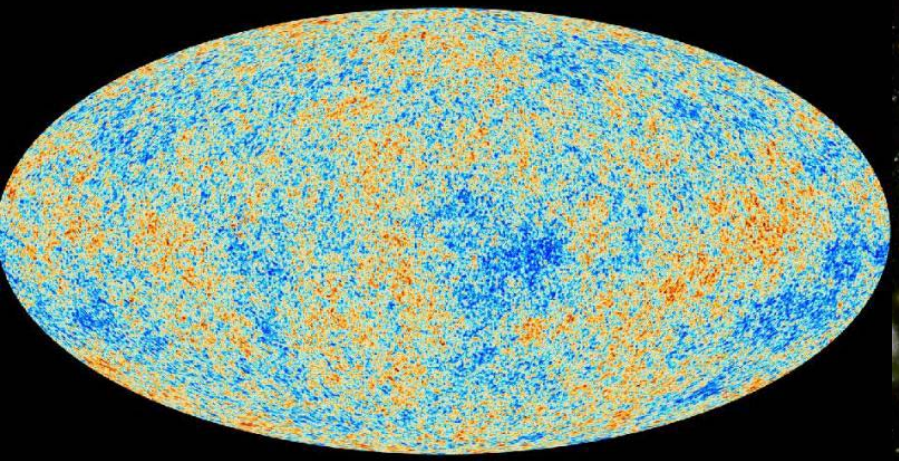
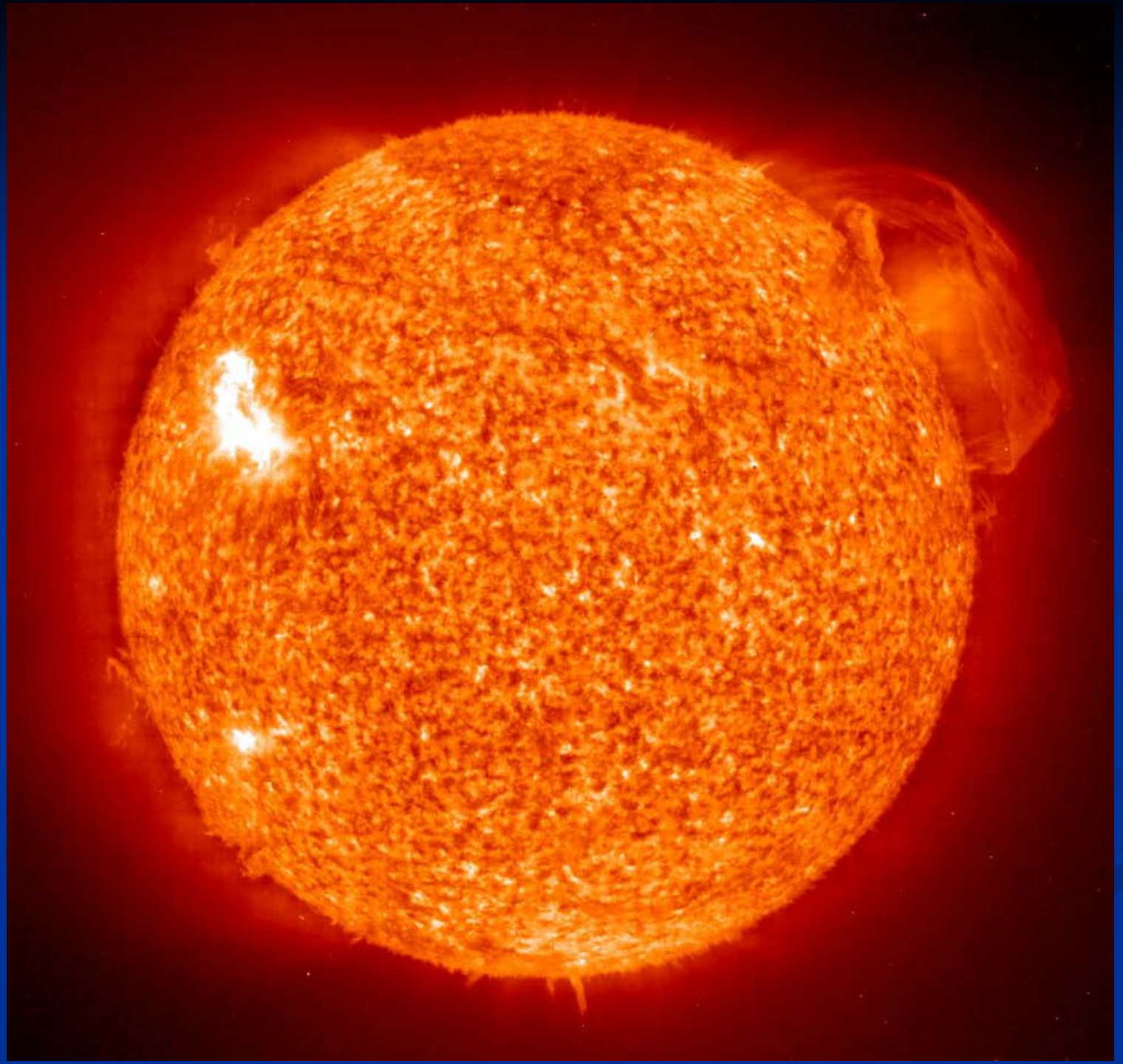
Die Entstehung des Universums - was wir wissen und wo wir rätseln



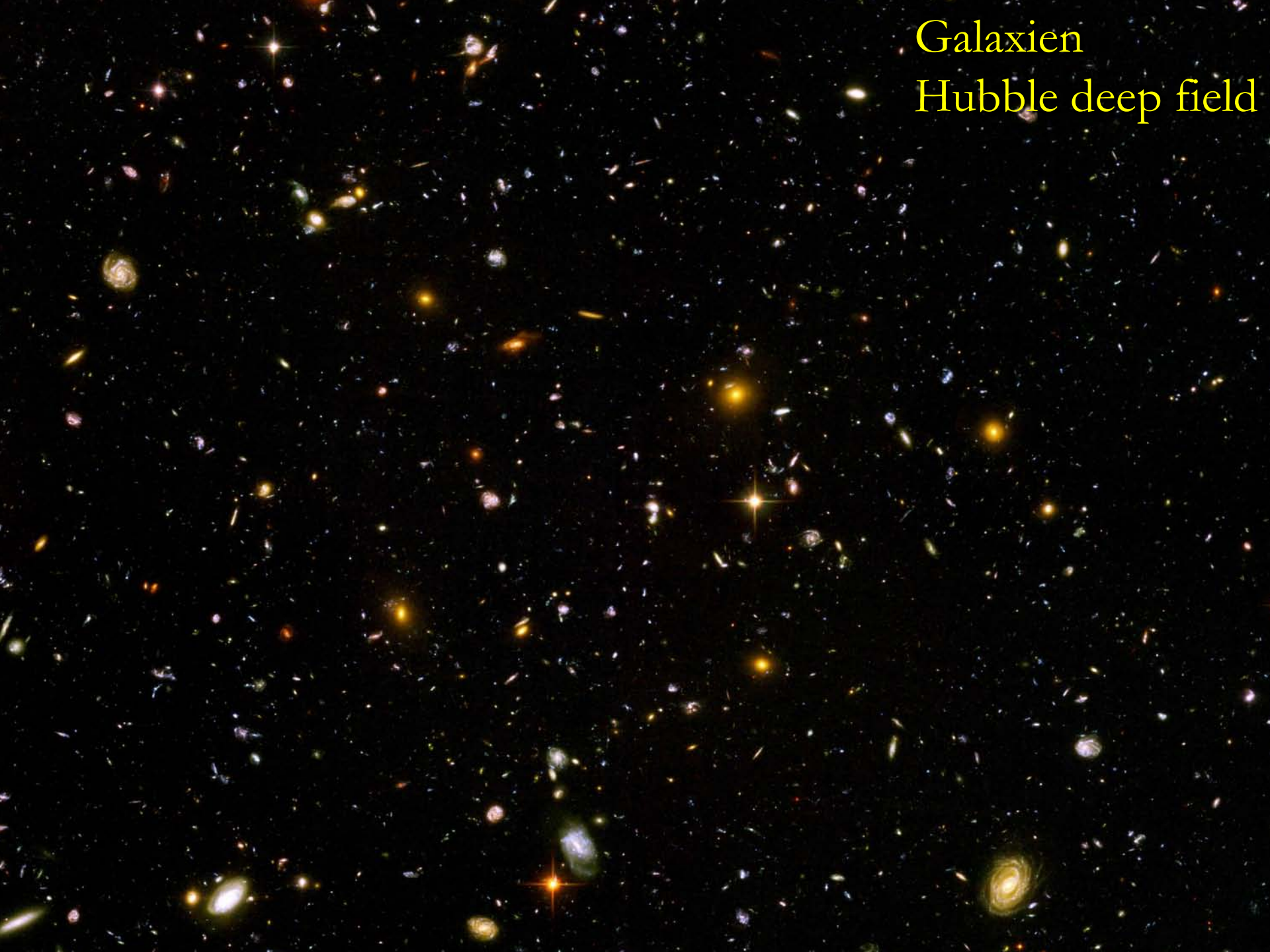
© Reuters

vor 8 Minuten
© EPA



vor vielen Tausenden von Jahren

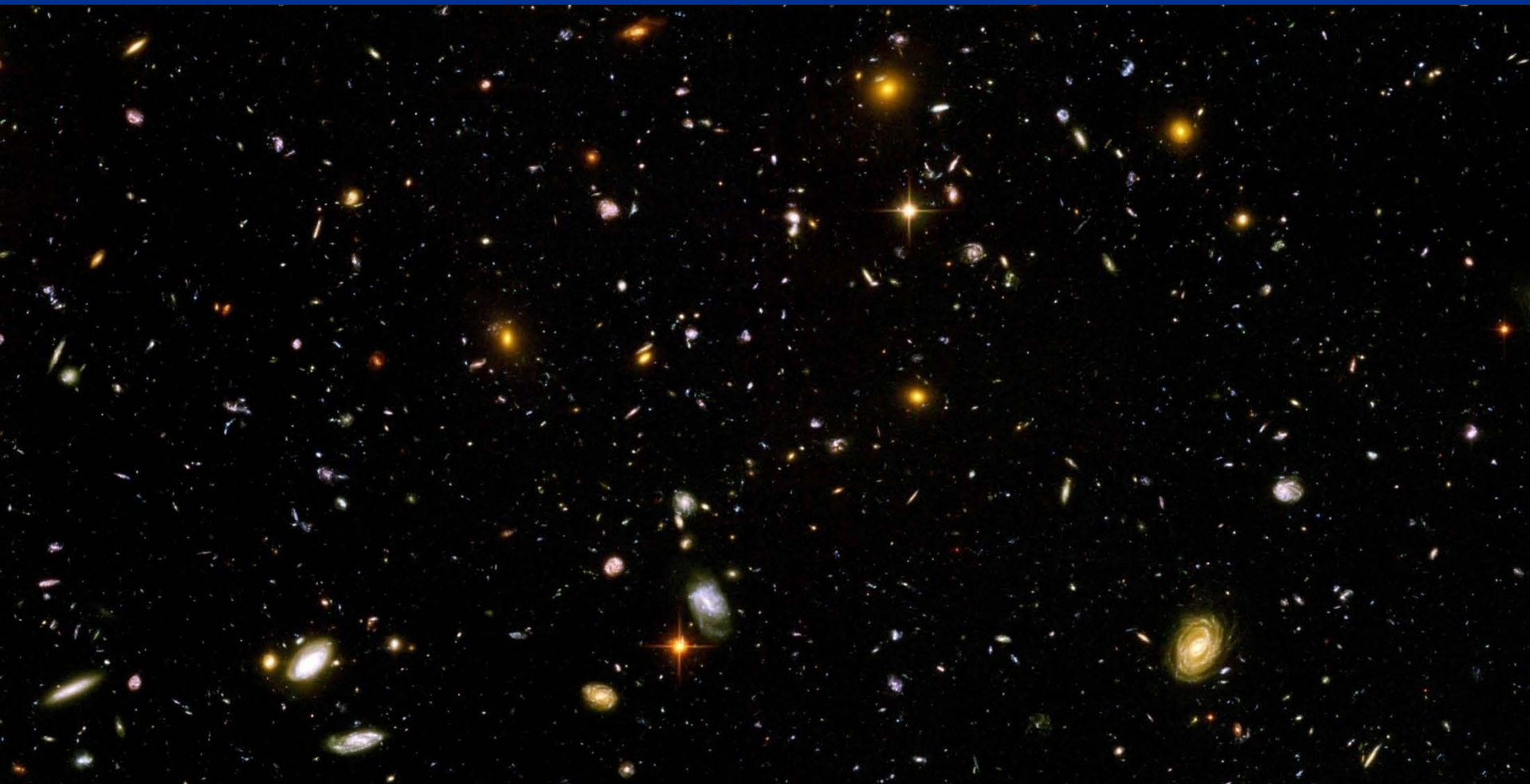
vor vielen Millionen von Jahren


Galaxien
Hubble deep field

vor Milliarden Jahren

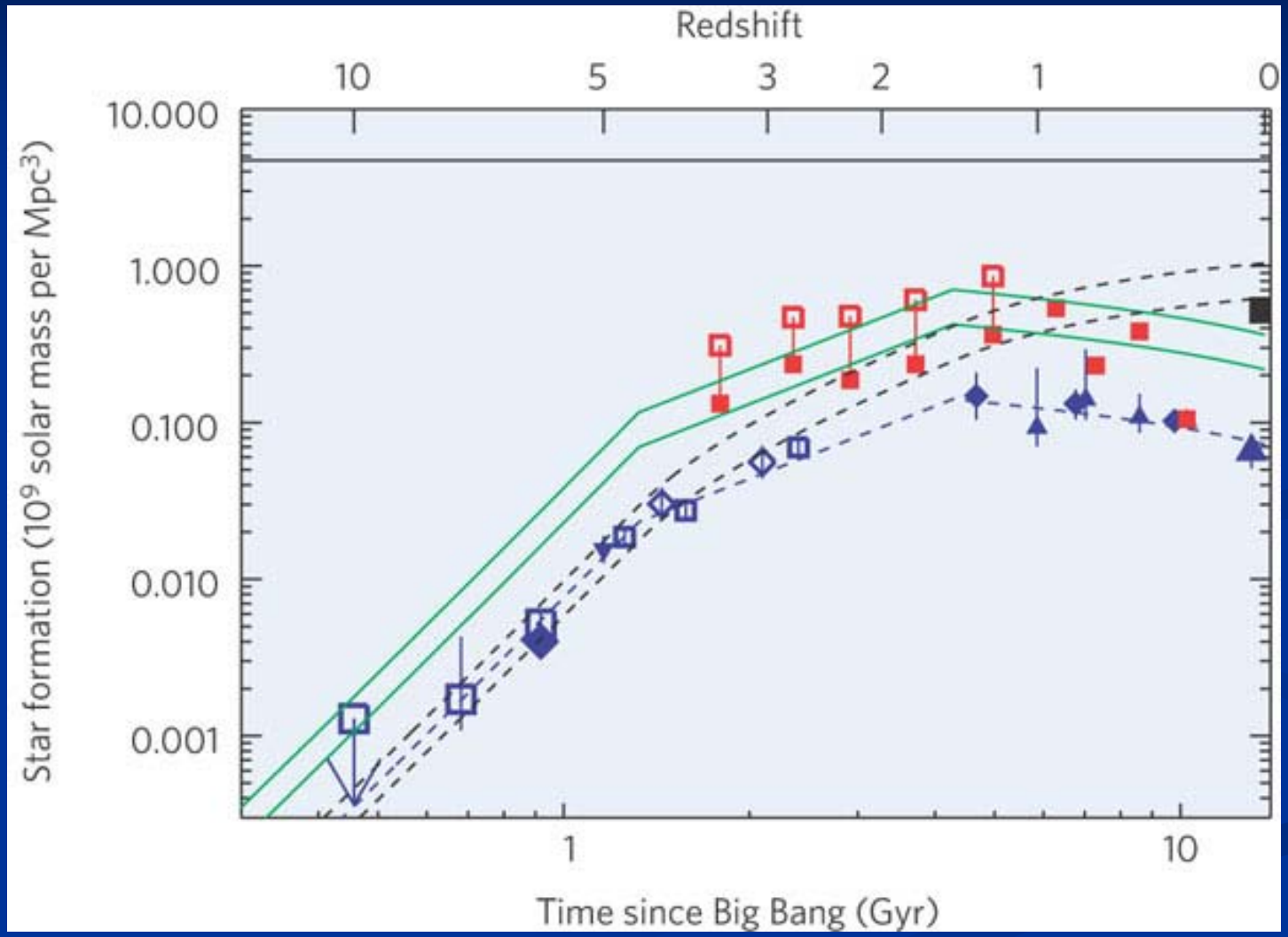
Was ist da ,
wo man nichts sieht ?

