

Galaxien und Kosmologie

Dipl.-Phys. Johannes Hölzl
hoelzl@naa.net

Nürnberger Astronomische Arbeitsgemeinschaft e.V.

Grundkurs Astronomie
4. Dezember 2023



- 1 Milchstraße
- 2 Galaxien
- 3 Hierarchische Strukturen
- 4 Entfernungsbestimmung
- 5 Kosmologie
 - Urknalltheorie
 - Strukturbildung
 - Zukunft des Universums

Entfernungen und Helligkeiten

Entfernungen

- Astronomische Einheit: $1 \text{ AE} \hat{=} \text{Abstand Erde-Sonne} \approx 150 \text{ Millionen km}$
- Lichtjahr: $1 \text{ Lj} \approx 9,46 \text{ Billionen km}$
- Größe Sonnensystem: Abstand Sonne-Pluto = $40 \text{ AE} \approx 5,5 \text{ Lichtstunden}$
- Abstand Proxima Centauri (nächster Stern) ca. $4,3 \text{ Lj}$, Abstand Deneb ca. 1550 Lj

Helligkeiten

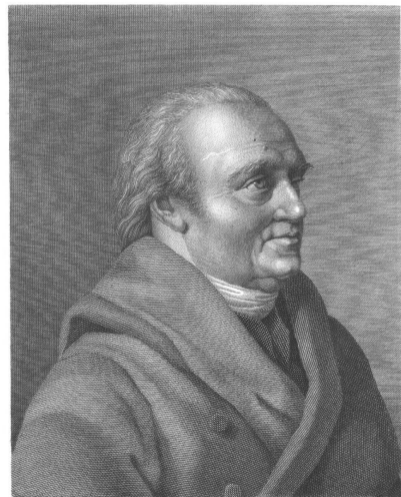
- Angabe in Magnituden mag , kleinere Zahl $\hat{=} \text{größere Helligkeit}$
- 5 mag Unterschied $\hat{=} \text{hundertfache Helligkeit}$
- Sirius: $-1,5 \text{ mag}$, Sonne: $-26,7 \text{ mag}$, Regulus: $1,4 \text{ mag}$
- Absolute Helligkeit Mag : Helligkeit, wie sie aus $32,6 \text{ Lj}$ (10 Parsec) erscheinen würde

- Namensherkunft: *γαλαξίας*: von *γάλα* = Milch
- Galilei 1609: Milchstraße besteht aus unzähligen Sternen



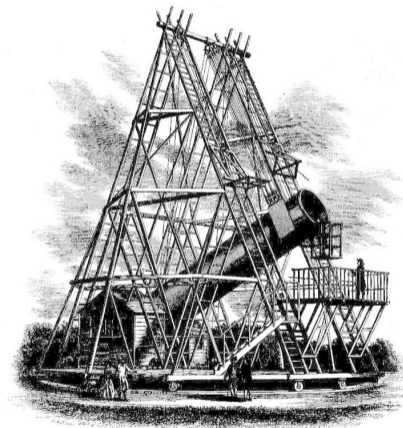
Jacopo Tintoretto:
Die Entstehung der Milchstraße, 1575

- Namensherkunft: $\gamma\alpha\lambda\alpha\xi\acute{\iota}\alpha\varsigma$: von $\gamma\acute{\alpha}\lambda\alpha$ = Milch
- Galilei 1609: Milchstraße besteht aus unzähligen Sternen
- Erste Vorstellung über die Scheibenform:
Wilhelm Herschel 1785 durch systematische Sternzählung



WILH. HERSCHEL.

- Namensherkunft: $\gamma\alpha\lambda\alpha\xi\acute{\iota}\alpha\varsigma$: von $\gamma\acute{\alpha}\lambda\alpha$ = Milch
- Galilei 1609: Milchstraße besteht aus unzähligen Sternen
- Erste Vorstellung über die Scheibenform: Wilhelm Herschel 1785 durch systematische Sternzählung



- Namensherkunft: $\gamma\alpha\lambda\alpha\xi\acute{\iota}\alpha\varsigma$: von $\gamma\acute{\alpha}\lambda\alpha$ = Milch
- Galilei 1609: Milchstraße besteht aus unzähligen Sternen
- Erste Vorstellung über die Scheibenform: Wilhelm Herschel 1785 durch systematische Sternzählung
- Erste realistische Größenabschätzung: Harlow Shapley 1919
Sonne liegt nicht im Zentrum der Milchstraße!



[American Institute of Physics
Niels Bohr Library]

- H. Shapley: Nebelflecken sind Objekte in unserer Milchstraße

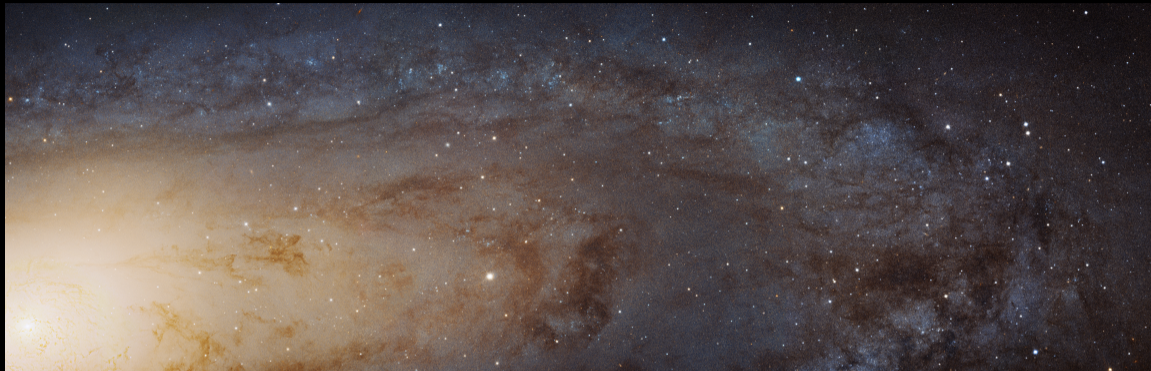


H. D. Curtis: Nebelflecken sind eigenständige Galaxien

- Edwin Hubble (1924): Beobachtung von Cepheiden (spezielle veränderliche Sterne) im Andromedanebel



Edwin Hubble [Christianson]



Hohe Auflösung: <https://www.spacetelescope.org/images/heic1502a/>

[NASA, ESA, J. Dalcanton, B. F. Williams, L. C. Johnson (Univ. of Washington), the PHAT team, and R. Gendler.]

- H. Shapley: Nebelflecken sind Objekte in unserer Milchstraße



H. D. Curtis: Nebelflecken sind eigenständige Galaxien

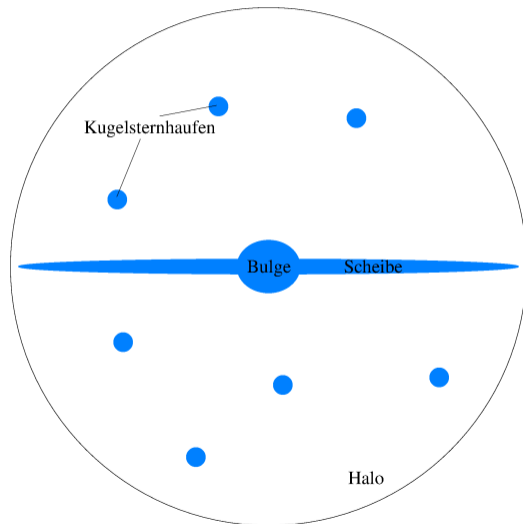
- Edwin Hubble (1924): Beobachtung von Cepheiden (spezielle veränderliche Sterne) im Andromedanebel
⇒ Nebelflecken sind entfernte Galaxien

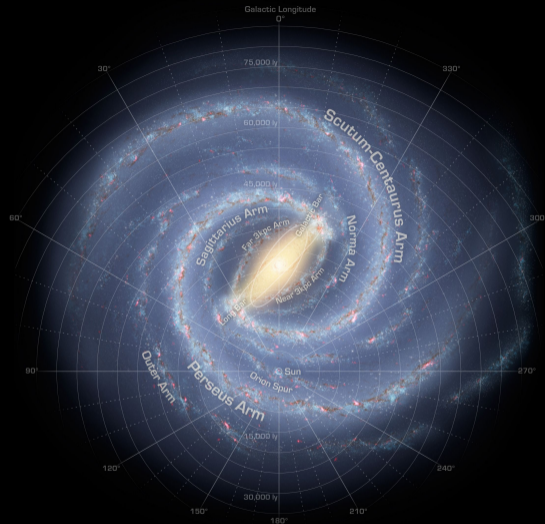


Edwin Hubble [Christianson]

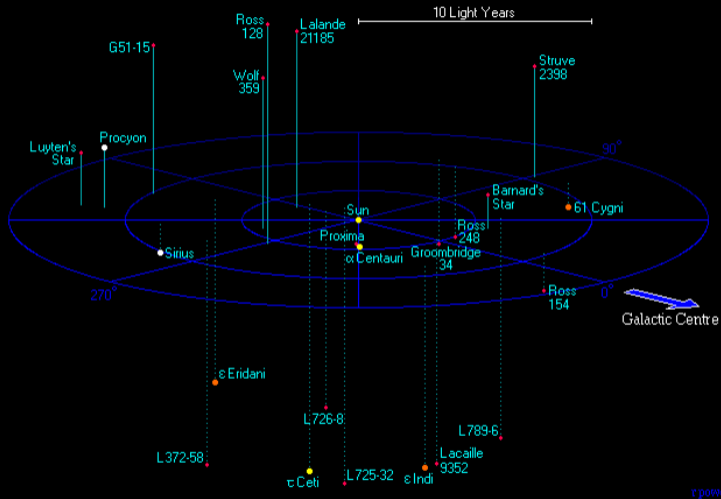
Aufbau der Milchstraße

- Scheibe
- Zentraler „Bulge“
- Kugelförmiger Halo
- ca. 100 Milliarden Sterne
- Interstellares Gas
- Staub
- Planetarische Nebel, Supernovaüberreste, Kugelsternhaufen ...

