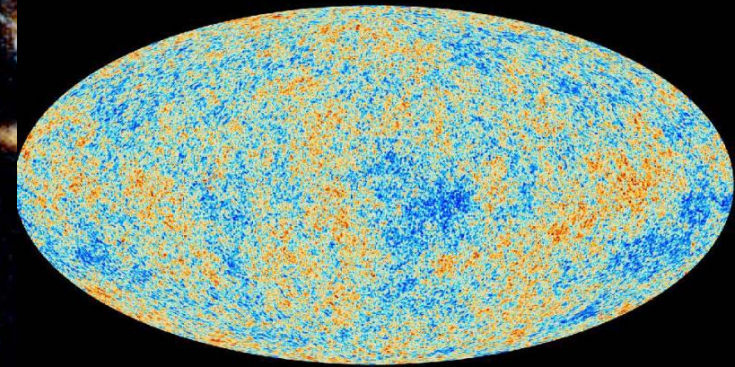


Dunkle Energie, Dunkle Materie und Urknall

– wie unser Universum zusammenpasst

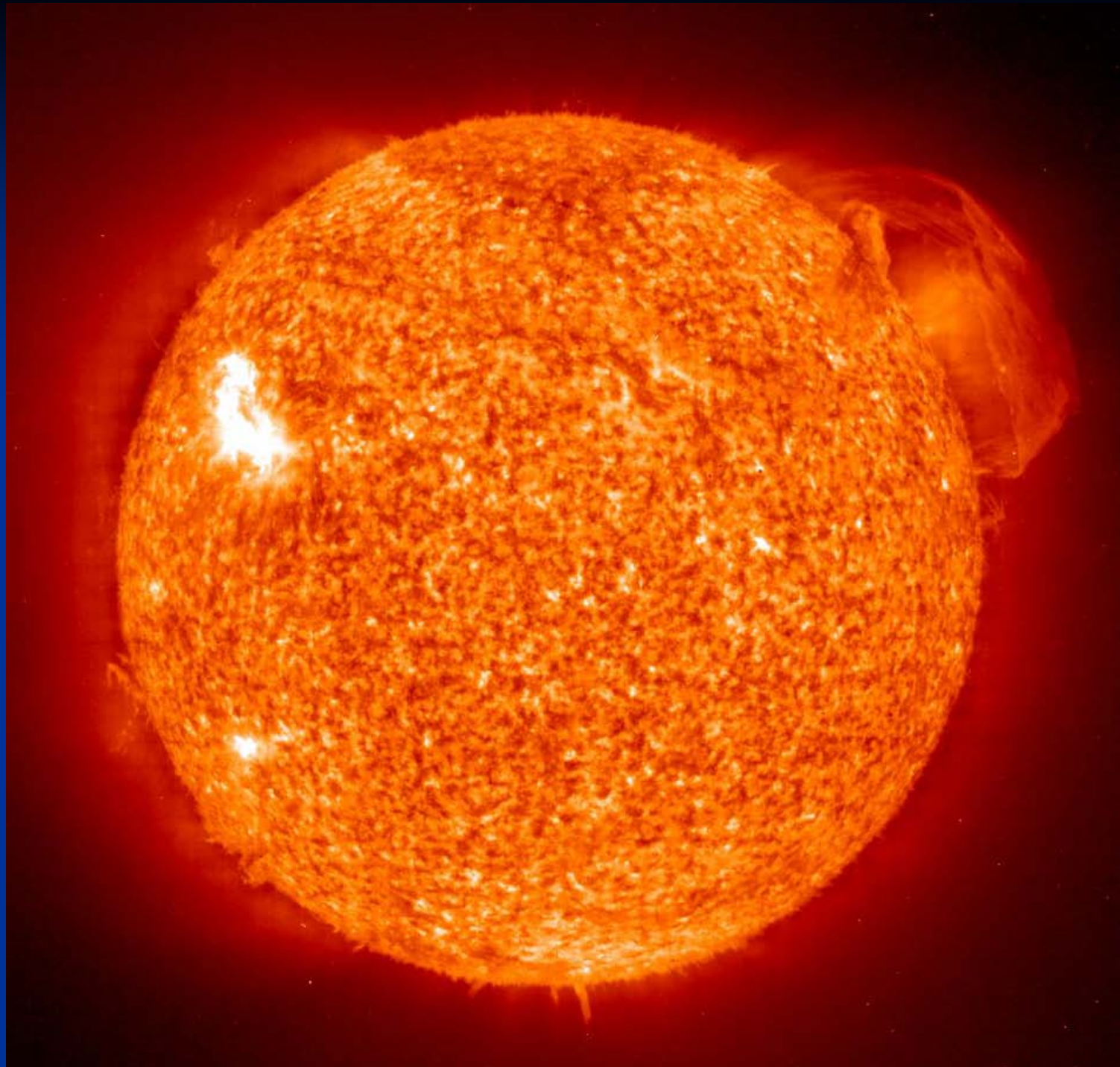














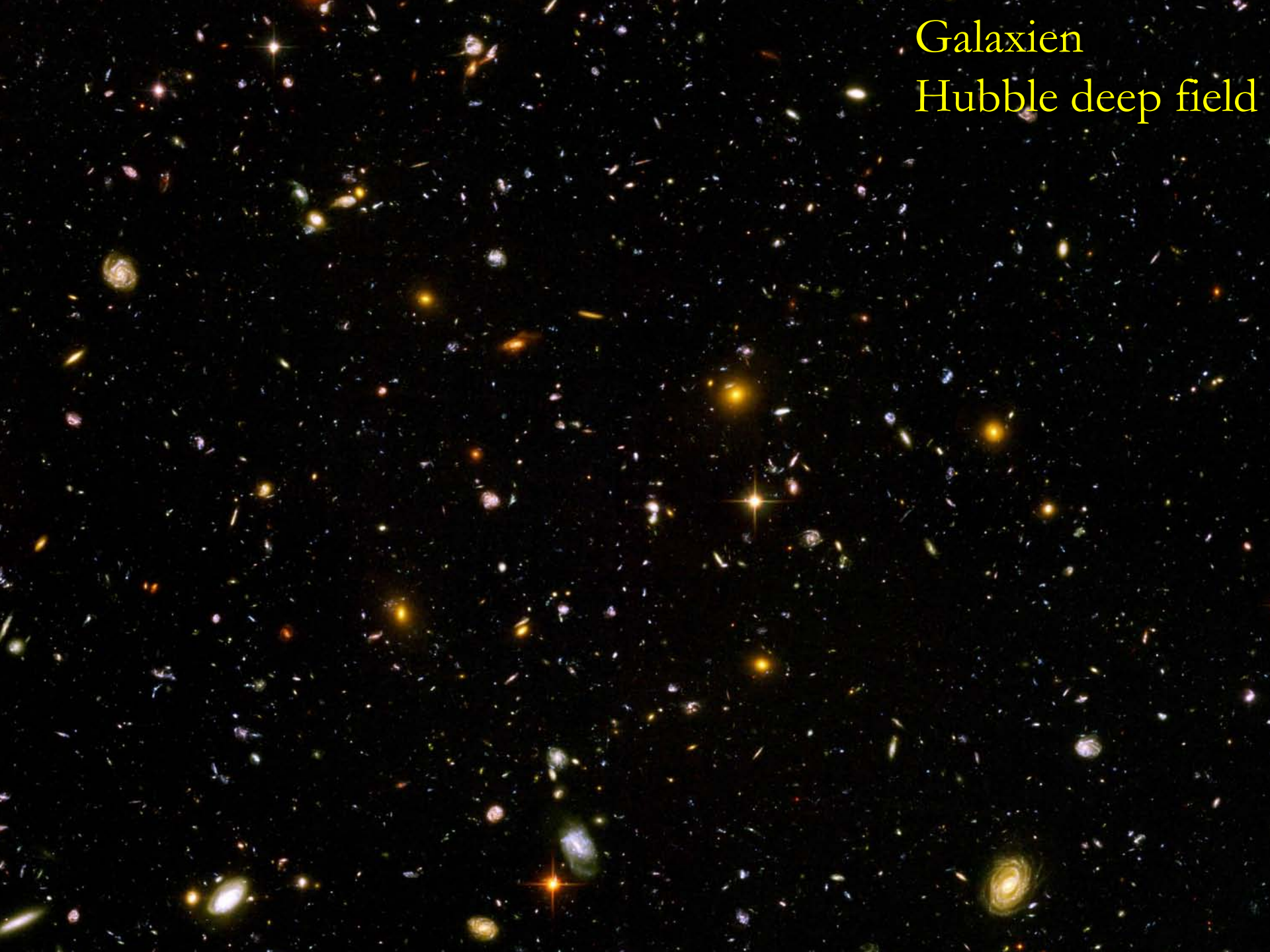






Galaxien

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 bright, point-like sources 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 :

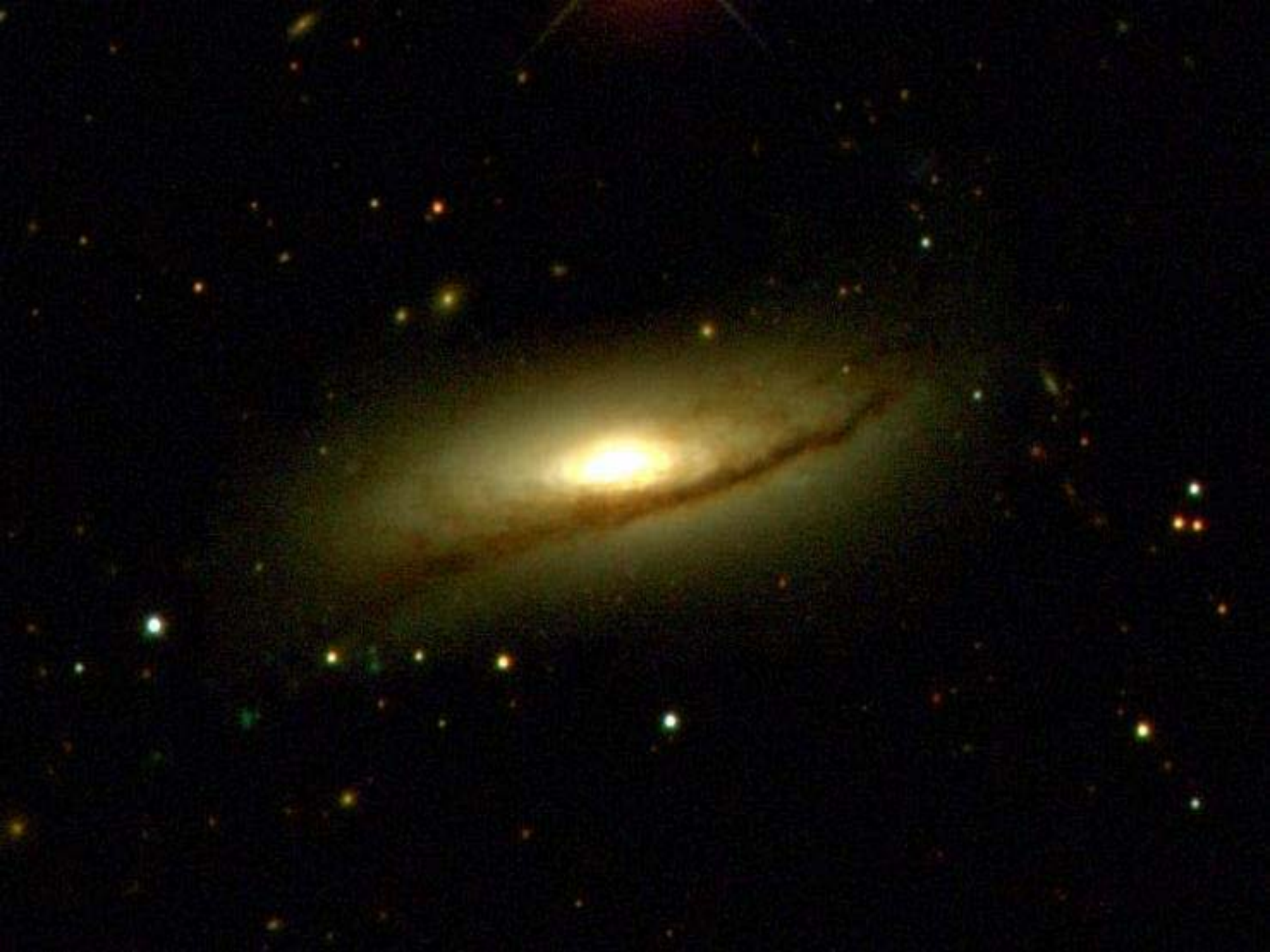
- Strahlung
- Gas von Atomen, Molekülen
- Magnetfelder
- Neutrinos
- Gravitationswellen

Alles zusammen , plus Atome in Galaxien :

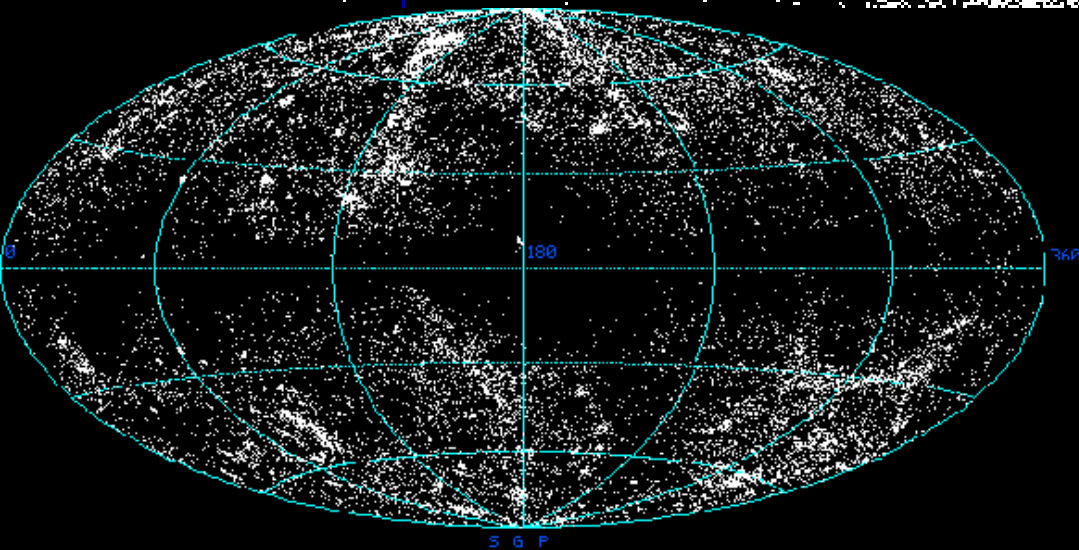
Nur 5% der Energiedichte des Universums

“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 ,

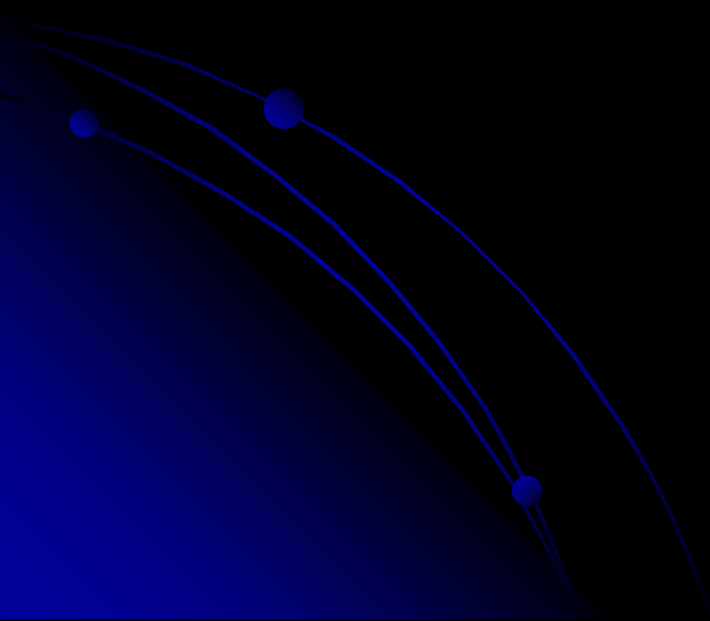
Nucleosynthese

400 000 Jahre abb
Atomphysik

Minute abb
Kernphysik



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



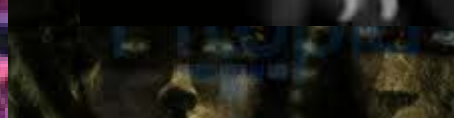
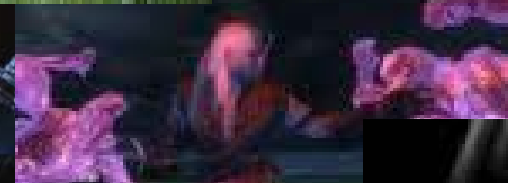
oder genauer : durchsichtig

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 is the title "Die Jagd nach den Phantomen" in a white, stylized 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 blue eyes in the bottom left; a skeletal figure with red eyes and long claws in the bottom right; a white ghost outline on the right edge; a dark, stormy landscape at the top left; a dark path with a bench and bare trees in the middle left; a dark, misty landscape in the middle; a small green plant in the bottom left corner; and a dark, rocky landscape with a waterfall in the bottom right corner.

