

Vom Urknall



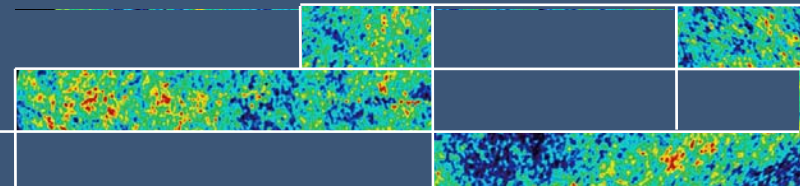
bis heute



Zeit

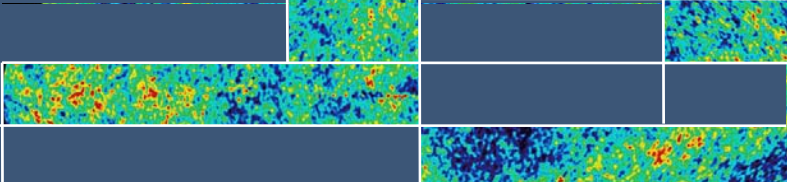
Kosmologie

Christian Stegmann
Universität Erlangen-Nürnberg



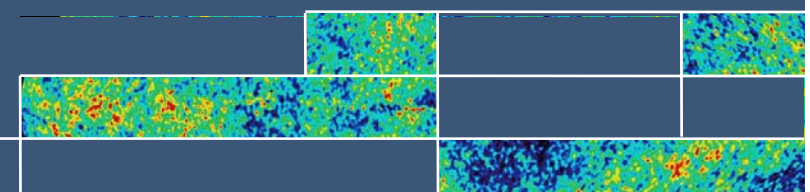
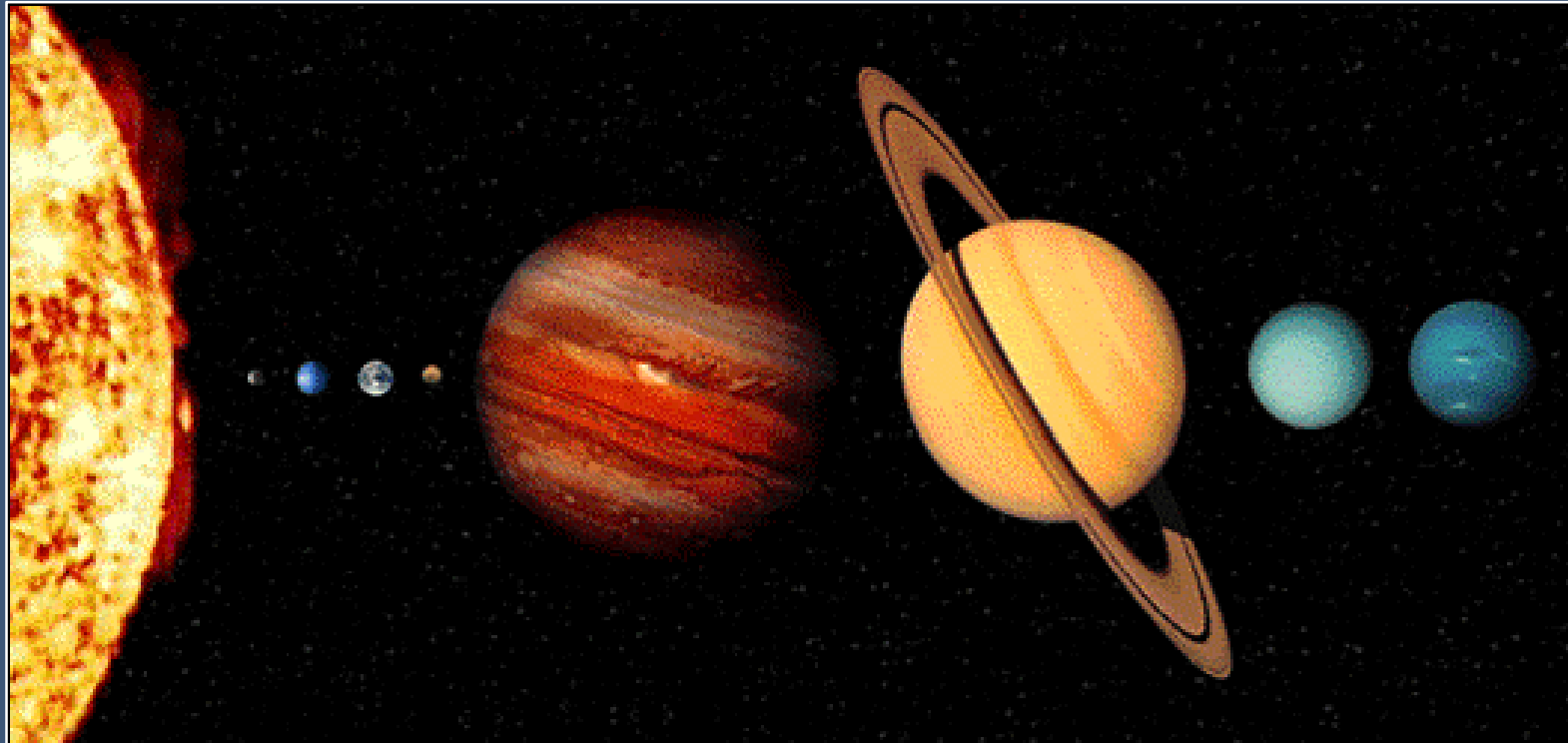
Die Erde ...

Heute
↑
Zeit →



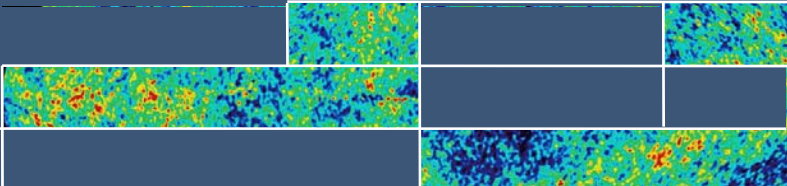
... einer von acht Planeten

Heute
↑
Zeit →



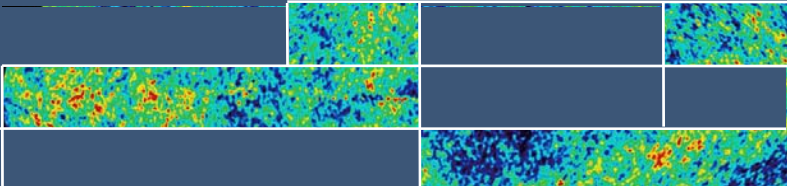
Sterne

Heute
↑
Zeit



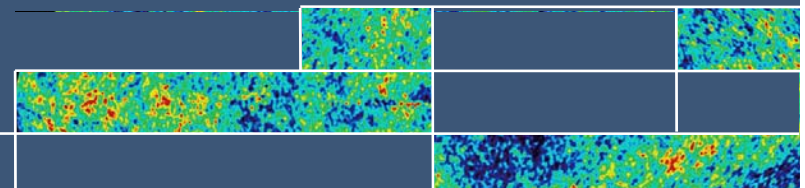
Die Milchstrasse

Heute
↑
Zeit



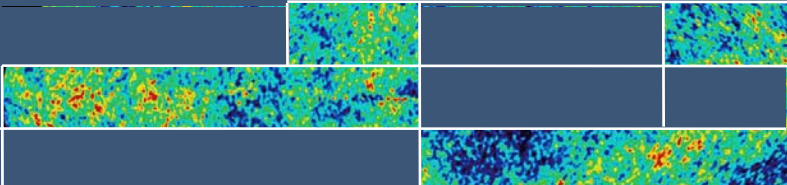
Voller Sterne

Heute
↑
Zeit



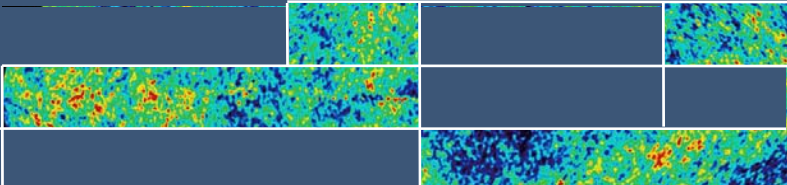
Und Nebel

Heute
↑
Zeit



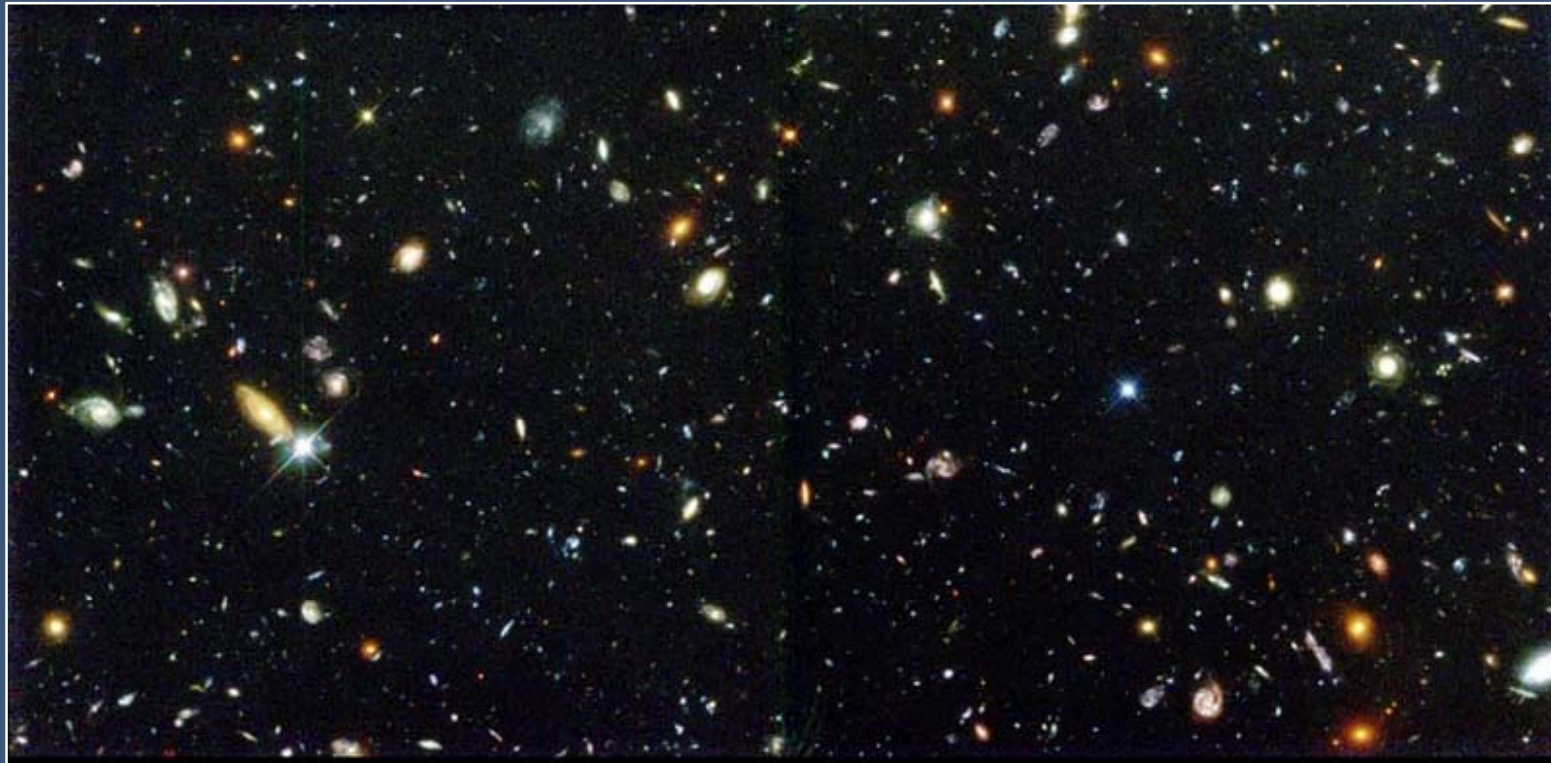
Unsere Milchstrasse

Heute
↑
Zeit



Das Weltall ist voller Galaxien

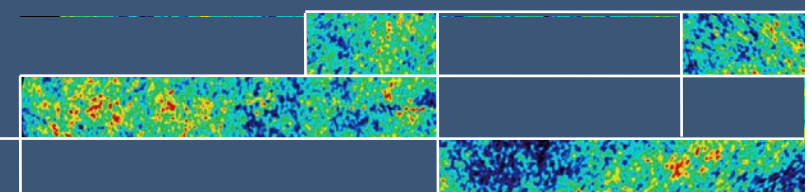
Heute
↑
Zeit →



Hubble Deep Field

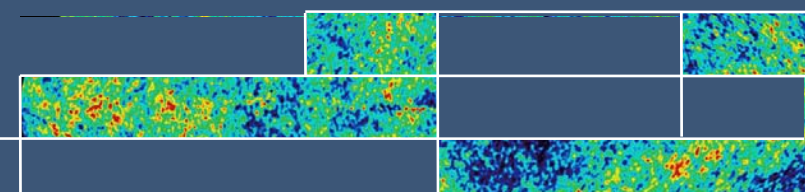
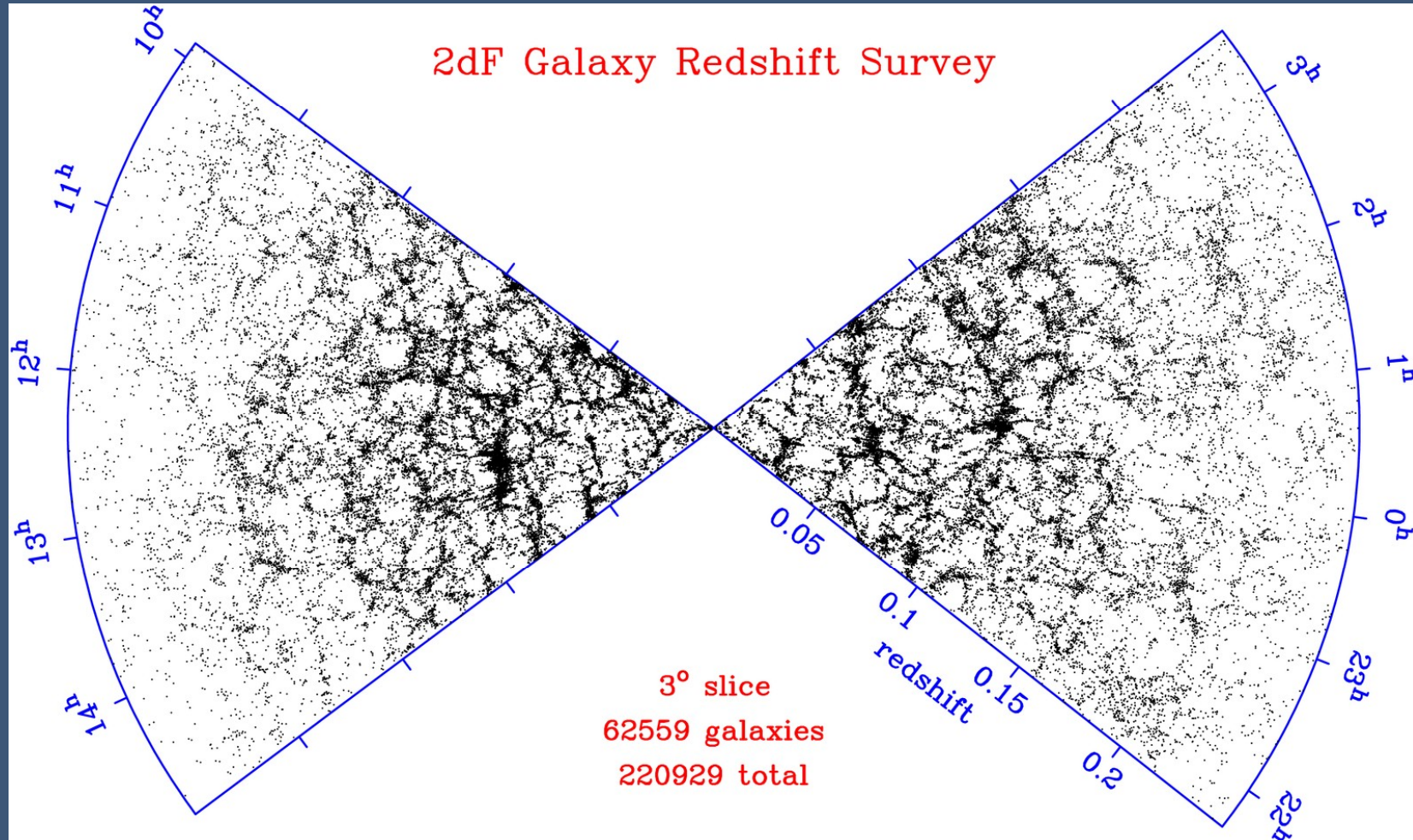
HST WFPC2

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



Galaxiencluster

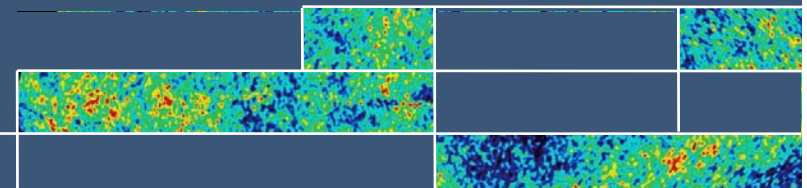
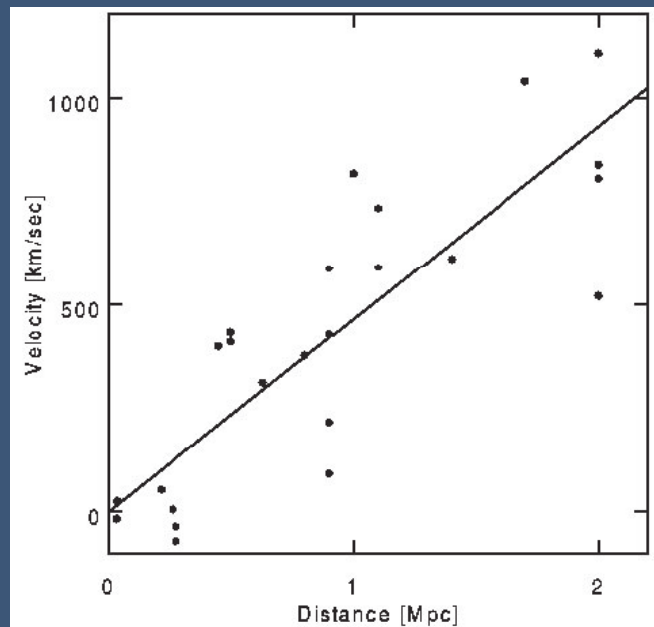
Heute
↑
Zeit



Edwin Hubbles Entdeckung

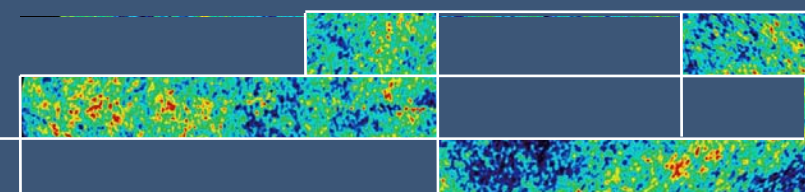
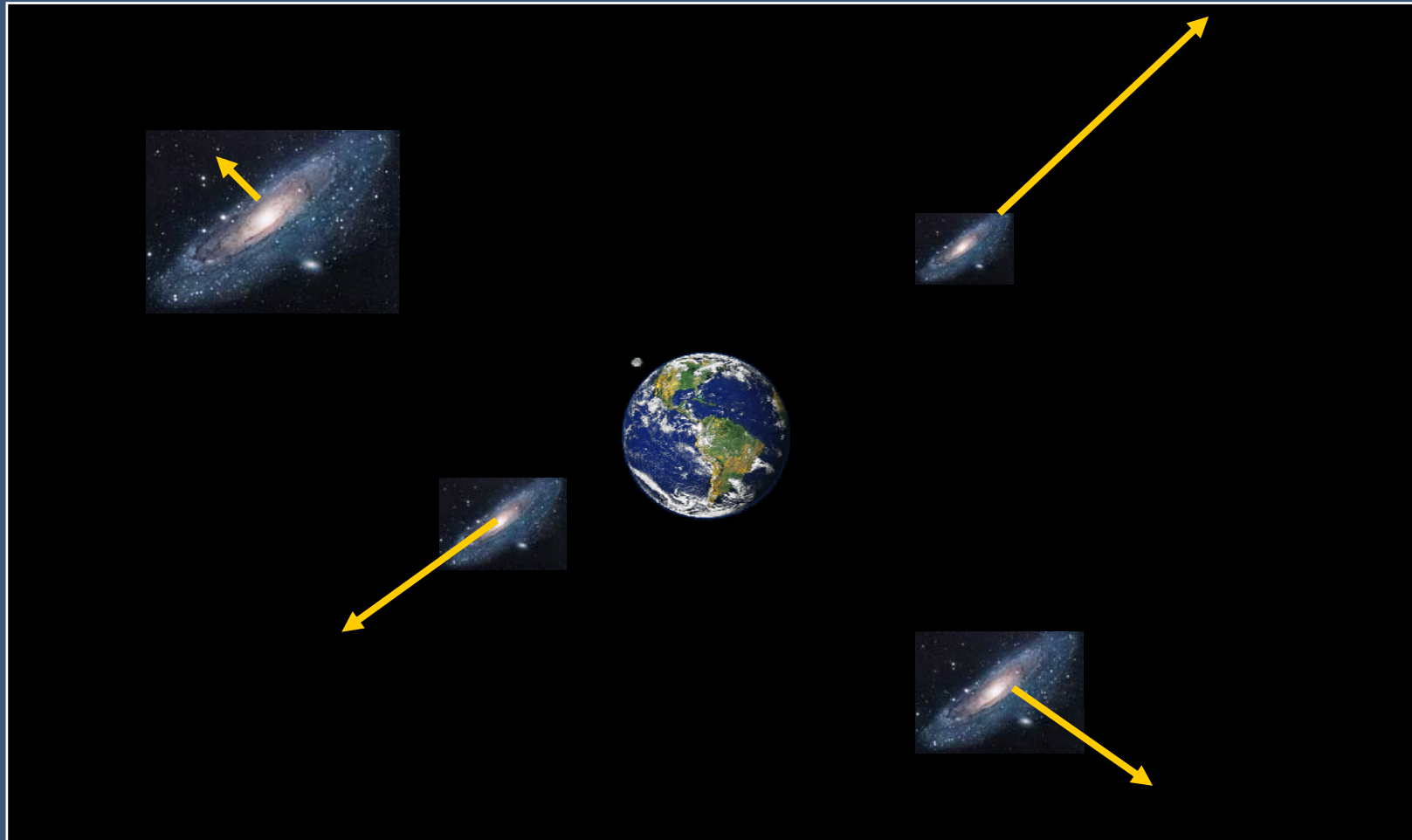
Heute
↑
Zeit

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



Galaxienflucht

Heute
↑
Zeit →

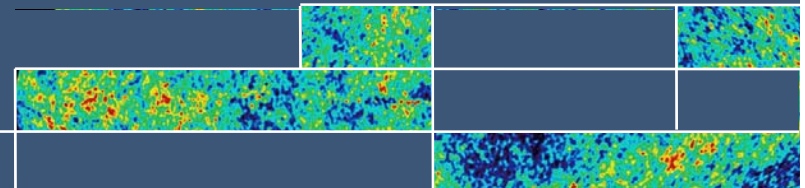


Verstehen wir das?

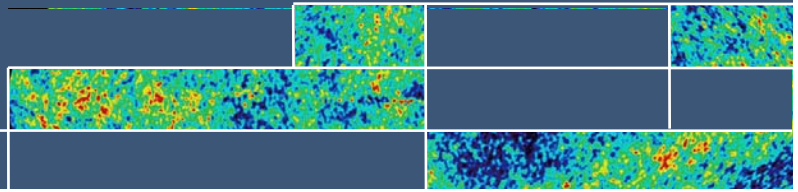
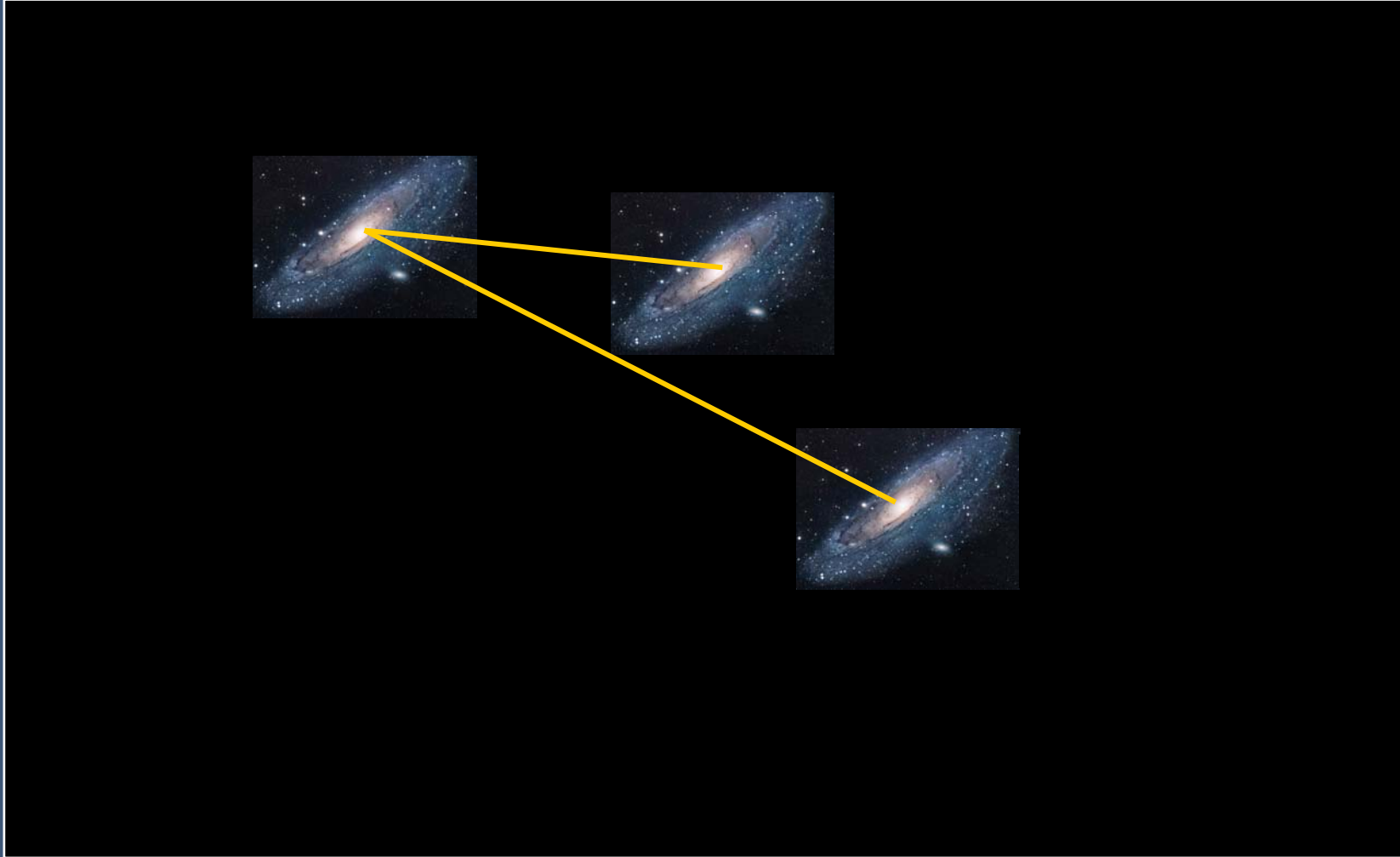
Heute
↑
Zeit

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

Wissenschaftlich attraktiver!