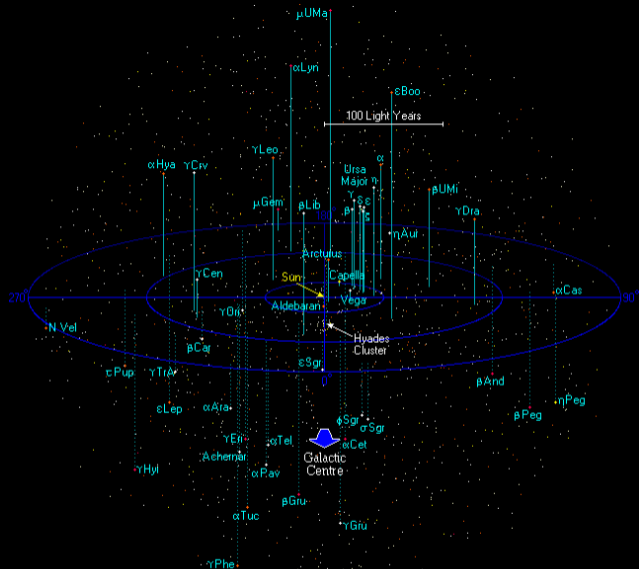




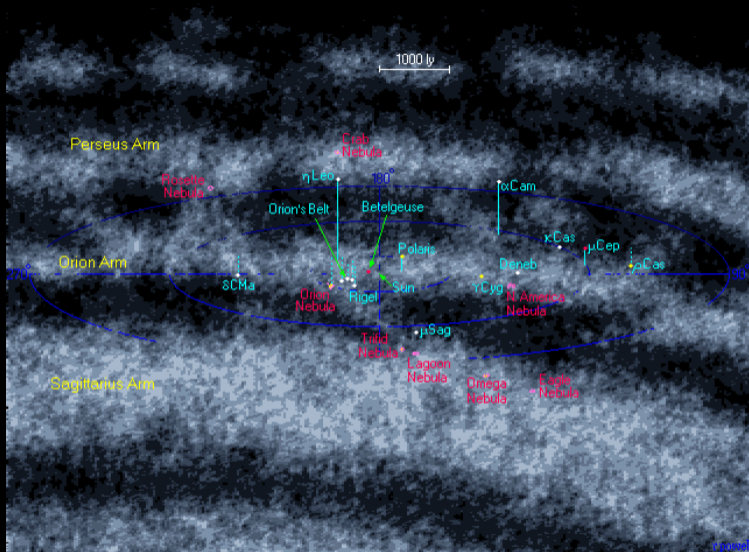
[NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC-Caltech)]



[www.atlasoftheuniverse.com]



r powell



[www.atlasoftheuniverse.com]

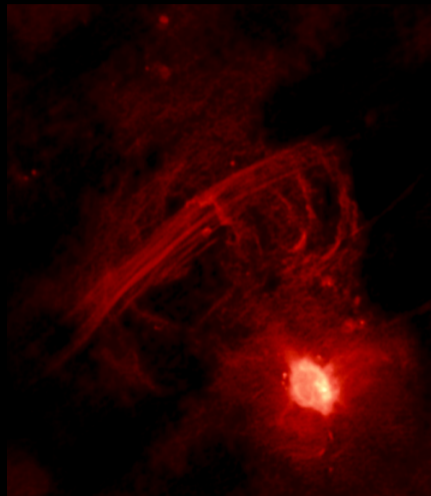
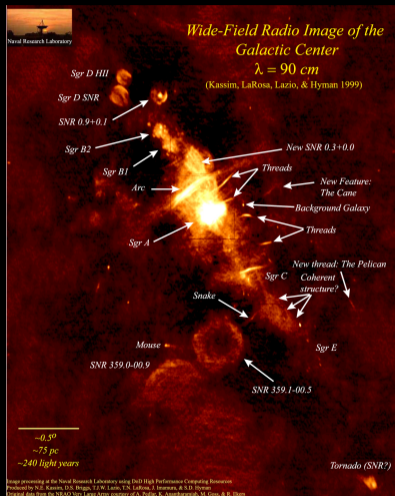
Galaktisches Zentrum

- Zentrum im Sternbild Schütze (SgA*)
- Beobachtung im Optischen aufgrund des Staubs nicht möglich
- Infrarotbeobachtungen: Sternhaufen nahe des galaktischen Zentrums
- Supermassives Schwarzes Loch mit 4,3 Millionen M_{\odot}



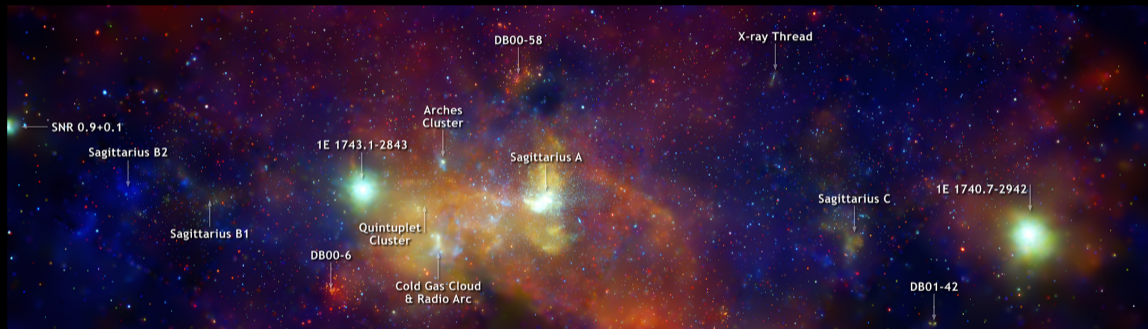
[ESO/VLT]

Galaktisches Zentrum: Radio



[re.: Farhad Zadeh et al. (Northwestern), VLA, NRAO]

Galaktisches Zentrum: Röntgen



[NASA/CXC/UMass/D. Wang et al]

Galaktisches Zentrum: Radio und Röntgen



[Röntgen: NASA, CXC, UMass, D. Wang et al.; Radio: NRF, SARAQ, MeerKAT]

Schwarzes Loch in M87 (6,5 Milliarden Sonnenmassen)



[Event Horizon Telescope Collaboration]

Galaxien: Klassifikation nach Hubble



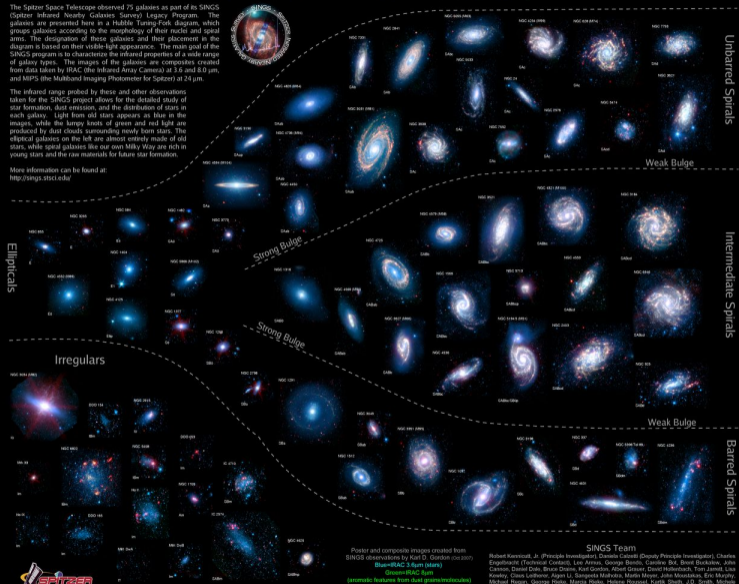
[Wikipedia]

The Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey (SINGS) Hubble Tuning-Fork

The Spitzer Space Telescope observed 75 galaxies as part of its SINGS (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey) Legacy Program. The galaxies are presented here in a Hubble Tuning-Fork diagram, which groups galaxies according to the morphology of their nuclei and spiral arms. The designation of these galaxies and their placement in the diagram is based on their visible-light appearance. The main goal of the SINGS program is to characterize the infrared properties of a wide range of galaxy types. The images of the galaxies are composites created from data taken by IRAC (the Infrared Array Camera) at 3.6 and 8.0 μm , and MIPS (the Multiband Imaging Photometer for Spitzer) at 24 μm .

