

Vom Urknall



bis heute

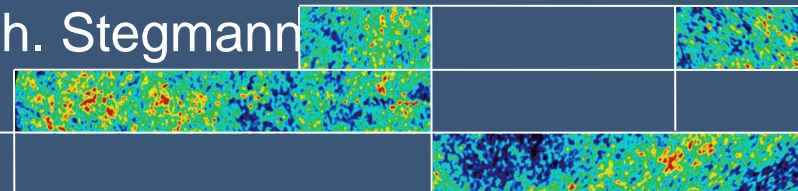
Zeit



Kosmologie 2012

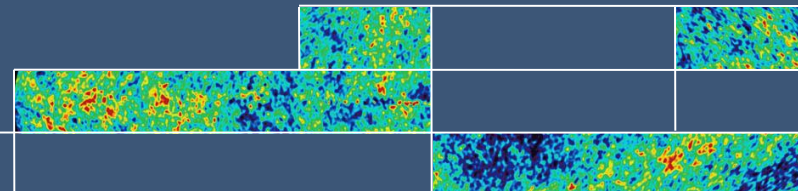
Alexander Lenz
CERN PH-TH

Folien von Urs Achim Wiedemann und Ch. Stegmann



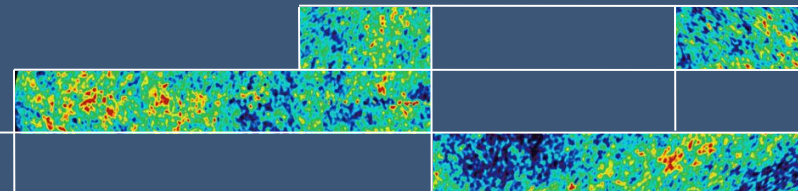
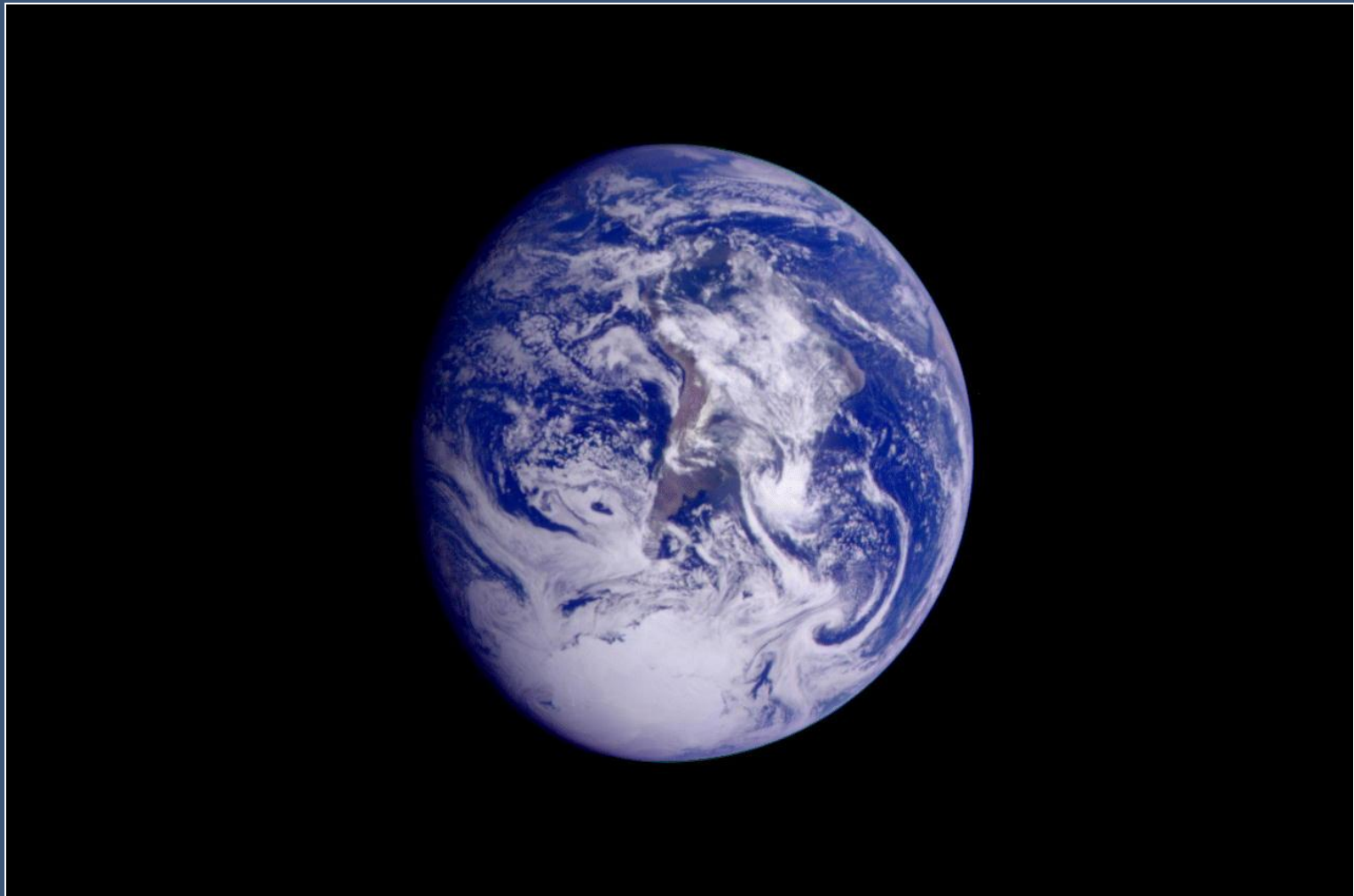
Heute
↑
Zeit

Dimensionen unseres Universums



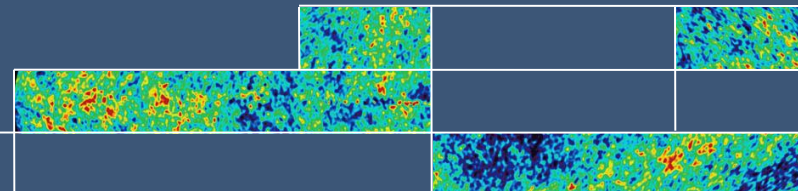
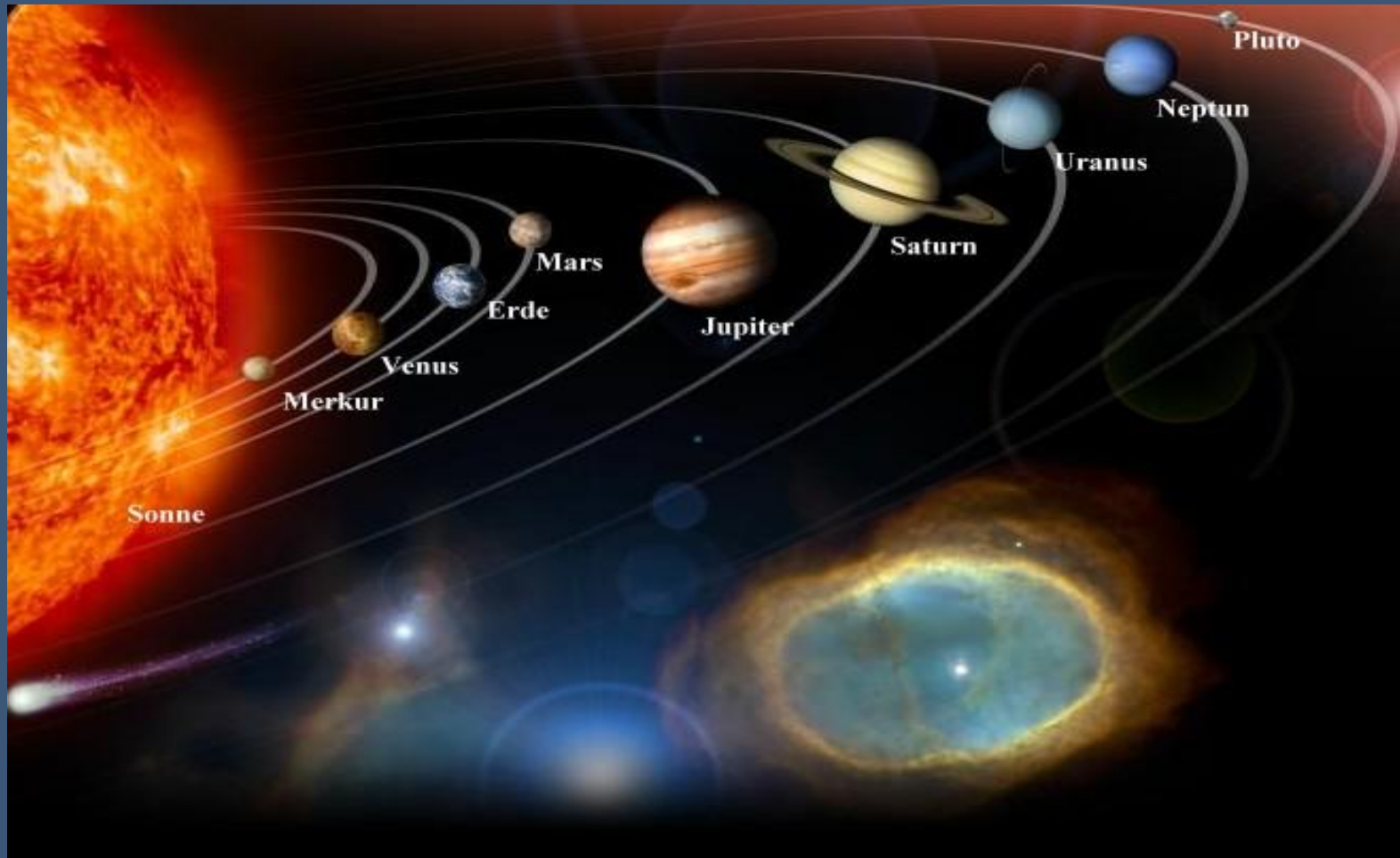
Die Erde ... $1.3 \times 10^7 = 13'000'000$ m Durchmesser

Heute
↑
Zeit →



Sonnensystem... $10^{13} = 10'000'000'000'000$ m

Heute
↑
Zeit →



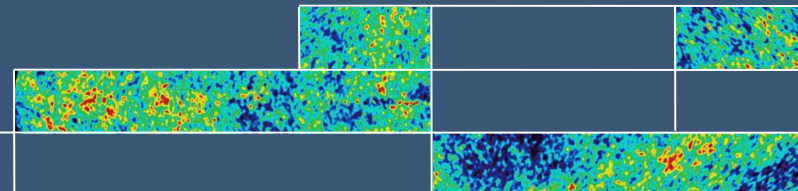
Unsere Milchstrasse... 10^{21} m

Heute
↑
Zeit →

10^{21} m = 100'000 Lichtjahre



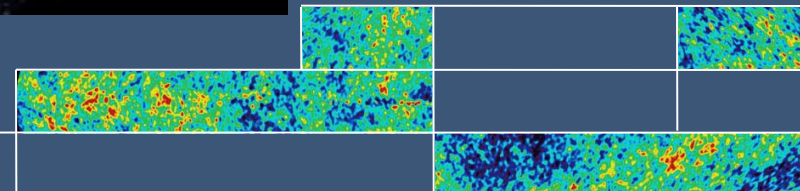
100 – 400 Milliarden Sterne



Andromedanebel: unsere Nachbarmilchstrasse

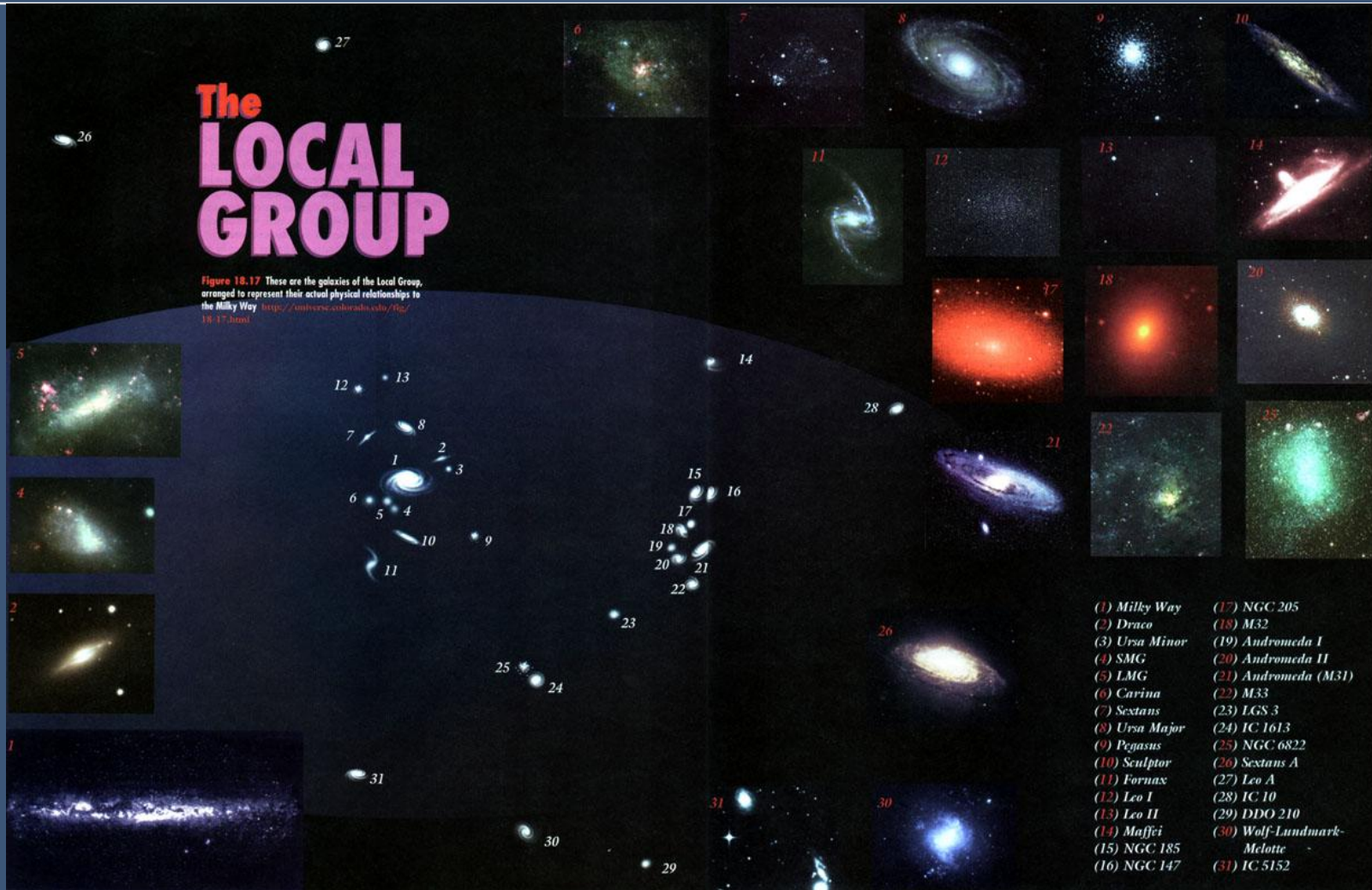
Heute
↑
Zeit →

Entfernung $2.5 \cdot 10^{22}$ m = 2.5 Millionen Lichtjahre



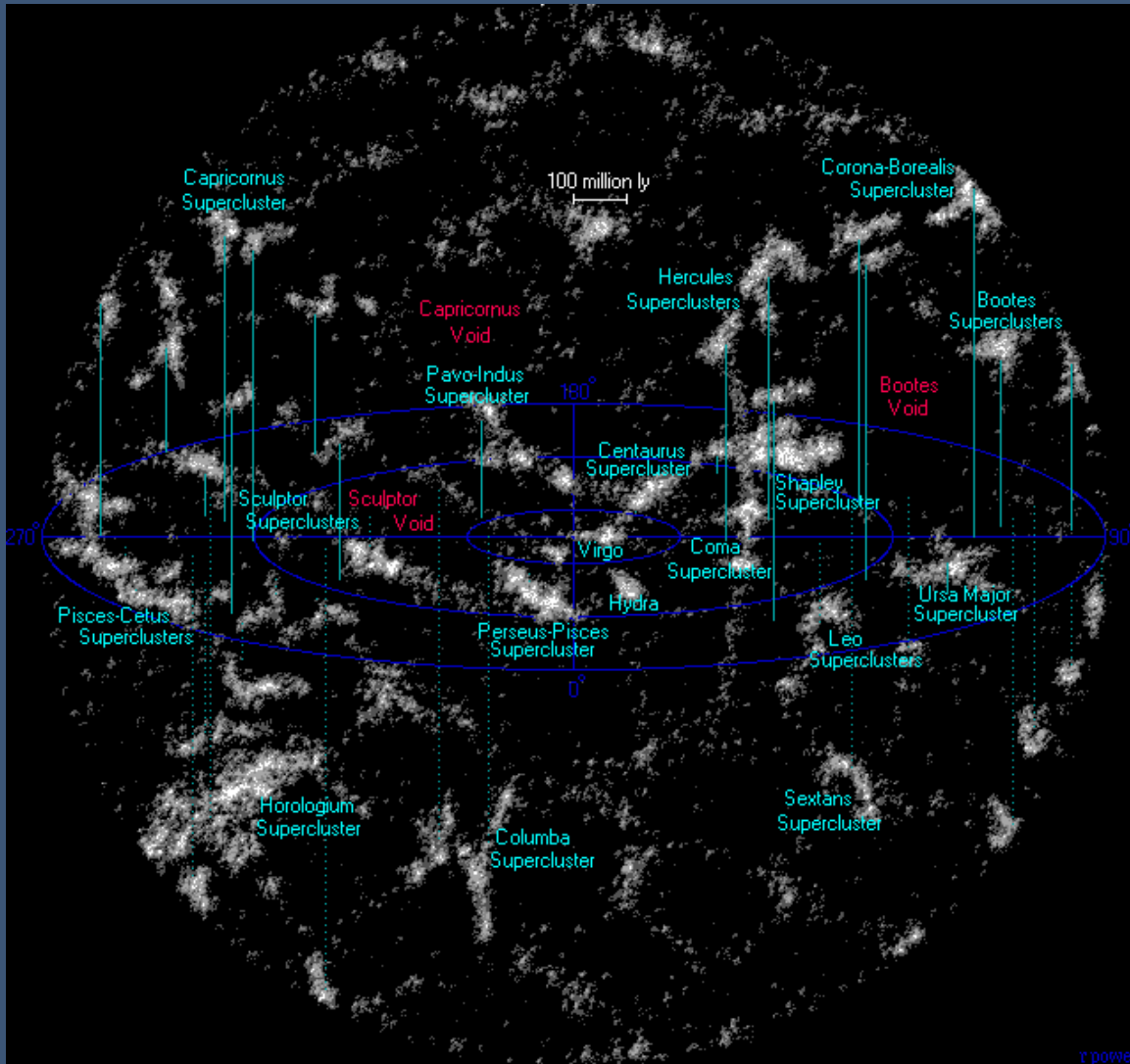
Weitere Nachbargalaxien

Heute
↑
Zeit



Die uns benachbarten Supercluster

Heute
↑
Zeit

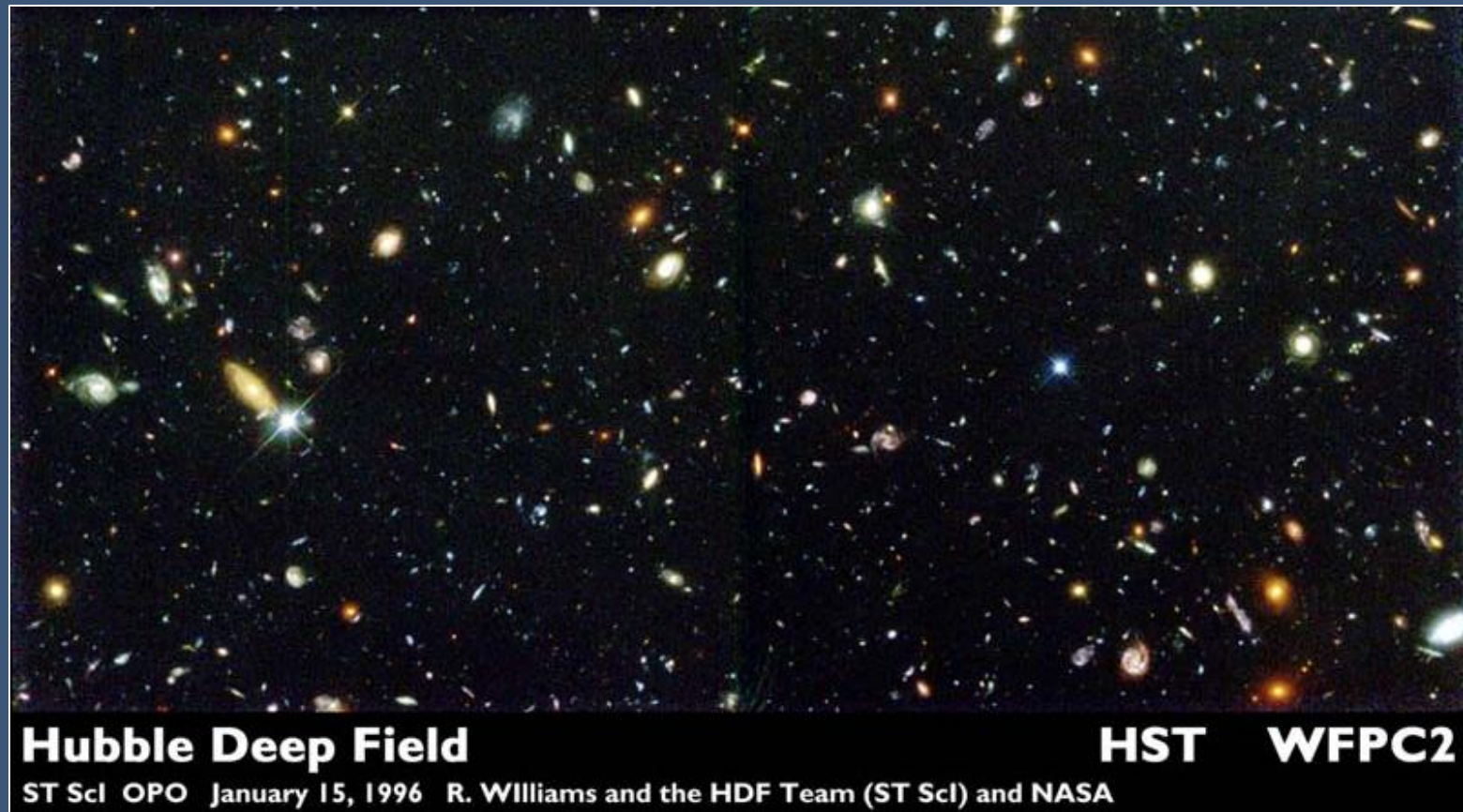


lokaler Supercluster =
lokale Gruppe
+ Virgo Cluster

1 Supercluster enthält
~ 1000 Galaxien

Ausdehnung eines
Superclusters ~ 100
Millionen Lichtjahre

Es gibt ~10 Millionen Supercluster im sichtbaren Universum.



Heute
↑
Zeit →

Wir sind die erste Generation, die bis an den Rand des sichtbaren Universums sehen kann.

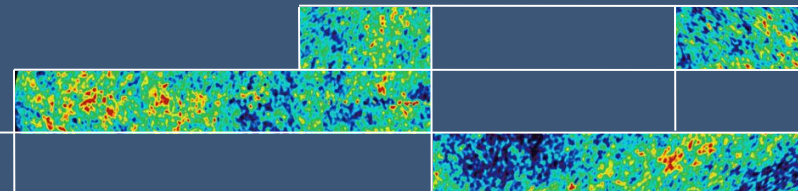
Was sehen wir?

