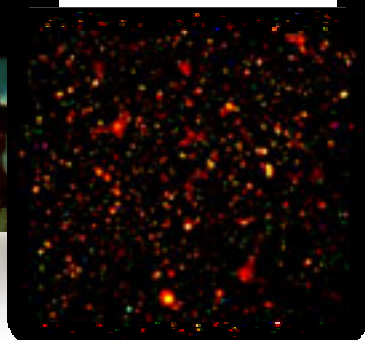
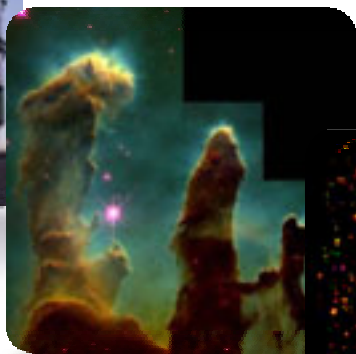
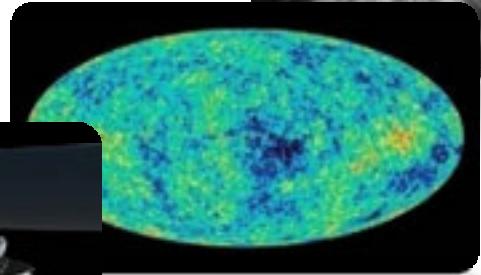
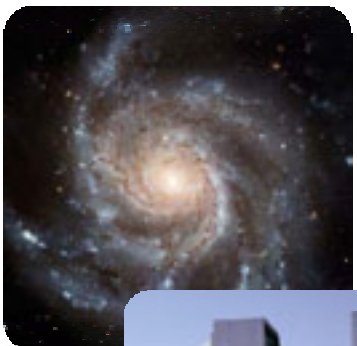


Lehrerfortbildung am 30. Juli 2009

Galaxien, Schwarze Löcher und Kosmologie

Andreas Müller



Deutsches Museum



Übersicht



Die Milchstraße

Dunkle Materie

Geburt und Tod der Sterne

Schwarze Löcher

Galaxien

Pioniere der Kosmologie

Rotverschiebung

Friedmannsche Weltmodelle

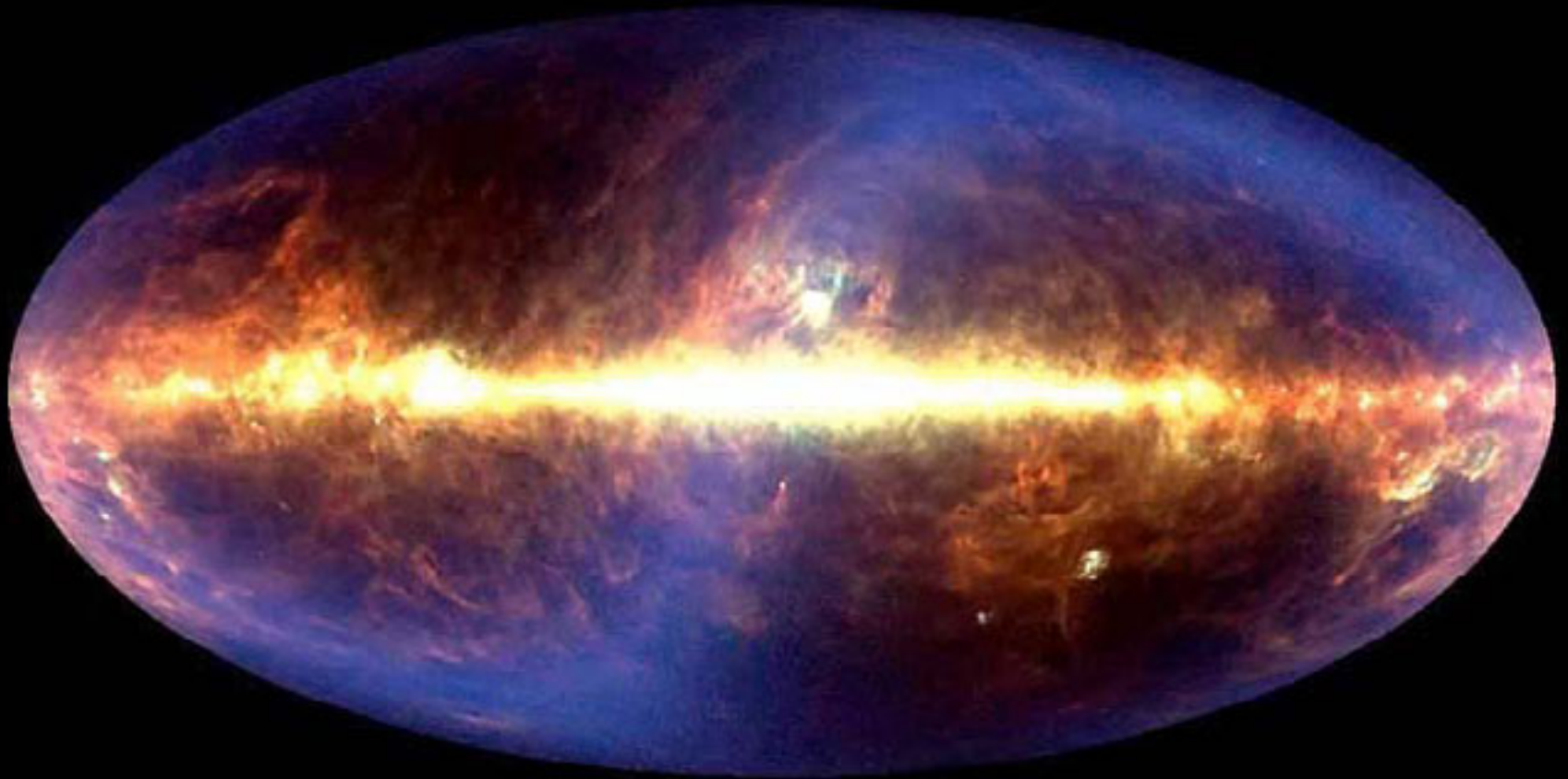
Supernovae

Galaxienhaufen

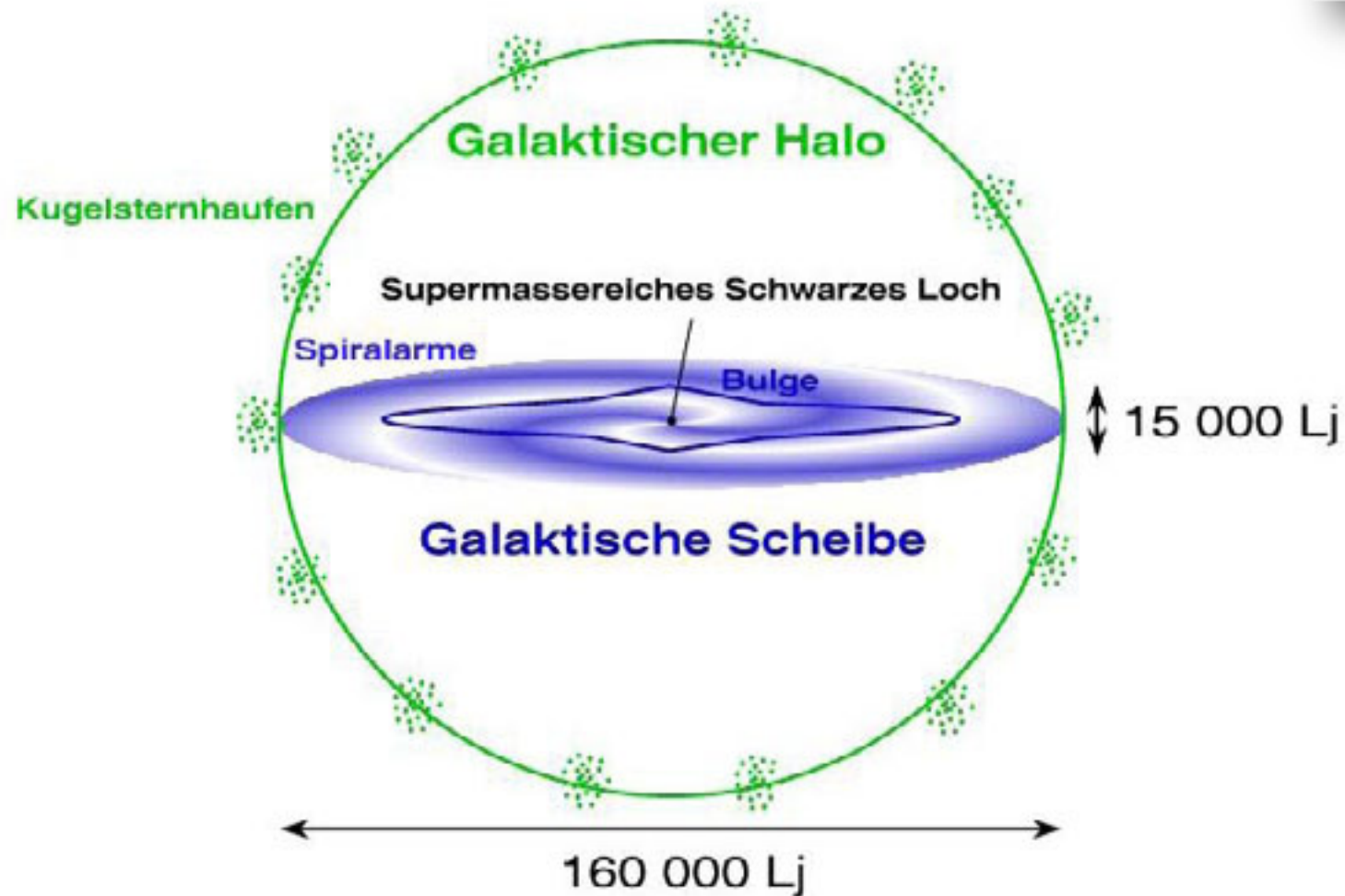
Dunkle Energie

kosmische Hintergrundstrahlung

Die Milchstraße



Struktur der Milchstraße



Kugelsternhaufen



[Die urheberrechtlich geschützten Bilder wurden entfernt, sind jedoch erhältlich auf der Website <http://apod.nasa.gov/apod/> , Bilder der Tage 15.04.07]

Fotos: apod 15.11.+15.04.2007

Entstehung der Milchstraße



[Der Film mit einer Computersimulation zur Entstehung der Milchstraße ist auf Anfrage erhältlich]

*Sommer-Larsen et al. 2005,
Niels-Bohr-Institut,
Kopenhagen*

Spiralgalaxie M81

[Das urheberrechtlich geschützte Bild wurde entfernt, ist jedoch erhältlich auf der Website <http://apod.nasa.gov/apod/> , Bild des Tages 07.07.06]

Foto: apod 07.07.2006

Das Zentrum der Milchstraße im Infraroten ...



Foto: 2MASS Survey

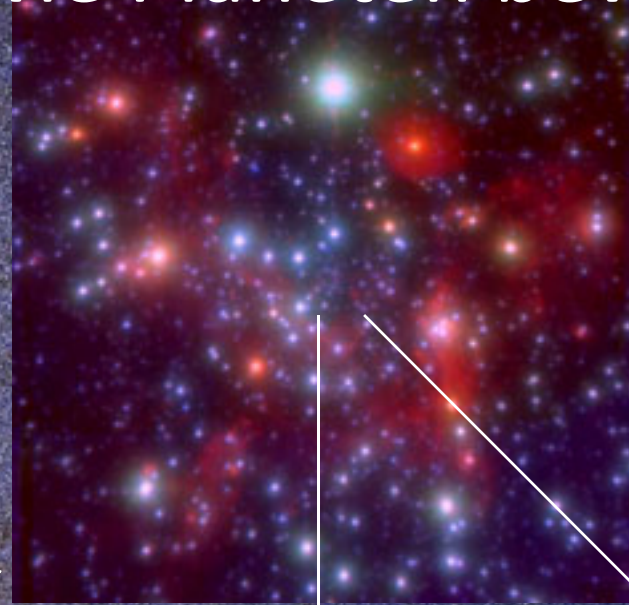
... hat einen prominent Sternhaufen ...



10''

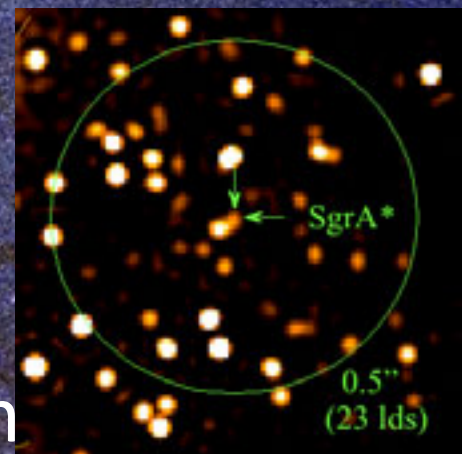
Sternhaufen
~ 20''
= 2,5 Lichtjahre

... mit Sternen, die sich wie Planeten bewegen ...