The infrared range probed by these and other observations taken for the SINGS project allows for the detailed study of star formation, dust emission, and the distribution of stars in each galaxy. Light from old stars appears as blue in the images, while the lumpy knots of green and red light are produced by dust clouds surrounding newly born stars. The elliptical galaxies on the left are almost entirely made of old stars, while spiral galaxies like our own Milky Way are rich in young stars and the raw materials for future star formation.

More information can be found at:
<http://sings.stsci.edu/>



Ellipticals

Irregulars

Unbarred Spirals

Intermediate Spirals

Barred Spirals

Poster and composite images created from SINGS observations by Matt D. Gordon (co-lead)
 Blue=IRAC 3.6 μm (stars)
 Green=IRAC 8.0 μm
 (see also features from dust grains/molecules)
 Red=MIPS 24 μm (warm dust)

SINGS Team

Robert Kennicutt, Jr. (Principal Investigator), Dennis Calzetti (Co-Principal Investigator), Charles Engelbracht (Technical Contact), Lee Armus, George Benelli, Catherine Bot, Brent Buckalew, John Carlson, Daniel Dale, Bruce Elmegreen, Karl Gordon, Robert Grunewald, David Hollenbach, Tom Jarrett, Lisa Kewley, Chris Leitherer, Arjen U. Smeets, Marisa Moshir, Martin Neugebauer, John Moulton, Eric Murphy, Michael Hoger, George Rieke, Marisa Rieke, Helene Roussel, Karik Shea, J.D. Smith, Michele Thornley, Fabian Walter & George Helou



Spiralgalaxien

- Sternentstehung in den Spiralarmen
- Beispiel: Milchstraße

Elliptische Galaxien

- Sehr massereich
- Entstehung vermutlich durch Verschmelzung von Galaxien

Irreguläre Galaxien

- Vielfältige Formen, in keine der anderen Kategorien passend
- Beispiele: Große und Kleine Magellansche Wolke

Balkenspiralgalaxie NGC 1300 (Entfernung: 69 Mio. Lj)



[NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)]

Irreguläre Galaxie NGC 4449



[NASA, ESA, A. Aloisi (STScI/ESA), and The Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration]



Hierarchische Strukturen

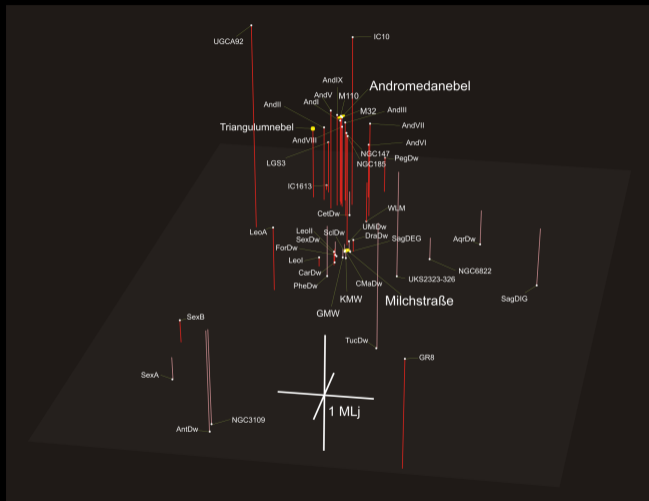
- Galaxien-Untergruppen (z.B. Milchstraßenuntergruppe, Andromedauntergruppe)
↓
- Galaxienhaufen (z.B. Lokale Gruppe mit Milchstraße und Andromedagalaxie, Virgo-Haufen)
↓
- Superhaufen (z.B. Laniakea-Superhaufen, der die lokale Gruppe enthält und dessen Zentrum der Virgo-Haufen bildet)
↓
- Schaumartige Struktur (Filamente) mit leeren Bereichen dazwischen (Voids)

Große und kleine Magellansche Wolke



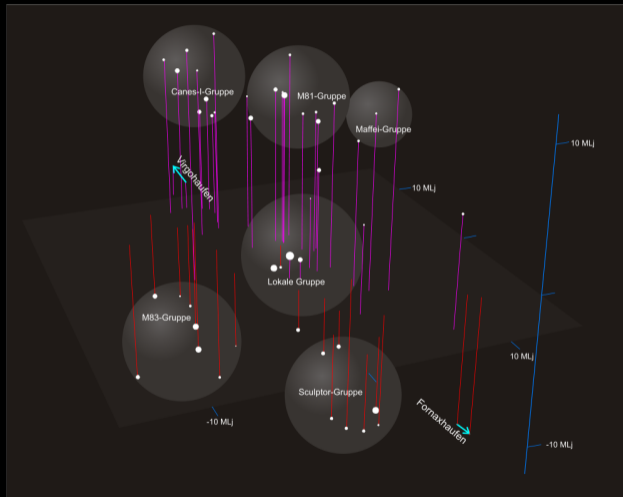
[ESO/S. Brunier]

Lokale Gruppe II



[Wikipedia/CWitte]

Umgebung der lokalen Gruppe

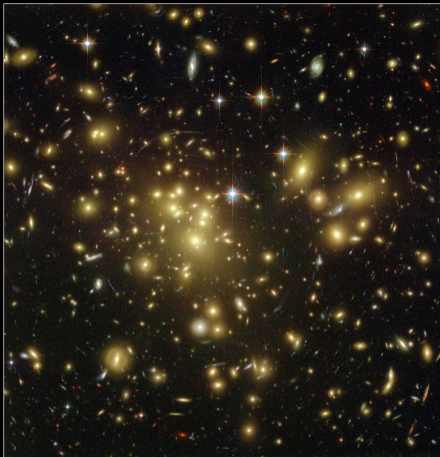


[Wikipedia/CWitte]

Coma-Galaxienhaufen (Entfernung: 400 Mio. Lj)



[Jim Misti (Misti Mountain Observatory)]



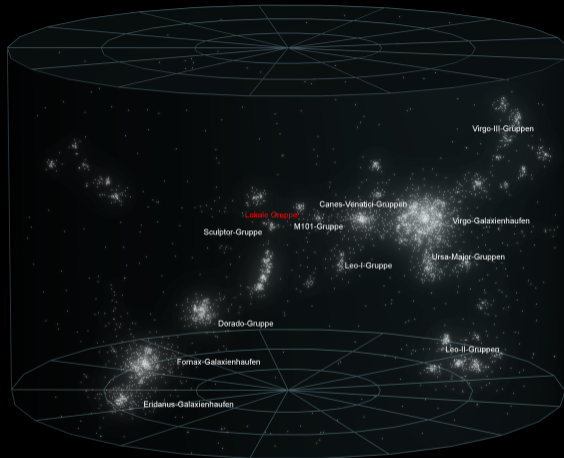
Galaxy Cluster Abell 1689
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA
STScI-PRC03-01a



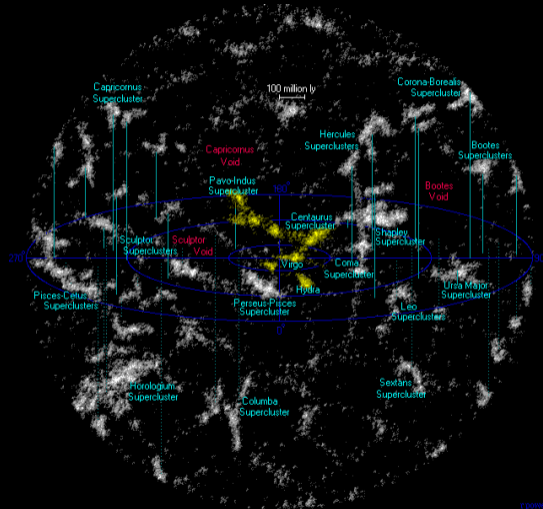
[re: NASA/CXC/MIT/E.-H Peng et al; Optical: NASA/STScI]

Virgo-Superhaufen



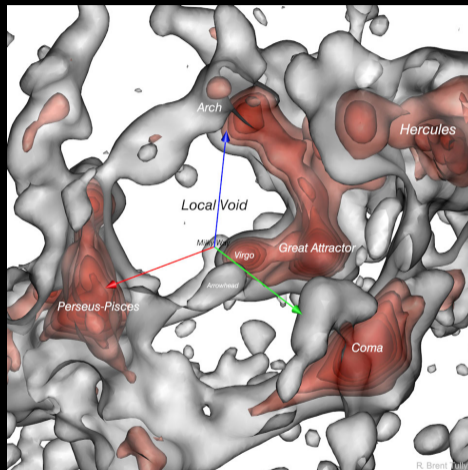
[Wikipedia/Andrew Z. Colvin]

Laniakea-Superhaufen und Umgebung



[Wikipedia/Richard Powell]

