

Astronomische Beobachtungen: Größenskalen, Objekte, Eigenschaften

Kosmologie für Nicht-Physiker

Markus Pössel & Björn Malte Schäfer

Haus der Astronomie/Institut für Theoretische Astrophysik

16.10.2014 bis 22.1.2015

Überblick

- 1 Sonnensystem**
- 2 Sterne**
- 3 Galaxien**
- 4 Großräumige Struktur**

Abstände im Sonnensystem

Grundeinheit: *Astronomische Einheit* (mittlerer Abstand Erde–Sonne); alle anderen Abstände ergeben sich aus 3. Kepler-Gesetz, $T^2 \sim a^3$.

Grundlage: Parallaxenmethode.

Je nach Position: Fernere Objekte „springen“ vor noch fernerem Hintergrund (Beispiel: Daumen am ausgestreckten Arm)

Mondparallaxe



Bild: Martin Federspiel, Simone Bolzoni

Martin Federspiel, „Beobachtungstipp: Wie ich die Mondentfernung bestimmte“ in *Sterne und Weltraum* 2/2008, S. 76-79

Daniel Ahrens, „Lippstadt und Kapstadt greifen zu den Sternen“, *Wissenschaft in die Schulen* 2/2008. <http://www.wissenschaft-schulen.de>

Abstände im Sonnensystem

Direkte Messungen

Sonnenparallaxe schwierig —
insbesondere: kein sichtbarer
Sternhintergrund!

Lösung: *Venustransit* — jeweils
zwei, 8 Jahre auseinander, dann
mehr als 100 Jahre Pause.

Vorteil: Direkte Messung ist
Zeitmessung

(Transitanfang/-ende). Ab 1769
gute, konsistente Ergebnisse,
 $1 AU \sim 150$ Mio. km, Parallaxe
 $8'',57 \pm 0'',04$ (5‰)

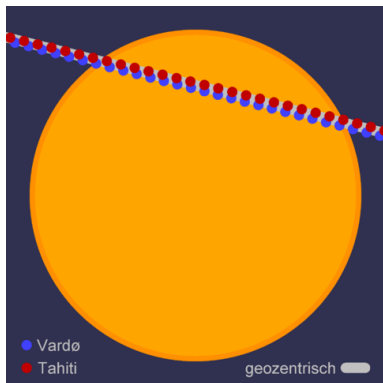


Bild: Benutzer Sch via Wikimedia Commons
unter Lizenz CC BY-SA 3.0

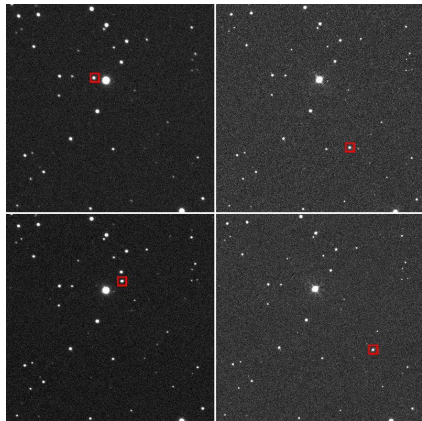
Asteroidenmessungen

Beobachtungen von (433) Eros
1900-1901, 1930-1931: 0,2‰

Bilder rechts: Beobachtungen
des erdnahen Asteroiden
(99942) Apophis mit den
Faulkes-Teleskopen
(links: N, rechts S)

Oben: 12:46 MEZ, unten 12:56
MEZ

Parallaxe $\approx 2'$,
Abstandsgenauigkeit 5‰



Moderne Messungen

Moderne Messungen: Radarabstände
1960er Jahre

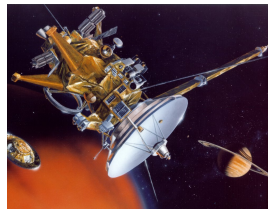
Radarmessungen ergeben

$$1 \text{ AU} = (149.597.870 \pm 1) \text{ km}$$

Noch präziser: Telemetrie mit Sonden
(rechts: Cassini, 1997-heute). Abstände
präzise messbar (Bertotti et al. 2003 als
Tests der Allgemeinen
Relativitätstheorie).



