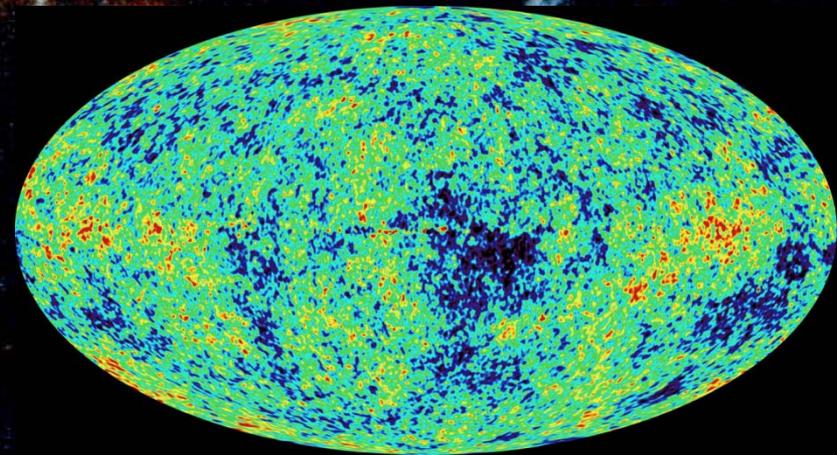


Dunkle Energie – ein kosmisches Rätsel



**Woraus besteht unser
Universum ?**



Quintessenz !

Feuer , Luft,
Wasser,
Erde !

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

bekannt von

Hintergrundstrahlung ,

Nukleosynthese

400 000 Jahre abb
Atomphysik

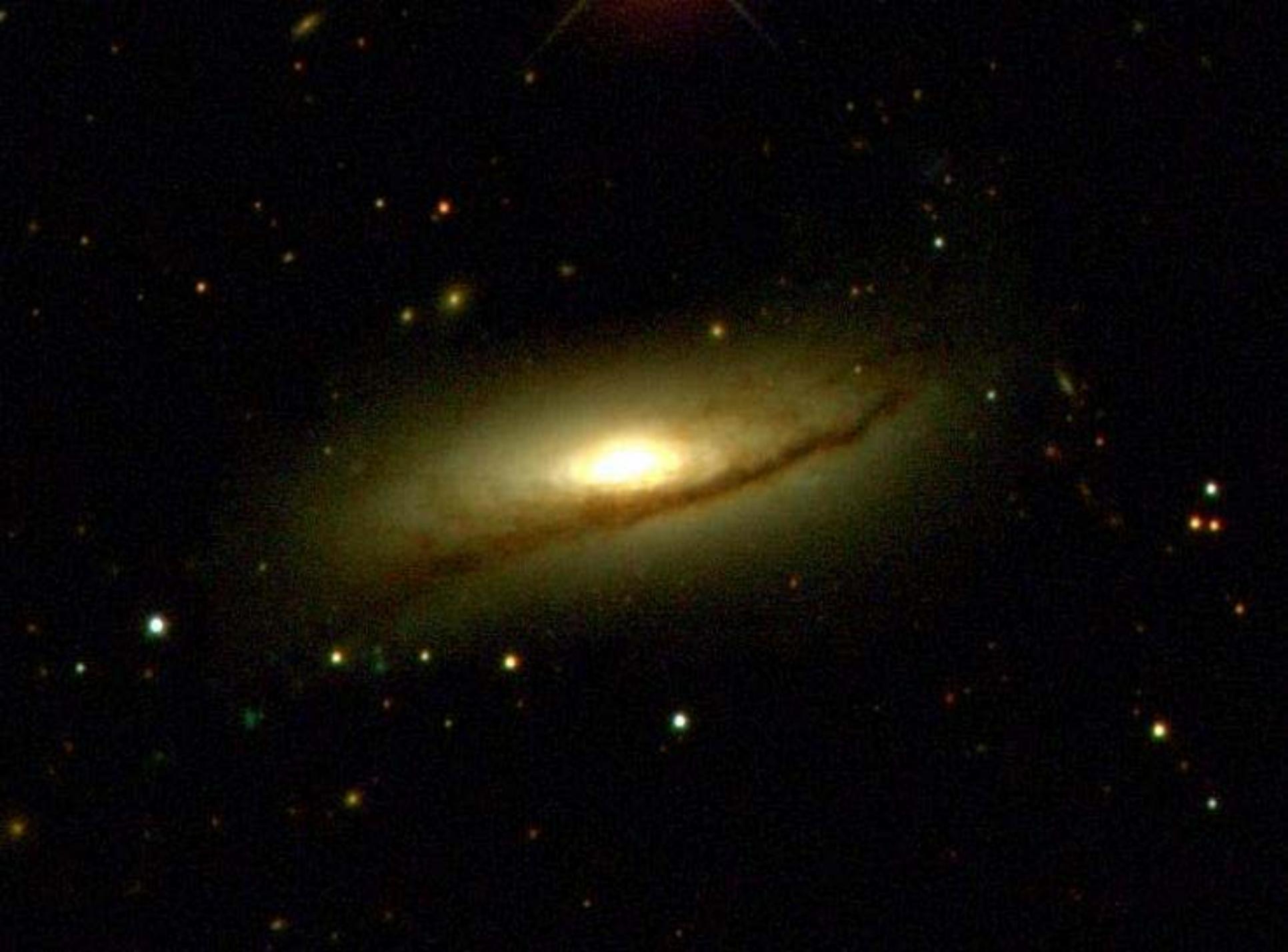
Minute abb
Kernphysik



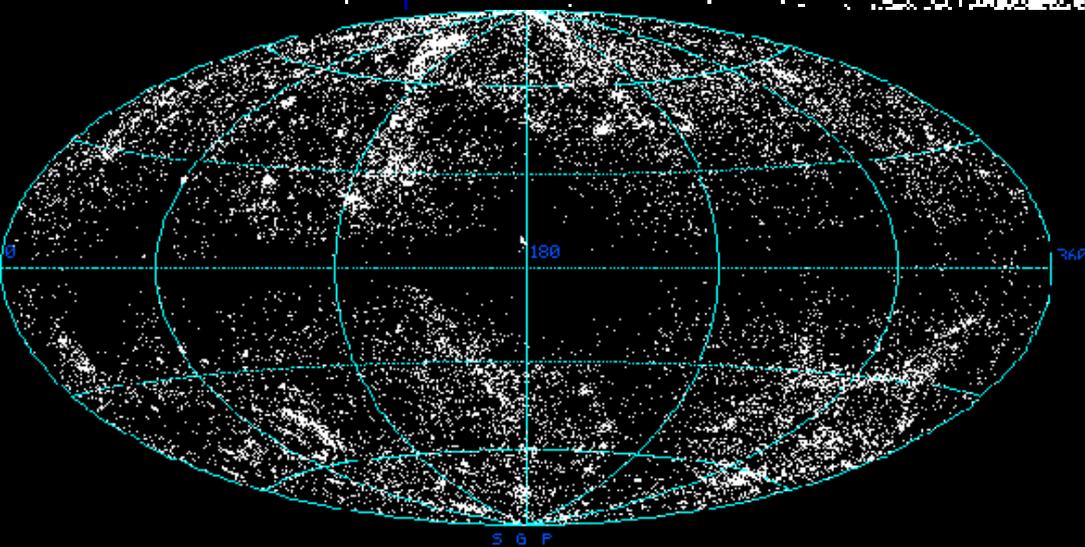
Atome – der Staub des Universums



Abell 2255 Cluster
~300 Mpc



Atome – der Staub des Universums

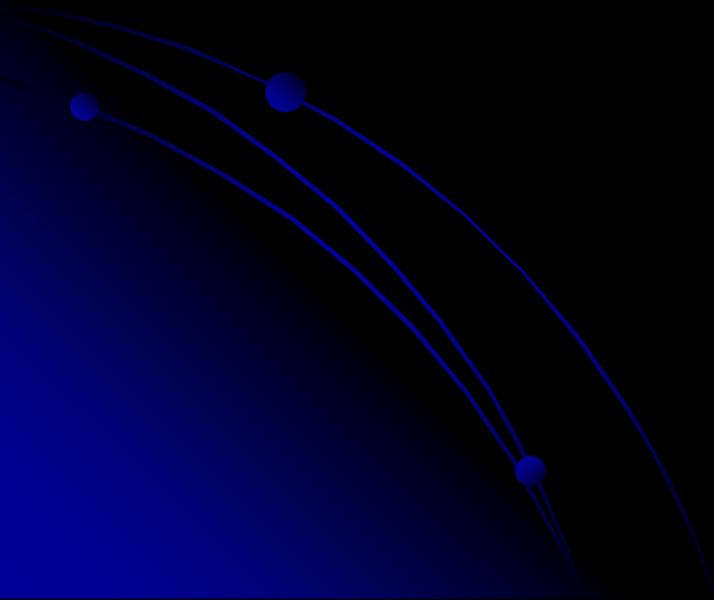


CFA Galaxy Catalog Galactic Map (30926 Gal.)

**(1) 95 % des Universums
sind dunkel**



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



oder genauer : durchsichtig

A vast field of galaxies, including spiral, elliptical, 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 ?*

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

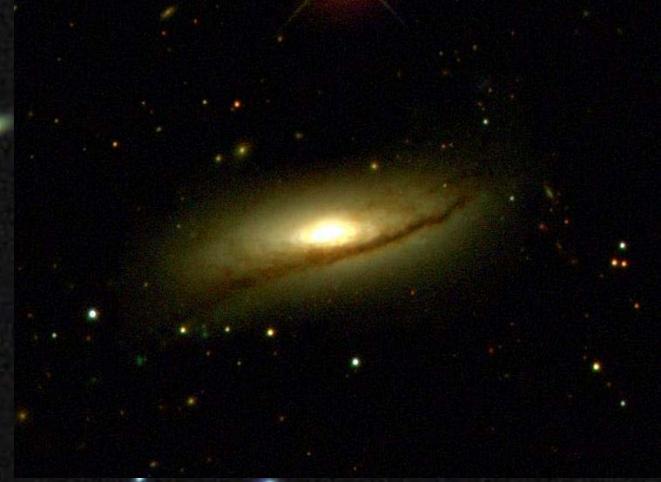
bullet cluster



Wieviel Dunkle Materie gibt es ?

Materie :

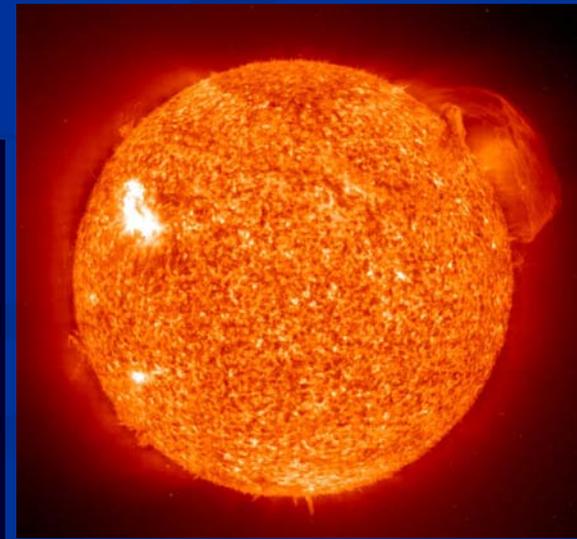
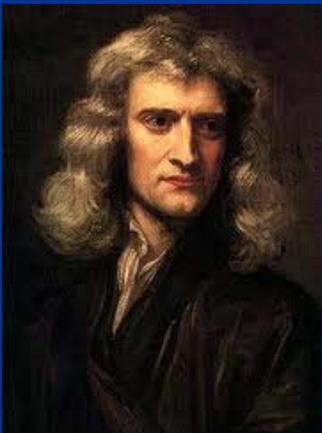
Alles , was klumpt



