

Abstandsbestimmung und Karten

Methoden der Astronomie für Nicht-Physiker

Björn Malte Schäfer & Markus Pössel

Astronomisches Rechen-Institut/Haus der Astronomie

20.10.2016 – 26.1.2017

Abstandsbestimmung und Karten

Grundproblem der Astronomie:

2D-Positionen am Himmel vergleichsweise genau bestimmbar

Abstände nötig, um physikalisch wichtige Größen zu bestimmen
(z.B. Leuchtkraft aus Helligkeit, Größe aus Winkelgröße)

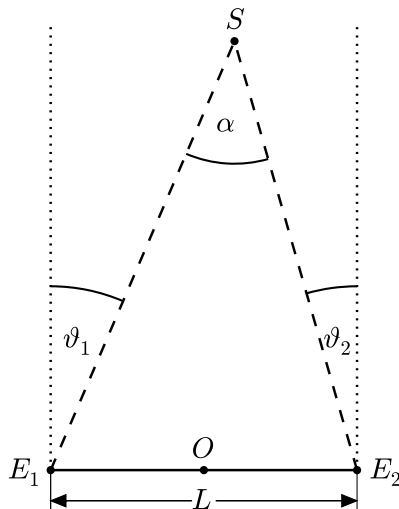
Abstandsbestimmung schwierig!

Abstände im Sonnensystem

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

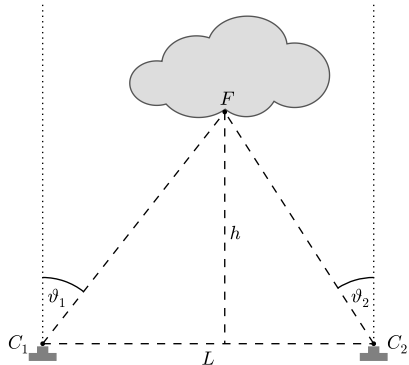
Grundlage: Parallaxenmethode.

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

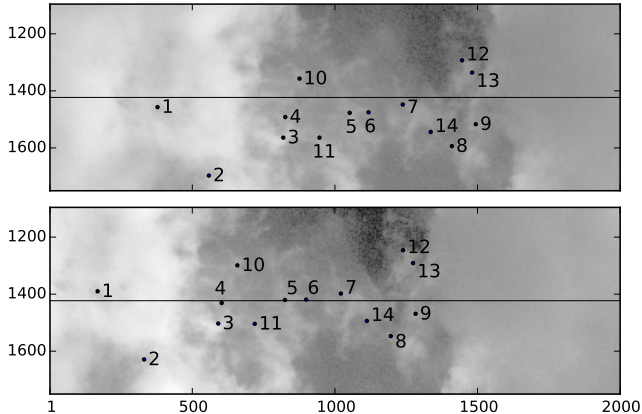


Alltagsbeispiel: Wolkenparallaxe

Zwei baugleiche Kameras,
beide senkrecht nach
oben gerichtet, gleichzeitig
Bilder aufnehmen,
Basislinie vermessen.



Alltagsbeispiel: Wolkenparallaxe



Resultat: Wolkenhöhe

$$d = (2896 \pm 155) \text{ m}$$

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,
 $1 \text{ AU} \sim 150 \text{ Mio. km}$, Parallaxe
 $8'',57 \pm 0'',04$ (5‰)

