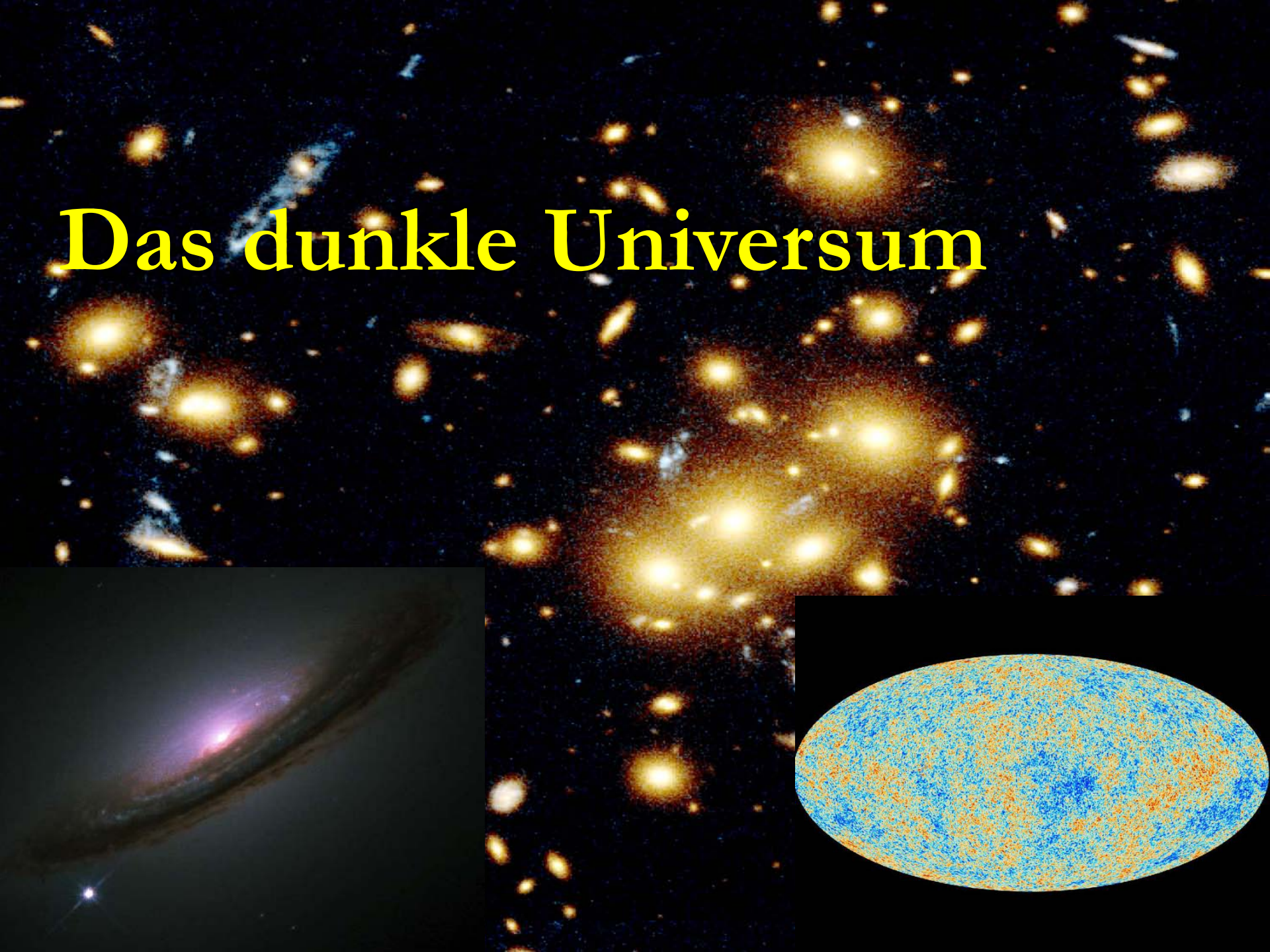


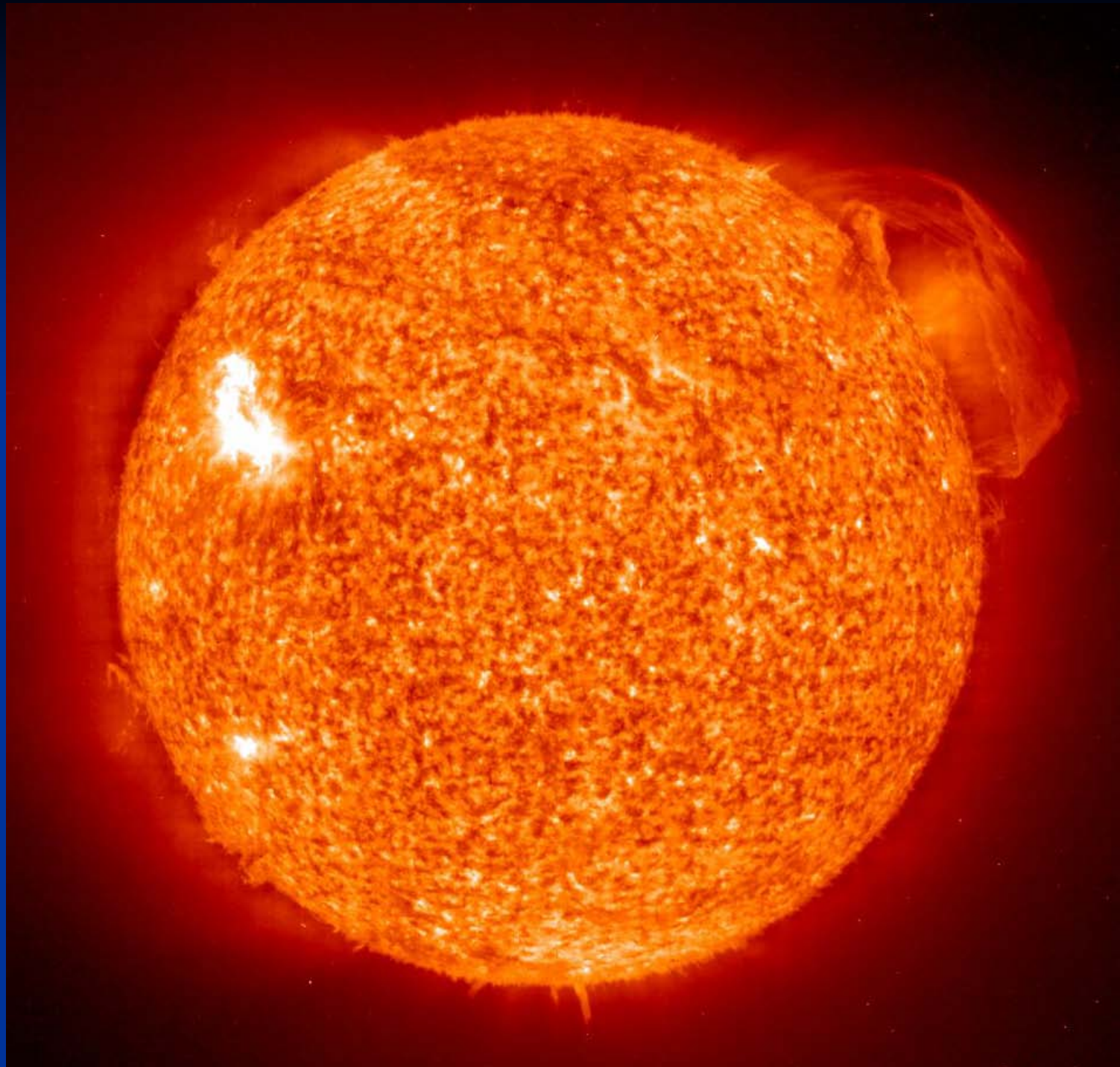
Das dunkle Universum













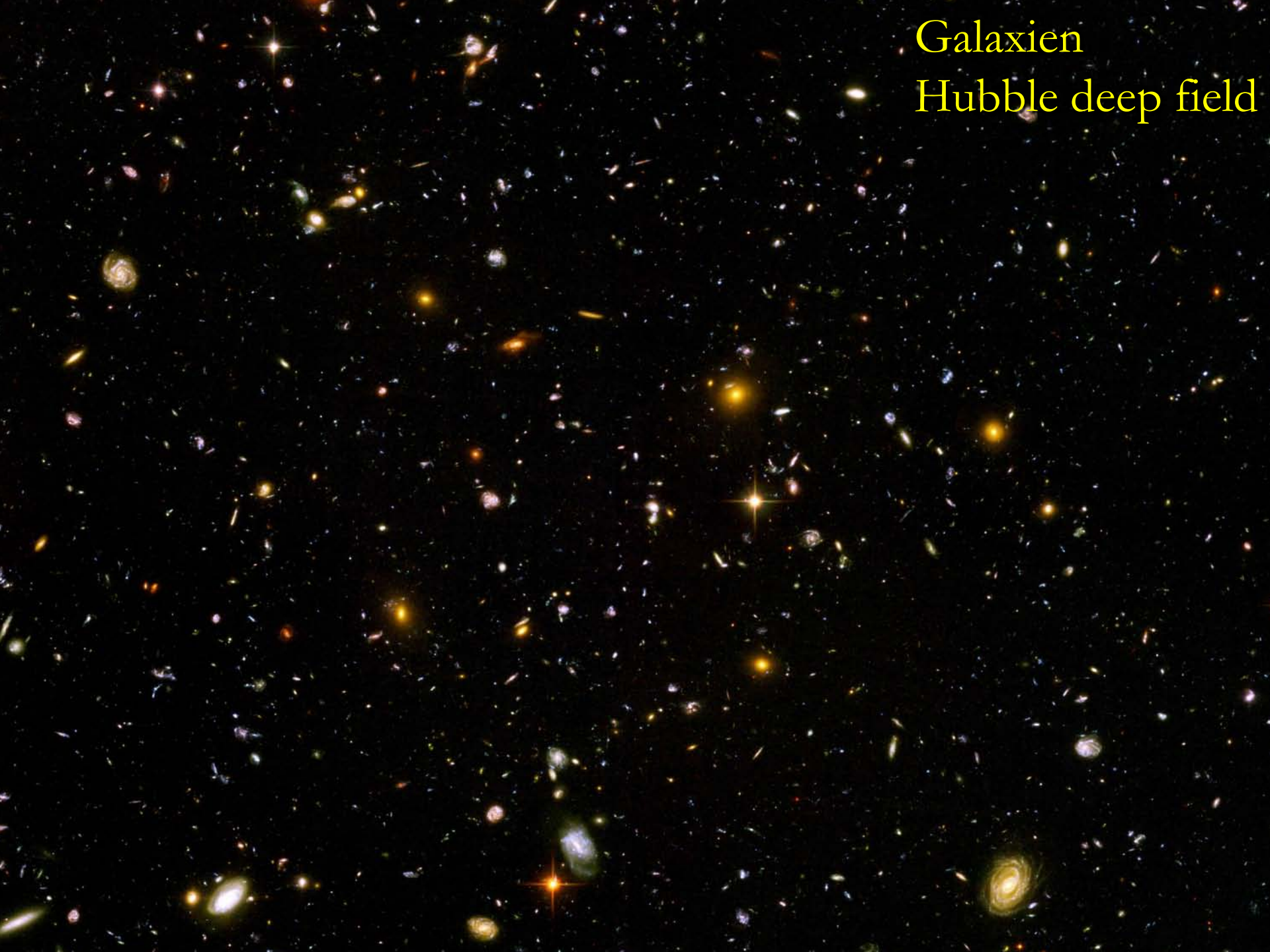






Galaxien

Hubble deep field



The background of the slide is a deep-field astronomical image, likely from the Hubble Space Telescope. It shows a vast field of galaxies and stars against a black background. The galaxies are of various shapes and sizes, some appearing as bright, diffuse clouds, others as more compact, elongated structures. The stars are represented by small, bright points of light, some with prominent diffraction spikes. The overall scene is a dense, colorful mosaic of cosmic objects.

Was ist da ,
wo man nichts sieht ?

Mehr oder weniger Bekanntes im extragalaktischen Raum :

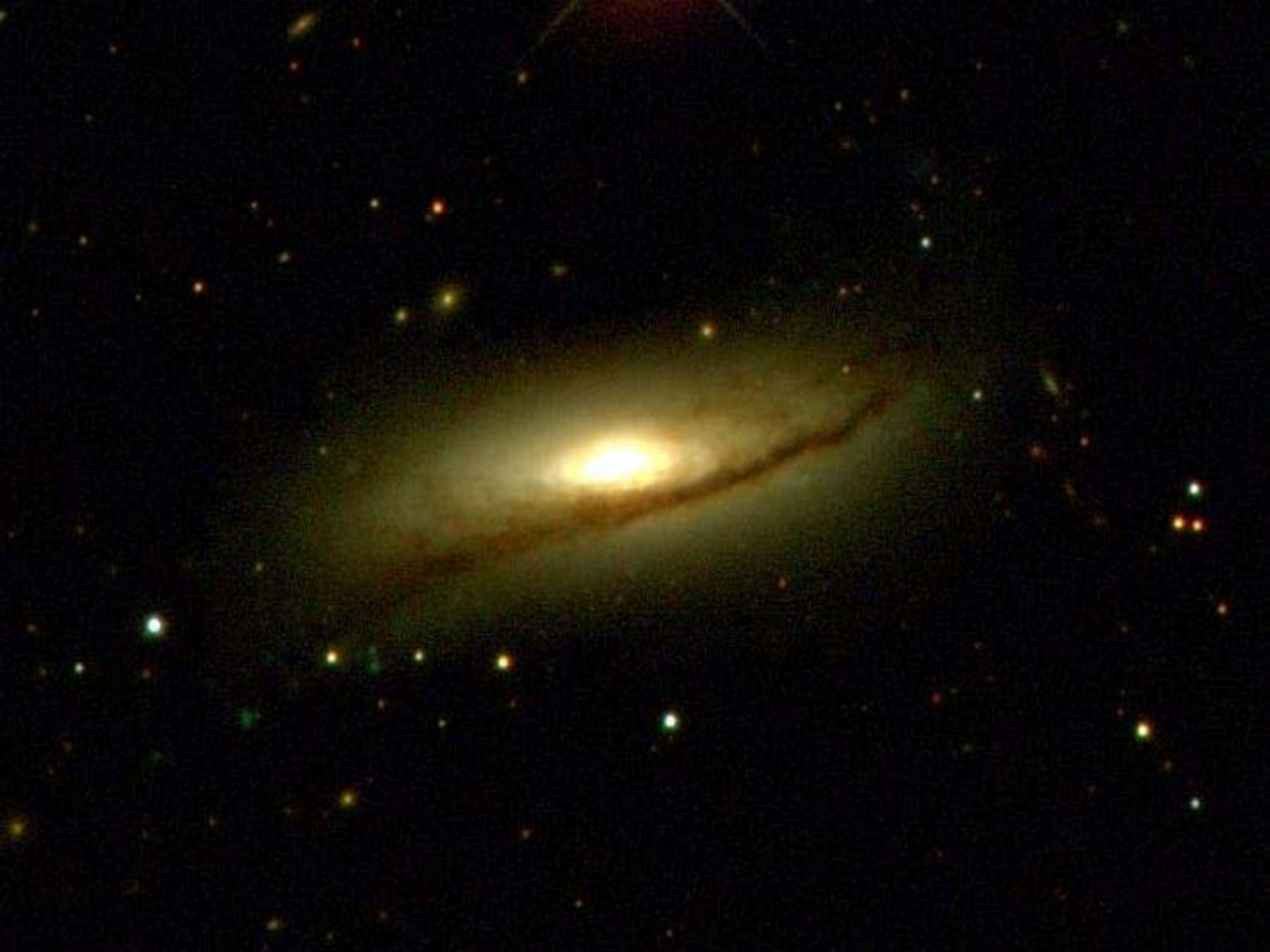
- Strahlung
- Gas von Atomen, Molekülen
- Magnetfelder
- Neutrinos
- Gravitationswellen

Alles zusammen , plus Atome in Galaxien :

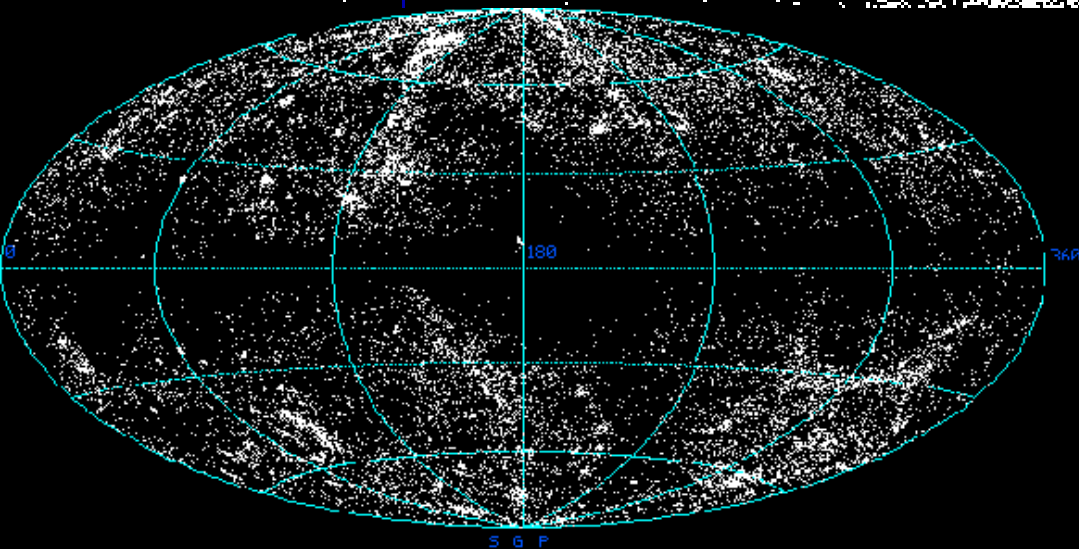
Nur 5% der Energiedichte des Universums

“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 ,

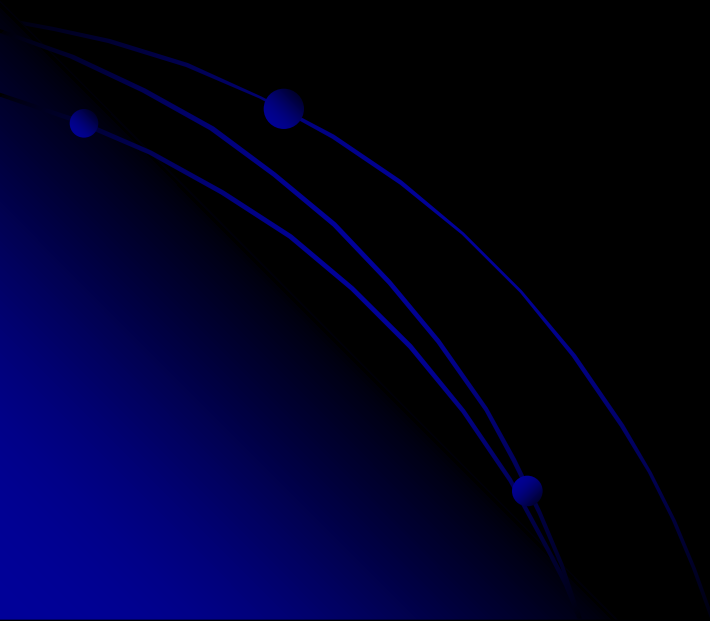
Nucleosynthese

400 000 Jahre abb
Atomphysik

Minute abb
Kernphysik



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



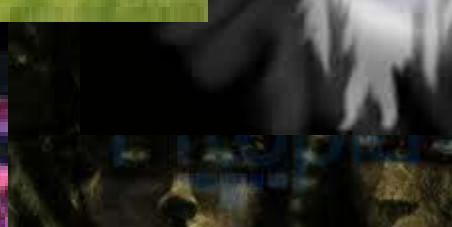
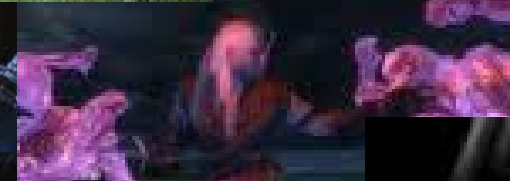
oder genauer : durchsichtig

Dunkle Materie und Dunkle Energie

95 % der Energiedichte des Universums

Das meiste ist unbekannt !