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

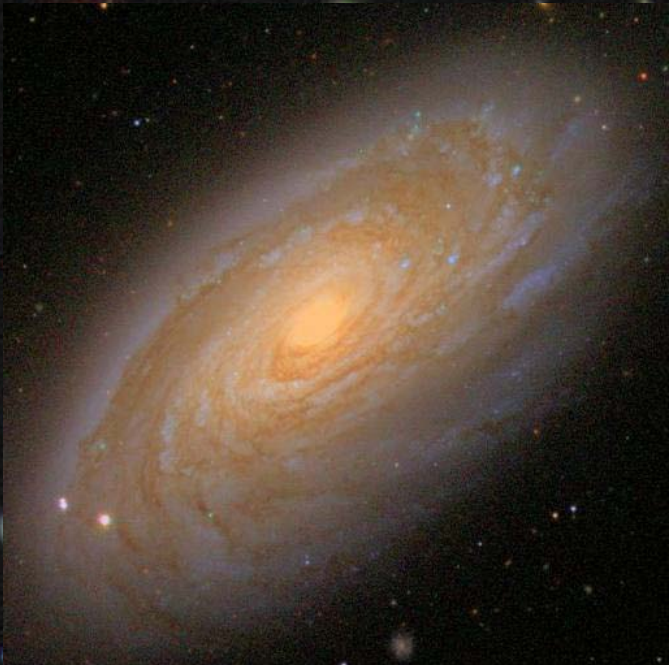
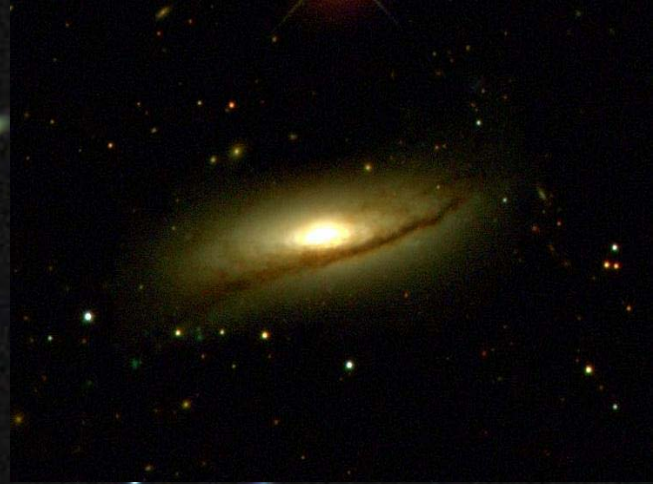
bullet cluster



Wieviele Dunkle Materie gibt es ?

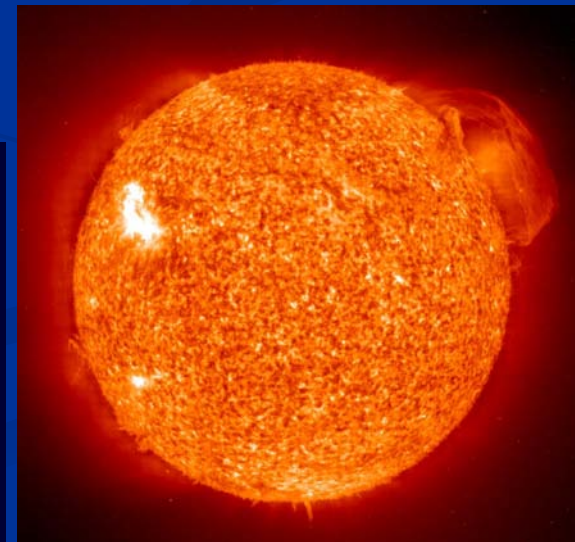
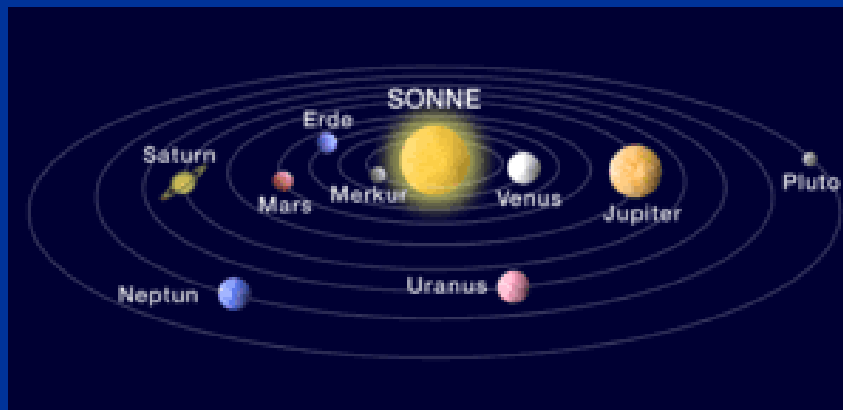
Materie :

Alles , was klumpt



Gravitations - Potenzial

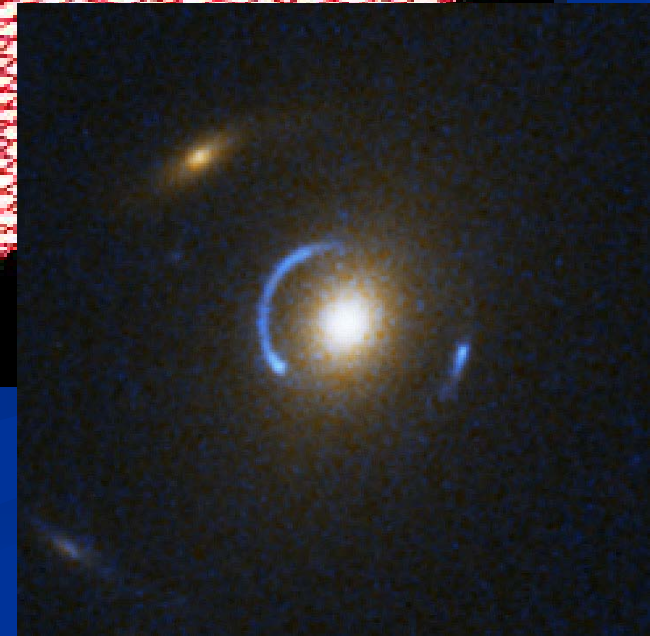
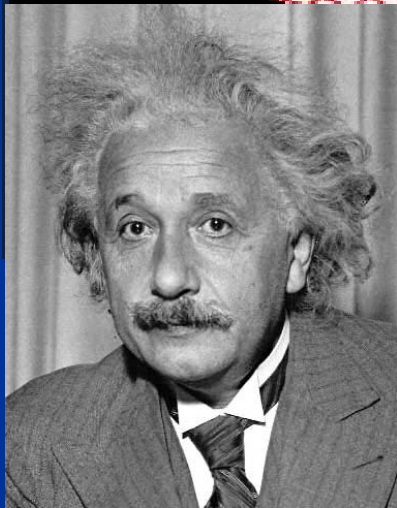
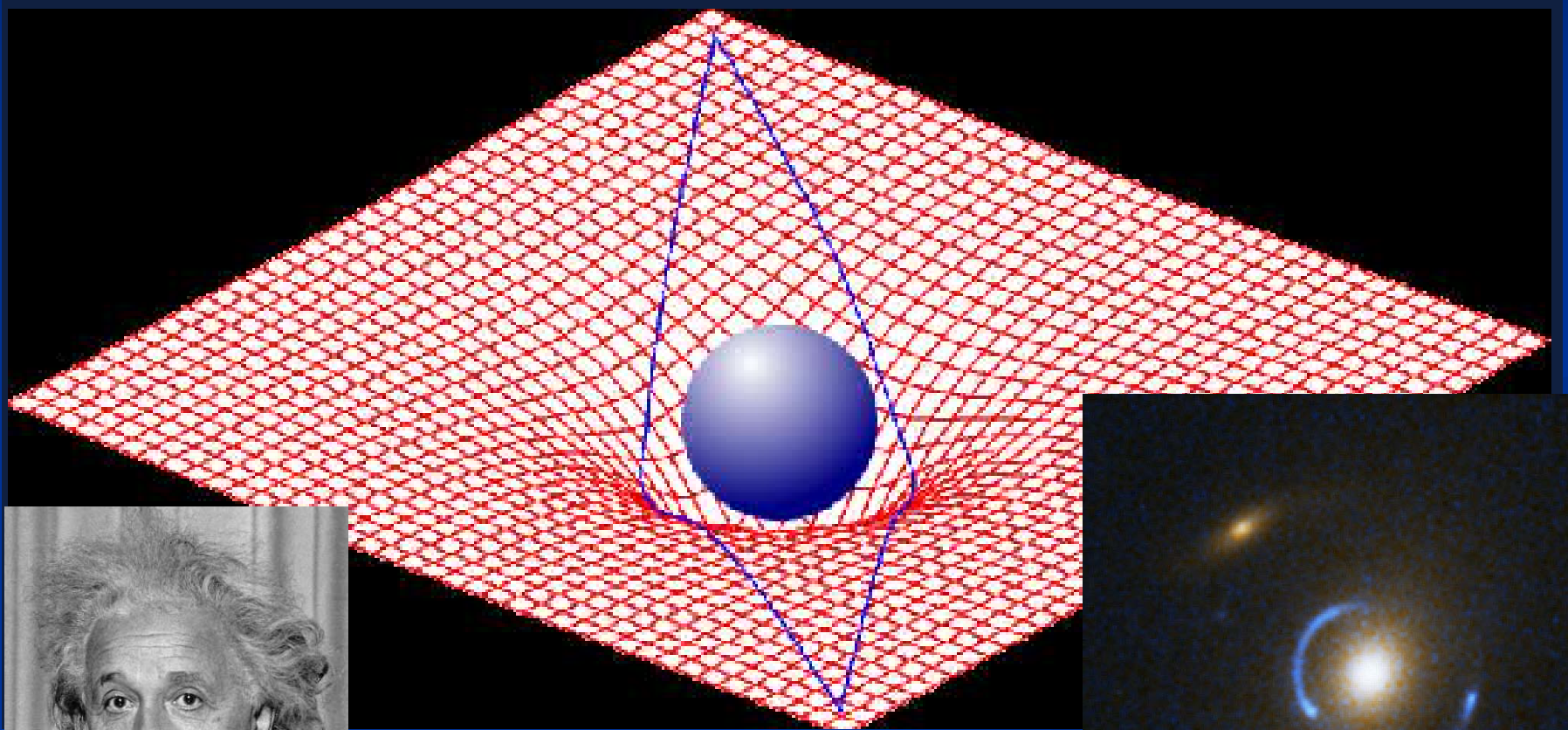
- Materieklumpen erzeugen Gravitationspotenzial (Newton)
- Dies kann vermessen werden
- Bestimmung der Masse des Klumpens
- z.B. Sonnenmasse genau bekannt