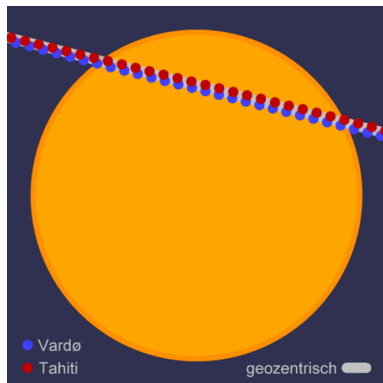


Bild: Benutzer Sch via Wikimedia Commons
unter Lizenz CC BY-SA 3.0

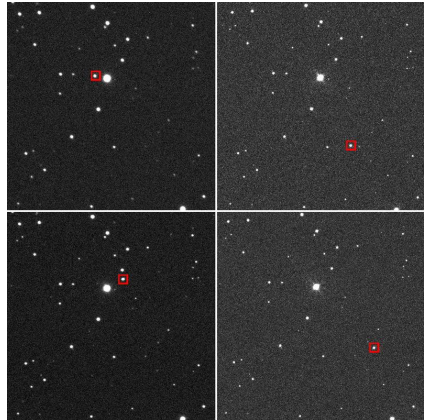
Asteroidenmessungen

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‰



M. Penselin, M. Metzendorf, C. Liefke 1/2013
Abstandsbestimmung und Karten

Moderne Messungen

Moderne Messungen: Radarabstände
1960er Jahre

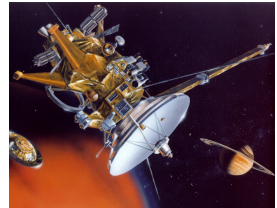
Radarmessungen ergeben

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

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

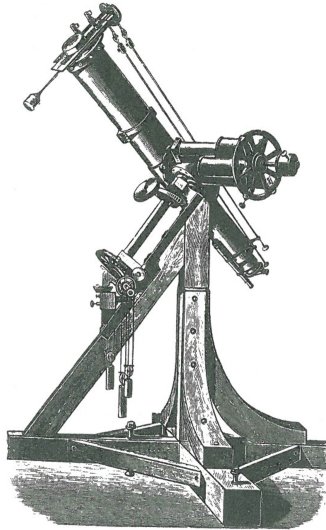


Arecibo observatory



Cassini mission

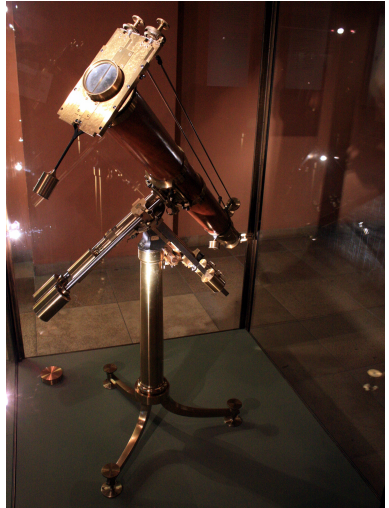
Bessels Heliometer: Sternparallaxe



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



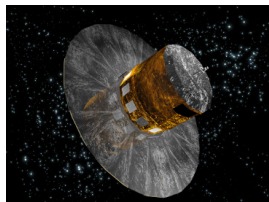
Genauigkeiten in der Astronomie

- 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

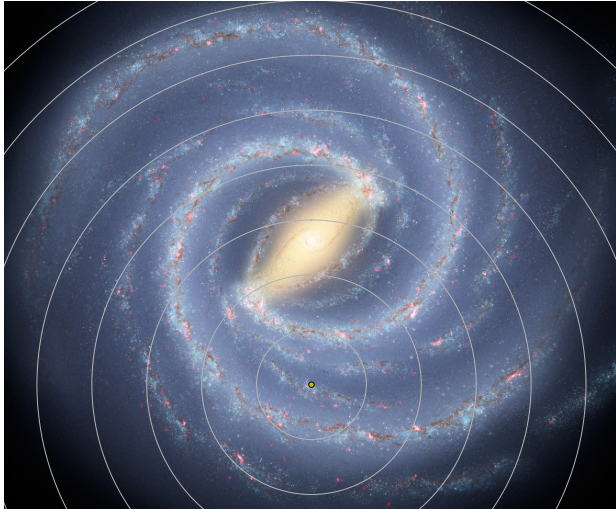
Beste Messungen: Satellitenmissionen!
Hipparcos 1989-1993, Gaia gestartet
Ende 2013

(Bild rechts: ESA)

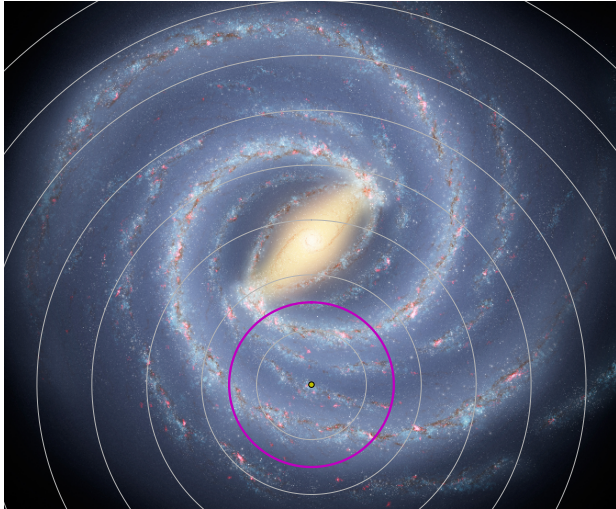


Größe	Hipparcos	Gaia
Genauigkeit	1 mas	20 μ as (bei 15 mag)
Entfernungen auf 10%	350 Lj	15.000 Lj

Wie weit kommen wir mit Sternparallaxen?



Wie weit kommen wir mit Sternparallaxen? Gaia



Noch genauere Parallaxen: VLBI

VLBI=Very Long Baseline
Interferometry

Radioteleskope zum Interferometer
zusammenschalten

Rechts VERA (JAPAN), außerdem:
VLBA (USA)

Winkelgenauigkeiten bis zu $10\mu\text{as}$
(besser als Gaia!)

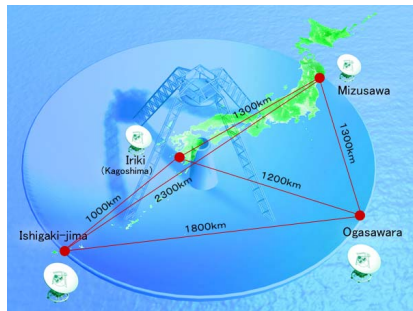


Bild: NAOJ

Genau detektierbare Quellen: Maser

Maser: Laserähnliche Lichtquellen
mit scharfen, starken Linien

Genauer Mechanismus (Anregung)
nicht ganz verstanden

Treten typischerweise in
Sternentstehungsgebieten (in
unserer Milchstraße)