10''

Zentraler Haufen
~ 1''
= 8000 AU
~ 200 x Sonnensystem

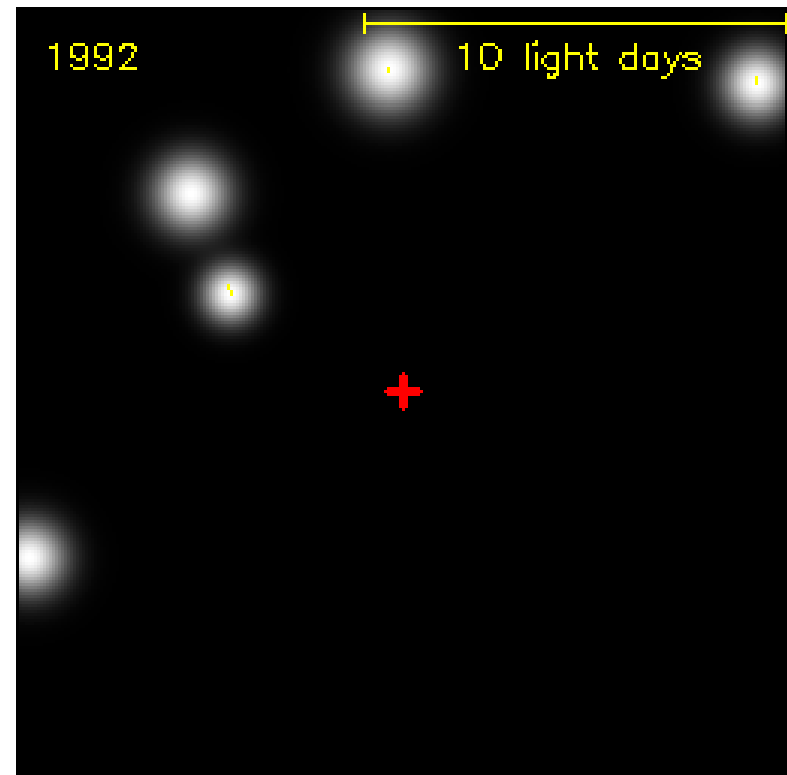


1''

0.5''
(23 Ids)

Zentrum der Milchstraße

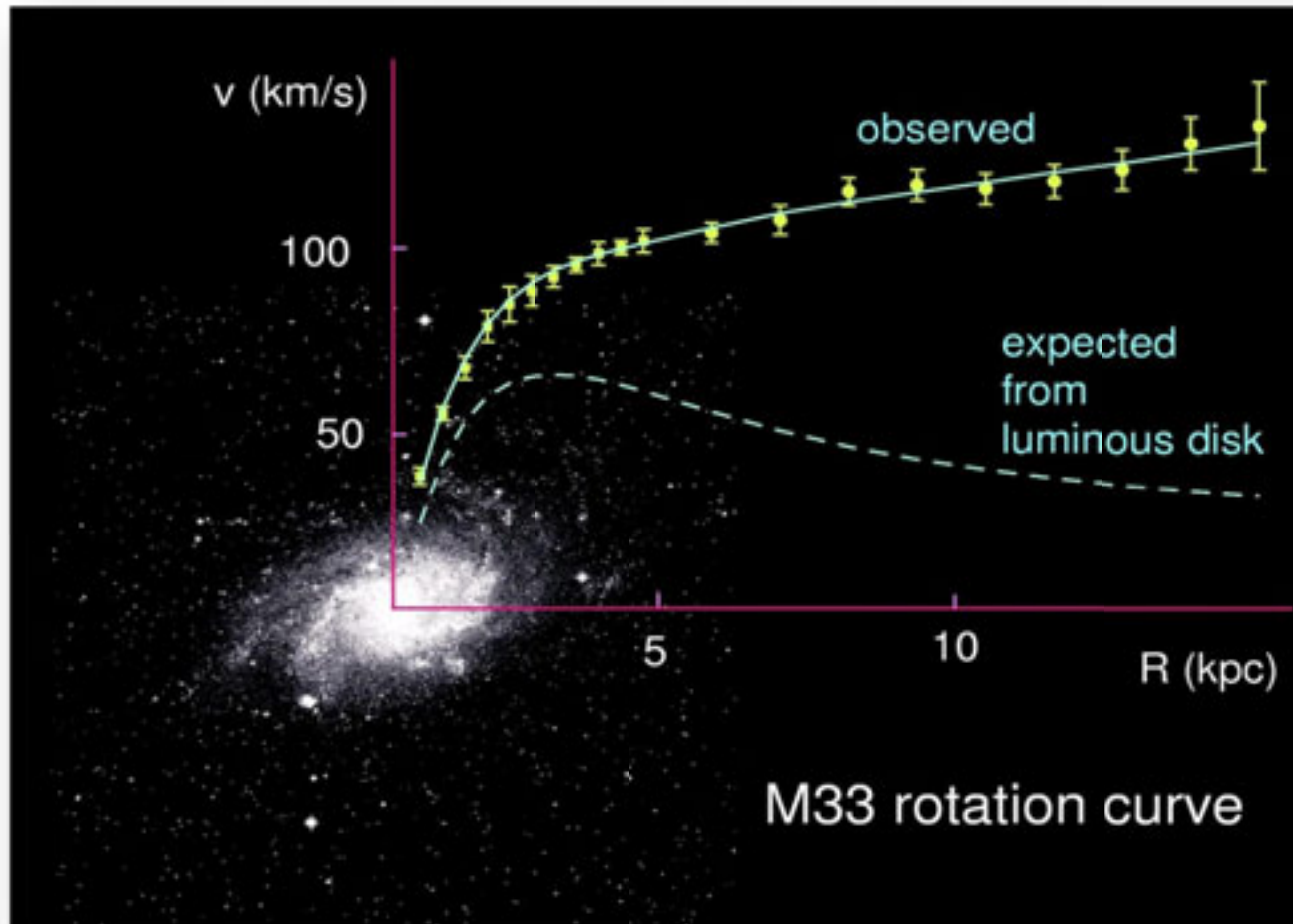
- Entfernung:
26000 Lichtjahre
- + Radioquelle Sgr A*
- Sterne auf
Ellipsenbahnen!
- **supermassereiches
Schwarzes Loch** mit
etwa 3.6 Millionen M_{\odot}



*Film: Sterne im Nahinfrarot,
Infrarotgruppe Genzel, MPE Garching*

RECHENPAKET

Dunkle Materie



Bildquelle: Bergström 2000

Geburt und Tod der Sterne



Bild: HST 2005

Kalter, dichter Staub

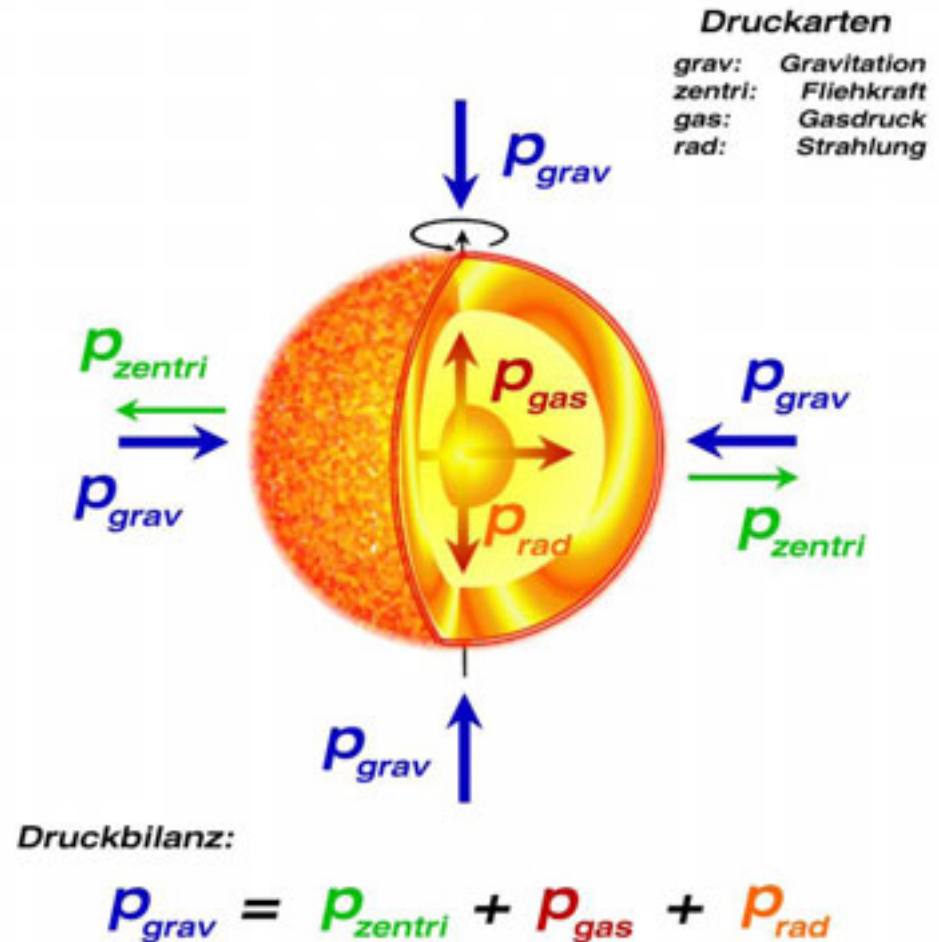
Sternbild Südliche Krone

Orion

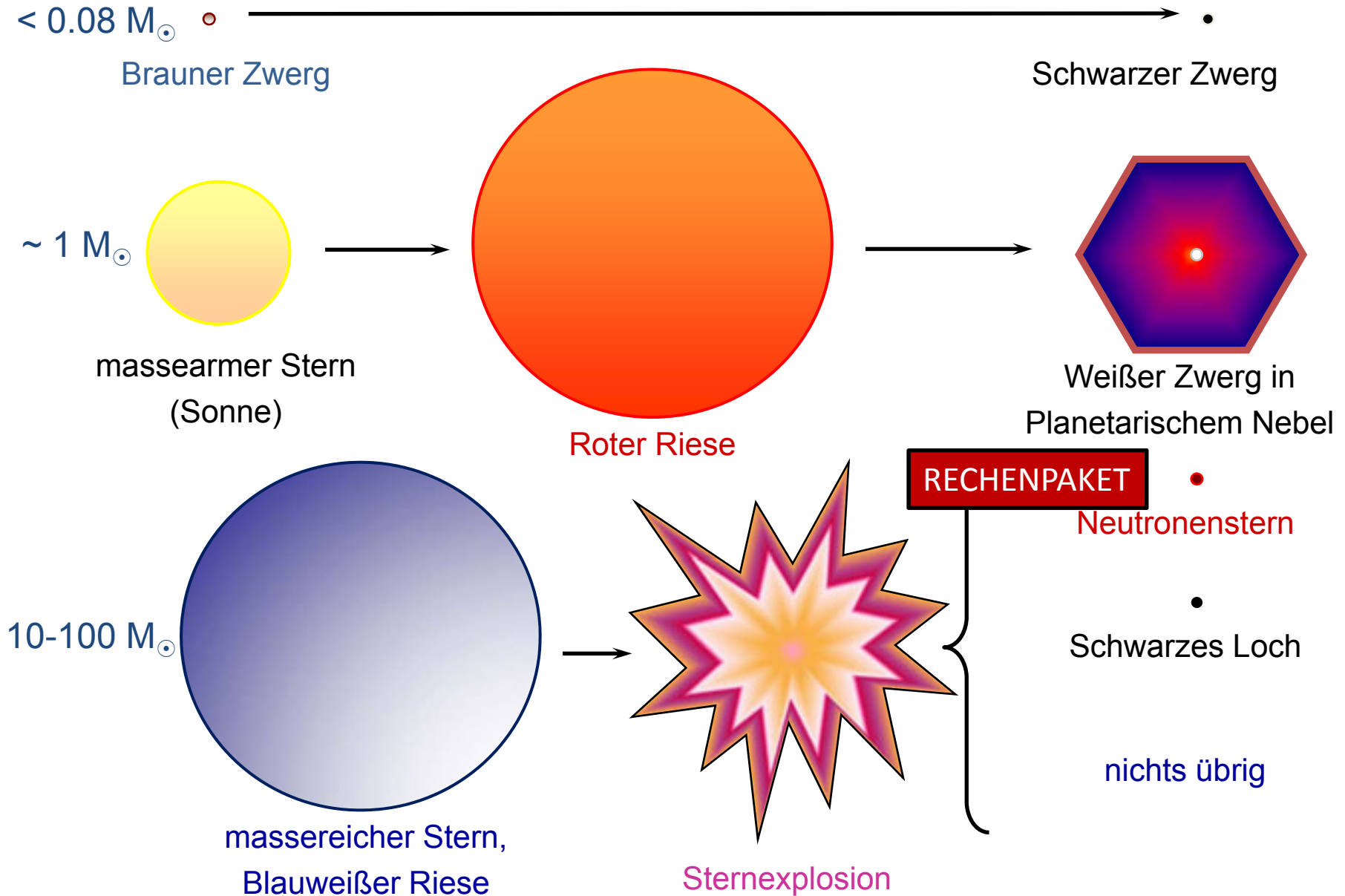


Was ist ein Stern?

„Plasmabälle im hydrostatischen Gleichgewicht, die durch Verschmelzung von Atomkernen leuchten“



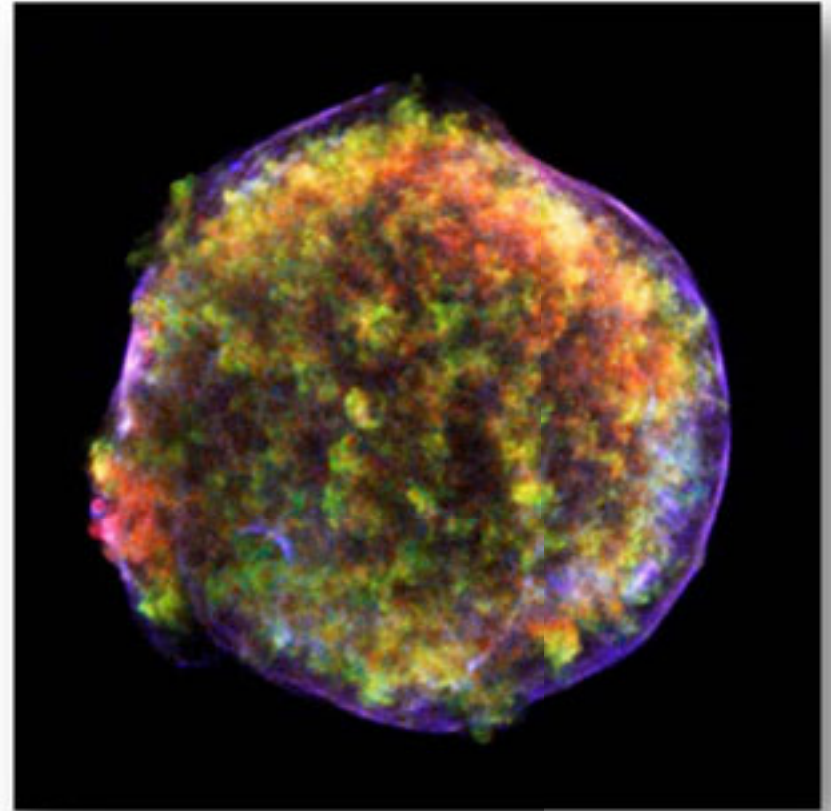
Was wird aus einem Stern?