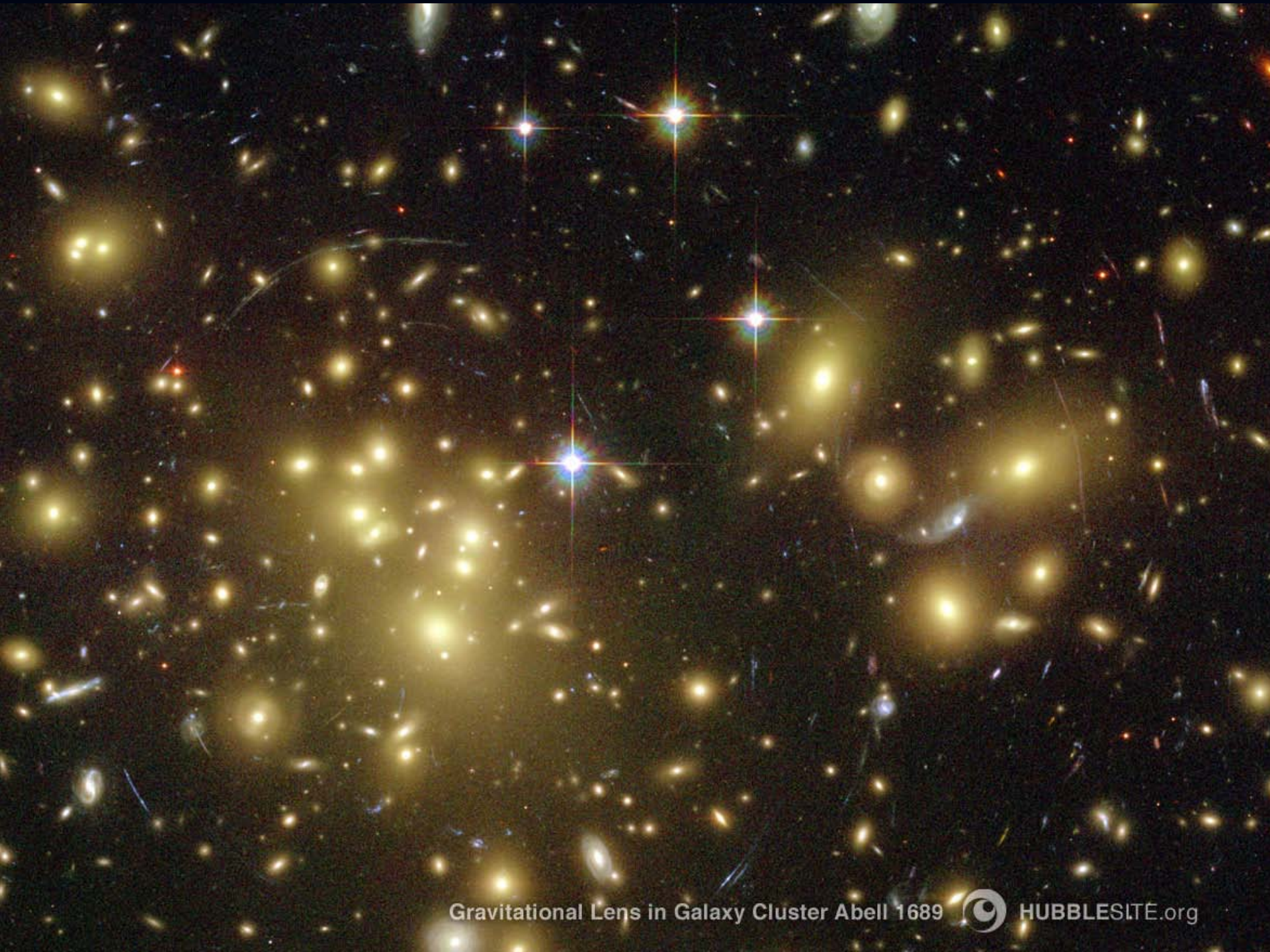
Gravitationslinse, HST

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

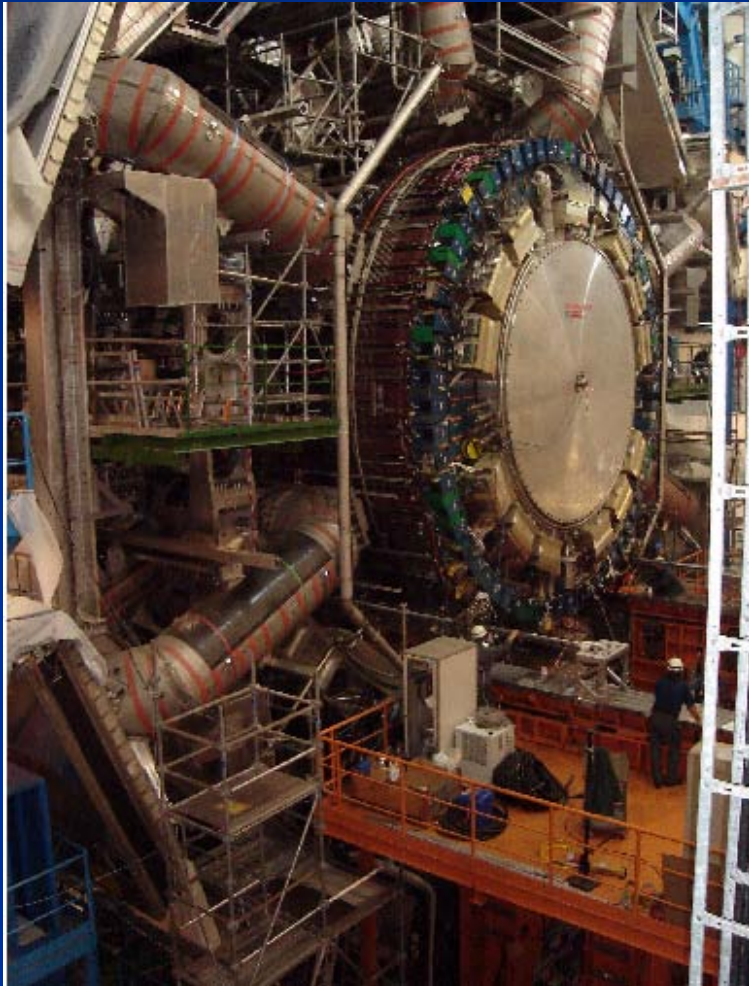


Dunkle Materie

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

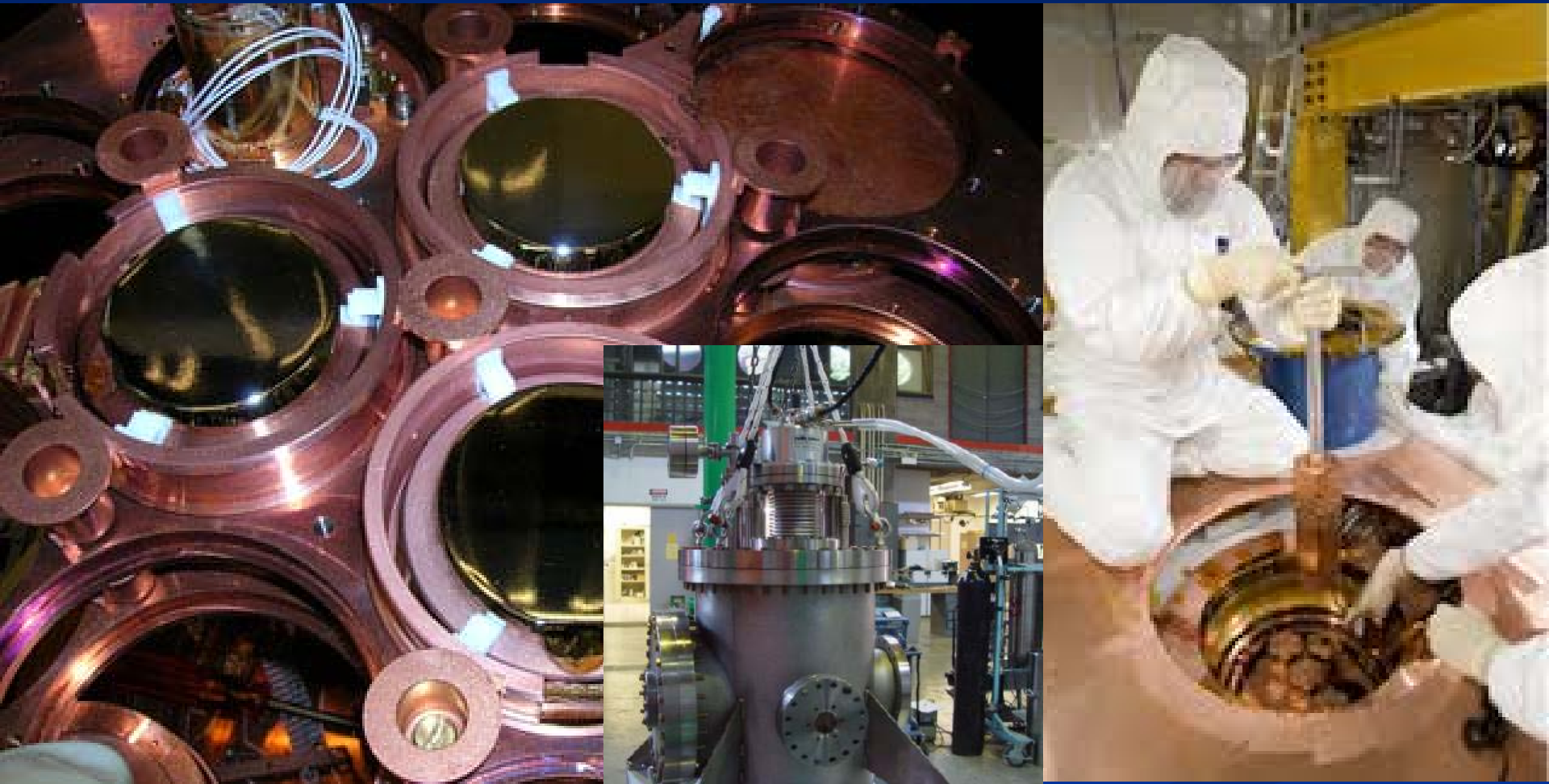
Woraus besteht Dunkle Materie ?

Dunkle Materie könnte aus noch unbekannten Elementarteilchen bestehen



LHC , CERN , Genf

Suche nach Dunkler Materie



bis heute nichts gefunden ...

Woraus besteht unser Universum ?



Quintessenz !

Feuer , Luft,
Wasser,
Erde !

Dunkle Materie + Atome :

Alles was klumpt !

30 %

Dunkle Energie :

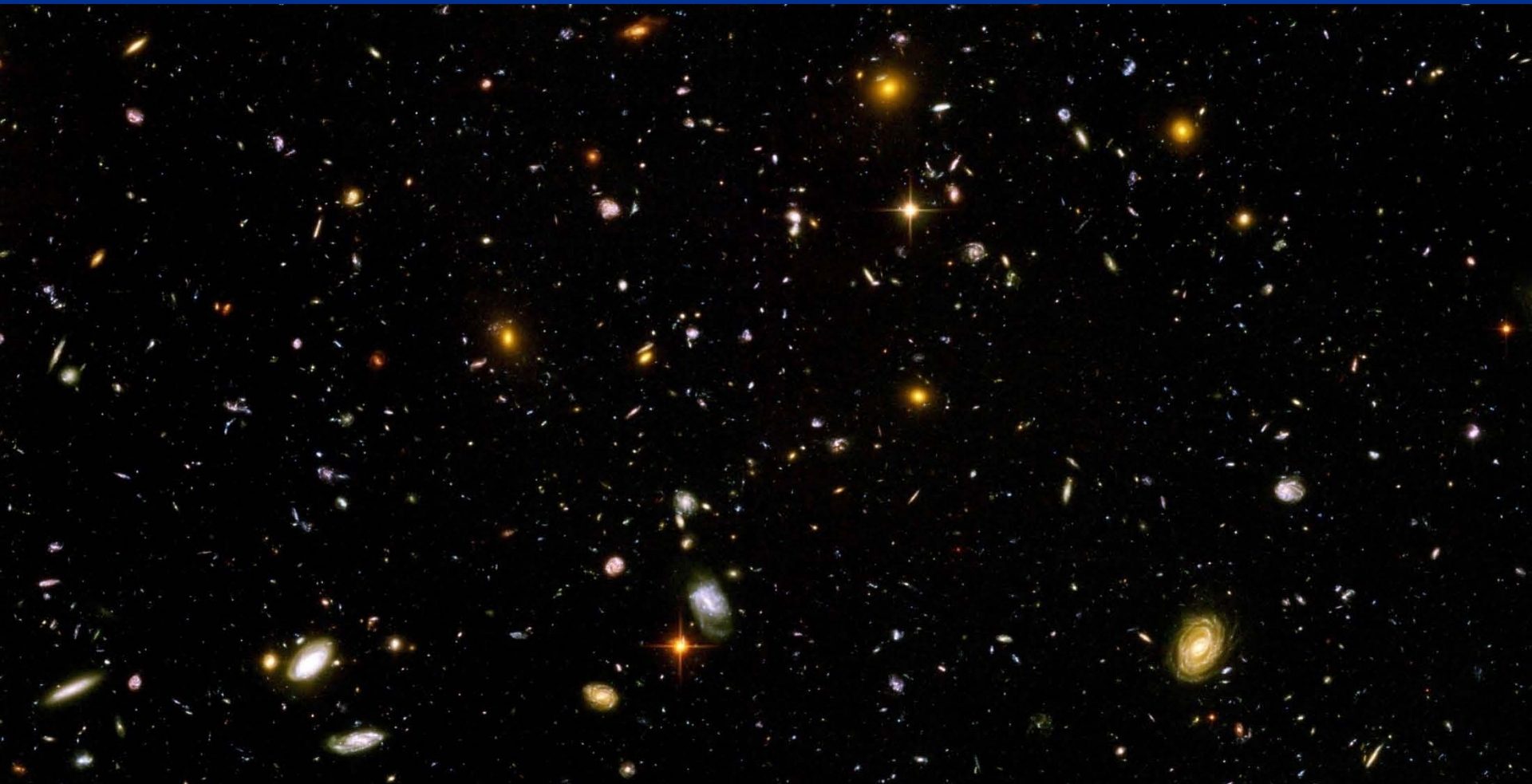
70 %

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

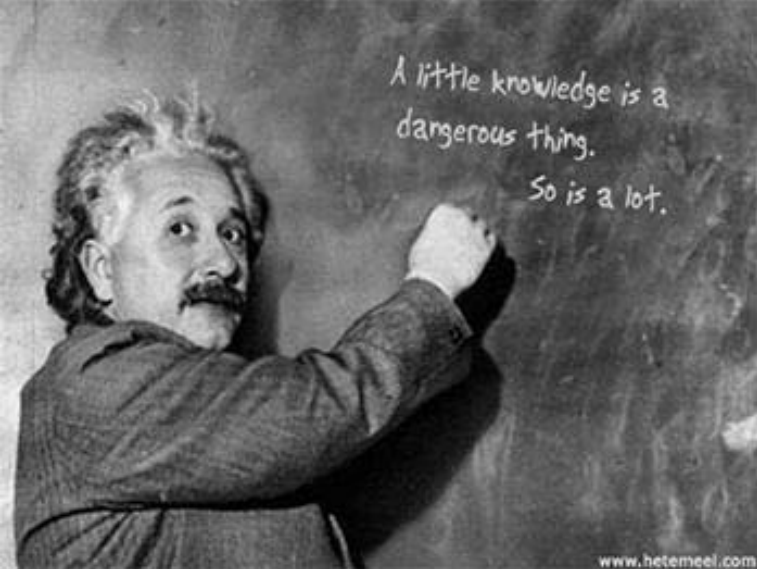
Die kosmische Renaissance:
Ende des "Dunklen Zeitalters"

← Reionisation beendet.
Das Universum ist transparent.

Galaxien entwickeln sich

Das Sonnensystem entsteht

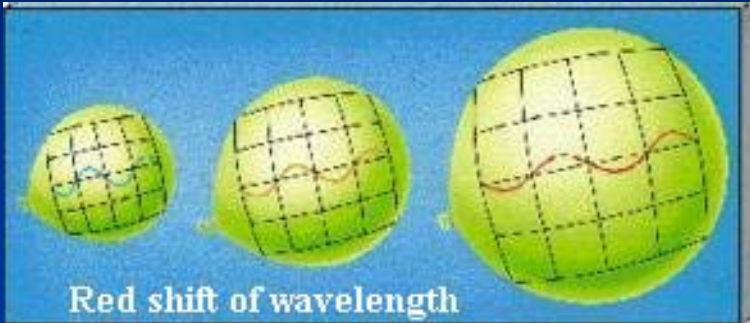
Heute: Astronomen
erklären das Universum



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

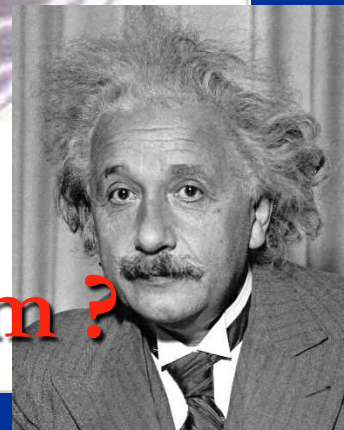


Expansion des Universums



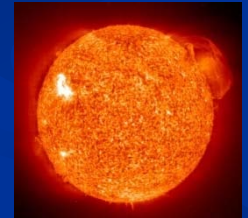
Expanding distance between galaxies

Hmm?