Wer weit hinaus schaut ,
schaut weit zurück !



Was war früher anders ?

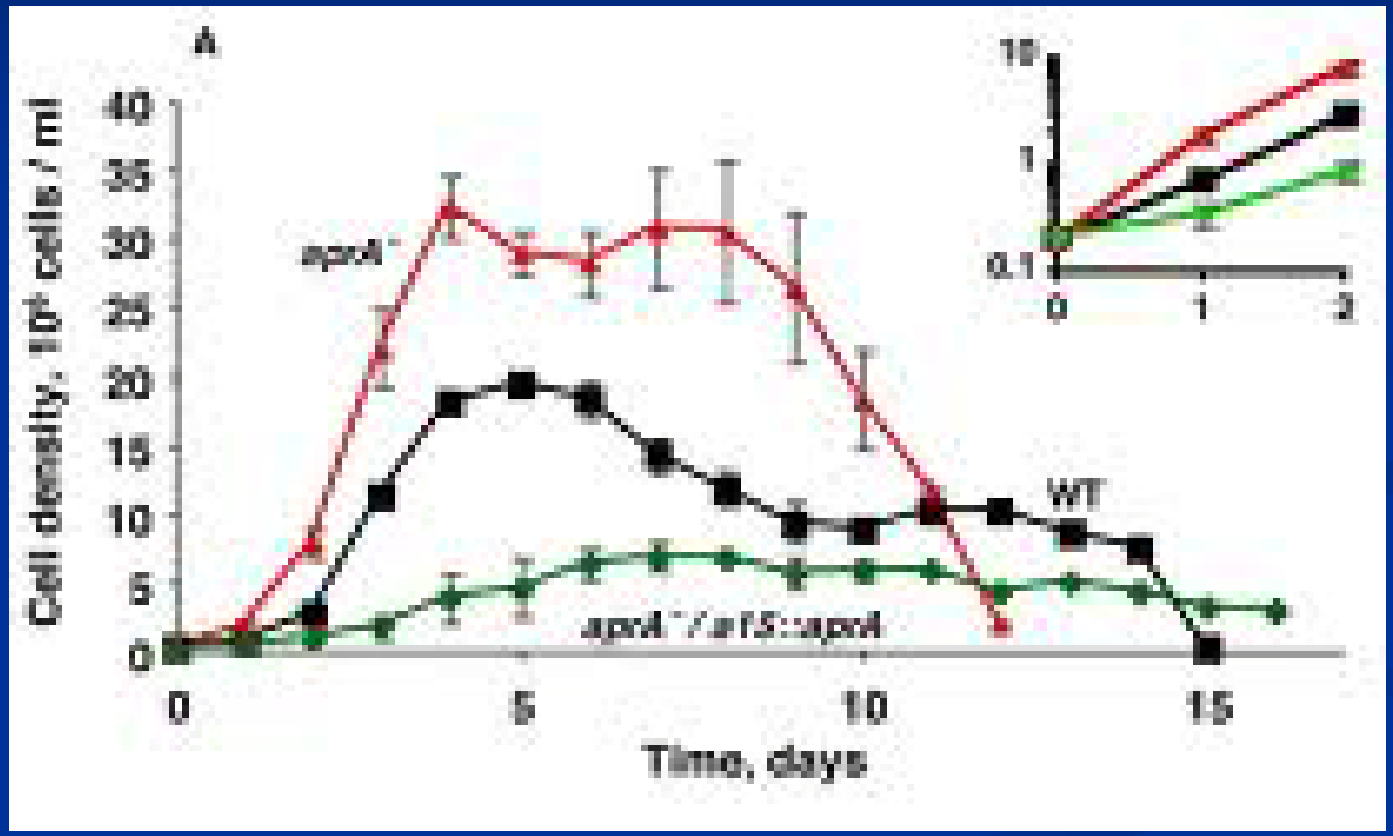
Früher sind weniger Sterne entstanden



Esther M. Hu & Lennox L. Cowie, Nature 440, 1145(2006)

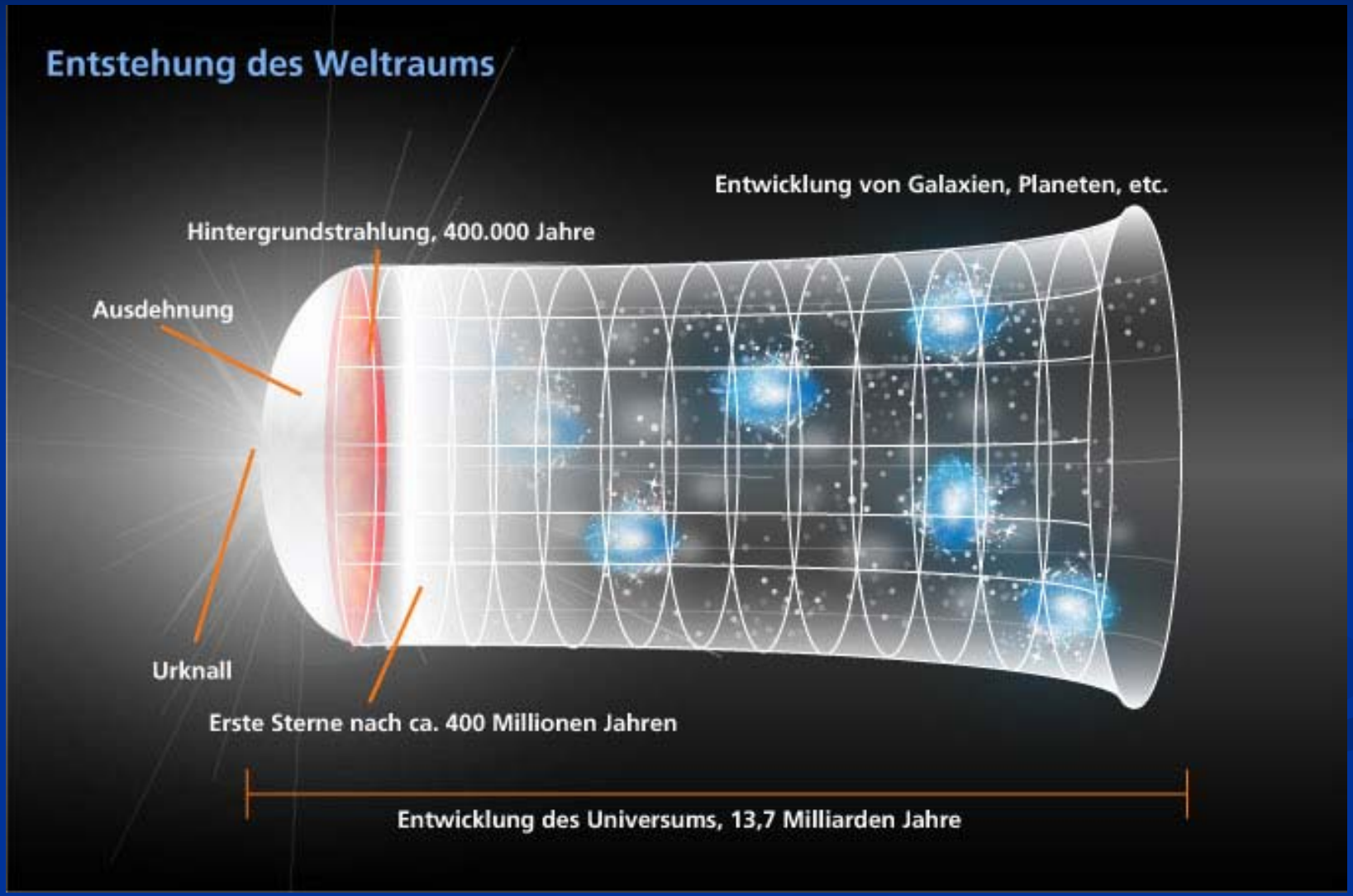
Vergleich : Erde

Vergleich mit Lebewesen



Zellwachstum

(1) Das Universum entwickelt sich

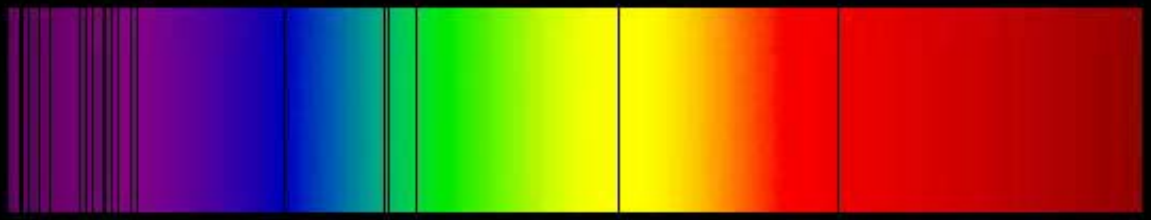


Expansion des Universums

Was war früher anders ?

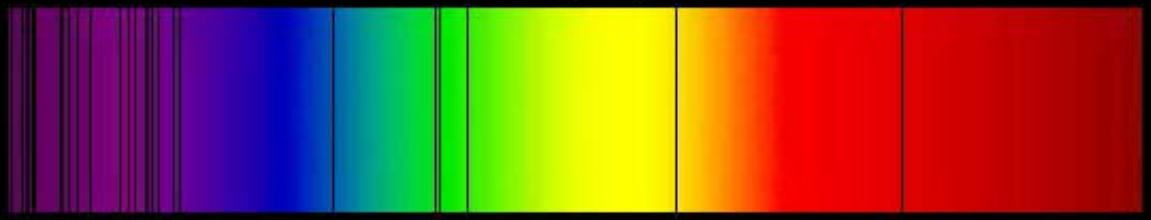
Verschobene Frequenzspektra

Absorption Lines from our Sun



Absorption Lines from a supercluster of galaxies, BAS11

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



Rotverschiebung

systematischer Effekt :

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

mögliche Erklärungen:

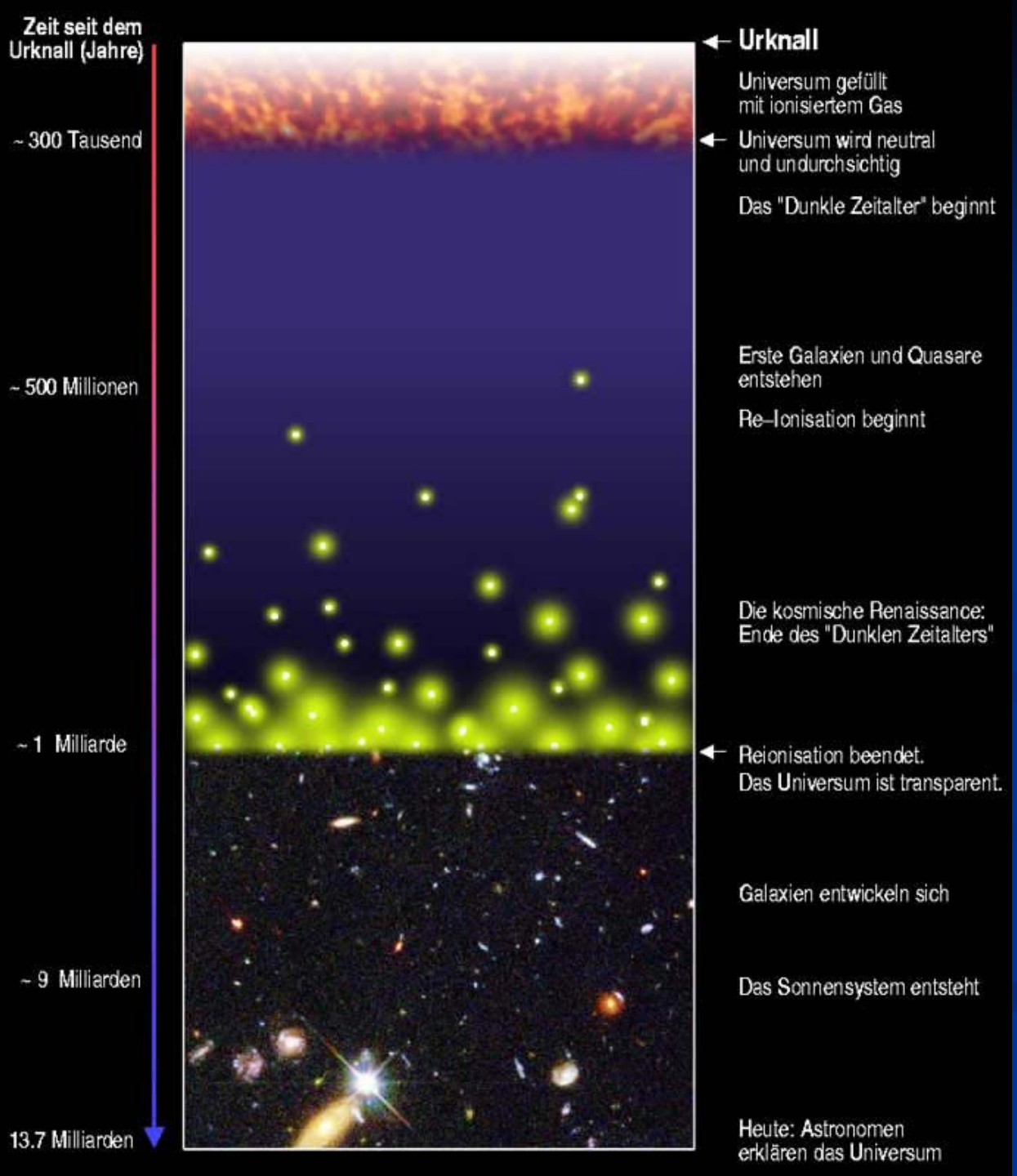
- Entfernte Galaxien bewegen sich von uns weg.

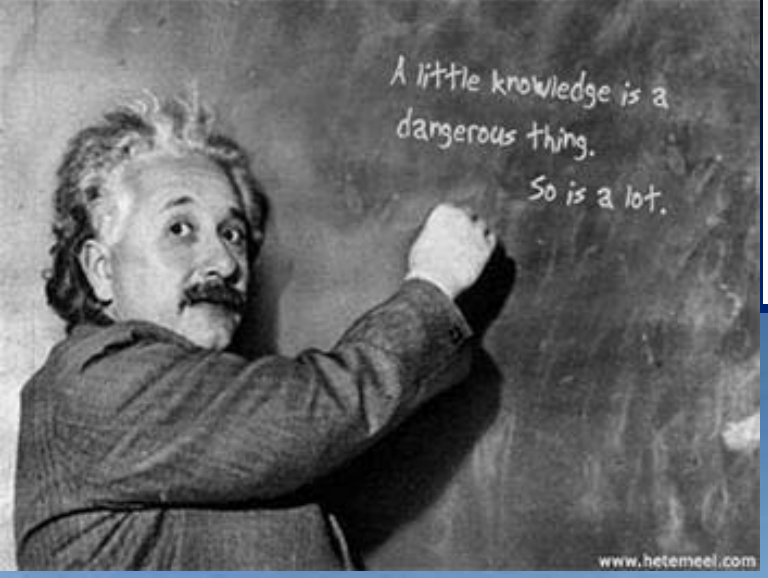
oder

- Atome waren früher größer.