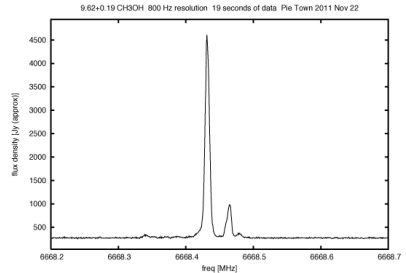
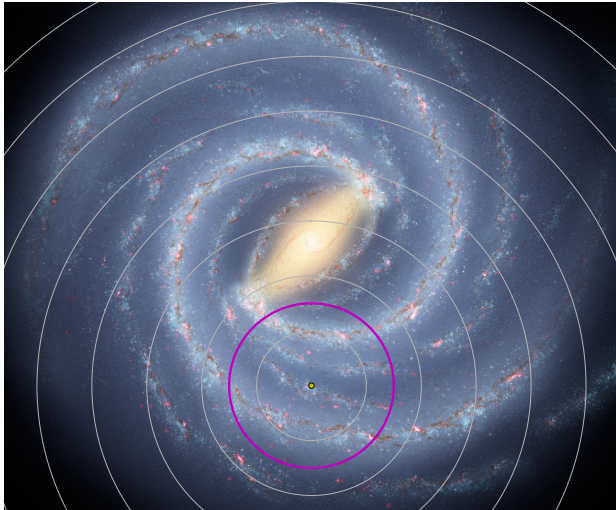
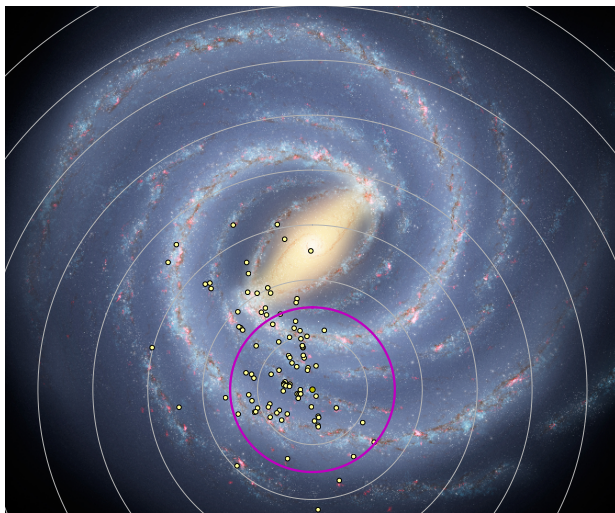


Bild: NRAO

Wie weit kommen wir mit Sternparallaxen? Gaia



Wie weit kommen wir mit Sternparallaxen? Maser



Hintergrund: NASA/JPL (Spitzer), Daten: Reid et al. 2014

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

Standardkerzen

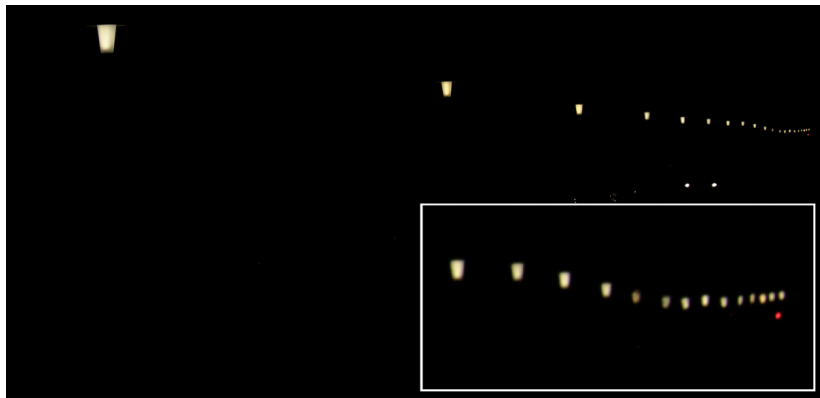
Ist die Leuchtkraft L bekannt und die scheinbare Helligkeit am Himmel F (Energie pro Zeiteinheit pro Detektorfläche) gemessen, kann man über

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

den Abstand d erschließen.

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

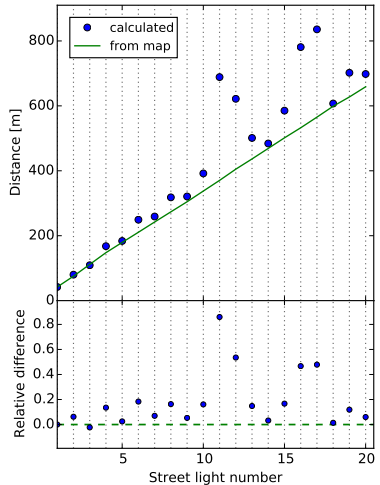
Standardkerzen: Alltagsbeispiel Straßenlaternen



Aufnahme (in Heidelberg) mit herkömmlicher Digitalkamera:
Straßenlaternen entlang einer Straße

Standardkerzen: Alltagsbeispiel Straßenlaternen

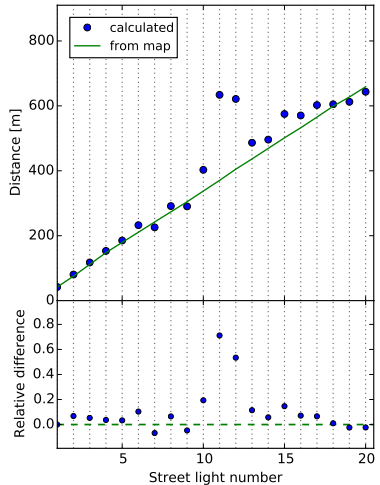
Berechnete Entfernung aus Foto-Helligkeitsmessung (im Vergleich zur ersten Laterne) im Vergleich mit Entfernungen aus Google Maps



Standardkerzen: Alltagsbeispiel Straßenlaternen

Berechnete Entfernung aus
Foto-Helligkeitsmessung (im
Vergleich zur ersten Laterne) im
Vergleich mit Entfernungen aus
Google Maps