Expansion des Universums

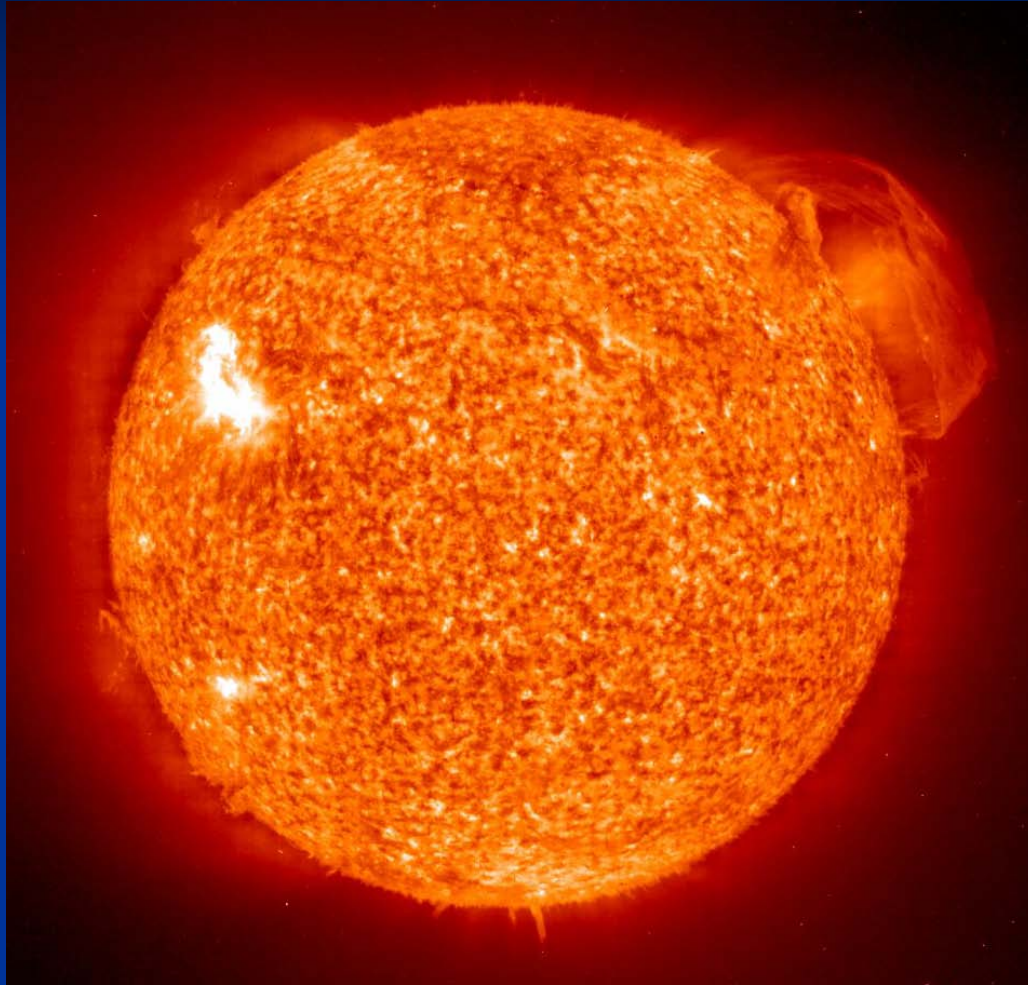
- Der Raum zwischen den Galaxienhaufen dehnt sich aus.
- Früher war das Universum dichter, ... und heißer.
- Zurückverfolgung der Einstein'schen kosmologischen Gleichungen :
Urknall, extrem heißer Feuerball !
- Bis ca 400 000 Jahre nach dem Urknall : heißes Plasma aus Protonen, Elektronen und Strahlung



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

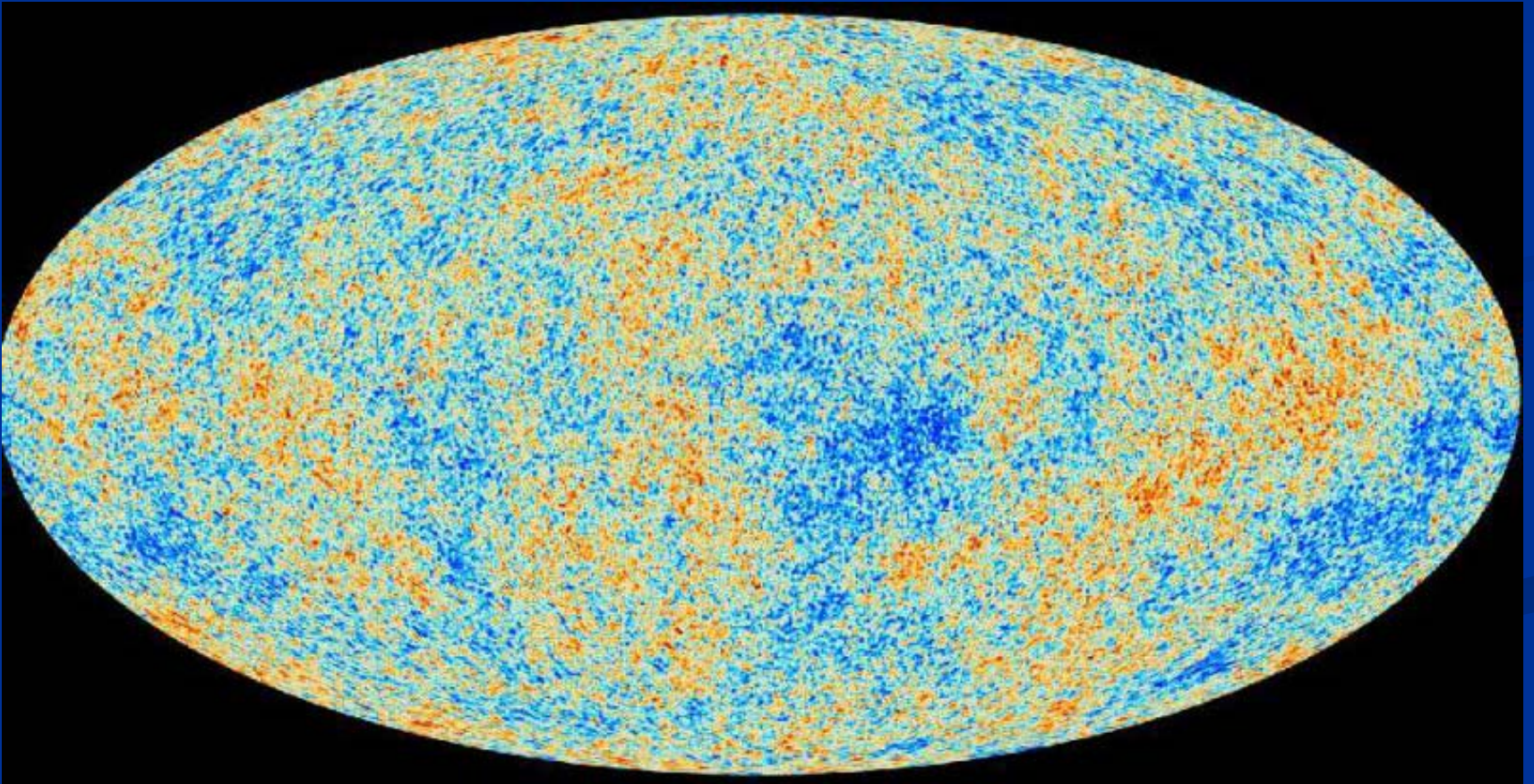
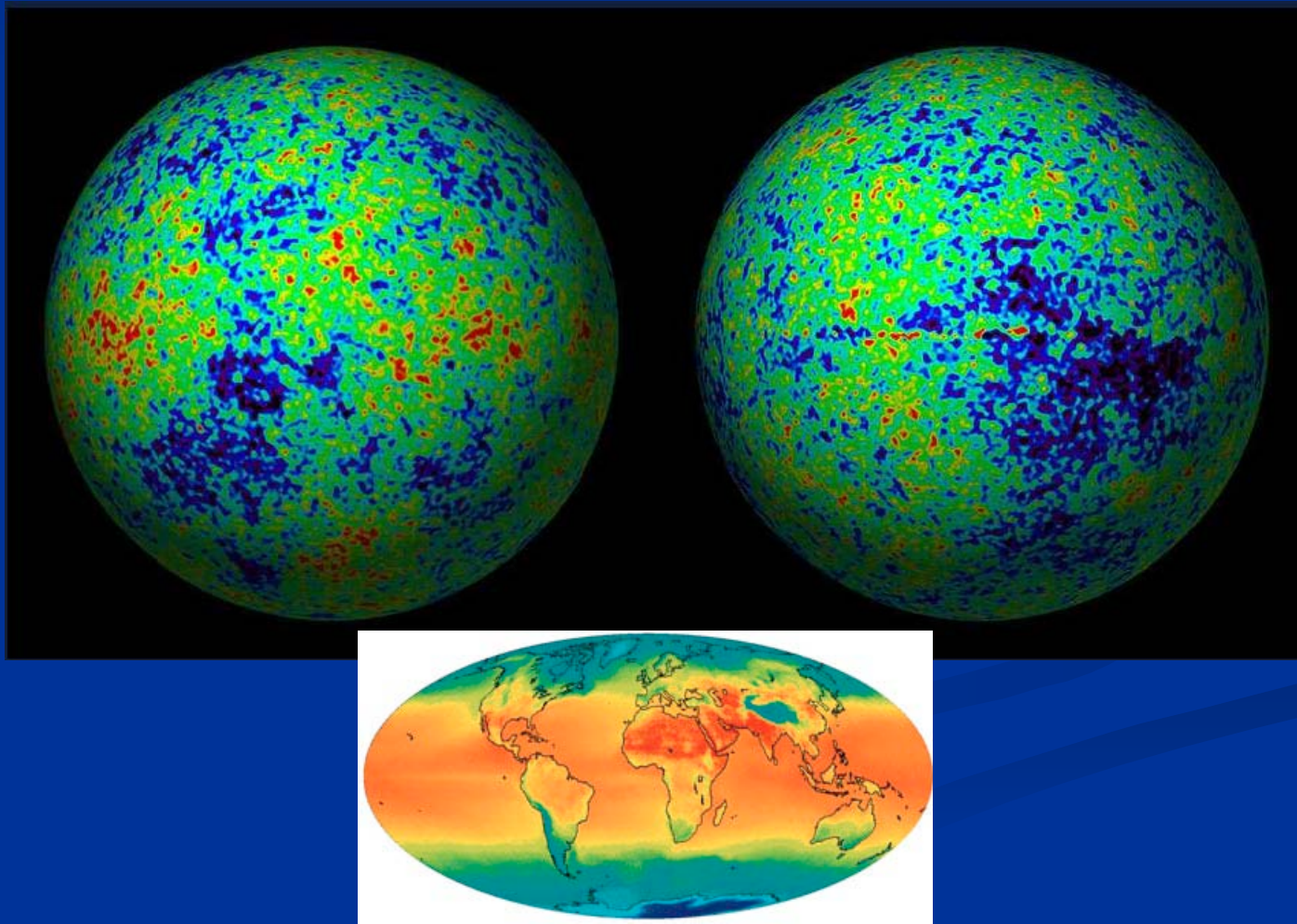
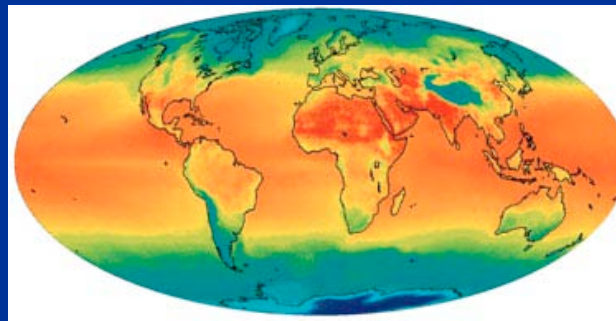
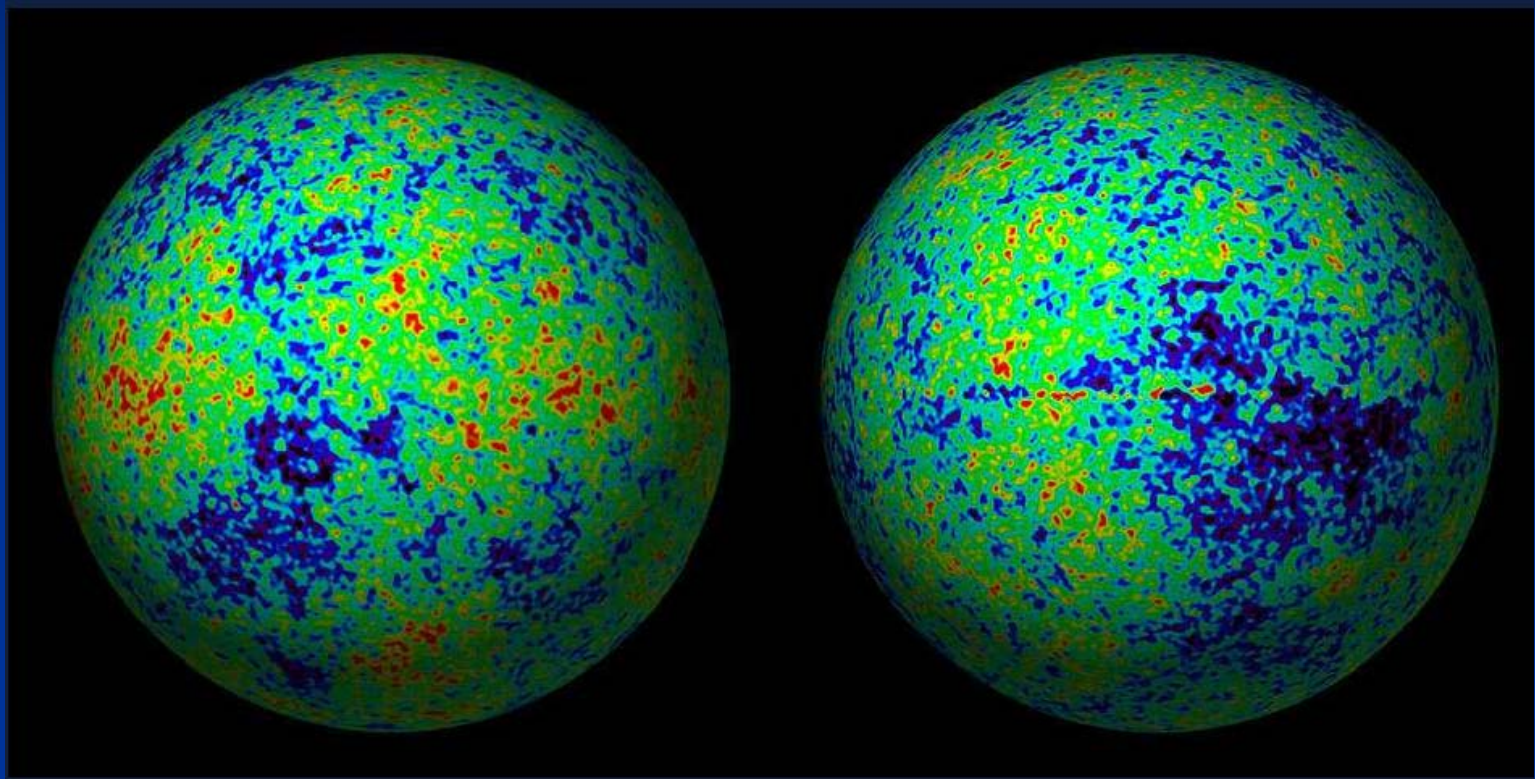


Bild einer Kugeloberfläche von innen winzige Temperatur-schwankungen der Hintergrundstrahlung