Heute
↑
Zeit



Heute
↑
Zeit

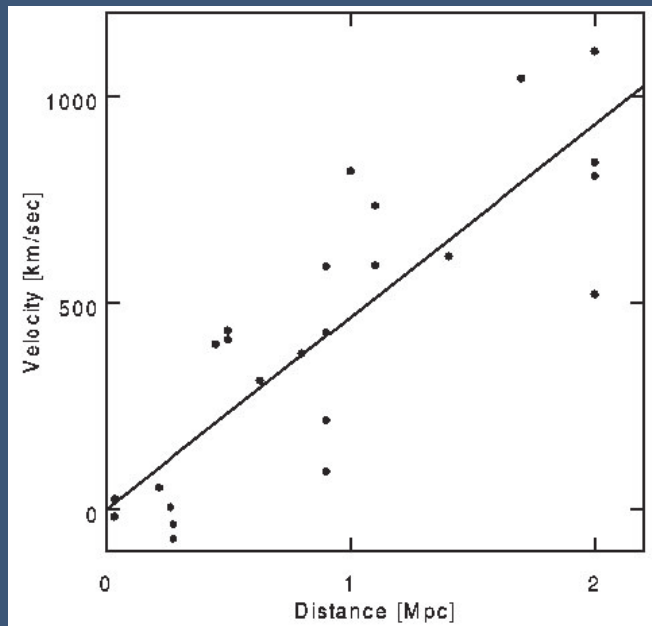
Dynamik des Universums



Edwin Hubble's Entdeckung (1929)

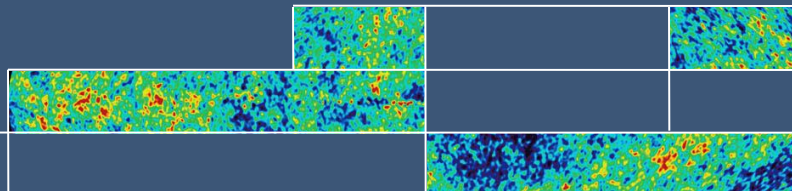
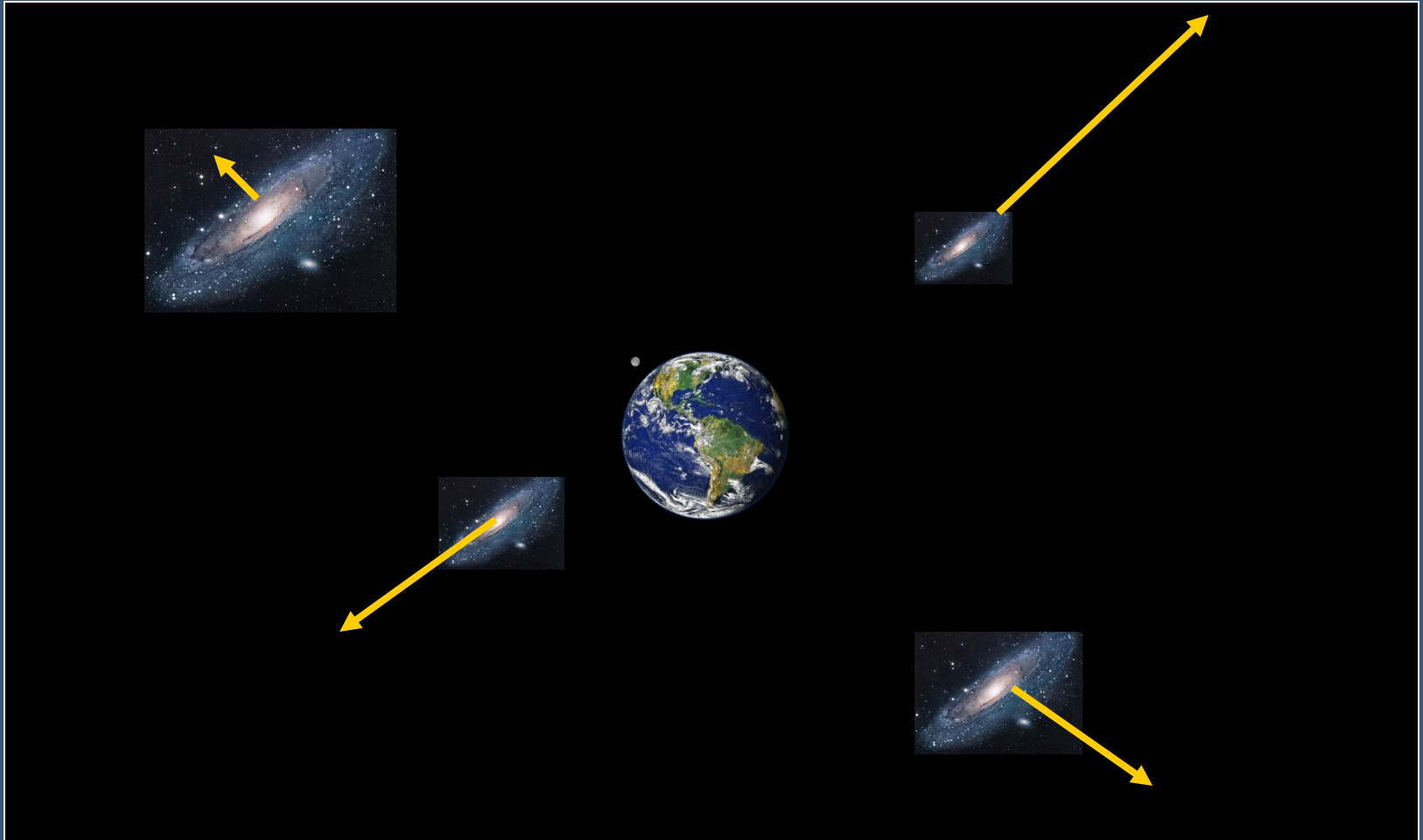
Heute
↑
Zeit

- Die Galaxien bewegen sich von uns weg.
- je schneller, desto entfernter



Galaxienflucht

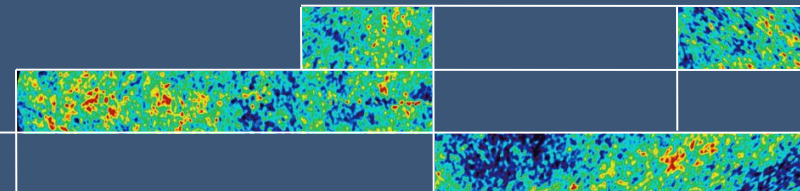
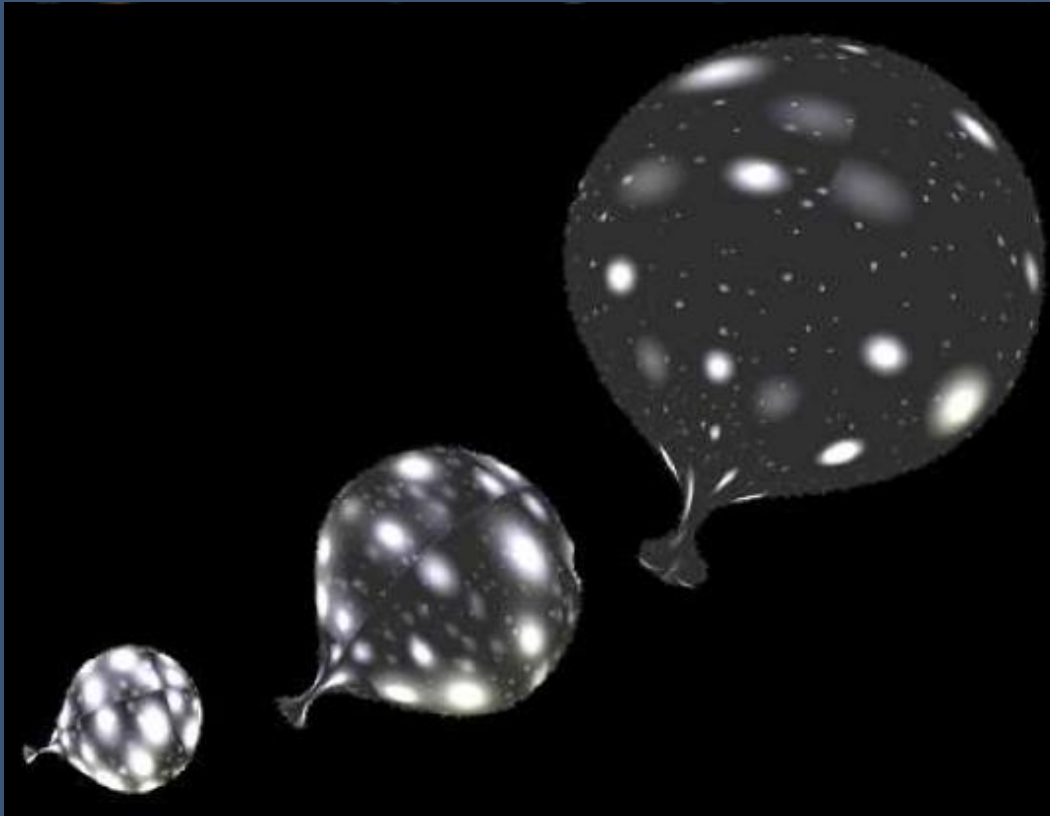
Heute
↑
Zeit →



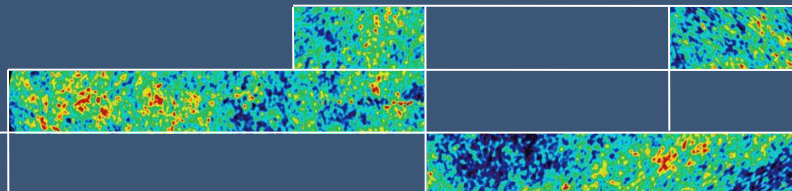
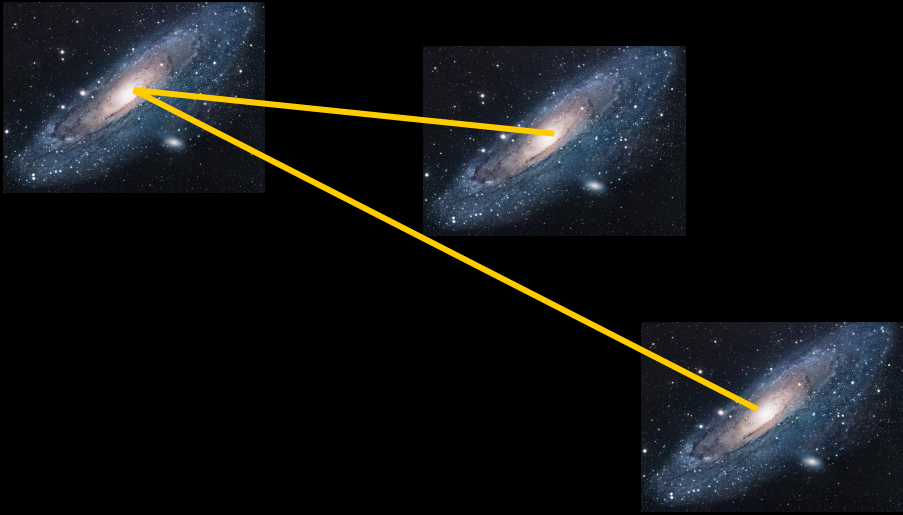
Verstehen wir das?

Heute
↑
Zeit

- Sind wir das Zentrum des Universums? Nein!
- Das Weltall dehnt sich aus.
Der Raum zwischen den Galaxien wird größer.
Luftballon-Analogie für Ausdehnung des 2-dimensionalen Raumes

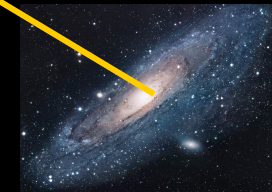
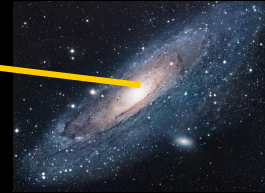
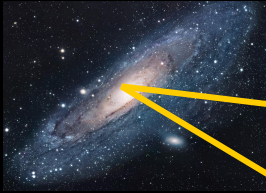


Heute
↑
Zeit

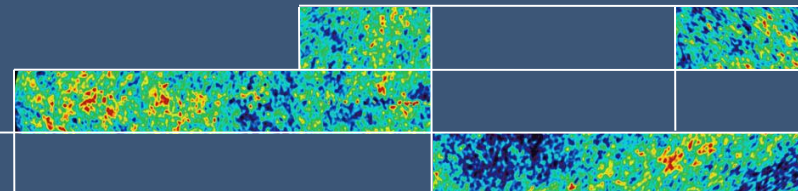


Heute
↑
Zeit →

Einige Zeit später



Doppelt so weite Galaxien entfernen
sich doppelt so schnell!

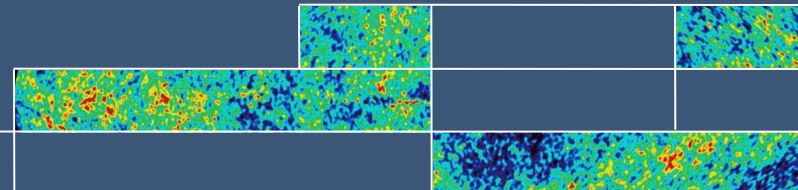


Woher wissen wir das? Was wird gemessen?

Heute
↑
Zeit →

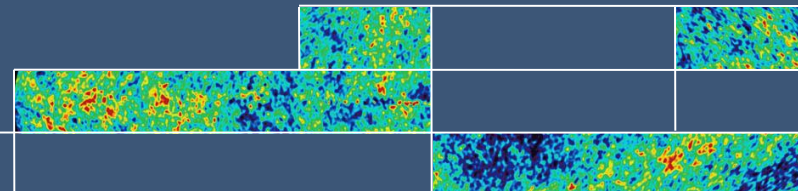
- Geschwindigkeitsmessung
 - Tacho?

- Entfernungsmessung
 - Lineal?



Heute
↑
Zeit

Geschwindigkeitsmessung über Rotverschiebung



Dopplereffekt

Heute
↑
Zeit →

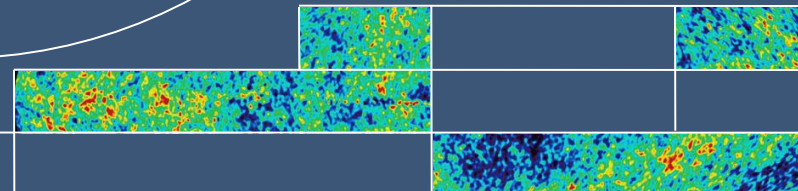
niedrige
Frequenz

Rotverschiebung



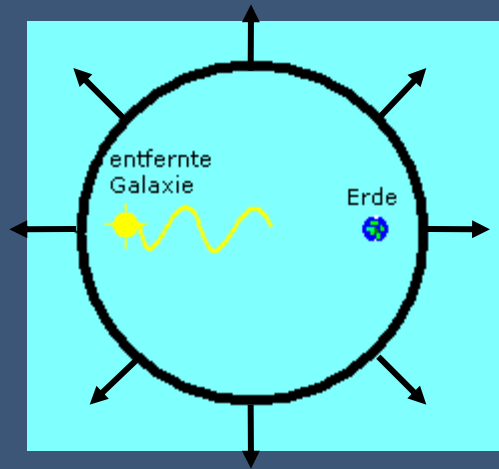
hohe
Frequenz

Blauverschiebung

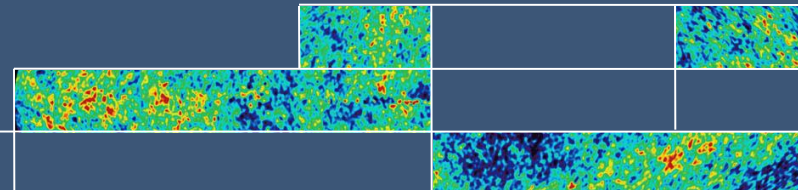
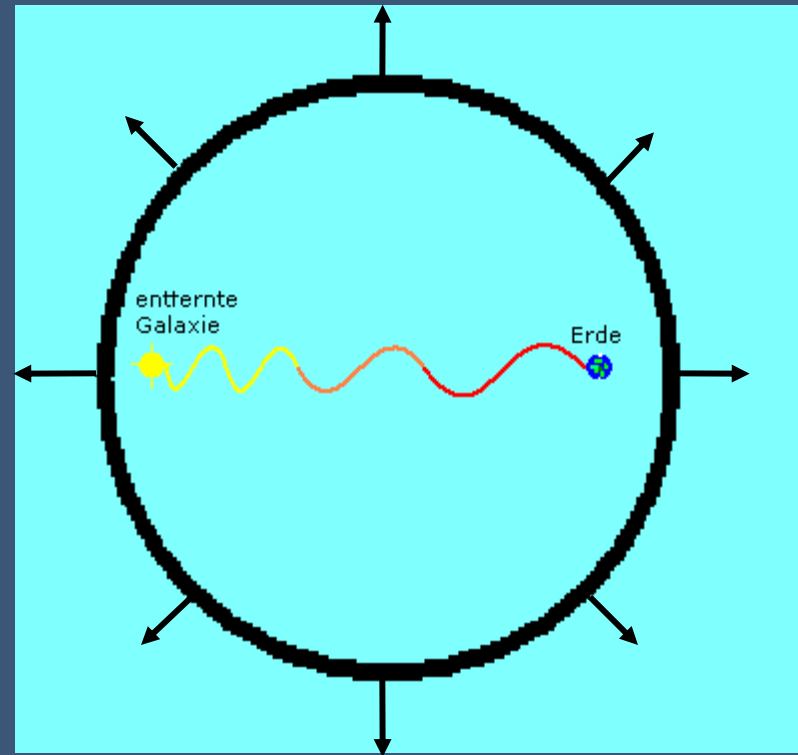


Kosmologische Rotverschiebung

Heute
↑
Zeit

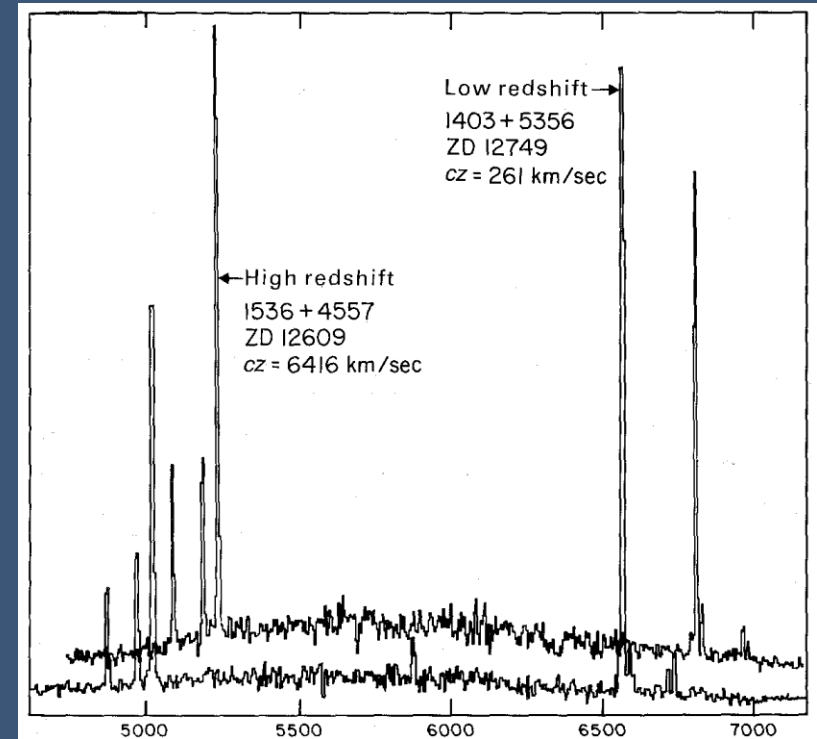
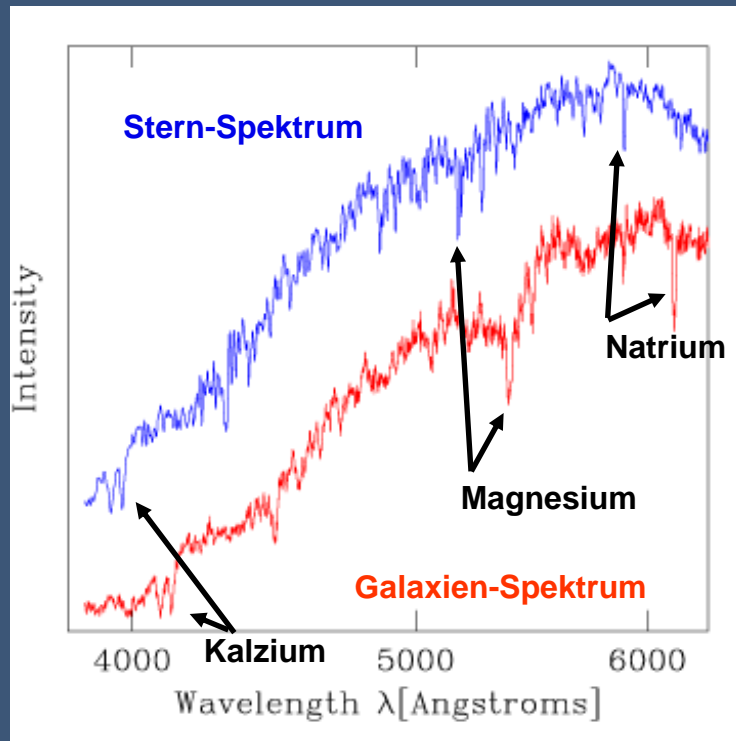


Weltall
dehnt
sich aus



Galaxien-Spektroskopie als Tempomessung

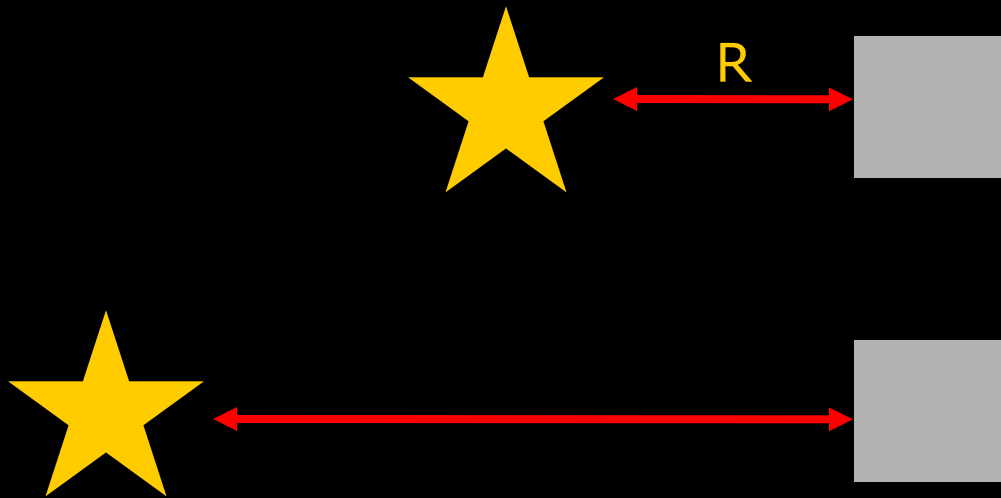
Heute
↑
Zeit →



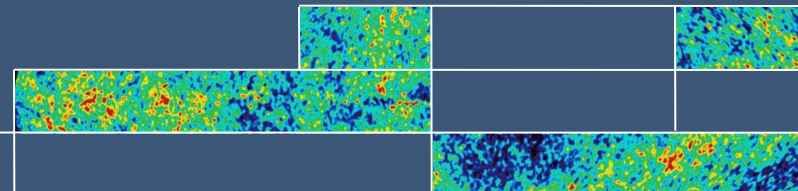
$$v_{\text{Galaxy}} \sim 12000 \text{ km/s}$$

Entfernungsmessung

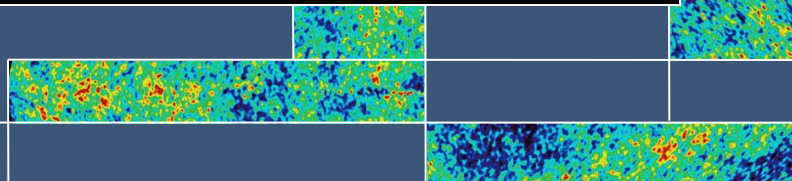
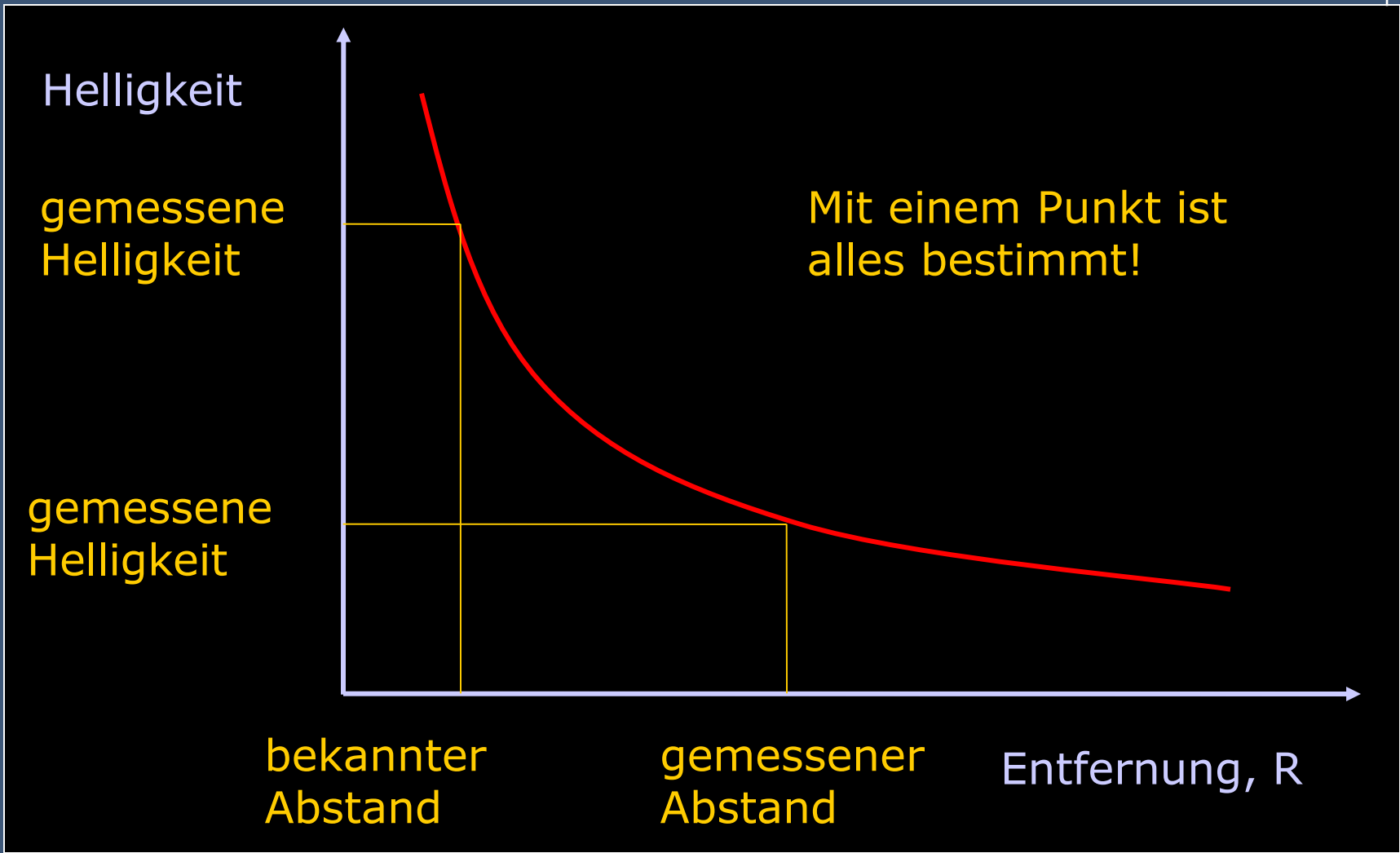
Heute
↑
Zeit →



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

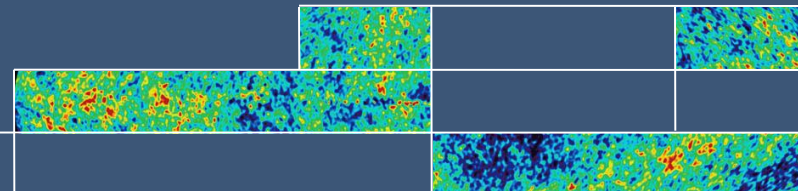


Heute
Zeit



Heute
↑
Zeit

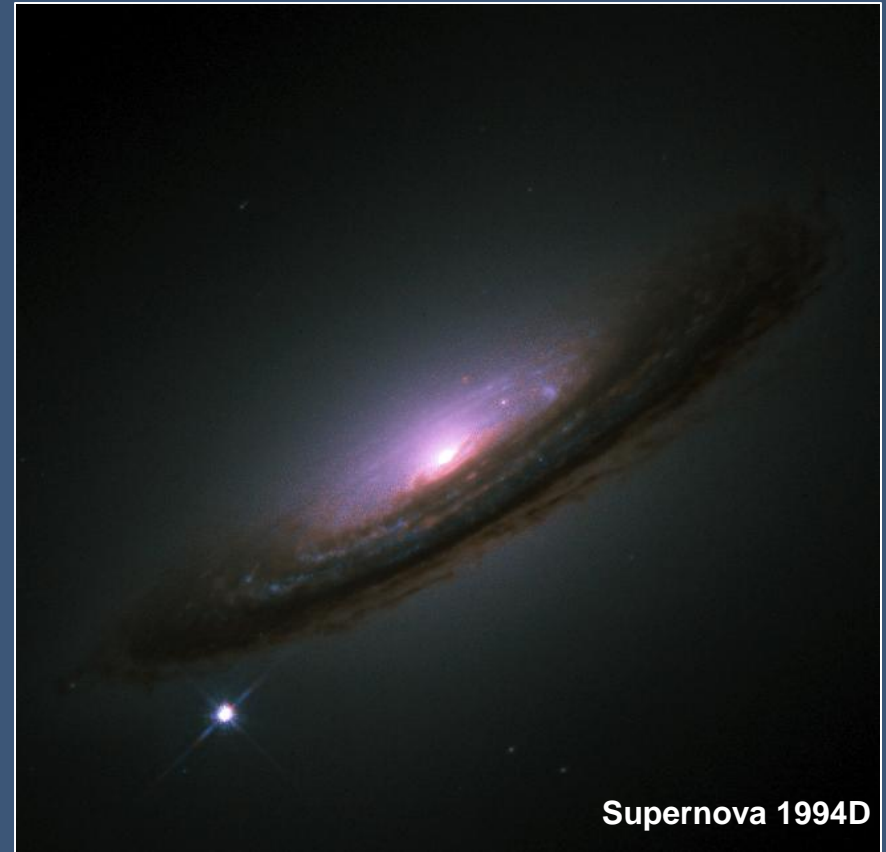
Wir brauchen Standardlampen!