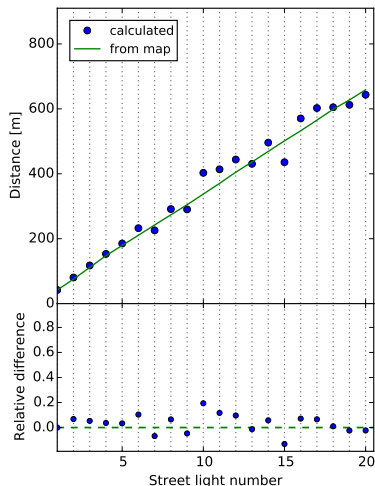
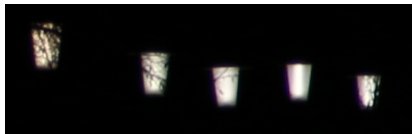
Hier: Korrigiert für individuelle
Helligkeiten der Laternen und
Verdeckung



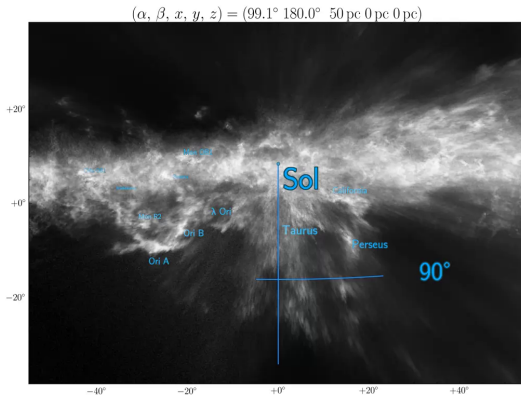
Standardkerzen: Alltagsbeispiel Straßenlaternen

Berechnete Entfernung aus
Foto-Helligkeitsmessung (im
Vergleich zur ersten Laterne) im
Vergleich mit Entfernungen aus
Google Maps

Hier: Korrigiert für individuelle
Helligkeiten der Laternen



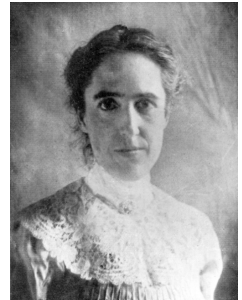
Extinktionskarten: Pan-STARRS 1



Animation: Gregory Green using Pan-STARRS1 data unter Lizenz CC BY-SA 4.0

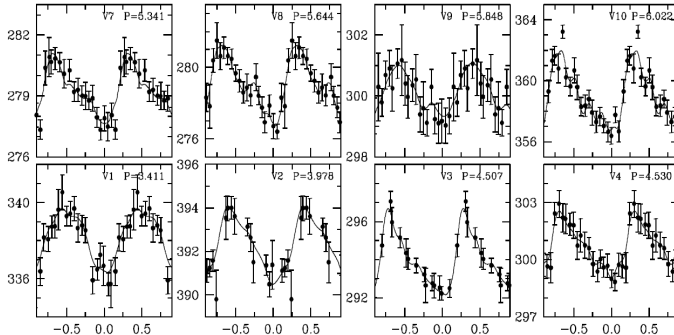
Animation hier wegen Größe (171 MB) nicht eingebunden, bitte bei Interesse selbst auf <http://argonaut.skymaps.info> ansehen!

Cepheiden: Eine Sorte variabler Sterne



Henrietta Leavitt

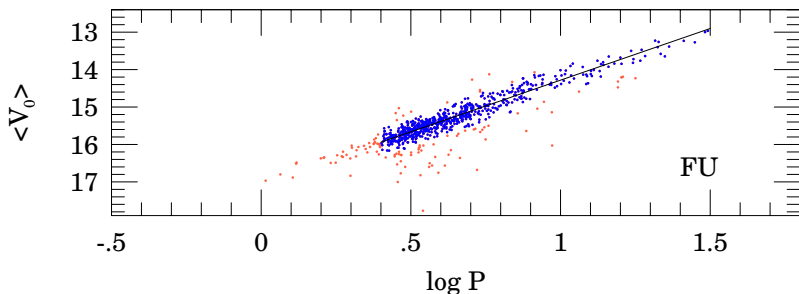
Lichtkurven von Cepheiden



Cepheiden: Sterne, die pulsieren (werden größer und kleiner; sogar Grundschiwingung 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; kalibrierte 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 22.12.16

Galaxien

Whirlpool Galaxy • M51



Hubble
Heritage

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI), and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope ACS • STScI-PRC05-12a

Nebel aus dem Messier-Katalog



Messier 1



Messier 8



Messier 16



Messier 20



Messier 31



Messier 51



Messier 82



Messier 100

Bild jeweils Deep Sky Survey 2. Bildausschnitt jeweils $1^\circ \times 1^\circ$

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?

