



# Frontiers of Extragalactic Astrophysics

Silke Britzen

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn

E-mail: [sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de](mailto:sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de)

Internet: <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/>

Tel.: 0228 525 280

Vorlesungs-Information: Kommentiertes Vorlesungsverzeichnis, Universität Heidelberg  
<http://www.kip.uni-heidelberg.de/veranstaltungen/#up>

- 10.10.08: Überblick über die Themen des Semesters
- 24.10.08: Kurze Einführung in die String-Theorie
- **07.11.08: Urknall & Inflation, Teil I**
- **21.11.08: Urknall & Inflation, Teil II**
- 05.12.08: Universum & Multiversen
- 19.12.08: Wurmlöcher und Schwarze Löcher

## *Weihnachtsferien*

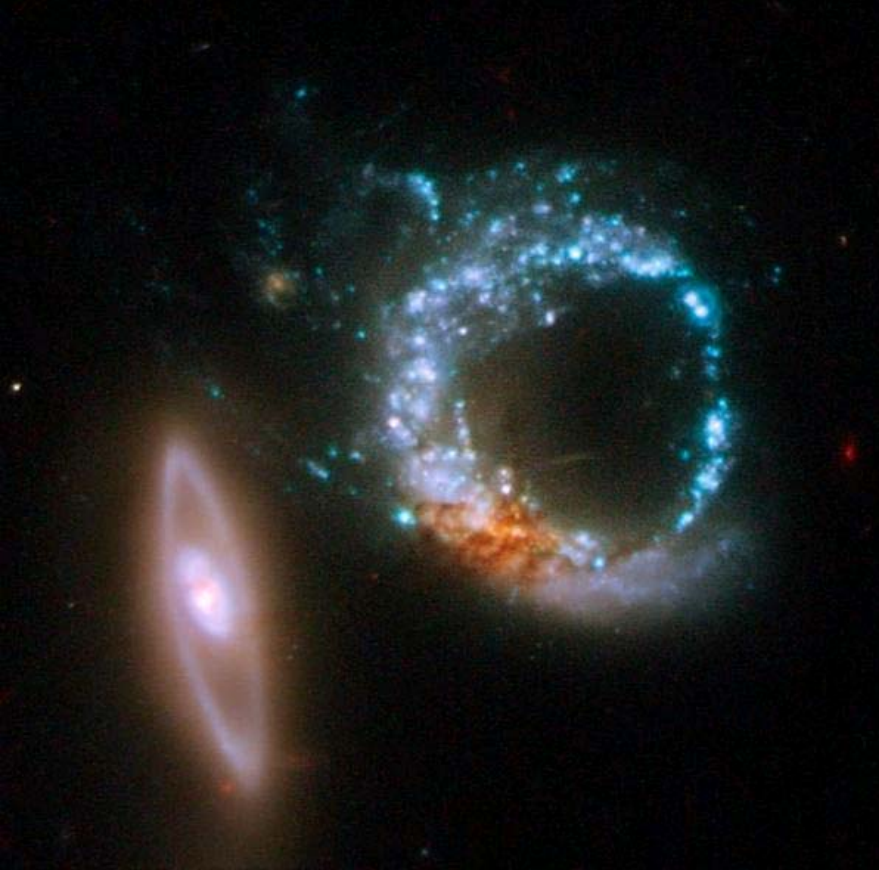
- 09.01.09: Zeitreisen & Zeitmaschinen
- 23.01.09: GLAST

- Programm:
  - Aktuelles
    - Wechselwirkungen
    - etc.
  - Urknall-Theorie
    - Was war der Anfang unseres Universums?
    - Woher wissen wir, daß der Urknall stattgefunden hat?
    - Planck
    - Wie lief der Urknall ab?
    - Schönheitsfehler der Urknall-Theorie
  - Inflation
    - Warum ist eine inflationäre Phase erforderlich?
    - Wie kann die Inflation erzeugt/erklärt werden? Welche Modelle gibt es? Welche Rolle spielt die Stringtheorie?
    - Experimentelle Überprüfung der Inflation
  - Zusammenfassung

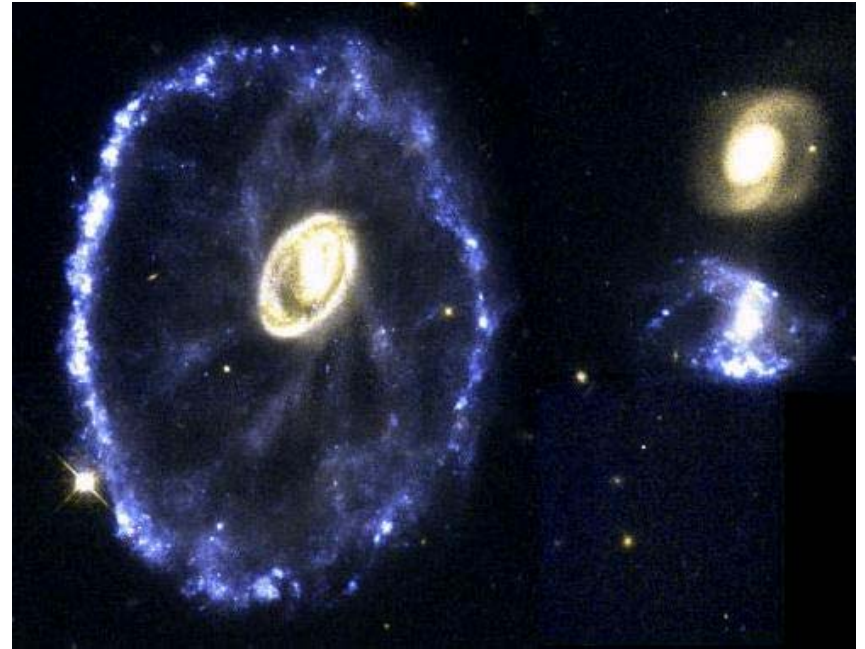


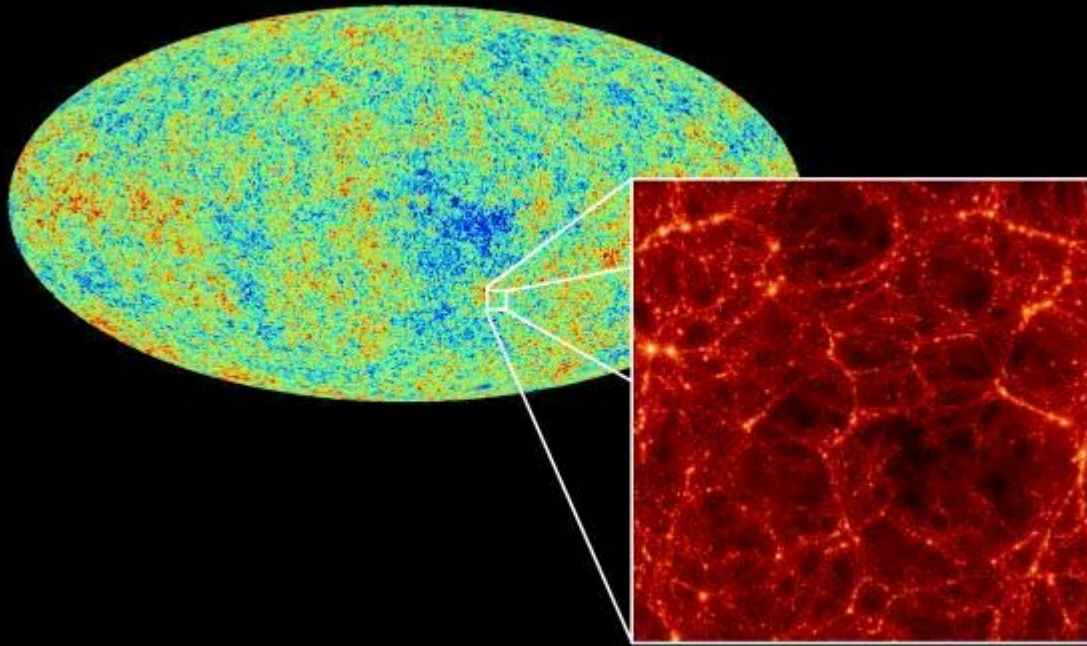
**AKTUELLES**

# Hubble zurück



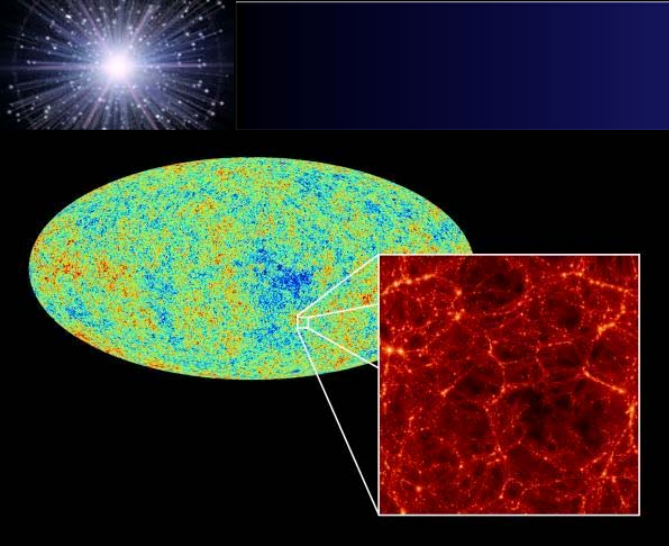
- Neustart der Reserveelektronik, arbeitete 1 Monat lang nicht, 25.10. neu gestartet
- Unklar wann Reparaturmission stattfinden wird
- Arp 147 (Sternbild Walfisch, 400 Mio Lichtjahre entfernt): wechselwirkende Galaxien
- Linke Galaxie hat sich durch die rechte Galaxien hindurchbewegt, dadurch entstand der blaue Ring mit starker Sternentstehung
- Roter Teil im blauen Ring: vermutlich der Original-Kern der blauen Galaxie



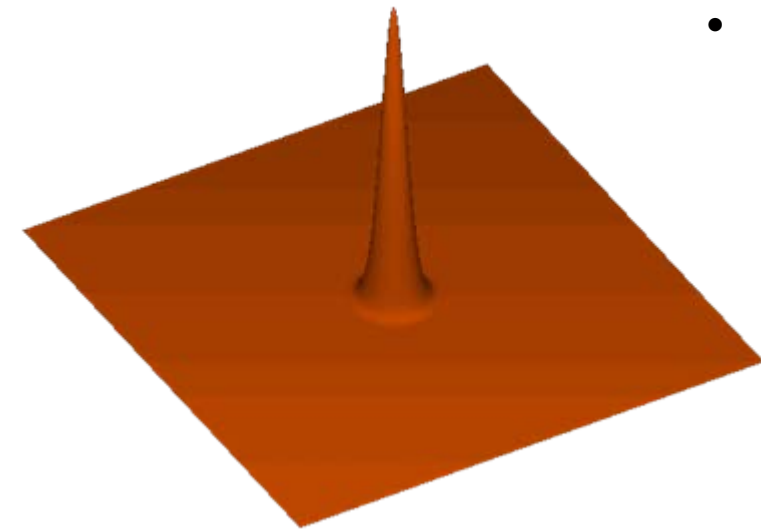


- SDSS-III, 3. Kartierungs-Programm des Sloan-Digital Sky Surveys begann im Sommer 2008, 4 Komponenten-Durchmusterung, wichtigste: BOSS, Baryon Oscillation Spectroscopic Survey
- Variationen in der Dichte des flüssigen Universums hinterließen zwei Kennzeichen im durchsichtigen Himmel:
  - Temperaturvariationen – Anisotropien in der Hintergrundstrahlung (CMB)
  - Dichteveränderungen – Galaxienanhäufung, barionische Oszillationen (BAO)
- 1 Grad Anisotropie des CMB und 500 Mio Lichtjahre Häufung des BAO sind stark miteinander korreliert – die Standardgröße für das Universum gemessen vom BAO kann aus dem CMB für jede Epoche seit der Entkopplung berechnet werden

# Dunkle Energie



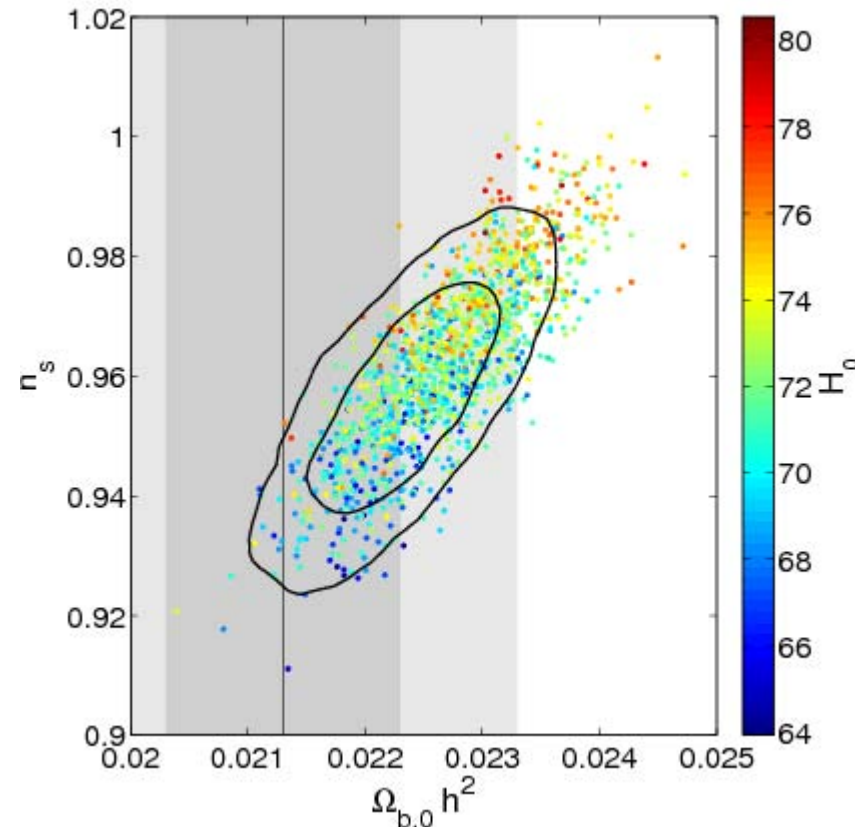
- BOSS: 10 000 Quadratgrad bis zu einer Rotverschiebung von  $z=0.7$  sollen gemessen werden, 1.5 Mio Galaxien; 200 000 Quasare bis zu einer Rotverschiebung von  $z=2$
- Galaxien: Geometrische Tests (Winkel zw. Galaxien) zeigen, um wieviel sich der Standard ausgedehnt hat und beschleunigt seit die Oszillationen eingefroren wurden
- Quasare: Wasserstoffabsorption in den Spektren der Quasare zeigt die Gasverteilung im Universum an
- Fragen:
  - War die Dunkle Energie konstant oder variabel?
  - Eine Illusion? (Supernova und BAO Studien sind unabhängig)
- Angestrebte Genauigkeit: 1%





<http://www.great08challenge.info/>

- GREAT08: GRavitational lEensing Accuracy Testing 2008 PASCAL Challenge: Dunkle Materie und Dunkle Energie bis April 2009
- Mithilfe der Untersuchung von Gravitationslinsenwirkung
- Dark Energy Survey (DES) in Chile
- Pan-STARRS in Hawaii
- Space missions by the European Space Agency (JDEM)
- Statistische Methoden
- <http://cosmocooffee.info/>
- <http://cosmocooffee.info/viewforum.php?f=10>
- <http://cosmologist.info/cosmomc/>





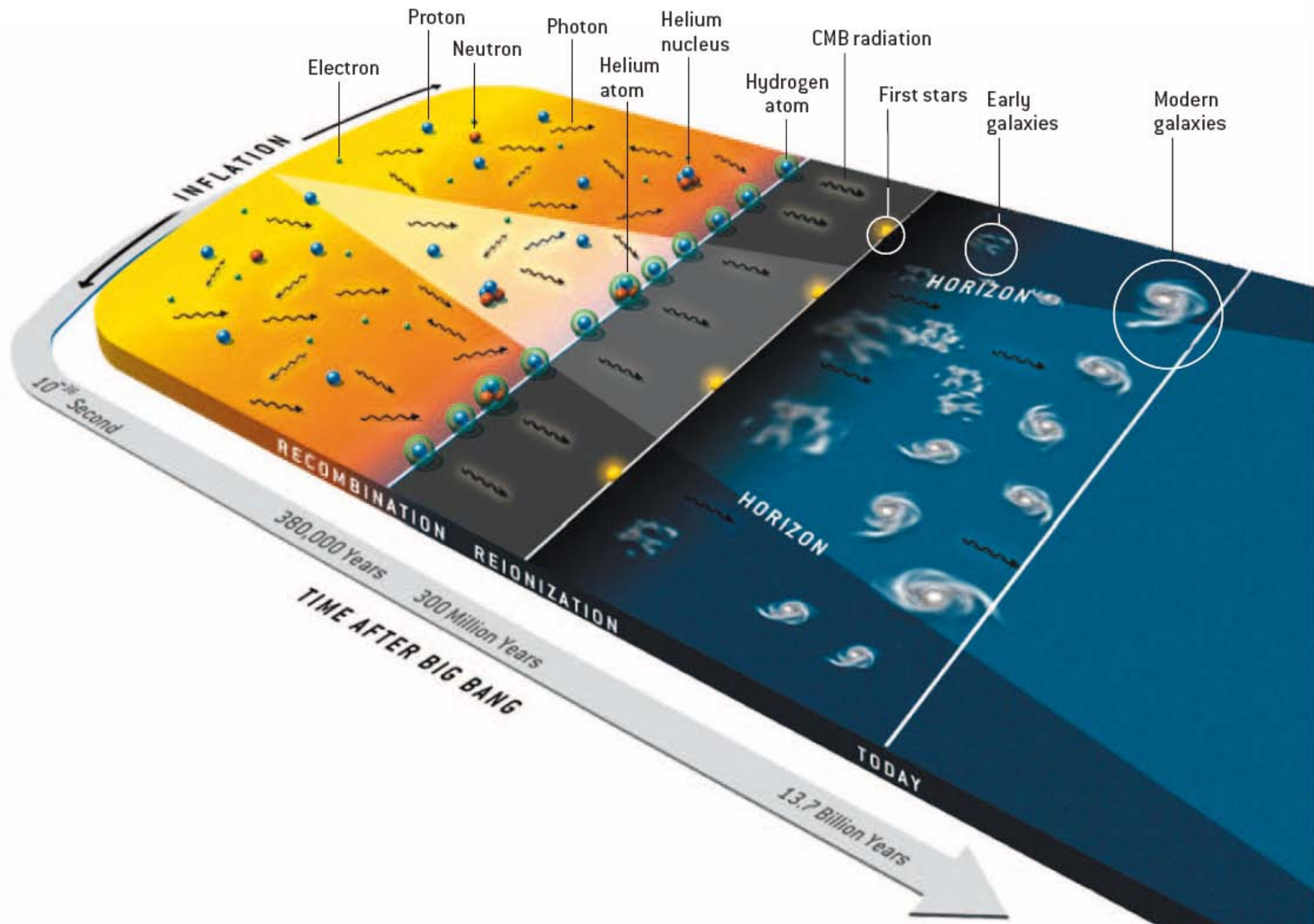


Der „Urknall“



@Pedroon

THE HURBLE TELESCOPE FINNALLY SEES  
THE BEGINNING OF THE UNIVERGE.





- Kosmologie im Netz unter:

<http://www.tim-thompson.com/cmb.html>





- Pionier des Urknall-Modells war Abbe Georges Lemaitre (1894-1966), fand zeitgleich, aber unabhängig von dem russischen Mathematiker Alexandr A. Friedmann dynamische Modelle für das Universum
- Modelluniversen können expandieren oder kollabieren, sogar im Wechsel (oszillieren)
- Lemaitre unternahm eine Extrapolation eines sich ausdehnenden Weltalls in die Vergangenheit zu kleinen kosmischen Radien hin. Dabei entdeckte er ein beliebig kleines Universum, was er als die ‚Geburt des Raumes‘ bezeichnete (Nature, 1931)
- Physikalisch gesehen ist der Urknall der Beginn des Universums aus einem unendlich heißen, unendlich dichten und unendlich kleinen Zustand, der so genannten Urknallsingularität – **Singularität** ist unausweichliche Konsequenz von Friedmanns und Lemaitres Rechnungen:

**DER KOSMOS HAT EINEN ANFANG!!!!**

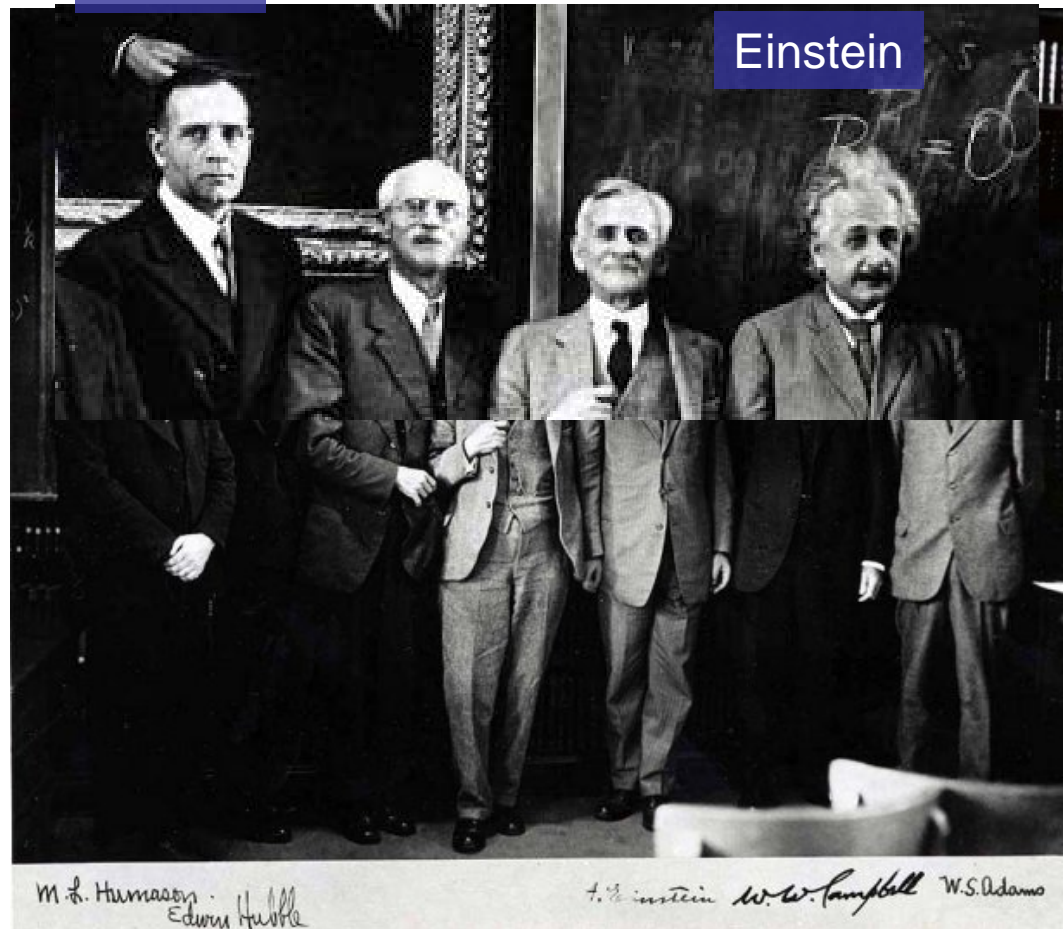
In den Anfängen der relativistischen Kosmologie wird von Einstein dagegen ein STATISCHES Universum favorisiert ...

# Was bedeutet das Urknall-Modell ?

- Das Modell liefert einen Rahmen, eine Geschichte
- Um es wissenschaftlich zu fundieren, ist eine theoretische Basis notwendig – wie funktioniert die Expansion wirklich??
- **Die Theorie wurde von Einstein ausgearbeitet, BEVOR die Expansion von Hubble entdeckt wurde**

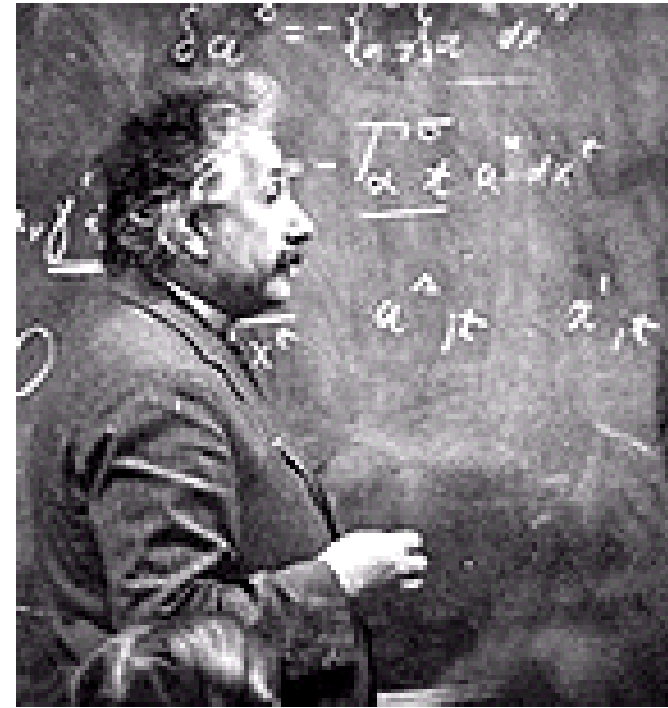
Hubble

Einstein



# Eine Theorie der Expansion

- Spezielle Relativität:
  - Beschreibt die Welt gesehen von verschiedenen Beobachtern die sich mit konstanter relativer Geschwindigkeit bewegen
  - Zeitdilatation
  - Längenkontraktion
  - $E=mc^2$
- Allgemeine Relativität
  - Beschreibt die Welt gesehen von verschiedenen Beobachtern die sich beschleunigt relativ zueinander bewegen
  - Erklärt die Gravitation als Konsequenz der Geometrie
    - Raumzeit erzählt der Materie, wie sie sich bewegen soll
    - Materie erzählt der Raumzeit, wie sie sich krümmen soll
- Expansion ist nicht Expansion in einen existierenden Raum sondern Expansion DES Raums
- Um dies zu verstehen, benötigt man eine Theorie, wie sich die Raumzeit ändert





- Frage nach der Dynamik des Universums
- erste und lange Zeit einzige Überlegungen von *Isaac Newton* zum endlichen und unendlichen Universum
- Erst *Einsteins* „Allgemeine Relativitätstheorie“ brachte neue Impulse. Nach Abschluss seiner Theorie im Jahre 1916 wollte er 1917 eine Lösung für seine Gleichungen finden, in der die Raum-Zeit-Geometrie des gesamten Universums beschrieben wäre.
- *Einsteins* Annahme: Die Lösung ist **homogen, isotrop und statisch**.
- Zur Lösung musste *Einstein* die sogenannte „**kosmologische Konstante**“ einführen. Damit ließ sich die Gravitation über große Entfernungen erklären.

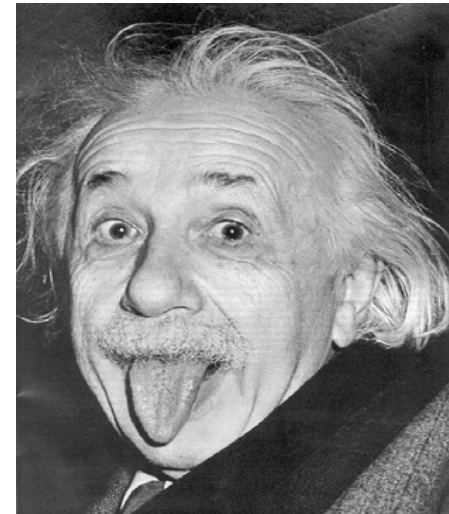
heute allgemein anerkannte Theorie über die Evolution unseres Universums

mit folgenden **Postulaten**:

- vor 12-14 Milliarden Jahren war das gesamte Universum auf wenige Millimeter konzentriert
- seitdem hat es sich bis von diesem Zustand extrem hoher Dichte und Temperatur bis zum heutigen Erscheinungsbild ausgebreitet

**Grundlage der Theorie** bilden:

- allgemeine Relativitätstheorie
- kosmologische Prinzip
- olbersches Paradoxon





# Oberssches Paradoxon

- Das **Oberssche Paradoxon** geht auf den deutschen Astronomen [Heinrich Wilhelm Olbers](#) zurück, der dieses Problem im Jahre 1826 formulierte, nachdem es bereits von anderen Wissenschaftlern erkannt worden war. Es geht von der Frage aus, warum der [Nachthimmel](#) dunkel ist, obwohl man doch erwarten könnte, in *jeder* Richtung einen Stern zu sehen, wenn das Weltall [unendlich](#) und im Mittel nach dem [Kopernikanischen Prinzip](#) gleichförmig wäre. Der Nachthimmel müsste also strahlend hell sein.

