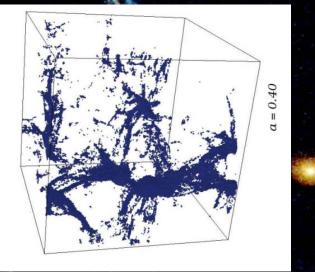
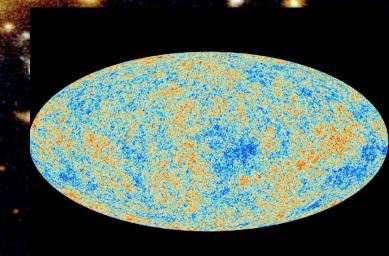
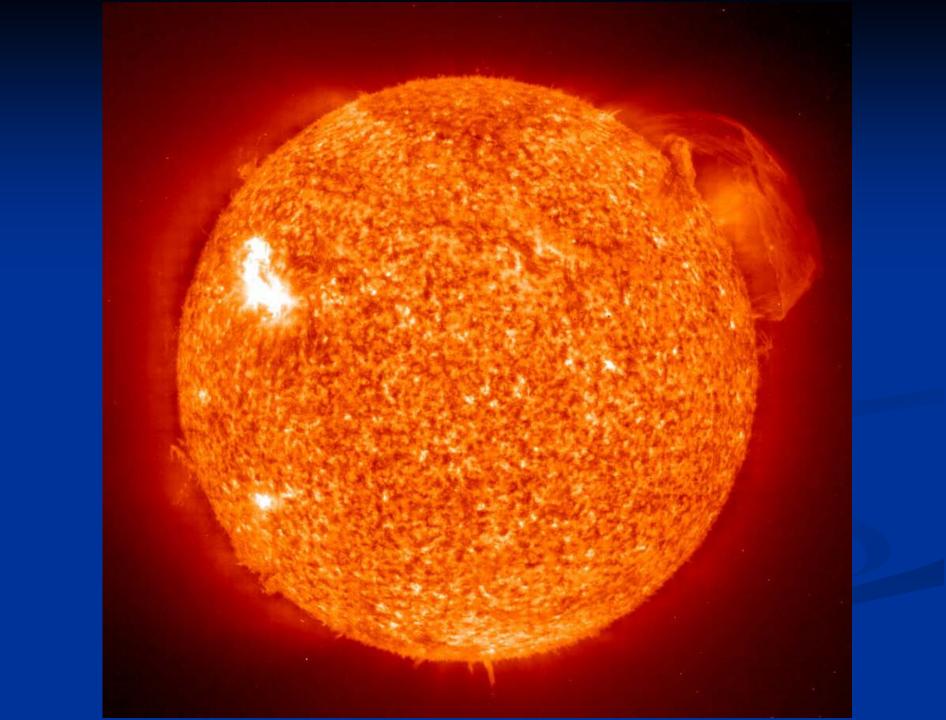
Haben Neutrinos mit Dunkler Energie zu tun?









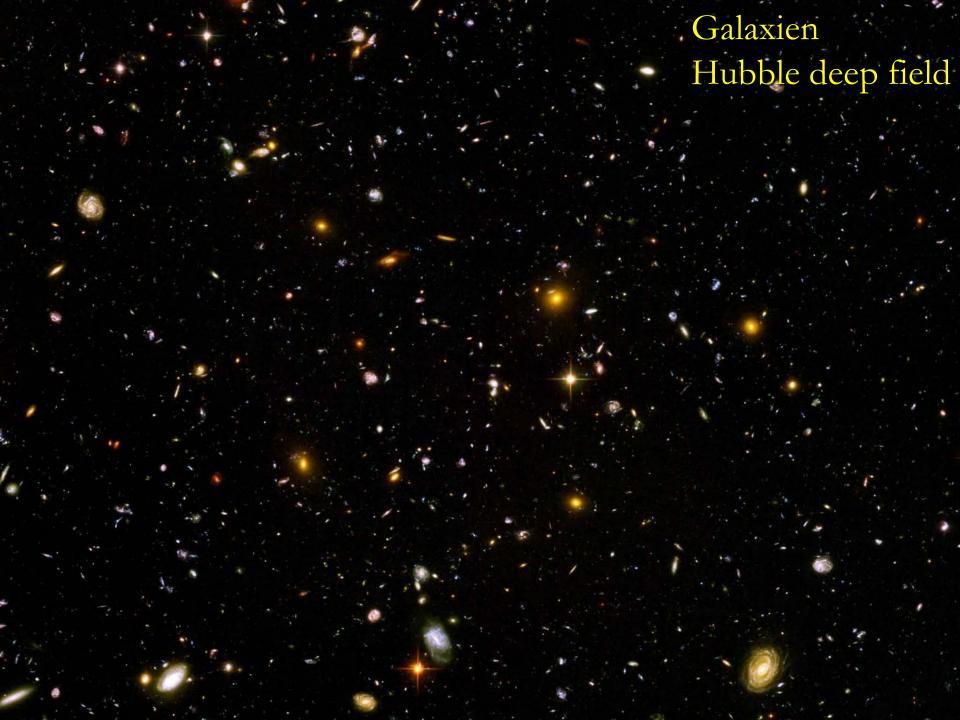












Was ist da, wo man nichts sieht?

