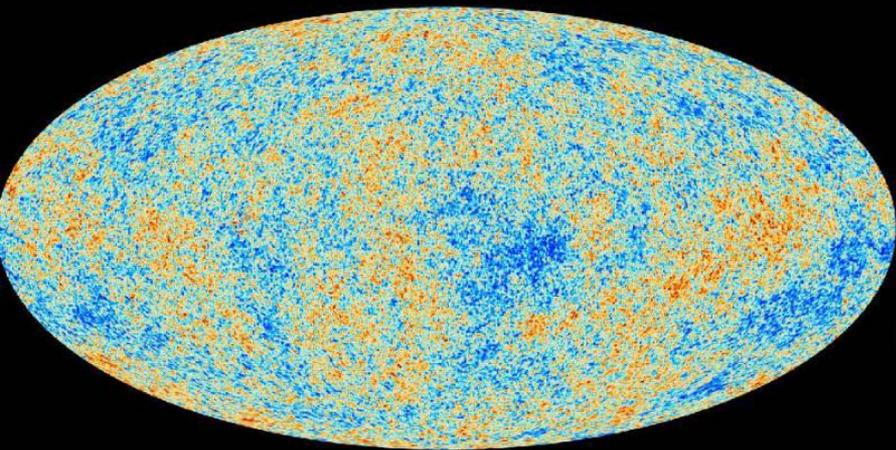


**Zeitreise durch das Universum -  
Wo Physik auf das fast  
Unvorstellbare trifft**

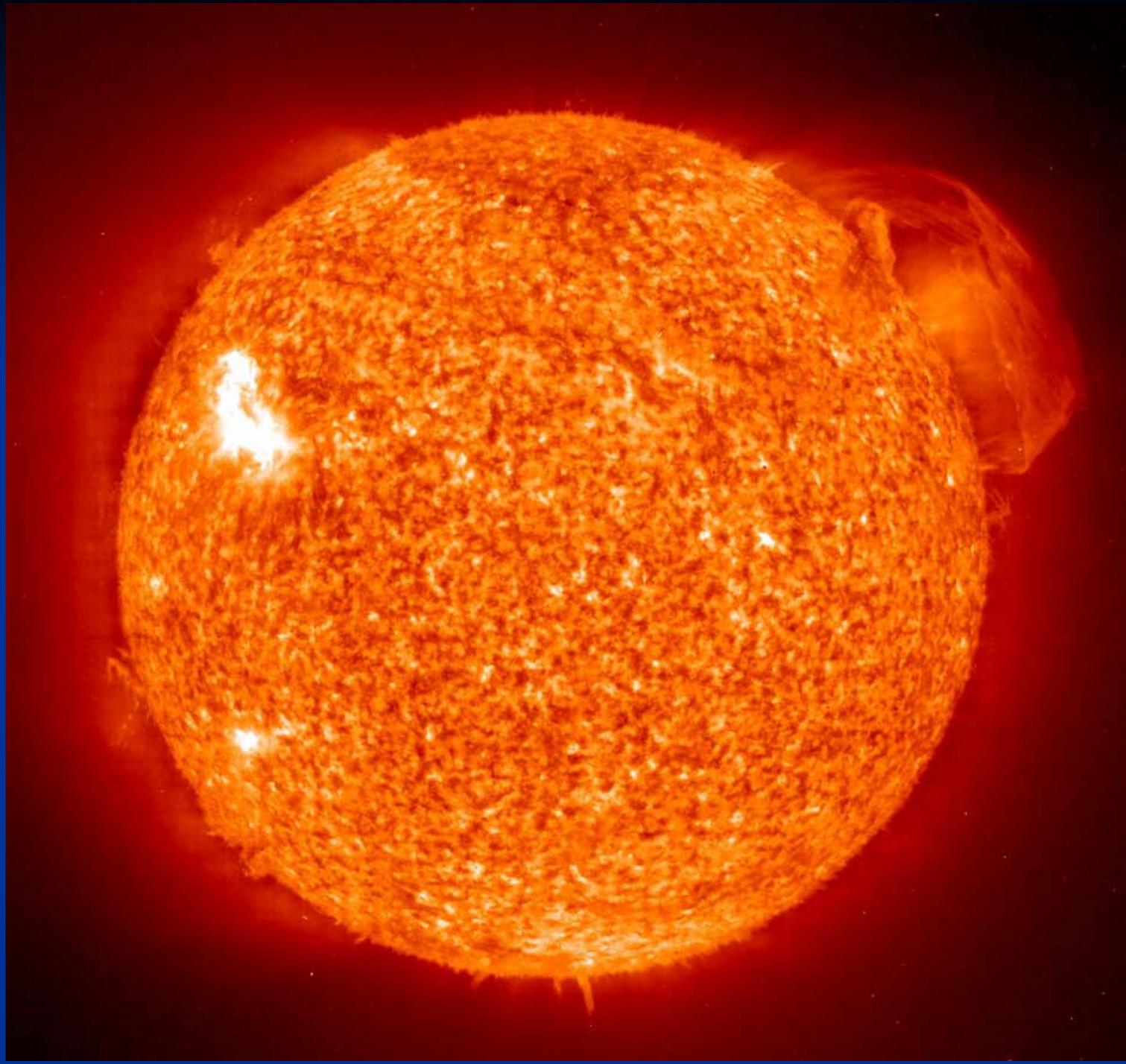








vor 8 Minuten



vor vielen Tausenden von Jahren







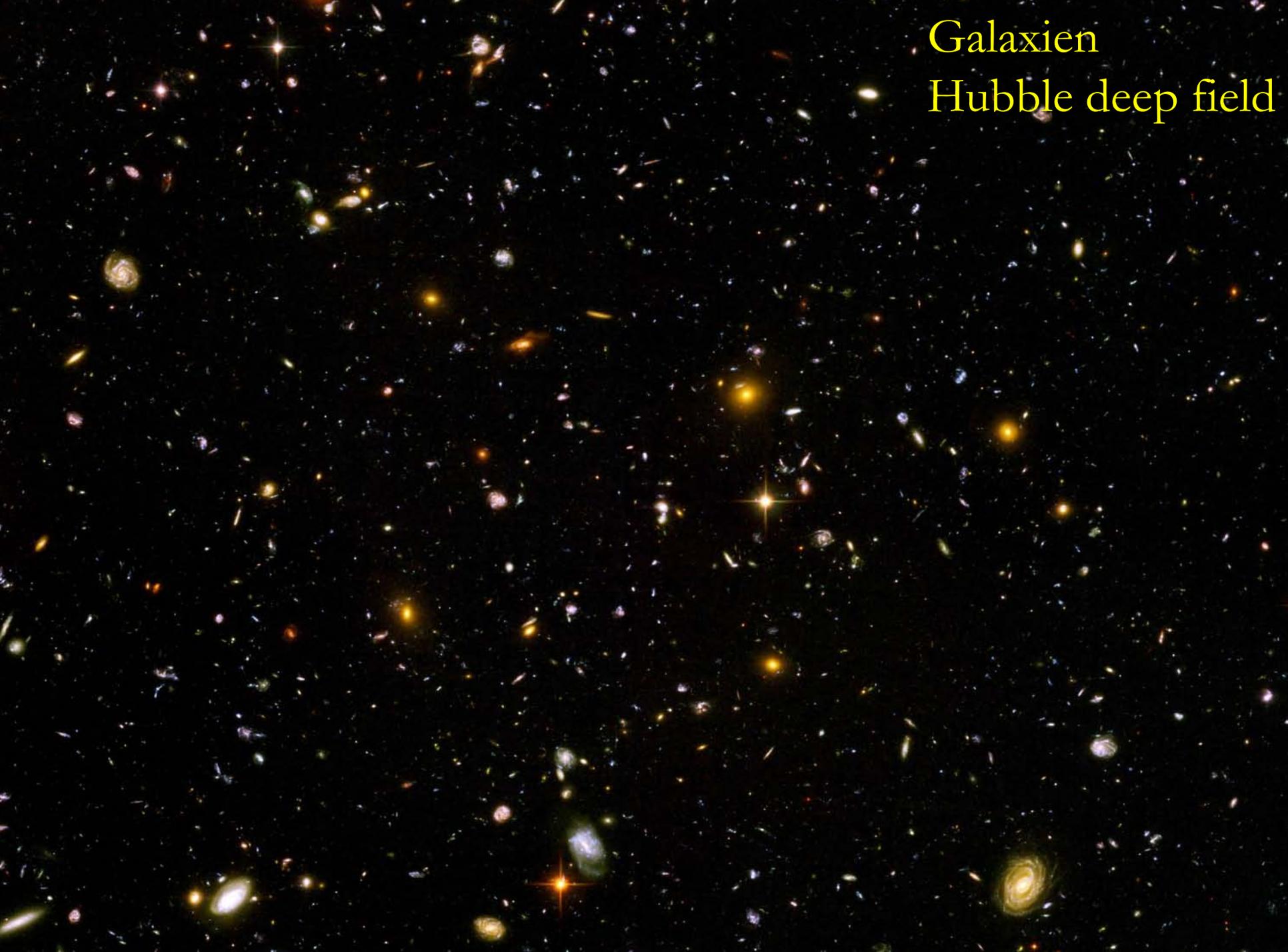




vor vielen Millionen von Jahren

Galaxien

Hubble deep field



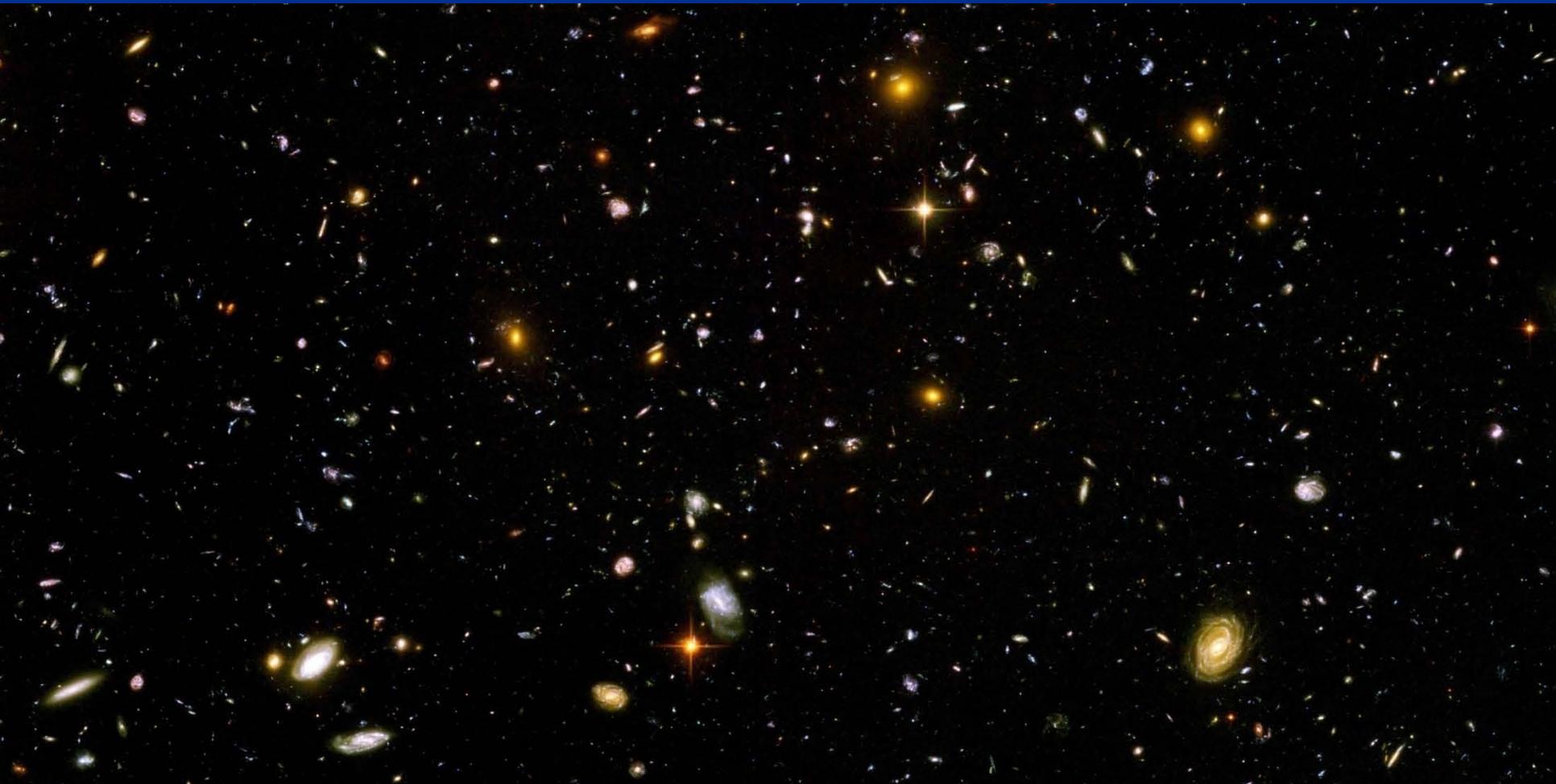
vor Milliarden Jahren



The background of the image is a vast field of galaxies, likely from a deep space survey. The galaxies are scattered across the frame, appearing in various colors including yellow, orange, red, blue, and purple. Some are bright and clear, while others are faint and distant. The overall appearance is that of a rich, multi-colored galaxy population.

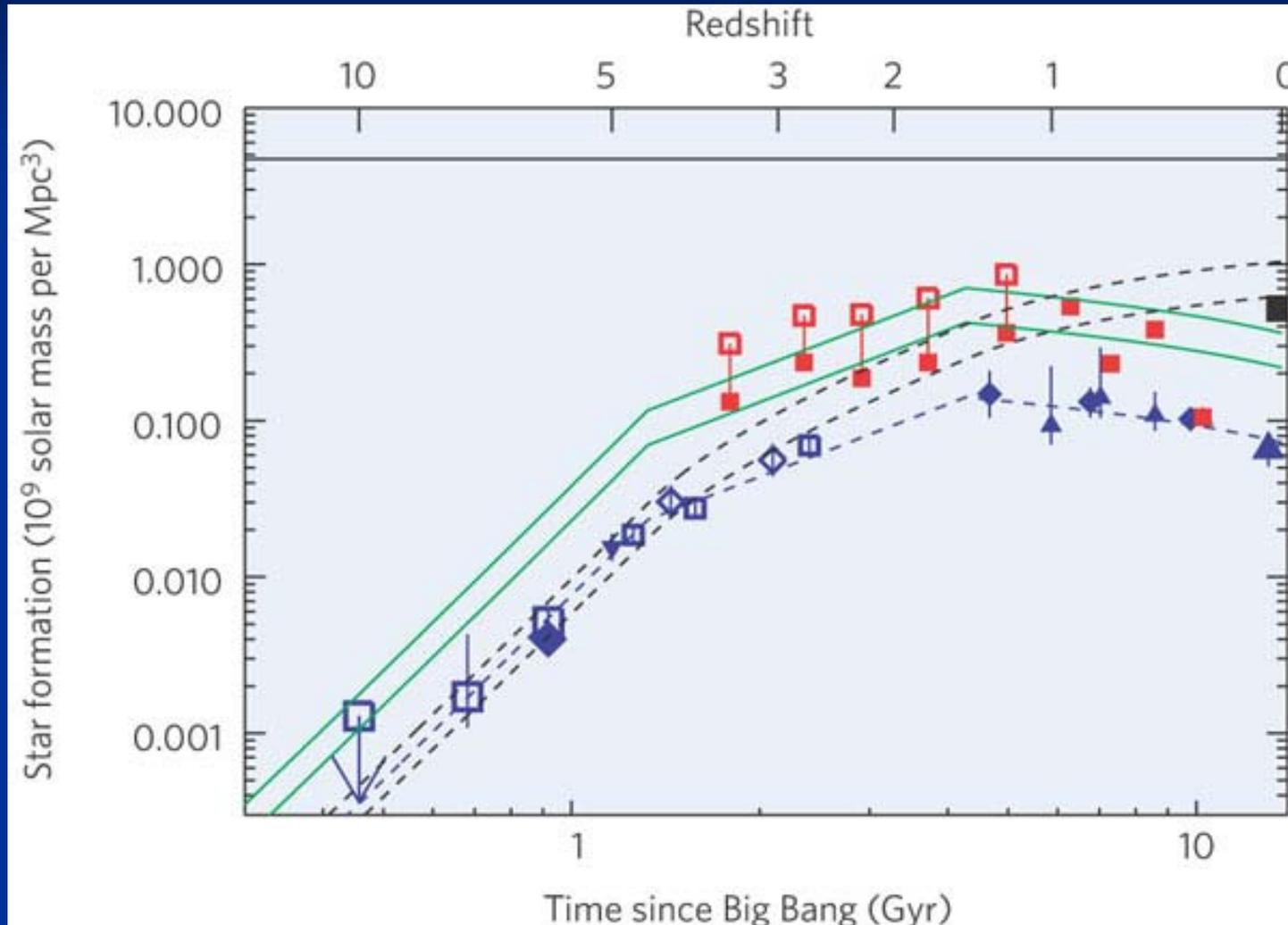
*Was ist da ,  
wo man nichts sieht ?*

Wer weit hinaus schaut ,  
schaut weit zurück !