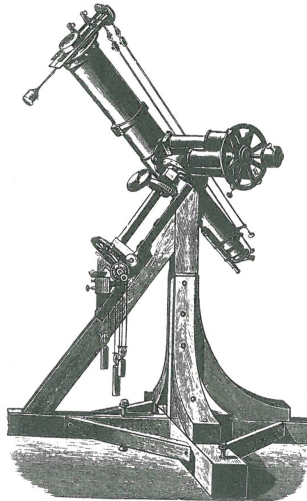
Arecibo observatory



Cassini mission

Bessels Heliometer

Parallaxe für Sterne?



Sternparallaxe

Bessel 1838:
Erste Parallaxe eines Sterns
(61 Cygni, 11,4 Lichtjahre,
17.-nächstes Sternensystem)

Rechts:
Kleineres Heliometer,
Utzschneider & Fraunhofer 1820,
jetzt im Deutschen Museum München



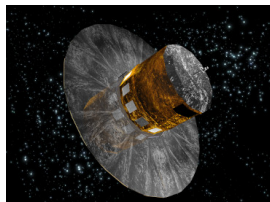
Genauigkeiten in der Astronomie

- Bessel 61 Cygni: $0,02''$ (mit Statistik!), Parallaxe $0,3''$
- Zielgenauigkeit SOFIA-Teleskop: $0,5''$
- Hipparcos: 1mas
- Gaia: 1 Mia. Sterne $20 - 200\mu\text{as}$, $m=15-20$

Sternparallaxen

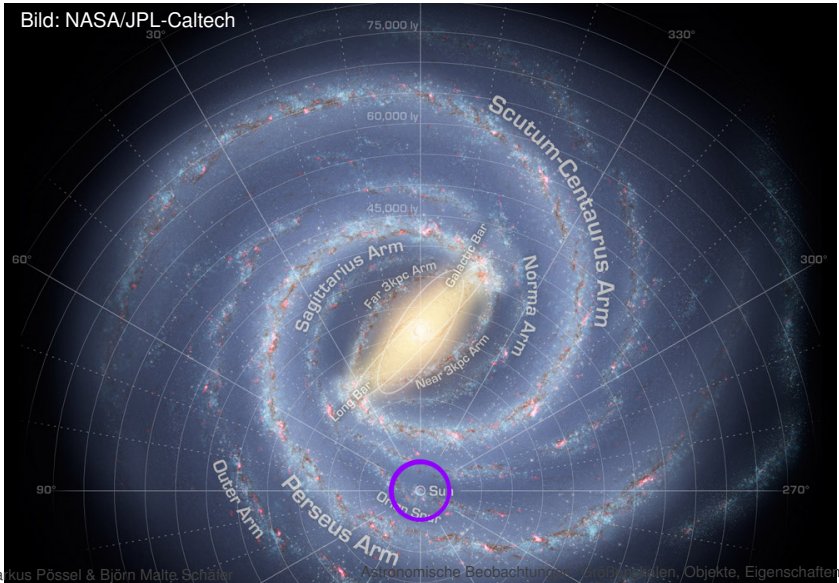
Beste Messungen: Satellitenmissionen!
Hipparcos 1989-1993, Gaia gestartet
Ende 2013

(Bild rechts: ESA)



Größe	Hipparcos	Gaia
Genauigkeit	1 mas	20 μ as (bei 15 mag)
Entfernungen auf 10%	350 Lj	15.000 Lj

Wie weit kommen wir mit Sternparallaxen?



