

Urknall



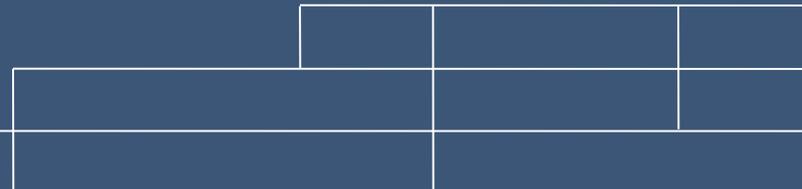
bis heute

Zeit

Kosmologie

Michael Kobel

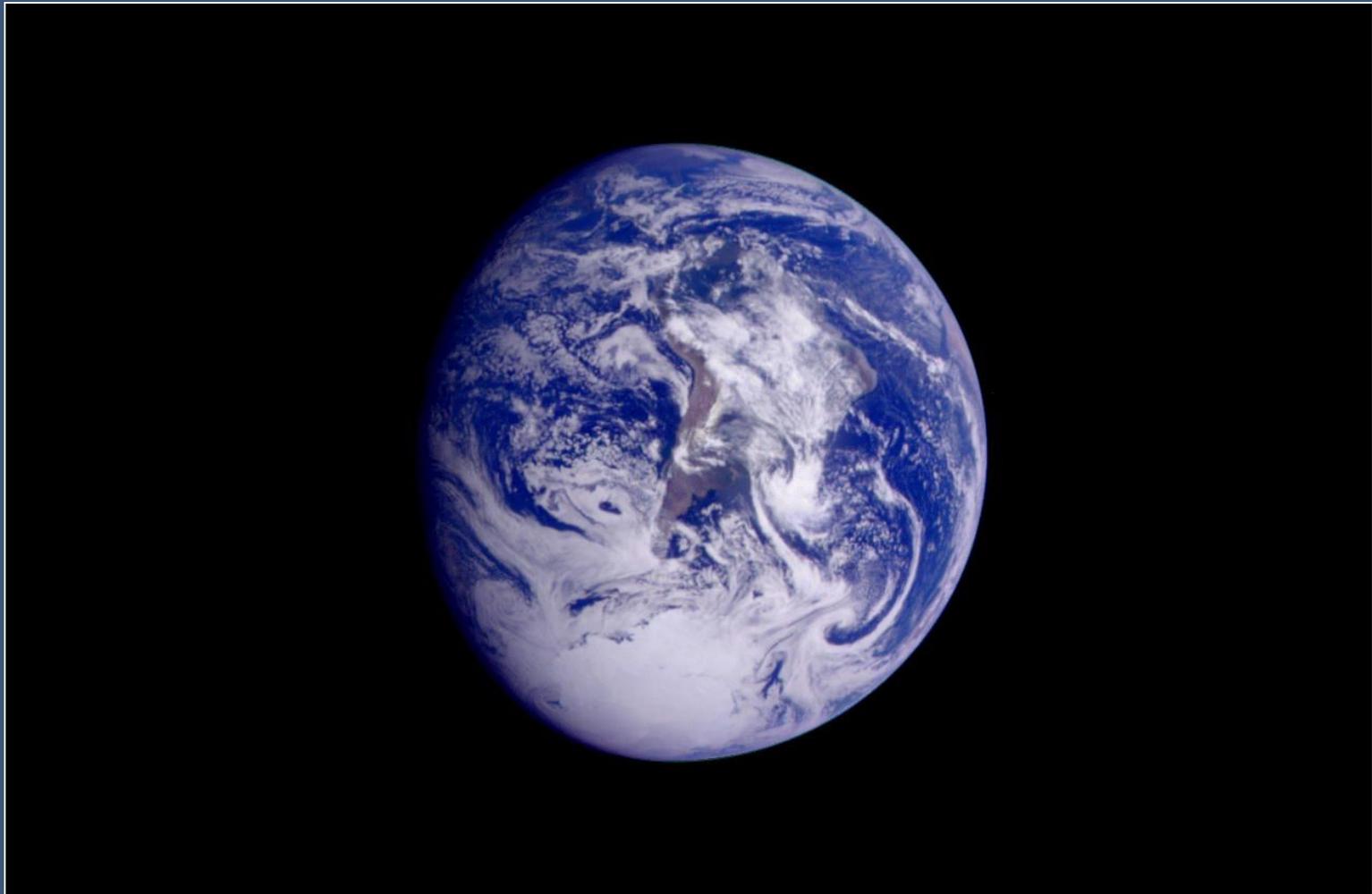
(mit 70% dunkler Energie aus Folien
von Christian Stegmann, DESY, Zeuthen)



Die Erde ...

Heute

Zeit



... einer von acht Planeten

Heute
Zeit



Sterne

Heute

Zeit



Die Milchstraße

Heute

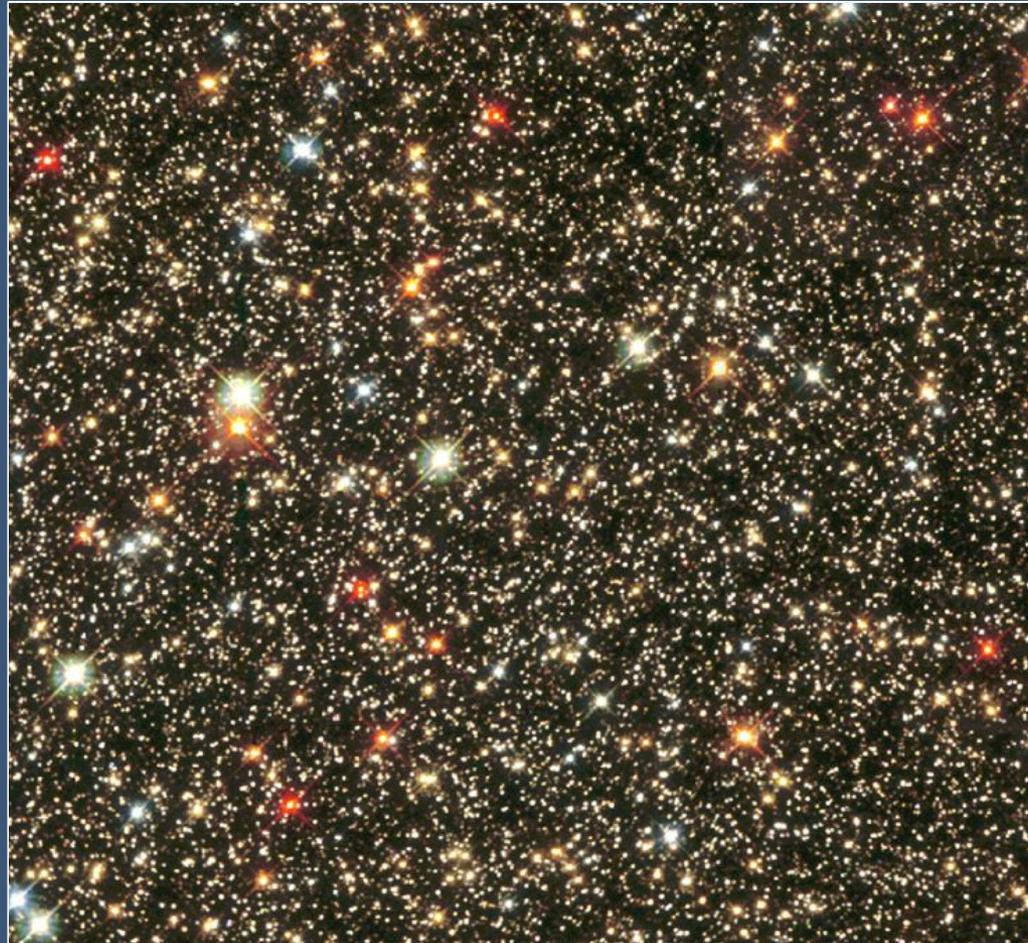
Zeit



Voller Sterne

Heute

Zeit



Und Nebel

Heute

Zeit



Unsere Milchstraße

Heute

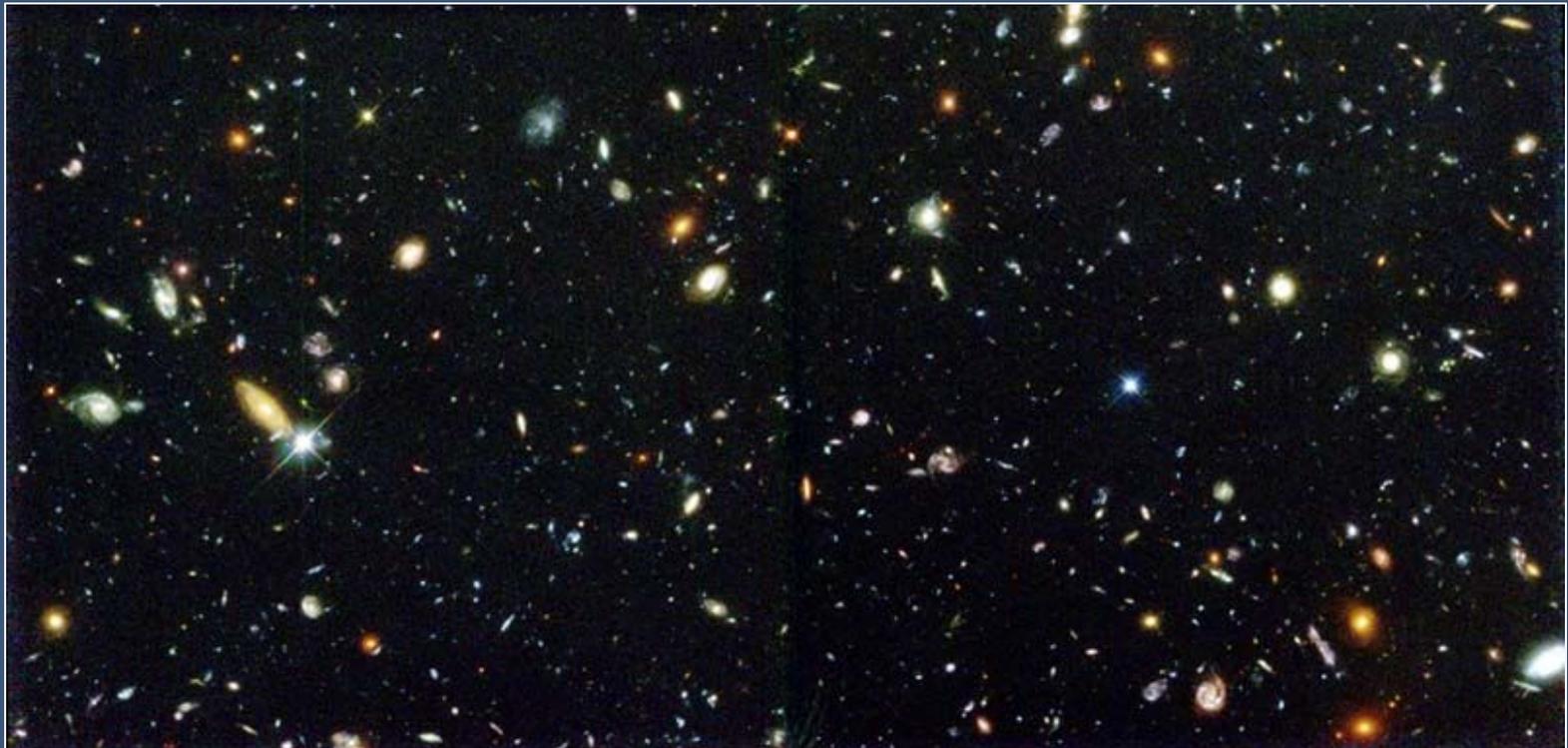
Zeit



Das Weltall ist voller Galaxien

Heute

Zeit



Hubble Deep Field

HST

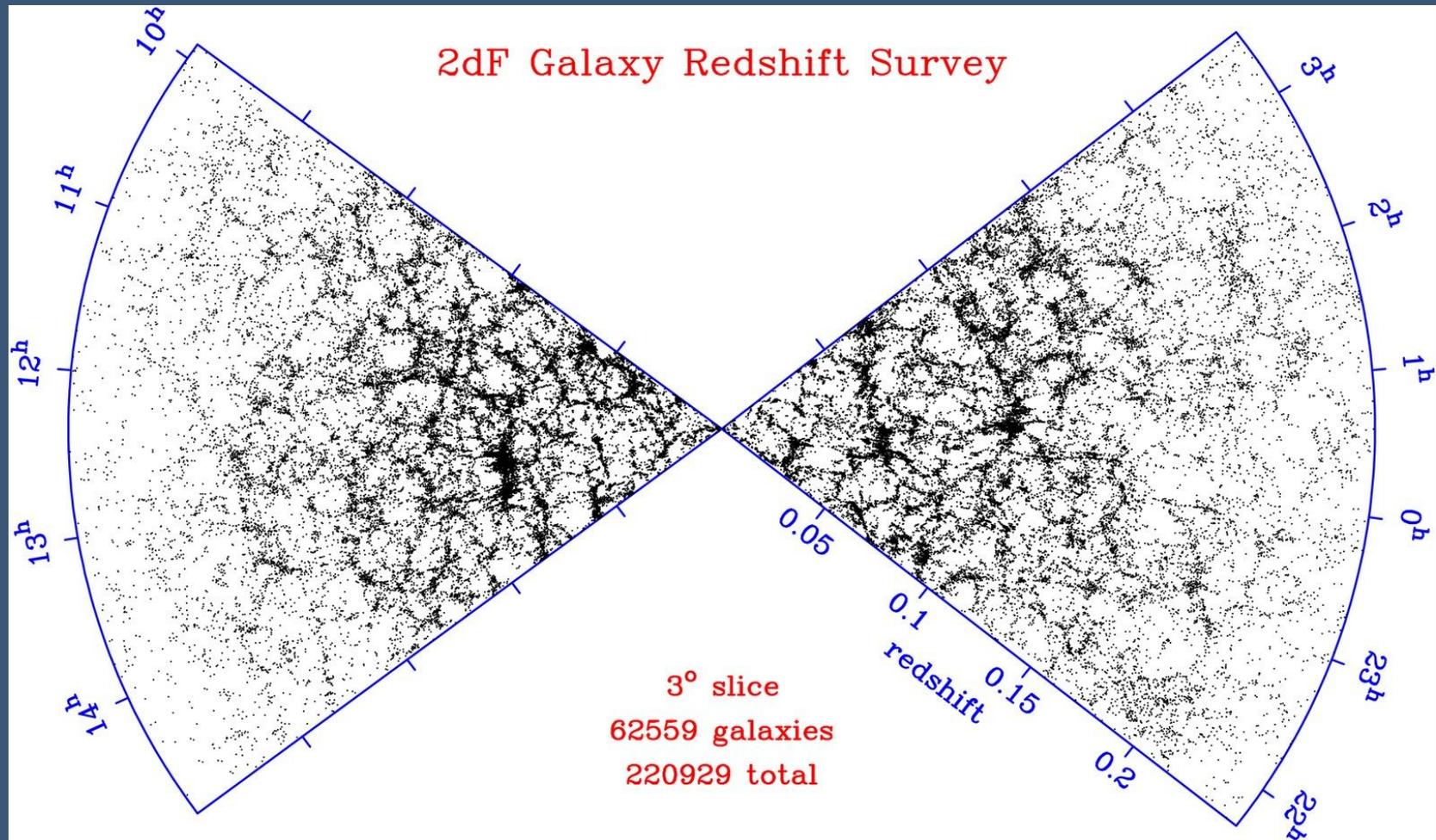
WFPC2

ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

Galaxiencluster

Heute

Z_{pit}

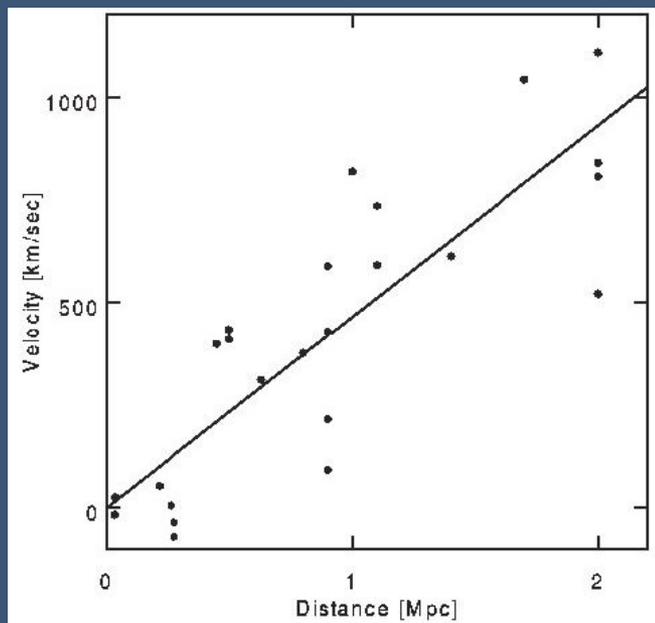


Edwin Hubbles Entdeckung

Heute

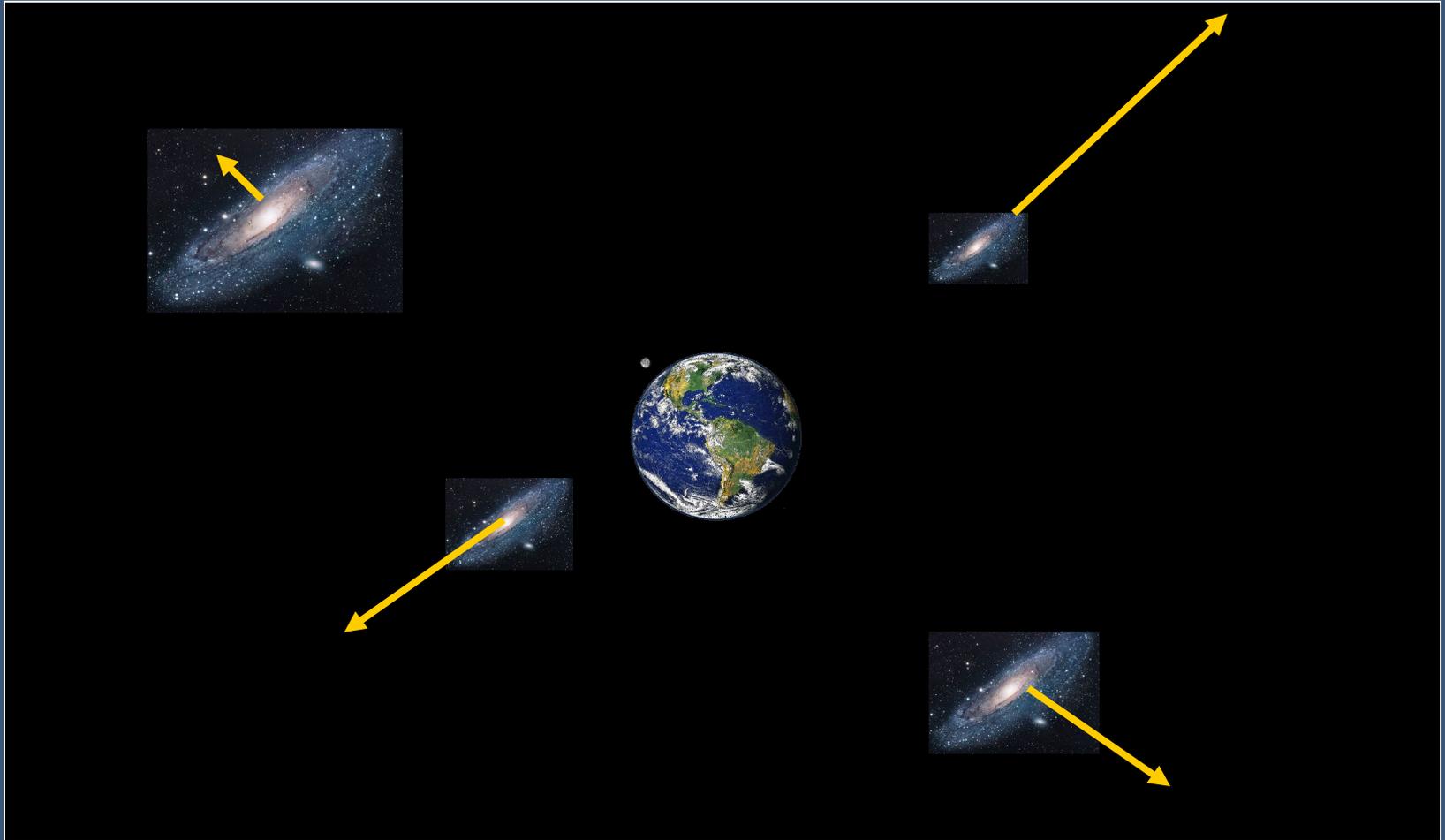
Zeit

- Die Galaxien bewegen sich von uns weg
- Umso schneller, je weiter sie weg sind



Galaxienflucht

Heute
Zeit



Verstehen wir das?

Heute

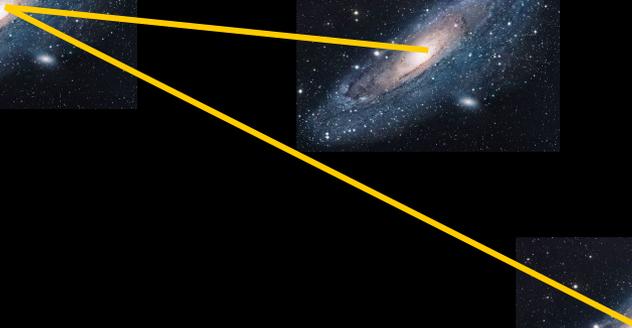
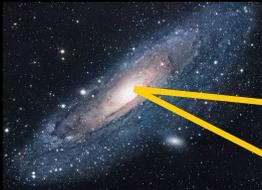
Zeit

- Wir sind das Zentrum des Universums!
- Das Weltall dehnt sich aus
 - Der Raum zwischen den Galaxien wird größer

Wissenschaftlich attraktiver!

Heute

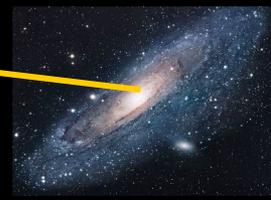
Zeit



Heute

Zeit

Einige Zeit später



Doppelt so weite Galaxien entfernen sich doppelt so schnell!

Wie kann man das messen?

Heute

Zeit

- Geschwindigkeitsmessung
 - Tacho?

- Entfernungsmessung
 - Lineal?

Heute

Zeit

Geschwindigkeitsmessung über Rotverschiebung

Dopplereffekt

Heute
↑
Zeit

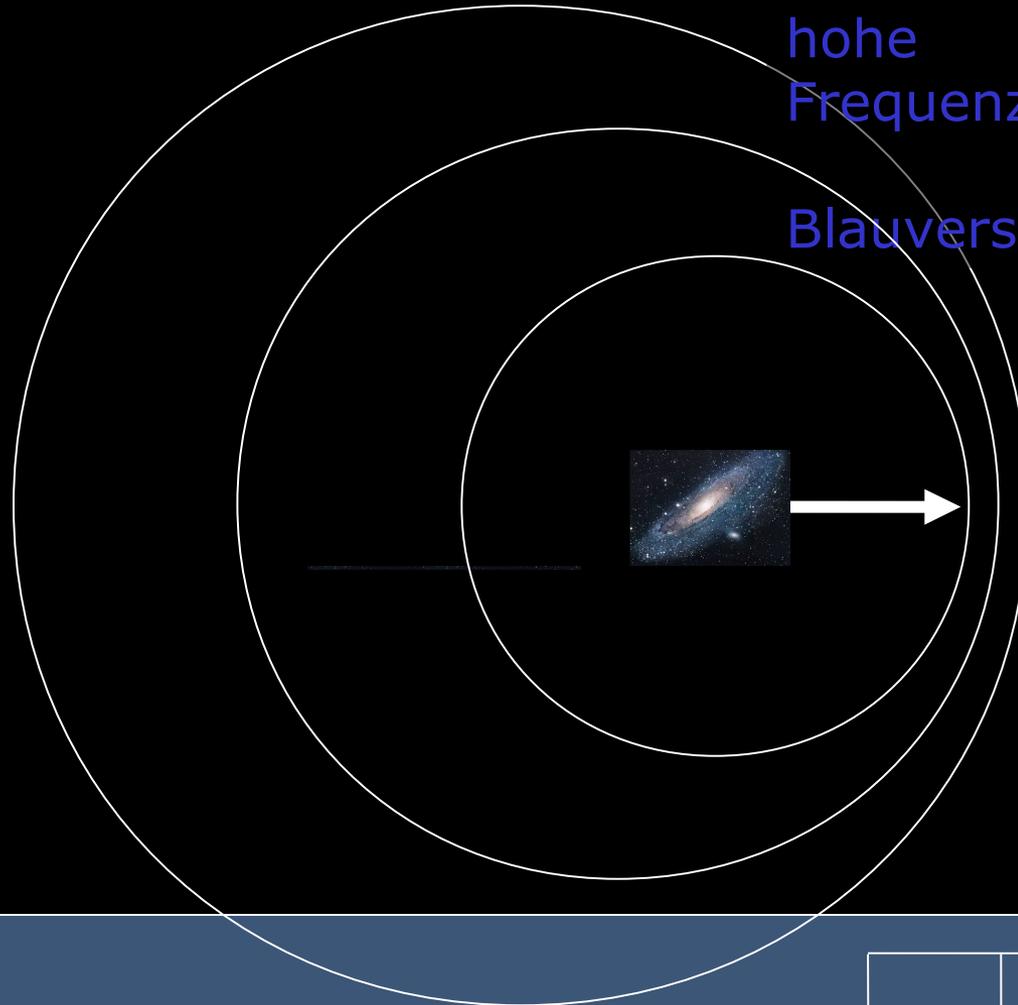
niedrige
Frequenz

Rotverschiebung



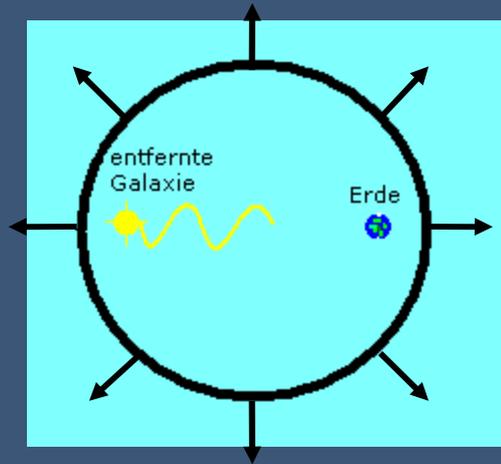
hohe
Frequenz

Blauverschiebung

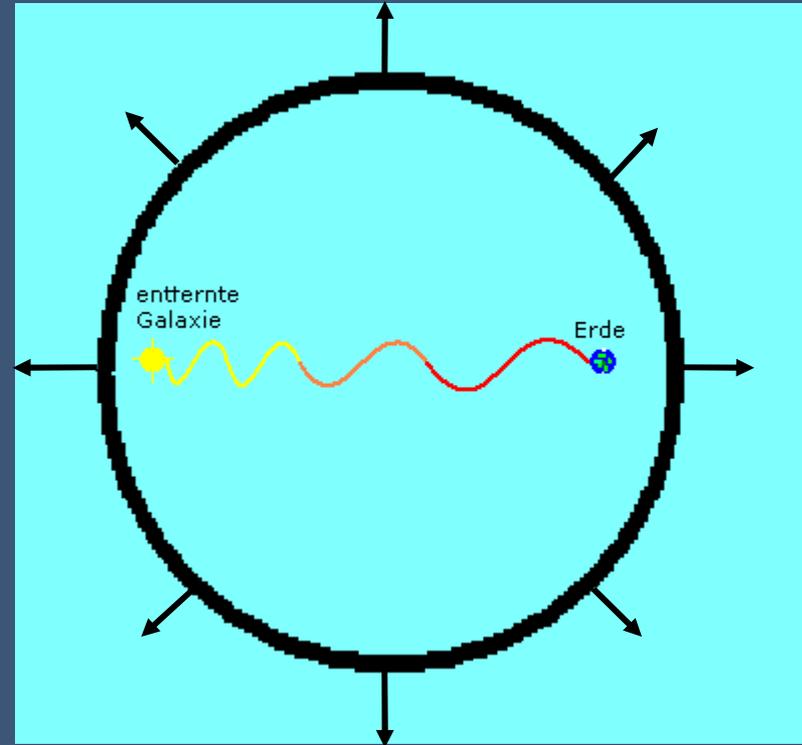


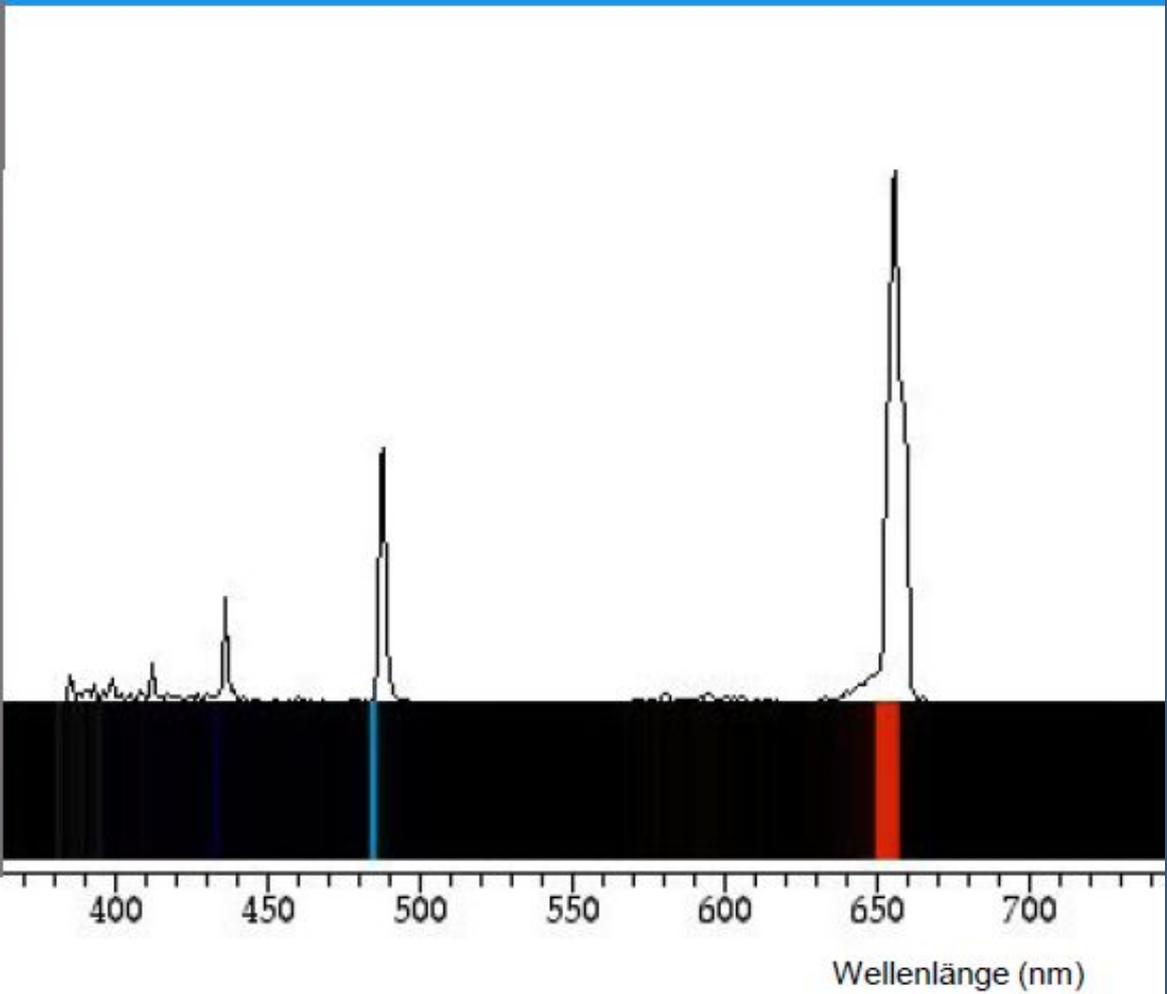
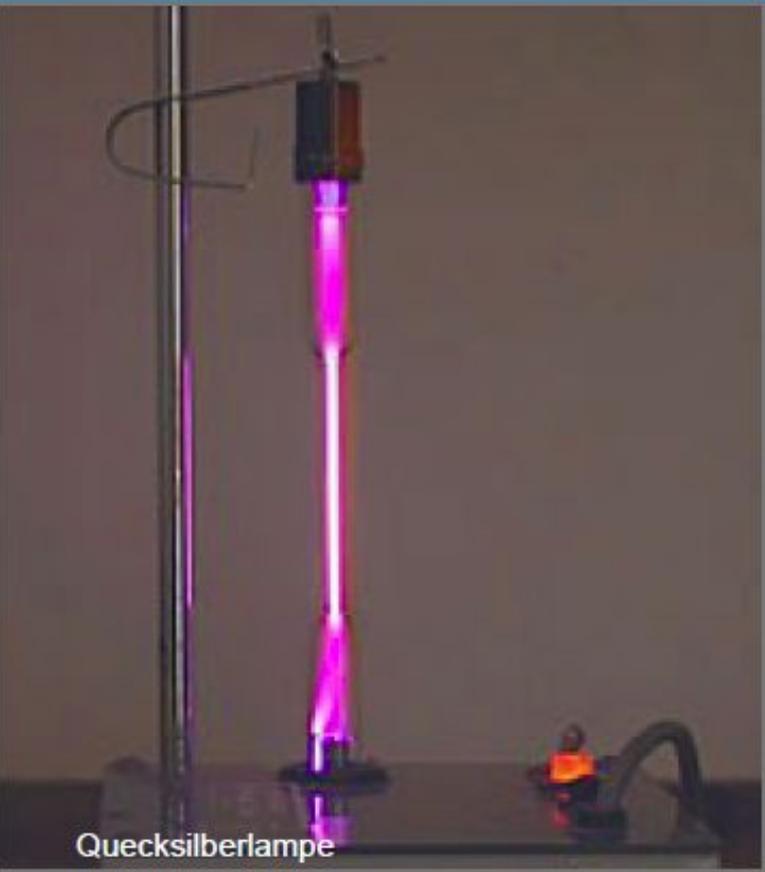
Kosmologische Rotverschiebung