*Was war früher anders ?*

# Früher sind weniger Sterne entstanden



# Vergleich : Erde

## Sieben Milliarden Menschen Mitte 2011

Zuwachs der Weltbevölkerung

Pro Jahr +83 Mio. Menschen

Pro Tag +228.200

Pro Minute +158

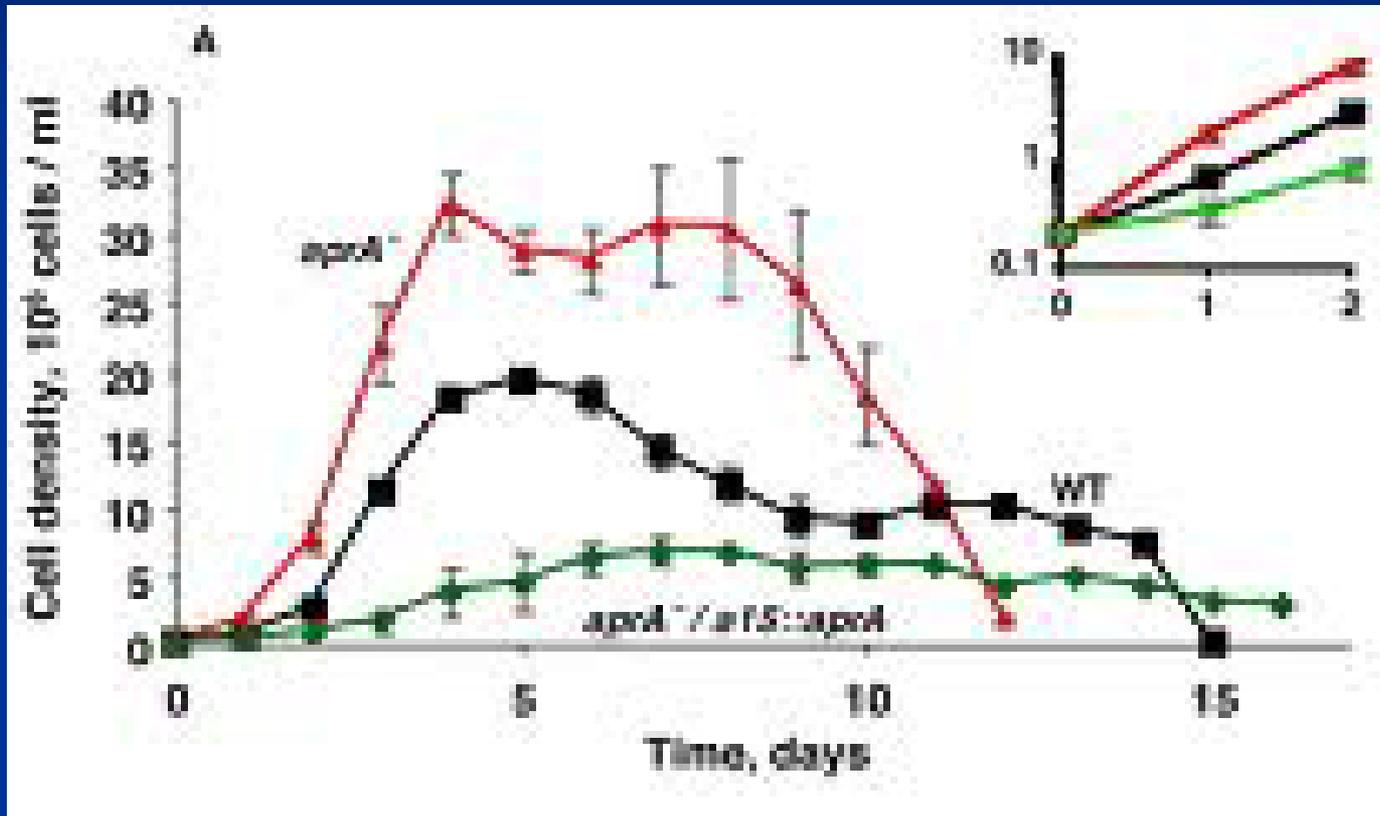
Pro Sekunde +2,6



Menschen auf der Welt

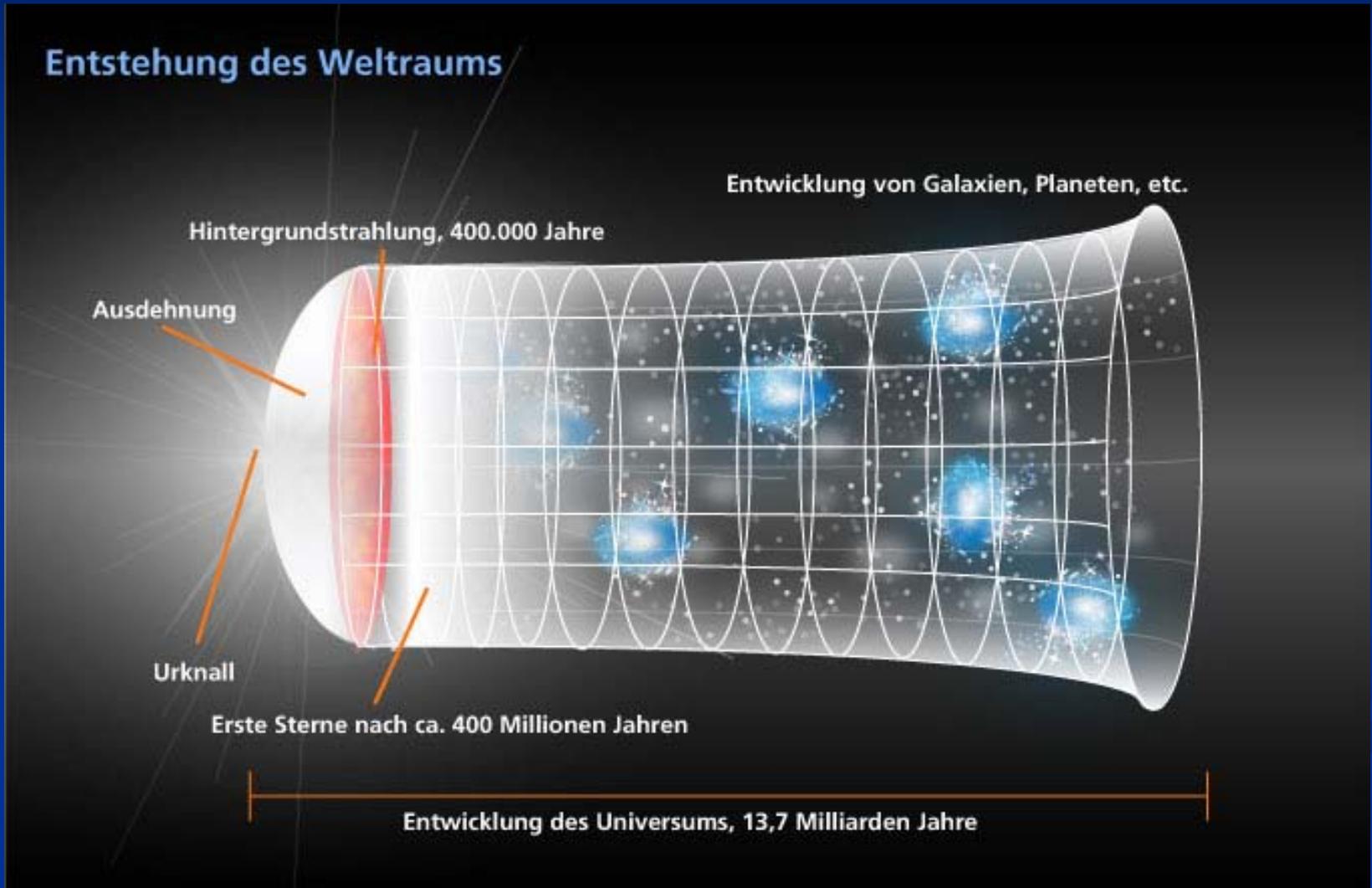


# Vergleich mit Lebewesen



Zellwachstum

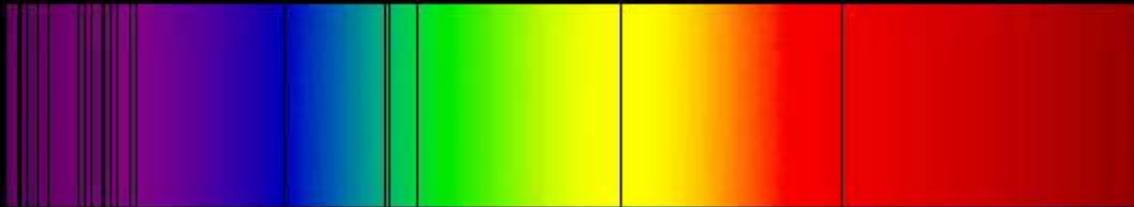
# (1) Das Universum entwickelt sich



*Was war früher anders ?*

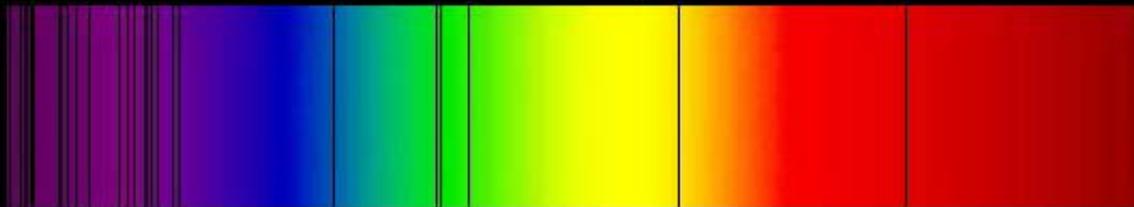
# Verschobene Frequenzspektra

Absorption Lines from our Sun



Absorption Lines from a supercluster of galaxies, BAS11

$v = 0.07 c$ ,  $d = 1$  billion light years



# Rotverschiebung

systematischer Effekt :

- je weiter weg, desto röter
- je früher, desto röter

mögliche Erklärungen:

- Entfernte Galaxien bewegen sich von uns weg.  
oder
- Atome waren früher größer.

**Kosmologie :**

**Verständnis des  
Universums als Ganzem**

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

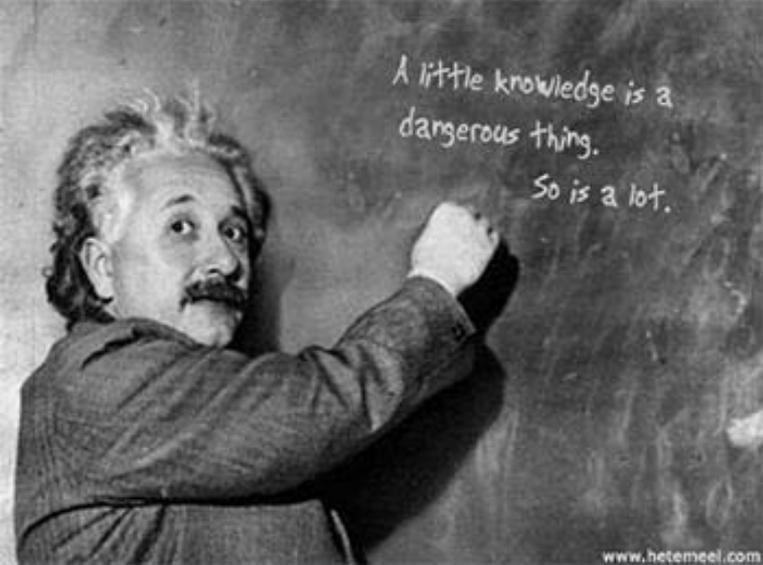
Die kosmische Renaissance: Ende des "Dunklen Zeitalters"

← Reionisation beendet. Das Universum ist transparent.

Galaxien entwickeln sich

Das Sonnensystem entsteht

Heute: Astronomen erklären das Universum

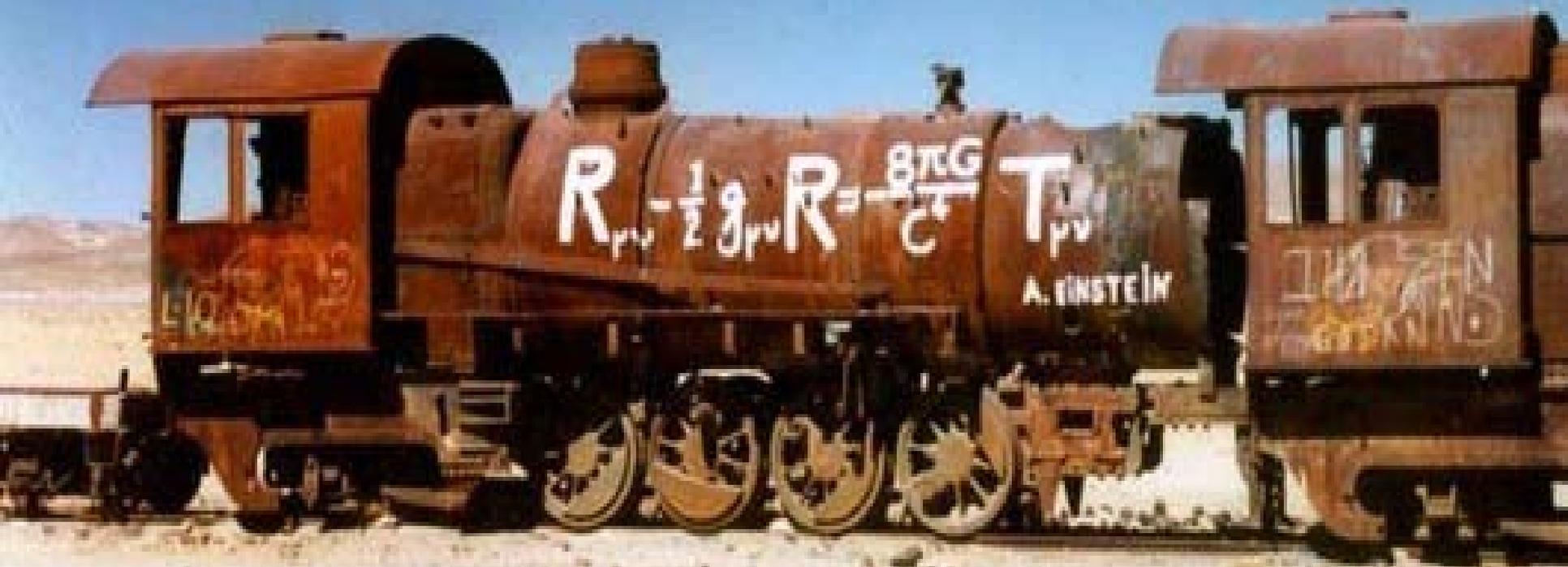


$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$



# Gravitation regiert die Welt

Einsteins Gleichungen leicht gemacht



C. Wetterich, Mainz 27.5.

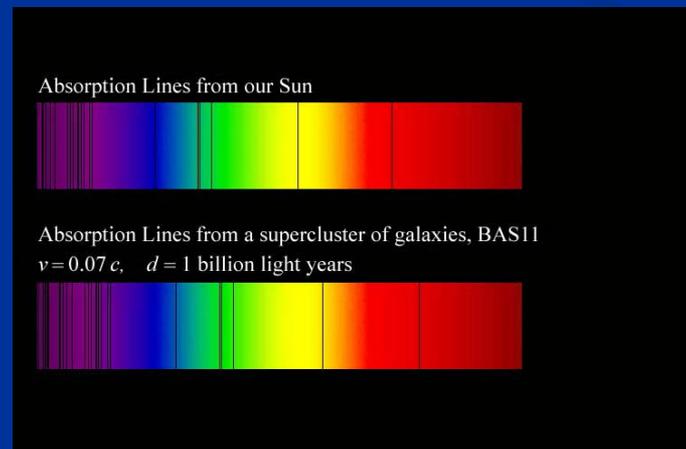
# Massereiche Schwarze Loecher und Galaxien

Reinhard Genzel , Mainz, 3.6.

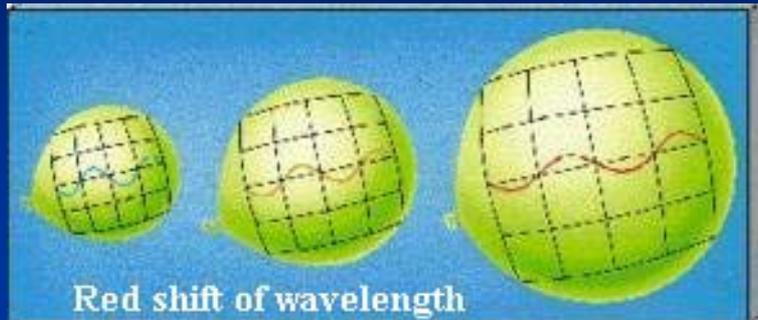


# Expansion des Universums

- Lösung der Einstein – Gleichung :
- Der Raum zwischen den Galaxien dehnt sich aus
- Passt mit Rotverschiebung !