Unterstellt man, dass das [Universum](#) eine unendlich große Zahl an gleichmäßig verteilten räumlich ausgedehnten [Sternen](#) hat, dann gilt: Die Gesamthelligkeit eines Sternes ist unabhängig von der Entfernung eines Beobachters (d. h., das Licht zerstreut sich zwar, erlischt allerdings nicht).

Ist das Universum unendlich, ist auf jeder möglichen Sichtlinie irgendwann ein Licht ausstrahlender Himmelskörper, sofern er nicht punktförmig ist.

Daraus folgt: Jeder Punkt am Himmel sollte dieselbe Helligkeit wie die Oberfläche eines Sternes besitzen.

Das widerspricht aber deutlich den Beobachtungen.

Die Voraussetzungen, die zu dieser Zeit weitgehend akzeptiert wurden, konnten also nicht stimmen. Kepler, der bereits ähnliche Überlegungen hatte, sah dies als ein Argument für ein endliches Universum oder zumindest eine endliche Zahl von Sternen.



# Olberssches Paradoxon

- **Heutige Erklärungen des dunklen Nachthimmels**
- Die heute (üblichste) Vorstellung zur Erklärung des dunklen Nachthimmels ist, dass das endliche Alter des Universums und Wirkungen der [allgemeinen Relativitätstheorie](#) auf unsere Ansicht des [Urknalls](#) in der Tat ein räumlich begrenztes Universum voraussetzen. Die wahre Ursache für den dunklen Sternenhimmel habe aber mit der [Rotverschiebung](#) zu tun.



# Kosmologisches Prinzip

- Unter **Kosmologisches Prinzip** sind zwei Grundannahmen in der naturwissenschaftlichen Kosmologie zusammengefasst, die deren Modellen vom Weltall als Ganzes zu Grunde liegen. Es ist eng verknüpft mit dem Kopernikanischen Prinzip. Das Kosmologische Prinzip wurde 1933 von dem Astrophysiker Edward A. Milne eingeführt.
- **Das Weltall ist homogen**, d.h. es stellt sich einem Beobachter unabhängig von dem Punkt des Raumes, indem er sich befindet, immer gleich dar (Prinzip der Homogenität, auch Kopernikanisches Prinzip genannt).
- **Das Weltall ist isotrop**, d.h. es stellt sich dem Beobachter unabhängig von der Beobachtungsrichtung im Raum immer gleich dar (Prinzip der Isotropie).

# Einstein's Gleichung



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

- Die Gleichung setzt die Änderungen der Raumzeit in Beziehung zu der Materie in ihr
- ART benötigt nicht-euklidische Geometrie
- Der Inhalt bestimmt die Entwicklung (kontinuierliche Expansion, Rekollaps, etc.)
- Theorie spezifiziert nicht Eingangsbedingungen
- Erklärt NICHT den Big Bang, liefert aber den Rahmen um die Geschehnisse DANACH berechnen zu können
- Beschreibt, wie der Raum um die Massen gekrümmt ist
- Der Hauptparameter ist die totale Dichte  $\Omega$
- Die Theorie sagt Relationen zwischen beobachtbaren Parametern voraus
  - Expansion mit der Zeit
  - Angular diameter distance vs. Expansion
  - Alter des Universums
- Einstein wollte ein statisches Universum und fügte einen Term hinzu, damit es ein statisches Universum wurde (1919)
- Hubble's Entdeckung erzeugte Probleme (1929)
- Wie stark expandiert das Universum an einem Tag?

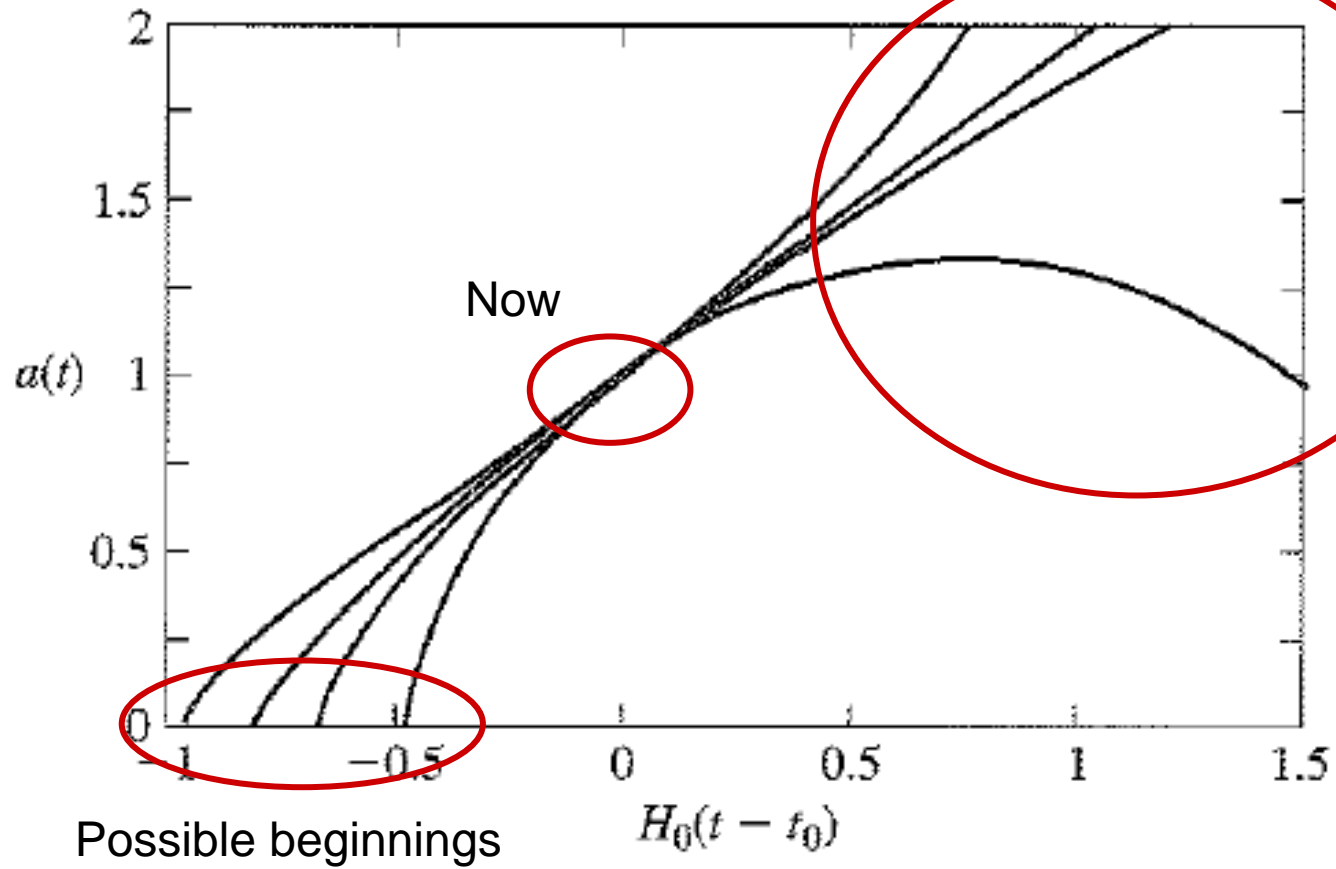
1m wächst um  $2 \times 10^{-13}$  m an einem Tag

# Was sagt die ART voraus?

- Es gibt eine kritische Energiedichte im Universum
- Das Verhältnis der realen Dichte zu dieser Energiedichte bestimmt, wie sich die Expansion des Universums entwickelt
- Ist  $\Omega$  zu groß, wird die Gravitation die Expansion stoppen und es zu einem Kollaps kommen
- Ist  $\Omega$  zu gering, wird die Gravitation die Expansion nicht stoppen können und die Dichte geht kontinuierlich gegen 0

$$\Omega_c = \frac{\overset{\text{Expansionsrate}}{3H^2}}{8\pi G \underset{\text{Stärke der Gravitation}}{1}}$$

Scale of the universe relative to now



Time relative to now in units of the age of the universe



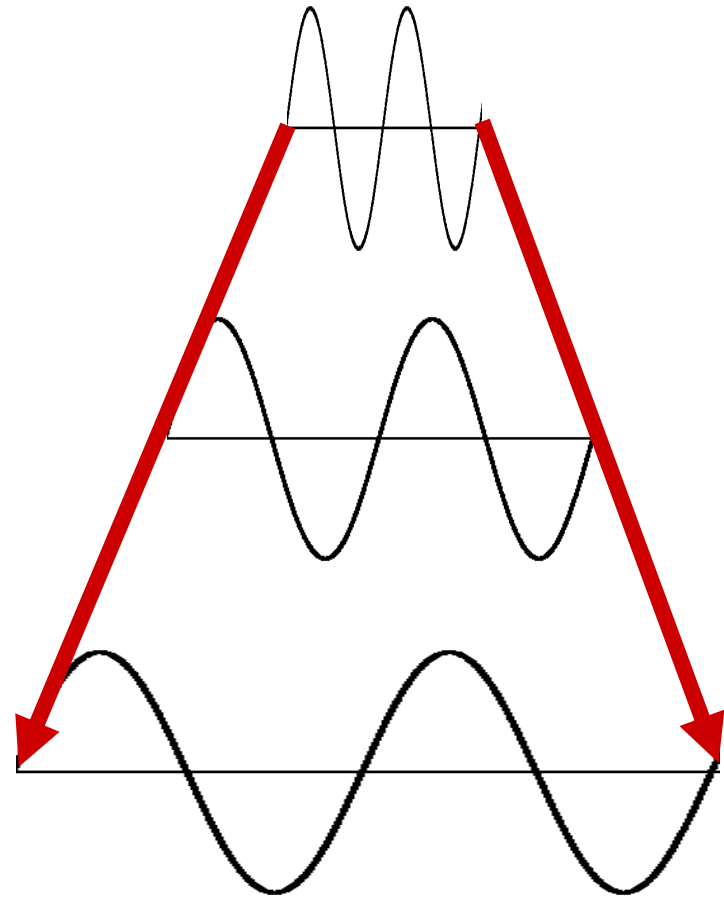


# Hubble's Entdeckung

# Rotverschiebung und Dopplerverschiebung

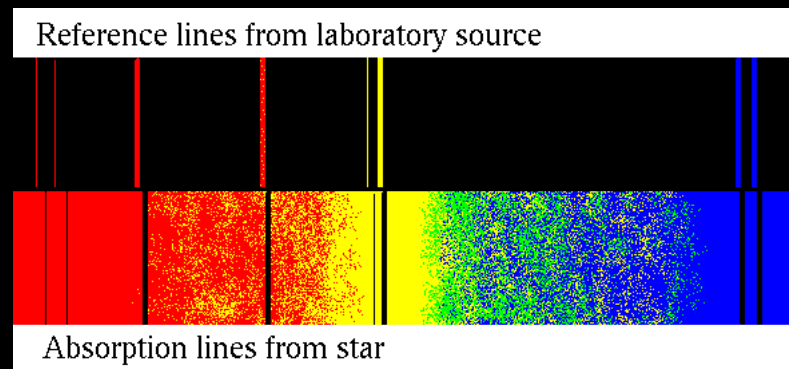
- Die Rotverschiebung  $z$  wird bestimmt durch Vergleich der Labor-Wellenlänge  $\lambda_0$  mit der beobachteten Wellenlänge  $\lambda$
- Bewegen sich Objekte weg vom Beobachter, wird das Licht rotverschoben
- Die Geschwindigkeit der Bewegung kann aus  $z$  bestimmt werden.
- Nicht die Objekte bewegen sich – der Raum expandiert und dehnt das Licht

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

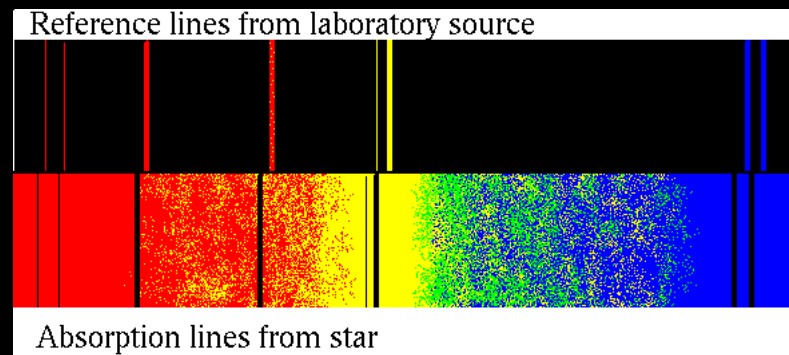


# Doppler

Vergleich der Laborwellenlänge mit der eines blau-verschobenen Objekts



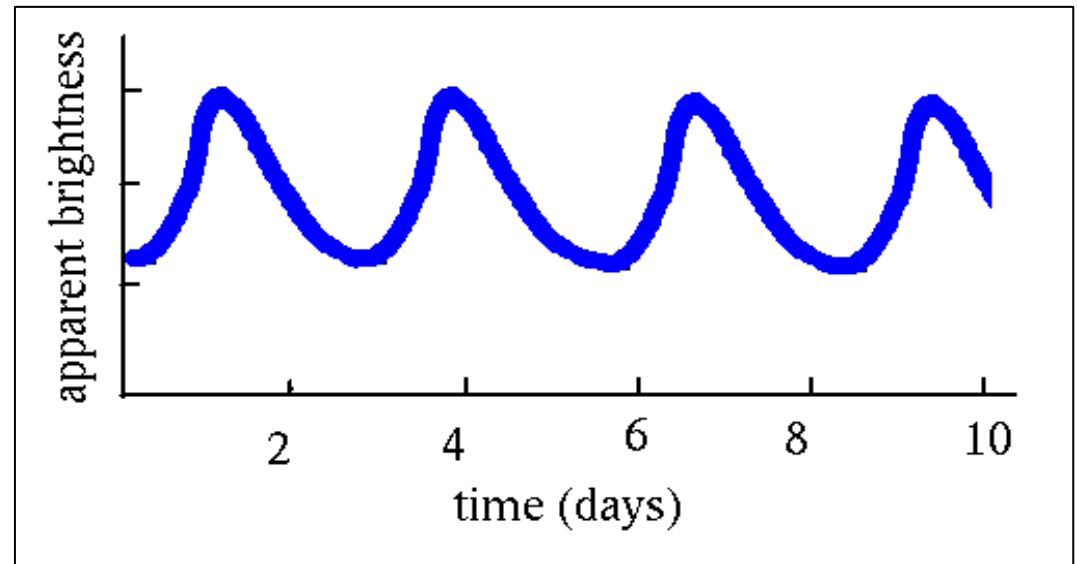
Vergleich der Laborwellenlänge mit der eines rotverschobenen Objekts



# Das Hubble-Gesetz

- *Edwin Hubble* untersucht 1923 M31 mit hochauflösendem Teleskop und berechnet die Entfernung auf 900.000 Lichtjahre anhand der Helligkeit einzelner Sterne (später mehrmals korrigiert auf etwa 2.000.000 Lichtjahre).
- Voraussetzung: Der Andromedanebel ist eine Galaxie ähnlich der unseren.
- Cepheiden: variieren periodisch, aus Leuchtkraft kann Distanz ermittelt werden

$$L = K P^{1.3}$$

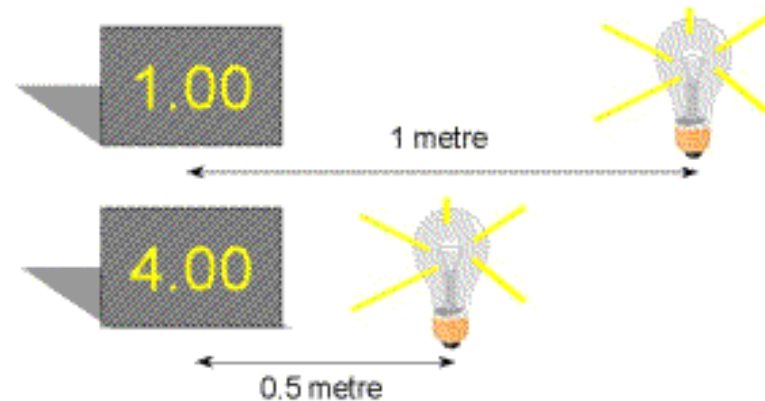


# Standardkerzen

- Kennt man die absolute Helligkeit eines Objekts, kann aus der gemessenen scheinbaren Helligkeit die Distanz gemessen werden
- Cepheiden sind Standardkerzen
- Supernovae auch!!

$$F_{\text{obs}} = L_{\text{abs}} / 4\pi d^2$$

## Measuring Distances with Standard Light Bulbs



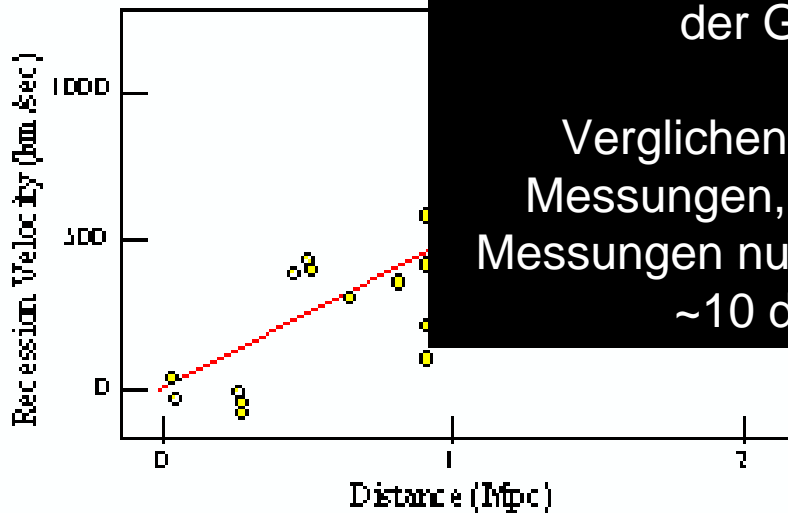
An Object becomes fainter by the square of its distance

# Das Hubble-Gesetz

- Weitere Nebel/Galaxien werden durch Hubble vermessen.

- *Hubble* entdeckt 1929: Bis auf wenige, sehr nahe Galaxien weisen alle Galaxien Rotverschiebungen in ihren Spektren auf. Dabei nehmen die Rotverschiebungen mit der Entfernung von uns zu!

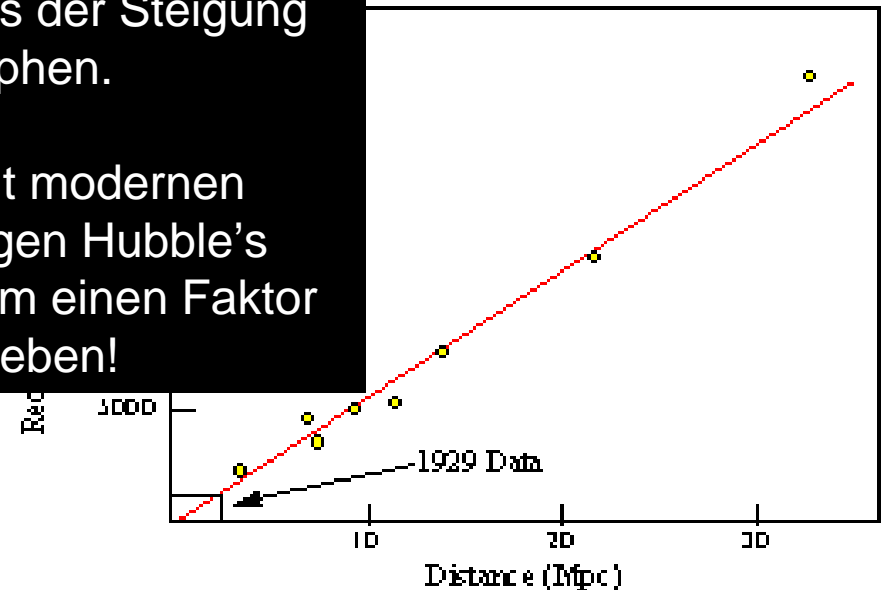
Hubble's Data (1929)



Die Hubble Konstante  
 $H_0 = 558 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$   
wird bestimmt aus der Steigung  
der Graphen.

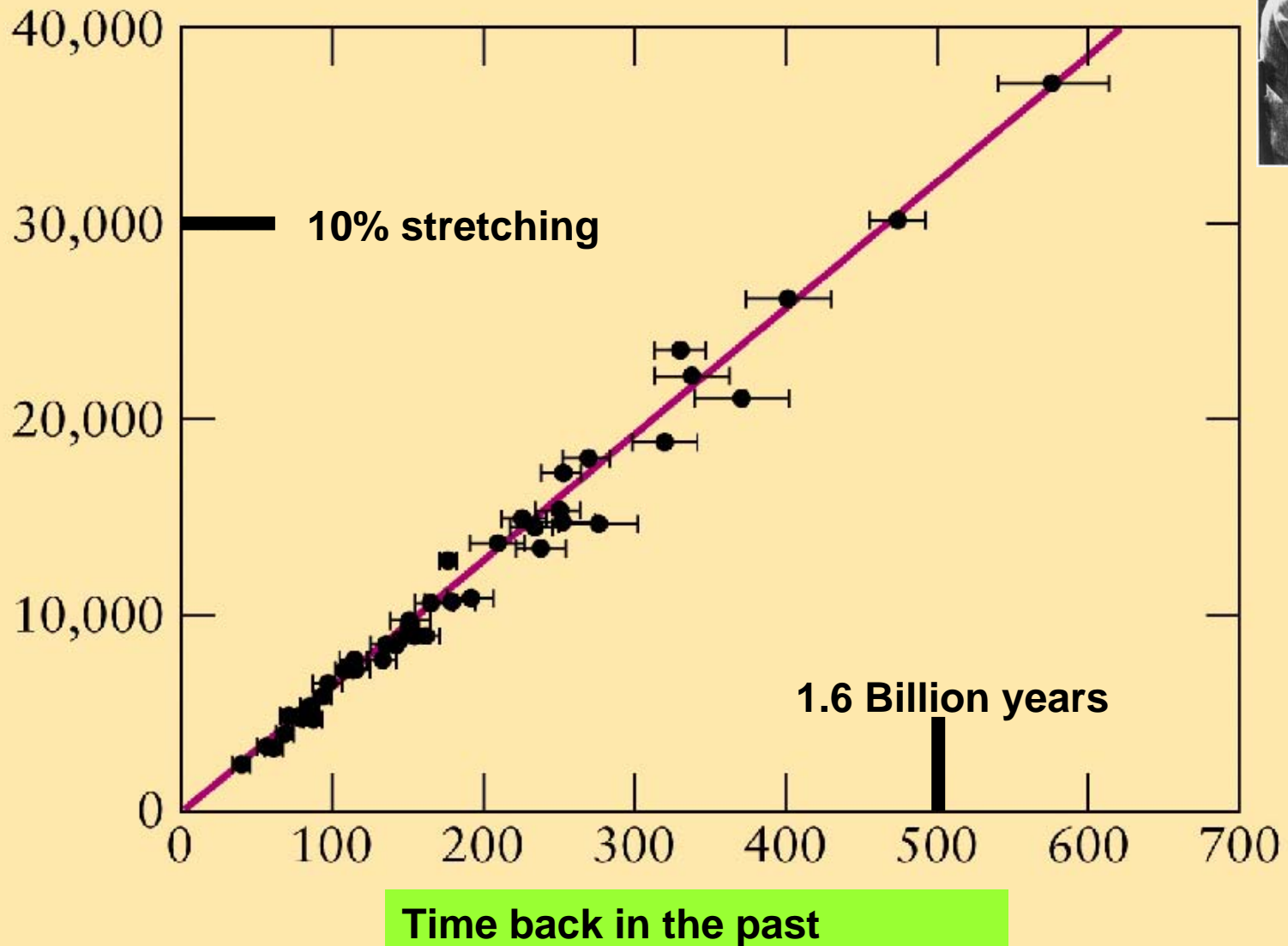
Verglichen mit modernen  
Messungen, lagen Hubble's  
Messungen nur um einen Faktor  
~10 daneben!

Lumason (1931)



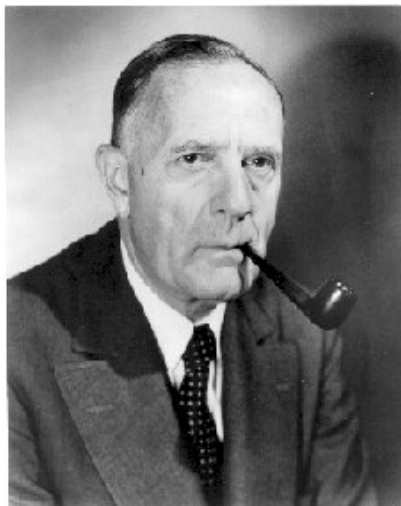


**Expansion of the Universe**

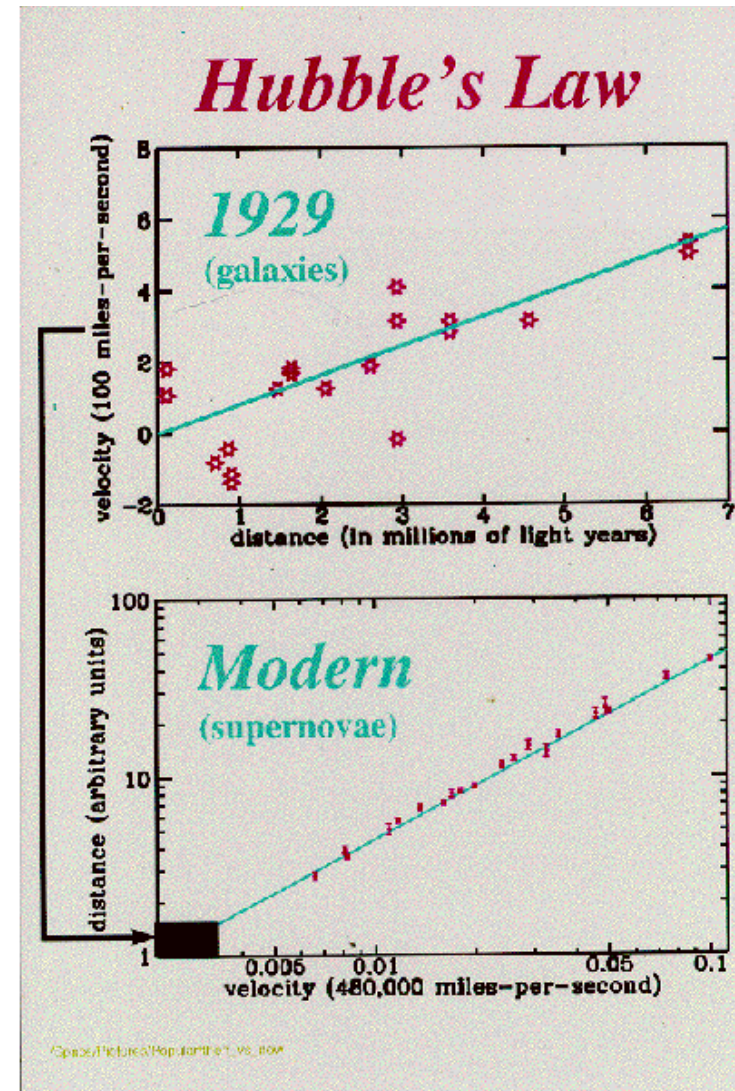


# Hubble's Entdeckung

- 1931 veröffentlicht *Hubble* besseres Beweismaterial.
- Hubble* verifiziert die Proportionalität zwischen Geschwindigkeit und Entfernung von Galaxien mit Geschwindigkeiten bis zu 20.000 km/s.
- Nach damaligen Schätzungen kommt er zu dem Schluss: Eine Geschwindigkeit von 20.000 km/s entspricht einem Abstand von  $120 \cdot 10^6$  Lichtjahren.
- Dieser Quotient heißt **Hubble-Konstante**, obwohl er sich mit dem Alter des Universums ändert (s.u.).
- Die Zahlen werden später des öfteren korrigiert.