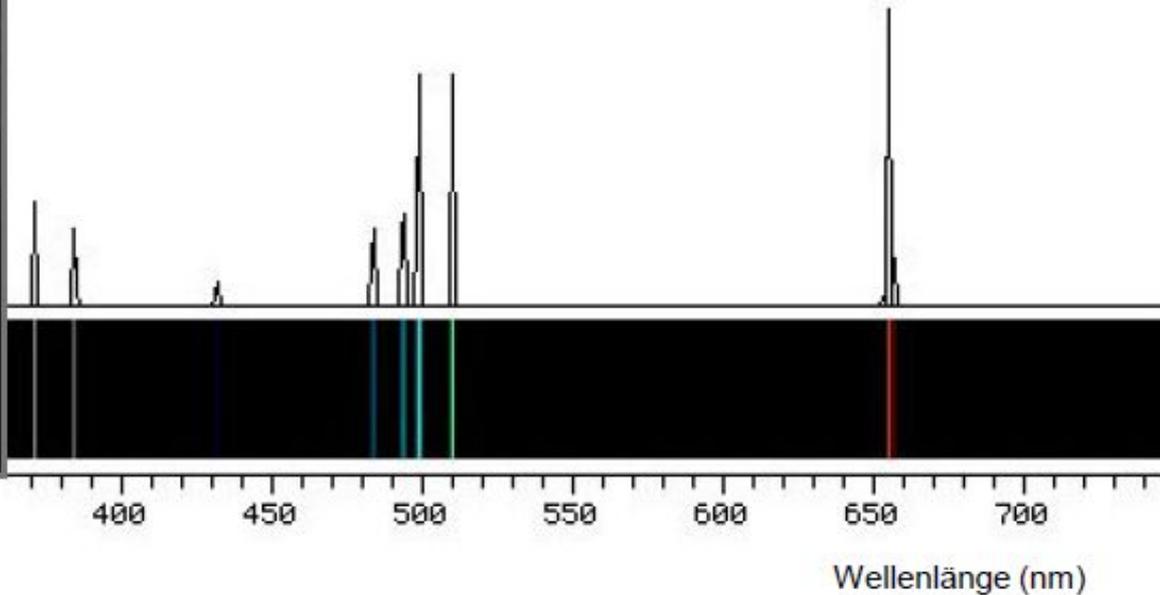
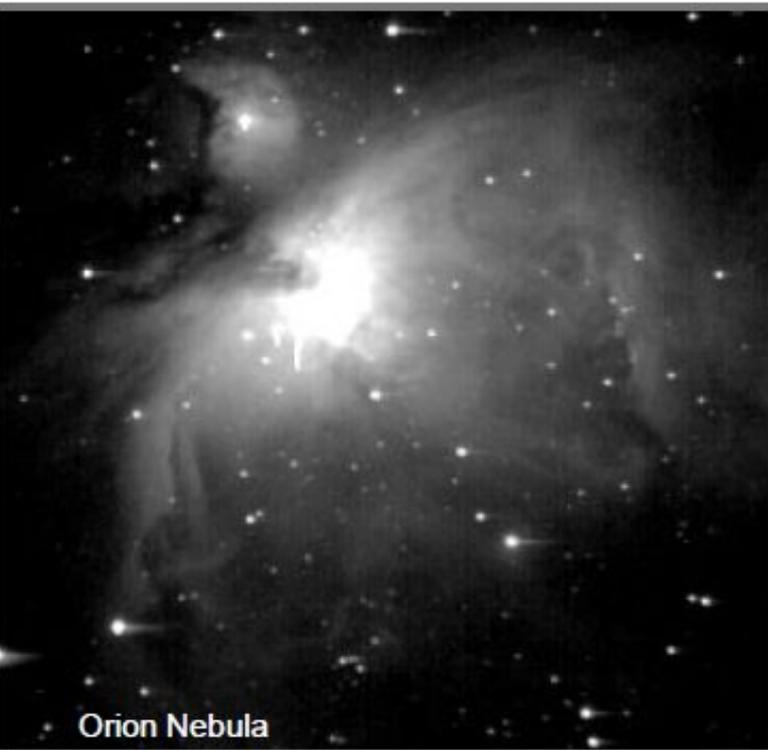
Heute
↑
Zeit

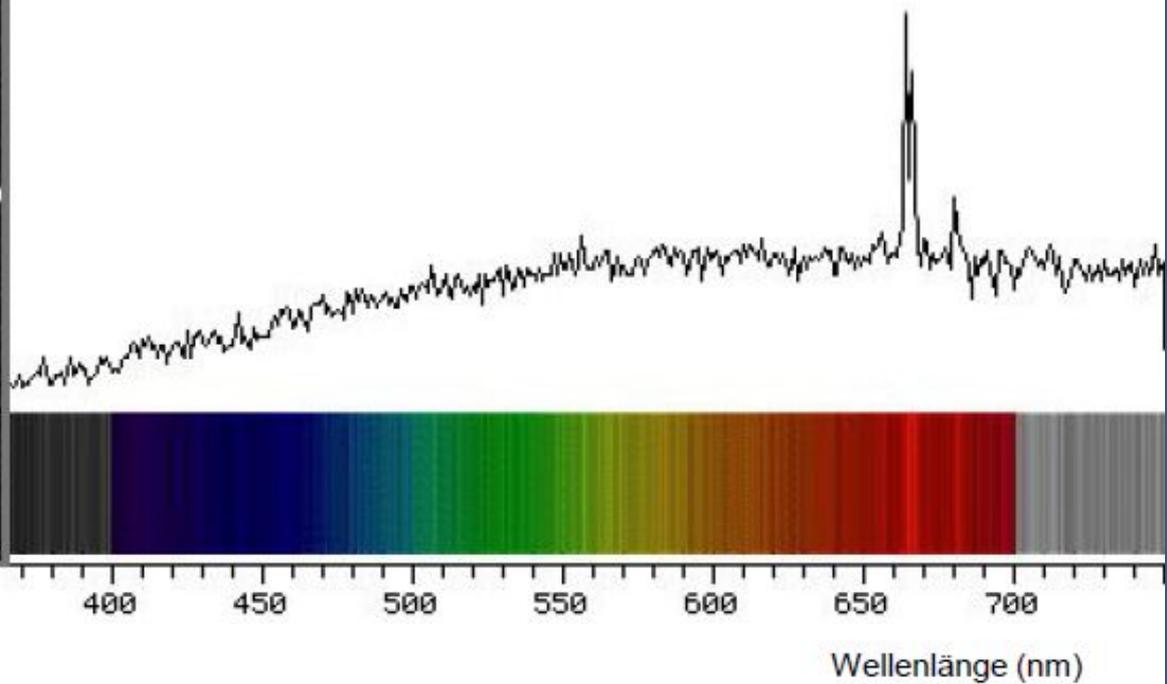
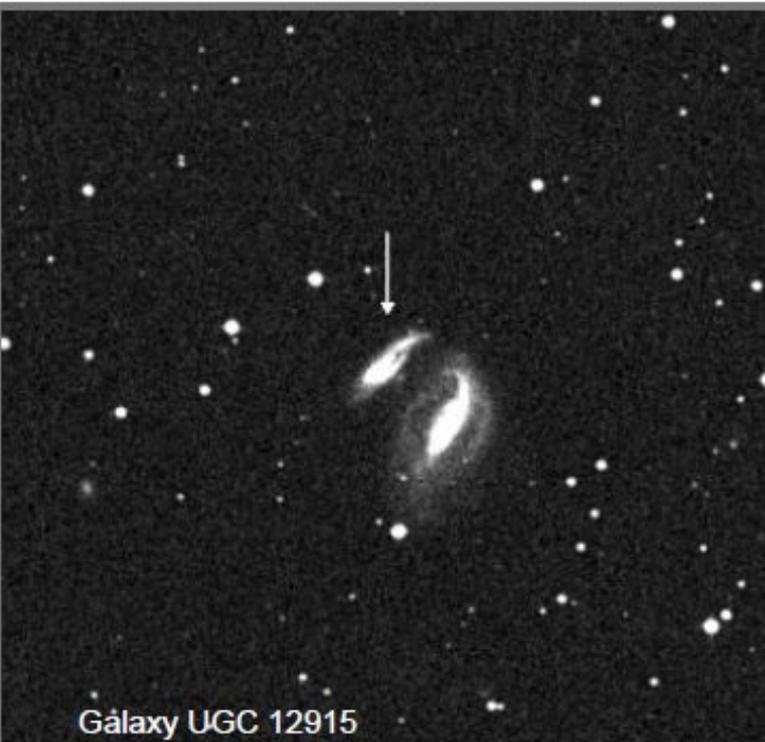


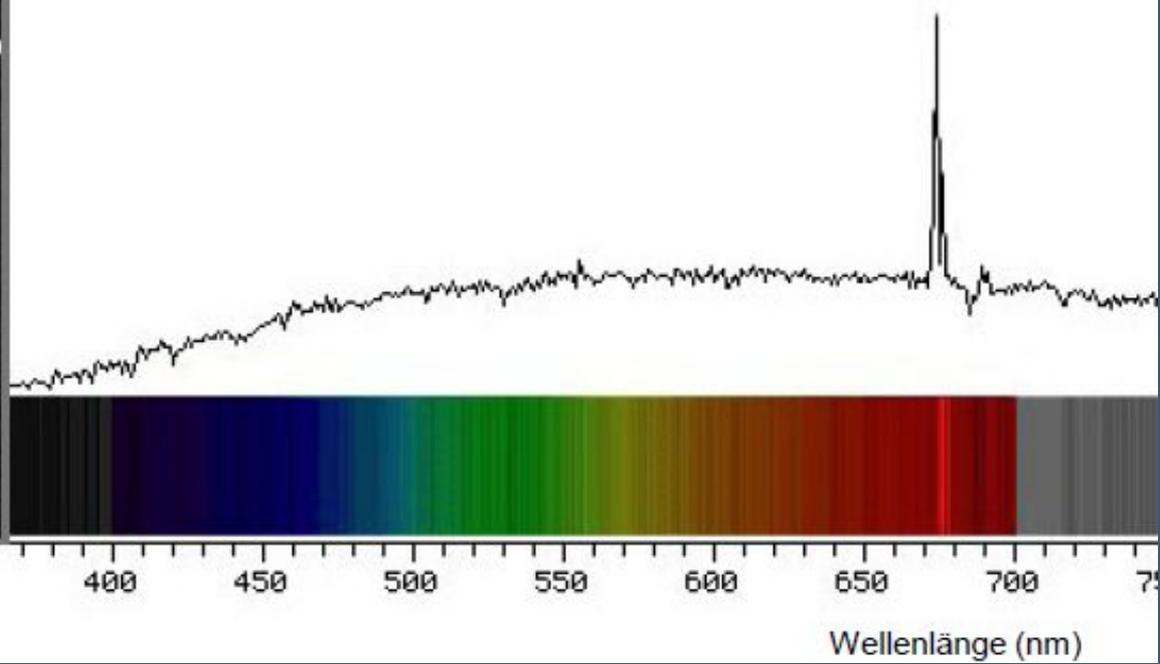
Weltall
dehnt
sich aus

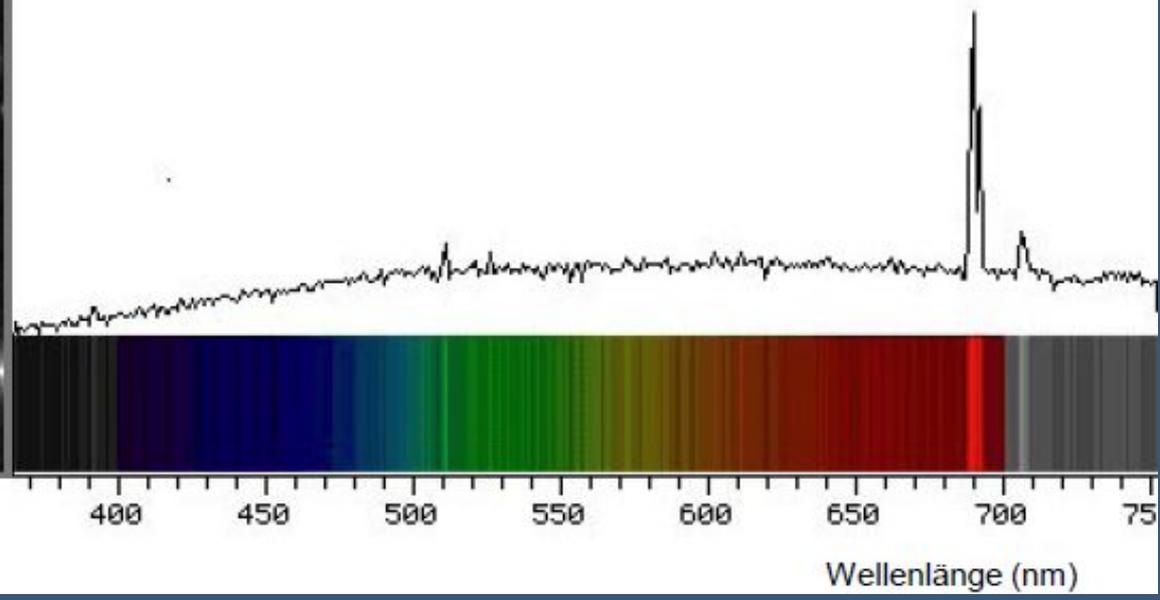
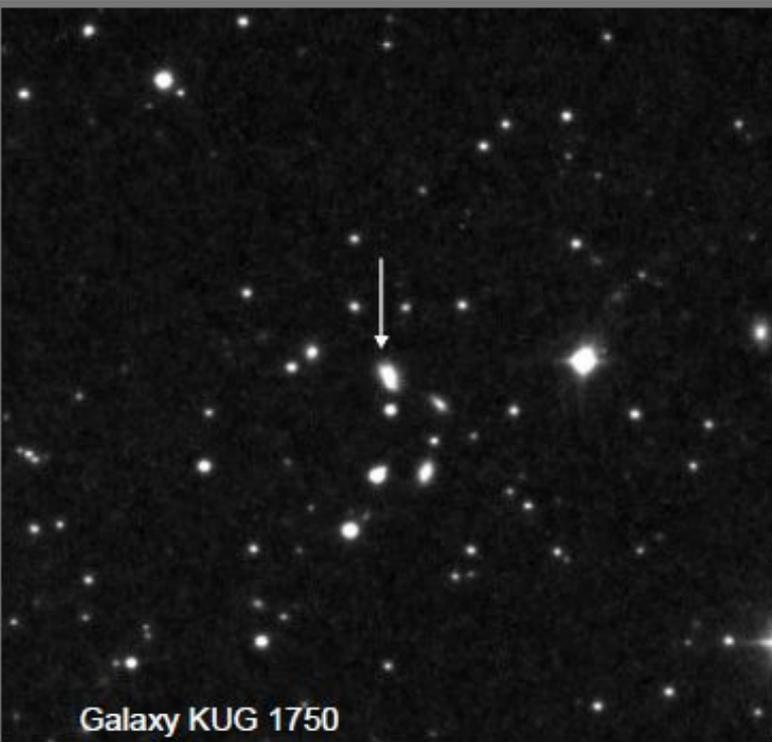


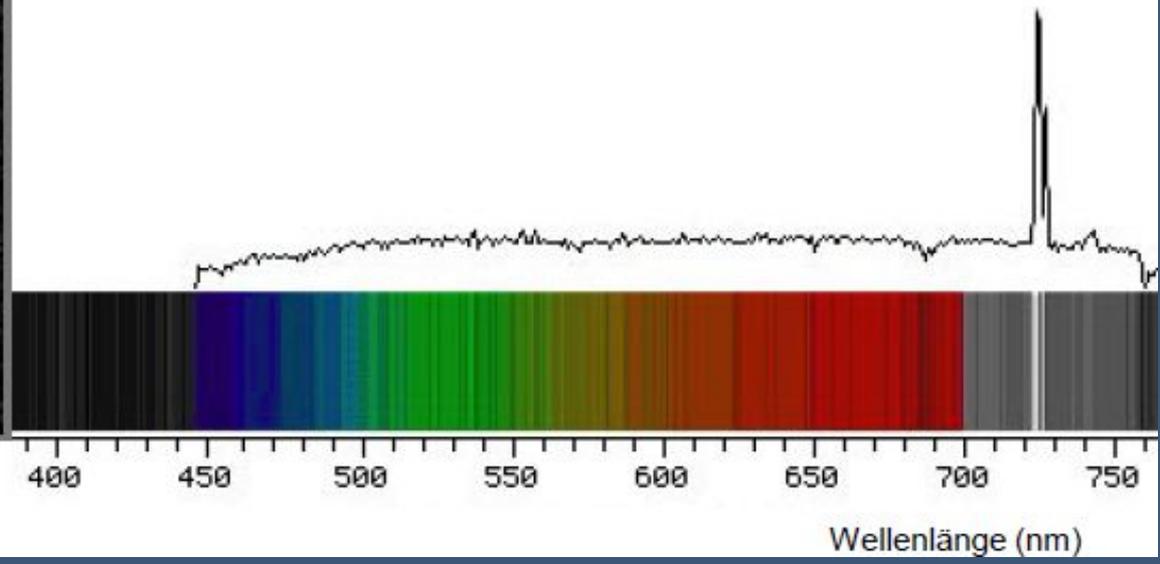


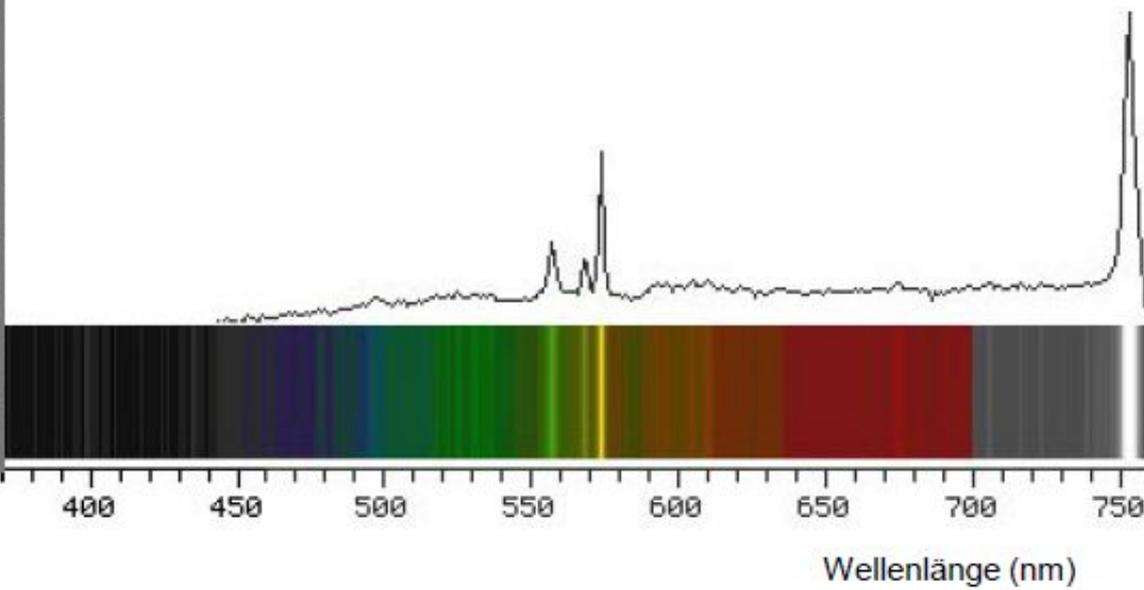






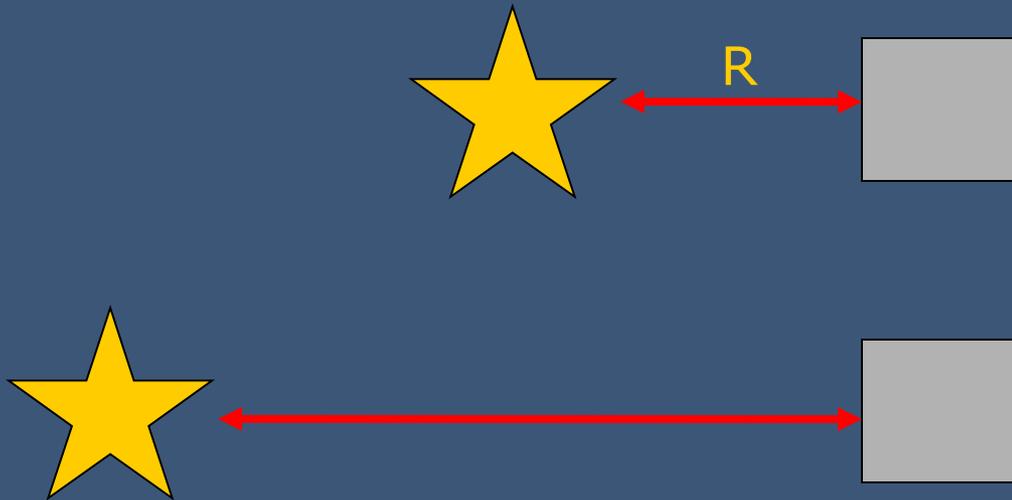






Entfernungsmessung

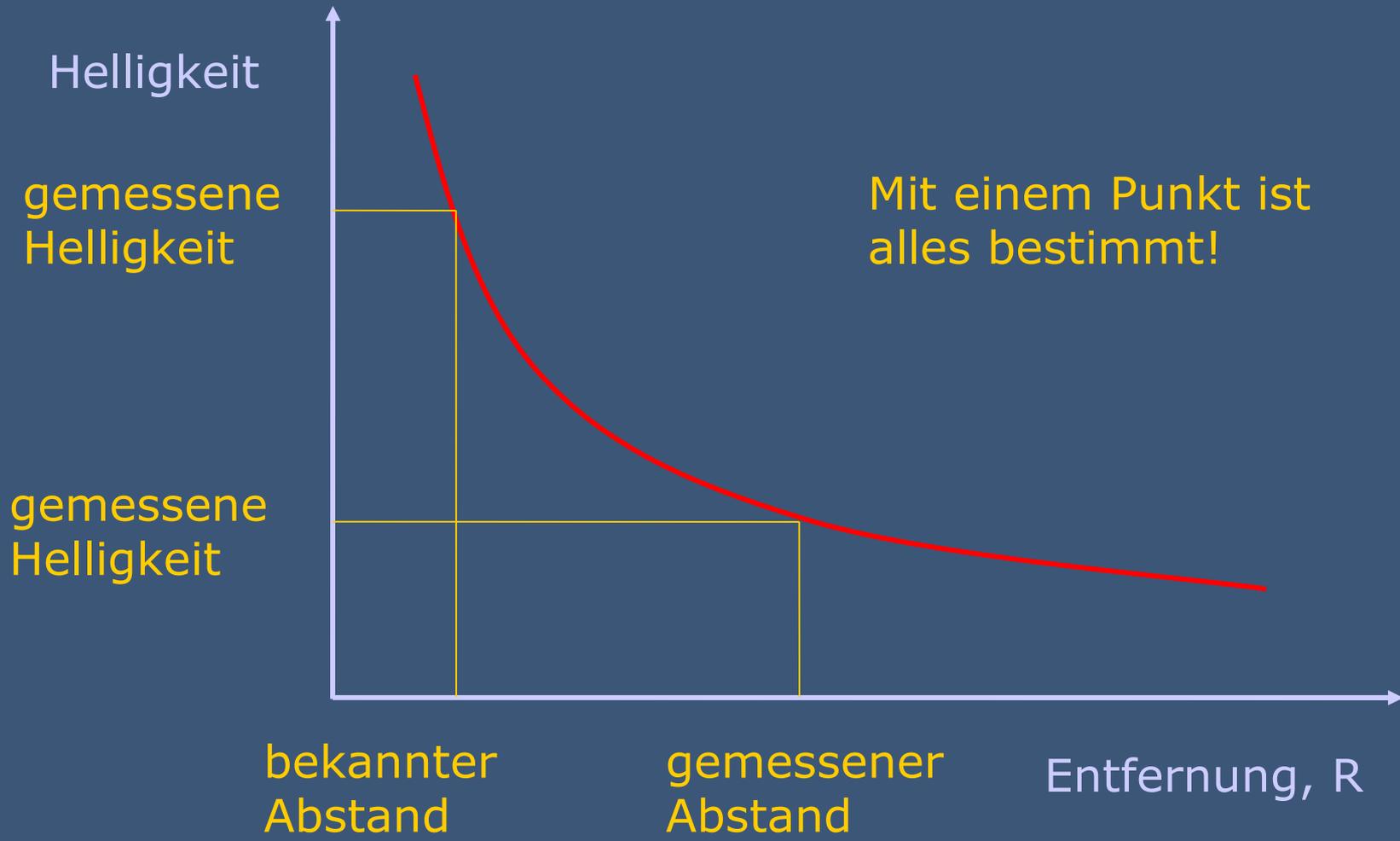
Heute
Zeit



scheinbare Helligkeit \sim wahre Helligkeit $\cdot 1/R^2$

Heute

Zeit



Heute

Zeit

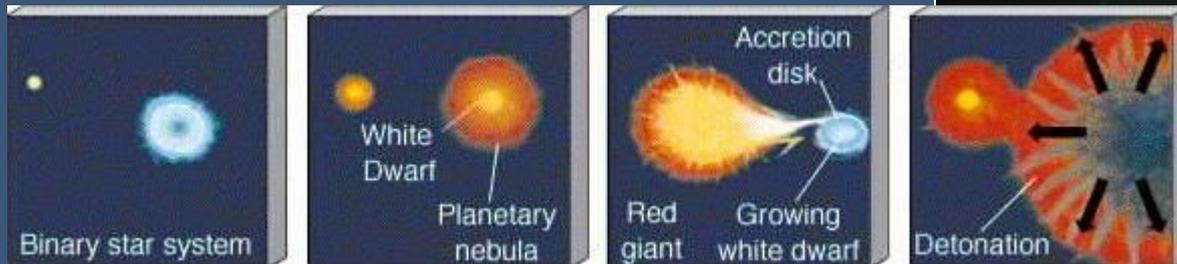
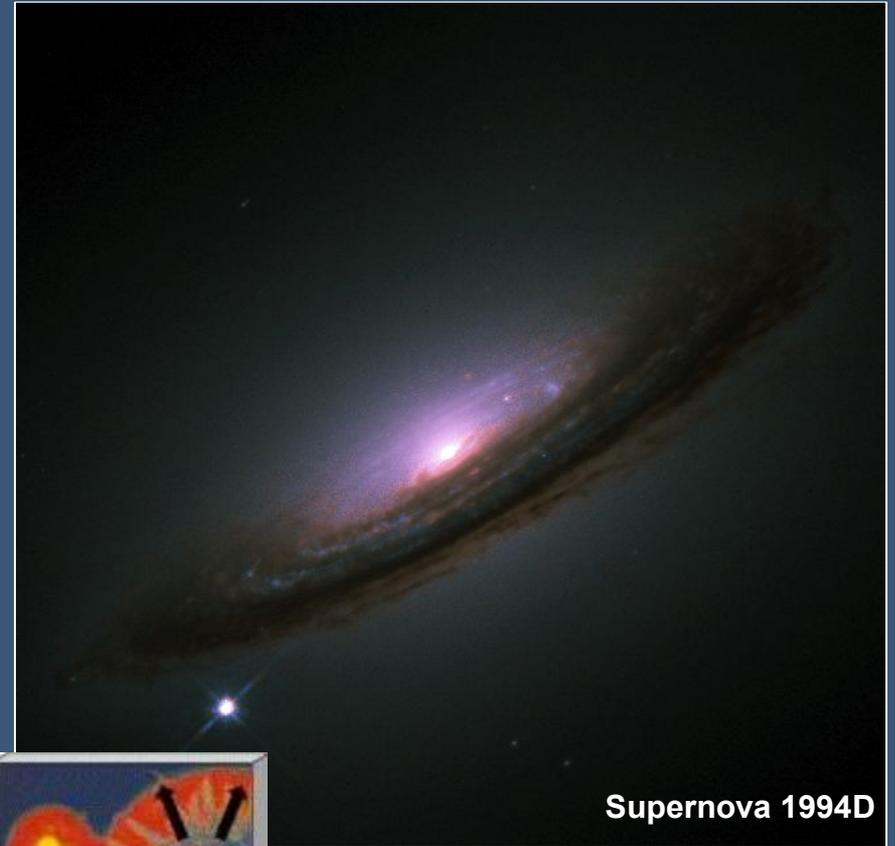
Wir brauchen Standard-Lampen!