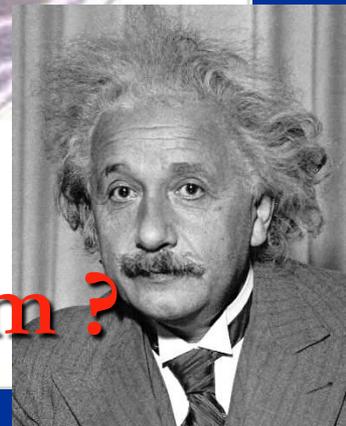


# Expansion des Universums



Expanding distance between galaxies

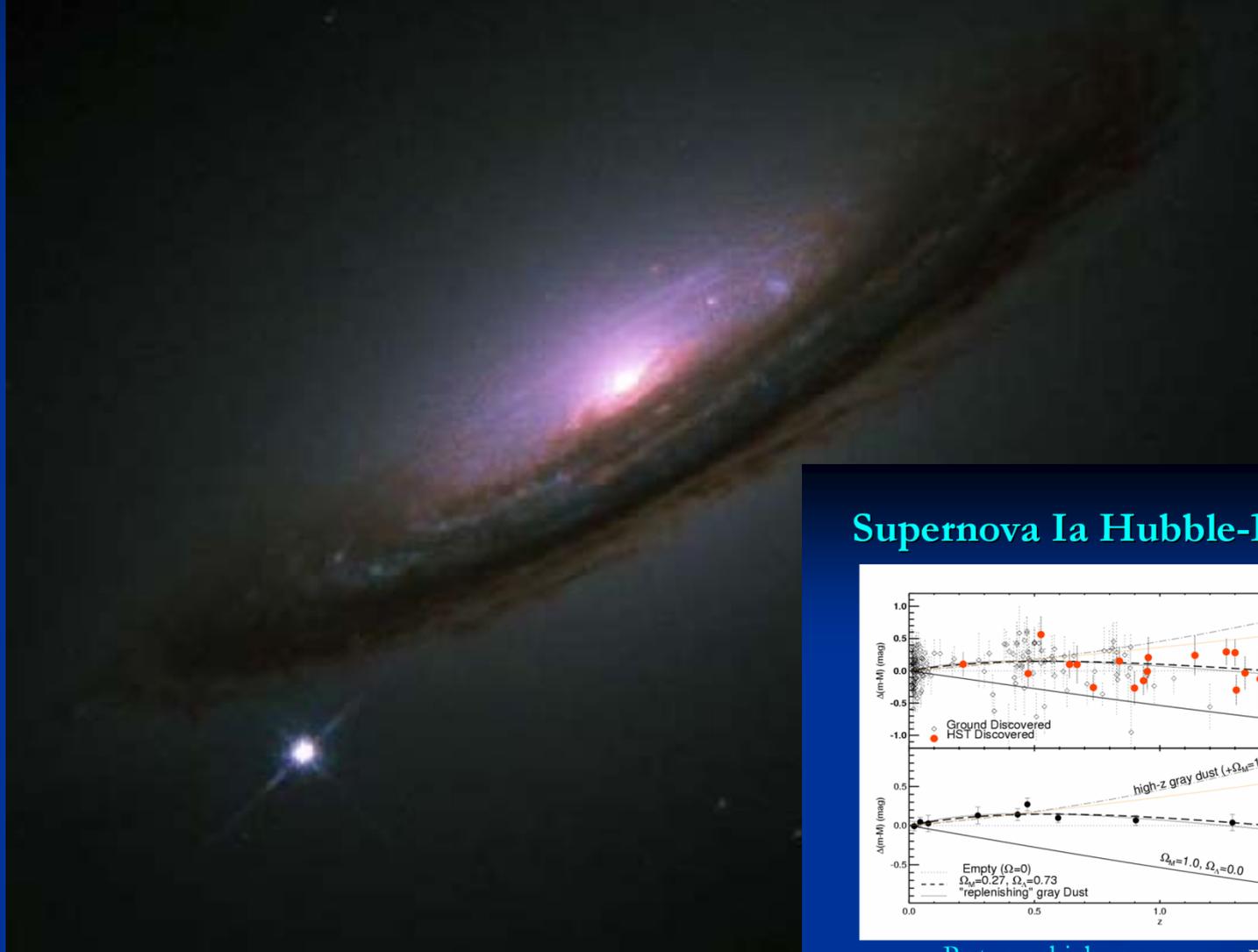
Hmm?



# Expansion des Universums

- Lösung der Einstein – Gleichung :
- Der Raum zwischen den Galaxien dehnt sich aus
- Passt mit Rotverschiebung !
- quantitativ ?

# Die Expansion des Universums beschleunigt sich heute !



## Supernova Ia Hubble-Diagramm

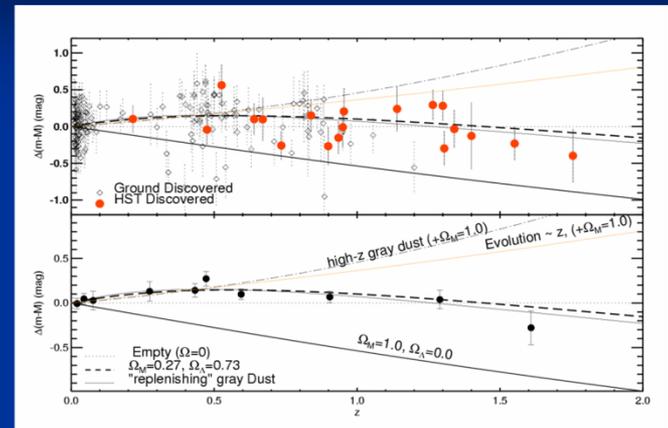




Photo: Roy Kaltschmidt. Courtesy: Lawrence Berkeley National Laboratory

**Saul Perlmutter**



Photo: Belinda Pratten, Australian National University

**Brian P. Schmidt**



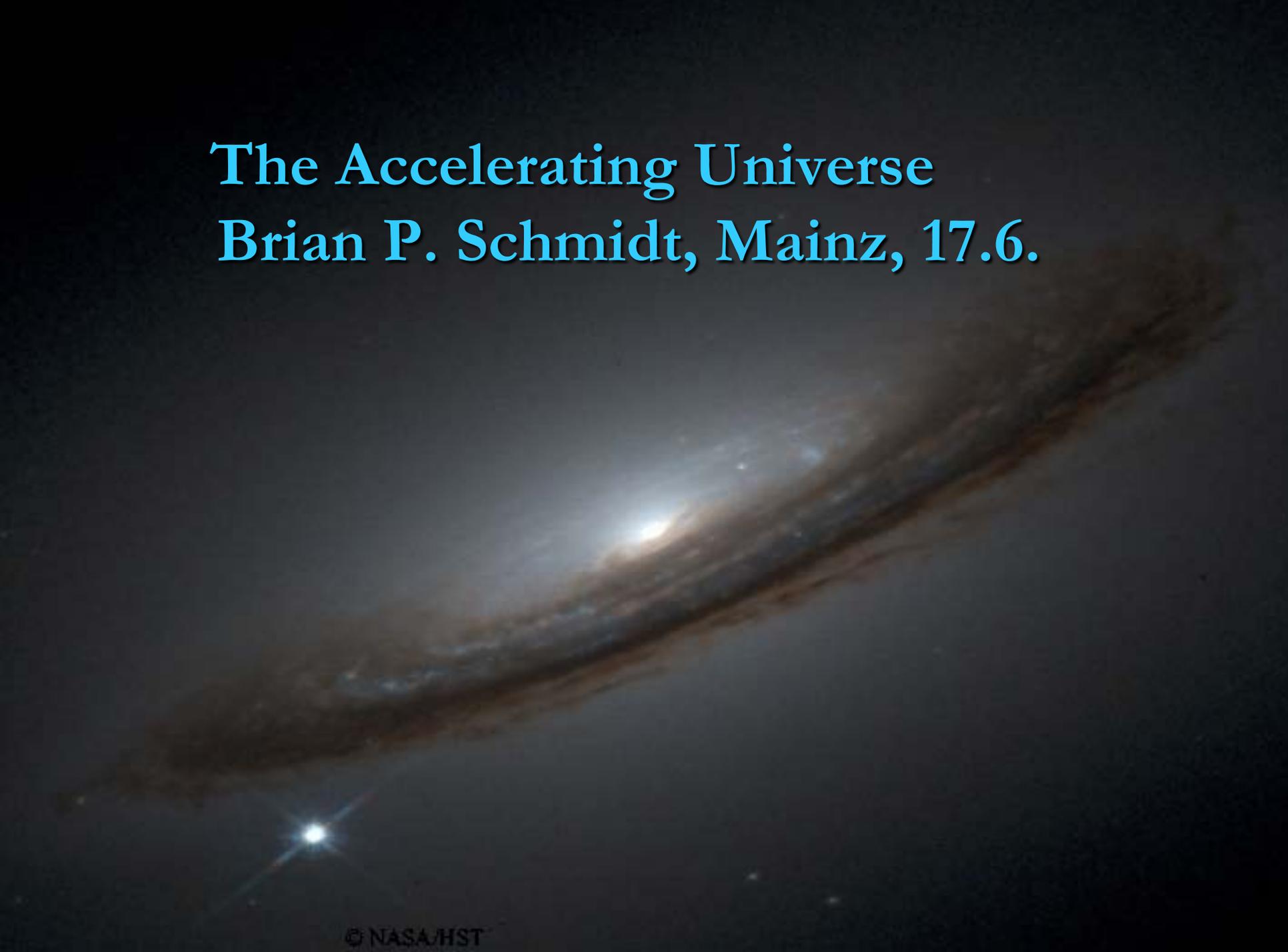
Photo: Homewood Photography

**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.

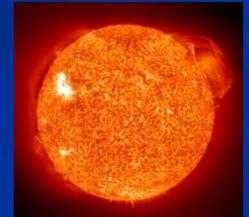
# The Accelerating Universe

Brian P. Schmidt, Mainz, 17.6.

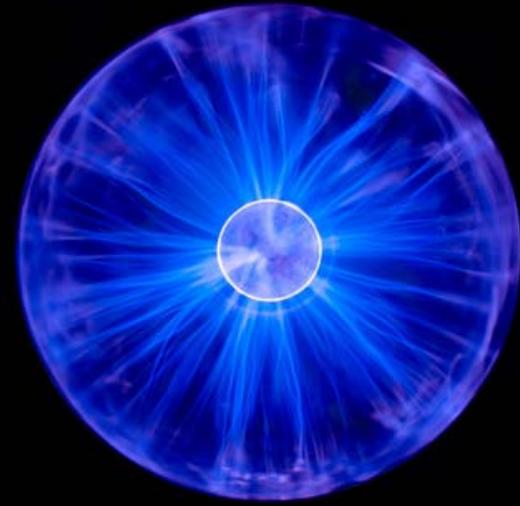


# Expansion des Universums

- 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



# Plasma



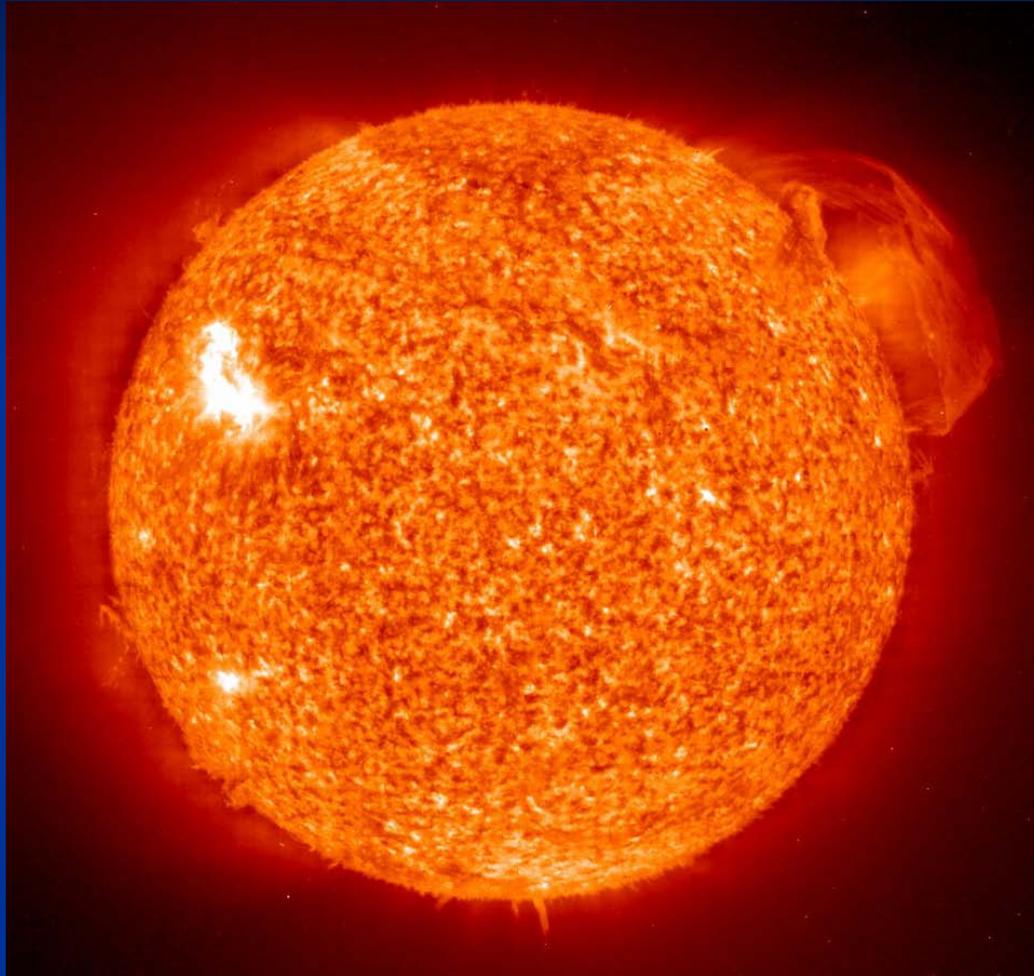
# Unendlicher Feuerball

- heißes Plasma
- Elektronen und Kerne oder Kernbestandteile getrennt
- viel heißer und dichter als die Sonne

# Thermisches Gleichgewicht

- Nur bestimmt durch Temperatur und erhaltene Teilchenzahlen
- Universum im thermischen Gleichgewicht vergisst Anfangsbedingungen
- Vorhersagekraft !
- Details des frühen Universum unzugänglich !

# Kann man in die Sonne hineinschauen ?



nur Oberfläche der Sonne sichtbar , obwohl viel elektromagnetische Strahlung im Innern !

# 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

# Kosmische Hintergrundstrahlung

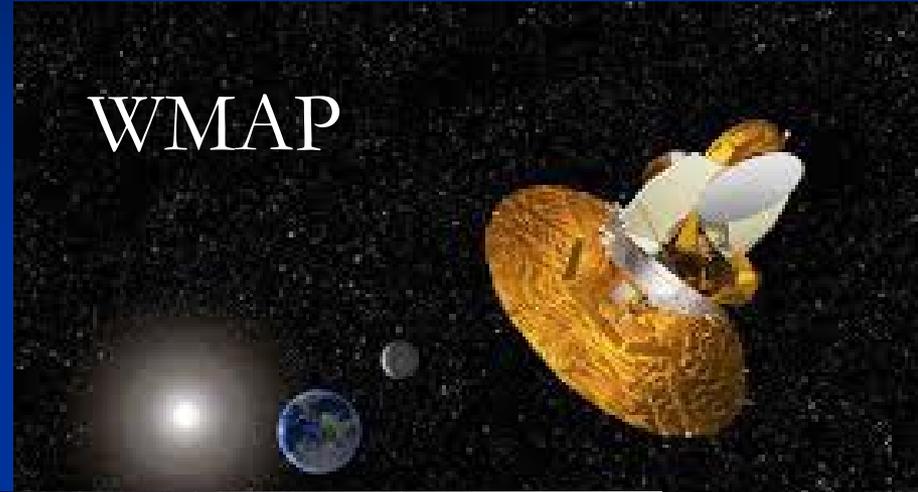
- 400 000 Jahre *abb* ist Universum genug abgekühlt, so dass sich neutrale Atome bilden können.
- Universum wird durchsichtig : *fiat lux*
- Vergleich : Wolke löst sich auf

