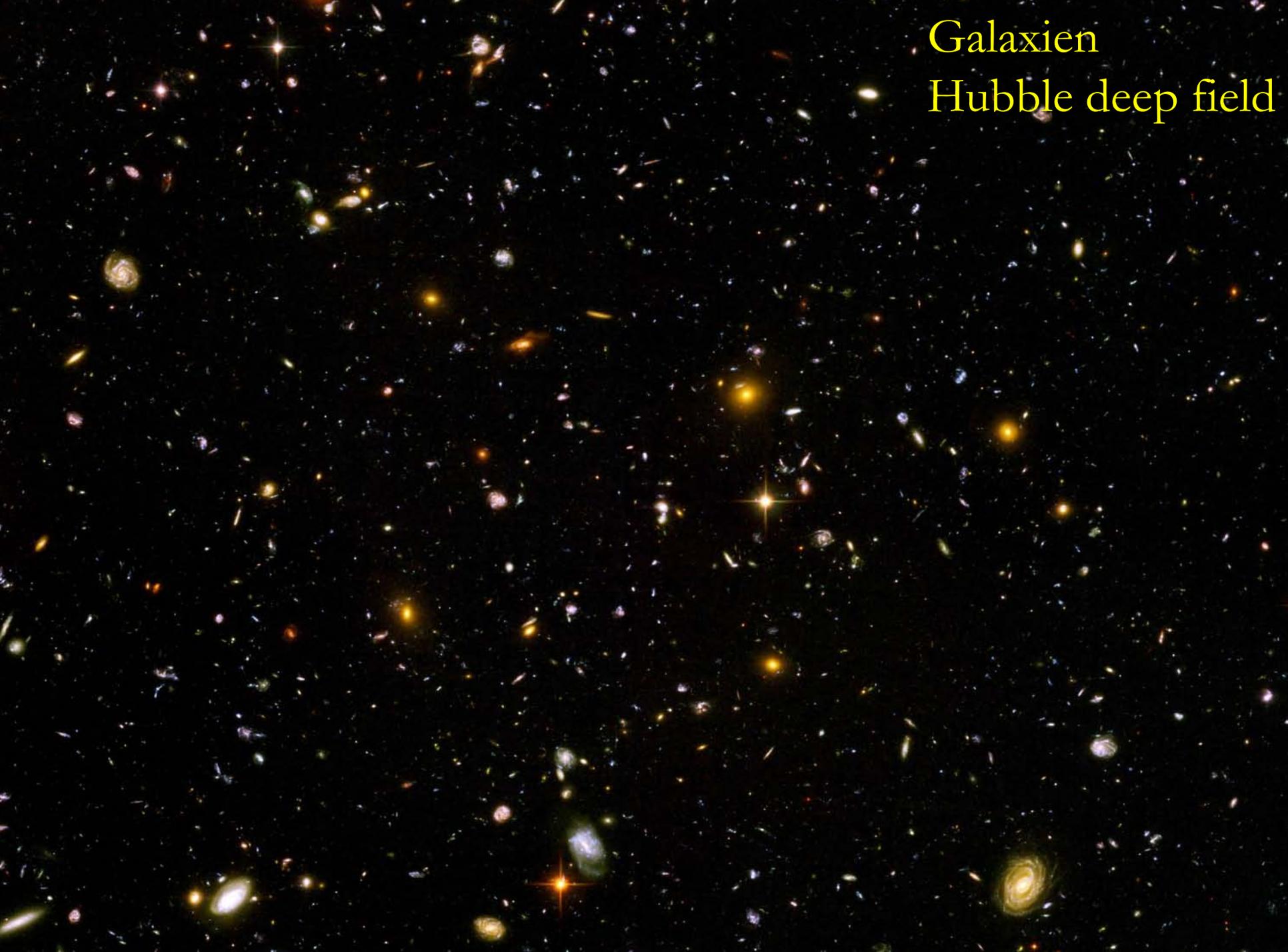






Galaxien

Hubble deep field



A vast field of galaxies, including spirals, ellipticals, and irregular shapes, scattered across a dark background. The galaxies are in various colors, including yellow, blue, and purple, and some have prominent starburst patterns.

Was ist da ,
wo man nichts sieht ?

Mehr oder weniger Bekanntes im extragalaktischen Raum :

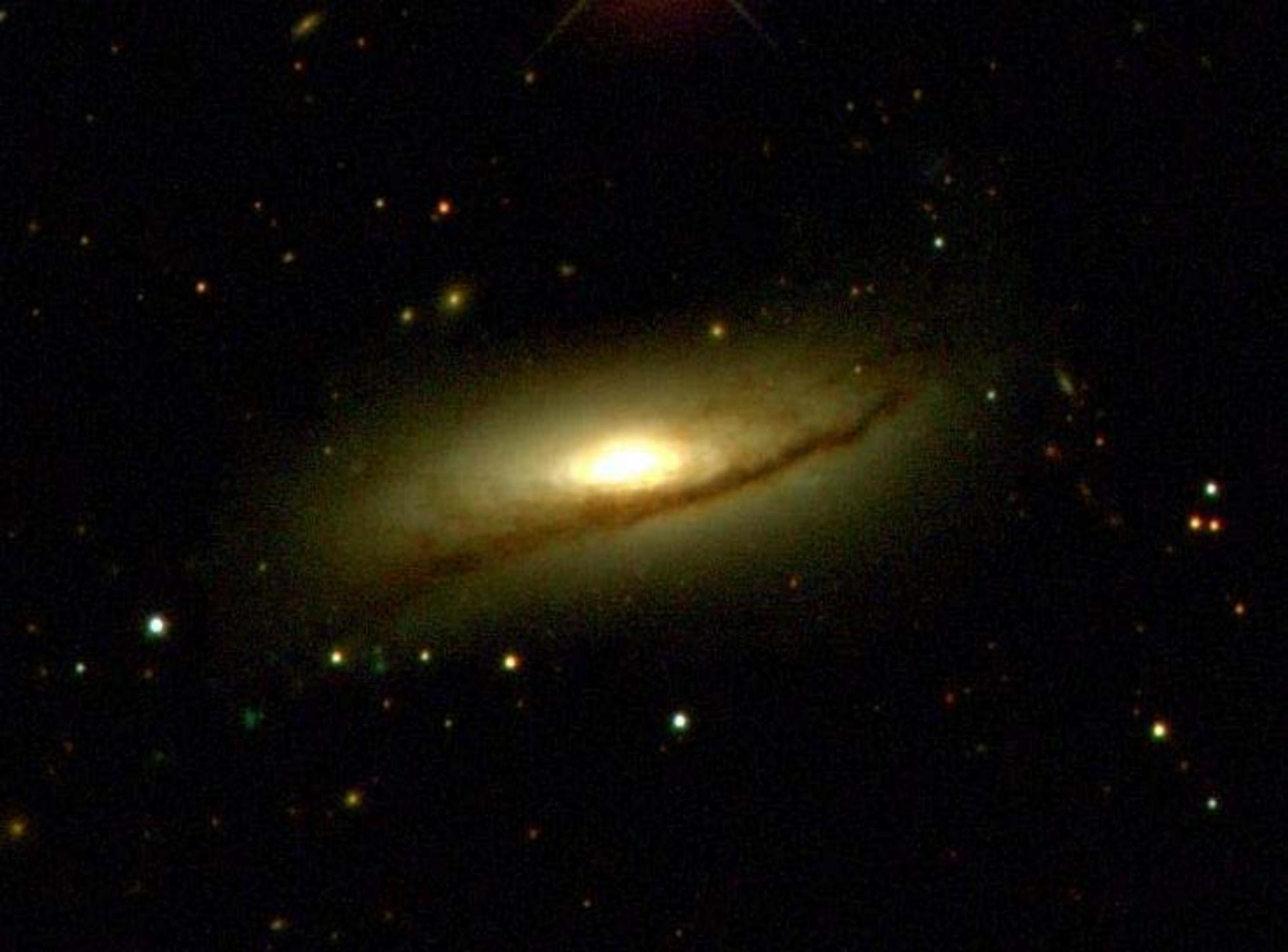
- Strahlung
- Gas von Atomen, Molekülen
- Magnetfelder
- Neutrinos
- Gravitationswellen

Alles zusammen , plus Atome in Galaxien :

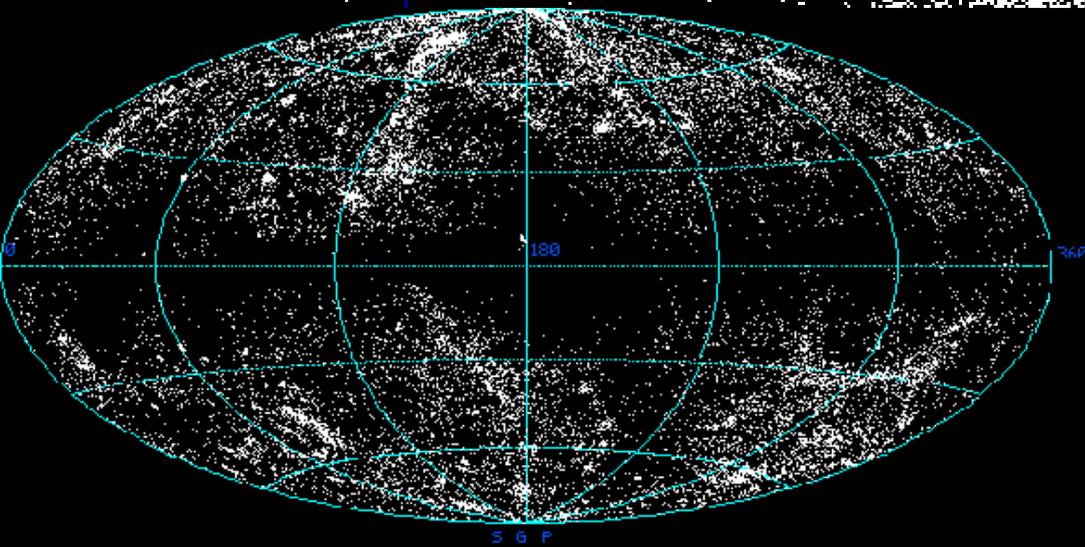
Nur 5% der Energiedichte des Universums

“Unsere Materie “ : Atome – der Staub des Universums

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

Dunkle Materie und Dunkle Energie

95 % der Energiedichte des Universums

Das meiste ist unbekannt !

Die Jagd nach den Phantomen



Himmelsdurchmusterung : nicht nur mit Licht !

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

Farben frei gewählt

Dunkle Materie

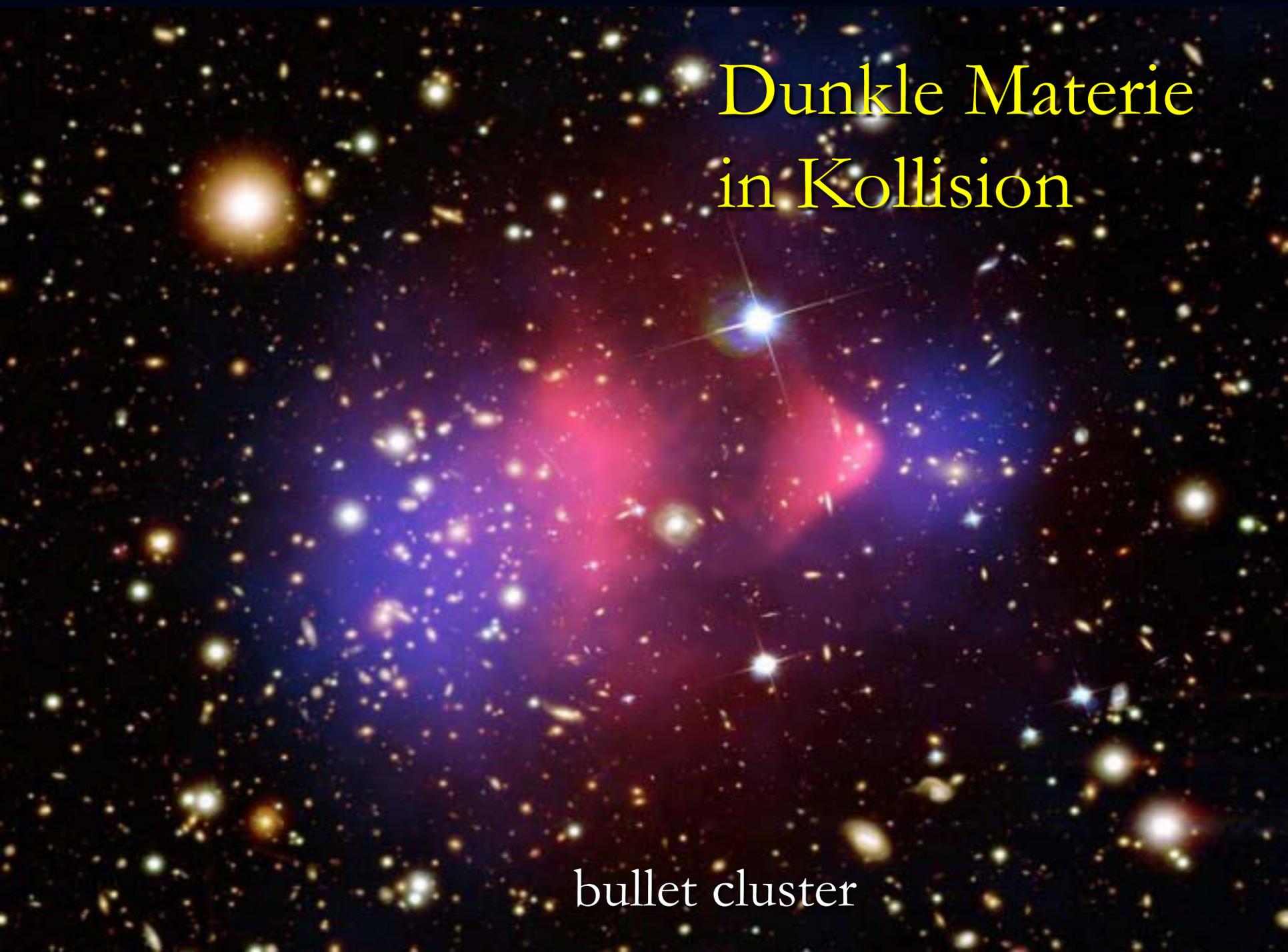


Dunkle Materie in Galaxienhaufen (Cluster)



Dunkle Materie in Kollision

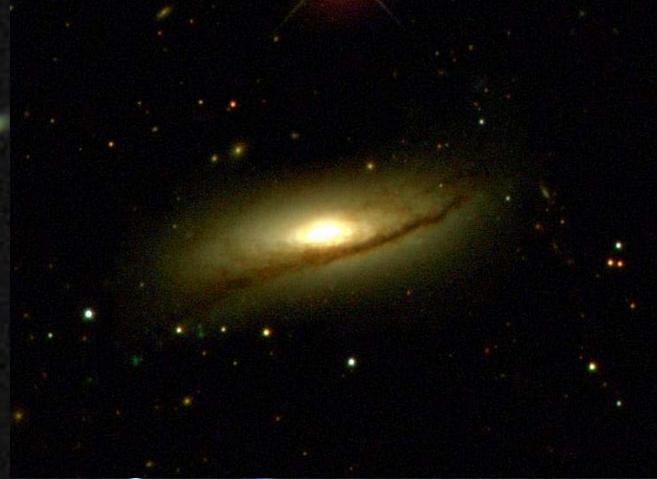
bullet cluster



Wieviel Dunkle Materie gibt es ?

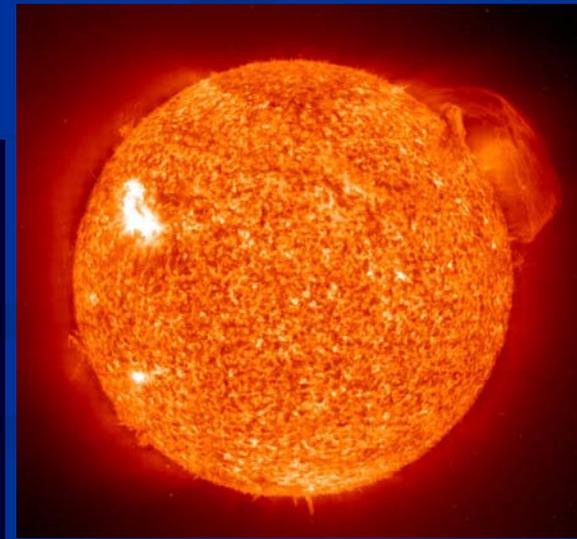
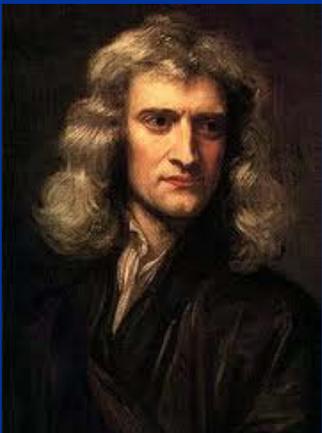
Materie :

Alles , was klumpt



Gravitations - Potenzial

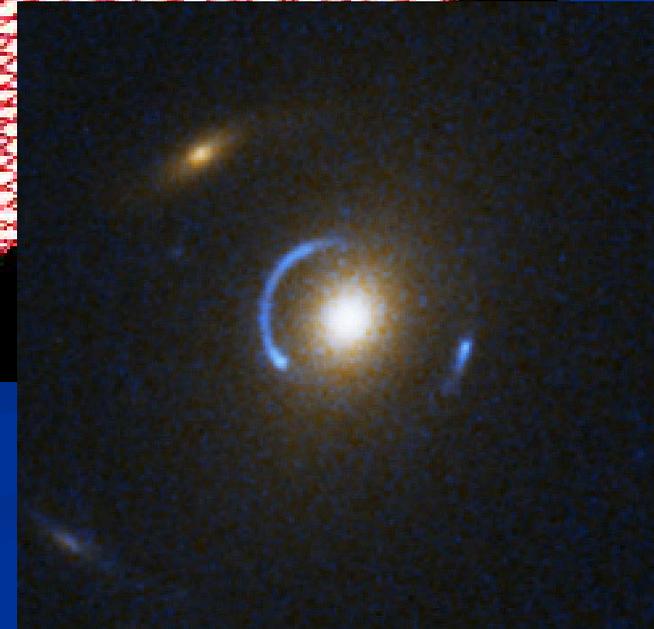
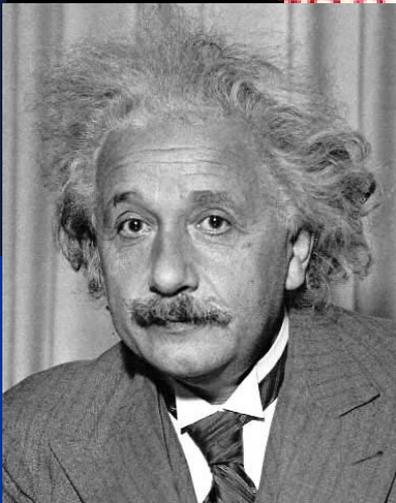
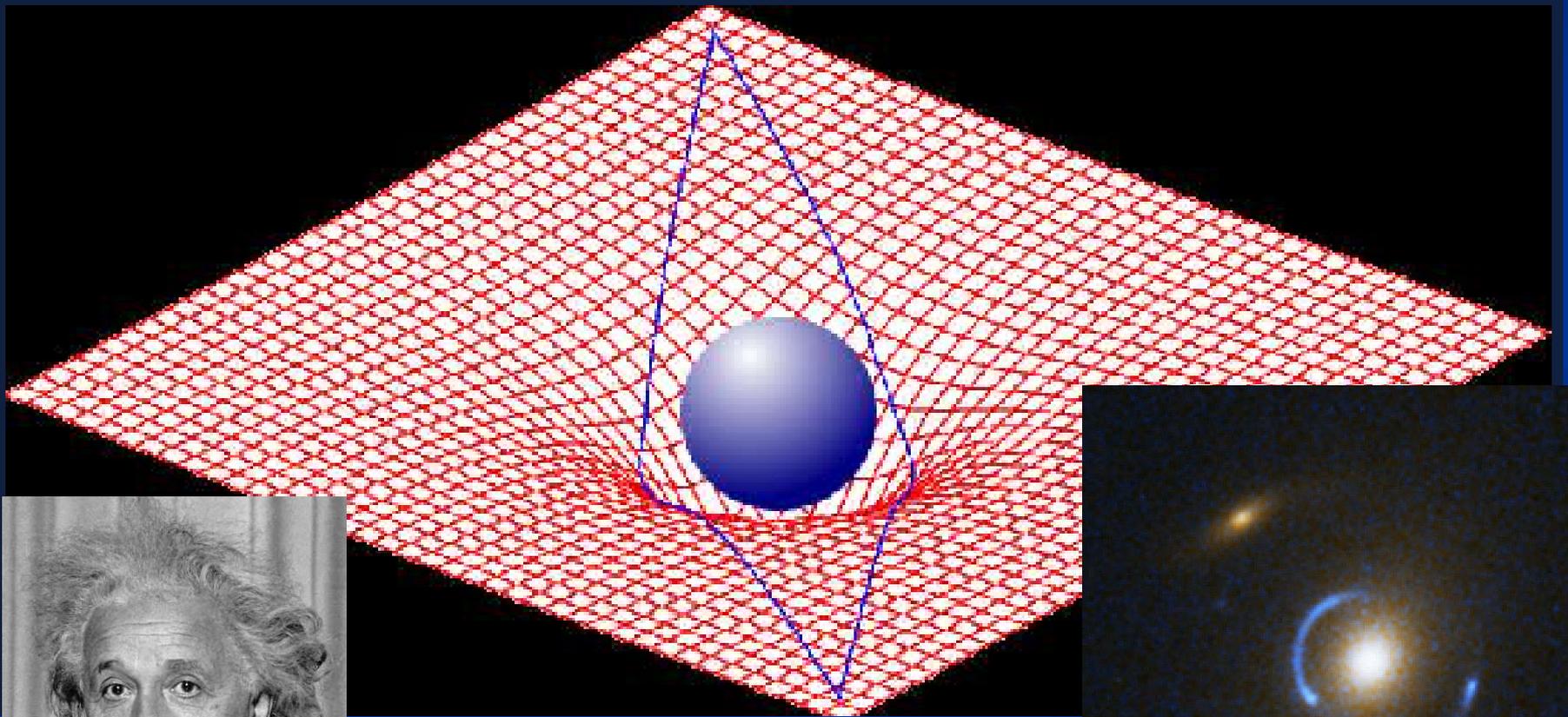
- Materieklumpen erzeugen Gravitationspotenzial (Newton)
- Dies kann vermessen werden
- Bestimmung der Masse des Klumpens
- z.B. Sonnenmasse genau bekannt