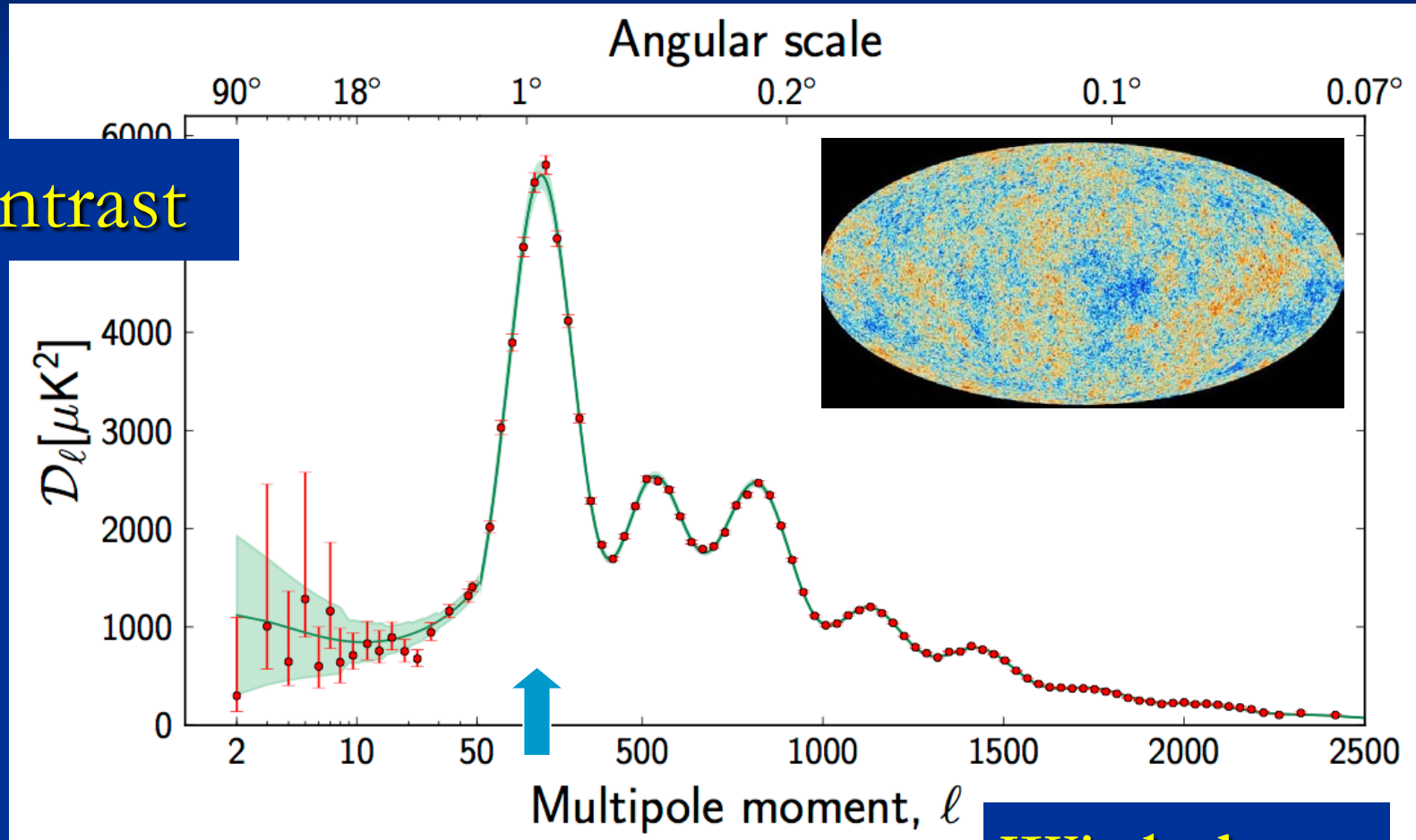


Anisotropie der Hintergrundstrahlung : Fleckengröße



Stärke der Temperaturschwankung in Abhängigkeit von Fleckengröße (im Winkel)

Kontrast

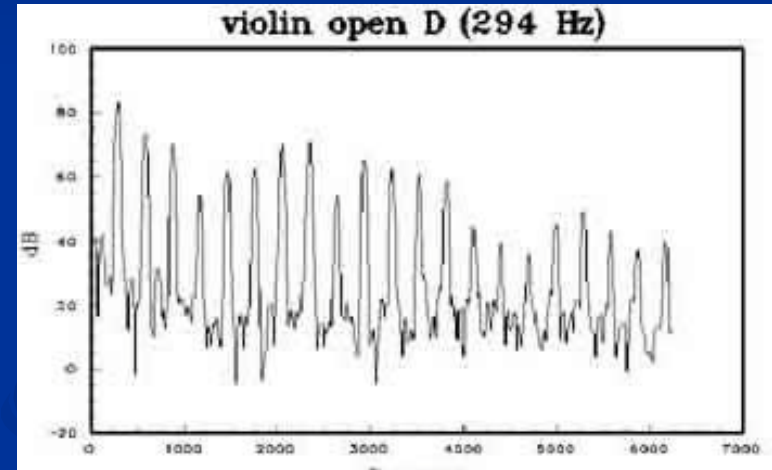
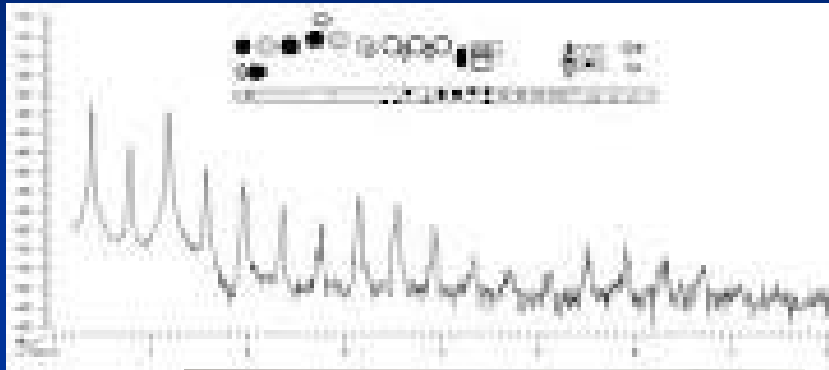


ca 10 Grad

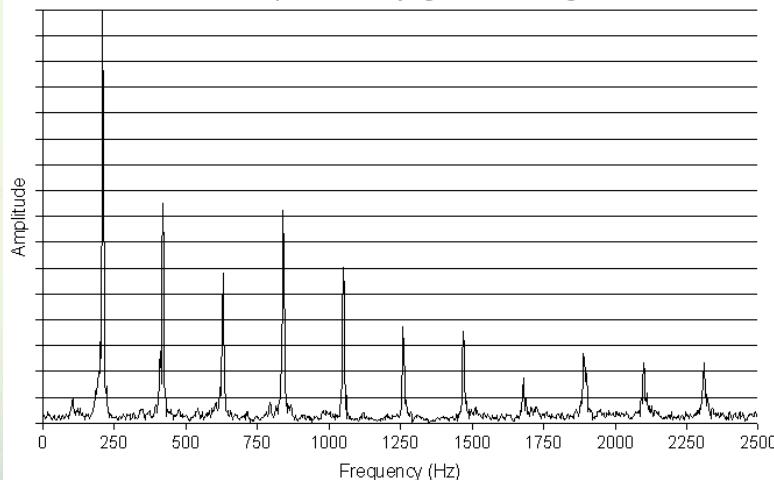
ca 1 Grad

Winkel

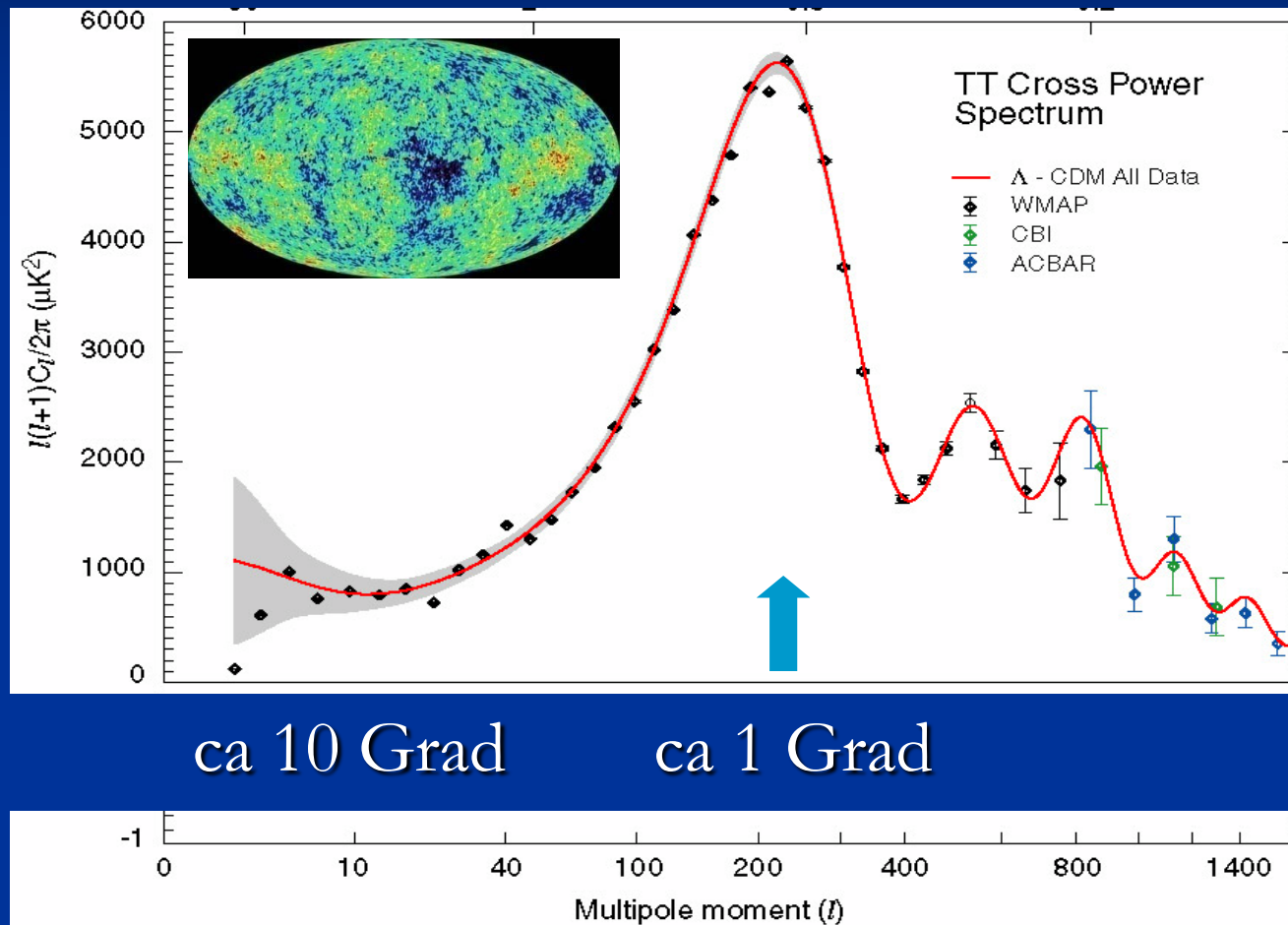
Frequenzpektrum Musikinstrumente



Cello Spectrum - Playing G# on D String



Akustische Schwingungen im Plasma



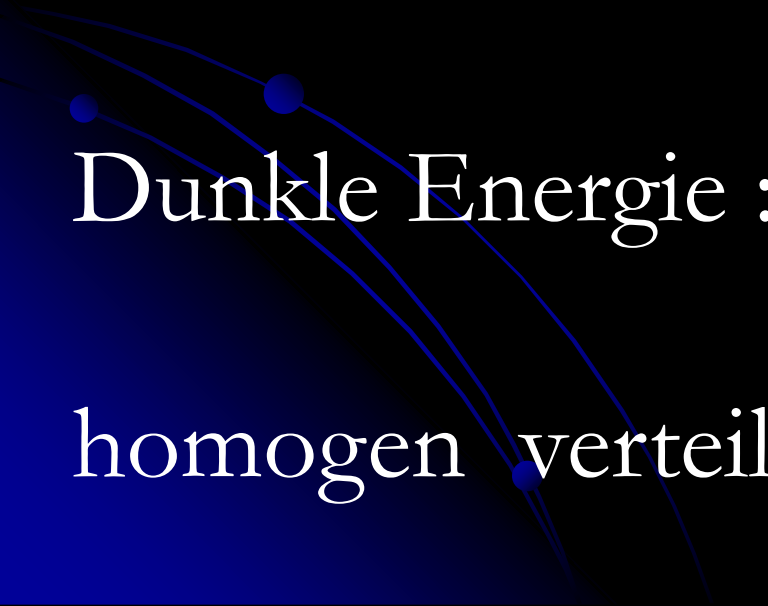
Zusammensetzung des Universums

Atome : 5 %

Dunkle Materie : 25 %

Dunkle Energie : 70 %

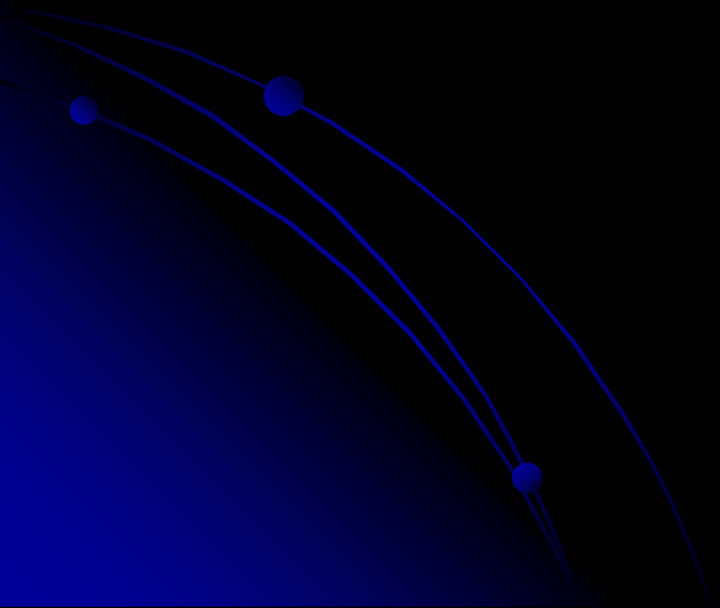
Eigenschaften der Dunkle Energie ?