Heute
↑
Zeit

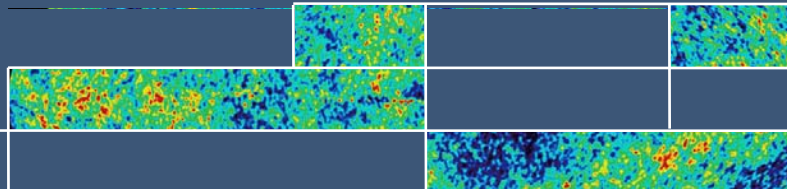


Heute
↑
Zeit →

Einige Zeit später



Doppelt so weite Galaxien entfernen
sich doppelt so schnell!

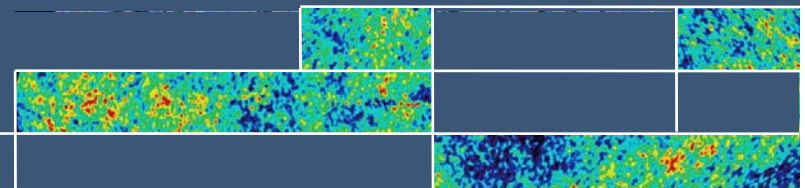


Wie kann man das messen?

Heute
↑
Zeit

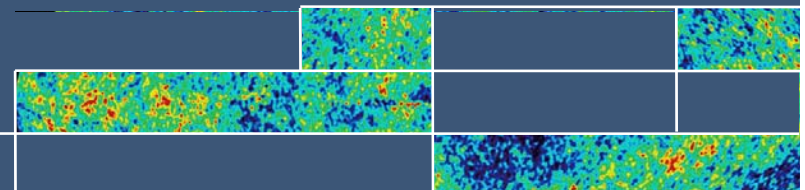
- Geschwindigkeitsmessung
 - Tacho?

- Entfernungsmessung
 - Lineal?



Heute
↑
Zeit

Geschwindigkeitsmessung über Rotverschiebung



Dopplereffekt

Heute
↑
Zeit →

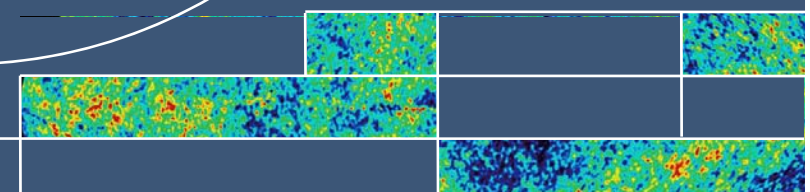
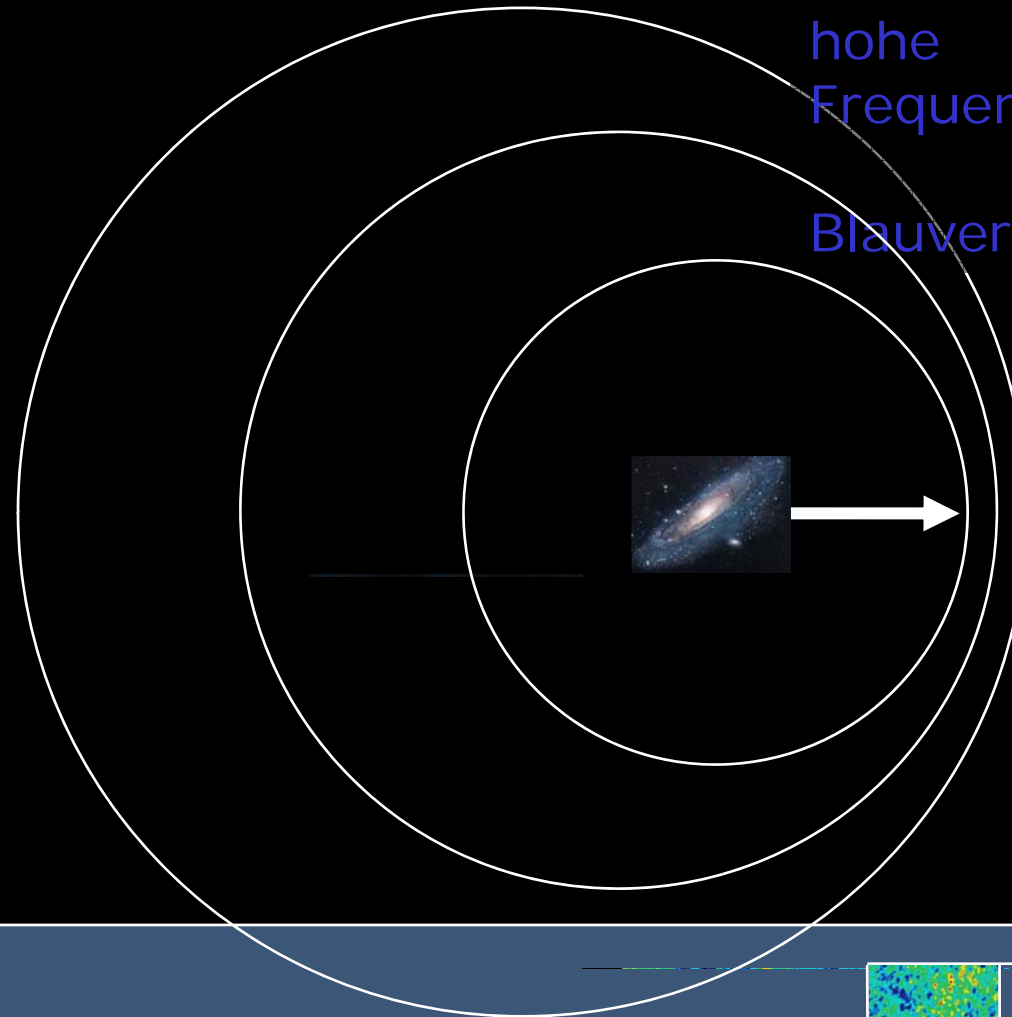
niedrige
Frequenz

Rotverschiebung



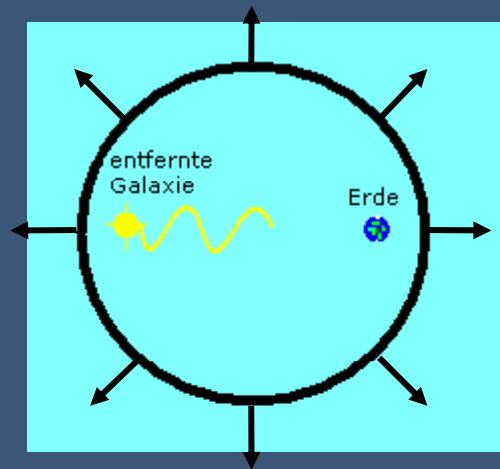
hohe
Frequenz

Blauverschiebung

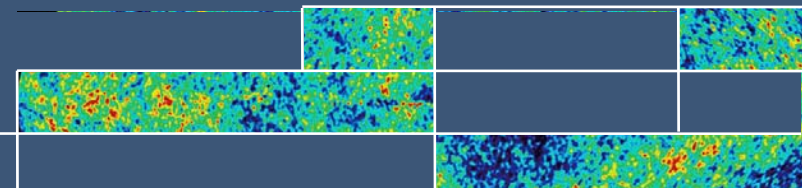
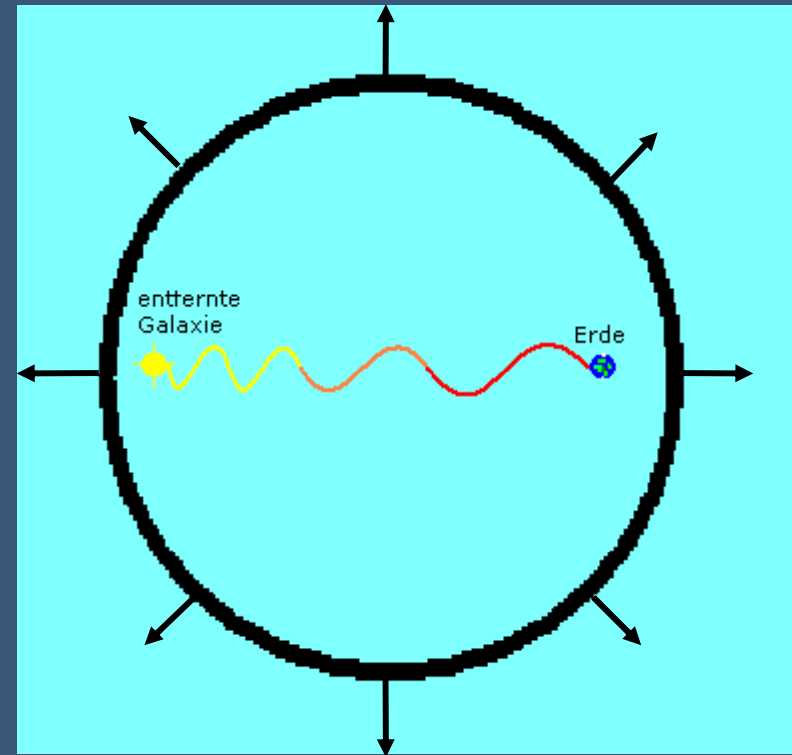


Kosmologische Rotverschiebung

Heute
↑
Zeit

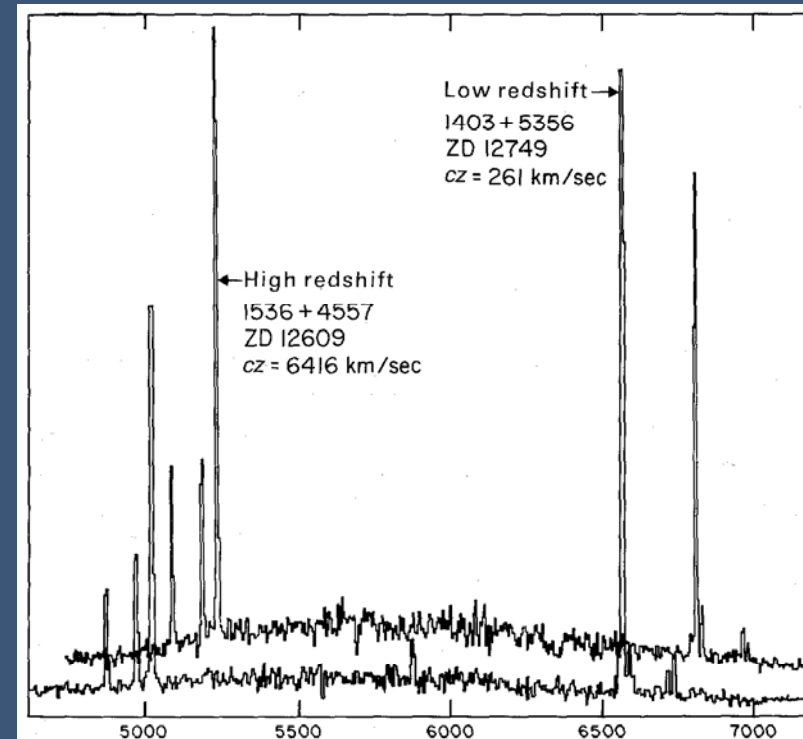
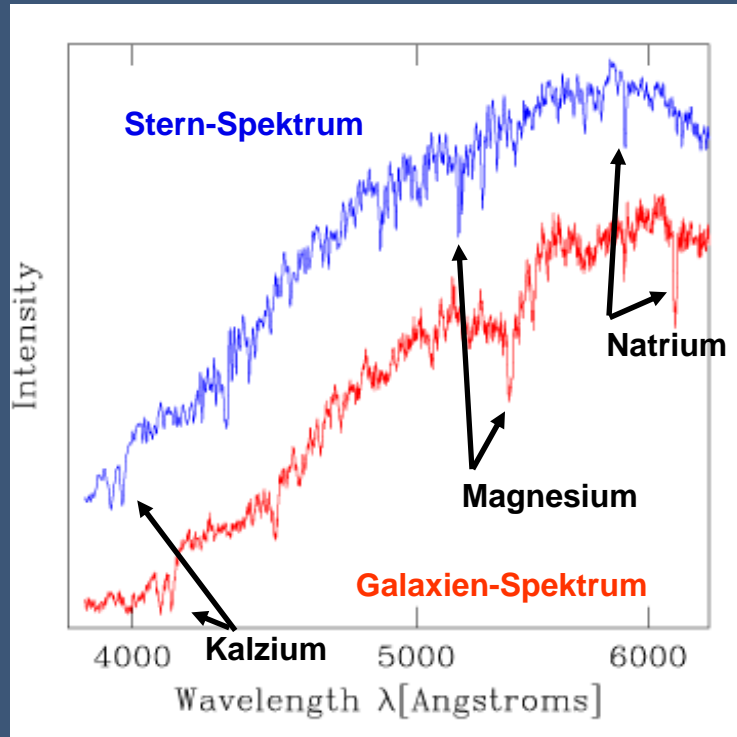


Weltall
dehnt
sich aus

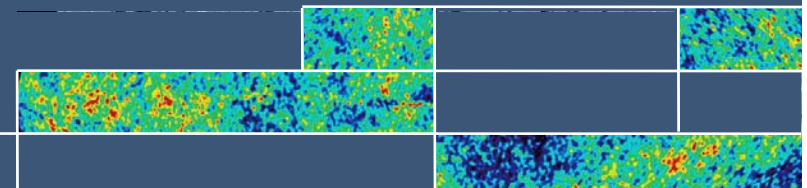


Galaxien-Spektroskopie

Heute
↑
Zeit →

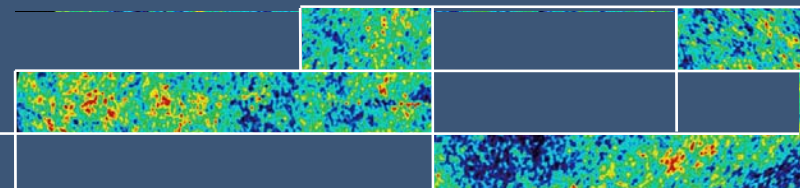
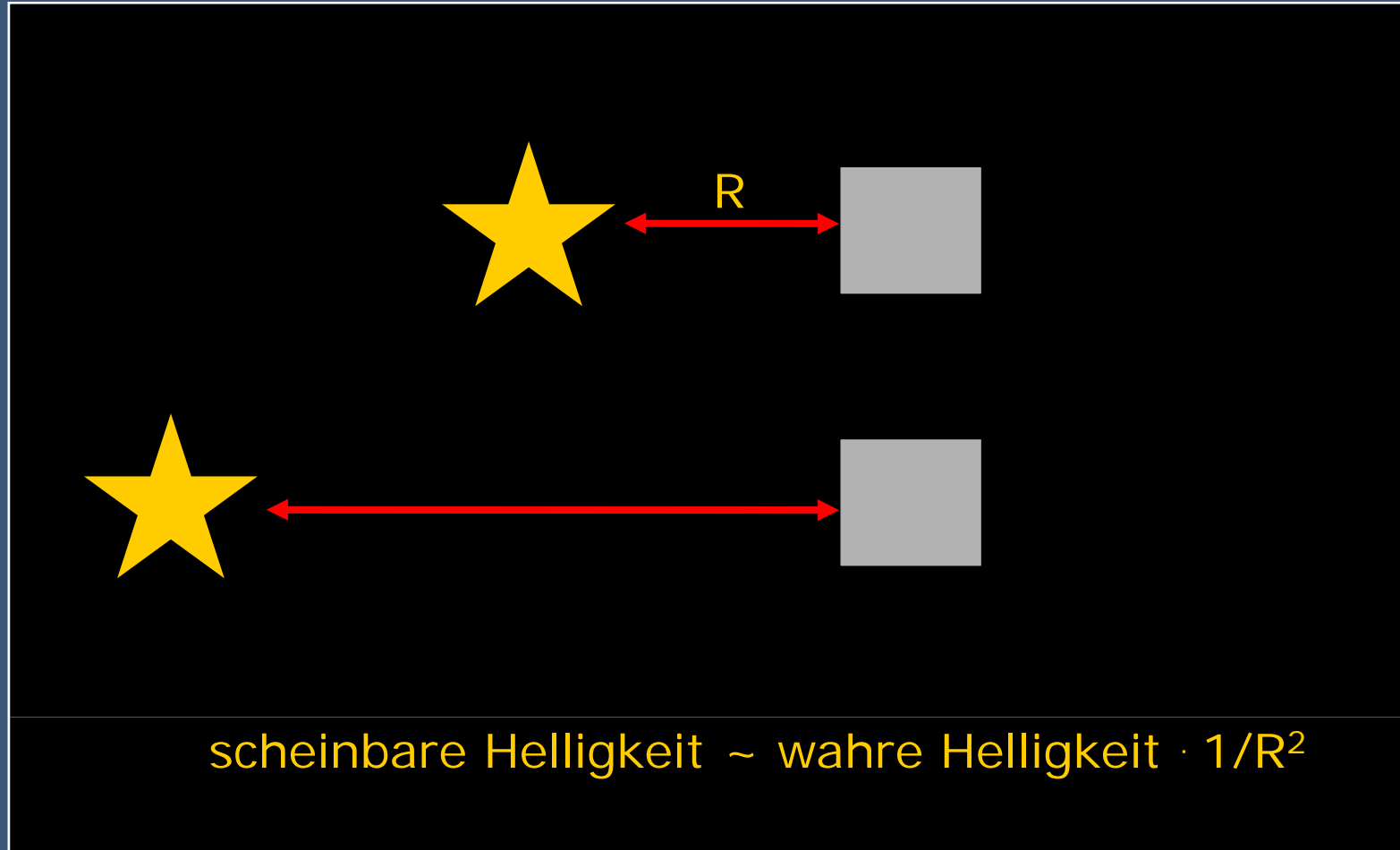


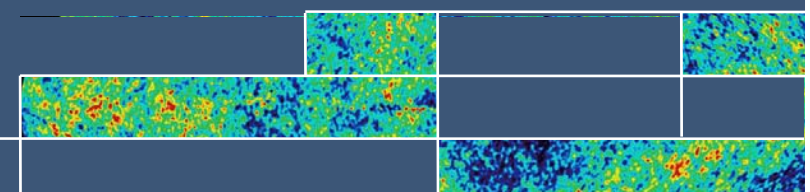
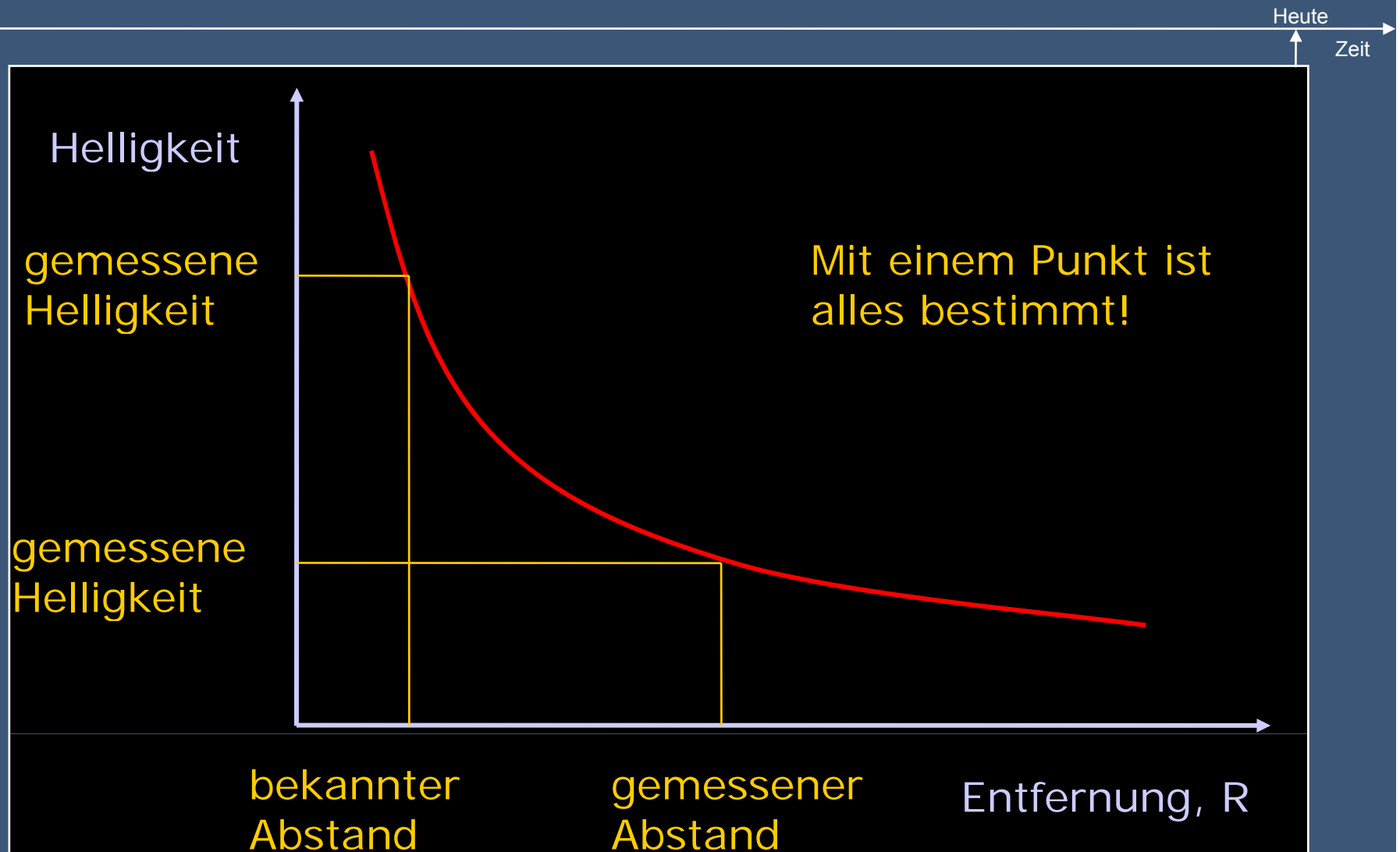
$$v_{\text{Galaxy}} \sim 12000 \text{ km/s}$$



Entfernungsmessung

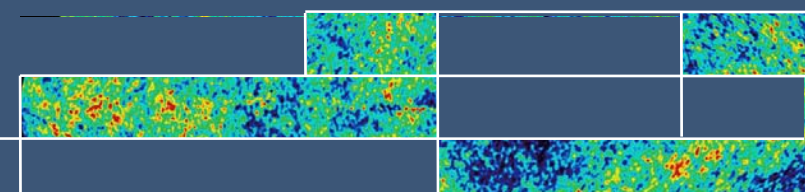
Heute
↑
Zeit





Heute
↑
Zeit

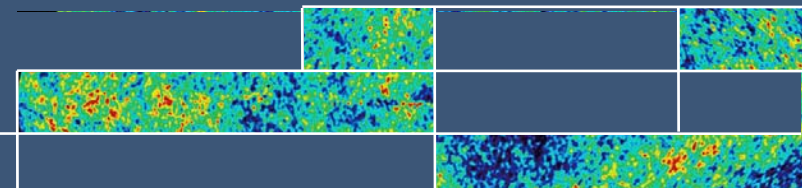
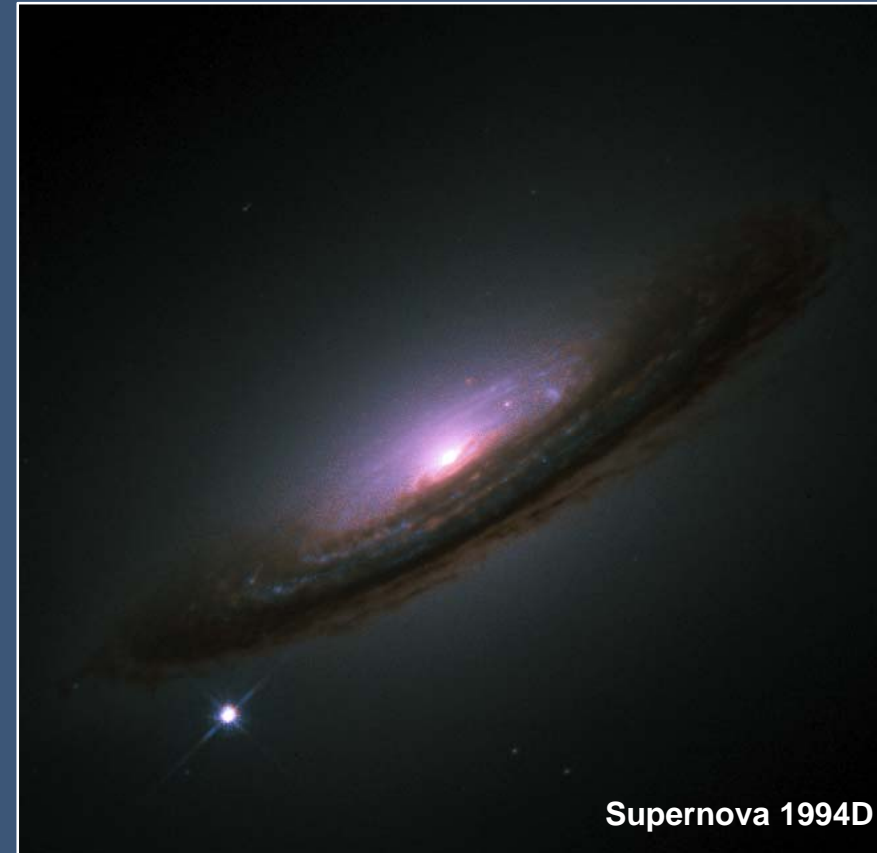
Wir brauchen Lampen!