Andere Arten von Parallaxe

- **Sternstromparallaxe:** Gemeinsame Bewegung (Sternhaufen) in gleiche Richtung – Entfernung aus Eigenbewegung (an der Himmelskugel) und Doppler
- **Statistische Parallaxe:** Sterne, die zusammengehören (d.h. im wesentlichen gleiche Entfernung). Annahme: Zusammenhang Dopplerverschiebung und Eigenbewegung
- **Pulsierende Cepheiden:** Vergleich Winkelgröße (Interferometrie) und Änderung in Radialgeschwindigkeit (Doppler) bis 1300 Lj oder so (Lane et al. 2000, Kervella et al. 2004)
- **Umlaufbahnen um Zentralmasse:** Eigenbewegung vs. Dopplerverschiebung gibt Entfernung. Beispiel: Sterne um zentrales Schwarzes Loch in der Milchstraße

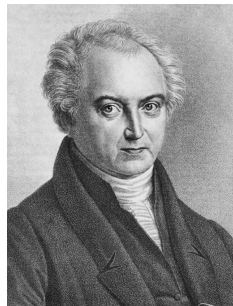
Olbers'sches Paradoxon (1823)

Heinrich Wilhelm Matthias Olbers (1758-1840):

Das Universum kann nicht unendlich groß und zeitlich unveränderlich sein.

Ad absurdum geführt: Jede Sichtlinie würde an einer Sternoberfläche enden – konstante Flächenhelligkeit, weil Helligkeit wie $1/r^2$ geht, scheinbare Fläche am Himmel wie r^2 .

(Staub → Absorption? Würde durch thermisches Gleichgewicht die gleiche Flächenhelligkeit bekommen!)



Inhomogenität des Universums auf Stern-Skalen

Sterndichten $\sim 10^3 \text{ kg/m}^3$ auf Größenskalen von 10^6 m

vs.

Interstellares Medium: $\sim 10^{-21} \text{ kg/m}^3$,
typische interstellare Abstände $10^{16} \dots 10^{17} \text{ m}$

Altersbestimmung für Sterne

Trivial: Nichts im Universum kann älter sein als das Universum als Ganzes.

(Es gab Zeiten, wo das problematisch war!)

z.B. radioaktive Altersbestimmung. Einige Halbwertzeiten:

$${}^{235}\text{U} \quad 7 \cdot 10^8 \text{ a}$$

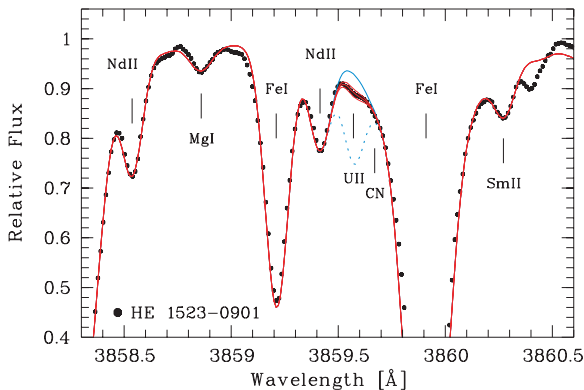
$${}^{232}\text{Th} \quad 1.4 \cdot 10^{10} \text{ a}$$

⇒ Schwere Elemente, die bei Sternexplosionen (Supernovae; Kern kollabiert, im r-Prozess lagern sich schnell Neutronen an) entstehen. Caveat: Hier spielen Modelle eine Rolle!

Buchtipp: Anna Frebel, *Auf der Suche nach den ältesten Sternen*, Fischer 2012

HE 1523-0903

Beispiel für sehr alten Stern; kaum Elemente außer Wasserstoff und Helium („metallarm“; Frebel, Christlieb et al. 2007): *U*- und *Th*-datiert auf 13,2 Milliarden Jahre!

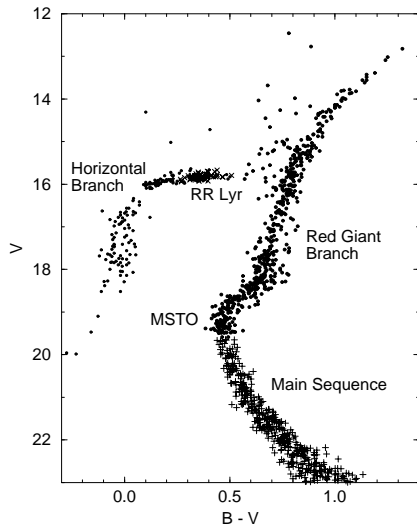


Sternalter

Systematische
Zusammenhänge von
Helligkeit/Temperatur von
Sternen im *Hertzsprung-
Russell-Diagramm*; Sterne
bewegen sich darin
während ihrer Entwicklung

Lebenszeit $\tau \sim L^{-2/3}$,
 $L \sim M^3$ und $\tau \sim T^{-1}$.