Sternenexplosionen Supernova Typ Ia

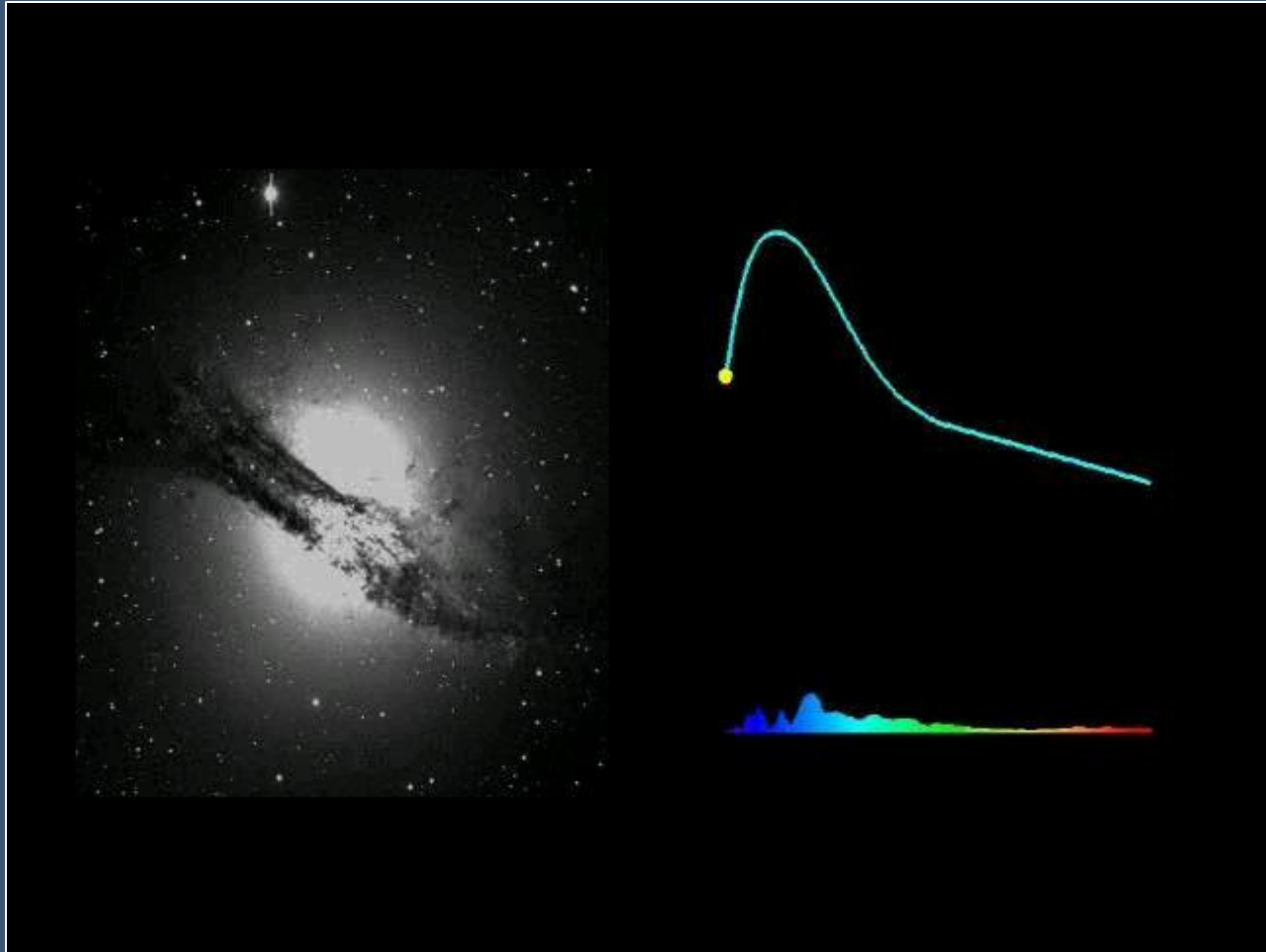
Heute
↑
Zeit →

- Weißer Zwerg überschreitet Chandrasekhar-Grenze (ca. 1,44fache Sonnenmasse) und explodiert
- Hell wie eine ganze Galaxie, thermonukleare Bombe von der Größe der Erde!
- Leuchtet auf und verschwindet nach einigen Wochen



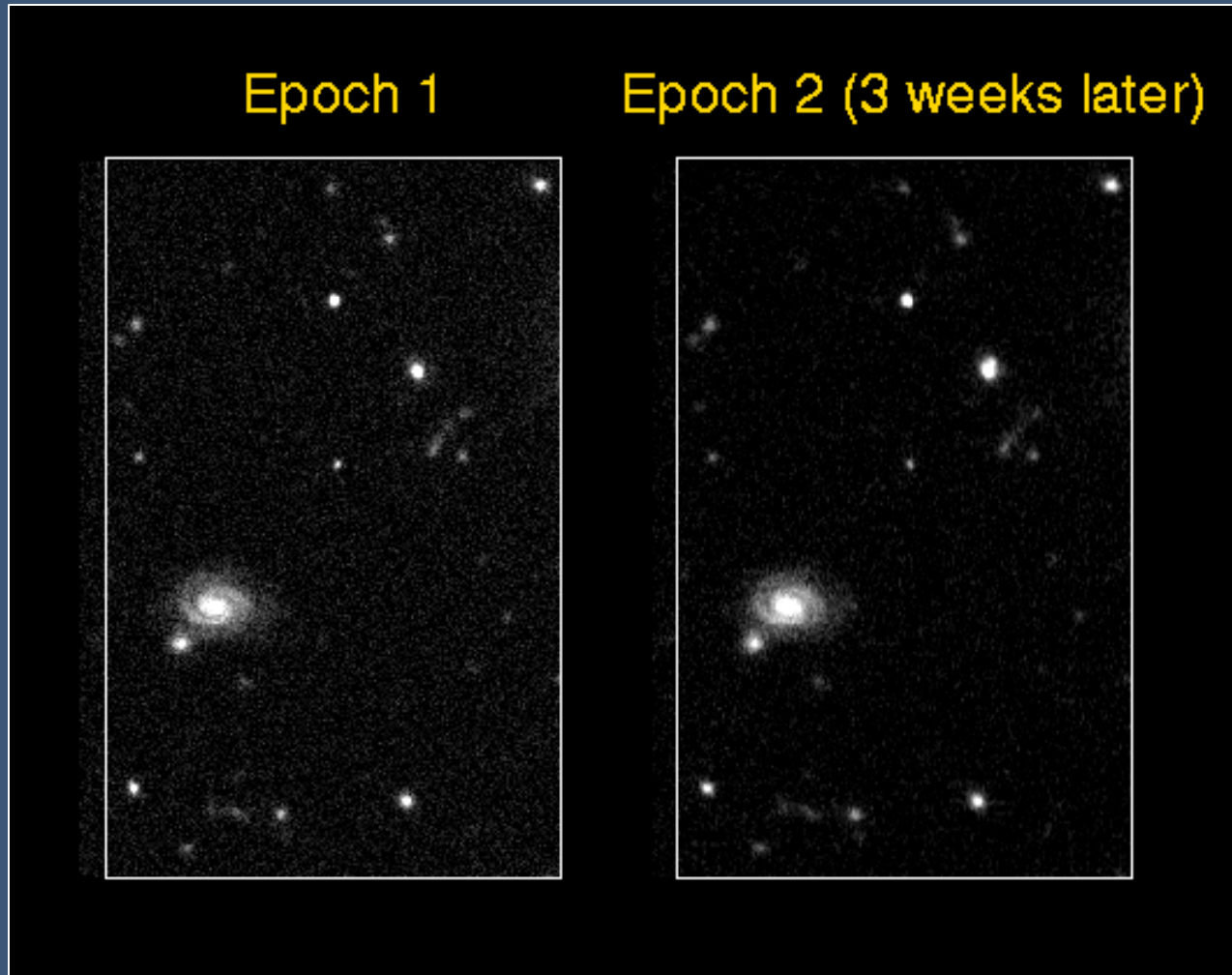
Eine Supernova

Heute
↑
Zeit →



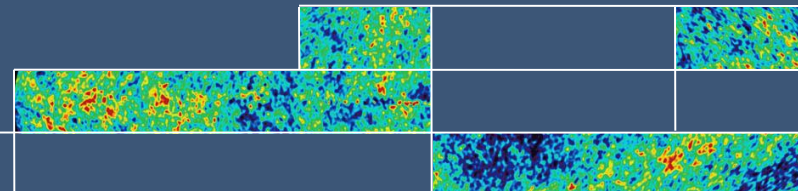
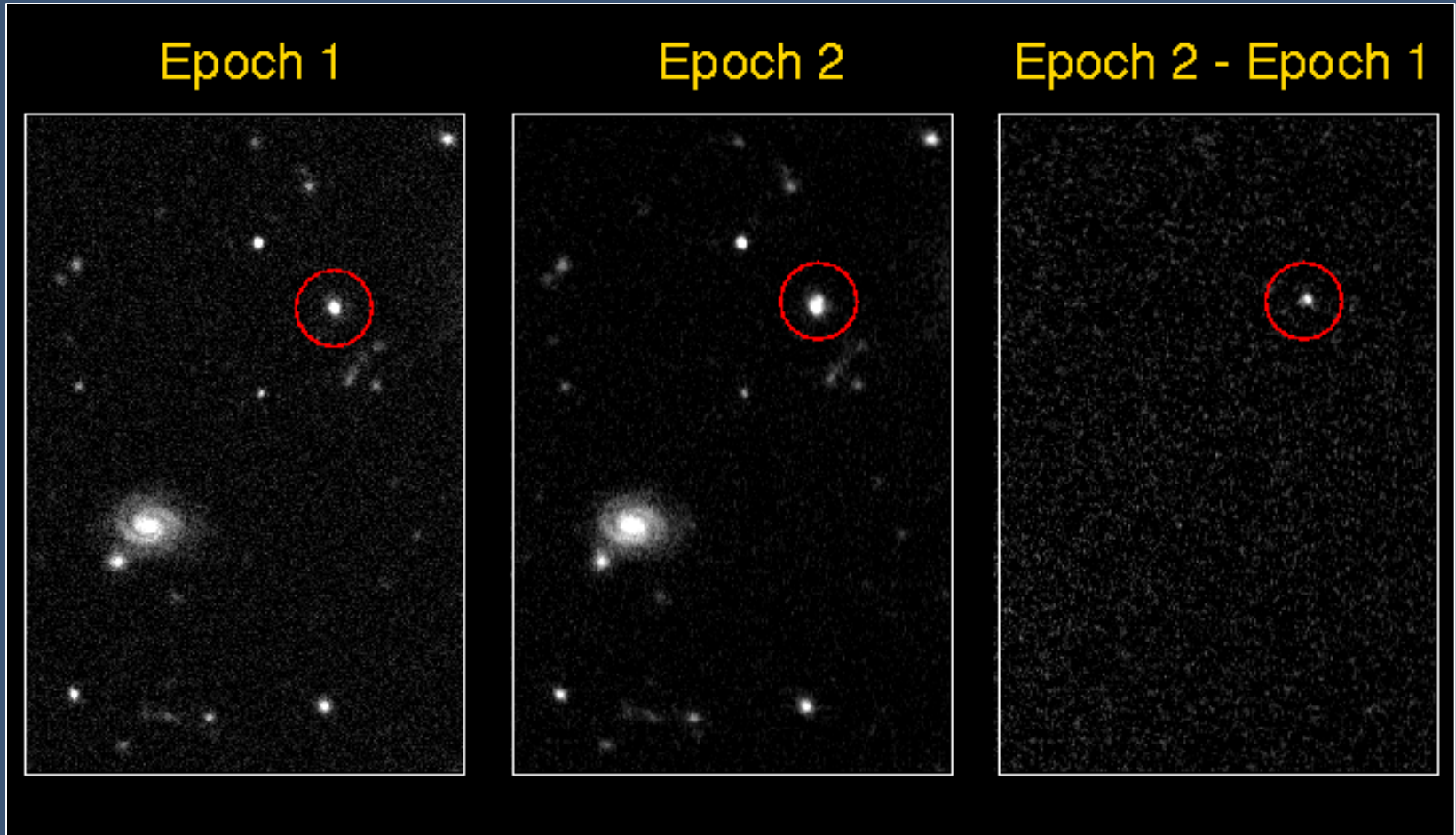
Wo ist die Supernova?

Heute
↑
Zeit →



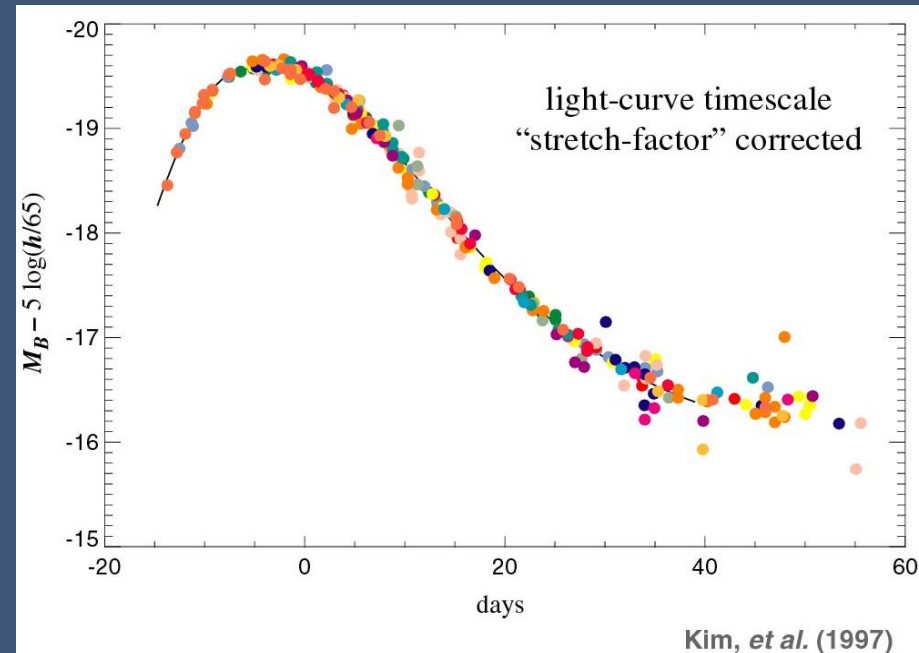
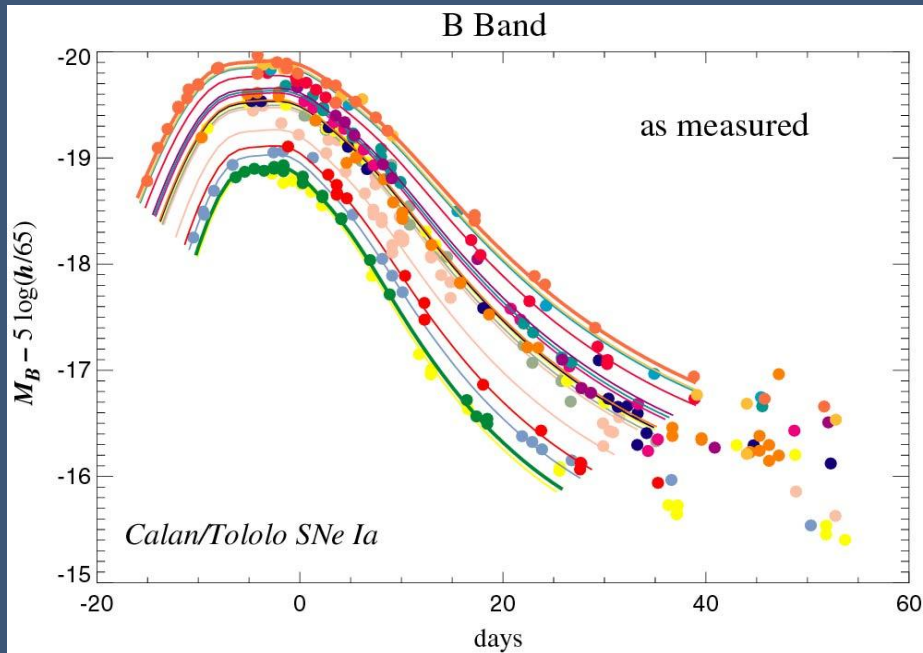
Hier!

Heute
↑
Zeit →



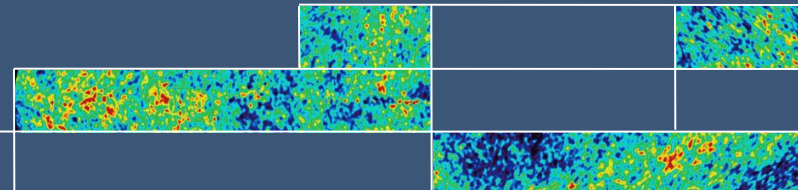
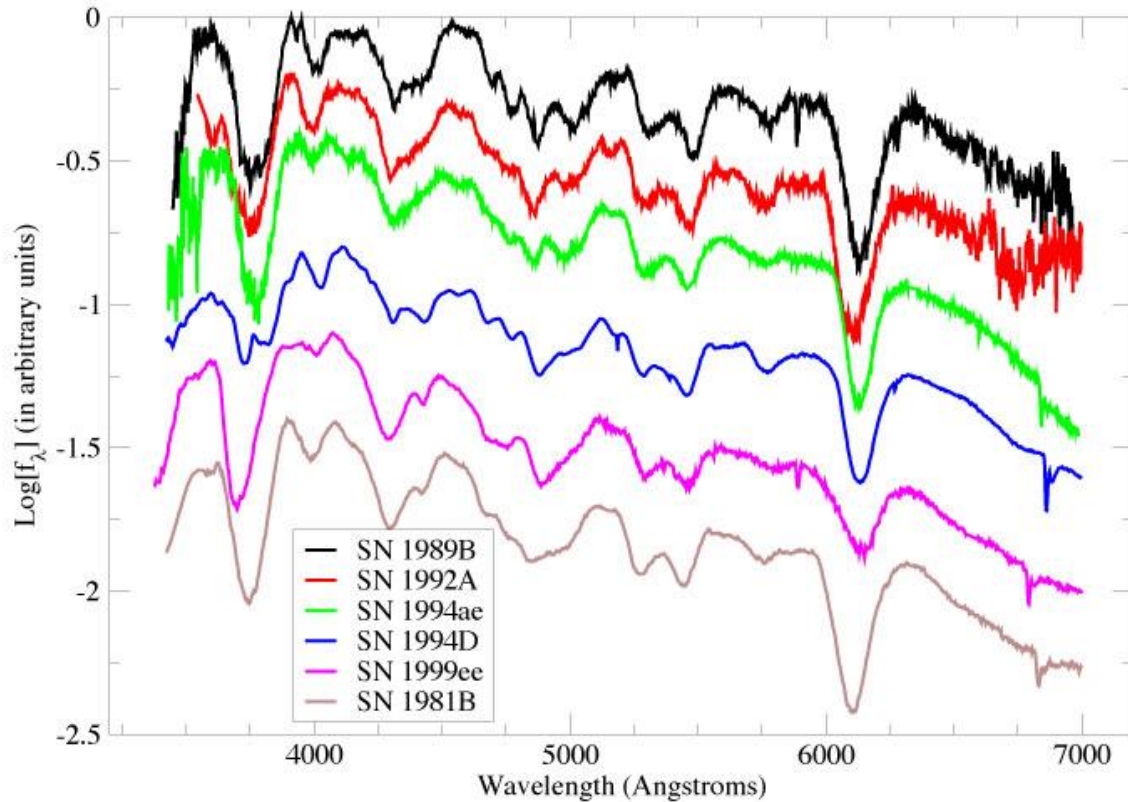
„Standardkerzen“

Heute
↑
Zeit →



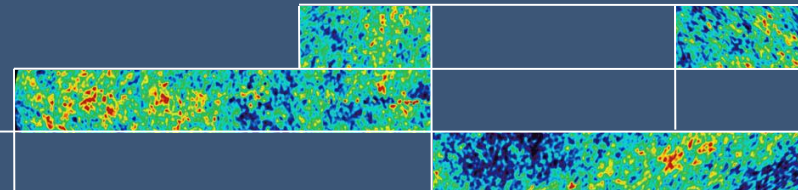
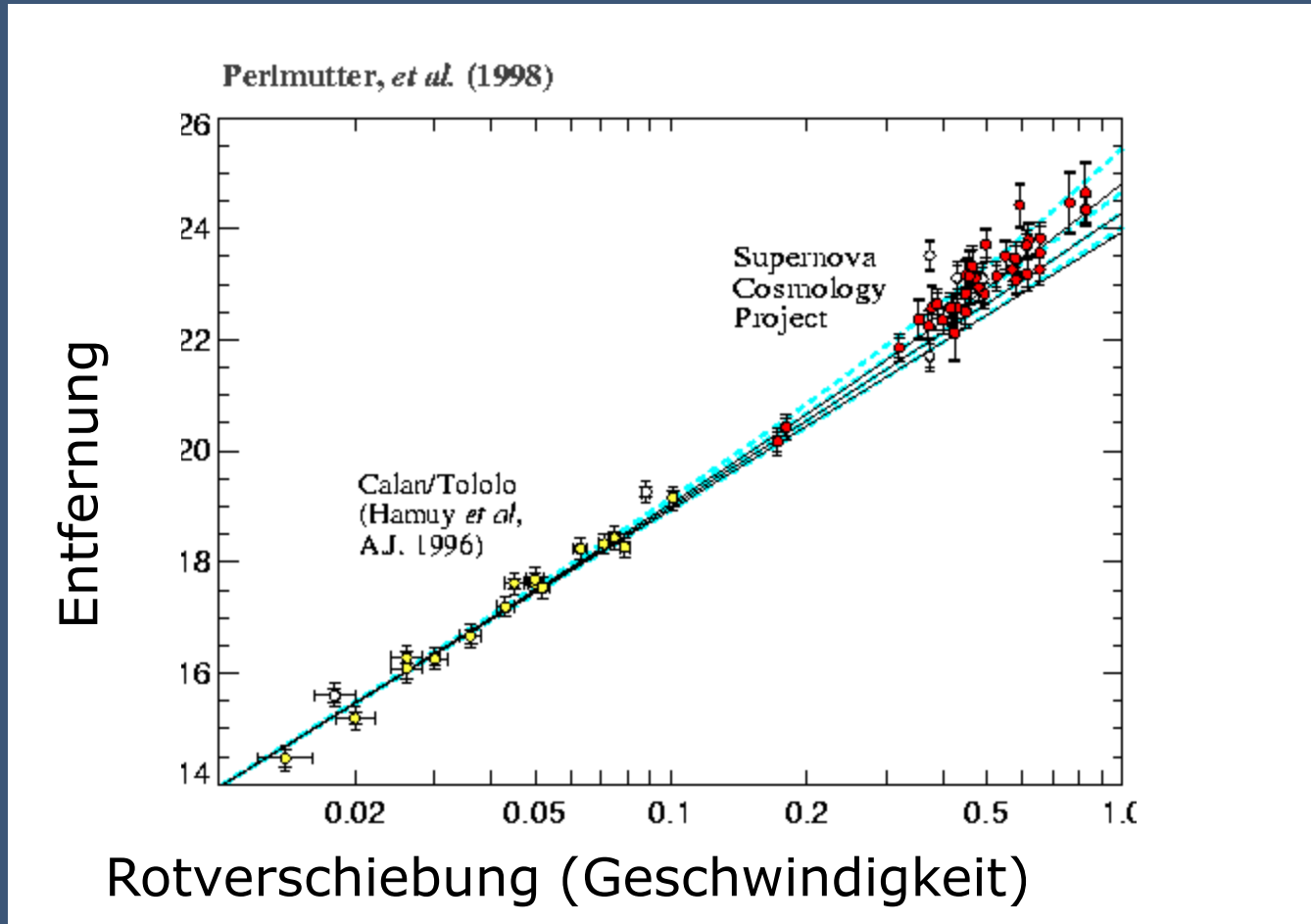
Spektren zur Identifikation

Heute
↑
Zeit



Das Hubble-Diagramm

Heute
↑
Zeit



Der Raum dehnt sich aus

- Das Weltall ist dynamisch und expandiert.
- Das Weltall war früher kleiner als heute.
- Das Weltall ist aus einer heißen Phase entstanden.