Kosmologie :

Verständnis des Universums als Ganzem

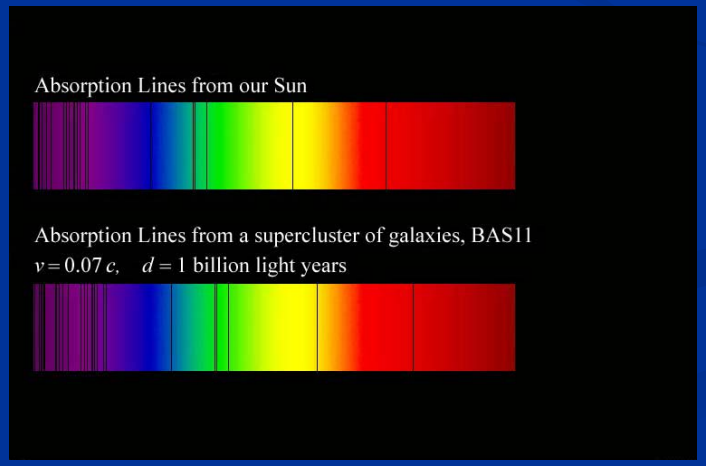

Zeit seit dem Urknall (Jahre)
~ 300 Tausend
~ 500 Millionen
~ 1 Milliarde
~ 9 Milliarden
13.7 Milliarden
Urknall
Universum gefüllt mit ionisiertem Gas
Universum wird neutral und undurchsichtig
Das "Dunkle Zeitalter" beginnt
Erste Galaxien und Quasare entstehen
Re-Ionisation beginnt
Die kosmische Renaissance: Ende des "Dunklen Zeitalters"
Reionisation beendet. Das Universum ist transparent.
Galaxien entwickeln sich
Das Sonnensystem entsteht
Heute: Astronomen erklären das Universum



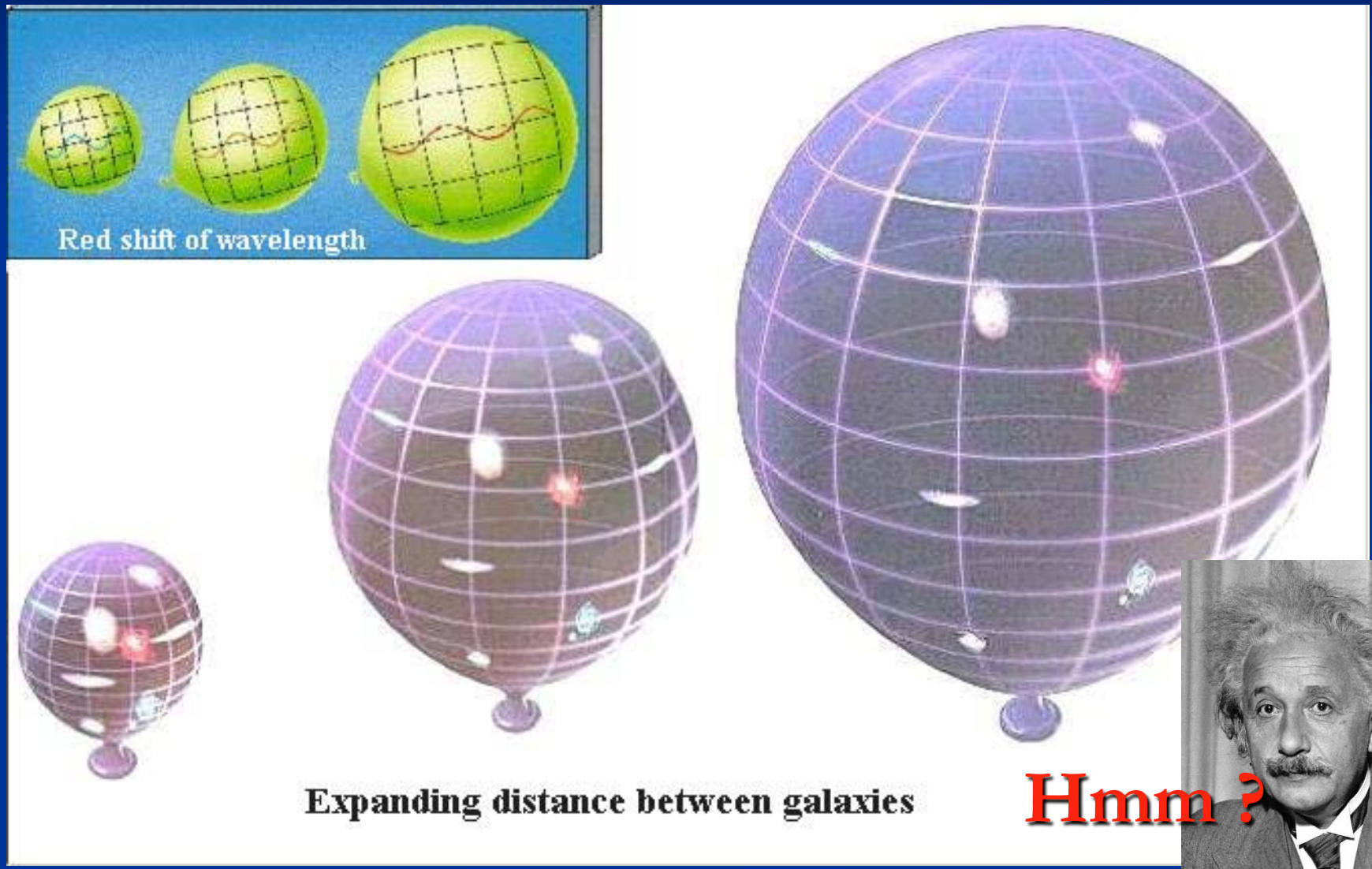
$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

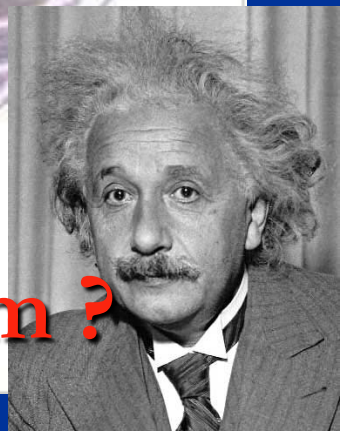
Expansion des Universums

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



Expansion des Universums





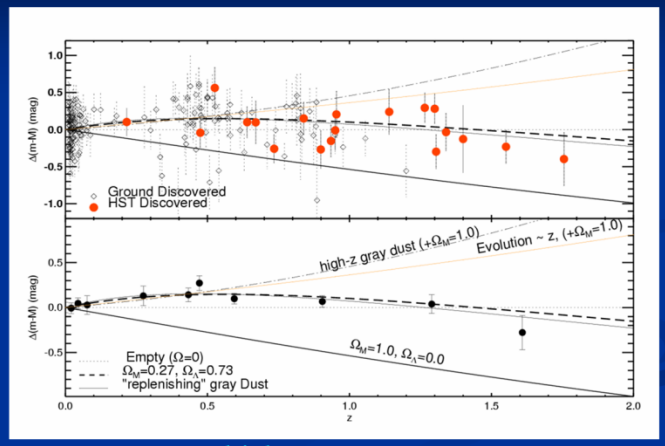
Expansion des Universums

- 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



Rotverschiebung z Riess et al. 2004

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

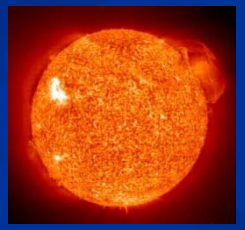
The Nobel Prize in Physics 2011 was awarded *"for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"* with one half to Saul Perlmutter and the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess.

Expansion des Universums

- Der Raum zwischen den Galaxienhaufen dehnt sich aus.
- Früher war das Universum dichter,

  … und heißer.
- Zurückverfolgung der Einstein'schen kosmologischen Gleichungen :

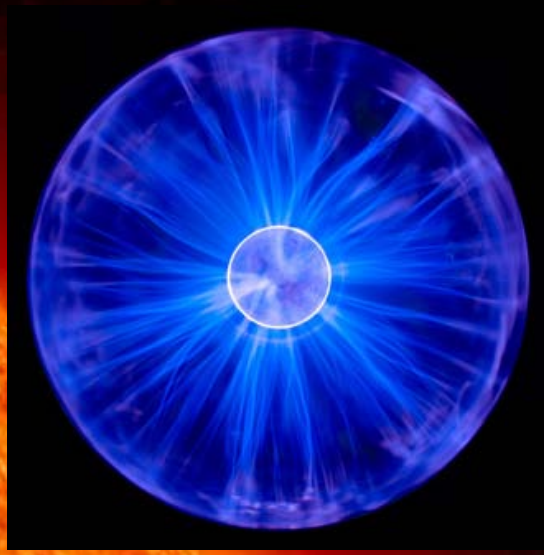
  Urknall, extrem heißer Feuerball !



- Bis ca 400 000 Jahre nach dem Urknall : heißes Plasma aus Protonen, Elektronen und Strahlung

Kosmisches Feuer

Plasma



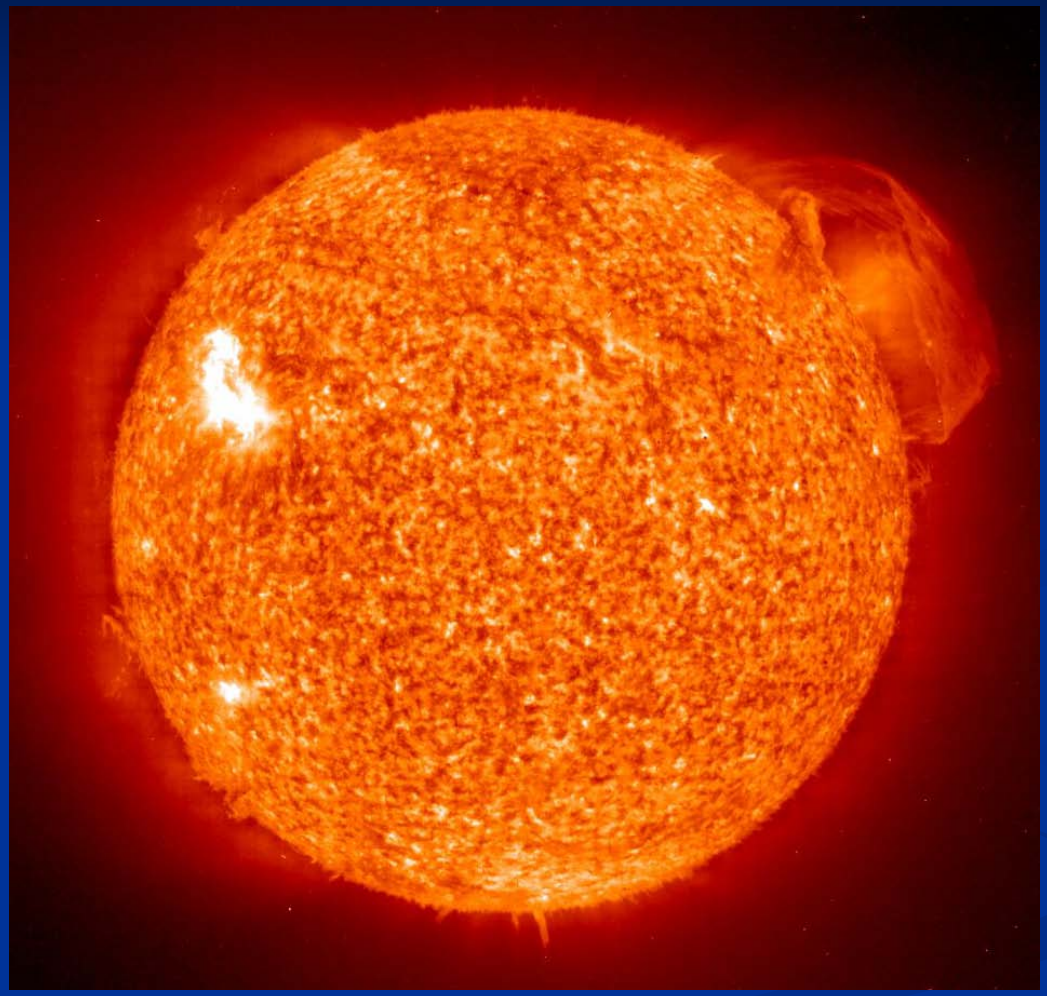
Unendlicher Feuerball

- 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 !

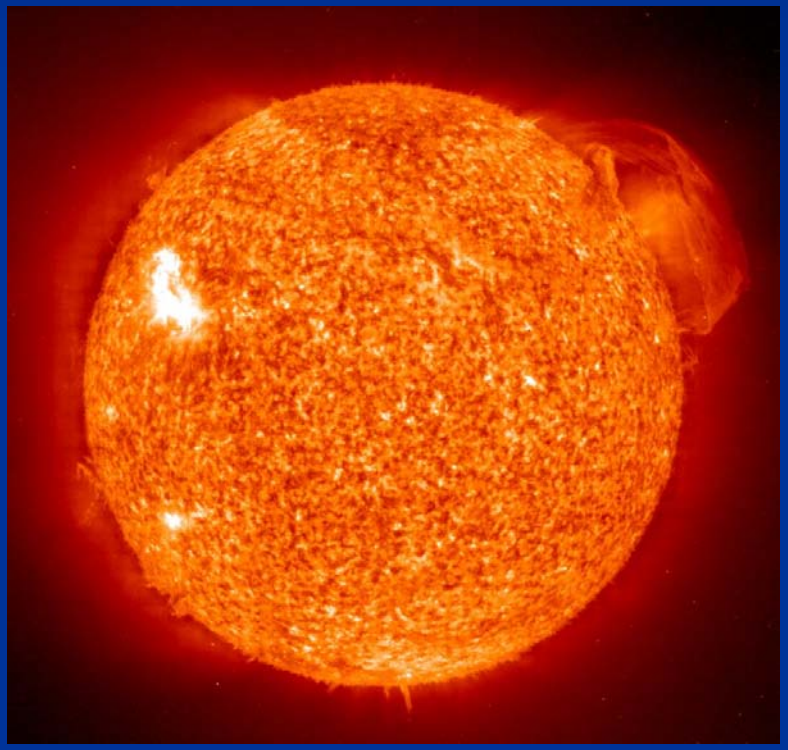
Kann man in die Sonne hineinschauen ?



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

Plasma

undurchsichtig



wie im Innern der Sonne

Atome

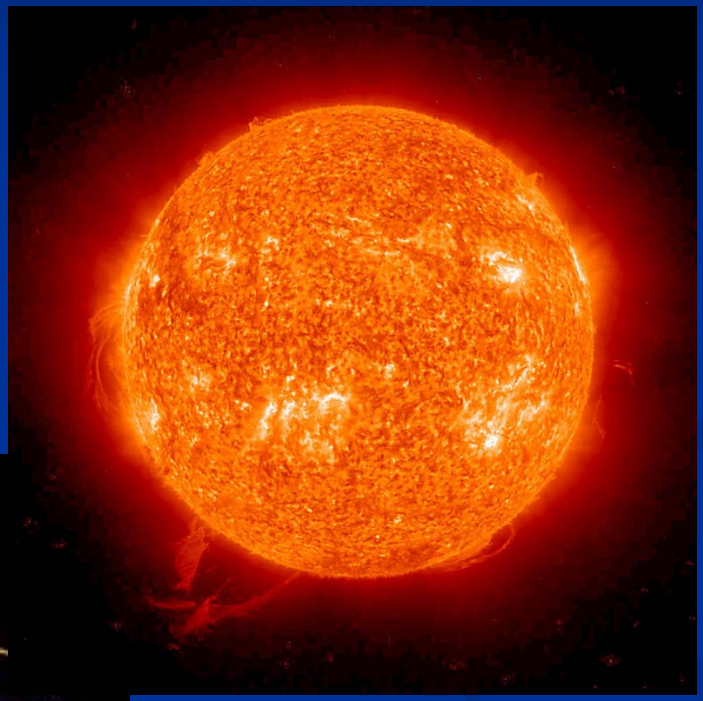
durchsichtig

Weltall heute

Was ist Licht ?

- Welle – Teilchen – Dualität
- Licht-Teilchen : Photonen
- Ohne Behinderung : auf (fast) geraden Bahnen: Lichtstrahlen
- Photonen können gestreut werden, oder absorbiert und emittiert werden

Photon – Streuung in Wolke oder Plasma



undurchsichtig !