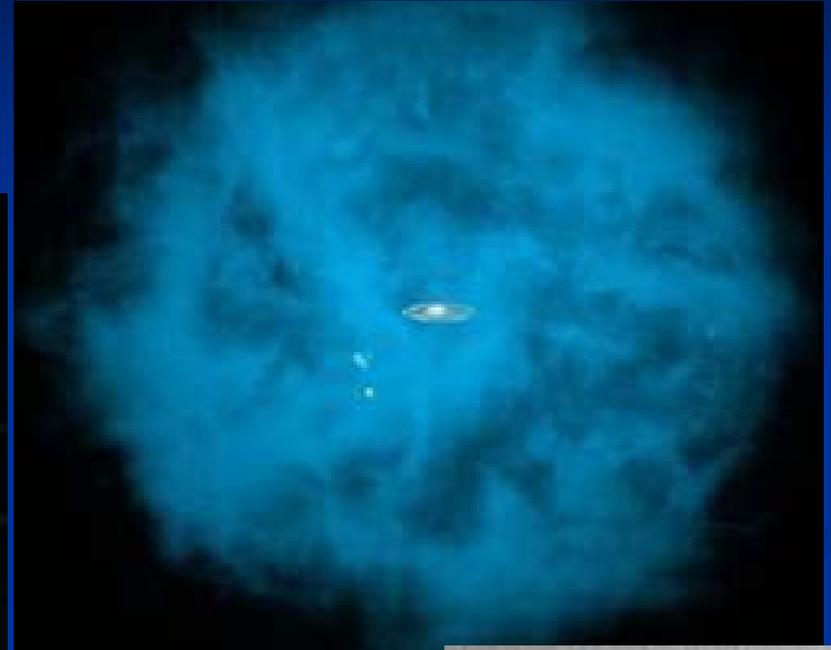
Atome
+
Dunkle
Materie

Gravitations - Potenzial

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



Dunkle Materie in Milchstraße



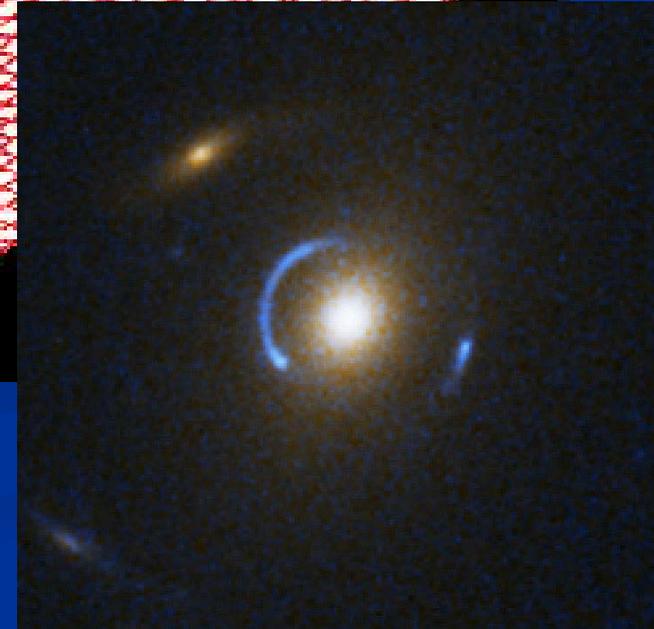
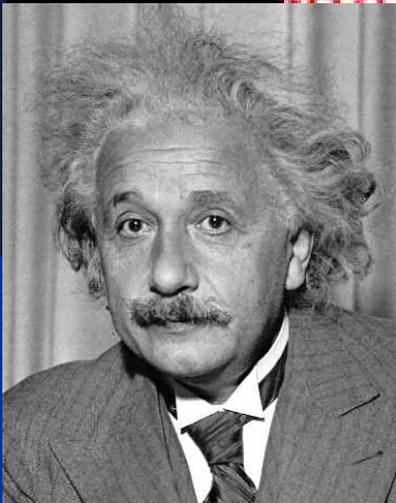
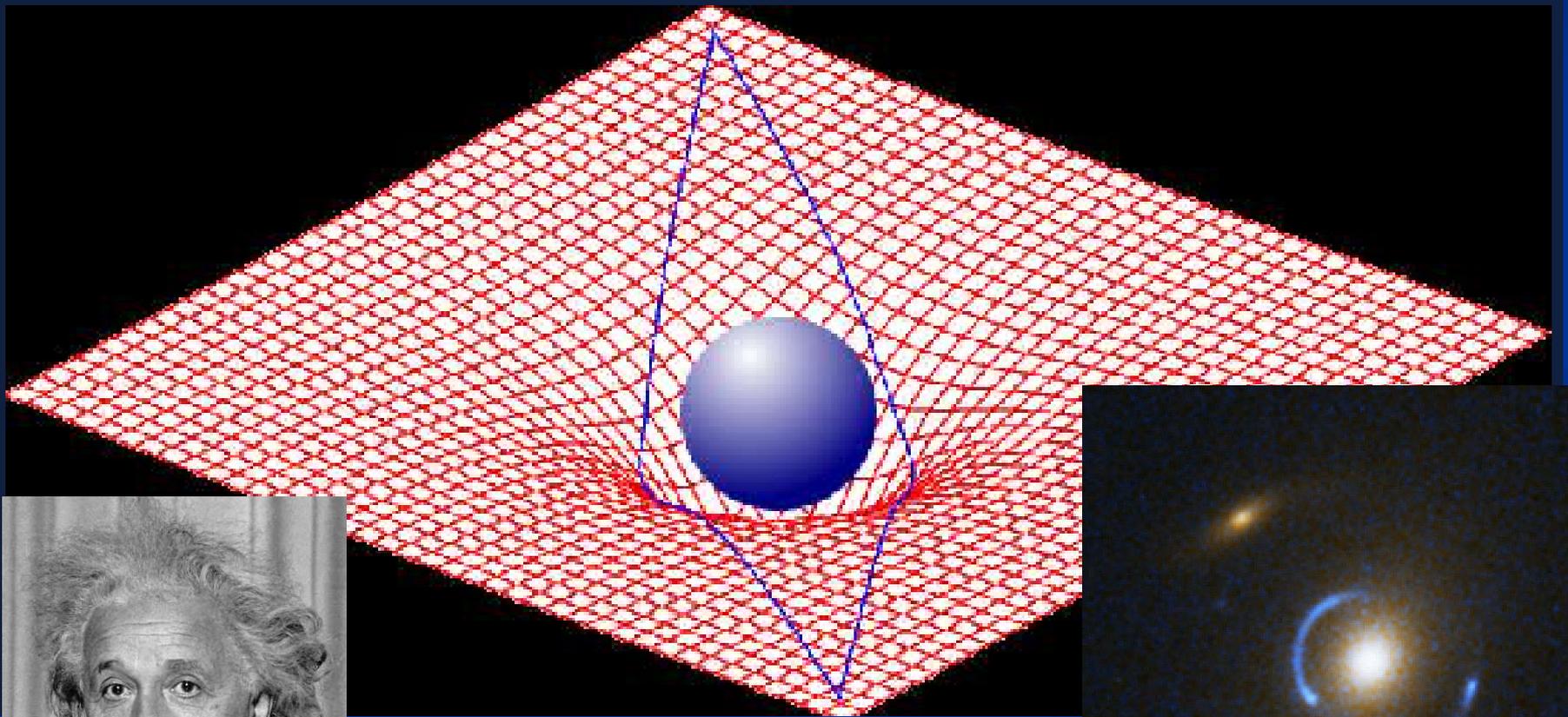
Fritz
Zwicky

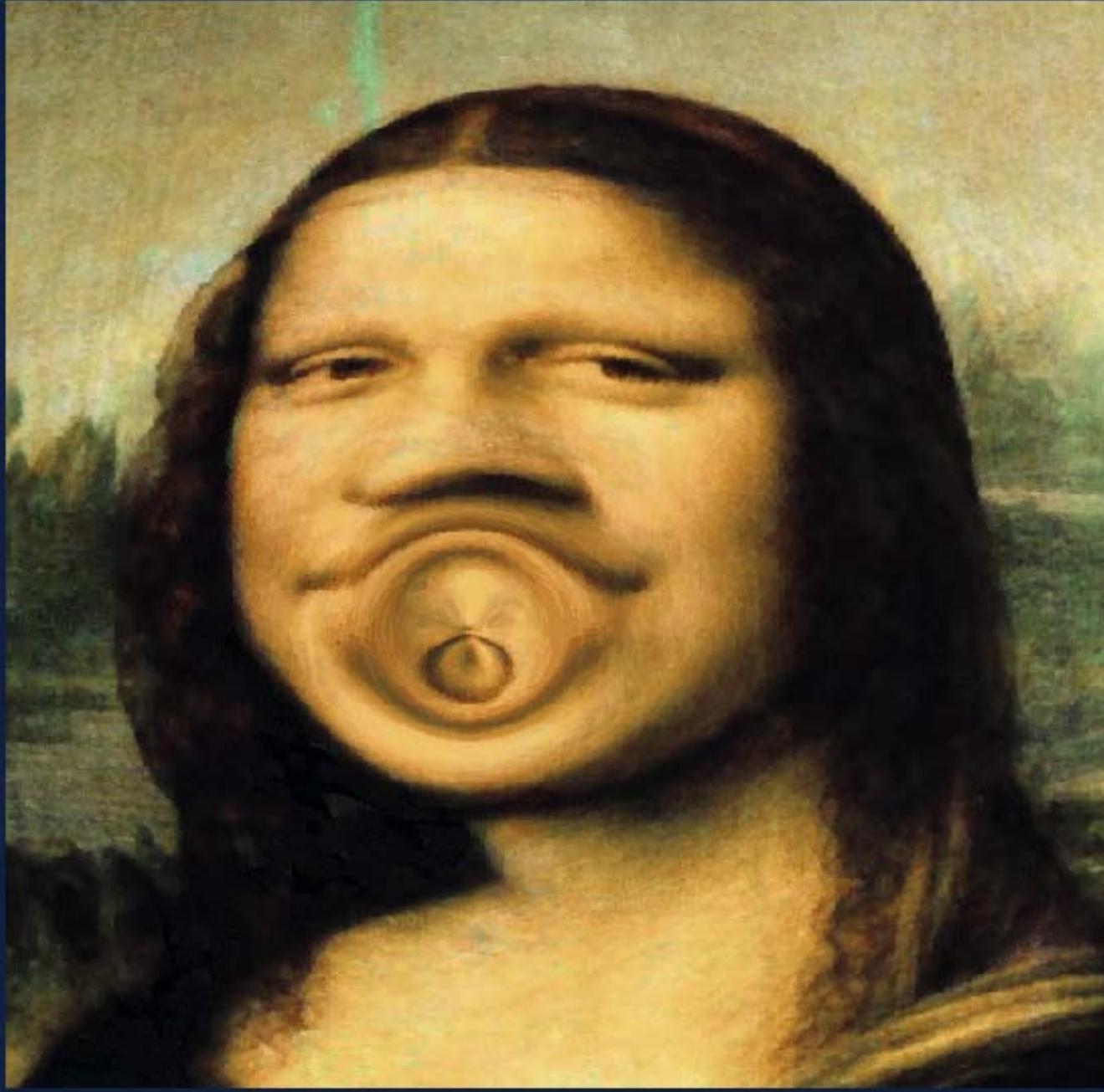




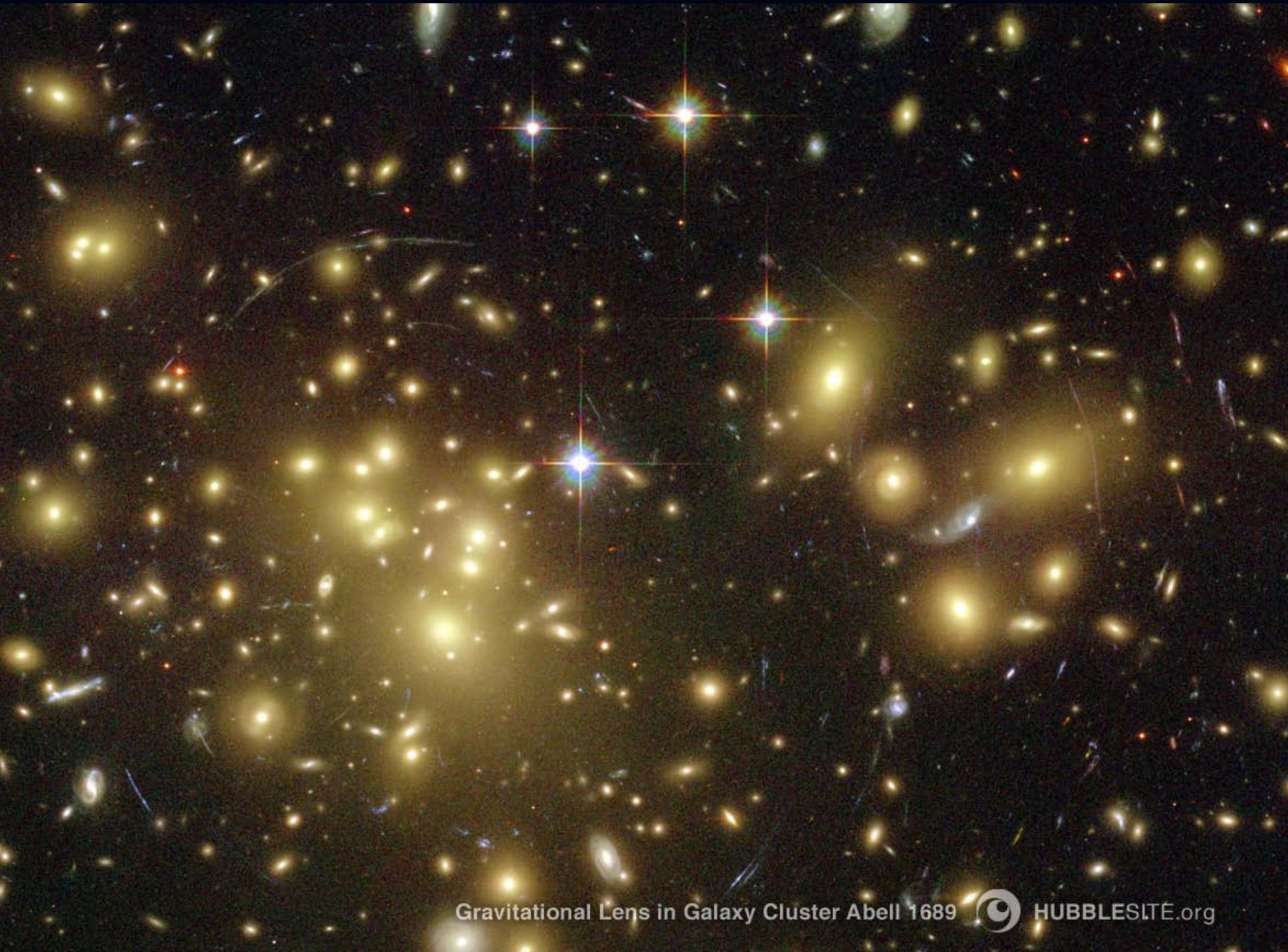
Gravitationslinse, HST

Lichtstrahlen werden durch Massen abgelenkt





M. Bartelmann



Gravitational Lens in Galaxy Cluster Abell 1689



HUBBLESITE.org

Schwacher Gravitationslinsen – Effekt :

Leichte Verzerrung des Bilds Tausender von Hintergrundgalaxien

Statistische Verteilung

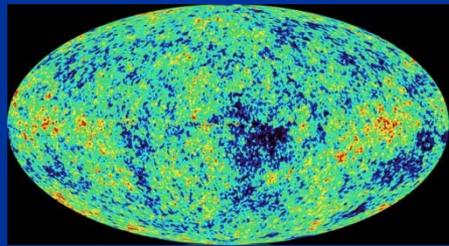


Dunkle Materie

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

Strukturbildung funktioniert nur mit Dunkler Materie !

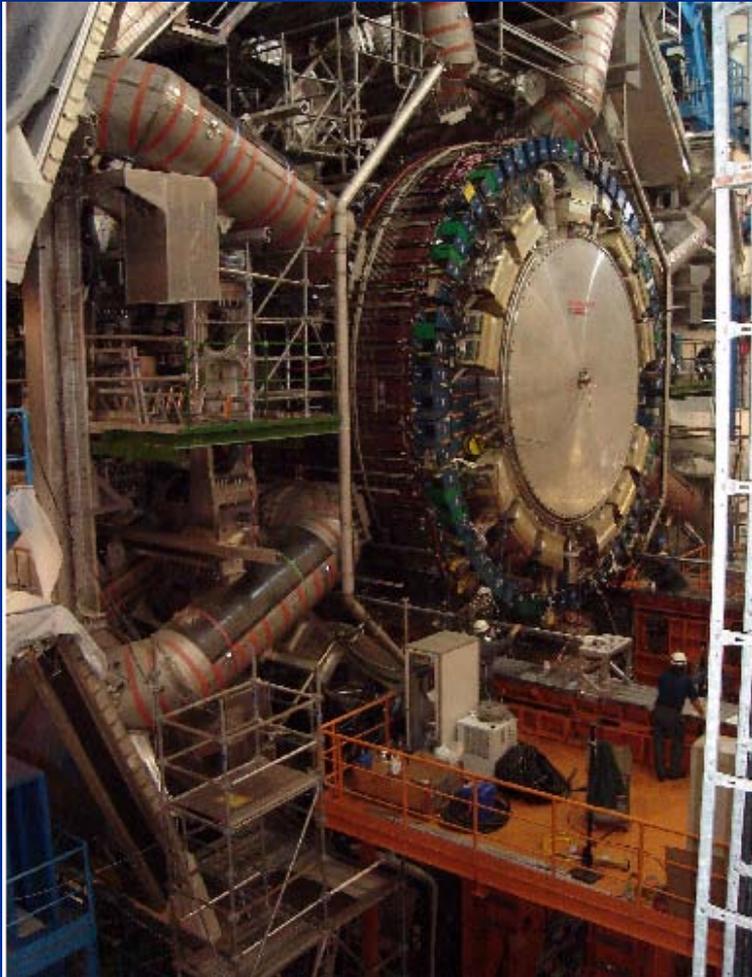
Aus winzigen Anisotropien wachsen die
Strukturen des Universums