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

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!



Himmelsdurchmusterung: nicht nur mit Licht!

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

Farben frei gewählt

Dunkle Materie

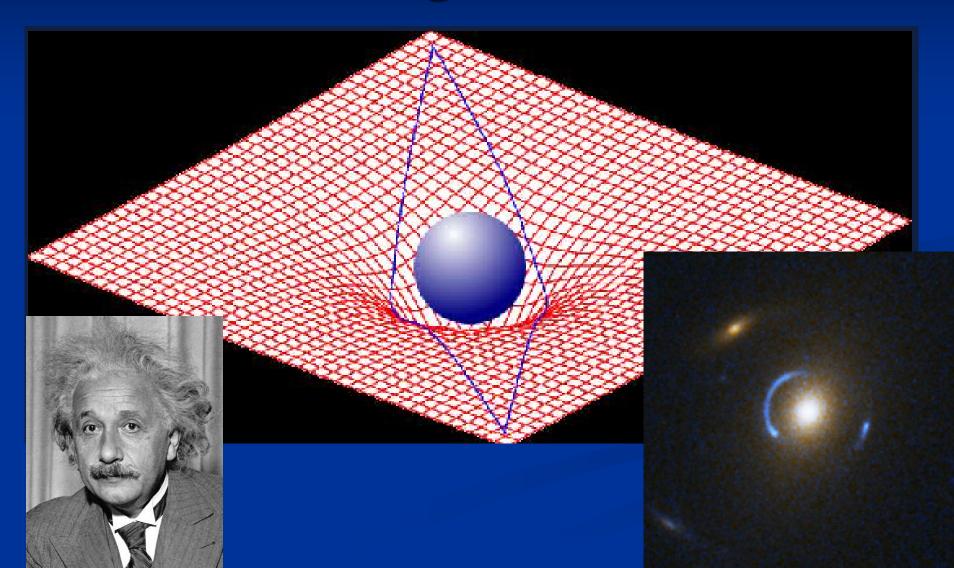


Dunkle Materie in Kollision

bullet cluster



Lichtstrahlen werden durch Massen abgelenkt







Schwacher Gravitationslinsen – Effekt:

Leichte Verzerrung des Bilds Tausender von

Hintergrundgalaxien

Statistische Verteilung



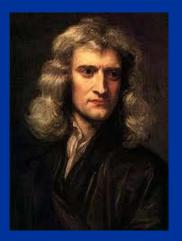
Wieviel Dunkle Materie gibt es?

Materie:

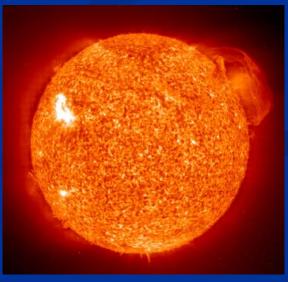
Alles, was klumpt

Gravitations - Potenzial

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







Dunkle Materie

■ Anteil der "Materie" insgesamt: 30 %

■ Die meiste Materie ist dunkel!

Bisher nur durch Gravitation spürbar

Alles was klumpt! Gravitationspotenzial

Woraus besteht unser Universum?

Dunkle Materie + Atome:

Alles was klumpt!

30 %

30 % von was ?

Kritische Dichte

Q_c = 3 H² M²
 Kritische Energiedichte des Universums

```
(M: reduzierte Planck-Masse, M<sup>-2</sup>=8 \pi G;
H: Hubble Parameter H = \dot{a}/a)
```

Ω_b=Q_b/Q_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

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

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

Kritische Dichte

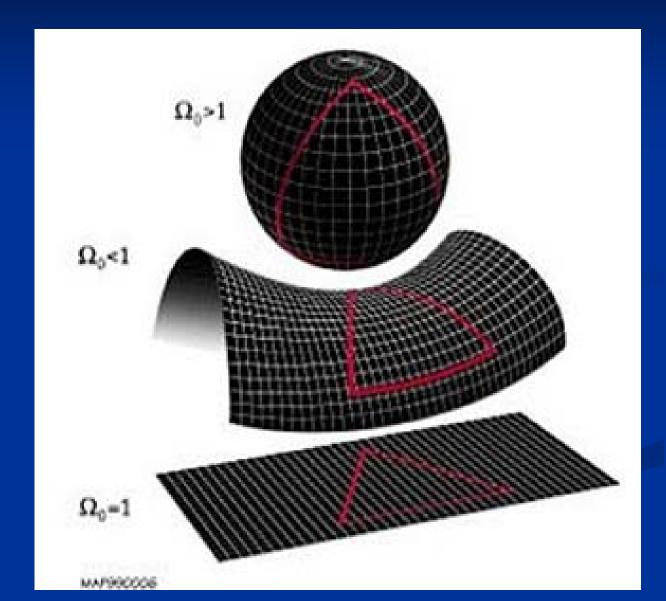
 $\Omega_{\rm tot}$ =1

flaches Universum $\Omega_{\rm tot}$ >1

Kugeloberfläche $\Omega_{\rm tot}$ <1

hyperbolische

Geometrie



Materie

Atome:

$$\Omega_{\rm b} = 0.05$$

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

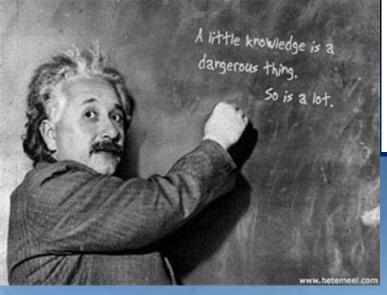
Dunkle Energie:

 $\Omega_{\rm h}$: 0.7

Dunkle Energie kann man nicht sehen, auch nicht indirekt

Kosmologie:

Verständnis des Universums als Ganzem



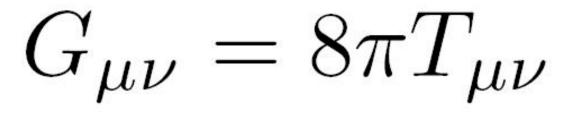
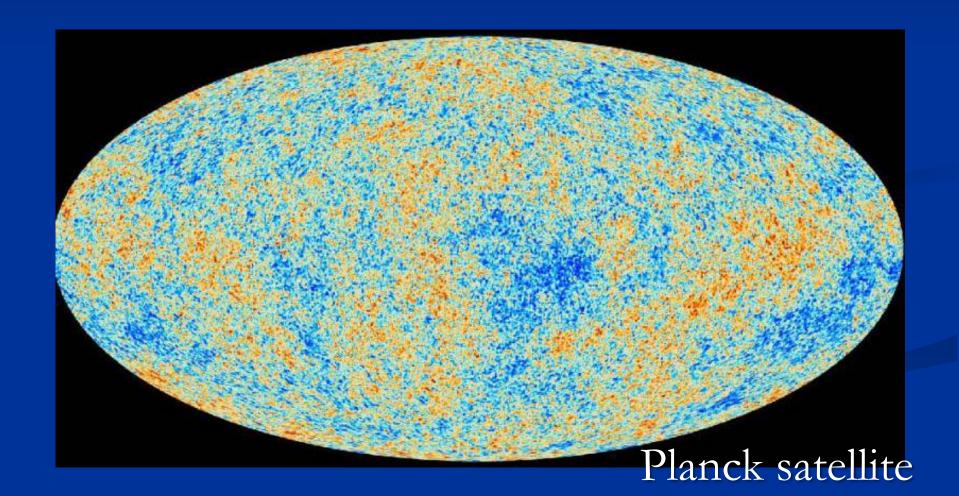




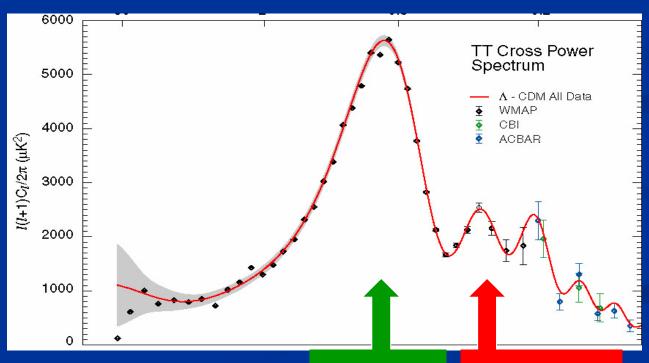
Foto des Urknalls

als sich die Atome bildeten: ca 400 000 Jahre abb



Räumlich flaches Universum

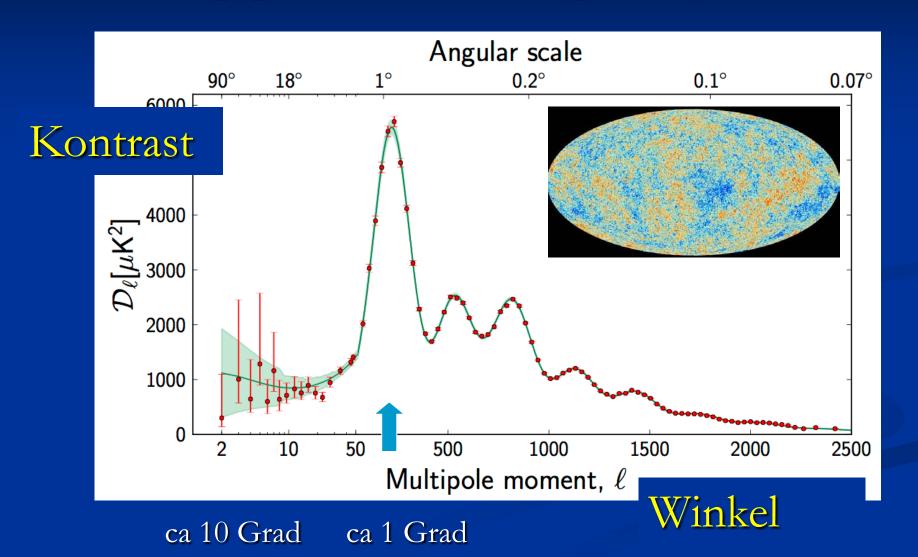
$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$