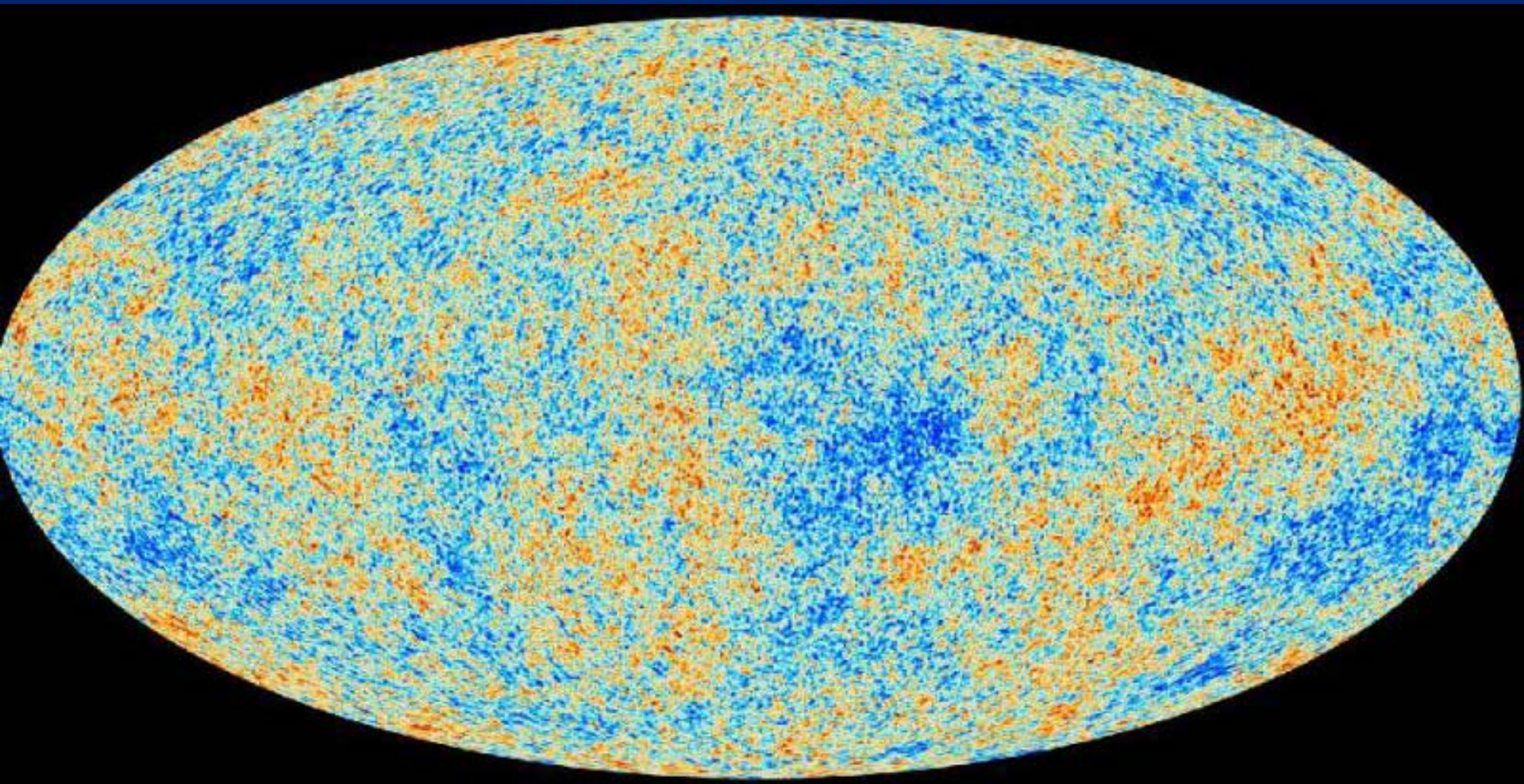
Kosmische Hintergrundstrahlung

Kosmische Hintergrundstahlung

- 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



Planck

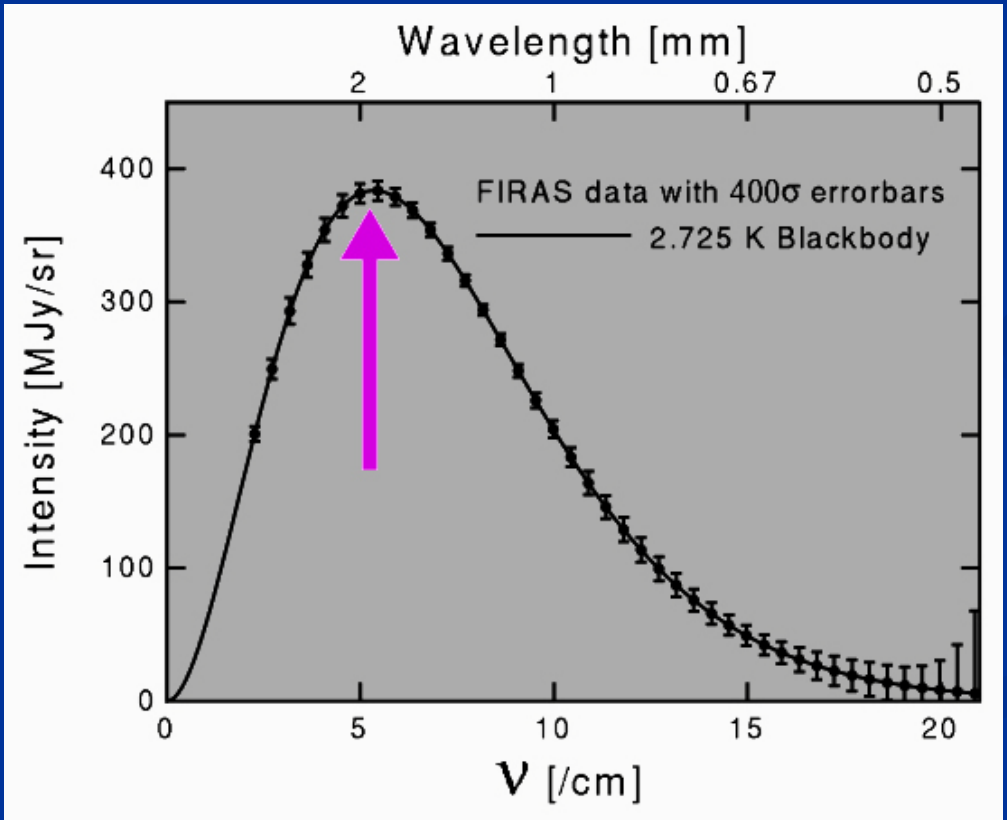
Vermessung der Hintergrundstrahlung

COBE

Was sehen wir ?

- Zustand des Universums ca 400 000 Jahre nach dem Urknall
- Fluktuationen eines heißen Plasmas

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

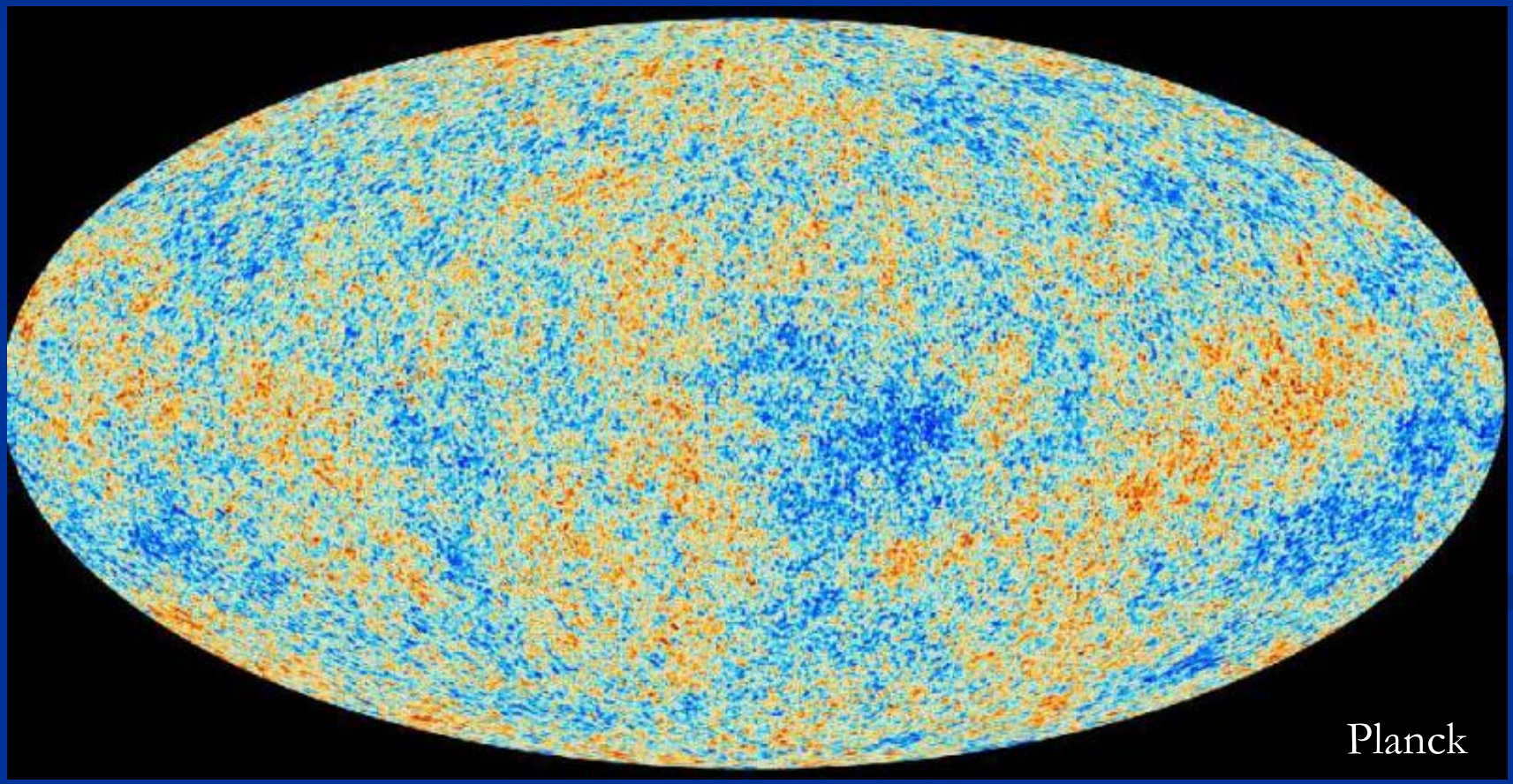


Planck – Spektrum (COBE)

Quantenmechanik auf astronomischen Skalen

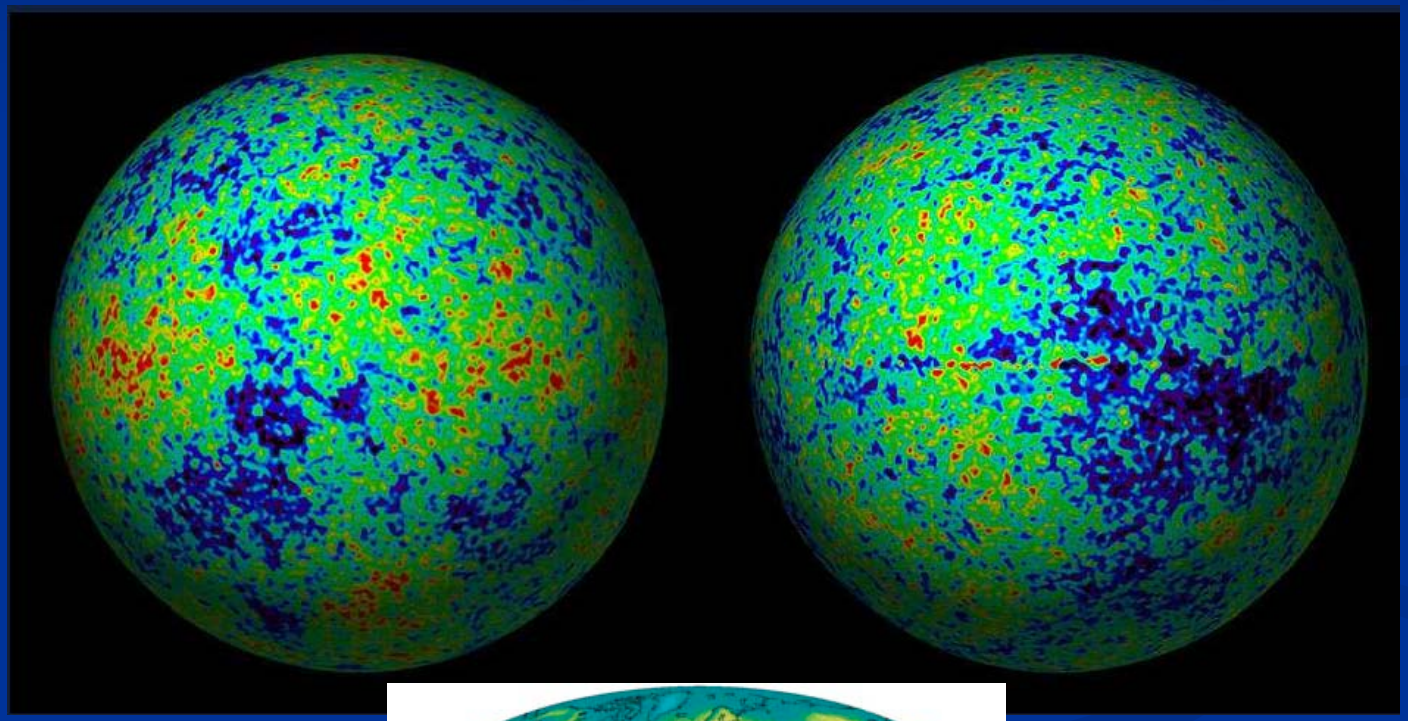
Foto des Urknalls

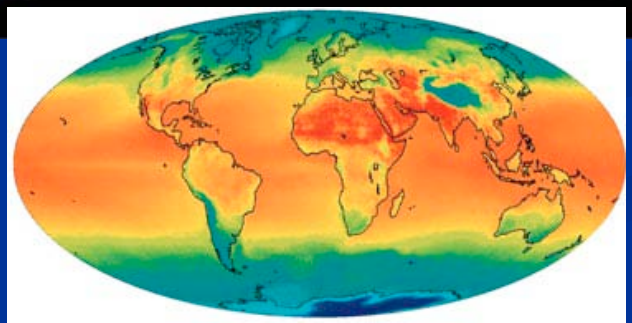
- als sich die Atome bildeten : ca 400 000 Jahre abb