Edwin Hubble







$$\frac{\dot{R}(t)}{R(t)} = H$$

$$\dot{r}(t) = v(t) = H \cdot r(t)$$

$$H(t = \text{heute}) = 70 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$$

R(t) : kosmologische Entfernung

r(t) : Abstand zu einer Galaxie

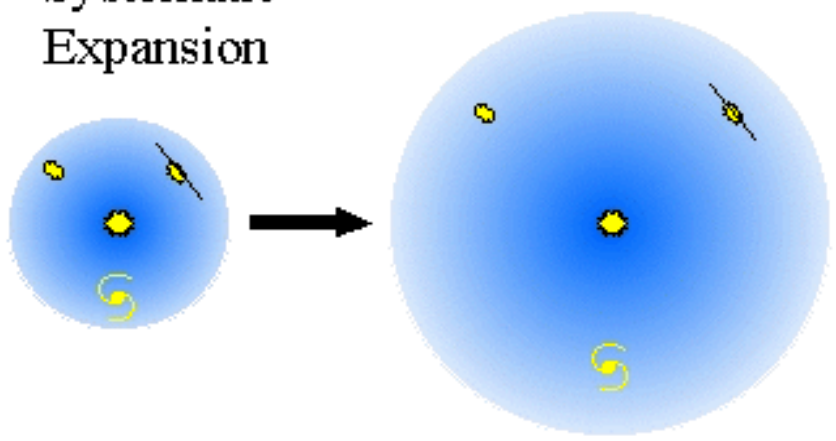
H : Hubble-Konstante

experimentell bestimmt

1 parsec

$$1 \text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m} = 3,26 \text{ Lichtjahre}$$

Systematic  
Expansion





# Wie alt ist unser Universum?

- Voraussetzung: Die Galaxien streben mit konstanter Geschwindigkeit auseinander. Dann waren die Galaxien vor „langer“ Zeit einmal sehr dicht zusammen. Damals muss das Universum entstanden sein!
  - Aus der Geschwindigkeit und dem relativen Abstand zweier Galaxien zueinander lässt sich das Alter des Universums bestimmen.
  - Die Rechnung ergibt: Das Universum ist 20 Milliarden Jahre alt. Dies nennt man die „**charakteristische Expansionszeit**“.
- Aber: Die Galaxien streben nicht mit konstanter Geschwindigkeit auseinander, sondern werden langsamer (Hubble-Konstante ändert sich).
- Weitere Belege führen zu einem **Alter von etwa 15 Milliarden Jahren**: Überlegungen zur Evolution von Sternen, Häufigkeiten verschiedener radioaktiver Isotope auf der Erde (insbesondere: U-235 und U-238)

- Neue Impulse verliehen *de Sitters* Modell von 1917. Es wurde in Europa aber erst 1922 populär. *De Sitter* strebte ebenfalls eine homogene, isotrope und statische Lösung für das Universum an.



- Universum ohne Materie, nur mit  $\Lambda$
- De Sitter 1917:

$$\ddot{a}(t) = \frac{\Lambda}{3} \cdot a(t)$$

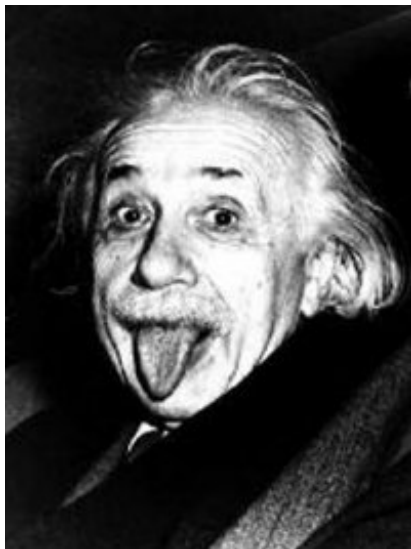
$$a(t) \propto e^{H_\infty \cdot t}$$

$$H_\infty = \sqrt{\Lambda / 3} = \text{const}$$

Exponentiell beschleunigte Expansion

# Die kritische Dichte $\rho_c$

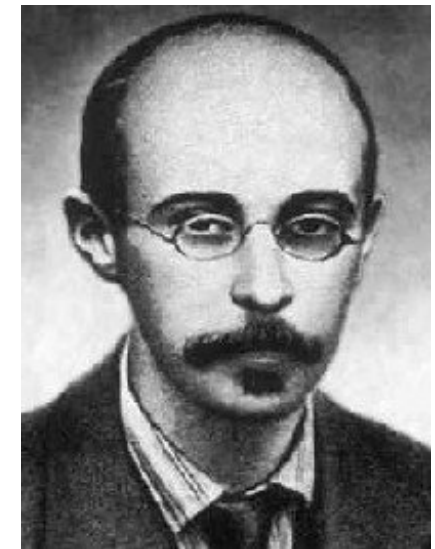
- Aber: *De Sitters* Modell enthielt Fehler. Sein Modell war **nicht-statisch**.
- *Einstein* bedauerte die Einführung der „kosmologischen Konstante“, ließ sich doch eine Lösung ohne diese für den nicht-statischen Fall finden.
- *Alexander Friedmann* fand 1922 die **allgemeine homogene und isotrope Lösung** für Einsteins ursprüngliche Gleichungen.



Albert Einstein



hinten: Albert Einstein, Paul Ehrenfest, Willelm de Sitter  
vorne Arthur Eddington Hendrik Lorentz ; Leiden, Niederlande



Alexander Friedmann



# A. Friedmann



- Gleichungen der Einsteinschen ART  
• (Friedmann-Lemaître Gleichungen ohne Druckterm)

$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_{Materie}(t) + \frac{1}{3} \Lambda - (\text{Krümmungsterm})$$

$$\ddot{a}(t) = \frac{1}{3} \left( -4\pi G \cdot \rho_{Materie}(t) + \Lambda \right) a(t)$$

# Wirkung der **Materie**

- Negativer Beitrag zur Beschleunigung
- Bremst die Expansion
- Könnte sogar zur Schrumpfung führen
- Die Dichte nimmt bei der Expansion ab:

$$\rho_{Materie}(t) \propto \frac{1}{a^3(t)} \xrightarrow{a \rightarrow \infty} 0$$



- Positiver Beitrag zur Beschleunigung der Expansion
- Bleibt konstant mit  $t$
- **Von Einstein 1917 eingeführt** zur Kompensation des negativen Materiebeitrags, um ein statisches Universum zu erreichen
- Nach der Entdeckung der Expansion von Einstein bedauert: “**biggest blunder of my life**“ (≠ „Eselei“!)
- **Die zweitgrösste Entdeckung von Einstein** (nach ART)?


$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + \frac{kc^2}{R^2} = \frac{8\pi}{3}G\rho$$

Friedmann-Gleichung: Dgl für Skalenparameter R,  
k : Vorzeichen-Parameter, entweder -1, 0 oder 1

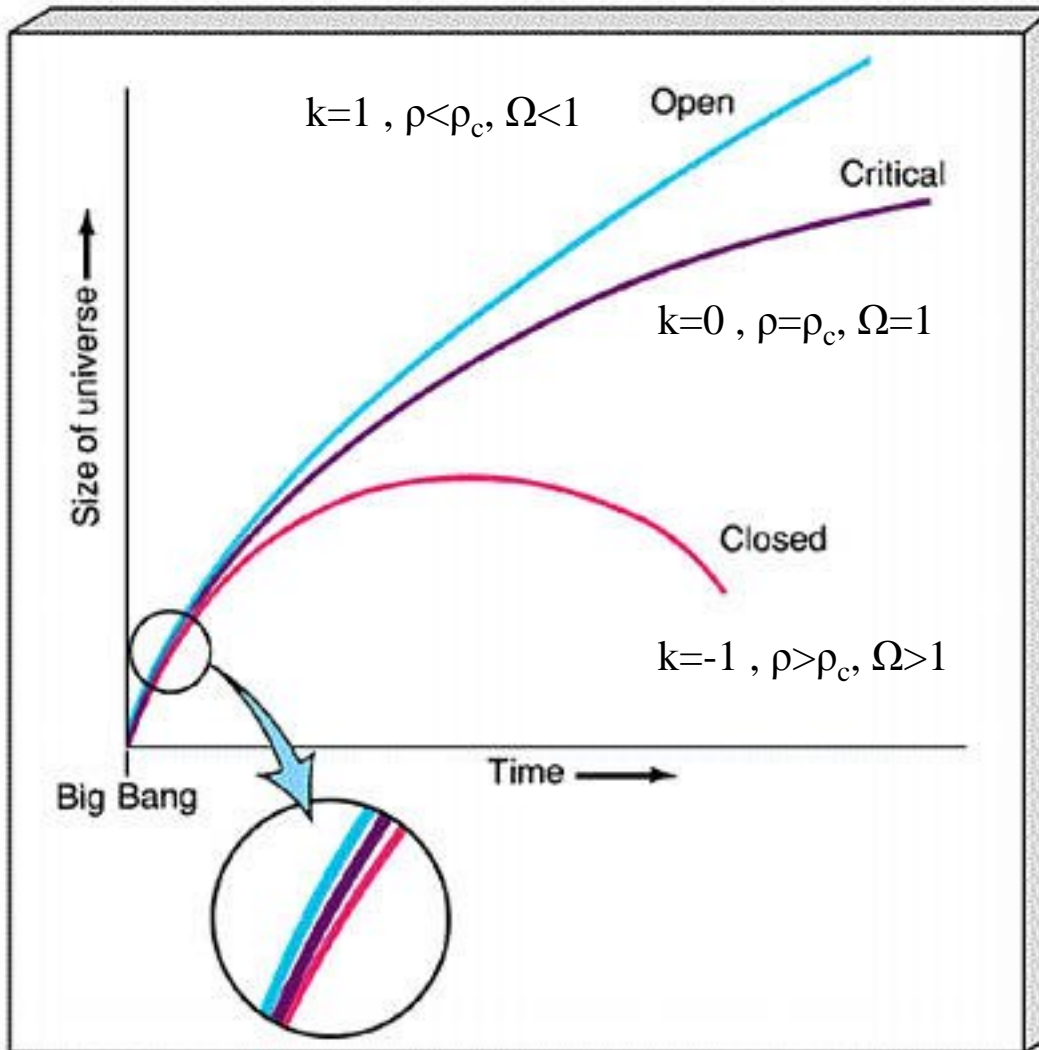
$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

kritische Dichte  $\rho_c$  : Dichte  $\rho$ , bei der k=0 wird

$$\Omega = \frac{\rho(t)}{\rho_c}$$

Einführung des  $\Omega$ -Parameters

- Konsequenzen der Dichte: Die Bewegung der Galaxien wird gebremst.
- Fraglich ist nur, wie stark abgebremst wird: Kann das Universum für alle Zeiten expandieren ( $\rho < \rho_c$  offenes Universum), wird die Expansion zum Stillstand kommen und in eine Kontraktion übergehen ( $\rho > \rho_c$  geschlossenes Universum) oder geht die Expansionsrate asymptotisch gegen Null ( $\rho = \rho_c$  flaches Universum)?



- Stand von 1977: Alles deutet auf ein offenes Universum hin.
- Stand heute:  $\Omega=1$   
Das **Universum ist flach**, dies haben zahlreiche Beobachtungen untermauert.

Offenes, flaches oder geschlossenes Universum?



Gamov, Alpher, Herman  
Penzias & Wilson

erste experimentelle Hinweise für die Urknalltheorie in den 20er Jahren durch den amerikanischen Astronom Edwin Hubble:

- durch **Spektromessungen von Galaxien** und Vergleich mit auf der Erde gemessenen Spektren fand er eine Fluchtbewegung der Galaxien (Spektren **rotverschoben**, je weiter weg desto stärker)

-**Hubble Gesetz:**  $\lambda_b = \lambda_e(1+z)$

$$c z = v = H_0 d$$



Edwin Powell Hubble



George Gamov

Aus diesen Erkenntnissen folgerten Gamov, Alpher und Herman in den 40er Jahren, dass noch ein **Nachrauschen des Urknalls** bei einer Temperatur von ungefähr **5K** vorhanden sein müsste.

1964 entdeckten die beiden Radio Ingenieure **Arno Penzias** und **Robert Wilson** bei der Eichung einer Antenne **ein Strahlungssignal im Mikrowellenlängenbereich** ( $\lambda = 7,15 \text{ cm}$ )

Da dieses Signal keine periodischen Schwankungen zeigte und aus allen Richtungen in gleicher Stärke kam, schien es **kosmischen Ursprungs** zu sein.



(beide erhielten 1978 den Nobelpreis für ihre Entdeckung)

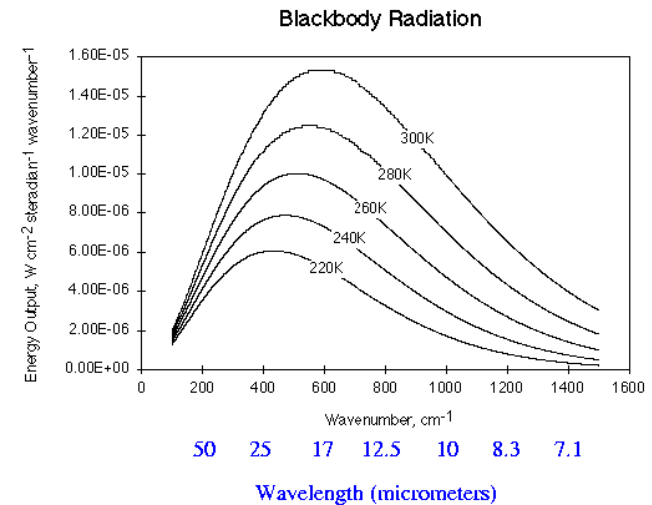
# Planck'sches Strahlungsgesetz:

Während der strahlungsdominierten Ära befanden sich Strahlung und Materie im thermodynamischen Gleichgewicht. Durch die Thomsonstreuung an freien Elektronen war das Universum für die Photonen undurchsichtig.

Das Abkühlen ermöglicht Rekombinationen, die mittlere freie Weglänge der Photonen nimmt zu, sie entkoppeln von der Materie.

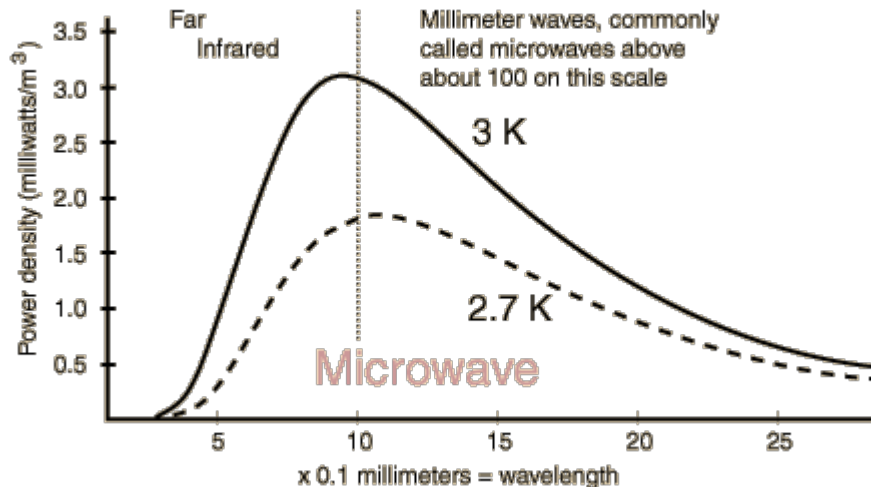
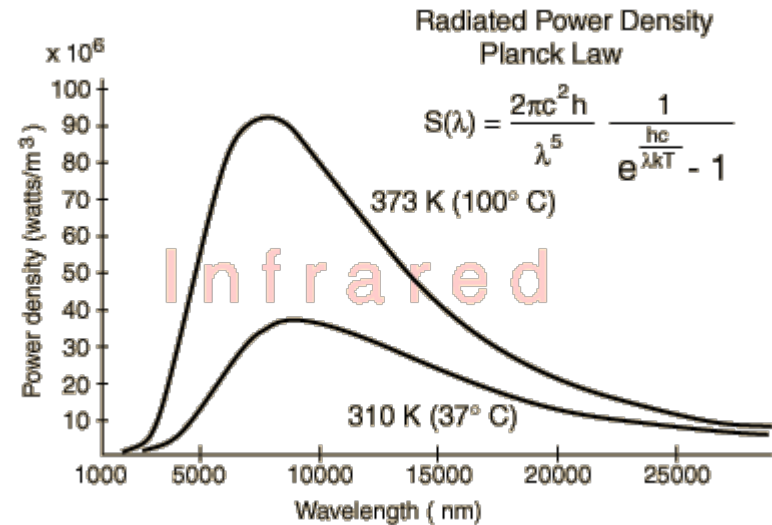
Da sie sich im thermodynamischen Gleichgewicht befanden sollte ihre Intensitätsverteilung dem eines Schwarzen Strahlers entsprechen, welches in homogenen Friedmann-Universen erhalten bleibt.

$$I(\nu) d\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} d\nu$$



Tatsächlich konnten Penzias und Wilson bei 7,35cm eine isotrope Strahlung von  $3,5 \pm 1$  K nachweisen. Dies entspricht einer Photonendichte von etwa  $412 \pm 2 \text{ cm}^{-3}$

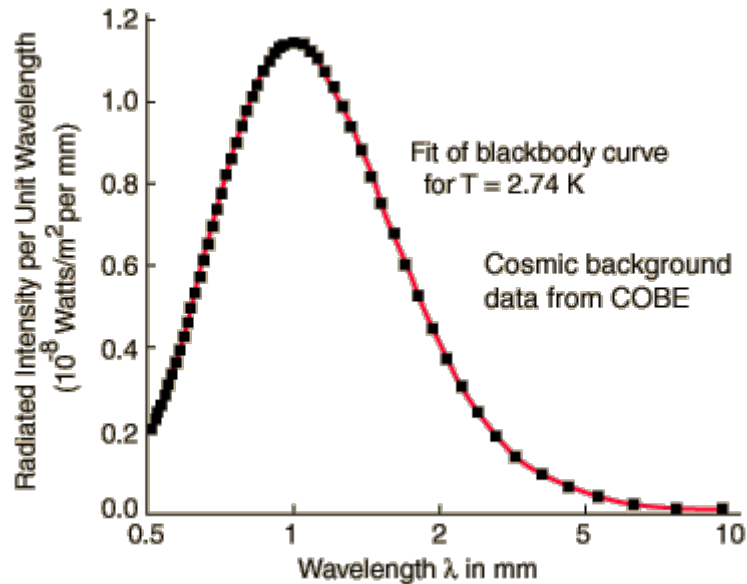
# Planck'sches Strahlungsgesetz



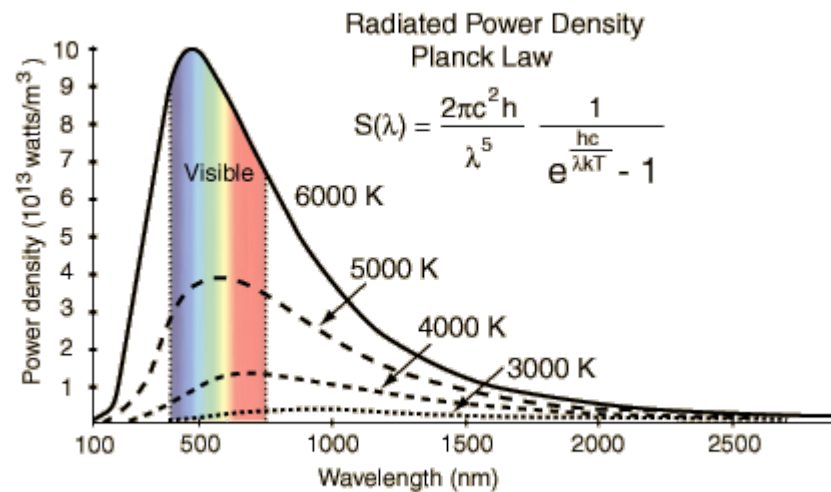
Nahezu die gesamte Strahlung eines menschlichen Körpers findet im Infrarot-Bereich statt



# Hintergrundstrahlung ist Schwarz-Körper-Strahlung

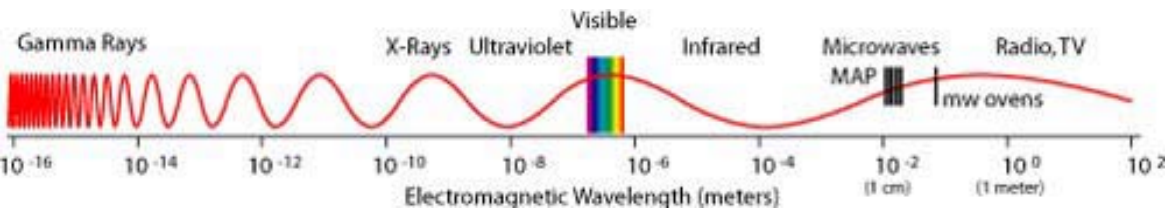


- COBE-Daten über der theoretischen Schwarz-Körper-Strahlung: extrem gute Übereinstimmung und Bestätigung des Big-Bang Modells

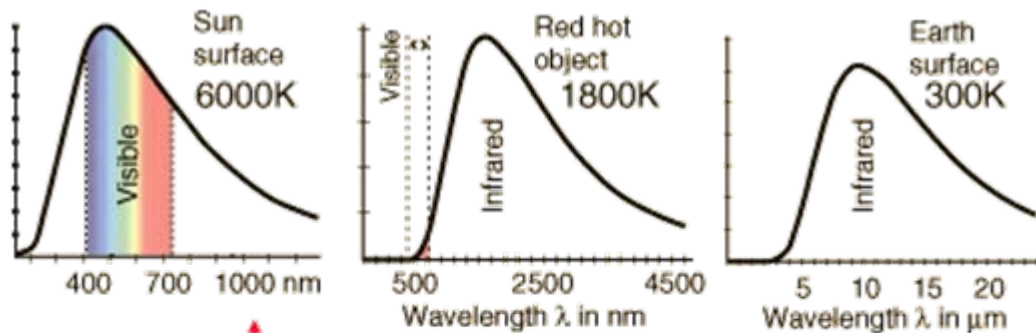


Strahlungskurve der Sonne

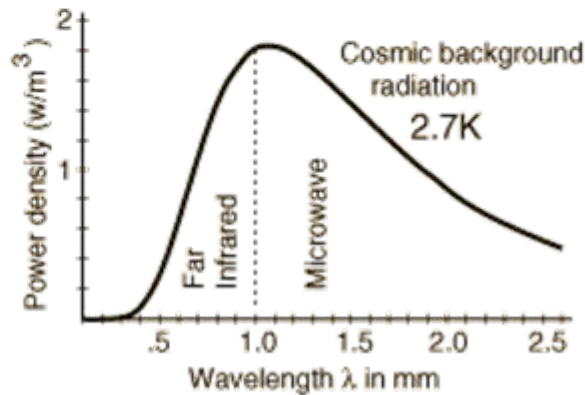
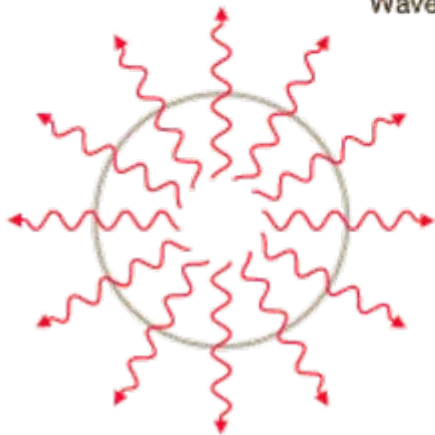
# Effektive Temperatur

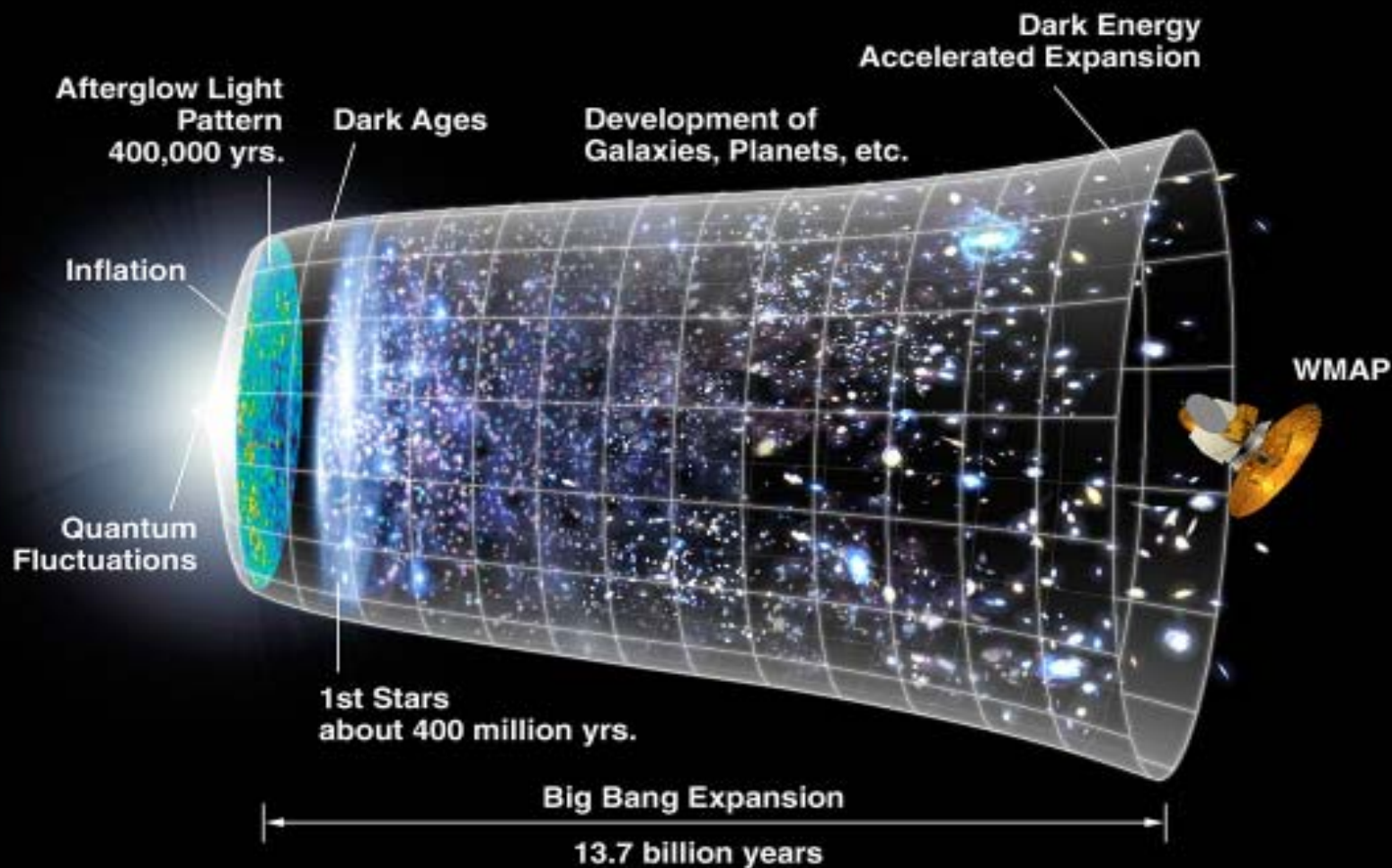


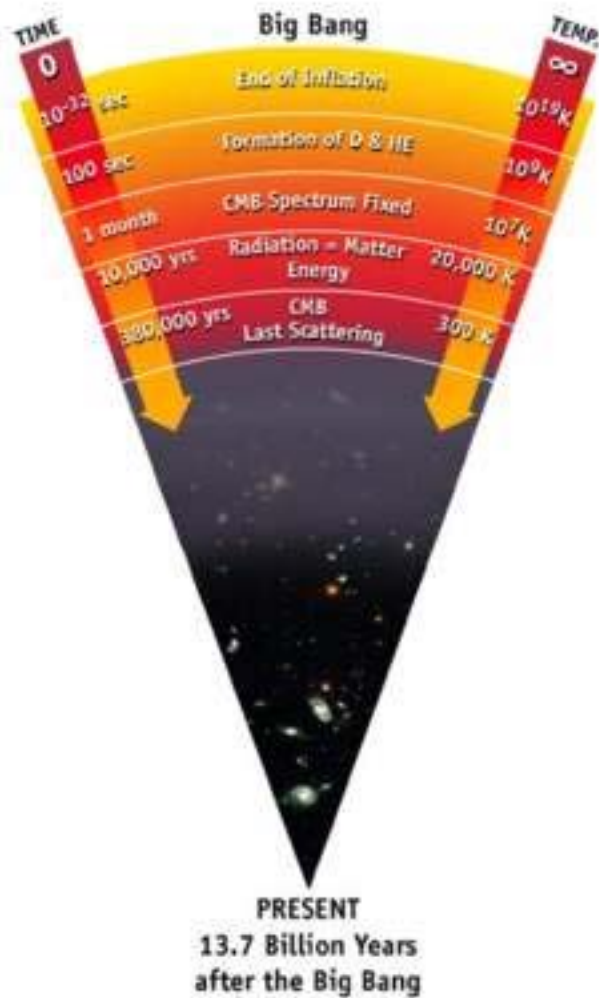
- Mikrowellenregion: 1.6-30 GHz



- Schwarzkörper-Strahlung ist Rest des Transparenz-Punktes an dem die Temperatur des expandierenden Universums unter 3000 K fällt: Strahlung kann entweichen

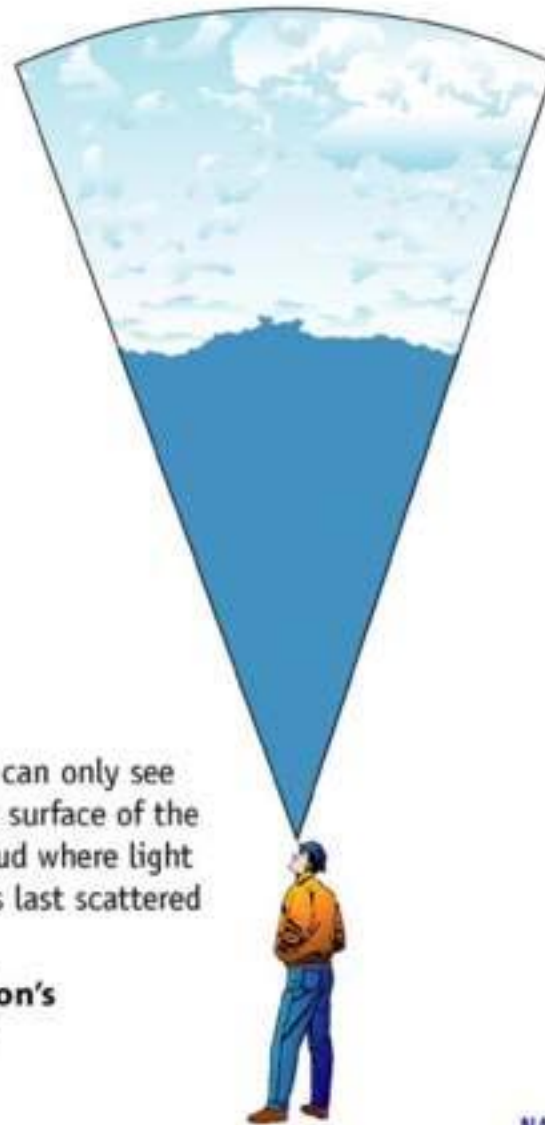






The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.