Sternenexplosionen

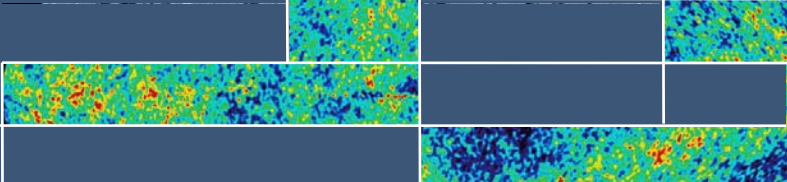
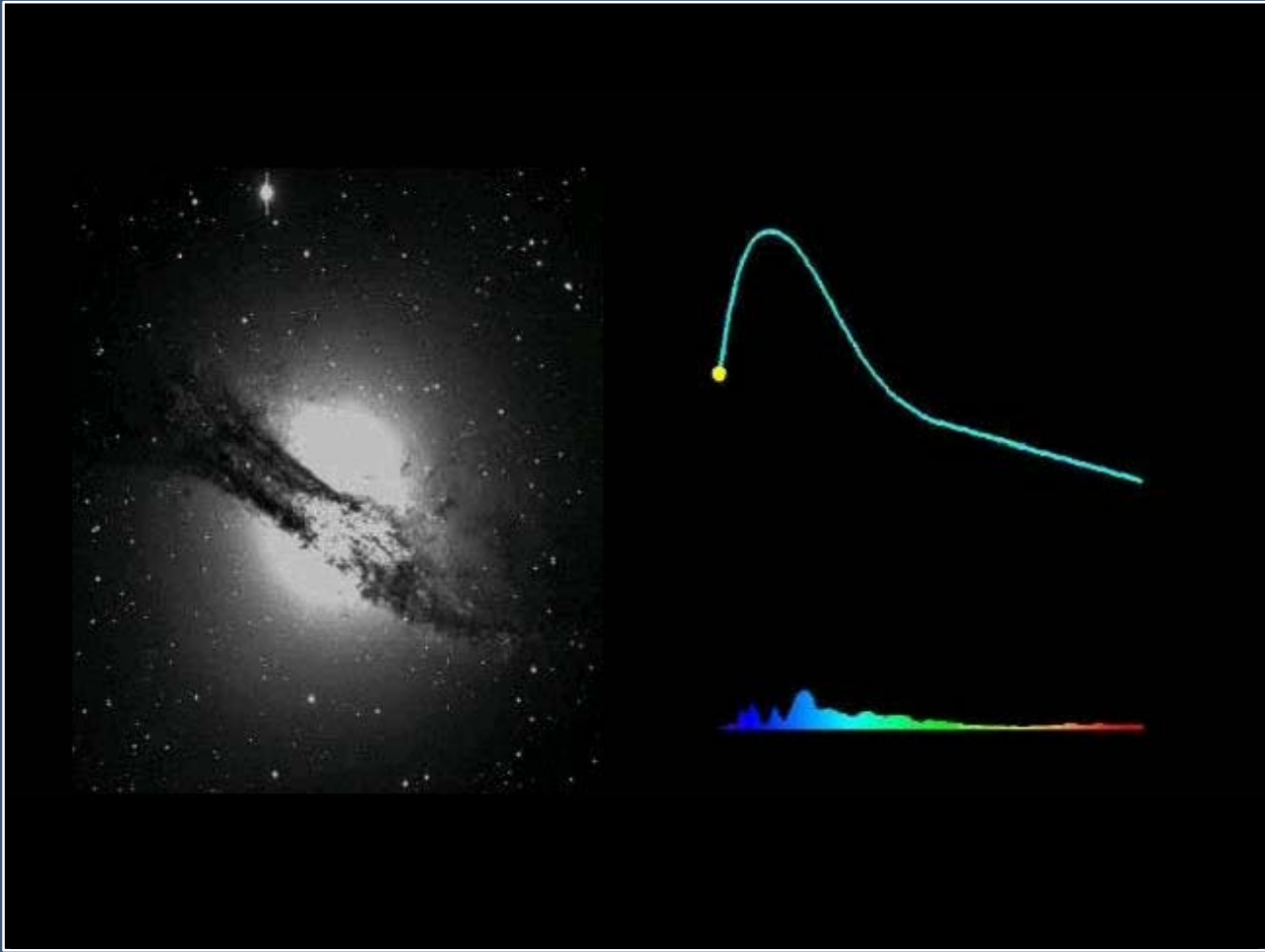
Heute
↑
Zeit →

- Supernova Typ Ia
- Explodierende weiße Zwerge
 - thermonukleare Bombe von der Größe der Erde!
- Hell wie eine ganze Galaxie
- Leuchten auf und verschwinden nach einigen Wochen



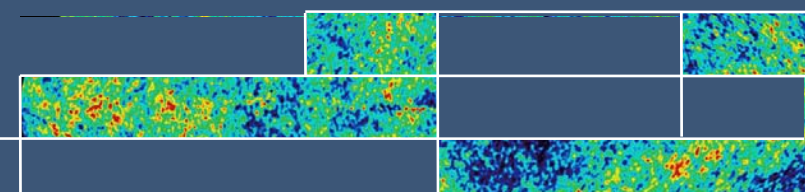
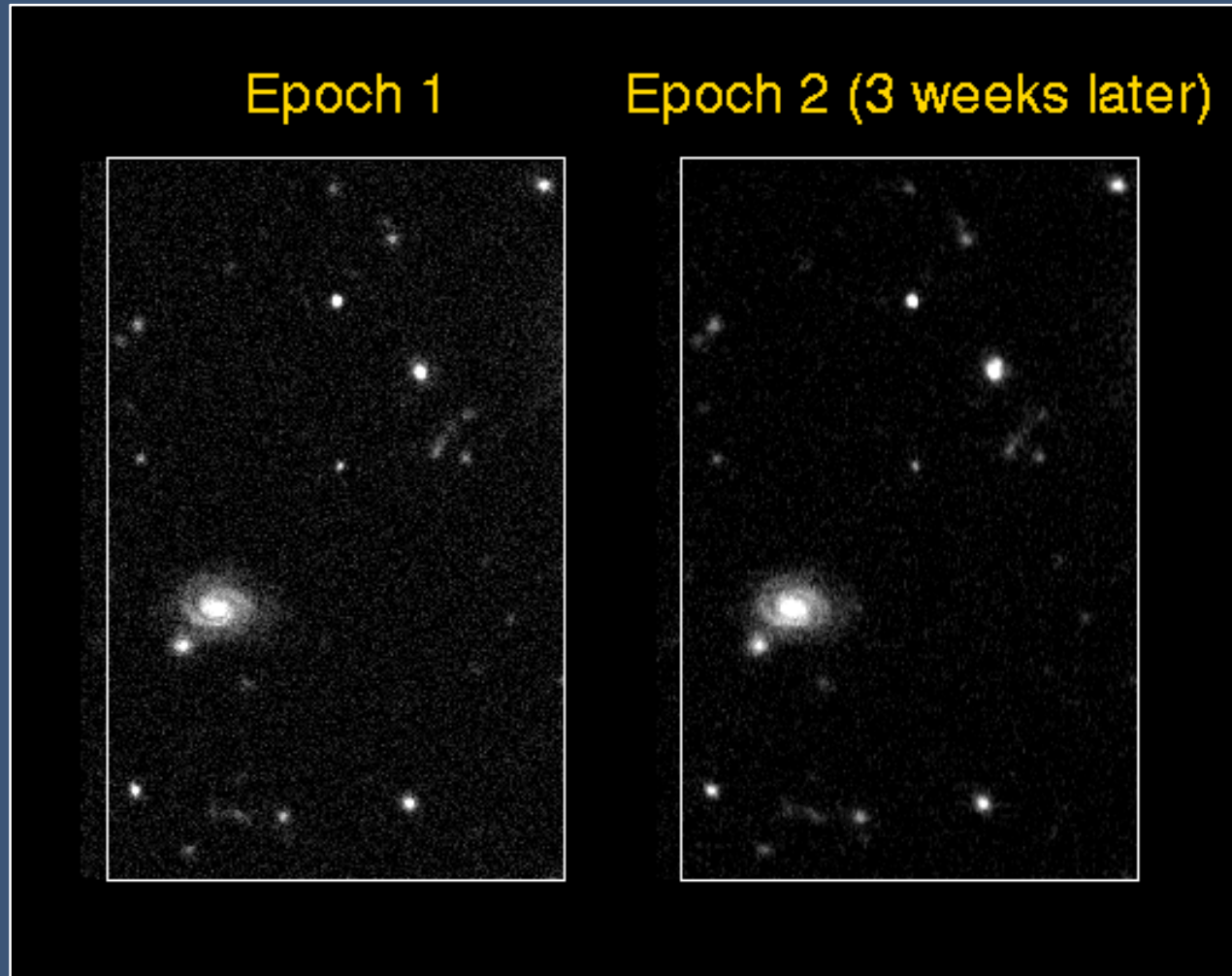
Eine Supernova

Heute
↑
Zeit



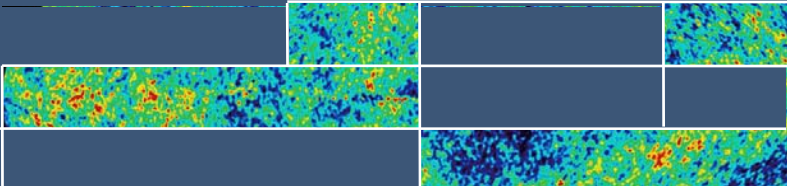
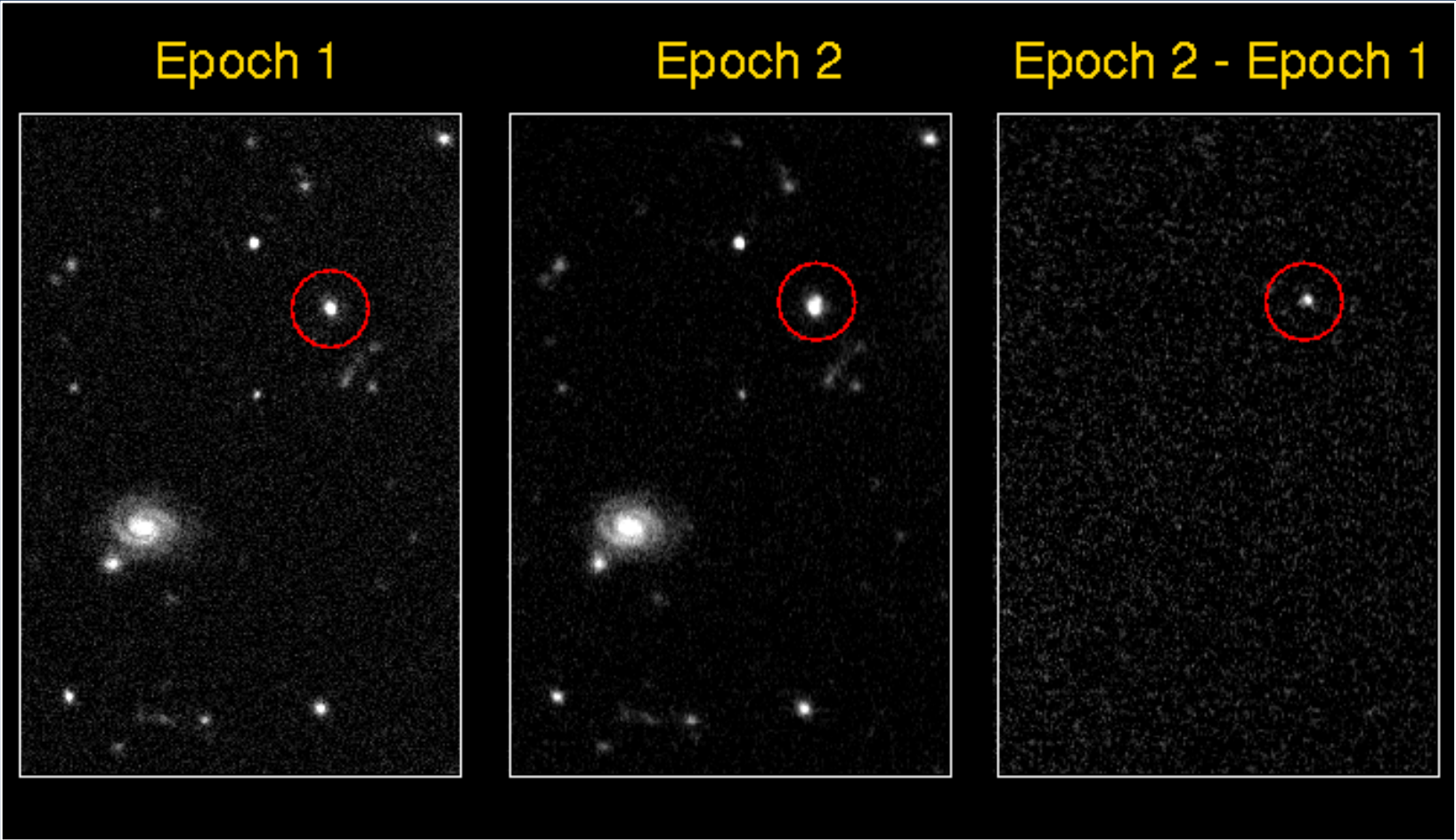
Wo ist die Supernova?

Heute
↑
Zeit



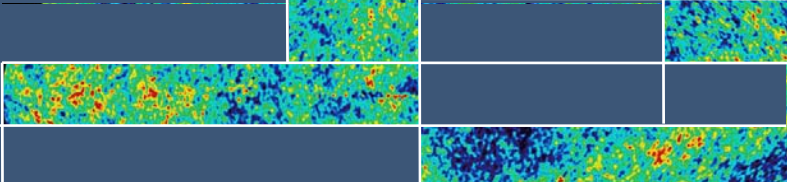
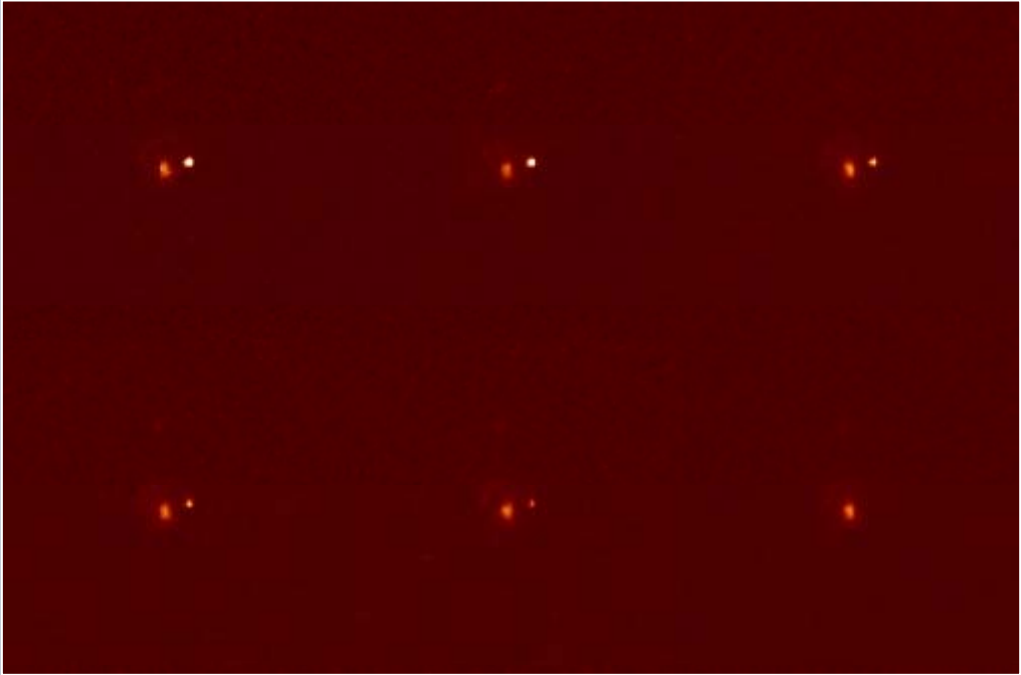
Hier!

Heute
↑
Zeit →



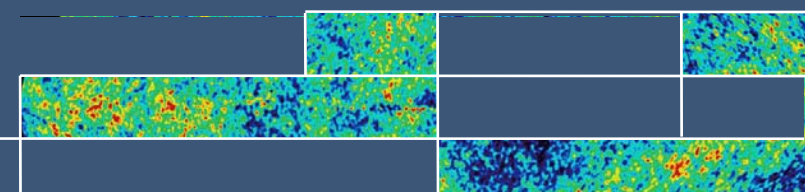
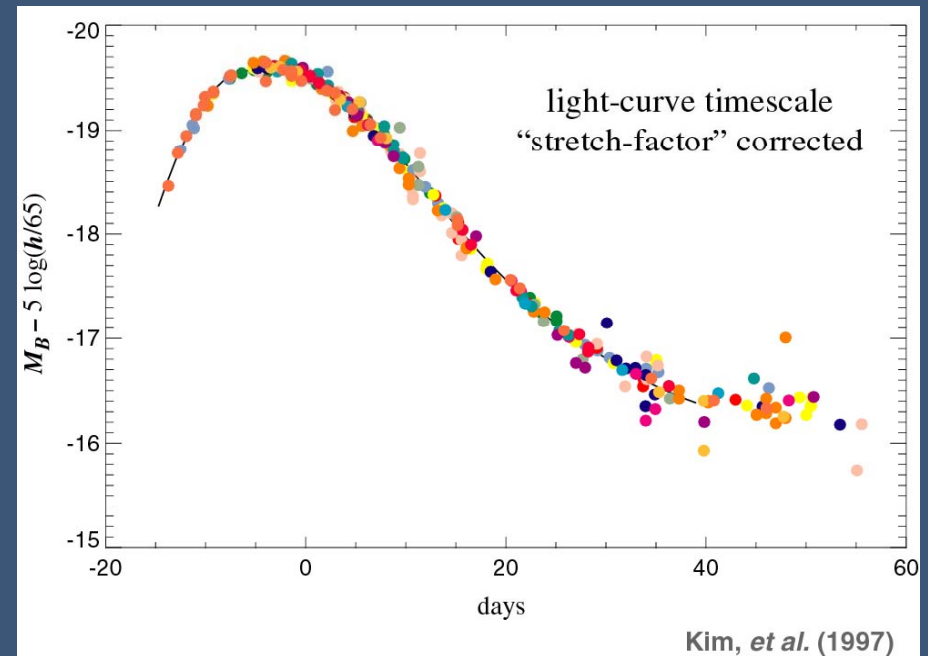
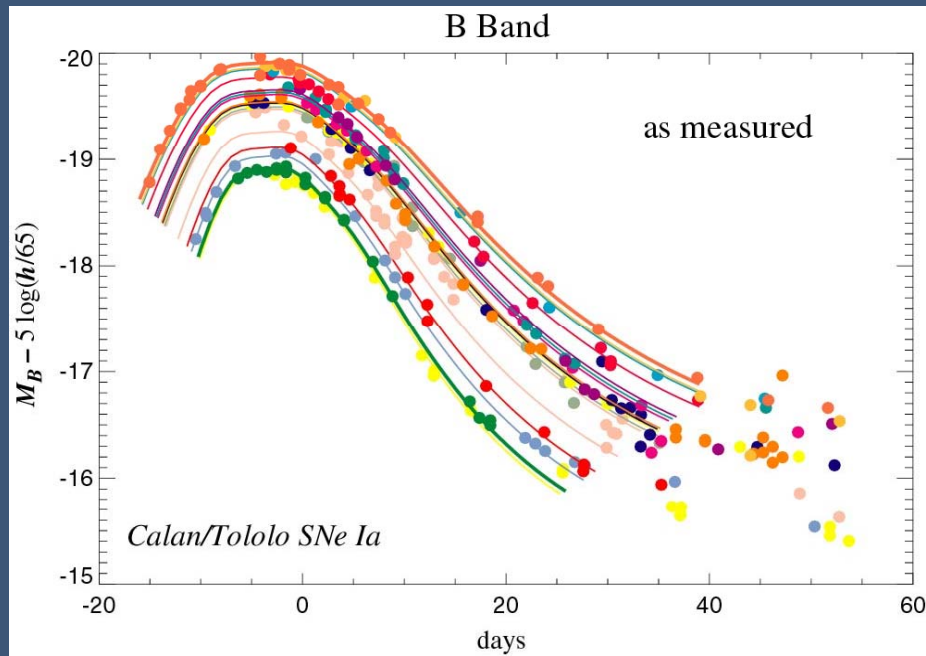
Noch eine Supernova

Heute
↑
Zeit



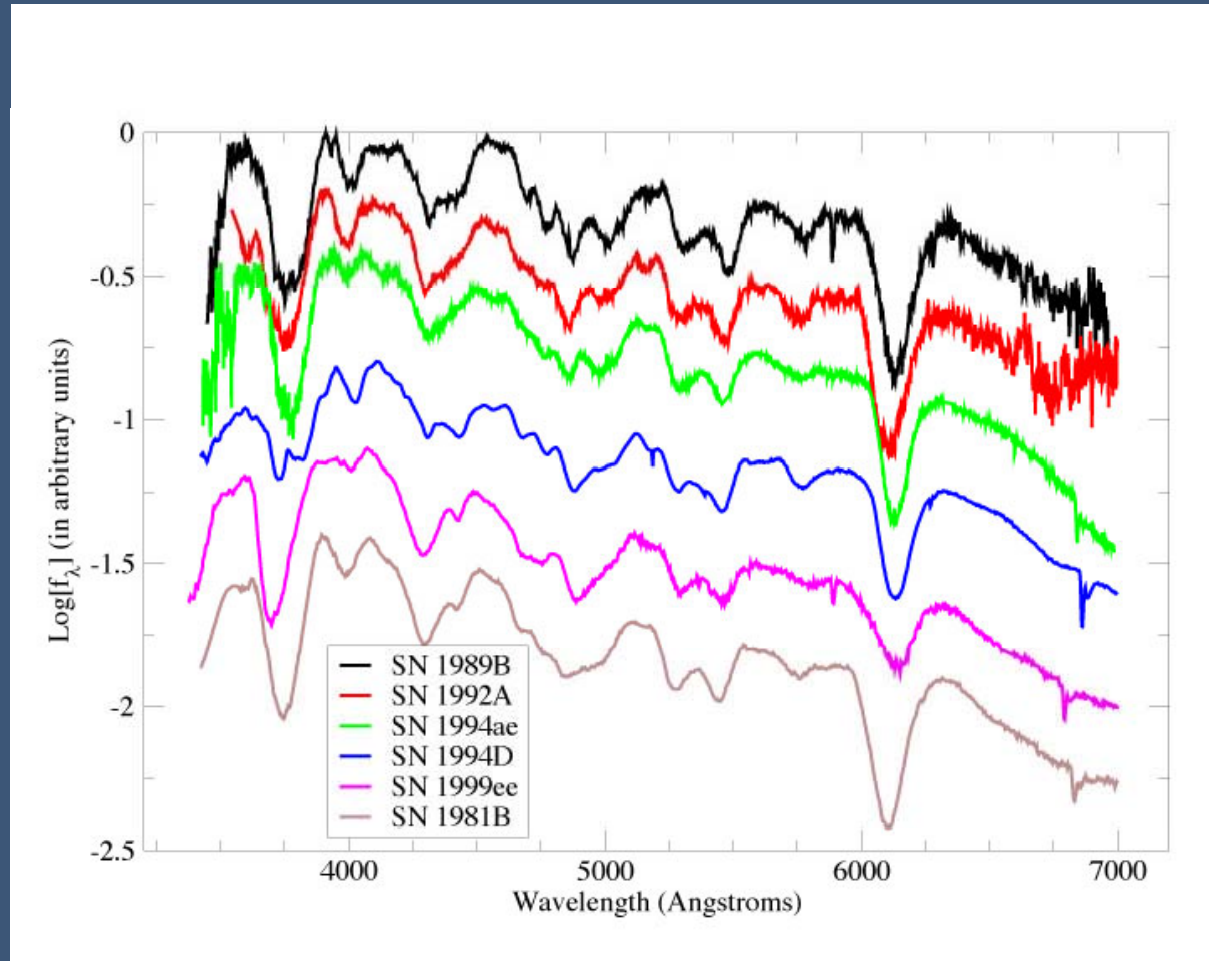
„Standardkerzen“

Heute
↑
Zeit



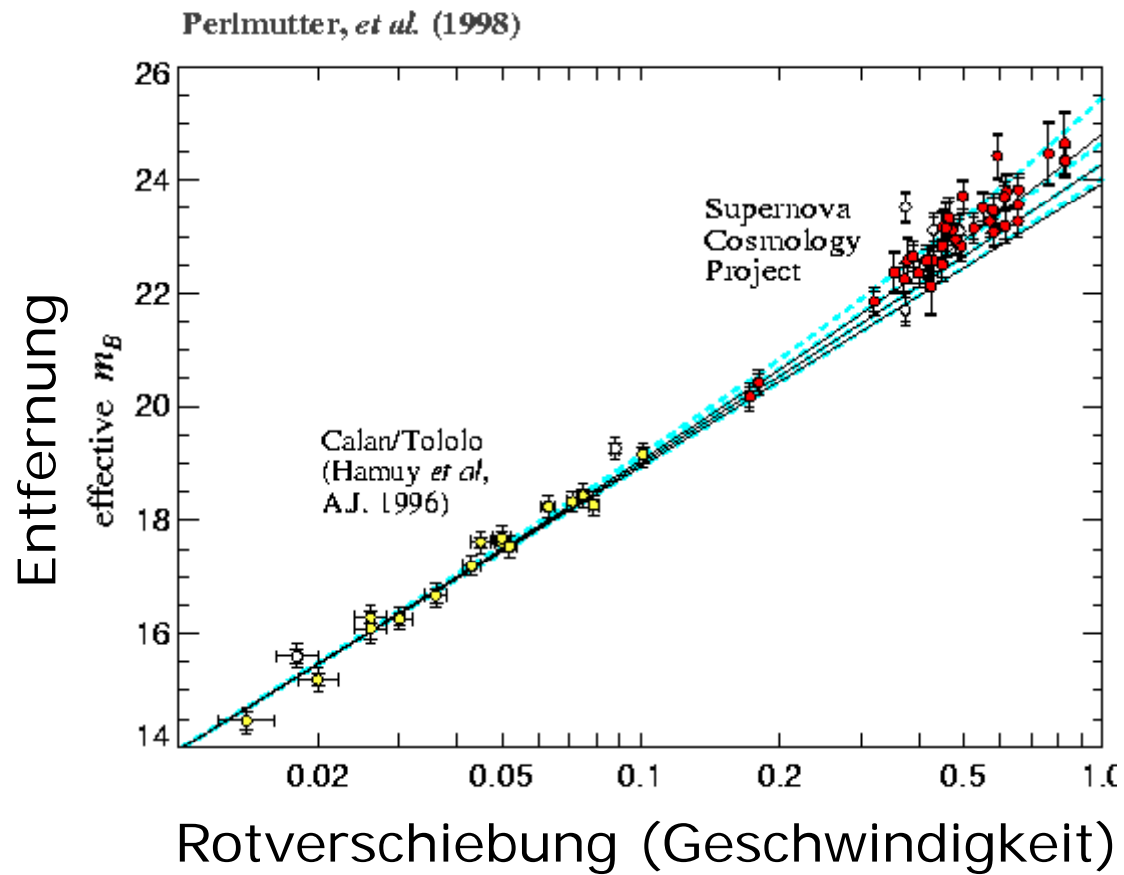
Spektren zur Identifikation

Heute
↑
Zeit



Das Hubble-Diagramm

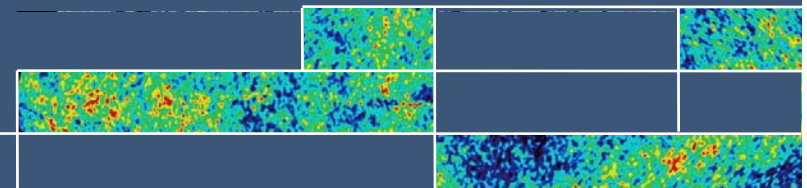
Heute
↑
Zeit



Heute
↑
Zeit

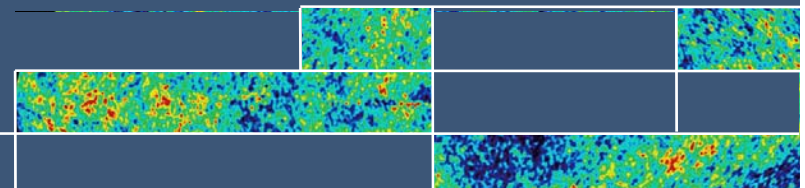
- Das Weltall ist dynamisch und expandiert (sogar beschleunigt)!
- Das Weltall war früher kleiner als heute
- Das Weltall ist aus einer heißen Phase entstanden