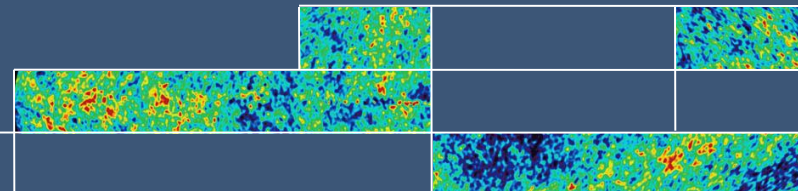
Heute
↑
Zeit



Heute
↑
Zeit

Weltmodelle

Warum und wie dehnt sich das Universum aus?



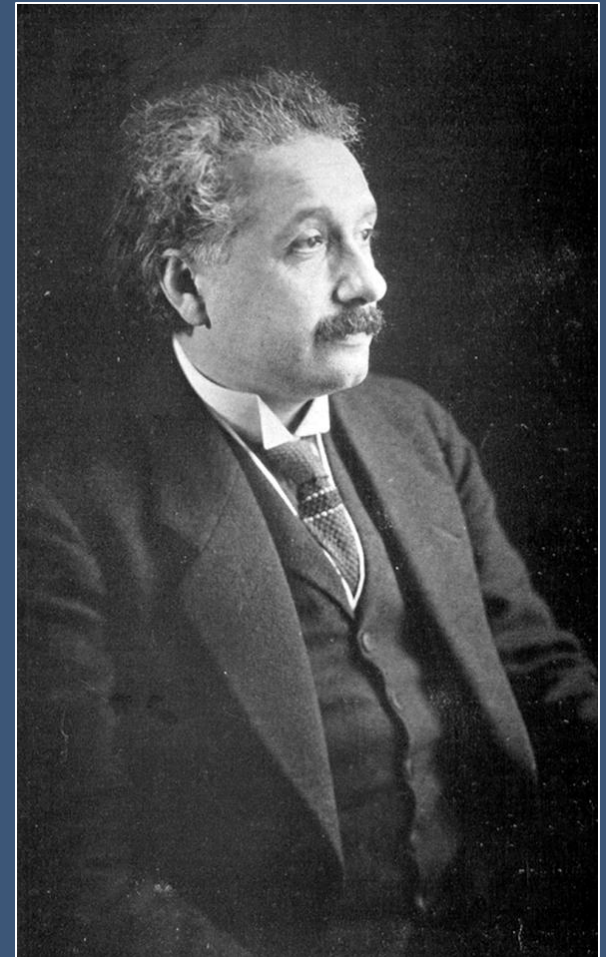
Allgemeine Relativitätstheorie (Einstein 1916)

Heute
↑
Zeit →

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

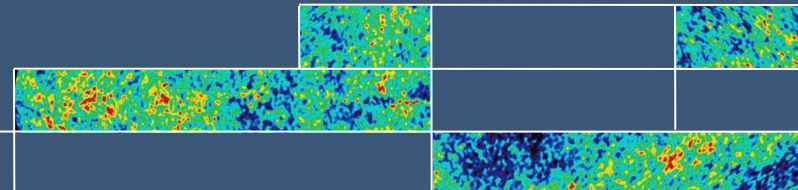
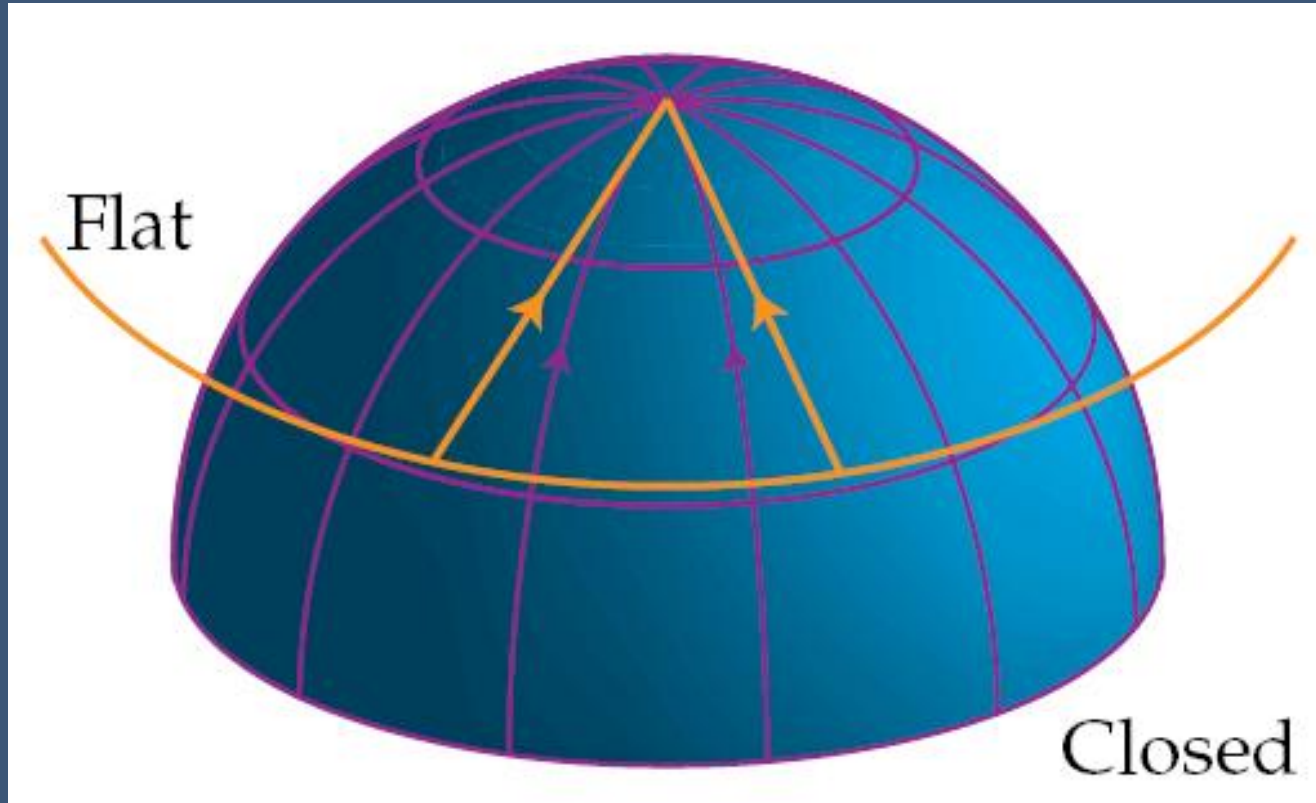
$$\mathbf{G}_{\mu\nu} - \Lambda \mathbf{g}_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{T}_{\mu\nu}$$

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



Raumkrümmung

Heute
↑
Zeit

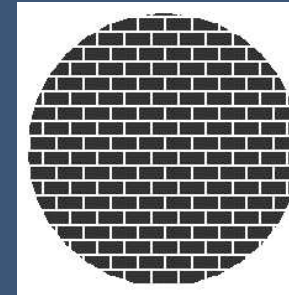


Lösungen

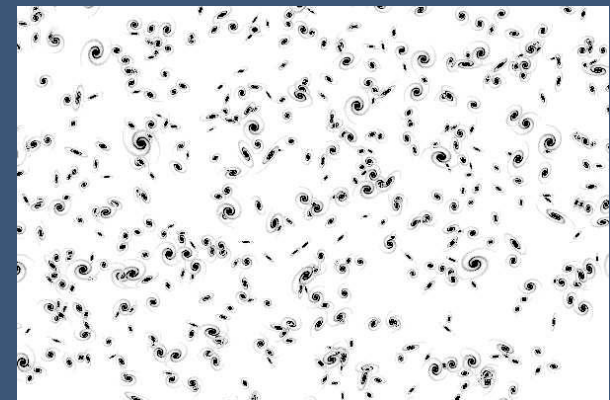
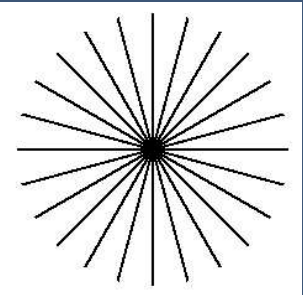
Heute
↑
Zeit →

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

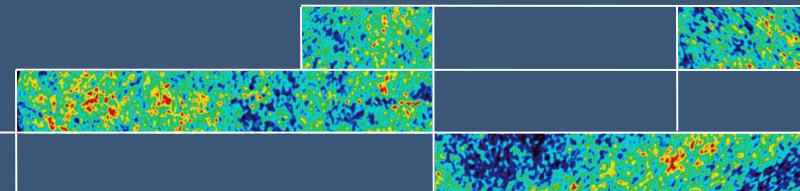
Homogen
aber nicht
isotrop



Isotrop aber
nicht
homogen



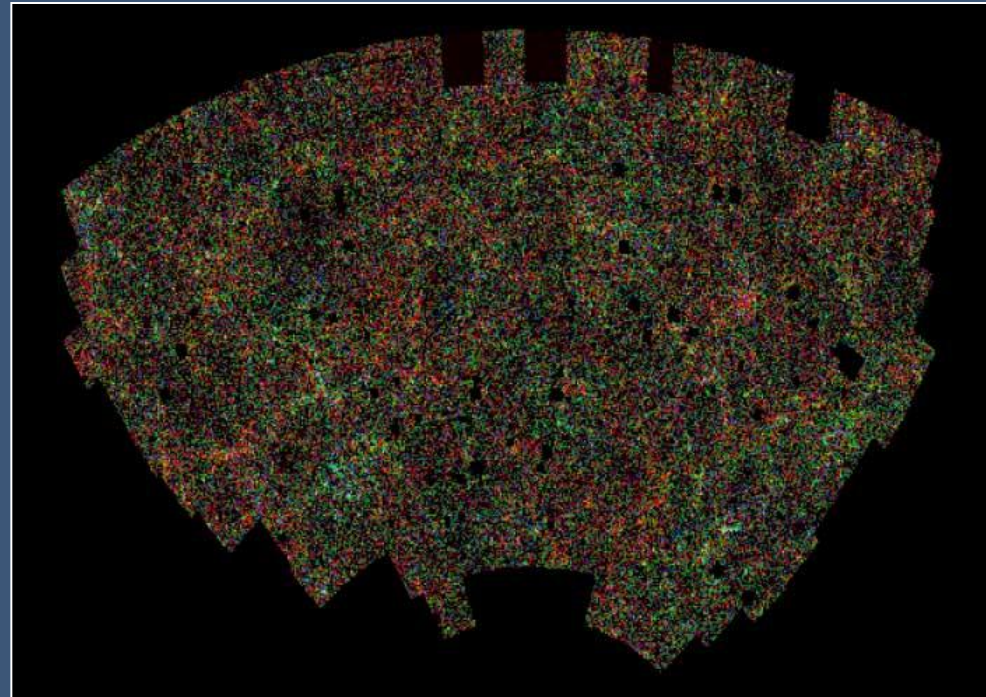
Isotrop **UND** homogen



Galaxienverteilung

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.

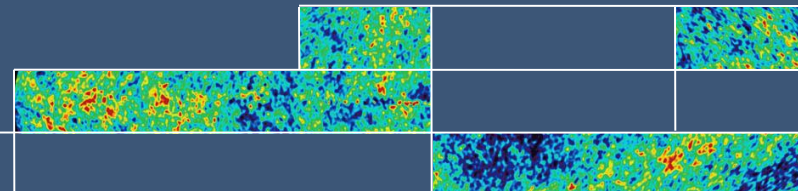
MAP990047

Parameter eines expandierenden Universums

Heute
↑
Zeit →

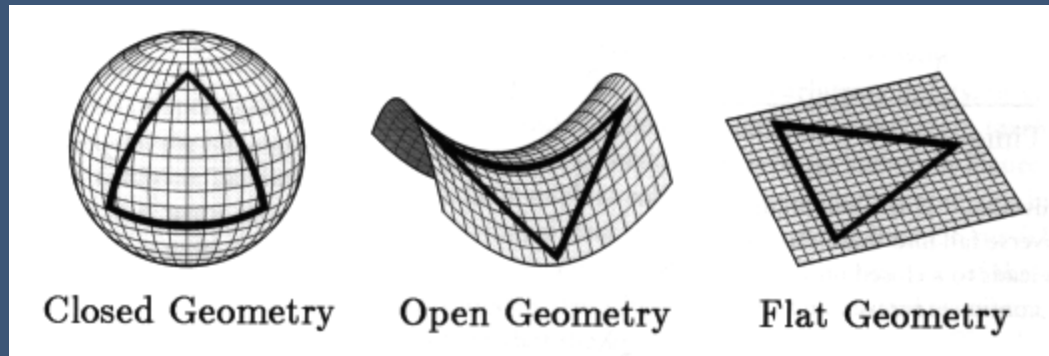
- Expansion ↔ Gravitationsanziehung
- Expansion
 - **Hubble Konstante** H_0 ist ein Maß für die Stärke der Expansion:
$$H_0 = 70,4 \pm 2,5 \text{ km/s/Mpc}$$
- Gravitationsanziehung
 - Normale Materie bremst die Expansion (mittlere Dichte ρ)
 - **Kritische Dichte**, nötig, um die Expansion zu stoppen:

$$\rho_{\text{krit}} = 3 H_0^2 / 8\pi G = 10^{-29} \text{ g/cm}^3 = 5 \text{ Protonen/m}^3$$

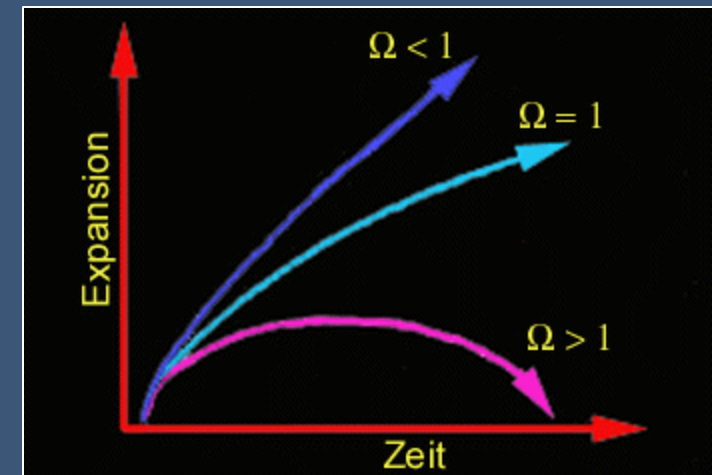


Geometrie des Universums

Heute
↑
Zeit



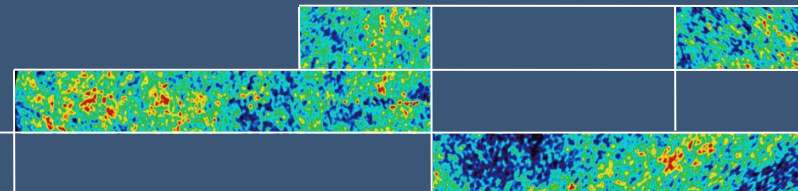
- Balance zwischen Kontraktion und Expansion ausgedrückt durch $\Omega_0 = \rho/\rho_{\text{krit}}$
 - $\Omega_0 > 1$, $\rho > \rho_{\text{krit}}$
Gravitation gewinnt, das Universum kollabiert
 - $\Omega_0 = 1$, $\rho = \rho_{\text{krit}}$
Ausgleich, Expansion hält schlussendlich an
 - $\Omega_0 < 1$,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



Zentrale Fragen

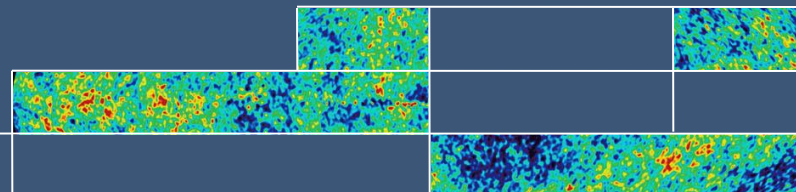
Heute
↑
Zeit

- Gibt es neben der Expansion des Universums weitere experimentelle Bestätigungen des Urknalls?
- Wie dehnt sich das Universum aus?
(Offene oder geschlossene Geometrie?)
- Was ist der Materieinhalt des Universums?



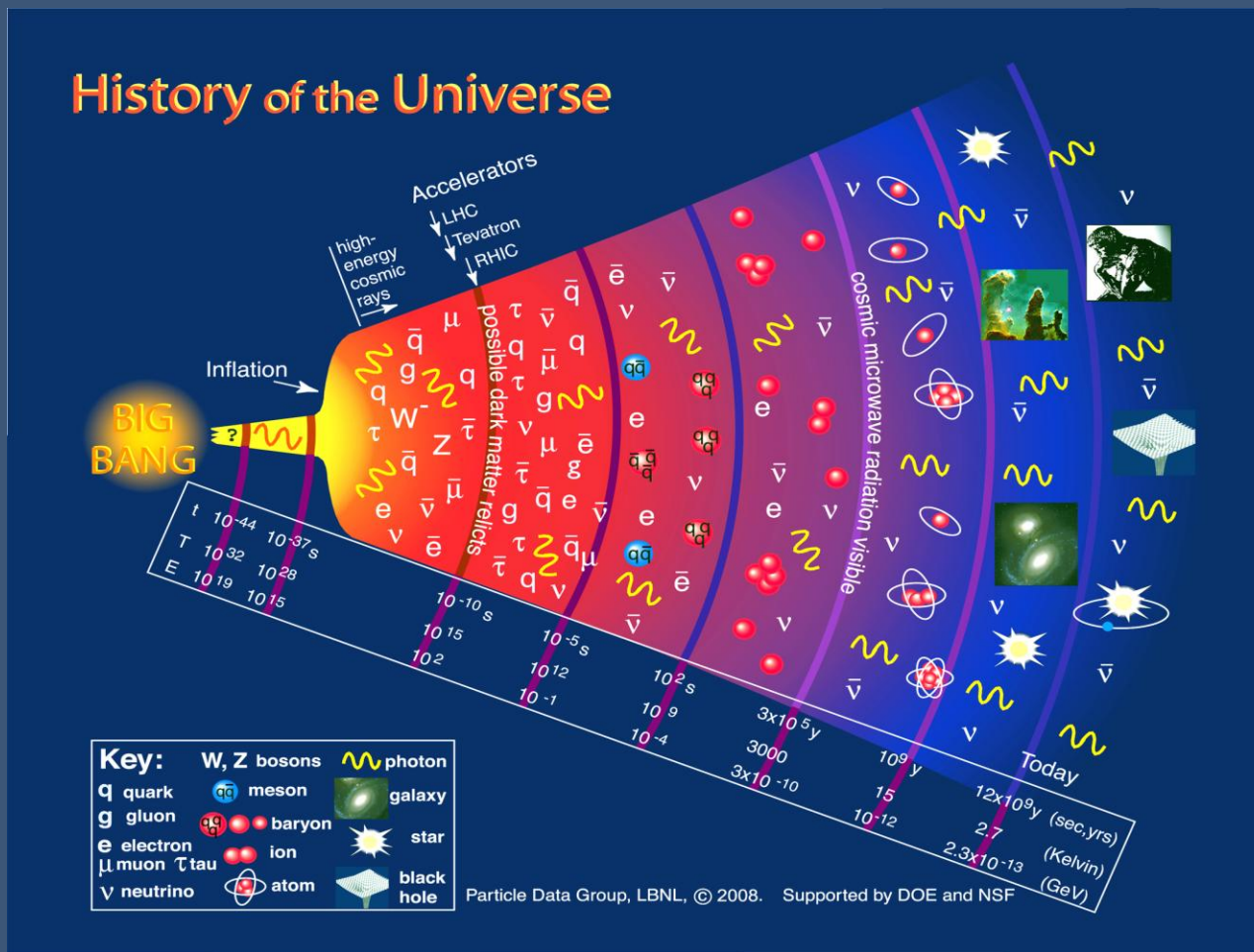
Eine Reise durch die Zeit

Experimentelle Bestätigungen des Urknalls



Vom Urknall bis heute

Zeit

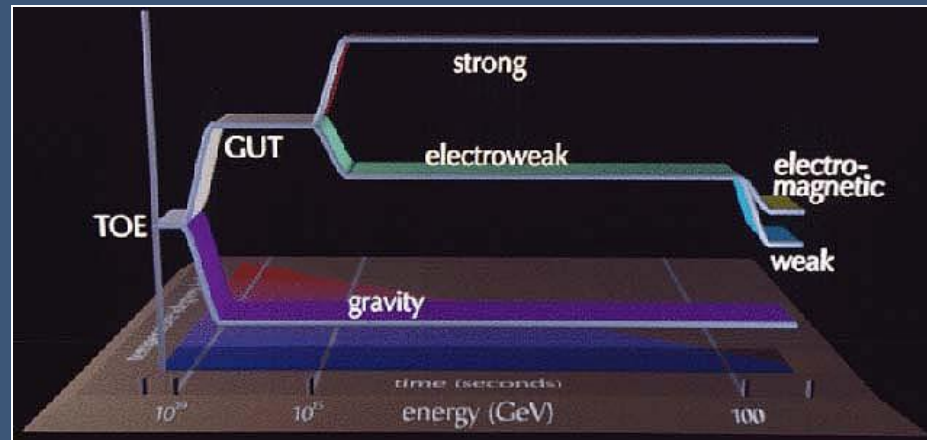


Eine Zeitreise

10^{-42} s

Zeit

- **Alter = 10^{-42} s**
 - Der Anfang unserer Physik
- **Alter = 10^{-36} s, $T = 10^{16}$ GeV = 10^{28} K**
 - Starke und elektro-schwache Kraft trennen sich



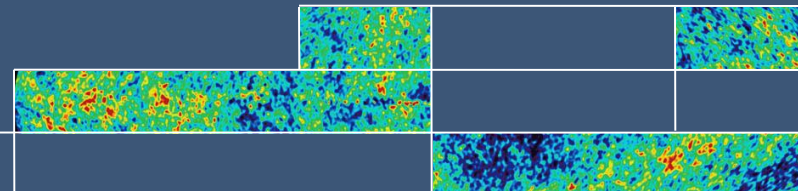
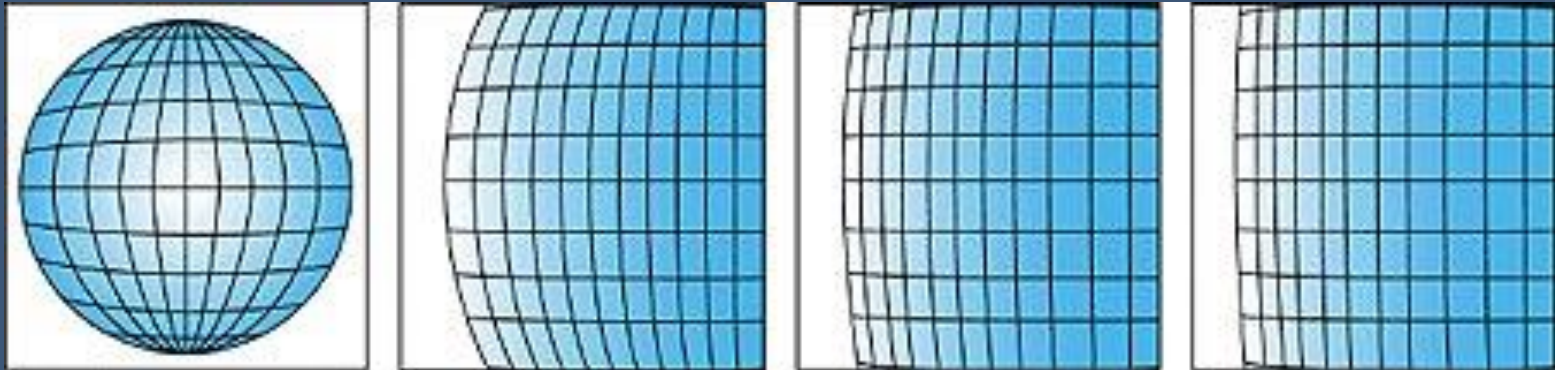
Die Inflation

10^{-36}s



Zeit

- **Alter = 10^{-36} s, $T = 10^{28}$ K**
 - Plötzliche Expansion des Universums um einen Faktor $10^{20} - 10^{30}$
 - Das Universum wird flach!