WMAP

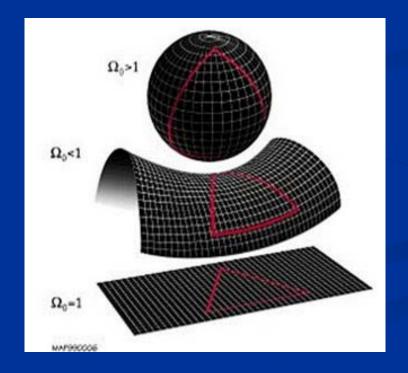
 $\Omega_{\text{tot}} = 1$ $\Omega_{\text{tot}} = 0.2$

Stärke der Temperaturschwankung in Abhängigkeit von Fleckengröße (im Winkel)



Räumlich flaches Universum

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



Dunkle Energie

$$\Omega_{\rm m} + X = 1$$

$$\Omega_{\rm m}:30\%$$

$$\Omega_{\rm h}$$
: 70% Dunkle Energie

h: homogen, oft auch Ω_{Λ} statt $\Omega_{\rm h}$

Dunkle Energie dominiert das Universum

Energie - Dichte im Universum

=

Materie + Dunkle Energie

30 % + 70 %

Zusammensetzung des Universums

Atome:

$$\Omega_{\rm b} = 0.05$$

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

Dunkle Energie: $\Omega_h = 0.7$

Eigenschaften der Dunkle Energie?

Dunkle Energie:

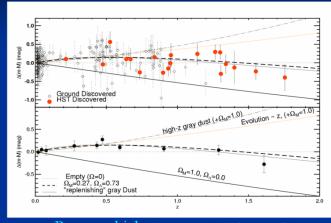
homogen verteilt

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



Photo: Roy Kaltschmidt. Courtesy: Lawrence Berkeley National Laboratory



Photo: Belinda Pratten, Australian National University



Photo: Homewood Photography

Saul Perlmutter

Brian P. Schmidt

Adam G. Riess

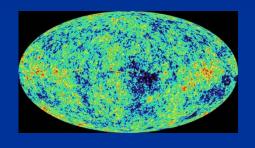
The Nobel Prize in Physics 2011 was awarded "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae" with one half to Saul Perlmutter and the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess.

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



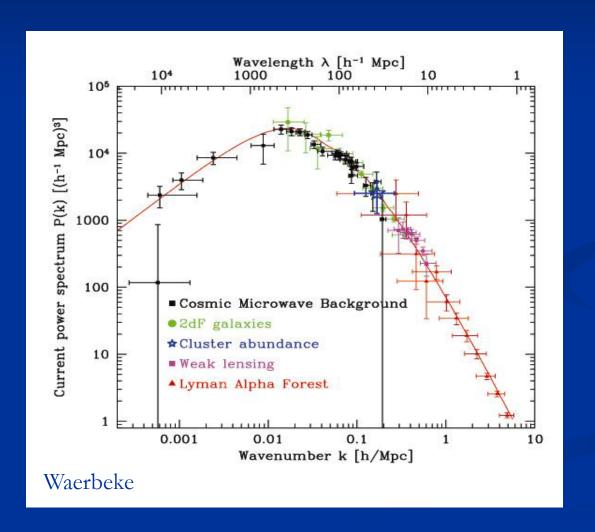


Sterne, Galaxien, Galaxienhaufen



Ein primordiales Fluktuationsspektrum beschreibt alle Korrelatonsfunktionen!

Strukturbildung: Ein primordiales Fluktuationsspektrum



CMB passt mit

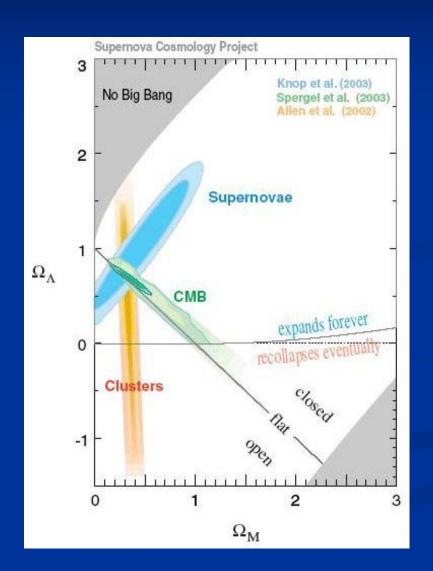
Galaxienverteilung

Lyman – α

und

Gravitationslinsen-Effekt!

Dunkle Energie: die Beobachtungen passen zusammen!



Konsistentes kosmologisches Modell!