Die Jagd nach den Phantomen

A collage of various horror and supernatural images. At the top center, the title "Die Jagd nach den Phantomen" is written in a white, cursive font on a dark blue background. The collage includes: a large, glowing white ghost with a visible skeleton on the right; a pink elephant in a green field in the upper middle; a flaming skull on a motorcycle in the middle left; a grinning cat with large green eyes in the bottom left; a skeletal figure with red eyes and long claws in the bottom right; a white ghost outline in a small box on the right; and several other smaller images of dark, misty landscapes and a person on a bench.

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

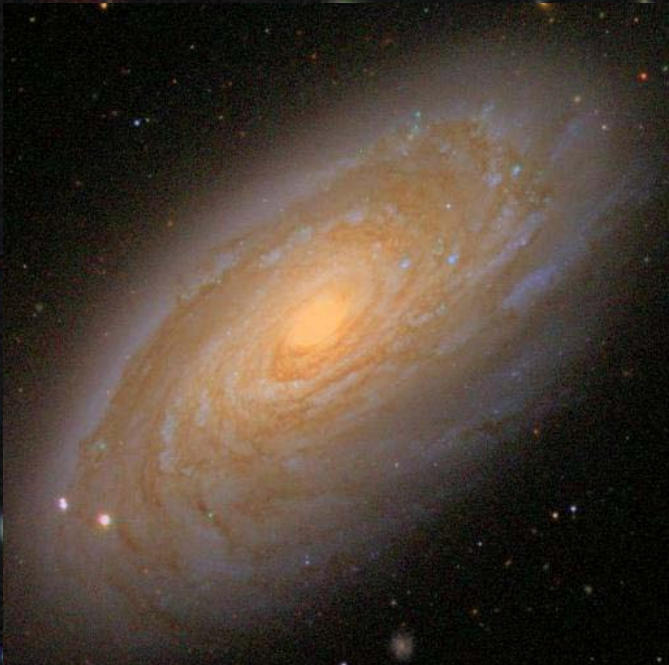
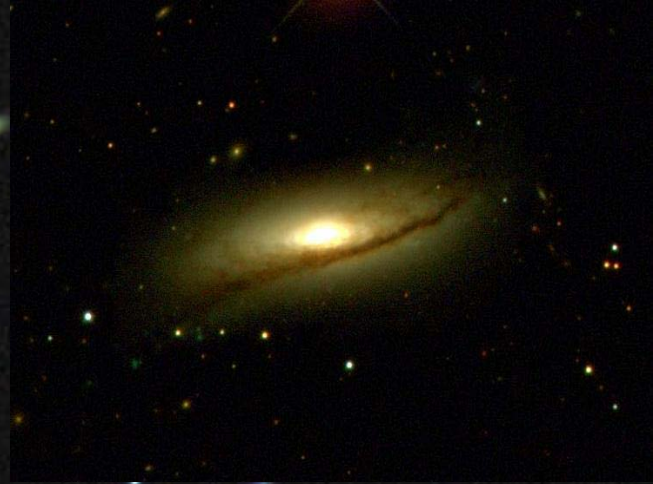
bullet cluster



Wieviele Dunkle Materie gibt es ?

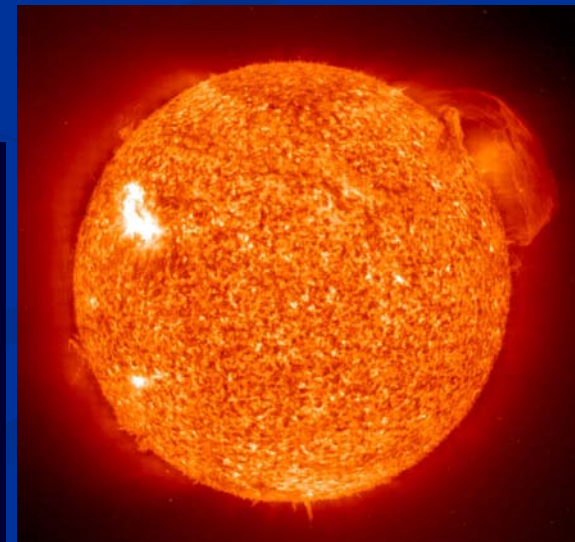
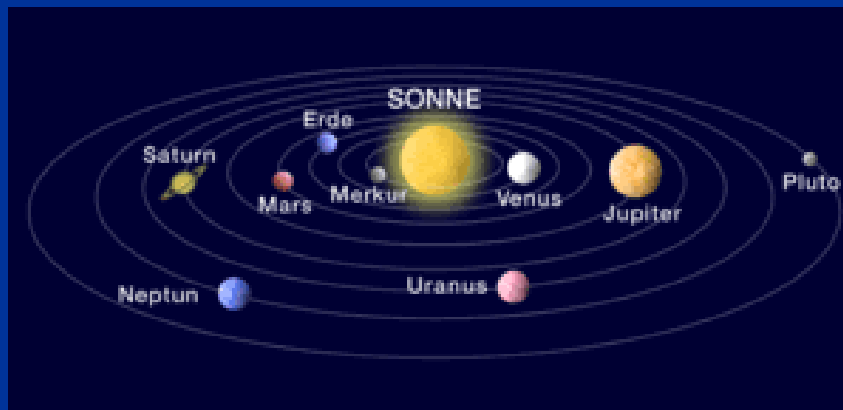
Materie :

Alles , was klumpt



Gravitations - Potenzial

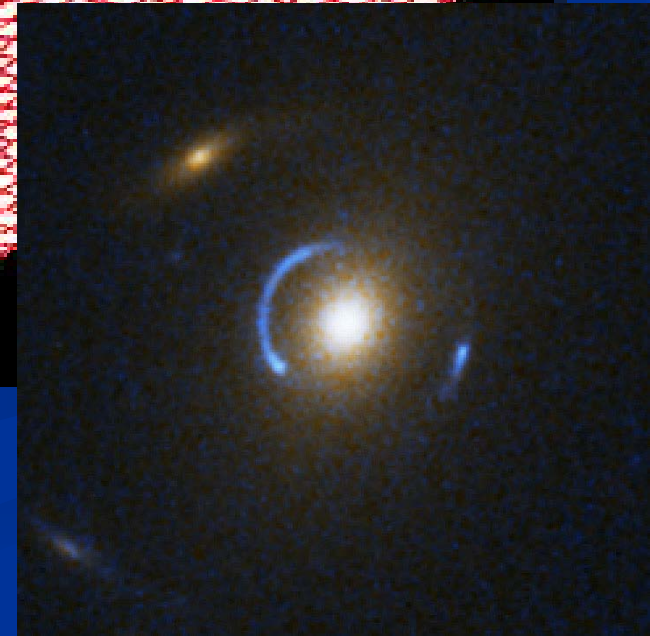
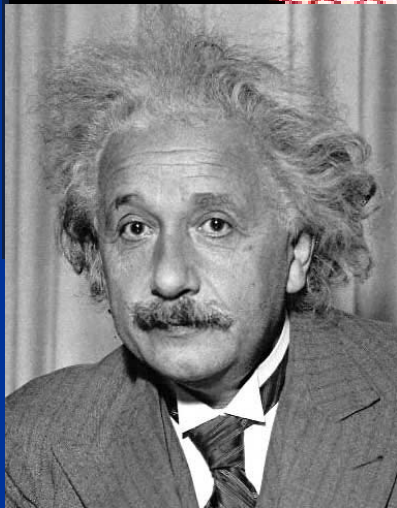
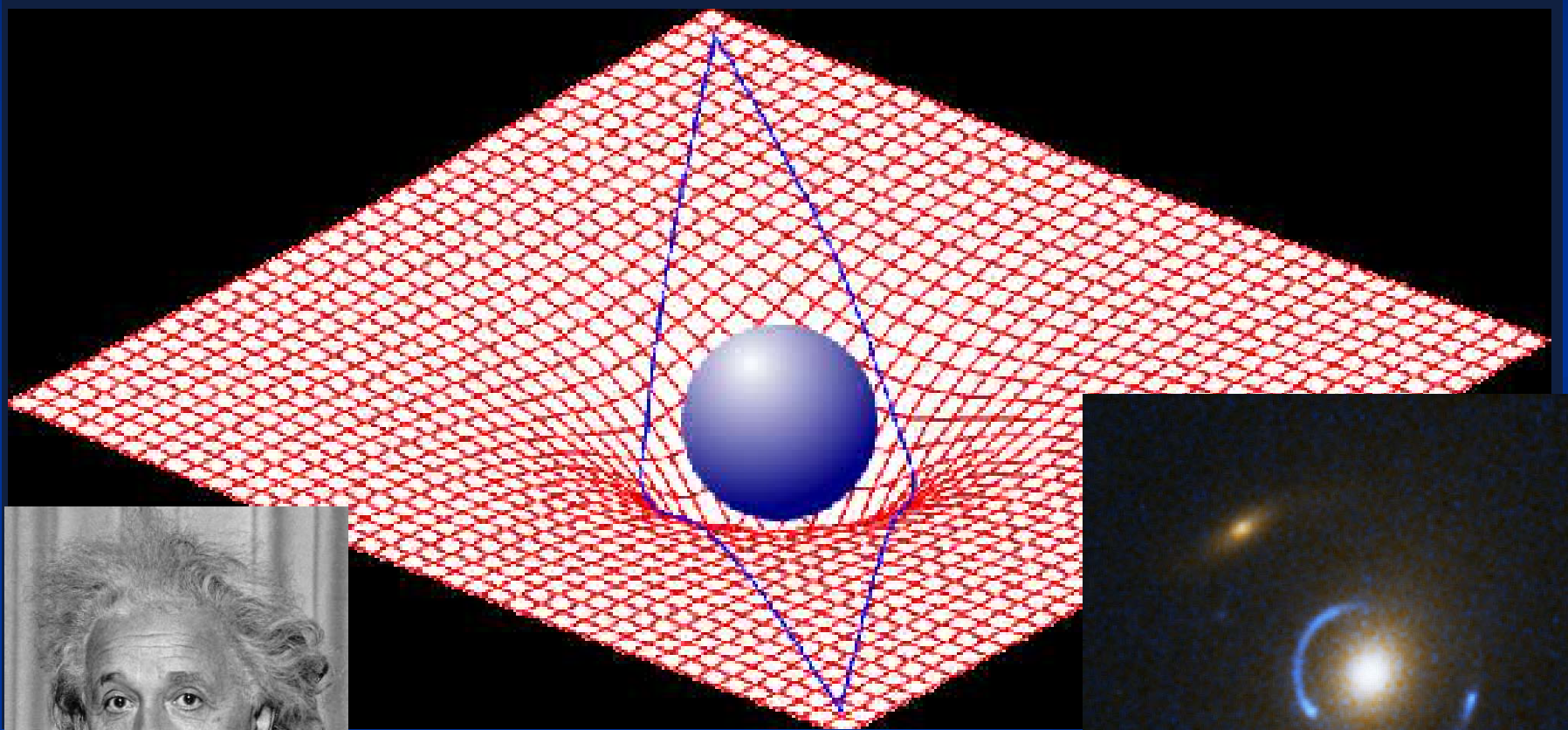
- Materieklumpen erzeugen Gravitationspotenzial (Newton)
- Dies kann vermessen werden
- Bestimmung der Masse des Klumpens
- z.B. Sonnenmasse genau bekannt