*abb* : after big bang  
nach dem Urknall

# Vermessung der Hintergrundstrahlung



COBE

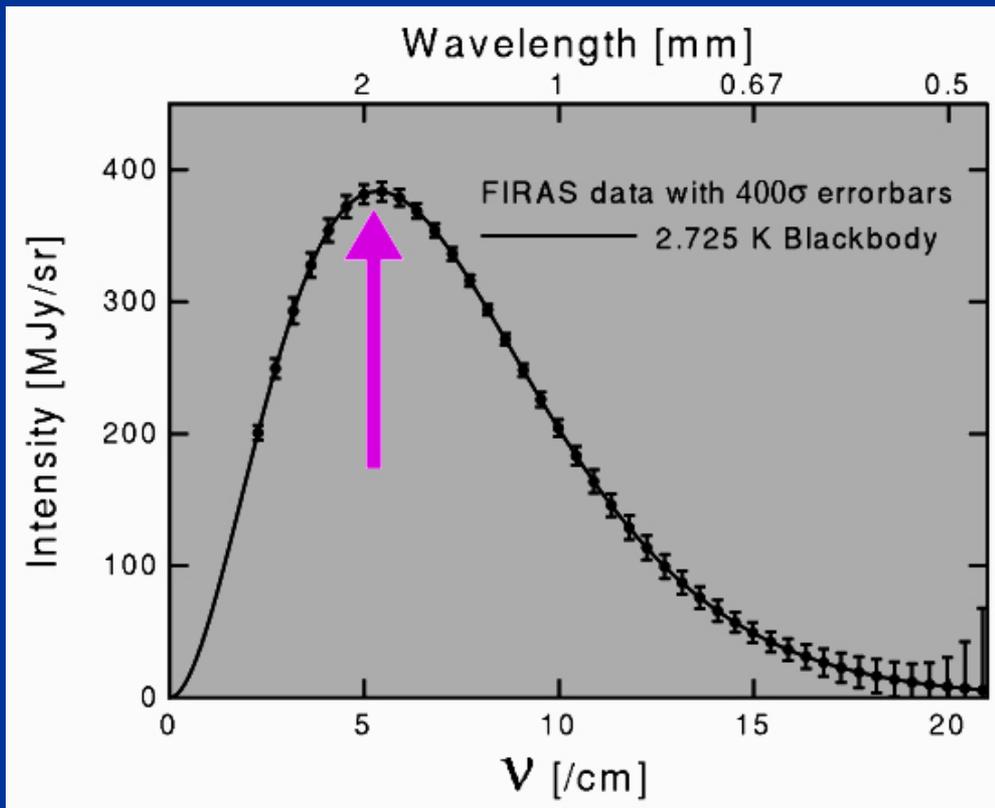


WMAP



Planck

## (2) Einfachkeit des frühen Universums: Fluktuierendes Plasma im Temperaturgleichgewicht

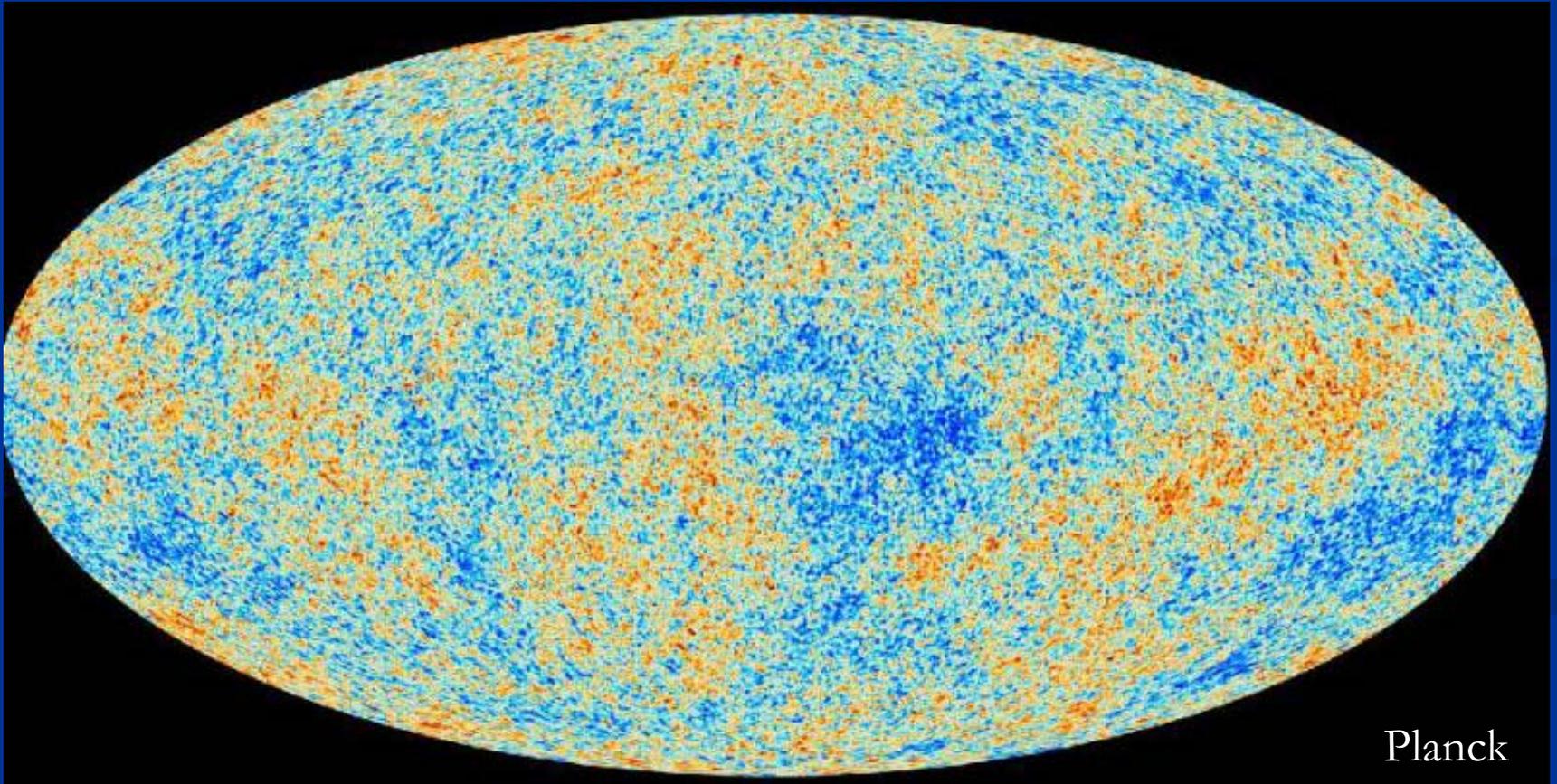


Planck – Spektrum  
( COBE )

Quantenmechanik  
auf  
astronomischen  
Skalen

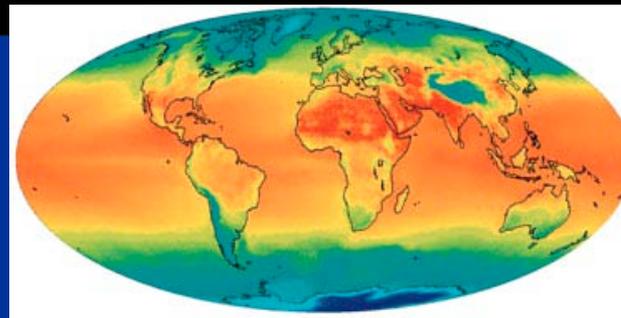
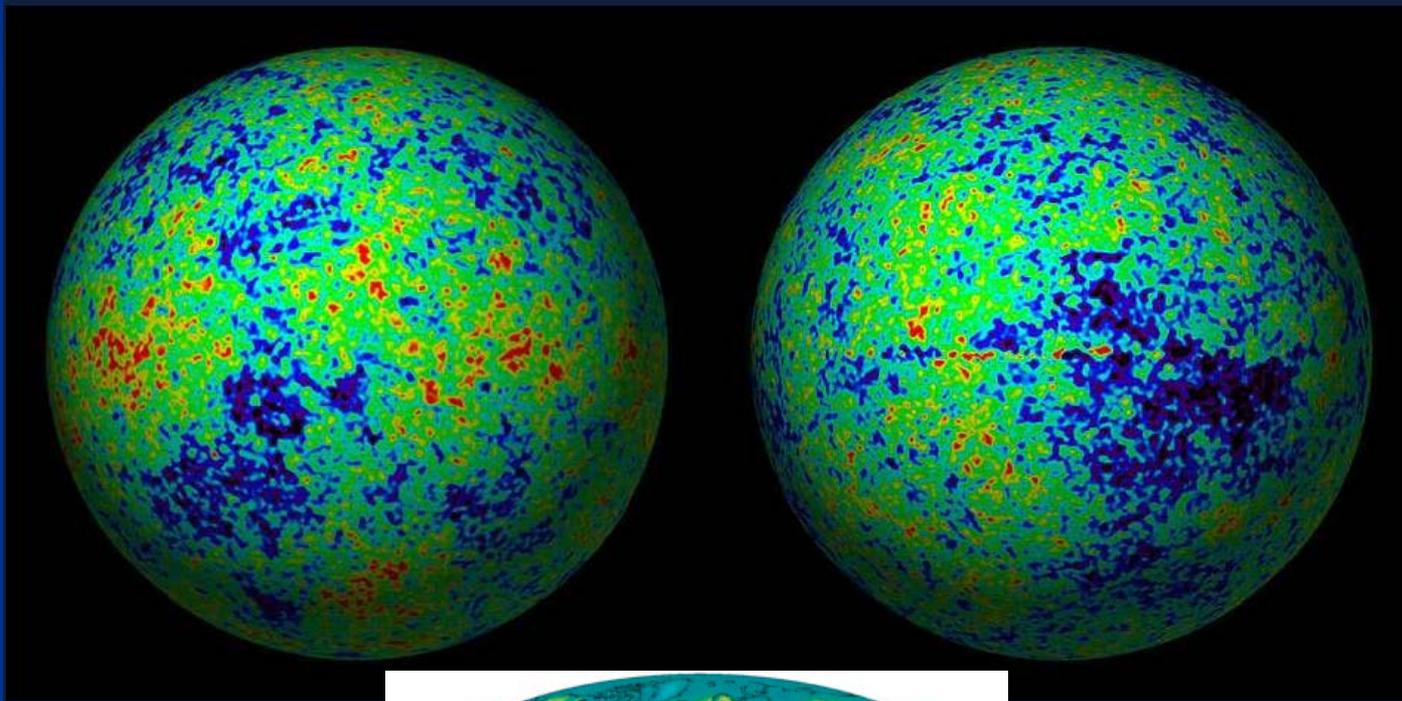
# Foto des Urknalls

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

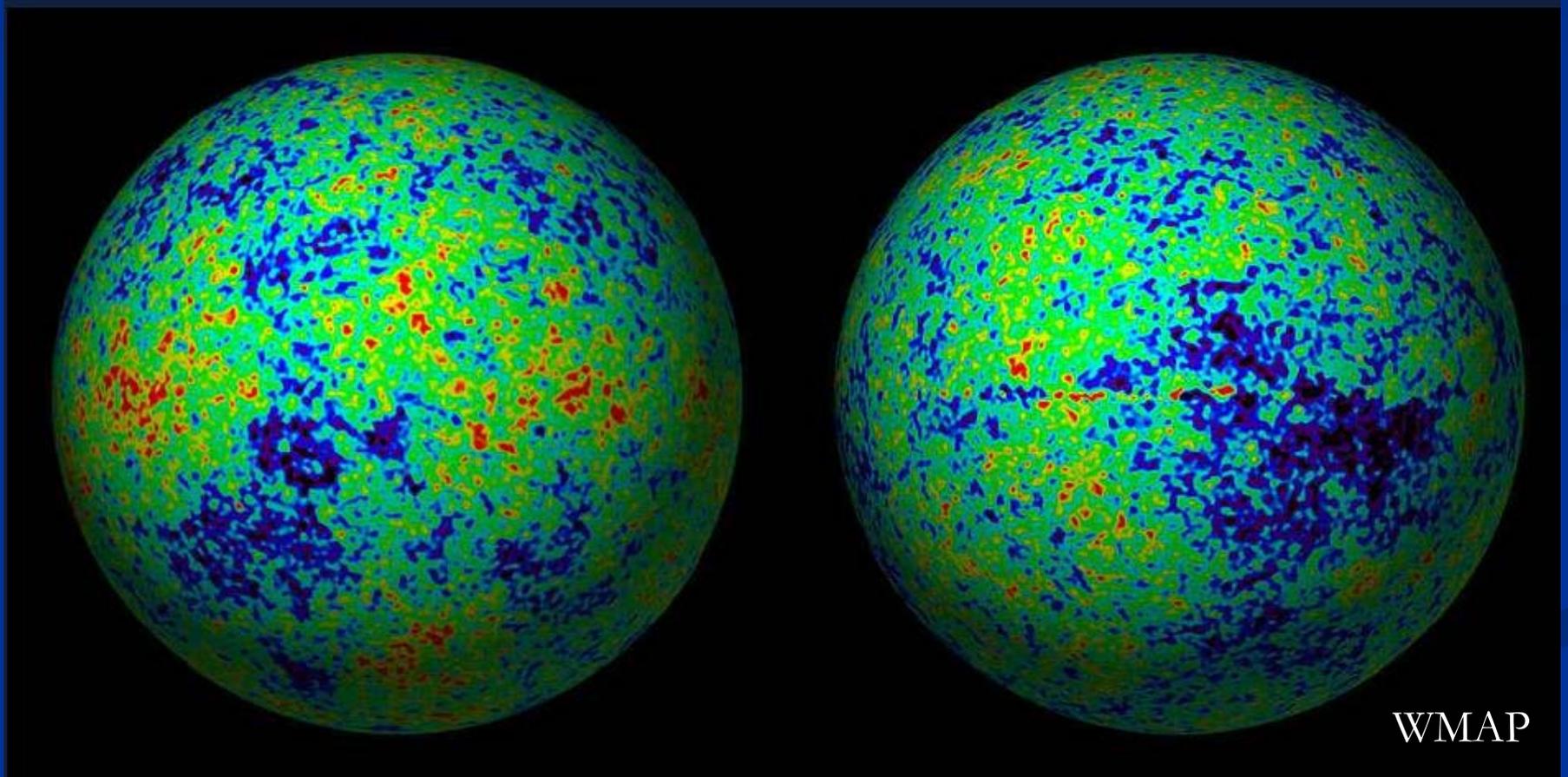


# Fluktuationen

# Bild einer Kugeloberfläche von innen: winzige Temperatur-Schwankungen der Hintergrundstrahlung

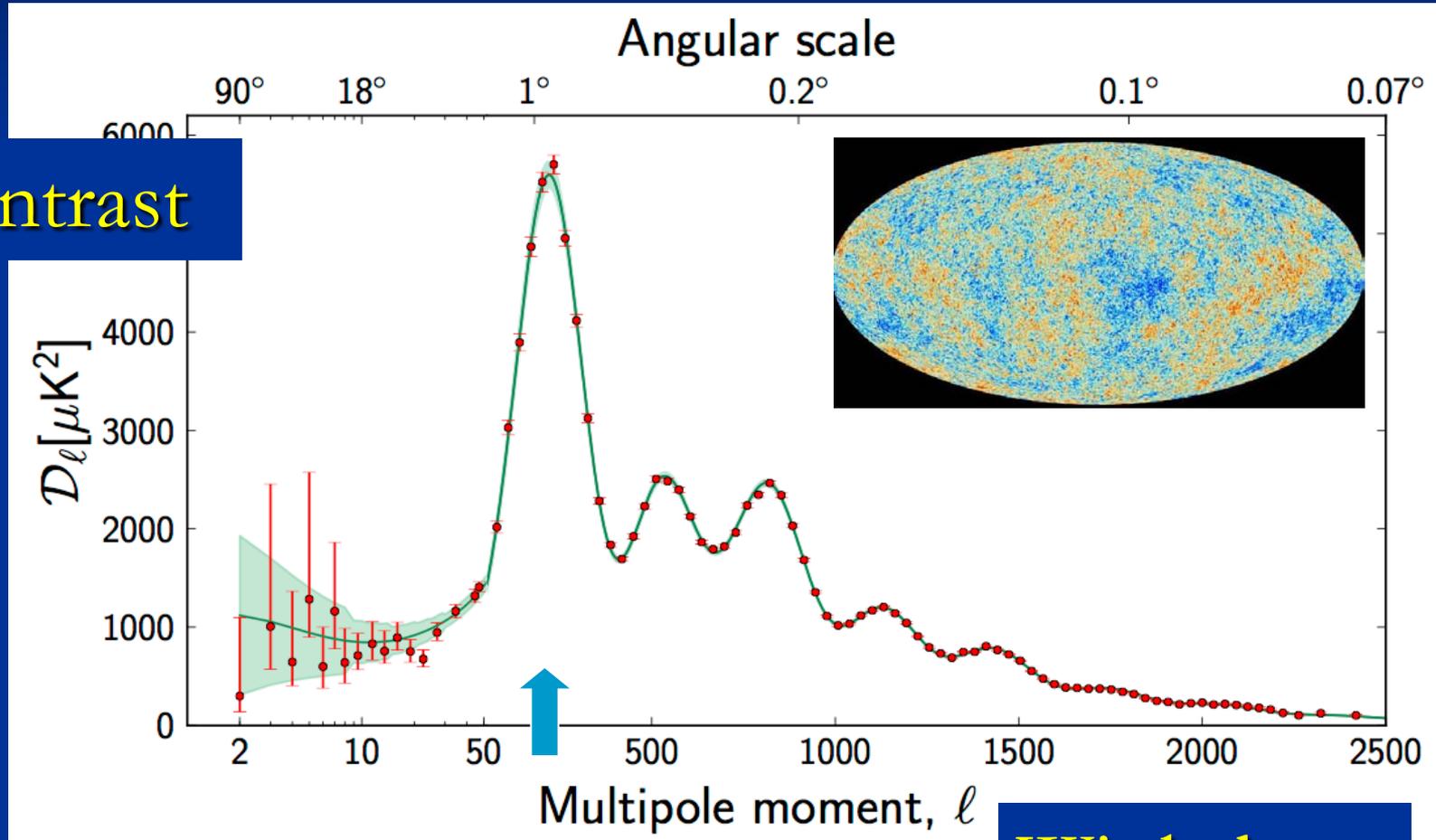


# Anisotropie der Hintergrundstrahlung : Fleckengröße



# Stärke der Temperaturschwankung in Abhängigkeit von Fleckengröße ( im Winkel )

Kontrast

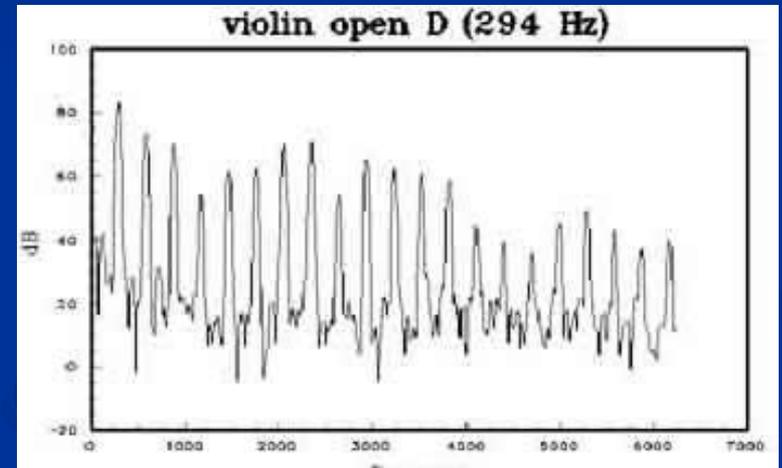
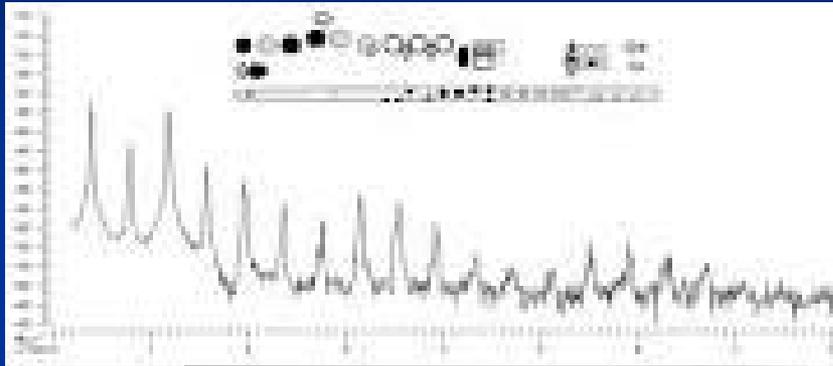