Der Urknall



Weltmodelle

Heute
↑
Zeit



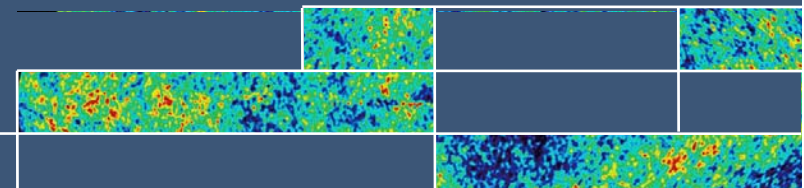
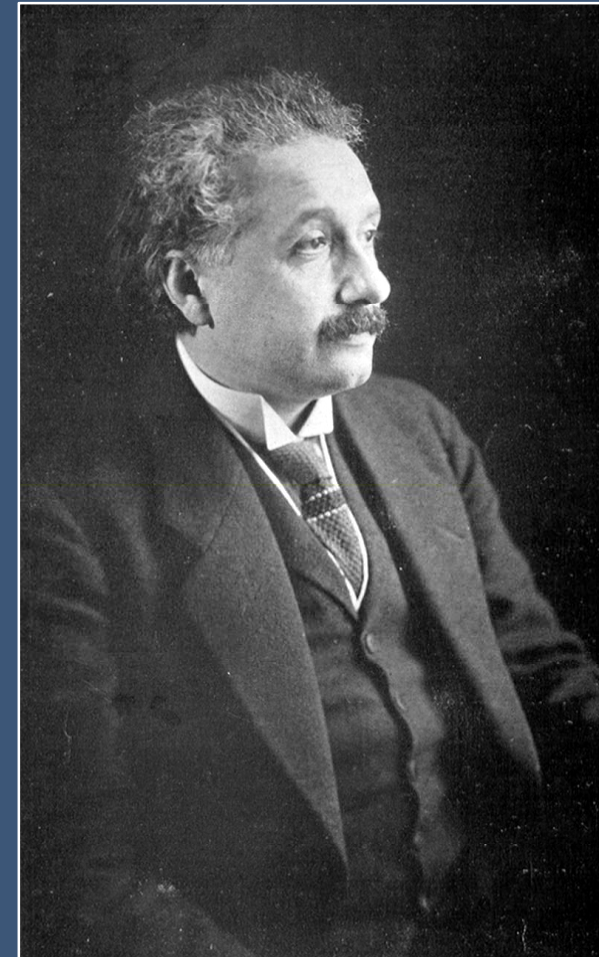
Allgemeine Relativitätstheorie

Heute
↑
Zeit

- Einstein 1916
- Beschreibt alle gravitativen System
 - Planetensysteme
 - Schwarze Löcher
 - Das Universum

$$\mathbf{G}_{\mu\nu} - \Lambda \mathbf{g}_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{T}_{\mu\nu}$$

- Masse erzeugt eine Krümmung des Raumes
- Raumkrümmung sagt den Massen, wie sie sich bewegen müssen
→ Gravitationsbeschleunigung



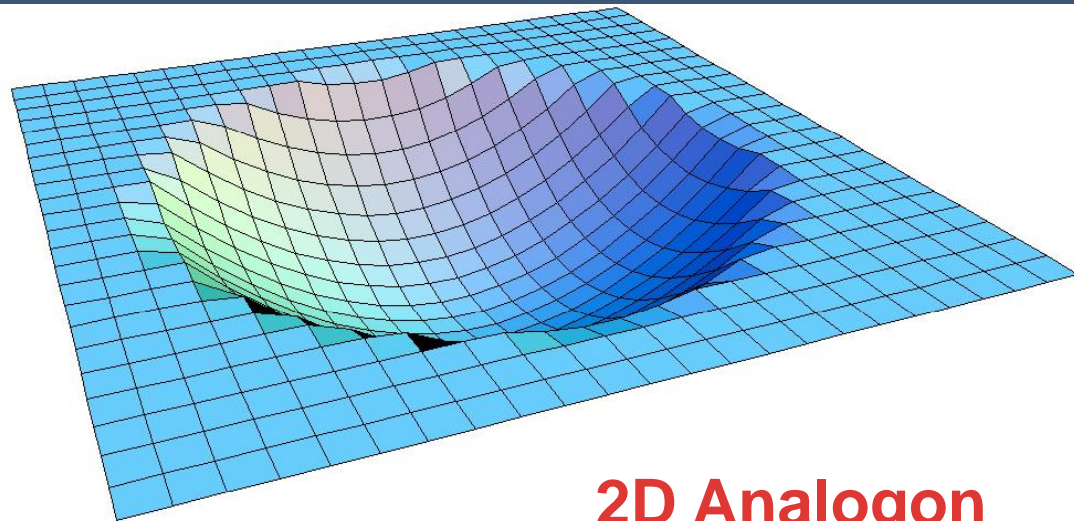
Einsteins Raumzeit

Heute
↑
Zeit

klassische Mechanik Relativitätstheorie

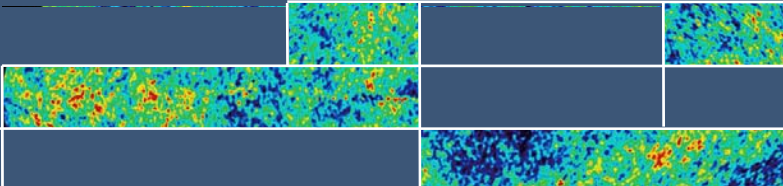
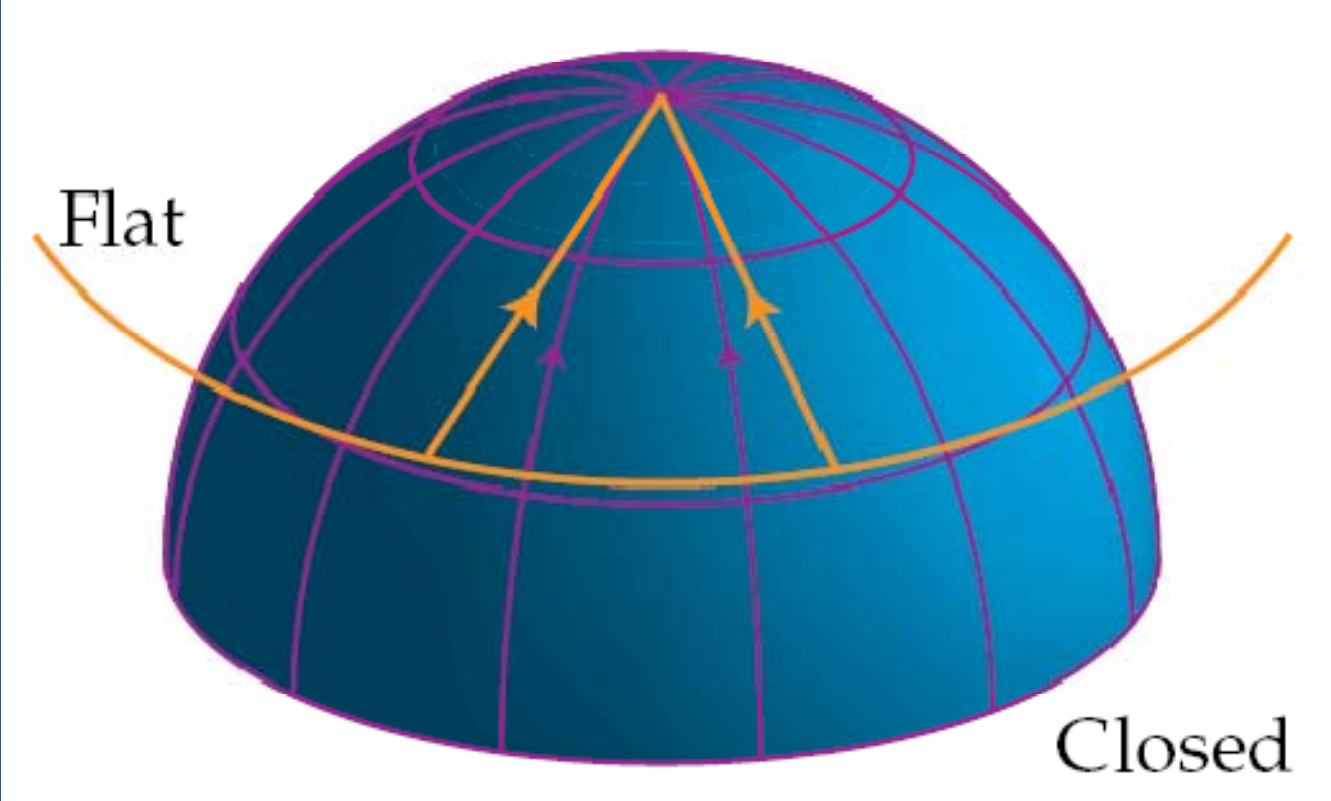
Raum + Zeit = Raumzeit

$$3 + 1 = 4$$

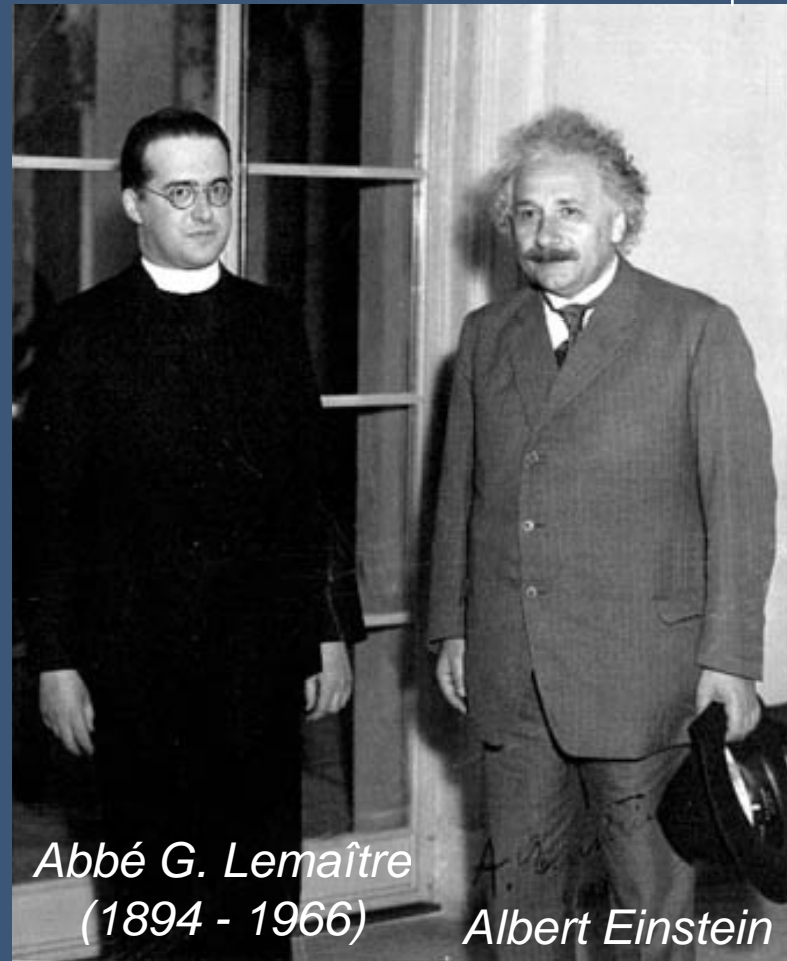


Raumkrümmung

Heute
↑
Zeit

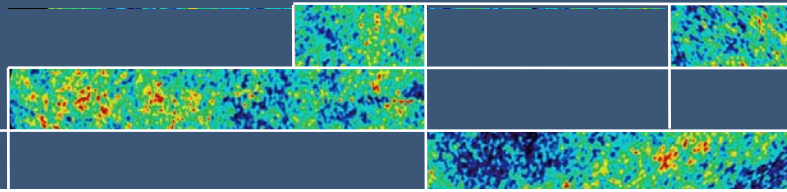


Heute
↑
Zeit →



*Abbé G. Lemaître
(1894 - 1966)*

Albert Einstein

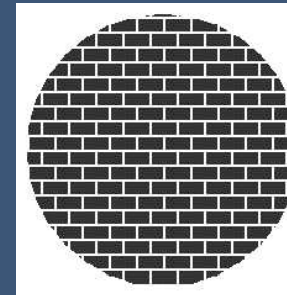


Lösungen

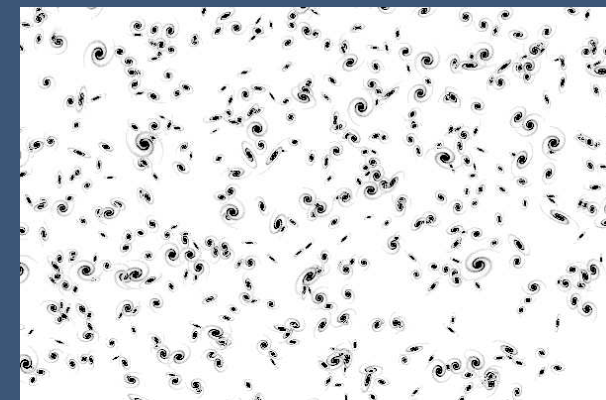
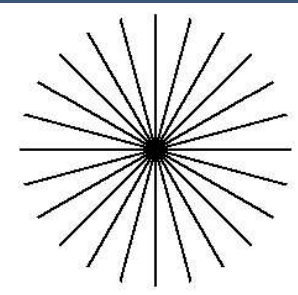
- **Kosmologische Prinzip**
 - Wir sehen das, was jeder andere auch sehen würde
 - **Isotropes** und **homogenes** Universum
- Friedmann Universen (1922)
- Weltmodelle hängen nur ab von
 - **Expansion**
 - **Gravitationsanziehung**

Heute
↑
Zeit

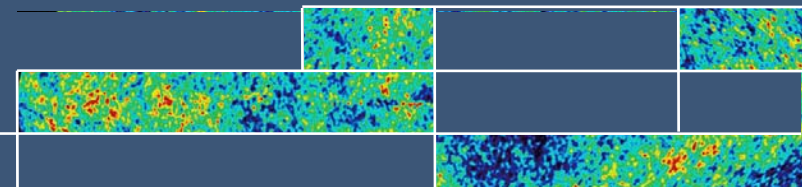
Homogen
aber nicht
isotrop



Isotrop aber
nicht
homogen

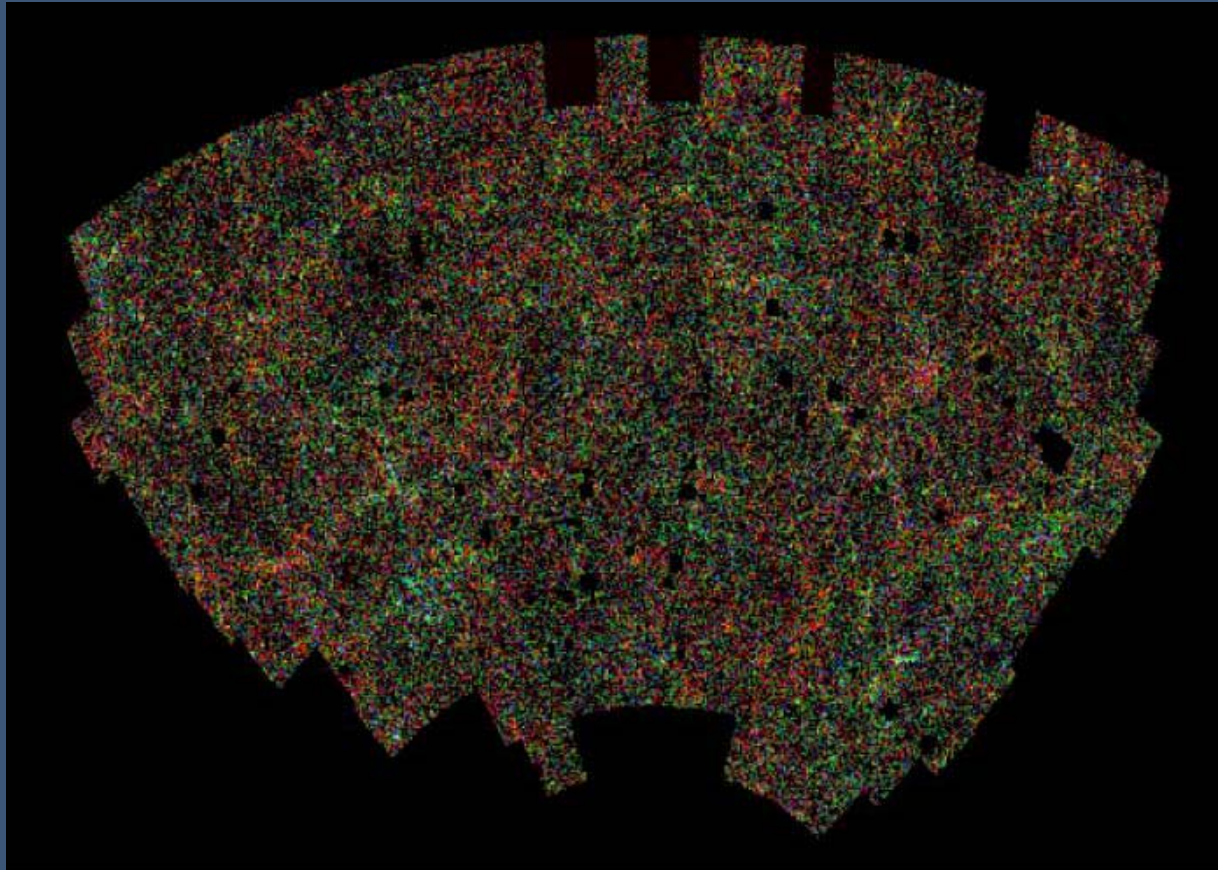


Isotrop **UND** homogen



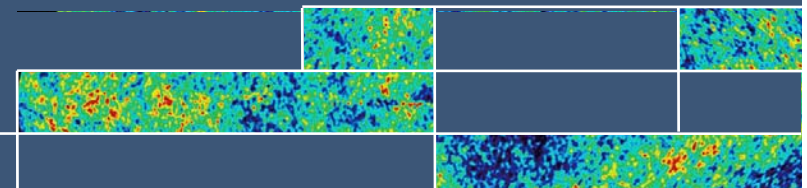
Galaxienverteilung

Heute
↑
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



Parameter eines expandierenden Universums

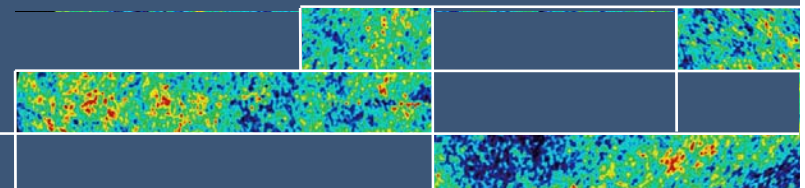
Heute
↑
Zeit →

- Expansion ↔ Gravitationsanziehung
- Expansion
 - **Hubble Konstante** H_0 ist ein Maß für die Stärke der Expansion:

$$H_0 = 20 \text{ km/s/MLj}$$

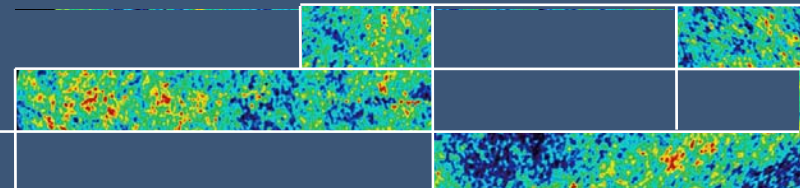
- Gravitationsanziehung
 - Normale Materie bremst die Expansion (mittlere Dichte ρ)
 - **Kritische Dichte**, nötig, um die Expansion zu stoppen:

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



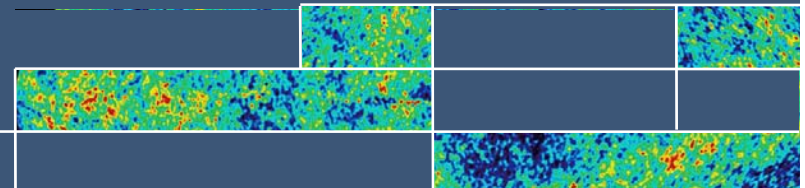
Zeit

Ende Tag 1!



Zeit

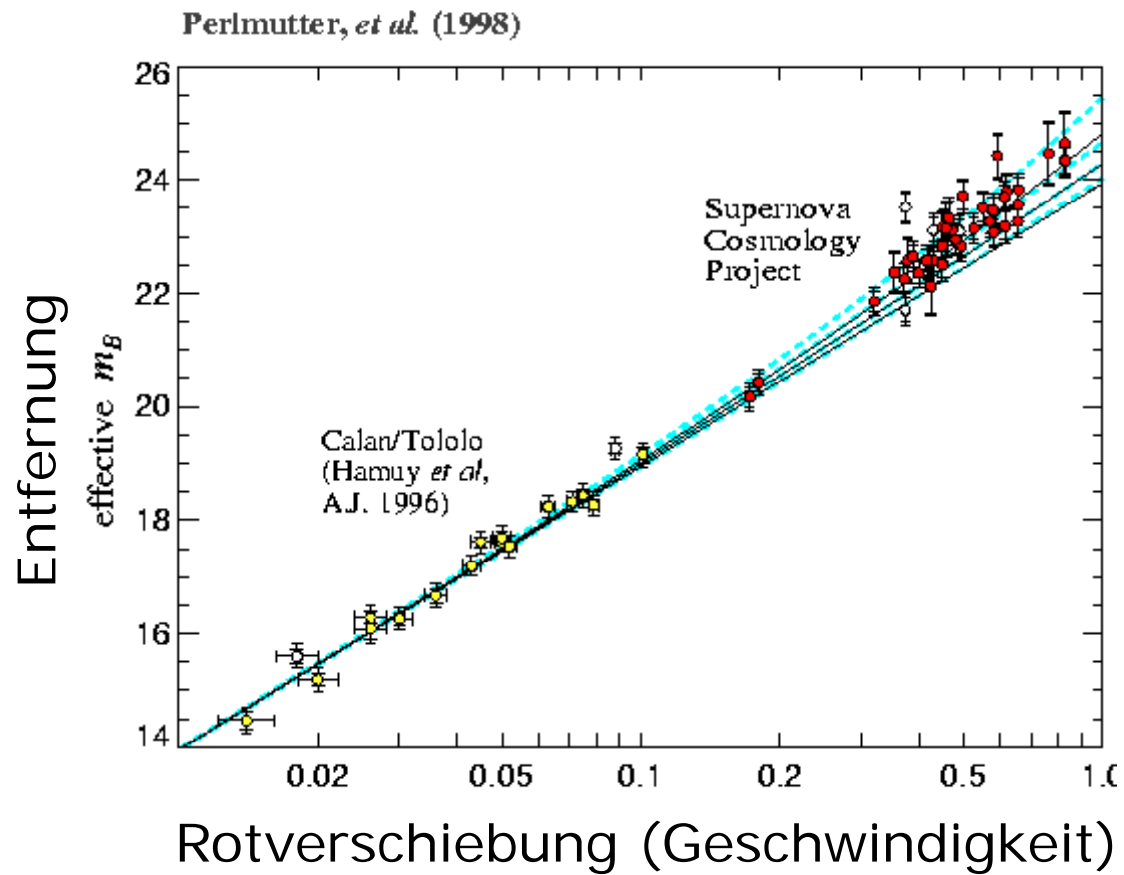
Tag 2



Wiederholung

- Der Raum dehnt sich aus!

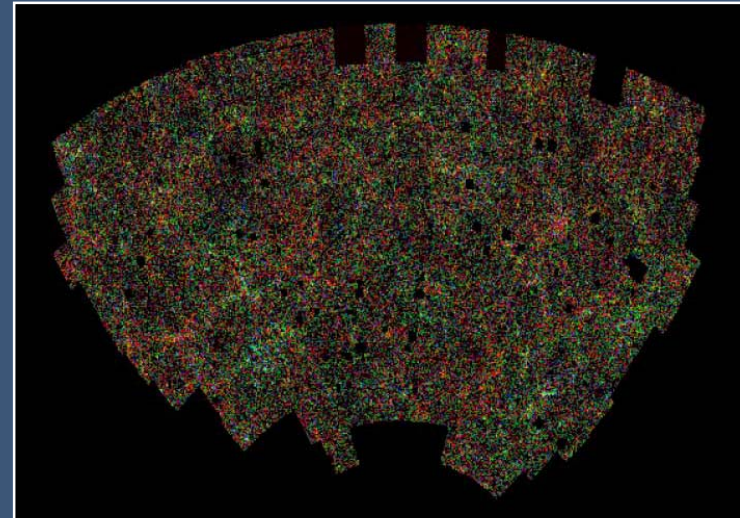
Heute
↑
Zeit



Wiederholung

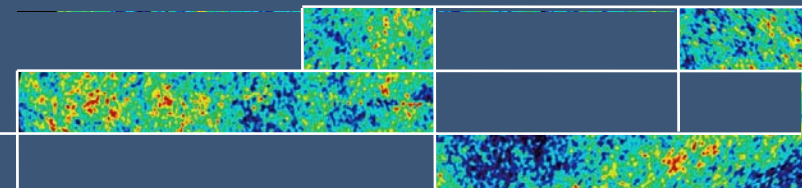
Zeit →

- Das Kosmologische Prinzip
 - Der Raum ist isotrop und homogen
- Entwicklung des Universums hängt ab von
 - Expansion
 - Gravitationsbeschleunigung



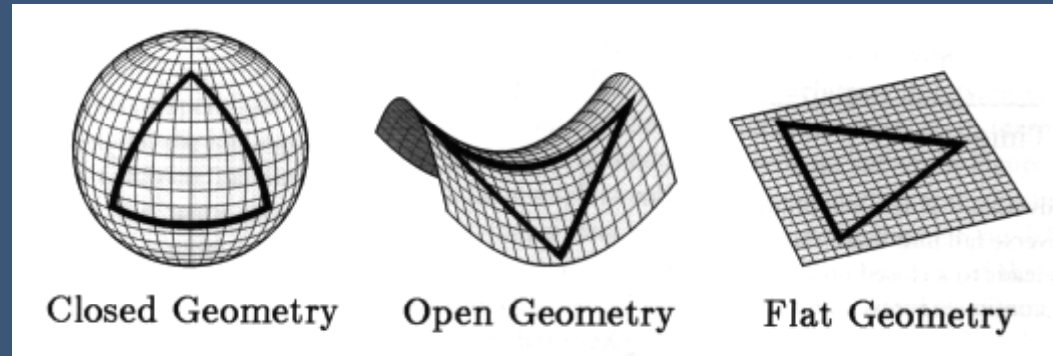
APM Survey picture of a large part of the sky, about 30 degrees across, showing almost a million galaxies out to a distance of about 2 billion light years.

MAF990047

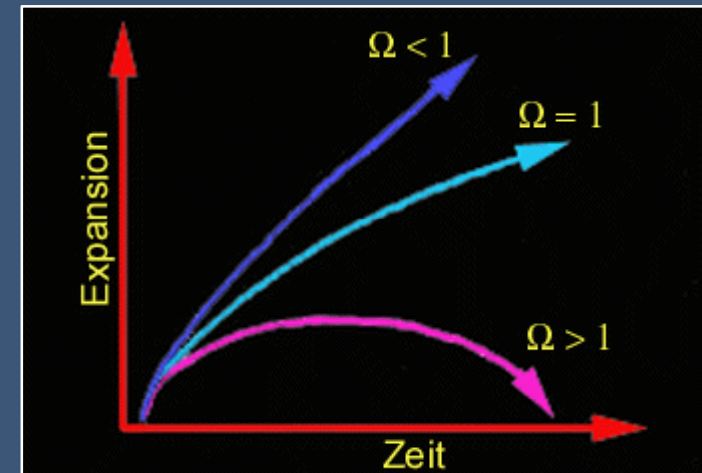


Geometrie des Universums

Heute
↑
Zeit →



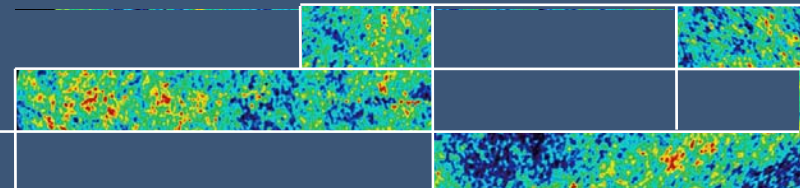
- Balance zwischen Kontraktion und Expansion ausgedrückt durch $\Omega_0 = \rho/\rho_{\text{krit}}$
 - $\Omega_0 > 1$, $\rho > \rho_{\text{krit}}$
Gravitation gewinnt, das Universum kollabiert
 - $\Omega_0 = 1$, $\rho = \rho_{\text{krit}}$
Ausgleich, Expansion hält schlussendlich an
 - $\Omega_0 < 1$,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



Fragen

Zeit →

- Schicksal unserer Sonne?
- Neutronensterne als Standardkerzen?
- Forschungsstand der Kritischen Masse?
- Wie wird die Entfernung zu einer Standardkerze geeicht?
- Kann es Antigravitation geben?