Die Vernichtungsschlacht

10^{-10} s



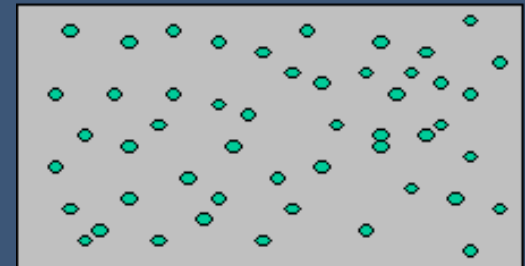
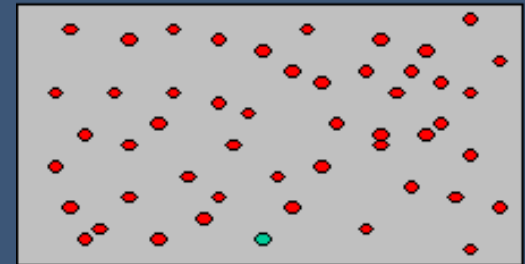
Zeit

- **Alter = 10^{-10} s, $T = 1$ TeV = 10^{15} K**
 - Materie und Antimaterie vernichten sich
 - Materie-Antimaterie-Verhältnis

100000001 : 100000000

- Danach Materie-Photon-Verhältnis

1 : 1000000000

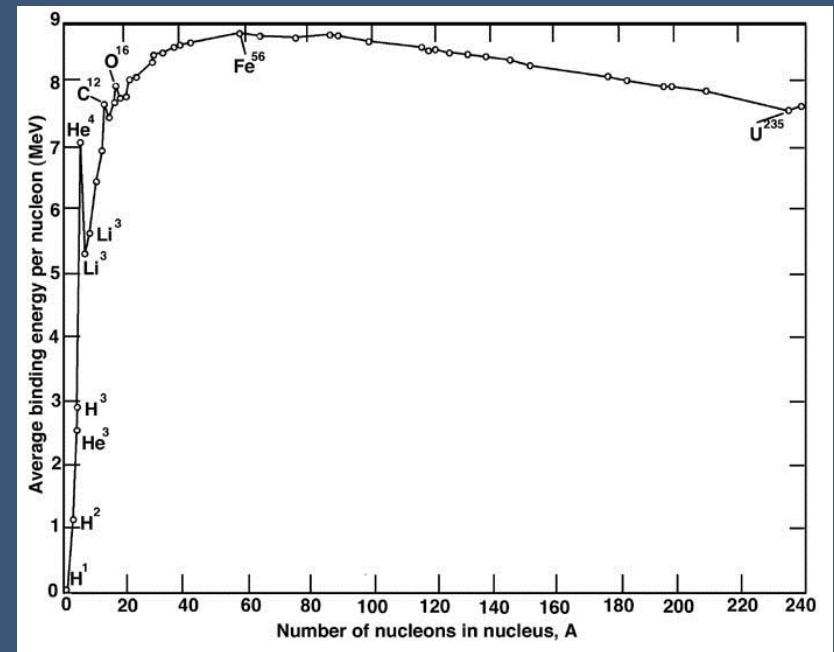


Nukleosynthese

1 min

Zeit

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

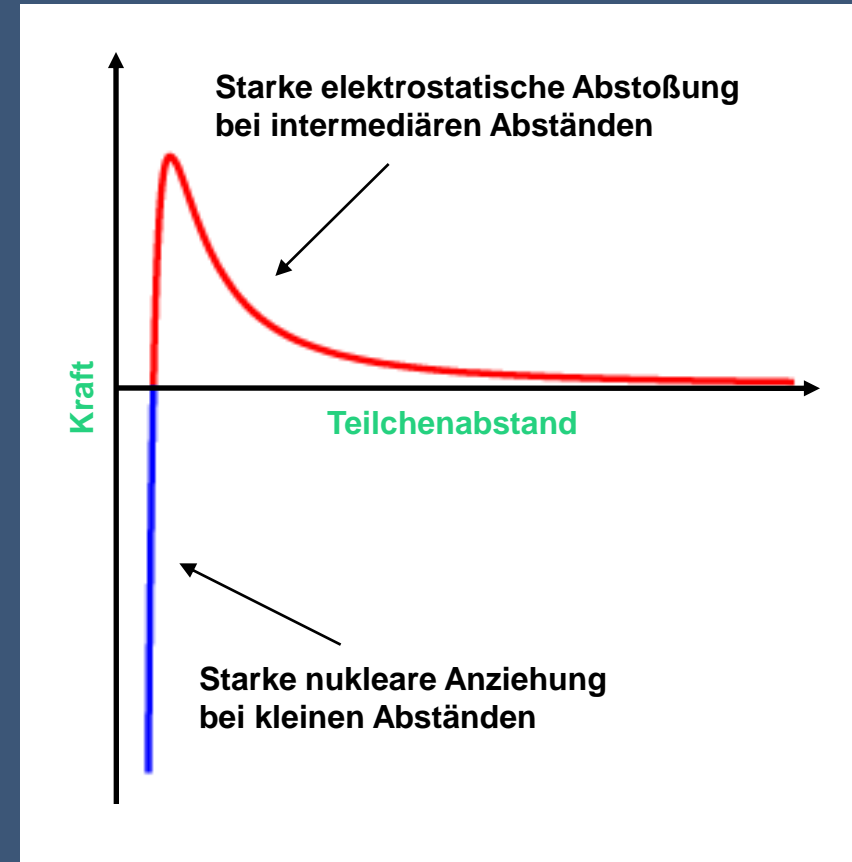


Kernfusion

1 min

Zeit

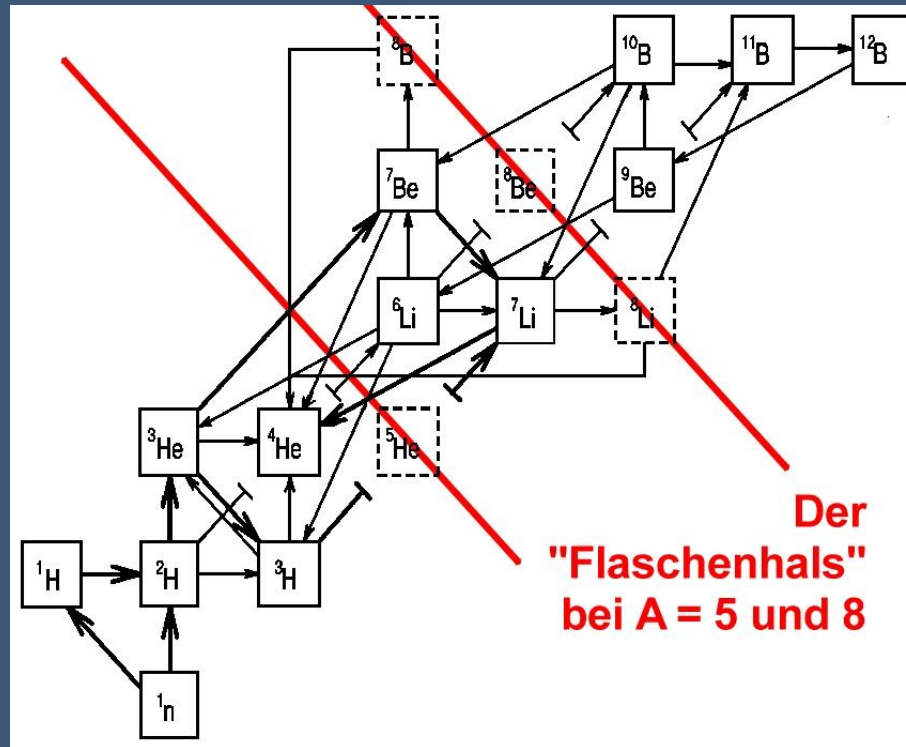
- Fusion bei Teilchenkollisionen
- Fusion benötigt hohe Temperaturen und große Teilchendichten



Primordiale Nukleosynthese

1 min

Zeit

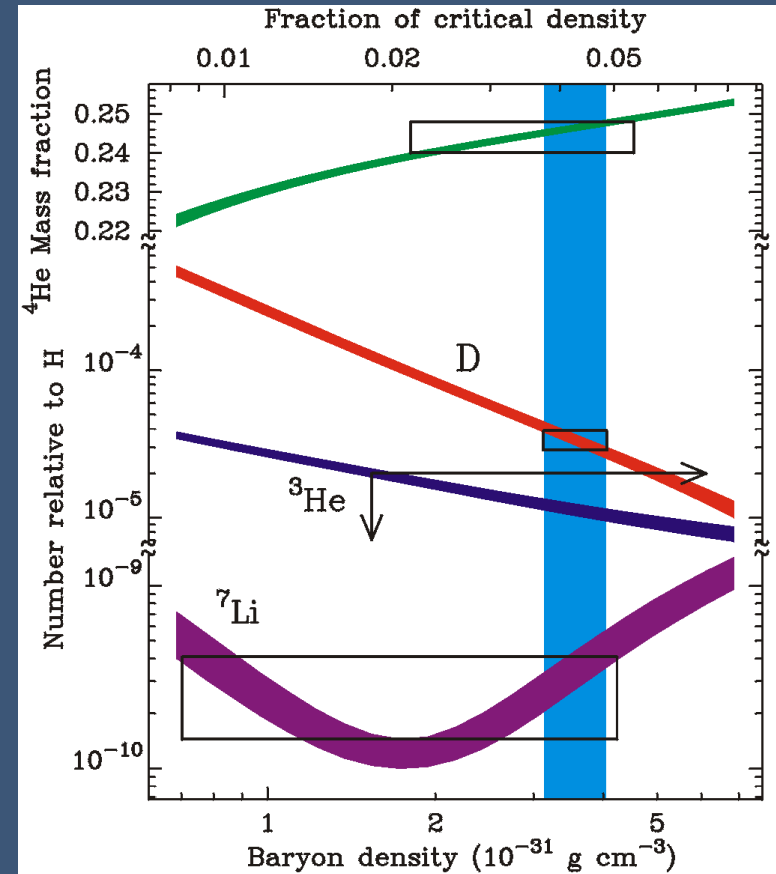


Primordiale Nukleosynthese

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**

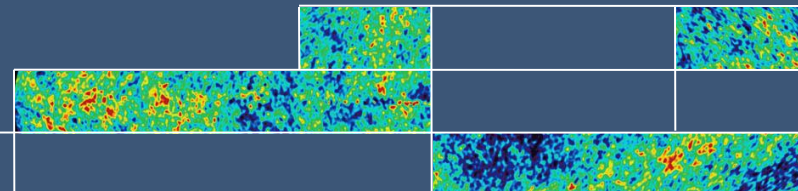


1 min



Zeit

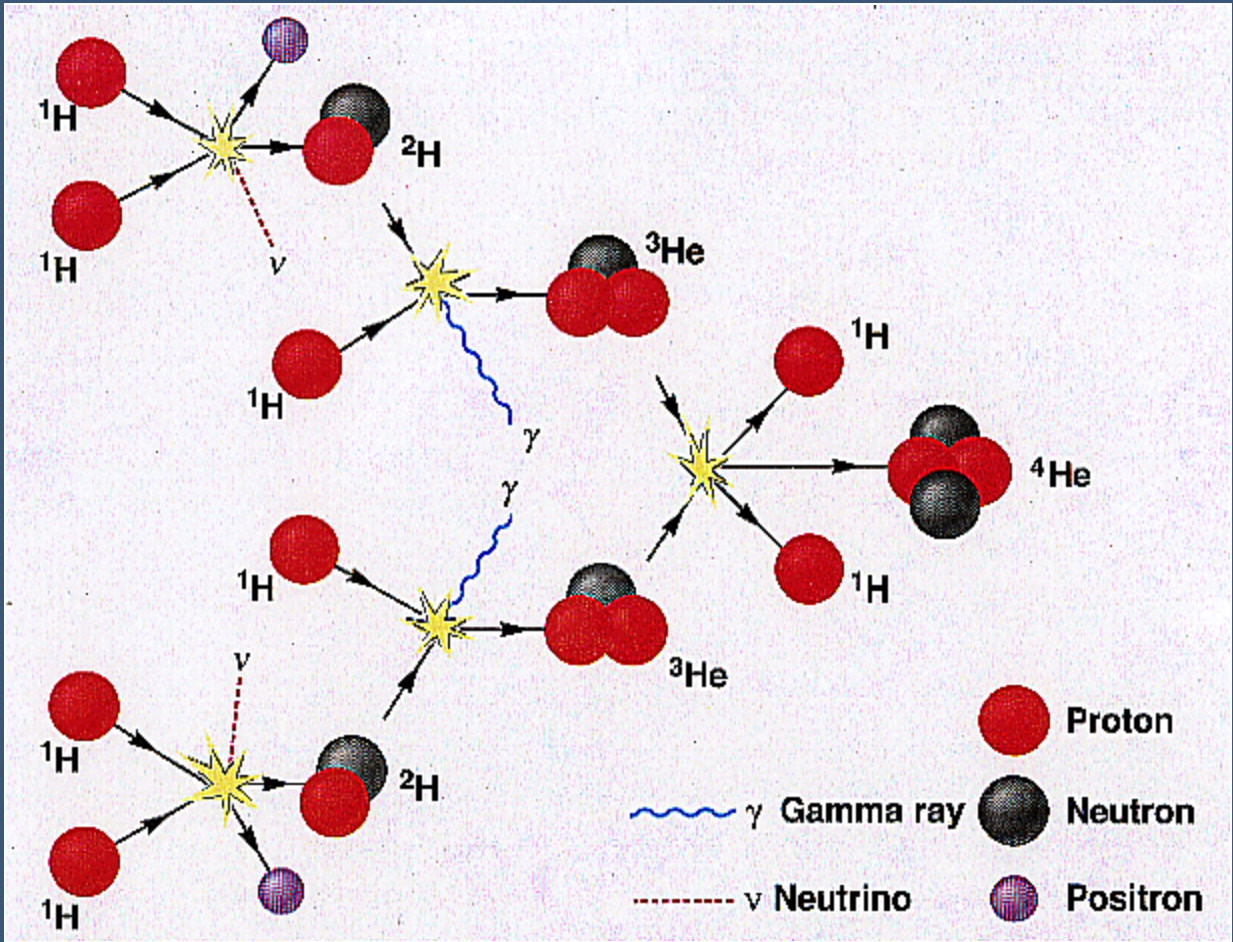
Warum nicht in Sternen?



Fusion in Sternen

1 min
↑

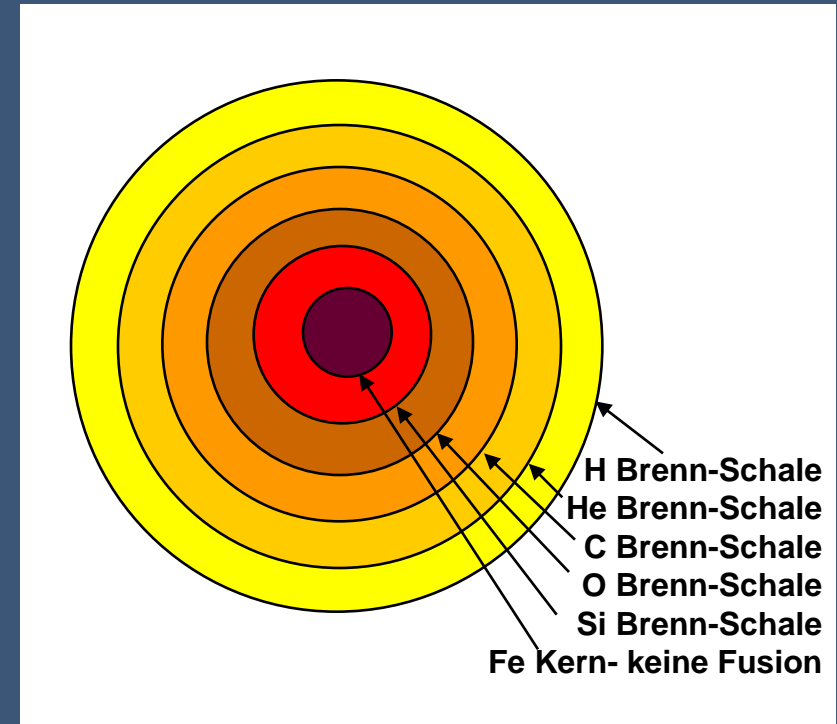
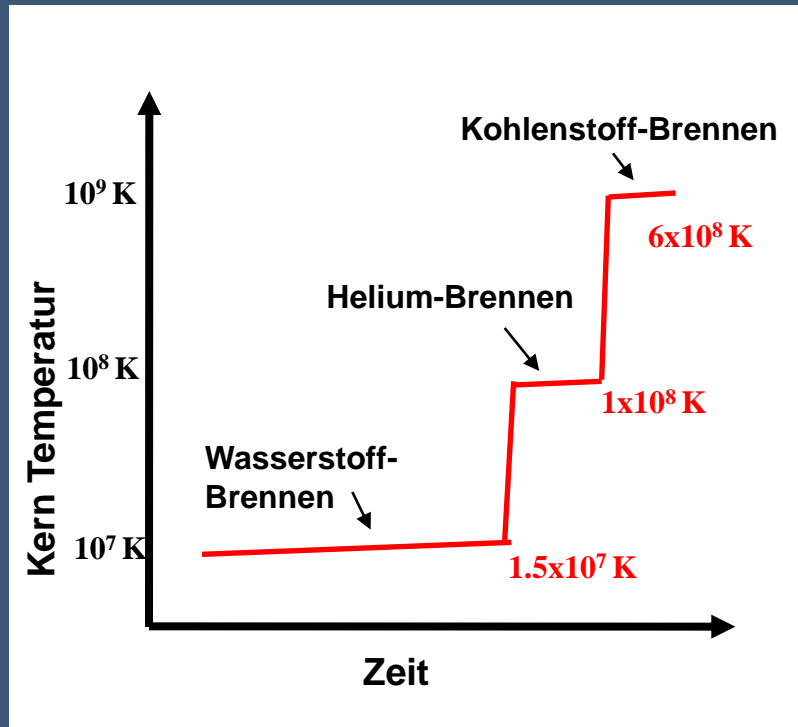
Zeit →



Fusion in Sternen

1 min

Zeit



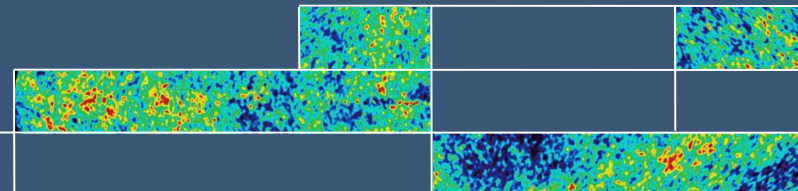
- Erwarte ungefähr genauso viel Helium wie andere Elemente mit großer Masse
 - Verhältnis: 75% H, 13% He, 12% Rest

Vergleich Stellarer und Primordialer Nukleosynthese

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



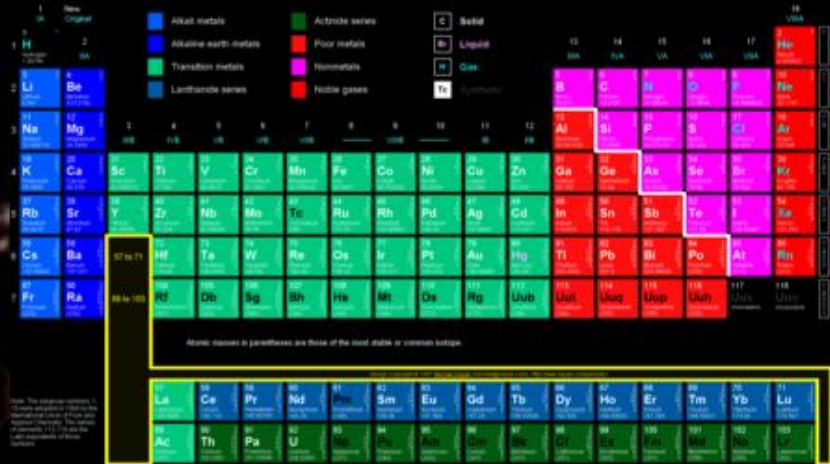
1 min

Zeit

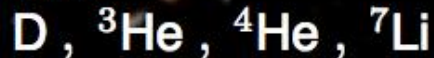
Ära der Kernphysik

$$10^{-2} < t < 10^2 \text{ s}$$

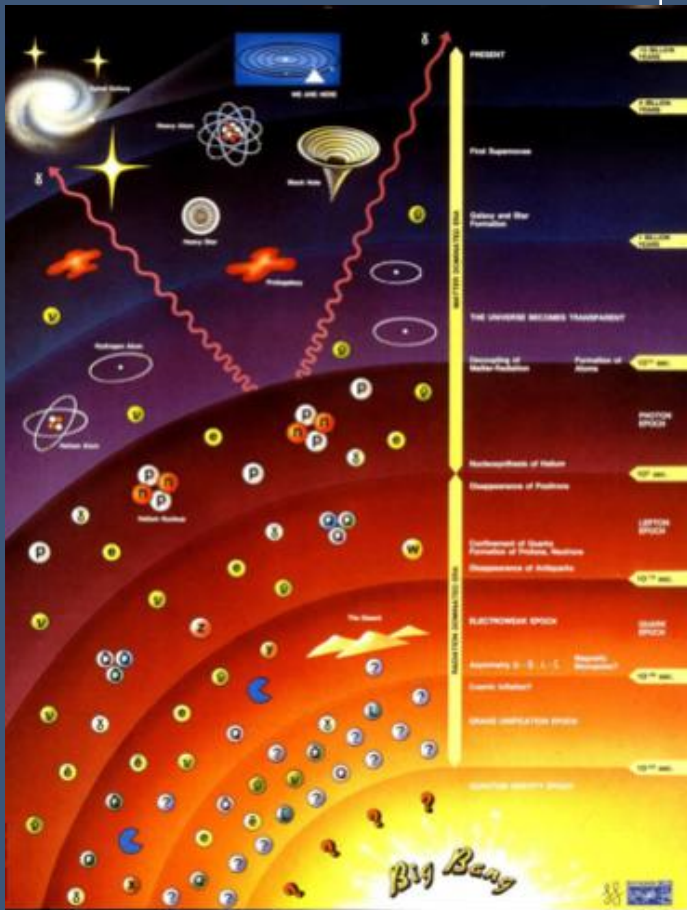
Periodensystem



Im Urknall werden die leichten Elemente gebildet:



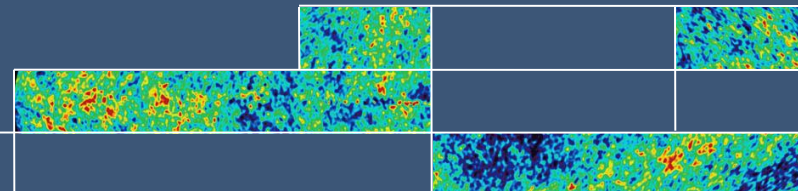
Die schweren Elemente werden später in Sternen gebildet



1 min

Zeit

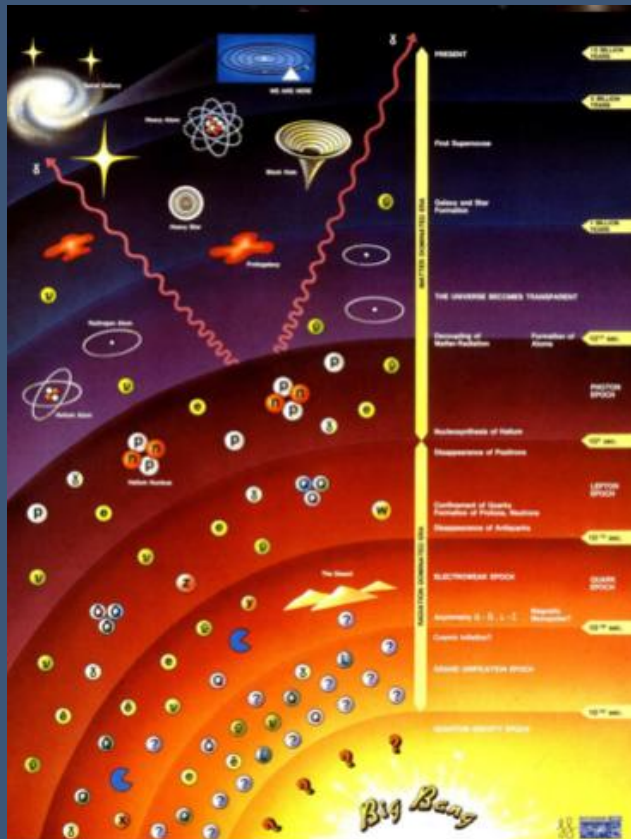
Primordiale Nukleosynthese ist eine der
Stützen des Urknall-Modells!