Sternenexplosionen

Heute

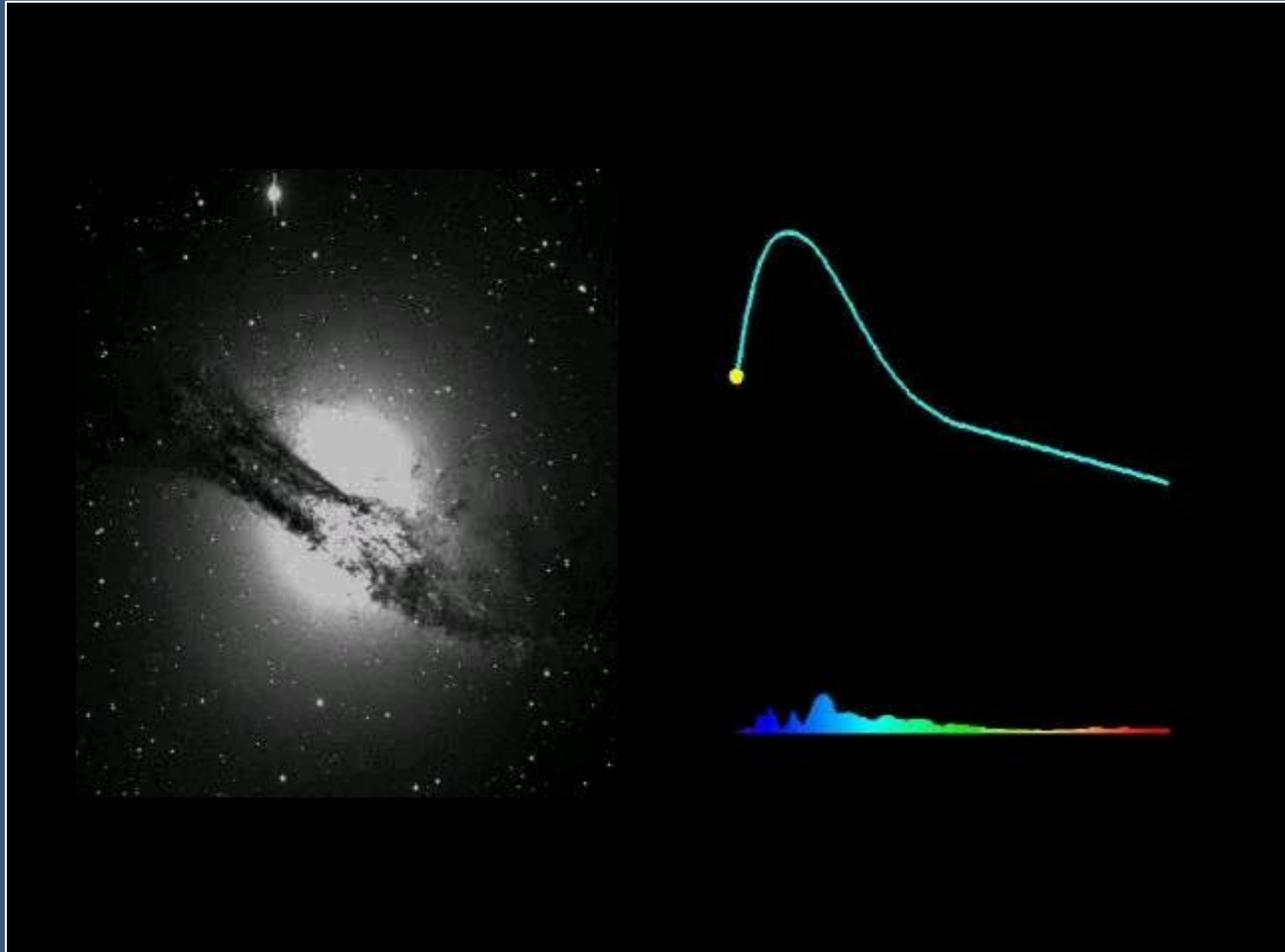
Zeit

- Supernova Typ Ia
- Explodierende weiße Zwerge nach Akkretion von Materie
- thermonukleare Bombe von der Größe der Erde!
- Hell wie eine ganze Galaxie
- Immer dieselbe absolute Helligkeit



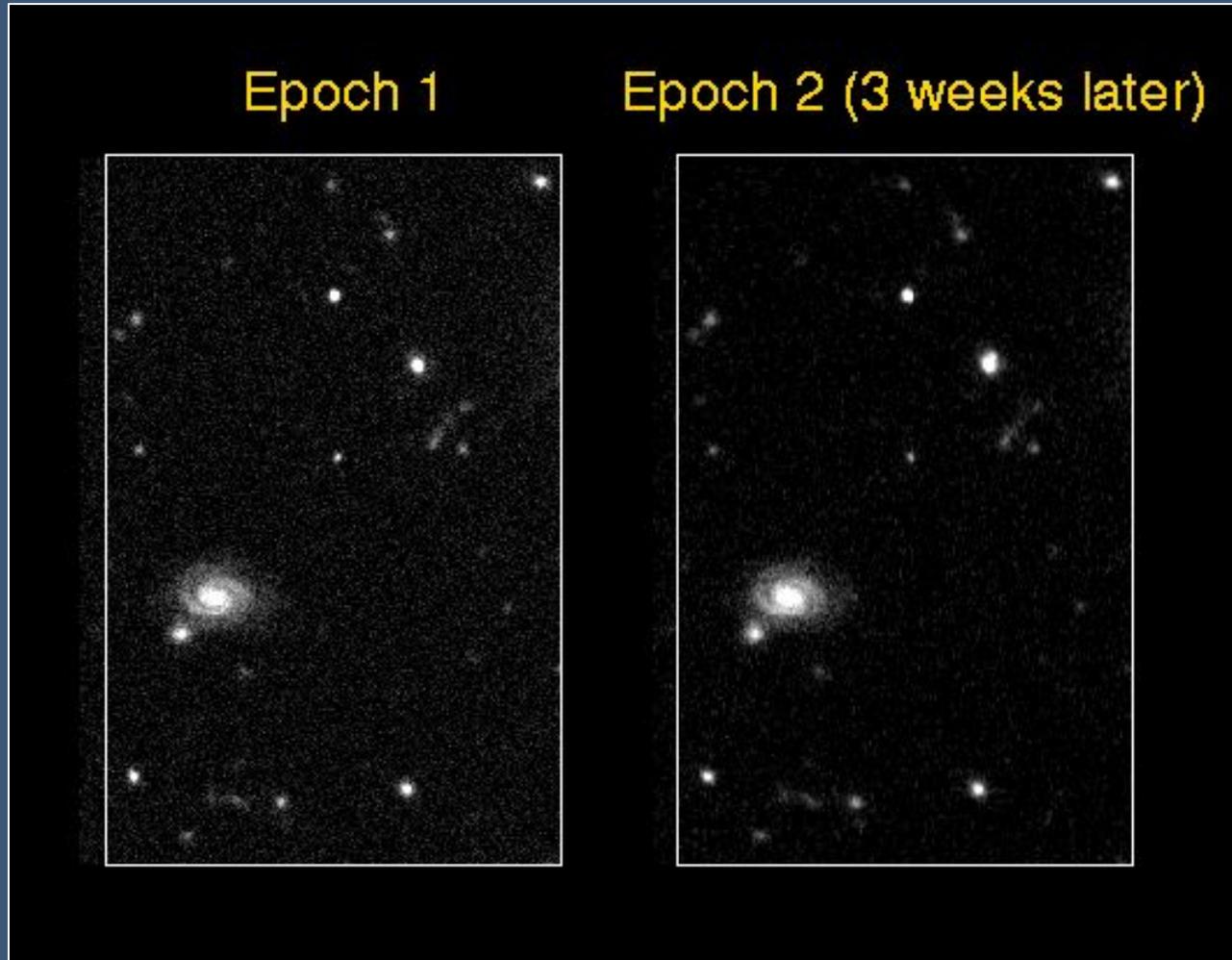
Eine Supernova

Heute
Zeit



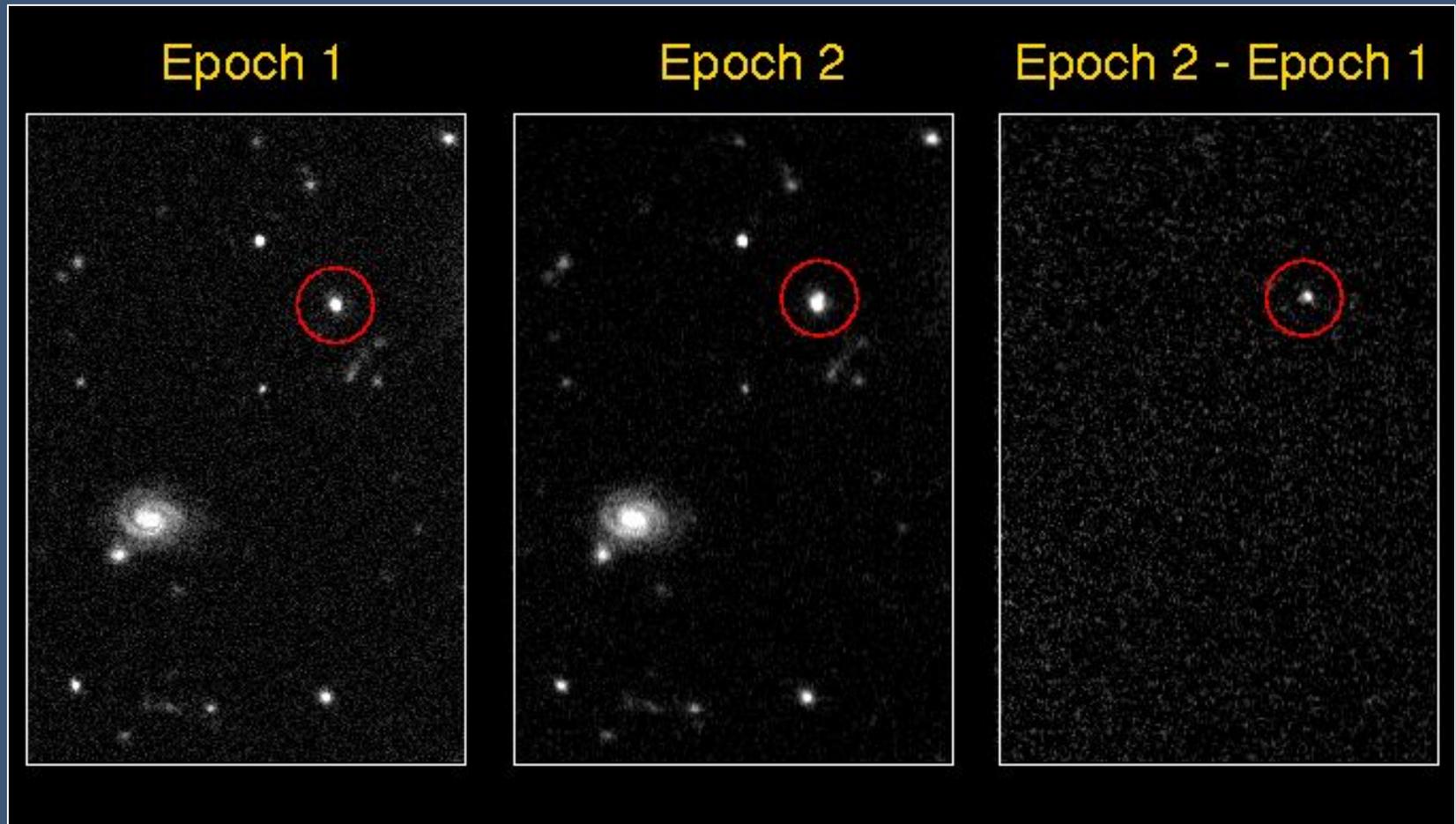
Wo ist die Supernova?

Heute
Zeit



Hier!

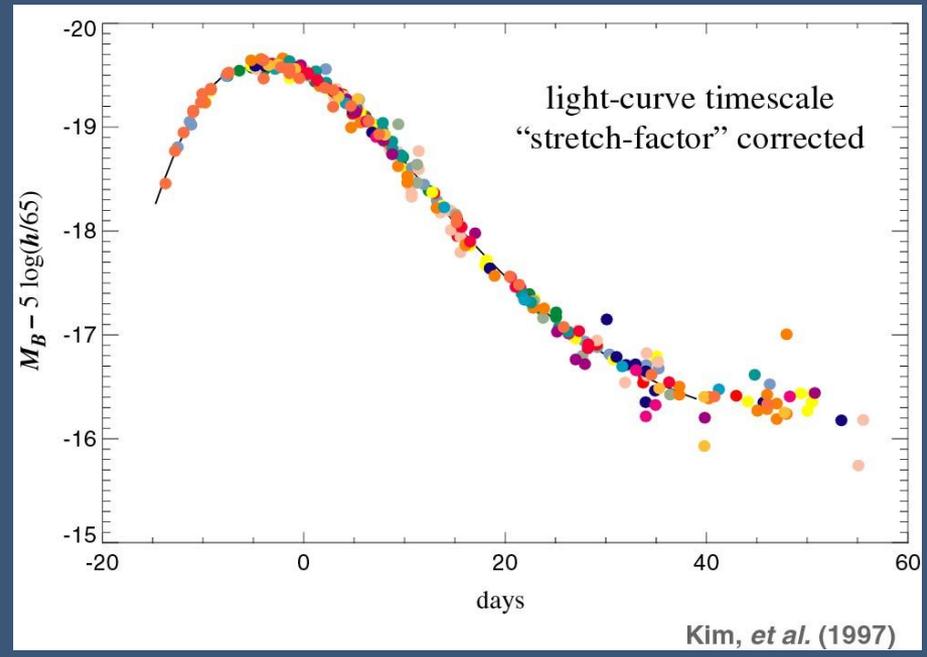
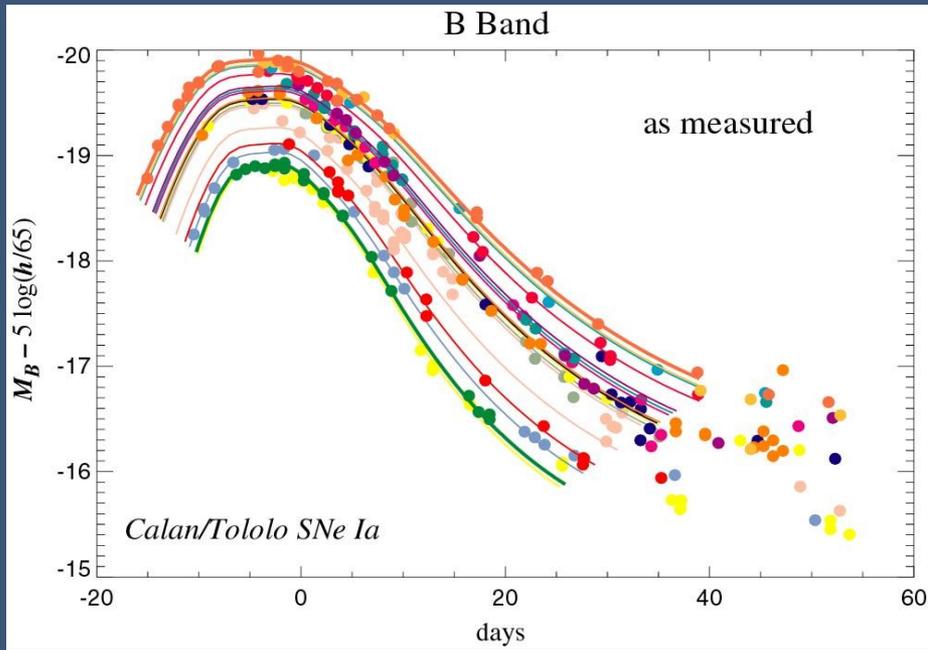
Heute
Zeit →



„Standardkerzen“

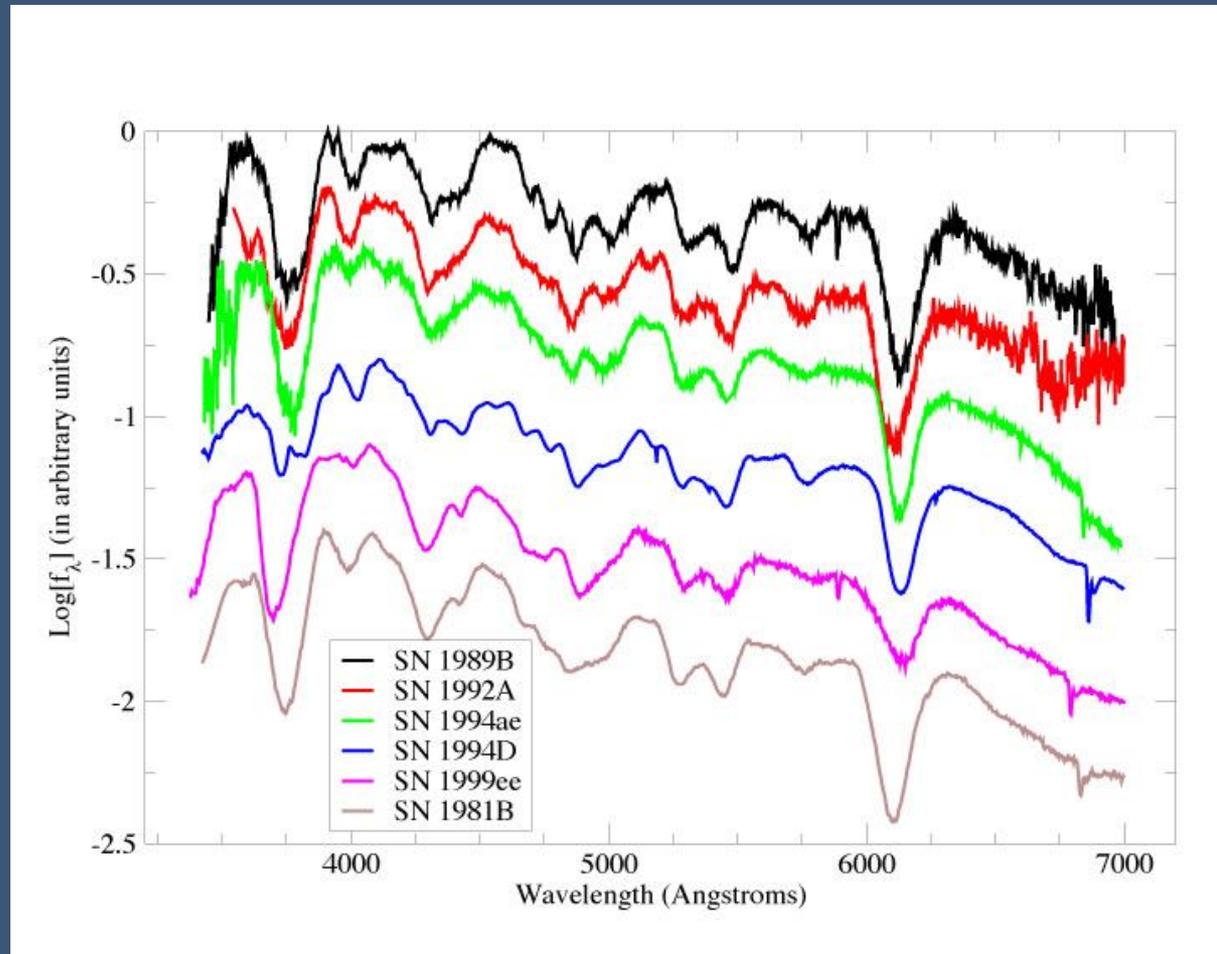
Heute

Zeit



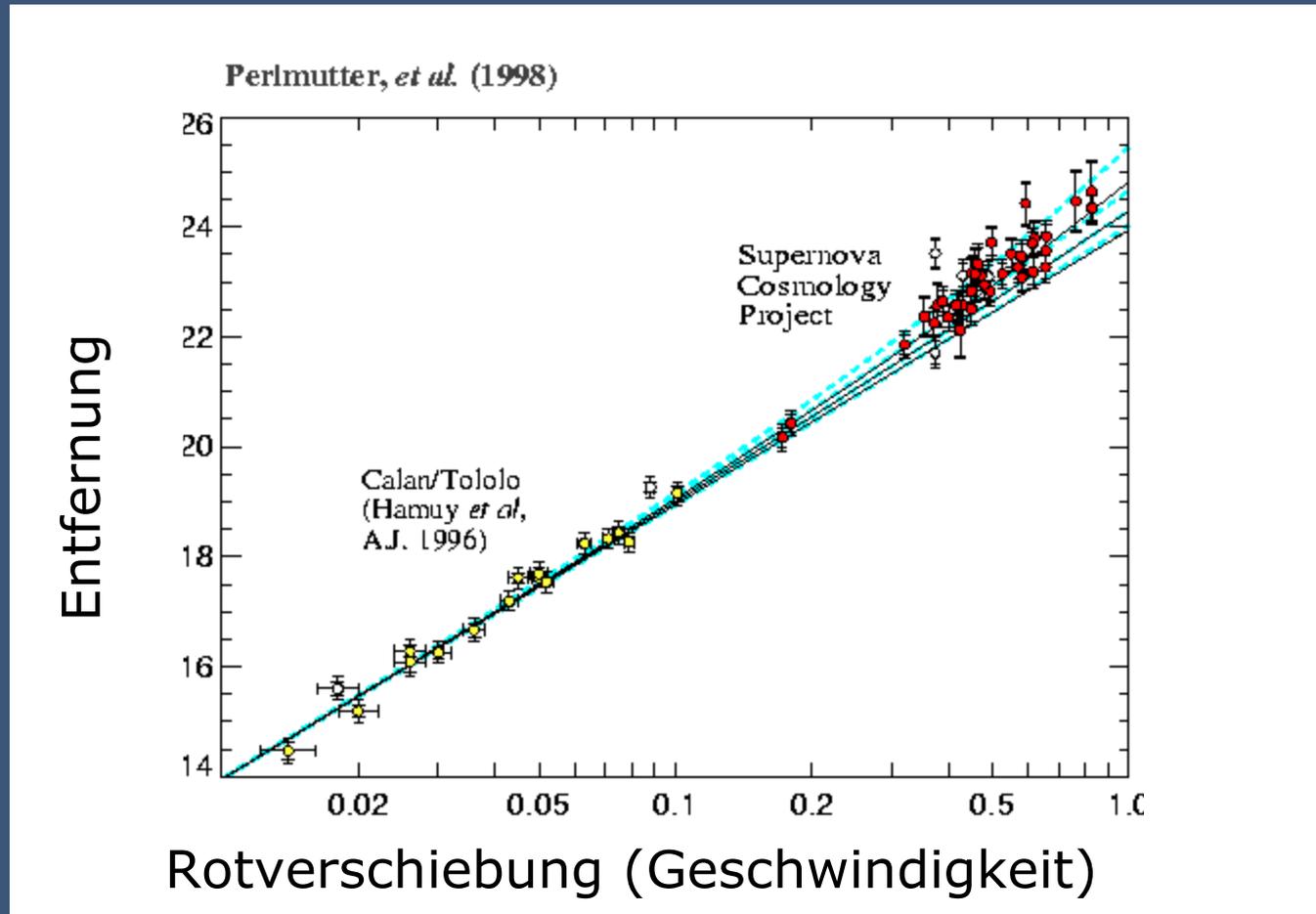
Spektren zur Identifikation

Heute
Zeit



Das Hubble-Diagramm

Heute
Zeit



Heute

Zeit

Weltmodelle

Heute

Zeit

- Das Weltall ist dynamisch und expandiert (sogar beschleunigt)!
- Das Weltall war früher kleiner als heute
- Das Weltall ist aus einer heißen Phase entstanden

Der Urknall

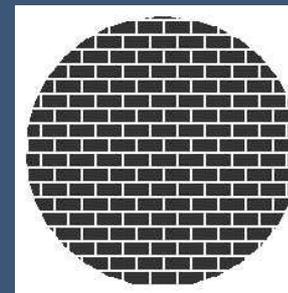
Lösungen

Heute

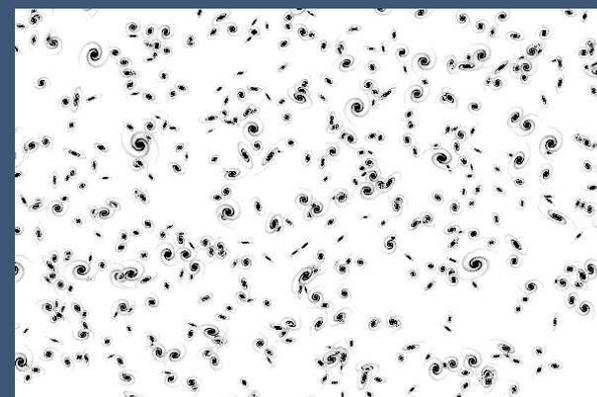
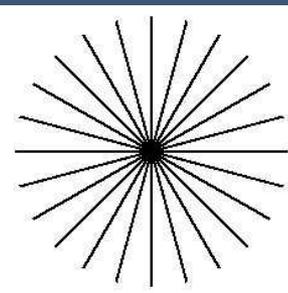
Zeit

- **Kosmologische Prinzip**
 - Wir sehen das, was jeder andere auch sehen würde
 - **Isotropes** und **homogenes** Universum
- Friedmann Universen (1922)
- Weltmodelle hängen nur ab von
 - **Expansion**
 - **Gravitationsanziehung**

Homogen
aber nicht
isotrop



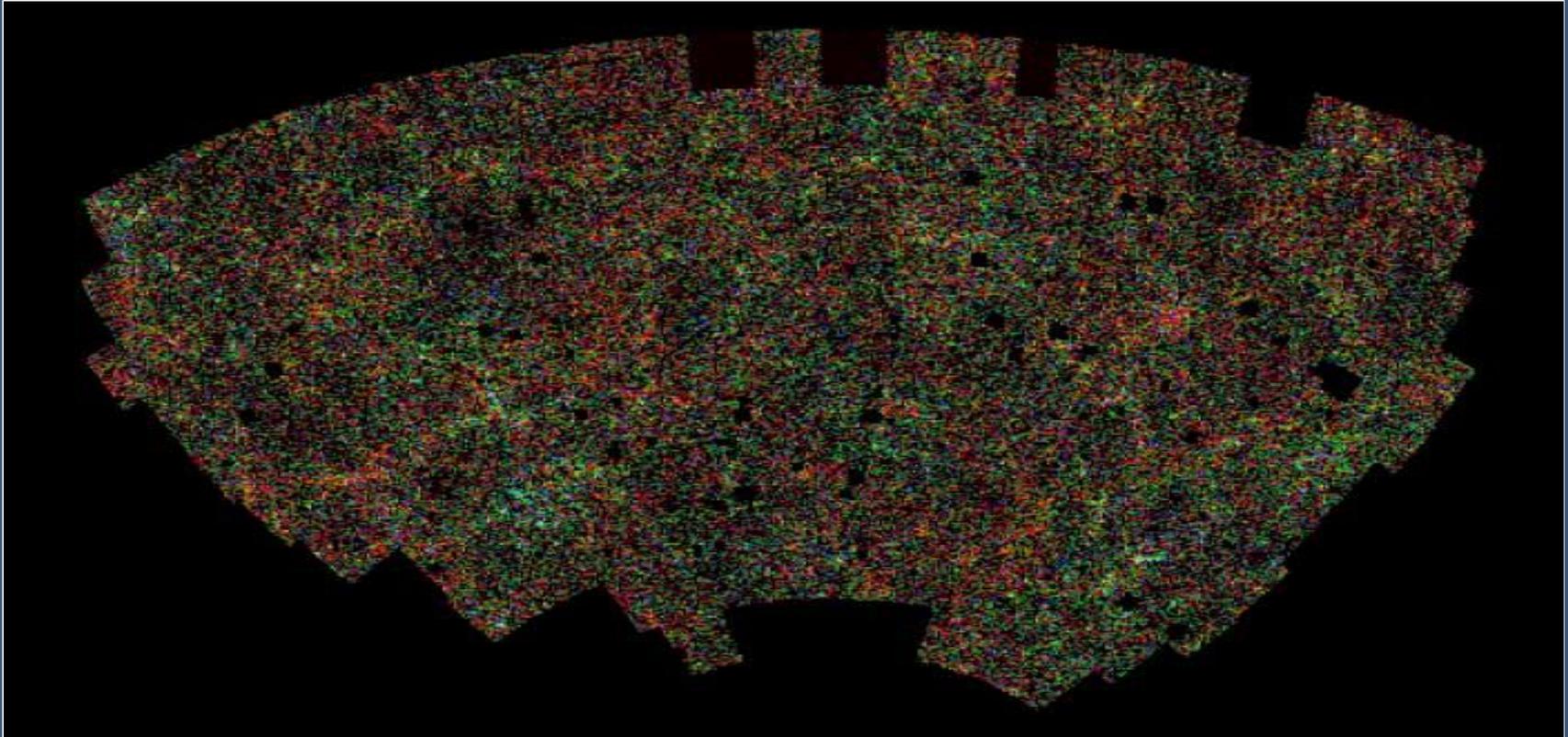
Isotrop aber
nicht
homogen



Isotrop **UND** homogen

Isotrop und homogen

Zeit →



APM Survey picture of a large part of the sky, about 30 degrees across, showing almost a million galaxies out to a distance of about 2 billion light years.