We can only see the surface of the cloud where light was last scattered





# Bedeutung der Entdeckung des CMB

- Bestätigt Urknall-Theorie
- Beobachtungsmöglichkeit eines sich entwickelnden Universums mit einem wohldefinierten Anfang
- Universum kann nicht statisch sein
- Universum muß eine heiße und dichte Phase kurz nach dem Urknall durchlaufen haben – extremere Bedingungen als jede Theorie beschreiben kann
- Erste Entdeckung eines Zusammenhangs zwischen Teilchenphysik im frühen Universum und Kosmologie
- Theorie der Nukleosynthese liefert überzeugende Theorie der Häufigkeit von Helium im Universum
- Theorien von Penrose und Hawking zeigen, daß Singularität im Beginn des Universums unvermeidbar ist nach ART – die klassische ART muß am heißen Big Bang zusammenbrechen – Hinweise auf Quantenkosmologie und eine neue Physik sollten zu finden sein

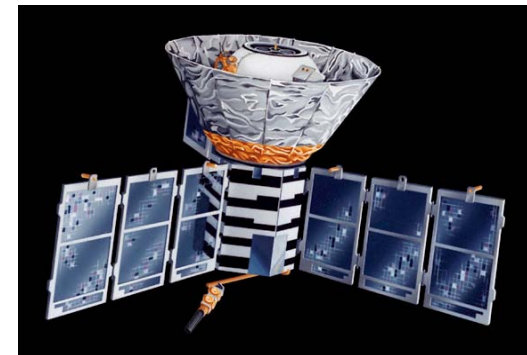
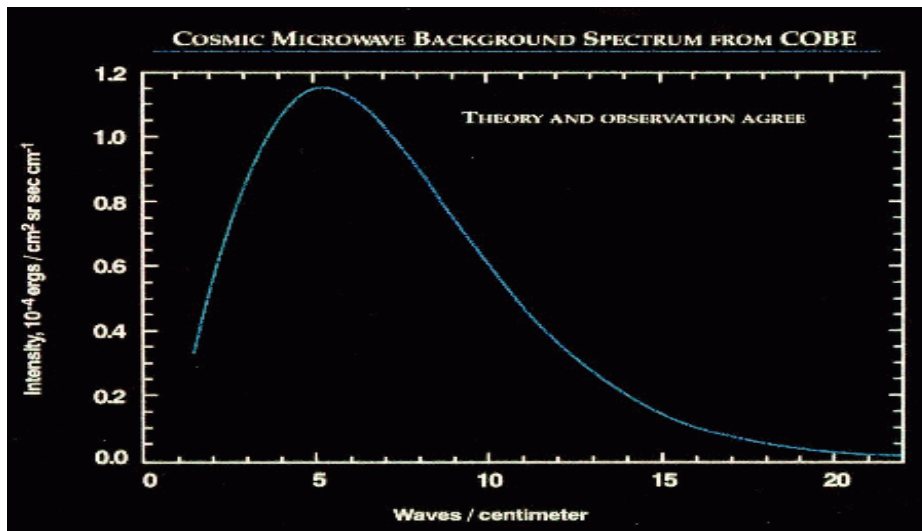
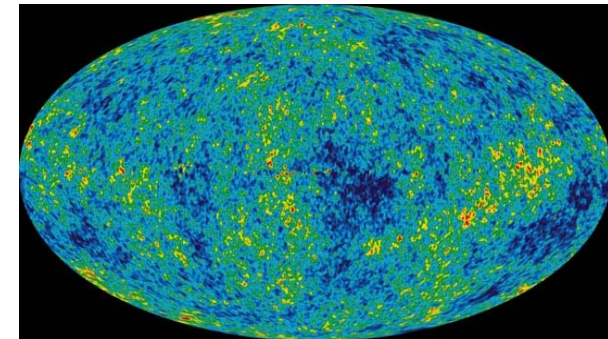
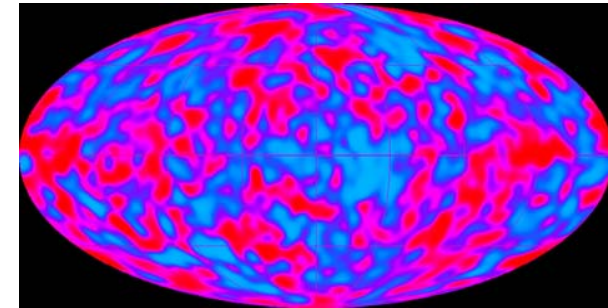


# Bedeutung der Entdeckung des CMB

- Fluktuationen wurden vermutlich  $10^{-35}$ s nach dem Urknall erzeugt, d.h. wir können fundamentale Physik auf Energieskalen viele Größenordnungen größer als an heutigen Teilchenbeschleunigern verfügbar untersuchen
- Viele verschiedene, wichtige Parameter die unser Universum definieren, werden bestimmt werden können: Geometrie, Alter, Komposition
- Auskunft über den Mechanismus der die Fluktuationen erzeugt hat
- Auskunft über eine mögliche inflationäre Phase
- Gibt es Evidenz für eine neue Physik? Die Extra-Dimensionen, die die String-Theorie benötigt?

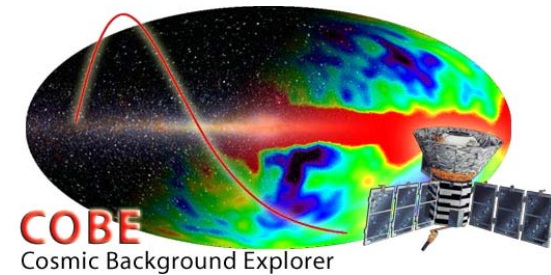
# Die weitere Erforschung:

- Suborbitale Erforschung:
  - Bodengebunden: Antennen
  - Atmosphärisch: Wetterballons, Raketen
- Satellitenmissionen:
  - Cobe (1989-1992)  $T=2,728\pm 0,002$  K
  - WMAP (ab 2002)
  - Planck ( Start 2009)

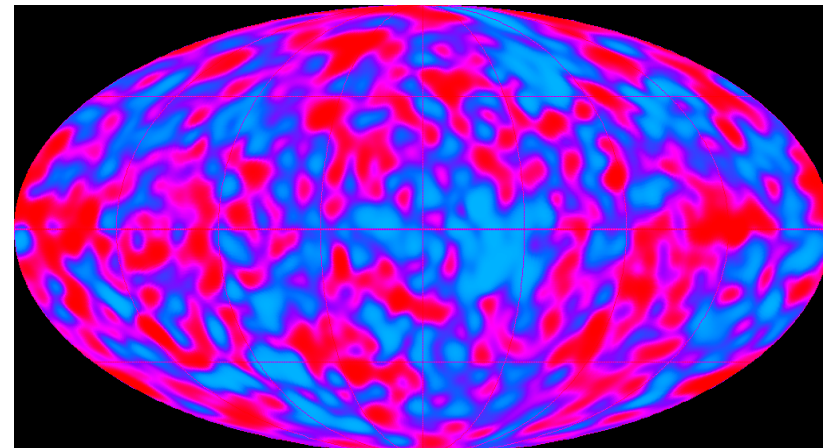


# Die Missionen

- COBE (Cosmic Background Explorer):
  - 1989-1993
  - Bestimmung der Schwarzkörper-Temperatur des CMB:  
 $T=2,728\pm 0,002$  K
  - Entdeckung von Anisotropien (von  $\sim 7$  Grad)



2006 erhielt George Smoot als wissenschaftlicher Leiter dieses Programms zusammen mit John C. Mather, ebenfalls Mitarbeiter an diesem Projekt, den Nobelpreis für Physik.

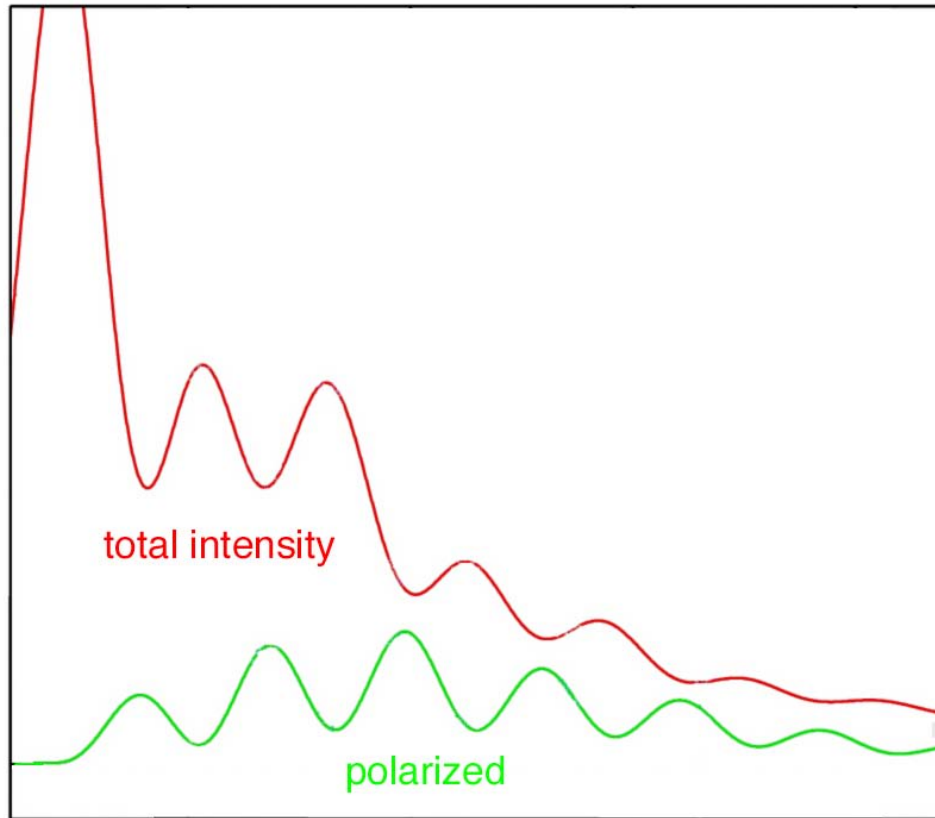




# Die Missionen

- CBI (Cosmic Background Imager):
  - Standort: Chilenische Anden
  - seit 1999 in Betrieb
  - Radiointerferometer, bestehend aus 13 Antennen
  - misst in zehn Frequenzbändern zwischen 26 und 36 GHz
  - Multipolmessungen  $l = 300 - 3500$

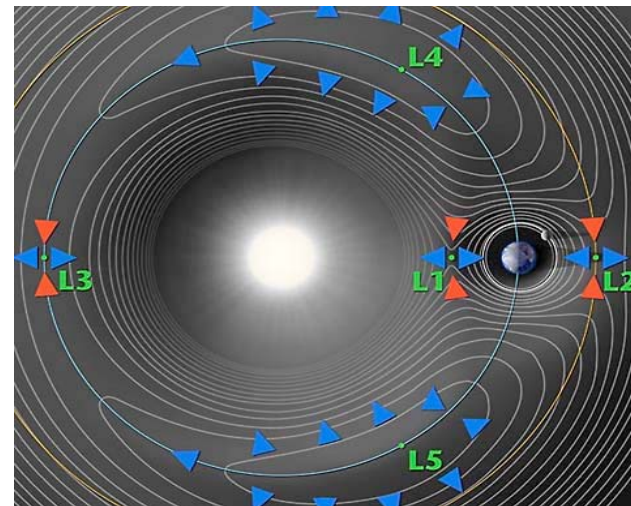
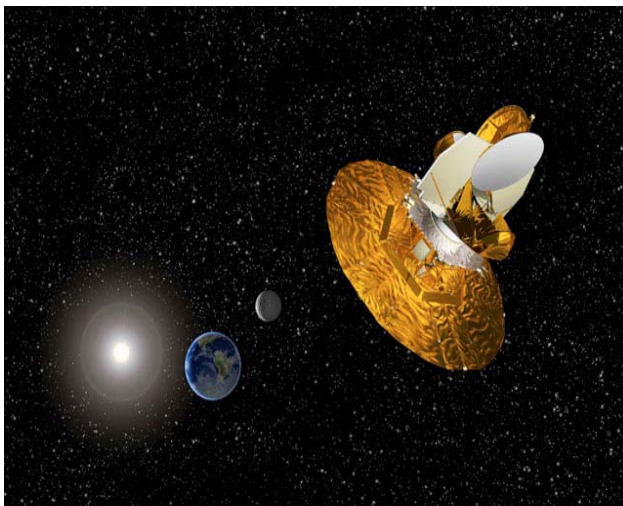
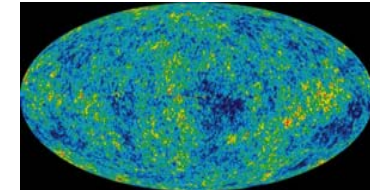
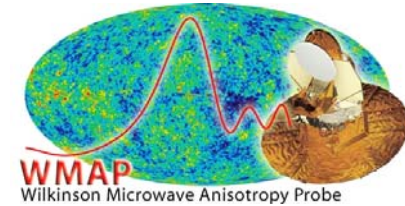




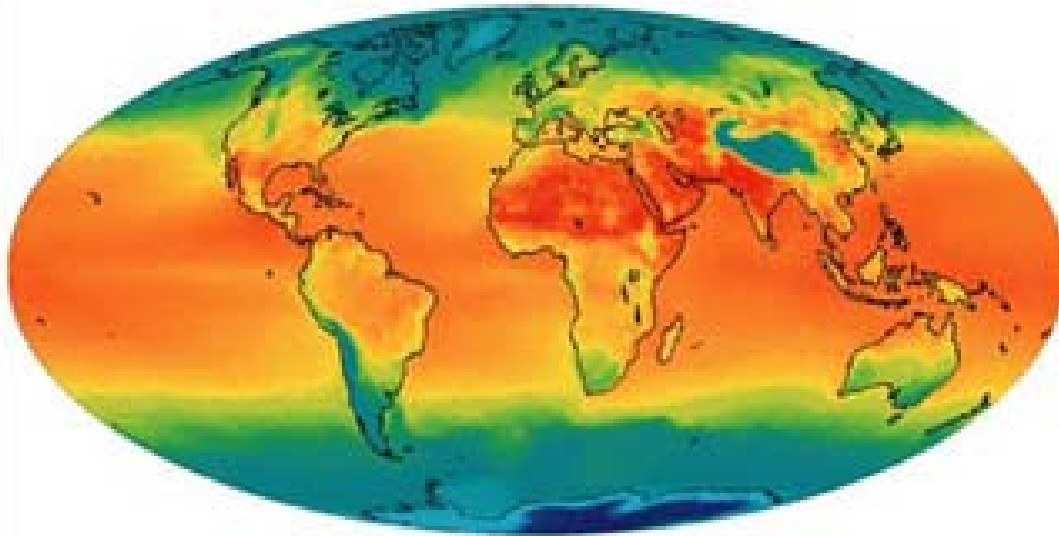
- Kann die Fluktuationen auf kleinen Skalen messen
- Hat Fluktuationen im polarisierten Licht gefunden
- 1/10 der Auflösung von COBE (7 Grad)
- Fluktuationen auf kleinen Skalen sind schwächer als auf großen Skalen
- QUIET wird Polarisation messen, ab 2008

# Die Missionen

- WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe):
  - 2001-2007
  - feste Position gegenüber Sonne und Erde (Lagrange-Punkt L2)
  - Radius der Umlaufbahn: vierfacher Abstand Erde-Mond
  - Beobachtung der gesamten Himmelskugel: 6 Monate
  - Auflösung: 13 arcmin
  - genaue Vermessung der Anisotropien
  - erste Polarisationsmessungen

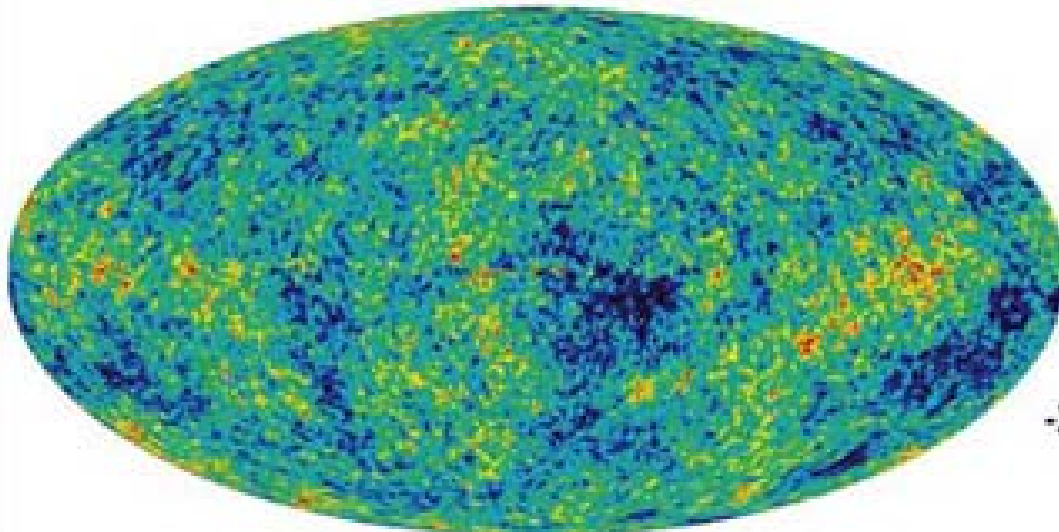


# Vergleich der Temperaturverteilung



Earth  
Temperatures

100 Grad!!



Microwave Sky  
Temperatures

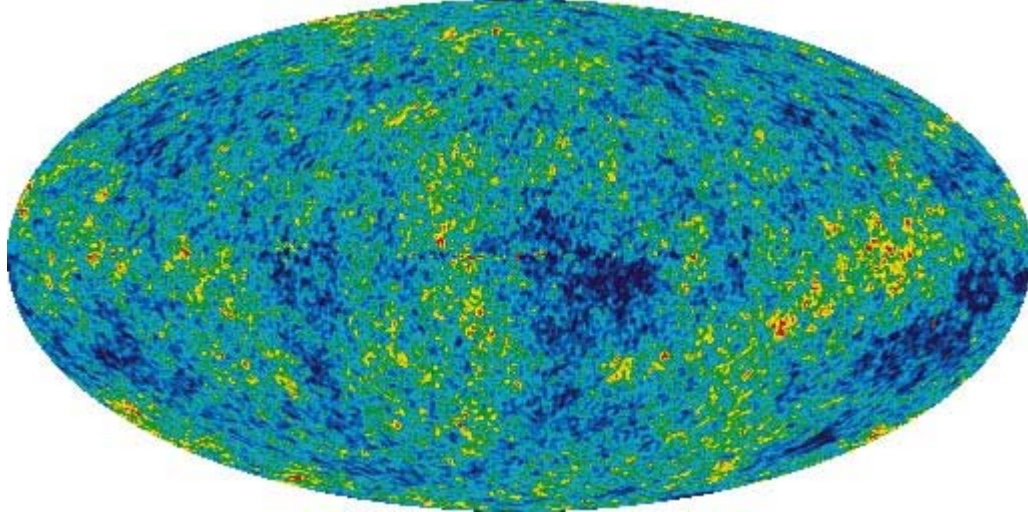
0.0004 Grad!!



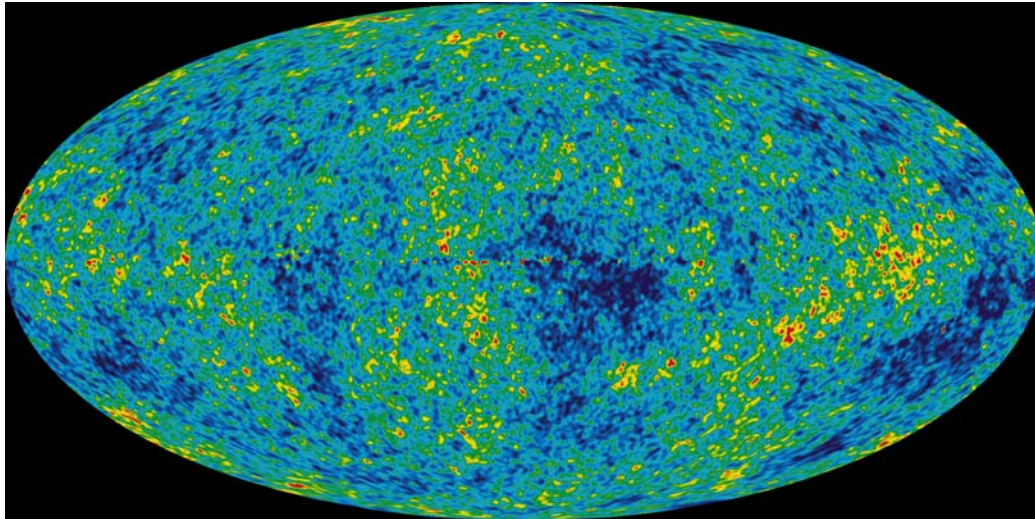
# WMAP: Neue Daten



- 3 Jahre Daten

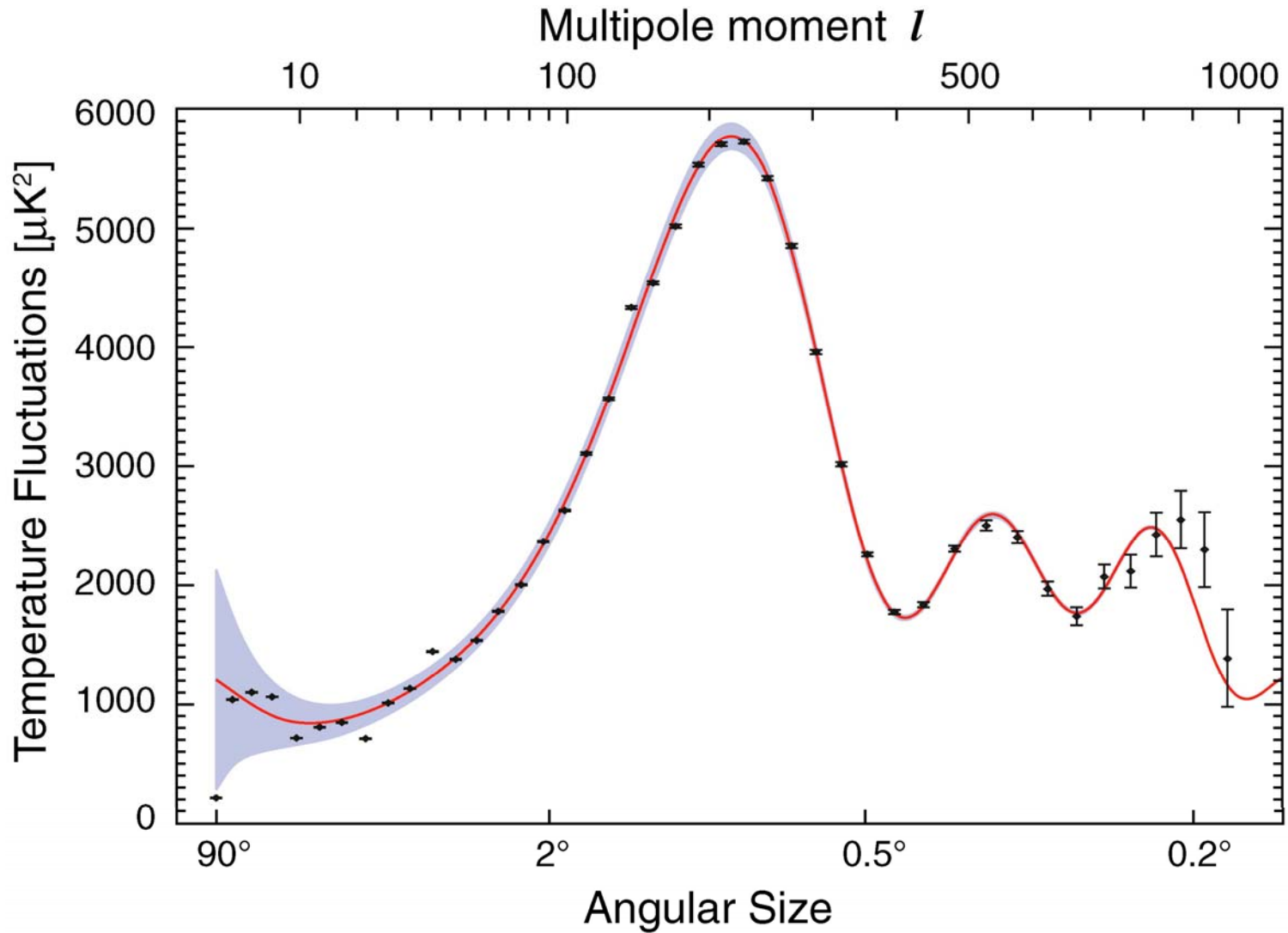


- 5 Jahre Daten

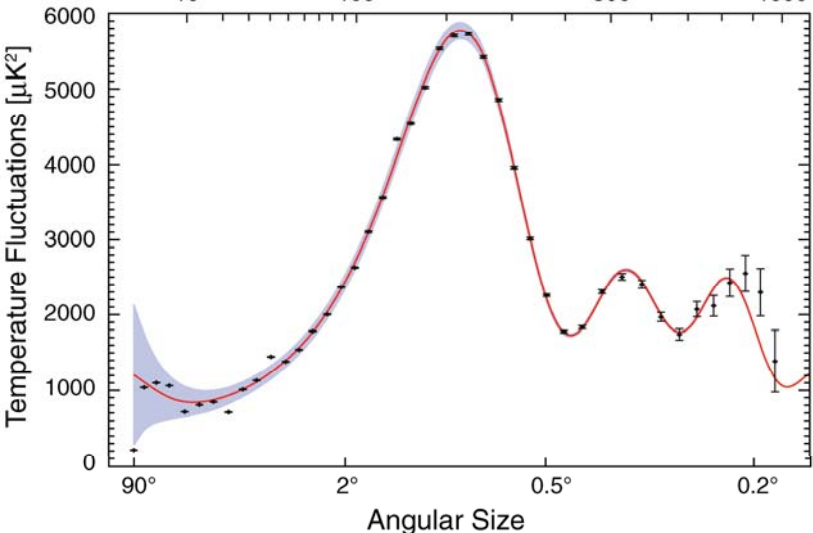
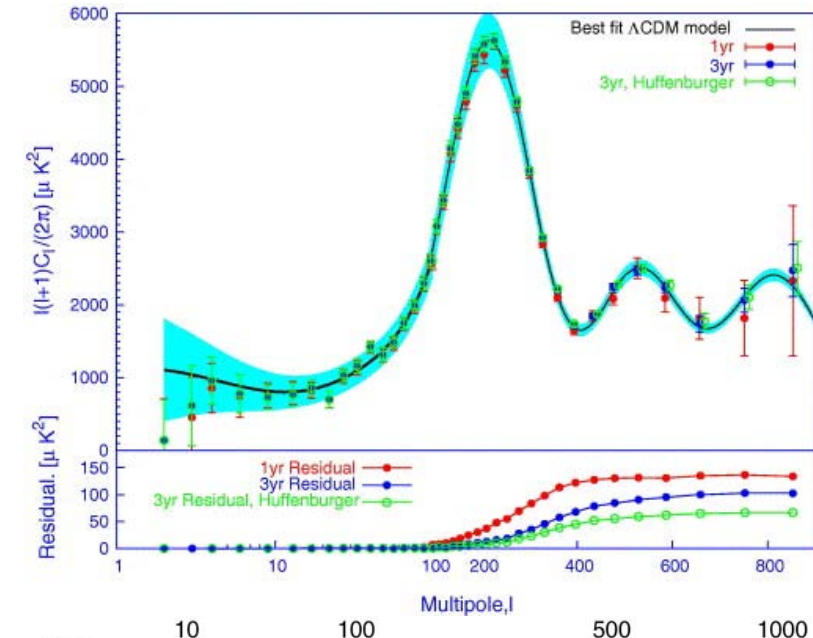