Supernova in der Natur



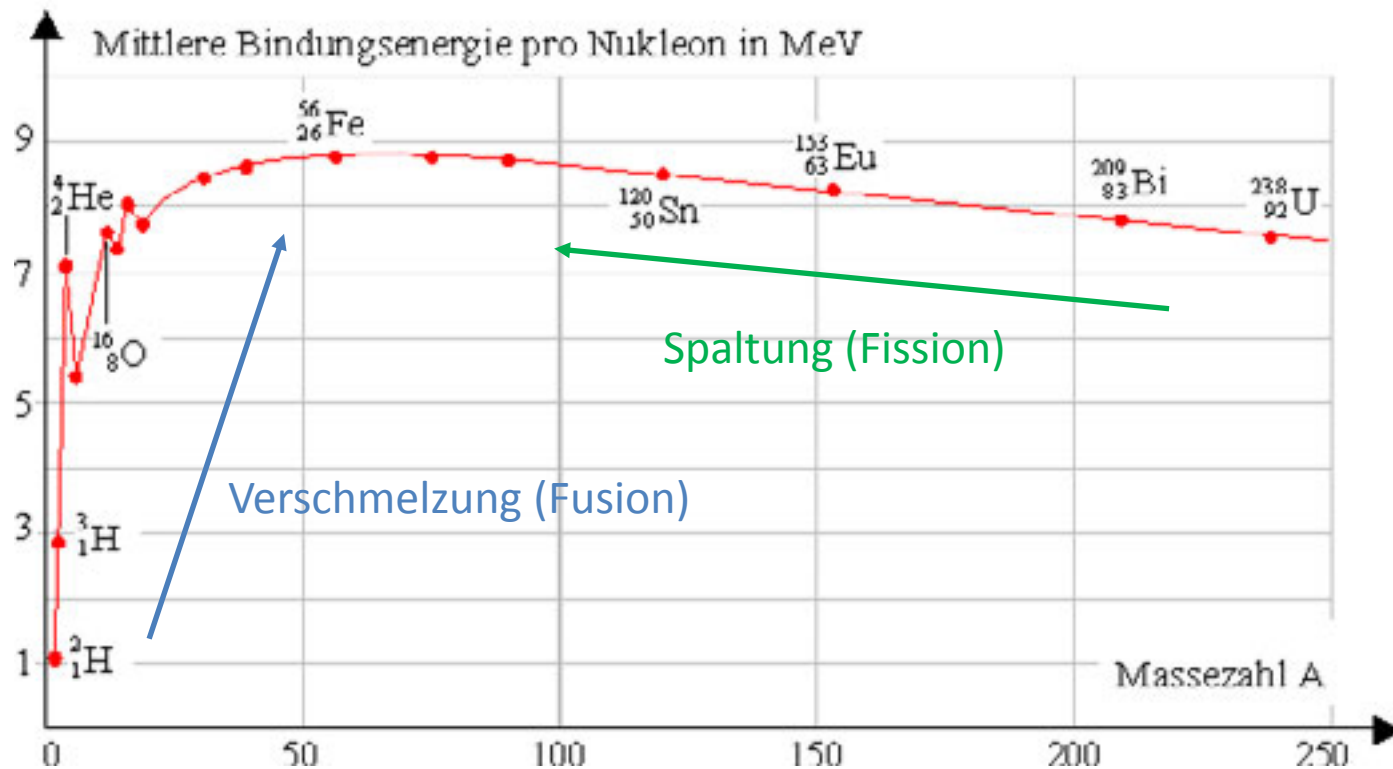
HST



Chandra

Kernphysik: Ursprung der schweren Elemente (schwerer als Eisen)

Bindungsenergie pro Nukleon



Bildquelle: LEIFI Uni München

Jede Masse kann zum Loch werden

- **Bedingung:**

Verdichten der Masse unter den Schwarzschildradius

$$R_S = 2 GM/c^2$$

[G: Newtonsche Gravitationskonstante]

[c: Vakuumlichtgeschwindigkeit]

M: Masse (variabel!)

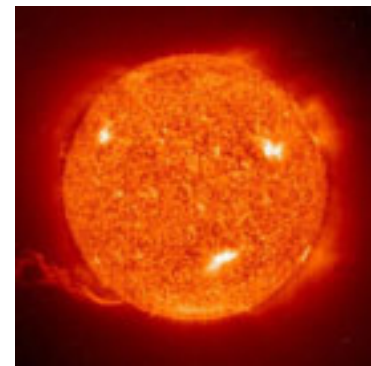
10^{-26} cm



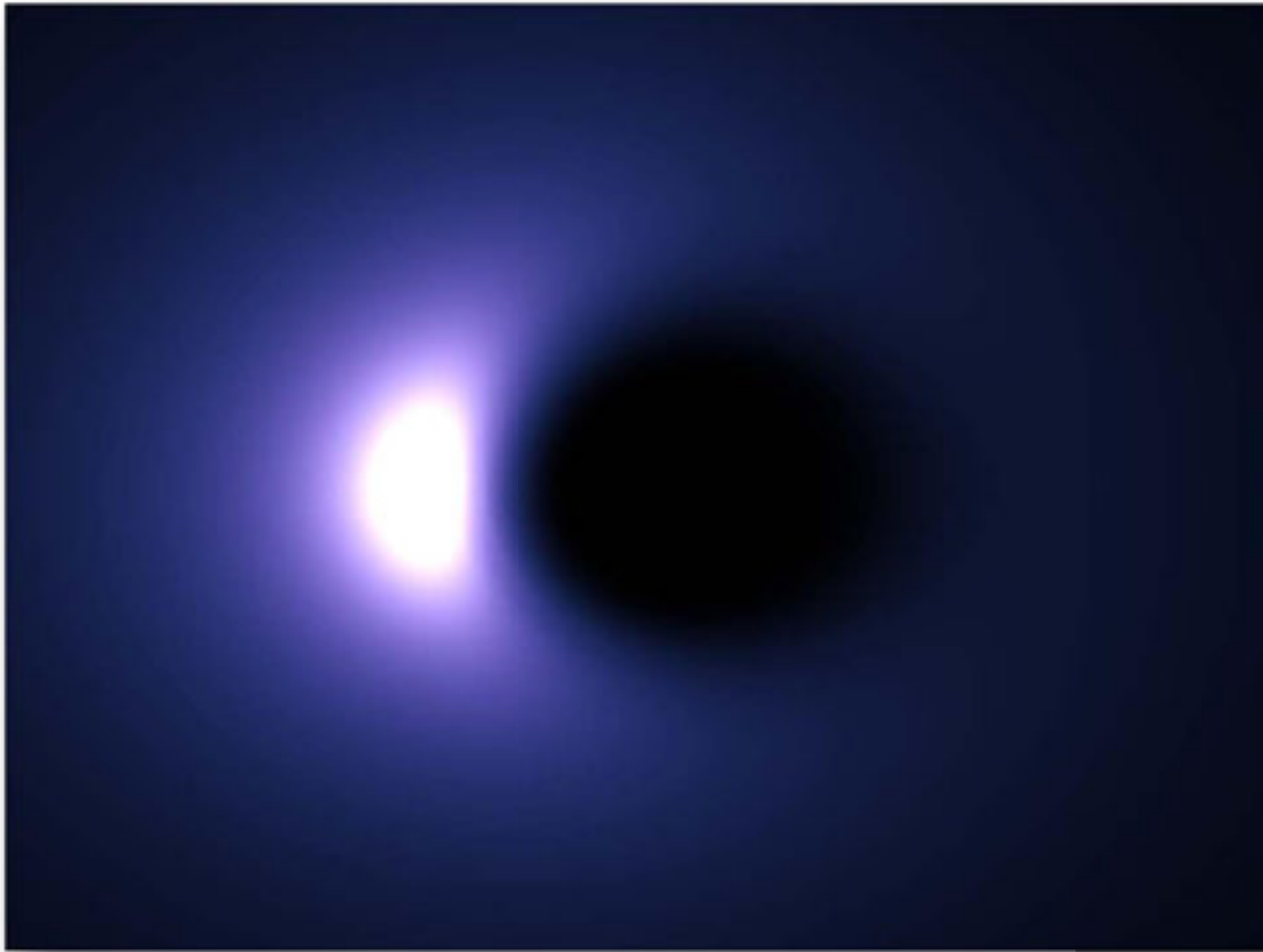
9 mm



3 km



Leuchtende Gasscheibe um Schwarzes Loch





Galaxien

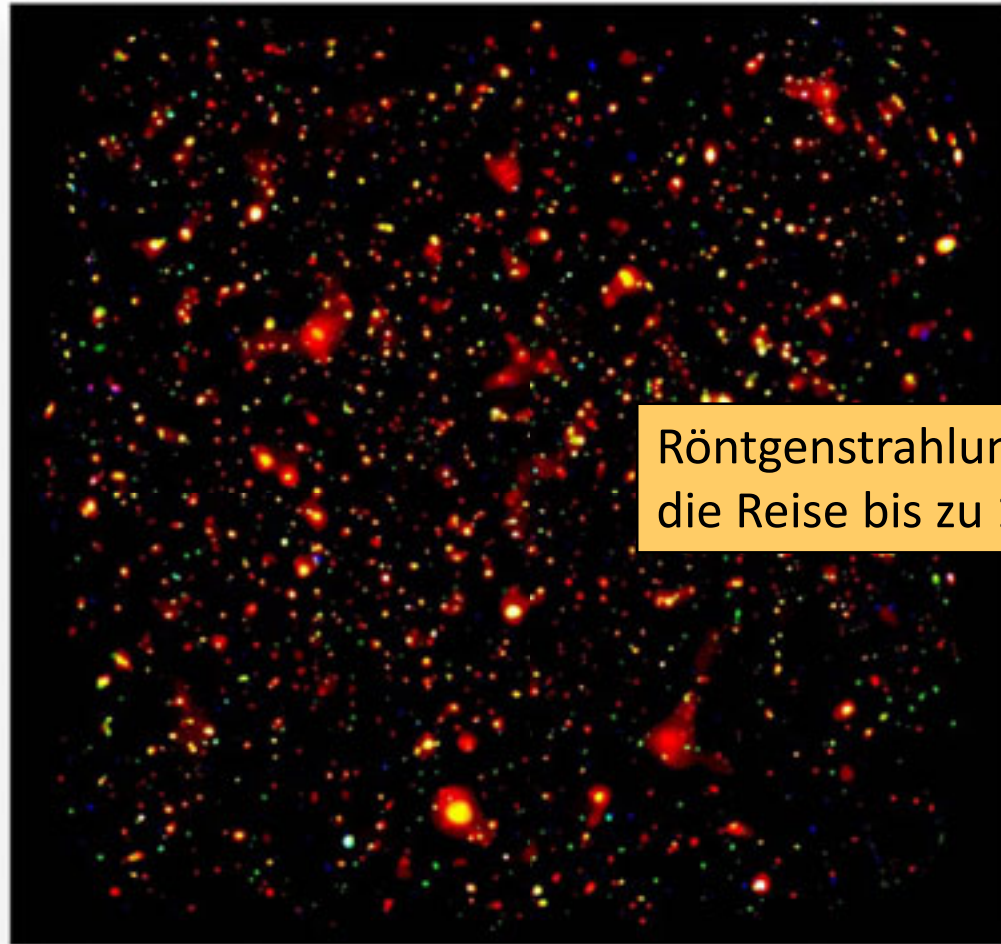
Galaxien und massereiche Schwarze Löcher



Bildquelle: Weltraumteleskop Hubble



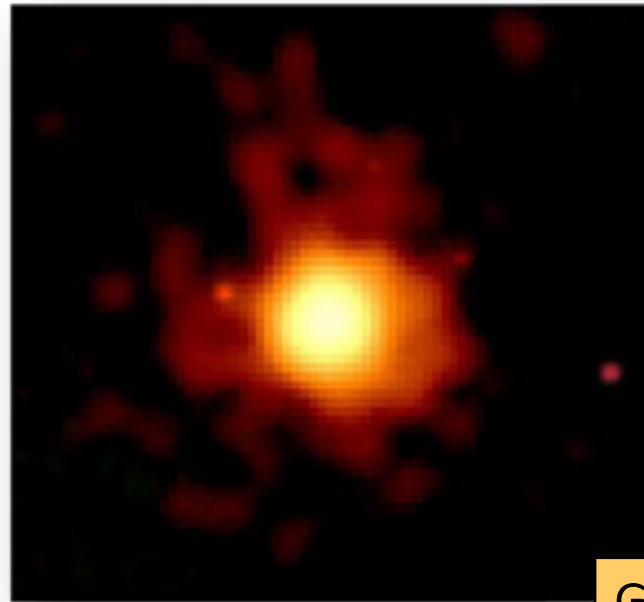
Massereiche Schwarze Löcher



Röntgenstrahlung benötigte für die Reise bis zu 12 Mrd. Jahre!