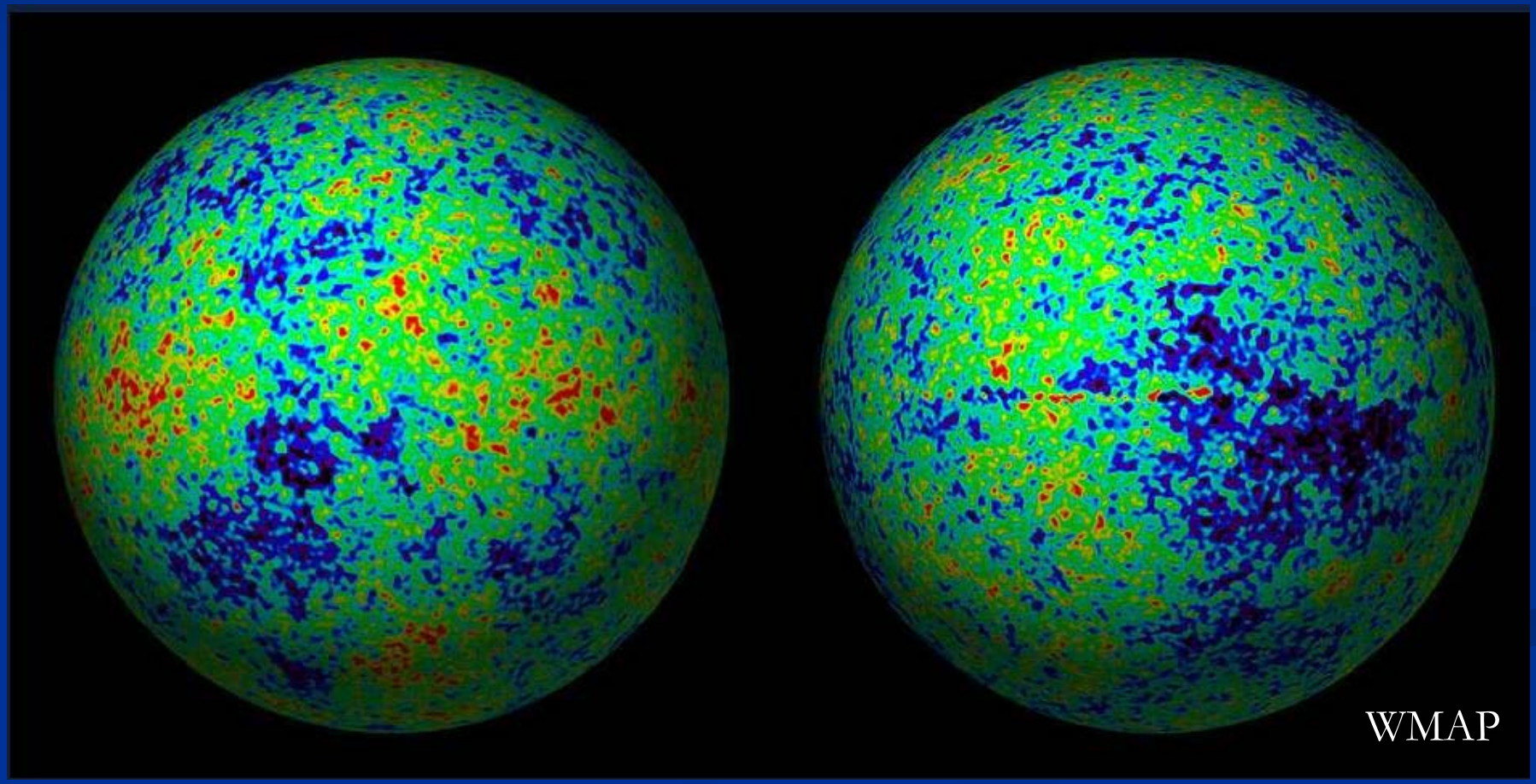
Fluktuationen

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

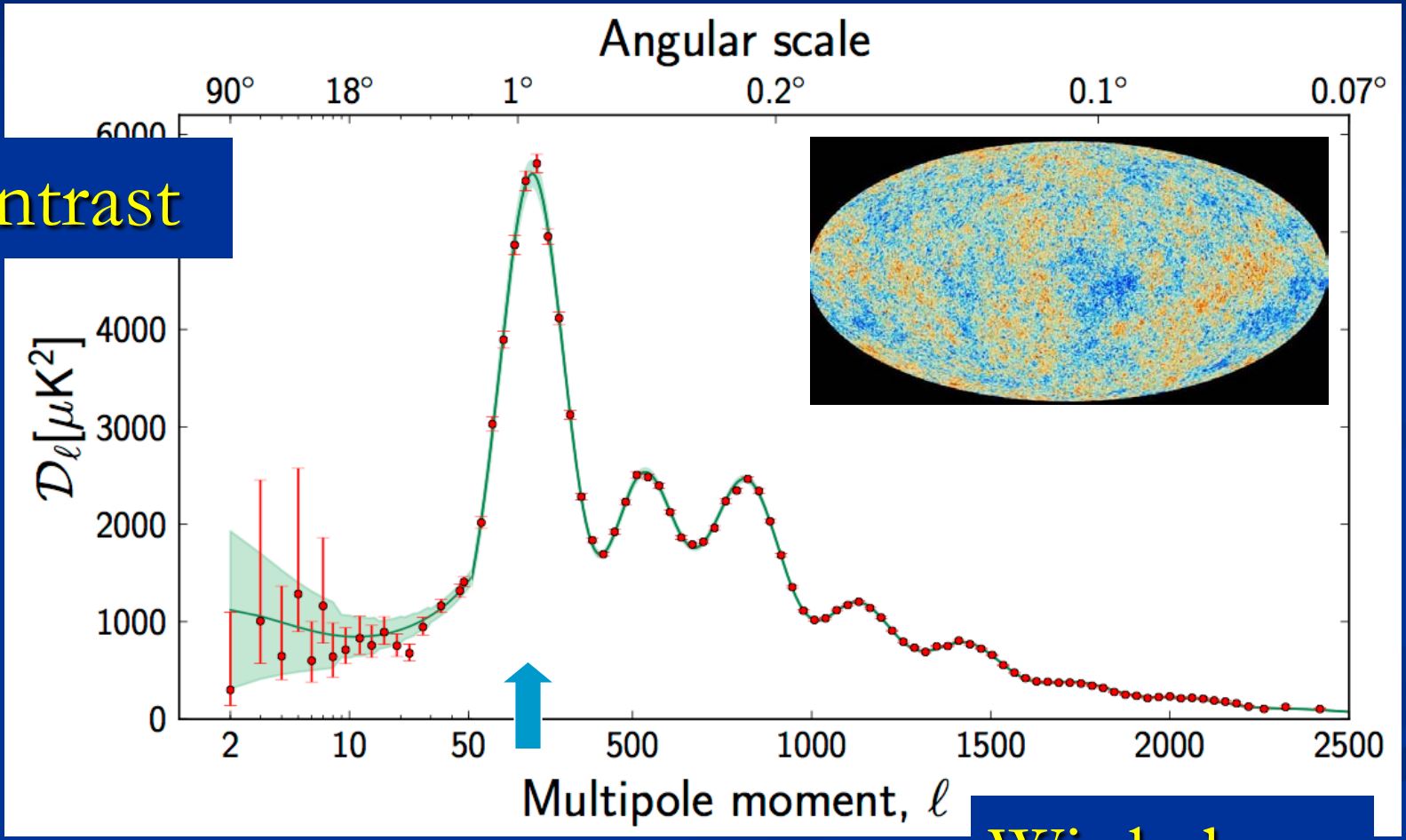




Anisotropie der Hintergrundstahlung : Fleckengröße



Stärke der Temperaturschwankung in Abhängigkeit von Fleckengröße (im Winkel)

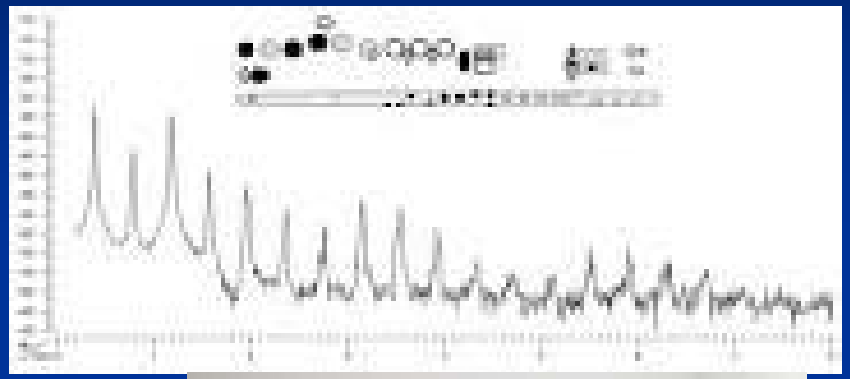


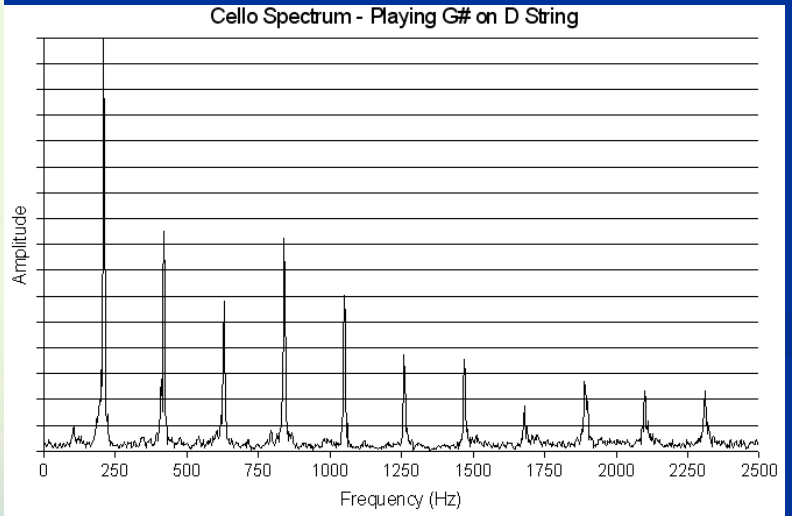
Kontrast

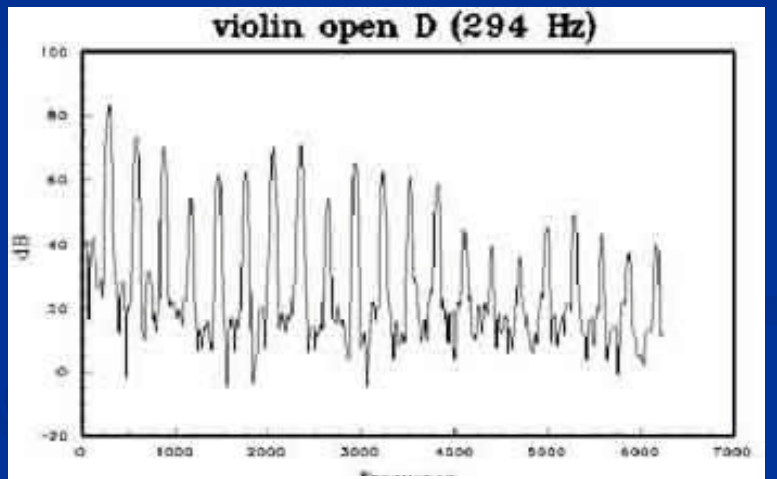
Winkel

ca 10 Grad ca 1 Grad

Frequenzpektrum Musikinstrumente







Zusammensetzung des Universums

Atome : 5 %

Dunkle Materie : 25 %

Dunkle Energie : 70 %

nur 4,5 % des Universums bestehen aus Atomen :

bekannt von

Hintergrundstahlung , **Nucleosynthese**

400 000 Jahre abb
Atomphysik

Minute abb
Kernphysik

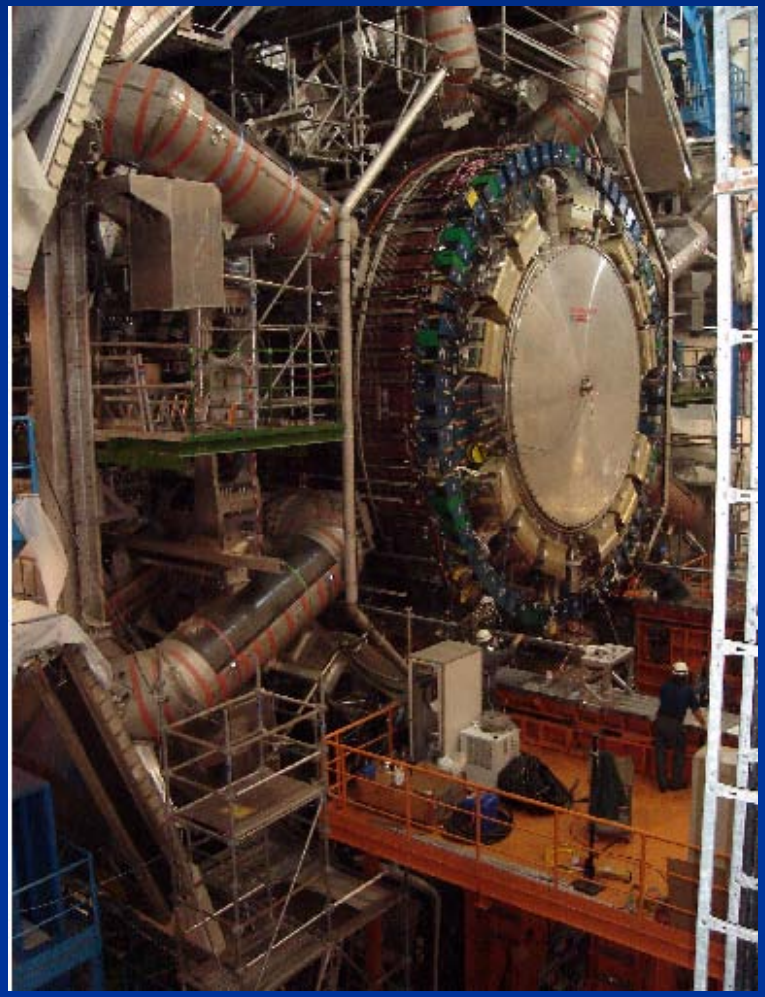
Das Dunkle Universum

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

oder genauer : durchsichtig

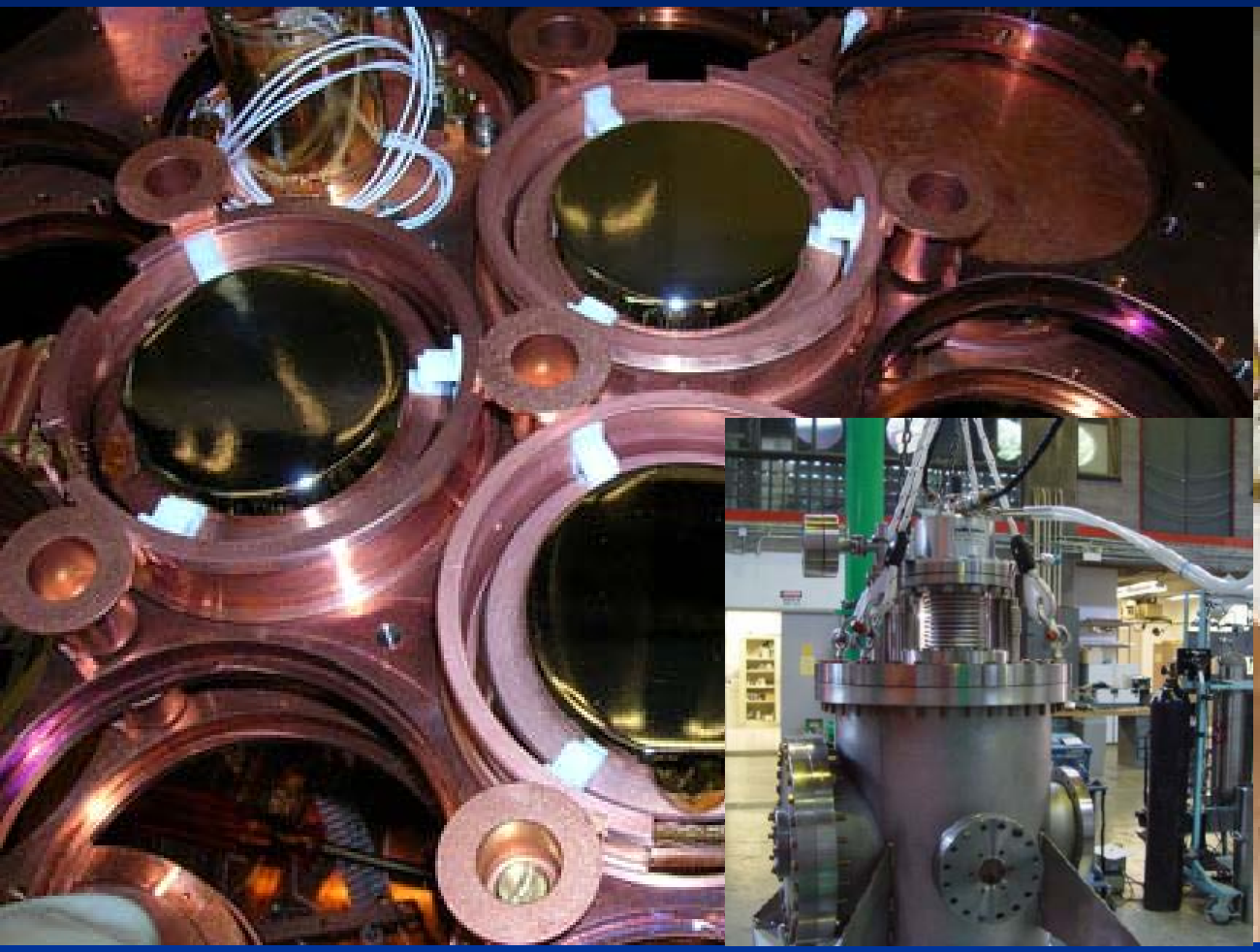
Dunkle Materie

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

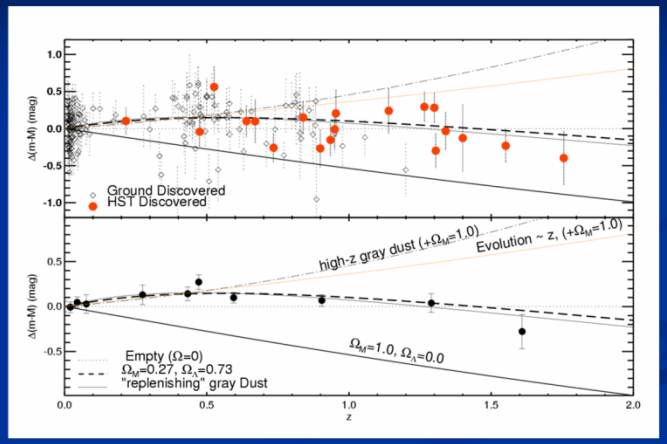
Dunkle Energie : kosmologische Effekte

Vorhersagen für Kosmologie mit Dunkler Energie

Die Expansion des Universums

beschleunigt sich heute !