- Neue Temperatur- und Polarisations-Karten in 5 Frequenzbändern zw. 23 und 94 GHz (um das CMB-Signal von der Vordergrund-Emission durch die Milchstraße und extragalaktischen Quellen zu trennen)
- Konsistent mit vorherigen Karten aber empfindlicher (Rauschen um Faktor  $\sqrt{5}$  reduziert)
- Verbesserungen in der Datenanalyse, Kalibration (Jupiter), Tests, etc.
- Resultat: Flaches Universum dominiert durch kosmologische Konstante mit nahezu skalen-invarianten gaußförmigen Fluktuationen; Dichte der Dunklen Materie-Dichte genau zu 6%; Neutrino-Hintergrund
- Quellenkatalog: 390 Objekte, Variabilität
- Wichtigste Änderungen: 3. Peak, Polarisations-Spektren
- Bisher:
  - Dunkle Materie muß nicht-baryonisch sein und wechselwirkt schwach mit Atomen und Strahlung
  - Dichte der Atome im Universum
  - Akustische Skala bei einer Rotverschiebung von  $z=1090$ . In Kombination mit anderen Messungen: flaches Universum dominiert durch Dunkle Energie (konsistent mit kosmologischer Konstante)
  - Eigenschaften der primordialen Fluktuationen
  - Universum war reionisiert lange vor der Epoche der ältesten bekannten Quasare

# WMAP: Neue Daten



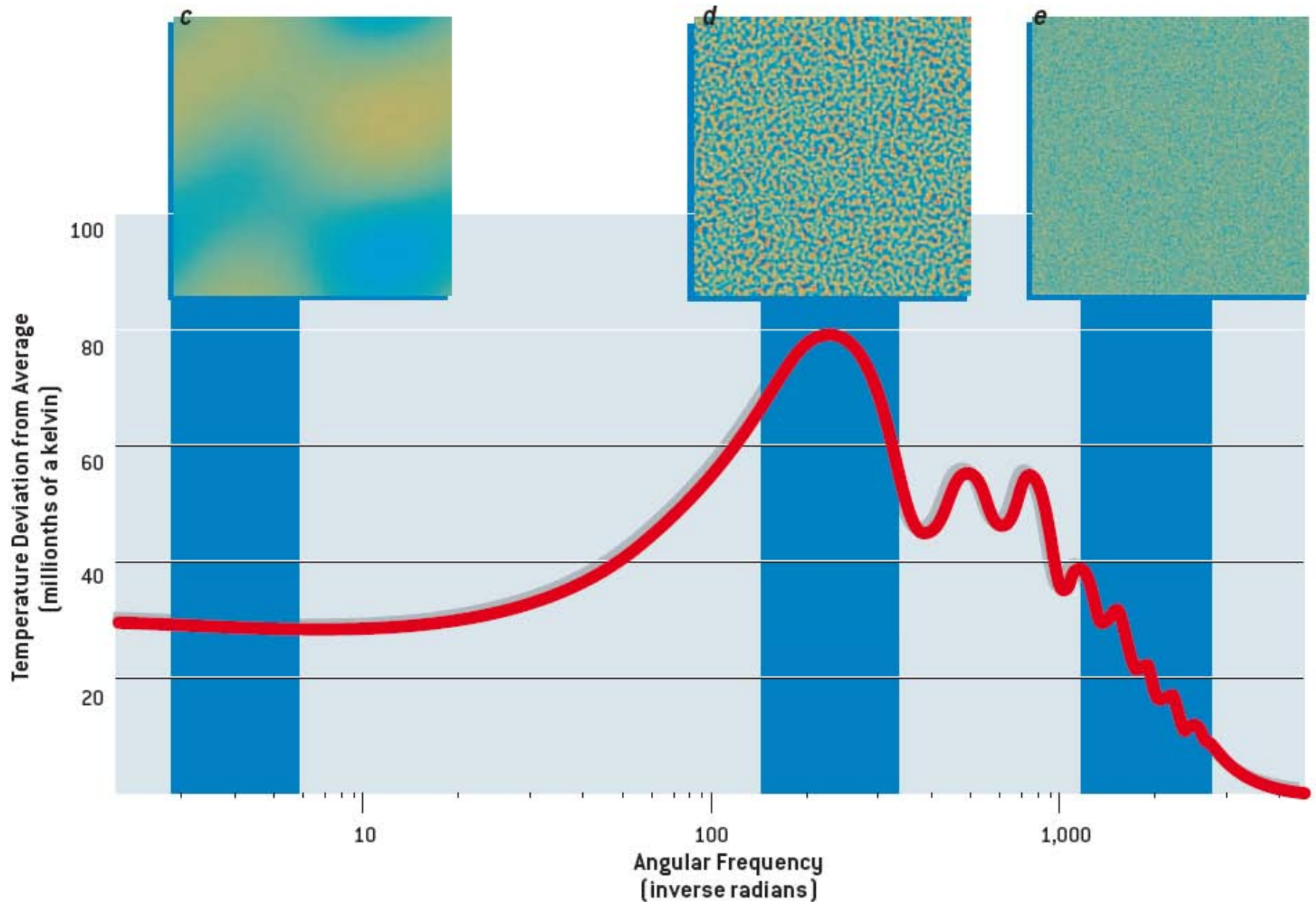
# WMAP: Neue Daten



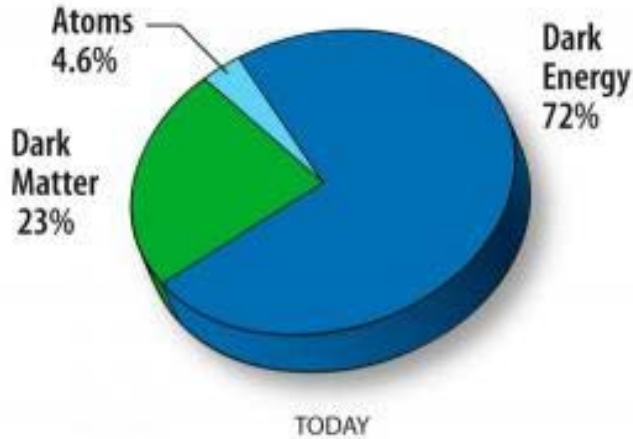
- WMAP-3Jahre
- Temperaturfluktuationen als Funktion der Winkelausdehnung – links: große Winkel
- 3. Maximum gibt Auskunft über die Neutrinos in den Frühphasen des Universums
- Bessere Bestimmung des 3. akustischen Peaks!!
- E-Mode Polarisation jetzt detektiert: Aussagen über die Reionisation
- Grenze für die Neutrino-Masse:  $<0.61$  eV aus Kombination von WMAP, Supernovae und BAO-Messungen
- etc.



# CMB – Akustische Oszillationen

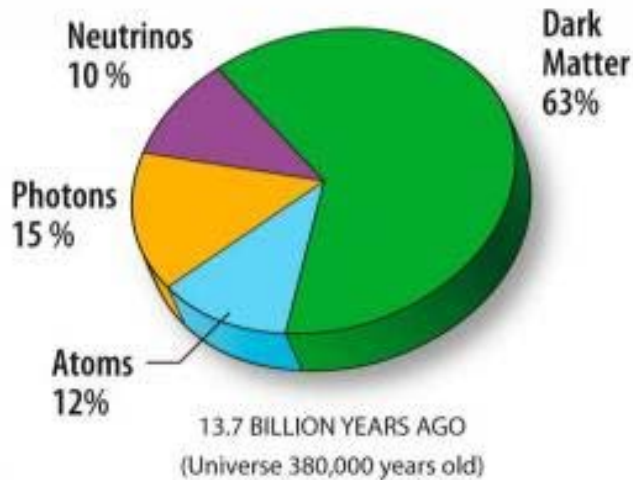


# Neutrinos



- Die Zusammensetzung des Universums heute

- Vor 13.7 Milliarden Jahren, das Universum im Alter von 380 000 Jahren



Parameter	Meaning	Status	Use	Definition
$\tau$	Reionization optical depth	Not optional		
$\omega_b$	Baryon density	Not optional	MCMC	$\omega_b = \Omega_b h^2 = \rho_b / (1.88 \times 10^{-26} \text{kg/m}^3)$
$\omega_d$	Dark matter density	Not optional	MCMC	$\omega_d = \Omega_d h^2 = \rho_d / (1.88 \times 10^{-26} \text{kg/m}^3)$
$f_\nu$	Dark matter neutrino fraction	Well motivated	MCMC	$f_\nu = \rho_\nu / \rho_d$
$\Omega_\Lambda$	Dark energy density	Not optional	MCMC	
$w$	Dark energy equation of state	Worth testing	MCMC	$p_\Lambda / \rho_\Lambda$ (approximated as constant)
$\Omega_k$	Spatial curvature	Worth testing		
$A_s$	Scalar fluctuation amplitude	Not optional		Primordial scalar power at $k = 0.05/\text{Mpc}$
$n_s$	Scalar spectral index	Well motivated	MCMC	Primordial spectral index at $k = 0.05/\text{Mpc}$
$\alpha$	Running of spectral index	Worth testing	MCMC	$\alpha = d \ln n_s / d \ln k$ (approximated as constant)
$r$	Tensor-to-scalar ratio	Well motivated	MCMC	Tensor-to-scalar power ratio at $k = 0.05/\text{Mpc}$
$n_t$	Tensor spectral index	Well motivated	MCMC	
$b$	Galaxy bias factor	Not optional	MCMC	$b = [P_{\text{galaxy}}(k)/P(k)]^{1/2}$ (assumed constant for $k < 0.2h/\text{Mpc}$ )
$z_{\text{ion}}$	Reionization redshift (abrupt)			$z_{\text{ion}} \approx 92(0.03h\tau/\omega_b)^{2/3}\Omega_m^{1/3}$ (assuming abrupt reionization; [37])
$\omega_m$	Physical matter density		Fits	$\omega_m = \omega_b + \omega_d = \Omega_m h^2$
$\Omega_m$	Matter density/critical density			$\Omega_m = 1 - \Omega_\Lambda - \Omega_k$
$\Omega_{\text{tot}}$	Total density/critical density			$\Omega_{\text{tot}} = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1 - \Omega_k$
$A_t$	Tensor fluctuation amplitude			$A_t = rA_s$
$M_\nu$	Sum of neutrino masses			$M_\nu \approx (94.4 \text{ eV}) \times \omega_d f_\nu$ [38]
$h$	Hubble parameter			$h = \sqrt{(\omega_d + \omega_b)/(1 - \Omega_k - \Omega_\Lambda)}$
$\beta$	Redshift distortion parameter			$\beta \approx [\Omega_m^{4/7} + (1 + \Omega_m/2)(\Omega_\Lambda/70)]/b$ [39, 40]
$t_0$	Age of Universe			$t_0 \approx (9.785 \text{ Gyr}) \times h^{-1} \int_0^1 [(\Omega_\Lambda a^{-(1+3w)} + \Omega_k + \Omega_m/a)]^{-1/2} da$ [38]
$\sigma_8$	Galaxy fluctuation amplitude			$\sigma_8 = \{4\pi \int_0^\infty [\frac{3}{x^3}(\sin x - x \cos x)]^2 P(k) \frac{k^2 dk}{(2\pi)^3}\}^{1/2}$ , $x \equiv k \times 8h^{-1}\text{Mpc}$
$Z$	CMB peak suppression factor		MCMC	$Z = e^{-2\tau}$
$A_p$	Amplitude on CMB peak scales		MCMC	$A_p = A_s e^{-2\tau}$
$\Theta_s$	Acoustic peak scale (degrees)		MCMC	$\Theta_s(\Omega_k, \Omega_\Lambda, w, \omega_d, \omega_b)$ given by [25]
$H_2$	2nd to 1st CMB peak ratio		Fits	$H_2 = (0.925\omega_m^{0.18} 2.4^{n_s-1})/[1 + (\omega_b/0.0164)^{12\omega_m^{0.52}}]^{0.2}$ [25]
$H_3$	3rd to 1st CMB peak ratio		Fits	$H_3 = 2.17[1 + (\omega_b/0.044)^2]^{-1}\omega_m^{0.59} 3.6^{n_s-1}/[1 + 1.63(1 - \omega_b/0.071)\omega_m]$
$A_*$	Amplitude at pivot point		Fits	$A_* = 0.82^{n_s-1} A_p$

# Die Missionen

- Planck:
  - ESA-Satellit
  - geplanter Start: 2009, April
  - Messung der Anisotropien für Winkel größer 5-10 arcmin, mit einer Genauigkeit von  $2 \times 10^{-6}$

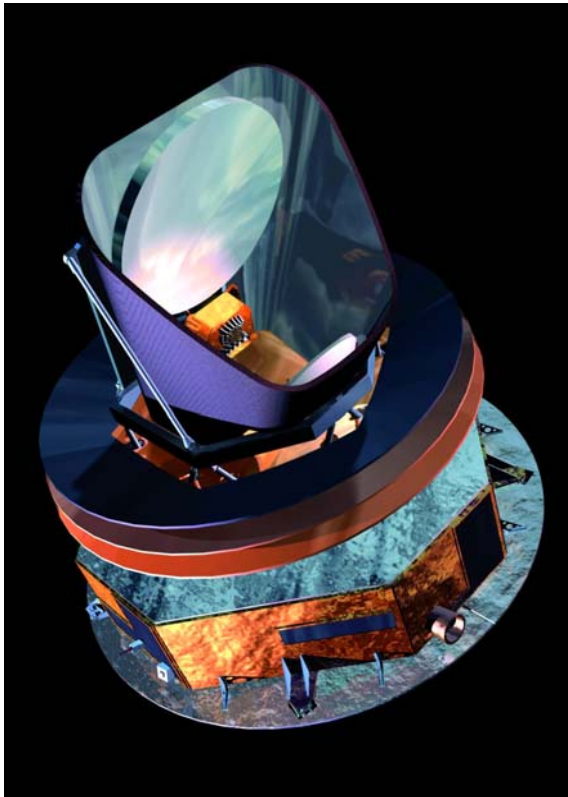
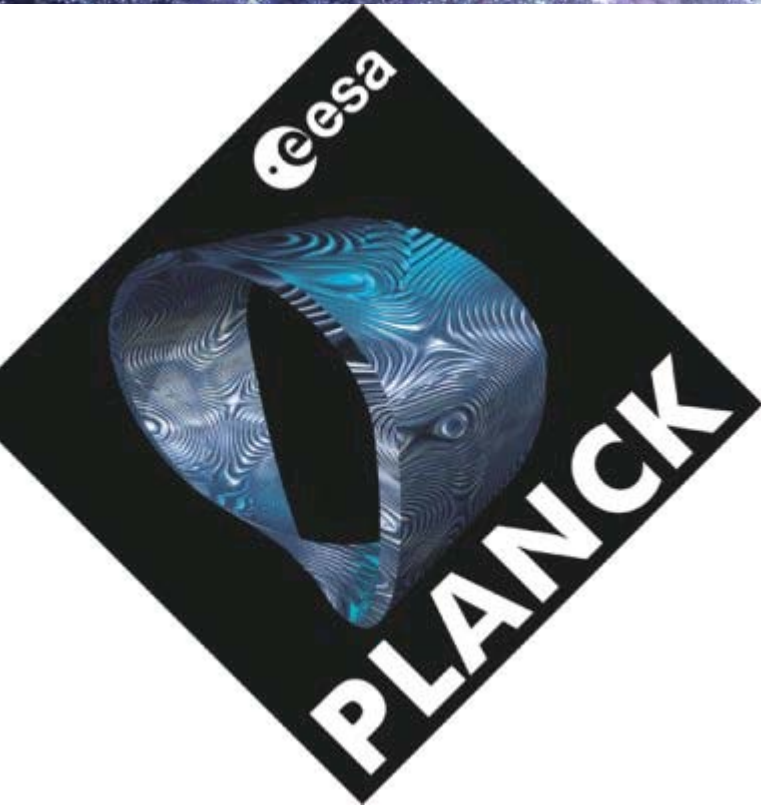
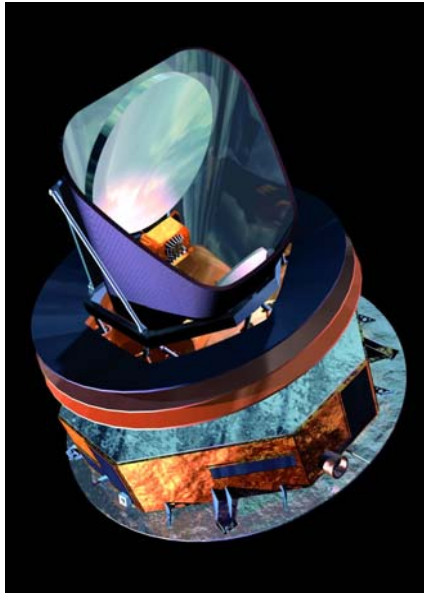


FIG 1.11.— *Planck* and *Herschel* ready for launch under the Ariane 5 fairing. The two satellites separate just after launch and proceed independently to their final orbits. View courtesy of Alcatel Space (Cannes).



Planck



- Planck ist die 3. Weltraum CMB Mission nach COBE und WMAP um sämtliche Information aus den CMB-Temperatur-Anisotropien zu extrahieren, die 400 000 Jahre nach dem Urknall entstanden sind (mittlere Temperatur des CMB heute: 2.726K)
  - Wird auch die Polarisation der CMB-Anisotropien messen – thermische Geschichte während der Zeit, als sich die ersten Sterne und Galaxien bildeten; Signatur eines stochastischen Gravitationswellenhintergrundes aus der Zeit der Inflation,  $10^{-35}$ s nach dem Urknall
- 3fache Winkelauflösung von WMAP
  - 1 Größenordnung geringeres Rauschen bei den wichtigen Frequenzen um 100 GHz (auch dann noch, wenn mit 8 Jahren WMAP verglichen)
  - Frequenz-Bereich: 30-875 GHz
  - Ziele:
    - Bessere Tests der inflationären Modelle des frühen Universums
    - Genaue Bestimmung der kosmologischen Parameter
    - Die Polarisation messen
    - Sunyaev-Zel'dovich Effekt, Linsenwirkung, Neutrino Masse, Sachs-Wolfe-Effekt, Dunkler Sektor
    - etc.

- Im einfachsten Modell stammen die beobachteten Temperatur-Anisotropien von 2 verschiedenen physikalischen Prozessen:
  - **Potentielle Fluktuationen im Frühen Universum:** Auf Skalen von  $>1$  Grad stammen die CMB Anisotropien von Fluktuationen im Gravitationspotential entlang der Sichtlinie = Sachs-Wolfe Effekt
    - nach Rainer Kurt Sachs und Arthur Michael Wolfe benannt, die ihn 1967 entdeckten; ermöglicht aus der Rotverschiebung der kosmischen Hintergrundstrahlung abzulesen, wie die Materiestruktur ca. 400 000 Jahre nach dem Urknall, zur Zeit der Rekombination gewesen sein muß; der Krümmungsparameter der Raumzeit läßt sich dadurch festlegen);
    - In den Frühphasen gab es kleine Verdichtungen, deren Gravitationspotentiale die der isotropen Umgebung übertraf – tritt ein Photon ein, gewinnt es Energie, während das Photon im ‚Topf‘ sich bewegt, expandiert der Raum – beim Austritt muß das Photon weniger Energie abgeben als es beim Eintritt gewonnen hatte -> das Photon gewinnt an Energie (diese Energie befand sich vorher im Potential); auf dem Weg zu uns durchlaufen die Photonen noch viele weitere Potentiale, mit vernachlässigbarer Wirkung – gehören nicht mehr zum Sachs-Wolfe-Effekt

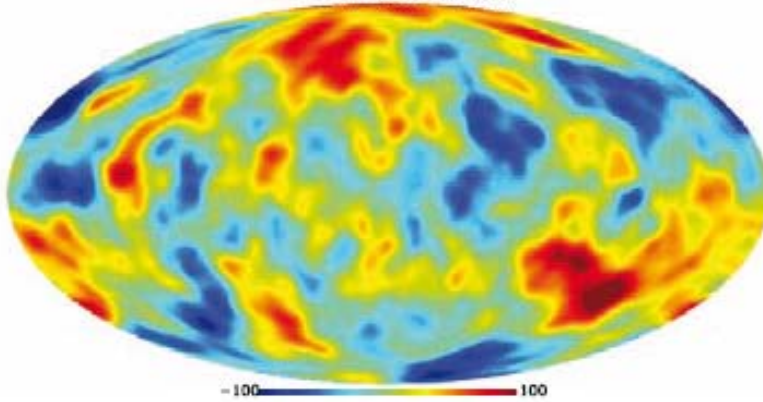
- Im einfachsten Modell stammen die beobachteten Temperatur-Anisotropien von 2 verschiedenen physikalischen Prozessen:
  - **Schallwellen vor der Rekombination:** Geringe Fluktuationen im Materie-Strahlungs-Flüssigkeitsfeld zur Zeit der Rekombination waren kausal verbunden und oszillierten wie Schallwellen. Die kleinskalige Struktur im CMB ist eine Konsequenz dieser Oszillationen – entspricht der maximalen Distanz, die eine Schallwelle sich bewegen kann bis zur Zeit der Rekombination
    - Diese Anisotropien liefern Aussagen über den Materie-Inhalt des Universums
    - Auch über die Geometrie des Universums



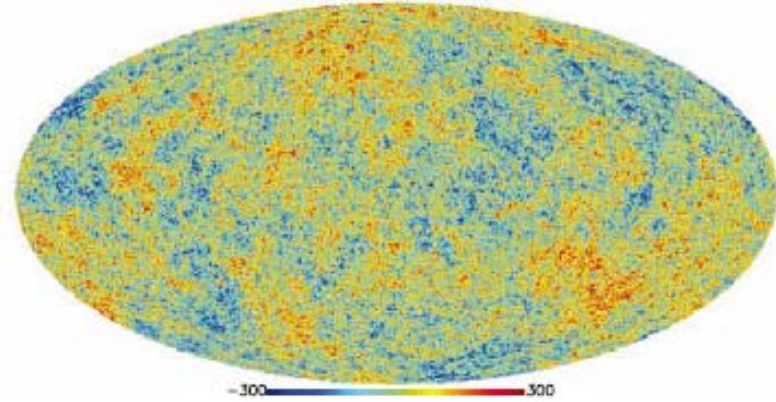
simuliert

CMB Fluctuations ( $\mu\text{K}$ )

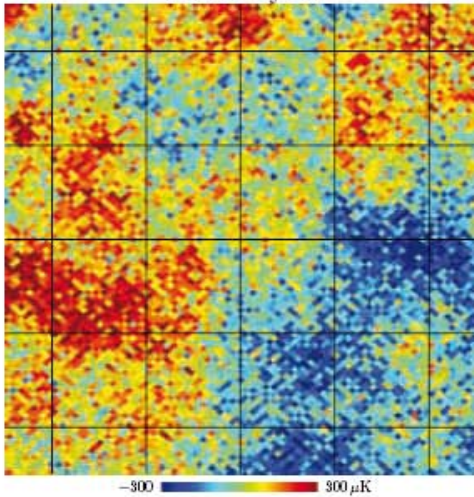
COBE-DMR resolution



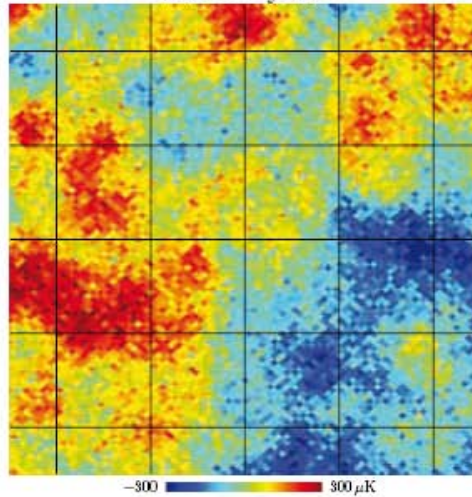
Planck resolution



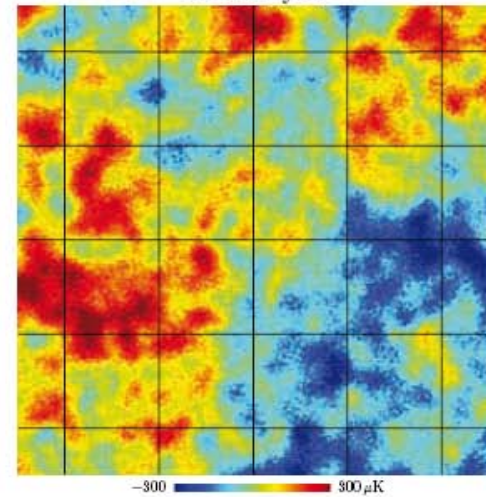
WMAP 2 years



WMAP 8 years



Planck 1 year



5 x 5 Grad

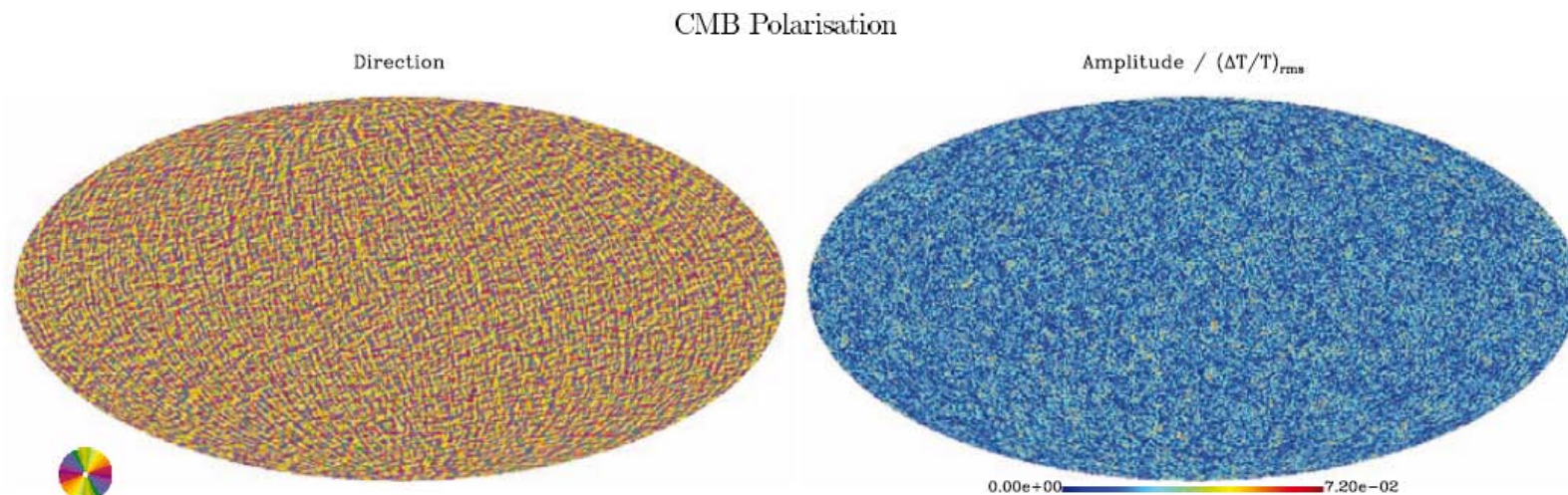
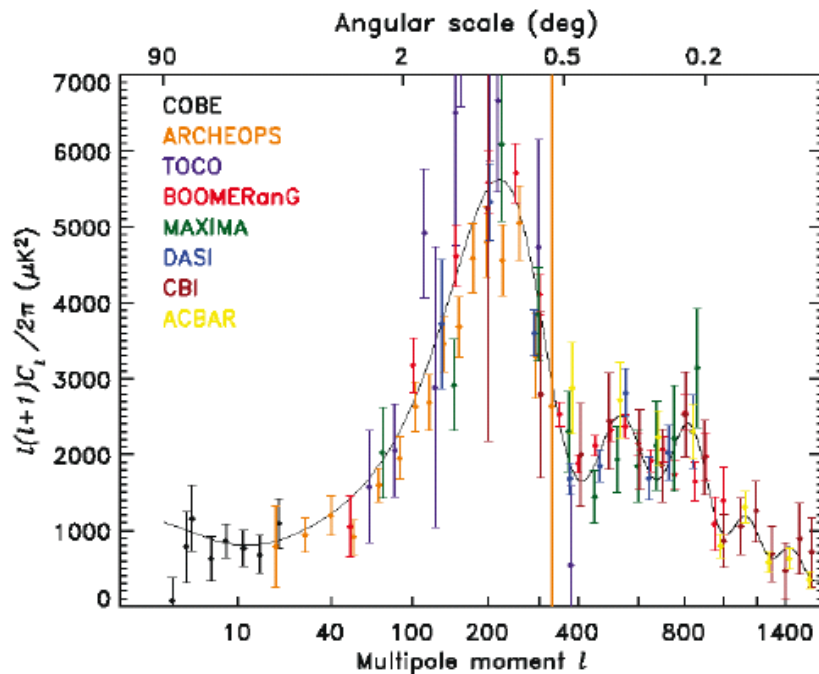


FIG 2.1.— Simulated maps of the CMB sky in inflationary CDM models. The top two pictures show temperature anisotropies over the whole sky at *COBE* and *Planck* resolutions. Such small pictures cannot show the difference in resolution between *WMAP* and *Planck*. Accordingly, the middle three pictures show an expanded view of a  $5^\circ \times 5^\circ$  patch of sky at *WMAP* (94 GHz, 15' FWHM) and *Planck* (217 GHz, 5' FWHM) resolutions, with noise calculated for 2 and 8 years for *WMAP* and 1 year for *Planck*. The significant differences between *WMAP* and *Planck* in resolution and noise (even for an 8-year *WMAP* mission) are shown in a different way in Fig. 2-8. The lower two pictures show the direction and amplitude of polarization anisotropies at *Planck* resolution for a pure scalar fluctuation mode.