Dunkle Energie :

homogen verteilt

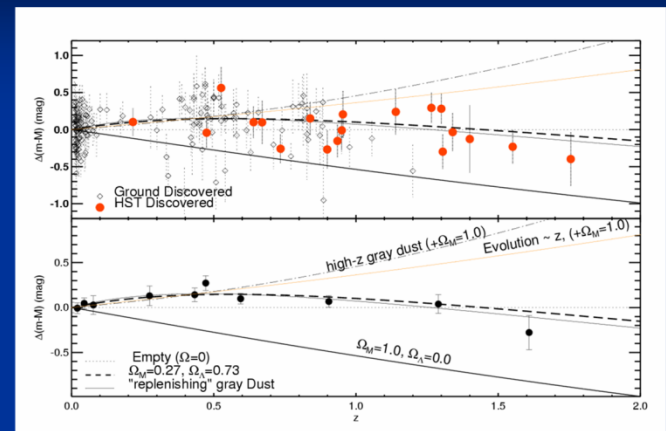
Dunkle Energie : kosmologische Effekte



Vorhersagen für Kosmologie mit Dunkler Energie

*Die Expansion des Universums
beschleunigt sich heute !*

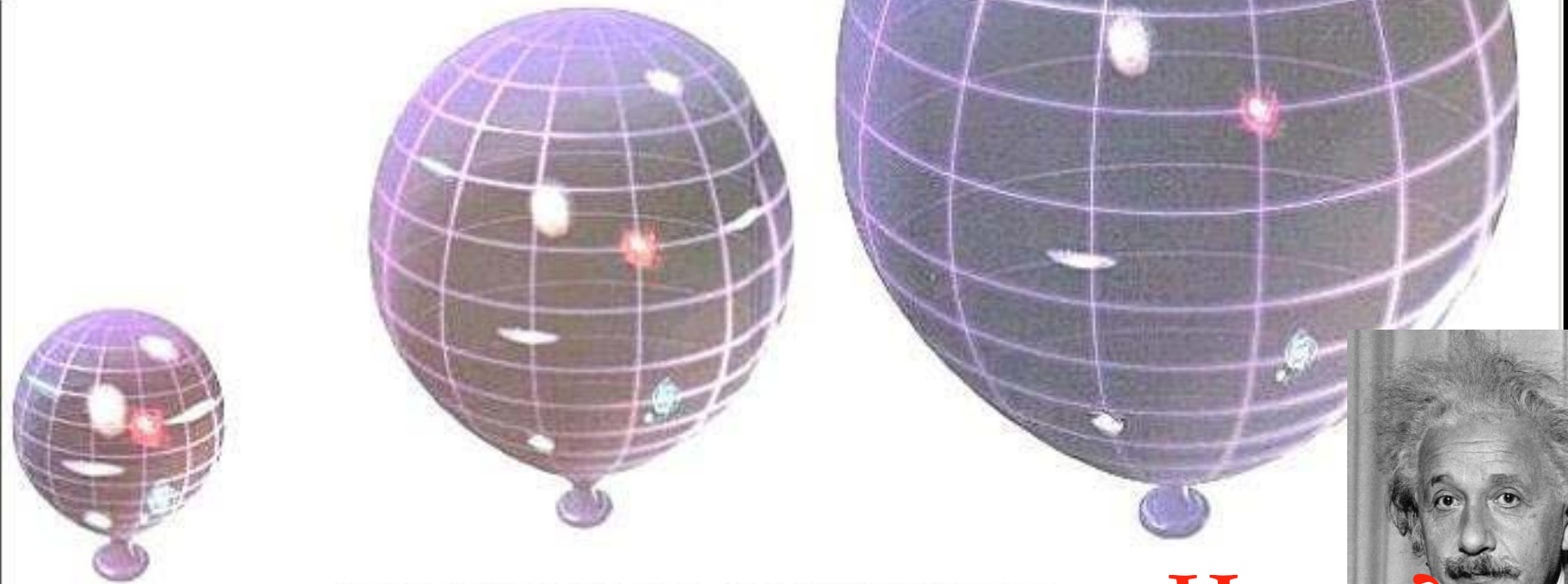
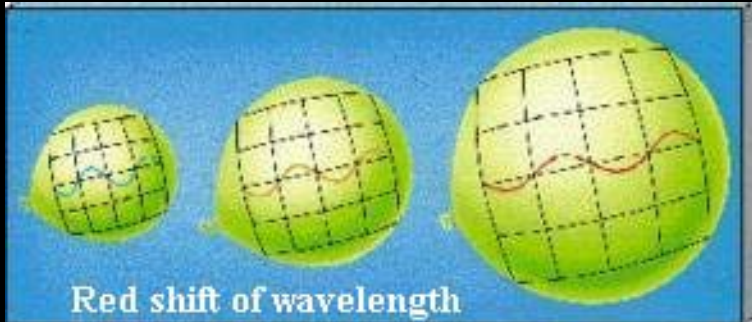
Supernova Ia Hubble-Diagramm



Rotverschiebung z

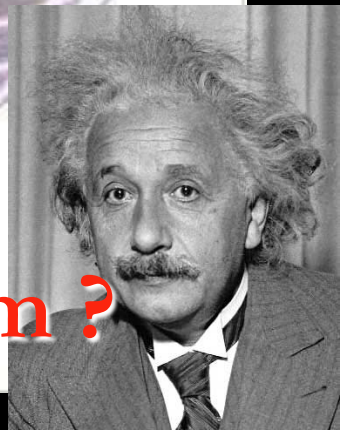
Riess et al. 2004

Expansion des Universums



Expanding distance between galaxies

Hmm?



Supernovae als Standardkerzen



Beschleunigte Expansion

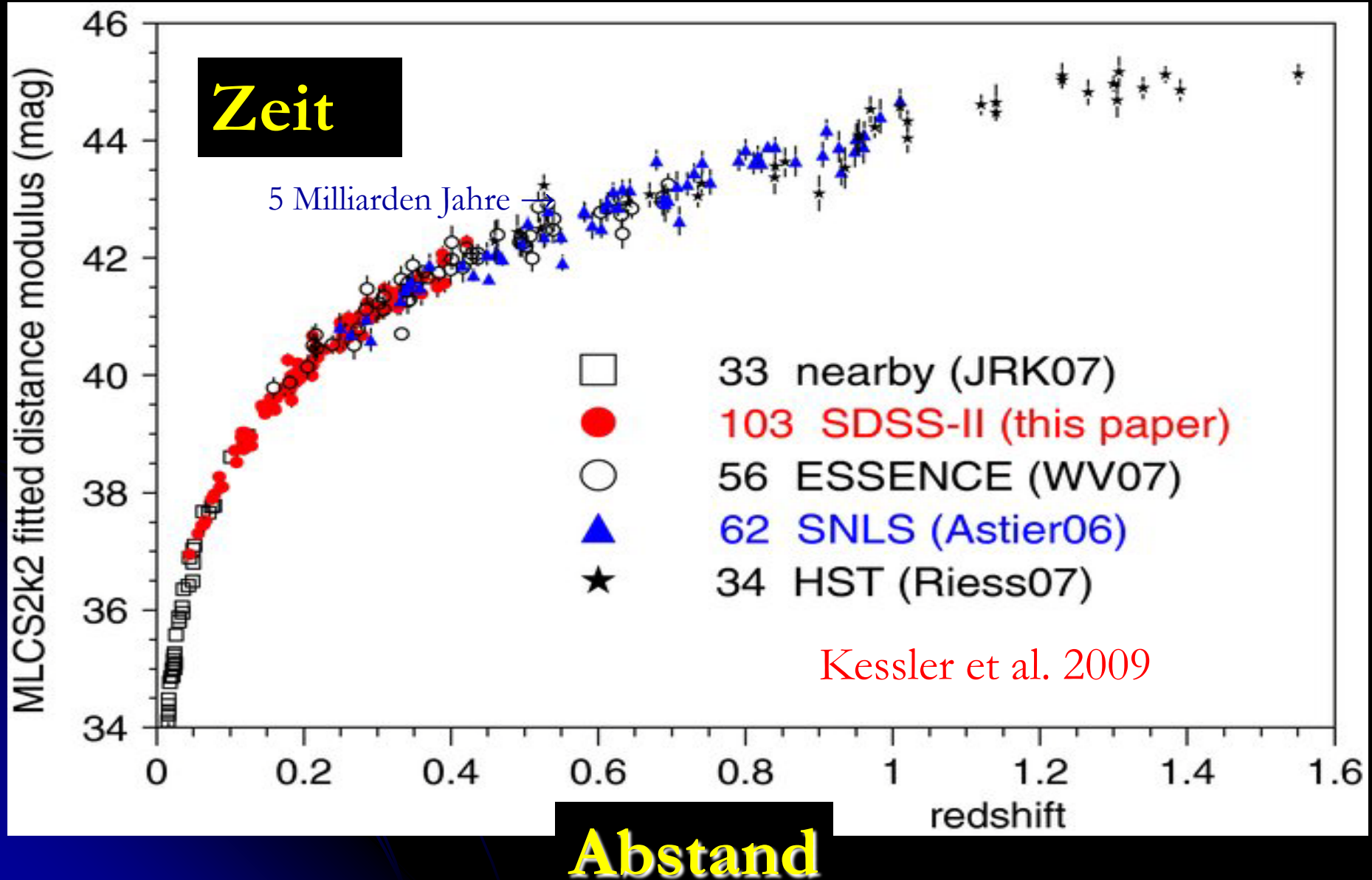




Photo: Roy Kaltschmidt. Courtesy: Lawrence Berkeley National Laboratory

Saul Perlmutter



Photo: Belinda Pratten, Australian National University

Brian P. Schmidt



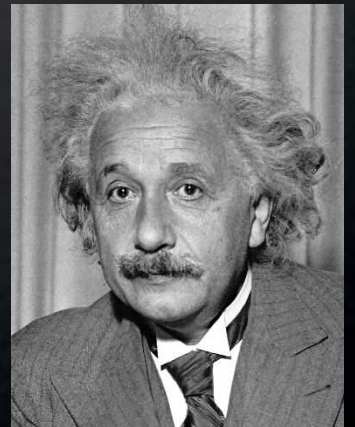
Photo: Homewood Photography

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 ? Hmm?



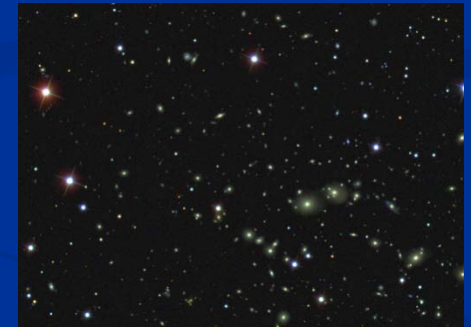
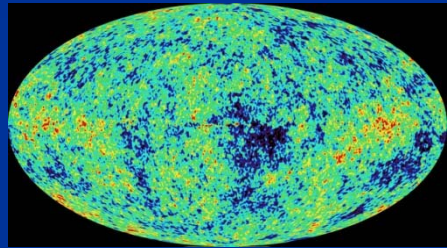
**Dunkle Energie und Dunkle Materie
sind (heute) Gegenspieler :**

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

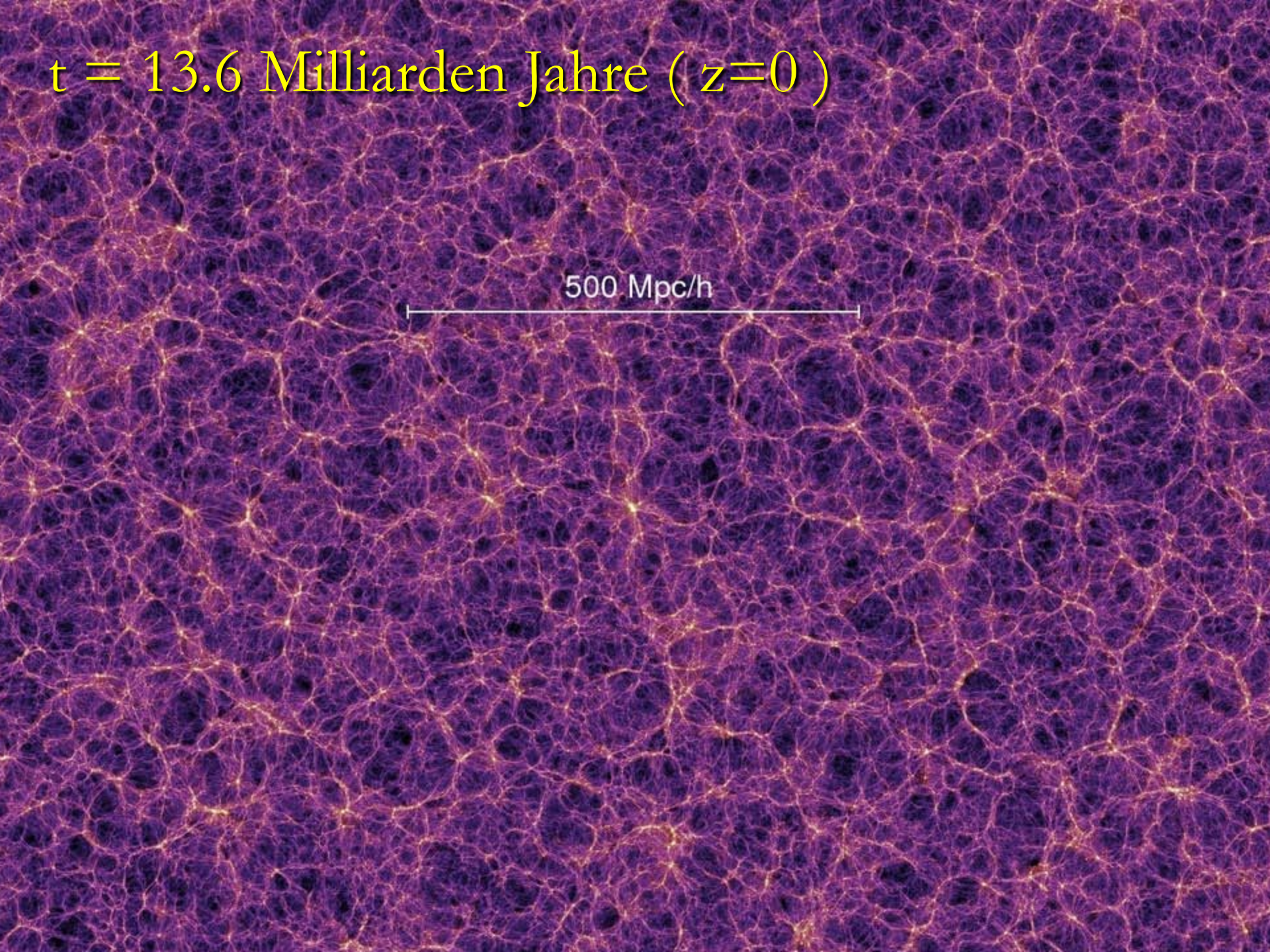
$t = 1$ Milliarde Jahre ($z = 5.7$)