Das beschleunigte Universum

Zeit →

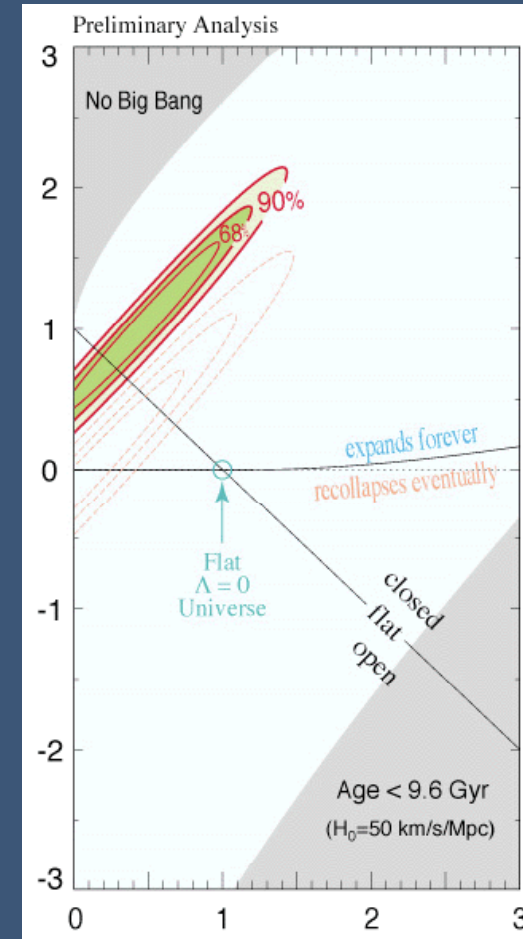
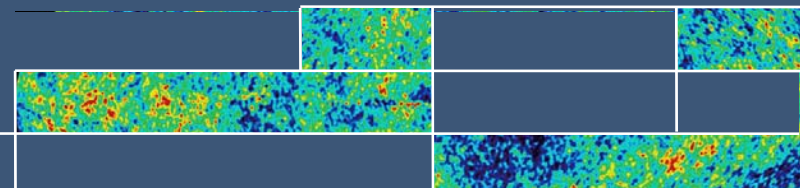
- Einsteins Kosmologische Konstante

$$\mathbf{G}_{\mu\nu} - \Lambda \mathbf{g}_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{T}_{\mu\nu}$$

- Kosmologische Konstante wirkt wie eine Anti-Gravitation

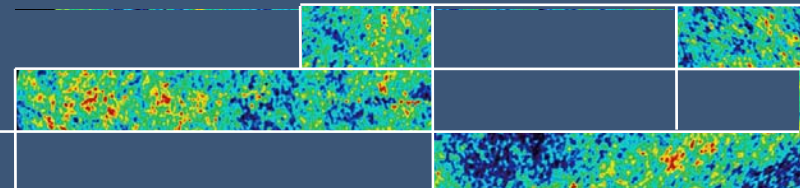


- ~70% Dunkle Energie
(Kosmologische Konstante)
- ~30% Materie
(Normale und dunkle Materie)

 Ω_Λ  Ω_m 

Zeit

Eine Reise durch die Zeit



Am Anfang war ...

0
↑

Zeit →



calvin and HOBBS by WATSON

First there was nothing...

... then there was Calvin!



Calvin, the mighty god, creates the universe with pure will!

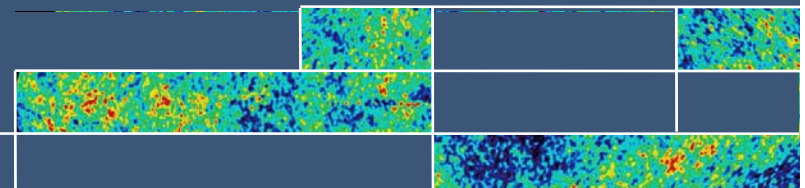
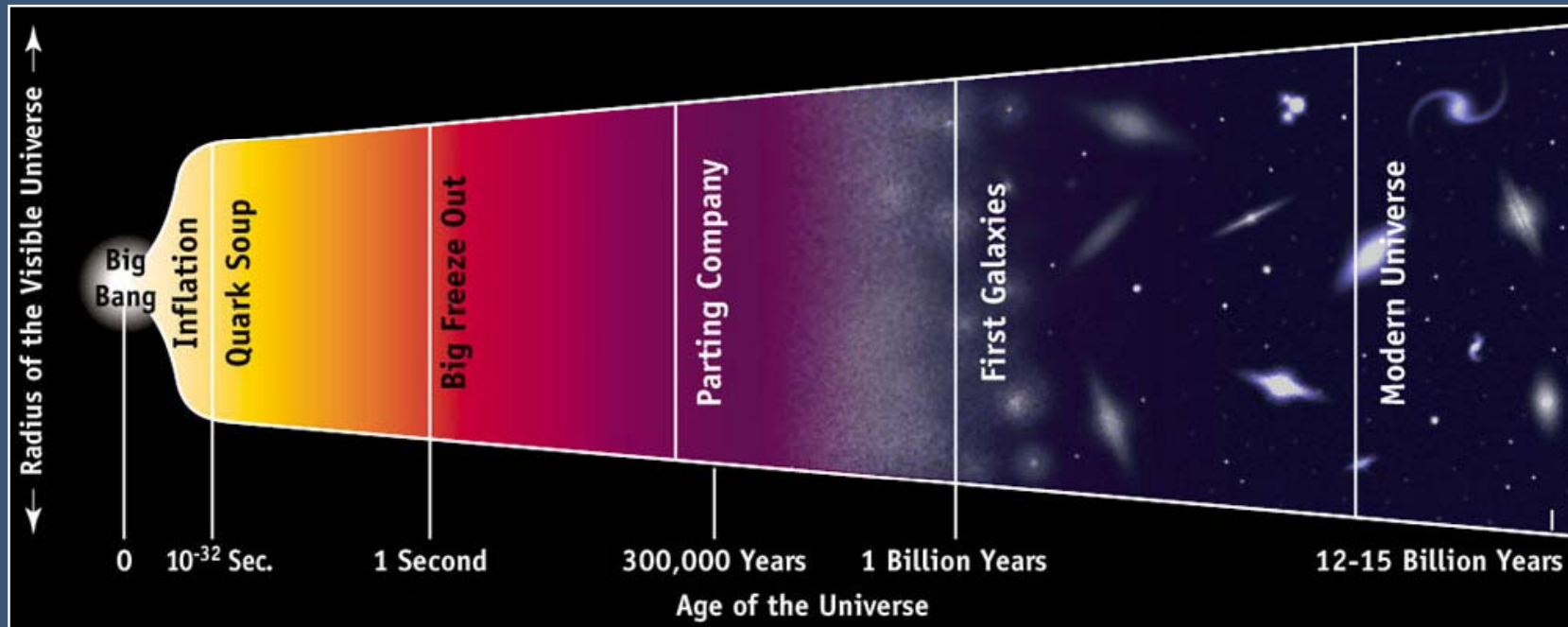


From utter nothingness comes swirling form! Life begins where once was void!



Vom Urknall bis heute

0 ↑ Zeit →

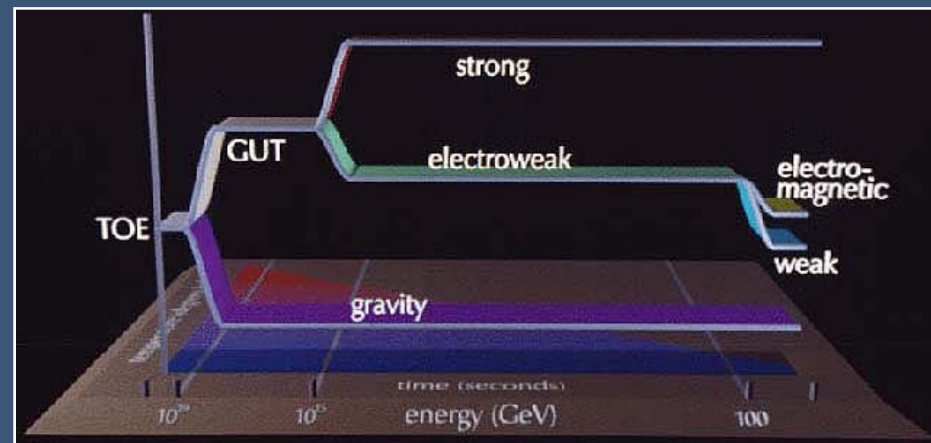


Eine Zeitreise

10^{-42} s

Zeit

- **Alter = 10^{-42} s**
 - Der Anfang unserer Physik
- **Alter = 10^{-36} s, $T = 10^{27}$ K**
 - Starke und elektro-schwache Kraft trennen sich



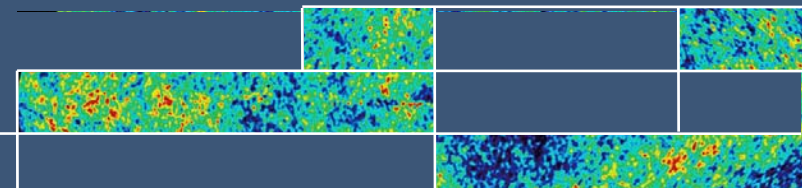
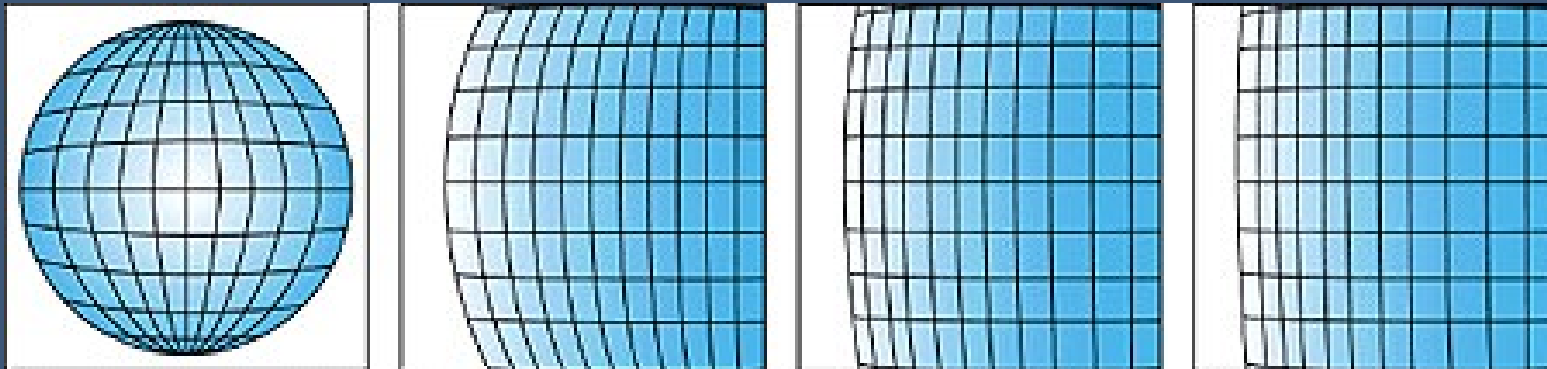
Die Inflation

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



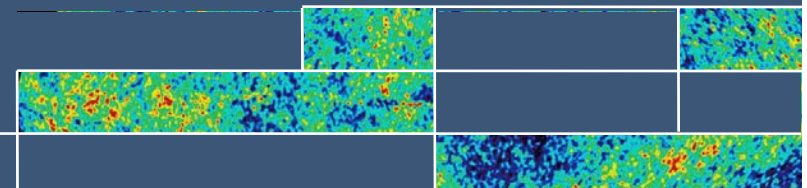
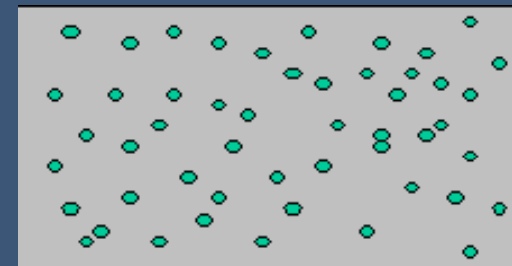
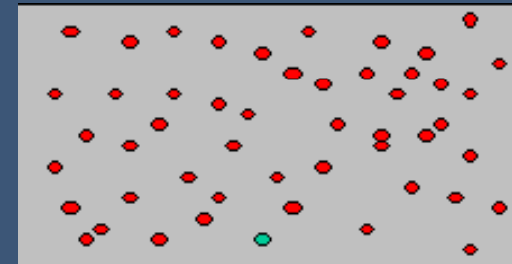
Zeit

- **Alter = 10^{-6} s, $T = 10^{12}$ Kelvin**
 - Materie und Antimaterie vernichten sich
 - Materie-Antimaterie-Verhältnis

100000001 : 100000000

- Danach Materie-Photon-Verhältnis

1 : 1000000000

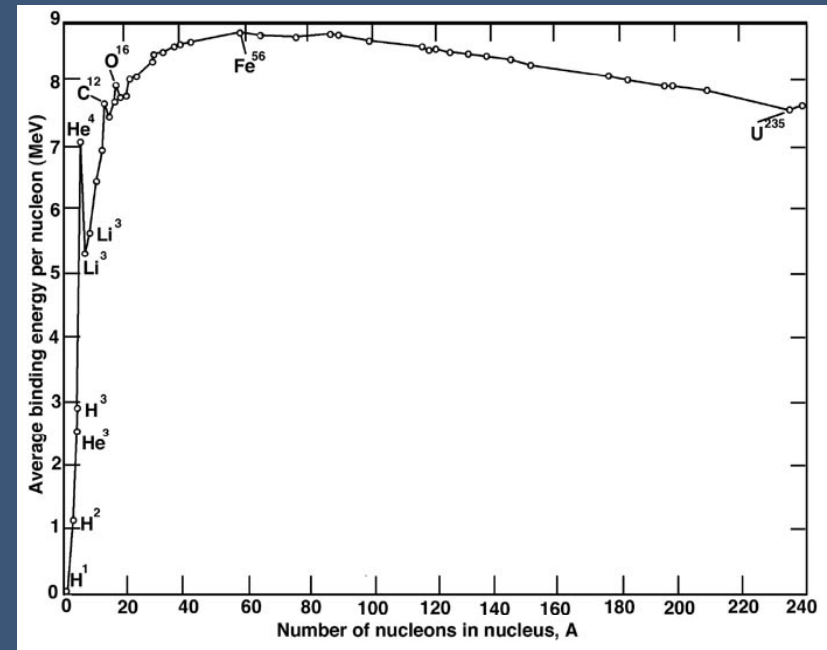


Nukleosynthese

1 min

Zeit

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

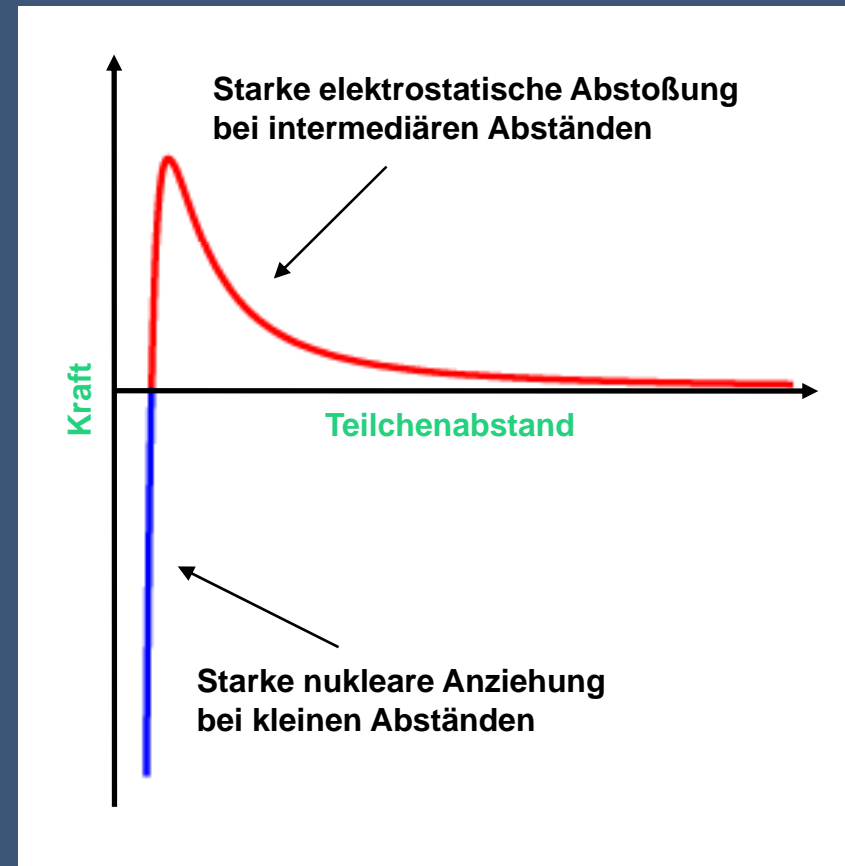


Kernfusion

1 min

Zeit

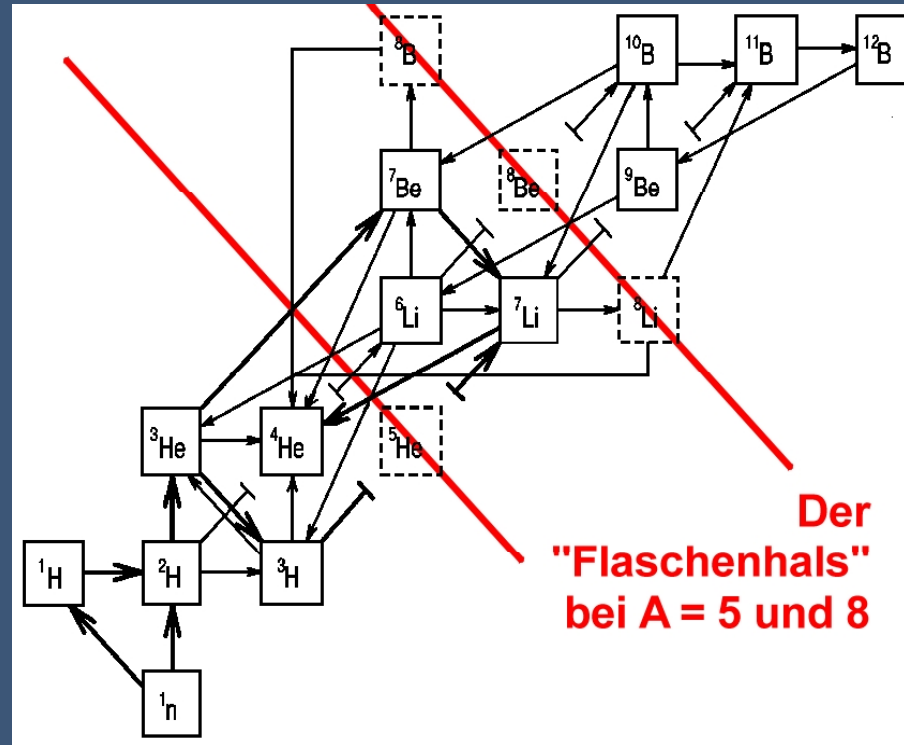
- Fusion bei Teilchenkollisionen
- Fusion benötigt hohe Temperaturen und große Teilchendichten



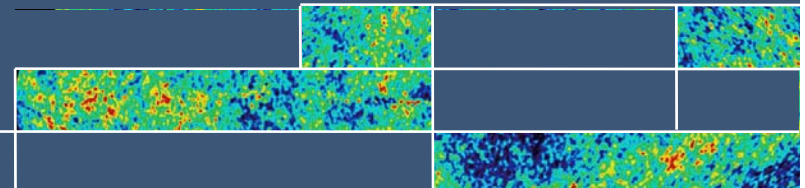
Primordiale Nukleosynthese

1 min

Zeit



Der
"Flaschenhals"
bei A = 5 und 8

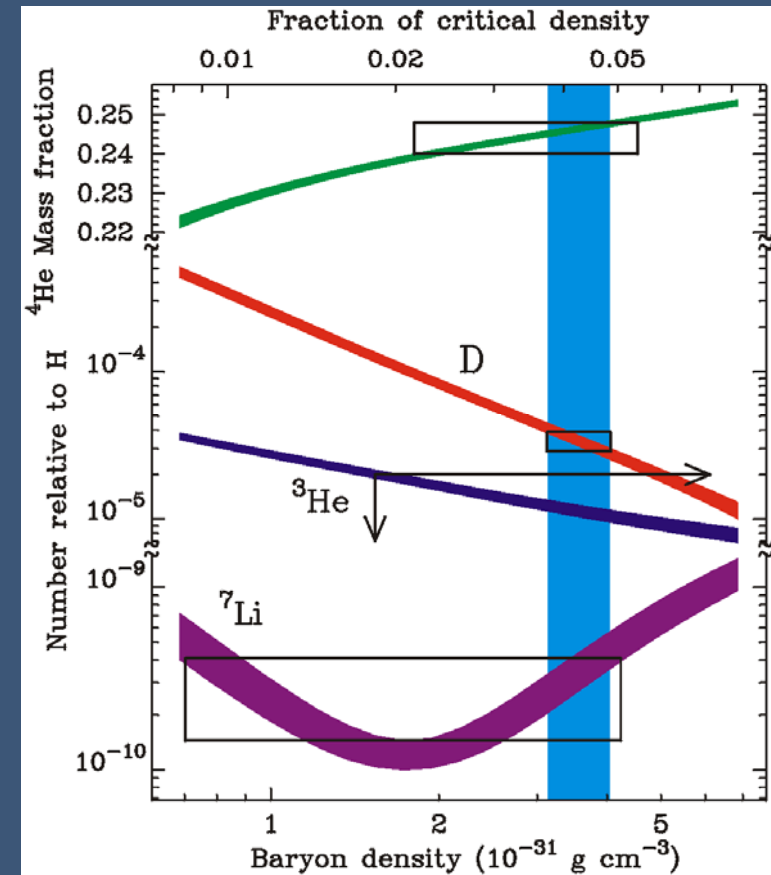


Primordiale Nukleosynthese

1 min

Zeit

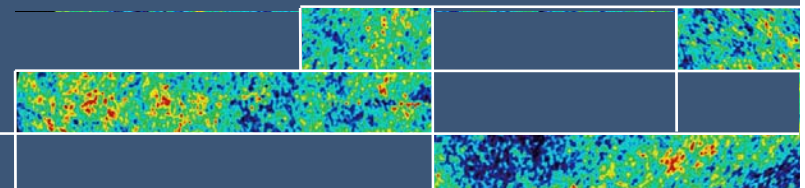
- Erklärt die Häufigkeit der leichten Elemente
 - 74% Wasserstoff
 - 25 % Helium
 - 1% Rest
- Baryonische Dichte
 - $3,5 \cdot 10^{-31} \text{ g/cm}^3$ oder
 - **0,2 Wasserstoffatome/m³**



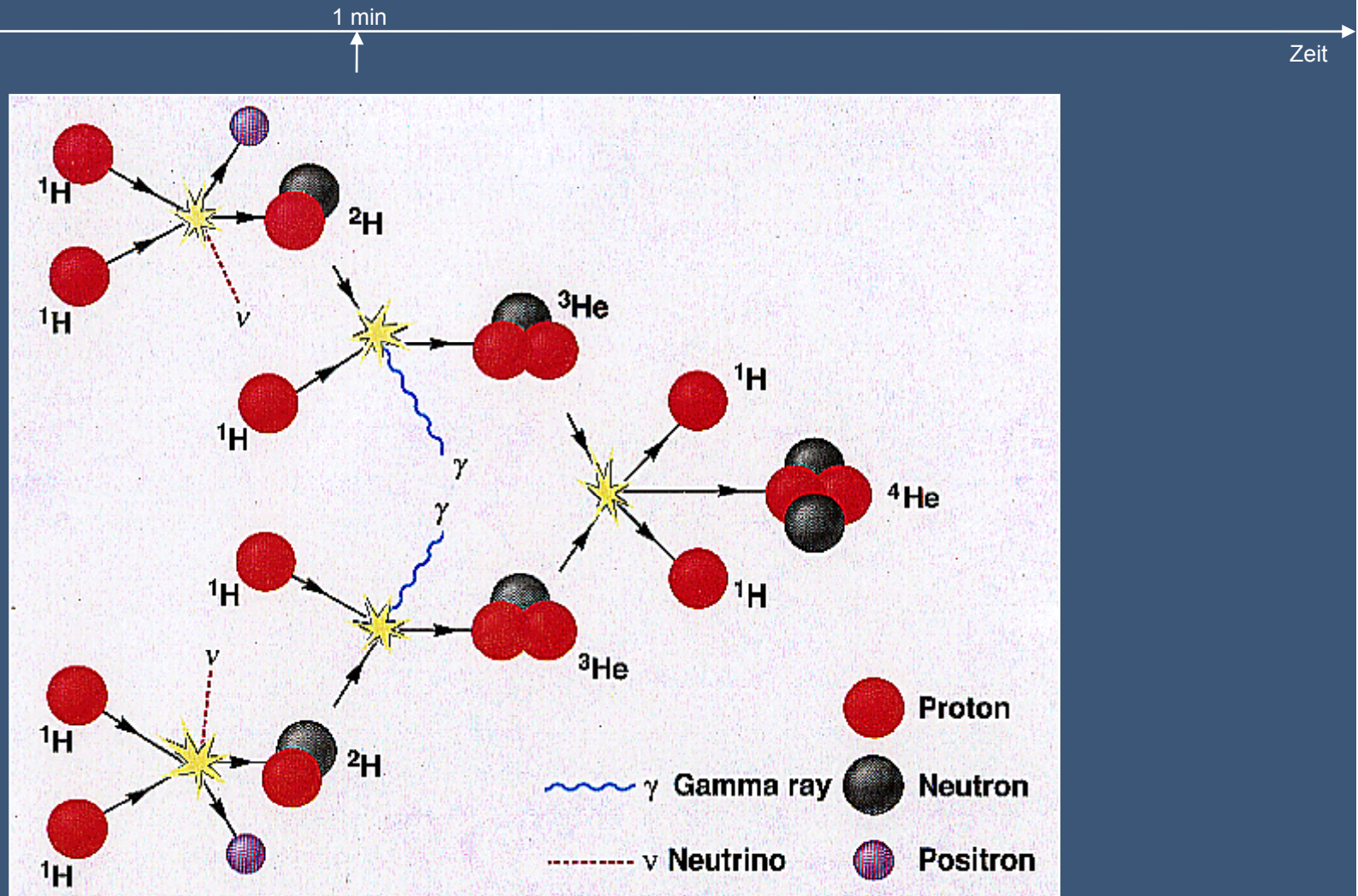
1 min

Zeit

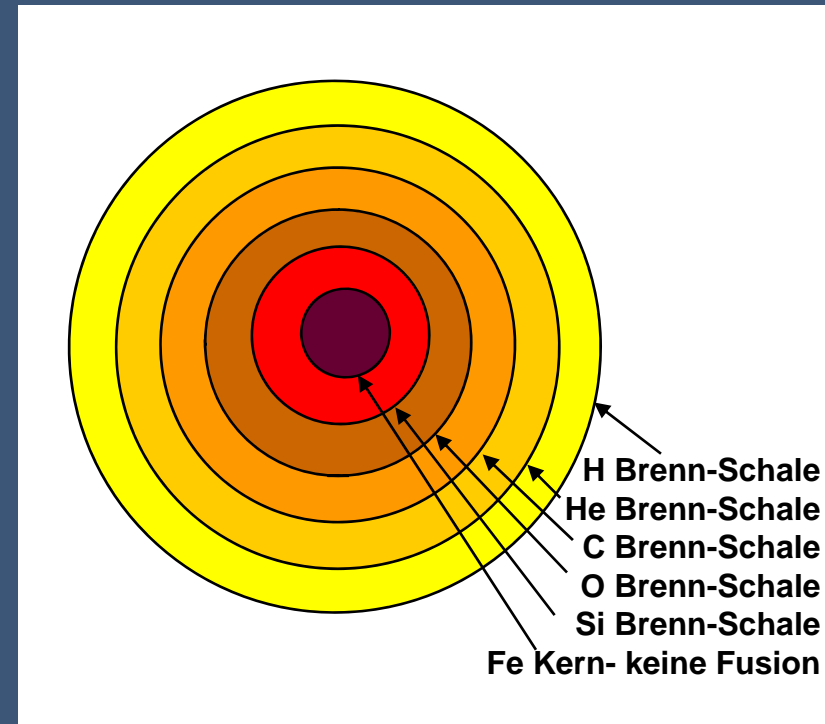
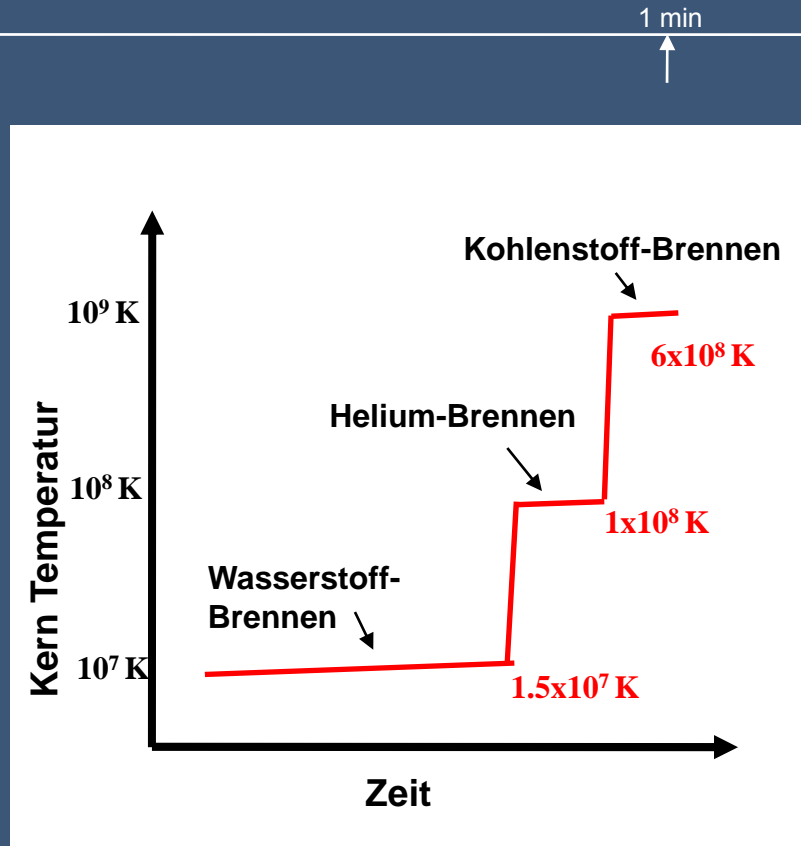
Warum nicht in Sternen?