Sterne , Galaxien, Galaxienhaufen

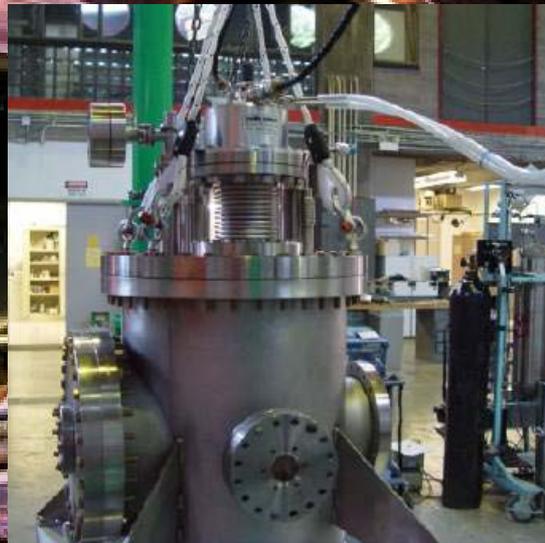
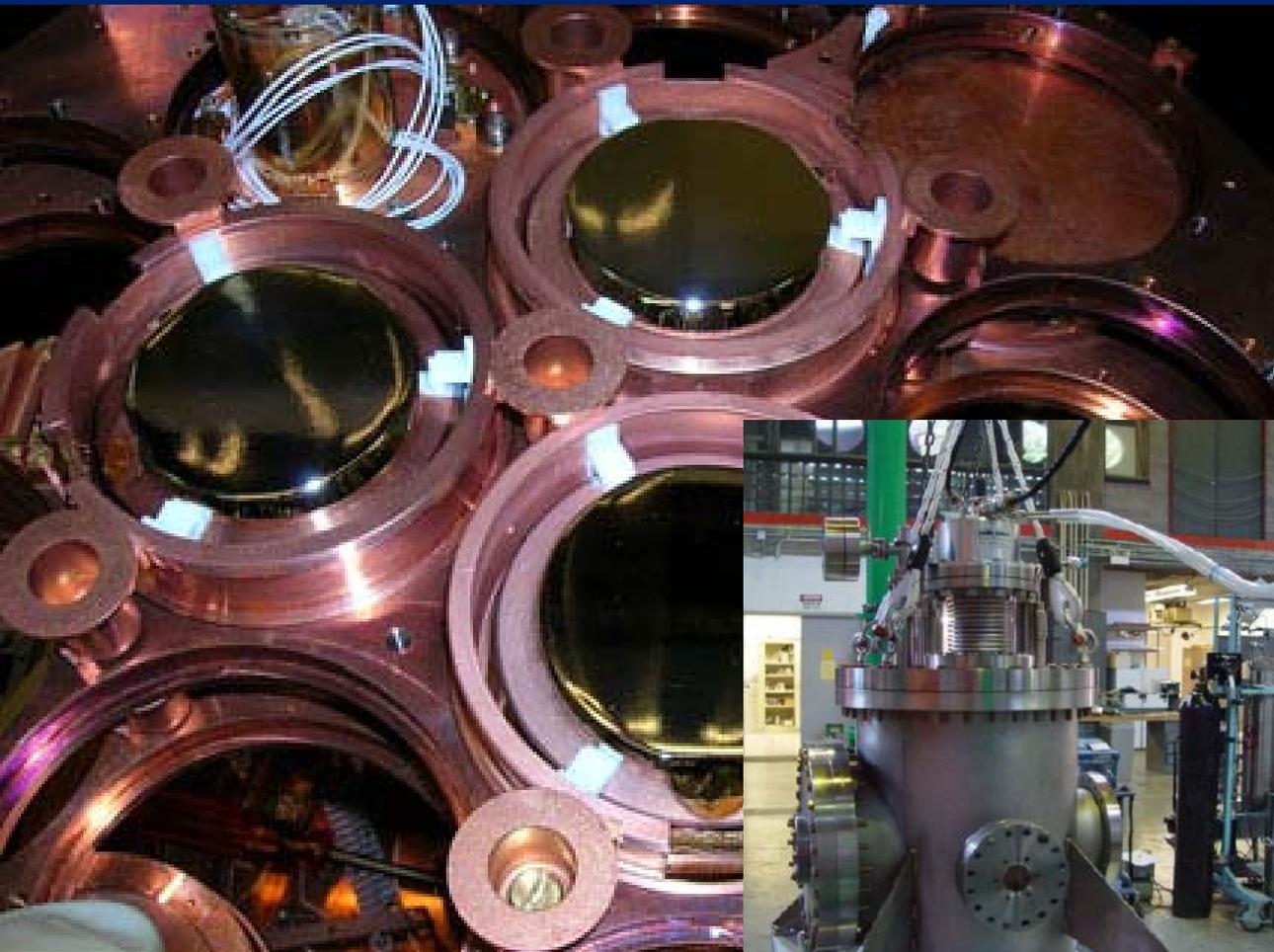
Woraus besteht Dunkle Materie ?

Dunkle Materie könnte aus noch unbekannten Elementarteilchen bestehen



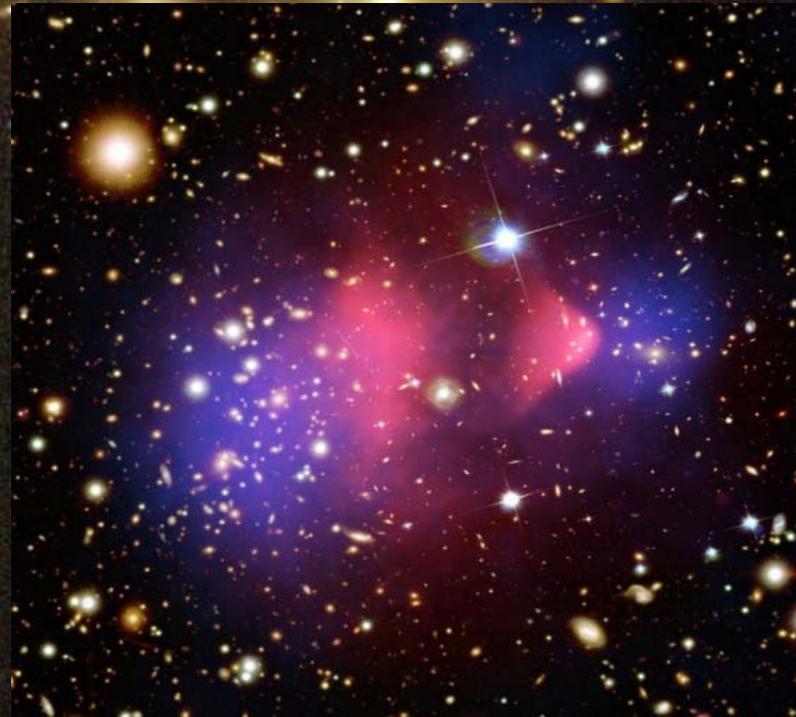
LHC , CERN , Genf

Suche nach Dunkler Materie



bis heute nichts gefunden ...

(2) Dunkle Materie klumpt in Galaxien und Galaxien-Haufen



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 : $\Omega_{dm} = 0.25$

Dunkle Energie

Kritische Dichte

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

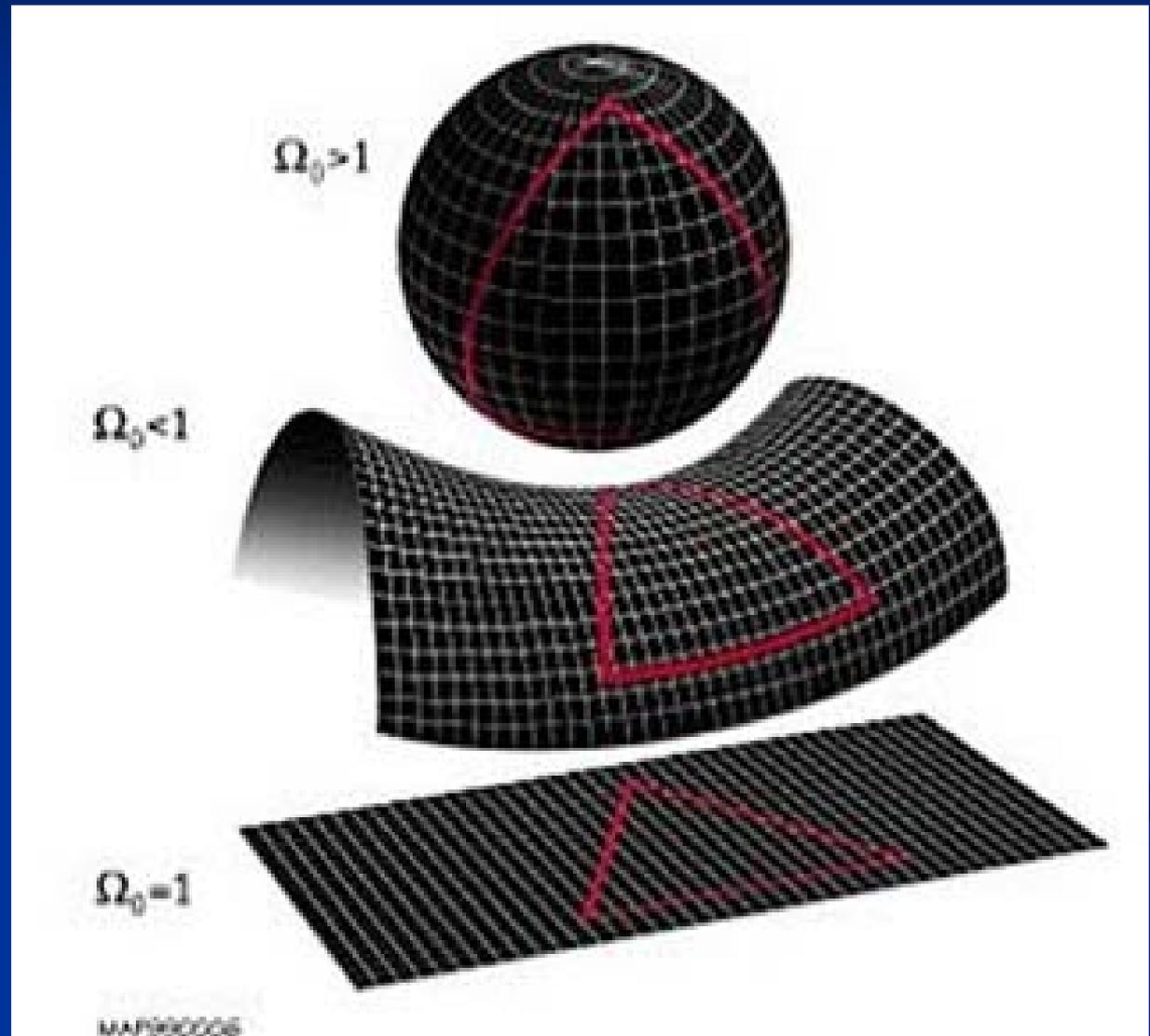
flaches Universum

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

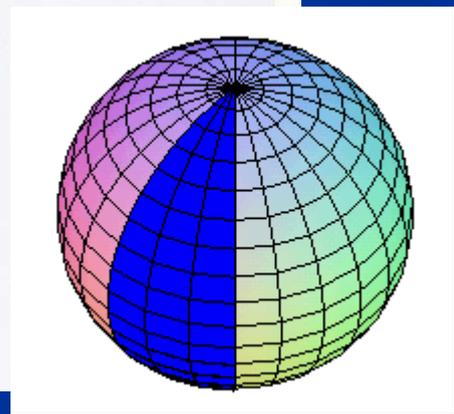
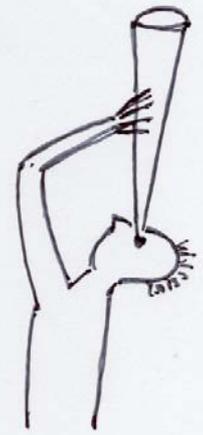
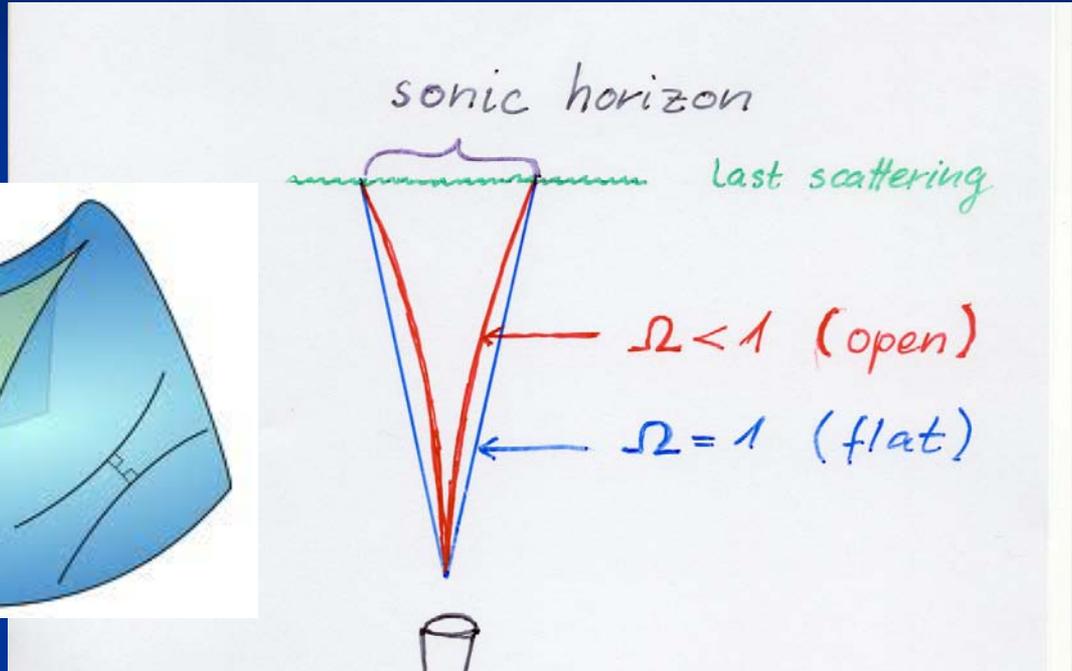
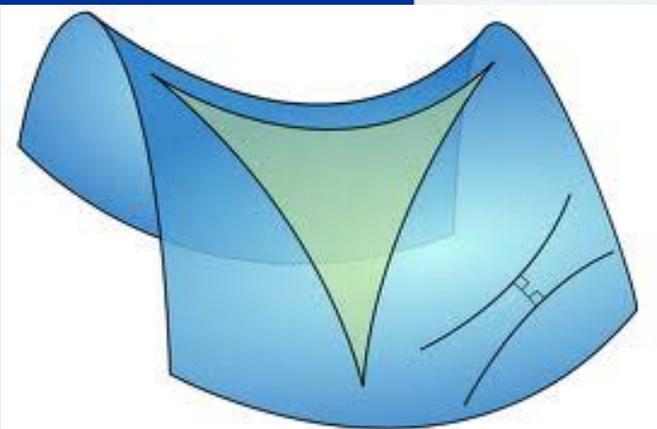
Kugeloberfläche

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

hyperbolische
Geometrie



gekrümmte Bahnen der Lichtstrahlen



Räumlich flaches Universum

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

- Theorie (Inflationäres Universum)

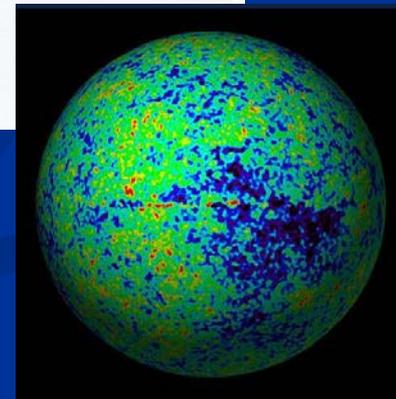
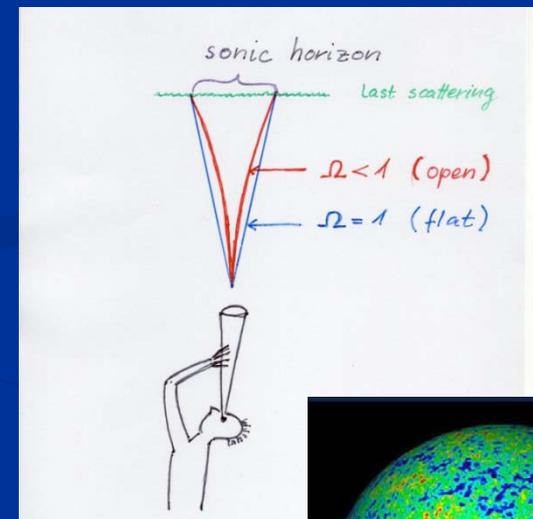
$$\Omega_{\text{tot}} = 1.0000\dots\dots\dots x$$