Supernova Ia Hubble-Diagramm

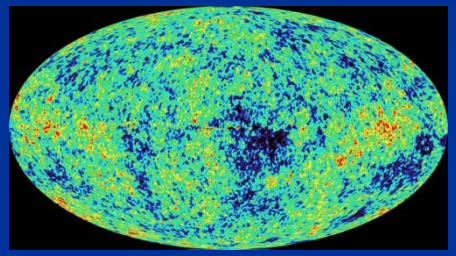


Rotverschiebung z

Riess et al. 2004

Strukturbildung

Aus winzigen Anisotropien wachsen die Strukturen des Universums



Sterne , Galaxien, Galaxienhaufen

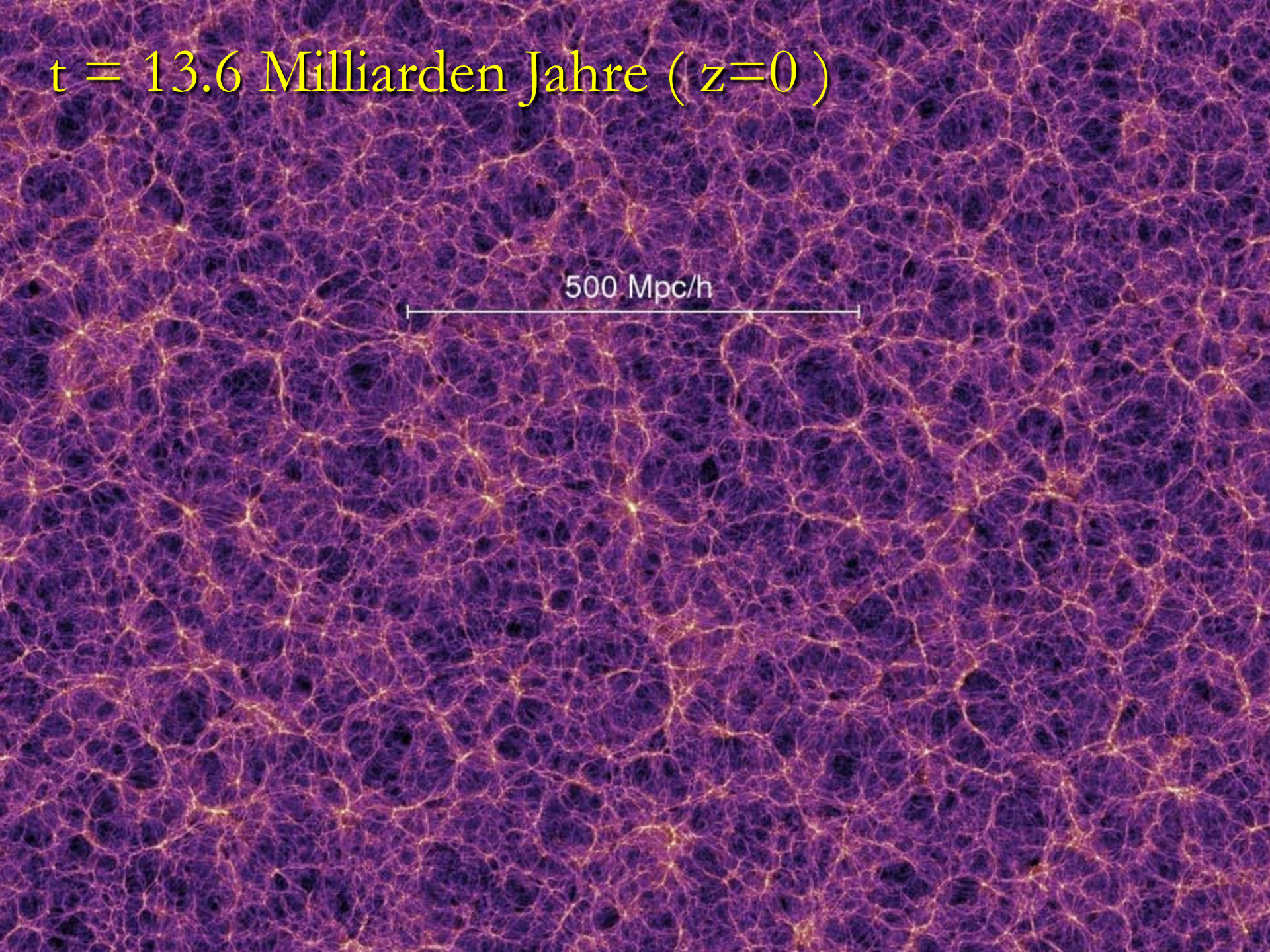
Ein primordiales Fluktuationsspektrum beschreibt alle Korrelatonsfunktionen !

Simulationen im Computer

Verteilung der Dunklen Materie im Universum

Millenium simulation , VIRGO project

t = 1 Milliarde Jahre (z =5.7)


t = 13.6 Milliarden Jahre (z=0)
500 Mpc/h

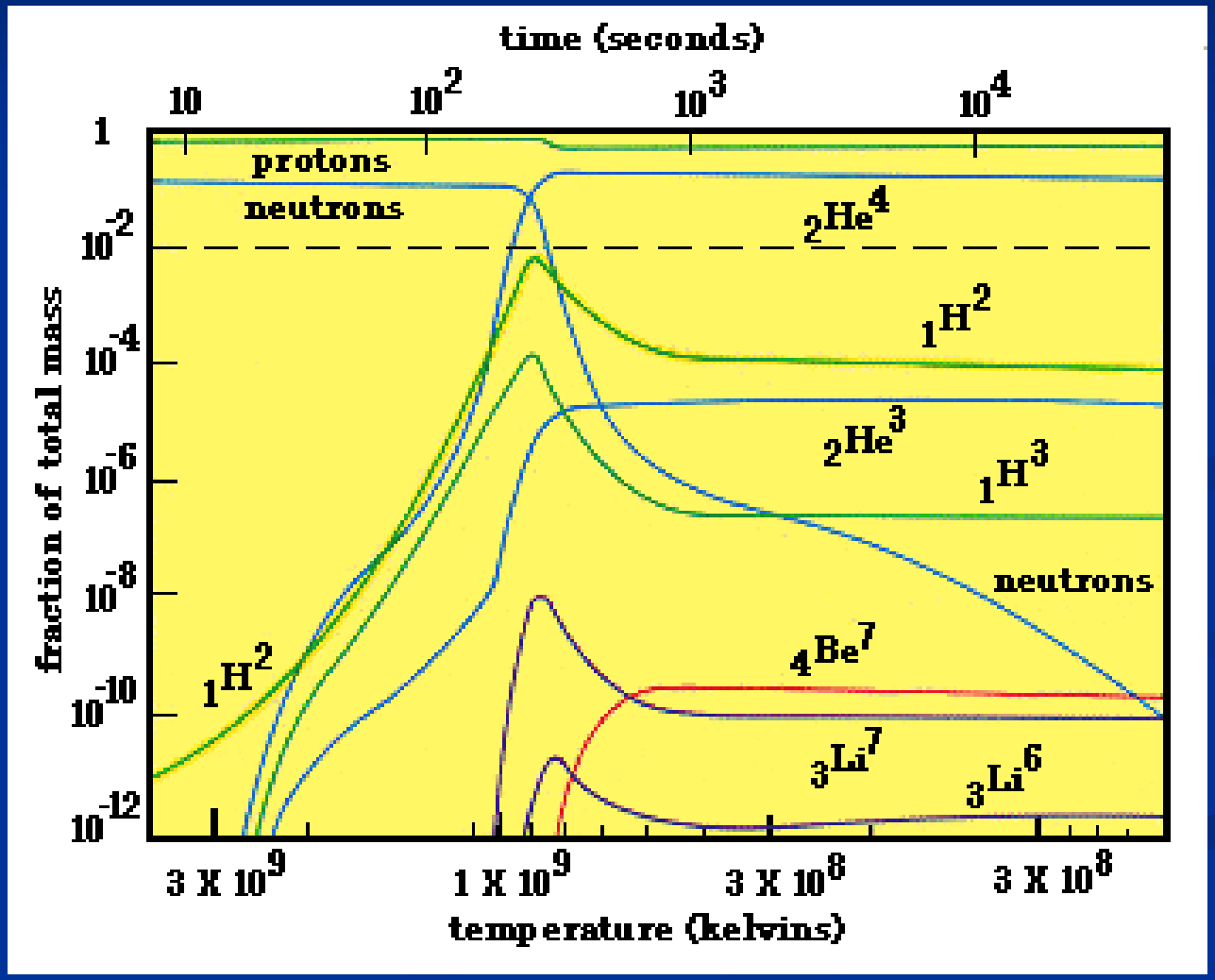
(3) Statistische Beschreibung des Universums erlaubt Präzisionskosmologie

Kosmologie,
Kern- und Teilchen- Physik

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

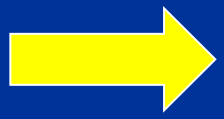
- Element – Häufigkeiten können beobachtet werden
- Übereinstimmung mit Theorie , falls Atome 5% des Universums ausmachen.

Urknall – Modell funktioniert !

Thermisches Gleichgewicht

Energie ~ Masse ~ Temperatur

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



Elementarteilchen - Physik

Näher an den Urknall

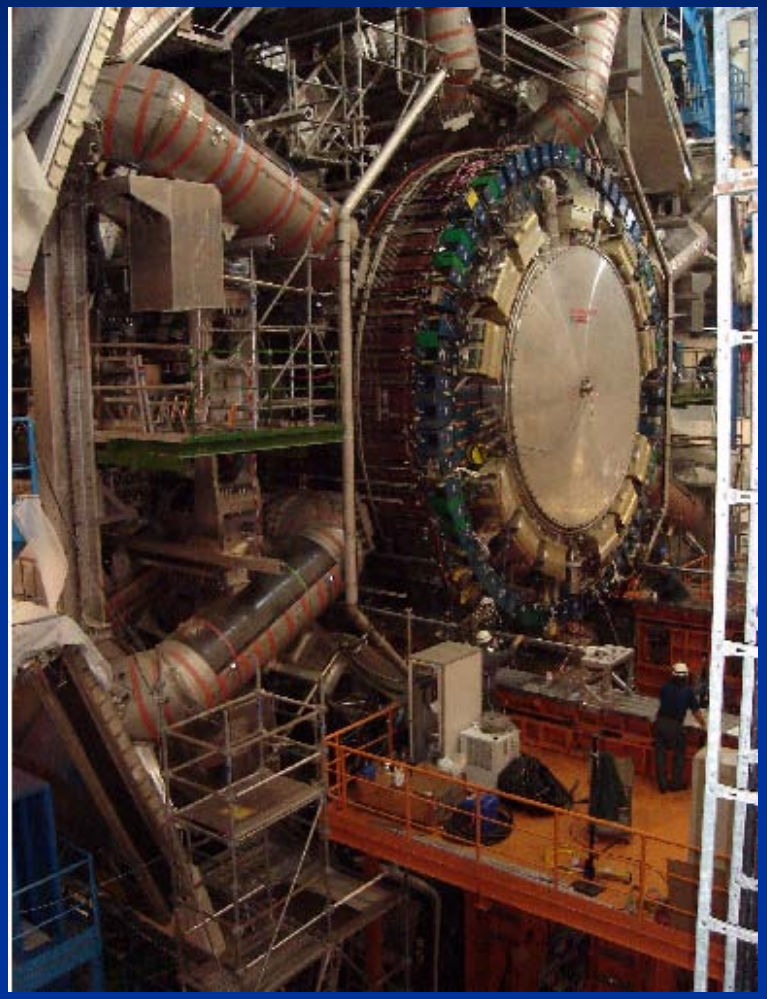
- Je näher an den Urknall, desto höher die Temperatur und Energie der Teilchen
- Physik bei hohen Energien weniger gut bekannt
- Erst ab 10^{-12} Sekunden abb : Im wesentlichen bekannte Physik