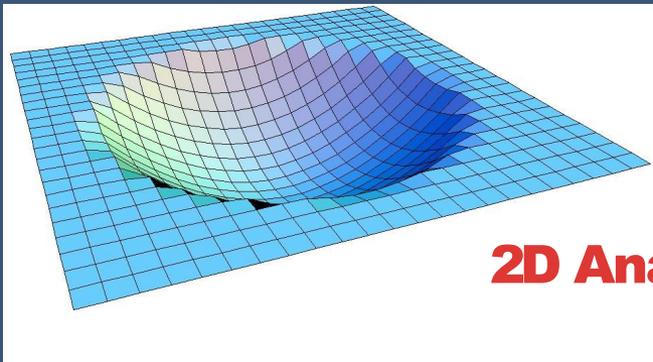
MAP990047

Allgemeine Relativitätstheorie

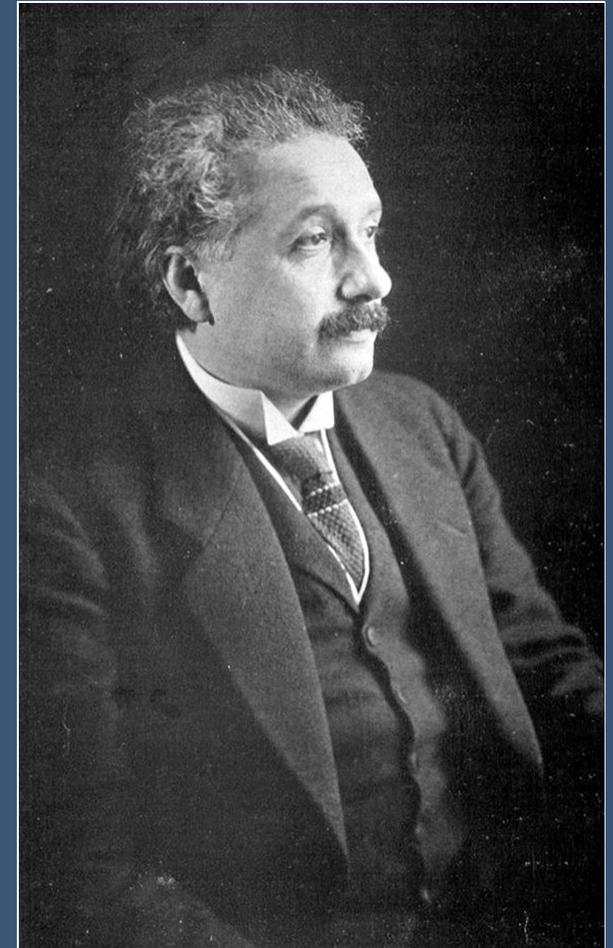
Heute

Zeit

- Einstein 1916
- Beschreibt alle gravitativen System
 - Planetensysteme
 - Schwarze Löcher
 - Das Universum
- Masse erzeugt eine Krümmung des Raumes
- Raumkrümmung sagt den Massen, wie sie sich bewegen müssen
→ Gravitationsbeschleunigung

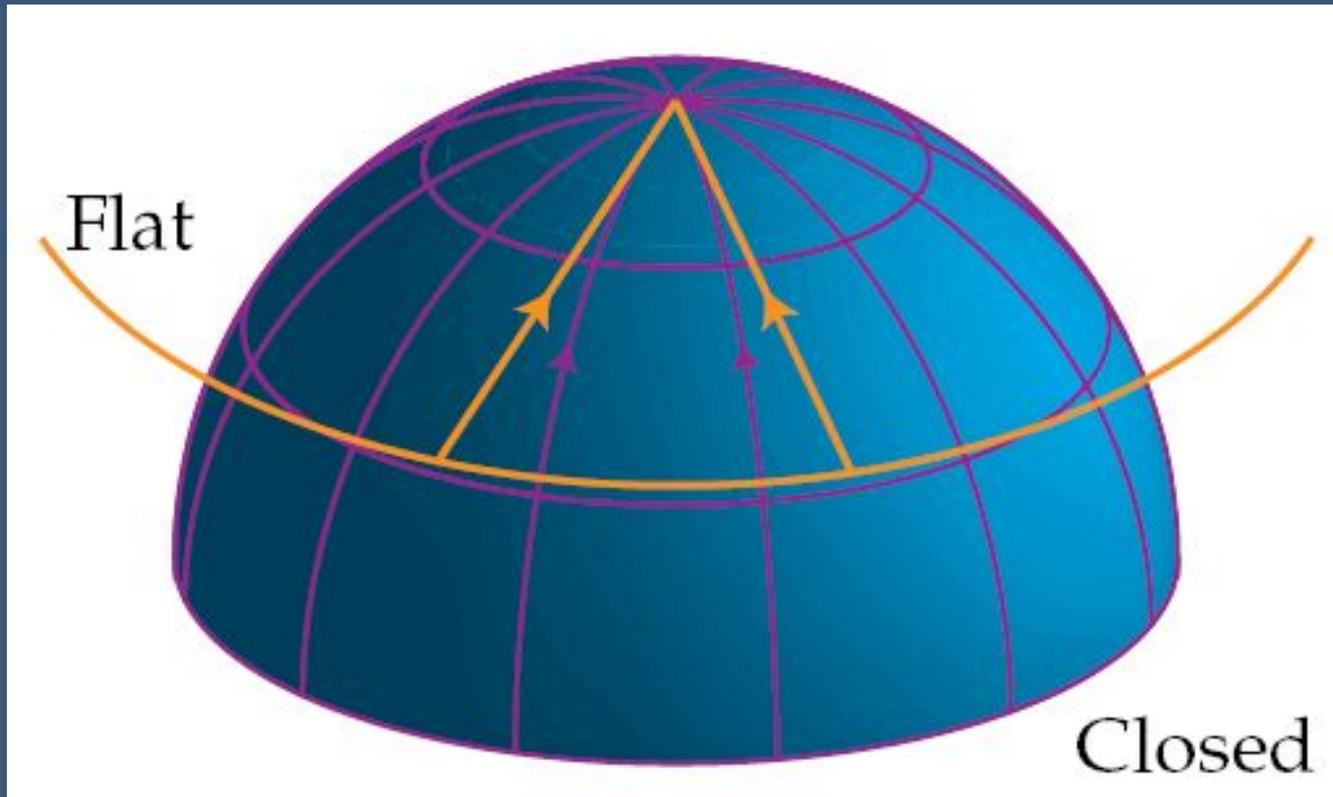


2D Analogon



Raumkrümmung

Heute
↑
Zeit



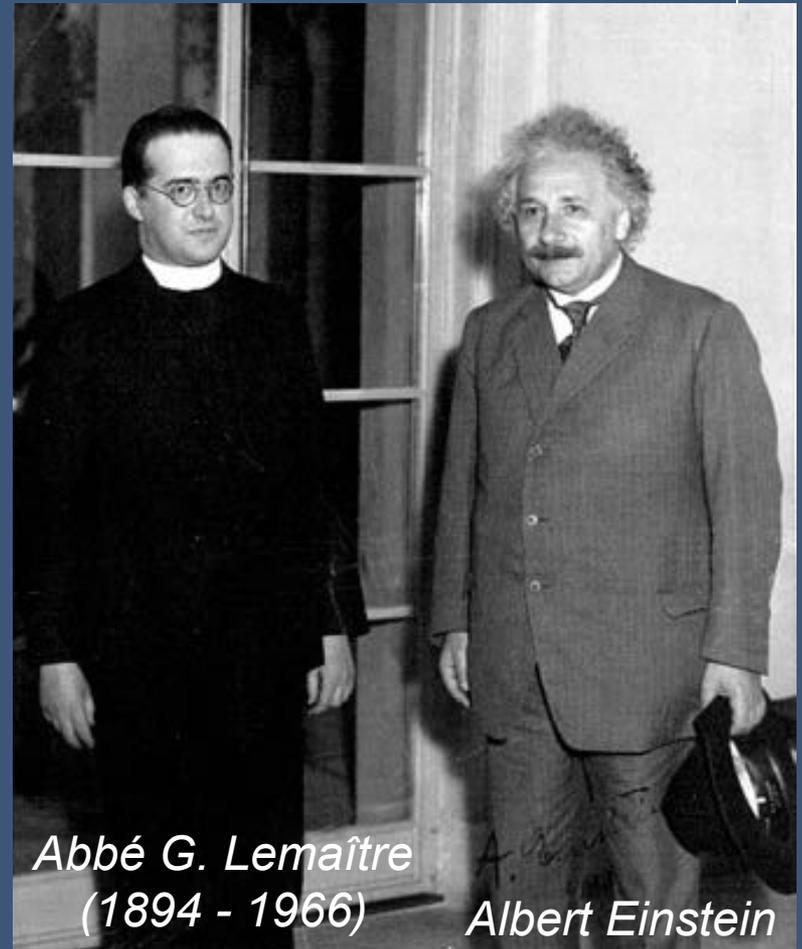
Einstein und Lemaitre

Heute

Zeit

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi}{3}G\rho + \frac{1}{3}\Lambda$$

- Abbremsung der Ausdehnung \leftrightarrow Gravitationsanziehung
- Kann verändert werden durch (willkürliche) kosmologische Konstante Λ
- Lemaitre: „Der Priester mit dem Urknall“
http://einestages.spiegel.de/static/topicalbumbackground/24682/der_priester_mit_dem_urknall.html
http://einestages.spiegel.de/static/topicalbumbackground/24682/der_priester_mit_dem_urknall.html



Abbé G. Lemaître
(1894 - 1966)

Albert Einstein

Parameter eines expandierenden Universums

Heute

Zeit

- Expansion \leftrightarrow Gravitationsanziehung

- Expansion

Hubble Konstante $H_0 = \dot{R}/R$

ist ein Maß für die Stärke der Expansion,
heutiger Wert: **$H_0 = 20 \text{ km/s/MLj}$**

- Gravitationsanziehung

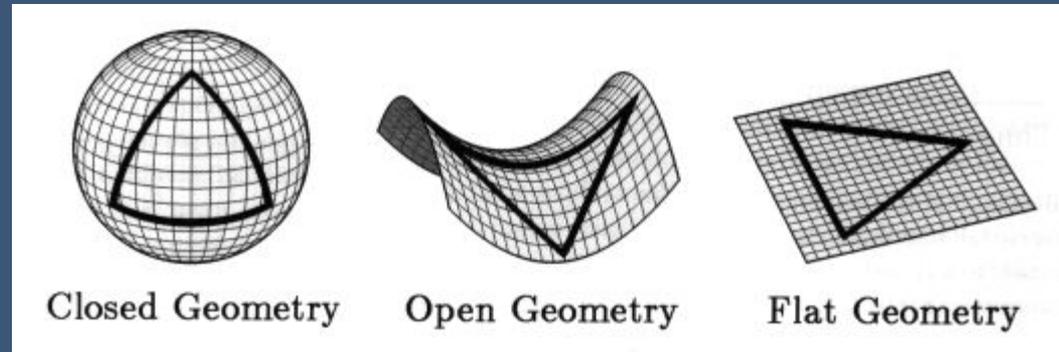
- Normale Materie bremst die Expansion (mittlere Dichte ρ)
- **Bei $\Lambda=0$ Kritische Dichte** nötig,
um die Expansion zu stoppen:

$$\rho_{\text{krit}} = 3 H_0^2 / 8\pi G = 10^{-29} \text{ g/cm}^3$$

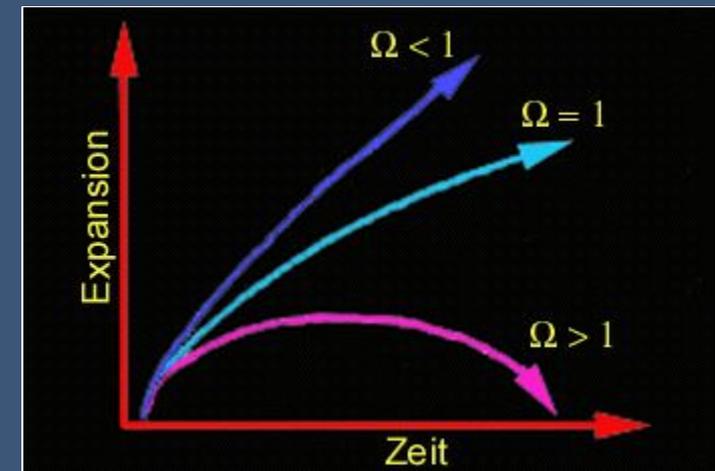
Geometrie des Universums

Heute

Zeit



- Balance zwischen Kontraktion und Expansion ausgedrückt durch $\Omega_0 = \rho/\rho_{\text{krit}}$
 - $\Omega_0 > 1$, $\rho > \rho_{\text{krit}}$
Gravitation gewinnt, das Universum kollabiert
 - $\Omega_0 = 1$, $\rho = \rho_{\text{krit}}$
Ausgleich, Expansion hält schlussendlich an
 - $\Omega_0 < 1$, $\rho < \rho_{\text{krit}}$
Expansion gewinnt, das Universum kollabiert
- $\Lambda > 0$, Schicksal des Universums ist nicht an die Geometrie gebunden



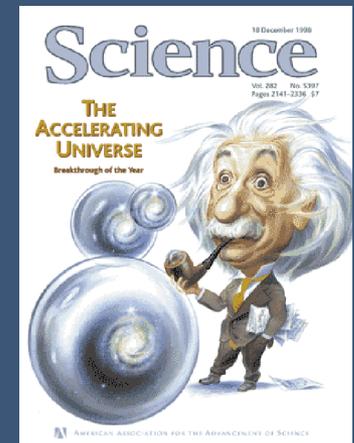
Das beschleunigte Universum

Zeit →

- Einsteins Kosmologische Konstante Λ
(ursprünglich ad-hoc für statisches Univ. eingeführt)
wirkt wie eine Anti-Gravitation

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi}{3}G\rho + \frac{1}{3}\Lambda$$

- Supernovae ergeben (seit 1998)
 - ~70% Dunkle Energie Ω_Λ
(Kosmologische Konstante)
 - ~30% Materie Ω_M
(Normale und dunkle Materie)



Unabhängige Bestätigungen: Mikrowellenhintergrund und Galaxiencluster

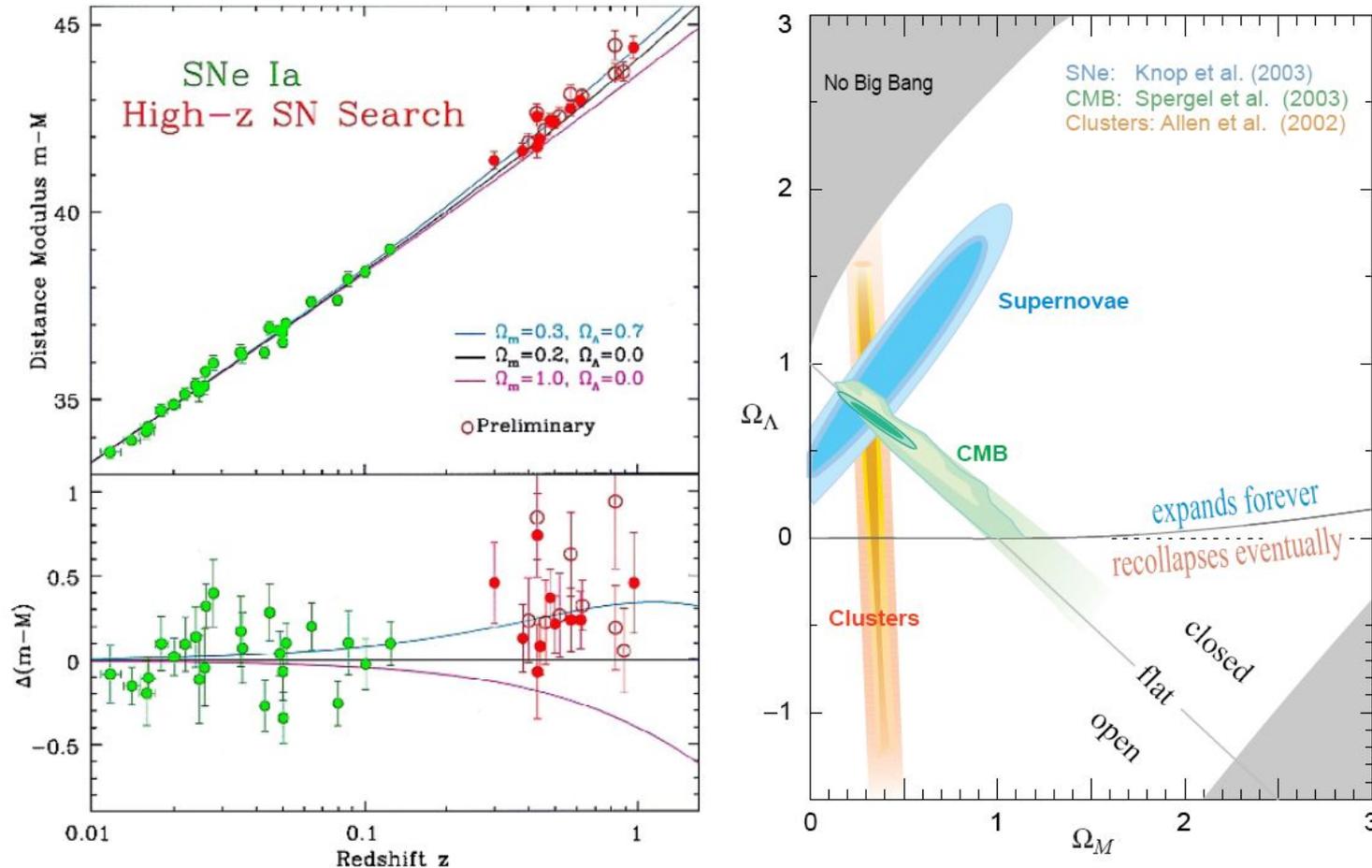


Abbildung 2.19: Links: Messungen des Hubble-Parameters für Supernovae vom Typ Ia. Die Abweichungen von einem linearen Verhalten bei großen Abständen weisen auf eine beschleunigte Expansion des Universums hin. Rechts: Vergleich der Bestimmungen von Ω_Λ aus den direkten Messungen (Beobachtungen von Supernovae Ia; $\lambda = \Omega_\Lambda$) und aus der CMB-Analyse ($\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_M$).

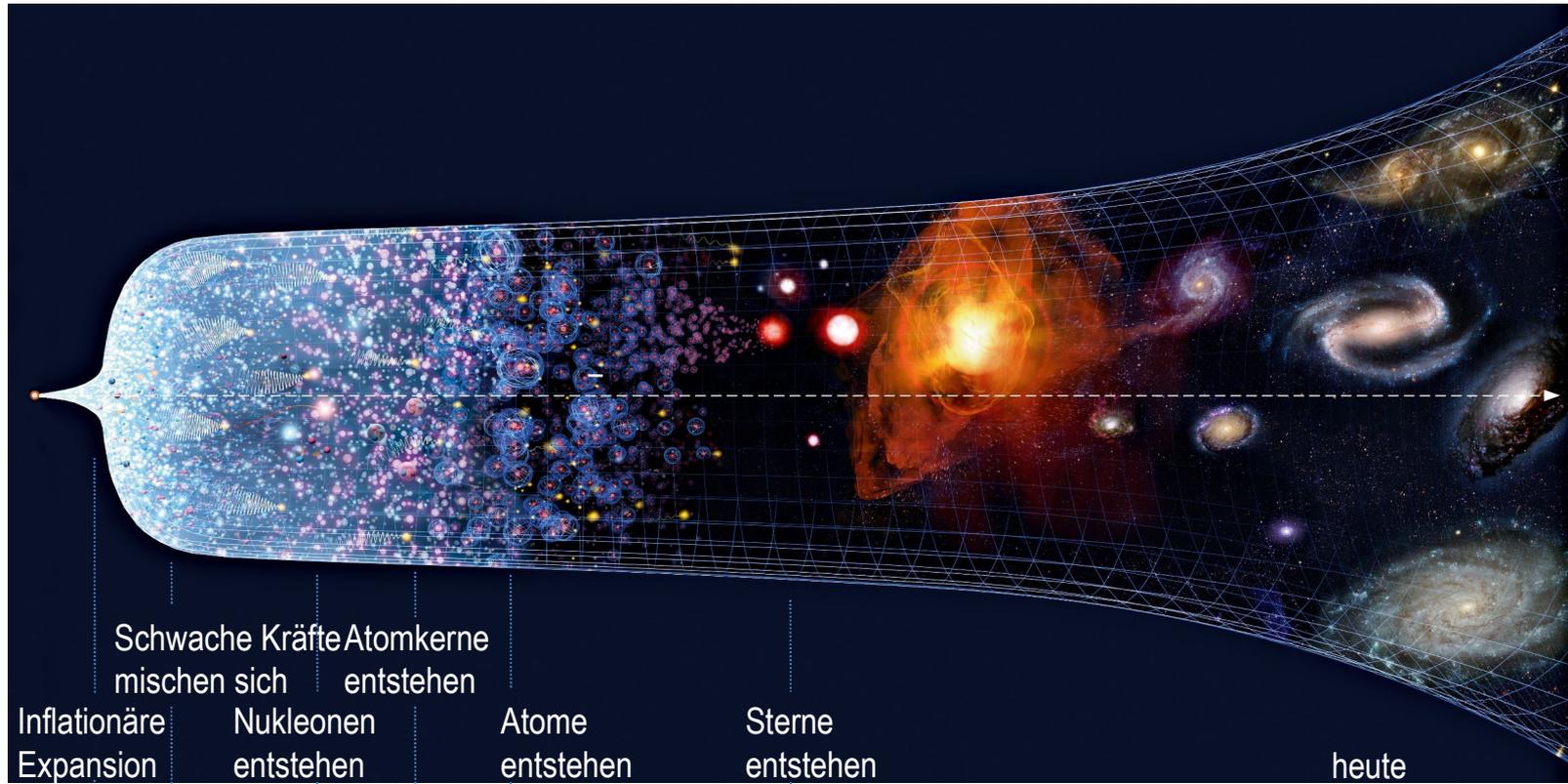
Zeit

Eine Reise durch die Zeit



Die Geschichte des Universums

Urknall



Energie

10^{13} TeV

1 TeV

150 MeV

0,1 MeV

1 eV

1 meV

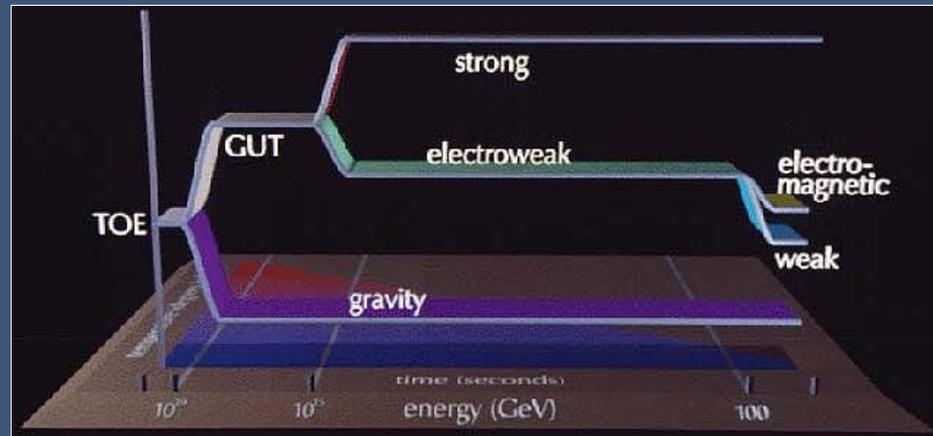
0,25 meV

LHC-Energie

Eine Zeitreise



- Alter = 10^{-43} s
 - Der Anfang unserer Physik
- Alter = 10^{-36} s, $T = 10^{27}$ K
 - Starke und “elektroschwache” Kräfte trennen sich

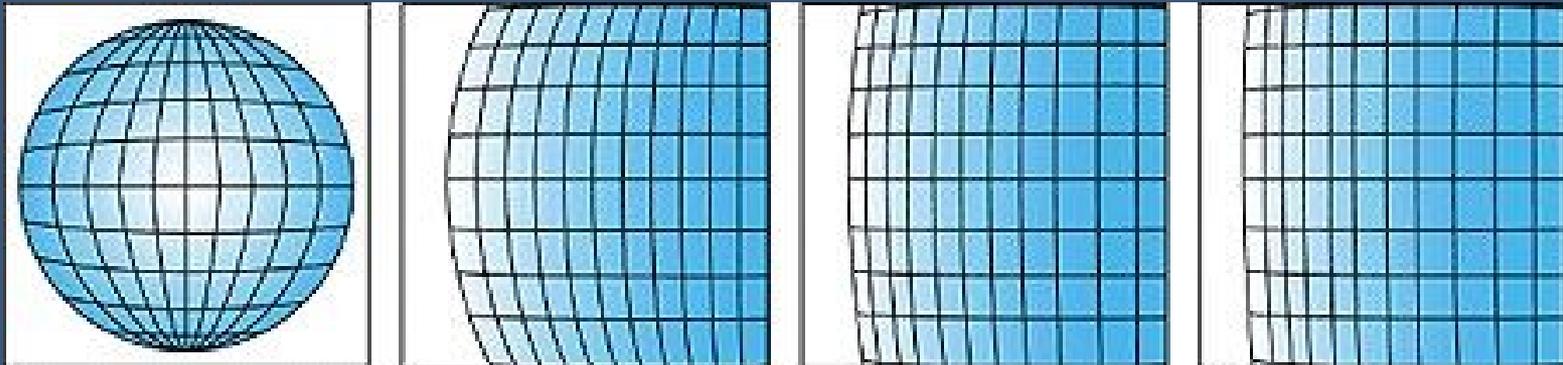


Die Inflation

10^{-36}s

Zeit

- **Alter = 10^{-36} s , $T = 10^{21}\text{ K}$**
 - Plötzliche Expansion des Universums um einen Faktor $10^{20} - 10^{30}$
 - Das Universum wird flach!



Die Vernichtungsschlacht

10^{-6} s



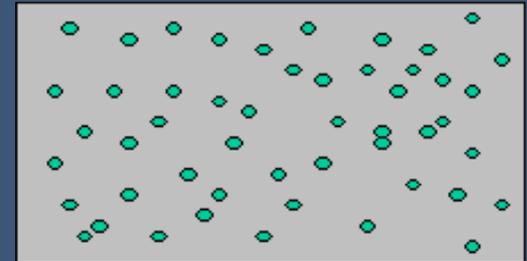
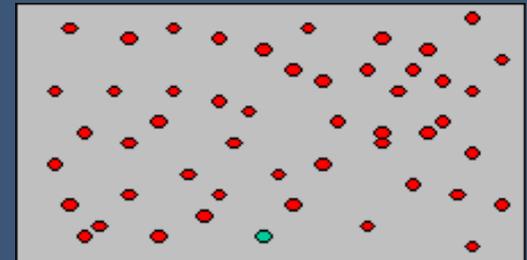
Zeit

- **Alter $\sim 10^{-2}$ s, $T = 10^{10}$ Kelvin**
 - Materie und Antimaterie vernichten sich
 - Materie-Antimaterie-Verhältnis

1.000.000.001 : 1.000.000.000

- Danach Materie-Photon-Verhältnis
(da 2 Photonen / Vernichtung)

1 : 2.000.000.000

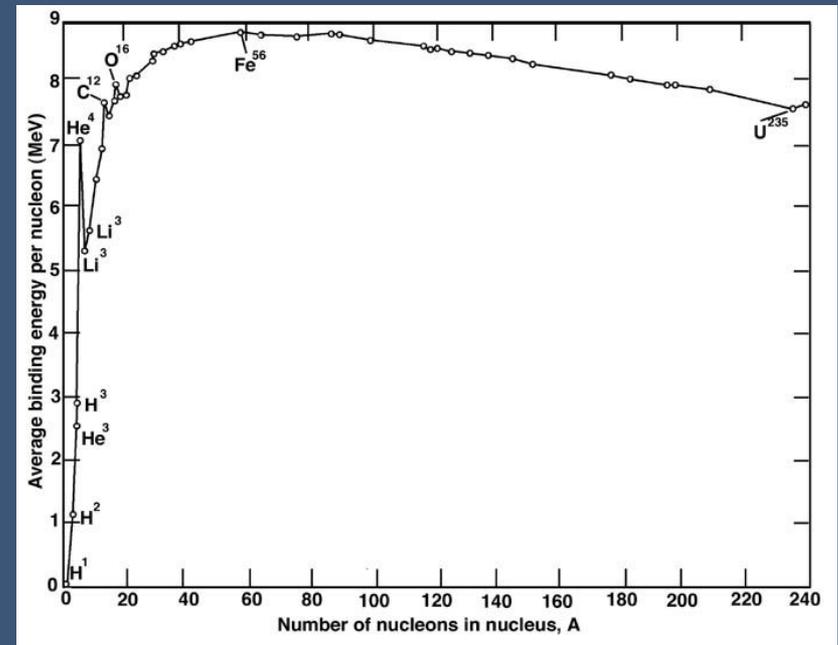


Nukleosynthese

1 min

Zeit

- Alter = 1 min, $T = 10^9$ K
 - Erzeugung leichter Elemente
 - Wasserstoff, Deuterium, Helium, Lithium

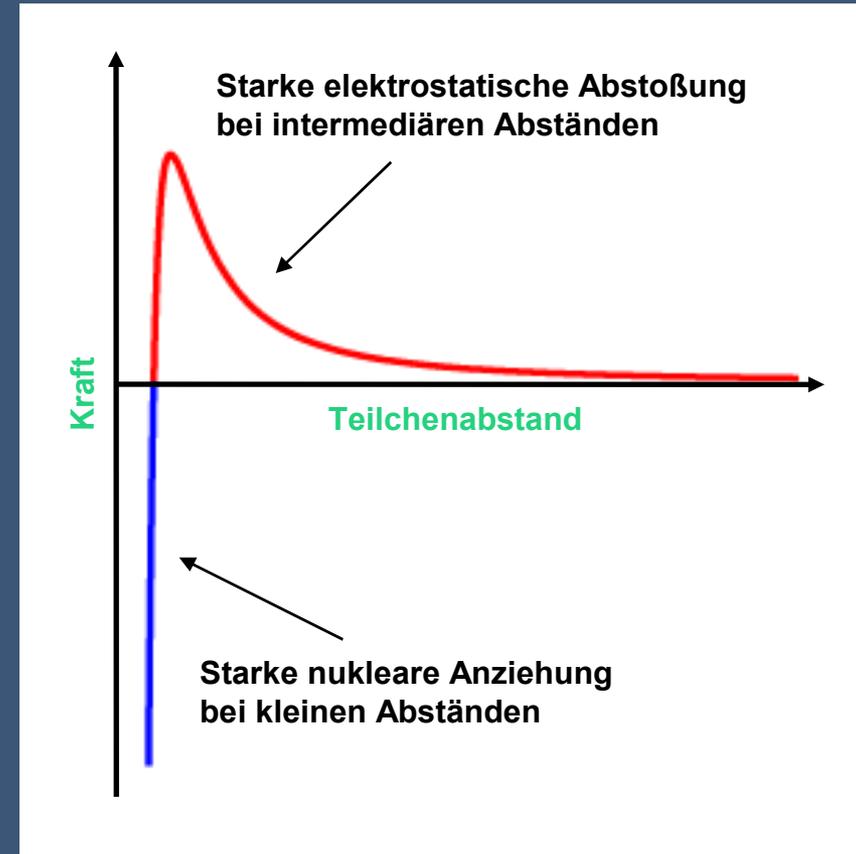


Kernfusion

1 min

Zeit

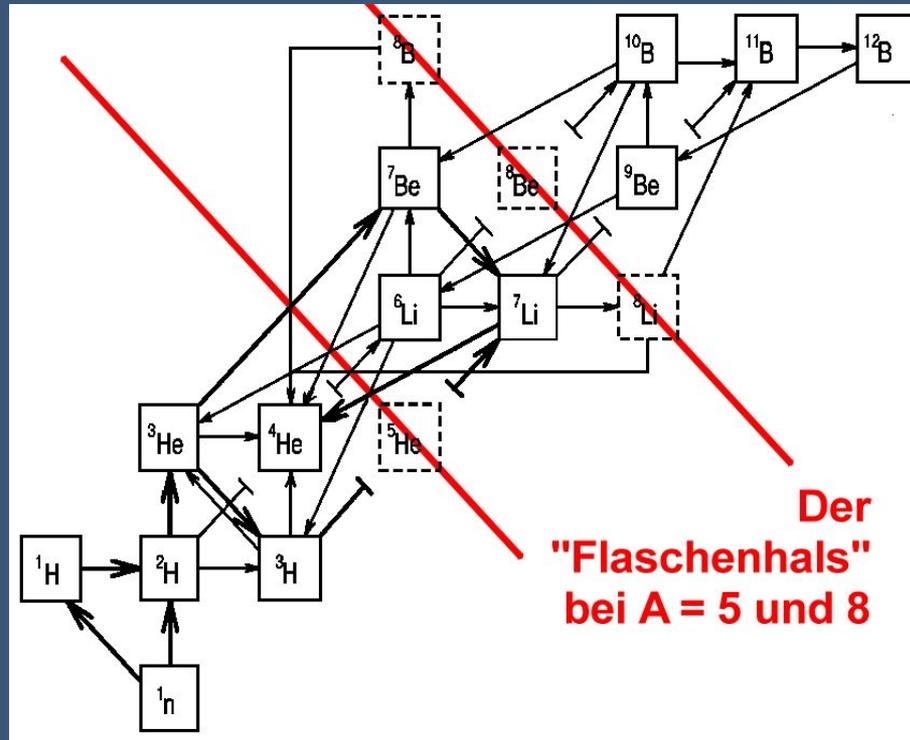
- Fusion bei Teilchenkollisionen
- Fusion benötigt hohe Temperaturen und große Teilchendichten



Primordiale Nukleosynthese

1 min

Zeit

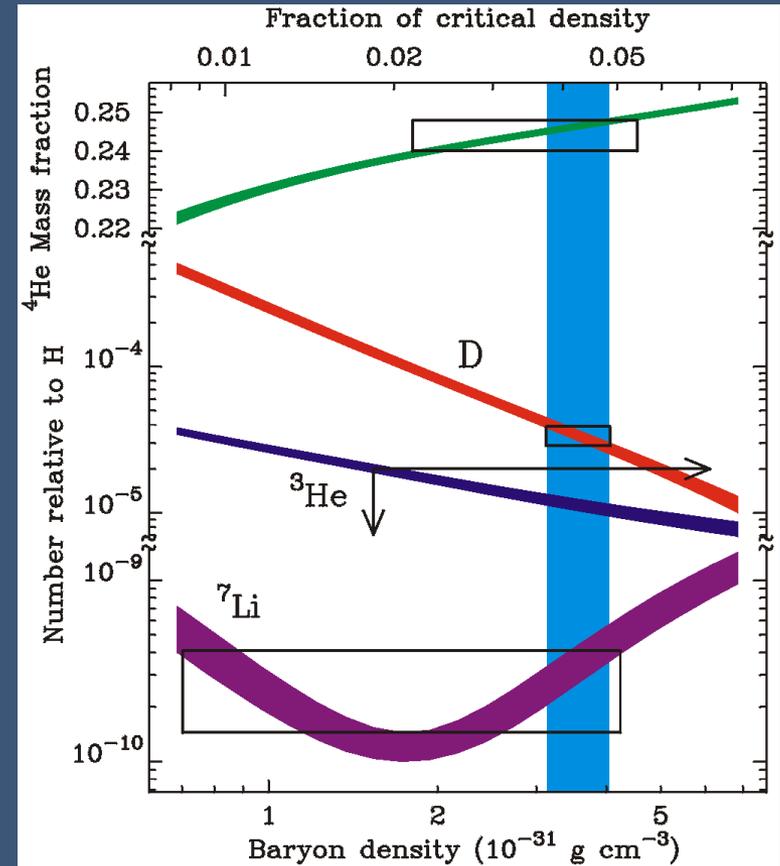


Primordiale Nukleosynthese

1 min

Zeit

- Erklärt die Häufigkeit der leichten Elemente
 - 74% Wasserstoff
 - 25 % Helium
 - 1% Rest
- Baryonische Dichte heute
 - $3,5 \cdot 10^{-31} \text{ g/cm}^3$ oder
 - **0,2 Wasserstoffatome/m³**



1 min



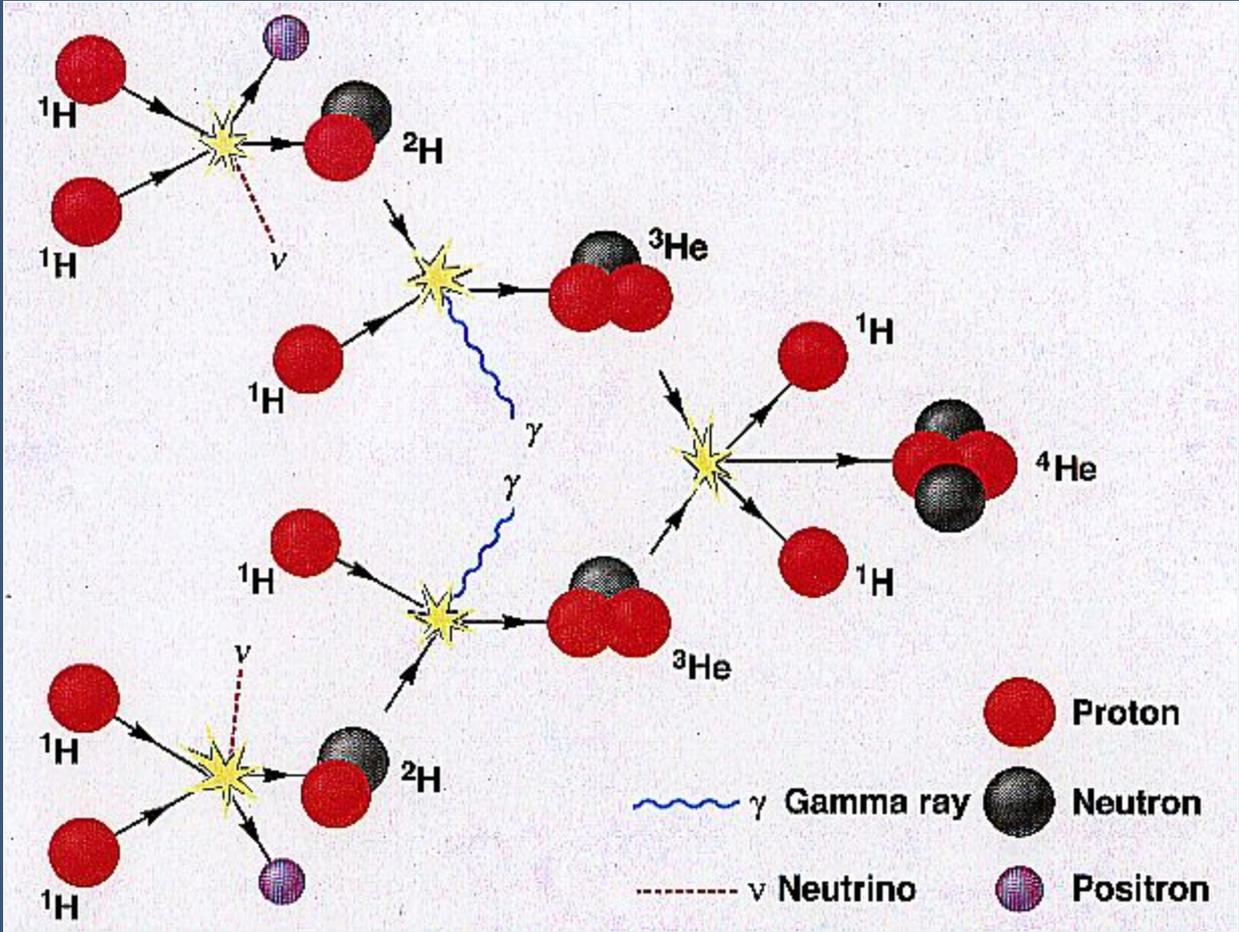
Zeit

Warum nicht in Sternen?

