### Galaxien und Kosmologie

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

Nürnberger Astronomische Arbeitsgemeinschaft e.V.

Grundkurs Astronomie 25. November 2024



## Gliederung

- Milchstraße
- 2 Galaxien
- Mierarchische Strukturen
- 4 Entfernungsbestimmung
- 6 Kosmologie
  - Urknalltheorie
  - Strukturbildung
  - Zukunft des Universums

### Entfernungen und Helligkeiten

#### Entfernungen

- Astronomische Einheit: 1 AE  $\hat{=}$  Abstand Erde-Sonne  $\approx$  150 Millionen km
- Lichtjahr:  $1 \, \text{Lj} \approx 9,46 \, \text{Billionen km}$
- ullet Größe Sonnensystem: Abstand Sonne-Pluto  $=40\,\mathrm{AE}pprox5,5$  Lichtstunden
- Abstand Proxima Centauri (nächster Stern) ca. 4,3 Lj, Abstand Deneb ca. 1550 Lj

#### Helligkeiten

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

Johannes Hölzl (NAA) Galaxien und Kosmologie 25. November 2024

### Milchstraße



[Thomas Jäger/NAA]



[H. Kintzel (NAA)]

25. November 2024

5/86

- Namensherkunft:  $\gamma \alpha \lambda \alpha \xi i \alpha \varsigma$ : von  $\gamma \dot{\alpha} \lambda \alpha = \text{Milch}$
- Galilei 1609: Milchstraße besteht aus unzähligen Sternen



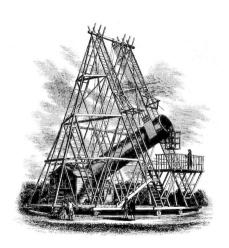
Jacopo Tintoretto: Die Entstehung der Milchstraße, 1575

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



WILH, HERSCHEL.

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



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



[American Institute of Physics Niels Bohr Library]

### Die große Debatte

 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/

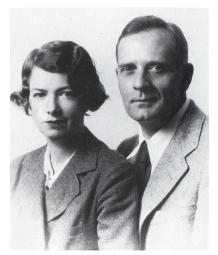
[NASA, ESA, J. Dalcanton, B. F. Williams, L. C. Johnson (Univ. of Washington), the PHAT team, and R. Gendler.]

### Die große Debatte

 H. Shapley: Nebelflecken sind Objekte in unserer Milchstraße

1

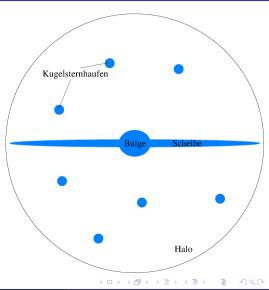
- H. D. Curtis: Nebelflecken sind eigenständige Galaxien
- Edwin Hubble (1924): Beobachtung von Cepheiden (spezielle veränderliche Sterne) im Andromedanebel
  - ⇒ Nebelflecken sind entfernte Galaxien

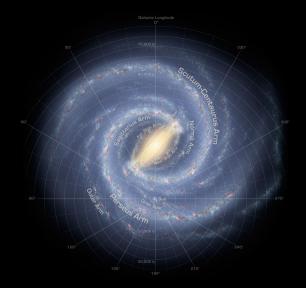


Edwin Hubble [Christianson]

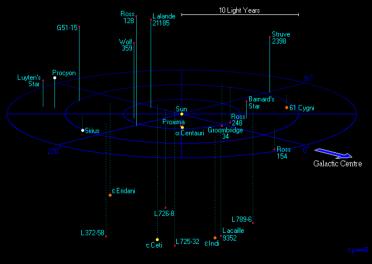
### Aufbau der Milchstraße

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

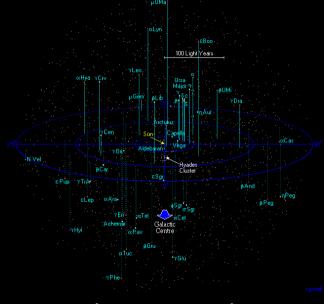




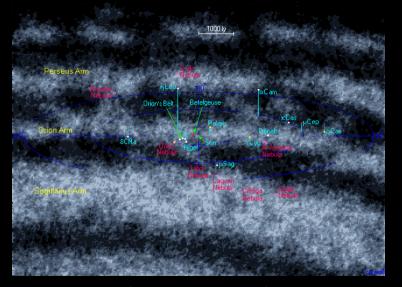
[NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC-Caltech)]