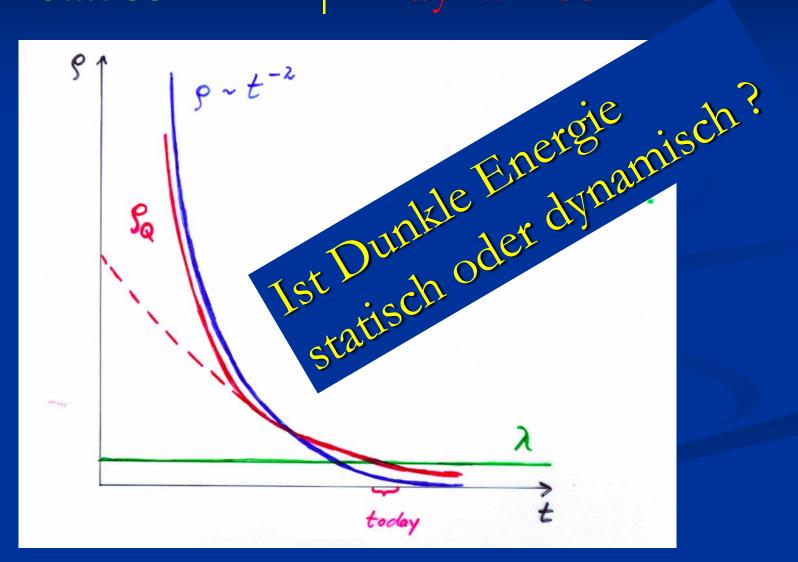
Was ist Dunkle Energie?

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

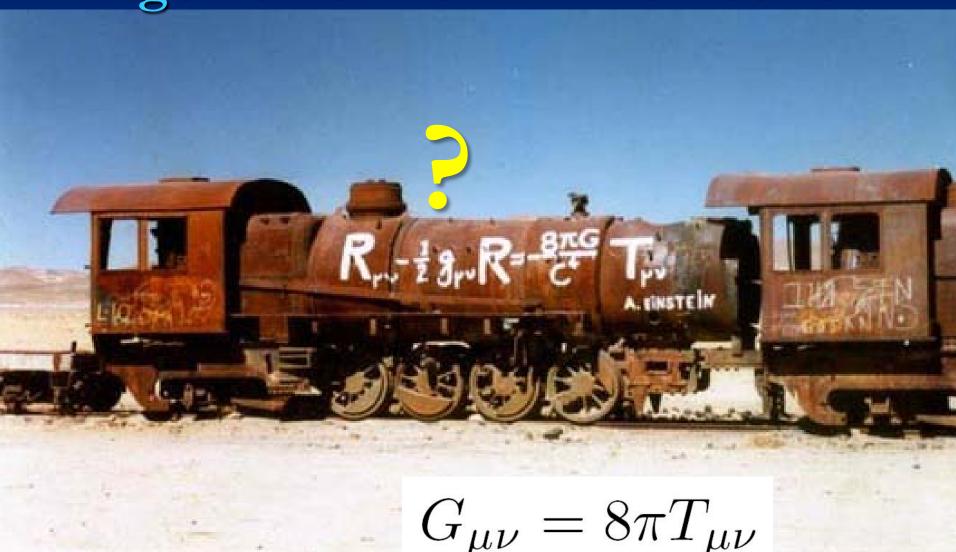
Auf astronomischen Skalen:

Graviton

+

Kosmon

Modifikation Einstein's allgemeiner Relativitätstheorie?



Vereinheitlichung aller Wechselwirkungen

Superstrings

Zusätzliche Dimensionen

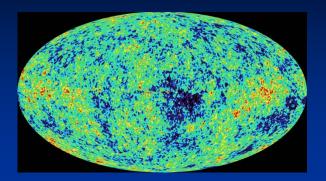
Fundamentaler Ursprung der Massenskalen







$$\Omega_{\rm m} + X = 1$$



 $\Omega_{\rm m}:30\%$



Ω_h: 70% Dunkle Energie

Zusammenfassung (1)

 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 × 10¹⁸GeV
- 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: $\rho_{\rm m}/{\rm M}^4=3.5\ 10^{-121}$

Zeitentwicklung

t⁻² Materie dominiertes Universum

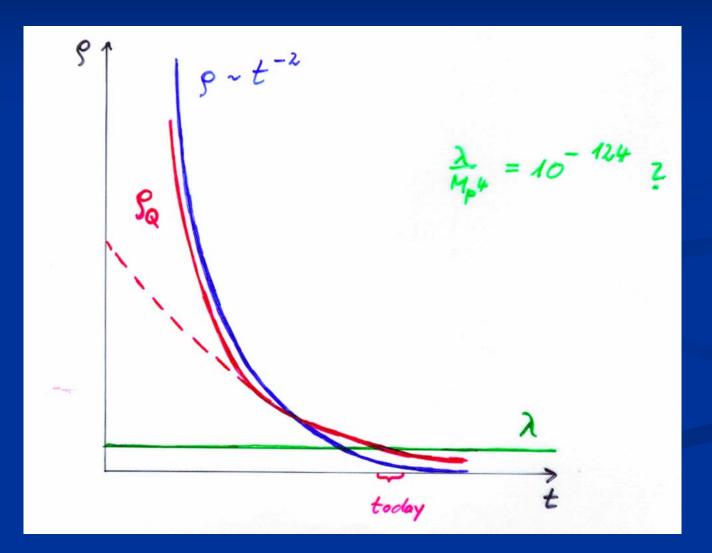
 ${
m Le}_{\rm m}/{
m M}^4 \sim a^{-3} \sim {
m t}^{-3/2}$ Strahlungsdominiertes Universum

 \blacksquare $\varrho_{\rm r}/{\rm M}^4 \sim {\rm a}^{-4} \sim {\rm t}^{-2}$ Strahlungsdominiertes Universum

Grosses Alter → 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.