Älteste Kugelsternhaufen:
 13.2 ± 2 Gyr
(Carretta et al. 2000).



Chemische Zusammensetzung

Element	relative Häufigkeit
Wasserstoff	92,1%
Helium	7,8%
Sauerstoff	0,5‰
Kohlenstoff	0,23‰

aus Lodders et al. 2009, Landolt-Börnstein

Caveat: Nur für obere Atmosphärenschichten.

Wasserstoff 92 Prozent, Helium 8 Prozent (25 Massenprozent)
kommt recht allgemein hin

Standardkerzen

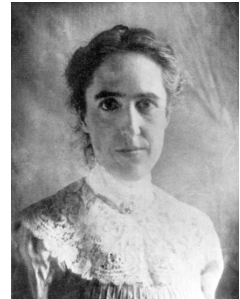
Ist die Leuchtkraft L bekannt und die scheinbare Helligkeit am Himmel F (Energie pro Zeiteinheit pro Detektorfläche) gemessen, kann man über

$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

den Abstand d erschließen.

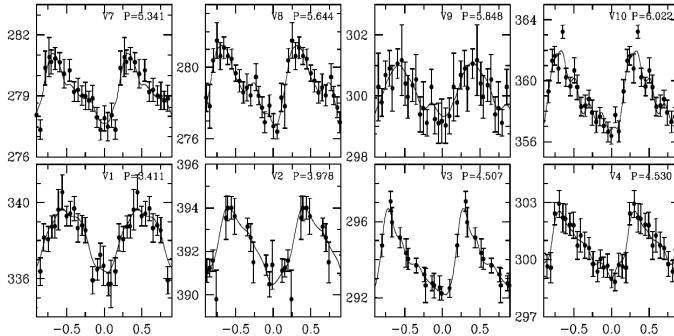
Problem: Bei welchen Objekten kennt man die Leuchtkraft, oder kann sie aus anderen Objekteigenschaften erschließen?

Cepheiden: Eine Sorte variabler Sterne



Henrietta Leavitt

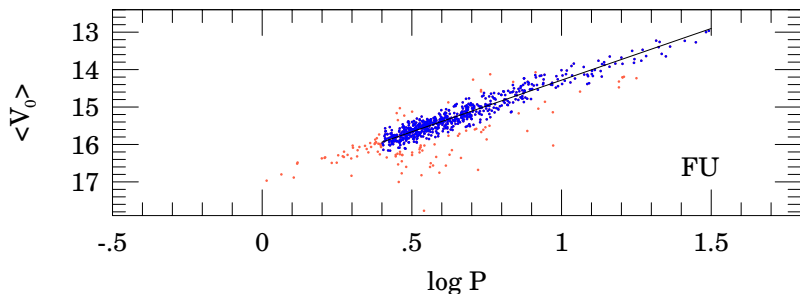
Lichtkurven von Cepheiden



Cepheiden: Sterne, die pulsieren (werden größer und kleiner; sogar Grundschwingung und Oberschwingungen lassen sich auseinanderhalten!) – Helligkeitsveränderungen!

Bild aus Joshi et al. 2010

Perioden-Leuchtkraft-Relation für Cepheiden



Perioden-Leuchtkraft-Relation $m = -2,76 \cdot \log(P/d) + 17,042$ für
Große Magellan'sche Wolke