[www.atlasoftheuniverse.com]



[www.atlas of the universe.com]



[www.atlasoftheuniverse.com]

# Kugelsternhaufen M 13



 $[\mathsf{Thomas}\ \mathsf{J\"{a}ger}\ (\mathsf{NAA})]$ 

## Kugelsternhaufen M 80



[NASA, The Hubble Heritage Team, STScI, AURA]



Johannes Hölzl (NAA) Galaxien und Kosmologie 25. November 2024 16 / 86

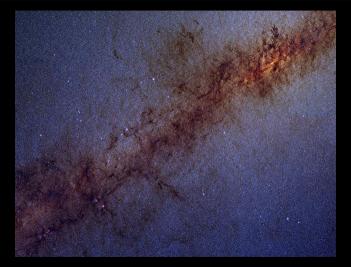
### Galaktisches Zentrum

- 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  $M_{\odot}$



Johannes Hölzl (NAA) Galaxien und Kosmologie 25. November 2024 17/86

### Galaktisches Zentrum: Infrarot

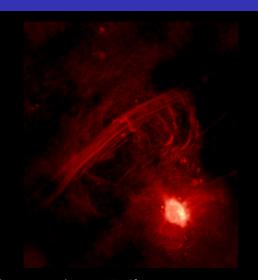


[2MASS/G. Kopan, R. Hurt]



### Galaktisches Zentrum: Radio





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

### Galaktisches Zentrum: Röntgen



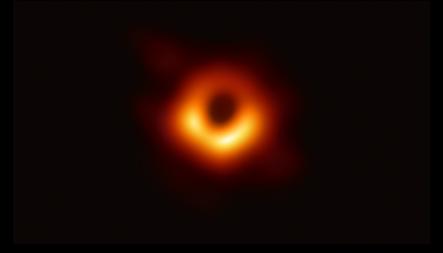
 $[{\sf NASA/CXC/UMass/D}.\ {\sf Wang\ et\ al}]$ 

### Galaktisches Zentrum: Radio und Röntgen



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

# Schwarzes Loch in M87 (6,5 Milliarden Sonnenmassen)

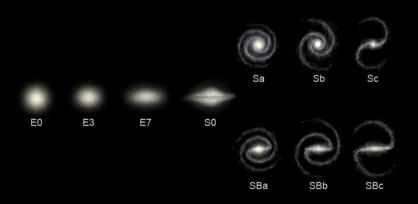


[Event Horizon Telescope Collaboration]

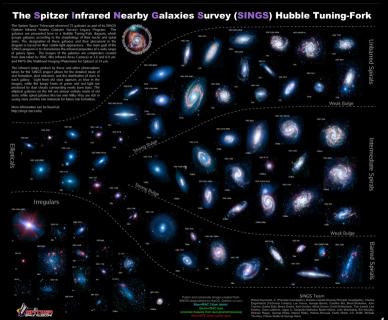
22 / 86

Johannes Hölzl (NAA)

### Galaxien: Klassifikation nach Hubble



[Wikipedia]



#### Galaxien

### 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



## Spiralgalaxie Andromedanebel M 31



[Marco Nelkenbrecher, Sternwarte Nürnberg]

Johannes Hölzl (NAA)

# Spiralgalaxie M 74



[NASA, ESA, and the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration]

Johannes Hölzl (NAA) Galaxien und Kosmologie 25. November 2024 27/86

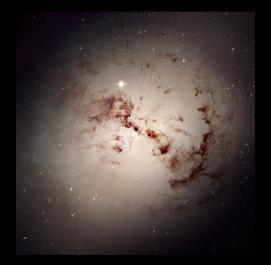
# Balkenspiralgalaxie NGC 1300 (Entfernung: 69 Mio. Lj)