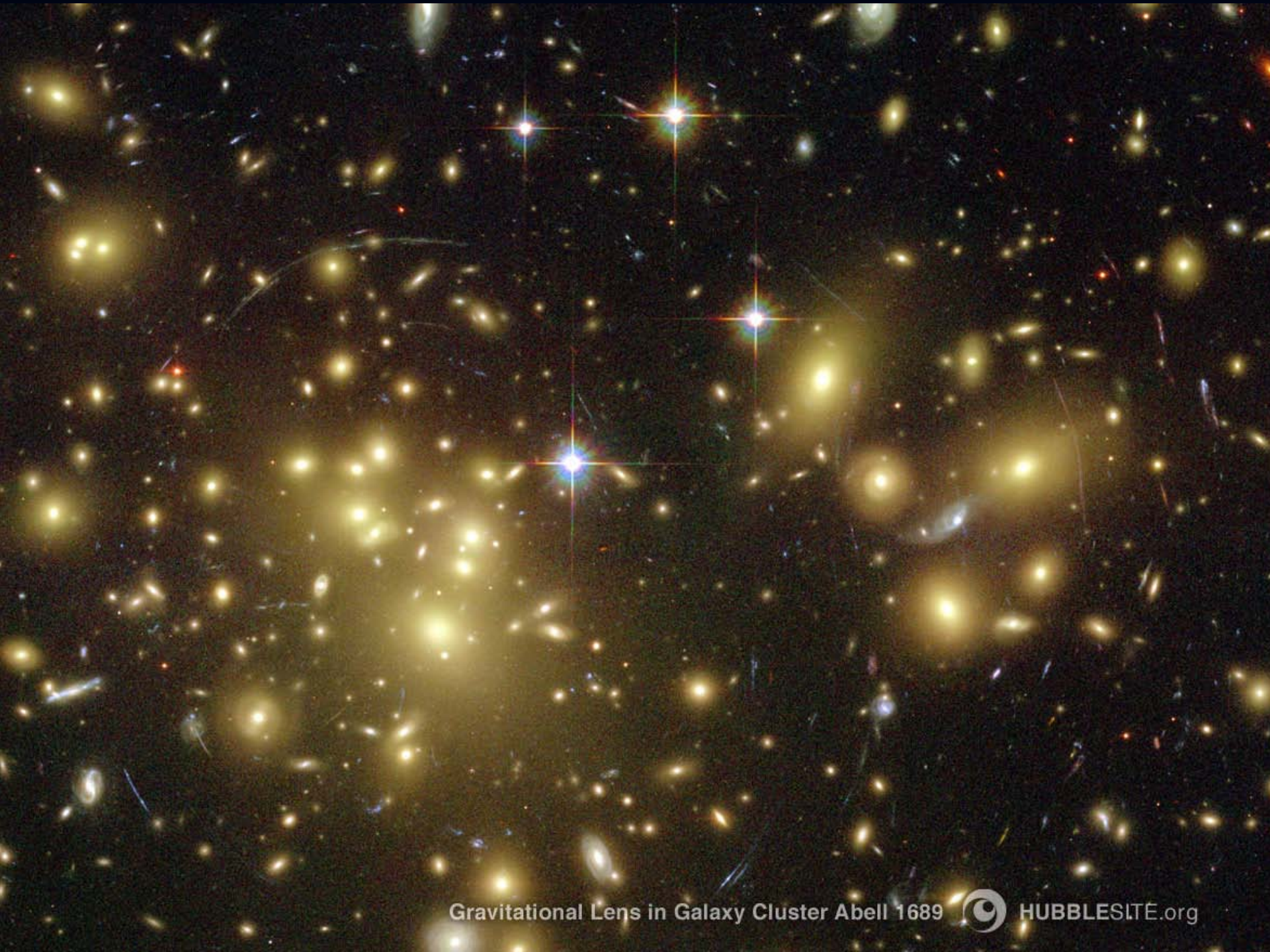
Gravitationslinse, HST

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

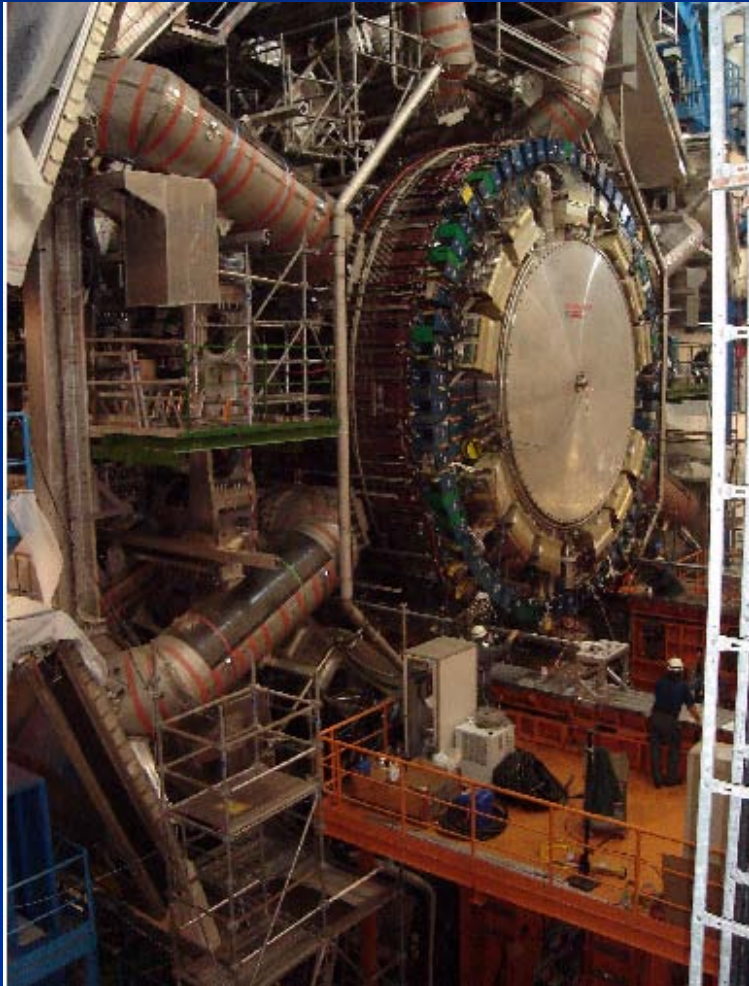


Dunkle Materie

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

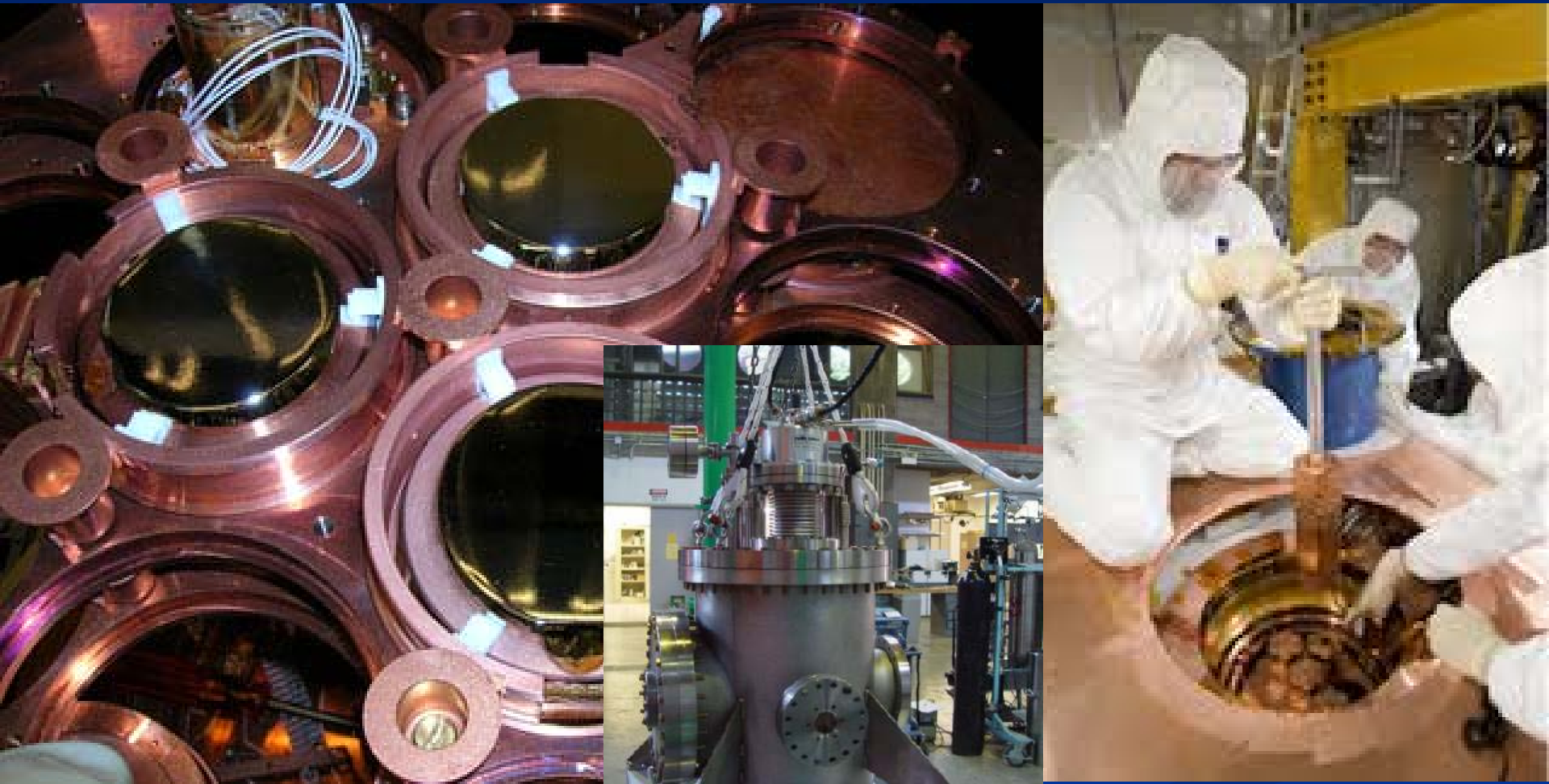
Woraus besteht Dunkle Materie ?

Dunkle Materie könnte aus noch unbekannten Elementarteilchen bestehen



LHC , CERN , Genf

Suche nach Dunkler Materie



bis heute nichts gefunden ...

Woraus besteht unser Universum ?

A classical painting depicting two men in a circular frame. The man on the left, with a beard and wearing a striped garment, holds a globe. The man on the right, also bearded and wearing a striped garment, gestures with his hand. The background is dark with a circular frame. The text 'Quintessenz !' is overlaid in yellow on the left side.

Quintessenz !

Feuer , Luft,
Wasser,
Erde !

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

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

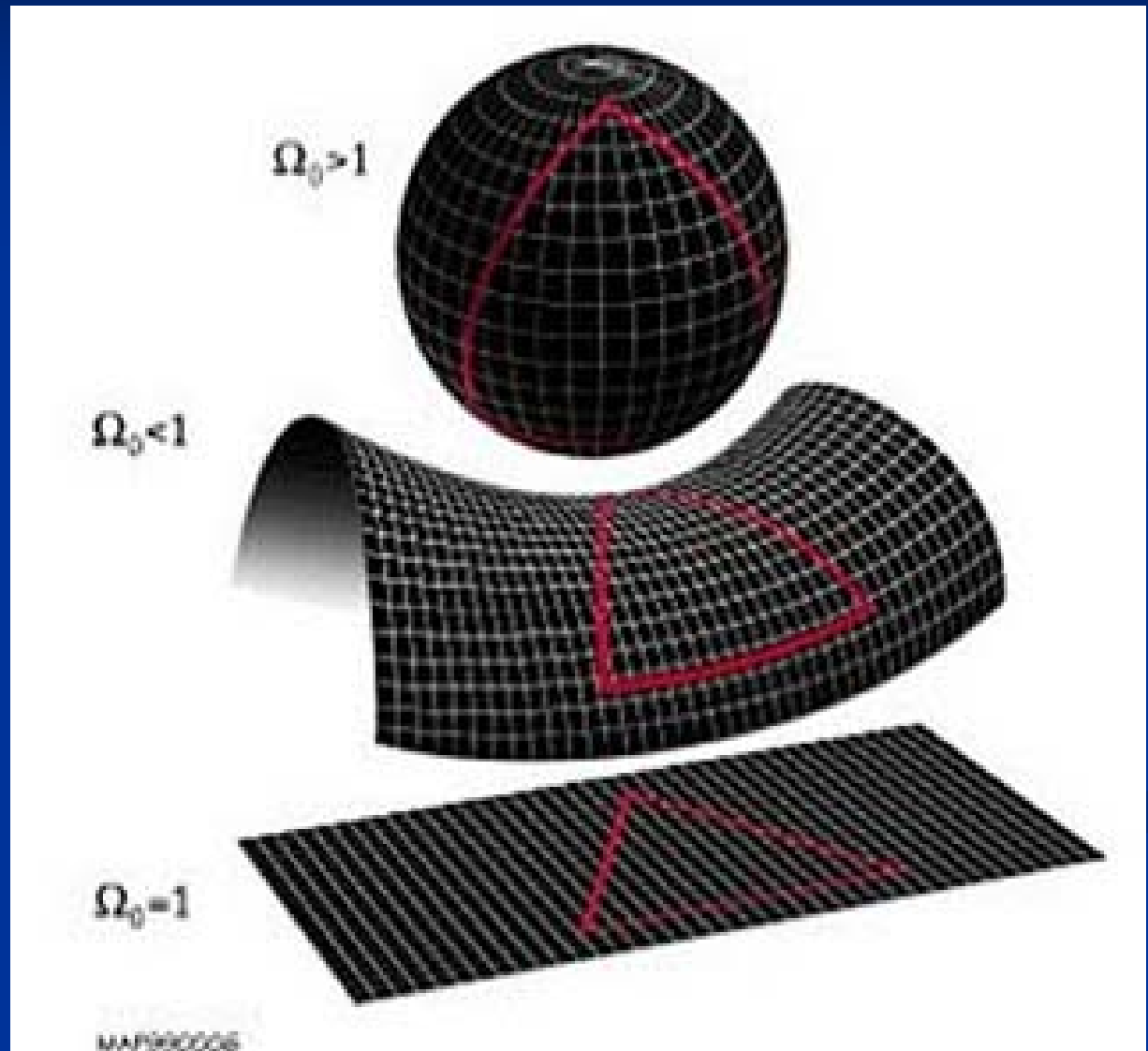
flaches Universum

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

Kugeloberfläche

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

hyperbolische
Geometrie



Woraus besteht unser
Universum ?

Materie

Atome : $\Omega_b = 0.05$

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

Dunkle Energie :

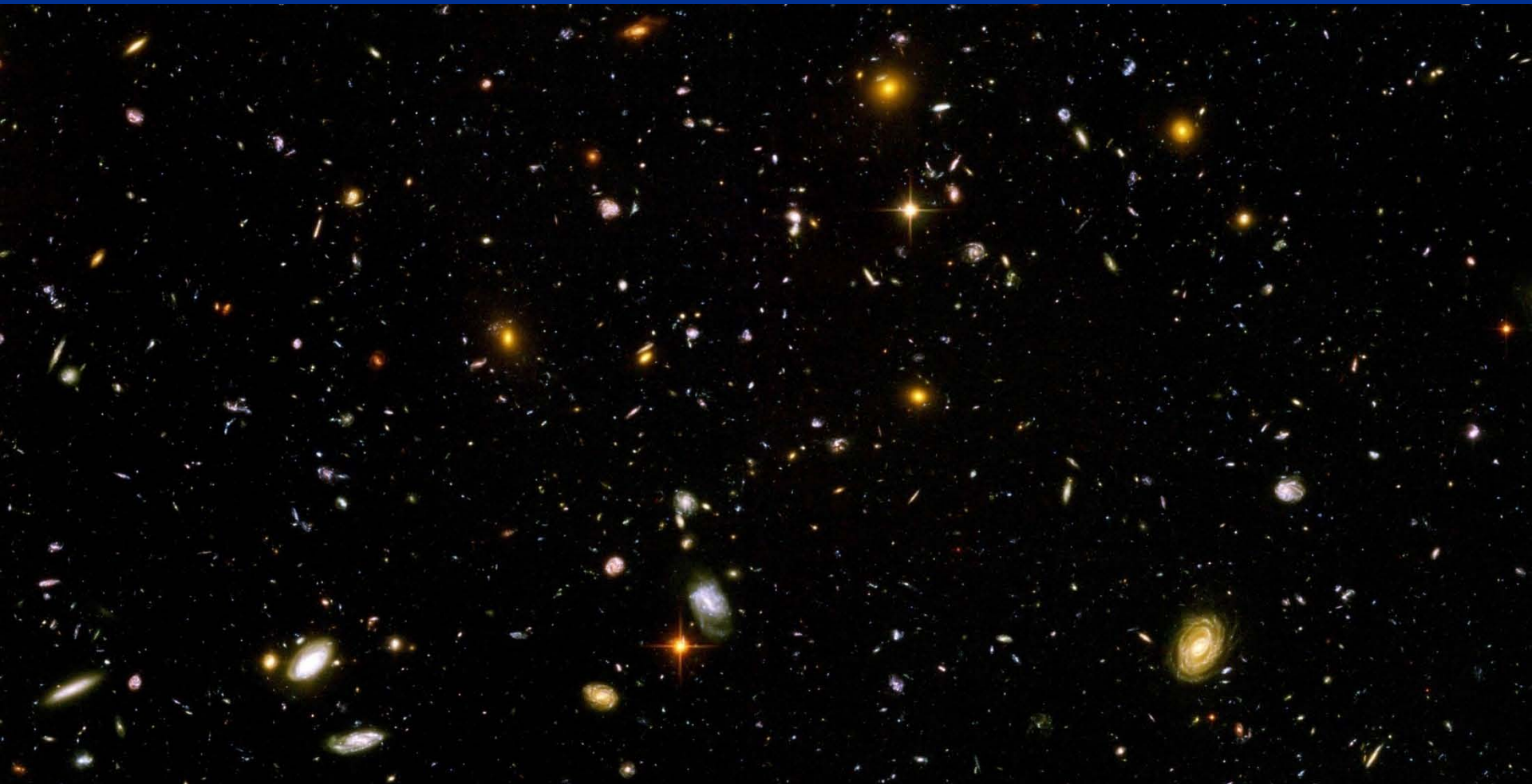
$$\Omega_h : 0.7$$

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

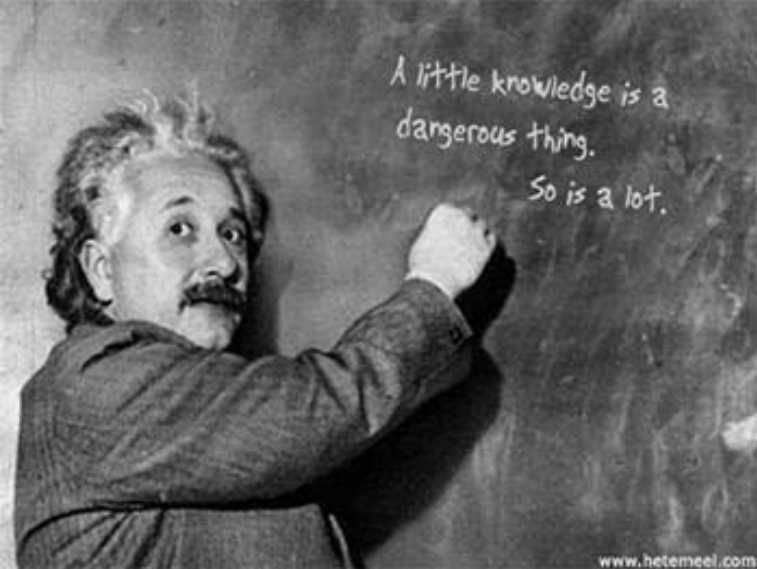
Die kosmische Renaissance:
Ende des "Dunklen Zeitalters"

← Reionisation beendet.
Das Universum ist transparent.

Galaxien entwickeln sich

Das Sonnensystem entsteht

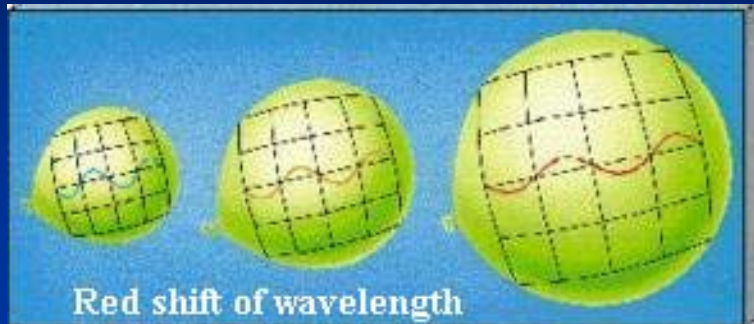
Heute: Astronomen
erklären das Universum



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

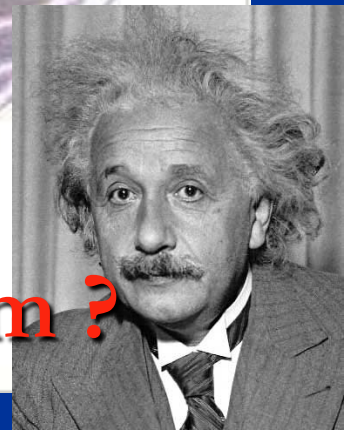


Expansion des Universums



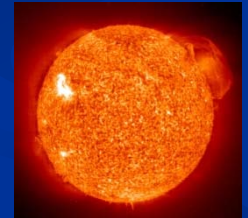
Expanding distance between galaxies

Hmm?



Expansion des Universums

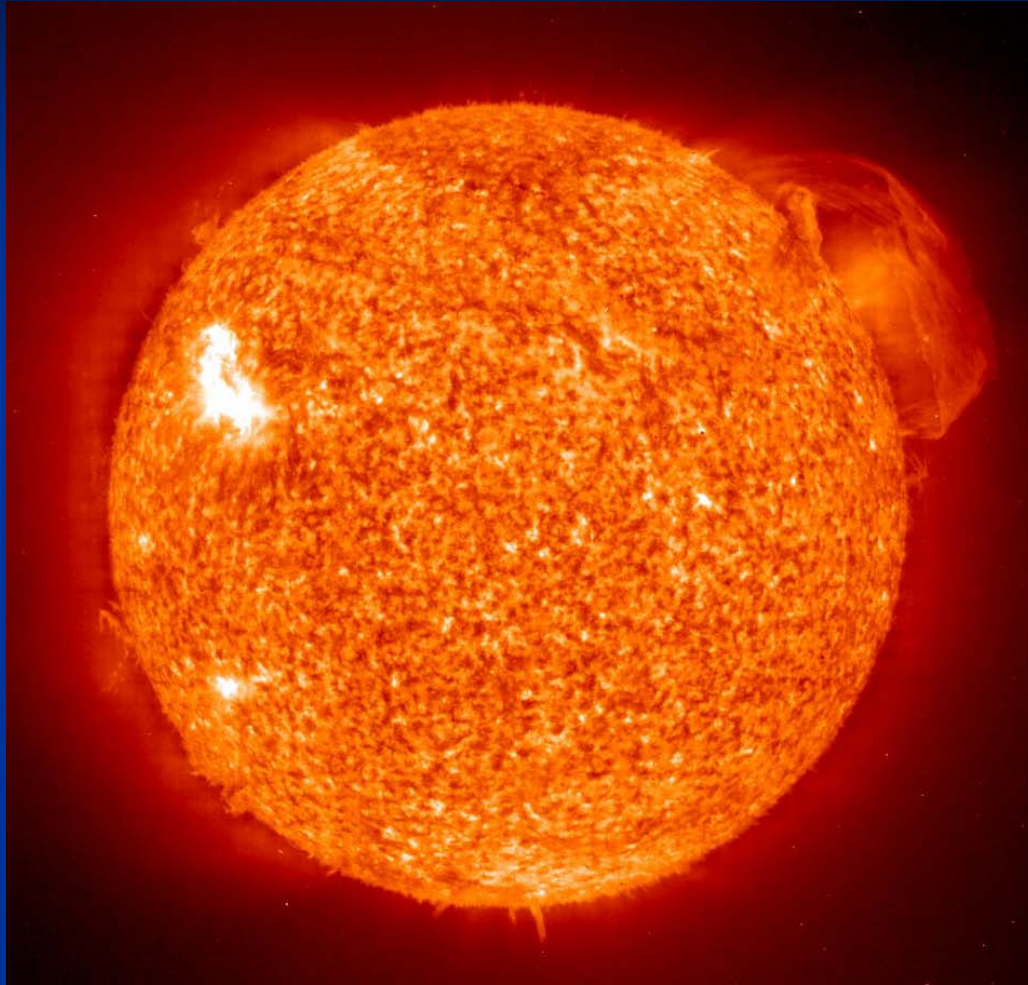
- Der Raum zwischen den Galaxienhaufen dehnt sich aus.
- Früher war das Universum dichter, ... und heißer.
- Zurückverfolgung der Einstein'schen kosmologischen Gleichungen :
Urknall, extrem heißer Feuerball !
- Bis ca 400 000 Jahre nach dem Urknall : heißes Plasma aus Protonen, Elektronen und Strahlung



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 : fiat lux
- 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