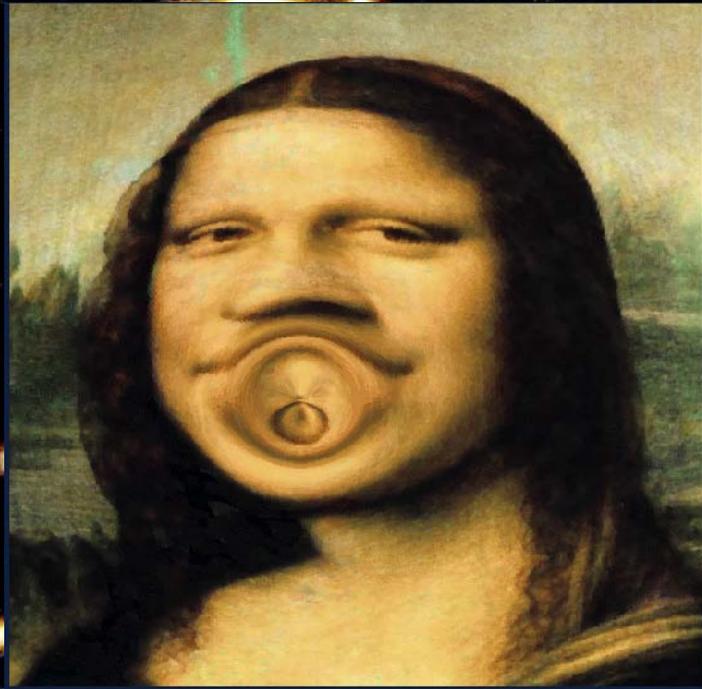




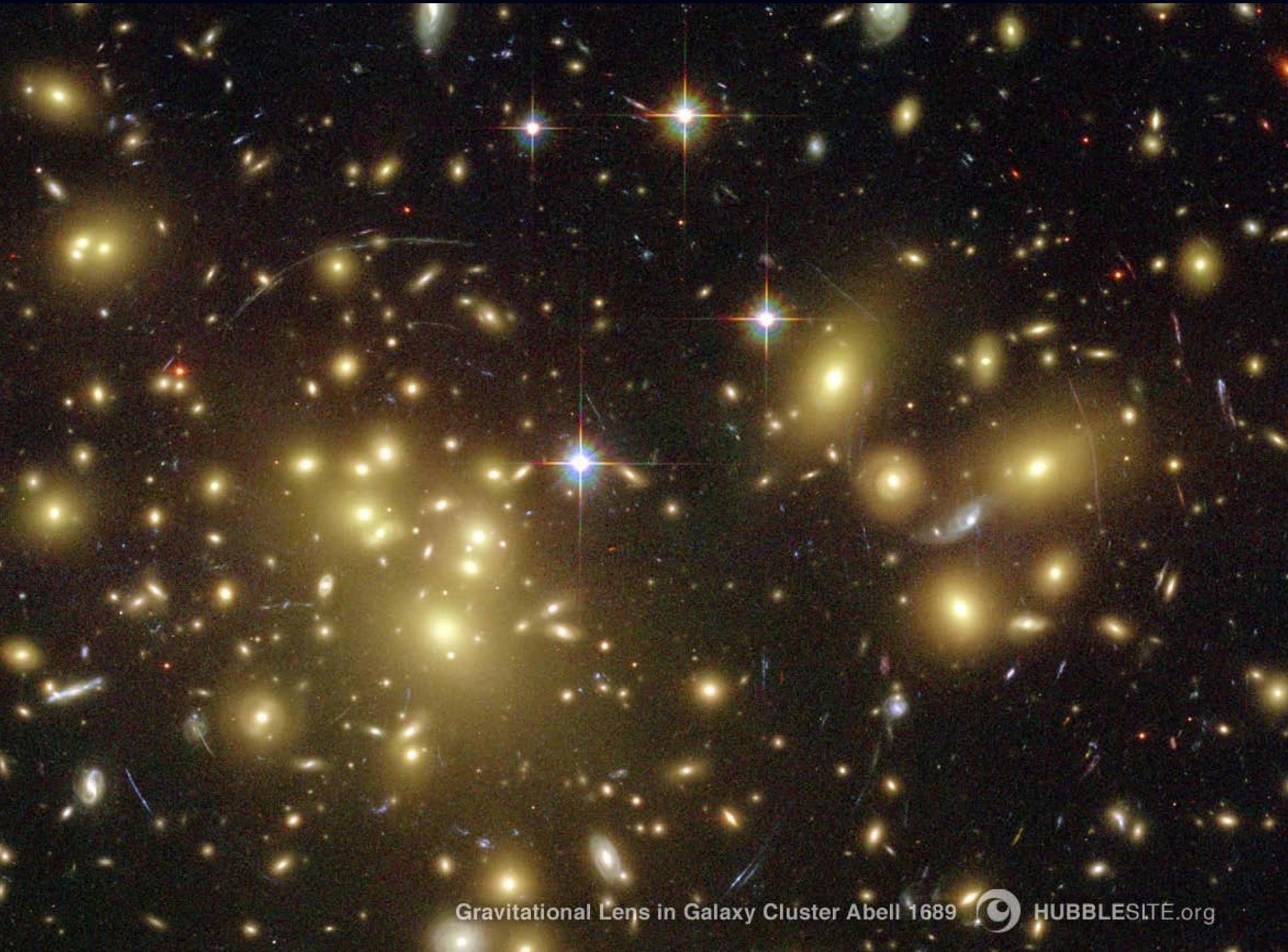
Gravitationslinse, HST

Lichtstrahlen werden durch Massen abgelenkt





Gravitationslinse, HST



Gravitational Lens in Galaxy Cluster Abell 1689



HUBBLESITE.org

Schwacher Gravitationslinsen – Effekt :

Leichte Verzerrung des Bilds Tausender von Hintergrundgalaxien

Statistische Verteilung

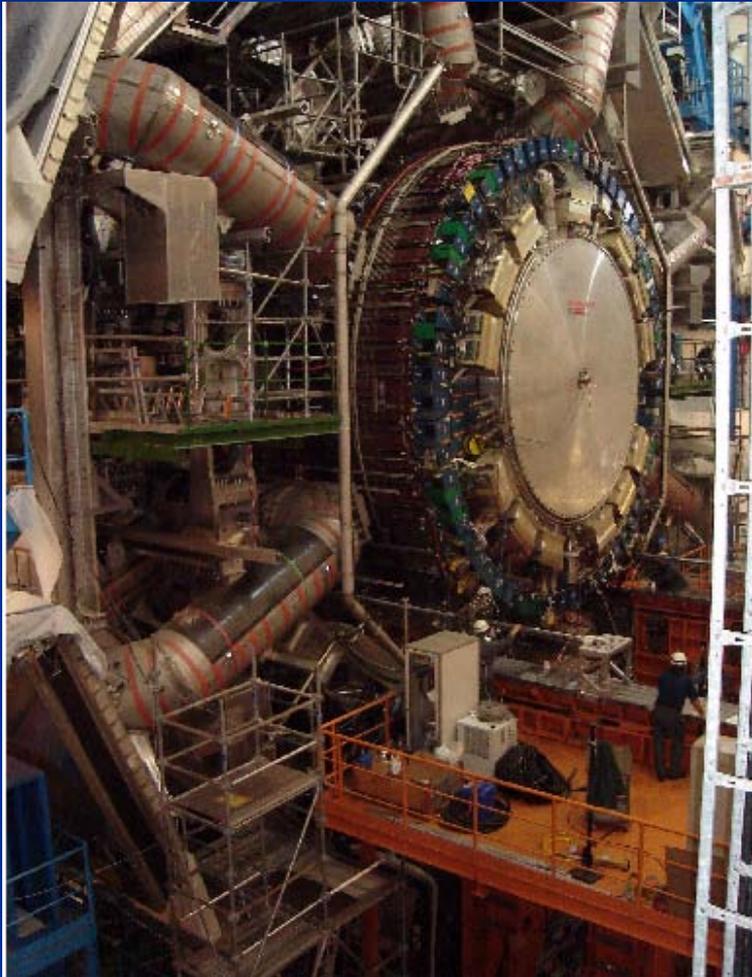


Dunkle Materie

- Anteil der “Materie” insgesamt : 30 %
- Die meiste Materie ist dunkel !
- Bisher nur durch Gravitation spürbar
- Alles was klumpt!  Gravitationspotenzial

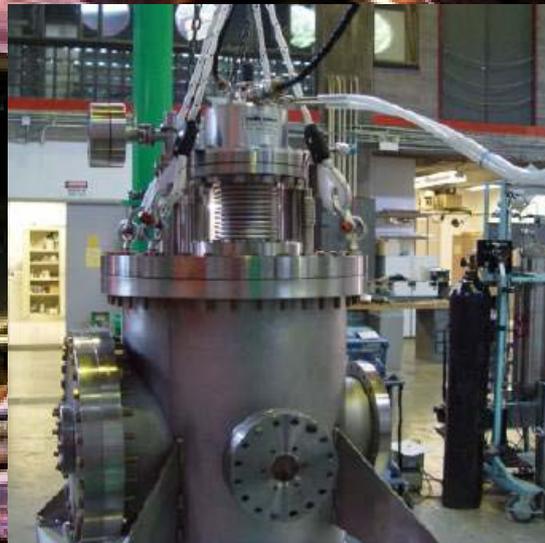
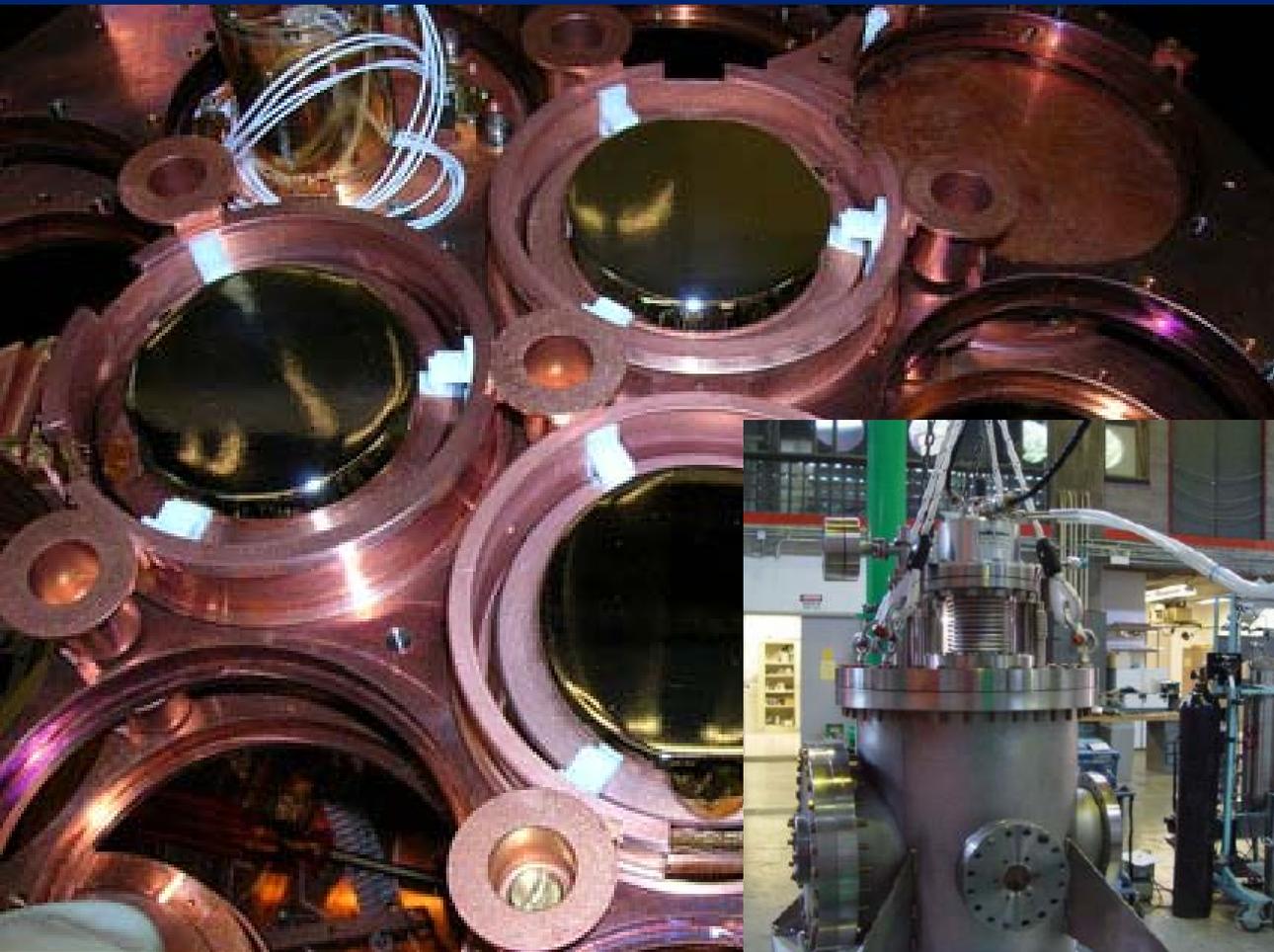
Woraus besteht Dunkle Materie ?

Dunkle Materie könnte aus noch unbekannten Elementarteilchen bestehen



LHC , CERN , Genf

Suche nach Dunkler Materie



bis heute nichts gefunden ...

Woraus besteht unser Universum ?

Dunkle Materie + Atome :

Alles was klumpt !

30 %

30 % 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

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

Kritische Dichte

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

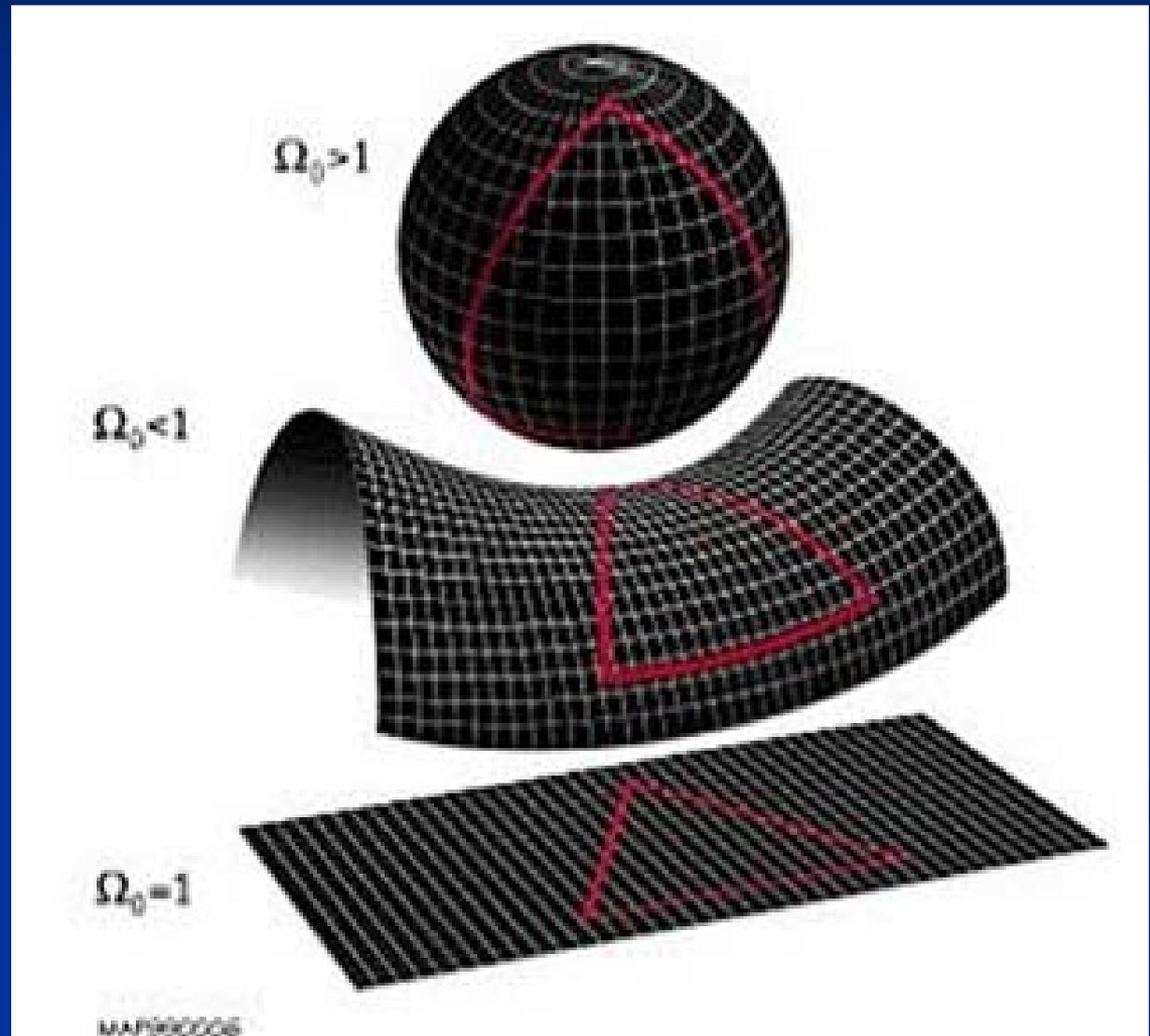
flaches Universum

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

Kugeloberfläche

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

hyperbolische
Geometrie



**Woraus besteht unser
Universum ?**



Quintessenz !

Feuer , Luft,
Wasser,
Erde !