Bildung von Atomen $T = 3000\text{ K}$

370000 Jahre

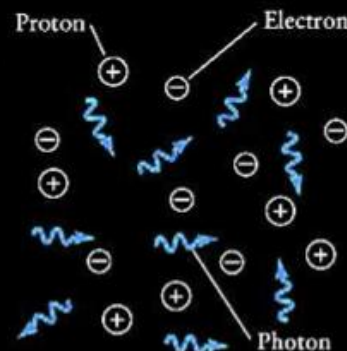
Zeit



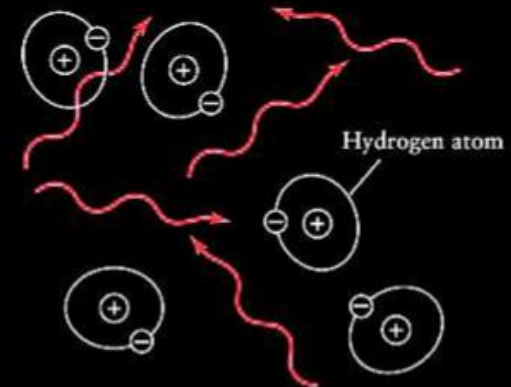
Ära der Atomphysik

$t \approx 10^{13}\text{ s} \approx 380000\text{ Jahre}$

- Materie und Strahlung entkoppeln
- Elektronen und Protonen bilden neutralen Wasserstoff
- die Energie der Photonen reicht nicht mehr zur Ionisation
- das Universum wird durchsichtig



a Before recombination



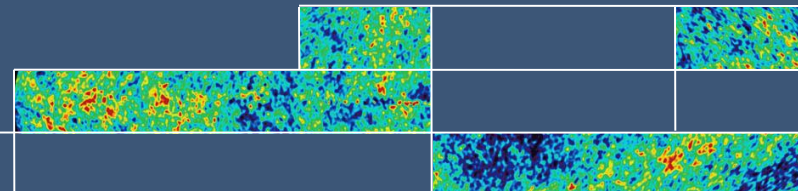
b After recombination

370000 Jahre

Zeit

Wir können den Urknall sehen! Wie?

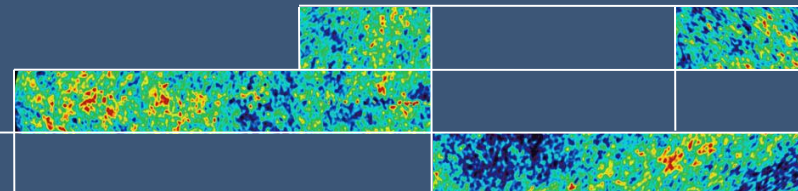
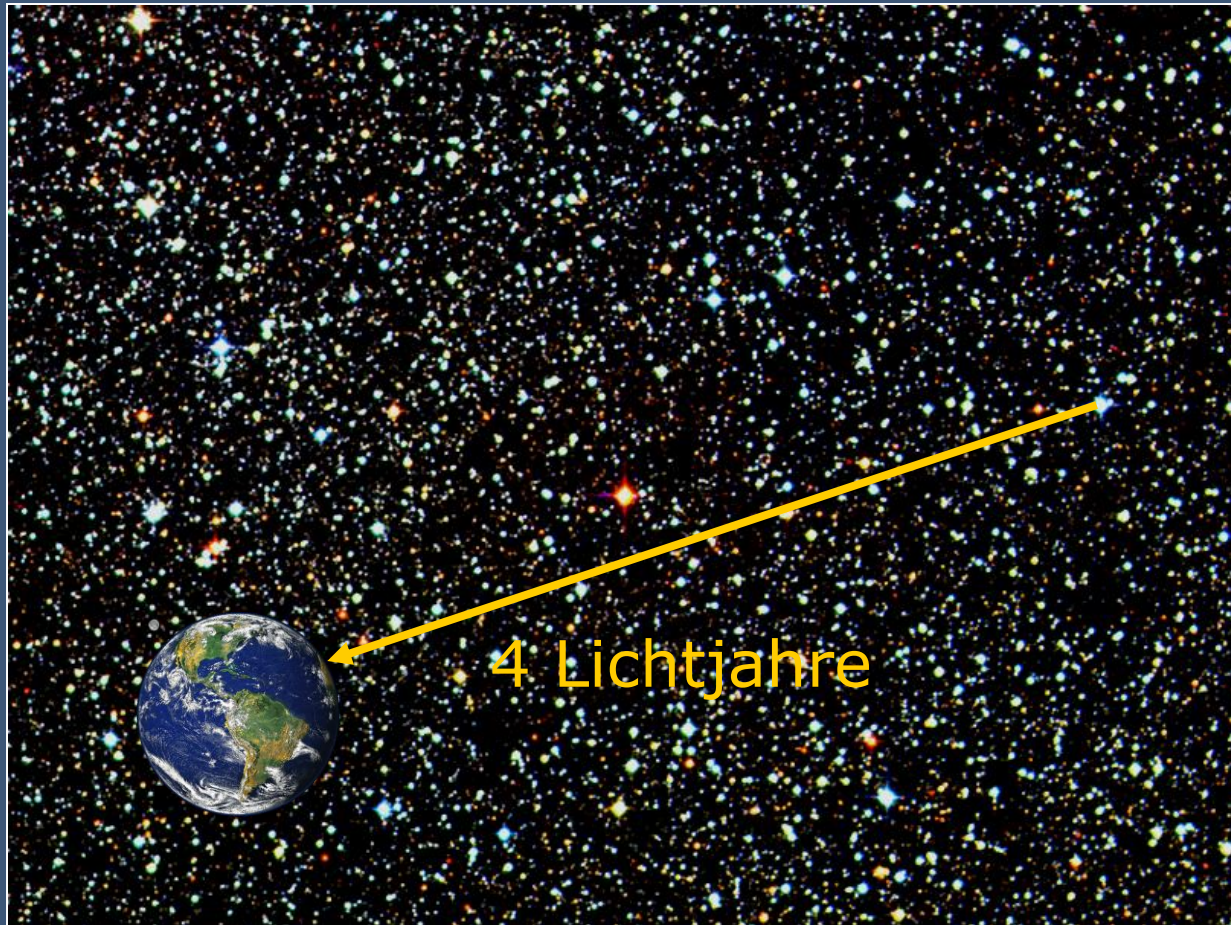
Wir sehen das 370'000 Jahre nach dem
Urknall ausgesandte Licht.



Blick in die Vergangenheit

370000 Jahre

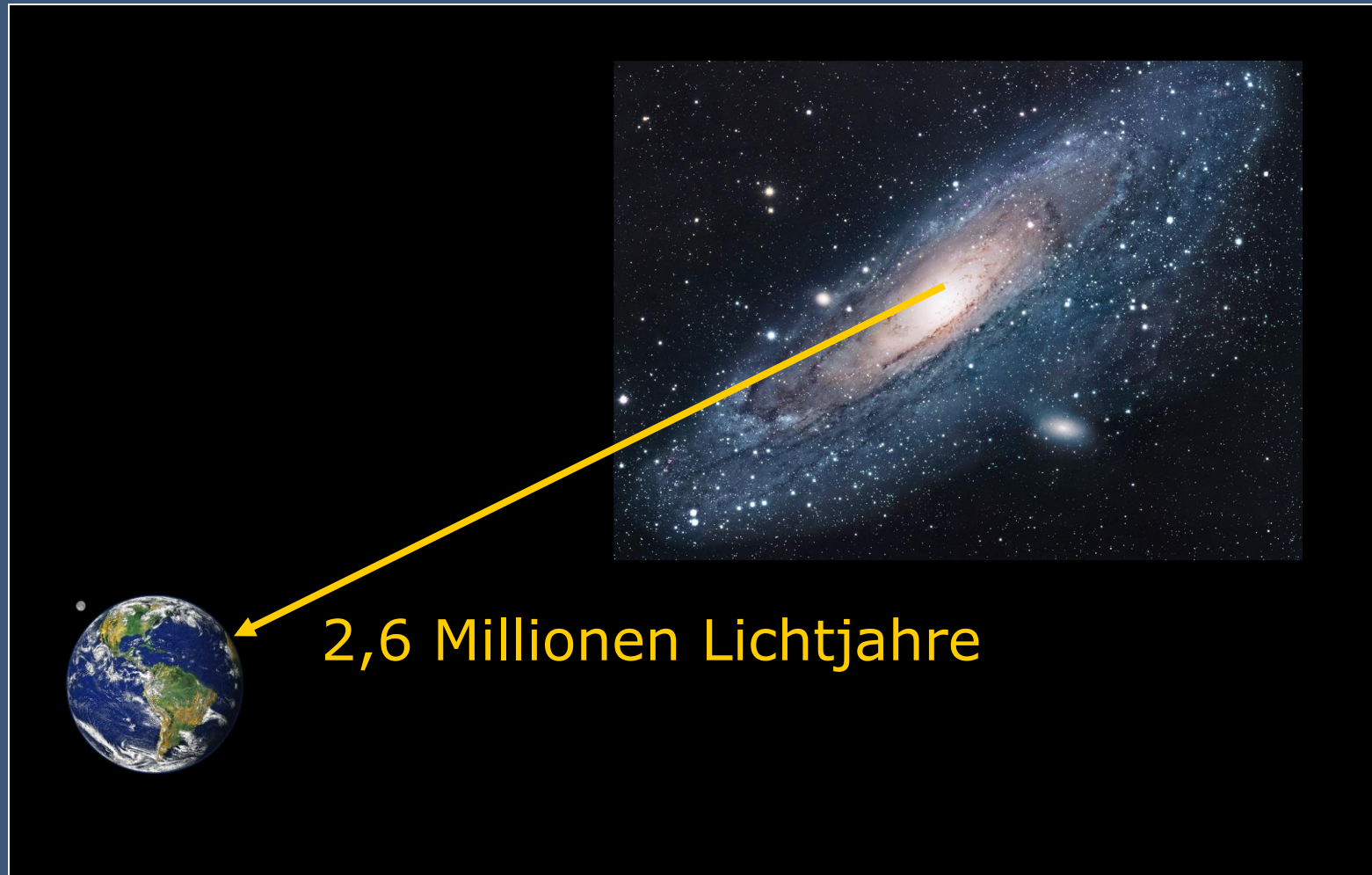
Zeit



Blick in die Vergangenheit

370000 Jahre

Zeit

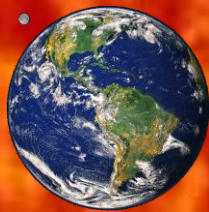


Blick in die Vergangenheit

Zeit



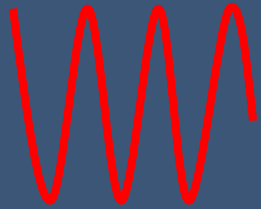
Der Urknall füllt den Himmel



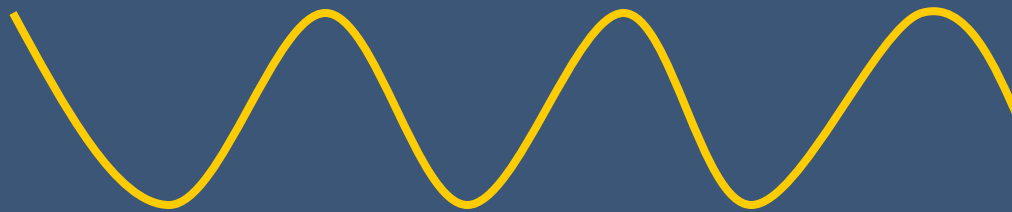
Der Urknall damals-heute

37000 Jahre

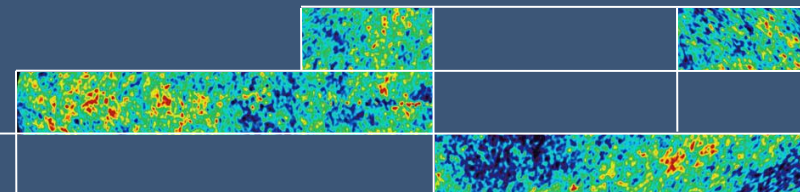
Zeit



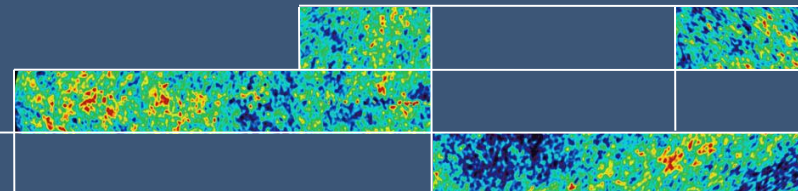
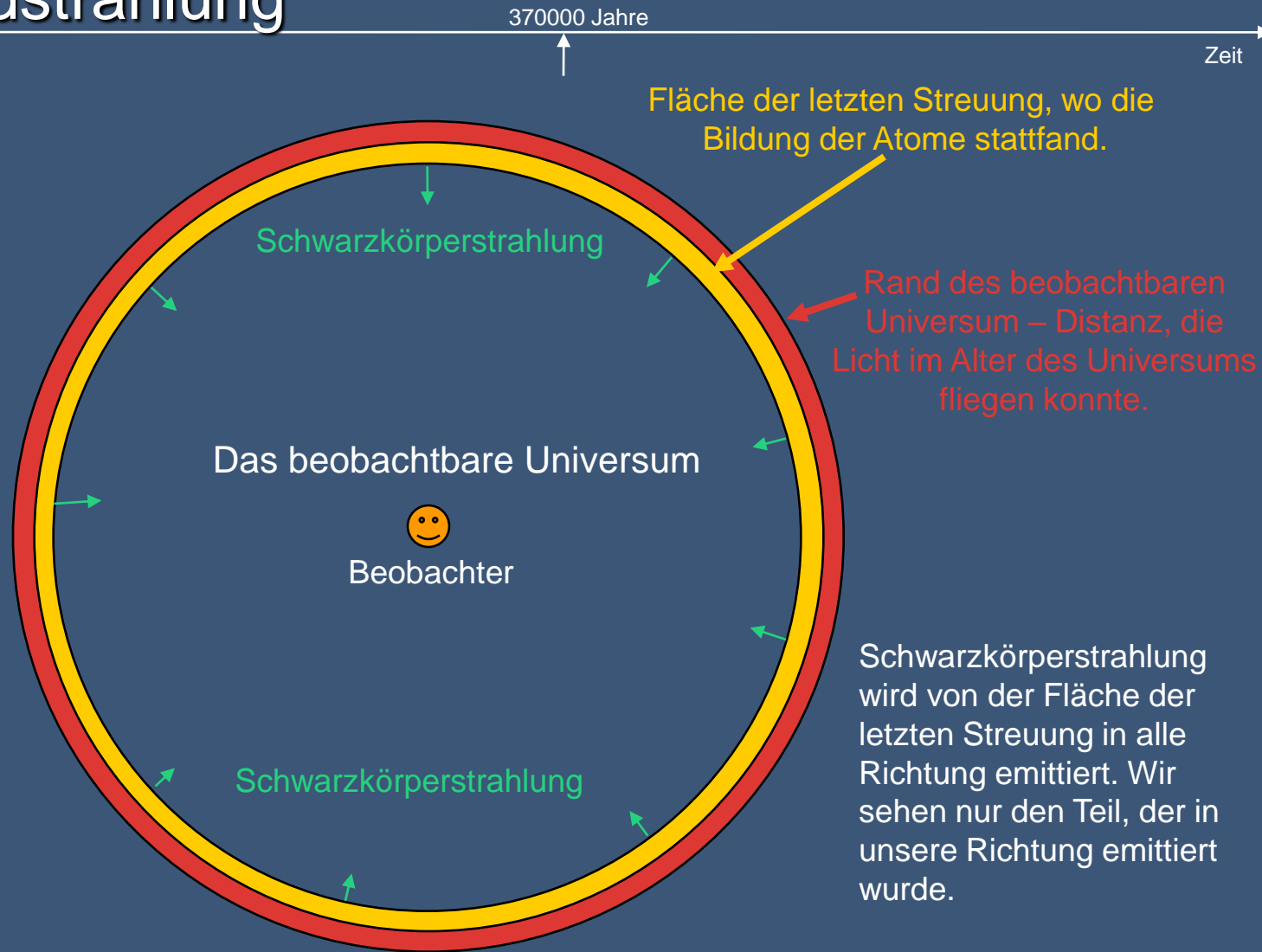
Damals:
Licht 3000 K



Heute:
Mikrowellen 3 K



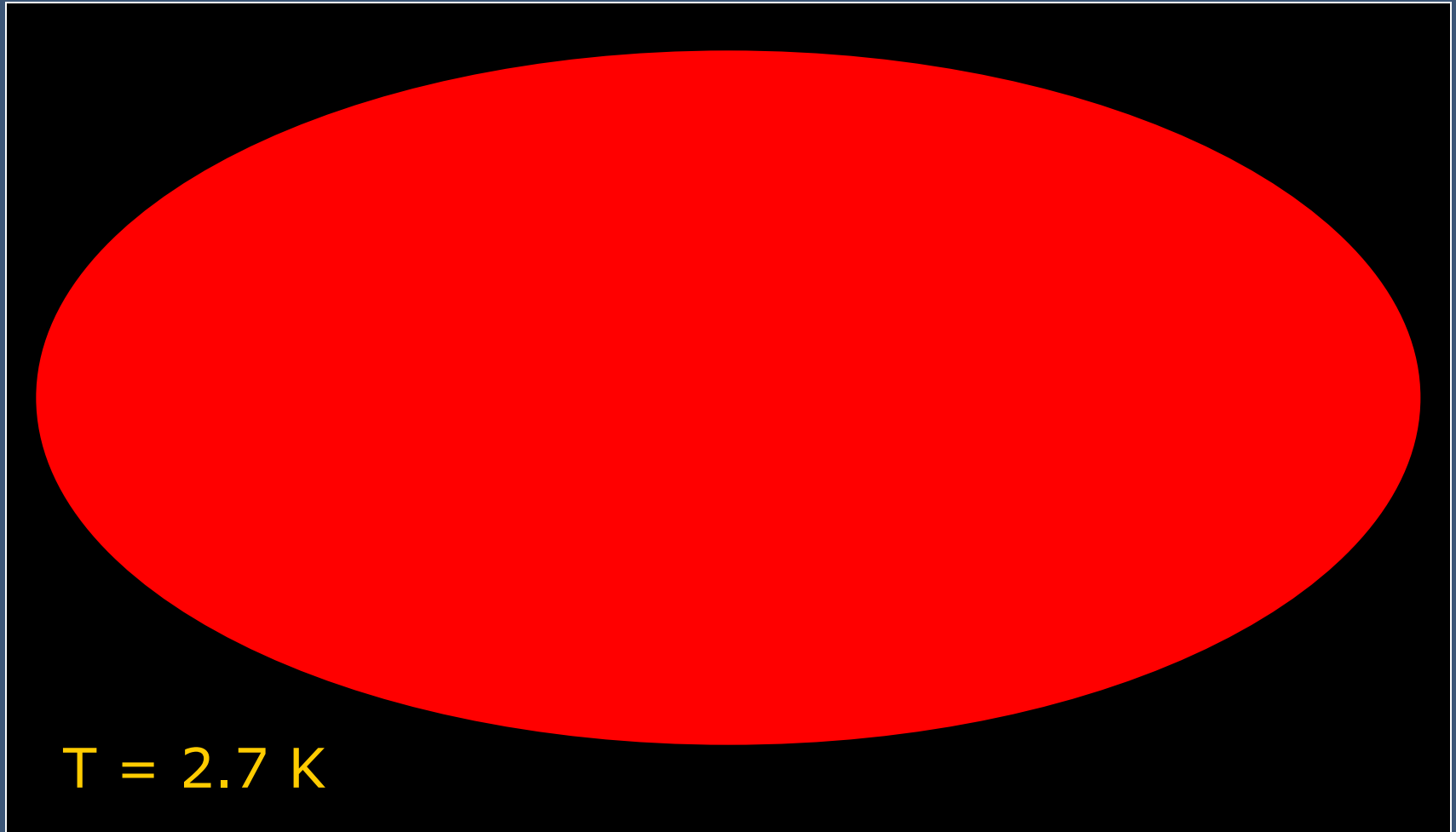
Die Geschichte der kosmischen Hintergrundstrahlung