Teilchenphysik nähert sich Urknall

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

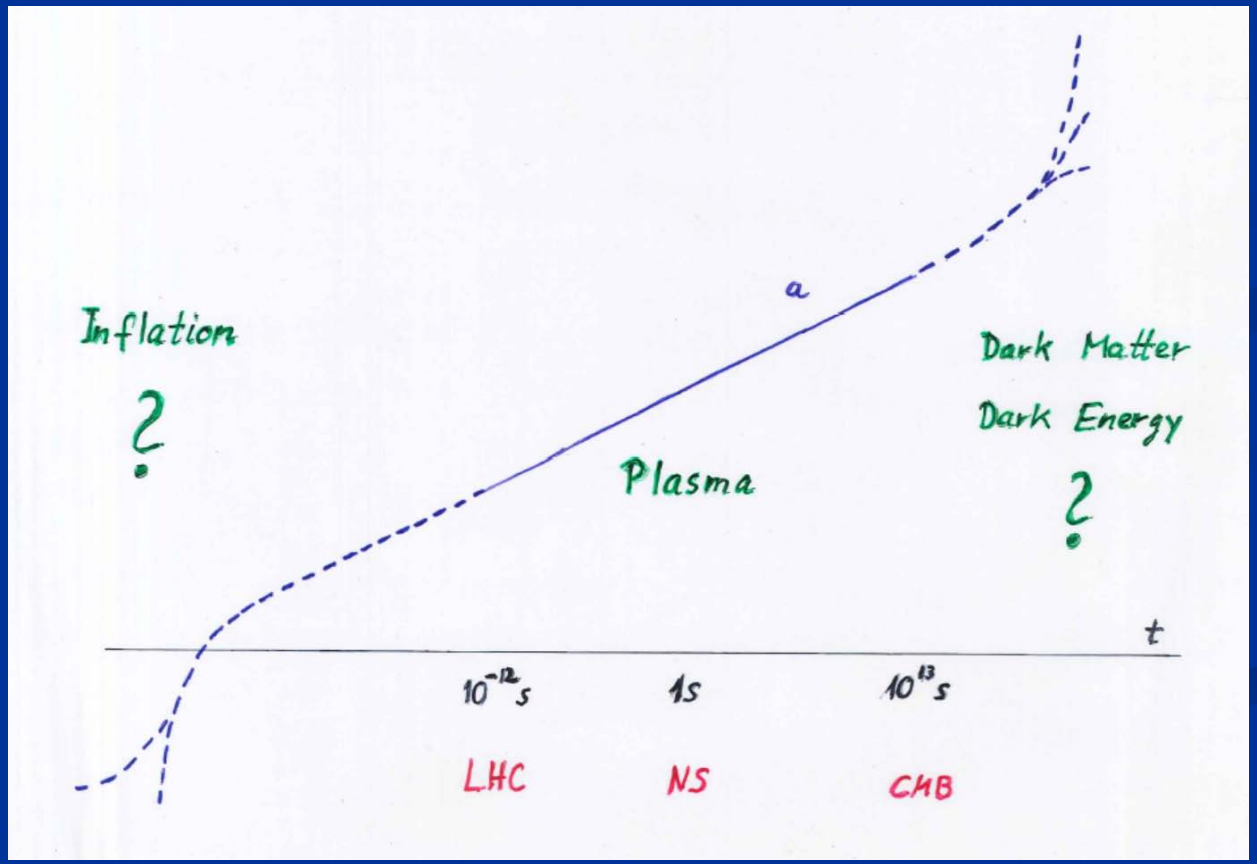
Energiegrenze …

Energiegrenze



LHC , CERN , Genf

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

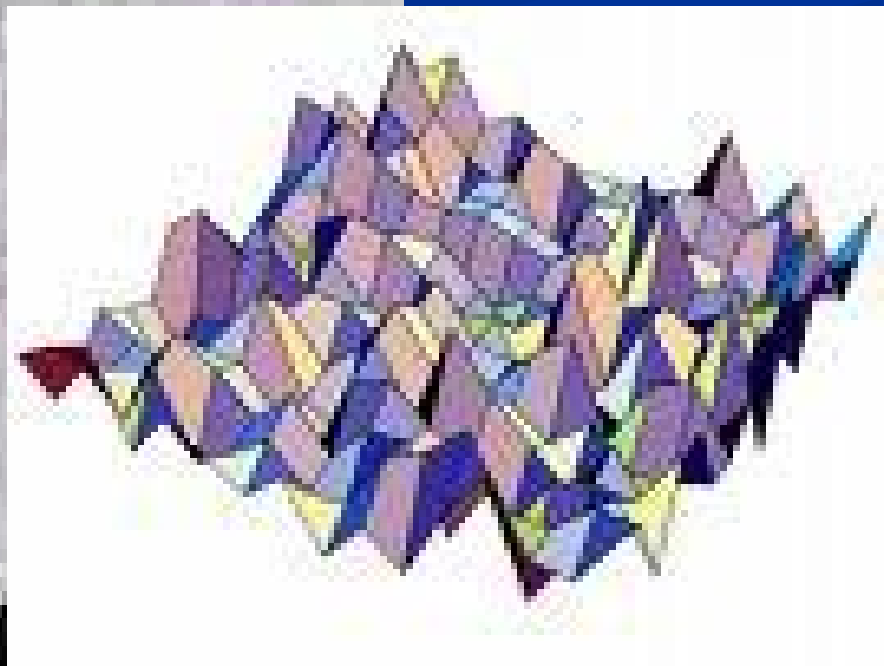


Abenteuerreise an den Anfang der Welt

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

Der Urknall

Wie unser Universum aus fast nichts entstand



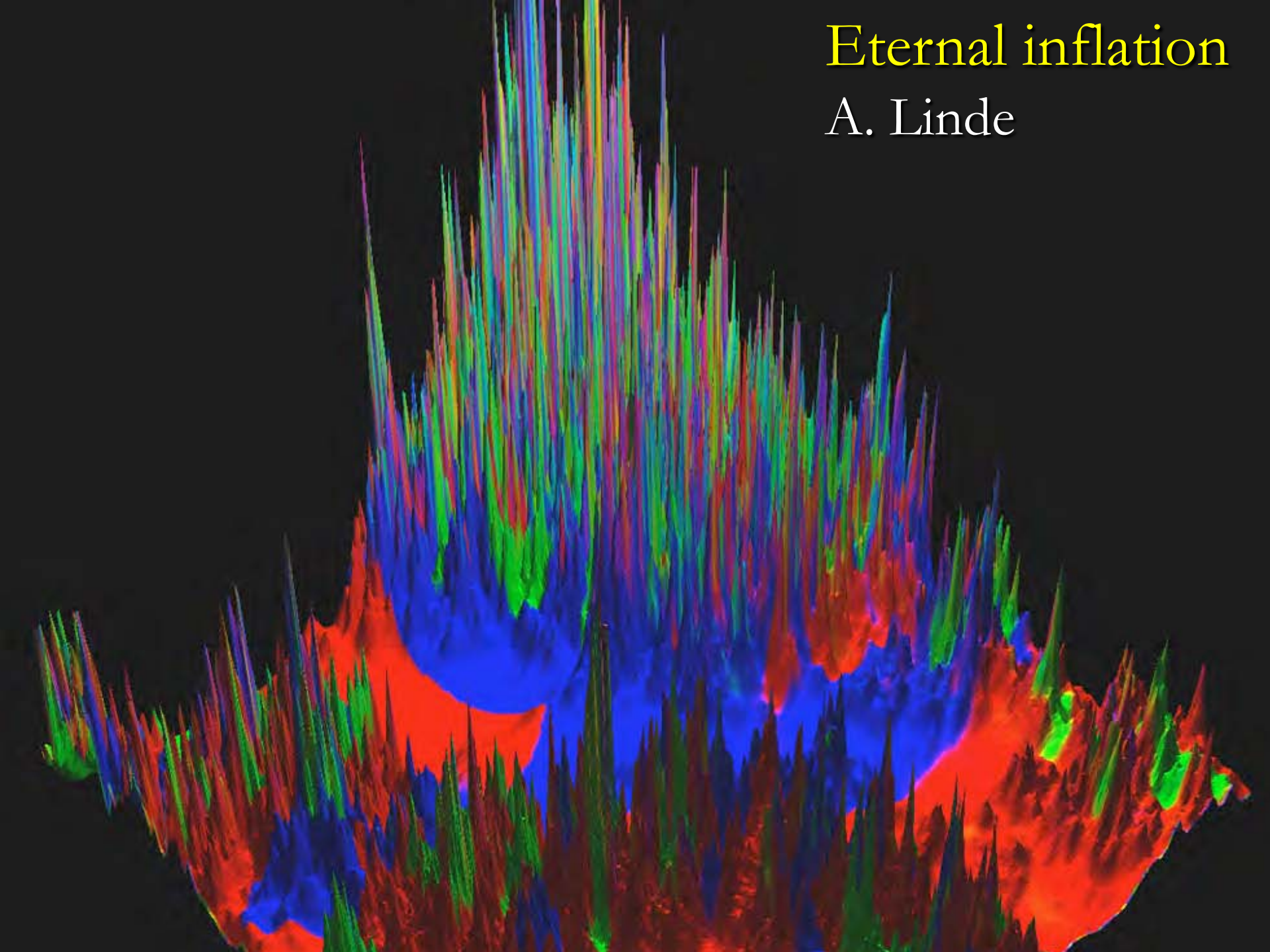
Was ist reell ?

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)

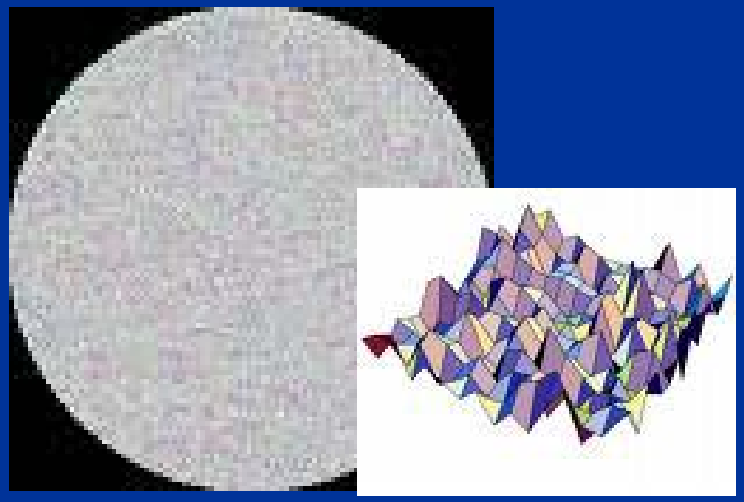
Kosmologische Gleichungen

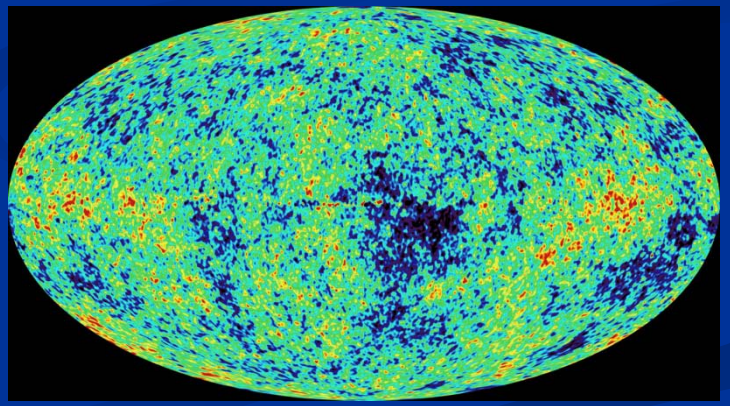
$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -dV/d\phi$$

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

Inflationäres Universum

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





Signale vom Urknall !

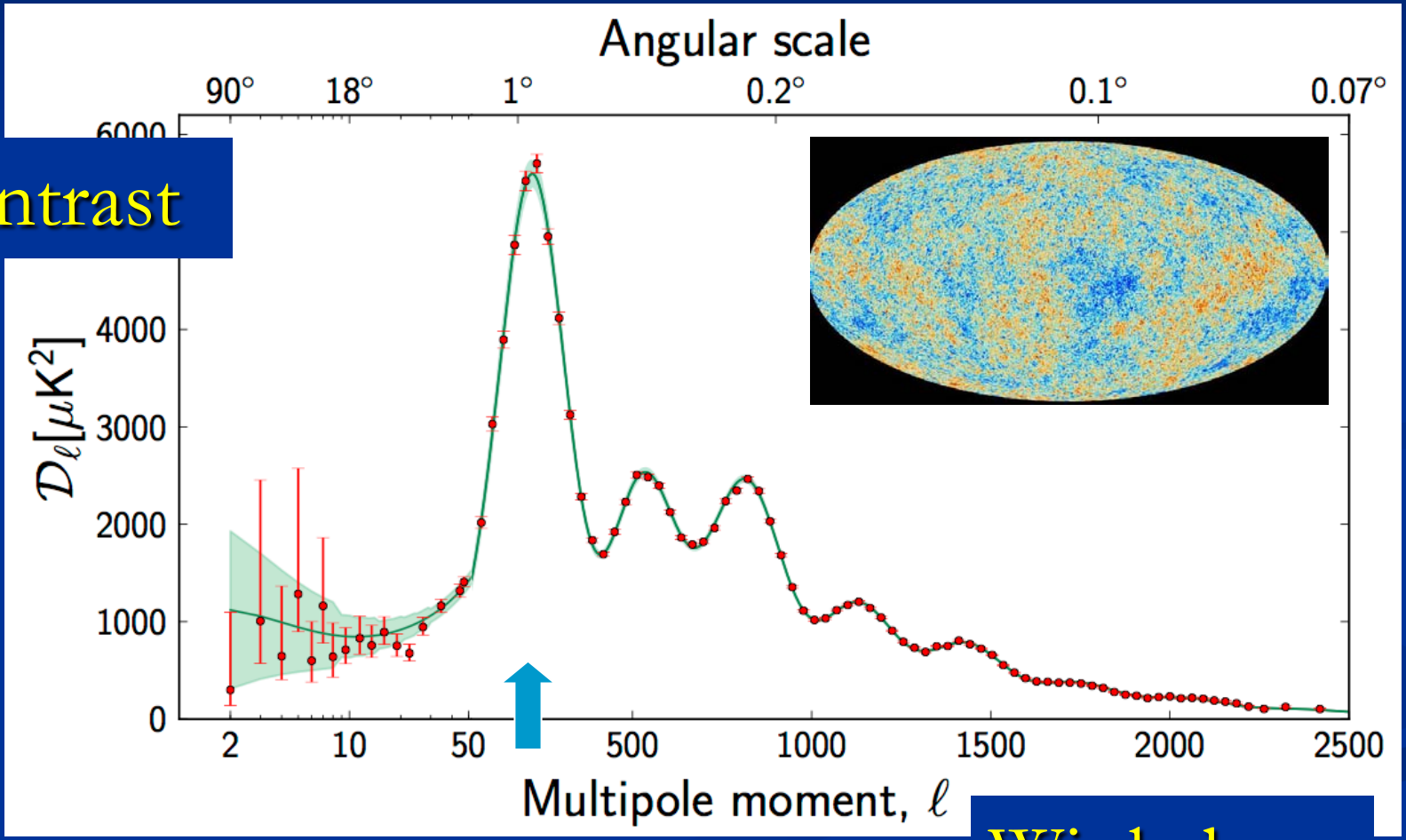
Vorhersagen der Inflation

- 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)

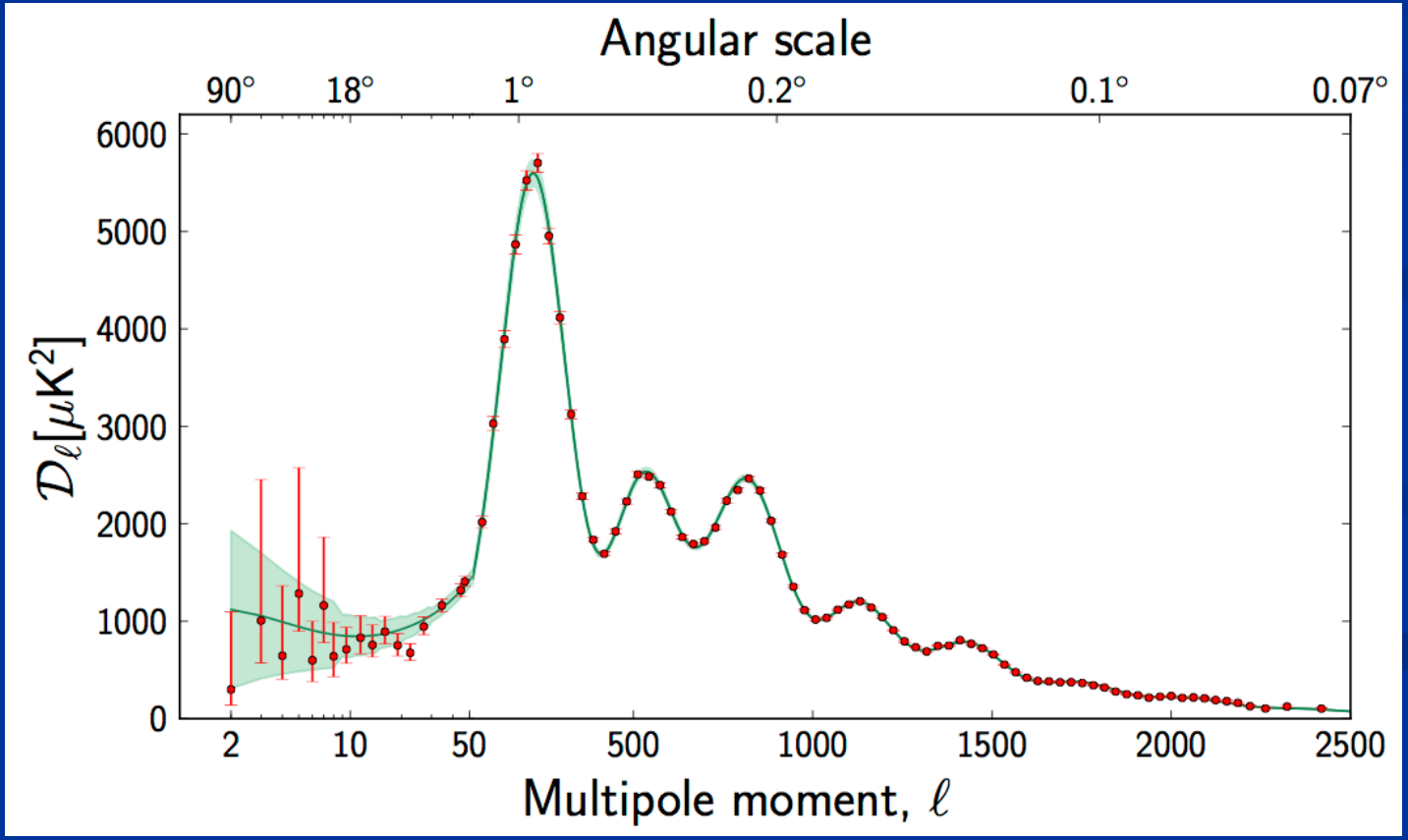


Kontrast

Winkel

ca 10 Grad ca 1 Grad

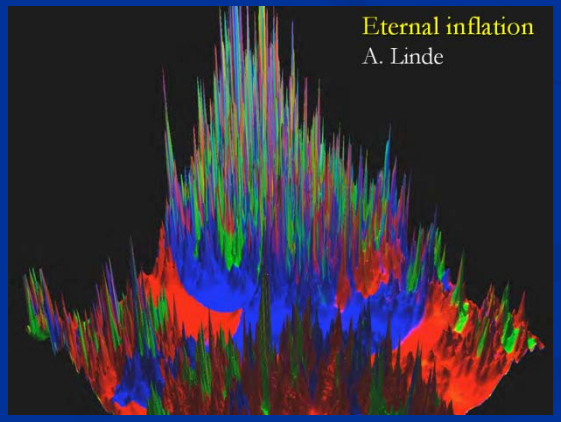
(5) Quantenfluktuationen in der Anfangsphase des Universums werden heute beobachtbar !



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 ?