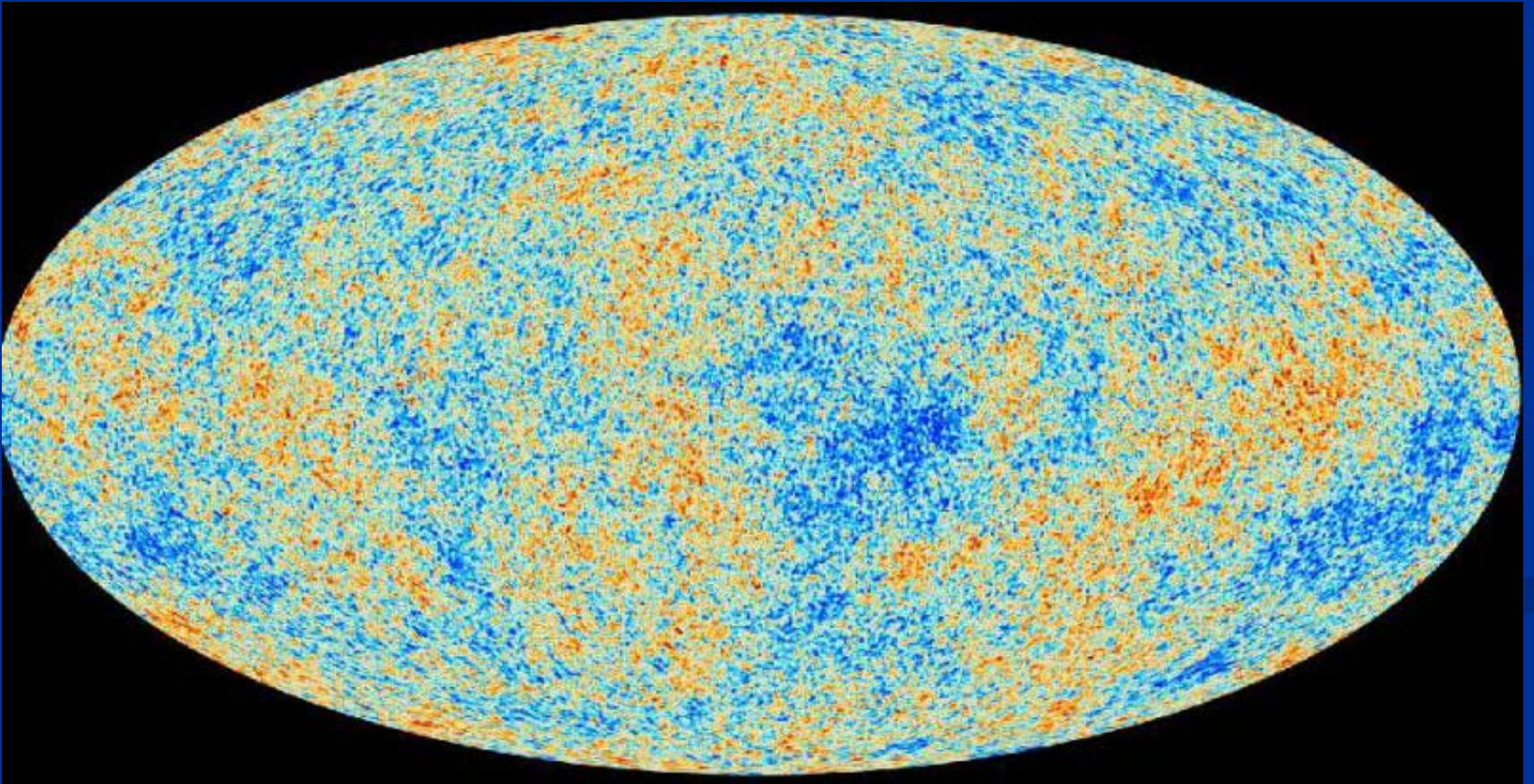
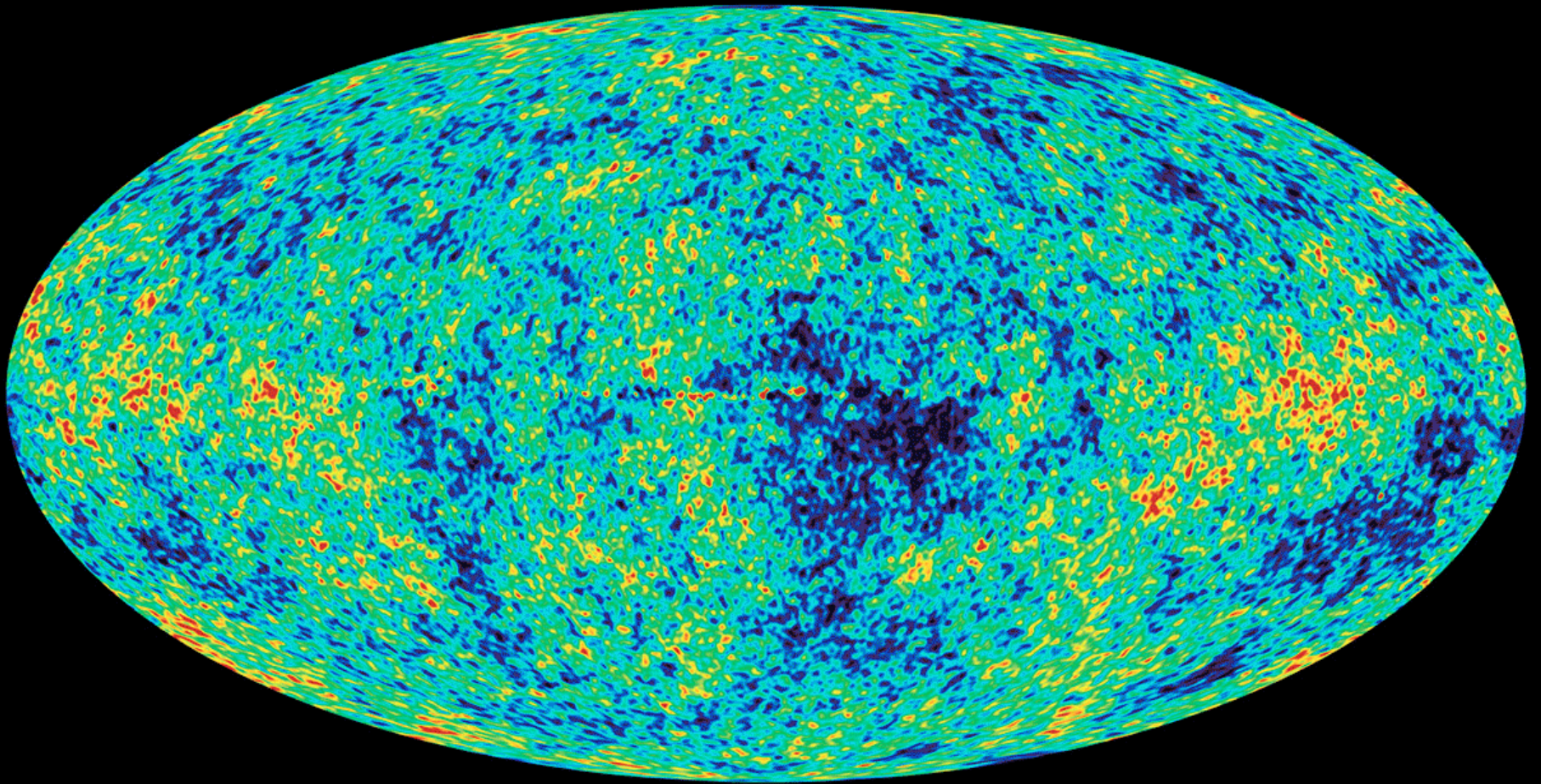


Foto des Urknalls



Bestimmung der Energiedichte des Universums

Bestimmung der Energiedichte des Universums

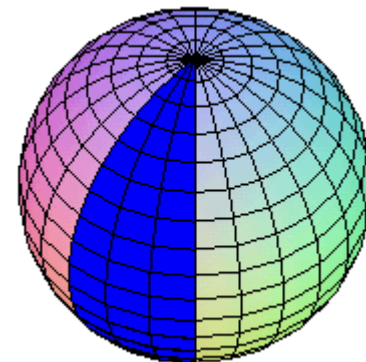
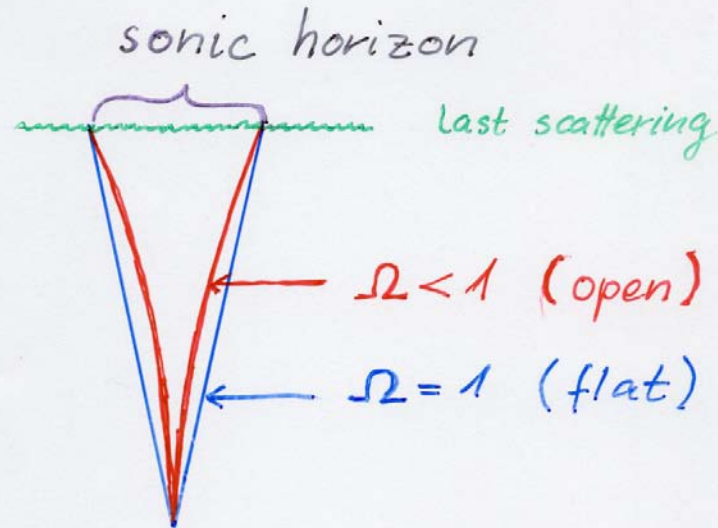
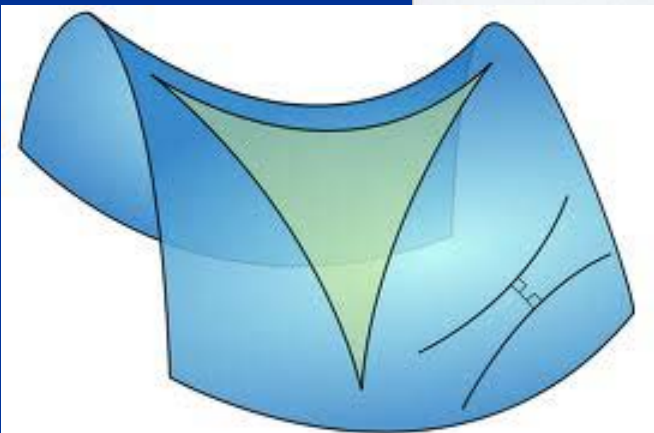
Ω_{tot} bestimmt die Geometrie des Universums :
kann vermessen werden

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

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

Bestimmung durch “Foto des Urknalls”

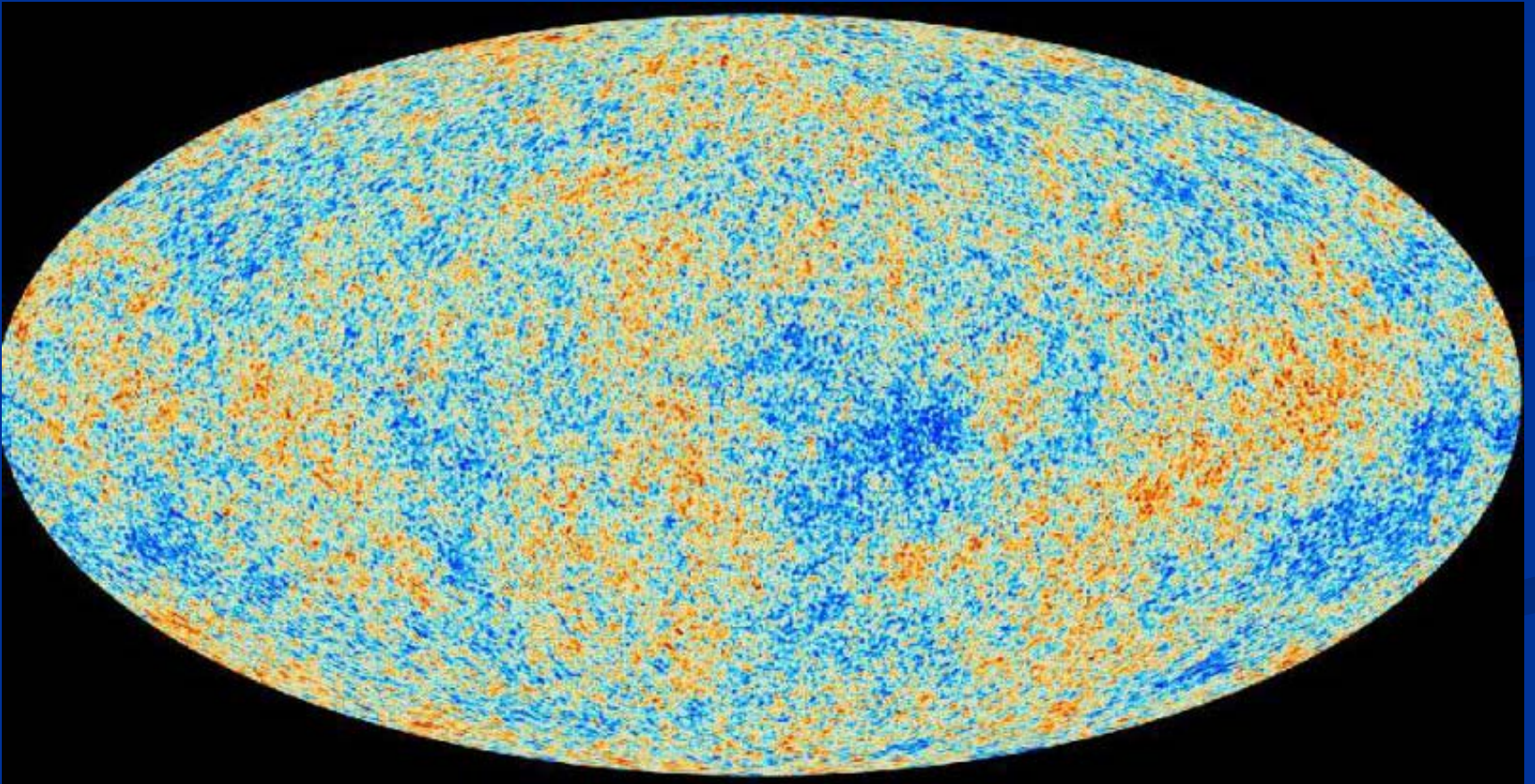
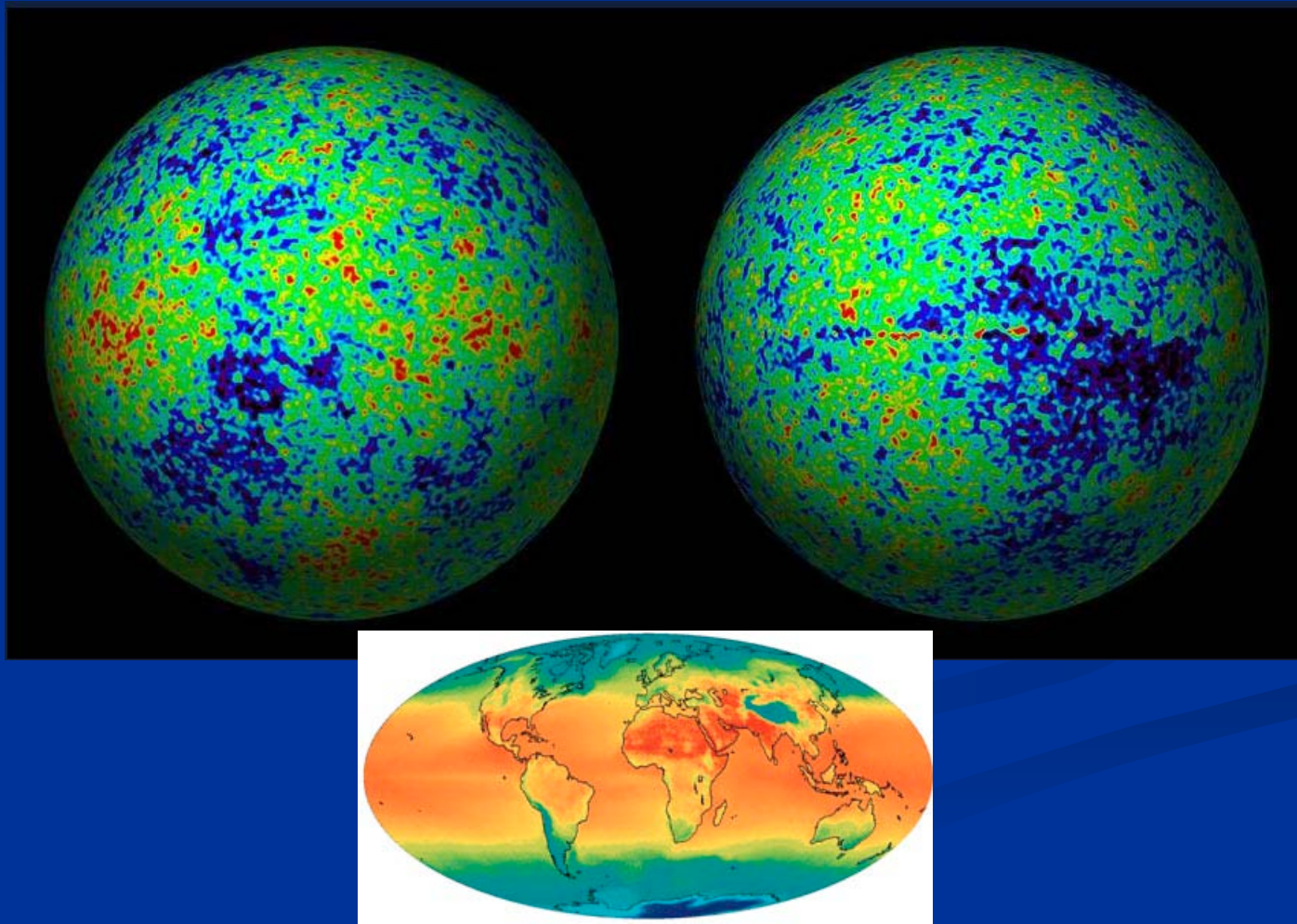
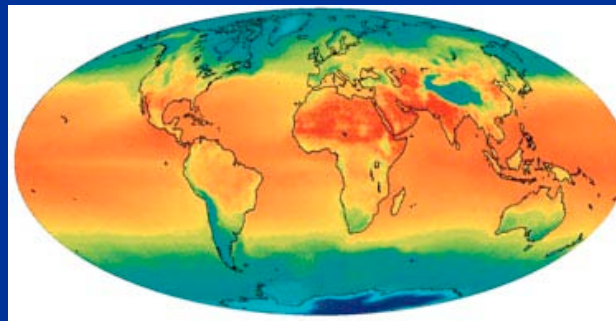
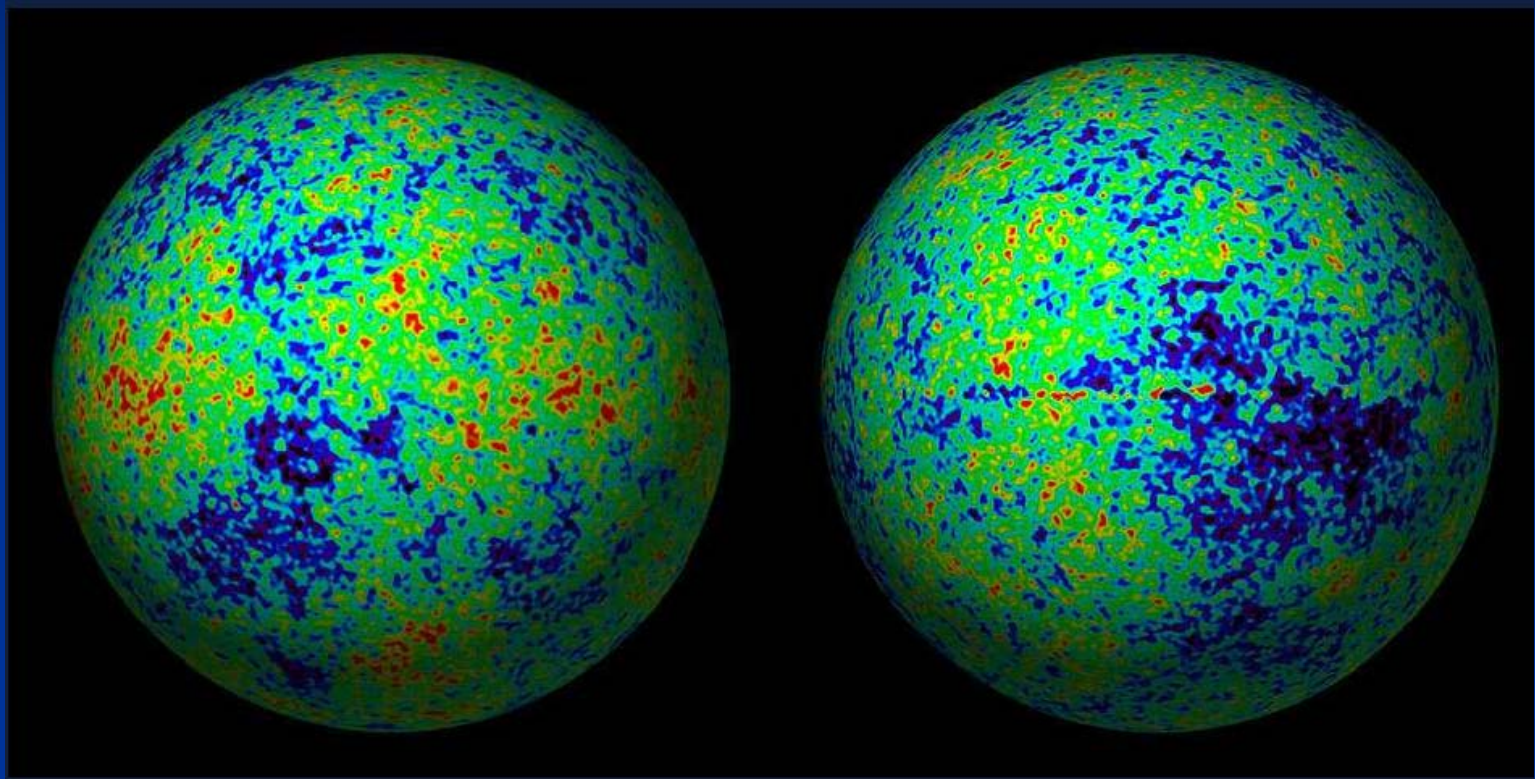