Skalarfeld

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

- ■Ähnlich wie elektrisches Feld
- Aber: keine Richtung ist ausgezeichnet

(kein Vektor)

Kosmologische Gleichungen

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

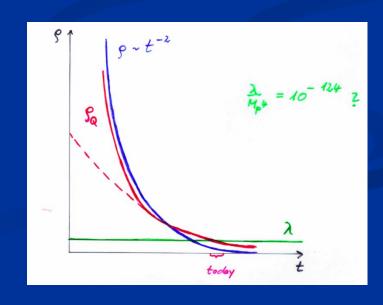
$$3M^2H^2 = V + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + \rho$$

exponentielles Potenzial konstanter Anteil der Dunklen Energie

$$\Omega_{\rm h} = 3/\alpha^2$$

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

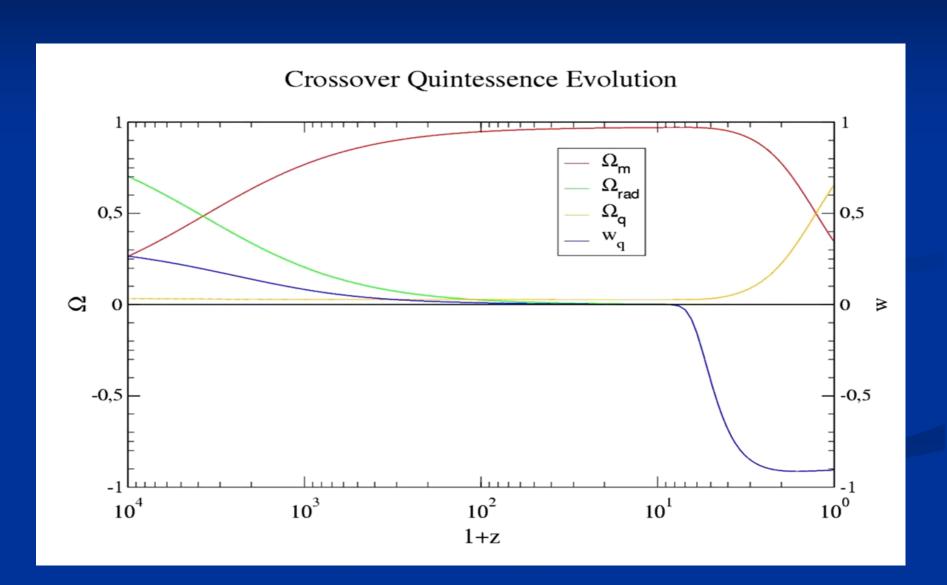
kann die Grössenordung der Dunklen Energie erklären!



realistische Quintessenz

Anteil der Dunklen Energie muss in letzter Zeit wesentlich gewachsen sein!

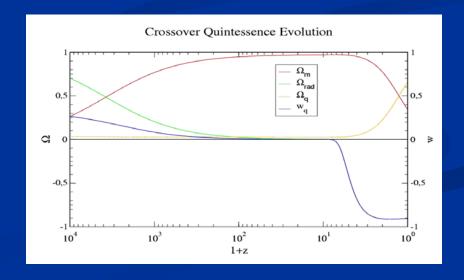
Quintessenz wird heute wichtig



Koinzidenz - Problem

Was ist verantwortlich für das Anwachsen von Ω_h für z < 6?

Warum heute?



Warum Neutrinos eine Rolle spielen können

Massen - Skalen:

Dunkle Energie Dichte: $\varrho \sim (2 \times 10^{-3} \text{ eV})^{-4}$.

Neutrino Massen: eV oder kleiner.

Kosmologischer Trigger: Neutrinos werden erst im späten Universum nicht-relativistisch.

Neutrino-Energie Dichte nicht viel kleiner als Dunkle Energie Dichte .

Neutrinos können substantielle Kopplung an Dunkle Energie haben.

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

jetzige Zustandsgleichung ist gegeben durch Neutrino - Masse!

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

Neutrinos in der Kosmologie

nur kleiner Anteil der Energie - Dichte



nur unbedeutende Rolle?

Neutrino - Kosmon Kopplung

realisiert durch Abhängigkeit der Neutrino Masse vom Wert des Kosmon Felds

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

■ β ≈ 1 : Anziehung zwischen Neutrinos durch Kosmon – Austausch hat ähnliche Stärke wie Gravitation

Quintessenz mit wachsender Neutrino – Masse

growing neutrino quintessence

Wachsende Neutrino –Masse ändert die Evolution des Kosmon - Felds

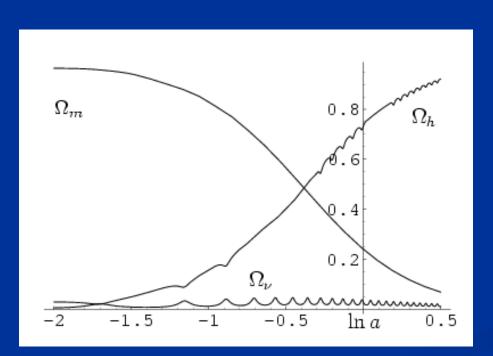
$$\ddot{\varphi} + 3H\dot{\varphi} = -\frac{\partial V}{\partial \varphi} + \frac{\beta(\varphi)}{M}(\rho_{\nu} - 3p_{\nu}),$$