- Beobachtung (Planck)

$$\Omega_{\text{tot}} = 0.99 (\pm 0.006)$$

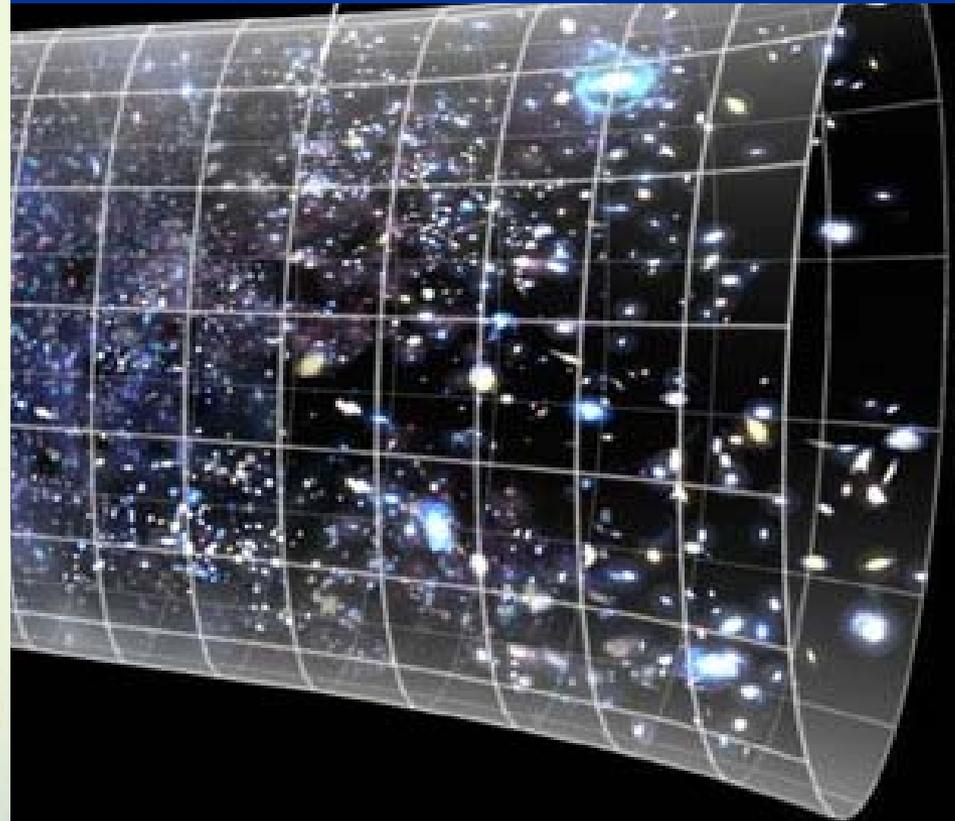
Zur Vermessung der Geometrie mit Hilfe der Hintergrundstrahlung : Lineal und Winkel

- Abstand (1) : Größe des Horizonts zum Zeitpunkt der Emission der Hintergrundstrahlung : berechenbar aus Einstein Gleichung
(Horizont : Wie weit Signale sich seit dem Urknall ausbreiten konnten)
- Winkel : aus beobachteten Anisotropien
- Abstand (2) : Entfernung zur Aussendung der Hintergrundstrahlung



Schallwellen im frühen Universum

Länge
berechen-
bar



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



last scattering

$\Omega < 1$ (open)

$\Omega = 1$ (flat)

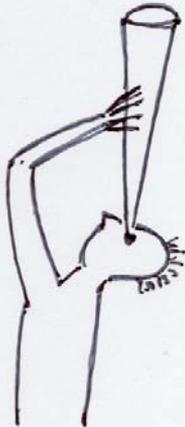
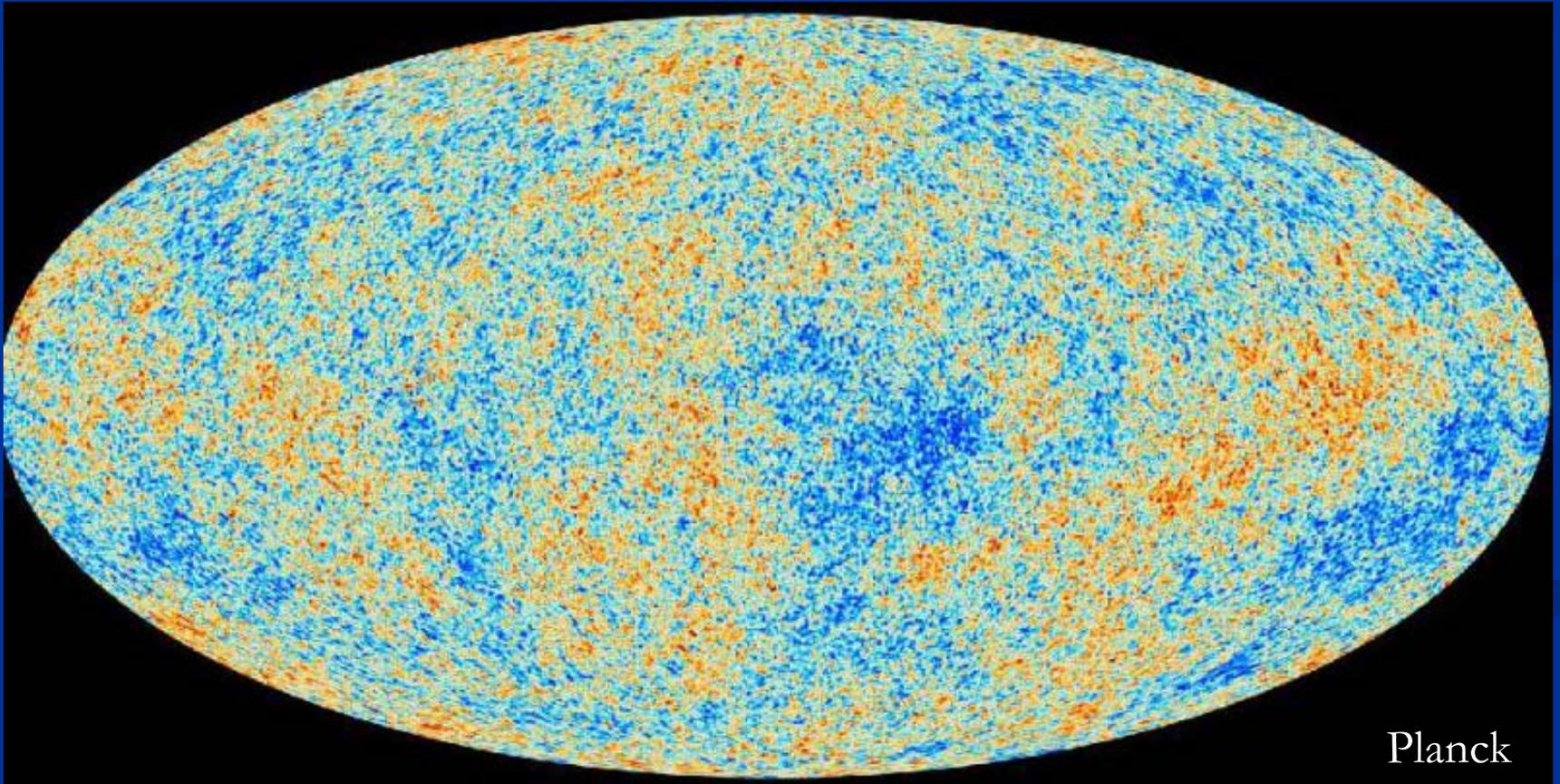


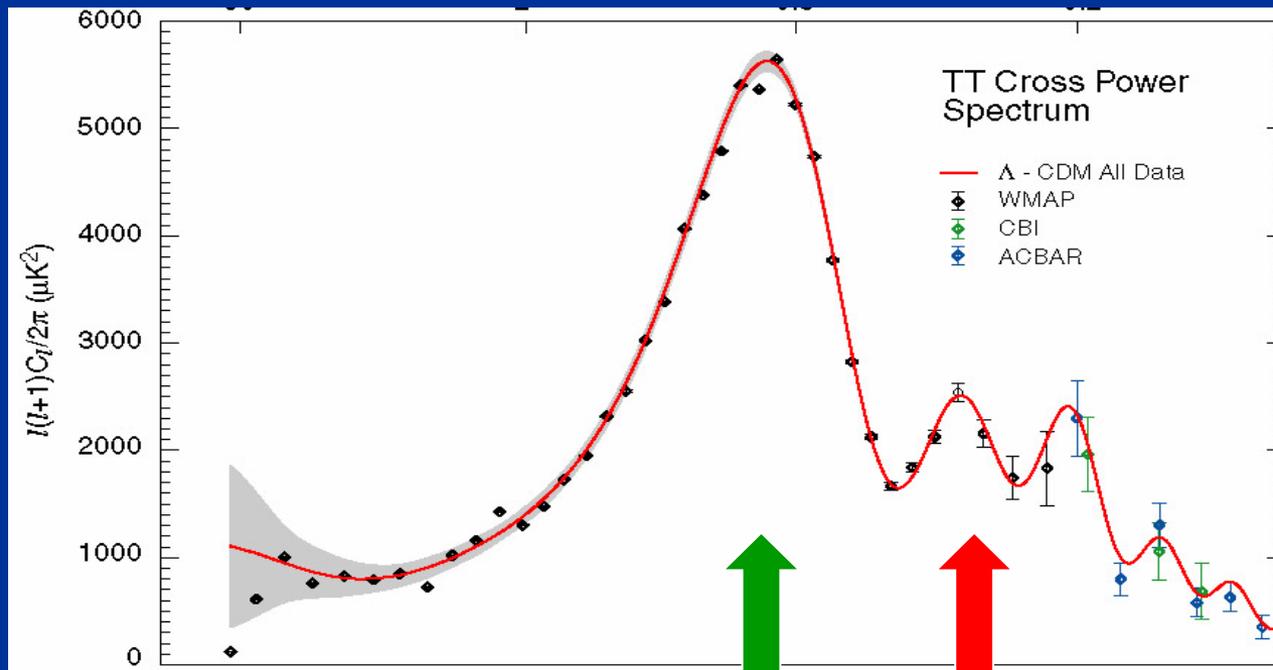
Foto des Urknalls

- als sich die Atome bildeten : ca 400 000 Jahre abb



Räumlich flaches Universum

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



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

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

Dunkle Energie

$$\Omega_m + X = 1 = 100\%$$

$$\Omega_m : 30\%$$

$$\Omega_h : 70\% \quad \text{Dunkle Energie}$$

h : homogen , oft auch Ω_Λ statt Ω_h

Dunkle Energie dominiert das Universum

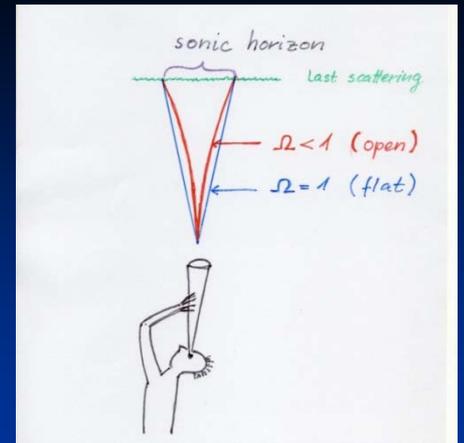
Energiedichte im Universum

=

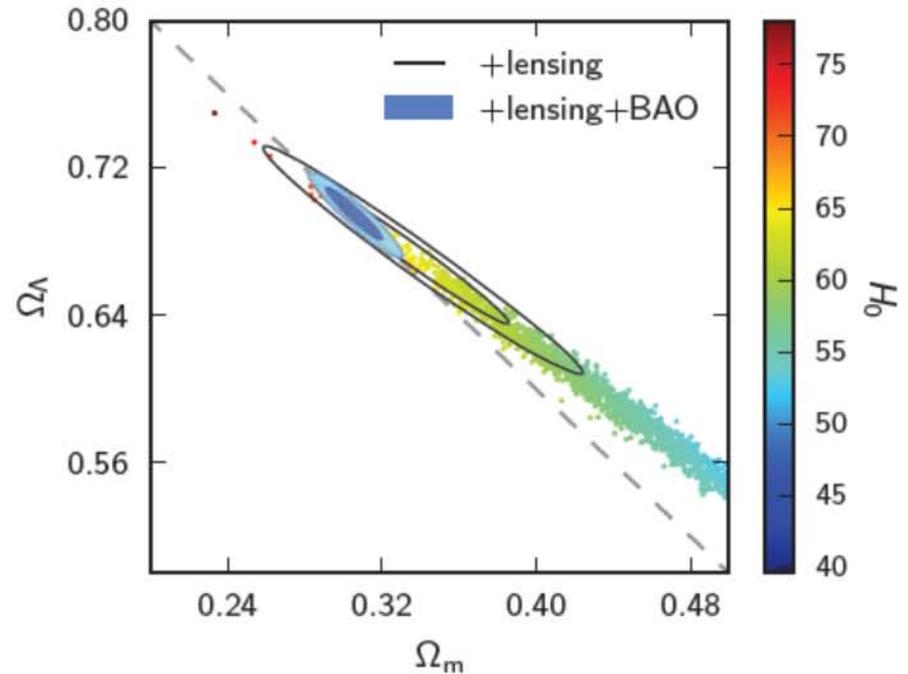
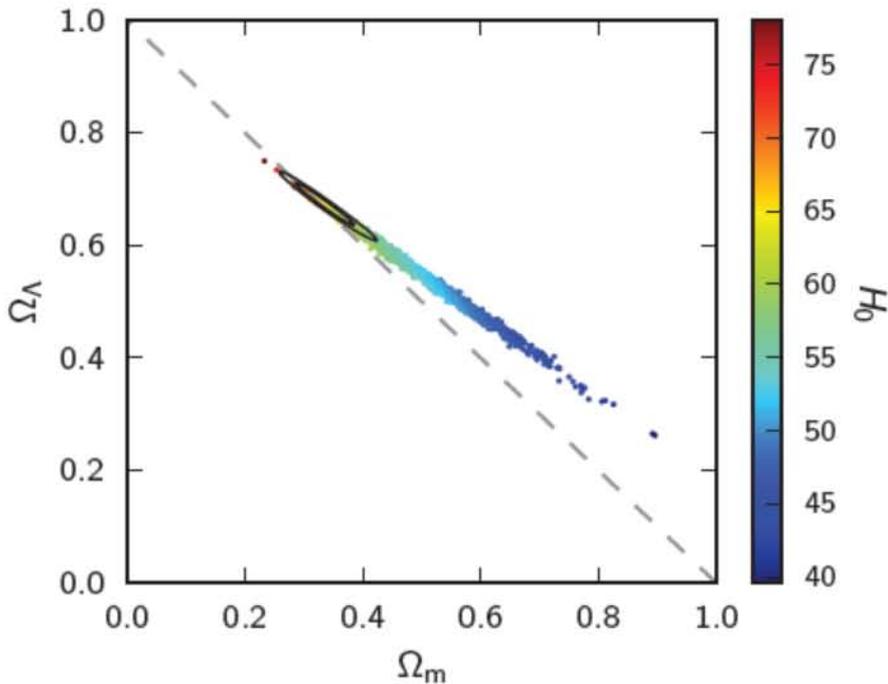
Materie + Dunkle Energie