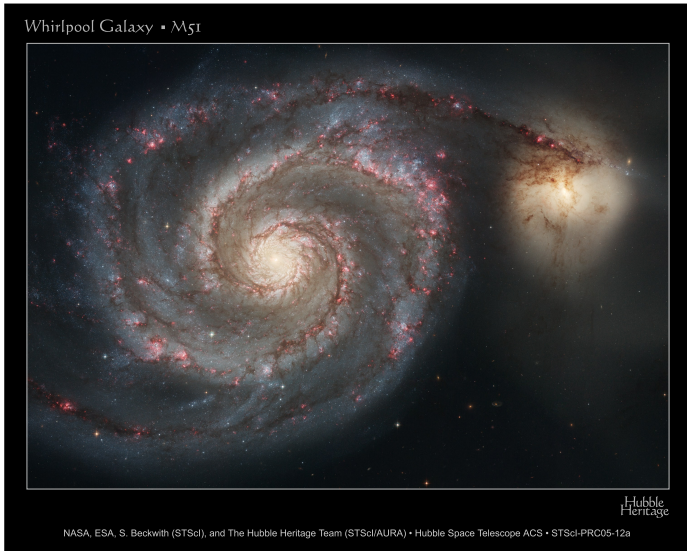
Teil von Abb. 3 in Udalski 1999 in *Acta Astronomica* **49**, 201

Andere Helligkeits-Entfernungen

- **RR Lyrae**: Veränderliche Sterne mit kürzerer Periode (1/10 bis 1 Tag) mit Perioden-Helligkeitsrelation
- **Hauptreihe**: Form und Größe durch physikalische Größen bestimmt; kalibriere mit Parallaxenmessungen; betrachte ferne Sternhaufen. (Damit zusammenhängend: rote Haufensterne in Farben-Helligkeits-Diagrammen)
- **Bedeckungsveränderliche** mit kleinerem Begleiter: Transitzeit des Begleiters hängt von Durchmesser des Hauptsterns ab; Spektroskopie gibt Temperatur; Fläche und Stefan-Boltzmann-Gesetz gibt Helligkeit

Ende Vorlesung 20.11.2014

Galaxien



Die große Debatte

194 THE SCALE OF THE UNIVERSE: H. SHAPLEY AND H. D. CURTIS

PART II

By HEBER D. CURTIS

DIMENSIONS AND STRUCTURE OF THE GALAXY

Definition of units employed.—The distance traversed by light in one year, 9.5×10^{12} km., or nearly six trillion miles, known as the light-year, has been in use for about two centuries as a means of visualizing stellar distances, and forms a convenient and easily comprehended unit. Throughout this paper the distances of the stars will be expressed in light-years.

The *absolute* magnitude of a star is frequently needed in order that we may compare the luminosities of different stars in terms

PART I

By HARLOW SHAPLEY

EVOLUTION OF THE IDEA OF GALACTIC SIZE

The physical universe¹ was anthropocentric to primitive man. At a subsequent stage of intellectual progress it was centered in a restricted area on the surface of the earth. Still later, to Ptolemy and his school, the universe was geocentric; but since the

¹This address and the following one by Dr. Heber D. Curtis are adapted from illustrated lectures given on the William Ellery Hale Foundation before the National Academy of Sciences, April 26, 1920. The authors have exchanged papers in preparing them for publication in order that each might have the opportunity of considering the point of view of the other.

²The word "universe" is used in this paper in the restricted sense, as applying to the total of sidereal systems now known to exist.

171

The Great Debate

26. April 1920

Heber Curtis vs. Harlow Shapley

Sind Spiralnebel eigene Galaxien?

Die große Debatte

Aus heutiger Sicht: Shapley lag bei Lage des Sonnensystems in der Milchstraße und Größe der Milchstraße näher an heutigem Wissen; Curtis hatte insgesamt Recht mit Galaxien als eigenen Sternensystemen analog zur Milchstraße.

Auflösung zugunsten der Galaxien als Inseluniversen (Begriff: Kant): Edwin Hubble identifiziert Cepheiden in M31; Abstand ist deutlich größer als Shapleys Vorschlag für Größe der Milchstraße.

Wieviel Materie enthalten Galaxien?