Fusion in Sternen

1 min

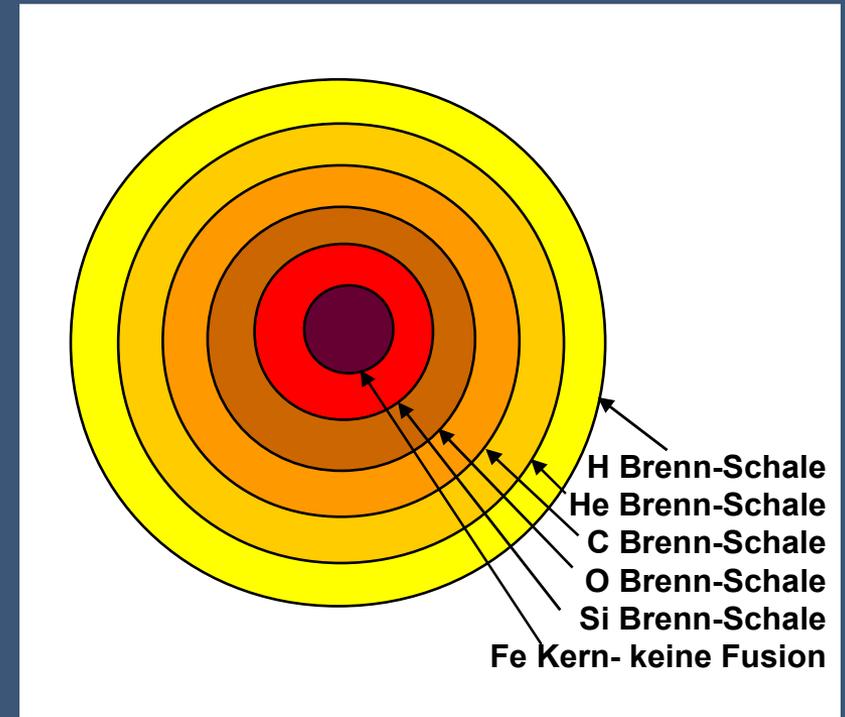
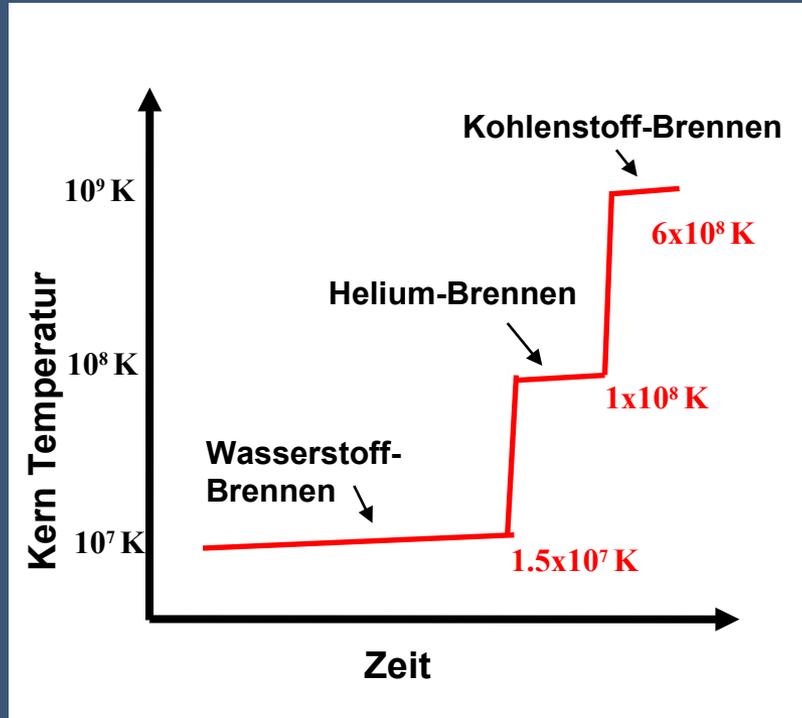
Zeit



Fusion in Sternen

1 min

Zeit



- Erwarte ungefähr genauso viel Helium wie andere Elemente mit großer Masse
 - Verhältnis: 75% H, 13% He, 12% Rest

Vergleich Stellarer und Primordialer Nukleosynthese

Zeit →

	Stellare Nukleosynthese	Primordiale Nukleosynthese
Zeitskala	Milliarden von Jahren	Minuten
Temperaturentwicklung	Ansteigend	Fallend
Dichte	100 g/cm ³	10 ⁻⁵ g/cm ³ (wie die Luft in diesem Raum)
Photon-Baryon-Verhältnis	1:1	10 ⁹ : 1

1 min

Zeit

Primordiale Nukleosynthese ist eine
der Stützen des Urknall-Modells!

370000 Jahre

Zeit

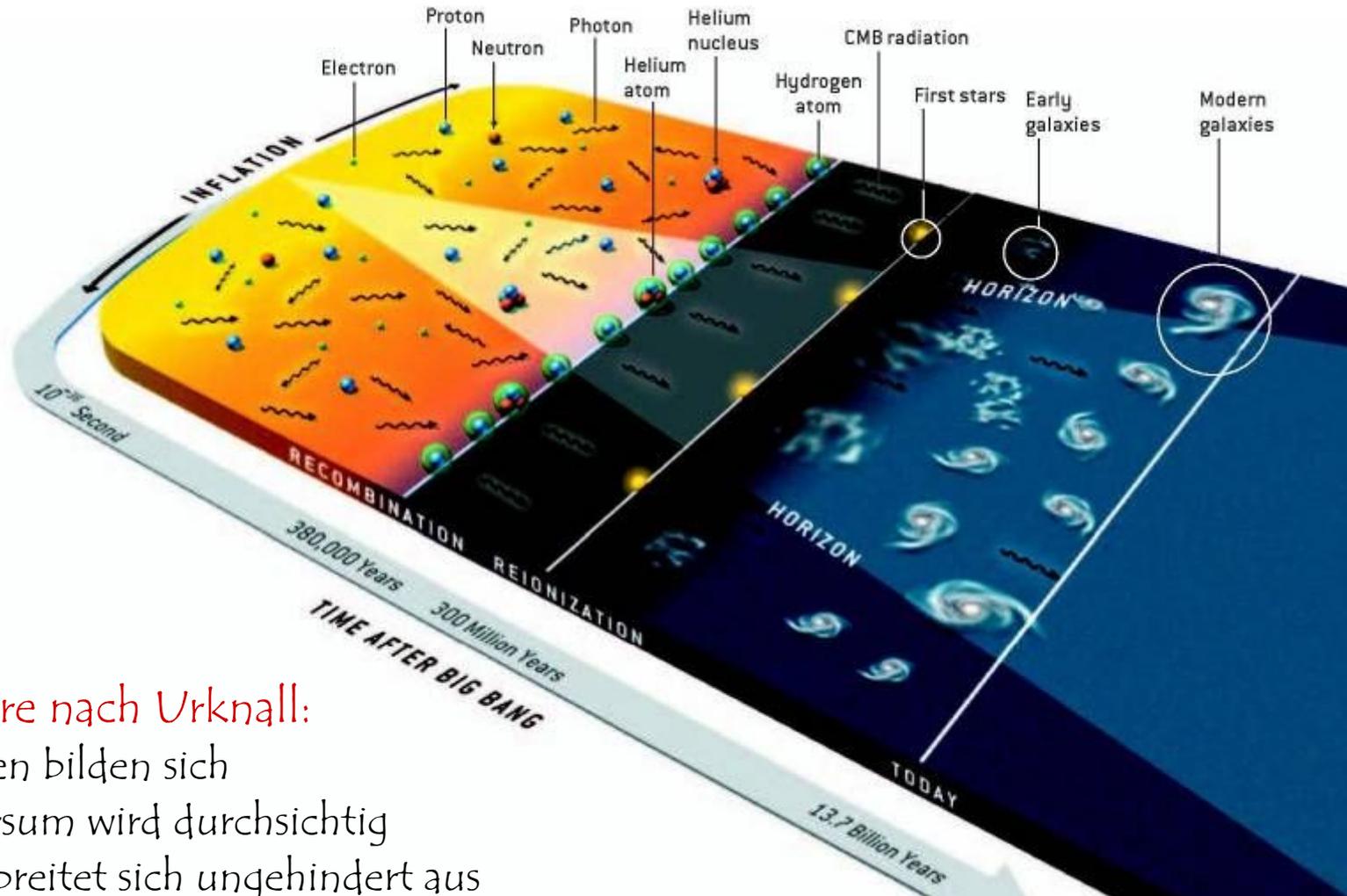
Wie weit können wir zum Urknall
sehen?

Die kosmische Hintergrundstrahlung

● Bis 380.000 Jahre nach Urknall:

- „Plasma“ aus Protonen, Heliumkernen, Elektronen, Photonen
1 : 0,06 : 1,12 : 2.000.000.000
- Strahlung (Photonen) und Materie in Wechselwirkung
- Temperatur $T > 3000\text{ K}$ → Ionisation von H-Atomen durch Photonen

Materie-Antimaterie
Vernichtung in Photonen



● 380.000 Jahre nach Urknall:

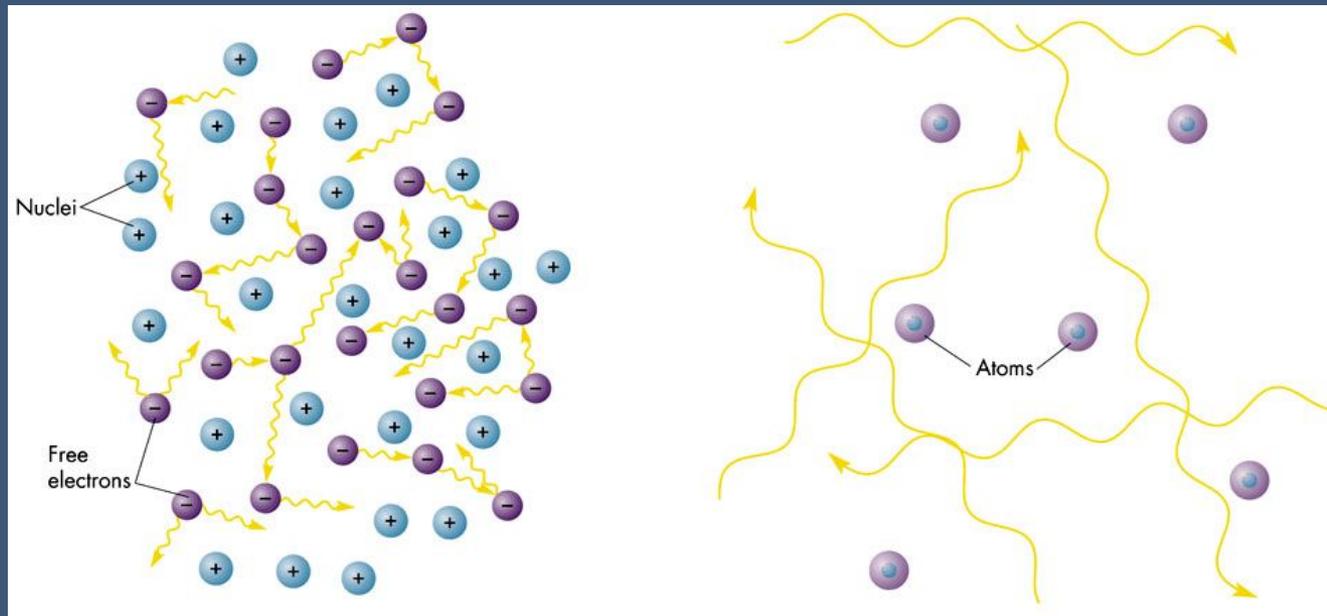
- Atomhüllen bilden sich
- Das Universum wird durchsichtig
- Strahlung breitet sich ungehindert aus

Bildung von Atomen

370000 Jahre

Zeit

- **Alter = 370000 Jahre, $T = 3000$ Kelvin**
 - Erste Atome bilden sich
 - Das Universum wird transparent



Wenn das Universum heute 80 Jahre wäre... (13.800.000.000 Jahre → 80 Jahre)



Ein Neugeborenes,
19 Stunden alt.



Erste Schritte
mit 13 Monaten

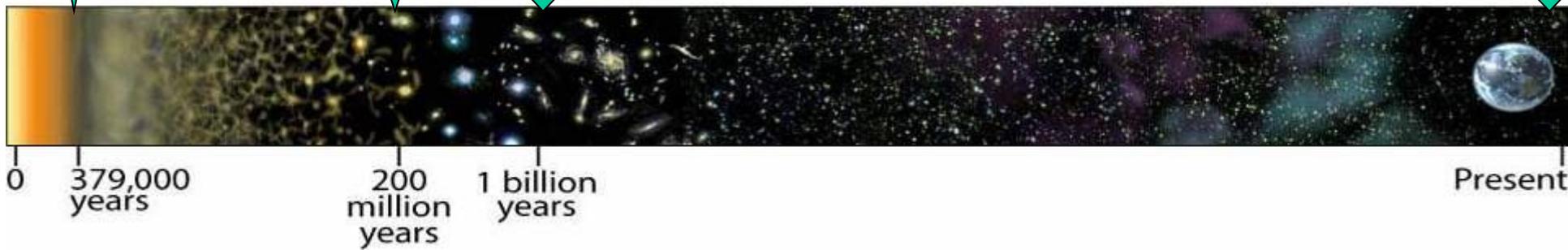


Schulanfang
mit 6 Jahren



Das Universum ist 80.
„Hat“ seit 5 Stunden
Homo Sapiens

Time Since the Big Bang



Vernichtungssstrahlung damals-heute

370000 Jahre

Zeit



Damals:
Licht 3000 K

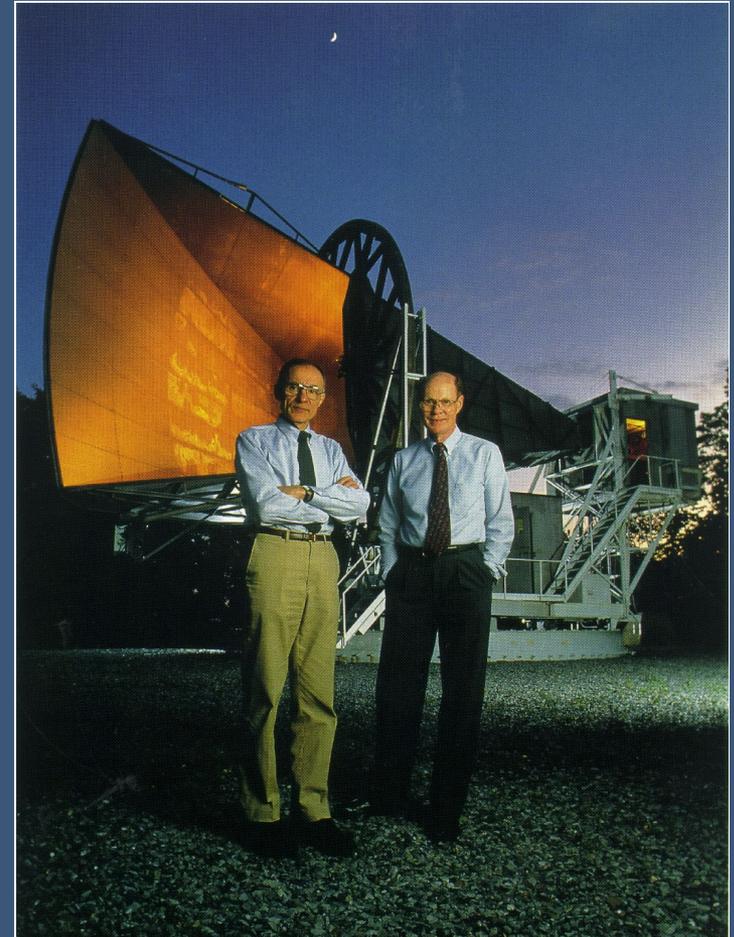
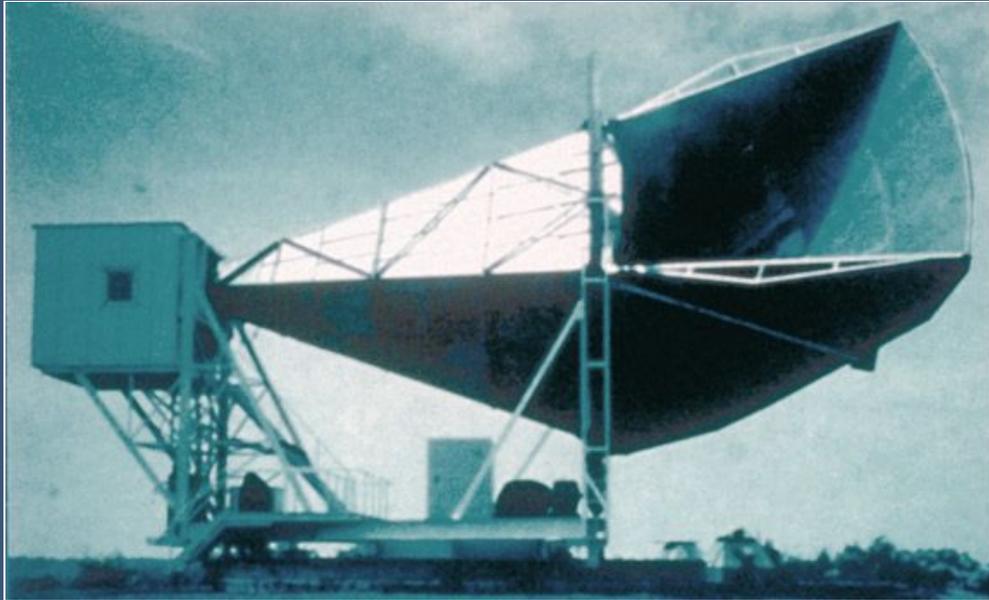


Heute:
Mikrowellen 3 K

1965 - Die Entdeckung

370000 Jahre

Zeit →



Mikrowellen-Strahlung
aus dem Kosmos

COBE, WMAP and PLANCK

370000 Jahre

Zeit →

- COBE

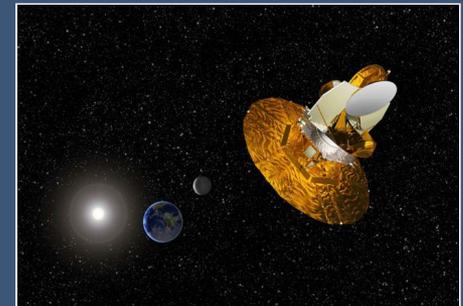
- COsmic Background Explorer
- 1989 – 1993
- Nobelpreis 2006
(G. Smoot, J. Mather)

- WMAP

- Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
- Start 2001

- PLANCK

- Erste Resultate : vor 4 Tagen !
- <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=51551>



Knallbuntes Panorama

Ein Jugendfoto des Universums krönt die Kosmologie des 20. Jahrhunderts: In groben Zügen ist die Chronik des Weltenbeginns jetzt bekannt.

ASTRONOMIE Knallbuntes Panorama

Ein Jugendfoto des Universums krönt die Kosmologie des 20. Jahrhunderts: In groben Zügen ist die Chronik des Weltenbeginns jetzt bekannt.

Wenn eine Brähe einmal 3000 Grad heiß ist, kommt es auf ein paar Grad mehr oder weniger auch nicht mehr an. Normalerweise.

Es gab jedoch eine Zeit, da spielte jedes Hundertstel Grad eine schicksalhafte Rolle: Ob 3000,00 oder 3000,01 Grad konnte den Unterschied zwischen Sein oder Nichtsein ganzer Weltsysteme bedeuten.

Am vergangenen Dienstag präsentierten die Astronomen ein Foto aus jener Zeit, aufgenommen von der Nasa-Sonde „Map“.

Es zeigt ein Oval voller roter, grüner und blauer Punkte, und es vermag einen Kosmologen zu verzaubern wie ein wundervolles Gemälde – so formulierte es Michael Turner, einer der Stars der Zunft.

Das bunte Fleckenmuster zeigt Mikrowellenstrahlung, die von der noch jungen Welt ausging. Gerade waren die Temperaturen so weit gesunken, dass sich elektrisch geladene Elektronen und Protonen zu neutralen Wasserstoffatomen verbinden konnten.

Unvermittelt klarte der zuvor trübe Kosmos auf; die Strahlen traten ungehindert ihren viele Milliarden Lichtjahre weiten Weg bis zum Planeten Erde an.

Jeder der Punkte auf dem „Map“-Bild steht für einen Teil des Himmels, der etwa so groß ist, wie ihn eine in Armlänge gehaltene Erbe abdeckt. Blau steht für „ein klein wenig kühler“, und das bedeutet: Das Urplasma hier ist dichter und neigt dazu zu verklumpen – deshalb ist es wahrscheinlich, dass aus diesem Fleck dereinst ein Haufen von Galaxien mit jeweils vielen Milliarden Siemen hervorgehen wird. Rote Punkte hingegen stehen für wärmere Regionen. Ihnen steht eine gemütsame Zukunft als Millionen Lichtjahre weite Leere bevor.

So begeistert sich die Astrophysiker auch über die knallbunte Panoramakarte des Universums äußern mögen, wirklich überraschend sind die Ergebnisse nicht. „Eigentlich bestätigen sie nur unsere Hypothesen“, erklärt Matthias Bartelmann vom Garching Max-Planck-Institut für Astrophysik. „Sensationell ist nur die Messgenauigkeit, mit der sie dies tun.“

Auch Bestätigung kann beleutsam sein: Erstaunlich schlüssig fügen sich die „Map“-Daten zum Szenario des Weltenbeginns. „Das kosmologische Rahmenprogramm steht fest“, verkündet Bartelmann. An den Eckdaten der Universums-Chronik kann fortan nicht mehr gerüttelt werden.

Es vollendet sich damit ein Forschungsprojekt, das vor 40 Jahren seinen Ausgang nahm. Damals hatten Physiker erstmals jenen Strahlungshintergrund aufgefangen, der als Echo des Urknalls den ganzen Kosmos erfüllt.

Unvermittelt war der Beginn allen Seins aus dem Bereich religiöser Spekulation gerückt und zum Gegenstand messender Naturwissenschaft geworden. Das Ziel war nun ein mit den Mitteln der Physik verfasster Schöpfungsbericht.

Seit letzter Woche steht der Plot endgültig fest. Alle wesentlichen Eigenschaften, die das Baby-Universum beschreiben – Dichte, Temperatur, Zusammensetzung, Expansionsgeschwindigkeit und Raumkrümmung –, lassen sich aus der „Map“-Karte herausdestillieren. „Bei diesen Parametern gibt es nun keinen Spielraum mehr“, erklärt Bartelmann.

Aus ungeklärter Ursache zündete demnach vor genau 13,7 Milliarden Jahren das All. Es folgte die Ära der Inflation: Das frisch geborene Universum dehnte sich aus – in einem kaum vorstellbar kurzen Moment in ebenso wenig vorstellbar gewaltigen Maße.

In den Minuten, die folgten, kristallisierten sich jene Kräfte heraus, mittels deren die Materie wechsellwirkt. Nach 380 000 Jahren wurden dann die Atome geboren: Die Welt bestand nun aus Wasserstoff, der in einem Meer von Mikrowellenstrahlen badete. Weitere 20 Millionen Jahre später kollabierte die erste Gaswolke zu einem Stern. Er war schwer wie 100 Erdensonnen und endete als Schwarzes Loch.

So gut die Fakten auch zusammenpassen, die Kosmologen werden nicht arbeitslos. Noch wissen sie nicht, warum der Urknall überhaupt zündete, und auch, warum sich das Universum während der Inflation so abrupt aufblähte, verstehen sie nicht. Das vielleicht größte Rätsel aber verbirgt sich hinter einem weiteren Ergebnis der „Map“-Mission: Das Universum, so lässt sich aus dem bunten Flecken-teppich schließen, ist eine Mischung aus drei Komponenten: 73 Prozent bestehen aus dunkler Energie, 23 Prozent aus dunkler Materie der Rest, also 4 Prozent, ist Materie herkömmlicher Art.

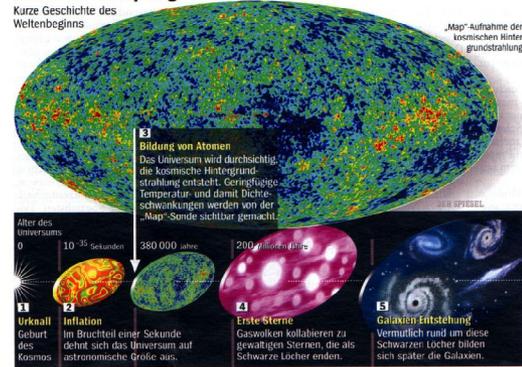
Das Problem ist nur: Niemand weiß, was „dunkle Energie“ und „dunkle Materie“ eigentlich sind. Ihre Wirkung auf Galaxien und Sterne lässt sich messen, ihre Natur jedoch ist unbekannt.

Die Bühne, auf der sich die Geburt allen Seins vollzogen, haben die Physiker mithin errichtet. Die Hauptakteure jedoch kennen sie nicht. Sicher scheint nur, dass das Universum einem Ozean gleicht, auf dem jene vier Prozent Materie, die aus Atomen aufgebaut ist, nicht viel mehr als die Schaumkronen bilden.