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

28 / 86

# Elliptische Galaxie NGC 1316 (Entfernung: 75 Mio. Lj)



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

900

## Irreguläre Galaxie NGC 4449

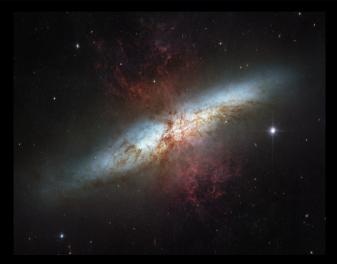


[NASA, ESA, A. Aloisi (STScI/ESA), and The Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration]

Johannes Hölzl (NAA) Galaxien und Kosmologie 25. November 2024 30 / 86

900

## Irreguläre Galaxie M 82



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

#### Hierarchische Strukturen

• Galaxien-Untergruppen (z.B. Milchstraßenuntergruppe, Andromedauntergruppe)

1

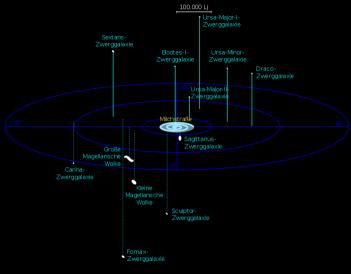
 Galaxienhaufen (z.B. Lokale Gruppe mit Milchstraße und Andromedagalaxie, Virgo-Haufen)

1

 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)



[www.atlasoftheuniverse.com]

# Große und kleine Magellansche Wolke



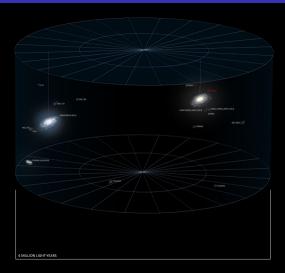
[ESO/S. Brunier]

# Große Magellansche Wolke



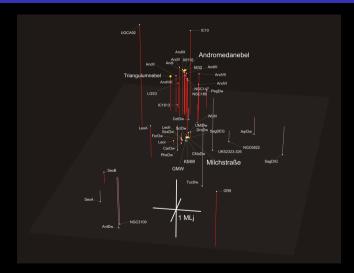
[AURA/NOAO/NSF]

# Lokale Gruppe I

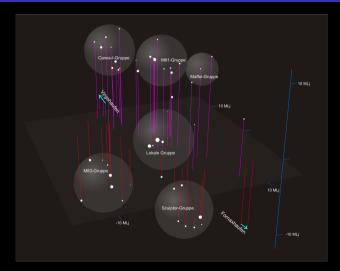


[Wikipedia]

# Lokale Gruppe II



# Umgebung der lokalen Gruppe





# Coma-Galaxienhaufen (Entfernung: 400 Mio. Lj)



[Jim Misti (Misti Mountain Observatory)]

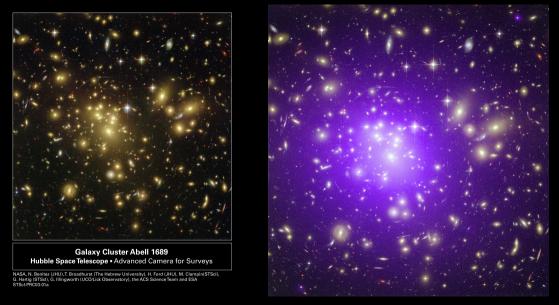
39 / 86

# Abell S0740 (Entfernung: 463 Mio. Lj)



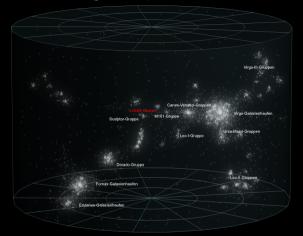
[NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)]

900

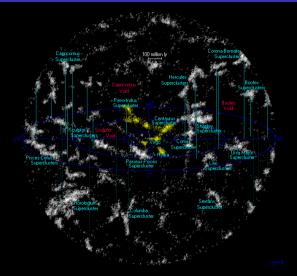


[re: NASA/CXC/MIT/E.-H Peng et al; Optical: NASA/STScl]