Materie

Atome : $\Omega_b = 0.05$

Dunkle Materie : $\Omega_{dm} = 0.25$

Dunkle Energie :

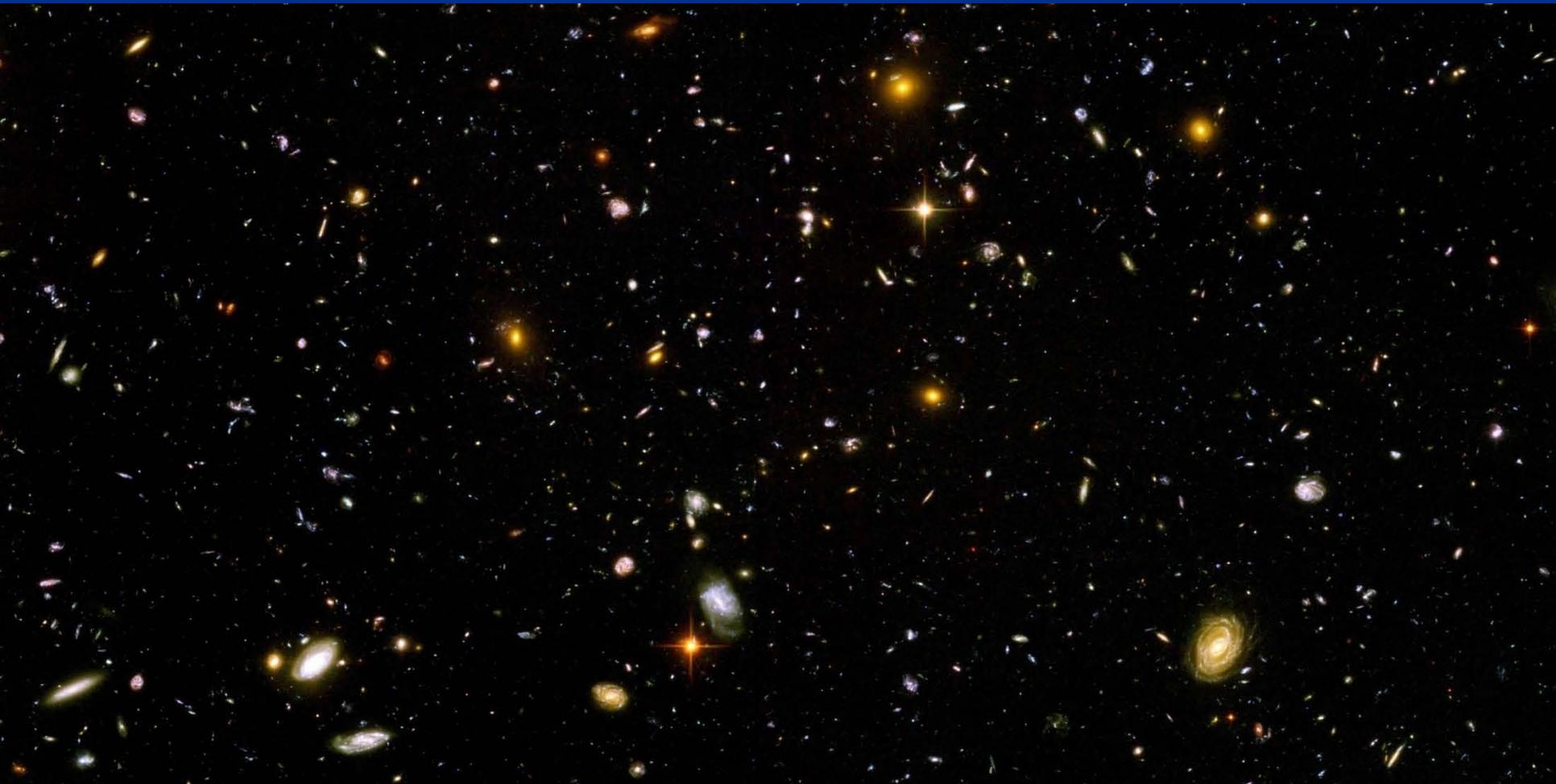
$$\Omega_h : 0.7$$

**Dunkle Energie kann man nicht
sehen , auch nicht indirekt**

Kosmologie :

**Verständnis des
Universums als Ganzem**

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

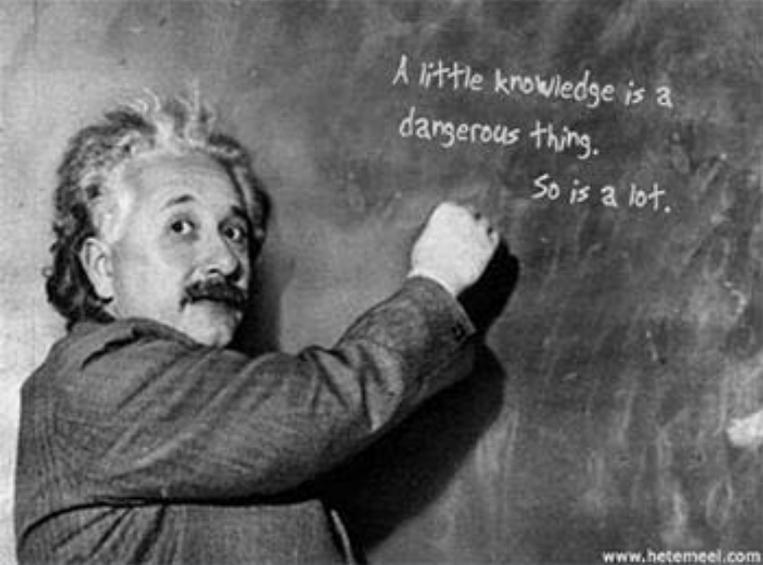
Die kosmische Renaissance: Ende des "Dunklen Zeitalters"

← Reionisation beendet. Das Universum ist transparent.

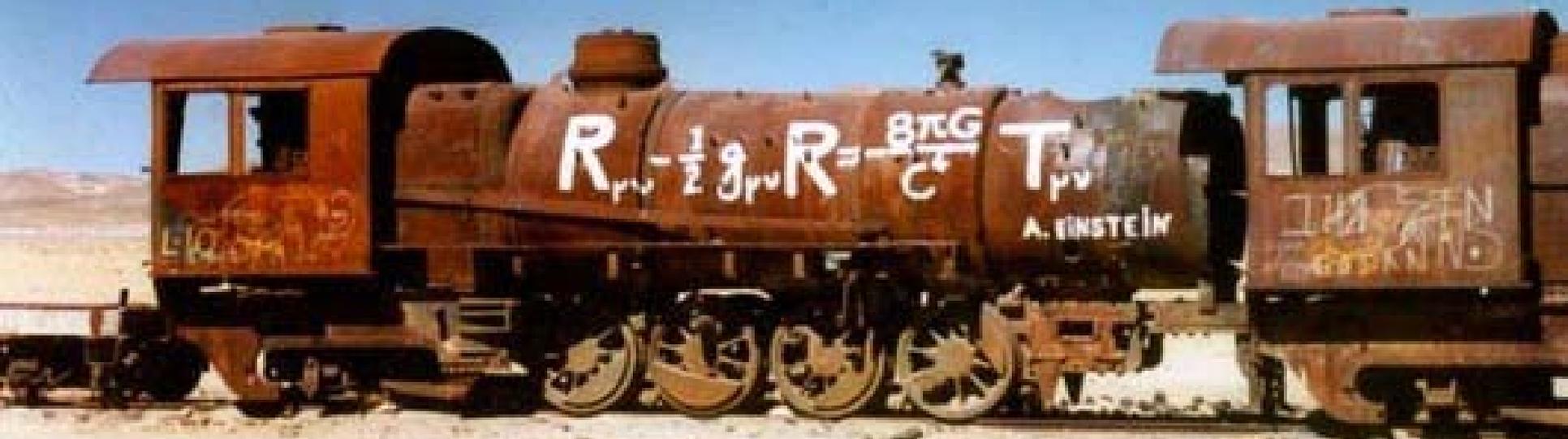
Galaxien entwickeln sich

Das Sonnensystem entsteht

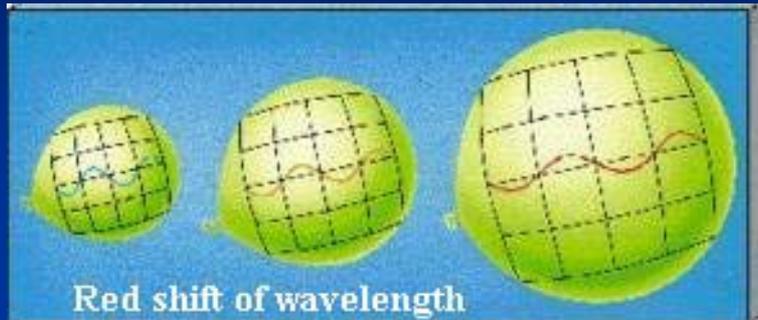
Heute: Astronomen erklären das Universum



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

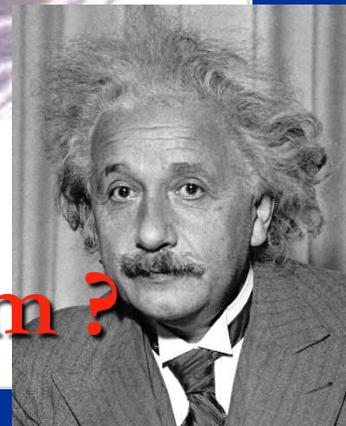


Expansion des Universums



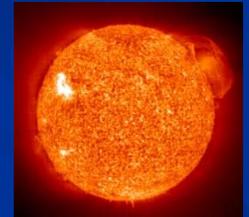
Expanding distance between galaxies

Hmm?



Expansion des Universums

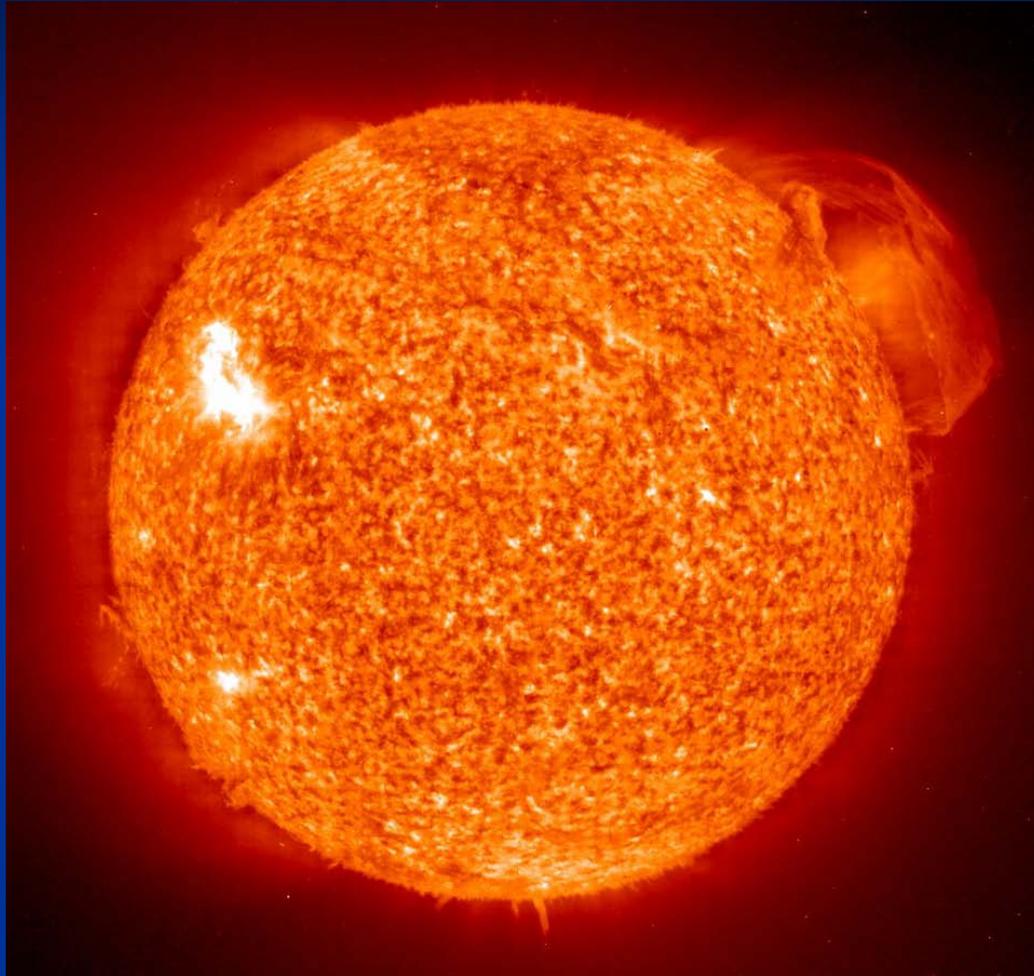
- Der Raum zwischen den Galaxienhaufen dehnt sich aus.
- Früher war das Universum dichter, ... und heißer.
- Zurückverfolgung der Einstein'schen kosmologischen Gleichungen :
Urknall, extrem heißer Feuerball !
- Bis ca 400 000 Jahre nach dem Urknall : heißes Plasma aus Protonen, Elektronen und Strahlung



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

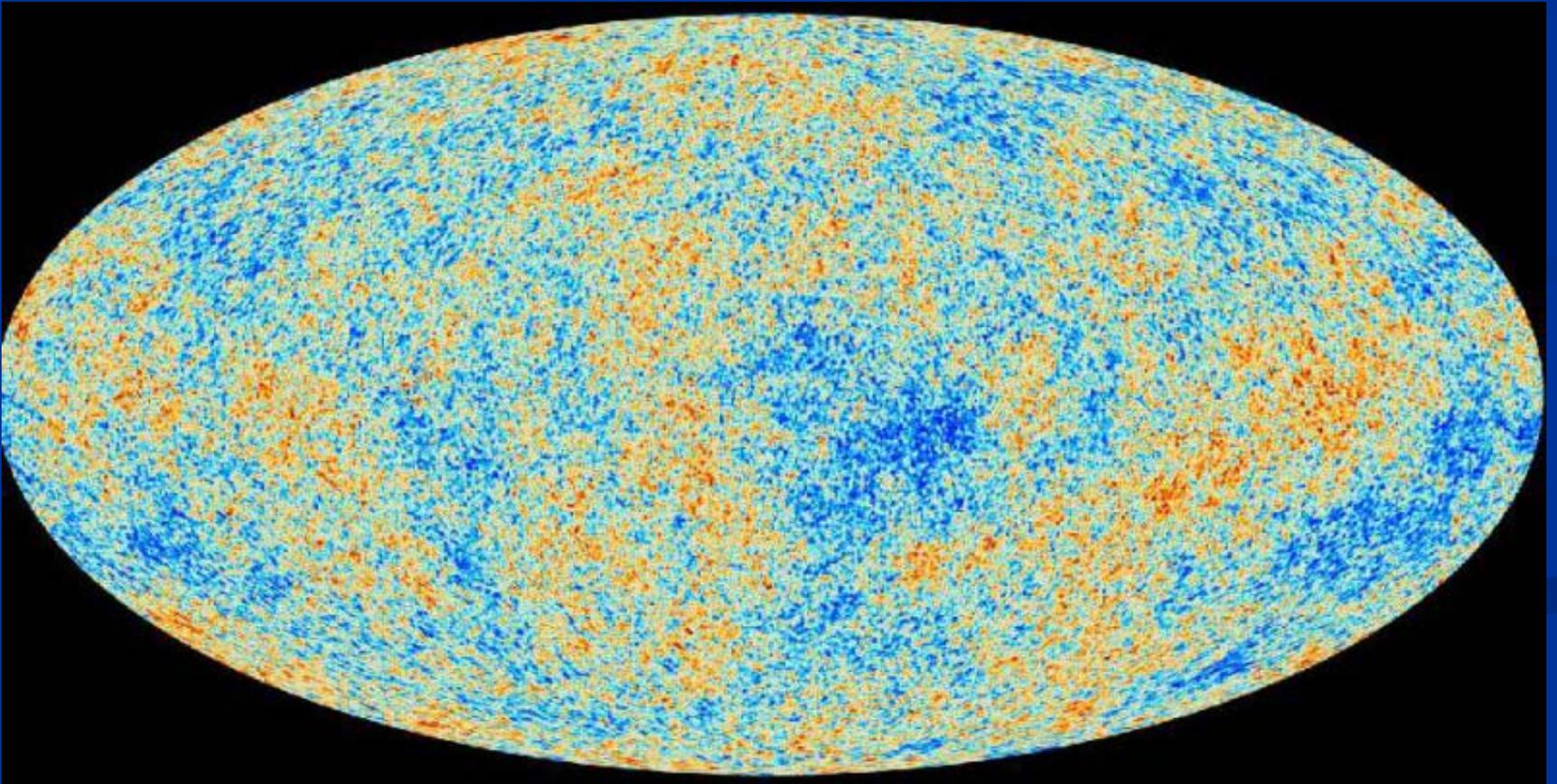
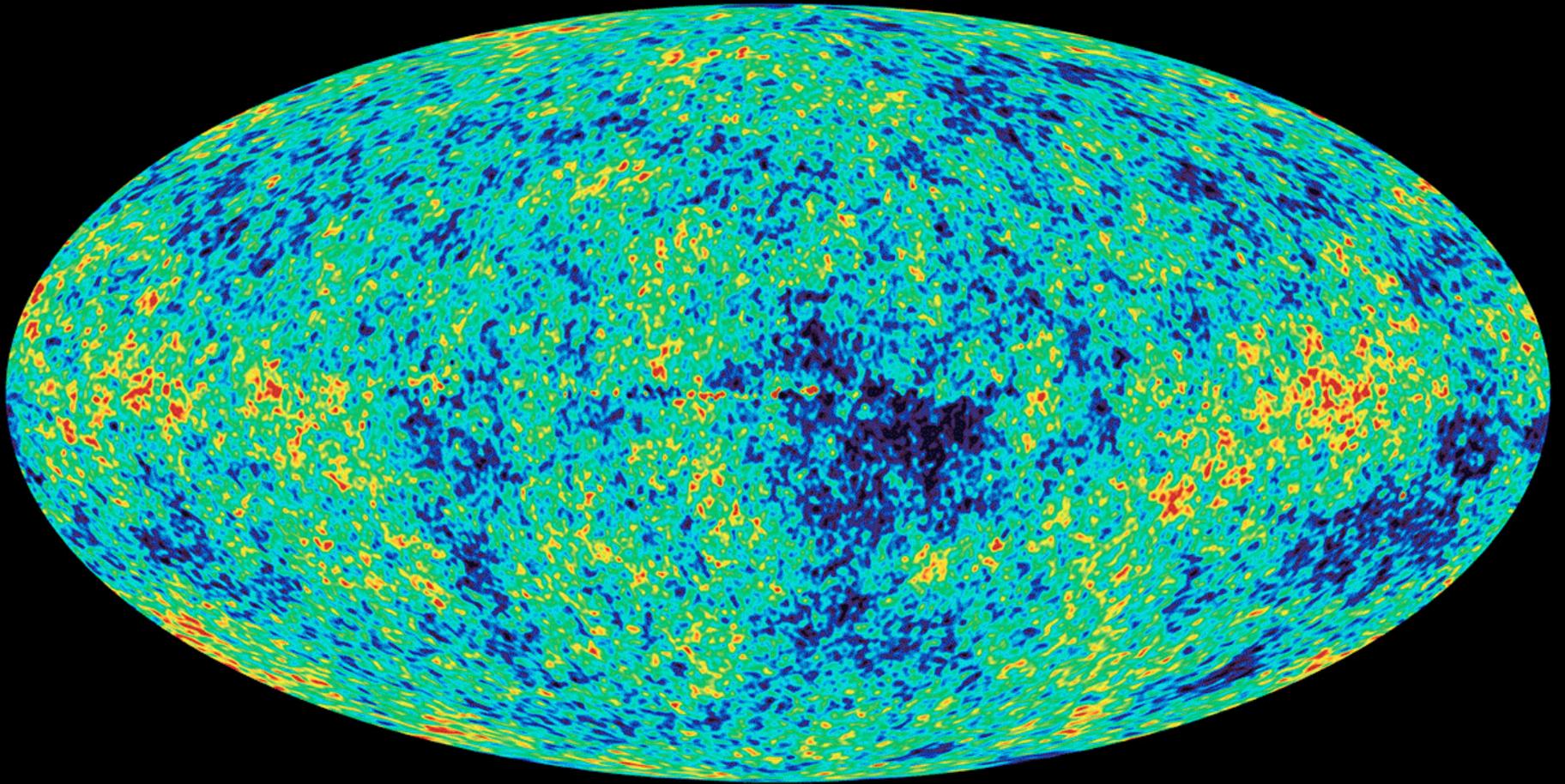


Foto des Urknalls



Bestimmung der Energiedichte des Universums

Bestimmung der Energiedichte des Universums

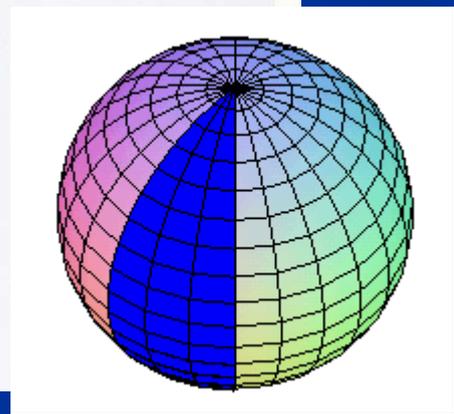
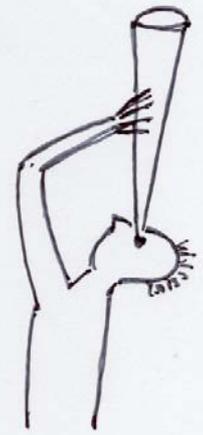
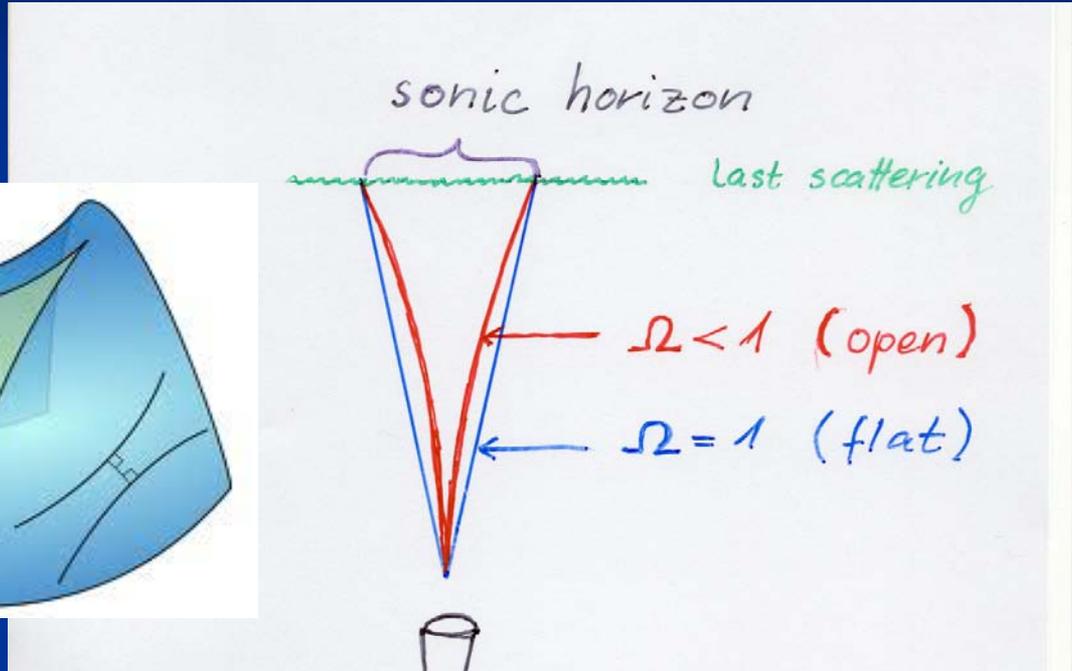
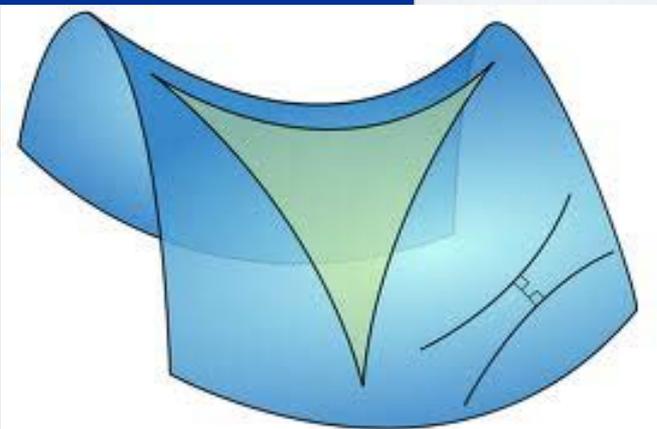
Ω_{tot} bestimmt die Geometrie des Universums :
kann vermessen werden