Zum Nachlesen: Shapley & Curtis 1921

Die große Debatte

Aus heutiger Sicht:

- Shapley bessere Werte Lage Sonnensystem in Milchstraße, Größe der Milchstraße
- Curtis richtige Identifizierung: Galaxien = Sternensysteme analog zur Milchstraße

Auflösung zugunsten der Galaxien als Inseluniversen (Begriff: Kant):
Cepheiden in M31 (Hubble)



Bild: K. Birkle / MPIA

Struktur der Milchstraße



Björn Malte Schäfer & Markus Pössel

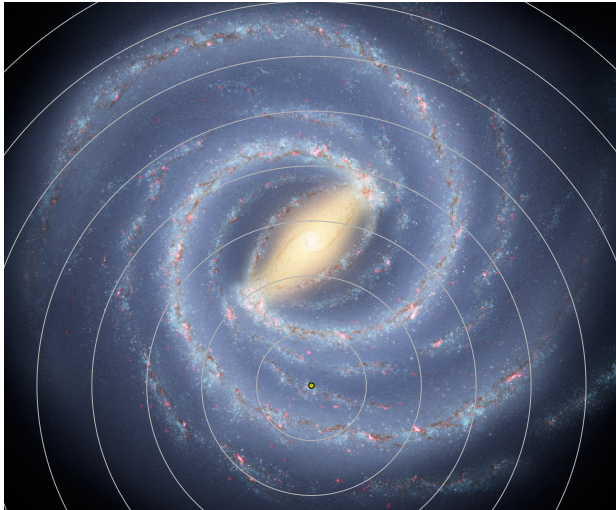
Eigenes Bild

Abstandsbestimmung und Karten

Struktur der Milchstraße, hier: NGC 1232

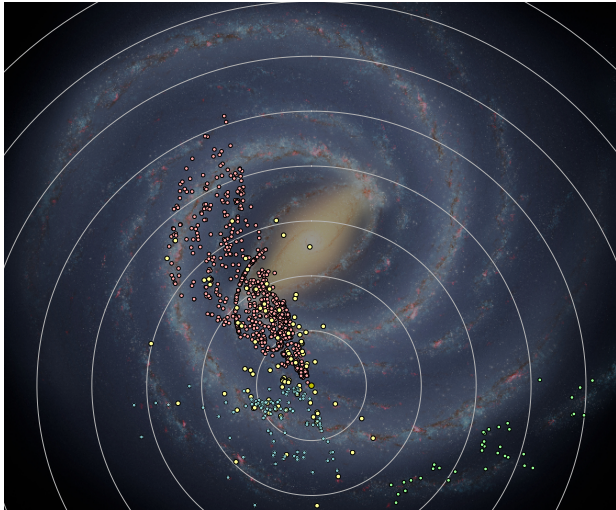


Struktur der Milchstraße: Künstlerische Darstellung



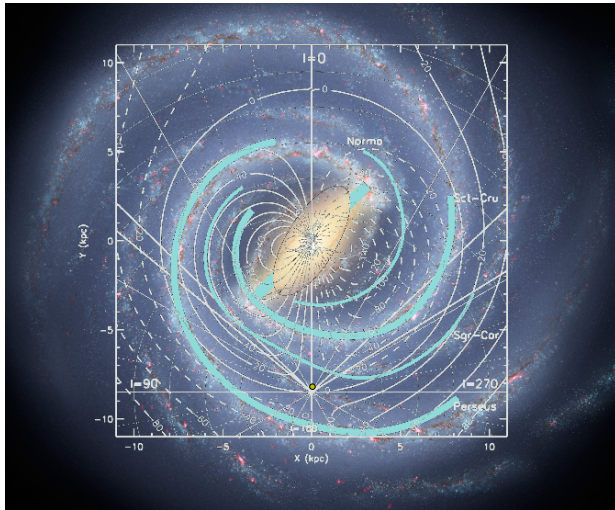
Hintergrund: NASA/JPL (Spitzer)

Struktur der Milchstraße: Objekte



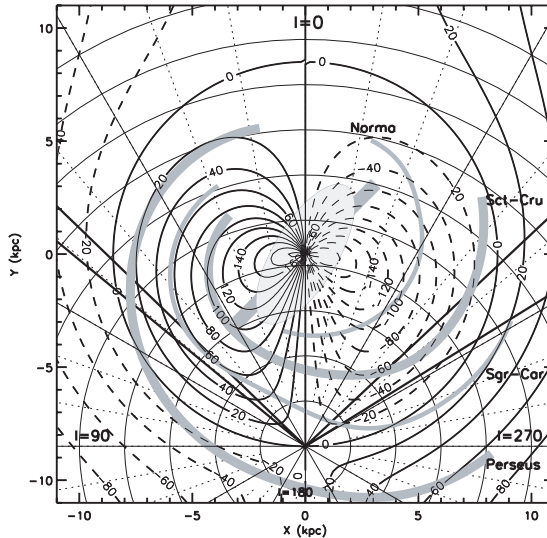
Hintergrund: NASA/JPL (Spitzer)