Bild einer Kugeloberfläche von innen winzige Temperatur-schwankungen der Hintergrundstrahlung

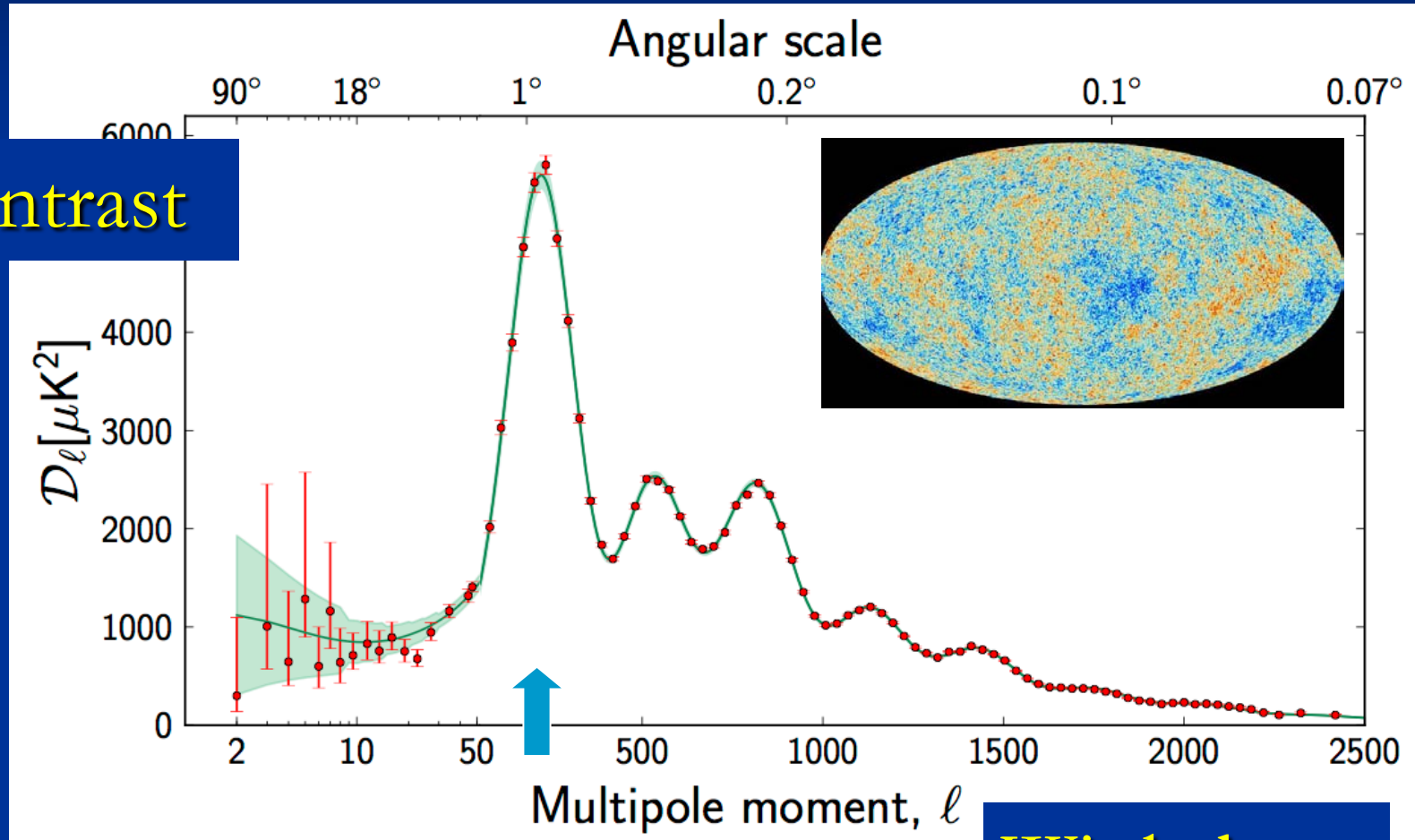


Anisotropie der Hintergrundstrahlung : Fleckengröße



Stärke der Temperaturschwankung in Abhängigkeit von Fleckengröße (im Winkel)

Kontrast

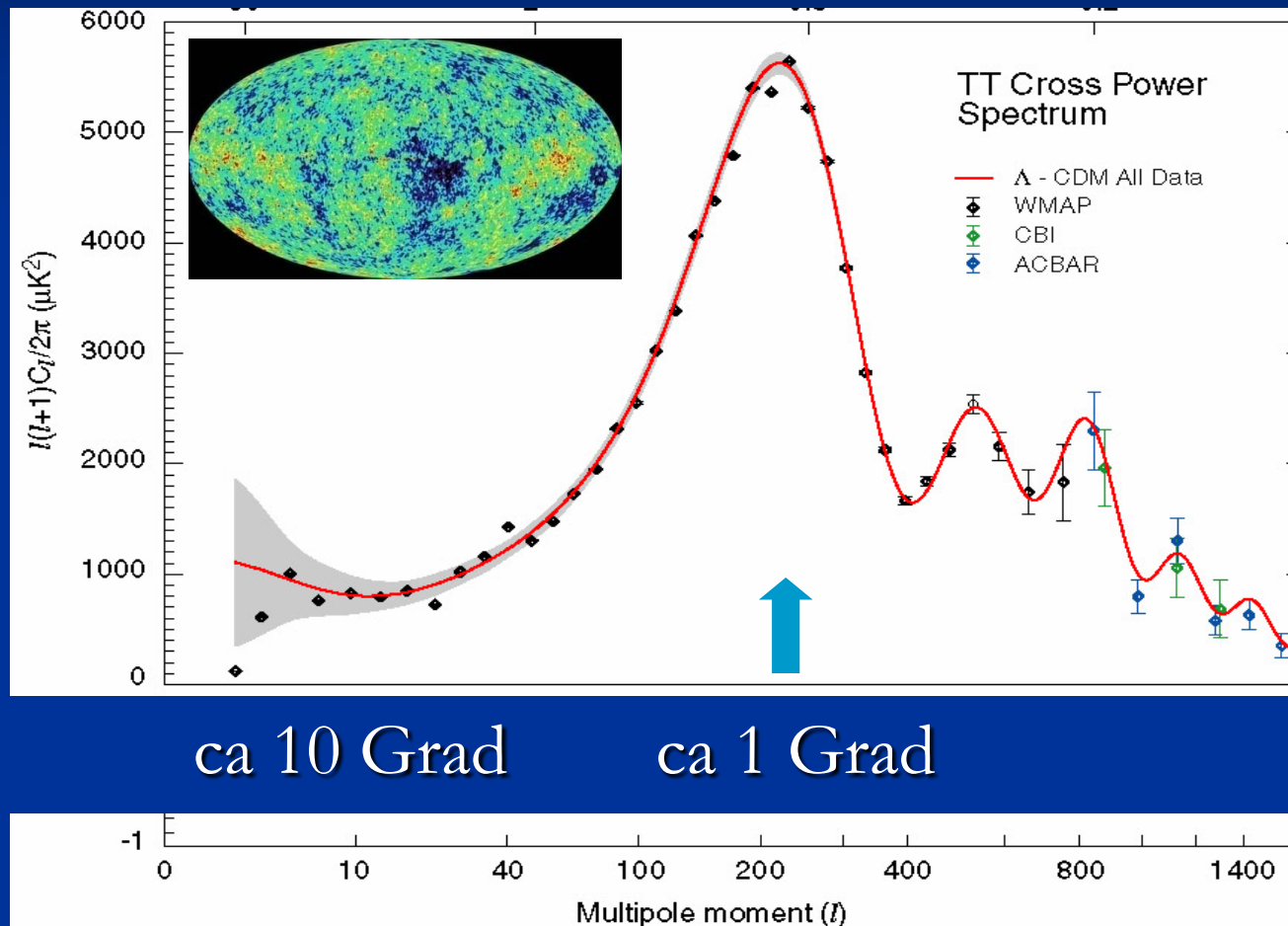


ca 10 Grad

ca 1 Grad

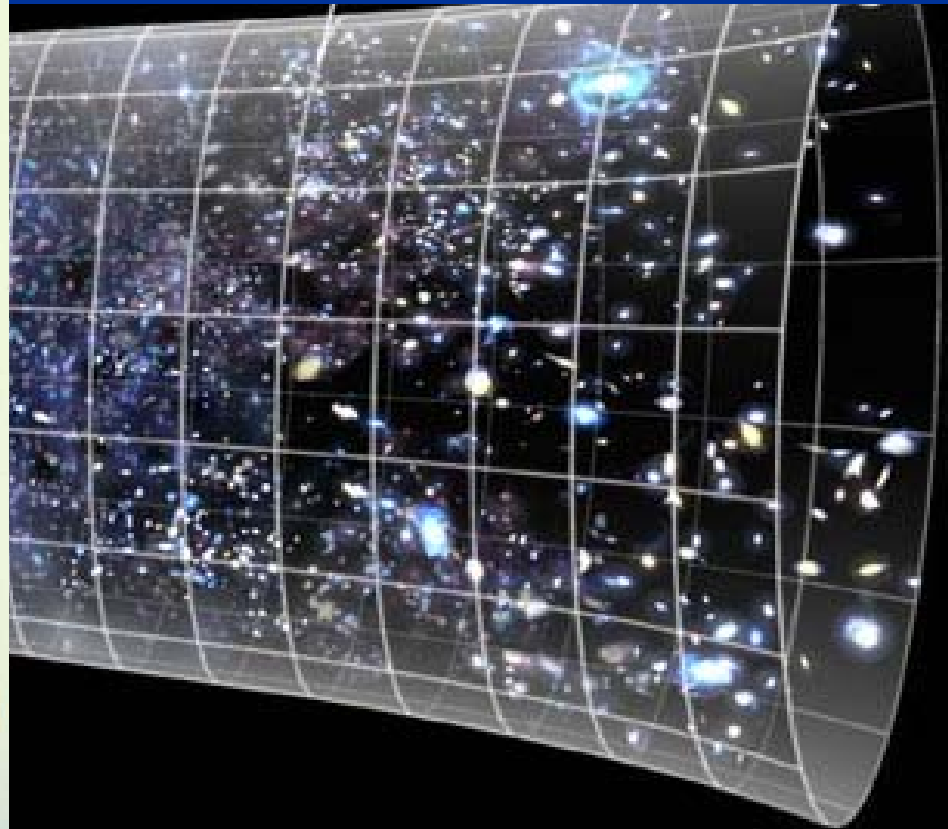
Winkel

Akustische Schwingungen im Plasma



Schallwellen im frühen Universum

Länge
berechen-
bar



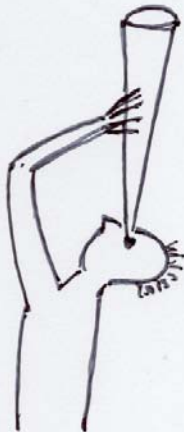
$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$



last scattering

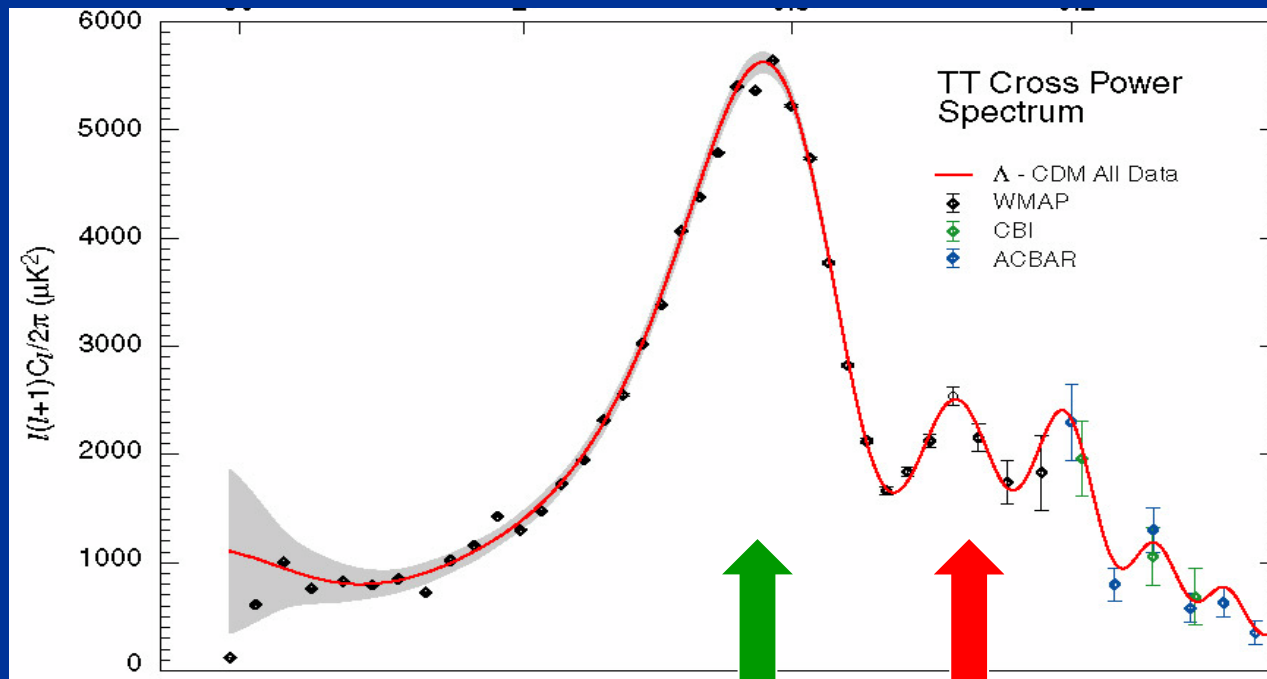
$\Omega < 1$ (open)

$\Omega = 1$ (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 %

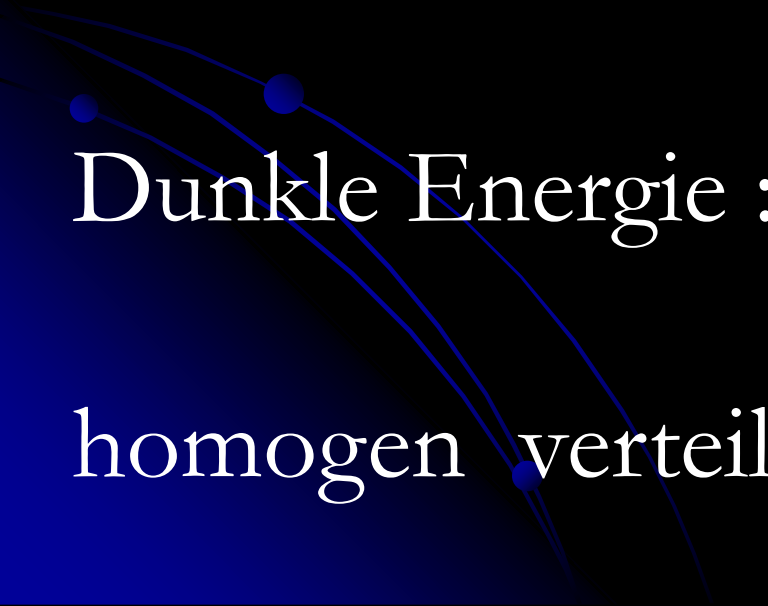
Zusammensetzung des Universums

Atome : $\Omega_b = 0.05$

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

Dunkle Energie : $\Omega_h = 0.7$

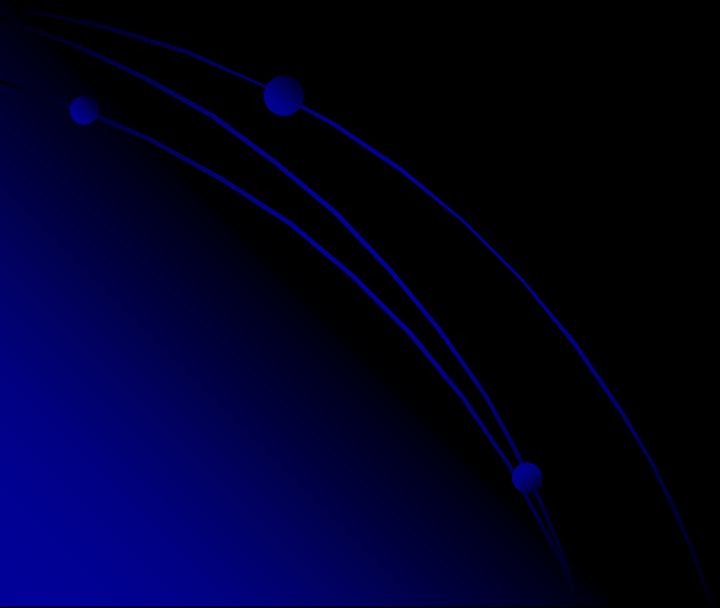
Eigenschaften der Dunkle Energie ?