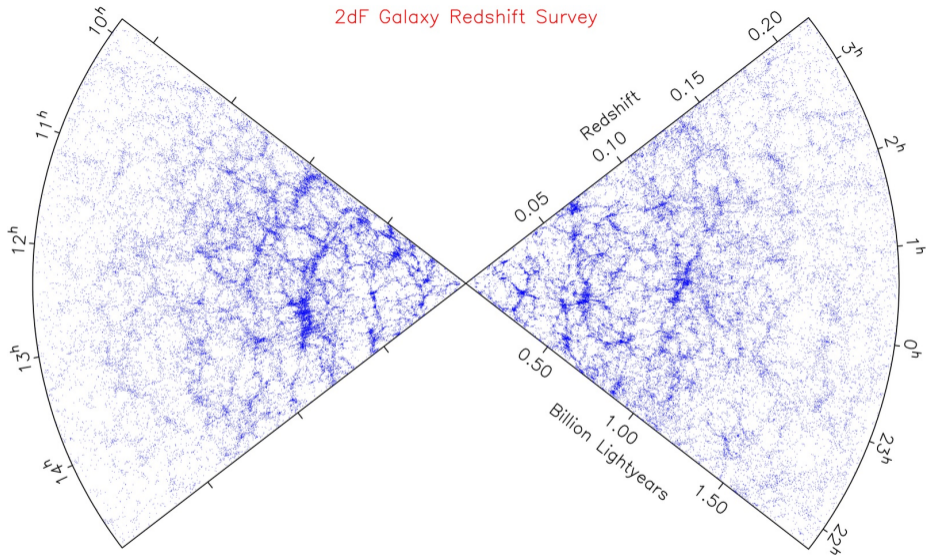
Local Void (Lokale Leere)



[R. Brent Tully (U. Hawaii) et al.]

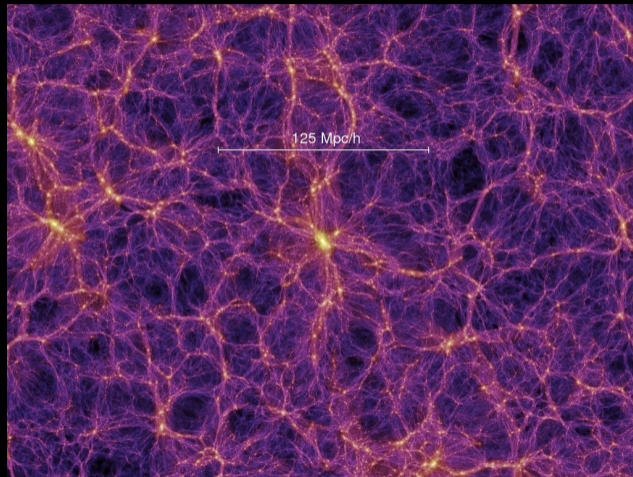
Animation „Cosmography of the Local Void“: <https://vimeo.com/239075970>

2dF Galaxy Redshift Survey



Großräumige Strukturen: 2dF-Survey

Großräumige Strukturen



[Millennium-Simulation, Max-Planck Institut für Astrophysik]

Entfernungsbestimmung

- Einzige direkte Möglichkeit: Parallaxenmessung
- Grundprinzip aller weiterer Methoden:

Absolute Helligkeit bekannt (sogenannte *Standardkerze*)



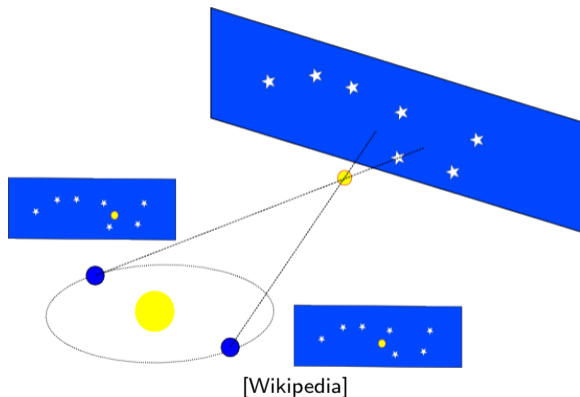
Messung der scheinbaren Helligkeit des Objektes



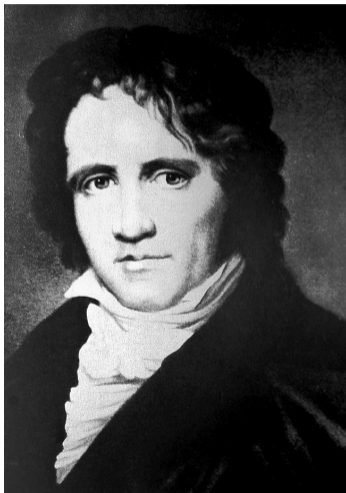
Bestimmung der Entfernung aus Differenz zwischen absoluter und scheinbarer Helligkeit

- „*Kosmologische Entfernungsleiter*“

Parallaxenmethode

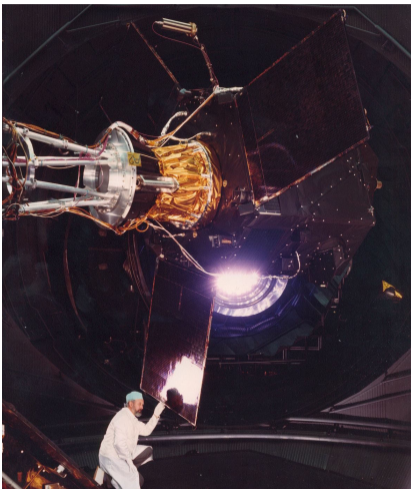


- Winkelmessung
- Maximale Basislänge:
Erdbahndurchmesser ≈ 300 Millionen
km (2 AE)



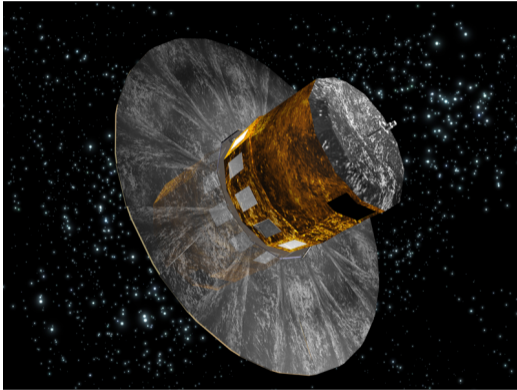
- Winkelmessung
- Maximale Basislänge:
Erdbahndurchmesser \approx 300 Millionen km (2 AE)
- Erste erfolgreiche Parallaxenbestimmung: Friedrich Wilhelm Bessel 1838 (des Sternes 61 Cyg, Entfernung 11 Lj)
- Erdbahndurchmesser erscheint aus einer Entfernung von 3,26 Lj unter $\varphi = 1''$)
 \Rightarrow 3,26 Lj = 1 Parsec
(entspricht 1 cm auf 2,06 km)

Satellit Hipparcos



[Michael Perryman, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license]

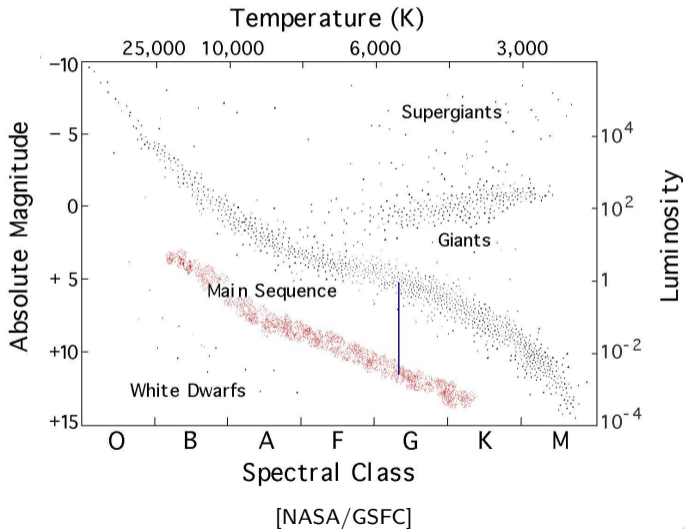
- In Betrieb 1989-1993
- Parallaxenmessung bis ca. 3000 Lichtjahre Entfernung
- ca. 118.000 Objekte mit höchster Präzision

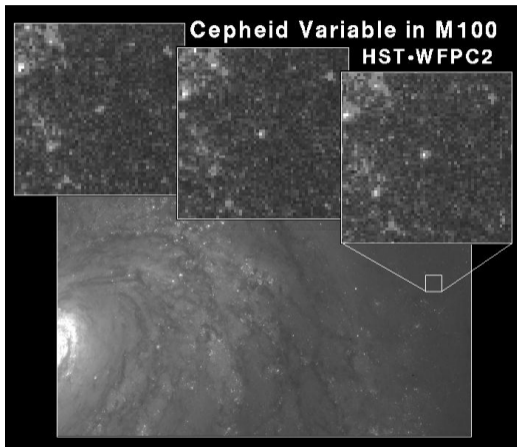


[ESA - C. Carreau]