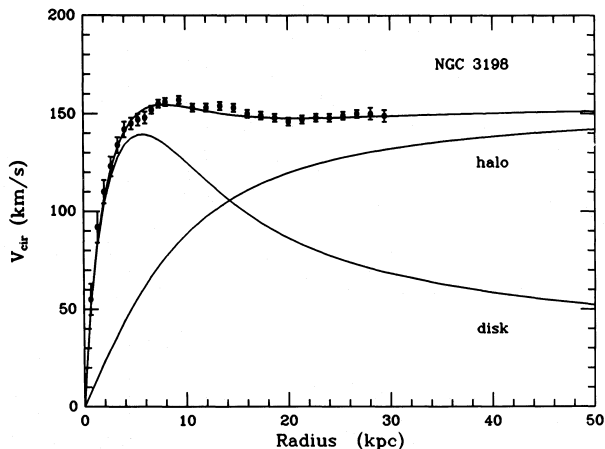
Zum Teil direkt aus Sternen (und damit aus Galaxienhelligkeit) ableitbar — Milchstraße (relativ groß): 200-300 Milliarden Sterne.

Zusätzlich: Interstellares Medium – trägt knapp 20% soviel Masse bei wie Sterne.

Dynamische Messungen legen nahe, dass es noch mehr Masse gibt: Dunkle Materie

Dunkle Materie

Ableitung aus Keplerbewegung im Vergleich mit der sichtbaren Masse (hier van Albada et al. 1985):



Dunkle Materie

- leuchtet nicht; verschärft: keine elektromagnetische Wechselwirkung, nur Gravitation
- erstmals 1933 von Fritz Zwicky postuliert, um Bewegungen im Coma-Haufen (Galaxienhaufen mit Geschwindigkeiten um die 7500 km/s) zu erklären
- Experimente zum direkten Nachweis von „Dunkle-Materie-Teilchen“: noch keine klaren (und z.T. widersprüchliche) Ergebnisse
- WIMPS – zusätzliche Teilchen außerhalb des Standardmodells der Elementarteilchen \Rightarrow LHC
- verschiedene unabhängige Hinweise auf Existenz:
 - Rotationskurven von Galaxien
 - Gravitationslinsen-Effekte (incl. Bullet Cluster)
 - Kosmologie (später): Fluktuationen im primordialen Plasma
- (oder alternativ: modifizierte Dynamik, z.B. MOND?)

Inhomogenität des Universums: galaktische Skalen

Galaktische Dichten (inklusive Dunkler Materie) $\sim 10^{-24} \text{ kg/m}^3$
auf Längenskalen von 10^{22} m (schließt den Halo mit ein)
(nach arXiv:0801.1232v5 p. 16 - Virial-Radius)

vs.

Intergalaktische Dichte (Gas + DM) $\sim 10^{-27} \text{ kg/m}^3$,
intergalaktische Distanzen $10^{22} \dots 10^{23} \text{ m}$

Sekundäre Entfernungskindikatoren I

Beziehungen, die anhand der primären Indikatoren (Cepheiden etc.) kalibriert wurden; betreffen typischerweise ganze Galaxien

- **Tully-Fisher-Relation:** (heuristische) Beziehung für Spiralgalaxien: Verbreiterung der 21 cm-Linie → maximale Rotationsgeschwindigkeit → korreliert mit Masse der Galaxie → korreliert mit Leuchtkraft der Galaxie
- **Faber-Jackson-Relation:** Heuristik für elliptische Galaxien: Streuung der Sternengeschwindigkeiten → Galaxienmasse (Virialsatz) → Leuchtkraft
- **Fundamental-Ebene:** Flächenhelligkeit als weitere Größe (plus Radius und Streuung der Geschwindigkeitsstreuung) ergibt dreidimensionalen Raum; elliptische Galaxien liegen auf zweidimensionaler Ebene darin

Sekundäre Entfernungskindikatoren II

- **Fluktuationen der Flächenhelligkeit:** Flächenhelligkeit selbst unabhängig von der Entfernung (vgl. Olbers!), aber Fluktuationen nicht (Poisson-Statistik)

... und am wichtigsten:

- **Supernovae vom Typ Ia**

Supernovae vom Typ Ia

Standardmodell (es gibt andere Möglichkeiten): Akkretion von Materie auf einen Weißen Zwerg (Sternrest für Sterne wie unsere Sonne; stabilisiert durch Pauli-Prinzip (Materieteilchen können nicht unendlich dicht zusammenrücken)).