Dunkle Energie :

homogen verteilt

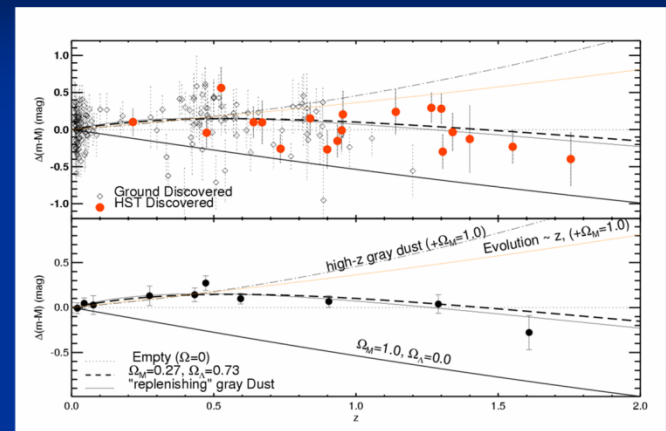
Dunkle Energie : kosmologische Effekte



Vorhersagen für Kosmologie mit Dunkler Energie

*Die Expansion des Universums
beschleunigt sich heute !*

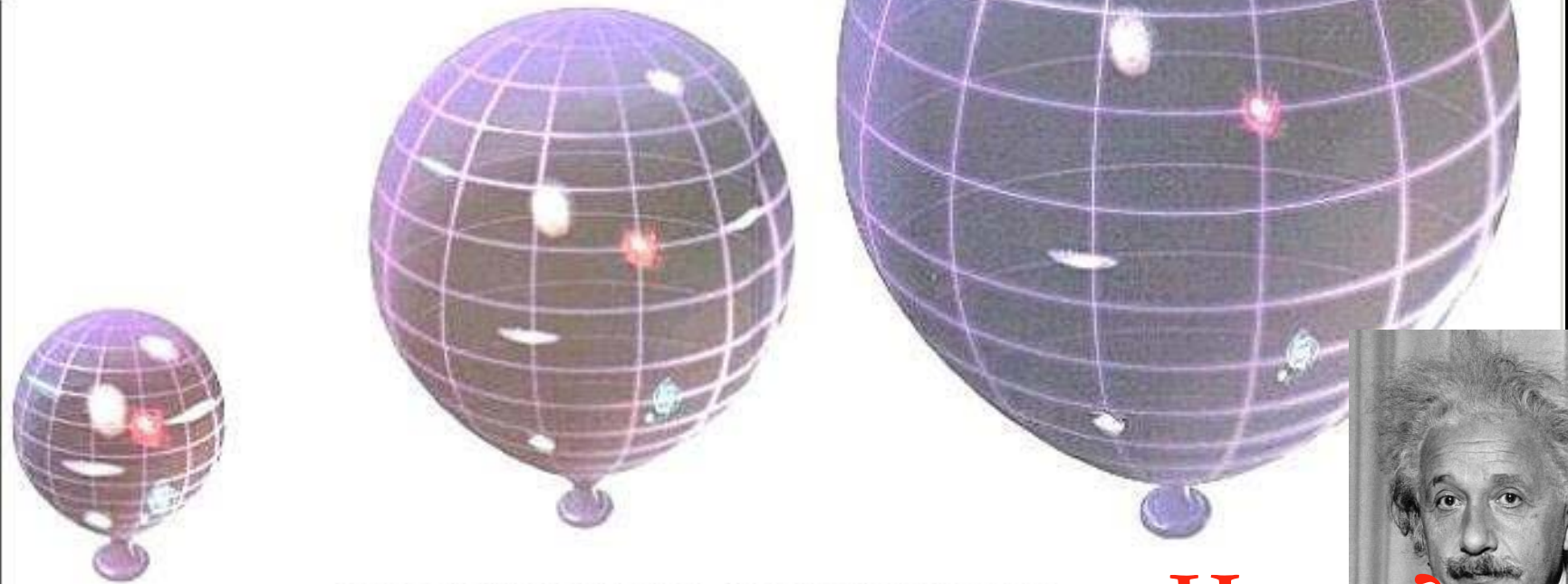
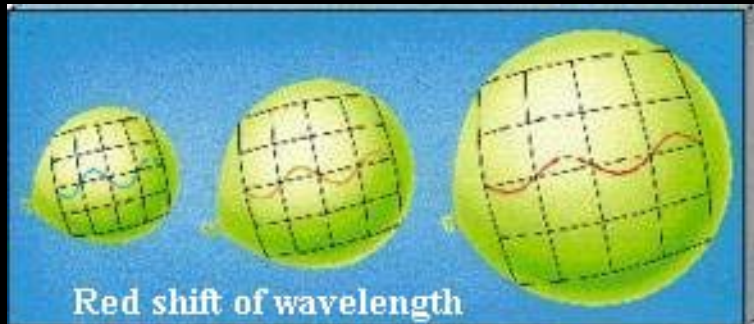
Supernova Ia Hubble-Diagramm



Rotverschiebung z

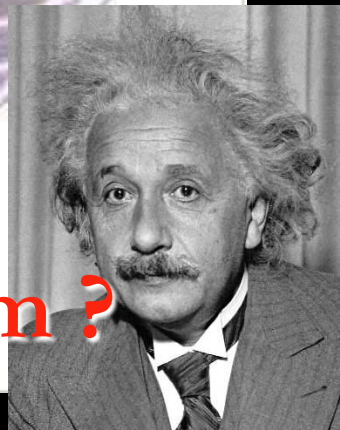
Riess et al. 2004

Expansion des Universums



Expanding distance between galaxies

Hmm?



Supernovae als Standardkerzen



Beschleunigte Expansion

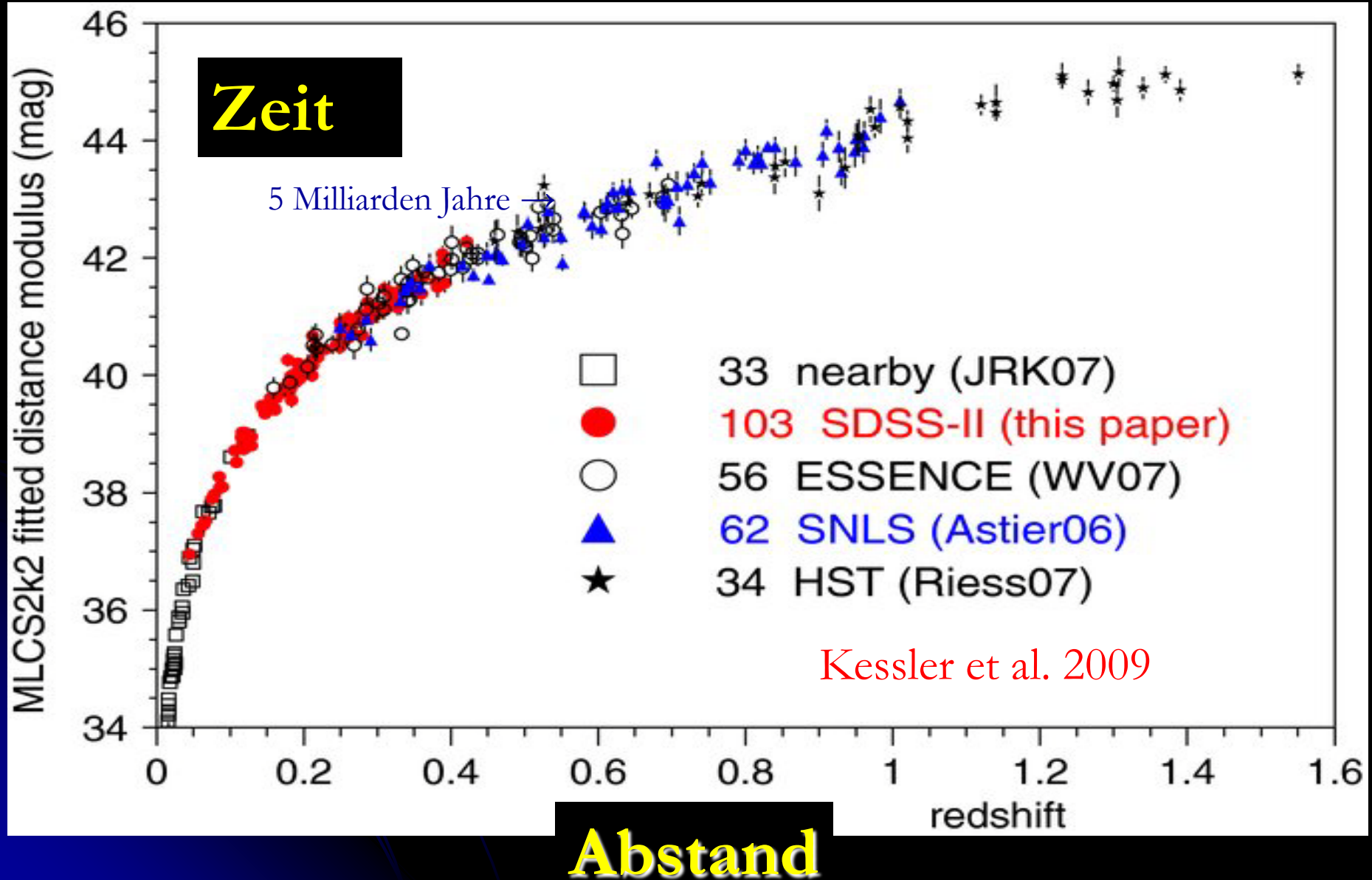




Photo: Roy Kaltschmidt. Courtesy: Lawrence Berkeley National Laboratory

Saul Perlmutter



Photo: Belinda Pratten, Australian National University

Brian P. Schmidt



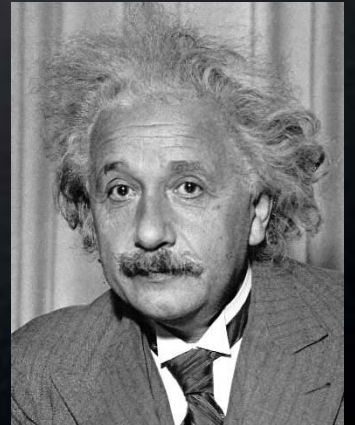
Photo: Homewood Photography

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.

Beschleunigte Expansion des Universums !

Hmm ?



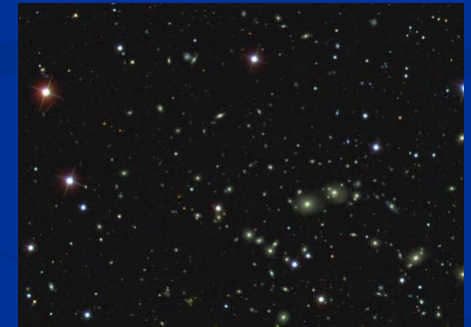
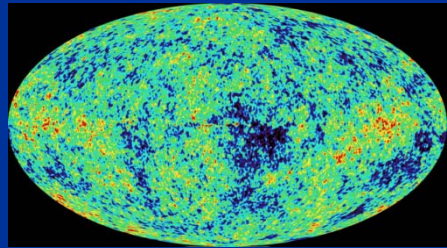
**Dunkle Energie und Dunkle Materie
sind (heute) Gegenspieler :**

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

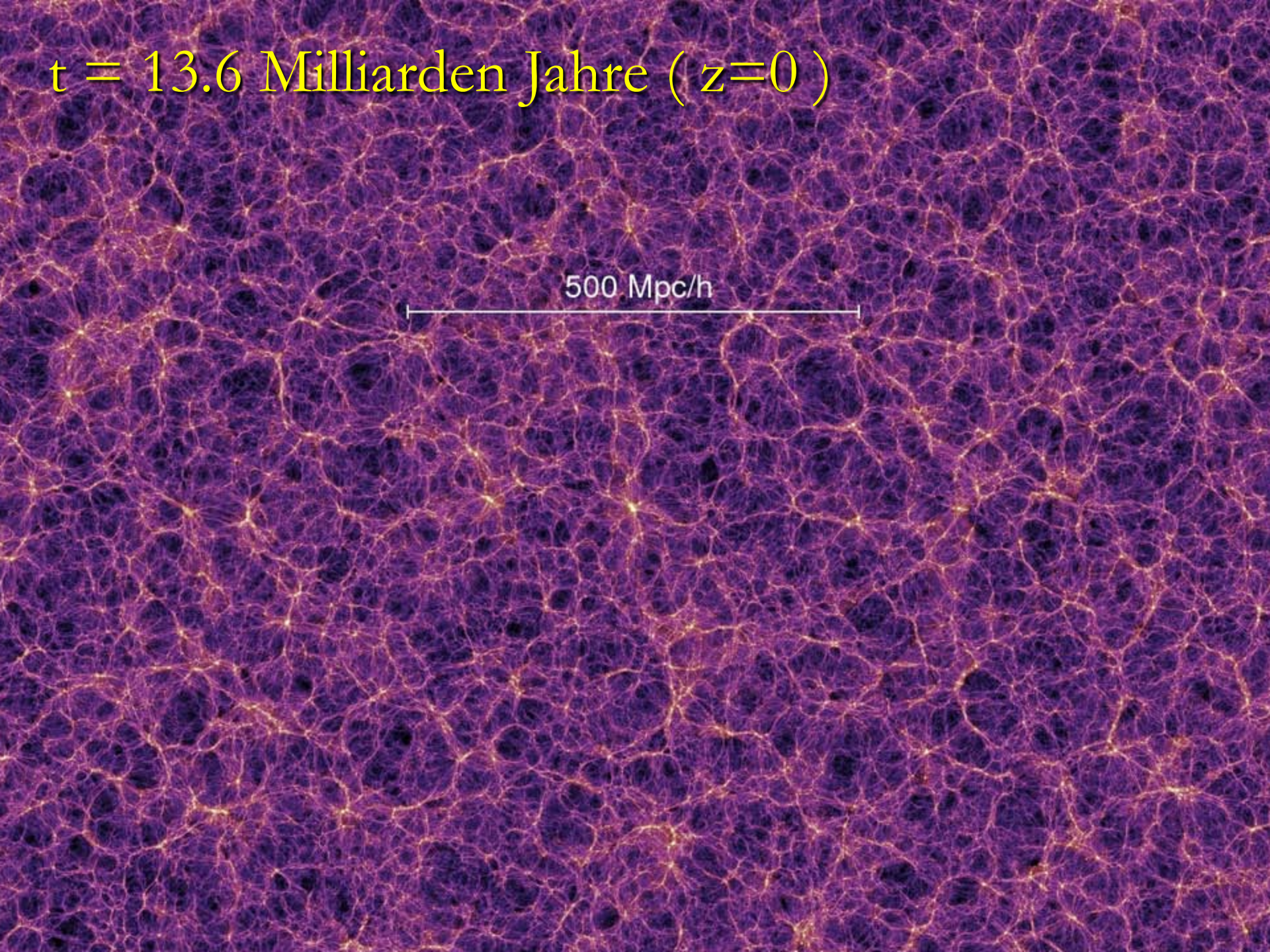
$t = 1$ Milliarde Jahre ($z = 5.7$)

500 Mpc/h



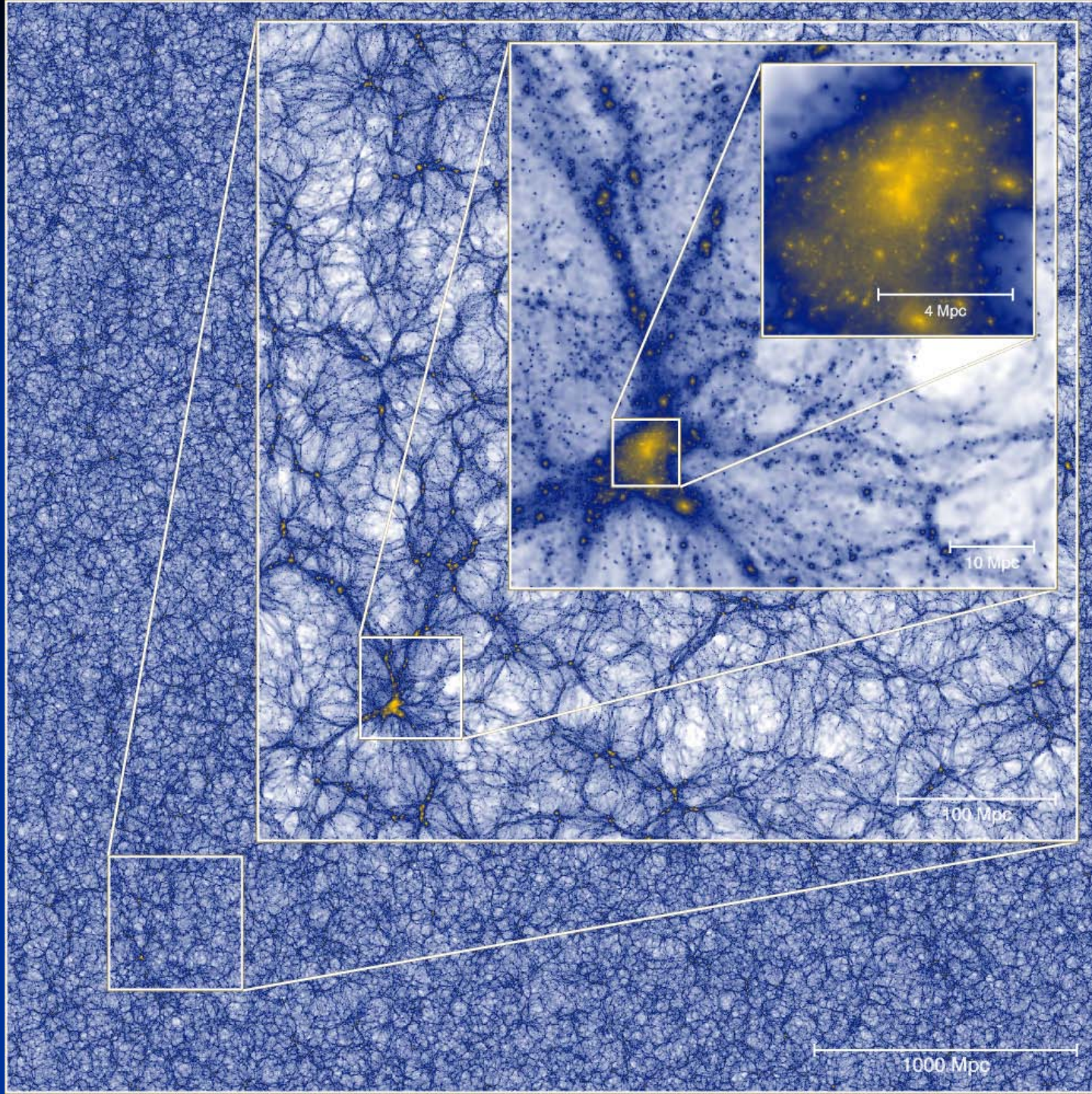
$t = 13.6$ Milliarden Jahre ($z=0$)