30 % + 70 %

Bestimmung kosmologischer Parameter



Planck Collaboration: Cosmological parameters



Bestimmung kosmologischer Parameter (Planck)

$$\Omega_{\text{tot}} = 0.999 \pm 0.006$$

Materie :

$$\Omega_{\text{m}} = 0.31 \pm 0.01$$

Atome :

$$\Omega_{\text{b}} = 0.048 \pm 0.005$$

Dunkle Materie :

$$\Omega_{\text{dm}} = 0.26 \pm 0.01$$

Dunkle Energie :

$$\Omega_{\text{de}} = 0.69 \pm 0.01$$

$$\text{Alter} = 13.80 \pm 0.05$$

Milliarden Jahre

Zusammensetzung des Universums

$$\Omega_b = 0.05$$

sichtbar

klumpt

$$\Omega_{dm} = 0.25$$

unsichtbar

klumpt

$$\Omega_h = 0.7$$

unsichtbar

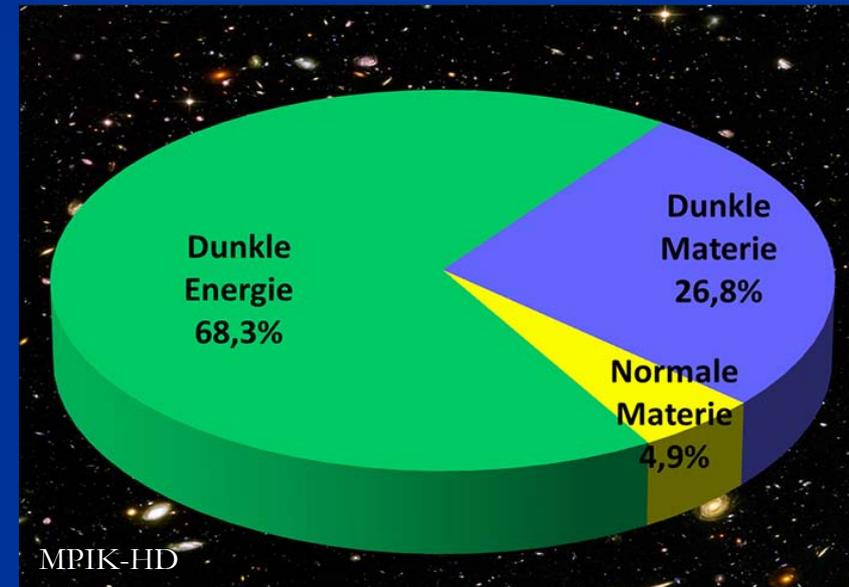
homogen

(3) Zusammensetzung des Universums

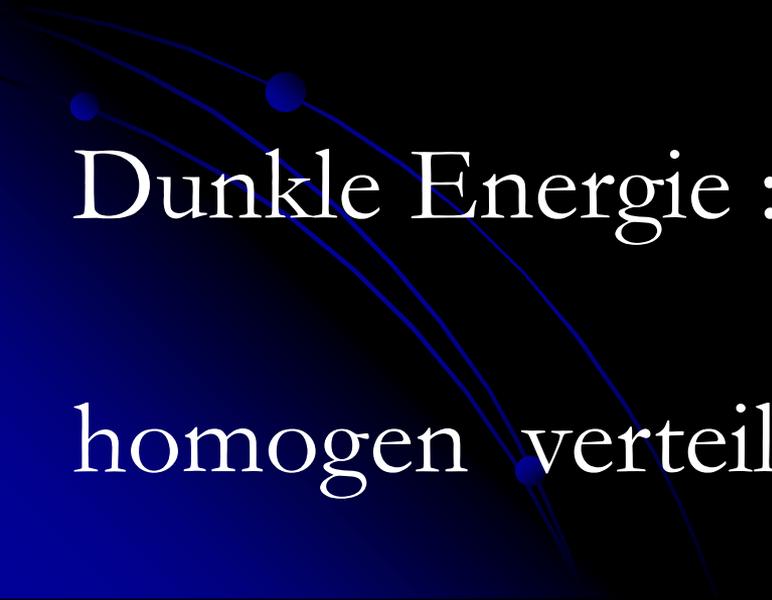
Atome : 5 %

Dunkle Materie : 25 %

Dunkle Energie : 70 %



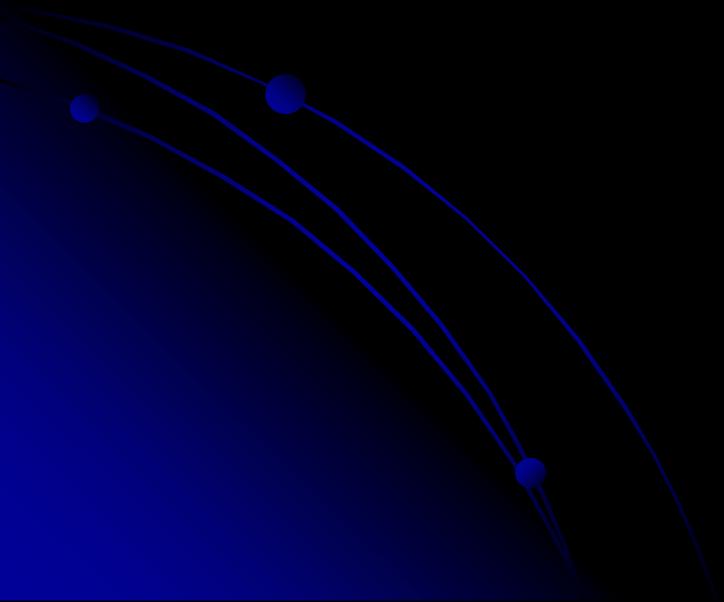
Eigenschaften der Dunklen Energie



Dunkle Energie :

homogen verteilt

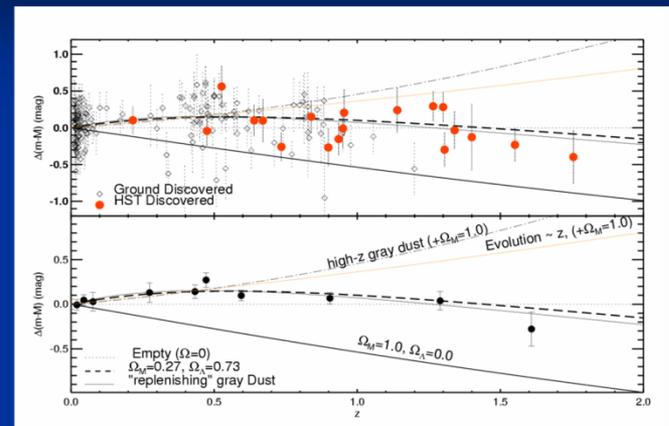
Dunkle Energie : kosmologische Effekte



Vorhersagen für Kosmologie mit Dunkler Energie

*Die Expansion des Universums
beschleunigt sich heute !*

Supernova Ia Hubble-Diagramm



Rotverschiebung z

Riess et al. 2004

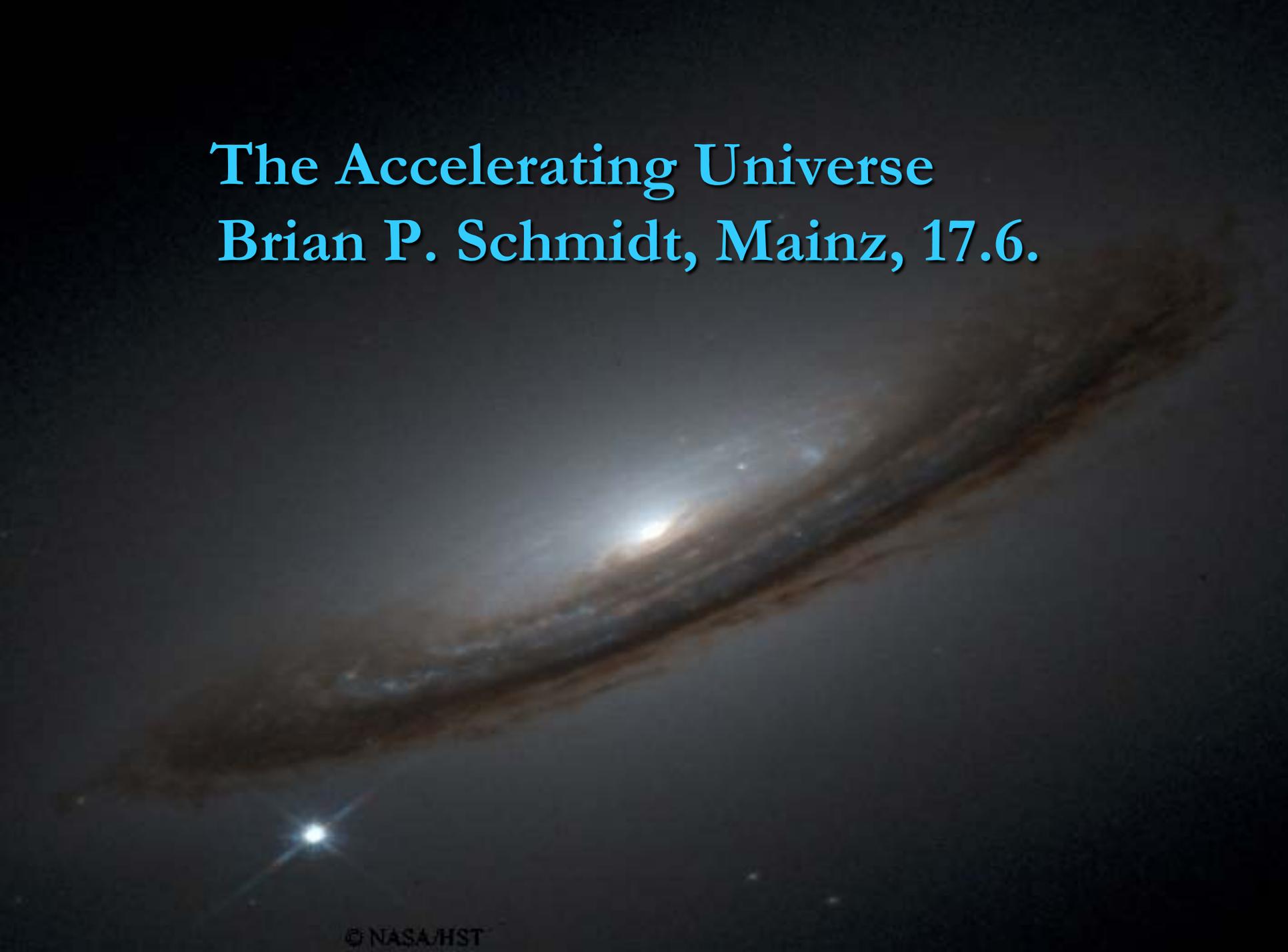
**Dunkle Energie und Dunkle Materie
sind (heute) Gegenspieler :**

Dunkle Materie verlangsamt Expansion

Dunkle Energie beschleunigt Expansion

The Accelerating Universe

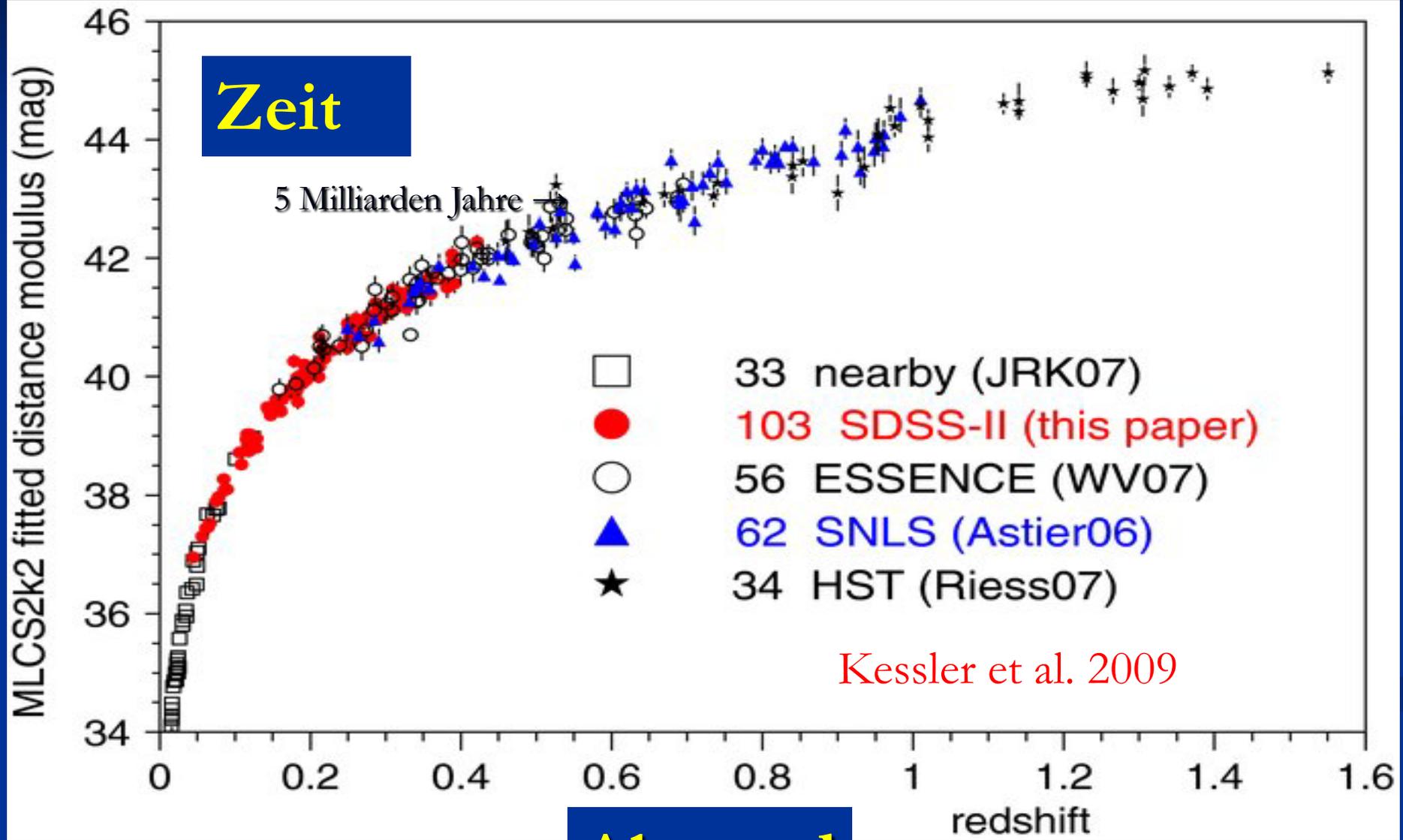
Brian P. Schmidt, Mainz, 17.6.