Struktur der Milchstraße: Fachveröffentlichung



Hintergrund: NASA/JPL (Spitzer), Vordergrund: Benjamin 2008

Struktur der Milchstraße: Fachveröffentlichung



Struktur der Milchstraße



Bild: Kevin Jardine, www.galaxymap.org

Struktur der Milchstraße

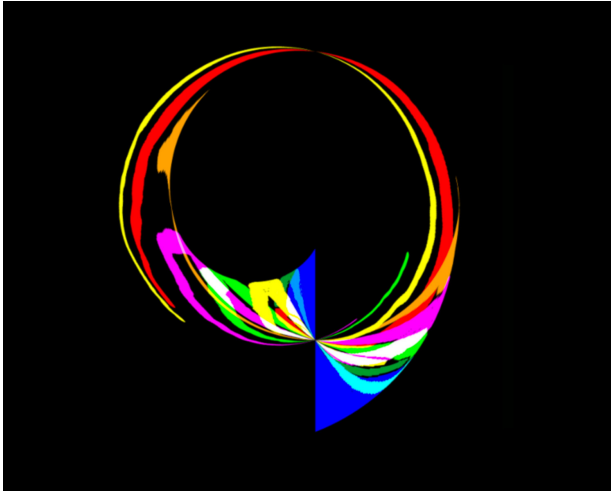


Bild: Kevin Jardine, www.galaxymap.org

Struktur der Milchstraße

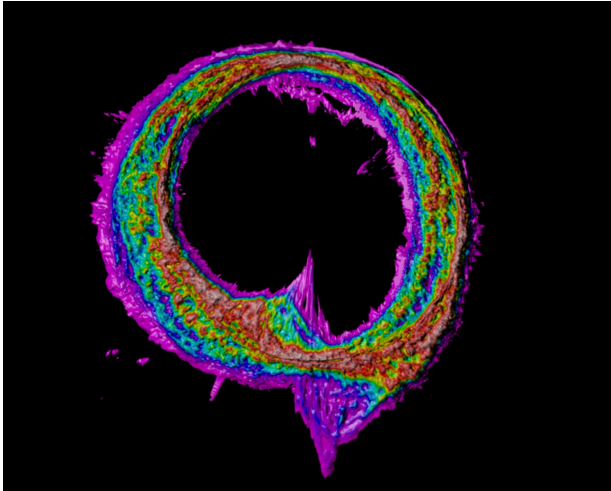
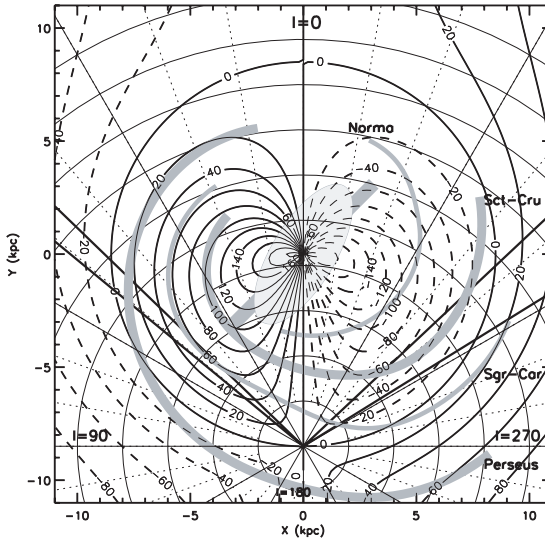


Bild: Kevin Jardine, www.galaxymap.org

Struktur der Milchstraße



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 Entfernungsindikatoren 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

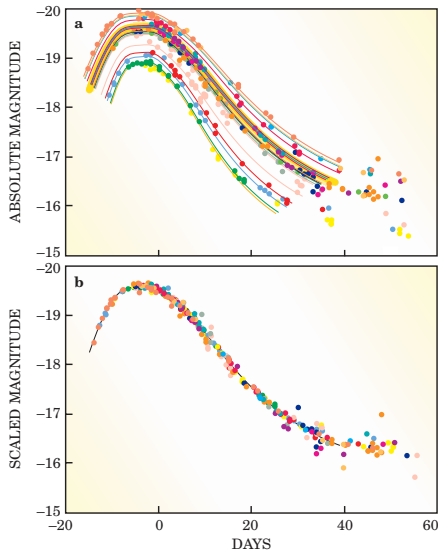
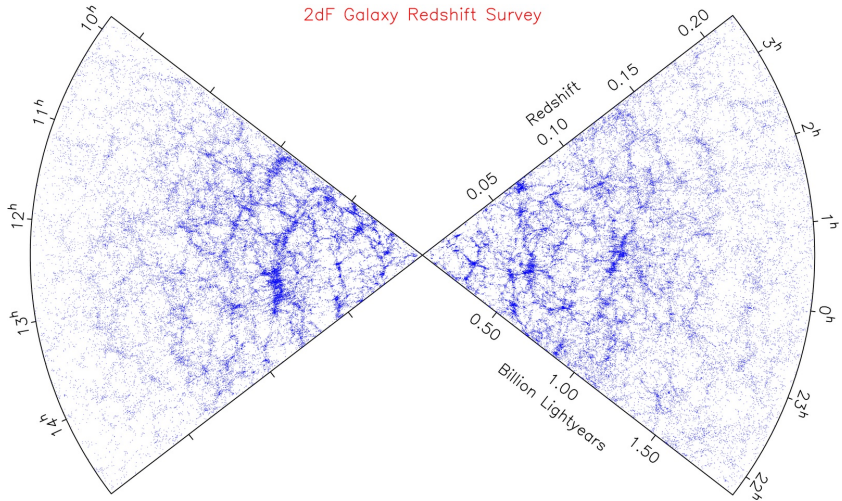


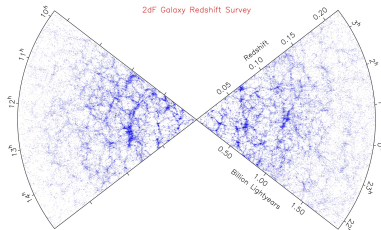
Bild: Perlmutter
2003 in *Physics*
Today

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)

Hubble-Beziehung und Hubbles Beobachtung

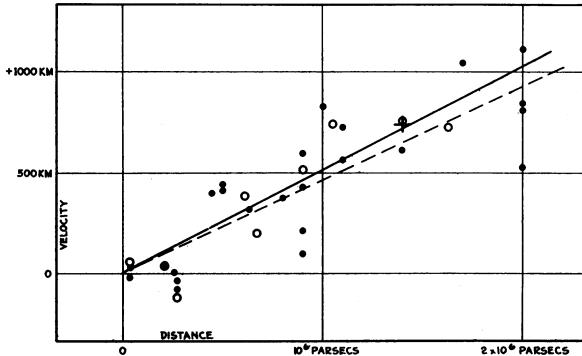


FIGURE 1

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.