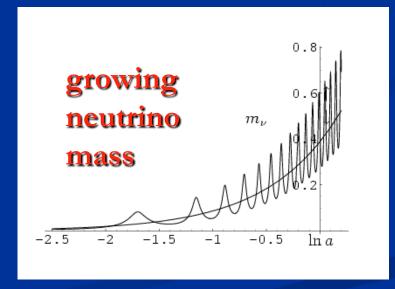
$$\beta(\varphi) = -M\frac{\partial}{\partial \varphi} \ln m_{\nu}(\varphi) = \frac{M}{\varphi - \varphi_{t}}$$

Modifikation der Energie-Impulserhaltung für Neutrinos

$$\dot{\rho}_{\nu} + 3H(\rho_{\nu} + p_{\nu}) = -\frac{\beta(\varphi)}{M}(\rho_{\nu} - 3p_{\nu})\dot{\varphi}$$
$$= -\frac{\dot{\varphi}}{\varphi - \varphi_{t}}(\rho_{\nu} - 3p_{\nu})$$

Wachsende Neutrino- Masse triggert Übergang zu fast statischer Dunklen Energie





L.Amendola, M.Baldi,...

kosmologischer Trigger für den Stop der Evolution des Kosmons: Neutrinos werden nicht - relativistisch

- dies hat sich erst "vor kurzem " zugetragen!
- bestimmt die Grösse des heutigen Werts der Dunklen Energie!

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

jetzige Zustandsgleichung ist gegeben durch Neutrino - Masse!

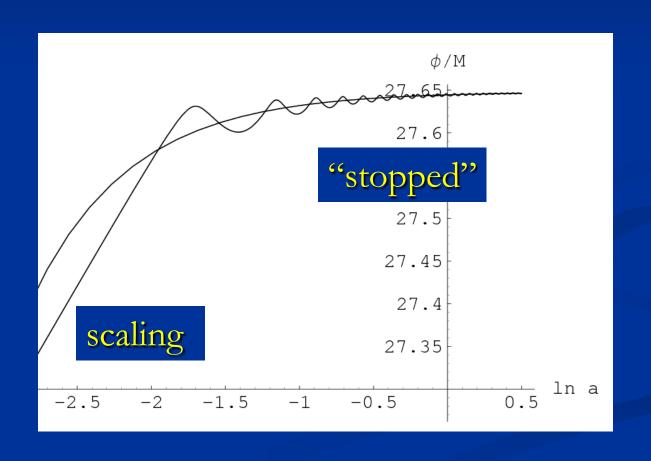
$$w_0 \approx -1 + \frac{m_{\nu}(t_0)}{12\text{eV}}$$

fast statisches Skalar Feld verhält sich wie kosmologische Konstante

Näherung für Dunkle Energie:

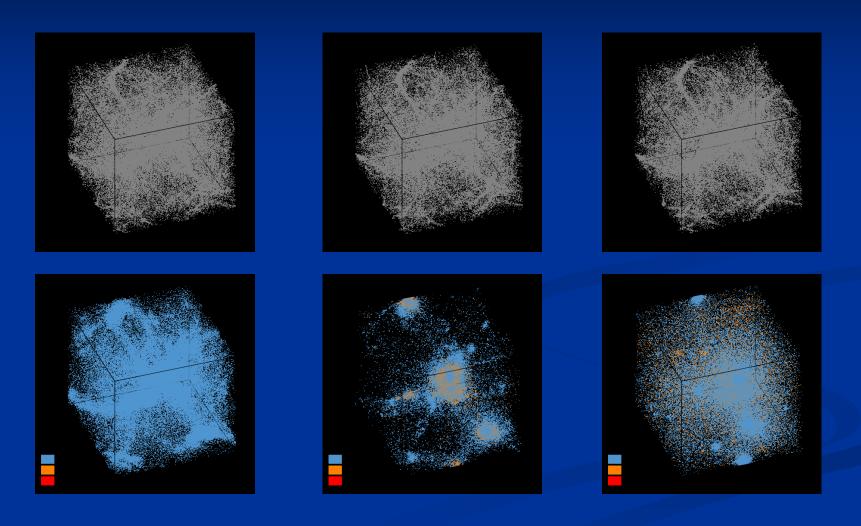
- \blacksquare vor Rotverschiebung z = 5-6: scaling (dynamisch)
- nach Rotverschiebung z = 5-6 : fast statisch
 (kosmologische Konstante)