ca 10 Grad

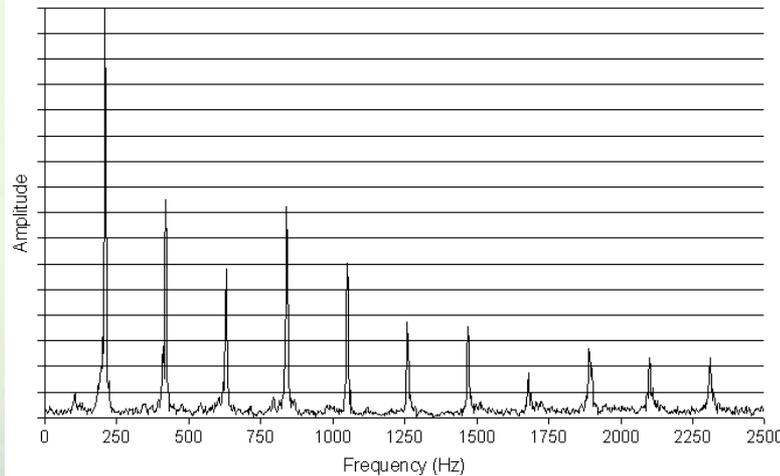
ca 1 Grad

Winkel

# Frequenzpektrum Musikinstrumente

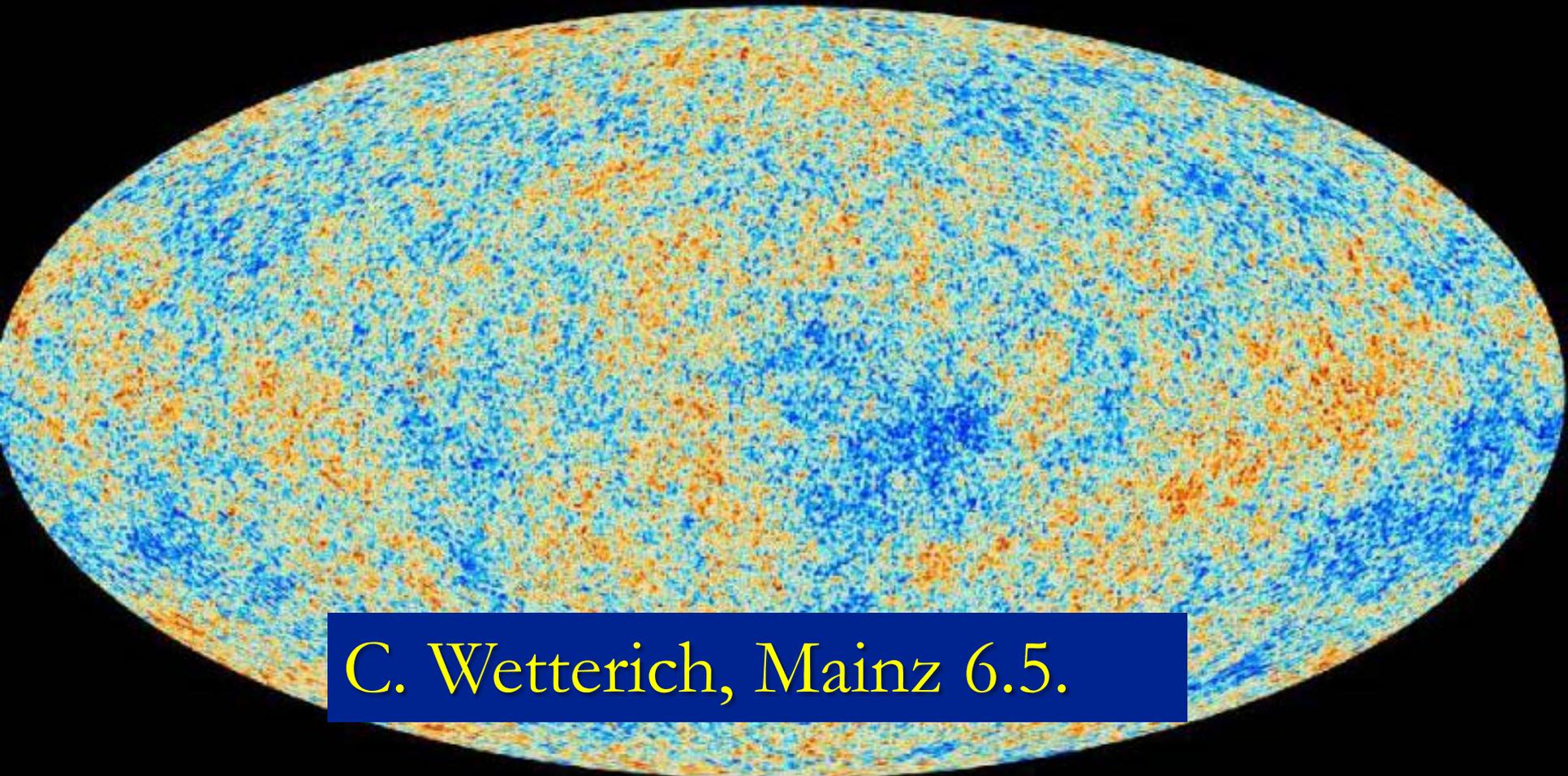


Cello Spectrum - Playing G# on D String



# Und es werde Licht

Die kosmische Hintergrundstrahlung



C. Wetterich, Mainz 6.5.

# Zusammensetzung des Universums

Atome : 5 %

Dunkle Materie : 25 %

Dunkle Energie : 70 %

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

bekannt von

**Hintergrundstrahlung ,**

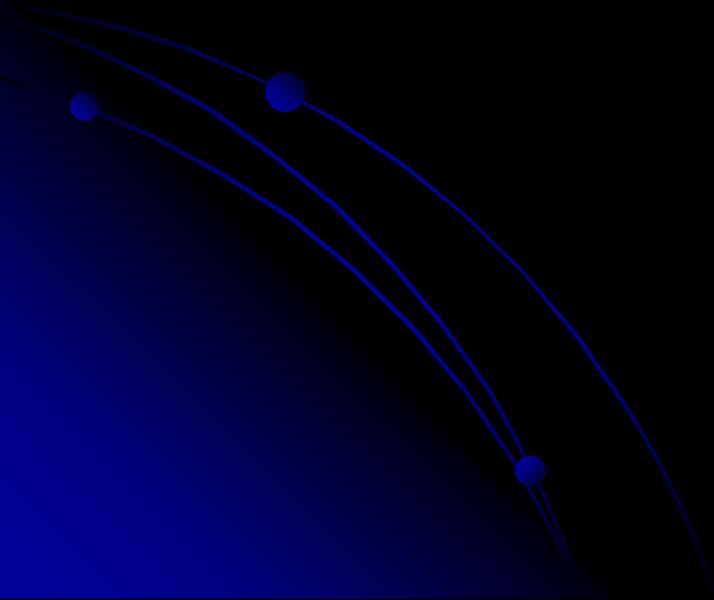
**Nucleosynthese**

400 000 Jahre abb  
Atomphysik

Minute abb  
Kernphysik



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



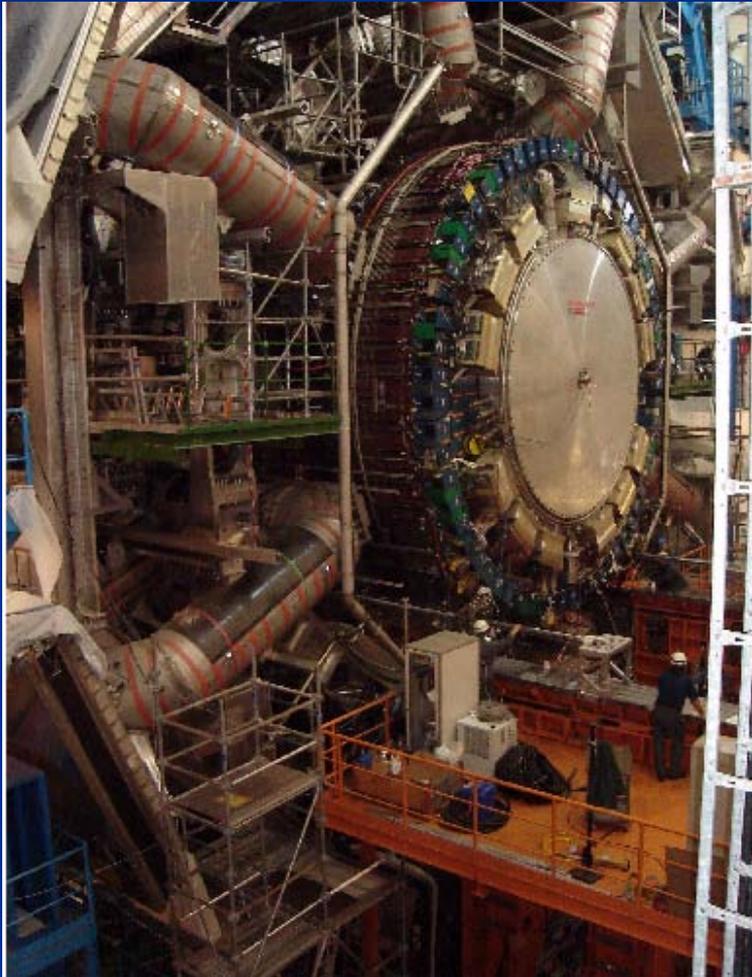
oder genauer : durchsichtig

The background of the slide is a deep space image. It features a central, bright yellow star with a soft, glowing aura. Surrounding this star is a large, diffuse purple and magenta nebula. The rest of the sky is dark, filled with numerous small, distant stars of various colors, including white, blue, and red. The overall effect is a sense of vastness and cosmic mystery.

# Dark Matter

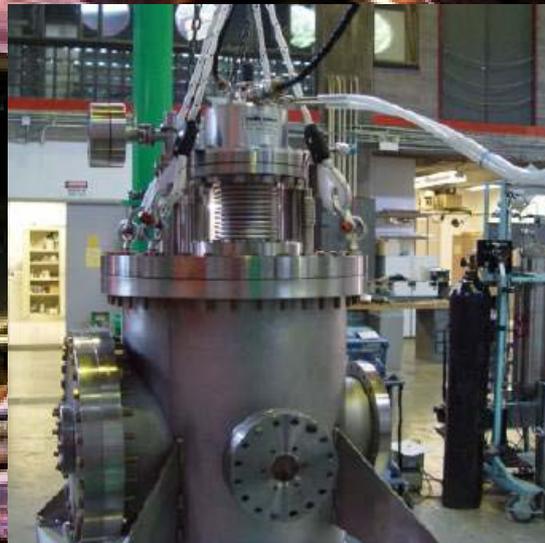
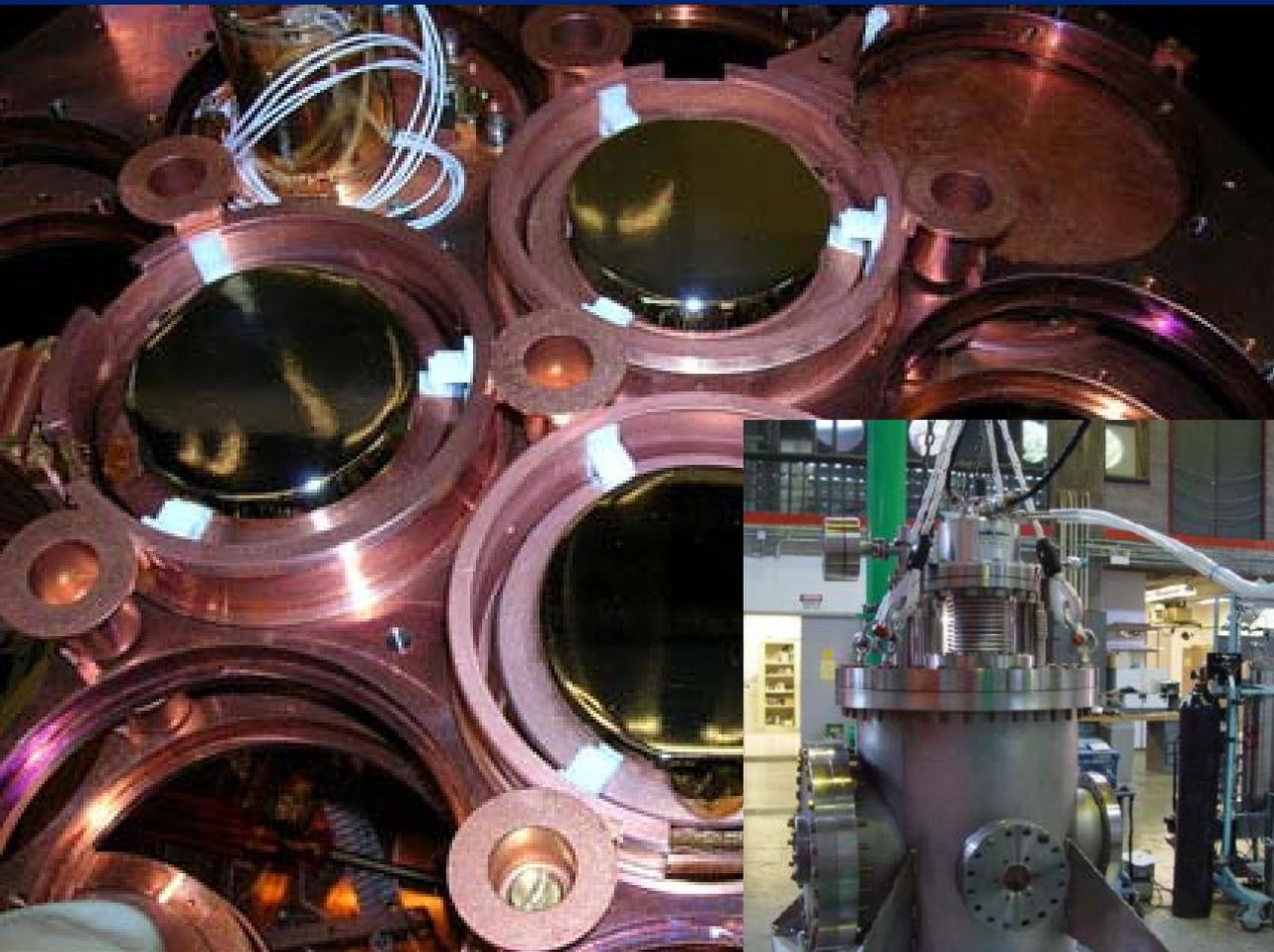
Frank Wilczek, Mainz, 20.5.

# Dunkle Materie könnte aus noch unbekannten Elementarteilchen bestehen



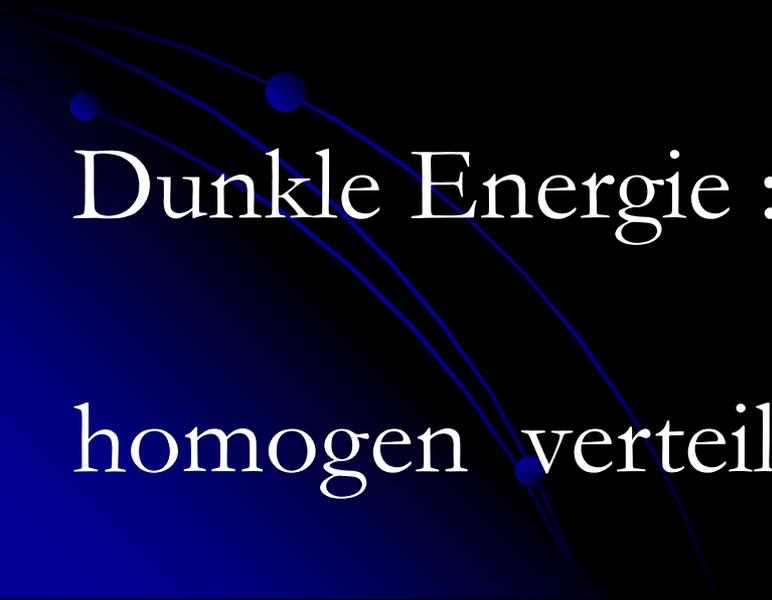
LHC , CERN , Genf

# Suche nach Dunkler Materie



bis heute nichts gefunden ...

Dunkle Energie kann man nicht  
“sehen”, auch nicht indirekt

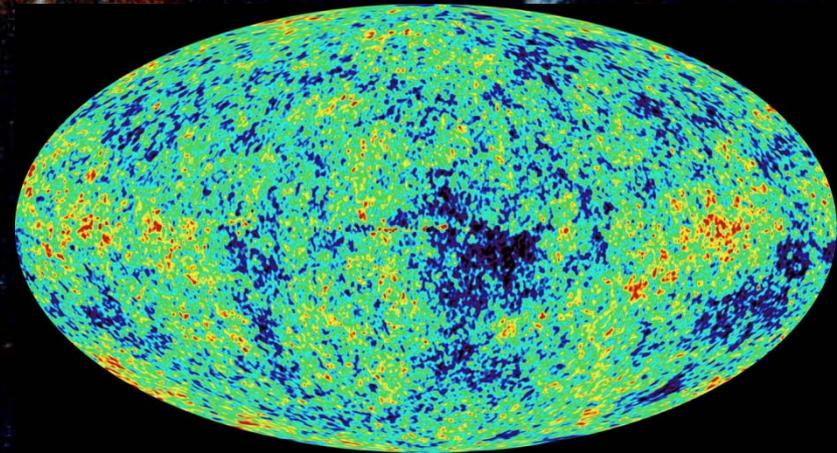


Dunkle Energie :

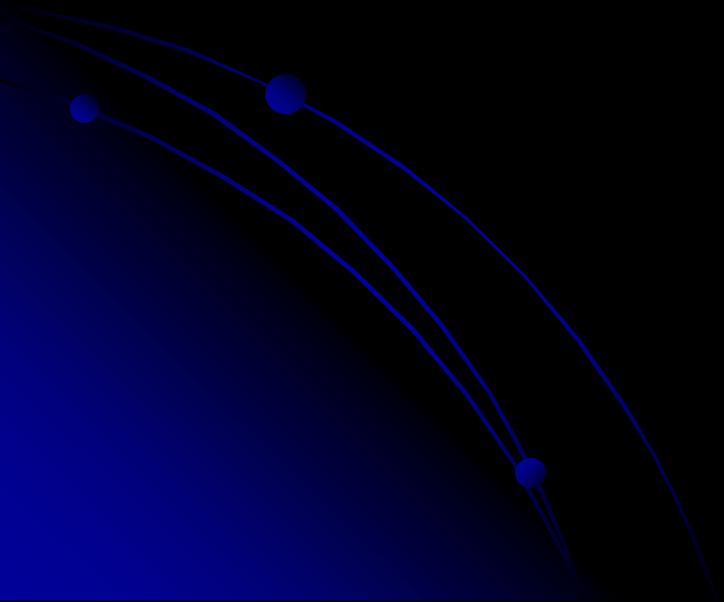
homogen verteilt

# Dunkle Energie – ein kosmisches Rätsel

C.Wetterich, Mainz 13.5.