JOHANN GROLLE

Bühne der Schöpfung

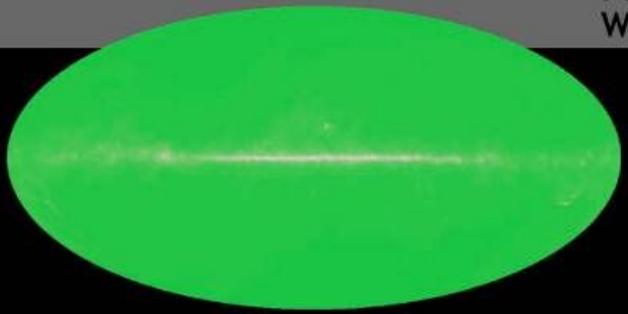
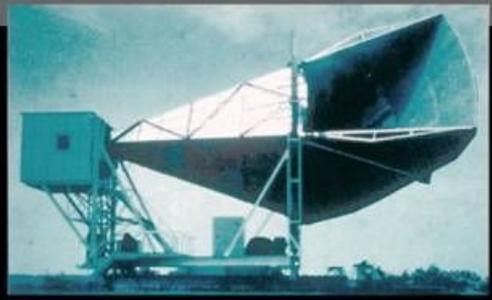
Kurze Geschichte des Weltenbeginns



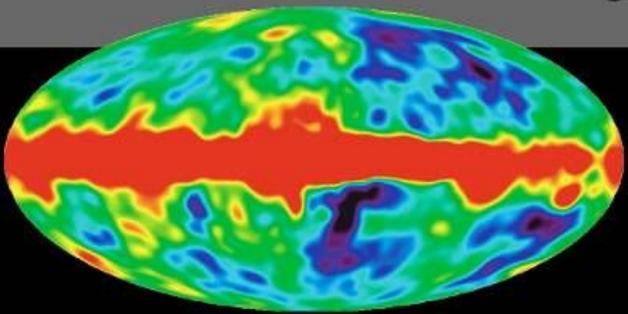
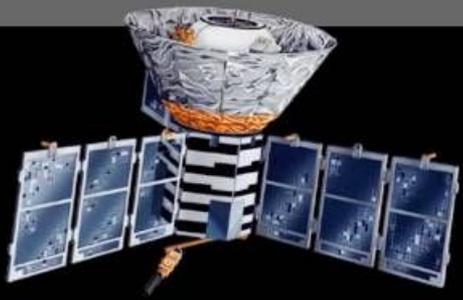
Beispiele zur Vermessung der Hintergrundstrahlung

Zeit →

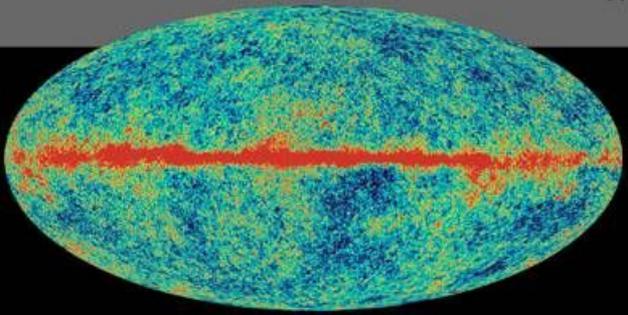
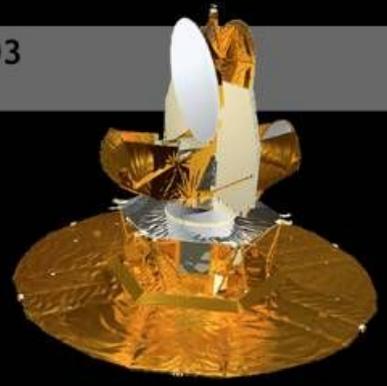
1965 Penzias and Wilson



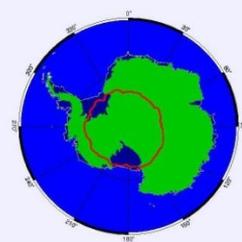
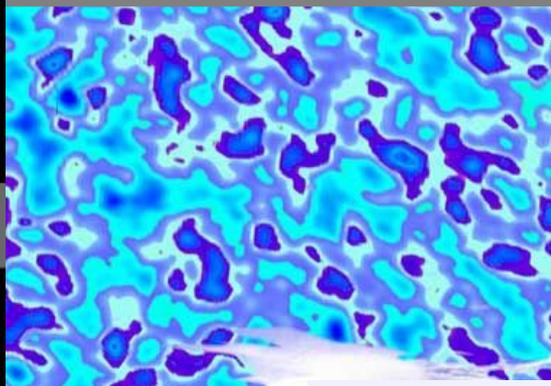
1992 COBE



2003 WMAP



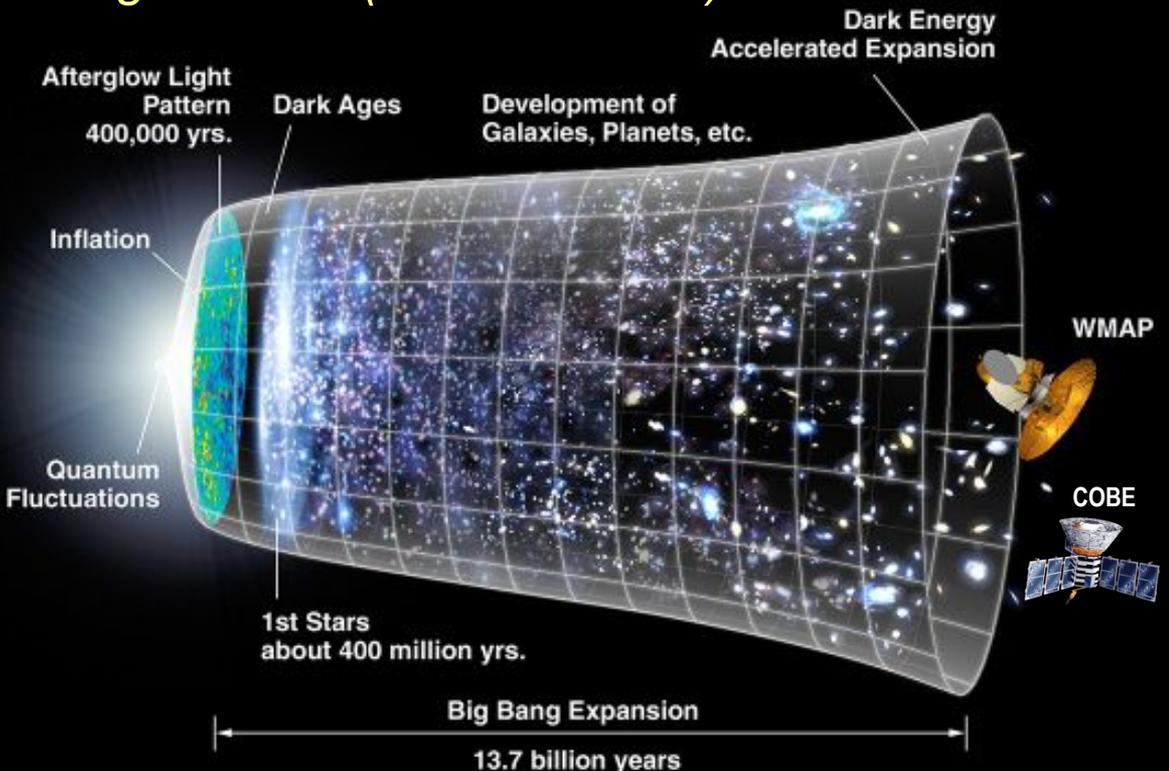
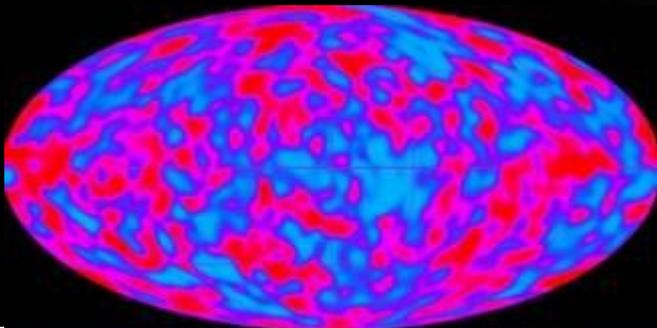
1999 BOOMERanG



Temperaturschwankungen

- Dichtere Regionen sind etwas wärmer als dünnere
- Hintergrundstrahlung von dort ist etwas energiereicher
 - Mittlere Temperatur heute: 2,73 K über absolut Null (-270,42 °C)
 - Typische Temperaturschwankungen: +/- 0,0002 K
- Physik Nobelpreis 2006: Entdeckung dieser Schwankungen
 - *John C. Mather und George Smoot (COBE Satellit)*

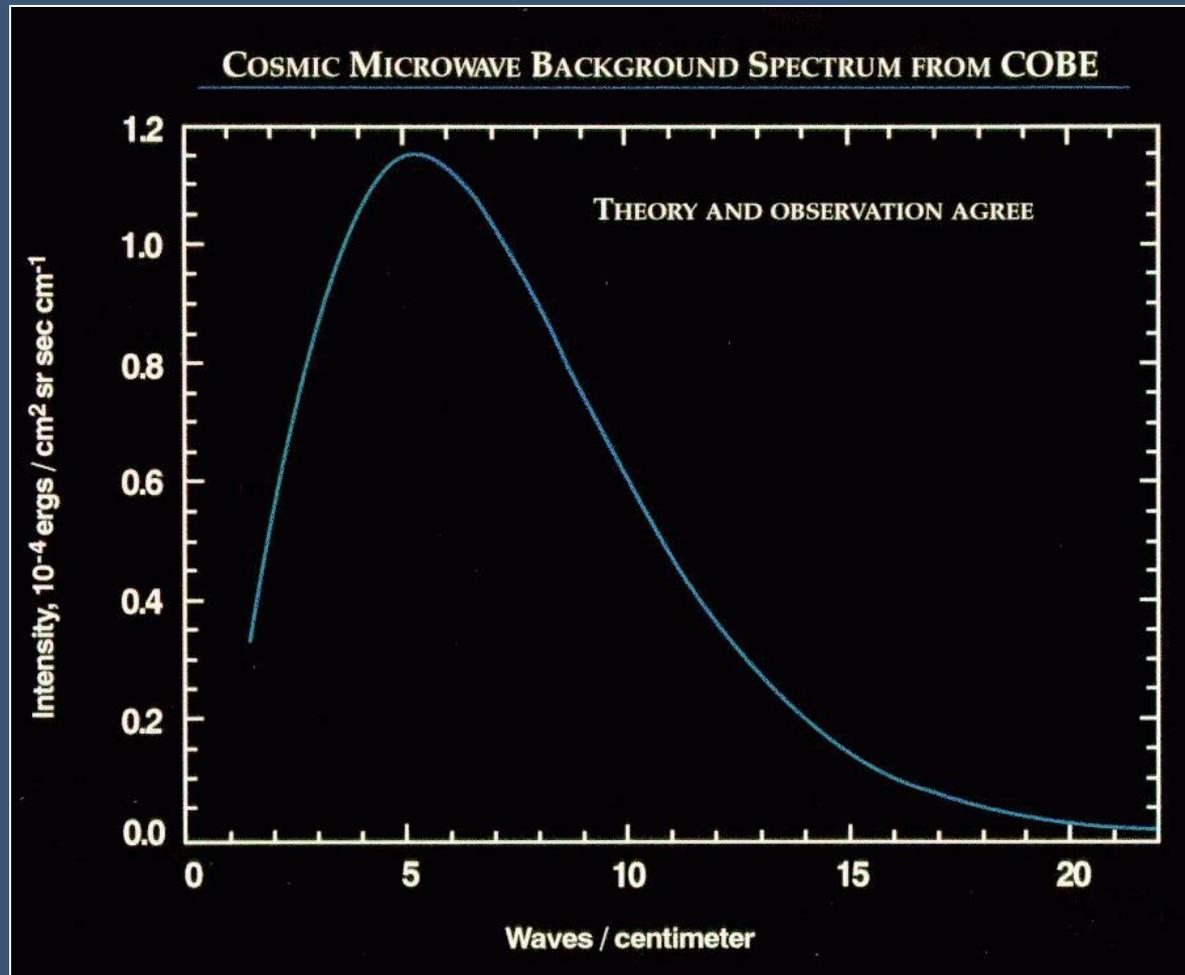
Zeit →



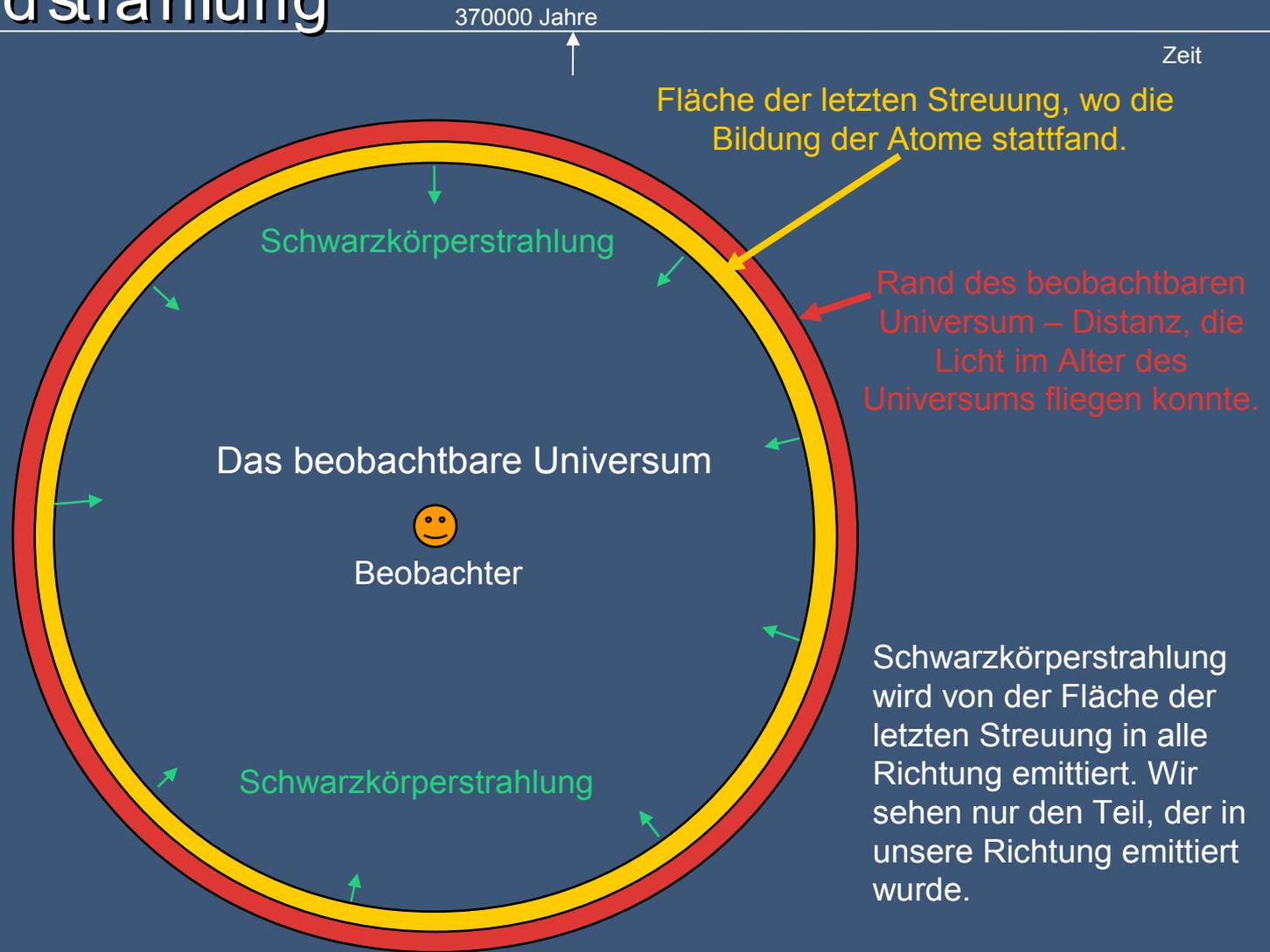
Das Spektrum

370000 Jahre

Zeit →



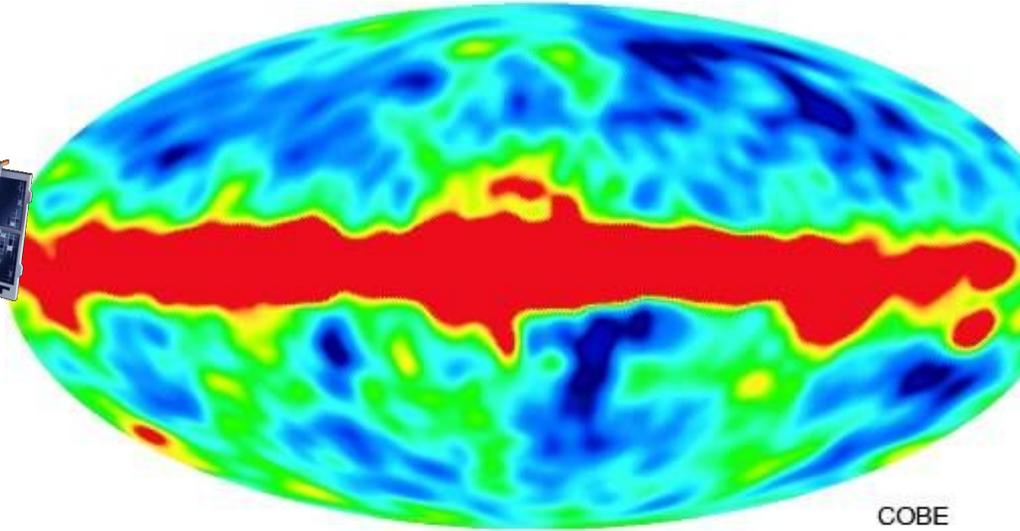
Die Geschichte der kosmischen Hintergrundstrahlung



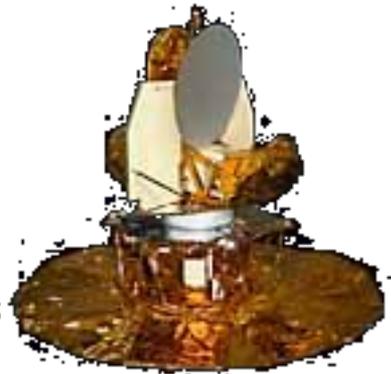
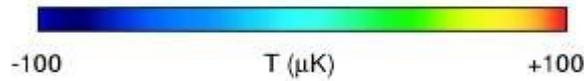
Mikrowellen als Babyfoto



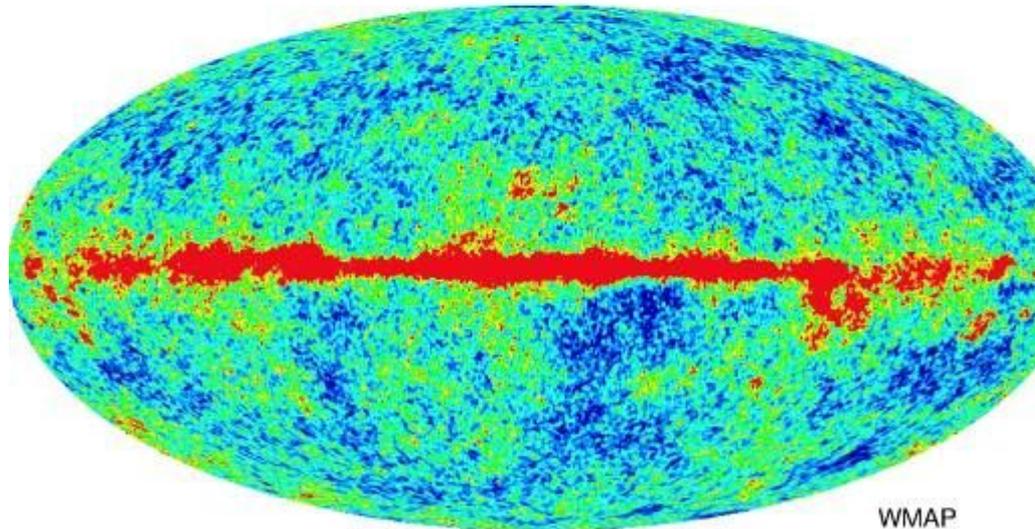
Cobe 1994



COBE



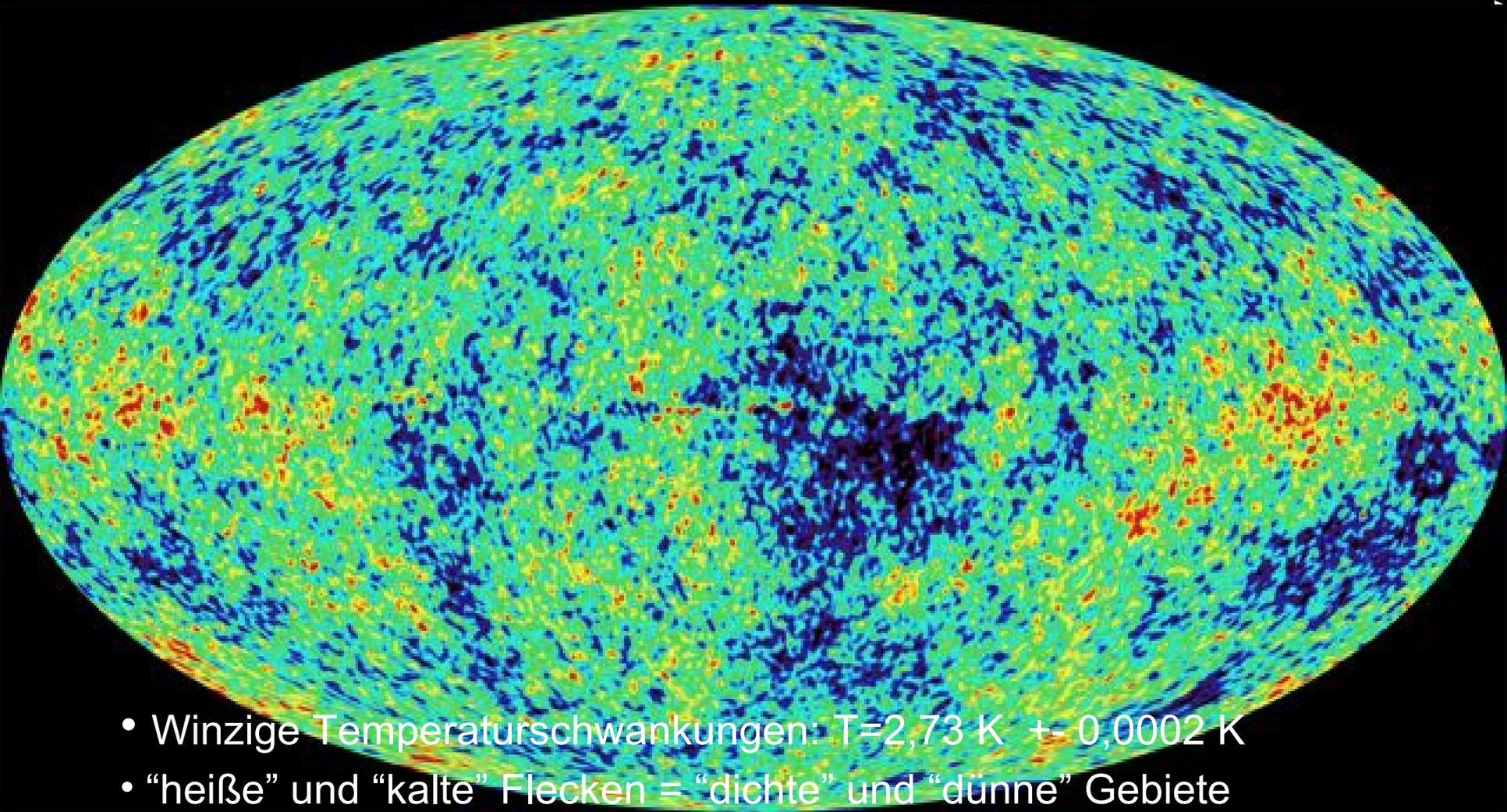
WMAP 2003



WMAP



Nach Abzug unserer Milchstraße



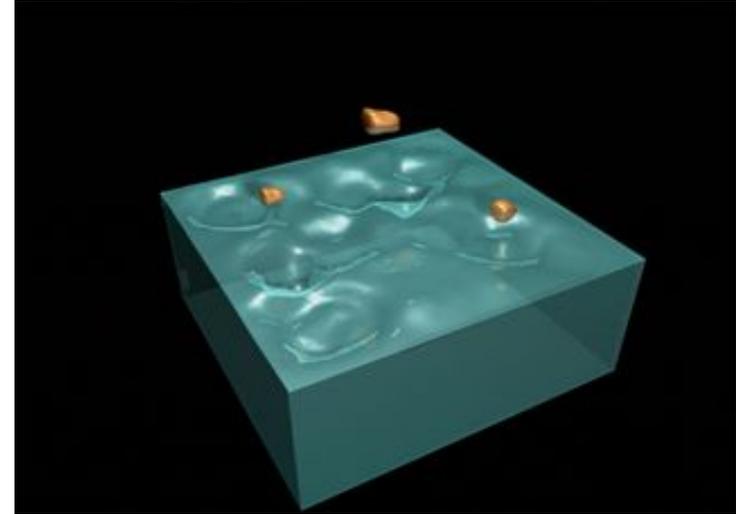
- Winzige Temperaturschwankungen: $T=2,73 \text{ K} \pm 0,0002 \text{ K}$
- “heiße” und “kalte” Flecken = “dichte” und “dünne” Gebiete
- genau wie bei Schall → **Klang des Universums**

Ursprung der Dichteunterschiede

- **Postulat:**

Aus Nachhall der Quantenfluktuationen des Urknalls, „eingefroren“ durch Inflation (überholen Ereignishorizont)

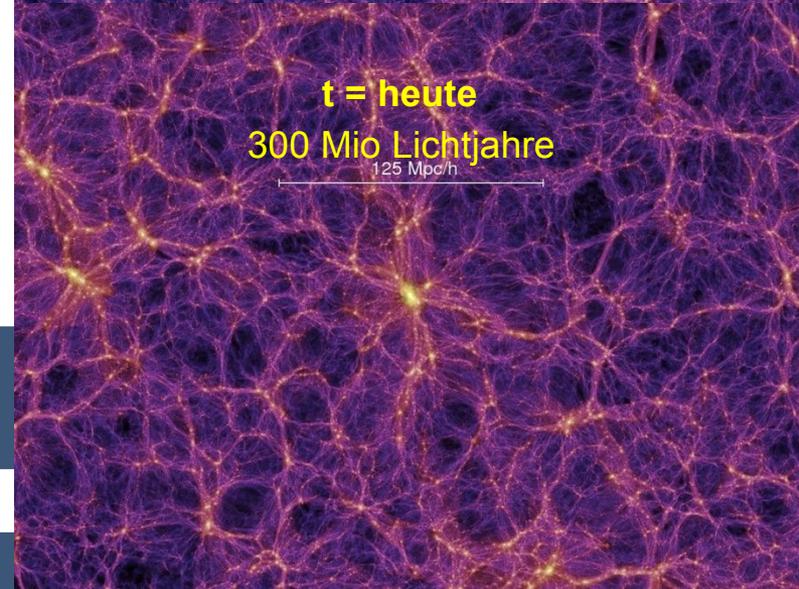
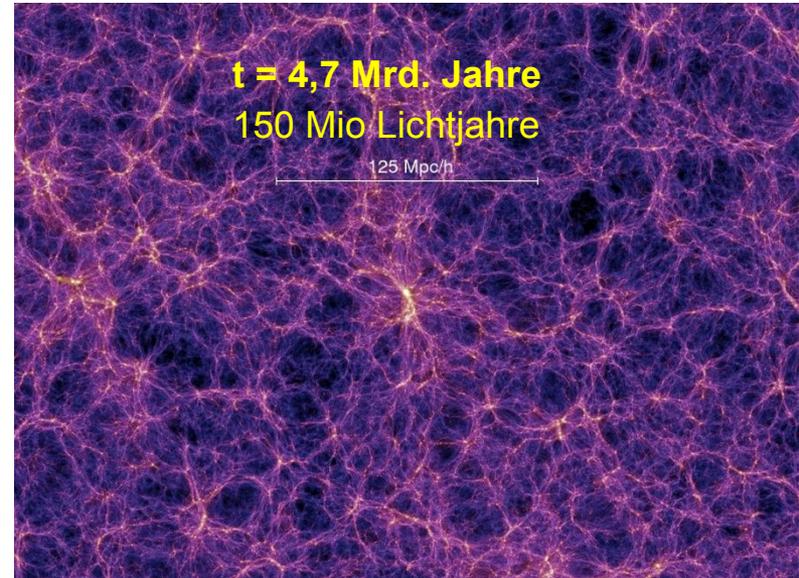
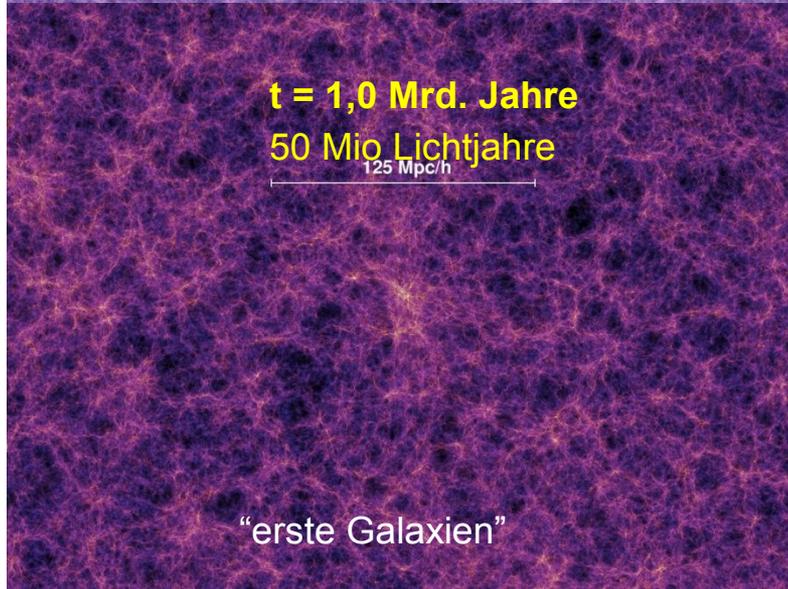
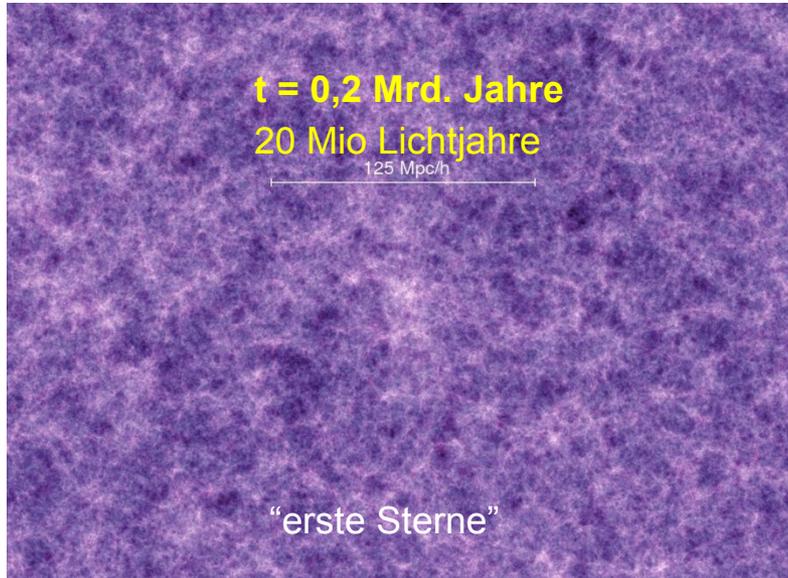
- Verstärkt durch gravitatives „Aufsammeln“ der Umgebung



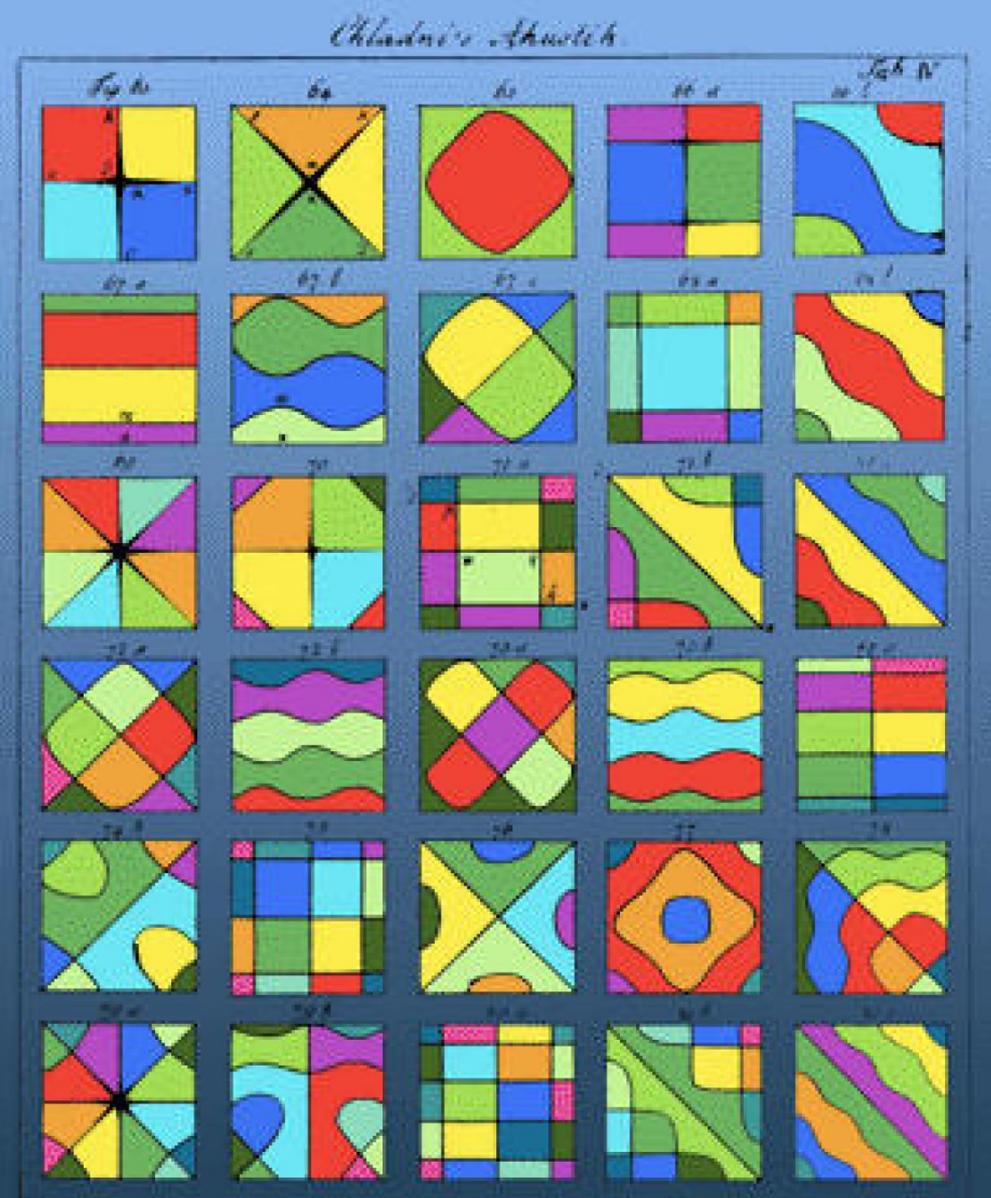
Strukturbildung im Universum

- MPI für Astrophysik München, Millenium Simulation

<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>



Akustische Analogie I: Chladni-Figuren



Chladni sound patterns (coloured)