Hubble-Beziehung

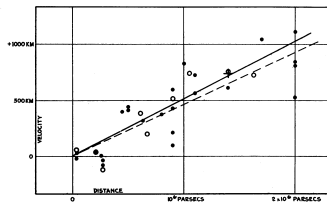


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

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

$c z = H_0 \cdot d$ erklärt, warum (bis auf nahe Galaxien) alle Werte für z positiv sind und warum die Werte (mit beachtlicher Streuung!) auf einer Geraden liegen.

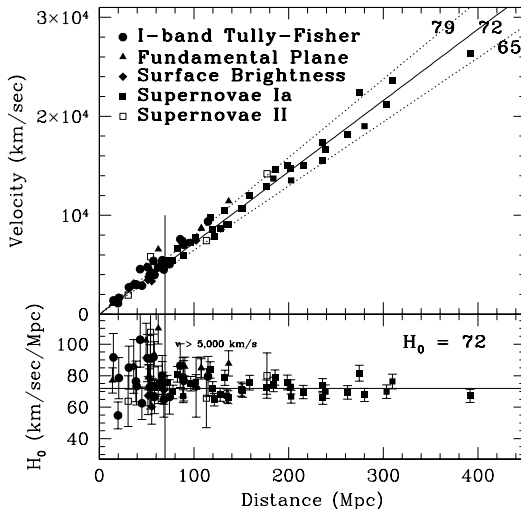
Hubble Space Telescope



Bild: STScI und NASA

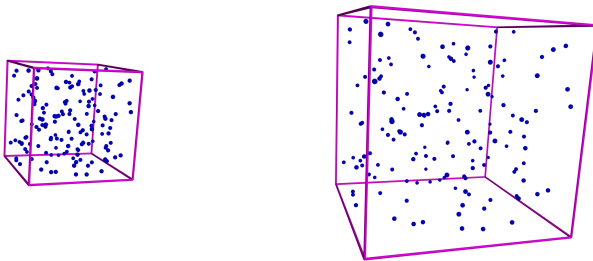
H_0 Key Project (Marc Aaronson, Wendy Freedman et al.):
Cepheiden kalibrieren; darauf aufbauend sekundäre
Entfernungsbestimmung (SN Ia, Tully-Fisher, Fundamentalebene,
Fluktuationen der Oberflächenhelligkeit etc.)

H_0 Key Project results



From Freedman 2001 et al. (HST Key Project)

Expansion mit Skalenfaktor



Verteilung (Muster) der Galaxienverteilung im Raum dasselbe —
Skala der Abstände verändert sich!

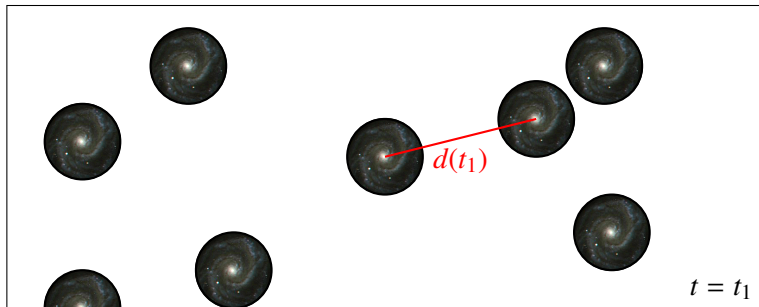
Der kosmische Skalenfaktor

Kosmischer Skalenfaktor $a(t)$ bestimmt, wie sich Abstände von Galaxien (z.B. G_A , G_B) verändern:

$$\underbrace{d_{AB}(t_2)}_{\text{Abstand } G_A \text{ und } G_B \text{ zur Zeit } t_2} = \frac{a(t_2)}{a(t_1)} \cdot \underbrace{d_{AB}(t_1)}_{\text{Abstand } G_A \text{ und } G_B \text{ zur Zeit } t_1}$$

Abstände zwischen Galaxien

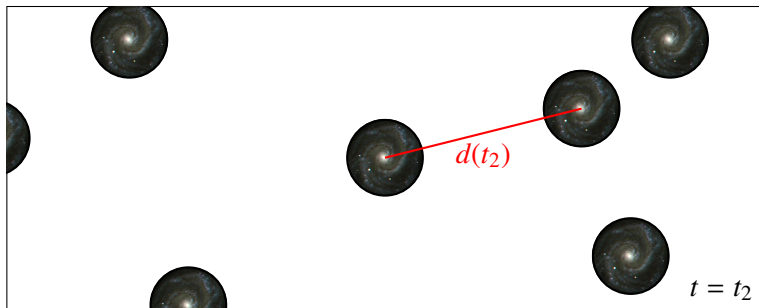
Skalenfaktor-Änderung von Abständen:



Alle Abstände ändern sich wie $d(t) = \frac{a(t)}{a(t_1)} \cdot d(t_1)$.

Abstände zwischen Galaxien

Skalenfaktor-Änderung von Abständen:



Alle Abstände ändern sich wie $d(t) = \frac{a(t)}{a(t_1)} \cdot d(t_1)$.