$\Omega_{\text{tot}} = 1$ 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 (Planck)

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.00 (\pm 0.01)$$

Bestimmung durch “Foto des Urknalls”

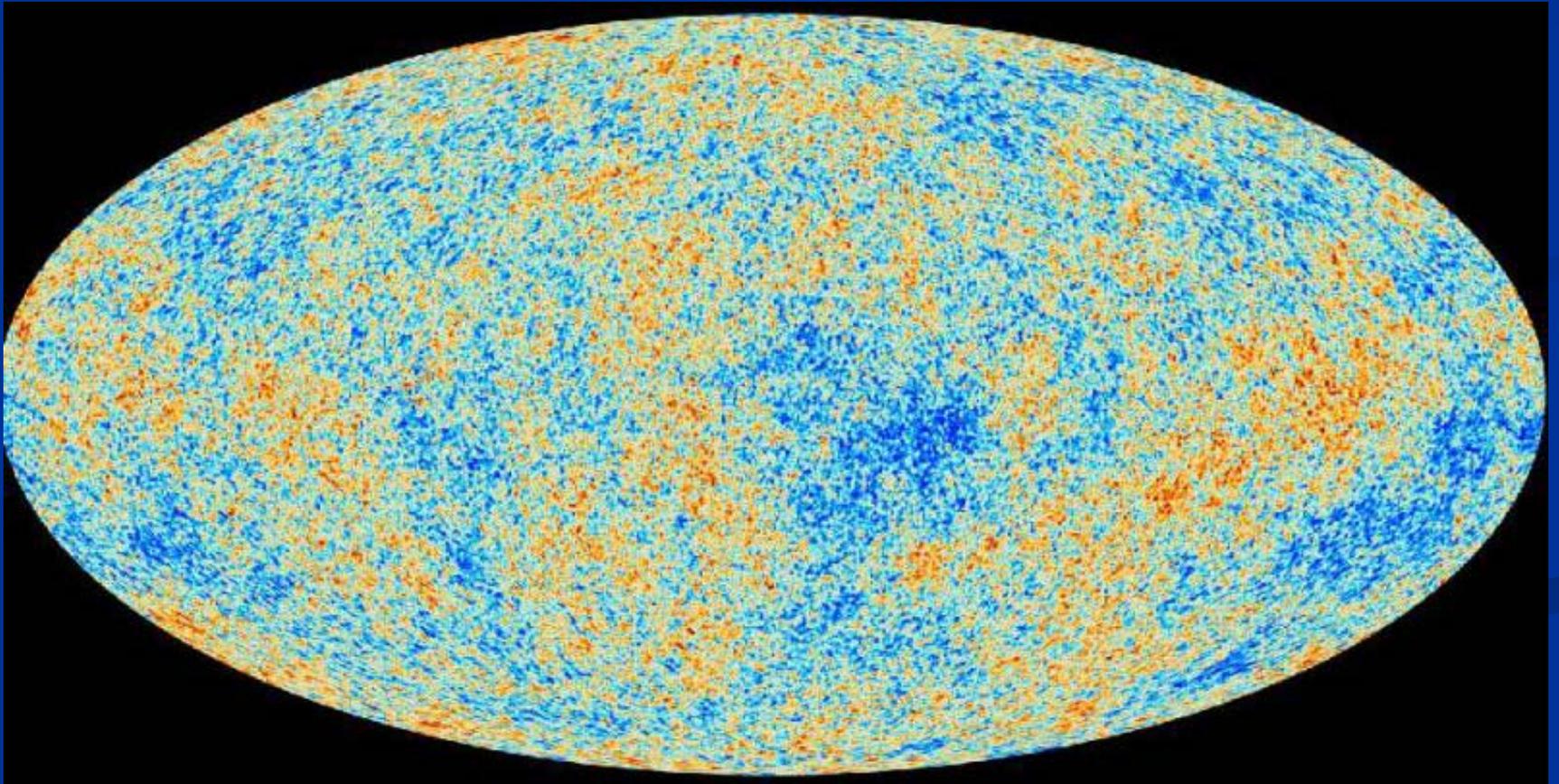
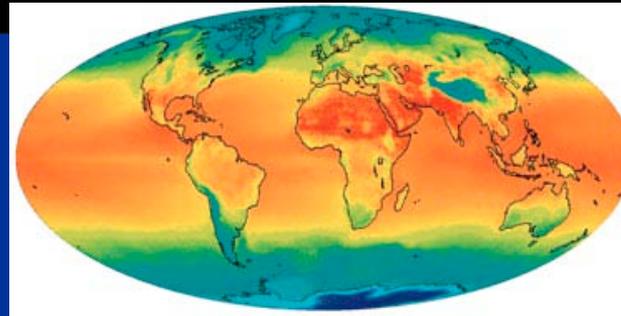
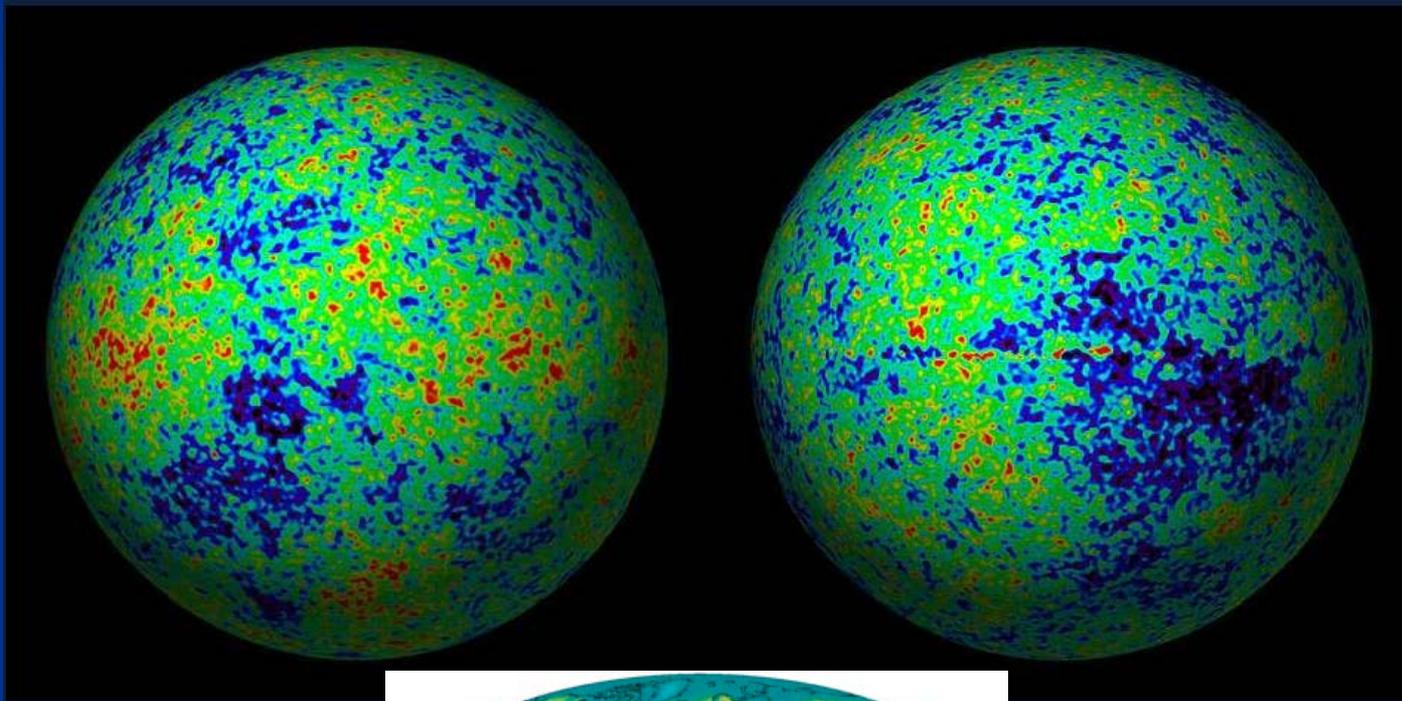
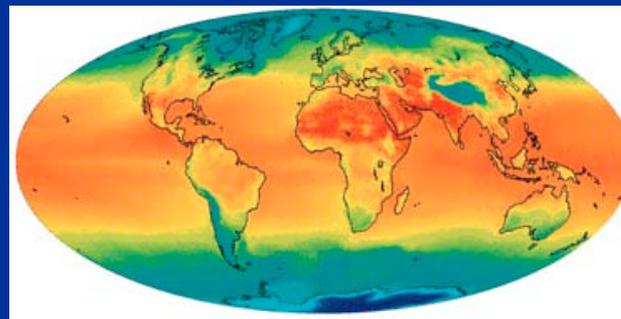
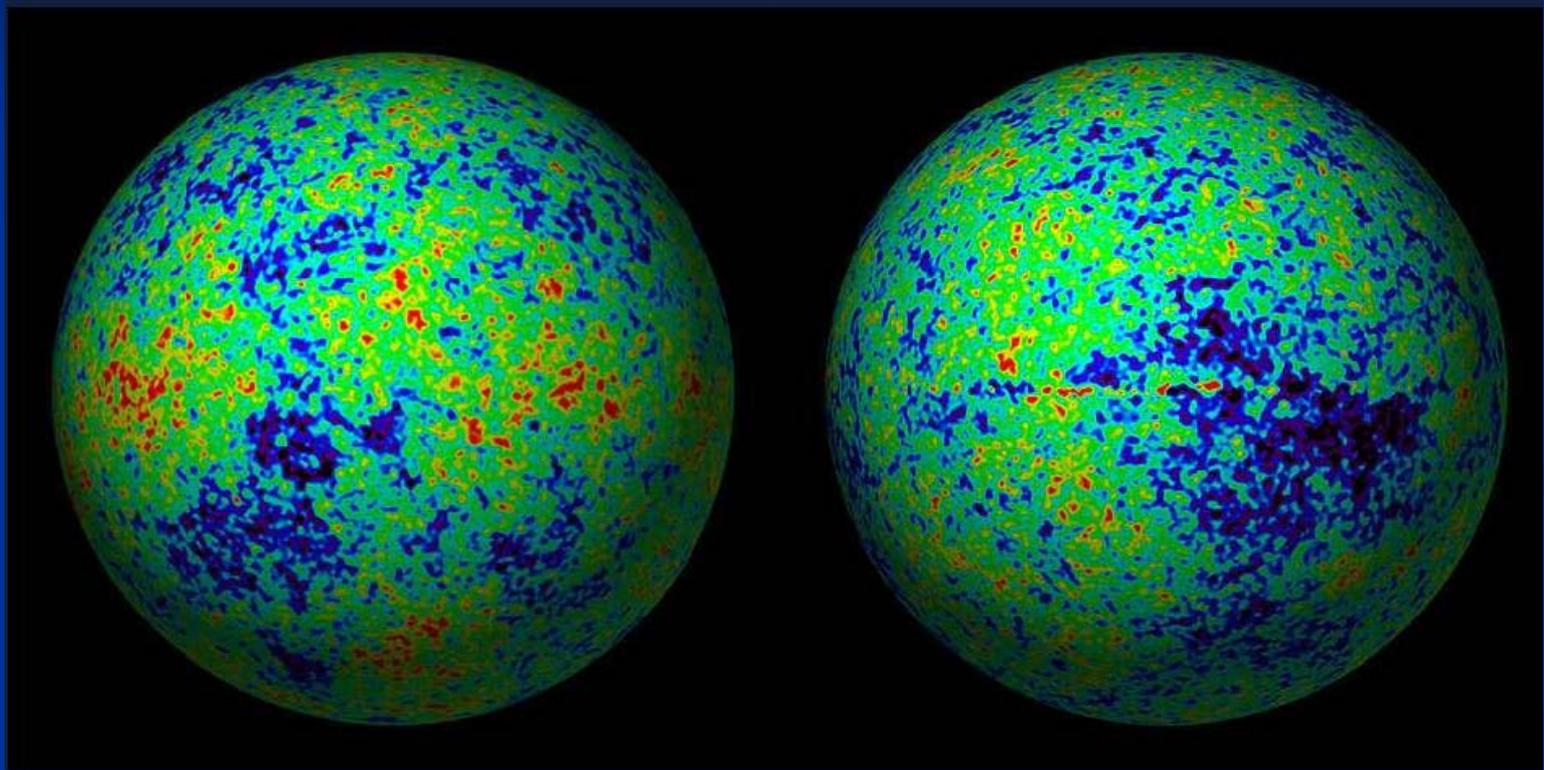


Bild einer Kugeloberfläche von innen winzige Temperatur-schwankungen der Hintergrundstrahlung

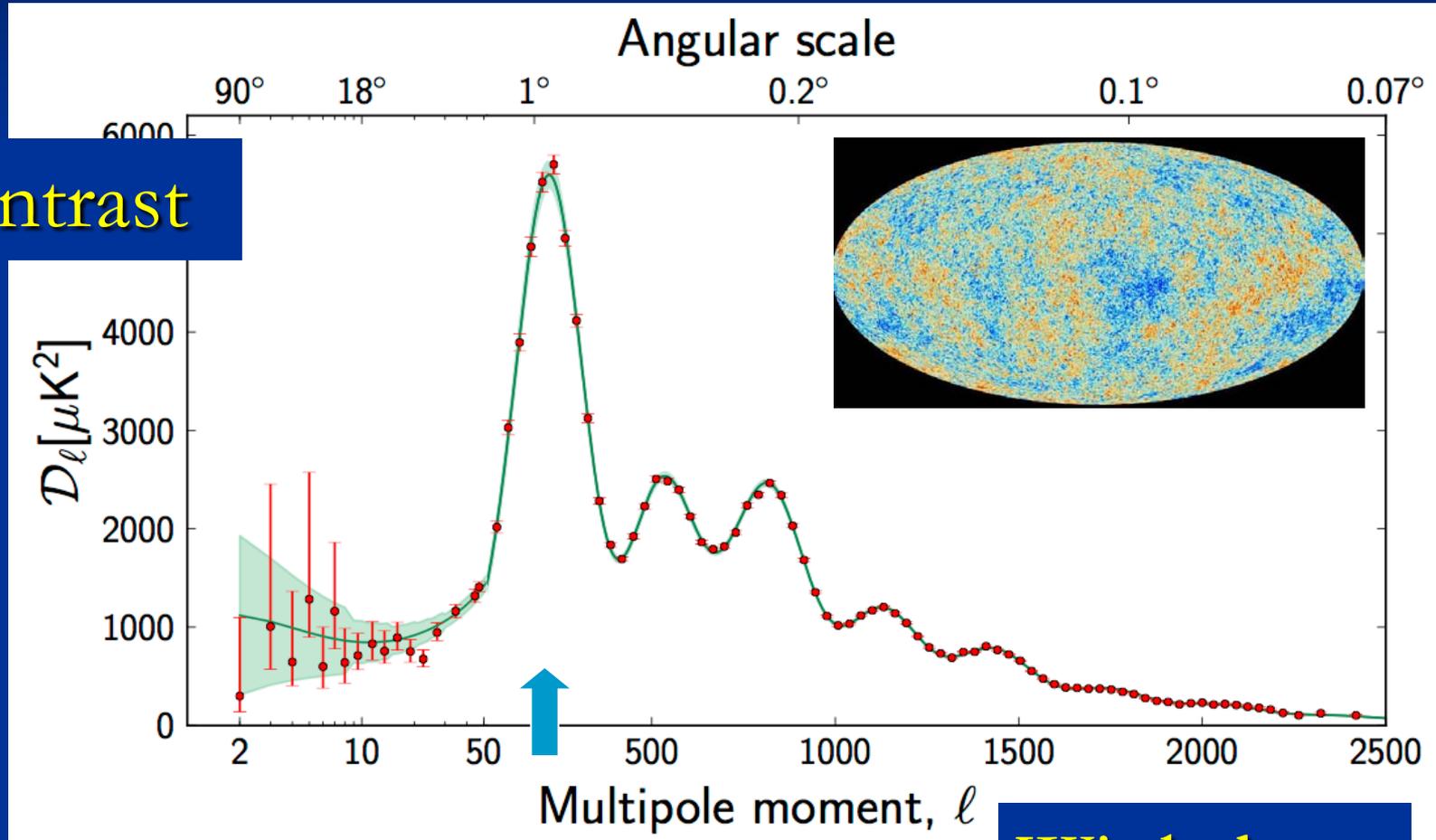


Anisotropie der Hintergrundstrahlung : Fleckengröße



Stärke der Temperaturschwankung in Abhängigkeit von Fleckengröße (im Winkel)

Kontrast

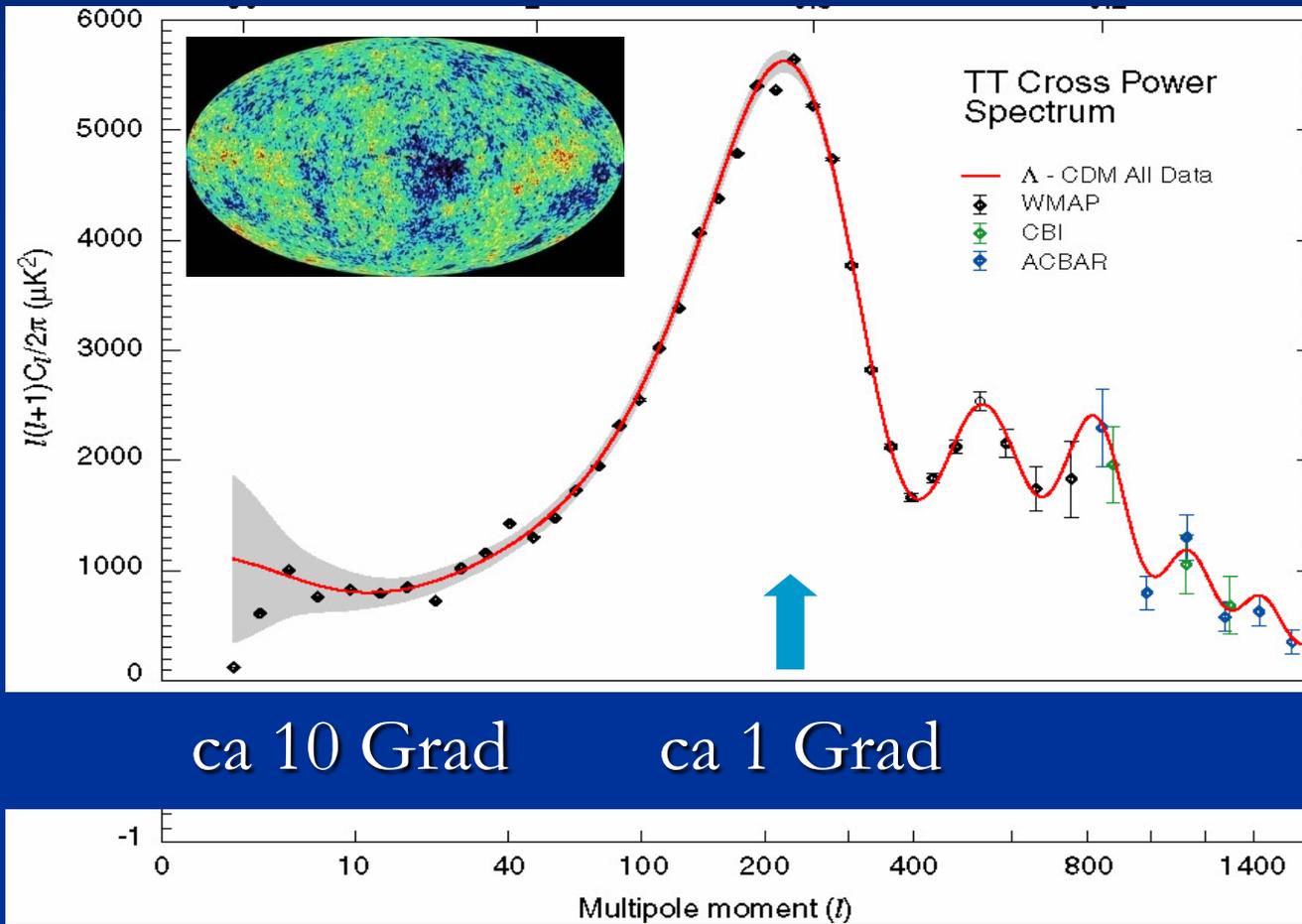


ca 10 Grad

ca 1 Grad

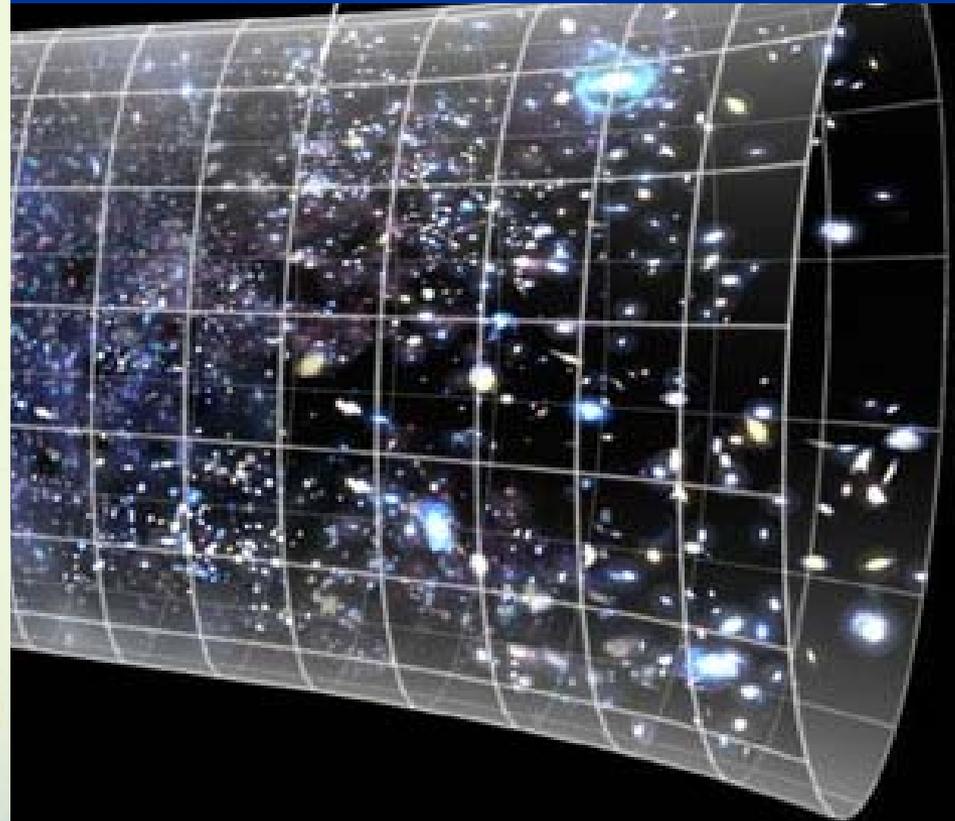
Winkel

Akustische Schwingungen im Plasma



Schallwellen im frühen Universum

Länge
berechen-
bar



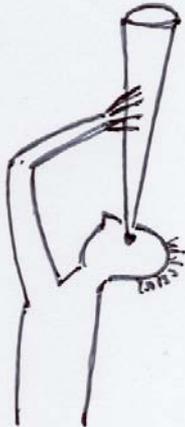
$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$