Ernst Florens Friedrich Chladni
(1756 – 1827)

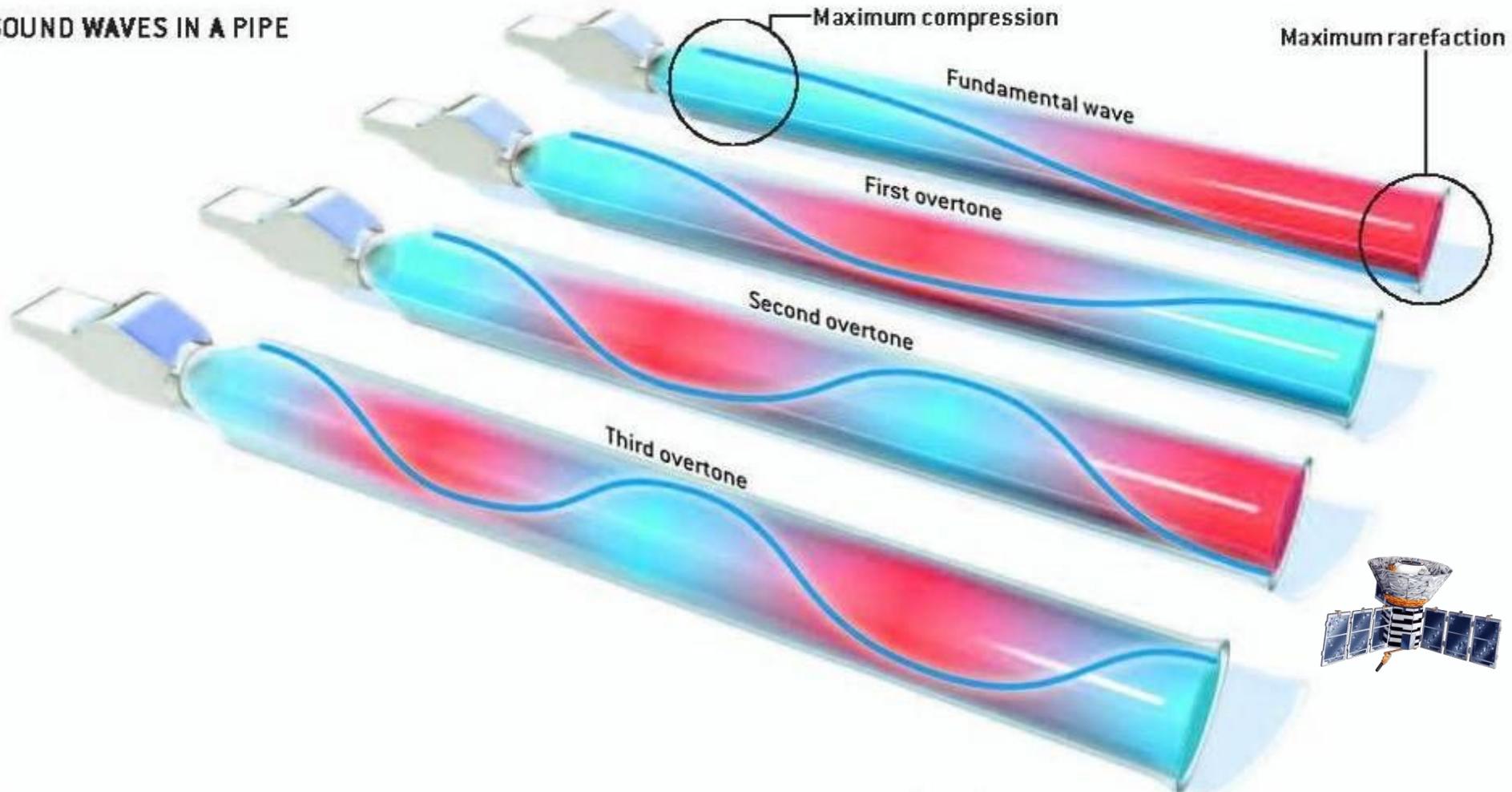
Die Akustik (Leipzig, 1802)

Akustische Analogie II: Musikinstrumente

THE SOUND SPECTRUM of the early universe had overtones much like a musical instrument's. If you blow into a pipe, the sound corresponds to a wave with maximum air compression (*blue*) at the mouthpiece and maximum rarefaction (*red*) at the end

piece. But the sound also has a series of overtones with shorter wavelengths that are integer fractions of the fundamental wavelength. (The wavelengths of the first, second and third overtones are one half, one third and one fourth as long.)

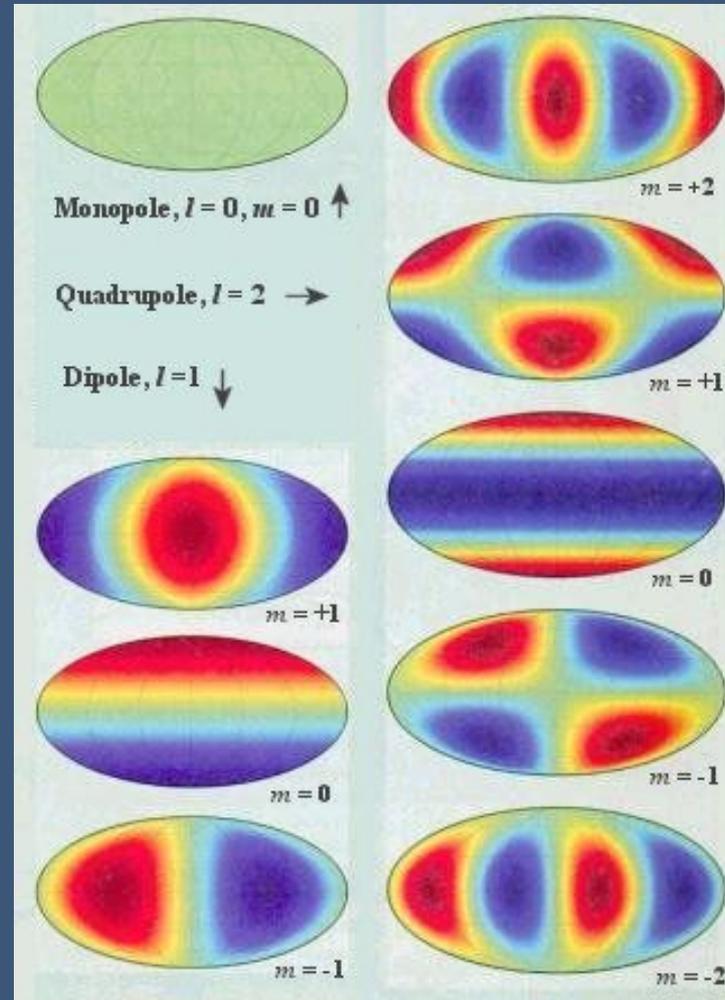
SOUND WAVES IN A PIPE



Multipolentwicklung

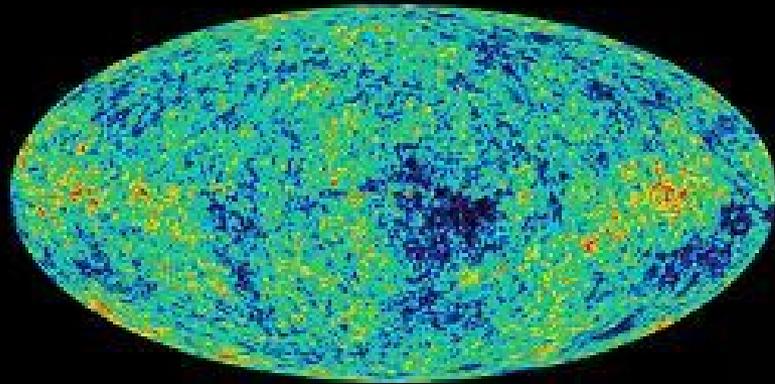
370000 Jahre

Zeit →

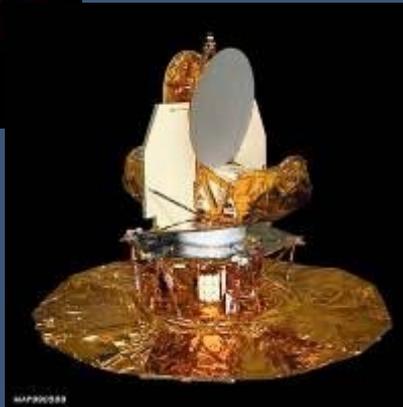


Die Obertöne des Kosmischen Klangs

Zeit →

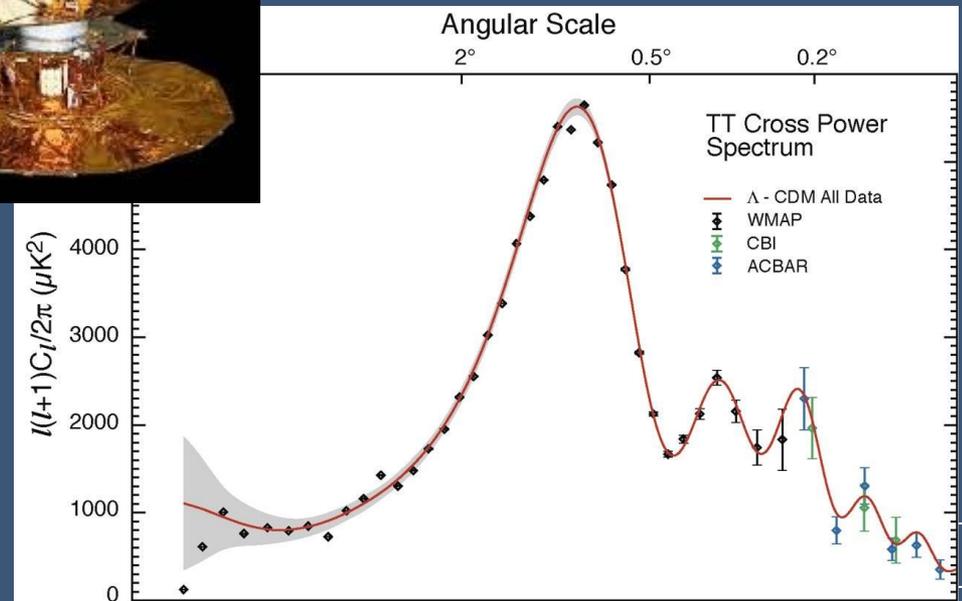


- Das Ohr hört an Obertönen:
 - Art des Instruments
 - geübtes Ohr: Bauweise



Astrophysiker erkennen an den Obertönen:

- „Form“ des Universums
- Zusammensetzung



Vergleich der Akustischen Wellen

Schallgeschwindigkeit im Gas $v = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}}$ Frequenz $f = \frac{v}{\lambda}$

	Luft	Universum	Verhältnis
Wechselwirkung	<i>Druck d. Stöße</i>	<i>Druck d. Strahlung + Gravitation (!)</i>	
Dichte	3×10^{25} Moleküle / m ³	3×10^8 Protonen / m ³ (bei 380.000 Jahren)	10^{-17}
Zustandsgleichung	$pV^\kappa = \text{const.} \rightarrow p \sim \rho^\kappa$	$p = \frac{1}{3}c^2\rho$	
Geschwindigkeit	$v = \sqrt{\kappa p / \rho} = 340$ m/s	$v = c / \sqrt{3} = 1,7 \times 10^8$ m/s	500.000
Wellenlänge	20 mm – 20 m	20.000 – 400.000 Lj	$10^{20} - 10^{22}$
Frequenz	17.000 – 17 Hz	$10^{-12} - 0,4 \times 10^{-13}$ Hz	$10^{-14} - 10^{-16}$

● **Akustik bis zu Frequenzen von 0,04 pHz !**

Schallwellen vermessen Geometrie

$$\lambda \text{ (Geometrie)} = \frac{v \text{ (1/\sqrt{Dichte})}}{f \text{ (Tonhöhe)}}$$

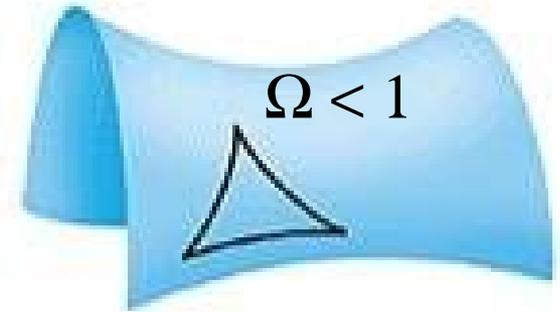
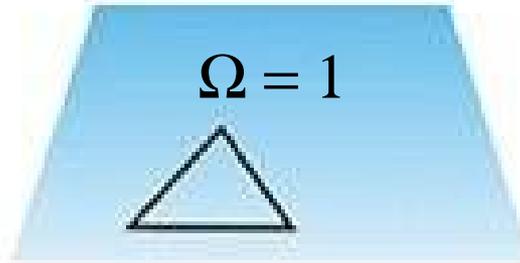
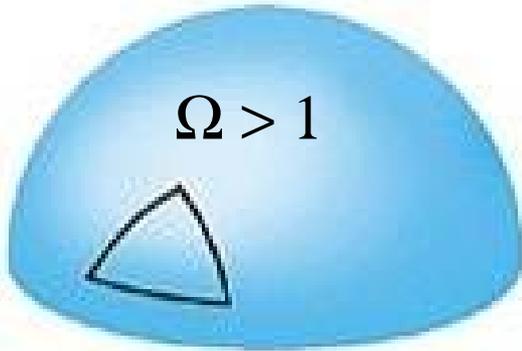
- Geometrieänderung (Dichte=const.) ergibt Frequenzänderung
 - Länge \rightarrow Tonhöhe (\rightarrow Saiten, \rightarrow Pfeifen)
 - Form \rightarrow Klang (Frequenzzusammensetzung) (\rightarrow Fourierzerlegung)



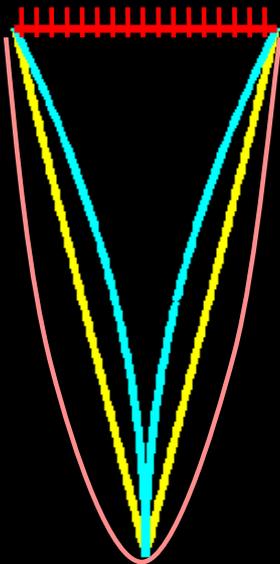
- Dichteänderung (Geometrie=const.) ergibt ebenfalls Frequenzänderung (\rightarrow Einatmen von Helium oder Schwefelhexafluorid SF_6)

Universum: Kenne v und $f \rightarrow$ bestimme λ (Maßstab)

Geometrie = „Form“ des Universums

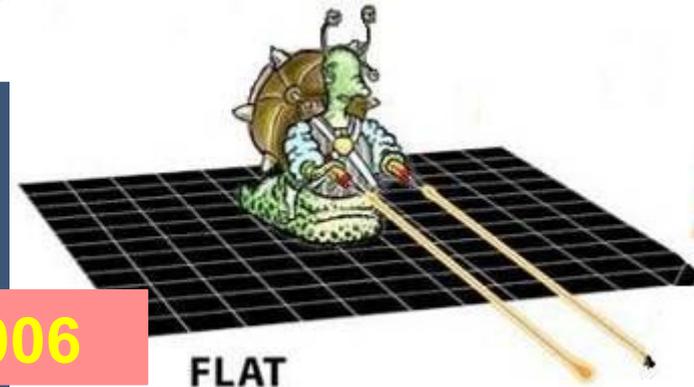
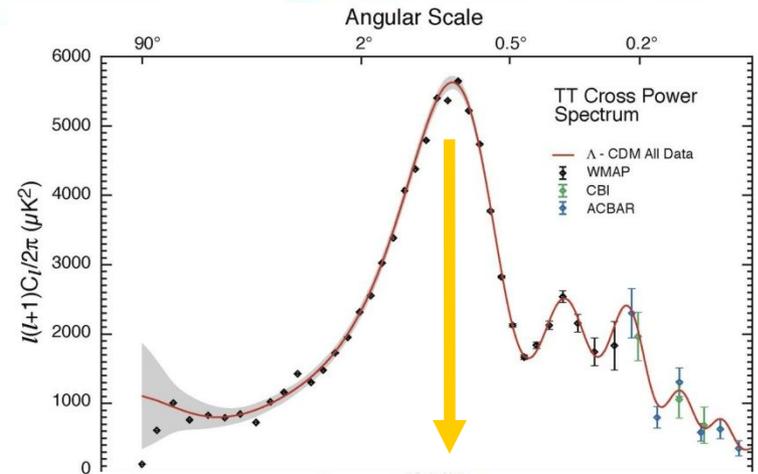


bekannter Maßstab
Sonic Horizon



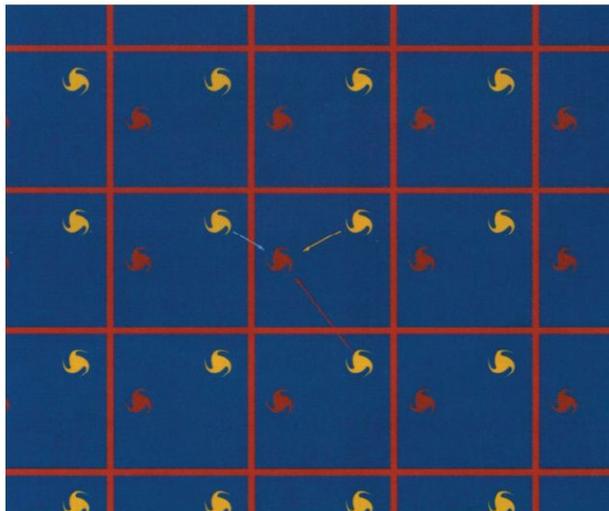
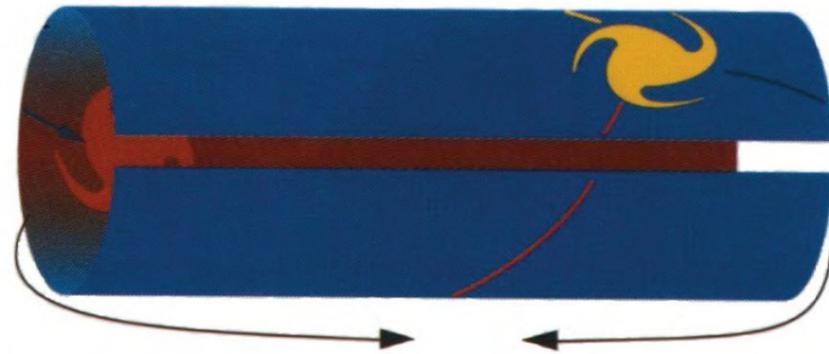
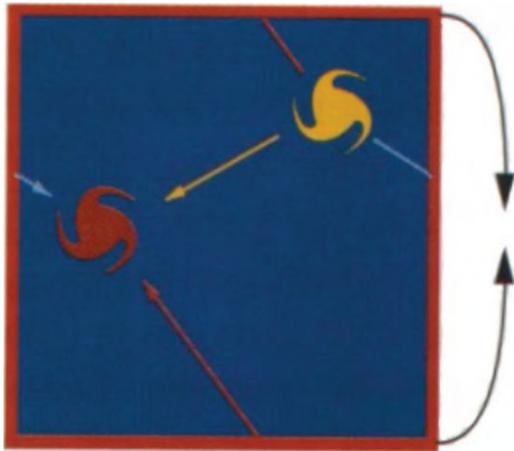
- neg. gekrümmt
- flach
- pos. gekrümmt

$\Omega = 1,005 \pm 0,006$



Das Universum als Spiegelsaal?

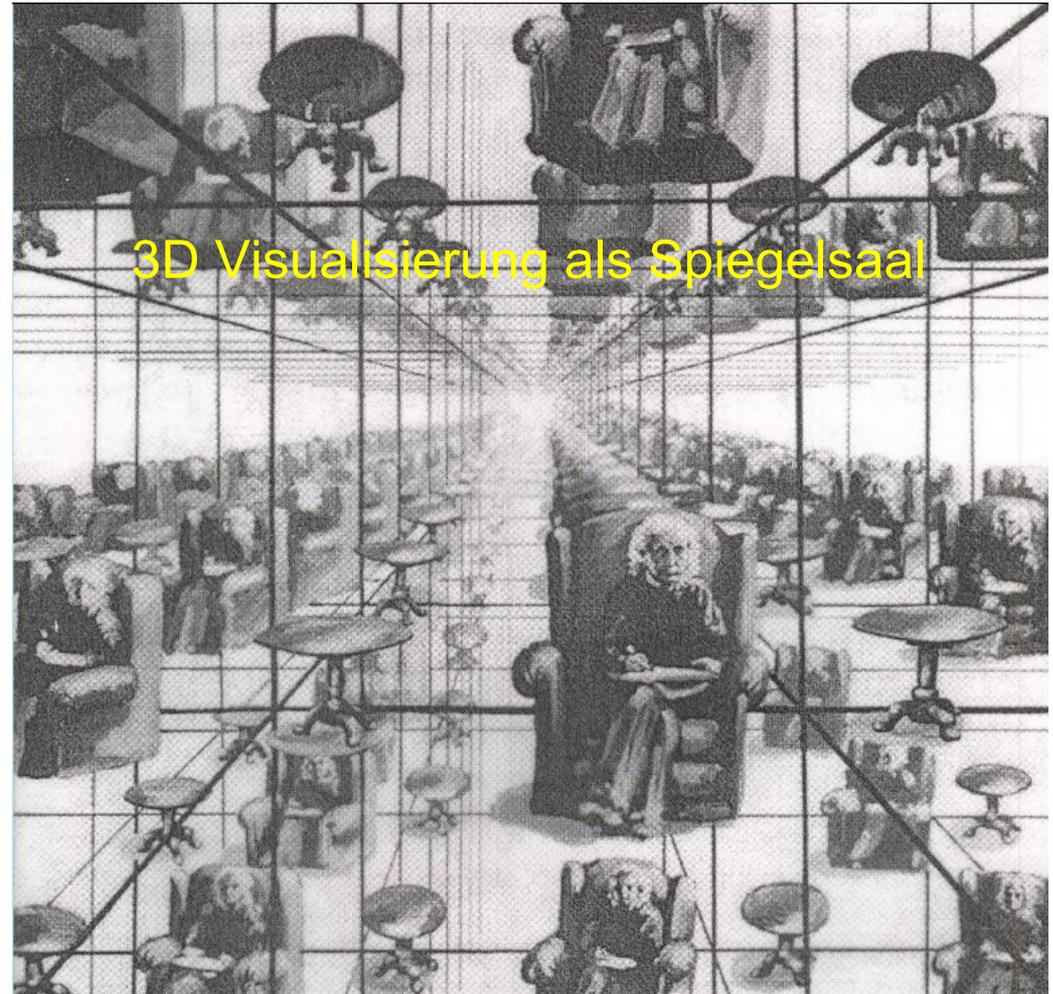
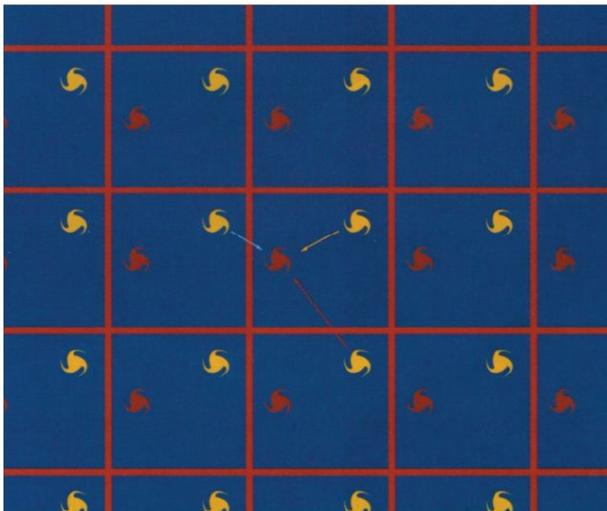
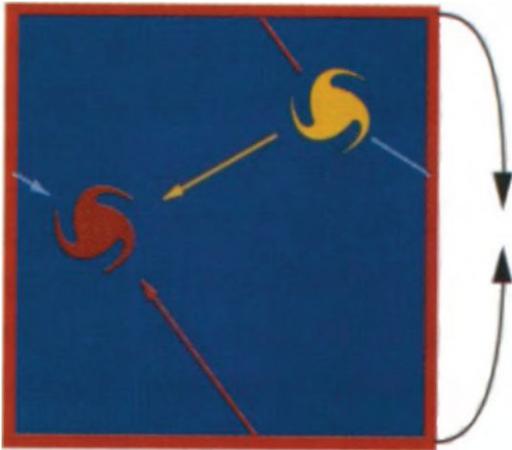
- Flach:= Parallele bleiben Parallel
- trotzdem endliches Volumen möglich!
 - einfachste Lösung: Torus (eingeschränkte 3D→2D Visualisierung)



- kleines Problem:
2D-Visualisierung
-> nicht mehr flach

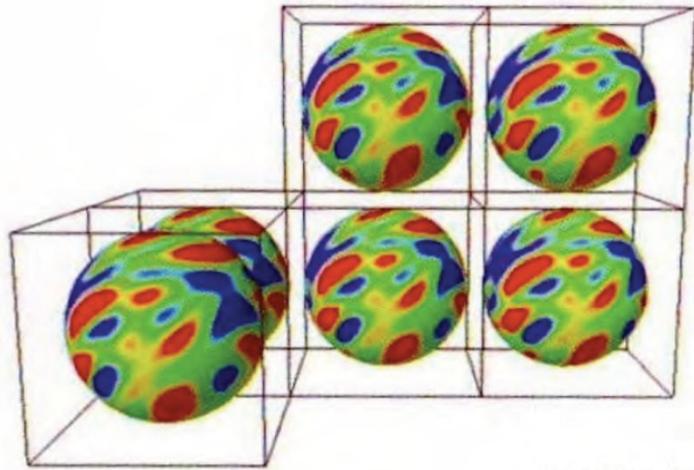
Das Universum als Spiegelsaal?

- Flach:= Parallele bleiben Parallel
- trotzdem endliches Volumen möglich!
 - einfachste Lösung: Torus (eingeschränkte 3D→2D Visualisierung)

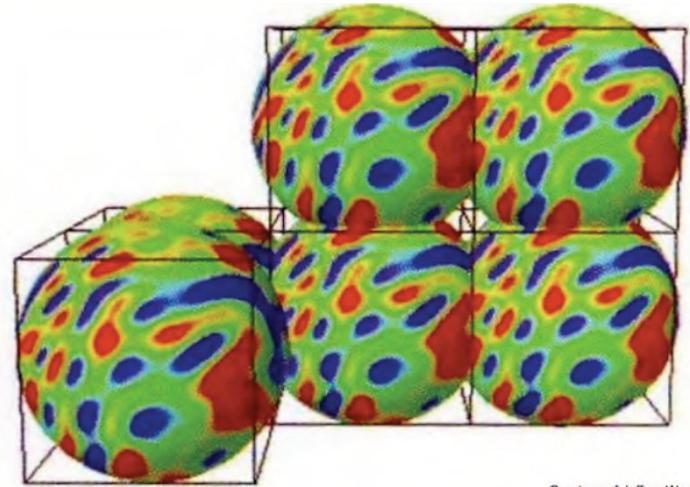


Möglicher Nachweis: "circles-in-the-sky"

- Sobald Ereignishorizont größer Einheitszelle \rightarrow gleiche Muster gegenüber (heutiger Ereignishorizont: 46 Mrd. Lichtjahre)
- konsistent mit langwelligen CMB Pattern!
 - Spektrum der Wissenschaft, Januar 2009 <http://www.spektrum.de/artikel/974631>



Courtesy of Jeffrey Weeks

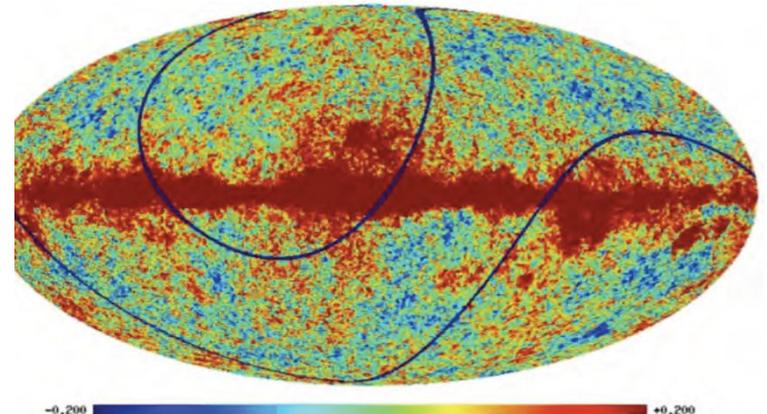


Courtesy of Jeffrey Weeks

Beste Anpassung an CMB Daten:
(Aurich, Steiner et al, Uni Ulm, 2008)

<http://arxiv.org/abs/0708.1420>

*Kantenlänge = 54 Mrd. Lichtjahre ??
(große Unsicherheiten, kaum signif.!)*



Zusammensetzung des Universums

Beiträge zur Gesamtenergie Ω

Zeit

atomare Materie (p, n, e): Ω_B

Sterne, Planeten, Gaswolken, Schwarze Löcher, ...