Bevor die ersten Daten von WMAP gezeigt wurden



Erste Daten von WMAP

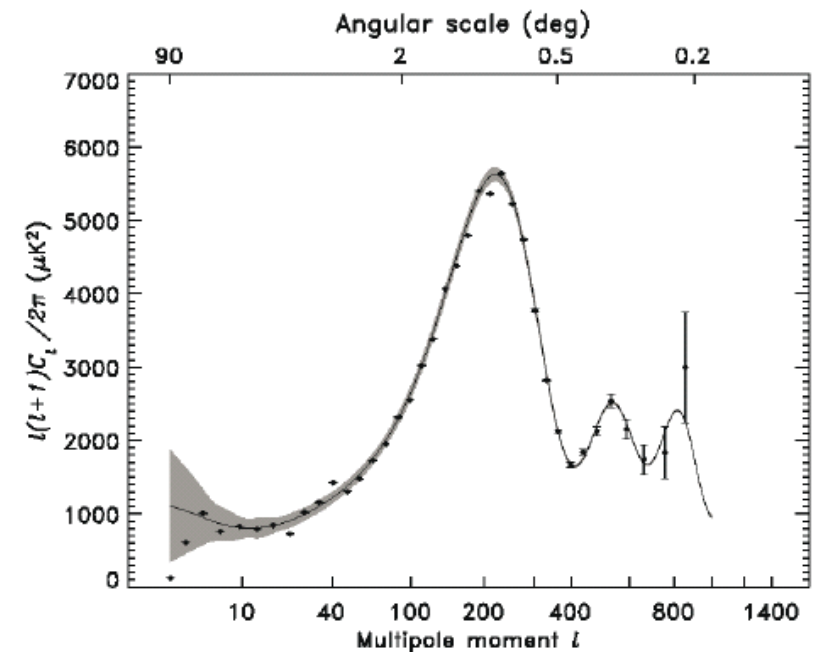


FIG 2.2.— The left panel (courtesy of the WMAP Science Team) shows a summary of CMB anisotropy measurements from various experiments prior to the release of the first year results from WMAP. The references to the experimental data are as follows: COBE (Tegmark 1996), Archeops (Benoit et al. 2003), TOCO (Miller et al. 2002), Boomerang (Ruhl et al. 2003), Maxima (Lee et al. 2001), DASI (Halverson et al. 2002), CBI (Pearson et al. 2003) and ACBAR (Kuo et al. 2004). The right panel shows results from the first year of WMAP data.

# Planck: Anisotropien alleine reichen nicht aus

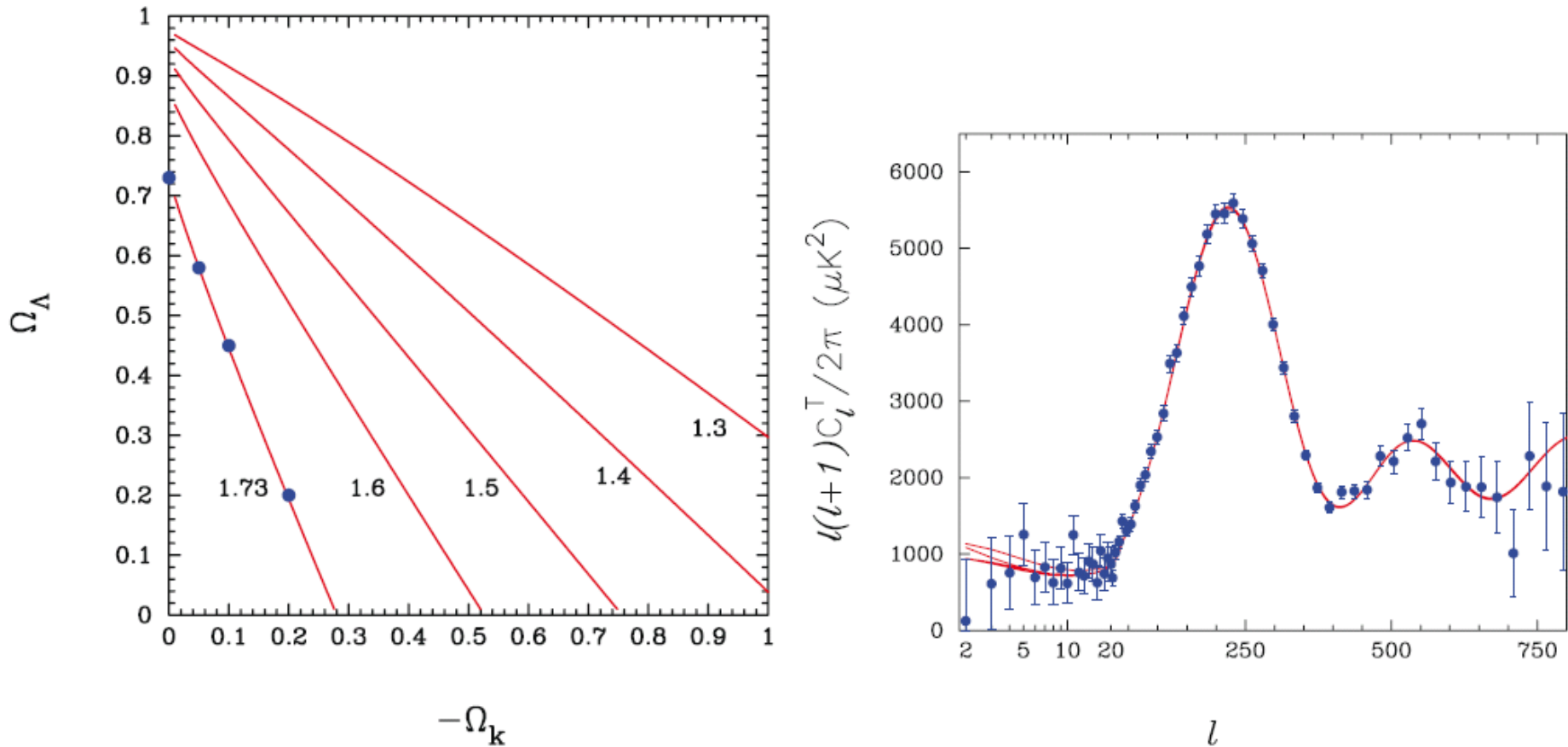


FIG 2.5.—The geometrical degeneracy. The left panel shows contours in the  $\Omega_\Lambda$ - $\Omega_k$  plane for which the parameter  $\mathcal{R}$  defined in Equation 2.4a is constant, with values of  $\mathcal{R}$  indicated next to each curve. Models with identical initial fluctuation spectra, matter content, and  $\mathcal{R}$  will have almost identical CMB power spectra. This is illustrated in the right panel, which shows the WMAP points and CMB power spectra for models with values of  $\Omega_\Lambda$  and  $\Omega_k$  corresponding to the four points in the left hand panel. These models are highly degenerate, showing that the CMB anisotropy data alone cannot strongly constrain both the geometry of the Universe and the value of  $\Omega_\Lambda$ .



# Planck: Anisotropien alleine reichen nicht aus

- CMB Anisotropie Daten alleine können nicht die geometrische Degeneration zwischen den beiden Omega-Werten brechen – Universen mit substantieller räumlicher Krümmung sind kompatibel mit den WMAP CMB-Daten
- Diese Mehrdeutigkeit kann nur dann aufgelöst werden, wenn man die Daten kombiniert mit anderen Datensätzen:
  - Direkten Bestimmungen der Hubble Konstante (jetzt:  $72 \pm 8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ )
  - Magnituden-Rotverschiebungsrelation für Typ Ia Supernovae
  - Galaxienverteilung aus großen Rotverschiebungs-Durchmusterungen
- Mehr, weniger genaue Mehrdeutigkeiten: z.Bsp. Bezgl. Inflationärer Modelle

# Hubble-Parameter

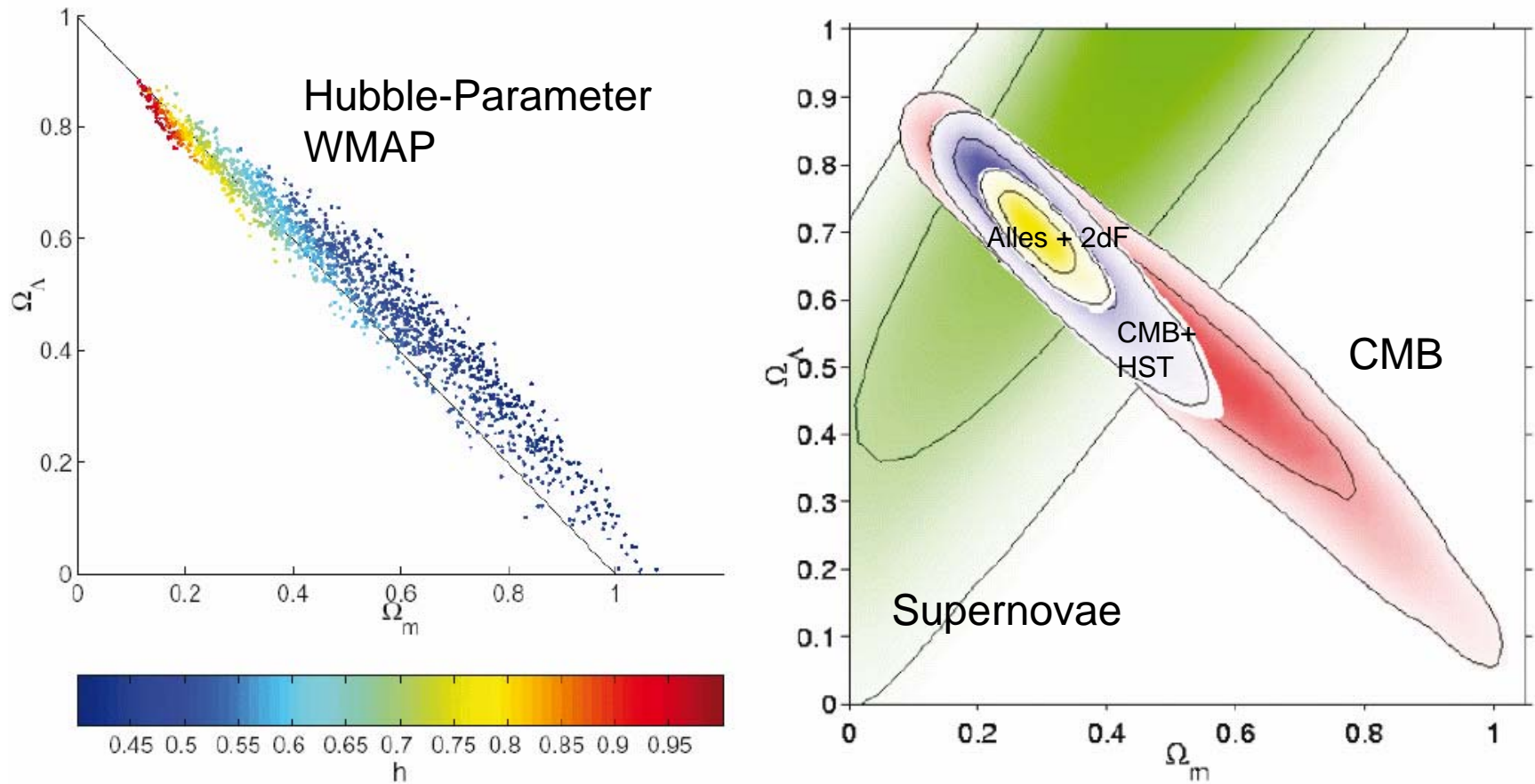


FIG 2.6.—Breaking the geometric degeneracy (from Lewis & Bridle 2002). The left panel shows samples of the posterior distribution in the  $\Omega_m$ - $\Omega_\Lambda$  plane from the pre-*WMAP* CMB data. The points are colour coded according to the value of the Hubble parameter  $h$ . The right panel shows 68% and 98% confidence contours for various datasets. The supernovae constraints alone are shown by the green contours; the CMB data alone are shown by the red contours; CMB+HST key project constraints on  $h$  are shown by the blue contours; finally, the yellow contours show the constraints derived by combining additional constraints from the distribution of galaxies in the 2dF Galaxy Redshift Survey and from primordial nucleosynthesis (in the form of a Gaussian prior of  $\omega_b = 0.020 \pm 0.002$ ).

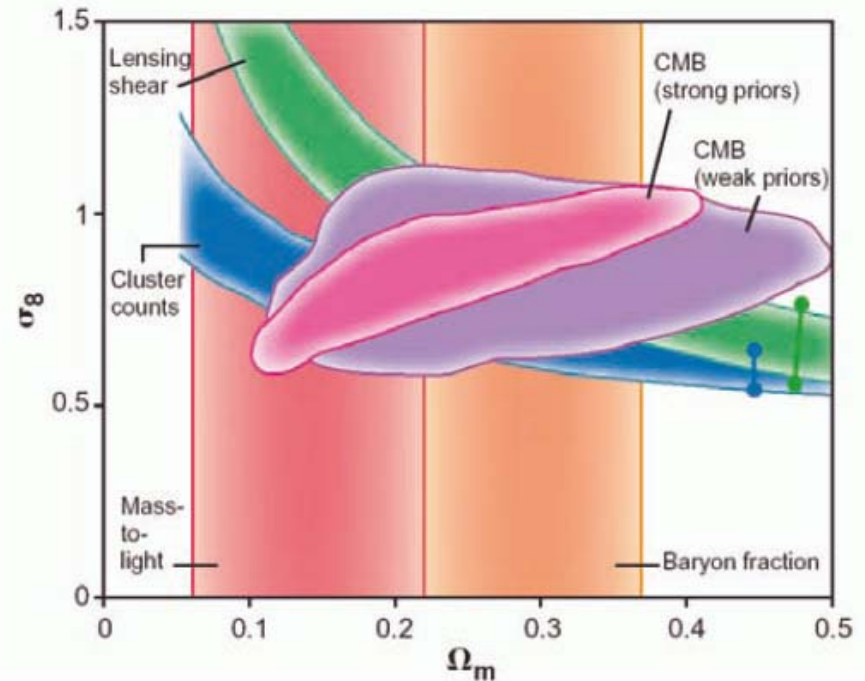
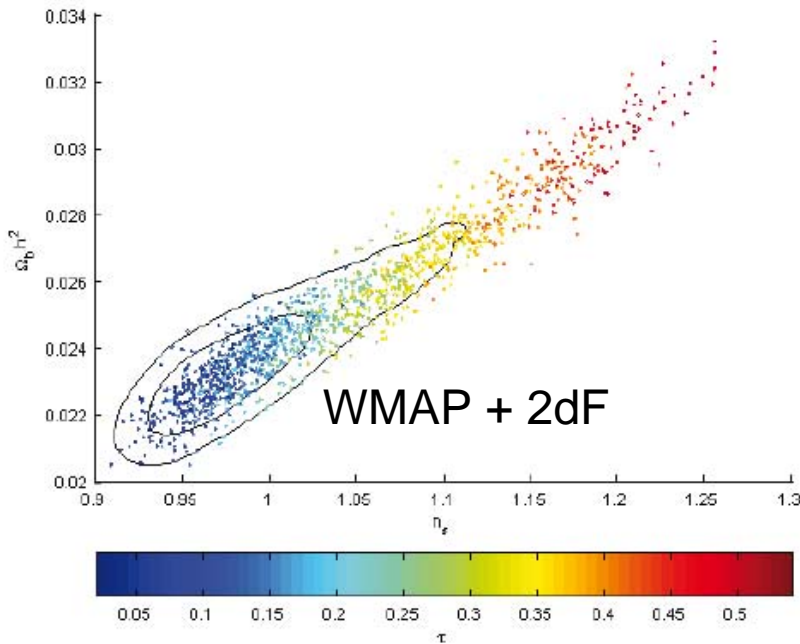


FIG 2.7.—The left panel shows constraints from *WMAP* in the  $\omega_b$ – $n_s$  plane (points, colour coded according to optical depth  $\tau$ ) and from *WMAP* combined with CMB anisotropy measurements at smaller scales and with 2dF galaxy clustering data. The right panel shows constraints on the amplitude of the fluctuations,  $\sigma_8$ , and  $\Omega_m$  for several data-sets. The contours labelled CMB show the constraints imposed by *WMAP* with weak priors (i.e., assuming a  $\Lambda$ CDM universe with a pure power law scalar spectral index and no tensor component) and with strong priors (i.e., where all parameters except  $h$ ,  $\omega_b$  and  $n_s$  are assumed known). The green and blue contours show constraints from weak gravitational lensing surveys and from estimates of the abundance of rich clusters of galaxies; the widths indicate the ranges of results reported in the literature. The vertical bands show constraints on  $\Omega_m$  derived from the mass-to-light ratios and gas content of rich clusters of galaxies (From Bridle et al. 2002).

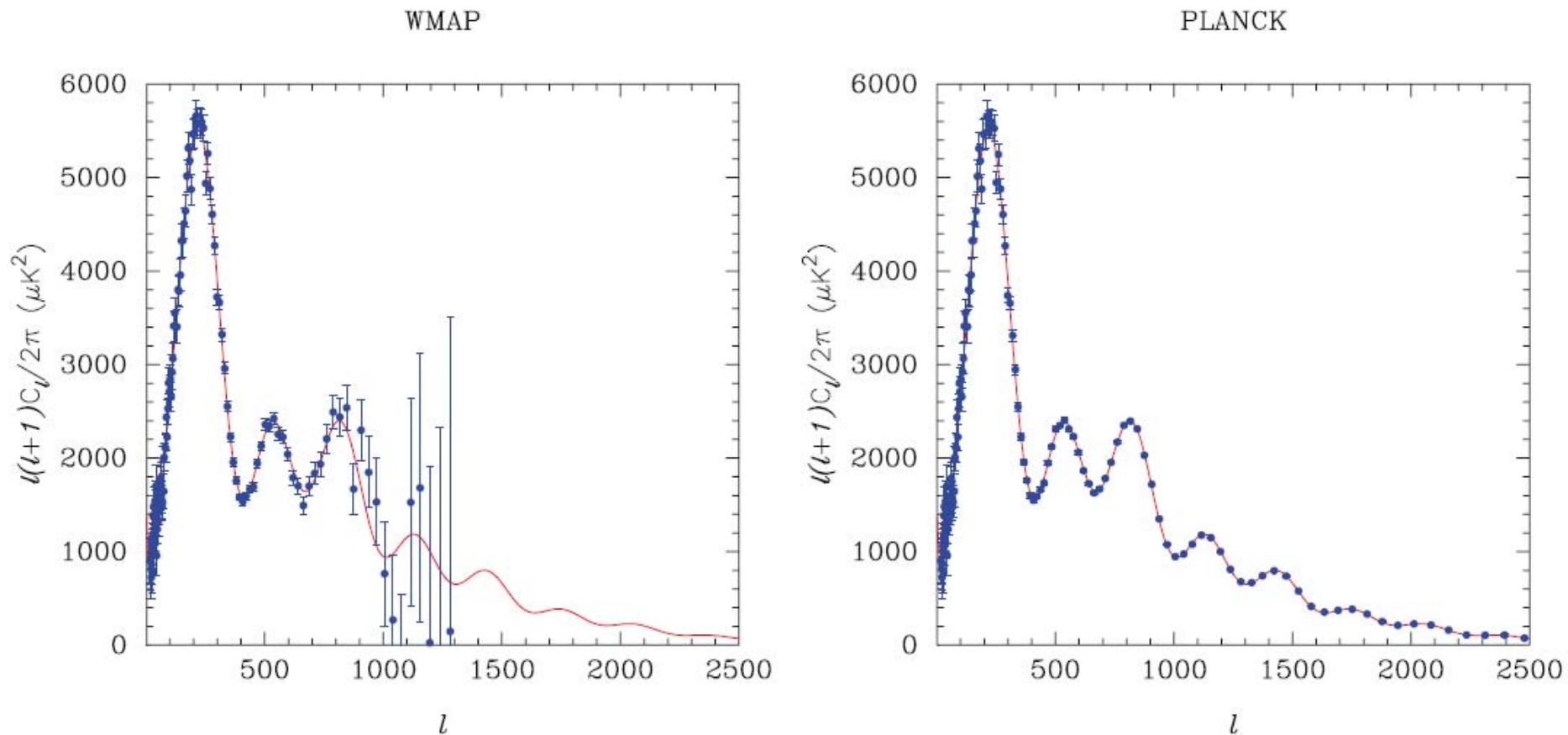


FIG 2.8.—The left panel shows a realisation of the CMB power spectrum of the concordance  $\Lambda$ CDM model (red line) after 4 years of *WMAP* observations. The right panel shows the same realisation observed with the sensitivity and angular resolution of *Planck*.



# Planck: Test der inflationären Modelle

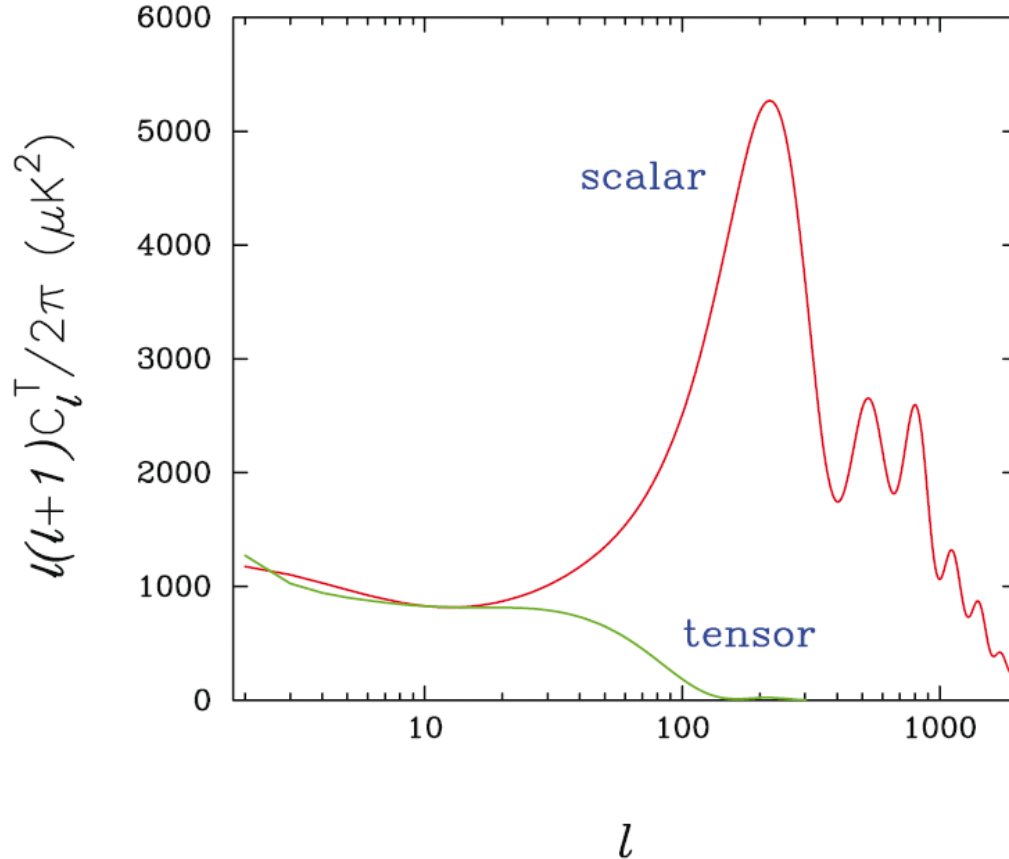


FIG 2.9.—The contributions to CMB anisotropies from scalar and tensor (gravitational wave) perturbations generated during inflation. The concordance  $\Lambda$ CDM model has been assumed with exactly scale-invariant initial fluctuations. The amplitudes of the tensor and scalar power spectra have been chosen arbitrarily to be equal at  $l = 10$ .