Bildquelle: XMM-COSMOS, Röntgengruppe Hasinger, MPE Garching

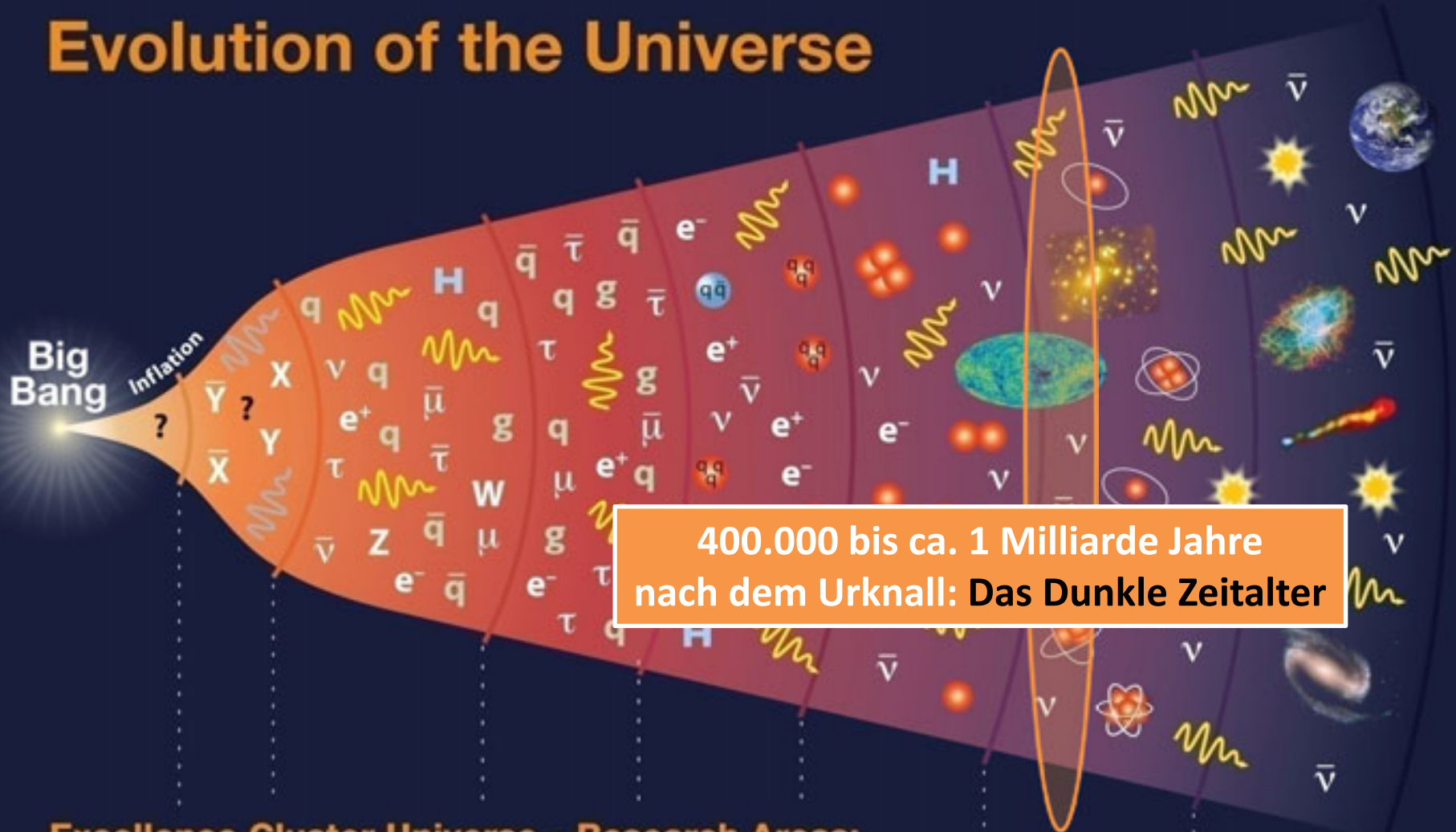
Gammastrahlenausbrüche: Schwarze Löcher bei der Geburt erwischt



GRB 090423, $z = 8$
650 Mio. Jahre nach Urknall

Bildquelle: Röntgenfoto, NASA/Swift/Stefan Immler

Evolution of the Universe



400.000 bis ca. 1 Milliarde Jahre nach dem Urknall: **Das Dunkle Zeitalter**

Excellence Cluster Universe – Research Areas:





Moderne Kosmologie

Friedmann-Gleichungen



- Kosmologisches Prinzip: Kosmos isotrop & homogen
- FG folgen aus den Einsteinschen Feldgleichungen
- *relativistische Kosmologie* (seit 1917)
- Friedmann –Lösung 1922
- FG beschreiben die Dynamik des Kosmos als Ganzes
- FG bieten Lösungen für dynamische oder statische Universen an mit unterschiedlicher Krümmung, mit oder ohne Λ , mit unterschiedlichen Materieformen
- *Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Modelle*

(Einzelheiten unter www.astronomiewissen.de)

Geburt des Raums



Abbé G. Lemaître Albert Einstein

- 1925: Entdeckung eines expandierenden Kosmos als Lösung der Feldgleichungen
- Friedmann-Lemaître-Modell
- Nature 1931: Extrapolation in die Vergangenheit und Entdeckung der „Geburt des Raums“
- „Vater des Urknalls“ (1949: Hoyles Big Bang)

Bildquelle: Wikipedia

Galaxienflucht



Edwin Hubble

Bildquelle: Wikipedia

- 1929: empirischer Befund der Fluchtbewegung von Galaxien
- Hubble-Gesetz:

$$cz = H_0 D$$

(c : Vakuumlichtgeschwindigkeit;
gültig bis Rotverschiebung $z \sim 0.1$ bzw.
Entfernung $D \sim 420$ Mpc)

- Hubble-Konstante
 $H_0 = 70$ km/(s Mpc) ist Maß für
Expansionsgeschwindigkeit des
Kosmos

Rotverschiebung

Doppler-Effekt bei Licht

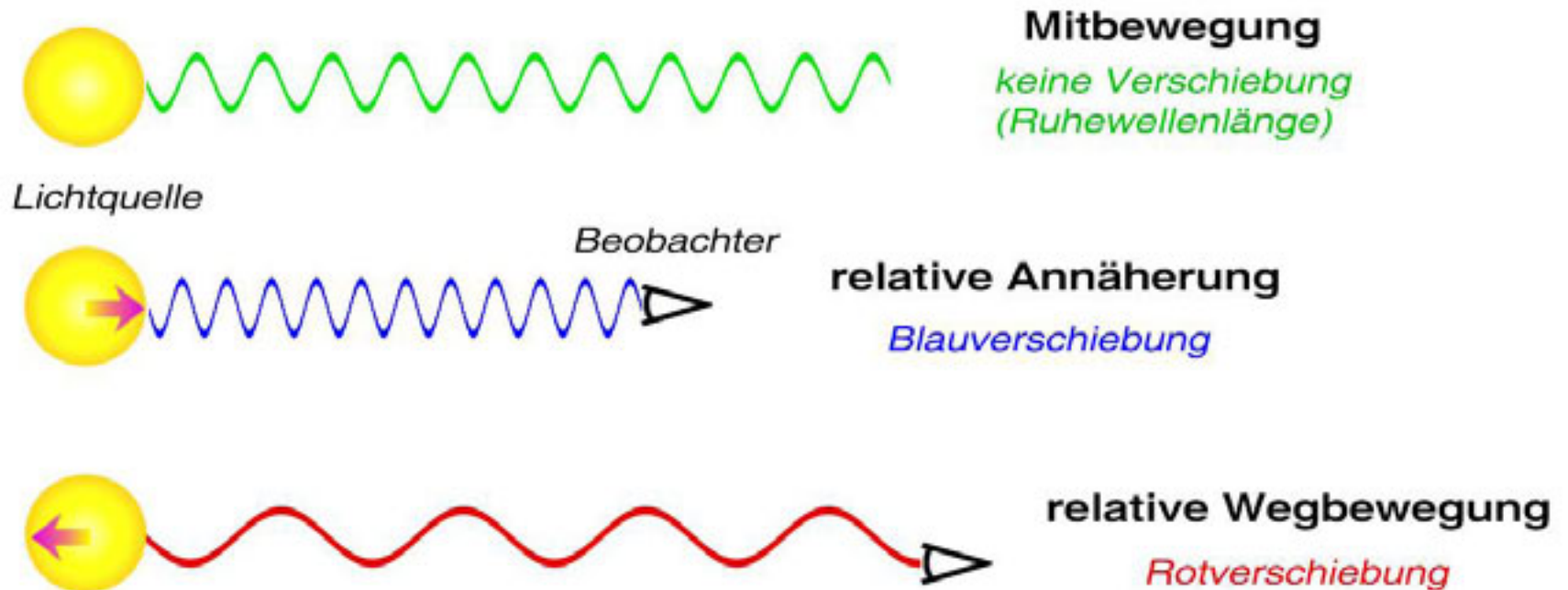


Bild: A. Müller

Fallendes Licht

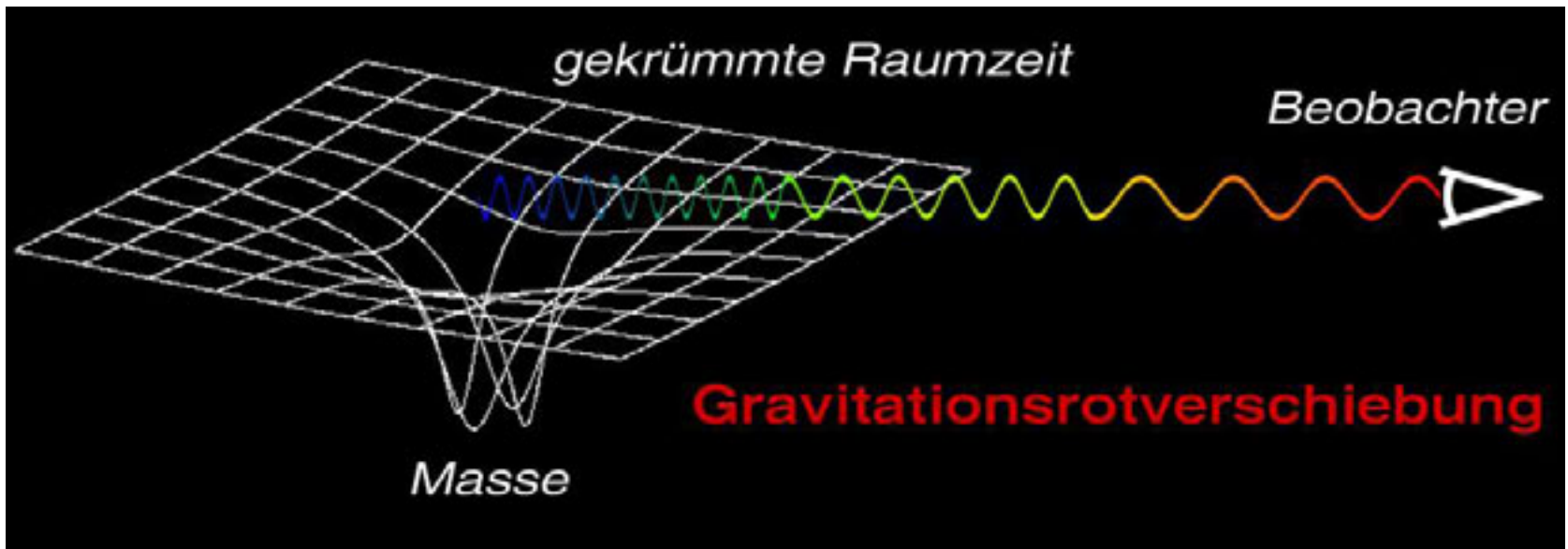
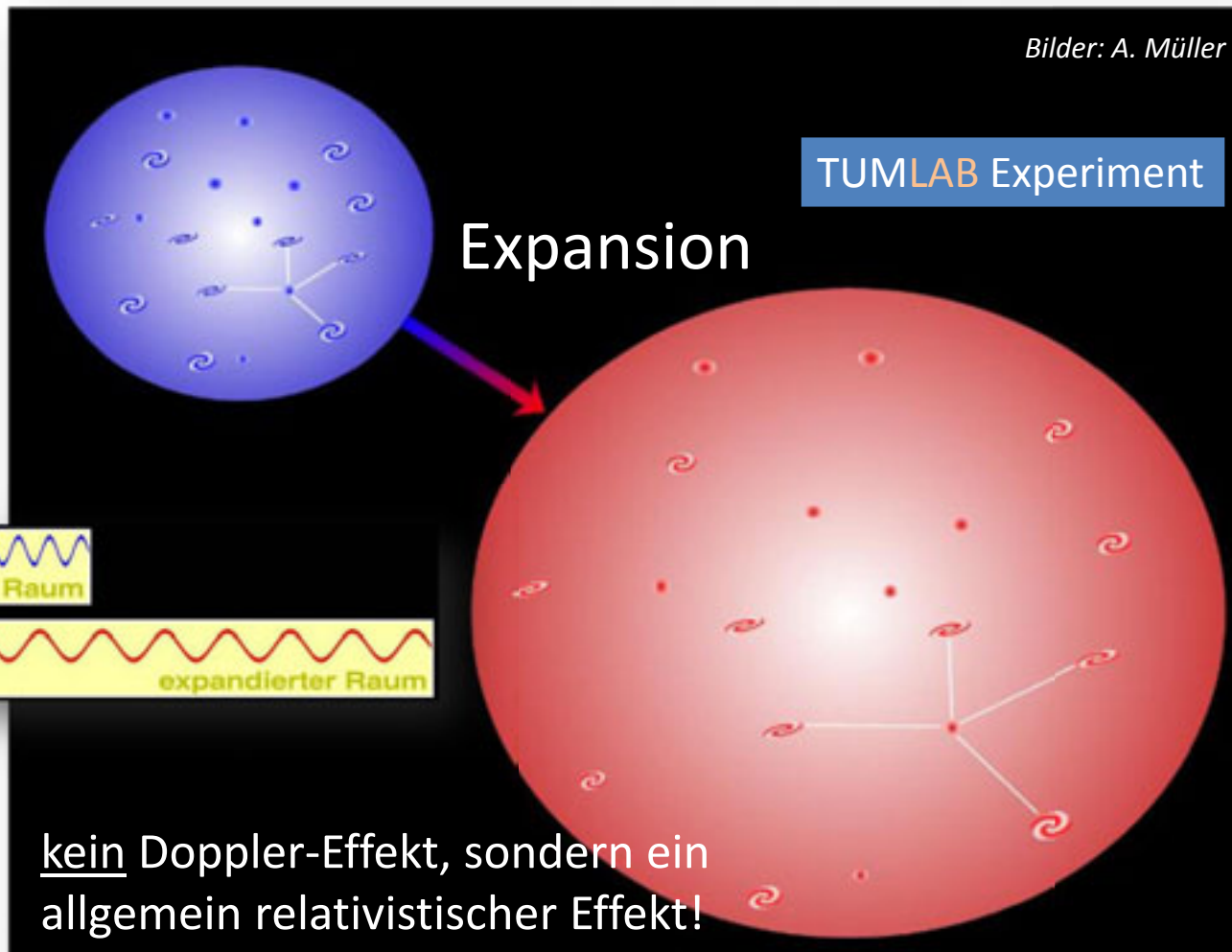


Bild: A. Müller

Fluchtbewegung der Galaxien



Rotverschiebungen

$$z = z_{\text{cosmo}} + z_{\text{grav}} + z_{\text{Doppler}}$$

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{em}}}{\lambda_{\text{em}}}$$

Expansion des Universums,
wichtig auf großer Raumskala,
Kosmologie!

reiner Bewegungseffekt,
nur lokal wichtig
(Andromedagalaxie)

wichtig bei starken Gravitationsfeldern,
z.B. Schwarze Löcher, Neutronensterne

obs: Beobachtersystem
em: Emittersystem

In welchem Universum leben wir?