-- dämpft den ersten „Oberton“

-- verstärkt den zweiten „Oberton“

nichtatomare „dunkle“ Materie (v, ...): Ω_{DM}

Ungebundene Elementarteilchen, schwach wechselwirkend

-- verstärken den zweiten „Oberton“

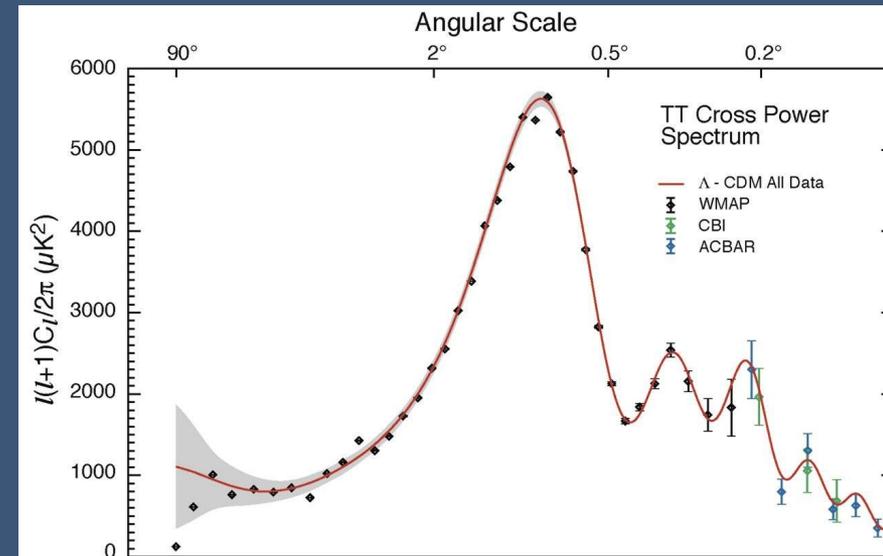
„dunkle“ Energie: Ω_v

„kosmologische Konstante“

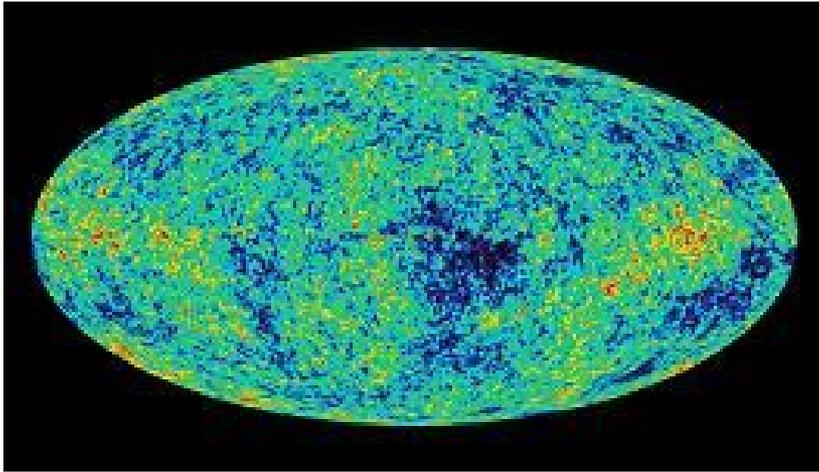
„Vakuumenergie“

unverdünnt

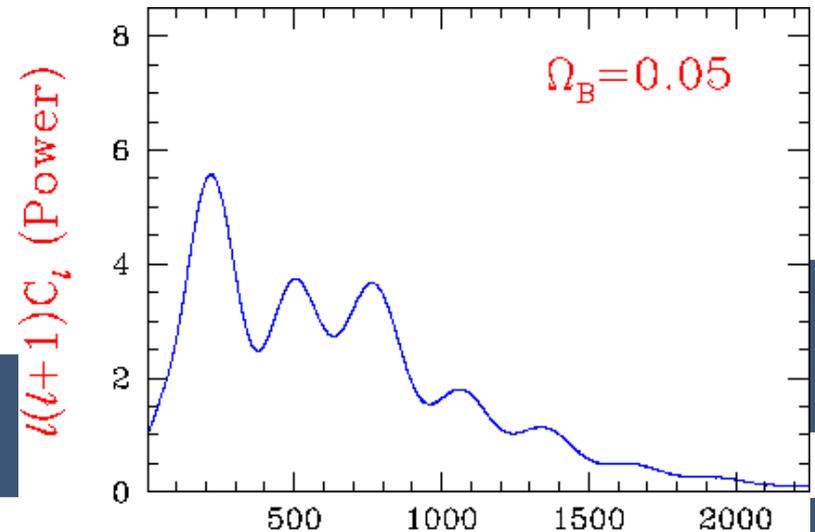
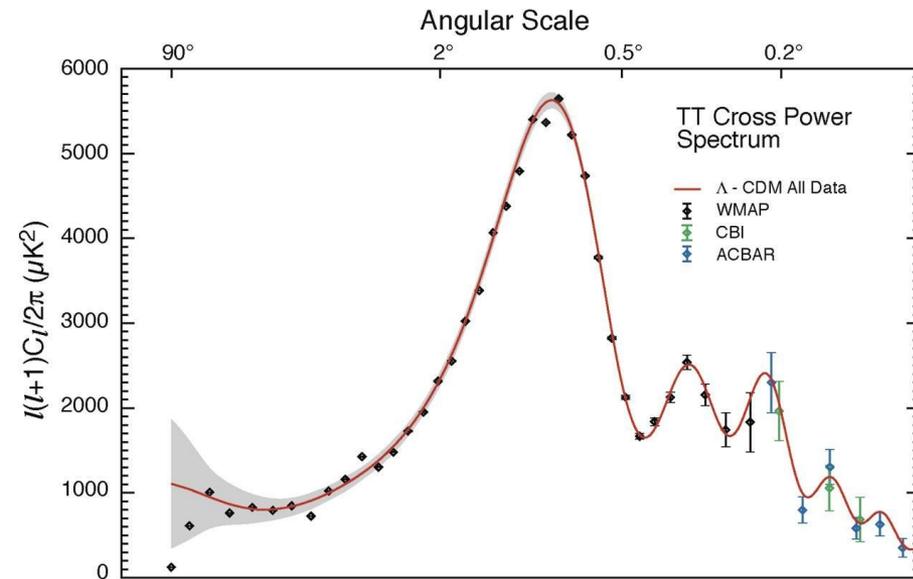
$$\Omega = \Omega_B + \Omega_{DM} + \Omega_v = 1$$



Ergebnis

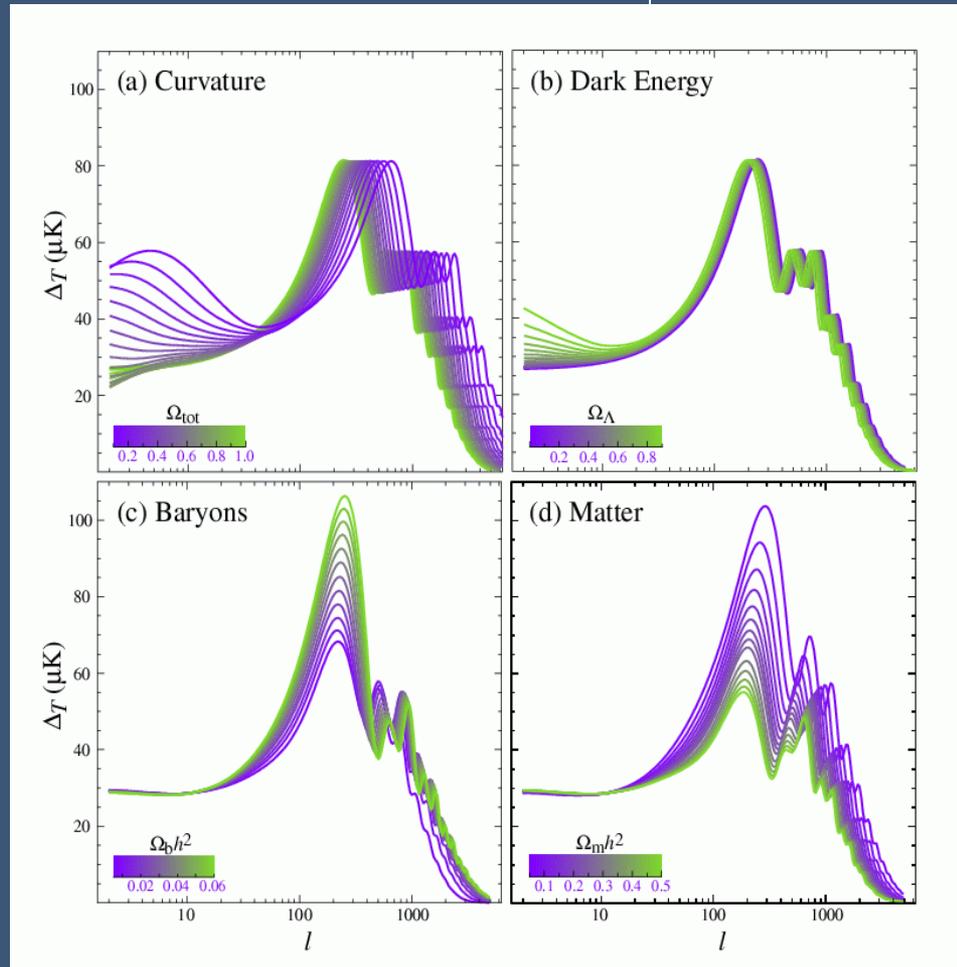


- 5% atomare Materie ($\Omega_B = 0,05$)
- 27% nichtatom. Materie ($\Omega_{DM} = 0,27$)
- Summe: $\Omega = 1,00 \rightarrow$
- 68% „dunkle Energie“ ($\Omega_V = 0,68$) !



370000 Jahre

Zeit



Nützliche und hochaktuelle Links

Zeit →

Lehrmaterialien von WMAP

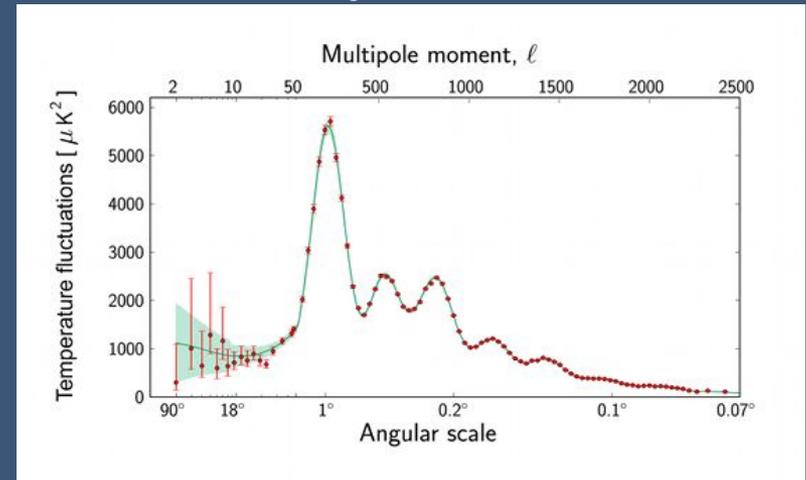
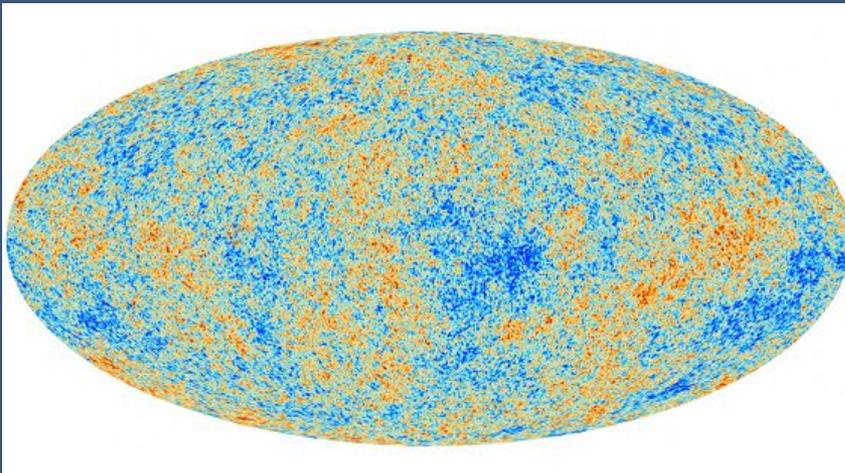
-- <http://map.gsfc.nasa.gov/resources/edresources1.html>

-- Beispiel: Herstellen des richtigen Klangs:

http://map.gsfc.nasa.gov/resources/camb_tool

Ergebnisse von PLANCK von letzter Woche

– <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=51551>



– <http://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/esa-teleskop-planck-anomalien-geben-kosmologen-raetsel-auf-a-890224.html>

Zwischenbilanz



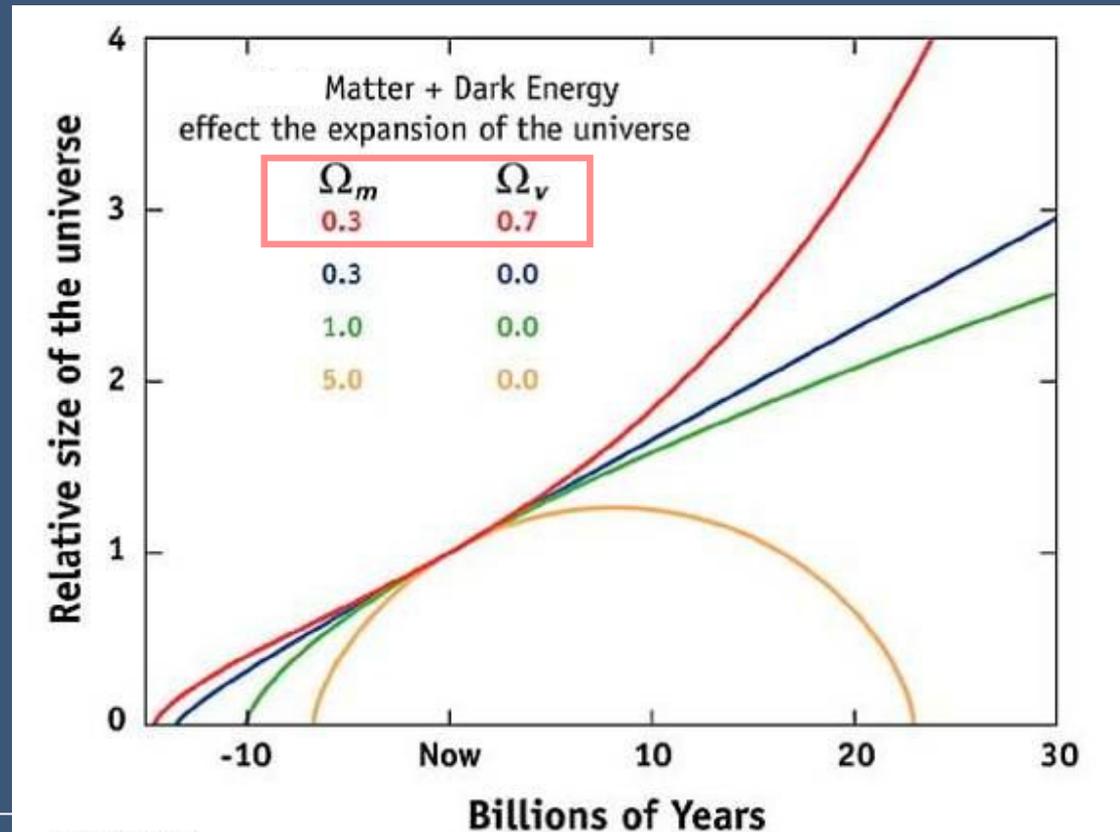
- Nur 32% des Universums ist Materie
 $\Omega_m = \Omega_B + \Omega_{DM} = 0,32$
- 5/6 davon ist nichtatomare, „dunkle“, Materie uns völlig unbekannt (< 10% davon Neutrinos)
- 68% ist keine Materie, sondern „dunkle Energie“ und treibt das Universum auseinander

Zeit →

• Weder die Erde noch die Sonne noch die Milchstraße ist Mittelpunkt des Kosmos

• Selbst der Stoff aus dem all das gemacht ist, ist eine „Randerscheinung“ (~ 5%)

• Die „dunkle Energie“ bestimmt die Zukunft



Dunkle Materie

Heute

Zeit

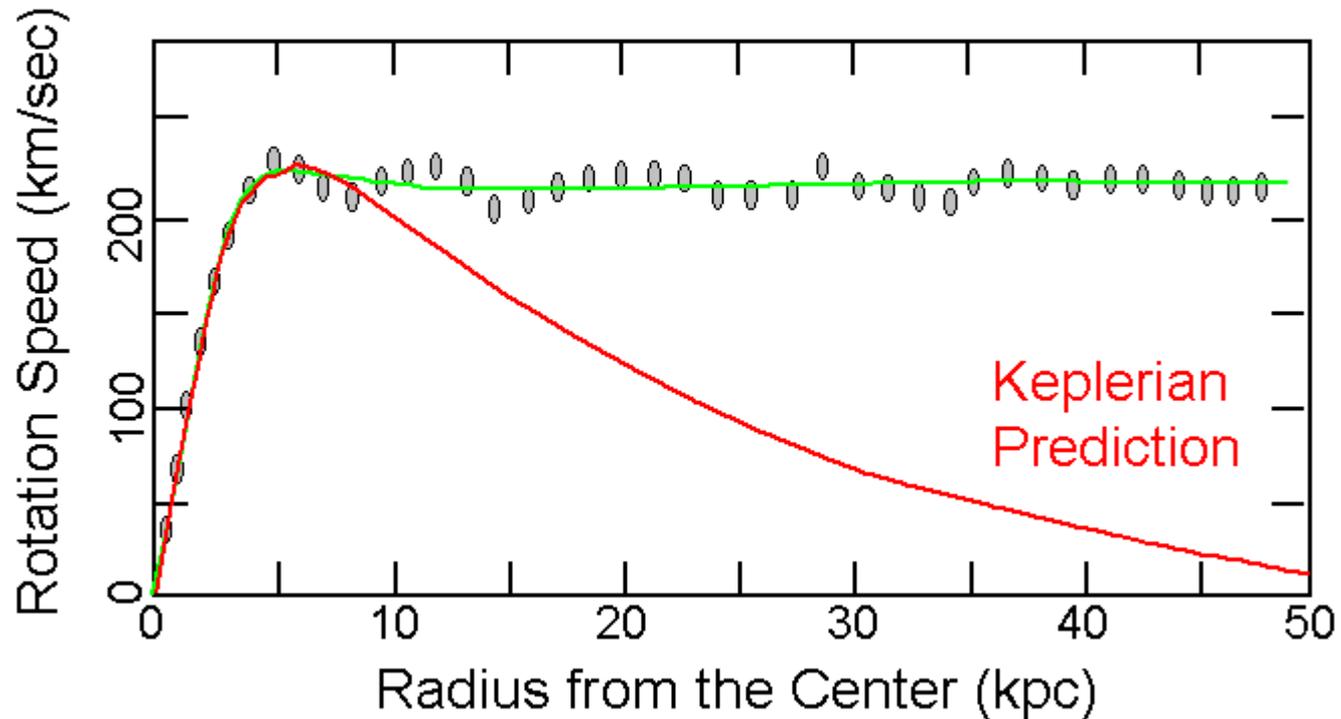
- Rotationskurven von Galaxien
- Elliptische Galaxien
- Gravitationslinsen
- Mikrowellen-Hintergrund

Rotationskurven

Heute

Zeit

Observed vs. Predicted Keplerian



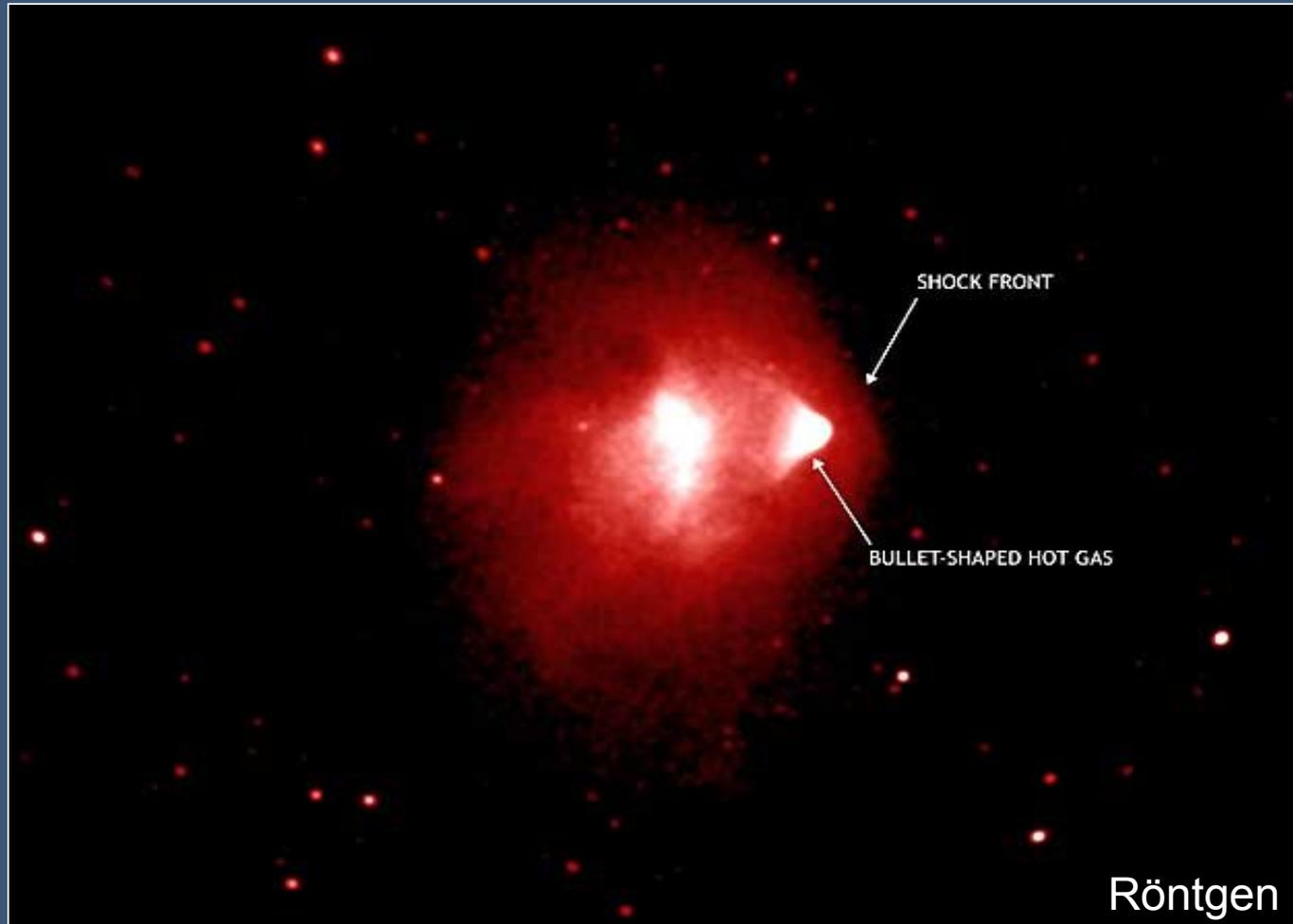
Galaxien-Cluster 1E 0657-56

Zeit →



Galaxien-Cluster 1E 0657-56

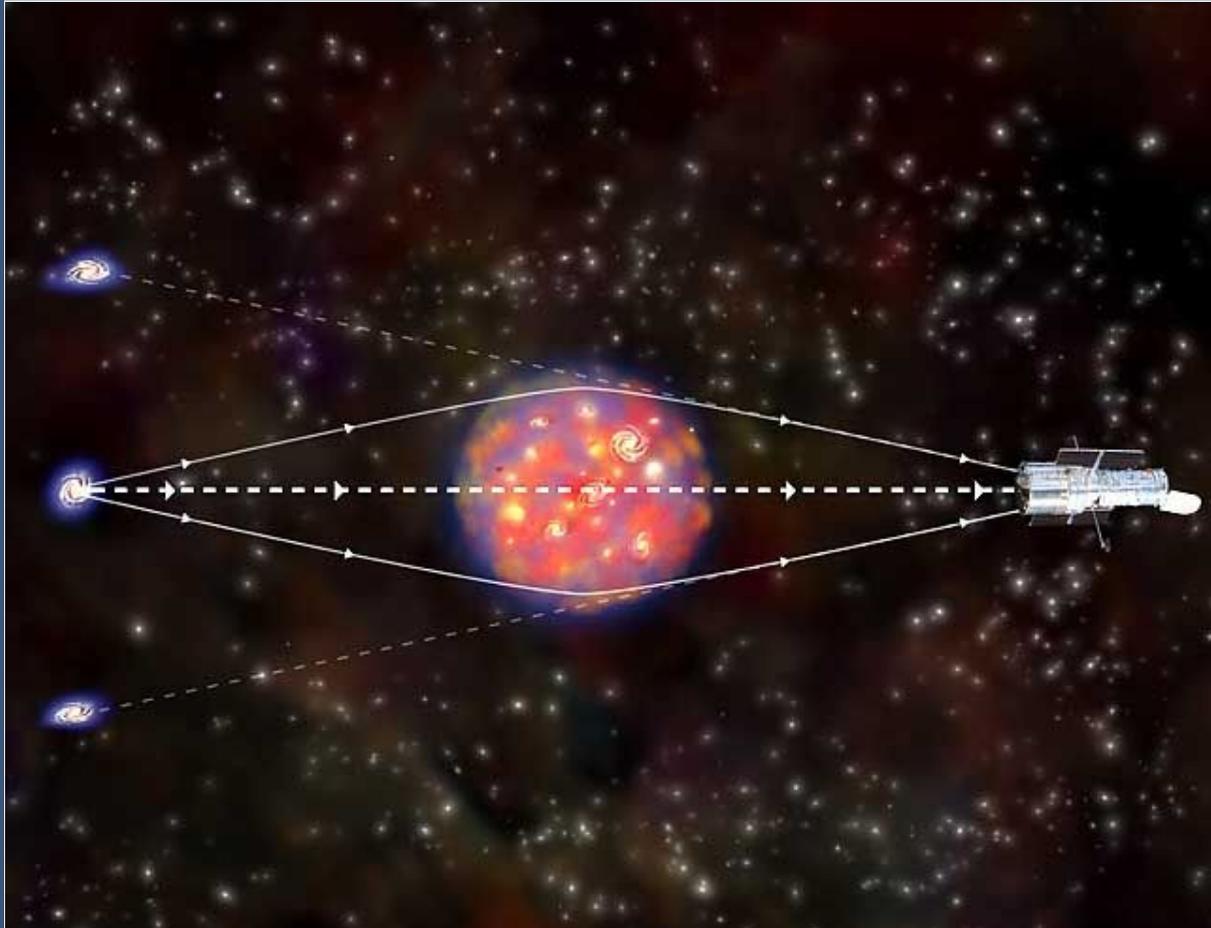
Zeit →





Gravitationslinsen

Zeit →



Galaxien Cluster CL0024 17

Heute

z_{pit}



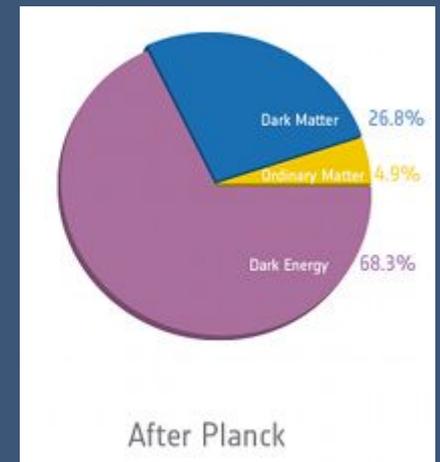
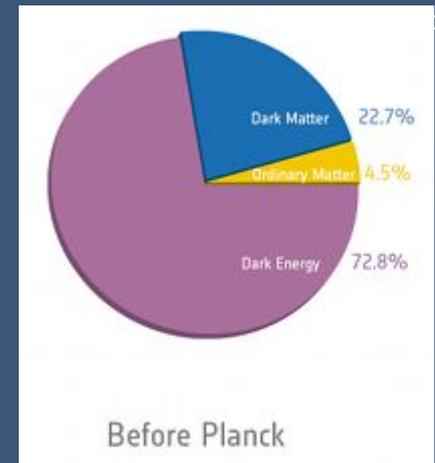
Kosmologische Parameter

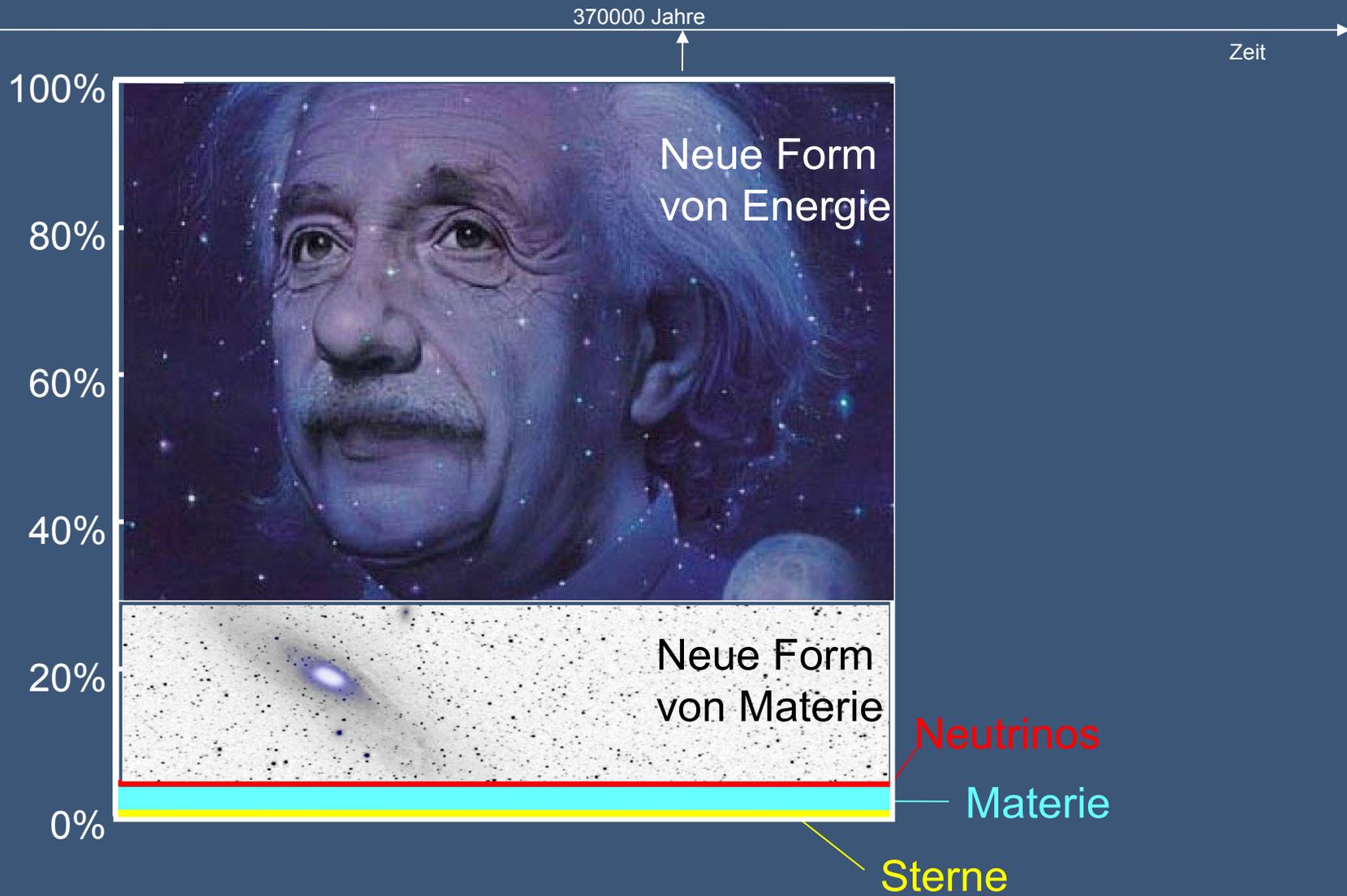
nach WMAP

<http://arxiv.org/pdf/1212.5226v2.pdf>

- Gesamtenergiedichte 1.003 ± 0.005
- Dunkle Materiedichte 0.233 ± 0.023
- Baryondichte 0.046 ± 0.002
- Vakuumenergiedichte 0.721 ± 0.025
- Neutrindichte < 0.014
- Alter des Universums 13.74 ± 0.11 Gyr
- Hubble-Parameter 0.70 ± 0.02

wobei $H_0 = 100 \cdot h \frac{km}{s \cdot Mpc}$





Zusammenfassung

Heute

Zeit

- Unser Universum ist aus einem Urknall entstanden
 - Galaxienflucht
 - Häufigkeit leichter Elemente
 - Die Kosmische Hintergrundstrahlung

- 95% der Energiedichte des Universums sind unbekannt!

Literaturempfehlungen (zusätzlich zu den schon genannten)

Zeit →

Harald Lesch / Jörn Müller
Kosmologie für Helle Köpfe
(Goldmann Taschenbuch, 2006)

Wayne Hu, The Physics of microwave background anisotropies
<http://background.uchicago.edu/~whu/physics/physics.html>
(mit Artikel aus Scientific American: The cosmic symphony, 2004)

Kosmologie und Teilchenphysik generell
www.weltderphysik.de → Das Weltall, Welt des Allerkleinsten
www.teilchenphysik.de

Physik am LHC
www.weltmaschine.de
www.weltderphysik.de/de/351.php

Teilchenphysik für die Schule
www.teilchenwelt.de/material
www.teilchenphysik.de/multimedia/lehr__und_lernmodule/
www.physicsmasterclasses.org (nächste Veranstaltungen: März 2014)