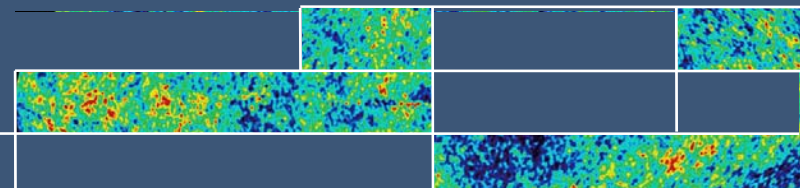
Fusion in Sternen



Fusion in Sternen



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

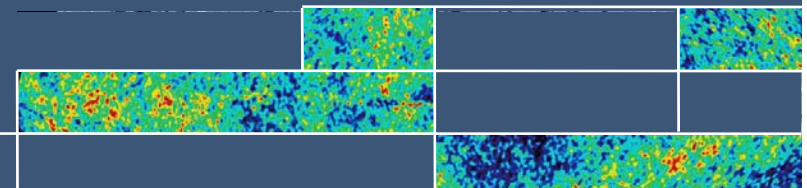


Vergleich Stellarer und Primordialer Nukleosynthese

1 min

Zeit

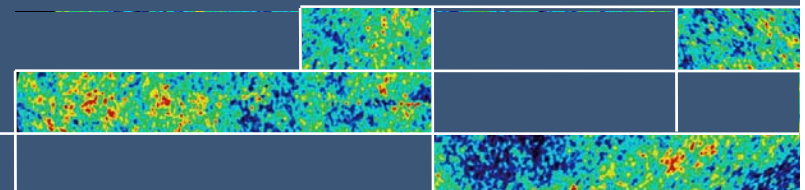
	Stellare Nukleosynthese	Primordiale Nukleosynthese
Zeitskala	Milliarden von Jahren	Minuten
Temperaturentwicklung	Ansteigend	Fallend
Dichte	100 g/cm ³	10 ⁻⁵ g/cm ³ (wie die Luft in diesem Raum)
Photon-Baryon-Verhältnis	1:1	10 ⁹ : 1



1 min

Zeit

Primordiale Nukleosynthese ist eine der
Stützen des Urknall-Modells!

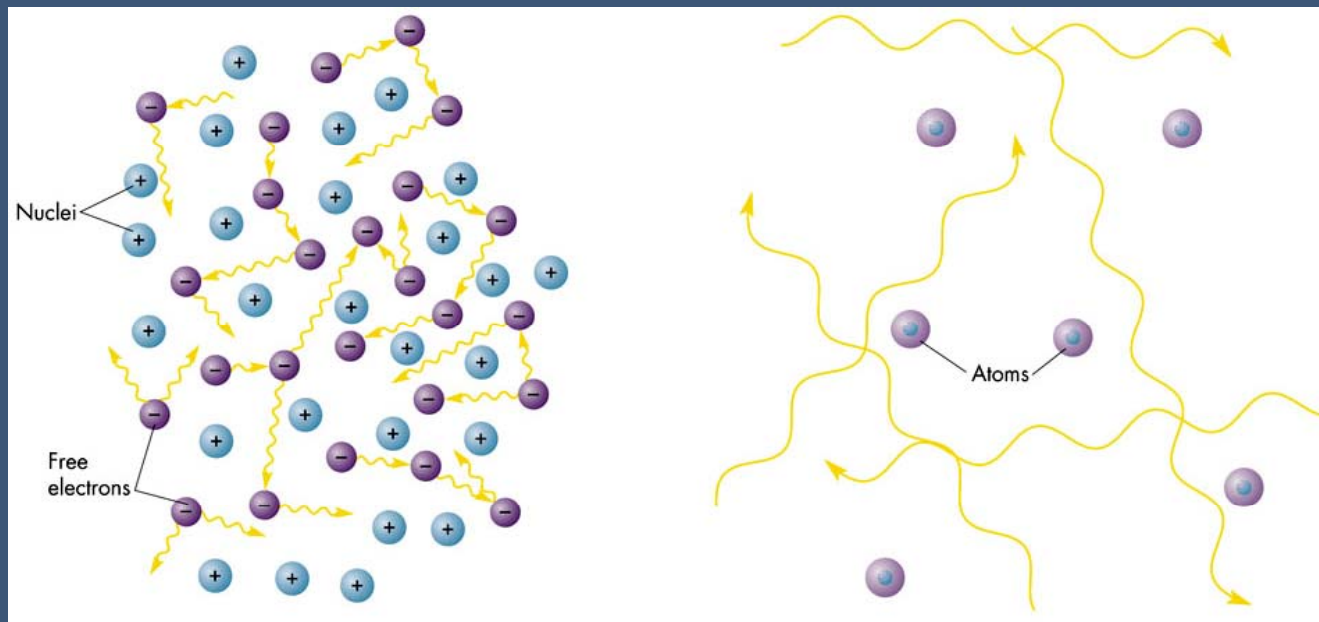


Bildung von Atomen

370000 Jahre

Zeit

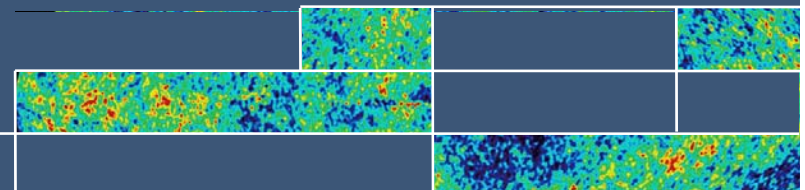
- **Alter = 370000 Jahre, $T = 3000$ Kelvin**
 - Erste Atome bilden sich
 - Das Universum wird transparent



370000 Jahre

Zeit

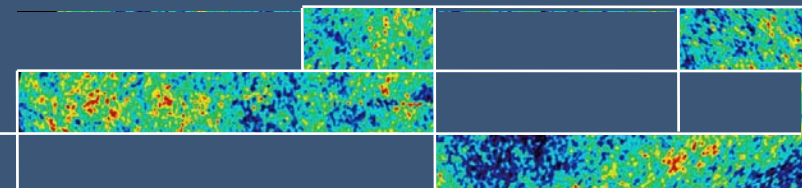
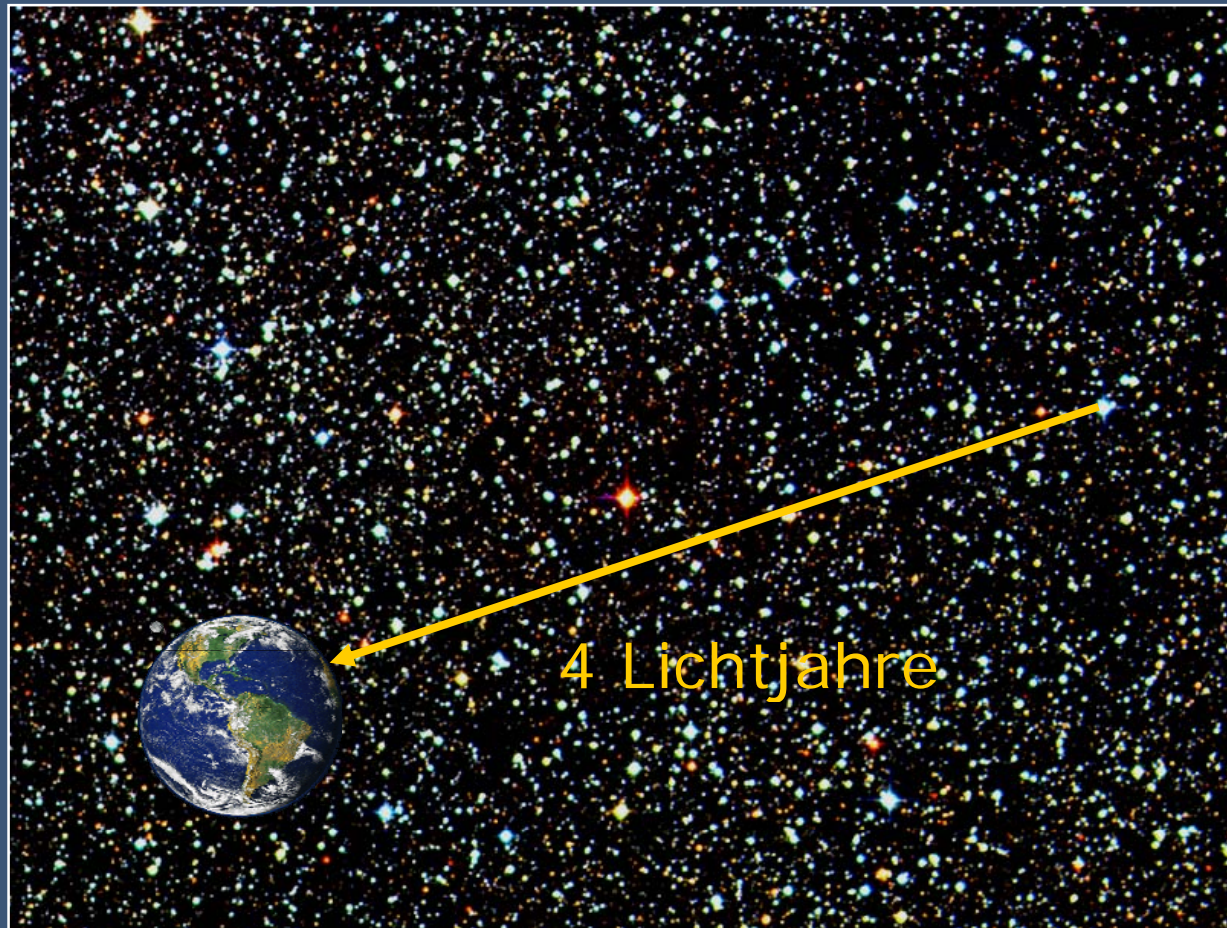
Können wir den Urknall sehen?



Blick in die Vergangenheit

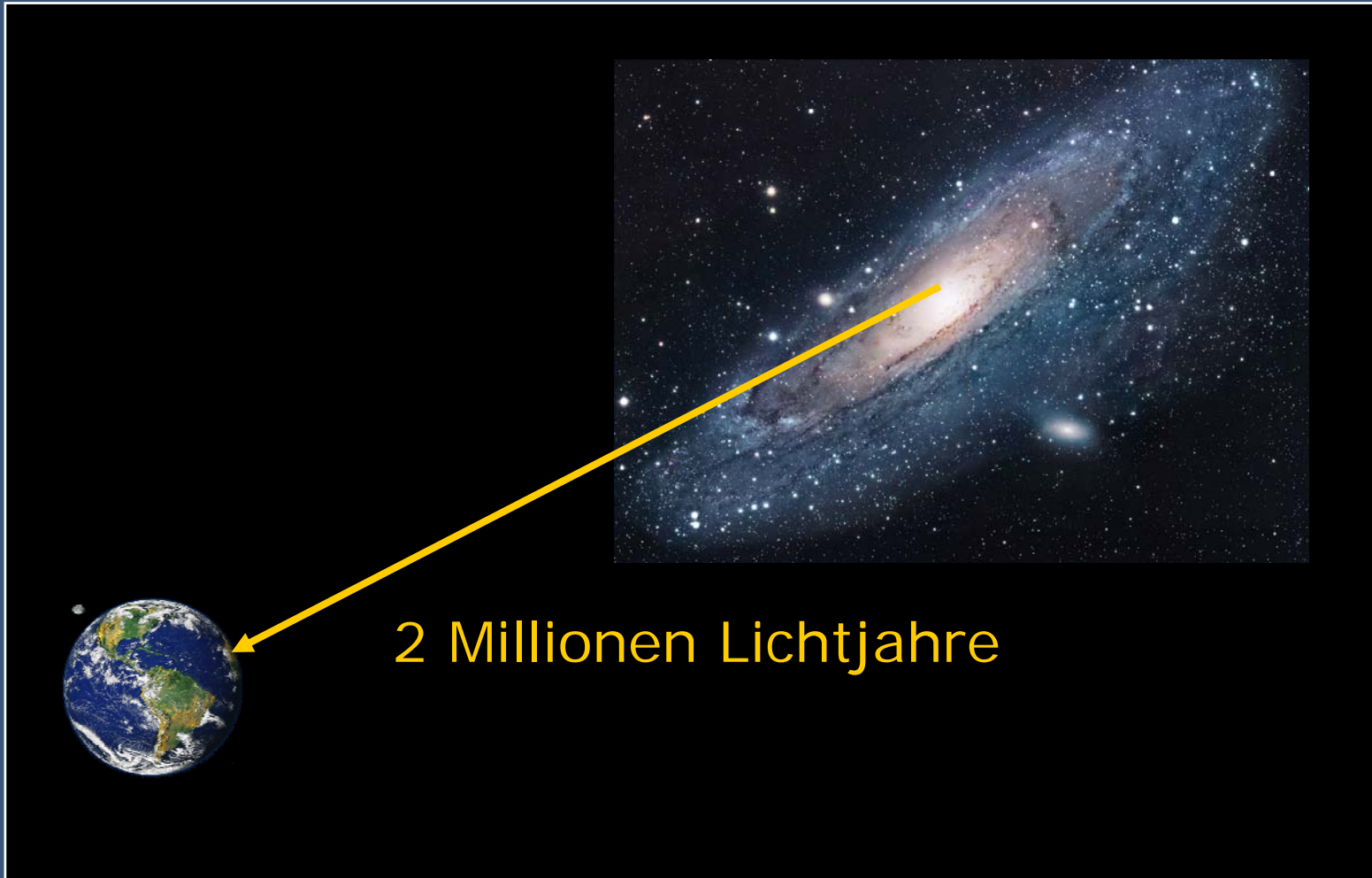
370000 Jahre

Zeit



370000 Jahre

Zeit



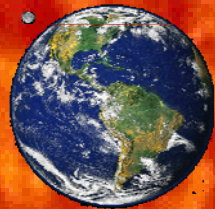
2 Millionen Lichtjahre

Blick in die Vergangenheit

Zeit →



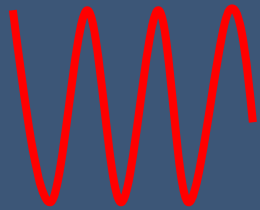
Der Urknall füllt den Himmel



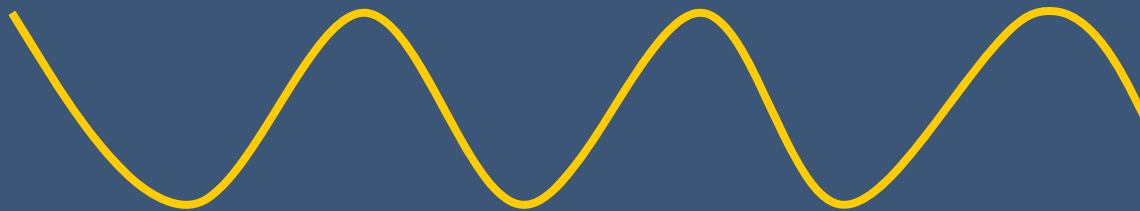
Der Urknall damals-heute

370000 Jahre

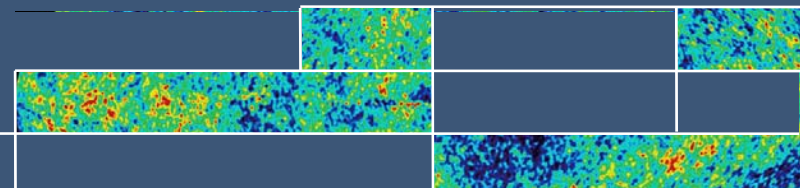
Zeit



Damals:
Licht 3000 K



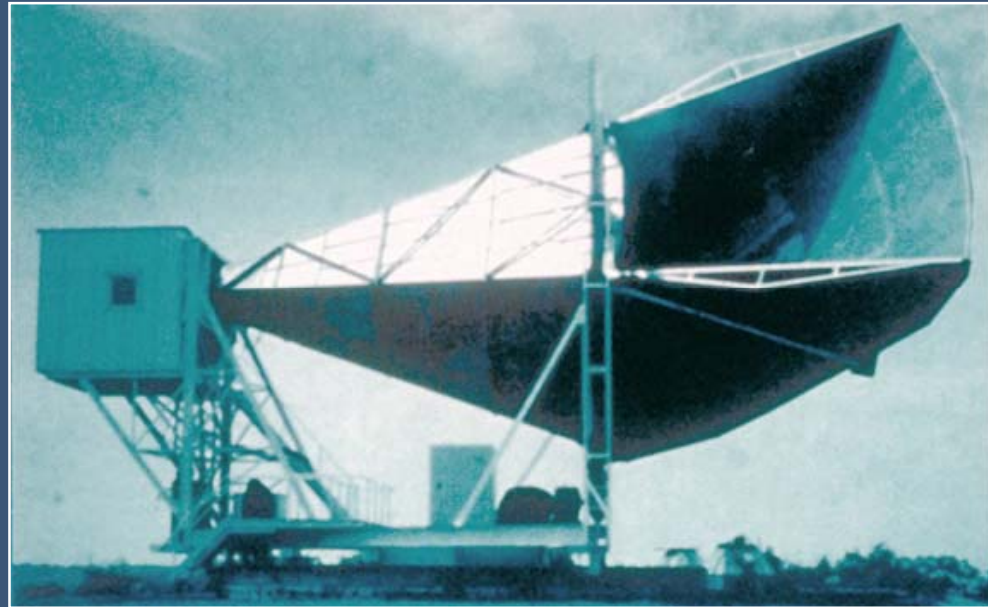
Heute:
Mikrowellen 3 K



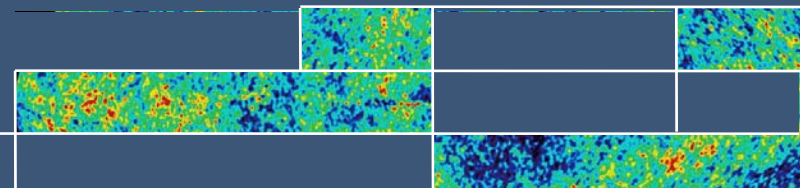
1965 - Die Entdeckung

370000 Jahre

Zeit



Mikrowellen-Strahlung
aus dem Kosmos



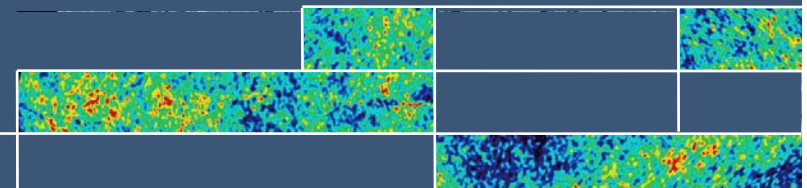
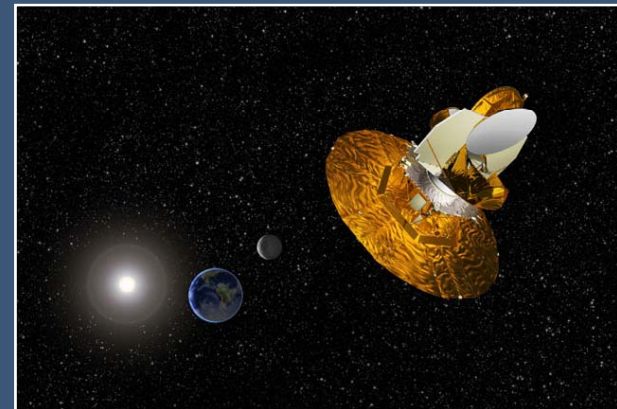
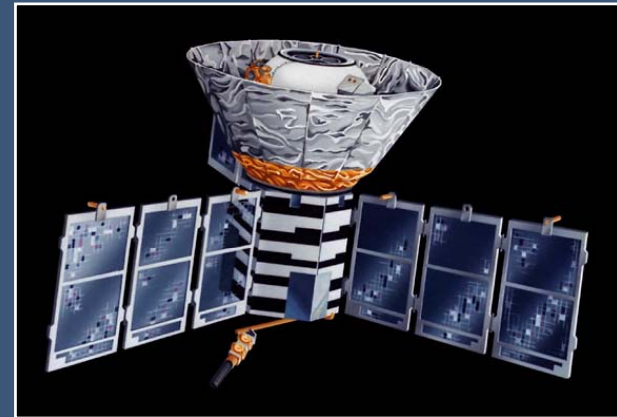
COBE and WMAP

370000 Jahre

Zeit

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

- WMAP
 - Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
 - Start 2001



Der Spiegel 8/2003

370000 Jahre

Zeit

Knallbuntes Panorama

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

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

Wissenschaft

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 Kosmos 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 trafen 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 Sternen hervorgehen wird. Rote Punkte hingegen stehen für wärmere Regionen. Ihnen steht eine geruhsame 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 bedeutsam 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 sendender 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 gewaltigem Maße.

In den Minuten, die folgten, kristallisierten sich jene Kräfte heraus, mittels deren die Materie wechselwirkte. Nach 380.000 Jahren wurden dann die Atome geboren: Die Welt bestand nun aus Wasserstoff, der in einem Meer von Mikrowellenstrahlen badete. Weitere 200 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 vollzog, haben die Physiker mühsam 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

1 Bildung von Atomen
Das Universum wird durchsichtig, die kosmische Hintergrundstrahlung entsteht. Geringfügige Temperaturschwankungen werden von der „Map“-Sonde sichtbar gemacht.

2 Inflation
Im Bruchteil einer Sekunde dehnt sich das Universum auf astronomische Größe aus.

3 Erste Sterne
Gaswolken kollabieren zu gewaltigen Sternen, die als Schwarze Löcher enden.

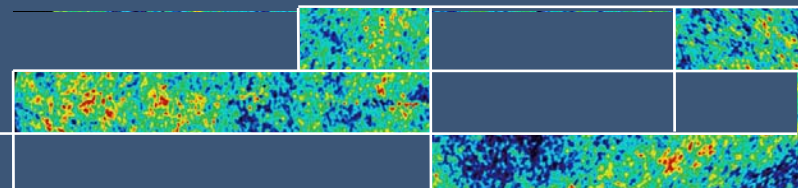
4 Galaxienentstehung
Vermutlich rund um diese Schwarzen Löcher bilden sich später die Galaxien.