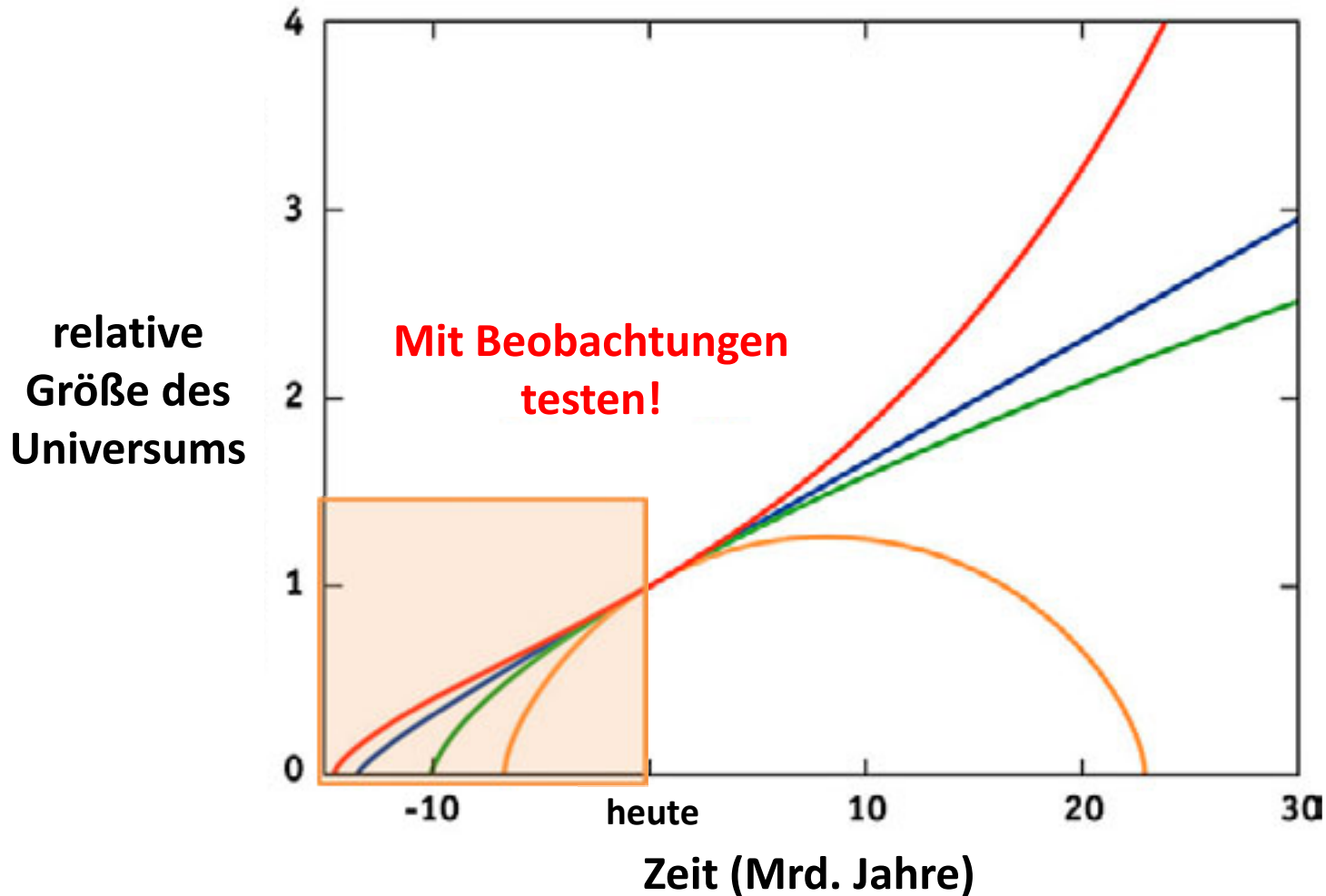
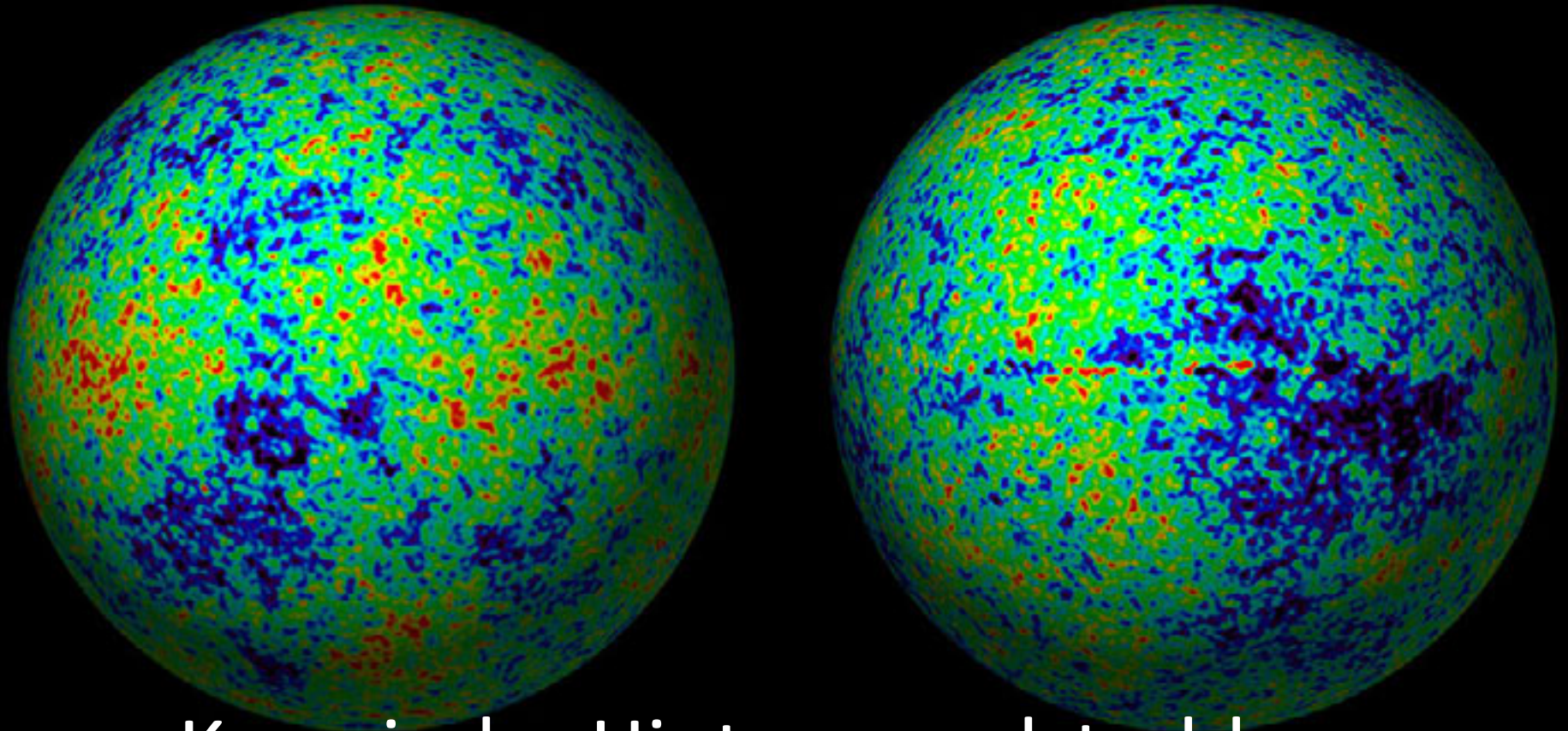
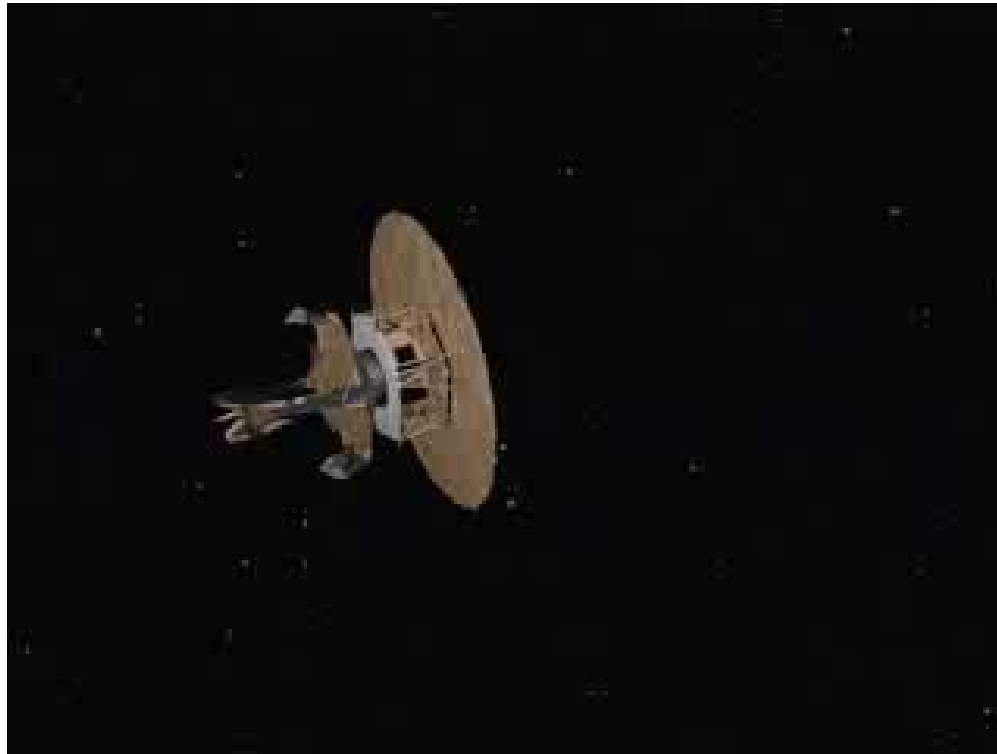


Bild: WMAP Website



Kosmische Hintergrundstrahlung

Kosmische Hintergrundstrahlung



RECHENPAKET

Film: WMAP Website

A photograph of a galaxy, possibly a spiral galaxy, viewed at an angle. The galaxy is tilted, showing its central core and surrounding arms. A bright, white-yellow point of light is visible in the center of the galaxy, which is likely a supernova. The galaxy's color is a mix of blue and purple, suggesting it might be a star-forming galaxy. In the foreground, there is a bright, blue-white star with a prominent four-pointed diffraction pattern. The background is dark, with some faint, distant stars visible.

Supernovae Ia


Supernovae Ia



- Weiße Zwerge (WDs): erdgroße Relikte sonnenartiger Sterne
- Maximalmasse eines WDs ist $1.46 M_{\odot}$ (*Chandrasekhar-Masse*)
- fällt mehr Masse (z.B. von einem Begleitstern) auf den Zwerg, so explodiert er als Wasserstoffbombe
- SN Ia: explodierende WDs
- gute Standardkerzen: immer etwa gleiche absolute Helligkeit!
- gute Meilensteine im Kosmos zur Zuordnung Rotverschiebung und Distanz

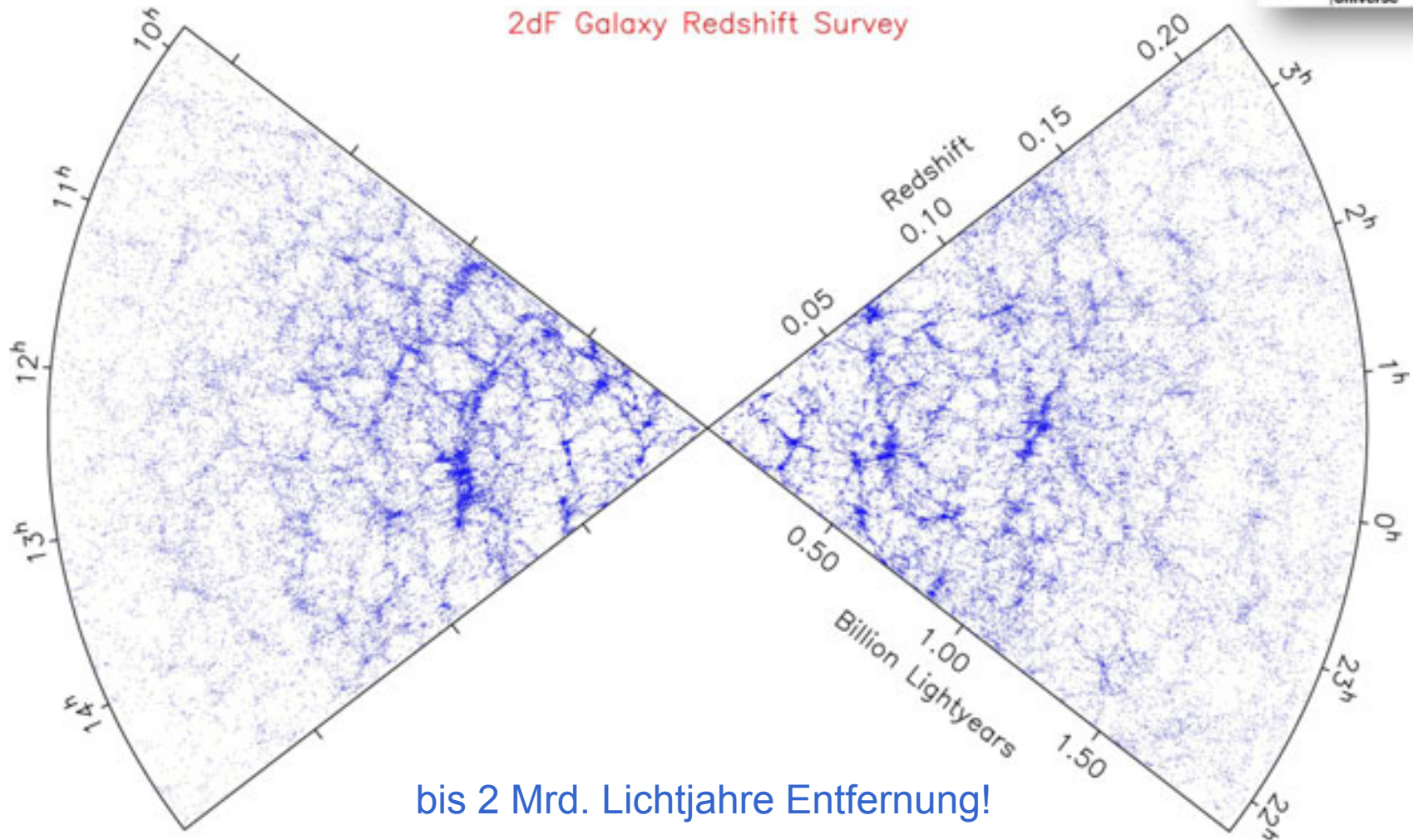
TUMLAB Experiment

RECHENPAKET



Galaxienhaufen
und großräumige Struktur

Verteilung der Galaxien



bis 2 Mrd. Lichtjahre Entfernung!