- Während der inflationären Phase erzeugen die Fluktuationen Störungen der Krümmung; außerdem werden Gravitationswellen erzeugt, die einen ‚Tensor‘-Beitrag zu den Fluktuationen erzeugen
- Relative Amplituden stark modellabhängig

# Planck: Test der inflationären Modelle

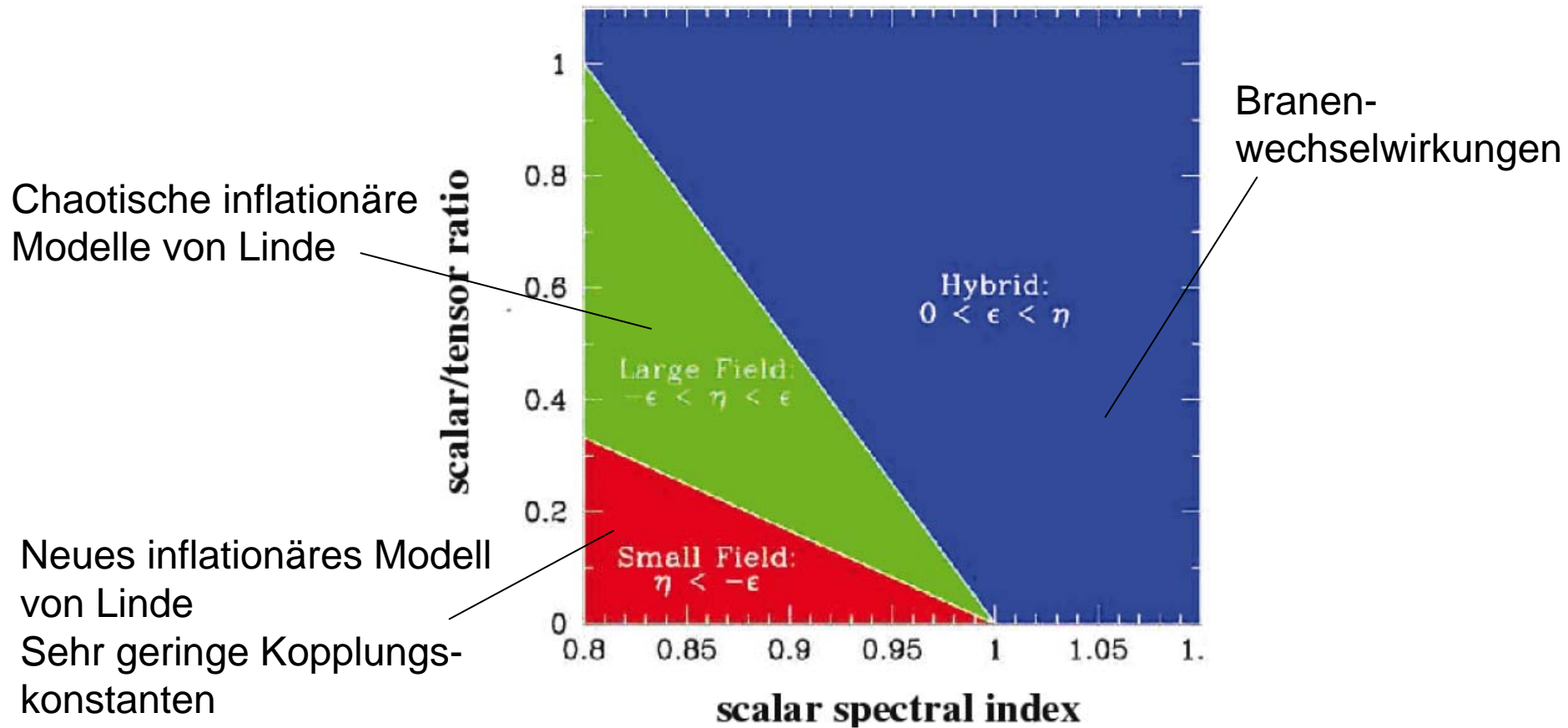


FIG 2.10.—The three classes of inflationary models discussed in the text, delineated in the plane of the tensor-to-scalar ratio  $r$  (Eq. 2.14) versus scalar spectral index  $n_S$  (adapted from Kinney, Melchiorri and Riotto, 2001)

# Planck: Test der inflationären Modelle

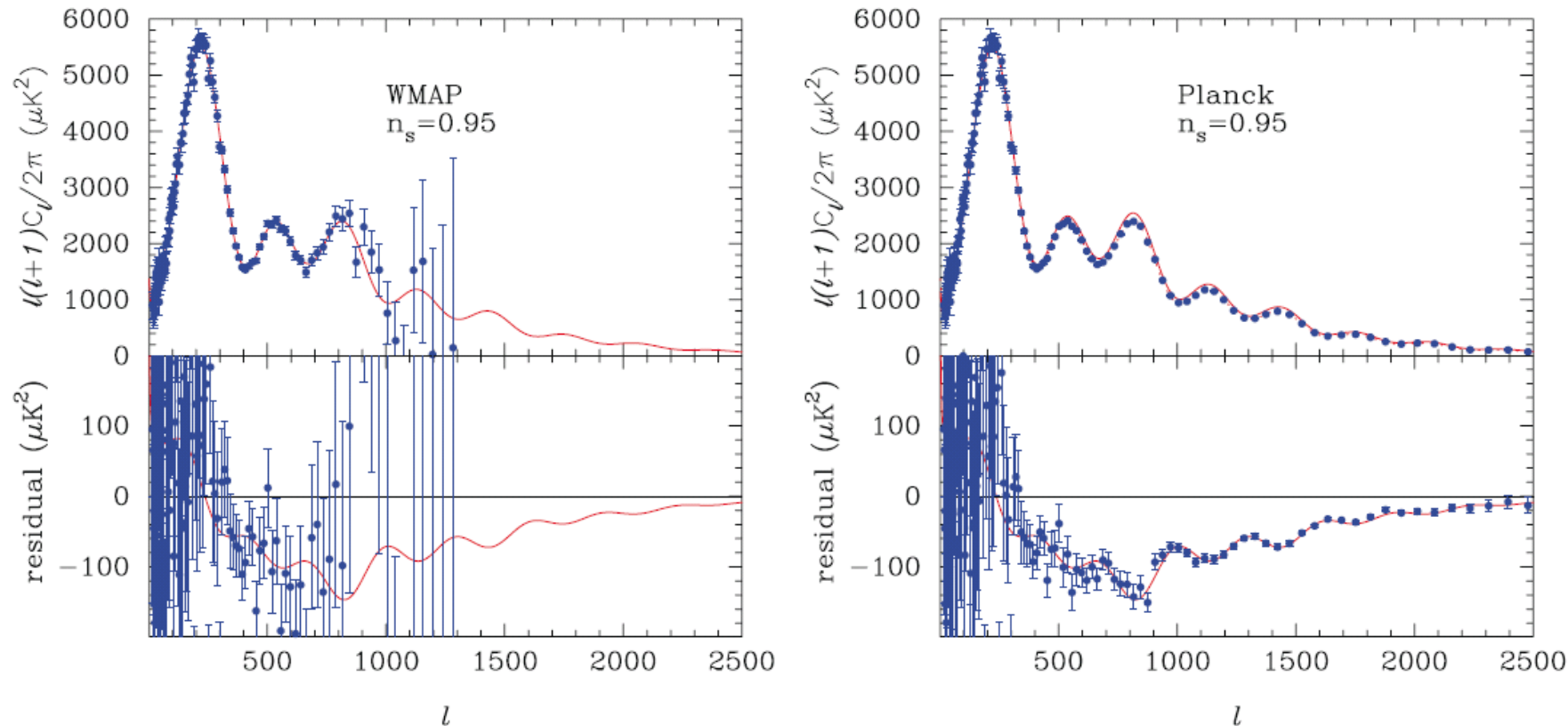


FIG 2.11.—The solid lines in the upper panels of these figures show the power spectrum of the concordance  $\Lambda$ CDM model with an exactly scale invariant power spectrum,  $n_s = 1$ . The points, on the other hand, have been generated from a model with  $n_s = 0.95$  but otherwise identical parameters. The lower panels show the residuals between the points and the  $n_s = 1$  model, and the solid lines show the theoretical expectation for these residuals. The left and right plots show simulations for *WMAP* and *Planck*, respectively.

... ohne zusätzliche Daten ist eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Skalaren Spektralindizes möglich

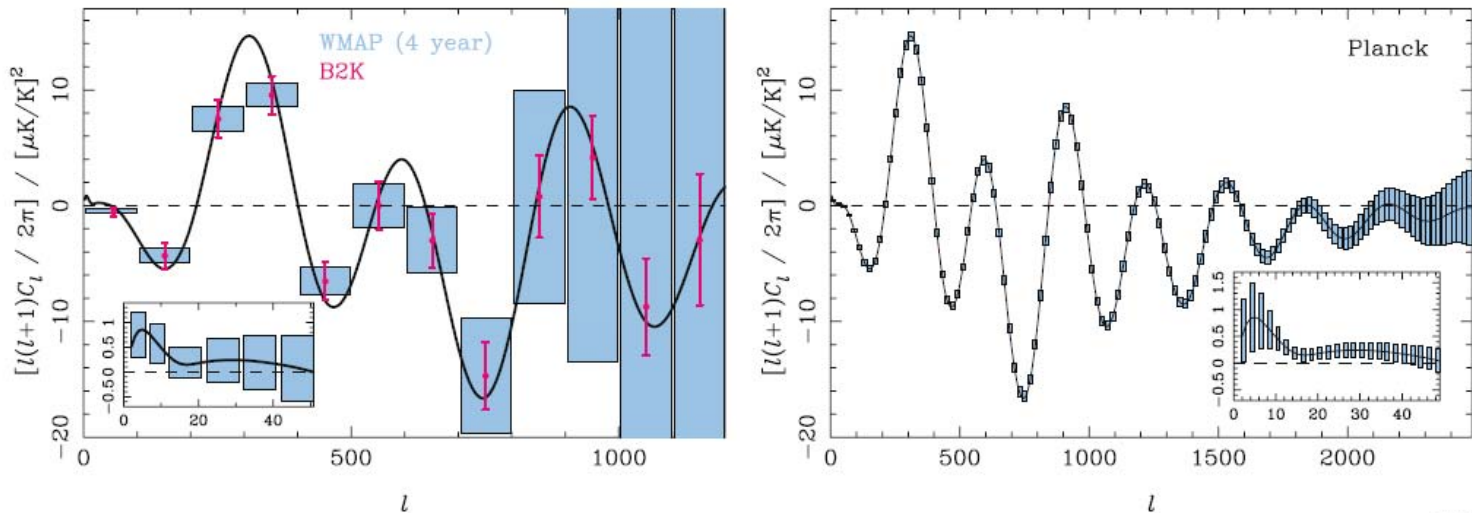


FIG 2.13.—Forecasts for the  $\pm 1\sigma$  errors on the temperature-polarization cross-correlation power spectrum  $C_\ell^{TE}$  in a  $\Lambda$ CDM model (with  $r = 0.1$  and  $\tau = 0.17$ ) from WMAP (4 years of observation) and BOOMERanG2K (left) and *Planck* (right). In the left-hand plot, flat band powers are estimated with  $\Delta\ell = 100$  for both experiments for ease of comparison. The inset shows the WMAP forecasts on large angular scales with a finer  $\Delta\ell$  resolution. For *Planck*, flat band powers are estimated with  $\Delta\ell = 20$  in the main plot, but with  $\Delta\ell = 2$  in the inset on large scales.

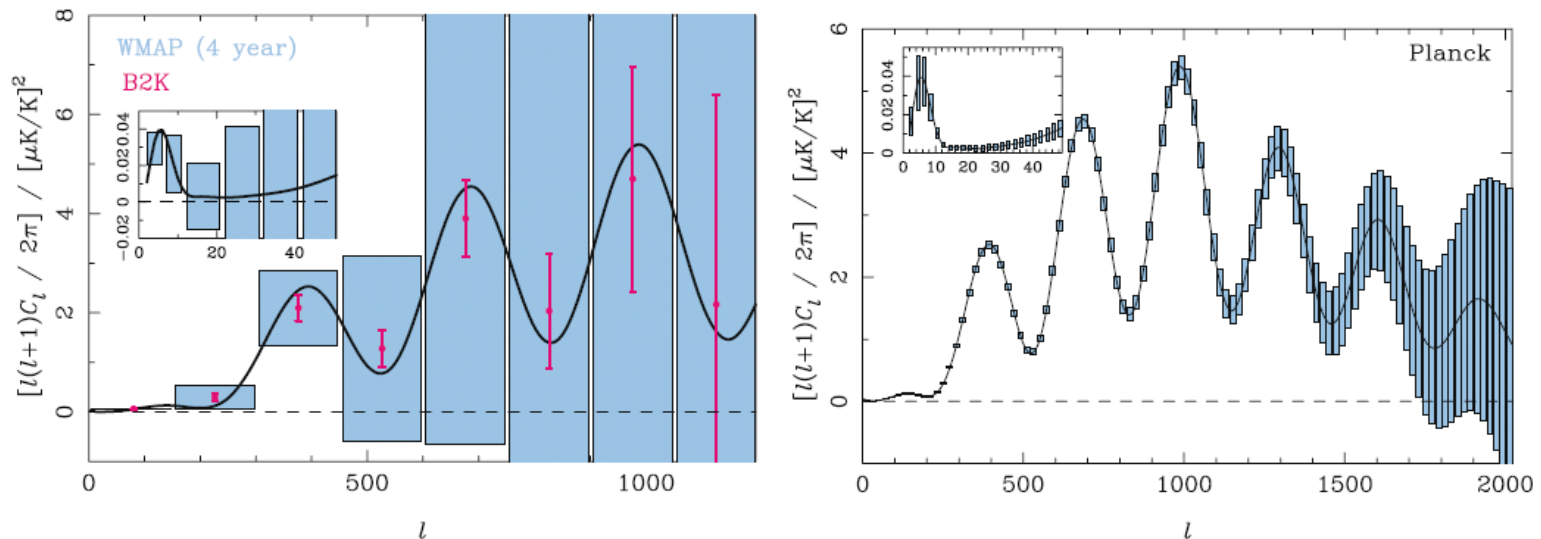


FIG 2.14.—Forecasts for the  $\pm 1\sigma$  errors on the  $E$ -mode polarization power spectrum  $C_\ell^E$  from WMAP and B2K (left) and *Planck* (right). The cosmological model, and the assumptions about instrument characteristics, are the same as in Figure 2.13. For WMAP and B2K, flat band powers are estimated with  $\Delta\ell = 150$  (with finer resolution on large scales for WMAP in the inset). For *Planck* we have used the same  $\ell$ -resolution as in Figure 2.13.

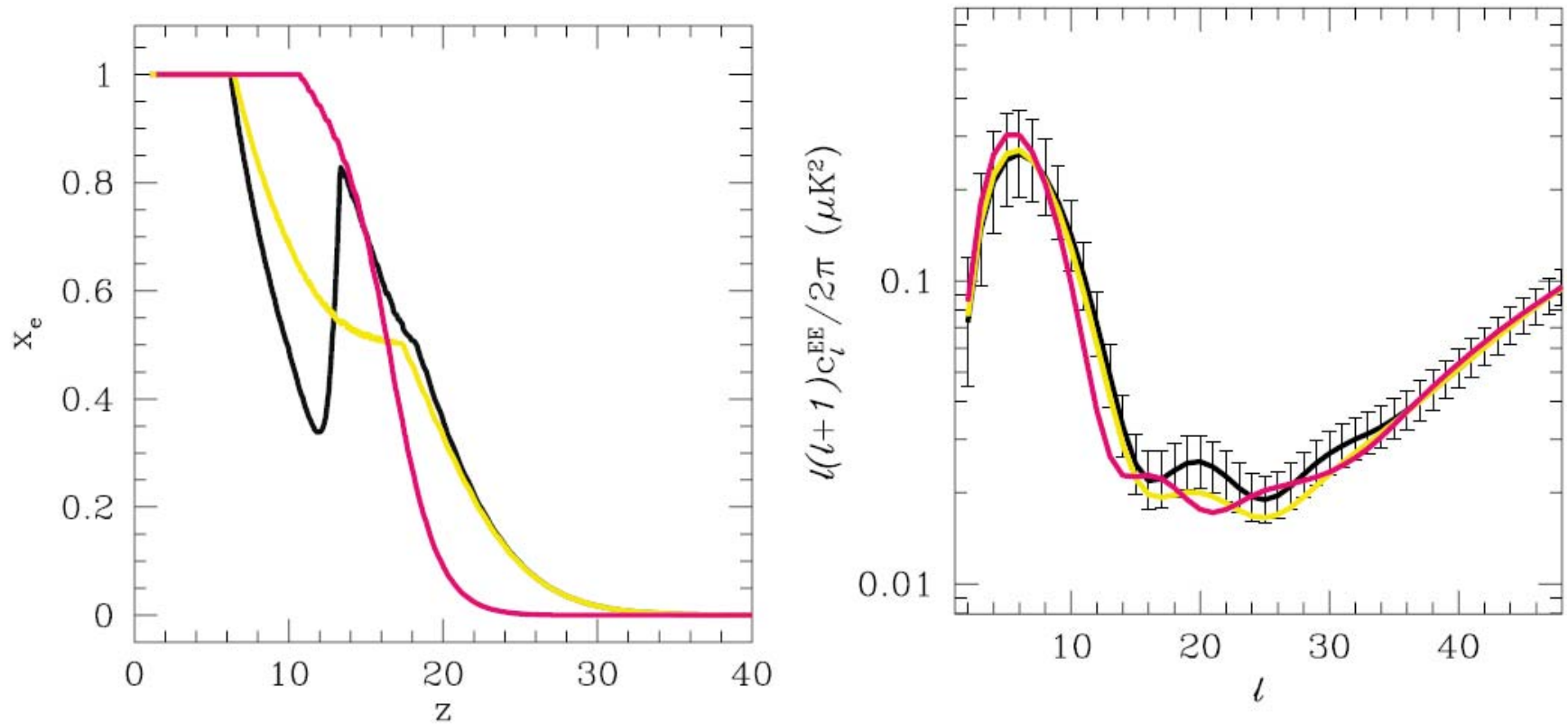
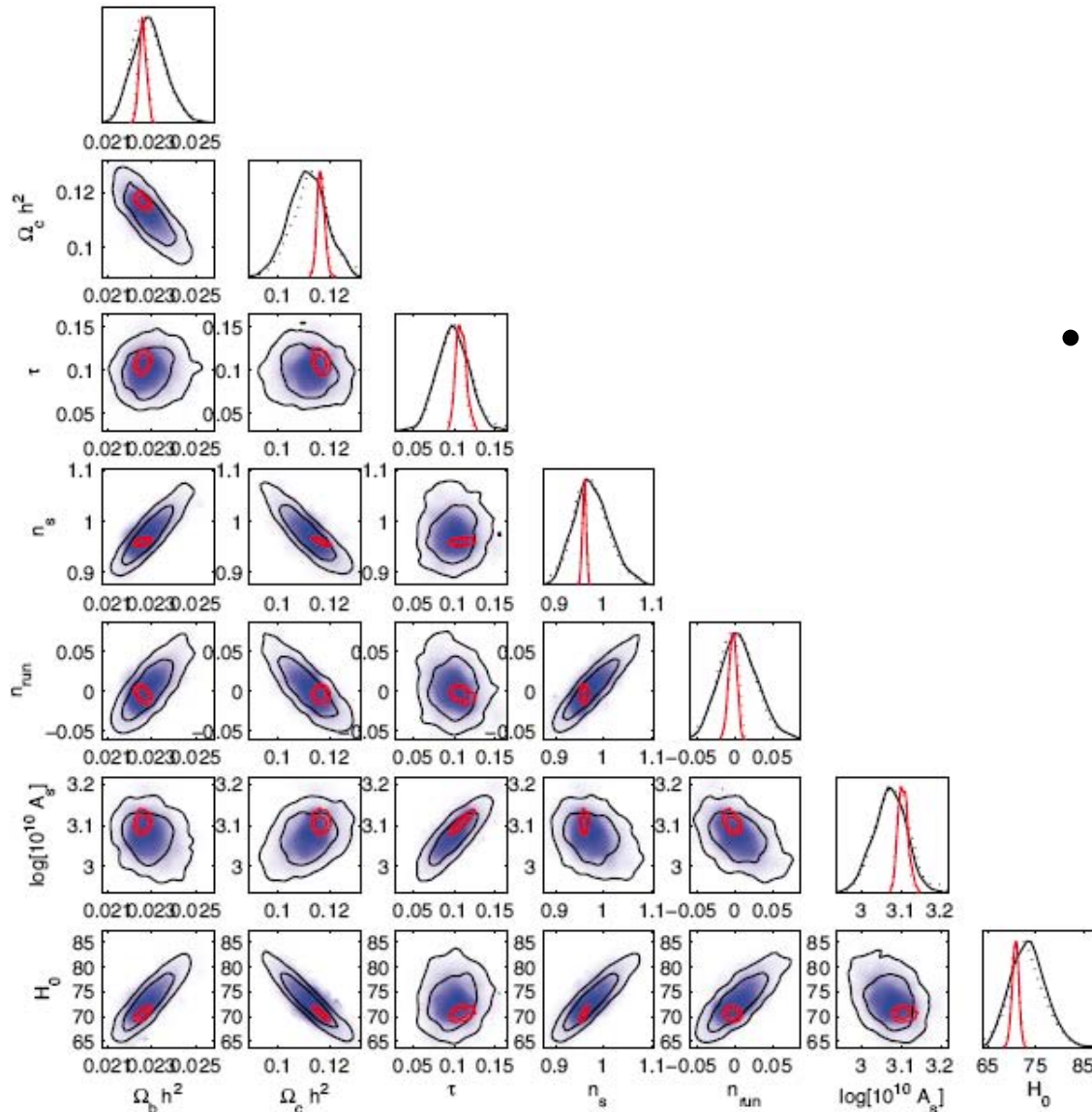


FIG 2.15.—Left: ionization histories for three physically-motivated models of reionization, each having the same optical depth ( $x_e$  is the fractional abundance of ionized hydrogen). Right: large-scale  $E$ -mode polarization power spectra for the different ionization histories, with all other parameters held fixed. Cosmic variance errors for a full-sky experiment are plotted for the model shown in black. (Figures modified from Holder et al. 2003).

- Unterschiedliche Effizienz für Sternentstehung in dunklen Halos bei hohen Rotverschiebungen und unterschiedlichen Metallizitäten der Sterne
- Hauptmaximum gleich, 2. Maximum verschoben

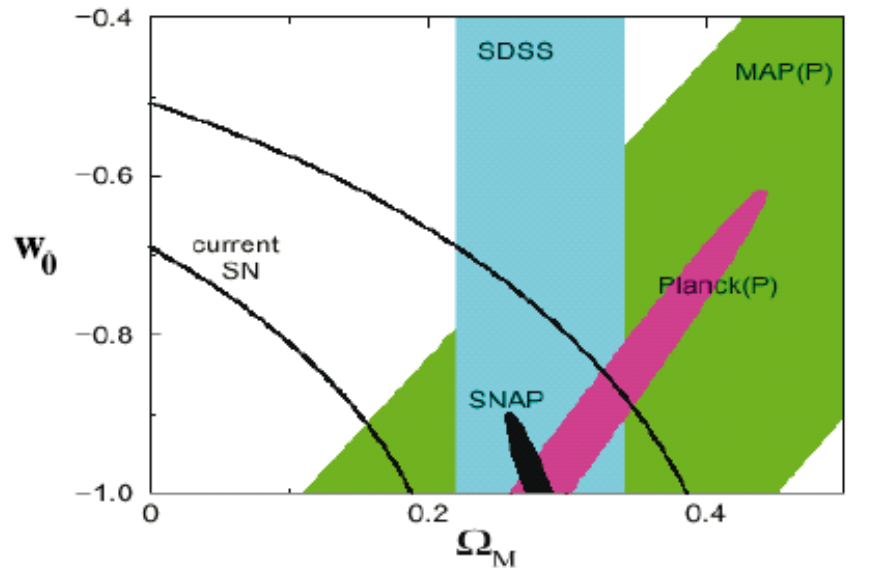
# Planck: kosmologische Parameter



- WMAP nach 4 Jahren gegen Planck

FIG 2.18.—Forecasts of 1 and 2 $\sigma$  contour regions for various cosmological parameters when the spectral index is allowed to run. Blue contours show forecasts for WMAP after 4 years of observation and red contours show results for Planck after 1 year of observations. The curves show marginalized posterior distributions for each parameter.

# Planck: Dunkle Energie



Huterer et al. 20

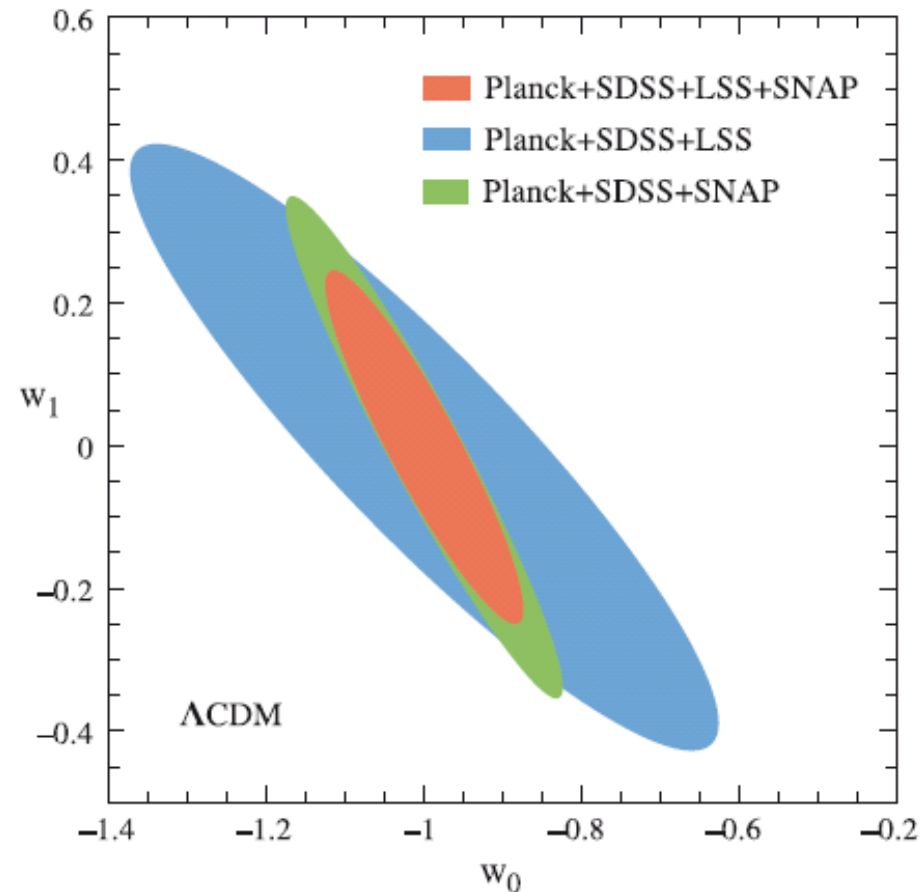


FIG 2.22.—The left panel (from Huterer & Turner 2001) shows forecasts of constraints on the dark energy equation of state parameter  $w$  and  $\Omega_m$  for various experiments including *Planck*. The right panel (from Seo & Eisenstein 2003) shows forecasts of constraints on the time evolution of  $w$ , parameterised through  $w \equiv w_0 + w_1 z$ , for *Planck* combined with various redshift surveys and SNe observations from SNAP (see text for details).

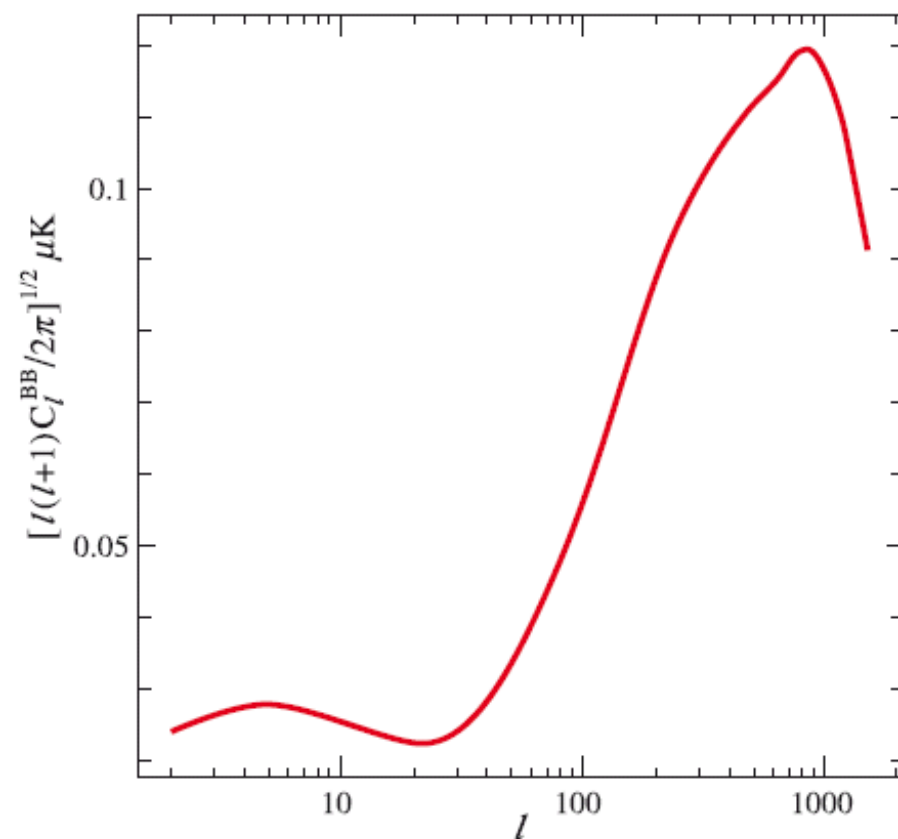
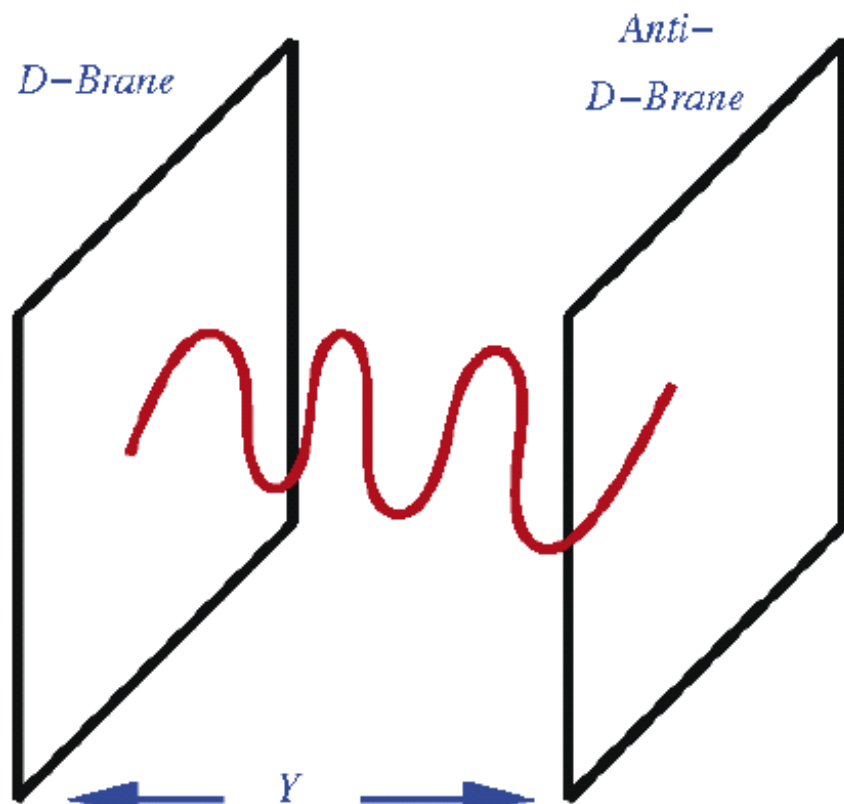
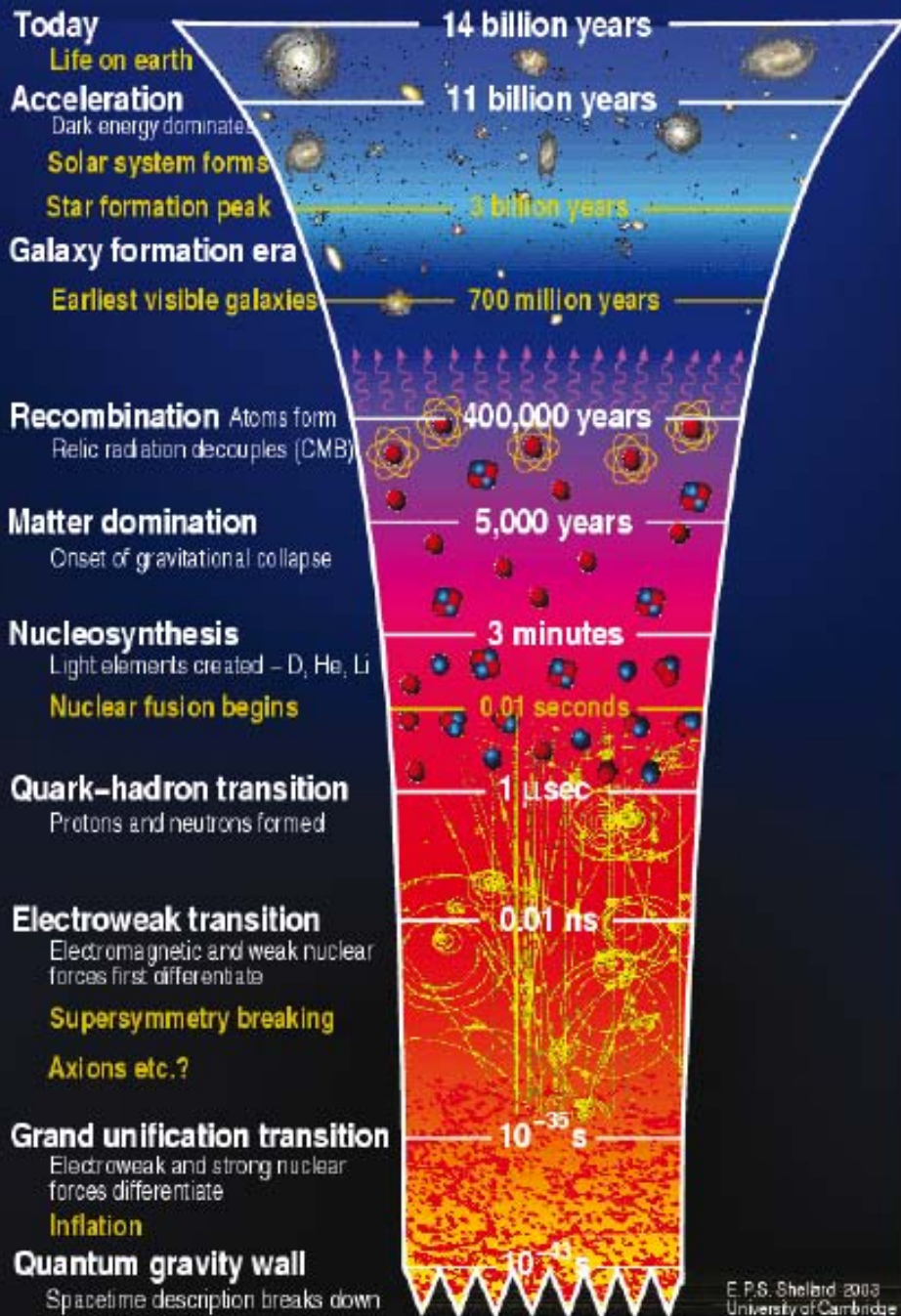


FIG 2.24.— The left panel shows an open string state with end points fixed on a brane and antibrane. At some critical separation the string state becomes massless and at smaller separations becomes tachyonic. At this critical point inflation ends, as in hybrid models of inflation (from Quevedo 2003). The right panel shows the B-mode polarization CMB power spectrum expected from cosmic strings (adapted from Pogosian et al. 2003)





Verbleibende Fragen:

Dunkle Energie, physikalischer Ursprung, warum existieren wir zu einer Zeit, zu der die Dunkle Energie dominant wird?