- Vermessung von ca. 1 Milliarde Sterne in unserer Milchstraße
- Entdeckung zahlreicher Exoplaneten erwartet
- 2013 gestartet
- Gaia DR1 (2016): erster vorläufiger Katalog, mehr als einer Milliarde Sterne
- Gaia DR2 (2018): zweiter vorläufiger Katalog, knapp 1,7 Milliarden Objekte

Main Sequence Fitting





[Dr. Wendy L. Freedman, Observatories of the Carnegie Institution of Washington, and NASA]

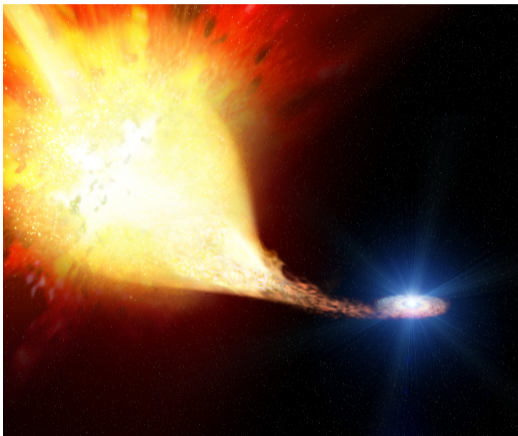
Cepheiden/RR Lyrae

- Veränderliche Sterne
- Für RR Lyrae und Cepheiden gibt es einen Zusammenhang zwischen Periode und Leuchtkraft
⇒ Absolute Helligkeit lässt sich berechnen

Tully-Fisher-Methode

Relation zwischen Rotationsgeschwindigkeit und absoluter Helligkeit bei Spiralgalaxien

Supernova Ia



[European Space Agency and Justyn R. Maund (University of Cambridge)]

- Vorläuferstern: Weißer Zwerg
- Durch Akkretion Überschreiten der Chandrasekhar-Grenze ($\approx 1,4 M_{\odot}$):
⇒ Supernova vom Typ Ia
- Nahezu im gesamten Universum beobachtbar

Expansion

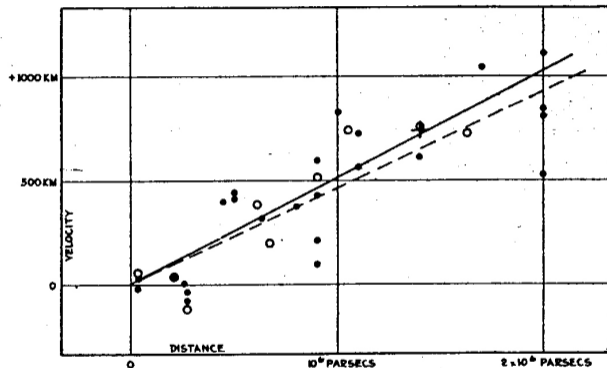


FIGURE 1

[Hubble, 1929]

Edwin Hubble (1929): je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, umso schneller entfernt sie sich von uns \Rightarrow Das Universum expandiert

Rotverschiebung

Messung der Rotverschiebung einer entfernten Galaxie:

$$z = \frac{\lambda_{\text{beobachtet}} - \lambda_{\text{emittiert}}}{\lambda_{\text{emittiert}}}$$

Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit, der mit der sich eine Galaxie durch die Expansion scheinbar von uns entfernt, und der Entfernung ist durch die *Hubble-Konstante* H_0 gegeben.

Berechnung der Entfernung d eines Objektes:

$$d \approx \frac{c \cdot z}{H_0}$$

Mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c .

Aktueller Wert der Hubble-Konstanten: $H_0 = 67,80 \pm 0,77 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{MPC}}$

[Bucher et al. (Planck Collaboration), 2013]

Folgerung aus der Expansion des Universums:

Urknalltheorie: Standardmodell der Kosmologie

Entstehung von Raum und Zeit, *keine* Explosion in bestehendem Raum

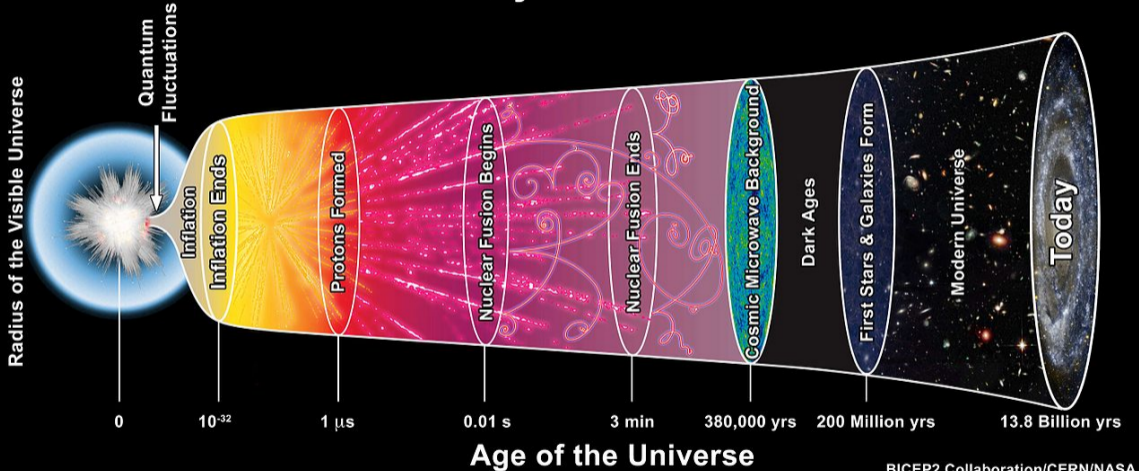
⇒ Was „vor“ dem Urknall war oder warum es zum Urknall kam, liegt außerhalb der Physik!

Alter des Universums: ca. 13,8 Milliarden Jahre

Zeitablauf nach dem Urknall:

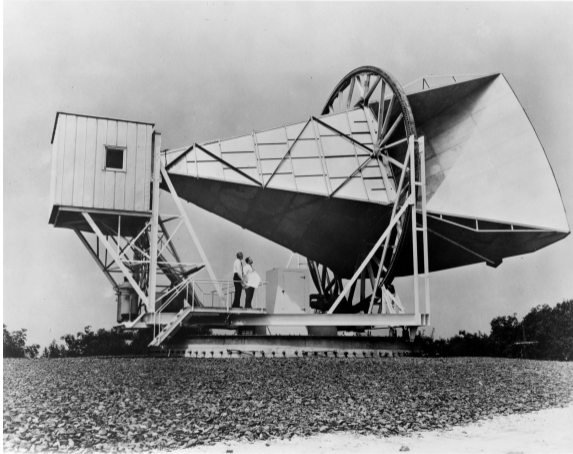
- Bis ca. 10^{-42} s nach dem Urknall: Planck-Ära
- 10^{-36} s - 10^{-32} s: Inflationäre Ausdehnung
- 10^{-7} s: Schwere Teilchen (Protonen, Neutronen entstehen)
- 10^{-4} s: Elektronen und Positronen entstehen
- 100 s: Nukleosynthese (Deuterium Helium, Lithium und Beryllium entstehen)
- 380.000 Jahre: Rekombination \Rightarrow Universum wird durchsichtig
- 500 Millionen Jahre: Entstehung der ersten Galaxien

History of the Universe



BICEP2 Collaboration/CERN/NASA

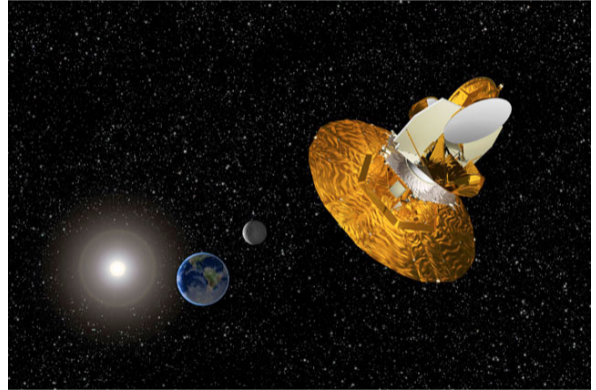
Der kosmische Mikrowellenhintergrund (CMBR)



[NASA]

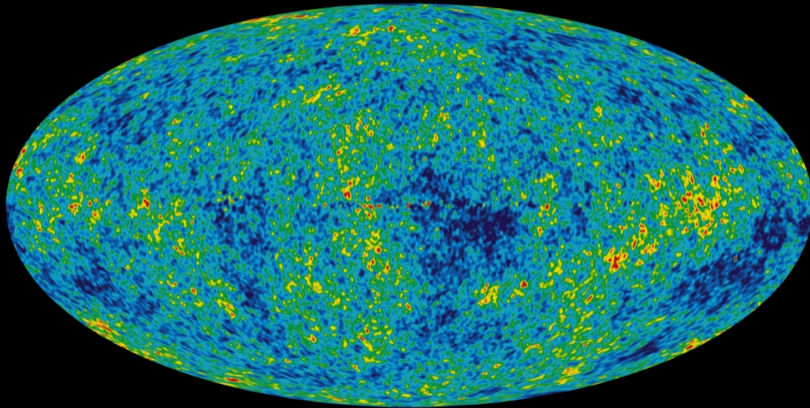
- Postuliert 1948 von George Gamow, Ralph Alpher und Robert Herman
 - Folge der Rekombination 380.000 Jahre nach dem Urknall :
Universum wird durchsichtig
 - 1964: Entdeckung des Mikrowellenhintergrundes durch Penzias und Wilson (Nobelpreis 1978)
- ⇒ Starke Evidenz für Urknalltheorie

Vermessung der Hintergrundstrahlung: COBE, WMAP, Planck



COBE (NASA/COBE Science Team), WMAP (NASA/WMAP Science Team)

WMAP-Karte des Mikrowellenhintergrundes



[NASA/WMAP Science Team]

Warum ist der Nachthimmel dunkel?