Strukturbildung im Kosmos



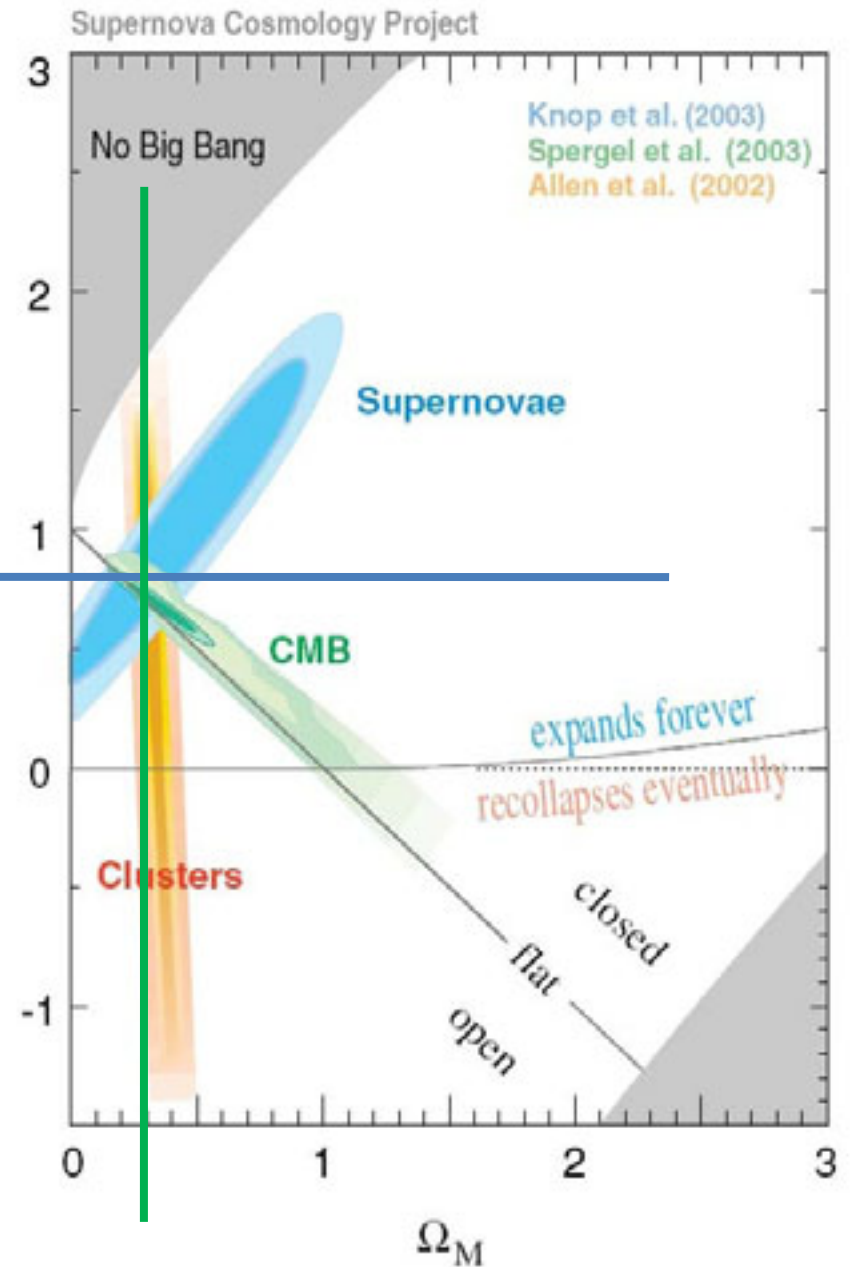


Vermessung des Universums

Dunkle Materie, Dunkle Energie

70% Dunkle Energie

30% Materie



Modelle des Universums

relative
Größe des
Universums

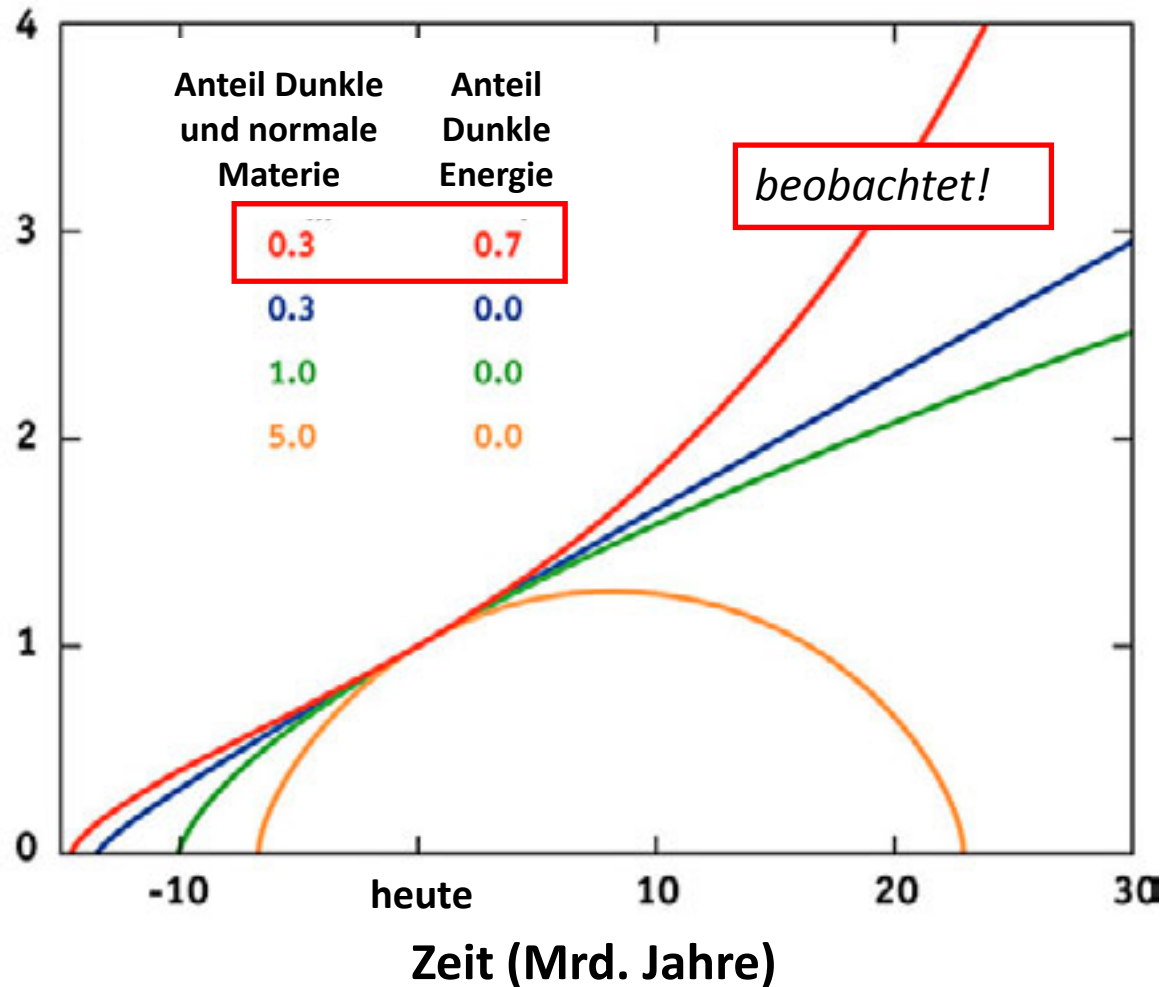
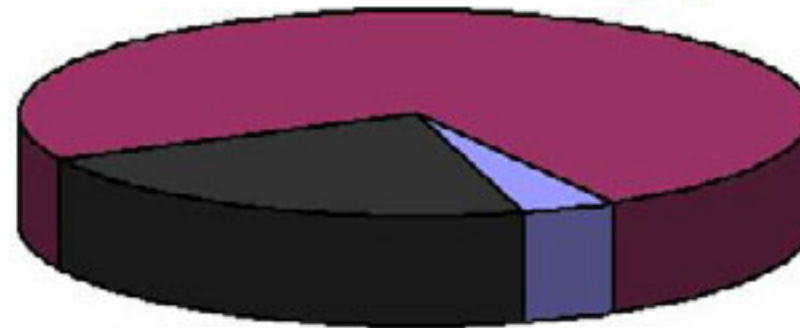


Bild: WMAP Website

Zutaten des Universums

Quantenvakuum?
Einsteins Λ ? Quintessenz?

Dunkle Energie
72%



Dunkle Materie
23%

Baryonen
5%

supersymmetrische Teilchen,
Axionen, ...?
(Vortrag Frank Simon)

Sterne, Gas, Staub, Planeten,
Menschen, ...

Kosmologische Konstante



$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

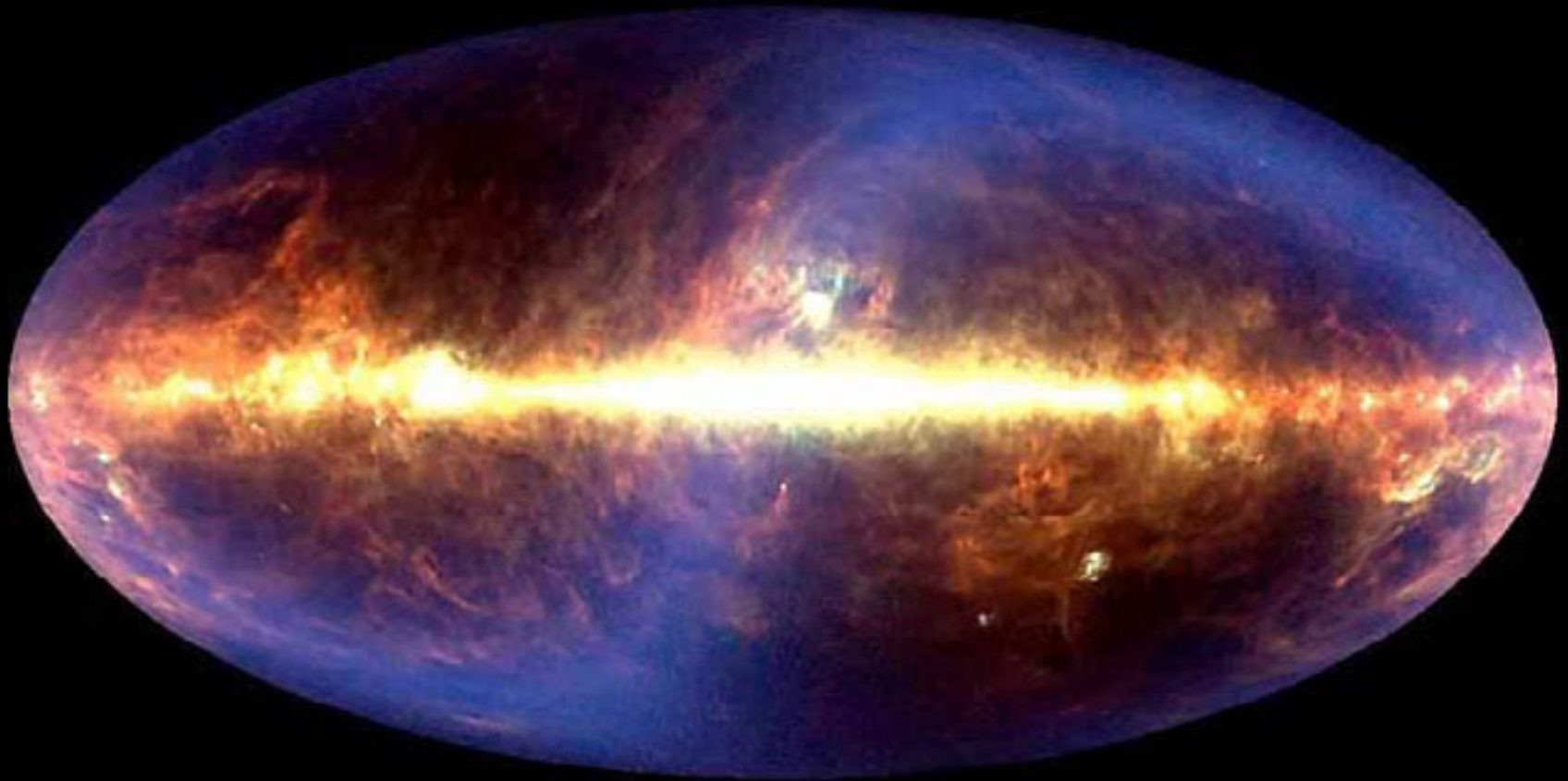
- 1917: Einstein erfindet die kosmologische Konstante Λ
- Sie erklärt statisches Universum, seinerzeit favorisiert.
- 1929: Slipher und Hubble entdecken dynamisches Universum
- 1931: Einstein verwirft Λ als seine „größte Eselei“
- 1998: Astronomen finden mit SN Ia beschleunigte Expansion
- heute: Λ ist wieder Bestandteil der modernen Kosmologie