# Virgo-Superhaufen



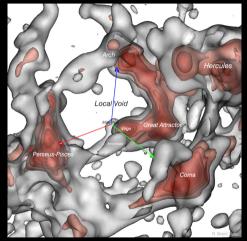
# Laniakea-Superhaufen und Umgebung



 $[Wikipedia/Richard\ Powell]$ 



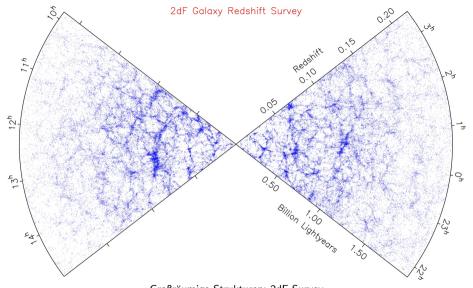
# Local Void (Lokale Leere)



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

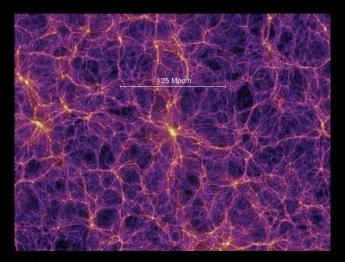
Animation "Cosmography of the Local Void": https://vimeo.com/239075970

900



Großräumige Strukturen: 2dF-Survey

# Großräumige Strukturen



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

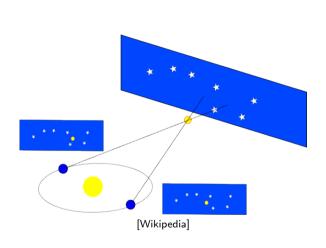
## Entfernungsbestimmung

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

Bestimmung der Entfernung aus Differenz zwischen absoluter und scheinbarer Helligkeit

• "Kosmologische Entfernungsleiter"

#### Parallaxenmethode



- Winkelmessung
- Maximale Basislänge: Erdbahndurchmesser  $\approx$  300 Millionen km (2 AE)

#### Parallaxenmethode



- 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



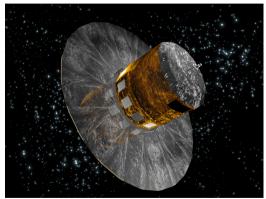
[Michael Perryman, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license]

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

49 / 86

Johannes Hölzl (NAA) Galaxien und Kosmologie 25. November 2024

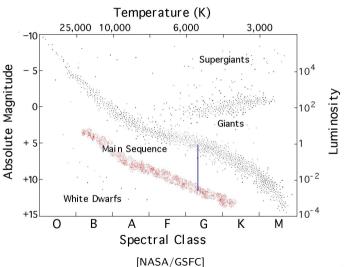
### Satellit Gaia



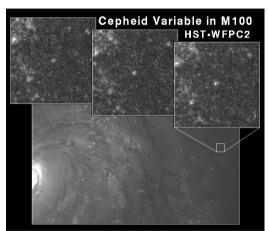
[ESA - C. Carreau]

- 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



#### Weitere Methoden



[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

Johannes Hölzl (NAA) Galaxien und Kosmologie 25. November 2024 52 / 86

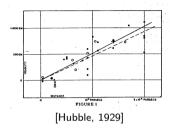
## Supernova la



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

- Vorläuferstern: Weißer Zwerg
- Durch Akkretion Überschreiten der Chandrasekhar-Grenze (≈ 1,4 M<sub>☉</sub>):
   ⇒ Supernova vom Typ Ia
- Nahezu im gesamten Universum beobachtbar

# Expansion



- Alexander Alexandrowitsch Friedmann: Eintseinsche Feldgleichungen erlauben dynamische Universen
- 1927: Georges Edouard Lemaître veröfentlicht Zusammenhang zwischen Entfernung und Rotverschiebung, Interpretation als Ausdehung des Raums
- 1929: Veröffentlichung weiter Daten zum Zusammenhang zwischen Entfernung und Rotverschiebung durch Edwin Hubble (aber: Interpretation als Bewegung der Galaxien im Raum)

## Rotverschiebung

Messung der Rotverschiebung einer entfernten Galaxie:

$$z = rac{\lambda_{ ext{beobachtet}} - \lambda_{ ext{emittiert}}}{\lambda_{ ext{emittiert}}}$$

Hubble-Lemaître-Beziehung: 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:  $H_0 = 67,80 \pm 0,77 \frac{km}{s \cdot MPc}$ 