last scattering

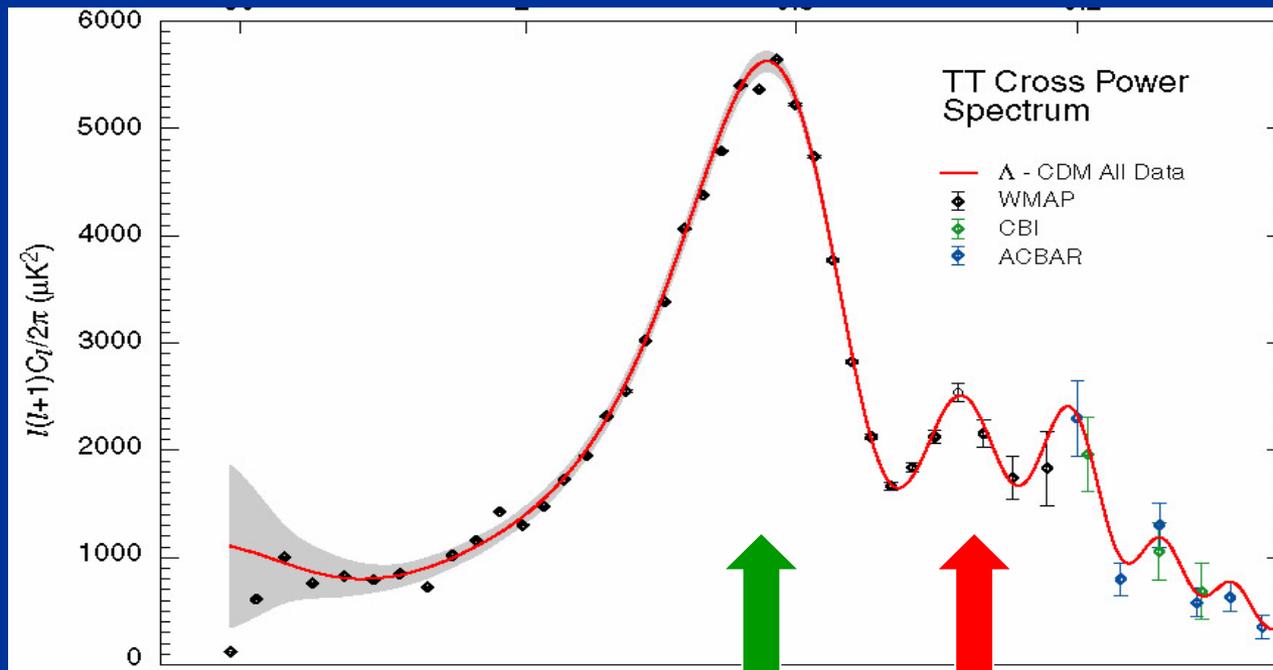
$\Omega < 1$ (open)

$\Omega = 1$ (flat)



Räumlich flaches Universum

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



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

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

Räumlich flaches Universum

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

Dunkle Energie

$$\Omega_m + X = 1$$

$$\Omega_m : 30\%$$

$$\Omega_h : 70\%$$

Dunkle Energie

h : homogen , oft auch Ω_Λ statt Ω_h

Dunkle Energie dominiert das Universum

Energie - Dichte im Universum

=

Materie + Dunkle Energie

30 % + 70 %

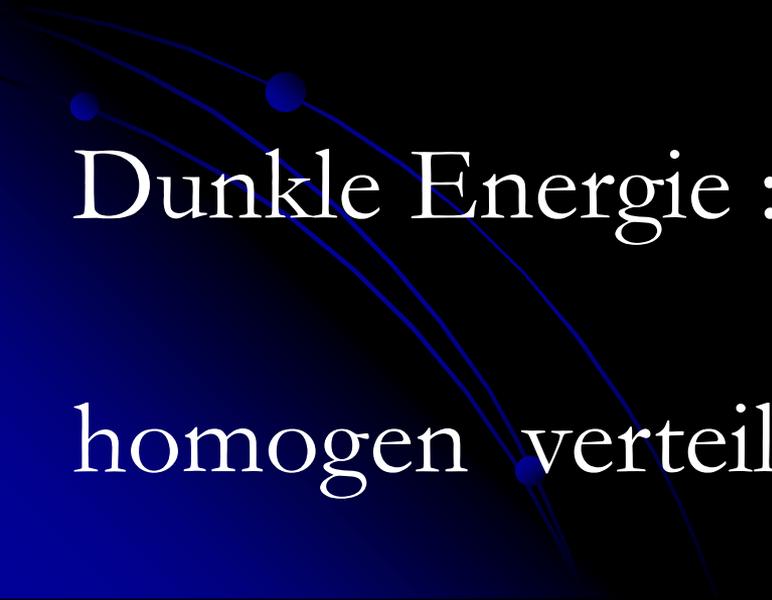
Zusammensetzung des Universums

Atome : $\Omega_b = 0.05$

Dunkle Materie : $\Omega_{dm} = 0.25$

Dunkle Energie : $\Omega_h = 0.7$

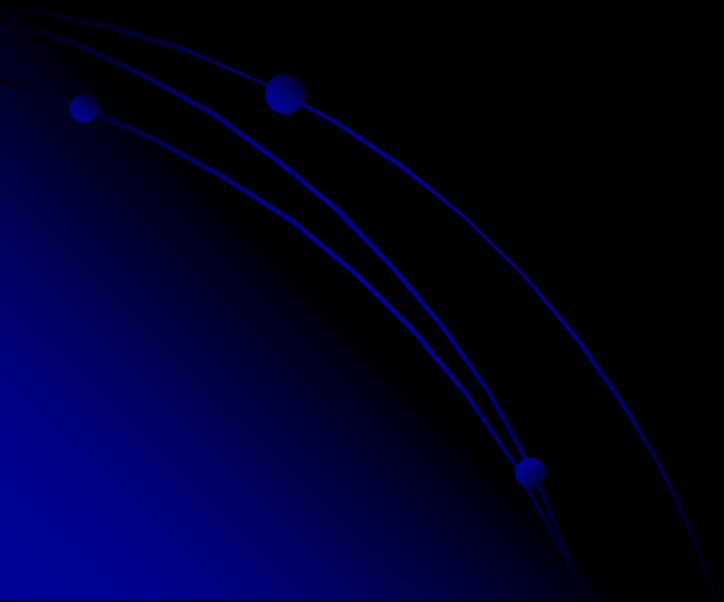
Eigenschaften der Dunkle Energie ?



Dunkle Energie :

homogen verteilt

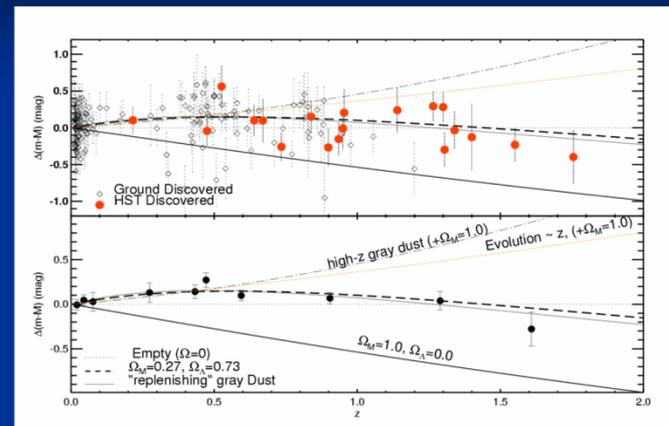
Dunkle Energie : kosmologische Effekte



Vorhersagen für Kosmologie mit Dunkler Energie

*Die Expansion des Universums
beschleunigt sich heute !*

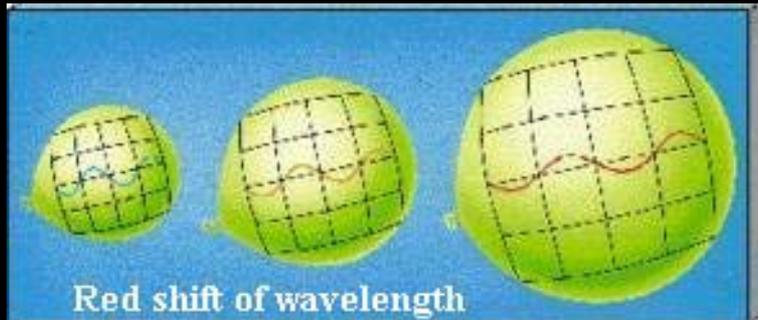
Supernova Ia Hubble-Diagramm



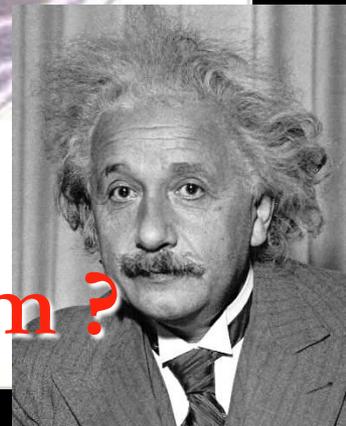
Rotverschiebung z

Riess et al. 2004

Expansion des Universums



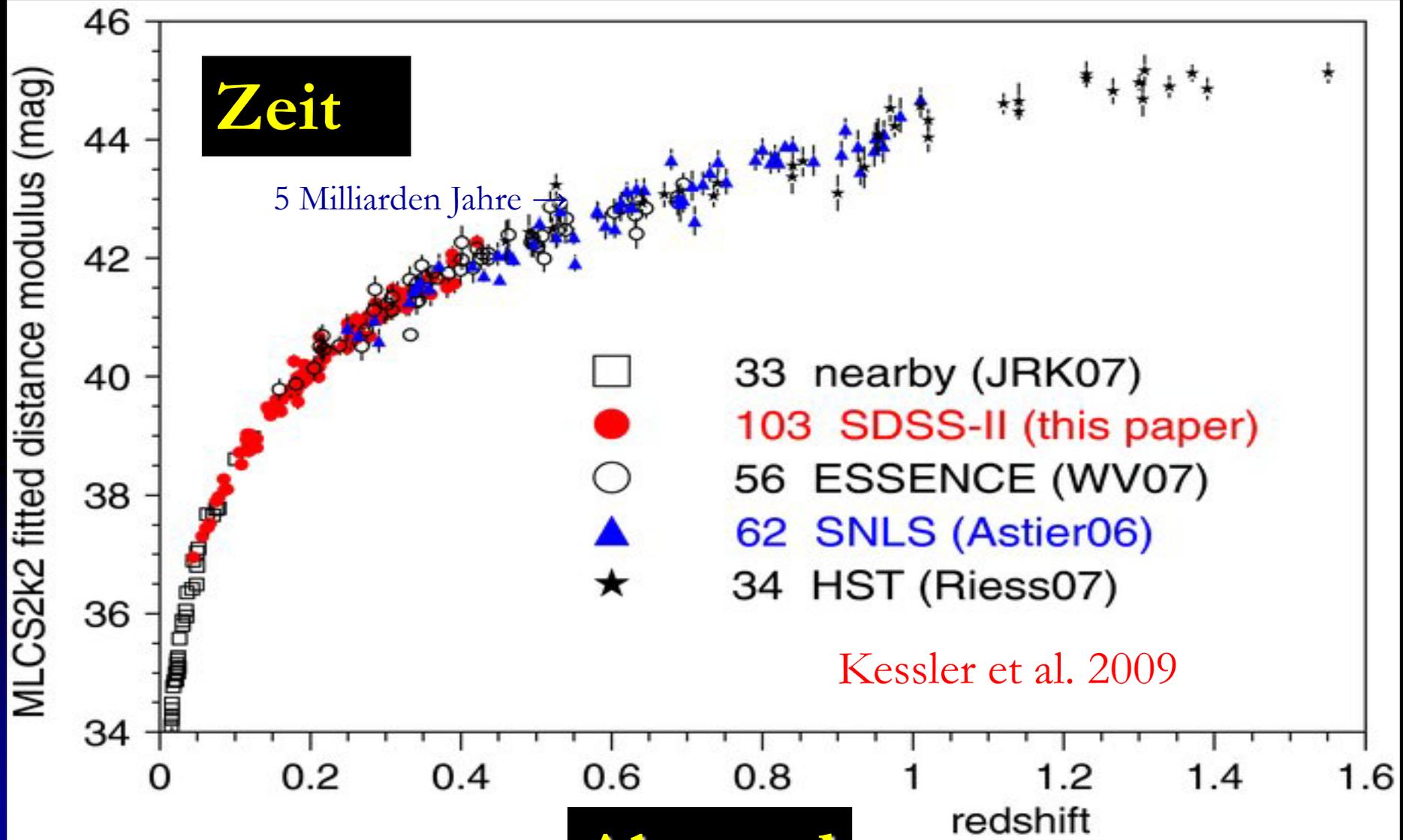
Hmm?



Supernovae als Standardkerzen

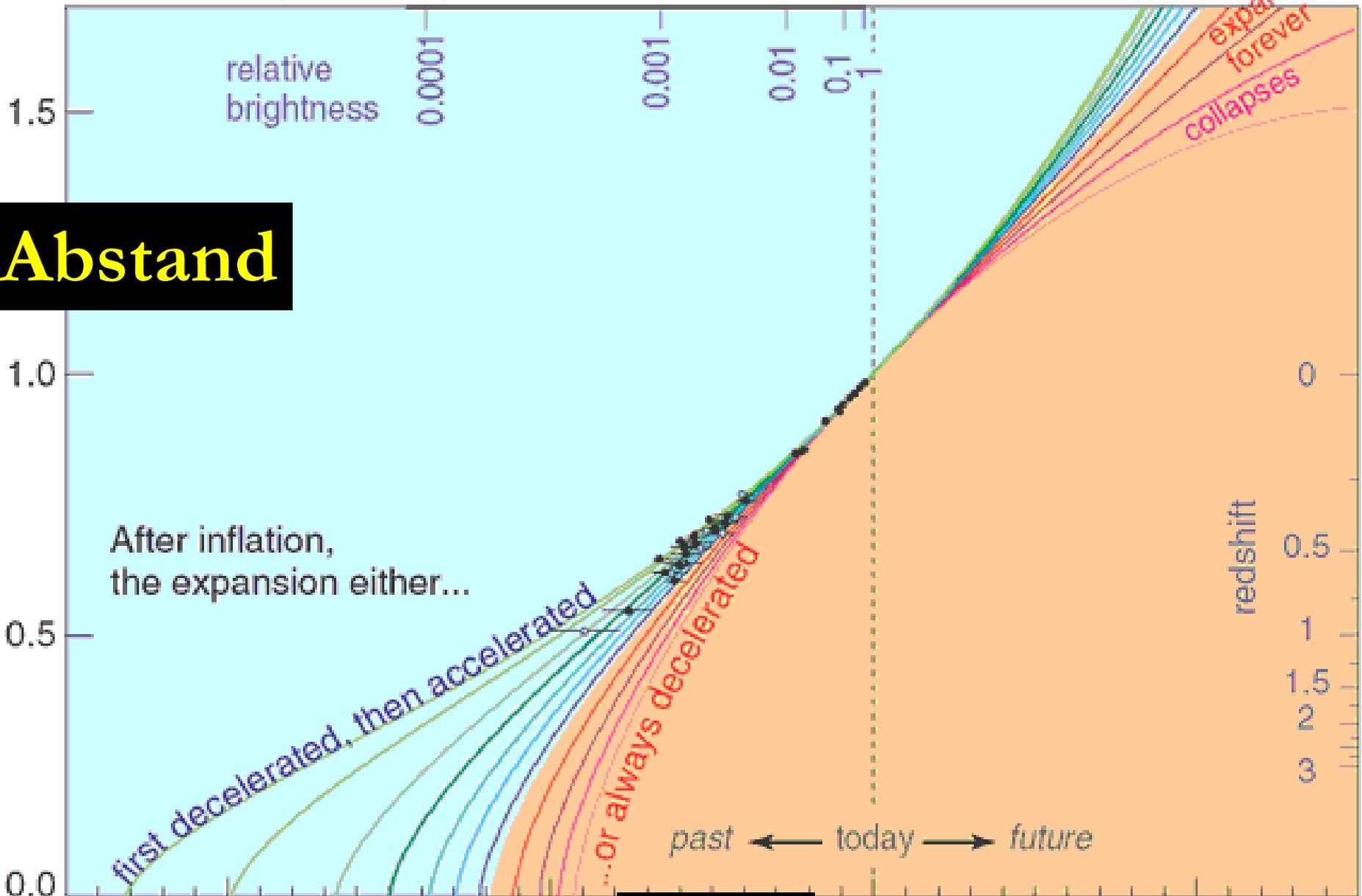


Beschleunigte Expansion



Abstand

Abstand



Zeit

Milliarden Jahre



Photo: Roy Kaltschmidt. Courtesy: Lawrence Berkeley National Laboratory

Saul Perlmutter



Photo: Belinda Pratten, Australian National University

Brian P. Schmidt

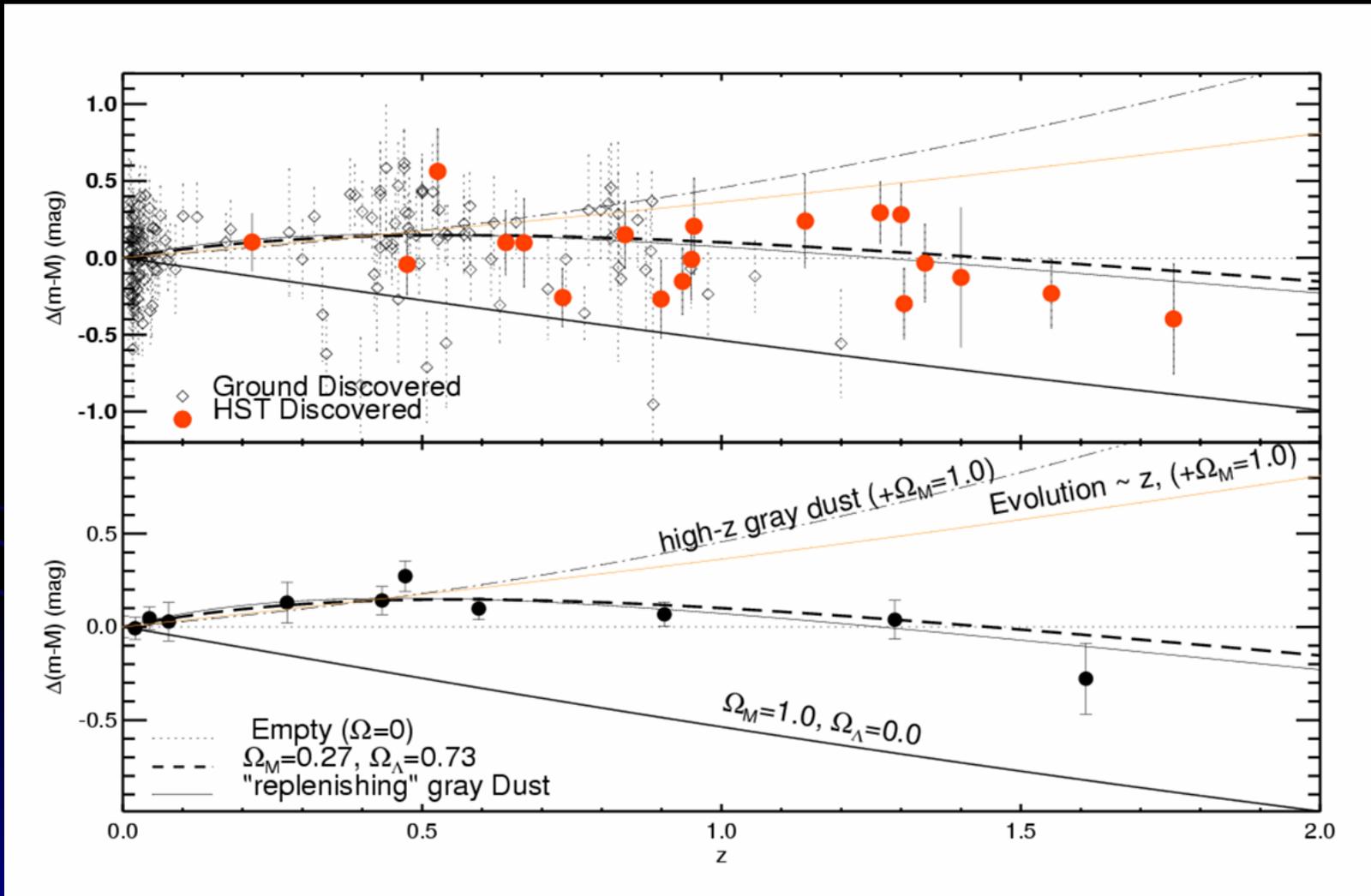


Photo: Homewood Photography

Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011 was awarded *"for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"* with one half to Saul Perlmutter and the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess.