Evolution des Kosmon - Felds



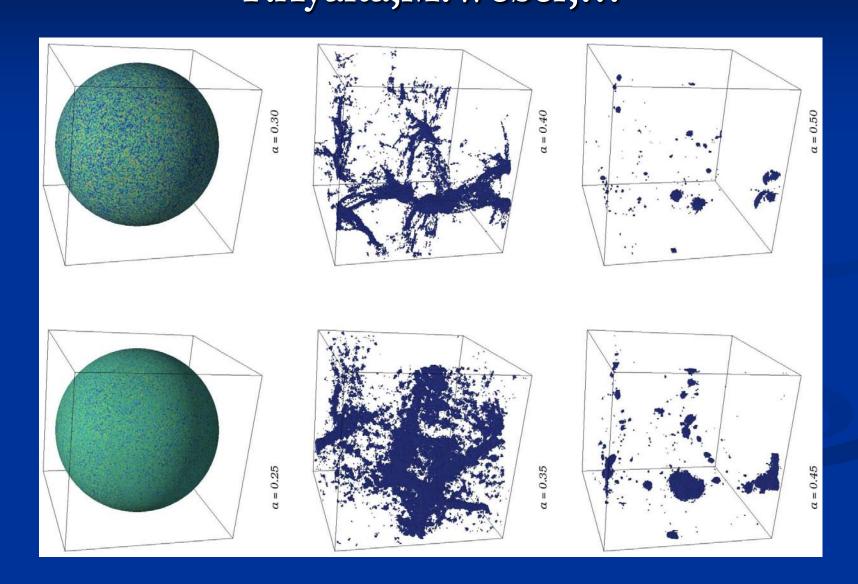
Neutrino Klumpen

Bildung von Neutrino Klumpen

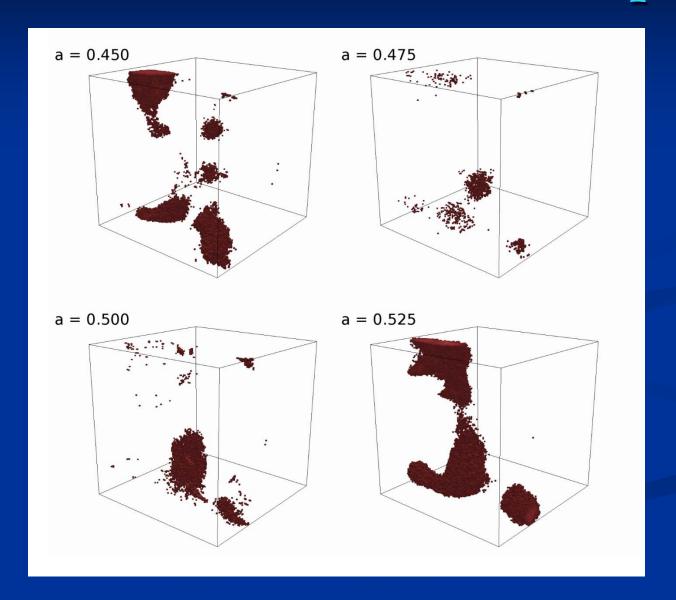


N- body simulation M.Baldi et al

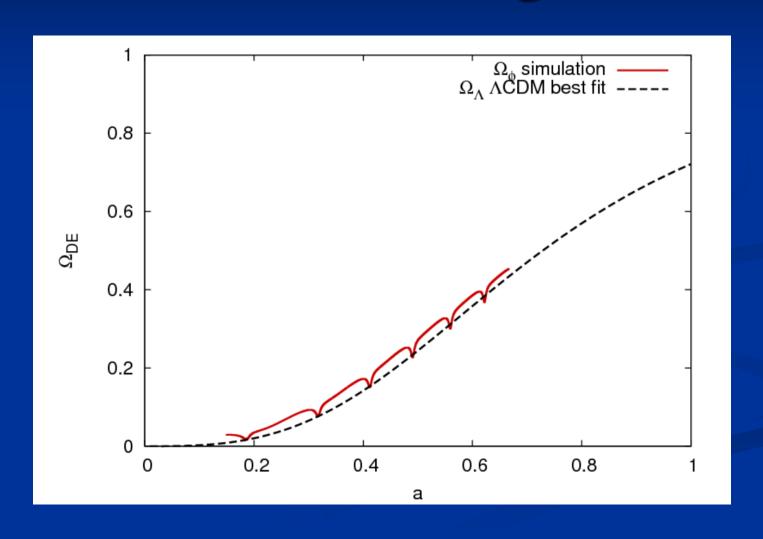
Bildung von Neutrino Klumpen Y.Ayaita, M.Weber,...



oszillierende Neutrino Klumpen



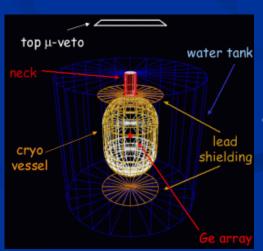
kleine Oszillationen in der Dunklen Energie



Kann die Zeit – Entwicklung der Neutrino- Massen beobachtet werden?

Experimentelle Bestimmung der Neutrino - Masse könnte einen grösseren Wert ergeben als von kosmologischen Obergrenzen bei konstanter Neutrino – Masse erlaubt (KATRIN, neutrinoloser Doppel-beta Zerfall)





GERDA

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?

Mögliche indirekte Beobachtung der fünften Wechselwirkung

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



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 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 ~ doublet square

$$m_{
u} = rac{h_{
u}^2 d^2}{m_R} + rac{h_L \gamma d^2}{M_t^2}$$

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