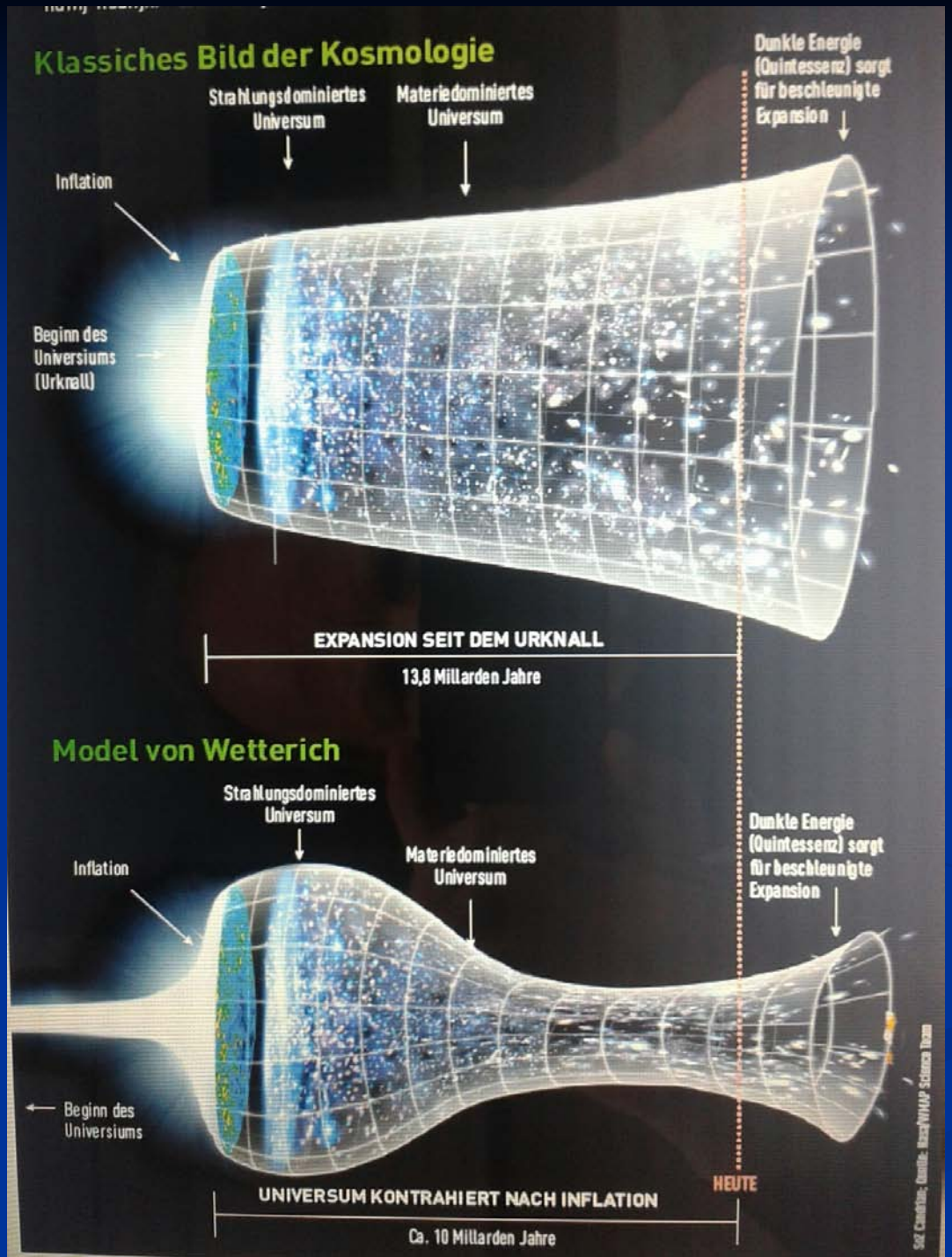
Bild : pm-magazin

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 !

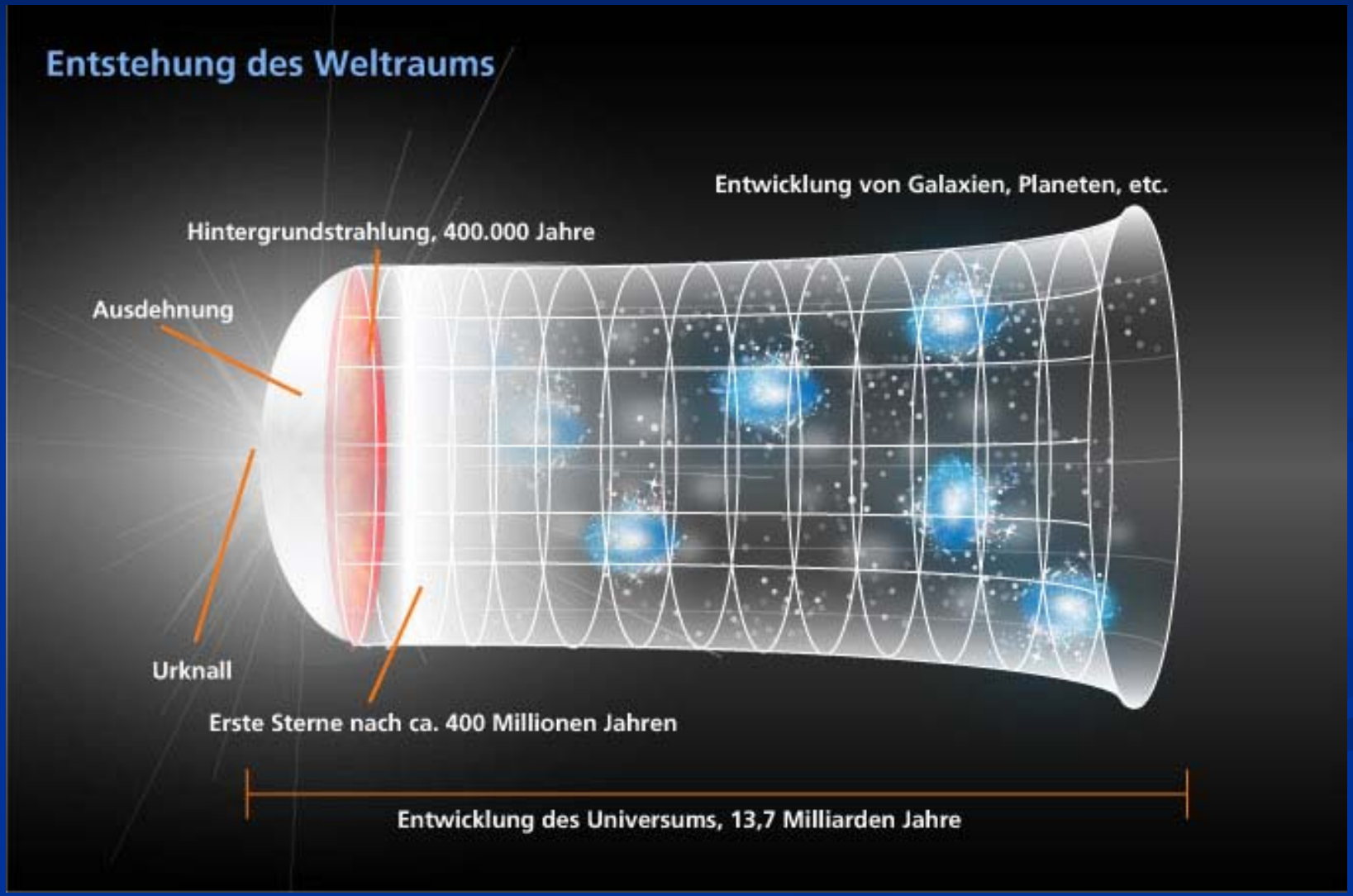
- Einfaches Modell mit wachsenden Teilchenmassen : Kosmon und Inflaton sind das gleiche Feld.



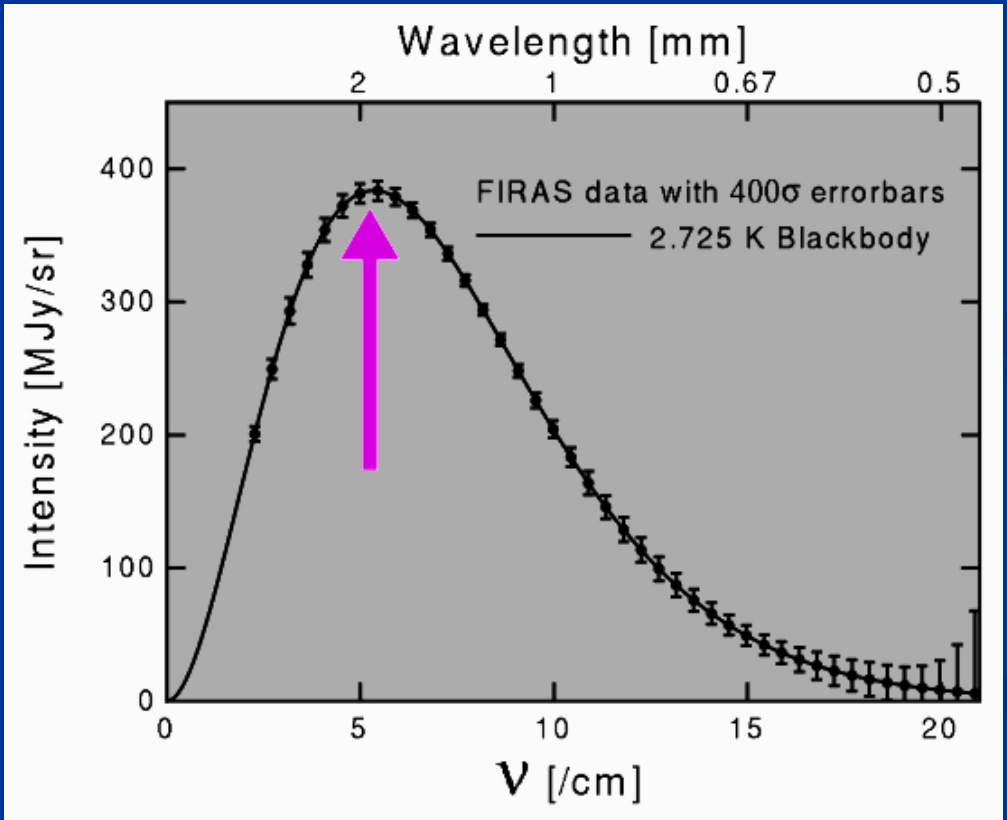
Sonntagszeitung
Zuerich
Laukenmann

Zusammenfassung

(1) Das Universum entwickelt sich



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

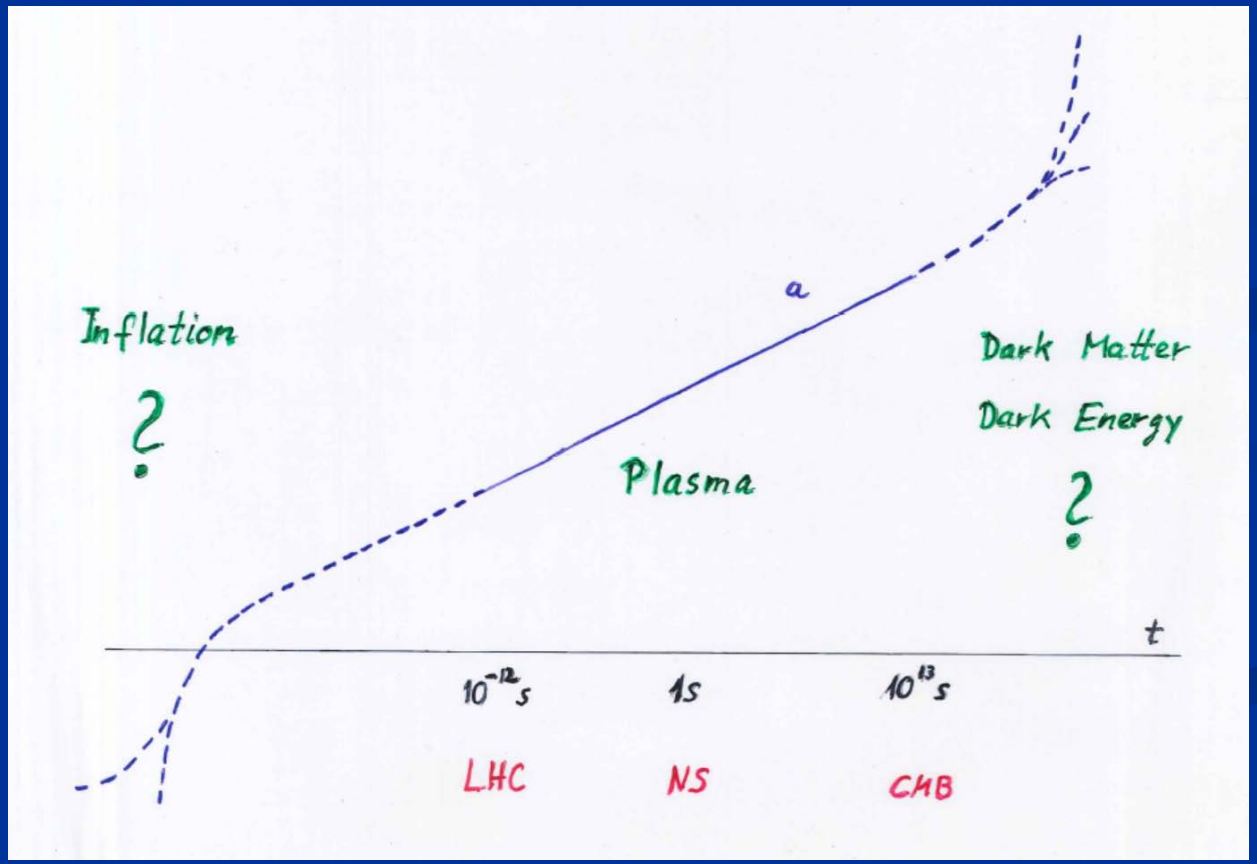


Planck – Spektrum (COBE)

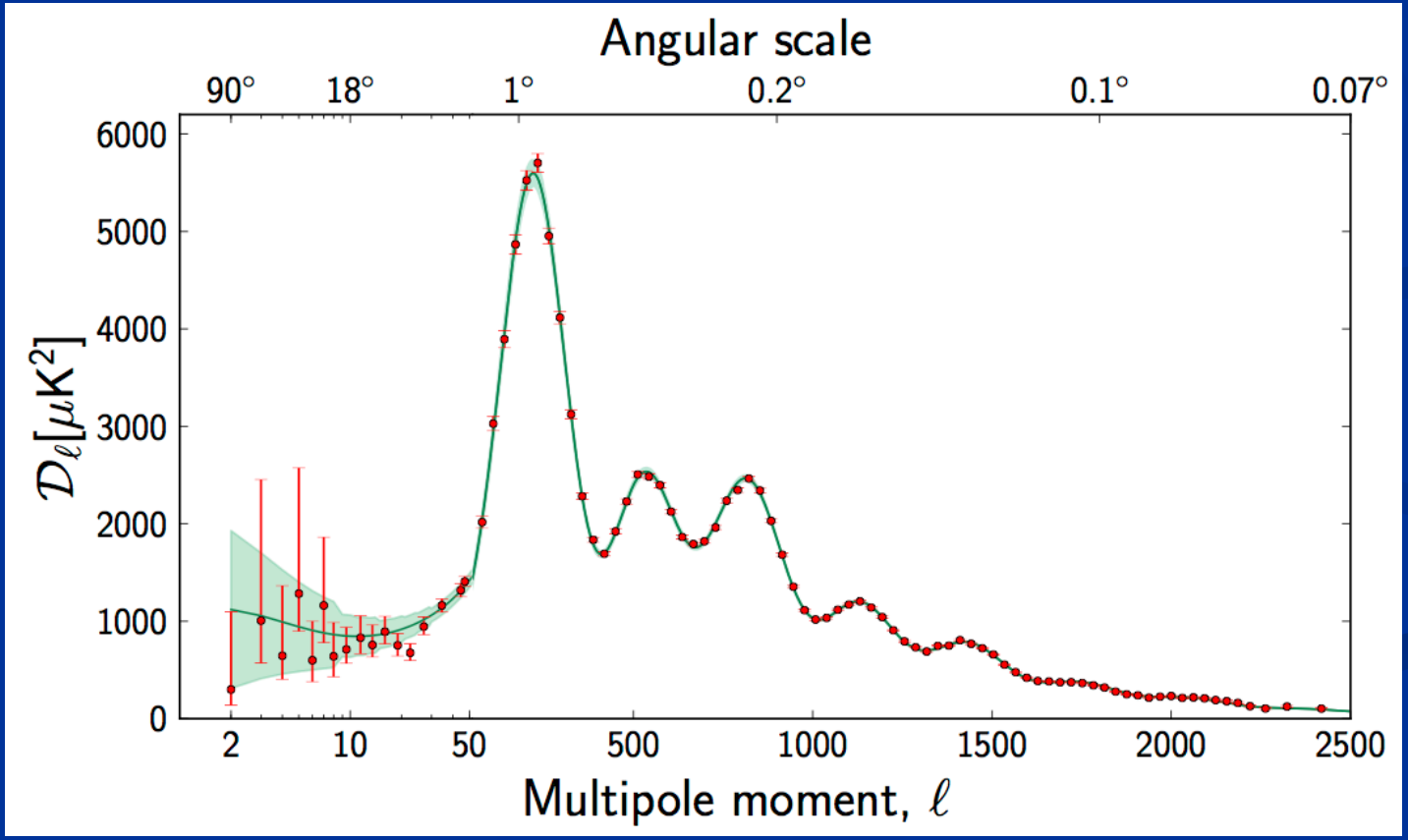
Quantenmechanik auf astronomischen Skalen

(3) Statistische Beschreibung des Universums erlaubt Präzisionskosmologie

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



(5) 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