Stabilitätsgrenze: *Chandrasekhar-Masse* bei $1,44 M_{\odot}$ – ist dieses Limit erreicht, thermonukleare Explosion (Fusion).

Charakteristische Helligkeitsentwicklung (Lichtkurve), dominiert durch radioaktiven Zerfall von Ni-56 zu Co-56 und Fe-56

Darauf basieren später die Bestimmungen größter Entfernungen (Milliarden von Lichtjahre)

Lichtkurven für Supernovae vom Typ Ia

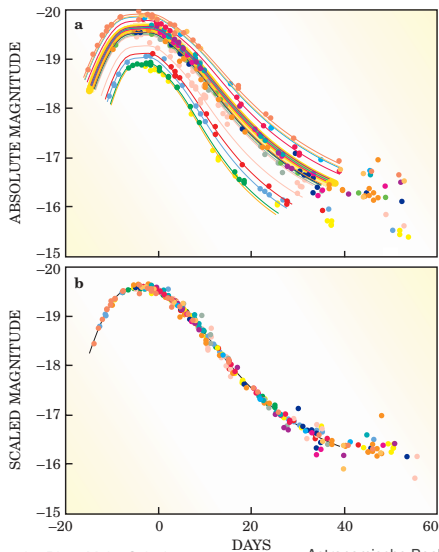
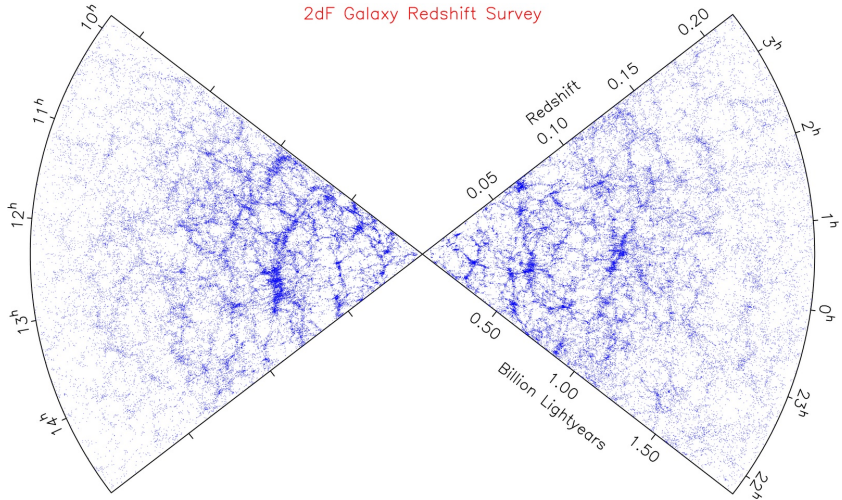


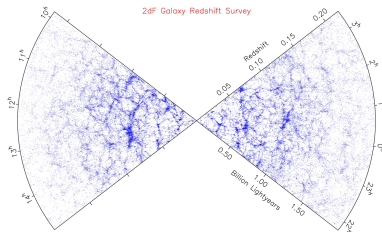
Bild: Perlmutter
2003 in *Physics
Today*

Großräumige Verteilung der Galaxien



2dF-Durchmusterung von Galaxien; Problem: Vorgriff, da hier Distanzen bereits über Rotverschiebungen bestimmt werden

Großräumige Verteilung der Galaxien



Großräumig und im Durchschnitt:

- Homogenität (Massendichte)
- Isotropie (Verteilung der Objekte)

Materieinhalt unseres Kosmos

- Sterne: einfach nachzuweisen! (man braucht freilich Absorptionskarten)
- Staub in unserer Milchstraße: Infrarot-Beobachtungen
- Wasserstoffatome: 21 cm-Linie, Absorptionslinien
- Moleküle: IR und Radiowellen
- Sehr fernes, warmes Plasma: Schwierig nachzuweisen

Allgemeinere Massenbestimmung: Gravitations-Sonden (z.B. Satelliten-Galaxien einer größeren Galaxie)