- Annahme: Unendlich viele, gleichförmig verteilte Sterne in unendlich großem Universum \Rightarrow heller Nachthimmel
- Historische Erklärung: Staub absorbiert Sternenlicht
- Elegante Auflösung: Das beobachtbare Universum ist räumlich und zeitlich begrenzt \Rightarrow Das Licht weit entfernter Galaxien hat uns noch nicht erreicht, sehr weit entfernte Galaxien bewegen sich durch die Expansion so schnell von uns weg, dass uns ihr Licht nie erreichen wird.

Das kosmologische Prinzip

Grundannahmen der Kosmologie:

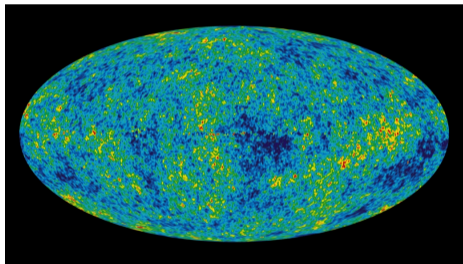
Homogenität

Überall im Universum bietet sich (auf großen Skalen) der gleiche Anblick dar. Es gibt keinen bevorzugten Ort. Das Universum hat keinen Mittelpunkt. Überall gelten die gleichen Naturgesetze.

Isotropie

Von jedem Punkt im Universum stellt sich das Universum (auf großen Skalen) in allen Richtungen gleich dar.

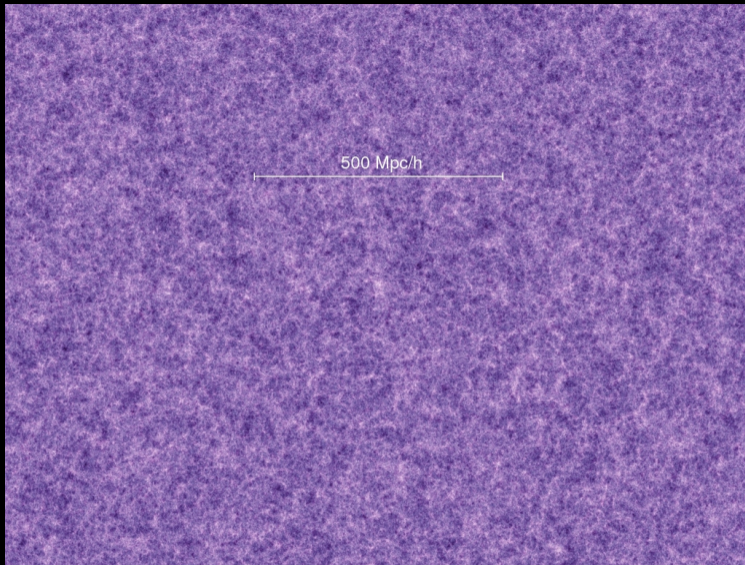
Ausgangspunkt: Kleine Dichtefluktuationen in der Hintergrundstrahlung
Daraus Strukturentstehung, Galaxienentstehung



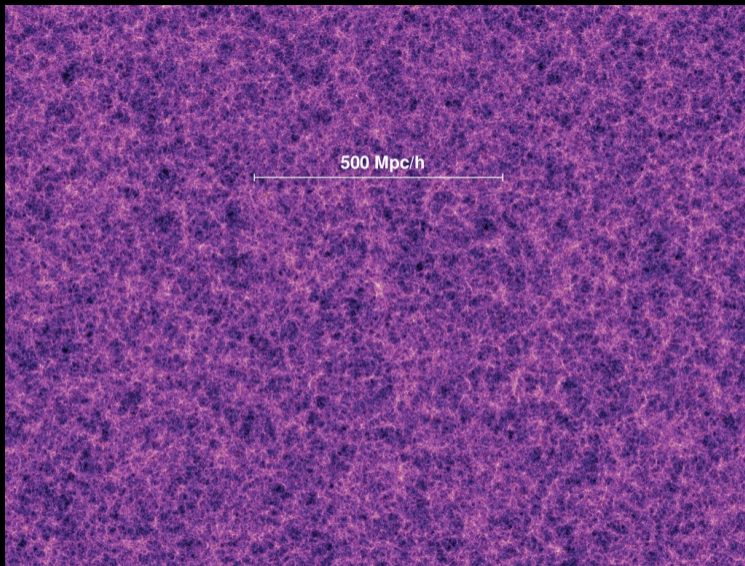
[NASA/WMAP Science Team]

Millennium-Simulation des Max-Planck Institut für Astrophysik:

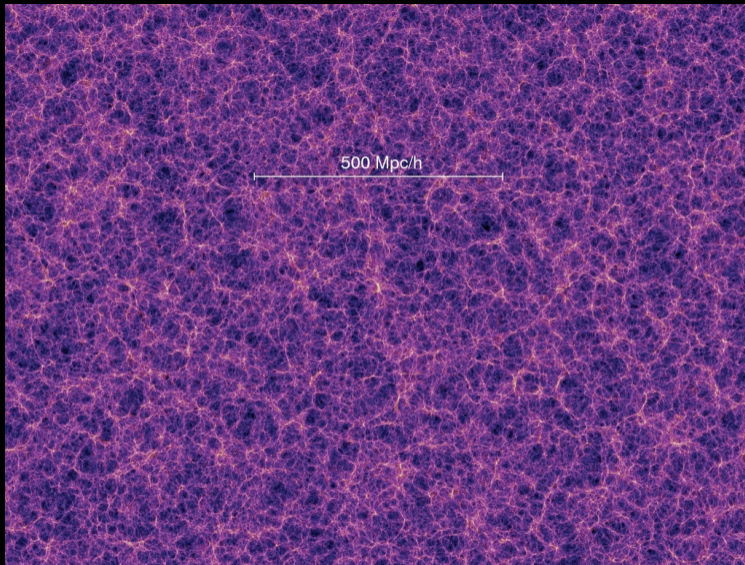
<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/presse/>



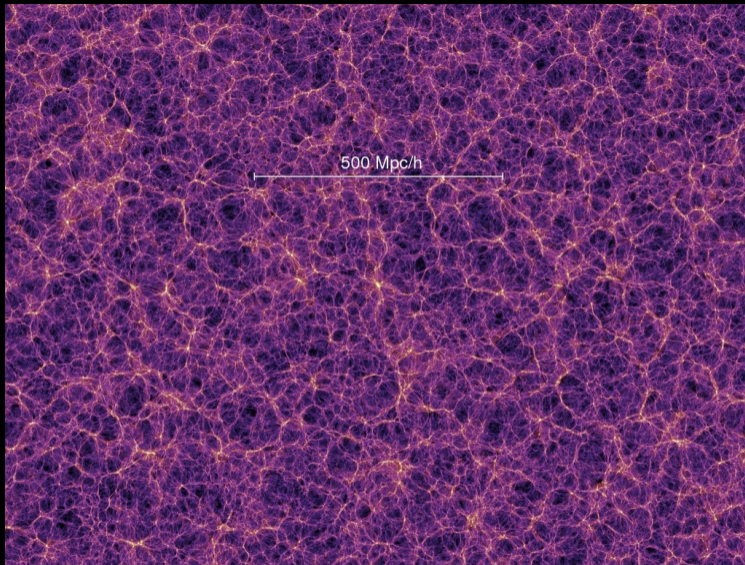
210 Millionen Jahre nach dem Urknall [Millennium-Simulation, Max-Planck Institut für Astrophysik]