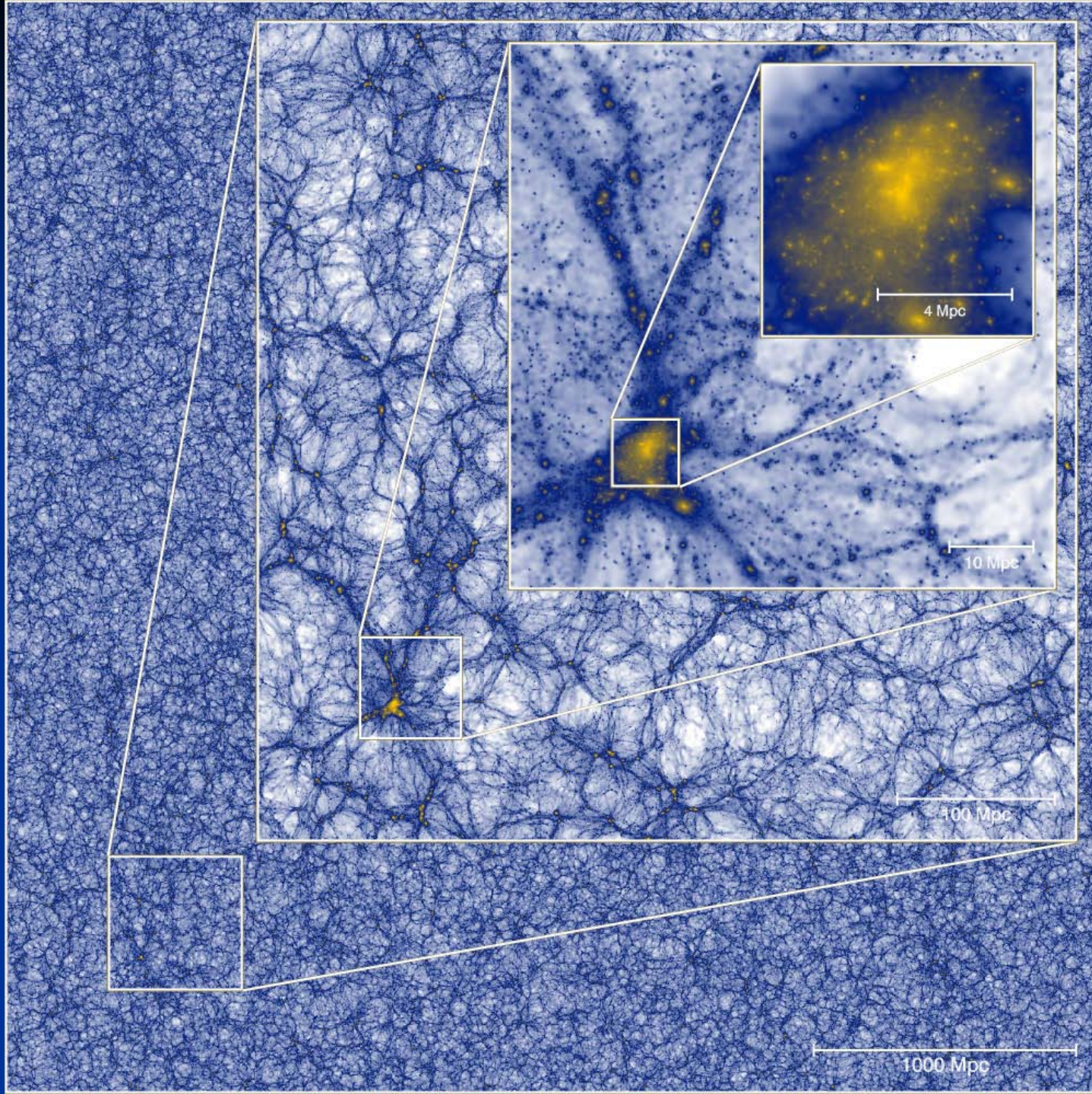
500 Mpc/h



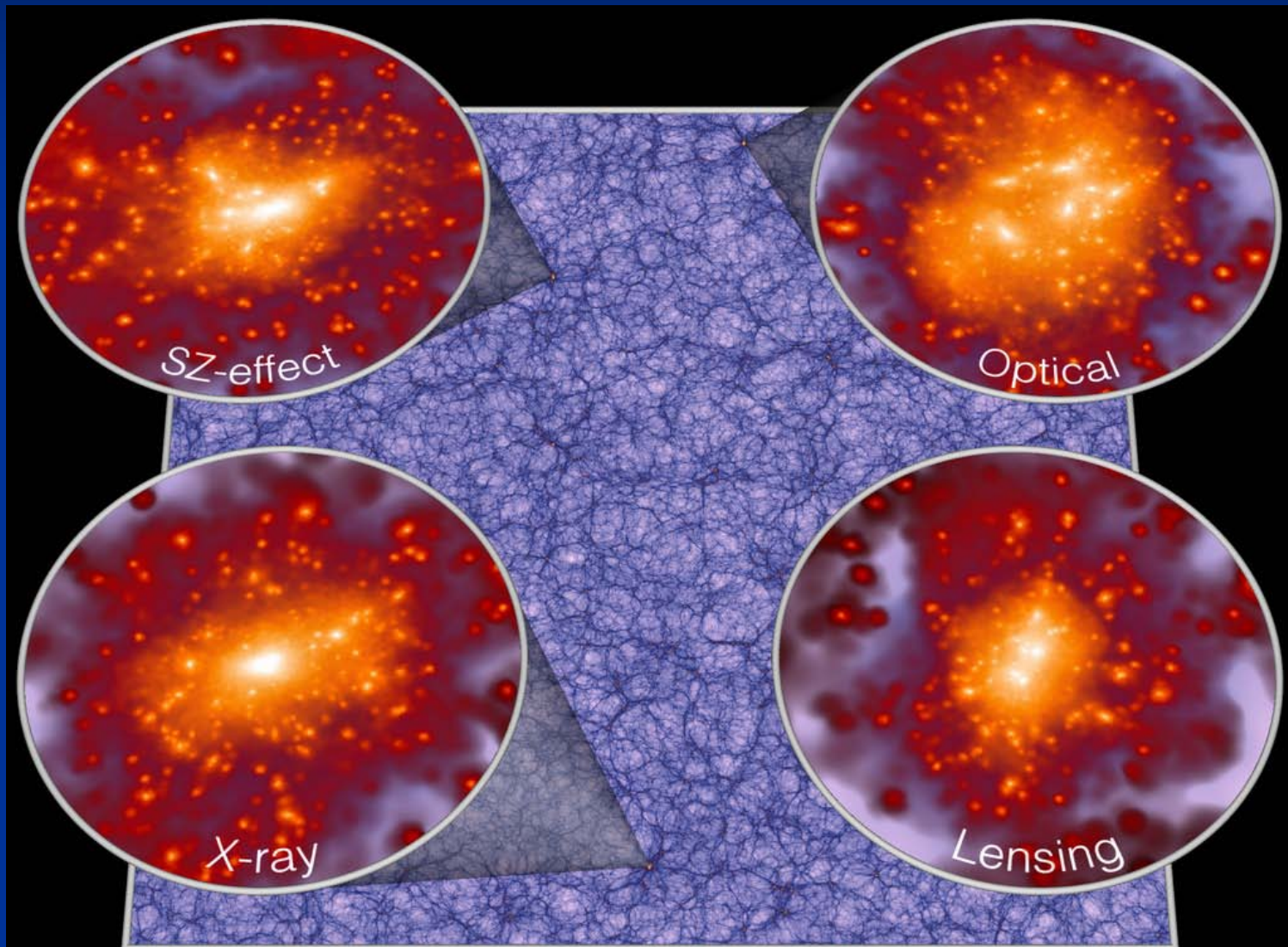
$t = 13.6$ Milliarden Jahre ($z=0$)

500 Mpc/h

A visualization of the cosmic web at redshift z=0, showing a dense network of filaments and nodes. The filaments are colored in shades of purple and blue, while the nodes are highlighted in yellow and orange. A horizontal scale bar is positioned in the upper-middle part of the image, with the text "500 Mpc/h" above it.



Eigenschaften der Galaxienhaufen können beobachtet werden

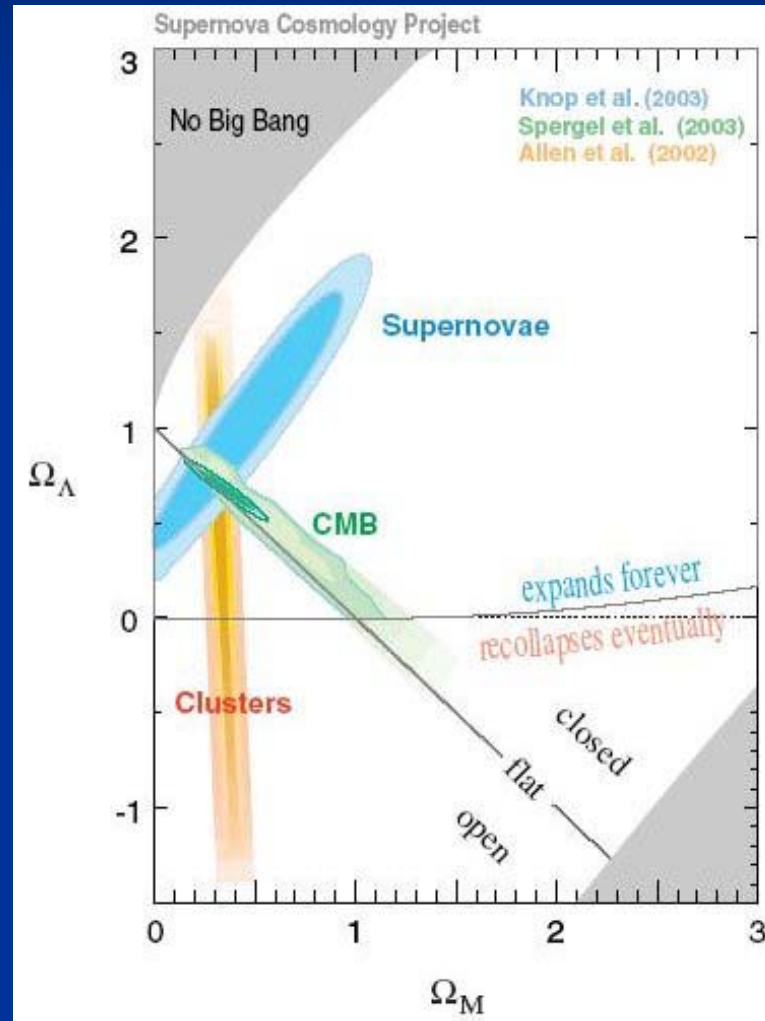


Vergleich mit Beobachtung

Quantitatives Verständnis der Strukturbildung braucht Dunkle Energie

Dunkle Energie :

die Beobachtungen passen zusammen !



Konsistentes kosmologisches Modell !

Zusammensetzung des Universums

Atome:	5%	sichtbar	klumpt
Dunkle Materie:	25%	unsichtbar	klumpt
Dunkle Energie:	70%	unsichtbar	homogen

Was ist Dunkle Energie ?

Was ist die Dunkle Energie ?

Kosmologische Konstante

oder

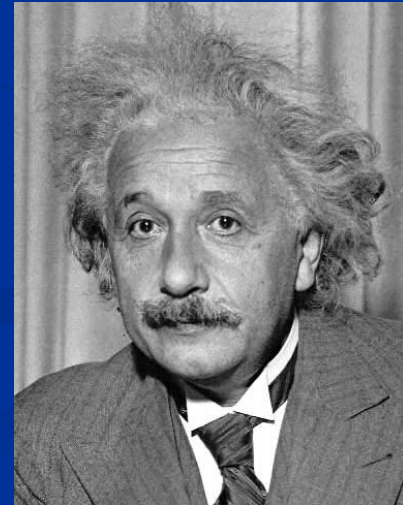
Quintessenz

oder

Modifikation der Gravitation ?

Kosmologische Konstante

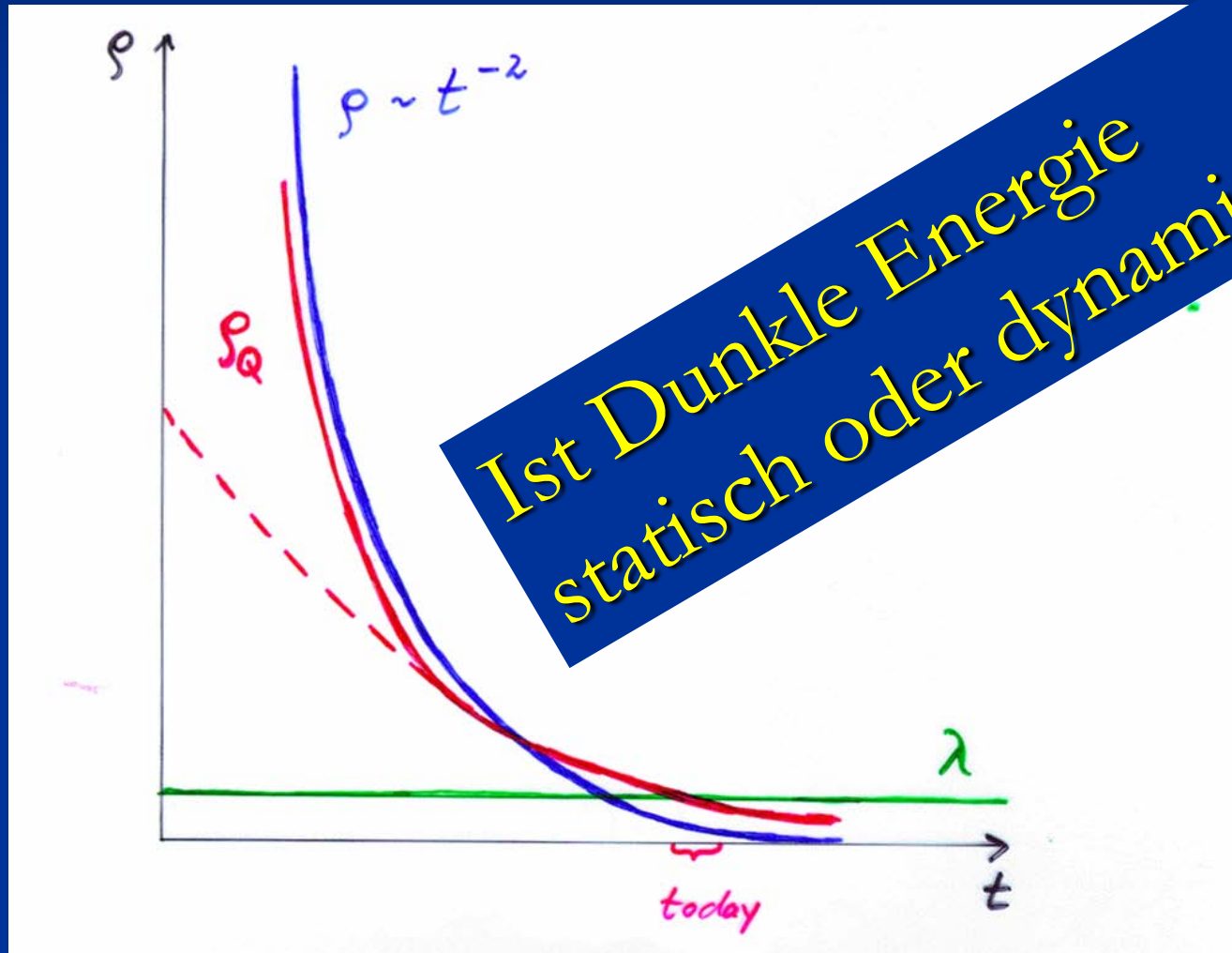
- Konstante λ verträglich mit allen Beobachtungen
- Konstante λ verträglich mit allen Symmetrien
- Zeitlich konstanter Beitrag zur Energiedichte
- Warum so klein ? $\lambda/M^4 = 10^{-120}$
- Warum gerade heute wichtig?



Meine
größte
Eselei

Kosm. Konst.
statisch

Quintessenz
dynamisch



Zeitentwicklung

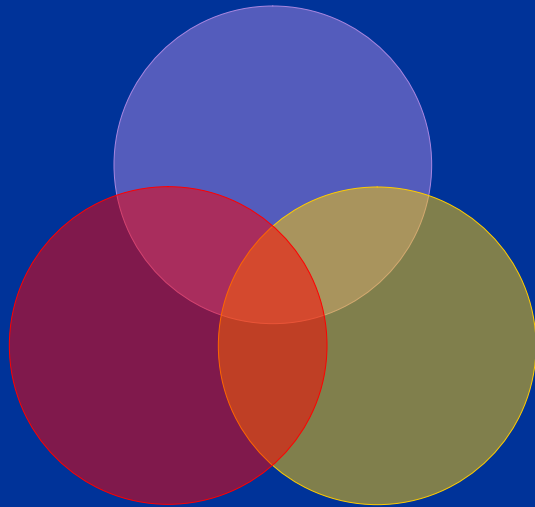
Dichte von Materie und Strahlung
fällt mit der Zeit ab : $\sim t^{-2}$

Grosses Alter $\rightarrow$ kleine Grössen

Gleiche Erklärung für dunkle Energie ?