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

#### Urknall

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

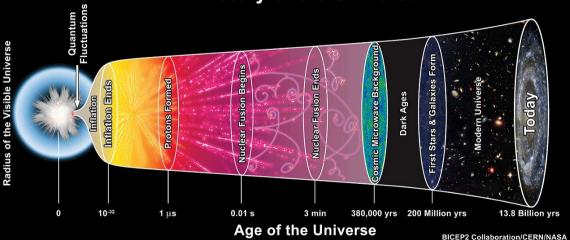
## Das frühe Universum

#### Zeitablauf nach dem Urknall:

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

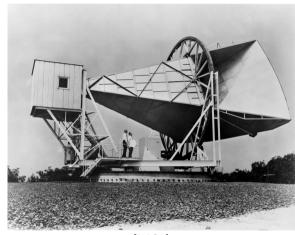


## **History of the Universe**



(ロト 4回 ) 4 章 ) 4 章 ) 9 9 9

## Der kosmische Mikrowellenhintergrund (CMBR)



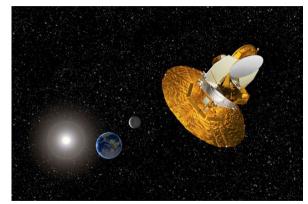
[NASA]

- 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

Johannes Hölzl (NAA) Galaxien und Kosmologie 25. November 2024 59 / 86

## Vermessung der Hintergrundstrahlung: COBE, WMAP, Planck

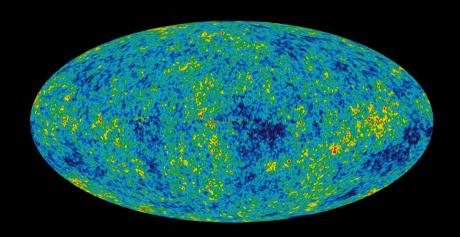




COBE (NASA/COBE Science Team), WMAP (NASA/WMAP Science Team)

Johannes Hölzl (NAA) Galaxien und Kosmologie 25. November 2024 60 / 86

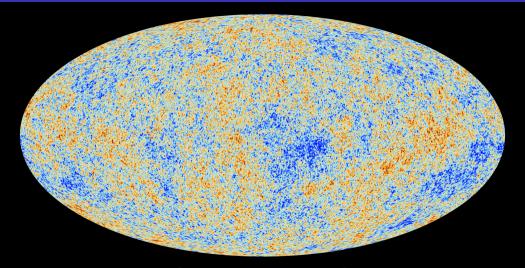
## WMAP-Karte des Mikrowellenhintergrundes



[NASA/WMAP Science Team]

61/86

# Planck-Karte des Mikrowellenhintergrundes



[ESA and the Planck Collaboration]

62 / 86

### Olberssches Paradoxon

#### Warum ist der Nachthimmel dunkel?

- Annahme: Unendlich viele, gleichförmig verteilte Sterne in unendlich großem Universum ⇒ heller Nachthimmel
- Historische Erklärung: Staub absorbiert Sternenlicht
- Elegante Auflösung: Das beobachtbare Universum ist räumlich und zeitlich begrenzt
  ⇒ 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

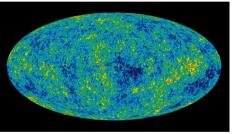
Überall im Universum bietet sich (auf großen Skalen) der gleiche Anblick dar. Es gibt keinen bevorzugten Ort. Das Universum hat keinen Mittelpunkt. Überall gelten die gleichen Naturgesetze.

#### Isotropie

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

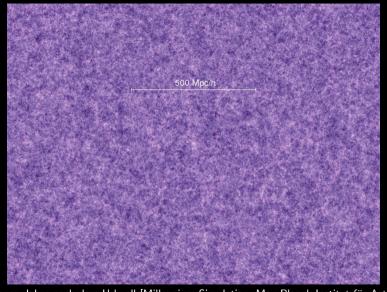
## Strukturbildung

Ausgangspunkt: Kleine Dichtefluktuationen in der Hintergrundstrahlung Daraus Strukturentstehung, Galaxienentstehung



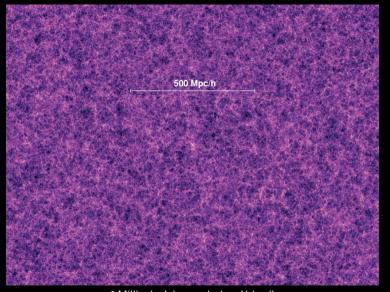
[NASA/WMAP Science Team]