Der Mikrowellen-Hintergrund

370000 Jahre

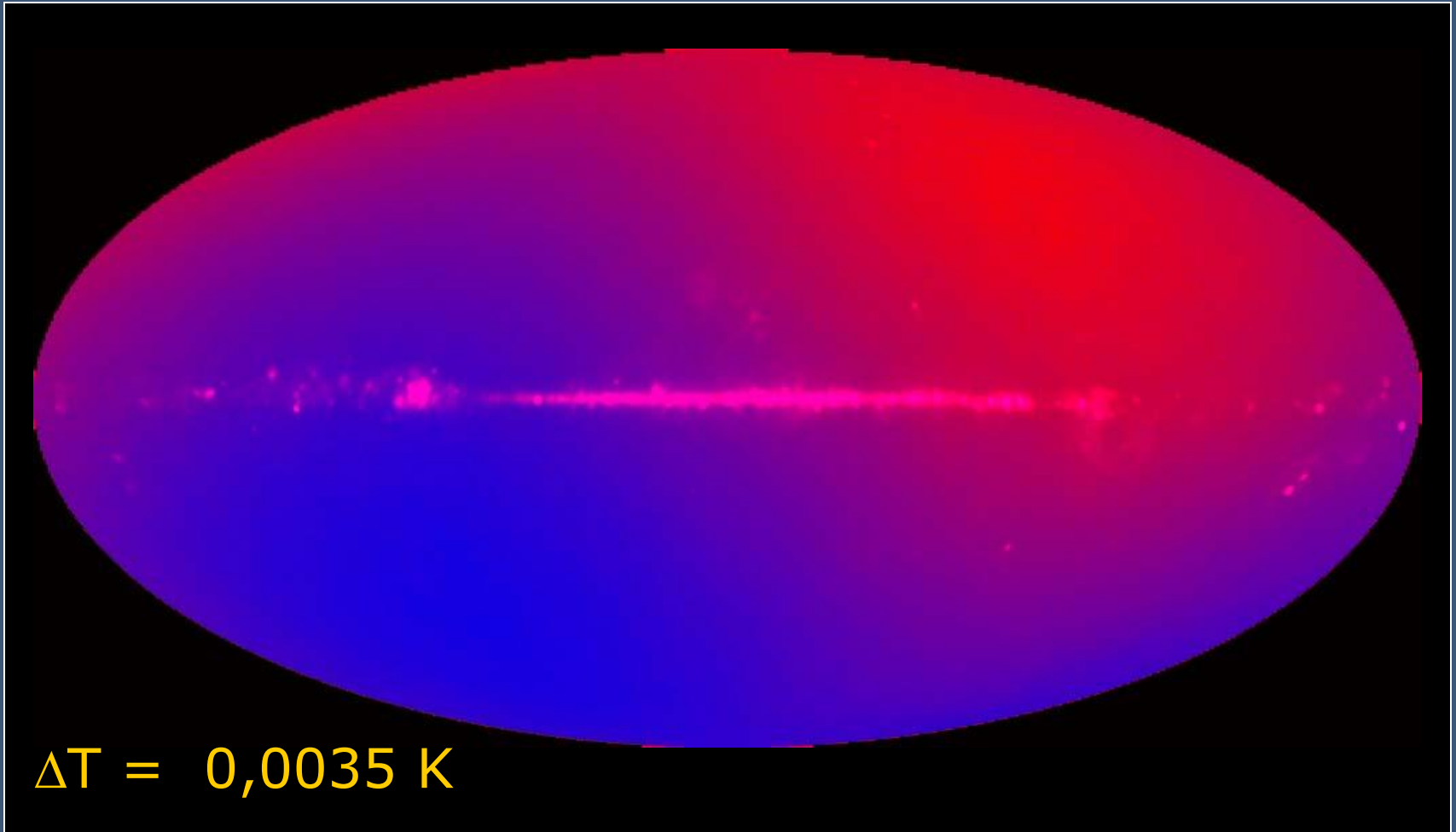
Zeit



Die Erde bewegt sich

370000 Jahre

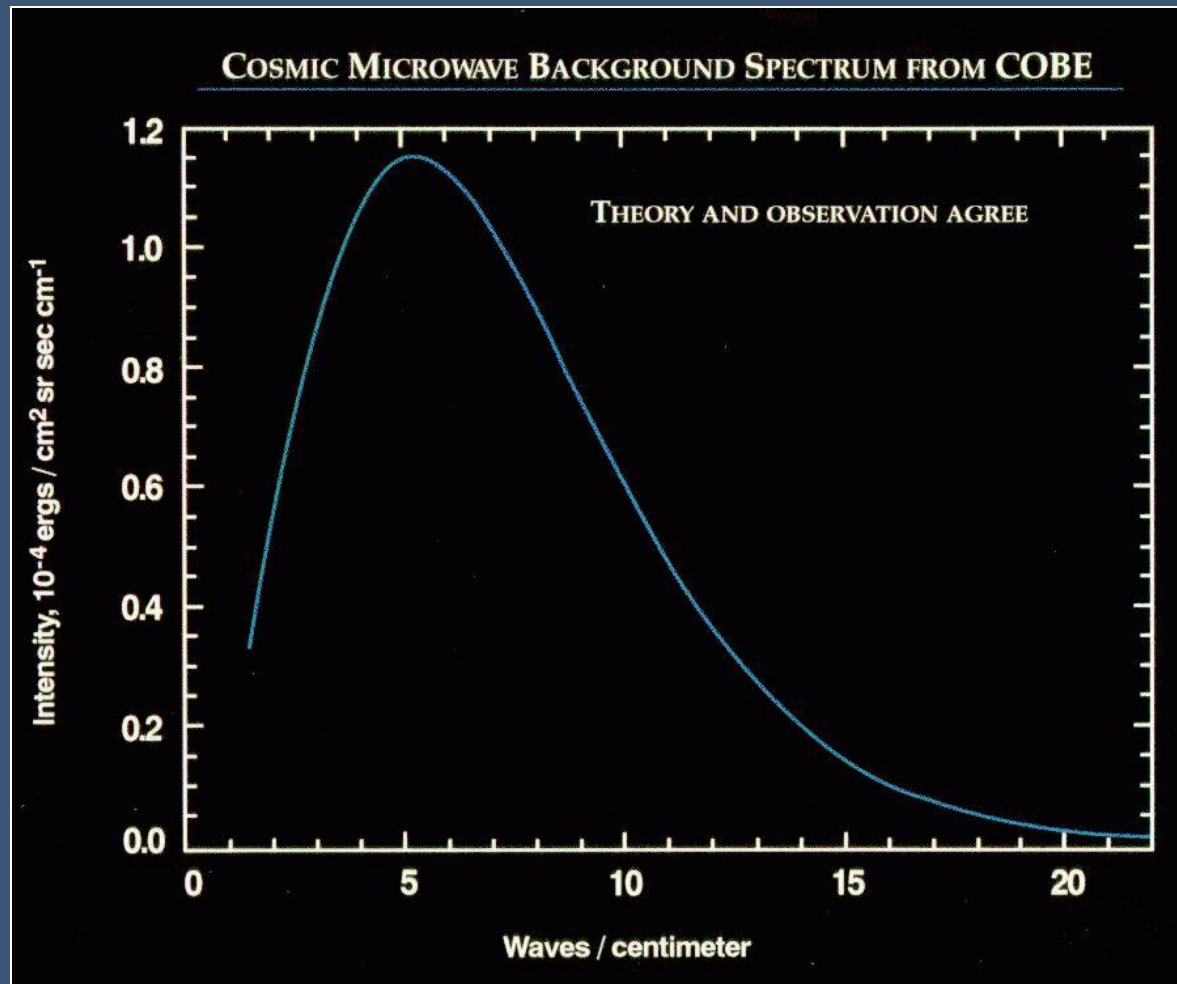
Zeit



Das Spektrum

370000 Jahre

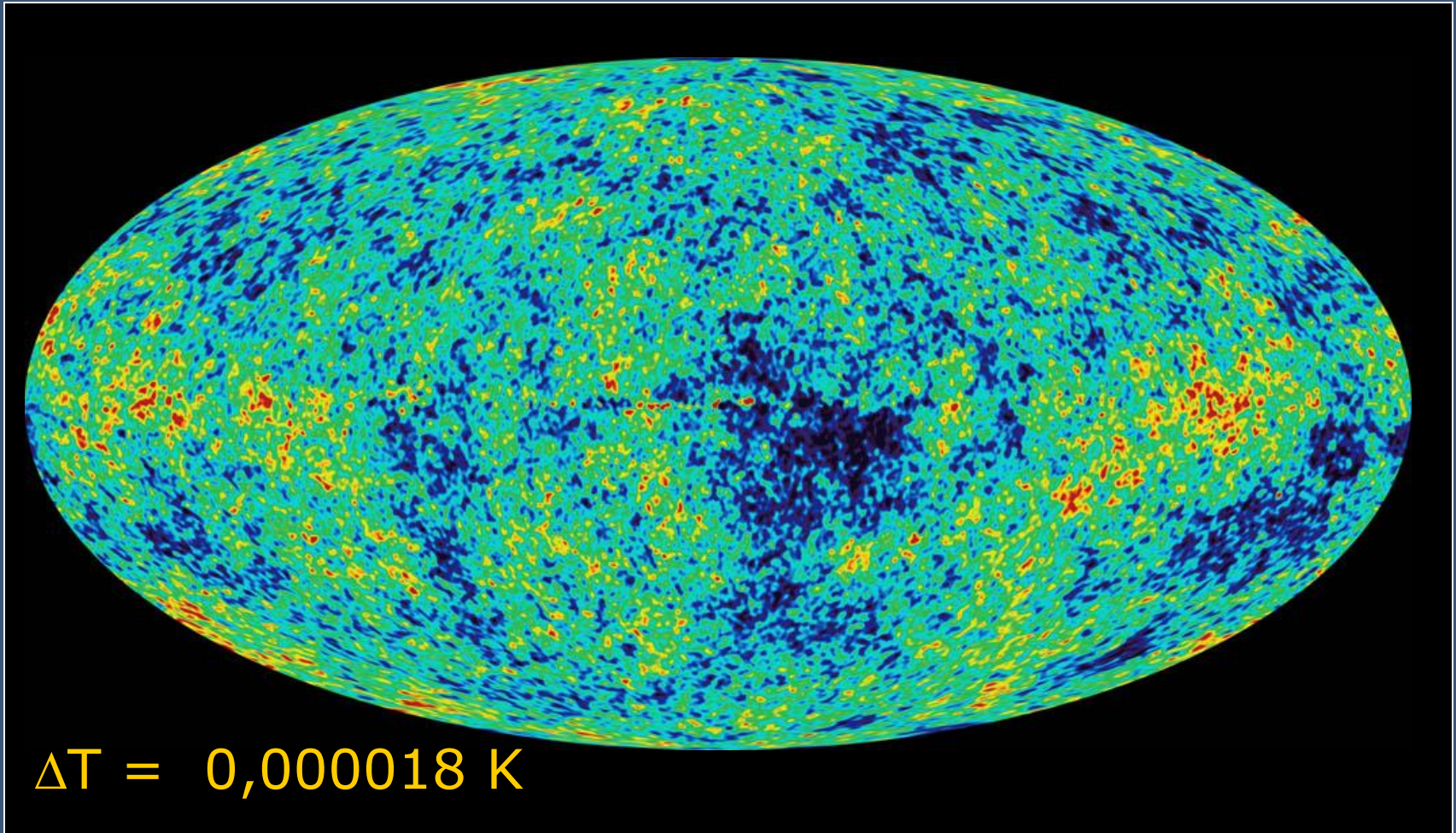
Zeit →



Das Echo des Urknalls

370000 Jahre

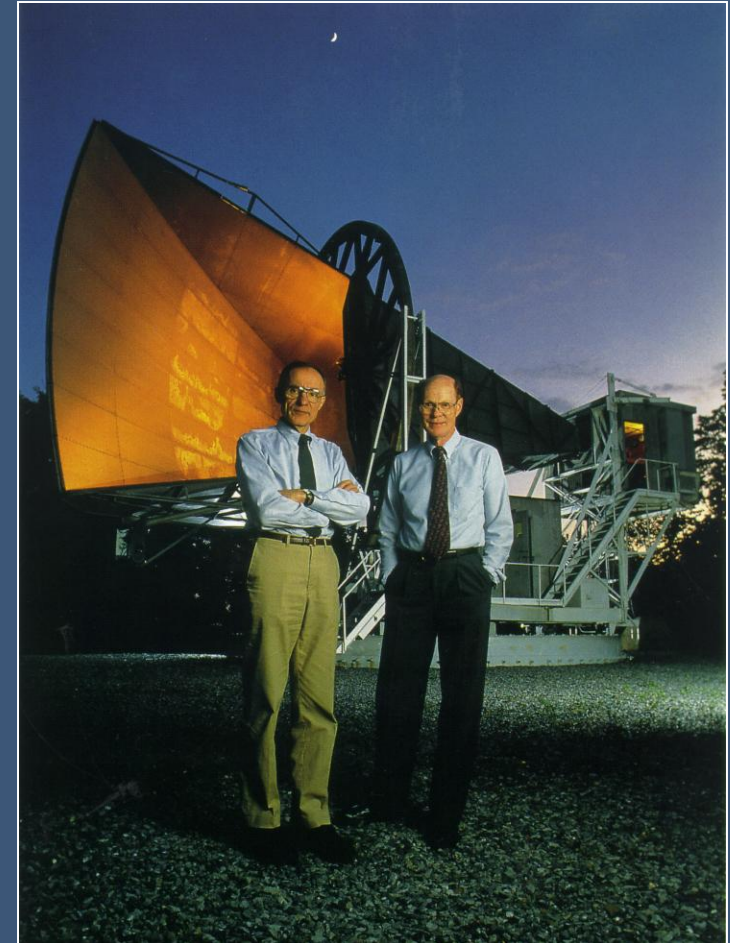
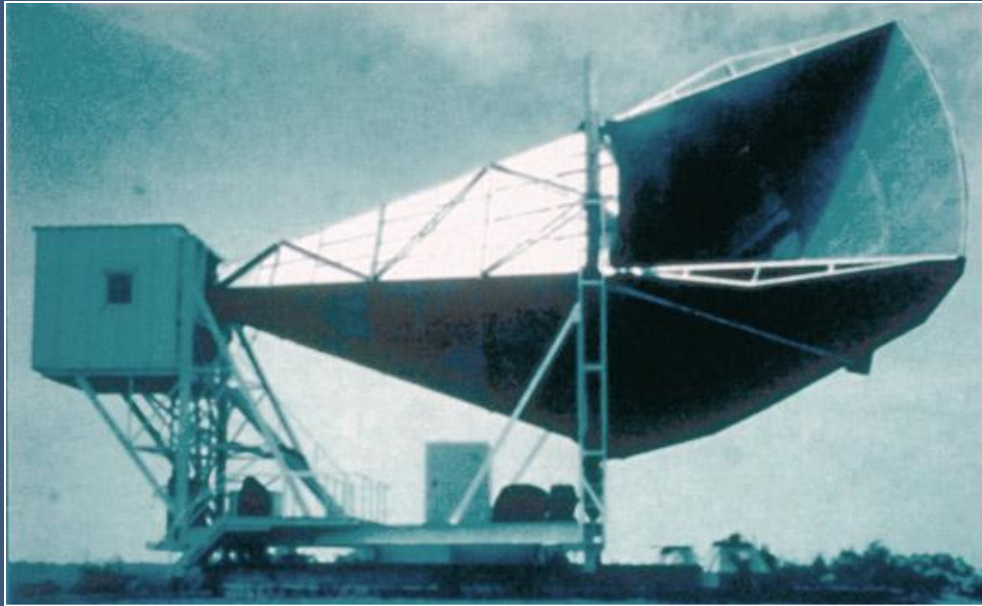
Zeit



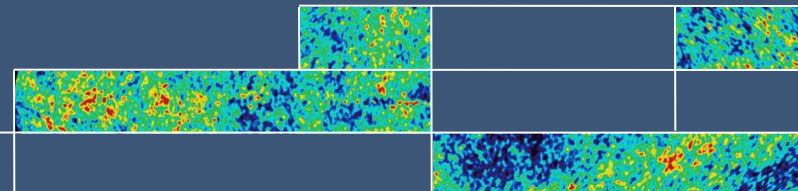
1965 - Die Entdeckung

370000 Jahre

Zeit →



Mikrowellen-Strahlung
aus dem Kosmos

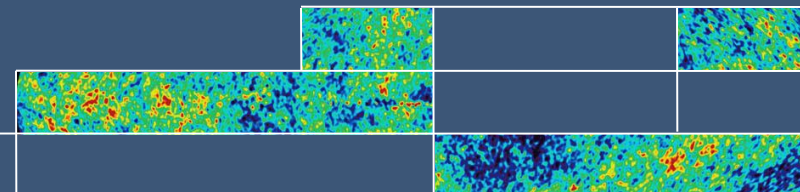
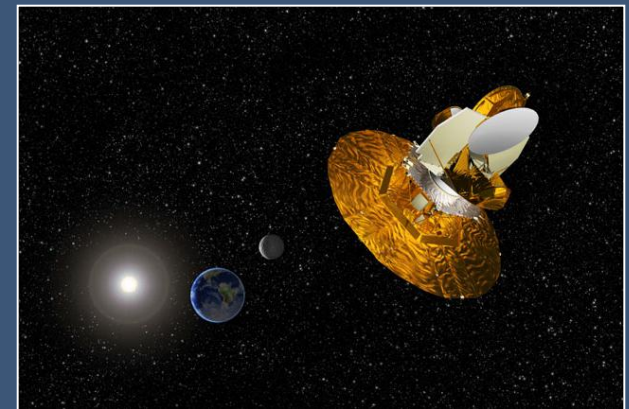
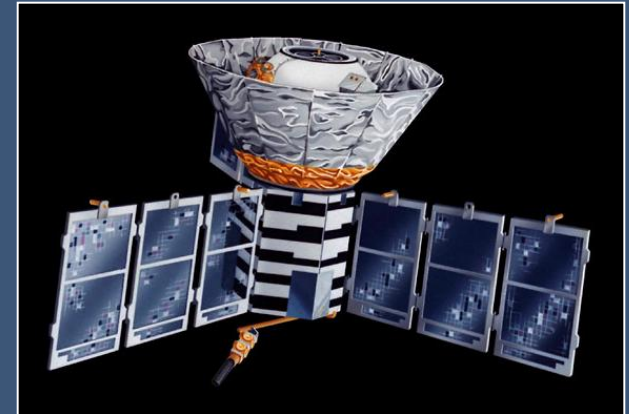


COBE, WMAP und Planck

370000 Jahre

Zeit →

- COBE
 - COsmic Background Explorer
 - 1989 – 1993
 - Nobelpreis
 - 2006 (G. Smoot, J. Mather)
- WMAP
 - Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
 - 2001 - 2010
- Planck
 - Start 2009, Ergebnisse 2013

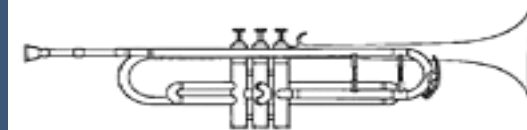
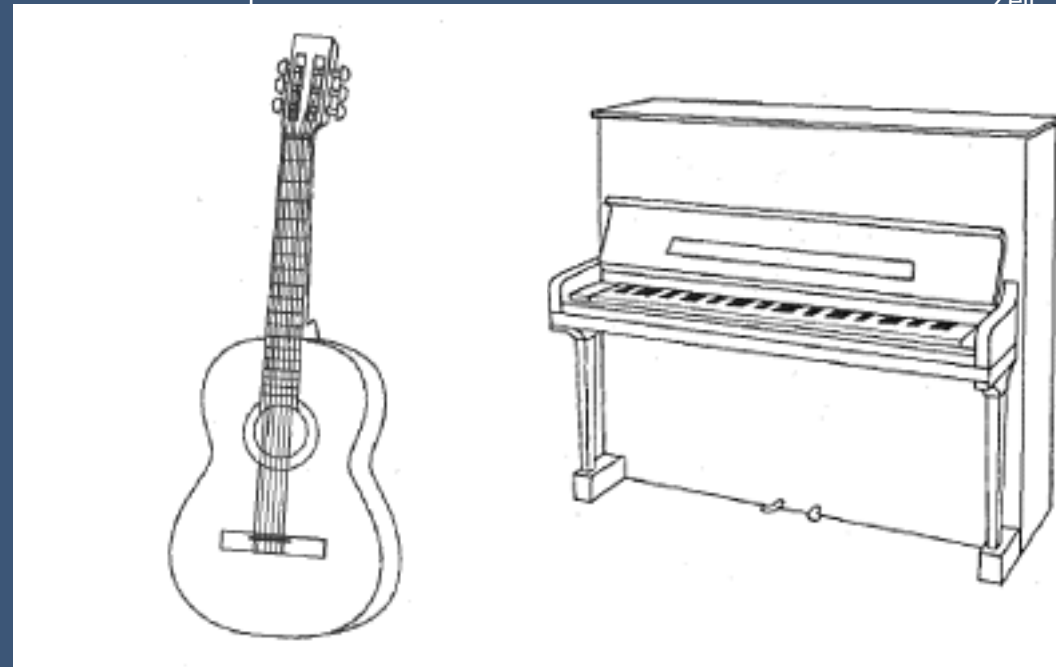


Frequenzanalyse

- Drei Instrumente spielen ein A (440Hz)
- Unser Ohr hört den Unterschied. Wie?
 - Obertonreihe ...
 - Frequenzanalyse hängt von Material des Instruments ab
- **Was ist die Obertonreihe unseres Universums?**

370000 Jahre

Zeit →

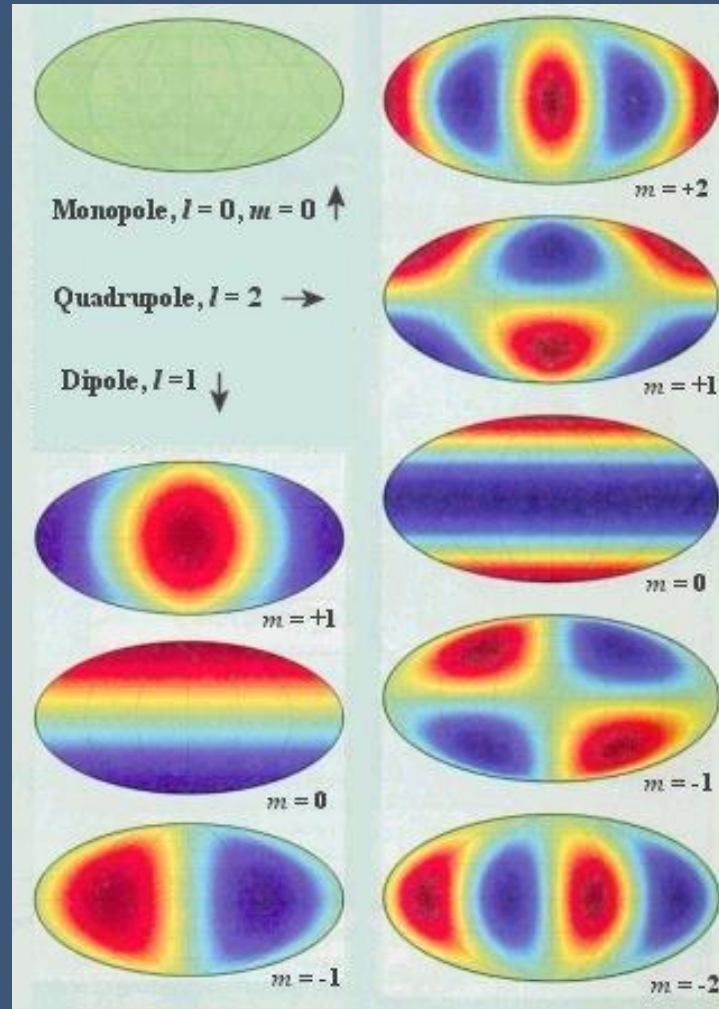


a?

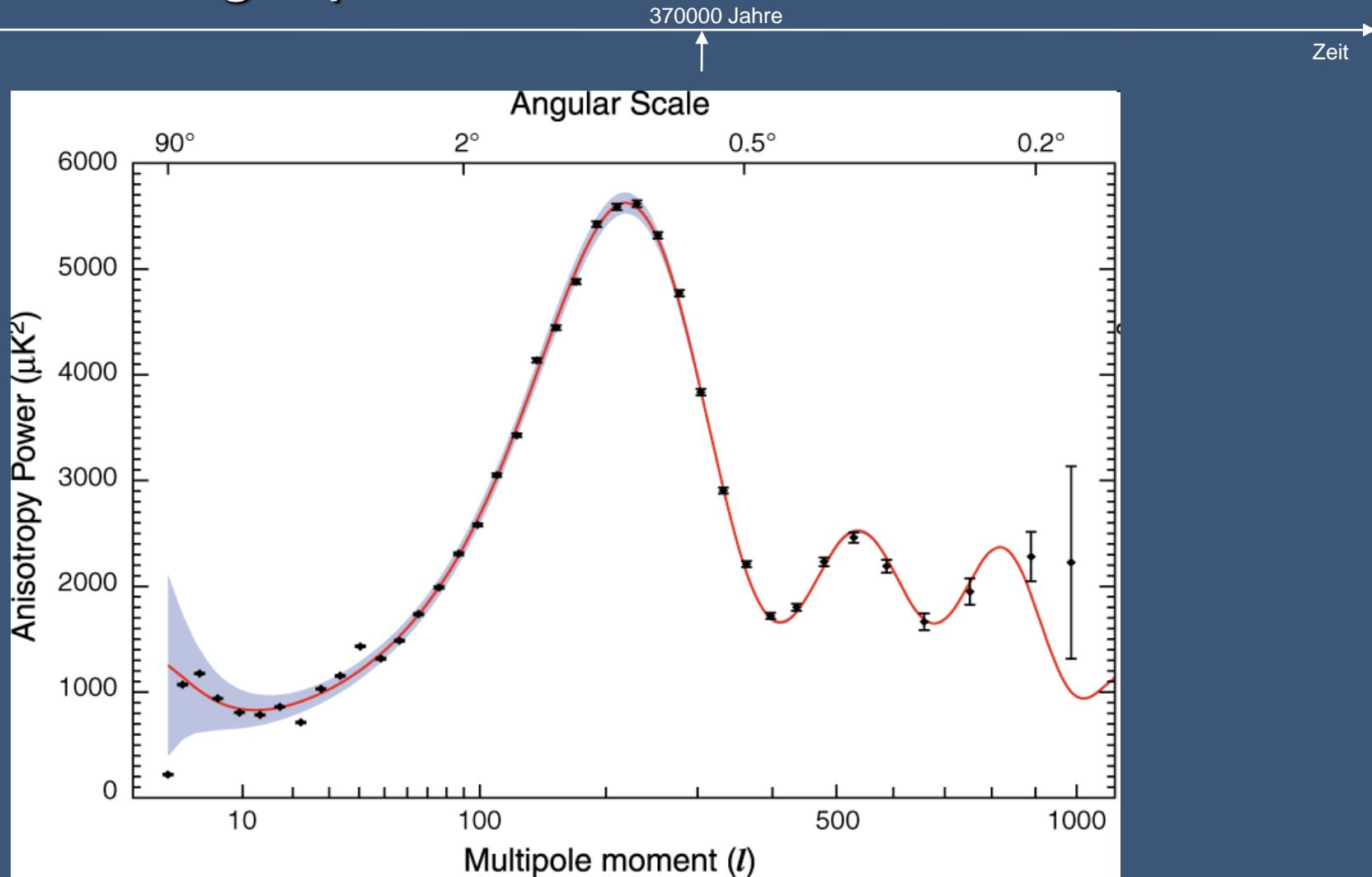
Multipolentwicklung

370000 Jahre

Zeit →



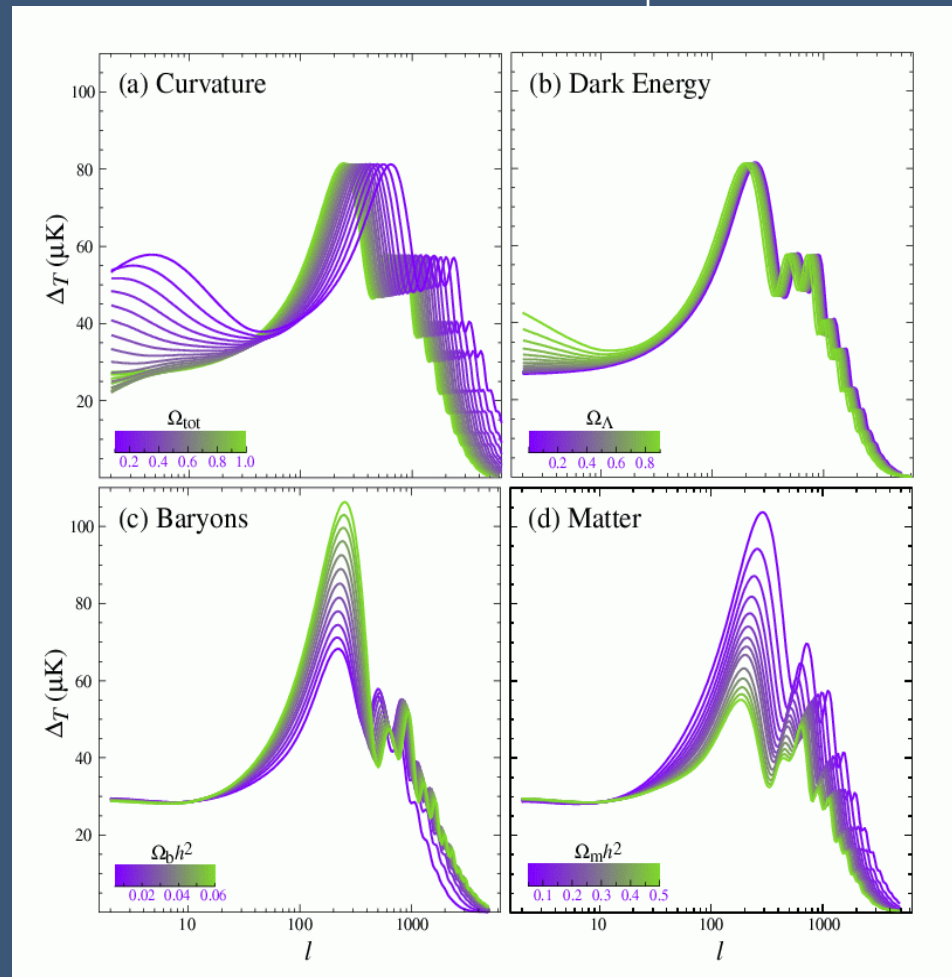
Das Leistungsspektrum



Kosmologische Modelle

370000 Jahre

Zeit



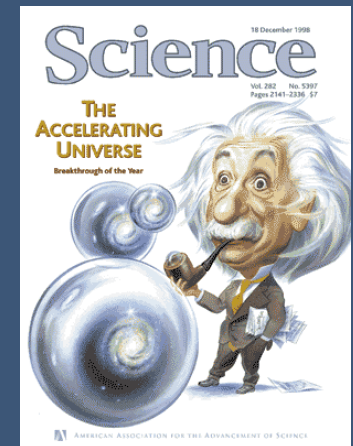
Das beschleunigte Universum

Zeit →

- Einsteins Kosmologische Konstante

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

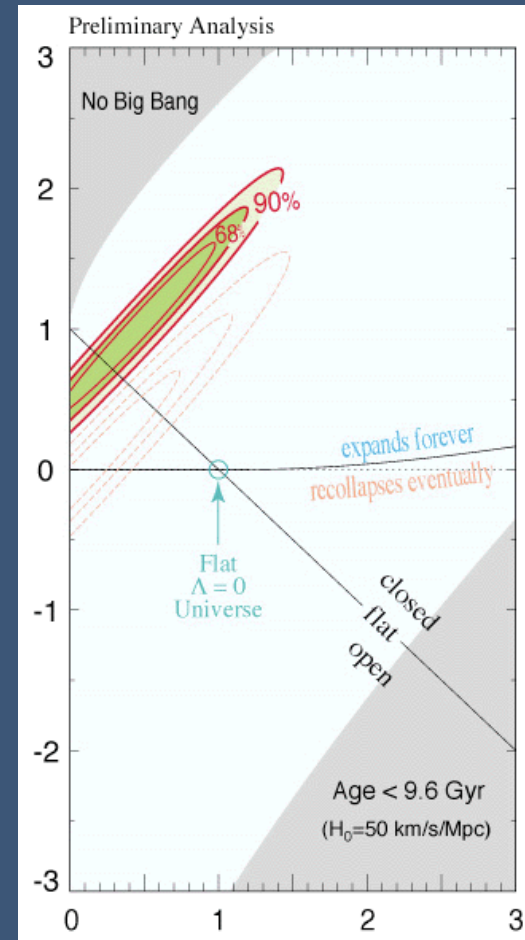
- Kosmologische Konstante wirkt wie eine Anti-Gravitation