Dunkle Materie

Wissen wir, welche Materie im Universum existiert? Netto-Beitrag der massiven Neutrinos?

Wann und wie wurden Baryonen erzeugt?

Gibt es Hinweise auf die Stringtheorie?

Wieweit können wir zurückextrapolieren mit der ART? Sind die Konstanten konstant? Gibt es Abweichungen von den Friedmann-Gleichungen wie von einigen Branen-Welten Szenarios vermutet?

Was ist die Physik hinter der Inflation? Kann die Inflation mit der Stringtheorie erklärt werden?

Wie begann das Universum? Kann die Stringtheorie das Problem der Urknall-Singularität lösen? Können wir mittels BigBang eine frühere Phase der Geschichte des Universums erforschen?

FIG 2.20.—Schematic diagram of the history of the Universe from the Planck time to the present.

# Planck: Sekundäre Anisotropien

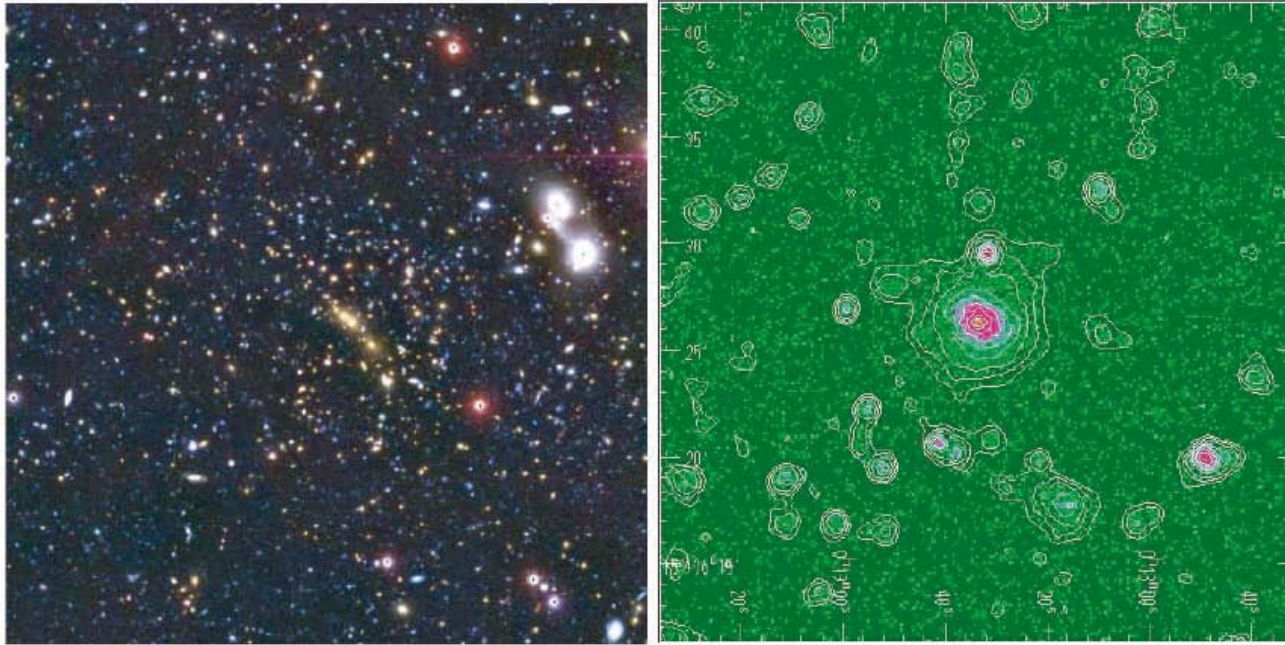


FIG 3.1.— Cluster Cl 0016+16 in visible light (Clowe et al. 2000; left panel), the Sunyaev-Zel'dovich effect (Hughes and Birkinshaw 1998; colours, right panel), and X-rays (contours, right panel).

- SZ-Effekt: Sunyaev-Zel'dovich Effekt, nach Rashid Sunyaev und Jakow Borissowitsch Seldowitsch; beschreibt die Reduzierung der Zahl niedrigenergetischer Photonen und die Erhöhung höherenergetischer Photonen relativ zum Planck-Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung in heißem Gas in Galaxienhaufen
- Elektronen im heißen, ionisierten IM eines Galaxienhaufens streuen Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung – inverser Compton-Effekt – Energie wird von den Elektronen auf die Photonen übertragen – Verschiebung der relativen Anzahl von niedrigenergetischen und höherenergetischen Photonen im Vergleich zum ursprünglichen Planck-Spektrum
- -> Suche nach Galaxienhaufen, werden als Schatten vor dem gleichmäßigen Spektrum des kosmischen Hintergrundes sichtbar

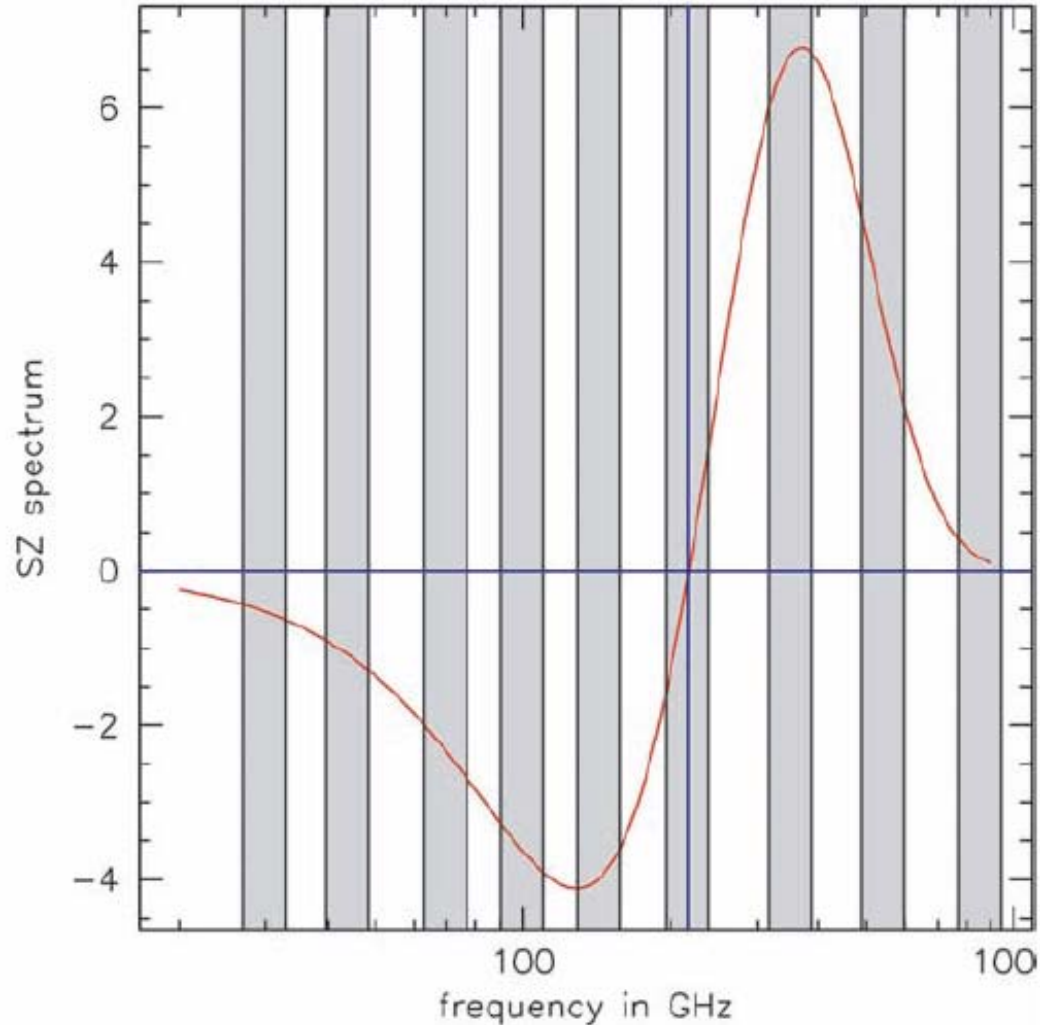


FIG 3.4.— Spectrum of the thermal Sunyaev-Zel'dovich effect (red curve, arbitrary units), overlaid with *Planck*'s frequency channels (grey bands). The CMB intensity is increased at frequencies above 217 GHz (i.e., to the right of the vertical blue line) at the expense of lower frequencies. In other words, galaxy clusters cast shadows below 217 GHz and shine above.

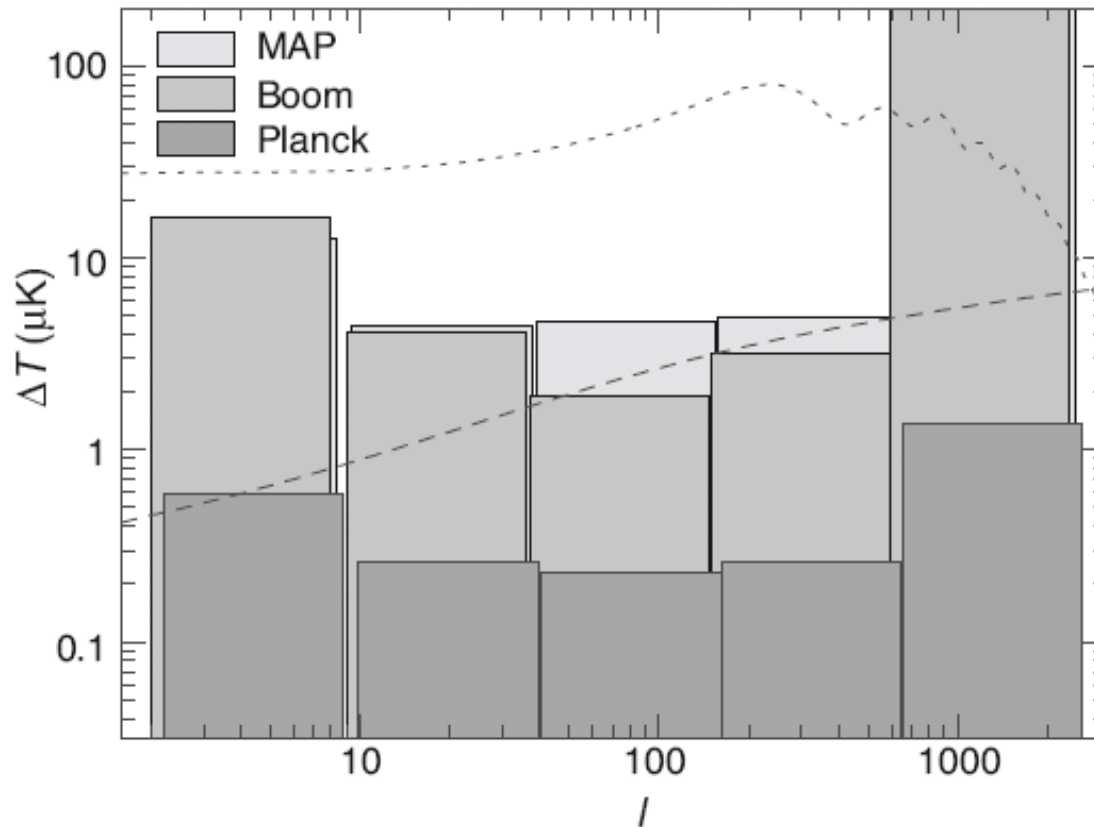


FIG 3.17.—Detection thresholds for the SZ effect due to large-scale structure. Error boxes represent the  $1-\sigma$  rms residual noise in multipole bands and can be interpreted as the detection threshold. Also shown (dotted) is the level of the primary anisotropies that have been subtracted with the technique and the signal (dashed) expected in a simplified model. (Cooray, Hu and Tegmark 2000).

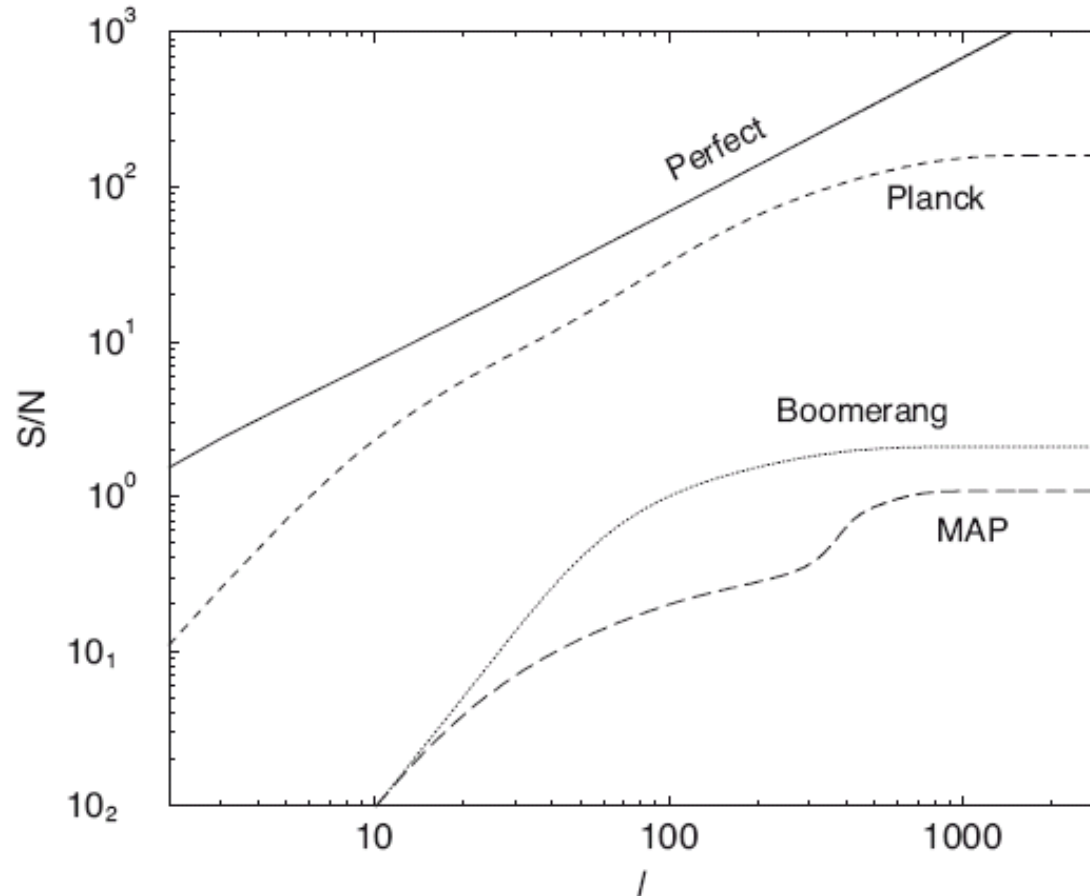


FIG 3.18.— Cumulative signal-to-noise ratio in the measurement of the power spectrum created by the SZ effect due to large-scale structures. Expectations are shown for Boomerang, *WMAP* and *Planck* as a function of multipole order  $l$ . The solid line is the maximum signal-to-noise ratio achievable in a perfect experiment. The signal-to-noise ratio is adequate in the *Planck* data for a clear detection of the SZ effect, while Boomerang and *WMAP* will only allow reasonable limits to be placed on any SZ contribution. (Cooray, Hu and Tegmark 2000; cf. Figures 3.17 and 3.18).

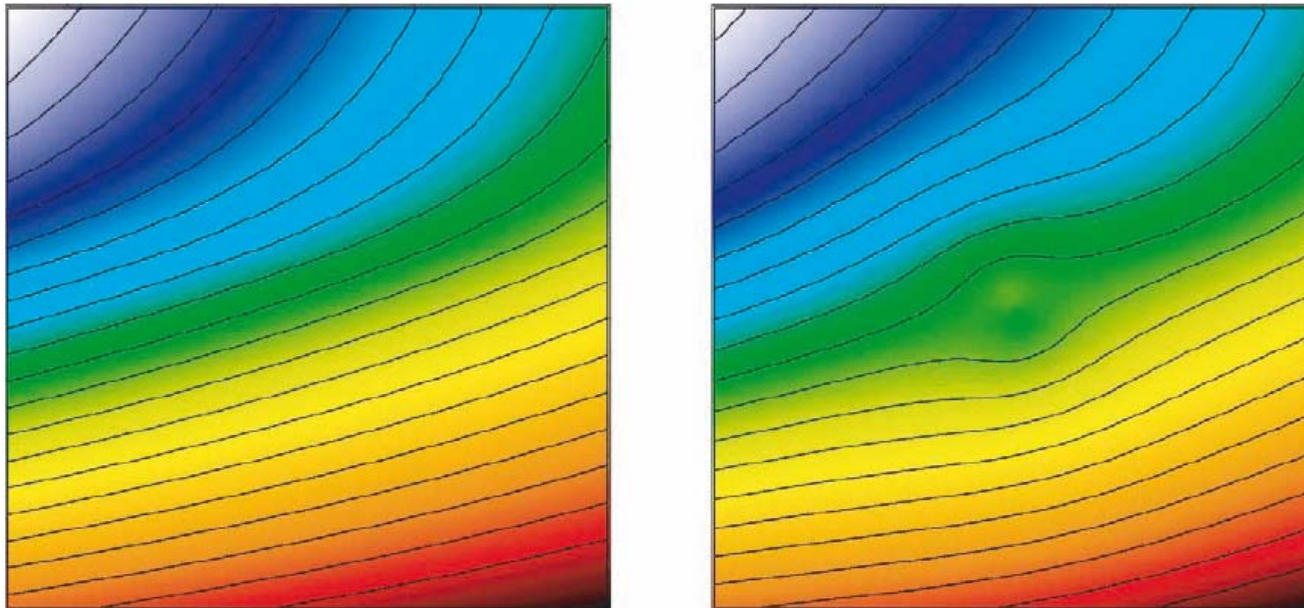
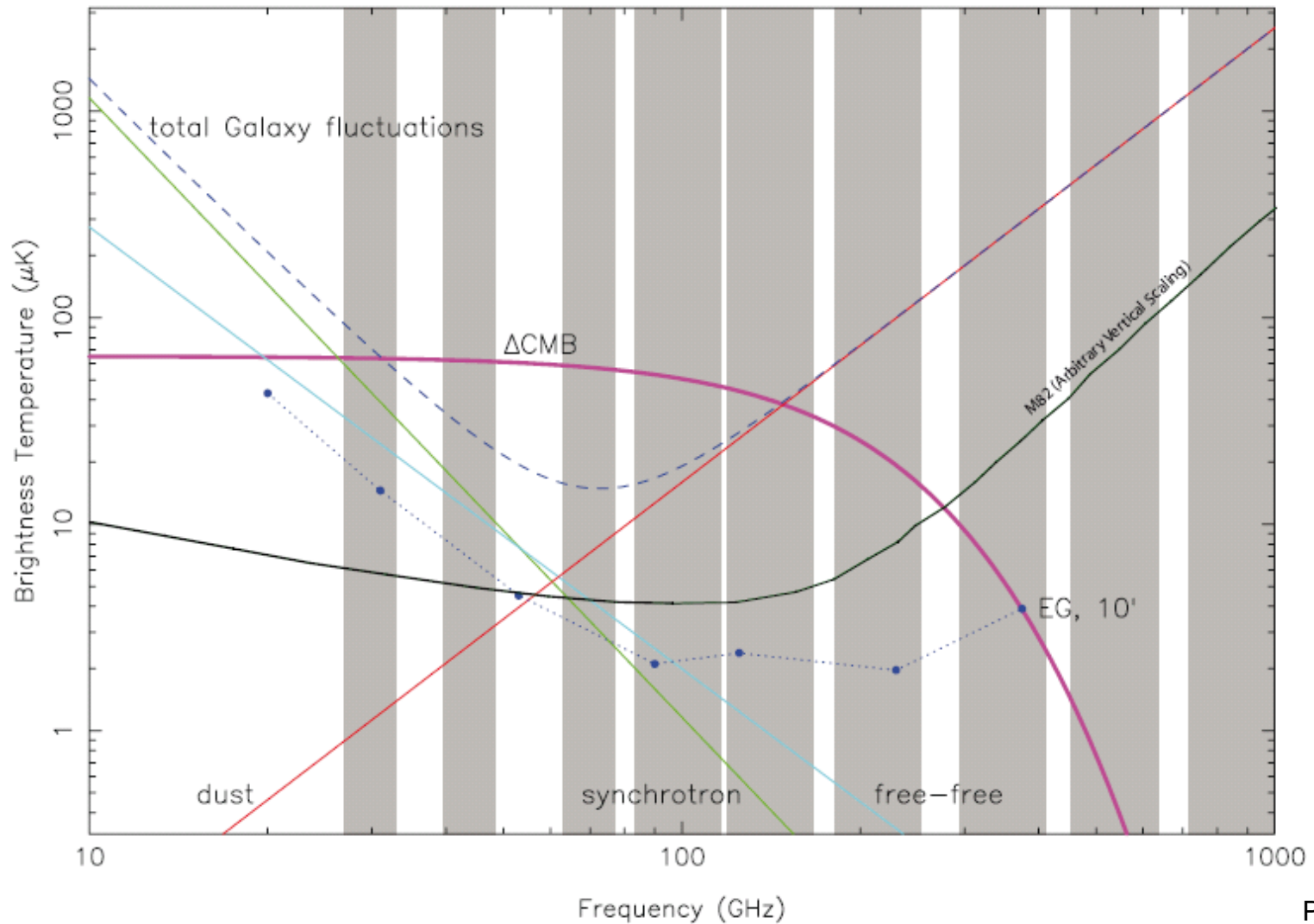


FIG 3.6.— Example of a CMB temperature field of area  $10' \times 10'$  (left panel) lensed by a cluster of mass  $10^{15} h^{-1} \text{Mpc}$  at redshift 0.4 in a  $\Lambda\text{CDM}$  universe (right panel). There is very little structure in the unlensed map, and lensing by the cluster creates a characteristic distortion most easily seen in the contours in the right panel.

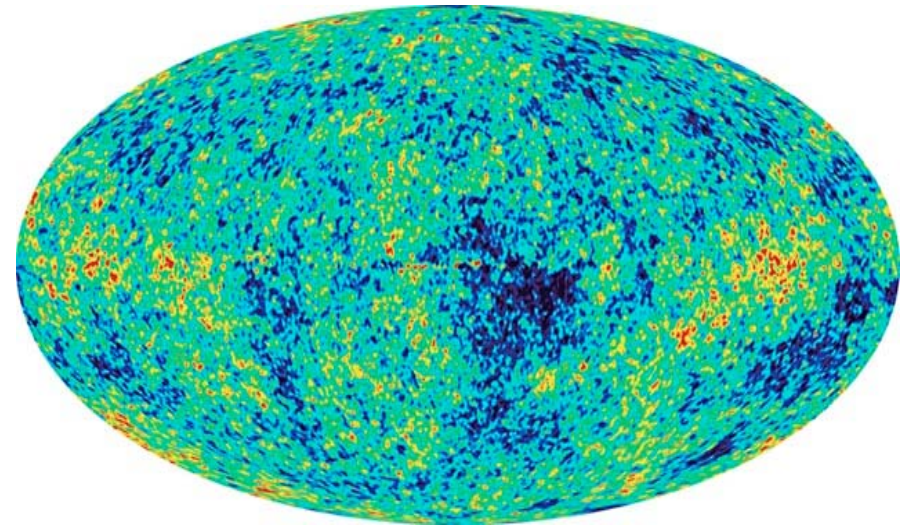
- Galaxienhaufen wirken auch auf die Hintergrundstrahlung wie Linsen



Planck bluebook

FIG 4.1.— Spectra of sources in “brightness temperature” (in which a Rayleigh-Jeans  $\nu^2$  spectrum is flat), superimposed on the *Planck* frequency bands. Spectra of the Galaxy (as measured by *WMAP*, see Fig. 1.3) and M82, a star-forming galaxy, are shown. For the Galaxy, the components contributing to the over-all spectrum are identified. Also shown are the expected level of CMB fluctuations on a  $1^\circ$  scale, and, as a light dashed line (EG), the expected level of fluctuations introduced by all foreground radio sources on a  $10'$  scale.

- Hubble-Expansion
- Kosmischer Mikrowellenhintergrund
- Elementverteilung im Universum





- 10.10.08: Überblick über die Themen des Semesters
- 24.10.08: Kurze Einführung in die String-Theorie
- 07.11.08: Urknall & Inflation, Teil I
- **21.11.08: Urknall & Inflation, Teil II**
- 05.12.08: Universum & Multiversen
- 19.12.08: Wurmlöcher und Schwarze Löcher

## Weihnachtsferien

- 09.01.09: Zeitreisen & Zeitmaschinen
- 23.01.09: GLAST