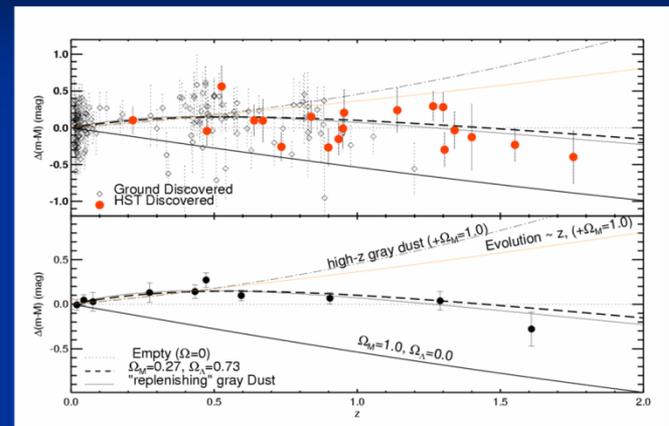
# Dunkle Energie : kosmologische Effekte



# Vorhersagen für Kosmologie mit Dunkler Energie

*Die Expansion des Universums  
beschleunigt sich heute !*

## Supernova Ia Hubble-Diagramm

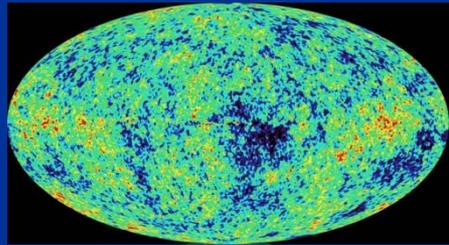


Rotverschiebung  $z$

Riess et al. 2004

# Strukturbildung

Aus winzigen Anisotropien wachsen die  
Strukturen des Universums



Sterne , Galaxien, Galaxienhaufen

Ein primordiales Fluktuationsspektrum beschreibt  
alle Korrelationsfunktionen !

# Simulationen im Computer

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

500 Mpc/h



# Verteilung der Dunklen Materie im Universum

Millenium simulation , VIRGO project

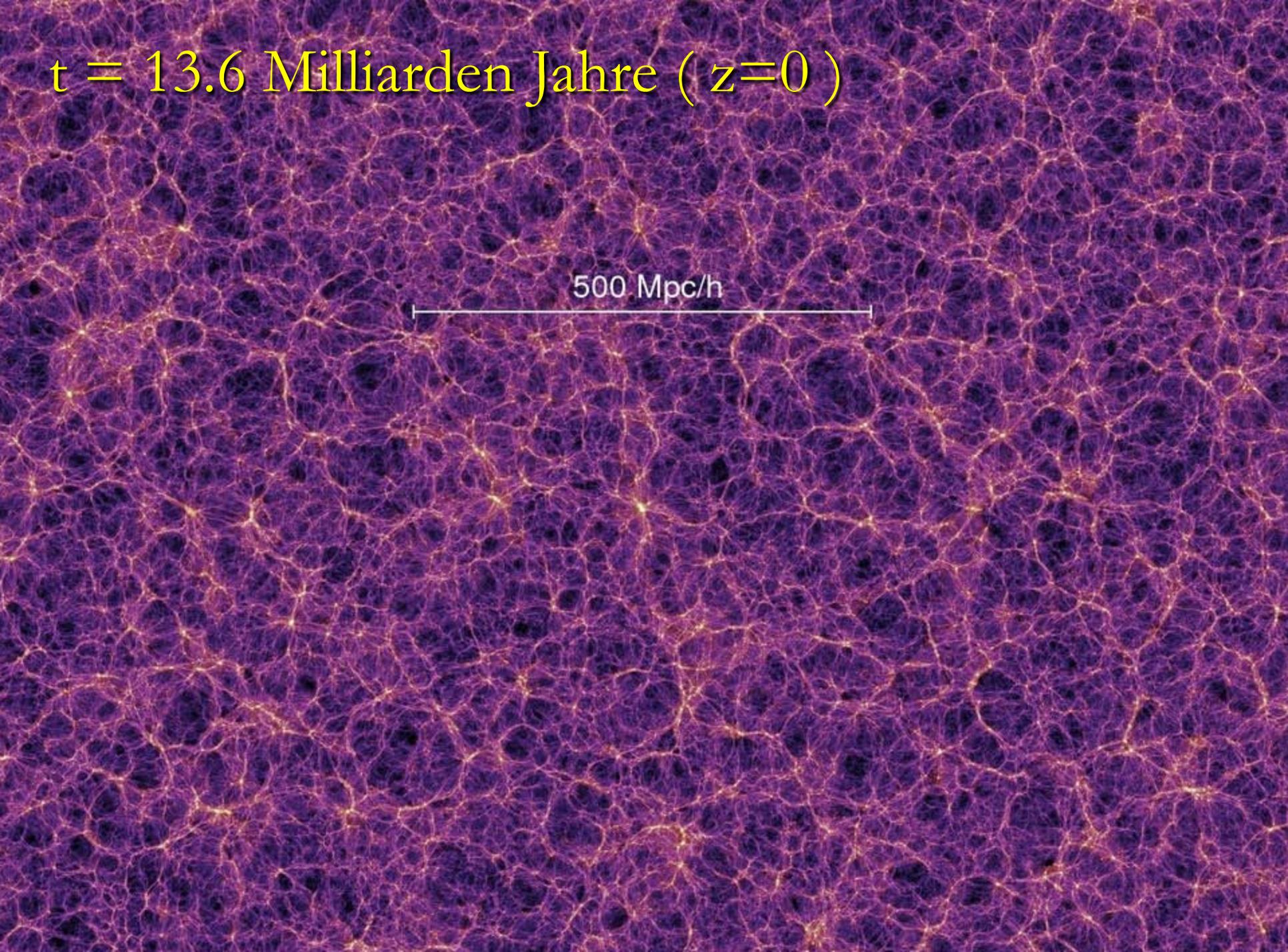
$t = 1$  Milliarde Jahre ( $z = 5.7$ )

500 Mpc/h



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

500 Mpc/h

A visualization of the cosmic web at  $t = 13.6$  billion years ( $z=0$ ). The image shows a complex, interconnected network of dark matter filaments and clusters, rendered in shades of purple and blue. The filaments form a dense, web-like structure that fills the entire frame. A horizontal scale bar is located in the upper-middle part of the image, labeled "500 Mpc/h".

# Kosmische Strukturbildung im Grossrechner

Simon White, Mainz, 1.7.

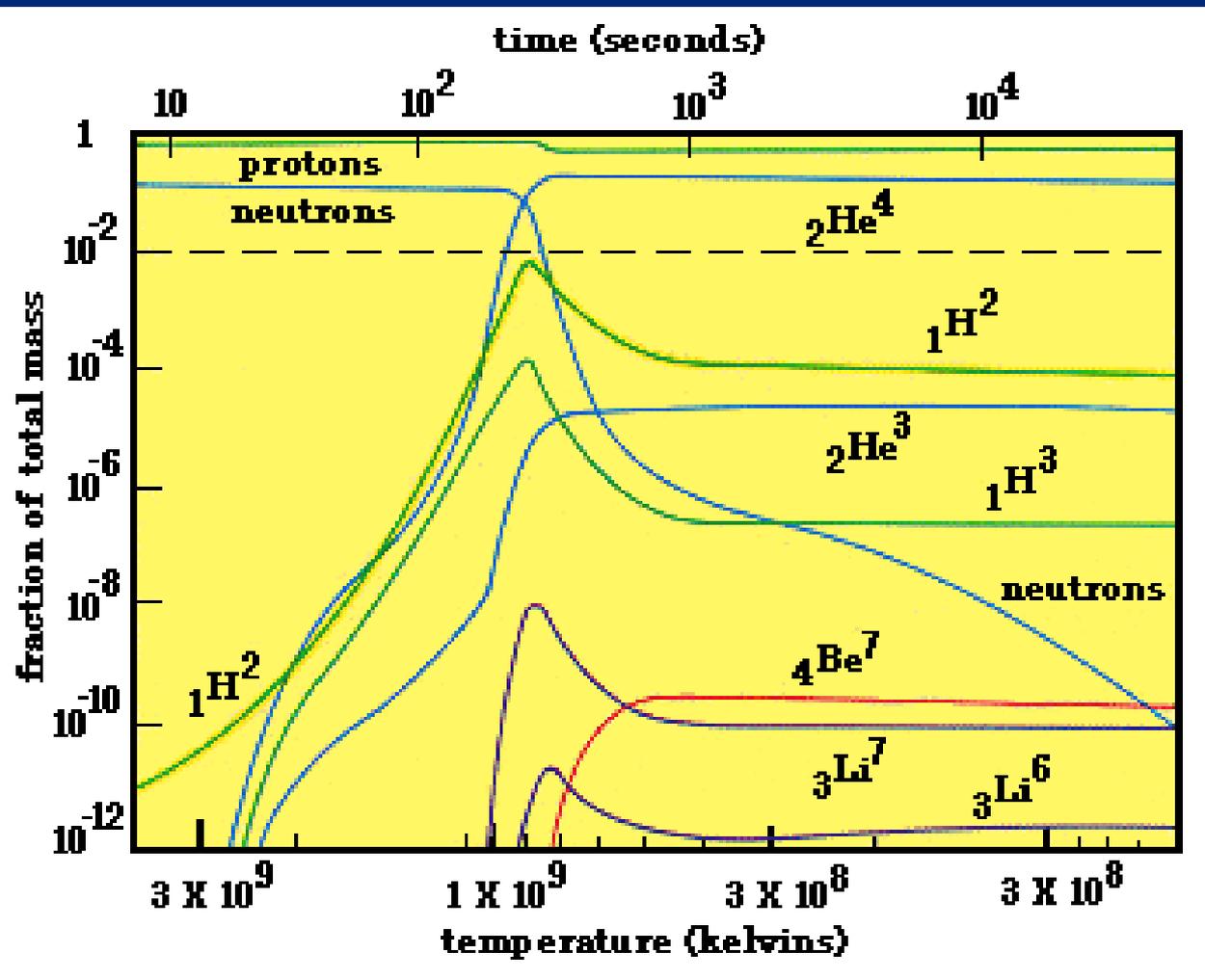
500 Mpc/h



# Nukleosynthese

- Eine Sekunde nach dem Urknall war das Universum so heiss, dass keine Atomkerne existieren konnten.
- nur Protonen , Neutronen
- bei Abkühlung : Entstehung der leichten Atomkerne
- Beginn der Chemie

# Nukleosynthese



# Nukleosynthese

- Element – Häufigkeiten können beobachtet werden
- Übereinstimmung mit Theorie , falls Atome 5% des Universums ausmachen.

Urknall – Modell funktioniert !

# Thermisches Gleichgewicht

Energie  $\sim$  Masse  $\sim$  Temperatur

- Welche Teilchensorten gibt es mit  
Masse  $<$  Temperatur ?  
( Elektronen , Quarks , Photonen , Neutrinos ,  
W-Bosonen , ...???? )
- Was ist ihre Masse ?



**Elementarteilchen - Physik**

# Näher an den Urknall

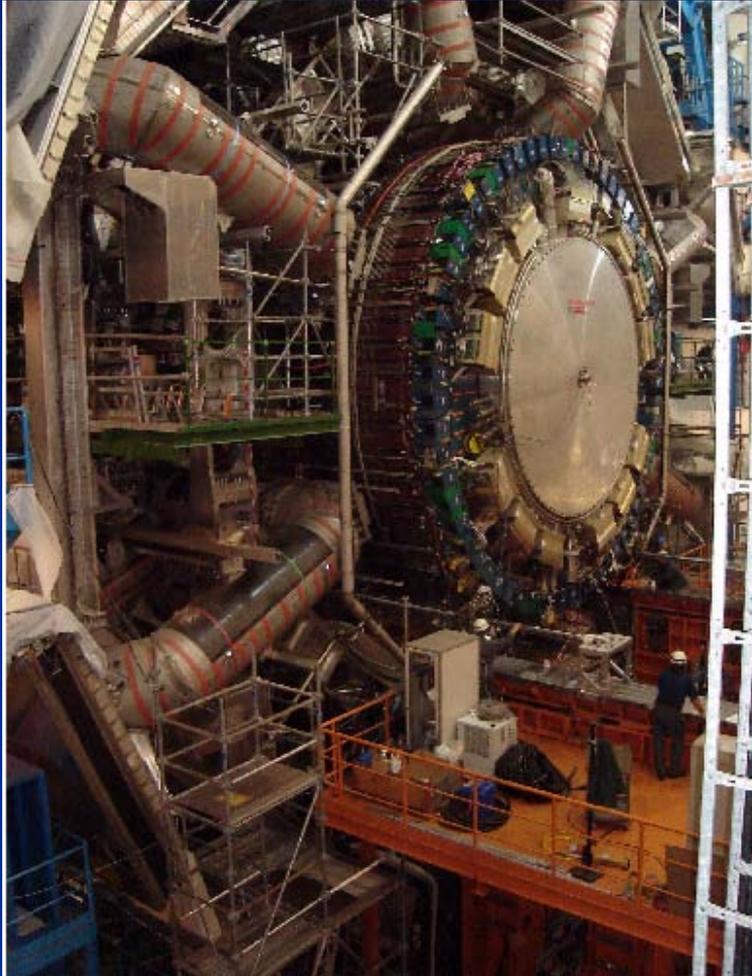
- Je näher an den Urknall, desto höher die Temperatur und Energie der Teilchen
- Physik bei hohen Energien weniger gut bekannt
- Erst ab  $10^{-12}$  Sekunden ab : Im wesentlichen bekannte Physik

# Teilchenphysik nähert sich Urknall

- vor Zeiten von  $10^{-12}$  Sekunden ab sind die Teilchen mit Masse  $<$  Temperatur nicht experimentell bekannt
- LHC erforscht Physik, die für  $10^{-12}$  Sekunden ab wichtig ist
- spontane Symmetriebrechung, Phasenübergang

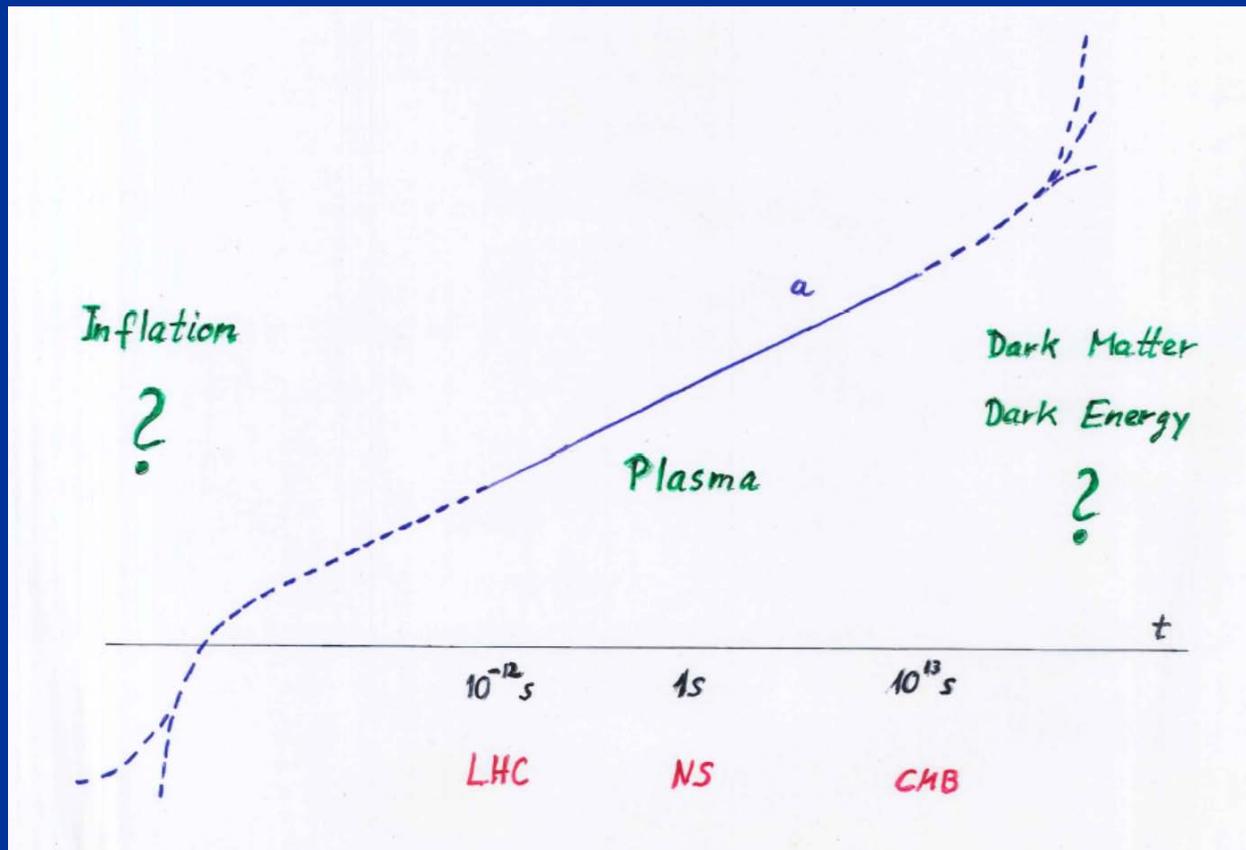
**Energiegrenze ...**

# Energiegrenze



LHC , CERN , Genf

# (3) Frühes Universum gut bekannt, von der Energiegrenze der Teilchenphysik bis zur Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung