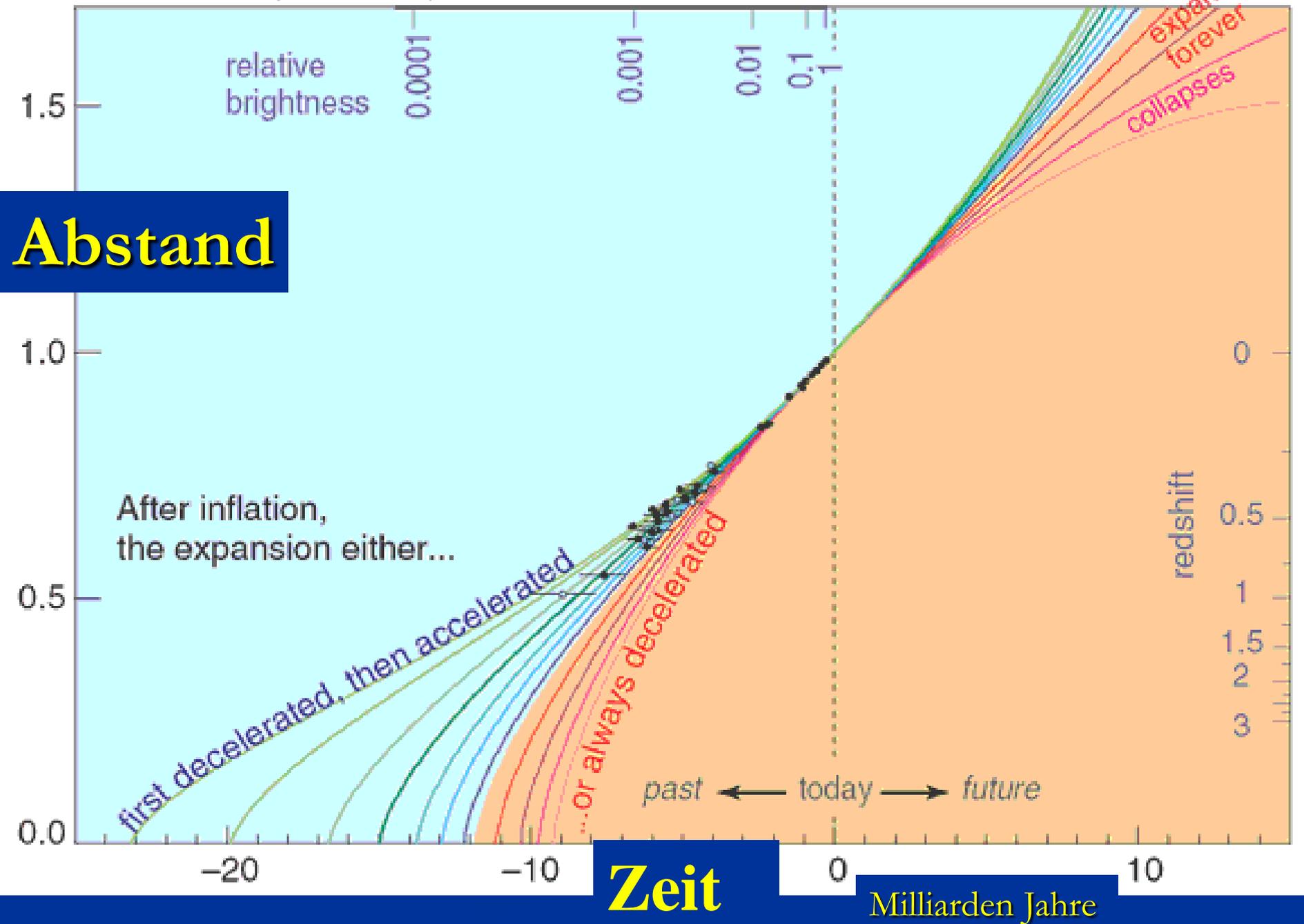
Supernovae als Standardkerzen



Beschleunigte Expansion

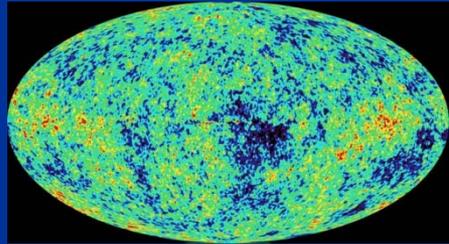


Abstand



Strukturbildung funktioniert quantitativ nur mit **Dunkler Materie** und **Dunkler Energie** !

Aus winzigen Anisotropien wachsen die
Strukturen des Universums



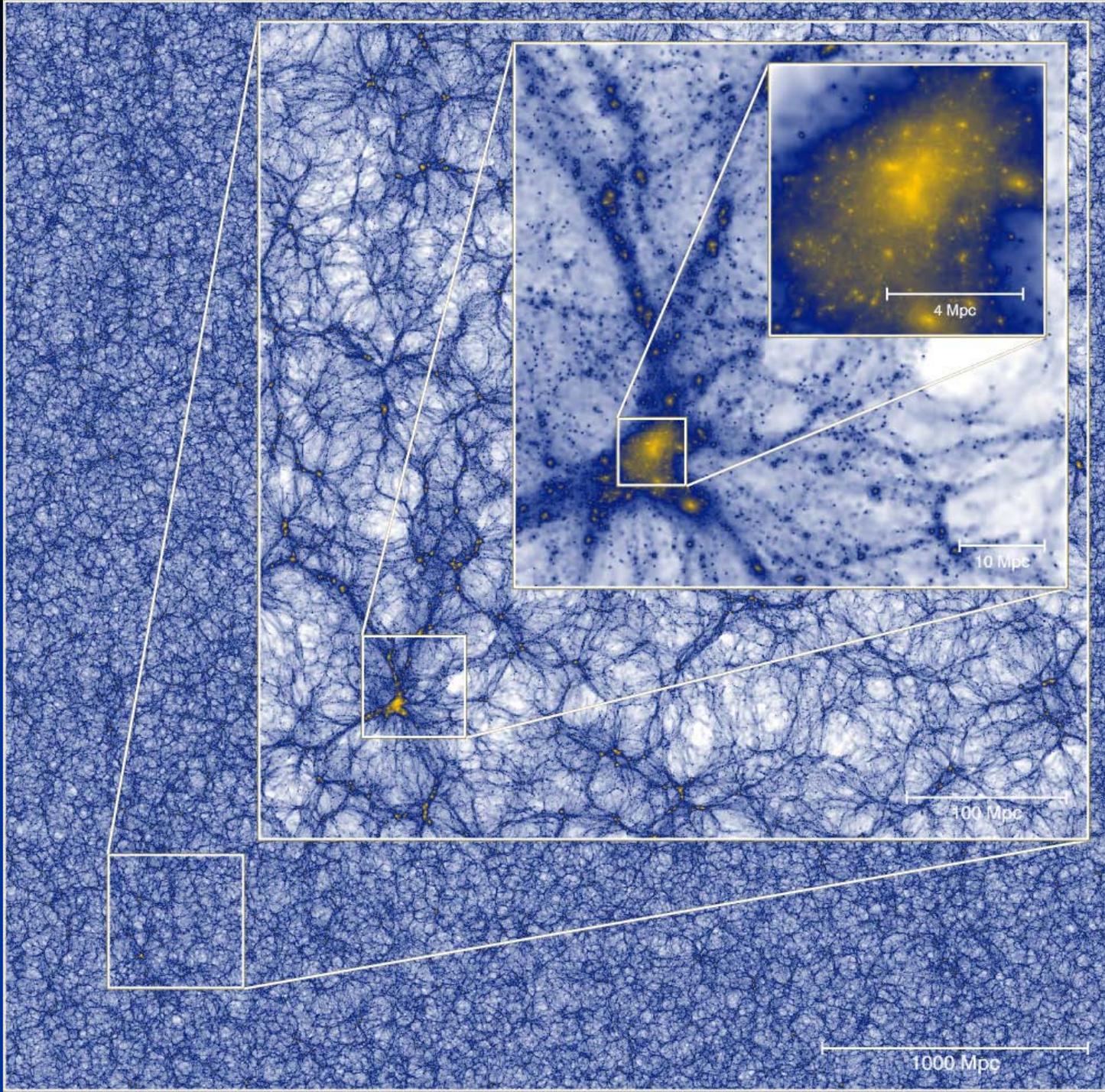
Sterne , Galaxien, Galaxienhaufen

Kosmische Strukturbildung im Grossrechner

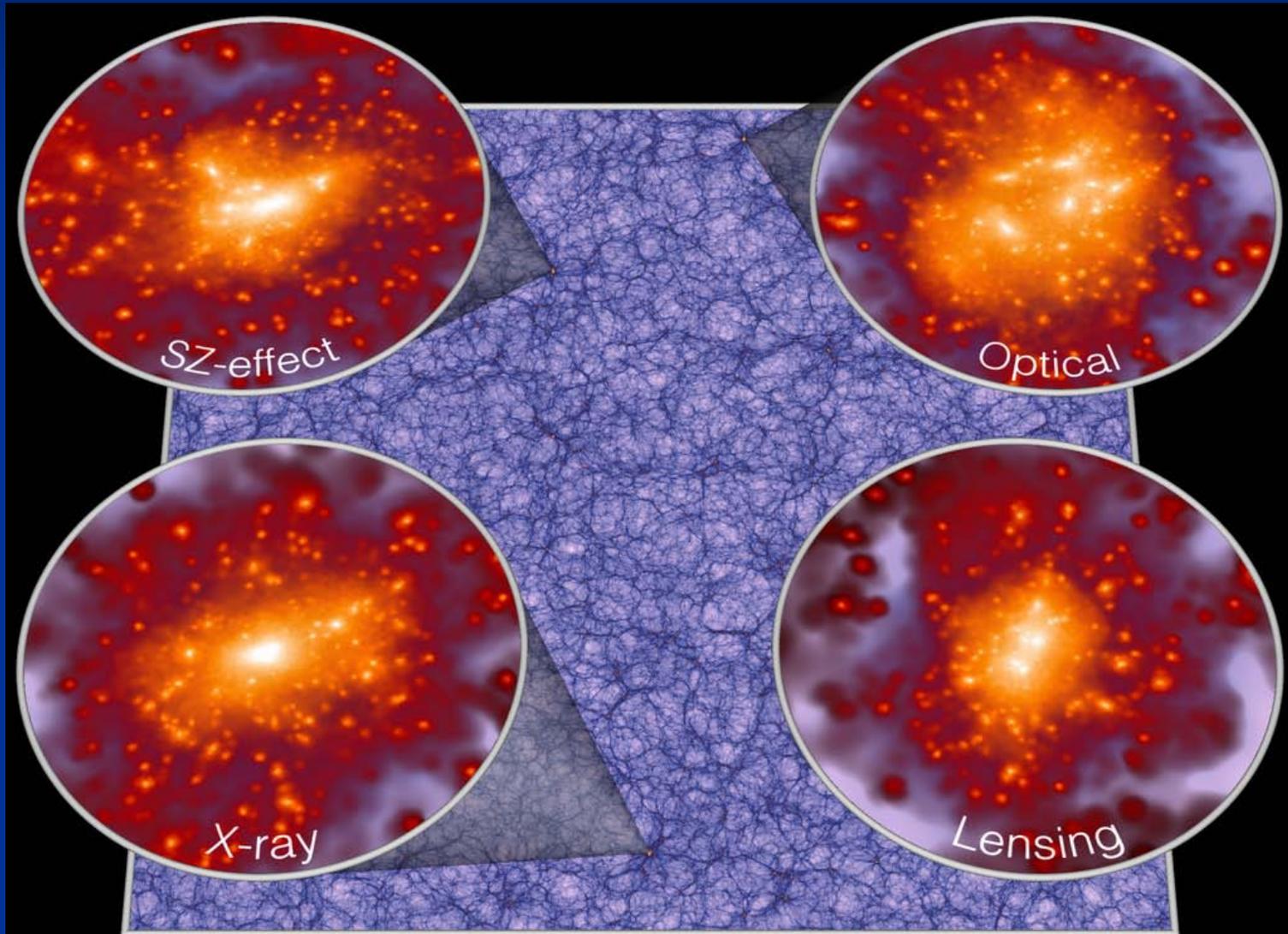
Simon White, Mainz, 1.7.

500 Mpc/h



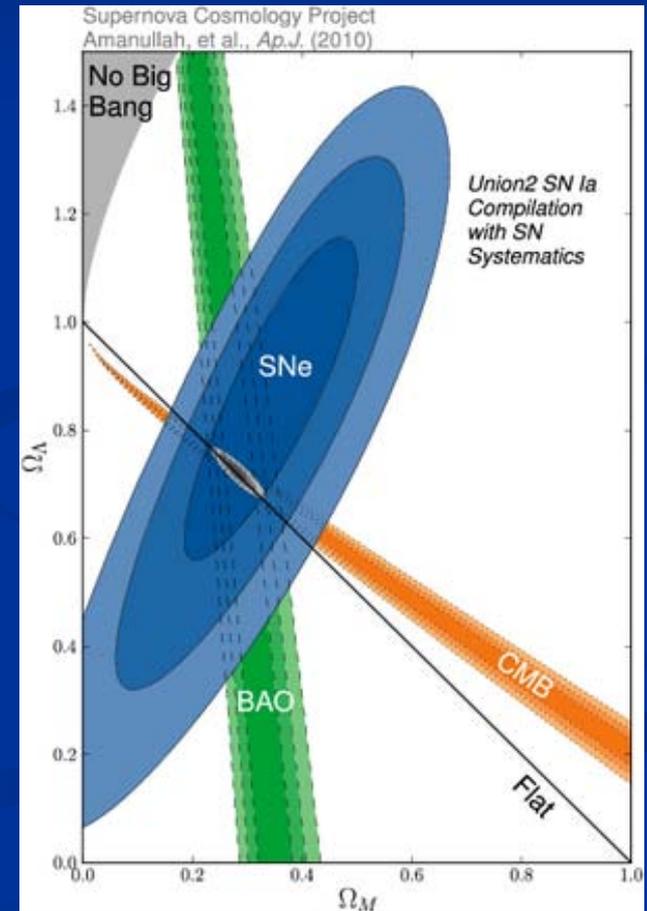
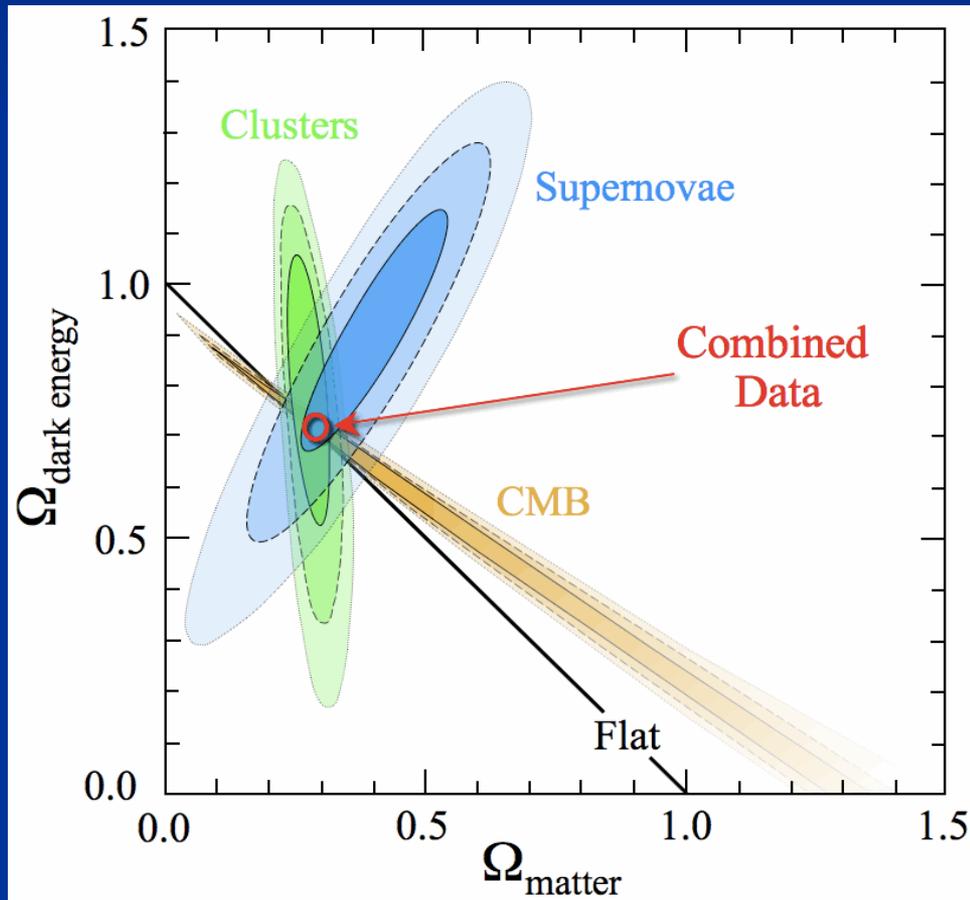


Eigenschaften der Galaxienhaufen können beobachtet werden



Quantitatives Verständnis der Strukturbildung braucht Dunkle Energie

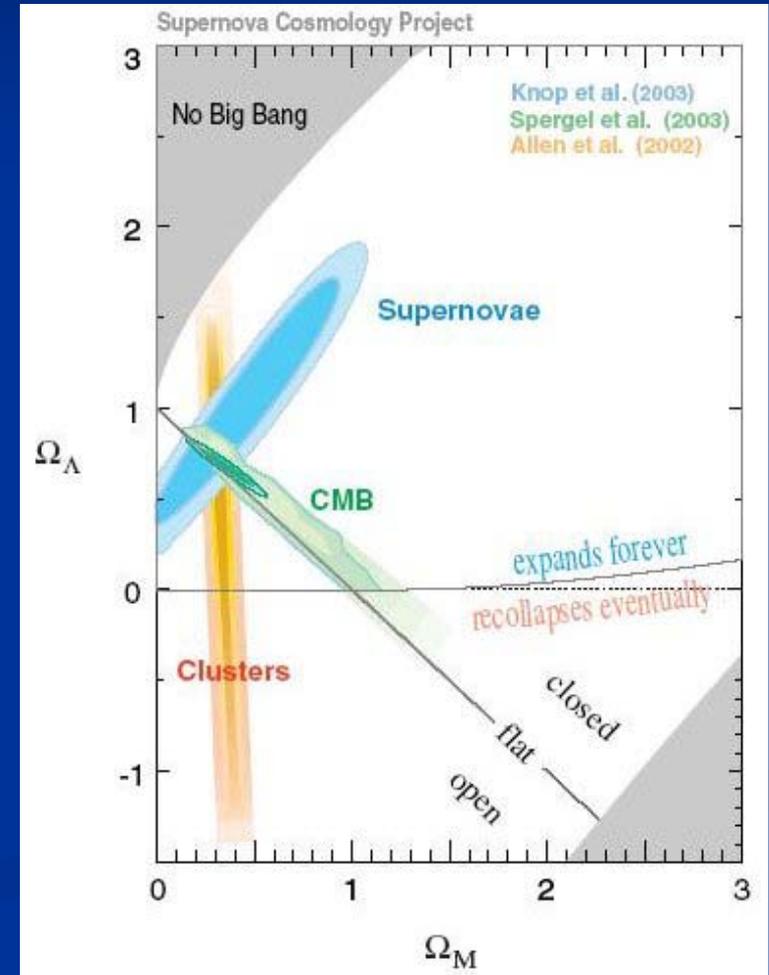
Dunkle Energie : die Beobachtungen passen zusammen !