„Map“-Aufnahme der kosmischen Hintergrundstrahlung

132 DER SPIEGEL 8/2003

370000 Jahre

Zeit

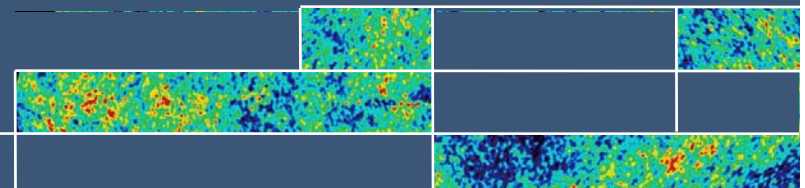


Der Mikrowellen-Hintergrund

370000 Jahre

Zeit

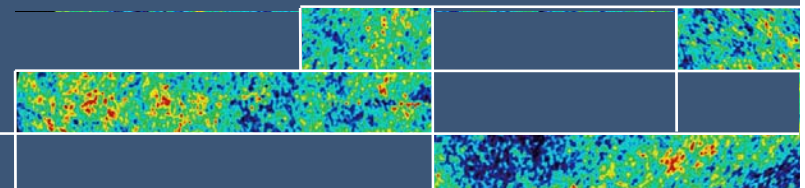
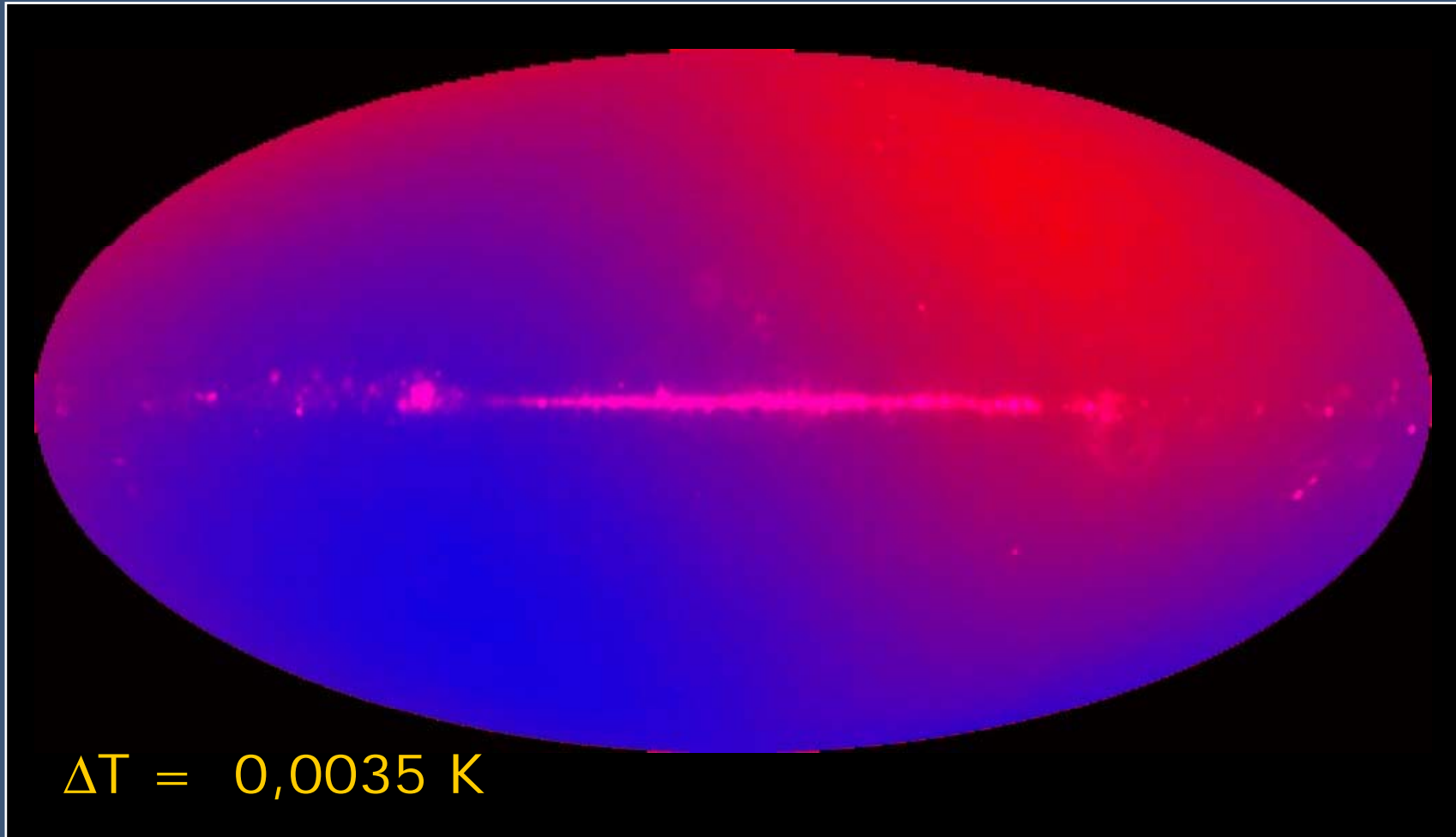
$T = 2.7 \text{ K}$



Die Erde bewegt sich

370000 Jahre

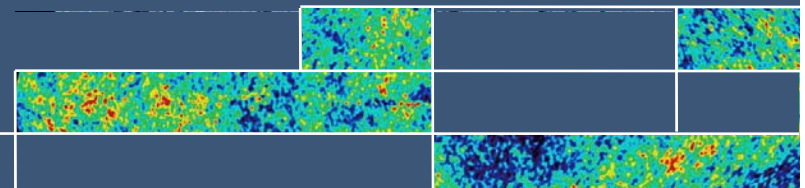
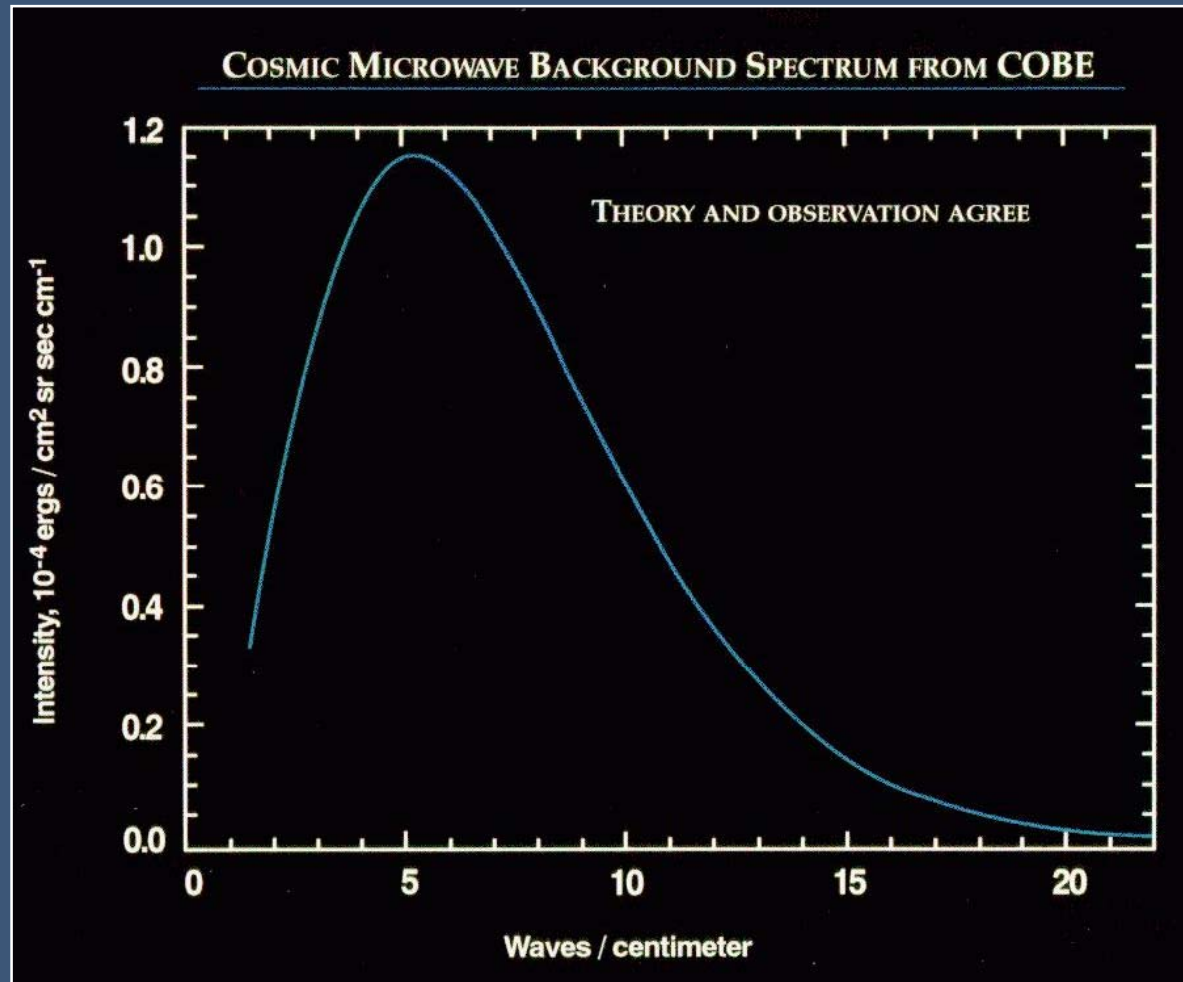
Zeit



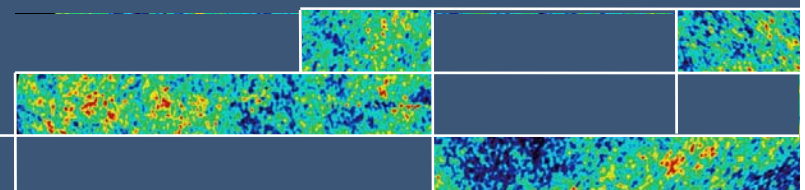
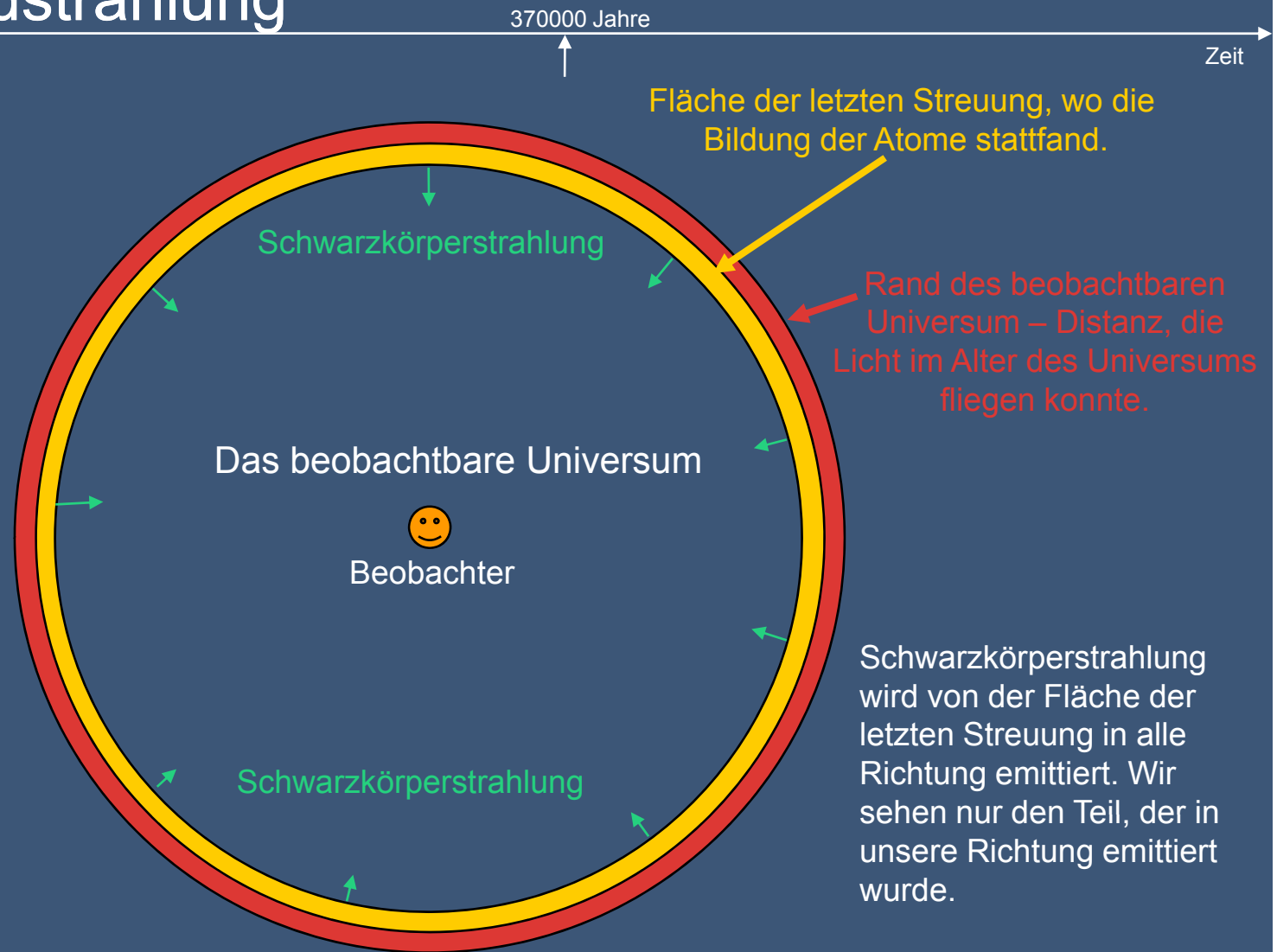
Das Spektrum

370000 Jahre

Zeit



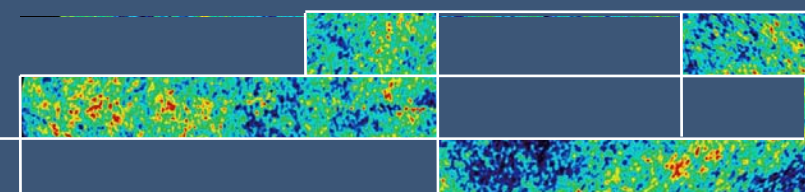
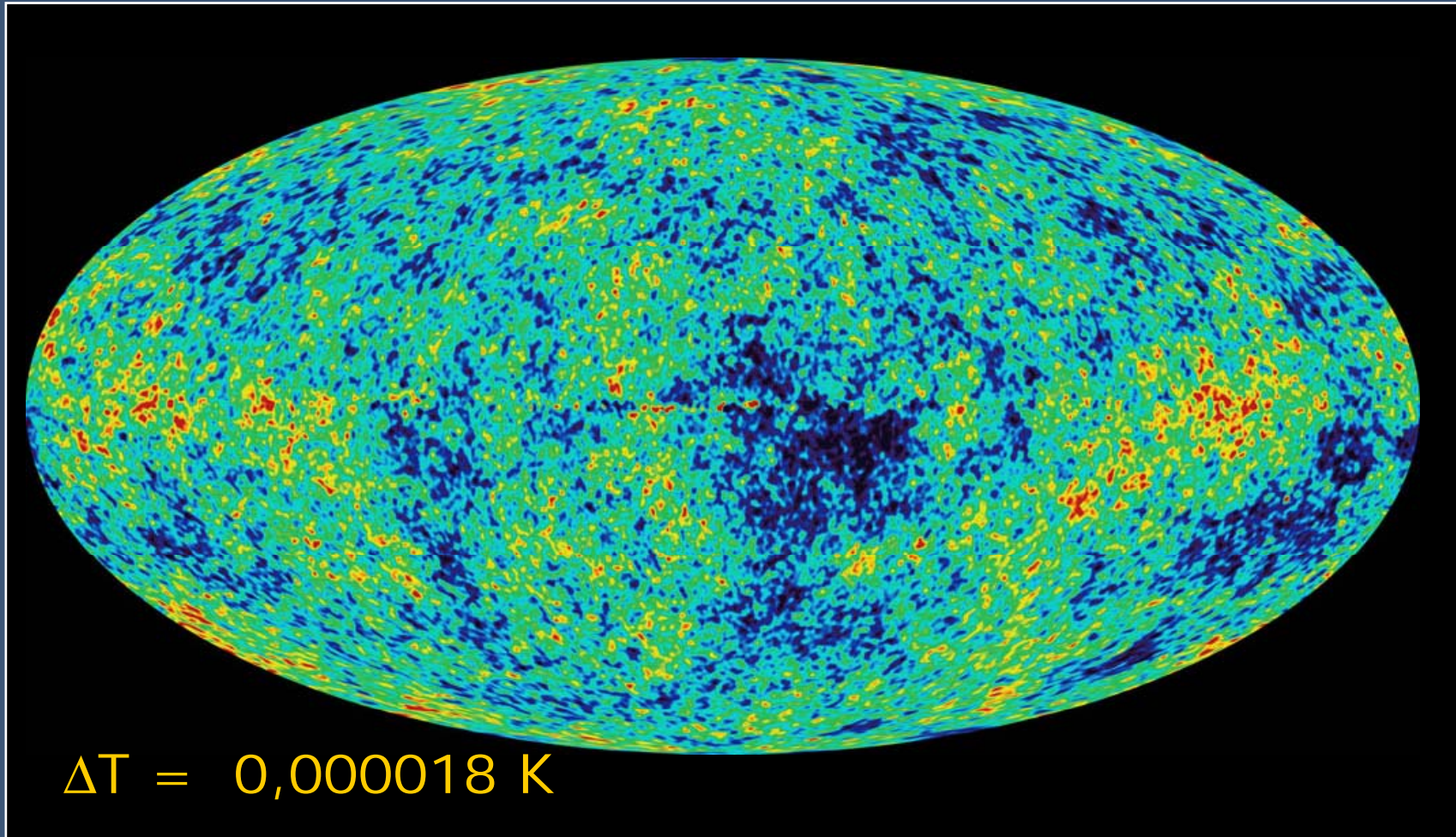
Die Geschichte der kosmischen Hintergrundstrahlung



Das Echo des Urknalls

370000 Jahre

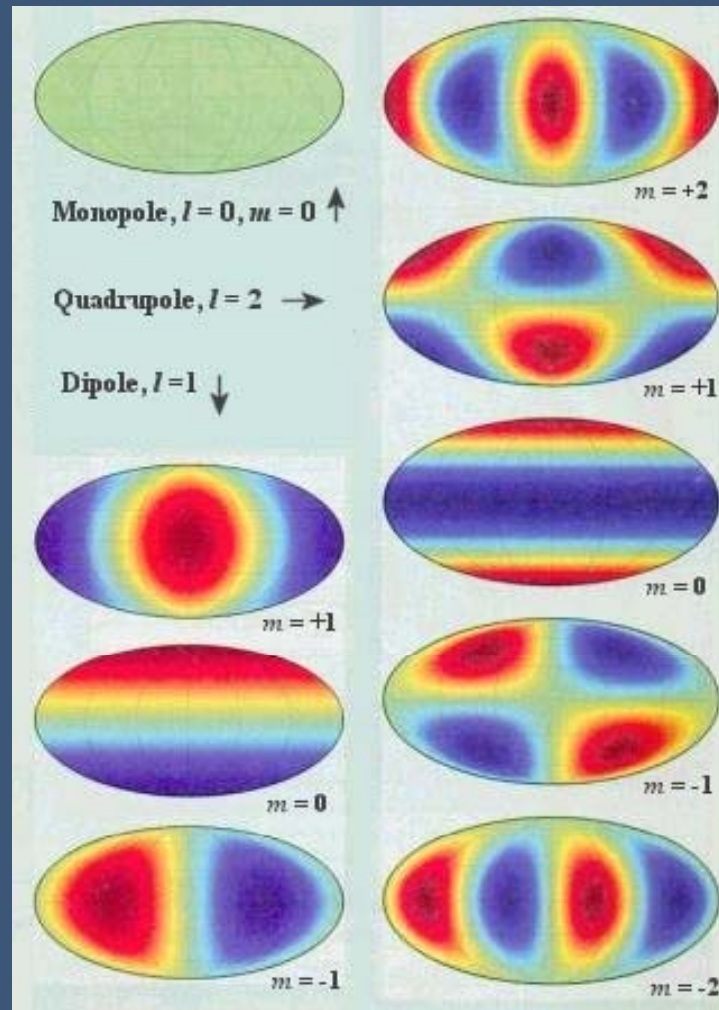
Zeit



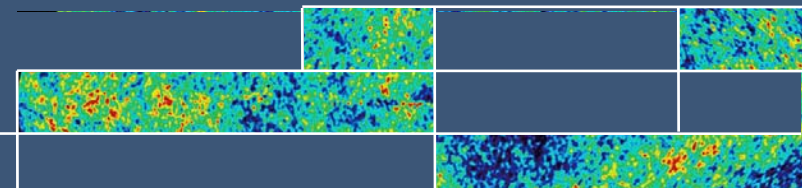
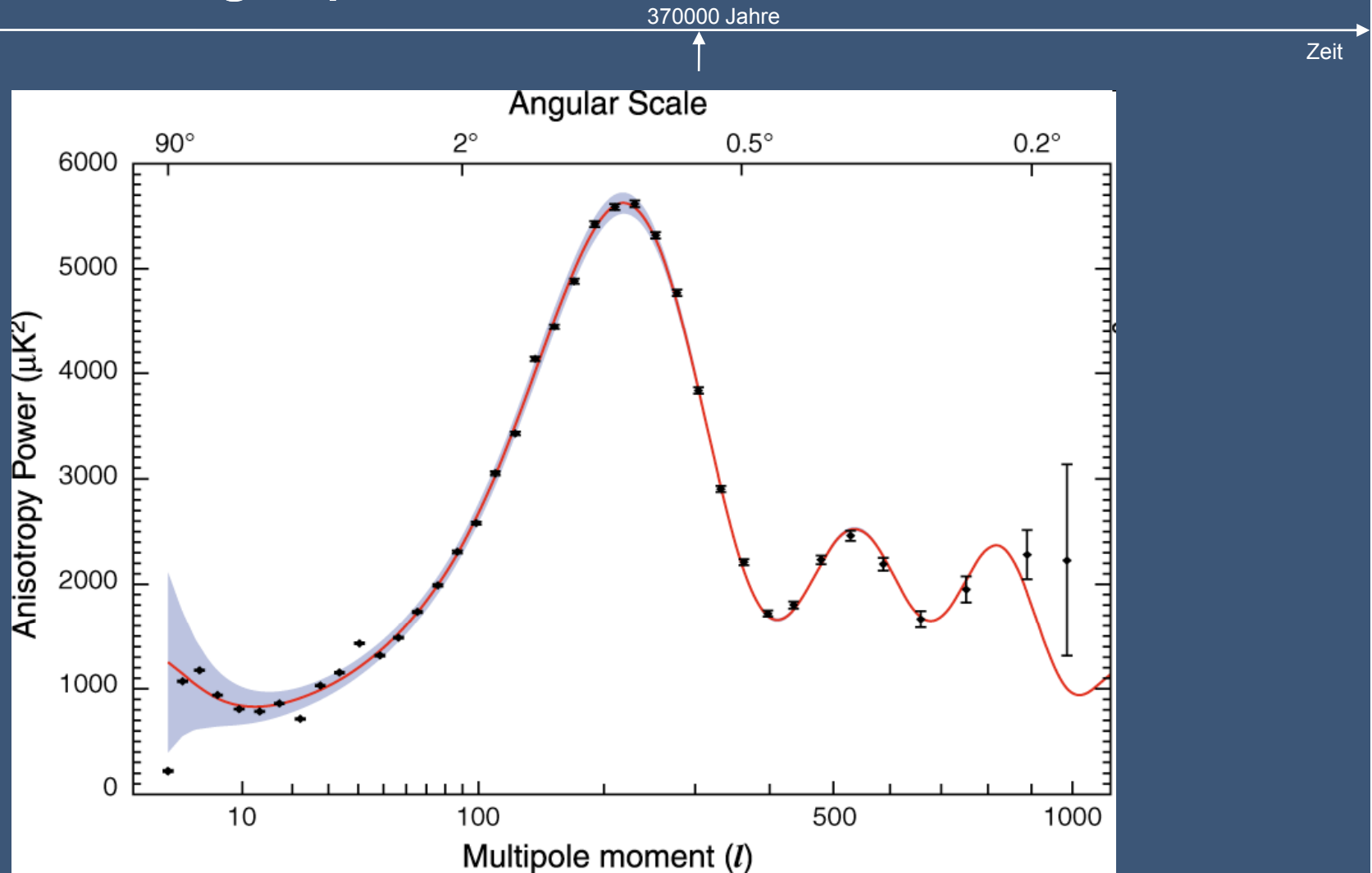
Multiploentwicklung

370000 Jahre

Zeit

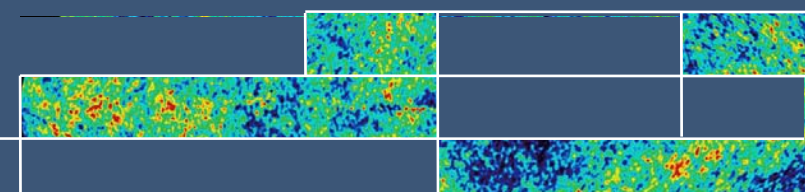
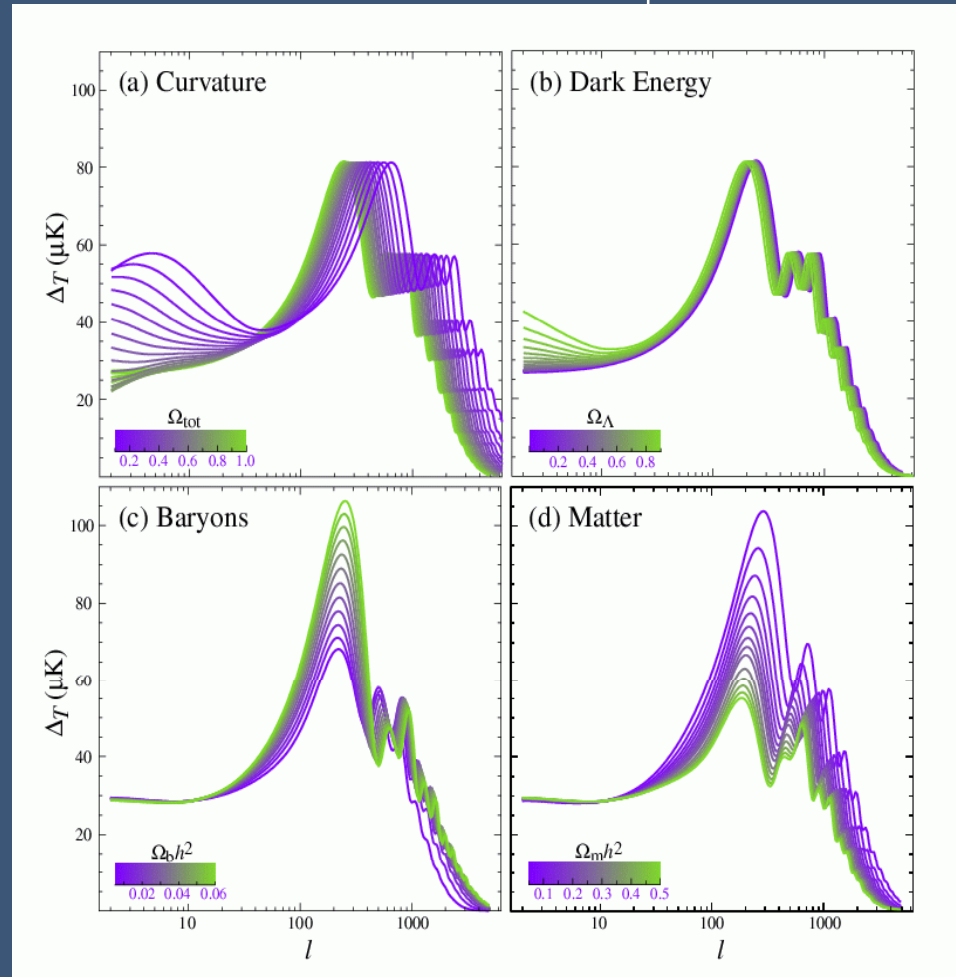


Das Leistungsspektrum



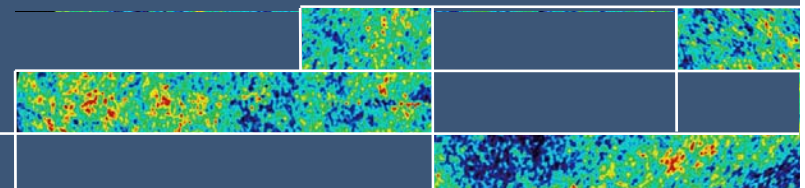
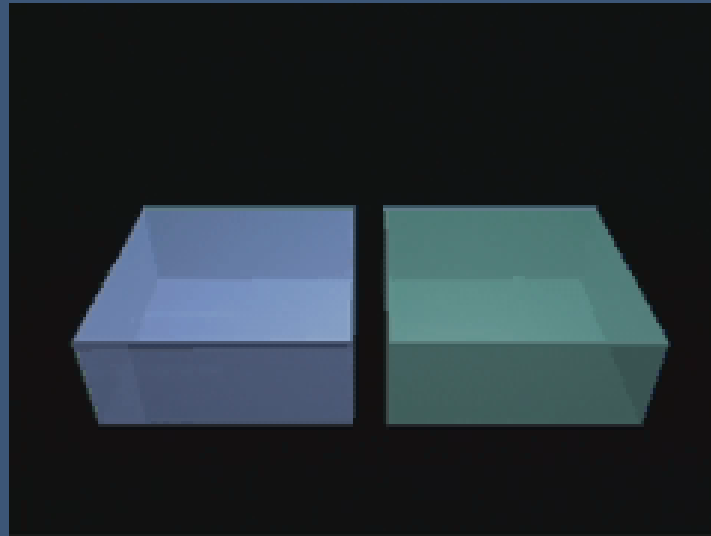
370000 Jahre