Eigenschaften Dunkler Energie

- hat negativen Druck, d.h. sie wirkt antigravitativ
→ treibt Universum auseinander
- beste Erklärung: **Quantenvakuum**, d.h. „*das überall fein verteilte Nichts bringt den Kosmos zur Expansion*“
- aber Berechnung mit Quantenfeldtheorie: Theorie und Beobachtung liegen 120 Zehnerpotenzen auseinander!
- **Dunkle Energie aktuell eines der größten Rätsel der Physik**

Rechenpaket: kosmische Hintergrundstrahlung

Die Himmelskarte



Kosmische Hintergrundstrahlung

- Gamov: Vorhersage 1948.
Wärmestrahlung als Relikt
des frühen, heißen
Universums
- Penzias & Wilson:
Entdeckung der Strahlung
1965. (Nobelpreis 1978)
- COBE-Team: Entdeckung der
Anisotropien 1989/90.
(Nobelpreis 2006 für Mather
und Smoot)

Alter der Strahlung: 13,7 Mrd. Jahre

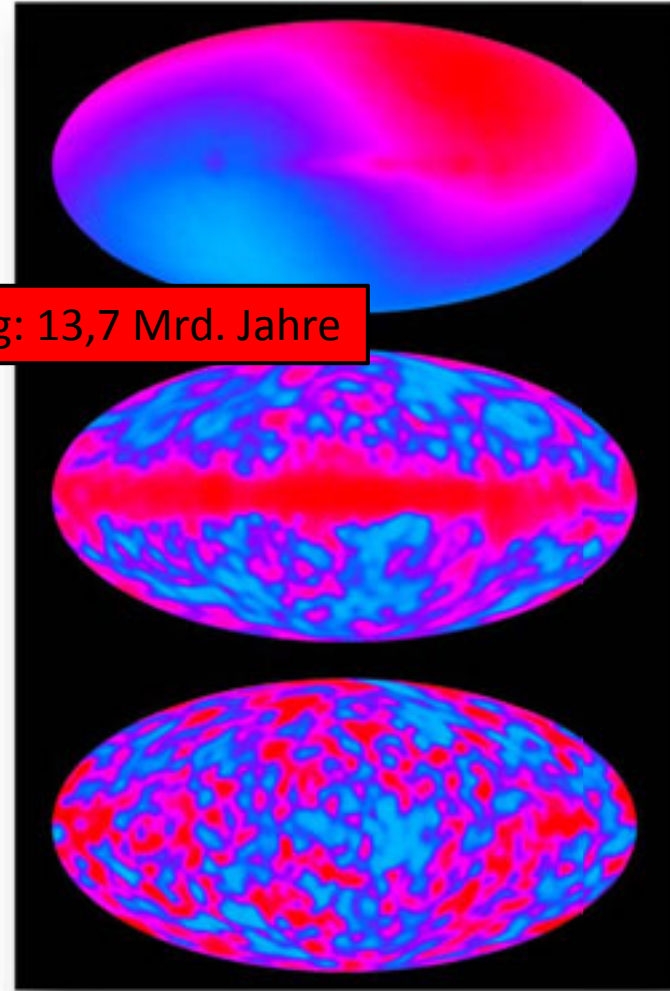


Bild: COBE/NASA

Maske zur Extraktion der Hintergrundstrahlung

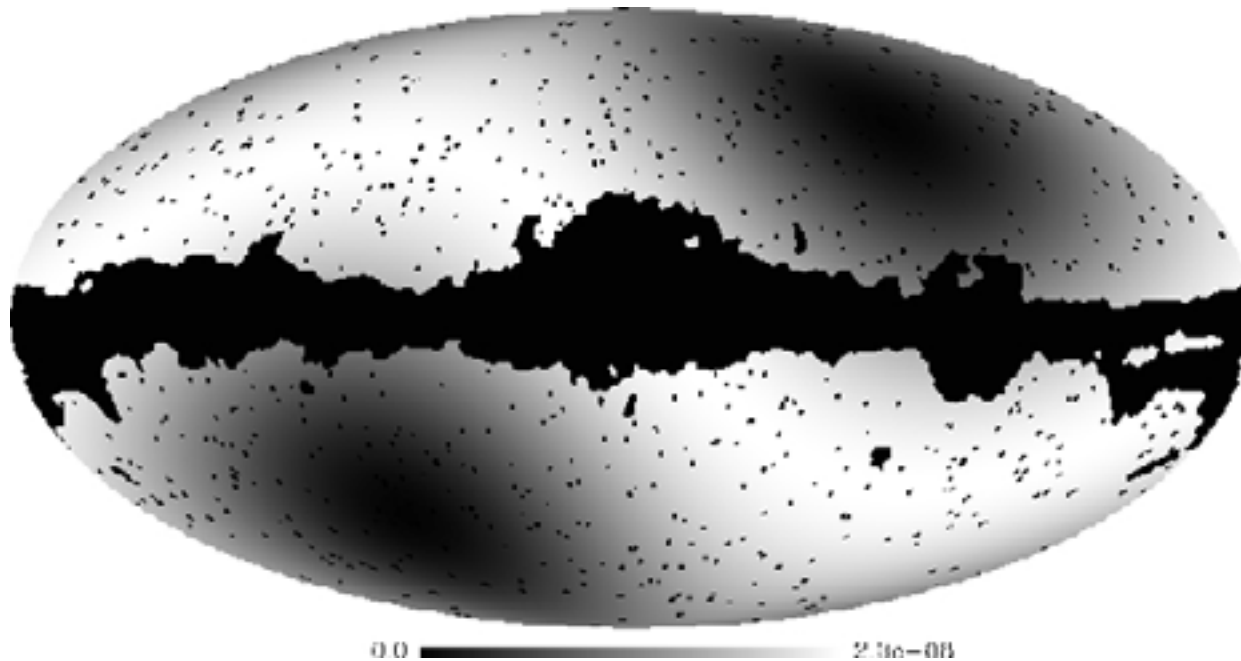


Bild: Chluba & Sunyaev 2004

Sachs-Wolfe-Effekt bei der Hintergrundstrahlung

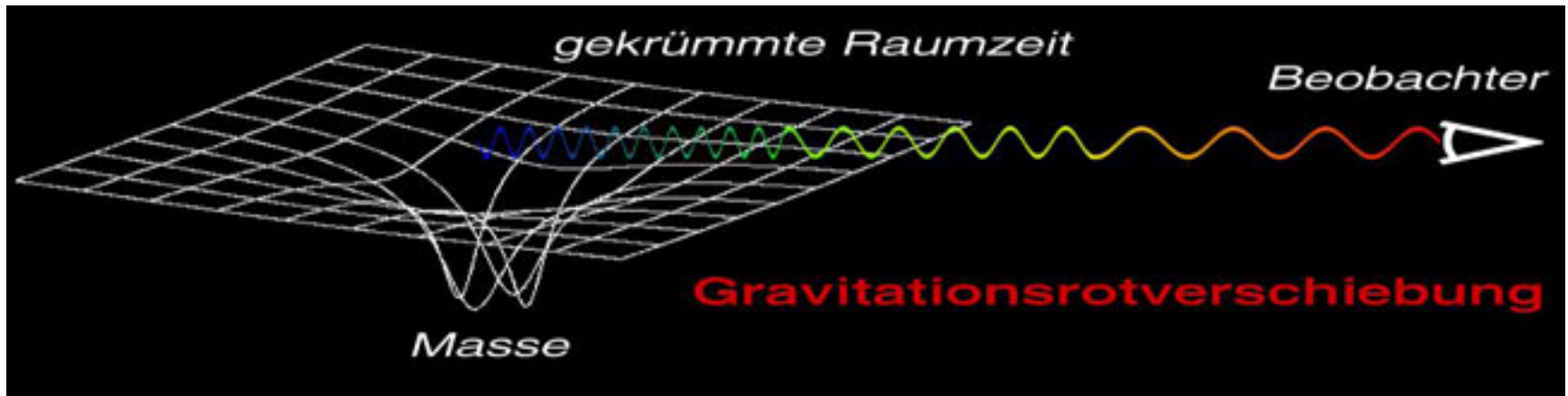
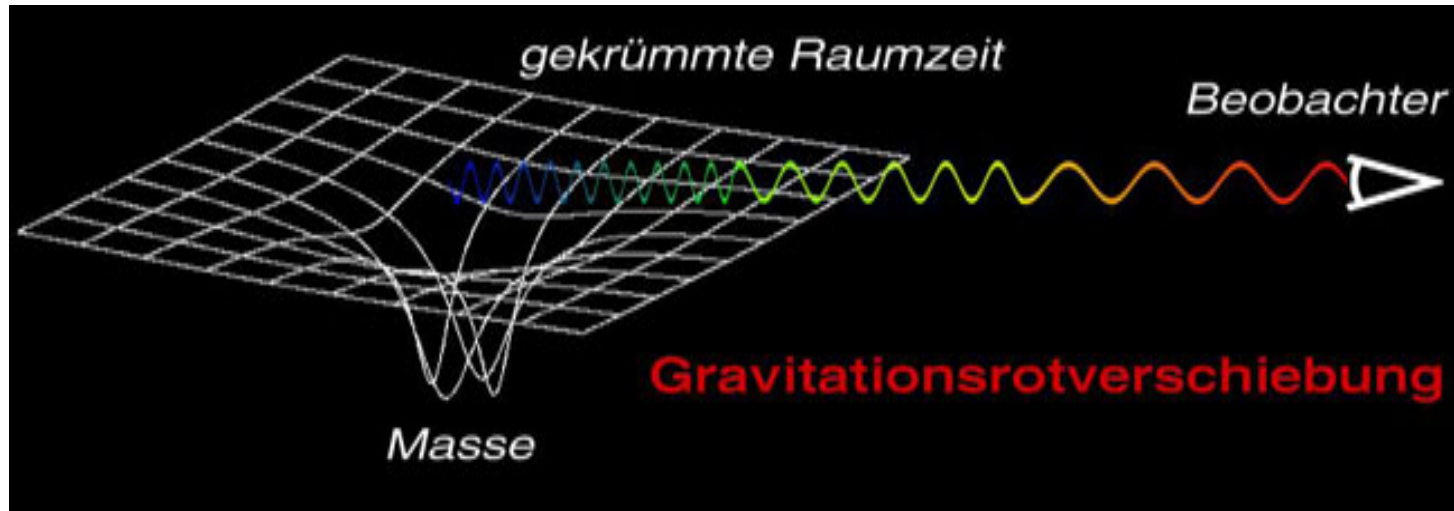
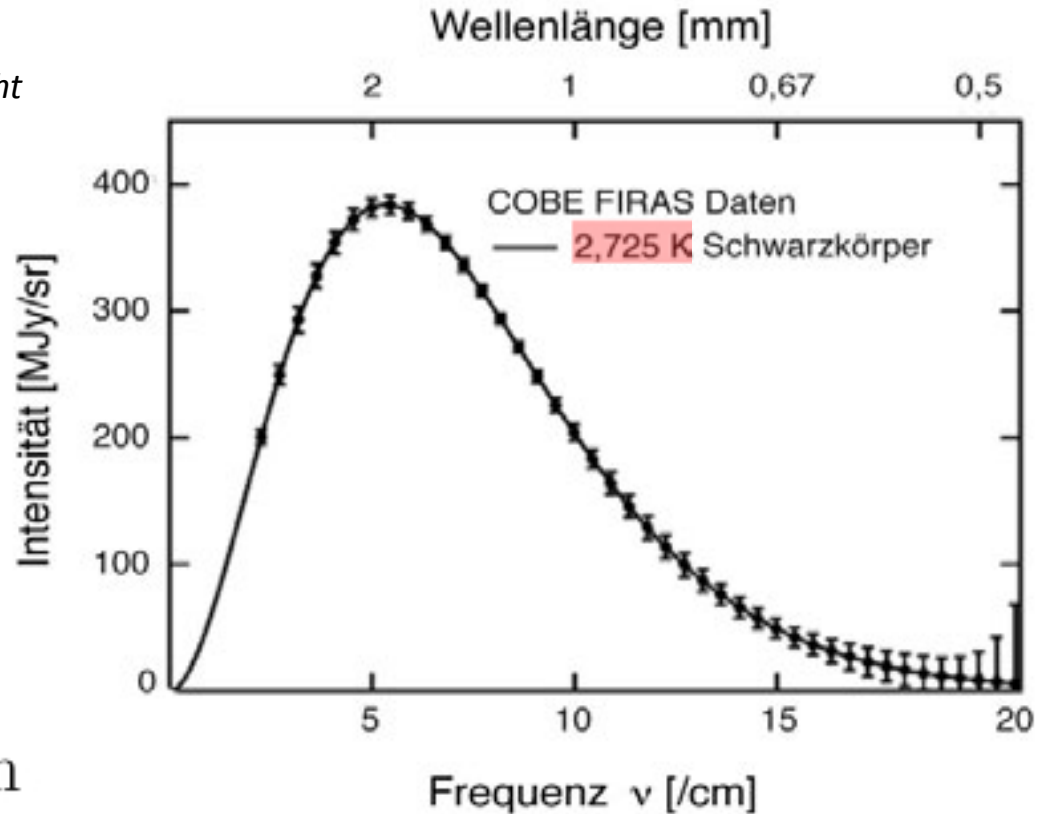


Bild: A. Müller

Spektrum der Hintergrundstrahlung

Bild: COBE/NASA, Ed Wright



Wien'sches Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{\max} = \frac{2\,880\,000}{T_{\text{eff}} [K]} \text{ nm}$$

$\lambda_{\max} \sim 1 \text{ mm} \rightarrow$ Mikrowellen; CMB: cosmic microwave background