# Abenteuerreise an den Anfang der Welt

*Könnten wir uns nicht mit dem  
Verständnis des Universums seit  
 $10^{-12}$  Sekunden nach dem Urknall  
zufrieden geben ?*

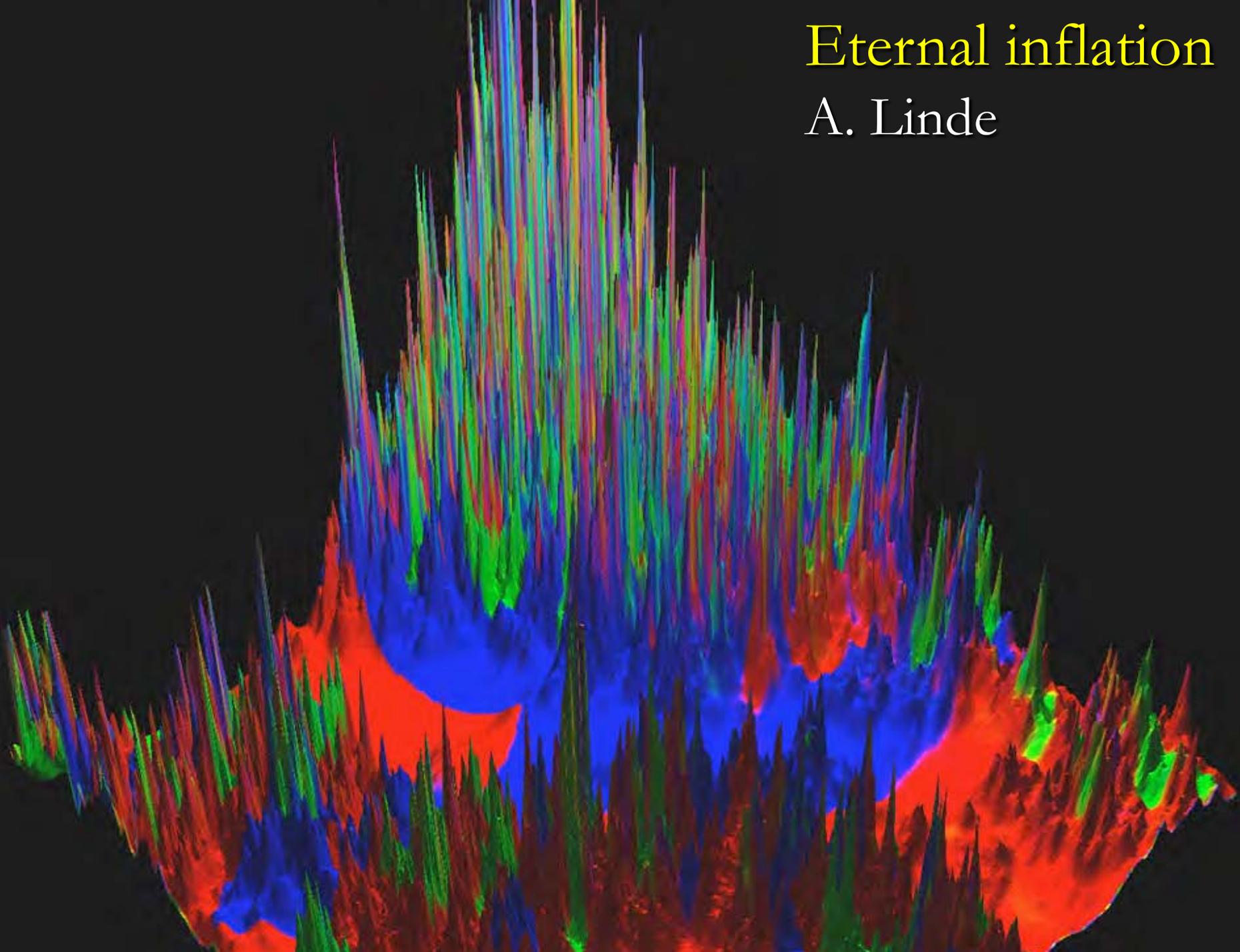
**Was ist reell ?**

**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 )

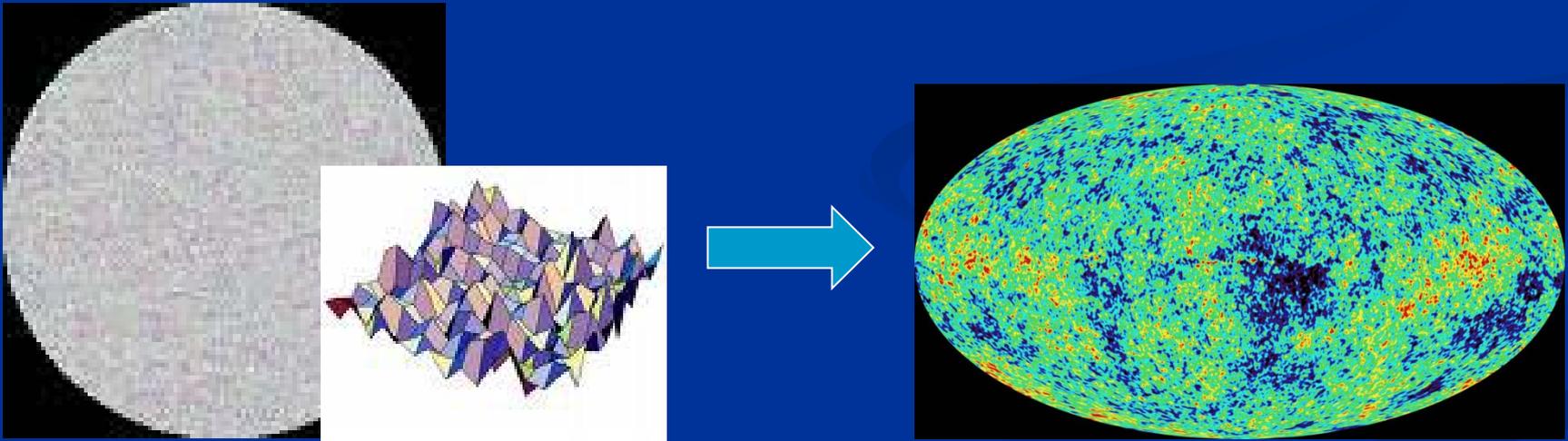
# Kosmologische Gleichungen

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

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

# Inflationäres Universum

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



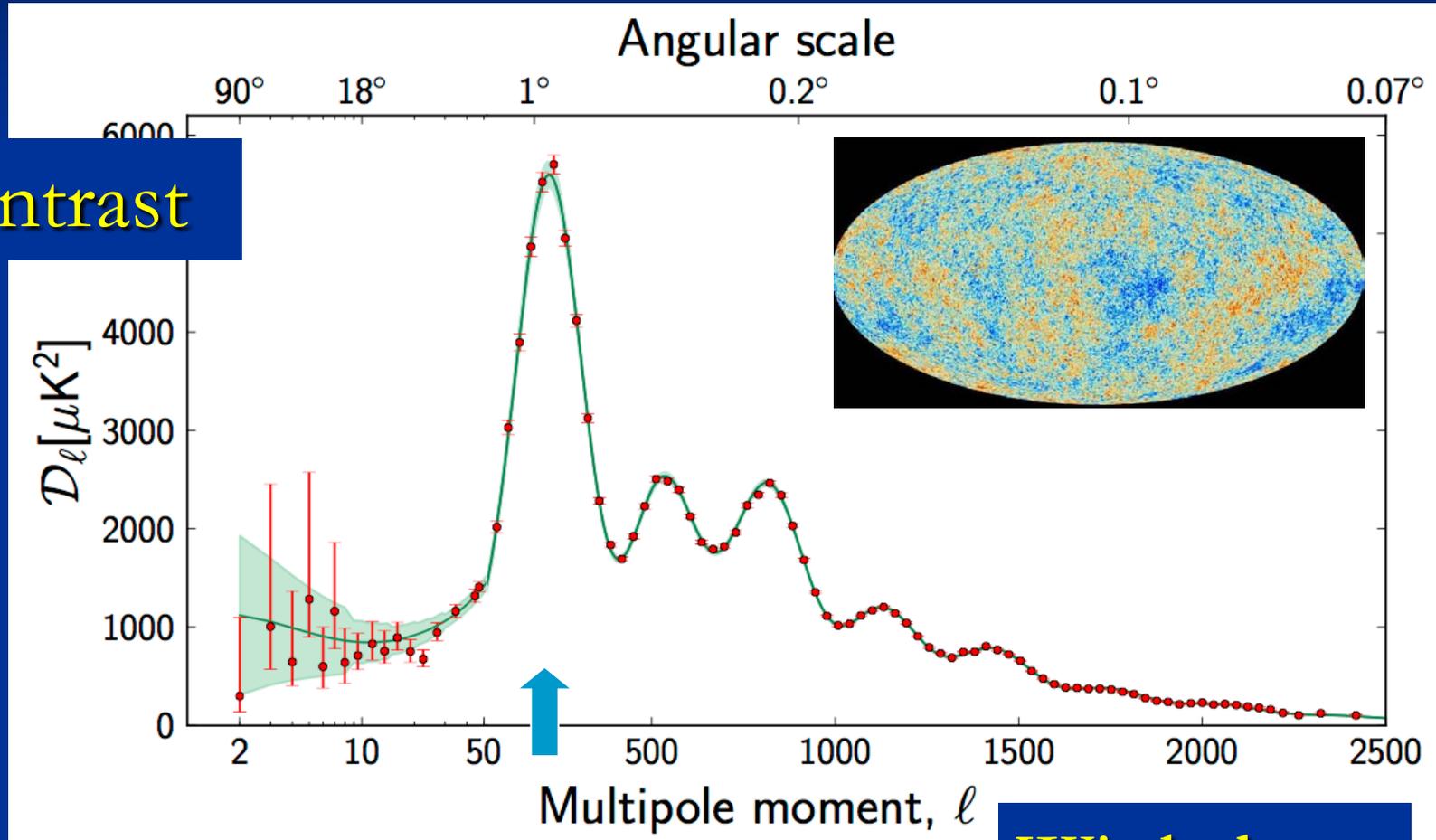
**Signale vom Urknall !**

# 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

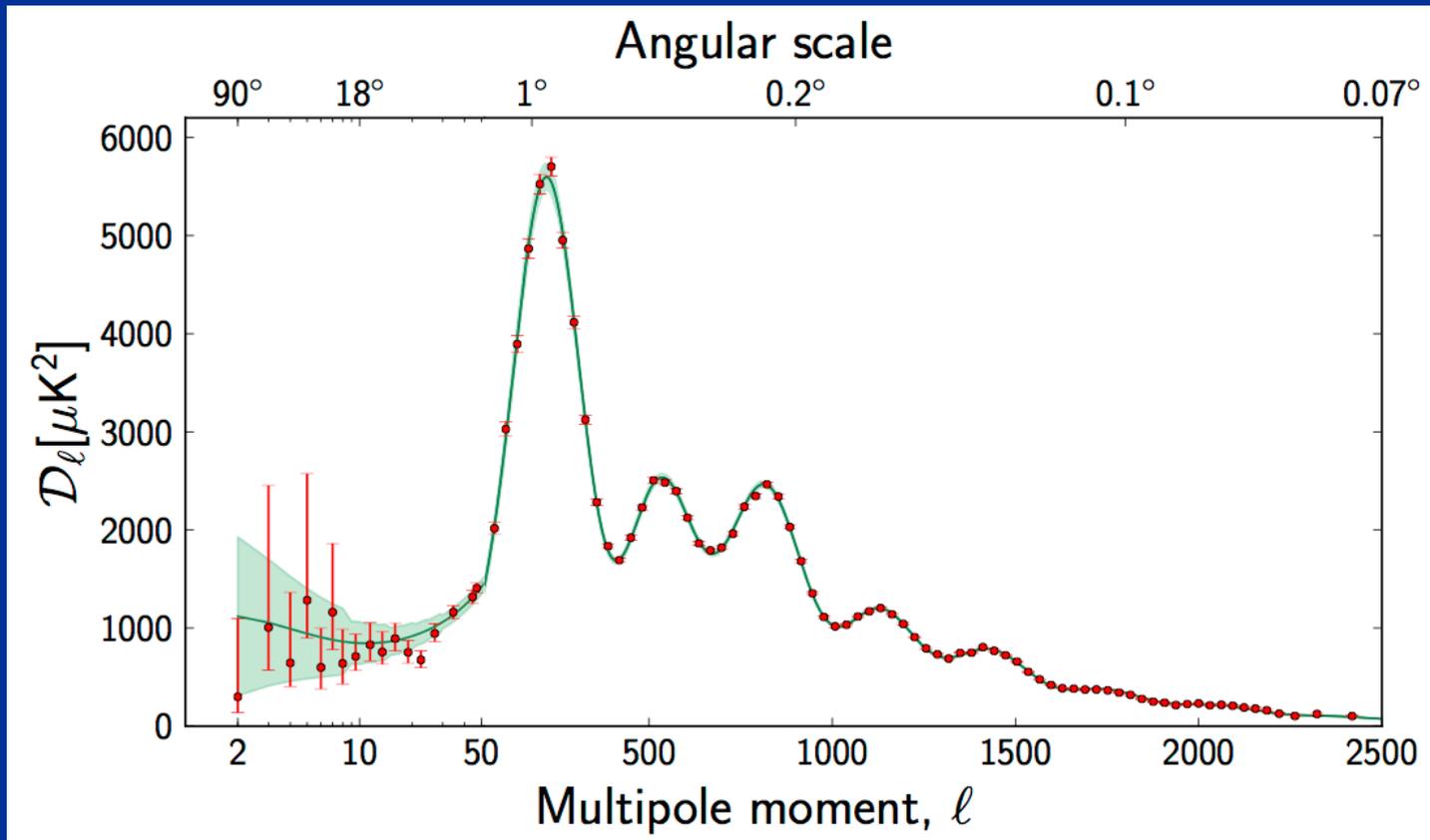


ca 10 Grad

ca 1 Grad

Winkel

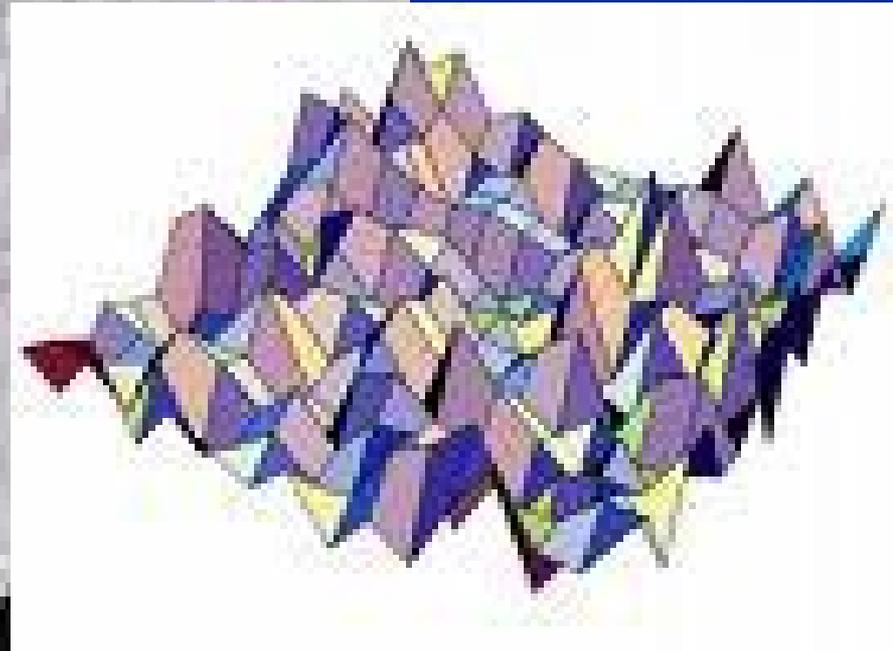
# (4) Quantenfluktuationen in der Anfangsphase des Universums werden heute beobachtbar !



# Der Urknall

Wie unser Universum aus fast  
nichts entstand

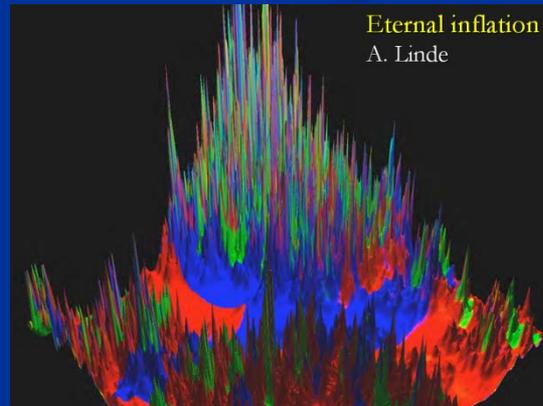
C. Wetterich,  
Mainz, 24.6.