Zeit



370000 Jahre

Zeit



Kosmologische Parameter

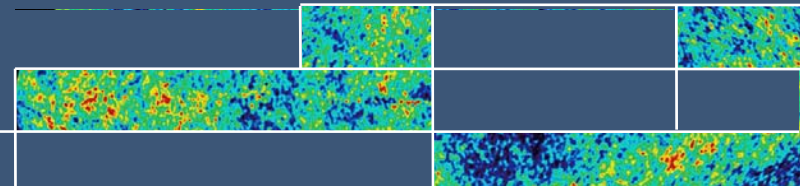
370000 Jahre



Zeit

Old Universe – *New* Numbers

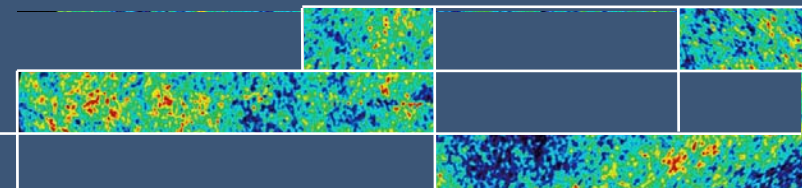
$\Omega_{\text{tot}} = 1.02^{+0.02}_{-0.02}$	$n_s = 0.93^{+0.03}_{-0.03}$
$w < -0.78$ (95% CL)	$dn_s/d \ln k = -0.031^{+0.016}_{-0.018}$
$\Omega_{\Lambda} = 0.73^{+0.04}_{-0.04}$	$r < 0.71$ (95% CL)
$\Omega_b h^2 = 0.0224^{+0.0009}_{-0.0009}$	$z_{\text{dec}} = 1089^{+1}_{-1}$
$\Omega_b = 0.044^{+0.004}_{-0.004}$	$\Delta z_{\text{dec}} = 195^{+2}_{-2}$
$n_b = 2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$ <small>$^{+0.1 \times 10^{-7}}_{-0.1 \times 10^{-7}}$</small>	$h = 0.71^{+0.04}_{-0.03}$
$\Omega_m h^2 = 0.135^{+0.008}_{-0.009}$	$t_0 = 13.7^{+0.2}_{-0.2}$ Gyr
$\Omega_m = 0.27^{+0.04}_{-0.04}$	$t_{\text{dec}} = 379^{+8}_{-7}$ kyr
$\Omega_{\nu} h^2 < 0.0076$ (95% CL)	$t_r = 180^{+220}_{-80}$ Myr (95% CL)
$m_{\nu} < 0.23$ eV (95% CL)	$\Delta t_{\text{dec}} = 118^{+3}_{-2}$ kyr
$T_{\text{cmb}} = 2.725^{+0.002}_{-0.002}$ K	$z_{\text{eq}} = 3233^{+194}_{-210}$
$n_{\gamma} = 410.4^{+0.9}_{-0.9}$ cm ⁻³	$\tau = 0.17^{+0.04}_{-0.04}$
$\eta = 6.1 \times 10^{-10}$ <small>$^{+0.3 \times 10^{-10}}_{-0.2 \times 10^{-10}}$</small>	$z_r = 20^{+10}_{-9}$ (95% CL)
$\Omega_b \Omega_m^{-1} = 0.17^{+0.01}_{-0.01}$	$\theta_A = 0.598^{+0.002}_{-0.002}$
$\sigma_8 = 0.84^{+0.04}_{-0.04}$ Mpc	$d_A = 14.0^{+0.2}_{-0.3}$ Gpc
$\sigma_8 \Omega_m^{0.5} = 0.44^{+0.04}_{-0.05}$	$l_A = 301^{+1}_{-1}$
$A = 0.833^{+0.086}_{-0.083}$	$r_s = 147^{+2}_{-2}$ Mpc



Dunkle Materie

Heute
↑
Zeit

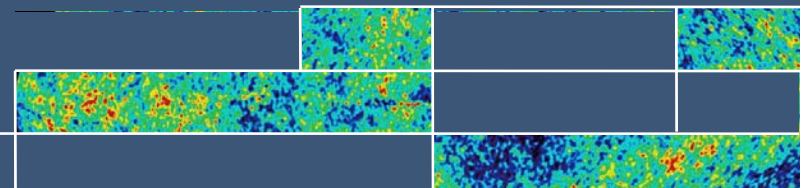
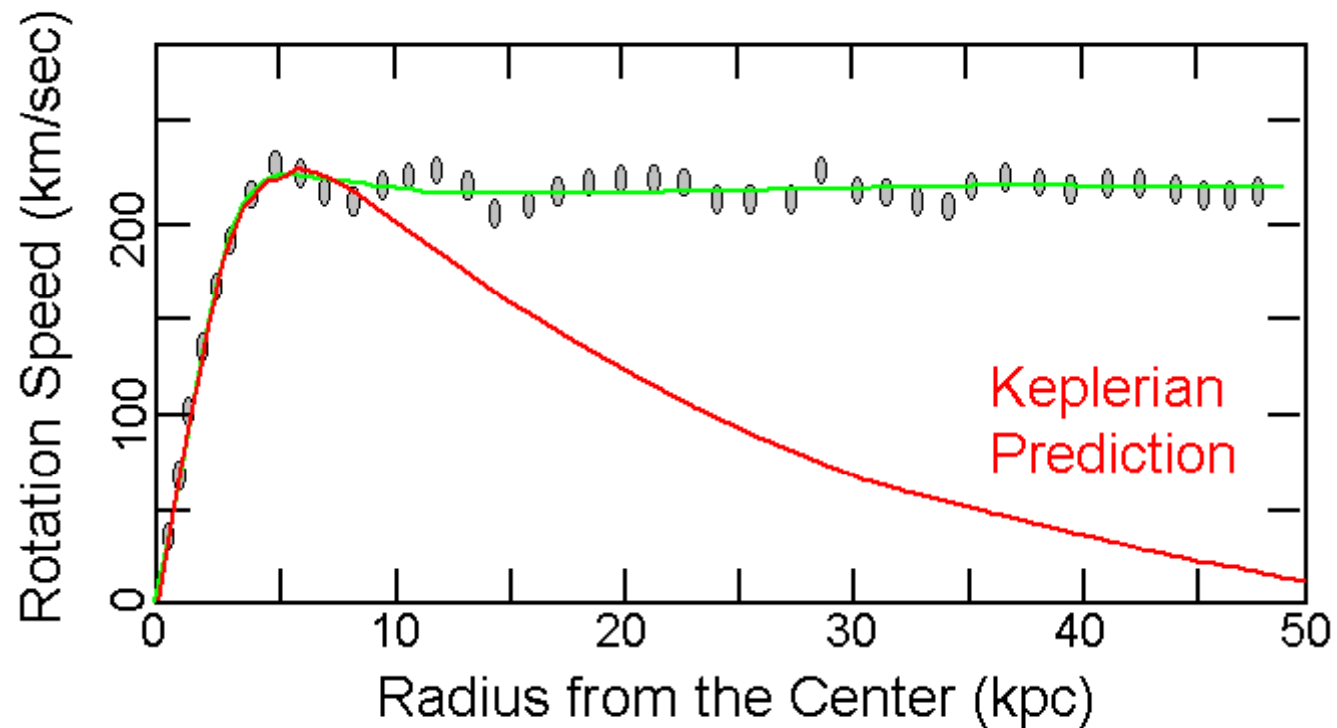
- Rotationskurven von Galaxien
- Elliptische Galaxien
- Gravitationslinsen
- Mikrowellen-Hintergrund



Rotationskurven

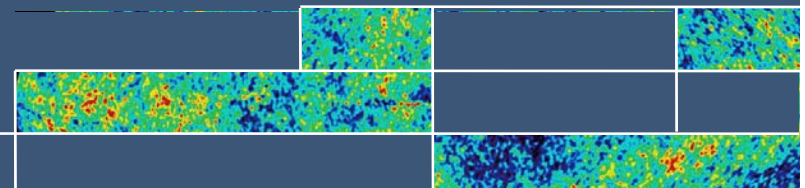
Heute
↑
Zeit

Observed vs. Predicted Keplerian



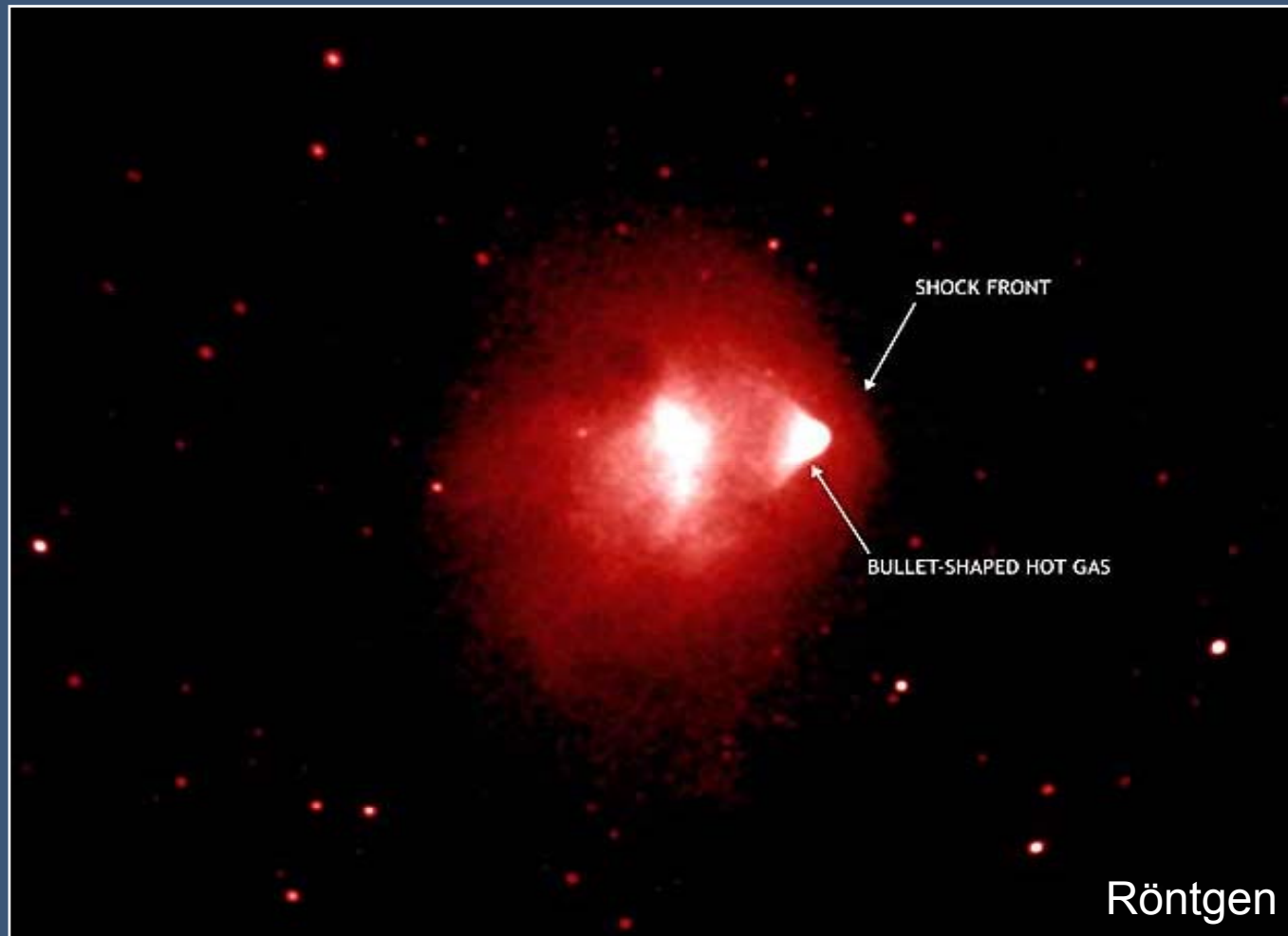
Galaxien-Cluster 1E 0657-56

Zeit →



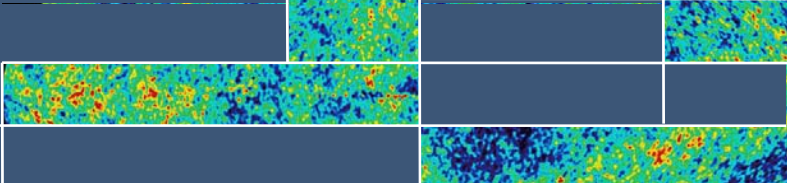
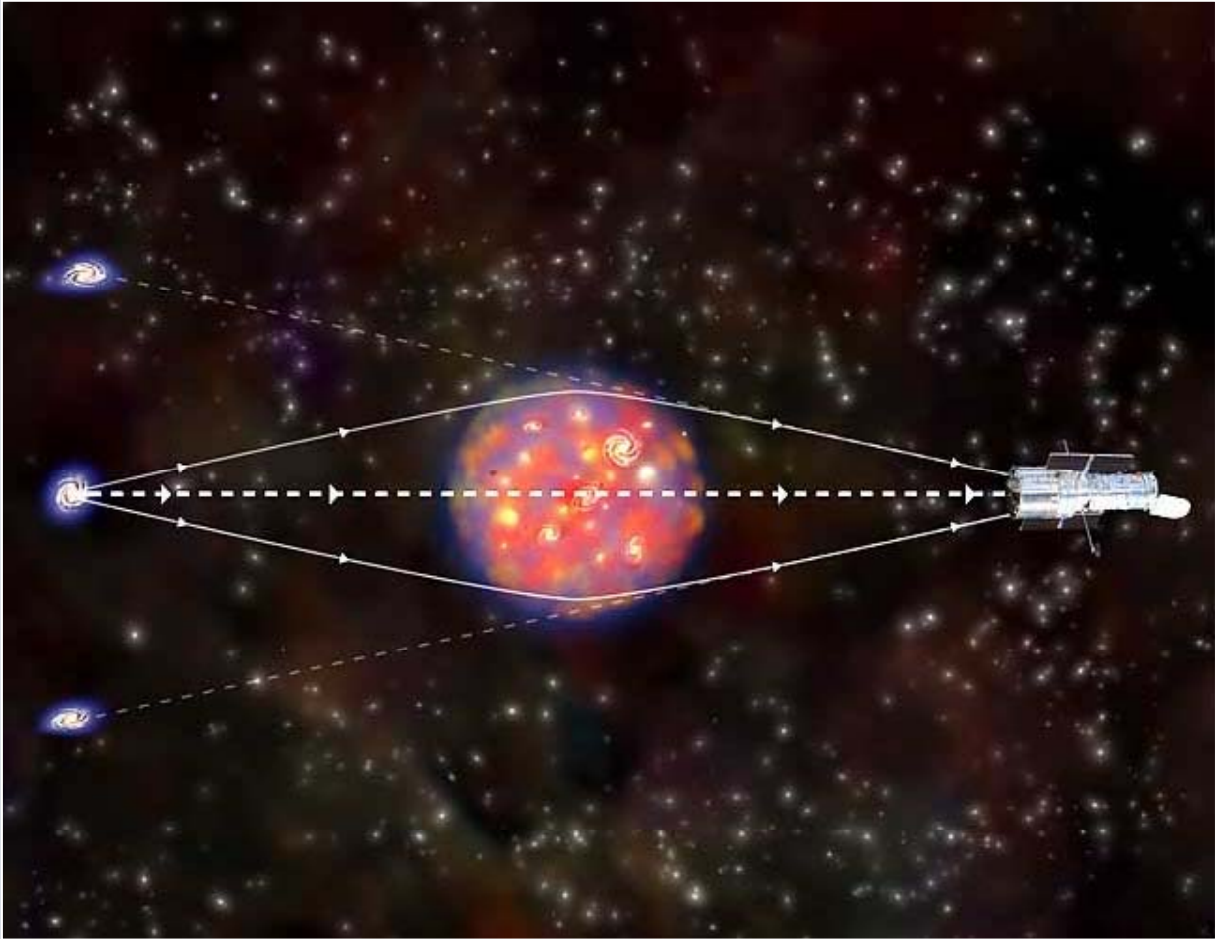
Galaxien-Cluster 1E 0657-56

Zeit →

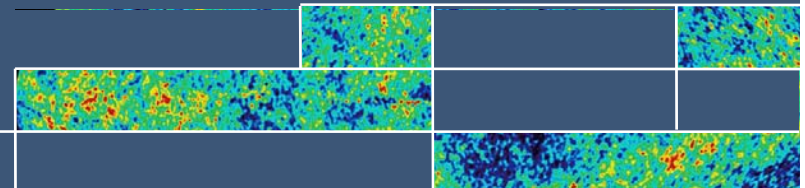


Gravitationslinsen

Zeit →

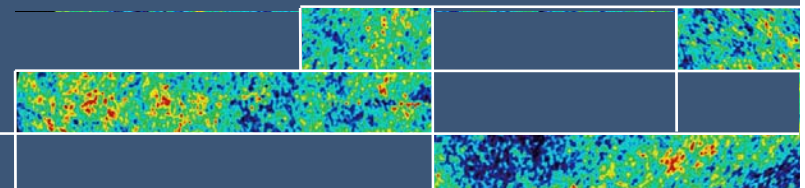
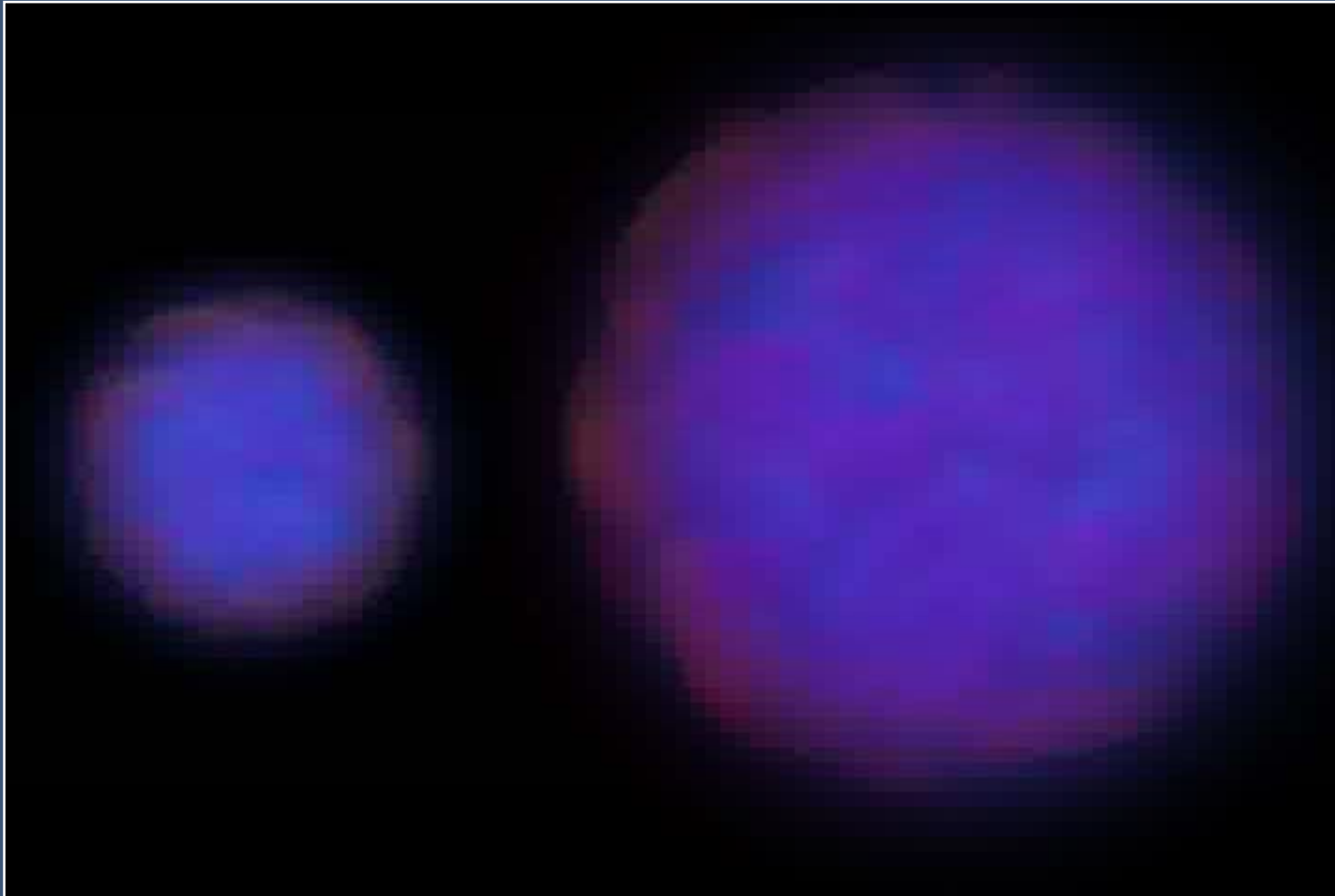


Zeit



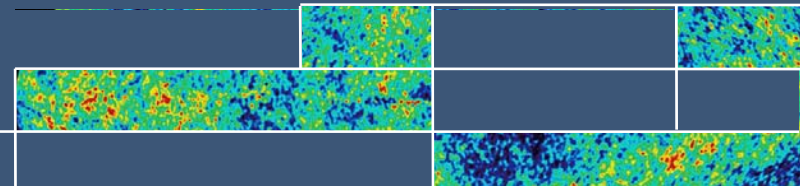
Was ist passiert?

Zeit →



Galaxien Cluster CL0024 17

Heute
↑
Zeit →



Kosmologische Parameter

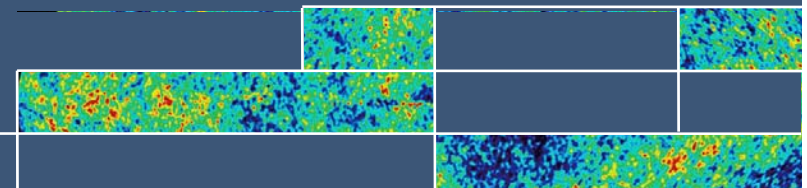
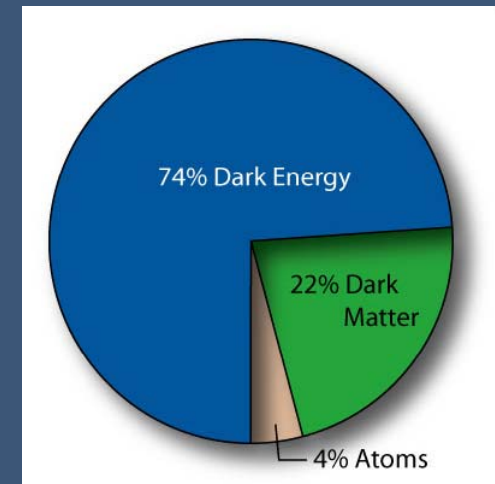
370000 Jahre



Zeit

- Gesamtenergiedichte 1.003 ± 0.015
- Materiedichte 0.24 ± 0.04
- Baryondichte 0.042 ± 0.004
- Vakuumenergiedichte 0.76 ± 0.05
- Neutrindichte < 0.014
- Alter des Universums 13.7 ± 0.2 Gyr
- Hubble-Parameter 0.73 ± 0.03

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



370000 Jahre

Zeit

100%

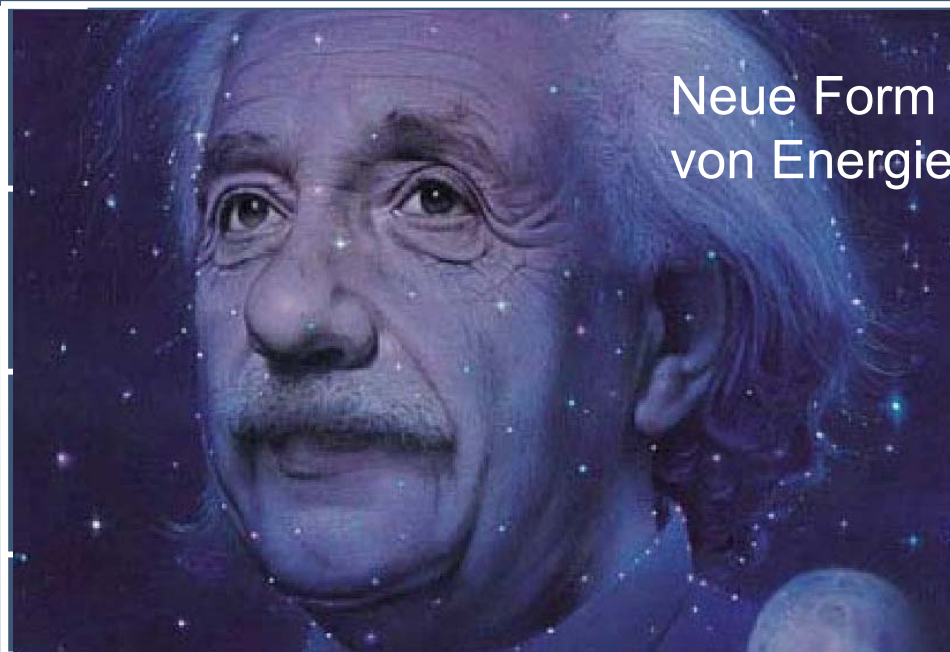
80%

60%

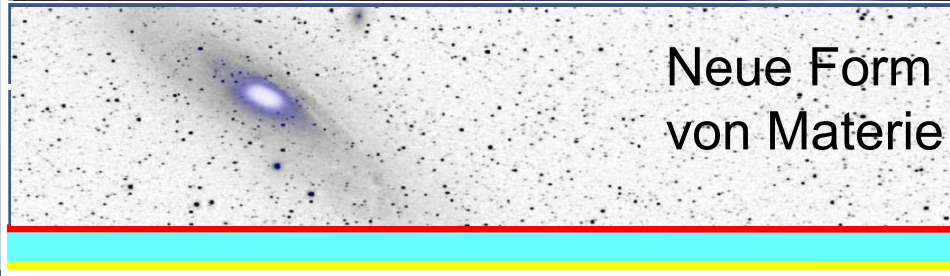
40%

20%

0%



Neue Form
von Energie

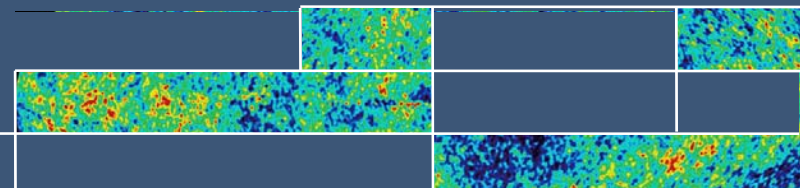


Neue Form
von Materie

Neutrinos

Materie

Sterne

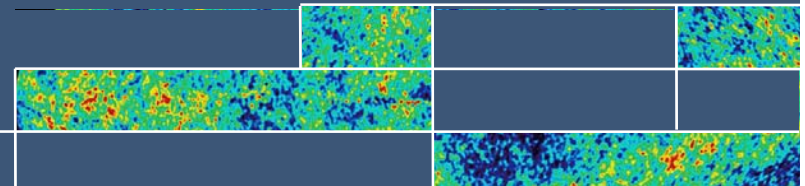


Zusammenfassung

Heute
↑
Zeit

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

- 97% der Energiedichte des Universums sind unbekannt!



Zeit