Konsequenzen der Skalenfaktor-Expansion

Wie ändern sich Entfernungen bei Skalenfaktor-Expansion?

Entfernung zur Zeit $t + \Delta t$:

$$d(t + \Delta t) = \frac{a(t + \Delta t)}{a(t)} d(t).$$

Entfernungsänderung während des Zeitintervalls Δt :

$$d(t + \Delta t) - d(t) = \left[\frac{a(t + \Delta t) - a(t)}{a(t)} \right] d(t).$$

(Mittlere) Geschwindigkeit während des Zeitintervalls Δt :

$$v(t) = \frac{d(t + \Delta t) - d(t)}{\Delta t} = \left[\frac{a(t + \Delta t) - a(t)}{\Delta t} \right] \frac{1}{a(t)} d(t).$$

Konsequenzen der Skalenfaktor-Expansion

Wenn

$$v(t) = \frac{d(t + \Delta t) - d(t)}{\Delta t}$$

die Änderungsrate des Ortes (= Geschwindigkeit) ist, dann ist

$$\dot{a}(t) = \frac{a(t + \Delta t) - a(t)}{\Delta t}$$

die Änderungsrate des Skalenfaktors — die Änderung von $a(t)$ mit der Zeit (Ableitung von $a(t)$ nach der Zeit).

Konsequenzen der Skalenfaktor-Expansion

Demnach:

$$v(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} d(t) = H(t) d(t)$$

mit *Hubble-Parameter*

$$H(t) \equiv \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

Beobachtungen zur heutigen Zeit

t_0 , mit *Hubblekonstante*

$H_0 \equiv H(t_0)$:

$$v = H_0 \cdot d.$$

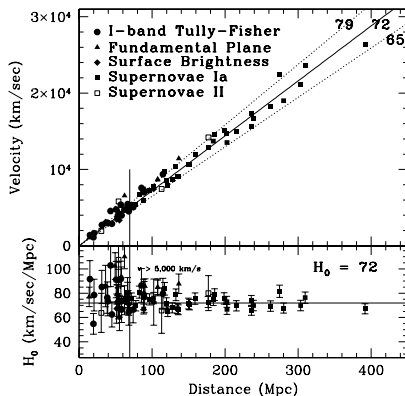


Diagramm: Freedman 2001 et al. (HST Key Project)

Rotverschiebung als Abstandsmaß

Extragalaktische Skalen:
kosmologische Modelle
voraussetzen

z (leicht messbar!) als
Abstandsmaß verwenden

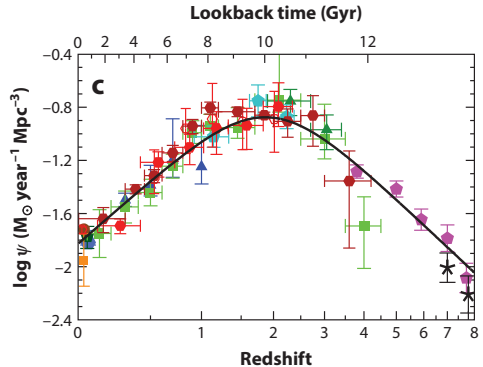


Figure 9 in Madau & Dickinson 2014

Rotverschiebung als Abstandsmaß

In der Praxis: Wenn z gegeben ist, kann man mit Ned Wright's Cosmology Calculator Abstand (vorsicht, mehrere Definitionen!), Lichtlaufzeit etc. berechnen:

www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html

Enter values, hit a button

69.6 H_0
 0.286 Ω_M
 0.544 z

 0.714 Ω_{vac}

Open sets $\Omega_{vac} = 0$ giving an open Universe [if you entered $\Omega_M < 1$]
Flat sets $\Omega_{vac} = 1 - \Omega_M$ giving a flat Universe.
General uses the Ω_{vac} that you entered.
[Source](#) for the default parameters.

For $H_0 = 69.6$, $\Omega_M = 0.286$, $\Omega_{vac} = 0.714$, $z = 0.544$

- It is now 13.720 Gyr since the Big Bang.
- The age at redshift z was 8.318 Gyr.
- The [light travel time](#) was 5.402 Gyr.
- The [comoving radial distance](#), which goes into Hubble's law, is 2053.1 Mpc or 6.696 Gly.
- The comoving volume within redshift z is 36.251 Gpc^3 .
- The [angular size distance \$D_A\$](#) is 1329.7 Mpc or 4.3370 Gly.
- This gives a scale of 6.447 kpc".
- The [luminosity distance \$D_L\$](#) is 3170.0 Mpc or 10.339 Gly.

1 Gly = 1,000,000,000 light years or 9.461×10^{26} cm.
 1 Gyr = 1,000,000,000 years.
 1 Mpc = 1,000,000 parsecs = 3.08568×10^{24} cm, or 3,261,566 light years.

[Tutorial: Part 1](#) | [Part 2](#) | [Part 3](#) | [Part 4](#)
[FAQ](#) | [Age](#) | [Distances](#) | [Bibliography](#) | [Reprints](#)

<http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>

Zusammenfassung

- Enge Kopplung: Entfernungs- und Strukturbestimmung
- Entfernungsleiter mit aufeinander aufbauenden Methoden
- Struktur-Hierarchie: Sonnensystem, Milchstraße, Galaxienhaufen / großräumige Struktur

Für kosmische Expansion: neuer Rahmen nötig → Allgemeine Relativitätstheorie!