Millennium-Simulation des Max-Planck Institut für Astrophysik: http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/presse/

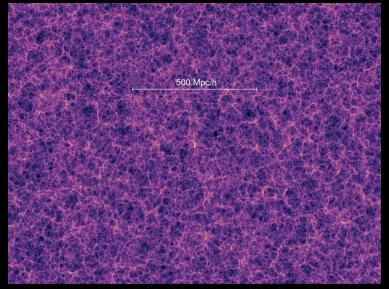


210 Millionen Jahre nach dem Urknall [Millennium-Simulation, Max-Planck Institut für Astrophysik]

25. November 2024

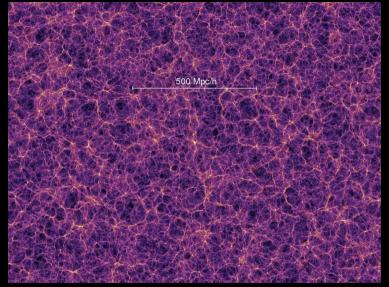


1 Milliarde Jahre nach dem Urknall



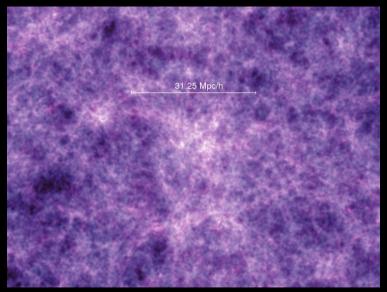
4,7 Milliarden Jahre nach dem Urknall

25. November 2024

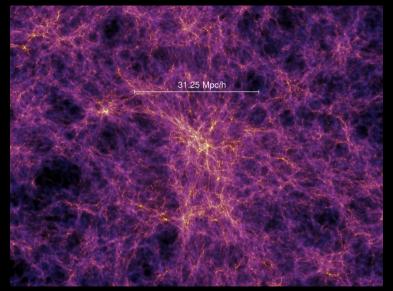


13,6 Milliarden Jahre nach dem Urknall

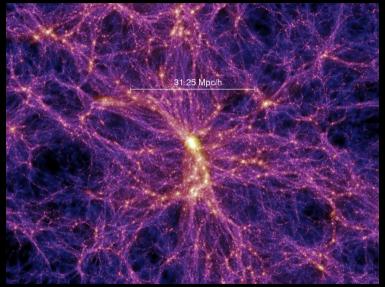
25. November 2024



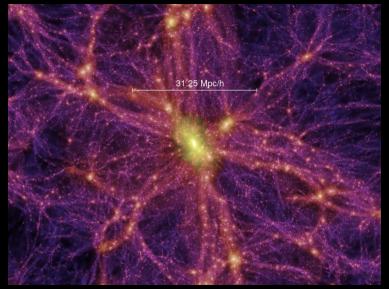
210 Millionen Jahre nach dem Urknall



1 Milliarde Jahre nach dem Urknall



4,7 Milliarden Jahre nach dem Urknall



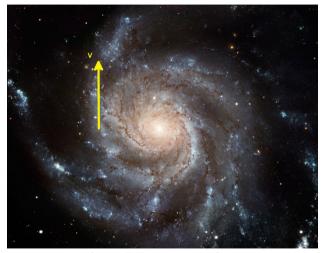
13,6 Milliarden Jahre nach dem Urknall

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



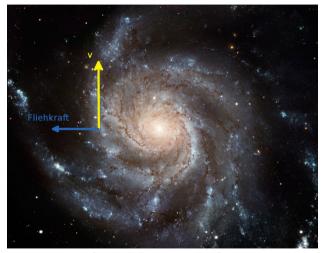
[Jim Misti (Misti Mountain Observatory)]

- 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



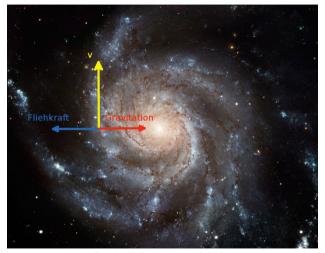
[NASA/ESA,CFHT,NOAO]