Supernova Ia Hubble-Diagramm



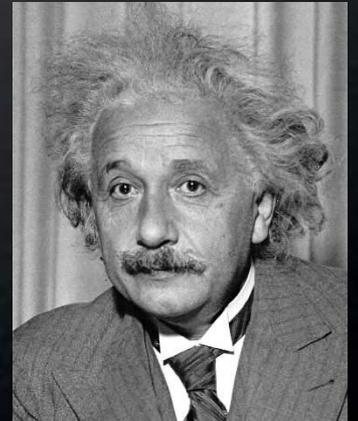
Rotverschiebung z

Riess et al. 2004

Beschleunigte Expansion des Universums !



Hmm ?



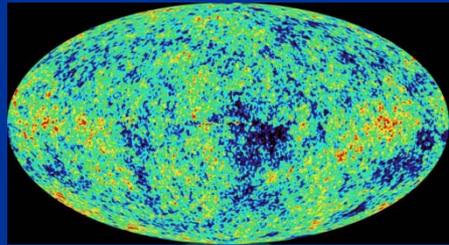
**Dunkle Energie und Dunkle Materie
sind (heute) Gegenspieler :**

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 !

Simulationen im Computer

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

500 Mpc/h



Verteilung der Dunklen Materie im Universum

Millenium simulation , VIRGO project

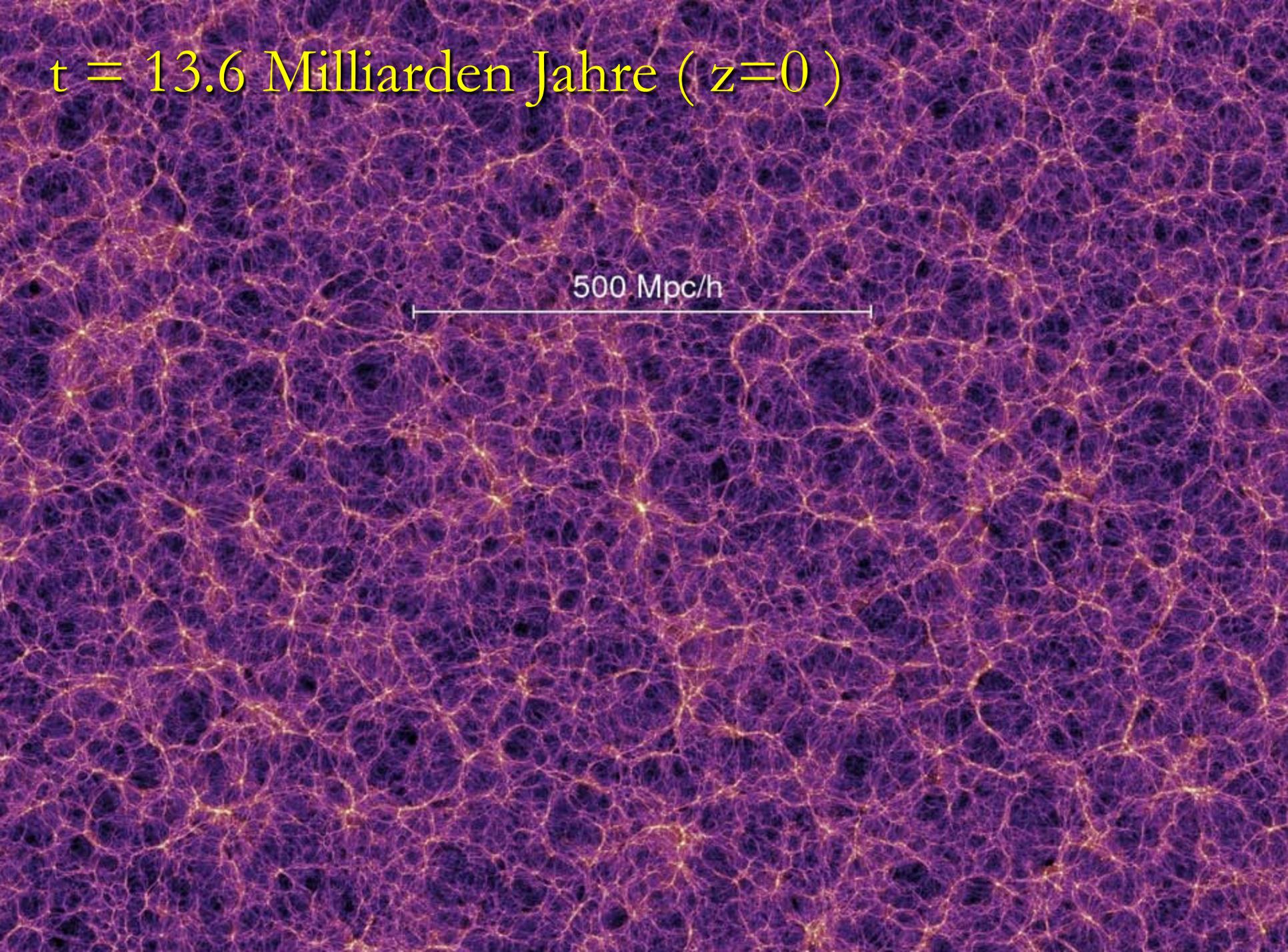
$t = 1$ Milliarde Jahre ($z = 5.7$)

500 Mpc/h

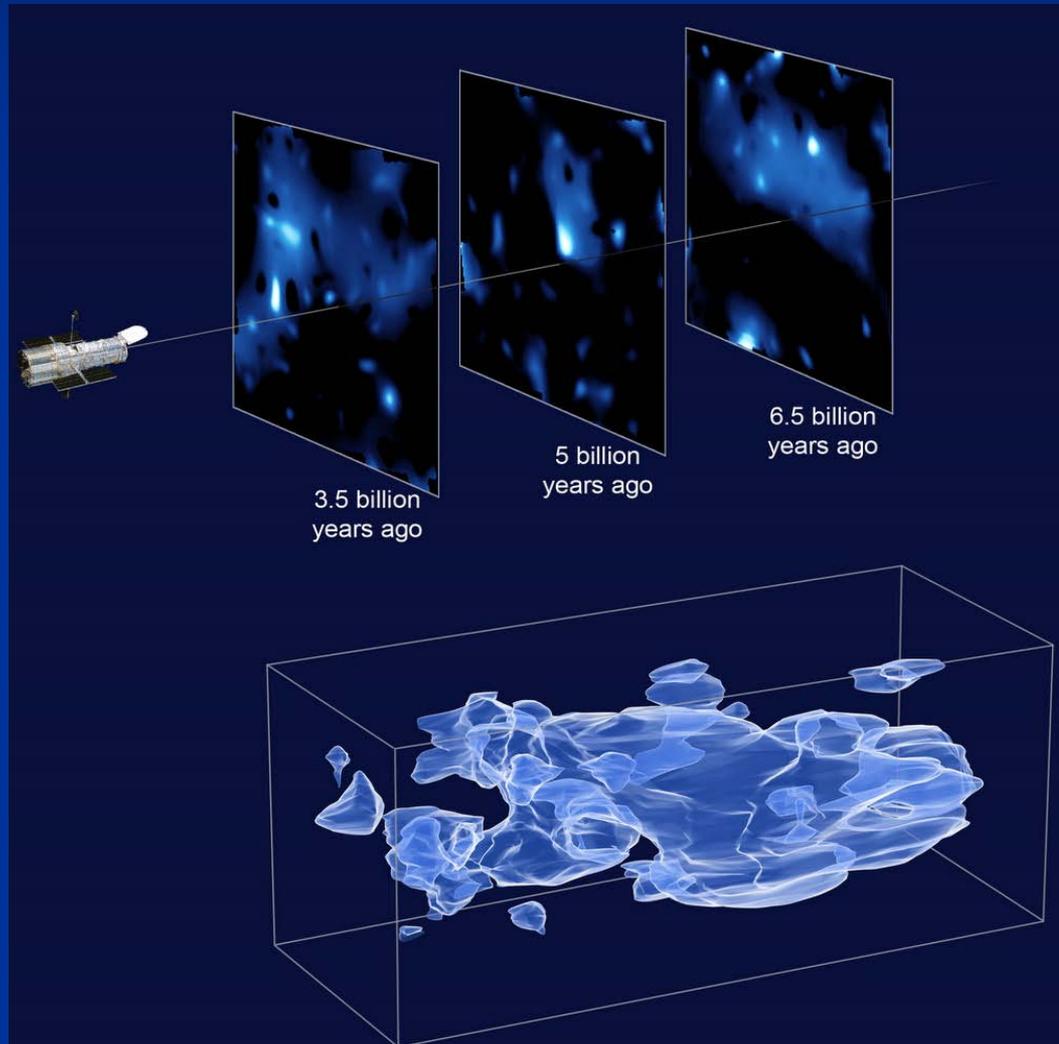


$t = 13.6$ Milliarden Jahre ($z=0$)

500 Mpc/h

A visualization of the cosmic web at $t = 13.6$ billion years ($z=0$). The image shows a complex, interconnected network of filaments and nodes, representing the large-scale structure of the universe. The filaments are colored in shades of purple and blue, while the nodes are highlighted in yellow and orange. A horizontal scale bar is located in the upper-middle part of the image, labeled "500 Mpc/h".

und Vergleich mit Beobachtung : Verteilung der Dunklen Materie



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

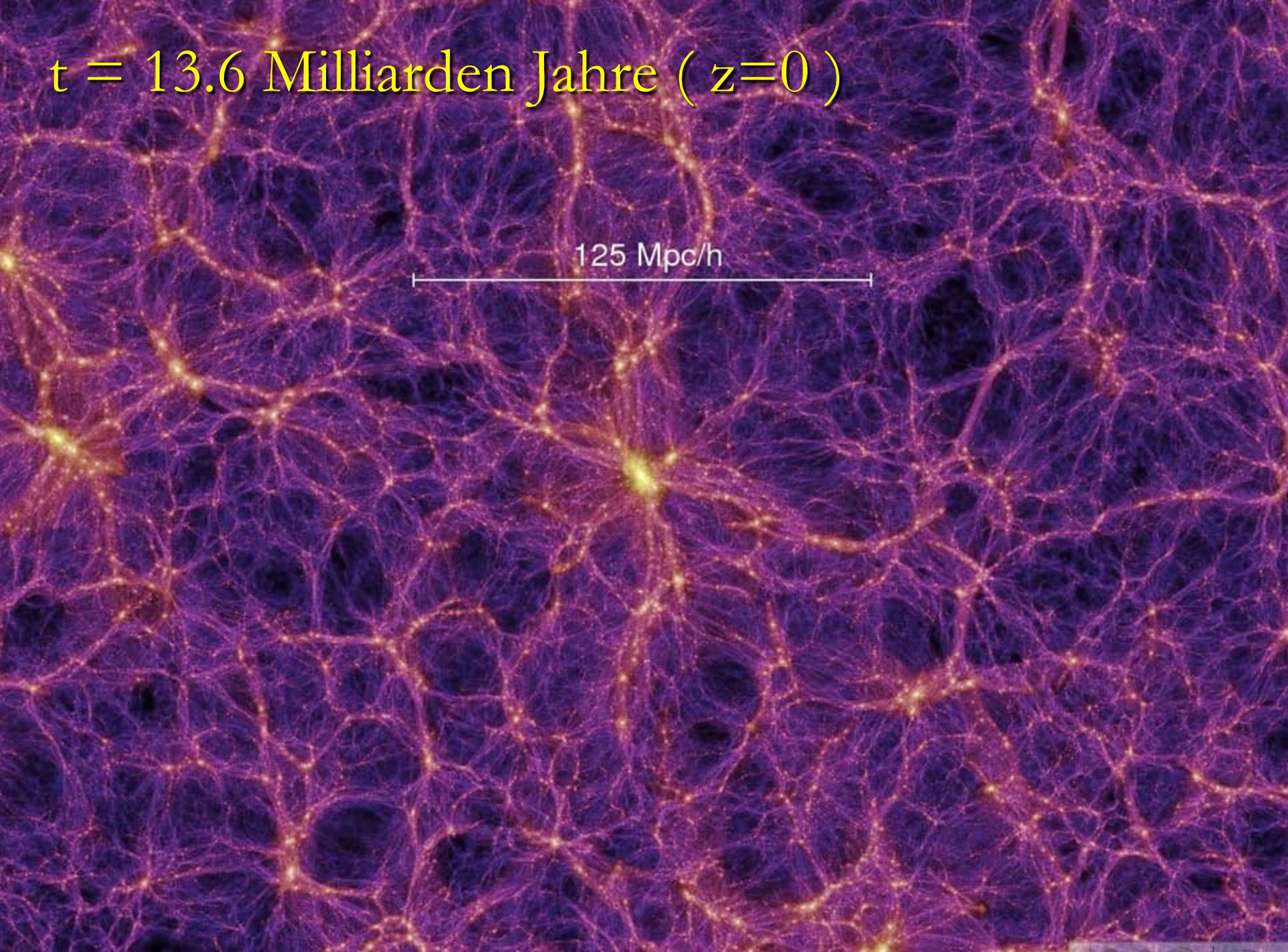
500 Mpc/h



Zoom auf Galaxienhaufen

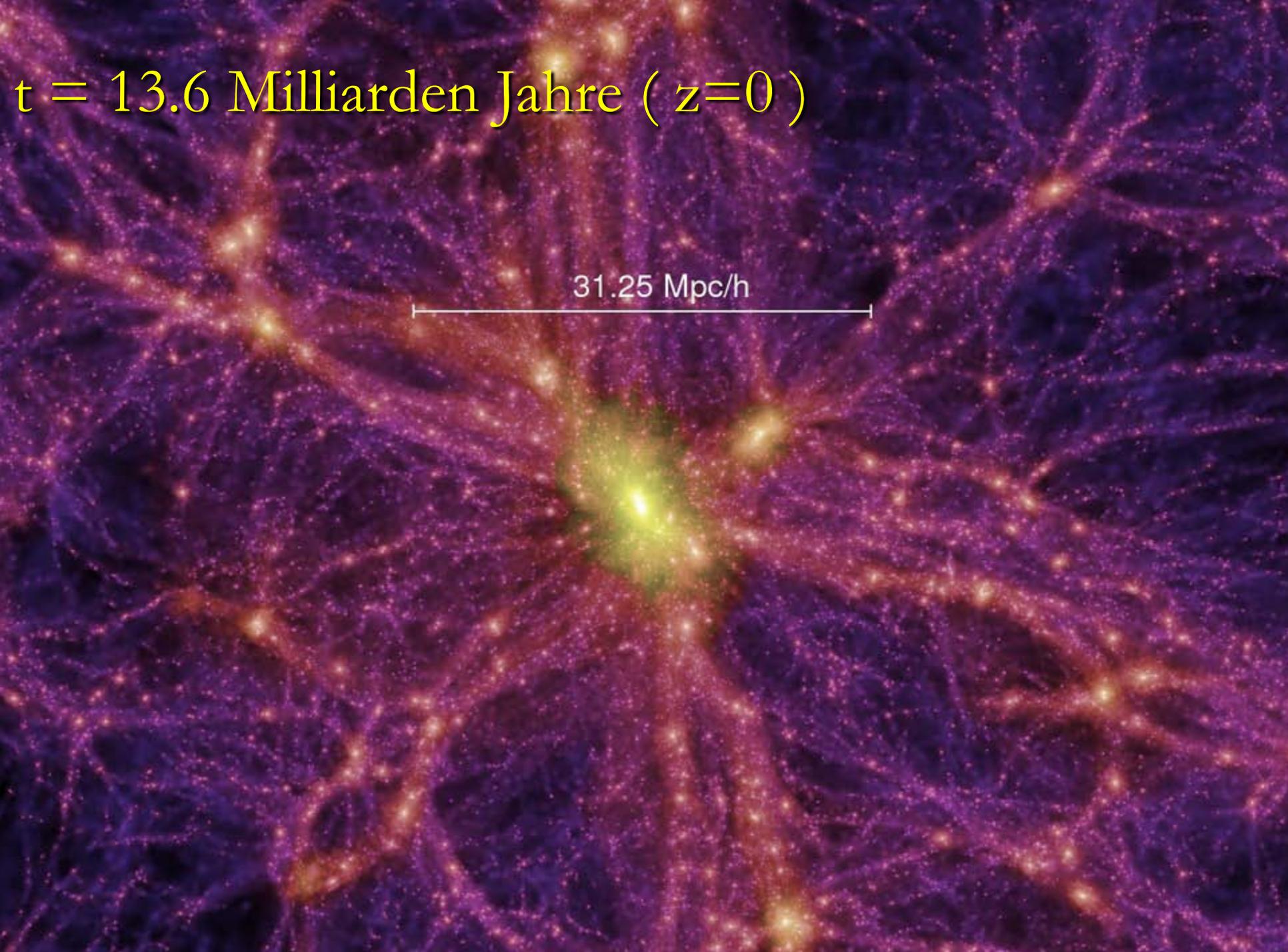
$t = 13.6$ Milliarden Jahre ($z=0$)

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 ($z=0$)

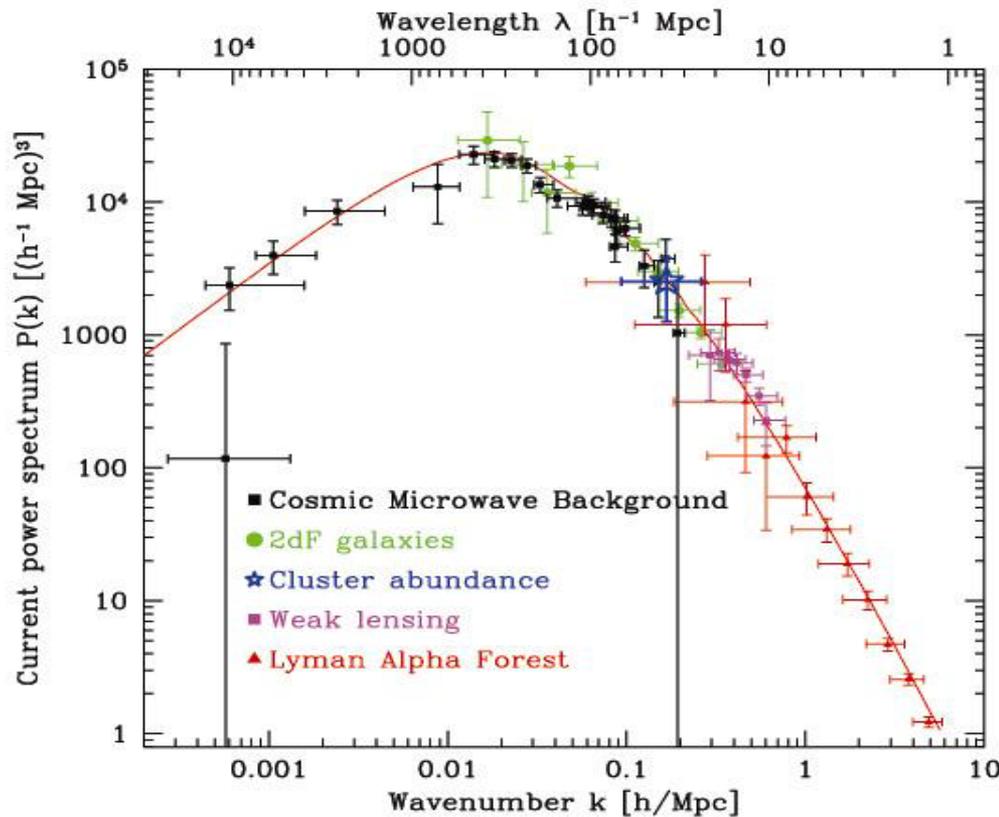
31.25 Mpc/h





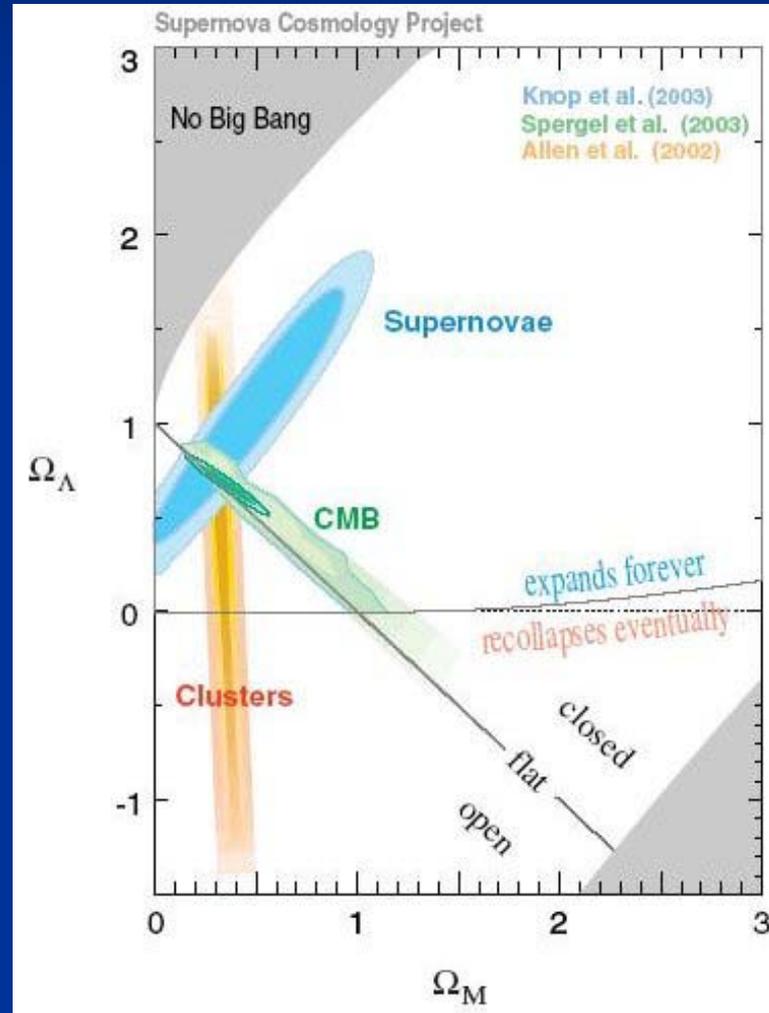
Vergleich mit Beobachtung

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

$\Omega_{dm} = 0.25$ unsichtbar klumpt

$\Omega_h = 0.7$ unsichtbar homogen

Was ist Dunkle Energie ?