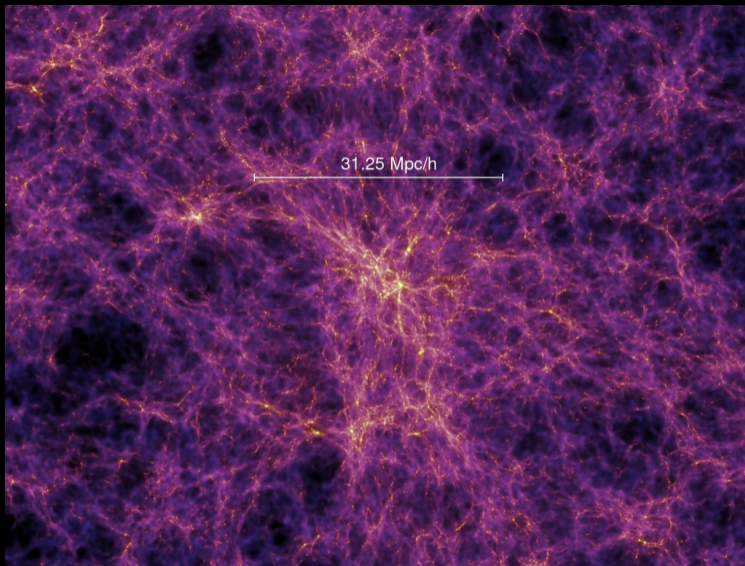
1 Milliarde Jahre nach dem Urknall



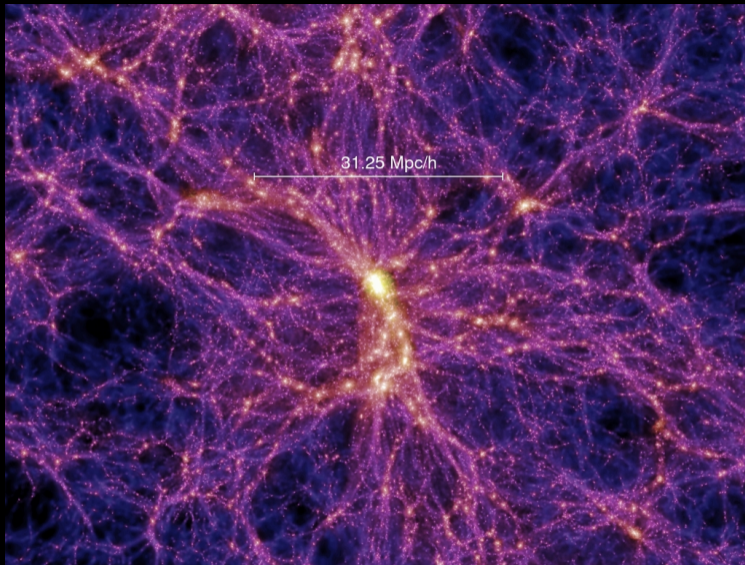
4,7 Milliarden Jahre nach dem Urknall



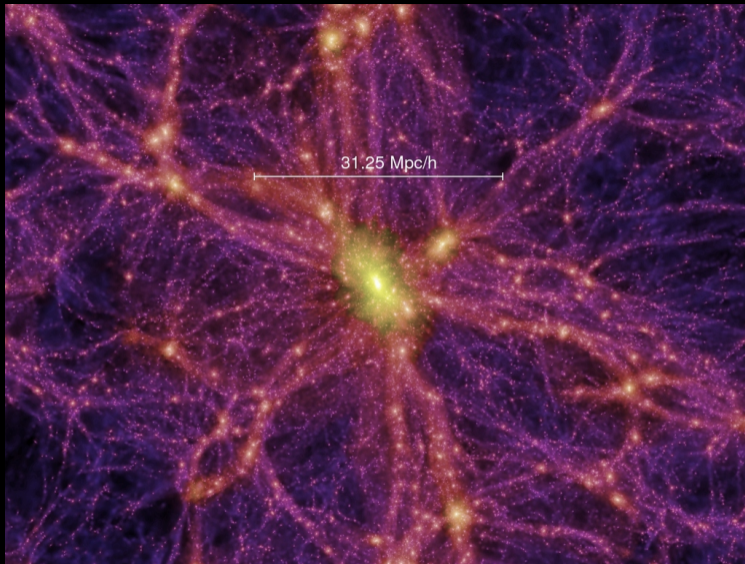
13,6 Milliarden Jahre nach dem Urknall



1 Milliarde Jahre nach dem Urknall



4,7 Milliarden Jahre nach dem Urknall



13,6 Milliarden Jahre nach dem Urknall

- Zwicky 1933: Galaxien im Coma-Haufen rotieren schneller um das Zentrum, als aus der Masse der sichtbaren Materie berechnet

⇒ Dunkle Materie

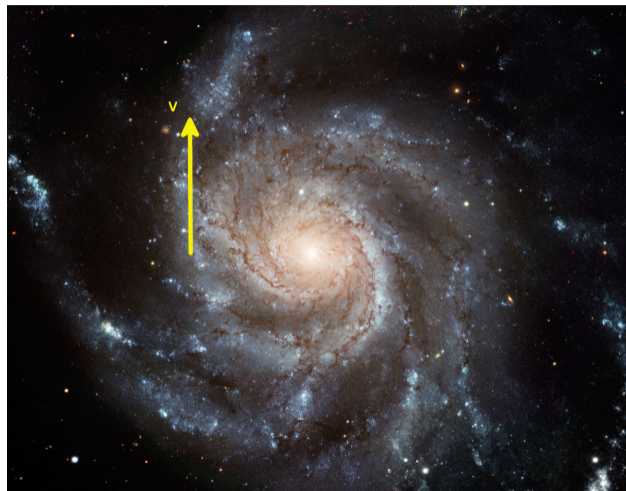


[Jim Misti (Misti Mountain Observatory)]

Dunkle Materie II

- Rotationsgeschwindigkeit in einem definierten Abstand zum Zentrum hängt von Gesamtmasse innerhalb der Umlaufbahn ab
- Beobachtung: Geschwindigkeit höher, als anhand von sichtbarer Materie berechnet

⇒ Dunkle Materie

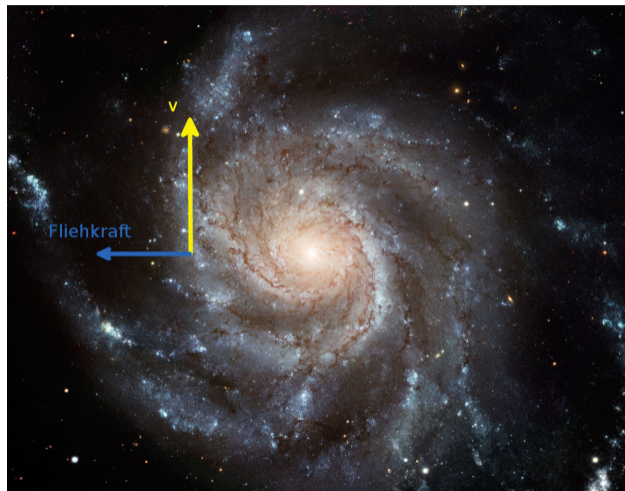


[NASA/ESA,CFHT,NOAO]

Dunkle Materie II

- Rotationsgeschwindigkeit in einem definierten Abstand zum Zentrum hängt von Gesamtmasse innerhalb der Umlaufbahn ab
- Beobachtung: Geschwindigkeit höher, als anhand von sichtbarer Materie berechnet

⇒ Dunkle Materie

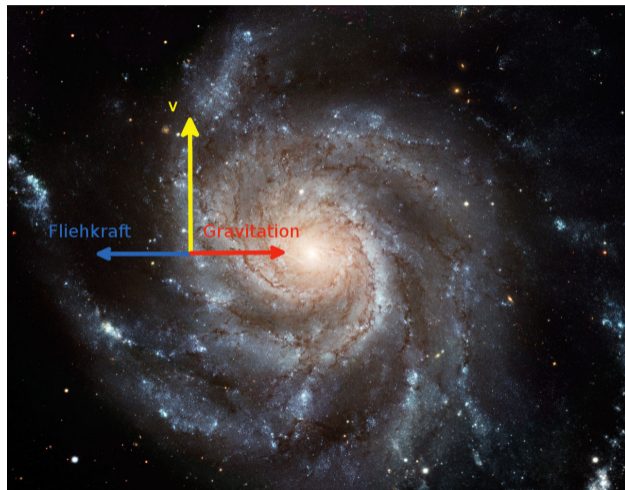


[NASA/ESA,CFHT,NOAO]

Dunkle Materie II

- Rotationsgeschwindigkeit in einem definierten Abstand zum Zentrum hängt von Gesamtmasse innerhalb der Umlaufbahn ab
- Beobachtung: Geschwindigkeit höher, als anhand von sichtbarer Materie berechnet

⇒ Dunkle Materie

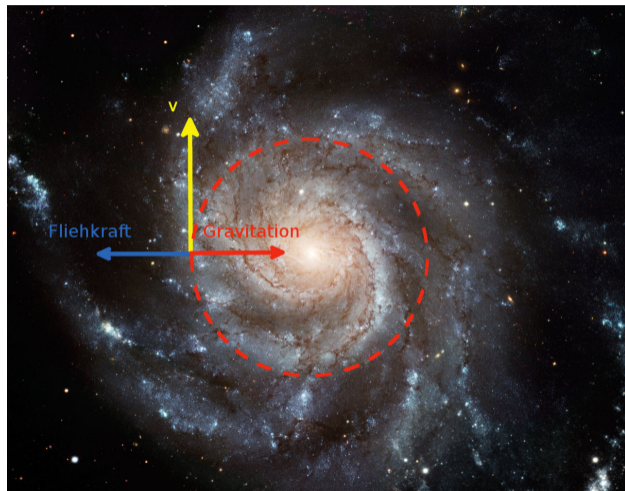


[NASA/ESA,CFHT,NOAO]