- 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



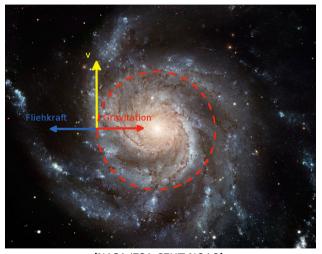
[NASA/ESA,CFHT,NOAO]

- 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]

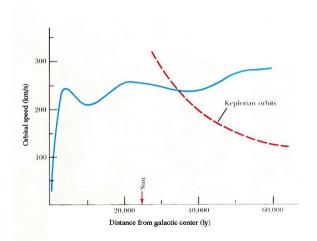
- Rotationsgeschwindigkeit in einem definierten Abstand zum Zentrum hängt von Gesamtmasse innerhalb der Umlaufbahn ab
- Beobachtung: Geschwindigkeit höher, als anhand von sichtbarer Materie berechnet.
- ⇒ Dunkle Materie



[NASA/ESA,CFHT,NOAO]

Johannes Hölzl (NAA) Galaxien und Kosmologie 25. November 2024

- 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]



75 / 86

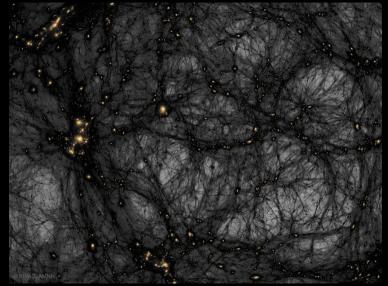
## Verteilung der Dunklen Materie in Abell 1689



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)]

76 / 86



Simulierte großräumige Verteilung der dunklen Materie [Tom Abel und Ralf Kaehler (KIPAC, SLAC), AMNH]

## Die Zukunft des Universums I

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

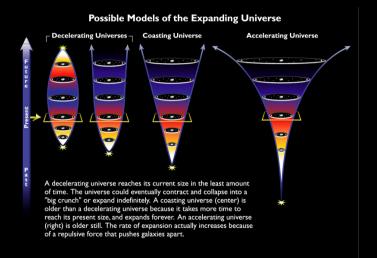
- $\bullet$  Dichte gewöhnlicher Materie  $\Omega_b$
- ullet Dichte Dunkler Materie  $\Omega_d$
- Dunkle Energie  $\Omega_{\Lambda}$

#### Szenarien:

- ullet 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

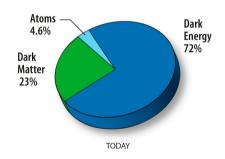


[NASA, ESA and STScl]

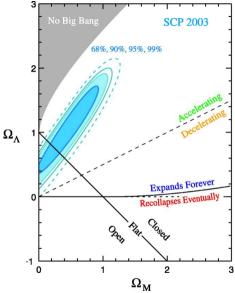
### Aktueller Stand

- $\Omega = 1$
- 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

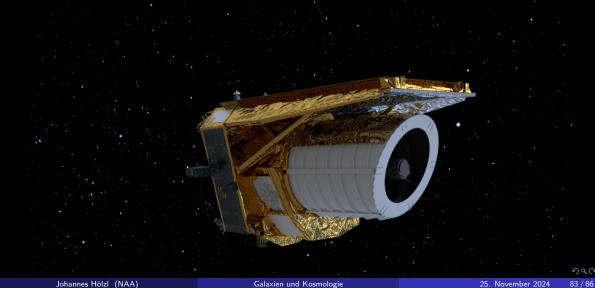
Adam G. Riess

82 / 86

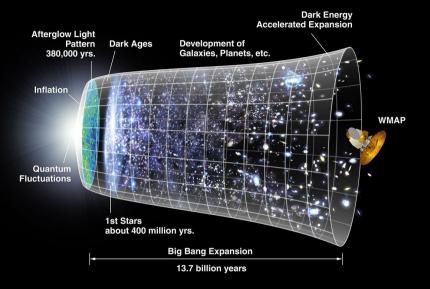
"for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"

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

# Euclid-Mission (Start 2023)



Galaxien und Kosmologie Johannes Hölzl (NAA)



[NASA / WMAP Science Team]

### Literatur

- 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



## Quellen



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