**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 !

# Der Ursprung von Raum und Zeit

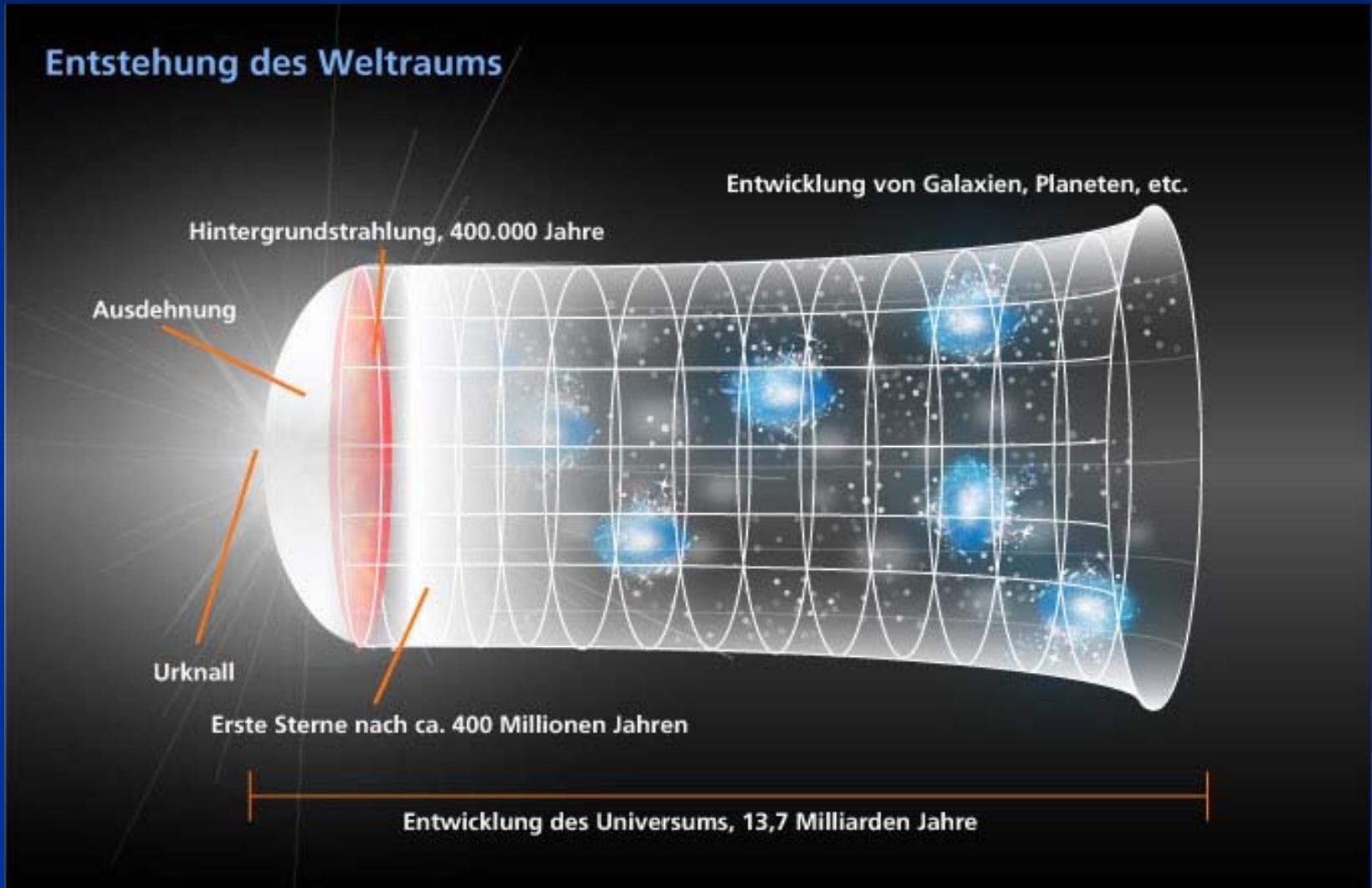


C. Wetterich, Mainz 8.7.

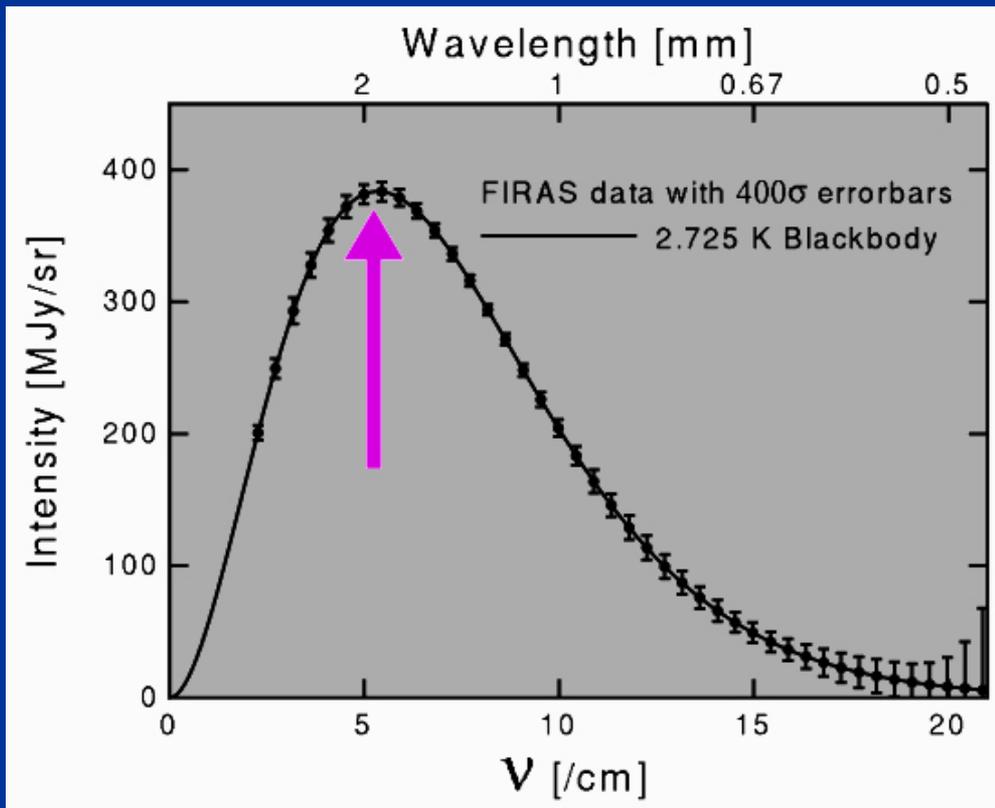
Bild : pm-  
magazin

# Zusammenfassung

# (1) Das Universum entwickelt sich



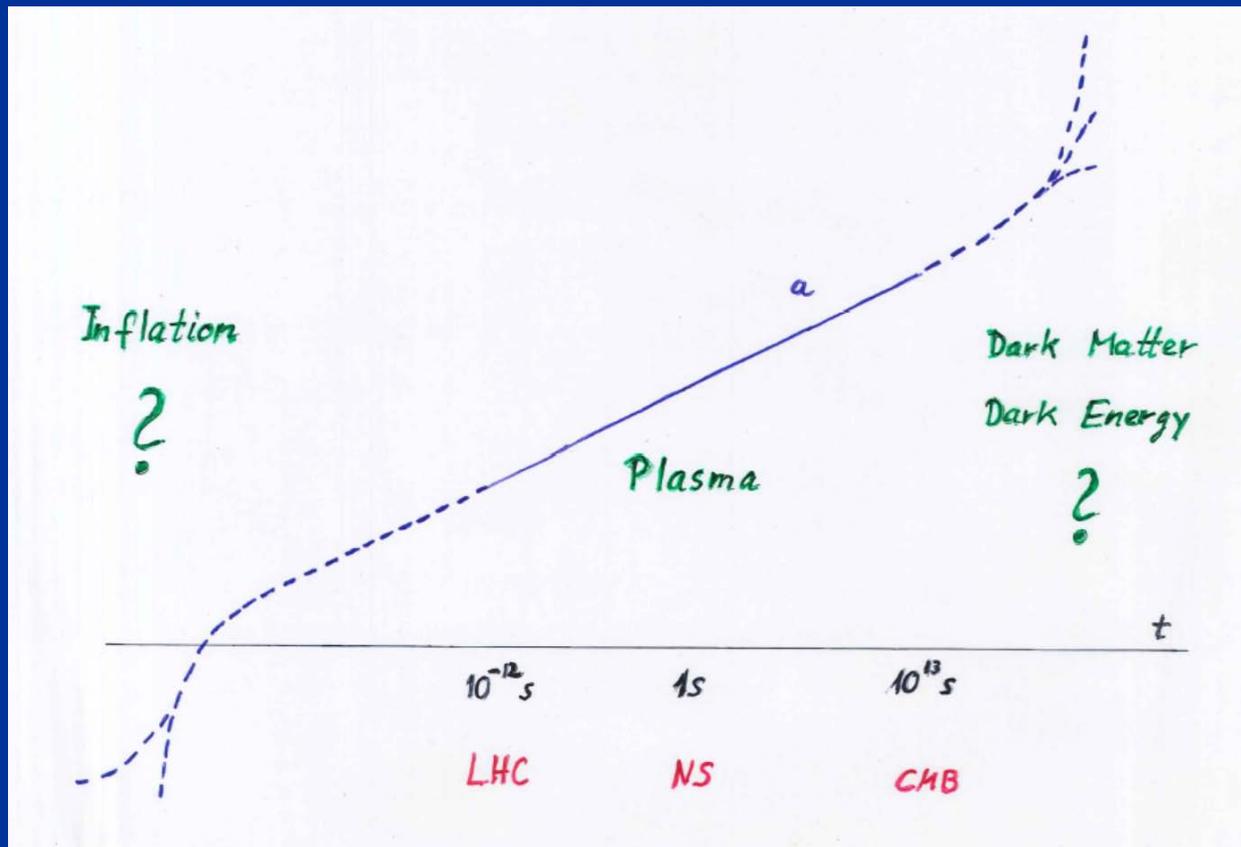
## (2) Einfachkeit des frühen Universums: Fluktuierendes Plasma im Temperaturgleichgewicht



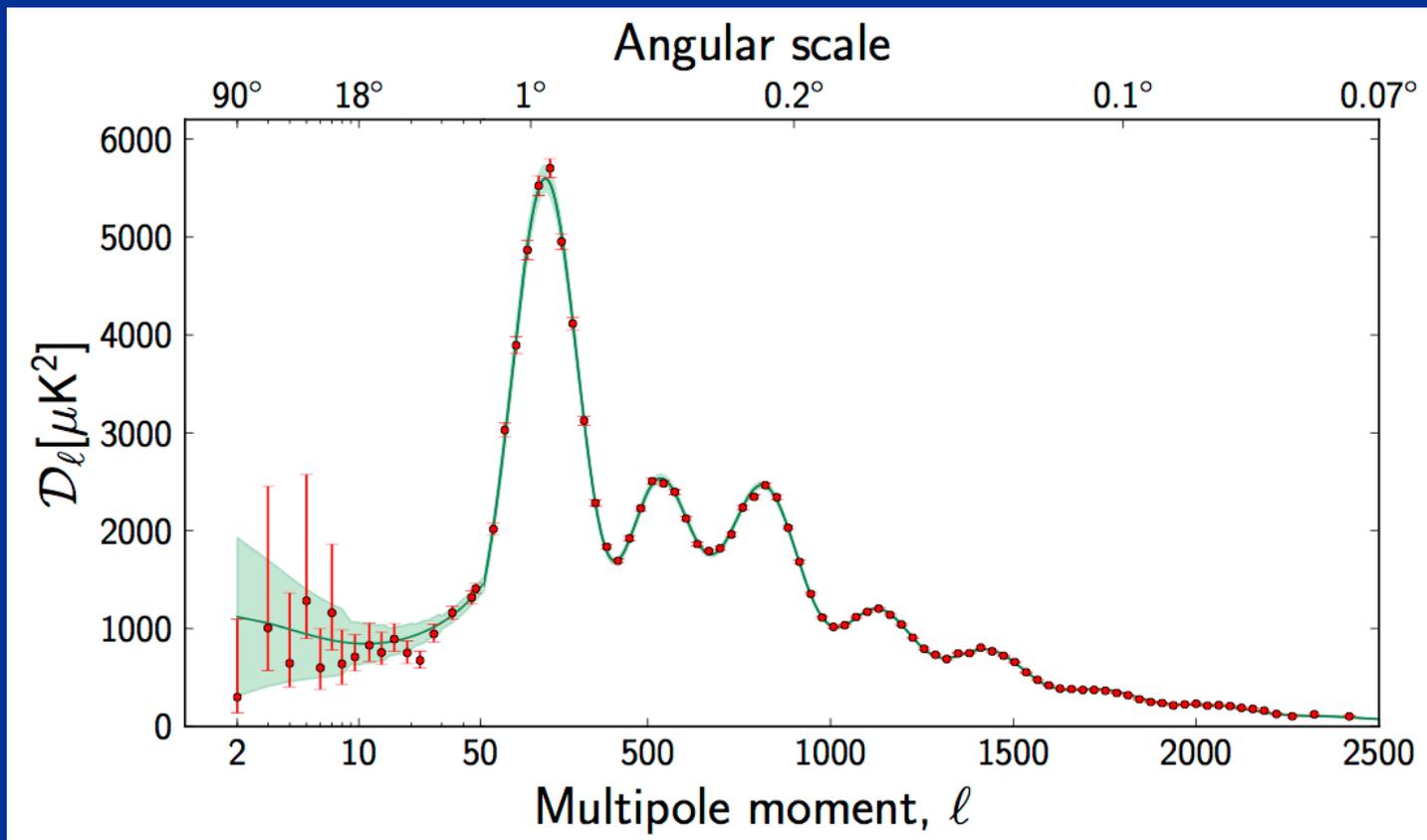
Planck – Spektrum  
( COBE )

Quantenmechanik  
auf  
astronomischen  
Skalen

# (3) Frühes Universum gut bekannt, von der Energiegrenze der Teilchenphysik bis zur Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung



# (4) Quantenfluktuationen in der Anfangsphase des Universums werden heute beobachtbar !



# Hauptrichtungen kosmologischer Forschung

Spätes Universum:

- Entstehung der Strukturen
- Dunkle Energie
- Dunkle Materie

Primordiales Universum:

- Quantengravitation
- Vereinheitlichte Theorie

# frei nach Goethe ...

Alles Vergängliche  
Ist nur ein Gleichnis;  
Das Unvorstellbare,  
Hier wird's Ereignis;  
Das Unbeschreibliche,  
Hier ist's getan;  
Die Geburt des Kosmos,  
Zieht uns hinan

Alles Vergängliche  
Ist nur ein Gleichnis;  
Das Unzulängliche,  
Hier wird's Ereignis;  
Das Unbeschreibliche,  
Hier ist's getan;  
Das Ewig-Weibliche,  
Zieht uns hinan

# 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 ?



Ende

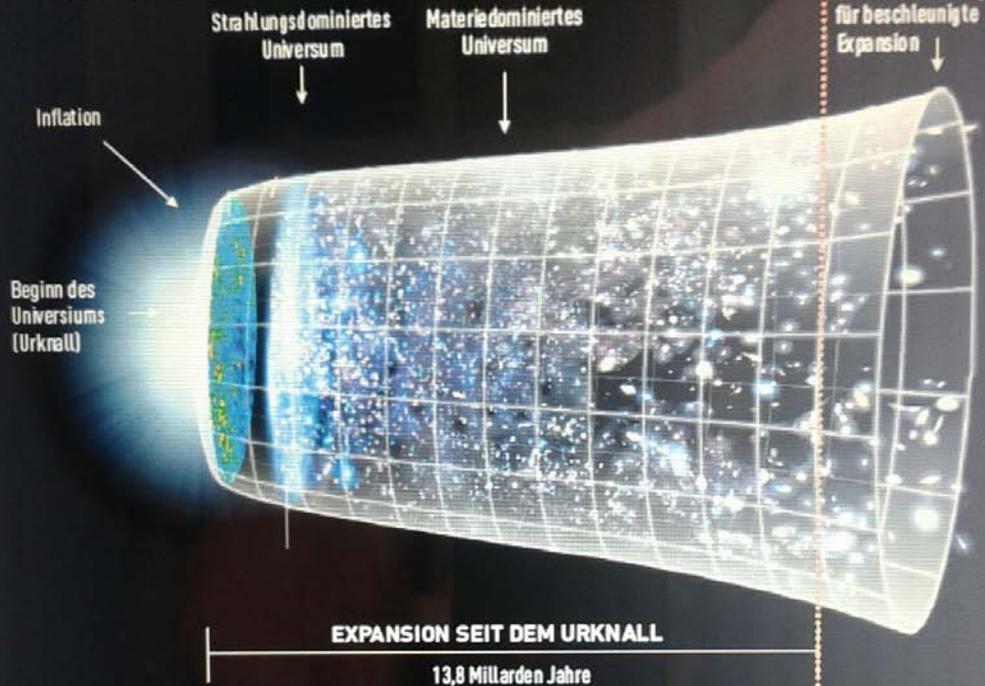
# Urknall oder Kältestarre ?

- 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...

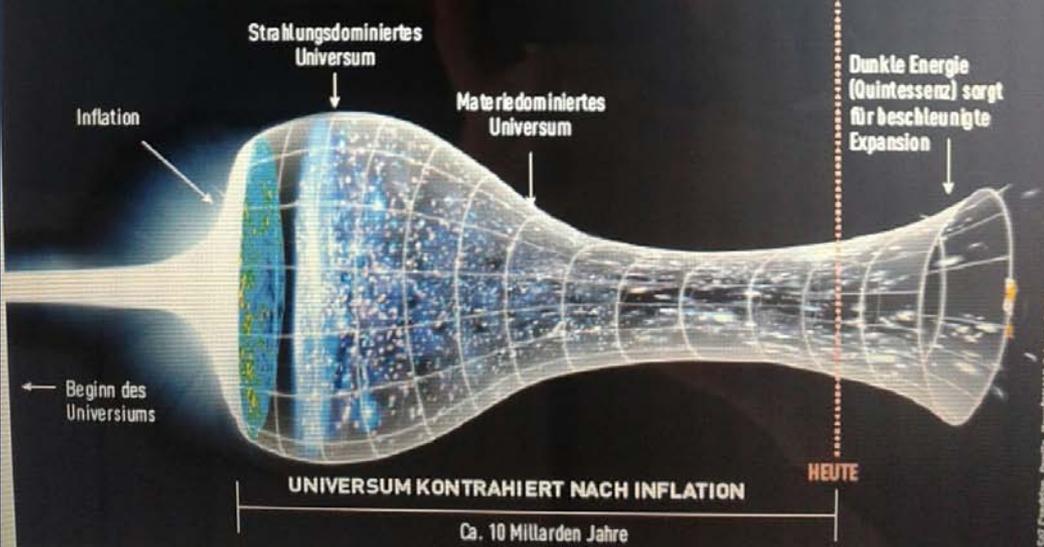
Verschiedene **Bilder** sind möglich !

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

## Klassisches Bild der Kosmologie



## Model von Wetterich



Sonntagszeitung  
Zuerich  
Laukenmann