Hintergrundstrahlung: $T(z)$ und z

Definition: $z = (\lambda_0 - \lambda_1) / \lambda_1 = \lambda_0 / \lambda_1 - 1$

$$c \Delta t_0 / c \Delta t_1 = v_1 / v_0 = \lambda_0 / \lambda_1 = R(t_0) / R(t_1) = 1 + z,$$

mit $R(t_0) > R(t_1)$; $t_0 > t_1$

$$h\nu_1 / h\nu_0 = kT_1 / kT_0 = 1 + z$$

$$\rightarrow T_1 = T_0 (1 + z) = 2,7 \times 1100 \sim 3000 \text{ (für CMB)}$$

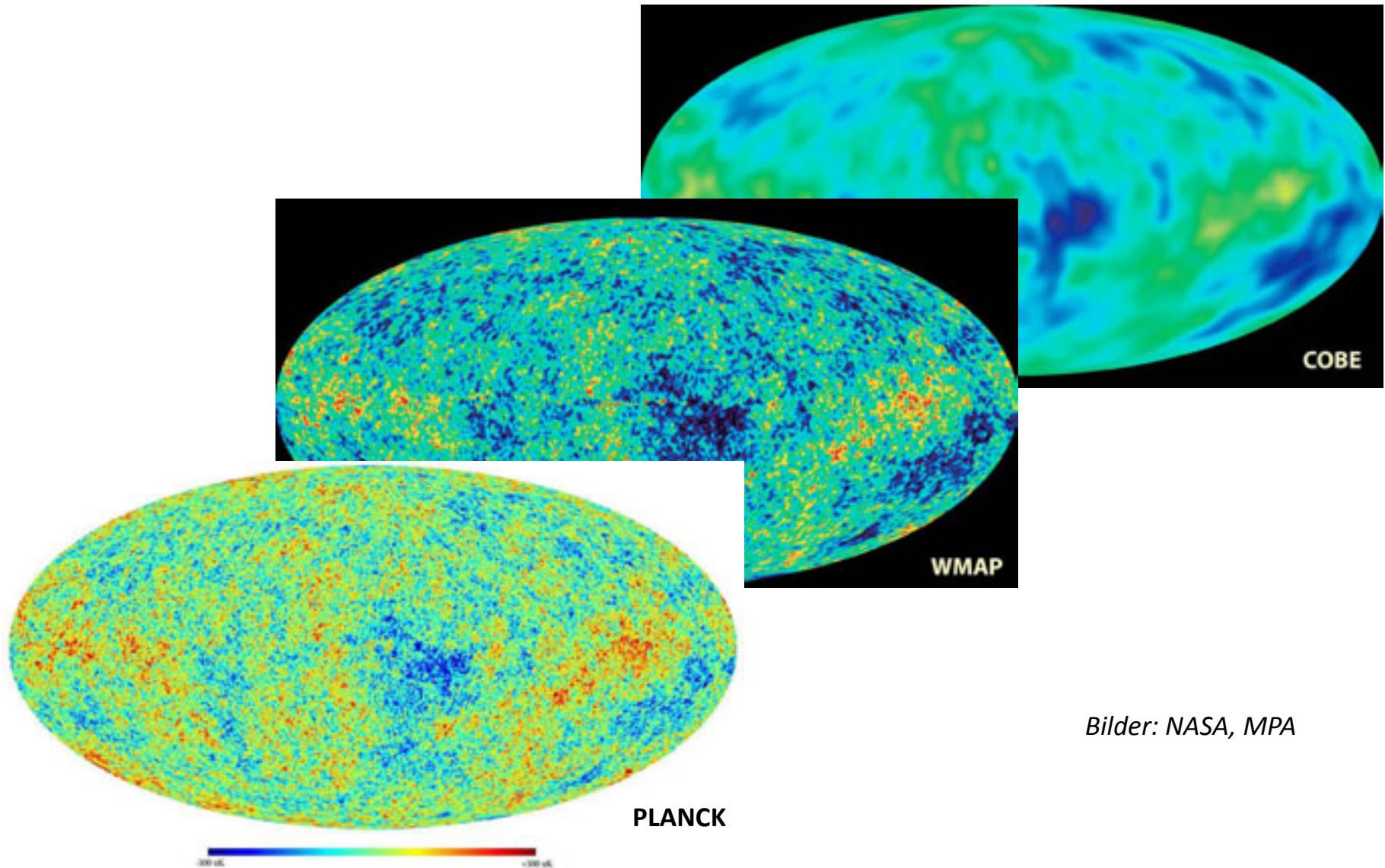
- Effekte:**
- kosmologische Rotverschiebung
 - kosmologische Zeitdilatation
 - Abkühlung durch kosmische Expansion

PLANCK Start am 14.05.09



Bilder: DLR, ESA

Leistungssteigerung bei CMB-Satelliten



Bilder: NASA, MPA

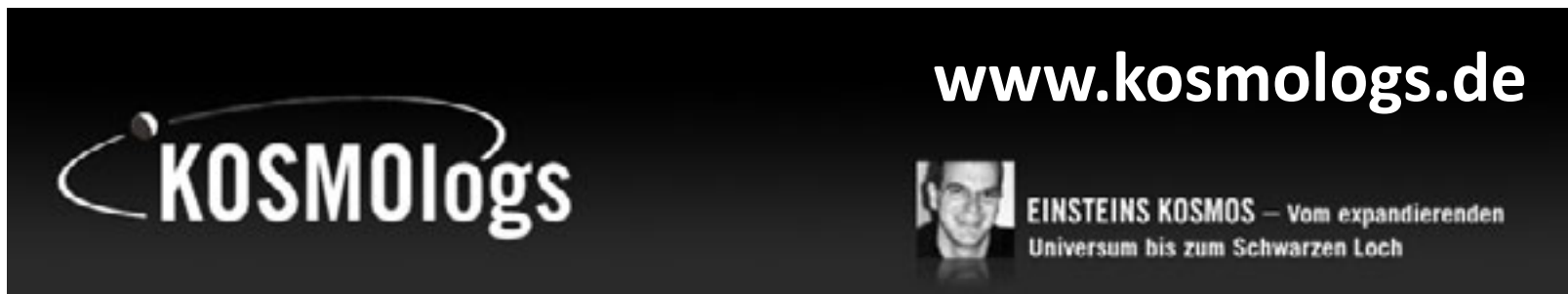
Mehr im Internet



www.universe-cluster.de



www.astronomiewissen.de



Zusatzmaterial

Friedmann-Gleichung und Dichteparameter



$$H(t)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) - \frac{kc^2}{R^2(t)} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$\Omega_m = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{m,0} := \frac{\rho_{m,0}}{\rho_c}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}$$

$$\Omega_k = -\frac{kc^2}{R_0^2 H_0^2}$$

$$1 - \Omega_{\text{rad}} - \Omega_m - \Omega_\Lambda := \Omega_k$$

Aktuelle Resultate: WMAP5

Anteile im lokalen Universum:

- Dunkle Energie 72,1%
- Dunkle Materie 23,3%
- baryonische („normale“) Materie: 4,6%
- Strahlung: 0,005%

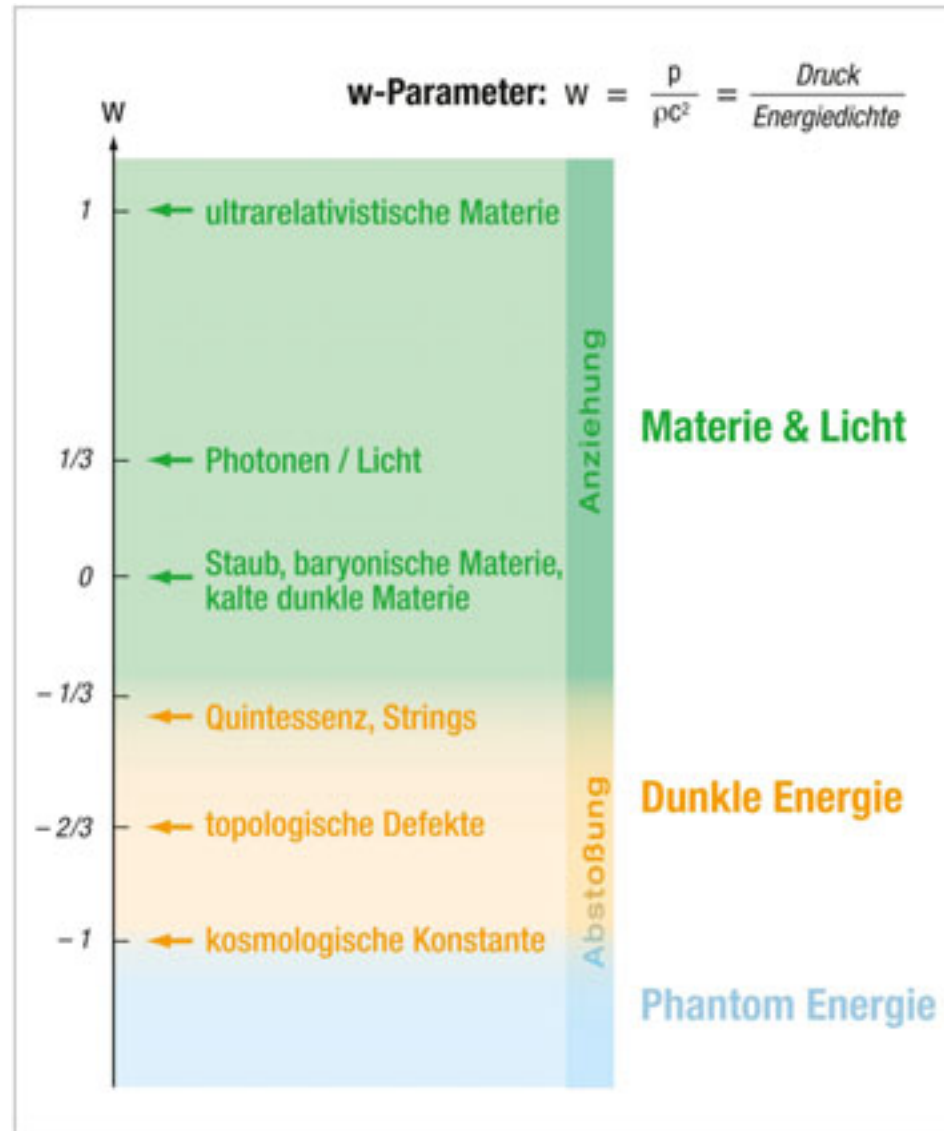
Λ CDM: 95% unbekannt!

CDM: *cold dark matter*
(kalte Dunkle Materie)

- $H_0 = 70,1 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- Alter des Universums: 13,73 Mrd. Jahre
- Kosmos ist flach

(Komatsu et al. 2008, <http://arxiv.org/abs/0803.0547>)

Zustandsgleichungen



Was war vor dem Urknall?

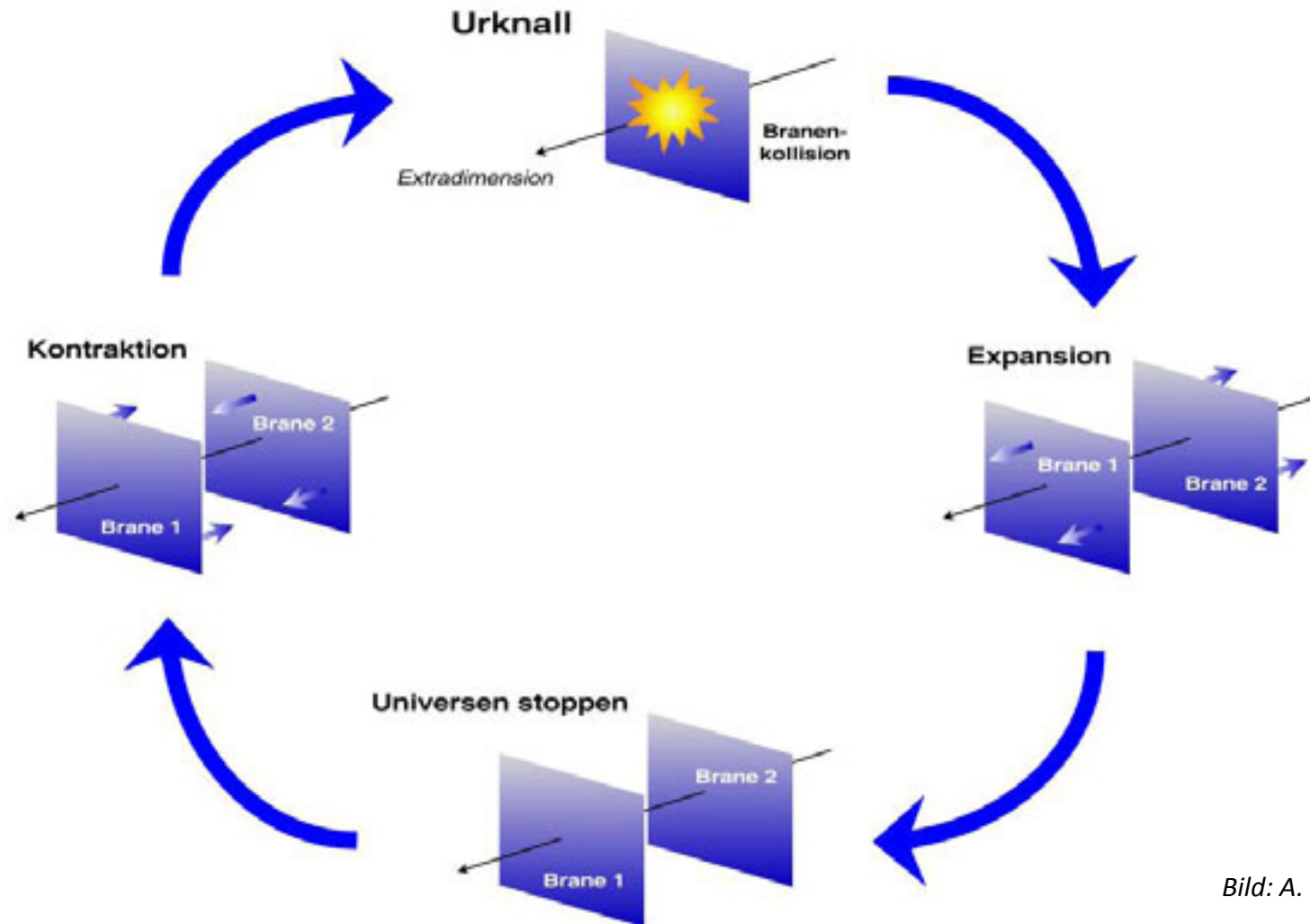


Bild: A. Müller