Quintessenz : neue fundamentale Wechselwirkung

Starke, elektromagnetische, schwache Wechselwirkung



Gravitation

Kosmodynamik

Auf
astronomischen
Skalen:

Graviton

+

Kosmon

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 : Kosmon

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

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

Kosmologische Gleichungen

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

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

Eigenschaften der Dunklen Energie bestimmen die Zukunft des Universums

Vorhersagbarkeit für die nächsten
100 Milliarden Jahre...

Abenteuerreise an den Anfang der Welt

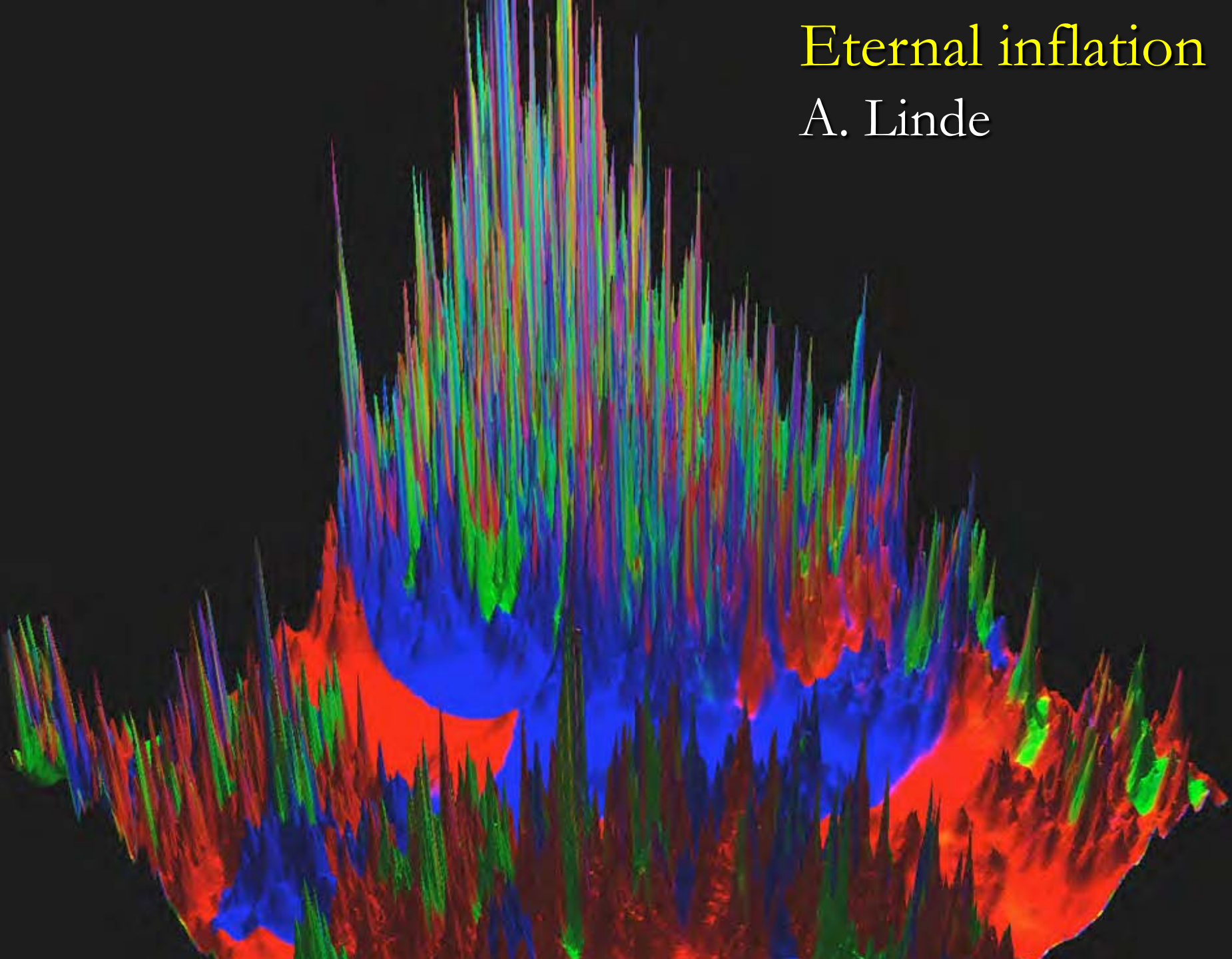
Was ist reell ?

Was ist Vorstellung ?

Was ist pure Spekulation ?

Eternal inflation

A. Linde



Explosion des Raums

- das inflationäre Universum
- am Anfang waren Raum und Zeit und Felder
- während der Inflation ist Universum leer
- Materie und Strahlung werden am Ende der Inflation erzeugt

Skalarfeld : Inflaton

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

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

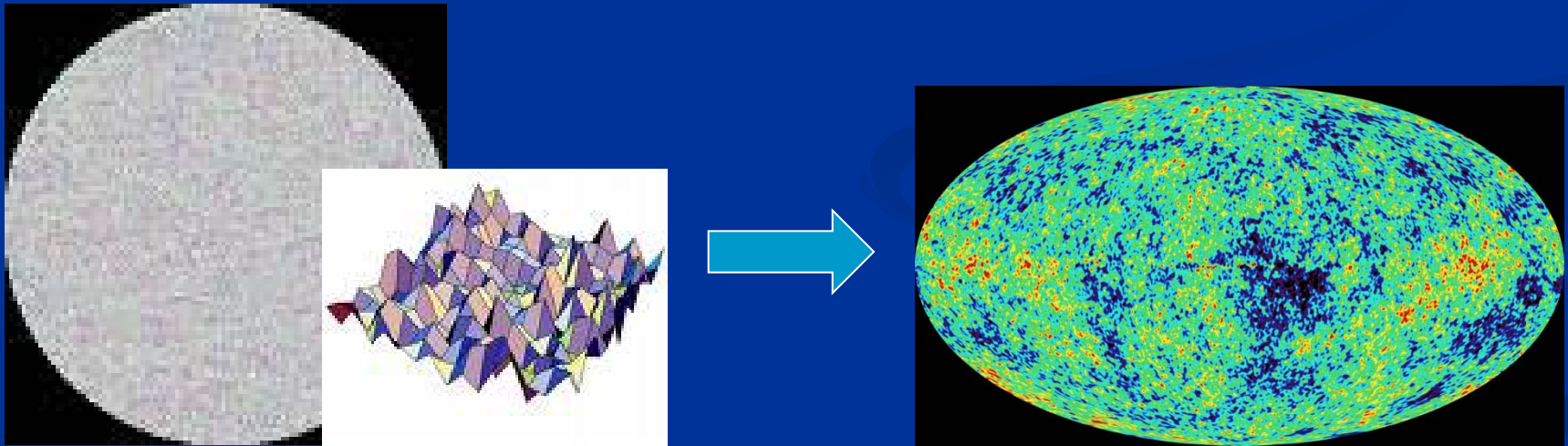
Kosmologische Gleichungen

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

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

Inflationäres Universum

- Ca 10^{-30} - 10^{-40} Sekunden abb
- Entstehung der primordialen Fluktuationen aus Quantenfluktuationen



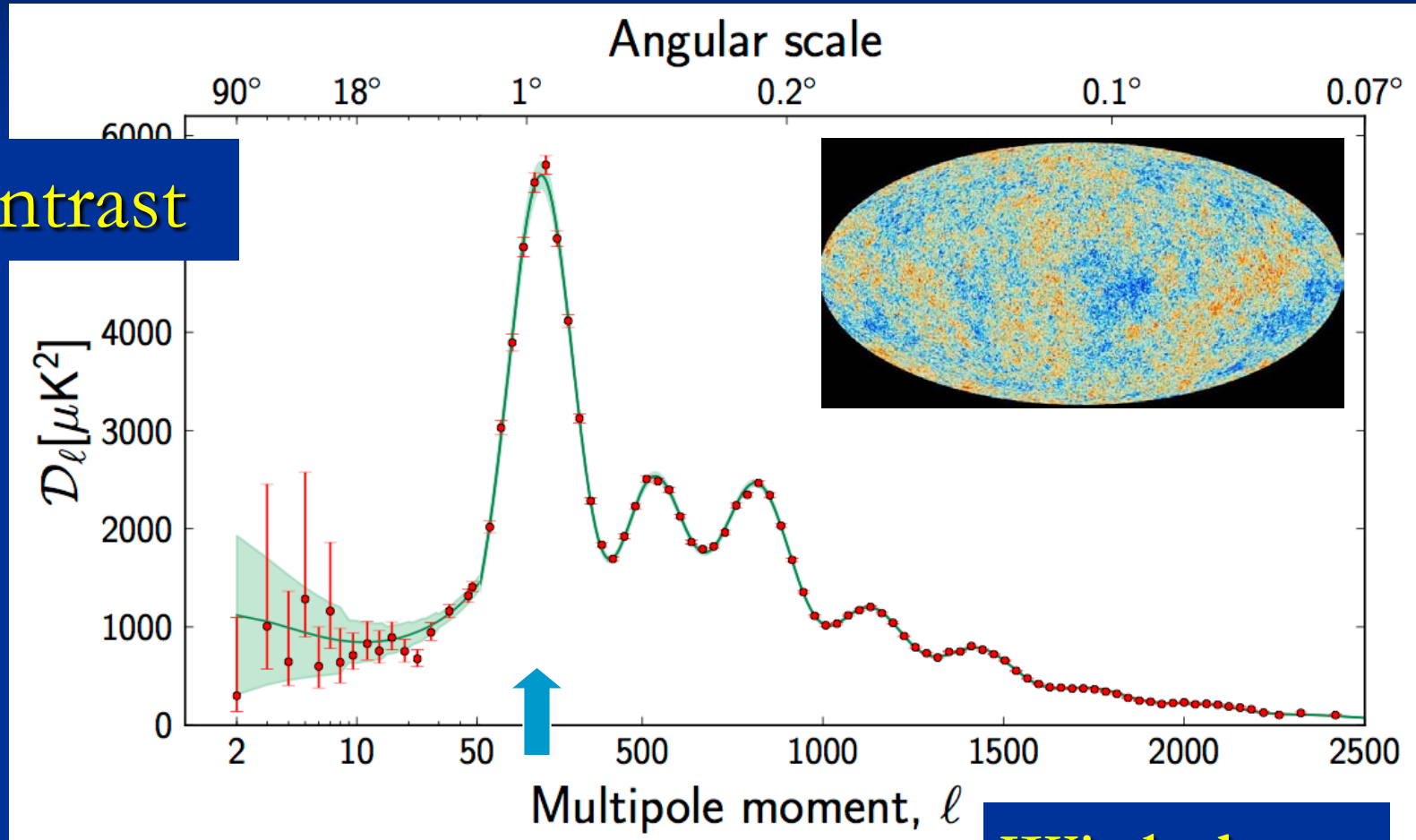
Signale vom Urknall !

Vorhersagen der Inflation

- Universum hat kritische Dichte ☺
- Quantenfluktuationen aus der Zeit der Inflation werden zu “Schallwellen“ zum Zeitpunkt der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung ☺
 - das Universum als Musikinstrument -

Stärke der Temperaturschwankung in Abhängigkeit von Fleckengröße (im Winkel)

Kontrast



ca 10 Grad

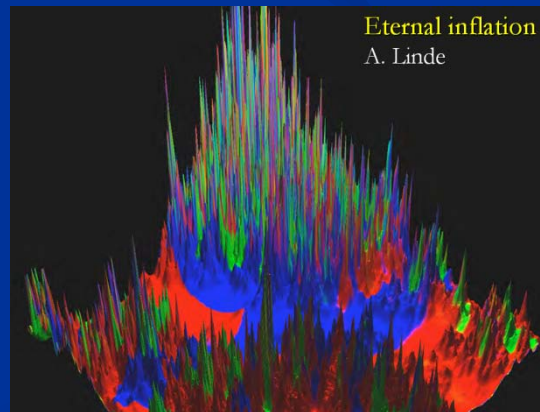
ca 1 Grad

Winkel

Was ist Ursache der Inflation ?

Spekulative Physik ..

- Zusätzliche Raumdimensionen
- Superstringtheorien
- “Kosmologie vor dem Urknall”
- Multiversum



Chancen der Verifizierung ?

- Es fehlt vereinheitlichte Theorie aller Wechselwirkungen !
- Dennoch : Beobachtungen geben Aufschluss über extreme frühe Epochen der kosmologischen Entwicklung !

Urknall oder Kältestarre ?

- Wissen wir wirklich , ob das Universum sich ausdehnt ?
- Beobachtet: der Abstand zwischen Galaxien, geteilt durch die Größe der Atome, wächst.
- Atome könnten auch kleiner werden...

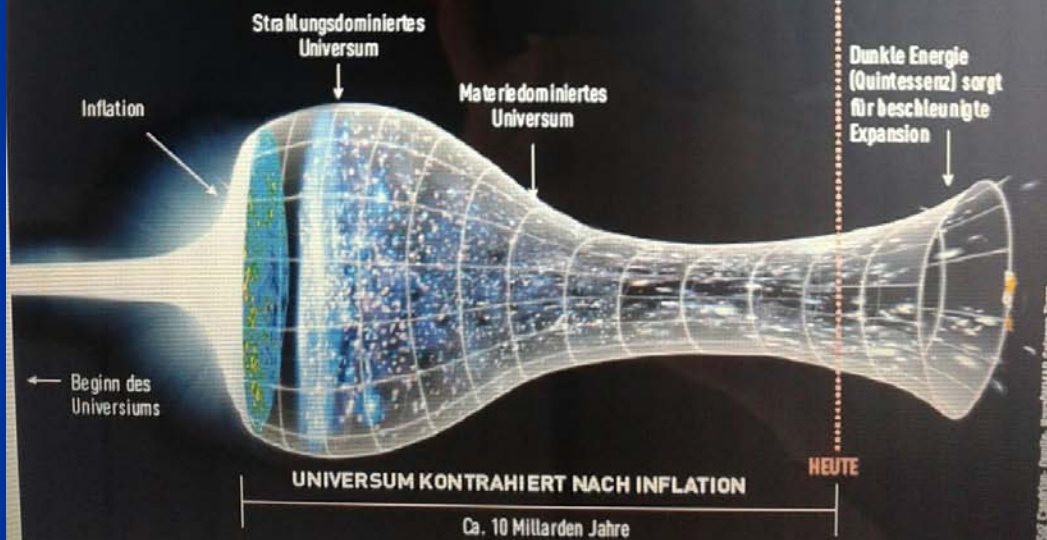
Verschiedene **Bilder** sind möglich !

- Einfaches Modell mit wachsenden Teilchenmassen : Kosmon und Inflaton sind das gleiche Feld.

Klassisches Bild der Kosmologie



Model von Wetterich



Sonntagszeitung
Zuerich
Laukenmann

Zusammenfassung

- Physik des Universums in wesentlichen Zügen bekannt von 10^{-12} Sekunden ab bis heute.
- Wir wissen noch nicht, was Dunkle Materie und Dunkle Energie ist.
- Vorhersagen über Zukunft benötigen quantitatives Verständnis der Dunklen Energie.

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