500 Mpc/h

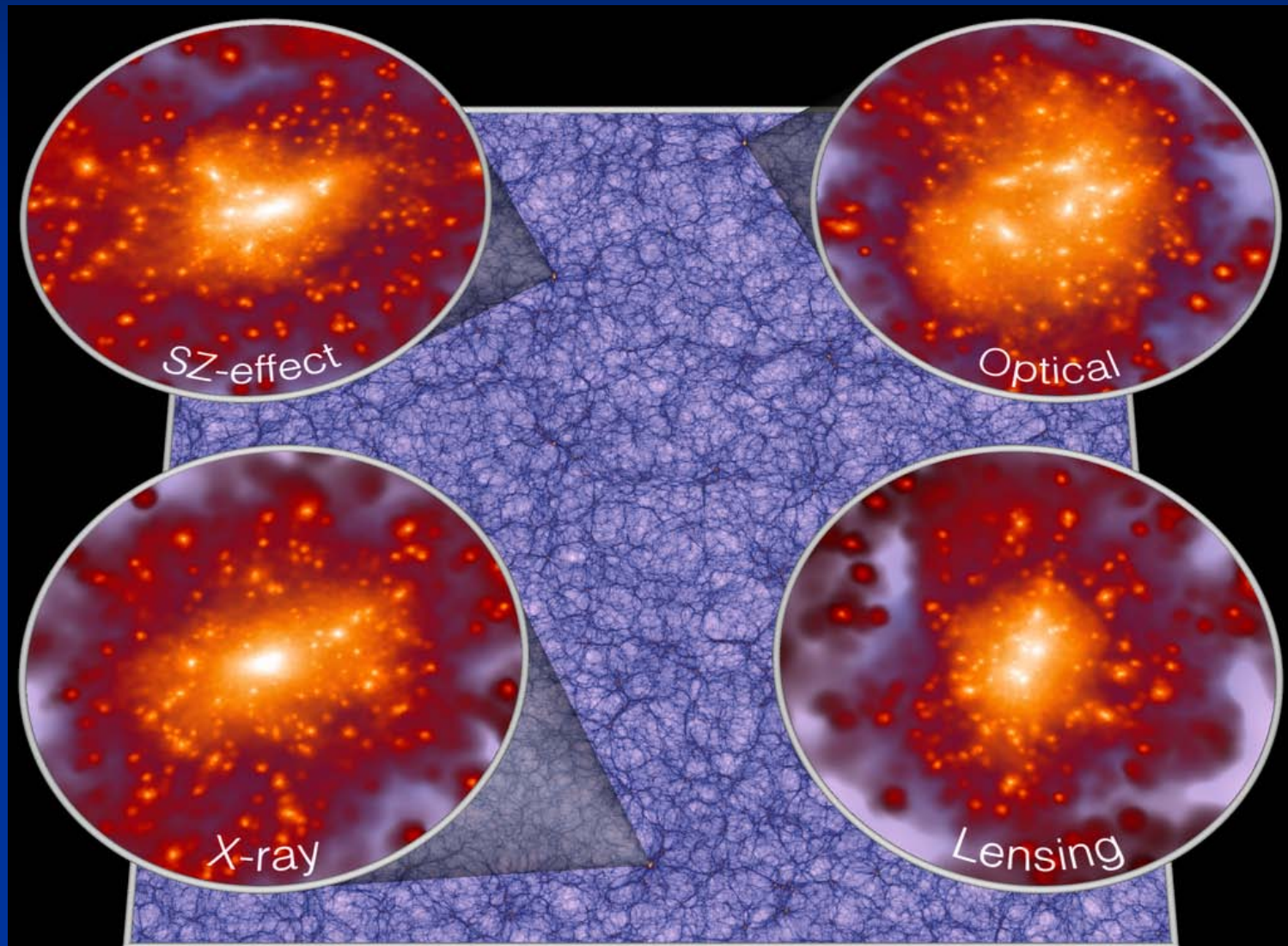
A visualization of the cosmic web at redshift z=0, showing a dense network of dark matter filaments and clusters. The filaments are colored in shades of purple and blue, with brighter yellow and orange spots indicating regions of higher density or galaxy clusters. A horizontal scale bar is positioned in the upper-middle part of the image, with the text '500 Mpc/h' centered above it.

Quantitatives Verständnis der Strukturbildung braucht Dunkle Energie

MXXL Angulo, Springel, White et al.
MNRAS426 (2012)2046



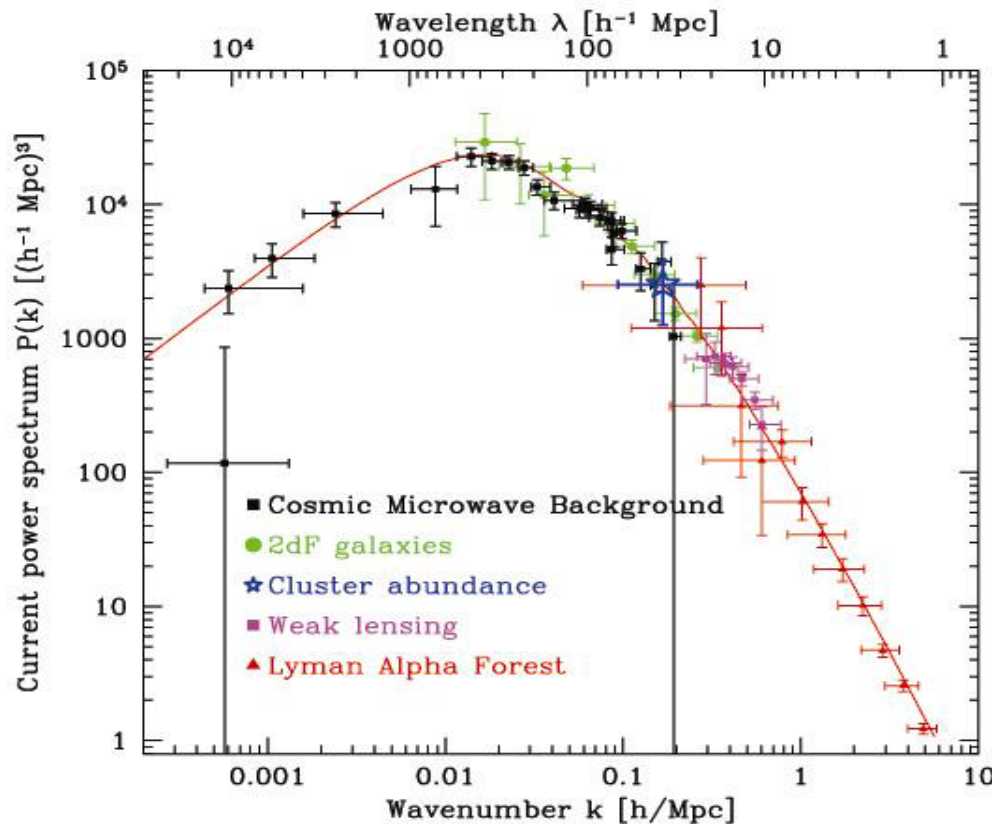
Eigenschaften der Galaxienhaufen können beobachtet werden



Vergleich mit Beobachtung

Strukturbildung :

Ein primordiales Fluktuationsspektrum

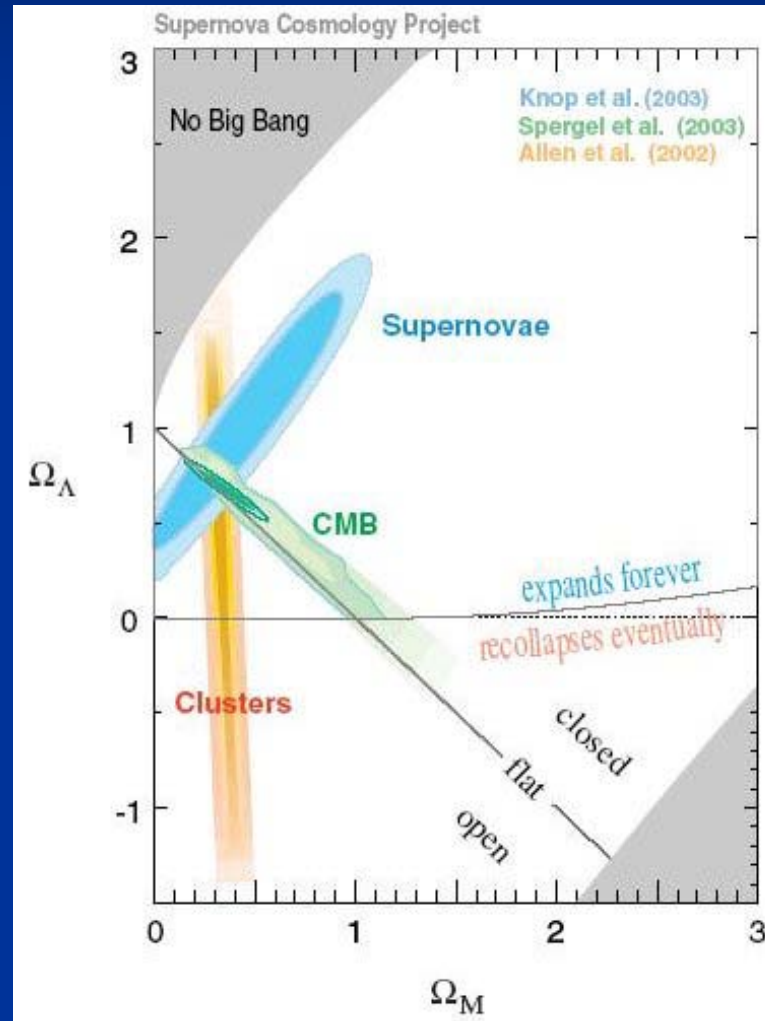


Waerbeke

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

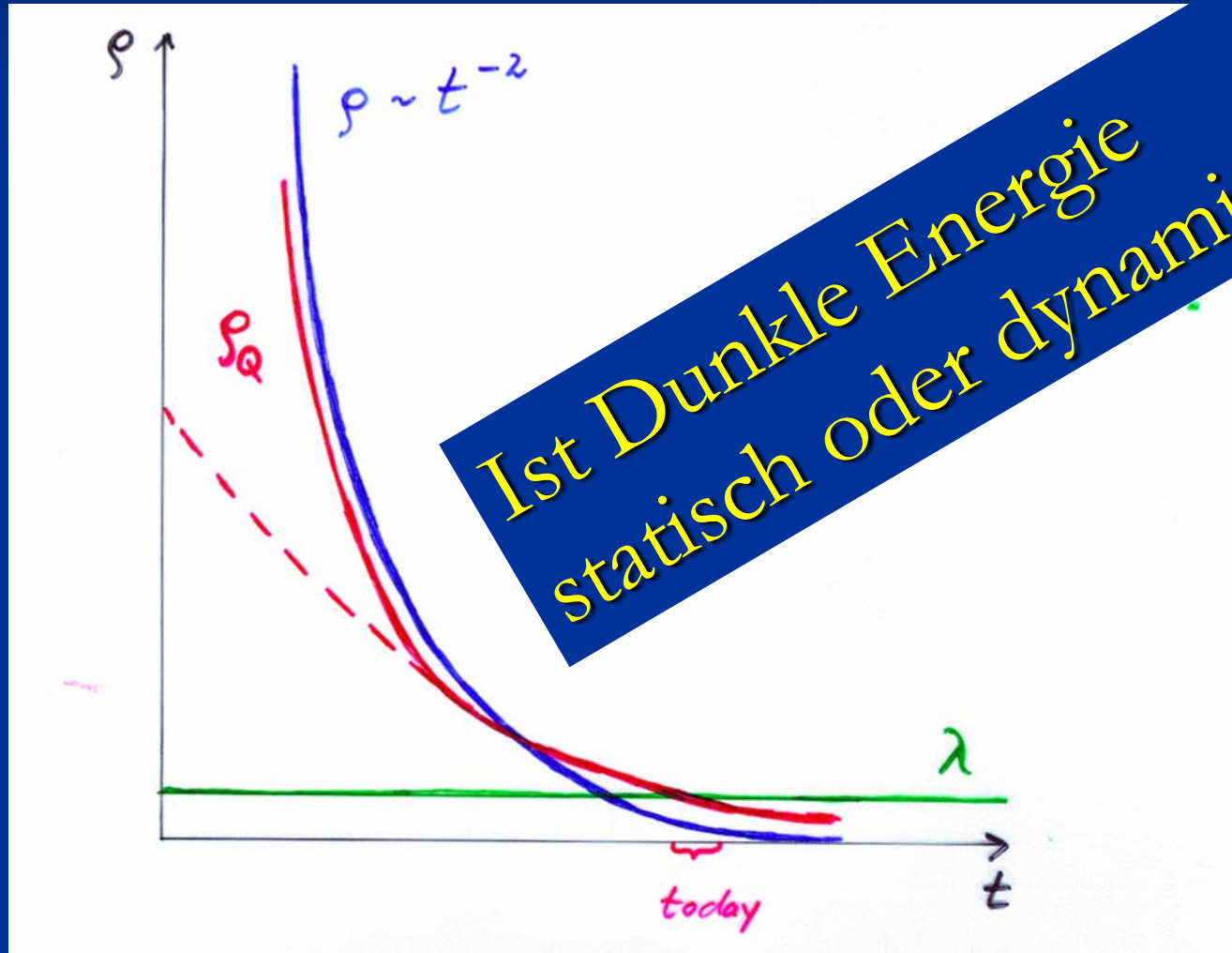
Quintessenz

oder

Modifikation der Gravitation ?

Kosm. Konst.
statisch

Quintessenz
dynamisch

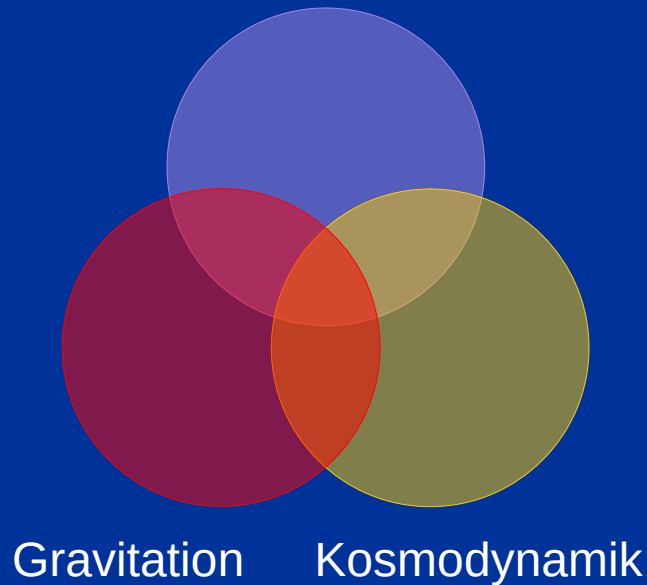


Eigenschaften der Dunklen Energie bestimmen die Zukunft des Universums

Vorhersagbarkeit für die nächsten
100 Milliarden Jahre...

Quintessenz : neue fundamentale Wechselwirkung

Starke, elektromagnetische, schwache Wechselwirkung



Auf astronomischen Skalen:

Graviton

+

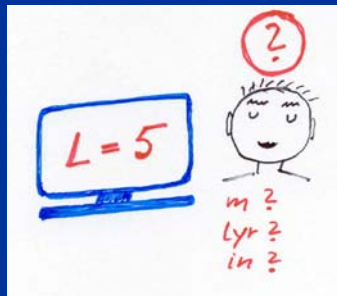
Kosmon

Vereinheitlichung
aller Wechselwirkungen

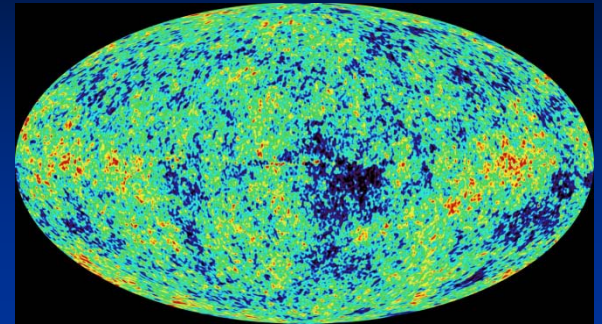
Superstrings

Zusätzliche
Dimensionen

Fundamentaler
Ursprung der
Massenskalen



$$\Omega_m + X = 1$$



$$\Omega_m : 30\%$$



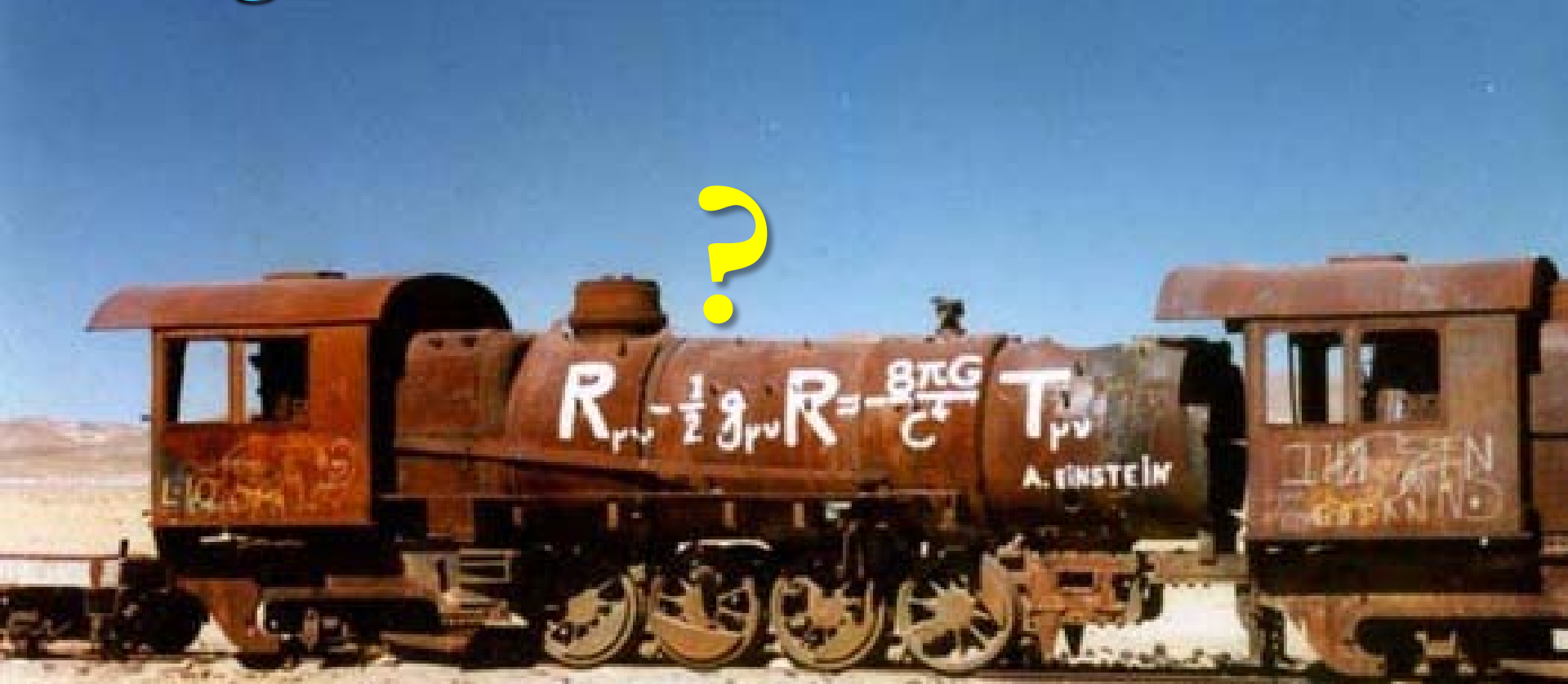
$$\Omega_h : 70\%$$

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 abb bis 3 Milliarden Jahre abb.
- 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