Was ist die Dunkle Energie ?

Kosmologische Konstante

oder

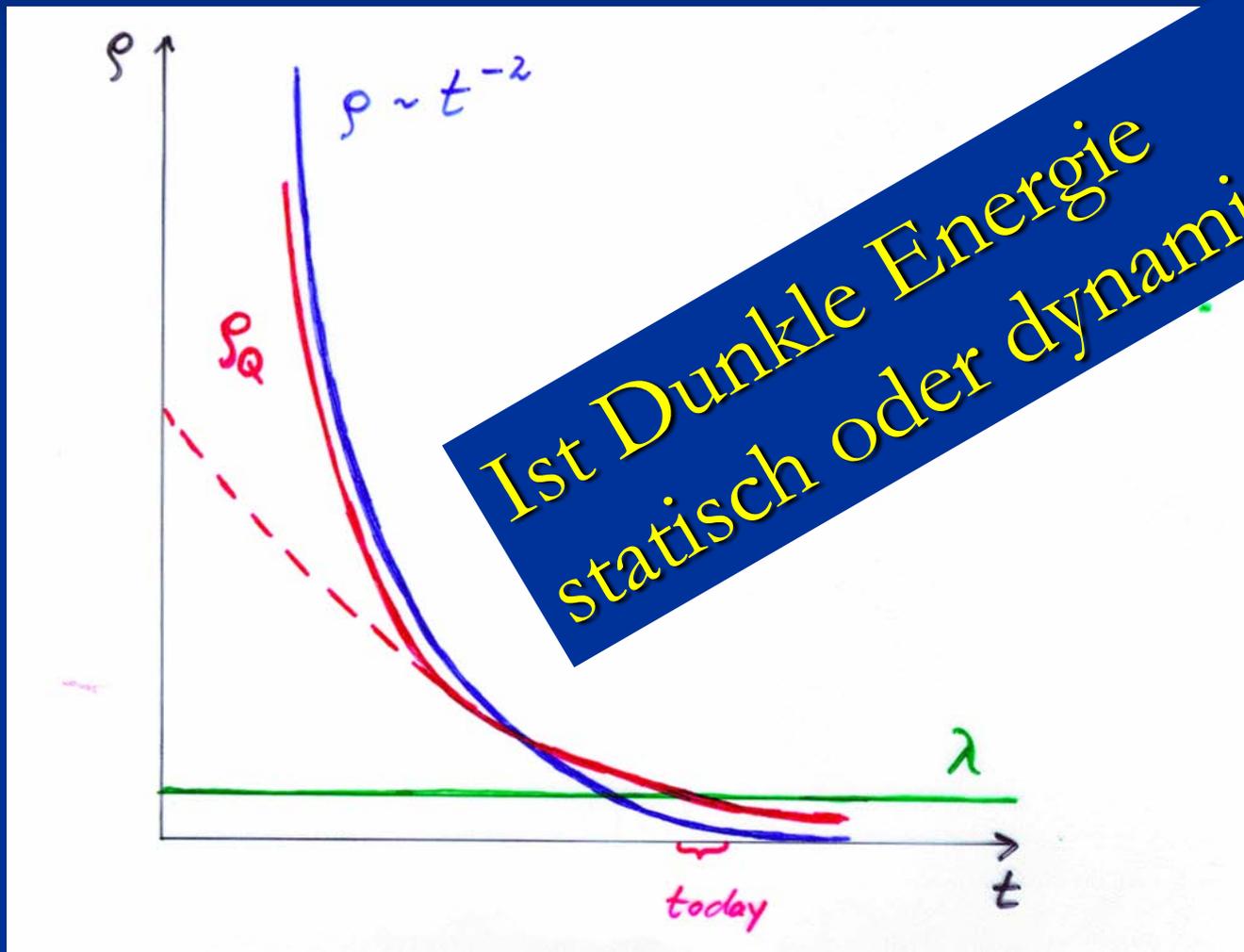
Quintessenz

oder

Modifikation der Gravitation ?

Kosm. Konst.
statisch

Quintessenz
dynamisch

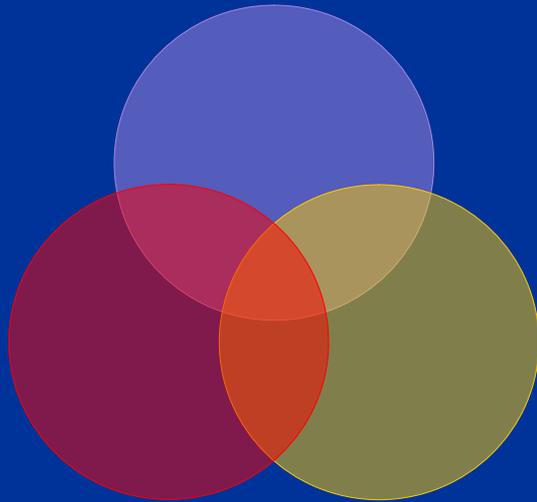


Eigenschaften der Dunklen Energie bestimmen die Zukunft des Universums

Vorhersagbarkeit für die nächsten
100 Milliarden Jahre...

Quintessenz : neue fundamentale Wechselwirkung

Starke, elektromagnetische, schwache Wechselwirkung



Gravitation

Kosmodynamik

Auf astronomischen Skalen:

Graviton

+

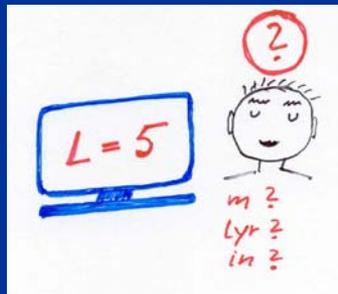
Kosmon

Vereinheitlichung
aller Wechselwirkungen

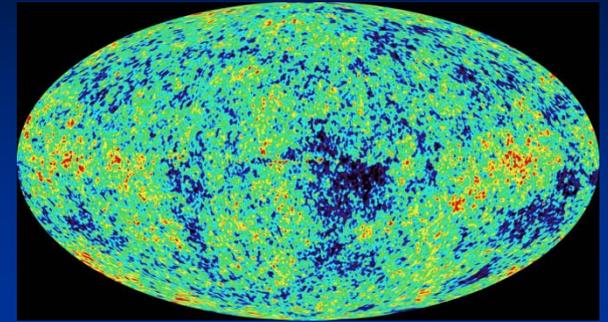
Superstrings

Zusätzliche
Dimensionen

Fundamentaler
Ursprung der
Massenskalen



$$\Omega_m + X = 1$$



$$\Omega_m : 30\%$$

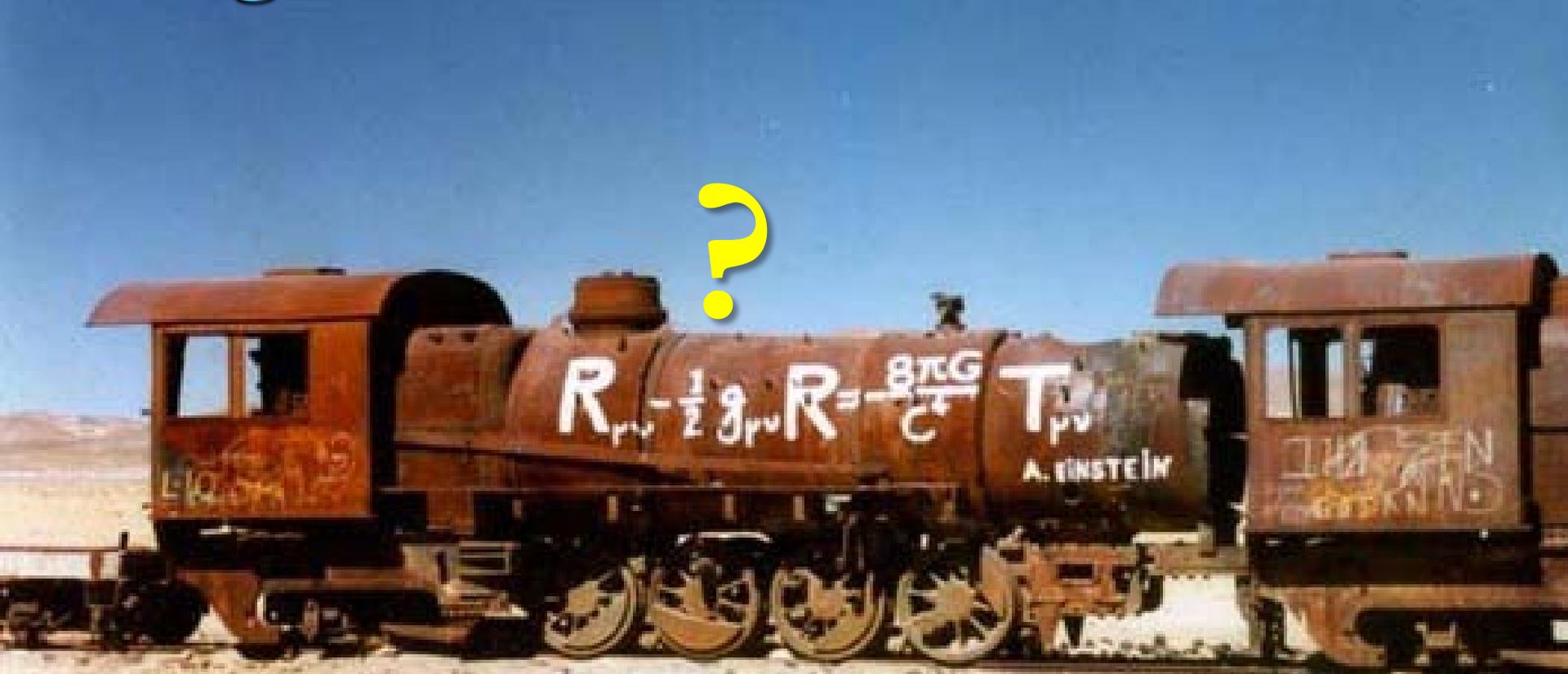


$$\Omega_h : 70\%$$

Dunkle Energie



Modifikation Einstein's allgemeiner Relativitätstheorie ?



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

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

Quintessenz

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

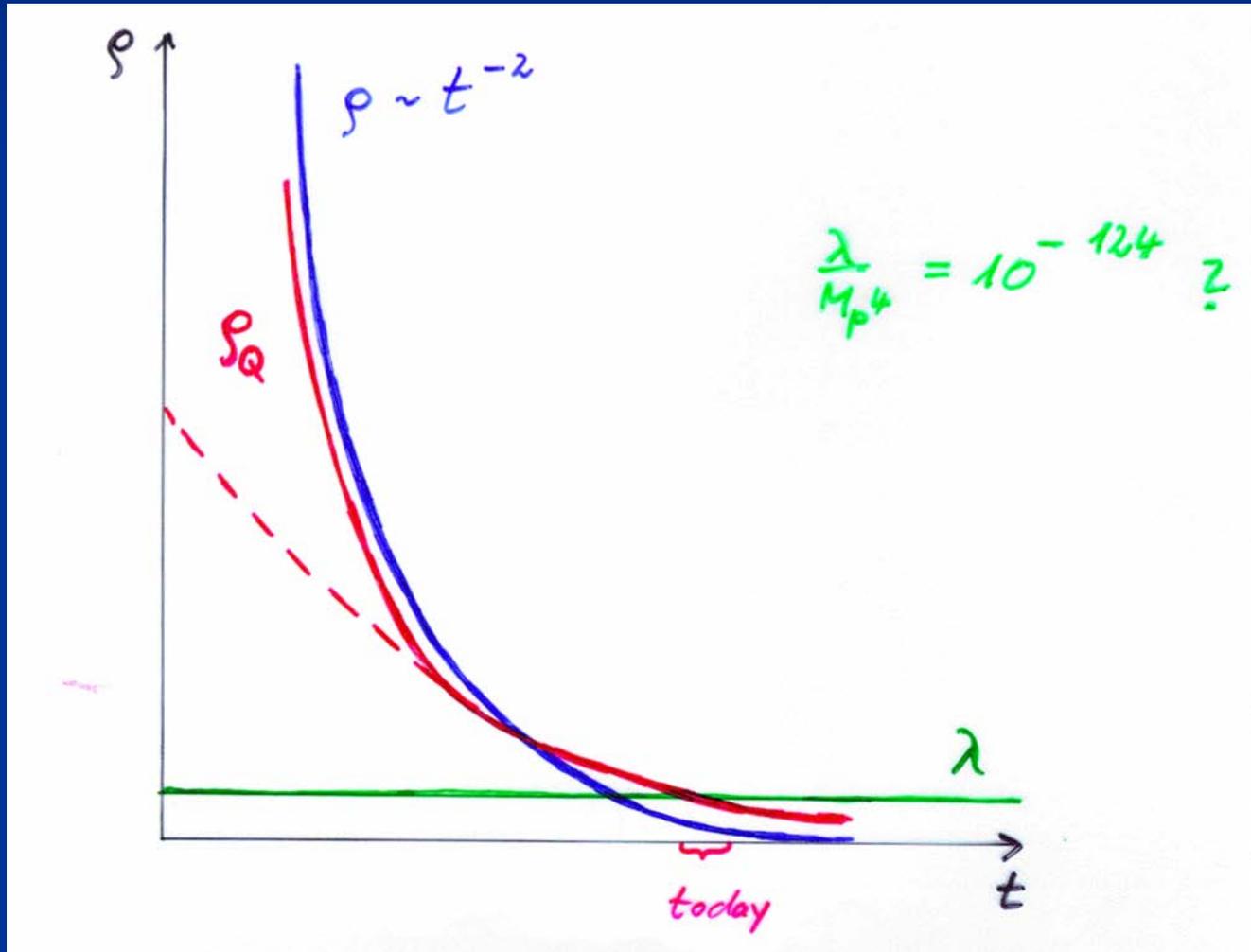
- $\rho_m/M^4 \sim a^{-3} \sim t^{-2}$ Materie dominiertes Universum
- $\rho_r/M^4 \sim a^{-4} \sim t^{-3/2}$ Strahlungsdominiertes Universum
- $\rho_r/M^4 \sim a^{-4} \sim t^{-2}$ Strahlungsdominiertes Universum

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

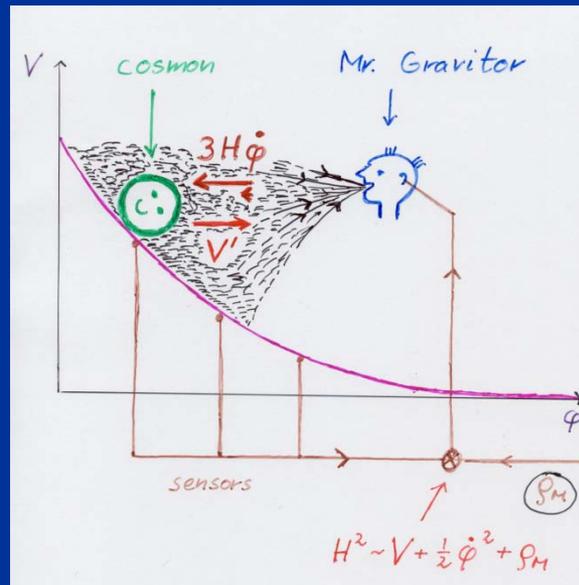
$$\Phi(x, y, z, t)$$

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

Kosmologische Gleichungen

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

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

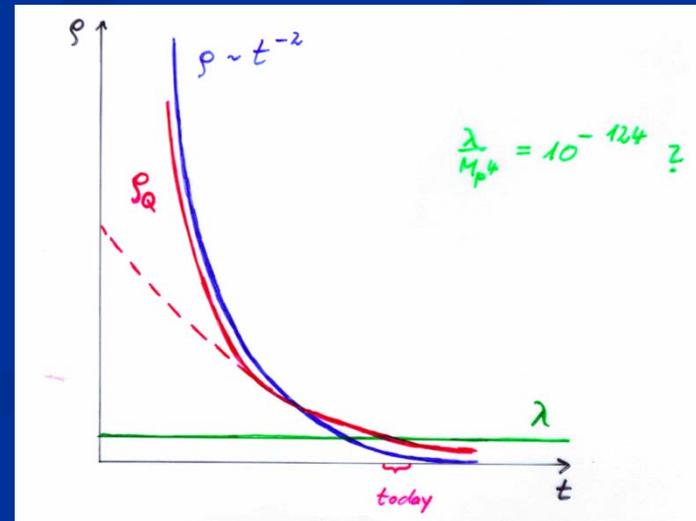


exponential potential \longrightarrow
constant fraction in dark energy

$$\Omega_h = 3/\alpha^2$$

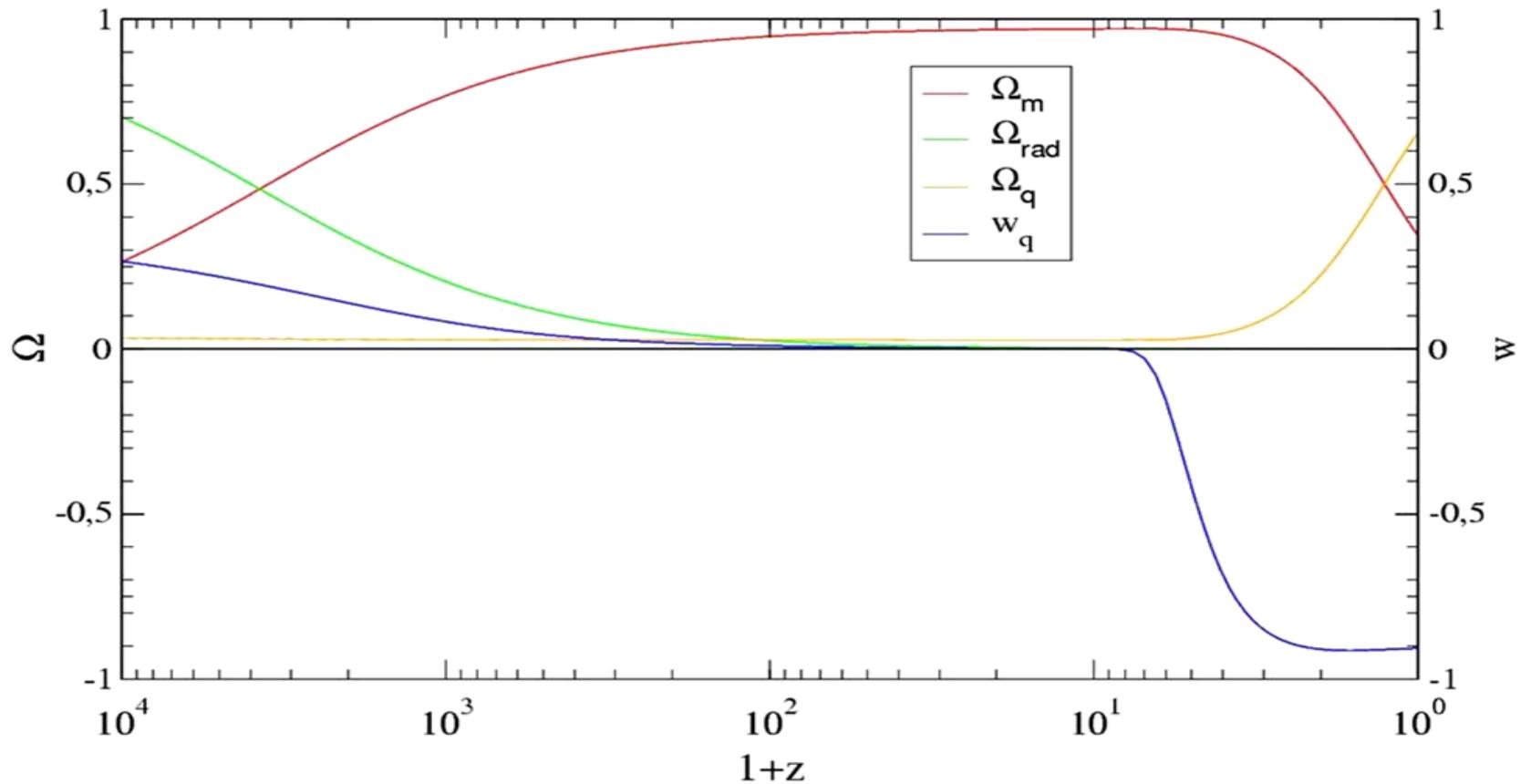
$$V(\varphi) = M^4 \exp(-\alpha\varphi/M)$$

can explain order
of magnitude
of dark energy !