Konsistentes kosmologisches Modell!

(4) Eigenschaften der Dunklen Energie:

- gleichverteilt im Raum
- (fast) zeitunabhängig
(in der heutigen kosmologischen Epoche)
- beschleunigt Expansion des Universums



Was ist Dunkle Energie ?

Was ist die Dunkle Energie ?

Kosmologische Konstante

oder

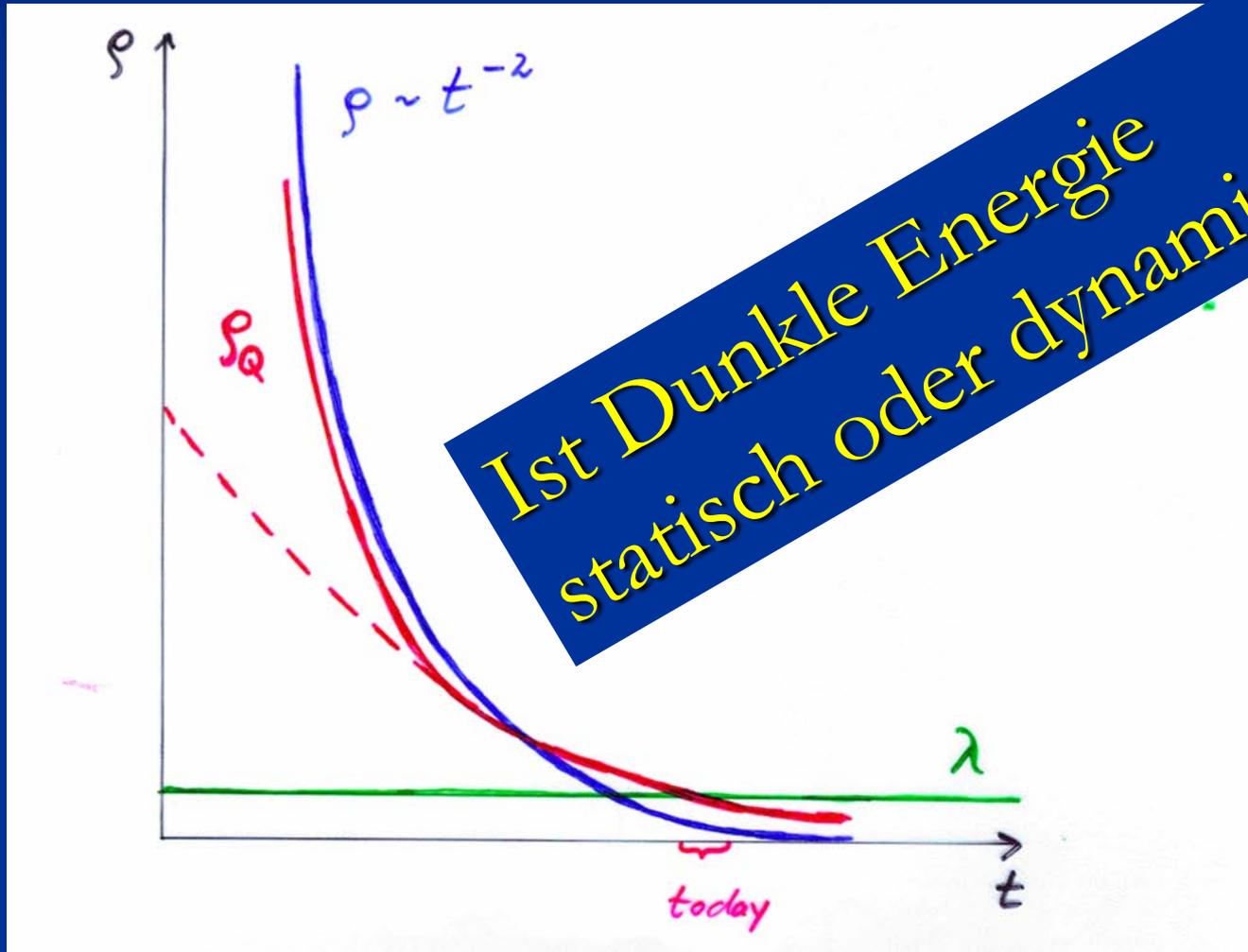
Quintessenz

oder

Modifikation der Gravitation ?

Kosm. Konst.
statisch

Quintessenz
dynamisch

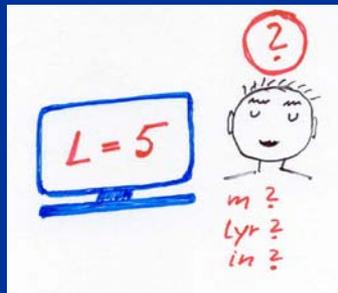


Vereinheitlichung
aller Wechselwirkungen

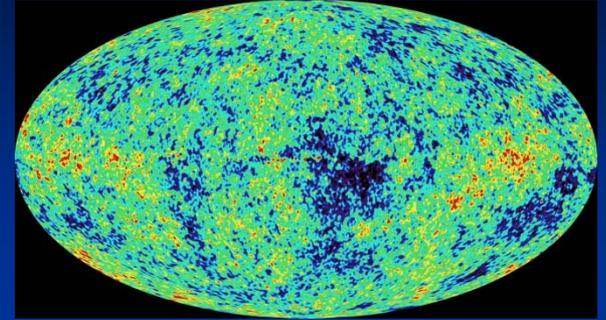
Superstrings

Zusätzliche
Dimensionen

Fundamentaler
Ursprung der
Massen und
Längenskalen



$$\Omega_m + X = 1$$



$$\Omega_m : 30\%$$



$$\Omega_h : 70\%$$

Dunkle Energie

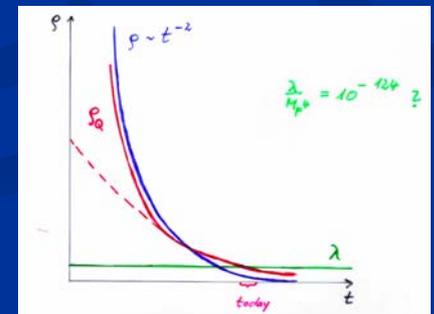


Kosmologische Konstante

- Konstante λ verträglich mit allen Beobachtungen
- Zeitlich konstanter Beitrag zur Energiedichte

■ Warum so klein? $\lambda/M^4 = 10^{-120}$

■ Warum gerade heute wichtig?



Anthropisches Prinzip

- Es gibt 10^{500} verschiedene Universen mit verschiedenen Gesetzen , die alle irgendwo realisiert sind
- Die Wahrscheinlichkeit für ein Universum mit der richtigen kosmologischen Konstante ist winzig : 10^{-120}
- Wir leben in einem , in dem Intelligenz sich gebildet hat

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

$$G_N = (8\pi M^2)^{-1}$$

Nur Verhältnisse von Massenskalen sind beobachtbar !

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

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

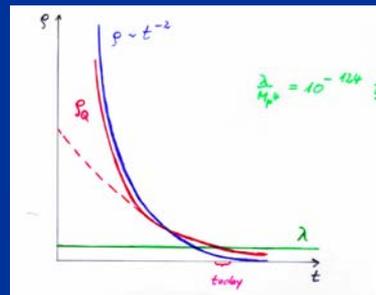
Zeitentwicklung

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



Großes Alter kleine Größen

Gleiche Erklärung für Dunkle Energie ?



Skalarfeld : Kosmon

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

- Ähnlich wie elektrisches Feld
- Aber : keine Richtung ist ausgezeichnet
(kein Vektor)
- Ähnlich wie Higgs – Feld (Elementarteilchenphysik)
- “ Moderner Äther “

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

Homogenes und isotropes Universum

- $\varphi(x,y,z,t) = \varphi(t)$
- Homogenes Kosmonfeld
- Homogener Beitrag zur Energiedichte

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

- Dynamische Dunkle Energie !

Evolution des Kosmonfelds

Feldgleichung

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

Potenzial $V(\varphi)$ bestimmt Details des Modells

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

Für wachsendes φ fällt Potenzial gegen Null

Kosmologische Gleichungen

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

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

kosmologische Konstante : Spezialfall,
 V konstant und ϕ konstant

Negativer Druck

$$p = T - V$$

Druck

kinetische Energie

$$\rho = T + V$$

Energiedichte

$$T = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2$$

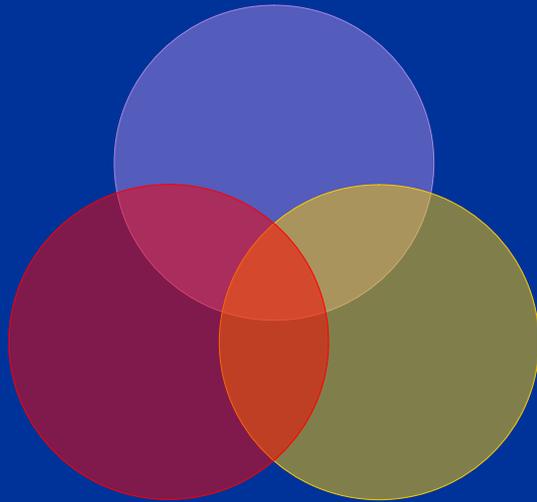
Zustandsgleichung

$$w = \frac{p}{\rho} = \frac{T - V}{T + V}$$

hängt von spezifischer Evolution des Skalarfelds ab

Quintessenz : neue fundamentale Wechselwirkung

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)

**Quintessenz
und
Zeitabhängigkeit
fundamentaler
Konstanten**

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 
Zeitentwicklung von α

Kosmodynamik

Kosmon vermittelt neue langreichweitige
Wechselwirkung

Reichweite : Grösse des Universums – Horizont

Stärke : schwächer als Gravitation

Photon

Elektrodynamik

Graviton

Gravitation

Kosmon

Kosmodynamik

Kleine Korrekturen zum Gravitationsgesetz

Verletzung des Äquivalenzprinzips

Verschiedene Kopplung
des Kosmons an
Proton und Neutron

Differentielle
Beschleunigung

Scheinbare Verletzung
des Äquivalenzprinzips



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

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

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

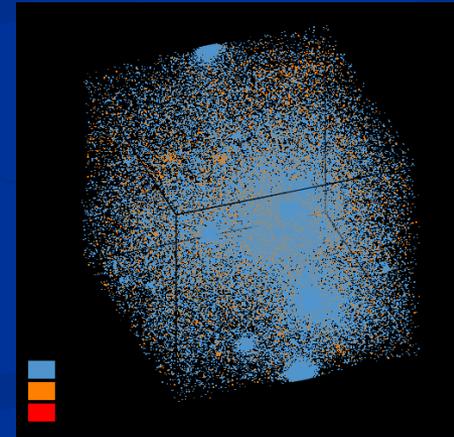
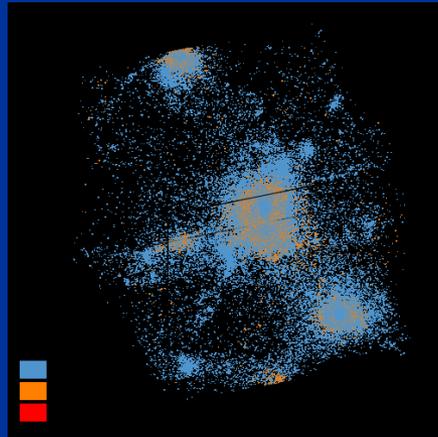
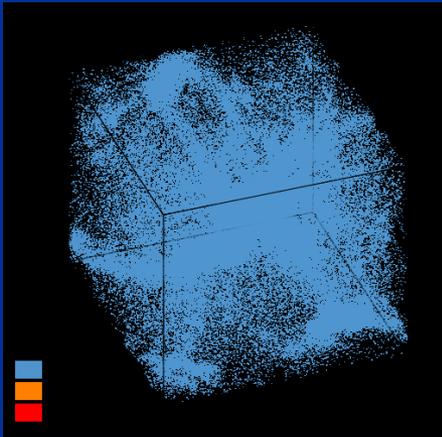
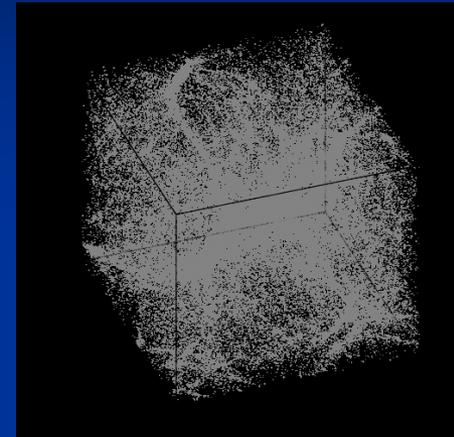
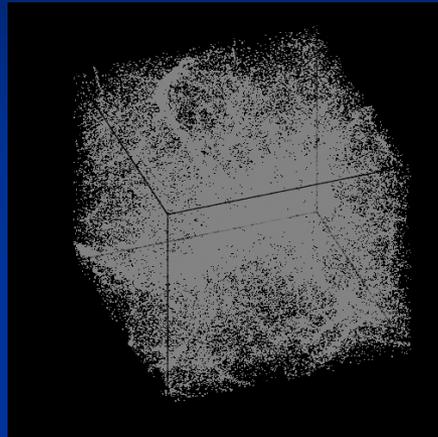
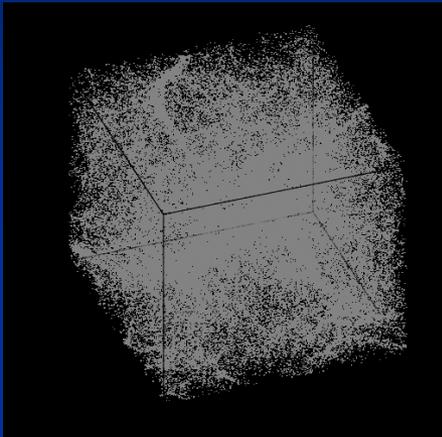
$$10^{-3} eV$$

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

jetzige Zustandsgleichung ist
gegeben durch Neutrino - Masse !