Virial-Messungen: Streuung der Sternengeschwindigkeiten σ hängen mit anziehender Masse M bei charakteristischem Abstand R zusammen wie

$$\sigma^2 \sim \frac{GM}{R}.$$

Materieinhalt: Gesamtdichte

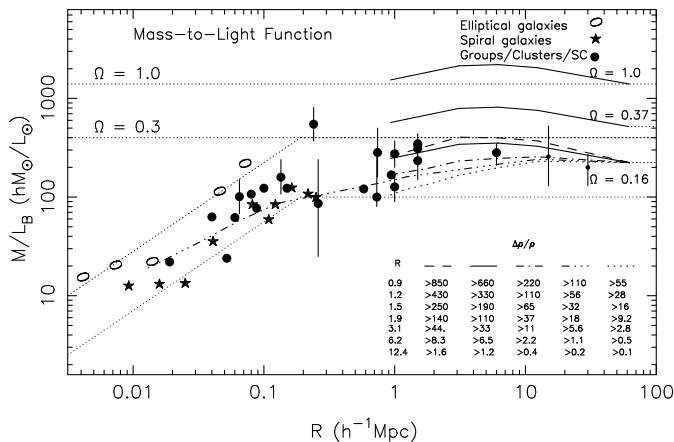


Abb. 2 in Bahcall et al. 2000, arXiv:astro-ph/0002310

wobei $\Omega \approx \rho/(10^{-26}\text{kg/m}^3)$. Leuchtende Materie ~ 20 Massen-%

Galaxienbewegungen: Radialgeschwindigkeiten

Vesto Slipher: Erstes Galaxienspektrum M31 im Jahre 1912 (4 Stunden Belichtungszeit, Lowell 24" Clark-Refraktor)

Ab 1927: Milton Humason (erst 100" auf Mt. Wilson, später 200" auf Mt. Palomar)

Galaxienbewegungen: Hubbles Beobachtung

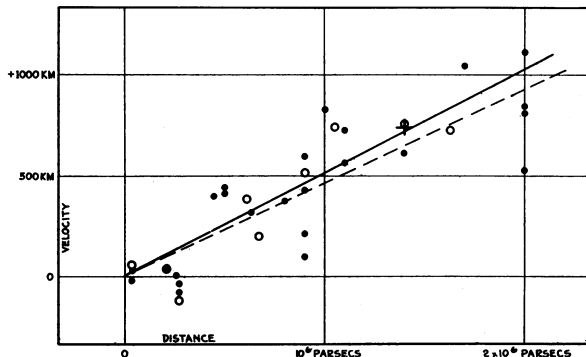


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Hubble 1929: „A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae“ in PNAS 15(3), S. 168ff.

Galaxienbewegungen

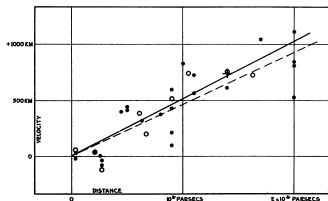


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Hubble 1929: „A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae“ in PNAS 15(3), S. 168ff.

... erste von vielen Messungen, spätere weit genauer!

Asymmetrie: Ab einer bestimmten Entfernung bewegen sich ferne Galaxien *alle* von uns fort!

Proportionalität: $v = H \cdot d$ (Hubble-Relation, H Hubble-Konstante)

Grundlegende Beobachtungsdaten

für die Kosmologie:

- Olbers-Beobachtung
- Gesamtdichte $\sim 0,3 \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$
- \exists Dunkle Materie. Leuchtende Materie nur rund 20 Massenprozent
- Leuchtende Materie: Wasserstoff 92 Prozent, Helium 8 Prozent (25 Massenprozent)
- Älteste Objekte > 13 Milliarden Jahre
- Ausdehnung größer als Milliarden Lichtjahre (aber: modellabhängig)
- Hierarchische Struktur (Haufen von Haufen von Haufen) bis zu 100 Mio. Lj. – darüber im Mittel homogen
- Großräumige Isotropie
- Hubble-Relation zwischen Rotverschiebungen/Entfernungen ferner Galaxien