Dunkle Materie II

- Rotationsgeschwindigkeit in einem definierten Abstand zum Zentrum hängt von Gesamtmasse innerhalb der Umlaufbahn ab
- Beobachtung: Geschwindigkeit höher, als anhand von sichtbarer Materie berechnet

⇒ Dunkle Materie

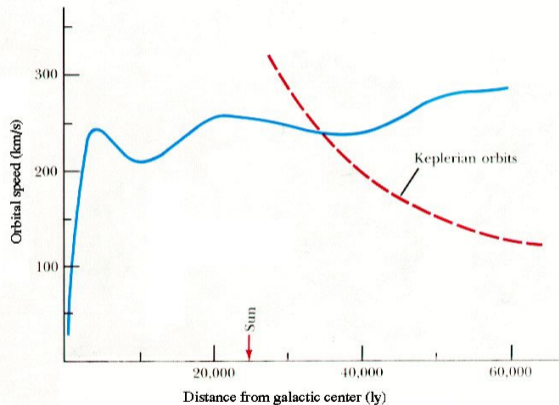


[NASA/ESA,CFHT,NOAO]

Dunkle Materie II

- Rotationsgeschwindigkeit in einem definierten Abstand zum Zentrum hängt von Gesamtmasse innerhalb der Umlaufbahn ab
- Beobachtung: Geschwindigkeit höher, als anhand von sichtbarer Materie berechnet

⇒ Dunkle Materie



[http://abyss.uoregon.edu/~js/images/gal_rotation.gif]

Verteilung der Dunklen Materie in Abell 1689



Verteilung berechnet aus dem Gravitationslinseneffekt auf Hintergrundgalaxien

[NASA, ESA, D. Coe (NASA Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, and Space Telescope Science Institute), N. Benítez (Institute of Astrophysics of Andalucía, Spain), T. Broadhurst (University of the Basque Country, Spain), and H. Ford (Johns Hopkins University, USA)]

Die Zukunft des Universums I

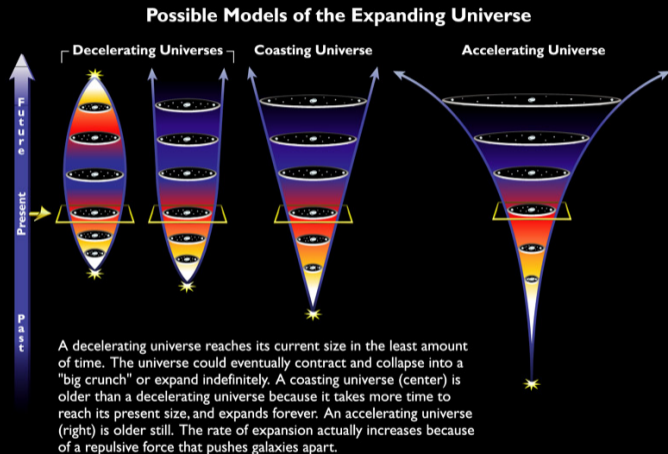
Weitere Entwicklung abhängig von Dichte des Universums: $\Omega = \Omega_b + \Omega_d + \Omega_\Lambda$

- Dichte gewöhnlicher Materie Ω_b
- Dichte Dunkler Materie Ω_d
- Dunkle Energie Ω_Λ

Szenarien:

- Expansion kommt zum Stillstand, Universum fällt wieder zusammen \Rightarrow „Big Crunch“
- Expansion verlangsamt sich und kommt nach unendlicher Zeit zum Stillstand
- Ewige Expansion, Geschwindigkeit nähert sich konstantem Wert an
- Beschleunigte Expansion bei Vorhandensein einer kosmologischen Konstante („Dunkler Energie“)

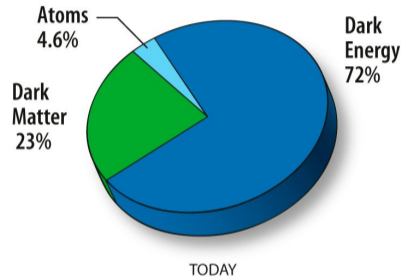
Die Zukunft des Universums II



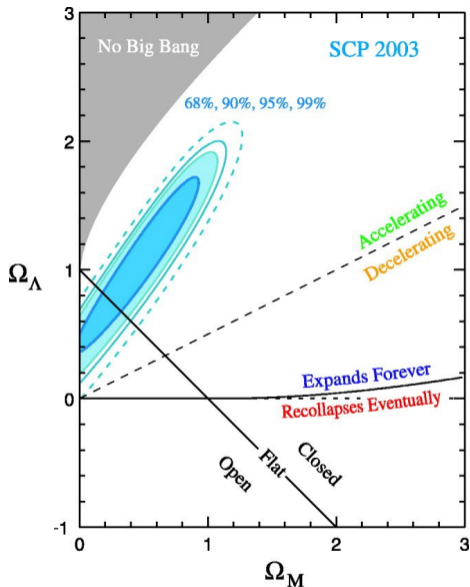
[NASA, ESA and STScI]

- $\Omega = 1$
- 4,5 % „Normale“ Materie
- 22,5 % Dunkle Materie
- 73 % Dunkle Energie

Beschleunigte Expansion durch dunkle Energie



[NASA / WMAP Science Team]



[<http://burro.astr.cwru.edu/Academics/Astr222/Cosmo/Models/lambda.html>]

Nobelpreis für Physik 2011



Saul Perlmutter



Brian P. Schmidt

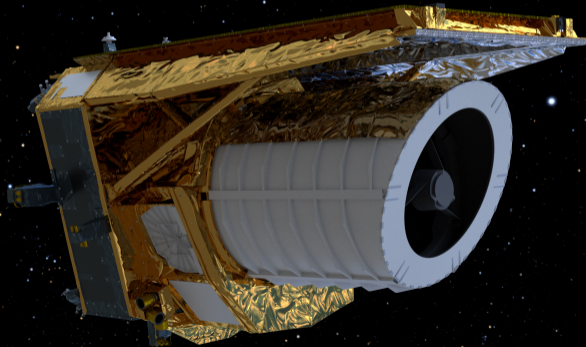


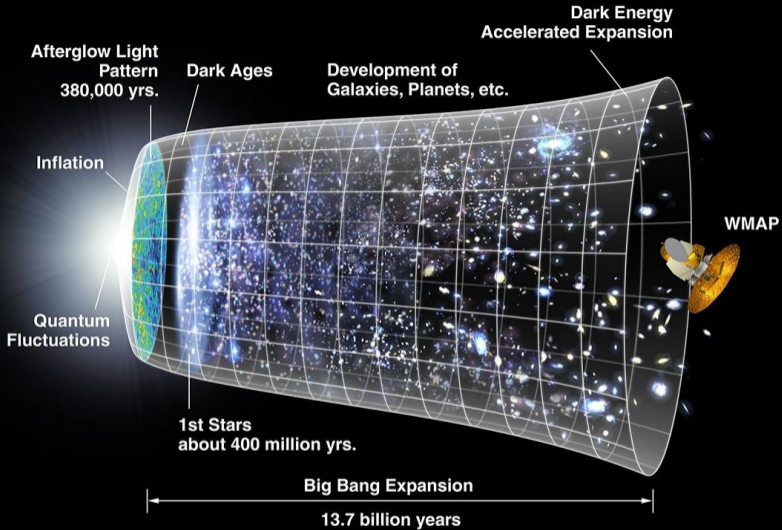
Adam G. Riess

„for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae“

Photos: Roy Kaltschmidt. Courtesy: Lawrence Berkeley National Laboratory/Belinda Pratten, Australian National University/Homewood Photography

Euclid-Mission (Start 2023)





[NASA / WMAP Science Team]

- Helmut Hetznecker: Expansionsgeschichte des Universums – Vom heißen Urknall zum kalten Kosmos (Astrophysik Aktuell), Spektrum akad. Verlag, Heidelberg 2007
Gut verständliches Buch zur Einführung, in der NAA-Bibliothek vorhanden
- Helmut Hetznecker: Kosmologische Strukturbildung – Von der Quantenfluktuation zur Galaxie (Astrophysik Aktuell), Spektrum akad. Verlag, Heidelberg 2009
Gut verständliches Buch zur Einführung, in der NAA-Bibliothek vorhanden
- Johannes V. Feitzinger: Galaxien & Kosmologie: Aufbau und Entwicklung des Universums, Kosmos, 2007
Populärwissenschaftliches Werk, in der NAA-Bibliothek vorhanden
- www.hubblesite.org
- www.eso.org



[Andreas Dosche](#)

Unterlagen zum BZ-Kursabend 2009



[Erich Karkoschka](#)

Atlas für Himmelsbeobachter, Franckh-Kosmos, 3. Auflage, Stuttgart 1997



[Andrew Liddle](#)

Einführung in die moderne Kosmologie, Wiley-VCH, Weinheim 2009



[Wilms J.](#)

Vorlesung „Introduction to Astronomy I/II“ 2006/2007



[Albrecht Unsöld, Bodo Baschek](#)

Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik, Springer, Berlin 2002



[Edward R. Harrison](#)

Kosmologie, Darmstädter Blätter, 3. Auflage 1990