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

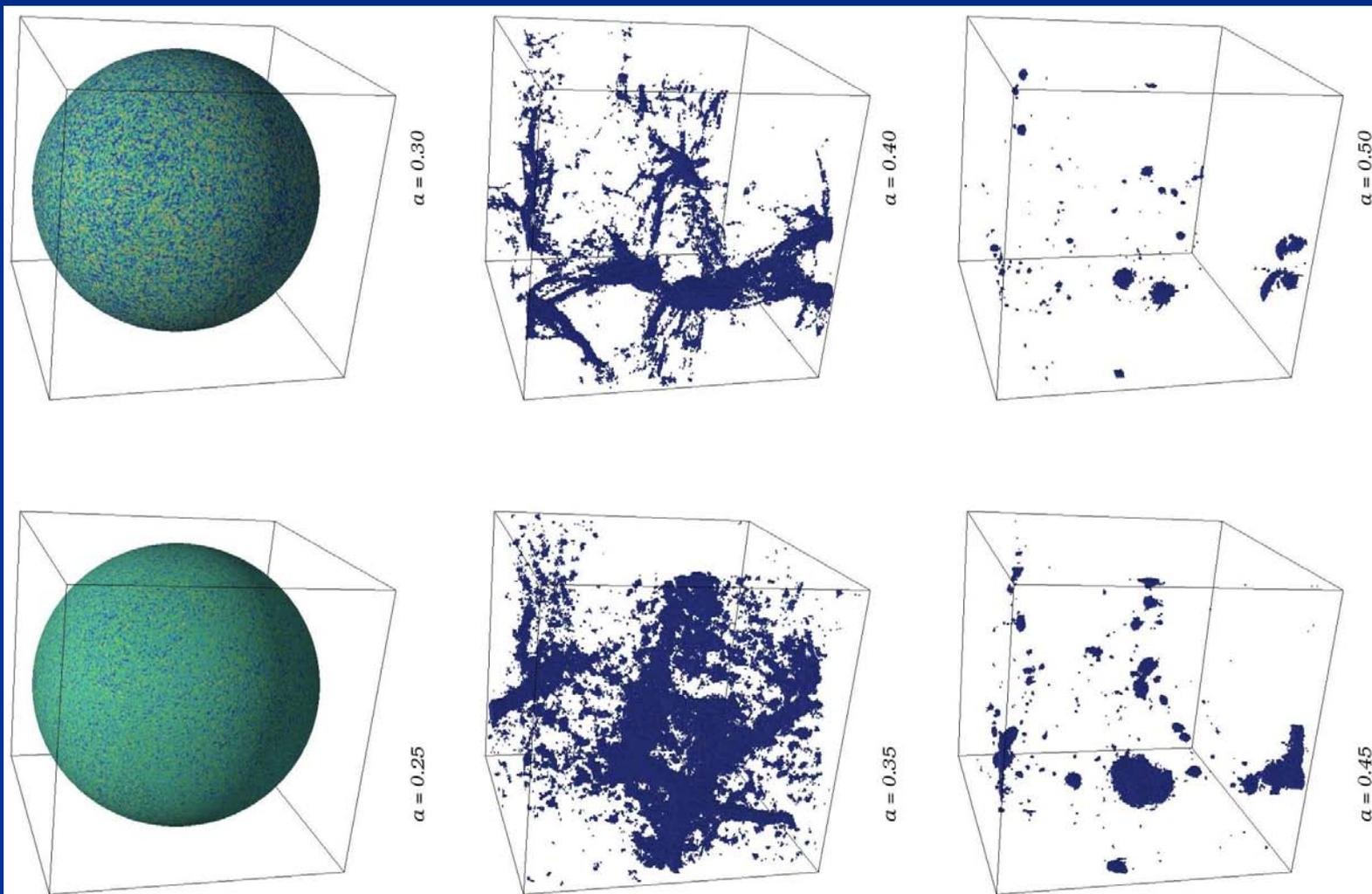
Bildung von Neutrino Klumpen



N- body simulation M.Baldi et al

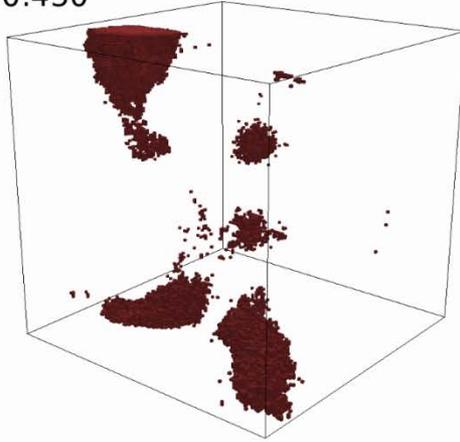
Kosmische Neutrinos bilden riesige Strukturen

Y.Ayaita, M.Weber, ...

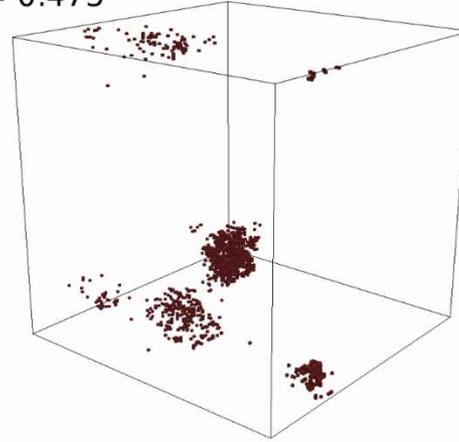


... die auch wieder vergehen...

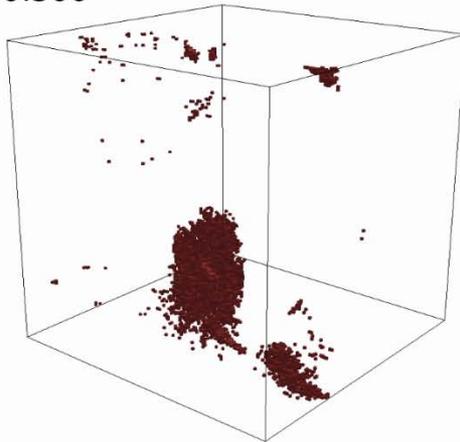
$a = 0.450$



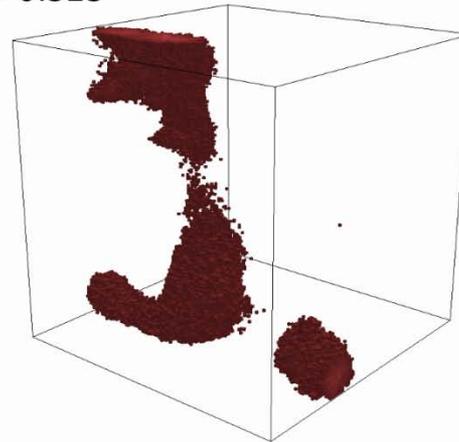
$a = 0.475$



$a = 0.500$

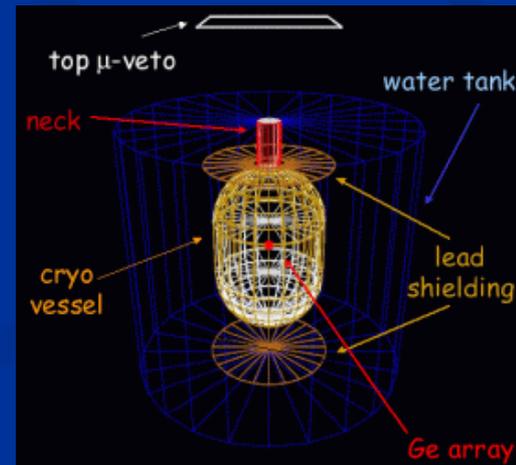


$a = 0.525$



Ist Zeitentwicklung der Neutrino - Masse beobachtbar ?

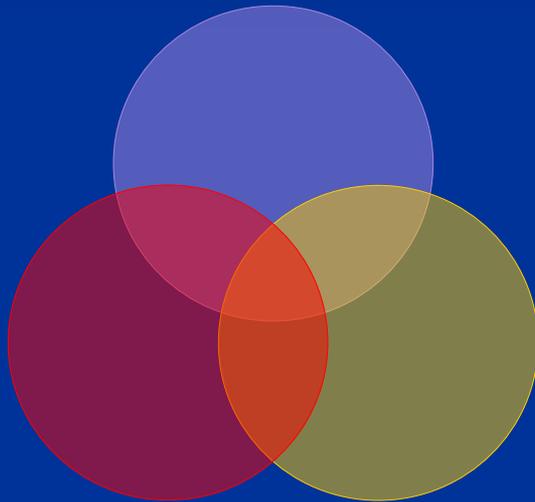
- Obere Grenze aus Kosmologie für frühe Zeit
- Heutiger Beobachtungswert kann darüber liegen
(KATRIN, neutrino-loser doppelter Betazerfall)



GERDA

(5) Dynamische Dunkle Energie erfordert „fünfte Kraft“

Starke, elektromagnetische, schwache
Wechselwirkung



Gravitation

Kosmodynamik

Auf
astronomischen
Skalen:

Graviton

+

Kosmon

Eigenschaften der Dunklen Energie bestimmen die Zukunft des Universums

Vorhersagbarkeit für die nächsten
100 Milliarden Jahre...

Dunkle Energie dominiert das Universum

Energiedichte im Universum

=

Materie + Dunkle Energie

30 % + 70 %

EUCLID Satellit



**(6) Eigenschaften der
Dunklen Energie bestimmen die
Zukunft des Universums**



Zusammenfassung

**(1) 95 % des Universums
sind dunkel**



(2) Dunkle Materie klumpt in Galaxien und Galaxien-Haufen

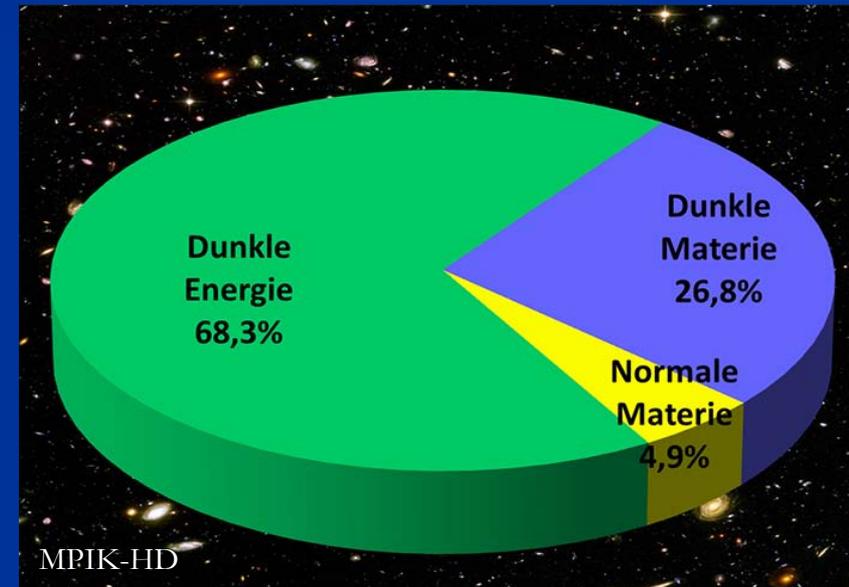


(3) Zusammensetzung des Universums

Atome : 5 %

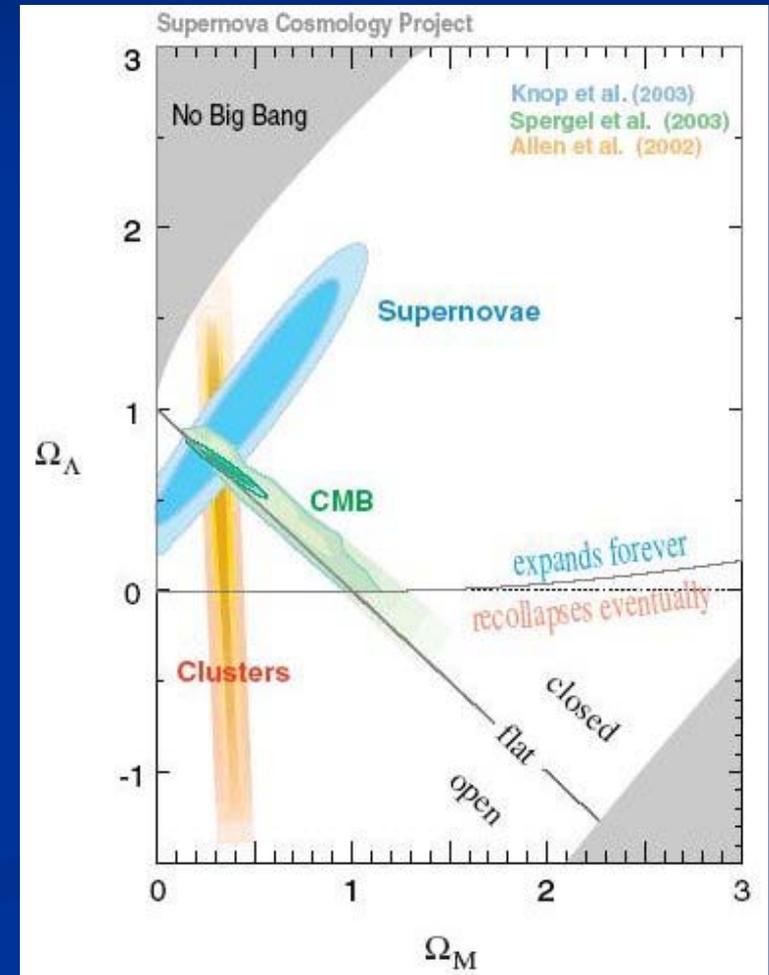
Dunkle Materie : 25 %

Dunkle Energie : 70 %



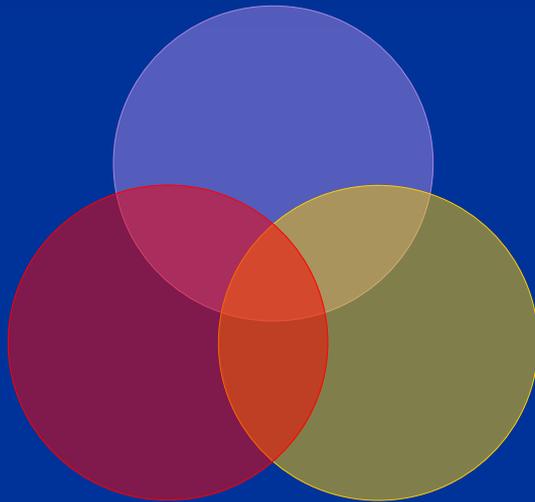
(4) Eigenschaften der Dunklen Energie:

- gleichverteilt im Raum
- (fast) zeitunabhängig
(in der heutigen kosmologischen Epoche)
- beschleunigt Expansion des Universums



(5) Dynamische Dunkle Energie erfordert „fünfte Kraft“

Starke, elektromagnetische, schwache
Wechselwirkung



Gravitation

Kosmodynamik

Auf
astronomischen
Skalen:

Graviton

+

Kosmon

**(6) Eigenschaften der
Dunklen Energie bestimmen die
Zukunft des Universums**



Zusammenfassung (2)

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