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

■ 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

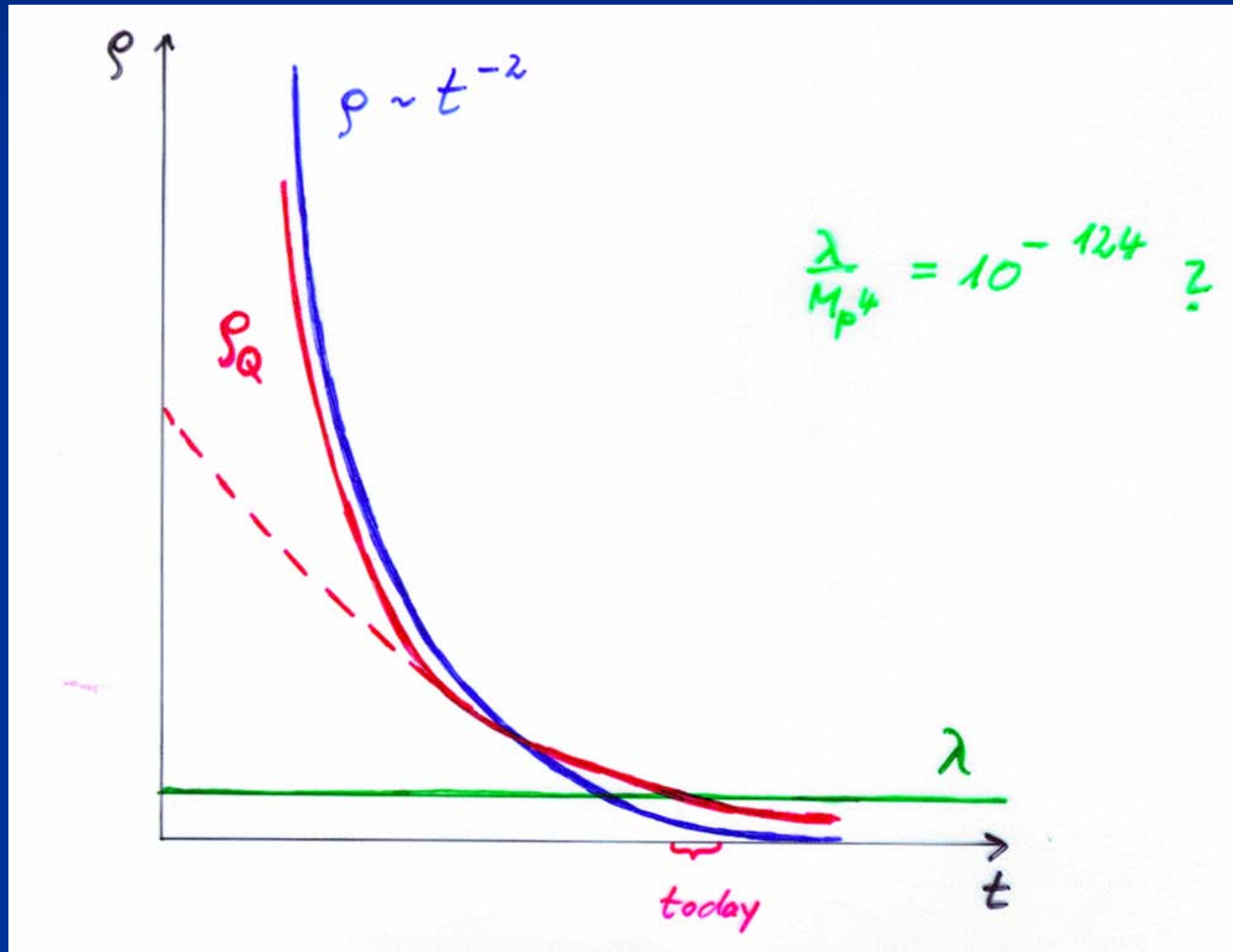
- $\rho_m/M^4 \sim a^{-3} \sim t^{-2}$ Materie dominiertes Universum
- $\rho_r/M^4 \sim a^{-4} \sim t^{-3/2}$ Strahlungsdominiertes Universum
- $\rho_r/M^4 \sim a^{-4} \sim t^{-2}$ Strahlungsdominiertes Universum

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

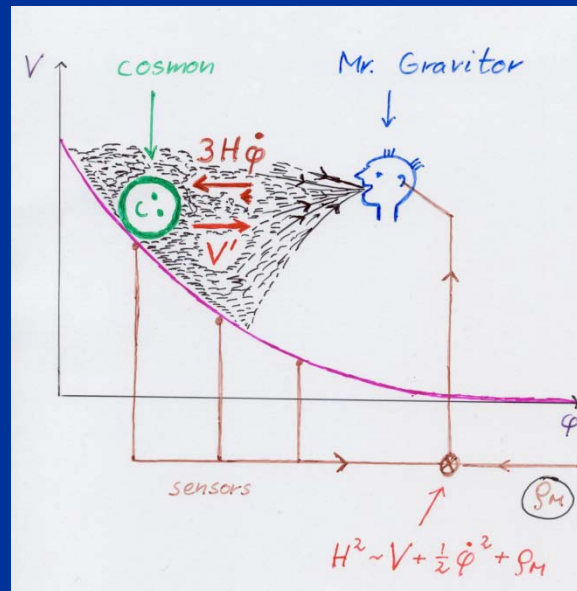
$$\Phi (x,y,z,t)$$

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

Kosmologische Gleichungen

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

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

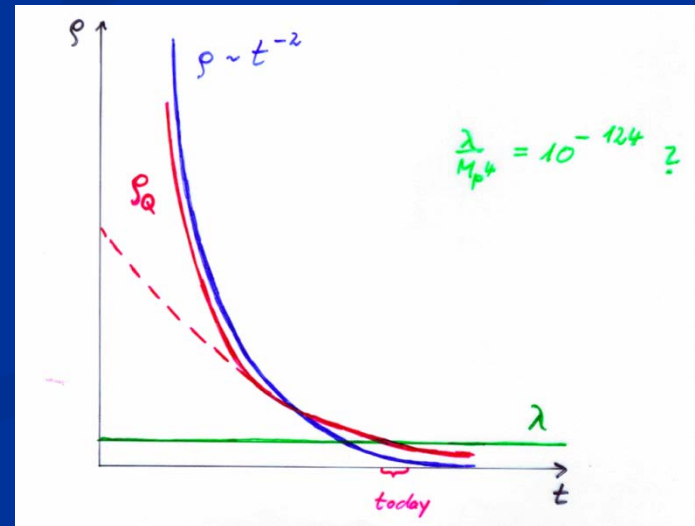


exponential potential $\longrightarrow$
constant fraction in dark energy

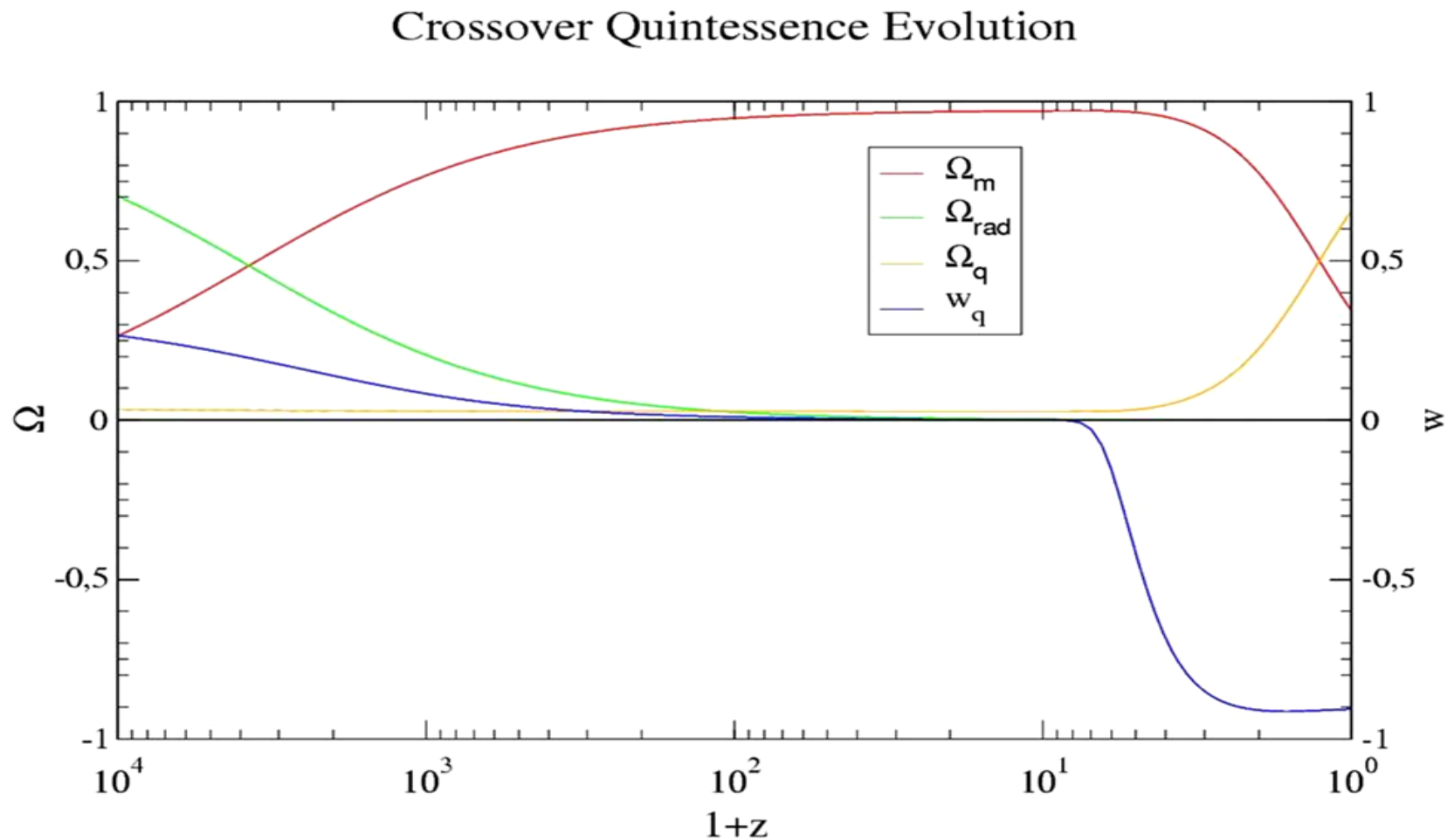
$$\Omega_h = 3/\alpha^2$$

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

can explain order
of magnitude
of dark energy !



Quintessenz wird heute wichtig



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

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

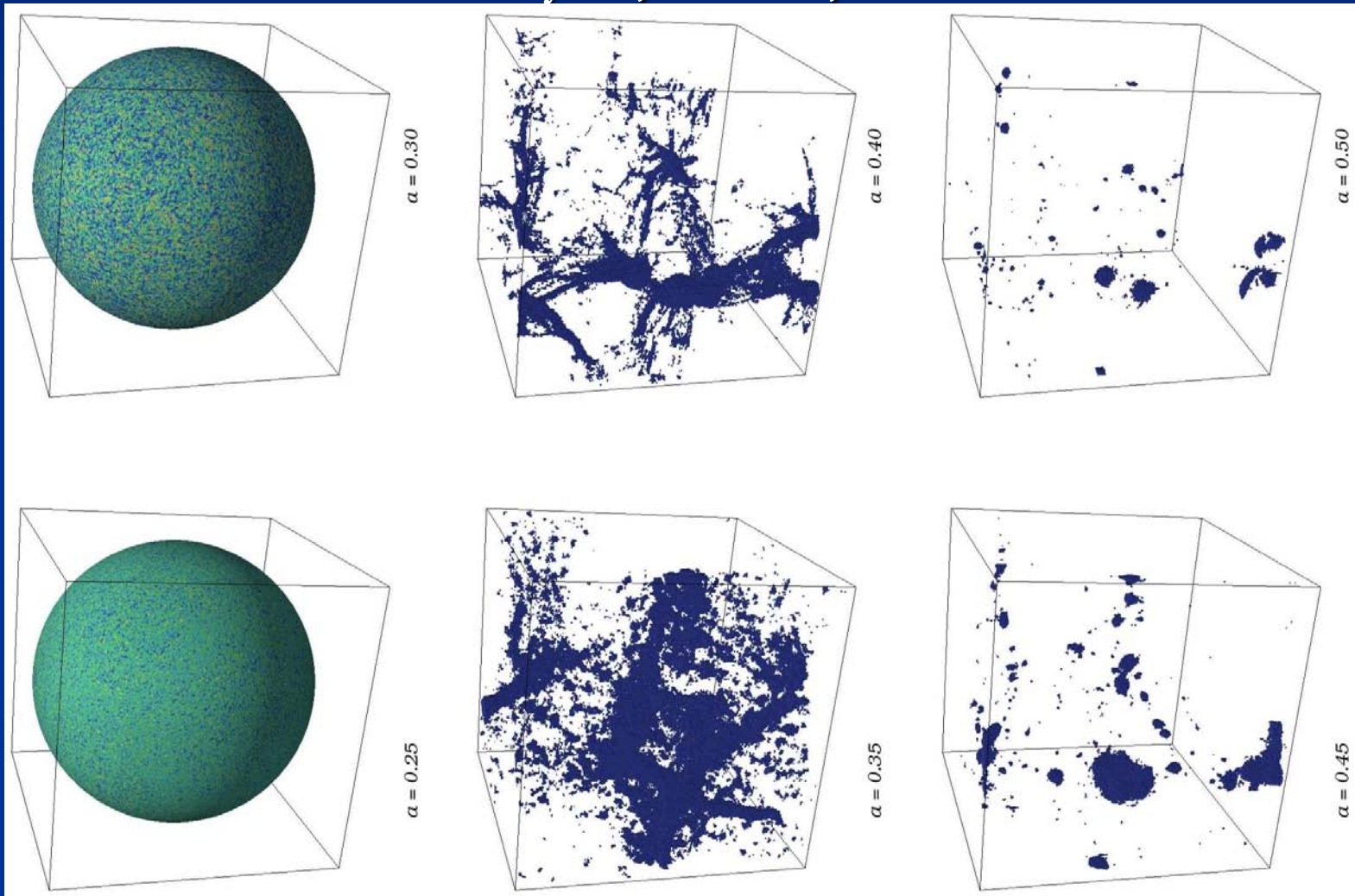
Dunkle Energiedichte : $\varrho^{1/4} \sim 2.4 \times 10^{-3} eV$

jetzige Zustandsgleichung ist
gegeben durch Neutrino - Masse !

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

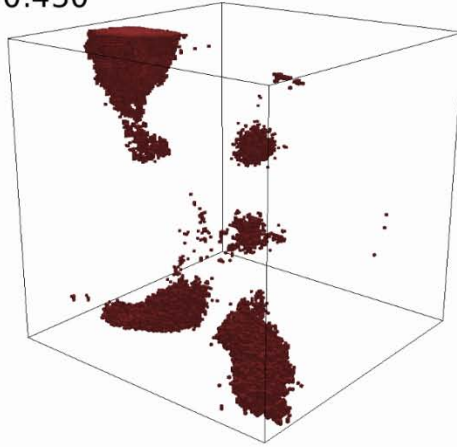
Kosmische Neutrinos bilden riesige Strukturen

Y.Ayaita,M.Weber,...

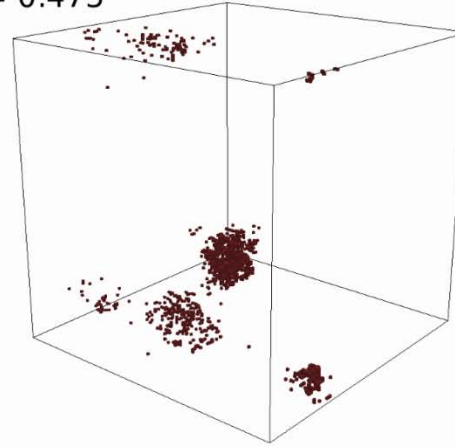


... die auch wieder vergehen...

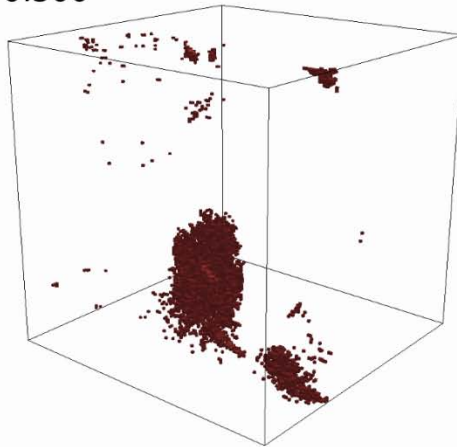
$a = 0.450$



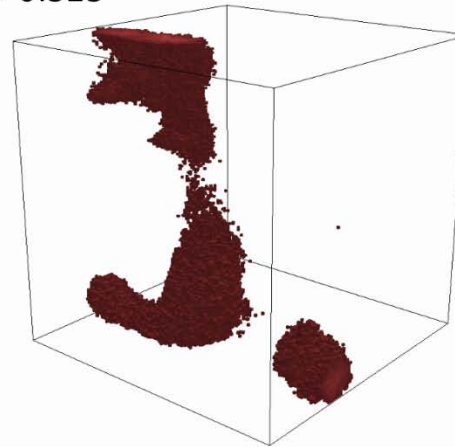
$a = 0.475$



$a = 0.500$



$a = 0.525$



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