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 !

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

Neutrinos in cosmology

only small fraction of energy density



only sub-leading role ?

Neutrino cosmon coupling

- Strong bounds on atom-cosmon coupling from tests of equivalence principle or time variation of couplings.
- No such bounds for neutrino-cosmon coupling.
- In particle physics : Mass generation mechanism for neutrinos differs from charged fermions. Seesaw mechanism involves heavy particles whose mass may depend on the value of the cosmon field.

Neutrino cosmon coupling

- realized by dependence of neutrino mass on value of cosmon field

$$\beta(\varphi) = -M \frac{\partial}{\partial \varphi} \ln m_\nu(\varphi)$$

- $\beta \approx 1$: cosmon mediated attractive force between neutrinos has similar strength as gravity

**growing neutrino
quintessence**

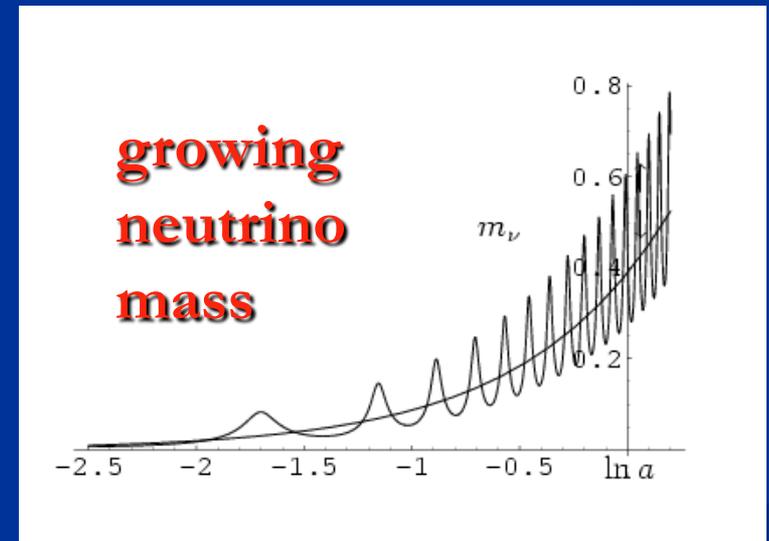
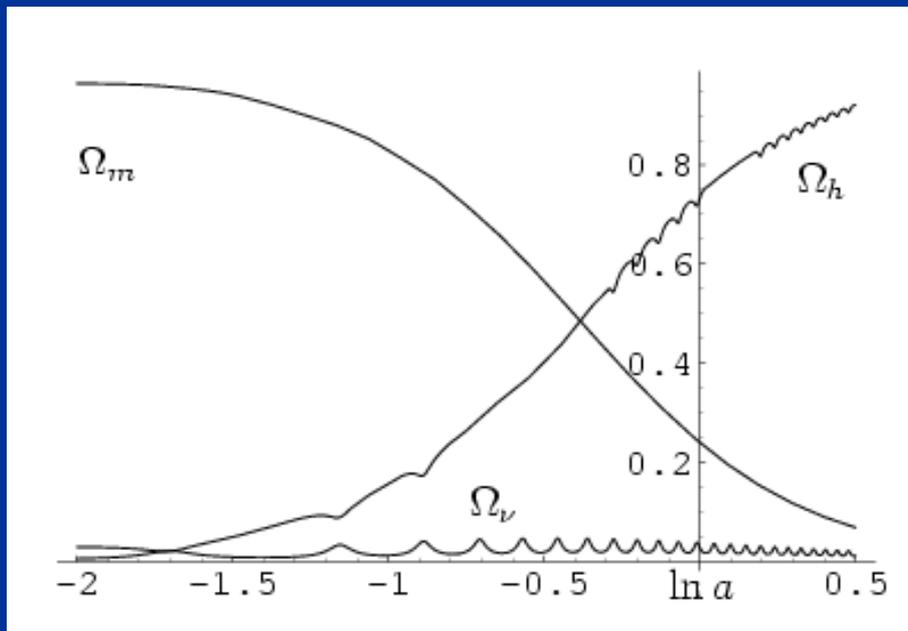
growing neutrinos change cosmological evolution

$$\ddot{\varphi} + 3H\dot{\varphi} = -\frac{\partial V}{\partial \varphi} + \frac{\beta(\varphi)}{M}(\rho_\nu - 3p_\nu),$$
$$\beta(\varphi) = -M \frac{\partial}{\partial \varphi} \ln m_\nu(\varphi) = \frac{M}{\varphi - \varphi_t}$$

modification of conservation equation for neutrinos

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_\nu + 3H(\rho_\nu + p_\nu) &= -\frac{\beta(\varphi)}{M}(\rho_\nu - 3p_\nu)\dot{\varphi} \\ &= -\frac{\dot{\varphi}}{\varphi - \varphi_t}(\rho_\nu - 3p_\nu) \end{aligned}$$

growing neutrino mass triggers transition to almost static dark energy



L. Amendola, M. Baldi, .

effective cosmological trigger
for stop of cosmon evolution :
neutrinos get non-relativistic

- this has happened recently !
- sets scales for dark energy !

connection between dark energy and neutrino properties

$$[\rho_h(t_0)]^{\frac{1}{4}} = 1.27 \left(\frac{\gamma m_\nu(t_0)}{eV} \right)^{\frac{1}{4}} 10^{-3} eV$$

present dark energy density given by neutrino mass

present equation
of state given by
neutrino mass !

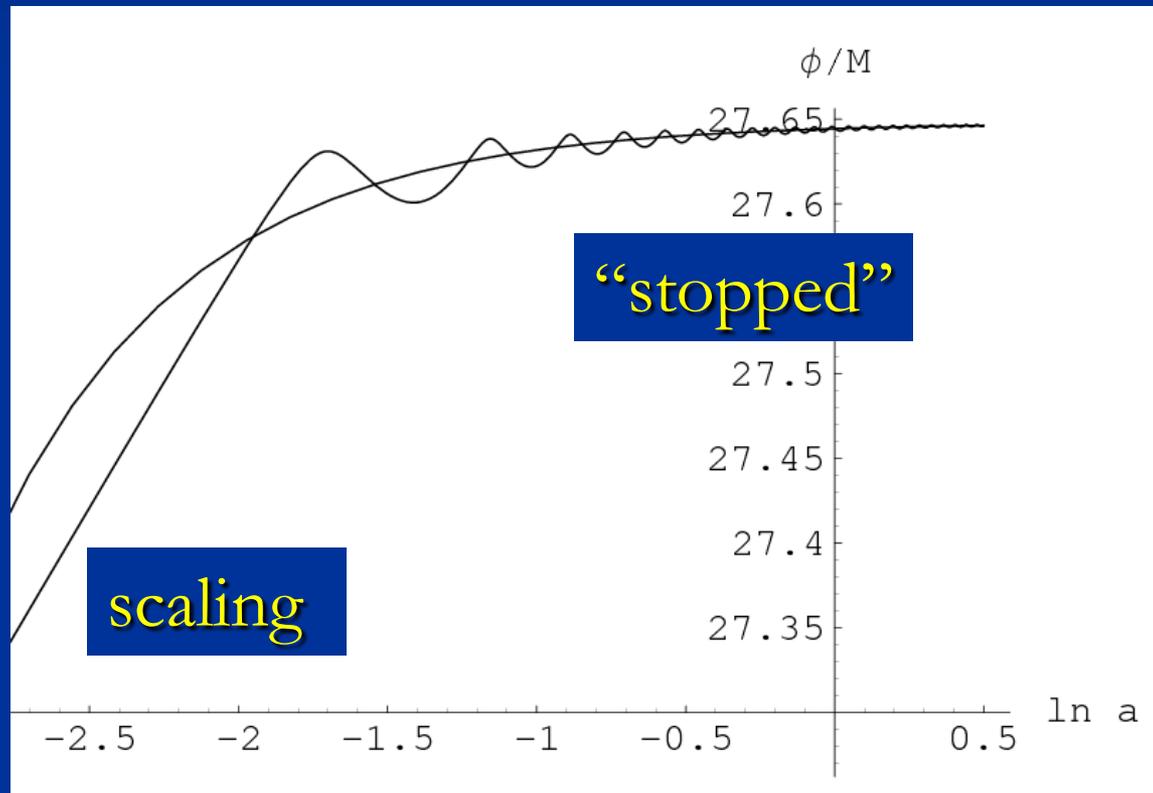
$$w_0 \approx -1 + \frac{m_\nu(t_0)}{12eV}$$

stopped scalar field
mimicks a
cosmological constant
(almost ...)

rough approximation for dark energy :

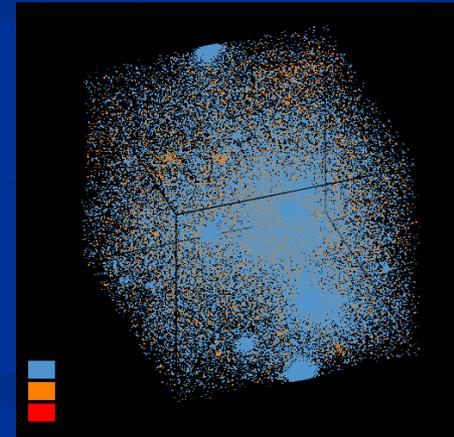
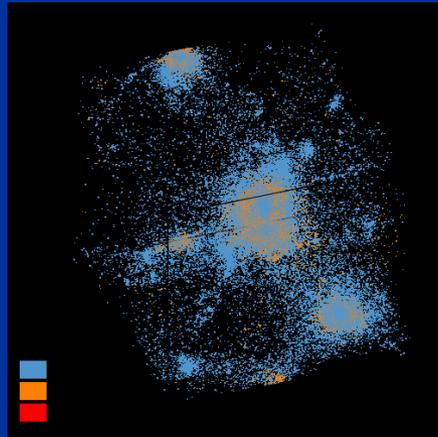
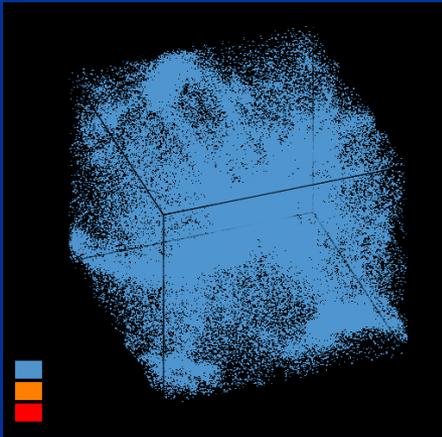
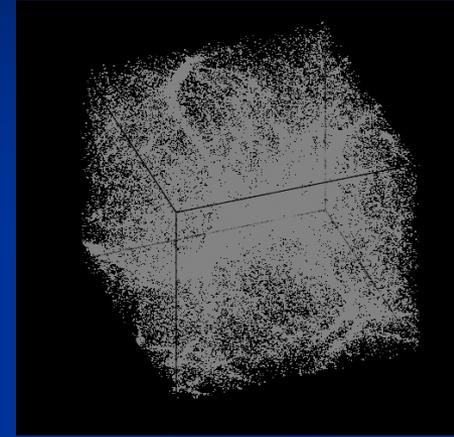
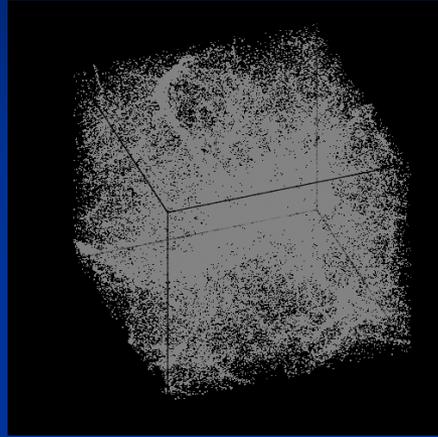
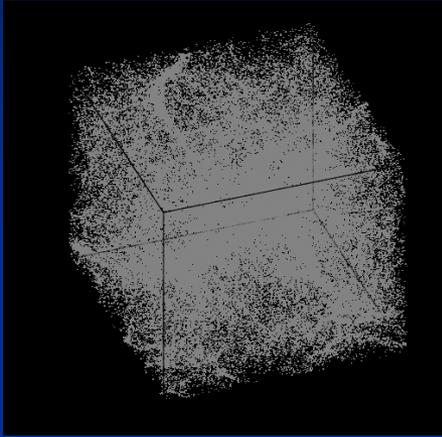
- before redshift 5-6 : scaling (dynamical)
- after redshift 5-6 : almost static
(cosmological constant)

cosmon evolution



neutrino lumps

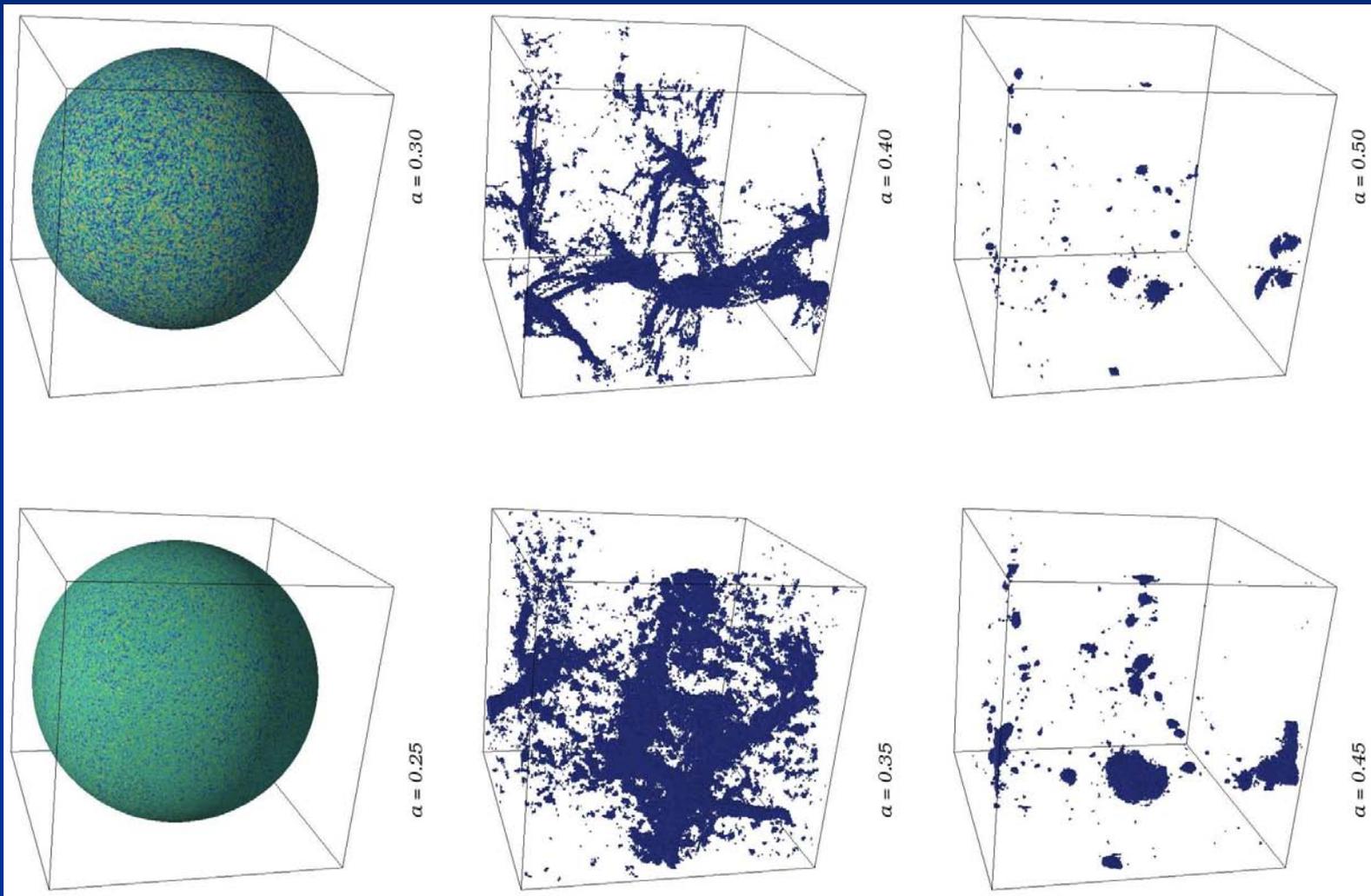
Formation of neutrino lumps



N- body simulation M.Baldi et al

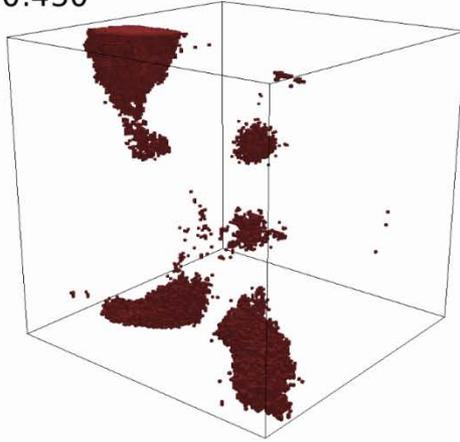
Formation of neutrino lumps

Y. Ayaita, M. Weber, ...

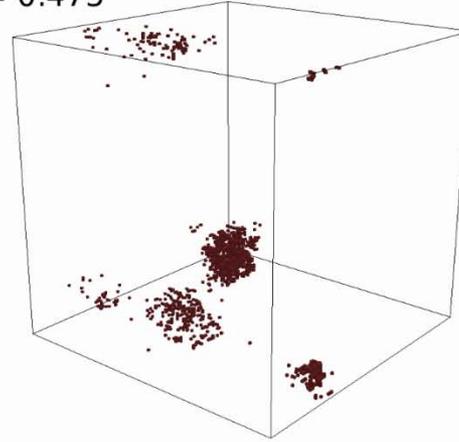


oscillating neutrino lumps

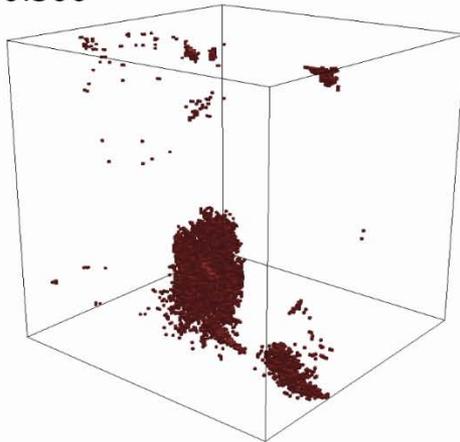
$a = 0.450$



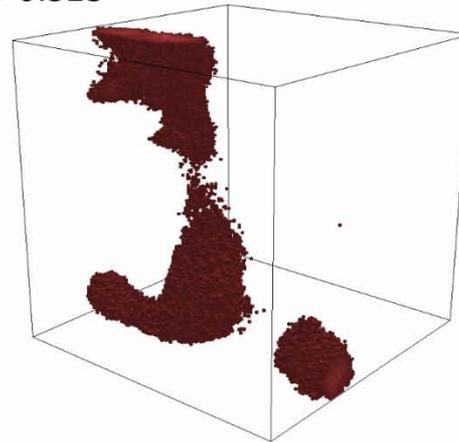
$a = 0.475$



$a = 0.500$



$a = 0.525$



observation ?

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 ?

Die Antwort der Künstlerin ...



Laura Pesce

neutrino mass

$$M_\nu = M_D M_R^{-1} M_D^T + M_L$$

$$M_L = h_L \gamma \frac{d^2}{M_t^2}$$

seesaw and
cascade
mechanism

triplet expectation value \sim doublet squared

$$m_\nu = \frac{h_\nu^2 d^2}{m_R} + \frac{h_L \gamma d^2}{M_t^2}$$

omit generation
structure

neutrino mass

$$M_\nu = M_D M_R^{-1} M_D^T + M_L$$

(?)

C.Wetterich, Nucl.Phys.B187 (1981) 343

$$M_L = h_L \gamma \frac{d^2}{M_t^2}$$

M.Magg, C.W. 1980

cascade (seesaw
II)
mechanism