Das dunkle Universum

- ~70% Dunkle Energie
(Kosmologische Konstante)
- ~30% Materie
(5% normale und 25% dunkle Materie)
- Nobelpreis 2011 Perlmutter, Schmidt, Riess

Ω_Λ



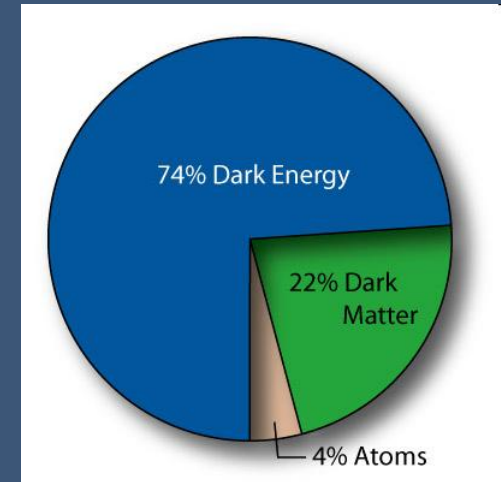
Ω_m

Kosmologische Parameter

370000 Jahre

Zeit

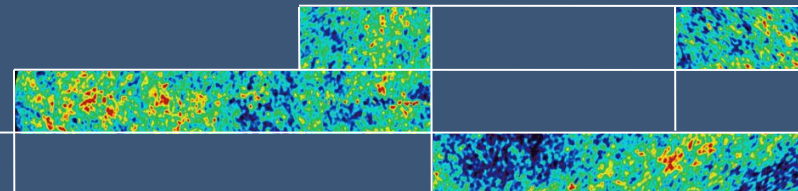
- Gesamtenergiedichte 1.01 ± 0.03
- Materiedichte 0.28 ± 0.01
- Baryondichte 0.045 ± 0.001
- Vakuumenergiedichte 0.73 ± 0.03
- Neutrindichte < 0.014
- Alter des Universums 13.7 ± 0.2 Gyr
- Hubble-Parameter 0.704 ± 0.025



Dunkle Materie

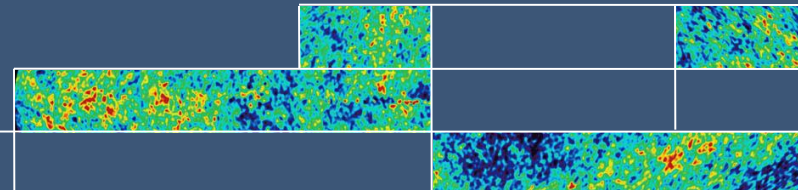
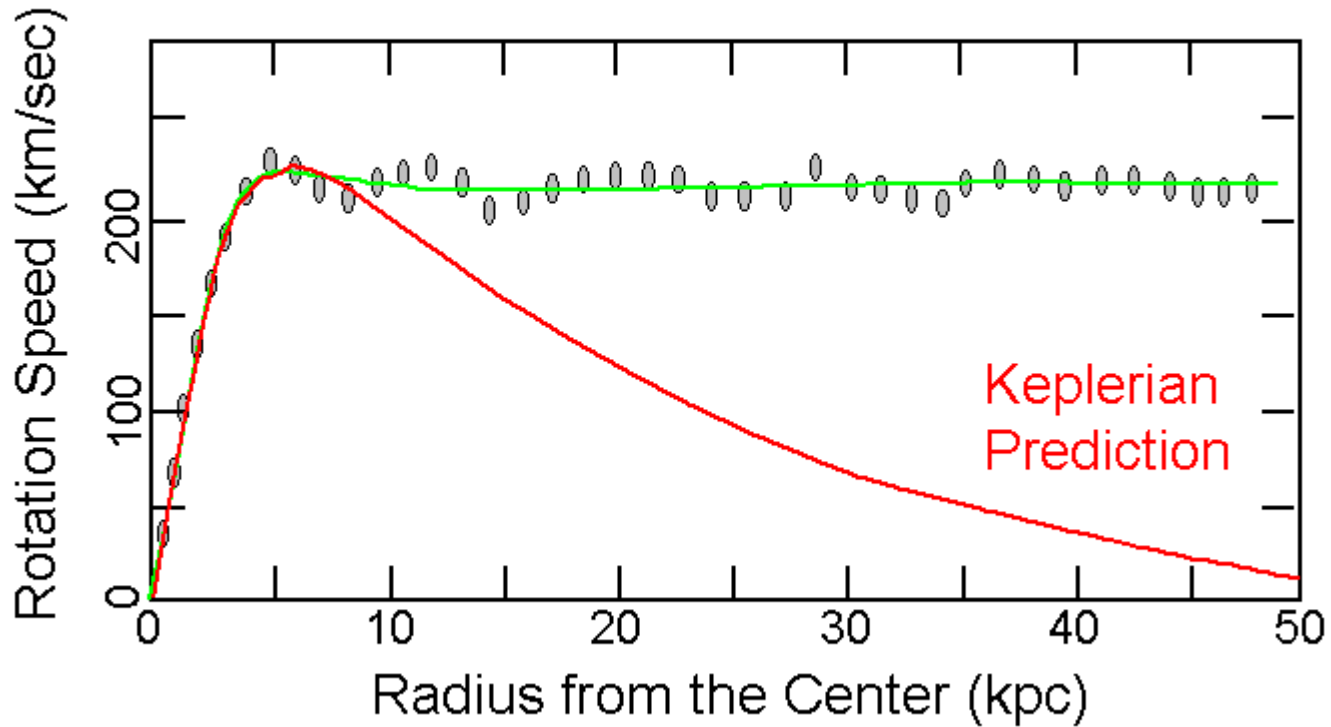
Heute
↑
Zeit →

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



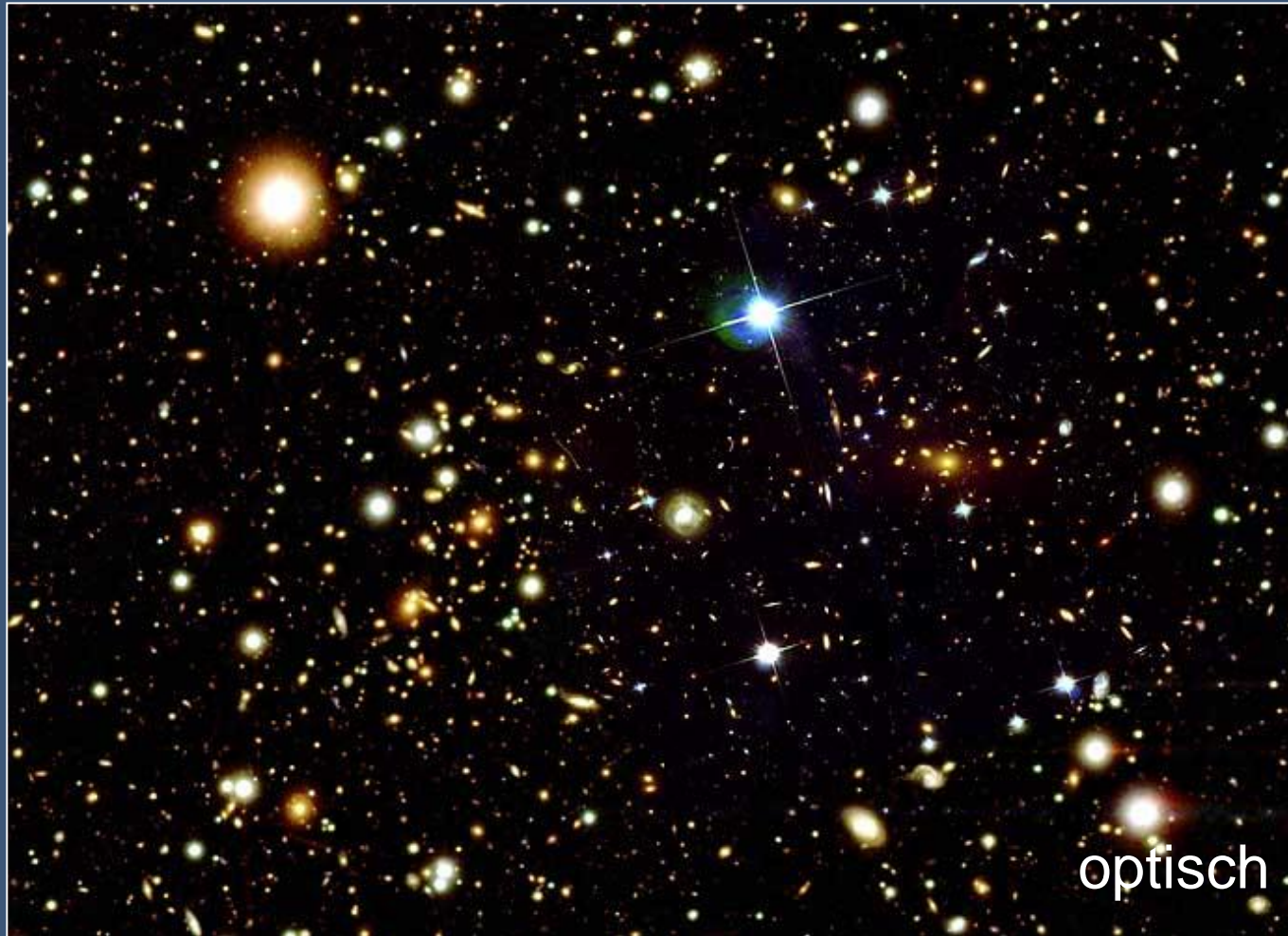
Rotationskurven

Observed vs. Predicted Keplerian



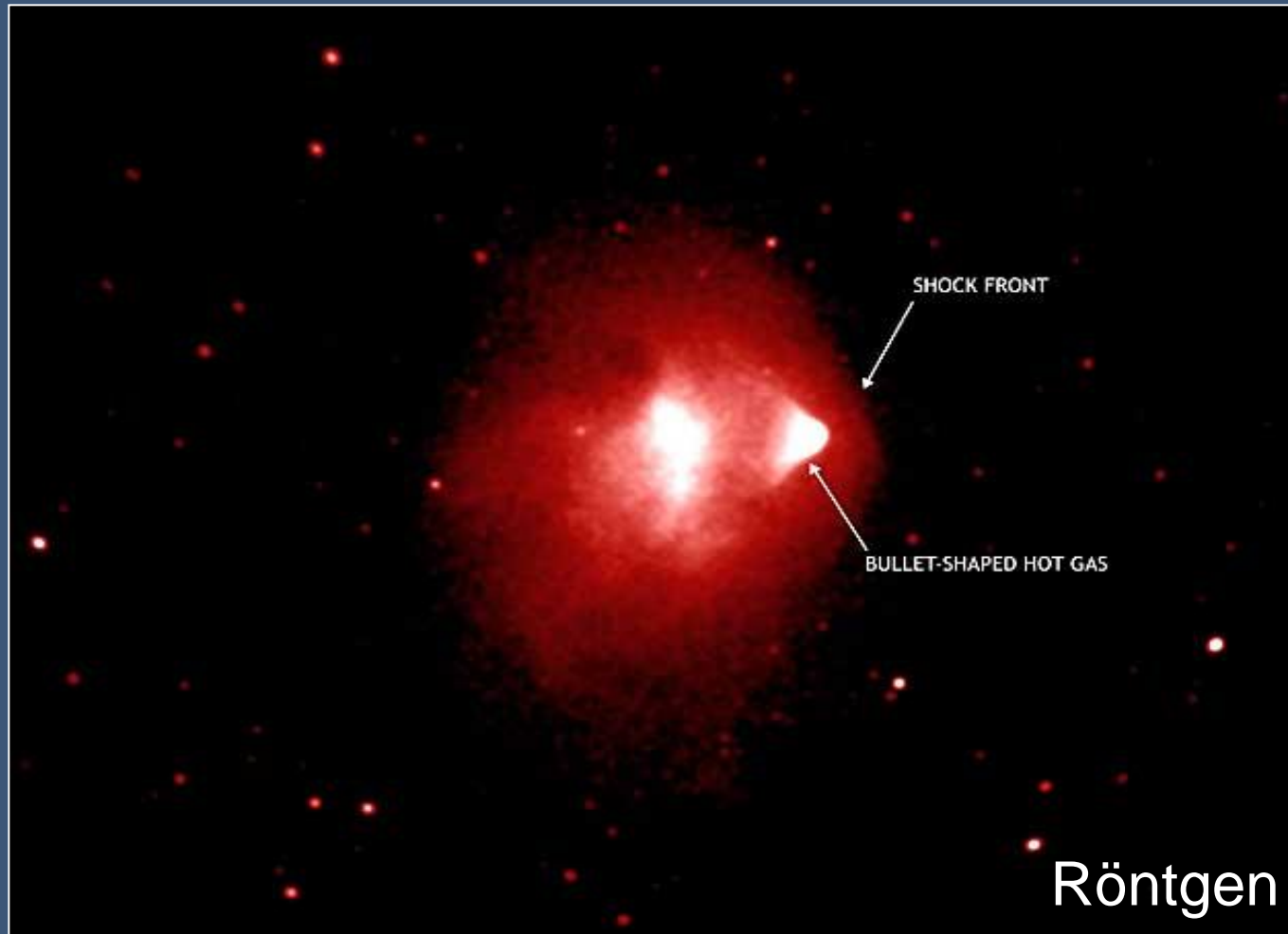
Galaxien-Cluster 1E 0657-56

Zeit →



Galaxien-Cluster 1E 0657-56

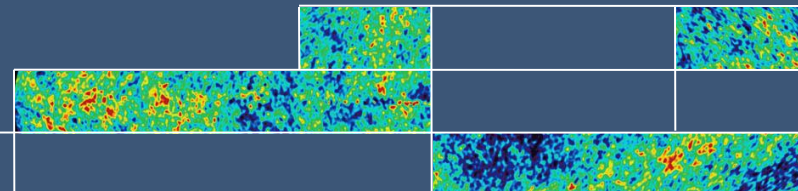
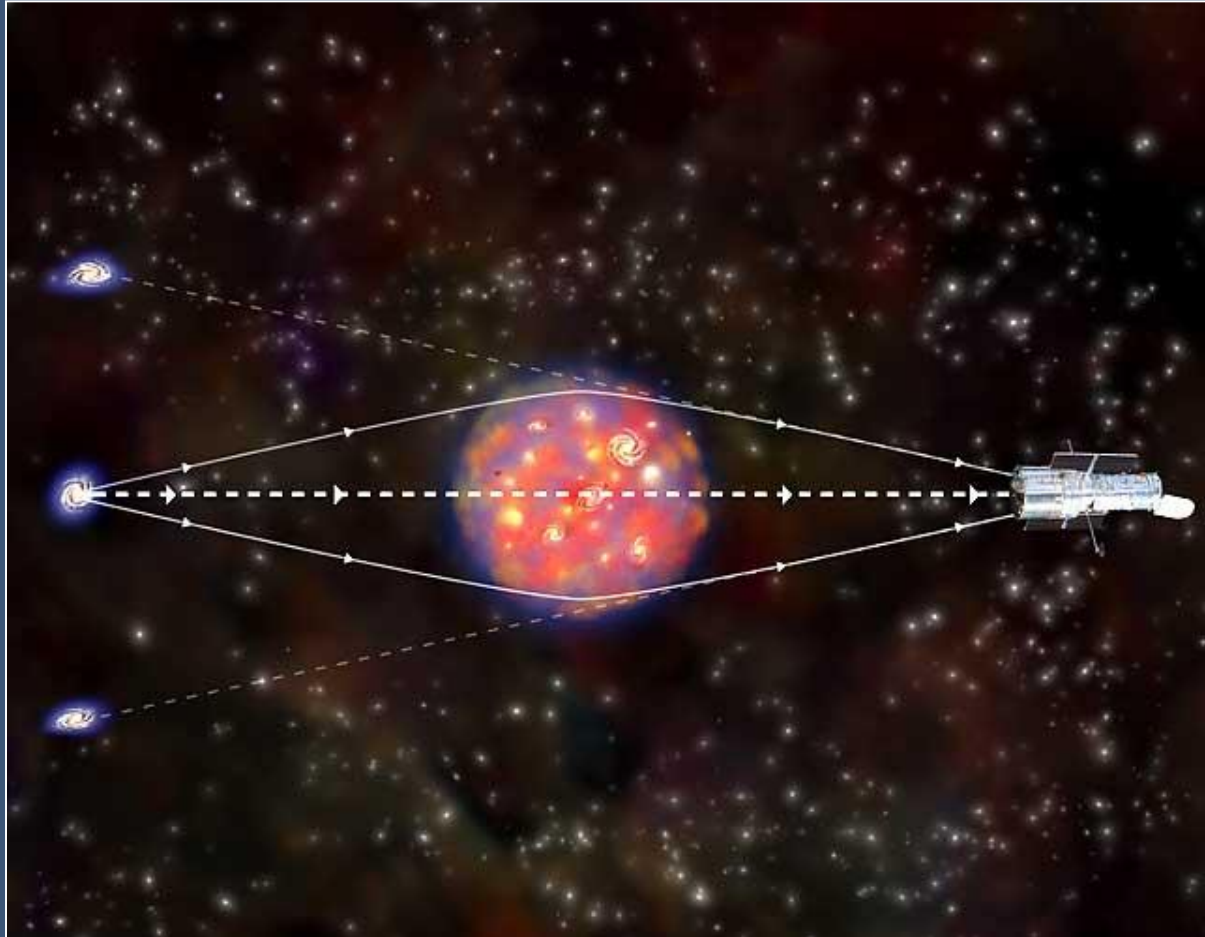
Zeit →





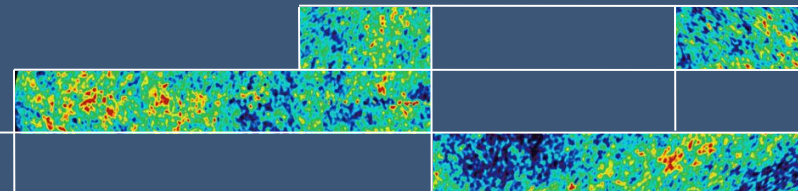
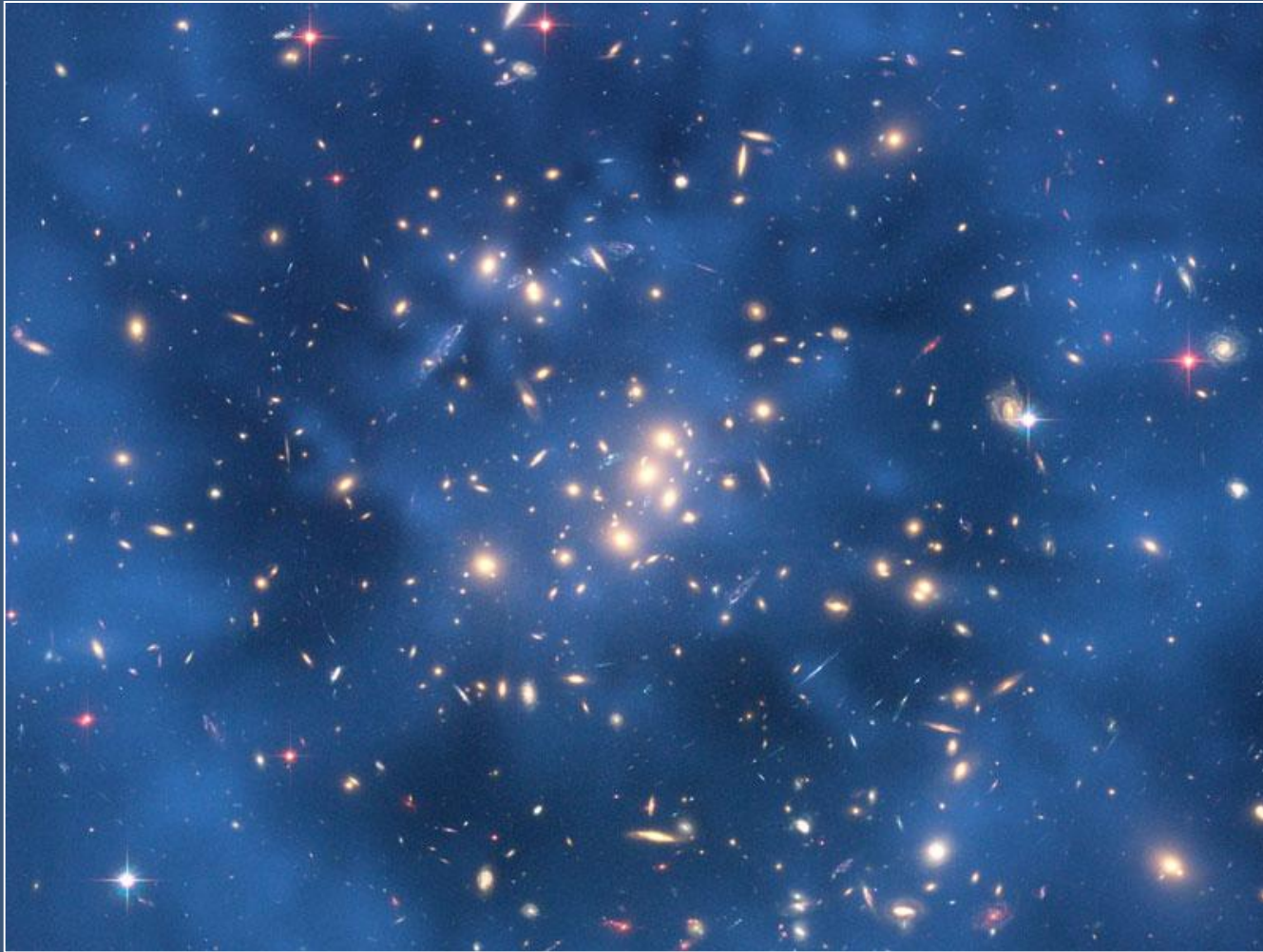
Gravitationslinsen

Zeit →



Galaxien Cluster CL0024 17

Heute
↑
Zeit →

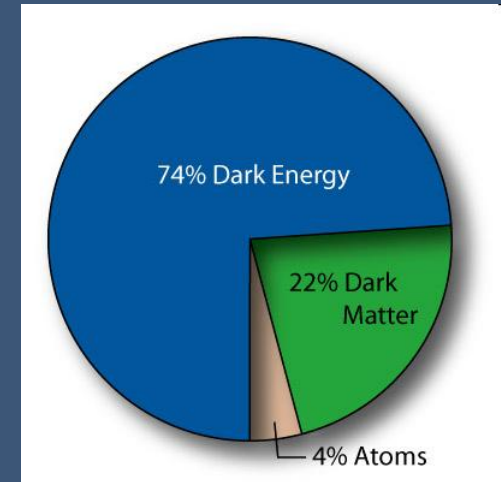


Kosmologische Parameter

370000 Jahre

Zeit →

- Gesamtenergiedichte 1.01 ± 0.03
- Materiedichte 0.28 ± 0.01
- Baryondichte 0.045 ± 0.001
- Vakuumenergiedichte 0.73 ± 0.03
- Neutrinodichte < 0.014
- Alter des Universums 13.7 ± 0.2 Gyr
- Hubble-Parameter 0.704 ± 0.025

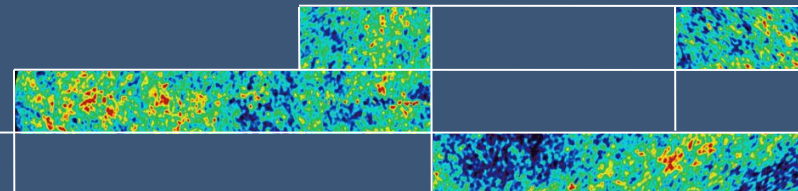


Zusammenfassung

Heute
↑
Zeit

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

- 97% der Energiedichte des Universums sind unbekannt!



Zeit